

(10)

スピードスケートにおける加速理論の再検討

(筑波大学大学院) 結城匡啓

(筑波大学体育科学系) 阿江通良, 浅見高明

1. 緒 言

1.1 スピードスケート競技

日本のスピードスケート界は、サラエボ(1984年), カルガリー(1988年)の冬季オリンピックにおいてメダルを獲得し, また, 毎年開催される世界選手権においても, 複数の選手が3位以内に入賞している。このように, 多くの選手が国際大会で活躍するようになり, スケート競技もスポーツファンが関心を寄せるもののひとつとなった。

スピードスケート競技(図1)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。その滑走速度は, 最も短い距離種目の500mでは, およそ15m/s(時速54km)にも達する。

滑走速度は, スケーターのキックによる加速と空

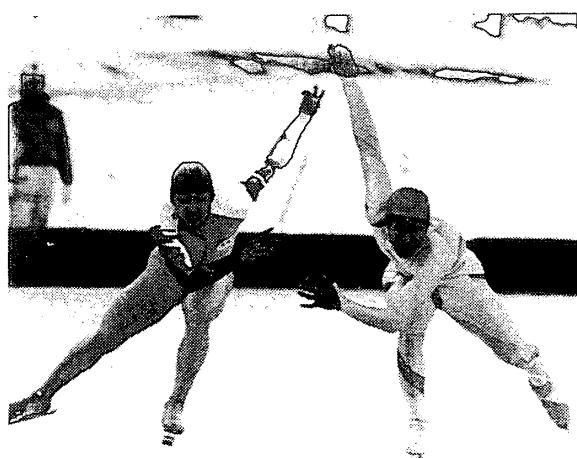


図1 スピードスケート競技風景

気抵抗および氷の摩擦抵抗による減速の差として決まる。空気抵抗には, 前投影面積(滑走姿勢), 空気密度, 風速, ウエアなどが影響することが知られている^{1,2)}。そして, ここ数年間, 空気抵抗の小さいウエアの開発や整氷技術の進歩により, 競技記録は飛躍的な伸びをみせ, 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の設立により, 好条件が整い, 多くの世界記録が生み出されている。

このようにスピードスケートの競技記録は, 用具の進歩や開発, 環境の改良によって大きく伸びてきた。しかし, 用具を自由に選択できる現在, やはり競技成績の優劣は, 加速を生み出す下肢の伸展動作などに特徴づけられる選手の滑走能力によって決定されるといえよう。

100分の1秒を争う競技の場では, いかに合理的に, しかも効率よく加速するかということが最大の技術的課題となる。したがって, このような技術的課題を解決するための基礎的知見を得るために, 滑走中の加速現象を客観的にとらえ, その理論的背景を究明していくことが不可欠となろう。

1.2 従来の加速理論

Ingen Schenauら¹⁾(1980)は, スピードスケート滑走中の下肢の伸展動作(以下, プッシュオフ動作)による加速について次のように述べている。すなわち, 「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, 速度の小さいスタート局面を除いては逆方向に向いていない。つまり, 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

視できるほど小さく、滑走方向に沿った方向の力は、この摩擦力より大きくなることはないので、滑走方向と逆向きの力は加速には貢献しない。歩行やランニングのように足底屈をともなうプッシュオフは、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、このようなプッシュオフで加速することはできない。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」というのである。さらに、以下に示すようなスケーターの発揮パワーの力学モデルを作成し、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7%の誤差範囲で推定できたことを報告している。

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

$$P_0 = g \cdot b_0 \cdot 1/2 \tan^2 \phi \cdot f \quad (2)$$

ここで、

g : 重力加速度

L : 身長

f : ストローク頻度

θ : 膝関節角度

P_0 : スケーターの発揮パワー

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分が鉛直に対しなす角度

図2は、Ingen Schenauらの提唱した加速理論の模式図である。このように、Ingen Schenauら³⁾(1985)は、プッシュオフ動作開始時の重心速度を VY 、プッシュオフ動作による重心速度の増分を ΔVX としたとき、 ΔVX が VY に対し垂直であることから、プッシュオフ終了時の滑走速度 V を以下の式で表している。

$$V = \sqrt{VY^2 + \Delta VX^2} \quad (3)$$

そして、加速を大きくするために、プッシュオフ動作による ΔVX を大きくすることが重要であると述べている。

de Boerら⁴⁾(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、支持脚が氷となす角度を角度 β としたとき、角度 β

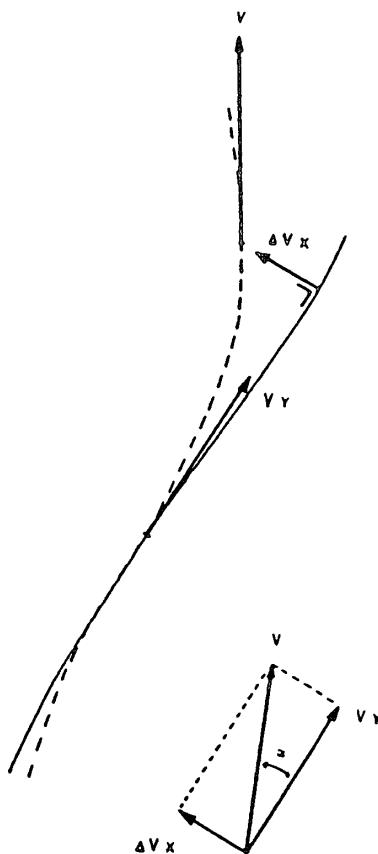


図2 Ingen Schenauらの提唱した加速理論の模式図 (Ingen Schenauら³⁾(1985)より引用)

が優れたスケーターほど小さかったことを報告している。そして、優れたスケーターは、角度 β を小さくすることによりプッシュオフ力の水平成分を大きくし、より大きな ΔVX を生み出していると述べている。

このように、Ingen Schenauらの加速理論を支持する報告もあるが、プッシュオフ動作前後の重心速度およびプッシュオフ動作による速度の増分をこれまでに測定したものはなく、この加速理論の検証はなされていない。

一方、多くの研究者がスピードスケート滑走中の重心速度の変化について研究してきた^{5~7)}。しかし、重心速度が脚伸展のない滑走期では減少し、プッシュオフ期では増加するという1ストローク中の重心速度の変化パターンを定性的に示した報告にとどまっている。これは主に、スピードスケートでは1ストロークで10m以上の距離を滑走するために計測上の制約があり、正確な3次元データを得ることが難し

いこと、スケートと氷の摩擦が小さいので陸上での運動に比べて速度変化が小さく、とらえにくいことなどの理由によると考えられる。

de Boer ら⁸⁾ (1989) は、カルガリー・オリンピック参加選手を分析し、Ingen Schenau らのパワー算出式(2)に含まれるパラメータを競技成績に関連づけて検討している。その結果、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 であり、これらのパラメータでは、一流選手の競技成績を説明できなかったと述べている。さらに、de Boer らは、従来から加速運動には貢献しないと考えられてきた足底屈が、滑走スピードの大きな種目ほど顕著であったと報告している。

これらのことから、競技レベルの高いスケーターの加速運動を、従来の加速理論で説明することには限界があると考えられる。また、Ingen Schenau らの提唱した加速理論は、実測値による検証が行わ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。

1.3 目的

本研究の目的は、優れたスケーターのブッシュオフ動作およびブッシュオフ期における重心速度の変化を 3 次元画像解析法により測定し、スピードスケート滑走における加速理論を検討することである。

2. 研究方法

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の男子 500 m 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 3 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。

2.1 被験者

2 日間にわたる 2 回の 500 m 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 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。

2.2 VTR 撮影

図 3 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 5 m、長さ 20 m で、滑走速度が大きく、しかも動作の安定する 500 m 競技の 240 m 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 4 m ごとに 5 つの小区間に分け、3 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 (撮影スピードは毎秒 60 フィールド、露出時間は 1/1000 秒) を設置した。

2.3 3 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較正器 (長さ 2.2 m) 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

表 1 被験者の特性

分析対象群	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	ベスト記録 (秒)	国内ランキング (位)
上位群 (<i>n</i> =11)	20.5±0.8	175.4±5.4	74.3±3.9	37.94±0.48	13.2±10.7
下位群 (<i>n</i> =11)	19.8±0.8	171.6±4.7	69.6±4.0	38.92±0.51	52.5±31.9
	N.S.	N.S.	<i>p</i> <0.05	<i>p</i> <0.01	<i>p</i> <0.01

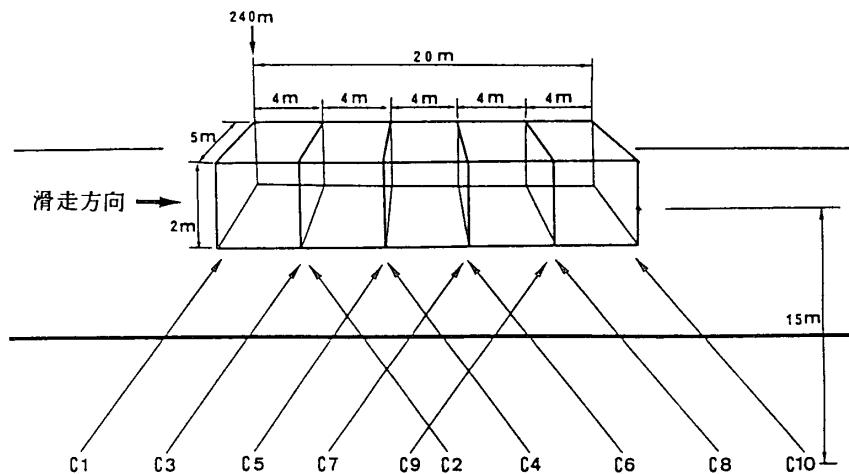


図 3 撮影範囲およびカメラ設定図

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およびスケート両端の 2 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 2 次元座標を 3 次スプライン関数により補間し、サンプリング周波数 200 Hz 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 2 次元座標を合成し、小区間ごとに DLT 法により 3 次元座標を求めた。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 3 次元座標を得た。

2.4 測定項目

本研究では、身体重心の座標を Chandler ら⁹ (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

滑走スケートプレードに対してなす角度を「重心スケート角」と定義し、算出した。

本研究では、膝関節の伸展角速度が 50°/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「滑走期」と「プッシュオフ期」の 2 つの局面に分けた。

なお、有意差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

3.1 競技成績

表 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。しかし、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

表 2 分析に用いたレースの成績

	レース記録 (sec)	1 サイクル滑走距離 (m)	1 サイクル頻度 (sec ⁻¹)	重心水平平均速度 (m/s)
上位群(<i>n</i> =11)	38.81±0.15	14.82±0.67	0.974±0.052	14.41±0.16
下位群(<i>n</i> =11)	39.89±0.43	14.70±1.00	0.954±0.066	13.96±0.27
	<i>p</i> <0.01	N.S.	N.S.	<i>p</i> <0.01

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、滑走期で 0.32 ± 0.04 秒、 0.35 ± 0.04 秒、ブッシュオフ期で 0.20 ± 0.02 秒、 0.20 ± 0.02 秒であり、下位群の滑走期がやや長いが、有意差はなかった。

3.2 矢状面内での下肢の動き

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(4)～(7)で表すことができる。

$$K_y = L_1 \cdot \cos \theta_a \quad (4)$$

$$K_z = L_1 \cdot \sin \theta_a \quad (5)$$

$$H_y = L_1 \cdot \cos \theta_a - L_2 \cdot \cos \theta_k \quad (6)$$

$$H_z = L_1 \cdot \sin \theta_a + L_2 \cdot \sin \theta_k \quad (7)$$

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4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 0.4 m 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、ブッシュオフ期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 ($p < 0.01$) を反映するものであろう。

また、大転子点では、ストローク開始時からブッシュオフ開始時にあたる 60 %ストロークにかけては大きな違いがみられないが、その後の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

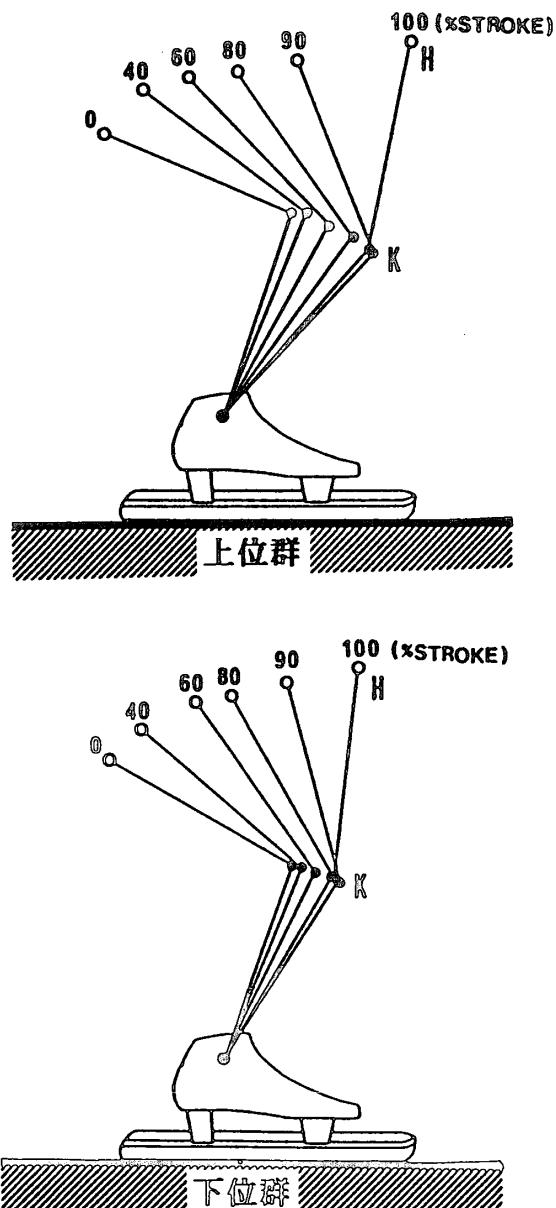


図4 両群の矢状面内での下肢の動きの比較
きい。

大転子点の Y 方向の位置は、式(6)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、上位群ではブッシュオフ期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。

3.3 水平面内の重心変位

図5は、1ストローク中の重心スケート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、両群間の重心スケート角には、60%ストローク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、重心スケート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%ストロークにかけて全被験者が重心スケート角の最小値を示し、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。

先行研究^{1,2,4,8,10,11)}では、ブ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

ーのブ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ブッシュオフ動作は、重心を横向に加速するために行われるとしている。

しかし、本研究においてブッシュオフ期での重心スケート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ブッシュオフ動作をしていることを示すと考えられる。

3.4 ブッシュオフ期における重心速度変化

先行研究において、スピードスケート滑走中の重心速度は、ブッシュオフ期では増加する傾向にあると報告されている。本研究におけるブ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、ブ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、ブ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。ブ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、ブ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。ブッシュオフ期の所要時間には両群で差がないことから、上位群のブッシュオフ期における重心の速度増加が大きいことは、優れた競技成績を反映するものであると考えられる。

ここで、ブ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 を算出した。

- 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。

$$|\Delta V| = \sqrt{V_0^2 + V^2 - 2 \cdot V_0 \cdot V \cdot \cos \theta} \quad (8)$$

- 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。

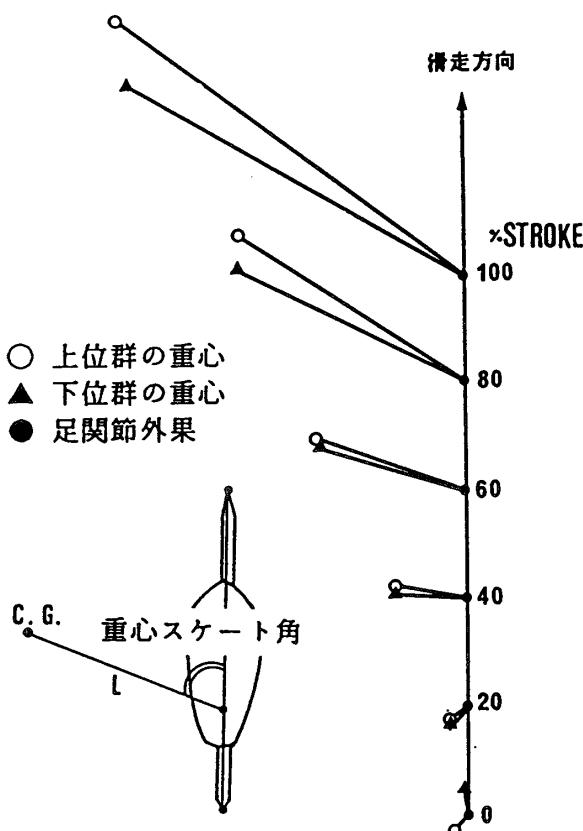


図5 両群の1ストローク中の重心スケート角の変化

$$\angle \alpha = \cos^{-1}((V_0^2 + \Delta V^2 - V^2)/(2 \cdot V_0 \cdot \Delta V)) \quad (9)$$

図6は、ブッシュオフ期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(8)より算出した $|\Delta V|$ の両群平均値は、上位群では1.60、下位群では1.86であり、下位群でやや大きかった。前述のようにブッシュオフ期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、重心を進行方向により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(9)により算出した加速角 α の平均値

V_0 : ブッシュオフ開始時重心速度
 V : ブッシュオフ終了時重心速度
 $|\Delta V|$: 速度変化ベクトル

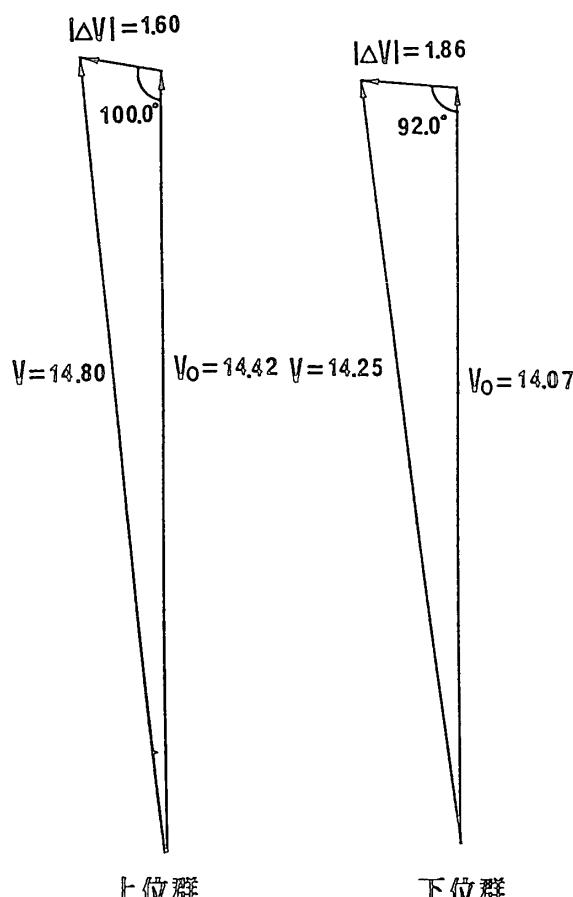


図6 両群のブッシュオフ動作前後における重心速度ベクトルの変化

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、ブッシュオフ期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、生み出した速度変化ベクトル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素のひとつと考えられる。

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ブッシュオフ動作をしていた。このようなブッシュオフ動作は、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。

3.5 スピードスケートの加速理論

3.5.1 実測値による加速理論の検討

本研究では、ブッシュオフ動作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、「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 Ingen Schenau ら¹¹⁾ (1987) の加速理論とはやや矛盾するように考えられる。

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加速理論について検討することにする。

図7は、ブッシュオフ動作前後の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、ブ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すこととする。このよ

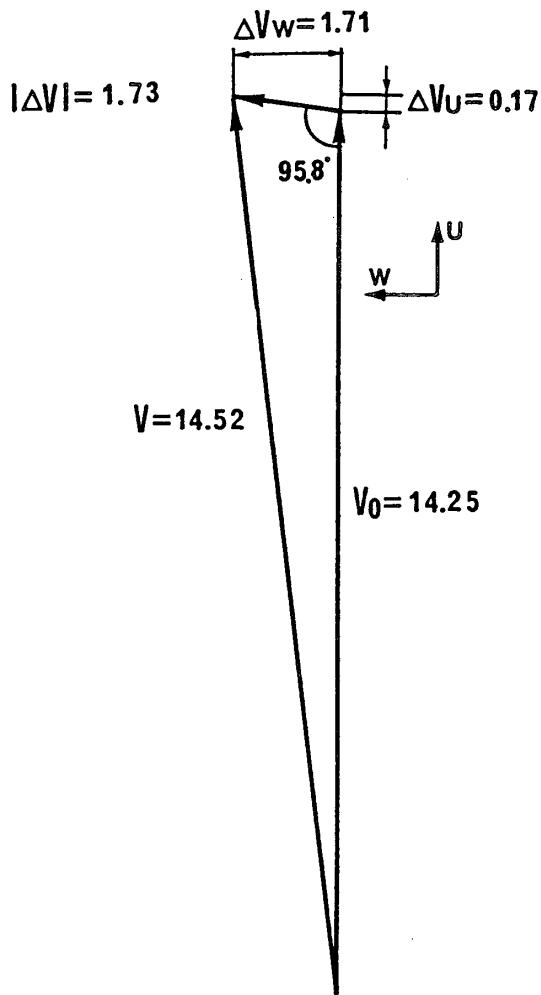


図 7 全被験者のプッシュオフ動作前後における重心速度ベクトルの変化

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。

$$\Delta V_u = \Delta V \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

$$\Delta V_w = -\Delta V \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

そして、プッシュオフ終了時の速度ベクトルを次式(12)で導くことができる。

$$V = \sqrt{(V_0 + \Delta V_u)^2 + \Delta V_w^2} \quad (12)$$

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 という値が算出され、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 0.17 m/s は、およそ 14 m/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、被写体（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、ミッセルソン¹²⁾ (1985) によると次のように導かれる。

$$V_r = R \cdot (2fd)^{3/2} \cdot (fs)^{-1/2} \quad (13)$$

ただし、 V_r ：速度分解能

R ：画像分解能

fd ：生データの帯域幅

fs ：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 であった。したがって、本研究の映像解析における速度分解能は、 0.06 m/s と推定できる。

本研究で得られた ΔV_u の平均値は 0.17 m/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、誤差も含んでいるが、すべて誤差とも言い切れず、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、 $\Delta V_u (0.17 \text{ m/s})$ は、 $\Delta V_w (1.71 \text{ m/s})$ の $1/10$ も満たないほど小さな値である。さらに、 $\Delta V (1.73 \text{ m/s})$ 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(12)に代入すれば、 V は 14.35 m/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 m/s となる。しかし、実測値 V は 14.52 m/s であり、速度の増分は 0.27 m/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% 低く見積もられることになる。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。

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。

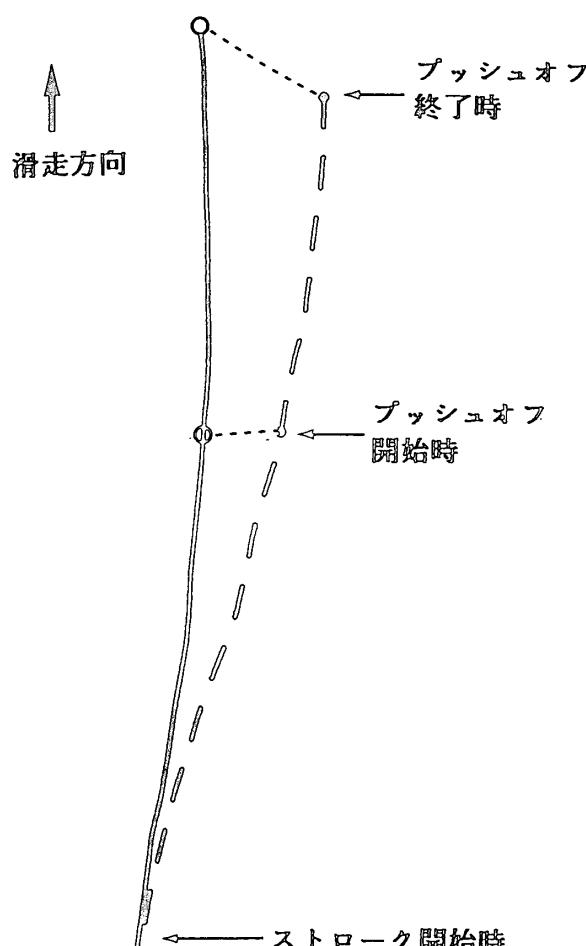
「スピードスケート滑走における重心の加速は、 ρ

ッショウオフによる滑走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、滑走方向の速度成分の増加によっても生じる」。

3.5.2 加速理論の力学的考察

滑走方向の速度増分 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 の生み出されるメカニズムについて説明する必要があろう。

図 8 は、水平面内における 1 ストローク中の重心および滑走スケートの軌跡の典型例を示したもので、点線は 20 % ストロークごと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



実線：重心、破線：滑走スケートの先端
図 8 水平面における重心および滑走スケートの軌跡(典型例)

いるようである。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変位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エッジが、氷に対して傾斜し、部分的に氷にくい込むことにより、スケートエッジが氷から方向を変える力を受けた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、空気抵抗力、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。

4. 結論

本研究では、競技成績と滑走動作を関連づけて検討したところ、以下のことが明らかになった。

- ① 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。
- ② 優れたスケーターは、プッシュオフ動作によって生じる速度変化ベクトルをより前方に向けることにより、有効な加速を生み出している。

また、全被験者において滑走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。

以上のことから、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滑走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、滑走方向の速度成分の増加によっても生じる」。

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したい。

参考文献

- 1) Ingen Schenau, G.J. van & Bakker, K. : A biomechanical model of speed skating, *J. Human Movement Studies*, 6, 1-18, (1980).
 - 2) Ingen Schenau, G.J. van : A power balance applied to speed skating, *Achademisch proefschrift*, Vrije Universiteit te Amsterdam, (1981).
 - 3) Ingen Schenau, G.J. van, Groot G. de & Boer, R.W. de : The control of speed in elite female speed-skaters, *J. Biomecha.*, vol.18 2, 91-96, (1985).
 - 4) Boer, R.W. de, Schermerhorn, P., Groot, G. de & Ingen Schenau, G.J. van : Characteristic stroke mechanics of elite and trained male speed skaters, *Int. J. Sport Biomech.*, 2, 175-185, (1986).
 - 5) Delnoij, R., Groot, G. de, Boer, R.W. de & Ingen Schenau, G.J. van : Refinements on the determination of power output during speed skating, in *Biomechanics*, X-B, 691-694, (1987).
 - 6) Doctorevic, A.M. : Zur Bestimmung von Kriterien einer rationellen Bewegungstechnik im Eisschnelllauf, Leistungssport, *Information zur Trainung*, 5, 42-46, (1975).
 - 7) Mueller, M. : *Kinematics of speed skating*, Master's thesis, Univ. of Wisconsin, (1972).
 - 8) Boer, R.W de & Nilsen, K.L. : The gliding and push-off technique of male and female speed skaters, *Int. J. Sport Biomecha.*, 5, 119-134, (1989).
 - 9) Chandler, R. F. : Investigation of inertia properties of human body, *Aerospace Medical Research Lab. Technical Report*, 74-137, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA, (1975).
 - 10) Boer, R.W. de, Ettema, G.J.C., Gorkum, H. van Groot, G. de & Ingen Schenau, G.J. van : Biomechanical aspects of push-off techniques in speed skating the curves, *Int. J. Sport Biomecha.*, 3, 69-79, (1987).
 - 11) Ingen Schenau, G.J. van, Boer, R.W. de & Groot, G. de : On the technique of speed skating, *Int. J. Sport Biomecha.*, 3, 419-431, (1987).
 - 12) ミッチャエルソン, D.L. : 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), (1985).
-

RE-EXAMINATION OF ACCELERATION THEORY IN SPEED SKATING

Masahiro YUUKI, Michiyoshi AE and Takaaki ASAMI

Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

Many researchers have attempted to measure the change in velocity of the center of gravity (CG) for speed skaters in stroking. However, there have been some difficulties in measuring the velocity change in speed skating; they include the very long stride length (about 10 m) and the three-dimensional behavior of the skater's CG.

The purposes of this study were to investigate the push-off technique for top-level Japanese speed skaters and the change in velocity during the push-off phase using 3 D cinematography, and then to examine acceleration theory during the push-off phase in speed skating.

Skaters participating in the 500 m race of the All Japan student championship (1989) were videotaped (60 fields/s) by 10 VTR cameras over 20 m at the crossing zone of the back straightaway. Twenty-two male skaters were selected as subjects and classified into two groups on the basis of the performance of the competition. 3 D coordinates of the segment endpoints were obtained on five sub-areas (each 4 m in length) using a DLT method. Displacement and velocity of the CG and the angles of the hip, knee and ankle joint were calculated.

The results obtained are summarized as

follows:

- 1) Push-off movement for the top group skaters placed the CG further forward than that of the second group.
- 2) The vector derived from the push-off movement for the top group skaters was directed forward, and accelerated the CG of the skaters effectively.
- 3) Increase in the velocity in skating direction for all subjects seemed to contribute more than expected to the acceleration of the CG.

It has been proposed that acceleration in speed skating occurs by push-off of the leg in a direction perpendicular to the gliding direction of the skate, since the force applied to the opposite direction of gliding cannot contribute to acceleration of the CG due to very small frictional force.

However, this theory cannot thoroughly explain the findings obtained for the top skaters in this investigation. Therefore, the acceleration theory should be modified to reflect the fact that the CG of the skater during speed skating is accelerated not only by the push-off perpendicular to the gliding direction but also by an increase in velocity vector in a gliding direction.