

原著論文

スピードスケート男子 1,500m 競技における世界一流スケーターのカーブ滑走技術
Skating technique during the curve of the world's leading male speed skaters in a
1,500-m race

横澤俊治¹⁾, 斉川史徳²⁾, 熊川大介³⁾
Toshiharu Yokozawa¹⁾, Fuminori Saikawa²⁾, Daisuke Kumagawa³⁾

Abstract : Although the record of speed skating has improved worldwide in recent years, the analysis of skating techniques at the international competitions has not progressed. The purpose of this study was to identify the skating technique of the world's leading male speed skaters during the curve of the track in a 1,500-m race. Thirteen skaters who participated in the men's 1,500-m race for the World Cup were selected, including the medalists in the race. Skating motion during the inner curve at the second or third lap was captured using 3 high-speed video cameras. The three-dimensional coordinates of the body were used to calculate the angles of the lower limb joints, the positional relationship between the body center of mass (CM) and the blades, and the heel elevation angle at the instant of the blade-off. All the parameters were analyzed for the correlation with the official time, and the velocity averaged in the section. In result, the characteristics of skaters who held better official time and higher section velocity were as follows: 1) the angular displacement of the right ankle dorsiflexion during gliding was smaller, 2) the angular displacement of the right hip extension and ankle plantarflexion during the push-off and the right heel elevation angle at the instant of the blade-off were smaller, 3) the direction of the right blade horizontal velocity vector was more consistent with that of the CM vector during the right stroke, and 4) the backward displacement of the blade relative to the CM during the right stroke was smaller. These results suggested that in the 1,500-m race the right stroke motion of the world's leading male skater was efficient and easy way to obtain a large centripetal force.

Key words : international competition, kinematics, right stroke, klapskate, blade motion

キーワード : 国際競技会, キネマティクス, 右ストローク, スラップスケート, ブレードの挙動

¹⁾ 国立スポーツ科学センター, ²⁾ 松本市役所, ³⁾ 国士館大学

¹⁾Japan Institute of Sports Sciences, ²⁾Matsumoto City Hall, ³⁾Kokushikan University

E-mail : toshiharu.yokozawa@jpnnsport.go.jp

受付日 : 2020 年 5 月 7 日

受理日 : 2020 年 8 月 11 日

I. 緒言

近年、スピードスケートの国際競技会における記録は急速に向上しており、オリンピック正式種目では、女子 500m を除く全種目において直近 5 シーズン（2014 年以降）で世界記録が更新されている。この間、1998 年オリンピック長野大会直前におけるスラップスケートの導入のような用具面の技術革新などはなく、世界一流スケーターの滑走技術が大きく変化した可能性がある。しかし、近年の滑走技術に関する報告はほとんどないようである。一方、スピードスケートの滑走理論に関する研究の歴史は長く、加速のメカニズムを追求したもの^{1), 17), 28)}、エネルギー論的な分析や理論^{2), 3), 16)}、スラップスケートの利点に関するもの^{4), 7), 8), 18), 27)}がよく知られており、その後のスピードスケートの研究やコーチングの指針となっている。このような研究に対し、国際競技会などを対象に一流スケーターの滑走動作を解析した報告が少ないことは、文献レビューからも明らかである⁹⁾。また、国際競技会の正式種目の一つである 1,500m 競技については、この種目で活躍する選手が他の種目においても好成績を収めていること、スピードの獲得とその持続がともに重要であること²⁰⁾から、1,500m 競技の動作分析によって得られた知見は、スピードスケートに関する多くの種目に応用できる可能性を有すると考えられる。さらに、男子 1,500m 競技は日本がこれまでオリンピックにおいてメダルを獲得したことがなく、日本の競技パフォーマンス向上に寄与するためにも男子 1,500m の研究は重要である。しかし、スピードスケートの 1,500m 競技に関する研究は、ペース配分に関するもの⁶⁾がわずかに報告されているに過ぎない。

スピードスケートはストレートとカーブで動作様式が大きく異なっており、カーブでは右脚を左脚よりも左に交差させて着氷する「レッグオーバー」とよばれる動作が用いられる¹⁾。また、カーブでは、単に滑走速度を大きくするだけでなく、遠心力に抗して氷から反力を得てコースに沿って弧を描かなければ高いパフォーマンスを発揮した

ことにはならない^{20), 25)}。さらに、スピードスケートにおける中・長距離種目は、原則としてストレートでは減速し、カーブで加速することが明らかになっている²⁰⁾。これらのことから、カーブ特有の滑走動作に関して、大きな求心加速度を得ながら大きな滑走速度を獲得する技術を明らかにすることが重要と考えられる。しかし、一流競技者のカーブ滑走動作に関するキネマティクスの研究は非常に少なく、スラップスケート導入後では、2000 年世界選手権男子 5,000m 競技について湯田ら²⁴⁾および Yuda et al.²⁶⁾が、韓国国内一流 500m 選手の事例について Song et al.¹¹⁾が報告している程度である。以上のことから、近年急激に記録が向上している世界一流スケーターのカーブ特有の滑走技術を探求することは、日本のスピードスケート競技が世界水準に達するために急務であると考えられる。

本研究では、スピードスケート国際競技会における男子 1,500m 競技を対象に、世界一流スケーターのカーブ滑走技術を明らかにすることを目的とした。これまでの関連研究や指導書では、体幹が水平に近く、膝関節角度が小さいほど空気抵抗が小さくなるという風洞実験の報告¹⁶⁾、脛に寄りかかるように前傾させる滑走姿勢が望ましいとする指導教本¹⁰⁾、男子 5,000m において世界一流スケーターでは身体の内傾が大きいという報告²⁴⁾、スラップスケートの利点として離氷まで下肢関節の伸展が抑制されずに済むことを指摘する報告¹⁸⁾などがある。そこで、世界一流スケーターは低い姿勢かつ内傾位を維持し、プッシュオフ時にスラップスケートの特性を利用して下肢関節を大きく伸展することによって大きな推進力と求心力を生み出し、ピッチを高めているという仮説を立てた。

II. 方法

1. データ収集

明治北海道十勝オーバルで開催された 2014 年ワールドカップ帯広大会の男子 1,500m 競技を対象とした。1,500m 競技は、1 周 400m のトラック

をバックストレート (Crossing straight) の入口から反時計回りに 3.75 周滑走する競技であり、インナーレーンスタートの選手とアウターレーンスタートの選手が同時に滑走し、2～4 周目のバックストレートで滑走するレーンが入れ替わるものである。日本スケート連盟および大会実行委員会の協力のもとで事前のセッティングおよびデータ収集を実施した。スタートからの加速局面である 1 周目とラストスパートの影響が大きい 4 周目は同競技の典型的な局面とはいえないため²⁰⁾、レース中盤の第 2 カーブ (バックストレート通過直後のカーブ) インナーレーン通過時を対象とした。すなわち、アウターレーンスタートの選手については 2 周目 (550m 付近)、インナーレーンスタートの選手については 3 周目 (950m 付近) を撮影した。入賞者と日本選手を中心に、問題なくデータ収集できた 13 名 (アウターレーンスタート 7 名: 記録 1 分 48 秒 43 ± 1 秒 81、インナーレーンスタート 6 名: 記録 1 分 47 秒 95 ± 1 秒 36、Division A と Division B という 2 つのクラスを合わせたタイムランクでは 44 名中 10 位以内が 7 名、11～20 位が 3 名、21～30 位が 2 名、30 位台前半が 1 名) を分析対象とした。

インナーレーン内側のラインを基準に 2 × 24m の撮影範囲を設定した (Figure 1)。3 台の高速度ビデオカメラ (Phantom v310 および v311、Vision Research 社製) を用いて 2 台はパンニング撮影、1 台は固定撮影した (300 frames/s、露出時間 1/1000 s)。ビデオカメラ間の同期にはワイヤレス LED 型シンクロナイザ (PTS-168、DKH 社製) を用いた。競技開始前に、2m 間隔で較正器を順次立てて全てのビデオカメラで撮影した。

2. データ処理

取得した画像から、ビデオ動作解析システム (Frame-Dias IV、DKH 社製) を用いて身体分析点 21 点およびブレード前後端の計 25 点について、50 Hz でデジタル化した。デジタル化の範囲は、どちらかのブレードが離氷する 0.2 秒前から再び同じブレードが離氷する 0.2 秒後までとした。パンニング DLT 法¹²⁾により得られた分析点 25 点の 3 次元座標を、4 次の Butterworth low-pass digital filter により遮断周波数 2.5-7.5 Hz で平滑化した¹⁹⁾。さらに、横澤ら²¹⁾の競技別身体部分慣性係数より、男子スピードスケート選手の値を参照して身体重心座標を求めた。また、身体重

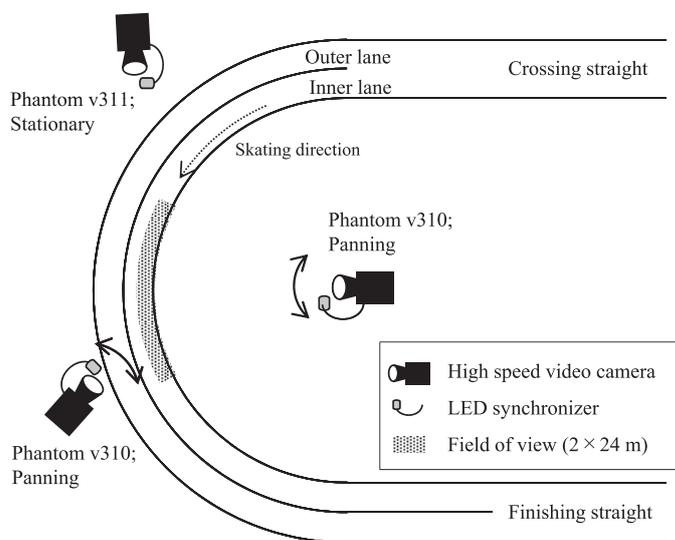


Figure 1. Set-up for the three-dimensional recording.

心速度の水平成分を y 軸、鉛直上向きを z 軸、 y 軸と z 軸との外積を x 軸とする移動座標系を設定し、時々刻々の進行方向に応じた各変量の算出のために使用した。

本研究では、左ブレード離氷から右ブレード離氷までを右ストローク、右ブレード離氷から左ブレード離氷までを左ストロークと定義し、連続する2ストローク（1サイクル）の所要時間の逆数をサイクル頻度とした²⁶⁾。さらに、各ストロークについて片脚支持時間と両脚支持時間についても算出した。

股関節、膝関節、足関節角度は、それぞれ、体幹（両肩峰点中点と両大転子中点を結ぶ線分）と大腿、大腿と下腿、下腿と足部（踵とつま先を結ぶ線分）とのなす角とした（Figure 2-a）。これらの下肢関節角度は、ブレード着氷時、反対ブレード着氷時、ブレード離氷時について算出した。また、ブレード着氷時から反対ブレード着氷時までの角変位をグライディング局面角変位、反対ブレード着氷時からブレード離氷時までの角変位をプッシュオフ局面角変位として算出した。

体幹起こし角は、体幹が水平面（ x - y 平面）となす角とした（Figure 2-a）。また、ストローク側のブレード（先端と後端の中点）から身体重心に向かうベクトルが x - z 平面内で z 軸となす角を身体内傾角と定義した（Figure 2-b）。さらに、 x - y 平面においてブレード速度ベクトルと身体重心速度ベクトルとのなす角（正の場合、ブレードが身体重心に対して右方向に向かって移動している）をブレード速度角と定義した（Figure 2-c）。身体重心高は、身体重心座標の z 成分を身長で除した。体幹起こし角、身体内傾角、ブレード速度角、および身体重心高は、ストロークごとに平均した。さらに、離氷時における身体重心からブレードに向かうベクトルの y 成分の大きさをブレード前後距離と定義した（Figure 2-d）。また、離氷時の足部とブレードとのなす角を踵拳上角と定義した（Figure 2-d）。

3. 統計処理

すべての算出項目について、公式記録および身体重心速度の1サイクル平均（以下、区間速度）とのピアソンの積率相関係数を求めた。公式記録との相関関係はパフォーマンスとの関連を示し、区間速度との相関関係はあくまでそのカーブ区間を高い滑走速度で滑走することとの関連を示すものである。なお、2周目と3周目とでは顕著に滑走速度が異なるため、一括りに各変量と滑走速度との相関を見てしまうと、本来確認したい各変量の個人差と区間速度の個人差との関係が明らかにできない。そこで、各変量と区間速度との相関については、独立変数、従属変数ともに周回ごとの平均値（2周目については7名、3周目については6名の平均値）との偏差を用いた。以下では、変量 A に関する周回平均値との偏差と区間速度に関する周回平均値との偏差との相関のことを、単に「変量 A と区間速度との相関」と言う。いずれも有意水準は5%とした。

Ⅲ. 結果

Table 1 は、時間パラメータに関する平均値、標準偏差、ならびに各変量と公式記録および区間速度との相関係数を示したものである。サイクル頻度、左右ストロークの片脚支持時間、両脚支持時間のいずれも公式記録および区間速度との間に有意な相関関係はみられなかった。

Table 2 には、左右の下肢関節角度および角変位について Table 1 と同様に示した。右着氷時の足関節角度は、公式記録との間に有意な正の相関関係が ($r=0.57$, $p<0.05$)、区間速度との間に有意な負の相関関係がみられた ($r=-0.63$, $p<0.05$)。一方、左ブレード着氷時の右足関節角度については、公式記録との間に有意な負の相関関係が ($r=-0.61$, $p<0.05$)、区間速度との間に有意な正の相関関係がみられた ($r=0.69$, $p<0.01$)。また、右足関節のグライディング局面角変位は、公式記録との間に有意な負の相関関係が ($r=-0.77$, $p<0.01$)、区間速度との間に有意な正の相関関係がみられた ($r=0.82$, $p<0.01$)。右股関節および右足関節の

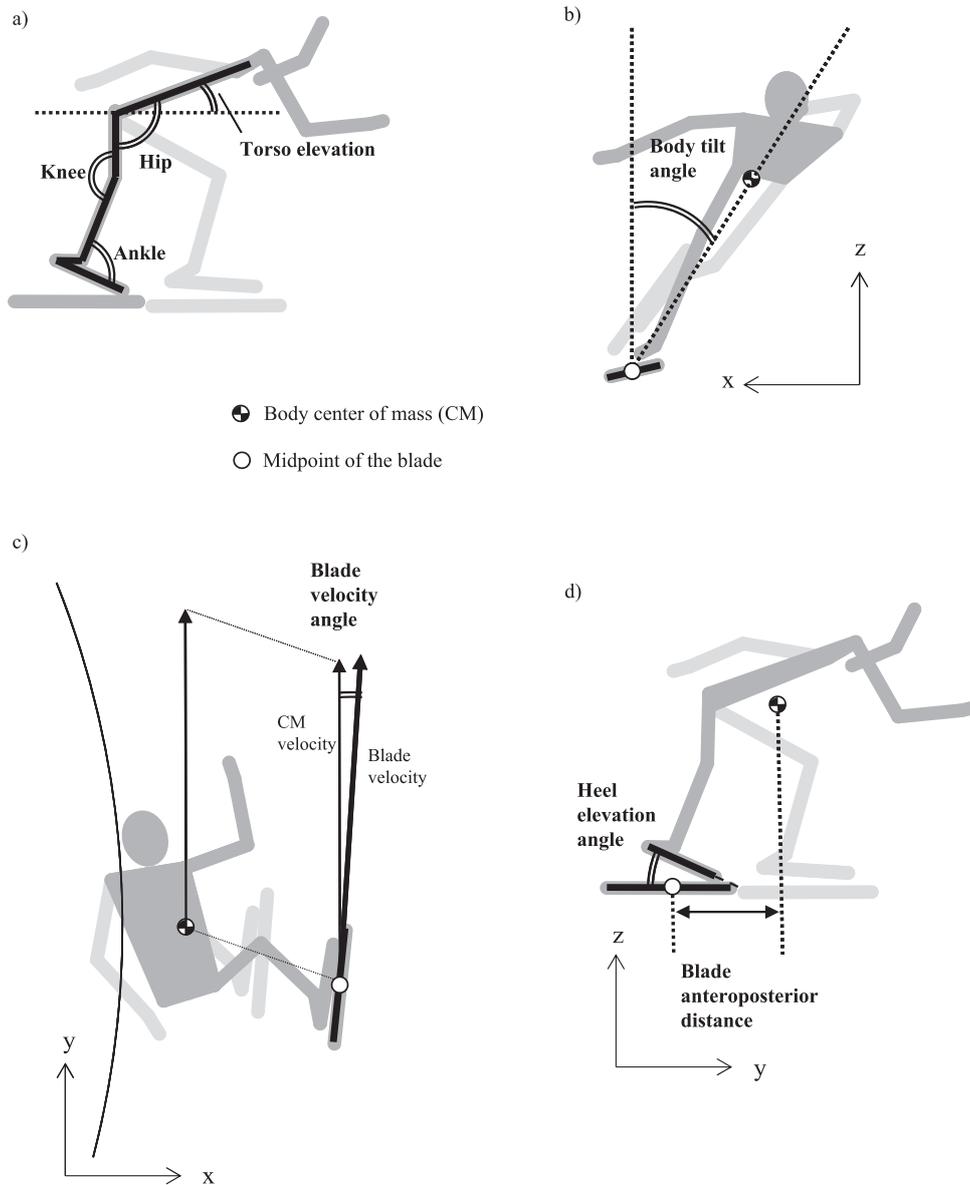


Figure 2. Definition of kinematic parameters; a) hip, knee, ankle, and torso elevation angles, b) body tilt angle, c) blade velocity angle, d) blade anteroposterior distance relative to the body center of mass (CM) and heel elevation angle. Cross-shaped circle and open circle indicate the position of the CM and midpoint of the blade, respectively.

プッシュオフ局面角変位については、公式記録との間に有意な正の相関関係が（股関節： $r=0.59$ 、 $p<0.05$ 、足関節： $r=0.58$ 、 $p<0.05$ ）、区間速度との間に有意な負の相関関係がみられた（股関節： $r=-0.60$ 、 $p<0.05$ 、足関節： $r=-0.56$ 、 $p<0.05$ ）。一方、

左脚の下肢関節角度および角変位については、公式記録および区間速度との間に有意な相関関係はみられなかった。Figure 3は、分析対象者の中で公式記録と区間速度ともに最も優れていた者（以下、メダリスト：公式記録1分45秒台、区間速

Table 1. Mean values and correlation coefficients of the temporal parameters.
r (time) indicates the correlation coefficient with the official time, while r (velocity) indicates the correlation coefficient with the skating velocity during the section.

	Cycle frequency (Hz)	Left stroke		Right stroke	
		Single support (s)	Double support (s)	Single support (s)	Double support (s)
Mean	1.06	0.33	0.10	0.40	0.12
S.D.	0.07	0.04	0.02	0.04	0.02
r (time)	-0.14	0.29	0.16	-0.11	-0.08
r (velocity)	0.21	-0.39	-0.15	0.15	-0.06

Table 2. Mean values and correlation coefficients of the joint angles and joint angular displacements in the lower extremity. * and ** indicate significant correlation, $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively.

	(deg)	Left leg			Right leg		
		Hip	Knee	Ankle	Hip	Knee	Ankle
Angle at blade contact	Mean	48.4	92.2	76.2	59.1	116.8	89.0
	S.D.	5.6	7.0	6.2	6.4	8.0	5.0
	r (time)	-0.06	-0.06	-0.34	-0.39	0.17	0.57 *
	r (velocity)	-0.01	-0.09	0.28	0.31	-0.23	-0.63 *
Angle at opposite blade contact	Mean	89.8	125.2	67.2	99.5	131.1	73.2
	S.D.	6.9	10.8	4.7	7.1	8.8	3.2
	r (time)	0.03	0.04	-0.21	0.13	-0.04	-0.61 *
	r (velocity)	-0.13	-0.18	0.01	-0.16	0.02	0.69**
Angle at blade-off	Mean	111.5	151.6	92.3	116.4	158.0	101.8
	S.D.	6.8	8.1	6.4	8.6	7.5	5.7
	r (time)	0.13	0.13	0.24	0.53	0.39	0.36
	r (velocity)	-0.25	-0.25	-0.42	-0.52	-0.28	-0.31
Angular displacement during gliding	Mean	41.4	32.9	-9.0	40.4	14.3	-15.8
	S.D.	6.1	7.5	7.2	7.1	8.5	6.3
	r (time)	0.09	0.12	0.16	0.48	-0.21	-0.77**
	r (velocity)	-0.15	-0.20	-0.23	-0.38	0.23	0.82**
Angular displacement during push-off	Mean	21.7	26.4	25.0	16.9	26.9	28.6
	S.D.	5.6	6.1	6.8	6.2	8.6	7.0
	r (time)	0.12	0.09	0.37	0.59 *	0.38	0.58 *
	r (velocity)	-0.13	-0.02	-0.40	-0.60 *	-0.26	-0.56 *

度 15.7 m/s) と最も劣っていた者 (以下、下位者: 1 分 50 秒台、区間速度 14.0 m/s) について、矢状面 (y-z 平面) における右ブレード着氷時、左ブレード着氷時、右ブレード離氷時のスティックピクチャーを示したものである。メダリストの動作 (上図) は下位者 (下図) と比較して、右脚 (実線) 足関節の背屈・底屈および右股関節伸展の関節可動範囲が小さいという特徴を有しており、Table 2 から分かる公式記録と区間速度が優れた者の特徴

と共通していた。

Table 3 は、体幹、身体重心、およびブレードに関する変量について Table1 および Table2 と同様に示したものである。体幹起こし角は、両ストロークともに公式記録および区間速度との間に有意な相関関係はみられなかった。右ストローク中の身体内傾角は、公式記録との間には有意な相関関係がみられなかったが ($r = -0.28$)、区間速度との間に有意な正の相関関係がみられた ($r = 0.60$ 、

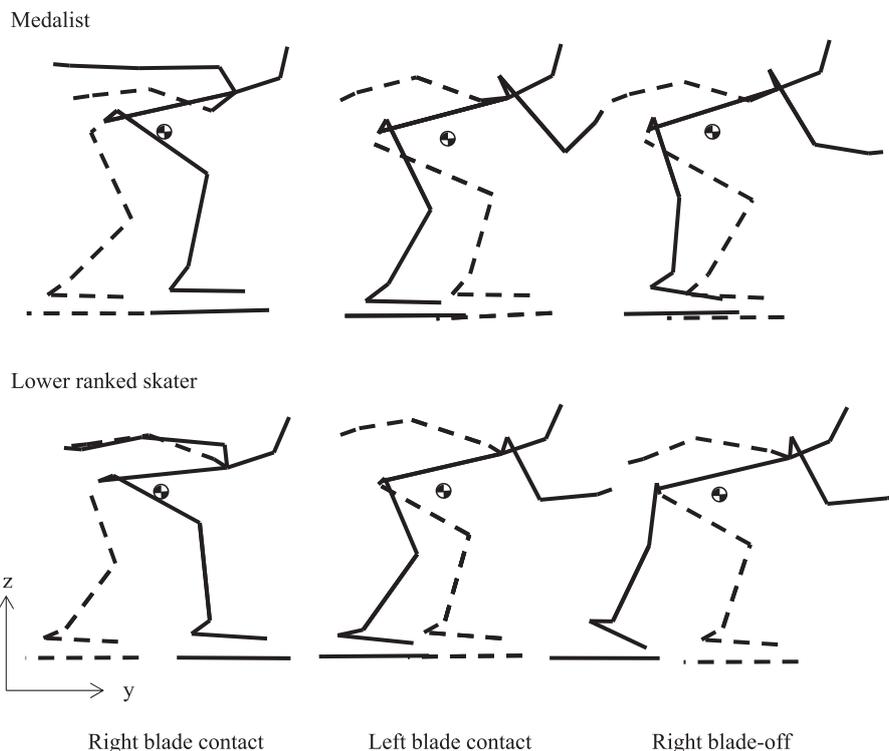


Figure 3. Stick figures with the body center of mass (CM) at the right blade contact, left blade contact, and right blade-off of a medalist and lower ranked skater. Solid and dashed lines indicate right and left segments, respectively.

Table 3. Mean values and correlation coefficients of the parameters in the torso, body center of mass (CM), and blade motions.

		Averaged torso elevation angle (deg)	Averaged body tilt angle (deg)	Averaged blade velocity angle (deg)	CM height relative to body height (no unit)	Blade anteroposterior distance at blade-off (m)	Heel elevation angle at blade-off (deg)
Left stroke	Mean	18.8	37.9	4.0	0.35	0.44	24.7
	S.D.	4.3	1.6	0.6	0.02	0.08	6.9
	r (time)	-0.05	0.02	-0.04	-0.47	0.31	0.42
	r (velocity)	0.05	0.06	0.20	0.36	-0.31	-0.51
Right stroke	Mean	20.0	41.9	3.7	0.35	0.28	19.8
	S.D.	4.5	2.1	0.5	0.01	0.09	4.6
	r (time)	-0.10	-0.28	0.63 *	-0.31	0.57 *	0.81**
	r (velocity)	0.13	0.60 *	-0.66 *	0.19	-0.72**	-0.87**

$p < 0.05$)。また、右ストローク中のブレード速度角については、公式記録との間に有意な正の相関関係が ($r = 0.63$, $p < 0.05$)、区間速度との間に有意な負の相関関係がみられた ($r = -0.66$, $p < 0.05$)。身長に対する身体重心高は、両ストロークともに

公式記録および区間速度との間に有意な相関関係はみられなかった。右離氷時のブレード前後距離については、公式記録との間に有意な正の相関関係が ($r = 0.57$, $p < 0.05$)、区間速度との間に有意な負の相関関係がみられた ($r = -0.72$, $p < 0.01$)。ま

た、右離氷時の踵挙上角については、公式記録との間に有意な正の相関関係が ($r=0.81, p<0.01$)、区間速度との間に有意な負の相関関係がみられた ($r=-0.87, p<0.01$)。なお、表には示していないが、右離氷時の踵挙上角は、足関節プッシュオフ局面角変位との間に有意な正の相関関係が ($r=0.74, p<0.01$)、右離氷時のブレード前後距離との間に有意な正の相関関係がみられた ($r=0.66, p<0.05$)。左脚に関するこれらの変量については、いずれも公式記録および区間速度との間に有意な相関関係はみられなかった。また Figure 3 から、メダリストは下位者と比較して右離氷時にブレードが身体重心に対して後方に位置しておらず、さらに踵の挙上が小さいという点で、Table 3 に示した公式記録と区間速度が優れた者の特徴と共通していたことが分かる。なお、右ストローク中のブレード速度角はメダリストが 3.2 deg、下位者は 4.1 deg であり、右離氷時のブレード前後距離は、メダリストが 0.11m、下位者は 0.43m であった。

Figure 4 には、Figure 3 と同様の 2 名の選手について、各ストローク中の身体重心を原点とした x-y 平面内のブレードの軌跡、すなわち身体重心に対するブレードの相対的な水平位置を示した。いずれの対象者も、左右ストロークともに身体重心に対して右やや前方で着氷し、右後方で離氷し

ていた。また、メダリストの右ストロークにおける前後方向（コース接線方向）の変位をみると、下位者と比べて後方への変位が少なく、離氷直前から身体重心に近づきながら離氷していた。

IV. 考察

1. 仮説の検証

本研究では公式記録と区間速度が優れている者、すなわちパフォーマンスが高い者ほど、低い姿勢かつ内傾位を維持し、プッシュオフ時にスラップスケートの特性を利用して下肢関節を大きく伸展することによって大きな推進力と求心力を生み出し、ピッチを高めているという仮説を立てた。本研究の結果から、この仮説は概ね棄却されたと言える。すなわち、本研究ではサイクル頻度などの時間パラメータはパフォーマンスとの相関がなく (Table 1)、膝関節角度、体幹起こし角、身長に対する身体重心高もパフォーマンスとの相関がなかったことから (Table 2、Table 3)、ピッチや姿勢の高さがパフォーマンスに影響しているとは言えない結果であった。また、右股関節と右足関節のプッシュオフ局面角変位 (Table 2) や、右離氷時の踵の挙上 (Table 3) は、公式記録と正の相関、区間速度と負の相関があり、このことはこれらの変量についてはパフォーマンスが高い者

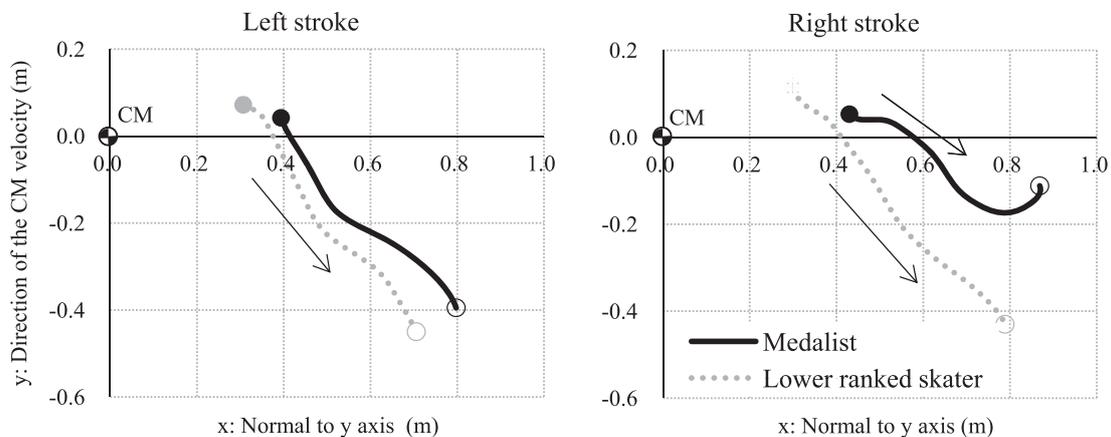


Figure 4. Trajectory of the left and right blades relative to the CM during each stroke of a medalist and a lower ranked skater. Closed and open circles indicate the instant at the blade contact and the blade-off, respectively.

ほどむしろ小さかったことを示している。身体内傾角については、区間速度が大きい者ほど右ストローク中に大きく内傾していたものの、他の変量と異なり、相関があったのは区間速度とのみで公式記録とは相関がなかった (Table 3)。

本研究の結果は、体幹をより水平に近づけ、膝関節をより屈曲位にして身体重心を低くしていた者ほどパフォーマンスが高いというものではないということを示していた。空気抵抗が表面積に比例することを考えれば姿勢を低くすることは理にかなっていると考えられるが¹⁶⁾、一方で Foster et al.⁹⁾ は、スピードスケート滑走中に膝関節をより屈曲位にさせると外側広筋の酸素飽和度が低下したと報告している。以上のことから、空気抵抗の抑制と筋血流量の制限の緩和は相反する関係にあり、個人の体形などに適した基本姿勢が存在すると解釈できるだろう。

1998 年のオリンピック長野大会直前から、ブレードが着氷したまま踵が挙上できるスラップスケートが導入され、スピードスケートの記録が飛躍的に向上した。スラップスケートの利点については多くの議論があるが、離氷直前に足関節底屈動作をしてもブレードを滑走させ続けられることに利点を見出している点では共通している^{4), 7), 8), 18), 27)}。本研究の結果からも、いずれの選手も足関節を底屈させながら離氷前に踵を挙上させ、スラップスケートの構造を活かしていたことが分かる。しかし本研究の結果からは、カーブ右ストロークに関して、右足関節のプッシュオフ局面角変位や右離氷時の踵挙上角が小さい者ほどパフォーマンスが高いことが明らかになった。さらに、右離氷時の踵挙上角は、右足関節のプッシュオフ局面角変位が大きかったものほど大きく、右離氷時のブレード前後距離が大きいものほど大きかった。したがって、カーブの右ストロークでは、足関節を大きく底屈させながらブレードを身体重心に対して後方に移動させることは、離氷時の踵の大きな挙上につながるが、この一連の動作が大きいことは大きな滑走速度に寄与しないと考えられる。

カーブ右ストローク中の身体内傾角に関して、

区間速度が大きい者ほど大きいという結果は、男子 5,000m 競技に関する報告²⁴⁾と共通していた。スケーターに作用する遠心力は滑走速度の 2 乗に比例することを考慮すると、滑走速度が大きくなるほど内向きの求心力を大きくする必要があり、モーメントのつり合いのためには大きく内傾させる必要があったと考えられる。ただし、公式記録とは相関がなかったことから、内傾を大きくすることが世界一流スケーターの滑走技術の一つというよりも、身体内傾角はあくまでバランスを維持するうえで滑走速度に応じて変化する変量であると解釈すべきであろう。

2. 世界一流スケーターのカーブ滑走動作の特徴と合理性

本研究で得られた世界一流スケーターのカーブ滑走動作の特徴は、上述のように仮説とは大きく異なるものであった。以下では、実際に彼らの滑走動作がどのような特徴を有していたかを整理し、その合理性、すなわち滑走技術について考察する。Table 2、Table 3、Figure 3、Figure 4 から分かるパフォーマンスの高い選手の特徴としては、①右脚 (Figure 3 における実線) 足関節の背屈・底屈の関節可動範囲が小さい、②右ストローク中における身体重心に対するブレードの後方への変位が小さいため (Figure 4)、右離氷時のブレード前後距離が小さい (Table 3)、③右股関節と右足関節のプッシュオフ局面角変位が小さい、④右離氷時における踵の挙上が小さい、⑤右ブレード速度角が小さい (Table 3)、すなわちブレードの進行方向が身体重心の進行方向に近い、といったことが挙げられる。これらの特徴をまとめると、パフォーマンスが高い選手、すなわち世界一流スケーターのカーブ滑走動作は、右ストローク中の股関節と足関節の動作範囲、身体重心に対する右ブレードの後方への移動、および離氷時の踵の挙上がいずれも小さく、ダイナミックというよりもむしろコンパクトな動作と言うべきものであったと考えられる。

高速でカーブを滑走するためには、プッシュオ

フの際に遠心力に抗する大きな力、すなわち求心力を得ることが重要である²⁵⁾。また、湯田ら²³⁾は、高い競技水準を有するスピードスケート選手を対象に、陸上において腰に掛けた輪状のベルトを検者の牽引力に抗しながら左方向に移動するカーブ滑走模倣動作を分析した。その結果、右ストロークにおける右足関節に対する身体重心の動きは左側方への移動が主であり、前後成分についてはわずかに後方に移動していた。さらに、カーブ滑走模倣動作はその地面反力左側方成分の大きさとパターンから、氷上カーブ滑走における側方へのプッシュを強調したものと位置づけられると述べている。湯田ら²³⁾が示した知見は、身体重心を基準に考えると、右脚が身体重心に対して後方に流れることなく右側方へ大きな力を作用させていたことを示している。このカーブ滑走模倣動作は競技水準の高い被験者がカーブ特有の技術習得のために実施していたものであることを踏まえると、氷上滑走においても、身体重心に対して右ブレードが後方に流れないほうが、右側方に作用させた大きな力の反作用として大きな求心力を得るために有効だと推察される。さらに左右方向に着目すると、滑走速度が高い者では、体内傾角を大きくする必要があるため右ブレードが身体重心の真下に近いわけではなかったが (Figure 4)、右ブレード速度角は小さかった (Table 3)。これらのことから、滑走速度が高い者でも右ブレードは身体重心に対して右方向に推移するが、身体重心に対してブレードが後方に推移しなかった、すなわち身体重心速度に近いブレード速度の進行方向成分を保持していたことが小さな右ブレード速度角につながったと考えられる。以上のことから、世界一流スケーターでは右ブレードが身体重心に対して後方に推移せずに身体重心移動方向に沿って移動しており、この動作はプッシュオフにおいて大きな求心力を得やすいものであったと推察できる。

反対に、下位者にみられた離氷に向けて右脚が後方に流れる動作は、指導現場で言われる「抜けたプッシュオフ」²²⁾に相当し、身体重心の後方に

残されたブレードで右側方に強く押すことは困難であったと想像できる。ただし、1998年オリンピック長野大会男子500m競技²⁹⁾および2000年世界選手権男子5,000m競技²⁶⁾における右離氷時の身体重心と右ブレードの前後距離を見ると、当時の世界一流スケーターであっても、男子500m競技において0.30-0.45m、5,000m競技において0.25-0.40mであり、本研究の下位者(0.43m)もその範囲に概ね収まっていた。むしろ本研究のメダリストの右離氷時のブレード前後距離(0.11m)は先行研究の値から逸脱しており、身体重心に対して前方に推移しながら離氷するパターン (Figure 4)は先行研究ではみられないものであった。したがって、離氷直前から身体重心に対して右ブレードを前方に近づけ、わずか0.11m後方で離氷するメダリストの動作は、近年になって滑走技術がさらに進歩したことを裏付けるものと考えられる。しかし、本研究を含め、カーブストロークにおいて右ブレード反力と右脚の動作との関係を実際に分析したものは見当たらず、右ブレードが後方に流れないことが大きな求心力の獲得や加速につながるかは今後実証が必要である。

時間パラメータおよび左脚に関する全ての変数については、パフォーマンスとの相関がなかった。これまで、一流競技者のカーブ滑走における時間パラメータとの関係を検討した研究は非常に少ない。Yuda et al.²⁶⁾は、男子5,000m競技のレース後半では滑走速度が高いものほどサイクル頻度が大きいことを報告している。しかし、本研究で対象とした国際競技会出場レベルにある男子1,500m選手の中でより高いパフォーマンスを発揮するためには、サイクル頻度を大きくすることによって大きな滑走速度を得るというよりも、上述のように1回1回のストローク、特に右ストロークのプッシュオフにおいて、大きな力を氷に作用させられる姿勢を取ることが重要であったと考えられる。一方、左ストローク中の滑走動作に関しては、これまで右ストローク以上に注目されてきた^{23), 25), 26)}。これは、カーブの左ストロークではストレートやカーブ右ストロークと異なり、アウ

トエッジでプッシュオフが行われるという特徴があることや²⁴⁾、両ストロークとも分析した結果として左ストロークにおいてパフォーマンスとの関係が顕著であったこと^{24), 26)}が要因と考えられる。種目、対象者、算出項目の定義の違いがあり、本研究の左ストロークに関する結果の要因を先行研究との比較から明らかにすることは困難であるが、近年の男子 1,500m 競技の世界水準の比較では、特に右ストロークに着目すべきであることが本研究から明らかになった。

3. 研究の限界と今後の課題

本研究は、競技会における映像データをもとに分析しており、ブレード反力、関節トルクなどのキネティクスの変数やエナージェティクスの変数を算出していない。このため、世界一流スケーターの滑走動作が滑走速度、推進力、求心力にどのように影響したかは直接明らかにすることができなかった。一方、近年では計測技術が発達し、シューズとブレードとの接続部分に比較的軽量なセンサーを埋め込み、ブレード反力を簡便に計測できるようになってきた^{13), 14), 15)}。しかし、本研究で重要と考えられた世界一流スケーターのカーブ右ストロークの滑走動作に関して、ブレード反力との関係を検討した研究はこれまでなく、今後の重要な研究課題と考えられる。

V. まとめ

本研究の目的は、スピードスケート国際競技会における男子 1,500m 競技を対象に、世界一流スケーターのカーブ滑走技術を明らかにすることであった。キネマティクスの変数と公式記録および区間速度との相関関係を中心に、本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- ①時間パラメータは公式記録および区間速度と相関がなかった。
- ②右足関節角度は、着氷時では公式記録および区間速度が優れている者ほど小さかった、すなわち背屈位だったが、グライディング局面の背屈角変位が小さかったため、反対ブレード着氷時

では公式記録および区間速度が優れている者ほど大きかった。

- ③右股関節および足関節のプッシュオフ局面角変位、ならびに右離氷時における踵の挙上角は、公式記録および区間速度が優れている者ほど小さかった。
- ④区間速度が高い者ほど右ストローク中に身体重心が右ブレードに対して内傾位であった。
- ⑤公式記録および区間速度が優れている者ほど、右ストロークにおいてブレード水平速度ベクトルが身体重心水平速度ベクトルに近い方向を向いていた。また、公式記録および区間速度が優れている者ほど、右ストローク中における身体重心に対するブレードの後方への変位が小さいため、右離氷時のブレード前後距離が小さかった。
- ⑥左脚については、計測した全項目で公式記録および区間速度と相関がなかった。

以上の結果から、男子 1,500m 競技における世界一流スケーターは、カーブ右ストロークにおいて、股関節と足関節の動作範囲、身体重心に対するブレードの後方への移動、および離氷時の踵の挙上がいずれも小さく、コンパクトかつ大きな求心力を得やすい動作をしていたと考えられた。本研究により、近年高速化が進んでいる男子スピードスケート中距離種目のカーブ滑走に関して、右ストロークの滑走技術の重要性が示唆された。

謝辞

本研究の実施にあたり、公益財団法人日本スケート連盟ならびにワールドカップ帯広大会実行委員会の関係者から、撮影の承諾や撮影のための環境整備など多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 1) de Boer RW, Ettema GJC, van Gorkum H, de Groot G, van Ingen Schenau GJ. Biomechanical aspects of push-off techniques in speed skating the curves. *Int J Sport Biomech*, 3: 69-79, 1987.

- 2) de Boer RW, Ettema GJ, van Gorkum H, de Groot G, van Ingen Schenau GJ. A geometrical model of speed skating the curve. *J Biomech*, 21(6): 445-450, 1988.
- 3) de Boer RW, Nilsen KL. Work per stroke and stroke frequency regulation in Olympic speed skating. *Int J Sport Biomech*, 5: 135-150, 1989.
- 4) de Koning JJ, Houdijk H, de Groot G, Bobbert MF. From biomechanical theory to application in top sports: the Klapskate story. *J Biomech*, 33(10): 1225-1229, 2000.
- 5) Foster C, Rundell KW, Snyder AC, Stray-Gundersen J, Kemkers G, Thometz N, Broker J, Knapp E. Evidence for restricted muscle blood flow during speed skating. *Med Sci Sports Exerc*, 31(10): 1433-1440, 1999.
- 6) Hettinga FJ, de Koning JJ, Schmidt LJ, Wind NA, Macintosh BR, Foster C. Optimal pacing strategy from theoretical modelling to reality in 1500-m speed skating. *Br J Sports Med*, 45(1): 30-35, 2011.
- 7) Houdijk H, Bobbert MF, de Koning JJ, de Groot G. The effects of klapskate hinge position on push-off performance: a simulation study. *Med Sci Sports Exerc*, 35(12): 2077-2084, 2003.
- 8) Houdijk H, de Koning JJ, de Groot G, Bobbert MF, van Ingen Schenau GJ. Push-off mechanics in speed skating with conventional skates and klapskates. *Med Sci Sports Exerc*, 32(3): 635-641, 2000.
- 9) Konings MJ, Elferink-Gemser MT, Stoter IK, van der Meer D, Otten E, Hettinga FJ. Performance characteristics of long-track speed skaters: A literature review. *Sports Med*, 45(4): 505-516, 2015.
- 10) 白幡圭史, 今村俊明, 井出敏彦. 氷上滑走技術. 日本スケート連盟スピードスケート強化部編, スピードスケート指導教本滑走技術初級編. 日本スケート連盟スピードスケート強化部, pp.4-23, 2010.
- 11) Song JH, Park JC, Kim JS. Kinematic analysis of the technique for 500m speed skaters in curving. *Korean J Sport Biomech*, 28(2): 93-100, 2018.
- 12) 高松潤二, 阿江通良, 藤井範久. 大きな計測範囲のためのパンニング DLT 法の開発. *体育学研究*, 42(1): 19-29, 1997.
- 13) van der Kruk E, den Braver O, Schwab AL, van der Helm FCT, Veeger HEJ. Wireless instrumented klapskates for long-track speed skating. *Sports Engineering*, 19: 273-281, 2016.
- 14) van der Kruk E, Schwab AL, van der Helm FCT, Veeger HEJ. Getting in shape: Reconstructing three-dimensional long-track speed skating kinematics by comparing several body pose reconstruction techniques. *J Biomech*, 69: 103-112, 2018.
- 15) van der Kruk E, Veeger HEJ, van der Helm FCT, Schwab AL. Design and verification of a simple 3D dynamic model of speed skating which mimics observed forces and motions. *J Biomech*, 64: 93-102, 2017.
- 16) van Ingen Schenau GJ. The influence of air friction in speed skating. *J Biomech*, 15(6): 449-458, 1982.
- 17) van Ingen Schenau GJ, de Groot G, de Boer RW. The control of speed in elite female speed skaters. *J Biomech*, 18(2): 91-96, 1985.
- 18) van Ingen Schenau GJ, de Groot G, Scheurs AW, Meester H, de Koning JJ. A new skate allowing powerful plantar flexions improves performance. *Med Sci Sports Exerc*, 28(4): 531-535, 1996.
- 19) Winter DA. Kinematics. In: Winter DA (Ed.) *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd edition, John Wiley and Sons, pp.13-58, 2005.
- 20) 横澤俊治, 加藤恭章, 紅楳英信, 熊川大介. スピードスケート国際競技会の中長距離レースにおける滑走軌跡と速度の分析. *Sports*

- Science in Elite Athlete Support, 3: 27-38, 2018.
- 21) 横澤俊治, 辻村諒太, 窪康之, 高橋英幸, 岡田英孝. 国内一流競技者の競技別身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Elite Sports Support*, 8(1): 11-27, 2016.
- 22) 湯田淳. 陸上トレーニング. 日本スケート連盟スピードスケート強化部編, スピードスケート指導教本滑走技術初級編. 日本スケート連盟スピードスケート強化部, pp.24-25, 2010.
- 23) 湯田淳, 村田正洋, 田内健二, 青柳徹. スピードスケートにおける陸上トレーニング手段としてのカーブ滑走模倣動作のバイオメカニクス的研究. *スポーツ方法学研究*, 21(2): 125-137, 2008.
- 24) 湯田淳, 結城匡啓, 阿江通良. 日本ジュニア長距離スピードスケート選手のカーブ滑走動作に関するバイオメカニクス研究-世界一流選手との比較から-. *スポーツ方法学研究*, 16(1): 1-11, 2003.
- 25) Yuda J, Yuki M, Aoyanagi T, Fujii N, Ae M. Changes in blade reaction forces during the curve phase due to fatigue in long distance speed skating. *Int J Sport Health Sci*, 2: 195-204, 2004.
- 26) Yuda J, Yuki M, Aoyanagi T, Fujii N, Ae M. Kinematic analysis of the technique for elite male long-distance speed skaters in curving. *J Appl Biomech*, 23(2): 128-138, 2007.
- 27) 結城匡啓. スピードスケートの動作解析. *計測と制御*, 38(4): 236-241, 1999.
- 28) 結城匡啓, 阿江通良, 浅見高明. 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: 111-121, 1992.
- 29) 結城匡啓, 阿江通良, 藤井範久, 岡田英孝, 高松潤二, 島田一志, 窪康之, 榎本靖士, 湯田淳. 長野オリンピック男子 500m 日本代表選手におけるカーブ滑走動作の 3 次元解析. 日本体育協会スポーツ科学委員会編, 平成 10 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告 No. II 競技種目別競技力向上に関する研究 - 第 22 報 -. 日本体育協会スポーツ科学委員会, pp.247-251, 1999.