

DA
1785
1995
49

博士論文

スピードスケート滑走動作のバイオメカニクス的研究
—加速動作の力学的メカニズム—

平成8年度

筑波大学大学院 体育科学研究科

結城匡啓

寄	贈
系吉	平成
城匡	年
啓氏	月
	日

98000085

目 次

I. 緒 論	… 1
1. スピードスケート競技について	… 1
2. スピードスケートの滑走動作に関するバイオメカニクスの 研究の必要性	… 2
3. 本研究の目的および研究課題	… 5
(1) 目的	… 5
(2) 研究課題	… 5
4. 研究上の仮定	… 6
5. 本研究の限界	… 7
(1) 研究方法に関する限界	… 7
(2) 一般化・普遍化に関する限界	… 8
6. 用語の定義	… 8
II. 文献研究	… 13
1. スピードスケート滑走中の重心速度変化に関する研究	… 13
(1) ストローク中の重心速度変化	… 13
(2) スピードスケートの加速理論	… 14
2. スピードスケートの滑走速度に影響を及ぼす技術的要因に 関する研究	… 18
(1) 滑走速度に影響を及ぼすキネマティクスの要因	… 19
(2) 滑走速度に影響を及ぼす力学的要因	… 21
1) 氷の摩擦に関する研究	… 21
2) キネティクスの要因	… 23
III. 一流スケーターの滑走速度に影響を及ぼす技術的要因 の三次元キネマティクスの分析	… 27
1. 目的	… 27
2. 方法	… 28

(1) 被験者	… 28
(2) VTR撮影	… 30
(3) 三次元座標の算出	… 30
(4) 測定項目および統計処理	… 32
3. 結果および考察	… 32
(1) 競技成績	… 33
(2) プッシュオフ動作による重心速度変化	… 33
(3) 下肢関節のキネマティクス	… 37
(4) 矢状面および水平面におけるプッシュオフ動作	… 41
(5) スピードスケート加速理論の再検討	… 46
4. 要約	… 53
IV. スピードスケートにおける滑走速度とブレード反力との関係	… 55
1. 目的	… 55
2. 方法	… 56
(1) センサースケートの構造および性能	… 56
(2) 被験者	… 58
(3) 実験方法	… 58
(4) ブレード反力の算出	… 62
(5) 測定項目および統計処理	… 64
3. 結果および考察	… 67
(1) 滑走結果	… 67
(2) センサーに作用する力	… 69
(3) ブレード傾斜角度	… 69
(4) ブレード反力	… 72
(5) 力の作用点	… 75
(6) 鉛直軸回りのフリーモーメント	… 75
(7) 滑走速度とブレード反力	… 78
4. 要約	… 79

V. スピードスケートの加速に影響を及ぼす力学的要因	… 80
1. 目的	… 80
2. 方法	… 80
(1) 被験者	… 81
(2) 実験方法	… 81
(3) 測定項目	… 81
3. 結果および考察	… 85
(1) ストローク中の重心速度の変化とその成分	… 85
(2) 水平ブレード反力と重心速度の変化との関係	… 88
(3) スケートブレードの曲線運動による重心速度の変化	… 93
4. 要約	… 99
VI. シミュレーションによる加速に影響を及ぼす要因の検討	… 100
1. 目的	… 100
2. シミュレーションの方法	… 100
(1) 重心とスケートの二次元モデル	… 100
(2) シミュレーションの流れ	… 102
(3) シミュレーションに用いた入力値	… 104
3. 結果および考察	… 105
(1) スケートの求心加速度成分の相違が加速に及ぼす影響	… 105
(2) 片脚滑走開始時の開き角の大きさが加速に及ぼす影響	… 110
(3) 力学的有効パワーの発揮パターンの相違が加速に及ぼす影響	… 116
(4) 片脚滑走開始時のスケートの相対位置が加速に及ぼす影響	… 119
4. 要約	… 122
VII. スピードスケート滑走動作のメカニズムについて	… 124
1. 目的	… 124

2. 方法	…124
(1) 被験者	…124
(2) 実験方法とデータ処理	…125
(3) セグメントの重心回りの角運動量の算出	…125
1) セグメントの直交移動座標系の決定	…125
2) セグメント角速度の算出	…129
3) 足-スケート系セグメントの慣性モーメントの測定	…129
4) 静止座標系における角運動量の算出	…131
(4) 三次元関節力および関節トルクの算出	…131
(5) 運動軸の決定	…134
1) 股関節	…136
2) 膝関節	…136
3) 足関節	…136
(6) 滑走動作の局面分け	…136
3. 結果および考察	…138
(1) 球座標モデルによる重心の相対運動の検討	…138
(2) 下肢関節の角速度, 関節トルクおよび関節トルクパワー	…142
1) 支持脚	…142
2) 遊脚	…149
(3) 支持脚の関節トルクと水平ブレード反力およびRCGAccとの関係	…155
1) 関節トルクと水平ブレード反力	…155
2) 関節トルクとRCGAcc	…159
(4) 倒立振り子モデルによる滑走動作のメカニズムの検討	…161
4. 要約	…165
VIII. 滑走動作の技術およびトレーニングへの示唆	…168
1. 滑走技術について	…168
(1) 水平ブレード反力と相対重心加速度	…168
(2) F/RA比を大きくする滑走動作	…170

(3) 滑走技術のポイント	…173
2. トレーニングへの実践的示唆	…175
(1) プッシュオフ動作について	…176
(2) アウトエッジ滑走技術について	…176
(3) スケートの着氷について	…177
(4) 股関節外転筋群のトレーニングの重要性について	…177
(5) 遊脚のトレーニングについて	…178
IX. 結 論	…179
1. 研究課題に関連して	…179
(1) 研究課題1：一流選手の滑走速度に影響を及ぼす技術的 要因	…179
(2) 研究課題2：滑走中のブレード反力と滑走速度との関係	…180
(3) 研究課題3：スピードスケート加速動作の力学的メカニ ズム	…180
1) 水平ブレード反力と重心速度の関係について	…180
2) シミュレーションによる加速に影響する要因の検討	…181
3) 加速動作のメカニズムについて	…181
(4) 研究課題4：スピードスケートの滑走技術およびトレー ニング	…182
2. 加速動作の力学的メカニズムおよびトレーニングの示唆に 関連して	…182
(1) 加速動作の力学的メカニズムについて	…182
(2) 滑走技術およびトレーニングへの示唆	…182
3. 今後の課題	…183
謝辞	…184
文献	…185
関連論文	

本論文は、次に示した関連論文をもとにしてまとめられたものである。

1. 結城匡啓, 阿江通良, 浅見高明 (1991) スピードスケート500mレースの競技成績に影響を及ぼす技術的要因. トレーニング科学 3(1) : 21-30.
2. 結城匡啓, 阿江通良, 浅見高明 (1992) スピードスケートにおける加速理論の再検討. バイオメカニズム11, pp. 111-121.
3. 結城匡啓, 阿江通良, 藤井範久 (1996) スピードスケート滑走中のブレード反力. バイオメカニズム13, pp. 41-51.

List of tablesⅢ. 一流スケーターの滑走速度に影響を及ぼす技術的要因の三次元キネマテ
ィクスの検討

Table 3-1 Characteristics of the subjects for the top and the 2nd groups.

Table 3-2 Performance of the race for both groups.

Ⅳ. スピードスケートにおける滑走速度とブレード反力との関係

Table 4-1 Results of trials in slow and fast speeds.

Ⅴ. スピードスケートの加速に影響を及ぼす力学的要因

Table 5-1 Comparisons of ΔV_u and ΔV_w measured with VTR
analysis and blade reaction forces.

List of figures

Ⅲ. 一流スケーターの滑走速度に影響を及ぼす技術的要因の三次元キネマテ ィクスの検討

- Figure 3-1 Experimental setup for DLT method.
- Figure 3-2 Mean CG velocities of both groups during push-off phase.
- Figure 3-3 Change in joint angles of the lower limb during stroke.
- Figure 3-4 Change in joint angular velocities of the lower limb during stroke.
- Figure 3-5 The relative hip and knee positions to the ankle.
- Figure 3-6 The movement of the lower limb in sagittal plane during stroke for both groups.
- Figure 3-7 The relative CG position to the skate blade in horizontal plane.
- Figure 3-8 Acceleration theory proposed by Ingen Schenau et al.(1985).
- Figure 3-9 Mean velocities of the CG at the onset and offset of push-off for all subjects(n=22).
- Figure 3-10 Loci of the CG and front tip of the skate blade in horizontal plane for a subject.

Ⅳ. スピードスケートにおける滑走速度とブレード反力との関係

- Figure 4-1 Two wheatstone bridges used to detect forces in lateral/medial and vertical directions.
- Figure 4-2 Results of calibration.
- Figure 4-3 Blade reaction forces in the coordinate system fixed on ice were derived from the transformation of force signals in the sensor-coordinates.
- Figure 4-4 Vertical and horizontal blade reaction forces applied and point of force application.
- Figure 4-5 Compression and shear stresses applied to sensor-skate while

skating.

- Figure 4-6 Mean blade lean angles of slow and fast skatings, and the world record holder of 1000m.
- Figure 4-7 Mean blade reaction forces in vertical and horizontal directions.
- Figure 4-8 Change in point of force application while stroking.
- Figure 4-9 Free moment about vertical axis.

V. スピードスケートの加速に影響を及ぼす力学的要因

- Figure 5-1 Experimental setup.
- Figure 5-2 Effective power as the product of relative CG velocity and horizontal blade reaction force.
- Figure 5-3 Means and standard deviations for CG velocities, horizontal blade reaction forces, relative CG velocities to the skate perpendicular to the gliding direction, and effective power of fast and slow skatings.
- Figure 5-4 Mean CG velocities during push-off phase for fast and slow skating trials.
- Figure 5-5 Relationship between the CG velocity vector and the horizontal blade reaction forces.
- Figure 5-6 Means and standard deviations for the components of horizontal blade reaction force in the directions along and perpendicular to CG velocity, and the angle between CG velocity vector and skate blade in fast and slow skatings.
- Figure 5-7 Typical examples of the approximated displacement of the mid-point of skate blade and the centripetal acceleration components in three different orders.
- Figure 5-8 Means and standard deviations of RMS for data approximated at ten different orders($n=21$).
- Figure 5-9 Means and standard deviations for the centripetal acceleration of the gliding skate in fast and slow skatings.

VI. シミュレーションによる加速に影響を及ぼす要因の検討

- Figure 6-1 Model and free body diagram for the CG of the skater.
- Figure 6-2 Flow chart of the simulation.
- Figure 6-3 Input data for the simulation of acceleration of the CG.
- Figure 6-4 Traces of CG and mid-point of skate blade for three gliding patterns in horizontal plane under the condition of the same initial CG-skate angle (1.5 deg).
- Figure 6-5 Results of simulation for three gliding patterns of the skate in case of the same initial CG-skate angle, mean value(1.5 deg).
- Figure 6-6 Traces of the CG and the mid-point of skate blade for the different initial CG-skate angles in case of the same gliding trace pattern.
- Figure 6-7 Results of simulation for the different initial CG-skate angles in case of the same gliding trace pattern.
- Figure 6-8 Effects of the initial CG-skate angle on the final velocities, dV_u and dV_w for three skating trace patterns.
- Figure 6-9 Comparisons of simulated results of two power output patterns for world record holder and mean value of the fast skating in case of the same initial CG-skate angle(1.5 deg) and inner gliding trace.
- Figure 6-10 Comparisons of simulated traces of skate blade and CG for world record holder and mean value of the fast skating.
- Figure 6-11 Effects of the initial skate positions on the final velocity, dV_u and dV_w for three skating traces in case of the same CG-skate angle.

VII. スピードスケート滑走動作のメカニズムについて

- Figure 7-1 Definitions of the moving reference frame fixed to the segment.
- Figure 7-2 Definitions of the moving reference frame fixed to the torso

and the skate-foot system segments.

- Figure 7-3 Free body diagram of the j-th segment.
- Figure 7-4 Definitions of the motion axes for the lower limb joints.
- Figure 7-5 Classification of movement phases.
- Figure 7-6 Relative acceleration of CG to the ankle joint(RCGAcc) in the direction perpendicular to skate blade in the moving spherical coordinates($\Sigma O x' y' z'$).
- Figure 7-7 Acceleration components in the spherical coordinate model and horizontal blade reaction force for two typical examples.
- Figure 7-8 Correlation coefficients of the mean acceleration components in the spherical coordinate model to the mean horizontal blade reaction forces and total amount of acceleration component at gliding and push-off phases(n=21).
- Figure 7-9 Average angular velocities, joint torques and joint torque powers about the hip abduction-adduction, extension-flexion and ext-int.rotation axes of the support leg in fast and slow skatings.
- Figure 7-10 Average angular velocities, joint torques and joint torque powers about the knee extension-flexion and ext-int.rotation axes of the support leg in fast and slow skatings.
- Figure 7-11 Average angular velocities, joint torques and joint torque powers about the plantar-and dorsi-flexion and pronation-supination axes of the support leg in fast and slow skatings.
- Figure 7-12 Average angular velocities, joint torques and joint torque powers about the hip abduction-adduction, extension-flexion and ext-int.rotation axes of the free leg.
- Figure 7-13 Average angular velocities, joint torques and joint torque powers about the knee extension-flexion and ext-int.rotation axes of the free leg.
- Figure 7-14 Average angular velocities, joint torques and joint torque

powers about the plantar-and dorsi-flexion and pronation-supination axes of the free leg.

- Figure 7-15 Relationships between mean horizontal reaction forces and mean joint torques of the support leg at gliding and push-off phases.
- Figure 7-16 Relative acceleration of the CG to the skate in the plane perpendicular to gliding direction and horizontal blade reaction force of fast and slow skating trials.
- Figure 7-17 Correlation coefficients of mean joint torques of support leg to the mean acceleration components in the model of spherical coordinates at push-off phase(n=21).
- Figure 7-18 Model for the estimation of the horizontal blade reaction force exerted by the hip abduction torque and the relative acceleration of the CG to the skate by the extension of the body in the plane perpendicular to skate blade ($\Sigma O_x'y'z'$).
- Figure 7-19 Comparisons of estimated and measured blade reaction forces at the various instants.

VIII. 滑走動作の技術およびトレーニングへの示唆

- Figure 8-1 Relationships between integrated RCGAcc and F_h in the gliding and push-off phases, and the single support period.
- Figure 8-2 Relationships of mean hip abduction torques to the lean angle and angular velocity of the blade in the double support and gliding phases.
- Figure 8-3 Lean angle and angular velocity of the shank in the blade reference frame for top and 2nd groups in 500m race.

List of photographs

IV. スピードスケートにおける滑走速度とブレード反力との関係

Photograph 4-1 Specially-made sensor skate with a pair of sensor elements
located between the shoe and skate blade.

Photograph 4-2 Sensor elements.

Photograph 4-3 Scene of the experiment.

Nomenclature

CG	center of gravity of the whole body
V_0	CG velocity at start of push-off
V	CG velocity at end of push-off
ΔV	velocity vector derived from push-off movement
$\angle \alpha$	angle between V_0 and ΔV
ΔV_u	ΔV component in direction along with V_0
ΔV_w	ΔV component in direction perpendicular to V_0
RF	resultant blade reaction force
F_h	horizontal RF component
F_z	vertical RF component
PFA	point of RF application
M_z'	free moment about vertical axis
RCGV _x	relative velocity of CG to the skate in direction perpendicular to gliding blade
EP	effective power
F_{hu}	F_h component in direction along with V_0
F_{hw}	F_h component in direction perpendicular to V_0
$\angle \phi$	angle between CG and skate velocities in the horizontal plane
VCG	velocity of the CG
ΔV_{Fhu}	change in velocity resulted from F_{hu}
ΔV_{Fhw}	change in velocity resulted from F_{hw}
V_e	estimated CG velocity at end of stroke
VS	velocity of the mid-point of gliding blade
$\angle \eta$	angle between VS and Y-axis
$\angle \xi$	angle between VCG and Y-axis
DX	distance between CG and skate blade in X direction
DY	distance between CG and skate blade in Y direction
DXY	distance between CG and skate blade in the horizontal plane

F_{ice}	ice frictional force
F_{air}	air resistance force
F_c	centripetal component of the gliding skate in curvilinear motion
ϕ_0	ϕ at onset of stroke
dV_u	change in velocity resulted from F_{hu} in computer simulation
dV_w	change in velocity resulted from F_{hw} in computer simulation
RCG_{acc}	relative acceleration of CG to the skate in the direction perpendicular to gliding blade
$\Sigma OXY Y$	reference coordinate system fixed on ice
$\Sigma oxyz$	local coordinate system at each segment
$\Sigma O x' y' z'$	local coordinate system at the skate blade

I. 緒論

1. スピードスケート競技について

雪や氷の中での生活を余儀なくされる地域では、雪靴(Snow shoes)と呼ばれる通行のための道具が、生活上の知恵として古くから用いられてきた。それは、やがて木片や動物の骨などを取り付けたものとして発達した。これらの道具は、その用途から歩行具と滑走具に区別され、雪上や氷上を移動するためのスキーやスケートの起源になったといわれている(寄金, 1979,1986 ; Gemser, 1987)。これらのことから、道具としてのスケートは凍った湖や川の上を移動するための手段として生まれたもので、自然環境に適応して生活・生存のために人間が生み出した身体活動の1つであるといえる。

マイネル(1981)は、スキーやスケートなどの「滑る」という運動の基本形態を「人間が自分の運動をある対象に向かって間接的に伝えるために、さらに道具を使う運動」としている。また、「このような運動形態は、人間の運動器官の働きを高め、その行動範囲を拡大するためになんらかのスポーツ用具を利用するものである。(中略)スケートの場合は、スケート靴を用いることによって、氷の上で滑走する能力を増大させ、より速く楽々と前進できるようにしている。」と述べている。このことから、スポーツ運動系において「滑る」という運動は、「雪上や氷上での摩擦力が極めて小さいことを利用した移動運動」としてとらえることができる。

生活における移動手段として用いられてきたスケートは、中世ヨーロッパにおいて若者達が氷の上に複雑な図形を描いたり、距離を定めて速

さを競い合ったりというように、遊びの道具として用いられていたという記録が数多く残されている(寄金, 1979,1986 ; Gemser, 1987). そして, 生活手段として誕生したスケートは, その後長い年月を経て, レースを主体とする「スピードスケート」, コンテストを主とする「フィギュアスケート」, ゲームを主とする「アイスホッケー」などの競技スポーツへと発展していった.

スピードスケート競技は, 定められた距離を滑走するのに要した時間を競う競技である. 現在, 公式競技会で行われている種目には, 短距離として500m, 1000m, 1500m, 長距離として3000m, 5000m, 10000mがある(日本スケート連盟規則集, 1989). 競技会には, オリンピックやアジア大会のように単種目における記録で順位を競うものと, 世界選手権や世界スプリント選手権などのように延べ4種目の記録を得点化してその合計点数で順位を決めるものがある.

競技方式は, 一組のレースを二人ずつで行い, 全ての組が滑走した時点で順位を決めるようになっている. そのため, 陸上競技のトラック種目などとは異なり, 予選を行わずに一回のタイムレースによって順位を決めるという特徴をもっている. 滑走コースはダブルトラックと呼ばれる, 内側と外側の幅4~5mのセパレートコースになっており, 各選手はバックストレートで滑走コースを交互に換えるようにして規定の距離を滑走する.

2. スピードスケートの滑走動作に関するバイオメカニクス的研究の必要性

100分の1秒を争う競技の場では, いかに滑走速度を大きくするか

ということが最大の運動課題となる。そして、その課題を達成するには、合理的で、効率のよい滑走動作を習得することが必要である。しかし、日本のスピードスケート界をみると、滑走技術の改善がコーチの観察や選手のカンのみを手がかりに行われているのが現状である。そして、いわゆる「基本」といわれる滑走技術の認識がコーチ間で異なること、さらにそれらはオランダやノルウェーのものとも全く異なる独自のものであることを指摘することができる。例えば、日本のコーチは、重心を低く安定させるために、「腰を低くすること」を重点的に指導することが多い。しかし、一流スケート選手を多く輩出しているオランダではそのようなことは一切言わず、「滑る方向にスケートの刃をまっすぐ向けること」を重要なポイントとしている(Kramer, 1992)。この例にみられるような様々な相違は、大きな滑走速度を得る動作のメカニズムが十分に明らかにされていないことに起因すると考えられる。

マトヴェイエフ(1985)は、スケートなどのシーズンスポーツでは、マクロサイクルの準備期にあたる陸上トレーニング期において、氷上滑走に相当する専門的手段の代替としてイミテーションエクササイズ(imitation exercise)を取り入れることを推奨している。多くの日本選手は、施設的な制約によって氷上滑走ができない半年以上の陸上トレーニング期において、模擬スケートやローラースケート滑走を練習手段に取り入れ、技術の改善を図ろうとしている。しかし、スケート技術の改善につながる要因が不明確なため、適切なトレーニング目標をもたないまま体力の向上のみを図るという傾向がみられる。したがって、スピードスケートの滑走速度に影響を及ぼす要因や合理的な滑走動作が明らかになれば、より大きな滑走速度を得るための技術的な示唆を得ることができ、さらに、動きを考慮した専門的体力トレーニングへの示

峻を与えることもできよう。

スピードスケート滑走は、氷とスケートの間の摩擦力が小さいこと、空気抵抗力およびカーブでの遠心力が大きいことなど、通常の陸上運動ではあまり考慮しない外力の影響を受ける。また、スケート滑走は厚さ1 mmのスケートブレードで体重を支え、さらにそれを介して力を氷に伝えるなどの多くの力学的要素を含んだ技術性の高い運動である。したがって、スピードスケート滑走動作を、生体の諸条件を考慮しながらバイオメカニクスの観点から研究することは極めて有効であると考えられる。

これまでに、1980年以降オランダVrije大学を中心とする一連の研究により滑走速度に影響を及ぼす要因が検討されてきた。しかし、これらの要因のみではオリンピック選手のような一流選手の競技成績の違いを説明できなかったという報告 (Boer et al.(1989)) もあることからわかるように、これらの研究成果を一流選手の競技力向上に役立てることは難しいようである。

その原因の1つとして、一連の研究で技術評価の根拠となっている「滑走方向と反対向きの力は小さく加速に貢献しないので、滑走方向に対して水平面内で垂直な方向への力のみが加速に貢献する」という理論 (Ingen Schenau et al.(1980)) が、実測値により検証されていないことがあげられる。最近、加速運動には貢献しないと従来考えられてきた重心の前方変位および足底屈が、滑走スピードの大きな種目ほど顕著に大きかったことが報告された (Boer et al.(1989))。このように、高い競技レベルのスケーターの加速運動を、従来の加速理論で十分に説明することには、限界があると考えられる。

第2の原因として、これらの研究で用いた被験者の競技レベルが一流

選手に比べて低いことや、比較するグループ間のレベル差が大きすぎる
ことなどもあげられる。したがって、一流選手のデータをもとにスピー
ドスケートの加速理論をバイオメカニクスの的に再検討する必要がある
と考えられる。

さらに、教育としての体育についてみると、体育運動としてのスケ
ートのねらいは、文部省の中学・高等学校学習指導要領(1988)には「野
外活動としてのスケートの特性を理解させるとともに、スケートの技能を
習得して氷の上を自由に滑ることができるようにする」と記されている。
したがって、合理的な滑走動作が明らかになれば、スピードスケートの
指導法を構築することができるので、体育におけるよりよいスケート指
導に貢献しうると考えられる。

3. 本研究の目的および研究課題

(1) 目的

本研究の目的は、スピードスケートの滑走速度に影響を及ぼす要因を
バイオメカニクスの的に検討することにより、滑走動作の力学的メカニ
ズムを明らかにするとともに、スピードスケートのトレーニングへの示唆
を得ることである。

(2) 研究課題

本研究では、目的に関連する以下の4つの研究課題を設定し、これら
を解決することにより本研究の目的を達成しようとした。

研究課題 1

スピードスケート競技会における一流選手の滑走動作を三次元的に分析し、滑走速度に影響を及ぼす技術的要因を明らかにする（Ⅲ章）。

研究課題 2

スピードスケート滑走中のブレードに作用する二分力（ブレード反力）を計測できるセンサースケートを開発し、滑走速度とブレード反力との関係を明らかにする（Ⅳ章）。

研究課題 3

スピードスケートの滑走速度に影響を及ぼす滑走動作、特に加速動作の力学的メカニズムを明らかにする（Ⅴ・Ⅵ・Ⅶ章）。

研究課題 4

滑走速度に影響を及ぼす動作のメカニズムに関する知見をもとにスピードスケートの滑走技術およびトレーニングへの示唆を引き出す（Ⅷ章）。

4. 研究上の仮定

本研究における実験などを遂行するために、次の仮定を設定した。

- ①直線滑走で抽出された1サイクルの滑走動作を分析することによって、被験者の滑走動作に内在する技術的要因を明らかにできる。
- ②滑走速度の大きな試技は、実際のレースにおける動作の主な技術的要因を内在しており、実験的試技を分析することによって高速滑走動作

の力学的メカニズムを明らかにできる。

- ③天候やウェアなどの外的滑走条件は，被験者固有の滑走動作には影響しない。
- ④ブレード反力測定用のスケート靴，ブレードは，被験者の普段使い慣れたものとは異なるが，それにより被験者固有の滑走動作は影響されない。

5. 本研究の限界

本研究には，以下の研究方法および得られた知見の一般化・普遍化に関する限界がある。

(1) 研究方法に関する限界

- ①スピードスケートでは1サイクルの滑走距離が長いので，完全なストロークを得るために広い計測範囲を設定する必要がある。本研究では20mの撮影範囲に10台のカメラを配置したが，高速度カメラを数多く用意することはできなかった。そのため，撮影には毎秒60 fieldsの8 m mVTRカメラおよびVTRカメラを用いた。
- ②ブレード反力測定用のスケート靴は，各被験者に合うサイズを選択し，靴に対するブレードの取付位置も微調整できるように工夫した。しかし，ブレードの長さおよびブレード底面の曲率は選手が通常用いる平均的なものと同等に設計し，全被験者で同じものを用いた。
- ③本研究で用いた身体部分係数は，各被験者の真の値ではなく，阿江(1996)が日本人アスリートの標本から数学モデルにより算出した係数による推定値である。

④本研究の実験は、屋外スケートリンクにて行ったため、風の影響や氷の状態、気温などの天候による影響を全ての試技で一定にすることはできなかった。

(2) 一般化・普遍化に関する限界

- ①本研究における被験者は、世界の一流選手を含むスピードスケートを専門とする男子である。したがって、本研究で得られた結果を技能レベルの低いスケーターや一般人にそのまま適用することには限界がある。
- ②本研究で得られた結果は、直線滑走で得られたデータを分析したものである。したがって、この結果から得られた知見を、スタート局面などの運動課題の異なる直線滑走やカーブ滑走にそのまま当てはめることはできないであろう。

6. 用語の定義

本研究で用いた主な用語の定義を示した。

- 1) スケートブレード(Blade of the skate) : スピードスケートの細長い刃の部分。
- 2) 股関節角度(Hip joint angle) : 大転子点から胸骨上縁を結ぶベクトルと大転子点から膝中点を結ぶベクトルのなす角度。
- 3) 膝関節角度(Knee joint angle) : 膝中点から大転子点を結ぶベクトルと膝中点から足関節外果を結ぶベクトルのなす角度。
- 4) 足関節角度(Ankle joint angle) : 足関節外果から膝中点を結ぶベクトル

ルとスケートブレード後端から先端を結ぶベクトルのなす角度.

- 5) 1 ストローク(One skating stroke) : 一方の脚の片脚滑走開始時 (他方の脚の離氷) から離氷までをいう.
- 6) 1 サイクル(One skating cycle) : 一方の脚のストローク開始から, それに続く他方の脚のストローク終了までをいう.
- 7) プッシュオフ動作(Push-off motion) : 支持している下肢の関節が伸展する動作.
- 8) 片脚滑走開始時(Onset of gliding) : 一方のスケートが着氷し, 他方のスケートが離氷した時点. ストローク開始時ともいう.
- 9) プッシュオフ開始時(Onset of push-off) : ストロークにおいて下肢関節のいずれかの伸展角速度が 50deg/s (0.87rad/s)以上になった時点.
なお, 本研究では, 第III章でのみ, 先行研究と比較するために, 下肢の関節を膝関節に限定した. 脚伸展開始時ともいう.
- 10) 離氷(Release) : スケートブレードが氷から離れることで, ストロークの終了を意味する. キネマティクス分析では, ブレードの先端か後端の鉛直位置が 0.02m 以上になった時点とし, キネティクス分析では, ブレード反力が身体質量の3%以下になった時点とした.
- 11) 滑走局面(Gliding phase) : 片脚滑走開始時からプッシュオフ開始時までの動作局面.
- 12) プッシュオフ局面(Push-off phase) : プッシュオフ開始時からストローク終了 (離氷) までの動作局面.
- 13) 二重支持局面(Double support phase) : 一方の脚の着氷から他方の脚の離氷までの, 両脚で身体を支持する動作局面(Fig.7-5).
- 14) 支持期(Support period) : 一方の脚が着氷してから離氷するまでの身体を支持する動作局面で, 二重支持局面と1ストロークをあわせた

もの(Fig.7-5).

- 15) 回復期(Recovery period) : 一方の脚が離氷してから次に着氷するまでの動作局面. さらに, これは, 他方の脚のプッシュオフ開始時を境に前半と後半に分けられる(Fig.7-5).
- 16) 支持脚(Support leg) : 身体を支持している脚.
- 17) 遊脚(Free leg) : 支持脚の反対の脚.
- 18) 重心ブレード角(CG-blade angle) : 重心と支持脚の足関節を結ぶ線分が水平面内でスケートブレードとなす角度(Fig.3-7).
- 19) 速度変化ベクトル(Vector derived from push-off) : プッシュオフ動作によって生み出される速度ベクトル. 本研究では, 式(3.1)により, プッシュオフ開始時の重心速度 V_0 とストローク終了時の重心速度 V の始点をそろえることにより求めた(Fig.3-2, ΔV).
- 20) 加速角(Acceleration angle, angle between V_0 and ΔV) : プッシュオフ開始時の重心速度 V_0 に対する速度変化ベクトル ΔV のなす角度(式(3.2), Fig.3-2, α).
- 21) ブレード反力(Blade reaction forces in the reference frame fixed on ice) : 静止座標系においてスケートブレードが氷から受ける反力. これは, さらに水平成分と鉛直成分に分けられる(Fig.4-3, 4-4).
- 22) センサースケート(Specially-made sensor skate) : ブレード反力を計測するために本研究で開発した特製スケートで, 上下方向と左右方向の二分力が計測できる(Photo.4-1).
- 23) ブレード傾斜角度(Lean angle of the blade) : スケートブレードが鉛直となす角度(Fig.4-3).
- 24) 重心相対速度(Relative velocity of CG to the skate, $RCGV_x$) : スケートブレードに直交する水平方向におけるスケートに対する重心

の相対速度.

- 25) 力学的有効パワー(Effective power): 重心相対速度(RCGV_x)と水平ブレード反力の積(Fig.5-2, 式(5.1)).
- 26) 開き角(CG-skate angle): 水平面内においてブレードの滑走方向と重心速度の方向がなす相対角(Fig.5-5, ϕ).
- 27) スケートの曲線運動(Curvilinear motion of the gliding skate): 底面にある曲率を持つブレードが傾斜して滑走することにより円弧を描く運動(Fig.3-10, 5-7).
- 28) スケートの求心加速度成分(Centripetal acceleration component): スケートの曲線運動を生じる法線方向の加速度成分(式(5.8), Fig.5-9).
- 29) トレースパターン(Trace pattern of the gliding skate): スケートの曲線運動による円弧のパターンをいう. さらに, 円弧がスケーターに近づくように描かれるパターンをイントレース, 直線を描くパターンを直線トレース, 円弧がスケーターから離れるように描かれるパターンをアウトトレースとした(Fig.6-3, 6-4).
- 30) 速度変化比(Ratio of velocity change): 速度変化ベクトルの大きさに対するプッシュオフ動作前後の正味の重心速度変化の比(式(6.15)).
- 31) 足-スケート系セグメント(Skate-foot system segment): 足セグメントとスケート靴を一つの剛体とみなしたときの系の名称(Fig.7-2).
- 32) 運動軸(Motion axis): 下肢関節の運動を分析するために定義した下肢セグメントにより決定する回転軸の総称で, 本研究では股関節に内転外転軸, 屈曲伸展軸, 内旋外旋軸の3つ, 膝関節に屈曲伸展軸, 内旋外旋軸の2つ, 足関節に足底背屈軸, 回内回外軸の2つを設定した(Fig.7-4).
- 33) ブレード座標系(Blade reference frame): 足関節を原点とし, ブレー

ドの滑走方向をy軸とする直交移動座標系(Fig.7-6, $\Sigma O x' y' z'$).

- 34) 重心相対加速度(Relative acceleration of CG to the skate : RCGAcc) : スケートブレードに直交する水平方向におけるスケートに対する重心の相対加速度(Fig.7-6).
- 35) 伸展加速度成分(RCGAcc component by extension of the body) : 重心相対加速度(RCGAcc)を構成する成分のうち, 重心と足関節を結ぶ線分の長さの二階微分を含む加速度成分で, 主に身体の伸展動作により生じる.
- 36) 内傾加速度成分(RCGAcc component by medial rotation of the body) : 重心相対加速度(RCGAcc)を構成する成分のうち, 重心と足関節を結ぶ線分の内傾角度の二階微分を含む角加速度成分で, 主に身体の内傾動作により生じる.
- 37) 倒立振り子モデル(Inverted pendulum model) : 股関節の外転トルクと伸展加速度成分を入力することにより, 滑走中の水平ブレード反力を推定するために用いたモデル(Fig.7-18).
- 38) 相対速度変化(Change in relative velocity) : 重心相対加速度(RCGAcc)によって生じる相対速度の変化で, RCGAccの時間積分値.
- 39) F/RA比(Ratio of the integrated F_h to change in relative velocity) : 相対速度変化に対する水平ブレード反力による力積の比(Fig.8-1).
- 40) ブレード方向角速度(Angular velocity of the blade about vertical axis) : 滑走中のブレードが鉛直軸回りにもつ回転角速度.
- 41) 下腿内傾角(Lean angle of the shank in the blade reference frame) : ブレード座標系の前額面($x'z'$ 面)内において下腿が鉛直となす角度.

II. 文献研究

1. スピードスケート滑走中の重心速度変化に関する研究

ここでは、スピードスケート滑走中の重心水平速度の変化に関する文献を概括する。

(1) ストローク中の重心速度変化

Mueller (1977)は、一流スピードスケーター2名の最大速度滑走時における滑走フォームを、側方からのフィルム撮影によって分析している。その結果、片脚支持期は減速局面であり、推進は二重支持期で生じていたと報告し、二重支持期中のプッシュオフで前方へ加速し、片脚支持期では空気抵抗や摩擦力のために減速すると述べている。

また、Doctorevic (1975)は、1ストローク中の速度の変化について滑走局面は減速傾向にあり、プッシュオフ局面は加速傾向にあるので、より速く滑るためには、滑走局面を短くしてプッシュオフ局面の割合を大きくすべきであると述べている。

Marino (1979a)は、4名の熟練したアイスホッケー選手の滑走を側方から毎秒100コマで撮影し、1ストローク中の速度変化について検討している。その結果、滑走速度は平均8.78 m/sであり、速度の変化パターンは片脚支持滑走が開始されるストローク開始時から減少し、片脚支持期中間点（ストロークのほぼ45%）で増加が生じ、二重支持期直前でピークに達したと報告している。

さらに、Marino (1979b)は、静止から20フィートまでのスタートにおける加速パターンを上記と同じ被験者・方法を用いて分析している。

そして、ほぼ4ストロークにあたる1.75秒までは、どの被験者も減速することなく加速し続けたことから、スタートにおいては、片脚支持期でも減速することなしに加速することができると述べている。

Delnoijら (1987)は8名のスケーターの滑走動作を前方と側方から撮影して、大転子点の位置の変化から1ストローク中の速度変化を測定し、滑走局面では減速し、プッシュオフ局面では加速する傾向にあったと報告している。しかし、データには大きなノイズが含まれていたため、速度変化を定量的に示すことができなかつたと述べている。これは、測定点が重心ではなく大転子点であったこと、スケーターの重心の軌跡は水平面内で蛇行するにもかかわらず、大転子点の軌跡を前方からのフィルムで身体幅をもとに推定した値から算出していることによるものと考えられる。

以上のように、滑走中の速度の変化パターンは、アイスホッケーの最大速度滑走では、片脚支持期のほぼ中間点にあたるストロークの45%までは減速の傾向にあり、その後の片脚支持期後半と二重支持期で加速の傾向にあるとされている。しかし、スピードスケートのストローク中の速度変化を定量的に明らかにした研究は、ほとんどない。これは、主に以下のような理由によると考えられる。

- ①滑走動作は三次元運動であり、しかも1ストロークの長さが10m以上にもなる。したがって撮影上の制約があり、正確な三次元データを得ることが難しい。
- ②スケートと氷の摩擦力が小さいため、加速と減速の大きさが陸上で行われる運動に比べて小さく、速度変化がとらえにくい。

(2) スピードスケートの加速理論

ここでは、スピードスケートにおけるストローク中の加速に関する理論についての文献を概括する。

ソコロフ (1957)は、「アイススケート」という指導書の中で、スピードスケートのカーブ滑走における加速理論について述べている。すなわち、キック後のスピードはキック前の滑走スピードと水平面内でその向きに垂直なキックスピードとの合成スピードで表わされ、その合成スピードは減速することなしに次のキックが行われる。このようにしてカーブでは滑走スピードは一步ごとに増加していく、というものである。

またペトロフ (1962)は、ソ連のコーチ・学生向けに書いた教科書の中で、スピードスケートの推進運動について次のように述べている。

「前に進むためには、支点に対して逆方向の力を加えなければならない。すなわち、スケーターのキックの方向を後方に向けなければならない。しかし、キックの力は、スケートの滑る方向に対して直角の方向をとって氷面に加えられ、また、スケートの先端部は横ではなく、やはり前方に向いているのであるから、つねにスケーターのキックは、後方ではなく側方に向かって行われるのである。(中略)スケート滑走では、真後ろに向かうキックなどというものはない。真後ろにキックするためには、けり脚のスケートは、スケーターの重心の後方に位置し、また運動の方向に対して直角におかれなければならない。人間の解剖学的な特徴、およびスピード用スケートの構造からいって、このような真後ろへのキックは、滑走の速度が小さい場合でも不可能である。」

このように、1960年前後のソ連における指導書は、キックの方向がつねにスケートの滑走方向に対して垂直に向いていることを推進運動の重要なポイントとしてあげていることがわかる。

Ingen Schenauら (1980)は、スケーターによって発揮される外的パワー

を算出するための力学モデルを導く際に、プッシュオフについて次のよう述べている。

「人間のほとんどの移動運動における推進力は、望まれる動きの方向と逆方向を向いているが、スピードスケートでは、スタートの局面を除いては逆方向に向いていない。技能の低いスケーターは、ランニングや歩行の時と同様に、足底屈によるプッシュオフを行う。足底屈は、氷上の固定点に対するプッシュオフを意味するが、明らかにある速度以上では、固定点に対する足底屈によるプッシュオフでは加速することができない。優れたスケーターのプッシュオフは、足底屈をせずに滑走方向に対し常に垂直な面で作用し、その作用点は、スケートの先端からおよそ2/3（足首付近）に位置する。スケートと氷の間の摩擦力は、プッシュオフ力に比較すると、無視できるほど小さい。滑走方向に沿った方向の力は、この摩擦力よりも大きくなることはないので、滑走方向と反対向きの力は加速に貢献しない。したがって、滑走方向に対して水平面内で垂直な方向へのプッシュオフ力のみが加速に貢献する。」

さらに、上述のような仮定のもとでスケートに対する重心の横への変位量を膝関節角度の関数としてモデル化している（式(2.1)-(2.2)）。このモデルによって算出したスケーターの発揮するパワーとスケーターが受ける抵抗力による損失パワーとの等式を用いることにより、実際の競技成績を誤差5%から7%の範囲で推定できたことを報告している ($r=0.97$)。

$$P_0 = g \cdot b_0 \cdot \frac{1}{2} \tan 2\phi \cdot f \quad (2.1)$$

$$b_0 = 0.17 + \frac{L}{4} \cdot \sqrt{2(1 - \cos\theta)} \quad (2.2)$$

ここで、 P_0 ：スケーターが発揮する出力パワー

g : 重力加速度, f : ストローク頻度, L : 身長
 b_0 : プッシュオフ開始時のスケートと大転子間の距離
 ϕ : プッシュオフ終了時のスケートと大転子を結ぶ線が鉛直になす角度,
 θ : 膝関節角度

さらに, Ingen Schenau (1985)は, プッシュオフの効果を評価するためにストロークのメカニクスを次のように述べている.

プッシュオフの結果は, X方向への重心の水平速度の増分 ΔV_x による運動エネルギーの増加として表される. ここで ΔV_x はプッシュオフ力が滑走方向(Y)に垂直な(X-Z)面でスケーターの重心に向けて作用しているので, V_y に対し垂直に向いていると仮定すれば, プッシュオフ終了時の重心の水平速度(V)は, プッシュオフ開始時の速度を V_y , プッシュオフによる水平速度増分を ΔV_x とすると, 次の式によって表される.

$$V = \sqrt{V_y^2 + \Delta V_x^2} \quad (2.3)$$

したがって, 運動エネルギーの増加は, スケーターの質量を m とするとき, 有効な仕事(A)として次のように導かれる.

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{2}mV^2 - \frac{1}{2}mV_y^2 \\
 &= \frac{1}{2}m(\Delta V_x)^2
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

また, この論文の中でIngen Schenauは, 1ストロークの仕事を大きくする要因としてプッシュオフ力のX成分の大きさをあげている.

Boer (1986)は, 公式競技会の1500mに参加した11名のスケーターを前方と後方から撮影し, 上位群と下位群に分けて比較することにより, プッシュオフの有効性について検討している. その結果, 大転子点と足関節を結ぶ線分が鉛直となす角度 ϕ (以下, プッシュオフ角度という)

は、プッシュオフ開始時で上位群が有意に大きかったことを報告している。そして、 $F_x = F \sin \phi$ であり、 ϕ が 90° から 0° に近づくとき F_x が大きくなることから、上位群ではプッシュオフ力(F)のX成分(F_x)がより大きくなると推測している。

上述したように、1980年代前半における Ingen Schenau らによる一連の研究では、プッシュオフ力が滑走方向に対して垂直に作用しているという加速理論が提唱された。そして、その仮定に基づいて算出されたスケーターの出力パワーと実際のレースで得られたデータとの高い適合性が示された。

ところが、Boerら(1989)は、1988年のカルガリー冬季オリンピックの男女1500m、5000mの計4種目の参加選手の滑走動作を競技成績と関連づけて検討し、高いレベルの競技成績を Ingen Schenau のパワーモデルに含まれるパラメータで説明できなかつたことを報告している(競技成績と最も相関の高いパラメータでさえも、相関係数が0.76)。

さらに、Boerらは、加速運動には貢献しないと考えられてきた重心の前方変位および足底屈が、滑走スピードの大きな種目ほど顕著に大きかったことを報告している。

これらのことから、プッシュオフ力は滑走方向に対して常に垂直に作用するという理論で、高い競技レベルにあるスケーターの加速運動を十分に説明することには限界があると考えられる。また、Ingen Schenau の提唱した加速理論は、実測値および実験による検証がなされていないことから、スピードスケートの加速理論を再検討する必要があると考えられる。

2. スピードスケートの滑走速度に影響を及ぼす技術的要因に関する研

究

ここでは、滑走速度に影響を及ぼす技術的要因に関する文献を概括する。

(1) 滑走速度に影響を及ぼすキネマティクスの要因

Marino (1975, 1979a, 1979b, 1983)は、加速することを課された69名の男子大学アイスホッケー選手の滑走動作を滑走速度に関連づけて重回帰分析した。その結果、滑走速度に影響を及ぼす要因として、ストローク頻度が高いこと、リカバリースケートの位置が重心下に近いこと、離氷角度が小さいことおよび前方倒れ角度が大きいことが重要であると報告している。

MaCawら (1987)は、習熟度の異なるエリート群6名（滑走速度は9.18 m/s）、中間群6名（8.28 m/s）、初心者群5名（6.94 m/s）の滑走動作を比較し、エリート群と中間群では股関節角度の変化パターンが類似していること、中間群と初心者群では膝関節角度のそれが類似していることを報告している。

Ingen Schenauらのオランダの研究グループは、滑走速度に影響を及ぼす技術的要因について1980年以降数多くの研究を行っている。

Ingen Schenauは、1981年の世界選手権オランダ代表選手5名とそれに続く競技レベルにある10名のスケーターの5000mストレート滑走を撮影し、技術的要因の違いを検討している。その結果、滑走速度の大きい代表選手群において、①体幹がより水平であること、②プッシュオフ開始直前の膝関節角度が小さいこと、③1ストロークの仕事量が大きいことを報告している。

また、スピードスケートの公式競技6種目間の滑走技術について検討し、異なる種目間の滑走速度の差異が1ストロークの仕事量の差ではなく、ストローク頻度によって生じていることを報告している(Ingen Schenau et al., 1980, 1983). また、距離が長くなると大腿がより鉛直に近づくが、それは筋の血流量を大きくするためであろうと述べている。

さらに、1980年の男子世界選手権と1982年の女子世界選手権のそれぞれ3種目を撮影し、男女間における競技速度の違いに影響を及ぼす技術的要因を検討している(Ingen Schenau, 1983). その結果、女子は男子に比べ膝関節角度が常に約 10° 大きく、それは大腿がより鉛直に近いことによるものであったと報告している。そして、女子にみられる大きな膝関節角度は、除脂肪体重が男子に比べ少ないことから、女子の脚筋力が男子に比べ劣っているために生じたのではないかと述べている。

Boerら(1986)は、11名のオランダのスケーターに1500mを滑走させて撮影し、ベスト記録から2つのグループに分けて滑走技術を検討している。その結果、滑走速度の大きなグループでは、①より長い滑走期と短いプッシュオフ期がみられたこと、②プッシュオフ開始時におけるプッシュオフ角が大きかったことを報告している。そして、プッシュオフ角が大ききことはスケーターの側方への重心速度を生み出すプッシュオフ力の側方成分を大きくするのに重要であること、さらに、滑走期が長いことがプッシュオフ角を大きくするのに有利であることを指摘している。

Boerら(1987a)は、オランダ選手権の5000mレースにおけるカーブ滑走をフィルム撮影し、滑走速度とカーブ滑走の技術的要因を関連づけて検討している。その結果、滑走速度の大きなグループでは、①ストローク頻度が高いこと、②ストローク中は常にプッシュオフ角度が大ききこと、

③膝の伸展範囲が大きいことを報告している。さらに、Boerら(1987b)は、スケーターはストレート滑走ではストローク頻度を自由に選択することができるが、カーブ滑走では滑走速度、カーブの曲率半径、1ストロークの仕事によってストローク頻度が制限されることを示している。

このように、オランダでなされた研究によるスピードスケートの滑走速度を大きくするための技術的要因は、次のようにまとめられる。すなわち、①ストローク頻度が高いこと、②プッシュオフ開始時の膝関節角度が小さいこと、③ストローク中の体幹角度がより水平であること、④プッシュオフ開始時のプッシュオフ角度が大きいこと、⑤1ストロークの仕事が大きいことである。

(2) 滑走速度に影響を及ぼす力学的要因

1) 氷の摩擦に関する研究

滑走速度に影響を及ぼす力学的な要因に関する研究は、スケートと氷の摩擦力および空気抵抗力に関するもの、滑走中の氷とスケーターとの相互作用、すなわちブレード反力および滑走動作のキネティクスの分析に関するものに大別できる。

スケートが氷の上をよく滑るメカニズムに関しては、19世紀後半から多くの物理学者によって論議されている。

イギリスのJoly (1887)は、水が氷に変わると体積を増すので氷は普通の物質とは逆に圧力を加えると融点が下がるという性質に注目し、スケートが加える圧力によって氷が解け、その解け水の潤滑によってスケートがよく滑るとする圧力融解説を出した。しかし、この学説では温度と圧力による水の存在状態領域の関係から、 -22°C 以下ではどんなに圧力を増しても水を発生することができず、 -22°C 付近でもスケートはよく

滑るという事実と矛盾する点で疑問視された。

その後、イギリスのBowden (1939)は、解け水が潤滑油となってスケートがよく滑ることに間違いはないが、その水は圧力によってではなく摩擦熱によって生ずると考え、摩擦融解説を主張した。さらに、Evansら (1976)は、ハの字に組んだスケートを回転する氷の上に滑らせて、摩擦と速度、温度、滑走体の熱伝導率との関係を調べ、スケート滑走が摩擦融解説で説明できることを報告した。

しかし、この摩擦融解説も、摩擦熱によって水が発生するまでにある時間を要するために、スケートが高速で滑走する場合にはその現象を説明できないという矛盾が生じている。その後も、これらの氷の低摩擦機構に関する説が検討されてきたが、いずれの学説も限られた条件下でしか成立しないことが指摘され、依然として未解決の問題が多いようである。

このような背景の中、小林らは札幌に誘致された冬季オリンピック大会のスケートリンク運営に対し科学的助言をするために、スケートがよく滑る氷の条件について研究した (小林ら, 1968, 1969, 1970, 1971; 北原ら, 1969, 1970)。その結果、氷温が -2°C のときに氷が最も良く滑ること、その時のスケートと氷の間の動摩擦係数は0.004であること、さらに -3°C 以下の低温下では氷の表面にエチレングリコールを塗布すると、真水による氷に比べて摩擦係数が小さいことなどを明らかにした。

その後、対馬ら (1969, 1975, 1980, 1986, 1988, 1989a, 1989b)は、スケートと氷の摩擦について次のことを明らかにしている。すなわち、①多くの選手が用いる超硬ステンレス製スケートでは表面仕上げをよくすると摩擦係数が小さくなること、② -20°C から -1°C まで温度を高める過程で摩擦を測定した実験では、温度が高いほど摩擦は小さいこと、

③スケートを傾けて滑らせたところ、摩擦は傾きの角度（0° から45°）にはほとんど依存しないことなどである。

2) キネティクスの要因

バイオメカニクスの領域においては、オランダのJobseら (1990) およびKoningら (1992)がスケート靴とブレードの間に滑走方向に作用するせん断力を検出するセンサーを内蔵した特製スケートを開発し、スピードスケート滑走中の摩擦力を測定している。それによると、ストローク前半では摩擦力は2～4Nと小さいが、およそ60%ストローク時あたりから増加してピーク時には約15Nに達しており、滑走中の摩擦力に大きな変動があることを報告している。また、動摩擦係数は氷温-7℃で0.0046から0.0059の間を示し、先行研究の値とほぼ一致したと述べている。

スピードスケートでは、氷摩擦力によるパワー損失のほかに、高速であるために空気抵抗力によるパワー損失が70%以上と大きいことが指摘されている(Åstrand, 1976)。

Ingen Schenauら (1982)は、体型の異なる6名のスケーターを用いて風洞実験を行い、滑走姿勢および体型が空気抵抗力に及ぼす影響について回帰モデルを用いて検討している。そして、滑走中の空気抵抗力は、身長、体重などの形態的パラメータと体幹が水平に対してなす角度と膝関節角度の2つの技術的パラメータの関数として表すことができることを報告している (式(2.5)～(2.10))。

$$P_{air} = K_n \cdot (H(v) \cdot F(\theta_{trunk}) \cdot G(\theta_{knee}) \cdot v^2 \cdot v_1) \quad (2.5)$$

$$P_{ice} = \mu mgv_1 \quad (2.6)$$

$$k_n = 0.0205 \cdot 1 \cdot \sqrt[3]{m} \quad (2.7)$$

$$H(v) = 4.028 - 0.809 \log(v) - 0.189v + 0.00866v^2 \quad (2.8)$$

$$F(\theta_{trunk}) = 0.798 + 0.0132\theta_{trunk} \quad (2.9)$$

$$G(\theta_{knee}) = 0.167 + 0.00757\theta_{knee} \quad (2.10)$$

ただし, P_{air} :空気抵抗による損失パワー(W), l :身長(m), m :体重(kg)

P_{ice} :氷摩擦による損失パワー(W), g :重力加速度

θ_{trunk} :体幹が水平となす角度(deg), θ_{knee} :膝関節角度(deg)

v :スケーターの空気との相対速度(m/s), v_1 :スケーターの滑走速度(m/s)

μ :氷とスケートブレードの動摩擦係数(0.005)

さらに, この回帰モデルを応用して, 向い風するときには滑走速度を一定にするよりも出力パワーを一定にする方が効率がよいこと, 標高が高くなると空気抵抗が減少して記録が大きく向上することなどの滑走速度に影響する力学的要因を指摘している.

以上のように, 氷の摩擦および空気抵抗のキネティックな研究をみてくると, 氷の低摩擦機構には未解決の問題も含まれる. しかし, 動摩擦係数の測定結果はほぼ一致しており, スケートと氷の動摩擦係数は0.005あたりが妥当と考えられる. また, 空気抵抗に関しては Ingen Schenauらの回帰モデルをもとに, 推定することが可能であると考えられる.

一方, 滑走速度に影響を及ぼす技術的要因のキネティクスの分析には, スケート滑走中の力の計測が不可欠であるが, 他の陸上運動と異なり force platformなどの既存の測定装置を用いることができない. そのため, これまでにもセンサー装置やデータ取込用装置が独自に工夫され, 滑走中の力の測定が試みられてきた.

Ingen Schenau (1981) は, 滑走中にスケートに作用する上下(圧縮)方向の力を測定し, その曲線が立脚中期に体重レベル以下になる二峰性を示

すことを報告した。しかし、それらと滑走速度や競技力との関係はなんら認められなかったことから、自らのパワーバランスモデルにこれらのパラメータを用いていない。

Koningら (1987) は、異なる3種のスピードで滑走したときのスケートに作用する上下(圧縮)方向の力を測定し、これらの力と滑走速度に關係が認められないことから、滑走速度は1ストローク中に発揮される力ではなく、ストローク頻度によって決定されると結論している。

以上のように、これまでのところ、測定された滑走中のキック力と滑走速度などとの関連性は明らかにされていない。この原因の1つは、ストローク中には、センサースケートはブレードの長軸回りに回転しているが、これまでの研究では、センサーで検出された力と静止座標系(氷上)におけるスケーターの進行方向との關係がほとんど考慮されていないことにあると考えられる。

Grootら (1985)は、ブレード反力に膝関節の伸展角速度を乗じてプッシュオフ局面のスケーターの出力パワーが2000W以上になることを報告している。

Boerら (1987c)は、2名の熟練スケーターにおける滑走中のブレード反力および下肢の7つの筋のEMGを記録し、同時に滑走動作を撮影した。そして、矢状面内における下肢の関節トルクおよび関節パワーを算出し、滑走中の下肢筋群の活動パターンを検討している。その結果、プッシュオフ局面におけるパワー出力は主として、大殿筋や内側広筋などの単関節伸筋群によって発揮されていることを報告している。

Koningら (1989b)は、5名の一流スケーターのブレード反力、滑走動作およびEMGを測定した。その結果、矢状面内における全ての下肢関節のトルクは、ストローク中伸展トルクを示し、関節パワーのピーク値は、

股，膝，足関節の順に出現したことを報告している．また，プッシュオフ局面において大殿筋による股関節の伸展パワーが大腿直筋を経て膝関節の伸展パワーに伝達されるコーディネーションが存在すると述べている．

このように，滑走動作のキネティクスの分析は試みられてきている．しかし，滑走速度と滑走動作のパラメータを関連づけて検討したものはまだなく，滑走速度に影響を及ぼす要因のキネティクスのパラメータ，すなわち，どのような滑走動作をすればよいのかは明らかにされていない．

この原因の1つは，先述のように静止座標系でブレード反力を測定することが試みられていないことにあると考えられる．また，スケート滑走動作の複雑な三次元運動を二次元的にモデル化してとらえていることも，技術的要因を詳細に検討できない原因の1つと考えられる．

Ⅲ. 一流スケーターの滑走速度に影響を及ぼす技術的要因の三次元キネマティクスの分析

1. 目的

スピードスケート競技は、一定の距離を滑走するのに要した時間を競うもので、滑走速度が競技成績に大きく影響するのはいうまでもない。滑走速度は、スケーターのキックによる加速と空気抵抗および氷の摩擦抵抗による減速の差として決定される。最近、空気抵抗の小さいウェアの開発や整氷技術の進歩、さらに気圧の低い高地スケートリンクや風の影響がない室内リンクなどにより、競技記録は飛躍的に短縮されている。しかし、競技成績の優劣は、下肢の伸展動作などにより発揮される選手の滑走能力によって決定されるといえよう。

文献研究で示したように、オランダの研究グループを中心として滑走速度に影響を及ぼす技術的要因が検討されてきた(Ingen Schenau, 1980, 1981, 1983, 1985, 1987, 1990; Boer, 1986)。しかし、これらの研究の被験者は、競技レベルが一流選手に比べて低いことや、比較するグループ間のレベル差が大きすぎるなどの問題があり、それらの研究成果を一流選手の競技力向上に役立てることは難しいようである。また、明らかにされてきた技術的要因では、オリンピック選手のような一流選手の競技成績の違いを説明できなかったという報告もある(Boer, 1989)。したがって、競技力向上を意図した滑走技術の研究には、競技レベルの高い集団の中での競技成績の異なる選手間を比較し、その相違を構成する要因について検討する必要があるだろう。

さらに、これまでの研究では、本来三次元的な滑走動作を二次元的に

しか分析していない。しかし、滑走中の重心速度の変化や滑走動作をより精確に測定するためには、三次元画像分析法を適用することが必要であると考えられる。このようにみてくると、一流選手の競技成績や滑走速度に影響を及ぼす滑走動作の技術的要因の実態は十分にはとらえられていないといえる。

本研究では、スピードスケート競技会における一流選手の滑走動作を三次元的に分析し、滑走速度に影響を及ぼす技術的要因について検討した。

2. 方法

1989年2月8日、9日に開催された第8回全日本学生スプリント選手権（群馬県伊香保町）の男子500m競技におけるバックストレート滑走中の選手を10台のVTRカメラを用いて撮影し、DLT法により得られた身体各部位の三次元座標から、身体重心の変位および速度、下肢関節の角度および角速度などを算出した。

(1) 被験者

2日間にわたる2回の500mレースのうち、記録のよい方を選択し、その記録順に上位22名を分析対象選手として選んだ。さらに、37秒台のベスト記録をもつ1位から11位までの11名を上位群、38秒台のベスト記録をもつ12位から22位までの11名を下位群として2つに分けた。

表3-1は、被験者の特性を各群の平均値と標準偏差で示したものである。体重は、上位群で有意に大きな値を示した。また、ベスト記録、国

Table 3-1 Characteristics of the subjects for the top and the 2nd groups.

	Age, yr.		Height, m		Weight, kg		Best record, s		National rank.	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Top group(n=11)	20.5	0.8	1.754	0.054	74.3	3.9	37.94	0.48	13.2	10.7
2nd group(n=11)	19.8	0.8	1.716	0.047	69.6	4.0	38.92	0.51	52.5	31.9
	ns		ns		p<0.05		p<0.001		p<0.001	

内ランキングともに上位群で優れていた。なお、上位群11名のうち8名は国際競技会の経験を有するもので、うち4名は世界スプリント選手権で10位以内にランクされた選手であった。

(2) VTR撮影

図3-1は、撮影範囲およびカメラの設定を示したものである。撮影範囲は幅5m、長さ20mで、滑走速度が大きく、しかも動作の安定する500m競技の240m通過付近（バックストレート中央部）に設定した。さらに、その撮影範囲を長さ4mごとに5つの小区間に分け、三次元座標を得るために各小区間について2台のVTRカメラ（撮影スピードは60 fields/s、露出時間は1/1000秒）を設置した。

(3) 三次元座標の算出

レースの撮影に先立ち、氷上の各測定点上に、6個のコントロールポイントのついた校正器（長さ2.2m）を鉛直になるように順次立て撮影した。そして、滑走コースと平行なY軸に対し、水平面内で直交する方向をX軸、鉛直方向をZ軸として空間座標系を決定し、DLT法に用いるための11個のカメラ定数を各カメラごとに算出した。

各被験者についてVTR画面上の身体各部位23点およびスケート両端4点の二次元座標（計27点）を滑走動作1サイクルにわたってマウスを用いて読み取った。そして、各カメラの二次元座標を三次スプライン関数により補間し、サンプリング周波数200Hz相当のものに換算した。このようにして得られたデータから、各カメラにおいて被験者の手先が最も高くなった時点を同期時点として2つのカメラから得られた二次元座標を合成し、小区間ごとにDLT法により三次元座標を求めた(Wal

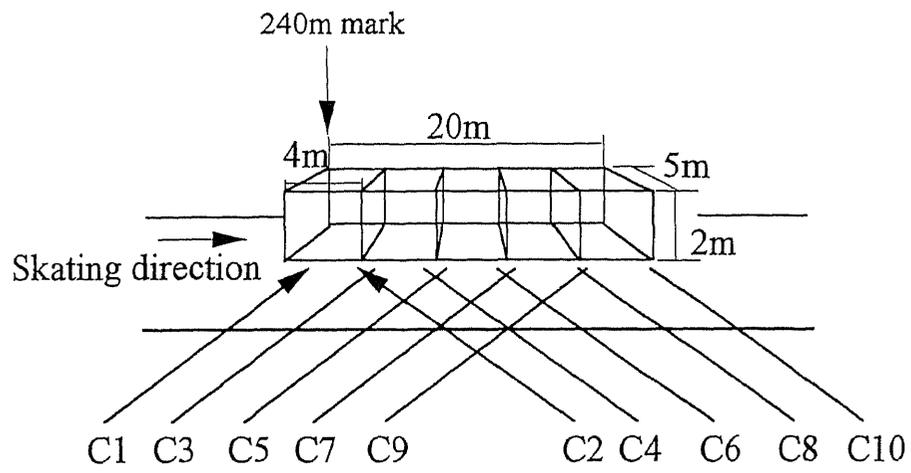


Figure 3-1 Experimental setup for DLT method.

ton, 1979). そして, 着氷しているスケートの先端のY座標値が, 連続する小区間の境界に最も近づいた時点を基準に各小区間のデータを連結し, 全撮影範囲の三次元座標を得た.

本研究では, 4次のButterworth low-pass digital filter(ハミング, 1980)を用いて三次元座標を平滑化した. 平滑化に用いる遮断周波数を以下のようにして決定した. すなわち, 被験者の中から2名を抽出し, 各点の三次元座標をフーリエ変換して算出したフーリエ係数から, 用いる級数項を徐々に増加させて逆フーリエ変換を施した(南, 1986). そして異なる級数項数で復元したデータと生データとの残差をもとに遮断周波数を決定した. その結果, 平滑化に用いた遮断周波数は6 Hzであった.

(4) 測定項目および統計処理

本研究では, 身体重心の座標をChandlerら(1975)の身体部分係数を用いて求め, その変位および速度を算出した.

また, 重心と足関節外果を結ぶ線分が水平面内で滑走スケートブレードに対してなす角度を「重心ブレード角」と定義し, 算出した.

本研究では, 先行研究と比較するために, それらの定義と同様に膝関節の伸展角速度が50deg/s以上になる時点を「プッシュオフ開始時」と定義し, その時点を境に1ストロークを「滑走局面」と「プッシュオフ局面」の2つの局面に分けた.

なお, グループ間の有意差の検定にはスチューデントtテストを用いた.

3. 結果および考察

(1) 競技成績

表3-2は、両群間での分析レースの成績を比較したものである。記録の平均は、上位群が38秒81、下位群が39秒89でその差は1秒余りと小さいが、上位群で有意に優れていた。

1 サイクル中の重心水平速度は、上位群で有意に大きかった。また、1 サイクルの滑走距離と頻度はいずれも上位群で大きい傾向にあるが、有意差はなかった。これは、1 サイクルの滑走距離が長い、いわゆるストライド型の選手と、1 サイクルの頻度が高いピッチ型の選手が両群に含まれていたことによると考えられる。

動作局面の平均所要時間は、上位群、下位群の順に、滑走局面で 0.32 ± 0.04 秒、 0.35 ± 0.04 秒、プッシュオフ局面で 0.20 ± 0.02 秒、 0.20 ± 0.02 秒であり、下位群の滑走局面がやや長い、有意差はなかった。

(2) プッシュオフ動作による重心速度変化

スピードスケート滑走中の重心速度は、プッシュオフ局面では増加する傾向にあると報告されている。本研究におけるプッシュオフ動作前後の重心速度を両群の平均値でみると、プッシュオフ開始時では、上位群が 14.42 ± 0.15 m/s、下位群が 14.07 ± 0.22 m/s、プッシュオフ終了時では、上位群が 14.80 ± 0.21 m/s、下位群が 14.25 ± 0.25 m/sであった。プッシュオフ動作前後の速度差を両群で比較すると、上位群では 0.38 ± 0.18 m/s、下位群では 0.18 ± 0.10 m/sであり、プッシュオフ動作によって上位群が下位群のおよそ2倍の速度増加を生み出しているといえる。

ここで、プッシュオフ動作の開始時および終了時の重心速度ベクトルをそれぞれ V_0 、 V とし、その2つのベクトルのなす角を θ とする。そして、次のようにして全被験者における速度変化ベクトル ΔV を算出し

Table 3-2 Performance of the race for both groups.

	500m record,s		Cycle length,m		Cycle frequency,s ⁻¹		CG velocity, m/s	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Top group(n=11)	38.81	0.15	14.82	0.67	0.974	0.052	14.41	0.16
2nd group(n=11)	39.89	0.43	14.70	1.00	0.954	0.066	13.96	0.27
	p<0.01		ns		ns		p<0.01	

た (図3-2) .

①余弦定理により, V_0 と V を結ぶ速度変化ベクトルの絶対値 $|\Delta V|$ を算出する.

$$|\Delta V| = \sqrt{V_0^2 + V^2 - 2 \cdot V_0 \cdot V \cdot \cos\theta} \quad (3.1)$$

② V_0 と速度変化ベクトル ΔV のなす角度を「加速角 α 」と定義し, 以下のようにして算出する.

$$\angle\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{V_0^2 + \Delta V^2 - V^2}{2 \cdot V_0 \cdot \Delta V}\right) \quad (3.2)$$

図3-2は, プッシュオフ局面前後の重心速度ベクトル V_0 および V と速度変化ベクトル ΔV を両群の実測平均値を用いて示したものである.

式(3.1)より算出した $|\Delta V|$ の両群平均値は, 上位群では1.60 m/s, 下位群では1.86 m/sであり, 下位群でやや大きかった. 前述のようにプッシュオフ局面における重心速度の増加は, 上位群が下位群のおよそ2倍の値を示したにもかかわらず, 速度変化ベクトル $|\Delta V|$ は, むしろ下位群でやや大きな値となった. これは, 単に大きな速度変化ベクトルを生み出すことが, 重心を進行方向に加速するための十分条件ではないことを意味している.

さらに, 式(3.2)により算出した加速角 α の平均値を比較すると, 上位群では 100.0° , 下位群では 92.0° であり, 5%水準で上位群が有意に大きな値を示した. このことは, 図からもわかるように, 上位群の速度変化ベクトル ΔV がより前方に向いていることを示すものであり, 両群における速度変化ベクトルの方向差が, プッシュオフ局面の速度増加の大きな差を生み出したと考えられる.

したがって, 生み出した速度が実際の滑走速度の増加に結びつくためには, 速度変化ベクトルの向きがより前方に向いていること, すなわち

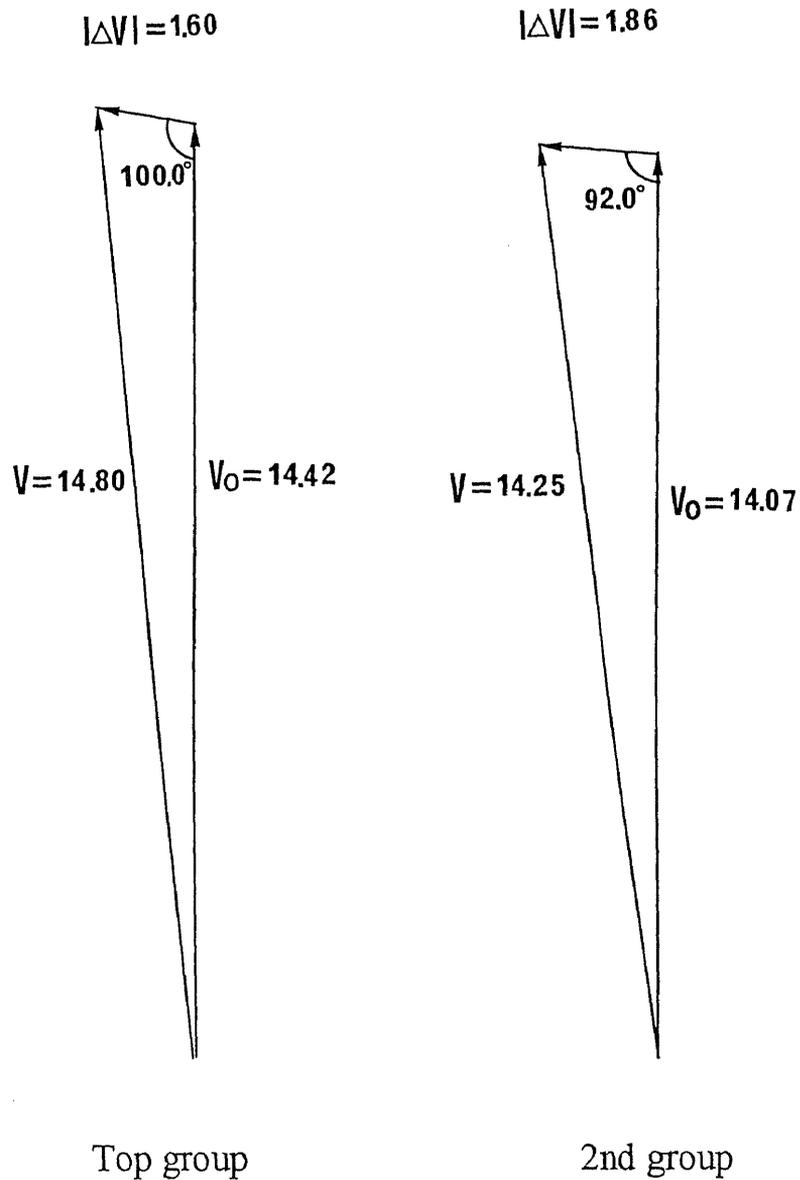


Figure 3-2
 Mean CG velocities of both groups during push-off phase.
 V_0 and V indicate the CG velocity at the onset and offset
 of push-off, respectively.

加速角がより大きいことが重要であり、このことは競技成績を決定づける要因の1つと考えられる。

(3) 下肢関節のキネマティクス

① 下肢関節の角度変化

図3-3は、上から順に1ストロークにおける股、膝、足関節角度の変化を平均値で示したもので、実線が上位群、破線が下位群を表している。

股関節ではプッシュオフ開始時(約60%ストローク時)で下位群ではやや高い値を示しているが、有意差は認められなかった。膝関節では片脚滑走開始時で上位群が 92.6° 、下位群が 98.5° と上位群が有意に小さい値を示した($P < 0.01$)。40%ストローク時付近では両群でほぼ同じ角度を示すが、ストローク中盤で両群ともにやや屈曲の傾向を示した。両群のプッシュオフ開始時では、上位群が 106.1° 、下位群が 111.6° と上位群で有意に小さかった($p < 0.01$)。

Ingen Schenauら(1987)は、プッシュオフ開始時の膝関節角度が小さいことが、重心の側方への移動距離を大きくするため、1ストロークの仕事が大きくなるのに重要であると報告している。本研究の上位群においてプッシュオフ開始時の膝関節角度が小さかったことは、この報告と一致している。

足関節では、上位群では30%ストローク時あたりから屈曲が開始されているのに対し、下位群では40%過ぎから屈曲が開始されている。そして、両群ともに80%過ぎあたりで最も大きく屈曲しており、その角度は上位群で $54.7 \pm 4.9^{\circ}$ 、下位群で $62.2 \pm 4.9^{\circ}$ と上位群で有意に小さかった($p < 0.01$)。

このような優れたスケーターにおけるプッシュオフ局面での足関節

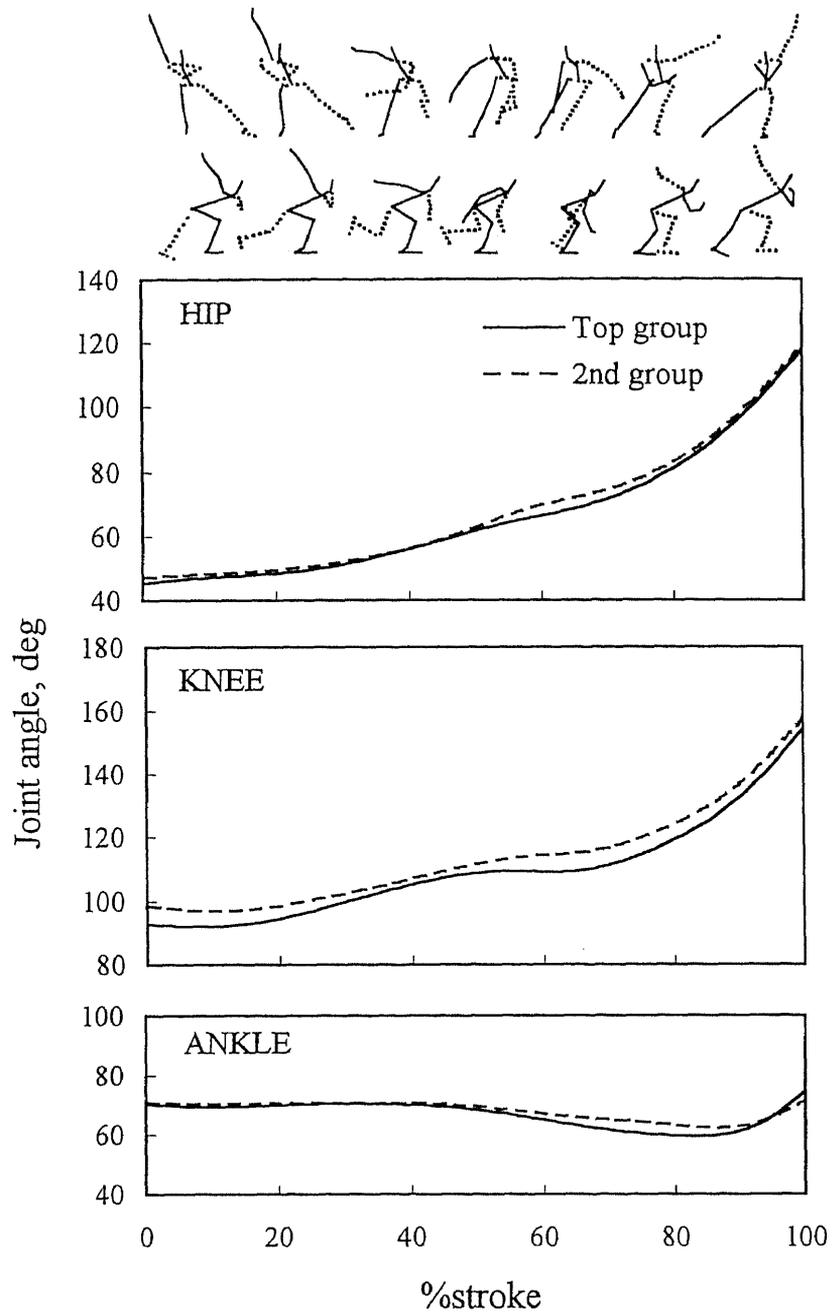


Figure 3-3
Change in joint angles of the lower limb during stroke.

の屈曲が大きくなることは、これまでに報告されていない。しかし、本研究の結果から、プッシュオフ局面における足関節の大きな屈曲は、滑走速度に影響を及ぼす技術的要因の1つであると考えられる。

②下肢関節の角速度変化

図3-4は、股、膝、足関節角速度の変化を平均値で示したもので、いずれも正が伸展、負が屈曲を示している。

股関節の角速度は両群ともにストローク前半でやや増加し、60%ストローク時あたりで一度減少したのち、急峻に増加している。プッシュオフ局面でみられる最大角速度は上位群でやや早く出現し、その値には有意差はないものの上位群で大きい傾向にあった。

膝関節では、股関節と同様に両群でストローク前半でやや増加したのち、負の値を示している。その後、60%ストローク時あたりから再び増加し始めており、80%あたりからさらに急峻に増加している。

Ingen Schenauら(1980)は、競技成績の優れたスケーターが、プッシュオフ局面において大きな股および膝関節の伸展角速度を示したことを報告している。本研究では、それぞれの関節での最大角速度に両群間で有意な差はなかったが、上位群で大きい傾向にあった。

足関節では、プッシュオフ後半にみられる足底屈曲角速度の最大値が、上位群で10.2rad/s、下位群で9.6rad/sであり、上位群で大きな傾向を示した。

先行研究(Ingen Schenau, 1987)では、プッシュオフ局面での股および膝関節の伸展角速度が大きいことが技術的要因として指摘されている。しかし、本研究では、その傾向はみられたものの有意差はなく、股および膝関節の伸展角速度は、一流選手の競技成績を決定するほどの技術的要因とは必ずしもなり得ないと考えられる。

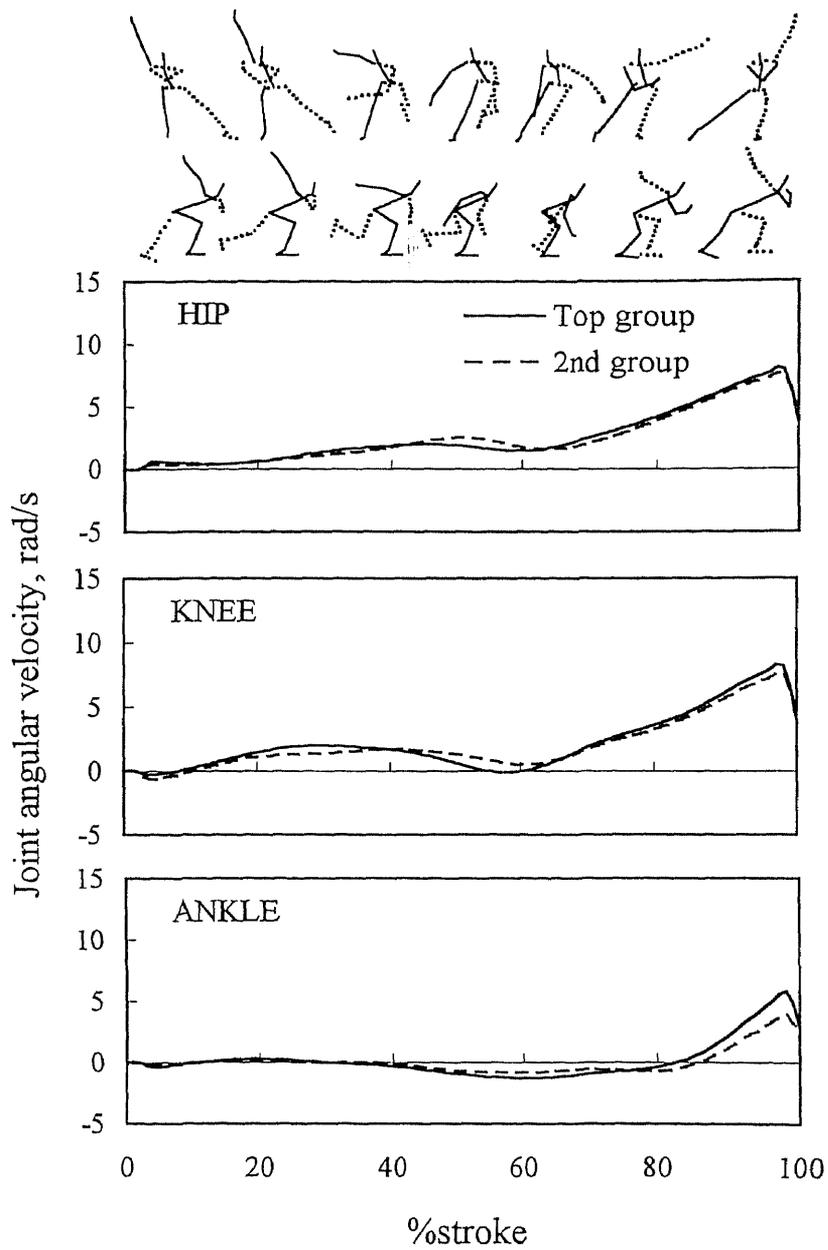


Figure 3-4
Change in joint angular velocities of the lower limb during stroke.

このように下肢関節角度および角速度の変化を両群で比較することにより、片脚滑走開始時およびプッシュオフ開始時の膝関節角度が小さいこと、プッシュオフ局面における足関節の屈曲角度が大きいことが滑走速度を大きくするための技術的要因であることが明らかになった。

(4) 矢状面および水平面におけるプッシュオフ動作

ここでは、両群にみられる膝関節と足関節角度の変化パターンの違いを滑走動作と関連づけて検討する。

矢状面(Y-Z)内での足関節に対する膝(K)と大転子点(H)の相対位置は、下腿が水平線となす角度と大腿が水平線となす角度の関数として次式(3.3)～(3.6)で表すことができる(図3-5参照)。

$$K_y = L_1 \cdot \cos \theta_a \quad (3.3)$$

$$K_z = L_1 \cdot \sin \theta_a \quad (3.4)$$

$$H_y = L_1 \cdot \cos \theta_a - L_2 \cdot \cos \theta_k \quad (3.5)$$

$$H_z = L_1 \cdot \sin \theta_a + L_2 \cdot \sin \theta_k \quad (3.6)$$

ただし、 K_y , K_z : 膝中点 (Y,Z座標値), H_y , H_z : 大転子点 (Y,Z座標値),
 θ_a : 下腿と水平線のなす角度, θ_k : 大腿と水平線のなす角度,
 L_1 : 下腿長, L_2 : 大腿長.

図3-6は、上式に θ_k および θ_a の実測平均値を代入することにより得られた膝と大転子点の位置を、それぞれ0%, 40%, 60%, 80%, 90%, 100%ストローク時間について示したものである。上が上位群、下が下位群のもので、 L_1 と L_2 は両群間の下肢長の相違による影響を除くために両群とも0.4mとした。

膝の位置についてみると、上位群のそれは下位群よりもストローク中

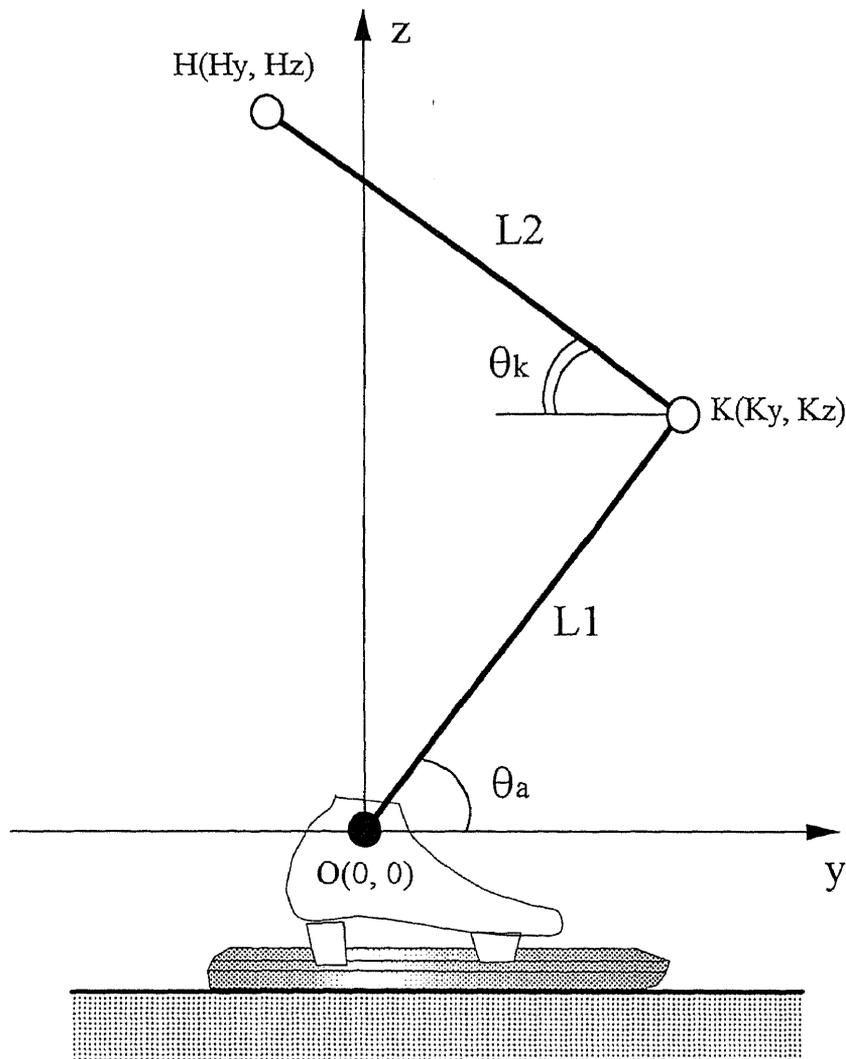


Figure 3-5
The relative hip and knee positions to the ankle.

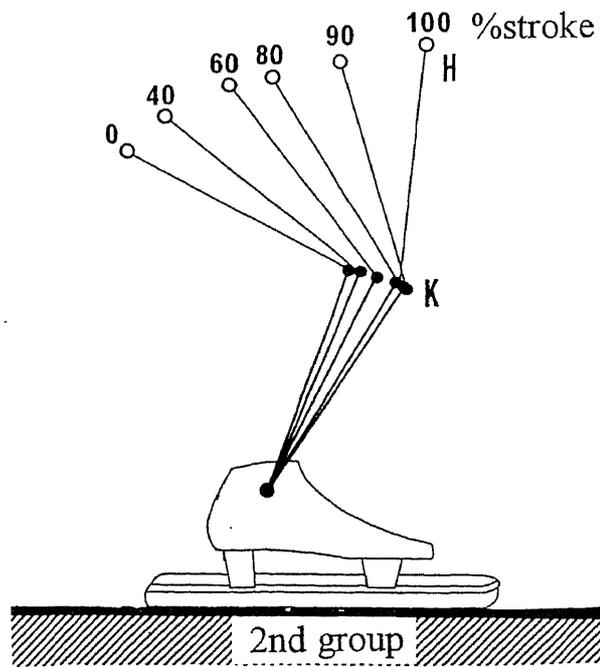
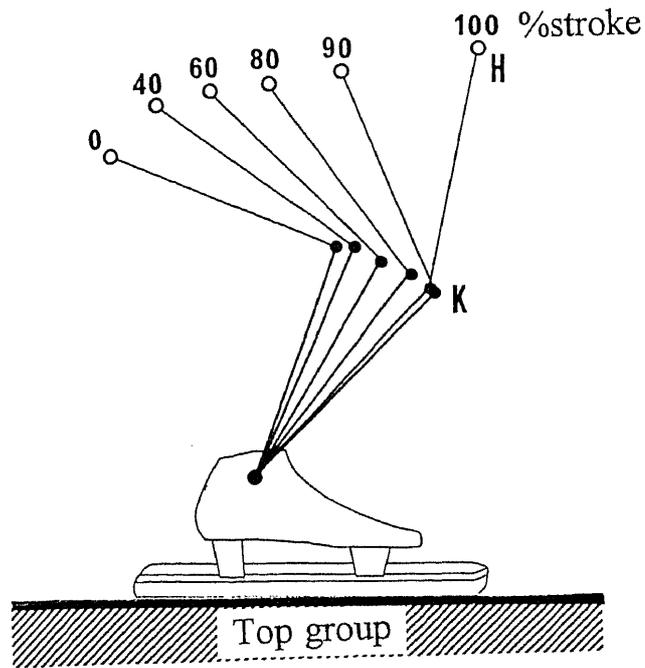


Figure 3-6
The movement of the lower limb in sagittal plane during stroke for both groups.

に前方かつ下方に大きく移動していることがわかる。このことは、プッシュオフ局面において上位群の足背屈が、下位群に比べて有意に大きかったことを反映するものであろう。

また、大転子点では、片脚滑走開始時からプッシュオフ開始時にあたる60%ストローク時にかけては大きな違いがみられないが、その後、上位群の大転子点の前方移動が下位群に比べ大きくなっている。特に、90%から100%にかけての上位群の前方移動が大きい。

大転子点のY方向の位置は、式(3.5)から膝のY方向の位置と関連が深く、膝のY方向の位置は足背屈角度によって決定されるので、上位群では足関節を大きく背屈させながら膝を伸展することによって、大転子点の前方への移動を大きくしているといえる。さらに、大転子点の移動から身体重心の移動を推測すれば、上位群ではプッシュオフ局面において重心をより大きく前方へ押し出すような下肢の動きをしていると考えられる。

図3-7は、1ストローク中の重心ブレード角および支持脚の足関節と重心間の距離の変化を、ストローク時間の20%ごとに両群の平均値で示したものである。

重心の位置は、20%ストローク時までは両群ともにほぼスケート靴上にある。また、両群間の重心ブレード角には、60%ストローク時までは大きな違いがみられず、両群ともに徐々に小さくなり、90°以下になっている。その後、重心ブレード角は両群ともにさらに小さくなり、80%ストローク時では上位群で56.1°、下位群で60.8°であり、上位群でより小さな値を示した。また、80%から90%ストローク時にかけて全被験者が重心ブレード角の最小値を示し、その値は上位群が $50.6 \pm 3.2^\circ$ 、下位群が $56.3 \pm 2.8^\circ$ であり、5%水準で上位群が有意に小さい値を示した。

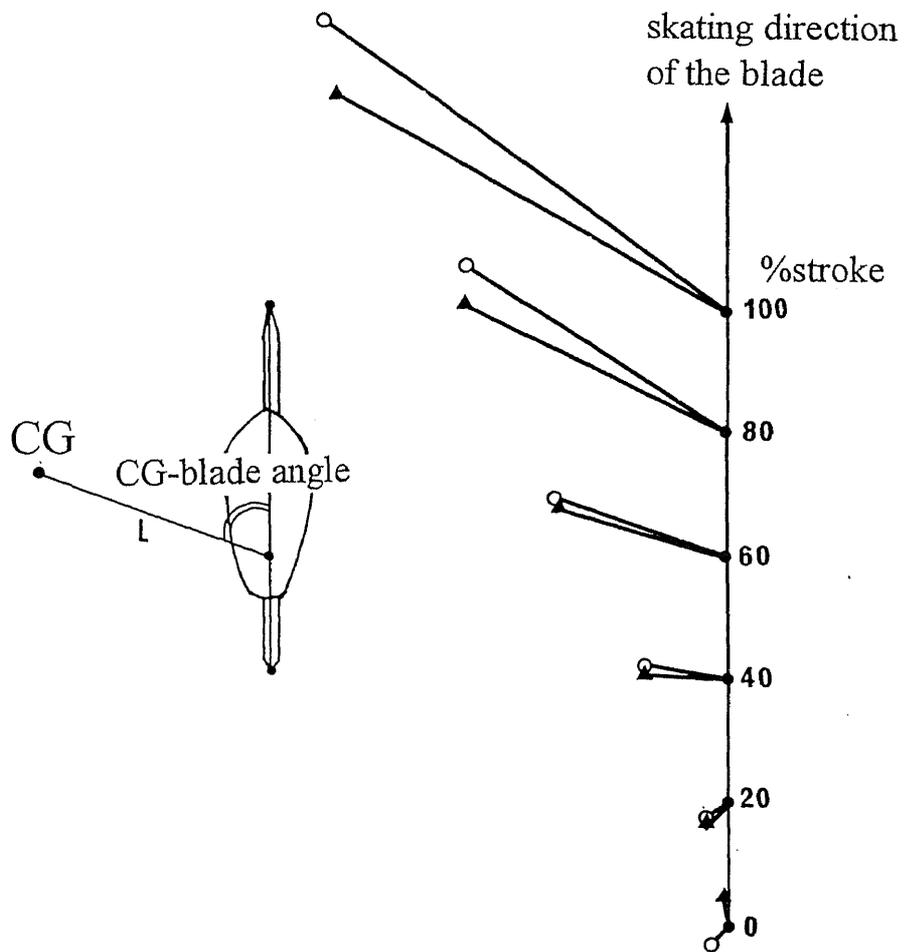


Figure 3-7
 The relative CG position to the skate blade in horizontal plane.
 O, Top group ; ▲, 2nd group.

先行研究(Ingen Schenau et al., 1980, 1981, 1987 ; Boer et al.;1986, 1987, 1989)では, プッシュオフによる側方への速度の増加のみが, 重心の加速に有効であると仮定して, 側方への速度の増加量によってスケーターのプッシュオフ動作を評価している. つまり, 優れたスケーターのプッシュオフ動作は, 重心を横方向に加速するために行われるとしている.

しかし, 本研究においてプッシュオフ局面での重心ブレード角が徐々に減少したことは, 重心が滑走スケートに対しより前方へ移動していることを意味していると考えられる. また, 本研究では, 水平面内での重心の側方の変位に関しては両群間で差異はみられなかったが, 上位群でより大きな前方への変位が認められた. これらのことは, 上位群では下位群に比べて, 重心をより前方へ押し出すようなプッシュオフ動作をしていることを示すと考えられる.

(5) スピードスケートの加速理論の再検討

図3-8には, 比較のためにIngen Schenauら(1985)の加速理論を引用した. 彼らの理論は「水平面内で V_0 に対し垂直な速度の増分のみが加速を引き起こす」というものである. しかし本研究では, プッシュオフ前後の重心速度ベクトル V_0 , V から, 重心速度の変化を示す速度変化ベクトル ΔV を算出し, ΔV が V_0 に対してなす角度を計算したところ, 垂直よりやや前方を向いていた. また, 両群間の比較では, 上位群の方が下位群よりも有意に前方を向いていた. このことは, Ingen Schenauらの理論とは矛盾すると考えられる.

そこで本研究では, 全被験者(22名)の実測値をもとにスピードスケートの加速理論について検討することにした.

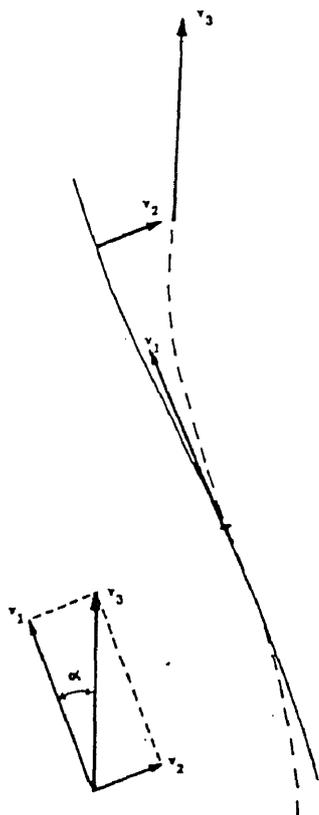


Figure 3 — Since skaters can only push off in a direction perpendicular to the gliding direction of the skate (solid line), the center of gravity follows a sinuous trajectory (broken line). The result of the push-off is a velocity increment v_2 , which increases the total velocity of the skater from v_1 to v_3 . Due to the sideward push-off, the result of the push-off is not only an increase of kinetic energy but also a change of direction α of the center of gravity.

$$V_3 = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$$

Figure 3-8
Acceleration theory proposed by Ingen Schenau et al.(1985).

図3-9は、プッシュオフ前後の3つの速度ベクトル V_0 、 V 、 ΔV を、全被験者の平均値をもとに V_0 と V の始点をそろえることにより模式的に示したものである。全被験者の加速角 α は 90° より大きく、平均で 95.8° であった。ここで、プッシュオフ開始時の速度ベクトル V_0 の方向をU軸とし、U軸に水平面内で垂直な方向をW軸と定め、以下、速度ベクトルを2方向のベクトル成分で表わすことにする。このようにすると、次のように ΔV をU方向成分 ΔV_u とW方向成分 ΔV_w に分解することができる。

$$\Delta V_u = -\Delta V \cos \alpha \quad (3.7)$$

$$\Delta V_w = \Delta V \sin \alpha \quad (3.8)$$

そして、プッシュオフ終了時の速度ベクトルを次式(3.9)で導くことができる。

$$V = \sqrt{(V_0 + \Delta V_u)^2 + \Delta V_w^2} \quad (3.9)$$

ここで、右辺に実測平均値 ($V_0:14.25\text{m/s}$, $\Delta V_u:0.17\text{m/s}$, $\Delta V_w:1.71\text{m/s}$) を代入すれば、14.52という値が得られ、等式の成立が確かめられる。

本研究では、全被験者において正の ΔV_u が計測された。しかし、その平均値 0.17m/s は、およそ 14m/s の滑走速度に比べると非常に小さな値であった。さらに、スケーターが高速度で運動しているにもかかわらず、本研究での撮影スピードは毎秒60フィールドと比較的遅いといえる。

映像解析による速度の分解能は、ミッチェルソン(1985)によると次のように導かれる。

$$V_r = R(2 \cdot fd)^{\frac{3}{2}} (\text{fs})^{-\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

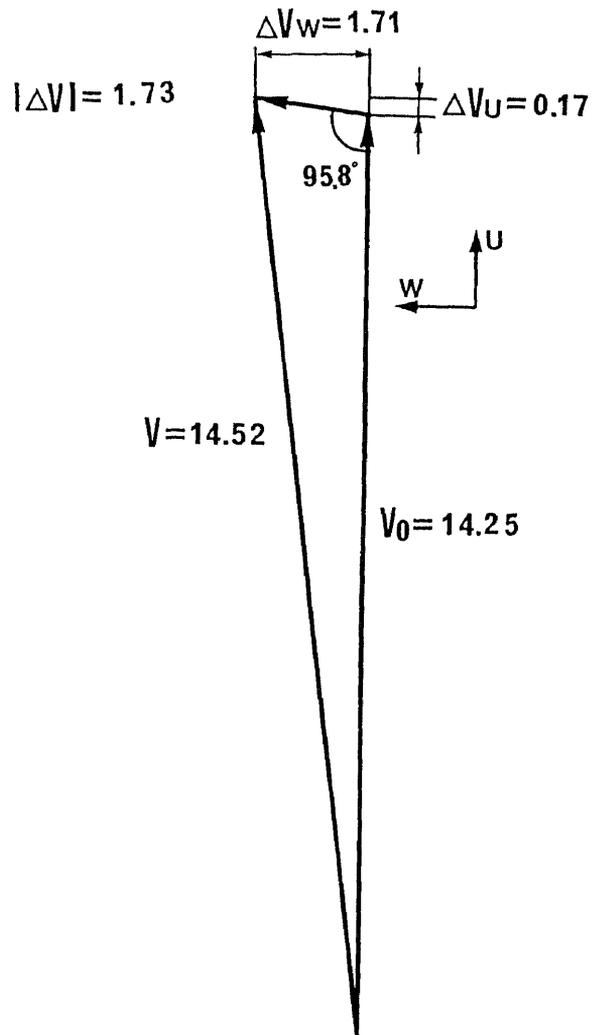


Figure 3-9

Mean velocities of the CG at the onset and offset of push-off for all subjects ($n=22$). Velocity components in skating direction (u) and in perpendicular to skating (w) were expressed as ΔV_u and ΔV_w , respectively.

ただし、 V_r ：速度分解能， R ：画像分解能

f_d ：生データの帯域幅， f_s ：サンプリング周波数．

本研究における重心位置データのもつデータ帯域を調べるために、パワースペクトラム解析を行ったところ、重心データのデータ帯域はおよそ6 Hz以下であった。したがって、式(3.10)から算出される本研究の計測条件($R:0.01\text{m}/\text{s}$; $f_d:6\text{Hz}$; $f_s:60\text{Hz}$)における速度分解能は、約 $0.06\text{m}/\text{s}$ と推定できる。

本研究で得られた ΔV_u の平均値は $0.17\text{m}/\text{s}$ であり、推定した速度分解能とほぼ同じオーダーの値である。しかし、本研究における ΔV_u の値は、全被験者とも正の値として算出された。もし、 ΔV_u がすべて誤差であるならば、平均的には相殺されてもっと小さくなると考えられる。したがって、本研究で認められた ΔV_u はすべて誤差とは言い切れず、滑走方向への加速が生じる可能性を示唆するものと考えられる。

実測平均値をみると、 $\Delta V_u(0.17\text{m}/\text{s})$ は、 $\Delta V_w(1.71\text{m}/\text{s})$ の1割にも満たないほど小さな値である。さらに、 $\Delta V(1.73\text{m}/\text{s})$ は、 ΔV_w にほぼ一致していることがわかる。ここで、 ΔV_u を無視し、 $\Delta V_u = 0$ として、式(3.9)に代入すれば、 V は $14.35\text{m}/\text{s}$ と算出される。このときの速度の増分(V と V_0 の差)は、 $0.10\text{m}/\text{s}$ となる。しかし、実測値 V は $14.52\text{m}/\text{s}$ であり、速度の増分は $0.27\text{m}/\text{s}$ であるから、 ΔV_u を無視したときの速度増加は、実際の速度増加よりも63%低く見積られることになる。したがって、 ΔV_u は、値としては小さいが、速度増加に対する割合としては大きく、重心の加速をとらえるうえで無視できない重要なパラメータであるといえる。

また、先に述べたように、上位群では下位群に比べて、重心をより前方に押し出すようなプッシュオフ動作をしていた。このようなプッシュ

オフ動作は、速度変化ベクトルをより前方に向けるために有効であると
考えられる。

以上に述べた本研究の結果から、従来の加速理論を修正し、次のよう
な新しい加速理論を提唱することができるであろう。

「スピードスケート滑走における重心の加速は、プッシュオフによる重
心速度方向に対し水平面内で垂直な速度成分の増加のみでなく、重心速
度方向の速度成分の増加によっても生じる。」

重心速度方向の速度の増分 ΔV_u が生じることは、スケーターの重心に
水平面内でU軸方向の成分をもつ力が作用することを意味する。したが
って、上述の加速理論を力学的に検証するためには、 ΔV_u の生み出され
る原因を考える必要がある。

図3-10は、水平面内における1ストローク中の重心（実線）および滑
走スケート（破線）の軌跡の典型例を示したもので、点線はプッシュオ
フ開始時およびストローク終了時の両点を結んだものである。両軌跡を
比較すると、重心の軌跡はストロークを通してゆるやかな円弧を描いて
いるが、滑走スケートのそれはストローク前半では直線的であるが、ス
トローク後半では重心よりもやや急な円弧を描いていることがわかる。
重心の軌跡よりも滑走スケートの軌跡の曲率が大きいことは、滑走スケ
ートが重心に近づくように移動することを示すものである。

滑走スケートが曲線運動するとき、法線方向に求心力が作用する。滑
走スケートの曲線運動は、底面に船底のような丸みをもつスケートブレ
ードが、氷に対して傾斜し、部分的に氷にくい込むことにより、スケ
ートブレードが氷から力を受けるために生じると考えられる。

滑走中のスケーターの重心には、空気抵抗、氷の摩擦力、スケ
ーターによって発揮されるプッシュオフ力が作用しており、それらの合力に

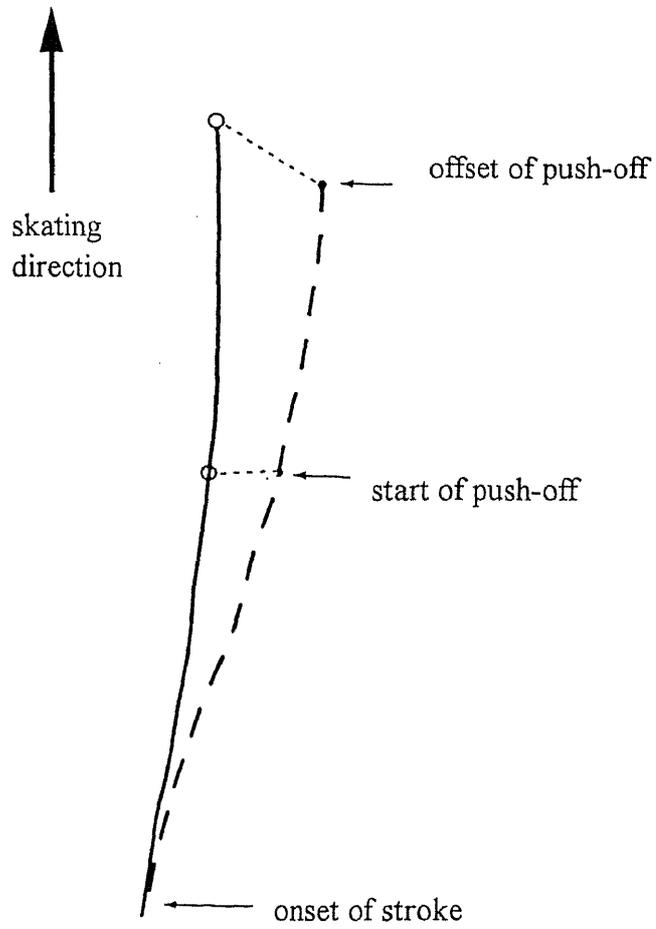


Figure 3-10
 Loci of the CG and front tip of the skate blade in horizontal plane
 for a subject. —;CG, - - - ;skate blade.

より重心の運動が起こる。ストローク後半では、スケートおよび重心の速度ベクトルの方向が異なり、しかも重心がスケートの前方に位置している。このとき、滑走スケートの曲線運動における求心力は、重心速度ベクトルの向きに成分をもつ。したがって、滑走スケートの曲線運動における求心力の重心速度ベクトル方向への成分が、重心を滑走方向に押し出す力として作用する可能性が考えられ、この成分が滑走方向への加速 ΔV_u を生み出すと推測できる。

今後は、さらにキネティックな観点からこの理論を検討し、加速が生じるメカニズムについて明らかにする必要がある。

4. 要約

本研究では、スピードスケート競技会における一流選手の滑走動作を三次元的に分析し、滑走速度に影響を及ぼす技術的要因について検討した。

全日本学生スプリント選手権の男子500m競技のバックストレート滑走中の選手を10台のVTRカメラを用いて撮影し、DLT法により上位22名の滑走動作の三次元座標値を算出した。そして、記録順に11名ずつ上位群(38.81±0.15秒)と下位群(39.89±0.43秒)に分け、身体重心の変位および速度、下肢関節の角度および角速度などのパラメータについて競技成績と関連づけて検討した結果、以下のことが明らかになった。

①上位群ではプッシュオフ動作によって生じる速度変化ベクトルが有意に前方に向いており($p<0.05$)、それにより有効な加速を生み出していた。

- ②上位群では片脚滑走開始時とプッシュオフ開始時の膝関節角度が有意に小さかった($p < 0.01$).
- ③プッシュオフ動作中に両群ともに足関節の屈曲がみられ、最大屈曲角度は上位群で有意に小さかった($p < 0.01$).
- ④プッシュオフ局面の重心ブレード角は、上位群で有意に小さい角度を示した($p < 0.05$).

以上の結果から、片脚滑走開始時およびプッシュオフ開始時の膝関節角度が小さいこと、プッシュオフ局面における足関節の屈曲が大きいことは、滑走速度を大きくするための重要な技術的要因であると考えられる。さらに優れたスケーターのプッシュオフ動作は重心をより前方に押し出すようなものであることが明らかになった。

また、全被験者において重心速度方向への速度の増分 ΔV_u が正の値で測定され、このパラメータは重心の加速に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。このことから、次のような新しいスピードスケートの加速理論を提唱することができよう。

「スピードスケート滑走における重心の加速は、プッシュオフによる重心速度方向に対し水平面内で垂直な速度成分の増加のみでなく、重心速度方向の速度成分の増加によっても生じる。」

IV. スピードスケートにおける滑走速度とブレード反力との関係

1. 目的

近年、数多くのスポーツで一流競技者の動作が解析されるようになり、最近では、地面反力と映像を併用して関節トルクやパワーを算出し、スポーツ技術をキネティックに評価できるようになってきた。

スピードスケート競技の分野においても、大きな滑走速度を得るための技術的要因の究明やストローク中の加速現象のメカニズムに関する理論 (Ingen Schenau et al.(1980)) が提示され、選手の技術やトレーニングの課題がキネマティック的には明らかにされてきている。スケート滑走中の力の測定は、他の陸上運動と異なり force platform などの既存の測定装置を用いることができない。そのため、これまでにも各種のセンサーやデータ取込用装置が工夫され、滑走中の力の測定が試みられてきた (Ingen Schenau (1981); Jobse et al.(1990))。しかし、スケート滑走中の氷とブレードとの間の相互作用、すなわちブレード反力をとらえる方法が確立されておらず、これまでの先行研究ではキネティックなパラメータと滑走速度などのパフォーマンスとの関連はなんら明らかにされていない。

この原因の1つは、実際のストローク中に生じるブレードの長軸回りの回転運動が計測されていないために、測定された力の方向とスケーターの進行方向との関係が不明であることである。第2の原因として、いずれも測定された力がスケートの上下軸方向に作用する圧縮力のみであり、実際にはこれに直交するブレード左右方向の力も作用することから、スケーターのキック力の大きさが精確に計測されていないことがあげられる。さらに、先行研究(Koning, 1991)では被験者がデータ取込用装置 (重量7.7kg)

を装着して滑走しているために、滑走動作が制限され、試技の滑走速度が最高で10.7m/sとレース時(12-15m/s)に比べて小さいこともあげられる。

高速で滑走するスケーターが空気抵抗による損失を小さく抑えて水平速度を大きくするには、スケーターの発揮するキック力の水平成分を大きくすることが重要であると考えられる。したがって、キック力を身体重心の動きや滑走速度と関係づけて検討するには、キック力を氷に対する静止座標系でとらえ、これらの力を鉛直成分と水平成分に分解して解析する必要がある。

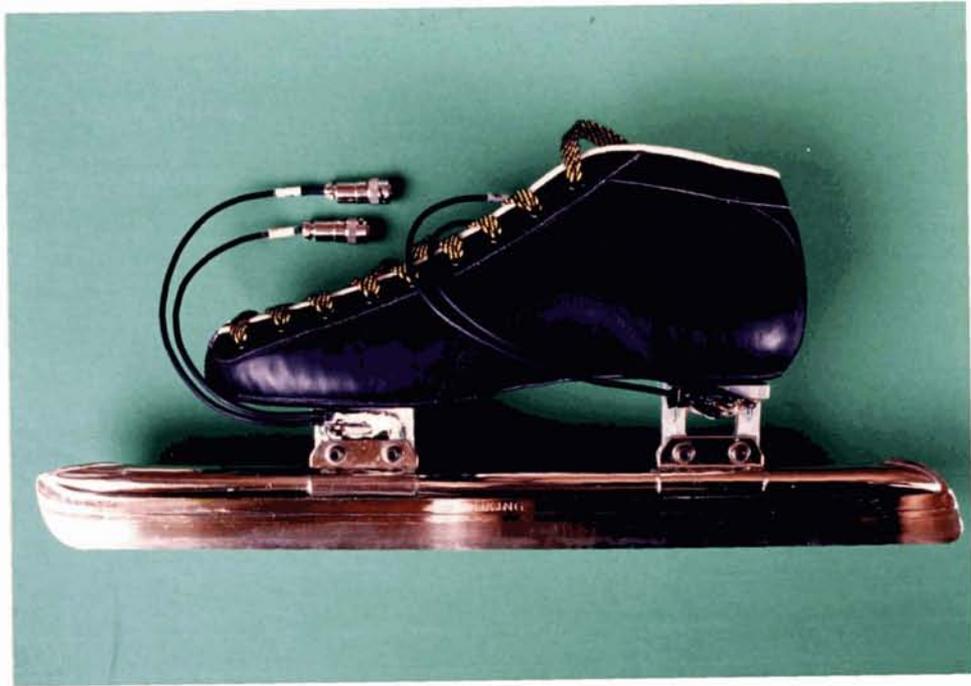
キック力を氷に対する座標系でとらえるには、ストローク中のブレードの長軸回りの回転運動を計測する必要がある。さらに、スケーターは身体を左右に移動しながら前方に移動しているので、キック力の水平成分を精確にとらえるには、これまで無視されてきたブレードの左右方向に作用する力の検出も必要であろう。

本研究では、スケートブレードに作用する上下および左右方向の二分力が計測できるセンサースケートを開発し、低速および高速滑走時におけるブレード反力を測定・比較することにより、滑走速度とブレード反力との関係について検討した。

2. 方法

(1) センサースケートの構造および性能

センサースケートは、靴とスケートブレードの間にT字型のセンサー部を前後2カ所装備した構造になっている(写真4-1)。前後センサー部の間隔や高さ、ブレードの長さなどは国内男子スケーターが通常用いているものと同等に設計し、ブレード底面の丸み(ロック)は曲率半径24mに加工



Photograph 4-1
Specially-made sensor skate with a pair of sensor elements
located between the shoe and skate blade.

した。

センサー部はアルミニウム製で、センサー（写真4-2）にはストレインゲージ（共和電業製）を用い、各センサー部で（上下）圧縮応力成分と（左右）曲げ応力成分が検出できるように2つのホイートストンブリッジ回路を構成した（図4-1）。なお、圧縮応力用ブリッジ回路には半導体ストレインゲージ(KSP, 120 Ω),曲げ応力用ブリッジ回路には箔ストレインゲージ(KFG, 120 Ω)を用いた。

図4-2には、圧縮および左右方向の較正の結果を示した。センサーの較正は、センサースケートをブレードおよびセンサー部に加重しないように較正台に固定し、圧縮方向と左右方向にそれぞれ加重して行った。各センサーの出力値に対する非直線性は、圧縮方向が平均で2.9%出力値、左右方向が2.6%出力値であった。圧縮加重による左右方向センサーへの干渉性は平均で1.3%と小さいが、左右加重による圧縮センサーへの干渉性が12.4%と大きかった。そこで本研究では、左右方向の加重量から圧縮方向センサーの出力を一次式により補正した。

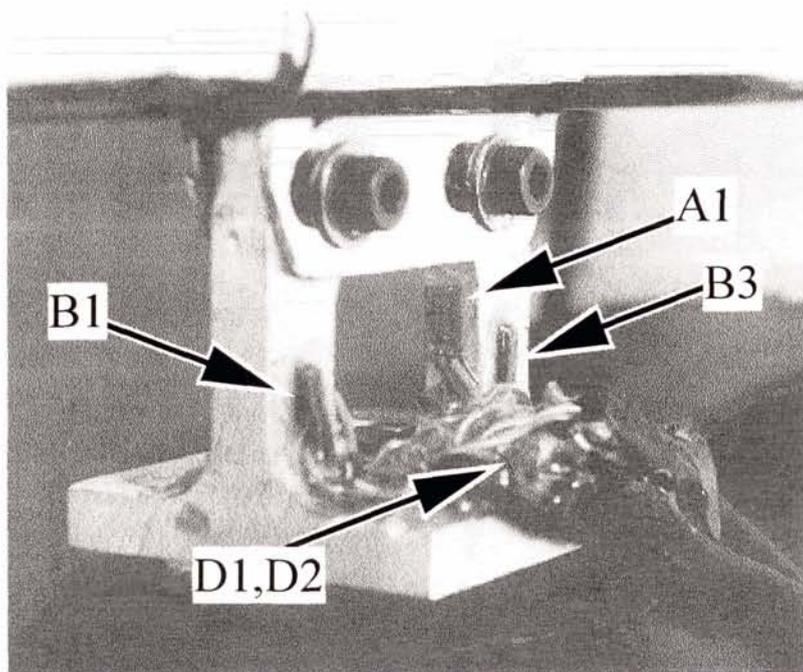
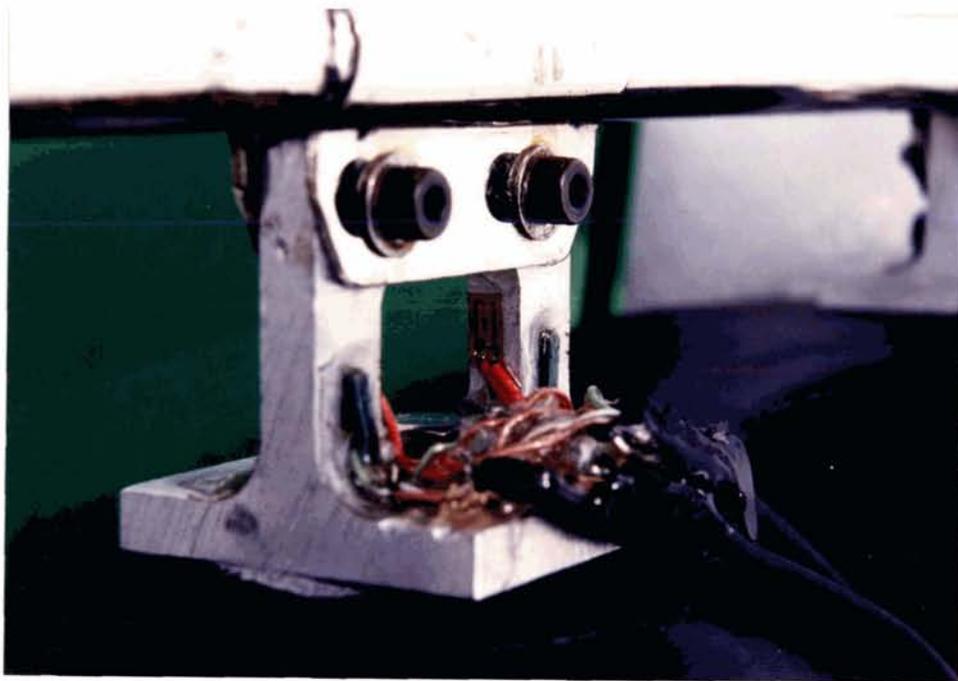
（2）被験者

被験者には、スピードスケート競技を専門とする高校生3名、大学生6名、社会人1名の男子計10名（身長 $1.71 \pm 0.05\text{m}$ 、体重 $69.4 \pm 0.67\text{kg}$ 、500m ベスト記録 $39.57 \pm 1.92\text{s}$ ）を用いた。専門種目の内訳は短距離が6名、長距離が4名であった。

なお、被験者の中には、1000mの元世界記録保持者が含まれていた。

（3）実験方法

実験は1995年1月、やまびこスケートの森400m国際スケートリンク（長



Photograph 4-2 Sensor elements.

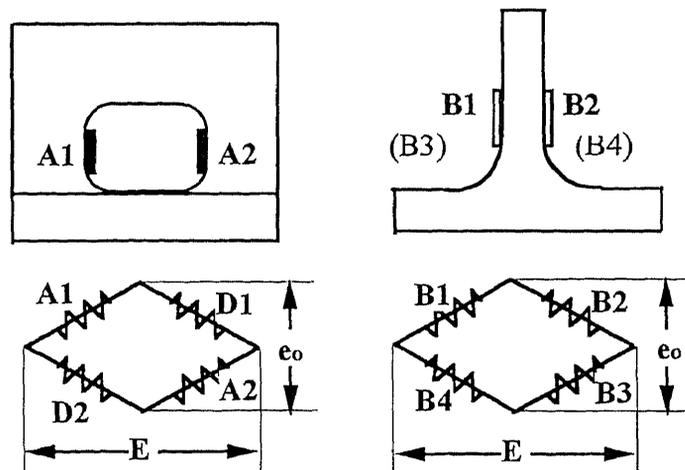


Figure 4-1
Two wheatstone bridges used to detect forces in lateral/medial and vertical directions.

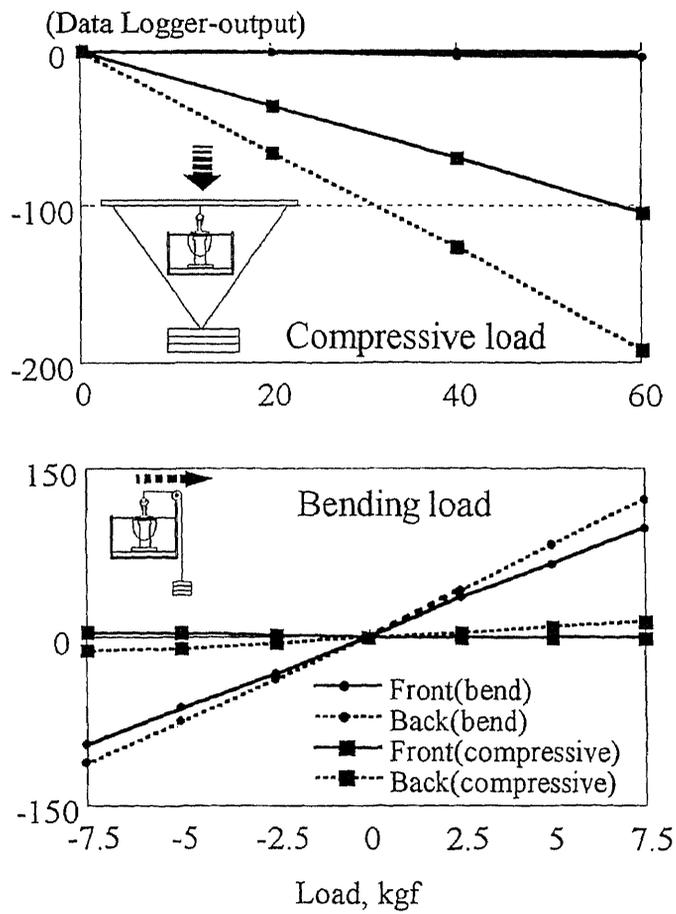


Figure 4-2 Results of calibration.

野県岡谷市)で行った。実験に先立ち、全被験者の滑走条件が等しくなるように整氷作業を施した。

被験者にセンサースケートを履かせ、1周(400m)40秒程度(約10m/s)の低速滑走と全力高速滑走を十分な休息をはさんで行わせた(写真4-3)。

滑走中のセンサースケートからの出力信号(8ch)は、被験者に装着した小型ストレインアンプ(電機計測販売社製)を介して2台の小型データロガ(P & G社製, DL1001,4ch)にサンプリング周波数100Hzでそれぞれ取り込んだ。これらの測定装置の総重量は約800gであった。

本研究ではストローク中のブレードの傾斜角度をとらえるために、スケーターの後方から2台のVTRカメラ(撮影スピード60fields/s, 露出時間1/10000s)を滑走動作の安定するスタートから250m通過地点の直線レーンに設置した。これらのVTRカメラの光軸は、左右の各ストロークの滑走方向にそれぞれ一致するように設定した。また、同地点の氷上に設置した2つのマーク間(20m)の所要時間から滑走速度を求めるために、試技をVTRカメラでパンニング撮影した。

(4) ブレード反力の算出

データロガに蓄えられたデジタル信号をパーソナルコンピュータに取り込み、各チャンネルごとにゼロレベルを調整した。2台のデータロガの同期には、全試技のスタート時にスケート先端が氷に強く接触した瞬間に生じるインパクト波形を利用した。

温度変化によるセンサー出力への影響を考慮して、各試技の前後に行った較正から得られた係数より、左右方向出力を力に換算した。また、先に述べたように左右方向の加重による圧縮方向出力への干渉量を補正したのち、圧縮方向出力を力に換算した。



Photograph 4-3 Scene of the experiment.

本研究では、図4-3に示すように、センサースケートから得られたスケートブレードに作用する力（センサー座標系）を、ブレードが鉛直となす角度 θ （以下、ブレード傾斜角度という）により氷上の静止座標系に変換した（式(4.1)）。センサー座標系は、圧縮方向をC軸、左右方向をB軸と定め、それぞれスケートブレードに作用する力が、圧縮方向、内向き方向を正とした。氷上の座標系は、鉛直方向をZ軸、ブレード長軸に直交する水平方向をH軸と定めた。

ブレード傾斜角度は、後方より撮影したVTR画像から、スケートブレード後端とスケート靴上端のマーク2点（距離約0.2m）をもとに算出した。ブレード傾斜角度は内傾を正とし、ブレード傾斜角度とセンサー出力の同期は、離氷時を基準に行った。

$$\begin{bmatrix} F_h \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

（5）測定項目および統計処理

図4-4には、前後センサー部で得られた氷上の静止座標系におけるHおよびZ軸方向の力を示した。式(4.2)～(4.4)により、ブレードに作用する力の鉛直成分(F_z)、水平成分(F_h)および合力(R_F)は、前後センサー部で得られた氷上の静止座標系におけるHおよびZ軸方向の力(F_{hf} , F_{hb} , F_{zf} , F_{zb})から算出した。

$$F_z = F_{zf} + F_{zb} \quad (4.2)$$

$$F_h = F_{hf} + F_{hb} \quad (4.3)$$

$$R_F = \sqrt{F_h^2 + F_z^2} \quad (4.4)$$

力の作用点(PFA)は、前後センサーの鉛直成分比から算出した（式(4.5)）。なお、作用点は、後センサーからの距離とし、前後センサー間距離(L)は0.16mである。

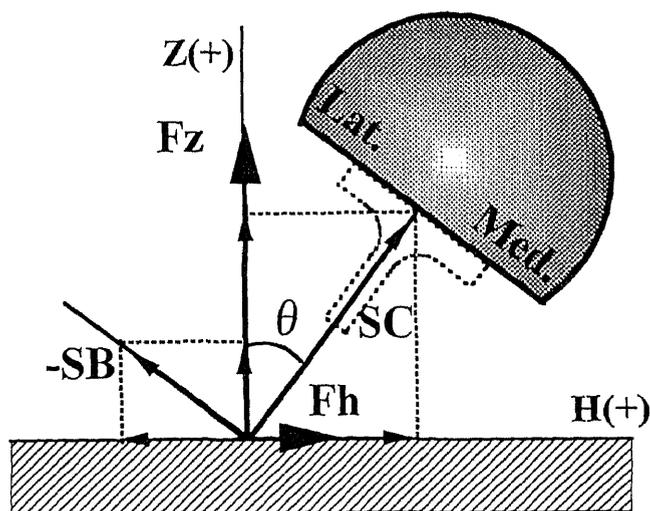


Figure 4-3
 Blade reaction forces in the coordinate system fixed on ice were derived from the transformation of force signals in the sensor-coordinates. Transformation was based on lean angle of the blade measured with VTR analysis.

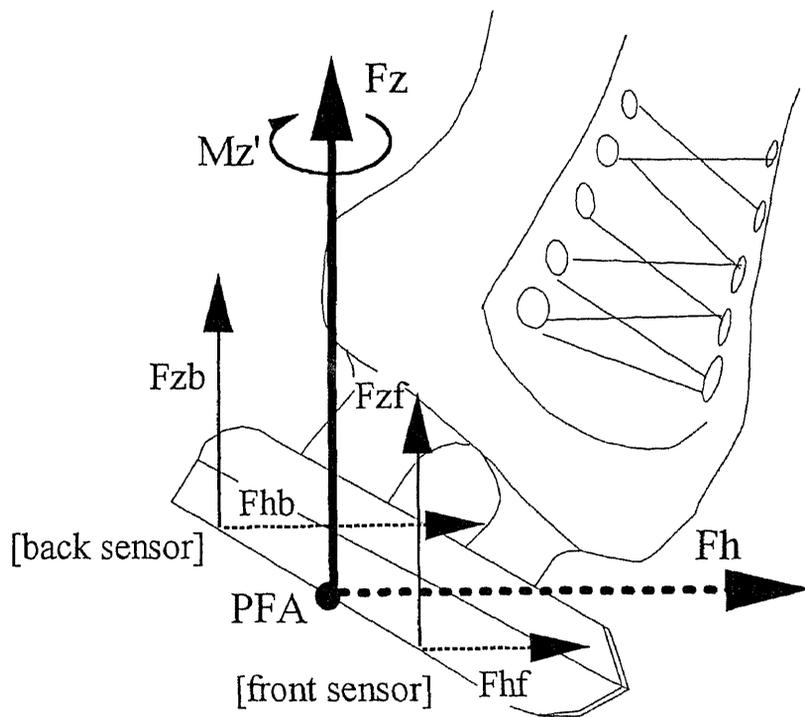


Figure 4-4
 Vertical and horizontal blade reaction forces applied and
 point of force application.

$$PFA = \left(\frac{F_{zf}}{F_z} \right) \cdot L \quad (4.5)$$

鉛直軸回りのフリーモーメント Mz' は、前後センサー部に作用する力の水平成分から算出した(式(4.6))。ただし、フリーモーメントの方向は両脚とも足の外旋方向(爪先が外側に回転)を正とした。

$$Mz' = \left(\frac{L}{2} \right) \cdot (F_{hb} - F_{hf}) - \left(PFA - \frac{L}{2} \right) \cdot F_h \quad (4.6)$$

本研究では、着氷および離氷の時点を合力(RF)が各被験者の身体質量と計測装置の重量の和のそれぞれ3%以上、3%以下になった時刻と定め、着氷から離氷までを「1ストローク」と定義した。

なお、各パラメータの両試技間における有意差検定にはスチューデントtテスト(両側検定)を用いた。

3. 結果および考察

(1) 滑走結果

表4-1には、低速および高速滑走試技の滑走結果を全被験者の平均値と標準偏差で示した。滑走速度、ストローク頻度ともに高速滑走で大きかった($p < 0.001$)。また、単脚支持期時間、二重支持期時間ともに高速滑走時で小さかったが($p < 0.001$)、ストローク時間に対する比率で見ると、両試技間に差はなかった。

本研究の高速滑走時の速度は500m競技時の滑走速度(14.2m/s)に比べ小さかった。これは、実験に用いたセンサースケートの靴、ブレード長、ブレード位置などが各被験者の普段使い慣れたものと異なることによると考えられる。しかし、本研究における高速滑走には競技会に近い速度(13.0m/s)の試技も含まれるなど、その速度は従来之力測定時のもの(9~10m/s)よりも

Table 4-1 Results of trials in slow and fast speeds.

	velocity		stroke frequency		stroke length		single phase		double phase			
	ms ⁻¹		s ⁻¹		m		s		s		%	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Slow skating(n=10)	9.33	0.45	0.82	0.13	11.6	1.5	1.05	0.20	0.20	0.04	16.1	2.7
Fast skating(n=10)	11.51	0.84	1.20	0.17	9.7	1.1	0.71	0.12	0.14	0.02	16.6	3.0
	p<0.001		p<0.001		p<0.001		p<0.001		p<0.001		ns	

明らかに大きく、測定されたデータは高速滑走時の特徴を十分反映するものと判断できる。

(2) センサーに作用する力

図4-5は、高速滑走試技でのスタート後200m通過付近のセンサー座標系における上下圧縮応力（上）および左右応力（下）の出力を典型例で示したものである。5つの左ストローク（太い実線）のうち前の2ストロークがカーブ滑走時、その後がストレート滑走時のものである。なお、左右応力は、正の値がブレードに対し内向きに作用する力を示す。

ストレート滑走中の圧縮応力は、両脚ともに二峰性を示した。また、変化パターンをカーブとストレートで比較すると、ストレート滑走時のストローク半ばでみられる力の低下がカーブ滑走時では小さいようである。これらの変化パターンはKoningら(1987)が報告したストレート滑走とカーブ滑走のカー時間曲線と同様であった。

ストレート滑走中の左右応力は、両脚ともにストローク前半では正（内向き）、キック動作を含むストローク後半では負（外向き）に作用していた。内向きおよび外向きの各ピーク出現は、圧縮応力における第1および第2ピーク値の出現と一致していた。また、カーブ滑走では、左ストロークの左右応力がストレート滑走時と逆向きで、大きかった。このことは、右脚はストレート、カーブ滑走ともに身体の右方向にキックするのに対し、左脚のキック方向がストレート滑走（左方向）とカーブ滑走（右方向）で異なることによるものであろう。

(3) ブレード傾斜角度

図4-6は、ストレート滑走中の全被験者のブレード傾斜角度の変化をスト

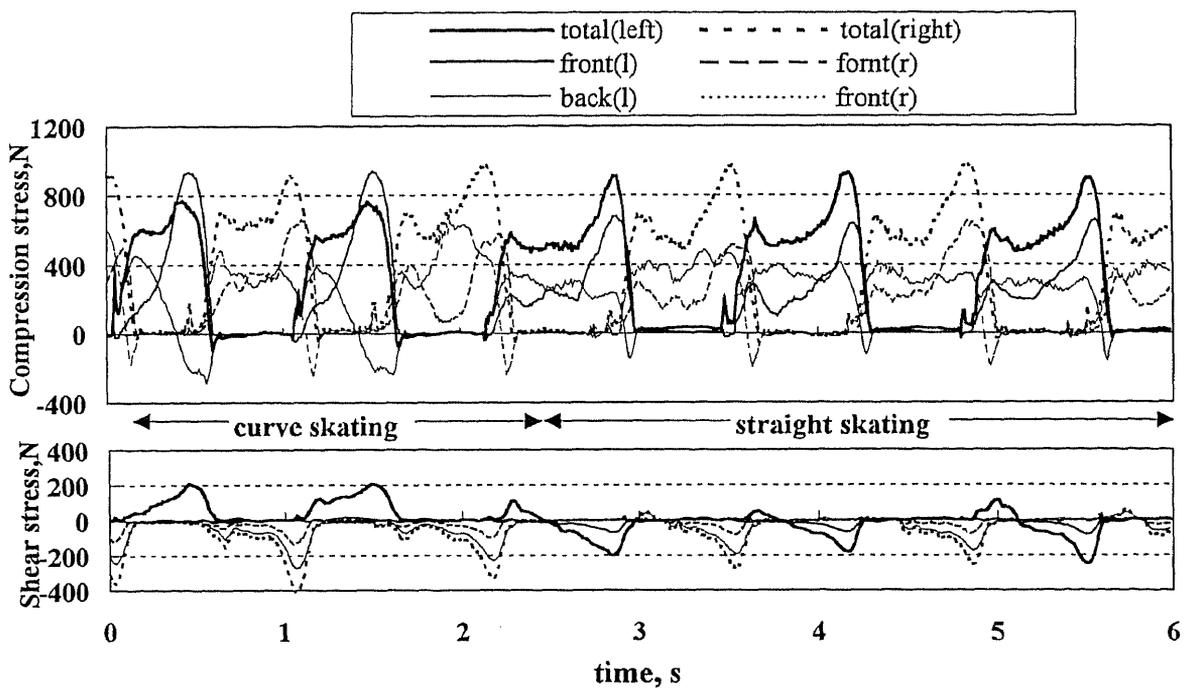


Figure 4-5
 Compression and shear stresses applied to sensor-skate while skating.

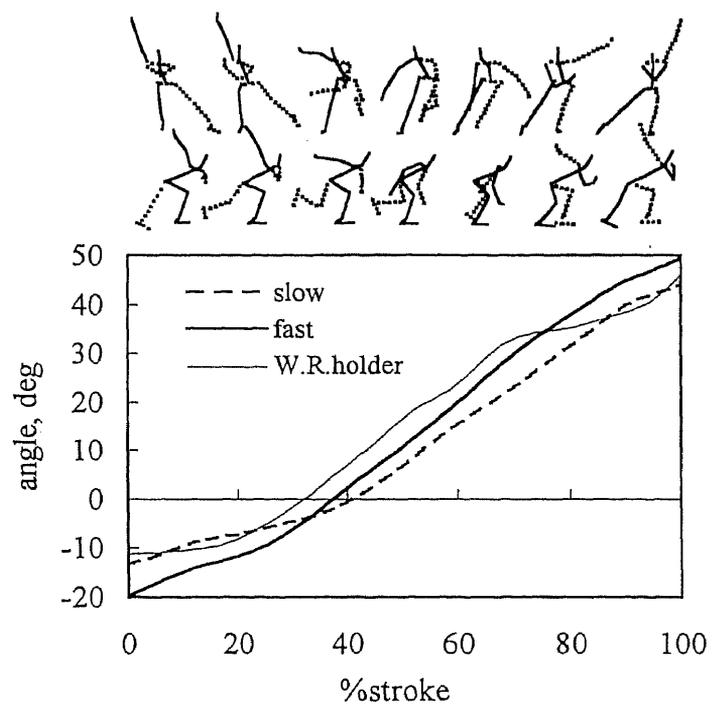


Figure 4-6
 Mean blade lean angles of slow and fast skatings, and the world record holder of 1000m.

ローク時間で規格化し，両試技ごとに平均したものである．図上には参考のために滑走動作のスティック図を示した．正は内傾，負は外傾を示す．

低速および高速滑走中のブレード傾斜角度は，およそ40%ストローク時までが外傾，その後内傾が大きくなるパターンを示し類似していたが，ストローク開始時($-13.1 \pm 5.1 \text{deg}$ vs. $-20.2 \pm 4.6 \text{deg}$)および終了時($44.8 \pm 2.0 \text{deg}$ vs. $50.0 \pm 2.2 \text{deg}$)の傾斜角度がいずれも高速滑走時で大きかった ($p < 0.05$, $p < 0.001$)．また，低速滑走ではストローク中の被験者間の偏差が大きかったのに対し，高速滑走ではそれが小さかった．

一般に，熟練度が増すにつれスケートブレードをストローク開始時に外傾させる，いわゆる”アウトエッジ滑走”をされるといわれているが(前田, 1969)，その実態はとらえられていなかった．本研究では，熟練者のストレート滑走でストローク開始時にスケートブレードが $15 \sim 20 \text{deg}$ 外傾しておよそ40%ストローク時までがアウトエッジ滑走，その後の60%ストローク時間がインエッジ滑走であることが明らかになった．

(4) ブレード反力

図4-7は，氷上の静止座標系におけるストレート滑走中のブレード反力の鉛直(上)および水平成分(下)を各被験者の身体質量(N)およびストローク時間で規格化し，試技ごとに平均したものである．

低速滑走時の鉛直成分は，20%ストローク時あたりまで急峻に立ち上がり，その後なだらかに増加して70%ストローク時あたりで体重レベルに達し，85%ストローク時付近でピークが出現してその後急減していた．高速滑走時では，20%ストローク時付近で第1ピークが出現したのちストローク中盤までやや減少し(体重の80%)，その後増加して85%ストローク時あたりで第2ピークが出現する二峰性を示した．両試技の85%ストローク時

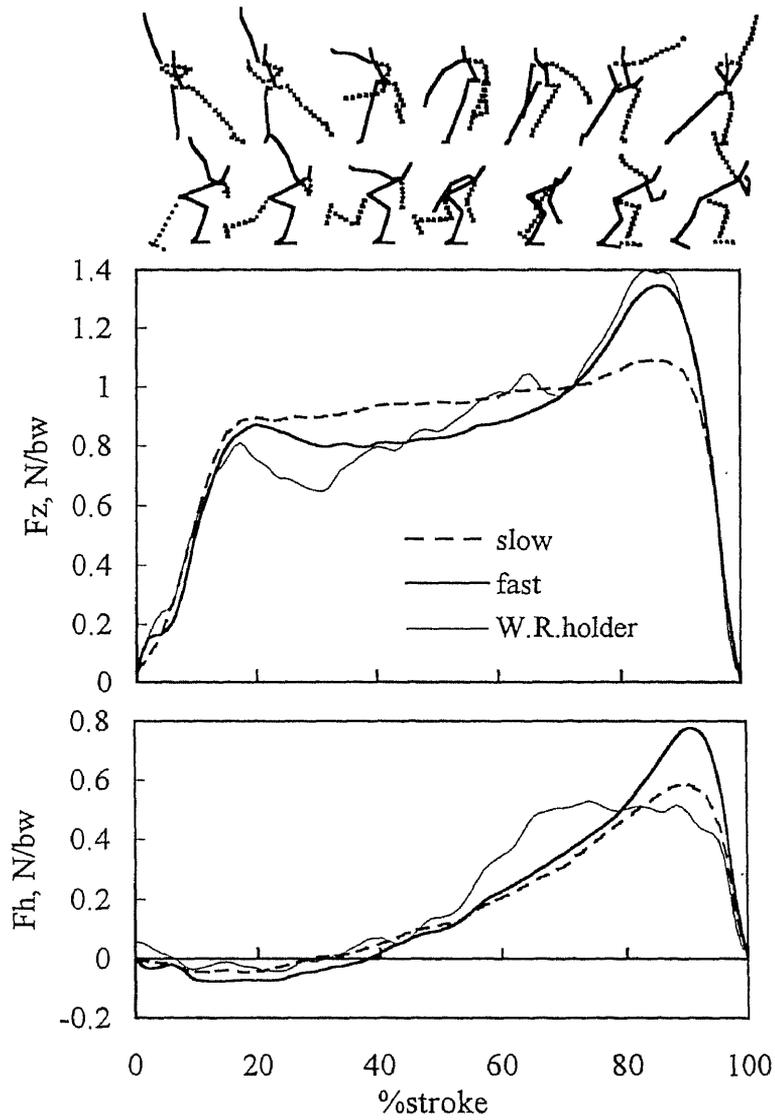


Figure 4-7
 Mean blade reaction forces in vertical (upper) and horizontal (lower) directions.

のピーク値には有意差が認められた($1.16 \pm 0.12\text{N/bw}$ vs. $1.38 \pm 0.14\text{N/bw}$, $p < 0.001$).

山下ら(1974)は, 37~49 steps/min.程度の極端な低速歩行における鉛直床反力は, 変化が小さく二峰性を示さなかったことを報告した. 本研究の低速滑走時の鉛直成分には二峰性がみられず, そのストローク頻度(47.9 strokes/min.)は, 山下らの報告した低速歩行の歩調範囲に含まれていた. したがって, スケート滑走においても歩行と同様, 極端な低ピッチ滑走では重心高をあまり変化させずに滑走していると考えられる.

水平成分は, 両試技ともおよそ40%ストローク時までわずかに外向き(負)の力を示し, その後方向が変わり内向き(正)の力が徐々に増加し90%ストローク時あたりでピークが出現していた. ストローク前半の外向きの力のピーク値は, 高速滑走時($-0.11 \pm 0.06\text{N/bw}$)が低速滑走時($-0.07 \pm 0.05\text{N/bw}$)よりも有意に大きかった($p < 0.05$). 内向きの力のピーク値は, 高速滑走($0.81 \pm 0.12\text{N/bw}$)が低速滑走時($0.63 \pm 0.10\text{N/bw}$)に比べて有意に大きかった($p < 0.01$). さらに, 内向きの水平成分(正)が作用している区間の力積を求め, その時間で除すことにより内向きの平均水平力を算出したところ, 高速滑走($0.34 \pm 0.06\text{N/bw}$)が低速滑走($0.27 \pm 0.06\text{N/bw}$)よりも有意に大きかった($p < 0.01$).

ストローク前半にみられる外向きのわずかな水平成分は, キックが終了して外転位にある遊脚が支持脚に近づくことにより生じると考えられる. 歩行時の側方床分力では, 着床の両脚支持期に外向きの床反力が生じてすぐに内向きに転じるが(盛合ら, 1987; 奥村ら, 1982), スケート滑走動作ではストローク開始時, 外転位にある遊脚が支持脚に近づくのに時間を要すために, およそ40%ストローク時まで外向きの水平成分が作用したと考えられる.

(5) 力の作用点

図4-8は、ストレート滑走中の力の作用点をストローク時間で規格化し、両試技ごとに平均したものを示した。後センサー位置は0m、前センサーは0.16mである。

ストローク後半では高速滑走時の作用点が低速滑走よりも前に位置しており、ストローク終了時の作用点は、高速滑走時($0.162 \pm 0.042\text{m}$)が低速滑走時($0.139 \pm 0.036\text{m}$)よりも有意に前方に位置していた($p < 0.05$)。このことから、高速滑走では、スケートに対する重心の前方変位を低速時に比べて大きくして滑走速度を高めていることが示唆される。

(6) 鉛直軸回りのフリーモーメント

図4-9は、ストレート滑走中の鉛直軸回りのフリーモーメントを各被験者の身体質量(N)およびストローク時間で規格化し、各試技ごとに平均したものである。

フリーモーメントは、両試技とも60%ストローク時あたりまではわずかに正（外旋方向）のモーメント、その後負（内旋方向）のモーメントが徐々に大きくなり、90%ストローク時付近で内旋方向のピークを示した。平均値では、高速滑走における内旋方向のピーク値($-0.12 \pm 0.04\text{Nm/bw}$)は、低速滑走時($-0.06 \pm 0.04\text{Nm/bw}$)の約2倍大きかった($p < 0.001$)。

滑走中のブレードに作用する内旋方向のフリーモーメントは、底面に丸みを持つブレードが内傾することによりブレードと氷との接触線が円弧上になるために生じると考えられる。本研究では全試技に同じブレードを用いたので、両試技間にみられた内旋方向のフリーモーメントの差は、高速滑走時のブレードの内傾が低速時よりも大きかったことによると考えられ

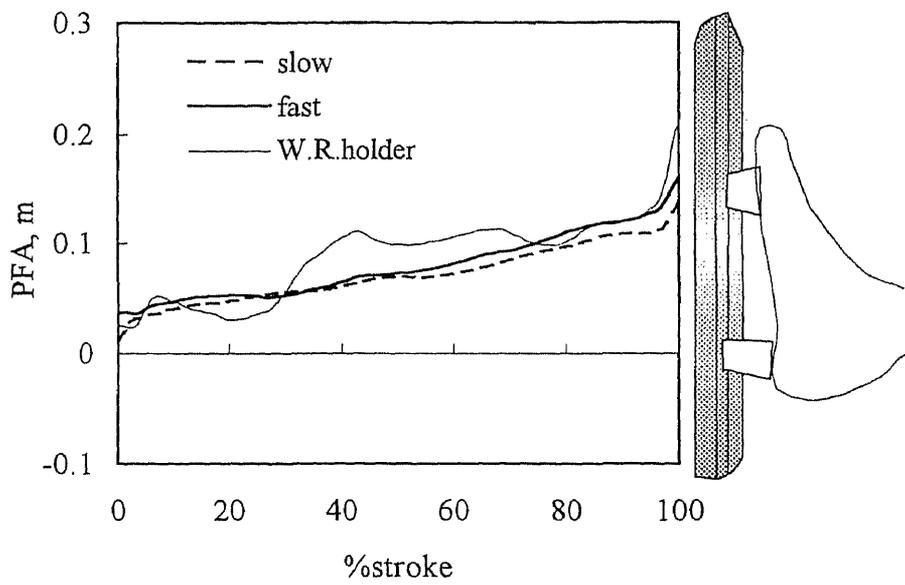


Figure 4-8
Change in point of force application while stroking.

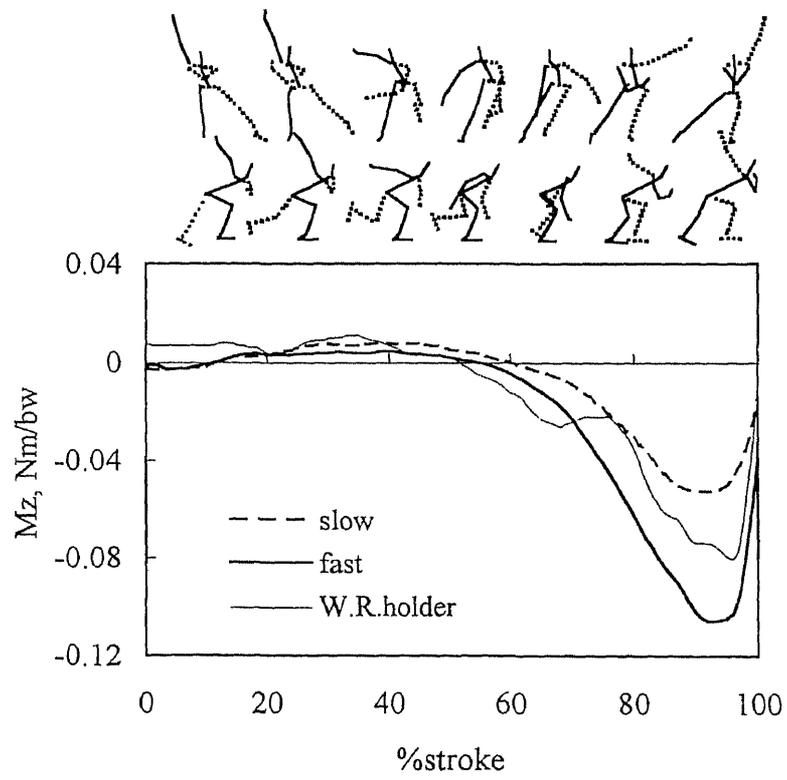


Figure 4-9 Free moment about vertical axis.

る。

スピードスケートでは、ブレードが長い(約43cm)ために離氷時に踵が挙上せず、ブレードを外旋させて離氷する。この離氷時のブレードの外旋は、主に股関節および足関節の外旋動作によって行われる。本研究では高速滑走時の内旋(外旋とは逆方向)のフリーモーメントが低速時に比べて大きいことから、高速滑走ではこれらの外旋筋群への負担が大きくなることが予想される。

(7) 滑走速度とブレード反力

本研究では、ブレード反力の水平成分(内向き)のピーク値および平均力に滑走速度による差がみられた。しかし、これらの値と滑走速度との相関係数をみると、ピーク値が0.53($p<0.05$)、平均力が0.68($p<0.01$)と有意ではあるが、いずれも滑走速度の大きさを決定づけるほど高いとは言えない。

加速の有効性は、水平ブレード反力がどの程度重心速度の方向に成分をもつかによって影響されると考えられる。この成分は、水平面内における重心速度の方向とブレード滑走方向との角度差が大きいほど大きく見積もられるが、逆に角度差が大きすぎると、スケートに対する重心の相対速度が大きくなるため、大きな力をスケートに作用できなくなると考えられる。また、この相対速度が大きい場合には、脚の動作範囲に制限されるキック力の作用時間が短くなり、大きな力積が得られないと考えられる。

このように、加速の有効性は単に重心とスケートの運動方向の角度差では推測できない。したがって、今後はキネマティックな解析を併用することにより、ブレード反力と身体重心の動きの関係について検討していく必要がある。

4. 要約

本研究では、スピードスケート滑走中のブレードに作用する上下および左右方向の二分力が測定できるセンサースケートを開発した。そして、画像分析により滑走中のセンサースケートの長軸回りの傾斜角度を計測し、静止座標系における鉛直および水平方向のブレード反力を測定した。

低速および高速滑走試技における元世界記録保持者を含む10名のブレード反力を測定し、ブレード傾斜角度、ブレード反力、作用点位置、鉛直軸回りのフリーモーメントなどを滑走速度に関連づけて検討した結果、以下のことがわかった。

- ①高速滑走($11.5 \pm 0.8 \text{m/s}$)では、低速滑走($9.3 \pm 0.5 \text{m/s}$)よりもストローク開始時および終了時のブレード傾斜角度が大きい。
- ②高速滑走では、低速滑走よりもキック時に作用する力の鉛直成分が大きい。
- ③高速滑走では、低速滑走よりもストローク前半における外向きの水平成分のピーク値と、ストローク後半における内向きの水平成分の平均およびピーク値が大きい。
- ④高速滑走時の力の作用点は、低速滑走時より前方移動が大きい。
- ⑤高速滑走では、低速滑走よりもキック時に作用する内旋方向の鉛直軸回りのフリーモーメントが大きい。

V. スピードスケートの加速に影響を及ぼす力学的要因

1. 目的

これまで、キック力がスケーターの重心の滑走方向に対して常に垂直に作用するというスケート滑走の加速理論が提示され、この理論に基づいて、滑走速度を大きくするための技術的要因が検討されてきている(Ingen Schenau, 1980, 1981, 1983, 1985, 1987, 1990; Boer, 1986). 一方、従来の理論ではオリンピック選手などの競技レベルの高いスケーターの加速動作や競技成績の差異を説明できないことなどが指摘された(Boer, 1989). また、本研究の第III章では、ストローク中の重心速度の変化が従来の加速理論によるものとは一致しないこと、すなわち重心の加速が重心速度方向に対して垂直な方向の速度の増加だけでなく、重心速度方向の速度の増加によっても生じることを指摘した。

スピードスケートにおけるストローク中の重心速度の変化は、氷摩擦力が小さいために極めて小さい。そのため、画像分析法のみでは、その測定精度の限界により加速の力学的要因を十分にとらえることはできない。したがって、ストローク中の加速のメカニズムを明らかにするには、ブレードに作用するブレード反力を測定し、それらを重心速度の変化と関連づけて力学的に検討することが不可欠である。

本研究では、ブレード反力の測定と画像分析法を併用してストローク中の重心速度の変化をとらえ、スピードスケートの加速に影響を及ぼす力学的要因を検討した。

2. 方法

(1) 被験者

被験者には、1000mの元世界記録保持者を含むスピードスケート競技を専門とする男子計12名（高校生4名，大学生7名，社会人1名．年齢：21.6±2.5歳；身長：1.71±0.05m；体重：69.4±6.1kg）を用いた．専門種目の内訳は短距離が6名，長距離が6名であった．

(2) 実験方法

被験者に自作のセンサースケートを履かせ、1周（400m）40秒程度の低速滑走と全力高速滑走を十分な休息をはさんで行わせた．図5-1に示したように、滑走速度の安定する250m付近における直線滑走中のブレード反力(サンプリング周波数100Hz)およびブレード傾斜角度を第IV章で用いたものと同様の方法で測定した．さらに本研究では、選手の滑走動作を第III章で用いた方法と同様に8台の8mmVTRカメラを用いて撮影し(60 fields/s, 露出時間1/4000s), DLT法により身体各部位23点とスケート端点4点の計27点の三次元座標を算出した．

本研究では1/480秒間隔の分解能をもつ同期信号を全ての8mmVTRカメラに音声信号として記録し（長野県岡谷市（株）やまびこスケートの森の協力による），同時に同期用ライトを点灯させてブレード傾斜角度用VTRカメラに写しこんだ．各8mmVTRカメラから得られた二次元座標を同期信号を基準に3次スプライン関数により補間した．さらにブレード傾斜角度用VTRカメラに写しこんだ同期ライトにより、画像データとブレード反力を同期させた．

(3) 測定項目

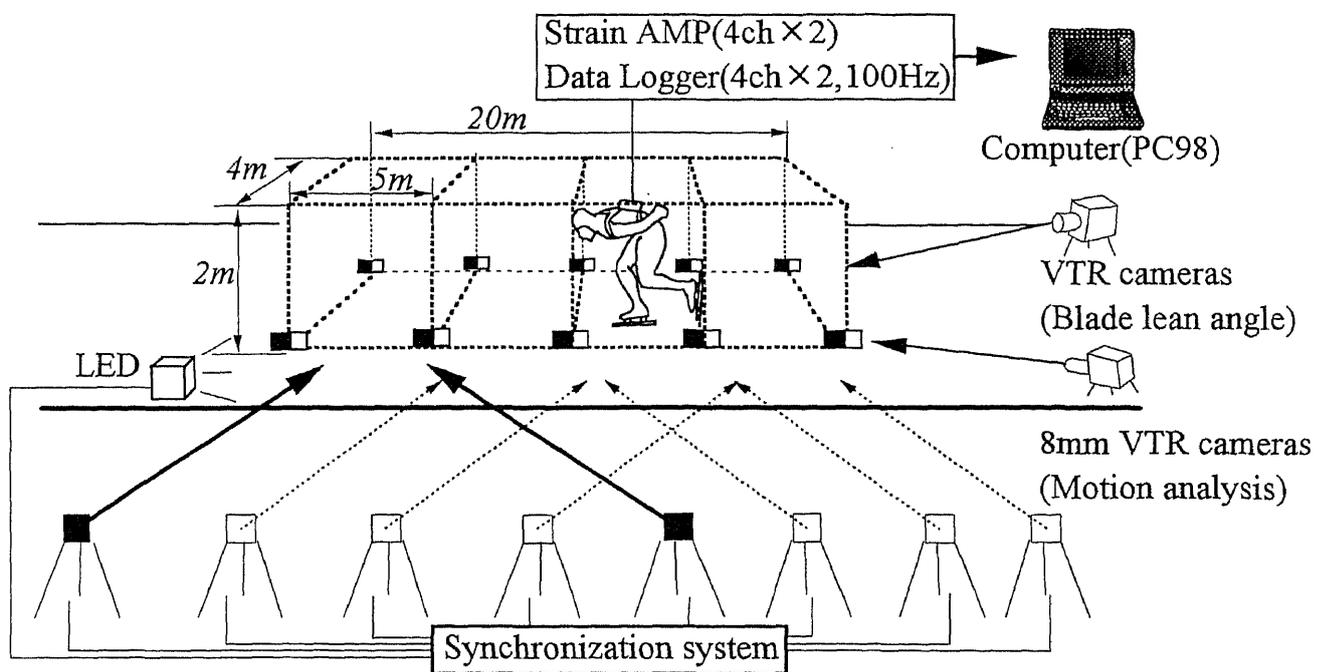


Figure 5-1 Experimental setup.

分析対象には、完全な1ストロークにわたりブレード反力および滑走動作の三次元座標が得られた計21試技（全力高速滑走12試技，低速滑走9試技）を選択した。

本研究では、Butterworth low-pass digital filter(Winter, 1990)を用いて三次元座標を平滑化した。平滑化に用いる遮断周波数は、各試技ごとに第Ⅲ章と同様の方法で決定した。その結果、用いた遮断周波数は高速滑走試技で3.5～8.8Hz，低速滑走試技で1.6～5.5Hzであった。

本研究では身体重心の位置を阿江(1996)の身体部分係数を用いて求め、その変位および速度を算出した。

スケーターのキック動作は、氷上を動いている支持点（スケートブレード）に力を加え、重心を水平に加速する動作である。このように支持点が動くスケート滑走では、陸上で行われる運動のように地面反力と重心速度の積として身体の発揮したパワーを見積もることはできない。したがって、スケーターの発揮したパワーを評価するには、支持点に対する重心の相対速度と水平ブレード反力を乗じる必要がある。ただし、ブレードの滑走方向には極めて小さい摩擦力しか作用しないので、水平面内ではブレード滑走方向に垂直な力のみが加速を生じる力として力学的には有効であると考えられる。

そこで本研究では、図5-2に示したように、スケートに対する重心の相対速度(V_{skate}^{CG})のブレード反力方向成分（以下、RCGV_xという）と水平ブレード反力(F_h)の積を「力学的有効パワー(EP: Effective power)」と定義し、式(5.1)により算出した。

$$EP = F_h V_{skate}^{CG} \sin \beta \quad (5.1)$$

ただし、角 β は水平面内においてブレード滑走方向と重心相対速度ベクトルのなす角度である。

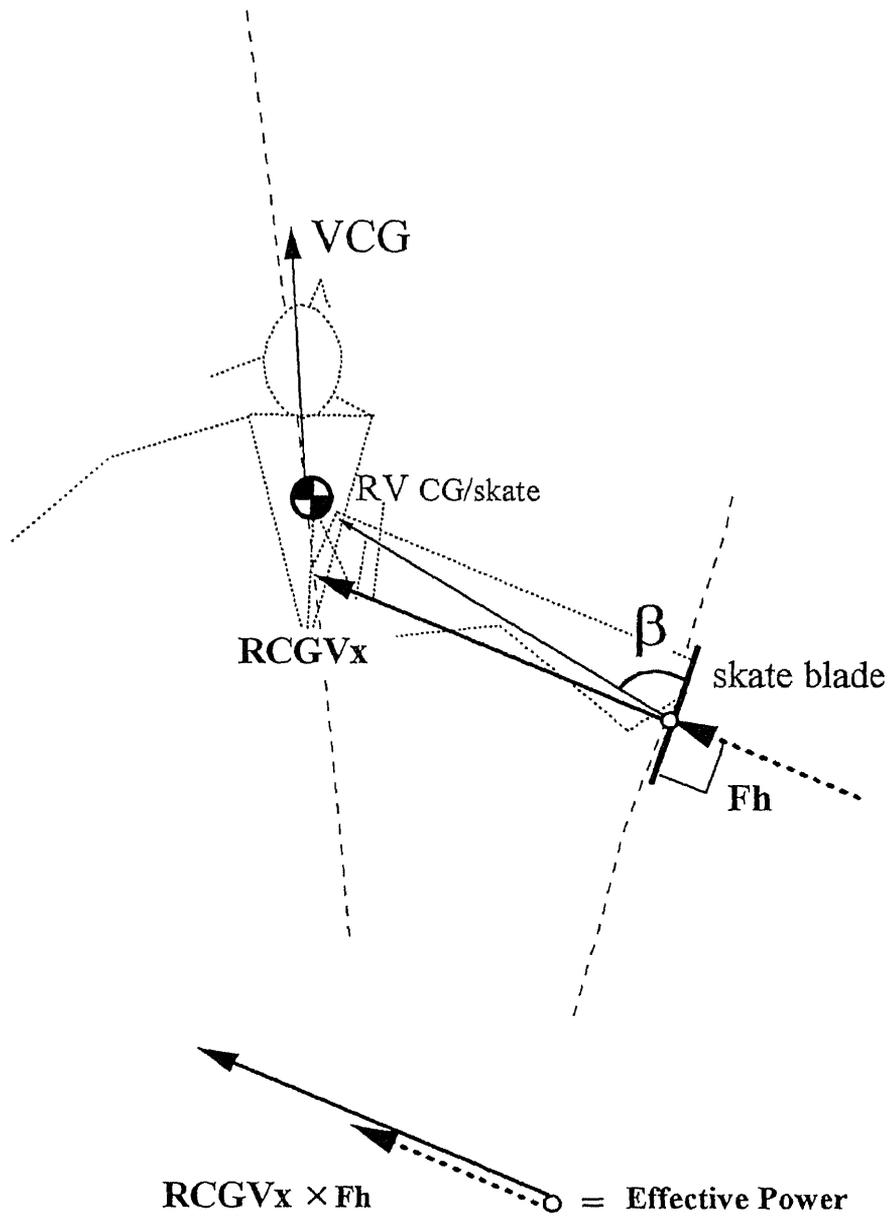


Figure 5-2
 Effective power as the product of relative CG velocity
 and horizontal blade reaction force.

3. 結果および考察

(1) ストローク中の重心速度の変化とその成分

図5-3は、高速および低速滑走試技におけるストローク中の重心速度、水平ブレード反力、RCGV_xおよび力学的有効パワーをストローク時間で規格化し、全被験者の平均で示したものである。なお、ブレード反力と力学的有効パワーは各被験者の身体質量(kg)で除した。

重心速度の変化は、高速、低速ともに微小であるが、ストローク前半では減速、後半で加速傾向であった。また、高速滑走では低速滑走よりも点線で示した標準偏差が大きく、被験者間の速度差が大きかったことがわかる。

RCGV_xをみると、両試技ともストローク後半で大きくなり、ストローク終了直前のピーク値は、高速滑走($2.08 \pm 0.43 \text{ m/s}$)が低速滑走($1.62 \pm 0.27 \text{ m/s}$)よりも大きかった($p < 0.01$)。

力学的有効パワーは、両試技とも50%ストローク時以降に発揮され、平均的には85%ストローク時あたりでピークに達していた。ピーク値は高速滑走($13.8 \pm 4.8 \text{ W/kg}$)が低速滑走($8.3 \pm 2.7 \text{ W/kg}$)よりも大きい($p < 0.01$)、高速滑走では標準偏差が大きかった。

ここで、水平面内における重心速度ベクトルの変化について検討する。図5-4は、第Ⅲ章と同様の方法（式(3.1)-(3.2)）でプッシュオフ局面前後の重心速度ベクトル V_0 , V , および速度変化ベクトル ΔV を算出し、高速（図左）および低速滑走試技（図右）の平均値と標準偏差を用いて示したものである。

これをみると、一流選手の三次元キネマティクスの分析の結果（第Ⅲ

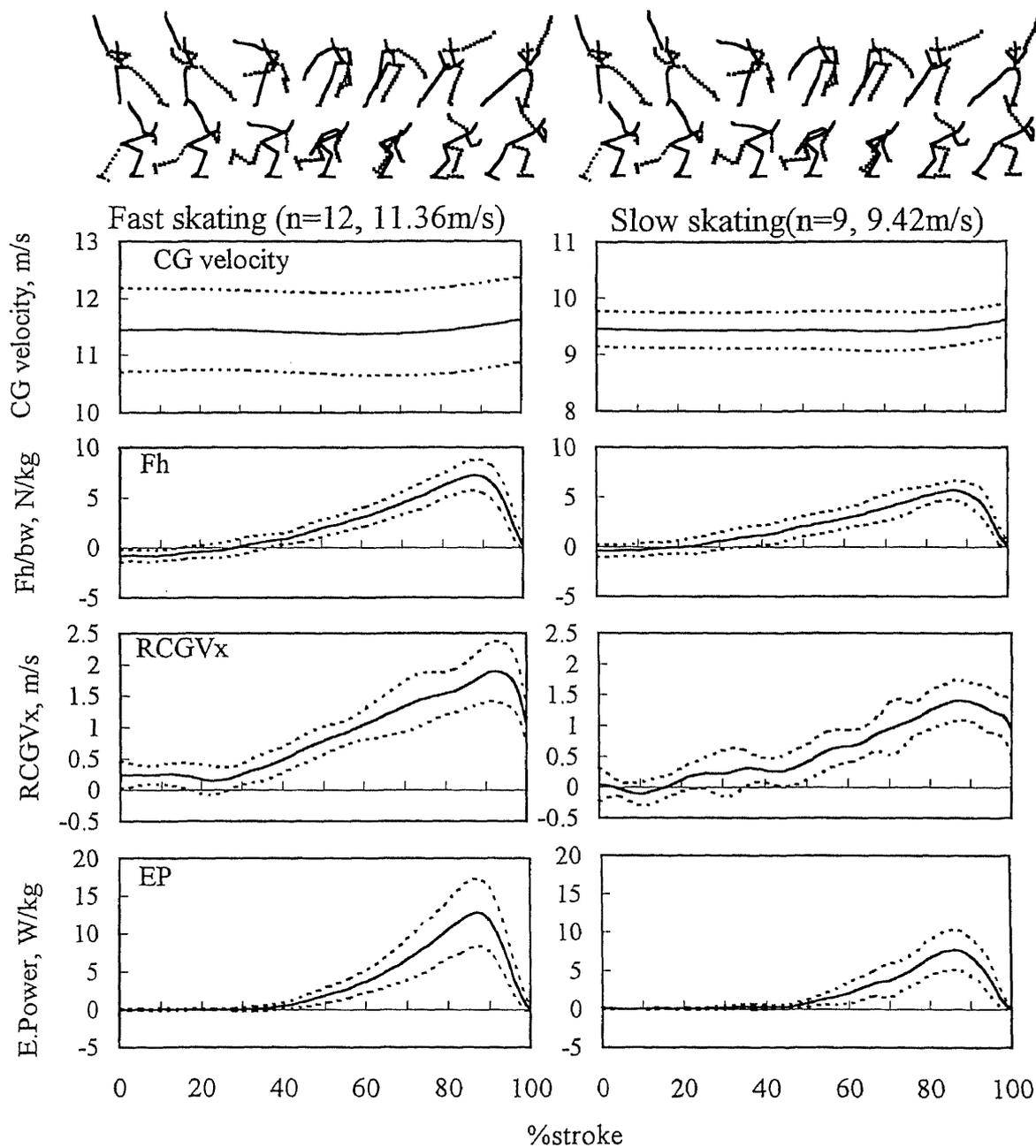


Figure 5-3
Means(thick line) and standard deviations(dotted line) for CG velocities, horizontal blade reaction forces, relative CG velocities to the skate perpendicular to the gliding direction, and effective power of fast(left side) and slow(right) skatings.

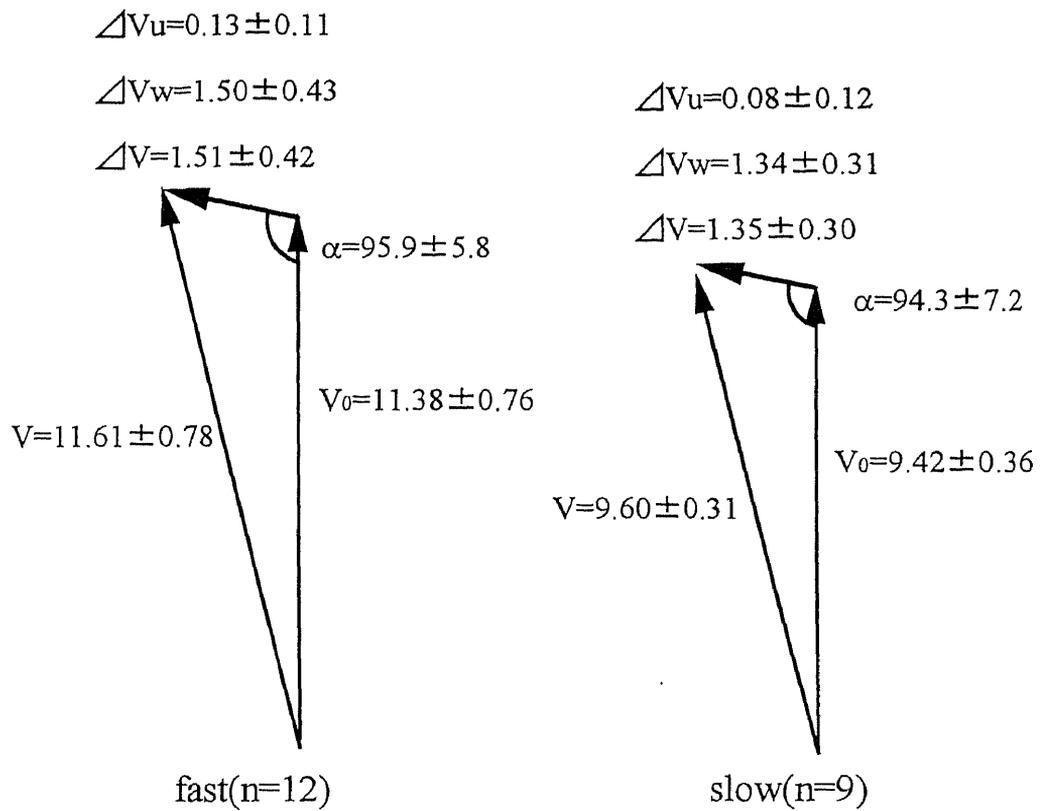


Figure 5-4

Mean CG velocities during push-off phase for fast and slow skating trials. V_0 and V indicated the CG velocity at the onset and offset of push-off, respectively.

章)と同様に、速度変化ベクトル ΔV は、やや前方に向いていることがわかる。また、加速角 α の平均値は、両試技ともに一流選手の平均値($95.8 \pm 4.2^\circ$)に極めて近い値であった。

以上のことから、競技会での一流選手にみられた重心速度変化と同様、本実験の低速および高速滑走試技においてもプッシュオフ動作による速度ベクトルの変化は、プッシュオフ開始時の重心速度に垂直な水平方向の加速成分のみでなく、重心速度方向の加速成分によっても生じていることがわかる。

(2) 水平ブレード反力と重心速度の変化との関係

図5-5には水平面内における重心速度ベクトルとブレード反力の関係を模式的に示した。

ここで、水平面内で重心速度ベクトル(VCG)とスケートブレードのなす角度を「開き角 ϕ 」と定義する。そして、重心速度ベクトル方向をU、それに直交する方向をWとするとき、開き角 ϕ によりブレード反力の水平成分(Fh)は次式(5.2)-(5.3)から、FhuとFhwの2つの成分に分解することができる。

$$F_{hu} = F_h \sin \phi \quad (5.2)$$

$$F_{hw} = F_h \cos \phi \quad (5.3)$$

図5-6は、Fhu、Fhw、開き角 ϕ のストローク中の変化を高速および低速滑走試技の平均と標準偏差で示したものである。

ストローク中のFhuは全被験者で正の値を示し、ストローク後半で徐々に増加しピークに達していた。Fhuのピーク値は高速試技の平均($1.21 \pm 0.40 \text{ N/kg}$)が、低速試技($0.89 \pm 0.26 \text{ N/kg}$)よりも大きかった($p < 0.05$)。Fhwは両試技平均ともに20%ストローク時あたりまで負の値を示したが、その

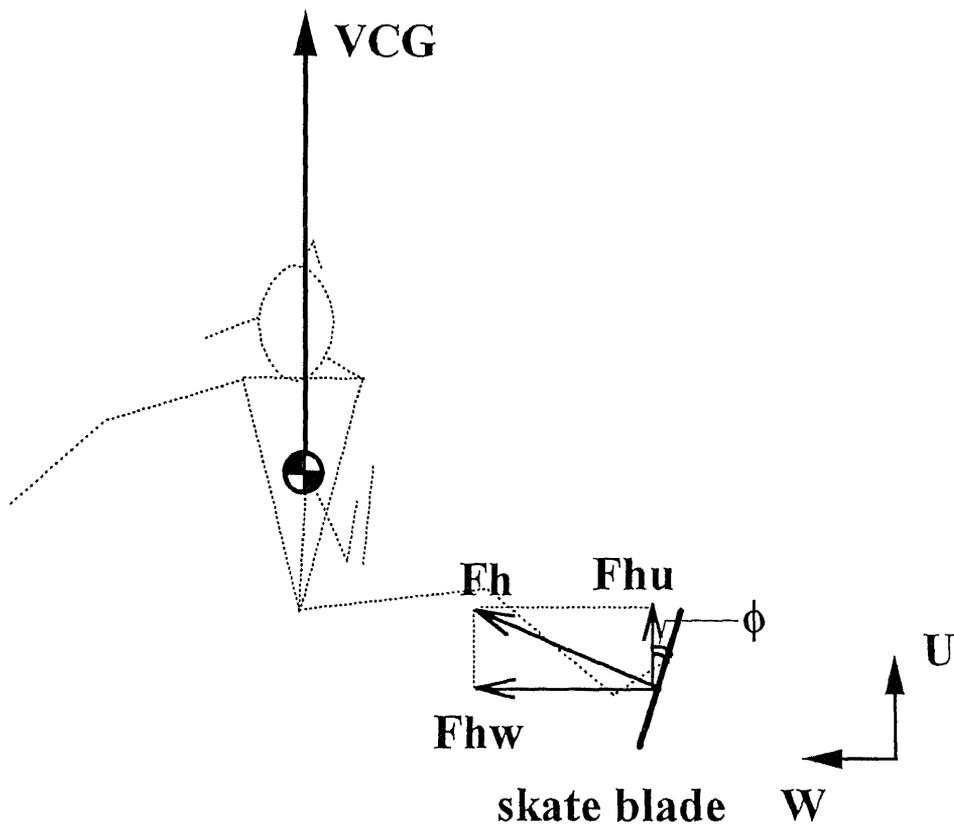


Figure 5-5
 Relationship between the CG velocity vector and the horizontal blade reaction forces.

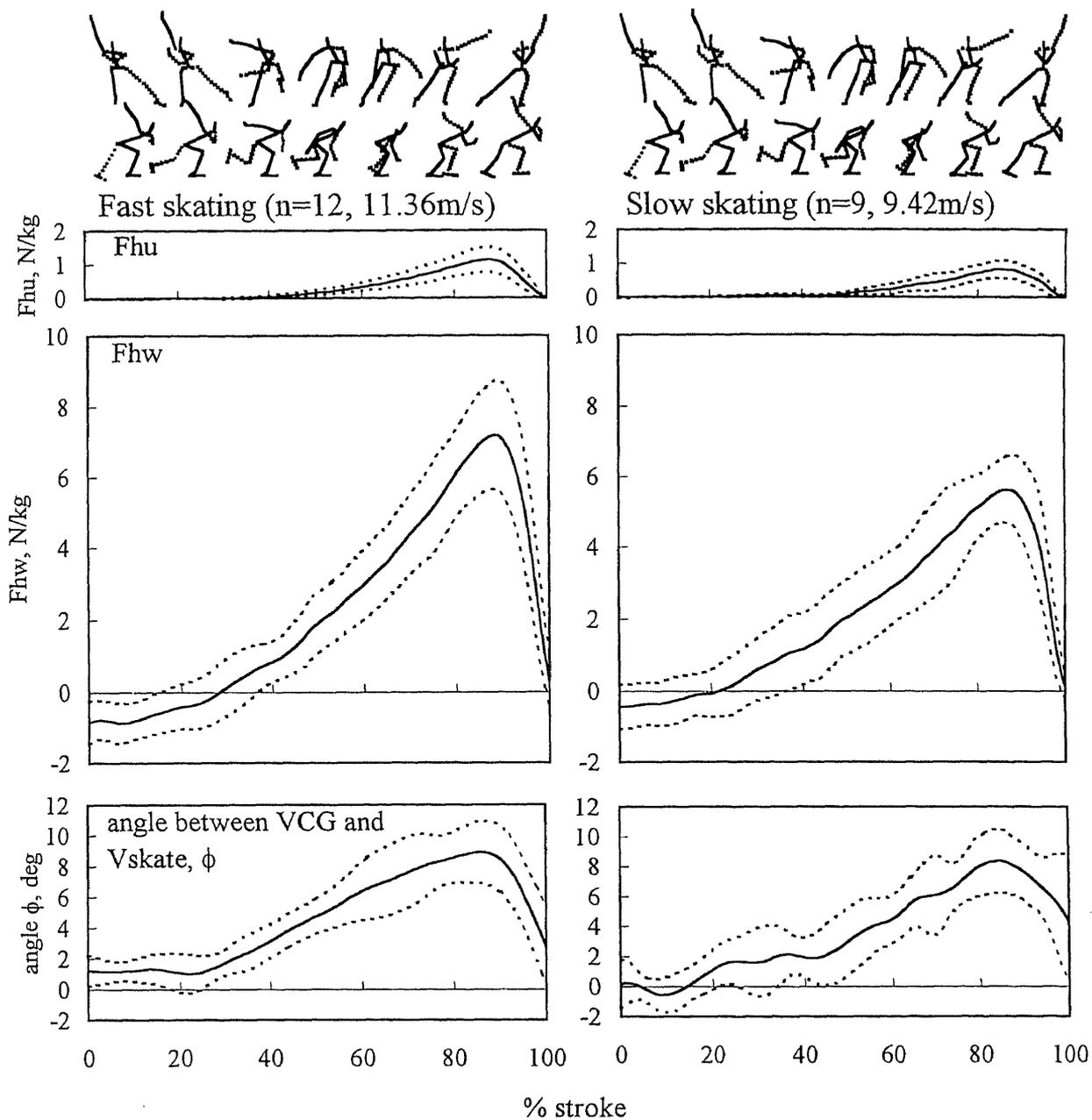


Figure 5-6
Means(thick line) and standard deviations(dotted line) for the components of horizontal blade reaction force in the directions along and perpendicular to CG velocity, and the angle between CG velocity vector and skate blade in fast(left side) and slow(right) skatings.

後ストローク後半ではFhuに比べて大きく、ピーク値は高速試技の平均(7.59±1.59N/kg)が、低速試技(5.98±0.98N/kg)よりも大きかった。開き角φはストローク開始時では高速試技が1.24deg, 低速試技が0.15degと小さく、ストローク開始時には重心とスケートの速度の向きはほとんど一致していた。その後、開き角φは40%ストローク時あたりから増加し、80%ストローク時過ぎにピークに達していた。ピーク値は高速試技の平均で10.4±1.8deg, 低速試技で9.6±1.8degであった。

ここで、水平ブレード反力によって生じる重心の速度変化を検討するためのFhuおよびFhwの力積をプッシュオフ局面について求め、身体質量mで除すことにより、 $\Delta VFhu$ および $\Delta VFhw$ を算出した(式(5.4)-(5.5))。

$$\Delta VFhu = \frac{\int_{\text{extension}}^{\text{end}} Fh \sin \phi dt}{m} \quad (5.4)$$

$$\Delta VFhw = \frac{\int_{\text{extension}}^{\text{end}} Fh \cos \phi dt}{m} \quad (5.5)$$

表5-1には、力積から得られた高速および低速試技におけるブレード反力によって生じる速度変化($\Delta VFhu$, $\Delta VFhw$)と、画像から算出された速度変化(ΔVu , ΔVw)の平均値と標準偏差を示した。

重心速度方向(U)成分についてみると、ブレード反力による $\Delta VFhu$ は画像より得られた ΔVu より両試技ともやや大きく、低速滑走では統計的に有意差があった(p<0.05)。重心速度方向に直交する(W)成分では、 $\Delta VFhw$ と ΔVw は平均的にはほぼ同等の値であった。

$\Delta VFhu$ が ΔVu より大きく算出された原因の1つとして、重心速度方向においてスケーターに作用した空気抵抗力が、ブレード反力の重心速度方向成分Fhuに含まれて測定されたことがあげられる。そこで、Ingen Schenauら(1982)の空気抵抗力の推定回帰モデル(式(2.5)-(2.10))に高速お

Table 5-1
 Comparisons of ΔV_u and ΔV_w measured with VTR
 analysis and blade reaction forces.

	unit	fast(n=12)		slow(n=9)	
		M	SD	M	SD
ΔV_u	m/s	0.13	0.11	0.08	0.12
ΔVF_{hu}	m/s	0.20	0.03	0.19	0.05
ΔV_w	m/s	1.50	0.43	1.34	0.31
ΔVF_{hw}	m/s	1.48	0.22	1.47	0.32

* p<0.05

よび低速滑走試技の平均速度を入力すると、空気抵抗力は高速試技、低速試技の順に0.26, 0.21N/kgと推定できた。これらの推定値にプッシュオフ局面の平均所要時間(0.30, 0.36s)を乗じると、空気抵抗力による身体質量あたりの力積、すなわち空気抵抗力による速度変化がそれぞれ0.078, 0.076m/sと算出される。△VF_{hu}からこの値を減じると、およそ0.12, 0.11 m/sとなり、画像から得られた△V_u(0.13, 0.08m/s)とほぼ一致する。

これらのことは、スピードスケート滑走における重心の加速が、重心速度に垂直な方向の加速成分のみでなく、重心速度方向の加速成分によっても生じることを力学的に裏付けるものである。したがって、プッシュオフ終了後の重心速度V_eは、水平ブレード反力の重心速度方向成分による速度変化△VF_{hu}とそれに直交する△VF_{hw}により、次のように表すことができる。

$$V_e = \sqrt{(V_0 + \Delta VF_{hu})^2 + \Delta VF_{hw}^2} \quad (5.6)$$

以上の検討から、①ブレードの滑走方向と重心速度の方向には水平面内で約10deg以内の開き角があること、②開き角により水平ブレード反力は重心速度方向に成分をもつこと、③ブレード反力の重心速度方向成分による加速の推定値と画像から求めた重心速度方向の加速がよく一致することが明らかになった。

これらの結果は、第Ⅲ章で提示した「スピードスケート滑走における重心の加速は、プッシュオフによる重心速度方向に対し水平面内で垂直な速度成分の増加のみでなく、重心速度方向の速度成分の増加によっても生じる」という加速理論を力学的に裏付けると考えられる。

(3) スケートブレードの曲線運動による重心速度の変化

第Ⅲ章では、重心速度方向への加速成分 ΔVu が生じる原因の1つとして、スケートブレードの曲線運動における求心力成分をあげた。ブレードの曲線運動とは、底面が丸いブレードがストローク前半では外傾、後半では内傾して滑走することにより、S字状、すなわち外側から内側へと円弧の向きを変えながら滑走する運動である。この曲線運動は、滑走後に残された氷上の軌跡により、定性的には認められているが、定量的には計測されていない。

そこで、本研究では、スケートブレードの曲線運動を定量化するため、スケートブレード midpoint のX座標をn次の多項式によりY座標の関数として近似した。図5-7は、高速滑走試技の、上から4次、5次、6次の多項式近似曲線と生データ、および各次数での近似曲線において算出された求心加速度成分である。ただし、曲率半径 R_c は、弧長の増分を ds 、回転角の増分を $d\theta$ として式(5.7)により求め、スケートの曲線運動による求心加速度成分 A_c は、スケート速度を V_{skate} として式(5.8)により算出した。求心加速度成分はスケーターに向く方向を正とした。

$$R_c = \frac{ds}{d\theta} \quad (5.7)$$

$$A_c = \frac{V_{skate}^2}{R_c} \quad (5.8)$$

各次数での近似曲線と生データを比較すると、視覚的にはどれもよく適合しているといえる。しかし、各次数での求心加速度成分をみると、4次近似と6次近似では求心加速度の変化パターンの傾向は似ていたが、5次近似では変化が逆パターンになっていた。このように、視覚的には判断できない近似曲線のわずかな相違が、求心加速度成分の大きな差異を生じることがわかる。そこで、本研究では、まず1次から10次までの各次数で近似し、各試技ごとに生データとの残差が最小になった次数

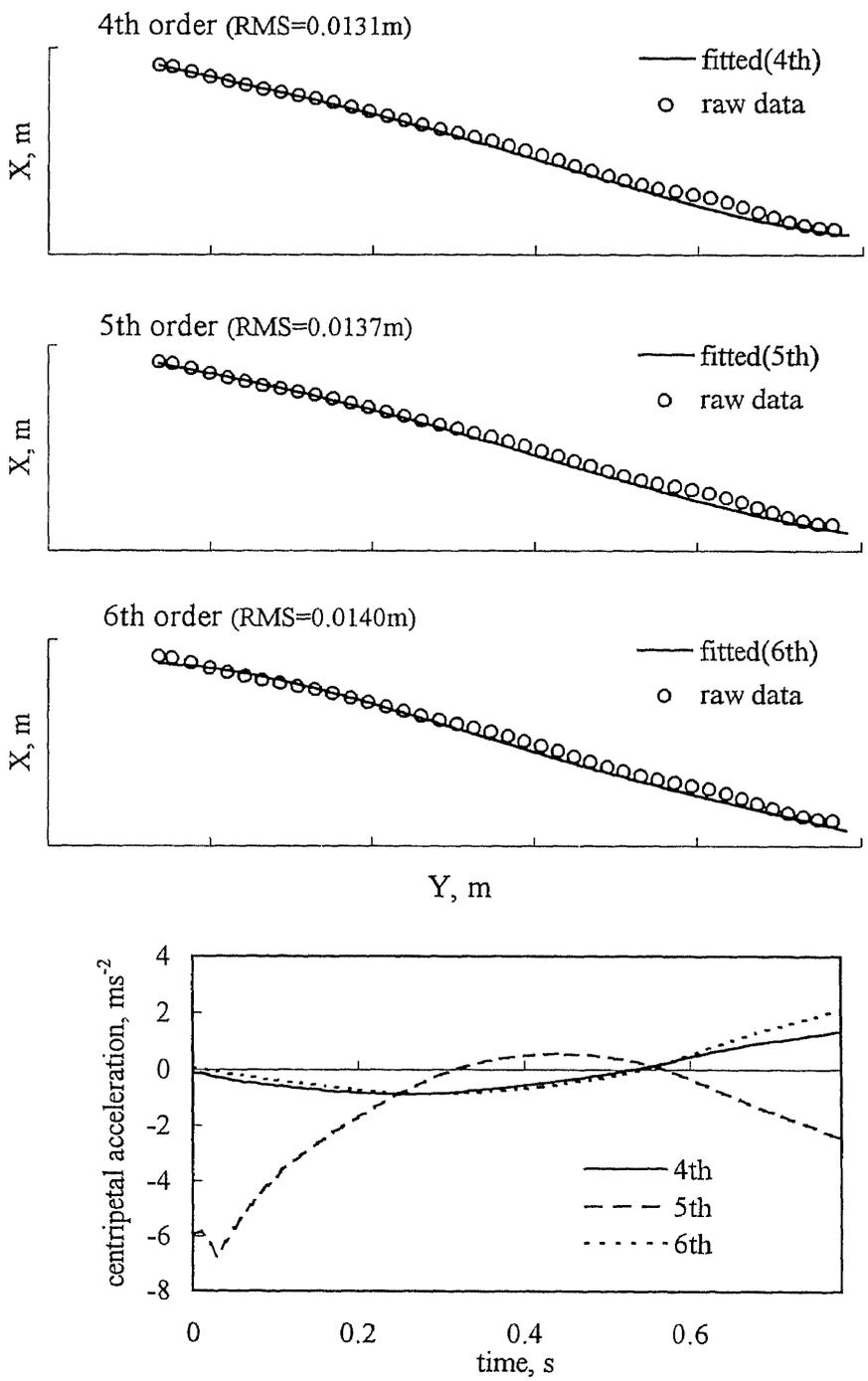


Figure 5-7
 Typical examples of the approximated displacement of the mid-point of skate blade(top three) and the centripetal acceleration components(bottom) in three different orders.

を用いた。図5-7に示した例では、残差は4次近似のときに最小であった。

図5-8は各次数における残差の平均値と標準偏差を示したものである。残差は4次近似で既に0.01mにほぼ収束していることがわかる。実際に用いた次数は、4次が最も多かった。

図5-9は、このようにして得られたブレードの曲線運動における、高速（上）および低速滑走試技（下）の求心加速度成分を平均と標準偏差で示したものである。

求心加速度成分は、両試技ともにストローク前半でわずかに負（外向き）、後半で正（内向き）の値を示した。ストローク後半での内向きの求心加速度成分は、高速滑走が低速滑走よりも大きい。ともにストローク終盤で被験者間の標準偏差が大きく、被験者によっては平均とは逆に外向きの求心加速度を示すものもあった。

求心加速度はブレード滑走方向に直交する方向の加速度成分なので、水平ブレード反力の方向と一致する。したがって、本研究で測定した水平ブレード反力は、スケーターによるキック力成分とスケートの曲線運動における求心力成分の和と考えることができる。ストローク中の水平ブレード反力と求心加速度によって生じる速度の増加分を求めると、高速、低速試技の順に、水平ブレード反力は、 1.55 ± 0.37 , 2.11 ± 0.79 m/s, 求心加速度は 0.90 ± 1.02 , 0.72 ± 0.95 m/sであった。また、水平ブレード反力による速度の増加分に対する求心加速度による速度の増加分の占める割合は、平均で高速試技が58.1%、低速試技が34.3%と算出された。このことは、重心を加速する水平ブレード反力の30~60%がスケートの曲線運動による求心力によって生じることを意味している。したがって、スケートの曲線運動による求心力は加速に影響を及ぼす重要な要因の1つと考えられる。

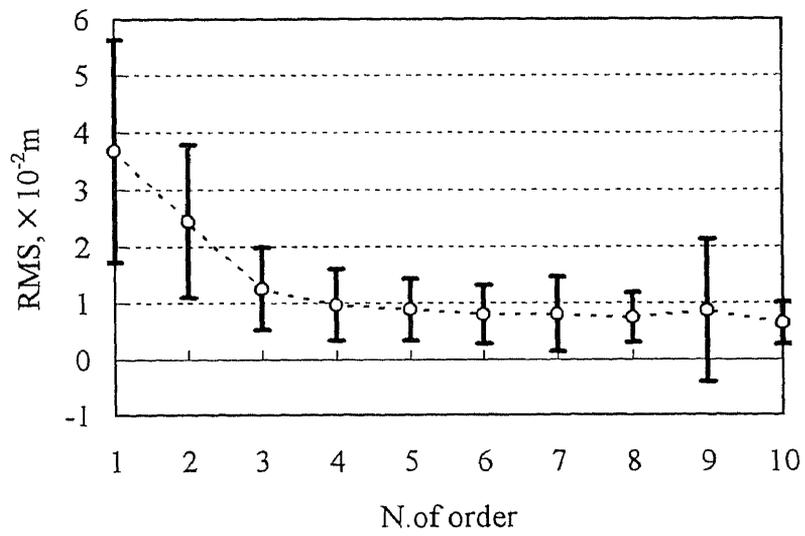


Figure 5-8
Means(circle) and standard deviations of RMS for data approximated at ten different orders(n=21).

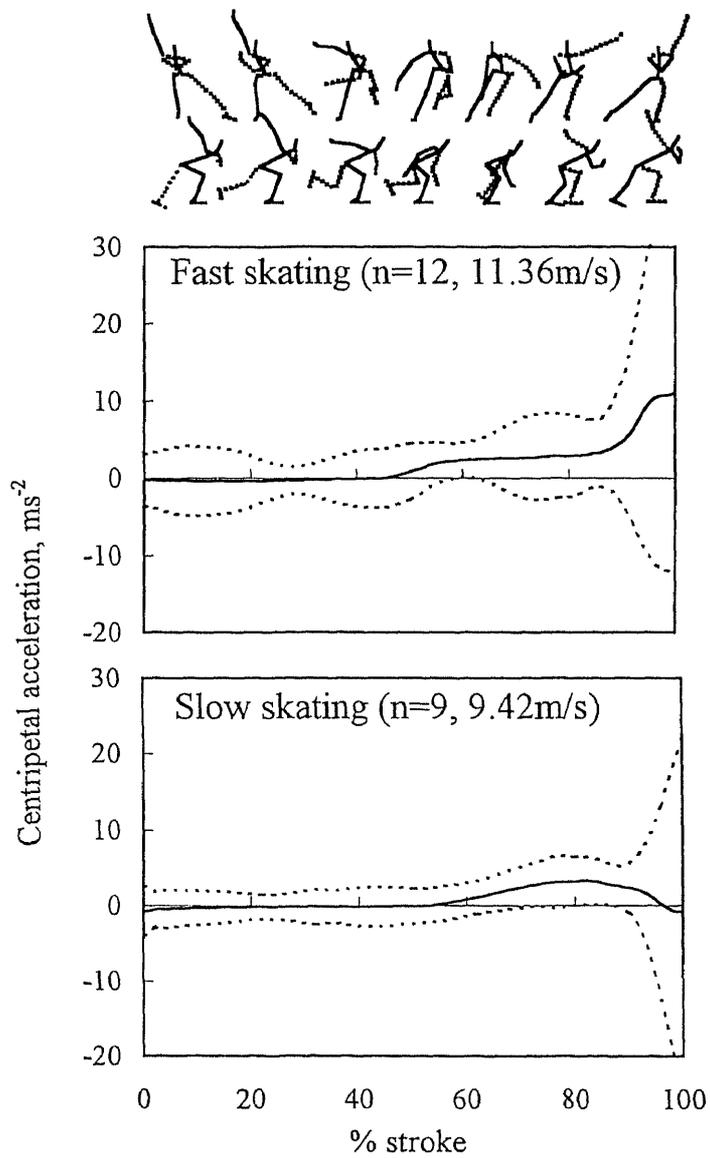


Figure 5-9
 Means(thick line) and standard deviations(dotted line) for the centripetal acceleration of the gliding skate in fast(top) and slow(bottom) skatings.

4. 要約

本研究では，元世界記録保持者を含む12名の低速および高速滑走試技（計21試技）におけるブレード反力および重心速度を測定し，ストローク中の重心の加速に影響を及ぼす力学的要因について検討した。

その結果，以下のことが明らかになった。

- ①水平面内で重心速度とブレード滑走方向のなす開き角は，0～10degの範囲でストローク中徐々に増加した。
- ②開き角により水平ブレード反力は重心速度方向に正の成分 F_{hu} を生じた。
- ③ F_{hu} 成分による加速の推定値と画像から得られた重心速度方向の加速成分はよく一致した。
- ④スケートの曲線運動による求心加速度成分によって生じる速度の増加分は，水平ブレード反力による速度の増加分の約30～60%であった。

これらの結果により，第Ⅲ章で提示した「スピードスケート滑走における重心の加速は，プッシュオフによる重心速度方向に対し水平面内で垂直な速度成分の増加のみでなく，重心速度方向の速度成分の増加によっても生じる」という加速理論が力学的に実証された。また，スケートの曲線運動による求心力は加速に影響を及ぼす重要な要因の1つであることが明らかになった。

VI. シミュレーションによる加速に影響を及ぼす要因の検討

1. 目的

これまでのところでは、ブレード反力の計測と画像分析法を用い、重心の加速を生み出す力学的要因について実測値をもとに検討した。しかし、ストローク中の開き角やスケートの曲線運動による求心力成分の変化は極めて微小であり、これらの相違が、加速の大きさにどのような影響をもたらすかについて実測値のみから明らかにすることは難しい。

そこで、加速に対する個々の力学的要因の影響を検討する1つの方法として、滑走中のスケーターに作用する力学的要因をモデル化し、ストローク中の重心速度の変化を数値的にシミュレーションすることが有用であると考えられる。シミュレーション手法では、種々のパラメータを微妙に変化させ、個々のパラメータの影響を推定することができる。

本研究では、水平面内におけるスケートと重心の関係をモデル化し、力学的有効パワーおよびスケートの求心力成分の実測値を用いることによりストローク中の重心速度の変化をシミュレーションし、加速の大きさに影響を及ぼす要因について検討した。

2. シミュレーションの方法

(1) 重心とスケートの二次元モデル

図6-1は、水平面内におけるストローク中の身体重心（白黒丸）とスケートブレード中点（白丸）の関係を示す二次元モデルと、重心とスケート中点に作用する外力のフリーボディダイアグラムを示したものである。

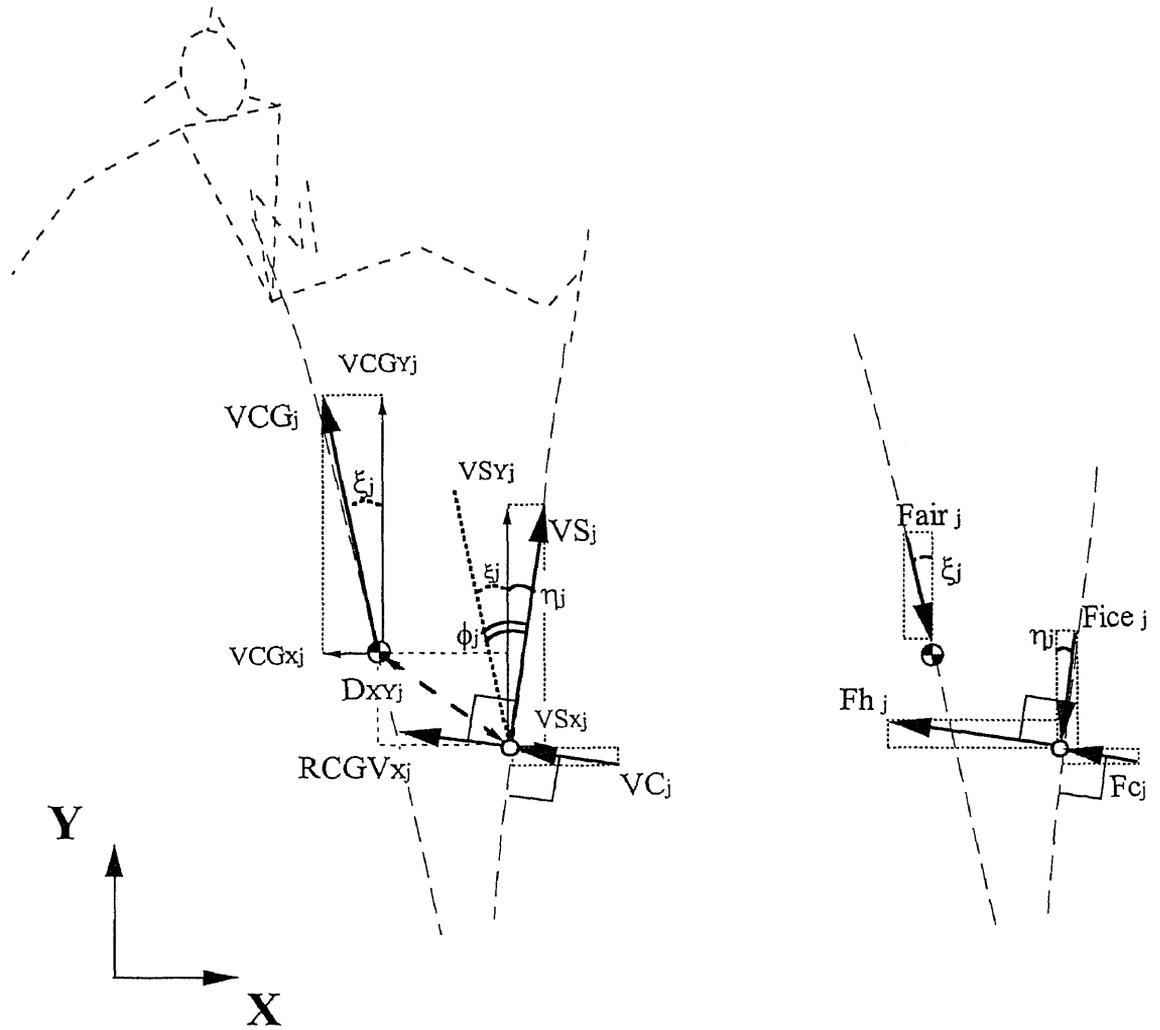


Figure 6-1
Model and free body diagram for the CG of the skater.

ただし、スケートブレード中点の速度をVS、VSが静止座標系Y軸となす角を η 、重心速度をVCG、VCGがY軸となす角を ξ 、VSとVCGのなす角度（開き角）を $\phi(=\eta+\xi)$ とし、重心に対するスケートの側方への相対距離をDX、前方への相対距離をDY、相対水平距離をDXYとした。角 η および角 ξ はY軸からみて反時計方向を正とした。また、スケートに作用する氷摩擦力をFice、スケートの曲線運動による求心力をFc、水平ブレード反力をFh、スケーターに作用する空気抵抗力をFairとし、これらは全て身体質量あたりのものに換算して用いた。

(2) シミュレーションの流れ

図6-2は本研究におけるシミュレーションの流れ図である。

空気抵抗力Fairは、Ingen Schenau et.al(1982)の回帰モデル式(2.5)~(2.10)により算出した。ただし、これらの式への入力値（膝関節および体幹水平角度、身長、体重）には、高速滑走試技の平均値を用いた。氷摩擦力Ficeは、氷とスケートブレードの動摩擦係数を0.005として算出した。

水平ブレード反力Fhは、以下のようにして算出した。

①時刻jの相対重心速度RCGV x_j は、重心速度VCG $_j$ と開き角 ϕ_j の幾何学的関係により算出した。

$$RCGVx_j = VCG_j \sin \phi_j \quad (6.1)$$

②時刻jの水平ブレード反力Fh $_j$ は、力学的有効パワーEP $_j$ を①で求めたRCGV x_j で除したものと、スケートの求心力成分Fc $_j$ の和として求めた。ここで、力学的有効パワーはストローク時間の関数として与えられる入力値である。

$$Fh_j = \frac{EP_j}{RCGVx_j} + Fc_j \quad (6.2)$$

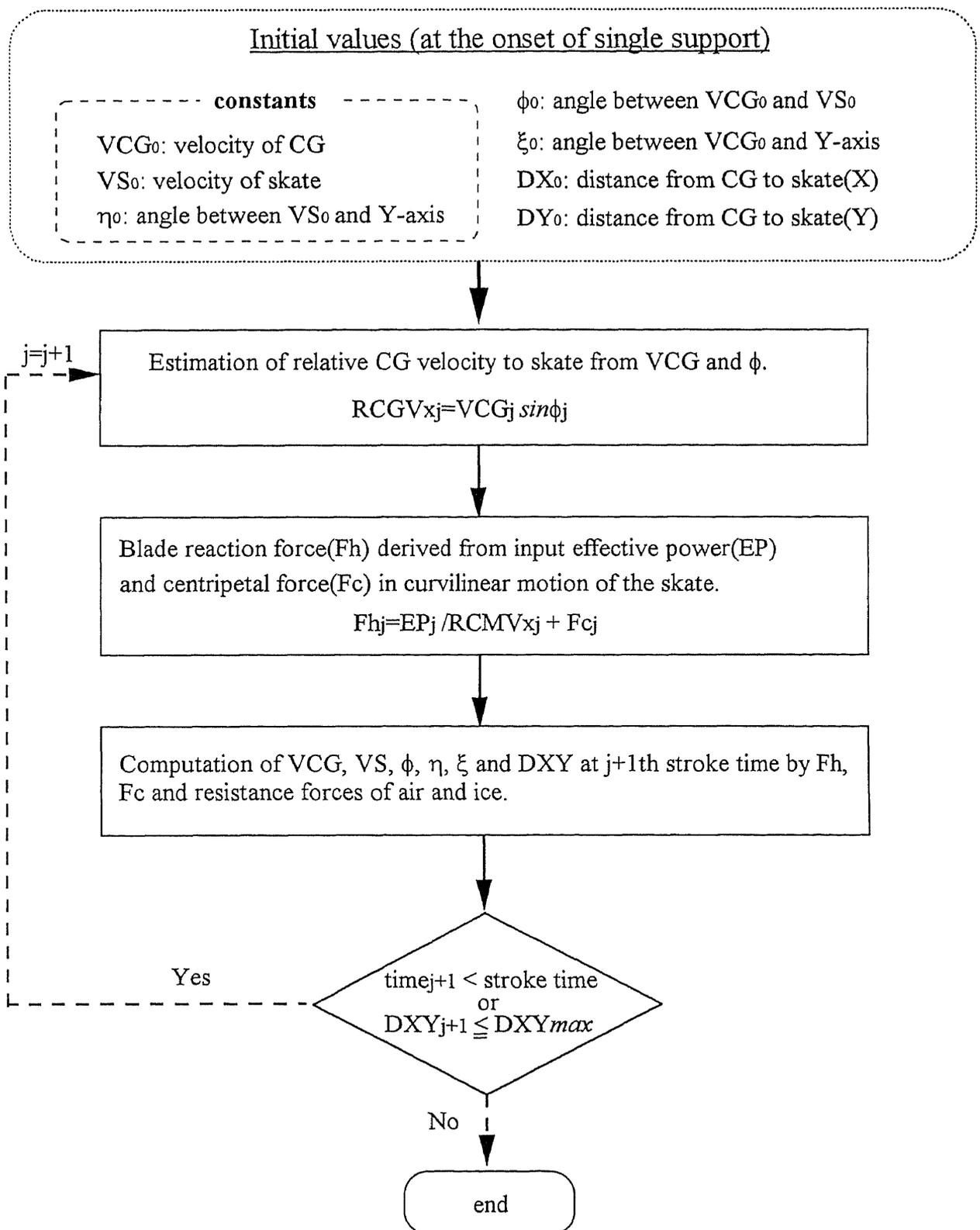


Figure 6-2 Flow chart of the simulation.

得られた時刻 j の4つの外力を積分することにより，時刻 $j+1$ の重心速度およびスケート速度の大きさ(VCG_{j+1} , VS_{j+1})と方向角(ξ_{j+1} , η_{j+1} , ϕ_{j+1})，および重心とスケートの相対水平距離(DX_{j+1})を算出した (式(6.3)-(6.14)) .

$$VCGX_{j+1} = VCGX_j + \int_j^{j+1} Fh_j dt \cdot \cos\eta_j + 2 \int_j^{j+1} Fair_j dt \cdot \sin\xi_j \quad (6.3)$$

$$VCGY_{j+1} = VCGY_j + \int_j^{j+1} Fh_j dt \cdot \sin\eta_j + 2 \int_j^{j+1} Fair_j dt \cdot \cos\xi_j \quad (6.4)$$

$$VCG_{j+1} = \sqrt{VCGX_{j+1}^2 + VCGY_{j+1}^2} \quad (6.5)$$

$$\xi_{j+1} = \tan^{-1} \left(\frac{VCGX_{j+1}}{VCGY_{j+1}} \right) \quad (6.6)$$

$$VS_{j+1} = VS_j + \int_j^{j+1} Fice_j dt \quad (6.7)$$

$$VSX_{j+1} = VSX_j + \int_j^{j+1} Fc_j dt \cdot \cos\eta_j \quad (6.8)$$

$$VSY_{j+1} = \sqrt{VS_{j+1}^2 - VSX_{j+1}^2} \quad (6.9)$$

$$\eta_{j+1} = \tan^{-1} \left(\frac{VSX_{j+1}}{VSY_{j+1}} \right) \quad (6.10)$$

$$\phi_{j+1} = \xi_{j+1} - \eta_{j+1} \quad (6.11)$$

$$DX_{j+1} = DX_j + \int_j^{j+1} (VCGX_{j+1} - VSX_{j+1}) dt \quad (6.12)$$

$$DY_{j+1} = DY_j + \int_j^{j+1} (VCGY_{j+1} - VSY_{j+1}) dt \quad (6.13)$$

$$DXY_{j+1} = \sqrt{DX_{j+1}^2 + DY_{j+1}^2} \quad (6.14)$$

初期時刻は片脚滑走開始時とし，重心およびスケート速度の初期値はそれぞれ11m/sとした．ストローク時間は高速試技平均値(0.73s)とし，時刻がストローク時間より大きくなるか，あるいは重心とスケートの相対水平距離がその高速試技平均値(0.71m)に達した時点で計算を終了した．

(3) シミュレーションに用いた入力値

図6-3は、入力値として用いた力学的有効パワー（上）とスケートの曲線運動による求心加速度成分（下）を示したものである。

力学的有効パワーとして、高速滑走試技の平均値(n=12)と優れた選手の典型例として元世界記録保持者のものを抽出した。元世界記録保持者の力学的有効パワーの発揮パターンには、立ち上がりのタイミングが早くピーク値が小さいという特徴がある。なお、両者の力学的有効パワーの大きさの差異による影響をなくすために、平均パワーが等しくなるように元世界記録保持者の値を1.17倍して調整した。

スケートの求心加速度成分には、高速試技の平均を基準値として選択した。さらに、この測定値の標準偏差が大きかったことを考慮して、基準値が正の値をとる45%~100%ストローク時間の範囲の求心加速度成分に0を代入したものと、基準値と絶対値が等しい異符号の値を代入したものの2つの仮想値を設定した（以下、3つの求心加速度成分の向きに着目して、基準値を「イントレース」、0を代入したものを「直線トレース」、基準値の符号を逆にしたものを「アウトトレース」とする）。

3. 結果および考察

(1) スケートの求心加速度成分の相違が加速に及ぼす影響

ここでは、スケートの曲線運動による求心加速度成分の相違が加速に及ぼす影響を検討するために、3つの求心加速度成分パターンにおける重心速度のシミュレーションを行った。ただし、開き角の初期値 ϕ_0 は高速滑走試技の平均値(1.5deg)に設定した。

図6-4は、3つの求心加速度成分パターンにより得られた水平面内における重心（実線）およびスケートブレード中点（破線）の軌跡を示した

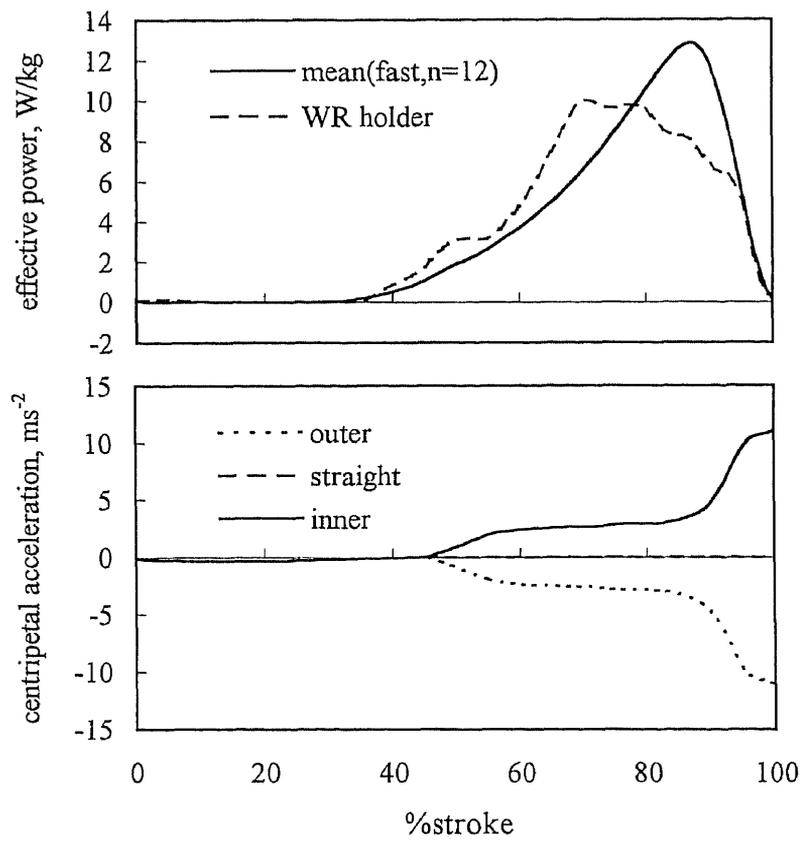


Figure 6-3
 Input data for the simulation of acceleration of the CG.

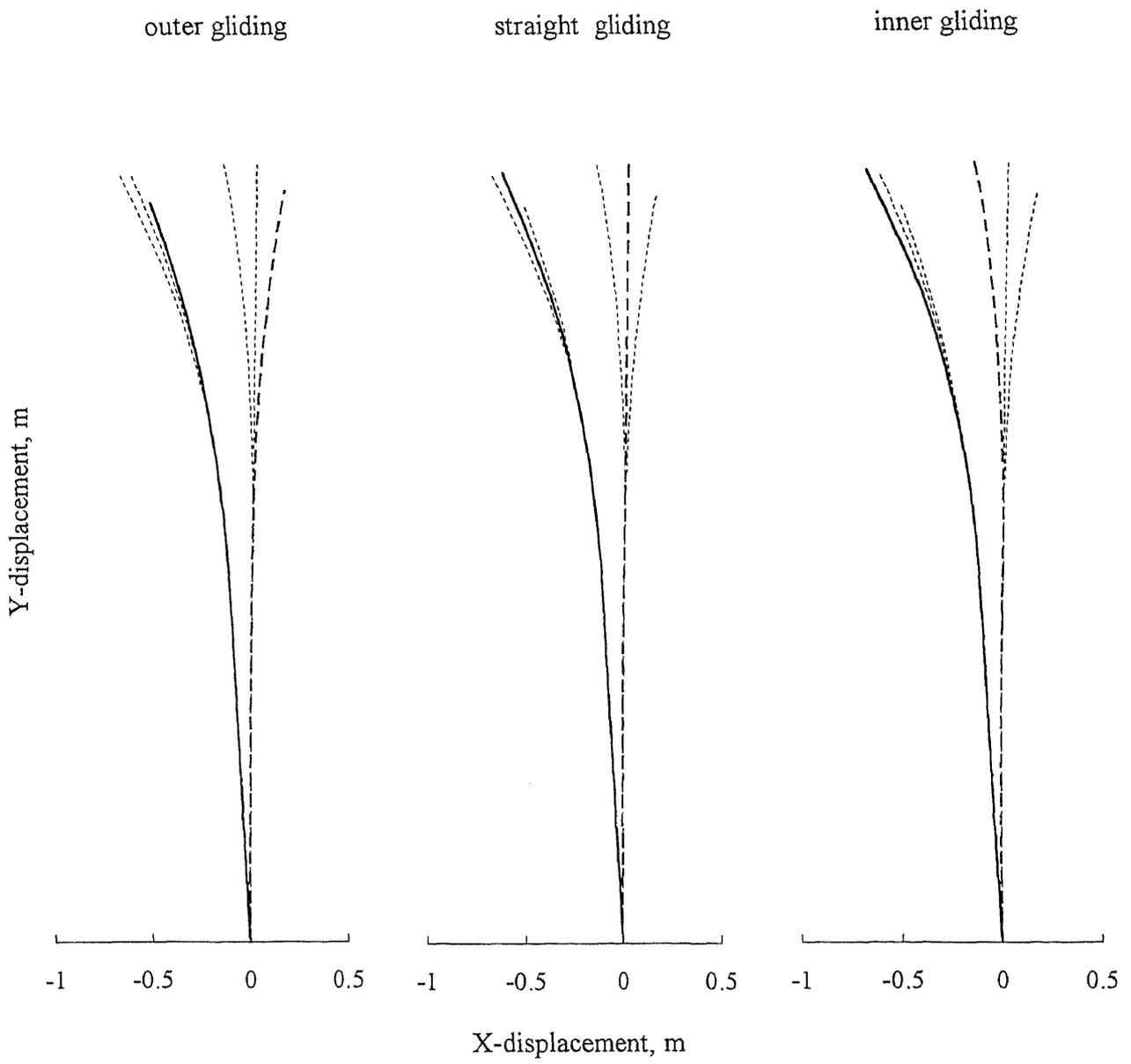


Figure 6-4
 Traces of CG(solid line) and mid-point of skate blade(broken) for three gliding patterns in horizontal plane under the condition of the same initial CG-skate angle (1.5 deg).

ものである。なお、比較のために他のトレースパターンを細い点線で示した。スケートの軌跡をみると、ストロークの後半部分で求心加速度成分パターンの相違により3つの軌跡が大きく異なり、アウトトレース

(左)では重心の反対方向(外側)に、イントレース(右)では重心のある方向(内側)に移動していることがわかる。重心の軌跡を比較すると、アウトトレースの場合には、他の2つに比べて重心の移動距離が短かった。直線トレース(中央)とイントレース(右)の重心の軌跡を比べると、イントレースでの側方変位がやや大きいようである。

アウトトレースにおける重心とスケートの軌跡が短いことは、アウトトレースではスケートが外側に移動したことにより重心の相対水平距離が設定した最大値を超え、本来のストローク時間よりも早く計算を終了した結果であると考えられる。

図6-5は、シミュレーションにより得られた各パラメータの時間的変化を3つの求心加速度パターンごとに示したものである。

重心速度(左上段)をみると、どの求心加速度パターンにおいても重心速度はストローク前半では空気抵抗により減少し、60%ストローク時あたりでは初期値から約0.2m/s減少していた。その後、重心速度はストローク後半で増加し、最大到達速度はイントレースではほぼ初期値に復元していたが、直線トレースとアウトトレースでは初期値まで復元していなかった。このことは、直線トレースとアウトトレースでは11m/sの速度を維持することができない、すなわち同じ出力パワーを発揮しても直線トレースとアウトトレースでは滑走速度が小さくなることを意味している。また、本研究で測定した求心加速度成分の高速試技平均値を用いたイントレースにおいて最大到達速度が初期値にほぼ復元したことは、本シミュレーションで用いたモデルの妥当性を示しているといえる。

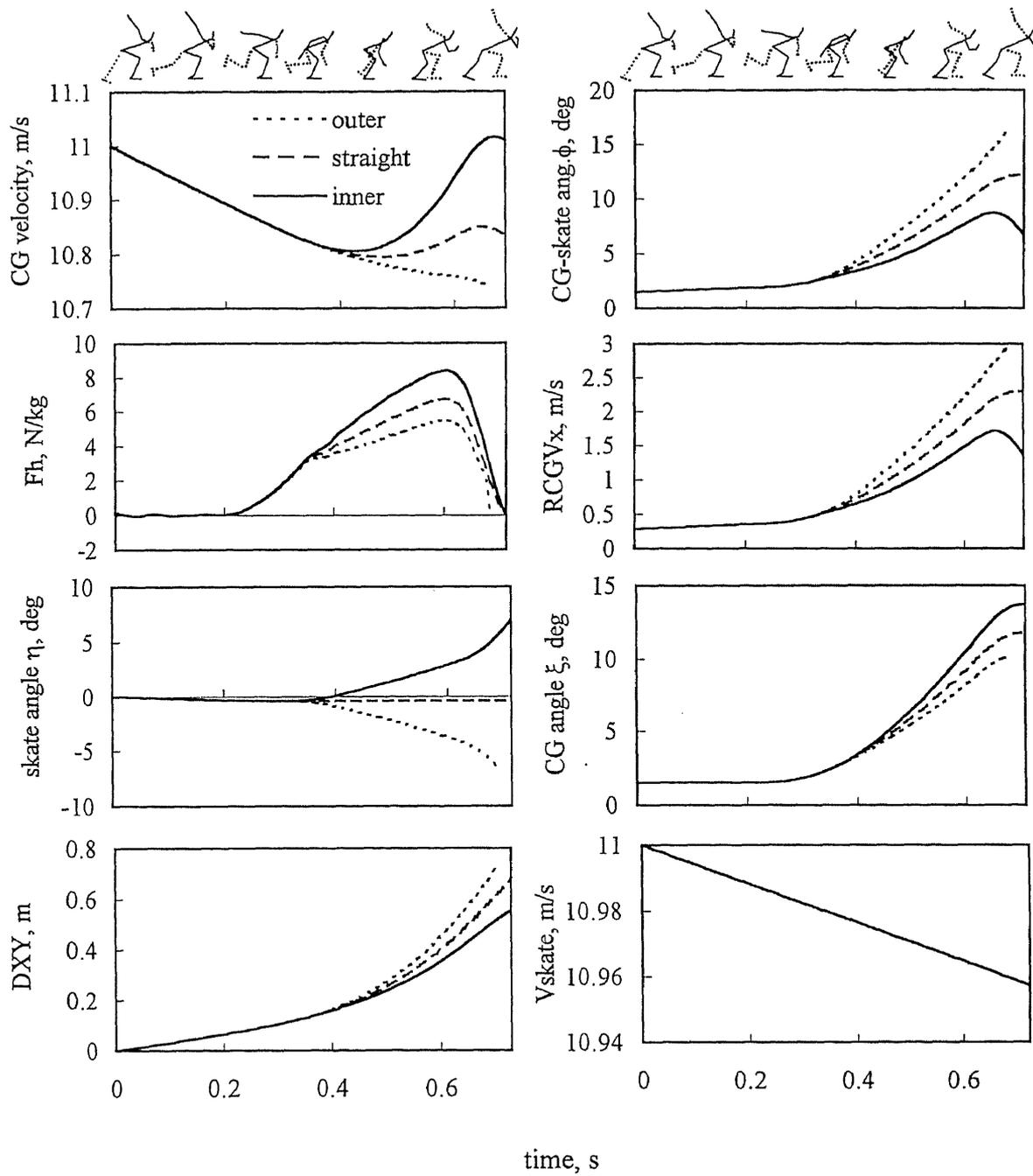


Figure 6-5
 Results of simulation for three gliding patterns of the skate in case of the same initial CG-skate angle, mean value(1.5 deg).

ブレード反力（左二段目）は、50%ストローク時あたりから差がみられ、イントレース、直線トレース、アウトトレースの順に大きかった。これは、スケートの曲線運動による求心力がこの順で大きいこと、および入力パワーが同一の場合には、式(6.2)に示したようにRCGV_x（右二段目）が小さいほどブレード反力が大きくなることによる。

開き角 ϕ （右上段）はスケートの方位角 η （左三段目）と重心速度の方位角 ξ （右三段目）のなす相対角である。3つの求心加速度パターンでそれらを比較すると、重心方位角 ξ は、開き角 ϕ の変化とは逆にイントレース、直線トレース、アウトトレースの順に大きいが、最大値におけるトレース間の差は約2 degと小さい。一方、スケート方位角 η は ξ と同じ順で大きいが、トレース間の差が約6 degと大きかった。したがって、これらの方位角の差として算出される開き角 ϕ は、スケート方位角 η により大きく影響を受け、イントレースでは小さく、アウトトレースでは大きくなったといえる。

以上の3つの求心加速度を用いたシミュレーションの比較から、内向きの求心加速度によってRCGV_xが小さくなるため大きなブレード反力が得られ、重心の加速が大きくなることがわかった。

（2）片脚滑走開始時の開き角の大きさが加速に及ぼす影響

ここでは、片脚滑走開始時の開き角（以下、 ϕ_0 という）の大きさが加速に及ぼす影響を検討するために、 ϕ_0 を0～10degの範囲で0.5degごとに変化させてシミュレーションを行った。ただし、求心加速度パターンはイントレースを、力学的有効パワーは高速試技の平均値をそれぞれ入力した。

図6-6は、 ϕ_0 を0 deg, 2 deg, 4 degとしたときの水平面内での重心（実

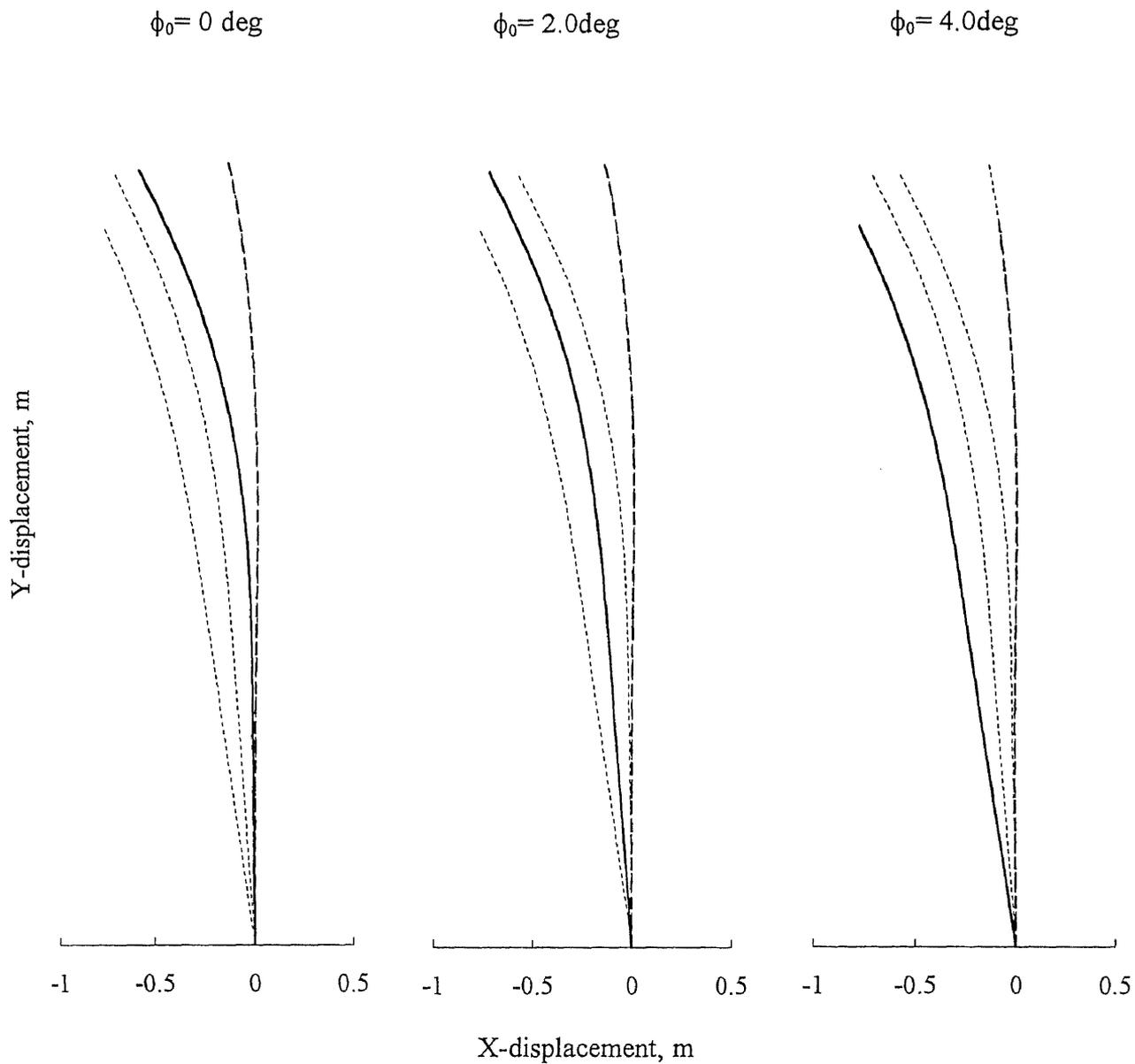


Figure 6-6
 Traces of the CG(solid line) and the mid-point of skate blade(broken) for the different initial CG-skate angles in case of the same gliding trace pattern.

線) およびスケート中点 (破線) の軌跡を示したものである。

ϕ_0 が 4 degの場合をみると、0 deg, 2 degの軌跡に比べて、重心、スケート中点ともに軌跡が短かった。これは、 ϕ_0 が 4 degの場合では力学的有効パワーの入力が終了しないうちに重心の相対水平距離が設定した最大値を超えたため、本来のストローク時間よりも早く計算を終了した結果である。 ϕ_0 が 0 degと 2 degの重心の軌跡を比べると、2 degのストローク終了時での重心側方変位が大きいようであった。

図6-7は、 ϕ_0 が 0 deg, 2 deg, 4 deg, 6 degのときにシミュレーションにより得られた各パラメータの時間的変化を示したものである。

重心速度 (左上段) をみると、最高到達速度は、2 deg(11.02m/s), 0 deg(11.01m/s), 4 deg(10.99m/s), 6 deg(10.84m/s)の順に大きかった。ブレード反力 (左中段) をみると、ピーク値、平均力ともに ϕ_0 の小さい順に大きかった (ϕ_0 の小さい順に、ピーク値: 8.49, 8.33, 7.91, 5.98N/kg; 平均力: 3.58, 3.09, 2.69, 1.37N/kg)。

ブレード反力が ϕ_0 の小さい順に大きかったことは、RCGV_xが開き角の小さい順に小さくなるためと考えられる。

ϕ_0 が 0 degと 2 degの場合を比較すると、 ϕ_0 が 2 degのときのブレード反力のピーク値、平均力はともに 0 degのときに比べて小さかったが、最高到達重心速度は 0 degよりもわずかに大きかった。このことは、加速の大きさがブレード反力の大きさばかりでなく、 ϕ_0 によっても微妙に影響を受けることを意味している。

図6-8は、横軸に開き角 ϕ_0 を、縦軸には上から順に、最高到達重心速度、速度変化ベクトルの滑走方向成分dV_uとそれに直交する成分dV_w、および速度変化比をとり、3つのトレースパターンごとにプロットしたものである。なお、速度変化ベクトルは、第Ⅲ章と同様にして、60%ストロ

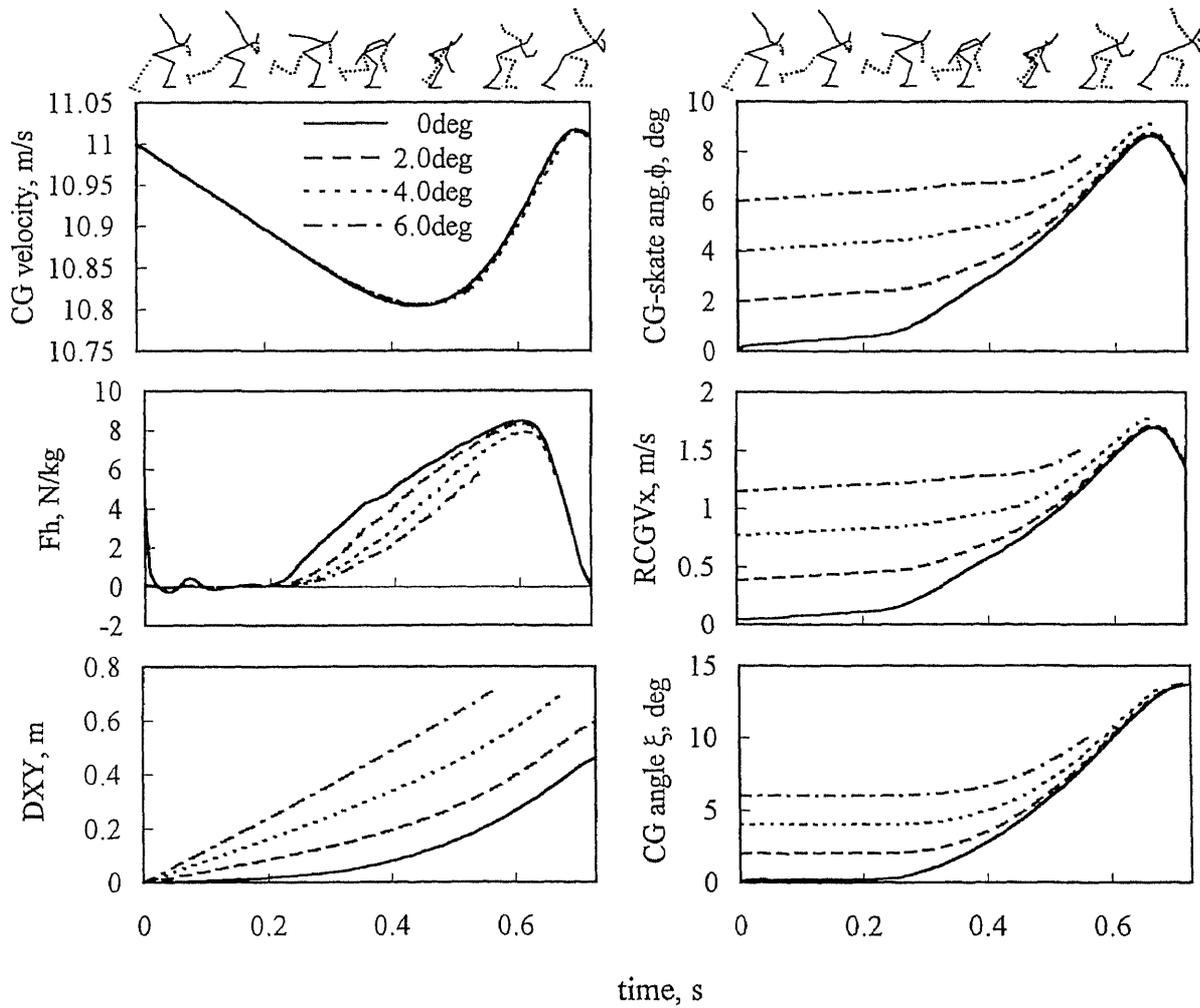


Figure 6-7
 Results of simulation for the different initial CG-skate angles in case of the same gliding trace pattern.

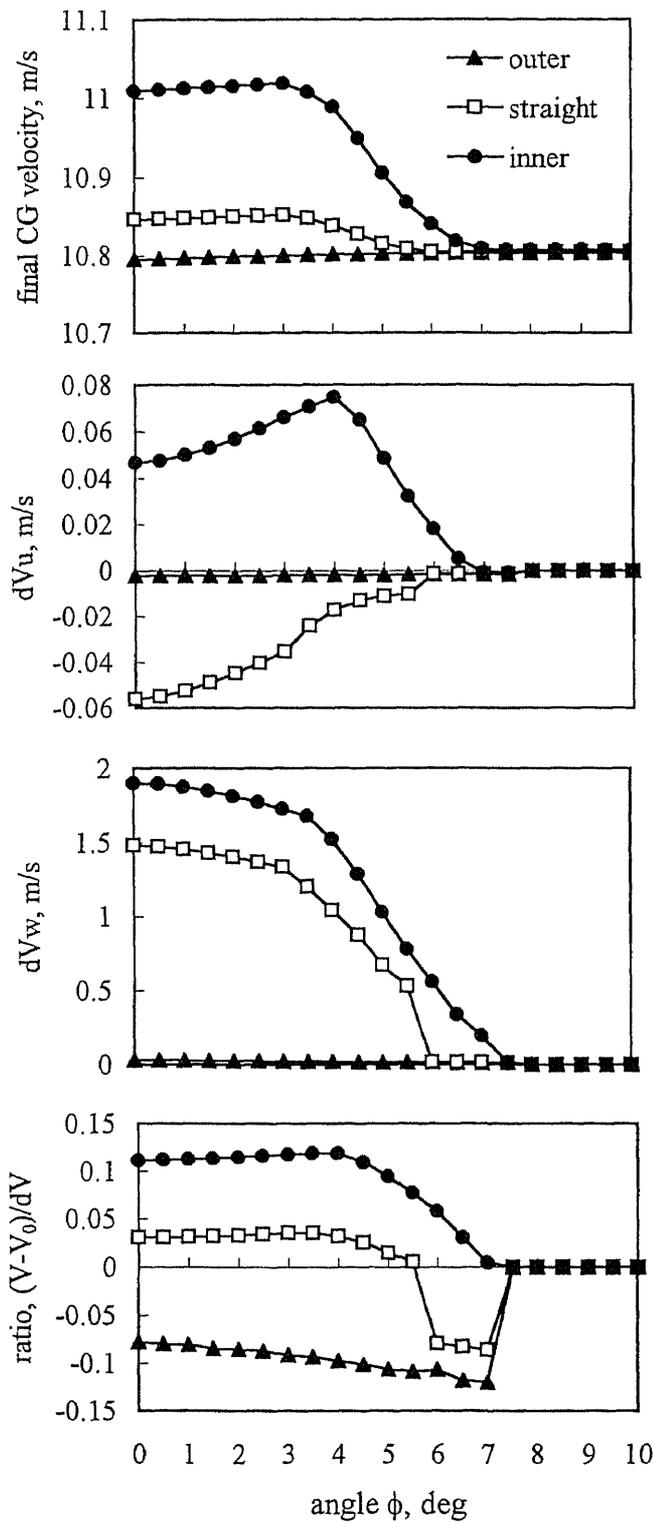


Figure 6-8
Effects of the initial CG-skate angle on the final velocities, dV_u and dV_w for three skating trace patterns.

ーク時と最高速度到達時の両ベクトルの始点をそろえ、式(3.1)-(3.2)により求めた。dVuとdVwは同様にして(3.7)-(3.8)により求めた。また、速度変化比(ratio of velocity change)は、速度変化ベクトルの大きさdVに対する正味の重心速度変化の比として、次式(6.15)より算出した。

$$\text{ratio of velocity change} = \frac{V - V_0}{dV} \quad (6.15)$$

最高到達重心速度は、イントレースパターンでは ϕ_0 が0～3 degの範囲で11m/sより大きく、3 degのとき最も大きかった。また、開き角 ϕ_0 が3 degより大きい範囲ではイントレースの場合でも最高到達重心速度は著しく減少し、6 deg以上ではほとんど加速が生じていなかった。このことは、滑走速度が11m/s、開き角 ϕ_0 が6 deg以上の場合、通常のキック開始のタイミングの以前に重心とスケートの相対水平距離が大きくなり、全く加速できないことを示している。これらのことから、 ϕ_0 を小さくすることは加速を生み出す重要な要因の1つであるといえる。

イントレースにおいて算出されたdVuおよびdVwの値は、第Ⅲ章で画像から測定された ΔVu および ΔVw とほぼ同じ大きさであった。dVu(二段目)をみると、イントレースの場合、dVuはどの開き角 ϕ_0 の範囲でも正の値として算出されるが、 ϕ_0 が4 degで最大(0.08m/s)に達していた。直線トレースおよびアウトトレースの場合にはdVuが正の値をとることはなかった。これらのことから、速度変化ベクトルの重心速度方向成分dVuが重心の有効な加速に結びつくための要因として、求心加速度がイントレースパターンであること、 ϕ_0 が4 degよりも小さいことがあげられる。

dVw(三段目)をみると、どのトレースパターンにおいてもdVwは4 degまで徐々に減少し、それ以降急減していた。速度変化比(下段)をみると、イントレースパターンの場合では、 ϕ_0 がおおよそ4 deg以内の範囲で

速度変化比が漸増し、 ϕ_0 がそれより大きな範囲では小さくなっていた。これは、 ϕ_0 が4 deg以内の範囲では、ブレード反力によって生じる速度変化ベクトル dV を漸減させながらも dVu 成分を大きくして有効な加速を生み出していたことによると考えられる。また、それ以降の範囲では、 dVw と dVu がともに増加しなかったために最高速度も減少し、速度変化比も小さくなったと考えられる。

以上の検討から、①発揮パワーが同じであれば片脚滑走開始時の開き角 ϕ_0 が小さいほど、大きなブレード反力が得られること、②イントレースの場合の最高到達重心速度は、片脚滑走開始時の開き角 ϕ_0 が0～3 degの範囲で大きいこと、③しかし、最高到達重心速度は、 ϕ_0 が0 degのときよりも2 degのときでわずかに大きく、加速の大きさはブレード反力の大きさのみでなく ϕ_0 によっても微妙に影響を受けること、④重心速度方向への加速成分 dVu は、求心加速度パターンがイントレース、開き角が4 deg以内の範囲のときに大きいことが明らかになった。

なお、本シミュレーション条件では、片脚滑走開始時の開き角 ϕ_0 が3 degのときに最高到達速度が最も大きく、速度変化比も大きかった。

(3) 力学的有効パワーの発揮パターンの相違が加速に及ぼす影響

ここでは、力学的有効パワーの発揮パターン（以下、パワーパターンという）の相違が加速に及ぼす影響をみるために、高速滑走試技の平均値と元世界記録保持者の力学的有効パワーを入力するシミュレーションを行った。ただし、開き角の初期値 ϕ_0 は高速滑走試技の平均値(1.5deg)に設定し、スケートの求心加速度パターンはイントレースを入力した。

図6-9は、パワーパターンの異なる2つの力学的有効パワーを入力したときのシミュレーション結果を示している。

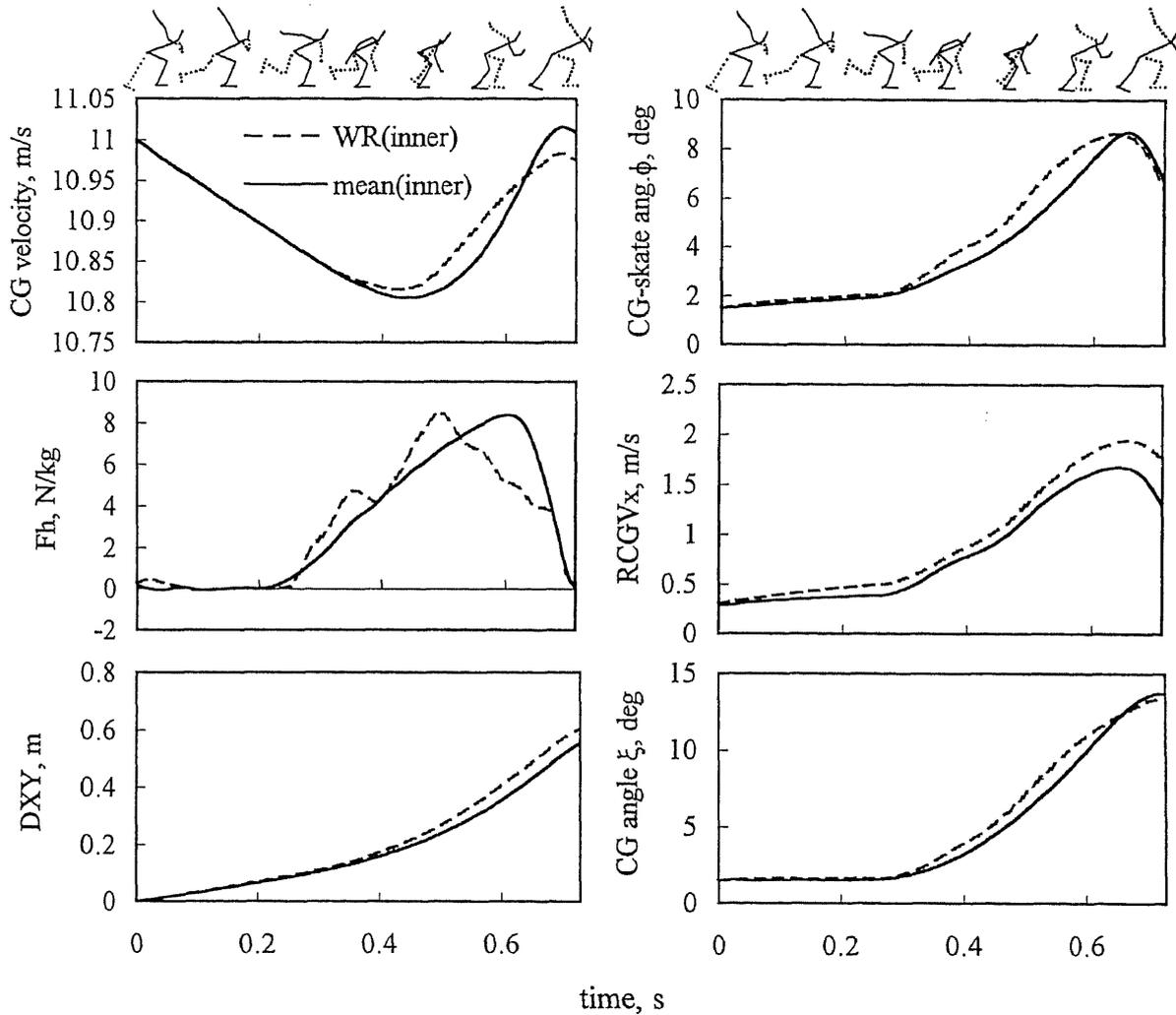


Figure 6-9

Comparisons of simulated results of two power output patterns for world record holder and mean value of the fast skating in case of the same initial CG-skate angle(1.5 deg) and inner gliding trace.

重心速度（左上段）をみると，最高到達重心速度は平均値パターン(11.02m/s)が元世界記録保持者(10.99m/s)よりもわずかに大きかった．また，60%ストローク時あたりにみられるストローク中の最低速度は，平均値パターン(10.80m/s)に比べ元世界記録保持者(10.82m/s)で大きかった．さらに，ストローク中の平均速度を求めると，元世界記録保持者(10.90m/s)が平均値パターン(10.89m/s)よりもわずかに大きかった．

ブレード反力（左中段）の変化パターンは，元世界記録保持者のブレード反力の立ち上がりが早かった．ブレード反力のピーク値は，元世界記録保持者(8.50N/kg)が平均値パターン(8.39N/kg)よりも大きかったが，平均力は平均値パターン(3.21N/kg)が元世界記録保持者(3.11N/kg)をわずかに上回った．

入力した力学的有効パワーのピーク値は，平均値パターン(12.9W/kg)が元世界記録保持者(10.0W/kg)よりも大きかったが，ブレード反力のピーク値は逆に元世界記録保持者で大きかった．このことは，元世界記録保持者の力学的有効パワーの立ち上がりが早く，その時点でのRCGV_xが小さいので，結果として，立ち上がりが早く，しかも大きなブレード反力が得られたと考えられる．また，そのようなブレード反力の発揮により，摩擦抵抗力のみが作用する減速時間が短くなり，元世界記録保持者でのストローク中の減速が小さかったと考えられる．

ところで，平均ブレード反力と平均速度の関係をみると，元世界記録保持者では平均ブレード反力が平均値パターンの場合に比べて小さいが，平均速度がわずかに平均値パターンの場合よりも大きかった．そこで，RCGV_x（右中段）をみると，RCGV_xのストローク後半でのピーク値はほぼ等しいが，元世界記録保持者では40%ストローク時以降のRCGV_xが平均値パターンに比べて大きいことがわかる．そのRCGV

xの積分値として算出される重心の相対水平距離（左下段）をみると、元世界記録保持者(0.61m)の相対水平距離が平均値パターン(0.55m)のものよりも大きかった。したがって、立ち上がりが早いブレード反力は、RCGVxの立ち上がりを早め、重心移動距離を増大させて平均速度を大きくすることに役立っていたと説明できる。

ここで、両者の相対水平距離の相違を視覚的にとらえるため、図6-10には、両パワーパターンの水平面内における重心およびスケート（点線）の軌跡を重ねて示した。

重心の軌跡をみると、破線で示した元世界記録保持者の重心の側方変位が、実線で示した平均値パターンのものに比べて大きいことがわかる。本シミュレーションでは、便宜上スケート速度ベクトルの初期方位角 η_0 を静止座標系のY軸に一致させている。しかし、実際にはスケートの初期方位角はわずかに外（図では右）方向を向いているため、ここに示した元世界記録保持者の重心の側方変位が大きいことは、実際には前方変位が大きいことを意味すると考えられる。

以上のように、立ち上がりが早くピークの小さいパワー発揮パターンは、ピーク出現の遅い平均値パターンに比べ、①ブレード反力の発揮が早まり、ストローク中の減速が小さくなる、②RCGVxの立ち上がりが早まることで重心の前方移動距離が大きくなり、平均速度が大きくなるという特徴のあることがわかった。

（4）片脚滑走開始時のスケートの相対位置が加速に及ぼす影響

ここでは、片脚滑走開始時の重心に対するスケートの相対位置が加速に及ぼす影響をみるために、スケートの相対位置 DX_0, DY_0 を $-0.1 \sim 0.2\text{m}$ の範囲でそれぞれの方向に 0.05m ごとに変化させてシミュレーションを

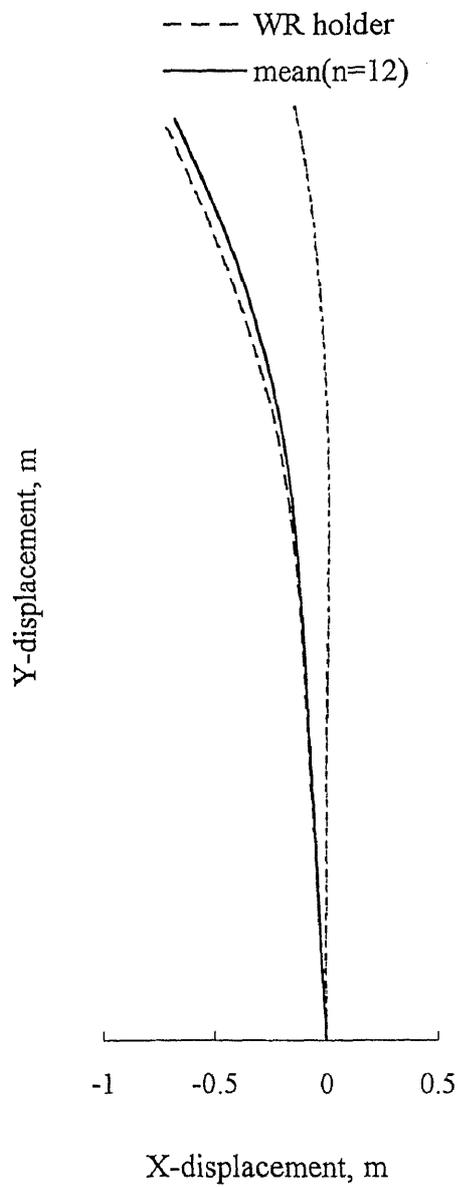


Figure 6-10
 Comparisons of simulated traces of skate blade(dotted line) and CG for world record holder(broken line) and mean value(solid line) of the fast skating.

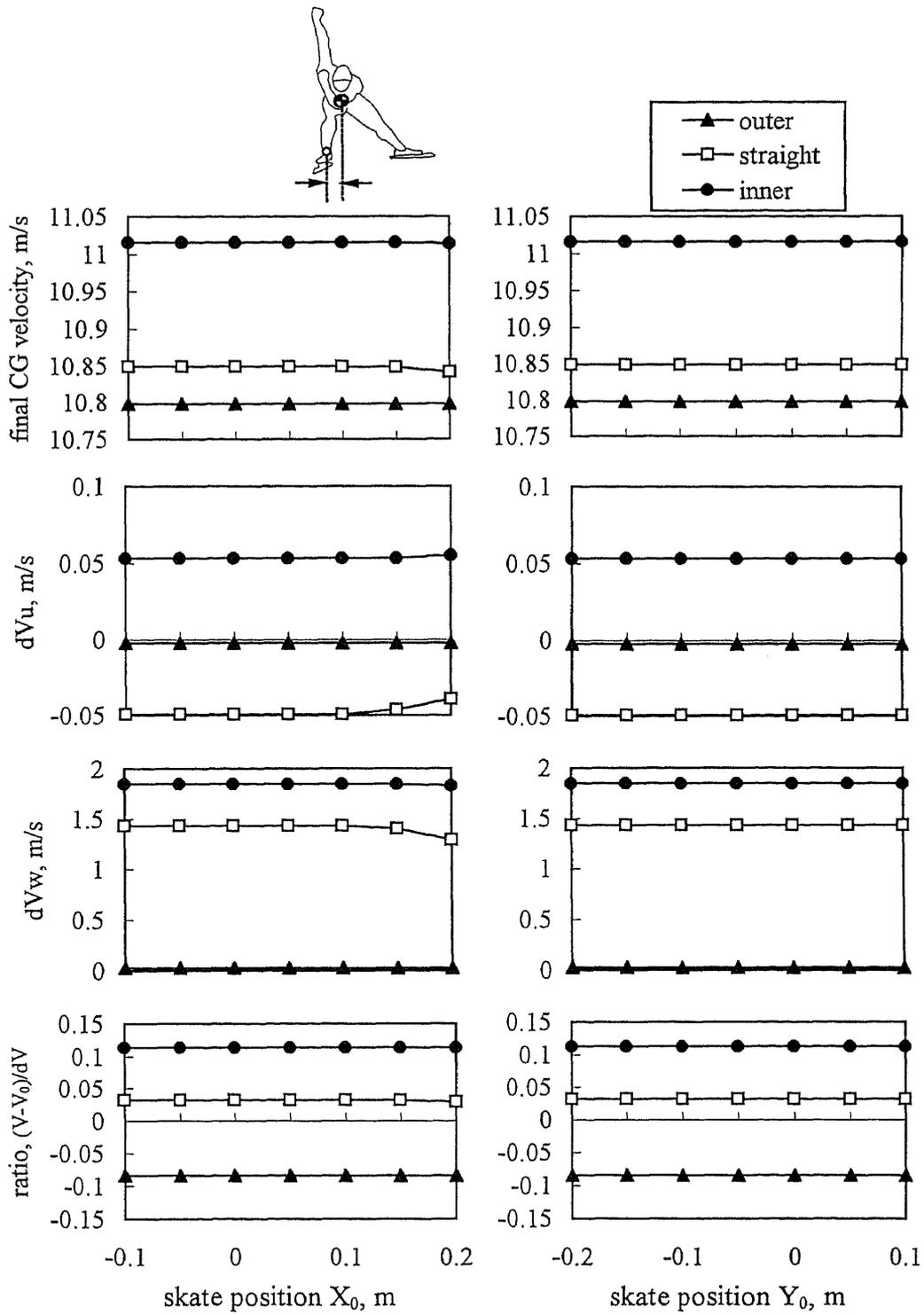


Figure 6-11
Effects of the initial skate positions on the final velocity, dV_u and dV_w for three skating traces in case of the same CG-skate angle.

行った。ただし、開き角の初期値 ϕ_0 を1.5degに設定し、入力パワーには高速滑走平均値パターンを、スケートの求心加速度パターンは3つのトレースパターンを用いた。

図6-11は、片脚滑走開始時のスケート位置を変えたときのシミュレーション結果を示したもので、上から、最高到達重心速度、 dVu 、 dVw および速度変化比である。

外側方位置(X) (左列) のいずれの求心力パターンにおいても最高到達重心速度は、スケートの初期位置により変化しなかった。 dVu と dVw においても同様に、スケートの初期位置による影響はほとんどなかった。また、スケートの前方位置(Y) (図右) をみると、相対前方位置の到達重心速度への影響は、どのトレースパターンにおいてもなかった。これらのことから、片脚滑走開始時のスケートの前後および左右位置は加速の大きさには影響しないといえる。

4. 要約

本研究では、スケートの曲線運動による求心力成分と力学的有効パワーの実測値を用いてストローク中の重心速度の変化をシミュレーションし、加速の大きさに影響を及ぼす力学的要因について検討した。

その結果、以下のことがわかった。

- ①力学的有効パワーが等しい場合、スケートの求心力がイントレースのときに相対重心速度(RCGV_x)が小さくなるため、大きな水平ブレード反力が得られ、大きな加速が生じる。
- ②力学的有効パワーが等しい場合、片脚滑走開始時の開き角 ϕ_0 が小さいほどRCGV_xが小さくなり、大きなブレード反力が得られる (ϕ_0 が0、

2, 4, 6 degの順に, ピーク値: 8.49, 8.33, 7.91, 5.98N/kg; 平均力: 3.58, 3.09, 2.69, 1.37N/kg) .

- ③イントレースの場合の最高到達重心速度は, ϕ_0 が0 ~ 3 degの範囲で大きい.
- ④ ϕ_0 が0 degのときの最高到達重心速度(11.01m/s)は, ブレード反力が小さい ϕ_0 が2 degのときの最高到達重心速度(11.02m/s)よりも小さく, 加速の大きさはブレード反力の大きさのみでなく ϕ_0 によっても微妙に影響を受ける.
- ⑤重心速度方向への加速成分 dV_u は, 求心加速度パターンがイントレース, ϕ_0 が0 ~ 4 degの範囲のときに大きかった.
- ⑥本シミュレーション条件では, ϕ_0 が3 degのときに最高到達重心速度が最も大きく, 速度変化比も大きかった.
- ⑦パワー発揮の立ち上がりが早い場合, ブレード反力の立ち上がりも早くなる. その結果, 重心の水平移動距離が大きくなり, ストローク中の減速が小さくなるため平均速度がわずかに大きくなる.
- ⑧片脚滑走開始時の重心に対するスケートの相対的な位置関係は, 加速にはほとんど影響しない.

以上の検討により, スケートの曲線運動による内向きの求心力を生み出すこと, 片脚滑走開始時の開き角 ϕ_0 を小さくすることが, 大きな加速を得るための重要な要因であるといえる. また, パワー発揮のタイミングを早めることは, 減速を小さく抑え, 平均滑走速度を大きくするために有効であるといえる.

VII. スピードスケート滑走動作のメカニズムについて

1. 目的

これまでに、スピードスケート滑走動作のキネマティクスが滑走速度や競技成績と関連づけて検討され、滑走速度に影響を及ぼす各種の技術的要因が明らかにされてきた(Ingen Schenau, 1980,1981,1983,1985,1987, 1990 ; Boer, 1986,1989). しかし、これらの要因と滑走速度に関する力学的要因との関係を検討したものはなく、どのような動作が大きな滑走速度を生じるのかという滑走動作そのもののメカニズムは究明されていない.

滑走動作の力学的メカニズムが明らかになれば、滑走技術の改善をより効果的に行えるようになり、また、スピードスケートの体力トレーニングにおいて用いるトレーニング負荷を決定する指標を与えたり、技術を考慮した専門的体力のトレーニング手段の構築にも応用できると考えられる.

本研究では、ブレード反力の測定と画像分析法を用いて、下肢関節の三次元関節トルクおよび関節トルクパワーなどのキネティックなパラメータを測定し、これらと滑走速度および水平ブレード反力を関係づけて検討することにより、滑走動作、特に加速動作の力学的メカニズムを明らかにすることを目的とした.

2. 方法

(1) 被験者

被験者には、1000mの元世界記録保持者を含むスピードスケート競技を専門とする男子計12名（高校生4名，大学生7名，社会人1名．年齢：21.6±2.5歳，身長：1.71±0.05m，体重：69.4±6.1kg）を用いた．専門種目の内訳は短距離が6名，長距離が6名であった．

（2）実験方法とデータ処理

被験者にセンサースケートを履かせ、1周（400m）40秒程度（約10m/s）の低速滑走と全力高速滑走を十分な休息をはさんで行わせた．

第IV章と同様の方法で、滑走速度の安定する250m付近のストレート滑走中のブレード反力およびブレード傾斜角度を測定した．さらに、第III章と同様の方法で選手の滑走動作を8台の8mmVTRカメラを用いて撮影し、DLT法により身体各部位23点と左右スケート端点4点の計27点の三次元座標を算出した．

本研究ではButterworth low-pass digital filter (Winter, 1990) を用いて三次元座標を平滑化した．用いた遮断周波数は1.6～8.8Hzであった．

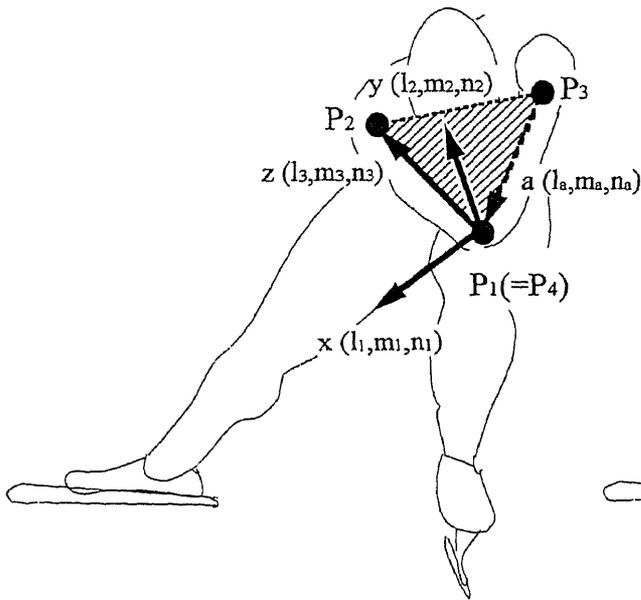
本研究では身体各部分の重心位置、質量および慣性モーメントは阿江(1996)の身体部分係数を用いて求めた．

（3）セグメントの重心回りの角運動量の算出

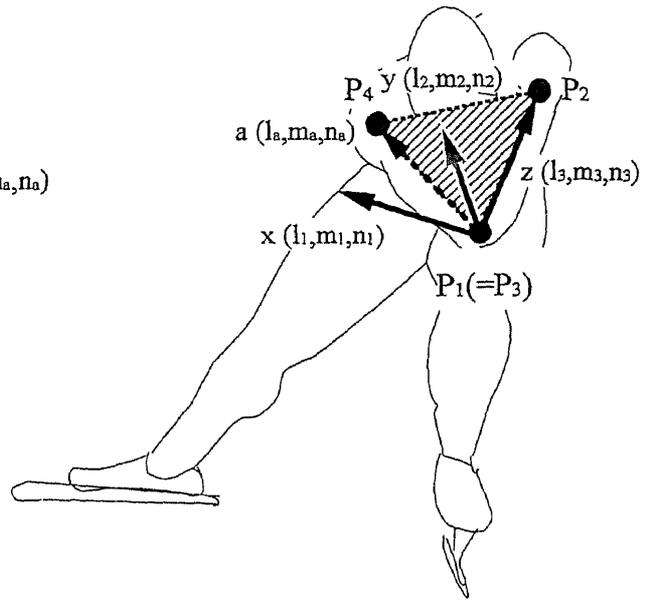
本研究では、以下のようにして、セグメントの重心回りの角運動量を算出した．

1) セグメントの直交移動座標系の決定

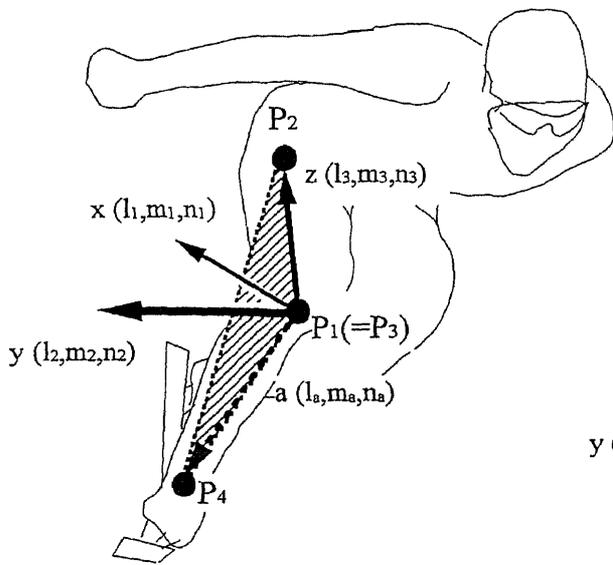
本研究では、図7-1の例に示すように、セグメントの遠位端から近位端に向かうベクトル($\overline{P_1P_2}$)、および隣接する他のセグメントの補助ベク



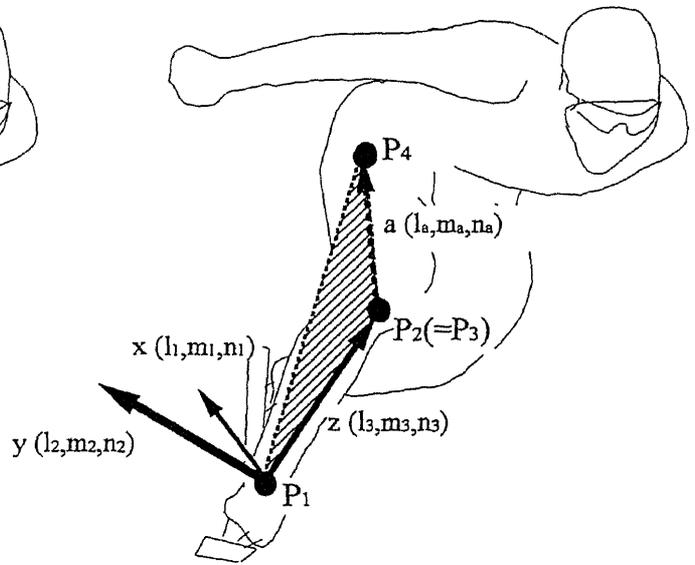
[Upper arm segment]



[Fore arm segment]



[Thigh segment]



[Shank segment]

Figure 7-1
Definitions of the moving reference frame fixed to the segment.

トル($\overline{P_3P_4}$)を定め、次の手順①から④により直交移動座標系 Σ (oxyz)を設定した。

①静止座標系 Σ (OXYZ)におけるセグメントの遠位端P1(X1, Y1, Z1)から近位端P2(X2, Y2, Z2)に向かうベクトル($\overline{P_1P_2}$)をz軸と定め、その方向余弦 l_3, m_3, n_3 を求めた (式(7.1)) .

$$l_3 = \frac{X2 - X1}{R1}, \quad m_3 = \frac{Y2 - Y1}{R1}, \quad n_3 = \frac{Z2 - Z1}{R1} \quad (7.1)$$

$$\text{ここで, } R1 = \sqrt{(X2 - X1)^2 + (Y2 - Y1)^2 + (Z2 - Z1)^2} .$$

②P3(X3, Y3, Z3)からP4(X4, Y4, Z4)に向かう補助ベクトル($\overline{P_3P_4}$)の方向余弦 l_a, m_a, n_a を算出した (式(7.2)) .

$$l_a = \frac{X4 - X3}{R2}, \quad m_a = \frac{Y4 - Y3}{R2}, \quad n_a = \frac{Z4 - Z3}{R2} \quad (7.2)$$

$$\text{ここで, } R2 = \sqrt{(X4 - X3)^2 + (Y4 - Y3)^2 + (Z4 - Z3)^2} .$$

③z軸の方向余弦 l_3, m_3, n_3 と補助ベクトルの方向余弦 l_a, m_a, n_a のベクトル積 (l', m', n') を求め (式(7.3)) , その方向余弦 l_2, m_2, n_2 を算出し, これをy軸とした (式(7.4)) .

$$l' = \begin{vmatrix} m_3 & n_3 \\ m_a & n_a \end{vmatrix}, \quad m' = \begin{vmatrix} n_3 & l_3 \\ n_a & l_a \end{vmatrix}, \quad n' = \begin{vmatrix} l_3 & m_3 \\ l_a & m_a \end{vmatrix} \quad (7.3)$$

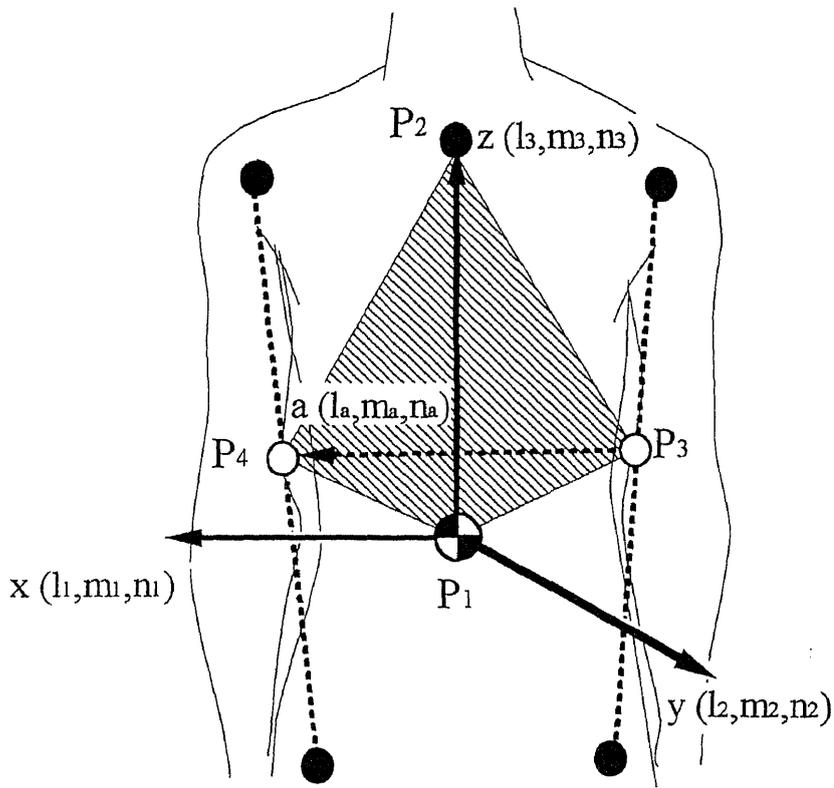
$$l_2 = \frac{l'}{R3}, \quad m_2 = \frac{m'}{R3}, \quad n_2 = \frac{n'}{R3} \quad (7.4)$$

$$\text{ここで, } R3 = \sqrt{l'^2 + m'^2 + n'^2} .$$

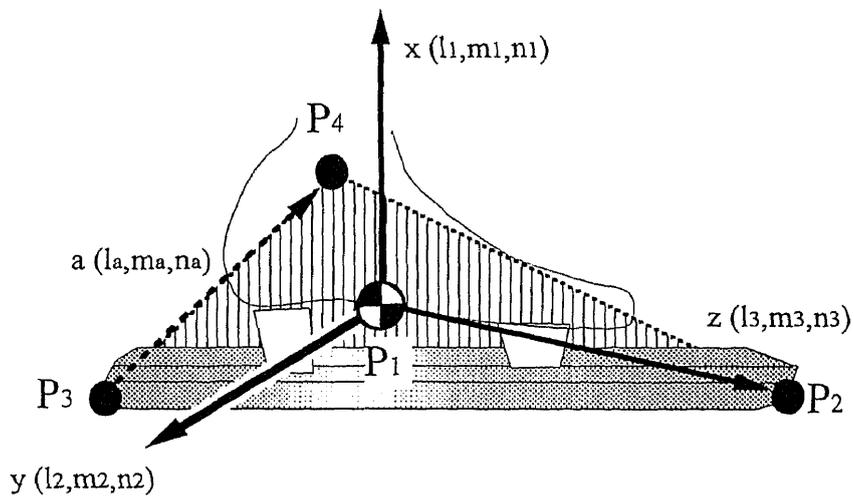
④y軸の方向余弦 l_2, m_2, n_2 とz軸の方向余弦 l_3, m_3, n_3 のベクトル積により, x軸の方向余弦 l_1, m_1, n_1 を求めた (式(7.5)) .

$$l_1 = \begin{vmatrix} m_2 & n_2 \\ m_3 & n_3 \end{vmatrix}, \quad m_1 = \begin{vmatrix} n_2 & l_2 \\ n_3 & l_3 \end{vmatrix}, \quad n_1 = \begin{vmatrix} l_2 & m_2 \\ l_3 & m_3 \end{vmatrix} \quad (7.5)$$

ただし, 胴体と足-スケート系については, 図7-2に示したように直交移動座標系を設定した。



[Torso segment]



[Skate-foot system segment]

Figure 7-2
 Definitions of the moving reference frame fixed to the torso and the skate-foot system segments.

胴体の長軸を決める点として、胴体の重心をP1、胸骨上縁点をP2とし、補助ベクトルを決める点には、左肩峰と左大転子を結ぶ線分の中点をP3、同右側をP4とした。足-スケート系セグメントは、足-スケート系セグメントの重心をP1、スケートブレード先端をP2とし、スケートブレード後端(P3)から足関節外果(P4)に向かうベクトルを補助ベクトルとした。そして、上述の①～④の順にしたがってそれぞれ求めた。

2) セグメント角速度の算出

本研究では、1)においてセグメントに固定した直交移動座標系 $\Sigma(oxyz)$ の各軸回りの角速度成分 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ を、以下のようにして求めた。

セグメント角速度 ω は、直交軸の単位ベクトルを i, j, k とするとき、次のように記述できる (和達, 1985)。

$$\omega = \omega_1 i + \omega_2 j + \omega_3 k \quad (7.6)$$

また、角速度ベクトル ω を用いて、次のように書くことができる。

$$\frac{di}{dt} = \omega \times i, \quad \frac{dj}{dt} = \omega \times j, \quad \frac{dk}{dt} = \omega \times k \quad (7.7)$$

ベクトルのスカラー三重積の公式を用いると、上式(7.6)と(7.7)から、各軸回りの角速度成分が次のようにして導出できる (式(7.8))。

$$\left[k \cdot \frac{dj}{dt} = k \cdot (\omega \times j) = \omega \cdot (j \times k) = \omega \cdot i = \omega_1 \text{ より} \right]$$

同様にして、

$$\omega_1 = k \frac{dj}{dt}, \quad \omega_2 = i \frac{dk}{dt}, \quad \omega_3 = j \frac{di}{dt} \quad (7.8)$$

3) 足-スケート系セグメントの慣性モーメントの測定

本研究では足セグメントとスケート靴を1つの剛体とみなし、足-スケート系セグメントとした。そのため、足-スケート系セグメントの重

心位置および慣性主軸回りの慣性モーメントを算出する必要がある。

足—スケート系セグメントの重心位置は、スケート靴の重心位置、足の重心位置および質量比により算出した。

スケート靴の慣性モーメントは物理振子法により測定した。すなわち、糸につるした天秤にスケート靴をのせて微小に振動させ、物理振子の周期 T が式(7.9)で与えられる（戸田，1982）ことを利用してスケート靴の慣性モーメントを測定した。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} \quad (7.9)$$

ここで、 T は振動の周期、 I は慣性モーメント、 m は物体の質量、 g は重力加速度、 l は糸の長さである。ただし、スケート靴の主軸は、 X 軸がスケート靴の鉛直軸、 Y 軸が左右軸、 Z 軸が前後軸（ブレード長軸）とした。

式(7.9)を慣性モーメント I について解くと、次式が得られる。

$$I = mgl \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (7.10)$$

天秤の重心回りの慣性モーメント I_{0cg} および天秤とスケート靴の合成重心回りの慣性モーメント I_{cg} は、天秤のみを振動したときの周期 T_0 および天秤にスケート靴をのせて振動したときの周期 T を測定することにより、平行軸の定理（式(7.11)-(7.12)）から算出できる。ただし、糸をつるした始点から天秤の重心までの距離を l_0 、始点から天秤とスケート靴の合成重心までの距離を l 、天秤の質量を $m_0(0.12\text{kg})$ 、天秤とスケート靴の合成質量を $m(0.905\text{kg})$ とする。

$$I_{0cg} = m_0gl_0 \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 - m_0l_0^2 \quad (7.11)$$

$$I_{cg} = mgl \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 - ml^2 \quad (7.12)$$

これらの差をとることにより、スケート靴の重心回りの慣性モーメント I_{skateCg} を得ることができる (式(7.13)) .

$$I_{\text{skateCg}} = I_{\text{cg}} - I_{\text{ocg}} \quad (7.13)$$

以上の結果、スケート靴の重心回りの主慣性モーメント I_{skateCg} は、X軸が 7.30×10^{-3} 、Y軸が 2.21×10^{-3} 、Z軸が $7.51 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ と算出された。

4) 静止座標系における角運動量の算出

静止座標系 Σ (OXYZ)におけるセグメントの重心回りの角運動量 L_X , L_Y , L_Z は、セグメントの慣性主軸と直交座標系の軸が一致すると仮定して、セグメントの主慣性モーメント I_x , I_y , I_z と直交座標系軸回りの角速度 ω_1 , ω_2 , ω_3 を乗じることにより求めた (式(7.14)) . ただし、これらの角運動量 L_x , L_y , L_z は直交移動座標系軸回りの角運動量なので、座標変換行列 R (直交座標系の方向余弦) により静止座標系軸回りのものに変換した (広瀬, 1987; 式(7.15)) .

$$\begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

$$\begin{bmatrix} L_X \\ L_Y \\ L_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

(4) 三次元関節力および関節トルクの算出

身体を足-スケート系、下腿、大腿、胴体、上腕、前腕、手からなる、三次元剛体リンクモデルとしてモデル化し、セグメント j の近位端からセグメント j に作用する関節力および関節トルクを求めるための運動方程式を導いた。

図7-3は、下腿セグメントに作用する力のフリーボディダイアグラムである。セグメントjの重心の加速度を aX_j , aY_j , aZ_j , セグメントjが遠位側セグメントj-1から受ける力を FX_{j-1} , FY_{j-1} , FZ_{j-1} とし、セグメントjの近位端に作用する関節力 FX_j , FY_j , FZ_j を次式(7.16)-(7.18)から算出した。

[$F_j - F_{j-1} = m_j a_j$ より]

$$FX_j = FX_{j-1} + m_j aX_j \quad (7.16)$$

$$FY_j = FY_{j-1} + m_j aY_j \quad (7.17)$$

$$FZ_j = FZ_{j-1} + m_j aZ_j + m_j g \quad (7.18)$$

関節力 FX_j , FY_j , FZ_j によるセグメントjの重心回りのモーメント MFX_j , MFY_j , MFZ_j と, FX_{j-1} , FY_{j-1} , FZ_{j-1} によるセグメントjの重心回りのモーメント MFX_{j-1} , MFY_{j-1} , MFZ_{j-1} を, 以下の式(7.19)-(7.24)により導く。ただし, セグメントjの重心からセグメントj-1側の端点(遠位端)への位置ベクトルを $r_{j,j-1}$, セグメントjの重心からセグメントj+1側の端点(近位端)への位置ベクトルを $r_{j,j+1}$ とあらわす。

$$MFX_j = \begin{vmatrix} r_{Y,j,j+1} & r_{Z,j,j+1} \\ FY_j & FZ_j \end{vmatrix} \quad (7.19)$$

$$MFY_j = \begin{vmatrix} r_{Z,j,j+1} & r_{X,j,j+1} \\ FZ_j & FX_j \end{vmatrix} \quad (7.20)$$

$$MFZ_j = \begin{vmatrix} r_{X,j,j+1} & r_{Y,j,j+1} \\ FX_j & FY_j \end{vmatrix} \quad (7.21)$$

$$MFX_{j-1} = \begin{vmatrix} r_{Y,j,j-1} & r_{Z,j,j-1} \\ -FY_{j-1} & -FZ_{j-1} \end{vmatrix} \quad (7.22)$$

$$MFY_{j-1} = \begin{vmatrix} r_{Z,j,j-1} & r_{X,j,j-1} \\ -FZ_{j-1} & -FX_{j-1} \end{vmatrix} \quad (7.23)$$

$$MFZ_{j-1} = \begin{vmatrix} r_{X,j,j-1} & r_{Y,j,j-1} \\ -FX_{j-1} & -FY_{j-1} \end{vmatrix} \quad (7.24)$$

そして, セグメントの近位端からセグメントjに作用する関節トルク TX_j , TY_j , TZ_j を以下の式(7.25)-(7.27)により導いた。ここで, $-TX_{j-1}$, $-TY_{j-1}$, $-TZ_{j-1}$ は, セグメントj-1からセグメントjに作用する関節トルク, MX_j ,

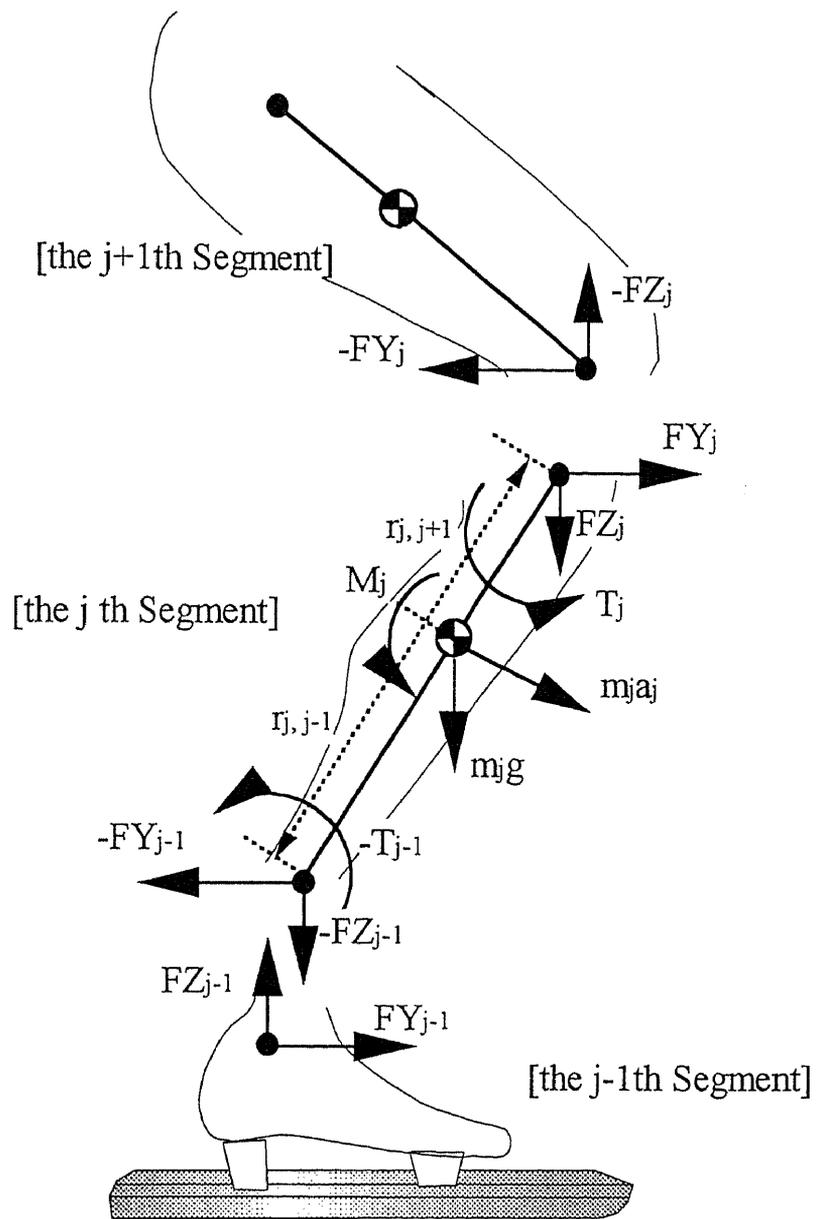


Figure 7-3 Free body diagram of the j -th segment.

MY_j, MZ_j はセグメント j の重心回りのモーメントで、これらのモーメント
 MX_j, MY_j, Mz_j は、前項で算出した角運動量 LX, LY, LZ を時間で微分すること
 により求めた (式(7.28)) .

$$[T_j + MF_j - T_{j-1} + MF_{j-1} = M_j \text{ より}]$$

$$TX_j = TX_{j-1} - MFX_{j-1} - MFX_j + MX_j \quad (7.25)$$

$$TY_j = TY_{j-1} - MFY_{j-1} - MFY_j + MY_j \quad (7.26)$$

$$TZ_j = TZ_{j-1} - MFZ_{j-1} - MFZ_j + MZ_j \quad (7.27)$$

$$MX_j = \dot{LX}_j$$

$$MY_j = \dot{LY}_j \quad (7.28)$$

$$MZ_j = \dot{LZ}_j$$

ただし、足-スケート系セグメントのZ軸回りのモーメントのつり合い
 式にはフリーモーメント Mz' を考慮して以下の式(7.29)を用いた.

$$TZ_j = TZ_{j-1} - MFZ_{j-1} - MFZ_j + MZ_j + Mz' \quad (7.29)$$

さらに本研究では、後述する方法で定義した運動軸回りに変換した関
 節トルクとセグメント間の相対角速度とを乗じることにより、関節トル
 クパワーを算出した.

(5) 運動軸の決定

静止座標系 Σ (OXYZ)において算出された関節力および関節トルクを
 任意の運動座標系に変換した. 図7-4には、本研究において下肢関節の
 運動を分析するために定めた7つの運動軸を示した. 股関節には伸展屈
 曲軸, 内転外転軸, 内旋外旋軸の3軸, 膝関節には伸展屈曲軸と内旋外
 旋軸の2軸, 足関節には足底背屈軸と回内回外軸の2軸を定めた. 各運
 動軸は、大転子(h), 膝中点(k), 足外果(a), 爪先(t), スケート先端(s_1)お
 よび後端(s_2)を用い、以下のように定義した.

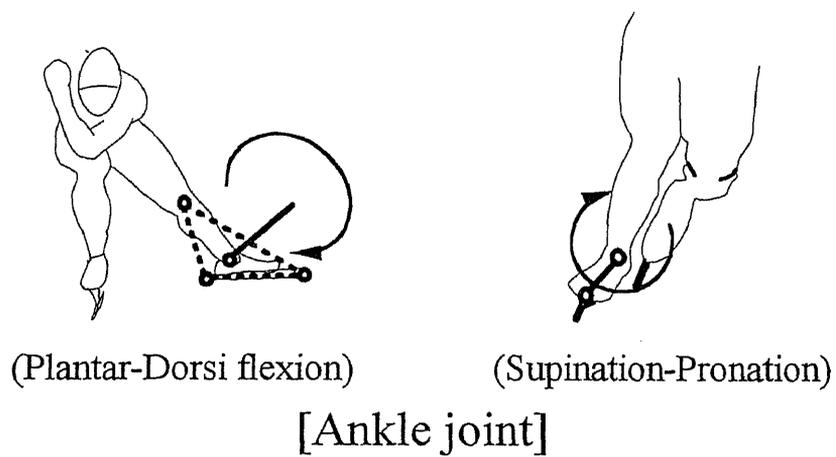
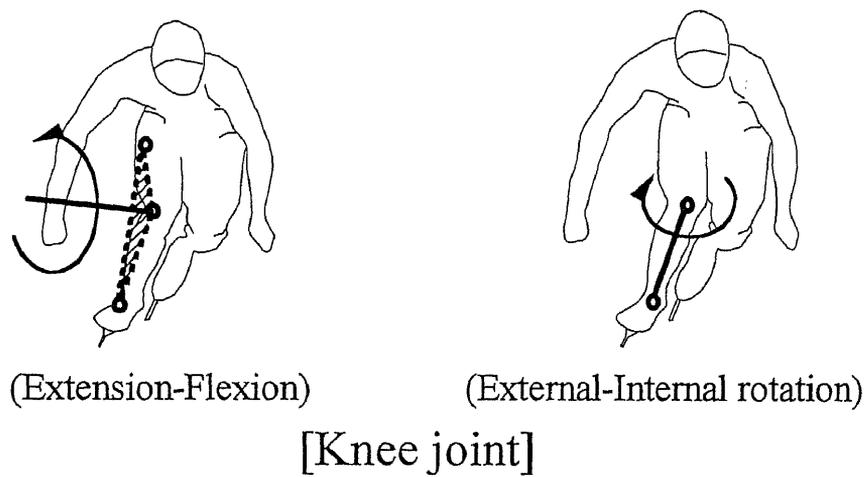
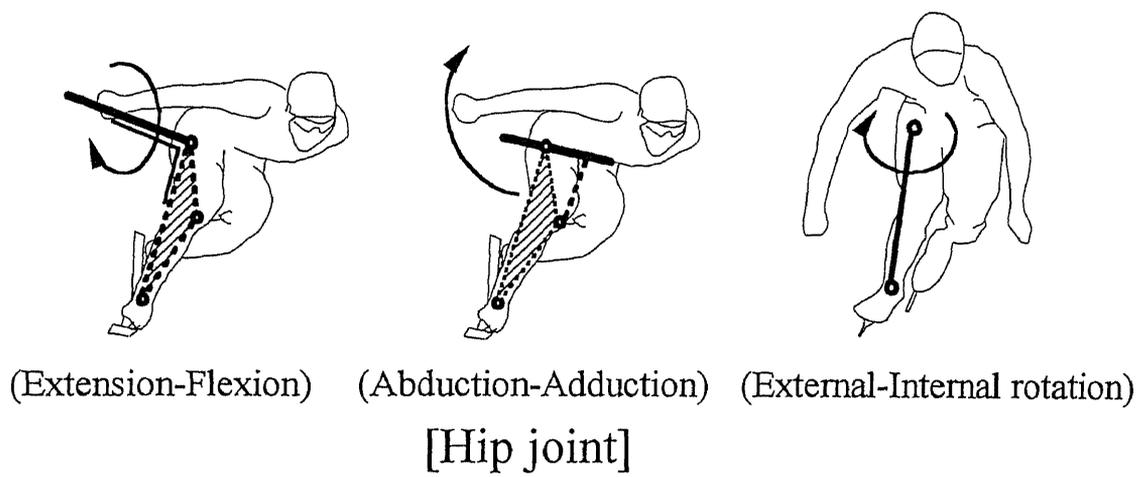


Figure 7-4
Definitions of the motion axes for the lower limb joints.

1) 股関節

- ①伸展屈曲軸は、 $\overline{kh} \times \overline{ka}$ に平行な軸とし、伸展方向を正とする。
- ②内転外転軸は、 \overline{kh} と \overline{ka} の作る平面に平行な水平軸とし、外転方向を正とする。
- ③内旋外旋軸は、 \overline{ah} に平行な軸とし、外旋方向を正とする。

2) 膝関節

- ④伸展屈曲軸は、 $\overline{kh} \times \overline{ka}$ に平行な軸とし、伸展方向を正とする。
- ⑤内旋外旋軸は、 \overline{ak} に平行な軸とし、外旋方向を正とする。

3) 足関節

- ⑥足底背屈軸は、 $\overline{ak} \times \overline{s_1s_2}$ に平行な軸とし、足底屈方向を正とする。
- ⑦回内回外軸は、 \overline{ta} に平行な軸とし、回外方向を正とする。

(6) 滑走動作の局面分け

図7-5には、本研究で用いる滑走動作の局面分けを定義した。1サイクルを、片脚（図では右脚）に着目して、スケートが氷に接触している支持期(support period)と接触していない回復期(recovery period)に分けた。なお、着氷と離氷は、体重の3%の加重を基準としてブレード反力(合力)により決定した。

さらに本研究では、支持期を①着氷から他方のスケートが離氷するまでの二重支持局面(double support phase)、②その後股関節の伸展角速度が50deg/sを超えた時点（以下、脚伸展開始時という）までの滑走路面(gliding phase)、③その後離氷する時点までのプッシュオフ局面(push-off phase)の3つの局面に分けた。回復期は、④離氷後、他方の脚伸展開始時

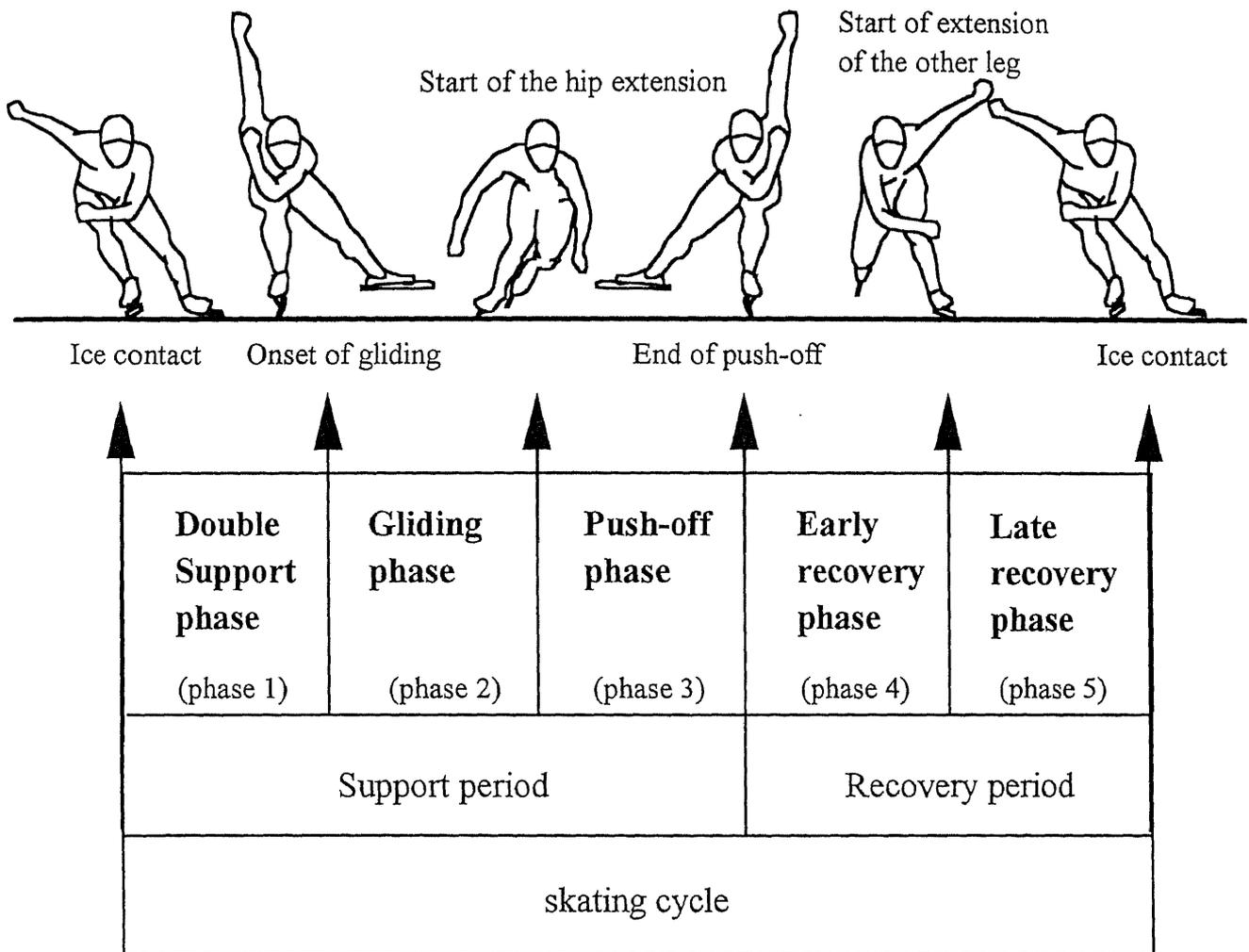


Figure 7-5 Classification of movement phases.

までの回復期前半(early recovery phase), ⑤その後着氷までの回復期後半(late recovery phase)に分けた。

3. 結果および考察

(1) 球座標モデルによる重心の相対運動の検討

ここでは、水平ブレード反力を生み出す要因を明らかにするため、スケートに対する重心の相対加速度のブレード直交方向成分（以下、RCG Accという）を構成する成分について、スケートに対する重心の相対運動に類似していると考えられる球座標モデル(spherical coordinates)を用いて検討する。

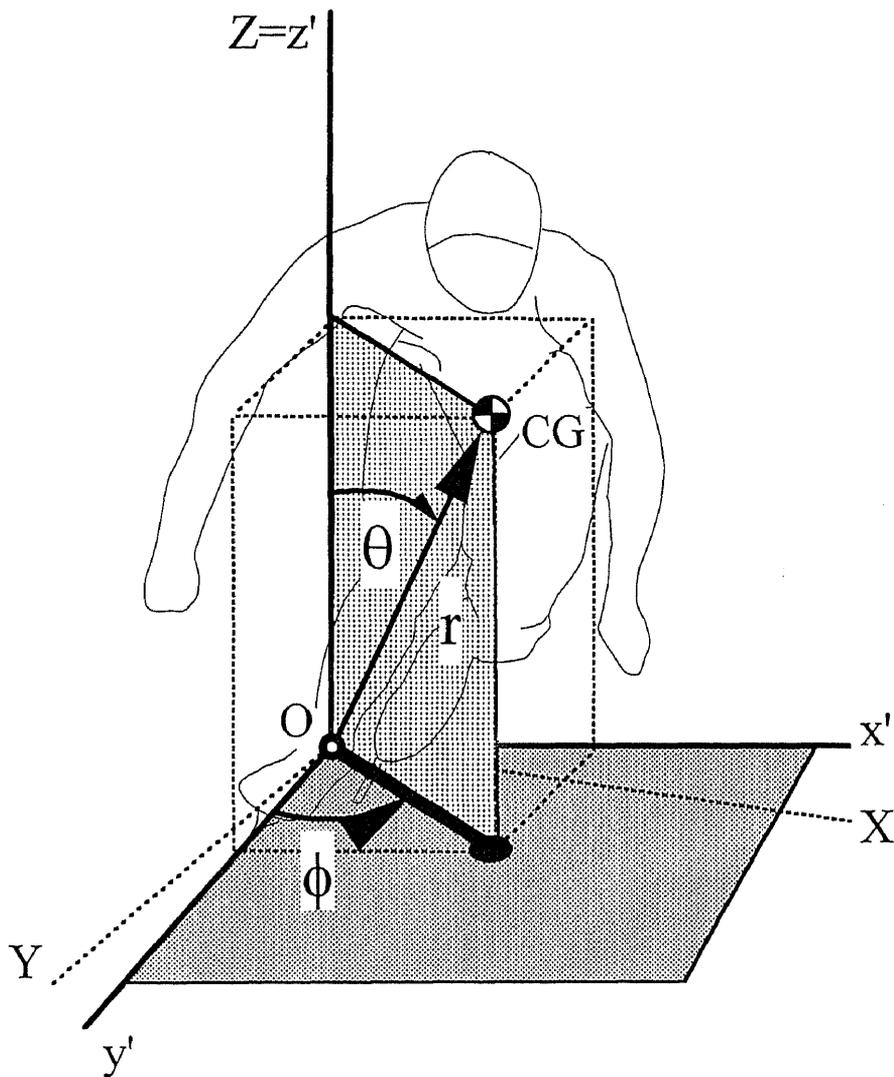
図7-6は、原点を足関節とし、y'軸がブレードの滑走方向に一致する直交座標系 $\Sigma(Ox'y'z')$ （以下、ブレード座標系という）における足関節に対する重心の相対運動を示す球座標モデルを示したものである。

ブレード座標系において足関節に対する重心の相対位置を球座標により表すとき、スケート滑走方向と直交するx'軸方向、すなわちブレードに直交する方向の相対重心加速度 \ddot{x}' は、以下の式で表される(Hughes and Gayload, 1964)。

$$\begin{aligned} \ddot{x}' = & \left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\dot{\phi}^2 \right) \sin\theta \sin\phi + \left(2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} \right) \cos\theta \sin\phi \\ & + \left(r\ddot{\phi} + 2\dot{r}\dot{\phi} \right) \sin\theta \cos\phi + 2r\dot{\theta}\dot{\phi} \cos\theta \cos\phi \end{aligned} \quad (7.30)$$

ただし、重心と足関節を結ぶ線分の長さをr、その線分が鉛直および水平面内でブレード(y'軸)となす角度をそれぞれ θ 、 ϕ とする。

さらに、上式を展開すると、次の8つの項に分けられる。



$$\begin{aligned}
 \text{RCGAcc} = \ddot{x}' = & \underbrace{\ddot{r} \sin \theta \sin \phi}_{(1)} - \underbrace{r \dot{\theta}^2 \sin \theta \sin \phi}_{(2)} - \underbrace{r \dot{\phi}^2 \sin \theta \sin \phi}_{(3)} \\
 & + \underbrace{2 \dot{r} \dot{\theta} \cos \theta \sin \phi}_{(4)} + \underbrace{r \ddot{\theta} \cos \theta \sin \phi}_{(5)} \\
 & + \underbrace{r \ddot{\phi} \sin \theta \cos \phi}_{(6)} + \underbrace{2 \dot{r} \dot{\phi} \sin \theta \cos \phi}_{(7)} \\
 & + \underbrace{2 r \dot{\theta} \dot{\phi} \cos \theta \cos \phi}_{(8)}
 \end{aligned}$$

Figure 7-6
Relative acceleration of CG to the ankle joint(RCGAcc) in the direction perpendicular to skate blade in the moving spherical coordinates ($\Sigma O x' y' z'$).

$$\begin{aligned} \ddot{x}' = & \ddot{r} \sin \theta \sin \phi - r \ddot{\theta} \sin \theta \sin \phi - r \dot{\theta}^2 \sin \theta \sin \phi + 2 \dot{r} \dot{\theta} \cos \theta \sin \phi \\ & + r \ddot{\theta} \cos \theta \sin \phi + r \dot{\phi} \sin \theta \cos \phi + 2 \dot{r} \dot{\phi} \sin \theta \cos \phi + 2 r \dot{\theta} \dot{\phi} \cos \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (7.31)$$

図7-7は、RCGAccと水平ブレード反力（上），および球座標モデルにおける8つの加速度成分のストローク中の変化を水平ブレード反力の発揮パターンが異なる被験者A（左，元世界記録保持者，滑走速度12.8 m/s）と被験者B（右，13.0m/s）の高速滑走試技について示したものである。

上図に示した滑走局面におけるRCGAccと水平ブレード反力をみると，被験者AではRCGAccは負の値を示すがブレード反力は正の値を示し，被験者Bでは逆にRCGAccは正でブレード反力が負を示した．両被験者にみられたRCGAccとブレード反力との差異は，ここで用いた球座標モデルではブレード座標系の原点が固定されており，スケート自体の運動を考慮していないことによると考えられる．

8つの加速度成分とRCGAccとの関係を両被験者で比較すると，ストローク開始時あたりでは，両者ともにRCGAccと同様の変化パターンを示す成分はみあたらなかったが，縦破線で示した脚伸展開始時あたりでは，被験者Aの第6項と被験者Bの第5項がRCGAccと類似した変化パターンを示した．また，プッシュオフ局面についてみると，被験者Aでは第1項と第5項が，被験者Bでは第1項と第6項がRCGAccと類似した変化パターンを示した．

このように，両被験者で共通してRCGAccと類似した変化パターンを示したものは，プッシュオフ局面における第1項の成分のみであった．しかし，このような図から被験者全員について各加速度成分とRCGAccおよびFhの関係を判断し，明らかにすることは難しい．そこで，各加速

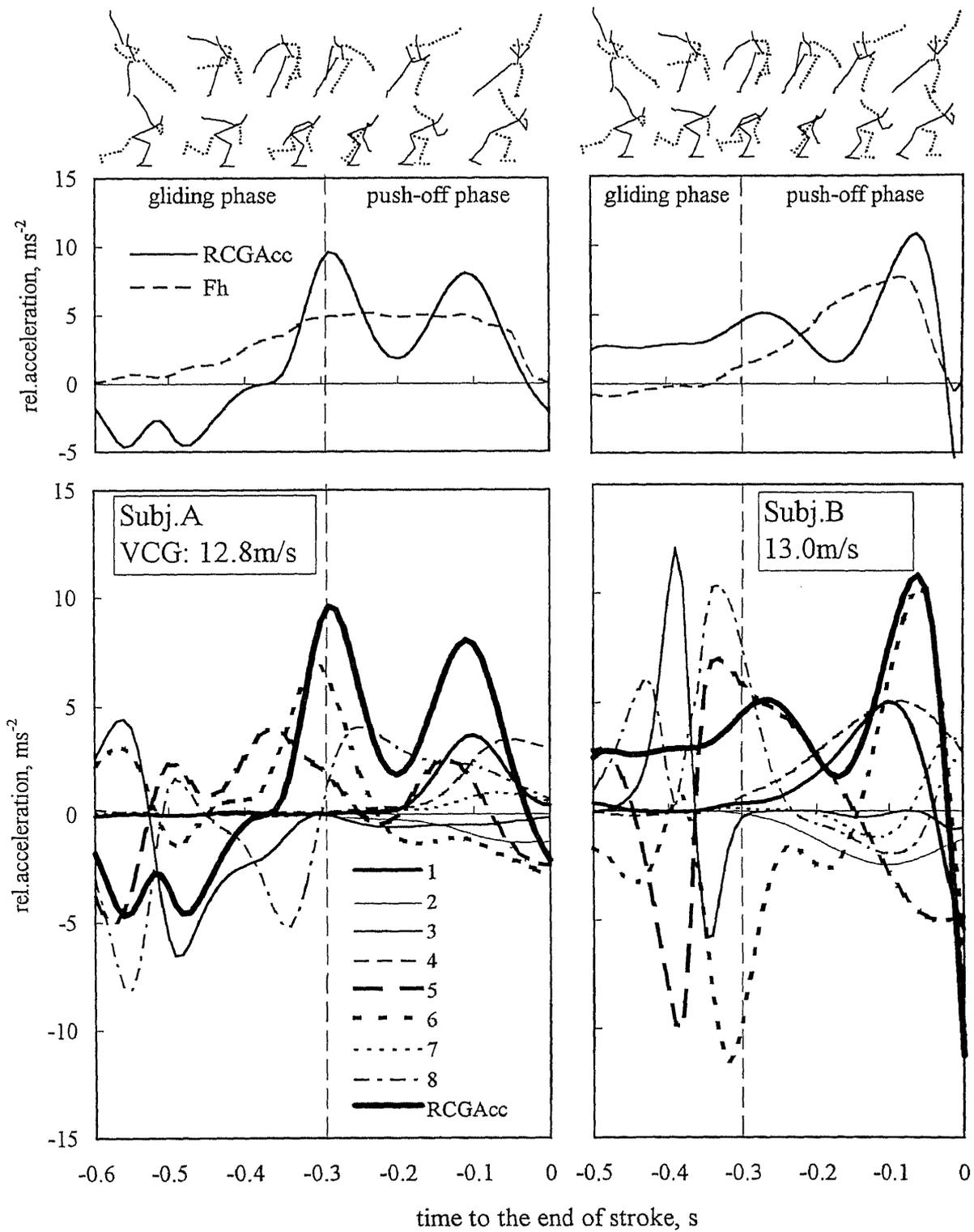


Figure 7-7
 Acceleration components in the spherical coordinate model and horizontal blade reaction force for two typical examples.

度成分，RCGAccおよびFhの各局面における平均値を求め，それらの関係を検討した。

図7-8は，滑走およびプッシュオフ局面における平均RCGAcc，平均Fhと各加速度成分の平均値との相関係数を示したものである。

加速度成分の平均は，平均Fhとの間にはいずれの局面でも有意な相関はみられず，平均RCGAccとの間ではプッシュオフ局面において第1項と第5項が有意な正の相関を示した(第1項： $r=0.857$ ， $p<0.001$ ；第5項： $r=0.629$ ， $p<0.01$)。

プッシュオフ局面においてRCGAccの平均との間に高い相関を示した第1項は，重心と足関節を結ぶ線分の長さの変化に関する加速度成分で，主として脚の伸展動作などによる重心の水平加速度を反映するパラメータであると考えられる。そこで，以下，この成分を伸展加速度成分という。また，第5項は，重心の傾斜による角加速度成分で，主として重心の内傾運動によって生じる水平加速度を表すパラメータと考えられる。そこで，以下，この成分を内傾加速度成分という。

このように，プッシュオフ局面においてRCGAccは，重心の8つの加速度成分から構成されるが，そのうち伸展加速度成分と内傾加速度成分との間に有意な相関がみられたことから，スケートに対する下肢の伸展動作および内傾動作がRCGAccに影響する主な要因と考えられる。

(2) 下肢関節の角速度，関節トルクおよび関節トルクパワー

1) 支持脚

図7-9は，支持脚における股関節の内転外転軸，伸展屈曲軸，内旋外旋軸回りの，図7-10は，膝関節の伸展屈曲軸，内旋外旋軸回りの，図7-11は，足関節の足底背屈軸，回内回外軸回りの，角速度，関節トルクお

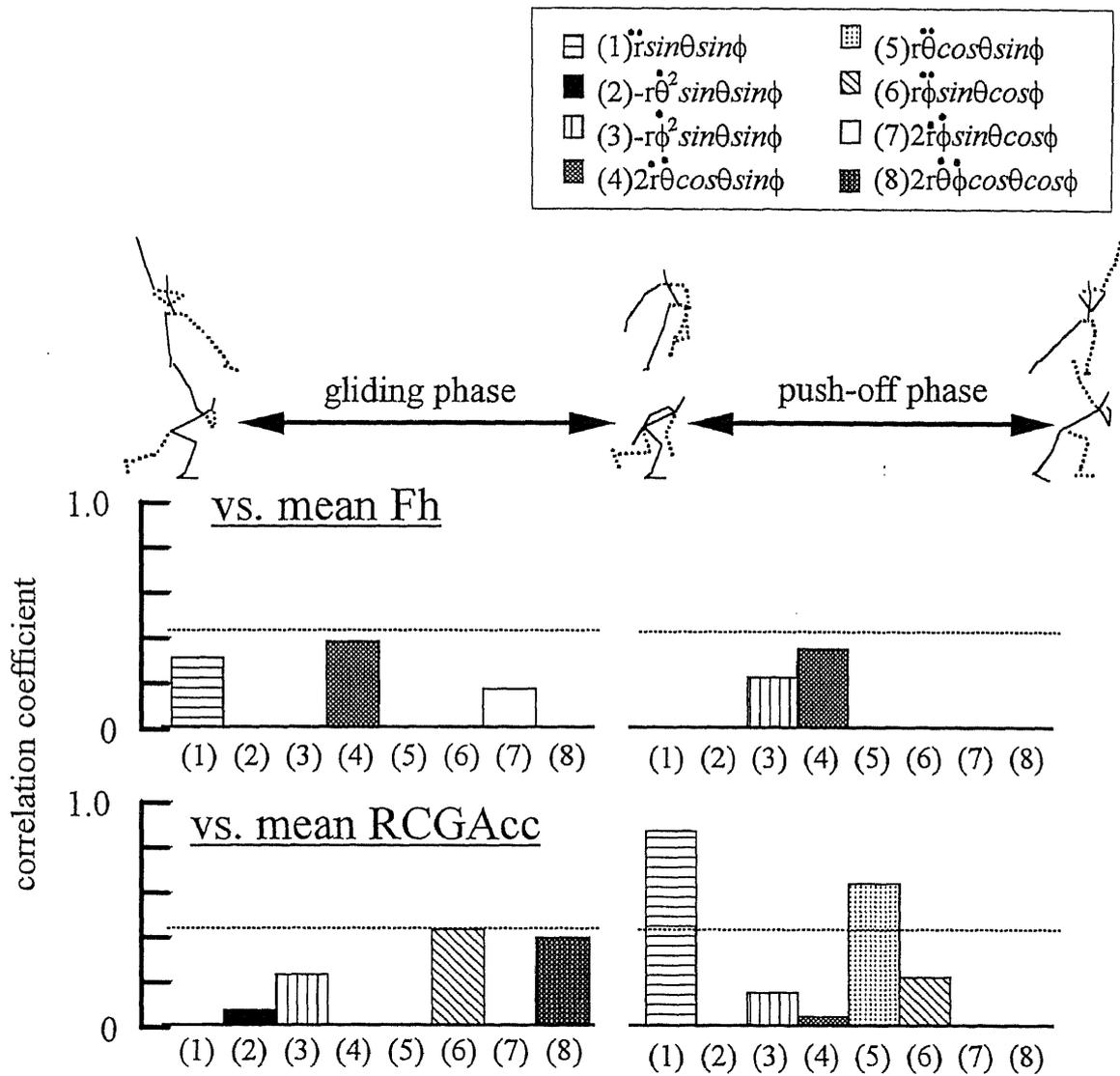


Figure 7-8

Correlation coefficients of the mean acceleration components in the spherical coordinate model to the mean horizontal blade reaction forces(top) and total amount of acceleration component(bottom) at gliding and push-off phases(n=21). Dotted lines indicate significant level at 5%.

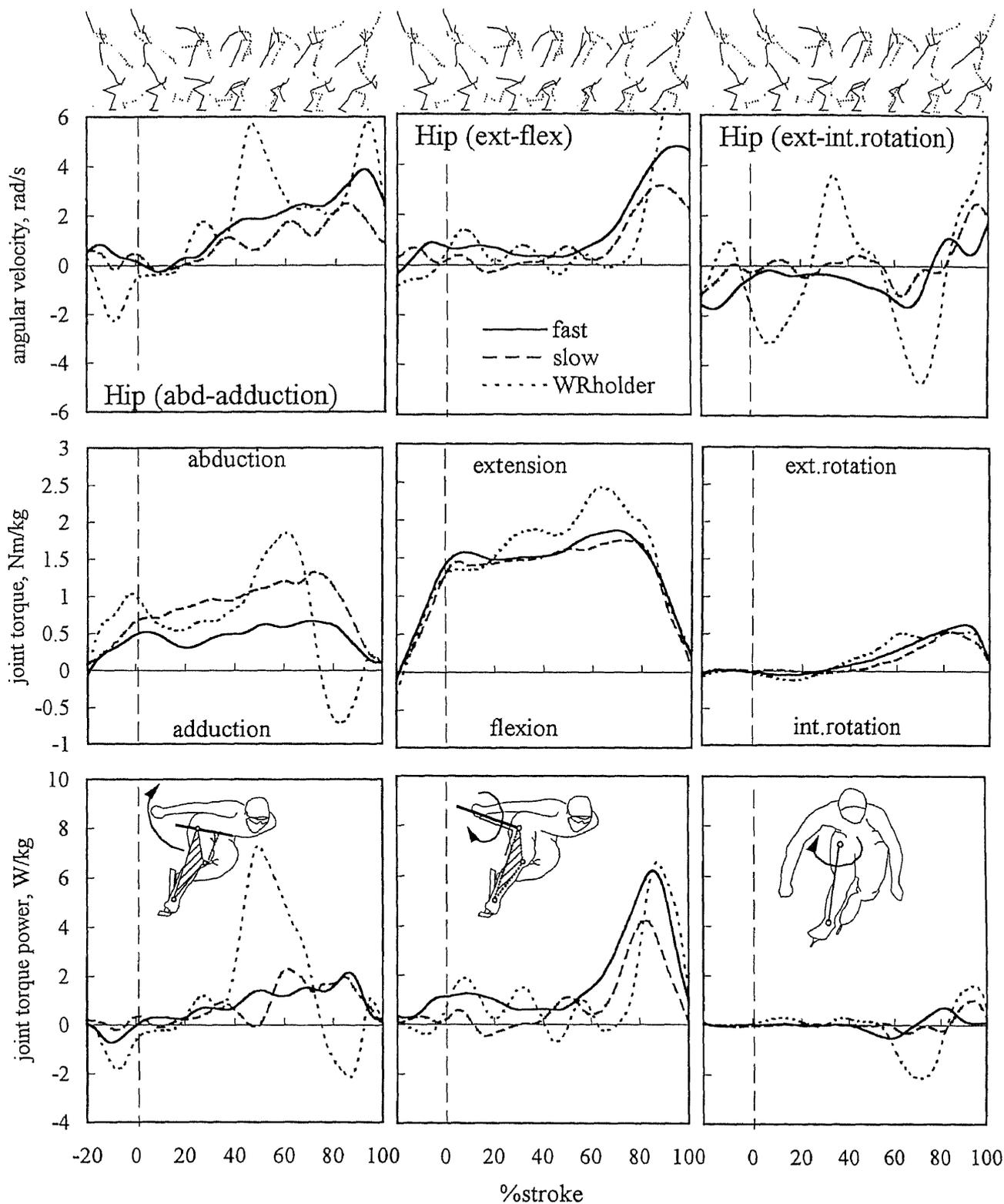


Figure 7-9
 Average angular velocities(top), joint torques(middle) and joint torque powers(bottom) about the hip abduction-adduction(left), extension-flexion(center) and ext-int.rotation(right) axes of the support leg in fast and slow skatings.

よび関節トルクパワーを，高速滑走（実線）と低速滑走（破線），一流選手の高速滑走時（点線）について示したものである．高速滑走と低速滑走の関節トルクおよび関節トルクパワーの値は身体質量あたりの平均値である．横軸はストローク時間を100%として表示し，二重支持局面を-20%から0%に加えた．

①股関節

股関節の内転外転軸(図7-9左列)をみると，高速および低速滑走の角速度は正，すなわち外転方向を示した．外転方向の角速度のピーク値は，滑走速度との間に有意な正の相関を示した($r=0.494$, $p<0.05$)．関節トルクは平均的には，ストローク全般にわたり外転トルクを示したが，高速滑走時が小さい傾向にあった．これは，高速滑走時では負（内転）のトルクを示すものがあり，被験者間にその傾向や大きさにかかなりのばらつきがあったことによると考えられる．関節トルクパワーは，高速と低速滑走で平均的にはほぼ等しい正のパワーを示した．

一流選手（元世界記録保持者）の高速滑走時では，二重支持局面における内転方向の角速度(-2.3rad/s)，外転方向の関節トルク(1.0Nm/kg)，負の関節トルクパワー(-1.8W/kg)が平均に比べて大きかった．また，ストローク中盤における外転方向の角速度(5.7rad/s)および外転トルク(1.8 Nm/kg)が平均より大きく，正のパワー(8.2W/kg)は平均を大きく上回った．ストローク終了直前あたりでは，外転方向の角速度と内転トルクを示しており，関節トルクパワーは負を示した．

股関節の伸展屈曲軸(図7-9中央)をみると，高速および低速滑走ともに伸展方向の角速度が60%ストローク時以降に増大し，ストローク後半にみられる伸展角速度のピーク値は，滑走速度との間に有意な相関を示した($r=0.703$, $p<0.001$)．関節トルクはストローク全般で伸展方向，関節ト

ルクパワーは角速度と同様，60%ストローク時以降大きくなっていった．元世界記録保持者では，ストローク後半の伸展トルク(2.4Nm/kg)が高速滑走平均(1.9Nm/kg)よりも大きかった．

股関節の内旋外旋軸(図7-9右列)をみると，角速度はストローク前半で内旋方向，ストローク終了時には外旋方向を示した．関節トルクはストローク全般にわたり外旋トルクが発揮され，ストローク後半で大きくなった．

②膝関節

膝関節の伸展屈曲軸(図7-10左列)をみると，角速度は，高速および低速滑走ともに60%ストローク時あたりでわずかに屈曲方向を示した後，伸展方向の角速度が70%ストローク時以降で大きくなった．伸展角速度のピーク値は，滑走速度との間に有意な相関を示した($r=0.445$, $p<0.05$)．関節トルクは，ストローク全般で伸展トルクを示し，関節トルクパワーは角速度とほぼ同様の变化パターンを示した．股関節と膝関節で高速滑走試技の伸展トルクの大きさを比べると，膝関節伸展トルクのピーク値($1.1\pm 0.7\text{Nm/kg}$)は股関節伸展トルク($1.9\pm 0.8\text{Nm/kg}$)のほぼ半分であった．

膝関節の内旋外旋軸(図7-10右列)をみると，角速度は小さいがストローク前半で外旋方向，ストローク終了時には内旋方向を示した．関節トルクはストローク全般にわたり外旋トルクが発揮されストローク後半で増加していた．

③足関節

足関節の足底背屈軸(図7-11左列)をみると，角速度は高速および低速滑走ともに20%ストローク時あたりから背屈方向(負)を示し，70%ストローク時あたりで負のピーク(高速： -1.5 ± 1.2 vs. 低速： -1.4 ± 1.0 r

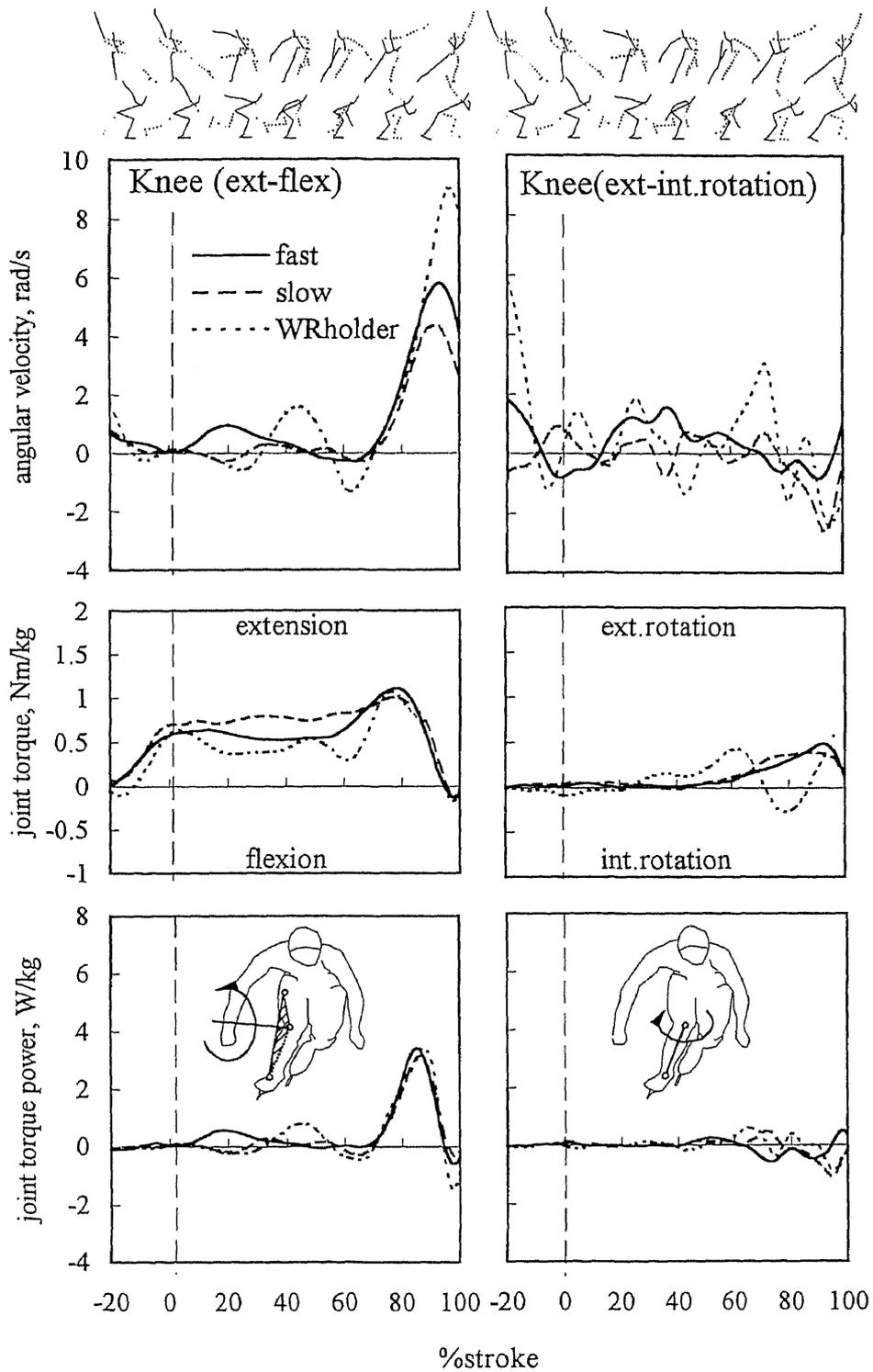


Figure 7-10
 Average angular velocities(top), joint torques(middle) and joint torque powers(bottom) about the knee extension-flexion(left) and ext-int.rotation(right) axes of the support leg in fast and slow skatings.

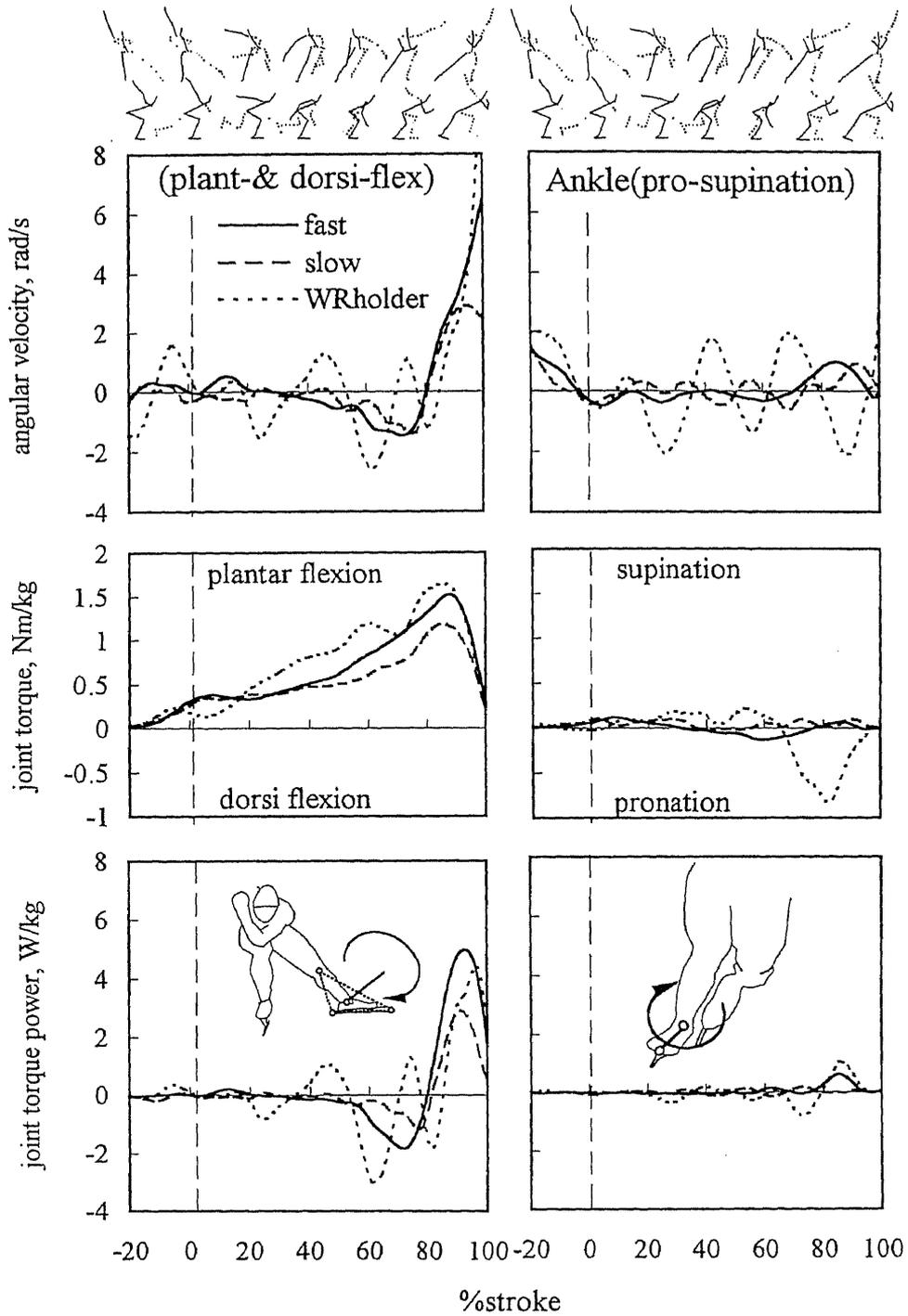


Figure 7-11

Average angular velocities(top), joint torques(middle) and joint torque powers(bottom) about the plantar-and dorsi-flexion(left) and pronation-supination(right) axes of the support leg in fast and slow skatings.

ad/s)に達し、その後底屈方向（正）を示した。関節トルクはストローク全般で足底屈トルクを示し、ストローク開始時から徐々に大きくなっていった。関節トルクパワーは角速度とほぼ同様の変化パターンを示し、60%から80%ストローク時あたりで一時的に負になった後、大きな正のパワーが発揮されていた。

足関節の回内回外軸(図7-11右列)をみると、角速度、関節トルク、関節トルクパワーは、いずれも小さかった。関節トルクはストローク前半でわずかに回外トルク（正）、ストローク後半で回内トルク（負）を示した。

そして、これらの測定項目と滑走速度の関係を検討してみると、股関節の外転および伸展の角速度、膝関節の伸展角速度のピーク値と滑走速度との間に有意な正の相関がみられた。しかし、関節トルクおよび関節トルクパワーのピーク値と滑走速度との間に有意な相関はみられなかった。この原因の1つとして、滑走速度はストローク中の速度変化とストローク開始時の速度によって決まるので、滑走速度が加速の大きさと必ずしも一致しないことがあげられる。

2) 遊脚

図7-12は、遊脚における股関節、図7-13は膝関節、図7-14は足関節における各運動軸回りの、角速度、関節トルクおよび関節トルクパワーを、高速滑走（破線）および低速滑走（点線）および一流選手（細い実線）について示したものである。なお、遊脚の関節トルクおよび関節トルクパワーはブレード反力のデータがなくても算出できるので、第Ⅲ章で得られた500m競技会における22名の平均（実線、平均速度14.18m/s）を加えて示した。

①股関節

股関節の内転外転軸(図7-12左列)をみると、角速度は70%ストローク時あたりまで内転方向(負)、その後外転方向を示した。内転および外転方向の角速度のどちらのピーク値も滑走速度と有意な相関を示した(内転： $r=-0.875$, $p<0.001$; 外転： $r=0.447$, $p<0.01$)。関節トルクは40%ストローク時までが内転トルク、その後外転トルクが発揮されていた。それらのピーク値は滑走速度と有意な相関を示した(内転トルク： $r=-0.375$, $p<0.05$; 外転トルク： $r=0.784$, $p<0.001$)。関節トルクパワーはストローク前半で正、ストローク中盤で負のパワーを示し、いずれのピーク値も滑走速度と有意な相関を示した(正： $r=0.685$, $p<0.001$; 負： $r=-0.521$, $p<0.001$)。

回復期前半で、滑走速度が大きいほど股関節の内転トルクが大きかったことは、回復期前半で股関節のトルクが遊脚の引き付け動作を加速し、滑走局面の所要時間を小さくすることに役立っていたことを示すと考えられる。また、回復期後半でみられる股関節の外転トルクが滑走速度と有意な相関を示したことは、回復期前半になされた遊脚の引き付け動作を止め、引き続き支持脚のプッシュオフ動作に伴う遊脚の側方への振り出し動作を生み出すためと考えられる。

股関節の伸展屈曲軸(図7-12中央)をみると、角速度、関節トルクともにストローク全般にわたり屈曲方向、関節トルクパワーは正の値を示した。屈曲方向(負)の角速度のピーク値($r=-0.741$, $p<0.001$)および正の関節トルクパワーのピーク値($r=0.783$, $p<0.001$)はともに滑走速度と有意な相関を示した。

股関節の内旋外旋軸(図7-12右列)をみると、角速度はほぼ内旋方向(負)を示し、競技会の平均で著しく大きかった。関節トルクは外旋ト

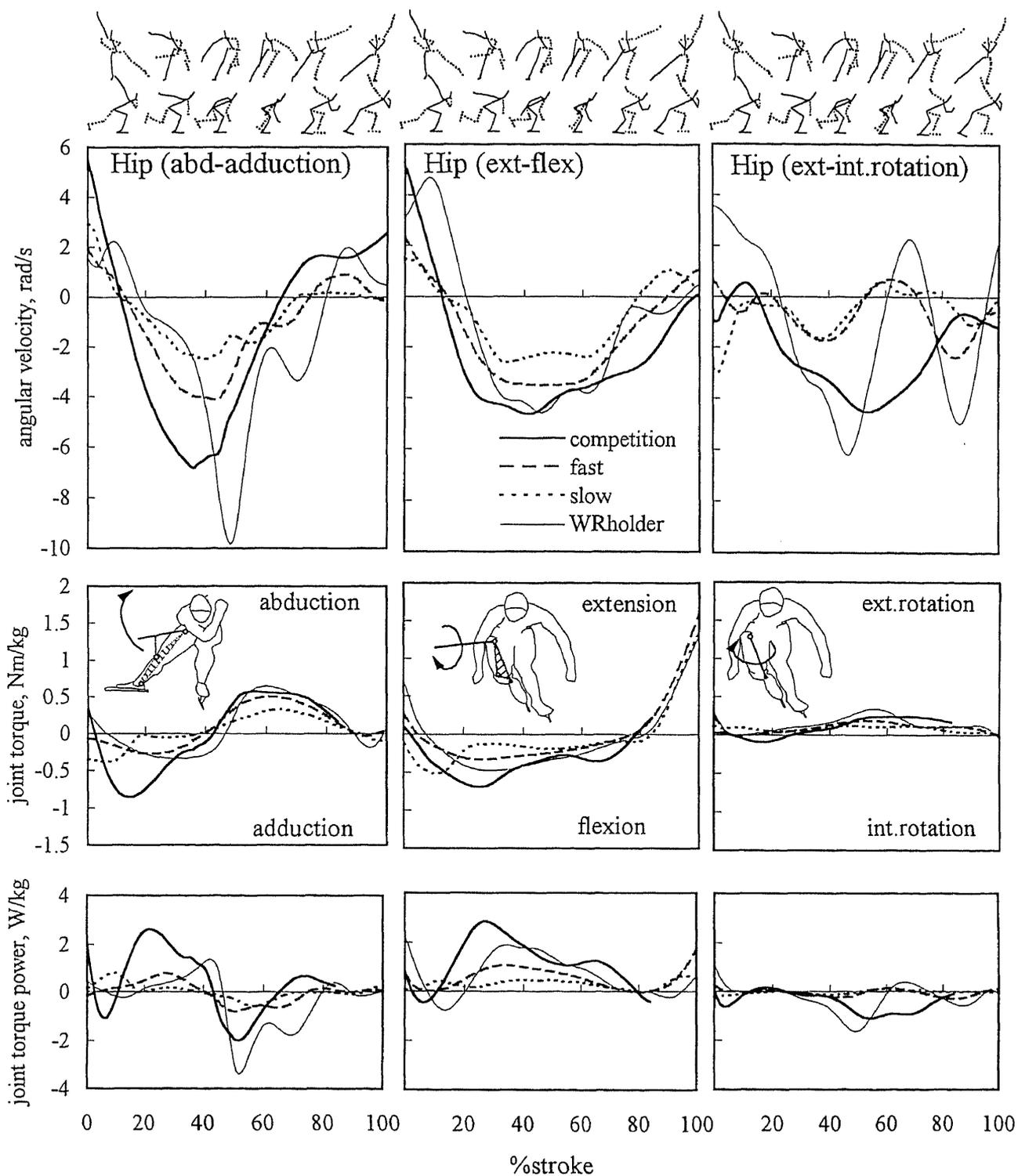


Figure 7-12

Average angular velocities(top), joint torques(middle) and joint torque powers(bottom) about the hip abduction-adduction(left), extension-flexion(center) and ext-int.rotation(right) axes of the free leg.

ルク（正）を示したが，いずれも小さかった．関節トルクパワーは，競技会の平均でのみ40%から80%ストローク時あたりで負のパワーを示したが，高速および低速試技ではほとんど発揮されていなかった．

②膝関節

膝関節の伸展屈曲軸(図7-13左列)をみると，角速度はストローク前半で屈曲方向（負），ストローク後半で伸展方向を示した．屈曲方向の角速度のピーク値は，滑走速度と有意な相関を示した($r=-0.864$, $p<0.001$)．関節トルクは角速度と逆のパターンを示し，ストローク前半では伸展トルク（正），後半で屈曲トルク（負）を示し，屈曲トルクのピーク値は，滑走速度と有意な相関を示した($r=-0.716$, $p<0.001$)．関節トルクパワーはストローク前半で伸展トルクによる負のパワー，後半で屈曲トルクによる負のパワーを示し，いずれも競技会の平均で大きかった．

回復期後半で膝関節屈曲トルクが滑走速度が大きい試技で大きかったことは，この局面で股関節トルクでなされた大腿の前方振り出し動作の影響を受けて下腿が前方に振り出されるのを止める働きをしたためと考えられる．

膝関節の内旋外旋軸(図7-13右列)をみると，角速度はストローク中盤で内旋方向（負），ストローク後半で外旋方向を示したが，関節トルクおよび関節トルクパワーは著しく小さかった．

③足関節

足関節の足底背屈軸(図7-14左列)をみると，角速度はストローク中盤まで足背屈方向（負），その後足底屈方向（正）を示した．足背屈方向の角速度は30%ストローク時あたりと60%ストローク時あたりにピークをもつ二峰性を示した．関節トルク，関節トルクパワーはともに小さかった．

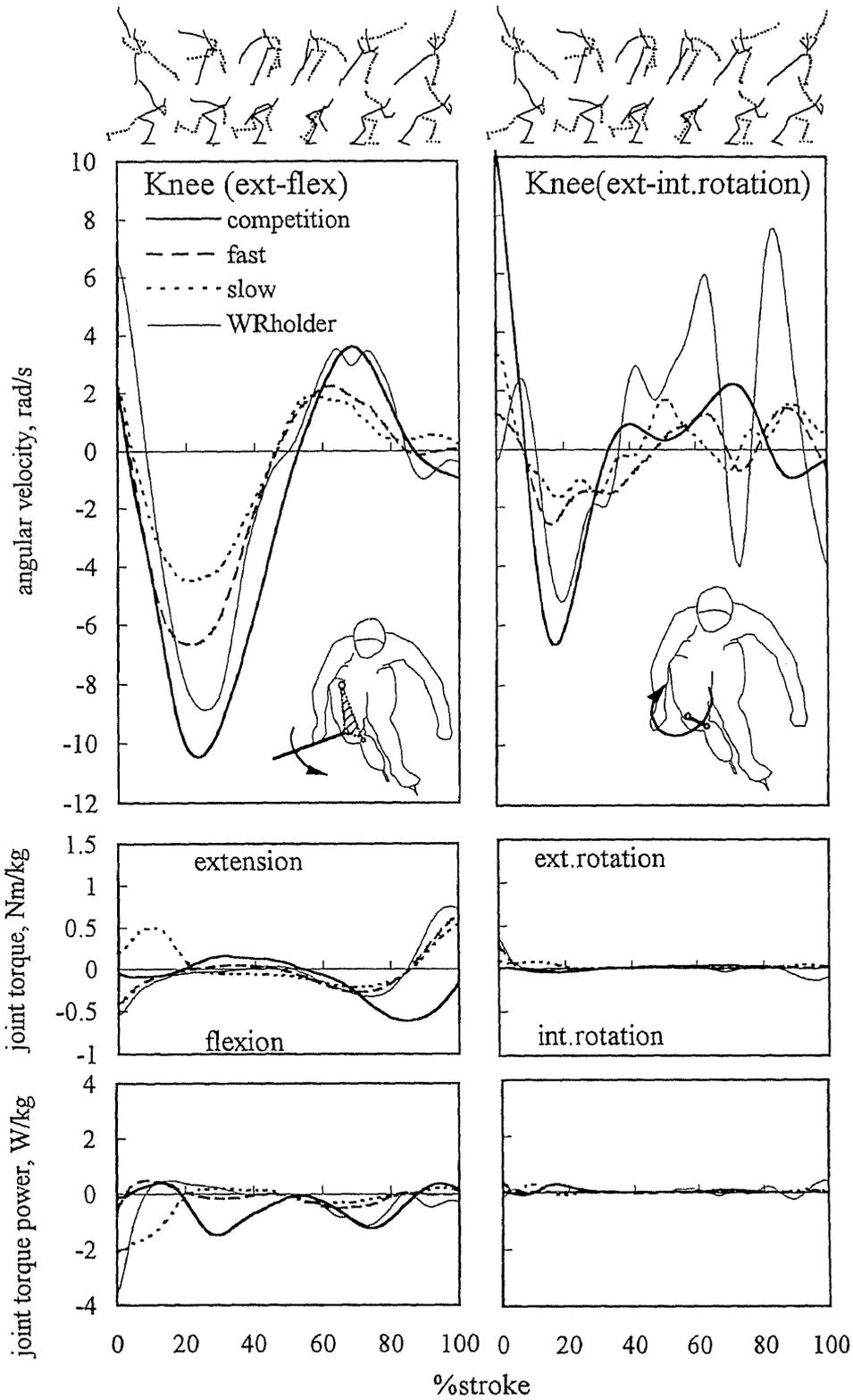


Figure 7-13
Average angular velocities(top), joint torques(middle) and joint torque powers(bottom) about the knee extension-flexion(left) and ext-int.rotation(right) axes of the free leg.

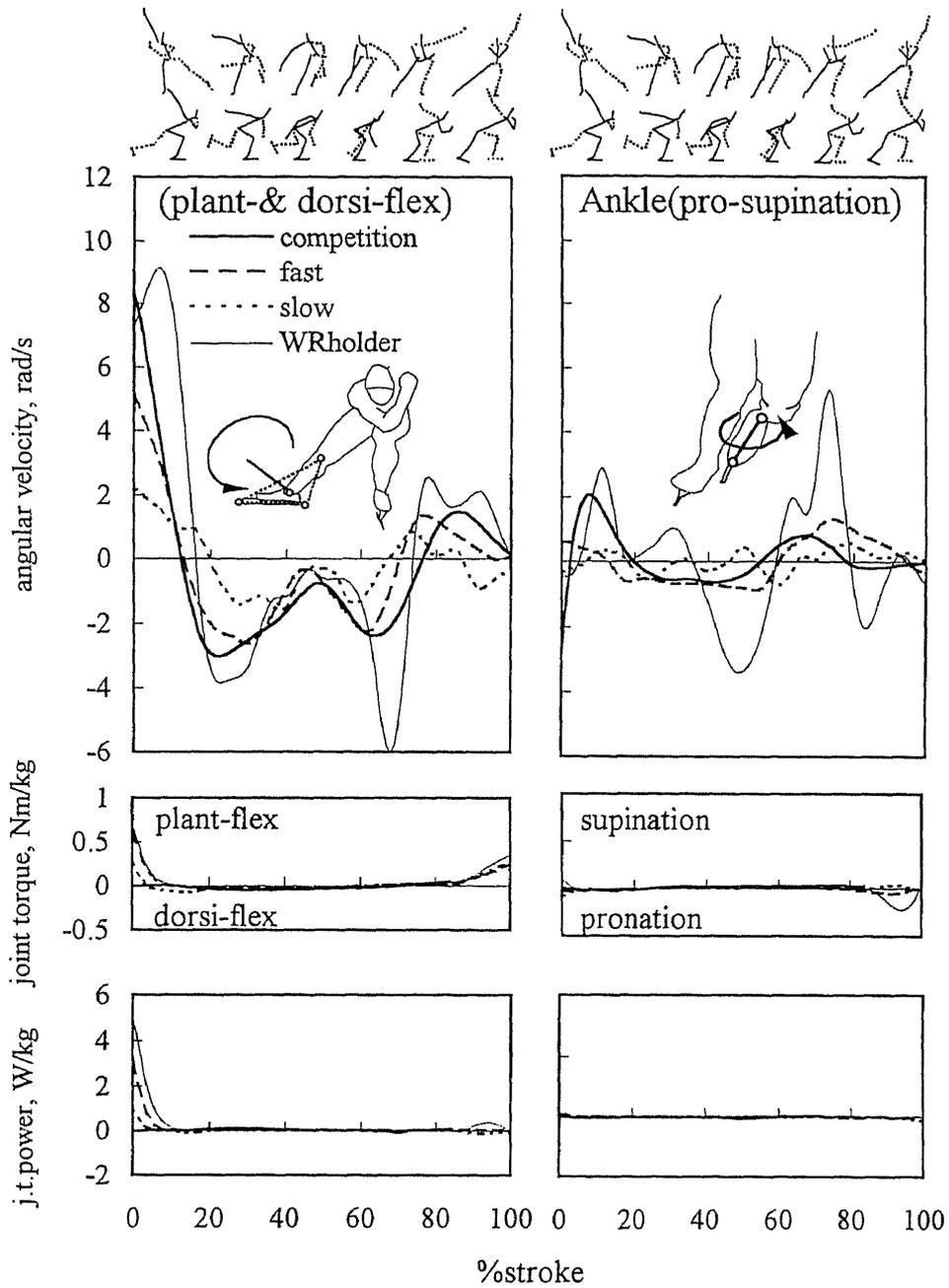


Figure 7-14

Average angular velocities(top), joint torques(middle) and joint torque powers(bottom) about the plantar-and dorsi-flexion(left) and pronation-supination(right) axes of the free leg.

足関節の回内回外軸(図7-14右列)をみると、角速度はストローク前半で回内方向（負）、後半で回外方向（正）を示した。関節トルク、関節トルクパワーはともに著しく小さかった。

このように、遊脚における関節トルクの値は支持脚に比べて小さいが、支持脚とは異なり、関節トルクと滑走速度との間に有意な相関がみられた場合が多かった。また、股関節の内転トルクは、回復期前半では遊脚を引き付ける、股関節の外転トルクは、回復期後半では遊脚を振り出す、膝関節の屈曲トルクは、下腿の前方振り出しを抑制する役割を果たしていると考えられる。

（3）支持脚の関節トルクと水平ブレード反力およびRCGAccとの関係

1）関節トルクと水平ブレード反力

図7-15には、滑走およびプッシュオフ局面における各運動軸回りの平均関節トルクと平均水平ブレード反力との関係を示した。黒丸は高速滑走試技、白丸は低速滑走試技である。

滑走局面（左列）についてみると、股関節の外転トルク（最上段）と平均ブレード反力の高い相関があった($r=0.838$, $p<0.001$)。また、足関節の回内回外軸回りの平均トルクとの間にも5%水準で有意な関係があったが、そのトルク値は小さかった。

プッシュオフ局面（右列）をみると、ブレード反力と各関節トルクは、ともに滑走局面に比べて大きい傾向にあったが、有意な相関を示したものはなかった。

滑走局面でみられた股関節の外転トルクと平均ブレード反力の高い正の相関関係は、この局面における股関節の外転トルクがブレード反力の発揮に大きく関わっていることを示すと考えられる。

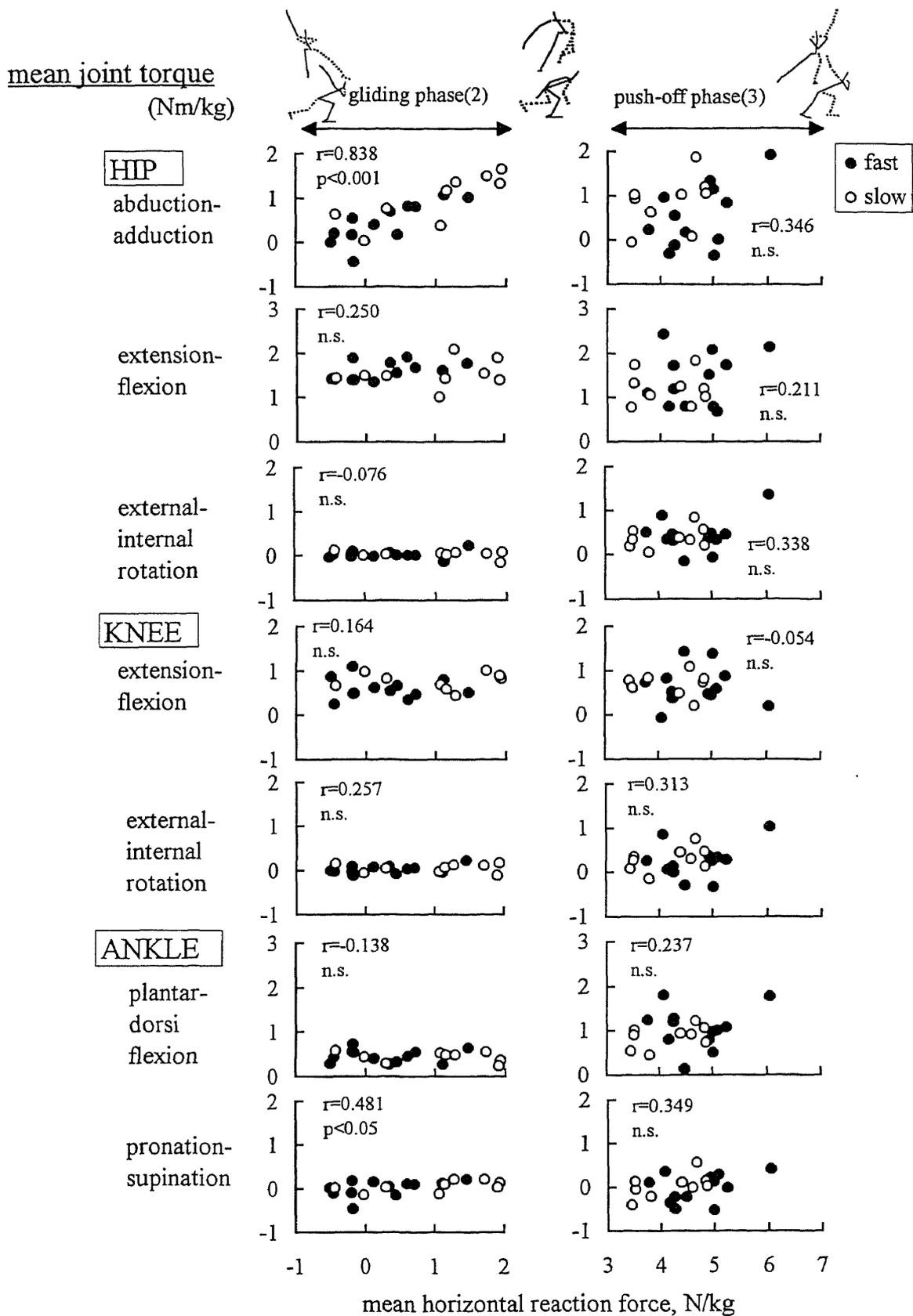


Figure 7-15 Relationships between mean horizontal reaction forces and mean joint torques of the support leg at gliding and push-off phases.

プッシュオフ局面でいずれの関節トルクも平均ブレード反力と有意な相関を示さなかった原因として、この局面では、スケートの曲線運動による求心力成分に被験者間のばらつきが大きかったことがあげられる（V章）。すなわち、ブレード反力は、身体の動きの他に、既に述べたように、求心力によっても影響を受け、この求心力には大きなばらつきがみられた。そのため、ブレード反力の作用方向と下肢関節との関係が被験者間で大きく異なり、関節トルクの発揮パターンにも大きなばらつきが生じたと考えられる。

このように考えると、プッシュオフ局面におけるブレード反力発揮と関節トルクとの関係を明らかにするには、求心力成分のブレード反力への影響について検討する必要がある。しかし、ブレードに作用する求心力成分のみを精度よく測定することは計測技術上難しい。そこで、身体、特に下肢の動作の効果を直接的に反映するスケートに対する重心の相対加速度とブレード反力との関係を検討しておく必要があると考えられる。

図7-16は、高速および低速滑走試技におけるRCGAcc（実線）とブレード反力（破線）の平均値を示したものである。

RCGAccとブレード反力による加速度を比較すると、両試技ともにRCGAccとブレード反力による加速度の変化傾向は、かなり一致している。しかし、完全に一致しているとはいえず、プッシュオフ局面でブレード反力による加速度がRCGAccより大きい傾向にある。

ブレード反力による加速度がRCGAccより大きいことは、ブレードの曲線運動による正（内向き）の求心力成分がブレードをスケーターに近づけるように加速するのでRCGAccが小さくなるためと考えられる。

このように、プッシュオフ局面におけるブレード反力による加速度に

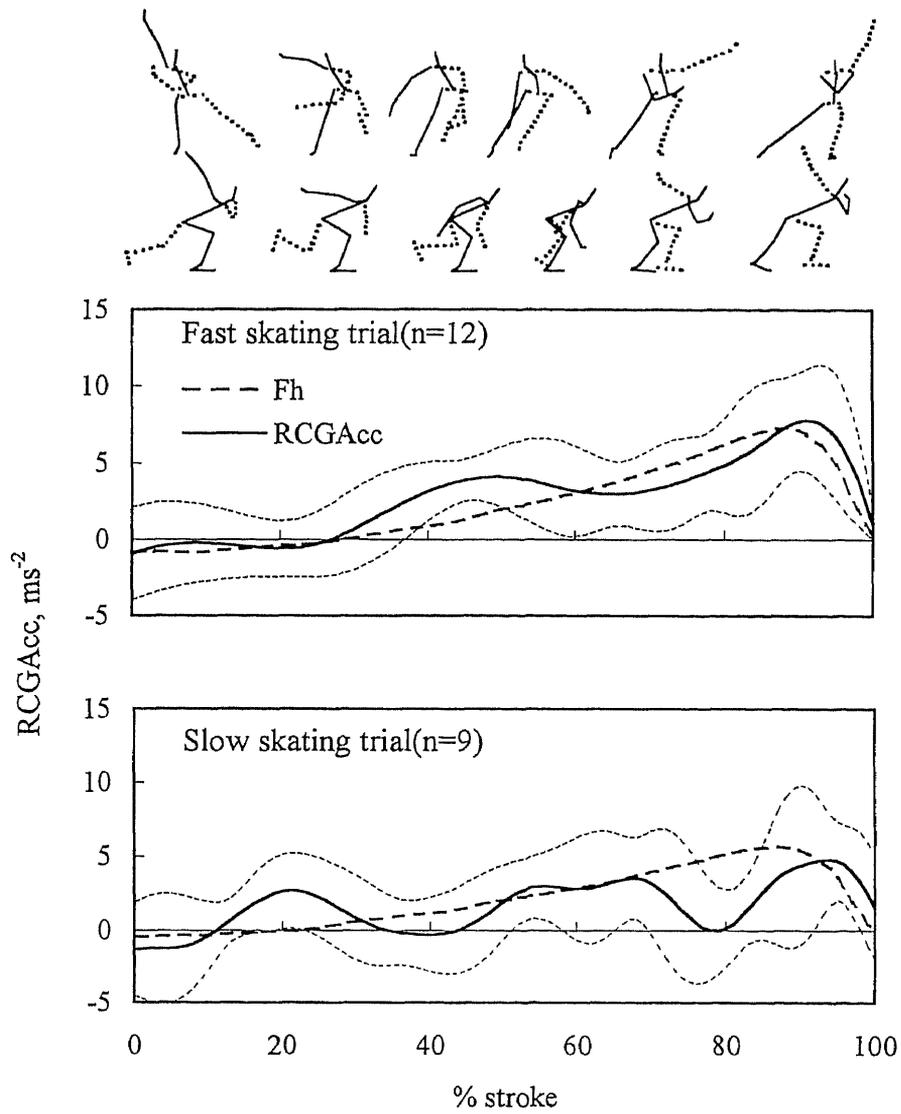


Figure 7-16
 Relative acceleration of the CG to the skate in the plane perpendicular to
 gliding direction and horizontal blade reaction force of fast(top) and
 slow(bottom) skating trials.

は、下肢関節トルクとともに、スケート自体の曲線運動から生じる求心力という身体、特に下肢の動作以外の要因が関与していることがわかる。しかし、ブレード反力による加速度とRCGAccの変化傾向はかなり一致していたので、下肢の動作がより直接的に反映されるスケートに対する重心の相対加速度と関節トルクの関係を検討することによって加速動作のメカニズムを明らかにすることができると考えられる。

2) 関節トルクとRCGAcc

図7-17は、プッシュオフ局面におけるRCGAccを構成する8つの加速度成分の平均値と平均関節トルクとの相関係数を示したものである。図中の点線は5%の有意水準を表している。

図7-17に示したように、RCGAccと股関節の伸展トルク($r=0.445$, $p<0.05$)が有意な相関を示した。また、伸展加速度成分(第1項)と股関節の伸展トルク($r=0.529$, $p<0.05$)、内傾加速度成分(第5項)と股関節の外転トルク($r=0.450$, $p<0.05$)および伸展トルク($r=0.460$, $p<0.05$)が有意な正の相関を示した。

これらの結果から、プッシュオフ局面では、股関節の伸展トルクは、大腿を伸展して質量の大きな体幹部を支持スケートに対して前方に加速し、RCGAccや伸展加速度成分を大きくするのに貢献していると考えられる。

また、内傾加速度成分は重心の内傾を生み出す回転運動の角加速度によって生じる成分である。したがって、内傾加速度成分と股関節の外転トルクおよび伸展トルクの間に見られた正の相関は、これらのトルクによって支持脚の回転運動が生み出され、それによって内傾加速度成分が生じたことを示すと考えられる。

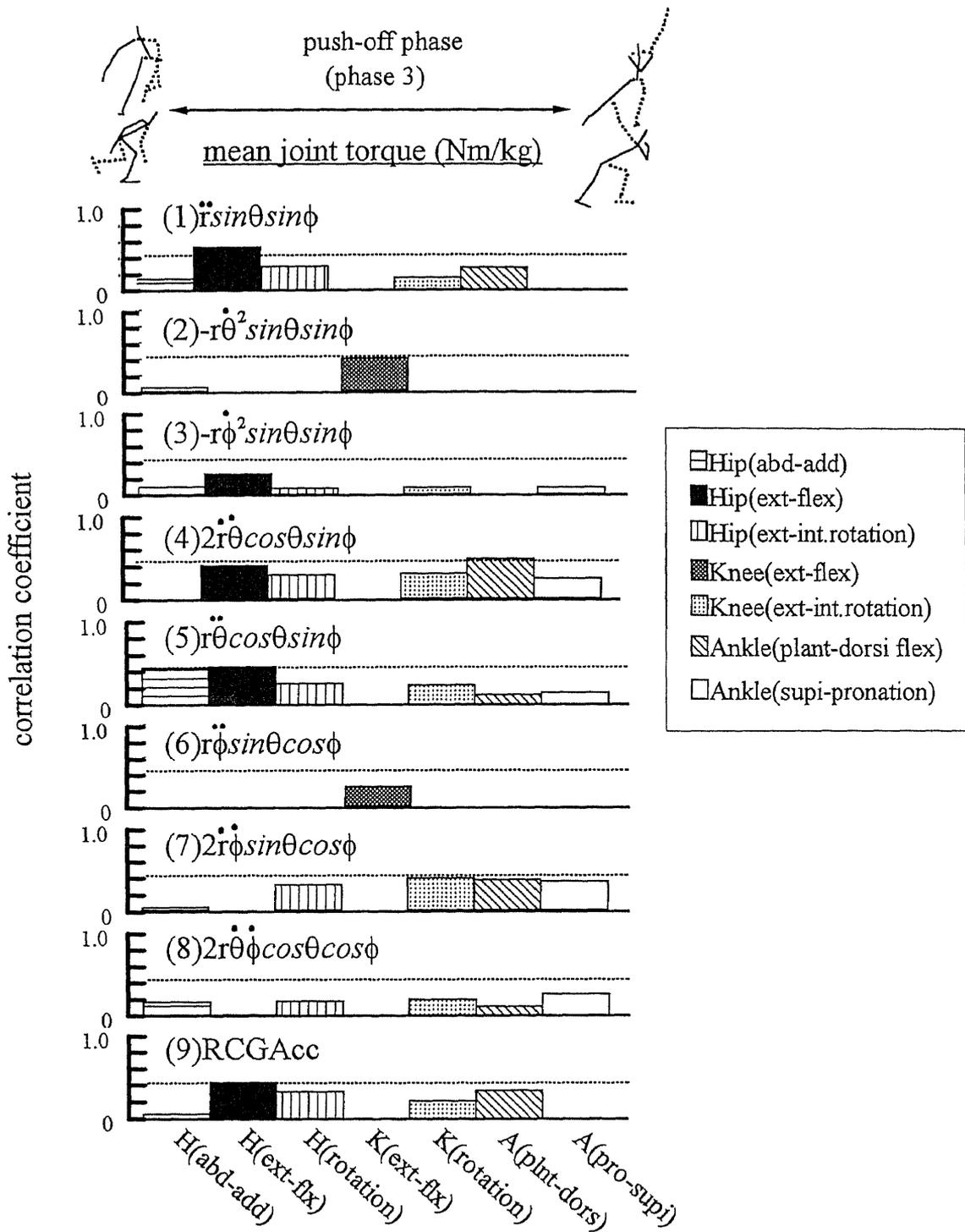


Figure 7-17
 Correlation coefficients of mean joint torques of support leg to the mean acceleration components in the model of spherical coordinates at push-off phase (n=21). Broken lines indicate significant level at 5%.

支持脚の関節トルクとブレード反力およびRCGAccとの関係を検討した結果、ブレード反力に対しては、滑走局面では股関節の外転トルクの関与が最も大きい、プッシュオフ局面では一定の傾向を見出せなかった。しかし、プッシュオフ局面におけるRCGAccのうち、伸展加速度成分が股関節の伸展トルクと、内傾加速度成分が股関節の外転および伸展トルクと有意な相関を示し、これらのトルクが滑走動作を生じる主要因であることが示唆された。

(4) 倒立振り子モデルによる滑走動作のメカニズムの検討

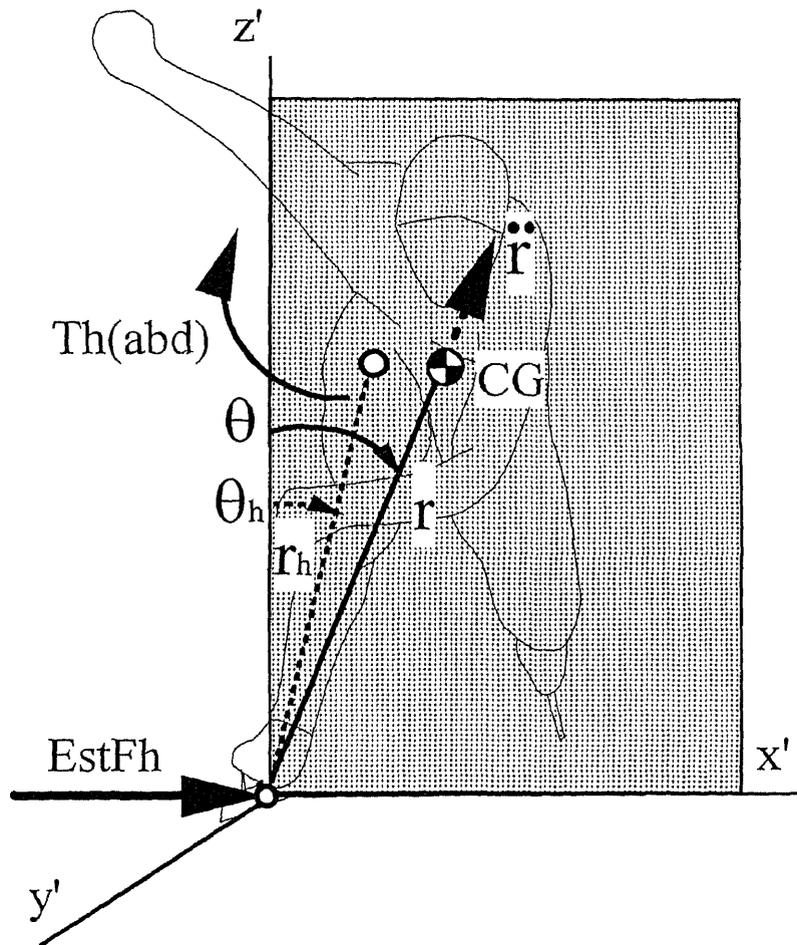
これまで、股関節の外転および伸展トルクによる重心の内傾運動と伸展運動が、水平ブレード反力やRCGAccに貢献することを統計的に検討してきた。そこで、図7-18に示すような、支持スケートを支点とする倒立振り子モデルにより、股関節の外転トルクと、伸展運動をあらわす伸展加速度成分を入力値として水平ブレード反力を推定し、滑走動作による水平ブレード反力発揮のメカニズムについて検討した。

推定ブレード反力EstFhは、股関節の外転トルクTh(abd)によってブレードに作用する力の水平成分と、伸展加速度 \ddot{r} の水平成分の和として求めた(7.32)。

$$\text{EstFh} = \frac{\text{Th}(\text{abd})}{r_h} \cos\theta_h + m \ddot{r} \sin\theta \quad (7.32)$$

ただし、 r_h は x' - z' 面内における股関節とブレード中点を結ぶ線分の長さ、 θ は x' - z' 面内における重心の内傾角、 θ_h は x' - z' 面内における線分 r_h の内傾角、 m は身体質量である。

図7-19は、低速および高速試技で実測されたブレード反力と、外転トルクによる推定成分（上段）、伸展加速度による推定成分（中段）、推



$$\text{EstFh} = \frac{\text{Th}(\text{abd})}{r_h} \cos\theta_h + m \ddot{r} \sin\theta$$

Figure 7-18
 Model for the estimation of the horizontal blade reaction force exerted by the hip abduction torque and the relative acceleration of the CG to the skate by the extension of the body in the plane perpendicular to skate blade ($\Sigma O x' y' z'$).

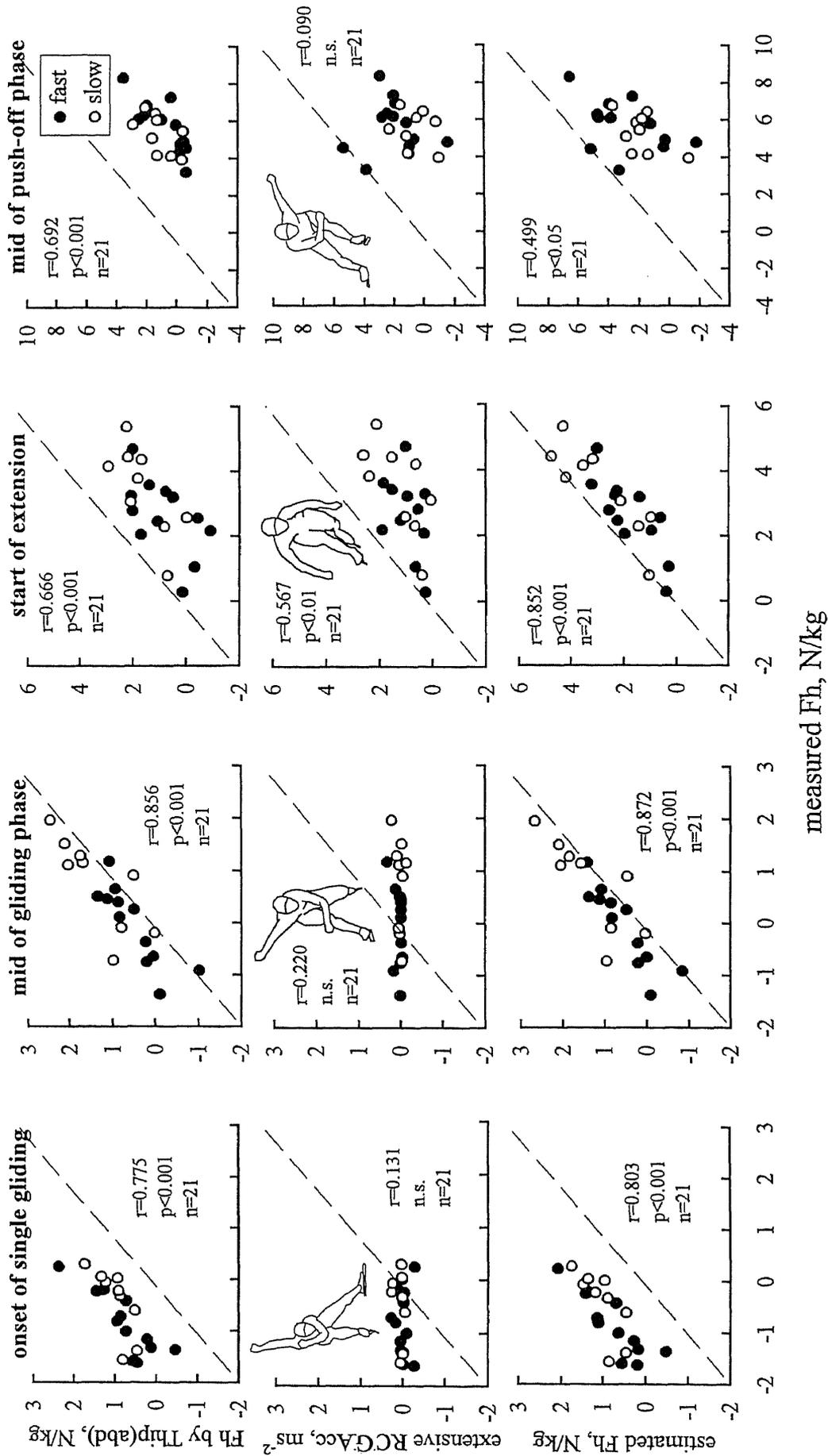


Figure 7-19
Comparisons of estimated and measured blade reaction forces at the various instants.

定ブレード反力（下段）との関係を示したものである。左から片脚滑走開始時、滑走中期、脚伸展開始時およびプッシュオフ中期について示したものである。なお、滑走中期は滑走局面の中間時、プッシュオフ中期はプッシュオフ局面の中間時とし、図中には実測値と推定値の等値線を示した。

外転トルクによる推定成分（上段）は、いずれの時点でも実測値との間に0.1%水準で有意な相関を示した。特に、滑走中期では両者の間に高い相関があった($r=0.856$, $p<0.001$)。

伸展加速度による推定成分（中段）は、脚伸展のない片脚滑走開始時と滑走中期では実測値との間に関係はなかった。脚伸展開始時の伸展加速度成分による推定値は実測値との間に有意な正の相関関係を示したが、プッシュオフ中期では推定値が負の値を示すものもあるなど、有意な関係はみられなかった。

推定ブレード反力（下段）は、いずれの時点においても実測値との間に有意な関係を示し、特に、滑走中期と脚伸展開始時では極めて高い相関を示した(滑走中期： $r=0.872$, $p<0.001$ ；脚伸展開始時： $r=0.852$, $p<0.001$)。実測値と推定値の標準誤差(RMS)を求めたところ、片脚滑走開始時が1.57N/kg、滑走中期が0.72N/kg、脚伸展開始時が1.04N/kg、プッシュオフ中期が3.67N/kgであった。また、ストローク前半では等値線の左領域に、ストローク後半では逆に右領域に分布しており、ストローク時刻の経過に伴い推定値が実測値より徐々に小さくなる傾向があった。

股関節の外転トルクと伸展運動をあらわす伸展加速度成分によるブレード反力の推定値と実測値との間に有意な相関がみられたことは、スピードスケート滑走において水平ブレード反力が股関節の外転トルクによる重心の内傾運動とスケートに対する重心の伸展運動が主要因と

なって発揮されていることを示すものといえる。

なお、ストローク前半において推定ブレード反力が大きかった原因として、支持脚側股関節に対する身体重心の相対運動の影響が考えられる。すなわち、滑走姿勢がより直立位にあるストローク前半では、外転トルクの作用は支持脚の内傾を生み出すが、その反作用は体幹を股関節に対して外側に回転させるモーメントを生じる。そのため、実際には、ストローク前半では重心の内向きへの移動が小さく、外転トルクによる推定値が水平ブレード反力よりも大きくなったと考えられる。

また、ストローク後半において推定ブレード反力値が小さかった原因として、既に幾度か指摘したように、スケートの曲線運動による求心力の影響が考えられる。さらに、本研究の推定モデルでは考慮していない支持脚の他の関節トルク、上肢や遊脚の振込動作による力、コリオリの力などがブレード反力に影響すると考えられ、それらによっても推定値が小さくなったと考えられる。

以上のことから、水平ブレード反力は、スケート自体の曲線運動から生じる求心力によっても影響を受けるが、身体の股関節外転トルクによる内傾動作と股関節伸展トルクによる伸展動作が主要因となって生じるといえるであろう。

4. 要約

ここでは、下肢関節の三次元関節トルクおよび関節トルクパワーを滑走速度、ブレード反力、RCGAccと関係づけることにより、滑走動作の力学的メカニズムについて検討した。

得られた結果をまとめると、以下のようなになる。

(1) プッシュオフ局面におけるスケートに対する重心の相対加速度(RCGAcc)は, 伸展加速度成分($r=0.857$, $p<0.001$)および内傾加速度成分($r=0.629$, $p<0.01$)に大きな影響を受けていた.

(2) 滑走速度と下肢の関節トルクおよび関節トルクパワーの関係

1) 支持脚

支持脚の股関節の関節トルクは, ストローク全般にわたり内転外転軸では外転トルク, 屈曲伸展軸では伸展トルク, 内旋外旋軸では外旋トルクが発揮されていた. 膝関節では, ストローク全般にわたり屈曲伸展軸で伸展トルク, 内旋外旋軸で外旋トルクが発揮されており, 膝関節伸展トルクは股関節伸展トルクよりも小さかった. 足関節では, ストローク全般にわたり足底背屈軸で足底屈トルク, 回内回外軸で回外トルクが発揮されていた.

また, 関節トルクおよび関節トルクパワーのピーク値と滑走速度との間には, いずれも有意な相関はみられなかった.

2) 遊脚

遊脚の股関節の関節トルクは, 内転外転軸では回復期前半で内転トルク, 後半で外転トルクが, 屈曲伸展軸では回復期全般にわたり屈曲トルクが, 内旋外旋軸では外旋トルクが発揮されていた. 膝関節では, 屈曲伸展軸で回復期前半が伸展トルク, 後半が屈曲トルクを示し, 内旋外旋軸のトルクは著しく小さかった. 足関節の関節トルクは, ストローク全般にわたり, 足底背屈軸, 回内回外軸ともに著しく小さかった.

また, 滑走速度が大きい試技ほど, 回復期前半局面では股関節の内転

トルク ($r=-0.375$, $p<0.05$) が大きく, 回復期後半局面では, 股関節の外転トルク ($r=0.784$, $p<0.001$), 膝関節の屈曲トルク ($r=-0.716$, $p<0.001$) が大きかった.

(3) 関節トルクとブレード反力およびRCGAccとの関係

- ①滑走路面における水平ブレード反力は, 股関節の外転トルクとの間に高い相関があった ($r=0.838$, $p<0.001$).
- ②プッシュオフ局面におけるRCGAccの内傾加速度成分は, 股関節の外転トルク ($r=0.450$, $p<0.05$) および股関節の伸展トルク ($r=0.460$, $p<0.05$) と有意な関係を示した.
- ③プッシュオフ局面におけるRCGAccの伸展加速度成分は, 股関節の伸展トルク ($r=0.529$, $p<0.05$) と有意な関係を示した.

(4) 倒立振り子モデルによるブレード反力発揮のメカニズムの検討

股関節の外転トルクと重心の伸展加速度成分による水平ブレード反力の推定値とその実測値との相関係数は, 片脚滑走開始時 ($r=0.803$, $p<0.001$), 滑走中期 ($r=0.872$, $p<0.001$), 脚伸展開始時 ($r=0.852$, $p<0.001$), プッシュオフ中期 ($r=0.499$, $p<0.05$) といずれも有意な関係を示し, 股関節の外転トルクと重心の伸展加速度成分が水平ブレード反力発揮に密接に関係していることがわかった.

本章で行ったブレード反力およびRCGAccに対する下肢を中心とする滑走路面の影響についての検討から, 「水平ブレード反力は, スケート自体の曲線運動から生じる求心力によるところもあるが, 身体の股関節外転トルクによる内傾動作と股関節伸展トルクによる伸展動作が主要因となって生じる」という加速動作のメカニズムが明らかになった.

VIII. 滑走動作の技術およびトレーニングへの示唆

この章では、これまでの滑走動作の力学的分析、ブレード反力発揮のメカニズムなどについて得られた知見をもとに滑走技術とそのトレーニングに関する示唆を引き出すことにした。

1. 滑走技術について

(1) 水平ブレード反力と相対重心加速度

図8-1は、横軸にRCGAccの積分値（以下、相対速度変化という）、縦軸にブレード反力による力積をとり、高速（黒丸）および低速（白丸）滑走試技の値をプロットしたもので、上から滑走局面、プッシュオフ局面、ストローク時間について示したものである。また、RCGAccとFhの関係を示す指標として、相対速度変化に対する力積の比を「F/RA比」と定義し、図中には、F/RA比が1、すなわち力積と相対速度変化が等しい値をとる等値線を示した。

両試技の分布を比較すると、滑走局面、プッシュオフ局面、ストローク時間のいずれにおいても、高速滑走試技は等値線の右領域、すなわちF/RA比が1より小さい領域に多く、左領域には元世界記録保持者を含む3試技のみが分布していた。一方、高速滑走とは逆に、低速滑走試技で等値線の左領域への分布が多かった。

ブレード反力は重心に作用する外力であるから、ブレード反力によって生み出される相対速度は重心の加速を生じるが、RCGAccはスケートと重心の相対加速度であるから、必ずしも重心の加速度を意味するとは限らない。したがって、RCGAccがブレード反力より大きいことは、ス

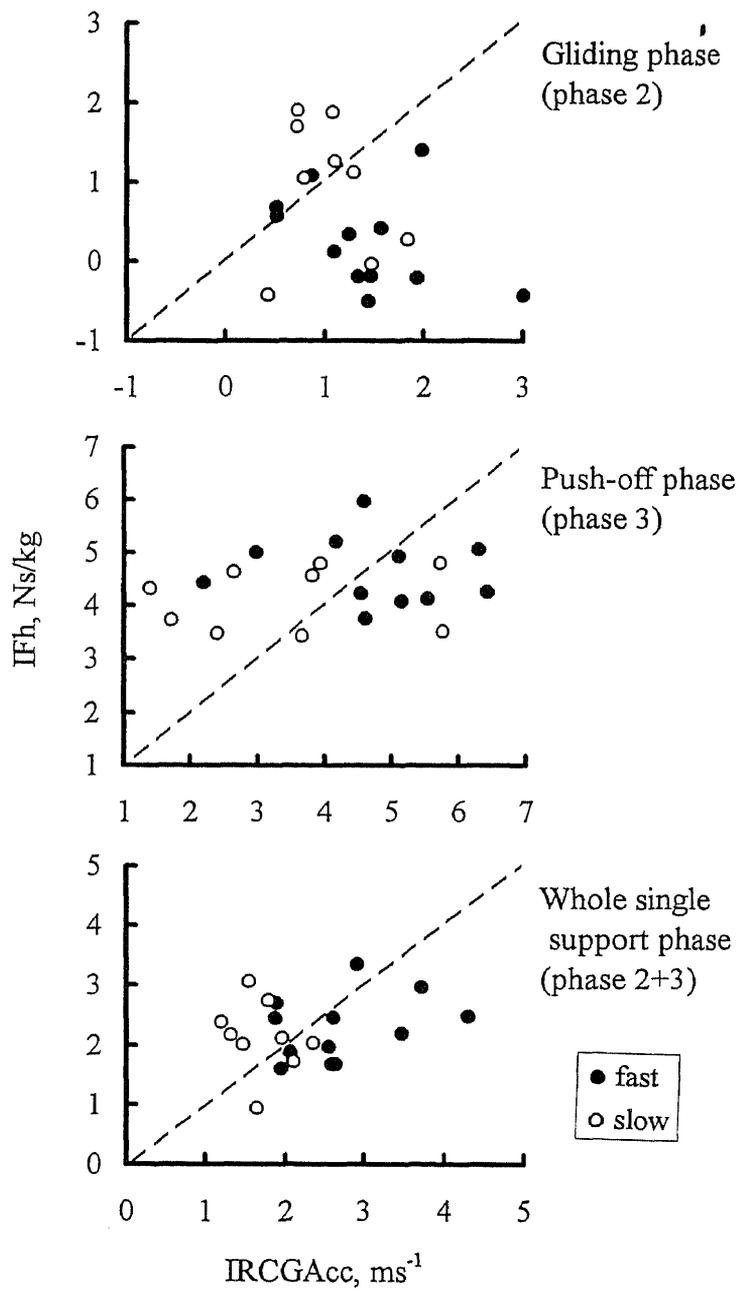


Figure 8-1 Relationships between integrated RCGAcc and Fh in the gliding(top) and push-off phases(middle), and the single support period(bottom).

ケーターの発揮したキック力がRCGVxを大きくするが、重心の加速を大きくできない、いわゆる「抜けたキック」を意味すると考えられる。

低速滑走のほとんどの試技でF/RA比が1より大きく、全力高速滑走では元世界記録保持者を含む3試技以外でF/RA比が1より小さいことは、低速滑走に比べて全力高速滑走ではF/RA比を大きくすることが難しく、「キックが抜ける」選手が多いことを示していると考えられる。また、滑走局面のF/RA比は正の平均Fhとの間に高い正の相関を示した($r=0.892$, $p<0.001$)。

これらのことから、F/RA比は、ブレード反力を大きくする滑走技術を評価する指標の1つと考えられる。

(2) F/RA比を大きくする滑走動作

ブレード反力とRCGAccの相違がスケートの曲線運動による求心力によって生じることは前章で述べた。そこで、F/RA比とスケートの求心力を関係づけると、正（内向き）の求心力は、Fhを大きくしてF/RA比を1より大きくし、負（外向き）の求心力は、RCGAccを大きくしてF/RA比を1より小さくするといえる。本研究では、用いたブレードの曲率が全試技で等しいので、ブレードの傾斜角度がスケートの曲線運動に大きく影響すると考えられる。

そこで、滑走局面におけるF/RA比と平均ブレード傾斜角度との関係をみたところ、それらの間には高い正の相関がみられた($r=0.848$, $p<0.001$)。また、スケートの曲線運動におけるブレードの鉛直軸回りの回転角速度（以下、ブレード方向角速度という）を求め、平均ブレード傾斜角度との関係をみたところ、それらの間には有意な正の相関がみられた($r=0.564$, $p<0.01$)。これらのことは、ブレードの内傾が大きな試技でスケート

が内向きに変位し、内向きの求心力が作用した結果、F/RA比が大きくなったことを示すと考えられる。

ブレードに作用する内向きの力は、ブレードを外傾させるモーメントを生じる。しかし、滑走局面においてブレードは徐々に内傾していた(IV章)。これらのことから、滑走局面におけるブレードの内傾は、能動的なトルク発揮による身体の内傾動作によって生じたと推測できる。そこで、身体の内傾動作に関与が大きい(VII章)、股関節外転トルクとブレード傾斜角度の関係について検討した。

図8-2は、二重支持局面における股関節の内転外転軸回りの平均トルクとブレード傾斜角速度(上)および滑走局面における同軸回りの平均トルクとブレード傾斜角度(下)の関係を示したものである。

二重支持局面における股関節の内転外転軸回りの平均トルクとブレード傾斜角速度の間には有意な正の相関関係があった($r=0.550$, $p<0.01$)。また、滑走局面における平均トルクとブレード傾斜角度の間にも高い正の相関関係がみられた($r=0.790$, $p<0.001$)。

二重支持局面における股関節の内転外転軸回りの平均トルクとブレード傾斜角速度の有意な関係は、着氷時(二重支持局面)には外傾しているブレードを股関節の外転トルクの発揮によって内傾する方向に素早く回転させる効果があることを示していると考えられる。また、滑走局面における外転トルクとブレード傾斜角度の関係は、二重支持局面から継続した外転トルクの作用が滑走局面でのブレードの内傾をさらに大きくすることを示すと考えられる。

以上の検討から、F/RA比を大きくするには、着氷直後(二重支持局面)に股関節の外転トルクを発揮することにより、外傾しているブレードを素早く内傾させることが役立つといえるであろう。

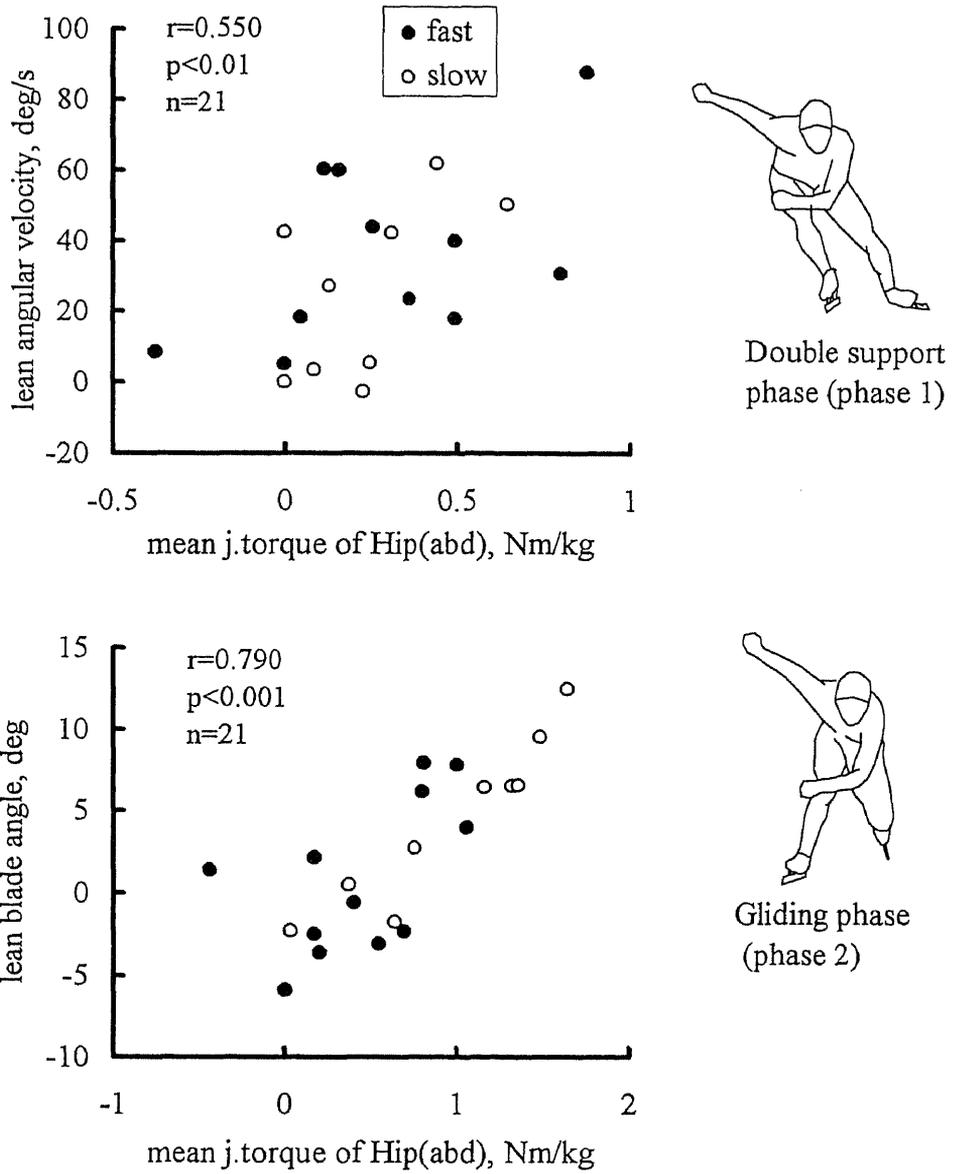


Figure 8-2
 Relationships of mean hip abduction torques to the lean angle and angular velocity of the blade in the double support and gliding phases.

(3) 滑走技術のポイント

図8-3は、第Ⅲ章において実際の競技会で得られた22名の上位群（実線，平均速度：14.41m/s，ゴールタイム：38.81s）と下位群（破線，13.96m/s；39.89s）におけるブレード座標系の前額面(x'-z'面)での下腿の内傾角度およびその角速度（以下，それぞれ下腿内傾角，下腿内傾角速度という）を平均で示したものである。

下腿内傾角（上）を両群で比較すると，上位群におけるストローク開始時の外傾とストローク終了時の内傾が下位群よりも大きかった。下腿内傾角速度（下）は，両群ともにストローク全般にわたり正，すなわち内傾方向の角速度を示し，ストローク前半の角速度は上位群が大きかった。滑走中期（およそ15%ストローク時）における両群の下腿内傾角速度を比較したところ，上位群($155.8 \pm 35.5 \text{ deg/s}$)が下位群($93.4 \pm 30.9 \text{ deg/s}$)よりも有意に大きかった($p < 0.01$)。

競技会ではブレード傾斜角度を撮影しなかったため，ブレード傾斜角度について検討することはできない。しかし，支持脚の滑走局面での足関節の回内回外軸回りの角速度は極めて小さいので（Ⅶ章），下腿内傾角はブレードの傾斜角度を反映するといえる。したがって，上位群では下位群に比べ，滑走局面において外傾しているブレードを素早く内傾させていたと考えられる。

さらに，滑走局面における両群のブレード方向角速度を比較したところ，滑走中期(上位群： $9.9 \pm 13.9 \text{ deg/s}$ ；下位群： $-2.8 \pm 12.4 \text{ deg/s}$ ， $p < 0.05$)，滑走局面の平均(上位群： $0.4 \pm 3.3 \text{ deg/s}$ ；下位群： $-3.0 \pm 2.4 \text{ deg/s}$ ， $p < 0.01$)ともに上位群が下位群よりも有意に大きな角速度を示した。また，両群の平均値の符号は異なっており，上位群の平均は内向きの角速度を，

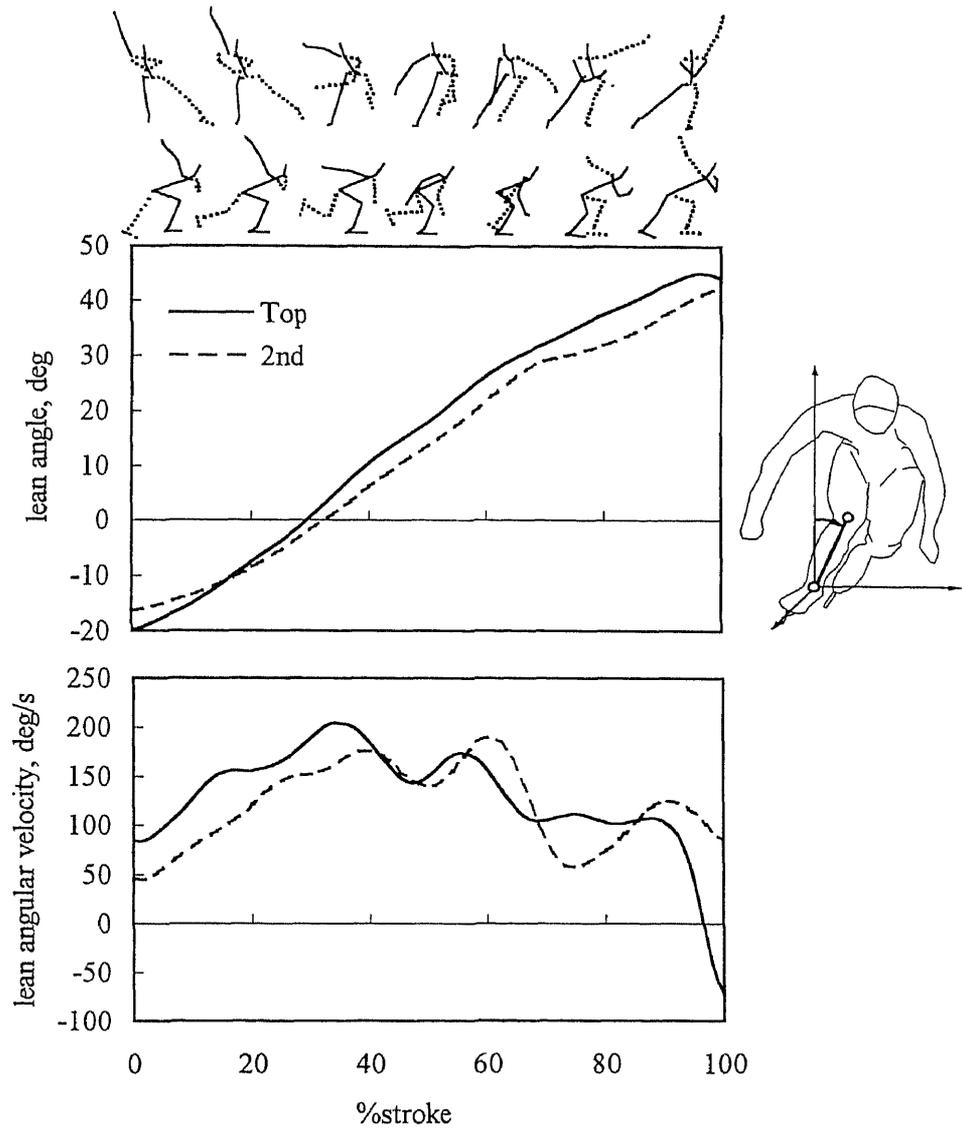


Figure 8-3
 Lean angle and angular velocity of the shank in the blade reference frame for top and 2nd groups in 500m race.

下位群の平均は外向きの角速度を示した。

これらのことは、上位群では、滑走局面において外傾しているブレードを素早く内傾させることにより、内向きの曲線運動を生み出していることを示すと考えられる。そして、これらのことに先述した股関節外転トルク、F/RA比に関する考察を考えあわせると、上位群では下位群に比べ、滑走局面における股関節外転トルクの発揮が大きく、その結果、F/RA比が大きい、有効なプッシュオフ動作を生み出していたと推測できる。

第Ⅲ章では、上位群におけるプッシュオフ局面での足関節の屈曲が大きく、このことが滑走速度に影響を及ぼす技術的要因であると述べた。しかし、足関節の足底背屈軸回りの関節トルクは、ストローク全般にわたり足底屈トルクを発揮していた（Ⅶ章）。また、本章において、上位群のブレードの曲線運動による内向きの求心力が大きいことが示唆された。これらのことから、上位群では、スケートの先端が内に向くように回転しながら曲線運動したことにより、プッシュオフ局面での足関節の大きな屈曲が生じたと考えられる。

このようにみてくると、滑走技術のポイントは、股関節の外転トルクの発揮により、身体、特に下腿の内傾を生み出してスケートの内向きの曲線運動を生じ、それに股関節の外転トルクと伸展トルクを加えることにあるといえる。そして、優れたプッシュオフ動作とは、ブレードに対して常に直交する水平方向に力を加えながら、身体を前方に運ぶ動作であるといえるであろう。

2. トレーニングへの実践的示唆

(1) プッシュオフ動作について

一般に、現場における技術指導では、選手に「強く蹴る」ことを意識させることが多い。しかし、本研究の結果から、重心を効果的に加速するためには、ブレード反力のピーク値を大きくすることよりも、その立ち上がりのタイミングを早め、平均力を大きくすることが重要であるといえる。

また、本研究では、滑走動作のメカニズムに基づき、ブレードに対して常に直交する水平方向に力を加えながら、身体を前方に運ぶ動作が優れたプッシュオフ動作であることを指摘した。これまでも、競技の現場では、キックの際に脚が後方に流れることを「たて蹴り」と呼び、技術的な欠点の1つとされてきた。本研究の指摘は、これまでの技術指導を理論的に裏付けるものであり、脚が後方に流れるタイプの選手には「ブレードに対して垂直に力を加えること」を指導することが有効といえる。また、このことは、レース後半の疲労した状態の滑走において脚が後方に流れ始めた場合にも有効であろう。

(2) アウトエッジ滑走技術について

アウトエッジ滑走は、キックによる重心の側方移動を次のストロークに連続させるために必要な、外傾姿勢で体重を支持する滑走技術である。本研究で得られた知見に基づくと、アウトエッジ滑走における技術課題は、単にブレードを外傾させながら片脚滑走することではなく、「股関節の外転トルクを発揮してブレードの素早い内傾を生み出すこと」であるといえる。したがって、アウトエッジ滑走の技術指導における重要なポイントは、ブレードが外傾から内傾へ移行するタイミングが遅れないことであると考えられる。内傾のタイミングを遅らせないためには、ス

ケートを置くときにブレードを外側に押し付けるような意識で滑走することが有効と考えられる。

(3) スケートの着氷について

日本の選手指導では、スケートを置くときに「正面から見て鼻、膝、爪先が一直線になるように」と指導されることが多い。一方、オランダでは、「滑る方向にブレードをまっすぐ向けること」を重要なポイントとして指導している(Kramer, 1992)。これらの指導内容を本研究と関連づけると、日本の指導内容は「重心に対するスケートの側方位置を一致させること」を、オランダは「開き角を小さくすること」を意図したものと考えられる。本研究では、重心に対するスケートの側方位置よりも、開き角が加速に大きく影響することがわかった(VI章)。したがって、「スケートを置く位置」よりも「スケートの向き」を強調するほうが有効であるといえよう。

(4) 股関節外転筋群のトレーニングの重要性について

スピードスケートの筋力トレーニングでは、股および膝関節の伸筋群の強化に重点がおかれており、股関節外転筋群を強化するトレーニングはほとんど行われていないようである。しかし、本研究では、股関節外転筋群がブレード反力を大きくし、加速を得るために極めて重要であるという知見を得た。したがって、股関節外転筋群を強化するトレーニングを積極的に行う必要があると考えられる。

また、水平ブレード反力の立ち上がりのタイミングが著しく早かった被験者(元世界記録保持者)では、着氷直後の二重支持局面においてエキセントリックな股関節外転トルクの発揮が被験者中で最も大きかつ

た（Ⅶ章，図7-9）．このような股関節外転筋群のエキセントリックな収縮は，着氷するスケートと重心速度のなす開き角を小さく保ちながら外方向への重心移動を受け止め，引き続きブレードの素早い内傾を生じさせるのに貢献していた．したがって，股関節外転筋群のエキセントリックな筋収縮によるトレーニングもスピードスケートのトレーニングでは考慮すべきであろう．

（5）遊脚のトレーニングについて

スピードスケート競技の現場をみると，遊脚の動きを意識したトレーニングはほとんど行われていないようである．本研究では，遊脚の関節トルクは支持脚のそれに比べて小さいが，遊脚を身体に引き付ける股関節内転トルクと遊脚を側方に振り出す股関節外転トルクが滑走速度との間に有意な関係を示した（Ⅶ章，図7-12）．したがって，回復期における股関節の内転および外転筋群の働きを強化することもトレーニング課題の1つと考えられる．

IX. 結論

本研究では、スピードスケートの滑走速度に影響を及ぼす要因をバイオメカニクス的に検討することにより、滑走動作の力学的メカニズムを明らかにするとともに、スピードスケートのトレーニングへの示唆を得ることを目的とした。

1. 研究課題に関連して

本研究の目的を達成するために設定した4つの研究課題に関して、得られた知見をまとめると、以下のようなになる。

(1) 研究課題1：一流選手の滑走速度に影響を及ぼす技術的要因

スピードスケート500m競技における一流選手22名の直線滑走動作をDLT法により三次元的に分析し、重心速度、下肢関節角度などのパラメータを競技成績と関連づけて検討した。

その結果、片脚滑走開始時およびプッシュオフ開始時の膝関節角度が小さいこと、プッシュオフ局面における足関節の屈曲が大きいことが、重要な技術的要因であることがわかった。また、全被験者において速度変化ベクトルの重心速度方向成分が重心の加速に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。

これらのことから、「スピードスケート滑走における重心の加速は、プッシュオフによる重心速度方向に対し水平面内で垂直な速度成分の増加のみでなく、重心速度方向の速度成分の増加によっても生じる」というスピードスケートの加速理論を提唱した。

(2) 研究課題2：滑走中のブレード反力と滑走速度との関係

スピードスケート滑走中のブレードに作用する力を測定するため、ブレードの上下および左右方向の二分力が計測できるセンサースケートを開発した。そして、低速および高速滑走試技におけるブレード反力の鉛直および水平成分、作用点の位置などを測定し、滑走速度に関連づけて検討した。

その結果、高速滑走では低速滑走に比べて、ストローク前半における外向きの水平ブレード反力のピーク値が大きく、ストローク後半では、鉛直ブレード反力、内向きの水平ブレード反力およびフリーモーメントのピーク値が大きいことがわかった。また、滑走速度の大きい試技ほど、内向きの水平ブレード反力の平均が大きい傾向がみられた。

(3) 研究課題3：スピードスケート加速動作の力学的メカニズム

1) 水平ブレード反力と重心速度の関係について

低速および高速滑走試技（計21試技）における滑走動作を三次元的に分析し、水平ブレード反力とストローク中の重心速度変化を関連づけて検討した。

その結果、ブレードの滑走方向と重心速度の方向には水平面内において約10deg以内の開き角があり、その開き角により水平ブレード反力は重心速度方向成分とそれに直交する水平成分の2つの成分をもつことがわかった。

これらのことから、スピードスケートにおける重心の加速が、水平ブレード反力の重心速度方向成分とそれに直交する水平成分によって生じることが明らかになり、研究課題1で提示した加速理論が力学的に検証された。

2) シミュレーションによる加速に影響する要因の検討

身体重心とスケートブレードに作用する外力の二次元モデルにより、スケートの曲線運動による求心力成分と力学的有効パワーの実測値からストローク中の重心速度の変化を推定し、加速の大きさに影響を及ぼす力学的要因について検討した。

その結果、スケートの曲線運動による内向きの求心力、および片脚滑走開始時の開き角 ϕ_0 が、大きな加速を得るための重要な要因であることがわかった。また、パワー発揮のタイミングを早めることは、減速を小さく抑え、平均滑走速度を大きくするために有効であることがわかった。

3) 加速動作のメカニズムについて

下肢関節の三次元関節トルクを算出し、これらと水平ブレード反力、ブレードに直交する方向の重心の相対加速度(RCGAcc)の関係から、加速動作の力学的メカニズムについて検討した。

その結果、プッシュオフ局面ではブレード反力と関節トルクとの間に有意な関係はなかったが、滑走局面では股関節の外転トルクと水平ブレード反力に有意な関係がみられた($r=0.838$)。また、RCGAccの伸展加速度成分が股関節の伸展トルクと、内傾加速度成分が股関節の外転および伸展トルクと有意な相関がみられた。さらに、倒立振り子モデルにより、股関節の外転トルクと重心の伸展加速度成分から水平ブレード反力を推定したところ、実測値と推定値はよく一致した。

これらのことから、水平ブレード反力は、身体の股関節外転トルクによる内傾動作と股関節伸展トルクによる伸展動作が主要因となって生じることがわかった。

(4) 研究課題4：スピードスケートの滑走技術およびトレーニング

得られた知見をもとに滑走技術について検討し、ブレード反力を大きくする滑走技術のポイントは、股関節の外転トルクにより、支持脚、特に下腿の内傾を生み出し、スケートの内向きの曲線運動を生じることにあること、股関節外転筋群の強化の重要性などの技術およびトレーニングに関する示唆を得た。

2. 加速動作の力学的メカニズムおよびトレーニングの示唆に関連して

加速動作の力学的メカニズムおよび滑走技術やトレーニングに関連して、以下のような示唆を引き出すことができよう。

(1) 加速動作の力学的メカニズムについて

- ①スピードスケートにおける重心の加速は、水平ブレード反力の重心速度方向成分とそれに直交する水平成分によって生じる。
- ②スピードスケートの加速動作とは、スケートの曲線運動による内向きの求心力に加え、主として身体の股関節外転トルクによる内傾動作と股関節伸展トルクによる伸展動作により水平ブレード反力を発揮することである。

(2) 滑走技術およびトレーニングへの示唆

- ①水平ブレード反力を大きくするための滑走技術のポイントは、アウトエッジ滑走において股関節外転トルクを発揮して支持脚の素早い内傾を生み出し、滑走スケートに内向きの求心力を生じることにある。

- ②重心の加速を大きくするためには、片脚滑走開始時の開き角を小さくすることが重要であり、そのためには着氷時に「スケートの位置」よりも「スケートの向き」を意識することが有効である。
- ③ストローク中の減速を小さくして平均滑走速度を大きくするためには、「強く蹴ること」よりも「蹴り始めのタイミングを早めること」によりブレード反力の平均を大きくすることが有効である。
- ④身体とスケートの関係でみると、スケートに対しては垂直に力を加えながら身体を前方に運ぶようなプッシュオフ動作が有効といえる。
- ⑤スピードスケートのトレーニングでは、股関節外転筋群を強化することが極めて重要である。また、これらの筋群は、着氷時にエキセントリックな筋収縮によって力を発揮することが要求されるので、このこともトレーニングでは考慮すべきである。

3. 今後の課題

本研究では、一流選手に関するデータは多く得られなかったが、一流選手に関するデータを加えることにより、スピードスケートの競技力向上に役立つ滑走動作の評価および予測が可能になると考えられる。

また、本研究で開発した方法を用いて、スタート局面などの運動課題の異なる直線滑走動作やカーブ滑走動作を研究することも今後の課題と考えられる。さらに、疲労を伴う状態の滑走動作を分析することにより、より明確な体力トレーニングの課題やレースペースなどの戦術に関する知見を提示することもできよう。

謝 辞

本研究は、指導教官である浅見高明教授，高松 薫教授，阿江通良助教授の御指導と励ましのもとに行われたものである。先生方には、研究に関する多数の貴重な助言および懇切丁寧なご校閲をいただいたことに加え、研究と競技実践の両立を目指すことにたいして十分な理解と支援をいただいた。

本学アイススケート部監督である田崎健太郎助教授には、常に暖かく支えていただいた。また、岡田守彦教授，藤井範久先生には多くの助言をいただいた。

ここに、今後のさらなる努力を誓い、深く感謝の意を表します。

さらに、実験の補助や多くの助言をいただいた研究仲間諸兄，実験の場を提供してくださった日本学生スケート連盟および（株）やまびこスケートの森，被験者として快く御協力いただいた選手各位に，心から感謝いたします。

文 献

阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリーの身体部分慣性特性. *Japanese J. Sports Sci.* 15(3): 155-162.

Åstrand, Per-Olof, (1976) (浅野勝己訳) 運動生理学. 大修館書店. 東京. pp. 415-417.

バウデン, F.P., D.テイバー (1980) (曾田範宗訳) 固体の摩擦と潤滑. 丸善. 東京. pp. 58-65.

Boer, R.W.de, Paul Schermerhorn, Gert de Groot, and G. Jan van Ingen Schenau (1986) Characteristic stroke mechanics of elite and trained male speed skaters. *Int. J.Sport Biomechanics* 2: 175-185.

Boer, R.W.de, Gertjan J.C.Ettema, Hans van Gorkum, Gert de Groot, and G. J. van Ingen Schenau (1987a) Biomechanical aspects of push-off techniques in speed skating the curves. *Int.J.Sport Biomechanics* 3: 69-79.

Boer, R.W.de, G.J.C.Ettema, H. van Gorkum, G.de Groot and G.J. van Ingen Schenau (1987b) A geometrical model of speed skating the curves. *J.Biomechanics* 21: 445-450.

Boer, R.W.de, J.Cabri, W.Vaes, J.P.Clarijs, A.P.Hollander, G.de Groot, and G.J van Ingen Schenau (1987c) Moments of force, power, and muscle coordination in speed skating. *Int.J.Sports Med.* 8: 371-378.

Boer, R.W.de, Kim L.Nilsen (1989) The gliding and push-off technique of male and female speed skaters, *Int.J.Sport Biomechanics* 5: 119-134.

Chandler,R.F. (1975) Investigation of inertia properties of human body. Aerospace Medical Research Lab. Technical report. pp. 74-137, Wright-Patterson Air Force Base,Ohio,USA.

Delnoij,R., Gert de Groot, R.W.de Boer, G.J.van Ingen Schenau (1987) Refinements on the determination of power output during speed skating, In: Biomechanics X-B, pp. 691-694.

Doctorevic,A.M. (1975) Zur Bestimmung von kriterien einer rationellen bewegungstechnik im eisschnellauf, Leistungssport, Information zur Training 5:42-46.

Evans, D.C.B., J.F. Nye, K.J. Cheeseman (1976) The kinetic friction of ice. Proc. Roy. Soc. Lond., A, 347: 493-512.

Gemser, Henk (1987) Handboek wedstrijdschaatsen, Ingen Schenau(Eds.), Uitgeverij eisma leeuwarden, pp. 1-6.

Groot,G.de, Boer,R.W.de and G.J.van Ingen Schenau (1985) Power output during cycling and speed skating. In: Biomechanics IX-B. Human Kinetics, Champaign, IL, pp. 555-559.

ハミング, R. W. (1980) (宮川 洋、今井秀樹訳) デジタル・フィルタ, 科学技術出版社.

広瀬茂男 (1987) ロボット工学. -機械システムのベクトル解析-. 裳華房. pp. 1-72.

Hughes and Gayload (1964) Basic equation of engineering science. McGraw-Hill Book company, pp. 126.

Ingen Schenau,G.J.van, and Bakker, K. (1980) A biomechanical model of speed skating. J.Human Movement Studies 6:1-18.

Ingen Schenau,G.J.van (1981) A power balance applied to speed skating.
Academisch proefschrift, Doctoral thesis, Vrije Universiteit te Amsterdam.

Ingen Schenau,G.J.van (1982) The influence of air friction in speed skating.
J.Biomechanics 15: 449-458.

Ingen Schenau,G.J.van, and G.de Groot (1983) On the origin of differences in
performance level between elite male and female speed skaters. J.Human Movement
Sci. 2: 151-159.

Ingen Schenau,G.J.van, G.de Groot and R.W.de Boer (1985) The control of speed
in elite female speed skaters. J.Biomechanics 18: 91-96.

Ingen Schenau,G.J.van, R.W.de Boer and Gert de Groot (1987) On the technique of
speed skating. Int.J.Sport Biomechanics 3: 419-431.

Ingen Schenau,G.J.van, J.J.de Koning and G.de Groot (1990) A simulation of speed
skating performances based on a power equation. Med.and Sci.in Sports and
Exercise 22(5): 718-728.

Jobse Hanse, Ruud schuurhof, Ferenc cserep, A.W.Schreurs, and J.J.de Koning
(1990) Measurement of push-off force and ice friction during speed skating.
Int.J.Sport Biomechanics 6: 92-100.

Joly, J. (1887) The phenomena of skating and professor J. Thomson's
thermodynamic relation. Sci. Proc. Roy. Dublin Soc. 5: 453-454.

北原武道, 河村俊行, 小林禎作 (1969) 氷の硬度の測定. 一特にスケート競技
のために一. 低温科学. 物理篇. 第28輯. 289-293.

北原武道, 河村俊行, 小林禎作 (1970) 氷の硬度の測定Ⅱ. 低温科学. 物理篇.
第28輯. 81-95.

小林禎作, 北原武道 (1968) スケートリンクの氷質調査. 低温科学. 物理篇. 第26輯. 298-313.

小林禎作, 北原武道, 河村俊行 (1969) スケートリンクの氷質調査II. 低温科学. 物理篇. 第27輯. 267-287.

小林禎作, 北原武道, 中尾正義, 進士康信 (1970) テストスケートによるリンク氷の動摩擦係数の測定. 低温科学. 物理篇. 第28輯. 243-259.

小林禎作 (1971) スケートリンクの氷質調査IV. 低温科学. 物理篇. 第29輯. 267-269.

Koning, J.J.de, R.W.de Boer, Gert de Groot, and G.J.van Ingen Schenau (1987) Push-off force in speed skating. *Int.J.Sport Biomechanics* 3: 103-109.

Koning, J.J.de, Gert de Groot, and G.J.van Ingen Schenau (1989a) Mechanical aspects of the sprint start in Olympic speed skating. *Int.J.Sport Biomechanics* 5: 151-168.

Koning, J.J.de, Gert de Groot, and G.J.van Ingen Schenau (1989b) Muscle coordination in speed skating. In: *Biomechanics XI-B*, pp. 878-882.

Koning, J.J.de, Gert de Groot and G.J.van Ingen Schenau (1991) Coordination of leg muscles during speed skating. *J.Biomechanics* 24: 137-146.

Koning, J.J.de, Gert de Groot and G.J.van Ingen Schenau (1992) Ice friction during speed skating. *J.Biomechanics* 25: 565-571.

Kramer (1992) スピードスケートのトレーニング, 日本スケート連盟強化合宿資料.

マイネル, K. (1981) (金子明友訳) スポーツ運動学. (Meinel K., Bewegungslehre, Volk und Wissen Volkseigner Verlag :Berlin. 1960) 大修館書店.

前田安雄 (1969) スピードスケーティング. 成美堂. pp. 39-40.

マトヴェイエフ・レフ・パウロウィチ(1985) (江上修代訳) ソビエト スポーツ・トレーニングの原理. 白帝社

Marino, G.W. (1975) Multiple regression models of the mechanics of the acceleration phase of ice skating. Doctoral thesis, University of Illinois.

Marino, G.W. and Ronald G. Weese (1979a) A kinematic analysis of the ice skating stride. In: Science in skiing, skating and hockey. Terauds J. and Gros H.J. (Ed.). Academic Publishers Inc. Del Mar. pp. 65-74.

Marino, G.W. (1979b) Acceleration-time relationships in an ice skating start. Research Quarterly 50(1): 55-59.

Marino, G.W. (1983) Selected mechanical factors associated with acceleration in ice skating. Research Quarterly 54(3): 234-238.

McCaw, S.T. and Hoshizaki, T.B. (1987) A kinematic comparison of novice, intermediate, and elite ice skaters. In: Biomechanics X-B. pp. 637-642.

南 茂夫 (編著) (1986) 科学計測のための波形データ処理. CQ出版社.

ミッチェルソン, D. L. (1985) 最新鋭の自動三次元運動追跡装置. (兼松エレクトロニクス株式会社内部資料) .

盛合徳夫 (1987) 歩行の力学(kinetics)ーフォースプレートによる歩行解析ー. 総合リハビリテーション 15(4): 289-298.

文部省 (1988) 高等学校学習指導要領解説, 保健体育編, 体育編.

文部省 (1988) 中学校指導書, 保健体育編.

Mueller, M. (1977) Kinematics of ice skating at different velocities. *Research Quarterly* 48(1): 93-97

日本スケート連盟(1988~1989年度)スピード・スケート記録集.

日本スケート連盟(1989)スピードスケート規則集.

奥村信二 (1982) 正常歩行の床反力解析—側方分力について—. *整形外科バイオメカニクス* Vol.3: 46-48.

ペトロフ, ニコライ I. (1962) (岡本正巳、小泉健司訳) 最新スケート技術. ベースボールマガジン社.

ソコロフ, M. P. (1957) (河村泰男訳) アイススケート. 理論社. 東京.

戸田盛和 (1982) 力学. 岩波書店, 東京.

対馬勝年 (1969) 氷の摩擦融解. *低温科学. 物理篇*. 第27輯. 17-30.

対馬勝年 (1975) 氷の摩擦機構について. *潤滑*. 第21巻.5号. 287-294.

対馬勝年 (1980) 氷盤の上をスケートはなぜ滑るか. *科学と実験*. 12月号. 45-49.

対馬勝年 (1986) 氷質・雪質と滑走. *冷凍*. 第61巻.710号. 1239-1247.

対馬勝年 (1988) 雪氷のトライボロジー. *潤滑*. 第33巻.4号. 274-279.

対馬勝年, 松浦順一, 藤城信行, 白井修二, 小谷典明 (1989a) スケートの摩擦特性. 富山県地学地理学研究論集 9: 55-60.

対馬勝年 (1989b) 氷表面の滑り. 表面科学. 第10巻. 第11号. 941-943.

寄金義紀 (1979) スケートの総論 I. 新体育 49(2): 72-73.

寄金義紀 (1986) I. スケート競技の概要. 現代体育スポーツ大系 16. スキー・スケート・そり競技. 講談社. pp. 182-186.

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

和達三樹 (1985) 物理のための数学. 岩波書店, 東京.

Winter, D.A. (1990) Biomechanics of human movement. A Wiley-interscience Publication.

山下 忠 (1974) 低速平地歩行時の鉛直床反力特性, バイオメカニズム 2, 東京大学出版会. pp. 236-242.

關 連 論 文

参考論文については学術雑誌掲載論文から構成されています。

論文 1) については著作権者(出版社、学会等)の許諾を得ていないため、筑波大学では電子化・公開していません。

2) 3) は下記URLからご覧いただくことができます。

論文 1) 結城匡啓、阿江通良、浅見高明

「スピードスケート 500mレースの競技成績に影響を及ぼす技術的要因」
トレーニング科学 3(1) 21-30 (1991)

論文 2) <http://hdl.handle.net/2241/101780>

論文 3) <http://hdl.handle.net/2241/101781>