

博士論文

異なる打点高に対する
野球打撃動作のキネティクスの分析

平成 26 年度

阿江数通

筑波大学

目次

博士論文に関する業績一覧

表題一覧

図題一覧

第1章 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 研究課題	4
1.4 本研究の仮定	4
1.5 本研究の限界	5
第2章 文献研究	6
2.1 打撃動作のバット・ヘッドスピード獲得に関する研究.....	6
2.1.1 キネマティクスの研究.....	6
2.1.2 キネティクスの研究.....	10
2.2 打撃動作の筋活動様式に関する研究.....	13
2.3 打撃動作のタイミング調整に関する研究.....	15
2.4 打撃動作の打ち分けおよび打撃ポイントの違いに関する研究.....	17
2.5 文献研究の総括	18
第3章 方法	20
3.1 スウィング実験	20

3.1.1 被験者	20
3.1.2 実験試技	20
3.1.3 実験設定	23
3.2 センサー・バット.....	23
3.2.1 センサー・バットの構造.....	23
3.2.2 作用力および作用モーメントの算出原理.....	27
3.3 センサー・キャリブレーション.....	33
3.3.1 校正方法	33
3.3.2 キャリブレーション結果.....	35
3.3.3 各センサー出力の算出.....	35
3.3.4 各センサー出力の結果.....	38
3.4 データ処理	38
3.4.1 分析試技の決定.....	38
3.4.2 分析範囲および局面の定義.....	41
3.4.3 3次元座標データの平滑化.....	41
3.4.4 データの規格化および平均化.....	43
3.5 統計処理	43
第4章 打点高の異なる野球打撃動作における左右各手のキネティクスの特徴	44
4.1 目的	44
4.2 方法	45
4.2.1 データ収集およびデータ処理.....	45
4.2.2 算出項目および算出方法.....	45
4.2.3 統計処理	49

4.3 結果	50
4.3.1 キネマティクスのパラメータ	50
4.3.1.1 バット・ヘッドスピードおよび各局面スウィング時間	50
4.3.1.2 バットの回転運動	50
4.3.1.3 バットのボール打撃部位における鉛直変位の内訳	53
4.3.2 キネティクスのパラメータ	55
4.3.2.1 バット移動座標系における左右各手の作用力	55
4.3.2.2 バット移動座標系における左右各手の作用モーメント	57
4.3.2.3 左右各手のバット長軸力の最大値および平均力	59
4.3.2.4 左右各手のバット長軸力の鉛直成分による力学的仕事	59
4.3.2.5 左右各手の作用力の Z_{bat} 軸成分による力学的仕事	62
4.3.2.6 左右各手の作用モーメントのバット起し倒し軸まわり成分による仕事	65
4.4 考察	65
4.4.1 バット・ヘッドスピードについて	65
4.4.2 バットの運動について	66
4.4.3 打点高の違いに対応するための左右各手の役割	67
4.4.3.1 左右各手のバット長軸力の役割	67
4.4.3.2 左右各手の偶力の役割	68
4.4.3.3 左右各手の作用モーメントの役割	69
4.5 要約	70
第5章 打点高の異なる野球打撃動作における上肢のキネティクスの特徴	72
5.1 目的	72
5.2 方法	73

5.2.1	データ収集およびデータ処理.....	73
5.2.2	上肢のセグメントおよび関節座標系の定義.....	73
5.2.3	算出項目および算出方法.....	80
5.2.4	統計処理	85
5.3	結果	85
5.3.1	左右の肩関節トルク，角速度およびトルクパワー	85
5.3.2	左右の肘関節トルク，角速度およびトルクパワー	90
5.3.3	左右の手関節トルク，角速度およびトルクパワー	92
5.3.4	関節トルクによる力学的仕事.....	94
5.3.5	左右肩関節の静力学的なトルク	99
5.3.6	左右の肘および手関節の静力学的なトルク	99
5.4	考察	103
5.4.1	打点高の違いに対応するための肩関節の役割.....	103
5.4.2	打点高の違いに対応するための肘関節の役割.....	109
5.4.3	打点高の違いに対応するための手関節の役割.....	112
5.4.4	局面毎の左右上肢関節の役割.....	115
5.5	要約	116
 第6章 打点高の異なる野球打撃動作における体幹と下肢のキネティクスの特徴		119
6.1	目的	119
6.2	方法	120
6.2.1	データ収集およびデータ処理.....	120
6.2.2	セグメントおよび関節座標系の定義.....	120
6.2.2.1	体幹部について.....	120

6.2.2.2 下肢について.....	125
6.2.3 算出項目および算出方法.....	132
6.2.3.1 体幹部について.....	132
6.2.3.2 下肢について.....	136
6.2.4 統計処理	138
6.3 結果	139
6.3.1 体幹部について.....	139
6.3.1.1 体幹の回転角度および角速度.....	139
6.3.1.2 体幹および下胴のバットのボール打撃部位速度に対する幾何学的貢献	141
6.3.1.3 体幹の関節トルク， 角速度およびトルクパワー	143
6.3.1.4 体幹の関節トルクによる力学的仕事.....	145
6.3.1.5 体幹の左右回旋軸トルクによる力学的仕事とバット・ヘッドスピードの関係	147
6.3.1.6 上胴の関節力パワーおよびセグメントトルクパワー	147
6.3.2 下胴および下肢について.....	149
6.3.2.1 下半身重心の鉛直変位および水平速度の大きさ	149
6.3.2.2 左右各脚の地面反力.....	151
6.3.2.3 左右の股関節トルク， 角速度およびトルクパワー	155
6.3.2.4 左右の膝関節トルク， 角速度およびトルクパワー	159
6.3.2.5 左右の足関節トルク， 角速度およびトルクパワー	162
6.3.2.6 左右の下肢関節トルクによる力学的仕事.....	166
6.3.2.7 左右股関節トルクの下胴回転成分.....	170
6.3.2.8 下胴の関節力パワーおよびセグメントトルクパワー	172
6.4 考察.....	174

6.4.1 打点高の違いに対応するための体幹部の役割について	174
6.4.1.1 体幹関節の役割.....	174
6.4.1.2 上胴の力学的エネルギーの流れ.....	178
6.4.2 打点高の違いに対応するための下半身の役割について	181
6.4.2.1 軸脚側の股関節について.....	182
6.4.2.2 ステップ脚側の股関節について.....	186
6.4.2.3 下胴の力学的エネルギーの流れ.....	188
6.5 要約	192
6.5.1 体幹について.....	192
6.5.2 下肢について.....	193
第7章 異なる打点高に対応するための指導への示唆.....	196
7.1 上位群および下位群の選定.....	196
7.2 バットおよび左右各手について.....	198
7.3 左右の上肢関節について.....	207
7.4 要約	218
7.4.1 バットおよび左右各手について.....	218
7.4.2 左右の上肢関節について.....	218
8章 結論	220
8.1 異なる打点高条件に対するキネティクス的特徴.....	220
8.2 指導への示唆	222
8.3 今後の課題	223

参考文献	225
謝辞	238
付録	

博士論文に関する業績一覧

I. 論文

- 1) 阿江数通・小池関也・川村卓 (2013) 打点高の異なる野球ティー打撃動作における左右各手のキネティクスの分析. バイオメカニクス研究, 17 (1) : 2-14.
- 2) 阿江数通・小池関也・川村卓 (2014) 打点高の異なる野球ティー打撃動作における右上肢のキネティクスの分析. 体育学研究, doi : 10.5432/jjpehss. 13067

II. 学会および研究発表

- 1) 阿江数通・小池関也 : 打点高の異なる野球打撃動作における左右各手のキネティクスの分析. 第 60 回日本体育学会大会 (2009. 8. 26-28, 広島大学)
- 2) 小池関也・阿江数通・川村卓・阿江通良 : 野球打撃動作における左右各手のキネティクスの分析 (打点高がキネティクスの変量に及ぼす影響). 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2009 (2009. 12. 3-5, 福岡工業大学)
- 3) 阿江数通・小池関也 : 打点高の異なる野球打撃動作における上肢のキネティクスの分析. 第 21 回日本バイオメカニクス学会大会 (2010. 8. 28-30, 国士舘大学)
- 4) 阿江数通・小池関也 : 野球打撃動作における打点高の違いが体幹のキネティクスに及ぼす影響. 第 61 回日本体育学会大会 (2010. 9. 8-10, 中京大学)
- 5) 小池関也・阿江数通・川村卓・阿江通良 : 打点高の異なる野球打撃動作における上半身のキネティクスの分析. 日本機械学会スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス (2010. 11. 3-6, 東京工業大学)
- 6) Ae, K. and Koike, S. : Kinetic analysis of each hand in baseball batting motion at different hitting point heights. The 29th International Conference on Biomechanics in Sports (2011. 6. 27-7. 1, University of Porto, Portugal)

- 7) 阿江数通・小池関也：野球バットのキネマティクスおよび左右各手のキネティクスにおける打点高調整様式. 第 62 回日本体育学会大会 (2011. 9. 25-27, 鹿屋体育大学)
- 8) 阿江数通・小池関也：野球打撃動作における上肢キネティクスの打点高対応様式について. 日本機械学会スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス (2011. 10. 31-11. 2, 京都大学)
- 9) 阿江数通・小池関也：野球打撃動作における異なる打点高への対応に寄与する上肢関節トルクの抽出. 第 22 回日本バイオメカニクス学会大会 (2012. 9. 11-13, 北翔大学)
- 10) 阿江数通・小池関也：野球打撃動作のキネティクスの分析－測定方法および打点高条件について－. 第 1 回日本野球科学研究会大会 (2013. 8. 27, びわこ成蹊スポーツ大学)

表題一覧

第3章 方法

Table 3-1 Characteristics of the subjects for the swing experiment.....	21
---	----

第4章 打点高の異なる野球打撃動作における左右各手のキネティクスの特徴

Table 4-1 Maximum values of bat-head speed, bat swing times in each swing phase and times of maximum downward velocity of bat-head.....	51
---	----

Table 4-2 Maximum values and average forces of bat longitudinal axial force of each for each hitting-point height (High, Middle, and Low).	60
---	----

Table 4-3 Correlations of maximum bat-head speed with maximum values and average forces of bat longitudinal axial force of each for each hitting-point height (High, Middle, and Low).....	60
--	----

第5章 打点高の異なる野球打撃動作における上肢のキネティクスの特徴

Table 5-1 The significant differences of the mechanical works done by the upper limbs joint torque among hitting-point height conditions.	98
--	----

第6章 打点高の異なる野球打撃動作における体幹と下肢のキネティクスの特徴

Table 6-1 The significant differences of the mechanical works done by the trunk joint torque among hitting-point height conditions.	146
--	-----

Table 6-2 The significant differences of the mechanical works done by the lower limbs joint torque among hitting-point height conditions.	169
--	-----

第7章 異なる打点高に対応するための指導への示唆

Table 7-1 Performance description and self-evaluation under the low hitting-point height condition with high group and low group.....	197
Table 7-2 Maximum values of bat-head speed, maximum values and average forces of the bat longitudinal axial force of each hand for the low hitting-point height condition with high group and low group.....	206

図題一覽

第3章 方法

Figure 3-1	Schematic illustration of the ball hitting-point heights (High, Middle, and Low).	22
Figure 3-2	Schematic illustration of the experimental setup.....	24
Figure 3-3	Experimental landscapes.	25
Figure 3-4	Placement of the reflective markers.	26
Figure 3-5	The structure of the instrumented bat.	28
Figure 3-6	Instrumented bat.	30
Figure 3-7	Calculation principle of the force and moment.	32
Figure 3-8	Setup for the sensor calibration.	34
Figure 3-9	Relationship between sensor output voltage and actual measured value for the sensor calibration.....	36
Figure 3-10	Calculated and actual moments for the sensor calibration.	39
Figure 3-11	Calculated and actual forces for the sensor calibration.	40
Figure 3-12	Definition of the down swing and level swing phases in forward swing batting motion.	42

第4章 打点高の異なる野球打撃動作における左右各手のキネティクス的特徴

Figure 4-1	Definition of the moving bat coordinate system for the analysis of kinetics and the angle about the inclinational axis.	46
Figure 4-2	Curves of angles and angular velocities about the bat inclinational axis in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).....	52
Figure 4-3	Mean and standard deviation of the vertical displacements of the ball hitting-point on the bat in the forward swing motion under each hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	54
Figure 4-4	Curves of the mean forces expressed by the moving bat coordinate system in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).56	
Figure 4-5	Curves of the mean moments expressed by the moving bat coordinate system in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).58	
Figure 4-6	Mean and standard deviation of the mechanical works done by the vertical component of longitudinal axial force of bat for each hitting-point height (H: High, M: Middle, and L: Low).	61
Figure 4-7	Mean and standard deviation of the mechanical works done by the Z_{bat} axial component of coupled force under each hitting-point height conditions (H: High, M: Middle, and L: Low).	63
Figure 4-8	Mean and standard deviation of the mechanical works done by the X_{bat} axial	

component of moment under each hitting-point height (H: High, M: Middle, and L: Low).	64
---	----

第5章 打点高の異なる野球打撃動作における上肢のキネティクスの特徴

Figure 5-1 Definitions of segment coordinate systems at upper limb ((a) upper arm, (b) forearm, and (c) hand) to calculate the angular velocity of each segment.	74
--	----

Figure 5-2 Definitions of joint coordinate systems at the upper limb ((a) shoulder, (b) elbow, and (c) wrist) to calculate the joint angles and express the joint torques.	78
--	----

Figure 5-3 Free body diagram for the calculation of joint force and torque of a segment.	83
--	----

Figure 5-4 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the flexion/extension, adduction/abduction, and internal/external rotation axes of the barrel-side shoulder joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	87
---	----

Figure 5-5 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the flexion/extension, adduction/abduction, and internal/external rotation axes of the knob-side shoulder joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	89
---	----

Figure 5-6 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the flexion/extension and pronation/supination axes of the barrel-side elbow joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	91
--	----

Figure 5-7 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the flexion/extension and pronation/supination axes of the knob-side elbow joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).93

Figure 5-8 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the barrel-side wrist joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).95

Figure 5-9 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the knob-side wrist joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).96

Figure 5-10 The mechanical works done by the upper limbs joint torque (shoulder, elbow, and wrist joint).98

Figure 5-11 Curves of joint torques caused statically by the three components which mainly contribute to generate vertical motion of the bat head. The torques are about the flexion/extension and adduction/abduction axes of individual shoulder joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).100

Figure 5-12 Curves of joint torques caused statically by the three components which mainly contribute to generate vertical motion of the bat head. The torques are about the flexion/extension axis of the individual elbow joints, the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the individual wrist joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).102

Figure 5-13	Curves of joint angles of the adduction/abduction axis of the individual shoulder joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	106
Figure 5-14	Curves of joint angles of the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	111
第 6 章 打点高の異なる野球打撃動作における体幹と下肢のキネティクスの特徴		
Figure 6-1	Definitions of segment coordinate systems at head and trunk ((a) head, (b) upper trunk, and (c) lower trunk) to calculate the angular velocity of each segment.	122
Figure 6-2	Definitions of the joint coordinate systems at the trunk to calculate the joint angles and express the joint torques.	124
Figure 6-3	Definitions of segment coordinate systems at the lower limb ((a) thigh, (b) shank, and (c) foot) to calculate the angular velocity of each segment.	127
Figure 6-4	Definitions of the joint coordinate systems at the lower limb ((a) hip, (b) knee, and (c) ankle) to calculate the joint angles and express the joint torques.	129
Figure 6-5	The segment rotation angles of the upper and lower trunk in the XY plane.	133
Figure 6-6	Free body diagram for the calculation of joint force and torque of the upper trunk segment.	135
Figure 6-7	Curves of angles and angular velocities of the upper and lower trunk segment, and the	

trunk twist in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).....	140
Figure 6-8 Curves of the vertical velocities of the ball hitting-point on bat obtained from the motion in the trunk joint and lower trunk in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	142
Figure 6-9 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the anteflexion/dorsiflexion, right/left lateral flexion, and right/left rotation axes of the trunk joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	144
Figure 6-10 The mechanical works done by the trunk joint torque.	146
Figure 6-11 Relationships between maximum values of bat-head speed and positive works done by the right/left rotation axis of trunk joint torque.	148
Figure 6-12 The mechanical energy flows for the upper trunk of joint force power and segment torque power in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).....	150
Figure 6-13 Curves of the vertical displacements and the horizontal speeds of the lower limbs CG in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	152
Figure 6-14 Ground reaction forces of each foot in the forward swing motion under hitting-point	

height conditions (High, Middle, and Low).	154
Figure 6-15 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the hip extension/flexion, adduction/abduction, and internal/external rotation axes of the pivot-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	156
Figure 6-16 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the hip extension/flexion and adduction/abduction, and internal/external axes of the step-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).	158
Figure 6-17 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the knee extension/flexion and internal/external rotation, axes of the pivot-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).....	161
Figure 6-18 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the knee extension/flexion and internal/external rotation, axes of the step-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).....	163
Figure 6-19 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the ankle plantar/dorsal flexion and inversion/eversion axes of the pivot-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).....	165
Figure 6-20 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the ankle plantar/dorsal flexion and inversion/eversion axes of the step-side in the forward swing	

motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low)	167
Figure 6-21 The mechanical works done by the lower limbs joint torque (hip, knee, and ankle joint)	169
Figure 6-22 Curves of moments about the lower trunk exerted by the individual hip joint torques in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low)	171
Figure 6-23 Curves of mechanical energy flows for the lower trunk of joint force power and segment torque power in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low)	173
Figure 6-24 Curves of joint angles of the flexion/extension axis of the individual hip joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low)	183
Figure 6-25 Curves of moments about the lower trunk exerted by joint torque of the internal/external rotation axis of individual hip joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low)	185
 第7章 異なる打点高に対応するための指導への示唆	
Figure 7-1 Curves of angles and angular velocities about the bat inclinational axis in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects	199
Figure 7-2 Curves of forces (Y_{bat} and Z_{bat}) and moments (X_{bat}) expressed by the axis of moving bat	

	coordinate system in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.	201
Figure 7-3	Mechanical works done by the three components which mainly contribute to generate vertical motion of bat head under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.	203
Figure 7-4	Stick diagram of the bat swing and configuration at the ball impact under the low hitting-point height condition with Subj. 23 (high group) and Subj. 20 (low group)...	204
Figure 7-5	Curves of joint angles of the flexion/extension and adduction/abduction axes of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.	208
Figure 7-6	Curves of joint angular velocities of the flexion/extension and adduction/abduction axes of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.	210
Figure 7-7	Curves of joint torques of the flexion/extension and adduction/abduction axes of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.	212
Figure 7-8	Curves of joint torque powers of the flexion/extension and adduction/abduction axes	

of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.213

Figure 7-9 Stick diagram of the batting motion in the forward swing under the low hitting-point height condition trial with Subj. 23 (high group) and Subj. 20 (low group).216

第1章 緒言

1.1 研究の背景

野球における打撃とは、得点を獲得するための攻撃手段であり、この能力の差が試合の勝敗を左右することから、打撃技術を高めることは試合での勝利、すなわち野球の競技力向上に繋がるものと考えられる。ここで野球打撃の運動課題は、投手により投球されたボールをインフィールド内へと打ち返すことであり、例えばゴルフのような静止球を打撃する動作ではなく、飛来球を打撃する他動的な動作となる。このため、野球の打撃動作の難しさはヒットを打つ確率である打率に表れており、プロ野球において打率 3 割を打つ選手は、好打者であるとの評価を受けていることからもみてとれる。

野球の打撃動作において打者には、ヒットやホームランを打つことが求められることから、投球されたボールをバットによって正確に捉え、狙ったフィールドにできる限り強い打球を打つことが課題となる。ここで強い打球とは、打球スピードが大きなことを意味し、バットとボールの運動量の関係から、バットのヘッドスピードを高めることが有効となる。このバット・ヘッドスピードについては、先行研究においても、打撃技術の高低を表す指標として用いられている。例えば川村ら（2000, 2001, 2008）は、社会人野球および大学野球選手のバットや上肢に関するキネマティクスの分析において、打撃技術の高い社会人野球選手は、大学野球選手と比べて打球速度が大きい傾向を示すこと、およびそのバット・スウィング軌道は、大学野球選手と比べて早い段階において水平となり、ボールとバットとが直衝突を行っていることを報告している。また、田内ら（2005）は、体幹の捻転動作がバット・ヘッドスピードに及ぼす影響について検討し、捻転角度の大きさよりも肩の捻り戻しの角加速度を増大することによってバット・ヘッドスピードが向上することを示唆している。これらの報告のように、野球打撃に関する研究の多くは、主にバットの動き、あるいは身体各関節の動作特徴についてキネマティクスの観点から分析したもので

あり，動作の生成要因を定量化するキネティクスの観点からの検討したものではない。

野球打撃の力学的な特徴として，上肢では右腕－バット－左腕によって，また，下肢では右脚－地面－左脚によって機構的な閉ループが構成される．このとき，系の運動の自由度数に対して力およびモーメントの自由度数が大きくなることから，各系とも力に関する冗長系となるため，バットや打者の動作データといった位置情報のみから，左右各手のバット作用力および作用モーメント，あるいは左右上肢の関節トルクといったキネティクスの変量を得ることはできない．このように閉ループに起因してキネティクスの変量が一意に定まらない問題を閉ループ問題と言う．なお，下肢の閉ループ問題に対しては，複数枚のフォースプラットフォームを適宜用いて左右各脚の地面反力データを取得することにより，容易に解決することが可能である．このため，フォースプラットフォームによって得た地面反力データについて検討したキネティクスの研究が多数報告されている (Messier and Owen, 1985, 1986 ; Hirano, 1985 ; 平野ら, 1989 ; 小田ら, 1991a, 1991b ; Welch, 1995 ; 勝又・川合, 1996 ; Katsumata, 2007 ; Yanai, 2007 ; 高木ら, 2010b ; Fortenbaugh *et al.*, 2011)．

これに対して，上肢の閉ループ問題では，左右各手によってバットに作用させる力およびモーメントを測定する必要があることから，平野 (1979) および伊藤ら (2001) の研究のように，仮定を設けることにより左右各手あるいは上肢のキネティクスの変量の推定が行われてきた．しかしながら，上述したように打撃動作では，投球されたボールをバットのボール打撃部位によって正確に捉えること，およびバット・ヘッドスピードを高めて強い打球を打つことが要求される．その際，ボールを捉えるためのスウィング軌道の調整，およびバット・ヘッドスピードの獲得といったバットの操作には，主に左右各手のバット作用力および作用モーメントが寄与しており，これらの各キネティクスの変量を生成しているのは上肢各関節の関節力およびトルクである．そこで，小池 (2004a, 2010), Koike *et al.* (2004b) および小池ら (2009b) は，力検出型センサー・バットを考案・開発して，左右各手のバット作用力および作用モーメントの計測を直接可能とし，この上肢の閉ループ問

題を解決している。そして、このセンサー・バットを用いて野球の打撃動作における上肢のキネティクスの分析を行うことによって、スウィング動作のメカニズム解明について検討している（小池ら，2006，2008，2009a，；小池，2007）。しかしながら、いずれのキネティクスの研究においてもその打点位置は一定に設定されており、異なるコース条件に対応する際のキネティクスの特徴を明らかにしたものではない。

他方、実際の試合において、投手は打者を打ち取るために様々なコースに投球を行うことから、打者にはこれらの異なるコースへの投球に対応できることが競技力の向上に不可欠な要素となる。しかしながら、これまでに挙げてきた先行研究を含めて、野球打撃に関する研究の多くは、ある一定のコースに設定されたボールに対する打撃を対象としたものであった。そこで、田子ら（2006a，2006b）は、異なるボールコースに対するティー打撃動作におけるキネマティクスの分析を行い、打点高の違いには肩および骨盤の回転よりも四肢の関節角変位の調整が優先され、また、内外角の違いには主に骨盤の回転が優先されると報告している。このように報告例は少ないものの、異なるコース条件に対するキネマティクスの分析は行われているのに対して、異なるコース条件に対する左右各手および上肢各関節におけるキネティクスの分析を行った研究、そして、上肢、体幹および下肢におけるキネティクスの関係について検討した研究は見当たらない。

以上のことから、野球の打撃動作において、実際の試合を想定した打撃条件に対するキネティクスの観点からの分析の第一歩として、異なる打点高条件に対する打撃動作のキネティクスの特徴を検討することによって、野球打撃のパフォーマンス向上への有用な基礎的知見を得られるものと考えられる。

1.2 本研究の目的

異なる打点高条件に対する野球打撃動作のキネティクスの分析を行い、打点高の違いに対応する際のバイオメカニクスの特徴を明らかにし、競技力の向上および指導に有用な

知見ならびに示唆を得ることである。

1.3 研究課題

本研究の目的を達成するために、以下の研究課題を設定した。

研究課題 1 (第 4 章)

異なる打点高条件下のティー打撃における左右各手のキネティクスの分析を行い、打点高の違いに対応するためのバットの動きを生成する左右各手のキネティクスの特徴を明らかにすること。

研究課題 2 (第 5 章)

研究課題 1 において明らかとなった、打点高の違いに対応するための左右各手のキネティクスを実現するための左右の上肢関節の役割について明らかにすること。

研究課題 3 (第 6 章)

打点高の違いに対応するための左右各手および左右の上肢関節のキネティクスを実現する際の、体幹および左右の下肢関節の役割について明らかにすること。

研究課題 4 (第 7 章)

研究課題 1～3 によって明らかとなった打点高の違いに対応するための身体各関節の役割から、打点高の違いに対応するための指導への示唆を導き出すこと。

1.4 本研究の仮定

本研究は以下の仮定に基づいている。

- ① 本研究において対象とした被験者は、男子大学野球競技者を代表する。
- ② 各被験者の分析対象試技は、被験者の特徴を表したものとする。
- ③ バットおよび身体（手部，前腕，上腕，足部，下腿，大腿，頭部，上胴，下胴）を剛体リンクモデルとしてモデル化して分析を行う。
- ④ 各被験者の身体部分の慣性特性は、阿江の推定式（阿江，1996）を適用できる。
- ⑤ 各被験者のすべての試技において、疲労の影響はない。
- ⑥ 被験者は実験前にセンサー・バットによる打撃練習を十分に行っていることから、普段使用しているバットとの違いによる動作の差は小さい。

1.5 本研究の限界

- ① 本研究における被験者は男子大学野球選手である。このため、一流野球選手や子供など、大学野球選手以外の対象者においては、本研究の結果と異なる可能性がある。
- ② 本研究はボール打撃位置を厳密に設定するためにティー打撃動作を分析対象としている。このため、実際の試合のように投手により投球を打撃する飛来球打撃においては、本研究の結果と異なる可能性がある。
- ③ 本研究は実験による打撃動作を分析対象としている。このため、実際の試合による打撃動作においては、本研究の結果と異なる可能性がある。
- ④ 逆動力学演算によって算出される身体各関節トルクは、関節まわりの筋群および結合組織などによる正味のトルクである。このため、得られたキネティクスの知見を筋力トレーニングに適用する場合には、注意が必要である。

第2章 文献研究

野球の打撃動作に関する研究は、競技力の向上に関する知見、あるいは指導への示唆を得ることを目的として、主に4つの観点に分類することができる。すなわち、打撃動作のバット・ヘッドスピード獲得に関する研究（キネマティクスおよびキネティクスの研究）、打撃動作の筋活動様式に関する分析、打撃動作のタイミング調整に関する研究、そして、打撃動作の打ち分けおよび打撃ポイントの違いに関する研究である。本章では、これら4つの観点に関する研究について概説し、それぞれの特徴について述べていく。

2.1 打撃動作のバット・ヘッドスピード獲得に関する研究

2.1.1 キネマティクスの研究

野球の打撃動作に関する研究は、バットの力学的要因に関する研究に始まり、近年までに数多く行われてきている（Race, 1960；大藪ら, 1979；浅見, 1984；平野, 1984, 1993；Messier and Owen, 1984；吉福, 1985；Noble and Eck, 1986；Weyrich *et al.*, 1989；Hay, 1993；Noble and Walker, 1994；Fleisig *et al.*, 2002；前田, 2003, 2006a；Koenig *et al.*, 2004；城所ら, 2011, 2012b；川端・伊藤, 2012；Nakata *et al.*, 2012b）。その後、バットと身体各関節とを関連づけてのキネマティクスの観点から分析した研究が多く行われるようになり、主に大きな打球スピードの獲得に影響を及ぼすバット・ヘッドスピードが打撃動作を評価する際の有効な指標とされている。この理由として、安打の確率を高めるためには、強い打球を得ることが重要であり、この強い打球、すなわち大きな打球速度を得るには、大きなバット・ヘッドスピードの獲得が必須条件となることが挙げられる（Sawicki *et al.*, 2003）。

バットの動きに関する研究として、前田（2001）は、熟練者と未熟練者におけるスウィングの再現性について検討し、熟練者はバット速度、バット角速度などといった各変数の標準偏差が小さくなり、熟練者と未熟練者とはバット操作の再現性に大きな差があると報告している。また、大室ら（2004）もスウィングの再現性とバット・ヘッドスピードに

ついて検討し、経験者は未経験者に比べて、スウィングのスピードおよび再現性が高くなると報告している。さらに、前田（2006b）は、高校野球選手を対象として、バットの加速度を評価尺度としたスウィングの類型化を試みている。その結果、スウィングを定量的に評価することは難しいとしつつも、インパクト直前におけるバットの加速度および角加速度の変化を基準に9つのタイプに分類を行い、加速度の増減を評価基準にできることは、スウィングを検討する際の新たな観点であると報告している。Tabuchi *et al.*（2007）は、大学野球選手を対象として、3種類の重さの異なるボールをティー打撃した際のバット・ヘッドスピードのピーク値出現のタイミングについて検討した。その結果、通常ボールでは、インパクト時点においてヘッドスピードのピーク値がみられたの対して、軽いボールでは、インパクト後もヘッドスピードは増加していたことから、先行研究におけるインパクト付近でのヘッドスピードの減少は、フィルター処理が影響を及ぼすと報告している。城所ら（2011, 2012b）は、大学野球選手を対象として、バット長軸まわりの回転（ローリング）に主眼を置き、スウィング特性と打球の運動エネルギーとの関係について検討した。その結果、運動エネルギーの大きな打球は低い弾道、且つ並進速度の大きなライナー性の打球であり、打球の運動エネルギーを増加させるためには、バット・ヘッド速度、スウィング角度、およびバット長軸まわりの角速度を増加させることが重要であると報告している。

一方、バット・スウィングと身体ならびに体力的要因との関係について、村田ら（1997）は、バット・ヘッドスピードに影響を及ぼす身長、体重といった身体的要因、筋瞬発力、筋持久力といった体力的要因などの各要因を重回帰分析に基づいて検討している。また、澤村ら（2006）は、最大筋力としてスクワット、ベンチプレスなどの5項目、筋パワーとして体幹回旋パワー、立ち幅跳びなどといった8項目から、スウィング速度と体力的な要因について検討している。さらに、Otsuji and Kinoshita（2002）は、実際の現場にみられる通常よりも重いバットおよび軽いバットによるスウィングが、即時的に通常バットによるスウィングに及ぼす影響について検討している。その他にも、バット素材の違いが打球速

度に及ぼす影響について検討した研究もいくつかみられる (Crisco *et al.*, 2002 ; Greenwald *et al.*, 2001 ; 川端・金子, 2005).

バットおよび手の動きに関する研究として、川村ら (2000) は、社会人野球選手と大学野球選手を対象として、真中のコースにおけるティー打撃を行わせた。その結果、バット・ヘッドスピードは社会人と大学選手との間に有意な差はみられなかったものの、打球スピードは社会人選手が有意に大きかった。この理由として、社会人選手はボールに対してバットをより直衝突させていることが挙げられ、大学野球選手と比べて、フォワード・スウィングにおいてバットがより早く水平に近くなるスウィング軌道であったと報告している。川村ら (2001) は、熟練野球選手における両手の動きについても検討し、大きな打球スピードを獲得するための指導では、フォワード・スウィング前半におけるバット・ヘッド側の回外動作、およびフォワード・スウィング後半におけるグリップエンド側手の回内動作に着目することが有効であると報告している。

上肢および体幹の動きに関する研究として、平野 (1996) は、打撃動作を力学的法則から検討し、バットのボール打撃部位の運動エネルギーを高めるためには、身体重心の打撃方向への移動、およびスウィングに支障を及ぼさない適度なテイクバック動作が有効であると報告している。川村ら (2008) は、大学野球選手と社会人野球選手を対象にして、バット・ヘッドスピードの大きさによって競技レベルの上位群と下位群とに分けて、上肢の動作について検討した。その結果、野球の打撃動作では、両肩関節の動作範囲は小さいのに対して、バット・ヘッド側の肘および手関節の動作範囲は大きくなること、およびバット・ヘッド速度の増加には、グリップエンド側肩関節の内転および水平内転による「脇をしめる」という動作が寄与することを報告している。Escamilla *et al.* (2009a) は、プロ野球選手および大学野球選手を対象にして、バットを短く持つことが打撃に及ぼす影響について検討した。その結果、バットを短く持った場合、バット・ヘッドスピードおよびバットの運動量は減少するものの、上腕および骨盤の回転角度の範囲が小さくなることにより、

コンパクトなスウィングが可能となり、バットのコントロール性は向上すると報告している。さらに、Escamilla *et al.* (2009b) は、打撃技術の成熟段階に応じた指導に関する知見を獲得するために、成人野球選手と中高生野球選手の比較を行った。その結果、肘および膝関節、骨盤および上脗の角度、ならびにステップ時のストライド長は、各群ともにほぼ同様であった。これに対して、各関節の速度、角速度およびバット・ヘッド速度は、成人野球選手が有意に大きかったことから、これらの得られた知見に基づき、成熟段階の選手に対して適切な打撃指導を行うことによって、より高いスウィング技術の獲得に役立つと報告している。

他方、高橋ら (1999) は、全日本候補野球選手と大学野球選手のティー打撃を対象として、競技力の違いにおける腰の回転動作の特徴について検討した。その結果、打球速度の大きい全日本候補野球選手におけるロングヒッターおよびミドルヒッターは、打球速度の小さい大学野球選手に比べて、腰の回転角および角速度が小さかった。このため、腰の回転動作において、身体に大きな運動量を得るために、適切な動作範囲によってその動作速度を高めることが重要であると報告している。津田ら (1999) は、体幹部におけるトレーニングの知見獲得を目的として、腰部における重量負荷が、腰部の回転動作および回転停止動作に及ぼす影響について検討した。その結果、腰部への重量負荷 (3.5 kg) は、スウィングにおける並進運動を回転運動に変化させる局面では影響を及ぼさないものの、回転動作を停止させる局面では大きく影響を及ぼしていた。このため、重量負荷を伴ったスウィングを行うことは、踏み出し脚の安定性を高めることに有効であると報告している。宮西 (2004, 2006) は、大学野球選手のピッチングマシンによる打撃を対象として、バットおよび身体の角運動量について検討した。その結果、バット・ヘッドスピードはバットの鉛直軸まわりの角運動量と密接に関係し、この角運動量の生成には、特に体幹の鉛直軸まわりの角運動量が大きく寄与していたことから、体幹の捻転動作の重要性について報告している。田内ら (2005) は、大学野球選手を対象として、体幹の捻転動作がバット・ヘッド

スピードに及ぼす影響について検討した。その結果、バット・ヘッドスピードと捻転角速度との間に差がみられたことから、バット・ヘッドスピードの増加には大きな捻転角速度を発生させることによって、肩の捻り戻しの角加速度を高めることが有効であると報告している。この他にも、体幹の捻転動作に着目した研究はいくつかみられる（宮西・櫻井, 2009 ; 石井ら, 2010 ; 川村ら, 2012）。また、及川ら（1996）の研究のように、バット運動と肩および腰における動作との関係から打撃動作の類型化について検討を試みたものも報告されている。

以上のことから、バットおよび身体各関節のキネマティクスの分析によって、バットのパフォーマンスに寄与する身体の動作特徴が明らかとなっている。しかしながら、これらのキネマティクスの分析のみでは、バット操作や身体各関節の調整といった動作の生成要因にまで言及することができていないと考えられる。

2.1.2 キネティクスの研究

野球の打撃動作に関するキネティクスの研究は、フォースプラットフォームを用いた下肢の分析がその大半を占めているといえる（Messier and Owen, 1985, 1986 ; Hirano, 1985 ; Mason, 1987 ; 平野ら, 1989 ; 小田ら, 1991a, 1991b ; Welch, 1995 ; 勝又・川合, 1996 ; Katsumata, 2007 ; Yanai, 2007 ; 高木ら, 2010b ; Fortenbaugh *et al.*, 2011）。これに対して、上肢についての研究は、以前はその数が少なかったものの（平野, 1979 ; 伊藤ら, 2001）、小池（2004a, 2010）、Koike *et al.*（2004b）および小池ら（2009b）が左右各手のキネティクスの変量を計測可能なセンサー・バットを考案・開発したことにより、このセンサー・バットを用いての研究がいくつかなされている（小池, 2007 ; 小池ら, 2003, 2006, 2008, 2009a ; 小池・阿江, 2012）。

下肢のキネティクスの分析として、Messier and Owen（1985）は、女子ソフトボール選手を対象として、地面反力データおよび下肢の動きについて検討した。その結果、スウィン

グ中における地面反力データの経時変化は、体重移動や両脚の荷重の仕方を明らかにすること、骨盤および上胴の回転動作を評価することに有効であると報告している。平野ら (1989) は、地面反力データを用いて、野球打撃、テニスサーブおよびゴルフスウィングにおける身体重心の移動に伴う力発揮様式について検討した。その結果、野球打撃において、バック・スウィング時では身体重心速度を減少させて重心移動を制御し、フォワード・スウィング時では打球方向へと身体重心を加速させることに寄与する地面反力データが観察されたと報告している。小田ら (1991b) は、大学野球選手におけるティー打撃を対象として、バット・ヘッドスピードと地面反力データとの関係について検討した。その結果、バック・スウィング時の地面反力における前後方向のピーク値とバット・ヘッドスピードとの間には有意な相関関係がみられ、大きなバット・ヘッドスピードを獲得するためには、バック・スウィング期終盤において身体重心を打球方向とは反対方向、且つ腹部側方向に移動させることが重要であると報告している。さらに、勝又・川合 (1996) は、大学野球選手を対象として、異なる投球速度に対する打撃動作における地面反力データについて検討した。その結果、力強いスウィングを行うためには、ステップ脚の地面に対する荷重量を大きくすること、スウィング局面におけるステップ脚の地面反力曲線はボールスピードによらずに一致すること、および投球速度が低速の場合、接地後のステップ脚の動作を遅らせることはスウィング動作開始のタイミング調整を行うことに寄与すると報告している。高木ら (2010b) は、大学野球選手を対象として、地面反力データを用いて下肢の逆動力学演算を行い、異なる投球速度に対する下肢および体幹の役割について検討した。その結果、高速なボールに対応するためには、ステップ脚接地後において、ステップ脚の股関節屈曲トルクの発揮タイミングを早めること、そして、軸脚の股関節外転トルクを大きくすること、骨盤が投手方向へ回転し始める時点においては、ステップ脚の股関節屈曲トルクによる下胴の回転成分を大きくすることが有効であると報告をしている。Fortenbaugh *et al.* (2011) は、プロ野球選手を対象として、高木ら (2010b) と同様に、異なる投球速度 (速球および

チェンジアップ)の成功試技と、チェンジアップの失敗試技に対する地面反力データについて検討した。その結果、スウィング開始からチェンジアップの失敗試技、チェンジアップの成功試技、速球の成功試技の順に、ステップ脚の鉛直および水平成分においてブレーキ力の最大値が出現していたことから、特にチェンジアップは打者のタイミング調整時における打撃方向への体重移動を乱れさせていたと報告している。

上肢のキネティクスの分析として、左右上肢とバットが構成する機構的な閉ループ系が存在するため、バットに対する逆動力学的演算を行ったとしても、左右各手のバット作用力および作用モーメントを求めることはできない。このため、従来の上肢キネティクスに関する研究は仮定あるいは推定を設けた上で行われてきた。平野(1979)は、大学野球選手を対象として、バット長軸力では左右の手は均等、バット長軸と垂直方向の成分では左右の手は偶力と仮定して、左右各手のバット作用力および作用モーメントを算出している。その結果、バットの振り出し時点ではバット長軸力によってバットを投手方向へと引き抜き、インパクト直前では両手の偶力によってバットを回転させていると報告している。伊藤ら(2001)は、左右上肢の関節トルクの和が最小となるように仮定を設けて左右各手のキネティクスの変量を求め、バットの慣性特性の違いがバット・スウィングに及ぼす影響について検討している。その結果、正仕事は体幹および下肢によって60%から80%の値が生成され、負仕事は上肢によって90%程度の値が生成されていた。このため、体幹および下肢はバットを加速する役割を、上肢はバット運動を調整する役割を担っていること、また、関節トルクはバットの質量に大きく影響を受けるのに対して、慣性モーメントにはあまり影響を受けないことを報告している。

これらの左右各手あるいは上肢関節のキネティクスの変量において仮定や推定を設けた研究に対して、小池(2004a, 2010), Koike *et al.* (2004b), および小池ら(2009b)は、センサー・バットを考案・開発することにより上肢における機構的な閉ループ問題(右腕-バット-左腕)を解決し、左右各手のバット作用力および作用モーメントの計測を可能と

した。さらに、小池ら (2003, 2006, 2008, 2009a), および小池 (2007) は、大学野球選手を対象として、センサー・バットを用いて打撃動作に対する左右上肢および体幹の役割について検討した。その結果、インパクト付近では、ノブ側手によるバット長軸力が顕著に大きくなり、主にノブ (グリップエンド) 側の肩関節外転トルクが、バットの回転運動により増大する遠心力に対応していたこと、そして、体幹部は打撃方向への回旋によって大きな正仕事を生成するとともに、大きなバット長軸力に抗して姿勢を維持するために大きなトルクを発揮していたことを報告している。

以上のことから、これまでの野球の打撃動作におけるキネティクスの分析によって、バット・ヘッドスピードの獲得およびスウィング軌道の調整などといった左右各手、ならびに四肢および体幹の働きに関する知見が得られている。しかしながら、上述したこれらのキネティクスの研究は、いずれもボール打撃位置を真中といった一定コースに設定した際の打撃動作を対象としているものであり、異なるコース条件における打撃動作を対象としていない。このため、先行研究のような一定のコースに対するスウィング動作に関する知見に加えて、様々なコースに対応するためのスウィング動作に関する知見の獲得が必要であると考えられる。

2.2 打撃動作の筋活動様式に関する研究

野球の打撃動作における筋の活動様式に関する研究は、主に筋電図を用いたものがいくつか行われているものの (Kitzman, 1963; 大藪ら, 1979; 平野, 1984; 東・徳山, 1989; Shaffer *et al.*, 1993; Reyes *et al.*, 2010, 2011; Nakata *et al.*, 2012a, 2013), 同じく打具を用いた種目であるテニスおよびゴルフを対象とした研究 (西島ら, 1984, 1985, 1986, 1989a, 1989b; Adelsberg *et al.*, 1986; Jobe *et al.*, 1989; Morris *et al.*, 1989; Pink *et al.*, 1990, 1993; 平野, 1993; Watkins *et al.*, 1996; 川上ら, 2006) に比べて、その数は少ないといえる。

Kitzman (1963) は、プロ野球選手および大学野球選手を対象として、技術レベルの違い

における左右の計 8 か所（大胸筋，広背筋，上腕三頭筋長頭・外側頭）の筋活動について検討した。その結果，技術レベルの高い選手は，低い選手に比べて，バック・スウィング動作が大きいことから，より右肩（バット・ヘッド側）関節の伸展および外転，ならびに右肘関節の伸展動作が行われるため，左大胸筋，右腕の上腕三頭筋における筋活動が大きくなる傾向があること，そして，バットの引き腕である左腕の上腕三頭筋の強化が重要であることを報告している。平野（1984）は，上肢および下肢の関節角（左右の肘関節屈曲伸展角，右膝関節屈曲伸展角），ならびに筋活動（左尺側手根屈筋，左上腕三頭筋長頭，右内側広筋，右腓腹筋）の関係について検討した。その結果，インパクト前 200 ms 付近では，腓腹筋が大きな放電を示したのに対して，内側広筋においては顕著な放電を示さなかったことから，軸脚の地面反力は腓腹筋の活動が大きく影響すること，そして，インパクト直前では左右の肘関節ともに完全伸展はせずに，左上腕三頭筋長頭および左尺側手根屈筋は大きな放電を示したことを報告している。堀田ら（1988）は，大学野球選手および野球未経験者を対象として，素振りおよび実打における左右腕部の計 8 か所（橈側手根屈筋，長橈側手根伸筋，上腕二頭筋，上腕三頭筋）の筋活動の共通点および相違点について検討した。その結果，素振りおよび実打ともに，バットの動きは類似しているものの，両腕における筋群の放電時間および放電パターンが異なり，素振りは実打を想定して行うことが有効であると報告している。Nakata *et al.*（2012a, 2013）は，熟練野球選手および野球未経験者を対象として，スウィング動作およびスウィング停止動作における左右下肢の計 8 か所（大腿直筋，大腿二頭筋，前脛骨筋，内側腓腹筋）の筋活動の違いについて検討した。その結果，軸脚の前脛骨筋，ステップ脚の大腿二頭筋および内側腓腹筋における筋活動の最大値は，スウィング停止動作よりもスウィング動作の方が大きく，また，熟練野球選手は，野球未経験者に比べて，軸脚の大腿直筋および前脛骨筋の筋活動が大きく，スウィングの際に筋活動を効率的に行うために，スウィング準備において早期の筋活動がみられた。このように試技および技術水準間による差が顕著にみられたことから，これらの知見は打撃

技術の理解および指導に有効であることを報告している。

以上のことから、野球の打撃動作における筋電図を用いた研究によって、打撃動作を行うために必要と考えられる主な筋について、その活動状態が明らかとなっている。しかしながら、筋電位情報を得るための電極を貼付する際の手間から、全身に対して適用することは難しく、上肢のみ、あるいは下肢のみといった局所的な筋に対する評価に留まっていると考えられる。

2.3 打撃動作のタイミング調整に関する研究

打撃動作のタイミングに関する研究は、卓上を転がるボール、あるいは発光ダイオード光など簡易的な装置を用いたもの(工藤, 1987; Matsuo *et al.*, 1993; Matsuo and Kasai, 1994), および投手あるいはピッチングマシンによる投球速度を変化させたものがある(Hirano, 1985; 勝又・川合, 1996; Katsumata, 2007; 高木ら, 2008, 2010a, 2010b; Fortenbaugh *et al.*, 2011). 他方では、意思決定や視覚的情報について検討した研究もいくつかみられる(Hubbard and Seng, 1954; Bahill and LaRitz, 1984; 豊島, 1991; 石田ら, 2000; 中本・森, 2008).

Hirano (1985) は、大学女子ソフトボール選手4名(熟練者2名, 未熟練者2名)を対象として、異なる投球速度のボール(高速, 中速, 低速)への対応について検討した。その結果、熟練者はいずれの投球速度においてもステップ脚を地面にしっかりと接地することによって大きなバット・ヘッドスピードを獲得し、また、地面反力においては、スウィング開始前では波形パターンを変化させ、スウィング開始後では波形パターンを変化させていなかった。これに対して、未熟練者は地面反力においてスウィング開始前では波形パターンを変化させずに、スウィング開始後では波形パターンを変化させていたと報告している。工藤(1987)は、特別な野球経験を持たない大学生を対象として、バットの振り幅および質量を変化させ、且つ動作所要時間を制限した条件を設定して、タイミングの正確性について検討した。その結果、打撃動作の所要時間の長さは、タイミングの尚早あるいは

遅延反応には直接影響しないこと、バットの質量が小さい場合、コンパクトなスウィングが可能になることから正確性が向上し、タイミング調整という観点から妥当な方略となることを報告している。Matsuo and Kasai (1994) は、大学野球選手を対象として、発光ダイオード光を発する装置を用いて、速球では平均速度 34.5 m/s (経過時間 531 ms)、遅球では平均速度 29.5 m/s (経過時間 633 ms) となる 2 条件の速度を、疑似打撃させた際のバットのタイミング誤差について検討した。その結果、バットの動き始めでは速度に関係なくバットの動きに差はみられないものの、ボールリリースの約 0.3 s 後付近では差がみられた。このため、ボールリリース後の約 0.3 s 付近の時刻から投球に対するタイミング調整が行われ、インパクトに近づくにつれてバットの動きのばらつきは小さくなると報告している。高木ら (2008) は、大学野球選手を対象として、異なる球速 (低速 : 75-80 km/h, 中速 : 100-105 km/h, 高速 : 125-130 km/h) に対する野球の打撃動作におけるタイミングの調整について検討した。その結果、投球速度が高速なボールに対応するためには、投手方向への身体重心の移動、その移動時間の短縮に伴う身体重心の並進運動に対する制限、および体幹の捻転動作の維持がそれぞれ必要であると報告している。さらに、高木ら (2010a, 2010b) は、上述した研究と同様な条件における下肢および体幹の役割についても検討し、主に左右股関節トルクの発揮タイミングの重要性について報告している。他方、石田ら (2000) は、大学野球選手を対象として、糸によって吊るしたボールを自在に自由落下可能とした装置を用いて、意思決定とバットの運動調整との関係について検討した。その結果、インパクト約 0.3 s 前までは打撃の判断が可能であり、最大努力下でのスウィングにおいてもインパクト前 0.077 s から 0.157 s まではバット運動が調整可能であることを報告している。

以上のことから、野球の打撃動作におけるタイミングに関する研究によって、スウィングにおけるタイミング調整が可能な限界時間、タイミング調整に伴うバットの動きおよび身体各関節の動作特徴が明らかとなっている。しかしながら、これらの研究のほとんどは、バットあるいは身体の幾何学的な情報を用いたキネマティクスの分析であることから、

タイミング調整を担うバットおよび身体，とりわけ上肢の動きの生成要因にまで言及することはできていないと考えられる。

2.4 打撃動作の打ち分けおよび打撃ポイントの違いに関する研究

野球打撃において，打者には様々な投球コースや球種，状況に応じた打球方向の調整などの打撃技術が必要不可欠であると考えられる．しかしながら，フィールド内の各方向および異なるコースへの打撃に関する研究は，野球の打撃動作における重要な課題であるにもかかわらず，その数は少ないといえる (Mcintyre and Pfautsch, 1982 ; Gelinas and Hoshizaki, 1988 ; 田子ら, 2006a, 2006b ; 前田, 2007 ; 城所ら, 2012a)．

打球の打ち分けについて，Mcintyre and Pfautsch (1982) は，大学野球選手を対象として，ピッチングマシンによって投球されたボールを自由にライトあるいはレフト方向へと打撃した際の打球の打ち分けが打撃動作に及ぼす影響について検討した．その結果，打者はグリップエンド側の肘関節屈曲伸展および手関節の動作を調整することによって，インパクトにおけるバットの姿勢を適切な方向へと調整することを報告している．Gelinas and Hoshizaki (1988) は，1名のプロ野球選手を対象として，ピッチングマシンにより投球を3つの区域（レフト，センター，ライト）に打ち分けた際の動作について検討した．その結果，右打者における反対方向（ライト）への打撃では，グリップエンド側の手関節尺屈角，ならびに骨盤および肩セグメントの鉛直軸まわりの回転角が制限されることを報告している．また，城所ら (2012a) は，大学野球選手を対象として，ピッチングマシンによって投球されたボールを反対方向へと打撃（流し打ち）した際のバットとボールとの幾何学的パラメータの関係性について検討した．その結果，流し打ち試技のおよそ70%は，インパクトにおけるバット長軸の起し倒しの傾斜角度（鉛直バット角），およびボールとバットの断面中心を結ぶ線分と，バット長軸に直交して水平面を通るベクトルとのなす角（衝撃線角度）の相互作用による貢献が大きくなることを報告している．

他方、打撃ポイントの違いについて、田子ら（2006a）は、大学野球選手のティー打撃を対象として、打点高の違いが打撃動作に及ぼす影響について検討した。その結果、打点高の違いに対応するためには、肩および骨盤の回転よりも四肢の各関節の調整が優先され、時間的拘束がある飛来球打撃では、低めの打点高を打撃することが困難になるとの示唆を報告している。さらに、田子ら（2006b）は、同条件の実験によって内外角のコースが打撃動作に及ぼす影響についても検討した。その結果、内外角に対応するためには、打点高への対応とは異なり、四肢の調整よりも骨盤の回転が重要となること、特に内角では、外角よりも肩および骨盤の回転角が打撃方向に大きくなり、打点位置はより投手側になることを報告している。前田（2007）は、プロ野球におけるレギュラークラスの選手を対象として、5.5 m の距離からの下手投げ打撃において、投球コースの違いが打撃動作に及ぼす影響について検討した。その結果、投球コースの違いによって、インパクト時点におけるバットの位置および姿勢には差があるものの、両腕を除いた身体各動作には顕著な差がないこと、特に腰の高さのコースでは、バット・ヘッド速度が大きくなることから大きな飛距離を得られる可能性があることを報告している。

以上のことから、野球の打撃動作における打球の打ち分け、および打撃ポイントの違いに関する研究によって、実際の試合を想定したより実践的な打撃動作についての知見が得られている。しかしながら、これらの研究についても、タイミング調整に関する研究と同様に、キネマティクスの観点からの分析が主であるといえる。このため、打球の打ち分けおよび異なるコース条件に対して、バットおよび身体各関節がどのように調整されているかという動作の生成要因に関しては、具体的に言及できていないと考えられる。

2.5 文献研究の総括

上述のように、大きく4つの観点に分類される野球の打撃動作に関する研究では、その大半をキネマティクスの分析手法が占めている。そして、左右各手および四肢の各関節

が力あるいはモーメント（トルク）をどのように調整しながらスウィング動作を行っているかを検討するキネティクス的分析については、フォースプラットフォームを用いた下肢に関する研究に集中していることが現状である。このため、打撃動作において、バットを直接把持してバット・ヘッドスピードの獲得、およびボールを正確に打撃するためのバット・スウィング軌道の調整などを担う、左右各手あるいは上肢関節のキネティクスに関する知見の獲得が求められる。加えて、実際の試合において、投手は打者を打ち取るために様々なコースへの投球を行うため、異なるコースへの対応が打撃技術の向上に不可欠となることから、各コースに対するスウィング動作を分析対象とする必要があると考えられる。

第3章 方法

3.1 スウィング実験

3.1.1 被験者

スウィング実験では，被験者を首都大学野球連盟一部リーグに所属する硬式野球部員 23 名とした（身長： 1.74 ± 0.04 m，体重： 74.1 ± 6.2 kg，競技歴： 12.0 ± 2.1 年，右打ち 11 名，左打ち 12 名）．各被験者の身体的特性および競技歴等を Table 3-1 に示す．実験に際して，各被験者には予め実験の目的および試技内容の説明を行い，協力への同意を得た上で実験を行った．なお，本研究は筑波大学研究倫理委員会の承認を得ている．

3.1.2 実験試技

筑波大学体育総合実験棟内において，被験者に 3 種類のボール高さ（高め，真中，低め）に設定されたティー上のボールをセンター方向に打撃するように指示した．試技数は各打点高に対して 7 回程度とした．その際，ボール高さについては，公認野球規則（日本プロフェッショナル野球組織，2009）に基づき，打撃動作時の被験者の姿勢から得た肩峰，ベルトおよび膝頭下部の各高さから，ストライクゾーンの上限と下限をそれぞれ決定した．すなわち，各被験者のベルト高さとストライクゾーン上限との中点を高め（High），ベルト高さを真中（Middle），そして，ベルト高さとストライクゾーン下限との中点を低め（Low）とした（Figure 3-1）．身体に対する打点の水平前後方向および内外角方向の位置については，打点高によらず同じ位置となるようにした．

なお，打撃するボール高さの順番は，被験者毎に無作為として，打撃の順番による影響を排除するように考慮した．

Table 3-1 Characteristics of the subjects for the swing experiment.

Subject	Age [years]	Height [m]	Weight [kg]	Career [years]	Throwing	Batting
1	20	1.80	74	11	Right	Left
2	19	1.76	80	10	Right	Right
3	18	1.70	68	9	Left	Left
4	19	1.70	60	13	Right	Left
5	18	1.71	71	7	Right	Right
6	18	1.82	78	9	Right	Right
7	19	1.78	78	12	Right	Left
8	18	1.75	75	12	Right	Left
9	22	1.72	72	14	Right	Right
10	20	1.75	74	12	Right	Right
11	21	1.75	85	13	Right	Right
12	20	1.71	77	13	Right	Right
13	19	1.74	82	10	Right	Right
14	19	1.70	63	13	Right	Left
15	20	1.71	70	14	Right	Left
16	21	1.71	76	13	Right	Left
17	19	1.71	73	11	Right	Left
18	19	1.68	68	12	Right	Left
19	22	1.77	82	11	Right	Left
20	20	1.72	67	11	Right	Left
21	21	1.73	74	14	Right	Right
22	21	1.73	78	15	Right	Right
23	22	1.77	80	16	Right	Right
Mean	19.8	1.74	74.1	12.0		
S.D.	1.3	0.04	6.2	2.1		

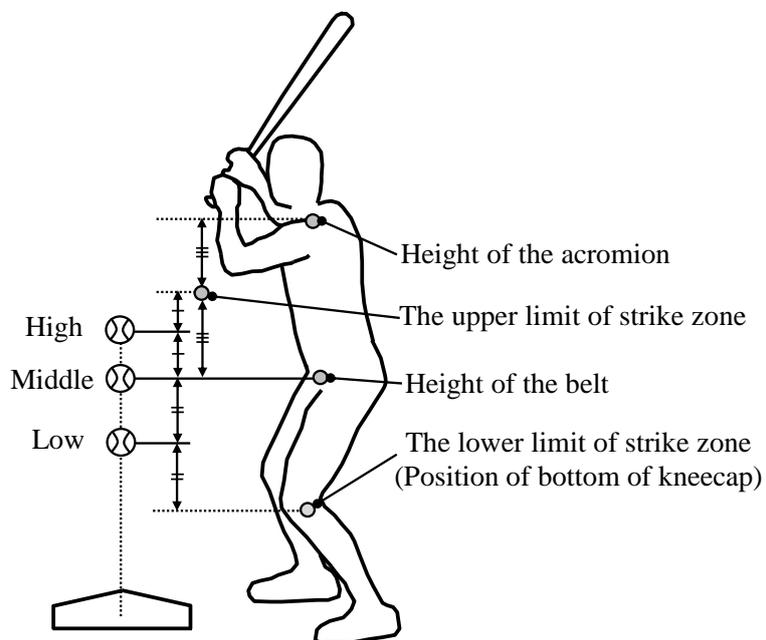


Figure 3-1 Schematic illustration of the ball hitting-point heights (High, Middle, and Low).

3.1.3 実験設定

Figure 3-2 は本研究におけるスウィング実験の実験設定を示し、Figure 3-3 はその実験風景を示している。3次元座標値の計測については、被験者に身体 47 点、およびバット 6 点の計 53 点 (Figure 3-4)、ならびにティー台の 4 点に反射マーカを貼付し、光学式 3次元自動動作分析装置 (VICON-MX, Vicon Motion Systems 社製) を用いて計測した (カメラ×12 台, 250 Hz)。キネティクス的変量の計測については、左右各手のバット作用力および作用モーメントの計測にはセンサー・バット (小池, 2010) およびストレインアンプ (AS1503, AS1603, 日本アビオニクス社製) を用いて (1000 Hz)、左右各脚の地面反力の計測には 3枚のフォースプラットフォーム (9281A×2 枚, 9827B×1 枚, Kistler 社製, 1000 Hz) を用いてそれぞれ計測した。また、打撃されたボールが正確にセンター方向に飛んでいる試技を分析対象として選別するために、打撃位置からセンター方向に 3 m, 地面から鉛直上方に 0.5 m の地点に、その下辺の midpoint が位置するよう縦 1.4 m×横 0.7 m の長方形の枠を設置し用いた。

分析に用いる静止座標系については、右打席から左打席に向かう方向を X 軸、ホームプレートから投手板に向かう方向を Y 軸、鉛直上向き方向を Z 軸とする右手系の座標系として定義した。

3.2 センサー・バット

本節では、本研究に用いたセンサー・バット (小池, 2010) の構造、算出原理、キャリブレーション手法などについて示す。

3.2.1 センサー・バットの構造

Figure 3-5 に、本研究において用いたセンサー・バットの構造図を示す。左右各手のバット作用力および作用モーメントの測定のために、同図に示すようにグリップハンドルを金属バット (ビクトリーステージ V コング 04, Mizuno 社製) のバット・ヘッド部の上部によ

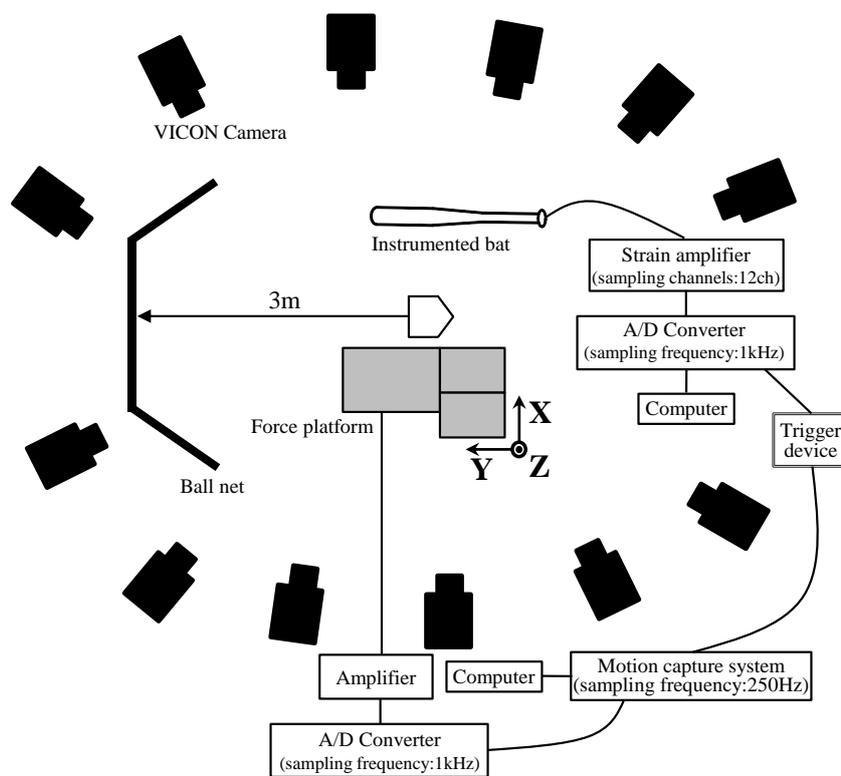
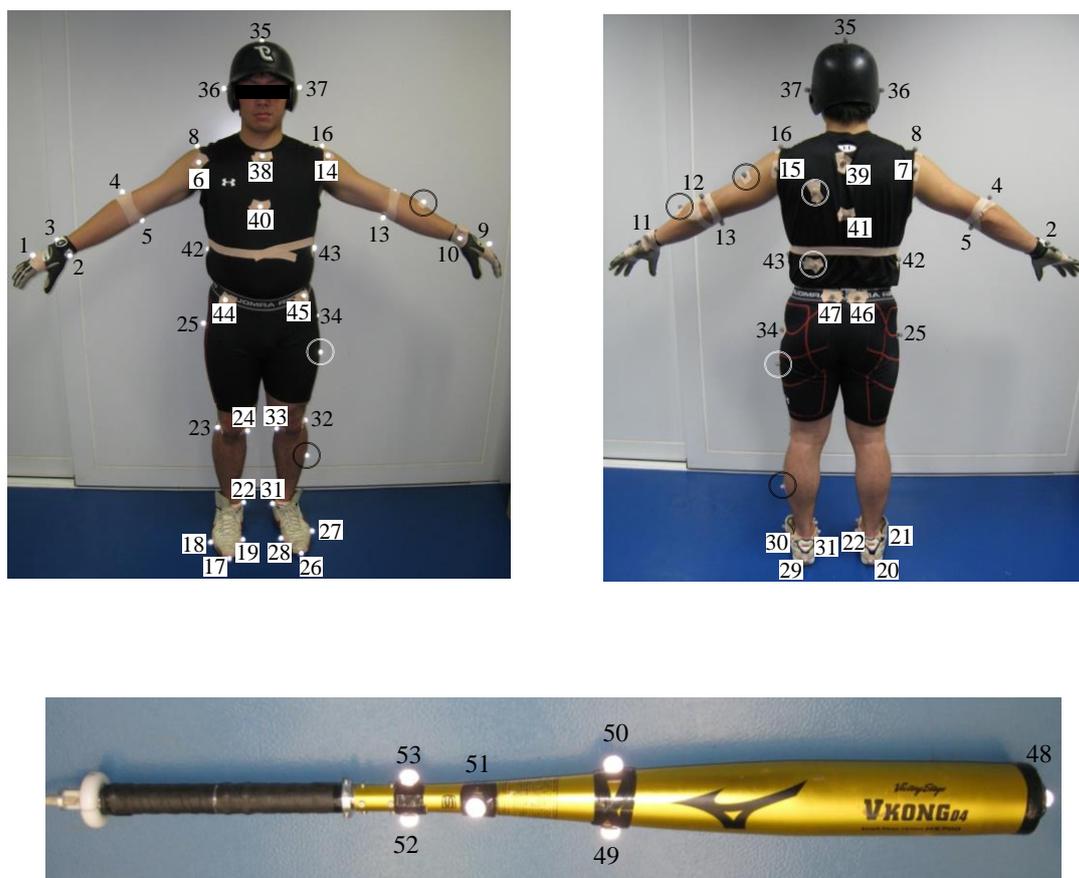


Figure 3-2 Schematic illustration of the experimental setup.



Figure 3-3 Experimental landscapes.



- | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|--|
| 1. Right 3rd metacarpal | 19. Right 1st metatarsal | 37. Left ear |
| 2. Right styloid process of radius | 20. Right calcaneus | 38. Suprasternals front side |
| 3. Right styloid process of ulna | 21. Right malleolus lateralis | 39. Suprasternals back side |
| 4. Right elbow lateral side | 22. Right malleolus medialis | 40. Xiphoid process front side |
| 5. Right elbow medial side | 23. Right knee lateral side | 41. Xiphoid process back side |
| 6. Right shoulder foreside | 24. Right knee medial side | 42. Right lowest edge of rib |
| 7. Right shoulder backside | 25. Right trochanter major | 43. Left lowest edge of rib |
| 8. Right acromion | 26. Left toe | 44. Right anterior superior iliac spine |
| 9. Left 3rd metacarpal | 27. Left 5th metatarsal | 45. Left anterior superior iliac spine |
| 10. Left styloid process of radius | 28. Left 1st metatarsal | 46. Right posterior superior iliac spine |
| 11. Left styloid process of ulna | 29. Left calcaneus | 47. Left posterior superior iliac spine |
| 12. Left elbow lateral side | 30. Left malleolus lateralis | 48. Bat head |
| 13. Left elbow medial side | 31. Left malleolus medialis | 49. Bat head side right |
| 14. Left shoulder foreside | 32. Left knee lateral side | 50. Bat head side left |
| 15. Left shoulder backside | 33. Left knee medial side | 51. Bat label side |
| 16. Left acromion | 34. Left trochanter major | 52. Bat bottom side right |
| 17. Right toe | 35. Top of head | 53. Bat bottom side left |
| 18. Right 5th metatarsal | 36. Right ear | ○. Dummy marker |

Figure 3-4 Placement of the reflective markers.

って切断し、その内部にひずみゲージの貼付を容易にするように一部を正方断面形状に切削加工されたアルミ合金製の中空シャフトを通してている。

バット・ヘッド側（以下、バレル側）のシャフト表面には、曲げモーメント検出用のひずみゲージ a, c (KFG-3-120-C1-11, 共和電業社製), バット長手方向軸（以下、長軸）力検出用のひずみゲージ b, および両手間に作用するバット長軸まわりのねじりモーメント検出用のひずみゲージ h (KFG-2-120-D31-11, 共和電業社製) が貼付されている。グリップエンド側（以下、ノブ側）のシャフト表面には、バレル側と同様に曲げモーメント検出用のひずみゲージ d, f, バット長軸力検出用のひずみゲージ e, およびねじりモーメント検出用のひずみゲージ g が貼付されている。

長軸力検出用のひずみゲージを除いた各ゲージは、バット長軸の中心線に対して対称の位置に貼付されており、それぞれ 2 枚で一組のセンサーを構成している。なお、詳細については割愛するものの、バット長軸方向の圧縮・引張り測定用のひずみゲージ b, e には、半導体ゲージをそれぞれ 4 アクティブ・ゲージ法により使用している。これにより、本デバイスのようにひずみゲージからブリッジボックスまでのリード線が約 6 m と長く、スウィング中にリード線の屈曲が生じる場合であっても、その影響がひずみの測定結果に出ないようにしている。Figure 3-6 には、実際に製作したセンサー・グリップハンドル型バットの写真を示す。同図上段 (a) には組立後のグリップハンドル部を、同図中段 (b) にはグリップハンドルの内部構造を、そして、同図下段 (c) にはバット全体の写真を示す。

3.2.2 作用力および作用モーメントの算出原理

左右各手がそれぞれバットに作用させる作用力および作用モーメントを算出するにあたり、以下の仮定を設けた。

・ 仮定 1 :

各被験者には、センサー・バットのグリップハンドルに設けたバレル側手とノブ側手と

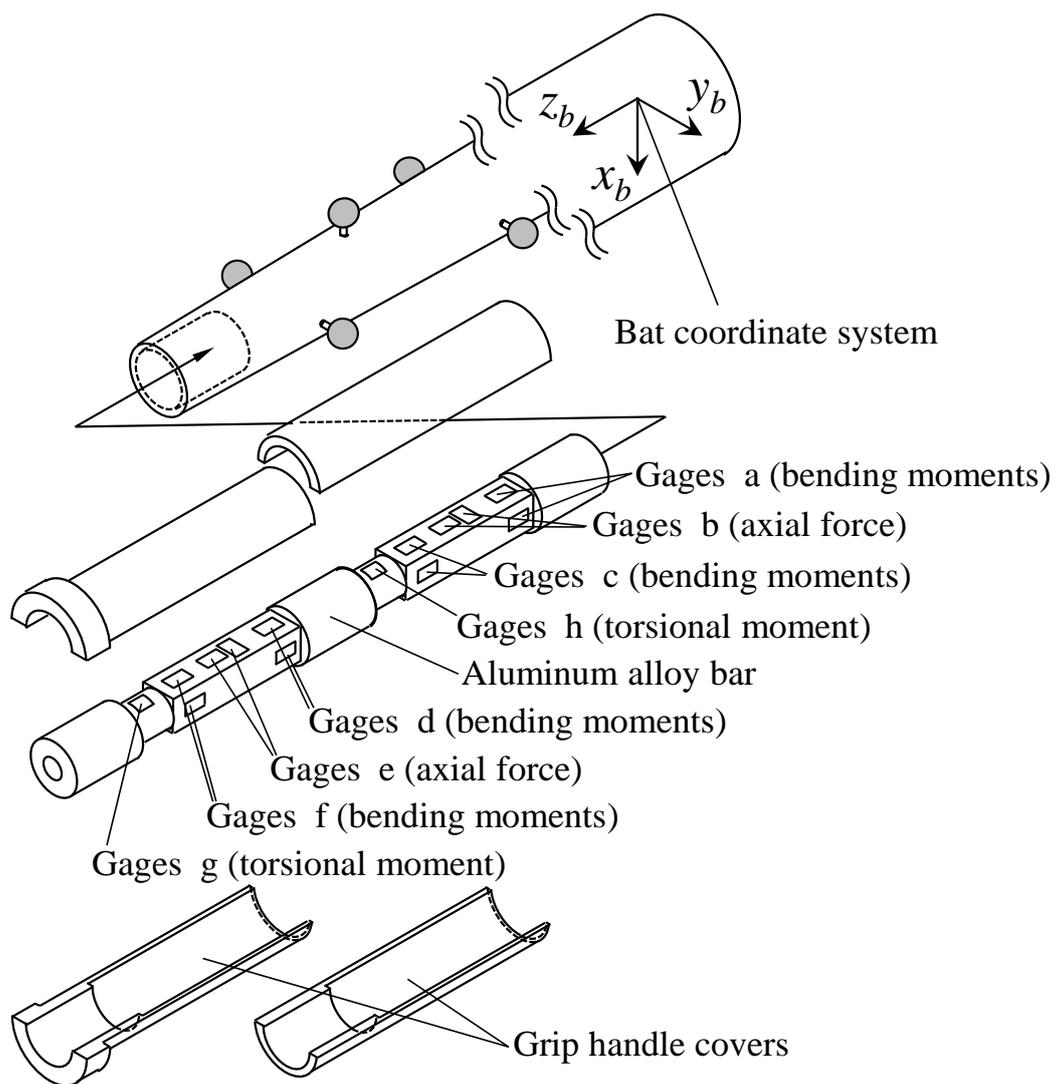


Figure 3-5 The structure of the instrumented bat.

の境目に従って各手がグリップを握るように指示しており，この境目からバット長軸に沿って，バット・ヘッド方向，およびグリップエンド方向にそれぞれ4 cm 変位した部位をバレル側手およびノブ側手の掌中心点した．そして，通常各手とも掌とバットとの接触部全体に渡る分布力によってバットに力およびモーメントを作用しているものとして，力およびモーメントは，この掌中心点（固定点）に対する力およびモーメントに換算して求める．

・ 仮定 2 :

各手の圧力中心点を詳細に検出することは困難であることから，上記の各固定点はスウィング中に変化しないものとした．

・ 仮定 3 :

バットグリップ部の質量および慣性モーメントは無視できるものとした．

はじめに，各手による作用力の算出原理について述べる．バット固定座標系 (Figure 3-5) の各軸まわりに作用するモーメントの算出は，対象軸まわりのモーメント測定用ひずみゲージを適宜貼付すれば容易に可能となる．これに対して， x_b 軸方向および y_b 軸方向の力といたったバット長軸と垂直に交わる平面内方向の力を，直接容易に測定できるようなひずみゲージは見当たらない．そこで，グリップハンドルのノブ側およびバレル側の長軸方向の各 2 箇所（計 4 箇所）においてモーメントを測定し，求めたい作用力および作用モーメントとこれら 4 箇所において測定されたモーメントとの釣り合い式を解くことにより，長軸に対して垂直な方向の作用力を算出している．

すなわち，例えば Figure 3-7 (a) に示すノブ側のグリップハンドル部のセンサー f, d により計測したモーメント $N_{f,y}$ および $N_{d,y}$ から，Figure 3-7 (b) における掌中心点の固定点に対する x_b 方向作用力 $F_{knob,x}$ および y_b 軸まわりモーメント $N_{knob,y}$ を，力とモーメントの釣り合い式によって，求めることが可能であることを利用している．

センサー a, c により測定された曲げモーメント τ_a , τ_c は，モーメントの釣り合い式により



(a) Instrumented grip handle.



(b) Structure of the handle.



(c) Overview.

Figure 3-6 Instrumented bat.

$$\boldsymbol{\tau}_a = \mathbf{N}_{\text{barrel}} + \mathbf{N}_{\text{knob}} + (\mathbf{r}_{h, \text{barrel}} - \mathbf{r}_{sa}) \times \mathbf{F}_{\text{barrel}} + (\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sa}) \times \mathbf{F}_{\text{knob}} \quad (3.1)$$

$$\boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{N}_{\text{barrel}} + \mathbf{N}_{\text{knob}} + (\mathbf{r}_{h, \text{barrel}} - \mathbf{r}_{sc}) \times \mathbf{F}_{\text{barrel}} + (\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sc}) \times \mathbf{F}_{\text{knob}} \quad (3.2)$$

と表すことができる。ここで、ベクトル \mathbf{F}_i と \mathbf{N}_i は、それぞれ点 i における力およびモーメントを表し、添え字 **barrel** と **knob** は、バレル側およびノブ側グリップハンドルにおける値であることを表す。そして、ベクトル $\mathbf{r}_{h, \text{barrel}}$ および $\mathbf{r}_{h, \text{knob}}$ は、各手の掌中心点の位置ベクトルを表し、ベクトル \mathbf{r}_{sa} および \mathbf{r}_{sc} は各センサー a, c の位置ベクトルを表す。センサー d, f によって測定された曲げモーメント $\boldsymbol{\tau}_d, \boldsymbol{\tau}_f$ についても同様にして、モーメントの釣り合い式を求めると以下の式となる。

$$\boldsymbol{\tau}_d = \mathbf{N}_{\text{knob}} + (\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sd}) \times \mathbf{F}_{\text{knob}} \quad (3.3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_f = \mathbf{N}_{\text{knob}} + (\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sf}) \times \mathbf{F}_{\text{knob}} \quad (3.4)$$

ここで、ベクトル \mathbf{r}_{sd} および \mathbf{r}_{sf} は各センサー d, f の位置ベクトルを表す。式 (3.1) ~ (3.4) から、各作用力および作用モーメントが以下の式で求まる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N}_{\text{barrel}} \\ \mathbf{N}_{\text{knob}} \\ \mathbf{F}_{\text{barrel}} \\ \mathbf{F}_{\text{knob}} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_a \\ \boldsymbol{\tau}_c \\ \boldsymbol{\tau}_d \\ \boldsymbol{\tau}_f \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

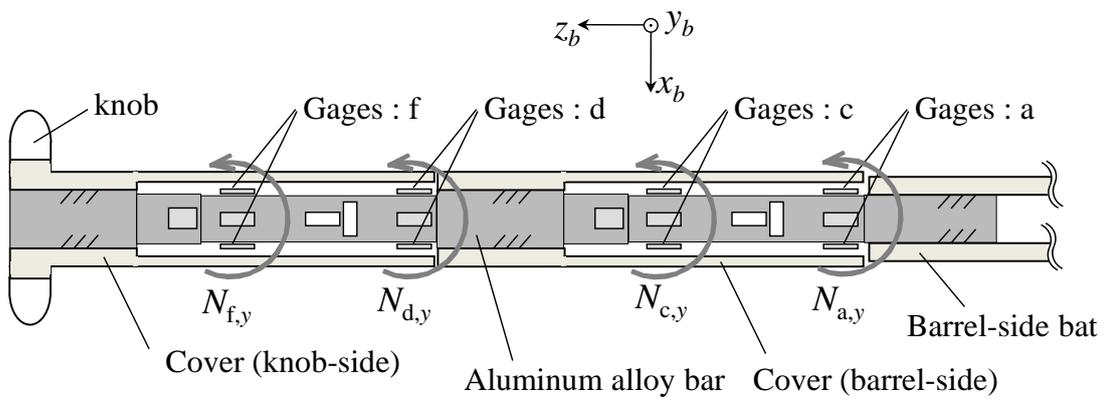
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I} & [(\mathbf{r}_{h, \text{barrel}} - \mathbf{r}_{sa}) \times] & [(\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sa}) \times] \\ \mathbf{I} & \mathbf{I} & [(\mathbf{r}_{h, \text{barrel}} - \mathbf{r}_{sc}) \times] & [(\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sc}) \times] \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} & \mathbf{O} & [(\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sd}) \times] \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} & \mathbf{O} & [(\mathbf{r}_{h, \text{knob}} - \mathbf{r}_{sf}) \times] \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ここで、 \mathbf{I} および \mathbf{O} は、 3×3 の単位行列および零行列を示す。

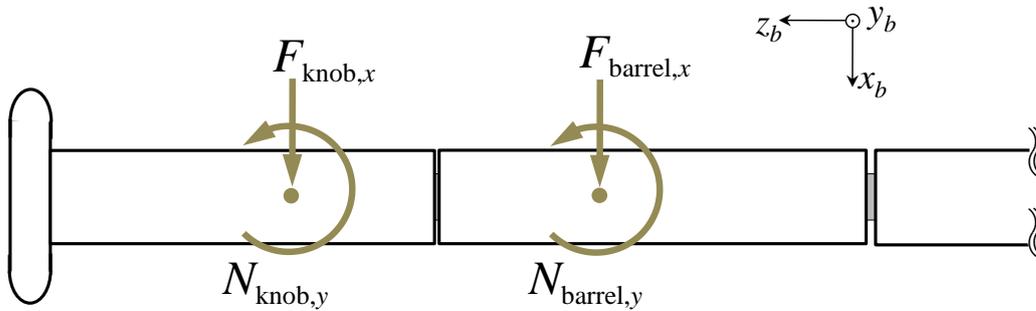
なお、長軸力 $\mathbf{F}_{\text{barrel}, z}, \mathbf{F}_{\text{knob}, z}$ については、Figure 3-5 内のひずみゲージ b, e の出力 f_b, f_e を用いて、それぞれ以下のように求める。

$$\mathbf{F}_{\text{barrel}, z} = f_b - f_e \quad (3.7)$$

$$\mathbf{F}_{\text{knob}, z} = f_e \quad (3.8)$$



(a) Cross sectional view of the instrumented handle.



(b) Force and moment by each hand.

Figure 3-7 Calculation principle of the force and moment.

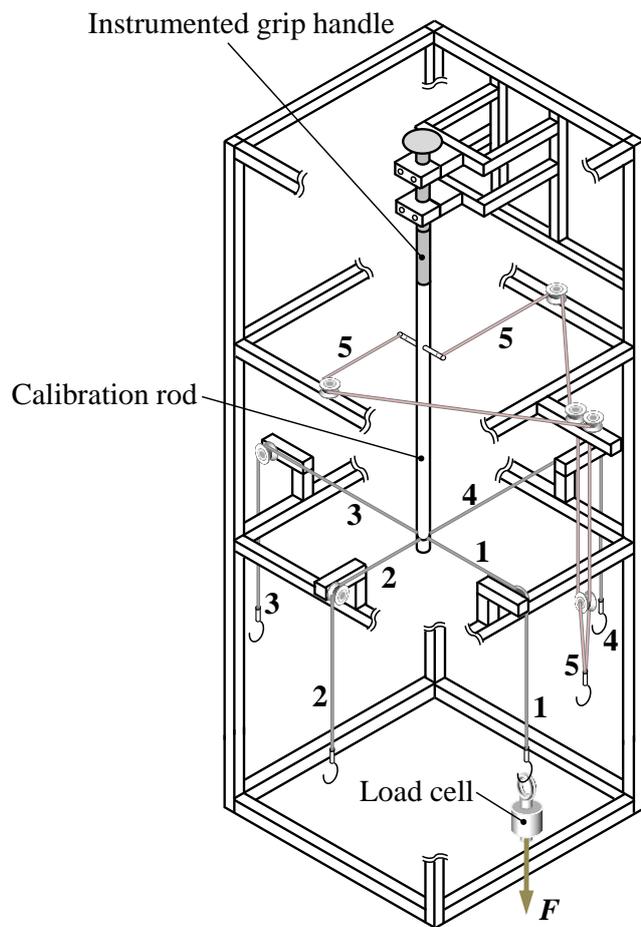
3.3 センサー・キャリブレーション

3.3.1 校正方法

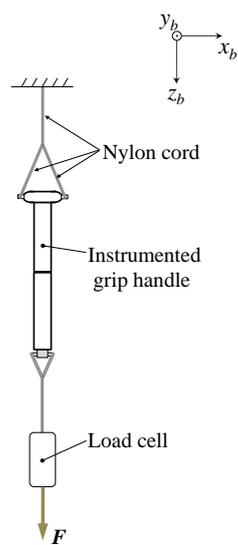
スウィング中のバットは、曲げ、ねじり、引張り、そして圧縮といった様々な作用を受けるとともに様々な姿勢となる。このような条件の変化により、センサー・バットに貼付しているひずみゲージではセンサーの校正係数が変化する。このため、様々な作用およびバットの姿勢においても安定に計測が可能となるように、センサー・キャリブレーションを行う必要がある。

Figure 3-8 に、センサー・キャリブレーションに用いた装置を示す。同図上段 (a) はグリップハンドルの固定およびモーメント負荷装置であり、ノブ側のグリップハンドルをシャフト・フォルダによって固定し、グリップハンドル先端にコネクタを介して取り付けられたキャリブレーション用棒の先端部には、ワイヤー1, 2, 3, 4により、それぞれバット固定座標系における y_b 負方向, x_b 負方向, y_b 正方向, x_b 正方向の力を作用できるようにしている。また、シャフト長軸まわりのねじりモーメント負荷装置として、キャリブレーション用棒に固定した金属棒の各端にワイヤー5を取り付けることにより、バット固定座標系における z_b まわりのモーメント（偶力）のみを作用させるようにしている。そして、番号1から5までの各ワイヤーの先端に、順次ロードセルを取付け、バット・ヘッド部への作用力が F となる各ワイヤーの張力を検出する。このときのワイヤーの取付部から各モーメント検出用センサー (a, c, d, f) 貼付部までの距離をモーメントアームとして、ワイヤー作用力とこれらモーメントアームとの積により、各センサー部の作用モーメントを算出する。

Figure 3-8 (b) は、バット長軸力の負荷方法を示しており、グリップハンドル長軸方向に負荷 F を作用させるために、グリップハンドル部からワイヤーを介して負荷測定用ロードセルが繋がっている。なお、負荷時にバットに対してモーメントがかからないようにするために、バレル側部およびノブ側部にワイヤーを介している。



(a) Bending and torsional moment loading device.



(b) Procedure for longitudinal axial force.

Figure 3-8 Setup for the sensor calibration.

3.3.2 キャリブレーション結果

Figure 3-9 に、キャリブレーションにおける曲げモーメント、ねじりモーメントおよび長軸力検出用センサーの出力電圧と実測値との関係を示す。なお、曲げモーメントについては、ひずみゲージの x_b 軸および y_b 軸まわり成分のセンサー出力電圧に関して、a (バレル側手) および d (ノブ側手) の結果を抜粋して示す。

同図から、曲げモーメントについて、a および d の x_b 軸および y_b 軸まわり成分ともに、モーメント負荷時には、センサー出力電圧とその実測値とは線形の関係があることがわかる。また、 x_b 軸まわり成分のモーメント負荷時には、 y_b 軸まわり成分の出力電圧は小さく、 y_b 軸まわり成分のモーメント負荷時には、 x_b 軸まわり成分の出力電圧は小さかった。なお、図については割愛している曲げモーメント検出用ひずみゲージ (c, f) においても、センサー出力電圧と実際のモーメントとの関係はセンサーaおよびdと同傾向の結果であった。ねじりモーメントおよび長軸力については、曲げモーメントと同様に、各センサーの出力電圧ともに実測値とは線形の関係があることがわかる。ここで、長軸力検出用センサーbおよびeにおいて、出力電圧の初期値がセンサーによって異なることから波形にも差がみられるものの、その傾きはほぼ同様であった。

以上のことから、曲げモーメント、ねじりモーメントおよび長軸力のセンサー出力電圧と各実測値との関係は、それぞれ線形関係を有しているといえる。また、曲げモーメントについては、各センサーにおいて x_b 軸および y_b 軸まわり成分ともに、他軸まわり成分にモーメントを作用した場合の影響は小さいことがわかる。

3.3.3 各センサー出力の算出

ここでは、上述した 3.3.2 のキャリブレーション結果に基づいて、グリップハンドル各部のセンサー出力電圧から、各部に作用する力あるいはモーメントの算出法について述べる。

はじめに、長軸力の算出について、Figure 3-9 に示したように長軸力検出用ひずみゲージ

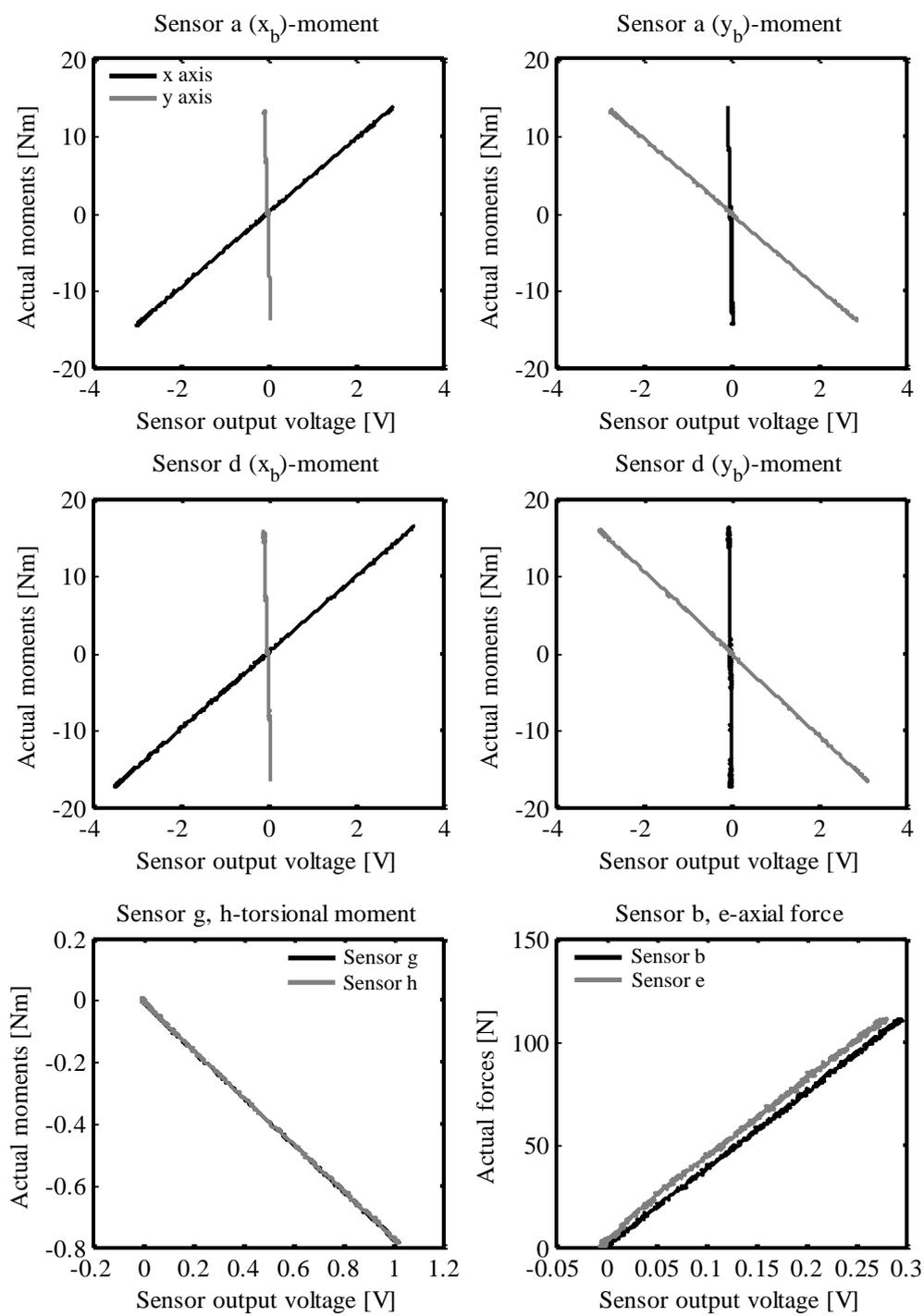


Figure 3-9 Relationship between sensor output voltage and actual measured value for the sensor calibration.

のセンサー出力電圧と実際の作用力との関係は、線形の関係性を有している。したがって、ひずみゲージのセンサー出力電圧と実際の作用力との関係を表す直線の傾きを求め、この傾きにセンサー出力電圧を乗ずることによって作用力を求めることができる。しかしながら、現在のセンサー・バット（小池，2010）とは、バット長軸力の検出に用いたひずみゲージの種類が異なる以前のセンサー・バット（小池ら，2009）において、実際の試技に用いた際、左右各手の長軸力に対して、曲げモーメントおよびねじりモーメントが干渉することが明らかとなっている。このため、長軸力（引張・圧縮力）測定用センサー**b**のセンサー出力電圧 V_b に対する曲げモーメント（ x_b 軸および y_b 軸まわり）およびねじりモーメントの干渉成分を、センサー**b**近傍の曲げモーメント検出用センサー**a**の出力電圧 $V_{a,x}$ および $V_{a,y}$ 、ならびにねじりモーメント検出用センサー**h**の出力電圧 V_h を用いて補正する。すなわち V_b に対する干渉成分を $V_{a,x}$ および $V_{a,y}$ についての2次多項式 $\eta_{b,a,x}(V_{a,x})$ および $\eta_{b,a,y}(V_{a,y})$ 、ならびに V_h の1次多項式 $\eta_{b,h}(V_h)$ によって近似する。なお、センサー**a**の近似式は出力電圧の符号毎に設けている。そして、 V_b からモーメントによる干渉成分を取り除いた電圧値

$$V'_b = V_b - \eta_{b,a,x}(V_{a,x}) - \eta_{b,a,y}(V_{a,y}) - \eta_{b,h}(V_h) \quad (3.9)$$

を用いて、センサー**b**部に作用するバット長軸力を算出する。

センサー**e**についても同様に、曲げモーメントによる干渉成分をセンサー**d**の出力電圧 $V_{d,x}$ および $V_{d,y}$ についての2次多項式 $\eta_{e,d,x}(V_{d,x})$ および $\eta_{e,d,y}(V_{d,y})$ 、ならびに V_g の1次多項式 $\eta_{e,g}(V_g)$ によって近似し

$$V'_e = V_e - \eta_{e,d,x}(V_{d,x}) - \eta_{e,d,y}(V_{d,y}) - \eta_{e,g}(V_g) \quad (3.10)$$

により出力電圧についての補正を行い、センサー一部に作用する長軸力を算出した。

つぎに、モーメント測定用センサーの校正係数算出について述べる。Figure 3-9に示したように曲げモーメントおよびねじりモーメント検出用ひずみゲージのセンサー出力電圧と実際の作用モーメントとの関係は、線形の関係性を有している。このため、長軸力と同様に、ひずみゲージのセンサー出力電圧と実際のモーメントとの関係を表す直線の傾きを求め、この傾きにセンサー出力電圧を乗ずることによって作用モーメントを求める。

3.3.4 各センサー出力の結果

Figure 3-10 および Figure 3-11 は、前述の方法によってセンサー出力電圧から求めた左右各手の作用モーメントおよび作用力と、それぞれの実測値の結果について示している。作用モーメントについては、キャリブレーションの結果と同様に、ひずみゲージの x_b 軸および y_b 軸まわり成分のセンサー出力電圧に関して、a および d の結果を抜粋して示す。バット長軸に対して垂直な方向 (x_b 軸および y_b 軸) の作用力については、各手における 2 箇所の曲げモーメントの差分から算出した値を示す。まず、Figure 3-10 の作用モーメントについて、各センサーの各軸まわりおよび正負ともに、センサー出力電圧から求めた値（黒線）と実測値（灰色線）とは、よく一致していることがわかる。なお、センサーc および e の結果についても同様な傾向であったことから図については割愛している。つぎに、Figure 3-11 の作用力について、各センサーの各軸方向ともに、センサー出力電圧から求めた値と実測値とは、作用モーメントと同様によく一致していることがわかる。

以上のことから、キャリブレーションにおける各センサーの出力電圧と実測値との関係から得た係数を用いることによって、左右各手のバット作用力および作用モーメントの計測が可能であるといえる。

3.4 データ処理

3.4.1 分析試技の決定

本研究では、センター方向に打撃された試技を分析対象として選別するために、打撃されたボールが縦 1.4 m×横 0.7 m の長方形の枠内（3.1.3 実験設定を参照）に入り、且つ試技毎に被験者に行った 5 段階評価（最高点：5 点，最低点：1 点）による内省点が 3 点以上の最も高い内省点である 1 試技を成功試技として分析した。

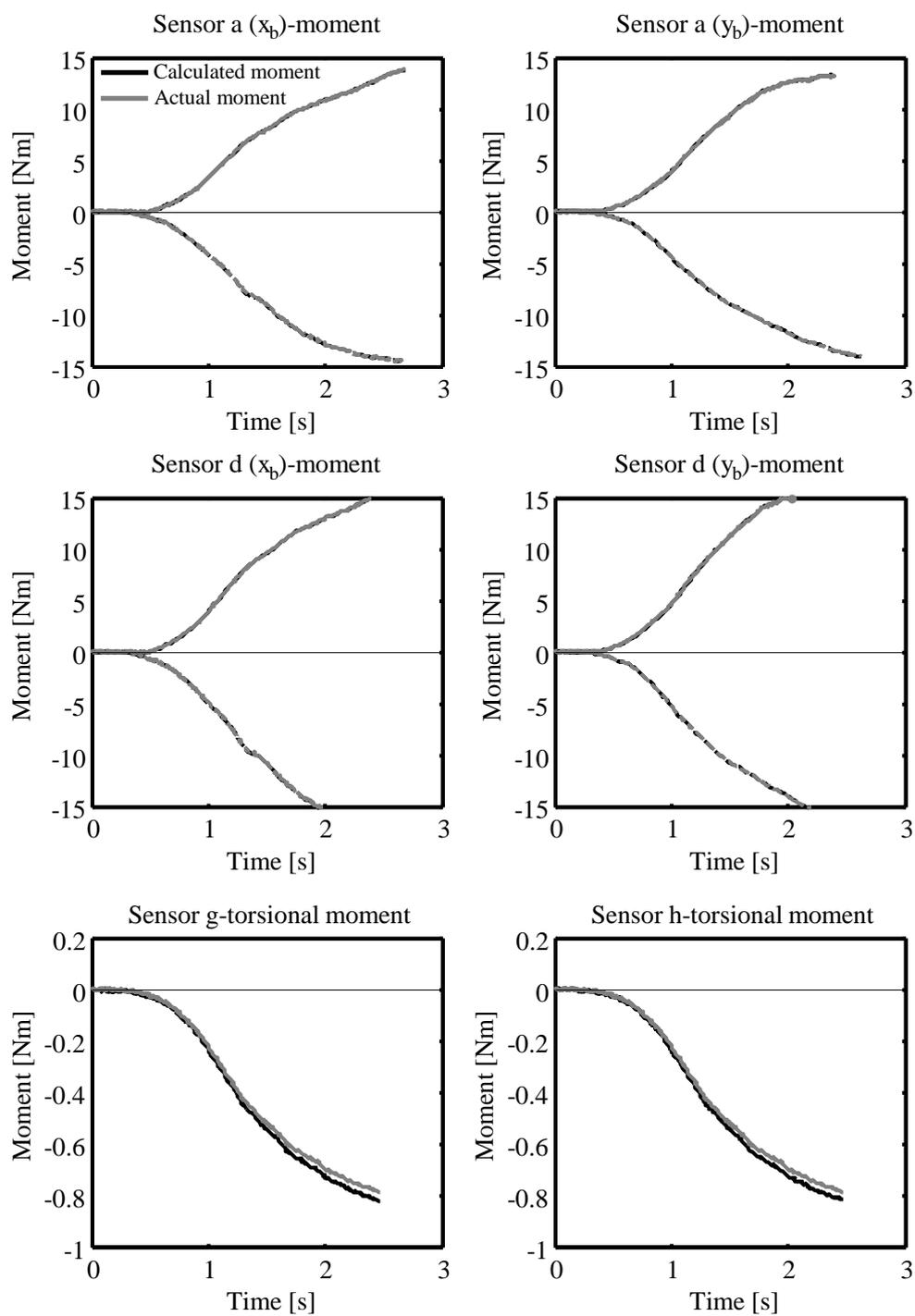


Figure 3-10 Calculated and actual moments for the sensor calibration.

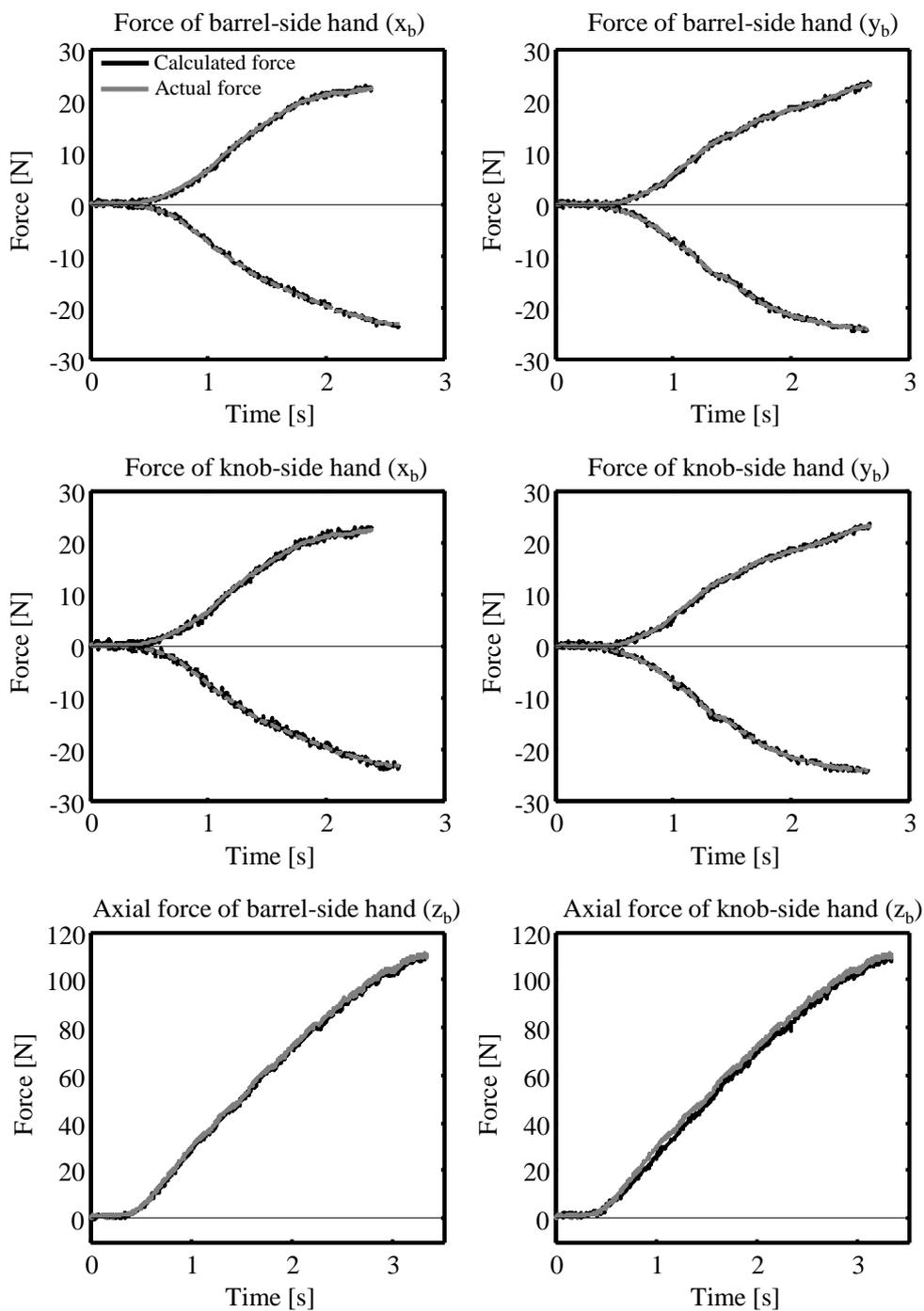


Figure 3-11 Calculated and actual forces for the sensor calibration.

3.4.2 分析範囲および局面の定義

本研究では、スウィング開始時点からボールインパクト（以下、インパクト）までのフォワード・スウィング期を動作の分析範囲とした (Figure 3-12)。スウィング開始時点から、バット・ヘッド速度の鉛直成分が最小となる時点（同図内の $V_{\text{bat-head}_z}$ (–) Max) までをダウン・スウィング局面、この時点からインパクトまでをレベル・スウィング局面とそれぞれ定義して局面分けを行った。ここで、スウィング開始時点については、川村ら (2008) を参考にして、バットのグリップエンド部の動き出し、およびバットのヘッド部の動き出しの両方を考慮するために、バット・ヘッド部速度およびグリップエンド部速度の和が 3 m/s を超えた時点とした。なお、このスウィング開始時点について、バット・ヘッド速度鉛直成分の最小（負値となる）は、バット・ヘッド速度の鉛直下方成分の最大を意味する。

インパクトに関しては、本研究のサンプリング周波数では正確なインパクト時点を検出することは困難であることから、平滑化処理を行っていないバット先端部の反射マーカから算出したバット・ヘッド速度がバットとボールの接触により急激に減少する 1 コマ前をインパクトとした。

田子 (2010) および高木 (2010) の野球打撃に関する研究では、分析開始時点をグリップが捕手方向へと動き始めた時点、あるいは身体重心が捕手方向へ最も移動した時点と定義している。本研究では、異なる打点高に対応するためのバットの動きを生成する左右各手、身体各関節のキネティクスを評価したいとの意図があることから、バットが顕著に動き始めるフォワード・スウィングの開始時点以降からを分析範囲とした。

3.4.3 3次元座標データの平滑化

取得した身体およびバットの各代表点の3次元座標については、Wells and Winter (1980) の方法を用いて決定された最適遮断周波数 (7.5-15 Hz) を有する位相ずれのない Butterworth

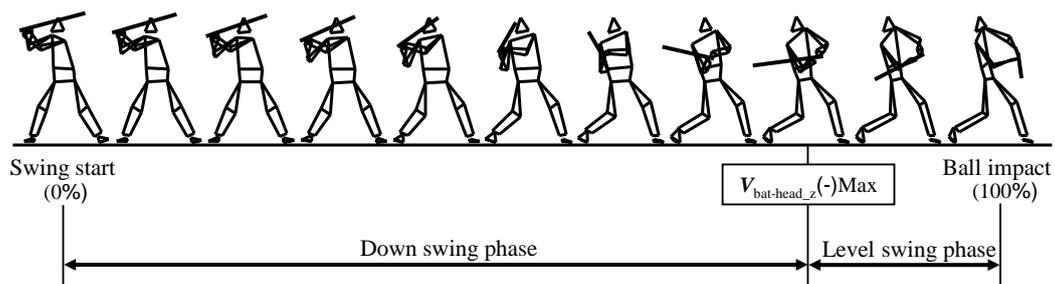


Figure 3-12 Definition of the down swing and level swing phases in forward swing batting motion.

digital filter を用いて平滑化処理を行った。その後、3 次のスプライン関数を用いて 1000 Hz のデータに内挿補間することによって、センサー・バットのサンプリング周波数と同じサンプリング間隔のデータとした。

3.4.4 データの規格化および平均化

本研究では、いずれのデータも全被験者の平均値を示しており、時系列データは、スイッチング開始からインパクトまでに要した時間によって規格化した (0%-100%)。なお、局面の切り替わりは (Figure 3-12 : $V_{\text{bat-head}_z}$ (-) Max), 各打点高ともにフォワード・スウィングにおける規格化時間のおよそ 80% (Table 4-1) であった。

本研究のデータは、左打者の値においても全て右打者の値となるように変換処理している。例えば、肩関節では右肩はバレル側、左肩はノブ側となり、股関節では右股関節は軸脚側、左股関節はステップ脚側となる。特に角速度や関節トルクといった時系列データ、および力学的仕事については、各図が見づらくなることを考慮して、標準偏差の表示を割愛している。

3.5 統計処理

各算出項目 (時系列データであれば規格化時間の 1% 毎) における高め、真中、および低め (High, Middle, Low) の打点高間の有意差に対する要因について、対応のある一元配置の分散分析を適用し、有意水準 5% の検定を行った。そして、有意であったものについては多重比較検定 (Bonferroni 法) を行った。

第4章 打点高の異なる野球打撃動作における左右各手のキネティクスの特徴

4.1 目的

野球の打撃動作において打者には、投手によって様々なコースに投球されたボールをバットのボール打撃部によって正確にミートすること、およびバット・ヘッドスピードを高めて、強い打球を得ることが要求される。

これらの運動課題を踏まえて、これまでの野球の打撃動作に関する研究では、バットに着目した研究が数多く行われており、バットならびに両手の動きについて検討したもの(川村ら, 2000, 2001; Tabuchi *et al.*, 2007; 城所ら, 2011, 2012b), スウィングの再現性やタイプ分けについて検討したもの(前田, 2001, 2006b; 大室ら, 2004) などがある。このときバット操作は、主に左右各手のバット作用力および作用モーメントによって行われることから、運動課題の達成あるいは改善のためには、動きの生成要因となるキネティクスの変量について検討を行うことが有効となる。

そこで、平野(1979)は、バット長軸成分において左右各手が均等、バット長軸と垂直方向の成分において左右各手は偶力と仮定して作用力および作用モーメントを算出しており、伊藤ら(2001)は、左右上肢関節トルクの二乗和を最小とするように関節トルクを算出している。これら仮定を設けた研究に対して、小池(2004a, 2010), Koike *et al.* (2004b) および小池ら(2009b)は、力検出型センサー・バットを考案・開発することにより、左右各手のバット作用力および作用モーメントの計測を直接可能としている。その結果から、ノブ側手による作用力のバット長軸方向成分が、インパクトが近づくにつれて顕著に大きくなり、バット長軸成分以外の作用力については、左右各手による偶力成分がその大半を占めると報告している。これらの研究から、キネティクスに関して、バット長軸力、あるいは両手による偶力がバットのボール打撃部位の軌道調整に関与することが明らかとなっている。しかしながら、具体的に打者が打点高の違いに応じてどのようにバットの動きを

コントロールしているかについては明らかとなっていない。

そこで本章の目的は、異なる打点高条件におけるバットのキネマティクスを含む左右各手のキネティクスの分析をティー打撃条件下で行うことにより、打点高の違いに対応するためのバットの動きを生成する左右各手のキネティクスの特徴、およびその役割を明らかにすることとした。

4.2 方法

4.2.1 データ収集およびデータ処理

本章のデータは、スウィング実験により収集したものである。なお、データ収集およびデータ処理については、第3章において述べた方法を用いた。

4.2.2 算出項目および算出方法

1) バット移動座標系

Koike *et al.* (2004b) および小池 (2010) は、左右各手のキネティクスの変量を評価するために、スウィング座標系を提案している。この座標系は、移動するバットの各部位の座標値を用いて設定されているため、時々刻々と変化する左右各手のキネティクスの変量を評価するのに有効であると考えられる。しかしながら、本研究のように異なる打点高条件での打撃動作では、打点高の違いに応じてバット・ヘッドの進行方向が変化することによってスウィング平面の傾きが異なるため、この平面を用いると、打点高の違いに対応する際の左右各手のキネティクスの変量を比較しにくいと考えられる。そこで本研究では、静止座標系における水平面 (XY 平面) に平行な軸 (X_{bat} 軸) をもつバット移動座標系を設定した。この座標系は、バット長軸 (Y_{bat} 軸) と静止座標系の Z 軸との外積により求めた軸をバット起し倒し軸である X_{bat} 軸として、これら X_{bat} 軸と Y_{bat} 軸との外積により求めた軸を Z_{bat} 軸として定義したものである (Figure 4-1)。

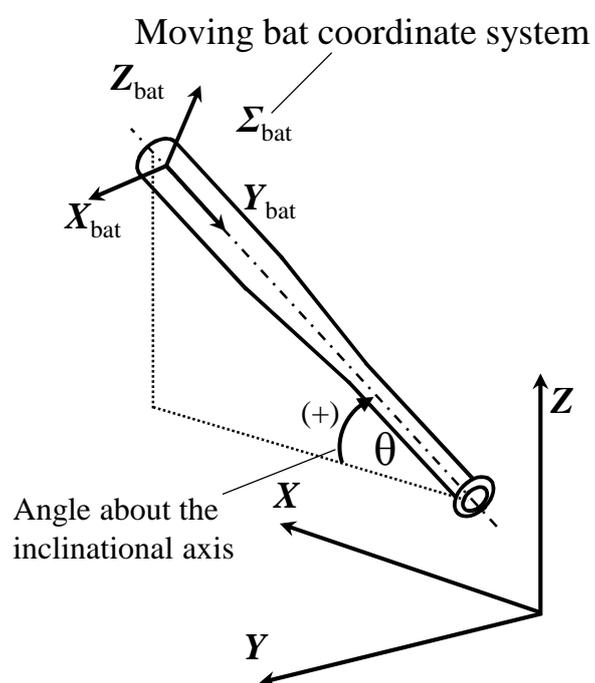


Figure 4-1 Definition of the moving bat coordinate system for the analysis of kinetics and the angle about the inclinational axis.

2) バット・ヘッドスピードおよびスウィング時間

フォワード・スウィング期におけるバット・ヘッドの平滑化処理前の3次元座標値を時間微分することによりバット・ヘッド速度ベクトルを算出し、その大きさをバット・ヘッドスピードとした。また、フォワード・スウィング開始時点からレベル・スウィング開始時点までに要した時間をダウン・スウィング時間、そして、レベル・スウィング開始時点からボールインパクトまでに要した時間をレベル・スウィング時間とした。

3) バット長軸の傾斜角度および角速度

バット長軸と静止座標系の水平面とのなす角度をバット長軸の傾斜角度として (Figure 4-1)、この角度を時間微分することにより、バット長軸の傾斜角速度とした。傾斜角度および角速度ともに、バットのヘッド位置がグリップエンド部より上方に位置した場合をバットが起きた状態 (正值) とし、ヘッド位置がグリップエンド部より下方に位置した場合をバットが倒れた状態 (負値) とする。

4) バットのボール打撃部位における鉛直変位の内訳

打点高の違いにより、ボール打撃部位の鉛直変位が、剛体としてのバット運動の内、重心の並進、および重心まわりの回転の各運動によってどのように生じているかを明らかにするために、鉛直変位の生成因子を定量化することにする。すなわちボール打撃部位に関して、フォワード・スウィング中に、バット重心の変位によって生じた変位と重心まわりの回転によって生じた変位をそれぞれ定量化する。

ティー台に貼付した4個の反射マーカークラから、ボール位置を外挿により算出し、実際にバットがボールを打撃した位置を算出したところ、各打点高における全被験者のバット・ヘッドからボール打撃部位までのバット長軸に沿った平均長さは、高めの場合が 0.143 ± 0.026 m、真中の場合が 0.139 ± 0.025 m、および低めの場合が 0.120 ± 0.031 m となっており、

これらの値の全打点高による平均は、 0.134 ± 0.029 mであった。本研究では、打点高によらずバットを握る位置は同一としていることから、各打点高において打撃中心の位置も同一となるといえる。このため、この打撃中心の位置をバットのボール打撃部位としたいことから、全打点高によるバット・ヘッドからボール打撃部位までの平均長さ 0.134 m (バット重心から 0.098 m) を用いた。また、インパクトにおけるボール打撃部位の鉛直変位については、フォワード・スウィング開始時点からのバットの並進および回転の各運動に起因する変位を算出した。すなわちバットを剛体として捉えると、バットのボール打撃部位において、スウィング開始からインパクトまでのフォワード・スウィング期におけるバットのボール打撃部位の鉛直変位 $d_{z,\text{hitting_point}}$ は、バットの並進運動に起因するバット重心の鉛直変位 $d_{z,\text{translation}}$ と、バット重心まわりの回転運動に起因する鉛直変位 $d_{z,\text{rotation}}$ の和であり、以下の式として表される。

$$d_{z,\text{hitting_point}} = d_{z,\text{translation}} + d_{z,\text{rotation}} \quad (4.1)$$

なお、各値については、打点高を各被験者の打撃姿勢時の各部位（肩峰、ベルトおよび膝頭下部）から算出していることから、被験者の身長の違いによるバットの鉛直変位の差を考慮するために、それぞれ被験者の身長によって除することにより規格化を行った。

5) 左右各手の作用力および作用モーメント

左右各手の作用力および作用モーメントの各ベクトルは、センサー・バットに固定した座標系（バット固定座標系）における値として計測されるため、静止座標系から見たバット固定座標系の姿勢行列をこれらの各ベクトルに乗ずることによって、静止座標系における作用力および作用モーメントベクトルに一旦変換したのちに、前述したバット移動座標系の姿勢行列の逆行列に乗ずることによってバット移動座標系における各値を算出した。

また、フォワード・スウィング期における左右各手の作用力のうち、バット長軸成分の平均値をバット長軸力の平均力とした。

6) 左右各手の作用力および作用モーメントによる力学的仕事

バット運動に対する左右各手による影響を評価するために、各手がバットに対して行った力学的仕事を求める。ここで、バット移動座標系における左右各手の作用力のうち、バット長軸 (\mathbf{Y}_{bat} 軸) 力の鉛直成分、ならびに \mathbf{Z}_{bat} 軸成分の左右各手による偶力成分に対して、各手におけるこれらの作用力と対応した左右各掌中心速度との積から各作用力によるパワーを求めた。その後、ダウン・スウィング局面およびレベル・スウィング局面の各区間別、ならびに符号の正負別にパワーを時間積分することによって、バット長軸力の鉛直成分、および \mathbf{Z}_{bat} 軸成分の偶力による各仕事を算出した。なお、作用力の \mathbf{Z}_{bat} 軸成分では、偶力成分以外に外力成分が存在するものの、この外力成分は、偶力成分と比較してその値は小さいこと、さらに、打撃中心の原理は、グリップを握る左右各手においても同様に成り立つことから、バットのグリップ部に作用するバット長軸に垂直な外力成分は、バットのボール打撃部位に対して並進加速度を生じさせないものであることから、本研究では言及しないこととする。

また、バット移動座標系における左右各手の作用モーメントのバット起し倒し軸 (\mathbf{X}_{bat} 軸) まわり成分と、バット角速度の \mathbf{X}_{bat} 軸まわり成分との積から、作用モーメントの \mathbf{X}_{bat} 軸まわり成分によるパワーを求めた後、時間積分により作用モーメントによる仕事を算出した。

本研究では、ダウン・スウィングおよびレベル・スウィングの各局面を設けていることから、バット作用力あるいはバット作用モーメントといった時系列データに加えて、力学的仕事（スカラー量）による評価は、各局面におけるバットの変位および角変位を、打点高間において比較する際に有効であると考えられる。

4.2.3 統計処理

第3章に示した方法によって統計処理を行った。

4.3 結果

4.3.1 キネマティクスのパラメータ

4.3.1.1 バット・ヘッドスピードおよび各局面スウィング時間

Table 4-1 に、バット・ヘッドスピードの最大値、ならびに各局面のスウィング時間における平均値および標準偏差を示す。同表から、まずバット・ヘッドスピードの最大値は、高めの場合が 35.2 m/s、真中の場合が 36.2 m/s、および低めの場合が 36.7 m/s と、打点が低い程、大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。つぎにスウィング時間は、ダウン・スウィング局面において、高めの場合が 0.167 s、真中の場合が 0.164 s、および低めの場合が 0.163 s であり、レベル・スウィング局面においては、高めの場合が 0.048 s、真中の場合が 0.041 s、および低めの場合が 0.040 s であり、各局面ともに打点が高い程、その時間は長くなり、レベル・スウィング局面において、高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。局面の切り替わり時間については、打点が低い程、その時間はインパクトに近づき、高めと真中との間、および高めと低めの間それぞれ有意な差がみられた。

4.3.1.2 バットの回転運動

Figure 4-2 に、バット長軸の傾斜角度 (a)、およびその角速度 (b) の平均値をそれぞれ示す (高：点線、中：黒線、低：灰色線)。バット長軸の傾斜角度および角速度ともに、バットの起し倒しの定義より、正值はバットの起しを、負値はバットの倒しを示す。なお、打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している (高-中：△、高-低：*、中-低：×)。

同図から、まずバット長軸の傾斜角度は、スウィング開始時点では各打点高ともに約 25 deg を示し、20%付近から打点が低い程、正值が大きくなり、55%付近では低めの打点高において約 40 deg であった。レベル・スウィング開始時点 (80%) では、各打点高ともにほ

Table 4-1 Maximum values of bat-head speed, bat swing times in each swing phase and times of maximum downward velocity of bat-head.

	Maximum value of bat-head speed [m/s]	Bat swing time [s]		$V_{\text{bat-head}_z(-)\text{Max}}$ time [%]
		Down swing phase	Level swing phase	
High	34.9 ± 1.4	0.167 ± 0.035	0.048 ± 0.013	77.7 ± 5.4
Middle	35.8 ± 1.4	0.164 ± 0.030	0.041 ± 0.005	79.9 ± 3.4
Low	36.2 ± 1.5	0.163 ± 0.026	0.040 ± 0.003	80.2 ± 2.5

*:p<0.05, Mean±S.D.

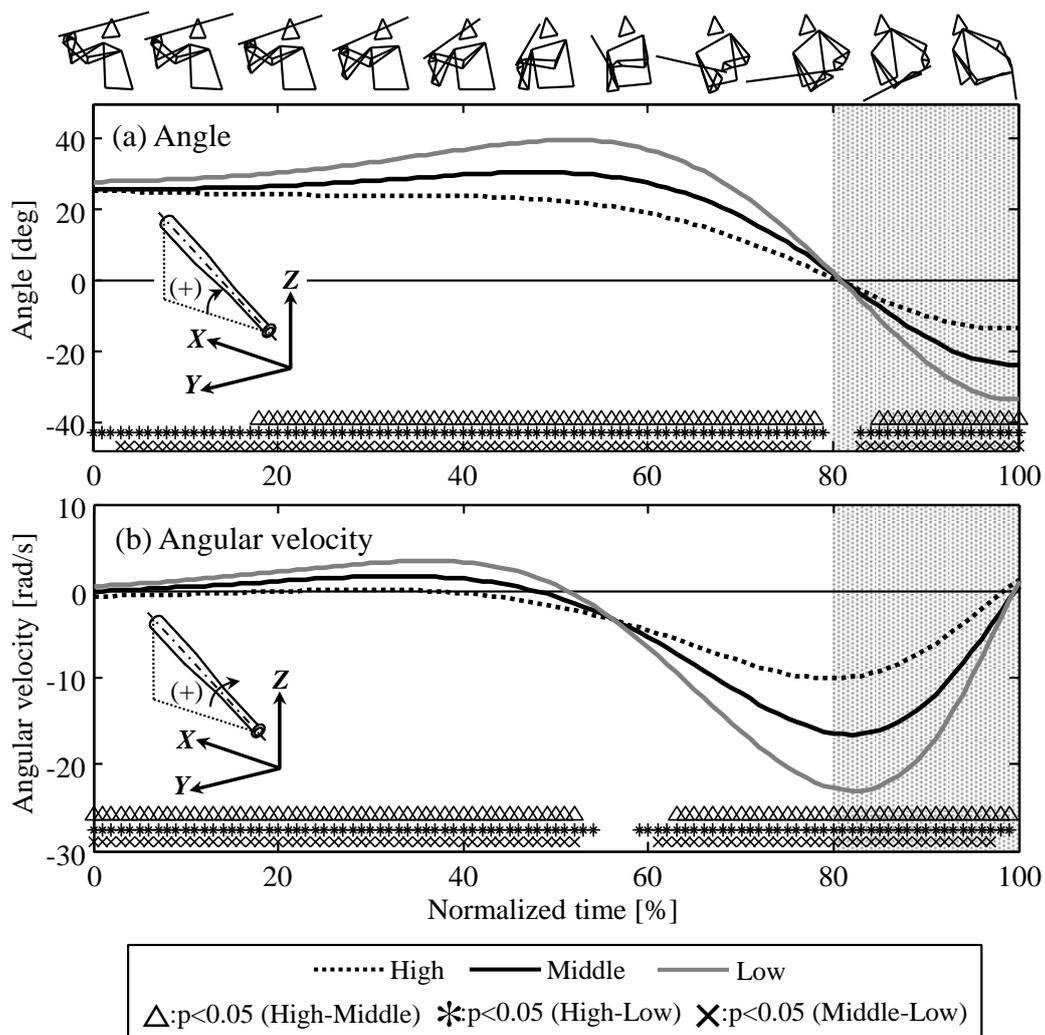


Figure 4-2 Curves of angles and angular velocities about the bat inclinational axis in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

ほぼ 0 deg を示し、それ以降から打点高によらず負値となり、インパクトを迎えていた（高：-13.3 deg, 中：-23.7 deg, 低：-33.6 deg）。その際、ほぼいずれの局面においても統計的に有意な差がみられた。

続いて、バット長軸の傾斜角速度は、スウィング開始時点では、打点高によらずほぼ 0 rad/s を示し、20%付近から打点が低い程、正值が大きくなり、50%付近では各打点高ともに 0 rad/s を示し、レベル・スウィング開始時点では、打点が低い程、負値が大きかった（高：-10.0 rad/s, 中：-16.4 rad/s, 低：-23.0 rad/s）。その後、インパクト付近では、打点高によらずにほぼ 0 rad/s を示していた。統計的な有意差については、60%付近を除いて各打点高間に有意な差がみられた。

4.3.1.3 バットのボール打撃部位における鉛直変位の内訳

Figure 4-3 に、フォワード・スウィング期のバットのボール打撃部位の鉛直変位を示す。各棒グラフは、左から高め、真中、および低めの各打点高条件における値を示し、バット重心の並進運動に起因する変位を白抜き印によって、バット重心まわりの回転運動に起因する変位を灰色印によってそれぞれ示している。ここで、平均値を棒グラフによって、標準偏差を誤差棒によって示し、各値は身長によって規格化することにより、無次元化量として示している。

同図から、ボール打撃部位の並進による変位は、高めの場合が約 0.35、真中の場合が約 0.45、および低めの場合が約 0.55 と打点が低い程、大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。これに対して、回転による変位は、並進による変位と比べて各打点高ともに大きな値を示してはいないものの、打点が低い程、大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。

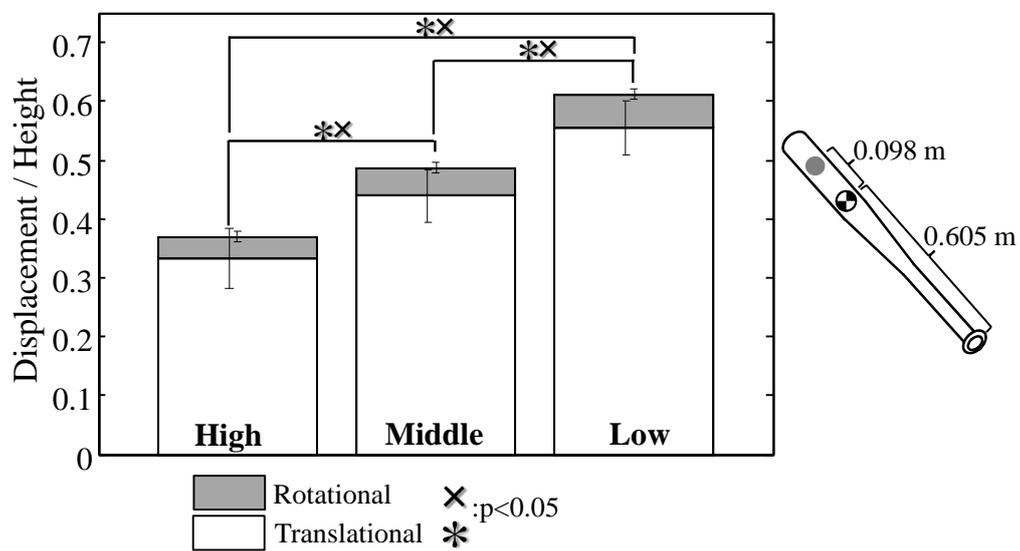


Figure 4-3 Mean and standard deviation of the vertical displacements of the ball hitting-point on the bat in the forward swing motion under each hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

4.3.2 キネティクスのパラメータ

4.3.2.1 バット移動座標系における左右各手の作用力

Figure 4-4 に、フォワード・スウィング期のバット移動座標系における左右各手の作用力を示す。上段 (a) がバット起し倒し軸 (X_{bat} 軸) 成分，中段 (b) がバット長軸 (Y_{bat} 軸) 成分，および下段 (c) が Z_{bat} 軸成分をそれぞれ示している。実線がバレル側 (バット・ヘッド側) 手の値を，点線がノブ側 (グリップエンド側) 手の値を示し，図内の各印の仕様は 4.3.1.2 のバットの回転運動 (Figure 4-2) と同様として，統計マークについては，バレル側では正の領域に，ノブ側では負の領域に打点高条件ごとに示している。

同図から，まず， X_{bat} 軸成分について，打点高条件によらずバレル側手は正に，ノブ側手は負に力を作用させ，これらの作用力は 0% から 80% 付近までにおいてほぼ偶力となっていた。打点高による違いについて，85% 付近からインパクトにかけて，主にノブ側手において各打点高間に有意な差がみられた。

つぎに， Y_{bat} 軸成分について，打点高条件によらず左右各手ともにほぼ正值を示しており，特にノブ側手は 80% 以降に大きな力を作用させていた。打点高による違いについて，ノブ側手では特に 80% 以降において打点が低い程，その値は大きくなり，各打点高間に有意な差がみられた。バレル側手ではノブ側手よりも値は小さいものの，20% から 45% 付近にかけて高めと低めとの間，および真中と低めとの間，ならびに 35% から 45% 付近にかけて高めと真中との間にそれぞれ有意な差がみられ，また，55% から 70% 付近にかけては各打点高間に有意な差がみられた。

最後に， Z_{bat} 軸成分について，打点高条件によらずスウィング開始から 80% 付近までバレル側手が正值，ノブ側手が負値を示していた。打点高による違いについて，打点が高い程，そのピークの大きさは有意に小さく，その発生タイミングは早くなっていた。そして，左右各手ともに 60% 以降からインパクト付近にかけて，各打点高間に有意な差がみられた。

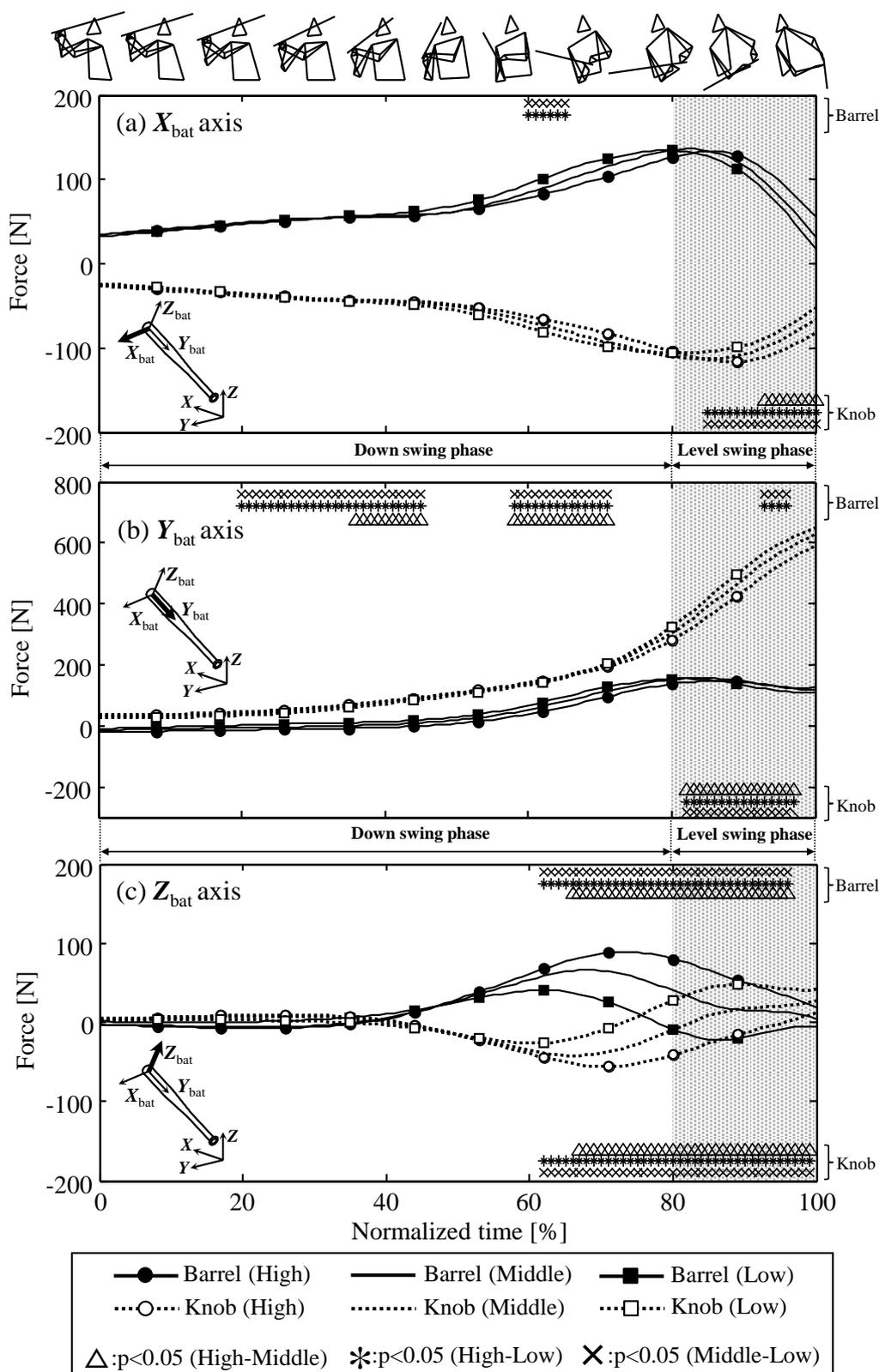


Figure 4-4 Curves of the mean forces expressed by the moving bat coordinate system in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

4.3.2.2 バット移動座標系における左右各手の作用モーメント

Figure 4-5 に、フォワード・スウィング期のバット移動座標系における左右各手の作用モーメントを示す。上段 (a) が X_{bat} 軸まわり成分，中段 (b) が Y_{bat} 軸まわり成分，および下段 (c) が Z_{bat} 軸まわり成分をそれぞれ示している。なお，図内の各線，および各印の仕様は，Figure 4-4 と同様である。

同図から，まず X_{bat} 軸まわり成分について，打点高条件によらずバレル側手はスウィング開始から 50% 付近にかけて正值を，それ以降は負値を示し，他方，ノブ側手は一部を除いて負値を示した。打点高による違いについて，ノブ側手では 55% から 85% 付近にかけては打点が高い程，また，それ以降は打点が高い程，負値が大きくなり，各打点間に有意な差がみられた。他方，バレル側手では 70% 付近からインパクトにかけて打点が高い程，負値が大きくなり，主に高めと低めとの間に有意な差がみられた。

つぎに， Y_{bat} 軸まわり成分について，打点高条件によらず左右各手ともに他の軸よりも小さい値を示し，スウィング開始からインパクトまで，バレル側手は正值を示し，これに対してノブ側手はほぼ上下対称の負値を示し，左右の手によって絞り込むようなねじりのモーメントを作用させていた。打点高による違いについて，ノブ側手では 20% 過ぎから 50% 付近まで，およびインパクト付近において，バレル側手では 30% から 45% 付近においてそれぞれ高めと低めとの間に有意な差がみられた。

最後に， Z_{bat} 軸まわり成分について，打点高条件によらずバレル側手はスウィング開始から 60% 付近にかけて小さな負値を示し，これ以降，若干ではあるものの正值を示し，インパクトでは再び負値を示した。ノブ側手はスウィング開始から正值を示し，80% 付近以降から負値を示しながら，インパクトを迎えていた。打点高による違いについて，ノブ側手では 50% から 60% 付近にかけて高めと低めとの間，および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。バレル側手では 60% から 80% 付近にかけて高めと低めとの間，および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられ，また，70% から 80% 付近にかけて高めと真中

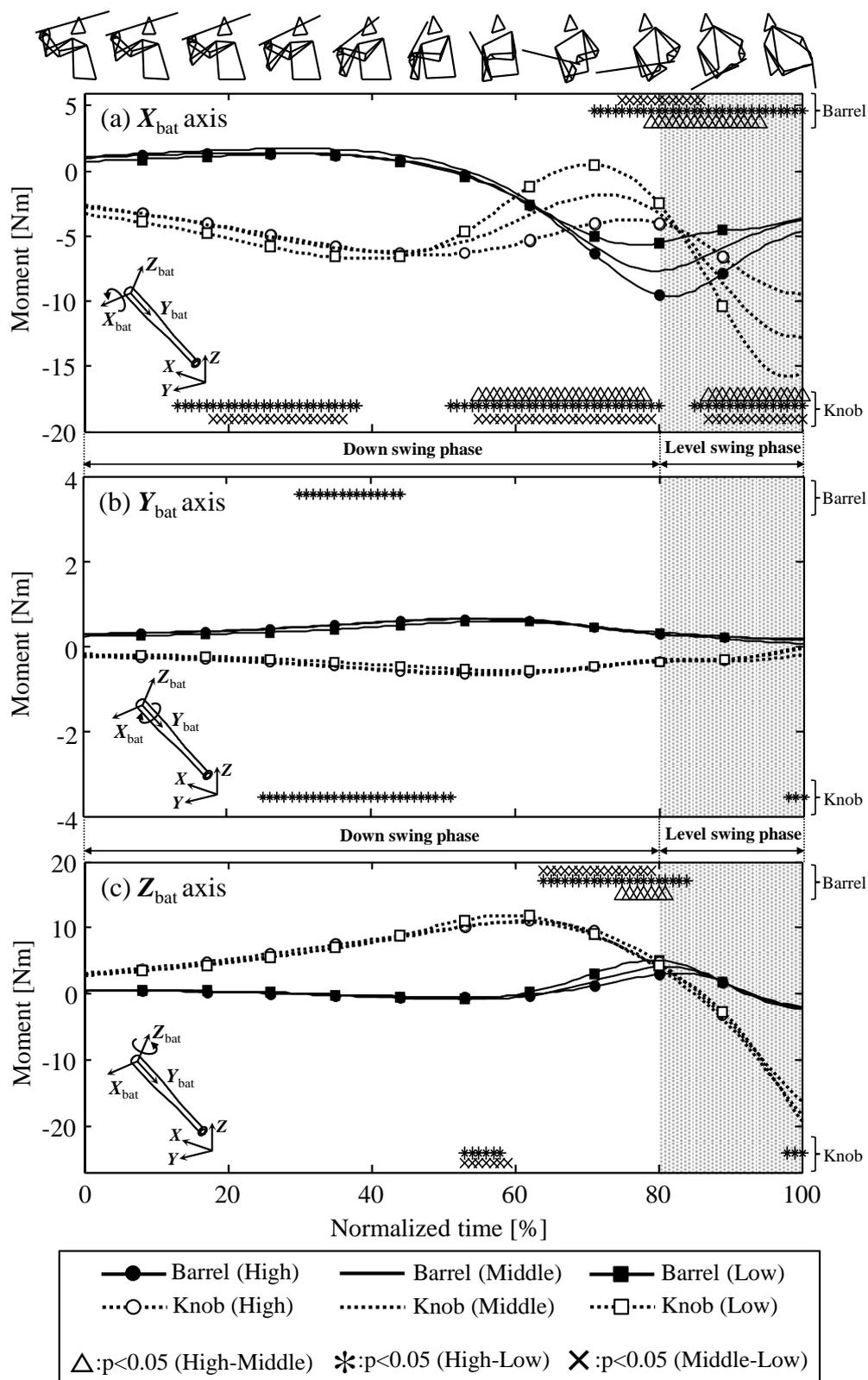


Figure 4-5 Curves of the mean moments expressed by the moving bat coordinate system in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

との間にも有意な差がみられた。しかしながら、打点高間における差異は小さかった。

4.3.2.3 左右各手のバット長軸力の最大値および平均力

Table 4-2 に、左右各手による作用力のバット長軸 (\mathbf{Y}_{bat} 軸) 成分の最大値および平均値を示し、Table 4-3 に、バット・ヘッドスピードとの相関係数を示す。Table 4-2 から、まず最大値について、ノブ側手では打点が低い程、その値は大きくなり、高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた ($H: r=0.754$, $M: r=0.749$, $L: r=0.704$, $p<0.05$)。これに対して、バレル側手では真中の打点高における値が一番大きかったものの、その値はノブ側手に対して約 4 分の 1 程度であり、各打点高間に有意な差はみられなかった ($H: r=0.457$, $M: r=0.453$, $L: r=0.494$, $p<0.05$)。

つぎに、平均値すなわち平均力について、ノブ側手では打点が低い程、値が大きくなる傾向を示したものの、打点高間に有意な差はみられなかった。これに対して、バレル側手ではノブ側手の値よりも小さいものの、打点が低い程、その値は大きくなり、高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた ($L: r=0.473$, $p<0.05$)。

4.3.2.4 左右各手のバット長軸力の鉛直成分による力学的仕事

Figure 4-6 に、左右各手のバット長軸 (\mathbf{Y}_{bat} 軸) 力の鉛直成分による力学的仕事を示す。同図 (a) がノブ側の値を、同図 (b) がバレル側の値をそれぞれ示し、点線によって局面を区切っている (左: ダウン・スウィング局面, 右: レベル・スウィング局面)。また、各欄における各棒グラフは、左から高め、真中、および低めの各打点高条件における値を示している。なお、各仕事間に統計的な有意差がみられた場合には、アスタリスクを左右各手および各局面に対する打点高条件ごとに示している。

同図から、まずノブ側手について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。他方、負仕事はほとんどみられなかつ

Table 4-2 Maximum values and average forces of bat longitudinal axial force of each for each hitting-point height (High, Middle, and Low).

	Maximum value [N]		Average force [N]	
	Knob-side hand	Barrel-side hand	Knob-side hand	Barrel-side hand
High	591.1±71.6	157.5±34.9	169.2±40.9	41.8±26.1
Middle	628.9±63.8	167.8±37.3	177.3±35.8	51.6±27.7
Low	648.6±82.7	161.8±40.8	179.3±42.7	57.4±30.2

*:p<0.05, Mean±S.D.

Table 4-3 Correlations of maximum bat-head speed with maximum values and average forces of bat longitudinal axial force of each for each hitting-point height (High, Middle, and Low).

	Bat-head speed vs Maximum value		Bat-head speed Average force	
	Knob-side hand	Barrel-side hand	Knob-side hand	Barrel-side hand
High	0.754 *	0.457 *	0.124	0.398
Middle	0.749 *	0.453 *	-0.065	0.401
Low	0.704 *	0.494 *	0.185	0.473 *

*:p<0.05

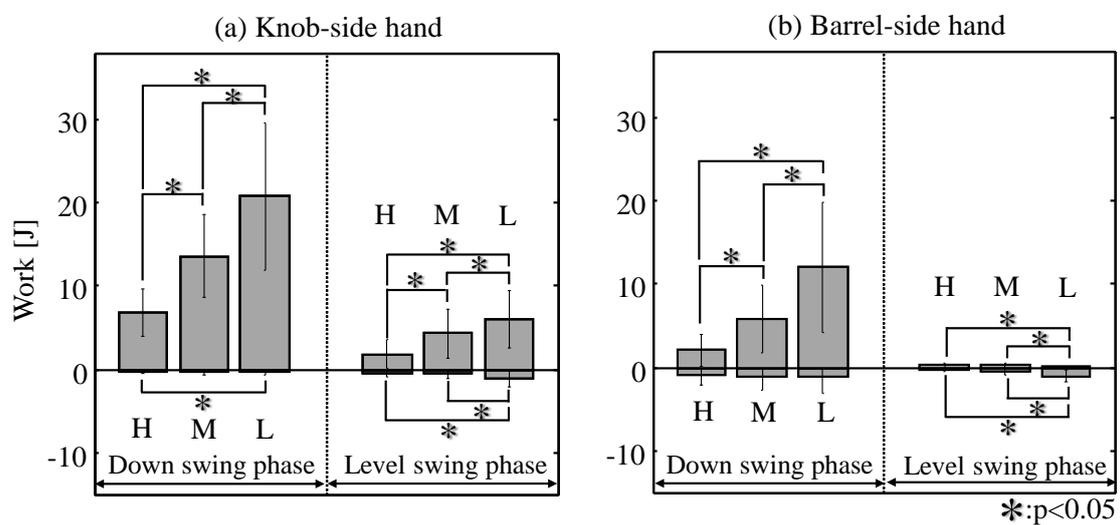


Figure 4-6 Mean and standard deviation of the mechanical works done by the vertical component of longitudinal axial force of bat for each hitting-point height (H: High, M: Middle, and L: Low).

たものの、高めと低めとの間に有意な差がみられた。レベル・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。負仕事は、値がほとんどみられなかったものの、高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

つぎに、バレル側手について、局面に関わらず仕事はノブ側手よりも小さかったものの、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。レベル・スウィング局面ではダウン・スウィング局面と比較してその値は小さかったものの、高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。これに対して負仕事は、値がほとんどみられなかったものの、高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

4.3.2.5 左右各手の作用力の Z_{bat} 軸成分による力学的仕事

Figure 4-7 に、左右各手の Z_{bat} 軸方向作用力の偶力成分による力学的仕事を示す。同図から、まずノブ側手について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が大きくなり、高めと低めとの間に有意な差がみられた。負仕事はその大きさが正仕事と同程度であったものの、打点高間に顕著な差はみられなかった。また、レベル・スウィング局面における正および負仕事は、ダウン・スウィング局面と比較して顕著に小さかった。

つぎに、バレル側手について、ダウン・スウィング局面では正および負仕事ともに、その大きさはノブ側手と同程度であったものの、打点高間に顕著な差はみられなかった。一方、レベル・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が大きくなり、高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。これに対して、負仕事は打点が高い程、大きくなり、高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

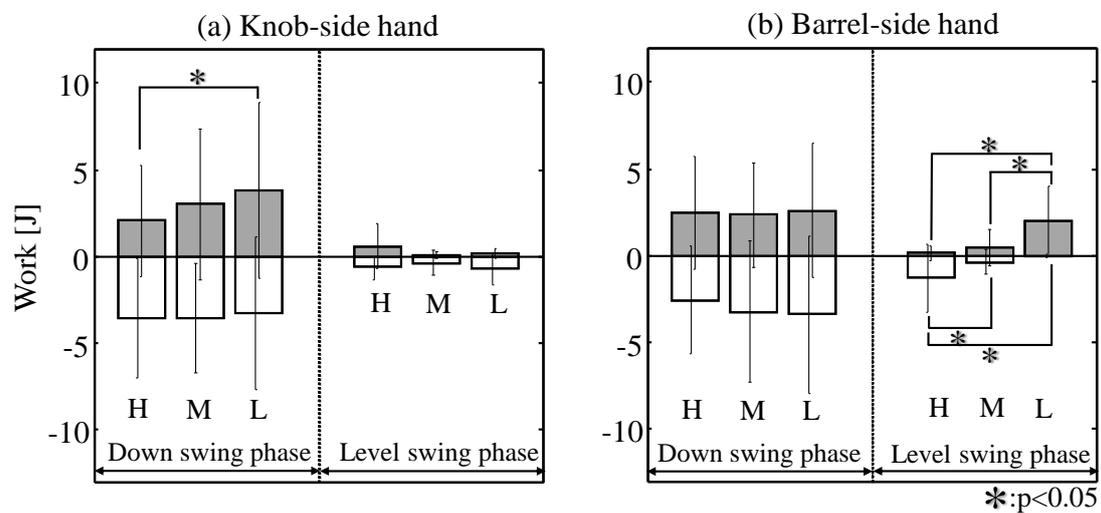


Figure 4-7 Mean and standard deviation of the mechanical works done by the Z_{bat} axial component of coupled force under each hitting-point height conditions (H: High, M: Middle, and L: Low).

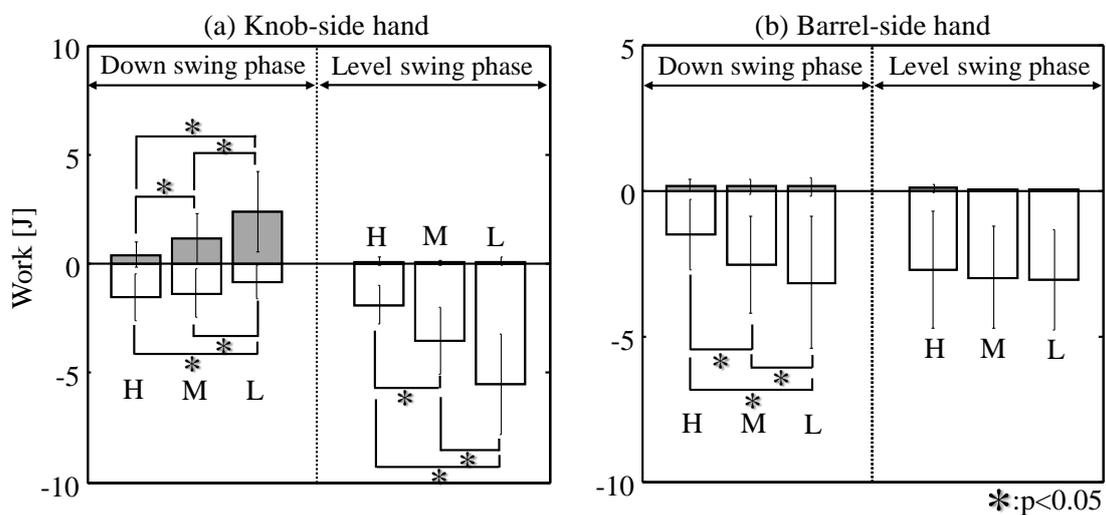


Figure 4-8 Mean and standard deviation of the mechanical works done by the X_{bat} axial component of moment under each hitting-point height (H: High, M: Middle, and L: Low).

4.3.2.6 左右各手の作用モーメントのバット起し倒し軸まわり成分による仕事

Figure 4-8 に、左右各手の作用モーメントのバット起し倒し軸 (X_{bat} 軸) まわり成分による仕事を示す。同図から、まずノブ側手について、ダウン・スウィング局面では正仕事は打点が低い程、大きくなり、各打点高間に有意な差がみられ、負仕事は打点が高い程、大きくなり、高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。レベル・スウィング局面では正仕事がほぼ0Jであったのに対して、負仕事は打点が低い程、大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。

つぎに、バレル側手について、ダウン・スウィング局面では正仕事がほぼ0Jであったのに対して、負仕事は打点が低い程、大きくなり、各打点高間に有意な差がみられた。レベル・スウィング局面では正仕事はほぼ0Jであったのに対して、負仕事はダウン・スウィング局面と同程度の値を示していたものの、打点高による顕著な差はみられなかった。

4.4 考察

4.4.1 バット・ヘッドスピードについて

打点高条件の違いに対するバット・ヘッドスピードの最大値は、打点が低い程、有意に大きかった (Table 4-1)。この結果は、バット・ヘッドスピードが打球速度を得ることに大きく影響するとの報告 (田内ら, 2005 ; 宮西, 2006 ; 石井ら, 2010) を考慮すると、異なる打点高条件を設定した打撃動作の分析において、打点が低い程、打球速度が大きくなるとの報告 (田子ら, 2006a) と同様な結果であったと考えられる。ここで、インパクト近傍における左右各手のバット長軸力のピーク値について、ノブ側手の値は打点が低い程、有意に大きく、バット・ヘッドスピードと高い正の相関関係がみられ、その平均力についても打点が低い程、大きくなる傾向を示し、いずれもバレル側手の値と比べておよそ4倍の大きさであったこと (Table 4-2, Table 4-3)、およびノブ側手のバット長軸力が他の軸成分の作用力よりも大きかったこと (Figure 4-4 (b)) から、打点高の違いによるバット・ヘッ

ドスピードの差に対しては、特にレベル・スウィング局面後半におけるノブ側手のバット長軸力が寄与していると考えられる。

4.4.2 バットの運動について

まず、バットの回転運動について、バット長軸の傾斜角度では、スウィング開始から80%付近にかけて打点が低い程、正值が有意に大きかった。そして、これ以降から各打点高ともに負値を示し、インパクトにかけて打点が低い程、負値が有意に大きかった (Figure 4-2 (a))。バット長軸の傾斜角速度では、スウィング開始から55%付近にかけて打点が低い程、正值が有意に大きかった。そして、これ以降から各打点高ともに負値を示し、80%付近において打点が低い程、その値は有意に大きくなり、その後、インパクトにかけて打点高によらず傾斜角速度は0 rad/sとなっていた (Figure 4-2 (b))。つぎに、バットの並進運動については、フォワード・スウィング中のボール打撃部位の鉛直変位に関して、バットの並進による変位、および回転による変位は、それぞれ打点が低い程、有意に大きかったものの、バットの回転による変位はバットの並進による変位と比べて約7分の1と小さかった (Figure 4-3)。

以上の結果から、打点高への対応に関して、フォワード・スウィングにおけるバットのボール打撃部位の鉛直変位は、バットの並進による変位が支配的であると考えられる。他方、バット長軸の傾斜角度および角速度において、60%からインパクトにかけて打点が低い程、バットを鉛直下方へと大きく倒そうとしていたこと、およびインパクトでは打点が低い程バットが倒れた状態のままであったことから、バットの鉛直変位に支配的であるバットの並進運動に加えて、バットの回転運動も打点高への対応に寄与すると考えられる。このように本研究では、バットの運動を詳細に検討することによって、打点高の違いによるバットの並進および回転運動に関する知見が明らかとなった。このため、異なる打点高への対応に関して、バットの並進運動に寄与するバット長軸力 (鉛直成分)、ならびにバット

の回転運動に寄与する Z_{bat} 軸方向作用力の偶力成分, および X_{bat} 軸まわりの作用モーメントについて, 以降にて詳しく述べることとする.

4.4.3 打点高の違いに対応するための左右各手の役割

4.4.3.1 左右各手のバット長軸力の役割

前述したように打点高への対応には, バットのボール打撃部位における鉛直変位のうち, バットの並進による変位が大きく寄与していることが明らかとなった. そこで, 左右各手のキネティクスの変量のうち, バットの並進運動に寄与し, 顕著に大きな値がみられたバット長軸力について考える. まず, インパクトが近づくにつれて急激に増大するノブ側手によるバット長軸力のピーク値は, 打点が低い程, 有意に大きかった (Figure 4-4 (b), Table 4-2). このバット長軸力の鉛直成分による仕事では, ノブ側手は, 各局面ともに主に打点が低い程, 正仕事が有意に大きく, 特にダウン・スウィング局面の値が大きかった (Figure 4-6 (a)). バレル側手は, ダウン・スウィング局面ではノブ側手と同様に打点が低い程, 正仕事は有意に大きく, レベル・スウィング局面では正および負仕事ともに有意な差がみられたものの, その値は小さかった (Figure 4-6 (b)).

平野 (1979) は, バットの振り出し局面では, バットが投手方向へと引き抜かれると報告し, Koike *et al.* (2004b) は, インパクト近傍においてノブ側手のバット長軸成分が大きくなると報告している. ここで, バット長軸力は剛体であるバットに対して, その長軸方向の並進加速度のみを生じさせるため, バット長軸方向作用力の鉛直成分が, そのままバットの鉛直方向への加速を行うものと考えられる. このため, 左右各手のバット長軸力は, Koike *et al.* (2004b) や上述した打点高間によるバット・ヘッドスピードの差に影響を及ぼすことに加えて, バットの鉛直方向への動きにも大きく影響を及ぼすものと考えられる. 特にノブ側手の長軸力 (Y_{bat} 軸成分) は, ダウン・スウィング局面において, その鉛直成分による仕事が顕著に大きく, 打点高間においても差がみられたことから, バットの鉛直方

向への操作に対して大きく寄与すると考えられる。さらに、レベル・スウィング局面においても、ダウン・スウィング局面ほどではないものの、ノブ側手のバット長軸力は打点高の調整に寄与すると考えられる。他方、バレル側手については、その平均力および仕事に対して、打点高間に有意な差がみられたことから (Table 4-2, Figure 4-6 (b)), 主にダウン・スウィング局面において、ノブ側手ほどではないものの、バレル側手の長軸力はバットの高さ調整に寄与しているものと考えられる。

4.4.3.2 左右各手の偶力の役割

前述したように、スウィング中盤以降では打点が低い程、バットが鉛直下方へと大きく倒れていたことから (Figure 4-2), 打点高への対応に対して、バットのボール打撃部位における鉛直変位のうち、回転成分に寄与するキネティクスの変量にも着目する必要があるといえる。剛体であるバットに対する Z_{bat} 軸方向作用力の偶力成分は、バット重心の並進運動は生じさせずに、バットの起し倒し軸まわりの回転運動を生じさせるものである。ここで、この偶力のピーク値は、ダウン・スウィング局面後半において打点が高い程、有意に大きかった (Figure 4-4 (c))。また、この偶力成分の仕事について、ノブ側手では、ダウン・スウィング局面において高めと低めとの間の正仕事は有意に大きくなり、バレル側手では、レベル・スウィング局面において正仕事は打点が低い程、負仕事は打点が高い程、有意に大きかった (Figure 4-7)。さらに、インパクトでは、各打点高間において傾斜角度に 5 から 10 deg 程度の差がみられ、打点が低い程、バットは倒れた状態となっていた (Figure 4-2 (a))。このため、バットのボール打撃部位が重心位置から約 0.098 m (バット・ヘッドから 0.134 m) 離れていることから、バットに起し倒し軸まわりの回転運動が生じることは、ボール打撃部位の高さ調整に寄与するものと考えられる。これらの知見から、ダウン・スウィング局面後半において、左右各手の偶力成分は、打点が高い程、バットの倒れ込みを抑制するように傾斜方向の回転運動を大きく角減速させることによって、バット長軸力ほど大きな作

用ではないものの、異なる打点高に対応に寄与するものと考えられる。

平野 (1979) は、インパクト付近では水平面内の大きな偶力を作用させていると報告している。また、川村ら (2001) は、バレル側手では回内、ノブ側手では回外することによってバットを回転させていると報告している。小池 (2010) は、バット長軸に垂直でありスウィング平面内方向に作用する偶力成分はインパクト近傍において小さくなること報告している。これらの報告は、主にヘッドスピードの獲得に寄与すると考えられる偶力成分に言及している。これに対して、左右各手の Z_{bat} 軸方向作用力の偶力成分は、本研究の結果から、ダウン・スウィング局面後半において打点高への対応に寄与していることが明らかとなった。

4.4.3.3 左右各手の作用モーメントの役割

ここでは、左右各手の作用モーメントのうち、バットの起し倒しの成分である X_{bat} 軸まわり成分について考える。この軸まわりのモーメントは、 Z_{bat} 軸方向作用力の偶力成分と同様に、異なる打点高に対するバットの回転運動に影響を及ぼすものと考えられる。まず作用モーメントについては、ノブ側手では、ダウン・スウィング局面後半において打点が高い程、レベル・スウィング局面においては打点が低い程、大きな負値（バットを起す方向）を示した。バレル側手では、特にレベル・スウィング局面前半において打点が高い程、大きな負値を示した (Figure 4-5 (a))。つぎに、この作用モーメントによる仕事について、ノブ側手では、ダウン・スウィング局面において正仕事は打点が低い程、負仕事は打点が高い程、有意に大きく、レベル・スウィング局面においては打点が低い程、負仕事は有意に大きかった (Figure 4-8 (a))。また、バレル側手では、ダウン・スウィング局面において打点が低い程、負仕事は有意に大きかった (Figure 4-8 (b))。

以上の結果から、バットの起し倒し軸まわりの作用モーメントについて、左右各手とも主に負仕事のみられたことから、ノブ側手は、まずダウン・スウィング局面後半において

は打点が高い程、バットの倒れ込みを抑制し、つぎにレベル・スウィング局面においては打点が低い程、バットを起すようなモーメントを作用させることにより、ボール打撃部位の高さを維持する働きがあると考えられる。また、バレル側手は、主にレベル・スウィング局面の前半付近において、ノブ側手がダウン・スウィング局面後半に作用したモーメントの傾向と同様に打点が高い程、バットの倒れ込みを抑制するように角減速させていると考えられる。このため、バット長軸力がバットの鉛直変位に大きく変化させることに加えて、バットの起し倒し軸まわりの左右各手の作用モーメントは、バットの起し倒しに寄与する両手による偶力成分とともに、バットの傾斜方向の回転運動、すなわちバットの姿勢およびバット・ヘッド軌道を変化させることに寄与すると考えられる。

4.5 要約

本章の目的は、異なる打点高条件に対するティー打撃動作におけるバットのキネマティクスを含む左右各手のキネティクスの分析から、異なる打点高に対応するための左右各手のキネティクスの特徴およびその役割を明らかにすることであった。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① バットのボール打撃部位の鉛直変位において、バットの並進による変位は、打点が低い程、有意に大きく、回転による変位と比べて約7倍の大きさであった。
- ② インパクト近傍において、ノブ側手のバット長軸力およびバット・ヘッドスピードのそれぞれの最大値は、打点が低い程、有意に大きかった。
- ③ バット長軸力の鉛直成分による仕事について、特にダウン・スウィング局面において、ノブ側手によって大きな正仕事が発揮され、その値は打点が低い程、有意に大きかった。
- ④ バット起し倒し軸まわりの作用モーメントによる仕事について、手の左右および局面に関わらず、その負仕事は打点が低い程、有意に大きかった。

- ⑤ 主にダウン・スウィング局面後半では，バット起し倒し軸まわりのモーメントとして作用する左右各手の偶力成分は，打点が高い程，有意に大きかった．

以上のことから，異なる打点高への対応には，主にノブ側手のバット長軸力の鉛直成分により，ダウン・スウィング局面においてバット重心を鉛直方向に並進運動させることに加えて，バット起し倒し軸まわりの作用モーメント，ならびにこの軸まわりのモーメントとして作用する左右各手の偶力成分によりバットの倒れ込みによる回転運動を抑制すると考えられる．

第5章 打点高の異なる野球打撃動作における上肢のキネティクスの特徴

5.1 目的

第4章における左右各手のキネティクスの分析の結果から、打点高への対応には、バット長軸方向作用力の鉛直成分がバットの打点高調整に大きく寄与するとともに、バット起し倒し軸まわりの作用モーメント、およびこの軸まわりのモーメントとして作用する左右各手の偶力成分が、バットの過度な下方変位の抑制に寄与することが明らかとなった。このとき、これら左右各手のキネティクスの変量の生成には、左右上肢の関節トルクおよび関節力といったキネティクスの変量が関与している。

ここで、野球の打撃動作における研究のうち、特に上肢に関する研究について、川村ら(2008)は、大学野球選手と社会人野球選手を対象として、バット・ヘッドスピードと上肢の動作との関係を検討している。さらに、田子ら(2006a, 2006b)は、異なるコース条件における上肢の動作調整について検討している。これらの研究によって、バット・ヘッドスピードの生成、あるいは各コースに対応する際のバット操作に関与する上肢関節のキネマティクスについて明らかとなっている。しかしながら、これらの先行研究では、バット操作に寄与する左右各手のキネティクスの変量を生成する上肢関節のキネティクスの変量についてまでは言及していない。したがって、野球打撃動作における指導への示唆あるいは競技力の向上に繋がる動作の生成要因を明らかにするためには、幾何学的情報から動作を評価するキネマティクスの分析に加えて、動作の生成要因を定量化するキネティクスの分析が有効であると考えられる。

そこで本章の目的は、異なる打点高条件における左右の上肢関節のキネティクスの分析をティー打撃条件下において行うことにより、打点高の違いに対応するための左右各手のキネティクスを実現する左右の上肢関節の役割について明らかにすることとした。

5.2 方法

5.2.1 データ収集およびデータ処理

本章のデータは、スウィング実験により収集したものである。なお、データ収集およびデータ処理については、第 3 章において述べた方法を用いた。

5.2.2 上肢のセグメントおよび関節座標系の定義

1) セグメント座標系の定義

本研究では、左右上肢をそれぞれ上腕、前腕および手からなる剛体リンクモデルとしてモデル化した。そして、左右上肢の逆動力学演算を行うにあたり、セグメント角速度を算出する必要があることから、Figure 3-4 の身体に貼付した反射マーカの座標値を用いて、各セグメントに固定したセグメント座標系を設定した。ここでは、例として右上肢 3 セグメントの定義について述べる (Figure 5-1)。なお、左上肢のセグメント座標系についても、右上肢と同様の手順を用いて座標系を定義した。

(1) 上腕座標系 (Σ_{ua})

上腕座標系 Σ_{ua} について、右肘内側 (elbRI) と右肘外側 (elbRO) の中点である右肘関節中心 (elbRC) から、右肩前 (shRF) と右肩後 (shRB) の中点である右肩関節中心 (shRC) へと向かう単位ベクトルを z_{ua} 、右肘内側から右肘外側へと向かうベクトルを s_{ua} とし、 z_{ua} と s_{ua} との外積より得た単位ベクトルを y_{ua} とし、 y_{ua} と z_{ua} との外積からなる単位ベクトル x_{ua} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル x_{ua} 、 y_{ua} 、 z_{ua} から構成される姿勢行列を上腕座標系 Σ_{ua} とした (Figure 5-1 (a))。

(2) 前腕座標系 (Σ_{fa})

前腕座標系 Σ_{fa} について、右手首内側 (wrRI) と右手首外側 (wrRO) の中点である右手関節中心 (wrRC) から右肘関節中心 (elbRC) へと向かう単位ベクトルを z_{fa} 、右手首内側か

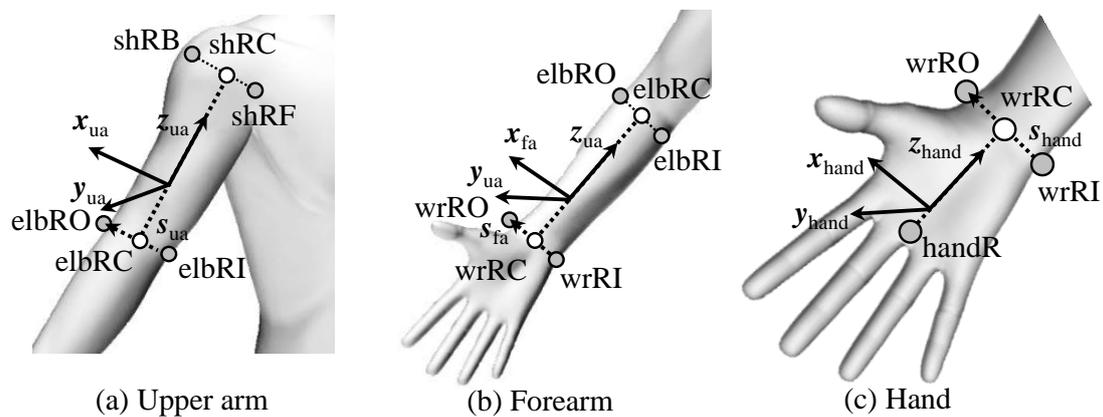


Figure 5-1 Definitions of segment coordinate systems at upper limb ((a) upper arm, (b) forearm, and (c) hand) to calculate the angular velocity of each segment.

ら右手首外側へと向かうベクトルを s_{fa} として、 z_{fa} と s_{fa} との外積より得た単位ベクトルを y_{fa} とし、 y_{fa} と z_{fa} との外積からなる単位ベクトル x_{fa} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル x_{fa} , y_{fa} , z_{fa} から構成される姿勢行列を前腕座標系 Σ_{fa} とした (Figure 5-1 (b)).

(3) 手部座標系 (Σ_{hand})

手部座標系 Σ_{hand} について、右手先 (handR) から右手関節中心 (wrRC) へと向かう単位ベクトルを z_{hand} , 右手首内側 (wrRI) から右手首外側 (wrRO) へと向かうベクトルを s_{hand} として、 z_{hand} と s_{hand} との外積より得た単位ベクトルを y_{hand} とし、 y_{hand} と z_{hand} との外積からなる単位ベクトル x_{hand} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル x_{hand} , y_{hand} , z_{hand} から構成される姿勢行列を手部座標系 Σ_{hand} とした (Figure 5-1 (c)).

2) 関節座標系の定義

本研究では、3次元動作を評価するために、Figure 3-4 の身体に貼付した反射マーカの座標値を用いて、上肢各関節に関節座標系を設定した (Figure 5-2)。なお、左上肢については、右上肢と同様の手順を用いて左手座標系に対して設定した。

(1) 肩関節の座標系

肩関節の運動軸および角変位の算出に際して、まず肩関節座標系設定用の上胴座標系 Σ_{sUT} を定義した後、肩関節屈曲伸展座標系 Σ_{sFE} , 肩関節内外転座標系 Σ_{sAA} , および肩関節内外旋座標系 Σ_{sIER} を順次定義した。

① 肩関節座標系設定用の上胴座標系 (Σ_{sUT})

肩関節座標系設定用の上胴座標系 Σ_{sUT} について、左肩関節中心 (shLC) から右肩関節中心 (shRC) へと向かう単位ベクトルを x_{sUT} , 左右肋骨下端の midpoint (ribC) から、左右肩関節の midpoint (shC) へと向かうベクトルを s_{sUT} として、 s_{sUT} と x_{sUT} との外積より得た単位ベクトルを y_{sUT} とし、 x_{sUT} と y_{sUT} との外積からなる単位ベクトル z_{sUT} を求めた。そして、これらの

直交単位ベクトル \mathbf{x}_{sUT} , \mathbf{y}_{sUT} , \mathbf{z}_{sUT} から構成される姿勢行列を肩関節座標系設定用の上腕座標系 Σ_{sUT} とした (Figure 5-2 (a)-1).

② 肩関節屈曲伸展座標系 (Σ_{sFE})

屈曲伸展座標系 Σ_{sFE} について, 肩関節座標系設定用の上腕座標系 Σ_{sUT} の \mathbf{x}_{sUT} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{sFE} , 右肘関節中心 (elbRC) から右肩関節中心 (shRC) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{sFE} とし, \mathbf{s}_{sFE} と \mathbf{x}_{sFE} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{sFE} とし, \mathbf{x}_{sFE} と \mathbf{y}_{sFE} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{z}_{sFE} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{sFE} , \mathbf{y}_{sFE} , \mathbf{z}_{sFE} から構成される姿勢行列を肩関節の屈曲伸展座標系 Σ_{sFE} とした (Figure 5-2 (a)-1).

③ 肩関節内外転座標系 (Σ_{sAA})

内外転座標系 Σ_{sAA} について, 屈曲伸展座標系 Σ_{sFE} の \mathbf{y}_{sFE} 軸と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{sAA} , 上述の \mathbf{s}_{sFE} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{sAA} とし, \mathbf{y}_{sAA} と \mathbf{z}_{sAA} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{sAA} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{sAA} , \mathbf{y}_{sAA} , \mathbf{z}_{sAA} から構成される姿勢行列を肩関節の内外転座標系 Σ_{sAA} とした (Figure 5-2 (a)-2).

④ 肩関節内外旋座標系 (Σ_{sIER})

内外旋座標系 Σ_{sIER} について, 内外転座標系 Σ_{sAA} の \mathbf{z}_{sAA} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{sIER} , 右肘の内側から外側へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{sIER} とし, \mathbf{z}_{sIER} と \mathbf{s}_{sIER} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{sIER} とし, \mathbf{y}_{sIER} と \mathbf{z}_{sIER} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{sIER} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{sIER} , \mathbf{y}_{sIER} , \mathbf{z}_{sIER} から構成される姿勢行列を肩関節の内外旋座標系 Σ_{sIER} とした (Figure 5-2 (a)-3).

(2) 肘関節の座標系

肘関節の運動軸および角変位の算出に際して, 肘関節屈曲伸展座標系 Σ_{eFE} , 肘関節内外反座標系 Σ_{eVV} , および肘関節回内外座標系 Σ_{ePS} を順次定義した.

① 肘関節屈曲伸展座標系 (Σ_{eFE})

屈曲伸展座標系 Σ_{eFE} について、肩関節の内外旋座標系 Σ_{sIER} の \mathbf{x}_{eIER} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{eFE} 、右手関節中心 (wrRC) から右肘関節中心 (elbRC) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{eFE} とし、 \mathbf{s}_{eFE} と \mathbf{x}_{eFE} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{eFE} として、 \mathbf{x}_{eFE} と \mathbf{y}_{eFE} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{z}_{eFE} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{eFE} 、 \mathbf{y}_{eFE} 、 \mathbf{z}_{eFE} から構成される姿勢行列を肘関節の屈曲伸展座標系 Σ_{eFE} とした (Figure 5-2 (b)-1)。

② 肘関節内外反座標系 (Σ_{eVV})

内外反座標系 Σ_{eVV} について、屈曲伸展座標系 Σ_{eFE} の \mathbf{y}_{eFE} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{eVV} 、上述の \mathbf{s}_{eFE} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{eVV} とし、 \mathbf{y}_{eVV} と \mathbf{z}_{eVV} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{eVV} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{eVV} 、 \mathbf{y}_{eVV} 、 \mathbf{z}_{eVV} から構成される姿勢行列を肘関節の内外反座標系 Σ_{eVV} とした (Figure 5-2 (b)-2)。

③ 肘関節回内外座標系 (Σ_{ePS})

回内外座標系 Σ_{ePS} について、内外反座標系 Σ_{eVV} の \mathbf{z}_{eVV} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{ePS} 、右手首の内側から外側へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{ePS} とし、 \mathbf{z}_{ePS} と \mathbf{s}_{ePS} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{ePS} として、 \mathbf{y}_{ePS} と \mathbf{z}_{ePS} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{ePS} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{ePS} 、 \mathbf{y}_{ePS} 、 \mathbf{z}_{ePS} から構成される姿勢行列を肘関節の回内外座標系 Σ_{ePS} とした (Figure 5-2 (b)-3)。

(3) 手関節の座標系

手関節の運動軸および角変位の算出に際して、手関節掌背屈座標系 Σ_{wPDF} 、手関節橈尺屈座標系 Σ_{wRU} 、および手関節回内外座標系 Σ_{wPS} を順次定義した。

① 手関節掌背屈座標系 (Σ_{wPDF})

掌背屈座標系 Σ_{wPDF} について、肘関節の回内外座標系 Σ_{ePS} の \mathbf{x}_{ePS} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{wPDF} 、右手先 (handR) から右手関節中心 (wrRC) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{wPDF} とし、 \mathbf{s}_{wPDF} と \mathbf{x}_{wPDF} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{wPDF} として、 \mathbf{x}_{wPDF} と \mathbf{y}_{wPDF} との外積からなる

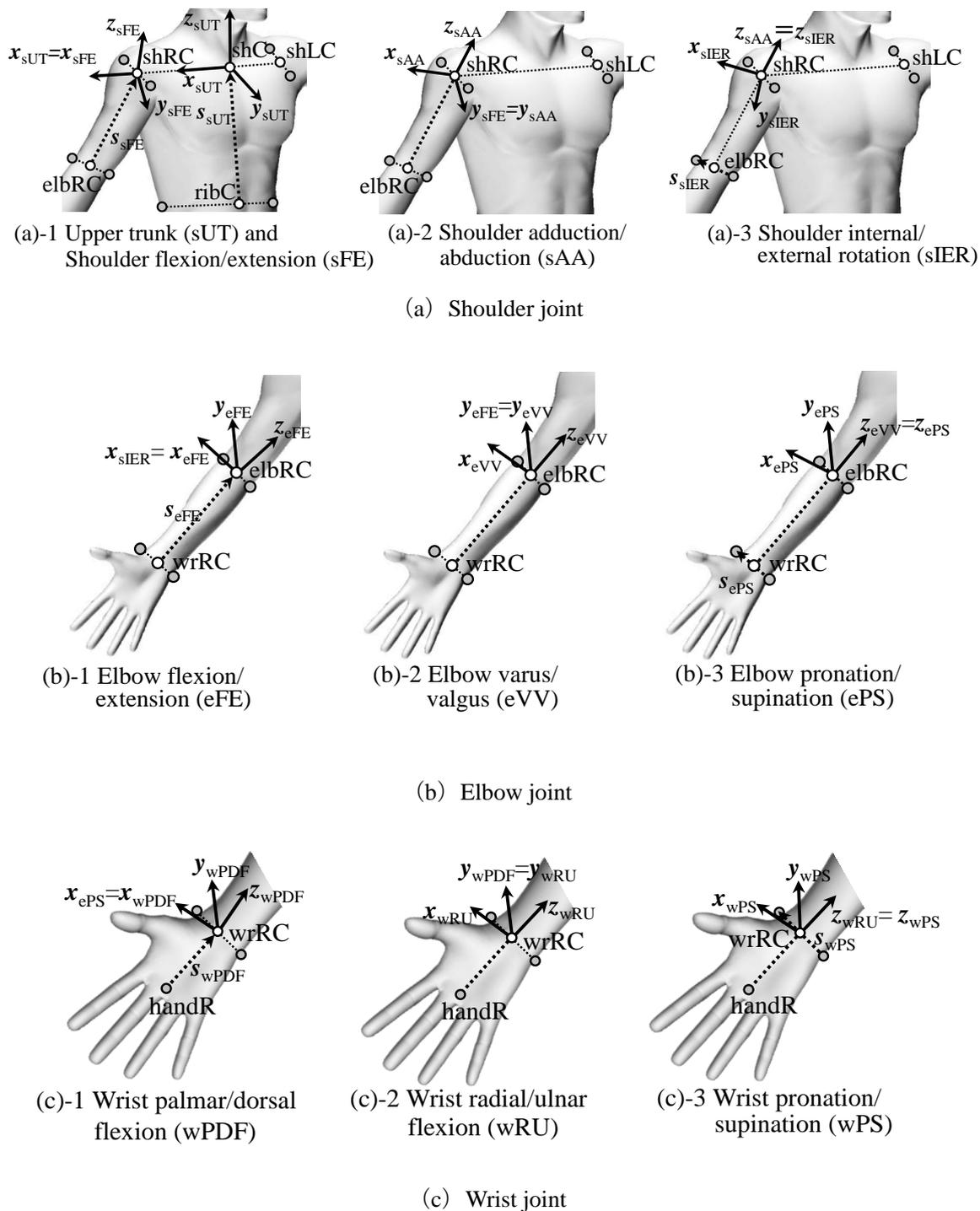


Figure 5-2 Definitions of joint coordinate systems at the upper limb ((a) shoulder, (b) elbow, and (c) wrist) to calculate the joint angles and express the joint torques.

る単位ベクトル \mathbf{z}_{wPDF} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{wPDF} , \mathbf{y}_{wPDF} , \mathbf{z}_{wPDF} から構成される姿勢行列を手関節の掌背屈座標系 Σ_{wPDF} とした (Figure 5-2 (c)-1)。

② 手関節橈尺屈座標系 (Σ_{wRU})

橈尺屈座標系 Σ_{wRU} について、掌背屈座標系 Σ_{wPDF} の \mathbf{y}_{wPDF} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{wRU} , 上述の \mathbf{s}_{wPDF} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{wRU} とし、 \mathbf{y}_{wRU} と \mathbf{z}_{wRU} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{wRU} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{wRU} , \mathbf{y}_{wRU} , \mathbf{z}_{wRU} から構成される姿勢行列を手関節の橈尺屈座標系 Σ_{wRU} とした (Figure 5-2 (c)-2)。

③ 手関節回内外座標系 (Σ_{wPS})

回内外座標系 Σ_{wPS} について、橈尺屈座標系 Σ_{wRU} の \mathbf{z}_{wRU} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{wPS} , 上述の \mathbf{s}_{cPS} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{s}_{wPS} とし、 \mathbf{z}_{wPS} と \mathbf{s}_{wPS} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{wPS} とし、 \mathbf{y}_{wPS} と \mathbf{z}_{wPS} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{wPS} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{wPS} , \mathbf{y}_{wPS} , \mathbf{z}_{wPS} から構成される姿勢行列を手関節の回内外座標系 Σ_{wPS} とした (Figure 5-2 (c)-3)。

3) 上肢関節の運動軸

(1) 肩関節軸 (屈曲伸展, 内外転, 内外旋)

肩関節軸について、①肩関節の屈曲伸展座標系 Σ_{sFE} の \mathbf{x}_{sFE} 軸を屈曲伸展軸 (Figure 5-2 (a)-1), ②内外転座標系 Σ_{sAA} の \mathbf{y}_{sAA} 軸を内外転軸 (Figure 5-2 (a)-2), そして、③内外旋座標系 Σ_{sIER} の \mathbf{z}_{sIER} 軸を内外旋軸とした (Figure 5-2 (a)-3)。

(2) 肘関節軸 (屈曲伸展, 回内外)

肘関節軸について、①肘関節の屈曲伸展座標系 Σ_{eFE} の \mathbf{x}_{eFE} 軸を屈曲伸展軸 (Figure 5-2 (b)-1), そして、②回内外座標系 Σ_{ePS} の \mathbf{z}_{ePS} 軸を回内外軸とした (Figure 5-2 (b)-3)。

(3) 手関節軸（掌背屈，橈尺屈）

手関節軸について、①手関節の掌背屈座標系 Σ_{wPDF} の \mathbf{x}_{wPDF} 軸を掌背屈軸 (Figure 5-2 (c)-1),
そして、②橈尺屈座標系 Σ_{wRU} の \mathbf{y}_{wRU} 軸を橈尺屈軸とした (Figure 5-2 (c)-2).

5.2.3 算出項目および算出方法

1) 上肢関節の角変位および角速度

上述した上肢の各関節座標系から関節角変位を算出した。本研究では左右の上肢ともに肩関節は3自由度（屈曲伸展，内外転，内外旋），肘関節は2自由度（屈曲伸展，回内外），および手関節は2自由度（掌背屈，橈尺屈）とした。また，関節角速度については，関節角変位をそれぞれ時間微分することにより算出した。なお，肘関節の内外反軸および手関節の回内外軸については，その軸まわりの関節角速度は生じないものとした。

関節角変位について，関節角変位の軸と角速度の軸を一致させるために，田子ら (2006a, 2006b) および川村ら (2008) の関節角変位とは異なる算出法であるオイラー角に対応した関節角変位を用いた (内藤・丸山, 2005 ; Wu *et al.*, 2005)。関節角速度については，近位セグメントに対する遠位セグメントの相対角速度を，各関節に設定した関節座標系に投影したものを関節角速度とする方法もある (宮西ら, 1996 ; 藤井ら, 1997)。この各関節座標系を用いて算出した角変位の時間微分による角速度と，近位および遠位セグメントの相対角速度より算出した角速度とでは，変換行列を有する関係となることから (阿江・藤井, 2002)，その値には差が生じる (Figure A1-1, Figure A1-2)。本研究では，各関節の運動軸まわりの動作を評価したいことから，回転軸を同一として，角変位と角速度との関係に整合性のある関節角変位の時間微分から算出した関節角速度を用いることとする。

(1) 肩関節角変位

肩関節屈曲伸展の角変位は，肩関節座標系設定用の上胴座標系 Σ_{sUT} に対する Σ_{sFE} の \mathbf{x}_{sFE} 軸まわりの回転角，肩関節内外転の角変位は，屈曲伸展座標系 Σ_{sFE} に対する Σ_{sAA} の \mathbf{y}_{sAA} 軸

まわりの回転角，肩関節内外旋の角変位は，内外転座標系 Σ_{sAA} に対する Σ_{sIER} の \mathbf{z}_{sIER} 軸まわりの回転角としてそれぞれ算出した．なお，符号の正負については，伸展，外転および外旋を正，屈曲，内転および内旋を負とした．

(2) 肘関節角変位

肘関節屈曲伸展の角変位は，肩関節の内外旋座標系 Σ_{sIER} に対する Σ_{eFE} の \mathbf{x}_{eFE} 軸まわりの回転角，肘関節回内外の角変位は，内外反座標系 Σ_{eVV} に対する Σ_{ePS} の \mathbf{z}_{ePS} まわりの回転角としてそれぞれ算出した．なお，符号の正負については，伸展および回外を正，屈曲および回内を負とした．

(3) 手関節角変位

手関節掌背屈の角変位は，肘関節の回内外座標系 Σ_{ePS} に対する Σ_{wPDF} の \mathbf{x}_{wPDF} まわりの回転角，手関節橈尺屈の角変位は，掌背屈座標系 Σ_{wPDF} に対する Σ_{wRU} の \mathbf{y}_{wRU} まわりの回転角としてそれぞれ算出した．なお，符号の正負については，掌屈および橈屈を正，背屈および尺屈を負とした．

2) セグメント角速度

本研究では，上述した各セグメントの角速度ベクトルを求めるために，下式を用いた（石井ら，1989；小池ら，2006）．セグメント i の角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_i$ と，セグメント i に設定した移動座標系の姿勢行列 \mathbf{R}_i には，次式の関係が成り立つ．

$$\dot{\mathbf{R}}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{R}_i = -\mathbf{R}_i \times \boldsymbol{\omega}_i \quad \mathbf{R}_i = [\mathbf{e}_{i,x} \ \mathbf{e}_{i,y} \ \mathbf{e}_{i,z}]^T \quad (4.1)$$

姿勢行列 \mathbf{R}_i の各軸成分 $\mathbf{e}_{i,x}$ ， $\mathbf{e}_{i,y}$ ， $\mathbf{e}_{i,z}$ を縦に並べたベクトルを \mathbf{B}_i

$$\mathbf{B}_i = [\mathbf{e}_{i,x}^T \ \mathbf{e}_{i,y}^T \ \mathbf{e}_{i,z}^T]^T \quad (4.2)$$

とすると，式 (4.1) は，

$$-\mathbf{B}_{i,j} \times \boldsymbol{\omega}_i = \dot{\mathbf{B}}_{i,j} \quad (j=x, y, z) \quad (4.3)$$

と表すことができる。ここで、 $[-\mathbf{B}_{i,j} \times]$ は正則行列ではないため、式 (4.3) から $\boldsymbol{\omega}_i$ を求めることはできない。そこで、最小自乗法によりセグメント角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_i$ を

$$\boldsymbol{\omega}_i = -\mathbf{H}_i \dot{\mathbf{B}}_{i,j} \quad (4.4)$$

と求める。

$$\mathbf{H}_i = \left[[\mathbf{e}_{i,x}]^T [\mathbf{e}_{i,y}]^T [\mathbf{e}_{i,z}]^T \right]^T \mathbf{B}_i^+ = (\mathbf{B}_i^T \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{B}_i^T \quad (4.5)$$

であり、ここで、 \mathbf{H}_i および \mathbf{B}_i^+ は \mathbf{B}_i の擬似逆行列である。

3) 左右上肢の関節力および関節トルク

左右各上肢の各節を構成する剛体リンクとしてモデル化されたセグメント k, i (k =バレル側, ノブ側 ; i =手, 前腕, 上腕) 単体に対する並進および回転の運動方程式を用いて算出した (Figure 5-3)。すなわち、セグメント k, i の遠位端に作用する力およびモーメントを $\mathbf{f}_{k,i}$ および $\mathbf{n}_{k,i}$ とすると、セグメント k, i の近位端に作用する力 $\mathbf{f}_{k,i+1}$ およびモーメント $\mathbf{n}_{k,i+1}$ は、セグメントの並進の運動方程式および回転の運動方程式から、それぞれ

$$\mathbf{f}_{k,i+1} = -m_{k,i} \ddot{\mathbf{x}}_{k,i} + m_{k,i} \mathbf{g} + \mathbf{f}_{k,i} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{n}_{k,i+1} = \mathbf{r}_{k,i,\overline{\text{cgP}}} \times \mathbf{f}_{k,i} - \mathbf{r}_{k,i,\overline{\text{cgD}}} \times \mathbf{f}_{k,i+1} - \hat{\mathbf{I}}_{k,i} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,i} - \boldsymbol{\omega}_{k,i} \times (\hat{\mathbf{I}}_{k,i} \boldsymbol{\omega}_{k,i}) + \mathbf{n}_{k,i} \quad (4.7)$$

と算出することができる。ここで、式 (4.6) および (4.7) における $m_{k,i}$ はセグメント k, i の質量、 $\mathbf{x}_{k,i}$ は静止座標系におけるセグメント k, i の重心位置ベクトル、 \mathbf{g} は重力加速度ベクトル ($\mathbf{g}=[0 \ 0 \ -9.807]^T$)、 $\hat{\mathbf{I}}_{k,i}$ は静止座標系におけるセグメント k, i の慣性行列、 $\boldsymbol{\omega}_{k,i}$ は静止座標系におけるセグメント k, i の角速度ベクトルをそれぞれ示している。また、 $\mathbf{r}_{k,i,\overline{\text{cgP}}}$ および $\mathbf{r}_{k,i,\overline{\text{cgD}}}$ は、セグメント重心から近位端および遠位端にそれぞれ向かう位置ベクトルを示している。なお、各セグメントの部分質量、重心位置および慣性モーメントなどの身体部分慣性パラメータについては、阿江 (1996) の身体部分慣性係数から算出し、静止座標系におけるセグメント慣性行列 $\hat{\mathbf{I}}_{k,i}$ は、セグメント k, i の慣性行列 $\mathbf{I}_{k,i}$ および姿勢座標系 $\mathbf{R}_{k,i}$ を用いて、下

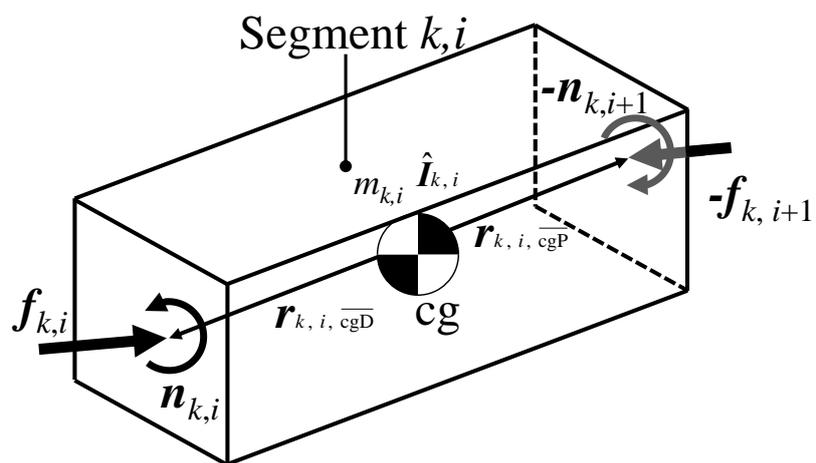


Figure 5-3 Free body diagram for the calculation of joint force and torque of a segment.

式より求めた.

$$\hat{\mathbf{I}}_{k,i} = \mathbf{R}_{k,i} \mathbf{I}_{k,i} \mathbf{R}_{k,i}^T \quad (4.8)$$

そして、この逆動力学演算によって算出された作用モーメント $\mathbf{n}_{k,i+1}$ を、該当する関節軸の軸方向単位ベクトルに投影することにより各関節トルクを求めた. なお、本研究では、関節トルクと、関節角速度および角変位の関係について検討したいことから、関節トルクについても関節角変位および角速度の同一な運動軸に投影した (Hirashima *et al.*, 2007 ; Schache and Baker, 2007 ; Desroches *et al.*, 2010).

1) 左右上肢の関節トルクパワーおよび力学的仕事

関節トルクパワーについては、関節トルクと関節角速度との積として求め、その後、この関節トルクパワーを、ダウン・スウィング局面およびレベル・スウィング局面の各区分別、ならびに符号の正負別に時間積分することによって各局面における関節トルクによる正負の力学的仕事を算出した. ここで、関節トルクパワーについては、各運動軸まわりの関節角速度およびトルクを用いて算出していることから (FigureA2-1, FigureA2-2), 直交座標系を用いて算出した関節トルクパワーとは差が生じている.

2) 左右上肢の静力学的な関節トルク

第4章において、バット移動座標系における左右各手のバット作用力および作用モーメントのうち、バットの鉛直変位の獲得に対してバット長軸力 (\mathbf{Y}_{bat} 軸方向作用力) の鉛直成分、偶力のバット起し倒し軸まわり成分 (\mathbf{Z}_{bat} 軸方向作用力), そして作用モーメントのバット起し倒し軸まわり成分 (\mathbf{X}_{bat} 軸まわり) の3成分が寄与することが明らかとなった. 左右上肢の逆動力学演算では、上肢の最遠位となる手セグメントの遠位端から、センサー・バットによって得られたバット作用力および作用モーメントを入力値として、各関節のトルクが算出される. この際、各関節トルクには、バットの鉛直変位に寄与するトルク以外

にも、重力に抗するためのトルク、バットの水平変位に寄与するトルクなどが含まれると考えられる。そこで、左右各手のキネティクスの変量のうちの上述した3成分を入力値として、この3成分に起因する上肢各関節軸まわりのトルクを静力学的に算出することによって、打点高への対応に寄与するトルクをより詳細に検討できると考えられる。

具体的には、上述した3成分を左右各手部セグメントの外力および外モーメントとして、力とモーメントの静的な釣り合い式 (Zatsiorsky, 2002 ; 広瀬, 2005) から、これらの3成分に起因する作用モーメントを算出した。そして、逆動力学演算によって算出した作用モーメントと同様に、左右上肢関節の該当する関節軸の軸方向単位ベクトルに投影することにより、各関節の静力学的な関節トルクを求めた。なお、上肢各セグメントの重力および慣性力については除いている。

5.2.4 統計処理

第3章に示した方法によって統計処理を行った。なお、上述した関節トルクや仕事といったキネティクスのパラメータに対する被験者の体重による規格化については、バットに対しての検討を行っていることから、本研究では体重によって除していない結果を示すこととする。

5.3 結果

5.3.1 左右の肩関節トルク、角速度およびトルクパワー

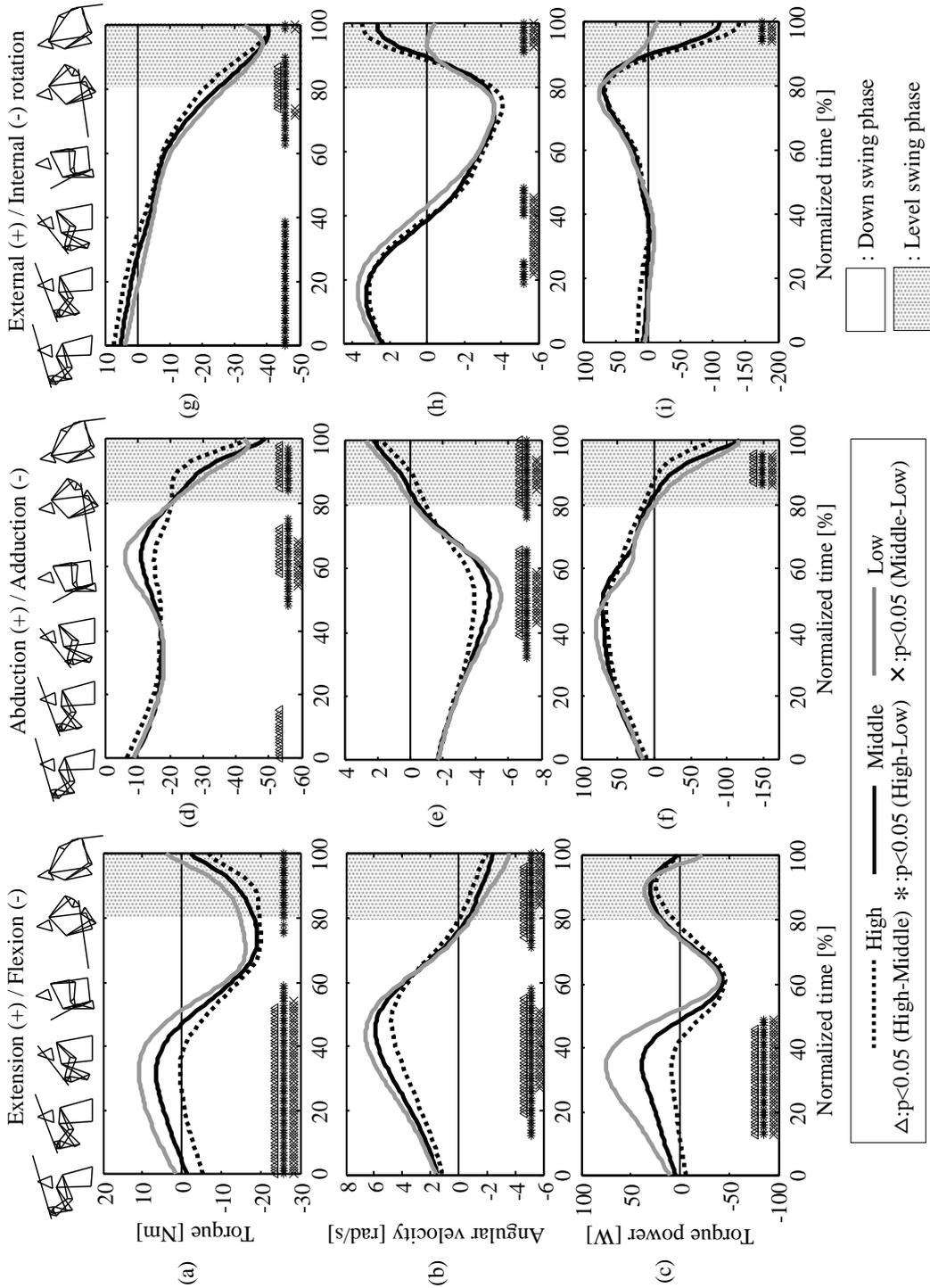
フォワード・スウィング期における肩関節の屈曲伸展、内外転、および内外旋の各軸に関する関節トルク、関節角速度、そして関節トルクパワーについて、バレル側の各値を Figure 5-4 に、ノブ側の各値を Figure 5-5 にそれぞれ示す。なお、各図の左列が屈曲伸展軸（伸展：正，屈曲：負）の値を，中列が内外転軸（外転：正，内転：負）の値を，右列が内外旋軸（外旋：正，内旋：負）の値をそれぞれ示しており，上段 (a)，(d)，(g) にトルク，中段

(b), (e), (h) に角速度, そして下段 (c), (f), (i) にトルクパワーの各値を示している (高: 点線, 中: 黒線, 低: 灰色線). また, 打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している (高-中: Δ , 高-低: $*$, 中-低: \times).

Figure 5-4 から, バレル側の肩関節の屈曲伸展軸について, 関節トルク (a) では, 0% から 50% 付近にかけて打点が低い程, 伸展トルクが有意に大きかった. なお, 50% 以降から 90% 付近にかけて屈曲トルクがみられ, 高めと低めの間には有意な差がみられた. 関節角速度 (b) では, 20% から 60% 付近にかけて打点が低い程, 伸展角速度が, そして 70% 付近以降では打点が低い程, 屈曲角速度がそれぞれ有意に大きかった. 関節トルクパワー (c) では, 主に 10% 付近から 50% 付近において打点が低い程, 正のトルクパワーが有意に大きかった.

バレル側の肩関節の内外転軸について, 関節トルク (d) では, 内転のみのトルクがみられ, 特に 60% 付近において打点高間による有意差が大きかった. 関節角速度 (e) では, 30% から 70% 付近にかけて打点が低い程, 内転角速度が有意に大きく, 80% 付近からは打点が低い程, 外転角速度が有意に大きかった. 関節トルクパワー (f) では, 20% から 50% 付近にかけて打点が低い程, 正のトルクパワーが大きくなり, 40% 付近においてピーク値がみられた. また, 80% 付近以降では打点が低い程, 負のトルクパワーが有意に大きかった.

バレル側の肩関節の内外旋軸について, 関節トルク (g) では, スウィング開始から打点が高い程, 外旋トルクが有意に大きく, その後 20% 付近以降からインパクトにかけて打点が低い程, 内旋トルクが大きく, 60% から 90% 付近にかけて, 主に高めと真中との間, および高めと低めとの間に有意な差がみられた. 関節角速度 (h) では, 20% から 40% 付近にかけて打点が低い程, 外旋角速度が有意に大きく, 40% 以降から 90% 付近にかけては内旋角速度がみられた. その後, インパクト近傍では, 高めおよび真中の打点高において打点が高い程, 外旋角速度が有意に大きかった. 関節トルクパワー (i) では, 50% から 90% 付近にかけて正のトルクパワーがみられた後, インパクト近傍では打点が高い程, 負のトルクパ



(a), (d), (g) : Joint torque (b), (e), (h) : Joint angular velocity (c), (f), (i) : Joint torque power

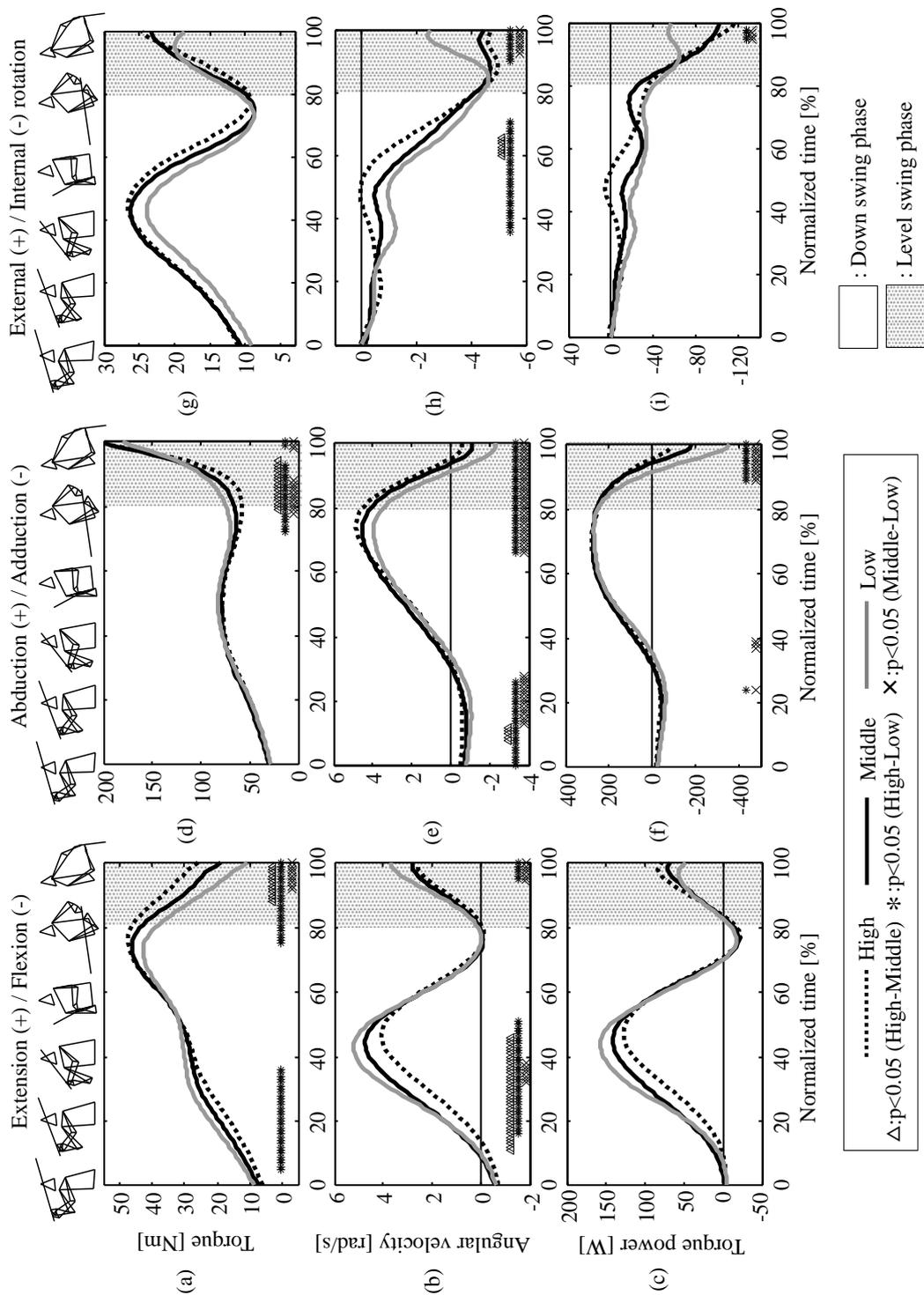
Figure 5-4 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the flexion/extension, adduction/abduction, and internal/external rotation axes of the barrel-side shoulder joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

ワーが有意に大きかった。

Figure 5-5 から、ノブ側の肩関節の屈曲伸展軸について、関節トルク (a) では、伸展のみのトルクがみられ、スウィング開始から 35% 付近にかけて打点が低い程、70% 付近から 100% にかけて打点が高い程、伸展トルクが有意に大きかった。関節角速度 (b) では、15% 付近から 50% にかけて、および 85% 付近以降において打点が低い程、伸展角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー (c) では、20% から 50% 付近にかけて打点が低い程、正のトルクパワーが大きかった。

ノブ側の肩関節の内外転軸について、関節トルク (d) では、バレル側の肩関節の内外転軸とは反対に、外転のみのトルクがみられ、70% から 90% 付近にかけては打点が低い程、そして、インパクト近傍では打点が高い程、それぞれ外転トルクが有意に大きかった。関節角速度 (e) では、スウィング開始から 30% 付近にかけて打点が低い程、内転角速度が、65% から 90% 付近にかけて打点が高い程、外転角速度が、90% 付近以降においては打点が低い程、内転角速度がそれぞれ有意に大きかった。関節トルクパワー (f) では、40% から 90% 付近にかけて正のトルクパワーが大きく、その後インパクト近傍においては打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きかった。

ノブ側の肩関節の内外旋軸について、関節トルク (g) では、外旋のみのトルクがみられ、40% 付近においてピーク値がみられた後、75% 付近において外旋トルクが最小値となり、その後、インパクトにかけて再び外旋トルクが増加していた。関節角速度 (h) では、ほぼ内旋角速度のみがみられ、35% 以降から 80% 付近にかけて打点が低い程、内旋角速度が大きく、35% から 70% 付近にかけて、主に高めと低めとの間に有意な差がみられた。その後、インパクトにかけて、特に低めの打点高において内旋角速度は減少していた。関節トルクパワー (i) では、インパクト近傍では、高めおよび真中の打点高において負のトルクパワーが増加していた。



(a), (d), (g) : Joint torque (b), (e), (h) : Joint angular velocity (c), (f), (i) : Joint torque power
 internal/external rotation axes of the knob-side shoulder joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

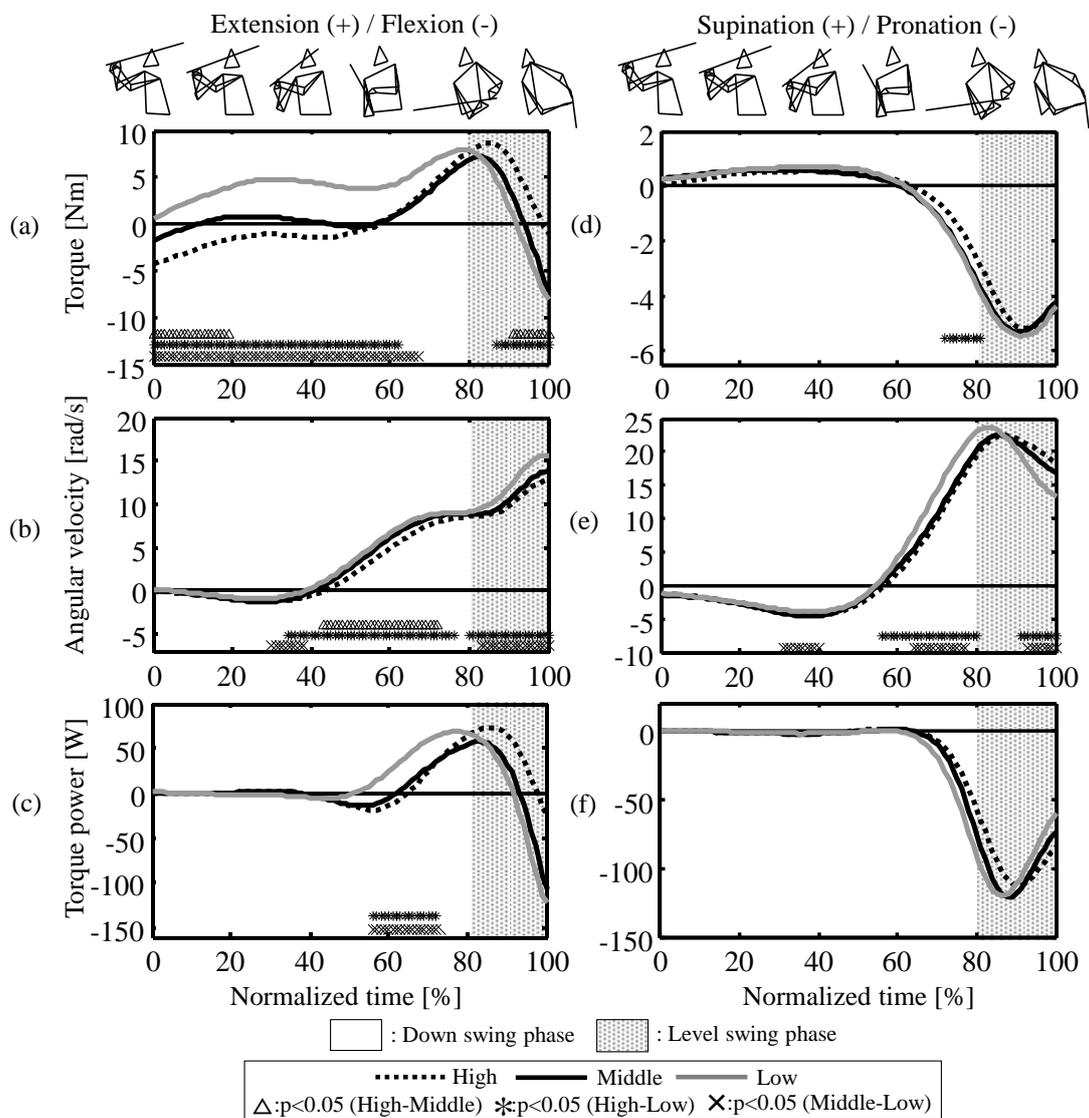
5.3.2 左右の肘関節トルク，角速度およびトルクパワー

フォワード・スウィング期における肘関節の屈曲伸展，および回内外の各軸に関する関節トルク，関節角速度，そして関節トルクパワーについて，バレル側の各値を Figure 5-6 に，ノブ側の各値を Figure 5-7 にそれぞれ示す．各図の左列が屈曲伸展軸（伸展：正，屈曲：負）を，右列が回内外軸（回外：正，回内：負）の値を示しており，図内の各線および各印の仕様は，Figure 5-4 および Figure 5-5 と同様である．

Figure 5-6 から，バレル側の肘関節の屈曲伸展軸について，関節トルク (a) では，スウィング開始から，主に高めの打点高において屈曲トルクが，低めの打点高においては伸展トルクがみられ，それぞれ打点高間に有意差もみられた．その後，60%付近からは各打点高ともに伸展トルクがみられ，インパクト近傍では，真中および低めの打点高において屈曲トルクがみられた．関節角速度 (b) では，主に 40%から 100%にかけて，その差は小さいものの打点が低い程，伸展角速度が有意に大きかった．関節トルクパワー (c) では，50%から 80%付近にかけて打点が低い程，正のトルクパワーが有意に大きくなり，インパクト近傍では，高めの打点高において正のトルクパワーを，真中および低めの打点高において負のトルクパワーをそれぞれ示した．

バレル側の肘関節の回内外軸について，関節トルク (d) では，60%付近以降において打点が低い程，回内トルクが大きかった．関節角速度 (e) では，スウィング開始から回内角速度がみられた後，55%付近以降から打点が低い程，回外角速度が有意に大きかった．関節トルクパワー (f) では，70%から 85%付近にかけて打点が低い程，負のトルクパワーが大きかった．

Figure 5-7 から，ノブ側の肘関節の屈曲伸展軸について，関節トルク (a) では，打点高によらず，伸展のみのトルクがみられ，90%付近に出現するピーク値の発揮タイミングは打点が低い程早く，インパクト近傍の伸展トルクは打点が高い程，大きくなる傾向にあった．関節角速度 (b) では，フォワード・スウィング期の大半において打点が低い程，伸展角速



(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Figure 5-6 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the flexion/extension and pronation/supination axes of the barrel-side elbow joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

度が有意に大きかった。関節トルクパワー (c) では、関節角速度の波形と同様にフォワード・スウィング期の大半において打点が低い程、正のトルクパワーが大きく、10%から60%付近にかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

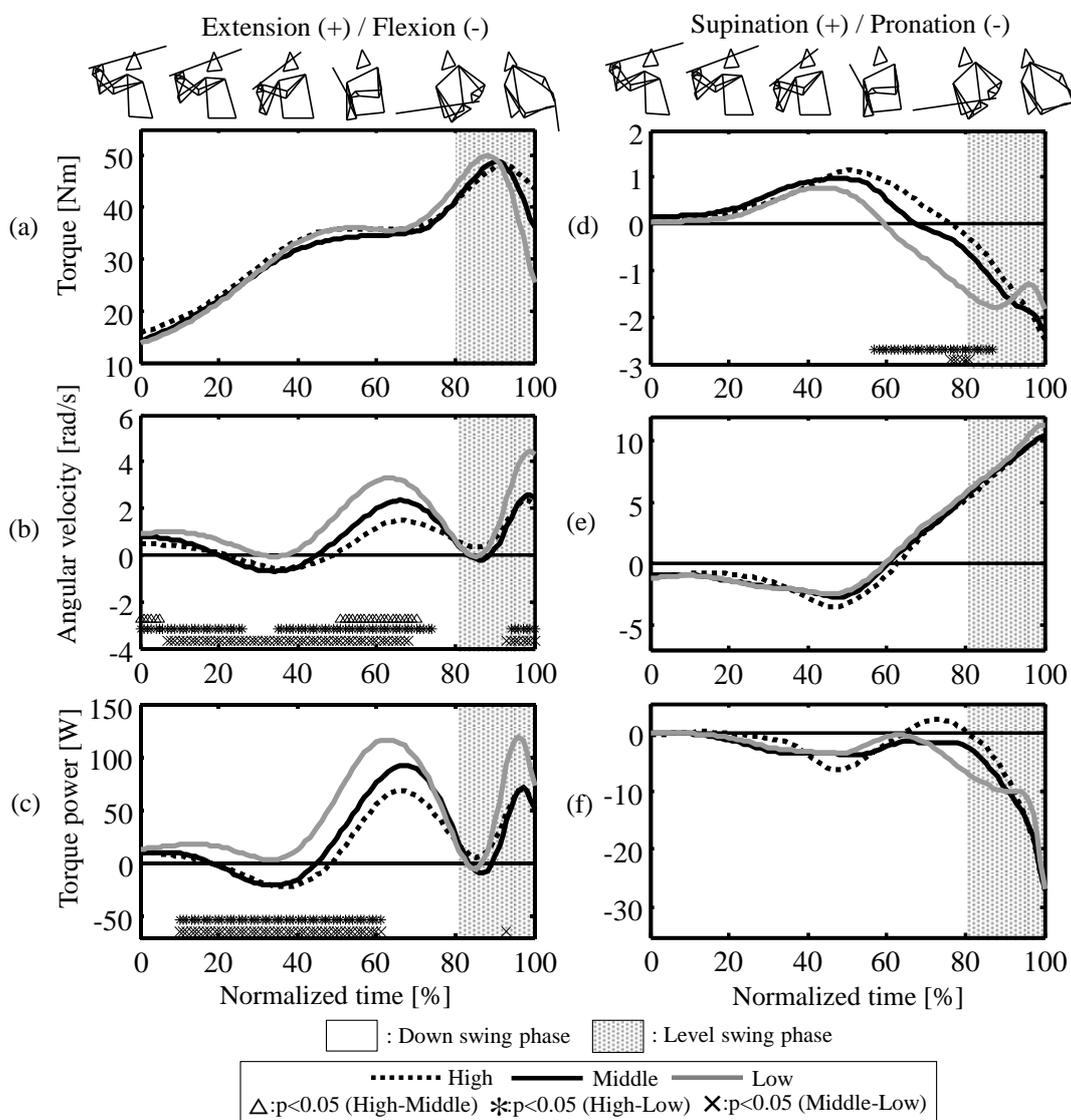
ノブ側の肘関節の回内外軸について、関節トルク (d) では、20%から60%付近にかけて打点が高い程、回外トルクが大きく、それ以降の60%から90%付近にかけては打点が低い程、回内トルクが有意に大きかった。関節角速度 (e) では、スウィング開始から60%付近にかけて回内角速度がみられた後、インパクトに向けて回外角速度が増大していたものの、打点高間に有意な差はみられなかった。関節トルクパワー (f) では、主にインパクトに近づくにつれて負のトルクパワーが増加していた。

5.3.3 左右の手関節トルク，角速度およびトルクパワー

フォワード・スウィング期における手関節の掌背屈，および橈尺屈の各軸に関する関節トルク，関節角速度，そして関節トルクパワーについて，バレル側の各値を Figure 5-8 に，ノブ側の各値を Figure 5-9 にそれぞれ示す。各図の左列が掌背屈軸（背屈：正，掌屈：負）を，右列が橈尺屈軸（橈屈：正，尺屈：負）の値を示しており，図内の各線および各印の仕様は，Figure 5-4 および Figure 5-5 と同様である。

Figure 5-8 から，バレル側の手関節の掌背屈軸について，関節トルク (a) では，スウィング開始から40%付近にかけて打点が高い程，背屈トルクが有意に大きく，80%からインパクトにかけては打点が高い程，掌屈トルクが有意に大きかった。関節角速度 (b) では，20%から70%付近にかけて背屈角速度がみられ，それ以降においては打点が低い程，掌屈角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー (c) では，50%から70%付近にかけて負のトルクパワーがみられた後，90%付近まで正のトルクパワーが増大していた。

バレル側の手関節の橈尺屈軸について，関節トルク (d) では，20%付近からは低めの打点高において，30%付近からは高めおよび真中の打点高において，それぞれ尺屈トルクがみ



(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Figure 5-7 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the flexion/extension and pronation/supination axes of the knob-side elbow joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

られ、70%付近からは特に高めの打点高において尺屈トルクが有意に大きかった。関節角速度 (e) では、80%付近からインパクトにかけて打点が低い程、尺屈角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー (f) では、70%近傍において打点が高い程、負のトルクパワーが有意に大きく、その後、80%付近以降からは正のトルクパワーが増大していた。

Figure 5-9 から、ノブ側の手関節の掌背屈軸について、関節トルク (a) では、掌屈のみのトルクがみられ、特にインパクト近傍においてその値は増大していたものの、打点高間に有意な差はみられなかった。関節角速度 (b) では、主に掌屈角速度がみられ、80%付近においてピーク値を迎え、その後、インパクト直前までその値は減少しており、打点高間に有意な差がみられた。関節トルクパワー (c) では、50%から 80%付近にかけて正のトルクパワーが増大した後、インパクトに向けて減少していた。

ノブ側の手関節の橈尺屈軸について、関節トルク (d) では、尺屈のみのトルクがみられ、インパクト近傍において打点が低い程、尺屈トルクが有意に大きかった。関節角速度 (e) では、60%付近から尺屈角速度が生じ、インパクト近傍においては打点が低い程、尺屈角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー (f) では、30%から 60%付近にかけて打点が高い程、負のトルクパワーが大きく、それ以降は正のトルクパワーとなり、インパクト近傍では、特に低めの打点高において正のトルクパワーの顕著な減少がみられた。

5.3.4 関節トルクによる力学的仕事

Figure 5-10 に、左右上肢の各関節軸トルクによる仕事を局面毎に正負 (正: W_p , 負: W_n) に分けて示す。各仕事は左右の上肢毎に、肩関節 (屈曲伸展軸: sFE, 内外転軸: sAA, 内外旋軸: sIER), 肘関節 (屈曲伸展軸: eFE, 回内外軸: ePS), そして手関節 (掌背屈軸: wPDF, 橈尺屈軸: wRU) における各軸の値をそれぞれ示している。なお、各仕事の打点高間における統計的な有意差を Table 5-1 に示す。

Figure 5-10 (a) から、バレル側上肢の肩関節について、ダウン・スウィング局面では打

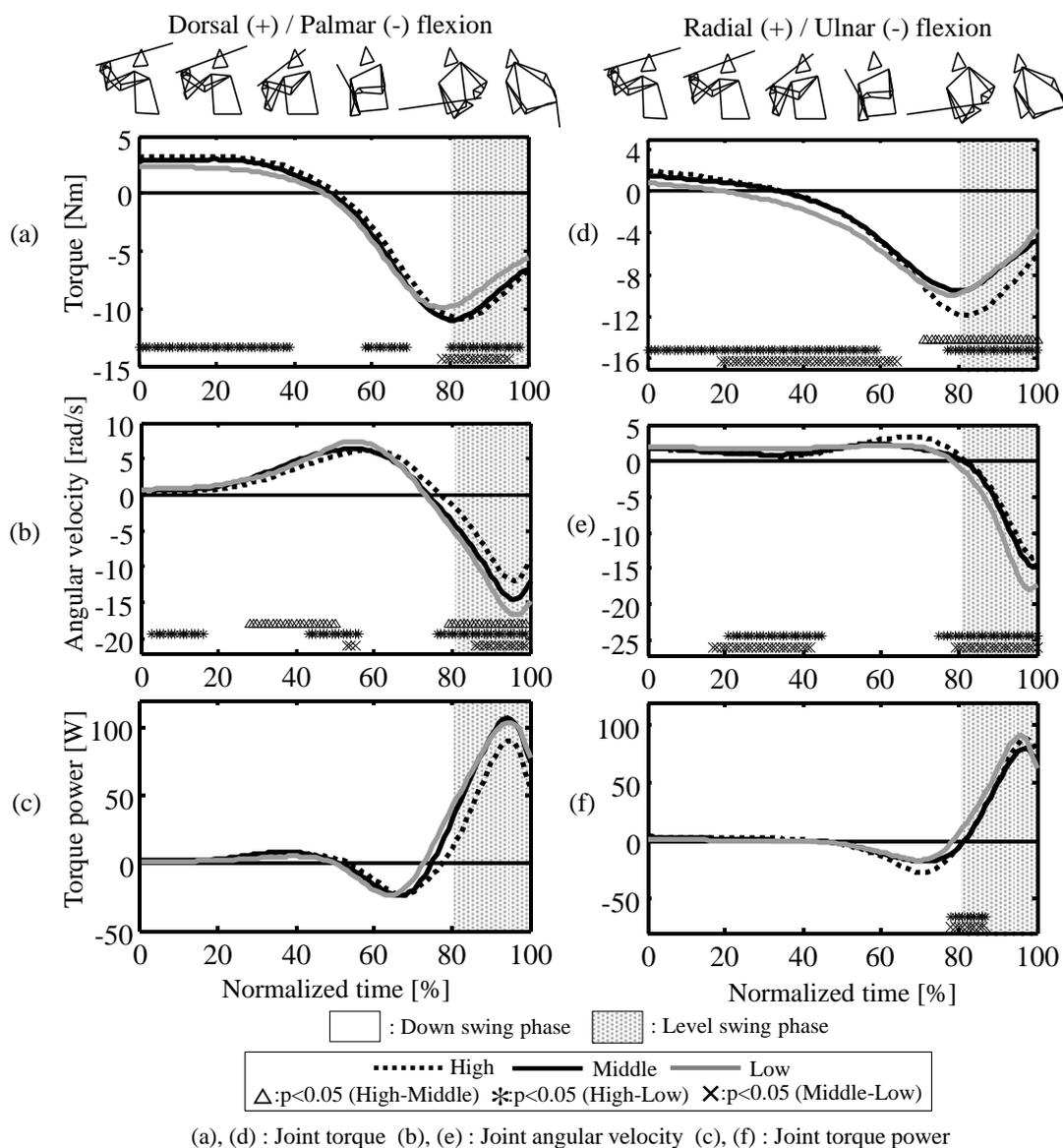
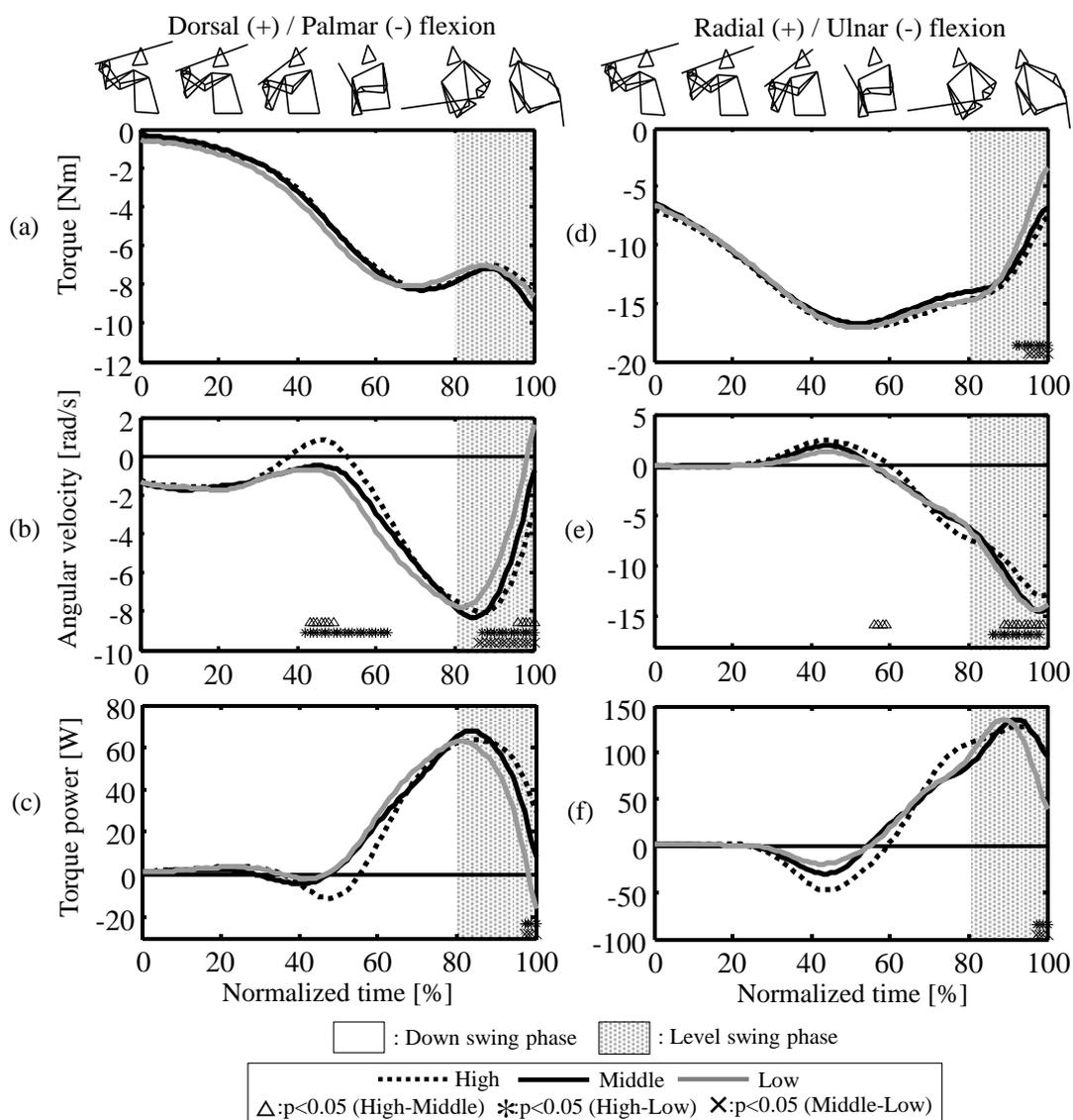


Figure 5-8 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the barrel-side wrist joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).



(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Figure 5-9 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the knob-side wrist joint in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事が有意に大きく ($sFE : H < M < L, p < 0.05$), また、打点が高い程、屈曲伸展トルクによる負仕事は有意に大きかった ($sFE : H > L, M > L, p < 0.05$). レベル・スウィング局面では打点が低い程、内外転トルクによる負仕事は有意に大きく ($sAA : H < M < L, p < 0.05$), 内外旋トルクによる仕事においては正および負仕事はみられ、正仕事は打点が低い程、有意に大きく ($sIER : H < L, p < 0.05$), 負仕事は打点が高い程、有意に大きかった ($sIER : H > L, p < 0.05$). 肘関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事は有意に大きかった ($eFE : H < L, M < L, p < 0.05$). また、レベル・スウィング局面では打点が高い程、屈曲伸展トルクによる正仕事は有意に大きかった ($eFE : H > M, H > L, p < 0.05$). 一方、回内外軸トルクによる負仕事もみられたものの、打点高間による有意な差はみられなかった. 手関節について、レベル・スウィング局面では打点が低い程、掌背屈トルクによる正仕事は大きかった ($wPDF : H < M, H < L, p < 0.05$).

Figure 5-10 (b) から、ノブ側上肢の肩関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事は有意に大きく ($sFE : H < L, p < 0.05$), また、打点が低い程、内外転トルクによる負仕事は有意に大きかった ($sAA : H < L, p < 0.05$). レベル・スウィング局面では打点が高い程、内外転トルクによる正仕事は有意に大きく ($sAA : H > L, p < 0.05$), また、打点が低い程、内外転トルクによる負仕事は有意に大きかった ($sAA : H < L, M < L, p < 0.05$). 肘関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、屈曲伸展トルクによる正仕事は有意に大きかった ($eFE : H < L, p < 0.05$). 手関節について、ダウン・スウィング局面では打点が低い程、掌背屈トルクによる正仕事は有意に大きく ($wPDF : H < L, p < 0.05$), また、打点が高い程、橈尺屈トルクによる負仕事は有意に大きかった ($wRU : H > M, H > L, p < 0.05$). レベル・スウィング局面では打点が高い程、掌背屈トルクによる正仕事は有意に大きかった ($wPDF : H > L, p < 0.05$).

なお、左右の肩関節には上胸部からの関節力が外力として作用されることとなる. この

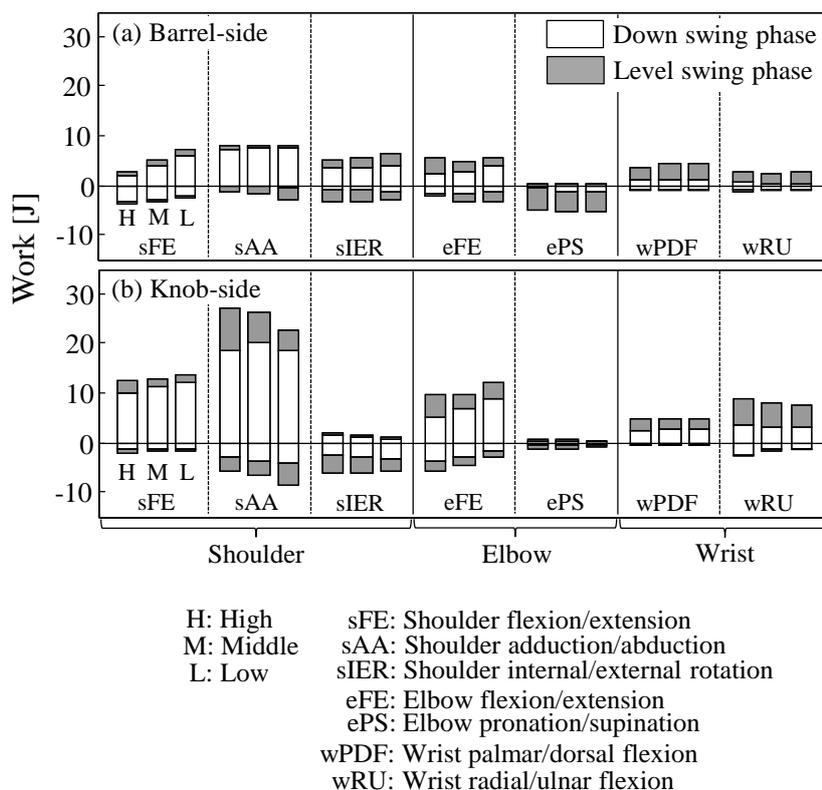


Figure 5-10 The mechanical works done by the upper limbs joint torque (shoulder, elbow, and wrist joint).

Table 5-1 The significant differences of the mechanical works done by the upper limbs joint torque among hitting-point height conditions.

	Down swing phase				Level swing phase			
	Barrel-side		Knob-side		Barrel-side		Knob-side	
	W_p	W_n	W_p	W_n	W_p	W_n	W_p	W_n
Shoulder	sFE	H<M<L, H>L, M>L	H<L	—	—	—	—	—
	sAA	—	H<L	—	H<L	H>M, H>L	H<M<L	H>L, H<L, M<L
	sIER	—	H<L	H>L	H<L	H<L, H>L	—	H>L
Elbow	eFE	H<L, M<L	—	H<L	H>L, M>L	H>M, H>L	H>L	—, —
	ePS	—	H<L, M<L	—	—	—	—	—, —
Wrist	wPDF	—	—	H<L	—	H<M, H<L	—	H>L, —
	wRU	—	—	—	H>M, H>L	—	H>L	—, —

Significant difference ($p < 0.05$)

H: High
M: Middle
L: Low
 W_p : Positive work
 W_n : Negative work

sFE: Shoulder flexion/extension
sAA: Shoulder adduction/abduction
sIER: Shoulder internal/external rotation
eFE: Elbow flexion/extension
ePS: Elbow pronation/supination
wPDF: Wrist palmar/dorsal flexion
wRU: Wrist radial/ulnar flexion

左右の肩関節力による力学的仕事については、打点高への調整には大きく関与しないことを確認していることから、本研究ではその記載を割愛する。

5.3.5 左右肩関節の静力学的なトルク

Figure 5-11 に、フォワード・スウィング期における左右の肩関節の屈曲伸展、内外転の各軸に関する打点高への対応に寄与する 3 成分による静力学的なトルクを示す。左列 ((a), (b)) がバレル側の屈曲伸展軸 (伸展: 正, 屈曲: 負), および内外転軸 (外転: 正, 内転: 負) の値を, 右列 ((c), (d)) がノブ側の値をそれぞれ示している (高: 点線・○, 中: 黒線・△, 低: 灰色線・□)。また, 打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している (高-中: △, 高-低: *, 中-低: ×)。

同図から, バレル側の肩関節の屈曲伸展軸 (a) について, 50% から 90% 付近にかけて低めおよび真中の打点高において伸展トルクが, 高めの打点高においては屈曲トルクが発揮され, 各打点高間に有意な差がみられた。つぎに, 内外転軸 (b) について, 特にインパクト近傍において打点が低い程, 屈曲トルクが有意に大きく, また, その値は逆動力学演算によるトルクに比べて顕著に小さかった。

ノブ側の肩関節の屈曲伸展軸 (c) について, 特に 80% からインパクトにかけて打点が低い程, 屈曲トルクが有意に大きく, 逆動力学演算によるトルクに比べて, その値は顕著に大きかった。つぎに, 内外転軸 (d) について, 20% からインパクトにかけて打点が低い程, 伸展トルクが有意に大きかったものの, 逆動力学演算によるトルクに比べて, その値は顕著に小さかった。

5.3.6 左右の肘および手関節の静力学的なトルク

Figure 5-12 に、フォワード・スウィング期における左右の肘関節の屈曲伸展、手関節の掌背屈および橈尺屈の各軸に関する打点高への対応に寄与する 3 成分による静力学的なト

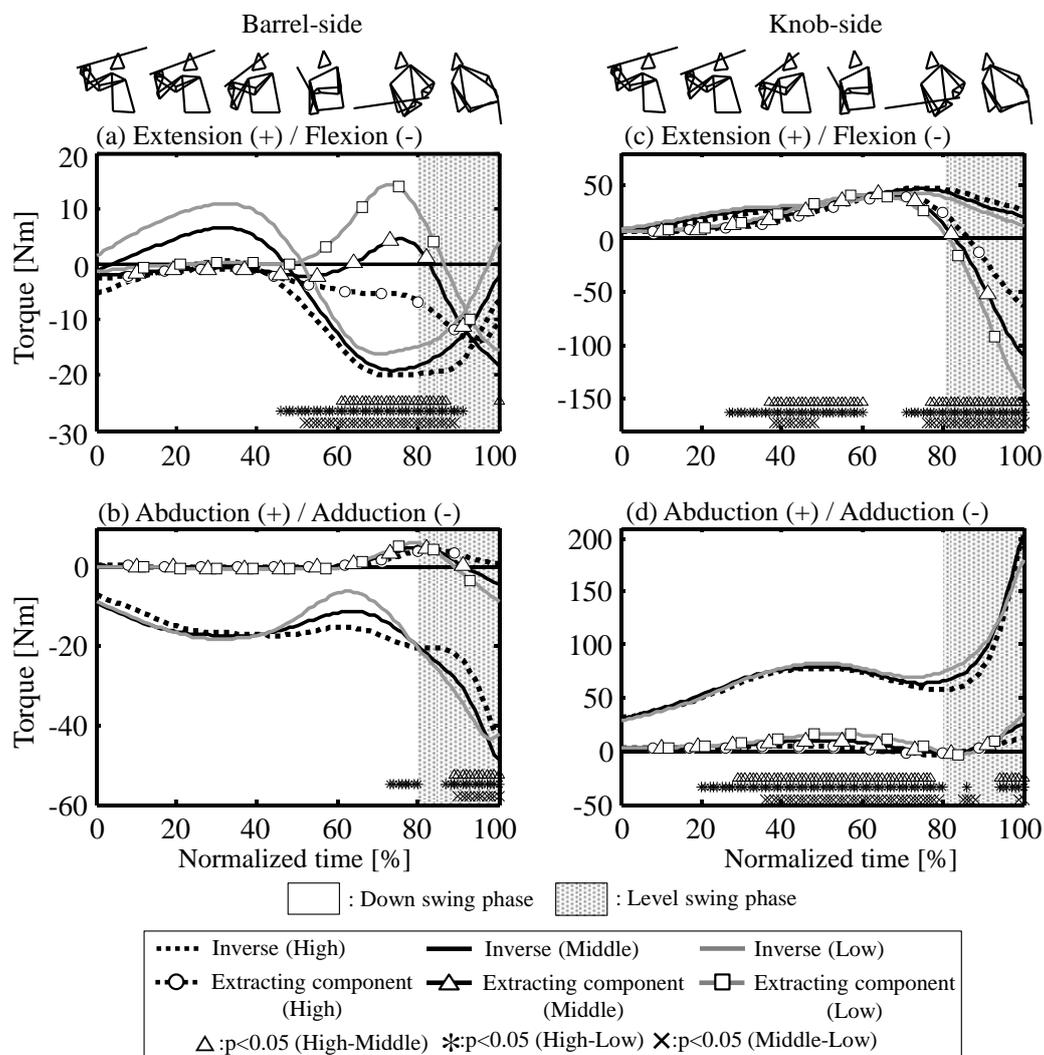


Figure 5-11 Curves of joint torques caused statically by the three components which mainly contribute to generate vertical motion of the bat head. The torques are about the flexion/extension and adduction/abduction axes of individual shoulder joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

ルクを示す。左列 ((a), (b), (c)) がバレル側の肘関節の屈曲伸展軸 (伸展: 正, 屈曲: 負), 手関節の掌背屈軸 (背屈: 正, 掌屈: 負), および橈尺屈軸 (橈屈: 正, 尺屈: 負) の値を, 右列 ((d), (e), (f)) がノブ側の各値をそれぞれ示している。なお, 図内の各線および各印の仕様は, Figure 5-11 と同様である。

同図から, バレル側の肘および手関節について, 肘関節の屈曲伸展軸 (a) では, 特に 40% から 80% 付近にかけて打点が低い程, 伸展トルクが有意に大きく, 80% 以降からインパクトにかけては打点が低い程, 屈曲トルクが有意に大きく, 10% 付近から主に高めと低めとの間, および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。また, 特にスウィング開始から 80% にかけて, 静力学的なトルクは逆動力学演算によるトルクと同様な波形パターンを示していた。手関節の掌背屈 (b) では, 60% からインパクトにかけて高めおよび真中の打点高において打点が高い程, 掌屈トルクが大きかったのに対して, 低めの打点高においては背屈トルクがみられた。そして, 逆動力学演算によるトルクに比べて, 静力学的なトルクは小さかったものの, 主に 60% 以降においては各打点高間に有意な差がみられた。手関節の橈尺屈軸 (c) では, 50% から 80% 付近にかけて打点が低い程, 尺屈トルクが有意に大きく, その後, 特に真中および低めの打点高においては小さな橈屈トルクがみられた。

ノブ側の肘および手関節について, 肘関節の屈曲伸展軸 (d) では, 30% から 80% 付近にかけて打点が低い程, 伸展トルクが有意に大きく, その後, インパクト近傍では打点が低い程, 屈曲トルクが有意に大きかった。手関節の掌背屈軸 (e) では, 主に 80% 以降において打点が低い程, 背屈トルクが増大しながらインパクトを迎えていた。逆動力学演算によるトルクに比べて, 静力学的なトルクは顕著に大きく, インパクト近傍においては各打点高間に有意な差がみられた。手関節の橈尺屈軸 (f) では, 特に 80% からインパクトにかけて打点が低い程, 橈屈トルクが有意に大きく, フォワード・スウィング期の大半において, 主に高めと低めとの間, および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。しかしながら, 逆動力学演算によるトルクに比べて, 静力学的なトルクは顕著に小さかった。

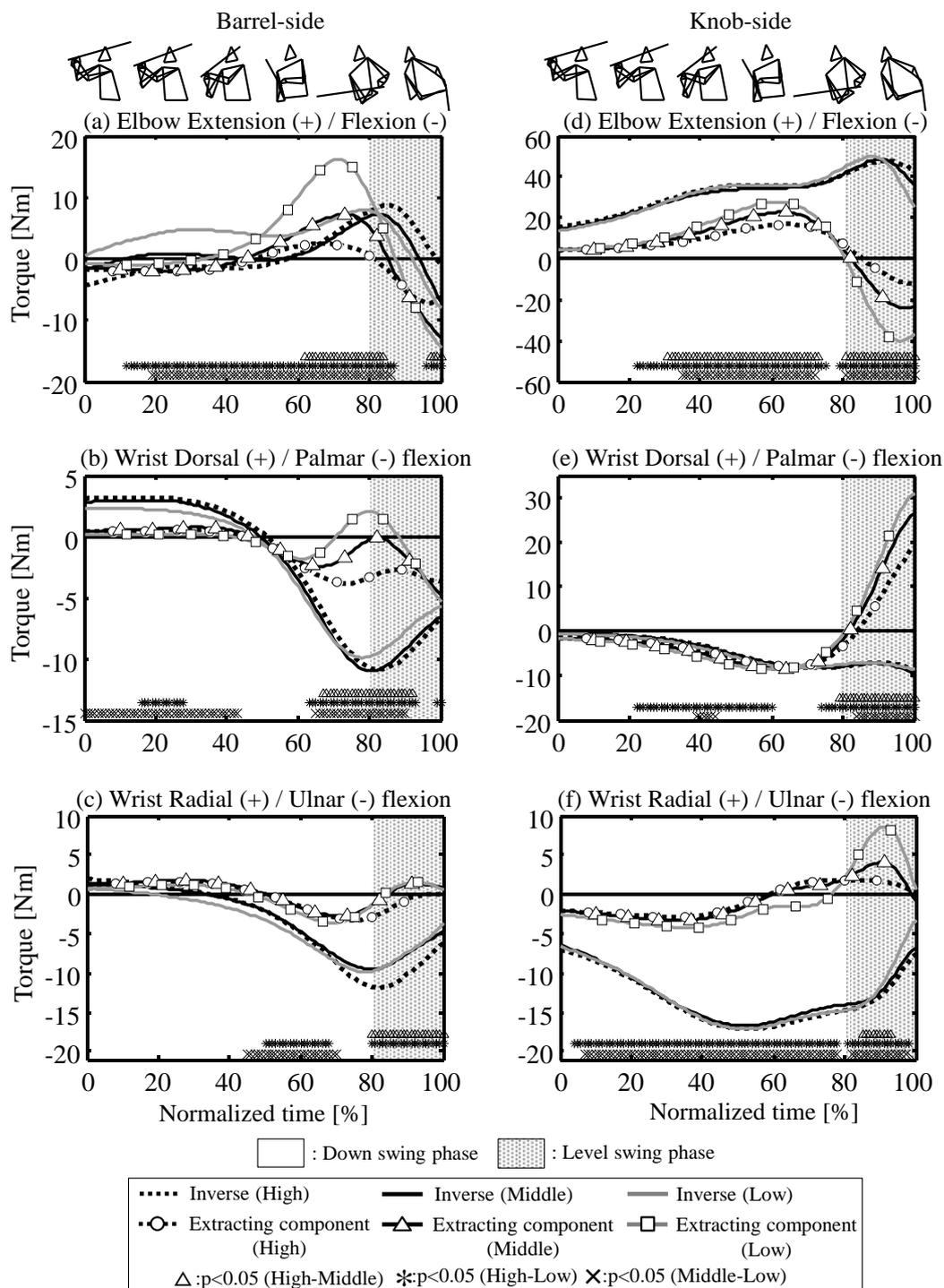


Figure 5-12 Curves of joint torques caused statically by the three components which mainly contribute to generate vertical motion of the bat head. The torques are about the flexion/extension axis of the individual elbow joints, the palmar/dorsal flexion and radial/ulnar flexion axes of the individual wrist joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

5.4 考察

第4章において、左右各手のキネティクスの変量のうち、バット長軸方向作用力の鉛直成分、バット起し倒し軸まわりの作用モーメント、およびこの軸まわりのモーメントとして作用する左右各手の偶力成分が、異なる打点高に対するバットの操作に寄与することが明らかとなった。本章では、これらバットの打点高調整に寄与する左右各手のキネティクスと、上肢関節の各軸まわりのキネティクスとを関連づけて検討を行うことよって、打点高に対応するための上肢関節の役割を明らかにする。

5.4.1 打点高の違いに対応するための肩関節の役割

1) バレル側の肩関節について

屈曲伸展軸について、関節トルクでは、0%から50%付近にかけて打点が低い程、伸展トルクが大きく、伸展角速度および正のトルクパワーも有意に大きかった (Figure 5-4 (a), (b), (c))。また、特にダウン・スウィング局面において打点が低い程、正仕事が有意に大きかった (Figure 5-10, Table 5-1)。ここで、第4章における左右各手のキネティクスについて、ダウン・スウィング局面において打点が低い程、左右各手によるバット長軸方向作用力、およびその鉛直成分による仕事がともに大きいこと (Figure 4-4 (b), Table 4-2, Figure 4-6)、そして、ダウン・スウィング局面前半において、バット長軸の傾斜角が正に大きくなること、すなわちバット・ヘッドがノブに対して、より上方に位置すること (Figure 4-2 (a)) が明らかとなっている。したがって、主にダウン・スウィング局面前半において打点が低い程、伸展トルク、ならびに正のトルクパワーを増大させることによって、バット重心、そして上肢の両方を鉛直下方へと加速させていると考えられる。

その一方で、打点高への対応に寄与する各関節の働きをより詳細に評価するために、第4章においてバットの打点高調整に寄与する3成分 (バット長軸力の鉛直成分、偶力のバット起し倒し軸まわり成分、作用モーメントのバット起し倒し軸まわり成分) に起因する静

力学的な屈曲伸展トルクを算出した。その結果、0%から50%付近にかけて屈曲伸展トルクは小さく、50%から90%付近にかけては打点高間による差がみられた (Figure 5-11 (a))。このため、静力学的に算出した屈曲伸展トルクの結果から、スウィング開始から50%付近にかけて、屈曲伸展トルクは上肢を下方へと変位させるための慣性力、あるいはバット長軸力の鉛直成分以外の成分を生成することに寄与すると考えられる。これに対して、50%以降にかけては、結果的に逆動力学演算による屈曲伸展トルクにおいては打点高間による差が顕著に表れにくいものの、その発揮されたトルク成分にはバットの打点高調整に対する働きもあることが示唆される。

内外転軸について、関節トルクでは、特に60%付近において打点が高い程、内転トルクが有意に大きかった (Figure 5-4 (d))。関節トルクパワーでは、20%から50%付近にかけては正のトルクパワーがみられ、80%以降にかけては打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きかった (Figure 5-4 (f))。また、屈曲伸展軸と同様に、ダウン・スウィング局面において打点が低い程、正仕事が有意に大きかった (Figure 5-10, Table 5-1)。ここで、ダウン・スウィング局面において、バレル側の肩関節外転角は、打点が低い程、やや大きく、スウィング開始時点から時間の経過により減少し、80%付近においては、いずれの打点高でも10度程度となっていた (Figure 5-13 (a))。このことは、ダウン・スウィング局面において、バッターが肩関節の外転角を小さくする動作、いわゆる脇を閉める動作を行っていることを意味している (川村ら, 2008)。すなわち、主にダウン・スウィング局面前半において打点が低い程、内転トルク、そして正のトルクパワーを増大させることによって、指導現場ではインサイド・アウトと表現されるスウィングを行うための脇を閉める動作を行っていると考えられる (土橋ら, 2009; 斎藤, 2011; 高橋, 2011)。これに対してレベル・スウィング局面では、インパクトに近づくにつれて打点が低い程、内転トルクによる負のトルクパワーが増大していた。ここで、バット・ヘッドスピードについては打点が低い程、その値は大きくなり (Table 4-1)、バット長軸力については、ノブ側手ほどではないものの、バ

レベル側手のバット長軸力は大きかった (Figure 4-4 (b), Table 4-2). なお, このバット長軸力は, バットのグリップエンドを中心とした回転運動を行うことによって発生する遠心力に抗する力である. そして, バットの打点高調整に寄与する 3 成分に起因する静力学的な内外転トルクについてみると, 逆動力学演算によるトルクに比べてその値は顕著に小さかった (Figure 5-11 (b)). このため, 内外転動作は, 主にバット重心の水平変位の獲得に寄与すること, および打点が低い程, 内転トルクによる負のトルクパワーが大きかったことを考慮すると, レベル・スウィング局面における内転トルクは打点が低い程, 大きくなるバットの遠心力に抗するために上腕の外転を抑制させつつ, バット長軸力を生成することに寄与すると考えられる.

内外旋軸について, 関節トルクでは, 主に 60%から 90%付近にかけて打点が低い程, 内旋トルクが有意に大きかった (Figure 5-4 (g)). 関節角速度では, スウィング開始から 40%付近にかけて外旋角速度がみられ, 40%から 90%付近にかけては内旋角速度がみられた後, インパクト付近において, 再度, 外旋角速度がみられた (Figure 5-4 (h)). 関節トルクパワーでは, 特にインパクト近傍において高めおよび真中の打点高における負のトルクパワーが有意に大きかった (Figure 5-4 (i)). ここで, レベル・スウィング局面における内外旋動作は, 内外転動作と同様に, 上腕を体幹に近づけて脇を閉めるような動作となることから, バットの水平変位の獲得に寄与すると考えられる. これらのことから, 同局面における内旋トルクは, 特に高めおよび真中の打点高において, 内外転トルクの働きと同様にバット長軸力の生成に寄与すると推察される.

2) ノブ側の肩関節について

屈曲伸展軸について, 関節トルクでは, フォワード・スウィング期において伸展トルクのみが発揮され, 80%から 100%にかけて打点が高い程, その値は有意に大きかった (Figure 5-5 (a)). 関節トルクパワーでは, 20%から 50%付近にかけて打点が低い程, 正のトルクパ

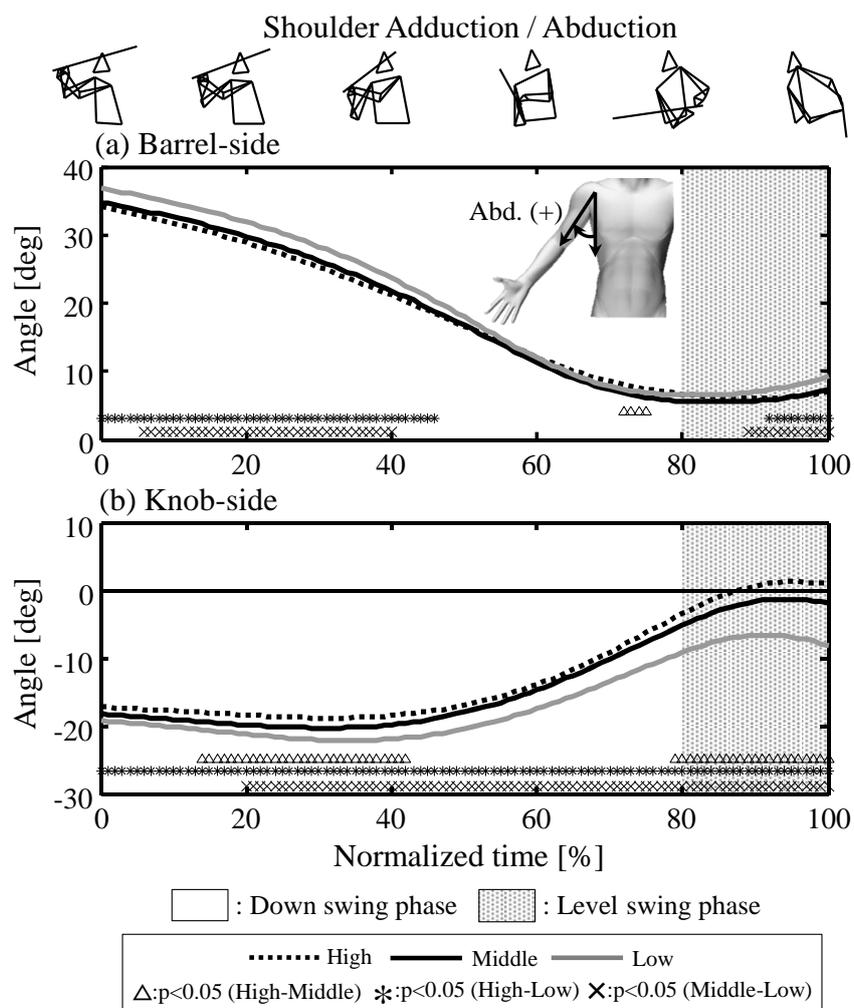


Figure 5-13 Curves of joint angles of the adduction/abduction axis of the individual shoulder joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

ワーが有意に大きかった (Figure 5-5 (c)). このように主にダウン・スウィング局面では、バレル側の肩関節の屈曲伸展軸と同様に、伸展トルクおよび正のトルクパワーがみられた。これらの結果から、ダウン・スウィング局面前半においては、バレル側の肩関節の屈曲伸展トルクの役割と同様に、ノブ側の肩関節の屈曲伸展軸では、打点が低い程、伸展トルク、そして正のトルクパワーを増大させて、バット重心、そして上肢を鉛直下方へと加速させていると考えられる。加えて、特にダウン・スウィング局面では、バレル側手に比べてノブ側手によるバット長軸力の鉛直成分が打点高への対応に大きく寄与すること (Figure 4-4 (b), Figure 4-6 (a)) から、屈曲伸展トルクは、バレル側の肩関節の屈曲伸展トルクよりも打点高への対応に大きく寄与することが示唆される。その後、ダウン・スウィング局面の後半からレベル・スウィング局面の初期において、伸展トルクには打点高間による差が顕著にみられたのに対して、伸展角速度は 0 rad/s に近く、トルクパワーにも顕著な差はみられなかった。ここで、川村ら (2008) は、肩関節の角度変化が小さいことから、体幹の回転動作に比べてバットの加速に対する肩関節の角変位による貢献は小さいと報告している。その一方で、田子ら (2006a) は、特に打点が高い場合には、インパクト近傍ではノブ側肩関節の屈曲角度が小さくなると報告している。これらのことを考慮すると、ダウン・スウィング局面後半からレベル・スウィング局面の初期においては、ノブ側の肩関節の屈曲伸展トルクを打点高に応じて変化させることによって、関節角度変化の範囲は小さいものの、屈曲伸展動作を抑制し、屈曲伸展角度を保っていたと考えられる。

内外転軸について、関節トルクでは、フォワード・スウィング期において外転トルクのみが発揮され、70%付近以降において打点高間に有意な差がみられた (Figure 5-5 (d)). 関節トルクパワーでは、特に 90%付近以降において打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きくなり、インパクト直前では、特に低めの打点高において約-300 Wであった (Figure 5-5 (f)). また、この内外転軸においてはトルクおよび仕事は他の軸よりも大きかった (Figure 5-5 (d), Figure 5-10, Table 5-1). 小池ら (2003, 2006), は、バット・スウィング動作にお

けるノブ側上肢の関節トルクは、主にバットを加速させること、そして、インパクト付近ではバットの遠心力に抗してバットを身体近傍に留めることに寄与すると報告している。本研究においても打点が低い程、バット・ヘッドスピードは大きくなること(高め:34.9 m/s, 真中:35.8 m/s, 低め:36.2 m/s, $H>M>L$, $p<0.05$, Table 4-1), 内外転トルクは他の関節軸トルクの値と比べて顕著に大きいこと、そして、特にインパクト付近においては、外転トルクおよび負のトルクパワーが増大していたことに加えて、内転角度の変化が緩やかになり (Figure 5-13 (b)), 関節角速度も減少していた (Figure 5-5 (e)). 先行研究の報告と同様に、ノブ側の肩関節の内外転トルクは、バットの遠心力に抗するバット長軸力を生成し、また、バットを身体近傍に留めることに寄与すると考えられる。

他方、特にダウン・スウィング局面において、第 4 章の結果からノブ側手が打点高への対応に大きく寄与することが明らかとなっているのに対して、内外転トルク、トルクパワーおよび仕事には、打点高間による顕著な差はみられなかった。そこで、打点高への対応に寄与する 3 成分に起因する静力学的な内外転トルクについてみると、内外転トルクは、主にダウン・スウィング局面中盤以降にかけて打点高間による顕著な差がみられた (Figure 5-11 (d)). このことから、逆動力学演算により算出された内外転トルクでは、上述の先行研究 (小池ら, 2003, 2006) において言及されているように、ヘッドスピードの生成に寄与する成分が支配的であるため、打点高の違いに対応するためのバット操作に寄与するトルクによる差異がみられにくくなっていると考えられる。

内外旋軸について、外旋トルクのみがみられたものの、屈曲伸展および内外転トルクおよび仕事と比べてその値は小さかった (Figure 5-5 (g), Figure 5-10, Table 5-1). このため、この内外旋動作は、ノブ側肩関節の屈曲伸展および内外転動作に比べて打点高への対応に大きくは寄与しないことが示唆される。

5.4.2 打点高の違いに対応するための肘関節の役割

左右の肘関節の回内外軸について、トルク発揮が他の軸と比較して顕著に小さく (Figure 5-6 (d), Figure 5-7 (d)), また、バレル側の肘関節の回内外軸では、インパクト直前において負のトルクパワーおよび負仕事が大きかったものの、打点高間に有意な差がみられなかった (Table 5-1). ここで、第4章におけるバットのボール打撃部位の鉛直変位について、バットの回転による変位は小さかったこと (Figure 4-3) から、バットのグリップ部を中心としてバットの回転運動に寄与する肘関節の回内外動作は、打点高への対応に大きくは寄与しないと推測される. したがって、本研究では左右の肘関節の屈曲伸展のみについて考察を行う.

1) バレル側の肘関節について

屈曲伸展軸について、関節トルクでは、30%から75%にかけて打点が低い程、伸展トルクが有意に大きかった (Figure 5-6 (a)). 関節角速度では、40%以降において打点が低い程、伸展角速度が有意に大きかった (Figure 5-6 (b)). 関節トルクパワーでは、50%付近から打点が低い程、正のトルクパワーの立ち上がりのタイミングが早く、インパクト直前では、主に真中および低めの打点高において、負のトルクパワーを示していた (Figure 5-6 (c)). そして仕事では、主にレベル・スウィング局面において打点が高い程、正仕事が有意に大きかった (Figure 5-10, Table 5-1). これらの結果から、特にダウン・スウィング局面前半において、屈曲伸展軸では、打点高の違いに応じて発揮トルクの大きさを変化させることによって、Figure 5-14 (a) の屈曲伸展角度の変化からもわかるように、打点高によらず関節角度の変化を小さくし、伸展角を維持しようとしていたと考えられる. このように、ダウン・スウィング局面前半において肘関節の伸展角度を維持しようとするのは、身体の近傍にバットを留めてバット操作を行いやすくして、左右の肩関節の屈曲伸展トルクがバットを鉛直下方へと加速させることに繋がると考えられる. その後、50%から90%付近にかけて、特に低めの打点高の場合には、正のトルクパワーの増大するタイミングが他の打点高の場

合よりも早かった。ここで、上述したようにノブ側の肩関節の屈曲伸展および内外転軸に比べて、バレル側の肩関節の屈曲伸展および内外転の各軸におけるトルクおよびトルクパワーでは打点高間の差が顕著にみられた。川村ら（2000）は、ハンマー投げのように体幹を軸とする回転運動が支配的な場合であれば、肘関節は常に伸展位を保つことになるのに対して、野球の打撃動作では、バットを押し出すためにスウィング中に両肘関節を伸展させる必要があると報告している。さらに田子ら（2006a）は、打点が低い程、バレル側の肘関節の伸展角度を大きくして、上肢をボール打撃方向（センター方向）へと伸ばしながらインパクトを迎えていたと報告しており、本研究においても、肘関節の屈曲伸展角度は同様な傾向を示した（Figure 5-14 (b)）。これらのことから、50%以降においてバレル側の肘関節では、伸展トルク、そして正のトルクパワーを増大させて、各打点位置へとバットを変位させる働きがあり、特に低めの打点高の場合には、その働きが他の打点高よりも顕著であったといえる。加えて、静力学的な屈曲伸展トルクは、スウィング開始からインパクトにかけて逆動力学演算により算出されたトルクとほぼ同様な波形パターンを示し、打点高間による差も顕著にみられた（Figure 5-12 (a)）。このため、逆動力学演算により算出された屈曲伸展トルクは、バットの打点高調整に寄与するキネティクスの変量の生成に寄与することも示唆される。その一方で、インパクト近傍では、特に真中および低めの打点高において負のトルクパワーがみられたことから、打点が低い程、肘関節の過伸展を抑制するような働きもあることが示唆される。

2) ノブ側の肘関節について

屈曲伸展軸について、関節トルクでは、フォワード・スウィング期において伸展トルクのみが発揮されており、打点高間に顕著な差はみられなかった（Figure 5-6 (a)）。これに対して、関節角速度およびトルクパワーでは、ダウン・スウィング局面において打点が低い程、主に伸展の角速度および正のトルクパワー値が有意に大きかった（Figure 5-6 (b), (c)）。

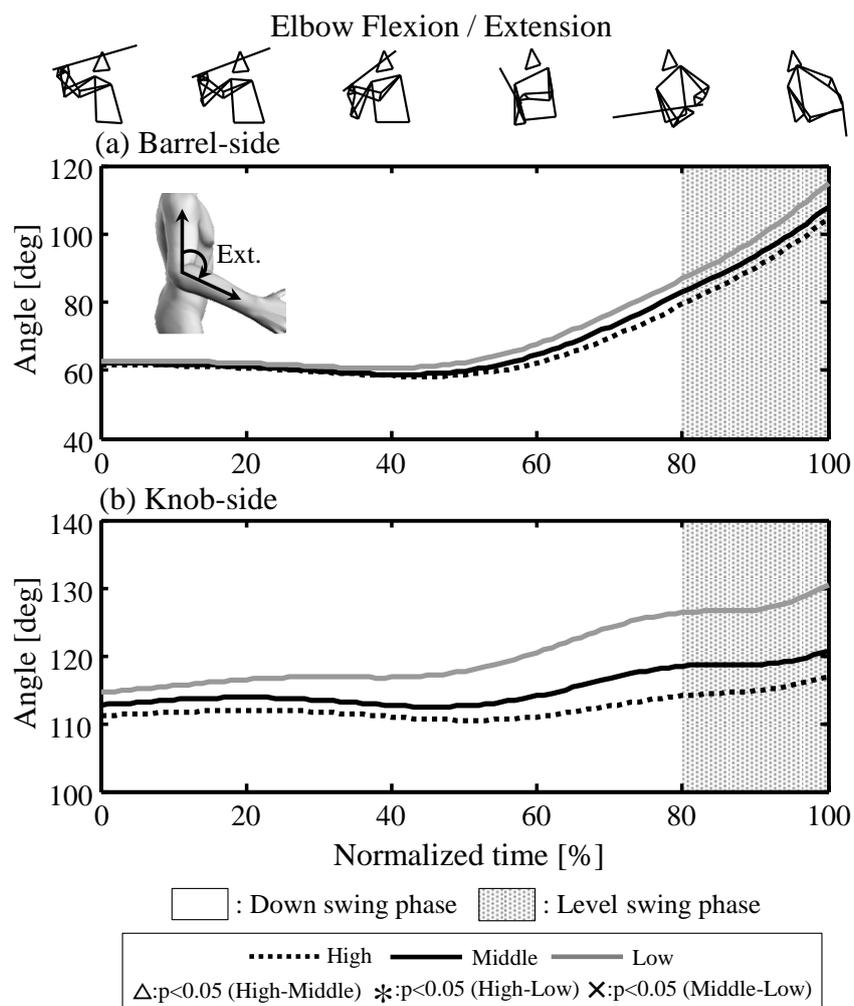


Figure 5-14 Curves of joint angles of the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

ただし、ダウン・スウィング局面における伸展トルクは大きいものの、打点高の違いによる差はみられず、また同軸の角速度については、打点高間において差がみられはしたものの、その値はとても小さかった。また、Figure 5-14 (b) 屈曲伸展角度の変化からもわかるように、スウィング開始からインパクトにかけて打点が低い程、伸展角が大きかった。このため、ノブ側の肘関節の屈曲伸展軸では、バレル側の肘関節の屈曲伸展トルクにおける打点高対応への働きと同様に、関節角度を維持することによって、バットの鉛直変位の獲得に対して補助的な働きをされると考えられる。加えて、打点高間において屈曲伸展トルクがほぼ同様であっても、関節角度および関節角速度に違いがあることによって、関節トルクパワーの立ち上がりのタイミング、およびその値に影響を及ぼすと推測される。また、80%付近以降においては伸展角速度の減少によるトルクパワーの一時的な減少がみられた後、打点が低い程、伸展トルクによる正のトルクパワーが急激に増大していた。静力学的な屈曲伸展トルクにおいては、特にインパクト近傍では打点が低い程、屈曲トルクが有意に大きかった (Figure 5-12 (d))。先行研究では、上述した肩関節の角度変化と同様にノブ側の肘関節の屈曲伸展角度の変化も小さいことから、バットの加速に対する角変位による貢献は小さいと報告 (川村ら, 2008) されている。その一方で、インパクト付近におけるノブ側上肢の役割は、バット・ヘッドを加速させることであると報告 (小池ら, 2003, 2006) もされている。これらのことから、レベル・スウィング局面において、打点高の違いによらず屈曲伸展角度の変化が小さく、また、関節角度を維持することは、バットのノブ側手を支点としてバレル側の肘関節伸展トルクによってバット・ヘッドを打撃方向へと押し出し易くすることに寄与した後、打点が低い程、ノブ側の肘関節の屈曲伸展トルクパワーを増大させることは、インパクトに向けてのバット・ヘッドの加速に寄与すると推測される。

5.4.3 打点高の違いに対応するための手関節の役割

1) バレル側の手関節について

掌背屈軸について、関節トルクでは、40%以降において掌屈トルクがみられ、主に 80% からインパクトにかけて打点が高い程、掌屈トルクが有意に大きかった (Figure 5-8 (a)). 関節角速度では、特にインパクト近傍において打点が低い程、掌屈角速度が有意に大きく、関節トルクパワーでは、正のトルクパワーが増大した後、減少してインパクトを迎えていた (Figure 5-8 (b), (c)). また、レベル・スウィング局面において打点が低い程、正仕事が有意に大きかった (Figure 5-10, Table 5-1). ここで、川村ら (2001, 2008) は、バットの加速に対して、手関節では主に橈尺屈動作が寄与すると報告している. その一方で、本研究では、特にインパクト直前において掌屈トルクによる正のトルクパワーが増大していた. そこで、静力学的に算出した掌背屈トルクについてみると、主に 60%付近以降において各打点高間に有意な差がみられたものの、逆動力学演算によるトルクと比べてその値は小さかった (Figure 5-12 (b)). すなわち、逆動力学演算による掌屈トルクの生成要因が、主にバットの水平変位の獲得に寄与する成分であることを示す. これらのことから、この掌屈トルクは主にバットの水平変位の獲得に寄与すると考えられる.

橈尺屈軸について、関節トルクでは、20%から 30%付近にかけて各打点高において尺屈トルクが生じ、70%付近からは特に高めの打点高において尺屈トルクが有意に大きかった (Figure 5-8 (d)). 関節角速度では、主に 80%以降において打点が低い程、尺屈角速度が有意に大きく (Figure 5-8 (e)), 関節トルクパワーでは、主に 80%付近において打点が高い程、負のトルクパワーが有意に大きくなり、それ以降からは急激に正のトルクパワーが増大し、90%付近において打点が低い程、正のトルクパワーが大きくなる傾向がみられた (Figure 5-8 (f)). バットの鉛直変位に寄与する 3 成分から静力学的に算出した橈尺屈トルクは、主に 50%付近以降において打点高間に有意な差がみられたものの、その値は小さかった (Figure 5-12 (c)). 他方、この 3 成分以外、すなわち主にバットの水平変位の獲得に寄与すると考えられるキネティクスの変量から算出した静力学的な橈尺屈トルクは、逆動力学演算によって算出されたトルクとほぼ同様な波形であった (図については割愛). これらのことから、

フォワード・スウィング中盤からインパクトにかけて、バレル側手関節の橈尺屈の働きは、尺屈トルクを発揮することにより、正のトルクパワーを増大させて、打点高の調整ではなく、主にバットの水平変位の獲得、すなわちバット・ヘッドスピードの生成に寄与することと考えられる。

2) ノブ側の手関節について

掌背屈軸について、関節トルクでは、インパクトに近づくにつれて掌屈トルクが増大していたものの、打点高間に顕著な差はみられなかった (Figure 5-9 (a))。関節角速度では、40%から80%付近にかけて掌屈の角速度、および正のトルクパワーが増大していた (Figure 5-9 (b), (c))。ここで、掌屈トルクに打点高間による顕著な差はみられなかったことから、掌屈トルクは、打点高によらずバット・ヘッドスピードの生成に寄与すると考えられる。その一方で、静力学的に算出した掌背屈トルクは、特にインパクト近傍において、逆動力学演算から得た掌背屈トルクに比べて顕著に大きく、打点高間に有意な差がみられた (Figure 5-12 (e))。このように打点高への対応に寄与する3成分による静力学的に算出したトルクが大きくなるのに対して、逆動力学演算によるトルクが小さいことは、バットの水平変位の獲得に寄与する成分による静力学的なトルクが、打点高への対応に寄与する3成分による静力学的なトルクを打ち消すように、大きくなっていることを示している。したがって、ノブ側の手関節の掌屈トルクはバットの鉛直および水平変位の獲得の両方に寄与することが示唆される。

橈尺屈軸について、関節トルクでは、尺屈トルクのみが発揮され、特にインパクト付近において打点高間に有意な差がみられた (Figure 5-9 (d))。関節トルクパワーでは、60%付近以降にかけて各打点高ともに正のトルクパワーがみられた (Figure 5-9 (f))。加えて、静力学的に算出した橈尺屈トルクについては、各打点高間に有意な差がみられるものの、逆動力学演算による橈尺屈トルクに比べてその値は小さかった (Figure 5-12 (f))。すなわち、

逆動力学演算による橈尺屈トルクは、打点高への対応に寄与する3成分を除いた、バットの水平変位の獲得に寄与するバットのキネティクス的変量、および各セグメントの慣性力に起因するトルクであるといえる。Mcintyre and Pfautsch (1982) は、ライトあるいはレフト方向へと打球を打ち分ける際、ノブ側の肘関節および手関節の動作調整がバットの姿勢を変化させると報告している。これらのことから、ノブ側の手関節の橈尺屈トルクは、バレル側の手関節トルクと同様に、主にバットの水平変位の獲得に寄与すると考えられる。また、ノブ側の手関節の尺屈トルクは、バレル側の手関節の尺屈トルクに比べて、スウィング開始からより早いタイミングにおいて、この尺屈トルクが顕著にみられた。したがって、ノブ側の手関節は、スウィング開始以降の早期にバット操作に関与することも示唆される。

他方、ノブ側の手関節を含めた左右の手関節では、肩および肘関節に比べて、その関節軸から各手におけるバット作用力の作用点までの距離が短く、そのモーメントアームも短くなることから、特にノブ側の手関節では、肩および肘関節のトルク発揮によって生成された力学的エネルギーをバットへと伝達する働きもあると考えられる。

5.4.4 局面毎の左右上肢関節の役割

ここでは、5.4.1 から 5.4.3 の考察に基づき、フォワード・スウィングにおける打点高に対応する際の局面毎の左右上肢関節の役割についてまとめる。まずスウィング開始から 80% 付近までのダウン・スウィング局面では、特に両肩関節の屈曲伸展トルクはバットの鉛直下方への加速に大きく寄与すると考えられる。また、バレル側の肩関節の内外転トルク、および両肘関節の屈曲伸展トルクは、関節角度の維持あるいは調整に寄与することによって、両肩関節の屈曲伸展トルクによるバットの鉛直下方への加速を行いやすくしていると考えられる。

つぎに、80% 付近以降からインパクトまでのレベル・スウィング局面では、いずれの関節

においても、インパクトに向けて関節トルクの発揮および関節トルクパワーが増大する傾向がみられた。とりわけノブ側の肩関節の内外転トルクが顕著に大きくなることから、このトルクが、バレル側の肩関節の内外転および内外旋トルクとともに、バットの遠心力に抗するためのバット長軸力の生成に寄与すると考えられる。また、これらの両肩関節トルク以外にも、両肘関節の屈曲伸展トルク、そして両手関節の掌背屈および橈尺屈トルクは、バットの水平変位の獲得、そして、バット・ヘッドスピード生成には寄与するものの、バットの鉛直変位の獲得に対しては、ダウン・スウィング局面ほど大きくは寄与しないと考えられる。

野球の打撃動作、テニスのフォアハンドストローク、およびゴルフ動作の筋活動に関する研究 (Kitzman, 1963 ; 平野, 1984, 1993 ; Jobe et al., 1989 ; Morris et al., 1989) において、スウィング開始直後では、主に体幹および肩関節まわりの筋群の活動が、インパクト直前では、体幹および肩関節まわりの筋群に加えて、主に手関節まわりの筋群の活動が顕著になると報告されている。すなわち、上肢の末端部を加速させるには身体の近位から遠位へと動作が順次行われることが有効であるといえる。したがって、スウィング開始直後では、身体の近位となる肩関節トルクによって主に打点高への対応を行い、インパクト直前では、打点高に関係なく、肘および手関節トルクによってバット・ヘッドスピードの生成を行うことが有効であると考えられる。

5.5 要約

本章の目的は、異なる打点高条件に対するティー打撃動作における左右の上肢関節のキネティクスの分析から、異なる打点高に対応するための上肢関節の役割について明らかにすることであった。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① バレル側の肩関節について、まずダウン・スウィング局面前半において打点が低い程、伸展および内転トルク、そして正のトルクパワーが有意に大きかった。つぎに同局面

後半において打点が高い程，内転トルクが有意に大きかった．他方，レベル・スウィング局面では，インパクト近傍において打点が低い程，内転トルクによる負のトルクパワーが有意に大きかった．

- ② ノブ側の肩関節について，ダウン・スウィング局面前半において打点が低い程，伸展トルクによる正のトルクパワーが有意に大きかった．そして，レベル・スウィング局面においては打点が高い程，伸展トルクが有意に大きく，特にインパクト近傍において打点が低い程，外転トルクによる負のトルクパワーが有意に大きかった．
- ③ 肘関節について，まずダウン・スウィング局面では打点が低い程，バレル側の屈曲伸展軸において主に伸展トルクが有意に大きく，また，ノブ側の屈曲伸展軸においては伸展トルクによる正のトルクパワーが有意に大きかった．つぎにレベル・スウィング局面では，バレル側の屈曲伸展軸において高めの打点高における伸展トルクによる正のトルクパワーが，真中および低めの打点高におけるパワーに対して，有意に大きかった．
- ④ 手関節について，特にバレル側手関節において打点高間による差がみられ，まずダウン・スウィング局面後半では打点が低い程，掌屈トルクが有意に大きく，また打点が高い程，尺屈トルクが有意に大きかった．つぎにレベル・スウィング局面前半では打点が低い程，掌屈および尺屈トルクによる正のトルクパワーが有意に大きかった．
- ⑤ 関節トルクによる力学的仕事について，左右の上肢ともに肩関節の屈曲伸展軸および内外転軸，ならびに肘関節の屈曲伸展軸では，発揮される仕事は顕著に大きく，且つ打点高間に有意な差がみられた．

以上のことから，異なる打点高への対応について，ダウン・スウィング局面では，両肩関節の屈曲伸展トルクがバットおよび上肢を鉛直変位させることに大きく寄与し，バレル側の肩関節の内外転および両肘関節の屈曲伸展トルクは，関節角度を調整あるいは維持することによって，身体の近傍にバットを留めてバット操作を行い易くするとともに，左右

の肩関節の屈曲伸展トルクによってバットを鉛直下方へと変位させることに寄与すると考えられる。レベル・スウィング局面では、打点が低い程、両肩関節の内外転トルクがバット長軸力の生成に大きく寄与し、特にノブ側の上肢関節トルクは打点が低い程、バット・ヘッドスピード獲得に大きく寄与すると考えられる。また、左右の上肢関節において、概ね打点が低い程、関節トルク、関節トルクパワー、および関節トルクによる総仕事が大きくなることから、時間的拘束条件の伴う飛来球打撃における低めの打点高では、バット操作に対して各関節トルクの短時間での増大が必要となり、他の打点高と比較して対応が難しくなることが示唆される。

第6章 打点高の異なる野球打撃動作における体幹と下肢のキネティクスの特徴

6.1 目的

第5章における左右上肢関節のキネティクスの分析の結果から、打点高への対応には、両肩関節の屈曲伸展および内外転軸，ならびに両肘関節の屈曲伸展軸トルクが、異なる打点高に対するバット操作に寄与することが明らかとなった。この際、体幹部と連結している左右の肩関節において顕著なトルク発揮，および打点高間による差がみられた。したがって、体幹と上腕の相互作用によって肩関節のトルク発揮がなされていることから、体幹と上肢とを関連づけて検討を行う必要があると考えられる。

ここで、野球の打撃動作では、下肢から動作が開始されて、体幹，そして上肢と順次動作が行われることによって、バットがボール打撃位置へと振り出されることとなる。Welch *et al.* (1995) および Escamilla *et al.* (2009b) は、最末端部となるバットのヘッドスピード生成には、下肢によって生成された力学的エネルギーが体幹を介して上肢へと効率よく伝達されることが重要であると報告している。その際、この体幹については、主に左右回旋軸まわりの角速度がバット・ヘッドスピードの生成に寄与すると報告されており（田内ら，2005；宮西，2006；宮西・櫻井，2009；石井ら，2010；森下ら，2013），平野（1992）は、体幹の筋力および動作が四肢の力強い動作に大きく寄与すると報告している。また、下肢については、ステップ脚が接地することによって大きなブレーキ力を発生させることは、下脛の打撃方向への回転に寄与すると報告されている（平野，1984；矢内，2007）。

他方、田子ら（2006a）および田子（2010）は、異なる打点高条件における打撃動作の調整について検討した結果、特に低めの打点高を打撃する場合には、主に左右の股関節屈曲伸展角を調整しているのに対して、肩および腰の回転角においてはインパクトを除いて打点高間による顕著な差はみられなかったと報告している。これらの研究では、上肢に関する知見に加えて、打点高の違いに対する体幹および下肢におけるキネマティクスの特徴が

明らかとなっている。しかしながら、異なる打点高条件に対する下肢および体幹における動作の生成要因、ならびに下肢や体幹によって生成された力学的エネルギーがどのように上肢へと伝達されているかといったキネティクスの特徴については明らかとなっていない。

そこで本章の目的は、異なる打点高条件下における体幹および下肢のキネティクスの分析をティー打撃条件下において行うことにより、打点高に対応するための体幹、および下肢の役割分担について明らかにすることとした。

6.2 方法

6.2.1 データ収集およびデータ処理

本章のデータは、スウィング実験により収集したものである。なお、データ収集およびデータ処理については、第3章において述べた方法を用いた。

6.2.2 セグメントおよび関節座標系の定義

6.2.2.1 体幹部について

1) セグメント座標系の定義

第5章における左右上肢と同様に、Figure 3-4の身体に貼付した反射マーカの座標値を用いて、頭部、上胴および下胴セグメントに固定したセグメント座標系を設定した (Figure 6-1)。なお、下胴座標系の設定の際に用いる股関節中心の座標値については、臨床歩行分析研究会の提唱する推定方法から算出した (倉林ら, 2003)。すなわち、左右大転子 (Figure 3-4, 25, 34) と左右上前腸棘骨点 (Figure 3-4, 44, 45) をそれぞれ結ぶ直線の大転子側 1/3 の位置に仮想点を設定し、この左右の仮想点を結んだ直線上において、左右大転子間の長さを 18% 内挿した点を股関節中心 (hipR, hipL) とした。

(1) 頭部座標系 (Σ_{head})

頭部座標系 Σ_{head} について、右耳 (earR) と左耳 (earL) との midpoint (earC) から頭頂 (head) へと向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{head} 、左耳から右耳へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{head} とし、 \mathbf{z}_{head} と \mathbf{s}_{head} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{head} とし、 \mathbf{y}_{head} と \mathbf{z}_{head} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{head} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{head} 、 \mathbf{y}_{head} 、 \mathbf{z}_{head} から構成される姿勢行列を頭部座標系 Σ_{head} とした (Figure 6-1 (a)).

(2) 上胴座標系 (Σ_{ut})

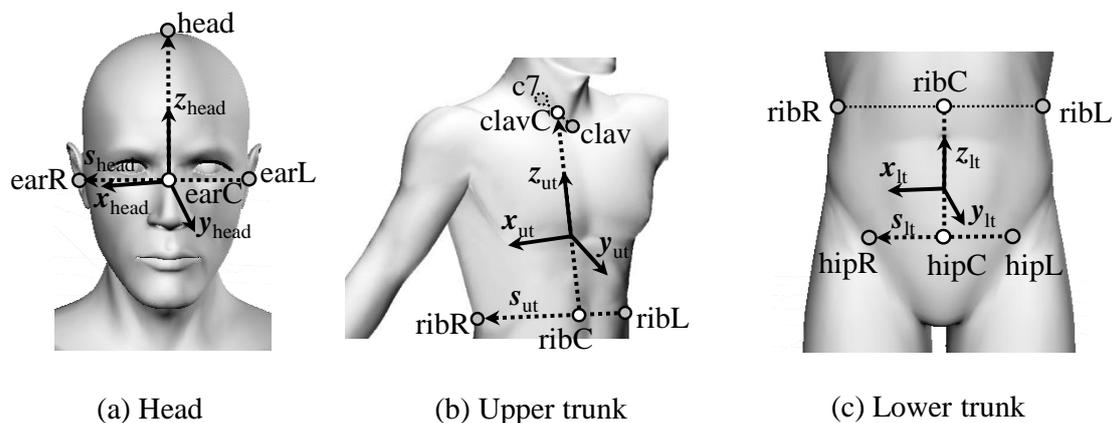
上胴座標系 Σ_{ut} について、左右肋骨下端との midpoint (ribC) から胸骨上縁 (clav) と第7頸椎 (c7) の midpoint (clavC) へと向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{ut} 、左肋骨下端 (ribL) から右肋骨下端 (ribR) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{ut} とし、 \mathbf{z}_{ut} と \mathbf{s}_{ut} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{ut} とし、 \mathbf{y}_{ut} と \mathbf{z}_{ut} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{ut} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{ut} 、 \mathbf{y}_{ut} 、 \mathbf{z}_{ut} から構成される姿勢行列を上胴座標系 Σ_{ut} とした (Figure 6-1 (b)).

(3) 下胴座標系 (Σ_{lt})

下胴座標系 Σ_{lt} について、左右股関節中心の midpoint (hipC) から左右肋骨下端の midpoint (ribC) へと向かうベクトルを \mathbf{z}_{lt} 、左股関節中心 (hipL) から右股関節中心 (hipR) へと向かうベクトル \mathbf{s}_{lt} とし、 \mathbf{z}_{lt} と \mathbf{s}_{lt} の外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{lt} とし、 \mathbf{y}_{lt} と \mathbf{z}_{lt} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{lt} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{lt} 、 \mathbf{y}_{lt} 、 \mathbf{z}_{lt} から構成される姿勢行列を下胴座標系 Σ_{lt} とした (Figure 6-1 (c)).

2) 関節座標系の定義

体幹の3次元動作を評価するために、Figure 3-4 の身体に貼付した反射マーカの座標値を用いて、上胴および下胴の結合部となる仮想関節 (以下、体幹) に対して、関節座標系



(a) Head

(b) Upper trunk

(c) Lower trunk

Figure 6-1 Definitions of segment coordinate systems at head and trunk ((a) head, (b) upper trunk, and (c) lower trunk) to calculate the angular velocity of each segment.

を設定した (Figure 6-2). なお, 本研究では体幹の関節を 3 自由度 (前後屈, 左右側屈, 左右回旋) とした.

体幹の運動軸および角変位の算出に際して, まず体幹関節座標系設定用の下胴座標系 Σ_{trLT} を定義した後, 体幹関節前後屈座標系 Σ_{trADF} , 体幹関節左右側屈座標系 Σ_{trLF} , および体幹関節左右回旋座標系 Σ_{trRot} を順次定義した.

(1) 体幹関節設定用の下胴座標系 (Σ_{trLT})

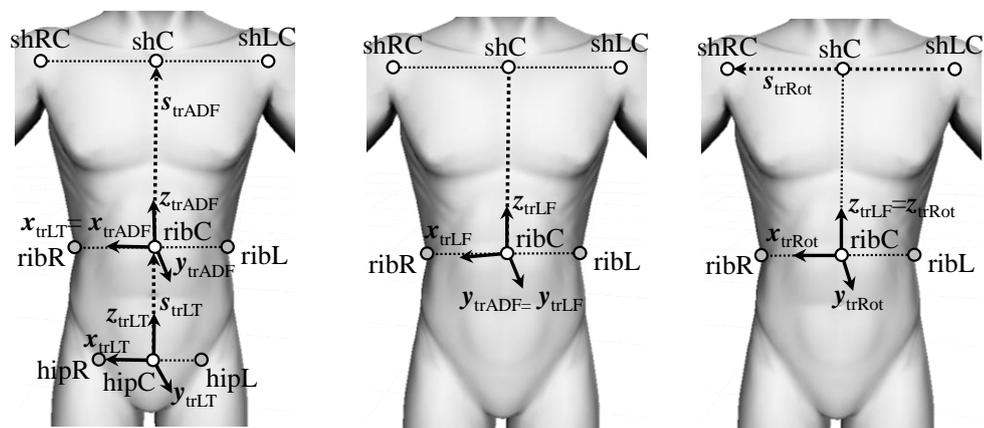
体幹関節設定用の下胴座標系 Σ_{trLT} について, 左股関節中心 (hipL) から右股関節中心 (hipR) へと向かう単位ベクトルを \mathbf{x}_{trLT} , 左右股関節中心の midpoint (hipC) から左右肋骨下端の midpoint (ribC) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{trLT} とし, \mathbf{s}_{trLT} と \mathbf{x}_{trLT} の外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{trLT} とし, \mathbf{y}_{trLT} と \mathbf{s}_{trLT} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{z}_{trLT} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{trLT} , \mathbf{y}_{trLT} , \mathbf{z}_{trLT} から構成される姿勢行列を体幹関節設定用の下胴座標系 Σ_{trLT} とした (Figure 6-2 (a)).

(2) 体幹前後屈座標系 (Σ_{trADF})

前後屈座標系 Σ_{trADF} について, 体幹関節設定用の下胴座標系 Σ_{trLT} の \mathbf{x}_{trLT} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{trADF} , 左右肋骨下端の midpoint (ribC) から左右肩関節の midpoint (shC) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{trADF} とし, \mathbf{s}_{trADF} と \mathbf{x}_{trADF} の外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{trADF} とし, \mathbf{x}_{trADF} と \mathbf{y}_{trADF} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{z}_{trADF} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{trADF} , \mathbf{y}_{trADF} , \mathbf{z}_{trADF} から構成される姿勢行列を体幹の前後屈座標系 Σ_{trADF} とした (Figure 6-2 (a)).

(3) 体幹左右側屈座標系 (Σ_{trLF})

左右側屈座標系 Σ_{trLF} について, 体幹の前後屈座標系の \mathbf{y}_{trADF} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{trLF} , 上述の \mathbf{s}_{trADF} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{trLF} とし, \mathbf{y}_{trLF} と \mathbf{z}_{trLF} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{trLF} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{trLF} , \mathbf{y}_{trLF} , \mathbf{z}_{trLF} から構成され



(a) Lower trunk (trLT) and Trunk anteflexion/dorsiflexion (trADF)

(b) Trunk right/left lateral flexion (trLF)

(c) Trunk right/left rotation (trRot)

Figure 6-2 Definitions of the joint coordinate systems at the trunk to calculate the joint angles and express the joint torques.

る姿勢行列を体幹の左右側屈座標系 Σ_{trLF} とした (Figure 6-2 (b)).

(4) 体幹左右回旋座標系 (Σ_{trRot})

左右回旋座標系 Σ_{trRot} について, 体幹の左右側屈座標系 Σ_{trLF} の z_{trLF} と同一方向の単位ベクトルを z_{trRot} , 左肩関節中心 (shLC) から右肩関節中心 (shRC) へと向かうベクトルを s_{trRot} とし, z_{trRot} と s_{trRot} の外積より得た単位ベクトルを y_{trRot} として, y_{trRot} と z_{trRot} の外積からなる単位ベクトル x_{trRot} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル x_{trRot} , y_{trRot} , z_{trRot} から構成される姿勢行列を体幹の左右回旋座標系 Σ_{trRot} とした (Figure 6-2 (c)).

3) 体幹の運動軸

体幹の各関節軸について, ①体幹関節の前後屈座標系 Σ_{trADF} の x_{trADF} 軸を前後屈軸 (Figure 6-2 (a)), ②左右側屈座標系 Σ_{trLF} の y_{trLF} 軸を内外転軸 (Figure 6-2 (b)), そして, ③左右回旋座標系 Σ_{trRot} の z_{trRot} 軸を左右回旋軸とした (Figure 6-2 (c)).

6.2.2.2 下肢について

1) セグメント座標系

Figure 3-4 の身体に貼付した反射マーカの座標値を用いて, 左右下肢をそれぞれ大腿, 下腿および足部の各セグメントに固定したセグメント座標系を設定した. ここでは, 例として右下肢 3 セグメントの定義について述べる (Figure 6-3). なお, 左下肢のセグメント座標系についても, 右下肢と同様の手順を用いて座標系を定義した.

(1) 大腿座標系 (Σ_{th})

大腿座標系 Σ_{th} について, 右膝内側 (knRI) と右膝外側 (knRO) の中点である右膝関節中心 (knRC) から右股関節中心 (hipR) へと向かう単位ベクトルを z_{th} , 右膝内側から外側に向かうベクトルを s_{th} として, z_{th} と s_{th} との外積より得た単位ベクトルを y_{th} とし, y_{th} と z_{th} と

の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{th} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{th} , \mathbf{y}_{th} , \mathbf{z}_{th} から構成される姿勢行列を大腿座標系 Σ_{th} とした (Figure 6-3 (a)).

(2) 下腿座標系 (Σ_{sh})

下腿座標系 Σ_{sh} について、右内顆 (anRI) と右外顆 (anRO) の中点である右足関節中心 (anRC) から右膝関節中心 (knRC) へと向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{sh} , 右内顆から右外顆へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{sh} とし、 \mathbf{z}_{sh} と \mathbf{s}_{sh} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{sh} とし、 \mathbf{y}_{sh} と \mathbf{z}_{sh} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{sh} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{sh} , \mathbf{y}_{sh} , \mathbf{z}_{sh} から構成される姿勢行列を下腿座標系 Σ_{sh} とした (Figure 6-3 (b)).

(3) 足部座標系 (Σ_{foot})

足部座標系 Σ_{foot} について、右第一中足骨頭 (baRI) と右第五中足骨頭 (baRO) の中点 (baRC) から右踵 (helR) へと向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{foot} , 右第一中足骨頭から右第五中足骨頭へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{foot} とし、 \mathbf{z}_{foot} と \mathbf{s}_{foot} との外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{foot} とし、 \mathbf{y}_{foot} と \mathbf{z}_{foot} との外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{foot} を求めた。そして、これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{foot} , \mathbf{y}_{foot} , \mathbf{z}_{foot} から構成される姿勢行列を足部座標系 Σ_{foot} とした (Figure 6-3 (c)).

2) 関節座標系の定義

(1) 股関節の座標系

股関節の運動軸および角変位の算出に際して、股関節屈曲伸展座標系 Σ_{hFE} , 股関節内外転座標系 Σ_{hAA} , および股関節内外旋座標系 Σ_{hIER} を順次定義した。

① 股関節屈曲伸展座標系 (Σ_{hFE})

屈曲伸展座標系 Σ_{hFE} について、左股関節中心 (hipL) から右股関節中心 (hipR) へと向かう単位ベクトルを \mathbf{x}_{hFE} (体幹関節座標系設定用の下胴座標系 Σ_{trLT} の \mathbf{x}_{trLT} と同一方向の軸),

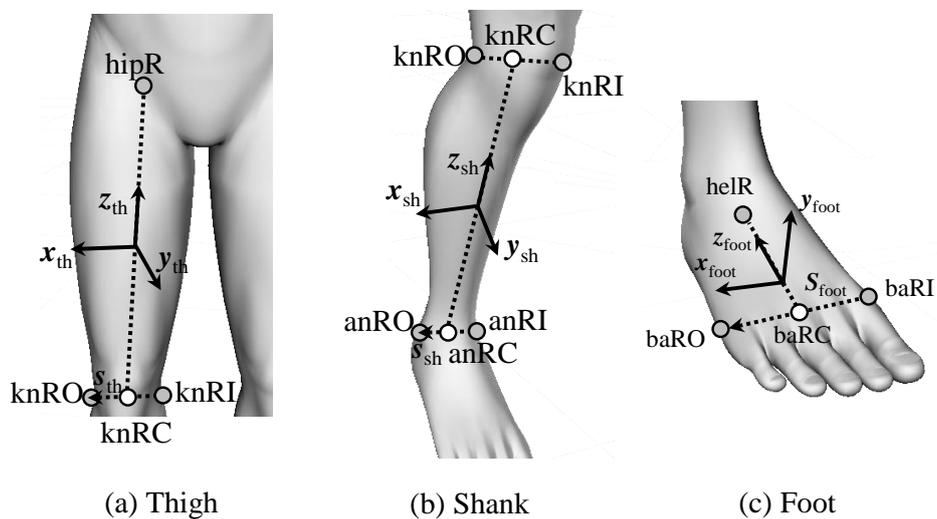


Figure 6-3 Definitions of segment coordinate systems at the lower limb ((a) thigh, (b) shank, and (c) foot) to calculate the angular velocity of each segment.

右膝関節中心 (knRC) から右股関節中心へと向かうベクトルを s_{hFE} とし, s_{hFE} と x_{hFE} の外積より得た単位ベクトルを y_{hFE} とし, x_{hFE} と y_{hFE} の外積からなる単位ベクトル z_{hFE} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル x_{hFE} , y_{hFE} , z_{hFE} から構成される姿勢行列を股関節の屈曲伸展座標系 Σ_{hFE} とした (Figure 6-4 (a)-1).

② 股関節内外転座標系 (Σ_{hAA})

内外転座標系 Σ_{hAA} について, 屈曲伸展座標系 Σ_{hFE} の y_{hFE} と同一方向の単位ベクトルを y_{hAA} , 上述の s_{hFE} と同一方向の単位ベクトルを z_{hAA} とし, y_{hAA} と z_{hAA} の外積からなる単位ベクトル x_{hAA} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル x_{hAA} , y_{hAA} , z_{hAA} から構成される姿勢行列を股関節の内外転座標系 Σ_{hAA} とした (Figure 6-4 (a)-2).

③ 股関節内外旋座標系 (Σ_{hIER})

内外旋座標系 Σ_{hIER} について, 内外転座標系 Σ_{hAA} の z_{hAA} と同一方向の単位ベクトルを z_{hIER} , 右膝内側 (knRI) から右膝外側 (knRO) へと向かうベクトルを s_{hIER} とし, z_{hIER} と s_{hIER} の外積より得た単位ベクトルを y_{hIER} とし, y_{hIER} と z_{hIER} の外積からなる単位ベクトル x_{hIER} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル x_{hIER} , y_{hIER} , z_{hIER} から構成される姿勢行列を股関節の内外旋座標系 Σ_{hIER} とした (Figure 6-4 (a)-3).

(2) 膝関節の座標系

膝関節の運動軸および角変位の算出に際して, 膝関節屈曲伸展座標系 Σ_{kFE} , 膝関節内外反座標系 Σ_{kVV} , および膝関節内外旋座標系 Σ_{kIER} を順次定義した.

① 膝関節屈曲伸展座標系 (Σ_{kFE})

屈曲伸展座標系 Σ_{kFE} について, 股関節の内外旋座標系 Σ_{hIER} の x_{hIER} と同一方向の単位ベクトルを x_{kFE} , 右足関節中心 (anRC) から右膝関節中心 (knRC) へと向かうベクトルを s_{kFE} とし, s_{kFE} と x_{kFE} の外積より得た単位ベクトルを y_{kFE} とし, x_{kFE} と y_{kFE} の外積からなる単位ベクトル z_{kFE} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル x_{kFE} , y_{kFE} , z_{kFE} から構成さ

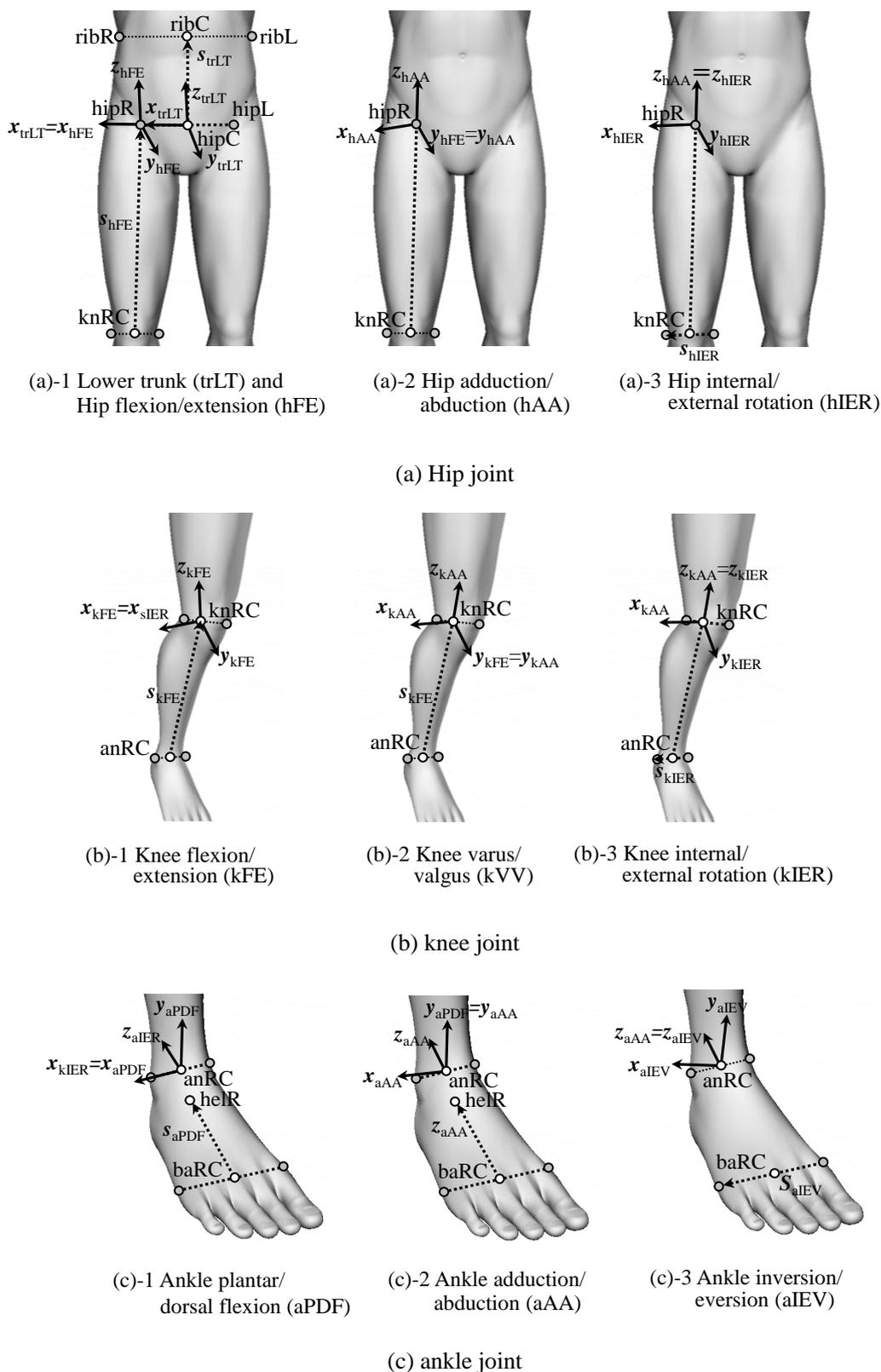


Figure 6-4 Definitions of the joint coordinate systems at the lower limb ((a) hip, (b) knee, and (c) ankle) to calculate the joint angles and express the joint torques.

れる姿勢行列を膝関節の屈曲伸展座標系 Σ_{kFE} とした (Figure 6-4 (b)-1).

② 膝関節内外反座標系 (Σ_{kVV})

内外反座標系 Σ_{kVV} について, 屈曲伸展座標系 Σ_{kFE} の \mathbf{y}_{kFE} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{kVV} , 上述の \mathbf{s}_{kFE} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{kVV} とし, \mathbf{y}_{kVV} と \mathbf{z}_{kVV} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{kVV} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{kVV} , \mathbf{y}_{kVV} , \mathbf{z}_{kVV} から構成される姿勢行列を膝関節の内外反座標系 Σ_{kVV} とした (Figure 6-4 (b)-2).

③ 膝関節内外旋座標系 (Σ_{kIER})

内外旋座標系 Σ_{kIER} について, 内外旋座標系 Σ_{kVV} の \mathbf{z}_{kVV} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{kIER} , 右内顆 (anRI) から右外顆 (anRO) に向かうベクトルを \mathbf{s}_{kIER} とし, \mathbf{z}_{kIER} と \mathbf{s}_{kIER} の外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{kIER} として, \mathbf{y}_{kIER} と \mathbf{z}_{kIER} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{kIER} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{kIER} , \mathbf{y}_{kIER} , \mathbf{z}_{kIER} から構成される姿勢行列を膝関節の内外旋座標系 Σ_{kIER} とした (Figure 6-4 (b)-3).

(3) 足関節の座標系

足関節の運動軸および角変位の算出に際して, 足関節底背屈座標系 Σ_{aPDF} , 足関節内外転座標系 Σ_{aAA} , および足関節内外反座標系 Σ_{aIEV} を順次定義した.

① 足関節底背屈座標系 (Σ_{aPDF})

底背屈座標系 Σ_{aPDF} について, 膝関節の内外旋座標系の \mathbf{x}_{kIER} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{aPDF} , 右第一中足骨頭 (baRI) と右第五中足骨頭 (baRO) の中点 (baRC) から右踵 (heIR) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{aPDF} とし, \mathbf{s}_{aPDF} と \mathbf{x}_{aPDF} の外積より得た単位ベクトル \mathbf{y}_{aPDF} とし, \mathbf{x}_{aPDF} と \mathbf{y}_{aPDF} の外積より得た単位ベクトル \mathbf{z}_{aPDF} を求めた. そして, これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{aPDF} , \mathbf{y}_{aPDF} , \mathbf{z}_{aPDF} から構成される姿勢行列を足関節の底背屈座標系 Σ_{aPDF} とした (Figure 6-4 (c)-1).

② 足関節内外転座標系 (Σ_{aAA})

内外転座標系 Σ_{aAA} について,底背屈座標系 Σ_{aPDF} の \mathbf{y}_{aPDF} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{aAA} , 上述の \mathbf{s}_{aPDF} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{aAA} とし, \mathbf{y}_{aAA} と \mathbf{z}_{aAA} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{aAA} を求めた.そして,これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{aAA} , \mathbf{y}_{aAA} , \mathbf{z}_{aAA} から構成される姿勢行列を足関節の内外転座標系 Σ_{aAA} とした (Figure 6-4 (c)-2).

③ 足関節内外反座標系 (Σ_{aIEV})

内外反座標系 Σ_{aIEV} について,内外転座標系 Σ_{aAA} の \mathbf{z}_{aAA} と同一方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{aIEV} , 右第一中足骨頭 (baRI) から右第五中足骨頭 (baRI) へと向かうベクトルを \mathbf{s}_{aIEV} とし, \mathbf{z}_{aIEV} と \mathbf{s}_{aIEV} の外積より得た単位ベクトルを \mathbf{y}_{aIEV} として, \mathbf{y}_{aIEV} と \mathbf{z}_{aIEV} の外積からなる単位ベクトル \mathbf{x}_{aIEV} を求めた.そして,これらの直交単位ベクトル \mathbf{x}_{aIEV} , \mathbf{y}_{aIEV} , \mathbf{z}_{aIEV} から構成される姿勢行列を足関節の内外反座標系 Σ_{aIEV} とした (Figure 6-4 (c)-3).

3) 下肢関節軸の定義

(1) 股関節軸 (屈曲伸展, 内外転, 内外旋)

股関節軸について,①股関節の屈曲伸展座標系 Σ_{hFE} の \mathbf{x}_{hFE} 軸を屈曲伸展軸 (Figure 6-4 (a)-1),②内外転座標系 Σ_{hAA} の \mathbf{y}_{hAA} 軸を内外転軸 (Figure 6-4 (a)-2),そして,③内外旋座標系 Σ_{hIER} の \mathbf{z}_{hIER} 軸を内外旋軸とした (Figure 6-4 (a)-3).

(2) 膝関節軸 (屈曲伸展, 内外旋)

膝関節軸について,①膝関節の屈曲伸展座標系 Σ_{kFE} の \mathbf{x}_{kFE} 軸を屈曲伸展軸 (Figure 6-4 (b)-1),そして,②内外旋座標系 Σ_{kIER} の \mathbf{z}_{kIER} 軸を内外旋軸とした (Figure 6-4 (b)-3).

(3) 足関節軸 (底背屈, 内外反)

足関節軸について,①足関節の底背屈座標系 Σ_{aPDF} の \mathbf{x}_{wPDF} 軸を底背屈軸 (Figure 6-4 (c)-1),

そして、②内外反座標系 Σ_{aIEV} の z_{aIEV} 軸を内外反軸とした (Figure 6-4 (c)-3).

6.2.3 算出項目および算出方法

6.2.3.1 体幹部について

1) 体幹の回転角度および角速度

静止座標系の水平面 (XY 平面) に対して, 上胴では左肩関節中心 (shLC) から右肩関節中心 (shRC) へ向かうベクトルを, 下胴では左股関節中心 (hipL) から右股関節中心 (hipR) へ向かうベクトルをそれぞれ投影し, 各ベクトルと静止座標系の Y 軸とのなす角度をそれぞれ上胴および下胴の回転角度とし, この上胴回転角度から下胴回転角度を減じた角度を捻転角度とした. なお, 上胴および下胴ともに, 正值は反時計回りの角変位, 負値は時計回りの角変位となる. そして, これらの角度をそれぞれ時間微分することによって角速度を算出した (Figure 6-5).

2) 体幹の関節角変位および角速度

体幹の前後屈の角変位は, 体幹関節座標系設定用の下胴座標系 Σ_{trLT} に対する Σ_{trADF} の x_{trADF} 軸まわりの回転角, 体幹関節左右側屈の角変位は, 前後屈座標系 Σ_{trADF} に対する Σ_{trLF} の y_{trLF} 軸まわりの回転角, 体幹関節左右回旋の角変位は, 左右回旋座標系 Σ_{trLF} に対する Σ_{trRot} の z_{trRot} 軸まわりの回転角としてそれぞれ算出した. なお, 符号の正負については, 後屈, 右側屈および左回旋 (反時計まわり) を正, 前屈, 左側屈および右回旋 (時計まわり) を負とした. また, 関節角速度については, 各関節角変位をそれぞれ時間微分することにより算出した.

3) 体幹および下胴のバットのボール打撃部位速度に対する幾何学的貢献

体幹および下胴の動作がバットのボール打撃部位 (第 4 章) の鉛直変位に及ぼす影響を

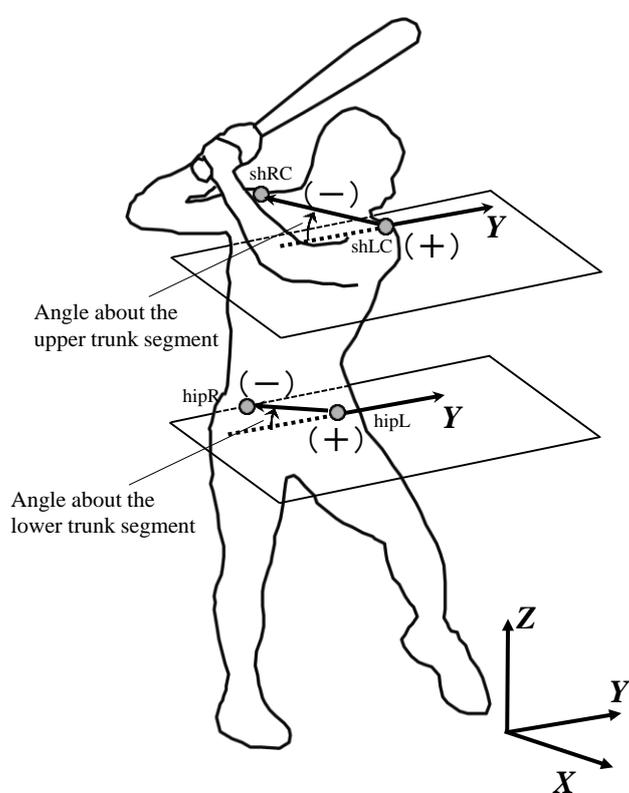


Figure 6-5 The segment rotation angles of the upper and lower trunk in the XY plane.

検討するために、バットのボール打撃部位速度に対する体幹および下胴の幾何学的な貢献を算出した (Springings *et al.*, 1994 ; 宮西ら, 1996). なお, ここで用いる角速度は, 上述した関節角変位を時間微分して算出した角速度とは異なり, 近位および遠位セグメント角速度の相対角速度, すなわち上胴セグメント角速度から下胴セグメント角速度を減じたものとした (宮西ら, 1996 ; 藤井ら, 1997). この理由として, 同パラメータは幾何学的情報である角速度について検討していることから, 上胴および下胴との間に位置する体幹の関節角速度と, 下胴セグメント角速度との間に整合性のある相対角速度を用いている. 詳細な算出方法については, 付録として巻末に記載した.

4) 体幹の関節力およびトルク

第5章における左右各上肢と同様に, 上胴を剛体リンクとしてモデル化し (Figure 6-6), 上胴セグメントの遠位端に作用する力およびモーメントを \mathbf{f}_{shR} , \mathbf{f}_{shL} , \mathbf{f}_{neck} と \mathbf{n}_{shR} , \mathbf{n}_{shL} , \mathbf{n}_{neck} すると, 上胴セグメントの近位端に作用する力 \mathbf{f}_{tr} およびモーメント \mathbf{n}_{tr} は, セグメントの並進の運動方程式および回転の運動方程式から, それぞれ

$$\mathbf{f}_{tr} = -m_{ut}\ddot{\mathbf{x}}_{ut} + m_{ut}\mathbf{g} + \mathbf{f}_{shR} + \mathbf{f}_{shL} + \mathbf{f}_{neck} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{tr} = & \mathbf{r}_{ut, \overline{cgD}, shR} \times \mathbf{f}_{shR} + \mathbf{r}_{ut, \overline{cgD}, shL} \times \mathbf{f}_{shL} + \mathbf{r}_{ut, \overline{cgD}, neck} \times \mathbf{f}_{neck} + \mathbf{r}_{ut, \overline{cgP}} \times \mathbf{f}_{tr} \\ & - \hat{\mathbf{I}}_{ut} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ut} - \boldsymbol{\omega}_{ut} \times (\hat{\mathbf{I}}_{ut} \boldsymbol{\omega}_{ut}) + \mathbf{n}_{shR} + \mathbf{n}_{shL} + \mathbf{n}_{neck} \end{aligned} \quad (6.2)$$

と算出することができる. ここで, 式 (6.1) および (6.2) における m_{ut} は上胴セグメントの質量, \mathbf{x}_{ut} は静止座標系における上胴セグメントの重心位置ベクトル, \mathbf{g} は重力加速度ベクトル ($\mathbf{g}=[0 \ 0 \ -9.807]^T$), $\hat{\mathbf{I}}_{ut}$ は静止座標系における上胴セグメントの慣性行列, $\boldsymbol{\omega}_{ut}$ は静止座標系における上胴セグメントの角速度ベクトルをそれぞれ示している. また, $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgD}, shR}$, $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgD}, shL}$, $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgD}, neck}$, および $\mathbf{r}_{ut, \overline{cgP}, tr}$ は, 上胴セグメント重心から遠位端, および近位端に向かう位置ベクトルをそれぞれ示している. そして, 前述した左右上肢の関節トルクと同様に, この逆動力学演算によって算出された作用モーメント \mathbf{n}_{tr} を, 該当する関節軸の軸

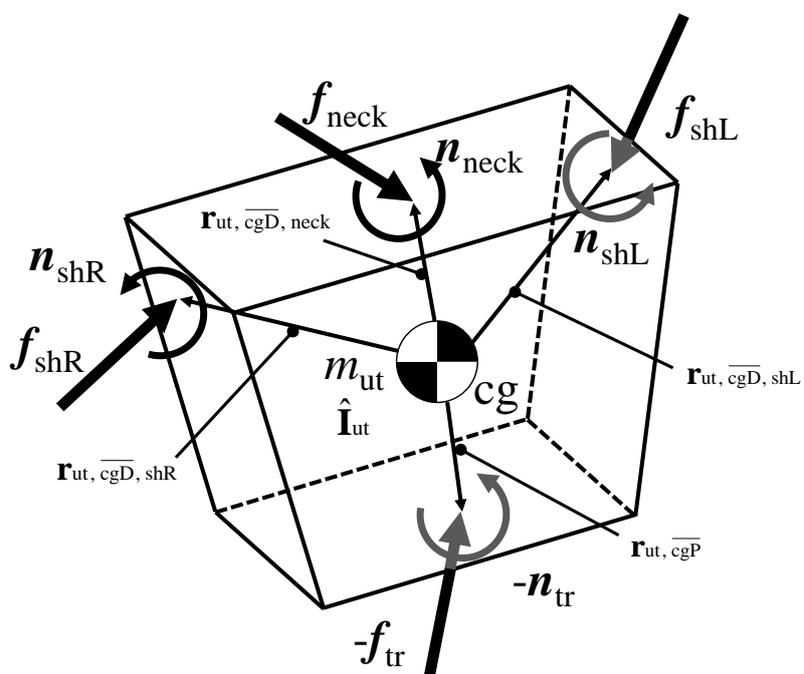


Figure 6-6 Free body diagram for the calculation of joint force and torque of the upper trunk segment.

方向単位ベクトルに投影することにより体幹の関節トルクを求めた。

5) 関節力パワー，トルクパワー，セグメントトルクパワーおよび力学的仕事

関節力パワーについては，上述した逆動力学演算により算出した体幹，ならびに左右肩関節の作用力 (\mathbf{f}_{tr} , \mathbf{f}_{shR} , \mathbf{f}_{shL}) と各関節速度との積とし，関節トルクパワーについては，関節トルクと関節角速度との積として求めた。セグメントトルクパワーについては，体幹，ならびに左右肩関節の作用モーメント (\mathbf{n}_{shR} , \mathbf{n}_{shL} , \mathbf{n}_{tr}) と上胴のセグメント角速度の積として算出した。力学的仕事については，関節トルクパワーを符号の正負毎に時間積分することによって関節トルクによる正負の力学的仕事を算出した。

6.2.3.2 下肢について

1) 下半身重心位置および下半身重心速度

身体のうち，左右の足，下腿，大腿および下胴の 7 セグメントについて，阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて，各セグメント重心位置および下半身重心位置を算出した。そして，下半身重心位置を時間微分することにより下半身重心速度ベクトルを算出した。

なお，本研究では下半身による鉛直変位量を明らかにするために，身体重心ではなく下半身重心を用いている。

2) 下肢関節角変位および角速度

上述した下肢の各関節座標系からの角変位を算出した。本研究では左右の下肢ともに股関節は 3 自由度 (屈曲伸展，内外転，内外旋)，膝関節は 2 自由度 (屈曲伸展，内外旋)，および足関節は 2 自由度 (底背屈，内外反) とした。また，関節角速度については，関節角変位をそれぞれ時間微分することにより算出した。なお，膝関節の内外反軸および足関節の内外転軸については，その軸まわりの関節角速度は生じないものとした。

(1) 股関節角変位

股関節屈曲伸展の角変位は、体幹関節座標系設定用の下胴座標系 Σ_{trLT} に対する Σ_{hFE} の \mathbf{x}_{hFE} 軸まわりの回転角、股関節内外転の角変位は、屈曲伸展座標系 Σ_{hFE} に対する Σ_{hAA} の \mathbf{y}_{hAA} 軸まわりの回転角、股関節内外旋の角変位は、内外転座標系 Σ_{hAA} に対する Σ_{hIER} の \mathbf{z}_{hIER} 軸まわりの回転角としてそれぞれ算出した。なお、符号の正負については、伸展、外転および外旋を正、屈曲、内転および内旋を負とした。

(2) 膝関節角変位

膝関節屈曲伸展の角変位は、股関節の内外旋座標系 Σ_{hIER} に対する Σ_{kFE} の \mathbf{x}_{kFE} 軸まわりの回転角、膝関節内外旋の角変位は、内外反座標系 Σ_{kVV} に対する Σ_{kIER} の \mathbf{z}_{kIER} まわりの回転角としてそれぞれ算出した。なお、符号の正負については、伸展および外旋を正、屈曲および内旋を負とした。

(3) 足関節角変位

足関節底背屈の角変位は、膝関節の内外旋座標系 Σ_{kIER} に対する Σ_{aPDF} の \mathbf{x}_{wPDF} まわりの回転角、足関節内外反の角変位は、内外転座標系 Σ_{aAA} に対する Σ_{aIEV} の \mathbf{z}_{aIEV} まわりの回転角としてそれぞれ算出した。なお、符号の正負については、底屈および外反を正、背屈および内反を負とした。

3) 左右下肢の関節力および関節トルク

左右各上肢と同様に、左右各下肢の各節を構成する剛体リンクとしてモデル化されたセグメント k, i (k =軸脚側, ステップ脚側; i =足, 下腿, 大腿) 単体に対する並進および回転の運動方程式を用いて(式については割愛), 各セグメント k, i の近位端に作用する力 $\mathbf{f}_{k,i+1}$ およびモーメント $\mathbf{n}_{k,i+1}$ を算出した。そして、作用モーメント $\mathbf{n}_{k,i+1}$ については、該当する関節

軸の軸方向単位ベクトルに投影することにより各関節トルクを求めた。

4) 関節力パワー，トルクパワー，セグメントトルクパワーおよび力学的仕事

関節力パワーについては，上述した逆動力学演算により算出した左右股関節，ならびに体幹の作用力 (f_{hipR} , f_{hipL} , f_{tr}) と各関節速度との積として求めた．ここで，体幹の作用力 f_{tr} については，地面反力データを用いた下肢の逆動力学演算から算出している（式および図については割愛）．関節トルクパワーについては，関節トルクと関節角速度との積として求めた．セグメントトルクパワーについては，左右股関節ならびに体幹の作用モーメント (n_{shR} , n_{shL} , n_{tr}) と下胴のセグメント角速度の積として算出した．力学的仕事については，ダウン・スウィング局面およびレベル・スウィング局面の各区間別，ならびに符号の正負別に時間積分することによって各局面における関節トルクによる正負の力学的仕事を算出した．

5) 股関節トルクの下胴回転成分

左右の股関節トルクが下胴の回転に及ぼす影響を明らかにするため，上述した逆動力学演算により算出した左右股関節トルクを下胴座標系 Σ_{lt} に投影して，股関節トルクの下胴回転成分を算出した（島田ら，2000；高木ら，2010b）．なお，このうち， x_{lt} 軸および y_{lt} 軸まわり成分のモーメントについては，足し合わせて合モーメントとして表記する．

6.2.4 統計処理

第5章における左右上肢のキネティクスと同様に，第3章に示した方法によって統計処理を行った．なお，フォワード・スウィング期では，身体重心変位は顕著に小さいために，体幹および下肢のキネティクス量に対して被験者の身体特性の違いが及ぼす影響は小さいと考えられる．このため，トルクや力学的仕事については，体重によって除していない結

果を示すこととする。

6.3 結果

6.3.1 体幹部について

6.3.1.1 体幹の回転角度および角速度

Figure 6-7に、フォワード・スウィング期における体幹の回転角度および角速度をそれぞれ示す。各図の左列が回転角度を、右列が回転角速度を示しており、上段 (a), (d) に上胴を、中段 (b), (e) に下胴を、そして下段 (c), (f) に捻転をそれぞれ示している (高: 点線, 中: 黒線, 低: 灰色線)。正值は反時計まわりの角変位および角速度, 負値は時計まわりの角変位および角速度となる。また, 打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している (高一中: Δ , 高一低: $*$, 中一低: \times)。

回転角度について, 上胴角度 (a) では, 各打点高ともにスウィング開始時点の約-60 deg から負値が減少し, 60%付近において正值へと切り替わり, インパクトにおいては打点が高い程, 正值が大きかった。そして, 全フォワード・スウィング期において高めと低めとの間に, 35%からインパクトにかけて真中と低めとの間に, および70%からインパクトにかけて高めと真中との間にそれぞれ有意な差がみられた。下胴角度 (b) では, 各打点高ともにスウィング開始時点の約-25 deg から負値が減少し, 40%付近において正值へと切り替わり, インパクトにおいては打点が高い程, 正值が大きくなり, 主に80%からインパクトにかけて各打点高間に有意な差がみられた。捻転角度 (c) では, 各打点高ともにスウィング開始から30%付近において打点が高い程, 負値が大きくなった後, 負値は減少し, 80%付近において正值へと切り替わり, インパクト近傍においては打点が高い程, 正值が大きかった。そして, 概ねフォワード・スウィング期において高めと低めとの間, および高めと真中との間に, ならびに30%からインパクトにかけて真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

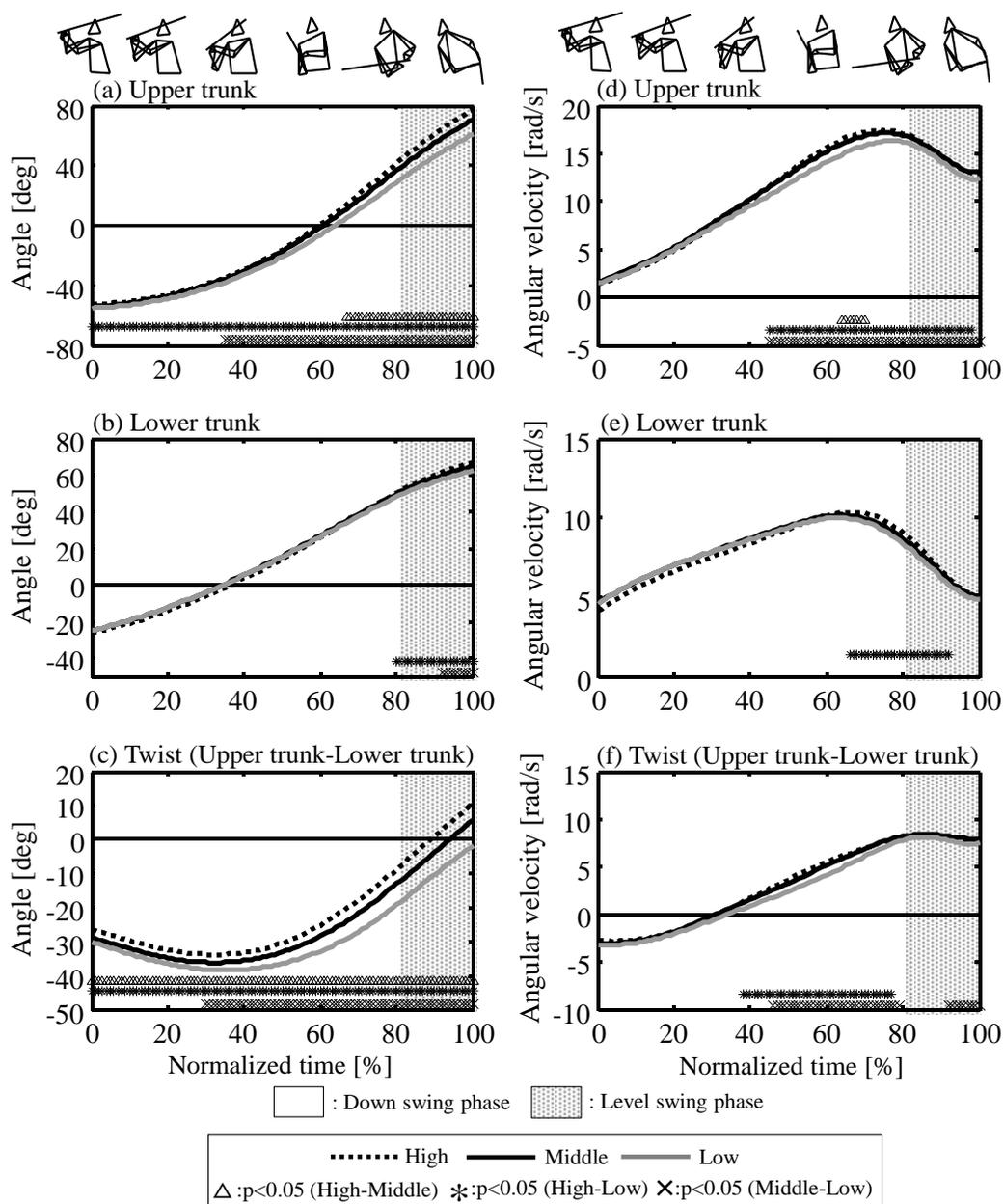


Figure 6-7 Curves of angles and angular velocities of the upper and lower trunk segment, and the trunk twist in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

回転角速度について、上腕角速度 (d) では、スウィング開始から正值が増加し、70%付近においてピーク値がみられ、打点が高い程、正值は大きくなった後、角速度は減少しながらインパクトを迎え、45%からインパクトにかけて、主に高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。下腕角速度 (e) では、スウィング開始から正值のみがみられ、65%からインパクトにかけて打点が高い程、正值が有意に大きかった。捻転角速度 (f) では、各打点高ともにスウィング開始から負値がみられ、30%付近から正值へと切り替わり、80%付近においてピーク値がみられた後、正值はやや減少しながらインパクトを迎えていた。そして、主に40%から80%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

6.3.1.2 体幹および下腕のバットのボール打撃部位速度に対する幾何学的貢献

Figure 6-8 に、フォワード・スウィング期におけるバットのボール打撃部位速度の鉛直成分に対する体幹および下腕の貢献を示す。左列が体幹の前後屈 (a)、左右側屈 (b)、および左右回旋軸 (c) に関する貢献を、右列が下腕重心速度 (d) および下腕角速度 (e) に関する貢献をそれぞれ示している (高: 点線, 中: 黒線, 低: 灰色線)。そして、正值は鉛直上方速度を、負値は鉛直下方速度を示す。また、打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している (高-中: Δ , 高-低: $*$, 中-低: \times)。

体幹について、前後屈軸 (a) では、80%付近から正值が急激に増加しながらインパクトを迎えていた。そして、値は小さいものの、20%から85%付近にかけて各打点高間に有意な差がみられた。左右側屈軸 (b) では、40%から90%付近にかけて打点が低い程、負値が大きかったものの、その値は小さかった。そして、主にスウィング開始から30%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間に、ならびに50%から85%付近にかけては各打点高間にそれぞれ有意な差がみられた。左右回旋軸 (c) では、50%から90%付近にかけて打点が低い程、負値が大きく、90%以降においては打点が高い程、正值が大きくなり、

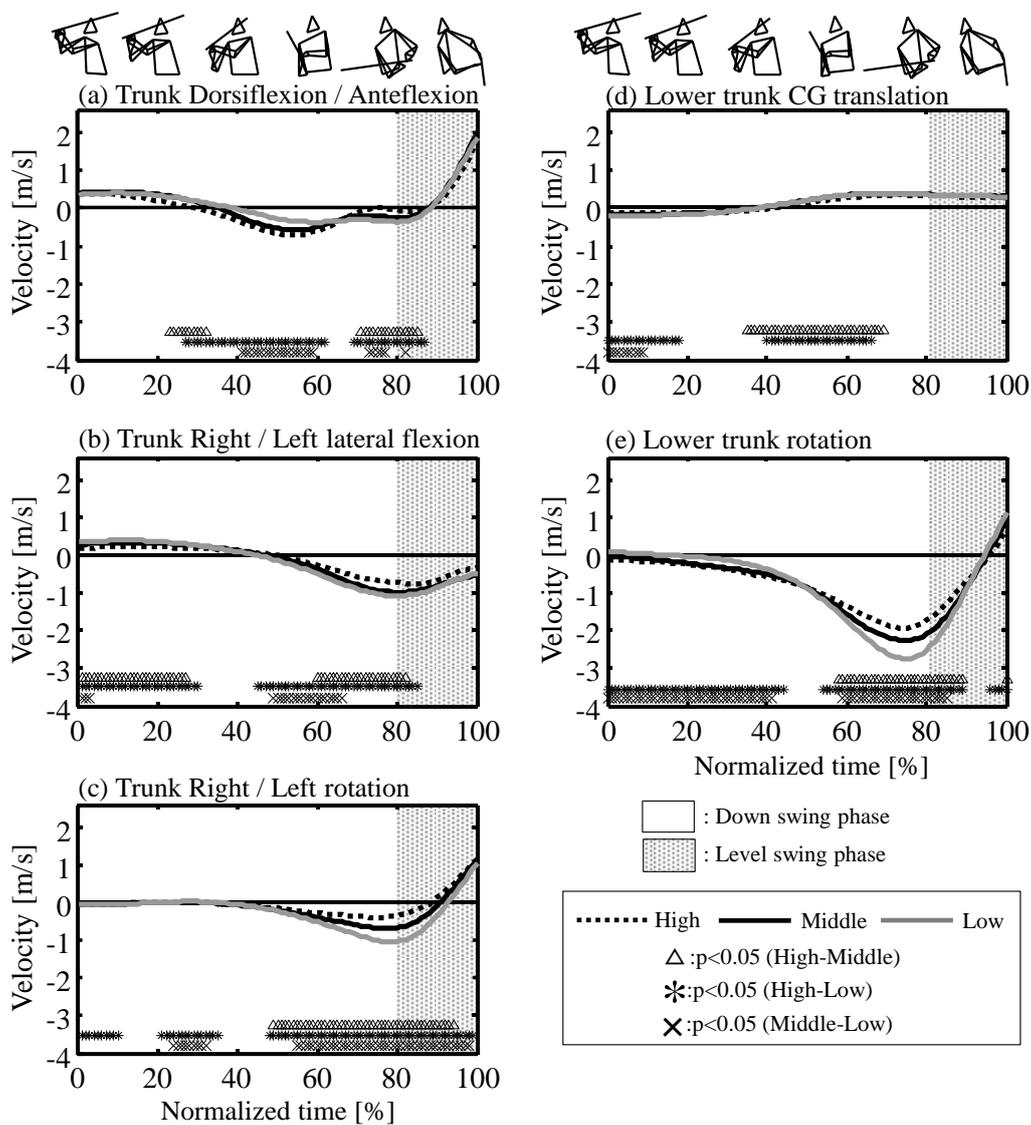


Figure 6-8 Curves of the vertical velocities of the ball hitting-point on bat obtained from the motion in the trunk joint and lower trunk in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

主に 50%からインパクトにかけて各打点高間に有意な差がみられた。

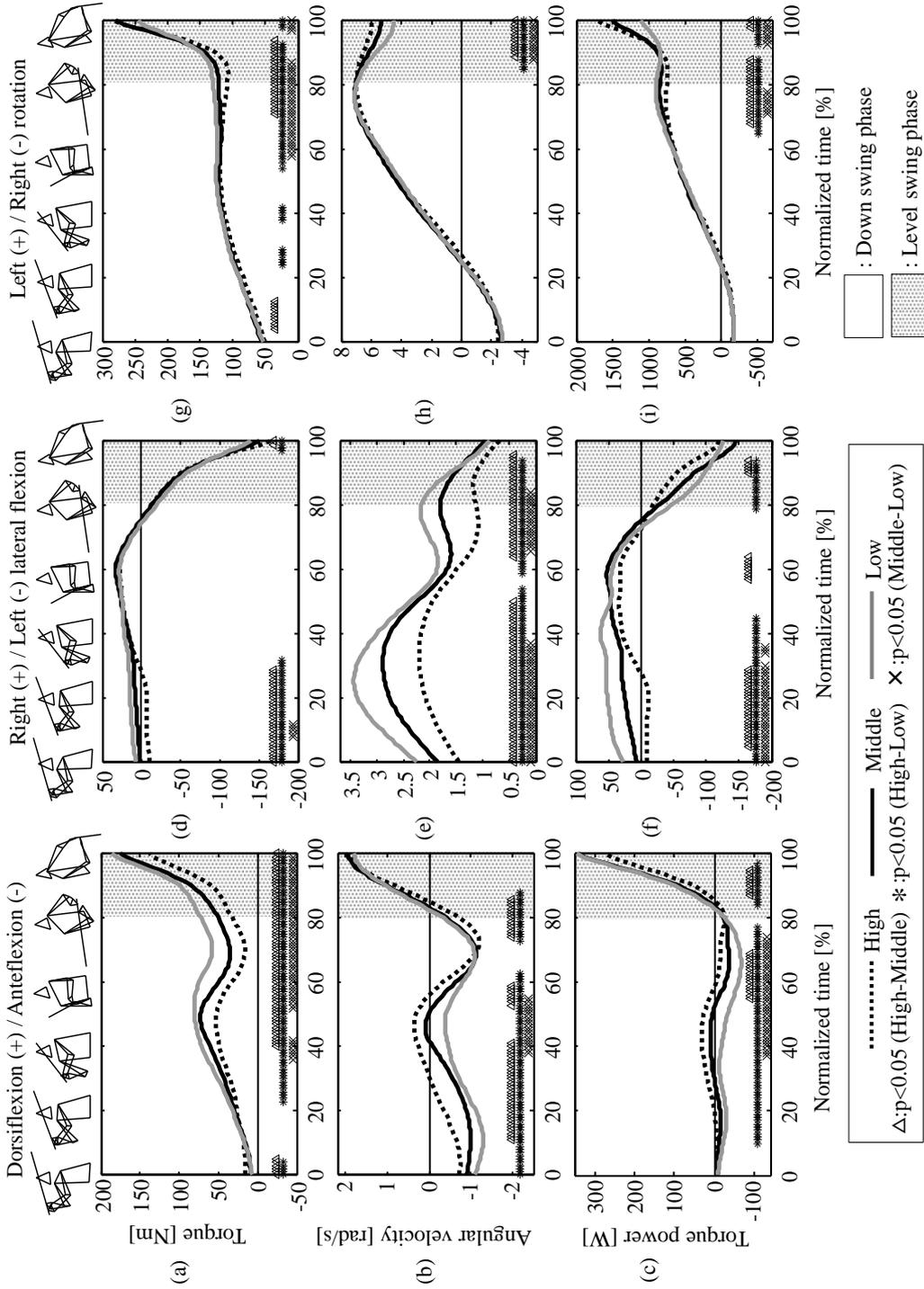
下胴について、下胴重心速度 (d) では、全フォワード・スウィング期においてほぼ一定値がみられ、その値は小さかったものの、スウィング開始から 20%付近にかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間に、ならびに 40%から 70%付近にかけては高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。下胴角速度 (e) では、50%から 90%付近かけて打点が低い程、負値が大きく、90%以降においては正値がみられ、スウィング開始から 40%付近にかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間に、ならびに 60%から 90%付近にかけては各打点高間にそれぞれ有意な差がみられた。

6.3.1.3 体幹の関節トルク、角速度およびトルクパワー

Figure 6-9 に、フォワード・スウィング期における体幹の前後屈、左右側屈、および左右回旋軸に関する関節トルク、関節角速度、そして関節トルクパワーをそれぞれ示す。左列が前後屈軸（後屈：正，前屈：負）を，中列が左右側屈軸（右側屈：正，左側屈：負）を，右列が左右回旋軸（左回旋：正，右回旋：負）の値を示しており，上段 (a)，(d)，(g) にトルク，中段 (b)，(e)，(h) に角速度，そして下段 (c)，(f)，(i) にトルクパワーをそれぞれ示している（高：点線，中：黒線，低：灰色線）。また，打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している（高—中：△，高—低：*，中—低：×）。

前後屈軸について、関節トルク (a) では、後屈のみのトルクがみられ、30%付近以降において打点が低い程、後屈トルクが有意に大きかった。関節角速度 (b) では、0%から 50%付近にかけて打点が低い程、前屈角速度が有意に大きくなった後、80%付近以降において後屈角速度がみられた。関節トルクパワー (c) では、10%から 80%付近にかけて打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きく、80%付近以降において正のトルクパワーが増加しながらインパクトを迎えていた。

左右側屈軸について、関節トルク (d) では、スウィング開始から打点が低い程、右側屈



(a), (d), (g) : Joint torque (b), (e), (h) : Joint angular velocity (c), (f), (i) : Joint torque power
 Figure 6-9 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the anteflexion/dorsiflexion, right/left lateral flexion, and right/left rotation axes of the trunk joint in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

トルクが有意に大きくなった後、インパクトに近づくにつれて急激に左側屈トルクが増加し、打点が高い程、その値は大きかった。関節角速度 (e) では、スウィング開始から右側屈のみの角速度がみられ、打点が低い程、その値は有意に大きかった。関節トルクパワー (f) では、スウィング開始から 80% 付近にかけて打点が低い程、正のトルクパワーが有意に大きく、インパクト近傍においては負のトルクパワーが急激に増加していた。

左右回旋軸について、関節トルク (g) では、スウィング開始から左回旋のみのトルクがみられ、特に 90% 付近以降にかけて急激に値が増加し、打点が高い程、その値は有意に大きかった。関節角速度 (h) では、0% から 30% 付近にかけて右回旋角速度がみられた後、左回旋角速度が増加して、特にインパクト近傍において打点が高い程、値が有意に大きかった。関節トルクパワー (i) では、角速度の変化と同様に、30% 付近以降において負のトルクパワーがみられた後、インパクトに近づくにつれて正のトルクパワーは急激に増加し、打点が高い程、その値は有意に大きかった。

6.3.1.4 体幹の関節トルクによる力学的仕事

Figure 6-10 に、体幹の関節トルクによる仕事を局面別、および正負別に示す。各仕事は、前後屈軸 (trADF)、左右側屈軸 (trLF)、および左右回旋軸 (trRot) について打点高毎に示す。なお、各仕事の打点高間における統計的な有意差を Table 6-1 に示す。

前後屈軸について、ダウン・スウィング局面では打点が高い程、正仕事が有意に大きく ($H > L$, $p < 0.05$)、また、打点が低い程、負仕事が有意に大きかった ($W_n: H < M < L$, $p < 0.05$)。レベル・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が有意に大きかった ($H < L$, $p < 0.05$)。左右側屈軸について、主にダウン・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が有意に大きかった ($H < M < L$, $p < 0.05$)。左右回旋軸について、前後屈および左右側屈軸に比べて両局面において合計した正仕事が約 10 倍も大きかった。ダウン・スウィング局面では打点が低い程、正仕事が有意に大きかったのに対して ($H < M$, $H < L$, $p < 0.05$)、レベル・スウィング

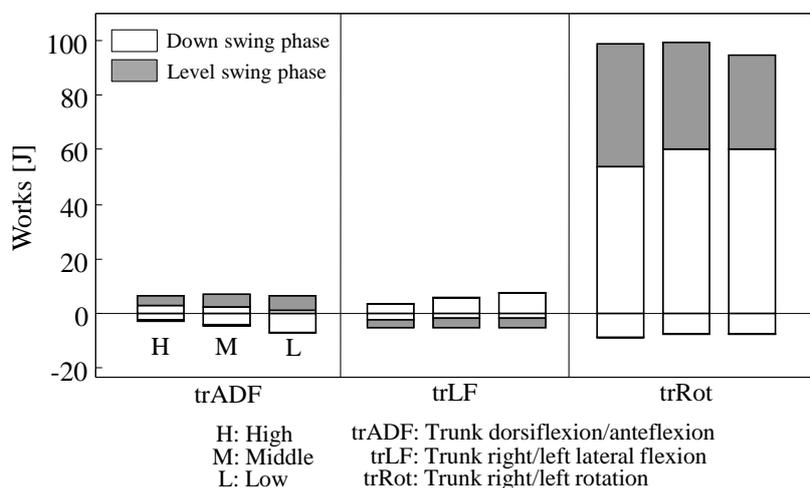


Figure 6-10 The mechanical works done by the trunk joint torque.

Table 6-1 The significant differences of the mechanical works done by the trunk joint torque among hitting-point height conditions.

	Down swing phase		Level swing phase	
	W_p	W_n	W_p	W_n
trADF	H>L	H<M<L	H<L	—
trLF	H<M<L	—	—	—
trRot	H<M, H<L	H>L	H>M>L	—

Significant difference ($p < 0.05$)

H: High
M: Middle
L: Low
trADF: Trunk dorsiflexion/anteflexion
trLF: Trunk right/left lateral flexion
trRot: Trunk right/left rotation

W_p : Positive work
 W_n : Negative work

局面では打点が高い程，正仕事が有意に大きかった ($H>M>L$, $p<0.05$)。負仕事は主にダウン・スウィング局面においてみられ，打点が高い程，有意に大きかった ($H>L$, $p<0.05$)。

6.3.1.5 体幹の左右回旋軸トルクによる力学的仕事とバット・ヘッドスピードの関係

Figure 6-11 に，体幹の左右回旋トルクによる正仕事とバット・ヘッドスピードの最大値との関係を各局面に分けて示す。各図には全被験者（23 名）における各打点高条件の値を示している（高：○，中：△，低：□）。

ダウン・スウィング局面（a）において，正仕事とバット・ヘッドスピード最大値の間に有意な正の相関がみられ ($r=0.362$, $p<0.05$)，レベル・スウィング局面（b）においても，同様に正の相関がみられた ($r=0.288$, $p<0.05$)。なお，図については割愛しているものの，ダウン・スウィング局面とレベル・スウィング局面における正仕事の合計値においても，正の相関がみられ ($r=0.489$, $p<0.05$)，ダウン・スウィング局面の負仕事においては有意な相関はみられなかった。

6.3.1.6 上腕の関節力パワーおよびセグメントトルクパワー

Figure 6-12 に，フォワード・スウィング期における上腕の関節力パワーおよびセグメントトルクパワーを示す。左列が関節力パワーを，右列がセグメントトルクパワーを示しており，上段（a），（d）に下腕と上腕間を，中段（b），（e）に上腕とバレル側上腕間を，そして下段（c），（f）に上腕とノブ側上腕間をそれぞれ示している（高：点線，中：黒線，低：灰色線）。なお，正值は上腕への力学的エネルギーの流入，負値は上腕からの力学的エネルギーの流出となり，打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している（高－中：△，高－低：*，中－低：×）。

関節力パワーについて，下腕と上腕間（a）では，40%付近以降にかけて打点が低い程，正の関節力パワーが有意に大きく，その後，インパクトが近づくにつれて打点が高い程，

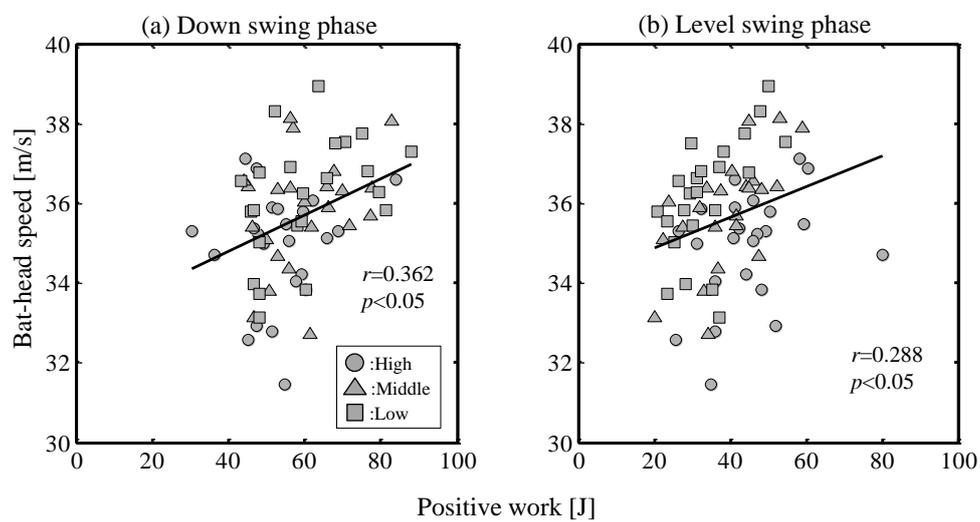


Figure 6-11 Relationships between maximum values of bat-head speed and positive works done by the right/left rotation axis of trunk joint torque.

負の関節力パワーは減少していた。上胴とバレル側の上腕間 (b) では、スウィング開始から 40% 付近にかけて打点が低い程、負の関節力パワーが有意に大きく、40% 以降にかけては打点が高い程、正の関節力パワーが有意に大きかった。上胴とノブ側上腕間 (c) では、全フォワード・スウィング期において負の関節力パワーのみがみられ、主にスウィング開始から 60% 付近にかけて打点高間に有意な差がみられた。そして、50% 付近以降から負の関節力パワーが増加し、70% 付近においてピーク値がみられた後、その負のトルクパワーは減少し、インパクト近傍においては打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きかった。

セグメントトルクパワーについて、下胴と上胴間 (d) では、全フォワード・スウィング期において正のセグメントトルクパワーのみがみられ、スウィング開始からその値は増加した後、60% から 90% 付近にかけて、一旦、正のセグメントトルクパワーの増加が停滞した後、インパクト近傍において急激に正のセグメントトルクパワーは増加していた。そして、60% から 90% 付近にかけて主に高めと真中との間に、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。上胴とバレル側の上腕間 (e) では、スウィング開始から負のセグメントトルクパワーのみがみられ、その変化パターンは緩やかな右下がりであった。上胴とノブ側の上腕間 (f) では、上胴とバレル側の上腕間と同様にスウィング開始から負のセグメントトルクパワーのみがみられ、スウィング開始から 40% 付近にかけて負のセグメントトルクパワーは増加し、40% から 90% 付近にかけて緩やか波形の変化を示した後、インパクトに近づくにつれて負のセグメントトルクパワーが増加し、打点が高い程、その値は大きかった。

6.3.2 下胴および下肢について

6.3.2.1 下半身重心の鉛直変位および水平速度の大きさ

Figure 6-13 に、フォワード・スウィング期の下半身重心の鉛直変位および水平速度の大きさを示す。(高：点線，中：黒線，低：灰色線)。下半身重心の鉛直変位については、被験

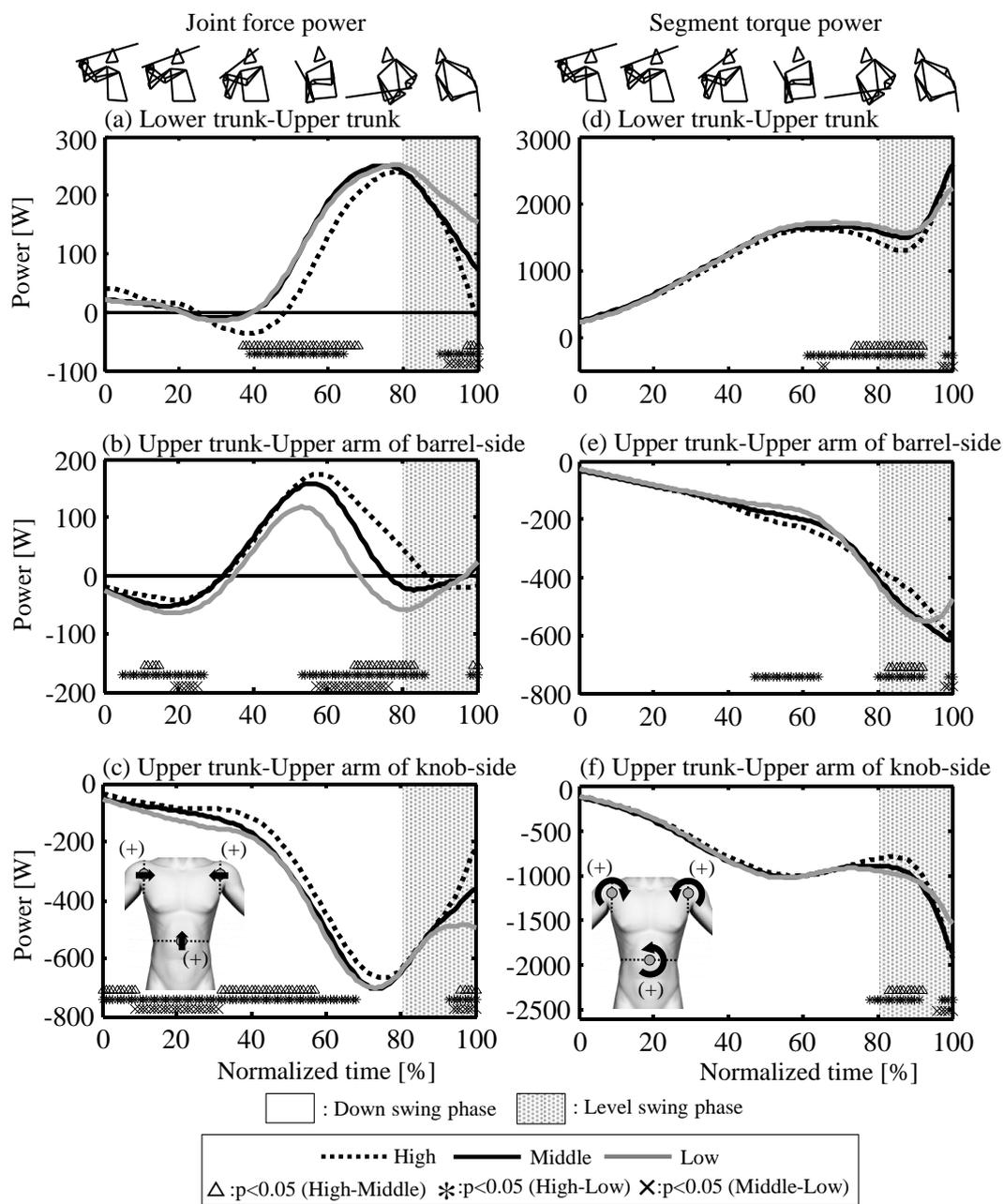


Figure 6-12 The mechanical energy flows for the upper trunk of joint force power and segment torque power in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

者の身長の違いによる鉛直変位の差を考慮するために、各被験者の身長によって除することにより規格化を行ったため無次元量となる。なお、打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している（高-中：△，高-低：*，中-低：×）。

下半身重心の鉛直変位（a）について、スウィング開始時点では打点が高い程、値は大きく（高：0.353，中：0.348，低：0.346）、40%付近にかけて各打点高ともに値が減少した後、インパクトに近づくにつれて値は増加して、インパクトでは打点が高い程、値は大きかった（高：0.360，中：0.357，低：0.353）。そして、スウィング開始から60%付近にかけて高めと真中との間に、全局面において高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

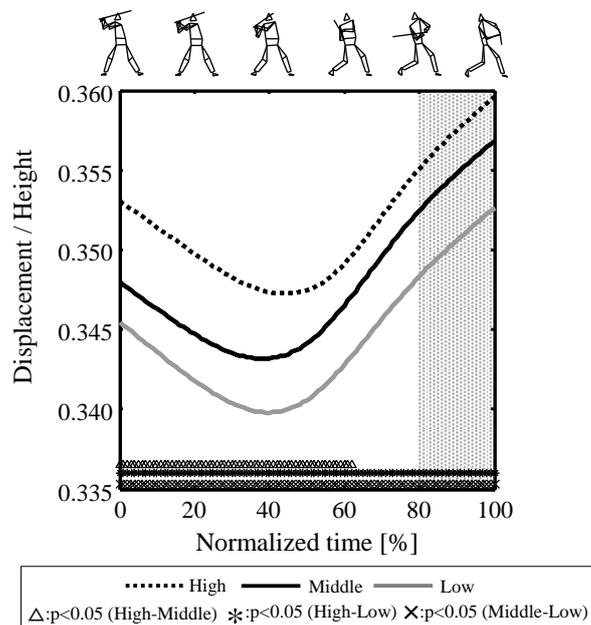
下半身重心の水平速度の大きさ（b）について、スウィング開始時点では打点が高い程、値は大きく（高：0.81 m/s，中：0.87 m/s，低：0.94 m/s）、30%付近から各打点高とも速度は減少したものの、インパクトでは打点が高い程、値は大きかった（高：0.21 m/s，中：0.24 m/s，低：0.27 m/s）。そして、45%から60%付近、および90%からインパクトを除く全期間において各打点高間に有意な差がみられた。

なお、上半身の動きを考慮した身体重心に関しても、鉛直変位および水平変位は下半身重心と同様にその値は小さく、また打点高間における関係性も変わらなかった。

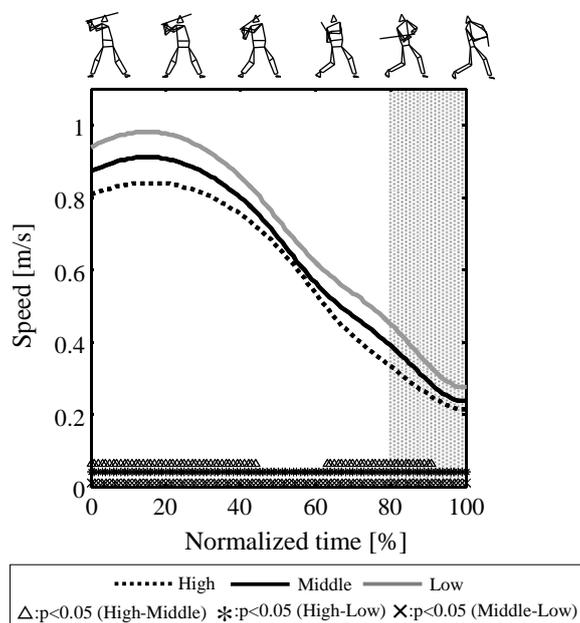
6.3.2.2 左右各脚の地面反力

Figure 6-14 に、フォワード・スウィング期の左右各脚の地面反力を示す。各図の左列が軸脚側の値を、右列がステップ脚側の値を示しており、上段（a）、（d）が X 軸成分、中段（b）、（e）が Y 軸成分、および下段（c）、（f）が Z 軸成分をそれぞれ示している（高：点線，中：黒線，低：灰色線）。また、打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している（高-中：△，高-低：*，中-低：×）。

X 軸成分について、軸脚側（a）では、全フォワード・スウィング期において正值（外角



(a) Vertical displacement of the lower limbs CG.



(b) Horizontal speed of the lower limbs CG.

Figure 6-13 Curves of the vertical displacements and the horizontal speeds of the lower limbs CG in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

方向)のみがみられ、スウィング開始から正值は増加し、50%付近においてピーク値がみられた後、インパクトに向けて値は減少していた。そして、40%から70%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間に、80%付近以降においては概ね各打点高間にそれぞれ有意な差がみられた。これに対して、ステップ脚側 (d) では、主に負値 (内角方向) がみられ、波形パターンは軸脚側と反対であり、40%付近においてピーク値がみられた後、インパクトに向けて値は減少し、主に30%から40%付近にかけて高めと真中との間に有意な差がみられた。

Y 軸成分について、軸脚側 (b) では、スウィング開始から80%付近にかけて正值 (打撃方向) がみられた後、インパクトに向けて負値 (捕手方向) がみられ、主に20%から50%付近にかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。ステップ脚側 (e) では、全フォワード・スウィング期において負値のみがみられ、スウィング開始から値は増加し、60%付近においてピーク値がみられた後、インパクトに向けて値は減少していた。そして、20%から60%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間に、ならびに80%以降において高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

Z 軸成分について、軸脚側 (c) では、スウィング開始から正值 (鉛直方向) のみがみられ、スウィング開始から緩やかに値は減少しており、スウィング開始から60%付近にかけて、各打点高間に有意な差がみられた。ステップ脚側 (f) では、軸脚側と同様に正值のみがみられ、スウィング開始から値は増加し、60%付近においてピーク値がみられた後、インパクトへ向けて値は減少していた。そして、スウィング開始から55%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間に、ならびに80%以降において高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

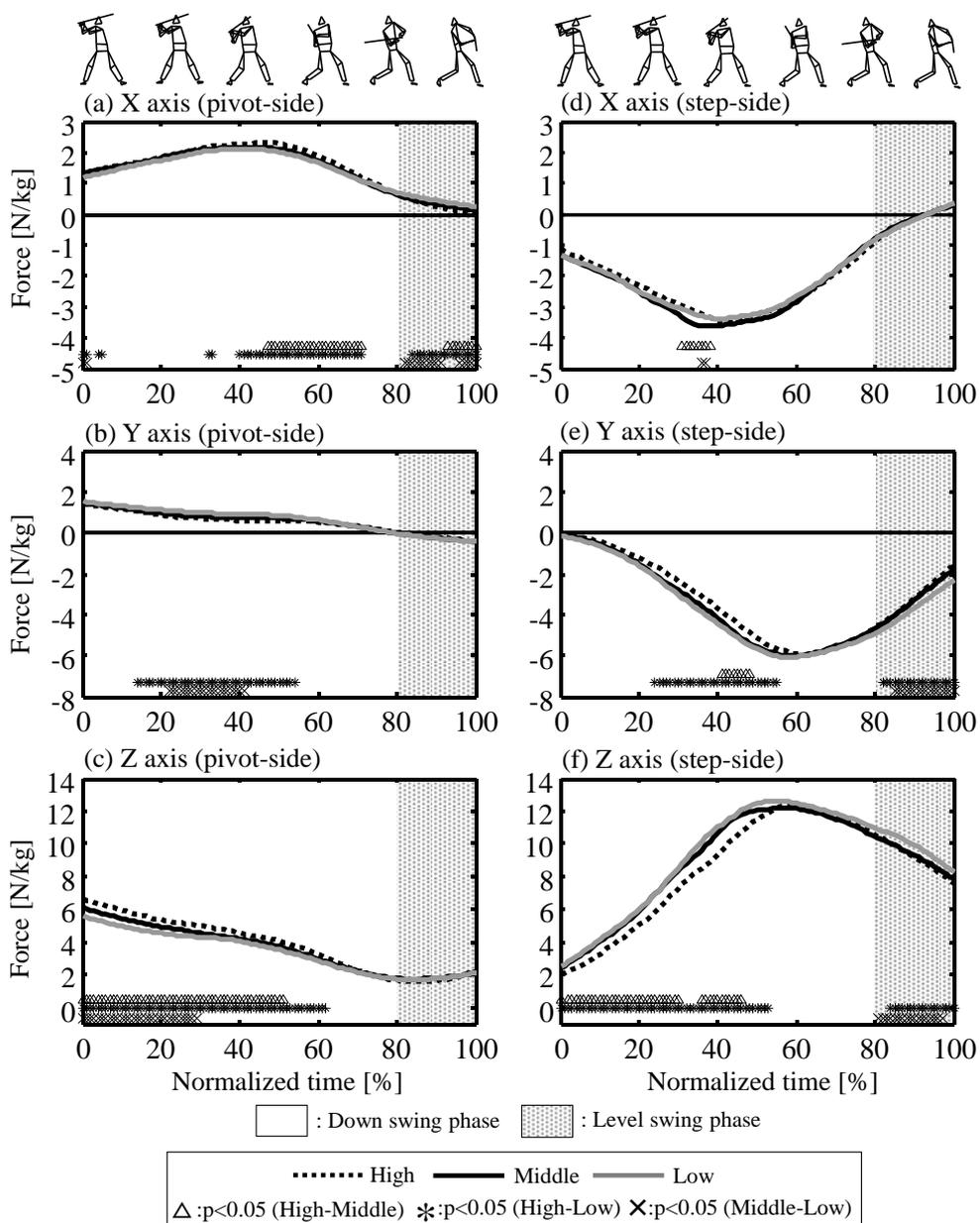


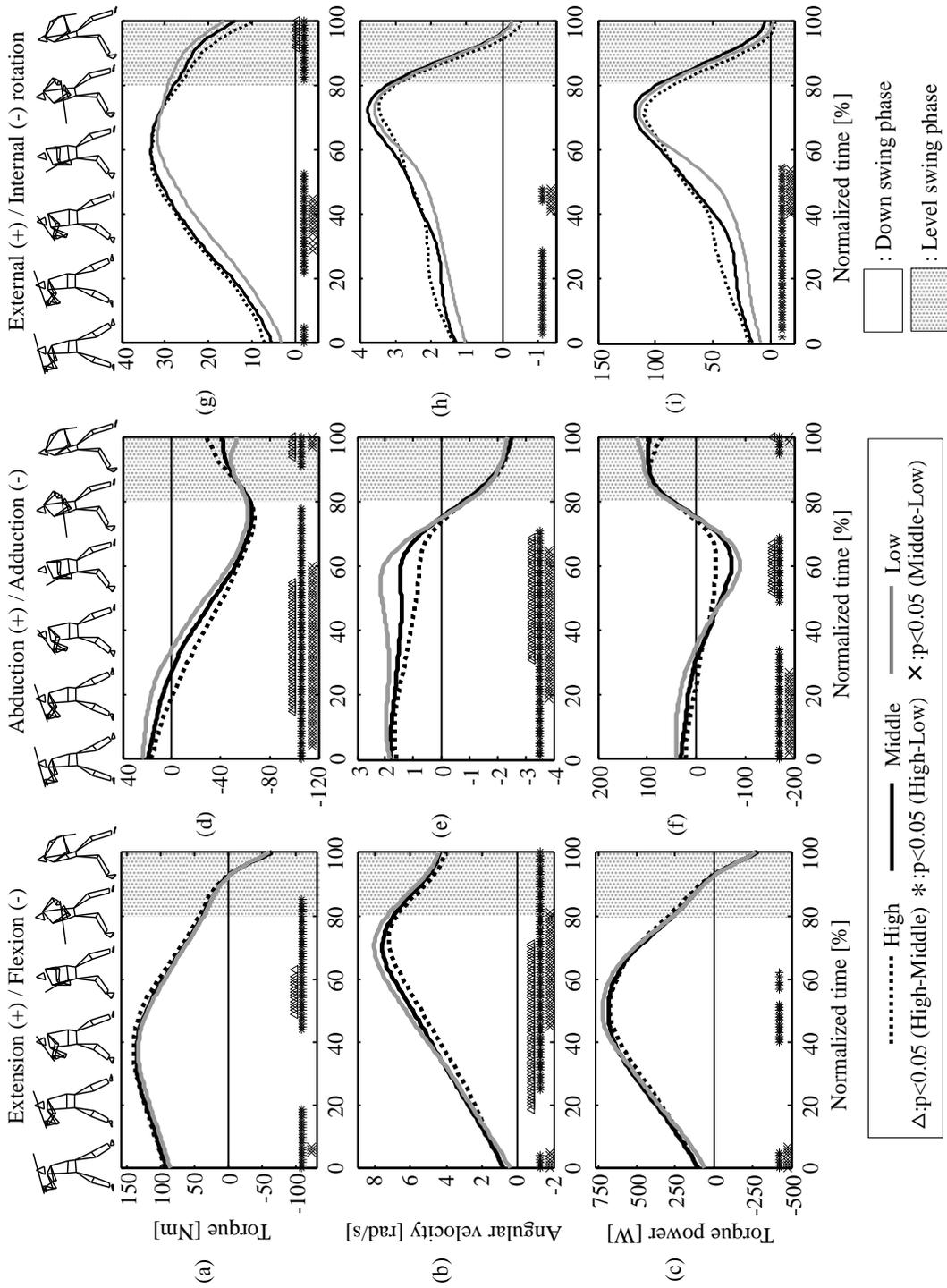
Figure 6-14 Ground reaction forces of each foot in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

6.3.2.3 左右の股関節トルク，角速度およびトルクパワー

フォワード・スウィング期における股関節の屈曲伸展，内外転，および内外旋の各軸に関する関節トルク，関節角速度，そして関節トルクパワーについて，軸脚側の各値を Figure 6-15 に，ステップ脚側の各値を Figure 6-16 にそれぞれ示す．なお，各図の左列が屈曲伸展軸（伸展：正，屈曲：負）を，中列が内外転軸（外転：正，内転：負）の値を，右列が内外旋軸（外旋：正，内旋：負）の値をそれぞれ示しており，上段 (a)，(d)，(g) にトルク，中段 (b)，(e)，(h) に角速度，そして下段 (c)，(f)，(i) にトルクパワーをそれぞれ示している（高：点線，中：黒線，低：灰色線）．また，打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している（高－中：△，高－低：＊，中－低：×）．

Figure 6-15 から，軸脚側の股関節の屈曲伸展軸について，関節トルク (a) では，スウィング開始から 90% 付近にかけて伸展トルクがみられ，90% 以降から屈曲トルクへと移行し，主に 45% から 60% 付近においておよひ高めと低めとの間に有意な差がみられた．関節角速度 (b) では，全フォワード・スウィング期において伸展角速度のみがみられ，30% 付近以降において打点が低い程，伸展角速度が有意に大きかった．関節トルクパワー (c) では，スウィング開始から 90% 付近にかけて正のトルクパワーがみられた後，インパクトに近づくにつれて負のトルクパワーが増加し，スウィング開始直後において高めと低めとの間，およひ真中と低めとの間に，ならびに 20% から 60% 付近にかけて高めと真中との間，およひ高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた．

軸脚側の股関節の内外転軸について，関節トルク (d) では，スウィング開始直後において外転トルクがみられた後，20% 付近以降においては内転トルクがみられ，特に 20% から 60% 付近にかけて打点が高い程，内転トルクが有意に大きく，また，インパクト近傍においては打点が低い程，内転トルクが有意に大きかった．関節角速度 (e) では，20% から 70% 付近にかけて打点が低い程，外転角速度が有意に大きくなった後，80% 付近からは内転角速度がみられたものの，打点高間に顕著な差はみられなかった．関節トルクパワー (f) では，



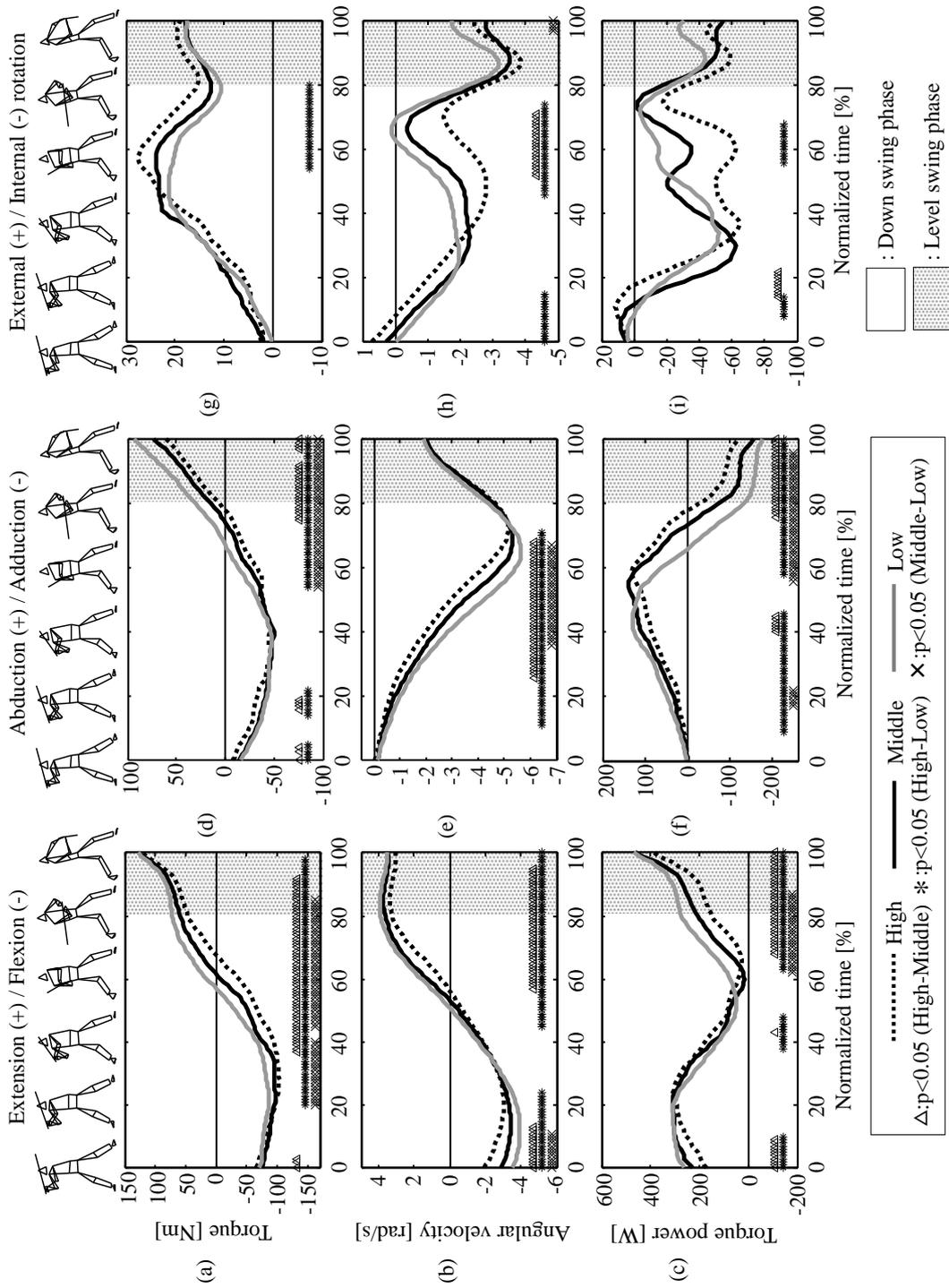
(a), (d), (g) : Joint torque (b), (e), (h) : Joint angular velocity (c), (f), (i) : Joint torque power
 Figure 6-15 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the hip extension/flexion, abduction/adduction, and internal/external rotation axes of the pivot-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

40%から70%付近にかけて打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きく、60%付近においてピーク値がみられた後、80%付近において正のトルクパワーがみられ、インパクト近傍においては打点が低い程、その値は有意に大きかった。

軸脚側の股関節の内外旋軸について、関節トルク (g) では、全フォワード・スウィング期において外旋トルクのみがみられ、スウィング開始から60%付近にかけて打点が高い程、外旋トルクが増加した後、インパクトに近づくにつれて打点が高い程、外旋トルクは減少していた。そして、30%から50%付近にかけて高めと低めとの間に、ならびに80%からインパクトにかけては高めと真中、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関節角速度 (h) では、スウィング開始から70%付近にかけて外旋角速度が増加した後、インパクトに近づくにつれて外旋角速度は減少し、インパクトにおいては内旋角速度がみられた。主にスウィング開始から30%付近にかけて高めと低めとの間に有意な差がみられた。関節トルクパワー (i) では、関節角速度の波形変化と同様に、スウィング開始から70%付近にかけて正のトルクパワーが増加した後、インパクトに近づくにつれて正のトルクパワーは減少し、10%から55%付近にかけて高めと低めとの間に、および40%から55%付近にかけては真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

Figure 6-16 から、ステップ脚側の股関節の屈曲伸展軸について、関節トルク (a) では、20%から50%付近にかけて打点が高い程、屈曲トルクが有意に大きく、それ以降においては打点が低い程、伸展トルクが有意に大きかった。関節角速度 (b) では、スウィング開始から30%付近において打点が低い程、屈曲角速度が有意に大きくなった後、50%以降においては打点が低い程、伸展角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー (c) では、全フォワード・スウィング期において正のトルクパワーのみがみられ、60%付近以降からインパクトに近づくにつれて打点が低い程、正のトルクパワーが増加し、主に60%付近以降において各打点高間に有意な差がみられた。

ステップ脚側の股関節の内外転軸について、関節トルク (d) では、50%から80%付近に



(a), (d), (g) : Joint torque (b), (e), (h) : Joint angular velocity (c), (f), (i) : Joint torque power
 Figure 6-16 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the hip extension/flexion and adduction/abduction, and internal/external axes of the step-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

かけて打点が高い程，内転トルクが有意に大きくなった後，80%付近以降においては打点が低い程，外転トルクが有意に大きかった．関節角速度（e）では，全フォワード・スウィング期において内転角速度のみがみられ，主に20%から70%付近にかけて打点が低い程，内転角速度が有意に大きかった．そして，70%付近にピーク値がみられた後，インパクトに近づくにつれて内転角速度は減少し，打点高間に顕著な差はみられなかった．関節トルクパワー（f）では，スウィング開始直後から80%付近にかけて打点が低い程，正のトルクパワーが大きく，それ以降においては打点が低い程，負のトルクパワーが大きかった．そして，10%から50%付近にかけて主に高めと低めとの間に，60%からインパクトにかけて高めと低めとの間，および真中と低めとの間に，ならびに80%からインパクトにかけて高めと真中との間にそれぞれ有意な差がみられた．

ステップ脚側の股関節の内外旋軸について，関節トルク（g）では，全フォワード・スウィング期において外旋トルクのみがみられ，60%付近においてピーク値がみられた後，外旋トルクは減少していた．そして，55%から80%付近にかけて高めと低めとの間に有意な差がみられた．関節角速度（h）では，40%から70%付近にかけて打点が低い程，内旋角速度は減少した後，一旦，各打点高ともに内旋角速度は増加し，インパクト近傍においては低め，高め，真中の打点高の順に，再び内旋角速度は減少していた．そして，スウィング開始から15%付近にかけて高めと低めとの間に，ならびに45%から75%付近にかけては高めと真中との間，および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた．関節トルクパワー（i）では，40%から70%付近において打点が高い程，負のトルクパワーが大きく，10%から20%付近，および55%から70%付近にかけて高めと真中との間，および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた．

6.3.2.4 左右の膝関節トルク，角速度およびトルクパワー

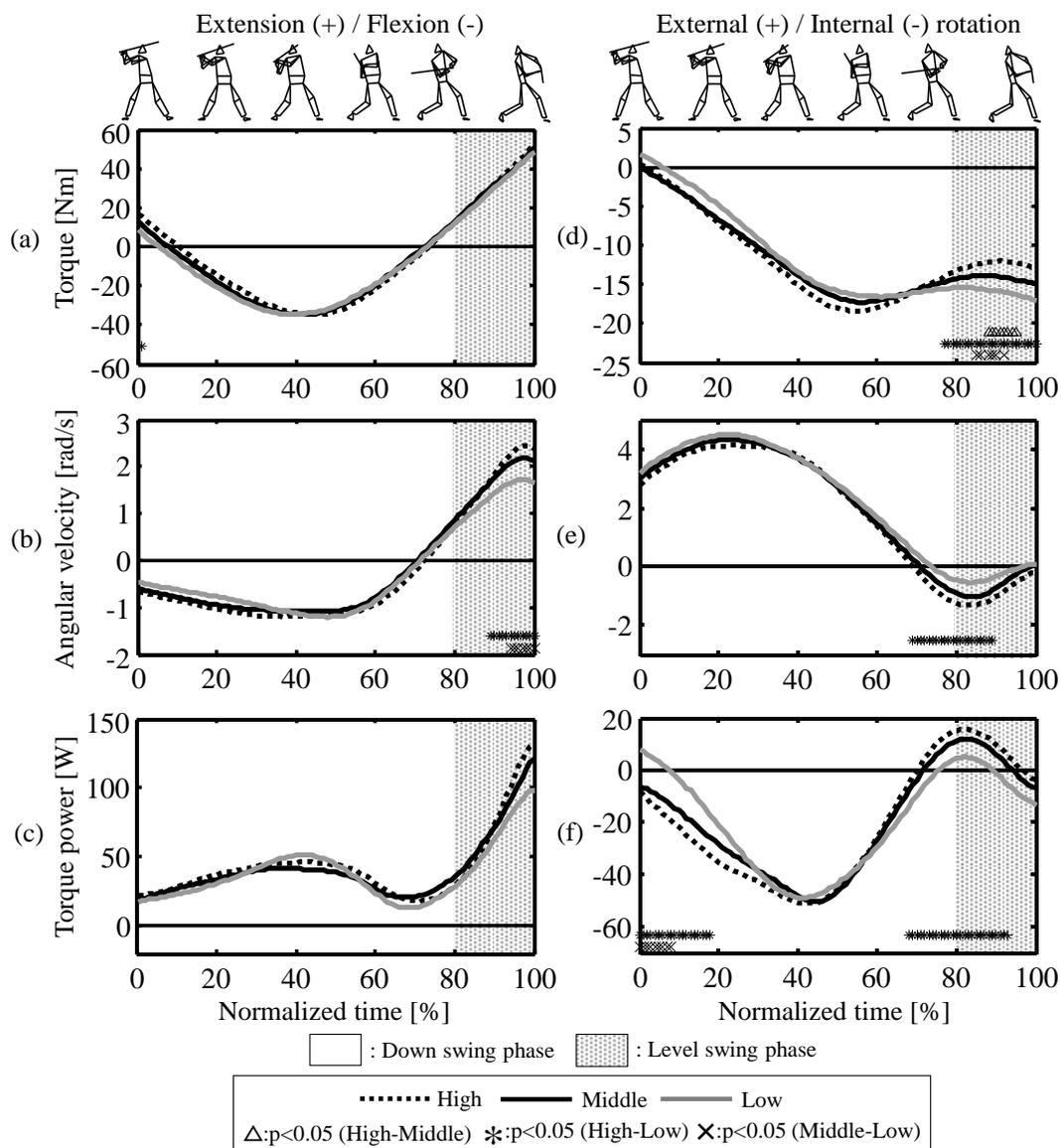
フォワード・スウィング期における膝関節の屈曲伸展，および内外旋の各軸に関する関

節トルク、関節角速度、そして関節トルクパワーについて、軸脚側の各値を Figure 6-17 に、ステップ脚側の各値を Figure 6-18 にそれぞれ示す。なお、各図の左列が屈曲伸展軸（伸展：正，屈曲：負）を、右列が内外旋軸（外旋：正，内旋：負）の値を示しており、図内の各線および各印の仕様は、Figure 6-15 および Figure 6-16 と同様である。

Figure 6-17 から、軸脚側の膝関節の屈曲伸展軸について、関節トルク (a) では、スウィング開始から 10% 付近にかけて伸展トルクが、10% から 65% 付近にかけて屈曲トルクが、そして、それ以降においては伸展トルクがみられた。また、打点高間による顕著な差はみられなかった。関節角速度 (b) では、スウィング開始から 70% 付近にかけて屈曲角速度がみられた後、インパクトに近づくにつれて打点が高い程、伸展角速度が有意に大きかった。関節トルクパワー (c) では、スウィング開始から正のトルクパワーのみがみられ、特にインパクトに近づくにつれて打点が高い程、その値は増加し、高めと低めとの間に有意な差がみられた。

軸脚側の膝関節の内外旋軸について、関節トルク (d) では、ほぼ内旋トルクのみがみられ、80% 以降において打点が低い程、内旋トルクが有意に大きかった。関節角速度 (e) では、スウィング開始から 65% 付近にかけて外旋角速度がみられ、それ以降においては打点が高い程、内旋角速度がみられ、70% から 90% 付近において高めと低めとの間に有意な差がみられた。関節トルクパワー (f) では、スウィング開始から 30% 付近にかけて打点が高い程、負のトルクパワーが大きくなり、40% 付近においてピーク値がみられた。その後、負のトルクパワーは減少し、80% 付近においては打点が高い程、正のトルクパワーが大きくなった後、インパクト近傍において再び負のトルクパワーがみられた。そして、スウィング開始から 20% 付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めの間、ならびに 70% から 90% 付近にかけて高めと低めの間それぞれ有意な差がみられた。

Figure 6-18 から、ステップ脚側の膝関節の屈曲伸展軸について、関節トルク (a) では、スウィング開始から 80% 付近にかけて伸展トルクがみられ、また、各打点高間に有意な差



(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Figure 6-17 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the knee extension/flexion and internal/external rotation, axes of the pivot-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

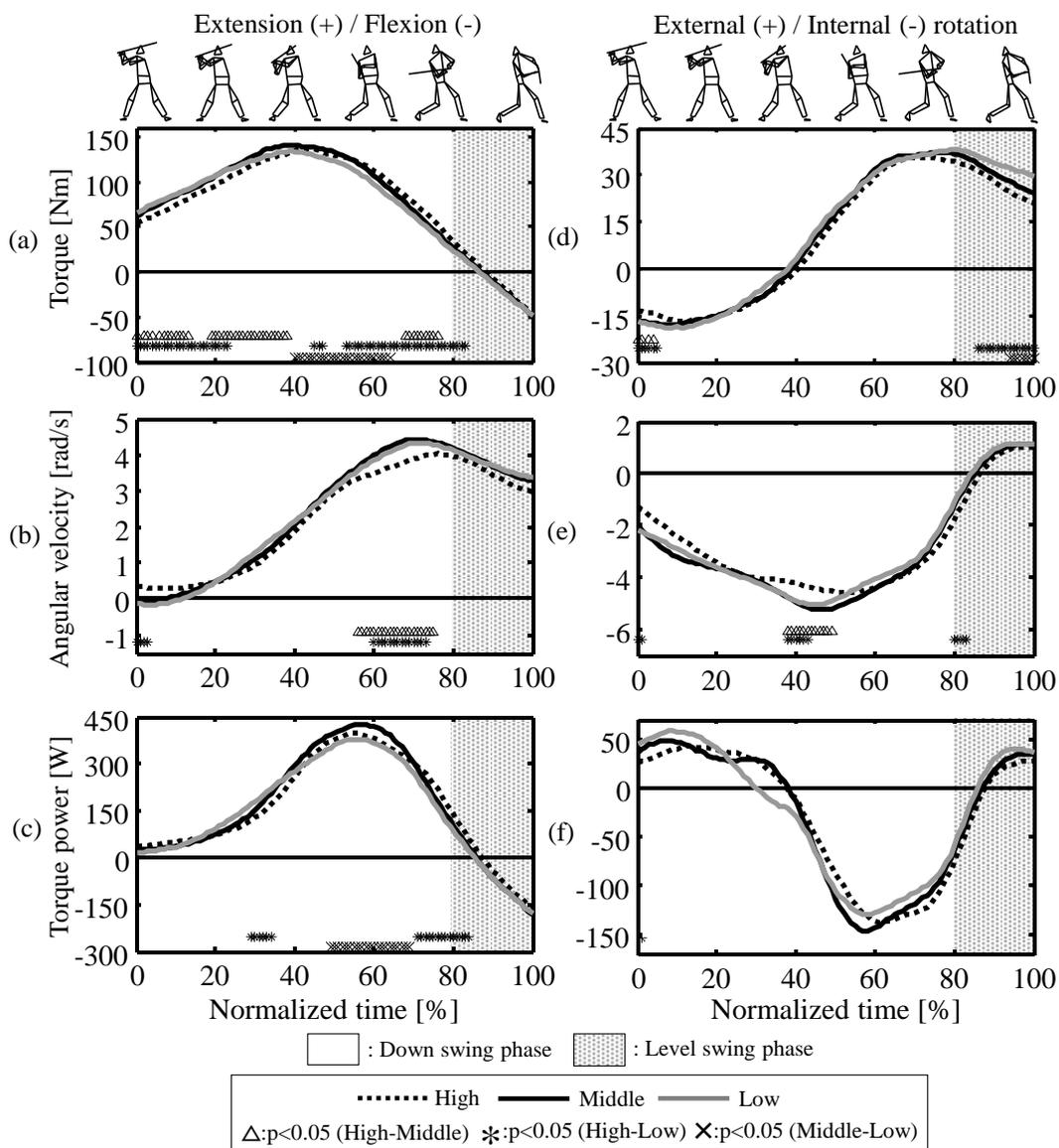
がみられた。そして、インパクトに近づくにつれて屈曲トルクが増加していた。関節角速度 (b) では、スウィング開始からほぼ伸展角速度のみがみられ、主に 60% から 80% 付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関節トルクパワー (c) では、40% から 70% 付近にかけて打点高間による差がみられ、60% 付近においてピーク値がみられた後、インパクトに近づくにつれて負のトルクパワーが増加していた。そして、主に 50% から 70% 付近にかけて真中と低めとの間、および 70% から 85% 付近にかけて高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

ステップ脚側の膝関節の内外旋軸について、関節トルク (d) では、スウィング開始から 40% 付近にかけて内旋トルクがみられた後、インパクト近傍において打点が低い程、外旋トルクが大きくなり、85% 以降にかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関節角速度 (e) では、スウィング開始から 80% 付近にかけて内旋角速度がみられた後、インパクト近傍においては外旋角速度みられた。そして、40% から 50% 付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関節トルクパワー (f) では、スウィング開始から 40% 付近にかけて正のトルクパワーがみられ、40% から 85% 付近にかけて負のトルクパワーがみられた後、インパクト近傍においては正のトルクパワーがみられた。

6.3.2.5 左右の足関節トルク、角速度およびトルクパワー

フォワード・スウィング期における足関節の底背屈、および内外反の各軸に関する関節トルク、関節角速度、そして関節トルクパワーについて、軸脚側の各値を Figure 6-19 に、ステップ脚側の各値を Figure 6-20 にそれぞれ示す。なお、各図の左列が底背屈（底屈：正、背屈：負）を、右列が内外反軸（外反：正、内反：負）の値を示しており、図内の各線および各印の仕様は、Figure 6-15 および Figure 6-16 と同様である。

Figure 6-19 から、軸脚側の足関節の底背屈軸について、関節トルク (a) では、スウィン



(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Figure 6-18 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the knee extension/flexion and internal/external rotation, axes of the step-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

グ開始から底屈のみのトルクが発揮され、スウィング開始から80%付近にかけて打点高間による差がみられたものの、統計的な有意差はみられなかった。関節角速度 (b) では、底屈角速度のみがみられ、スウィング開始から底屈角速度は増加し、70%付近においてピーク値がみられた後、インパクトに近づくにつれて値は減少していた。また、打点高間に顕著な差はみられなかった。関節トルクパワー (c) では、スウィング開始から正のトルクパワーのみがみられ、60%付近にみられるピーク値に近づくにつれて打点が高い程、正のトルクパワーが増加し、高めと低めとの間に有意な差がみられた。そして、インパクトに近づくにつれて正のトルクパワーは減少していた。

軸脚側の足関節の内外反軸について、関節トルク (d) では、スウィング開始から打点が高い程、内反トルクが大きく、10%付近から低めおよび真中の打点高において外反トルクがみられ、50%付近以降においては各打点高とも内反トルクが増加しながらインパクトを迎えていた。そして、スウィング開始から50%付近にかけて主に高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関節角速度 (e) では、スウィング開始から50%付近にかけて内反角速度がみられた後、外反トルクへと移行して、インパクト近傍においては低め、高め、真中の打点高の順に外反トルクが大きかった。そして、スウィング開始から20%付近、および40%から60%付近にかけて高めと低めとの間に、ならびに90%からインパクトにかけて真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関節トルクパワー (f) では、スウィング開始から60%付近にかけて打点が高い程、正のトルクパワーが有意に大きく、60%以降から負のトルクパワーがみられ、インパクト近傍においては打点が低い程、負のトルクパワーが有意に大きかった。

Figure 6-20 から、ステップ脚側の足関節の底背屈軸について、関節トルク (a) では、全フォワード・スウィング期において底屈のみのトルクがみられ、打点が低い程、その値は大きく、主に15%から50%付近にかけて高めと低めとの間、ならびに90%からインパクトにかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関

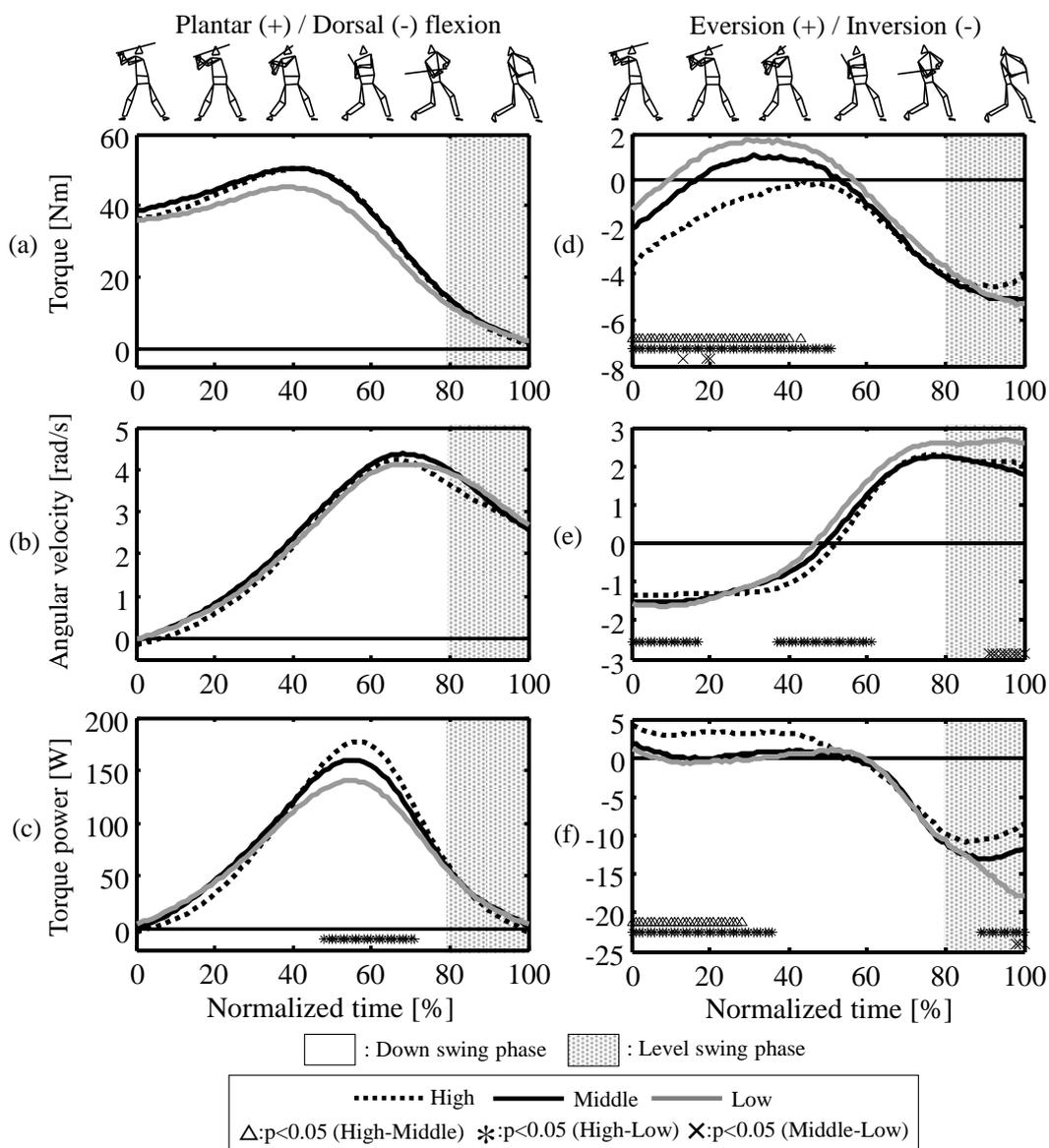


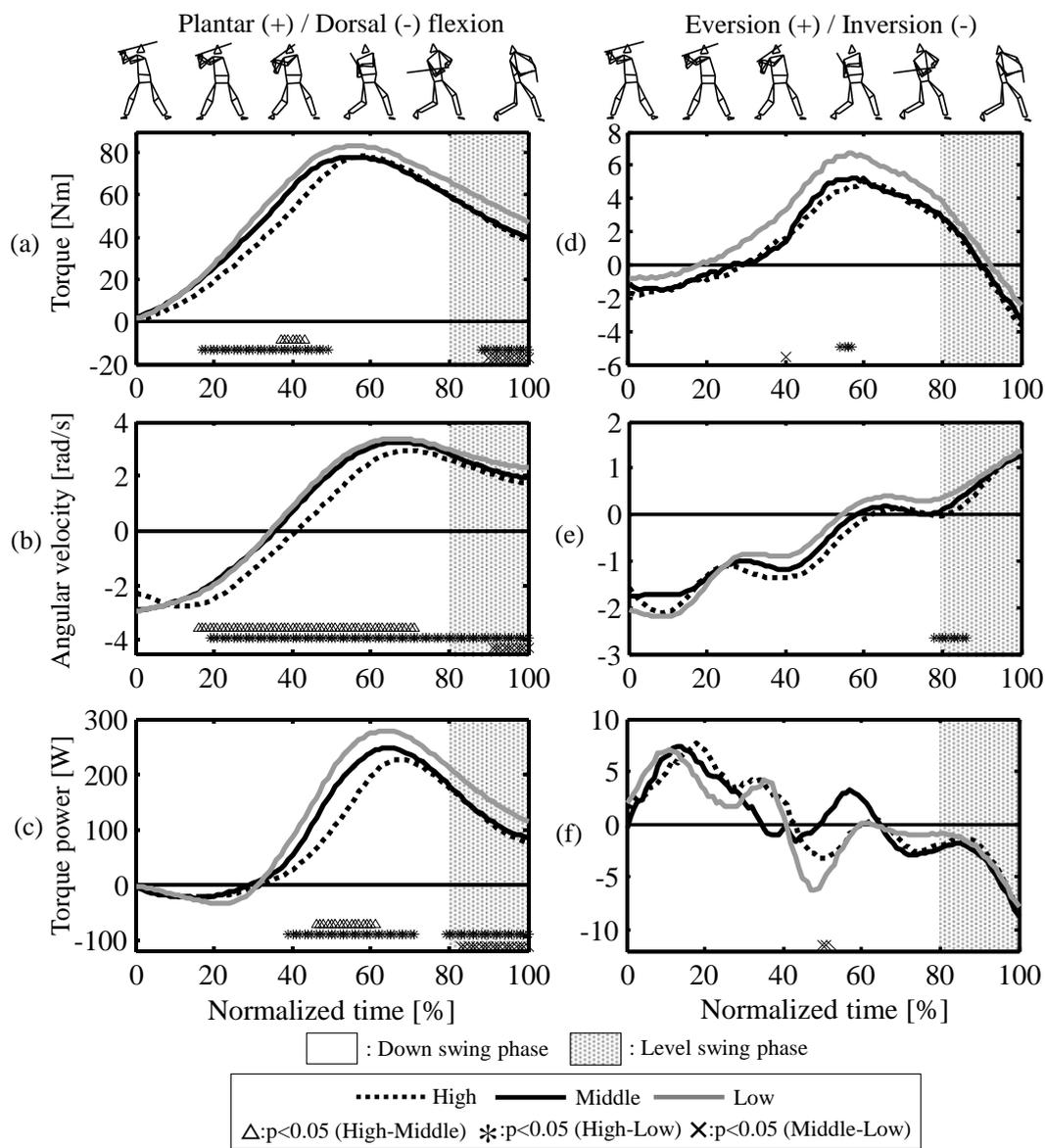
Figure 6-19 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the ankle plantar/dorsal flexion and inversion/eversion axes of the pivot-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

節角速度 (b) では、スウィング開始から 35% 付近にかけて打点が高い程、背屈角速度が大きく、それ以降からは打点が低い程、底屈角速度が大きくなり、20% から 70% 付近にかけて高めと真中との間、20% からインパクトにかけて高めと低めとの間、およびインパクト近傍において真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。関節トルクパワー (c) では、30% からインパクトにかけて打点が低い程、正のトルクパワーが大きく、60% 付近においてピーク値がみられた後、インパクトに近づくにつれて正のトルクパワーは減少していた。そして、40% からインパクトにかけて高めと低めとの間、45% から 60% 付近にかけて高めと真中との間、および 80% からインパクトにかけて真中と低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

ステップ脚側の足関節の内外反軸について、関節トルク (d) では、スウィング開始から 30% 付近にかけて打点が高い程、内反トルクが大きく、30% から 90% 付近にかけて打点が低い程、外反トルクが大きかった。その後、再度、インパクト近傍において内反トルクがみられ、打点が高い程、内反トルクが大きかった。関節角速度 (e) では、スウィング開始から 60% 付近にかけて内反角速度がみられ、60% 以降において外反角速度がみられた。関節トルクパワー (f) では、他の軸よりも正および負のトルクパワーが顕著に小さく、スウィング開始から 40% 付近にかけて正のトルクパワーがみられた後、インパクトに近づくにつれて各打点高ともに負のトルクパワーがみられた。

6.3.2.6 左右の下肢関節トルクによる力学的仕事

Figure 6-21 に、左右の下肢関節による仕事を局面毎に正負（正： W_p 、負： W_n ）に分けて示す。各仕事は下肢毎に、股関節（屈曲伸展軸： hFE 、内外転軸： hAA 、内外旋軸： $hIER$ ）、膝関節（屈曲伸展軸： kFE 、内外旋軸： $kIER$ ）、足関節（底背屈軸： $aPDF$ 、内外反軸： $aIEV$ ）の各軸について示す。なお、各仕事の打点高間における統計的な有意差を Table 6-2 に示す。



(a), (d) : Joint torque (b), (e) : Joint angular velocity (c), (f) : Joint torque power

Figure 6-20 Curves of joint torques, joint angular velocities, and joint torque powers of the ankle plantar/dorsal flexion and inversion/eversion axes of the step-side in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

1) 左右の股関節トルクによる力学的仕事

軸脚側の股関節について、ダウン・スウィング局面では、屈曲伸展軸による正仕事が顕著に大きかったものの、打点高間に顕著な差はみられなかった。内外転軸においては正および負仕事がみられ、正仕事は打点が低い程、有意に大きく ($hAA : H < L, M < L, p < 0.05$)、負仕事は打点が低い程、有意に大きく ($hAA : H < M, H < L, p < 0.05$)、内外旋軸においては打点が高い程、正仕事が有意に大きかった ($hIER : H > L, M > L, p < 0.05$)。レベル・スウィング局面では、各軸ともにダウン・スウィング局面に比べて値は小さく、屈曲伸展トルクによる仕事のみ打点が高い程、正仕事が有意に大きかった ($hFE : H > M, H > L, p < 0.05$)。

ステップ脚側の股関節について、ダウン・スウィング局面では、屈曲伸展軸において打点が低い程、正仕事が有意に大きかった ($hFE : H < L, p < 0.05$)。内外転軸においては正および負仕事がみられ、正仕事は大きかったものの、打点高間に顕著な差がみられなかったのに対して、負仕事には有意な差がみられた ($hAA : H < L, M < L, p < 0.05$)。内外旋軸においても正および負仕事がみられ、正仕事に有意な差がみられた ($hIER : H > L, M > L, p < 0.05$)。レベル・スウィング局面では、ほぼ屈曲伸展軸による正仕事のみがみられ、打点が低い程、有意に大きかった ($hFE : H < L, p < 0.05$)。内外転軸において打点が低い程、負仕事が有意に大きく ($hAA : H < L, M < L, p < 0.05$)、内外旋軸においては打点が高い程、正仕事が有意に大きく ($hIER : H > M, p < 0.05$)、また、打点が低い程、負仕事が有意に大きかった ($hIER : H > L, p < 0.05$)。

2) 左右の膝および足関節トルクによる仕事

軸脚側の膝関節について、ダウン・スウィング局面では、内外旋軸による負仕事に有意な差がみられた ($kIER : H > L, p < 0.05$)。レベル・スウィング局面では、屈曲伸展および内外旋軸ともに打点間に顕著な差はみられなかった。ステップ脚側の膝関節について、ダウン・スウィング局面では、屈曲伸展および内外旋軸において軸脚側よりも大きな正仕事

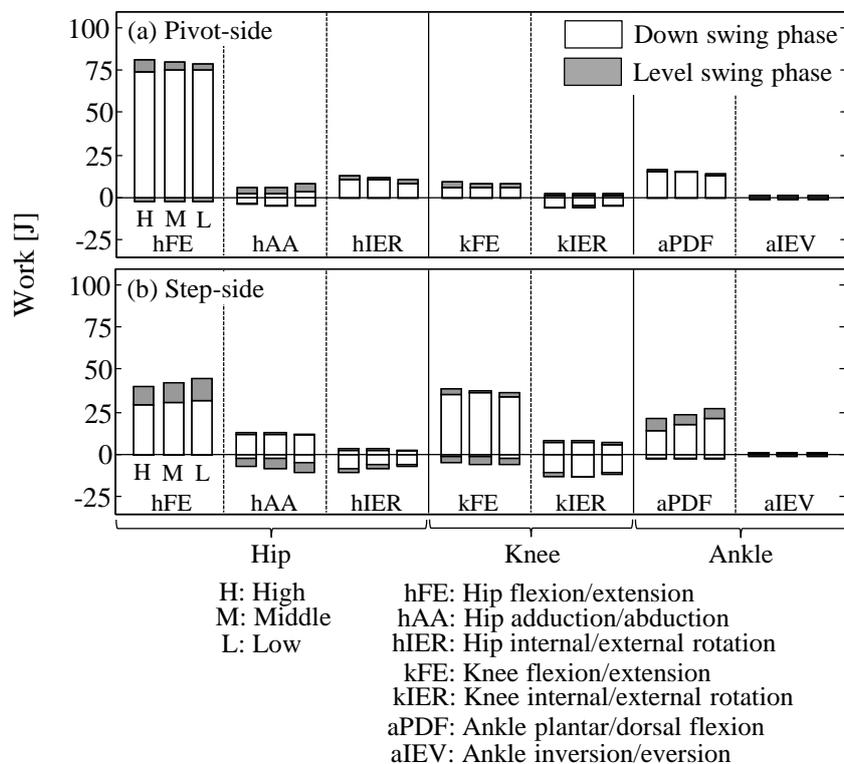


Figure 6-21 The mechanical works done by the lower limbs joint torque (hip, knee, and ankle joint).

Table 6-2 The significant differences of the mechanical works done by the lower limbs joint torque among hitting-point height conditions.

		Down swing phase				Level swing phase			
		Pivot-side		Step-side		Pivot-side		Step-side	
		W_p	W_n	W_p	W_n	W_p	W_n	W_p	W_n
Hip	hFE	—	—	H<L	H>L	H>M, H>L	—	H<L	—
	hAA	H<L, M<L	H<M, H<L	—	H<L, M<L	—	—	—	H<L, M<L
	hIER	H>L, M>L	—	—	H>L	—	—	H>M	H>L
Knee	kFE	—	—	—	—	—	—	H>M, H>L	—
	kIER	—	H>L	—	—	—	H<L	—	—
Ankle	aPDF	H>L	H>M, H>L	H<M<L	—	—	—	—	—
	aIEV	H>L	—	—	H<M, H<L	H>L	—	—	—

Significant difference ($p<0.05$)

H: High
M: Middle
L: Low
 W_p : Positive work
 W_n : Negative work
hFE: Hip flexion/extension
hAA: Hip adduction/abduction
hIER: Hip internal/external rotation
kFE: Knee flexion/extension
kIER: Knee internal/external rotation
aPDF: Ankle plantar/dorsal flexion
aIEV: Ankle inversion/eversion

がみられたものの、打点高間に顕著な差はみられなかったのに対して、レベル・スウィング局面では、打点が高い程、屈曲伸展軸において正仕事が有意に大きかった ($kFE : H>M, H>L, p<0.05$).

足関節について、左右ともに底背屈トルクによる正仕事が顕著にみられ、ダウン・スウィング局面では、軸脚側において打点が高い程、有意に大きく ($aPDF : H>L, p<0.05$), ステップ脚側においては打点が低い程、有意に大きかった ($aPDF : H<M<L, p<0.05$).

6.3.2.7 左右股関節トルクの下胴回転成分

Figure 6-22 に、フォワード・スウィング期における左右股関節トルクの下胴回転成分を示す。各図の左列が軸脚側の値を、右列がステップ脚側の値を示しており、上段 (a), (c) が X_{it} 軸および Y_{it} 軸まわり成分の合モーメント、ならびに下段 (b), (d) が Z_{it} 軸まわり成分のモーメントをそれぞれ示している (高: 点線, 中: 黒線, 低: 灰色線)。正值については、 X_{it} 軸および Y_{it} 軸の合モーメントでは後傾および右傾斜, Z_{it} 軸では反時計まわり, 負値については、 X_{it} 軸および Y_{it} 軸の合モーメントでは前傾および左傾斜, Z_{it} 軸では時計まわりとなる。また、打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している (高-中: Δ , 高-低: $*$, 中-低: \times)。

軸脚側について、 X_{it} 軸および Y_{it} 軸の合モーメント (a) では、スウィング開始から 60% 付近にかけて正值がみられ、60%以降にかけては打点が低い程、負値が大きくなり、主に 80%以降にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。 Z_{it} 軸 (b) では、全フォワード・スウィング期において正值のみがみられ、主に 10% から 70% 付近にかけて打点が低い程、正值が大きく、25% から 45% 付近にかけて高めと真中との間に、10% から 90% 付近にかけて高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

ステップ脚側について、 X_{it} 軸および Y_{it} 軸の合モーメント (c) では、スウィング開始から 50% 付近にかけて打点が高い程、負値が大きく、50% 付近以降においては打点が低い程、

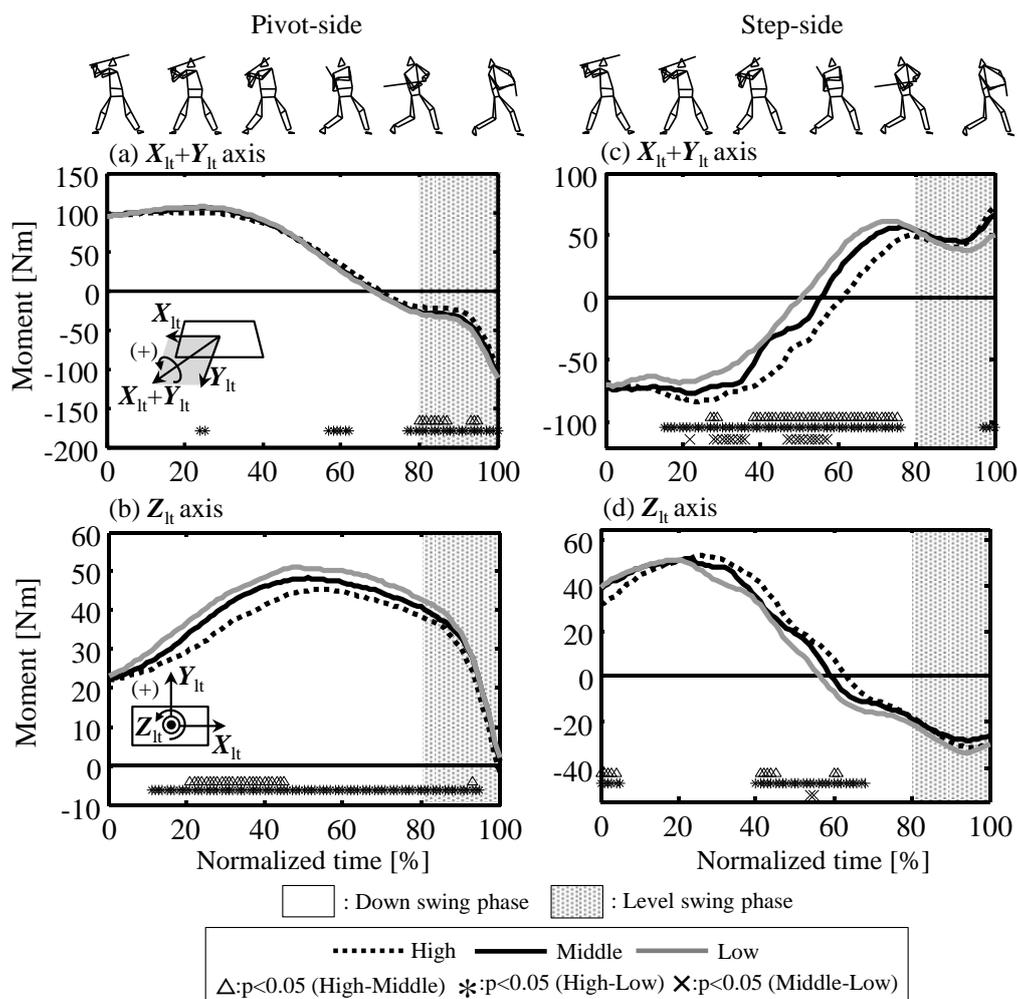


Figure 6-22 Curves of moments about the lower trunk exerted by the individual hip joint torques in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

正值が大きくなり、主に 15%から 75%付近にかけて各打点高間に有意な差がみられた。 Z_{it} 軸 (d) では、スウィング開始から 60%付近にかけて正值がみられ、60%付近以降にかけては打点が低い程、負値が大きかった。そして、40%から 70%付近にかけて、主に高めと低めとの間に有意な差がみられた。

6.3.2.8 下胴の関節力パワーおよびセグメントトルクパワー

Figure 6-23 に、フォワード・スウィング期における下胴の関節力パワーおよびセグメントトルクパワーを示す。左列が関節力パワーを、右列がセグメントトルクパワーを示しており、上段 (a), (d) に下胴と上胴間を、中段 (b), (e) 軸脚側の大腿と下胴間を、そして、下段 (c), (f) にステップ脚側の大腿と下胴間をそれぞれ示している (高:点線, 中:黒線, 低:灰色線)。なお、正值は下胴への力学的エネルギーの流入を、負値は下胴からの力学的エネルギーの流出を、打点高間に有意差がみられた時点には記号を示している (高-中: Δ , 高-低: *, 中-低: \times)。

関節力パワーについて、下胴と上胴間 (a) では、40%から 80%付近にかけて打点が低い程、負の関節力パワーが大きくなり、高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。軸脚側の大腿と下胴間 (b) では、全フォワード・スウィング期において正の関節力パワーのみがみられ、主に 50%から 90%付近にかけて打点が高い程、正の関節力パワーが大きかった。そして、75%から 85%付近にかけて高めと真中との間に、60%から 95%付近にかけて高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。軸脚側の大腿と下胴間 (c) では、スウィング開始から 30%付近にかけては負の関節力パワーがみられ、その後は打点が低い程、正の関節力パワーが増加し、70%付近においてピーク値がみられた後、インパクトに向けて正の関節力パワーは減少していた。そして、スウィング開始から 15%付近にかけて高めと低めとの間、および真中と低めとの間、ならびに 40%から 70%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

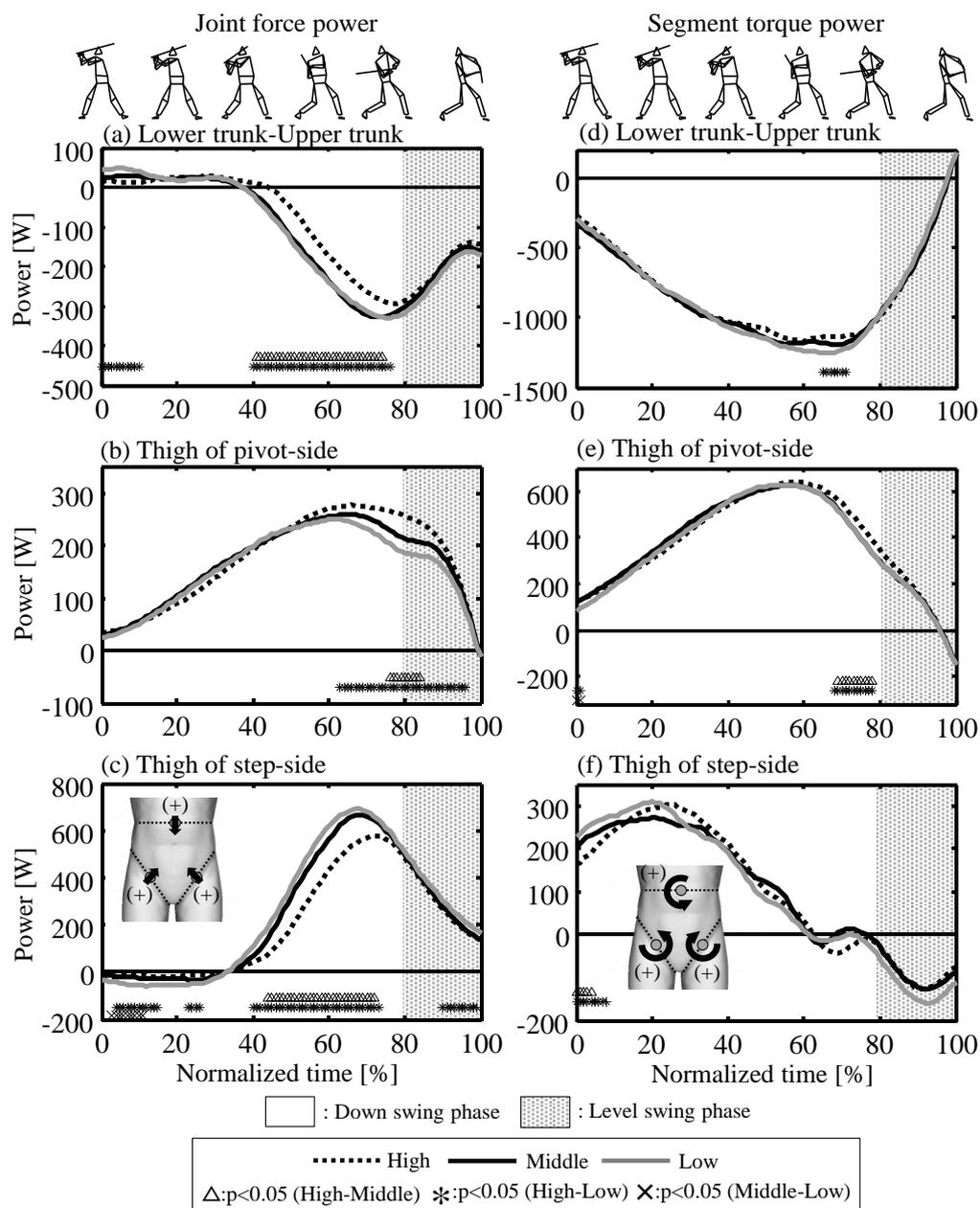


Figure 6-23 Curves of mechanical energy flows for the lower trunk of joint force power and segment torque power in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

セグメントトルクパワーについて、下胴と上胴間 (d) では、フォワード・スウィング期においてほぼ負のセグメントトルクパワーのみがみられ、50%から70%付近にかけて打点が低い程、負のセグメントトルクパワーは大きかった。軸脚側の大腿と下胴間 (e) では、主にスウィング開始から90%にかけて正のセグメントトルクパワーがみられ、70%から80%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。ステップ脚側の大腿と下胴間 (f) では、スウィング開始から正のセグメントトルクパワーのみがみられ、スウィング開始から80%付近にかけて打点が低い程、正のセグメントトルクパワーが大きくなった後、インパクトに近づくにつれて正のセグメントトルクパワーは減少していた。スウィング開始から10%付近にかけて高めと真中との間、および高めと低めとの間にそれぞれ有意な差がみられた。

6.4 考察

6.4.1 打点高の違いに対応するための体幹部の役割について

これまでに野球の打撃動作における先行研究によって、体幹部は上胴と下胴の角度差を作ること、すなわち捻転動作を行うことにより、主に左右回旋軸まわりの角速度を高めて、バット・ヘッドスピードの生成に寄与すると報告されている (Welch *et al.*, 1995 ; 田内ら, 2005 ; 宮西, 2006 ; 宮西・櫻井, 2009 ; 石井ら, 2010 ; 森下ら, 2013)。したがって、ここでは異なる打点高条件下において、体幹部のうち、上胴の役割が打点高の違いによってどのように変化するかについて検討を行う。

6.4.1.1 体幹関節の役割

1) 前後屈軸について

関節トルクでは、30%付近以降において打点が低い程、後屈トルクが有意に大きかった (Figure 6-9 (a))。関節角速度では、0%から50%付近にかけて打点が低い程、前屈角速度が有意に大きくなった後、レベル・スウィング局面において後屈角速度がみられた (Figure

6-9 (b)). 関節トルクパワーでは、インパクトに向けて正のトルクパワーが急激に増大していた (Figure 6-9 (c)). このようにダウン・スウィング局面前半において後屈トルクがみられたものの、後屈トルクによるトルクパワーは小さく、体幹の前後屈動作におけるバットのボール打撃部位速度の鉛直成分に対する幾何学的貢献も小さかった (Figure 6-8 (a)). また、野球の打撃動作における体幹の関節角変位量、すなわち動作範囲は上肢関節と比較して小さいことも考慮すると、体幹の前後屈動作には上胴が前屈し過ぎないように姿勢を維持するような働きがあると考えられる. その後、インパクト近傍においては打点が低い程、後屈トルクが有意に大きくなり、同局面におけるバットのボール打撃部位速度の鉛直成分に対する幾何学的貢献は、打点高によらず鉛直上方速度が大きかった (Figure 6-8 (a)). したがって、インパクト近傍において打点が低い程、大きくなる後屈トルクはバットを起こす角速度の生成 (Figure 4-2 (b)) に寄与すると考えられるものの、前述したようにバットの鉛直下方変位は、ダウン・スウィング局面において主にバットの並進運動によってなされることから、同局面におけるバットへの働きは、打点高への対応には大きく寄与していないと推測される.

2) 左右側屈軸について

関節トルクでは、インパクト近傍において打点が高い程、左側屈トルクが大きかった (Figure 6-9 (d)). 関節角速度では、スウィング開始から右側屈角速度のみがみられ、打点が低い程、その値は有意に大きく (Figure 6-9 (e)), また、関節トルクパワーでは、インパクト近傍において真中、低め、高めの打点高の順に負のトルクパワーが大きかった (Figure 6-9 (f)). このように、特にインパクト近傍において左側屈トルク、および左側屈トルクによる負のトルクパワーが大きかったことから、体幹の左右側屈軸では、インパクトに向けて体幹は右側屈しているのに対して、これに抗するように左側屈トルクを発揮することによって右屈動作を抑制するような働きがみられた. 加えて、第4章のバット長軸の傾斜角

度において、インパクトでは打点が低い程、角度は負値、すなわちバットが鉛直下方に倒れていた (Figure 4-2 (a)). したがって、バット長軸の傾斜に加えて、体幹の傾きを大きくするとバット・ヘッドも大きく鉛直下方へと下がってしまうことから、体幹の左右側屈トルクを発揮することによって左右側屈動作を抑制する働きは、バットの鉛直下方への過度な倒れ込みを防ぐことに寄与すると推測されるものの、その働きは打点高への対応におけるバットの鉛直下方変位と比較して顕著に小さいといえる。

3) 左右回旋軸について

関節トルクでは、スウィング開始から左回旋のみのトルクがみられ、特にインパクト付近において打点が高い程、その値は有意に大きかった (Figure 6-9 (g)). 関節角速度およびトルクパワーでは、30%付近以降において左回旋角速度、および正のトルクパワーがみられ、特にインパクト付近において打点が高い程、それぞれ有意に大きかった (Figure 6-9 (h), (i)). 田子ら (2006a) は、インパクトにおける肩の回転角度 (本研究では上胴の回転角度) について、低めの打点高を打撃する際には、高めおよび真中の打点高に比べて打撃方向への回転角度が小さくなることを報告している。この結果は本研究における上胴および下胴の回転角度の結果とも一致していた (Figure 6-7). その一方で田子らは、打点高への対応には肩および腰の回転よりも四肢の調整が優先されるとの報告も行っており、体幹の左右回旋におけるバットのボール打撃部位速度の鉛直成分に対する幾何学的貢献についても、打点高によらずインパクト近傍において鉛直上方速度がみられた (Figure 6-8 (c)). ここで、体幹の左右回旋運動とバットのボール打撃部位における鉛直速度の生成には、体幹関節点からボール打撃部位までの位置ベクトルと角速度との関係がある ($\mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$). しかしながら、体幹の左右回旋トルク、および左右回旋の角速度が顕著に大きくなるインパクト直前では、バットは倒れた姿勢、すなわち地面と平行に近い姿勢になっていることから、大きなバットの鉛直速度は生成されないといえる。これらのことから、特にレベル・スウィング局面にお

いて打点が高い程、大きくなる左右回旋トルクは、打点高への対応に関係なく、水平方向にバットを加速させるためにバットが打撃方向へと引き抜かれることに伴う、打撃方向への上胴の開き（回転）動作の打点高間による差が影響すると考えられる。

他方、田内ら（2005）は、体幹の捻転動作において、スウィング開始直後に肩よりも腰を早く回転させることによって生じる捻転角速度は、肩の捻り戻しの角加速度を高めることに繋がり、間接的にバット・ヘッドスピードの生成に影響を及ぼすと報告している。宮西（2006）は、体幹の鉛直軸まわりの角運動量を増加させることはバットの角運動量を増加させ、これによってバット・ヘッド速度が大きくなることを報告している。加えて、田内ら、および宮西・櫻井（2009）は、野球打撃における体幹の捻転動作は、体幹筋群の伸張－短縮サイクル（SSC）を用いる運動であり、この体幹の捻転におけるSSCを効果的に利用できることはバット・ヘッドスピードの増加に繋がると報告している。本研究では、インパクト付近において打点が高い程、上胴の打撃方向への回転角度、回転角速度、および捻転角速度の負値が大きかったことから、打点が高い程、左回旋トルクを大きくさせることに影響を及ぼすと推測される。これらの結果に加えて、前述したように、左右回旋トルクによる正仕事とバット・ヘッドスピード最大値との間において正の相関がみられたこと（Figure 6-11）から、バット・ヘッドスピードにおいても打点が高い程、その値は大きくなると予測される。しかしながら、バット・ヘッドスピードは打点が低い程、大きくなり（Table 4-1）、体幹の左右回旋におけるバットのボール打撃部位速度の鉛直成分に対する幾何学的貢献は、主にダウン・スウィング局面後半において打点が低い程、鉛直下方速度が有意に大きかった（Figure 6-8 (c)）。さらに、バットのボール打撃部位速度の水平成分に対する幾何学的貢献は、打点高によらずインパクトにおいて約4.3 m/sであった（Figure A3）。これらのことから、左右回旋トルクの打点高間による差はバット・ヘッドスピードの打点高の差に大きくは寄与していないと考えられる（バット・ヘッドスピードの最大値の約12%）。このため、主に体幹の左右回旋トルクによって生成された力学的エネルギーが左右

上肢，バットへと効率的に伝達されること，そして，第5章の左右上肢の関節トルクおよび関節トルクによる仕事における打点高間の差が，バット・ヘッドスピードの打点高間の差に対して大きく影響を及ぼすと示唆される。

6.4.1.2 上胴の力学的エネルギーの流れ

体幹の左右回旋トルク，および関節トルクによる仕事において打点高間による差がみられ (Figure 6-9 (h), Figure 6-10)，この左右回旋トルクにおける正仕事とバット・ヘッドスピードの間には正の相関がみられた (Figure 6-11)。その一方で，上述したように，主に体幹の左右回旋トルクはバット・ヘッドスピードの打点高間による差に対して大きくは寄与しないと考えられる。これらのことから，体幹関節トルクにより生成された力学的エネルギーが上胴を介して左右上肢へと伝達されることは，打点高の違いによるバットの操作，およびバット・ヘッドスピードの生成に影響を及ぼすと考えられる。したがって，ここでは上胴と左右上腕間における力学的エネルギーの流れについて検討を行う。

1) セグメントトルクパワーについて

下胴と上胴間では，インパクト付近において打点が高い程，力学的エネルギーの流入が有意に大きかった (Figure 6-12 (d))。上胴とバレル側の上腕間では，力学的エネルギーの流出のみがみられ，インパクト付近において高めおよび真中の打点高の値は，低めの打点高の値よりも有意に大きかった (Figure 6-12 (e))。上胴とノブ側の上腕間では，インパクト付近において打点が高い程，力学的エネルギーの流出が有意に大きかった (Figure 6-12 (f))。このように，下胴から上胴への力学的エネルギーの流入は，関節力パワーに比べてセグメントトルクパワーが顕著に大きく，打点が高い程，その流入も大きいことが明らかとなった。上胴と左右の上腕間についても打点が高い程，力学的エネルギーの流出が大きくなり，そのほとんどがノブ側の上腕へと流出していた。先行研究 (小池ら，2003，2006)，および第5章の結果から，ノブ側上肢には打点高への対応に加えて，バット・ヘッドを加速

させる働きもあることが明らかとなっている。したがって、最末端部のスピード獲得が求められるバット・スウィング動作では、上肢各関節には大きな速度および角速度が発生することから、必然的に遠位へと力学的エネルギーが流れることとなる。このため、ノブ側上肢へと流出した大きな力学的エネルギーの大部分は、バット・ヘッドスピードの生成に寄与すると考えられる。ここで野球の打撃動作の特徴として、スウィングが開始されるよりも以前となるテイクバック期において、ステップ脚が接地するまでは打撃方向への身体重心速度は増加するものの、ステップ脚の接地後、スウィングが開始されると同時に、この身体重心速度は減少すると報告されている（平野・町永，1990）。したがって、スウィング開始後において下肢、そして体幹による回転運動が主となり、特にレベル・スウィング局面においては打点が高い程、打撃方向へ上胴を開く動作が行われるために、体幹の左右回旋トルク、下胴の回旋角速度および捻転角速度が大きくなったと推測される（Figure 6-7 (e), (f), Figure 6-9 (g)）。これらの要因から打点が高い程、力学的エネルギーは上胴を介して左右の肩関節へと大きく伝達されると考えられる。

他方、宮西ら（2010）は、野球の打撃動作における体幹の捻転様式は野球の投球動作とほぼ共通であると報告している。そこで、野球の投球動作における力学的エネルギーの流れについてみると、島田ら（2000）は、野球の投球動作におけるストライド脚接地前後の局面では、軸脚側の股関節の伸展および内転トルクによって力学的エネルギーが生成されること、さらに島田ら（2004）は、この軸脚により生成された力学的エネルギーは下胴を介して上胴へと伝達されることを報告している。これらのことを考慮すると、本研究では、打点高の違いによって左右脚による下胴の左右回転運動、および力学的エネルギーの流れに差が生じていたことから、体幹の回旋運動にも打点高間による差が生じたと推測される。また、野球の投球動作では、上胴から投球腕への関節力パワーによる力学的エネルギーの流入が顕著に大きくなるのに対して（宮西ら，1997；島田ら，2000），野球の打撃動作では、フォワード・スウィング期においては回転運動が主となることから、セグメン

トトルクパワーによる力学的エネルギーの下胴から上胴への流入，および上胴から左右上腕への流出が関節力による流出入よりも顕著に大きくなったと考えられる。

2) 関節力パワーについて

関節力パワーはセグメントトルクパワーに比べていずれの値も小さく，下胴と上胴間では，40%付近から70%にかけて，およびインパクト近傍において打点が低い程，力学的エネルギーの流入が有意に大きかった (Figure 6-12 (a))。上胴とバレル側の上腕間では，30%から80%付近にかけて打点が高い程，力学的エネルギーの流入が大きかった (Figure 6-12 (b))。上胴とノブ側の上腕間では，力学的エネルギーの流出のみがみられ，70%付近においてピーク値がみられた後，インパクト付近において打点高間に有意な差がみられた (Figure 6-12 (c))。小池ら (2003, 2006) は，バレル側上肢は主にバット軌道の制御を行うと報告し，また，第 5 章において打点が低い程，バットを鉛直変位させるために上肢各関節の総仕事量が概ね大きくなることが明らかとなっている。これらのことから，打点が高い程，関節力は上腕の動作を抑制するために力学的エネルギーを上胴へと流入させていたと推測される。しかしながら，第 4 章のバットの動き，および第 5 章の上肢関節の分析よって，ダウン・スウィング局面後半では，左右の上肢関節トルクがバットの鉛直下方変位に大きく寄与することが明らかとなっている。このため，前述したように力学的エネルギーを上肢へと流すことによりバット・ヘッドスピードの生成には寄与するものの，これら体幹の関節力が直接的に上肢関節の調整およびバットの鉛直下方変位に及ぼす影響は小さいと考えられる。

他方，ダウン・スウィング局面後半において，下胴から上胴に流入した力学的エネルギーは顕著に小さかったのに対して，上胴からノブ側の上腕に流出した力学的エネルギーは顕著に大きかった。ノブ側の肩関節においては，主に体幹の左右回旋動作によって肩関節力（遠心力）が生成されることから，上胴からノブ側の上腕へと流出する力学的エネルギーが大きくなったと考えられる。しかしながら，同局面における関節力パワーには打点高

間において顕著な差がみられなかったことから、上胴から左右上腕への関節力による力学的エネルギーの流れは、打点高の違いに関係なくスウィングを行う際に共通にみられる特徴であるといえる。

6.4.2 打点高の違いに対応するための下半身の役割について

6.4.1 において、体幹の捻転動作による左右回旋軸まわりのトルク発揮、そして、この左右回旋トルクによって生成される力学的エネルギーの左右上肢への伝達には、打点高間による差異があることが明らかとなった。この体幹の捻転動作には、上胴と下胴の間に位置する体幹関節における回転運動に加えて、下胴の回転運動も影響を及ぼすことから、打点高の違いにより下肢関節においても変化が生じると考えられる。加えて、田子ら (2006a) は、異なる打点高に対応するためには、下肢のうち、とりわけ股関節の重要性について報告し、高木ら (2010b) は、下胴の回転動作における股関節の役割について報告している。

他方、下胴を含む下半身重心の鉛直変位は、打点高間において有意な差がみられたものの、その変位量はバットの総鉛直変位に対して顕著に小さく (Figure 6-13 (a))、また、左右の膝関節および足関節まわりの関節トルクには、打点高間による顕著な差はみられなかったことから、下肢のうち、膝および足関節が下半身重心の鉛直変位に及ぼす影響も小さいと考えられる。ここで、本研究の分析範囲はフォワード・スウィング開始以降、すなわち両脚を地面に支持した局面としている。このため、身体では主に鉛直軸まわりの回転運動が行われており、加えて、並進運動となる鉛直下方への変位を顕著に行うことは回転運動にも影響を及ぼすことになると推測される。したがって、上肢によるバットの鉛直下方変位が顕著に大きくなると考えられる。これらのことを考慮して、ここでは異なる打点高条件に対応するための下半身の役割のうち、下胴および左右股関節の役割について検討を行う。

6.4.2.1 軸脚側の股関節について

屈曲伸展軸について、下肢における他の関節軸と比較して、関節トルク、関節トルクパワー、および関節トルクによる仕事は顕著に大きく、また統計的な有意差はみられたものの、打点高間による差は小さかった (Figure 6-15 (a), (c), Figure 6-21, Table 6-2). 加えて、下半身重心の鉛直変位には打点高間による差がみられたものの、フォワード・スウィング期における変位量においては打点高間による差が小さかった (Figure 6-13 (a)). 高木ら (2010b) は、軸脚側の股関節が外転位の場合、股関節伸展トルクは身体重心を打撃方向へと移動させることに寄与すると報告している。本研究においても股関節は外転位であったことから、屈曲伸展トルクは、打点高への対応に関係なく、主に身体重心を打撃方向へと移動させることに寄与すると考えられる。その一方で、屈曲伸展トルクにおいて打点高間による顕著な差はみられなかったものの、関節角速度においては打点が低い程、伸展角速度が有意に大きかった (Figure 6-15 (b)). 加えて、スウィング開始時点では、田子ら (2006a) と同様に、この股関節の屈曲伸展角は打点が低い程、屈曲角が有意に大きかった (Figure 6-24 (a)). これらのことから、屈曲伸展トルクは打点高間においてほぼ同様であっても、関節角に打点高間による違いがみられたことから、結果的に関節角速度において打点高間による差が生じたと推測される。

内外転軸について、関節トルクでは、特に 30% から 80% 付近にかけて打点が高い程、内転トルクが有意に大きかった (Figure 6-15 (d)). また、40% から 70% 付近にかけて打点が低い程、外転角速度および負のトルクパワーが有意に大きかった (Figure 6-15 (e), (f)). これに対して、股関節トルクの下胴回転成分における軸脚側の X_{ft} 軸および Y_{ft} 軸の合モーメント (股関節の屈曲伸展および内外転トルクに相当) では、打点高間による差はほとんどみられなかった (Figure 6-22 (a)). これらのことから、特にダウン・スウィング局面における内転トルクは、下胴を後傾、あるいは右傾させるような働きがあるものの、打点高への対応に大きくは寄与しないと推測される。また、関節角速度の打点高間による差につい

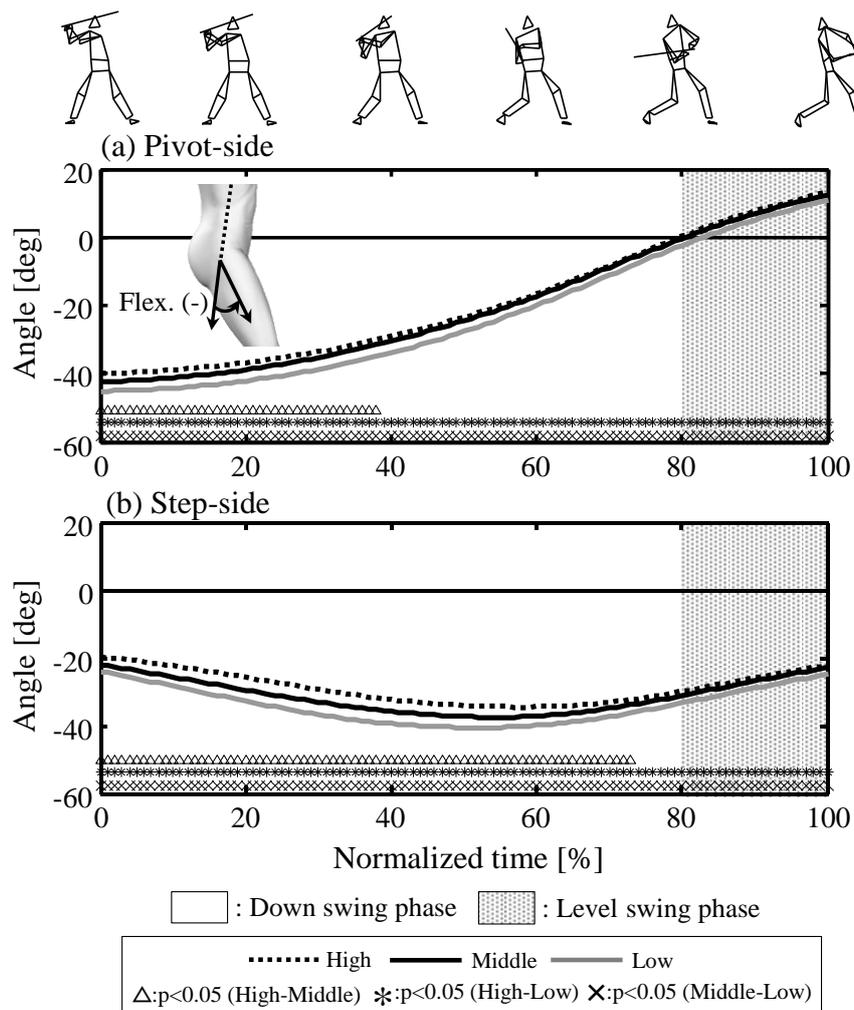


Figure 6-24 Curves of joint angles of the flexion/extension axis of the individual hip joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

では、フォワード・スウィング期において打撃方向への体重移動の際には、下胴が打撃方向へと並進変位、および回転運動するのに対して、軸脚は接地位置からほぼ変位しないことから、下胴と大腿の連結点となる股関節では、相対的な関係から外転角および外転角速度が結果的に生じたと推測される。さらに打点が低い程、打撃方向への下半身重心の水平速度の大きさ（スピード）が有意に大きかったこと（Figure 6-13 (b)）から、打点が低い程、外転角速度が大きくなり、内転トルクによるパワーについても打点が低い程、負のトルクパワーが増大したと考えられる。

内外旋軸について、関節トルクでは、30%から60%付近において打点が高い程、また、インパクト近傍においては打点が低い程、外旋トルクがそれぞれ有意に大きかった（Figure 6-15 (g)）。関節角速度では、スウィング開始から外旋角速度がみられ、関節トルクパワーでは、スウィング開始から55%付近にかけて打点が高い程、正のトルクパワーが有意に大きかった（Figure 6-15 (h), (i)）。上述したように、スウィング開始以降では身体の回転運動が主となり、股関節トルクの下胴回転成分における軸脚側の Z_{lt} 軸のモーメントでは、スウィング開始から下胴を打撃方向へと回転させるモーメントがみられ、 X_{lt} 軸および Y_{lt} 軸の合モーメントよりもその値は小さいものの、主に10%から70%付近にかけて打点高間に有意な差もみられた（Figure 6-22 (b)）。さらに、この下胴の Z_{lt} 軸のモーメントに対する股関節の屈曲伸展、内外転および内外旋軸トルクの内訳についてみると、下胴の Z_{lt} 軸のモーメントに対して股関節の内外旋トルクが大きく寄与しているものの、打点高間に有意な差はみられなかった（Figure 6-25 (a)）。すなわち、股関節の屈曲伸展および内外転トルクは、下胴回転成分の Z_{lt} 軸のモーメントに大きく寄与していないこととなる。これらのことから、内外旋トルクは下胴の打撃方向への回転、および下肢により生成された力学的エネルギーを下胴へと伝達させる働きがあるものの、打点高への対応に対して大きくは寄与しないと考えられる。

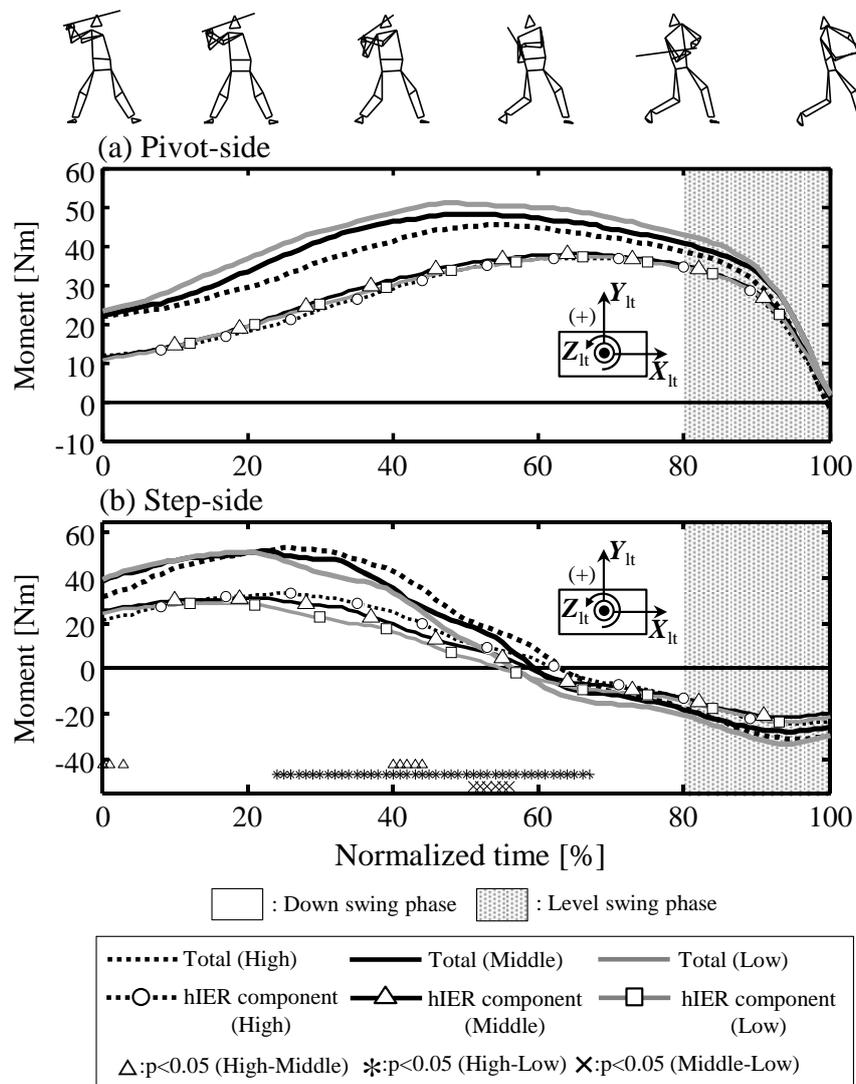


Figure 6-25 Curves of moments about the lower trunk exerted by joint torque of the internal/external rotation axis of individual hip joints in the forward swing motion under hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).

6.4.2.2 ステップ脚側の股関節について

屈曲伸展軸について、田子ら (2006a) は、股関節を大きく屈曲させて打点高に対応していたと報告している。本研究においても田子らの研究と同様に、スウィング開始から 50% 付近において打点が低い程、股関節の屈曲角は有意に大きかった (Figure 6-24 (b))。20% から 60% 付近にかけて打点が高い程、屈曲トルクが有意に大きく (Figure 6-16 (a))、スウィング開始から 30% 付近において打点が低い程、屈曲角速度が有意に大きかった (Figure 6-16 (b))。しかしながら、上述したように下半身重心の鉛直変位は小さかったことから、股関節の屈曲トルクは、打点高への対応、すなわちバットの鉛直変位に対して大きくは寄与しないと推測される。その後、60% 以降においては打点が低い程、伸展トルクおよび正のトルクパワーが大きかった (Figure 6-16 (a), (c))。また、軸脚側の股関節の屈曲伸展トルクによる仕事ほど大きくはないものの、ダウン・スウィングおよびレベル・スウィングの両局面において打点が低い程、正仕事が有意に大きかった (Figure 6-21, Table 6-2)。ここで平野 (1984) は、インパクト直前において、ステップ脚は打撃方向への運動量を減少させて、その代わりにバットが加速されると報告している。加えて、股関節トルクの下胴回転成分におけるステップ脚側の X_{II} 軸および Y_{II} 軸の合モーメントでは、40% 付近以降にかけて打点が低い程、下胴を後傾および右傾させるようなモーメントがみられ、また、インパクトに近づくにつれて軸脚側の X_{II} 軸および Y_{II} 軸の合モーメントを相殺するようなモーメントであった (Figure 6-22 (c))。これらのことから、打撃方向への身体の並進運動を減少させて下胴の回転運動を行うためには、インパクトに近づくにつれて打点が低い程、伸展トルクおよび正のトルクパワーを大きくする必要があると考えられる。加えて、ステップ脚側の股関節の伸展トルクによって軸脚側の X_{II} 軸および Y_{II} 軸の合モーメントを相殺すること、すなわち下胴の前後傾および左右傾を抑制するような働きは、下胴の姿勢を調整して、下胴をより鉛直軸まわりに回転させ易くさせるための作用であると推測される。そして、この股関節の伸展トルクによる下胴への働きは、股関節トルクの下胴回転成分の Z_{II} 軸のモー

メントの結果 (Figure 6-22 (b), (d) Figure 6-25) も考慮すると, 左右の股関節トルク, とりわけ内外旋トルクによる下胴の回転運動を行い易くさせることに繋がると推測される.

内外転軸について, 関節トルクでは, 主に 70%から 80%付近にかけて打点が高い程, 内転トルクが, 80%付近以降においては打点が低い程, 外転トルクがそれぞれ有意に大きかった (Figure 6-16 (d)). 関節トルクパワーでは, スウィング開始直後から 80%付近にかけて打点が低い程, 正のトルクパワーが, 80%以降においては打点が低い程, 負のトルクパワーがそれぞれ有意に大きかった (Figure 6-16 (f)). また, 主にスウィング開始から 60%付近にかけて, ステップ脚側の地面反力の鉛直成分が増大し, 軸脚側からステップ脚側へと体重移動が行われていた (Figure 6-14 (f)). これらのことから, 軸脚側からステップ脚側へと体重移動がなされる際に, ステップ脚側の股関節内転トルク, および正のトルクパワーは, ステップ側脚が打撃方向へと開かないようにする動作, すなわち実際の指導現場におけるステップ脚側に壁を作る (土橋ら, 2009), あるいは膝割れ (斎藤, 2011) を抑制することに寄与すると考えられる. 上述したように, 股関節トルクの下胴回転成分におけるステップ脚側の X_H 軸および Y_H 軸の合モーメントでは, 50%付近以降において打点が低い程, 下胴を前傾および右傾させるようなモーメントがみられた. したがって, 股関節トルクと下胴における作用反作用の関係から, ステップ脚側の股関節内転トルクは, 下胴を前傾および右傾させることに寄与すると考えられる. ここで矢内 (2007) は, 身体の並進移動はステップ脚の接地と同時に大きなブレーキ力を瞬時に発生させるために必要であると報告している. 吉福 (1982) は, ステップ動作を行うことによる並進運動から回転運動への移行は, ステップ脚側とは反対側の端点 (軸脚側の股関節点) の速度増加に寄与することを簡易的なモデルを用いて報告している. これらのことから, ステップ脚の開きを抑制する働きは, 先行研究におけるブレーキ力, すなわちステップ脚側の地面反力の Y 軸成分 (負値) を生成すること, および下胴の打撃方向への回旋角速度を増加させることに寄与すると考えられる.

また、関節トルクパワーに影響を及ぼす内転角速度の打点高間による差については (Figure 6-16 (e)), 上述した軸脚側の股関節外転角速度のように、打点が低い程、下半身重心の打撃方向への水平スピードが大きかったこと (Figure 6-13 (b)) がその要因であると考えられることから、ステップ脚側の股関節において打点が低い程、内転角速度が大きくなったといえる。そして、50%以降では関節角および関節角速度の打点高間による差が小さかったことから、内外転トルクの発揮を打点高間によって調整することは、関節角および関節角速度を打点高間において同様とすることに繋がると推測される。

内外旋軸について、関節トルクでは、主に 55% から 80% 付近にかけて打点が高い程、外旋トルクが有意に大きかった (Figure 6-16 (g))。関節角速度では、45% から 70% 付近にかけて打点が高い程、内転角速度が有意に大きく (Figure 6-16 (h))、関節トルクパワーでは、関節角速度と同様な変化パターンを示し、55% から 70% 付近にかけて打点が高い程、負のトルクパワーが有意に大きかった (Figure 6-16 (i))。また、股関節トルクの下胴回転成分における軸脚側の Z_{it} 軸のモーメントでは、スウィング開始から 60% 付近にかけて下胴を打撃方向へと回転させるモーメントが、それ以降にかけては下胴を捕手方向へと回転させるモーメントがみられた (Figure 6-22 (d))。そして、この下胴の Z_{it} 軸のモーメントに対して、軸脚側と同様に内外旋トルクがその大半を占めていた (Figure 6-25 (b))。これらのことから、ステップ脚側股関節の内外旋トルクの働きは打点が高い程、外旋トルク、および外旋トルクによる負のトルクパワーを発揮して、下胴の回転動作を行うことに寄与するものの、軸脚側の股関節の内外旋軸と同様に、打点高への対応に対して大きくは寄与しないと考えられる。

6.4.2.3 下胴の力学的エネルギーの流れ

6.3.1.6 の下胴から上胴への力学的エネルギーの流れにおいて、特に下胴から上胴へのセグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの流入が顕著にみられ、打点高間による差

もみられた (Figure 6-12 (d)). 野球の打撃動作では, 下肢から動作が開始された後, 体幹, 上肢, そしてバットへと運動が順次行われていくことから, 力学的エネルギーについても下肢から下胴へと伝達され, 且つ打点高の違いに対応するための調整が生じるものと考えられる. そこで異なる打点高条件に対して, 下肢によって生成された力学的エネルギーがどのように体幹部へと伝達されるかを明らかにするために, 左右大腿と下胴間における力学的エネルギーの流れについて検討を行う.

なお, 下胴における関節力パワーおよびセグメントトルクパワーは, 地面反力データを用いて下肢の逆動力学演算から算出した関節力および関節トルクから算出している. このため, 下胴における関節力パワーおよびセグメントトルクパワーの流入出量と, センサー・バットを用いて, 上肢の逆動力学演算から算出した上胴の関節力パワーおよびセグメントトルクパワーの流入出量とは一致していない.

1) セグメントトルクパワーについて

下胴と上胴間では, 60%から70%付近にかけて打点が低い程, 力学的エネルギーの流出が大きかった (Figure 6-23 (d)). 軸脚側の大腿と下胴間では, スウィング開始から90%にかけて力学的エネルギーの流入がみられた (Figure 6-23 (e)). ステップ脚側の大腿と下胴間では, スウィング開始から60%付近にかけて打点が低い程, 力学的エネルギーの流入が大きくなった後, インパクトに向けて力学的エネルギーの流出が増大していた (Figure 6-23 (f)). このように, 下胴から上胴への力学的エネルギーの流出は, 上胴の力学的エネルギーの流れの結果と同様に, 関節力パワーに比べてセグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの流出量が大きくなることが明らかとなった. また, 同局面における下胴セグメントの回転角速度には打点高間による顕著な差はみられなかったのに対して (Figure 6-7 (f)), 体幹の左右回旋トルクは打点が低い程, 左回旋トルク (打撃方向) が大きかった (Figure 6-9 (g)). これらのことから, 打点が低い程, 下胴から上胴への力学的エネルギーの流出が

大きくなる要因は、体幹の左右回旋トルクの打点高間による差が影響すると考えられる。加えて、この下胴から上胴への力学的エネルギーの流出量は、左右の大腿から下胴への流入量に比べておよそ 2 倍の大きさであった。ここで、股関節トルクの下胴回転成分における Z_H 軸まわりのモーメントについてしてみると、軸脚側では全フォワード・スウィング期において、ステップ脚側ではスウィング開始から 60% 付近にかけて下胴における打撃方向へのモーメントがみられた (Figure 6-22 (b), (d))。また、前述したように野球打撃における体幹の捻転動作は体幹筋群の伸張-短縮サイクル (以下, SSC) を用いる運動であり (田内ら, 2005 ; 宮西・櫻井, 2009), この SSC による筋の活性水準の増大, およびそれに伴う出力の増大は, 筋の伸張速度に依存すると報告されている (Cavagna *et al.*, 1968 ; Aura and Komi, 1986)。これらのことから, 左右の股関節トルク, とりわけ内外旋トルクによって打撃方向への下胴の回転運動を生成することは, 下胴の力学的エネルギーを増大させることに繋がるといえる。この下胴の回転運動は体幹の捻転動作を生じさせて左右回旋トルクを増大させることにも繋がり, 下胴から上胴へと力学的エネルギーの流入量を増加させることに有効であることが示唆される。しかしながら, セグメントトルクパワーの打点高間による差は大きくないことから, セグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの伝達は, 打点高への対応に関係なくバット・ヘッドスピードの生成, およびスウィング運動に必要なものであると考えられる。

2) 関節カパワーについて

下胴と上胴間では, 40% から 80% 付近にかけて打点が低い程, 力学的エネルギーの流出が有意に大きかった (Figure 6-23 (a))。軸脚側の大腿と下胴間では, 主に 60% から 90% 付近にかけて打点が高い程, 力学的エネルギーの流入が有意に大きかった (Figure 6-23 (b))。ステップ脚側の大腿と下胴間では, 主にダウン・スウィング局面後半にかけて打点が低い程, 力学的エネルギーの流入が有意に大きくなった後, インパクトに近づくにつれてその

流入量は減少していた (Figure 6-23 (c)). このように、関節力によるパワーは、セグメントトルクパワーに比べて小さいものの、打点高の違いにおける下胴から上胴への流出、および左右の大腿から下胴への流入には顕著な差があることが明らかとなった。特にダウン・スウィング局面後半において打点が低い程、下胴から上胴への流出量が大きくなったことには、ステップ脚側の大腿から下胴への力学的エネルギーの流入が影響しているといえる。すなわち打点が低い程、ステップ脚側の股関節力、および下半身重心の水平スピードが大きくなることがその要因として考えられる。

他方、ダウン・スウィング局面において、左右の大腿から下胴へと流入した力学的エネルギーに比べて、下胴から上胴へと流出した力学的エネルギーは小さかった。上述したように、平野 (1984) は、ステップ脚は打撃方向への運動量を減少させると報告し、矢内 (2007) は、身体の並進移動はステップ脚の接地と同時に、大きなブレーキ力を発生させると報告している。また、ダウン・スウィング局面では、打撃方向への下半身重心の水平スピードは各打点高において最大値でおよそ 1.0 m/s であったのに対して (Figure 6-13 (b)), 下胴の回転角速度は打撃方向におよそ 10 rad/s であった (Figure 6-7 (e)). これらのことから、スウィング開始以降、下胴では並進運動よりも回転運動が顕著に行われることから体幹の関節力パワーの減少、すなわち左右脚から下胴へと流入した関節力による力学的エネルギーは、セグメントトルクパワーと比較して下胴を介して上胴へとそこまで大きくは伝達されないと考えられる。したがって、左右脚の関節力による力学的エネルギーは、体幹を介して上肢へと伝達されるというよりは、身体が回転運動を行う際に身体を支持することに寄与すると考えられる。特にステップ脚においては、セグメントトルクパワーと比較して関節力パワーが大きいこと、および地面反力の Y 軸および Z 軸成分も顕著に大きかったこと (Figure 6-14 (e), (f)) を考慮すると、身体を地面に対して支持する際には、股関節のトルク発揮よりも関節力の利用、すなわち脚の軸力を利用することが有効であると推測される。

6.5 要約

本章の目的は、異なる打点高条件に対するティー打撃動作における体幹および下肢のキネティクスの分析から、異なる打点高に対応するための体幹および下肢の役割について明らかにすることであった。その結果、以下のことが明らかとなった。

6.5.1 体幹について

- ① 体幹の前後屈について、特にインパクト近傍において打点が低い程、後屈トルクが有意に大きかった。体幹の左右側屈については、インパクト近傍において、打点高によらず大きな左側屈トルクおよび負のトルクパワーがみられた。
- ② 体幹の左右回旋について、特にインパクト近傍において打点が高い程、左回旋トルクおよび正のトルクパワーが有意に大きかった。また、左右回旋トルクによる力学的仕事については、ダウン・スウィング局面において打点が低い程、レベル・スウィング局面においては打点が高い程、ともに正仕事が有意に大きかった。
- ③ 左右回旋トルクによる正仕事とバット・ヘッドスピード最大値との間には、ダウン・スウィング局面およびレベル・スウィング局面ともに正の相関関係 ($r=0.362, p<0.05$; $r=0.288, p<0.05$) がみられた。
- ④ セグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの流れについて、ダウン・スウィング局面後半において打点が高い程、下胴から上胴への流入、および上胴からノブ側上腕への流出が大きく、上胴からバレル側上腕では真中、高め、低めの順に流出が大きかった。
- ⑤ 関節力パワーによる力学的エネルギーの流れについて、ダウン・スウィング局面後半において打点が低い程、下胴から上胴への流入、および打点が高い程、バレル側上腕から上胴への流入、ならびに上胴からノブ側上腕への流出がそれぞれ有意に大きかった。

以上のことから、異なる打点高への対応について、特にレベル・スウィング局面において打点が高い程、バットが打撃方向へと引き抜かれることに伴う上胴の打撃方向への回旋動作に対して、左右回旋トルクが寄与すると考えられる。また、体幹の前後屈および左右側屈トルクについては、バットを鉛直上方へと起こす角速度の生成、およびバットが鉛直下方へと過度に倒れないように上胴の動きを抑制する働きもみられた。しかしながら、これらの働きはいずれもインパクト直前にみられたのに対して、バットの鉛直下方変位は、主にダウン・スウィング局面に大きくなることから、打点高対応に及ぼす影響は小さいと推測される。加えて、打点が高い程、体幹の左右回旋トルクは大きな力学的エネルギーの生成、および上胴を介して左右上肢、とりわけノブ側上肢へと大きな力学的エネルギーを伝達して、バット・ヘッドスピードの生成に寄与すると考えられる。

6.5.2 下肢について

- ① 地面反力について、主にダウン・スウィング局面において、 X 軸成分では左右脚による偶力成分が大半を占め、 Y 軸および Z 軸成分では主にステップ脚側が捕手方向、および鉛直上方向の反力が顕著にみられ、それぞれ打点高間による差もみられた。
- ② 軸脚側の股関節について、屈曲伸展軸ではスウィング開始から主に大きな伸展トルクおよび正のトルクパワーがみられたものの、打点高間による差は小さかった。内外転軸では主にダウン・スウィング局面において内転トルクおよび負のトルクパワーに打点高間による有意な差がみられた。内外旋軸では外旋トルクおよび正のトルクパワーのみがみられたものの、打点高間による差は小さかった。
- ③ ステップ脚側の股関節について、ダウン・スウィング局面前半において打点が高い程、屈曲トルクが、ダウン・スウィング局面後半以降において打点が低い程、伸展トルクおよび正のトルクパワー、ならびに打点が高い程、内転トルクがそれぞれ有意に大きかった。インパクト近傍においては打点が低い程、外転トルクおよび負のトルクパワ

一が有意に大きかった。内外旋軸では外旋トルクおよび負のトルクパワーがみられたものの、軸脚側と同様に、打点高間による差は小さかった。

- ④ 関節トルクによる力学的仕事について、左右脚ともに股関節の屈曲伸展および内外転トルクによる仕事が各打点高ともに大きく、且つ打点高間に有意な差がみられた。また、左右の膝関節および足関節の仕事は打点高間に顕著な差はみられなかった。
- ⑤ 股関節トルクによる下胴回転成分について、軸脚では打撃方向へのモーメントのみがみられ、ステップ脚では主にダウン・スウィング局面前半において打撃方向へのモーメントがみられた。これらのモーメントには左右脚ともに股関節の内外旋トルクが大きく寄与していたものの、打点高間による顕著な差はみられなかった。
- ⑥ セグメントトルクパワーによる力学的エネルギーの流れについて、主にダウン・スウィング局面後半において打点が低い程、下胴から上胴への流出、および打点が高い程、軸脚側の大腿から下胴への流入がそれぞれ有意に大きかった。
- ⑦ 関節力パワーによる力学的エネルギーの流れについて、主にダウン・スウィング局面後半からインパクト近傍にかけて打点が低い程、下胴から上胴への流出、およびステップ脚側から下胴への流入、ならびに打点が高い程、軸脚側の大腿から下胴への流入がそれぞれ有意に大きかった。

以上のことから、異なる打点高への対応について、ダウン・スウィング局面後半以降において、ステップ脚側の股関節の屈曲伸展および内外転トルクは、打点高によって発揮するトルクを調整して、打撃方向へのステップ脚側の開き動作を抑えつつ、並進運動から回転運動への切り替えに寄与すると考えられる。これに対して軸脚側の股関節トルクは、全フォワード・スウィング期において、打点高によらず下胴を打撃方向へと並進および回転運動させることに寄与すると考えられる。加えて、左右の股関節トルクは、下肢によって生成した力学的エネルギーを下胴の回転運動によって上胴へと伝達すること、ならびに下胴の回旋動作および体幹の捻転動作を生じさせて、体幹の左右回旋トルクを発揮させるこ

とも寄与すると考えられる。しかしながら、左右の下肢トルクは、身体を鉛直変位させることによる打点高への対応に大きくは寄与しないと推測される。

第7章 異なる打点高に対応するための指導への示唆

本研究の目的は、異なる打点高条件に対する野球打撃動作のキネティクスの分析を行い、打点高の違いに対応する際のバイオメカニクス的な特徴を明らかにし、競技力の向上および指導に有用な知見ならびに示唆を得ることであった。第4章から第6章において、打点高に対応する際のバットおよび各手、ならびに身体各関節の役割について詳細に分析を行った。その結果、異なる打点高への対応には、主に左右各手および左右の上肢関節が寄与することが明らかとなった。加えて、打点が低い程、バット操作に対して上肢の各関節トルクの短時間での増大が必要となることから、田子ら(2009a)の報告と同様に、低めの打点高への対応は、高めの打点高に比べて困難となることが明らかとなった。したがって、異なる打点高条件のうち、とりわけ低めの打点高への対応に関する知見を獲得することは、野球打撃動作における技術の向上に繋がると考えられる。

そこで本章では、上位群および下位群における低めの打点高への対応様式の特徴を明らかにすることにより、打点高の違いに対応するための指導への示唆を導き出すことを目的とした。具体的には、バットの動き、各手の作用力および作用モーメント、ならびに上肢の関節角速度、トルク、およびトルクパワーなどの各パラメータから低めの打点高への対応の差について検討した。その結果から、群間において、バット・ヘッド軌道とバット長軸力の鉛直成分との関係、左右の肩および肘関節の屈曲伸展トルクの働き、ならびにバレル側上肢の働きに関する差が、低めの打点高への対応の差、すなわちパフォーマンスの差に繋がることについて述べていく。

7.1 上位群および下位群の選定

本研究では、3打点高条件(高、真中、低)におけるティー打撃動作を各打点高に対して7回程度行った。その結果、いずれの被験者においても高めおよび真中の打点高条件では、

Table 7-1 Performance description and self-evaluation under the low hitting-point height condition with high group and low group.

High group														
Subj. 7		Subj. 8		Subj. 10		Subj. 12		Subj. 19		Subj. 21		Subj. 23		
Trial	Success / Failure	Self-evaluation [1-5]	Success / Failure											
1	O	4	x	2	x	3	O	4	O	4	x	1	x	2
2	O	4	O	3	O	4	O	5	O	3	O	5	O	3
3	x	3	O	3	x	2	O	4	x	4	Δ	2	O	3
4	O	4	x	3	O	3	O	5	O	3	O	4	x	3
5	O	4	O	3	O	4	O	4	x	3	O	3	O	5
6	x	3	O	3	O	4	O	4	O	5	O	3	O	3
7	O	4	O	3	O	3	O	4	O	5	x	1	Δ	2

Low group															
Subj. 5		Subj. 6		Subj. 11		Subj. 14		Subj. 17		Subj. 18		Subj. 20		Subj. 22	
Trial	Success / Failure	Self-evaluation [1-5]													
1	x	1	x	1	x	2	x	1	x	1	x	3	O	1	
2	x	3	x	2	x	2	x	1	x	2	Δ	4	O	2	
3	x	3	x	1	O	5	Δ	3	x	1	x	2	x	2	
4	O	4	x	1	x	3	x	1	O	4	x	1	x	3	
5	x	3	x	1	x	5	x	3	x	1	Δ	2	x	4	
6	x	4	x	1	x	3	x	1	x	2	Δ	2	x	3	
7	x	1	x	1	O	5	Δ	3	Δ	4	x	2	Δ	5	
8			x	1	x	1	x	3		4	O	4	x		
9			O	3	x	3	x	3		4	O	1	x		

試技の成功数に大きな差はみられなかった。これに対して、低めの打点高条件では、被験者によって成功数に大きな差がみられた。そこで、スウィング実験における低めの打点高条件に対する試技結果から、試技の成功数が失敗数を3回以上多く上回った被験者を上位群、これに対して試技の失敗数が成功数を3回以上多く上回った被験者を下位群とした (Table 7-1)。その結果、全被験者23名において、上位群は7名、下位群は8名となった。なお、Table 7-1における灰色は、第4章から第6章において分析対象とした試技を示している。

これ以降では、低めの打点高条件における各パラメータについて、上位群、下位群における各被験者の分析対象試技の平均値、および全被験者の平均値（以下、全平均値）を比較、検討していく。なお、各算出項目（時系列データであれば規格化時間の1%毎）における上位群と下位群間との有意差に対する要因について、対応のないt検定を適用し、有意水準5%の検定を行った。

7.2 バットおよび左右各手について

1) バット長軸の傾斜角度および角速度

第4章において、打点高の違いに対応するためのバットの動きに関して、バットの起し倒しを示すバット長軸の傾斜角度および角速度において、打点高間による顕著な差異がみられたことから、バット長軸の傾斜は打点高への対応に有効なバットの動きであることが明らかとなった。

Figure 7-1 に、低めの打点高条件におけるバット長軸の傾斜角度 (a)、および角速度 (b) をそれぞれ示す (上位群：実線、下位群：点線、全平均値：灰色線)。また、群間に有意差がみられた時点には記号を示している (上位群－下位群：*)。同図 (a) から、スウィング開始時点では、上位群および全平均値の角度はほぼ同様であったのに対して、下位群の角度は上位群および全平均値よりも正值が大きかった。同図 (b) から、主に20%から50%付

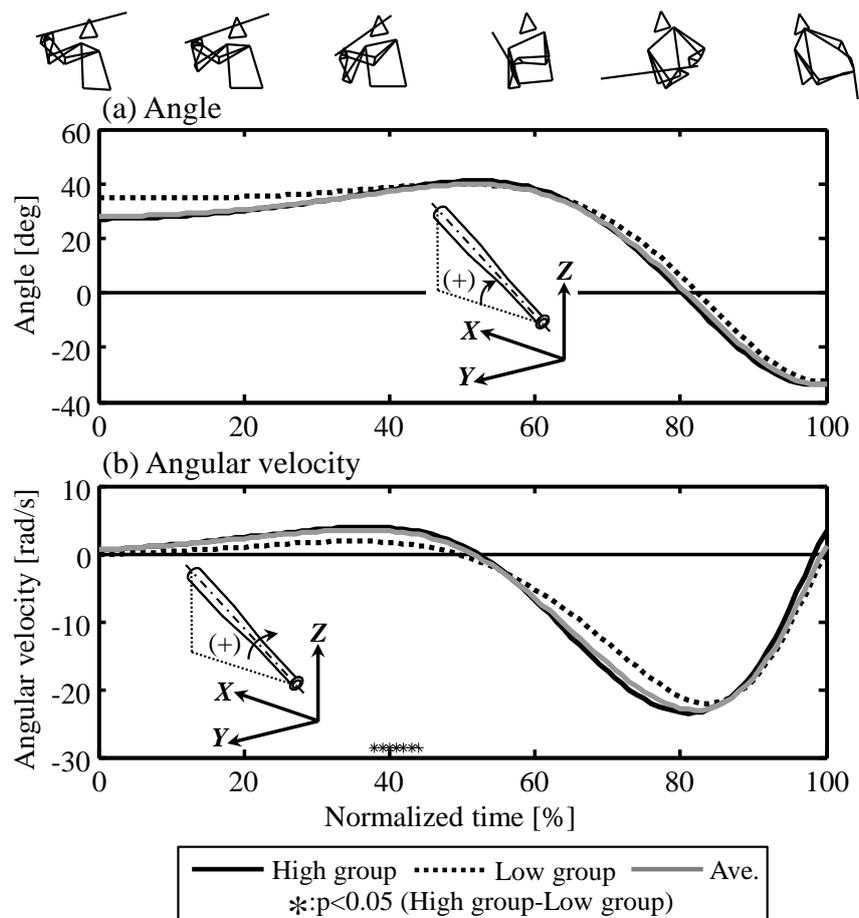


Figure 7-1 Curves of angles and angular velocities about the bat inclinational axis in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.

近にかけて上位群および全平均値は下位群よりも正値が大きく、その後、60%から85%付近にかけて上位群および全平均値の角速度は、下位群よりも負値のピークを迎える時点が早かった。

2) 打点高への対応に寄与する左右各手の作用力および作用モーメント

第4章において、異なる打点高への対応には、左右各手のバット作用力および作用モーメントのうち、バット長軸力の鉛直成分 (F_{y_z})、バット起し倒し軸まわりの作用モーメント (M_x)、およびこの軸まわりのモーメントとして作用する両手による偶力成分 (F_{z_cpl}) の3成分が主に寄与することが明らかとなった。

Figure 7-2 に、低めの打点高条件における上記3成分に関連する左右各手の作用力および作用モーメントの時系列データをそれぞれ示す(上段 (a) : 作用力の Y_{bat} 軸成分, 中段 (b) : 作用力の Z_{bat} 軸成分, 下段 (c) : 作用モーメントの X_{bat} 軸まわり成分)。ここで、実線は上位群の値を、点線は下位群の値を、灰色線は全平均値を示し、丸記号はノブ側手の値を示している。また、上位群および下位群間に有意差がみられた時点には記号を示している(バレル側 : *, ノブ側 : ×)。同図から、作用力の Y_{bat} 軸成分 (a) について、特にインパクト近傍において、ノブ側手の作用力は上位群、全平均値および下位群の順に正値が大きくなり、70%以降において有意な差がみられた。作用力の Z_{bat} 軸成分 (b) について、主に25%から80%付近において下位群における両手の偶力成分は、上位群および全平均値よりも大きく、バット・ヘッドを起こすように作用していたのに対して、80%以降における両手の偶力成分は上位群、全平均値および下位群の順に有意に大きく、バット・ヘッドを倒すように作用していた。作用モーメントの X_{bat} 軸まわり成分 (c) について、スウィング開始から60%付近にかけてノブ側手の負値は、上位群および全平均値が下位群よりも大きく、また、インパクト近傍においてノブ側手の負値は、上位群が下位群および全平均値よりも大きかった。

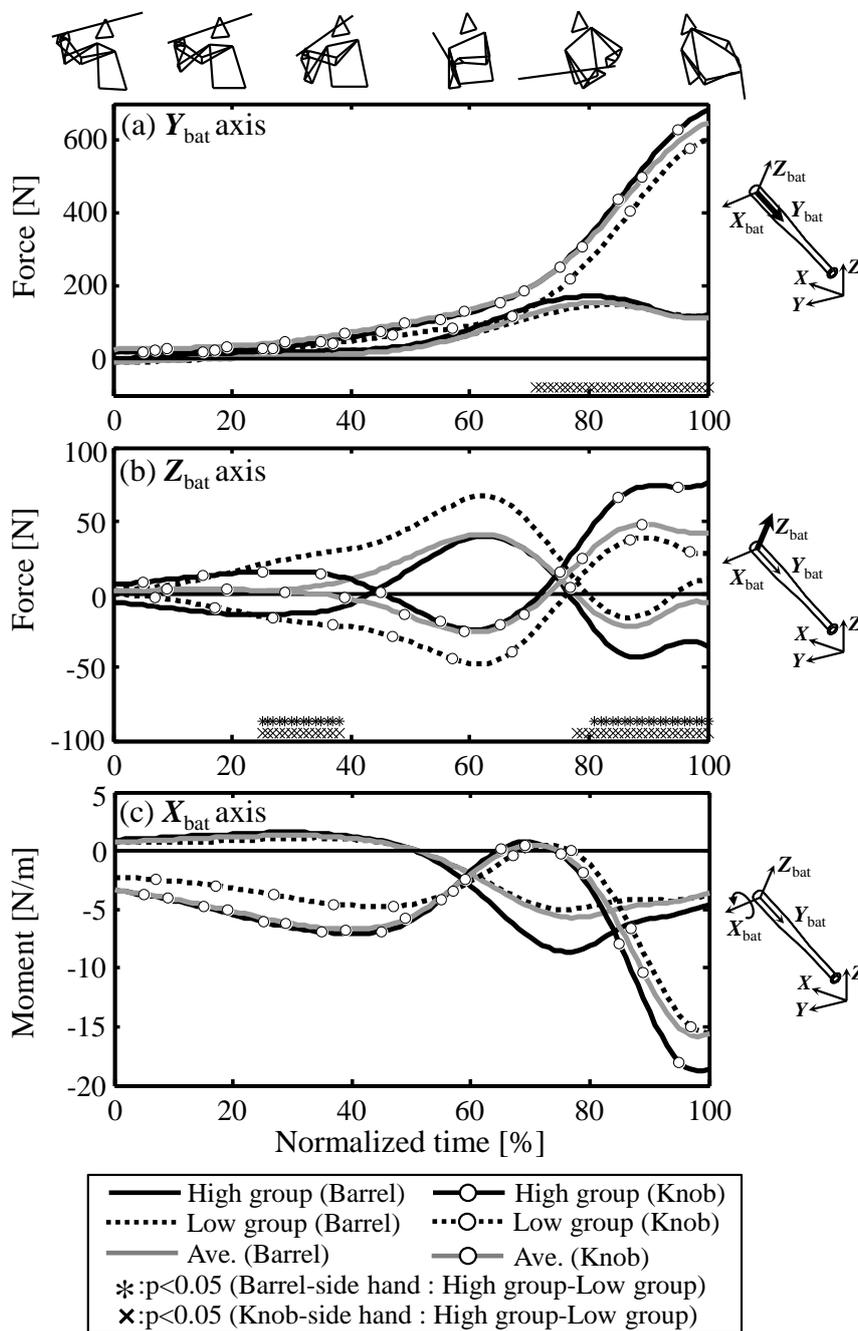


Figure 7-2 Curves of forces (Y_{bat} and Z_{bat}) and moments (X_{bat}) expressed by the axis of moving bat coordinate system in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.

3) 打点高への対応に寄与する左右各手の力学的仕事

Figure 7-3 に、低めの打点高条件における上記3成分による左右各手の力学的仕事を示す(上段:上位群, 中段:下位群, 下段:全平均値)。なお, 統計結果の表記については, レベル・スウィング局面におけるバレル側手の偶力成分による正仕事のみに有意な差がみられたことから割愛している。同図から, 3群ともに左右各手および各成分ともに仕事の傾向は同様であったものの, 特にノブ側手では, ダウン・スウィング局面におけるバット長軸力の鉛直成分では, 上位群および全平均値の正仕事は下位群よりも顕著に大きかった。

4) 低めの打点高に対応するための有効なバットの動き

バットの傾斜角度では, スウィング開始から 40%付近にかけて, 傾斜角速度では, 60%から 80%付近にかけて, 上位群と下位群との間に差がみられた (Figure 7-1)。しかしながら, 第4章において明らかになったように, 打点高への対応にはバットの並進運動が大きく寄与することから, バット長軸の起し倒しの角度および角速度における群間の差が, 打点高への対応の差を決定する要因にはならないと推測される。ノブ側手のバット長軸力では, インパクト近傍において上位群は下位群よりも顕著に値が大きく (Figure 7-2 (a)), 3成分による各手の力学的仕事では, 特にダウン・スウィング局面において, 上位群は下位群よりもノブ側手におけるバット長軸力の鉛直成分による正仕事が顕著に大きかった (Figure 7-3)。これらのことから, 低めの打点高への対応には, 特にダウン・スウィング局面において, ノブ側手によるバット長軸力の鉛直成分を増大させて, バットの並進運動を利用してバットを鉛直下方へと変位させられることが, パフォーマンスの差を決定する大きな要因になると考えられる。このため, 下位群はバットの鉛直変位に対して支配的に寄与する, ダウン・スウィング局面におけるノブ側手のバット長軸力の鉛直成分による正仕事が小さかったことから, バットの鉛直変位が十分になされずに, ボールを上手く打撃できていなかったと推測される。

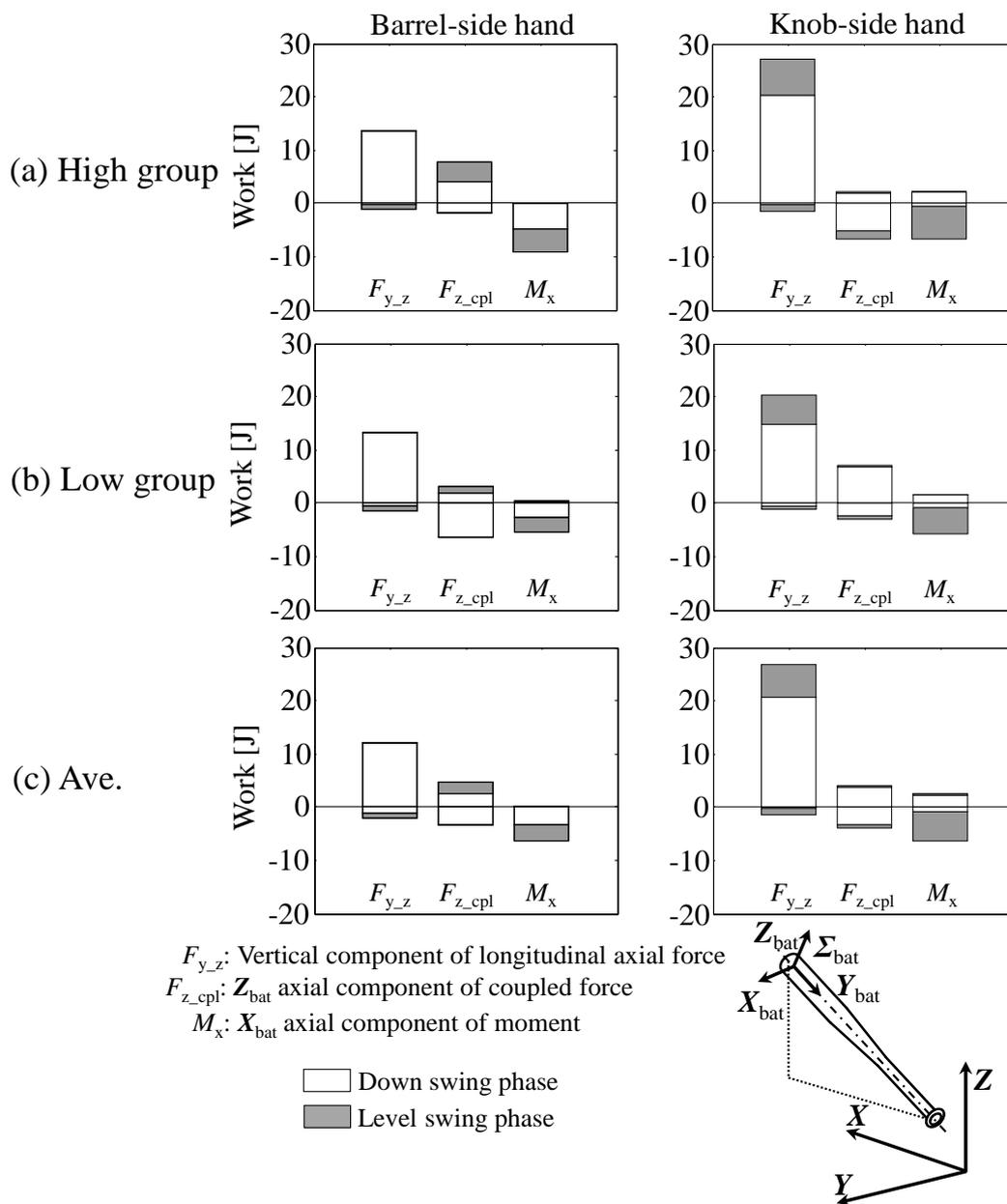


Figure 7-3 Mechanical works done by the three components which mainly contribute to generate vertical motion of bat head under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.

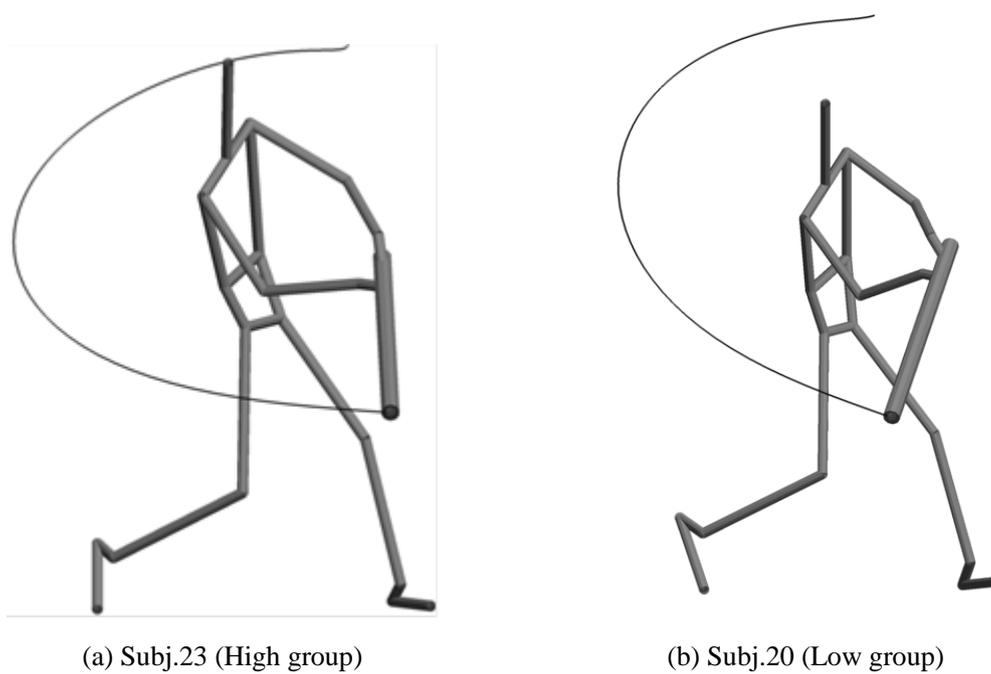


Figure 7-4 Stick diagram of the bat swing and configuration at the ball impact under the low hitting-point height condition with Subj. 23 (high group) and Subj. 20 (low group).

ここで、一例として上位群の Subj. 23 および下位群の Subj. 20 のバット・スウィング軌道についてみる (Figure 7-4). 特にインパクト直前において、上位群の Subj. 23 (Figure 7-4 (a)) は、下位群の Subj. 20 (Figure 7-4 (b)) に比べて、バットが地面と平行となる、すなわち指導現場において表現されるレベル・スウィングのバット軌道であり、バットの姿勢変化を緩やかにしながらインパクトを迎えていた。これに関連して、特にレベル・スウィング局面において、バットの回転運動としてバット起し倒しに寄与する、両手の偶力成分および作用モーメントについて、上位群は下位群および全平均値よりもその値が大きかった (Figure 7-2 (b), (c)). そして、上位群の Subj. 23 においてもバットの回転運動に寄与する各手のキネティクス量が大きくなる傾向がみられた。これらの点を考慮すると、ダウン・スウィング局面におけるバット長軸力によるバットの並進運動に加えて、インパクト直前では、ボールを正確にミートするためのバットの調整として、バットの姿勢制御に寄与するバットの回転運動を利用できることが重要となることが改めて示唆される。

他方、バットの動きとバット・ヘッドスピードとの関係について、川村ら (2000) は、バット・ヘッドスピードが大きな選手は、より早い局面からバットが水平になるスウィング軌道であったと報告している。ここで、低めの打点高条件における上位群および下位群のバット・ヘッドスピードの最大値、バット長軸力の最大値、および全フォワード・スウィング期における平均力についてみてみると、上位群のバット・ヘッドスピードの最大値、ならびにノブ側手におけるバット長軸力の最大値および平均力は、下位群よりも有意に大きかった (Table 7-2). さらに、上述した Figure 7-4 (a) における上位群の Subj. 23 のバット・スウィング軌道はレベル・スウィングのバット軌道であり、低めの打点高におけるバット・ヘッドスピードは全被験者において最大であった (Table 7-2). したがって、インパクト直前におけるレベル・スウィングのバット軌道は、バット・ヘッドスピードに大きく寄与するバット長軸力の水平成分を増大させることに繋がると考えられる。また、上位群は下位群と比較して、バット・ヘッドスピードおよびノブ側手のバット長軸力が大きかつ

Table 7-2 Maximum values of bat-head speed, maximum values and average forces of the bat longitudinal axial force of each hand for the low hitting-point height condition with high group and low group.

Subject (HG)	Maximum value of bat-head speed [m/s]	Maximum value [N]		Average force [N]	
		Barrel-side hand	Knob-side hand	Barrel-side hand	Knob-side hand
7	36.3	174.9	612.8	53.3	160.6
8	35.8	131.0	680.4	43.9	176.9
10	38.3	193.2	702.2	81.5	148.5
12	36.6	145.6	656.8	52.0	200.1
19	36.9	132.7	727.0	54.0	219.2
21	37.5	215.9	760.8	94.9	174.4
23	38.9	223.6	637.0	105.2	163.3
Ave.	37.2	173.9	682.4	69.3	177.6
S.D.	1.1	38.6	51.8	24.3	24.5

Subject (LG)	Maximum value of bat-head speed [m/s]	Maximum value [N]		Average force [N]	
		Barrel-side hand	Knob-side hand	Barrel-side hand	Knob-side hand
5	35.5	157.2	599.9	37.9	150.1
6	35.8	168.9	555.1	64.5	142.1
11	37.5	190.0	783.4	97.8	169.1
14	33.1	110.2	526.1	25.3	140.3
17	36.8	202.6	575.6	60.1	124.5
18	33.7	106.5	590.9	48.5	173.4
20	33.8	152.0	537.0	63.3	130.4
22	36.3	198.1	644.9	63.0	146.9
Ave.	35.3	160.7	601.6	57.5	147.1
S.D.	1.6	37.1	82.6	21.5	17.1

Signature	HG>LG *	n.s.	HG>LG *	n.s.	HG>LG *
-----------	---------	------	---------	------	---------

*: $p < 0.05$

た。このため、本研究の結果から、打点高に関係なく、基本的にバット・ヘッドスピードが大きな被験者ほど打点高への対応を行える可能性があることも示唆される。

以上のことから、打点高への対応に関連するバットの鉛直変位、打球に関連するバット・ヘッドスピードには、バットの並進運動に寄与するバット長軸力をバットに大きく寄与できるか否かがパフォーマンスを決定する大きな要因であるといえる。したがって、適切に打点高への対応ができていない場合には、スウィング開始以降のダウン・スウィング局面において、バット長軸を起こす（立てる）ことはバット長軸力の鉛直成分を増大させることに有効となる。適切に打点高への対応ができている場合には、特にレベル・スウィング局面において、バット長軸を倒してレベル・スウィングのバット軌道にすることは、バット長軸力の水平成分を増大させ、バット・ヘッドスピードを増大させることに有効となる。

7.3 左右の上肢関節について

第5章において、左右の肩および肘関節の屈曲伸展トルクが打点高への対応に大きく寄与することに加えて、左右の肩関節の内外転トルクがバット・ヘッドスピードの生成に大きく寄与することも明らかとなった。このため、関節角度や関節トルクといった各パラメータについては、左右の上肢関節のうち、肩関節の屈曲伸展および内外転軸、ならびに肘関節の屈曲伸展軸に関して比較、検討していく。

1) 左右上肢の関節角度および角速度について

Figure 7-5 および Figure 7-6 に、低めの打点高条件における左右上肢の関節角度、および関節角速度をそれぞれ示す（上位群：実線、下位群：点線、全平均値：灰色線）。統計結果の表示は Figure 7-2 と同様である。Figure 7-5 の関節角度から、バレル側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、スウィング開始から 20% 付近にかけて、上位群、全平均値、および下位群の順に屈曲角度が大きく（Figure 7-5 (a)）、内外転角度でも、全フォワード・スウ

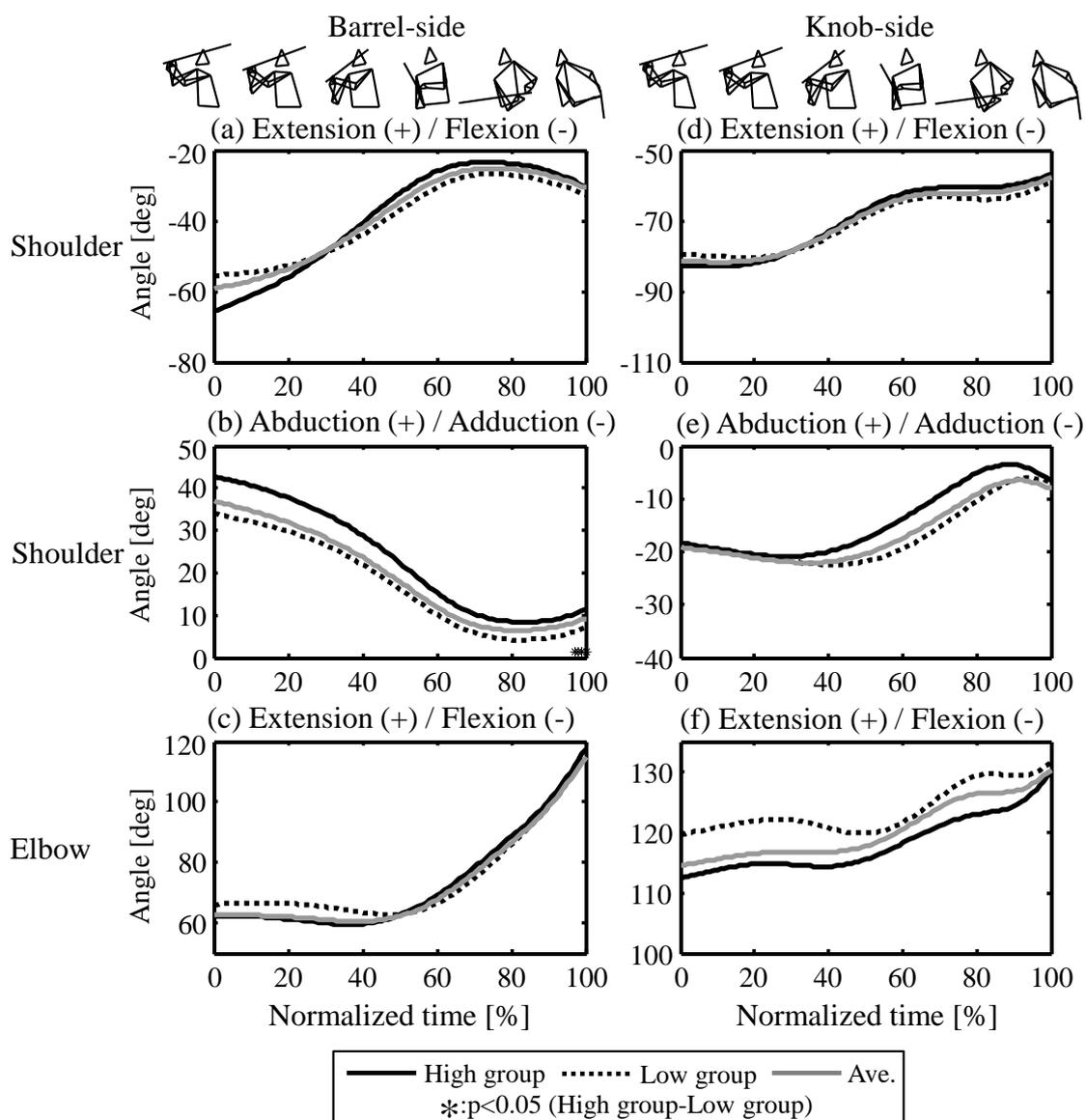


Figure 7-5 Curves of joint angles of the flexion/extension and adduction/abduction axes of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.

イング期において、上位群、全平均値、および下位群の順に外転角度が大きかった (Figure 7-5 (b)). これに対して、肘関節の屈曲伸展軸では、スウィング開始から 50%付近にかけて、下位群の伸展角度が上位群および全平均値よりも大きかったものの、その後の角度には各群による差はみられなかった (Figure 7-5 (c)). ノブ側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、全フォワード・スウィング期において各群間に顕著な差はみられなかった (Figure 7-5 (d)). 内外転軸では、40%からインパクトにかけて、下位群、全平均値、および上位群の順に内転角度が大きかった (Figure 7-5 (e)). 肘関節の屈曲伸展軸では、全フォワード・スウィング期において、下位群、全平均値、および上位群の順に伸展角度が大きかった (Figure 7-5 (e)).

Figure 7-6 の関節角速度から、バレル側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、スウィング開始から 60%付近にかけて、上位群および全平均値の伸展角速度が下位群よりも大きかった (Figure 7-6 (a)). 内外転軸では、スウィング開始から 70%付近にかけて、全平均値の内転角速度が上位群および下位群よりも大きかった (Figure 7-6 (b)). 肘関節の屈曲伸展軸では、主に 60%付近以降から全平均値、上位群、および下位群の順に伸展角速度が大きかった (Figure 7-6 (c)). ノブ側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、スウィング開始から 60%付近にかけて、上位群の伸展角速度が全平均値および下位群よりも大きく、その後、インパクトにかけて全平均値、下位群、および上位群の順に伸展角速度が大きかった (Figure 7-6 (d)). 内外転軸では、スウィング開始から各群ともに内転角速度がみられた後、40%付近以降では、特に全平均値において外転角速度がみられた (Figure 7-6 (e)). 肘関節の屈曲伸展軸では、主に 60%付近以降において上位群、下位群、および全平均値の順に伸展角速度が大きかった (Figure 7-6 (f)).

2) 左右上肢の関節トルクおよびトルクパワーについて

Figure 7-7 および Figure 7-8 に、低めの打点高条件における左右上肢の関節トルク、およ

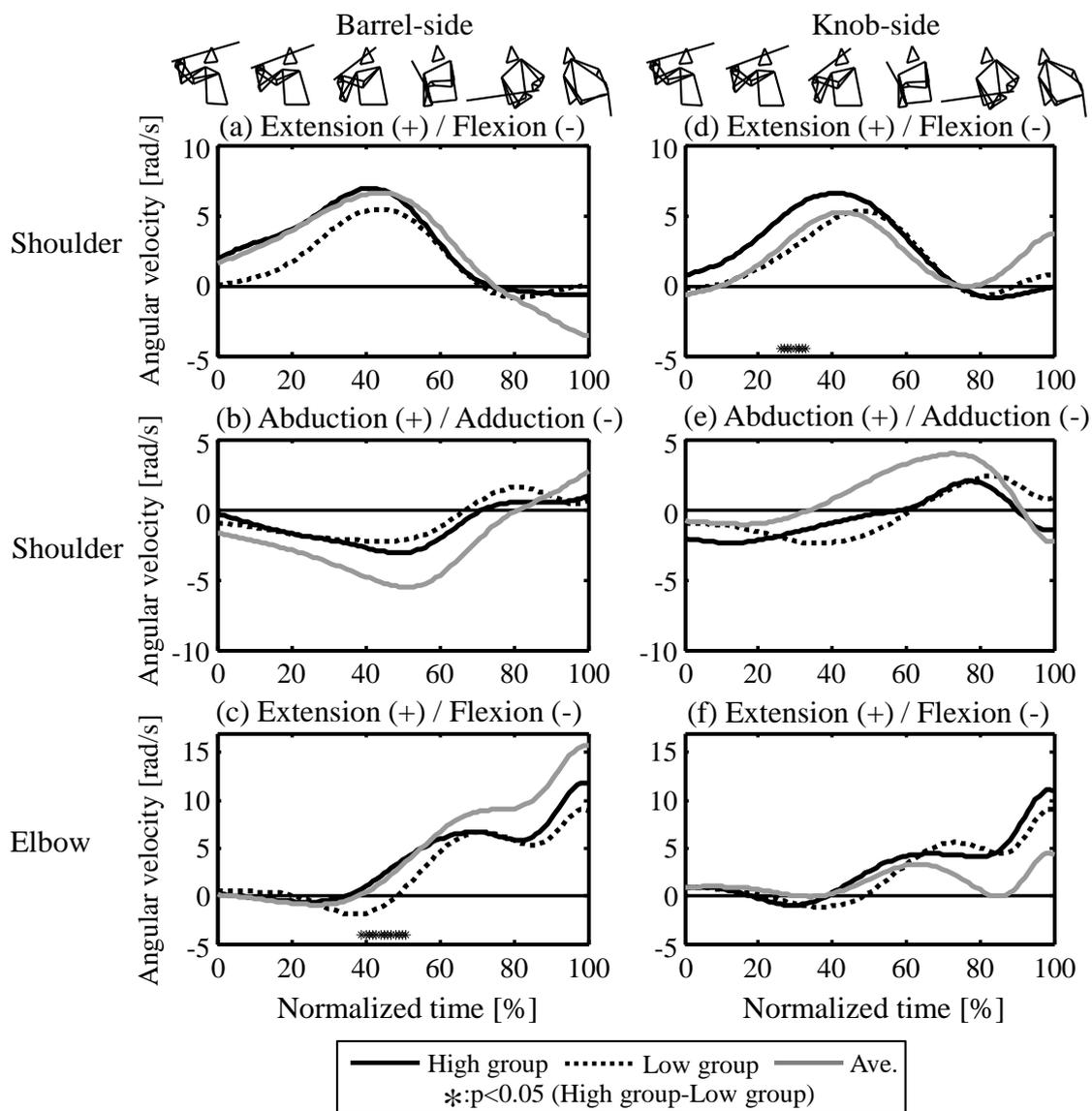


Figure 7-6 Curves of joint angular velocities of the flexion/extension and adduction/abduction axes of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.

び関節トルクパワーをそれぞれ示す。図の仕様は Figure 7-5 および Figure 7-6 と同様である。

Figure 7-7 の関節トルクから、バレル側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、スウィング開始から 50% 付近にかけて上位群、全平均値、および下位群の順に伸展トルクが大きく、また、上位群および下位群間に有意な差がみられ、インパクト近傍においては、特に上位群において伸展トルクが増大していた (Figure 7-7 (a))。内外転軸では、全フォワード・スウィング期において、各群間に顕著な差はみられなかった (Figure 7-7 (b))。肘関節の屈曲伸展軸では、20% から 60% 付近にかけて下位群において顕著な伸展トルクがみられたものの、それ以降においては、各群に顕著な差はみられなかった (Figure 7-7 (c))。ノブ側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、60% 以降において下位群、全平均値、および上位群の順に外転トルクが大きく、また、上位群および下位群間に有意な差もみられた (Figure 7-7 (d))。内外転軸では、スウィング開始から 30% 付近にかけて、上位群および全平均値の外転トルクが下位群よりも大きく、また、上位群および下位群間に有意な差もみられた (Figure 7-7 (e))。肘関節の屈曲伸展軸では、全フォワード・スウィング期において、全平均値の伸展トルクが上位群および下位群よりも大きかった (Figure 7-7 (f))。

Figure 7-8 の関節トルクパワーから、バレル側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、スウィング開始から 50% 付近にかけて、上位群、全平均値、および下位群の順に正のトルクパワーが大きく、上位群および下位群間に有意な差もみられ、インパクト近傍においては、特に上位群において正のトルクパワーが顕著に増大していた (Figure 7-8 (a))。内外転軸では、40% から 55% 付近にかけて、上位群の正のトルクパワーが全平均値および下位群よりも大きかったものの、その差は小さかった (Figure 7-8 (b))。肘関節の屈曲伸展軸では、特に 60% から 90% 付近にかけて、上位群の正のトルクパワーが全平均値および下位群よりも大きく、インパクトでは、下位群、全平均値、および上位群の順に負のトルクパワーが大きかった (Figure 7-8 (c))。ノブ側上肢について、肩関節の屈曲伸展軸では、60% から 80% 付近において、下位群の負のトルクパワーが上位群および全平均値よりも大きく、インパ

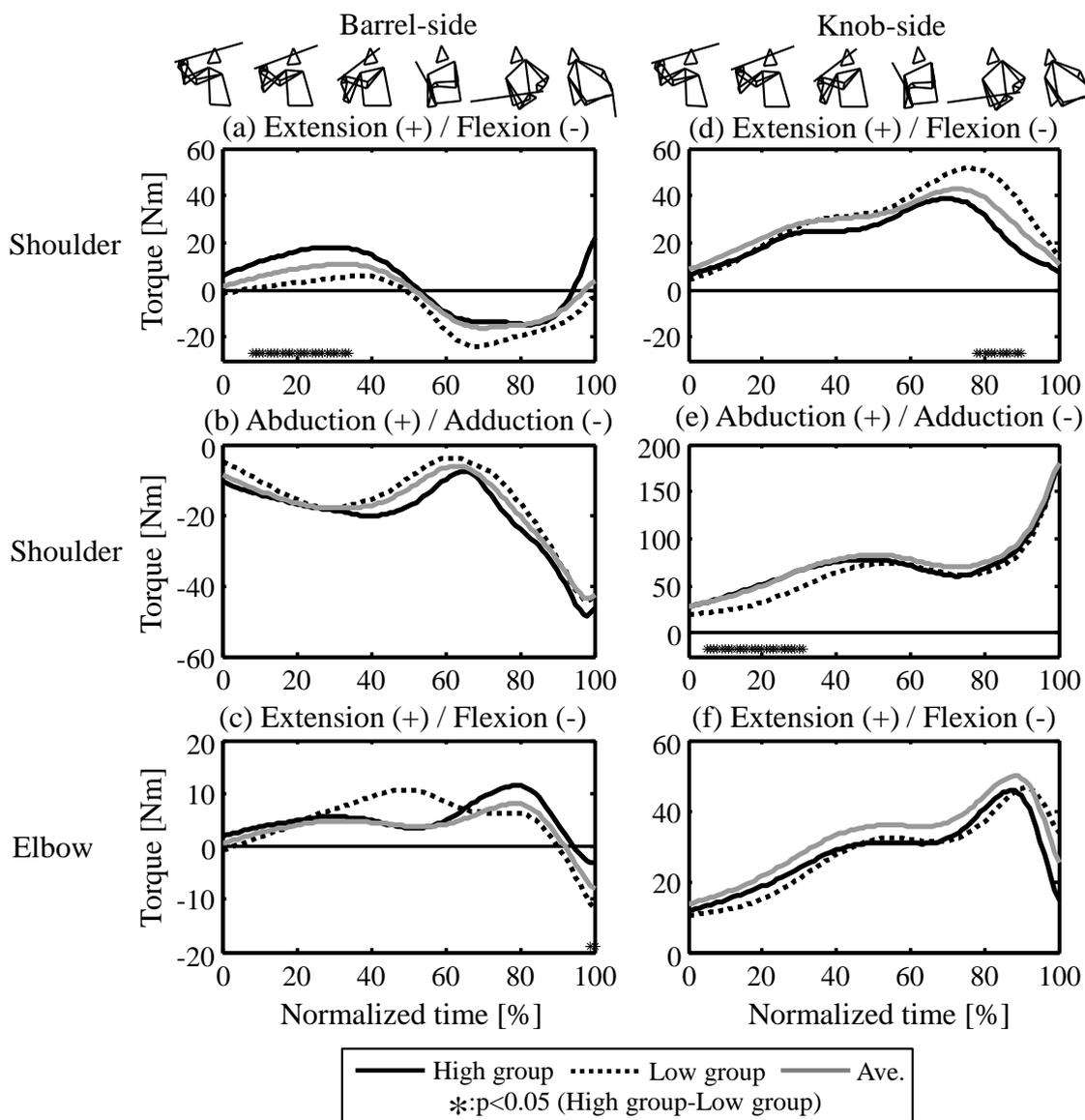


Figure 7-7 Curves of joint torques of the flexion/extension and adduction/abduction axes of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.

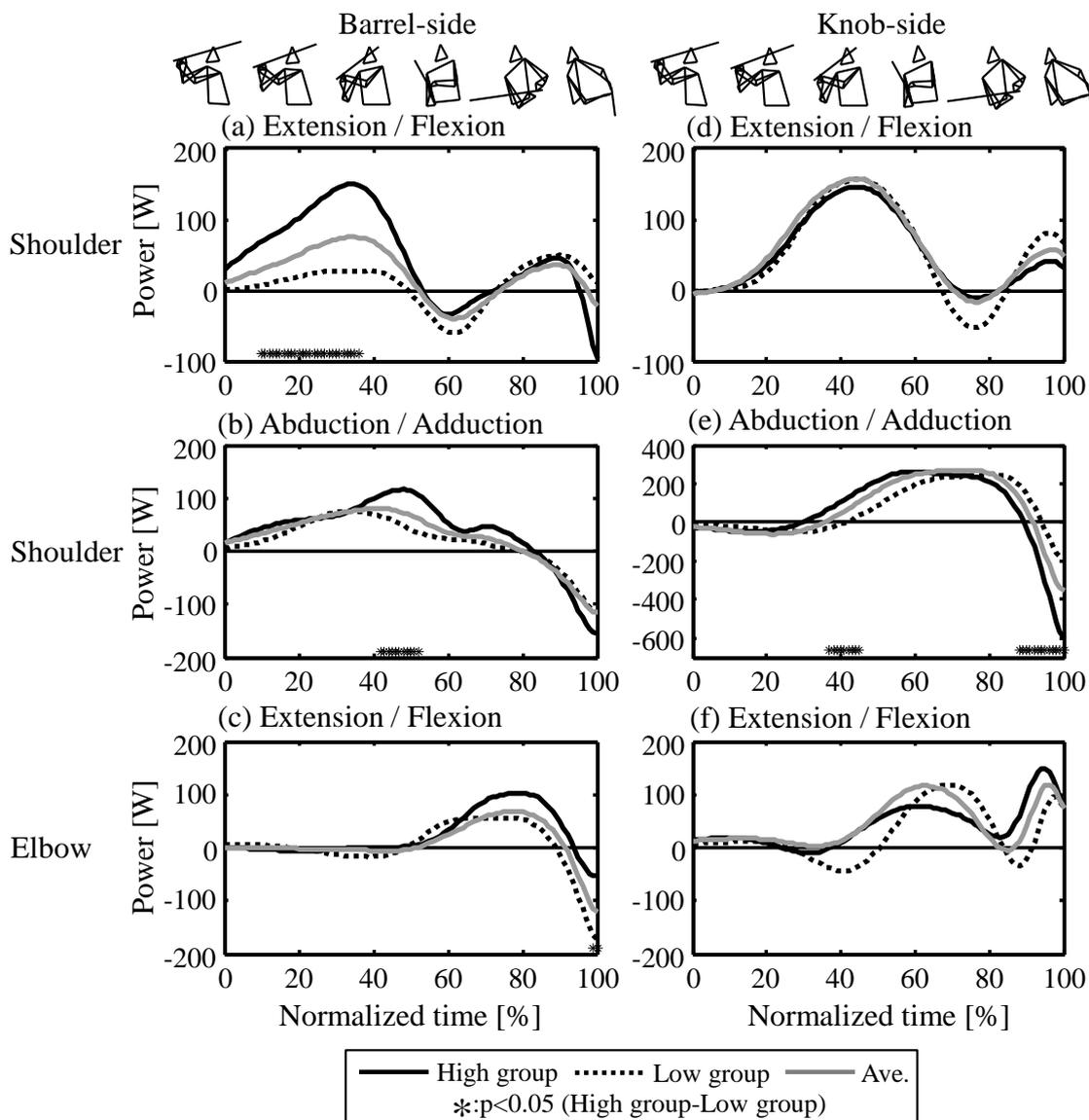


Figure 7-8 Curves of joint torque powers of the flexion/extension and adduction/abduction axes of the individual shoulder joints and the flexion/extension axis of the individual elbow joints in the forward swing motion under the low hitting-point height condition with high group, low group, and average of the all subjects.

クト近傍においては下位群，全平均値，および上位群の順に正のトルクパワーが大きかった (Figure 7-8 (d)). 内外転軸では，主にインパクト近傍において上位群，全平均値，および下位群の順に負のトルクパワーが大きく，上位群および下位群間に有意な差もみられた (Figure 7-8 (e)). 肘関節の屈曲伸展軸では，特にインパクト近傍において上位群，全平均，および下位群の順に正のトルクパワーが大きかった (Figure 7-8 (f)).

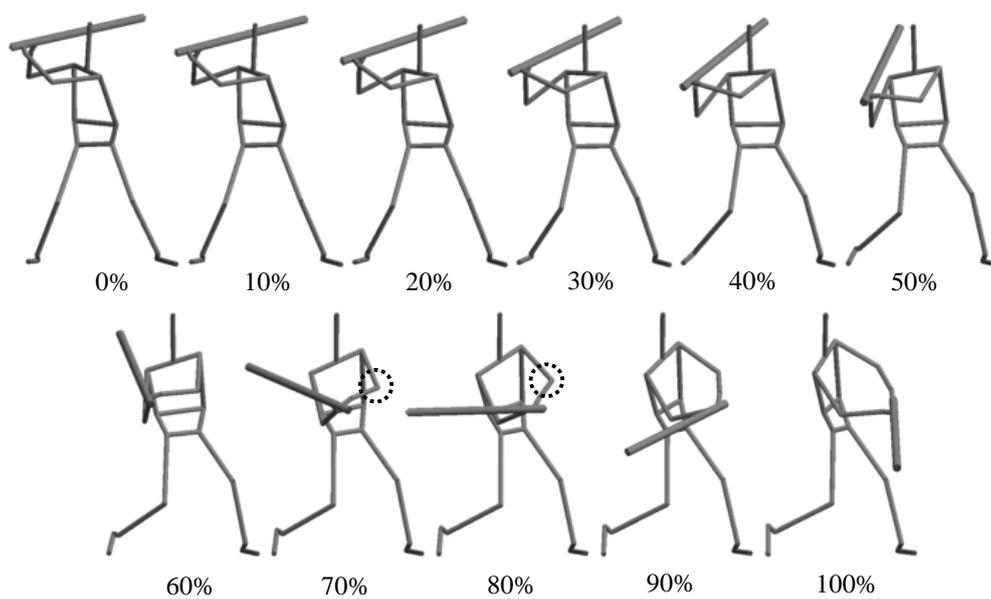
3) 低めの打点高に対応するための有効な上肢関節の動作

ダウン・スウィング局面では，特にバレル側の肩関節の伸展トルク，伸展トルクによる正のトルクパワーを，上位群は下位群よりも顕著に増大させることにより (Figure 7-7 (a), Figure 7-8 (a)), バットを鉛直下方へと変位させていたと考えられる．この上位群における大きな伸展トルクの発揮には，スウィング開始時点において，下位群と比較して，上位群はバレル側の肩関節の屈曲角度を予め大きくしていたことが影響を及ぼしたと考えられる (Figure 7-5 (a)). すなわち肩関節を大きく屈曲させることは，バットおよび上肢の位置をより鉛直上方に位置させることとなり，これによって上肢の振り下しの動作範囲も大きくなり，結果的に上肢各セグメントの質量を利用することにより肩関節の伸展トルク，伸展角速度を増大させることに繋がると推測される．

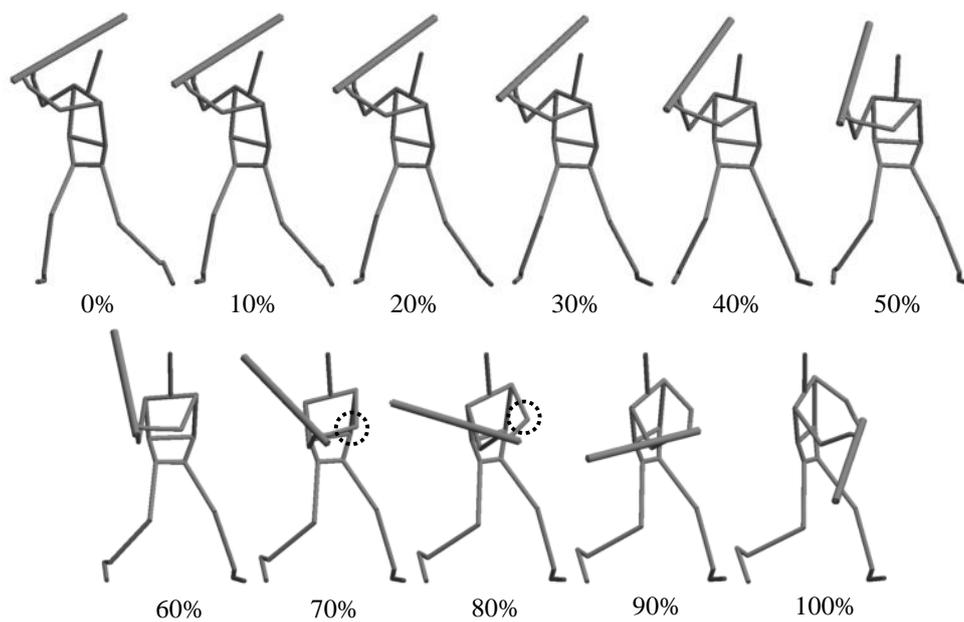
レベル・スウィング局面では，バレル側の肩関節の伸展トルク，および伸展トルクによる負のトルクパワー，ノブ側の肩関節の外転トルクによる負のトルクパワー，ならびにノブ側の肘関節の伸展トルクによる正のトルクパワーにおいて，上位群は下位群よりも顕著に大きな値を示した (Figure 7-7 (a), Figure 7-8 (a), (e), (f)). ここで，左右各手の仕事，およびのバット長軸力の結果からもわかるように，上位群は，下位群と比較してノブ側手によるバットへの作用力が顕著に大きかった (Figure 7-3, Table 7-2). 加えて，上肢関節とバット・ヘッドスピードの関係について，小池ら (2003, 2006) は，インパクト付近におけるノブ側上肢の役割は主にバット・ヘッドを加速させることであると報告し，第5章で

は、打点が低い程、特にノブ側の肩関節の内外転トルクがバット・ヘッドスピードの増大に伴う遠心力によって増大することが明らかとなっている。したがって、特にインパクト近傍において、上位群におけるノブ側の肩関節の外転トルク、および外転トルクによる負のトルクパワーは顕著に大きくなったと考えられる (Figure 7-7 (e), Figure 7-8 (e)). その一方で、同局面では、ノブ側の肩関節の伸展トルク、および伸展トルクによる正および負のトルクパワー、ならびにバレル側の肘関節の屈曲トルク、および屈曲トルクによる負のトルクパワーにおいて、下位群が上位群よりも顕著に大きな値を示した (Figure 7-7 (c), (d), Figure 7-8 (c), (d)). 特に下位群におけるバレル側の肘関節の伸展トルク、およびノブ側の肩関節の伸展トルクは、第5章における上肢関節トルクの結果から、高めの打点高条件に対する全平均値と同程度のトルク発揮量であった (Figure 5-5 (a), Figure 5-6 (a)). すなわち下位群は、低めの打点高への対応を求められているにも関わらず、上肢関節の主要なトルクは、高めの打点高への対応様式であったといえる。これらのことから、下位群は上位群と比較して目的となる打点高条件に対してトルク発揮を適宜調整できていなかったと推測される。これに対して、上位群は、インパクト直前において主に負のトルクパワーがみられていることから、ボールを正確に打撃するためにバット軌道の微調整が行われていると考えられるものの、そのバットへの抑制は下位群よりも少なくなる傾向にあったと推測される。

他方、第5章においても述べたように野球の指導現場では、理想的なスウィング軌道はインサイド・アウト、すなわち身体の近い位置をバットが通る軌道が望ましいとされている (土橋ら, 2009; 斎藤, 2011; 高橋, 2011)。このインサイド・アウトのバット軌道は、肘関節の屈曲伸展動作が重要となると報告もされている。そこで、左右の肘関節の屈曲伸展角度についてみてみると、バレル側では、スウィング開始から50%付近にかけて、ノブ側では、全フォワード・スウィング期において、下位群の角度が上位群よりも大きかった (Figure 7-5 (c), (f)). これに関連して関節トルクについても、スウィング開始時点から下



(a) Subj. 23 (High group)



(b) Subj. 20 (Low group)

Figure 7-9 Stick diagram of the batting motion in the forward swing under the low hitting-point height condition trial with Subj. 23 (high group) and Subj. 20 (low group).

位群は上位群よりノブ側の肘関節の伸展トルクが大きかった (Figure 7-7). 加えて, 上述した上位群 (Subj. 23) および下位群 (Subj. 20) の2名の被験者についてみると, 特にスウィング中盤以降となる70-80%において, バットを打撃方向へと変位させる際に, 上位群のSubj. 7は, 下位群のSubj. 7と比較してノブ側の肘関節の伸展角度を小さくすることによって, より身体の近くにバットを通すような動作となっていた (Figure 7-9). これらのことから, 上位群は, 左右の肘関節のうち, 特にノブ側の肘関節の屈曲伸展トルクを調整して, 伸展動作を抑制してバットを身体近傍に留めることにより, バット操作を行い易くしていたと考えられる. この働きはバットの最短距離での変位を可能としてスウィング開始後より早い局面からレベル・スウィングのバット軌道を行うことに繋がり, 低めの打点高条件においてもバットとボールとが直衝突になる可能性を高めていたと考えられる.

以上のことから, 第5章において明らかとなった, ダウン・スウィング局面における両肩関節の屈曲伸展トルクがバットの鉛直変位に寄与する知見に加えて, 打点高への対応の優劣には, 特にバレル側の肩関節の伸展トルクが寄与することが明らかとなった. したがって, 適切に打点高への対応ができていない場合には, ダウン・スウィング局面において肩関節の伸展トルクを増加させることが有効であり, このためには, スウィング開始時点において, 上肢を鉛直下方へと勢いよく振り下すために肩関節の屈曲角度を大きくしておくことが有効な動作となる. これに対して, 適切に打点高への対応ができている場合には, 特にレベル・スウィング局面において, ボールを正確に打撃するためのバット制御の作用を少なくすることがバット・ヘッドスピードの増大に重要であることも示唆される. このためには, インパクト近傍において肩関節トルクのような大きなトルク発揮を行う関節よりも, 肘および手関節のようなトルク発揮自体は小さいものの, バットに近い関節によって打点高への対応に関するバット操作を意識することが有効となる.

7.4 要約

本章の目的は、第4章および5章において明らかとなった、異なる打点高に対応するためのバットおよび左右各手、ならびに左右の上肢関節に関する知見をもとに、低めの打点高に対する上位群、下位群、および全被験者の平均値を比較、検討することによって、指導への有用な示唆を得ることであった。なお、第6章の体幹および下肢については、打点高への対応に大きくは寄与しないことから、打点高への対応に関して各群の優劣の決定に及ぼす影響は小さいといえる。指導への示唆として以下のことが挙げられる。

7.4.1 バットおよび左右各手について

- ① 低めの打点高条件に対してバットを鉛直下方へと変位させるためには、スウィング開始時点において、バット長軸を起こす（立てる）ことにより左右各手のバット長軸力の鉛直成分を増大させることが有効である。
- ② 打点高の違いに対応するためには、バットの並進運動に加えて、インパクト直前においてバットの回転運動を有効に寄与できることが重要となる。そのためには、バットの起し倒し軸の作用モーメント、およびこの軸まわりのモーメントとなる両手の偶力成分を増大させることが有効である。
- ③ 適切に打点高への対応ができている場合には、レベル・スウィング局面において、バット長軸が倒れたバット軌道、すなわち指導現場におけるレベル・スウィングのバット軌道を実現することによりバットの長軸力の水平成分を増大させ、バット・ヘッドスピードを増大させることに繋がる。

7.4.2 左右の上肢関節について

- ① 低めの打点高条件に対してバットを鉛直下方へと変位させるためには、ダウン・スウィング局面において両肩関節の伸展トルクを増大させることが有効である。また、打

点高対応の優劣には、特にバレル側の肩関節の伸展トルクが寄与することから、バレル側の肩関節の屈曲伸展動作は、指導を行う上で重要な観点となる。

- ② 打点高への対応に寄与する両肩関節の伸展トルクを増大させるためには、スウィング開始時点において、肩関節の屈曲角度を予め大きくして、より高い位置からバットを振り下すことが有効である。
- ③ 低めの打点高条件に対してライナーを打撃するためには、インサイド・アウトのバット軌道によってバットとボールとを直衝突させることが重要であり、そのためには、スウィング開始時点から、特にノブ側の肘関節の屈曲伸展トルクを調整して伸展動作を抑えることが有効である。
- ④ 適切に打点高への対応ができている場合には、打球に大きく影響を及ぼすバット・ヘッドスピードを増大させるために、レベル・スウィング局面において、バット制御の作用を少なくできることが重要となる。そのためには、肘および手関節トルクといったバットに近い上肢関節トルクによってバット操作を行うことが有効である。

8章 結論

本研究の目的は、異なる打点高条件に対する野球打撃動作のキネティクス分析を行い、打点高の違いに対応する際のバイオメカニクス的な特徴を明らかにし、競技力の向上や指導に有用な知見および示唆を得ることであった。

本研究の結果および考察から、以下のような結論を導くことができる。

8.1 異なる打点高条件に対するキネティクスの特徴

1) 左右各手について（研究課題 1）

- ① バットの鉛直下方変位の獲得に対して、ダウン・スウィング局面後半以降において打点が高い程、ノブ側手のバット長軸力の鉛直成分が大きく寄与する。
- ② ダウン・スウィング局面後半以降において、バットの起し倒し軸まわりの作用モーメント、および両手による偶力成分は、打点高の違いに対応するために、バットの倒れ込みによる回転運動を抑制してバットのボール打撃部位の上下方向を調整することに寄与する。
- ③ インパクト近傍において打点が高い程、大きくなる左右各手のバット長軸力は、バット・ヘッドスピードの打点高間による差を生成することに寄与する。

2) 左右上肢について（研究課題 2）

- ① ダウン・スウィング局面において、打点高の違いに対応するために、両肩関節の伸展トルクはバットおよび上肢を鉛直下方へと変位させることに寄与する。
- ② ダウン・スウィング局面において、バレル側の肩関節の内転トルクおよび両肘関節の伸展トルクは、バットと身体との位置関係を維持することに寄与し、この働きはバットの鉛直下方変位の獲得に対してバットの操作性を向上させることに有効となる。

- ③ レベル・スウィング局面において、バレル側の肩関節の内転トルク、およびノブ側の肩関節の外転トルクはバット長軸力の生成に大きく寄与し、打点高によらずバット・ヘッドスピードの生成にも寄与する。
- ④ 打点が低い場合には、打点が高い場合に比べて、短時間での上肢各関節の大きなトルク発揮が必要となることから、鉛直下方向へのバット操作が難しくなる一方で、バット・ヘッドスピードが大きくなることから、ボールを正確にミートできた場合には、強い打球を打てる可能性が高くなる。

3) 体幹について（研究課題3）

- ① インパクト近傍において打点が高い程、打撃方向への回旋トルクを大きくすることは、バットの水平変位を行い易くすることに有効となる。
- ② 打撃方向への回旋トルクを大きくすることは、打点高によらず上肢への力学的エネルギーの伝達量を増大させて、バット・ヘッドスピードを増大させることに寄与する。
- ③ インパクトに近づくにつれて、体幹の後屈および左側屈トルクを発揮して体幹を起こす働きは、打点高によらずバット・ヘッドの鉛直下方への過度な倒れを抑制することに有効となる。

4) 下半身について（研究課題3）

左右の膝関節および足関節の各軸トルクには、打点高間による顕著な差はみられなかったことから、膝関節および足関節の働きは、打点高によらず、主に力学的エネルギーの生成や身体の支持をすることであると考えられる。このため、下半身については、主に下胴の回転運動に寄与する股関節の働きについてまとめることとする。

- ① 地面反力について、打点高によらず、 X 軸成分では左右脚による偶力成分が大半を占め、 Y 軸および Z 軸成分ではステップ脚側が捕手方向、および鉛直上方向の反力が顕

著にみられた。

- ② ダウン・スウィング局面後半において、ステップ脚側の股関節伸展トルク、および内転トルクは、打点高によらず、打撃方向への脚の開きを抑制すること、並進運動から回転運動への切り替えること、そして下胴の回旋運動を発生させることに寄与する。
- ③ 軸脚側の股関節伸展トルクおよび内転トルクは、打点高によらず、打撃方向への身体の並進移動および回転運動を発生させること、力学的エネルギーを生成すること、およびこのエネルギーを体幹部へと伝達させることに寄与する。
- ④ バット・ヘッドスピードの生成に対して、スウィング開始以降、すなわちステップ脚の接地以降では、左右の膝および足関節のトルク発揮を打点高間によって大きく変化させないことが望ましい。

8.2 指導への示唆

本研究では、第 4 章から第 6 章（研究課題 1～3）から得られた知見をもとに、打点高への対応に関する指導への示唆として、以下のことが導き出された。

1) バットおよび左右各手について（研究課題 4）

- ① 低めの打点高条件に対してバットを鉛直下方へと変位させるためには、スウィング開始時点から、バットを起こす（立てる）意識によってスウィングを行うことが有効である。
- ② 打点高の違いに対応するためには、バットの並進運動に加えて、バットの回転運動に寄与する、バットの起し倒し軸の作用モーメント、およびこの軸まわりのモーメントとなる両手の偶力成分を有効に利用できることが重要である。
- ③ 適切に打点高への対応ができている場合には、レベル・スウィング局面において、バット・ヘッド軌道を指導現場におけるレベル・スウィングを実現することによって、バット長軸力の水平成分を増大させてバット・ヘッドスピードを増加させることが有

効である。

2) 左右の上肢関節について（研究課題4）

- ① 低めの打点高条件における対応の優劣には、特にバレル側の肩関節の屈曲伸展トルクが寄与することから、バレル側の肩関節の屈曲伸展動作に着眼することは、指導を行う上で有効である。
- ② 低めの打点高条件においてライナーの打球を放つためには、指導現場におけるインサイド・アウトおよびレベル・スウィングのバット軌道によって、バットとボールとを直衝突させる確率を高めることが重要である。そのためには、スウィング開始時点から、特にノブ側の肘関節の屈曲伸展トルクを調整して伸展動作を抑えることが有効である。
- ③ 適切に打点高への対応ができている場合には、バット・ヘッドスピードを増大させるために、レベル・スウィング局面において、肘および手関節トルクといったバットに近い上肢関節トルクによってバット操作を行うことが有効である。
- ④ 適切に打点高への対応ができていない場合には、両肩関節の伸展トルクを増大させることが重要であり、そのためには、スウィング開始時点において肩関節の屈曲角度を予め大きくして、より高い位置からバットを振り下ろす意識が有効である。

8.3 今後の課題

- 1) 本研究では、静止球打撃となるティー打撃におけるキネティクスの分析を行った。このため、時間的拘束の伴う飛来球打撃における動作を分析対象とすることによって、実際の試合に近い条件における打撃動作に関するキネティクスの知見を獲得することができると考えられる。

- 2) 本研究では、ボールコース条件を打点高の違いのみとして打撃動作を対象として分析を行った。しかしながら、実際のコース条件には、打点高の違いに加えて、内角および外角といった打者からみて左右のコースの違いも存在する。このため、打点高条件に関する知見に加えて、左右のコース条件に関する打撃動作について分析を行うことによって、より打撃技術の向上に繋がる知見を獲得することができると考えられる。

参考文献

[A]

阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 15 : 155-162.

阿江通良・藤井範久 (2002) スポーツバイオメカニクス 20 講. 朝倉書店: 東京, pp.30-31.

Adelsberg, S. (1986) The tennis stroke: An EMG analysis of selected muscles with rackets of increasing grip size. *The American Journal of Sports Medicine*, 14 (2) : 139-142.

Aura, O. and Komi, P.V. (1986) Effects of prestretch intensity on mechanical efficiency of positive work and elastic behavior of skeletal muscle in stretch-shortening cycle exercises. *International Journal of Sports Medicine*, 7 : 137-143.

浅見俊雄 (1984) スポーツ運動の打について. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 3 (3) : 178-187.

東隆史・徳山廣 (1989) 打撃動作の基礎的研究—野球の筋電図的研究—. 大阪教育大学紀要 第IV部門, 38 (2) : 205-215.

[B]

Bahill, A.T. and LaRitz, T. (1984) Why can't batters keep their eyes on the ball?. *American Scientist*, 72 : 249-253.

[C]

Cavagna, G.A., Doman, B., and Margaria, R. (1968) Positive work done by a previous stretched muscle. *Journal of Applied Physiology*, 24 : 21-32.

[D]

Desroches, G., Chèze, L., and Dumas, R. (2010) Expression of joint moment in the joint coordinate system. *Journal of Biomechanical Engineering*, 132 (11) : 114503.

[E]

Escamilla, R.F., Fleisig, G.S., DeRenne C., and Taylor, M.K. (2009a) Effects of bat grip on baseball hitting kinematics. *Journal of Applied Biomechanics*, 25 : 203-209.

Escamilla, R.F., Fleisig, G.S., DeRenne, C., and Taylor, M.K. (2009b) A comparison of age level on baseball hitting kinematics. *Journal of Applied Biomechanics*, 25 : 210-218.

[F]

Fleisig, G.S., Zheng, N., Stodden, D.F., and Andrews, J.R. (2002) Relationship between bat mass properties and bat velocity. *Sports Engineering*, 5 : 1-8.

Fortenbaugh, D., Fleisig, G., Onar-Thomas, A., and Asfour, S. (2011) The effect of pitch type on ground reaction forces in the baseball swing. *Sports Biomechanics*, 10 (4) : 270-279.

藤井範久・宮下憲・阿江通良 (1997) ハードル走における下肢 3 次元関節トルクおよび関節トルクパワー. *バイオメカニクス研究*, 1 (1) : 41-50.

[G]

Gelinas, M. and Hoshizaki, T.B. (1988) Kinematic characteristics of opposite-field hitting. *Proceeding of the 6th International Symposium on the International Society of Biomechanics in Sports 1988*, Montana State University, Montana, pp. 519-530.

Greenwald, R.M., Penna, L.H., and Crisco, J.J. (2001) Differences in batted ball speed with wood and aluminum baseball bats: A batting cage study. *Journal of Applied Biomechanics*, 17 : 241-252.

[H]

Hay, J.G. (1993) *The biomechanics of sports techniques* 4th ed. Prentice-Hall, New Jersey, pp. 215-221.

平野裕一 (1979) バットスイングの分析. *体育の科学*, 29 (8) : 543-545.

平野裕一 (1984) バットによる打の動作. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 3 (3) : 199-208.

Hirano, Y. (1985) An analysis of timing in softball hitting. *The proceedings of the Department of*

- Physical Education, College of General Education, University of Tokyo, 19 : 1-8.
- 平野裕一 (1992) 打つ科学. 大修館書店 : 東京
- 平野裕一 (1993) 当てる打撃と運ぶ打撃. *Japanese Journal of sports sciences*, 12 (3) : 340-345.
- 平野裕一・友末亮三・宮下充正 (1989) 地面反力と把握力からみたテニス, 野球, ゴルフにおける打撃技術の比較. *Japanese Journal of sports sciences*, 8 (4) : 243-248.
- 平野裕一・町永智丈 (1990) 野球の打撃中の身体重心移動様式. 日本バイオメカニクス学会編「バイオメカニクス研究 1990」, メディカルプレス : 東京, pp. 226-228.
- Hirashima, M., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2007) A new non-orthogonal decomposition method to determine effective torques for three-dimensional joint rotation. *Journal of Biomechanics*, 40 : 871-882.
- 広瀬茂男 (2005) ロボット工学—機械システムのベクトル解析— (改訂版) 改訂第 17 版. 裳華房 : 東京, pp. 181-184.
- 堀田朋基・表克昌・北村潔和 (1988) 野球のバッティングにおける素振りと実打一筋放電パターンとバッティング動作からみた比較— 第 9 回日本バイオメカニクス学会大会論集, 40-45.
- Hubbard, A.W. and Seng, C.N. (1954) Visual movement of batters. *Research Quarterly*, 25 : 42-57.
- [1]
- 石田和之・仲井良平・平野裕一 (2000) 野球打者の打撃の意思決定とバットの運動調整に関する実験的研究. *バイオメカニクス研究*, 4 (3) : 172-178.
- 石井優・坂根茂幸・柿倉正義・三上芳夫 (1989) 3次元モデルに基づくロボットシステムのためのマニピュレータ・キャリブレーション. *日本ロボット学会誌*, 7 (2) : 182-191.
- 石井泰光・山本正嘉・図子浩二 (2010) 体幹部の鉛直軸回りの回転運動から見た野球の打球とバッティングおよびゴルフのドライバーショットの類似性. *体育学研究*, 55 : 63-79.
- 伊藤幸司・佐藤文宣・金子靖仙・島名孝次 (2001) バットの慣性特性がバットスイングに

及ぼす影響. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集, 49-53.

[J]

Jobe, F.W., Perry, J., and Pink, M. (1989) Electromyographic shoulder activity in men and women professional golfers. *The American Journal of Sports Medicine*, 17 (6) : 782-787.

[K]

Katsumata, H. (2007) : A functional modulation for timing a movement: A coordinative structure in baseball batting. *Human Movement Science*, 26 : 27-47.

勝又宏・川合武司 (1996) 地面反力からみた異なる投球速度に対する野球の打撃動作の特性. *体育学研究*, 40 : 381-398.

川端浩一・伊藤章 (2012) グリップ位置と投球速度の違いが野球のバットスイングに及ぼす影響. *体育学研究*, 57 : 557-565.

川端浩一・金子公宥 (2005) 金属バットと木製バットによる打球速度と打撃動作. *大阪体育大学紀要*, 36 : 38-50.

川村卓・功刀靖男・阿江通良 (2000) 熟練野球選手の打撃動作に関するバイオメカニクス的研究～バットの動きに着目して～. *大学体育研究*, 22 : 19-32.

川村卓・島田一志・阿江通良 (2001) 熟練野球選手の打撃動作における両手の動きについて. *大学体育研究*, 23 : 17-28.

川村卓・島田一志・高橋佳三・森本吉謙・小池関也・阿江通良 (2008) 野球の打撃における上肢の動作に関するキネマティクスの研究：ヘッドスピード上位群と下位群のスウィング局面の比較. *体育学研究*, 53 : 423-438.

川村卓・島田一志・山下優・奈良隆章・小池関也 (2012) 野球のトス打撃における投球角度の違いがスイング動作に及ぼす影響－肩・腰およびバットの回転角度に着目して－. *筑波大学体育科学系紀要*, 35 : 59-66.

川上泰雄・井出敦夫・野沢むつこ・吉永俊彦・小林海・小田俊明・千野謙太郎・栗原俊之・

- 加藤えみか・福永哲夫 (2006) ゴルフスウィング中の筋活動およびキネティクス：プロゴルファーの事例研究. スポーツ科学研究, 3 : 18-29.
- 城所収二・若原卓・矢内利政 (2011) 野球のバッティングにおける打球飛距離と打球の運動エネルギーに影響を及ぼすスイング特性. バイオメカニクス研究, 15 (3) : 78-86.
- 城所収二・近田彰治・矢内利政 (2012a) 『流し打ち』を可能にする2つのインパクトメカニズム：各メカニズムの貢献. 日本機械学会シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, 491-496.
- 城所収二・若原卓・矢内利政 (2012b) 野球のバッティングにおける打球の運動エネルギーを決定するスイングとインパクト. バイオメカニクス研究, 16 (4) : 220-230.
- Kitzman, E.W. (1963) Baseball: Electromyographic study of batting swing. The Research Quarterly, 35 (2) : 166-178.
- Koenig, K., Mitchell, N.D., Hannigan, T.E., and Clutter, J.K. (2004) The influence of moment of inertia on baseball/softball bat swing speed. Sports Engineering, 7 : 105-117.
- 小池関也・木村大志・川村卓・藤井範久・高橋佳三・阿江通良 (2003) 野球のティーバッティングにおける上肢関節のトルクパターン. 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2003 CD-ROM 講演論文集, "448-1"-448-6".
- 小池関也 (2004a) 両手の打撃動作を解き明かすセンサー打具の開発. バイオメカニクス研究, 8 (3) : 179-184.
- Koike, S., Iida, H., Fujii, N., Kawamura, T., and Ae, M. (2004b) An instrumented bat for simultaneous measurement of forces and moments exerted by the hands during batting. The Engineering of Sport 5 (2) : 194-200.
- 小池関也・川村卓・阿江通良 (2006) 野球打撃動作における四肢関節のトルク・パワー. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2006 講演論文集, 110-115.
- 小池関也 (2007) : センサーバットによる投球打撃動作のバイオメカニクスの分析. 筑波大

学体育科学紀要, 30 : 131-136.

小池関也・阿江数通・川村卓・阿江通良 (2008) 野球打撃動作における上半身のキネティクスの分析. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2008 講演論文集, 112-116.

小池関也・阿江数通・川村卓・阿江通良 (2009a) 野球打撃動作における左右各手のキネティクスの分析 (打点高がキネティクスの変量に及ぼす影響). 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集, 182-187.

小池関也・川村卓・阿江通良 (2009b) 野球打撃動作のキネティクスの分析用センサーグリップハンドル型バットの開発. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集, 188-193.

小池関也 (2010) 力覚検出型センサーバットの開発. 機能材料, 30 (8) : 13-17.

工藤孝幾 (1987) バッティング動作におけるタイミングの分析. 体育学研究, 31 (4) : 285-292.

倉林準・持丸正明・河内まき子 (2003) 股関節中心推定方法の比較・検討. バイオメカニズム学会誌, 27 (1) : 29-35.

[M]

前田正登 (2001) 野球におけるバットのスイングの再現性に関する研究. スポーツ方法学研究, 14 (1) : 1-11.

前田正登 (2003) 野球バットの特性がスイングに及ぼす影響. スポーツ産業学研究, 13 (1) : 45-51.

前田正登 (2006a) 野球におけるバットの質量・重心位置が打撃に及ぼす影響. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2006 講演論文集, 98-103.

前田正登 (2006b) 高校野球選手におけるバットスイングの類型化に関する研究. スポーツ方法学研究, 19 (1) : 45-56.

前田正登 (2007) 投球コースの違いがバットスイングに及ぼす影響. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2007 講演論文集, 103-107.

- 前田正登 (2009) 野球におけるバットの質量・重心位置が打撃に及ぼす影響. スポーツ産業学研究, 19 (2) : 91-103.
- Mason, B.R. (1987) Ground reaction forces of elite Australian baseball batters. In : B. Jonson (Eds.), Biomechanics X-B. Human Kinetics, pp. 749-752.
- Matsuo, T., Kasai, T., and Asami, T. (1993) The improvement of coincidence anticipation timing task with bat-swing. Journal of Human Movement Studies, 12 : 289-295.
- Matsuo, T. and Kasai, T. (1994) Timing strategy of baseball-batting. Journal of Human Movement Studies, 27 : 253-269.
- Mcintyre, D.R. and Pfautsch, E.W. (1982) A kinematic analysis of the baseball batting swings involved in opposite-field and same-field hitting. Research Quarterly for Exercise and Sport, 53 (3) : 206-213.
- Messier, S.P. and Owen, M.G. (1984) Bat dynamics of female fast pitch softball batters. Research Quarterly For Exercise and Sport, 55 (2) : 141-145.
- Messier, S.P. and Owen, M.G. (1985) The mechanics of batting : Analysis of ground reaction forces and selected lower extremity kinematics. Research Quarterly for Exercise and Sport, 56 (2) : 138-143.
- Messier, S.P. and Owen, M.G. (1986) Mechanics of batting : Effect of stride technique on grand reaction forces and bat velocities. Research Quarterly For Exercise and Sport, 57 (4) : 329-333.
- Morris, M., Jobe, F.W., Perry, J., Pink, M., and Healy, B.S. (1989) Electromyographic analysis of elbow function in tennis players. The American Journal of Sports Medicine, 17 (2) : 241-247.
- 宮西智久 (2004) 野球の打撃動作の角運動量解析. 第 18 回バイオメカニクス学会大会論集, 160-161.
- 宮西智久 (2006) 打撃動作と体幹・四肢の角運動量-野球のバッティングの場合 (特集「巧みな動き」の脚と腕). 体育の科学, 56 (3) : 181-186.

宮西智久・櫻井直樹（2009）野球の投・打動作の体幹捻転研究—SSC 理論に着目して—.

バイオメカニクス研究, 13 (3) : 149-169.

宮西智久・藤井範久・阿江通良・功刀靖雄・岡田守彦（1996）野球の投球動作におけるボ

ール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する 3 次元的研究. 体育学研究, 41 :

23-37.

村田厚生（1998）野球のスイング時のバットのヘッドスピードに及ぼす要因の検討. 人間

工学, 34 (3) : 151-155.

[N]

内藤耕三・丸山剛生（2006）野球の投球速度を生成する運動依存トルク解析のための 3 次

元上肢動力学的モデル. バイオメカニクス研究, 10 (3) : 146-158.

中本浩揮・森司朗（2008）速度変化状況での一致タイミング課題における野球の熟達と運

動修正との関係. 体育学研究, 53 : 13-50.

Nakata, H., Miura, A., Yoshie, M., and Kudo, K. (2012a) Electromyographic activity of lower limbs

to stop baseball batting. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26 (6) : 1461-1468.

Nakata, H., Miura, A., Yoshie, M., and Kudo, K. (2012b) Differences in the head movement during

baseball batting between skilled players and novices. *Journal of Strength and Conditioning*

Research, 26 (10) : 2632-2640.

Nakata, H., Miura, A., Yoshie, M., Kanosue, K., and Kudo, K. (2013) Electromyographic analysis of

lower limbs during baseball batting. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27 (5) :

1179-1187.

日本プロフェッショナル野球組織（2009）公認野球規則 2009. ベースボールマガジン社 :

東京, pp. 38-39.

西島良典・徳山廣・堤実（1984）打球動作の基礎的研究—テニスフォアハンドストローク

の筋電図的研究—. 大阪教育大学紀要 第IV部門, 33 (1) : 93-104.

- 西島良典・徳山廣・堤実・中雄勇（1985）打球動作の基礎的研究ーゴルフスウィングの筋電図的研究ー. 大阪教育大学紀要 第IV部門, 34 (1) : 89-97.
- 西島良典・徳山廣・吉岡真佐江・堤実（1986）打球動作の基礎的研究ーテニス両手バックハンドストロークの筋電図的研究ー. 大阪教育大学紀要 第IV部門, 35 (1) : 55-62.
- 西島良典・徳山廣（1989a）打球動作の基礎的研究ーゴルフスウィングの initiate movement に関する筋電図的研究ー. 大阪教育大学紀要 第IV部門, 38 (1) : 69-78.
- 西島良典・徳山廣（1989b）打球動作の基礎的研究ーテニスフォアハンドストロークの initiate movement に関する筋電図的研究ー. 大阪教育大学紀要 第IV部門, 38 (2) : 243-252.
- Noble, L. and Eck, J. (1986) Effect of selected softball bat loading strategies on impact impulse. *Medicine and Sciences in Sports and Exercise*, 18 : 50-59.
- Noble, L. and Walker, H. (1994) Baseball bat inertial and vibrational characteristics and discomfort following ball-bat impact. *Journal of Applied Biomechanics*, 10 : 132-144.
- [O]
- 小田伸午・森谷敏夫・田口貞善（1991a）野球のティーバッティングにおける地面反力ーレギュラー選手と非レギュラー選手の比較ー. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 10 (1) : 80-88.
- 小田伸午・森谷敏夫・田口貞善・松本珠希・見正富美子（1991b）地面反力からみた野球のティーバッティング技術. *体育学研究*, 39 : 255-262.
- 及川研・大沼徹・平野裕一（1996）野球のバットの軌道及びそれに影響する打撃動作の類型化の試み. *スポーツ方法学研究*, 9 (1) : 127-139.
- 大室康平・坂本龍斗・大部隆志・長谷川伸・野村徹・彼末一之（2004）野球のバットスウィングの解析ー速さか安定性かー. *日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2006 講演論文集*, 108-112.
- Otsuji, T. and Kinoshita, H. (2002) After of using a weighting bat on subsequent swing velocity and

batter's perceptions of swing velocity and heaviness. *Perceptual and Motor Skills*, 94 : 119-126.

大藪由夫・高橋邦郎・須藤芳樹・佐藤宣庚 編 (1979) 野球におけるバッティングの動作分析. 工学院大学研究論叢, 17 : 55-74.

[P]

Pink, M., Jobe, F.W., and Perry, J. (1990) Electromyographic analysis of the shoulder during the golf swing. *The American Journal of Sports Medicine*, 18 (2) : 137-140.

Pink, M., Perry, J., and Jobe, F.W. (1993) Electromyographic analysis of the trunk in golfers. *The American Journal of Sports Medicine*, 21 (3) : 385-388.

[R]

Race, D.E. (1960) A cinematographic and mechanical analysis of the external movements involved in hitting a baseball effectively. *The Research Quarterly*, 32 (3) : 394-404.

Reyes, G.F., Dickin, D.C., Dolny, D.G., and Crusat, N.J.K. (2010) Effects of muscular strength, exercise order, and acute whole-body vibration exposure on bat swing speed. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24 (12) : 3234-3240.

Reyes, G.F. “Cisco”, Dickin, D.C., Crusat, N.J.K., and Dolny D.G. (2011) Whole-body vibration effects on the muscle activity of upper and lower body muscles during the baseball swing in recreational baseball hitters. *Sports Biomechanics*, 10 (4) : 280-293.

[S]

斎藤正直 (2011) 野球ステップアップシリーズ バッティング編. ベースボール・マガジン社 : 東京

Sawichi, G.S., Hubbard, M., and Stronge, W.J. (2003) How to hit home runs : Optimum baseball bat swing parameters for maximum range trajectories. *American Journal of Physics*, 71 (11) : 1152-1162.

Schache, A.G. and Baker, R. (2007) On the expression of joint moments during gait. *Gait & Posture*,

25 : 440-452.

Shaffer, B., Jobe, F.W., Pink, M., and Perry, J. (1993) Baseball batting. An electromyographic study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 292 : 285-293.

島田一志・阿江通良・藤井範久・結城匡啓・川村卓 (2000) 野球のピッチング動作における体幹および下肢の役割に関するバイオメカニクス的研究. *バイオメカニクス研究*, 4 (1) : 47-60.

島田一志・阿江通良・藤井範久・川村卓・高橋佳三 (2004) 野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ. *バイオメカニクス研究*, 8 (1) : 12-26.

Springings, E., Marshall, R., Elliott, B., and Jennings, L. (1994) A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racquet-head speed. *Journal of Biomechanics*, 27 : 245-254.

[T]

Tabuchi, N., Matsuo, T., and Hashizume, K. (2007) Bat speed, trajectory, and timing for collegiate baseball batters hitting a stationary ball. *Sports Biomechanics*, 6 (1) : 17-30.

田子孝仁 (2010) 野球における異なる投球コースに応じた打撃動作の調整. 平成 21 年度筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻博士論文.

田子孝仁・阿江通良・藤井範久・小池関也・高橋佳三・川村卓 (2006a) 野球における打撃ポイントの高さが打撃動作に及ぼす影響. *バイオメカニクス研究*, 10 (1) : 2-13.

田子孝仁・阿江通良・藤井範久・小池関也・川村卓 (2006b) 野球における内外角の打撃ポイントが打撃動作に及ぼす影響. *バイオメカニクス研究*, 10 (4) : 222-234.

高橋弘・加賀勝・西河英隆・船渡和男 (1999) バッティングレベルでみた腰の回転運動. 第 14 回日本バイオメカニクス学会大会論集「バイオメカニクス研究概論」, 399-402.

高橋善正監 (2011) マルチビジョン・バッティング. 成美堂出版 : 東京

高木斗希夫 (2010) 野球における速度の異なるボールに対する打撃動作のバイオメカニク

- 的研究. 平成 21 年度筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻博士論文.
- 高木斗希夫・藤井範久・小池関也・阿江通良 (2008) 異なる投球速度に対する野球の打撃動作に関するキネマティクスの研究. バイオメカニズム学会誌, 32 (3) : 158-165.
- 高木斗希夫・藤井範久・小池関也・阿江通良 (2010a) 無作為投球速度変化状況での野球の打撃動作に関するキネマティクスの研究. バイオメカニズム学会誌, 34 (1) : 53-62.
- 高木斗希夫・藤井範久・小池関也・阿江通良 (2010b) 異なる投球速度に対する野球の打撃動作に関する下肢および体幹部のキネティクスの研究. バイオメカニズム学会誌, 34 (3) : 216-224.
- 田内健二・南形和明・川村卓・高松薫 (2005) 野球のティーバッティングにおける体幹の捻転動作がバットスピードに及ぼす影響. スポーツ方法学研究, 18 (1) : 1-9.
- 豊島進太郎 (1991) 打運動と予測について—野球における打撃を中心に—. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 10 (10) : 690-694.
- 土橋恵秀・小山田良治・小田伸午 (2009) 野球選手なら知っておきたい「からだ」のこと 打撃編. 大修館書店 : 東京
- 津田幸保・高橋弘・加賀勝 (1999) バッティングにおける腰の回転動作に重量負荷が及ぼす影響. 第 14 回日本バイオメカニクス学会大会論集「バイオメカニクス研究概論」, 403-405.
- [W]
- Watkins, R.G., Uppal, G.S., Perry, J., Pink, M., and Dinsay, J.M. (1996) Dynamic electromyographic analysis of trunk musculature in professional golfers. *The American Journal of Sports Medicine*, 24 (4) : 535-538.
- Welch, C.M., Banks, S.A., Cook, F.F., and Draovitch, P. (1995) Hitting a baseball : A Biomechanical Description. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 22 (5) : 193-201.
- Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal noise in the kinematics of normal,

- pathological and sporting gaits. *Human Locomotion*, I : 92-93.
- Weyrich, A.S., Messier, S.P., Ruhmann, B.S., and Berry, M.J. (1989) Effect of bat composition, grip firmness, and impact location on postimpact ball velocity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21 (2) : 199-205.
- Wu, G., van der Helm, F.C.T., Veeger, H.E.J., Makhsous, M, Roy, P.V., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A.R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F.W., and Buchholz, B. (2005) ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion Part II : shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38 : 981-992.
- Wu, T., Gervais, P., Baudin, P., and Bouffard, M. (2011) The effects of stride technique and pitch location on slo-pitch batting. *Sports Biomechanics*, 10 (4) : 351-360.
- [Y]
- Yanai, T. (2007) A mechanical cause of body rotation about the vertical axis in baseball batting. *Proceedings of the ASB Annual Meeting CD-ROM*, Stanford University, California.
- 矢内利政 (2007) 野球のバッティングにおける重心移動と回転運動—Deterministic model を利用した分析—. *バイオメカニクス研究*, 11 (3) : 200-212.
- 吉福康郎 (1985) バットの力学的性質から見たバッティングの科学. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 4 (10) : 723-728.
- Zatsiorsky, V.M. (2002) *Kinetics of human motion*. Human kinetics : Champaign, pp. 117-197.

謝辞

本研究は、指導教員である本学准教授の小池関也先生をはじめ、本学教授の藤井範久先生、西嶋尚彦先生、そして本学准教授の向井直樹先生の懇切丁寧なご指導やご校閲、そして多大なる励ましのもとに行われました。小池関也先生には、修士課程より今日に至るまで、研究に対する態度や問題解決へのアプローチの方法など研究を行う上で必要不可欠となる知識や能力に加えて、研究以外の事柄においても多くの心得を熱心にご指導頂きました。藤井範久先生には、データの分析方法や解釈の仕方など様々な観点からのご指摘やご助言を、時に優しく、時に厳しく頂きました。本学の阿江通良教授には、教員の立場から研究に関するご指摘やご助言を頂き、父の立場からとしても多くの叱咤激励の言葉をかけてもらいました。また、スポーツバイオメカニクス研究室の諸兄には、幾度となくご助言を頂きますとともに、実験の験者としてご協力を頂きました。これらすべての方々に対して心より感謝致します。

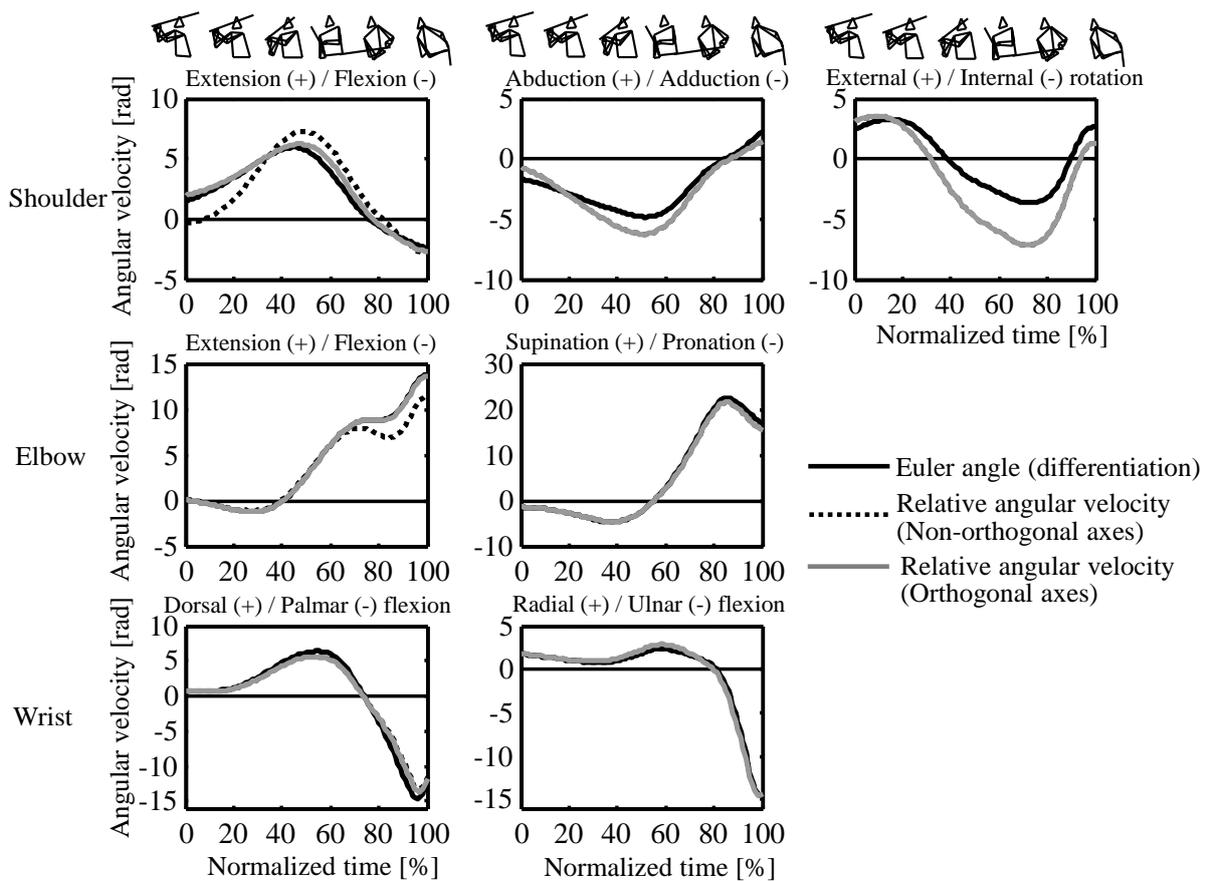
被験者としてご協力頂いた筑波大学硬式野球部員、そして、被験者の実験参加を快く承諾して下さった本学准教授の川村卓先生には、本研究への貴重なご意見を頂くとともに、温かい励ましのお言葉を頂きました。これ以外にも、本研究に携わり協力を頂きました多くの方々のご支援・ご協力がなければ、本研究は成し得るものではありませんでした。そして、最後まで温かく見守り、応援し続けてくれた家族に対して心より感謝します。

以上をここに記して、ご協力を賜った多くの方々へ深く感謝の意を表すとともに、今後とも研究活動に尽力し、精進していくことを誓います。

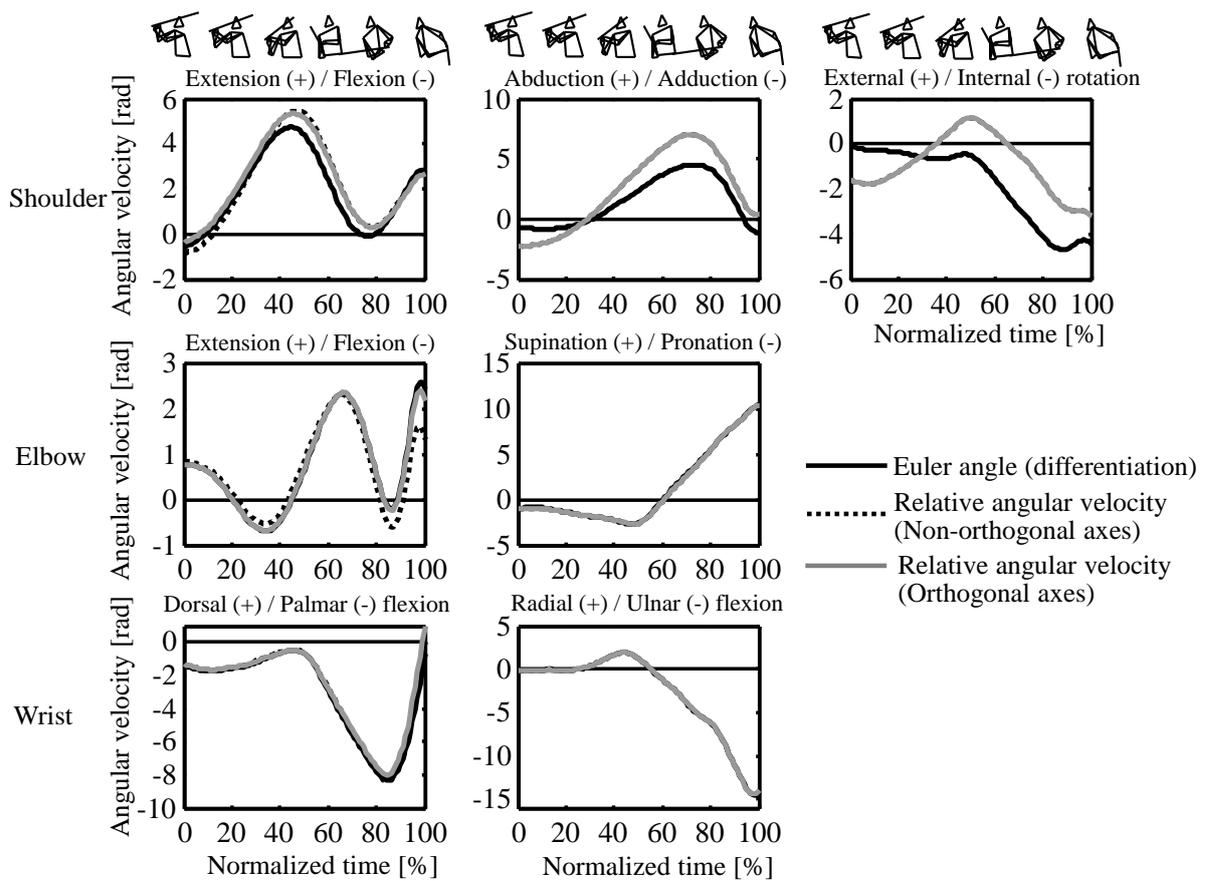
阿江 数通

Appendix

A1. 上肢関節角速度（オイラー角の微分および相対角速度，ならびに直交座標系
および斜交座標系）

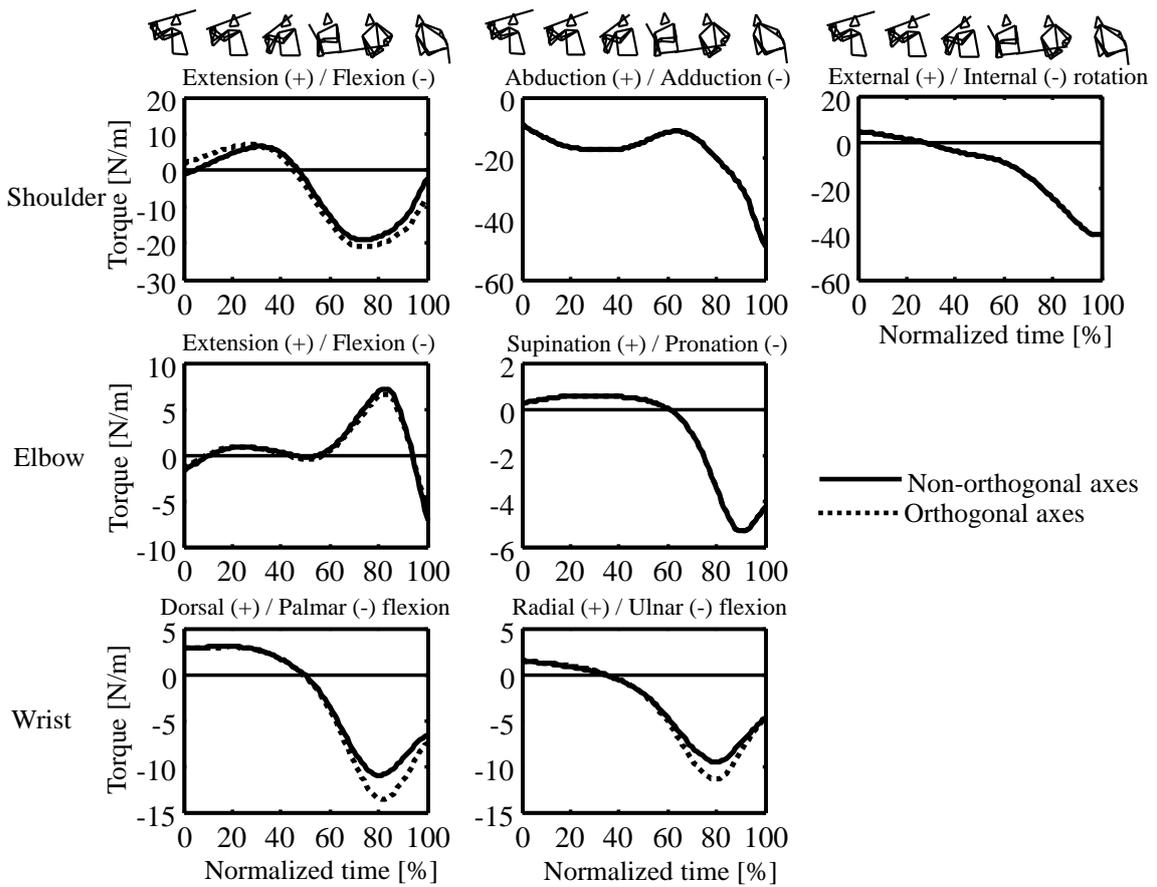


FigureA1-1 Comparison of mean joint angular velocities of barrel-side upper limb (shoulder, elbow, and wrist) among differentiation of Euler angle, relative angular velocity of orthogonal joint coordinate system, and that of non-orthogonal joint coordinate system in the forward swing motion under the middle condition.

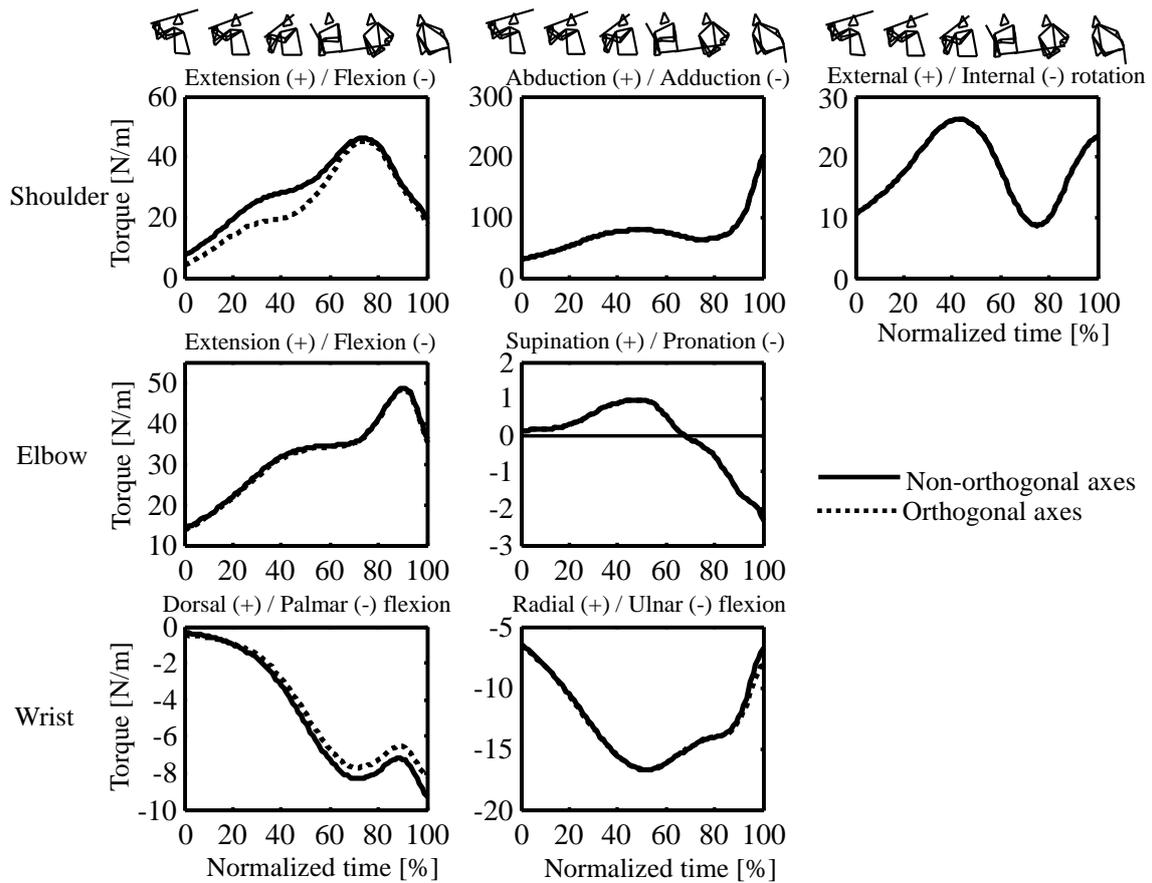


FigureA1-2 Comparison of mean joint angular velocities of barrel-side upper limb (shoulder, elbow, and wrist) among differentiation of Euler angle, relative angular velocity of orthogonal joint coordinate system, and that of non-orthogonal joint coordinate system in the forward swing motion under the middle condition.

A2. 上肢関節トルク（直交座標系および斜交座標系）



FigureA2-1 Comparison of mean joint torques of barrel-side upper limb (shoulder, elbow, and wrist) between orthogonal joint coordinate system and non-orthogonal joint coordinate system in the forward swing motion under the middle condition.



FigureA2-2 Comparison of mean joint torques of knob-side upper limb (shoulder, elbow, and wrist) between orthogonal joint coordinate system and non-orthogonal joint coordinate system in the forward swing motion under the middle condition.

A3. 体幹および下胴のバットのボール打撃部位速度に対する幾何学的貢献の算出方法

バットのボール打撃部位速度に対する体幹および下胴の幾何学的な貢献を、先行研究に基づいて算出した (Springings *et al.*, 1994 ; 宮西ら, 1996).

バットのボール打撃部位の速度は、以下に示す相対速度の総和として表すことができる.

$$\mathbf{V}_{\text{bat}} = \mathbf{V}_{\text{lt}} + \mathbf{V}_{\text{tr/lt}} + \mathbf{V}_{\text{sh/tr}} + \mathbf{V}_{\text{elb/sh}} + \mathbf{V}_{\text{wr/elb}} + \mathbf{V}_{\text{hand/wr}} + \mathbf{V}_{\text{bat/hand}} \quad (\text{A.1})$$

ここで、 \mathbf{V} は速度ベクトル、添え字の bat, lt, tr, sh, elb, wr および hand は、それぞれバットのボール打撃部位、下胴重心、上胴下端点 (左右肋骨下端の midpoint)、肩関節中心、肘関節中心、手関節中心、第 3 中手指関節点を示し、例えば、 $\mathbf{V}_{\text{tr/lt}}$ は下胴重心に対する上胴下端点の相対速度を表す。また、 \mathbf{V}_{lt} は下肢の運動によって生成された下胴重心の速度ベクトルとなる。

身体各セグメントを剛体リンクモデルと仮定すると、式 A.1 の右辺の各項を各セグメントの角速度ベクトルを用いて示すと式となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\text{bat}} = & \mathbf{V}_{\text{lt}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{lt}} \times \mathbf{r}_{\text{tr/lt}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{ut}} \times \mathbf{r}_{\text{sh/tr}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{ua}} \times \mathbf{r}_{\text{elb/sh}} \\ & + \boldsymbol{\omega}_{\text{fa}} \times \mathbf{r}_{\text{wr/elb}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{h}} \times \mathbf{r}_{\text{hand/wr}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{bat}} \times \mathbf{r}_{\text{bat/hand}} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

ここで、 $\boldsymbol{\omega}$ は静止座標系における身体各セグメントの角速度ベクトルである。 \mathbf{r} は添え字の 2 点を結ぶ相対位置ベクトルとなり、例えば、 $\mathbf{r}_{\text{tr/lt}}$ は下胴重心から上胴下端点への相対ベクトルとなる。また、添え字の ut は、上胴重心を示す。

つぎに、式 A.2 の相対位置ベクトルは以下のように置き換えることができる。

$$\mathbf{r}_{\text{tr/lt}} = \mathbf{r}_{\text{bat/lt}} - \mathbf{r}_{\text{bat/tr}} \quad (\text{A.3})$$

$$\mathbf{r}_{\text{sh/tr}} = \mathbf{r}_{\text{bat/tr}} - \mathbf{r}_{\text{bat/sh}} \quad (\text{A.4})$$

$$\mathbf{r}_{\text{elb/sh}} = \mathbf{r}_{\text{bat/sh}} - \mathbf{r}_{\text{bat/elb}} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{r}_{\text{wr/elb}} = \mathbf{r}_{\text{bat/elb}} - \mathbf{r}_{\text{bat/wr}} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{r}_{\text{hand/wr}} = \mathbf{r}_{\text{bat/wr}} - \mathbf{r}_{\text{bat/hand}} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.3) から式 (A.7) を式 (A.2) に代入し、角速度ベクトルの差 ($\boldsymbol{\omega}_{ut} - \boldsymbol{\omega}_{lt}$) を $\boldsymbol{\omega}_{ut/lt}$ と表記すると、下式 (A.8) が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{bat} = & \mathbf{V}_{lt} + \boldsymbol{\omega}_{lt} \times \mathbf{r}_{bat/lt} + \boldsymbol{\omega}_{ut/lt} \times \mathbf{r}_{bat/ut} + \boldsymbol{\omega}_{ua/ut} \times \mathbf{r}_{bat/sh} \\ & + \boldsymbol{\omega}_{fa/ua} \times \mathbf{r}_{bat/elb} + \boldsymbol{\omega}_{h/fa} \times \mathbf{r}_{bat/wr} + \boldsymbol{\omega}_{bat/h} \times \mathbf{r}_{bat/hand} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

ここで、 $\boldsymbol{\omega}_{ut/lt}$ などは下胴に対する上胴の相対角速度ベクトルを示す。

式 (A.8) に示す角速度は、静止座標系における関節角速度を表している。なお、前述しているように、幾何学的な貢献を算出する際に用いた関節角速度は、関節角変位を数値微分することによって得られた関節角速度とは異なる。

そして、式 (A.8) における下胴に対する上胴の相対角速度 $\boldsymbol{\omega}_{ut/lt}$ を体幹の解剖学的な運動軸（前後屈、左右側屈、左右回旋）における関節角速度をそれぞれの軸に投影し算出した。

前屈/後屈：

$$\boldsymbol{\omega}_{trADF} = (\boldsymbol{\omega}_{ut/lt} \cdot \mathbf{i}_{trADF}) \mathbf{i}_{trADF} \quad (\text{A.9})$$

右側屈/左側屈：

$$\boldsymbol{\omega}_{trLF} = (\boldsymbol{\omega}_{ut/lt} \cdot \mathbf{j}_{LF}) \mathbf{j}_{LF} \quad (\text{A.10})$$

右回旋/左回旋：

$$\boldsymbol{\omega}_{trRot} = (\boldsymbol{\omega}_{ut/lt} \cdot \mathbf{k}_{trRot}) \mathbf{k}_{trRot} \quad (\text{A.11})$$

ここで、 $\boldsymbol{\omega}_{trADF}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{trLF}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{trRot}$ は、それぞれ静止座標系における体幹の前後屈、左右側屈および左右回旋軸まわりの関節角速度ベクトル、 \mathbf{i}_{trADF} 、 \mathbf{j}_{trLF} 、 \mathbf{k}_{trRot} は、それぞれ体幹の前後屈、左右側屈および左右回旋座標系の各軸方向の単位ベクトルである。

以上のことから、体幹および下胴のバットのボール打撃部位速度の幾何学的な貢献としては、下胴重心速度 (\mathbf{V}_{lt})、下胴角速度による速度 ($\boldsymbol{\omega}_{lt} \times \mathbf{r}_{bat/lt}$)、体幹の前後屈の角速度による速度 ($\boldsymbol{\omega}_{trADF}$)、左右側屈の角速度による速度 ($\boldsymbol{\omega}_{trLF}$)、左右回旋の角速度による速度 ($\boldsymbol{\omega}_{trRot}$) の5項となる。なお、肩関節、肘関節、手関節、およびバットの角速度によるバットのボール打撃部位速度の幾何学的な貢献の算出方法については割愛する。

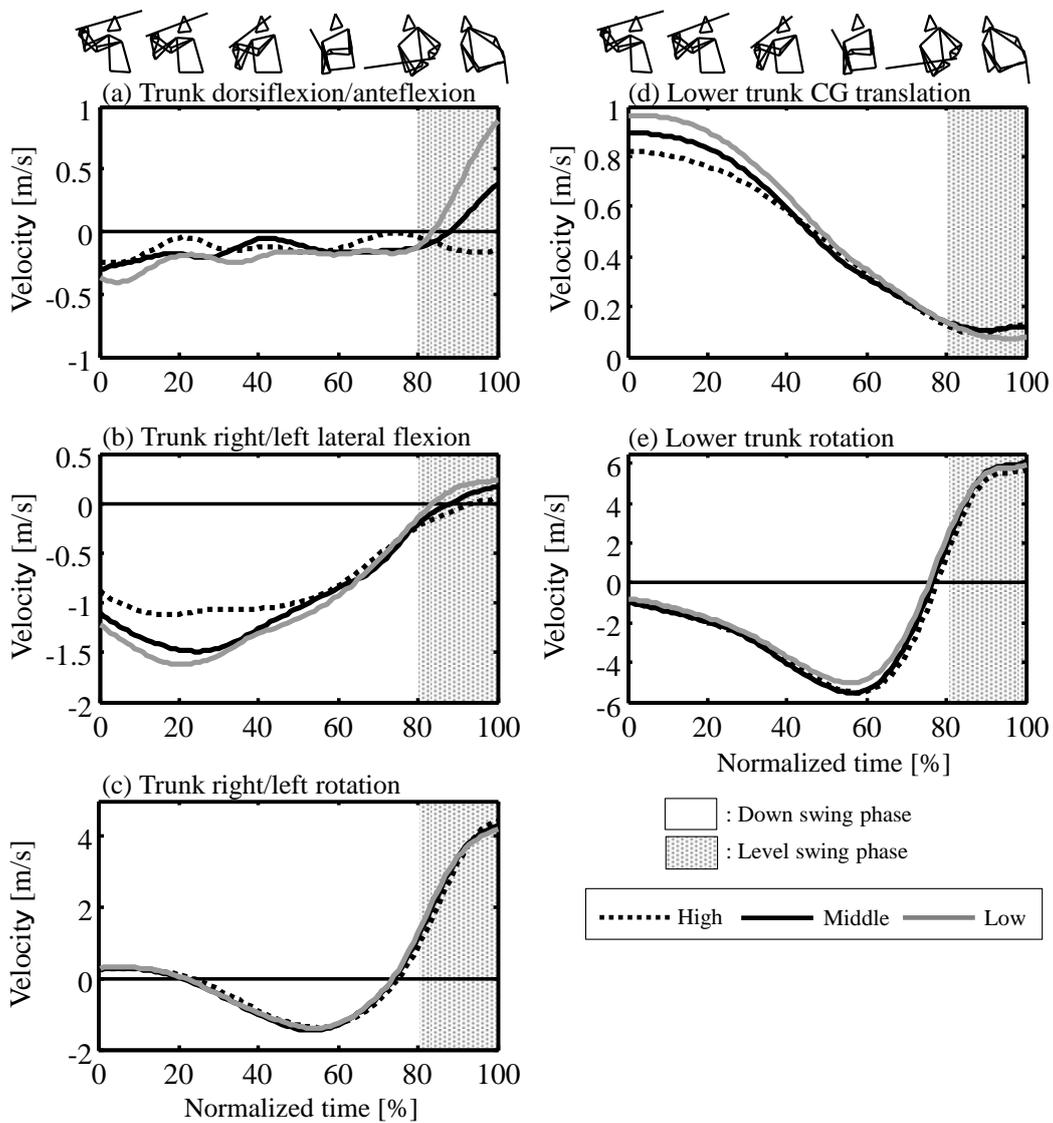


Figure A3 Curves of horizontal velocities of the ball hitting-point on bat obtained from the motion in the trunk joint and lower trunk in the forward swing motion under the hitting-point height conditions (High, Middle, and Low).