

30696
000
16)

博 士 論 文

野球の投球動作のバイオメカニクス的研究

— 加速局面の上腕と投球腕の運動に着目して —

平成 1 2 年度

宮 西 智 久

寄	贈
宮 西 智 久 氏	平成 年 月 日

筑 波 大 学

01003520

この論文は、下記の論文に未公表資料の内容を加えてまとめたものである。本文の第3章、第4章および第5章はそれぞれ1、2および3の各論文に、付録A、付録Bはそれぞれ4、5の各論文の内容に基づいたものである。

1. 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦 (1995) 大学野球選手における速投および遠投動作の3次元的比較研究. 体育学研究, 第40巻第2号, 89-103.
2. 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 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, 第41巻第1号, 23-37.
3. 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦 (1997) 野球の投球動作における体幹および投球腕の力学的エネルギー・フローに関する3次元解析. 体力科学, 第46巻第1号, 55-68.
4. 宮西智久 (1997) 画像を用いた身体部分の3次元角速度算出法の比較. バイオメカニクス研究, 第1巻第1号, 7-14.
5. 宮西智久 (1998) 剛体リンク系における身体運動の3次元関節トルク算出法の実際. 仙台大学紀要, 第30巻第1号, 46-56.

目次	頁
第1章 緒論	
1.1 野球の投球動作について	1
1.2 研究の目的	6
1.3 研究の限界	8
1.4 用語の定義	11
図・表	16
第2章 関連文献の研究	
2.1 野球の投球動作に関する理論的研究	18
2.1.1 ボール速度増大仮説	
2.2 野球の投球動作に関する映像解析法を用いた実験的研究	20
2.2.1 課題投に関する研究	
2.2.2 身体部分の「貢献度」に関する研究	
2.2.3 身体部分の運動メカニズムに関する研究	
2.3 小 括	34
図・表	35
第3章 スピード投-速投と遠投動作の比較	
3.1 緒 言	40
3.2 研究方法	40
3.2.1 被験者	
3.2.2 投球動作実験およびDLT法による3次元画像撮影法	
3.2.3 分析試技の選定	
3.2.4 データの算出項目と算出法	
3.2.5 データの規格化および平均化	
3.2.6 データの統計処理	
3.3 結 果	47
3.3.1 リリースパラメータおよびボール速度	
3.3.2 体幹および投球腕の運動	
3.4 考 察	50
3.4.1 先行研究との比較	
3.4.2 速投と遠投におけるボール速度の比較	
3.4.3 速投と遠投における体幹および投球腕の運動の比較とボール速度	
3.5 小 括	59

図・表	62
第4章 速投動作の運動学的研究－ボール速度の貢献度に着目して－	
4.1 緒言	85
4.2 研究方法	86
4.2.1 被験者	
4.2.2 投球動作の実験および解析方法	
4.3 データの算出方法	87
4.3.1 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度の算出法	
4.3.2 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度の「貢献度」の算出法	
4.3.3 データの規格化および平均化	
4.4 結果	97
4.4.1 ボール速度の測定値と計算値	
4.4.2 ボール合成および水平速度の局面分け	
4.4.3 上腕および投球腕各関節における角速度	
4.4.4 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度および「貢献度」	
4.5 考察	103
4.5.1 ボール速度の測定値と計算値	
4.5.2 上腕および投球腕各関節における角速度	
4.5.3 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度および「貢献度」	
4.6 小括	110
図・表	112
第5章 速投動作の動力学的研究－力学的エネルギーフローに着目して－	
5.1 緒言	131
5.2 研究方法	132
5.2.1 被験者	
5.2.2 投球動作の実験および解析方法	
5.3 データの算出方法	133
5.3.1 「力学的エネルギーフロー」の意味	
5.3.2 力学的エネルギーフローの算出	

	目次
	頁
5.4 結果	138
5.4.1 力学的エネルギー	
5.4.2 部分における近位端／遠位端の関節力パワーおよび 関節トルクパワー	
5.4.3 関節における関節トルクパワー	
5.4.4 上腕および投球腕各関節の関節トルクパワー	
5.4.5 上腕および投球腕各関節の合成関節力および合成関節トルク	
5.5 考察	144
5.5.1 力学的エネルギーの変化	
5.5.2 関節力パワー，関節トルクパワーおよび力学的仕事	
5.5.3 上腕および投球腕各関節の合成関節力および合成関節トルク	
5.6 小括	154
図・表	158
第6章 投球動作のメカニズム／指導／筋力トレーニング	
6.1 野球の投球動作における速投のメカニズムについて	176
6.2 速投と遠投動作の指導について	182
6.3 投能力を高める筋力トレーニング方法について	185
第7章 結論	
7.1 総括	187
7.2 今後の研究課題	192
文献	195
付録A－運動学データの算出－	204
付録B－動力学データの算出－	212
謝辞	218

第1章 緒論

1.1 野球の投球動作について

(1) 野球の投球動作の体系

野球は、我が国では最も人気のあるスポーツのひとつである。野球の動作には投、打、走、守、捕などがみられるが、このうち投球動作は野球を構成する最も重要な動作である。野球の投球動作には、守備位置別にみると、異なる運動課題（目的）が要求されている。すなわち、投手には打者をアウトにするためにストライクゾーンに直球や変化球を正確にかつ速く投げることが、捕手、内野手および外野手には打者走者をアウトにするために他の野手に、すばやい動作でボールを正確にかつ速く投げることが要求される。

このように、野球の投球動作は、状況に応じて複数の課題が組み合わされていることがわかる。そして、野球におけるそのメカニズムを究明するにあたっては、これらの課題のうち、次の2つが極めて重要な意味をもつものと考えられる。すなわち、ひとつは、ボールにできるだけ大きなスピードを与えて投げ出すという“スピード”の問題、もうひとつは、他の野手や捕手へボールをより正確に投げるという“正確性”の問題である。以下、本研究では、前者を「スピード投」、後者を「正確投」と呼ぶことにする。

図 1.1 は、運動課題の観点から、野球の投球動作を分類して示したものである。図に示すように、スピード投には、ボールのスピードを最大にするという目的は同じでも、ボールの投射方向（角度）を考慮すると、さらに「水平方向への投げ方」と「斜め上方への投げ方」というものがあると考えられる。以下、本研究では、水平方向へのスピード投を「速投」とし、斜め上方へのスピード投を「遠投」と呼ぶこととする。

このように、スピード投を速投と遠投の2つに類別して考えてみると、これらの投げ方の比較検討が、スピードボールを投げるという野球の投球動作のメカニズム究明

のための手がかりを与えるものと考えられる。

速投と遠投に共通する力学的課題はボールスピードを大きくすること、両投に異なることは投射角度の大小である。したがって、速投と遠投において、仮に投げ出されたボールのスピードに顕著な相違が認められれば、投射角度そのものがボールスピードに対する制約条件になっているものと考えられ、このことは両投の投げ方に全く異なるメカニズムが内在することを意味している。またさらに、速投と遠投における各被験者のボールスピードに相関がなければ、両投の投げ方は能力的にも全く異なるものであることが示唆される。したがって、これらのことは、野球の投動作を体系化するにあたって極めて重要な意味を持つと言える。

一方、上述のことを逆に考えてみる。すなわち、速投と遠投間のボールスピードに相違が認められず、また速投と遠投における各被験者のボールスピードに相関があれば、両投の投げ方に本質的な相違は存在せず、両投を共通の投げ方に分類してもよいことを意味する。したがって、投の体系化を考えるにあたり、上述のボールの“スピード”の問題においては、ボールの投射方向を考慮する必要はなく、ボールスピードのみの問題に帰着することができると言えよう。

次に、正確投における力学的課題を考えてみると、これはボール初速度、すなわちボールスピードと投射方向との組み合わせを適切なものに調節することである。しかし、野球の投球動作では、正確投においても、以下の理由により投げ出されたボールスピードが極めて重要な問題となっている。

投射体の力学において、同一距離にある的にボールを当てるには二通りの方法が存在することが知られている。すなわち、ボールを「高く投げ出す方法」と「低く投げ出す方法」である。このうち、ボールを低く投げ出す方法はボールのスピードを大きくすることにより投射角度の調節幅を小さくしようとするものであり、一方、高く投げ出す方法ではその逆になっていると考えられる。しかし、野球の投球動作では、一般に高く投げ出す方法を用いて他の野手や捕手へボールを投げることはほとんどない

と考えていいので、ボールを低く投げ出す方法を用いた正確投が重要である。言い換えれば、投射角度の方をできるだけ小さくして、ボールスピードの方をできるだけ大きくすることが重要であると考えられる。また、先行研究（豊島と星川, 1976）において、同一距離に設置した的に当たる確率は、遠投距離が大きい（遠投能力の高い）ものは小さいものよりも高いという結果が報告されている。このことは、ボールのスピードと正確性との間に強い相関関係があることを示すものである。

これらのことから、野球の投球動作では、ボールの“スピード“の問題が速投や遠投だけでなく、正確投においてさえも内在しており、極めて重要な問題となっていると言えるであろう。

以上のように論を進めてくると、速投と遠投に着目することは、野球の投球動作におけるスピード投のメカニズムの究明のみだけでなく、さらに正確投のメカニズムを究明するための基礎的な手がかりを与えるものとしても極めて大きな意味をもつと言えよう。

本研究では、スピード投のメカニズムを究明するために速投と遠投に着目して研究を行なう。

(2) 野球の投球動作における上手投げと主要局面

野球で用いられるスピード投や正確投の動作は、片腕でボールを加速する動作でも、ソフトボールの投手などで用いられる下手投げ *underarm throw* や砲丸投げなどの押し投げ *pushlike throw* などでなく、一般に上手投げ *overarm throw* を用いることが多い。上手投げは、リリース時の手の位置によって主に以下の3つに分類される。

すなわち、手の位置が頭部より上方、ほぼ同水準、より下方に位置するもので、それぞれオーバーハンドスロー *overhand throw*、サイドハンドスロー *sidehand throw*、アンダーハンドスロー *underhand throw* である。これらのうち、オーバーハンドスローは、野球において守備位置に関係なく、最も多用されている投動作とな

っている。したがって、野球の投球動作における上手投げのオーバーハンドスローに着目することが、野球のスピード投のメカニズムを解明するために有効であると考え、本研究ではこの投球動作に着目することにした。

図 1.2 は、上手投げのオーバーハンドスローの典型例である、投手の投球動作（ピッチング¹）を例にして示したものである。過去の研究において、ピッチング動作は大きく4つの動作局面に分けられている (Jobe et al., 1983)。すなわち、図 1.2 に示すように、① wind-up 局面（投球開始－グローブからの離球時, a-e）、② cocking 局面（グローブからの離球時－肩の最大外旋位時, e-j）、③ acceleration 局面（肩の最大外旋位時－ボールリリース時, j-l）、④ follow through 局面（ボールリリース時－投球動作の終了, l-n）である。なお、cocking 局面は、さらに細かく early cocking 局面（グローブからの離球時－踏出脚の接地時, e-h）と late cocking 局面（踏出脚の接地時－肩の最大外旋位時, h-j）の2つに分けられる。

ところで、これらの局面のうち、ボールへなされる仕事の大部分が acceleration 局面（リリース前 50 ms に相当）において行なわれることが報告されている (Atwater, 1979)。このことは、acceleration 局面が野球の投球動作のスピード投のメカニズムを究明することにおいて最も重要な局面であることを意味している。したがって、本研究で着目する主要区間は、踏出脚の接地時（図 1.2g）からリリース時（図 1.2l）までの局面とした。なお、この局面を本研究ではボール加速局面（単に加速局面と呼ぶこともある）と呼ぶ。

また、ボール加速局面では、下肢の運動にはほとんど変化がみられないことが観察されることから、本研究において着目する部分 segment は、主として体幹（上胴）

¹ ピッチングは、本研究の投げの分類からいえば、正確性を意図したスピード投である。ただし、野球競技規定により、水平距離 18.44 m、地上 0.254 m からストライクゾーンへ向かって投げおろすという極めて特殊な投形態の一群である。

および投球側上肢（以下、投球腕）各部分とし、下腕および下肢の各部分の運動は分析の対象から除外した。

(3) 野球の投球動作の研究とその問題点

これまで、野球における投球動作のメカニズムを究明しようとした研究は、投手のピッチング動作を中心にしたものが多く (Vaughn, 1985; Elliott et al., 1986; Feltner and Dapena, 1986; Feltner, 1989; Gibson and Elliott, 1987; 桜井ら, 1990; Sakurai et al., 1993; Dillman et al., 1993; Werner et al., 1993; Fleisig et al., 1995, 1996), 投動作における種々の課題に着目した研究はほとんど見当たらない。

三浦と橋本 (1980), 三浦ら (1983)は、課題投, すなわち水平投げ, 遠投, 真上投げに着目して研究を行なったが, 彼らは各投の動作そのものに着目して, ボールの初速度や投射角度の相違がいかなる身体部分の運動によるものかについて検討していない。したがって, 課題の異なる速投と遠投動作そのものに着目した研究は見当たらない。

投球動作のメカニズムを探るために, 身体各部分の貢献度を運動学的に検討した研究が行なわれている (Atwater, 1977; Bowne, 1960; Kunz, 1974; Toyoshima et al., 1974; Hoshikawa and Toyoshima, 1976)。その他, 映像を用いて部分の貢献度を定量的に捉えた研究として, 以下のものがある。すなわち, 石井と斉藤 (1982)はボール速度に対する身体各部分の貢献度を関節点の速度を用いて検討し, 淵本ら (1985)は投球腕の各関節点の相対速度のボール絶対速度方向への成分を求め, Elliott et al. (1985)はリリース時のボール速度に対する投球腕の各関節点の相対速度差の比を算出した。さらに, Vaughn (1985)は投球腕の上腕の回旋および肘関節の屈伸の角速度を3次元的に算出し, 投球方向の手首の速度に対する上腕の回旋および肘の屈伸運動によって生じた速度とそれらの貢献度を詳細に検討している。しかし, これらの研究はいずれも, 身体各関節の解剖学的回転運動によって得られたボール速度に対する貢献

度を明らかにしたものではない。

野球の投球動作の仮説的モデルは、身体部分における“むち”動作や“から竿”動作などの「運動連鎖モデル」(Morehouse and Cooper, 1950; Bunn, 1972; Dyson, 1986; Kreighbaum and Barthels, 1990), 「力学モデル」(吉福, 1982), さらに「Stretch-Shortening Cycle 理論」(Komi, 1986)などがある。これらの仮説モデルの多くは、現在においても十分に明らかにされているとは言えない。

近年、3次元映像解析法を用いて投手のピッチング動作を詳細に分析した動力学的研究が行なわれている (Feltner and Dapena, 1986; Feltner, 1989; Dillman et al., 1993; Werner et al., 1993; Fleisig et al., 1995, 1996)。しかし、エネルギー論的な観点からみた場合、これらの研究方法では、部分のエネルギーがどこで発生し、どのようにして関節間で授受されてもたらされているのかを明らかにすることはできない。投球動作中の身体部分の力学的エネルギーフロー（流れ）の動態は、投球動作のメカニズムの解明のために検討すべき重要課題のひとつであるとともに、先に述べたように運動連鎖モデルの検証、Stretch-Shortening Cycle の使用筋群の確証、また投球動作の効率の解明などのための手がかりを与えるものとして極めて重要な意味をもつものである。

1. 2 研究の目的

本研究の目的は、3次元画像解析法を用いて、野球の投球動作のスピード投における加速局面の上腕および投球腕の運動のメカニズムをバイオメカニクス的に究明するとともに、得られた知見を手がかりとして野球の投球動作指導とその筋力トレーニング方法について検討することである。

この目的を達成するために、本研究では、以下の3つの課題を設定する。

(1) 研究課題

課題1 速投と遠投に着目し、両投の動作の特徴を運動学的に明らかにすることである。具体的には、両投のボール速度の特徴を検討するとともに、それらの両投のボールスピードや投射角度が、主として上腕および投球腕のいかなる運動によってもたらされているのかを検討すること（第3章）。

課題2 速投に着目し、上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度を算出する方法を考案し、運動学的観点からボール速度に対する上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動の貢献度を検討すること（第4章）。

課題3 速投に着目し、上腕および投球腕各部分における力学的エネルギー、力学的エネルギーフロー（流れ）を明らかにするとともに、関節トルクパワーを関節の解剖学的な回転運動として評価し、それらの力学的仕事を明らかにして動力的観点から投球動作のメカニズムについて検討を行なうこと（第5章）、

である。

なお、投動作の個人差や能力間などの比較については、本研究の目的から外れるため、本研究ではその検討を行なわない。

(2) 仮 説

上記の研究課題に対して、それぞれ以下の仮説を設ける。

仮説1 速投と遠投間および被験者間のボールスピードは異なる。速投ではボールの水平速度が、遠投では鉛直速度がリリース前に増大する。これらの原因は投球腕よりも、主として上腕の運動が影響する。

仮説2 ボール速度漸増局面では、主として上腕の回旋運動による貢献度が大きい。

ボール速度急増局面では、主として肘伸展および肩内旋運動による貢献度が大きい。

仮説3 ボールへ伝えられるエネルギーのほとんどは手関節のパワーによってもたらされる。手関節のパワーの大部分は主として体幹などで発生したエネルギーが伝達されたことによるものである。肩関節の運動によって発揮されるパワーの多くは内

旋筋群に起因する。

1.3 研究の限界

本研究から得られた知見を一般化・普遍化するには、いくつかの限界が存在する。この限界は、(1) 野球の投球動作による限界、(2) 被験者による限界、(3) データの解析方法による限界、(4) 力学モデルによる限界、(5) 下肢を分析対象から除いたことによる限界、に分類される。以下、各項目を具体的に説明する。

(1) 野球の投球動作による限界

本研究で対象とする投球動作は、既に述べたように「上手投げ」とすることであった。したがって、本研究において得られた知見を「押し投げ」、「回転投げ」および「下手投げ」などの各投動作に一般化するには限界がある。

本研究で使用したボールは、質量 0.145 kg、直径 7.4 cm の硬式野球ボールであった。このボールは、一般に成人であれば握ることが可能で、「腕を振り回して投げる」ことのできるものである。このような用具的な制約により、本研究で得られた知見を他の「上手投げ」、例えばハンドボール投げなどの動作には一般化できない場合がある。

肩関節は自由度 3 の 3 軸関節、肘および手関節は自由度 2 の 2 軸関節であり、その他指部の関節を含めると、一般に上肢の運動の自由度は計 27 にも及ぶ。このように上肢の運動は下肢の運動よりも自由度が極めて大きい。このため、投球腕の運動における各力学量算出データは、歩行や走運動など、下肢を対象とした算出データに比べ、標準偏差 (S.D.) が大きくなることが予測される。

(2) 被験者による限界

本研究で用いた被験者は、日本の大学の硬式野球部に所属する年齢 19 歳 - 22 歳の

健常な男子 24 名で、競技歴が 10.3 ± 2.3 年の選手であった。したがって、職業（プロ）野球選手および公共団体や民間企業に所属するアマチュア野球選手などの一般に熟練度の極めて高い一流選手、また熟練度の低い男女成人あるいは若年者と高齢者、さらに他民族の人々には、得られた知見を一般化・普遍化するには限界がある。

(3) データ解析方法による限界

① データの精度

身体各部位の計測点の座標データは、高速ビデオカメラから得られた画像をマウスを用いて手動で読み取った。したがって、計測点座標の確定において、人為的で不規則な読み取り誤差 *digitizing errors* が混入している (Miller, 1980; Winter, 1990; 小林と大島, 1983; 阿江, 1991)。また、カメラレンズやディスプレイなどの光学的な装置は、それ自体で固有の誤差（ひずみ）特性を持っている (Miller and Nelson, 1973; Winter, 1990; 小林と大島, 1983; 安藤, 1983)。これらの誤差特性は、算出された運動学・動力学データの精度に影響を与えている。

② 計測区間

本研究の計測区間は、踏出脚の接地前 0.05 秒 (50 ms) からボールリリース後 0.05 秒 (50 ms) までとした。この区間外の運動現象についての言及は推測の域を出ない。

(4) 力学モデルによる限界

体幹の上部と下部および体幹と頭部の間に、解剖学的には定まらない仮の関節を定義し、本研究ではこれらの関節をそれぞれ上胸関節および頸関節と呼ぶ。

投球腕における肩関節の運動の定量化に際して、上胸（胸郭、肩甲骨および鎖骨）を1つの剛体としてモデル化した。したがって、肩関節の運動は、肩甲上腕関節、肩甲胸郭関節、肩鎖関節および胸鎖関節の複合運動を表すものである。

関節力および関節トルクは、身体部分を剛体リンクモデルと仮定して算出した。したがって、これらの動力学データは関節の“合成”関節力および“合成”関節トルクを示すものであり、関節間力および筋トルクそのものを意味するものではない。

身体部分の慣性特性値は、先行研究 (阿江ら, 1992)に基づいて各被験者毎に推定した。したがって、被験者自身の慣性特性値を用いたものではない。

関節の回転中心の位置は、実際には関節の回転運動に伴い瞬時的に変化しているが、本研究では各関節の計測点の位置をその関節の回転中心とみなした。

以上の力学モデルによる仮定は、算出されたデータの精度に影響を与え、その解釈に制限を加えている。

(5) 下肢を分析対象から除いたことによる限界

本研究において分析の対象とする部分は、主として上腕と投球腕の上腕、前腕および手とし、下肢各部分は分析の対象から除外した。野球のピッチング動作時の地面反力計測を行なった研究 (Elliott et al., 1988)によると、踏出脚接地直後において、軸足の鉛直および前後方向への地面反力が最大となり、その後においてもその減少率 (特に前後方向力) は小さいことが示されている。このことは、ボール加速局面における下肢の運動が投球動作のメカニズムを究明するにあたって極めて重要な働きを示唆するものである。しかし、本研究では、加速局面中の両足 (軸足・踏出足) に作用する地面反力データを計測しなかったため、下肢の運動については精度よい分析を行なうことが困難である (Miller and Nelson, 1973; Miller, 1980; 宮西, 1998) と判断した。これらのことが、本研究 (第5章) において下肢の動力学分析を除外した理由である。なお、投球腕やボールへ伝達されるエネルギーの大部分は、下肢の運動によって発揮されたエネルギーが伝達されたことによるものであることが理論的に指摘されている (吉福, 1982)。したがって、野球の投球動作のメカニズム究明にあたって、体幹や投球腕およびボールのエネルギーの由来を、下肢の運動も含めて

詳細に検討するには限界がある。

1.4 用語の定義

ここでは、本研究で用いた用語の定義および説明についてそれぞれ各章（第3章，第4章，第5章）の研究に分けて述べる。なお，本研究では“メカニズム”という言葉を用いて，以下のように定義する。

- ・メカニズム mechanism：広辞苑（岩波書店第四版，1991）によると，「機械装置，仕掛け，機構，仕組み」とある。この概念に依拠して，本研究では，メカニズムを「人間の運動の仕組みを機械論的に明らかにする」という意味で用いる。具体的には，このメカニズムは2つの観点から検討される。すなわち，ひとつは，運動学 kinematics 的観点からであり，これは身体部分の運動を位置や角度，速度などの運動学変量を用いて記述・検討することである。もうひとつは，動力学 kinetics 的観点からで，これはその運動の原因をエネルギーや力，トルクなどの動力学変量を用いて検討することである。

(1) スピード投—速投と遠投動作の比較（第3章）

- ・速投（水平投） horizontal throw：ボールを全力で水平方向へ投げる投動作。
- ・遠投（距離投） distance throw：ボールを全力で遠くへ投げる投動作。
- ・部分 segment：本研究では，例えば，上腕，前腕などの名称を総称して部分と呼ぶ。
- ・リリースパラメータ release parameters：リリース時におけるボールの初速度，投射角度および投射高，ボール中心と踏出脚踵との距離。
- ・踏出脚 stride foot：投球方向へ踏み出す脚（左脚）。
- ・踏出脚の接地時 instant of stride foot contact (SFC)：投球動作において，踏出脚が地面に接地した時点。

- ・肩関節の最大外旋位時 instant of maximum external rotation of shoulder joint (MaxER) : 肩関節の外旋角が最大となった時点.
- ・リリース時 instant of ball release (BRL) : ボールが末節骨 (指先) から離れた時点.
- ・ボール加速局面 acceleration phase of ball : 踏出脚の接地時からボールリリース時までの局面.
- ・静止座標系 global coordinate system : 地面に固定した右手系の直交座標系 (図 3.2) . X 軸の正は投球方向に対して右方向, Y 軸の正は投球方向 (水平方向) , Z 軸の正は鉛直方向とした.
- ・上胴座標系 local (moving) coordinate system at upper torso : 上胴に定義した右手系の直交運動座標系 local (moving) coordinate system.
- ・上胴の後傾/前傾角 backward/forward lean of upper torso (BFL) : 静止座標系の YZ 面での上胴の長軸と静止座標系の Z 軸とのなす角度 (図 3.6) .
- ・上胴の右傾/左傾角 right/left lean of upper torso (RLL) : 静止座標系の XZ 面での上胴の長軸と静止座標系の Z 軸とのなす角度 (図 3.6) .
- ・体幹のひねり (回旋) 角 anterior/posterior twist of torso (APT) : 左肩関節から右肩関節へのベクトルと左股関節から右股関節へのベクトルを上胴の長軸に垂直な平面へそれぞれ投影したときの双方のベクトルとのなす角度 (図 3.6) .
- ・肩内転/外転角 adduction/abduction angle at shoulder joint (AA) : 上腕ベクトル V_1 を上胴座標系の xz 面に投影したベクトル V_3 と上胴座標系の z 軸方向を示すベクトルとのなす角 (図 3.7) .
- ・肩水平屈曲 (内転) / 伸展 (外転) 角 horizontal flexion (adduction) / extension (abduction) angle at shoulder joint (HFE) : 上腕ベクトル V_1 を上胴座標系の xy 面に投影したベクトル V_4 と上胴座標系の x 軸方向を示すベクトルとのなす角 (図 3.7) .

- ・肩内旋／外旋角 internal/external rotation angle at shoulder joint (IER) : 前腕ベクトル V_2 と上腕座標系の z 軸方向を示すベクトルを上腕に垂直な平面へ投影した時の双方のベクトル (V_5 と V_6) とのなす角 (図 3.7) .
- ・肘屈曲／伸展角 flexion/extension angle at elbow joint (FE) : 方向を逆にした上腕ベクトル V_1 と前腕ベクトル V_2 とのなす角 (図 3.7) .

(2) 速投動作の運動学的研究—ボール速度の貢献度に着目して— (第4章)

- ・関節の解剖学的な回転運動 anatomical joint rotation : 物体の運動は、一般に任意の座標系に対して記述することが可能である。通常、物体の運動は、3軸が直交する静止座標系と運動座標系のどちらかの座標系に着目して記述される。本研究では、関節に運動座標系 (関節座標系) を定義して、身体部分の運動を関節の解剖学的な回転運動として評価した。なお、関節座標系の各軸は、主として隣接する部分のベクトルを用いて求めている。したがって、各軸は部分の姿勢 (運動) に依存するため、関節の解剖学的な定義に基づいた回転運動そのものを表していない場合がある (特に、描円運動をする球・楕円関節の肩および手関節など)。なお、関節の解剖学的な回転運動の方向は、日本整形外科学会身体障害委員会および日本リハビリテーション医学会評価基準委員会 (1973) の定義に基づいた。
- ・貢献度 contribution : 関節の解剖学的な回転運動によって得られた速度の正 (負) 方向へ向かうボール速度の総和に対する各回転運動によって得られた正 (負) 方向へ向かうボール速度の比率 (%) とした (図 4.5) .
- ・関節角速度 anatomical angular velocity of joint : 関節の解剖学的な回転運動として表した角速度。
- ・運動座標系 orthogonal local (moving) coordinate system : 静止座標系に対して並進かつ回転運動する右手系の直交座標系。
- ・部分座標系 segment coordinate system : 部分 (重心) に定義した右手系の直交運

動座標系 (図 4.3) . 座標系の各軸はベクトルの外積 **vector product** を用いて, 各軸が互いに直交条件を満たすように定義した.

- ・ 関節座標系 **joint coordinate system** : 関節中心に定義した右手系の直交運動座標系 (図 4.4) . 座標系の各軸はベクトルの外積を用いて, 各軸が互いに直交条件を満たすように定義した.
- ・ 有効距離 **effective distance** : 関節座標系の各軸からボール中心までの垂直距離.
- ・ 上胴関節 **upper torso joint** : 上胴と下胴の間に仮定した関節とした. 図 4.2 に示すように, 点 rt と点 lt を境に体幹を上胴と下胴に分け, 点 rt と点 lt を結んだ線分の中点 (点 td : 上胴下端点) に定義した関節である.

(3) 速投動作の動力学的研究—力学的エネルギーフローに着目して— (第5章)

- ・ 力学的エネルギーフロー (流れ) **mechanical energy flow** : 本研究でいう「力学的エネルギーフロー (流れ)」とは, 関節および筋・腱を介して伝達されるパワー (近位端・遠位端の関節力パワーおよび関節トルクパワー : 後出) と筋・腱によって発生・吸収されるパワー (関節の関節トルクパワー : 後出) の動態を意味する (図 5.2, 図 5.3, 表 5.1) .
- ・ 合成関節力 **resultant joint force** : 本研究では, 身体部分を剛体リンクモデル **link-segment model** (Winter, 1990) として仮定した. したがって, 関節に作用する力は, 関節間力 **bone-on-bone force** (Winter, 1990) ではなく, 関節の合力を示すものである. これを本研究では「合成関節力」と呼ぶ.
- ・ 合成関節トルク **resultant joint torque** : 前項と同様に, 身体部分を剛体リンクモデルと仮定したことにより, 関節まわりに発生するトルクは, 主働筋群と拮抗筋群の個々の筋トルク **muscle torque** を求めた結果としての関節トルクを算出したものでなく, 主働筋群と拮抗筋群の収縮の結果として関節まわりに発現した合トルクを示すものである. これを本研究では「合成関節トルク」と呼ぶ.

- ・近位端／遠位端における関節力パワー proximal/distal joint force power : これは、合成関節力と関節点速度を乗じたものであり、合成関節力によって生じるパワーを示す。このパワーの正は部分へのエネルギーの流入を、負は部分からの流出を意味する。
- ・近位端／遠位端における関節トルクパワー proximal/distal joint torque power : これは、合成関節トルクと隣接部分の角速度を乗じたものであり、合成関節トルクによって生じるパワーを示す。このパワーの正は部分へのエネルギーの流入を、負は部分からの流出を意味する。
- ・関節における関節トルクパワー joint torque power at joint : これは、合成関節トルクと関節角速度を乗じたものであり、合成関節トルクによって生じるパワーを示す。このパワーの正は発生を、負は吸収を示しており、前者は短縮的収縮を、後者は伸張的収縮を意味する。
- ・身体部分の慣性特性 inertial properties of body segment : 部分の質量、質量中心（重心）位置および主慣性モーメント値である。本研究では、これらの値を阿江ら（1992）が報告した回帰式を用いて各被験者毎に推定した。なお、この回帰式は、各被験者の体重と部分長から推定するものであり、部分長は関節の計測点間の長さとして求めた。
- ・頸関節 neck joint : 頭部と上胴の間に仮定した関節とする。つまり、左右の肩関節点を結んだ線分の midpoint（点 tp）に定義した関節である（図 5.1）。頸関節の運動は、環椎後頭関節、頸椎（7 個）・椎間関節および鉤状関節の複合運動を反映したものである。

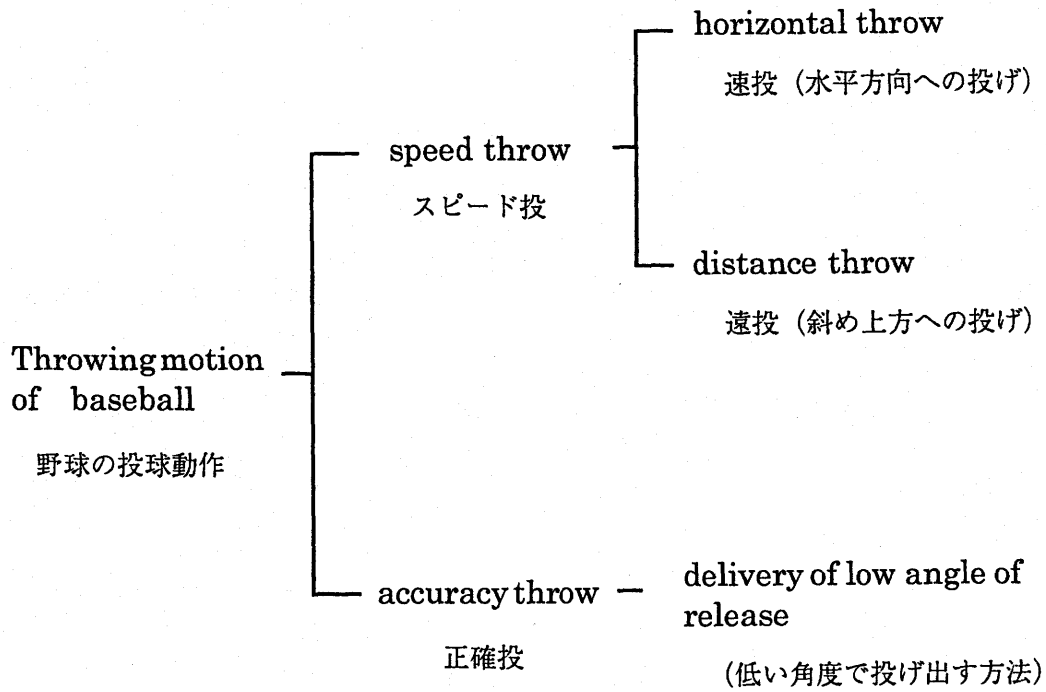


Figure 1.1
Classification for throwing motion of baseball.

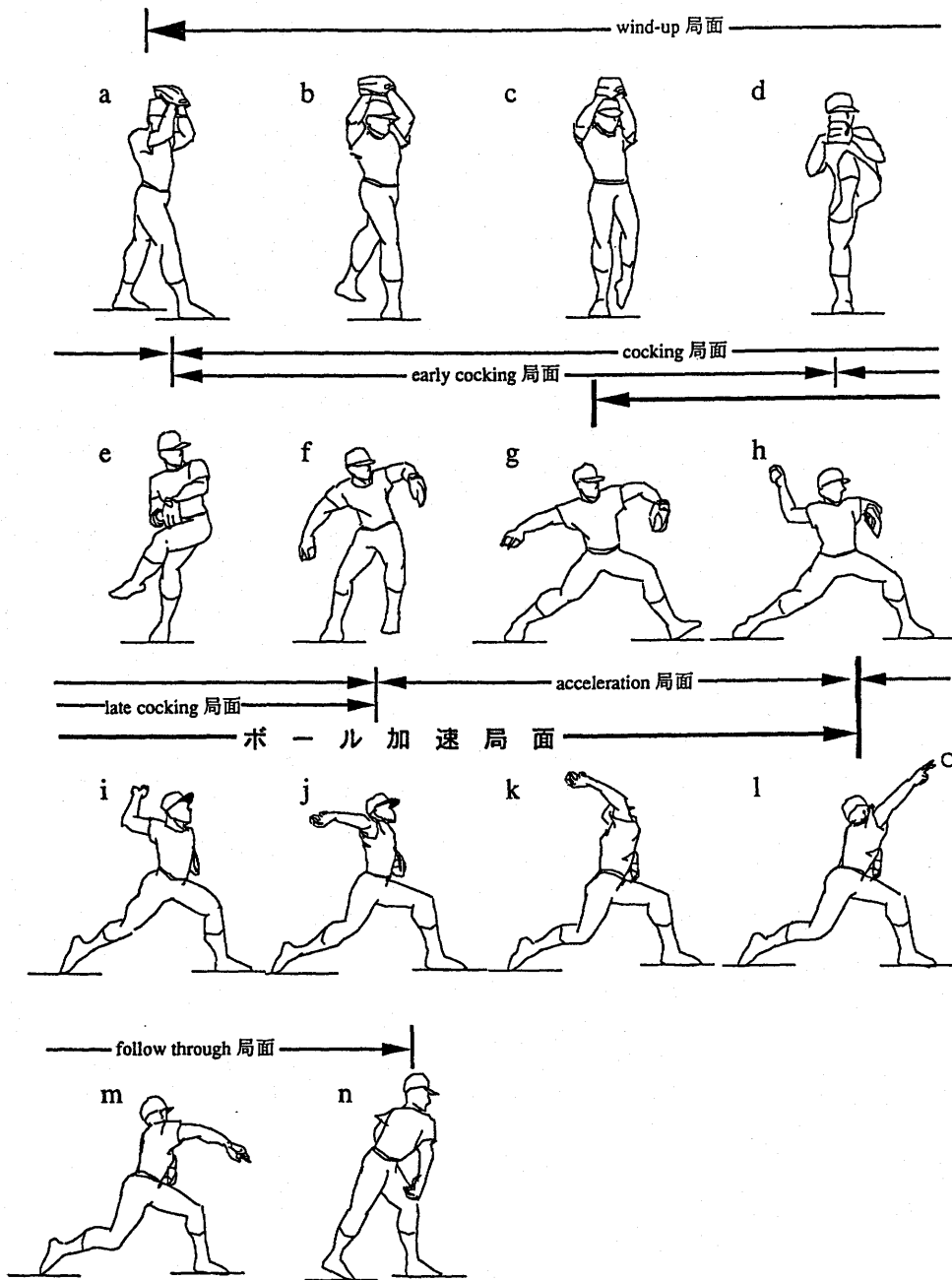


Figure 1.2
Pitching motion of baseball pitcher.

第2章 関連文献の研究

2.1 野球の投球動作に関する理論的研究

2.1.1 ボール速度増大仮説

これまで、投球動作におけるボール速度を増大させるための方法は、3つの仮説モデルが提示されている。すなわち、(1) 運動連鎖 kinetic chain モデル、(2) 力学モデル、(3) Stretch-Shortening Cycle 理論によるモデルである。これらの仮説を具体的に以下に述べる。

(1) 運動連鎖モデル

図 2.1 は、ボールなどの投てき物あるいは身体部分の末端の速度を大きくするための運動連鎖の概念図を示したものである。Morehouse and Cooper (1950)によれば、ボールや末端の速度を最も大きくするには、図に示す2および3のパターンではなく、1のパターンを用いなければならないとしている。すなわち、動作の開始において、まず身体の近位の部分（例えば、投球動作では体幹）の力を発揮してから、遠位の部分（投球腕上肢）の力を発揮するのであるが、ボールスピードを最大にするには、部分に発揮された力が最大となった瞬間に次の部分へ発揮する力を開始しなければならないというものである（パターン1）。したがって、彼らはこのタイミングが遅すぎても（パターン2）、また速すぎても（パターン3）、ボールのスピードを大きくすることはできないと指摘している。

このような身体部分の運動連鎖のメカニズムは、一般にニュートンの作用反作用の原則や慣性そのものによるもの、また部分における力 (Morehouse and Cooper, 1950; Bunn, 1972; Dyson, 1986)、スピード (Bunn, 1972) およびトルク加算の原則 (Kreighbaum and Barthels, 1990) によって説明されている。

(2) 力学モデル

このモデルは、吉福 (1982)によって理論的に述べられたものである。図 2.2はその模式図を示している。例えば、図に示すように、身体を長さ L の棒 (剛体) とみなし、 A , B , C をそれぞれ肩, 足先, 手, G を重心とする。ただし、腕 AC および手 C に持った物体の質量を無視するとする。右図は、矢状面内において、棒が鉛直に立った状態で右側から進行しているところである。右側から速度 V で進んできた棒の下端点 B が、点 P にぶつかって (左図), 点 P を中心に回転を開始する。そうすると、棒は点 P において右向き of 力を受け、重心 G の速度は V から $3/4V$ に減速するが、回転中心 P (B) からみて、 G よりも 2 倍の距離にある肩 A の速度は G の 2 倍の $3/2V$ に増速する。さらに回転半径の大きい手 C の速度は、 $AC=L/3$ とすると $2V$ となり急増すると述べている。

これをエネルギー論からみると、棒の下の部分は衝突によって速度が減り、上の部分は速度が増していることがわかる。すなわち、下の部分の運動エネルギーが、上の部分へ伝達したものと考えることができる。特に手 C の部分は速度が 2 倍となっているので、運動エネルギーは 4 倍となる。これらのことは、かなり短時間で行なわれるので、物体になされたパワーは莫大なものとなると述べている。

(3) Stretch-Shortening Cycle 理論によるモデル

このモデルは、平野 (1988)が筋生理学研究から得られた Stretch-Shortening Cycle 理論 (Cavagna et al., 1965, 1968; Asmussen and Bonde-Petersen, 1974; Komi and Bosco, 1978; Bosco and Komi, 1979)を根拠に指摘したものである。平野 (1988), 平野と浅見 (1988)は、プロ投手とリトルリーグ投手のピッチング中の身体重心と右手 (利き手) の水平速度変化から、プロ投手では身体重心速度が右手のそれを凌駕する時期がみられることを観察した。この現象の理由として、平野 (1988), 平野と浅見 (1988)は、Stretch-Shortening Cycle 理論に基づいて、体幹と右手の間にあるいずれかの筋が伸張 stretch されている可能性を指摘した。また、平野

(1988)は、Stretch-Shortening Cycle を根拠に、Mourehouse and Cooper (1950)による速度加算の原則に反論している。すなわち、彼は、部分の速度の加算が効果的であるためには、次の部分の運動が開始される前に予備的に筋が stretch されていなければならないとして、図 2.3 に示す (a) のパターンではなく、(b) のパターンが使われている可能性を指摘した。

2. 2 野球の投球動作に関する映像解析法を用いた実験的研究

2. 2. 1 課題投に関する研究

これまでに課題投を比較検討した研究は、三浦と橋本 (1980)、三浦ら (1983)の研究のみしか見当たらない。

三浦と橋本 (1980)、三浦ら (1983)は、投げの方向とボール重量の違いがボール速度に及ぼす影響を明らかにするために研究を行なっている。被験者は、投動作の熟練度の異なる 5 名であった。被験者には、4 種類の異なる重さのボールを用いて、水平投、遠投、真上投を行なわせ、その動作を映画解析した。その結果、投げの角度が低くなるほど、大きなボール初速度が得られたこと、投げの方向（角度）と力を加える方向には差があり、投てき物の重量が大きくなるにつれ、その差も大きくなること、ボール初速度には投てき物の重量が影響していることなどを明らかにしている。このように、これらの研究は、各課題投の動作そのものを比較検討したものではない。

2. 2. 2 身体部分の「貢献度」に関する研究

これまで、投球動作における身体各部分の「貢献度」を運動学的に解明しようとする研究が数多く試みられてきた。これらの研究において、「貢献度」の定義が異なるとは言え、そのほとんどはボール速度と身体各部分の動きとの関連性を検討したものである。

Broer (1969)は、2名の女性を対象に、テニスのボールを投げさせた時の身体各部分のボール速度に対する貢献度を検討している。その結果、オーバーハンド投げにおけるボール速度の約50%は身体のステップと回転によるものであり、残りの半分は肩、肘、手、指の運動によるものであることを明らかにした。

Toyoshima et al. (1974)は、上手投げのオーバーハンドスローにおけるボール速度に対する身体部分の貢献度を明らかにすることを目的に研究を行なった。被験者は7名の成人男性であった。被験者には、種々の重さ(100g, 200g, 300g, 400g, 500g)のボール(直径7cm)を、以下に記す5つのパターンで各25回投げさせた。すなわち、①ステップを用いる、②ステップを用いない、③下半身を固定、④上半身も固定、⑤椅座位で上腕を固定した前腕のみの投げ方である。その結果、ボール速度に対する身体各部分の貢献度はボール重量と無関係であること、パターン①では、ボール速度の53.1%がステップと身体の回転によって、残りの46.9%は投球腕の上肢によるものであることを示した。さらに、ボール速度に対する肘伸展の貢献は、いずれの投げ方も上腕三頭筋の筋放電量に変化がみられなかったことから、上腕三頭筋のパワーのみによるものではなく、身体の回転トルクによるものであると述べている。

Kunz (1974)は、ボール重量およびワインドアップモーションの有無がリリース時の手の速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的に研究を行なった。被験者は一般人20名である。用いたボールの重さは、0g, 80g, 400g, 800gであった。また、実験試技として、直立姿勢で腕を伸ばした投げ方とワインドアップモーションを用いた投げ方の2つを比較した。その結果、上位群では下位群よりもワインドアップを効果的に利用して、より短い軌道でより大きい手の速度を獲得していたこと、また、上位群の腰速度は下位群よりも高いにもかかわらず、リリース時の腰速度が下位群よりも低かったことを報告している。これらのことから、踏出脚のより強い押し動作により腰を急激に止める動作がボール速度増大の貢献要因であると述べている。

Hoshikawa and Toyoshima (1976)は、4人の成人男性を被験者として、非利き腕

で、250 g のゴムボールを4つの異なる動作で投げさせた。すなわち、①ステップを用いる、②ステップを用いない、③上半身を固定、④奇座位で上腕を固定した前腕のみの投げ方である。その結果、非利き腕と利き腕間のボール速度の相違は、ステップを用いて投げさせたときに最も大きかったことから、動きに関与する部分の数が多いほど、ボール速度差は大きくなると述べている。また、Toyoshima et al. (1974)の利き腕と非利き腕の投げ方を比較して、非利き腕投げによるボール速度の約40%はステップと体幹によるものであり、残りの約60%は肩と肘の回転によることを示している。

Atwater (1977)は、4名の大リーグ投手と1名の大学の投手計5名を対象として、ワインドアップとストレッチポジションから球種の異なる投球動作（直球、スライダ一、ナックル、スクリューボール、チェンジアップ、カーブ）を行なわせた。その結果、リリース時のボールの速度は、両投法間のすべての球種において、差がみれなかったことを報告した。

石井と斉藤 (1982)は、野球のオーバーハントスローを分析した。躯幹（肩峰点）、上腕（肘点）、前腕（前腕の茎突点）、手根（中指手根関節点）、指先（指先とボールの接点）のそれぞれの速度を写真解析から求め、ボールリリース時のボール速度を100%としたときのそれぞれの貢献度を求めた。その結果、指先の貢献度が26.0%で最も大きく、以下、前腕（19.2%）、手根（19.0%）、躯幹（18.2%）、上腕（17.6%）であったことを報告した。

淵本ら (1985)は、ボール速度に対する各関節速度の貢献度などを明らかにすることを目的に、大学の球技部に所属する計11名の選手を対象にして、野球、ハンドボールおよびソフトボールの投球動作を比較・検討した。その結果、各投げ方において、肩の運動によるボール速度への影響は小さかったこと、いずれの投法においても、肩は運動の前半で、肘は後半で作用していたこと、手関節のスナップ効果（屈曲運動）は、野球とソフトボール投げではリリース前に著しく増大したことを明らかにした。

堀田ら (1986)は、大学の野球部に所属する学生3名を対象として、制限投げと自

由投げの2種類の投げ方で硬式野球ボール、ハンドボール、バスケットボールを投げさせた。また、肘の最大速度時の肘の速度と手首のそれとの差を上肢のむち動作の指標とした。この指標の考えは、上肢を「むち的」に動かすと、肘の速度がまず増大し、その後、手首の速度が増大するため、むち動作が顕著であれば、肘の最高速度の出現時点において、肘と手首の速度差が最も大きくなるというものである。実験結果において硬式野球ボールを投げた時に最もその差が大きくなったことから、彼らは、野球投げでは上肢をむち的に使用し、スナップを効かせて投げていると述べている。このように、彼らは、野球投げでは末端部位の運動でボール速度の増大を図っていることを示した。

Vaughn (1985)は、3次元映画解析法により、野球の投球動作中の肘および肩関節の運動を定量化し、手首の運動に対するそれらの貢献度を明らかにすることを目的に研究を行なった。被験者は、高校および大学の野球部に所属する投手、それぞれ4名と12名の計16名であった。被験者にオーバーハンドスローを用いてボールを投げさせ、その動作を高速映画カメラを用いて撮影した。その結果、投球方向への肩および肘の速度はそれぞれ3.19 m/s (± 0.64 m/s)および4.86 m/s (± 0.84 m/s)であり、投球方向の手首の速度に対する肘の伸展および上腕の回旋に起因する速度はそれぞれ3.15 m/s (± 1.68 m/s)および9.75 m/s (± 1.67 m/s)であったことを示した。

Elliott et al. (1985)は、野球のピッチング動作における直球投球時の貢献度などを明らかにするために、DLT (Direct Linear Transformation) 法による3次元映画解析法を用いて研究を行なった。被験者はオーストラリア野球連盟のナショナルメンバー6名の投手であった。貢献度として、ボール水平速度に対する投球腕の各関節点の相対水平速度差の比を求めている。その結果、リリース時の各部分の貢献度は、前腕が35.0%で最も大きく、以下、手が26.8%、体幹が19.4%、上腕が8.8%であり、ボール速度に対するこれらの全貢献度は約90%になることを明らかにした。また、Elliott et al. (1986)は、前腕のボール速度に対する貢献度は35%であったことを報告してい

る。

このようにボール速度への「貢献度」に関する研究は、Elliott et al. (1985)のものを除き、そのほとんどが2次元映像解析法を用いて検討されてきたものである。投球動作は、身体各部分が3次的に運動することを考えれば、これらの研究は「貢献度」を詳細に明らかにしているとは言えないであろう。また、3次元映像解析法を用いたElliott et al. (1985)の研究は投球側各関節の速度を用いて検討したものであり、投球腕各関節の解剖学的な回転運動による「貢献度」を明らかにしたものではない。さらに、Vaughn (1985)は、投球腕各関節の解剖学的な回転運動のうち、肘の伸展と上腕の回旋運動による「貢献度」のみしか検討しておらず、しかもそれは手首の速度に着目したものである。

したがって、過去、野球の投球動作において、ボール速度に対する体幹および投球腕各関節の解剖学的な回転運動による「貢献度」を3次元映像解析法を用いて明らかにした研究は見当たらない。

2. 2. 3 身体部分の運動メカニズムに関する研究

これまでに、3次元映像解析法を用いて、成人における野球の投球動作（ピッチング動作）の分析を行なった研究は以下のものがあるが、その数は少ない。すなわち、Vaughn (1985), Feltner and Dapena (1986), Elliott et al. (1985, 1986), Feltner (1989), 桜井ら (1990), Sakurai et al. (1993), Werner et al. (1993), Dillman et al. (1993), Fleisig et al. (1995, 1996)の研究である。さらに、これらのうち動力的解析を適用した研究は、Feltner and Dapena (1986), Feltner (1989), Werner et al. (1993), Fleisig et al. (1995, 1996)の研究があるのみだけである。なお、Werner et al. (1993), Dillman et al. (1993), Fleisig et al. (1995, 1996)は主として投球障害の観点から検討しており、したがってこれらの研究は投球腕の運動メカニズムの観点から検討したものではない。

表 2.1 は、3次元映像解析法を用いた、野球のピッチング動作（直球）研究の結果をまとめて示したものである。なお、関節角度値は、各研究によって角度定義方法が異なるため、日本整形外科学会身体障害委員会・日本リハビリテーション医学会評価基準委員会編（1973）の定義に則って補正して示したものである。

（1）運動学的研究

Pappas et al. (1985)は、投手のピッチング動作を解明するために、15名の大リーグ投手を対象に、2台の高速カメラを用いてピッチング動作を2次元的に分析している。その結果、cocking局面、acceleration局面およびfollow-through局面の動作時間は、それぞれ約1,500 ms、約50 ms、約350 msであり、投球動作全体に占める割合はそれぞれ約80%、約2%、約18%であること、踏出脚の接地時からリリース時までの平均時間は110 msであったこと、踏出脚の接地時の肩外旋位（90°）から肩最大外旋位（160°）までの平均所要時間は60 msで、その範囲は28 msから88 msまでであったこと、acceleration局面において、肩の内旋および肘の伸展角速度の最大値が出現し、それぞれ平均6,180°/s（範囲：3,340°/s - 9,198°/s）、4,595°/s（範囲：2,287°/s - 6,993°/s）であったことなどを報告した。

前出したVaughn (1985)は、次の結果も報告している。すなわち、肘関節の平均角度は161.47°（±3.29°）であったこと、肘の伸展および肩の回旋角速度はそれぞれ630±342°/s（10.99±5.97 rad/s）および6121±854°/s（106.83±14.90 rad/s）であったこと、肘の伸展はリリース前約60 ms時から開始し、約10 ms時にピークに達したこと、上腕の回旋が約30 ms時に外旋から内旋へ変化し、リリース時に最大となったことである。

Elliott et al. (1985, 1986)は、野球の直球などの投球時の特徴を明らかにするために、オーストラリア野球連盟のナショナルメンバー6名の投手の動作を映画解析している。その結果、リリース時の平均ボールスピードは35.1 m/s（±1.5 m/s）であったこと、身長に対する踏み出し幅の平均値は82.3%（±2.3%）であったこと、リリース前

20 ms 時の肘関節の平均角速度は $968^{\circ}/s$ (16.9 rad/s) であったこと、リリース時において、肘関節角は 144° ($\pm 2.6^{\circ}$) であったこと、前腕と手の長軸がほぼ直線的で (手関節角: 178°) あること、手関節角速度は $178^{\circ}/s$ (3.1 rad/s) であったこと、follow-through 局面では回内運動が生じていることなどを示した。

桜井ら (1990) は、野球のピッチング動作 (直球) における上肢の運動を明らかにするために、Feltner and Dapena (1986) が算出した肩および肘関節の角度に加え、さらに手関節と橈尺関節の角度、すなわち手関節の掌屈/背屈および橈屈/尺屈、橈尺関節の回内/回外角度を算出した。被験者は、日本の大学野球部に所属する投手 6 名であった。その結果、リリース時のボール速度は 35.0 m/s ($\pm 1.6 \text{ m/s}$) であったこと、肘および肩関節角度は、Feltner and Dapena (1986) の研究とほぼ同様であったこと、橈尺関節の回内/回外角は、最初回内位にあり、その後回外し、リリース直前で急速に回内したこと、手関節の掌屈/背屈は、投球中に次第に背屈し、リリース前 35 ms 時に最大背屈位となり、その後掌屈しながらリリースしたこと、リリース前 35 ms 時に肩の最大外旋が生じたことを明らかにした。また、上肢の運動は、リリース前後における肩関節の水平位内転と内旋、肘関節の伸展、橈尺関節の回内、手関節の掌屈であり、いずれの運動もその運動に先立つ前に逆方向の運動がみられたと述べている。

Sakurai et al. (1993) は、先行研究 (桜井ら, 1990) に基づいて、野球のピッチング動作における直球とカーブボールを分析している。被験者は、日本の大学野球選手 6 名である。直球時の結果は、以下の通りである。

リリース時のボールスピードは 35.0 m/s ($\pm 1.8 \text{ m/s}$) であったこと、肩の最大外旋時における橈尺関節の回内/回外角および手関節の掌屈/背屈角はそれぞれ -9.1° および -37.5° であったこと、リリース時の橈尺関節の回内/回外角は 14.2° であったこと、橈尺関節の回外角の最大値は -19.4° であり、手関節の背屈角の最大値は -41.7° であったこと、リリース時に回内と掌屈運動が同時に生じたこと、late cock-

ing 局面および acceleration 局面では手掌が投球方向へ向けられていることを明らかにした。

(2) 動力学的研究

① Feltner の研究

Feltner and Dapena (1986)は、野球のピッチング動作（直球）における投球腕の上腕と前腕の運動を動力学的に明らかにすることを目的に研究を行なっている。被験者は、米国の大学野球部に所属する投手8名であった。その結果、リリース時のボール速度は 33.5 m/s であったこと、踏出脚の接地前 75 ms 時において、肩は外転 28°（平均値）、水平外転 24° および内旋 80°、肘は 144° であったこと、踏出脚の接地時では、肩は内転 14°、水平外転 18° および内旋 44°、肘は 117° であったこと、踏出脚の接地時と肩最大外旋時の中間で、肘が最大屈曲 ($89 \pm 8^\circ$) したと、肩最大外旋時 (80° : リリース前 32 ms 時) において、肩は外転 12° および水平内転 11°、肘は 106° であったこと、ボールリリース時では、肩は外転および水平内転ともほぼ中間位 (2°) で、外旋位 (23°) であり、肘は 160° であったこと、肘の伸展および肩の内旋角速度の最大値はそれぞれ $2,200^\circ/\text{s}$ ($\pm 400^\circ/\text{s}$) および $6,100^\circ/\text{s}$ ($\pm 1,700^\circ/\text{s}$) であり、出現時刻（リリース時: 10.0 秒とする）はそれぞれ 9.985 秒 (± 0.003 秒) および 10.004 秒 (± 0.005 秒) であったこと、肩水平内転トルクの最大値は 110 Nm (± 20 Nm) であり、肩最大外旋の直前に外転および内旋トルクの最大値が生じ、それぞれ 70 Nm (± 20 Nm) および 90 Nm (± 20 Nm) であったこと、肘の伸展トルクの最大値は 20 Nm (± 10 Nm)、内反トルクは 100 Nm (± 20 Nm) であったこと、肘の回内外トルクは、投球中 10 Nm 以下であったこと、肩の合成関節力 X3 は、肩最大外旋からリリースまで急増し、ほぼリリース時 (10.005 ± 0.005 秒) に最大値 860 N (± 120 N) を示したと、肘の合成関節力 Y4 は、リリース時に最大値 830 N (± 80 N) となったこと、肘の合成関節力 X4 のピーク値は肩最大外旋直前に出現し、320 N (± 60

N)であったことなどを示した。

彼らは、肘の急速な伸展のメカニズムとして、以下のように述べている。すなわち、肘の伸展トルクは、踏出脚の接地時からリリース時まで小さかったこと（最大値で 20 Nm）から、肘の急激な伸展は上腕三頭筋によるものではなく、肘での合成関節力によるものである可能性を示唆した。彼らは、この肘伸展メカニズムの根拠として、上腕三頭筋を麻痺してボールを投げさせた Dobbins (Roberts, 1971 から引用)の研究を挙げている。すなわち、被験者は、6回の試行後、麻痺前のボール速度の約 80%を獲得したことから、上腕三頭筋の肘伸展運動への貢献度は低いことが予測されるというものである。

また、彼らは、肩関節の外旋運動の発生メカニズムについて検討した。図 2.4 はその模式図を示したものである。すなわち、踏出脚の接地後において、肩の水平内転筋群がまず水平内転トルクを生み出す。このトルクは腕の重心を前方へ加速させようとするので、結果として肩に前方への力 (FY3) が生じる。したがって、この力 FY3 は、側方からみると (図 2.4b) , 腕を外旋させるモーメントとして働くことになる。さらに、肩が内外旋中間位から外旋していくと、腕の重心に対する力 FY3 によるモーメント・アームは小さくなるので、力 FY3 による外旋の効果が小さくなる。ところが、この時期に肩の外転筋群が働き、肩の外転トルクを発生させる。このトルクは、上述のことと同様なことから、肩関節に上方への力 FZ3 を引き起こす (図 2.4c) 。この力 FZ3 は、図 2.4d に示すように、肩が内外旋中間位 (0°) を越えて外旋すると、腕の外旋モーメントとして作用することになる。同時に、力 FZ3 は、力 FY3 とともに合力 FR となって (図 2.4d) , 外旋運動がさらに促進されると述べている。

Feltner (1987), Feltner and Dapena (1989)は、上腕と遠位部 (前腕・手・ボール) における隣接部分の近位-遠位連鎖運動パターンを明らかにするために、運動依存角加速度 motion-dependent angular accelerations を算出する方法を考案した。これは、端点が自由に運動する物体では、隣接部分の運動などが互いの運動そのもの

に影響を与えるために、合成関節トルクのみだけからでは隣接部分の運動を決定できないという考えに基づいている (Putnam, 1983, 1993) . 運動依存成分は6つのものからなっている. すなわち, 近位部分の角速度および角加速度, 遠位部分の角速度および角加速度, 近位部分の近位端点の加速度, そして重力による加速度である. したがって, これら6つの運動依存成分と合成関節トルクとから, 隣接する部分の運動は完全に決定される.

Feltner (1987, 1989)は, この運動依存角加速度 (Feltner and Dapena, 1989)を手がかりに, 野球のピッチング中における上腕と遠位部 (前腕・手・ボール) の運動を分析した. 被験者は, 米国の大学野球部に所属する8名の投手であった. その結果, リリース時のボール速度は 33.5 m/s ($\pm 1.9 \text{ m/s}$)であったこと, 肩外転の開始時において, 肩の外転 (加速度) は上腕に作用する前腕の角速度によること, 踏出脚接地後の局面では肘の外反方向への回転は肩の加速度と上腕の角加速度によってもたらされること, 肘の伸展による前腕の回転は肩の加速度と上腕の角速度によるものであり, 肘伸展筋群によるものではないこと, 肘の内反方向への回転 (トルク) は内反筋群が存在しないことから, 上腕の内旋トルクによって生じていること, さらに上腕が後方へ回転する局面では, 肩の水平外転は前腕の角速度および角加速度と肩の加速度によるものであり, また, 肩の内転は前腕の角加速度によるものであることなどを示した.

② Feltner 後の研究—投球障害に着目した研究—

Werner et al. (1993)は, 肘関節障害のメカニズムを明らかにすることを目的に研究を行なった. 被験者は米国の健常な大学生投手およびマイナーリーグ投手計7名であり, 分析試技は直球動作である. Feltner and Dapena (1986)の方法に基づいて, 肘の合成関節トルクおよび合成関節力 (圧縮力 *compression force* : 前腕の長軸方向に発生した力)などを算出した. その結果, リリース時の平均ボールスピードは 36.4 m/s であること, 肘関節の角度は, 肩の最大外転時まで一定に保たれ, その後リリースまで急激に伸展 ($85^\circ - 20^\circ$) し, リリース直前で $2,300^\circ / \text{s}$ の最大値となったこ

と、肩の最大外旋は 185° であること、最大圧縮力は 780 N であったこと、肘伸展トルクの最大値は 40 Nm であり、肘伸展開始時に生じたこと、肘屈曲トルクの最大値は 55 Nm であり、リリース後に発生したこと、肘内反トルクの最大値は 120 Nm で、肩最大外旋前に生じたこと、肘外反トルクの最大値は 40 Nm で、リリース直後に生じたこと、arm deceleration局面において、圧縮力は体重の90%に達したことを報告した。

Dillman et al. (1993)は、肩関節障害のメカニズムを明らかにすることを目的に研究を行なった。被験者はスキルレベルの高い(大学生、プロ選手)健常な成人29名の投手で、分析試技は直球動作である。その結果、リリース時のボール速度は 38 m/s ($\pm 1\text{ m/s}$)であったこと、踏み出し幅(身長比)は 75% ($\pm 4\%$)であったこと、踏出脚の接地時の踏出足と軸足との距離は 0.4 cm ($\pm 8.3\text{ cm}$)であったこと、投球方向に対する踏出足の爪先の角度は 15° ($\pm 10^{\circ}$)であったこと、投球中の肩の主な運動は外転、水平内転および内旋/外旋であったこと、踏出脚の接地時からリリース時までの時間は $145 \pm 15\text{ ms}$ であったこと、肩の外転は踏出脚の接地後、約 100° の角度で持続し、リリース直前で内転し、リリース後に急速に外転すること、肩の水平内外転は踏出脚の接地時に 30° の水平外転位であり、肩の最大外旋の瞬間に最大水平内転 14° となつて、リリース時では 0° となつたこと、肩の内外旋は踏出脚の接地時に外旋 53° であり、その後外旋は持続し、最大外旋 178° に達したこと、踏出脚の接地時からリリース時までの時間を100%とすると、肩の外旋の運動($125^{\circ} = 178^{\circ} - 53^{\circ}$)は全体の80%を占めること、残りの20%(約 29 ms)は内旋運動によるものであること、リリース時は肩外旋位 105° であったこと、肩の内旋の最大平均角速度は $6,940 \pm 1080^{\circ}/\text{s}$ であったことを明らかにした。

Fleisig et al. (1995)は、肩および肘関節障害のメカニズムを明らかにすることを目的に研究を行なった。被験者はスキルレベルの高い健常な成人投手26名を用い、分析試技は直球動作である。その結果、リリース時のボール速度の平均値は 38.3 m/s

(± 0.7 m/s)であったこと、踏出脚の接地時からリリース時までの平均時間は 139 ± 17 ms であったこと、肩および肘関節の力・トルクパターンは先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; Werner et al., 1993) とほぼ類似していたこと、肘伸展トルクは発生せず、常時屈曲トルクであったこと、arm cocking 局面において、肩関節では前方剪断力 anterior shear force, 圧縮力 compressive force, 水平内転トルク, 内旋トルクの最大値が出現し、それぞれ 380 N (± 90 N), 660 N (± 110 N), 100 Nm (± 20 Nm), 67 Nm (± 11 Nm)であったこと、また、肘関節では内側剪断力, 内反トルクが最大値を示し、それぞれ 300 N (± 60 N), 64 Nm (± 12 Nm)であったこと、最大内反トルクの出現時の肘関節角度は 95° ($\pm 14^\circ$)であったこと、arm acceleration 局面において、肘では前方剪断力, 屈曲トルクが最大となり、それぞれ 360 N (± 60 N), 61 Nm (± 11 Nm)であったこと、arm deceleration 局面において、肩では後方剪断力, 上方剪断力, 圧縮力, 内転トルク, 水平外転トルクが最大となり、それぞれ 400 N (± 90 N), 310 N (± 80 N), 1090 N (± 110 N), 83 Nm (± 26 Nm), 97 Nm (± 25 Nm)であったこと、肘では前方剪断力, 圧縮力が最大となり、それぞれ 260 N (± 70 N), 900 N (± 100 N)であったことを報告した。

これらのことから、彼らは、Feltner and Dapena (1986)の見解と同様に、肘内反トルクの発生は肩の内旋トルクの発生と密接に関連していると述べている。

Fleisig et al. (1996)は、投動作の改善および投球障害のメカニズムの解明のために、野球のピッチング動作とアメリカンフットボールのパス動作を3次元高速ビデオ自動デジタイズシステムを用いて分析し比較検討した。被験者は、ピッチング動作については大学、高校の野球部に所属する健全な男子 26 名の投手を用いている。ピッチング動作に関する結果は、以下の通りである。すなわち、ボールスピードは 35 ± 3 m/s であったこと、投球腕の最大肘伸展角速度は $2,340 \pm 300^\circ$ /s, 上腕の角速度は $1,170 \pm 100^\circ$ /s であったこと、arm deceleration 局面中、肘の圧縮力は 710 ± 110 N, 肩の圧縮力は 850 ± 140 N および内転トルクは 79 ± 2 Nm であったことなどを報告した。

(3) 3次元映像解析法を用いた研究の方法論上の問題点について

これらの3次元映像解析法を用いた研究において、以下の方法論上の問題点が存在する。すなわち、① 3次元関節角度の算出法の問題、② ボール速度の「貢献度」の算出法の問題、③ 合成関節トルクの算出法の問題である。

① 3次元関節角度の算出法の問題

Elliott et al. (1985, 1986), Gibson and Elliott (1987)の研究は、投球腕上肢（手、肘および肩）の3次元角度を算出しているが、彼らはこれらの算出方法について具体的に示していない。仮に合成角度が算出されているとすれば、肘関節については自由度1の1軸関節であるので、屈曲/伸展角を精度よく算出できていると考えられるが、手および肩関節は3軸運動を行なう球関節であるため、それらの角度は関節の解剖学的な運動を反映したものではない。彼らの手と肩関節の角度データをみると、合成角度を算出したものであると思われる。

また、Feltner and Dapena (1986), 桜井ら (1990), Sakurai et al. (1993)は、投球腕上肢における肩関節角度を解剖学的な回転運動を表す角度として評価している。しかし、これらの研究は体幹を上胴と下胴に分けずに1つの剛体としてモデル化して、肩関節角度を算出している。Miller and Nelson (1973), Miller (1980)は、身体運動を力学的に解析する場合、特に体幹を1つの剛体としてモデル化すると、データの精度に大きな影響を与え、実際の体幹の運動を反映したものとはならないと述べている。Feltner and Dapena (1986), 桜井ら (1990), Sakurai et al. (1993)による算出方法では、肩関節角度が精度よく示されていないものと考えられる。

これらのことから、野球の投球動作において、肩関節の運動などを精度よく分析するためには、体幹の上部と下部をそれぞれ上胴と下胴の2つに分けて、肩関節角度を上胴に対して算出する必要があると言えるが、先行研究において、このような方法を取ったものは見当たらない。

② ボール速度の「貢献度」の算出法の問題

Vaughn (1985)は、野球のピッチング動作において、投球腕の上腕の回旋および肘関節の屈伸の角速度を3次元的に算出し、投球方向の手首の速度に対する上腕の回旋および肘の屈伸運動によって生じた速度とそれらの「貢献度」を検討している。しかし、この研究は、ボール速度に着目したものではなく、また上腕の回旋と肘関節の屈伸以外の他の関節運動を検討していない。また、Elliott et al. (1985, 1986)は、ボール水平速度に対する投球腕上肢の各関節点の相対水平速度差の比を「貢献度」として2次元的に求めている。しかし、これらの研究は、投球腕上肢の関節運動によって生じた「貢献度」を求めたものではない。

これらのことから、野球の投球動作において、体幹および投球腕上肢の各関節の解剖学的な回転運動によって生じたボール速度を算出し、さらにそれらの回転運動の「貢献度」を検討した研究は見当たらない。

③ 合成関節トルクの算出法の問題

Feltner and Dapena (1986), Feltner (1987, 1989), Werner et al. (1993), Dillman et al. (1993), Fleisig et al. (1995, 1996)は、剛体リンクモデルを用いて、投球腕上肢における肩および肘関節の合成関節力および合成関節トルクを算出している。しかし、Feltner and Dapena (1986), Feltner (1987, 1989)は、合成関節トルクを求める際に、上腕と前腕の長軸まわりの角速度を無視し、さらに前腕から先の部分(手)を1つの剛体とみなして計算を行なった。このような投球腕上肢のモデルの簡略化は、算出されたデータの精度に影響を及ぼしているものと考えられる。

これらのことから、野球の投球動作では、投球腕上肢のモデルは手、前腕および上腕そのものに分けてモデル化する必要がある。さらに前腕部などへ新たにマーカーなどの取り付けを工夫し、前腕や手などの長軸まわりの運動を考慮して、各種力学量を算出する必要がある。

なお、Werner et al. (1993), Dillman et al. (1993), Fleisig et al. (1995)は、合成関節トルクをFeltner and Dapena (1986)の方法に従って算出したため、彼らの研究

には上記したことと同様の問題が内在している。

2. 3 小 括

- (1) 1. 1 (1)において、課題投、すなわち速投と遠投に着目して検討することは、野球の投球動作におけるスピード投のメカニズムを解明するために極めて重要な意味を持つことを論じた。しかし、前節に挙げた研究において、速投と遠投に着目した研究は見当たらず、したがって両投の動作の特徴は運動学的に明らかにされていない。
- (2) ボール速度の「貢献度」の研究は種々あるが、上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度を3次元的に算出し、ボール速度に対するそれらの運動による「貢献度」を明らかにした研究は見当たらない。
- (3) 野球の投球動作の上腕および投球腕の力学的エネルギーフロー（流れ）、力学的エネルギーおよび力学的仕事を明らかにした研究は見当たらない。したがって、投球動作のメカニズムについて、動力学的に十分に解明されていない。

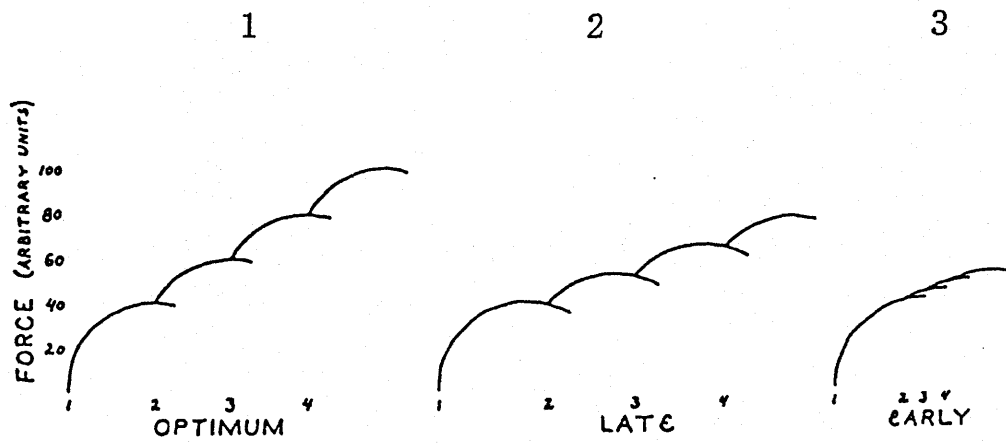


Figure 2.1

Schematic diagram for summation of speed (force) principle in kinetic chain
(In: Kinesiology, Figure 35 by Morehouse and Cooper, 1950).

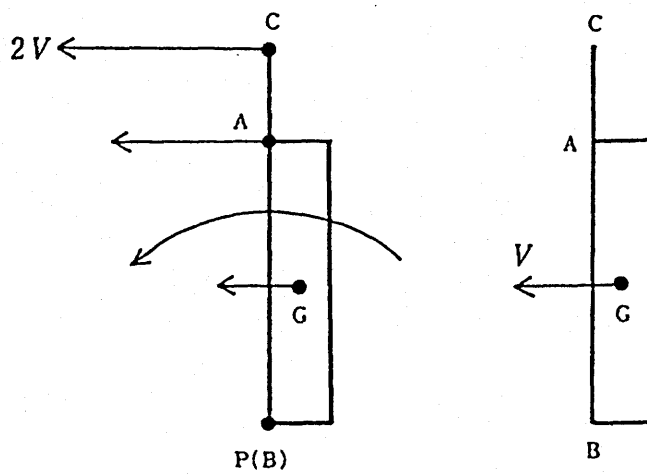


Figure 2.2

Schematic diagram for increase of speed by mechanical model (Yoshifuku, 1982).

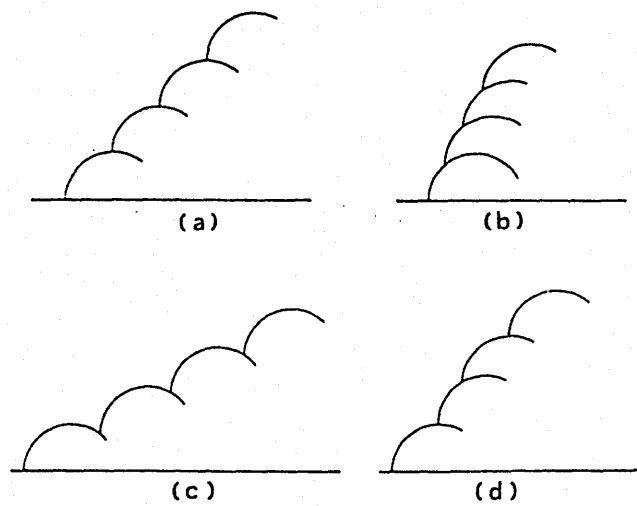


Figure 2.3

Schematic diagram for summation of speed (force) principle in kinetic chain
(In: Understanding the Scientific Base of Human Movement, Figure 6.16 by
O'Connell and Gardner, 1980).

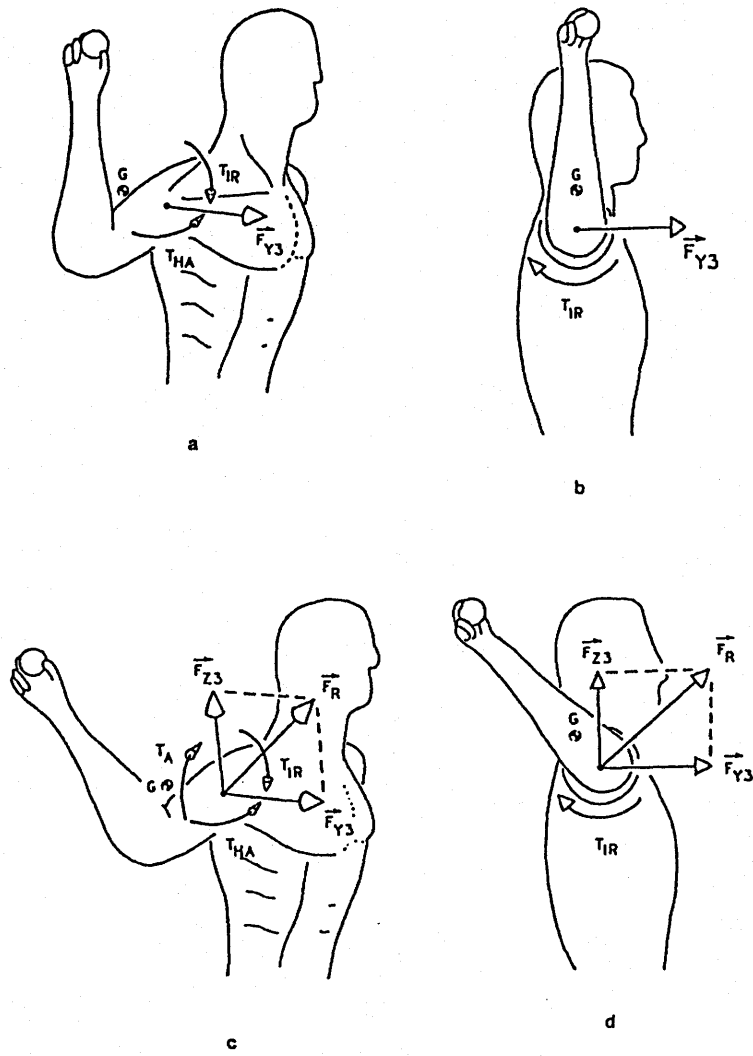


Figure 2.4

Mechanisms of shoulder external rotation during baseball pitching (Feltner and Dapena, 1986).

第3章 スピード投－速投と遠投動作の比較

3.1 緒言

野球の投球動作は、1.1(1)で詳述したように、スピード投と正確投があり、そのうちスピード投にはボールを水平方向へ速く投げる速投と遠くへ投げる遠投があることを論じた。そして、速投の力学的課題はリリース時のボールの初速度を大きくすること、遠投は初速度の大きさに加え、適切な投射角度をつけることであった。したがって、速投と遠投に共通する力学的課題はボールの初速度を大きくすること、両投に異なっていることは投射角度の大小のみだけである。投射角度はリリース時のボールの初速度を水平成分と鉛直成分に分けることにより求められるため、速投と遠投の投射角度がどのようなボールの水平速度と鉛直速度の変化パターンによってもたらされたのかを明らかにすることは興味深い。またさらに、両投のボール速度や投射角度などが身体各部のいかなる運動によってもたらされているのかを明らかにすることは、野球の投球動作におけるスピード投のメカニズムを究明するために重要であろう。

本章の目的は、スピード投における速投と遠投に着目し、両投におけるボール初速度や投射角度などの特徴を明らかにするとともに、両投においてこれらの諸量が相違するとすれば、体幹や投球腕などのいかなる運動の相違によってもたらされているのかを3次的に検討することである。

3.2 研究方法

3.2.1 被験者

表3.1は、被験者の身体的特徴および競技歴などを示したものである。被験者は、筑波大学硬式野球部に所属する右投げの男子24名(身長 1.75 ± 0.04 m, 身体質量 72.4 ± 6.1 kg, 年齢 20.0 ± 0.9 歳, 競技歴 10.3 ± 2.3 年; 平均値 \pm 標準偏差)であった。

守備位置の内訳は、投手3名、捕手7名、内野手10名、外野手4名であった。

3. 2. 2 投球動作実験およびDLT法による3次元画像撮影法

本研究では Direct Linear Transformation (DLT)法 (Abdel-Aziz and Karara, 1971; Walton, 1979; 池上, 1983)を適用するための3次元投球動作実験を行ない、身体各部位における計測点の3次元座標の算出を行なった。

以下、投球動作実験とともに、DLT法による3次元画像撮影法について具体的に説明する。

(1) マークの貼付

図 3.1 は、試技の撮影前に被験者の身体各部位に貼付した計測点用のマーク（合計30点：ボール中心点を含む）の位置を解剖学的な名称とともに示したものである。投球動作中の肩関節および体幹の運動をより詳細に捉えるため、左右側の肋骨下端（それぞれ点16と点17）にマークを貼付して体幹を上胴と下胴に分けて分析できるようにした。また、投球腕における前腕や手の角速度の検出および関節座標系の定義のために、手背中手骨部、前腕遠位端（手関節）部（橈骨-尺骨茎状突起部）および肘関節部（上腕骨内側上顆-外側上顆部）の3ヶ所に両端に発泡スチロール球（直径2.0 cm）を取り付けたアルミニウム製の自作マーカー（長さ13 cm-20 cm、質量2.0 g-2.2 g）を両面テープと輪ゴムでずれないように装着した。

なお、図からわかるように、右手関節点および右肘関節点は、本研究では計測していない。これらの各点の座標は、それぞれ手関節部と肘関節部に装着した自作マーカーの点4と点5、点6と点7を結んだ線分の中点として求めた。

(2) 投球動作試技の3次元撮影

図 3.2 は、2台の高速ビデオカメラ (HSV-400, nac 社製) の設置および撮影範囲などを模式的に示したものである。遠近誤差 (Miller and Nelson, 1973; Winter,

1990)をできるだけ除去するために、2台の高速ビデオカメラを投球方向に対して右横 40 m および斜後方 25 m の地点に設置して、被写体からなるべく遠くへ離れた。そして、各カメラのズームを幅 2.5 m, 奥行き 2.0 m, 高さ 2.3 m の撮影範囲が十分カバーできるように調整した。

撮影範囲内に被験者を立たせ、速投では前方 5 m の地点に設置したネット (幅 4 m × 高さ 3 m) に向かってできるだけ速いボールを、遠投ではできるだけ遠くへボールを投げるように指示し、各々 2 回投げさせた。ただし、いずれの試技も、助走を用いないワインドアップモーションによる投法とし、また動作時間は規定しなかった。使用したボールは硬式野球ボール (質量 0.145 kg, 直径 7.4 cm) であった。

これらの動作を 2 台の高速ビデオカメラを用いて同時撮影した。2 台のカメラの撮影スピードは毎秒 200 コマ、露出時間は 1/2500 秒であった。

(3) 較正作業

図 3.3 は、本研究で使用した高さ 2.3 m で、較正点 control point 用の白球 8 個を取り付けた較正器 calibration pole を示したものである。較正器の撮影は、試技の撮影の前後に、図 3.2 に示す 12ヶ所の地点に順番に較正器を鉛直に置いて行なった。また、2 台のカメラの同期を取るために、試技の撮影中に同期装置 (PH-100A, DKH 社製) からの発光ダイオード (LED) による光信号を、各カメラの画面内に映し込んだ。

なお、本研究で用いた高速ビデオカメラは、phase lock 機能 (2 台のカメラのシャッターの開閉を電氣的に完全に同期する機能) を有していない。したがって、次節のカメラ間の同期において、算出された身体各部の計測点の 3 次元座標値には、最大で 5 ms の同期ずれが生じる場合がある。

(4) DLT 法による 3 次元座標の算出

図 3.4 は、DLT 法によって計測点の 3 次元座標を算出するためのフローチャートを

示したものである。

図に示すように、DLT法により3次元座標を算出するためには、以下の作業を行なう必要がある。すなわち、①較正点の3次元座標の実測、②各カメラの較正点の2次元座標のデジタイジング（座標値の読み取り）、③①と②から各カメラのカメラ定数の算出、④各カメラの投球動作中の身体各部位の計測点の2次元座標のデジタイジングおよび同期、⑤③と④から身体各部位の計測点の3次元座標の算出である。

以下、作業内容について述べる。

①デジタイジング

2台のカメラから得られた投球動作および較正器の2次元画像を、ビデオカセットレコーダー（BR-9000, Victor社製）からスーパーインポーズボード（PSI-400, I.C社製）を差し込んだ計算機（PC-9800vm, NEC社製）のディスプレイモニタ（PCTV-452, NEC社製）上に再生・停止した。そして、ボールおよび身体各部位の計測点と較正点の2次元座標を1コマ毎にマウスを用いて手動で読み取り、磁気ディスクに保存した。

なお、計測区間は、踏出脚（左脚）の接地前10コマ（0.05秒）からボールリリース後10コマ（0.05秒）までとした。平均的な計測区間は、47コマ（0.235秒）であった。

②身体各部位計測点の3次元座標の算出

身体各部位の計測点の3次元座標を算出するための11個のカメラ定数 camera constant は、較正点84個の実測3次元座標値とデジタイジングにより得られたカメラ毎の84個の較正点の2次元座標とから、最小2乗法 (Kreyszig, 1983; 南, 1986) によりカメラ毎に算出した。なお、本研究では、図3.2に示す1の地点を原点(0, 0, 0)として、右手系の直交静止座標系 global coordinate system を設定した。静止座標系のX軸の正は投球方向に対して右方向、Y軸の正は水平方向（投球方向）、Z軸の正は鉛直上方である。

次に、試技の撮影中に、同期装置から各カメラに映し込まれた発光信号(LED)を基準時刻として、デジタイジングにより得られたカメラ毎の計測点の2次元座標を同期した。そして、このように同期した計測点の2次元座標とカメラ定数とから、最小2乗法により身体各部位計測点の3次元座標を算出した。

実測した校正点の3次元座標と算出された値との平均誤差 mean error は、静止座標系のX軸方向が8 mm, Y軸方向が5 mm, Z軸方向が4 mmであった。

(5) 3次元座標データの平滑化

本研究では、残差分析法 residual analysis method (Wells and Winter, 1980; Winter, 1990)を用いて、計測点の座標成分毎に最適遮断周波数4 Hz-22 Hzを決定した。ボール中心(図3.1の点30)の鉛直成分の周波数が最も大きく(22 Hz)、踏出脚の足先(図3.1の点29)の左右成分が最も小さかった(4 Hz)。これらの最適遮断周波数を用いて、計測点の座標データを4次(時間遅れゼロ)のバターワース型のローパスデジタルフィルタ butterworth low-pass digital filter により平滑化した(Winter, 1990)。

なお、表3.2に、各計測点(30点)の最適遮断周波数の平均値と標準偏差(S.D.)を示す。

3.2.3 分析試技の選定

2回の投球試技のうち、速投では右側方カメラから計測したボール水平速度が、遠投では投距離が大きい方の試技を3次元解析のための試技として選定した。

速投において、2次元分析により得られたボール水平速度と3次元分析により得られたものとは高い正の相関関係があった($r = 0.95$)。したがって、速投における2次元データによる分析試技の選定は妥当であったものと考えられる。

3. 2. 4 データの算出項目と算出法

本研究では、ボールのリリースパラメータ、ボールおよび投球腕各関節の速度、また、身体各部の運動として、体幹における3つの角度および投球腕における4つの関節角度を算出し検討項目とした。以下、各項目を説明するとともに算出法を述べる。なお、速度および角度の算出方法については、それぞれ付録 A.1 および付録 A.2 に示した。

(1) リリースパラメータ

図 3.5 は、リリースパラメータの定義を示したものである。

リリースパラメータとして、リリース時におけるボールの速度、水平面からの投射角度、高さ（リリース高）、静止座標系の YZ 面および XZ 面におけるボール中心と踏出脚の踵との距離を用いた。

また、動作時間および踏み出し幅（YZ 面における右足の足先から左足の踵までの距離）を算出した。

(2) 体幹のひねり角、上腕の後傾／前傾角および右傾／左傾角の算出

図 3.6 は、上腕の後傾／前傾角（BFL）、右傾／左傾角（RLL）および体幹のひねり角（APT）の定義および正負の符号を示したものである。

上腕の後傾／前傾角は、静止座標系の YZ 面での上腕の長軸と静止座標系の Z 軸とのなす角度と定義し、角度の正は前傾角を、負は後傾角を示す。

上腕の右傾／左傾角は、静止座標系の XZ 面での上腕の長軸と静止座標系の Z 軸とのなす角度と定義し、角度の正は左傾角を、負は右傾角を示す。

体幹のひねり角は、左肩関節から右肩関節へのベクトルと左股関節から右股関節へのベクトルを上腕の長軸に垂直な平面へそれぞれ投影したときの双方のベクトルとのなす角度と定義した。なお、体幹のひねり角の符号は、左肩関節から右肩関節へのベクトルが左股関節から右股関節へのベクトルと交差して、右肩関節が右股関節よりも

前方へ位置する場合を正（前方ひねり角と呼ぶ）とし，後方に位置する場合を負（後方ひねり角）とした。

(3) 投球腕における肩関節の内転／外転（肩内外転角），水平屈曲／伸展（肩水平屈伸角），内旋／外旋（肩内外旋角）および肘関節の屈曲／伸展（肘屈伸角）角の算出

投球腕における肩内外転，水平屈伸および内外旋角は，Feltner and Dapena (1986)の方法を参考にして算出した．そのために上腕に固定した直交運動座標系（上腕座標系と呼ぶ）を以下のように定義した．まず，左右の肩関節中心を結んだ線分の中点を原点 $(0, 0, 0)$ とし，次に，上腕座標系の z 軸を左右の肋骨下端点の中点から原点へ方向とした．ここで，左肩から右肩へ方向を仮の x 軸として， z 軸と仮の x 軸から上腕に対して前方へ向かう y 軸を求め， y 軸と z 軸からそれらの軸に直交する真の x 軸を求めた．

図 3.7 は，投球腕の肩の内外転角 (AA)，水平屈伸角 (HFE)，内外旋角 (IER) および肘の屈伸角 (FE) の定義を示したものである．なお，ベクトル V_1 および V_2 は，それぞれ上腕および前腕の長軸方向のベクトルとする．

肩内外転角 (α) は，上腕ベクトル V_1 （肩関節中心から肘関節中心へのベクトル）を上腕座標系の xz 面に投影したベクトル V_3 と上腕座標系の z 軸方向を示すベクトルとのなす角度とした．

肩水平屈伸角 (β) は，上腕ベクトル V_1 を上腕座標系の xy 面に投影したベクトル V_4 と上腕座標系の x 軸方向を示すベクトルとのなす角度とした．

肩内外旋角 (λ) は，前腕ベクトル V_2 （肘関節中心から手関節中心へのベクトル）と上腕座標系の z 軸方向を示すベクトルを上腕の長軸に垂直な平面へそれぞれ投影したときの双方のベクトル（それぞれ V_5 と V_6 ）とのなす角度とした．

肘屈曲伸展角 (κ) は，方向を逆にした上腕ベクトル V_1 と前腕ベクトル V_2 とのな

す角度をもとにして、最大伸展位が 90° となるように補正した。

なお、上述の定義では、特別な肢位（例えば、肘屈伸角が $\pm 90^\circ$ ）において角度が算出できなくなるが、本研究の計測範囲ではそのような場合は生じなかった。

図3.8は、これらの角度の正負の符号を示したものである。

3. 2. 5 データの規格化および平均化

各被験者におけるボールおよび投球腕各関節の速度、体幹および投球腕の角度データについて規格化を行なった。すなわち、踏出脚の接地時からボールのリリース時までのデータを3次スプライン関数 (Kreyszig, 1983) を用いて補間し、その区間を100%とした際の1%毎のデータを求めた。

3. 2. 6 データの統計処理

規格化された10%毎におけるデータについて、試技と能力（ボールの初速度を基に上位群と下位群に分類）および試技と守備位置（投手、捕手、内野手および外野手に分類）をそれぞれ2要因とする二元配置分散分析を行ない、さらにF値が有意であった場合、Scheffe's test（危険率： $p < 0.05$ または $p < 0.01$ ）を行なった。その結果、能力間および守備位置間では有意差がみられるところもあったが、各要因間における交互作用はなかった。

以上のことから、規格化された1%毎のデータを全被験者について加算し、平均と標準偏差 (S.D.) を求めた。

以下の結果および考察は、平均化されたデータに基づいて、速投と遠投動作の比較検討を行なったものである。

3. 3 結果

3. 3. 1 リリースパラメータおよびボール速度

(1) リリースパラメータ

表 3.3 は、リリースパラメータの平均値と標準偏差 (S.D.) を示したものである。遠投の投距離の平均は 75.9 ± 7.0 m であった。

表からわかるように、ボールの初速度 (以下、合成速度と呼ぶ) は速投が 29.8 ± 2.0 m/s、遠投が 30.5 ± 2.2 m/s であり、両投間に有意な差は認められなかった。ボールの水平速度は速投が遠投よりも大きく、鉛直速度は遠投の方が速投よりも有意に大きかった。また、ボールの投射角度およびリリース高は、いずれも遠投が速投よりも有意に大きかった。リリース位置 (D1) は速投では左足の踵の前方に、一方遠投では踵の後方にあり、両投間に有意な差があった。

図 3.9 は、各被験者における速投と遠投のボール合成速度の散布図を示したものである。図からわかるように、速投と遠投の被験者間のボール合成速度には有意に高い正の相関が認められた ($r = 0.874, p < 0.01$)。

(2) ボールの合成、水平および鉛直速度

図 3.10 は、ボールの合成、水平および鉛直速度を規格化し、平均値と標準偏差 (S.D.) で示したものである。

図からわかるように、速投および遠投間のボール合成速度にはほとんど差がみられず、また、統計処理の結果からも踏出脚の接地時 (SFC) からリリース時 (BRL) まで有意な差がなかった。

ボール水平速度は、速投および遠投とも約 50% 時 (BRL 前約 50 ms に相当する) から増大し、両投とも BRL においてピークを示していることがわかる。また、ボール水平速度は、統計処理の結果、速投が遠投よりも約 40% 時 (BRL 前約 60 ms) から BRL まで有意に大きかった。

ボール鉛直速度は、速投では約 40% 時から約 80% 時まで、遠投では約 30% 時

(BRL 前約 70 ms) から約 90%時まで急激に増大する。その後 BRL まで、両投とも速度が減少するが、その程度が遠投で小さいことがわかる。また、ボール鉛直速度は、20%時および 30%時では速投が遠投よりも有意に大きく、60%時 (BRL 前約 40 ms) から BRL までには遠投が速投よりも有意に大きかった。なお、これらの両投におけるボールの水平および鉛直速度の相違は、投球腕の手、手首、肘および肩においても認められた。

3. 3. 2 体幹および投球腕の運動

図 3.11 は、速投と遠投のスティックピクチャを被験者 Y.U. を例に示したものである。上段が速投、下段が遠投で、それぞれ側方 (X 軸の正方向) と前方 (Y 軸の正方向) からみたものである。

また、図 3.12 は、被験者 Y.U. を例にして、速投と遠投におけるボールの軌跡を SFC から BRL までについて示したものである。

図 3.11 から、SFC から BRL まで、上胴と下胴の運動が顕著に異なっていることがわかる。

(1) 体幹の運動

図 3.13 は上胴の後傾/前傾角 (BFL)、右傾/左傾角 (RLL) および体幹の前方/後方ひねり角 (APT) を規格化し、平均値と標準偏差 (S.D.) で示したものである。また、表 3.4 には、これらの角度について、SFC、肩関節の最大外旋時 (MaxER) および BRL における平均値と標準偏差 (S.D.)、さらに SFC から BRL までの角変位 (運動範囲) を示した。

図からわかるように、上胴の後傾/前傾角では、SFC から BRL まで、遠投が速投よりも後傾角が有意に大きかった。また、速投では約 30%時から約 55%時まで、遠投では約 30%時から約 85%時まで、上胴を後傾した状態から垂直へもどし、その後 BRL まで両投とも前方 (投球方向) へ倒していた。

上腕の右傾/左傾角では、SFC から BRL まで、遠投が速投よりも左傾角が有意に大きかった。

体幹のひねり角では、0%–20%および 90%–100%において、遠投が速投よりも後方へのひねりが有意に大きかった。

(2) 投球腕の運動

図 3.14 は、投球腕の肩関節の内外転角 (AA) , 水平屈伸角 (HFE) , 内外旋角 (IER) および肘関節の屈伸角 (FE) を規格化し、平均値と標準偏差 (S.D.) で示したものである。また、表 3.5 には、SFC, MaxER および BRL におけるこれらの角度の平均値と標準偏差 (S.D.) を示した。

肩の内外転角は、速投では約 30%時から約 60%時まで、遠投では約 20%時から約 60%時まで内転し、遠投の方がより大きく内転していた。その後 BRL まで速投では外転し、外転位でボールをリリースしていたが、遠投では角度の変化はほとんどなく、内転位でリリースしていた。

肩の水平屈伸角は、速投では約 15%時から BRL まで水平屈曲し、屈曲位でリリースしていた。遠投では約 30%時から約 70%時まで水平屈曲したが、その後 BRL まで角度の変化がなく、伸展位でリリースしていた。

肩の内外旋角は、両投とも SFC から約 65%時まで外旋したが、遠投の方が速投よりも大きく外旋していた。その後 BRL まで両投とも急激に内旋方向へ変化した。BRL では両投とも外旋位であり、遠投の方が外旋位が大きかった。

肘の屈伸角は、両投とも SFC から BRL まで伸展し、約 75%時から BRL まで急激に伸展していた。

3. 4 考 察

3. 4. 1 先行研究との比較

(1) リリースパラメータ

Feltner and Dapena (1986), 桜井ら (1990)によるピッチング動作の結果では, 大学野球部の投手におけるリリース時のボール合成速度の平均 (\pm S.D.) はそれぞれ 33.5 m/s, 35.0 m/s (\pm 1.6) であったと報告している. 本研究の速投では, リリース時におけるボール合成速度は 29.8 m/s (\pm 2.0) であった. この値は, Feltner and Dapena (1986), 桜井ら (1990)の報告と比べ小さかった. この原因のひとつとして, Feltner and Dapena (1986), 桜井ら (1990)の用いた被験者が投能力の高いと考えられる投手のみであったのに対して, 本研究では投手以外の選手も多数含まれていたため, 速投のボール合成速度の範囲が 26.8 m/s–34.1 m/s と大きくばらついたことによるものと考えられる.

三浦と橋本 (1980), 三浦ら (1983)は, リリース時におけるボールの投射角度と合成速度に着目し, 熟練度の異なる被験者 5 名を対象に水平投げ, 遠投, 真上投げを行なわせた. その結果, リリース時のボール合成速度は水平投げ, 遠投, 真上投げの順に大きかった. この理由として, 三浦と橋本 (1980), 三浦ら (1983)は, 遠投では水平投げよりも重力に逆らってボールを加速するためであると述べている.

本研究では, 表 3.3 に示したように, 速投と遠投間のリリース時におけるボール合成速度には統計的に有意な差がなかった. この原因のひとつとして, 本研究で用いた被験者の中に, 野球の練習において遠投動作を頻繁に行なっていると考えられる内・外野の選手が多く含まれていたため, ボールを斜め上方へ加速することができる投げ方を身に付けていたものと考えられる.

(2) 体幹の運動の比較

投球動作において, 体幹のひねりが重要であるといわれている(豊島, 1980)にもかかわらず, これまで体幹のひねりを検討した研究はほとんどなく, わずかに豊島

(1980)の研究があるのみである。しかし、この研究では、体幹のひねりを上方に設置したカメラのみだけで2次元的に検討している。したがって、豊島(1980)の研究では、例えば、体幹の長軸が上方のカメラの光軸に対して直交していない場合には体幹のひねりを詳細に捉えることができない。本研究では、3.2.4(2)で述べたように、体幹のひねり角を上胴の長軸に垂直な平面に対して求めているため、体幹の姿勢の変化にかかわらず、より高い精度で体幹のひねり角を捉えているものと考えられる。

(3) 投球腕の運動の比較

Feltner and Dapena (1986)のピッチング動作と本研究の速投を比較すると、肩の内外転運動に相違が認められた。すなわち、Feltner and Dapena (1986)の被験者(1名のみ)の結果では踏出脚の接地時からリリース時まで肩が外転するが、一方、本研究では踏出脚の接地時後に肩が大きく内転した。

これらの相違の原因のひとつとして、肩関節の関節角度を求めるために体幹に固定した運動座標系の定義方法が、双方の研究で異なっていることが挙げられる。すなわち、Feltner and Dapena (1986)は、体幹を1つの剛体としてモデル化して、体幹の座標系の長軸を胸骨上縁点から左右の股関節中心を結んだ中点への方向で定義している。一方、本研究では、体幹を上胴と下胴の2つに分けて、3.2.4(3)で述べたように、体幹座標系(本研究では上胴座標系)の長軸を左右の肋骨下端点の中点から原点への方向で定義している。

図3.15は、本研究の速投のデータを用いて、Feltner and Dapena (1986)の体幹座標系の定義法により求めた肩の内外転角と本研究によるものを比較して示したものである。

図3.15から、Feltner and Dapena (1986)の方法では踏出脚の接地時からリリース時まで肩の内転運動はみられず、一貫して肩が外転し、またその大きさも双方の算出

法で顕著に異なっていることがわかる。

これらのことから、Feltner and Dapena (1986)と本研究の速投における肩の内外転角の相違は、上述したように双方の研究における体幹のモデルの相違によるものと考えられる。

しかし、図 3.11 に示したように、踏出脚の接地後の局面では、体幹の上胴と下胴の運動が顕著に異なることからわかるように、本研究による肩関節の角度の算出法の方が、Feltner and Dapena (1986)のものに比べ、より高い精度で肩の内外転角を表していると考えられる。

肩の外旋運動は、両投ともに踏出脚の接地時から約 65%時までみられた（図 3.14）。Feltner and Dapena (1986)は、肩の外旋の発生のメカニズムとして、踏出脚の接地直後の肩の水平内転トルク、引き続く肩の外転トルクが外旋を促進していると述べているが、上胴の動きによる影響については述べていない。

本研究では、図 3.13 (BFL) からわかるように、上胴の前方（投球方向）への回転の開始が約 30%時から約 40%時においてみられた。これは、この局面では、それ以前の局面よりも上胴の前方への角加速度が大きくなっていることを示すものである。したがって、この上胴の前方への角加速度は、図 3.11 における左から 3 番目のスティックピクチャ（側方）にみられるように、肘屈曲位および肩外転位の状態では、肩の外旋トルクを発生させる要因として考えられる。これらのことから、上胴の前方への回転運動は、肩の外旋を発生させるメカニズムのひとつとして考えられる。

3. 4. 2 速投と遠投におけるボール速度の比較

(1) ボールの合成、水平および鉛直速度の比較

表 3.3 に示したように、リリース時において、ボールの合成速度は速投と遠投間に有意な差がなかったが、ボールの水平速度は速投が遠投よりも有意に大きく、鉛直速度は遠投が速投よりも大きかった。

また、このようなリリース時のボール合成速度だけでなく、図 3.10 に示したように、さらにリリース前における両投間のボール合成速度にも差がみられなかった。しかし、リリース前のボール合成速度を水平と鉛直の各成分に分けてみると、両投間のそれらの速度には、リリース時にみられたことと同様に統計的に有意な差がみられた。すなわち、速投ではボール水平速度が約 40%時からリリース時まで、遠投では鉛直速度が約 60%時からリリース時まで有意に大きくなることがわかった。そして、これらの両投におけるボールの水平および鉛直速度の相違は、投球腕の手、手首、肘および肩においても認められた。

これらのことは、適切な投射角度でボールをリリースするために、ボールや投球腕の末端部分は、踏出脚の接地時からリリース時にかけて、遠投では斜め上方へ、速投では水平に向けられていることを示すものである。

このように、速投ではボールの水平速度を、遠投では鉛直速度を大きくするために、ボール加速局面において、両投に固有の動作特性が存在するものと考えられる。次節にこれらのことについて詳細に検討する。

3. 4. 3 速投と遠投における体幹および投球腕の運動の比較とボール速度

速投と遠投におけるボールの水平および鉛直速度変化パターンなどの相違が、両投のいかなる動作的特徴でもたらされているのかを上脛を含めた体幹と投球腕の運動に着目して検討する。

(1) 上脛と体幹の運動の比較

本研究から、速投と遠投における上脛の後傾/前傾角および右傾/左傾角を比較した結果、図 3.13 に示したように、ほぼ類似したパターンを示したが、その大きさが著しく異なっていた。すなわち、上脛の後傾および左傾角は、遠投が速投よりも踏出脚接地時からリリース時まで統計的に有意に大きかった。

そこで、速投と遠投における上脛の運動を踏出脚接地時とリリース時について模式

的に示すと図 3.16 のようになる。図に示すように、速投の上胴の運動に特徴的なのは上胴を立てた状態から前方へ倒し、一方、遠投は上胴を大きく後方へ倒した状態から垂直へもどすと同時に、左側（非投球腕側）へ大きく倒す動作が顕著に認められた。なお、表 3.4 に示すように、両投間の踏出脚の接地時からリリース時までの上胴の後傾/前傾角および右傾/左傾角の運動範囲には有意な差はなかった。

これらのことは、速投と遠投におけるボール速度成分や投射角度、リリース位置などが大きく異なる原因として、両投における上胴の運動の相違が主として関与することを示すものである。

また、図 3.13 に示すように、体幹のひねり角では、上胴の運動にみられたような踏出脚の接地時からリリース時までのすべての時点にわたって統計的な差はみられなかった。しかし、速投は遠投よりも前方へのひねり角がリリース直前の局面で特に大きく、遠投は速投よりも後方へのひねり角が踏出脚の接地時直後に大きかった。このように、上述した上胴の動きに加えてさらに、速投では遠投よりも体幹を大きく前方へひねる動作を行っており、一方、遠投では後方へ大きくひねった体幹を前方へひねりもどす動作を行っていた。なお、両投間の踏出脚の接地時からリリース時までの体幹のひねり角の運動範囲には有意な差はなかった（表 3.4）。

ところで、これらの速投と遠投における上胴の動きと体幹のひねりの力学的意味については、両投のリリース位置の違いが大きく関与しているものと考えられる。すなわち、図 3.12 からわかるように、速投のリリース位置は、遠投よりもより前方で、かつ低く、遠投ではその逆になっている。今、仮に遠投時に、速投における上胴と体幹の運動を用いた場合を考えてみると、その遠投ではボールの加速距離そのものが短くなってしまい（ボールになされる仕事小）、結果的に遠投距離が小さくなるものと考えられる。先に示したように上胴や体幹の運動範囲には両投間に違いが認められないことから（表 3.4）、速投と遠投ともボールを加速するため上胴や体幹のひねりの運動範囲を確保するために、投げの構えに入る前（踏出脚の接地時前）に先取りして

上腕や体幹の角度（動き）を調節しているものと考えられる（図 3.11：左から 1 番目の図）。このように考えると、速投と遠投のリリース位置の違いそのものが上腕と体幹の動きに大きく関与しているものと言えよう。

(2) 投球腕の運動の比較

速投と遠投における投球腕の運動の相違は、図 3.14 と表 3.5 に示すように、上腕の運動に比べると小さかった。しかし、両投間に次のような相違が認められた。すなわち、遠投は速投よりも、肘の屈曲角は踏出脚の接地直後において、肩の内転角はボール加速局面の後半において、肩の外旋角は 50%時から 80%時までおよびリリース時において、肩の水平伸展角はリリース直前の局面において有意に大きかったことである。

このうち両投において、図 3.14 に示すように肩の内転および外旋角に大きな差が生じているが、特に約 50%時からリリース時までの差が大きい。これらの角度差が開始する約 50%時というのは、前節で述べた上腕の動き（図 3.13）で言えば、速投ではほぼ垂直に立った上腕を前方へ倒そうとする時期に、一方、遠投では後傾した上腕を垂直に戻そうとする時期に一致していることがわかる。これらのことは、両投の肩の内転および外旋角の差が上腕の運動に大きく影響を受けていることを示すものである。

すなわち、遠投において、肩の外旋が速投よりも大きくなったのは、後傾した上腕を垂直に戻す時に投球側の遠位端部（手・前腕・ボール）自体の慣性に加えて、さらにこれらの遠位端部に重力が大きく作用したためであるものと考えられる。

また、遠投では速投よりも肩が大きく内転するのは、重力に抗して投球腕を斜め上方へ加速させなければならないために、その分速投よりも、肩周囲筋および体幹部に付着する筋群はより大きな力を発揮する必要があるためと考えられる。すなわち、遠投における肩の外転約 20° から 0° （中間位）までの運動（表 3.5, 図 3.14），言い換えれば上腕の長軸を上腕の長軸に直交させる運動は、筋の力-速度関係（Hill, 1970）と Stretch-Shortening Cycle 理論（Komi, 1986）によれば、筋がより大きな力

や仕事を発揮するために有利になるものと考えられる。つまり、この動きの利点は、まず上胴の長軸まわりの慣性モーメントの増大を導くので、上胴の左回旋スピードの減少をもたらす。この左回旋スピードの減少の結果は、大胸筋や体幹部などの大筋群が大きな力を発揮しやすい状態を作る。同時に投球腕自体の慣性によって、さらに投球腕が上胴に対して下後方へ遅れ（水平伸展運動）、肩周囲に付着する大胸筋や体幹部などの筋群が極度に伸張されて大きな力を発揮することが可能になるということである。このように、この動きによって引きだされた肩や体幹部の筋力は、重力に抗して投球腕やボールを斜め上方へ加速するのに役立つものと考えられる。なお、これらのことは、速投の動作においても言えることではあるが、遠投ではより効果的な投げ方を用いていたものと考えられる。

(3) 体幹および投球腕の運動とボール速度との関連性

図 3.10 に示したように、ボールの水平速度は速投が遠投よりも約 40%時からリリース時まで、一方、ボールの鉛直速度は遠投が速投よりも約 60%時からリリース時まで有意に大きかった。

速投と遠投動作におけるボールの水平および鉛直速度への影響は、図 3.16 に示したように、両投における上胴の運動の違いが大きく関与しているものと考えられる。

すでに述べたように、遠投では、速投よりも上胴を大きく後傾した状態から垂直へもどし、同時に投球腕の反対側へ倒す動作が、ボールおよび投球腕を斜め上方へ向けさせるため、約 60%時からリリース時までのボール鉛直速度の増大を引き起こしたのと考えられる。一方、速投では、ほぼ垂直に立てた上胴を大きく投球方向へ倒す動作が、約 40%時からリリース時までのボール水平速度の増大をもたらしたのと考えられる。

また、両投の投球腕の運動によるボール速度への影響は、主として約 50%時からリリース時までにおいて生じているものと考えられる。特に、遠投における肩の内旋に

先立つ外旋運動範囲の大きさは、上腕を垂直へ戻す運動と同時に、ボールをより鉛直方向へ動かすために有効な動作となるものと考えられる。

以上のことから、ボール加速局面において、遠投では、速投よりも上腕を大きく後方へ倒した状態から垂直へもどすと同時に、投球腕の反対側に大きく倒し、また主として肩の外旋および内転を大きくすること、一方、速投では、上腕を立てた状態から前方（投球方向）へ大きく倒すことが、ボールの各速度成分、すなわち結果としての合成速度を大きくし、適切な投射角度でリリースするために重要であると考えられる。

(4) リリース高について

リリース高は、遠投が速投よりも有意に大きかった（表 3.3）。またリリース時における肩の内外転角および肘の屈伸角をみると、肩の内外転角では遠投が速投よりも内転した状態にあり、肘の屈伸角には両投間に差がなかった（表 3.5, 図 3.14）。このことは、投球腕の運動を検討する限り、リリース高が速投よりも遠投で小さくなることを示すものである。

しかし、遠投では、速投よりも踏み出し幅が小さい傾向にあり（表 3.3）、また、リリース時の上腕の前傾が小さく、かつ左傾が大きかったことから、リリース時の肩関節の鉛直高（遠投： 1.24 ± 0.07 m, 速投： 1.15 ± 0.07 m, $p < 0.05$ ）が有意に大きくなったことによって、リリース高が大きくなったものであると考えられる。

また、これらのことは、仮に速投にみられた投球腕の運動を遠投において行なった場合、遠投ではリリース高をさらに大きくすることができることを意味している。しかし、実際には、遠投では速投よりも外転が小さく、また上述したように上腕の運動と踏み出し幅によってリリース高が大きくなっていた。

このように、遠投では速投よりも肩が大きく内転するのは、3.4.3 (2) で述べたとおり、重力に抗して投球腕やボールを斜め上方へ加速しなければならないため、それだけ速投よりも肩や体幹部の筋群が大きな力を発揮する必要があることによるも

のと考えられる。

3.5 小括

- ① ボールの合成速度は，速投が 29.8 ± 2.0 m/s，遠投が 30.5 ± 2.2 m/s で，両投間に有意な差はなかった。しかし，ボールの水平速度は速投が遠投よりも40%時からリリース時まで有意に大きく，一方，ボールの鉛直速度は遠投が速投よりも60%時からリリース時まで有意に大きかった。これらの水平および鉛直速度パターンの相違は，投球腕の手，手首，肘および肩においても認められた。
- ② 速投と遠投の被験者間のボール合成速度には，有意に高い正の相関関係が認められた ($r = 0.874, p < 0.01$)。
- ③ 投射角度は遠投が速投よりも有意に大きかった。また，リリース位置は遠投が速投よりも高く，かつ後方であった。
- ④ 上脛：後傾および左傾角（投球方向に対してそれぞれ後方および左方への傾倒）は，遠投が速投よりも踏出脚接地時からリリース時まで有意に大きかった。体幹の後方へのひねり角（右肩が右腰に対して後方へ向かうひねり）は，遠投が速投よりも0%–20%および90%–100%において大きかった。踏出脚接地時からリリース時までにおける上脛の後傾/前傾，右傾/左傾および体幹のひねりの運動範囲には，速投と遠投間に有意な差がなかった。
- ⑤ 投球腕：肩の内転角は，遠投は速投よりもボール加速局面の後半において有意に大きかった。肩の水平伸展角は，遠投は速投よりもリリース直前の局面において大きかった。肩の外旋角は，遠投は速投よりも50%時から80%時までおよびリリース時において大きかった。肘の屈曲角は，遠投は速投よりも踏出脚の接地直後において大きかった。
- ⑥ 図 3.17 は，速投と遠投間における上脛・体幹および投球腕の動作的な相違をまと

めて示したものである。図に示すように、遠投では速投よりも、上腕の後傾および左傾、体幹の後方へのひねり、肩関節の内転、外旋および水平伸展運動が統計的に有意に大きかった。これらの動作的な相違、とりわけ上腕および体幹の運動の相違がボールおよび投球腕各関節の水平速度と鉛直速度（投射角度）などの相違の主因であった。したがって、遠投でボールをより遠くへ投げるためには、踏出脚の接地前の局面では体幹を後方へ大きくひねった状態で上腕を大きく後方へ倒すことが、そして、踏出脚の接地時後の局面では大きく後方へ倒した上腕を垂直へもどすと同時に、投球腕の反対側へ倒すことが重要であると考えられた。一方、速投では、ボールを水平方向へ加速するために、踏出脚の接地時からリリース時において、垂直に立てた上腕を前方へ大きく倒すことが重要であると考えられた。

本章の研究では、野球の投球動作をスピード投と正確投の2つに分け、さらに運動課題の相違からスピード投を速投と遠投に分類した。このようにスピード投を分類したのは、速投と遠投がボールのスピード（合成速度）を大きくするという共通の力学的課題を有するために、両投を比較検討することによって、スピード投のメカニズムをより詳細に検討することができるのではないかと考えたからである。

1. 1 (1) で指摘したように、仮に両投のボールスピードに統計的な差が認められれば、投射角度そのものがボールスピードの増大に密接に関係し、また両投の被験者間においてボールスピードに相関がなければ、速投と遠投は全く異なる投げ方を意味することになる。このようなことから、速投と遠投に着目して研究することは野球の投球動作のスピード投のメカニズムを究明するために極めて重要な意味を持つ課題であった。

しかしながら、本章の結果は、表 3.3 および図 3.9 に示したように、速投と遠投におけるリリース時のボールの合成速度には両投間に有意な差がなく、また被験者においては高い正の相関関係が認められたという、予想とは全く逆の結果を示すものであ

った。

これらのことは、ボールスピードを大きくするという観点に立つと、両投の投げ方のメカニズムには共通する要素が極めて多いことを示すものである。したがって、スピード投のメカニズムは、ボールの投射方向の相違によって異なることはないと言えよう。

図3.18は、図1.1で示した野球の投球動作の分類を修正したものである。図に示すように、スピード投は、ボールの投射方向の相違によって運動の成果そのものが左右されるものではないため、図1.1に示した速投と遠投を同一の投球動作に属するものとして扱っても問題はないと考えられる。

以上のことから、以降の各章（第4章、第5章）の研究では、速投に着目して、野球の投球動作におけるスピード投のメカニズムをバイオメカニクスの的に検討する。

Table 3.1

Characteristics of subjects.

No. Subject	Age (yrs)	Height (m)	Weight (kg)	Competition (yrs)	Position
1. Y.U.	19	1.80	80.1	7	pithcer
2. H.K.	21	1.72	72.0	10	pithcer
3. H.U.	19	1.80	74.0	11	pithcer
4. M.T.	19	1.77	73.0	11	catcher
5. T.E.	21	1.76	79.0	9	catcher
6. K.N.	21	1.71	66.0	12	infielder
7. T.A.	20	1.72	75.0	12	catcher
8. T.S.	19	1.81	72.0	10	catcher
9. R.N.	20	1.79	76.2	10	infielder
10. S.T.	22	1.73	78.0	11	catcher
11. Y.T.	19	1.68	65.0	10	outfielder
12. H.I.	20	1.77	72.5	13	catcher
13. S.H.	19	1.75	62.0	7	infielder
14. Y.O.	20	1.70	63.0	9	infielder
15. T.S.	20	1.80	75.2	3	outfielder
16. N.O.	20	1.75	78.0	11	infielder
17. S.T.	21	1.69	65.0	15	infielder
18. S.N.	20	1.77	79.0	10	catcher
19. T.K.	20	1.68	69.0	10	infielder
20. N.K.	19	1.69	72.0	10	infielder
21. T.H.	20	1.70	67.0	10	outfielder
22. K.Y.	21	1.76	75.0	13	outfielder
23. H.S.	20	1.80	85.0	11	infielder
24. N.H.	21	1.73	65.0	12	infielder
mean	20.0	1.75	72.4	10.3	
S.D.	0.9	0.04	6.1	2.3	
Maximum	22.0	1.81	85.0	15.0	
Minimum	19.0	1.68	62.0	3.0	

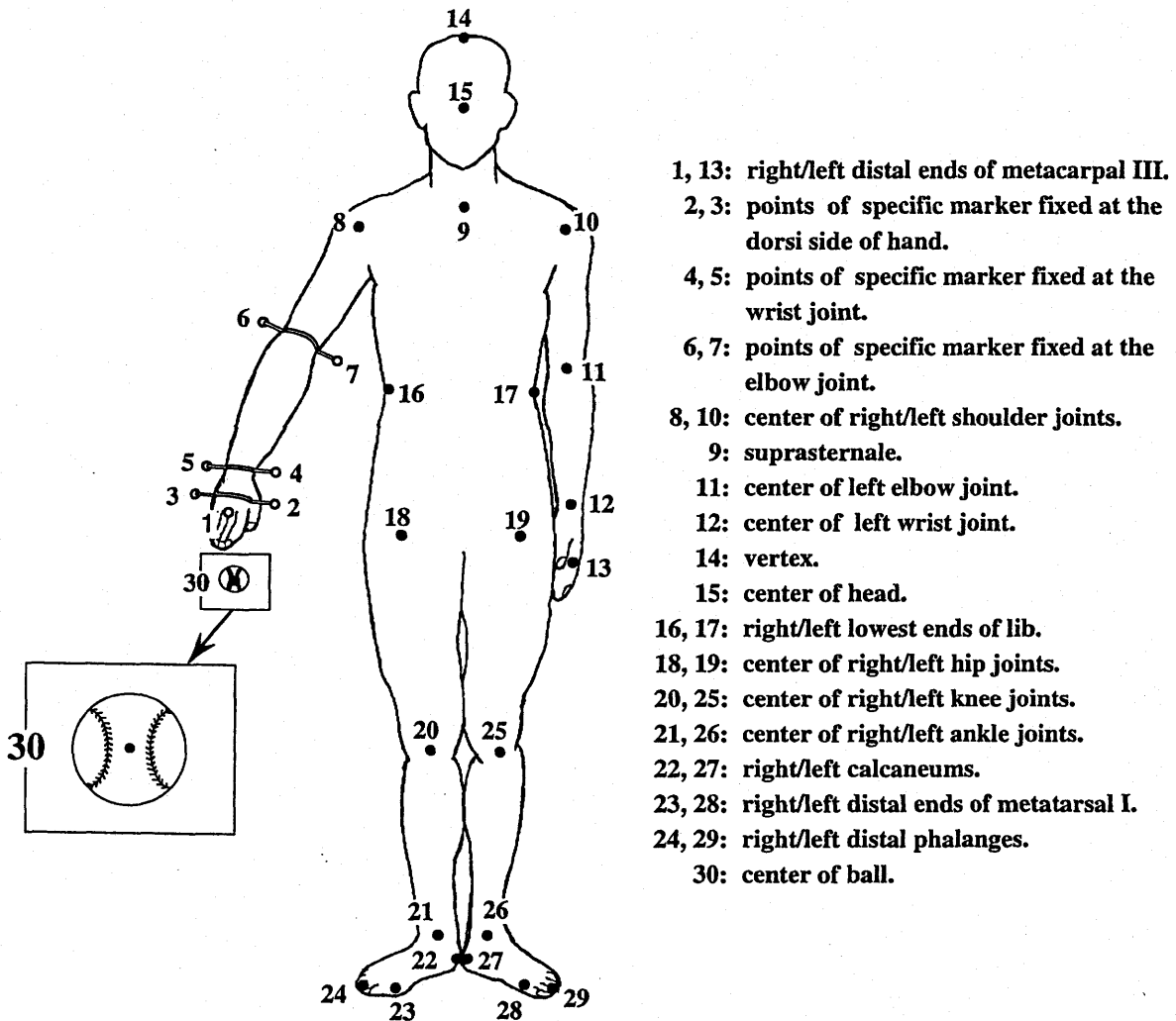


Figure 3.1
 Measured points in body segments and ball.

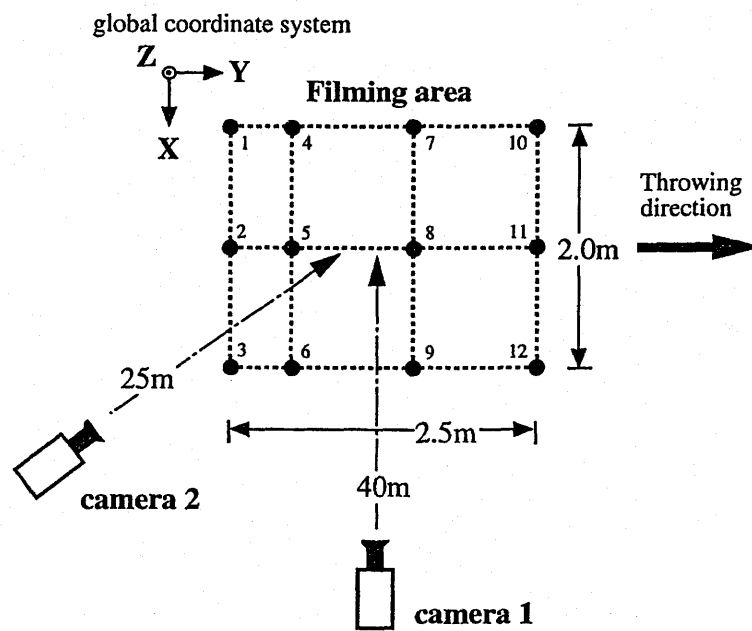


Figure 3.2

Two high-speed video cameras setup and the filming area on the global coordinate system.

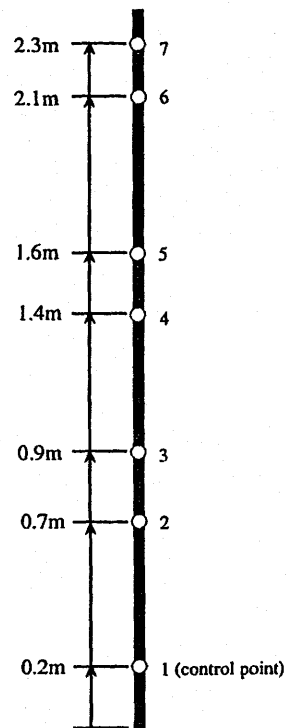


Figure 3.3
Calibration pole.

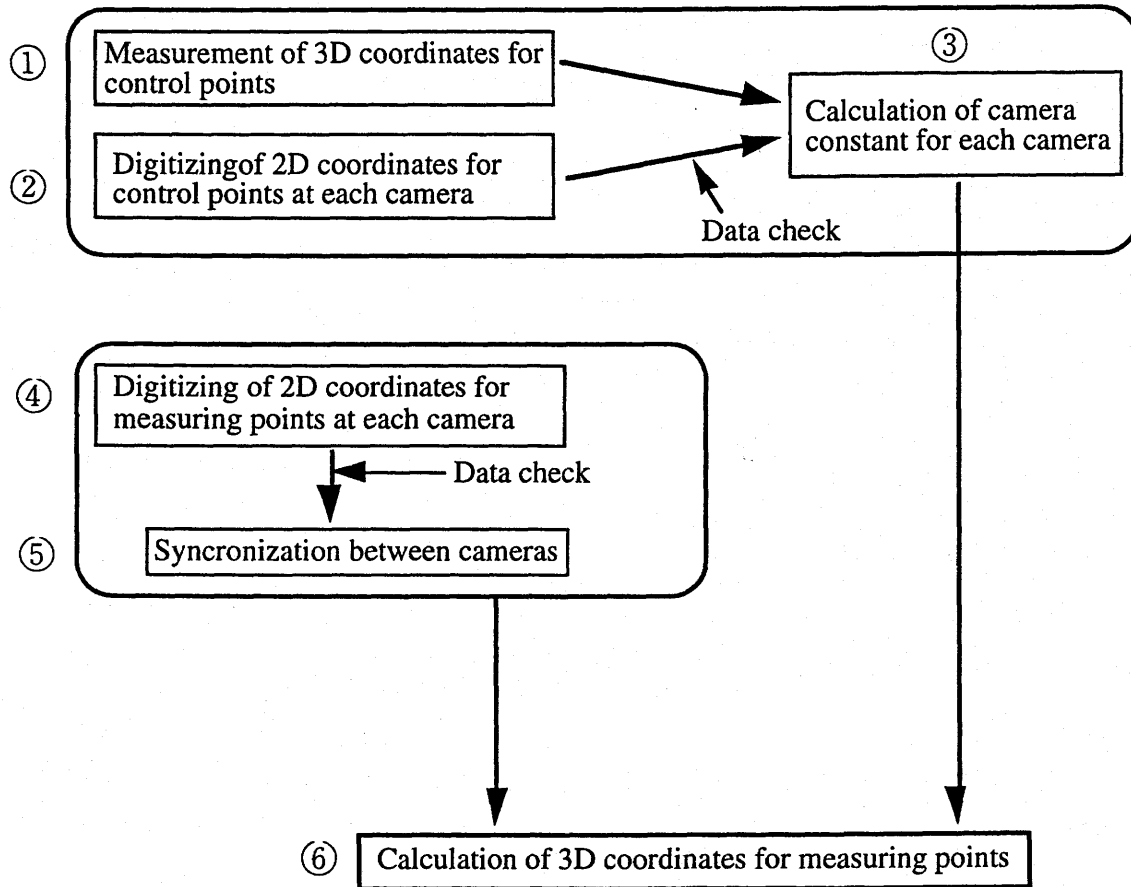


Figure 3.4

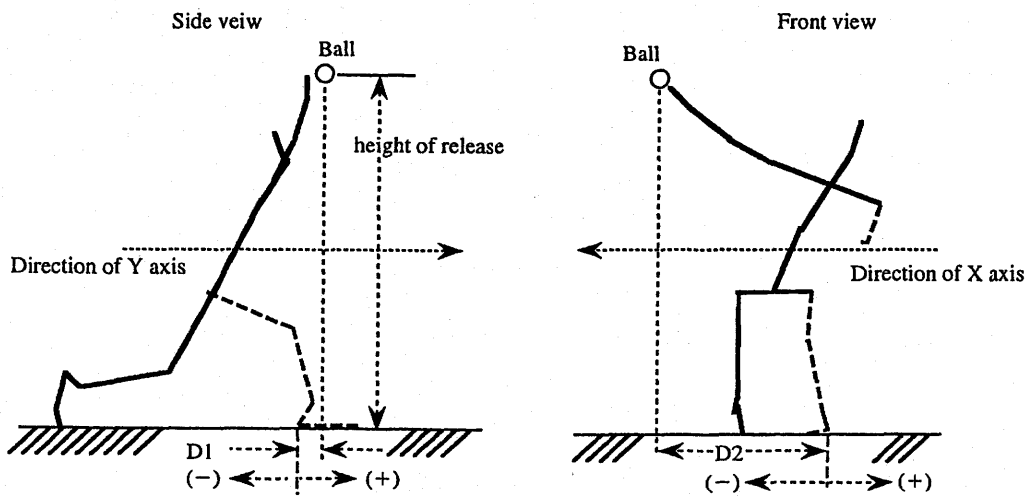
Flowchart for the calculation of three-dimensional (3D) coordinates by the DLT method.

Table 3.2

Optimal cutoff frequencies.

Point Number	Cutoff Frequency (Hz)		
	X-com	Y-com	Z-com
	Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)
	n=24		
1	16.5 (1.8)	19.2 (1.0)	19.8 (1.1)
2	16.1 (2.3)	18.9 (1.0)	20.1 (0.7)
3	17.3 (1.7)	17.9 (1.5)	18.8 (1.3)
4	15.3 (2.3)	18.6 (1.2)	18.7 (1.1)
5	18.1 (1.8)	19.2 (1.0)	19.0 (1.0)
6	16.3 (2.5)	18.8 (1.8)	20.1 (1.1)
7	16.9 (1.9)	18.4 (1.2)	18.3 (1.5)
8	13.8 (2.5)	14.0 (2.4)	13.6 (2.4)
9	12.8 (2.9)	13.2 (1.9)	12.4 (2.6)
10	13.5 (2.8)	13.6 (3.0)	12.8 (2.8)
11	14.2 (2.9)	13.3 (2.4)	13.7 (2.6)
12	13.7 (3.3)	12.8 (2.7)	13.8 (3.1)
13	13.0 (3.1)	11.7 (3.2)	13.2 (3.2)
14	12.4 (3.6)	13.4 (3.1)	11.1 (2.9)
15	11.3 (3.3)	12.4 (3.5)	12.5 (3.3)
16	12.8 (2.7)	12.4 (3.2)	12.4 (3.1)
17	12.2 (3.4)	13.3 (2.7)	11.6 (3.2)
18	11.6 (3.3)	10.1 (3.0)	11.7 (3.2)
19	11.8 (3.5)	10.9 (2.5)	10.0 (3.1)
20	10.3 (3.7)	11.6 (3.1)	11.5 (2.4)
21	11.3 (3.3)	10.8 (3.3)	10.6 (2.7)
22	11.8 (2.7)	11.1 (3.1)	13.0 (2.5)
23	12.2 (4.0)	12.0 (3.5)	12.1 (2.5)
24	11.1 (3.2)	12.0 (2.8)	10.3 (3.6)
25	9.6 (3.1)	9.8 (2.5)	12.8 (2.6)
26	10.9 (4.1)	10.8 (3.2)	10.5 (2.5)
27	9.9 (2.7)	9.7 (3.2)	11.0 (2.6)
28	9.7 (3.0)	10.8 (3.1)	11.5 (3.3)
29	10.8 (2.9)	10.8 (3.4)	12.4 (2.1)
30	16.3 (1.5)	18.0 (1.2)	19.2 (1.2)

X, Y, Z-com: components in global coordinate system



D1: distance on the YZ plane between ball center and heel of stride foot at the ball release
 D2: distance on the XZ plane between ball center and heel of stride foot at the ball release

Figure 3.5
 Definitions of the release parameters.

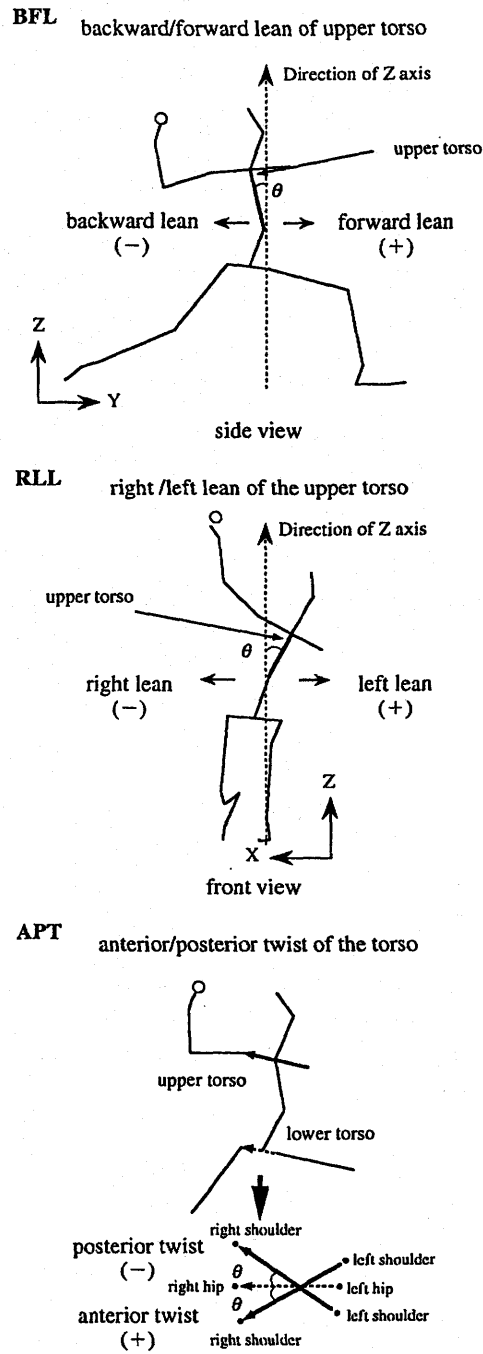


Figure 3.6

Definitions of the angles of the backward/forward lean (BFL), right /left lean of the upper torso (RLL), and the anterior/posterior twist of the torso (APT).

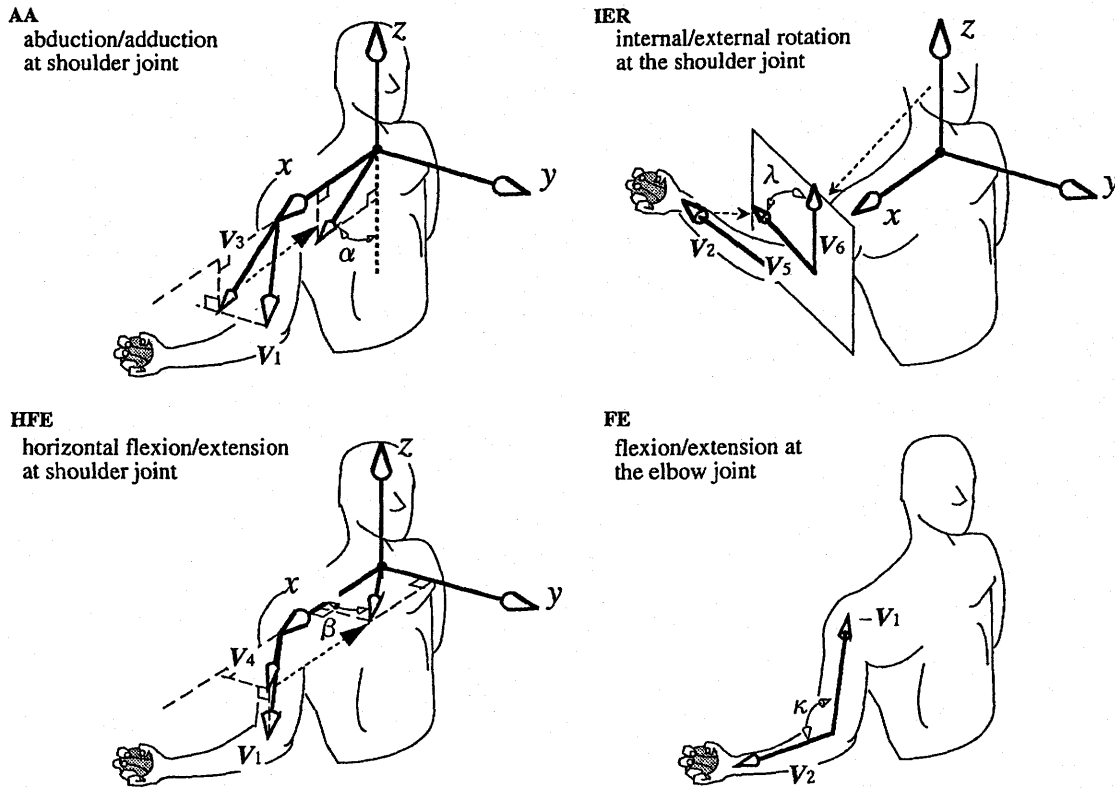


Figure 3.7

Definitions of the angles of the abduction/adduction (AA), horizontal flexion/extension (HFE), internal/external rotation at the shoulder joint (IER), and the flexion/extension at the elbow joint (FE).

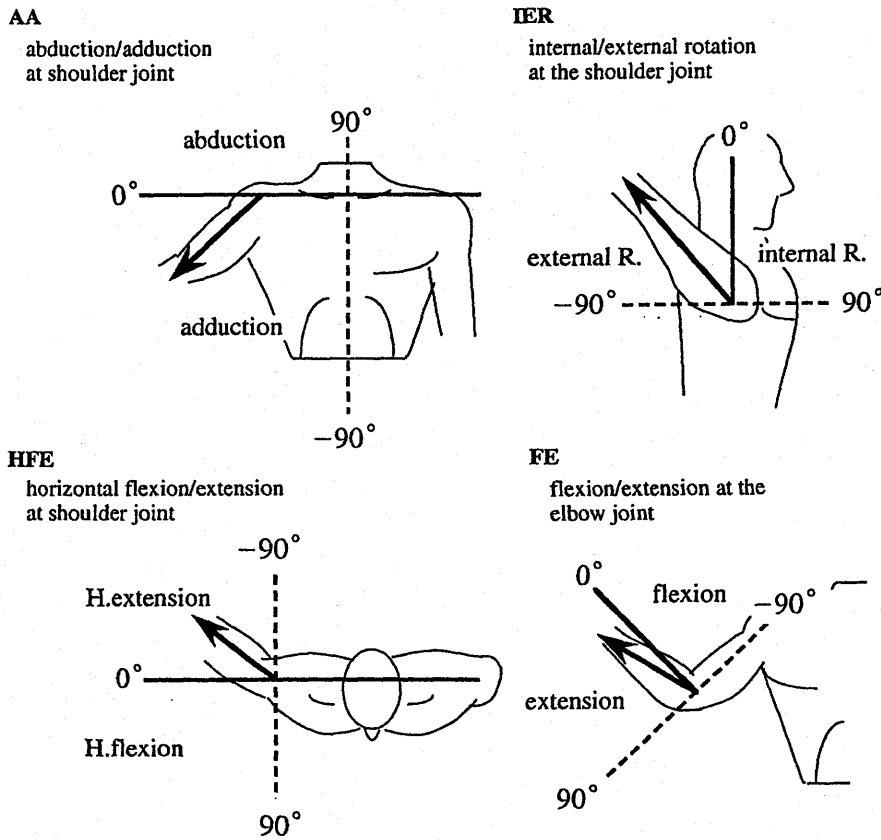


Figure 3.8

Definitions of the signs of the abduction/adduction (AA), horizontal flexion/extension (HFE), internal/external rotation at the shoulder joint (IER), and the flexion/extension at the elbow joint (FE).

Table 3.3

Comparisons of the release parameters between the horizontal throw and the distance throw.

	HT, DT : n=24				
	HT		DT		
	mean	S.D.	mean	S.D.	
AR (deg)	6.3	(2.5)	30.3	(3.2)	*
HR (m)	1.64	(0.1)	1.78	(0.1)	*
RVB (m/s)	29.8	(2.0)	30.5	(2.2)	ns
HVB (m/s)	29.6	(2.0)	26.2	(2.3)	*
VVB (m/s)	3.2	(1.2)	15.3	(1.4)	*
D1 (m)	0.14	(0.08)	-0.27	(0.09)	*
D2 (m)	0.32	(0.11)	0.25	(0.13)	ns
SL (m)	1.28	(0.11)	1.23	(0.09)	ns
TM (s)	0.12	(0.02)	0.11	(0.02)	ns
HDT (m)	-	-	75.9	(7.0)	-

HT: horizontal throw no significant: ns
 DT: distance throw significant level: * p < 0.05
 AR: angle of release
 HR: height of release
 RVB: resultant velocity of ball
 HVB: horizontal velocity of ball
 VVB: vertical velocity of ball
 D1: distance on the YZ plane between ball center and heel of stride foot at the ball release
 D2: distance on the XZ plane between ball center and heel of stride foot at the ball release
 SL: stride length at the stride foot contact
 TM: time of motion from SFC to BRL
 HDT: horizontal distance of throw

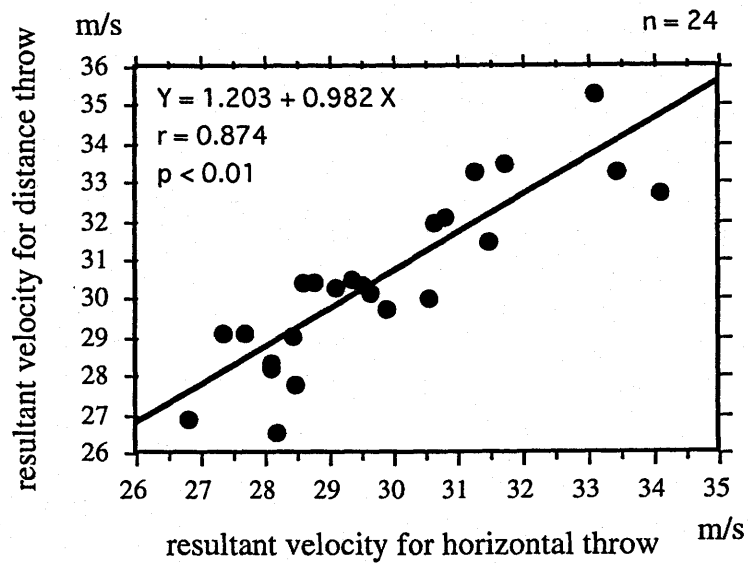


Figure 3.9

Scattergrams showing relationships between the resultant velocity at the instant of ball release in the horizontal throw and that in the distance throw.

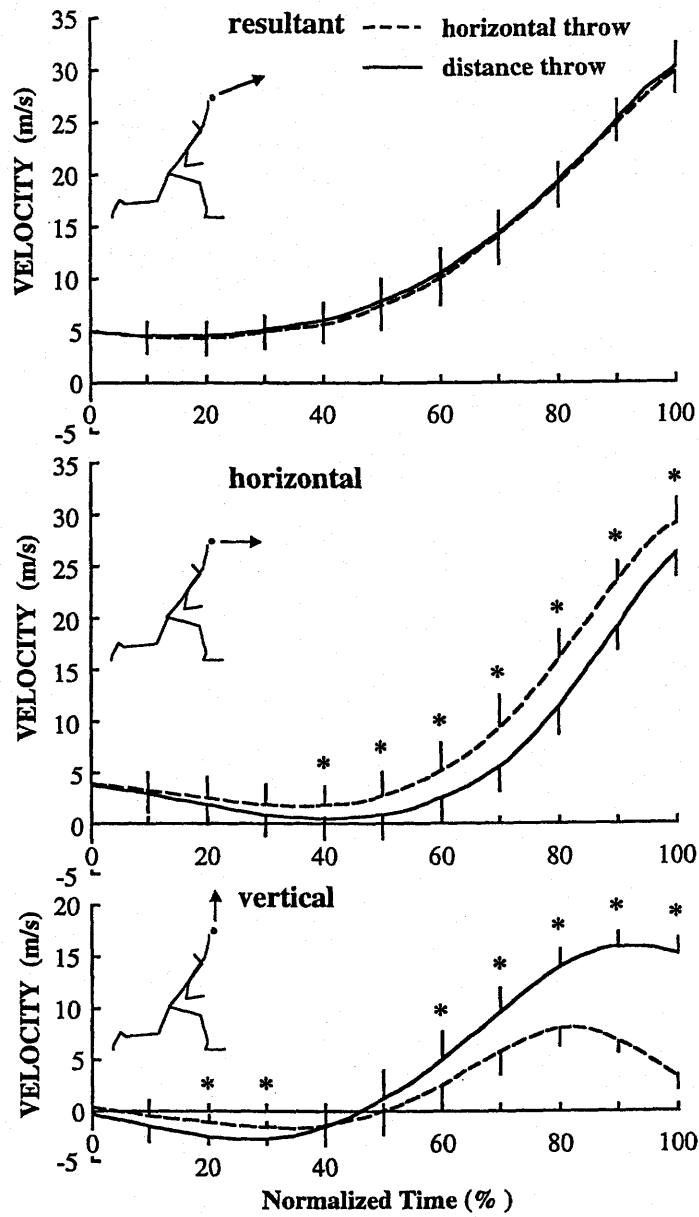


Figure 3.10

Comparisons of the resultant, horizontal, and the vertical averaged (S.D.) velocities of the ball between the horizontal throw and the distance throw.

0%: at the stride foot contact

100%: at the ball release

*: $p < 0.05$

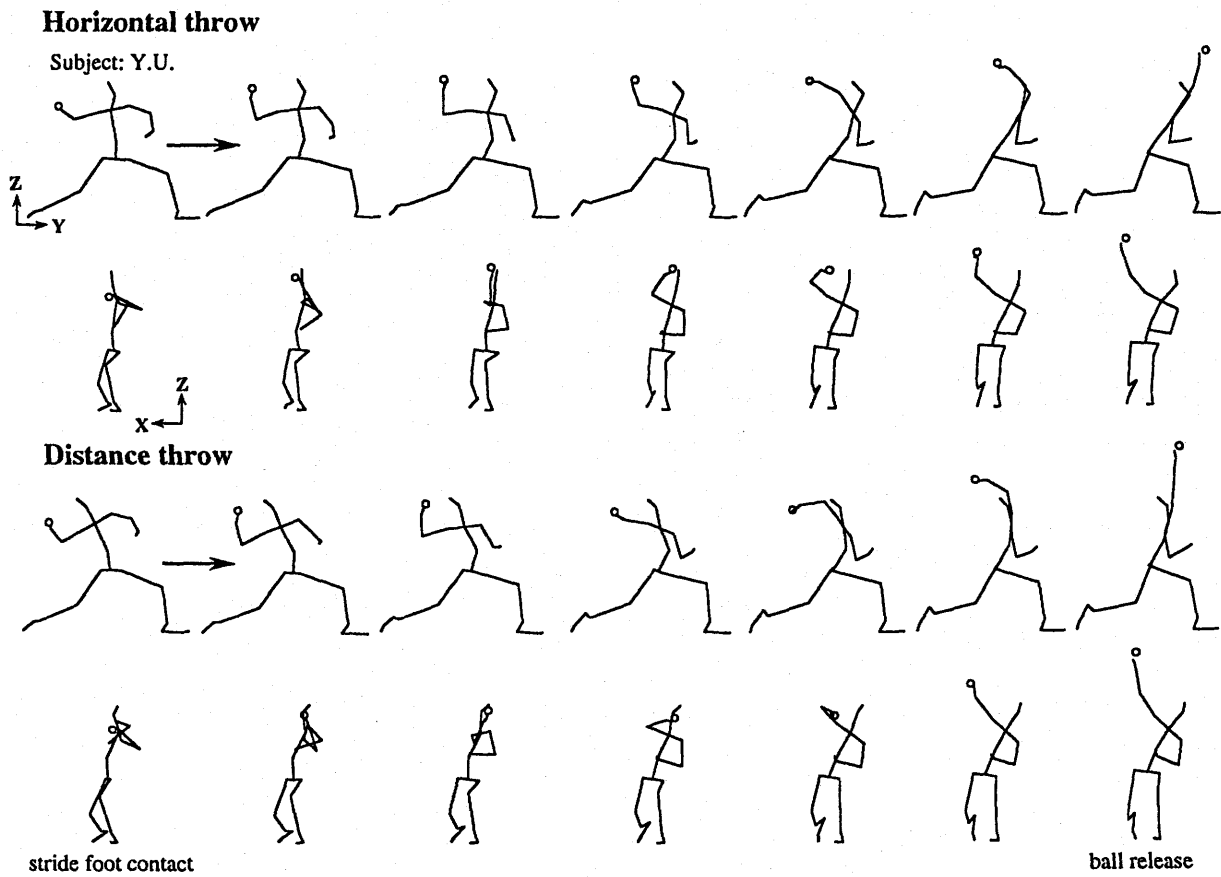


Figure 3.11

Stick figures from side views and front for the horizontal throw and the distance throw in the subject Y.U.

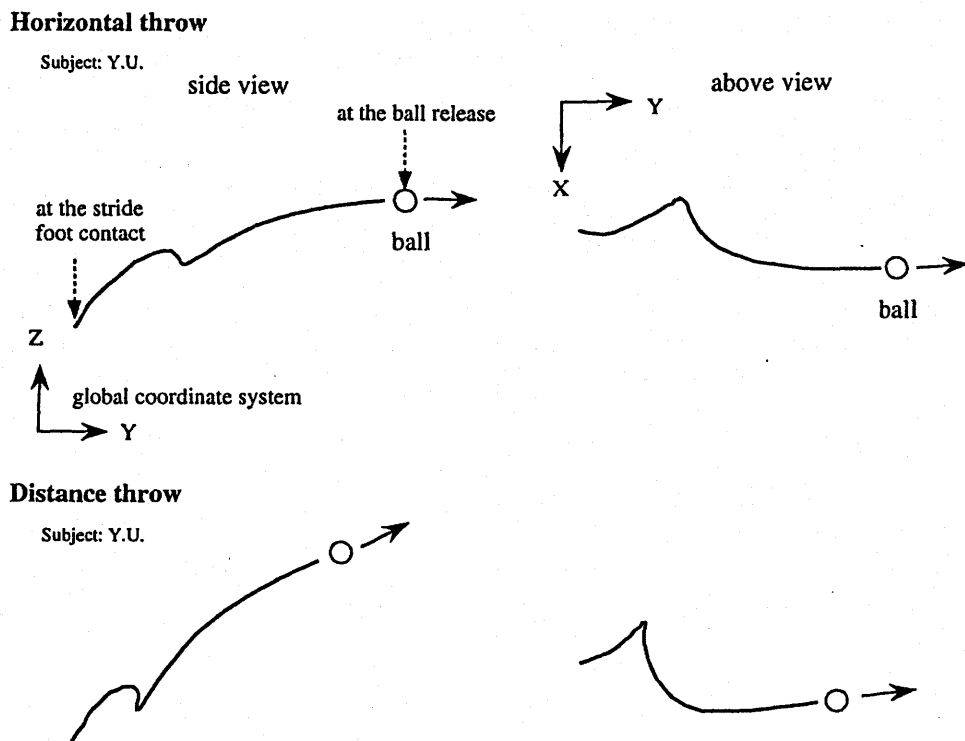


Figure 3.12

Locus of the ball for the horizontal throw and the distance throw.

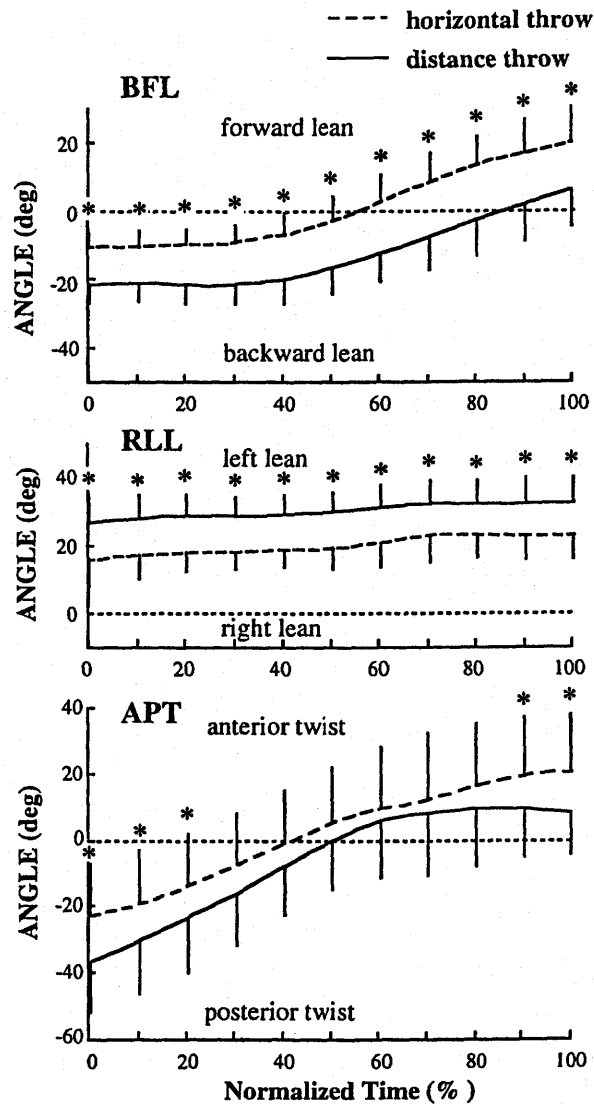


Figure 3.13

Comparisons of the averaged (S.D.) angles of the backward/forward lean (BFL), right/left lean of the upper torso (RLL), and the anterior/posterior twist of the torso (APT) between the horizontal throw and the distance throw.

0%: at the stride foot contact

100%: at the ball release

*: $p < 0.05$

Table 3.4

Comparisons of the angles of the torso at the SFC, MaxER, BRL, and of the ROM between the horizontal throw and the distance throw.

HT, DT : n=24

		SFC		MaxER		BRL		ROM	
		Mean	(S.D.)	Mean	(S.D.)	Mean	(S.D.)	Mean	(S.D.)
BFL	HT	-10.6	(4.5) *	5.6	(8.5) *	20.3	(9.8) *	30.9	(8.1) ns
	DT	-21.7	(5.0)	-11.5	(9.2)	5.4	(10.9)	27.1	(9.7)
RLL	HT	16.3	(7.9) *	22.6	(7.1) *	23.5	(7.5) *	7.2	(7.0) ns
	DT	27.0	(8.2)	32.0	(7.2)	32.6	(7.7)	5.6	(6.8)
APT	HT	-22.5	(15.9) *	10.7	(18.4) ns	20.9	(17.8) *	43.4	(17.6) ns
	DT	-36.6	(15.3)	6.0	(16.7)	8.5	(12.9)	45.1	(13.1)

HT: horizontal throw
 DT: distance throw
 SFC: at the stride foot contact
 MaxER: at the maximum position of the external rotation at the shoulder joint
 BRL: at the ball release
 ROM: range of angular displacement between SFC and BRL
 BFL: backward/forward lean angle of the upper torso
 RLL: right/left lean angle of the upper torso
 APT: anterior/posterior twist angle of the torso

unit: degree
 no significant: ns
 significant level: * p < 0.05

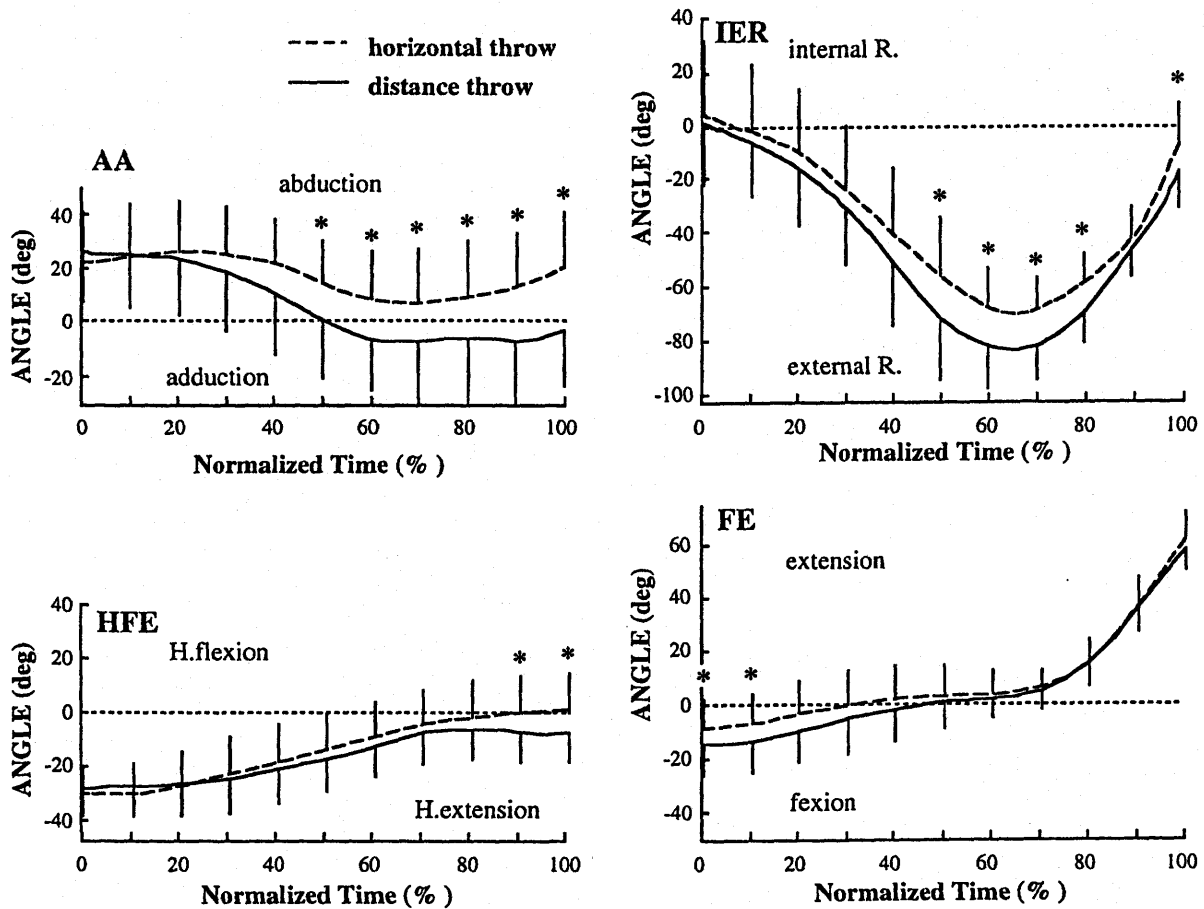


Figure 3.14

Comparisons of the averaged (S.D.) angles of the abduction/adduction (AA), horizontal flexion/extension (HFE), internal/external rotation at the shoulder joint, (IER) and the flexion/extension at the elbow joint (FE) between the horizontal throw and the distance throw.

0%: at the stride foot contact

100%: at the ball release

*: $p < 0.05$

Table 3.5

Comparisons of the angles of the shoulder and elbow joints at the SFC, MaxER, BRL between the horizontal throw and the distance throw.

		HT, DT : n=24		
		SFC	MaxER	BRL
		Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)
AA	HT	22.4 (18.9) ns	7.5 (18.8) *	21.0 (20.2) *
	DT	26.0 (18.8)	-6.0 (20.0)	-2.6 (20.8)
HFE	HT	-30.2 (9.8) ns	-6.1 (11.8) ns	1.4 (13.8) *
	DT	-28.1 (10.4)	-10.5 (11.4)	-7.6 (11.2)
IER	HT	4.4 (27.5) ns	-73.1 (13.2) *	-6.5 (14.6) *
	DT	1.1 (22.5)	-85.6 (14.5)	-17.1 (13.9)
FE	HT	-7.8 (10.5) *	3.0 (9.6) ns	63.0 (10.4) ns
	DT	-14.5 (11.6)	2.2 (7.9)	58.7 (7.6)

HT: horizontal throw
 DT: distance throw
 SFC: at the stride foot contact
 MaxER: at the maximum position of the external rotation at the shoulder joint
 BRL: at the ball release
 AA: abduction/adduction angle at the shoulder joint
 HFE: horizontal flexion/extension angle at the shoulder joint
 IER: internal/external rotation angle at the shoulder joint
 FE: flexion/extension angle at the elbow joint

unit: degree
 no significant: ns
 significant level: * p < 0.05

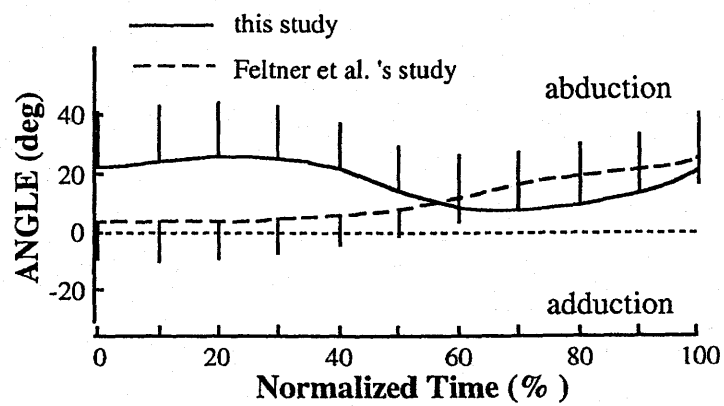


Figure 3.15

Comparisons of the averaged (S.D.) angle of the abduction/adduction at the shoulder joint in the horizontal throw between the computations for the Feltner and Dapena (1986)'s study and for this study.

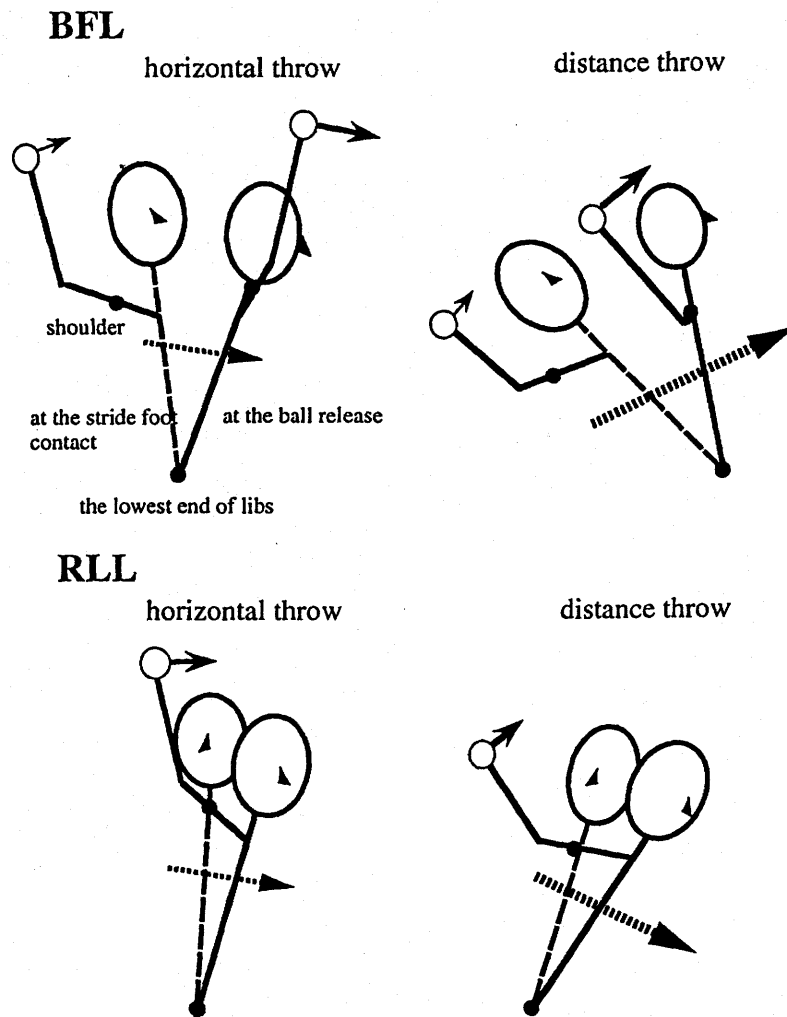


Figure 3.16

Schematic motions of the backward/forward lean (BFL), and the right/left lean of the upper torso (RLL) at the SFC and BRL between the horizontal throw and the distance throw.

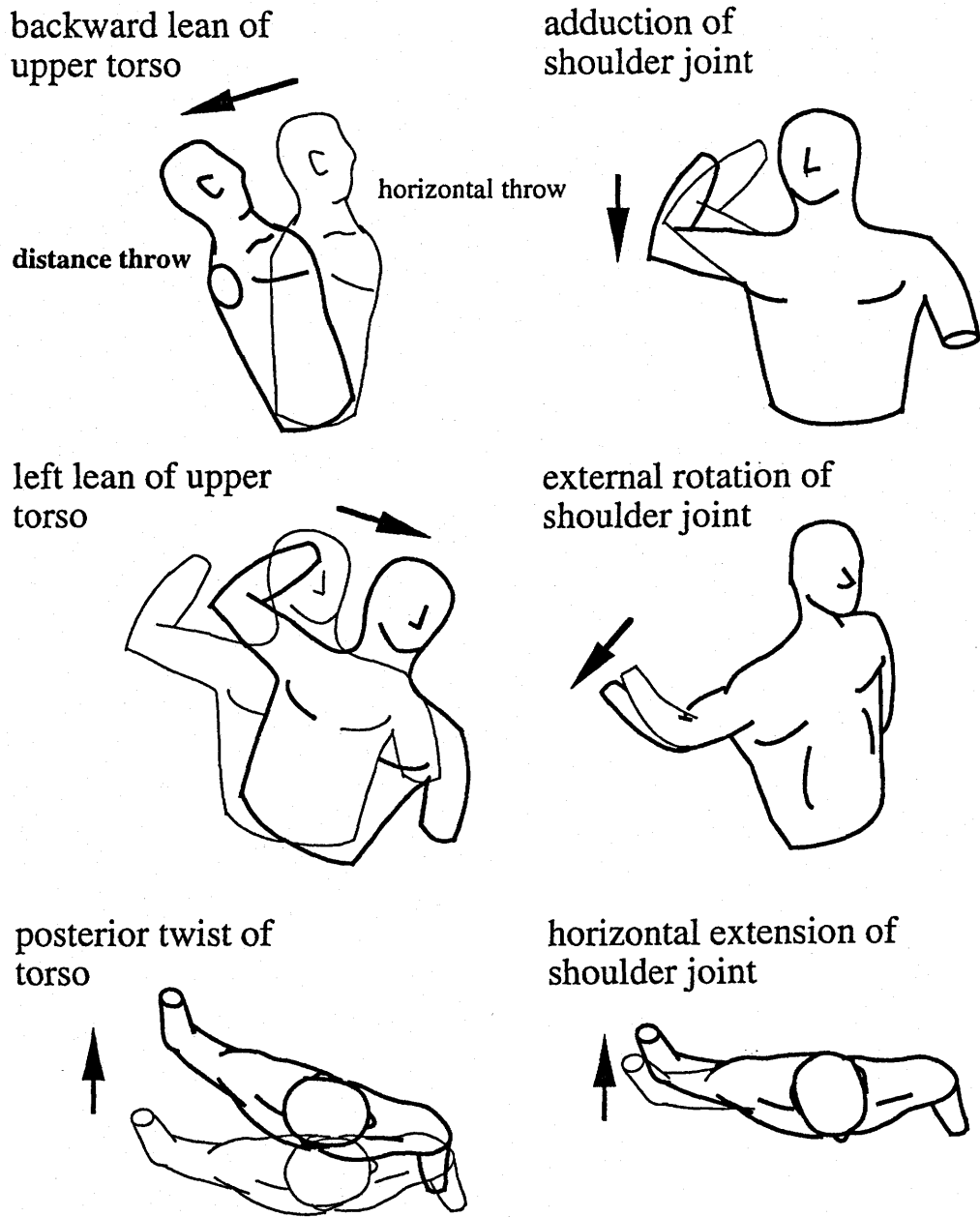


Figure 3.17

Summary for the differences of the torso and the throwing arm motion between the horizontal throw and the distance throw.

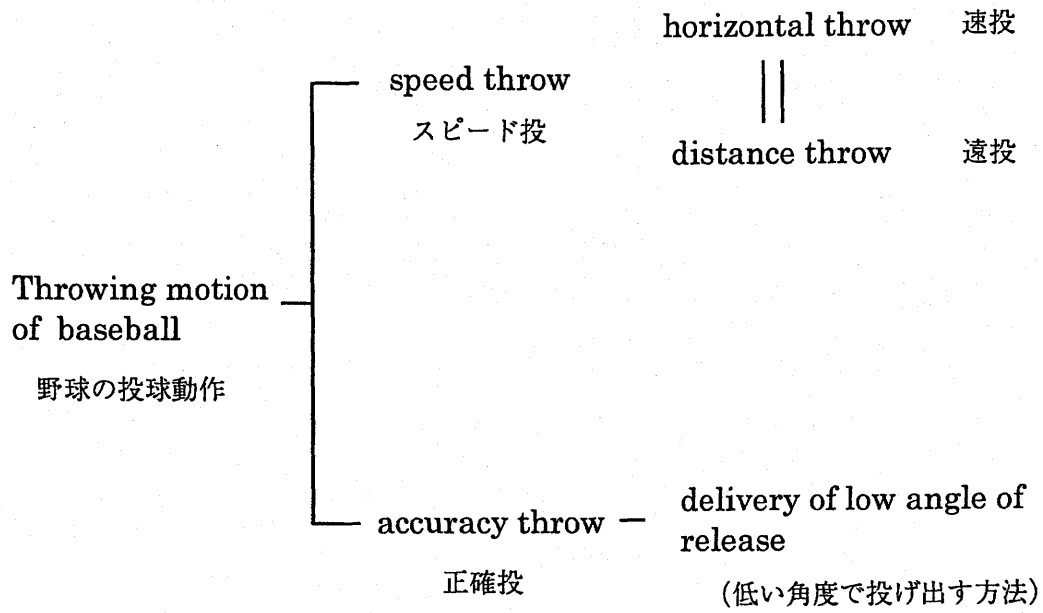


Figure 3.18

Modified classification for speed throw of baseball.

第4章 速投動作の運動学的研究－ボール速度の貢献度に着目して－

4.1 緒言

野球の投手のピッチング動作は、一般に踏出脚の挙上、踏出脚の接地、骨盤の回転、体幹の回転および回旋（ひねり）、肩関節の外転／内転、水平伸展／屈曲および外旋／内旋、肘関節の屈曲／伸展、前腕の回外／回内、手関節の背屈／掌屈および橈屈／尺屈、指節間関節の伸展／屈曲などの運動が順序性をもって行なわれていることが観察されている (Atwater, 1979; Tarbell, 1971; Vaughn, 1985; Feltner and Dapena, 1986; Elliott et al., 1985, 1986; 桜井ら, 1990)。

このような複雑な関節運動を伴う投球動作において、ボール速度そのものが各関節のどのような回転運動に起因しているのかを明らかにすることは、スピード投（速投）におけるメカニズム解明のために重要な研究課題のひとつであると考えられる。

投球動作において、身体各部分の貢献度を運動学的に検討するために、いくつかの研究が行なわれている (Atwater, 1977; Bowne, 1960; Kunz, 1974; Toyoshima et al., 1974; Hoshikawa and Toyoshima, 1976; 石井と斉藤, 1982; Vaughn, 1985; 淵本ら, 1985; Elliott et al., 1986)。しかし、これらの研究は、野球の投球動作（速投）において、上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度およびそれらの運動によるボール速度に対する貢献度を3次元的に検討したものではない。

最近, Sprigings et al. (1994)は、テニスのサーブにおいて、打撃上肢各関節の合計7つの解剖学的な回転運動によって生み出されたラケットヘッド前方速度を3次元的に算出する方法を考案した。しかし彼らは、体幹の運動によって生み出されたラケットヘッド前方速度を算出しておらず、また各関節の回転運動によって生み出されたラケットヘッド合成速度を求めていない。

本章の目的は、Sprigings et al. (1994)の方法を参考にして、さらに上腕をもモデル

に含めて、野球の投球動作の速投における上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度を3次的に算出する方法を考案し、ボール速度に対するそれらの関節の回転運動の貢献度を運動学的観点から明らかにすることである。

図4.1に合計11の上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動を示した。

4.2 研究方法

4.2.1 被験者

被験者は、3.2.1で述べた被験者と同一である。

4.2.2 投球動作の実験および解析方法

(1) 投球動作の撮影

投球動作の撮影は、3.2.2.(2)で述べたことと同一である。

図4.2は、本研究で用いたボールおよび身体各部位の計測点の位置を示したものである。本研究では、体幹を点rtと点ltを境に上腕と下腕に分け、下腕および下肢を分析の対象から除外した。

(2) 分析試技の選定

分析試技として、3.2.2.(2)で述べた速投動作を選定した。

(3) 残差分析法による座標データの最適遮断周波数の決定および平滑化

本研究で用いた計測点の最適遮断周波数の範囲は6 Hz-22 Hzであり、ボール中心の鉛直成分の周波数が最も高く(22 Hz)、左肋骨下端点(図4.2では点lt)の鉛直成分が最も低かった(6 Hz)。これらの最適遮断周波数を用いて、計測点の座標データを4次のバターワース型のローパスデジタルフィルタにより平滑化した(Winter,

1990) .

これらの平滑化された計測点の3次元座標値を用いて、上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度を算出した。

4. 3 データの算出方法

4. 3. 1 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度の算出法

本研究では、Sprigings et al. (1994)によるモデルに基づいて、上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動（以下、関節の回転運動と呼ぶ）によって得られたボール速度を求めた。

しかし、Sprigings et al. (1994)の方法と本研究では、関節の回転運動に関する角速度（関節角速度）の算出方法が異なっている。

すなわち、Sprigings et al. (1994)は、打撃上肢に取り付けた8個の計測点を用いて、上肢各関節における関節角速度を直接求めている。一方、本研究では、上腕を含めて合計8個（投球腕に関しては5個）の計測点を用いて、まず上腕、上腕、前腕および手に運動座標系（部分座標系）を定義して、部分の角速度を求めた。そして、先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; 宮西ら, 1995) に基づいて、上腕、肩、肘および手関節中心に運動座標系（関節座標系）を定義し、上述の方法で求めた部分の角速度を関節の角速度として表したことである。

なお、部分座標系および関節座標系は、静止座標系に対して並進かつ回転運動する右手系の直交座標系を示すものである。

以下、具体的に上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール速度の算出方法について説明する。

ボールド体の記号 (Nomenclature 参照) はベクトル量を表す。

(1) 部分座標系の定義と部分の角速度の算出

本研究では、上腕、上腕、前腕および手の角速度ベクトルを部分座標系の各軸方向の単位ベクトル unit vector を利用して求めた。

以下では、部分座標系の定義と部分の角速度の算出方法を述べる。

① 部分座標系の定義

図 4.3 は、(a) 上腕、(b) 上腕、(c) 前腕および (d) 手に定義した部分座標系を示したものである。図中の i, j, k は部分座標系の各軸方向の単位ベクトルを、添字の ut, ua, fa および h はそれぞれ上腕、上腕、前腕および手を示す。

上腕に定義した部分座標系（上腕座標系：図 4.3a）の z 軸は、左右の肋骨下端点を結ぶ線分の midpoint (td : 上腕下端点) から左右の肩関節中心を結ぶ線分の midpoint (tp) へ向かう方向とした。 y 軸は z 軸方向のベクトルと左肩関節中心 (ls) から右肩関節中心 (rs) へのベクトルとの外積から定義し、残る 1 軸を x 軸とした。

なお、以下の定義方法において、上腕、前腕および手座標系の x 軸の定義は、上腕における x 軸の定義と同様である。

上腕に定義した部分座標系（上腕座標系：図 4.3b）の z 軸は投球腕の肘関節中心 (e) から右肩関節中心 (rs) へ向かう方向とし、 y 軸は z 軸方向のベクトルと肘関節中心 (e) から手関節中心 (w) へのベクトルとの外積から定義した。

前腕に定義した部分座標系（前腕座標系：図 4.3c）の z 軸は投球腕の手関節中心 (w) から肘関節中心 (e) へ向かう方向とし、 y 軸は z 軸方向のベクトルと尺骨茎状突起から橈骨茎状突起へのベクトル（図中の点 2 から点 1 へ向かうベクトル）との外積から定義した。

手に定義した部分座標系（手座標系：図 4.3d）の z 軸は投球腕の第 3 中手指節間関節中心 (hd) から手関節中心 (w) へ向かう方向とし、 y 軸は z 軸方向のベクトルと上述した点 2 から点 1 へのベクトルとの外積から定義した。

なお、上述の定義では、特別な肢位、例えば上腕と前腕の長軸方向が互いに平行と

なる場合において軸の方向を示すベクトルが算出できなくなるが、本研究の測定範囲ではそのような場合は生じなかった。

部分座標系の各軸方向の単位ベクトルは、各軸方向のベクトルの成分をその大きさで除すことにより求めた (和達, 1983) .

② 部分の角速度の算出

そして、これらの部分座標系の各軸方向の単位ベクトルを用いて、上腕 (ω_{ut}) , 上腕 (ω_{ua}) , 前腕 (ω_{fa}) および手 (ω_h) の角速度を求めた。

例えば、上腕座標系の各軸方向の単位ベクトル (i_{ut}, j_{ut}, k_{ut}) の時間微分は、以下のように表される (和達, 1983) .

$$\frac{di_{ut}}{dt} = \omega_{ut} \times i_{ut}, \quad \frac{dj_{ut}}{dt} = \omega_{ut} \times j_{ut}, \quad \frac{dk_{ut}}{dt} = \omega_{ut} \times k_{ut} \quad [4.1]$$

ただし、 $\omega_{ut} = \omega_{utx} i_{ut} + \omega_{uty} j_{ut} + \omega_{utz} k_{ut}$ である。

したがって、スカラー3重積 scalar triple product の公式により、上腕の角速度ベクトルの成分は以下の式で求められる。

$$\omega_{utx} = k_{ut} \cdot \frac{dj_{ut}}{dt}, \quad \omega_{uty} = i_{ut} \cdot \frac{dk_{ut}}{dt}, \quad \omega_{utz} = j_{ut} \cdot \frac{di_{ut}}{dt} \quad [4.2]$$

このようにして求めた上腕の角速度ベクトルは部分座標系における角速度ベクトルであるので、座標変換行列 (付録 A.2. (2)) を用いて静止座標系における角速度ベクトルに変換した (和達, 1983) .

上述の静止座標系と部分座標系の関係を示す座標変換行列は、前節で述べた部分座標系の各軸方向の単位ベクトルを用いることによって導出できる (和達, 1983) . 同様に、上腕、前腕および手の角速度ベクトルを求めた。

なお、部分の角速度の算出において、これまでにいくつかの方法が報告されているが、このうち湯 (1995) は静止座標系から直接角速度を算出する方法を考案した。し

かし、この方法では部分の長軸まわりの角速度（回旋，ひねり）が算出されない。したがって、本研究では上記の方法を用いて部分の角速度の算出を行なった。このことに関しては、付録 A.3 に上腕と投球側の上腕および大腿の角速度を例にして示した。

(2) 上腕および投球腕各部分の回転運動によって得られたボール速度の算出

次に、Sprigings et al. (1994)のモデルに基づき、野球の投球動作において、上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール速度を算出するための基本式を導出する。

任意の瞬間のボール速度は、以下に示す相対速度の総和として表すことができる。

$$V_b = V_{td} + V_{rs/td} + V_{e/rs} + V_{w/e} + V_{hd/w} + V_{b/hd} \quad [4.3]$$

ここで、 V は速度ベクトル、添字の b , td , rs , e , w および hd はそれぞれボール中心，上腕下端点，右肩関節中心，肘関節中心，手関節中心および第3中手指節間関節中心を示し，例えば， $V_{rs/td}$ は上腕下端点に対する右肩関節中心の相対速度ベクトルを示す。

なお， V_{td} は下腕や下肢の運動によって得られた上腕下端点 (td) の速度ベクトルである。

ここで，ボールを質点とみなし，上腕，上腕，前腕および手をそれぞれ肩，肘および手関節中心でつながれた剛体²リンクモデル link-segment model (Winter, 1990)として仮定する。

その結果，式 [4.3] における右辺の各項を各部分の角速度ベクトルを用いて表すと，

² 大きさおよび形を有する物体は，無数の質点が集まって形成されたものと考えることができる。この場合，各質点間の距離が不変な物体，換言すれば，変形しない物体を剛体 rigid body という。剛体は，固有の質量，質量中心，慣性モーメントをもつ (守屋と鷺津, 1973)。

$$V_b = V_{td} + \omega_{ut} \times r_{rs/td} + \omega_{ua} \times r_{e/rs} + \omega_{fa} \times r_{w/e} + \omega_h \times r_{hd/w} + V_{b/hd} \quad [4.4]$$

となる。

ここで、 ω は前節で述べた静止座標系における部分の角速度ベクトルである。 r は添字の2点を結ぶ相対位置ベクトルで、例えば、 $r_{rs/td}$ は上腕下端点 (td) から右肩関節中心 (rs) への相対位置ベクトルを示す。

なお、本研究では、指部の角速度の測定精度の問題から、 $V_{b/hd}$ を角速度ベクトルを用いて表すことはしなかった。

次に、式 [4.4] の相対位置ベクトルは、ベクトル加法から、以下のように置き換えることができる。

$$\begin{aligned} r_{rs/td} &= r_{b/td} - r_{b/rs} \\ r_{e/rs} &= r_{b/rs} - r_{b/e} \\ r_{w/e} &= r_{b/e} - r_{b/w} \\ r_{hd/w} &= r_{b/w} - r_{b/hd} \end{aligned} \quad [4.5]$$

これらを式 [4.4] に代入し、角速度ベクトルの差 ($\omega_{ua} - \omega_{ut}$) を $\omega_{ua/ut}$ とおくなどして、整理すると、

$$V_b = V_{td} + \omega_{ut} \times r_{b/td} + \omega_{ua/ut} \times r_{b/rs} + \omega_{fa/ua} \times r_{b/e} + \omega_{h/fa} \times r_{b/w} - \omega_h \times r_{b/hd} + V_{b/hd} \quad [4.6]$$

となる。

ここで、 $\omega_{ua/ut}$ などは上腕に対する上腕の相対角速度ベクトルを示す。

式 [4.6] は、野球の投球動作における上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール速度を求めるための基本式を示している。

(3) 関節座標系の定義と運動軸

式 [4.6] における角速度は、静止座標系における部分の角速度である。

そこで、本研究では、これらの上腕および投球腕各部分の角速度を関節角速度とし

て表した。そのために、先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; 宮西ら, 1995) に基づいて、各関節中心に関節座標系を定義した。

図 4.4 に (a) 上腕下端点, (b) 肩, (c) 肘および (d) 手関節に定義した関節座標系を示した。図中の i, j, k は関節座標系の各軸方向の単位ベクトルで、添字の ut_j, sj, ej および wj はそれぞれ上腕, 肩, 肘および手関節中心である。

上腕下端点 (td) に定義した関節座標系 (仮に上腕関節座標系と呼ぶ: 図 4.4a) の z 軸は上腕下端点 (td) から左右の肩関節中心を結ぶ線分の midpoint (tp) へ向かう方向とし、 y 軸は z 軸方向のベクトルと左上腕下端点 (lt) から右上腕下端点 (rt) へのベクトルとの外積から定義し、残る 1 軸を x 軸とした。

なお、以下の定義方法において、肩および肘関節座標系の x 軸の定義は、上腕関節座標系における x 軸の定義と同様である。

右肩関節中心 (rs) に定義した関節座標系 (肩関節座標系: 図 4.4b) の z 軸は投球腕の肘関節中心 (e) から右肩関節中心 (rs) へ向かう方向とし、 y 軸は z 軸方向のベクトルと右肋骨下端点 (rt) から右肩関節中心 (rs) へのベクトルとの外積から定義した。

肘関節中心 (e) に定義した関節座標系 (肘関節座標系: 図 4.4c) の z 軸は投球腕の手関節中心 (w) から肘関節中心 (e) へ向かう方向とし、 y 軸は z 軸方向のベクトルと肘関節中心 (e) から右肩関節中心 (rs) へのベクトルとの外積から定義した。

手関節中心 (w) に定義した関節座標系 (手関節座標系: 図 4.4d) の x 軸は、前述した前腕座標系の x 軸とした。 y 軸は投球腕の第 3 中手指節間関節中心 (hd) から手関節中心 (w) へのベクトルと x 軸方向のベクトルとの外積から定義し、最後に z 軸は x 軸方向のベクトルと y 軸方向のベクトルとの外積から定義した。

部分座標系の定義と同様に、上述の定義では、特別な肢位において軸方向のベクトルが算出できなくなるが、本研究の測定範囲ではそのような場合は生じなかった。また、関節座標系の各軸方向の単位ベクトルは、各軸方向のベクトルの成分をその大き

さで除すことにより求めた (和達, 1983) .

上腕関節座標系の x 軸は伸展 (+) / 屈曲 (-) の運動軸を示し, y 軸は右屈 (+) / 左屈 (-) 軸, z 軸は左回旋 (+) / 右回旋 (-) 軸を示す. 肩関節座標系の x 軸は水平屈曲 (+) / 伸展 (-) 軸, y 軸は内転 (+) / 外転 (-) 軸, z 軸は内旋 (+) / 外旋 (-) 軸を示す. 肘関節座標系の x 軸は内反 (+) / 外反 (-) 軸, y 軸は伸展 (+) / 屈曲 (-) 軸, z 軸は回内 (+) / 回外 (-) 軸を示す. 手関節座標系の x 軸は掌屈 (+) / 背屈 (-) 軸, y 軸は尺屈 (+) / 橈屈 (-) 軸, z 軸は長軸の右回旋 (+) / 左回旋 (-) 軸を示す. 括弧内は正・負を示す.

(4) 関節角速度の算出

上腕および投球腕各関節の角速度は, 静止座標系における上腕の角速度ベクトル (ω_{ut}), 上腕に対する上腕 ($\omega_{ua/ut}$), 上腕に対する前腕 ($\omega_{fa/ua}$) および前腕に対する手 ($\omega_{h/fa}$) の相対角速度ベクトルを, それぞれ前節で定義した上腕, 肩, 肘および手関節座標系の各軸に射影することにより求めた.

ここで, 関節の自由度を考慮すると, 関節の角速度は互いに独立ではない. 例えば, 図 4.4b および図 4.4c からわかるように, 肘関節 90 度屈曲位では, 肩関節座標系の z 軸と肘関節座標系の x 軸とが完全に一致する.

このことは, $\omega_{fa/ua}$ を肘関節座標系の x 軸 (内反 / 外反軸) へ射影した成分は 0 となることを示している. 同様なことから, $\omega_{h/fa}$ を手関節座標系の z 軸 (長軸回旋軸) へ射影した成分も 0 である.

これらのことにより, 上腕, 上腕, 前腕および手の角速度ベクトルを静止座標系における関節角速度ベクトルを用いて表すと, 以下のようになる.

① 上腕関節

屈曲 / 伸展 (屈伸と呼ぶ) :

$$\omega_{(ut)x} = (\omega_{ut} \cdot i_{utj}) * i_{utj}$$

左屈／右屈（左右屈）：

$$\omega_{(ut)y} = (\omega_{ut} \cdot j_{utj}) * j_{utj}$$

左回旋／右回旋（左右旋）：

$$\omega_{(ut)z} = (\omega_{ut} \cdot k_{utj}) * k_{utj} \quad [4.7]$$

ここで、 $\omega_{ut} = \omega_{(ut)x} + \omega_{(ut)y} + \omega_{(ut)z}$ である。また、 $\omega_{(ut)x}$ 、 $\omega_{(ut)y}$ 、 $\omega_{(ut)z}$ は静止座標系における関節角速度ベクトル、 i_{utj} 、 j_{utj} 、 k_{utj} は上腕関節座標系の各軸方向の単位ベクトルである。

② 肩関節

水平屈曲／伸展（水平屈伸）：

$$\omega_{(ua/ut)x} = (\omega_{ua/ut} \cdot i_{sj}) * i_{sj}$$

内転／外転（内外転）：

$$\omega_{(ua/ut)y} = (\omega_{ua/ut} \cdot j_{sj}) * j_{sj}$$

内旋／外旋（内外旋）：

$$\omega_{(ua/ut)z} = (\omega_{ua/ut} \cdot k_{sj}) * k_{sj} \quad [4.8]$$

ここで、 $\omega_{ua/ut} = \omega_{(ua/ut)x} + \omega_{(ua/ut)y} + \omega_{(ua/ut)z}$ である。また、 $\omega_{(ua/ut)x}$ 、 $\omega_{(ua/ut)y}$ 、 $\omega_{(ua/ut)z}$ は静止座標系における関節角速度ベクトル、 i_{sj} 、 j_{sj} 、 k_{sj} は肩関節座標系の各軸方向の単位ベクトルである。

③ 肘関節

内反／外反：

$$\omega_{(fa/ua)x} = (\omega_{fa/ua} \cdot i_{ej}) * i_{ej} = 0$$

屈曲／伸展（屈伸）：

$$\omega_{(fa/ua)y} = (\omega_{fa/ua} \cdot j_{ej}) * j_{ej}$$

回内／回外（回内外）：

$$\omega_{(fa/ua)z} = (\omega_{fa/ua} \cdot k_{ej}) * k_{ej} \quad [4.9]$$

ここで、 $\omega_{fa/ua} = \omega_{(fa/ua)y} + \omega_{(fa/ua)z}$ である。また、 $\omega_{(fa/ua)x}$ 、 $\omega_{(fa/ua)y}$ 、 $\omega_{(fa/ua)z}$ は静止座

標系における関節角速度ベクトル, i_{ej} , j_{ej} , k_{ej} は肘関節座標系の各軸方向の単位ベクトルである.

④ 手関節

掌屈/背屈 (掌背屈) :

$$\omega_{(h/fa)_x} = (\omega_{h/fa} \cdot i_{wj}) * i_{wj}$$

橈屈/尺屈 (橈尺屈) :

$$\omega_{(h/fa)_y} = (\omega_{h/fa} \cdot j_{wj}) * j_{wj}$$

長軸回旋 :

$$\omega_{(h/fa)_z} = (\omega_{h/fa} \cdot k_{wj}) * k_{wj} = 0 \quad [4.10]$$

ここで, $\omega_{h/fa} = \omega_{(h/fa)_x} + \omega_{(h/fa)_y}$ である. また, $\omega_{(h/fa)_x}$, $\omega_{(h/fa)_y}$, $\omega_{(h/fa)_z}$ は静止座標系における関節角速度ベクトル, i_{wj} , j_{wj} , k_{wj} は手関節座標系の各軸方向の単位ベクトルである.

(5) 上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール速度の算出

以上のことから, 各関節の角速度ベクトルを式 [4.6] へ代入すると, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} V_b &= V_{td} \\ &+ \{(\omega_{(ut)_x} + \omega_{(ut)_y} + \omega_{(ut)_z}) \times r_{b/td}\} \\ &+ \{(\omega_{(ua/ut)_x} + \omega_{(ua/ut)_y} + \omega_{(ua/ut)_z}) \times r_{b/rs}\} \\ &+ \{(\omega_{(fa/ua)_y} + \omega_{(fa/ua)_z}) \times r_{b/e}\} \\ &+ \{(\omega_{(h/fa)_x} + \omega_{(h/fa)_y}) \times r_{b/w}\} \\ &- \omega_h \times r_{b/hd} + V_{b/hd} \end{aligned} \quad [4.11]$$

式 [4.11] は, ボール速度ベクトルが, 上腕下端点の速度ベクトル, 上腕関節の屈伸, 左右屈および左右旋, 肩関節の水平屈伸, 内外転および内外旋, 肘関節の屈伸および回内外, 手関節の掌背屈および橈尺屈の角速度ベクトルに, それぞれ上腕, 肩,

肘および手関節中心からボール中心までの相対位置ベクトルとの外積によって得られる速度ベクトル，さらに指節間関節の屈伸運動によって得られる速度ベクトル ($-\omega_h \times r_{b/hd} + V_{b/hd}$) のベクトル和とみなすことができることを示すものである。

したがって，式 [4.11] は，上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られた速度そのものがボール速度の構成要因であることを意味すると言える。

4. 3. 2 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度の「貢献度」の算出法

本研究では，上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール速度をボール合成速度方向へそれぞれ射影することによって，関節の回転運動によって得られたボール合成速度方向への速度成分を求めた。さらに，試技の課題からボールの水平速度に着目し，ボール水平速度方向への速度成分についても算出した。

図 4.5 は，関節の回転運動によって得られたボール速度の「貢献度」の定義を模式的に示したものである。任意の瞬間の投球動作を考えると，図から関節の回転運動によって得られた速度（例えば，図中では $V_1 \sim V_5$ ）のボール合成速度方向への速度成分は，ボール合成速度方向へ向かっているもの（正とする： $V_2 \sim V_5$ ）と逆方向へ向かっているもの（負： V_1 ）があると考えられる。このことは，ボール水平速度についても同様である。

そこで，本研究では，関節の回転運動によって得られた速度の正方向へ向かうボール速度に着目し，それらの速度の総和 (V_b^+) に対する個々の回転運動によって得られた正方向へ向かうボール速度 ($V_2^+ \sim V_5^+$) の比率 (%) を「貢献度 contribution」と呼ぶ。

例えば，上腕関節の屈伸運動によって得られた速度の正方向へ向かうボール速度 (V_{EF-UTj}^+) の「貢献度」は，以下の式で求めた。

$$\text{貢献度 (\%)} = \frac{|V_{EF-UTj}^+|}{|V_b^+|} \times 100 \quad [4.12]$$

4. 3. 3 データの規格化および平均化

さらに「貢献度」の算出には、関節の回転運動によって得られた速度の正方向へ向かうボール合成速度および水平速度データを時間で規格化し、全被験者について平均化したデータを用いて行なった。すなわち、踏出脚の接地時（以下、SFCと呼ぶ）からリリース時（BRL）までのデータを3次スプライン関数 (Kreyszig, 1983) を用いて補間し、その区間を100%とした際の1%毎のデータを求めた。そして、規格化された1%毎のデータを全被験者について加算し、平均値と標準偏差 (S.D.) を求めた。

4. 4 結果

4. 4. 1 ボール速度の測定値と計算値

図 4.6 は、SFC 前から BRL までのボールの合成、左右、水平および鉛直速度の測定値と式 [4.11] を用いて得られた計算値を典型例（被験者 N.H.）で示したものである。

被験者 N.H. の BRL におけるボール合成速度は測定値が 29.6 m/s、計算値が 28.9 m/s であった。

4. 4. 2 ボール合成および水平速度の局面分け

図 4.7 は、被験者 N.H. におけるボールの合成および水平速度の変化を示したものである。

図から、ボールの合成および水平速度パターンは、SFC 後いったん減少した後、BRL まで増大した。また、両速度とも、ボール速度が比較的緩やかに増大する局面

と急激に増大する局面が認められた。これらの傾向はほぼすべての被験者にみられた。

そこで、本研究では、ボールの合成および水平速度が最小となる時点（それぞれ Min.RBV および Min.HBV）と合成および水平加速度の変化率が最大となる時点（それぞれ Max.RBA および Max.HBA）に着目し、SFC から BRL までの局面を以下のように3つに分けた。ただし、これらの時点は、計算値を用いて求めたものである。

- ① DPr 局面および DPh 局面（ボール合成および水平速度減少局面）：SFC から Min.RBV および Min.HBV までの局面。
- ② EPIr 局面および EPIh 局面（ボール合成および水平速度漸増局面）：Min.RBV から Max.RBA および Min.HBV から Max.HBA までの局面。
- ③ LPIr 局面および LPIh 局面（ボール合成および水平速度急増局面）：Max.RBA および Max.HBA から BRL までの局面。

また、SFC から BRL までの時間を 100% とすると、ボール合成速度の Min.RBV および Max.RBA の出現時点はそれぞれ $22.1 \pm 12.5\%$ 、 $71.4 \pm 8.7\%$ であり、ボール水平速度の Min.HBV および Max.HBA はそれぞれ $29.6 \pm 11.9\%$ 、 $74.4 \pm 6.6\%$ であった。

また、両出現時点の分布を検定した結果、ボール合成速度および水平速度においても正規性が認められた。すなわち、水平速度の Min.HBV では歪度および尖度がそれぞれ 0.121、-1.279、水平速度の Max.HBA ではそれぞれ -0.431、-0.811 であり、また、合成速度の Min.RBV ではそれぞれ 0.183、-0.533、合成速度の Max.RBA ではそれぞれ -0.467、-0.815 であった。

これらのことから、先に述べたように規格化されたデータを用いて、「貢献度」の算出および評価を行なうことが可能であると判断した。

4. 4. 3 上腕および投球腕各関節における角速度

図 4.8 は、(a) 上腕、(b) 肩、(c) 肘および (d) 手関節の角速度の変化を典型例（被験者 N.H.）で示したものである。図の縦軸は角速度（正負の値は関節の回転

運動の方向を示す) を、横軸は時間を示し、図上にはスティックピクチャを示した。

これらの角速度の変化パターンは、ほぼすべての被験者で類似していた。

図から、DPr 局面および EPIr 局面では上腕関節の左回旋，肩関節の水平屈曲および外旋，手関節の背屈および尺屈の角速度が大きく，LPIr 局面では肩関節の内旋，肘関節の伸展，手関節の掌屈の角速度が大きかった。上腕関節の左回旋の角速度は，SFC 前から一定の大きさを BRL 直前まで持続した。

角速度の増大を時間的にみると，肩関節の水平屈曲／外旋，肘関節の回外，肘関節の伸展／回内，手関節の背屈／尺屈，肩関節の内旋，手関節の掌屈の順に大きくなった。

また，肩関節の水平屈曲および内旋，肘関節の回内および手関節の掌屈の角速度の増大は，それぞれ肩関節の水平伸展および外旋，肘関節の回外および手関節の背屈の角速度の増大に引き続いて生じた。

表 4.1 は，SFC から BRL 後約 50 ms までにおけるそれらの角速度の最大値およびその出現時刻の平均値 (\pm S.D.) を示したものである。同様に，表 4.2 には，SFC から BRL までのものを示した。

表 4.1 に示したように，手関節掌屈の角速度の最大値は， 40.5 ± 9.7 rad/s ($2,320 \pm 556^\circ /s$) で，ほぼ BRL に出現した (0 ± 7 ms)。肘関節伸展および肩関節内旋の角速度の最大値はそれぞれ 38.5 ± 5.2 rad/s ($2,206 \pm 298^\circ /s$) および 92.5 ± 26.0 rad/s ($5,300 \pm 1,490^\circ /s$) であり，その出現時刻はそれぞれ BRL 直前 (-9 ± 4 ms) と BRL 直後 (10 ± 11 ms) であった。肩関節外旋の角速度の最大値は 40.5 ± 28.3 rad/s ($2,320 \pm 1,621^\circ /s$) で，BRL 前 -42 ± 58 ms に生じた。肘関節回内外の角速度は，回外が BRL 直後に (5 ± 39 ms)，回内がそれに遅れて出現し (26 ± 12 ms)，最大値がそれぞれ 40.0 ± 27.0 rad/s ($2,292 \pm 1,547^\circ /s$) および 63.0 ± 27.4 rad/s ($3,610 \pm 1,570^\circ /s$) であった。

BRL において，上腕関節では屈曲，右屈および左旋の角速度であり，それぞれ一

3.9±1.7 rad/s (223±97° /s) , 0.9±1.6 rad/s (52±92° /s) および 4.9±2.1 rad/s (281±120° /s) であった。肩関節では水平屈曲, 外転および内旋であり, それぞれ 3.2±4.1 rad/s (183±235° /s) , -7.0±3.3 rad/s (401±189° /s) および 56.3±23.5 rad/s (3,226±1,346° /s) であった。肘関節では伸展および回外であり, それぞれ 29.7±5.8 rad/s (1,702±332° /s) および -9.0±21.5 rad/s (516±1,232° /s) であった。手関節では掌屈および橈屈であり, それぞれ 36.5±12.2 rad/s (2,091±699° /s) および -15.9±9.9 rad/s (911±567° /s) であった。

4. 4. 4 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度および「貢献度」

(1) 上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール合成速度および「貢献度」

図 4.9 は, ボール合成速度と (a) 上腕下端点, (b) 上腕, (c) 肩, (d) 肘, (e) 手および (f) 指節間関節の回転運動によって得られたボール合成速度の変化を典型例 (被験者 N.H.) で示したものである。図の縦軸は速度を, 横軸は時間を示す。

図 4.9 に示したように, Min.RBV 時以降において, 上腕下端点の速度は急激に減少した。また, 上腕関節の運動, 特に左右回旋によって得られた速度は EPIr 局面において大きかった。

EPIr 局面の後半から, 肘関節の屈伸による速度が増大を開始し, 次に, 肩関節の内外旋, そして手関節の掌背屈による速度が増大を開始した。肘関節の屈伸による速度は BRL 直前で減少したが, 肩関節の内外旋および手関節の掌背屈による速度は, LPIr 局面において急激に増大を持続し, 両者ともほぼ BRL に最大となった。

図 4.10 は, 被験者 N.H. を例として, SFC から BRL までの上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール合成速度の貢献度を示したものである。図中の太い曲線は, 関節の回転運動によって得られたボール合成速度の正方向へ向かうボー

ル速度を示したものである。図の左右の縦軸はそれぞれ貢献度および速度，横軸は時間である。

図 4.10 に示すように，SFC から Min.RBV 時まで，上脗下端点および上脗関節の左右屈による速度の貢献度が大きかった。Min.RBV 時から Max.RBA 時まで，上脗関節の運動，特に左右回旋および屈伸による速度の貢献度が大きかった。Max.RBA 時から BRL まで，肩関節の内外旋，肘関節の屈伸および手関節の掌背屈による速度の貢献度が大きかった。

図 4.11 は，全被験者における関節の回転運動によって得られたボール合成速度を規格化および平均化して，貢献度として表したものである。図中の太い曲線は，全被験者における関節の回転運動によるボール合成速度の正方向へ向かうボール合成速度を平均して示したものである。図の左右の縦軸はそれぞれ貢献度および速度，横軸は規格化した時間である。

全被験者の貢献度の変化パターンは，全体的に，図 4.10 に示した被験者 N.H.における貢献度の変化と類似していた。

表 4.3 に，SFC と BRL における各関節の回転運動によって得られたボール合成速度の正方向へ向かうボール速度の平均値（ \pm S.D.）と貢献度，さらにそれらの負方向へ向かうボール速度についても示した。

SFC におけるボール合成速度の貢献度は，上脗下端点による速度が 42.1%，肩関節の内外旋運動が 33.5%，肩関節の内外転が 7.4%，上脗関節の左右屈が 7.2%，指節間関節の屈伸が 4.8%，上脗関節の屈伸および左右回旋がそれぞれ 2.8% および 1.6%，肘関節の回内外が 0.4%，手関節の橈尺屈が 0.3% であった。

BRL におけるボール合成速度の貢献度は，肩関節の内外旋運動による速度が 34.1%，手関節の掌背屈が 17.7%，肘関節の屈伸が 15.2%，上脗関節の左右回旋および屈伸がそれぞれ 9.6% および 8.4%，肩関節の水平屈伸が 6.0%，指節間関節の屈伸が 5.9%，肩関節の内外転が 1.4%，上脗下端点が 1.0%，手関節の橈尺屈が 0.5%，上脗

関節の左右屈が0.2%であった。

(2) 上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール水平速度および「貢献度」

図 4.12 は、ボール水平速度と (a) 上腕下端点, (b) 上腕, (c) 肩, (d) 肘, (e) 手および (f) 指節間関節の回転運動によって得られたボール水平速度の変化を典型例 (被験者 N.H.) で示したものである。

図 4.12 に示したように、Min.HBV 時以降において、上腕下端点の速度は急激に減少した。また、上腕関節の運動、特に左右回旋および屈伸によって得られた速度は大きく増大した。

SFC から、肩関節の内外旋による速度が負方向へ増大し、ほぼ Max.HBA 時において、正となり、急激に増大した。EPIh 局面の後半から、肘関節の屈伸および肩関節の内外旋による速度が増大を開始し、次に手関節の掌背屈による速度が増大した。肘関節の屈伸による速度は BRL 直前で減少したが、肩関節の内外旋および手関節の掌背屈による速度は、LPIh 局面において増大を継続し、両者ともほぼ BRL に最大となった。

図 4.13 は、被験者 N.H. を例として、SFC から BRL までの上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール水平速度の貢献度を示したものである。図中の太い曲線は、関節の回転運動によって得られたボール水平速度の正方向へ向かうボール速度を示したものである。

図 4.13 に示すように、SFC から Min.HBV 時まで、上腕下端点および上腕関節の左右屈による速度の貢献度が大きかった。Min.HBV 時から Max.HBA 時まで、上腕関節の運動、特に左右回旋および屈伸による速度の貢献度が大きかった。Max.HBA 時から BRL まで、肩関節の内外旋、肘関節の屈伸および手関節の掌背屈による速度の貢献度が大きかった。

図 4.14 は、全被験者における関節の回転運動によって得られたボール水平速度を規格化および平均化して、貢献度として表したものである。図中の太い曲線は、全被験者における関節の回転運動によるボール水平速度の正方向へ向かうボール水平速度を平均して示したものである。

全被験者の貢献度の変化は、全体的に、図 4.13 に示した被験者 N.H.における貢献度の変化と類似していた。

表 4.4 に、SFC と BRL における各関節の回転運動によって得られたボール水平速度の正方向へ向かうボール速度の平均値 (\pm S.D.) と貢献度、さらにそれらの負方向へ向かうボール速度についても示した。

表 4.4 に示すように、SFC におけるボール水平速度の貢献度は、上腕下端点による速度が 60.0%、肩関節の内外旋運動が 13.0%、肩関節の内外転が 11.2%、上腕関節の左右屈および左右回旋がそれぞれ 6.8%および 6.4%、指節間関節の屈伸が 2.6%、手関節の橈尺屈が 0.1%であった。

BRL におけるボール水平速度の貢献度は、肩関節の内外旋運動による速度が 33.0%、肘関節の屈伸が 18.2%、手関節の掌背屈が 17.6%、上腕関節の左右回旋および屈伸がそれぞれ 9.7%および 8.3%、肩関節の水平屈伸が 5.9%、指節間関節の屈伸が 5.5%、上腕下端点が 1.2%、上腕関節の左右屈が 0.4%、肩関節の内外転が 0.2%であった。

4. 5 考 察

4. 5. 1 ボール速度の測定値と計算値

図 4.6 に示したように、ボールの速度成分の測定値と計算値は、完全には一致しなかった。この主な原因として、身体各部分、特に上肢帯と上腕をひとつの剛体としてモデル化したことや、前腕や手、指などの小さく高速度で運動する部分の角速度の測

定精度などが考えられる。

しかし、リリース時におけるボール合成速度の平均は測定値が 29.8 ± 2.0 m/s、計算値が 29.2 ± 2.0 m/s であり、両者間に統計的に差が認められなかった（対応のある t 検定：危険率、 $p < 0.05$ ）。また同様に、ボール水平速度についても統計的な差はなかった（対応のある t 検定：危険率、 $p < 0.05$ ）。

これらのことから、計算値はボール速度変化をよく反映していると言える。

4. 5. 2 上腕および投球腕各関節における角速度

桜井ら (1990) は、投球上肢各関節の 3 次元角度を算出した結果、リリース前後において、肩関節の水平位内転と内旋、肘関節の伸展、橈尺関節の回内、手関節の掌屈に先立ち、いずれもその運動とは逆方向の運動（肩関節の水平位外転と外旋、肘関節の屈曲、橈尺関節の回外、手関節の背屈）が認められたことを報告している。

このことから、桜井ら (1990) は、これらの運動に関する諸筋が、短縮する前に伸張 (pre-stretch) されることによって、弾性エネルギーの再利用が行なわれている可能性を示唆した。

本研究では、図 4.8 に示したように、肩関節の水平屈曲および内旋、肘関節の回内および手関節の掌屈に先立ち、肩関節の水平伸展および外旋、肘関節の回外および手関節の背屈の角速度が大きくなった。

このように、本研究の角速度の変化は、桜井ら (1990) の角度変化パターンとほぼ同様な結果であった。しかし、本研究では、肘関節の屈曲の角速度が計測区間においてほとんどみられなかった（図 4.8）。また、3. 3. 2 (2) に示したように、速投の肘関節の角度変化は、踏出脚の接地時からリリース時まで一貫して伸展運動であった（宮西ら, 1995）。

これらのことから、リリース直前の肘関節の伸展角速度の増大は、桜井ら (1990) が指摘するように上腕三頭筋の stretch 効果による影響は小さいものと推察される。

踏出脚の接地直後において、肩関節の水平屈曲角速度の急激な増大とともに、外旋の角速度が大きくなった(図4.8)。これは、Feltner and Dapena (1986)が述べているように、肩関節の水平内転(屈曲)トルクの発生によって、肩関節の外旋が促進されたものであると考えられる。

しかし、踏出脚の接地時からリリース時までの角速度の最大値の出現をみると、肩関節の外旋の角速度が水平屈曲よりも前に生じていた。すなわち、肩関節外旋の角速度の最大値(26.2 ± 6.0 rad/s)はリリース前 76 ± 17 ms時に出現し、水平屈曲(11.4 ± 3.1 rad/s)がリリース前 60 ± 27 ms時に出現した。

また、図4.8からわかるように、上腕関節の左回旋の角速度が踏出脚の接地時前から一定の大きさで持続し、その最大値が 20.6 ± 2.0 rad/sであり、出現時刻はリリース前 69 ± 19 msであった(表4.1)。

肩関節の外旋が開始する初期に発生する、このような上腕関節の左回旋運動は、投球腕側の肩関節に前方への力を発生させると同時に、この力は投球腕の重心まわりにモーメントとなる。したがって、投球腕における肩外転約 90° 、肘屈曲 90° の肢位では、この上腕関節の左回旋運動によって発生するモーメントは投球腕の後方運動、とりわけ肩関節の外旋と水平伸展運動に大きく関与しているものと推察される。

投球腕の関節角速度について、Vaughn (1985)およびFeltner and Dapena (1986)の結果(投手)と本研究の投手3名のもの进行比较すると、肩関節の内旋および肘関節の伸展の角速度にほぼ類似したパターンがみられたが、その大きさは異なっていた。

すなわち、Vaughn (1985)の報告では、リリース時における肩関節の内旋および肘関節の伸展の角速度はそれぞれ 106.8 ± 14.9 rad/s ($6,119 \pm 854^\circ$ /s) および 11.0 ± 6.0 rad/s ($630 \pm 344^\circ$ /s)であった。また、Feltner and Dapena (1986)の結果では、肩関節の内旋の角速度(ほぼリリース時に一致)が 106.5 ± 29.7 rad/s ($6,100 \pm 1,700^\circ$ /s)であった。Feltner and Dapena (1986)は、リリース時の肘関節伸展角速度を示していないが、被験者1名の角速度グラフから判断すると、Vaughn (1985)の

報告とほぼ同様な結果であった。

一方、本研究では、肩関節の内旋および肘関節の伸展の角速度は、それぞれ 45.8 ± 21.6 rad/s ($2,624 \pm 1238^\circ$ /s) および $27.9/\pm 5.6$ rad/s ($1,599 \pm 321^\circ$ /s) であった。

このように、Vaughn (1985), Feltner and Dapena (1986)の結果は、本研究のものよりも、リリース時の肩関節の内旋角速度が2倍以上も大きく、逆に、肘関節伸展の角速度は、本研究の方が2倍以上も大きかった。

また、肩関節の内旋角速度の最大値は、Vaughn (1985), Feltner and Dapena (1986)の結果では、上述したようにほぼリリース時に出現していた。一方、本研究では、リリース後 7 ± 6 ms に出現し、その大きさは 77.5 ± 13.7 rad/s ($4,440 \pm 785^\circ$ /s) で、リリース時のものよりも約2倍弱大きかった。

さらに、肘関節の伸展角速度の最大値は、Feltner and Dapena (1986)の報告では 38.4 ± 7.0 rad/s ($2,200 \pm 400^\circ$ /s) であり、本研究のものも 38.8 ± 5.7 rad/s ($2,223 \pm 327^\circ$ /s) で、ほぼ同様な値であった。その出現時刻は、それぞれリリース前約 15 ms 時およびリリース前 12 ± 3 ms 時であった。これらのことは、Vaughn (1985)の研究も同様な結果であった。

これらの結果から判断すると、Vaughn (1985), Feltner and Dapena (1986)の用いた被験者(投手)は、肘関節の伸展に比べて、肩関節の内旋の角速度がリリース時に最大となるように投げており、一方、本研究の投手では、肩関節の内旋に比べ、肘関節の伸展角速度が最大になるように投けているものと推察される。

4. 5. 3 上腕および投球腕各関節の解剖学的な回転運動によって得られたボール速度および「貢献度」

(1) 上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール合成速度および「貢献度」と関節角速度について

関節の回転運動によって得られたボール合成速度(図 4.9)は、それだけでは関節

の相拮抗する運動，例えば，ボール速度が肩関節の内旋によって生じたものか，外旋によるものなのかを明確に区別することができない。したがって，これらの関節の拮抗運動を区別するためには，図 4.8 に示した関節の角速度の方向を考慮して判断する必要がある。

図 4.8 と図 4.9 を見比べるとわかるように，EPIr 局面および LPIr 局面において，上腕関節の左右回旋による速度は左回旋によって得られたものであり，屈伸による速度は屈曲運動によるもの，左右屈による速度は左屈運動によるものであった。

EPIr 局面において，肩関節の水平屈伸によって得られた速度は水平屈伸によるものであり，EPIr 局面後半からリリース時における肩関節の内外旋による速度は内旋運動によるものであった。

EPIr 局面後半からリリース時にかけて，肘関節の屈伸によって得られた速度は伸展運動によるものである。

EPIr 局面における手関節の掌背屈によって得られた速度は掌屈運動によるものであり，Max.RBA 前後の手関節の橈尺屈による速度は尺屈運動によるものである。

このように，ボール速度漸増局面（EPIr 局面）では，上腕関節の左回旋および屈曲運動，肩関節の水平屈曲運動がボール速度の増大に大きく貢献し，ボール速度急増局面（LPIr 局面）では，肩関節の内旋運動，肘関節の伸展運動，手関節の掌屈運動および上腕関節の左回旋運動が大きく貢献していることがわかった。

Broer (1969)は，テニスボールを投げさせた時の身体各部分の貢献度を検討した結果，オーバーハンド投げによるボール速度の約 50%は身体のステップと回転によるものであり，残りの半分は肩，肘，手，指の運動によるものであると述べた。また，Toyoshima et al. (1974)は，動作を制限させて，100 g のボールを投げた場合の結果から，ボール速度の 53.1%がステップと身体の回転によって，残りの 46.9%は投球側の上肢の運動によるものであると報告した。

これらの研究と本研究とは，「貢献度」の定義そのものが異なるため，一概に比

較することはできない。しかし本研究では、特に肩関節の内旋運動 (34.1%)、手関節の掌屈運動 (17.7%)、肘関節の伸展運動 (15.2%)、肩関節の水平屈曲運動 (6.0%) および指節間関節の屈伸運動 (5.9%) の貢献度が大きかった (表 4.3)。これらのことから、Broer (1969)、Toyoshima et al. (1974)によって報告された投球腕による約半分の貢献度は、肩関節の内旋、手関節の掌屈、肘関節の伸展、肩関節の水平屈曲および指節間関節の屈伸運動が寄与しているものと考えられる。

(2) 上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール合成速度と水平速度の比較について

前節で述べた関節の回転運動によって得られたボール合成速度 (図 4.9) とボール水平速度 (図 4.12) の変化は、踏出脚の接地時から Max.RBA (Max.HBA)時までの肩関節の外旋によって得られた速度を除き、ほぼ類似するパターンであった。

ボール速度急増局面 (LPIr および LPIh 局面) において、ボール合成速度と水平速度のパターンが類似する理由は、本研究の試技の課題が水平方向へのボール投げであったため、投球動作の最終局面ではボールの合成速度ベクトルと水平速度ベクトルの方向がほぼ一致するためと考えられる。

(3) 先行研究との比較

Vaughn (1985)の報告によると、リリース時において、手関節の投球方向速度 (17.8 m/s) に対する肩関節の内旋運動によって得られた速度が 9.8 m/s (54.9%) であった。一方、本研究では、肩関節の内旋運動によって得られたボール水平速度は 9.69 m/s (33.0%) であり、Vaughn (1985)のものと比べると、貢献度において約 22.0%も小さかった (表 4.4, 図 4.14)。

そこで、手関節の水平速度 (15.4 ± 1.0 m/s) に対する肩関節の内旋運動によって得られた水平速度の貢献度を求めたところ、リリース時では 62.9%と大きくなり、双

方の研究の貢献度の差が顕著に小さくなった。

したがって、Vaughn (1985)と本研究の肩関節の内旋運動の貢献度の相違は、内旋運動によって得られた水平速度をボールに対して求めるかあるいは手首に対して求めるかの違いによって生じたものであると言える。

このように、肩関節の内旋運動の貢献度はボール水平速度に対してよりも手関節のものの方が顕著に大きかったこと、また、手関節の掌屈および指節間関節の屈伸運動による水平速度の貢献度は約 23%であったこと（表 4.4）などから、リリース直前の局面では、手首から先の手指部の運動がボール水平速度に大きく関与しているものと推察される。

野球の投球動作において、肩関節の内旋および肘関節の伸展運動の重要性は多くの研究者によって指摘されている (Tarbell, 1971; Plagenhoef, 1971; Roberts, 1971; Atwater, 1977, 1979; 石井と斉藤, 1982; Vaughn, 1985; Elliott et al., 1985, 1986; Feltner and Dapena, 1986; Gibson and Elliott, 1987; Feltner, 1989; 淵本ら, 1985; Kreighbaum and Barthels, 1990; 桜井ら, 1990; Sakurai et al., 1993; 宮西ら, 1995)。

しかし、ボール速度に対するこれらの貢献度については定量的に明らかにされていない。本研究の結果から、リリース時において、肩関節の内旋および肘関節の伸展運動によって得られたボール合成速度への貢献度は約 49%、水平速度への貢献度は約 51%であることが明らかとなった（表 4.3, 表 4.4）。

以上のように、本研究では、従来の研究で行なわれてきたような投球腕の運動だけでなく、新たに上腕関節の運動をモデル化したことにより、上腕関節の左回旋および屈曲運動がボール速度に大きく貢献することが明らかとなった。

最後に、本研究によるボール速度「貢献度」の算出方法は、4.3.1 (1) および (3) で詳述したように、身体各部分に部分座標系を、そして各関節に関節座標系を定義することができれば、他の投動作や打撃動作、さらに走および跳動作などにも応用することが可能であろう。

4.6 小括

- ① ボール速度の測定値と計算値は、踏出脚の接地時からリリース時までよく一致し、本研究における関節運動によって得られたボール速度の算出法は妥当であるものと考えられた。
- ② 上腕関節の左回旋の角速度は、踏出脚の接地前から一定の大きさをリリース直前まで持続した。関節の角速度の増大は、肩関節の水平屈曲/外旋、肘関節の回外、肘関節の伸展/回内、手関節の背屈/尺屈、肩関節の内旋、手関節の掌屈の順に大きくなった。また、肩関節の水平屈曲および内旋、肘関節の回内および手関節の掌屈の角速度の増大は、それぞれ肩関節の水平伸展および外旋、肘関節の回外および手関節の背屈の角速度の増大に引き続いて生じた。
- ③ ボール速度漸増局面（EPI局面）では、上腕関節の左回旋および屈曲運動、肩関節の水平屈曲運動がボール速度の増大に大きく貢献した。ボール速度急増局面（LPI局面）では、肩関節の内旋運動、肘関節の伸展運動、手関節の掌屈運動および上腕関節の左回旋運動が大きく貢献した。
- ④ 上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール合成速度とボール水平速度の変化は、肩関節の外旋運動によって得られた速度を除いて、ほぼ同様なパターンを示した。
- ⑤ 上腕および投球腕各関節の回転運動によって得られたボール合成速度（水平速度）の「貢献度」は、リリース時において、投球腕の関節運動が80.8%（80.4%）であり、上腕関節が18.2%（18.4%）、上腕下端の運動が1.0%（1.2%）であった。ボール合成速度では、このうち肩関節の内旋運動が34.1%で最も大きく、以下、手関節の掌屈運動が17.7%、肘関節の伸展運動が15.2%、上腕関節の左回旋運動が9.6%であった。また、ボール水平速度では、肩関節の内旋運動が33.0%で最も大きく、以下、肘関節の伸展運動が18.2%、手関節の掌屈運動が17.6%、上腕関節の左回旋運動が9.7%であった。

本章では、スピード投（速投）において、ボール速度そのものが上腕および投球腕各関節のどのような回転運動に起因しているかを「貢献度」を手がかりに運動学的観点から明らかにした。その結果、ボール速度漸増局面では主として上腕の左回旋および屈曲、肩の水平屈曲運動による貢献が大きく、引き続き速度急増局面では肩の内旋、肘の伸展および手の掌屈運動による貢献が大きかった。これらの関節運動は、関節まわりの筋群によって発揮されたトルクなどによって生じたものである。したがって、上述の関節運動による貢献度の変化パターンは、合成関節トルクのそれと類似することが予想される。

また、ボール速度急増局面において、上腕の運動による貢献が減少すると同時に、投球腕各関節の貢献度が増大したのは、エネルギーなどが体幹から投球腕各部分へ伝達されていることを示すものであると推察される。

これらのことについては、上腕や投球腕各部分（関節）における合成関節トルクや力学的エネルギーフロー（流れ）などの動力学量を算出し検証する必要があるであろう。

したがって、次章では、上腕および投球腕各部分（関節）における合成関節トルク、力学的エネルギー、力学的エネルギーフロー、力学的仕事などを算出し、速投のメカニズムについて動力的観点からさらに検討を加える。

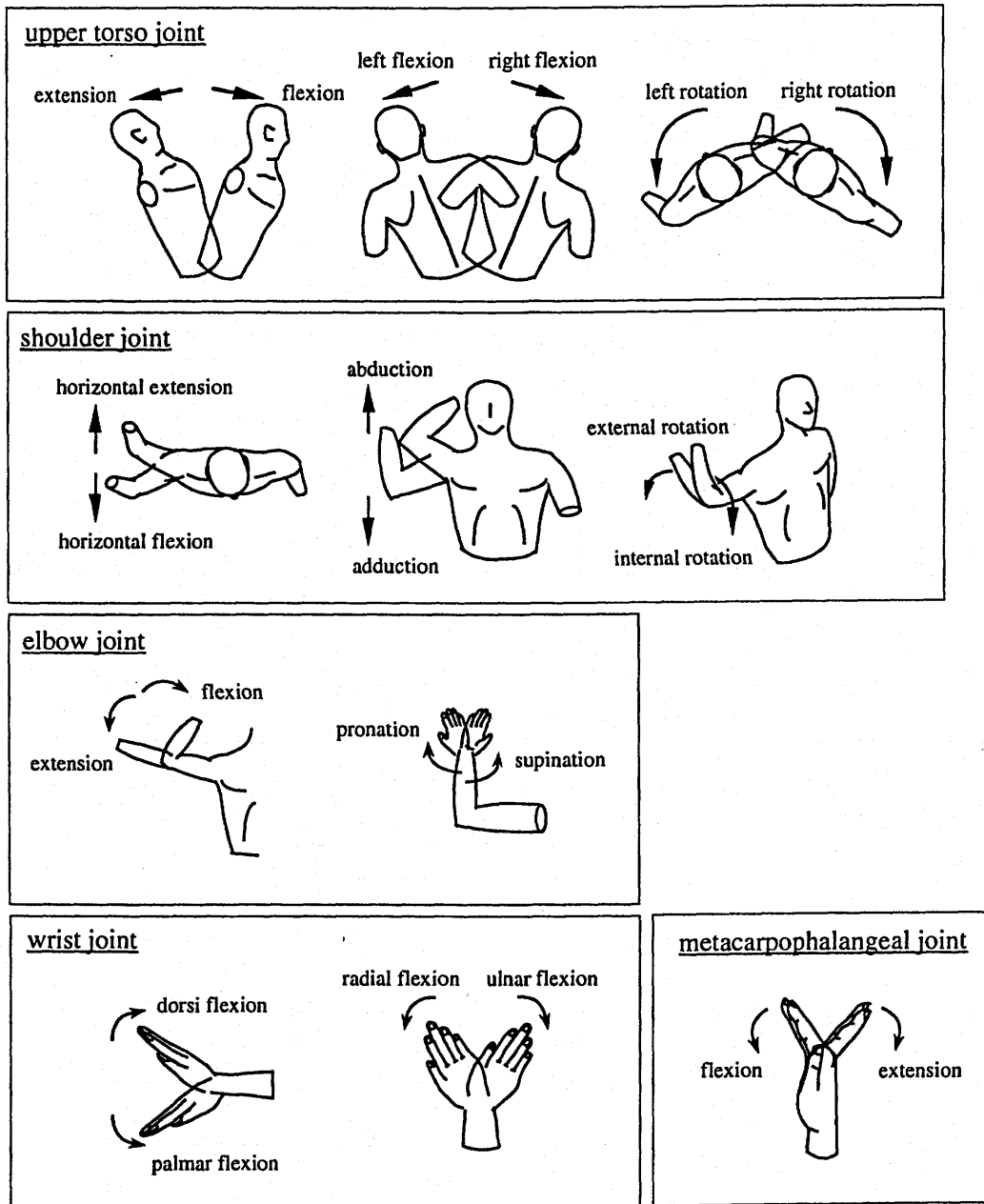


Figure 4.1

Anatomical joint rotations at the upper torso, shoulder, elbow, wrist and metacarpophalangeal joints.

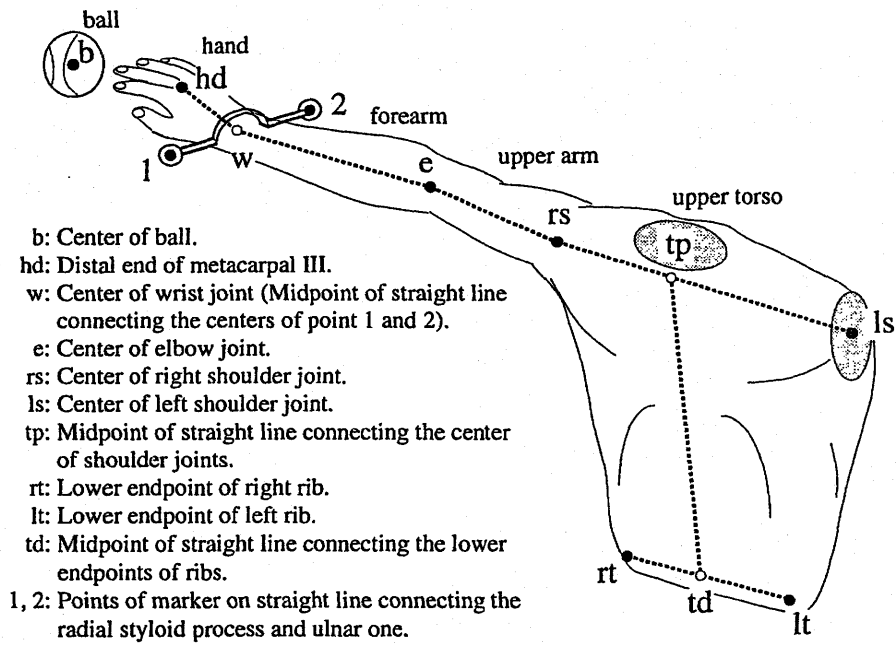


Figure 4.2

Digitized points (●) on the upper torso, upper arm, forearm, hand of throwing arm and ball.

Nomenclature

V_a	linear velocity vector of point a in global coordinate system.
$V_{a/b}$	relative linear velocity vector of point a to point b in global coordinate system.
$r_{a/b}$	relative displacement vector of point a to point b.
ω_a	angular velocity vector of segment a in global coordinate system.
$\omega_{a/b}$	relative angular velocity vector of segment a to segment b in global coordinate system.
$\omega_{(a)j}$ or $\omega_{(a/b)j}$	anatomical angular velocity vector of segment a (or segment a to segment b) along with the axis of the joint coordinate system fixed at joint center in global coordinate system, where $j = x, y, z$ component in joint coordinate system.
i_i, j_i, k_i	unit vectors along with each axis at the segment / joint coordinate systems (see, Figure 4.3 and Figure 4.4), where $i =$ (upper torso) ut / (upper torso joint) utj, (upper arm) ua / (shoulder joint) sj, (forearm) fa / (elbow joint) ej and (hand) h / (wrist joint) wj.
*	product
·	scalar product
×	vector product

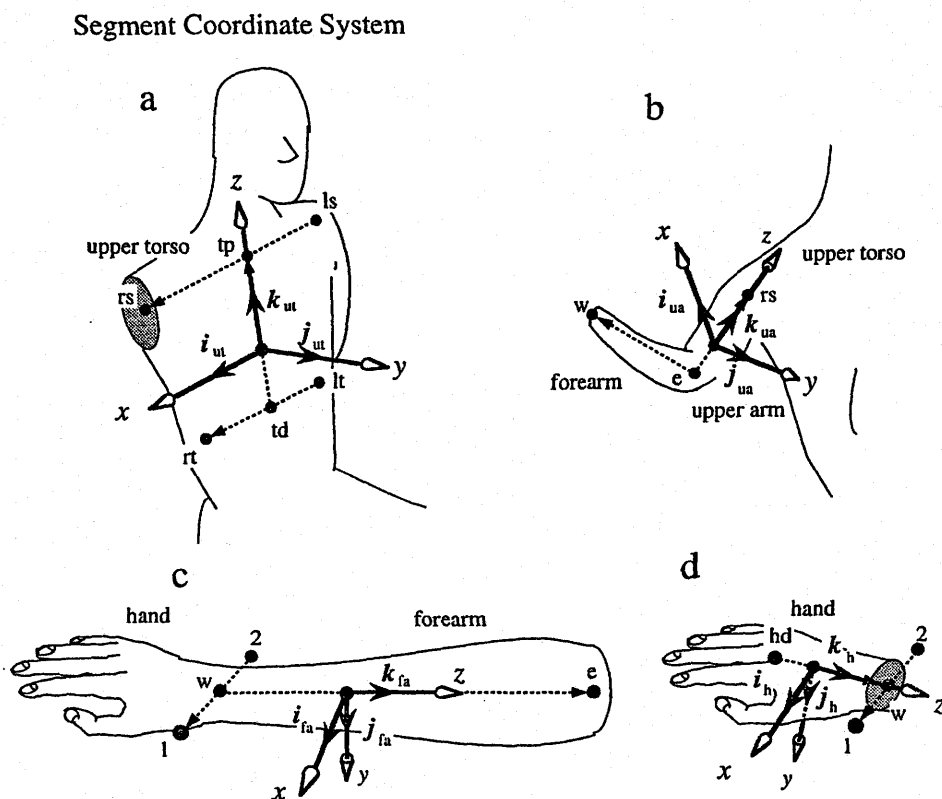


Figure 4.3

Definitions of the segment coordinate systems (right hand orthogonal moving system) fixed at the (a) upper torso, (b) upper arm, (c) forearm and (d) hand segments to calculate the angular velocity of each segment. Symbols i, j, k are unit vectors along each axis in the segment coordinate systems.

Joint Coordinate System

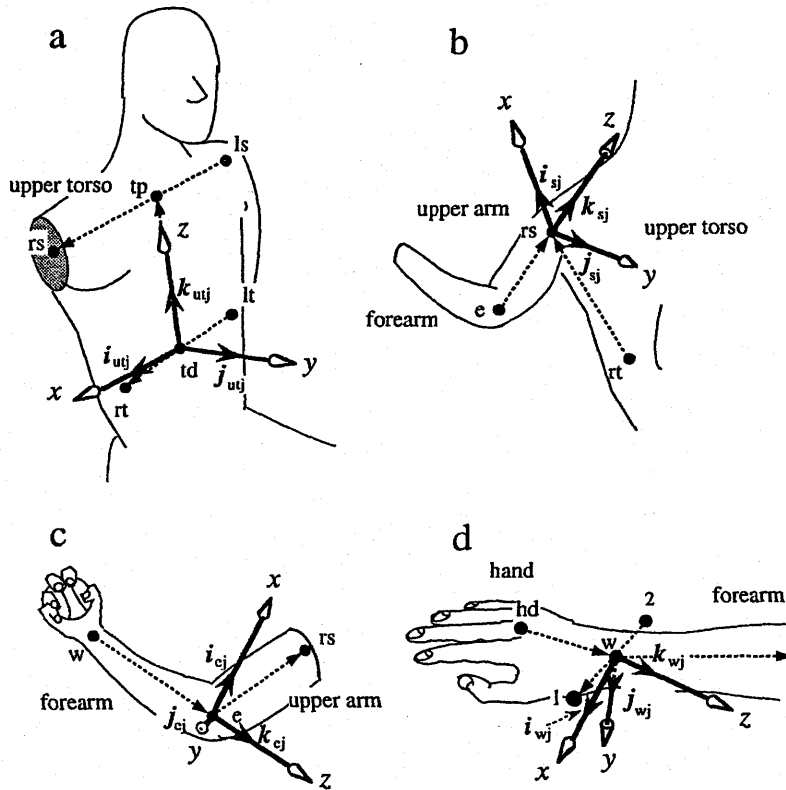


Figure 4.4

Definitions of the joint coordinate systems (right hand orthogonal moving system) fixed at the centers of the (a) upper torso, (b) shoulder, (c) elbow and (d) wrist joints to express the anatomical joint rotations. Symbols i, j, k are unit vectors along each axis in the joint coordinate systems.

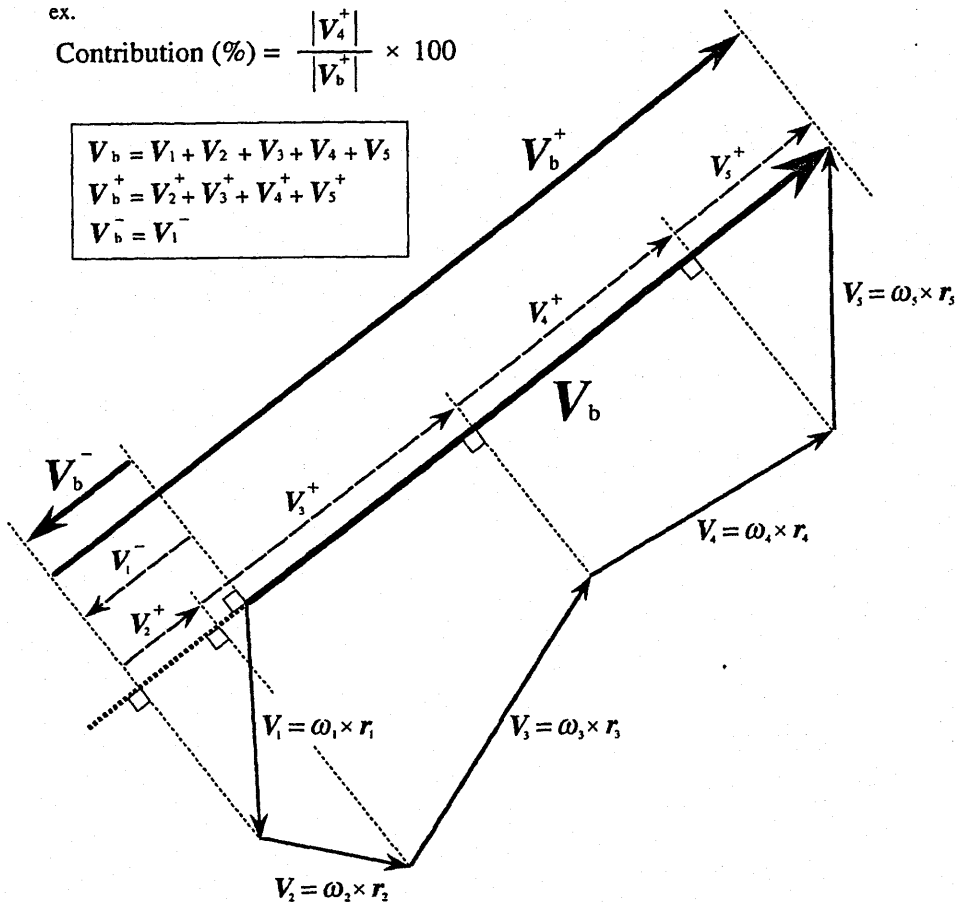


Figure 4.5

Schema of the calculation for the contribution. The contribution was defined as the ratio of the positive velocities (V_2^+ , V_3^+ , V_4^+ and V_5^+) obtained from the motions to the sum of all positive velocities (V_b^+). V_b , calculated ball velocity, was computed by summing the velocities (V_1 , V_2 , V_3 , V_4 and V_5) obtained from the motions.

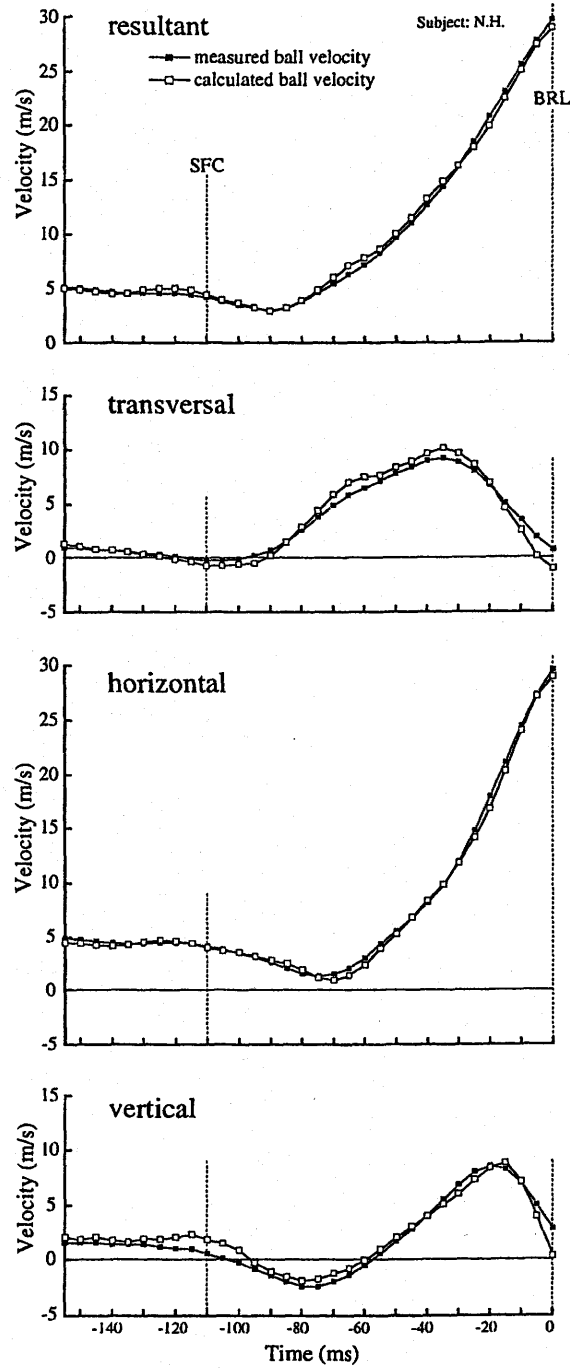


Figure 4.6

Comparison between the measured and calculated ball velocities. The measured ball velocities were obtained by digitizing motion pictures. SFC: the instant of stride foot contact; BRL: the instant of ball release.

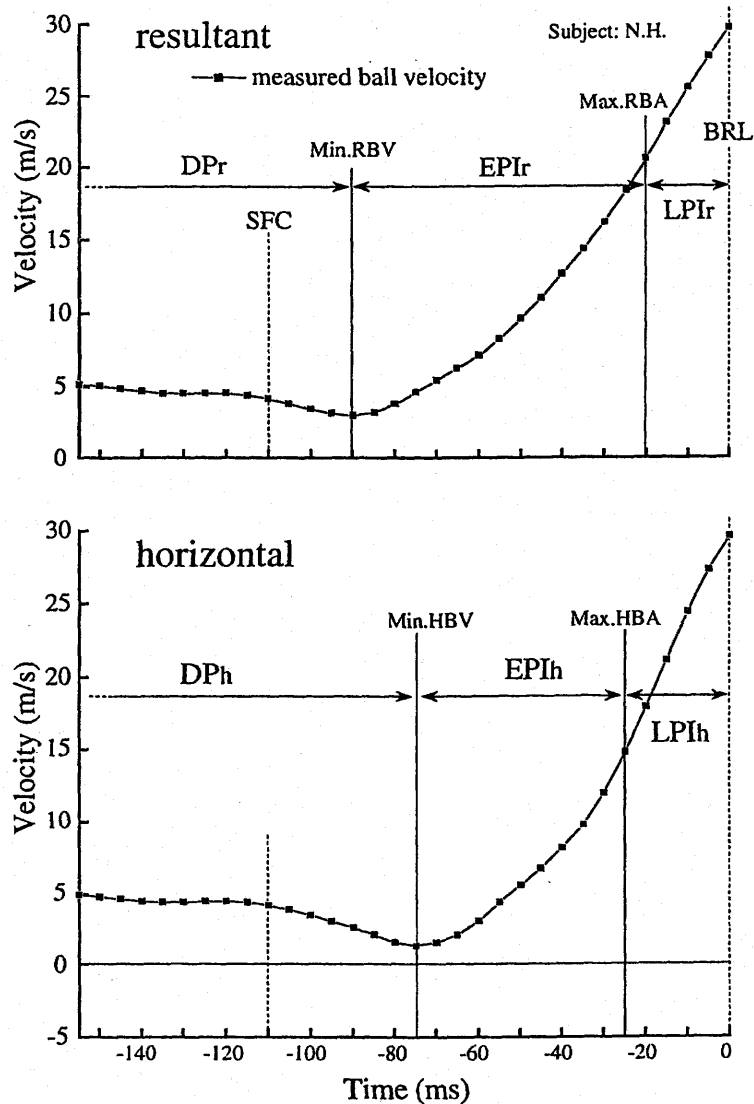


Figure 4.7

Changes of resultant and horizontal ball velocities in the subject N.H.

SFC: the instant of stride foot contact; BRL: the instant of ball release.

In the upper graph, DPr: decreasing phase in the resultant ball velocity; EPIr: early phase of increase in the resultant ball velocity; LPIr: late phase of increase in the resultant ball velocity; Min.RBV: the instant of minimum resultant ball velocity; Max.RBA: the instant of maximum rate of change in the resultant ball acceleration.

In the lower graph, DPh: decreasing phase in the horizontal ball velocity; EPIh: early phase of increase in the horizontal ball velocity; LPIh: late phase of increase in the horizontal ball velocity; Min.HBV: the instant of minimum horizontal ball velocity; Max.HBA: the instant of maximum rate of change in the horizontal ball acceleration.

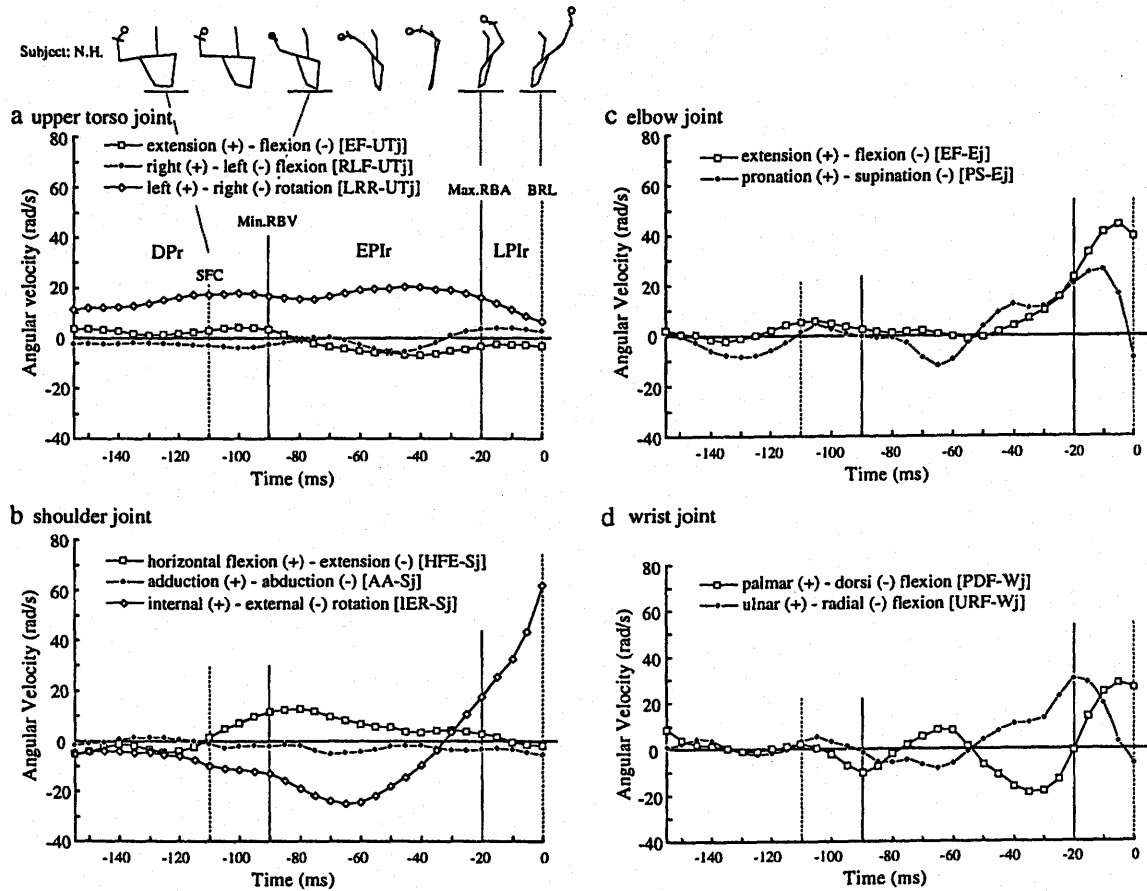


Figure 4.8

Changes in the anatomical angular velocities in the (a) upper torso, (b) shoulder, (c) elbow and (d) wrist joint. For abbreviation, see Figure 4.7.

Table 4.1

Maximum values of joint angular velocities and their appearance times in the upper torso, shoulder, elbow and wrist joint from the SFC until approximately 50 ms after the BRL.

Joint rotation	n = 24	
	Maximum Mean (S.D.) rad/s	Time Mean (S.D.) ms
upper torso j.		
[extension	2.1 (1.5)	-95 (62)
[flexion	7.8 (1.3)	-33 (31)
[right flexion	2.7 (1.4)	-16 (45)
[left flexion	6.3 (2.9)	-53 (33)
[left rotation	20.6 (2.0)	-69 (19)
[right rotation	4.9 (2.1)	0 (0)
shoulder j.		
[horizontal flexion	17.3 (3.5)	23 (28)
[horizontal extension	3.6 (2.8)	-70 (56)
[adduction	10.6 (2.4)	25 (43)
[abduction	9.4 (2.6)	-19 (36)
[internal rotation	92.5 (26.0)	10 (11)
[external rotation	40.5 (28.3)	-42 (58)
elbow j.		
[extension	38.5 (5.2)	-9 (4)
[flexion	12.4 (3.6)	8 (28)
[pronation	63.0 (27.4)	26 (12)
[supination	40.0 (27.0)	5 (39)
wrist j.		
[palmar flexion	40.5 (9.7)	0 (7)
[dorsi flexion	21.8 (5.9)	-17 (59)
[ulnar flexion	25.9 (8.2)	-19 (17)
[radial flexion	22.2 (8.5)	9 (17)

0ms: the instant of ball release
 -: before the instant of ball release
 + : after the instant of ball release

Table 4.2

Maximum values of joint angular velocities and their appearance times in the upper torso, shoulder, elbow and wrist joint from the SFC to the BRL.

Joint rotation	n = 24	
	Maximum Mean (S.D.) rad/s	Time Mean (S.D.) ms
upper torso j.		
┌ extension	2.0 (1.6)	-115 (18)
└ flexion	7.7 (1.4)	-40 (15)
┌ right flexion	2.4 (1.7)	-28 (32)
└ left flexion	6.3 (2.9)	-62 (15)
┌ left rotation	20.6 (2.0)	-69 (19)
└ right rotation	4.9 (2.1)	0 (0)
shoulder j.		
┌ horizontal flexion	11.4 (3.1)	-61 (27)
└ horizontal extension	3.5 (2.9)	-77 (50)
┌ adduction	5.4 (3.4)	-72 (34)
└ abduction	8.8 (2.4)	-27 (33)
┌ internal rotation	56.8 (22.9)	-1 (4)
└ external rotation	26.2 (6.0)	-76 (17)
elbow j.		
┌ extension	38.5 (5.2)	-9 (4)
└ flexion	5.0 (4.0)	-67 (20)
┌ pronation	25.1 (6.8)	-24 (14)
└ supination	16.5 (16.9)	-44 (47)
wrist j.		
┌ palmar flexion	39.3 (10.5)	-3 (4)
└ dorsi flexion	18.9 (6.4)	-65 (23)
┌ ulnar flexion	25.5 (8.7)	-24 (7)
└ radial flexion	17.7 (8.4)	-22 (39)

0ms: the instant of ball release

- : before the instant of ball release

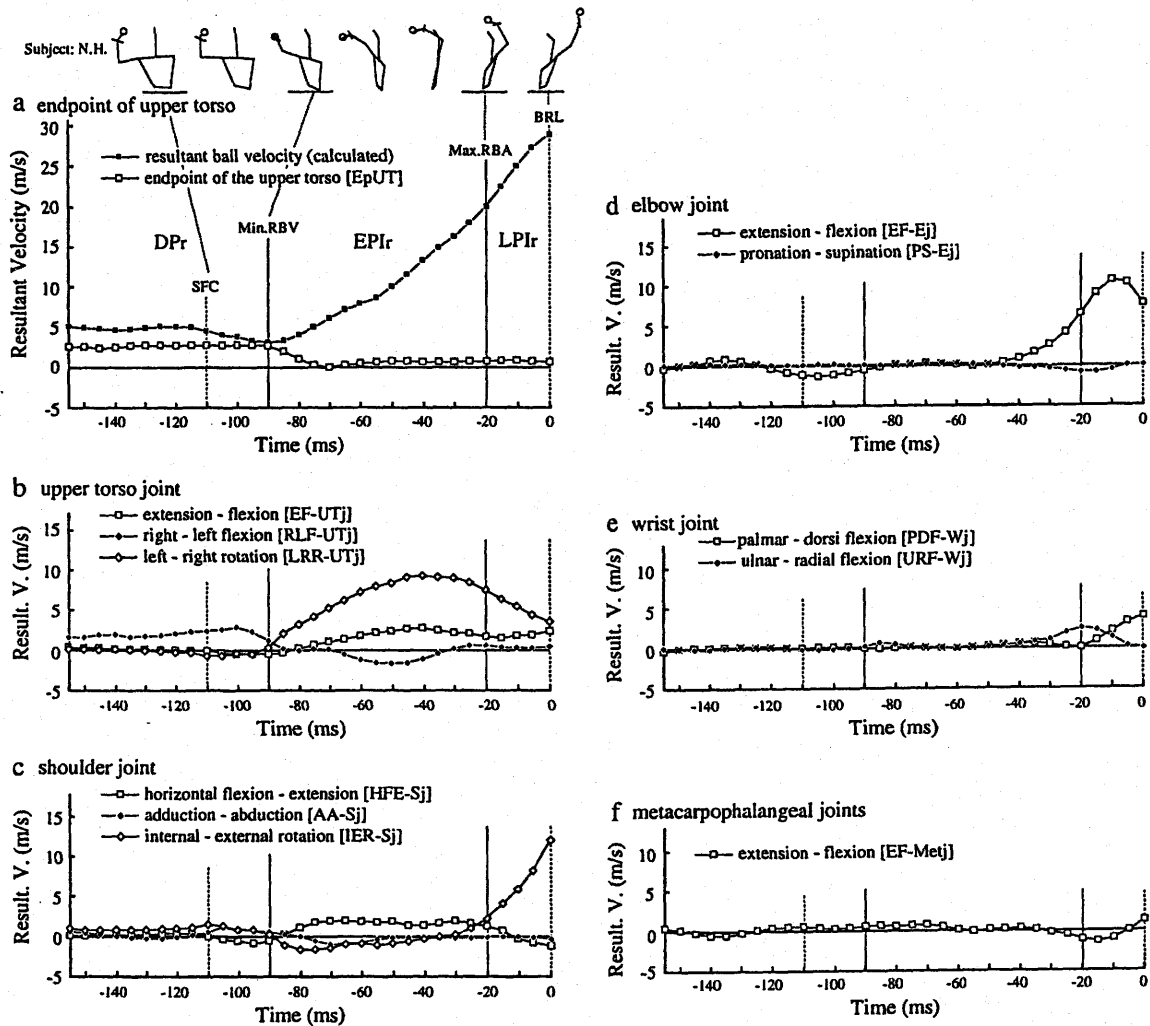


Figure 4.9

Changes in the resultant ball velocities obtained from the motions in the endpoint of upper torso and joints. For abbreviation, see Figure 4.7.

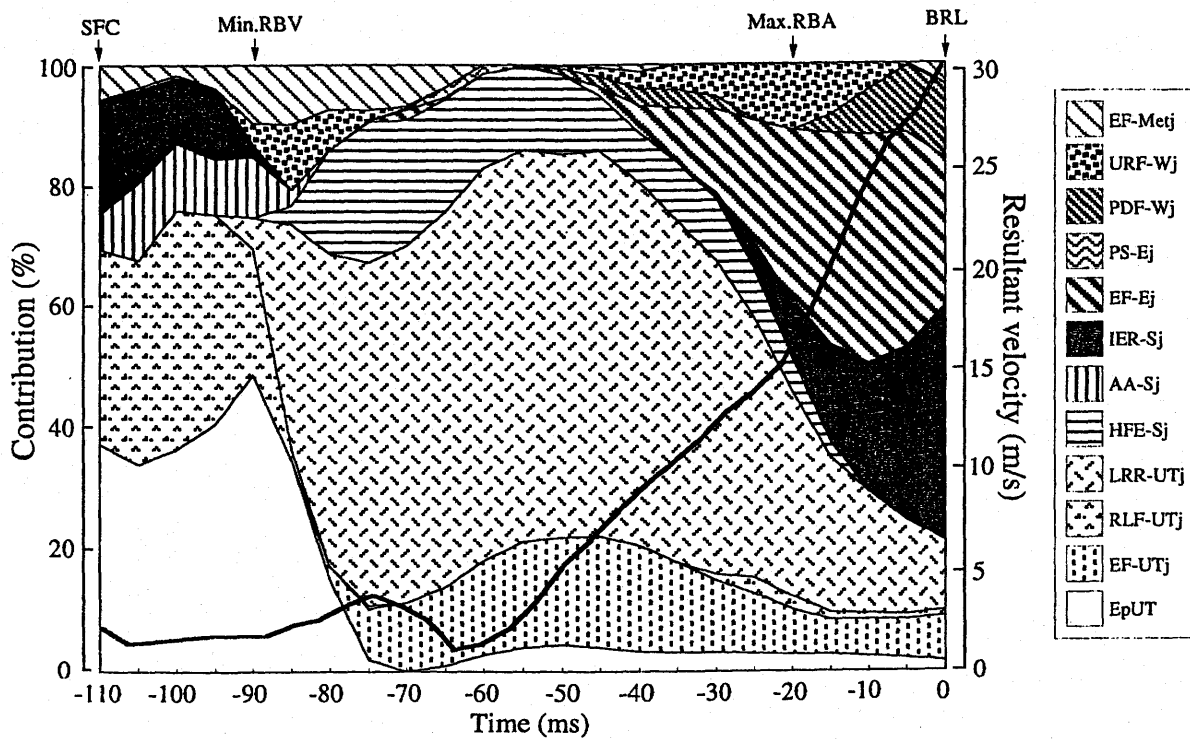


Figure 4.10

Changes in the contributions of the resultant ball velocities obtained from the motions in the endpoint of upper torso and joints for the subject N.H. Bold line in the figure is the summation of positive resultant ball velocity. For abbreviation, see Figure 4.7 and Figure 4.9.

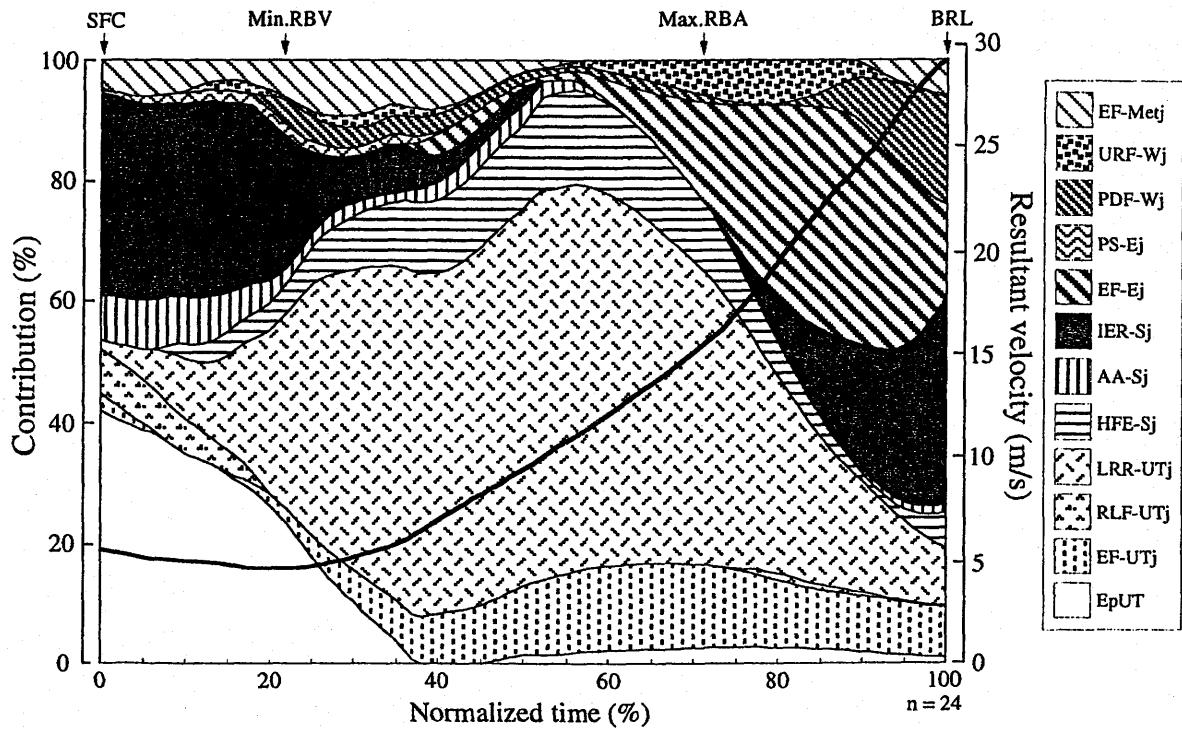


Figure 4.11

Changes in the contributions of the normalized resultant ball velocities obtained from the motions in the endpoint of upper torso and joints. Bold line in the figure is the summation of positive resultant ball velocity. For abbreviation of the motions, see Figure 4.9.

Table 4.3

Resultant velocities and its positive contribution of the motions to the resultant ball velocity calculated at SFC and BRL. For abbreviation of the motions, see Figure 4.9.

n = 24						
Resultant Velocity						
SFC			BRL			
	Mean (S.D.) (m/s)		Mean (S.D.) (m/s)			
BV	4.92 (2.0)		29.20 (2.0)			
	positive		negative		negative	
	Mean (S.D.)	contri-	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	contri-	Mean (S.D.)
	(m/s)	bution	(m/s)	(m/s)	bution	(m/s)
	(m/s)	(%)	(m/s)	(m/s)	(%)	(m/s)
p/n-BV	5.54 (0.9)		-0.62 (0.2)	29.44 (3.0)		-0.24 (0.9)
EpUT	2.33 (0.8)	42.1	-	0.30 (0.3)	1.0	-
EF-UTj	0.16 (0.5)	2.8	-	2.48 (1.1)	8.4	-
RLF-UTj	0.40 (0.9)	7.2	-	0.06 (0.3)	0.2	-
LRR-UTj	0.09 (1.9)	1.6	-	2.84 (1.3)	9.6	-
HFE-Sj	-	-	-0.11 (0.6)	1.76 (2.2)	6.0	-
AA-Sj	0.41 (0.8)	7.4	-	0.40 (0.8)	1.4	-
IER-Sj	1.85 (1.8)	33.5	-	10.03 (3.8)	34.1	-
EF-Ej	-	-	-0.42 (1.0)	4.48 (2.4)	15.2	-
PS-Ej	0.02 (0.3)	0.4	-	-	-	-0.24 (0.9)
PDF-Wj	-	-	-0.08 (0.7)	5.20 (1.5)	17.7	-
URF-Wj	0.02 (0.4)	0.3	-	0.16 (0.4)	0.5	-
EF-Metj	0.27 (0.5)	4.8	-	1.74 (1.5)	5.9	-

BV: calculated ball velocity.

p/n-BV: a sum of positive / negative ball velocities obtained from individual motions.

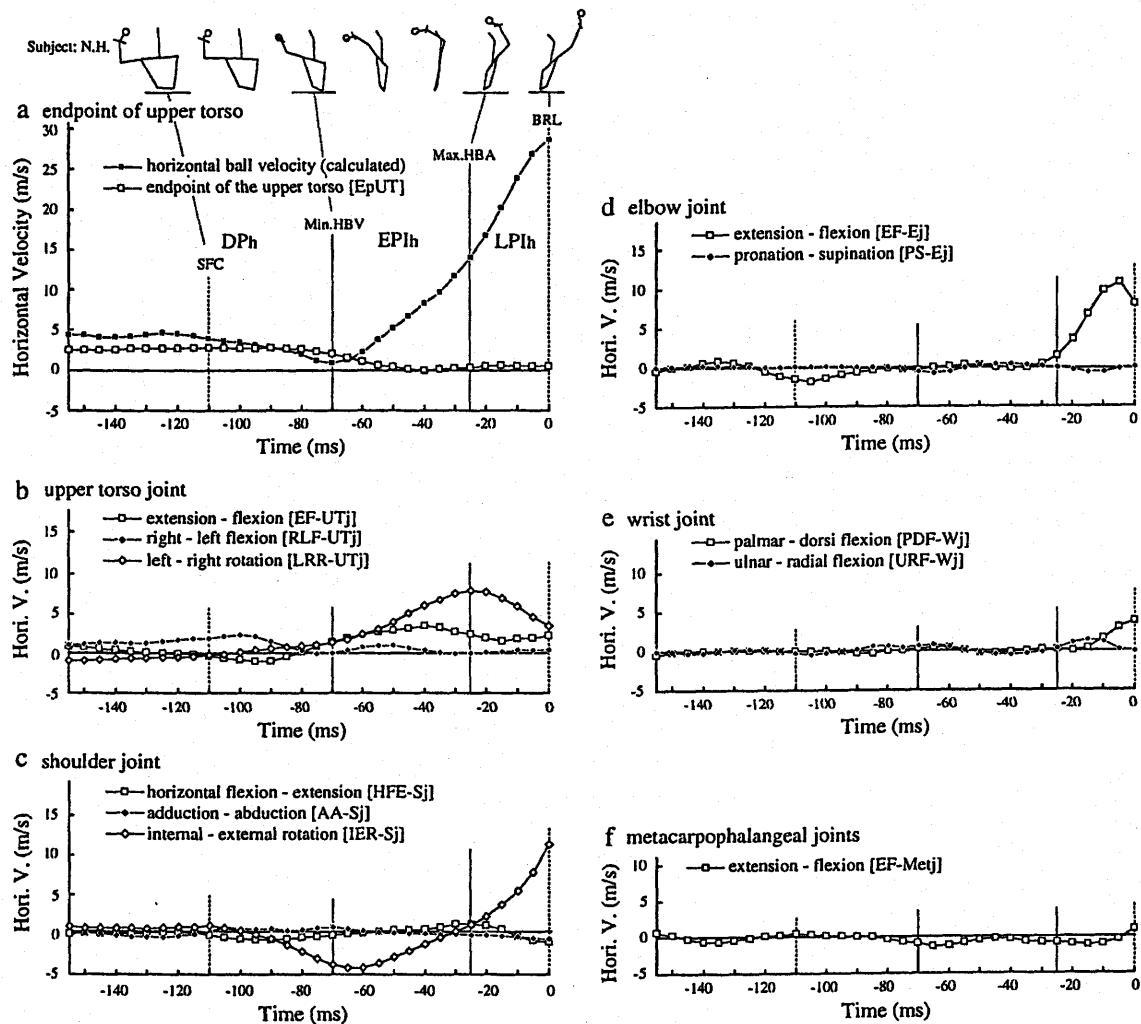


Figure 4.12

Changes in the horizontal ball velocities obtained from the motions in the endpoint of upper torso and joints. For abbreviation, see Figure 4.7.

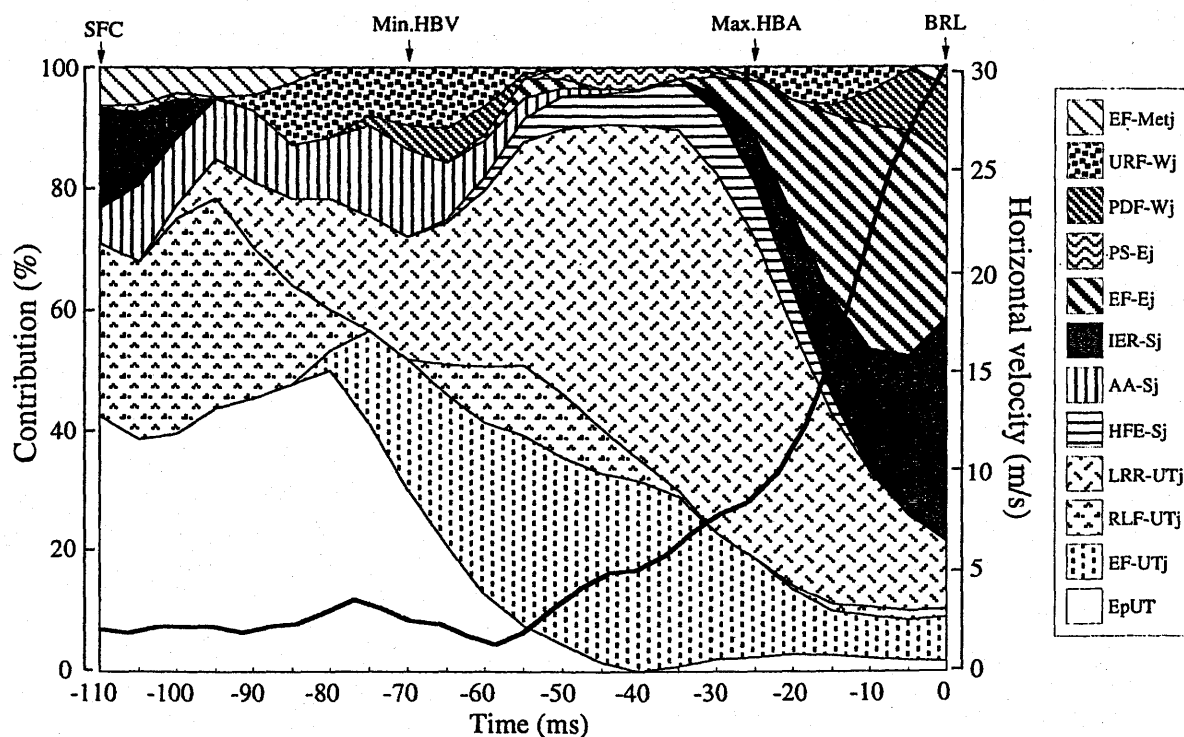


Figure 4.13

Changes in the contributions of the horizontal ball velocities obtained from the motions in the endpoint of upper torso and joints for the subject N.H. Bold line in the figure is the summation of positive horizontal ball velocity. For abbreviation, see Figure 4.7 and Figure 4.12.

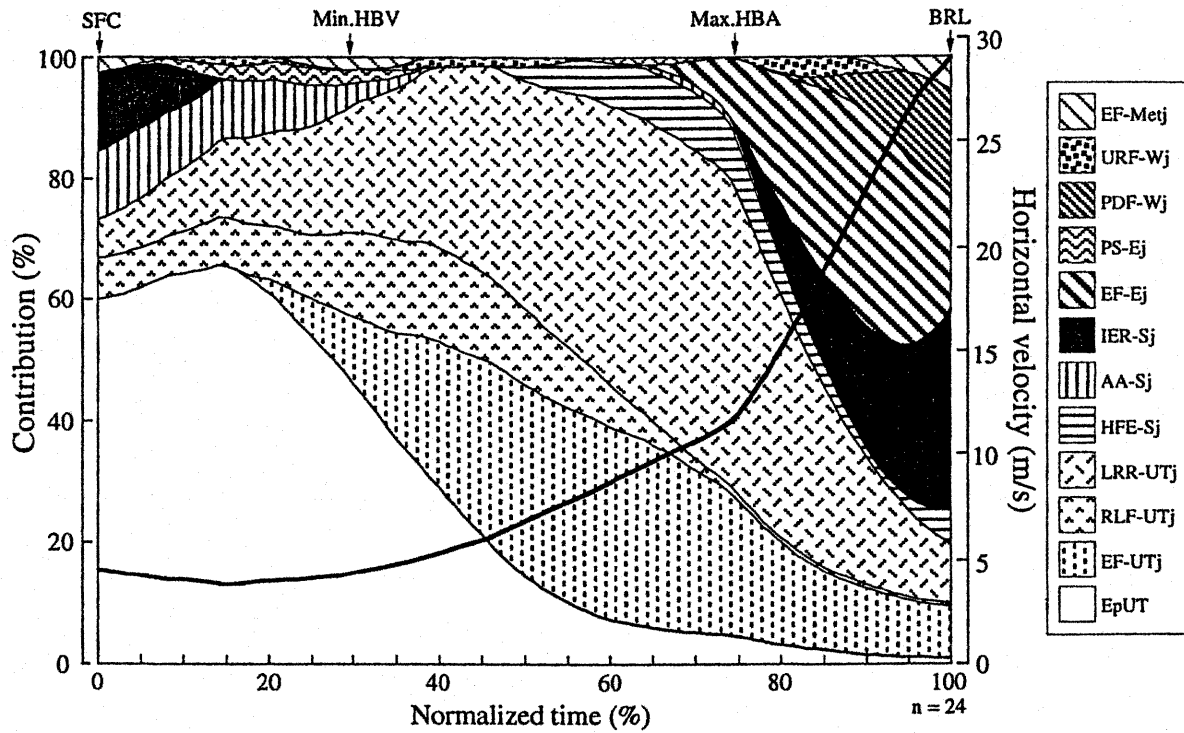


Figure 4.14

Changes in the contributions of the normalized horizontal ball velocities obtained from the motions in the endpoint of upper torso and joints. Bold line in the figure is the summation of positive horizontal ball velocity. For abbreviation of the motions, see Figure 4.12.

Table 4.4

Horizontal velocities and its positive contribution of the motions to the horizontal ball velocity calculated at SFC and BRL. For abbreviation of the motions, see Figure 4.12.

n = 24						
Horizontal Velocity						
	SFC			BRL		
	Mean (S.D.) (m/s)			Mean (S.D.) (m/s)		
BV	3.99 (1.8)			29.01 (1.9)		
	positive		negative	positive		negative
	Mean (S.D.)	contri-	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	contri-	Mean (S.D.)
	(m/s)	bution	(m/s)	(m/s)	bution	(m/s)
	(m/s)	(%)	(m/s)	(m/s)	(%)	(m/s)
p/n-BV	4.91 (1.0)		-0.93 (0.3)	29.32 (3.0)		-0.31 (0.1)
EpUT	2.95 (0.3)	60.0	-	0.32 (0.3)	1.2	-
EF-UTj	-	-	-0.02 (0.2)	2.45 (1.0)	8.3	-
RLF-UTj	0.33 (0.9)	6.8	-	0.13 (0.2)	0.4	-
LRR-UTj	0.31 (1.0)	6.4	-	2.83 (1.3)	9.7	-
HFE-Sj	-	-	-0.10 (0.5)	1.73 (2.1)	5.9	-
AA-Sj	0.55 (0.9)	11.2	-	0.05 (0.7)	0.2	-
IER-Sj	0.64 (0.8)	13.0	-	9.69 (3.7)	33.0	-
EF-Ej	-	-	-0.65 (1.3)	5.34 (2.4)	18.2	-
PS-Ej	-	-	-0.04 (0.2)	-	-	-0.24 (0.9)
PDF-Wj	-	-	-0.12 (0.3)	5.17 (1.5)	17.6	-
URF-Wj	0.00 (0.5)	0.1	-	-	-	-0.07 (0.2)
EF-Metj	0.13 (0.3)	2.6	-	1.62 (1.5)	5.5	-

BV: calculated ball velocity.

p/n-BV: a sum of positive / negative ball velocities obtained from individual motions.

第5章 速投動作の力学的研究－力学的エネルギーフロー －に着目して－

5.1 緒言

野球の投球動作の速投において、前章で「ボール速度貢献度」を手がかりに運動学的に検討したように、上腕の左回旋および屈曲、肩関節の水平屈曲および内旋、肘関節の伸展、手関節の掌屈、指節間関節の屈曲がボール速度に大きく貢献することがわかった。とりわけ、上腕の左回旋および屈曲、肩の水平屈曲運動はボール速度漸増局面において、肩の内旋、肘の伸展および手の掌屈運動はボール速度急増局面において大きく貢献した。

これらの関節運動は、関節まわりの筋群によって発揮されたトルクによって生じたものである。したがって、前章で明らかにした上腕および投球腕各関節運動による貢献度の変化は、これらの関節の合成関節トルクの変化パターンと類似することが予想される。

また、ボール速度の貢献度において、ボール速度急増局面では、上腕の運動による貢献が減少し、逆に投球腕各関節の貢献度が増大した。これらのことは、力学的エネルギーが体幹から投球腕各部分へ伝達されていることを示すものであると推察される。

先行研究において、Jöris et al. (1985) は、2次元映画解析法を用いて、女子ハンドボール選手のシュート動作を分析し、ボールに対して発揮されたパワーや仕事などを算出した。しかし、彼らは投球腕各部分の関節力パワーや関節トルクパワーそのものを算出していないため、この研究は示唆的な見解に留まっているものに過ぎない。

また、これまでに、野球の投球動作における身体各部分の力学的エネルギー、力学的エネルギーフローおよび力学的仕事を明らかにした研究は見当たらない。したがって、野球の投球動作はエネルギー論の観点から解明されていない。

本章の目的は、速投における上腕および投球腕各部分の力学的エネルギー、力学的

エネルギーフローおよび力学的仕事を明らかにし、さらに力学的仕事を関節の解剖学的な回転運動として評価して、上腕および投球腕の運動のメカニズムについて動力学の観点から検討を行なうことである。

5. 2 研究方法

5. 2. 1 被験者

被験者は、3. 2. 1で述べた被験者と同一である。

5. 2. 2 投球動作の実験および解析方法

(1) 投球動作の撮影

投球動作の撮影は、3. 2. 2. (2)で述べたことと同一である。

図 5.1 は、本研究で使用したボールおよび身体各部位の計測点の位置を示したものである。本研究では、体幹を点 rt と点 lt を境に上腕と下腕に分け、下腕および下肢を分析の対象から除外した。

(2) 分析試技の選定

分析試技として、3. 2. 2. (2)で述べた速投動作を選定した。

(3) 残差分析法による座標データの最適遮断周波数

本研究で用いた計測点の最適遮断周波数の範囲は、4. 2. 2 (3)で述べたことと同一であった。これらの最適遮断周波数を用いて、計測点の座標データを4次のバターワース型のローパスデジタルフィルタにより平滑化した (Winter, 1990)。

これらの平滑化された計測点の3次元座標値を用いて、次節で述べる各種力学量の算出を行なった。

5.3 データの算出方法

5.3.1 「力学的エネルギーフロー」の意味

力学の原理によれば、力学的エネルギーの変化率は、力学的パワーを意味する。剛体リンクモデルを用いた分析では、部分の力学的エネルギーは、瞬時的にみれば、図5.2に示されているように隣接部分からその部分へ関節を介して伝達（流入）されるパワー（近位端・遠位端の関節力パワー； P_{jp} と P_{jd} ）と関節まわりの筋群によって伝達（流入）されるパワー（近位端・遠位端の関節トルクパワー； P_{mp} と P_{md} ）の総和である (Winter, 1990).

ところで、筋・腱には上述のパワーの伝達 transferに加えて、さらに発生 generation と吸収 absorption の機能がある (Winter, 1990). 図5.3は、これらの (a) 筋・腱および (b) 関節によるパワーの機能を概念的に示したものである。なお、矢印の大小がパワーの大きさに相当するものとする。以下、これらの機能を説明する。

まず、(a) 筋・腱に着目してみると、図5.3 (a) -1 はパワーの伝達のみを示したものであり、部分1から流出したパワーと等しい大きさのパワーが部分2へ流入することを示している。このような状況は、例えば、筋が収縮するにもかかわらず、関節角度に変化が生じない場合、すなわち、筋が等尺性収縮を行なう場合に相当する。

図5.3 (a) -2 は、図5.3 (a) -1 と同様に部分1から部分2へパワーが伝達されるが、さらにパワーが伝達される過程で筋によってパワーが発生し、部分1から流出したパワーよりも大きいパワーが部分2へ流入することを示している。この例としては、関節角度が減少する、すなわち、筋が短縮性収縮を行なう場合に相当する。

図5.3 (a) -3 は、同様にパワーが部分1から部分2へ伝達されるが、図5.3 (a) -2 と異なり部分1から流出したパワーが筋によって吸収されることを示している。したがって、部分2へは部分1から流出したパワーよりも小さいパワーしか流入しないことを示している。このような状況は、関節角度が増大する、すなわち、筋が伸張性収縮を行なう場合に相当する。

一方、関節（可動連結部）に着目すると、図 5.3 (b) は、部分 1 から流出したパワーそのものが部分 2 へ流入することを示している。このように、関節では、パワーの発生はなく、また吸収はないものと仮定し、伝達が行なわれるのみだけである。

なお、Robertson and Winter (1980) は、このような筋・腱によるパワーの発生、吸収および伝達の機能を表 5.1 のようにまとめている。

以上のことから、「力学的エネルギーフロー（流れ）」とは、関節および筋・腱を介して伝達されるパワー（近位端・遠位端の関節力パワーおよび関節トルクパワー）と筋・腱によって発生・吸収されるパワー（関節の関節トルクパワー）の動態そのものを意味する。

5. 3. 2 力学的エネルギーフローの算出

本研究では、身体各部分を 8 つの剛体リンクモデル (Winter, 1990) として仮定した。すなわち、図 5.1 に示したように両側の上腕、前腕および手、そして頭部と上腕である。ただし、ボールは質点とみなし、ボールのリリース前はボールを手に含めてモデル化した。

先行研究 (Robertson and Winter, 1980; Winter, 1990) の算出方法に基づいて、上腕および投球腕各部分（関節）における合成関節力によるパワーおよび合成関節トルクによるパワーを算出した。以後、前者を「関節力パワー」、後者を「関節トルクパワー」と呼ぶ。

以下、具体的に各力学量の算出方法について述べる。ボールド体の記号はベクトル量を表す。Nomenclature に各記号の意味を示した。

(1) 力学的エネルギーの算出

部分の力学的エネルギー (ME) の算出は、式 [5.1] を用いて行なった。

$$ME_j = m_j g h_j + \frac{1}{2} m_j V_j^2 + \frac{1}{2} I_j \omega_j^2 \quad [5.1]$$

身体各部分の慣性特性係数，すなわち質量 (m)，質量中心位置 (CG) および主慣性モーメント (I_x, I_y, I_z) は，阿江ら (1992) が報告した係数を用いて各被験者毎に推定したものをを用いた．なお，付録B.1の表B.1に身体部分の質量および主慣性モーメントの全被験者の平均値 (S.D.) を示した．

各部分の慣性モーメントテンソル (I) は，先行文献 (広瀬, 1990) を参考にして，先行研究 (湯, 1995) に基づき導出した．なお，慣性モーメントテンソルの導出方法の詳細は付録B.2に，また式 [5.1] の右辺第3項の部分の重心まわりの回転運動エネルギーの算出法は付録B.3に示した．

(2) 合成関節力および合成関節トルクの算出

図5.4に，身体部分のフリーボディダイアグラムを模式的に示す．

左右の肩，肘および手関節，頸関節，上腕関節における合成関節力および合成関節トルクの算出は，図5.4に従い，各部分に対してニュートンの運動方程式を導出して行なった (Miller and Nelson, 1973; Andrews, 1974, 1982; Beer and Johnston, 1977b; 岩田編, 1982; Feltner and Dapena, 1986; Hibbeler, 1989b; 広瀬, 1990; Winter, 1990) ．

すなわち，以下に示すように，合成関節力 (RJF) は式 [5.2] を，合成関節トルク (RJT) は式 [5.3] を用いて算出した．

$$RJF_{j,j+1} = -m_j a_j + RJF_{j-1,j} - m_j g k \quad [5.2]$$

$$RJT_{j,j+1} = -M_j + RJT_{j-1,j} + r_{j,j+1} \times RJF_{j-1,j} - r_{j,j+1} \times RJF_{j,j+1} \quad [5.3]$$

ただし，近位から遠位部分へ作用する方向を正とする．

式 [5.3] に示す部分の重心まわりに生じる外部トルク (M) は，先行研究 (湯, 1995) に基づき部分の重心まわりの角運動量を求め，それを時間微分することにより算出した．なお，付録B.4に部分の重心まわりの角運動量の算出法を示した．

また，上腕と投球腕における手，前腕および上腕の角速度の算出は，先行研究 (宮

西ら, 1996: 4. 3. 1 (1) 参照) に従って, 部分の重心に定義した直交運動座標系の各軸方向を示す単位ベクトルを時間微分して行なった. 他の部分, すなわち頭部と非投球腕の手, 前腕および上腕については, 新たにマーカーなどを取り付けて部分の長軸 (z 軸) まわりの角速度を算出することが困難であったため, 湯 (1995) の方法を用いて行なった (付録 A.3 参照). このようにして得られた部分の角速度を再度時間微分することにより, 部分の角加速度を求めた.

さらに, 算出された合成関節力および合成関節トルクを各被験者の全計測点 (X, Y, Z 成分座標値) の最適遮断周波数の平均値を用いて, 3点移動平均法により平滑化した. 全被験者の全計測点の最適遮断周波数の平均値は 13.6 ± 0.9 Hz であった.

本研究では, 前述したように剛体リンクモデルを用いているため, 算出された合成関節トルク値そのものは, 主働筋群と拮抗筋群における個々の筋トルク (靭帯の張力, 軟部組織の抵抗力および関節の摩擦抵抗力などによって生じるトルクを含む) をすべて足し合わせたものを示す. したがって, 例えば, 肘関節の屈曲トルク値は屈筋群のみだけの発揮によって発現したものとは限らないものである.

(3) 部分における近位端/遠位端の関節力パワーおよび関節トルクパワーの算出

部分に作用する近位端および遠位端の関節力パワーと関節トルクパワーの算出は, 以下の式を用いて行なった. すなわち, 部分 j へ作用する (近位端の) 関節力パワー (JFP) および関節トルクパワー (JTP) は, それぞれ式 [5.4] および [5.5] を用いて求めた.

$$JFP_{j-1,j} = R J F_{j-1,j} \cdot V_i \quad [5.4]$$

$$JTP_{j-1,j} = R J T_{j-1,j} \cdot \omega \quad [5.5]$$

また, 部分 $j-1$ へ作用する (遠位端の) 関節力パワーは式 [5.4] の右辺にマイナス (-) を乗じて, 関節トルクパワーは式 [5.6] により求めた.

$$JTP_{j,j-1} = - R J T_{j-1,j} \cdot \omega_{j-1} \quad [5.6]$$

このパワーの正は部分へのエネルギーの流入を、負は部分からの流出を意味する。

(4) 関節における関節トルクパワーの算出

さらに、式 [5.7] により、合成関節トルクと関節角速度を乗じて、投球腕の手、肘および肩関節における関節トルクパワー (JTP_m) を算出した。

$$JTP_{m_i} = RJT_{j-1,j} (\omega_j - \omega_{j-1}) \quad [5.7]$$

ここで、 $(\omega_j - \omega_{j-1})$ は関節角速度を示す。このパワーの正は発生（短縮的収縮）を、負は吸収（伸張的収縮）を意味する。

なお、本研究では、前項の式 [5.5] および [5.6] を用いて算出した部分の近位端および遠位端の関節トルクパワー（近位端／遠位端の関節トルクパワーと呼ぶ）と区別するため、式 [5.7] を用いて求めた関節トルクパワーを単に（関節における）関節トルクパワーと呼ぶ。

(5) 力学的仕事の算出

力学的仕事 (W) の算出は、式 [5.8] を用いて行なった。すなわち、前項の式 [5.7] を用いて算出した関節トルクパワー (JTP_m) を各局面毎で時間積分することにより行なった。

$$W_i = \int |JTP_{m_i}| dt \quad [5.8]$$

各局面とは、踏出脚の接地時 (SFC) から肩関節の最大外旋角度時 (MaxER) までの局面 (EA 局面) と MaxER からリリース時 (BRL) までの局面 (LA 局面) の 2 つである。

また、これらの局面における力学的仕事をその符号に着目し、正仕事 (W_p)、負仕事 (W_n) および両者の絶対値の和である絶対仕事 (W_{ab}) に分けて求めた。

肩関節の外旋角度の算出は、宮西ら (1995) の方法に基づき行なった。

(6) 関節の回転運動で表された関節トルクパワーと力学的仕事の算出

本研究ではまた、先行研究(宮西ら, 1996: 4. 3. 1 (3) 参照)に従い、投球腕の各関節中心に関節座標系を定義し、これらの座標系における座標変換行列(和達, 1983; 広瀬, 1990)を利用して、前節で求めた関節の関節トルクパワー($JTPm$)を関節の解剖学的回転運動を表すパワーとして評価した。

例えば、手関節では、手関節の合成関節トルク、手および前腕の角速度を手関節の座標変換行列を用いて手関節座標系へ変換した後、合成関節トルクと関節角速度を乗じて関節トルクパワーを求めた。同様にして、肘関節および肩関節の関節トルクパワーを求めた。

またさらに、これらの関節トルクパワーを、前節で述べた方法と同様に各局面毎で時間積分することにより、力学的仕事を算出した。

なお、上腕および投球腕各関節の回転運動とは、指節間関節の屈伸運動を除いた、関節運動である(図 4.1)。また本研究では、関節座標系の各運動軸(図 4.4)において、 x 軸および y 軸方向の力はともに剪断力(単に力) shear force と呼称する。具体的に言えば、上腕関節の x 軸の正は右側方力、負は左側方力、 y 軸の正は前方力、負は後方力とし、肩関節の x 軸の正は上方力、負は下方力、 y 軸の正は前方力、負は後方力とし、肘関節の x 軸の正は前方力、負は後方力、 y 軸の正は内側力、負は外側力とし、手関節の x 軸の正は外側力、負は内側力、 y 軸の正は前方力、負は後方力とする。またいずれの関節においても、 z 軸の正は圧縮力 compression force, 負は離脱力 decompression force と呼ぶことにする。

5. 4 結果

5. 4. 1 力学的エネルギー

図 5.5 は、ボール、上腕、投球腕における手、前腕および上腕の力学的エネルギーの変化を示したものである。なお、以下の図のすべては、典型的な変化パターンを示

したうちの一人である被験者 N.H.のものである。被験者 N.H.の BRL のボール速度は 29.6 m/s であり、全体の平均値は 29.8 ± 2.0 m/s であった。表 5.2 には、SFC から BRL における力学的エネルギーの最大値とその出現時刻を示した。

図 5.5 に示すように、力学的エネルギーの変化パターンは、ほぼすべての被験者に類似して認められた。図 5.5 および表 5.2 に示したように、力学的エネルギーの最大値は上腕、上腕、前腕、手、ボールの順に生じた。ボールの最大値の出現時刻は BRL (0 ms) であった。このように、力学的エネルギーは、上腕から投球腕末端部、そしてボールへと位相ずれを引き起こしながら増大した。

5. 4. 2 部分における近位端/遠位端の関節力パワーおよび関節トルクパワー

図 5.6 は、(a) 手からボールへ発揮したパワー、(b) 手、(c) 前腕、(d) 上腕、(e) 上腕における近位端/遠位端の関節力パワーと関節トルクパワーの変化を示したものである。関節トルクパワーの " $-P'$ " および " $-D'$ " は、それぞれ部分の近位端 proximal end および遠位端 distal end を示す。なお、上腕の遠位端の関節トルクパワーは、右肩関節のパワーを示したものである。

表 5.3 には、SFC から BRL におけるボールに発揮したパワー、部分における近位端の関節力パワーおよび近位端/遠位端の関節トルクパワーの正・負の最大値とその出現時刻を示した。なお、部分の遠位端の関節力パワーの値は、算出式 [5.4] からわかるように遠位部の近位端の関節力パワーと大きさが等しく、正負が逆であるため、表には示していない。

図 5.6 に示すように、投球腕における近位端の関節力パワーの最大値は、上腕、前腕、手の順に出現し、最後にボールに発揮したパワーの最大値が出現した。

表 5.3 に示したように、投球腕における近位端の関節力パワーの正の最大値は、上腕が 2118.6 ± 449.8 Watts (以下 W)、前腕が 3322.0 ± 559.9 W、手が 3092.2 ± 502.2 W であり、ボールに発揮したパワーの最大値は 1729.9 ± 345.1 W であった。ま

た、これらの出現時刻は、上腕が BRL 前 73 ± 11 ms、前腕が 44 ± 6 ms、手が 27 ± 4 ms、ボールが 10 ± 4 ms であった。このように、投球腕における近位端の正の関節力パワーは、上腕、前腕、手へと位相がずれながら順に増大した。近位端の負の関節力パワーは、上腕を除き、いずれも正のパワーよりも顕著に小さかった。

近位端の関節トルクパワーの正の最大値は、上腕が 2263.3 ± 784.5 W で最も大きく、以下、順に上腕、前腕、手であった。その出現時刻は、上腕が BRL 前 99 ± 28 ms、上腕が 19 ± 14 ms、前腕が 22 ± 7 ms、手が 79 ± 34 ms であった。このように、投球腕の近位端の正の関節トルクパワーは体幹に近い部分ほど大きな値であったが、先に示した近位端の正の関節力パワーにみられたような位相ずれは生じなかった。

上腕の近位端における関節力パワーおよび関節トルクパワーの負の最大値はそれぞれ -2279.2 ± 933.1 W (BRL 前 87 ± 14 ms に出現) および -1946.0 ± 845.0 W (BRL 前 25 ± 17 ms に出現) であった。このように、上腕の近位端の関節力パワーは SFC 後に上腕から顕著に流出し、また近位端の関節トルクパワーは BRL 直前に流出した。

5. 4. 3 関節における関節トルクパワー

図 5.7 は、図 5.6 に示した手、前腕、上腕および上腕における近位および遠位端の関節トルクパワーをそれぞれ (a) 手関節、(b) 肘関節および (c) 肩関節に分けて示し、さらに式 [5.7] を用いて算出した関節の関節トルクパワー (鎖線) を加えて示したものである。

表 5.4 に SFC から BRL における各関節の関節トルクパワーの正・負の最大値とその出現時刻を示した。また、表 5.5 には各関節の力学的仕事を示した。

図 5.7 に示すように、LA 局面後半から BRL 後において、手関節の関節トルクパワー (鎖線) および手の近位端の関節トルクパワー (実線) はそれぞれ負であった。関節の関節トルクパワーの負の最大値は -142.7 ± 66.9 W (BRL 前 11 ± 21 ms に出現) であった (表 5.4)。

肘関節では、EA 局面において上腕の遠位端の関節トルクパワー（破線）が正であり、前腕の近位端の関節トルクパワー（実線）が負であった。LA 局面では上腕の遠位端の関節トルクパワーが負となり、前腕の近位端の関節トルクパワーは正となった。また、関節の関節トルクパワー（鎖線）は LA 局面前半で正となり、LA 局面後半で負となった。表 5.4 に示したように、この関節トルクパワー（鎖線）の正の最大値は 221.8 ± 114.3 W で、BRL 前 30 ± 9 ms に出現し、負の最大値は -519.7 ± 196.2 W で、BRL 前 2 ± 3 ms に出現した。

肩関節では、EA 局面前から BRL 後まで、上腕の近位端の関節トルクパワー（実線）は正であり、上腕の遠位端の関節トルクパワー（破線）は負であった。また、EA 局面後半では関節の関節トルクパワー（鎖線）が負となり、LA 局面では正となった。この関節トルクパワー（鎖線）の正の最大値は 1142.2 ± 359.8 W で、BRL 前 10 ± 10 ms に出現し、負の最大値は -884.4 ± 341.8 W で、BRL 前 57 ± 9 ms に出現した（表 5.4）。表 5.5 に示すように、SFC から BRL までの局面（EA 局面 + LA 局面）の肩関節の正仕事は 27.0 ± 7.7 Joules（以下 J）であり、負仕事は -26.0 ± 9.4 J であった。このうち EA 局面の正・負の仕事がそれぞれ 1.0 ± 1.3 J および -23.6 ± 9.2 J であり、LA 局面ではそれぞれ 26.1 ± 7.7 J および -2.3 ± 2.3 J であった。

このように、手関節では、肘や肩関節に比べ伝達および発生・吸収のパワーがともに小さかった。肘関節ではパワーの伝達が大きいものの、肩に比べ発生・吸収のパワーは小さかった。肩関節ではパワーの伝達が大きいだけでなく、加速局面前半後期の吸収パワー（仕事）および後半の発生パワー（仕事）が顕著に大きかった。

5. 4. 4 上腕および投球腕各関節の関節トルクパワー

図 5.8 は、図 5.7 に示した (a) 手関節、(b) 肘関節および (c) 肩関節の関節トルクパワー（鎖線）をそれぞれ関節の解剖学的回転運動を表すパワー（下段）として評価し、さらに関節角速度（上段）と合成関節トルク（中段）を合わせて示したもので

ある。

表 5.6 には SFC から BRL における関節の回転運動を表す関節トルクパワーの最大値と出現時刻を、表 5.7 にはそれらの力学的仕事を示した。

図 5.8a に示すように、手関節では、LA 局面において背屈から掌屈の角速度となり、また掌屈から背屈トルクとなった。橈尺屈では尺屈の角速度で、橈屈トルクであった。掌背屈の関節トルクパワーは BRL 前後に、橈尺屈のパワーは LA 局面にそれぞれ負のパワーであった。このように、リリース前後の負のパワー（図 5.7a）は主として手関節背屈（伸展）筋群による吸収パワーであった。

肘関節（図 5.8b）では、LA 局面において伸展と回内の角速度であり、また伸展から屈曲トルクとなった。SFC から BRL 直後まで内反トルクを示した。屈伸の関節トルクパワーは LA 局面前半において正となり、LA 局面後半で負となった。また、回内外の関節トルクパワーは LA 局面において正となった。このように、LA 局面前半の正のパワー（図 5.7b）は伸展および回内筋群による発生パワーであり、また LA 局面後半からリリース後における負のパワー（図 5.7b）は屈筋群による吸収パワーであった。

肩関節（図 5.8c）では、MaxER 直後に外旋から内旋の角速度となった。SFC から BRL 直後まで内旋および水平屈曲トルクであり、また、EA 局面では外転トルク、LA 局面では内転トルクであった。内外旋の関節トルクパワーは SFC から MaxER 直後まで負となり、LA 局面では正となった。また、水平屈伸の関節トルクパワーは SFC 直後から LA 局面前半まで、内外転の関節トルクパワーは EA 局面においてそれぞれ正であった。表 5.6 に示すように、肩内旋および水平屈曲運動の関節トルクパワーの最大値はそれぞれ 1038.3 ± 340.9 W および 488.2 ± 154.0 W であった。また、表 5.7 から、肩内外旋運動による仕事は、EA 局面では -37.3 ± 10.7 J で、LA 局面では 21.8 ± 6.7 J であった。このように、EA 局面後半の負のパワー（図 5.7c）は、内旋筋群の吸収パワーが水平屈曲筋群および外転筋群の発生パワーを上回ることによって生

じたものであった。LA 局面からリリース直後までの正のパワー（図 5.7c）のほとんどは内旋筋群による発生パワーであった。

5. 4. 5 上腕および投球腕各関節の合成関節力および合成関節トルク

図 5.9 は、関節の回転運動によって表された合成関節力（左図）および合成関節トルク（右図）の変化パターンを被験者 N.H.を例にして、スティックピクチャとともに示したものである。なお、関節によって力とトルクの最大値は顕著に異なるため（特に手と上腕）、縦軸の値は統一して示されていない。

表 5.8 に SFC から BRL における関節の回転運動軸方向の合成関節力の正・負の最大値とその出現時刻を、表 5.9 には関節の回転運動軸まわりの合成関節トルクの最大値とその出現時刻を示した。

図 5.9（左図）に示すように、合成関節力は、手、肘および肩のいずれの関節においても、圧縮力（正の z 軸方向の力）が顕著に大きく、リリース直後に最大値を示した。上腕関節では、右側方力（正の x 軸方向への力）が顕著に大きく、SFC から MaxER の間に最大値を示した。表 5.8 に示すように、右側方力の最大値は 1244.8 ± 431.5 N であり、BRL 前 68 ± 21 ms に生じた。また、BRL 後を含めた計測区間中の手、肘および肩関節の圧縮力の最大値と出現時刻は、それぞれ 293.4 ± 35.4 N と 3 ± 10 ms、 554.1 ± 62.0 N と 8 ± 4 ms、 639.8 ± 85.7 N と 11 ± 4 ms であった。

このように、上腕関節では主として右側方力が、他の関節では圧縮力が極めて大きな値を示した。

図 5.9（右図）に示したように、合成関節トルクは、手関節ではその大きさが他の関節に比べ顕著に小さかった。掌背屈では掌屈から背屈トルクとなり、背屈トルクでボールをリリースした。

肘関節では、内反トルクがほぼ MaxER まで増大した後、減少した。内反トルクの最大値は 60.0 ± 10.6 Nm で、BRL 前 40 ± 6 ms に生じた（表 5.9）。屈伸トルクは

BRLまで小さく、BRLは屈曲トルクとなった。伸展トルクの最大値は 11.9 ± 5.7 Nmであり、BRL前 47 ± 21 msに生じた。回内外トルクの変化はほとんどみられず、その大きさは顕著に小さく、回内トルクが優位であった。

肩関節では、BRLまで水平屈曲および内旋トルクが優位であり、内外転トルクはMaxERを境に、外転から内転トルクとなり、内転トルクでリリースした。表5.9に示したように、水平屈曲トルクの最大値は 59.8 ± 10.8 Nmで、BRL前 45 ± 8 msに生じた。内旋トルクは 65.3 ± 11.8 Nmで、BRL前 39 ± 6 msに生じた。外転トルクは 39.6 ± 14.4 Nmで、BRL前 52 ± 19 msに生じた。

上腕関節では、右屈トルクがBRL前 52 ± 27 msにおいて、 269.3 ± 87.6 Nmの最大値を示した後減少し、再度BRL直前に増大した。左右回旋トルクは全般に左回旋トルクから右回旋トルクへと変化した。左回旋トルクの最大値は 131.8 ± 45.2 Nmで、BRL前 99 ± 35 msに出現した(表5.9)。また右回旋トルクの最大値は 127.0 ± 62.4 Nmで、BRL前 19 ± 17 msに出現した。屈伸トルクはSFCからMaxERにおいて屈曲トルクとなった後、MaxERからBRLに伸展トルクとなった。屈曲トルクの最大値は 160.7 ± 60.9 Nmで、BRL前 68 ± 11 msに出現した(表5.9)。伸展トルクの最大値は 182.3 ± 89.8 Nmで、BRL前 37 ± 49 msに出現した。

5.5 考察

5.5.1 力学的エネルギーの変化

Jöris et al. (1985) は、ボールに大きな速度を与えるために、投球腕各部分におけるエネルギーフローの重要性を示唆した。

図5.5に示したように、ボール加速局面では、上腕から投球腕の末端、そしてボールへとエネルギーの増大の位相ずれが生じていることがわかる。このような位相ずれは、エネルギーが上腕から投球腕へ伝えられていることを示すものである。しかしな

から、これらのエネルギーは、関節まわりの筋群そのものによって発揮されるパワーおよび隣接部分から関節や筋・腱を通して伝達されるパワーによって供給されたものであるので、次にこれらの部分の力学的エネルギーの発生の原因を関節力パワーと関節トルクパワーに着目して検討する。

5. 5. 2 関節力パワー，関節トルクパワーおよび力学的仕事

(1) 投球腕各部分および関節における関節力・トルクパワーと力学的仕事について

投球腕各部分の近位端の関節力パワーは、図 5.6 からわかるように、図 5.5 のエネルギー変化と類似して、上腕から前腕、そして手へと位相ずれを起こしており、しかも両端の関節トルクパワーよりも顕著に大きかった。このように全体的にみると、ボールへ伝達されるパワーのほとんどは近位端の関節力パワーに起因していると言える。

しかし、これらの近位端の関節力パワーは、関節トルクパワー、すなわち身体の筋活動によって結果的に生じたものに過ぎない。そこで、以下では、先行研究の結果を示しながら、関節トルクパワーに着目して検討する。

Jöris et al. (1985) は、女子ハンドボール選手のシュート動作における2次元分析の結果から、ボールになされた全仕事 (55 J) の約73%はリリース前50 msの間になされ、このうちの約30%は手首と指の屈筋群によるものであると推測した。しかし、Sisto et al. (1987) は、筋電図を用いて野球のピッチング動作を研究した結果、手関節の屈曲/伸展筋群の放電量が顕著に小さかったことを報告した。

図 5.7a に示したように、手関節の関節トルクパワー (鎖線) の値は肘や肩関節に比べ顕著に小さく、しかも伸張的収縮が優位であり、踏出脚の接地時からリリース時までの仕事は負 (-3.6 ± 1.4 J) でわずかなものであった。この結果は、Sisto et al. (1987) の筋放電結果と合致していることを示すものである。

これらのことから、野球などの比較的軽く、握ることのできるボール (重さ 145 g) を投げる場合は、ハンドボールなどの重く、握るために大きな力 (握力) が必要

なボール (450 g) を投げる場合に比べ、手指部が高速に運動するため (手関節最大速度: Jöris et al. ; 10.9 ± 0.9 m/s vs 本研究 ; 17.3 ± 1.0 m/s) , 筋の力-速度関係から言えば、手関節まわりの筋群はパワーを発生 (発揮) することが困難になっているものと推察される。したがって、仮に Jöris et al. (1985) の推測が正しければ、野球の投球動作では、ハンドボール投げに比べ、手やボールに伝えられるエネルギーの大部分が手関節の関節力パワーに起因していると言えるであろう。

肘関節 (図 5.7b) では、LA 局面前半において、上腕から前腕へ流入する近位端の関節トルクパワー (実線) の最大値が 976.2 ± 368.5 W (リリース前 22 ± 7 ms に出現) であり、短縮的な収縮によって生じる関節トルクパワー (鎖線) の最大値が 221.8 ± 114.3 W (リリース前 30 ± 9 ms) であった。

このように、肘関節の筋群 (腱) を介して上腕から前腕へ流れ込むエネルギーの約 $3/4$ は上腕から流れてきたものであり、残りが肘関節の伸展筋群 (上腕三頭筋) によって発揮されたものと考えられる。

また、この局面では、先行研究 (Atwater, 1979; Vaughn, 1985; Feltner and Dapena, 1986; Feltner, 1987, 1989; Werner et al., 1993; 宮西ら, 1996) とほぼ同様に最大肘伸展角速度は $2,206 \pm 298^\circ$ /s (リリース前 9 ± 4 ms に出現) に達した。

このような肘関節の大きな伸展角速度の原因は、従来、筋電図学研究 (Toyoshima et al., 1974; 風井ら, 1976; Jobe et al., 1984; DiGiovine et al., 1992; Werner et al., 1993) などにより上腕三頭筋によるものと考えられてきたが、橈骨神経遮断分析 (Dobbins, 1970; Roberts, 1971 から引用) , 動作制限分析 (Toyoshima et al., 1974) や映像を用いた 3 次元動力学分析 (Feltner and Dapena, 1986; Werner et al., 1993) などの研究によって、上腕三頭筋による主因説に疑問がもたれた。

最近、3次元映像解析法を用いた隣接部分の相互作用分析 (Feltner, 1987, 1989; Feltner and Dapena, 1989) の結果から、肘伸展角速度の増大は、肩関節の加速度や上腕の角速度 (運動依存角加速度) による影響が大きいといわれている。

図 5.7b に示したように、上腕から前腕へ流入するパワーのうち、肘関節の伸展筋群（上腕三頭筋）による発揮パワー（鎖線）は上述のように約 1/4 と推察された。したがって、肘伸展（前腕）角速度の増大は、肘関節伸展筋群によるよりも、主に上腕や肩関節筋群によって生み出されたエネルギーが、関節（図 5.6c：近位端の関節力パワー）や筋・腱を介して上腕から前腕へ伝達したことによってもたらされているものと推察される。

LA 局面後半からリリース直後では、先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; Werner et al., 1993) と同様に肘関節の屈曲トルクが認められた（図 5.8b 中段）。この屈曲トルクは、図 5.8b（上段）からわかるように伸展角速度中に生じているので、結果的に関節の関節トルクパワー（下段）は負となっている。この時期に上腕二頭筋の顕著な放電が観察されている（風井ら, 1976; Jobe et al., 1984; Werner et al., 1993）ことから、リリース前後では、肘屈曲筋群は伸張性収縮状態にあると言える。

また、先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; 桜井ら, 1990; Sakurai, 1993; Werner et al., 1993; 宮西ら, 1995) において、最大肘伸展角度は約 160° 前後で、ほぼリリース時に出現していることや先に述べたように肘関節そのものが蝶番構造であることなどから考えると、肘関節屈曲筋群は、主としてフォロースルー局面での伸展損傷 extension injuries (Slocum, 1968) などの障害を未然に防ぐために、肘の伸展角速度を抑えて (Feltner and Dapena, 1986; Vaughn, 1985; 宮西ら, 1996) , 障害の発生を導く余剰なエネルギーを吸収しているものと考えられる。

肩関節の関節トルクパワーは、EA 局面後半から負方向へ増大していた（図 5.7c）。この負のパワーは、図 5.8c をみると、内旋トルクであるにもかかわらず、外旋運動することによって生じたものである。引き続き、LA 局面では内旋トルクのままであるが、角速度は外旋から内旋運動となり、正の関節トルクパワーが増大することがわかる（図 5.7c）。また、内外旋運動による EA 局面の仕事のほとんどは負（ -37.3 ± 10.7 J）であった（表 5.7）。肩内旋トルクの発生は、先行研究 (Feltner and Dap-

ena, 1986) の結果と同様であり、また大胸筋、広背筋および肩甲下筋などの肩内旋筋群の放電時期とも一致している (風井ら, 1976; Gowan et al., 1987; DiGiovine et al., 1992) . これらのことは、肩内旋筋群が EA 局面では伸張性収縮に、LA 局面では短縮性収縮になっていることを示すものである。

先行研究 (Cavagna et al., 1965, 1968) において、筋は伸張後に短縮すると大きな仕事をし、さらにその伸張/短縮が短時間に行なわれるほど仕事が大きくなることが報告されている。また、野球のピッチング動作において、平野 (1988) は、ボール加速局面中に体幹と右手の間にあるいずれかの筋が stretch されている可能性を示唆している。

先に示したように、肩内旋運動による正のパワー (仕事) に先立って短時間で生じる大きな負のパワー (仕事) , すなわち伸張的収縮パワーは、投球腕の末端部分、すなわち前腕、手およびボールに対して大きな仕事をするために重要な貢献因子となっていると言える。

したがって、野球の投球動作において、肩内外旋運動は、最も重要な Stretch-Shortening Cycle (Cavagna et al., 1965, 1968; Asmussen and Bonde-Petersen, 1974; Komi and Bosco, 1978; Bosco and Komi, 1979; Komi, 1986) 運動であると言える。

肩内旋筋群のうち、特に広背筋は重量が最も大きく、しかも腱の付着部が上腕骨の小結節稜に位置し、大円筋の腱と交差する形でその前方に付着する (Kapandji, 1980). このような機能解剖学上の特徴は、バイオメカニクスの有効性に結びついているものと考えられる。つまり、肩外転 90° 位で、上腕を外旋させれば (ボール加速局面の投球腕の運動) , 上腕骨小結節稜は上方へ変位し、広背筋の腱が上腕骨に巻き付くような状態になる。このような肢位は、広背筋の筋・腱を効率よく stretch させる準備状態となると同時に、上腕骨長軸まわりに内旋トルクを発生させる状態にもなっていると推察される。したがって、このような肩内旋筋群の機能解剖学上の特性が、先の

内旋運動による大きなパワー（仕事）を発生させる大きな要因であると考えられる。

(2) 上腕の近位端のパワーについて

吉福 (1982) は、直進する物体の端点が地面などに打突し、物体が回転運動を引き起こす場合、それとは反対側にある端点の速度（エネルギー）が急激に大きくなることを簡単なモデルを用いて理論的に述べている。

図 5.6e に示したように、踏出脚の接地直後において、上腕下端点の速度（図 4.8a）が正であったにもかかわらず、上腕の近位端における負の関節力パワーが急激に増大した。このことは、踏出脚の接地によって踏出脚が投球方向とは逆向き（負方向）の力を受けたものと考えられ、そのため上腕下端点にも投球方向とは逆向きの力（この局面では右側方力：図 5.9d : x 軸）が作用したことによるものであると言える。

この力は、吉福 (1982) が指摘するように、上腕の重心まわりにトルクを発生させ、上腕を前方（投球方向）へ回転させると考えられるので、投球腕各部分のエネルギーの増大を導くために寄与しているものと推察される。

上腕の近位端の関節トルクパワーは、踏出脚の接地前から踏出脚の接地直後まで顕著に大きかった（図 5.6e）。この局面において、このパワー以外に、パワーがほとんど観察されていないため、このパワーがその後の投球腕へ伝えられるパワー源となっているものと考えられる。なお、このパワーの一部は、下肢で生み出されたものが下腕を通して流れてきたものと考えられる。

5. 5. 3 上腕および投球腕各関節の合成関節力および合成関節トルク

(1) 肘および肩関節の合成関節力と合成関節トルクについて

Feltner and Dapena (1986) , Feltner (1987, 1989) , Werner et al. (1993) , Dillman et al. (1993) , Fleisig et al. (1995) は、3次元映像解析法を用いて、野球の投手のピッチング動作中の肘および肩関節運動を動力学的観点から分析し検討した。

これらの報告と本研究の結果を比較すると、合成関節力および合成関節トルクの変化はほぼ類似していたが、それらの大きさは異なっていた。すなわち、本研究の結果は、表 5.8 および表 5.9 と表 2.1 からわかるように合成関節力および合成関節トルクの値が他の報告のものよりも全般的に小さかった。一例を示すと、肘関節では、内反トルク値は、Feltner and Dapena (1986) が 100 ± 20 Nm, Werner et al. (1993) が 120 Nm (最大値), Fleisig et al. (1995) が 64 ± 12 Nm という結果を得、一方本研究では 60 ± 11 Nm であったなどである (表 5.9)。

これらの相違の原因として、対象とした被験者(数)の違い、すなわち、大学生とプロフェッショナル選手などの競技能力(熟達度)、あるいは投手と野手などの投能力の違い、また用いた被験者の身体的特徴の違いなどによるボールスピードの相違(表 2.1)が挙げられる。したがって、他の研究報告の値よりも本研究のものが小さかったのは、本研究で用いた被験者が大学生であり、しかもその中に投能力が一般的に低い、投手以外の野手も 24 名中 21 名と多数含まれていたことによるものであると考えられる。

本研究では、肩内外転トルクは、Feltner and Dapena (1986), Fleisig et al. (1995) の結果ではリリースまで一貫して外転トルクであり、一方、本研究では、図 5.9c からわかるようにほぼ肩最大外旋位時を境にして、外転トルクから内転トルクとなった。

この相違の主とした原因は、肩の関節トルクなどの定量化の相違が考えられる。すなわち、2.2.3(4)で述べたように、Feltner and Dapena (1986) は、肩の関節トルクデータを肩関節に定義した関節座標系を用いて示しているが、この座標系そのものは体幹を1つの剛体とみなして定義されたものである。したがって、肩の関節トルクデータには、上腕の運動による成分が含まれているものと言える。このことが、Feltner and Dapena (1986) らと本研究の肩内外転トルクデータ間に違いが生じた原因であると考えられる。しかし、筋電図学研究において、ボール加速局面では肩内転

筋群が顕著に活動することが観察される (風井, 1976; Jobe et al., 1984; Gowan et al., 1987; DiGiovine et al., 1992) ことを考えると, 本研究の肩内外転トルクデータは, Feltner and Dapena (1986) らのものよりも, 精度よく求められているものと考えられる。

Feltner and Dapena (1986) は, 肘伸展トルクが 20 ± 10 Nm と小さかったことを理由に, 肘の伸展は上腕三頭筋によるものではなく, 肘での合成関節力によるものであることを示唆した。本研究の結果においても, 肘最大伸展トルクは 11.9 ± 5.7 Nm と顕著に小さかった (表 5.9)。このことは, Feltner and Dapena (1986) の見解を支持するものである。

5. 5. 2 (1) で述べたように, LA 局面後半からリリース直後では, 先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; Werner et al., 1993) と同様に肘関節の屈曲トルクがみられた (図 5.9b)。この屈曲トルク, 言い換えれば肘屈筋群の収縮力は, 前腕の重心速度を減少させるだけでなく, 前腕の重心まわりのモーメントとしても作用するものと考えられる。このように推察すると, 肘屈筋群による収縮力は, 前腕の近位端と逆側にある手関節の合成関節力と偶力 couple を形成するため, 手から前腕へ作用する合成関節力の大きさ/方向に依存して, 手首を肘伸展方向へ加速させる場合があるものと考えられる。したがって, 肘屈筋群優位による屈曲トルクの発現は, ボール速度への貢献, さらに肘関節障害予防機能 (前出) という二重の意味で重要な役割を果たしている可能性がある。このことに関しては, さらに筋骨格モデルや運動依存角加速度 (Feltner, 1987; Feltner and Dapena, 1989; Feltner, 1989) などを手がかりに詳細に検討する必要があるであろう。

先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; Werner et al., 1993; Fleisig et al., 1995) から, 肘関節の内反トルク値の範囲はボール加速局面において約 64 Nm – 120 Nm にあることが報告されている。本研究では, 肘の内反トルクは 60.0 ± 10.6 Nm であり (表 5.9), この値は先の研究に比べて小さかった。これは, これまでにも述べてきたよ

うに、本研究で用いた被験者の投能力によるものであると考えられる。なお、肘内外側部は腱・靭帯の付着部であり、しかも肘関節の構造そのものが蝶番関節（腕尺関節）であることを考えると、この内反トルクは、先行研究 (Feltner and Dapena, 1986; Werner et al., 1993; Fleisig et al., 1995) に指摘されるように肘関節障害、とりわけ内側牽引損傷の発生の主因であるものと考えられる。

第4章において関節運動による「貢献度」を検討したように、ボール速度急増局面において、肩関節の内旋および肘関節の伸展運動が大きく貢献した。しかし、図 5.9bc (右図) からわかるように、肩の内旋運動の貢献度は内旋トルクの変化とほぼ一致したが、肘の伸展運動では伸展トルクがわずかで、しかもリリース直前では屈曲トルクとなり一致しなかった。このことは肘伸展運動による貢献度データと矛盾する。これは前節で示したように、肘の伸展運動が体幹や肩関節によって発生したエネルギーが上腕を介して前腕へ伝達されること、また先行研究 (Feltner, 1987; Feltner and Dapena, 1989; Feltner, 1989) の報告により肩の加速度や上腕の角速度（運動依存角加速度）によって引き起こされることによるものであるからである。

(2) 手関節の合成関節力と合成関節トルクについて

過去、野球の投球動作中の手関節の合成関節力や合成関節トルクを明らかにした研究はみられない。

図 5.9a に示すように、手関節では、他の関節に比べ関節トルクそのものが著しく小さいことがわかる。これらのことは、投球の最終局面（リリース直前）では、手やボールの加速は、手関節まわりの筋群（手関節の関節トルクやそのパワー）によるものではなく、以下で述べるように、主として合成関節力によることを示すものと考えられる。

すなわち、Feltner (1987, 1989), Putnam (1983, 1993) は、隣接部分の相互作用について、それぞれ運動依存力や運動依存角加速度 (2. 2. 3 (2) 参照) を算

出して検討を行なった。その結果、彼らは、隣接部分の運動は、ある局面では合成関節トルクよりも、むしろ運動依存力や運動依存角加速度によって生じるモーメントによる影響の方が大きいことを示した。

図 5.9b からわかるように、肘関節の圧縮力（正の z 軸方向の力）が顕著に大きかった（最大値 $499.6 \pm 78.6 \text{ N}$: 表 5.8）。この圧縮力の方向は前腕の長軸方向にあるため、この力は、手関節背屈位の状態では手の掌屈運動のモーメントとなることが推察される。したがって、この圧縮力が、手関節の掌屈運動を生じさせる主な原因であるものと考えられる。

なお、手の質量は約 0.5 kg （平均値）であり（付録 B の表 B.1），前腕と上腕のそれぞれ約 $1/2$ と約 $1/4$ の質量であること、また圧縮力の最大値（表 5.8）が手関節では肘および肩関節の約半分であることなどから考えると、この圧縮力によって手部が加速される比率は前腕部とほぼ同じで、上腕部の約 2 倍になるものとみられる。

第 4 章で検討したように、ボール速度急増局面において、手関節の掌屈運動が大きく貢献した。しかし図 5.9a（右図）からわかるように、本研究の結果では、掌屈トルクではなく、逆に背屈トルクになるというものであった。しかし、背屈トルクとなる前に掌屈トルクが生じること、また上述で推察したように肘関節の圧縮力による掌屈モーメントの発生を考えると、ボール速度急増局面では、背屈トルクが働くにもかかわらず、結果的に慣性が小さい手部の掌屈運動が生じたものと考えられる。

(3) 上腕関節の合成関節力と合成関節トルクについて

これまでに、野球の投球動作中の上腕関節の合成関節力や合成関節トルクを明らかにした研究は見当たらない。

図 5.9d（右図）からわかるように、踏出脚の接地直後、右屈トルクが急激に増大し、その最大値は $269.3 \pm 87.6 \text{ Nm}$ で、リリース前 $52 \pm 27 \text{ ms}$ に生じた（表 5.9）。このトルクは、図 5.9d（左図）の合成関節力からわかるように踏出脚の接地時に右側方力

(表 5.8 : 1244.8 ± 431.5 N, リリース前 68 ± 21 ms) が急激に大きくなることによって生じたものであろう。このように、右側方力の発生とほぼ同時に生じる、右屈トルクの働きは、上体の前方(投球方向)への回転を抑制するので、体幹に存在する大筋群(特に、右側屈筋など)を強制的に伸張させて、大きなエネルギーを体幹に発生させることにあるものと考えられる。

屈伸トルクは、加速局面前半に屈曲トルク、後半に伸展トルクとなった(図 5.9d : 右図)。特に伸展トルクの最大値は 182.3 ± 89.8 Nm と大きく、リリース前 37 ± 49 ms に生じた。前半の屈曲トルクは先の右側方力と同様な働きを行っており、上体を投球方向へ回転させているものと考えられる。加速局面後半の伸展トルクは、前半に投球方向へ回転させられた上体の運動を抑えるために生じたものであろう。

回旋トルクは、加速局面前半に左回旋トルクであり、後半に右回旋トルクとなった(図 5.9d : 右図)。加速局面前半の左回旋トルクは、左回旋筋群によるだけでなく、踏出脚を接地することによって生じた身体重心まわりの左まわりのモーメントによっても引き起こされているものと考えられる。加速局面後半の右回旋トルクはこのように生じた左回旋運動を抑制するために生じたものであろう。なお、左回旋トルクは、踏出脚接地時前からすでに大きい。このトルクは、先と同様に左回旋筋群によるだけでなく、軸(右)脚で投球方向へ蹴ることによって生じた地面反力が身体重心まわりに上方からみて左まわりのモーメントを引き起こすためにも生じたものであろう。

第4章において関節運動による「貢献度」を検討したように、ボール速度漸増局面において、上腕の左回旋および屈曲運動が貢献していたが、図 5.9d (右図) からわかるように、それらの運動による貢献度は左回旋および屈曲トルクの変化とほぼ合致した。

5.6 小括

- ① 力学的エネルギーの最大値は上腕が最も大きく、以下、順に手、上腕、前腕、ボールであった。また、その出現時刻は上腕、上腕、前腕、手、ボールの順であった。
- ② 投球腕における近位端の関節力パワーの最大値は、力学的エネルギーの変化と類似して、上腕、前腕、手の順に出現した。また、関節力パワーは、いずれの関節においても近位端／遠位端の関節トルクパワーよりも顕著に大きかった。
- ③ 手関節の関節トルクパワーはリリース直前にみられたが、肘や肩関節に比べ顕著に小さく、しかも負のパワーであった。肘関節の関節トルクパワーは肩関節の内旋運動開始直後に正となり、リリース直前に負となった。肩関節の関節トルクパワーは肩外旋局面で負となり、内旋局面で正となった。肩関節の正・負の関節トルクパワー（仕事）は手関節および肘関節に比べ顕著に大きく、そのほとんどが内旋運動（内旋筋群）によるものであった。上腕の近位端の負の関節力パワーおよび関節トルクパワーは踏出脚の接地後に急激に増大した。
- ④ 手関節の合成関節トルクは、肘や肩関節に比べ顕著に小さかった。肘関節では内反トルクが大きく、伸展トルクおよび回内トルクは小さかった。肩関節では水平屈曲トルクおよび内旋トルクが大きかった。肩最大外旋時を境に外転トルクから内転トルクとなった。上腕関節では、踏出脚の接地直後右屈トルクが急増した。また、合成関節力は、手、肘および肩関節のいずれにおいても z 軸方向の力（圧縮力）がリリース直後まで急激に増大した。踏出脚の接地後に上腕関節の x 軸方向の力（右側方力）と右屈トルクが増大した。

以上のことから、野球の投球動作では、ボールへ伝えられるエネルギーの大部分が手関節の関節力パワーに起因しており、さらにこれらのパワーのほとんどは、体幹や肩関節の運動（筋群）によって生み出されたエネルギーが関節や筋・腱を介して伝達されることによってもたらされているものと考えられた。

本章では、上腕および投球腕各部分の力学的エネルギー、エネルギーフロー（流れ）および仕事を算出し、スピード投（速投）における上腕および投球腕各部分の運

動のメカニズムについて動力学的観点から検討を行なった。その結果、力学的エネルギーの最大値は、上腕から上腕、前腕、手、そしてボールの順に位相ずれを起こした。また、部分のエネルギーの由来を関節力パワーや関節トルクパワーを算出して検討した結果、手、前腕および上腕の力学的エネルギーの増大の原因は、いずれの部分においても近位端の関節力パワーによってもたらされており、しかもその割合が投球腕末端の部分ほど大きくなることが示された。したがって、野球の投球動作におけるスピード投では、体幹部は主としてエネルギーの発生・蓄積器、肩関節は発生・伝達器、そして肘および手関節は伝達器としての機能を果たすことが示された。

以上のことから、関節トルクパワーを2つ、つまり伝達を意味する部分の両端のパワーと発生/吸収を意味する関節のパワーに別々に分けて算出することにより、投球腕の手、肘および肩関節の力学的エネルギーフロー（流れ）の動態がより詳細に明らかとなった。

ところで、第4章の研究において、ボール速度に対する各関節運動の貢献度は、ボール速度漸増局面では上腕の左回旋運動などが、また速度急増局面では肩の内旋、肘の伸展、手の掌屈運動が大きく貢献していた。しかし、本研究において明らかにされたように、これらの関節の貢献度（図4.10）と関節トルク（図5.9）の変化パターンは合致しなかった。例えば、図4.10の肩の内旋運動の貢献度はボール速度急増局面（加速局面後半の相当）において大きく貢献するが、図5.9cからその局面の内旋トルクをみると減少していることがわかる。逆に、上腕の貢献度は全体的にボール速度急増局面において貢献度が小さくなるにもかかわらず、上腕の関節トルクは比較的大きいこと、などである。このように、各関節の貢献度と関節トルクの変化には時間的なずれがあり、関節トルクの変化が貢献度のそれに先立つものであった。

このように関節トルクの変化が貢献度の変化に先立って現れるのは、力学的に言えば、運動の位置（角変位）・速度（角速度）・力（トルク）間に、法則的な関係が存在するためである（小林, 1977）。すなわち、小林（1977）によれば、バネにつり下げ

られた重りに周期的（正弦波）に力を加えると、その重りの速度の変化は 1/4 周期遅れて現れ、位置の変化は速度からさらに 1/4 周期遅れて現れることを指摘し、結局のところ、力の変化は位置の変化と逆位相になると述べている。

4. 3. 1 で詳述したように、本研究における「貢献度」の算出方法は、関節の角速度ベクトルにその関節からボールへの位置ベクトルを乗じて得られた速度を利用したものであった。したがって、貢献度と関節トルクの変化が合致しない理由は、関節トルクの変化が貢献度よりも時間的に 1/4 周期先立って生じているためによるからである。

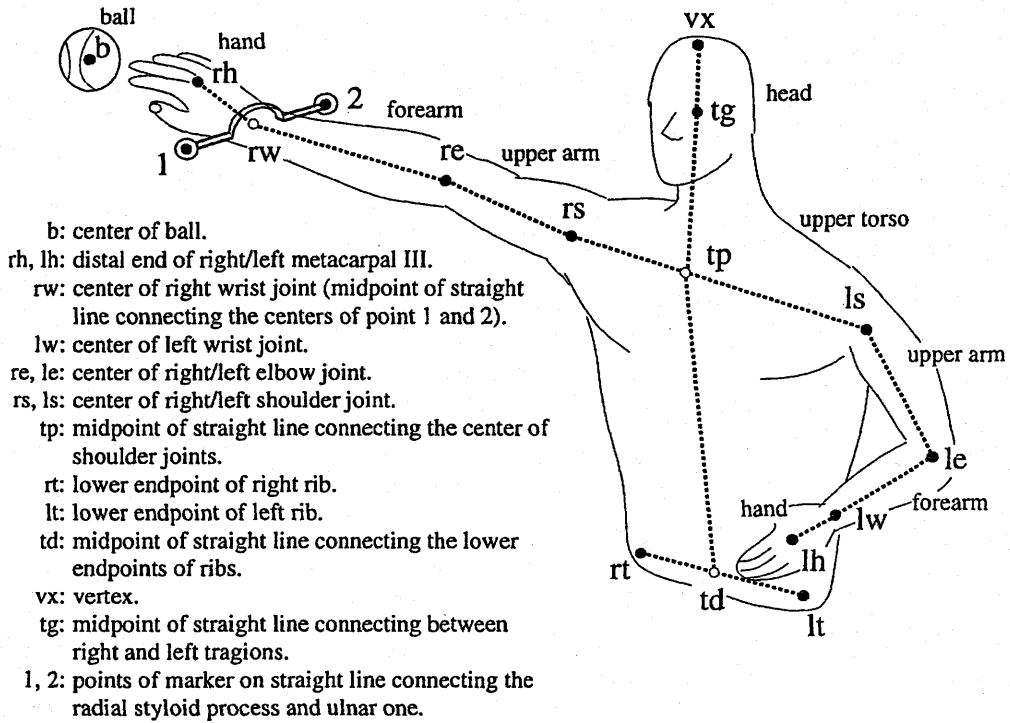


Figure 5.1

Digitized points (●) on the upper torso, upper arm, forearm, hand and ball.

$$\frac{dE_s}{dt} = P_{jp} + P_{mp} + P_{jd} + P_{md}$$

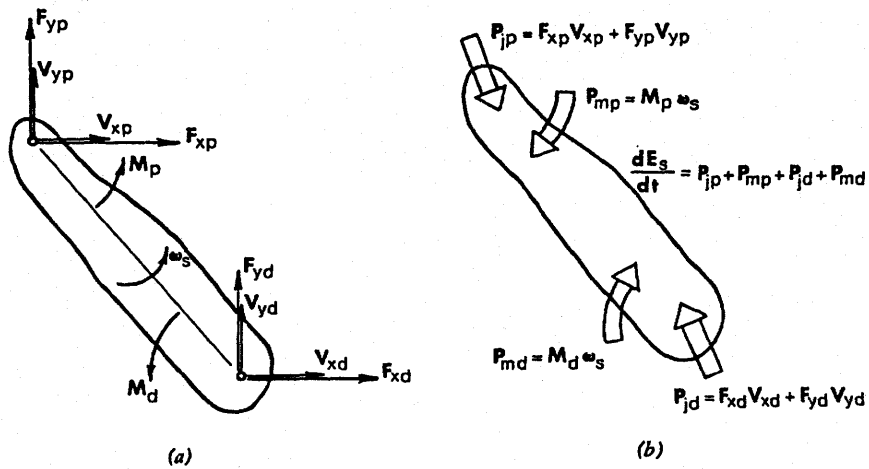


Figure 5.2

(a) Biomechanical variables describing the instantaneous state of a given segment in which passive energy transfers may occur at the proximal and distal joint centers and active transfers through the muscles at the proximal and distal ends. (b) Power balance as calculated using the variables shown in (a). The passive power flow at the proximal end P_{jp} , and the distal end P_{jd} , combined with the active (muscle) power at the proximal end P_{mp} and the distal end P_{md} must equal the rate of change of energy of the segment dE_s/dt (In: Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Figure 5.19 by Winter, 1990).

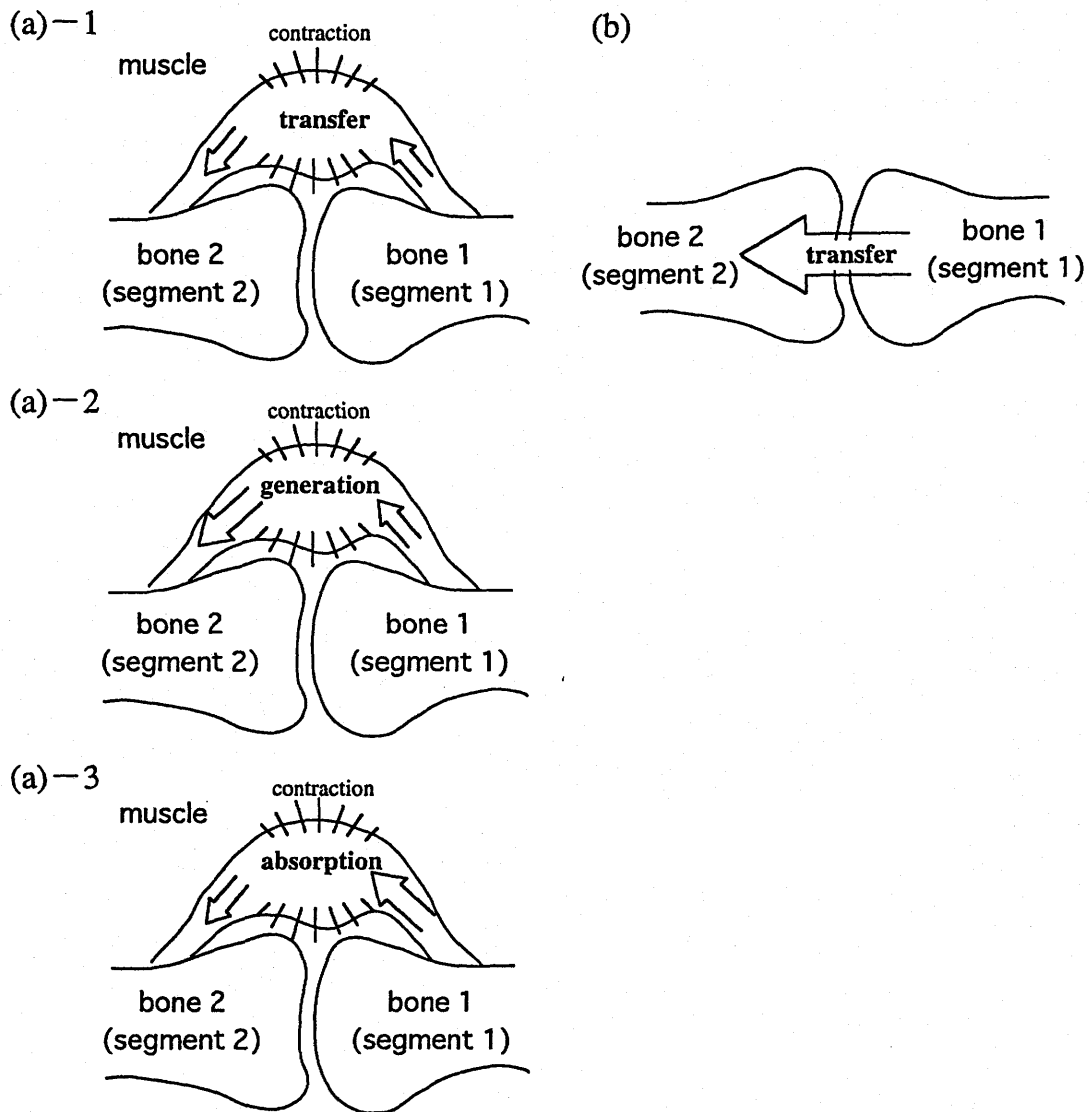
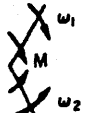
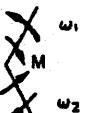
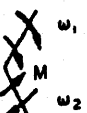
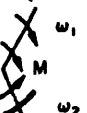
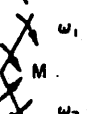


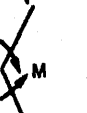


Figure 5.3
Schematic diagrams of mechanical energy flow.

Table 5.1

Power Generation, Transfer and Absorption Functions (Robertson and Winter, 1980).

Description of Movement	Type of Contraction	Directions of Segmental Angular Velocities	Muscle Function	Amount, Type, and Direction of Power
Both segments rotating in opposite directions (a) joint angle decreasing	Concentric		Mechanical energy generation	$M\omega_1$ generated to segment 1 $M\omega_2$ generated to segment 2
(b) joint angle increasing	Eccentric		Mechanical energy absorption	$M\omega_1$ absorbed from segment 1 $M\omega_2$ absorbed from segment 2
Both segments rotating in same direction (a) joint angle decreasing (e.g. $\omega_1 > \omega_2$)	Concentric		Mechanical energy generation and transfer	$M(\omega_1 - \omega_2)$ generated to segment 1 $M\omega_2$ transferred to segment 1 from 2.
(b) joint angle increasing (e.g. $\omega_2 > \omega_1$)	Eccentric		Mechanical energy absorption and transfer	$M(\omega_2 - \omega_1)$ absorbed from segment 2. $M\omega_1$ transferred to segment 1 from 2.
(c) joint angle constant ($\omega_1 = \omega_2$)	Isometric (dynamic)		Mechanical energy transfer	$M\omega_2$ transferred from segment 2 to 1.
One segment fixed (e.g. segment 1.) (a) joint angle decreasing ($\omega_1 = 0, \omega_2 > 0$)	Concentric		Mechanical energy generation	$M\omega_2$ generated to segment 2.
(b) joint angle increasing ($\omega_1 = 0, \omega_2 > 0$)	Eccentric		Mechanical energy absorption	$M\omega_2$ absorbed from segment 2.
(c) joint angle constant ($\omega_1 = \omega_2 = 0$)	Isometric (static)		No mechanical energy function	Zero.

Nomenclature

i, j	joint and segment, respectively.
ME_j	total mechanical energy (Joule) of segment j .
m_j	mass (kg) of segment j .
g	acceleration due to gravity (9.81 m/s^2).
h_j	vertical height (m) of segment j from a reference plane.
V_i, V_j	velocity (m/s) vectors of center of joint i and of center of gravity (cg) of segment j , respectively.
I_j	moment of inertia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) tensor about cg of segment j .
ω_j	angular velocity (rad/s) vector of segment j .
$RJF_{j-1,j}, RJT_{j-1,j}$	resultant joint force (N) and resultant joint torque (Nm) vectors acting from segment $j-1$ to segment j at joint i , respectively.
$RJF_{j,j+1}, RJT_{j,j+1}$	resultant joint force (N) and resultant joint torque (Nm) vectors acting from segment j to segment $j+1$ at joint $i+1$, respectively.
$r_{j-1,j}, r_{j,j+1}$	position vectors from cg of segment j to joint center in which acting $RJF_{j-1,j}, RJF_{j,j+1}$, respectively.
M_j	external torque (Nm) about cg of segment j .
a_j	acceleration (m/s^2) vector of cg of segment j .
k	unit vector to vertical direction.
$JFP_{j-1,j}, JTP_{j-1,j}$	joint force power (Watt) and joint torque power (Watt) acting on segment j at joint i , respectively.
$JFP_{j,j-1}, JTP_{j,j-1}$	joint force power (Watt) and joint torque power (Watt) acting on segment $j-1$ at joint i , respectively.
$JTPm$	joint torque power (Watt) obtained by the dot product of resultant joint torque and joint angular velocity.
W	mechanical work (Joule) obtained by integrating with time the joint torque power ($JTPm$).

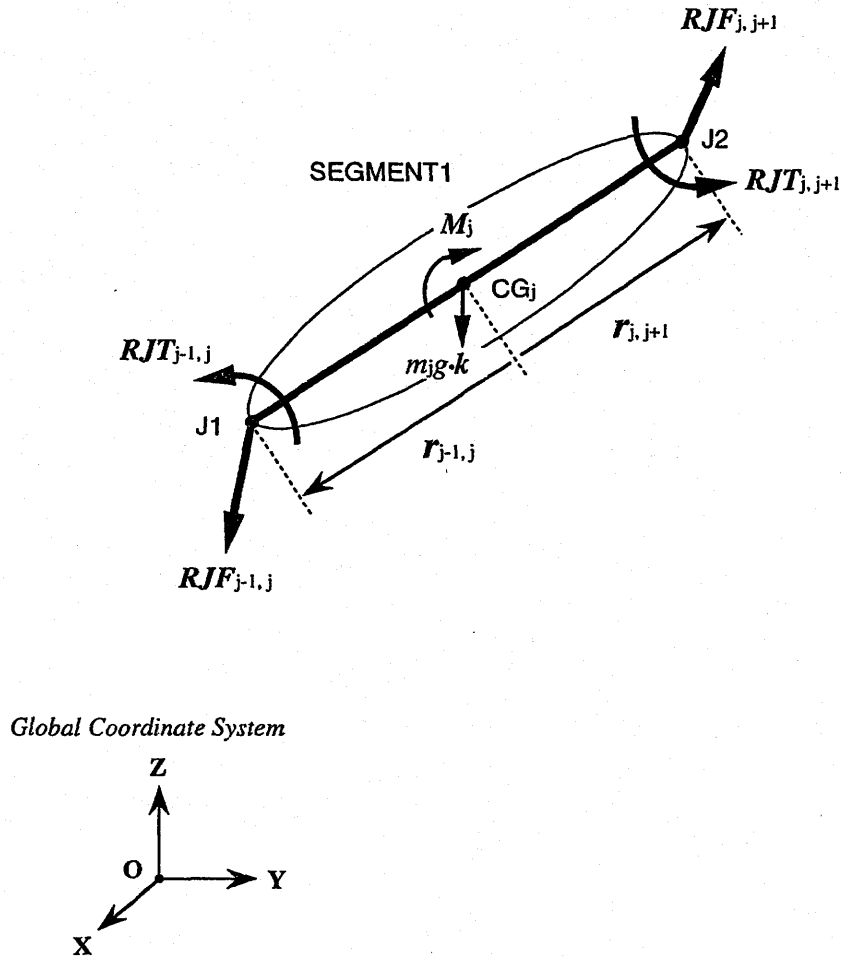


Figure 5.4
Free-body diagram.

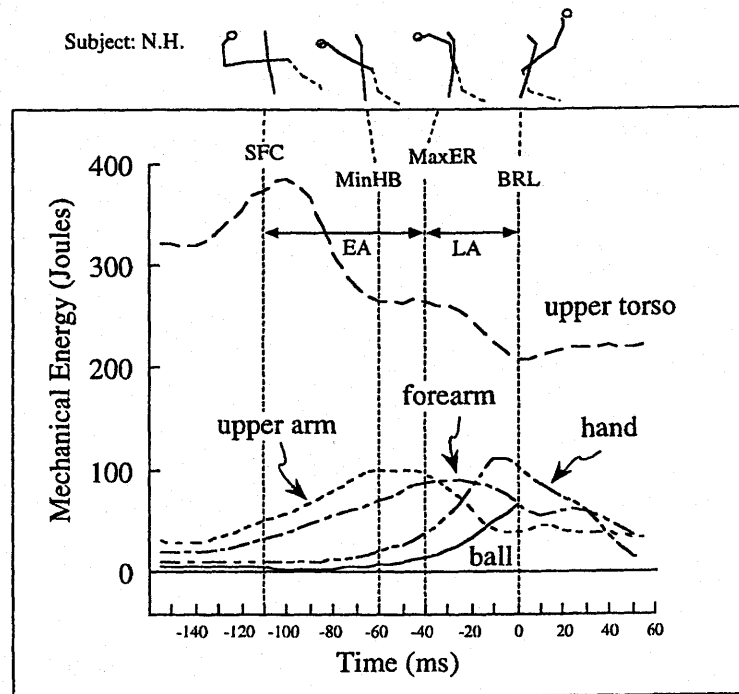


Figure 5.5

Changes of the mechanical energies for the upper torso, upper arm, forearm, hand and ball. SFC; the instant of stride foot contact, MinHB; the instant of minimum height of ball, MaxER; the instant of maximum external rotation at the shoulder joint, BRL; the instant of ball release, EA; the early acceleration phase of ball (SFC to MaxER), LA; the late acceleration phase of ball (MaxER to BRL).

Table 5.2

Maximum values and their appearance times for the mechanical energies (*ME*) of the ball, hand, forearm, upper arm and upper torso segments.

	n = 24	
	<u>max.value</u>	<u>time</u>
	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) ms
ball	66.4 (8.6)	0 (0)
hand	106.3 (13.6)	-8 (4)
forearm	93.4 (12.6)	-26 (5)
upper arm	104.6 (14.0)	-56 (6)
upper torso	417.3 (61.1)	-101 (17)

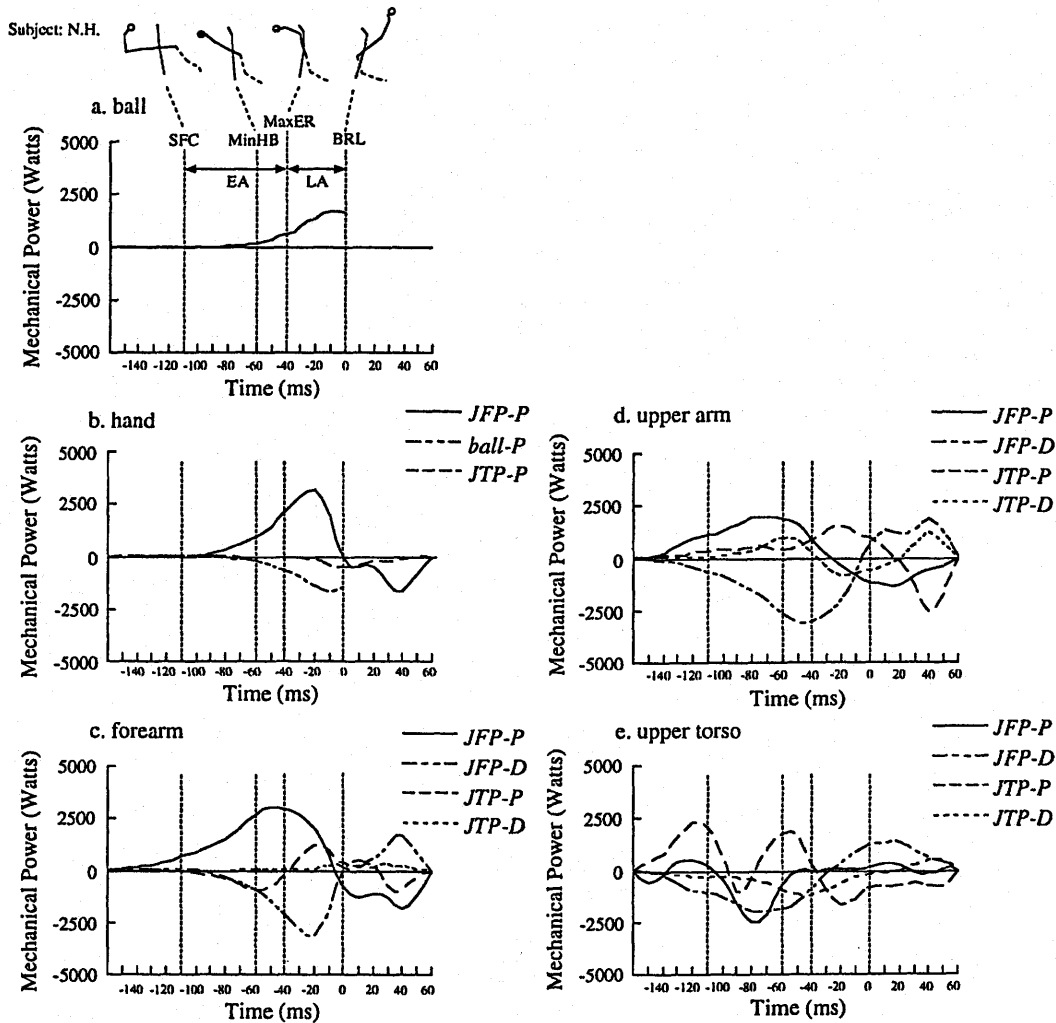


Figure 5.6

Changes of the (a) power exerted on ball, the joint force powers and the joint torque powers in the proximal end and distal end for the (b) hand, (c) forearm, (d) upper arm and (e) upper torso segments. *JFP*; joint force power, *JTP-P*; joint torque power at proximal end of segment, *JTP-D*; joint torque power at distal end of segment.

Table 5.3

Positive and negative maximum values and their appearance times for the power exerted on the ball, and for the joint force powers and joint torque powers at the proximal and distal end of the hand, forearm, upper arm and upper torso segments.

	n = 24			
	max.value		min.value	
	Mean (S.D.) Watts	time Mean (S.D.) ms	Mean (S.D.) Watts	time Mean (S.D.) ms
ball	1729.9 (345.1)	-10 (4)	-62.7 (55.8)	-114 (18)
JFP				
hand	3092.2 (502.2)	-27 (4)	-287.4 (263.7)	-42 (56)
forearm	3322.0 (559.9)	-44 (6)	-383.0 (302.3)	-11 (38)
upper arm	2118.6 (449.8)	-73 (11)	-663.7 (319.6)	-4 (6)
upper torso	575.1 (808.8)	-57 (54)	-2279.2 (933.1)	-87 (14)
JTP-P				
hand	64.5 (47.2)	-79 (34)	-333.1 (139.6)	-12 (22)
forearm	976.2 (368.5)	-22 (7)	-923.5 (266.4)	-62 (11)
upper arm	1583.7 (348.2)	-19 (14)	49.3 (177.4)	-103 (31)
upper torso	2263.3 (784.5)	-99 (28)	-1946.0 (845.0)	-25 (17)
JTP-D				
forearm	203.0 (78.2)	-8 (17)	-62.3 (44.9)	-67 (37)
upper arm	920.1 (269.1)	-62 (10)	-920.4 (311.5)	-15 (9)
upper torso	35.1 (170.1)	-56 (51)	-1215.2 (394.3)	-48 (7)

JFP: joint force power

JTP-P: joint torque power at proximal end of segment

JTP-D: joint torque power at distal end of segment

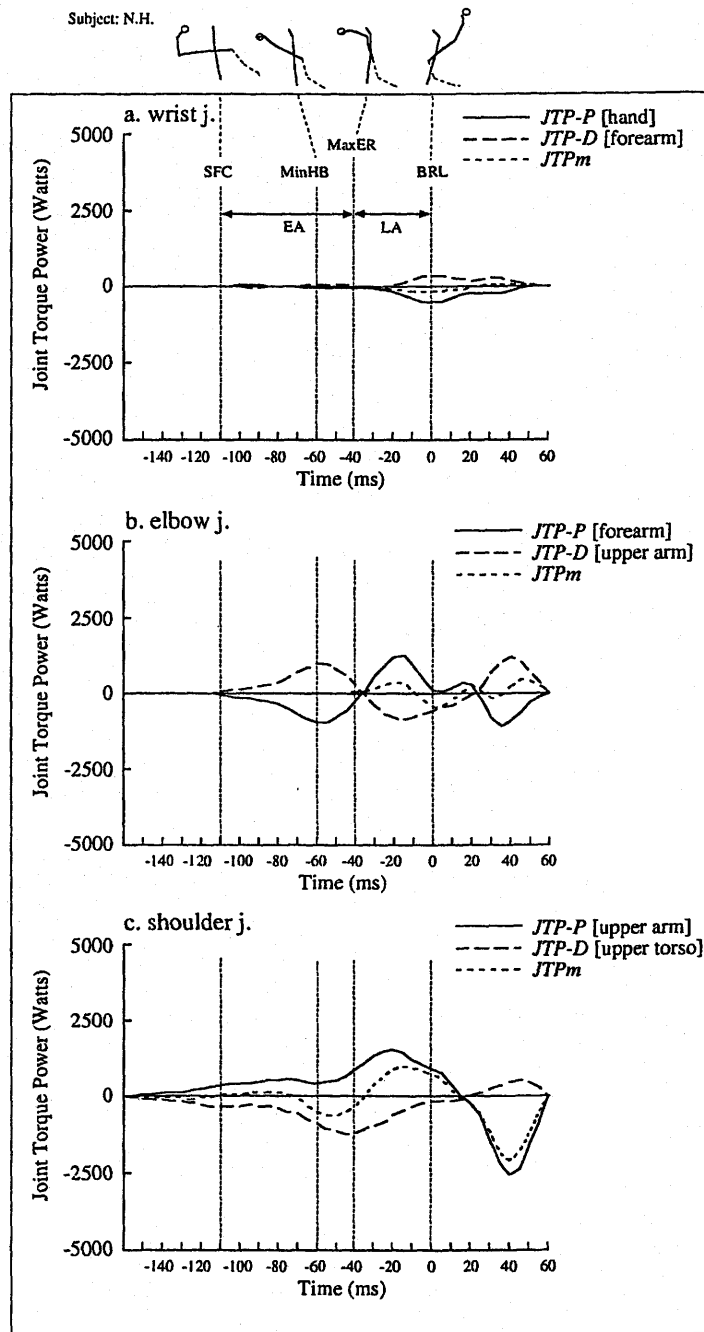


Figure 5.7

Changes of the joint torque powers in the proximal (*JTP-P*) and distal (*JTP-D*) end, and the joint torque powers (*JTPm*) in the (a) wrist, (b) elbow and (c) shoulder joints.

Table 5.4

Positive and negative maximum values and their appearance times for the the joint torque powers (*JTPm*) at the wrist, elbow and shoulder joints.

	n = 24							
	posi.max.value		time		nega.max.value		time	
	Mean (S.D.) Watts		Mean (S.D.) ms		Mean (S.D.) Watts		Mean (S.D.) ms	
wrist j.	20.5	(22.4)	-72	(41)	-142.7	(66.9)	-11	(21)
elbow j.	221.8	(114.3)	-30	(9)	-519.7	(196.2)	-2	(3)
shoulder j.	1142.2	(359.8)	-10	(10)	-884.4	(341.8)	-57	(9)

Table 5.5

Mechanical works (positive, negative and absolute) at the wrist, elbow and shoulder joints.

	n = 24								
	EA			LA			EA + LA		
	W_p	W_n	W_{ab}	W_p	W_n	W_{ab}	W_p	W_n	W_{ab}
Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules
wrist j.	0.2 (0.3)	-1.1 (0.8)	1.3 (0.8)	0.1 (0.3)	-2.6 (1.4)	2.7 (1.3)	0.3 (0.4)	-3.6 (1.4)	3.9 (1.5)
elbow j.	1.1 (1.1)	-1.1 (0.9)	2.2 (1.1)	3.9 (2.5)	-5.8 (3.9)	9.6 (3.3)	5.0 (3.2)	-6.9 (4.0)	11.8 (3.4)
shoulder j.	1.0 (1.3)	-23.6 (9.2)	24.6 (9.0)	26.1 (7.7)	-2.3 (2.3)	28.4 (8.4)	27.0 (7.7)	-26.0 (9.4)	53.0 (12.0)

EA: early acceleration phase of ball (SFC to MaxER)
 LA: late acceleration phase of ball (MaxER to BRL)

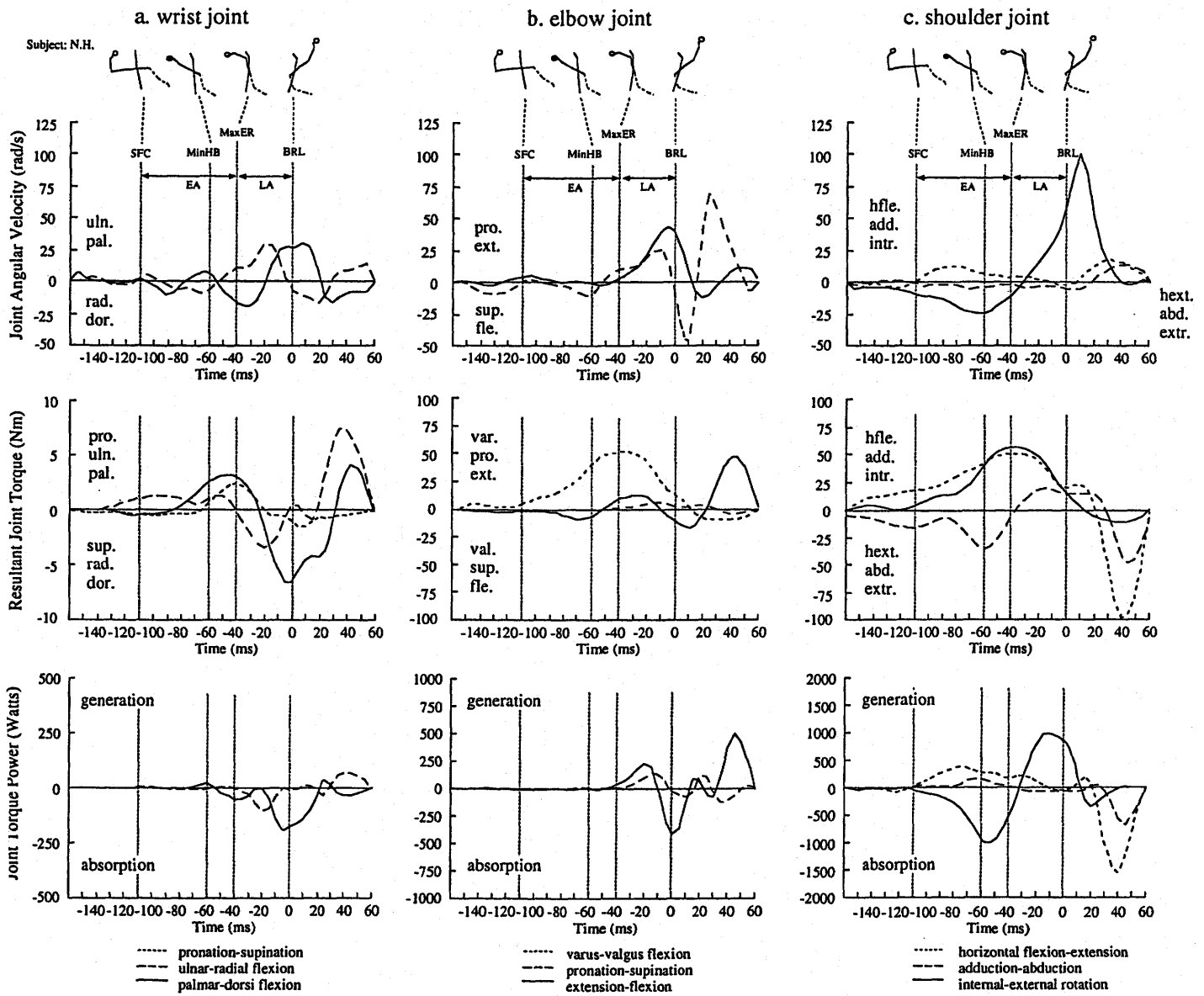


Figure 5.8

Changes of the (top) joint angular velocities, (middle) resultant joint torques, and (bottom) joint torque powers (*JTPm*) in the (a) wrist, (b) elbow and (c) shoulder joints.

Table 5.6

Maximum values and their appearance times for the the joint torque powers (*JTP_m*) at the wrist, elbow and shoulder joints expressed as their anatomical rotations.

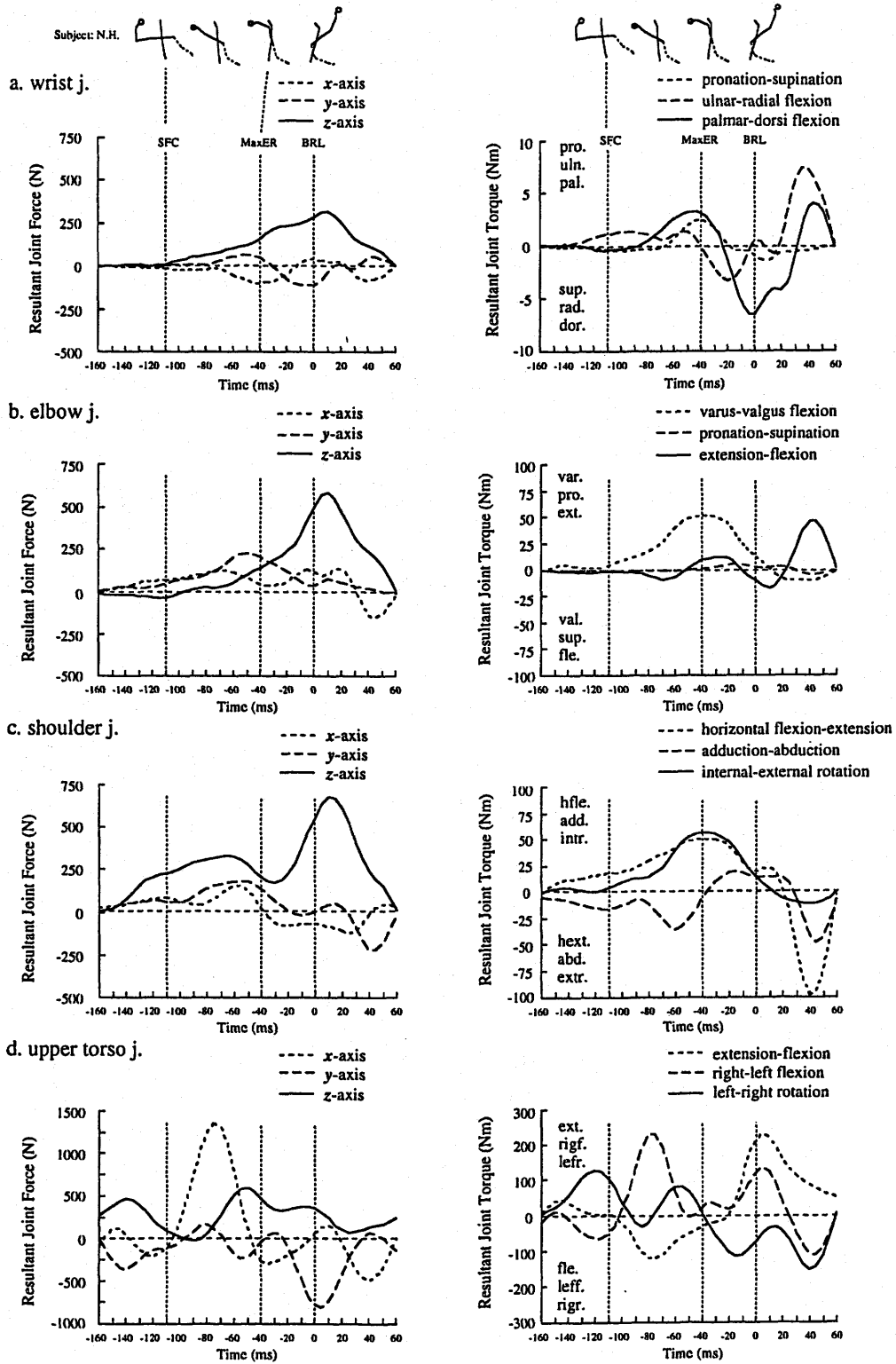
Joint rotation	n = 24	
	Maximum	Time
	Mean (S.D.) Watts	Mean (S.D.) ms
wrist j.		
[ulnar flexion	23.5 (23.5)	-50 (36)
[radial flexion	55.8 (37.3)	-38 (35)
[palmar flexion	20.4 (21.2)	-57 (36)
[dorsi flexion	137.9 (60.2)	-10 (20)
elbow j.		
[pronation	130.9 (84.6)	-23 (15)
[supination	50.3 (63.0)	-32 (36)
[extension	140.1 (88.5)	-34 (12)
[flexion	490.7 (186.4)	-3 (4)
shoulder j.		
[horizontal flexion	488.2 (154.0)	-58 (21)
[horizontal extension	88.6 (71.9)	-65 (50)
[adduction	185.6 (103.3)	-41 (23)
[abduction	170.7 (124.6)	-48 (34)
[internal rotation	1038.3 (340.9)	-10 (9)
[external rotation	1155.8 (420.4)	-55 (8)

Table 5.7

Mechanical works (positive, negative and absolute) at the wrist, elbow and shoulder joints expressed as their anatomical rotations.

Joint rotation	EA						LA						EA + LA					
	Wp		Wn		Wab		Wp		Wn		Wab		Wp		Wn		Wab	
	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules	Mean (S.D.) Joules
wrist j.																		
URF	0.2 (0.2)	-0.3 (0.3)	0.6 (0.4)	0.1 (0.2)	-0.9 (0.7)	1.0 (0.7)	0.4 (0.3)	-1.2 (0.8)	1.5 (0.7)									
PDF	0.2 (0.2)	-1.0 (0.7)	1.1 (0.7)	0.1 (0.3)	-1.9 (0.8)	2.0 (0.8)	0.3 (0.3)	-2.8 (0.8)	3.1 (1.0)									
elbow j.																		
PS	0.4 (0.5)	-0.3 (0.3)	0.7 (0.5)	2.4 (1.5)	-0.2 (0.3)	2.6 (1.4)	2.8 (1.5)	-0.5 (0.4)	3.3 (1.4)									
EF	0.9 (1.0)	-1.0 (1.0)	1.9 (1.2)	2.2 (1.7)	-6.5 (4.0)	8.7 (3.6)	3.1 (2.4)	-7.5 (4.2)	10.6 (3.5)									
shoulder j.																		
HFE	15.1 (4.8)	-0.8 (1.1)	15.9 (4.9)	5.4 (3.4)	-0.5 (0.9)	5.9 (3.0)	20.5 (6.2)	-1.3 (1.4)	21.8 (6.0)									
AA	2.8 (2.4)	-2.8 (2.9)	5.6 (3.1)	2.5 (2.5)	-0.6 (1.1)	3.1 (2.4)	5.3 (3.5)	-3.4 (2.8)	8.7 (3.7)									
IER	0.3 (0.8)	-37.3 (10.7)	37.6 (11.2)	21.8 (6.7)	-4.7 (3.9)	26.5 (7.6)	22.0 (6.6)	-42.0 (11.4)	64.1 (13.2)									

URF: ulnar-radial flexion at the wrist joint
 PDF: palmar-dorsi flexion at the wrist joint
 PS: pronation-supination at the elbow joint
 EF: extension-flexion at the elbow joint
 HFE: horizontal flexion-extension at the shoulder joint
 AA: adduction-abduction at the shoulder joint
 IER: internal-external rotation at the shoulder joint



x-and y-axes means the shear forces.
z-axis the compression force.

Figure 5.9

Changes in the resultant joint forces (left side) and the resultant joint torques (right side) at the (a) wrist, (b) elbow, (c) shoulder and (d) upper torso joints.

Table 5.8

Positive and negative maximum values and their appearance times for the resultant joint forces at the wrist, elbow, shoulder and upper torso joints evaluated with their joint coordinate systems.

Joint axes	max.value		time		min.value		time	
	Mean (S.D.)		Mean (S.D.)		Mean (S.D.)		Mean (S.D.)	
	N		ms		N		ms	
n = 24								
wrist j.								
x	53.9	(19.0)	-10	(7)	-80.8	(30.4)	-51	(16)
y	59.7	(26.3)	-59	(9)	-99.5	(29.6)	-10	(6)
z	278.4	(46.0)	-8	(11)	33.6	(23.3)	-118	(22)
elbow j.								
x	143.8	(36.0)	-23	(30)	16.3	(32.4)	-75	(45)
y	250.8	(37.4)	-51	(9)	20.3	(34.0)	-79	(56)
z	499.6	(78.6)	0	(0)	-6.8	(31.0)	-113	(22)
shoulder j.								
x	204.2	(61.0)	-63	(11)	-81.3	(58.2)	-18	(31)
y	201.2	(32.7)	-67	(25)	-40.5	(52.1)	-52	(52)
z	551.3	(88.3)	0	(0)	142.8	(57.6)	-74	(46)
upper torso j.								
x	1244.8	(431.5)	-68	(21)	-431.6	(324.2)	-35	(48)
y	324.2	(264.1)	-80	(39)	-906.5	(406.3)	-47	(46)
z	736.0	(205.6)	-62	(29)	-247.9	(292.5)	-33	(33)

0ms: the instant of ball release
 - : before the instant of ball release
 x-and y-axes means the shear forces.
 z-axis the compression force.

Table 5.9

Maximum values and their appearance times for the resultant joint torques at the wrist, elbow, shoulder and upper torso joints expressed as their anatomical rotations.

Joint rotation	n = 24	
	Maximum Mean (S.D.) Nm	Time Mean (S.D.) ms
wrist j.		
[pronation	1.9 (1.1)	-43 (16)
[supination	1.5 (0.7)	-18 (39)
[ulnar flexion	2.6 (1.2)	-68 (38)
[radial flexion	2.2 (1.4)	-19 (12)
[palmar flexion	4.3 (2.0)	-50 (8)
[dorsi flexion	3.6 (1.7)	-14 (34)
elbow j.		
[varus flexion	60.0 (10.6)	-40 (6)
[valgus flexion	2.3 (6.6)	-98 (47)
[pronation	6.2 (1.9)	-15 (10)
[supination	2.6 (1.0)	-73 (24)
[extension	11.9 (5.7)	-47 (21)
[flexion	15.3 (5.4)	-1 (2)
shoulder j.		
[horizontal flexion	59.8 (10.8)	-45 (8)
[horizontal extension	6.6 (10.9)	-82 (51)
[adduction	8.0 (11.3)	-44 (49)
[abduction	39.6 (14.4)	-52 (19)
[internal rotation	65.3 (11.8)	-39 (6)
[external rotation	2.1 (5.5)	-103 (42)
upper torso j.		
[extension	182.3 (89.8)	-37 (49)
[flexion	160.7 (60.9)	-68 (11)
[right flexion	269.3 (87.6)	-52 (27)
[left flexion	88.2 (92.6)	-76 (53)
[left rotation	131.8 (45.2)	-99 (35)
[right rotation	127.0 (62.4)	-19 (17)

第6章 投球動作のメカニズム／指導／筋力トレーニング

6.1 野球の投球動作における速投のメカニズムについて

ボール加速局面において、上腕と投球腕の主要な関節運動（20 rad/s 以上）は、上腕の左回旋、肩の水平屈曲および内外旋、肘の伸展および回内、手の掌屈および尺屈であった（図 4.8, 表 4.1）。しかしながら、これらの関節運動を引き起こす主因である関節トルクをみると、上腕のすべてと肩の水平屈曲、外転、内旋の関節運動の最大値は非常に大きい。肘関節の内反を除く、肘および手の関節運動は非常に小さかった（図 5.9, 表 5.9）。上腕や肩関節の関節トルクが手や肘関節よりも大きくなった理由は、上腕や肩関節に付着する筋群は、手や肘関節に付着する筋群よりも、質量の大きい体幹や上腕部を動かさなければならないためであろう。

しかし、これだけでは、以下のような細かい点を説明することができない。例えば、加速局面において肩の内旋トルクが生じるにもかかわらず、実際には前半では外旋運動が生じている。このように、関節トルクと同一方向の関節運動が生じるとは必ずしも言えず、反対に逆方向への運動が生じる場合もあった。さらに言えば、関節の運動が生じて、そのトルクに見合ったものではなかったり、なんら運動が生じない場合もみられた。関節運動は関節トルクの発生の結果であろうと考えられるので、このような矛盾する結果が本研究で見出されたことは、野球の投球動作のメカニズムを検討するうえで極めて重要な意味をもつことを示すものであろう。

ところで、Feltner and Dapena (1989)やPutnam (1993)は、投動作やキック動作など開放系の身体部分の運動は、関節トルクだけでなく、運動依存力（角加速度）、すなわち近位端点や隣接部分の運動、さらに重力によって生じる関節力（角加速度）成分にも影響を受けることを示した。

本研究では、これらの運動依存力（角加速度）を算出していないので、隣接部分の運動が具体的にどの関節力成分に起因するものなのかを検討することはできない。し

かし、隣接部分の動きは主として関節トルクと関節力の相互作用によって引き起こされているので、以下、この点に着目して、野球の投球動作（速投）における加速局面の上腕と投球腕の運動のメカニズムについて考察を加える。

(1) 上腕関節について

上腕関節では、図 4.8a に示すように、リリース直前まで左回旋運動がほぼ一定の値（約 20.6 rad/s）で持続したが、その他の屈伸および右左屈運動は非常に小さかった。一方、関節トルクをみると、図 5.9d に示したように、局面前半において右屈と屈曲トルクが、後半において伸展と右屈トルクが大きくなった。また、回旋トルクは局面前半では左回旋トルク、後半では右回旋トルクとなったが、その大きさは右屈や屈伸トルクに比べ小さかった（表 5.9）。このように、上腕の運動は左回旋運動が主体となるにもかかわらず、右屈や屈伸トルクが回旋トルクを大きく上回っていた。

局面前半に大きな右屈トルク（最大値 269.3 Nm : BRL 前 52 ms）の発生がみられたが、右屈運動はわずかにしか生じなかった（図 4.8a）。すでに 5.5.3 (3) で述べたように、局面前半には、踏出脚の接地によって、上腕下端に大きな右側方力（1244.8 N : BRL 前 68 ms）が生じる。右屈トルクは、この力、すなわち上体を投球方向（この局面では左屈方向）へ大きく回転させようとする力に抗すべく発生したものである。したがって、右屈トルクと右側方力によって生じる運動の方向が互いに逆となるため、右屈運動があまり生じなかったものと考えられる。この右屈トルクの機能については、5.5.3 (3) で述べた。

局面後半には、特に伸展トルク（182.3 Nm : BRL 前 37 ms）が大きくなったが、伸展運動はほとんど生じなかった（図 4.8a）。このトルクは、この局面に生じる後方力（負の y 軸方向の力、-906.5 N : BRL 前 47 ms）と圧縮力（正の z 軸方向の力、736.0 N : BRL 前 62 ms）との合力によって、上体は大きく投球（前方）方向へ回転させられようとするので、この合力に対抗するために生じたものと考えられる。これらのトルクと力の機能は、吉福 (1982) の指摘を借りれば、上腕の投球方向への回転

を抑えることにより、末端部、すなわち投球腕各部の速度を大きくすることにあるものと考えられる。

左回旋運動は局面後半まで持続した。これは、局面前・前半に発生する左回旋トルク (131.8 Nm : BRL前 99 ms) の結果であろう。特にこの左回旋運動を減ずる方向で作用する関節力は生じていない (図 5.9d) ので、このことが左回旋運動が一定の大きさをもって生じる理由であろう。また、局面後半の左回旋運動の減少は、右回旋トルクの発生によるものだと考えられる。このトルクは、先に述べた伸展トルクと同様な機能があり、投球腕を加速するために重要な役割を果たしているものと考えられる。

(2) 肩関節について

肩関節では、局面前半には外旋、後半には内旋運動が極めて大きくなった (図 4.8b)。また加速局面において水平屈曲運動や外転運動が生じるが、その大きさは非常に小さく、約 10 rad/s 前後であった (表 4.1)。一方、関節トルクをみると、加速局面中、内旋と水平屈曲トルクが極めて大きく、また前半には外転トルク、後半には内転トルクとなった (図 5.9c)。このように、肩関節の主運動は外旋-内旋運動であるが、外旋トルクは全く生じなかった。また、水平屈曲トルクの大きさは内旋トルクとほぼ等しいが、水平屈曲運動は内旋運動ほど大きくならなかった。さらに局面前半に外転トルク、後半に内転トルクが発生するにもかかわらず、内転運動はほとんど発生せず、また外転運動は発生しても極めて小さなものであった。

局面前半において、内旋トルクが増大するが、逆に外旋運動が生じた。この外旋運動のメカニズムについては、2. 2. 3 (2) において詳述したように Feltner and Dapena (1986)が興味深い仮説を提示している。本研究においても、局面前半、すなわち肩が外旋運動する局面において、肩にまず前方力 (正の y 軸方向の力, 201.2 N : BRL前 67 ms) が、次に上方力 (正の x 軸方向の力, 204.2 N : BRL前 63 ms) が生じた (図 5.9c)。これらの力の発生およびそのタイミングの遅れは、Feltner

and Dapena (1986)による肩外旋運動発生仮説を支持するものであろう。しかし、本研究では、これらの前方力や上方力の発生とほぼ同時に、上腕関節に圧縮力（前出）が生じた（図 5.9d, 表 5.8）。したがって、この力は、肩において上方力と同様な作用を行なうと考えられるので、肩の外旋運動を促進させる要因のひとつに挙げられるものであろう。なお、Feltner and Dapena (1986)の指摘のように、局面前半の内旋トルクの増大は、これらの関節力による外旋モーメントの結果として発生したものであり、後半の内旋トルクは、これらの力による外旋モーメントよりもトルクの方が大きくなったために生じたものであろう。

内旋トルクと同様に、大きな水平屈曲トルクがみられたが、水平屈曲運動は小さかった。この原因のひとつは、肩の前方力（前出）が上腕の重心まわりに水平伸展運動を引き起こすモーメントを生み出しているため、水平屈曲トルクと前方力によって引き起こされる運動が互いに逆方向となっていること、もうひとつは、内旋筋群（トルク）に比べ、水平屈曲筋群（トルク）は長軸まわりでない慣性の大きい上腕の回転を引き起こす必要があることなどが挙げられる。

加速局面中、外転および内転トルクともに発生したが（図 5.8c）、内外転運動はほとんどみられなかった（図 4.8b）。局面前半には外転トルク（39.6 Nm : BRL 前 52 ms）が発生する同時に、上方力（前出）も発生している（図 5.8c）。したがって、局面前半において、外転トルクの発生にもかかわらず、外転運動が生じなかったのは、上方力が上腕の重心まわりに内転運動を発生させるモーメントを生み出しているためであると考えられる。同様な理由から、局面後半において、内転が生じなかったのは、下方力による上腕の重心まわりの外転モーメント発生のためであると考えられる。

(3) 肘関節について

肘関節では、局面後半において伸展と回内運動が顕著に大きかった（図 4.8c）。一方、関節トルクは、伸展と回内トルクが非常に小さく、内反トルクが著しく大きかった。

た(図 5.9b)。このように、肘関節で主体となる運動は伸展と回内運動であったが、これらの運動を引き起こすトルクの発生は極めて小さかった。また、肘関節は内外反方向への運動が制限されているにもかかわらず、内反トルクが極めて大きな値を示した。

肘の伸展トルクそのものは小さかったが、局面後半に急激な伸展運動がみられた(図 4.8c)。また、局面後半には、肩関節の圧縮力(正の z 軸方向の力, 551.3 N : BRL 前 0 ms) が急激に増大した(図 5.9c, 表 5.8)。この圧縮力は、肘屈曲位では前腕の重心まわりの強力な伸展モーメントとなるので、この肩の圧縮力によって肘の伸展が生み出されているものと考えられる。したがって、肘の伸展運動は、肘の伸展筋群によるものではないと考えられる。このような結果は、Feltner and Dapena (1986)による伸展運動のメカニズムと一致するものである。

加速局面後半の回内運動は、これを引き起こすとみられる関節力によるモーメントはみられない。強いて言えば、肘の外側力(負の y 軸方向の力)や後方力(負の x 軸方向の力)による回内モーメントが考えられるが、局面中、これらの力は全く生じないので(図 5.9b, 表 5.8)、この可能性も考えられない。回内運動は、恐らく、局面後半の肘の伸展運動と肩の内旋トルクの結果として生み出されているものと考えられる。すなわち、局面後半の肘の伸展によって、前腕の長軸が上腕の長軸方向へ一致していくので、この状態で発生している肩の内旋トルクは、内旋運動だけでなく、さらに回内運動をも引き起こしているものと考えられる。なお、肘の伸展および回内運動とも、リリース直前において減少する(図 5.8b)のは、上腕筋や上腕二頭筋(屈曲筋であると同時に、強力な回外筋でもある)による屈曲トルクの発生のためである(図 5.9b, 表 5.9)。この理由については、すでに 5.5.2 (1) で述べた。

加速局面中、内反トルクが極めて大きな値を示した(図 5.9b)。このトルクは、肩の内旋トルクの大きさおよびそのパターンに極めて類似したものである。Feltner and Dapena (1986), Feltner (1989)は、この内反トルクは肩の内旋トルクの大部分

が上腕を介して肘へ伝わったものであると述べている。肘関節は屈伸運動のみ可能な一軸性の蝶番関節であり、肘関節単独では内外反方向の運動を行なうことができない。このように、関節の自由度を考慮すると、肘関節は、その構造上、肩関節の内外旋運動に連動して内外反運動を行なう特性をもっているものと考えられる。したがって、Feltner and Dapena (1986), Feltner (1989)の指摘するように、肘の内反トルクの発生は、肩の内旋トルクの結果であるものと考えられる³。

(4) 手関節について

手関節では、局面後半において背屈から掌屈運動となり、また尺屈運動が生じた(図 4.8d)。そして、これらのうち、とりわけ掌屈の角速度は約 39.3 rad/s (最大値)と大きかった(表 4.1)。一方、関節トルクは、加速局面中に掌屈から背屈トルク、後半に撓屈トルクが優位であった(図 5.9a)が、これらのトルクの最大値は約 5.0 Nm 以下で極めて小さかった(表 5.9)。このように、手関節では掌背屈と尺屈運動が主体であった。そして、これらの運動の角速度は大きな値を示すにもかかわらず、そのトルクは著しく小さなものであった。

加速局面後半の背屈からの掌屈運動は、その一部は、掌屈と背屈トルクの発生によるものであると考えられる。しかし、これらのトルクはわずかなものであるので、これらのトルクのみだけで、大きな掌屈運動が生じるとは通常考えられない。これについては、5.5.3(2)で述べたように、手の背屈位では肘関節の圧縮力(図 5.9b: 正のz軸方向の力, 499.6 N: BRL前0 ms)と、さらに手関節の後方力(図 5.9a: 負のy軸方向の力, -99.5 N: BRL前10 ms)が手の重心まわりの掌屈モーメ

³ 本研究では、各関節は1点で連結された点と仮定しているため、肘関節の内外反運動は生じないようにモデル化されている。これを考慮すると、肘の内反トルク(図 5.9b)は、肩の内旋トルク(図 5.9c)に合致しなければならないが、実際には一致しなかった(表 5.9)。これは、部分を剛体としたことや計算上の算出精度などによるためであると考えられる。

ントとなるために、これらの圧縮力によって掌屈運動が引き起こされているものと考えられる。同様な理由から、局面中期の背屈運動は、手関節の前方力（図 5.9a：正の y 軸方向の力，59.7 N：BRL 前 59 ms）と肘関節の圧縮力による背屈モーメントのためであろう。

尺屈運動は、局面中期の内側力（図 5.9a：負の x 軸方向の力，-80.8 N：BRL 前 51 ms）が手の重心まわりの尺屈モーメントとなるため、この力によって引き起こされたものであると考えられる。また、局面後半の撓屈トルク（図 5.9a）は、この尺屈運動を減じるために発生したものであると考えられる。

6. 2 速投と遠投動作の指導について

本研究から得られた結果は、それぞれ 3. 5，4. 6 および 5. 6 で述べたとおりである。以下、これらの結果から、速投と遠投動作の指導について有益となる知見を引き出す。

第 3 章において示されたように、速投と遠投間において、ボールの合成速度の変化パターンに差はなかった。しかし、ボールの水平速度は速投が遠投よりも大きく、ボールの鉛直速度は遠投が速投よりも大きかった。また、投射角度は遠投が速投よりも大きく、リリース位置は遠投が速投よりも高く、かつ後方であった。そして、これら速投と遠投における運動学的諸量の相違は、主として両投の上腕の運動の相違に起因したものであった。

具体的に言えば、踏出脚の接地時からリリース時まで、遠投が速投よりも、上腕の後傾および左傾運動が顕著に大きく、また体幹の後方へのひねり運動が大きかった。

以上のことから、速投の指導では、ボールを水平方向へ加速するために、踏出脚の接地時からリリース時において、垂直に立てた上腕を前方へ大きく倒させること、また遠投の指導では、ボールをより遠くへ投げるためには踏出脚の接地前の局面におい

て体幹を後方へ大きくひねった状態で上腕を大きく後方へ倒させ、引き続くボール加速局面においては大きく後傾した上腕を垂直へ戻させると同時に、投球腕の反対側へ倒させることを強調することが望ましいと考えられる。

一方、両投における投球腕の相違は、肩の内転ではボール加速局面の後半において、肩の水平伸展ではリリース直前の局面において、肩の外旋では50%時から80%時までとリリース時において、また肘の屈曲では踏出脚の接地直後において認められ、いずれの運動も遠投が速投よりも大きかった。

このうち、特に強調できることは、両投ともボール加速局面において肩の水平屈曲がみられない、すなわち肘部は前額面を越えることがほとんどなく、肩関節の内外転角はほぼ約 -10° -20° の範囲にあった。そしてこの肩の肢位からの主要な関節運動は肩の外内旋と肘の伸展運動であったことである。したがって、これらのことから、指導上の留意点を述べるとすれば、「肩内外転中間位および水平伸展位を保持して、肩の外内旋と肘の伸展運動を用いてボールを加速できるようにする」ということになる。とりわけ、遠投では重力に逆らって投球腕やボールを斜め上方へ投げ上げなければならぬため、これらの動作を大きくすることが望ましいと考えられる。

ところで、これらの速投と遠投間にみられた体幹や投球腕の運動を、実際に被験者が意識的に行なっているのか、あるいはそうではないのかを明らかにすることは指導上極めて重要な課題のひとつであると考えられるが、本研究の結果だけからでは明確に示すことはできない。しかし、以下のことから、被験者は投球腕の運動よりも、体幹部の動きを意識的に用いているものと考えられる。

すなわち、投球腕各部分は体幹部よりも質量が小さいので動かしやすく、またボール加速局面は極めて短時間で終了してしまうので、被験者が投球腕の運動を意識しているというよりは、むしろ質量が大きく、動かすのに時間を要する体幹部を意識的に用いていると考えた方が妥当であると思われる。したがって、両投にみられた投球腕の運動の相違は、体幹部の動きの結果として生じたものであると考えられる。

これらのことから、投球指導では、第6章の研究からも具体的に指摘されるように、投球腕の運動ではなく、両投の上腕や体幹の運動の違いの方を強調した方が効果的であろう。

第4章の研究では、ボール加速局面の前半において、上腕関節の左回旋および屈曲運動、肩関節の水平屈曲運動がボール速度の増大に大きく貢献した。引き続き加速局面後半では、肩関節の内旋運動、肘関節の伸展運動、手関節の掌屈運動および上腕関節の左回旋運動が大きく貢献したことが示された。

関節運動は関節トルクや関節力などの発生の結果として生じたものなので、この研究結果だけから投球指導への示唆を得ることは危険である。なぜならば、手関節の掌屈運動がリリース直前において大きく貢献するが、第5章の研究において明らかにされたように掌屈トルクそのものは著しく小さかったことなどによるためである（5.3(1)）。このことは、熟練度の高い被験者は手関節の屈曲筋群を積極的に用いていないことを意味するので、したがって、投球時に掌屈運動を強調することは望ましくないであろう。なお、投球動作では、上記した関節運動が各局面においてボール速度の増大に寄与するという事実を理解させることは重要なことであろう。

第5章の研究では、ボールへ伝えられるエネルギーの大部分が手関節の関節力パワーに起因しており、さらにこれらのパワーのほとんどは、体幹や肩関節における筋群によって生み出されたエネルギーが関節や筋・腱を介して伝達されることによってもたらされていたこと、また手関節や肘関節屈伸のトルクは著しく小さかったことが示された。

以上のことから、投球指導では、先にも述べたように投球腕末端、すなわち肘や手関節まわりの筋群を用いるのではなく、特に体幹の回旋・屈曲・側屈筋群や肩関節の水平屈曲筋・内旋筋群などを用いるように強調することが極めて重要であろう。

6. 3 投能力を高める筋力トレーニング方法について

第5章では、上腕および投球腕各部分の運動を動力的観点から検討した。合成関節トルクや関節トルクパワーは筋の動員や収縮様式を示すものであるので、これらの動力学量は投球動作のメカニズムのみだけでなく、投球動作固有の筋力トレーニング法を考える上で極めて有益な知見をも提供する。

上腕では、投球加速局面において左右屈、屈伸および左回旋運動のいずれもが大きなトルクを示した。肩関節では内旋および水平屈曲トルクが、肘関節では内反トルクが顕著に大きかったが、手関節のトルクはほとんどみられなかった。また関節のトルクパワーをみると、肩関節の内旋運動はボール加速局面において収縮様式が伸張性収縮から短縮性収縮へと変わり、水平屈曲は短縮性収縮であった。ただし、水平屈曲運動はリリース後は極めて大きな伸張性収縮となった。肘関節ではボール加速局面後半において伸展運動が短縮性から伸張性収縮になり、回内は短縮性収縮であった。手関節の掌屈はリリース前後において伸張性収縮であった。

以上の結果から、ボール速度を高める具体的な筋力トレーニング方法について考えると、次のようになろう。

体幹では、踏出脚の接地直後において身体に投球方向とは逆向きの力が加わるので、この力に耐えるべく側屈、屈伸および回旋運動を司るすべての筋群をトレーニングすべきであり、特にこれらの筋群を伸張性の収縮 *eccentric contraction* でトレーニングを行なうことが重要である。肩関節では内旋筋群および水平屈曲筋群をトレーニングすべきであるが、収縮様式を考慮すると、これらの筋群は伸張および短縮性 *concentric* の両方の収縮様式でトレーニングを行なう必要がある。これらの体幹部や肩関節部で生み出されたエネルギーは投球腕末端部へ伝わり、ボールのエネルギー増大を導くだろう。肘関節や手関節はそれ自体パワーを発生する駆動部ではないが、体幹部や肩関節部で発生した大きなエネルギーに運動器そのものが破壊されることなく、かつエネルギーを効果的にボールへ伝達するために、以下のような点に留意すべきで

あろう。すなわち、肘関節は加速局面後半において極めて大きな伸展速度を持つため、障害防止の観点から肘屈曲筋群を伸張性収縮でトレーニングすべきであること、また内反トルクを引き起こす筋自体は存在しないので、尺（内）側側副靭帯や前腕屈筋回内筋群（臑）のストレッチングとその強化（特に、伸張性収縮のトレーニング）を図るべきであろう。そして、手関節ではトルクそのものは小さいが、体幹や肩・肘関節から伝わるエネルギーによって手部が大きく加速されるため、障害防止の観点から掌背屈筋群は伸張性収縮のトレーニングを行なうことが重要である。

第 7 章 結 論

7. 1 総 括

(1) 研究の要約

第1章で論じたように、本研究では、野球の投球動作のメカニズムを究明するにあたって、運動課題の観点から野球の投球動作を2つに分類することが極めて重要な意味を持つことを述べた。その2つの投球動作とは、すなわち「スピード投」と「正確投」である。そして、「スピード投」では「速投」と「遠投」の2つに分類することができ、「正確投」では「低く投げ出す方法」と「高く投げ出す方法」があることを述べた。一方、「正確投」においても、“スピード“の問題が内在していることを指摘し、「スピード投」の解明が野球の投球動作のメカニズムを究明するために最優先課題となっていることを論じた。

しかしながら、第2章で明らかにしたように、これまで映像解析法を用いた野球の投球動作のバイオメカニクス的研究は、投手のピッチング動作に着目した、2次元的なものが多く、野球の投球動作を3次元的に検討したものは少ないことがわかった。したがって、野球の投球動作における「スピード投」、すなわち「速投」と「遠投」については、その実態がほとんど解明されていなかった。

以上のことから、本研究では、3次元画像解析法を用いて、野球の投球動作の「スピード投」における加速局面の上腕および投球腕の運動のメカニズムをバイオメカニクス的に解明するとともに、得られた知見を手がかりとして野球の投球動作指導とその筋力トレーニング方法について検討することを目的とした。この目的を達成するために、本研究では、以下の3つの研究課題を設定した。

すなわち、1) スピード投-速投と遠投動作の比較(第3章)、2) 速投動作の運動学的研究-ボール速度の貢献度に着目して-(第4章)、3) 速投動作の動力学的研究-力学的エネルギーフローに着目して-(第5章)、である。

以下、各章の研究の概要を述べ、野球の投球動作のメカニズムについて要約する。

第3章の研究では、速投と遠投に着目し、両投におけるボール初速度（合成速度）や投射角度などの特徴を明らかにすること、またこれらの諸量が両投において異なるとすれば、それは体幹や投球腕などのいかなる運動の相違によってもたらされるのかを3次的に比較検討することであった。その結果、両投に以下の動作的相違が認められた。すなわち、遠投では、速投よりも全体的に上腕の後傾および左傾、体幹の後方ひねり、肩関節の内転、外旋および水平伸展運動が大きかったことであった。これらの部分の運動の相違は、遠投では速投よりもボールの鉛直速度を大きく、すなわち投射角度を大きくしてボールを投げ出す必要があるために生じたものであった。

なお、ボール合成速度は速投と遠投間に統計的な差が認められず、さらに両投の被験者間のボール合成速度に有意に高い正の相関関係が認められた。これらのことは、投射角度が異なることによってスピード投のメカニズムそのものが相違することはないことを意味するものであった。したがって、速投と遠投は、同一の投げ方（スピード投）に分類できるものと考え、これにより、以降の各章（第4章、第5章）では速投に着目して研究を行なった。

第4章では、速投に着目して、ボール速度が上腕および投球腕各関節のどのような回転運動に起因するのかを「貢献度」を手がかりに運動学的観点から明らかにすることであった。すなわち、上腕および投球腕各関節における合計11の回転運動によって得られたボール速度を3次的に算出する方法を考案し、ボール速度に対するこれらの関節運動による速度およびその貢献度を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

ボール速度の変化パターンは、ボール加速局面において3つの局面に分けられた。すなわち、1) ボール速度減少局面、2) ボール速度漸増局面、3) ボール速度急増局面であった。これらのうち、ボール速度漸増局面では、上腕の左回旋および屈曲、肩の水平屈曲運動がボール速度の増大に貢献していた。引き続きボール速度急増局面で

は、肩関節の内旋運動、肘関節の伸展運動、手関節の掌屈運動がボール速度の増大に大きく貢献していることが明らかにされた。

これらの関節の回転運動によって得られたボール速度の変化パターンは、関節のトルク発現の結果なので、さらに次章では動力学的な観点から検討を行ない、速投動作のメカニズムについて検討を加えた。

第5章では、第4章の研究と同様に速投に着目して、剛体リンクモデルを用いて、上腕および投球腕各部分（関節）の力学的エネルギーフロー、力学的エネルギー、力学的仕事、合成関節力および合成関節トルクを3次元的に算出し、動力学的観点から上腕および投球腕各部分の運動のメカニズムについて検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

力学的エネルギーの最大値は、踏出脚の接地前後からリリースにかけて、上腕、上腕、前腕、手、ボールへと順に現れた。

手関節では、合成関節トルクの発生は他の関節よりも非常に小さなものであった。一方、近位端の関節力パワーは踏出脚の接地後から急激に増大していき、リリース直前で減少したが、近位・遠位端および関節の関節トルクパワーに比べ顕著に大きかった。このように、本研究においてはじめて、手部へ伝えられるエネルギーのほとんどが近位端の関節力パワーに起因していることが明らかとなった。

肘関節では、手関節と同様に、近位端の関節力パワーが近位・遠位端および関節の関節トルクパワーよりも踏出脚の接地前からリリース直前まで著しく大きかった。一方、関節トルクパワーはリリースの直前で増大したが、その大部分は筋・腱を介して上腕から前腕へ流入するパワー（近位端の関節トルクパワー）によるものであり、関節で発生するパワー（関節の関節トルクパワー）は小さかった。このように、前腕のエネルギーの大部分は近位端の関節力パワーに起因することが明らかになった。

肩関節では、ボール加速局面の前半では近位端の関節力パワーが、後半では上腕から上腕へ伝達される近位端の関節トルクパワーが大きかった。肩の関節の関節トルク

パワーは、内外旋運動を境に吸収パワーから発生パワーとなり、それらのパワーのほとんどは内旋筋群によるものであった。このように、本研究においてはじめて、肩内外旋運動は典型的な Stretch-Shortening Cycle 運動であることが明らかにされた。

上腕関節では、合成関節力および合成関節トルクは他の関節に比べ最も大きかった。踏出脚の接地直後に投球方向に対して逆方向へ作用する合成関節力（ x 軸方向：右側方力）が急増するとともに、右屈トルクが増大した。この力とトルクの同時発生は、体幹の大筋群を伸張させ、大きなエネルギーを生み出すために極めて有効に作用していることが明らかになった。また上腕関節では、踏出脚の接地前からその直後まで近位端の正の関節トルクパワーが顕著に大きかった。この関節トルクパワーは投球腕に伝えられるエネルギー源となっているものと考えられた。一方、上腕の近位端の関節力パワーは、ボール加速局面において終始負のパワーであった。この負のパワーは、投球方向とは逆向きの力が上腕下端に作用したことによるものであると推察された。このように、本研究において、上腕の発生および蓄積されたエネルギーの大部分は加速局面において投球腕と下腕へ流出することが明らかとなった。

(2) 野球の投球動作の速投のメカニズムについて

第5章における力学的エネルギーフローの結果から、野球の投球動作の速投では、ボール加速局面において、ボールおよび投球腕末端部のエネルギーは、手や肘関節の筋群によるものではなく、肩や体幹で発生したエネルギーが肘や手関節の関節や筋・腱を通して伝達されることによることが示された。

以上のことから、野球の投球動作の速投（遠投）では、加速局面において、体幹部は主としてエネルギーの発生・蓄積器、肩関節は発生・伝達器、そして肘および手関節は伝達器としての機能を果たしているものと考えられた。

また、関節運動と関節トルクおよび関節力の結果から、野球の投球動作の速投では、加速局面において、これらの力やトルクがその関節運動を引き起こす上で究めて複雑

な作用を行なっていることが明らかとなった。

これらのことをまとめると、上腕関節では、特に右屈トルクと右側方力、伸展トルクと後方・圧縮力などが、肩関節では内旋トルクと前方・上方力および上腕関節の圧縮力、水平屈曲トルクと前方力、内外転トルクと下上方力などが、肘関節では伸展トルクと肩の圧縮力、回内運動と肩の内旋トルク、内反トルクと肩の内旋トルクなどが、手関節では、掌背屈運動と前後方力および肘の圧縮力、尺屈運動と内側力などが、その関節の運動の発生に密接に関わっていることが明らかにされた。

(3) 野球の投球の動作指導と筋力トレーニング方法について

従来、野球の投球動作指導や筋力トレーニング方法については、明確な識見がほとんど得られていなかった。これは、野球の投球動作そのものが複雑で、用いられる主要な関節運動が明確でなかったこと、また関節における筋群の収縮様式などの情報を提供する、力学的エネルギーフローなどの動態が全く知られていなかったことなどによるためである。

本研究で得られた結果は、野球の投球動作指導およびその筋力トレーニング方法に関して、極めて具体的で有益な知見を提供するものであった。これらのことについてまとめると、以下のようなになる。

野球の投球動作のボール加速局面における主要な関節運動は、体幹のひねり、上腕の屈伸、肩の内外旋および水平屈伸、肘の屈伸、手の掌背屈運動であった（第3章、第4章）。したがって、投球指導では、これらの関節運動を理解させることが望ましい。しかし、動力的観点から明らかにされたように、ボールへ伝達されるエネルギーの大部分は、投球腕末端の肘や手関節で発生したものではなく、体幹や肩の運動によって発生したものによることであった（第5章）。このことは、投球動作の加速局面では肘や手関節まわりの筋群を用いているのではなく、体幹や肩関節部、すなわち体幹の回旋・屈曲・側屈筋群や肩関節の水平屈曲筋・内旋筋群などを用いていること

を意味するので、投球指導では、投球腕よりも体幹や肩の運動を意識的に用いるよう強調することが重要であると考えられた。

投球動作の筋力トレーニング方法について、特にトレーニングすべき具体的な筋群を挙げれば、体幹では側屈、屈伸および回旋運動にかかわるすべての筋群、肩では内旋筋群および水平屈曲筋群、肘では屈曲筋群、手では掌背屈筋群であることがわかった。さらにこれらの筋群の収縮様式において、体幹では伸張性から短縮性の収縮でトレーニングすべきであり、肩では特に内旋筋群が Stretch-Shortening Cycle 運動であるため、伸張性から短縮性収縮のトレーニングを実施し、しかもその外旋から内旋運動の切り返しを極めて短時間で行なうようにすること、また水平屈曲筋群は短縮性収縮で行なうことが重要である。肘関節および手関節では、それぞれ屈曲筋群および掌背屈筋群の伸張性収縮トレーニングを重点的に行なうことが望ましいであろう。

7. 2 今後の研究課題

本研究では、3次元画像解析法を用いて、野球の投球動作のスピード投（速投および遠投）におけるボール加速局面の上脛および投球腕の運動のメカニズムをバイオメカニクスの的に検討した。

ボール加速局面に着目した理由は、ボールになされる仕事のほとんどが踏出脚の接地後の局面で行なわれると指摘されているからである (Atwater, 1979)。

また、上脛および投球腕の運動に着目した理由は、ボール加速局面ではそれらの部分の運動は顕著に観察されるが、一方、身体下部（下脛および下肢）の運動は踏出脚の接地後ほとんどみられないからである。

しかし、これらのことは、野球の投球動作のスピード投において、ボール加速局面以外の局面（準備・終末）や、また体幹・投球腕以外の身体部分の運動が重要でないことを意味するものではない。実際に、準備・終末局面では、投球腕以外の部分の運

動が顕著に観察されている。

準備局面（ワインドアップ局面：投球開始時から踏出脚の接地時まで）がない投球動作、つまり体幹の回旋や脚のステップ、非投球腕を用いない動作は、ボール速度の約50%しか獲得できないことが示されている (Toyoshima et al, 1974)。このことは、体幹やステップ脚、非投球腕の運動がボールを加速するために何らかの貢献をしていることを示すものであろう。

また、終末局面、つまりフォロースルー局面（リリース時から投球終了時まで）は、以下の理由から極めて重要な意味をもつ局面である。すなわち、この局面の目的は、加速された投球腕から障害の発生を導く要因を取り除くことにある。したがって、投球腕にかかるストレス（靭帯や関節面に過剰に作用する力）を軽減させるような方向で動作を遂行しなければならない。このストレスを効率よく軽減することができなければ、先立つボール加速局面（主要局面）において大きな力を発揮することはできないであろう。なぜならば、高い投能力をもつ一流選手は主要局面で大きな力を発揮しながらも、重篤な障害を惹起しないのは終末局面で障害の発生を導く過剰なストレスを動作的に軽減しているものと推察されるからである。

このように論じてくると、準備局面および終末局面での体幹、下肢および非投球腕の運動は、投球腕、延いてはボールの加速のために何らかのバイオメカニクスの有効要因を引き出して大きく貢献していると言えるであろう。

以上のことから、今後の研究課題として、以下のものが挙げられる。

- ① 野球の投球動作のスピード投（速投・遠投）における加速局面の非投球腕、下肢および下腕の運動を検討する。
- ② 野球の投球動作のスピード投（速投・遠投）における準備局面の身体部分の運動を検討する。
- ③ 野球の投球動作のスピード投（速投・遠投）における終末局面の身体部分の運動を検討する。

なお、野球の投球動作のメカニズムを包括的に究明するためには、第1章において野球の投球動作を分類したように、スピード投だけでなく、正確投についても本研究課題および上記の研究課題を検討する必要がある。

文献

- Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In., ASP UI Symposium on Close-Range Photogrammetry, Falls Church, VA, American Society of Photogrammetry: pp.1-19.
- 阿江通良(1991) 画像データによる動作解析法. *Japanese Journal of Sports Sciences* 10: 196-203.
- 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志 (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム* 11 (バイオメカニズム学会 編), 東京大学出版会: pp.23-33.
- 安藤幸司 (1983) 高速度写真撮影手法による写真計測法. *Japanese Journal of Sports Sciences* 2: 200-212.
- Andrews, J.G. (1974) Biomechanical analysis of human motion. In., *Kinesiology IV*, American Association for Health, Physical Education and Recreation, Published by the Committee on Kinesiology of the Physical Education Division, Washington, D.C.: pp.32-42.
- Andrews, J.G. (1982) On the relationship between resultant joint torques and muscular activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 14: 361-367.
- Asmussen, E. and Bonde-Petersen, F. (1974) Storage of elastic energy in skeletal muscle in man. *Acta Physiologica Scandinavica* 91: 358-392.
- Atwater, A.E. (1977) Biomechanical analysis of different pitches delivered from the windup and stretch position. *Medicine and Science in Sports* 9 (abstract): 49-50.
- Atwater, A.E. (1979) Biomechanics of overarm throwing movements and of throwing injuries. In., R.S.Hutton and D.I.Miller (Eds.), *Exercise and Sport Sciences Reviews* 7, Franklin Institute Press, Philadelphia, PA: pp.43-85.
- Beer, F.P. and Johnston, E.R. (1977a) *Vector Mechanics for Engineers: Statics* (3rd ed.). McGraw-Hill, New York. [長谷川節 訳 (1982) *工学のための力学*: 上. ブレイン図書出版, 東京.]
- Beer, F.P. and Johnston, E.R. (1977b) *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics* (3rd ed.). McGraw-Hill, New York. [長谷川節 訳 (1982) *工学のための力学*: 下. ブレイン図書出版, 東京.]

- Bosco, C. and Komi, P.V. (1979) Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiologica Scandinavica* 106: 467-472.
- Bowne, M.E. (1960) Relationship of selected measures of acting body levers to ball-throwing velocities. *Research Quarterly* 31: 392-402.
- Broer, M.R. (1969) *Efficiency of Human Movement*. W.B. Saunders Company, Philadelphia and London.
- Bunn, J.W. (1972) *Scientific Principle of Coaching* (2nd. ed.). Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Cavagna, G.A., Saibene, F.P. and Margaria, R. (1965) Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle. *Journal of Applied Physiology* 20: 157-158.
- Cavagna, G.A., Dusman, B. and Margaria, R. (1968) Positive work done by a previously stretched muscle. *Journal of Applied Physiology* 24: 21-32.
- Dapena, J. (1978) A method to determine the angular momentum of a human body about three orthogonal axes passing through its center of gravity. *Journal of Biomechanics* 11: 251-256.
- DiGiovine, N.M., Jobe, F.W., Pink, M. and Perry, J. (1992) An electromyographic analysis of the upper extremity in pitching. *Journal of Shoulder Elbow Surgery* 1: 15-25.
- Dillman, C.J., Fleisig, G.S. and Andrews, J.R. (1993) Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. *Journal of Orthopedic and Sports Physical Therapy* 18: 402-408.
- Dillman, C.J. (1994) Biomechanical contributions to the science of rehabilitation in sports. *Sport Science Review: Sport Biomechanics* 3, Human Kinetics Publishers, Inc., Champaign, Illinois: pp.70-78.
- Dyson, G.H.G. (1986) *Dyson's Mechanics of Athletics*. (8th. ed.) [revised by B.D.Woods and P.R.Travers], Hodder and Stoughton, London.
- 江原義弘 (1987) トルク・内力推定法の流れと問題点. 第1回数学モデルの歩行分析への応用-現状と問題点-, 臨床歩行分析セミナー (臨床歩行分析懇談会編): pp.13-30.
- Elliott, B.C., Grove, J. R. Gibson, B.J. and Thurston, W. (1985) A three-

- dimensional cinematographic analysis of baseball pitching technique. *Australian Journal of Science and Medicine in Sport* 17: 8-13.
- Elliott, B.C., Grove, J. R. Gibson, B. and Thurston, B. (1986) A three-dimensional cinematographic analysis of the fastball and curveball pitches in baseball. *International Journal of Sport Biomechanics* 2: 20-28.
- Elliott, B, Grove, J.R. and Gibson, B. (1988) Timing of the lower limb drive and throwing limb movement in baseball pitching. *International Journal of Sport Biomechanics* 4: 59-67.
- Feltner, M. and Dapena, J. (1986) Dynamics of the shoulder and elbow joints of the throwing arm during a baseball pitch. *International Journal of Sport Biomechanics* 2: 235-259.
- Feltner, M.E. (1987) Three-dimensional segment interactions of the throwing arm during overarm fastball pitching in baseball. Doctoral dissertation, Indiana University.
- Feltner, M.E. and Dapena, J. (1989) Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part I: General model. *International Journal of Sport Biomechanics* 5: 403-419.
- Feltner, M.E. (1989) Three-dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part II: Application to the throwing arm in baseball pitching. *International Journal of Sport Biomechanics* 5: 420-450.
- Fleisig, G.S., Andrews, J.R., Dillman, C.J. and Escamilla, R.F. (1995) Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *American Journal of Sports Medicine* 23: 233-239.
- Fleisig, G.S., Escamilla, R.F., Andrews, J.R., Matsuo, T., Satterwhite, Y. and Barentine, S.W. (1996) Kinematic and kinetic comparison between baseball pitching and football passing. *Journal of Applied Biomechanics* 12: 207-224.
- 淵本隆文, 宍倉保雄, 能村雅子, 金子公宥 (1985) 三種の投動作における関節運動の貢献度とエネルギー転移. *大坂体育大学紀要* 16: 99-104.
- Gibson, B.J. and Elliott, B.C. (1987) A three dimensional cinematographic analysis of junior baseball pitchers. *Journal of Human Movement Studies* 13: 363-375.
- Gowan, I.D., Jobe, F.W., Tibone, J.E., Perry, J. and Moynes, D.R. (1987) A comparative electromyographic analysis of the shoulder during pitching. *Ameri-*

- can Journal of Sports Medicine 15: 586-590.
- Hay, J.G. (1985) *The Biomechanics of Sports Techniques* (3rd. ed.). Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hibbeler, R.C. (1989a) *Engineering Mechanics, Statics* (5th ed.). Macmillan, New York.
- Hibbeler, R.C. (1989b) *Engineering Mechanics, Dynamics* (5th ed.). Macmillan, New York.
- Hill, A.V. (1970) *First and Last Experiments in Muscle Mechanics*. Cambridge.
- 平野裕一 (1988) 投球動作のバイオメカニクス. *臨床スポーツ医学* 5: 853-858.
- 平野裕一, 浅見俊雄 (1988) 野球の投球動作とその指導. *体育の科学* 38: 93-100.
- 広瀬茂男 (1990) *ロボット工学-機械システムのベクトル解析-*, 第3版 (機械工学選書: 西本 廉, 坂田 勝, 越後亮三 編), 裳華房, 東京.
- Hochmuth, G. (1974) *Biomechanik Sportlicher Bewegungen*. Sportverlag Berlin.
[遠藤万里 訳 (1981) *スポーツ運動のバイオメカニクス*. 新体育社, 東京.]
- 堀田朋基, 鶴 賢行, 河野信弘, 北村潔和 (1986) 硬式野球ボール, ハンドボール及びバスケットボール投げにおける動作の特徴. 第8回日本バイオメカニクス学会大会論集-動きのコツを探る- (石井喜八 編): pp.118-122.
- Hoshikawa, T. and Toyoshima, S. (1976) Contribution of body segments to ball velocity during throwing with nonpreferred hand. In., P.V.Komi (Ed.) *Biomechanics V-B*, University Park Press, Baltimore: pp.101-117.
- 池上康男 (1983) 写真撮影による運動の3次元解析法. *Japanese Journal of Sports Sciences* 2: 163-170.
- 石井喜八, 斉藤好史 (1982) 強靱でしなやかな投げ. *Japanese Journal of Sports Sciences* 1: 79-84.
- 岩原信九郎 (1991) *教育と心理のための推計学* (新訂版第27刷). 日本文化科学社, 東京.
- 岩田一明 編 (1982) *人体の運動動作解析と作業機能評価に関する研究*. 神戸大学工学部生産機械工学科報告書.

- Jobe, F.W., Moynes, D., Tibone, J.E. and Perry, J. (1983) An EMG analysis of the shoulder in throwing and pitching: A preliminary report. *American Journal of Sports Medicine* 11: 3-5.
- Jobe, F.W., Tibone, J.E., Perry, J. and Moynes, D. (1984) An EMG analysis of the shoulder in pitching: A second report. *American Journal of Sports Medicine* 12: 218-220.
- Jöris, H.J.J., van Muyen, A.J.E., van Ingen Schenau, G.J. and Kemper, H.C.G. (1985) Force, Velocity and energy flow during the overarm throw in female handball players. *Journal of Biomechanics* 18: 409-414.
- Kapandji, I.A. (1980) *Physiologie Articulare I*. Maloine, S.A. ed., Paris. [嶋田智明 訳, 荻島秀男 監訳 (1986) カパンディ関節の生理学I 上肢. 医歯薬出版, 東京.]
- 風井 誠, 熊本水頼, 岡本 勉, 山下謙智, 後藤幸弘, 丸山宣武 (1976) 野球の投動作 (オーバーハンドスロー) における上肢・上肢帯筋群の作用機序. *体育学研究* 21: 137-144.
- 機械工学便覧 (1989) 力学・機械力学 (新版). 日本機械学会 (日本機械学会 編), 東京.
- 小林一敏 (1977) スポーツの科学的原理. 講座現代のスポーツ科学 (朝日奈一男, 水野忠文, 岸野雄三 編), 大修館書店: pp.298-340, 東京.
- 小林一敏, 大島義晴 (1983) 映像解析におけるフィルタリング. *Japanese Journal of Sports Sciences* 2: 172-181.
- Komi, P.V. and Bosco, C. (1978) Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Medicine and Science in Sports* 10: 261-265.
- Komi, P.V. (1986) The stretch-shortening cycle and human power output. In., L.J. Norman, N. McCartney and J. McComas (Eds.), *Human Muscle Power*, Human Kinetics Publishers, Inc., Champaign, Illinois: pp.27-39.
- Kreighbaum, E. and Barthels, K.M. (1990) *Biomechanics: A Qualitative Approach for Studying Human Movement* (3rd ed.). Macmillan, New York.
- Kreyszig, E. (1983) *Advanced Engineering Mathematics* (5th ed.). John Wiley & Sons, Inc., New York. [北川源四郎, 阿部寛治, 田栗正章 訳 (1987) 数値解析 (原書第5版), 技術者のための高等数学5, 培風館]
- Kunz, H. (1974) Effects of ball mass and movement pattern on release velocity in

- throwing. In., R.C.Nelson and C.A.Morehouse (Eds.), Biomechanics IV, University Park Press, Baltimore: pp.163-168.
- 松浦義行 (1989) 体育・スポーツ科学のための統計学 (初版第5刷). 朝倉書店, 東京.
- Miller, D.I. and Nelson, R.C. (1973) Biomechanics of Sport—A Research Approach. Lea & Febiger, Philadelphia.
- Miller, D.I. (1980) Body segment contributions to sport skill performance: Two contrasting approaches. Research Quarterly for Exercise and Sport 51: 219-233.
- 南 茂夫 編著 (1986) 科学計測のための波形データ処理. CQ 出版株式会社, 東京.
- 三浦望慶, 橋本 勲 (1980) 投げにおける方向と初速度と重量と. 体育の科学 30 : 473-477.
- 三浦望慶, 池上康男, 松井秀治, 橋本 勲 (1983) 投げの方向とボールの重さが初速度におよぼす影響について. 身体運動の科学 V (日本バイオメカニクス学会 編), 杏林書院: pp.189-195.
- 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦 (1995) 大学野球選手における速投および遠投動作の3次元比較研究. 体育学研究 40: 89-103.
- 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 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.
- 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦 (1997) 野球の投球動作における体幹および投球腕の力学的エネルギー・フローに関する3次元解析. 体力科学 46: 55-68.
- 宮西智久 (1997) 画像を用いた身体部分の3次元角速度算出法の比較. バイオメカニクス研究 1: 7-14.
- 宮西智久 (1998) 剛体リンク系における身体運動の3次元関節トルク算出法の実際. 仙台大学紀要 30: 46-56.
- 宮崎信次 (1987) 数学モデルの利用の現況 (レビュー). 第1回数学モデルの歩行分析への応用—現状と問題点—, 臨床歩行分析セミナー (臨床歩行分析懇談会 編): pp.1-11.

- 宮崎信次, 石田明允 (1991) 関節の 3 次元的回転の記述について. *バイオメカニズム学会誌* 15: 217-224.
- Morehouse, L.E. and Cooper, J.M. (1950) *Kinesiology*. Henry Kimpton, London.
- 森口繁一 (1959) 初等力学 (初版第 43 刷). 培風館, 東京.
- 守屋富次郎, 鷺津久一郎 (1973) 力学概論 (改訂第 8 刷). 培風館, 東京.
- Morrey, B.F. and An, K.N. (1983) Articular and ligamentous contributions to the stability of the elbow joint. *American Journal of Sports Medicine* 11: 315-319.
- 日本整形外科学会身体障害委員会・日本リハビリテーション医学会評価基準委員会編 (1973) 関節可動域表示ならびに測定表. *リハビリテーション医学* 10: 119-123.
- O'Connell, A.L. and Gardner, E.B. (1980) *Understanding the Scientific Base of Human Movement* (2nd ed.). Williams & Wilkins Company, Baltimore.
- Pappas, M., Zawacki, R.M. and Sullivan, T.J. (1985) Biomechanics of baseball pitching: A preliminary report. *American Journal Sports Medicine* 13: 216-222.
- Plagenhoef, S. (1971) *Patterns of Human Motion*. Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Putnam, C.A. (1983) Interaction between segments during a kicking motion. In., H. Matsui and K. Kobayashi (Eds.), *Biomechanics VIII-B, Human Kinetics Publishers, Champaign, Illinois*: pp.688-694.
- Putnam, C.A. (1993) Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: Descriptions and explanations. *Journal of Biomechanics* 26 (Suppl.1): 125-135.
- Roberts, E.M. (1971) Cinematography in biomechanical investigation. In., J.M. Cooper (Ed.), *Selected topics in biomechanics. Proceedings of the C.I.C. Symposium on Biomechanics, The Athletic Institute, Chicago*: pp.41-50.
- Roberts, E.M. (1991) Tracking velocity in motion. In., C.L.Tant, P.E.Patterson and S.L.York (Eds.), *Biomechanics in Sports IX*: pp.3-23.
- Robertson, D.G.E. and Winter, D.A. (1980) Mechanical energy generation, ab-

sorption and transfer amongst segments during walking. *Journal of Biomechanics* 13: 845-854.

桜井伸二, 池上康男, 矢部京之助, 岡本 敦, 豊島進太郎 (1990) 野球の投手の投動作の3次元動作解析. *体育学研究* 35: 143-156.

Sakurai, S., Ikegami, Y., Okamoto, A., Yabe, K. and Toyoshima, S. (1993) A three-dimensional cinematographic analysis of upper limb movement during fast-ball and curveball baseball pitches. *Journal of Applied Biomechanics* 9: 47-65.

渋川侃二 (1969) 運動力学. 現代保健体育学体系 6, 大修館書店, 東京.

渋川侃二 (1984) 身体運動の力学的基礎. 現代体育・スポーツ大系 第7巻, 身体運動の科学 (浅見俊雄, 宮下充正, 渡辺 融 編), 講談社, 東京: pp.40-61.

Sisto, D.J., Jobe, F.W., Moynes, D.R. and Antonelli, D.J. (1987) An electromyographic analysis of the elbow in pitching. *American Journal of Sports Medicine* 15: 260-263.

Slocum, D.B. (1968) Classification of elbow injuries from baseball pitching. *Texas Medicine* 64: 48-53.

Spiegel, M.R. (1982) *Theory and Problems of Theoretical Mechanics*, Schaum's outline series, (SI ed.), McGraw-Hill Book Company, New York.

Springs, 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.

田中 繁 (1989) 関節モーメント計算法. 第2回数学モデルの歩行分析への応用-現状と問題点-, 臨床歩行分析セミナー (臨床歩行分析懇談会 編): pp.15-29.

湯 海鵬 (1995) 3次元的身体角運動量の算出法. *体育学研究* 40: 161-169.

Tarbell, T. (1971) Some biomechanical aspects of the overhead throw. In., J.M. Cooper (Ed.), *Selected topics in biomechanics. Proceedings of the C.I.C. Symposium on Biomechanics*, The Athletic Institute, Chicago: pp.71-81.

Toyoshima, S., Hoshikawa, T., Miyashita, M. and Oguri, T. (1974) Contribution of the body parts to throwing performance. In., R.C.Nelson and C.A.Morehouse (Eds.) *Biomechanics IV*, University Park Press, Baltimore: pp.169-174.

豊島進太郎, 星川 保 (1976) 投げだされたボールの速度と正確性からみた投運動の調整力. 身体運動の科学II (キネシオロジー研究会 編), 杏林書院: pp.168-177.

豊島進太郎 (1980) ボール投げと体幹のひねり. 体育の科学 30: 478-482.

Vaughn, R.E. (1985) An algorithm for determining arm action during overarm baseball pitches. In., D.A.Winter, R.W.Norman, R.P.Wells, K.C.Heyes and A.E.Patla (Eds.), Biomechanics IX-B, Human Kinetic Publishers Inc., Champaign, Illinois: pp.510-515.

和達三樹 (1983) 物理のための数学. 物理入門コース 10, 岩波書店, 東京.

Walton, J.S. (1979) Close-range cine-photogrammetry, Another approach to motion analysis. In., J.Terauds (Ed.), Science in Biomechanics Cinematography, Academic Publishers: pp.69-97.

Wells, R.P. and Winter, D.A. (1980) Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. In., Human Locomotion I, Proceedings of the First Congress of the Canadian Society of Biomechanics, Canada: pp.92-93.

Werner, S.L., Fleisig, G.S., Dillman, C.J. and Andrews, J.R. (1993) Biomechanics of the elbow during baseball pitching. Journal of Orthopedic and Sports Physical Therapy 17: 274-278.

Winter, D.A. (1990) Biomechanics and Motor Control of Human Movement (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc., New York.

山崎信寿 (1989) 関節モーメントの解釈. 第 2 回数学モデルの歩行分析への応用-現状と問題点-, 臨床歩行分析セミナー (臨床歩行分析懇談会 編) : pp.31-41.

矢野健太郎, 石原 繁 (1990) 科学技術者のための基礎数学 (新版第 35 版). 裳華房, 東京.

吉福康郎 (1982) 投げる-物体にパワーを注入する. Japanese Journal of Sports Sciences 1: 85-90.

吉福康郎 (1984) 身体のなす力学的仕事の定義に対する考察. Japanese Journal of Sports Sciences 3: 254-260.

付 録 A

—運動学データの算出—

1. 速度の計算

身体各部分の速度は、平滑化された身体各部分の座標変位データを用いて、以下の式 [A.1.1] により数値微分して求めた。

$$\dot{X}_i = \frac{-X_{i-1} + X_{i+1}}{2\Delta t} \quad [A.1.1]$$

ここで、

\dot{X} : 速度

X_{i-1}, X_{i+1} : 変位データ

i : フィルムのフレーム番号

Δt : サンプルング間隔 (200 Hz)

である。

2. 角度の計算

(1) 身体部分角 (絶対角)

2つのベクトル $A (X_A, Y_A, Z_A)$ とベクトル $B (X_B, Y_B, Z_B)$ とのなす角度 (θ) は、以下の式 [A.2.1] により、各フレーム毎に求めた。

$$\theta = \arccos \frac{X_A X_B + Y_A Y_B + Z_A Z_B}{\sqrt{(X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2)} \sqrt{(X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2)}} \quad [A.2.1]$$

(2) 関節角度 (相対角)

投球腕の関節角度 (肩関節の水平屈伸角, 内外転角および内外旋角) の算出は、以下のようにして行なった。

すなわち、各フレーム毎に上腕に運動座標系 (上腕座標系) を定義し、身体各部分の計測点の座標を座標変換行列 (以下、参照) を用いて、上腕座標系の座標値に変換した。そして、上腕座標系の任意の平面に上腕の長軸方向を示すベクトルを射影した

ベクトルと運動座標系の各軸の方向を示すベクトルとのなす角度として求めた（第 3 章参照）。なお、角度データは $\pi/2$ まででしか定義されていないので、それを越えると不連続量となり、そのままでは角速度や角加速度の算出に際し重大な影響を及ぼす。そこで、2つのベクトルの外積の正・負の方向を利用し、角度データが連続量となるように補正した。

① 空間上に原点が一致した 2つの直交座標系の座標変換

表 A.1 に示すように、空間上に原点が一致した 2つの直交座標系、仮に静止座標系 Σ (O-X, Y, Z) と運動座標系 Σ' ($o'-x', y', z'$) がある場合、座標変換は、以下の式 [A.2.2] , 式 [A.2.3] で表される (矢野健太郎, 1975; 矢野健太郎と石原繁, 1990)。

$$\begin{aligned} X &= l_1x' + l_2y' + l_3z' \\ Y &= m_1x' + m_2y' + m_3z' \\ Z &= n_1x' + n_2y' + n_3z' \end{aligned} \quad [A.2.2]$$

$$\begin{aligned} x' &= l_1X + m_1Y + n_1Z \\ y' &= l_2X + m_2Y + n_2Z \\ z' &= l_3X + m_3Y + n_3Z \end{aligned} \quad [A.2.3]$$

ただし、これらの座標系の間には、次の関係が成り立つ。

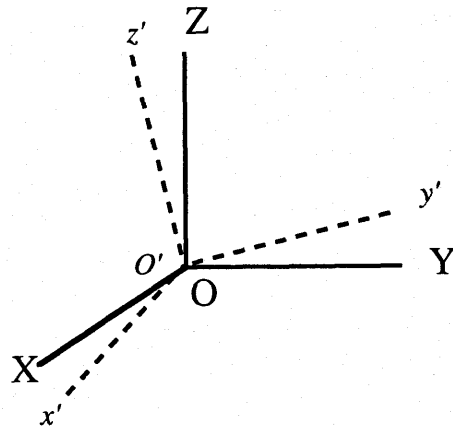
$$\begin{aligned} l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 &= 1 \\ m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 &= 1 \\ n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 &= 1 \\ l_1m_1 + l_2m_2 + l_3m_3 &= 0 \\ m_1n_1 + m_2n_2 + m_3n_3 &= 0 \\ n_1l_1 + n_2l_2 + n_3l_3 &= 0 \end{aligned} \quad [A.2.4]$$

$$[A.2.5]$$

ここで、 l_i, m_i, n_i ($i=1, 2, 3$) は、静止座標系と運動座標系との関係を示す係数、すなわち、方向余弦 direction cosine である。これら 9つの方向余弦を行列式で表したものを座標変換 (回転) 行列 transformation matrix, rotation matrix と呼ぶ。

Table A.1

		運動座標系 (moving coordinate system)		
		x'	y'	z'
静止座標系 (global coordinate system)	X	l_1	l_2	l_3
	Y	m_1	m_2	m_3
	Z	n_1	n_2	n_3



3. 部分の角速度の計算

(1) 静止座標系から直接求める方法 (湯, 1995) と本研究による方法の比較

湯 (1995) は, 以下の式 [A.3.1] により, 静止座標系 (X, Y, Z) における部分の重心まわりの角速度を算出している.

$$\omega_{Xji} = \frac{\{(Y_{ji} - Y_{jc})(V_{Zji} - V_{Zjc}) - (Z_{ji} - Z_{jc})(V_{Yji} - V_{Yjc})\}}{R_{ji}^2},$$

$$\omega_{Yji} = \frac{\{(Z_{ji} - Z_{jc})(V_{Xji} - V_{Xjc}) - (X_{ji} - X_{jc})(V_{Zji} - V_{Zjc})\}}{R_{ji}^2},$$

$$\omega_{Zji} = \frac{\{(X_{ji} - X_{jc})(V_{Yji} - V_{Yjc}) - (Y_{ji} - Y_{jc})(V_{Xji} - V_{Xjc})\}}{R_{ji}^2}$$

[A.3.1]

ここで, X_{ji}, Y_{ji}, Z_{ji} および $V_{Xji}, V_{Yji}, V_{Zji}$ はそれぞれ部分 j の長軸上の点 i の座標と速度, X_{jc}, Y_{jc}, Z_{jc} および $V_{Xjc}, V_{Yjc}, V_{Zjc}$ はそれぞれ部分重心点の座標と速度, R_{ji} は長軸上の点と部分重心点との距離である.

なお、以下、湯 (1995) による方法で求めた部分の角速度算出法を「静止座標系誘導法」と呼び、本研究による方法 (4. 3. 1 (1)) を「直交単位ベクトル微分法」と呼ぶ。また、角速度の算出部分は右側上腕、右側大腿および上脗とした。これらの部分の質量中心点の座標は先行研究 (阿江ら, 1992) に基づき被験者毎に推定した。右大腿に固定した運動座標系の各軸方向のベクトルは右膝関節点から右足関節点へのベクトルと右膝関節点から右股関節点へのベクトルを利用して求めた。

図 A.1 は、左図 (a) が静止座標系誘導法によって算出した右側上腕 (上段)、右側大腿 (中段) および上脗 (下段) の角速度を示し、右図 (b) が直交単位ベクトル微分法によって求めたそれらの角速度を静止座標系に変換して示したものである。X、Y および Z 軸は静止座標系の軸を示す。変換後の合成角速度は変換前のものと同値であった。これらの角速度の変化はほぼ全被験者に類似して認められた。図に示す被験者のリリース時のボール速度は 33.4 m/s であった。

図 A.2 の左図 (a) は、静止座標系誘導法によって求めた角速度を運動座標系へ変換したものであり、右図 (b) は直交単位ベクトル微分法による角速度である。各部分の z 軸は部分の長軸を示し、x 軸と y 軸は互いに直交しかつ長軸に垂直である。ただし、これらの運動座標系の軸は厳密には関節の回転運動軸を示すものではないが、打球加速局面の姿勢 (図上段のスティックピクチャ) から各部分の運動座標系の軸が関節運動軸に相当するものとみなした。このことから、上腕の運動座標系の x 軸の運動は水平屈伸、y 軸は内外転および z 軸は内外旋とし、大腿の x 軸は内外転、y 軸は屈伸および z 軸は内外旋、また上脗の x 軸は屈伸、y 軸は右左屈および z 軸は左右旋とする。図中にこれらの運動の正・負を示した。変換後の合成角速度は変換前のものと同値である。

図 A.1 に示すように、両方法で算出した角速度は、上腕と上脗においてその大きさ・変化パターンとも顕著に異なっていることがわかる。すなわち、直交単位ベクトル微分法による角速度は、いずれの部分においても静止座標系誘導法のものよりも顕

著に大きかった。特に、直交単位ベクトル微分法は、静止座標系誘導法よりも上腕のリリース前後の全角速度成分が大きく、上腕の Z 軸まわりの角速度が計測範囲にわたり、また X 軸と Y 軸の角速度が踏出脚の接地時（図中の SFC）からリリース時（BRL）にかけて大きかった。大腿では Y 軸と Z 軸の角速度が大きかった。

これらの角速度の相違を運動座標系において示したものが図 A.2 である。図に示すように、直交単位ベクトル微分法を用いて算出した角速度は部分の長軸（z 軸）まわりの角速度が顕著に観察されているが、静止座標系誘導法では長軸まわりの角速度がみられなかった。したがって、両方法の静止座標系における角速度（図 A.1）の相違は、静止座標系誘導法において部分の長軸まわりの角速度が算出できていないことによるものであると言える。

先行研究 (Vaughn, 1985; Feltner and Dapena, 1986; 桜井ら, 1990; Sakurai et al., 1993; 宮西ら, 1996)において、投球の加速局面では投球側の肩の内外旋や体幹の回旋運動などが顕著に認められることが報告されている。これらのことから、静止座標系誘導法において部分の長軸まわりの角速度がみられなかったのはモデル上なんらかの問題があるものと言える。

この原因について考えてみると、静止座標系誘導法では、式 [A.3.1] に示したように、部分の長軸上の点および重心点の位置座標とそれらの速度を利用しているため、仮に部分はその長軸まわりのみだけで回転している場合、上述の変数のすべてが不変となることがわかる。このことから、静止座標系誘導法は、部分の長軸まわりの角速度が見積もられていないものと考えられる。

両方法による大腿の角速度（図 A.1）の相違が上腕や上腕よりも小さかったのは、投球加速局面では大腿の長軸まわりの回旋運動が顕著に小さいことによるものとみられる。

以上のことから、直交単位ベクトル微分法の方が静止座標系誘導法よりも角速度が精度よく算出できているものと言える。

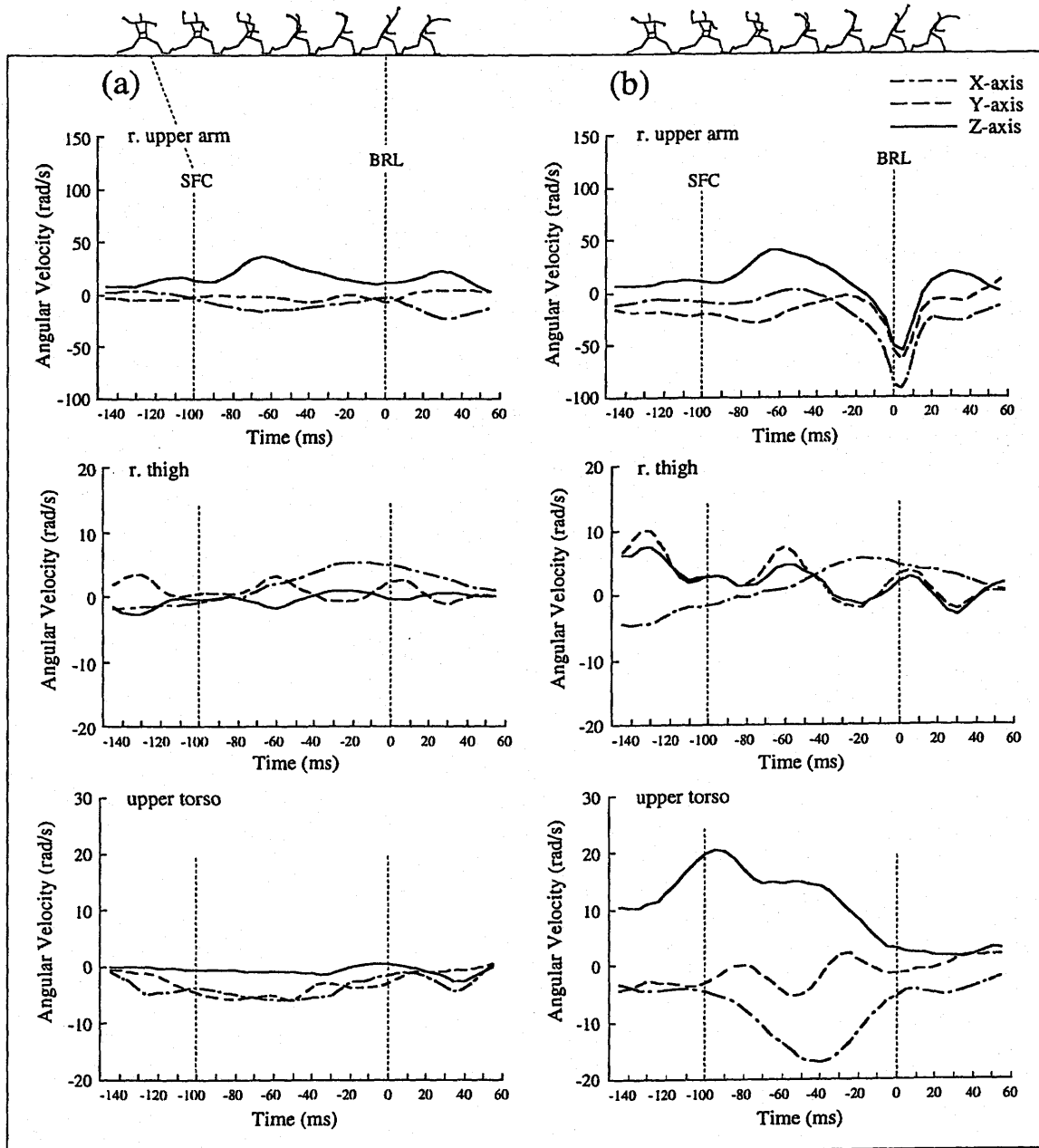


Figure A.1

Comparisons of the segment angular velocities of the (top) right upper arm, (middle) right thigh and (bottom) upper torso in the right handed orthogonal global coordinate system calculated by the (a) Tang's method (1995) and the (b) present study, respectively. X-axis is that of the medio-lateral direction to throwing direction, Y the antero-posterior axis and Z the vertical axis in the global coordinate system. SFC; the instant of stride foot contact, BRL; the instant of ball release.

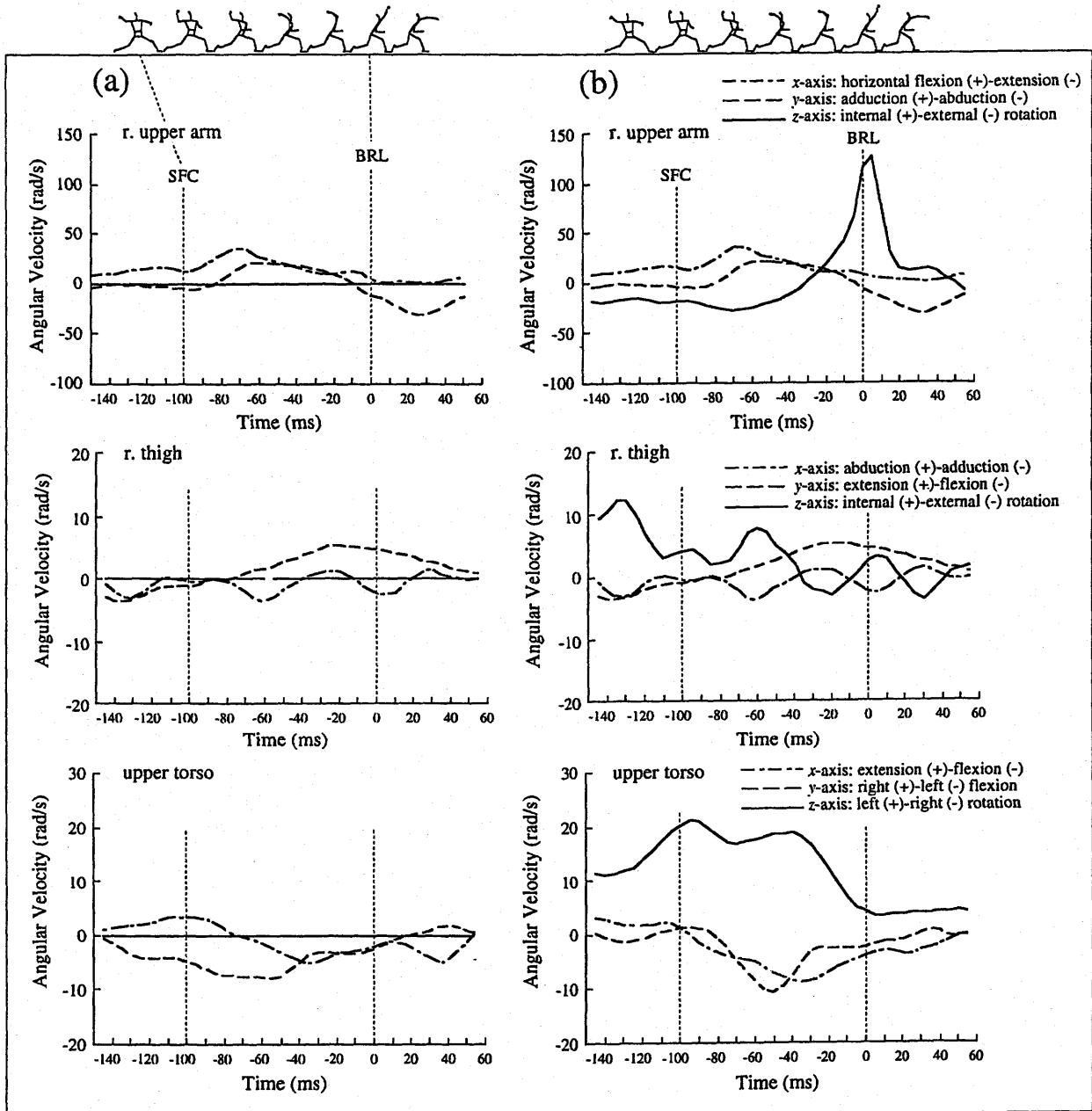


Figure A.2

Comparisons of the segment angular velocities of the (top) right upper arm, (middle) right thigh and (bottom) upper torso in the right handed orthogonal moving coordinate system calculated by the (a) Tang's method (1995) and the (b) present study, respectively. Each axis in the moving coordinate systems was assumed to be its axis of anatomical joint rotation.

付 録 B

—動力学データの算出—

1. 身体部分慣性特性係数

表 B.1 に、手、前腕、上腕、頭部、上脗における質量 (kg) および主慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) の全被験者の平均値 (S.D.) を示した。なお、手、前腕および上腕の質量と主慣性モーメントは左右側とも等しいものとし、それらの平均値を示したものである。

Table B.1

Inertial properties of body segment.

segment	MASS (kg)	Moment of Inertia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)		
		MX	MY	MZ
		Mean (SD)	Mean (SD)	Mean (SD)
hand	0.5 (0.03)	.0007 (.00009)	.0009 (.00011)	.0003 (.00003)
forearm	1.1 (0.10)	.0048 (.00099)	.0046 (.00098)	.0011 (.00016)
upper arm	1.9 (0.18)	.0055 (.00226)	.0051 (.00219)	.0030 (.00041)
head	3.6 (0.41)	.0132 (.00448)	.0113 (.00419)	.0091 (.00206)
upper torso	21.2 (2.00)	.3425 (.15198)	.3545 (.17559)	.2967 (.05036)

n=24

MX: frontal axis
 MY: sagittal axis
 MZ: longitudinal axis

2. 慣性モーメントテンソル (慣性テンソル) の導出方法

(1) 静止座標系における部分の慣性テンソルの導出

付録 A.2. (2) に示したように、静止座標系 Σ (O-X, Y, Z) と運動座標系 Σ' ($o'-x', y', z'$) との関係を示す座標変換行列 (R) を、以下のように定義する。

$$R = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}$$

[B.2.1]

運動座標系における慣性テンソル (I') を、静止座標系についての慣性テンソル (I) に変換するために、以下の式を用いた (守屋と鷺津, 1973; 森口, 1989; 広瀬, 1990) .

$$I = RI'R^T \quad [B.2.2]$$

Tは転置 transpose を示す.

これを行列式で表せば、次のようになる.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x' & -I_x'y' & -I_x'z' \\ -I_y'x' & I_y' & -I_y'z' \\ -I_z'x' & -I_z'y' & I_z' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad [B.2.3]$$

ただし、本研究では、部分の3つの慣性主軸が部分座標系 (図 4.3: 4. 3. 1 (1) ①参照) の各軸に一致するものと仮定した. したがって、上式の部分の慣性乗積 (右辺第2項) は0となる (守屋と鷺津, 1973; 森口, 1989; Beer and Johnston, 1977b; Hibbeler, 1989b; 広瀬, 1990) .

式 [B.2.3] を展開すると、静止座標系に関する慣性テンソル (I) の成分は、それぞれ以下のように表される.

$$\begin{aligned} a_{11} &= I_x'l_1^2 + I_y'l_2^2 + I_z'l_3^2 \\ a_{22} &= I_x'm_1^2 + I_y'm_2^2 + I_z'm_3^2 \\ a_{33} &= I_x'n_1^2 + I_y'n_2^2 + I_z'n_3^2 \\ a_{12} &= a_{21} = I_x'l_1m_1 + I_y'l_2m_2 + I_z'l_3m_3 \\ a_{13} &= a_{31} = I_x'l_1n_1 + I_y'l_2n_2 + I_z'l_3n_3 \\ a_{23} &= a_{32} = I_x'm_1n_1 + I_y'm_2n_2 + I_z'm_3n_3 \end{aligned} \quad [B.2.4]$$

ただし、上腕と投球腕の手、前腕および上腕の慣性テンソルは、式 [B.2.4] を用いて求めたが、それ以外の部分、すなわち頭部と非投球腕の手、前腕および上腕につい

では、部分の長軸（ z 軸）が慣性主軸のひとつに一致しているものと考え、さらに表 B.1 から部分の長軸に直交する 2 軸、すなわち x 軸と y 軸の主慣性モーメントが等しいものとみなして、以下のようにして求めた（守屋と鷺津, 1973; 森口, 1989; 湯, 1995）。

すなわち、 $I = I_x = I_y$ とすると、

$$a_{11} = I l_1^2 + I l_2^2 + I_z l_3^2 = I(l_1^2 + l_2^2) + I_z l_3^2$$

付録 A.2. (2) で示した関係から、 $(l_1^2 + l_2^2) = 1 - l_3^2$ であるので、上式は、

$$a_{11} = I(1 - l_3^2) + I_z l_3^2$$

となる。

同様に、

$$a_{22} = I(1 - m_3^2) + I_z m_3^2$$

$$a_{33} = I(1 - n_3^2) + I_z n_3^2$$

である。

また、慣性乗積の項は、

$$a_{12} = a_{21} = I l_1 m_1 + I l_2 m_2 + I_z l_3 m_3 = I(l_1 m_1 + l_2 m_2) + I_z l_3 m_3$$

付録 A.2. (2) で示した関係から、 $(l_1 m_1 + l_2 m_2) = -l_3 m_3$ であるので、上式は、

$$a_{12} = a_{21} = (I_z - I) l_3 m_3$$

となる。

同様に、

$$a_{13} = a_{31} = (I_z - I) l_3 n_3$$

$$a_{23} = a_{32} = (I_z - I) m_3 n_3$$

である。

[B.2.5]

部分の主慣性モーメント (I_x, I_y, I_z) は、先の表 B.1 に示した慣性モーメント値を用いた。

3. 静止座標系における部分の重心まわりの回転運動エネルギーの算出法

静止座標系における部分の重心まわりの回転運動エネルギーは、以下の式で求められる (森口, 1989; 守屋と鷺津, 1973; Beer and Johnston, 1977b) .

$$\frac{1}{2}I_j\omega_j^2 = \frac{1}{2}(a_{11j}\omega_{xj}^2 + a_{22j}\omega_{yj}^2 + a_{33j}\omega_{zj}^2 + 2a_{12j}\omega_{xj}\omega_{yj} + 2a_{13j}\omega_{xj}\omega_{zj} + 2a_{23j}\omega_{yj}\omega_{zj}) \quad [\text{B.3.1}]$$

ここで、 a_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$) は前節で記した慣性テンソルの各成分、 ω_{xj} , ω_{yj} および ω_{zj} は静止座標系に関する部分の角速度成分である。

4. 静止座標系における部分の重心まわりの角運動量の算出法

部分の重心まわりの角運動量 local term は、以下の式で求められる。

$$LT_j = I_j \times \omega_j \quad [\text{B.4.1}]$$

ここで、 I_j は部分 j の慣性テンソル、 ω_j は部分 j の角速度ベクトルである。

これを、静止座標系について表すと、

$$\begin{aligned} LT_{xj} &= a_{11j}\omega_{xj} + a_{12j}\omega_{yj} + a_{13j}\omega_{zj} \\ LT_{yj} &= a_{21j}\omega_{xj} + a_{22j}\omega_{yj} + a_{23j}\omega_{zj} \\ LT_{zj} &= a_{31j}\omega_{xj} + a_{32j}\omega_{yj} + a_{33j}\omega_{zj} \end{aligned} \quad [\text{B.4.2}]$$

となる。

添字の意味は先に示した。

ただし、慣性テンソルは、上腕と投球腕の手、前腕および上腕については先の式 [B.2.4] を、それ以外の部分については式 [B.2.5] を用いた。

部分の角速度は、5. 3. 2 (2) で述べたように、上腕と投球腕の手、前腕および上腕については本研究の第5章 (4. 3. 1 (1) 参照) で示した方法を用いて求め、それらを静止座標系に変換したのを用い、それ以外の部分については湯 (1995) の方法 (付録 A. 3 参照) を用いた。

以上のようにして求めた部分の重心まわりの角運動量を，本文で述べたように時間微分することにより，外部トルク (M) を求めた⁴。

⁴ 部分の重心回りの外部トルクを誘導する方法は，本文で述べた静止座標系で誘導する方法以外に，オイラー Euler の方程式を用いた運動座標系誘導法がある (守屋と鷺津, 1973; 森口, 1989; Beer and Johnston, 1977b; Hibbeler, 1989b; 広瀬, 1990)。本研究では，この方法により投球腕の上腕と前腕の重心回りの外部トルクを求めた結果，本論で述べた方法の結果と同一の値が得られた。

謝 辞

本論文は、筑波大学大学院体育科学研究科博士課程在学中（平成3年4月－平成8年3月）に行なわれた研究に基づくものである。したがって、この論文は、以下の多くの諸先生方の御指導、大学院生の協力なしには到底成し遂げることは出来なかった。

本論文を作成するにあたり、終始懇篤なる御指導ならびに御校閲を頂きました岡田守彦教授、宮永 豊教授、阿江通良教授に深甚なる謝意を表します。また、論文作成にあたり、藤井範久講師の御指導に、実験に際して、快く承諾して下さった功力靖雄先生（元筑波大学教授、元硬式野球部監督）ならびに硬式野球部部員の御協力に深く謝意を表します。またさらに、実験やデータ処理などを遂行するにあたり、大学院生の岡田英孝（現電気通信大学知能機械工学科助手）、高松潤二（現国立スポーツ科学センター研究員）、森丘保典（現日本体育協会スポーツ科学研究所）、大山卞圭悟（現筑波大学体育科学系講師）の各氏をはじめとする、スポーツバイオメカニクス研究室ならびに応用解剖学研究室学兄に心からお礼を申し上げます。