

支持脚伸展動作からみたスピードスケート500m競技での 氷上加速運動と陸上模倣運動の諸特性の比較

湯田 淳¹⁾ 村田正洋²⁾ 横澤俊治³⁾ 山田 哲⁴⁾ 青柳 徹⁵⁾

Comparison of some characteristics during propulsive movement in 500m speed skating race and imitating movement on the viewpoint of motions of support leg extension

Jun Yuda¹⁾, Masahiro Murata²⁾, Toshiharu Yokozawa³⁾, Tetsu Yamada⁴⁾ and Toru Aoyanagi⁵⁾

Abstract

The purpose of this study was to identify an effective technique in the support leg extension for sprint speed skaters. Ten junior and 9 senior elite male skaters who participated in a 500 m race were videotaped with 2 synchronized high-speed video cameras (250 fps) positioned at the middle of the home straight (~50 m from the start line); the recorded images were analyzed using a panning direct linear transformation technique. The three-dimensional coordinates of the segment endpoints and blades were determined to calculate the kinematic variables during the right stroke. On the other hand, skaters performed a single leg skate jump test on a tartan track. The ground reaction forces and three-dimensional coordinates of the segment endpoints were determined to calculate the kinetic variables at the right support leg by using an inverse dynamics approach. During the first half of the stroke in the ice skating performance, the change in the forward displacement of the center of mass in the senior group was greater than that in the junior group; this was attributable to the smaller segment angle of the shank in the support leg for the senior group. This indicates that a greater anteversion of the shank is a technical characteristic of an excellent skater. While the vertical ground reaction force in the single leg skate jump test greatly increased, the senior group maintained a smaller segment angle of the shank and a greater knee extension torque in the support leg. On the other hand, knee extension torque in the support leg for the junior group decreased temporarily owing to increase of the segment angle of the shank. Thus, the ability to maintain a greater knee extension torque with a greater load in the lower limb is an important factor for acceleration during the straight skating in the first half of the 500m race.

Key words: speed skating, three-dimensional motion analysis, propulsive technique in straight skating, imitating motion, joint torque at the lower limb

スピードスケート, 3次元動作分析, ストレート加速動作, 模倣動作, 下肢関節トルク

I. 緒言

スピードスケートにおける短距離種目としては500m競技が挙げられ, その所要時間は35 - 40秒程度である。レース中の滑走スピードは最大でおよそ60kmに

も達するため(湯田ほか, 2002), 優れた成績を出すためには身体重心を効果的に加速させる滑走技術が要求される。このため, スピードスケートにおける滑走スピードに影響を及ぼす要因についての研究は多く(van Ingen Schenau and Bakker, 1980; van Ingen

-
- 1) 日本女子体育大学体育学部
Japan Women's College of Physical Education
 - 2) 財団法人日本自転車競技連盟
Japan Cycling Federation
 - 3) 国立スポーツ科学センタースポーツ科学研究部
Department of Sports Sciences, Japan Institute of Sports Sciences
 - 4) 兵庫医療大学リハビリテーション学部
Faculty of Rehabilitation, Hyogo University of Health Sciences
 - 5) 日本体育大学
Nippon Sport Science University

Schenau, 1982 ; van Ingen Schenau et al., 1987 ; de Koning et al., 1987, 1992a), 滑走中の出力パワーや空気抵抗などといった力学的側面から検討が行われている。また, 大きな滑走スピードを得るための優れた滑走技術についての報告もみられ (van Ingen Schenau et al., 1983, 1985 ; de Boer et al., 1986 ; de Boer and Nilsen, 1989a, 1989b), 一流スピードスケート選手の滑走動作の特徴が競技水準の劣る鍛錬選手などとの比較からキネマティクスの的に検討されている。このように, スピードスケート滑走において競技力向上のために考慮すべき要因を明らかにするという観点からは有益な知見が得られているといえよう。しかし, これらの研究においては, 滑走運動という3次元的な運動を2次元的に捉えていることや比較対象とする被験者の競技水準が低いなどの問題点が挙げられ, 競技水準の高い一流選手への十分な技術的示唆は得られていない。

短距離種目の競技力向上のために有効な加速技術については3次元画像分析法を用いて詳細に検討されてきており, 競技水準の高い一流選手への示唆が得られてきている。結城ほか (1991) は, 国内競技会における男子500m競技を対象として競技成績とストレート滑走における各種力学的パラメータとの関係について検討した結果, 優れたスケーターは重心をより前方へ大きく変位させるようなプッシュオフ動作を行っていたことを報告している。また, 結城ほか (1996) は, スケートブレードに作用する二分力が測定できるセンサースケートを開発し, ストレート滑走中のブレード反力を計測している。その結果, 世界記録を有する極めて高い競技水準のスケーターでは, スケートブレードの内傾 (身体の内側への傾斜) および力の作用点が前方へ移動するタイミングが早いことによって力の水平成分の立ち上がりが早くなっていると報告している。その後, ストレート滑走中の下肢関節トルクと水平ブレード反力との関係を検討し, 加速にとって有効な水平ブレード反力を生み出すためにはストローク前半における股関節での外転トルク発揮が重要となることを示唆している (結城, 1999)。これらのように, 加速動作についてはキネマティクスおよびキネティクスの側面から詳細に研究が行われており, メカニズムの解明を通して効果的な加速技術が示唆されている。しかし, これらはいずれも最大スピードが出現する, 比較的定常スピードに近い局面での加速動作の分析から得られた知見である。

スピードスケート500m競技の滑走スピードの変化について検討した研究は多く (Fokichev et al., 1990 ; 結城ほか, 1998, 1999 ; 湯田ほか, 2002, 2006), 最大スピードはバックストレート (200m - 300m区間) またはそれ以降で出現することが報告されている。これは500m競技では, スタートからバックストレートまでといった比較的長い区間が加速局面となることを意味している。そして, 滑走スピードはスタート後, 100m通過時点までの間に急激に増大し, 第1カーブ (100m - 200m区間) ではすでに最大スピードに近い値まで増大していることが報告されている。スピードスケート滑走では氷摩擦抵抗が極めて小さいため (de Koning et al., 1992a), 低速から高速までの加速においては, ストロークごとに得られるスピードの増加量が滑走距離の増大に伴って累積され, 最終的に大きな滑走スピードに到達すると考えられる。したがって, レース中盤において最終的に大きな最大スピードを獲得するためには, スタート後に早い時点で大きな滑走スピードを得ておくことが効果的であるといえる。しかし, このような低速からの急激な加速が行われる局面での加速技術について詳細に検討した報告はまだない。これまでの先行研究で分析された最大スピード出現付近での加速動作 (結城ほか, 1991, 1996 ; 結城, 1999) は, 高速滑走付近での加速に相当するため, そこで得られるスピードの増加量は小さい。このため, この局面で得られた有効な加速技術を, 低速からの急激な加速局面にそのまま当てはめることができるかは疑問が残る。また, これらの先行研究で得られた加速技術に関する知見は, 踵の離れない従来のスケートから得られた結果であるため, 踵が離れるスラップスケートでの加速技術という観点からも再検討する必要がある。

スピードスケート滑走は極めてスピードが大きい移動運動であり, それは空気摩擦および氷摩擦に打ち勝ちながらの爆発的な支持脚伸展動作によって自身の体を加速させることによって達成されている (van Ingen Schenau, 1982 ; de Groot et al., 1985 ; van Ingen Schenau et al., 1987 ; de Koning et al., 1992a)。このため, 短距離種目の競技成績に及ぼす体力的要因については, 筋力 (根本ほか, 1984) や下肢パワー (Geijsel et al., 1984) などといった観点からその重要性が示唆されている。しかし, これらの体力的側面からのパラメータのみでは高い競技水準間の競技力の差異を十分に説明できないことが報告されており (van Ingen Schenau et al., 1992), その原因として, 被験者の競技水準の幅が

広すぎることや、用いた運動が単関節での膝関節伸展動作や自転車ペダリング運動などといった一般的運動であることが指摘されている(湯田ほか, 2008b)。極めて高い競技水準にある短距離選手の加速動作では、支持脚伸展における力発揮の最大値が大きいことではなく、そのタイミングが早いといった特徴がみられる(結城ほか, 1996)ことを考慮すると、体力的側面からスピードスケート加速技術を詳細に評価するためには、滑走動作を考慮した動きの中での力発揮を詳細に検討する必要があるといえる。

スピードスケートは冬季種目のため、非氷上期におけるトレーニング手段として、スピードスケート滑走動作を模倣した多くの体力トレーニング手段が用いられている(de Boer et al., 1987; Kloosterboer, 1999; 湯田ほか, 2007, 2008a)。これらの模倣動作は、両端にストッパーが取り付けられた摩擦の小さな板の上を左右に滑走するためのスライドボード(Kandou et al., 1987)など、特別な機器を要さずに、夏季においても簡便に実施できることから多くのスケート選手が活用しているという実態がある。したがって、このような模倣動作について、氷上での加速技術と関連づけてその動作の特徴を明らかにすることができれば、体力の向上を有効に水上パフォーマンスへつなげるための支持脚伸展技術の評価に活用できると考えられる。そして、このような検討は、陸上での専門的トレーニングにおける動作の観点からみた評価基準の明確化へと繋がり、水上パフォーマンスの発現に優れる体力的要因を有する子供を見分けるといったタレント発掘などへの活用が期待できよう。

本研究の目的は、スピードスケート短距離種目での急激な加速局面におけるストレート滑走動作のキネマティクスの特徴を明らかにし、陸上でのスピードスケート模倣動作の一つである片脚スケートジャンプのキネティクスの特徴と関連づけて検討することにより、加速にとって有効な支持脚伸展技術を獲得するためのトレーニング指導に役立つ知見を得ることである。

II. 方法

1. 被験者

被験者には、スピードスケート短距離種目を専門とする男子ジュニア選手10名(以下、ジュニア群)およびシニア選手9名(以下、シニア群)の計19名を用いた。計測に先立ってこれらの被験者には、研究のねら

いや意義、計測状況、安全性などを説明し、被験者と指導者(コーチ)から協力の同意を得た。

2. 氷上での滑走動作の計測

2.1 分析対象およびVTR撮影

被験者19名のうち、14名は長野市オリンピック記念アリーナ(エムウェーブ)で開催された第13回全日本スピードスケート距離別選手権大会における男子500m競技(2006年10月28日)を、残りの5名は当日の競技終了後に同様の条件下において実施された500mタイムトライアルを分析対象とした。なお、被験者はいずれもスラップスケートを使用していた。ホームストレート中央付近のインレーンに幅4m、長さ24m、高さ1.5mの計測範囲を設置し、同期した2台の高速VTRカメラ(NAC社製, HSV-500C³)により側方(パンニング)および後方(固定)から選手を撮影した(撮影スピードは250 fps, 露出時間は1/500s)。なお、計測範囲の設置においてはホームストレート中央付近にある1000m競技のゴールライン(500m競技スタートラインから55.21mの地点)を活用したため、本研究での計測範囲の開始および終了地点はそれぞれ、500m競技スタートラインから51.21m, 75.21mであった。

2.2 測定項目およびその算出法

得られたVTR画像からVTR digitizer (DKH社製, Frame-Dias II)により身体各部位21点、ブレード端点4点およびリファレンスポイント1点(計26点)をデジタイズし、分析点25点の3次元座標をパンニングDLT法(高松ほか, 1997)により算出した。得られた3次元座標は、残差分析法(Winter, 1990)により最適遮断周波数を決定し、4次のButterworth low-pass digital filterにより平滑化した。用いた遮断周波数は6.3–16.3Hzであった。本研究では、左ブレード離氷から右ブレード離氷までを1ストロークと定義し、この局面において支持脚となる右脚について分析を行った。その後、阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて身体重心の座標を求め、その変位を算出した。

身体重心変位から重心速度ベクトルを算出し、静止座標系の原点を重心速度ベクトルの始点に移動した後、Y軸と重心速度ベクトルが一致するように座標変換することによって、身体重心を原点とする移動座標系(X', Y', Z')を決定した。Fig.1に本研究における右支持脚の角度定義を示した。部分角度は、左右の大転子中点と胸骨上縁を結んだベクトル、右大転子と右膝

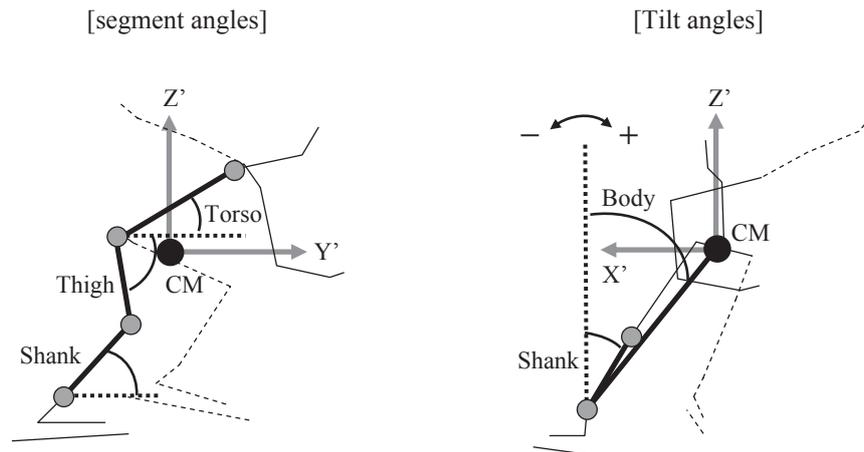


Fig. 1 Definition of angles for the right support leg in this study.

関節を結んだベクトルおよび右足関節と右膝関節を結んだベクトルがY'軸となす角をそれぞれ体幹角、大腿角および下腿角とし、いずれも各ベクトルをY'-Z'平面に投影することによって算出した。傾斜角度は、右足関節と身体重心を結んだベクトルおよび右足関節と右膝関節を結んだベクトルがZ'軸となす角をそれぞれ身体傾斜角および下腿傾斜角とし、いずれも各ベクトルをX'-Z'平面に投影することによって算出した。なお、傾斜角では、身体の内側への傾斜を正（内傾）、外側への傾斜を負（外傾）とした。

3. 陸上での支持脚伸展動作の計測

3.1 実験運動

被験者には、下肢を深く屈曲し、上体を前傾させたスピードスケート滑走と同様の片脚支持姿勢からの上方への1回全力跳躍（片脚スケートジャンプ）を行わせた。支持脚は右脚とし、被験者には下肢の反動動作を伴わないようにスタート姿勢（低い姿勢）で数秒間静止した後、できるだけ高く跳躍するように指示した。跳躍における遊脚および上肢の動作は任意とした。なお、前項の通り、本研究で対象とした滑走動作は低速からの急激な加速局面でのものであり、この局面においてスケーターは極めて大きなパワー発揮を求められることとなる（de Koning et al., 1992b）。このため、本研究では、スピードスケート模倣動作に関する先行研究（湯田ほか, 2007, 2008b）を踏まえ、特別な機器を要さずに非氷上期においても簡便に実施でき、より大きな支持脚伸展パワー発揮を要する片脚スケートジャンプを実験運動として採用した。

3.2 データ収集法

実験室内のタータントラック上に幅3m、長さ2.9m、高さ2.5mの計測範囲を設置し、範囲内に埋設してあるフォースプラットフォーム上で試技を行わせた。撮影は同期した2台の高速VTRカメラ（NAC社製、HSV-500C³）により側方および後方から行い（撮影スピードは250fps、露出時間は1/500s）、1台のフォースプラットフォーム（Kistler社製、Type 9287B）により右支持脚に作用する地面反力を測定した。フォースプラットフォームからの信号は専用アンプを介してA/D変換し、サンプリング周波数500Hzでパーソナルコンピュータに取り込んだ。また、同期ランプの画像への映し込みおよび同期信号のA/D変換ボードへの取り込みによってVTR画像と地面反力データとの同期を行った。

3.3 測定項目およびその算出法

得られたVTR画像からVTR digitizer（DKH社製、Frame-Dias II）により身体各部位23点をデジタイズし、DLT法（池上ほか, 1991）を用いて3次元座標を算出した。得られた3次元座標は、残差分析法（Winter, 1990）により最適遮断周波数を決定し、4次のButterworth low-pass digital filterにより平滑化した。用いた遮断周波数は3.1-8.8Hzであった。その後、阿江（1996）の身体部分慣性係数を用いてセグメントの質量、重心位置および主慣性モーメントを算出した。本研究では、動作開始後、地面反力の鉛直成分が体重の5%を超えた時点から離地までを支持脚伸展局面と定義し、この局面において支持脚となる右脚について分析を行った。

静止座標系において算出された地面反力のX, YおよびZ成分をそれぞれ前後, 側方および鉛直成分とし, 本研究では値の大きかった前後および鉛直成分を分析対象とした. 鉛直成分については, ストローク中の値を数値積分することによって力積を算出した. また, 水上滑走動作の計測と同様に, 左右の大転子中点と胸骨上縁を結んだベクトル, 右大転子と右膝関節を結んだベクトルおよび右足関節と右膝関節を結んだベクトルが静止座標系におけるX軸となす角をそれぞれ体幹角, 大腿角および下腿角とし, いずれも各ベクトルを静止座標系のX-Z平面に投影することによって部分角度を算出した. さらに, 画像分析から得られたキネマティクスのパラメータと, フォースプラットフォーム測定から得られた地面反力を用い, 湯田ほか(2007)の方法にしたがって右支持脚の3次元関節トルク, 関節角速度および関節トルクパワーを算出した. なお, ここで設定された下肢関節の運動軸は, 股関節では内外転軸, 屈伸軸および内外旋軸の3軸, 膝関節では屈伸軸と内外旋軸の2軸, 足関節では底背屈軸と回内外軸の2軸であったが, 本研究ではそれぞれの関節において大きな関節トルクおよびトルクパワー値を示した股および膝関節屈伸軸, 足関節底背屈軸に絞って分析を進めた.

4. データの規格化および統計処理

関節トルクおよびトルクパワーは被験者の身体質量(kg)で, 地面反力および力積は被験者の体重(身体質量と重力加速度の積で, 本研究ではbwと表記)で除して示した. また, 時系列データは, ストロークまたは支持脚伸展局面に要した時間で規格化し, ジュニア群およびシニア群においてそれぞれ平均したものを平均パターンとした.

測定項目のジュニア群とシニア群の差を検定するために対応のないt検定を行った. また, 2変数の関係をみるために相関係数を算出した. これらの有意水準

はいずれも5%未満とした.

III. 結果

1. 被験者の特徴

被験者の身長, 体重はそれぞれ, ジュニア群では $1.71 \pm 0.04\text{m}$, $66.8 \pm 6.5\text{kg}$, シニア群では $1.69 \pm 0.03\text{m}$, $70.2 \pm 4.3\text{kg}$ であり, いずれにおいても群間に有意差はみられなかった. また, 年齢はジュニア群(17.2 ± 1.0 歳)の方がシニア群(21.8 ± 1.4 歳)よりも有意に小さかった ($p < 0.001$).

2. 500mレースおよび片脚スケートジャンプのパフォーマンス

Table 1にジュニア群およびシニア群における500mレースの競技成績および片脚スケートジャンプの測定結果を平均値および標準偏差で示した. 500mレースでは, 100m通過時間 ($p < 0.001$), ゴールタイム ($p < 0.001$) およびストローク所要時間 ($p < 0.05$) のいずれにおいてもシニア群の方がジュニア群よりも有意に小さかった. 片脚スケートジャンプでは, 最大重心高, 支持脚伸展時間および鉛直力積のいずれにおいても群間に有意差はみられなかった.

3. 水上での支持脚伸展動作

Fig.2にジュニア群およびシニア群におけるストレート滑走中の部分角度の変化を平均値および標準偏差で示した. 体幹角は, いずれの群もストローク中の変化は小さく, 体幹は一定の角度が保たれていた. 大腿角は, いずれの群もストローク開始から終了へ向けて急増し, ストローク終了へ向けて大腿は急激に起き上がっていた. 下腿角は, いずれの群もストローク開始から漸減し, ストローク終了へ向けて下腿は前傾していた. ストローク中, ジュニア群の方がシニア群よりも大きな値を示し, ストローク開始時 (Junior, 76.3

Table 1 Comparison of the performance of the 500m race and single leg skate jump test in the junior and senior groups.

	500m race			Single leg skate jump test		
	Split time at 100m (s)	Goal Time (s)	Stroke time (s)	Maximal height of CM (m)	Time during push on ground (s)	Impulse of vertical GRF (Ns/bw)
Junior (n=10)	10.24 ± 0.21	37.96 ± 0.65	0.37 ± 0.03	1.37 ± 0.07	0.54 ± 0.08	0.79 ± 0.07
Senior (n=9)	9.89 ± 0.12	36.45 ± 0.73	0.34 ± 0.01	1.35 ± 0.04	0.58 ± 0.09	0.82 ± 0.09
Difference	J>S***	J>S***	J>S*	ns	ns	ns

* : $p < 0.05$, *** : $p < 0.001$

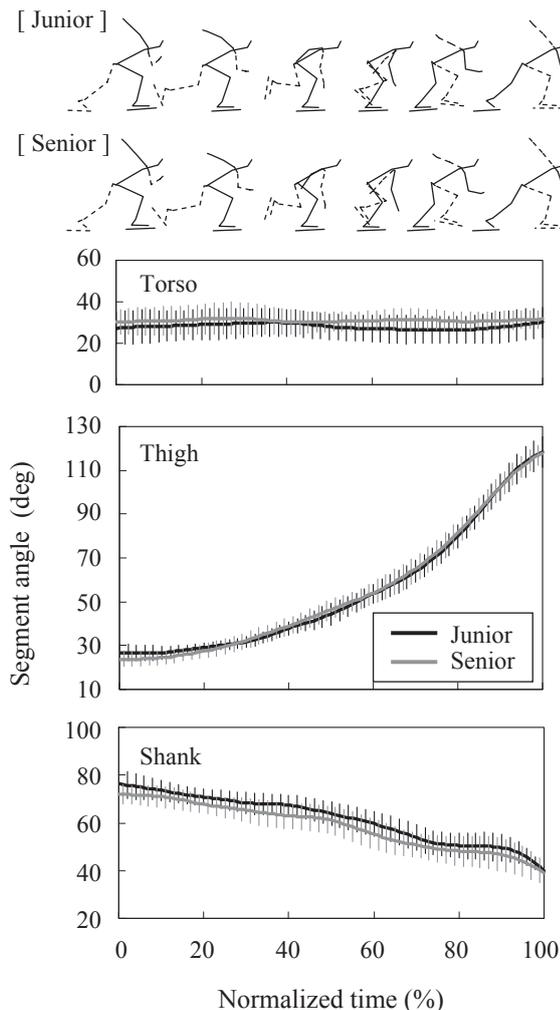


Fig. 2 Segment angles of the right support leg during the straight skating in the junior and senior groups.

± 5.8 deg vs. Senior, 72.0 ± 4.3 deg) および20%時 (Junior, 70.8 ± 3.4 deg vs. Senior, 67.8 ± 3.8 deg) においてはジュニア群の方が大きい傾向 ($p < 0.1$) が, 40%時 (Junior, 67.5 ± 4.3 deg vs. Senior, 62.8 ± 5.3 deg) においては有意差がみられた ($p < 0.05$).

Fig.3にジュニア群およびシニア群におけるストレート滑走中の傾斜角度の変化を平均値および標準偏差で示した. 身体傾斜角は, いずれの群もストローク開始後に漸増し, ストローク終了に向けてより内傾するように変化していた. 下腿傾斜角は, いずれの群もストローク開始時には負の値を示し, 下腿が外傾していた. いずれの群もストローク開始から下腿傾斜角は漸増し, 20%付近で正に転じて下腿は内傾し, ストローク終了に向けて漸増していた. また, ストローク開始から30%付近まではシニア群の方がジュニア群よりも大きな値を示し, 値が正に転じる(下腿が外傾

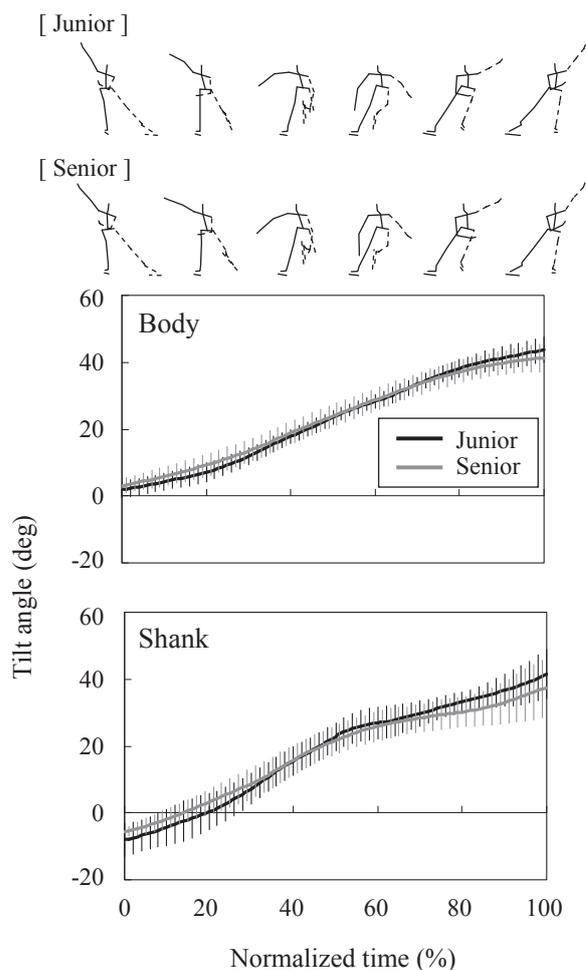


Fig. 3 Tilt angles of the right support leg during the straight skating in the junior and senior groups.

から内傾に転じる) タイミングはシニア群の方が早かった. また, 70%付近からストローク終了まではジュニア群の方がシニア群よりも値は大きく, 下腿はより内傾しており, 80%時 (Junior, 33.2 ± 2.9 deg vs. Senior, 30.1 ± 4.4 deg) においてはジュニア群の方が大きい傾向 ($p < 0.1$) がみられた.

Fig.4にジュニア群およびシニア群におけるストレート滑走中の右支持脚足関節に対する身体重心の水平面内における軌跡を平均値で示した. 図中の原点は右足関節を示しており, 身体重心の軌跡には20%ストロークごとに丸印を付した. いずれの群も身体重心はストローク開始後, 右支持脚後方付近から左側方への移動を伴って前方へと大きく移動していくという変化パターンを示した. 20%ストロークごとの重心位置は, いずれの時点においても側方および前方成分ともに群間に有意差はみられなかった. 20%ストロークご

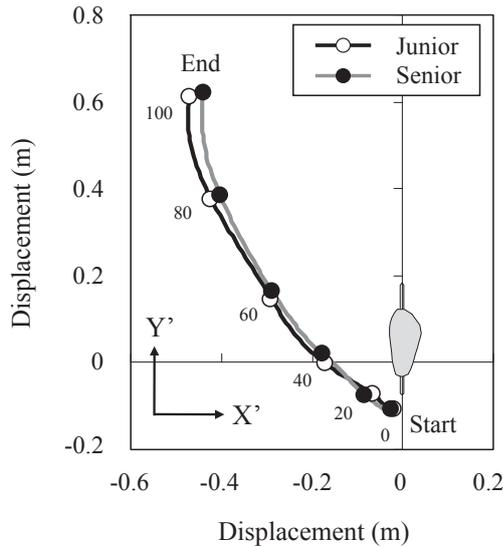


Fig. 4 Trajectories of the center of mass on the horizontal plane, relative to the ankle of the right support leg during the straight skating in the junior and senior groups. The circles are drawn at every 20% time of stroke.

との重心変位量は、側方成分では60-80%時においてジュニア群 ($0.13 \pm 0.03\text{m}$) の方がシニア群 ($0.11 \pm 0.02\text{m}$) よりも大きい傾向 ($p < 0.1$) が、前方成分では20-40%時においてシニア群 ($0.10 \pm 0.02\text{m}$) の方がジュニア群 ($0.07 \pm 0.03\text{m}$) よりも大きい傾向 ($p < 0.1$) がみられた。

4. 陸上での支持脚伸展動作

Fig.5 にジュニア群およびシニア群における片脚スケートジャンプでの部分角度の変化を平均値および標準偏差で示した。体幹角は、いずれの群も動作開始後40%付近から増大し、動作終了へ向けて体幹は起き上がっていた。また、動作中、シニア群の方がジュニア群よりも大きい値を示し、60%時 (Junior, 30.7 ± 5.2 deg vs. Senior, 36.4 ± 6.5 deg) および70%時 (Junior, 39.4 ± 4.3 deg vs. Senior, 45.1 ± 6.4 deg) においては有意差がみられた ($p < 0.05$)。大腿角は、いずれの群も動作開始から漸増し、大腿は起き上がっていた。下腿角は、いずれの群も動作開始から一定の値を保ち、60%付近から漸増した後に90%付近から急増し、下腿は急激に起き上がっていた。60-90%付近においてはジュニア群の方がシニア群よりも大きな値を示し、60%時 (Junior, 58.0 ± 2.5 deg vs. Senior, 54.8 ± 3.1 deg ; $p < 0.05$)、70%時 (Junior, 60.9 ± 3.4 deg vs. Senior, 56.3 ± 3.5 deg ; $p < 0.01$) および80%時 (Junior, $62.8 \pm$

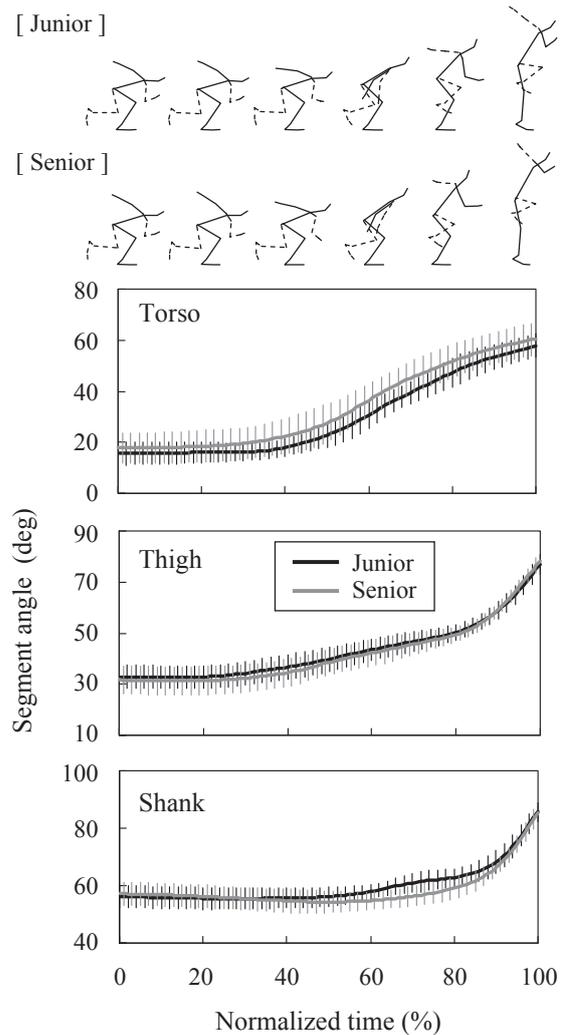


Fig. 5 Segment angles of the right support leg during the single leg skate jump test in the junior and senior groups.

3.1 deg vs. Senior, 59.1 ± 3.8 deg ; $p < 0.05$) においては有意差がみられた。

Fig.6 にジュニア群およびシニア群における片脚スケートジャンプでの地面反力の変化を平均値および標準偏差で示した。前後成分では、いずれの群も動作開始後わずかに前方成分が漸増し、その後60%付近で後方成分に転じた後に90%付近で後方成分のピークに達していた。60%時においてはシニア群 (0.03 ± 0.10 N/bw) の方がジュニア群 (0.10 ± 0.06 N/bw) よりも値が小さい傾向 ($p < 0.1$) がみられ、シニア群では後方成分へ転じるタイミングが早かった。また、90%時においてはシニア群 (-0.23 ± 0.05 N/bw) の方がジュニア群 (-0.29 ± 0.04 N/bw) よりも値が有意に大きく ($p < 0.05$)、ジュニア群の方が後方成分は大きかった。鉛直成分では、いずれの群も動作開始から値は体

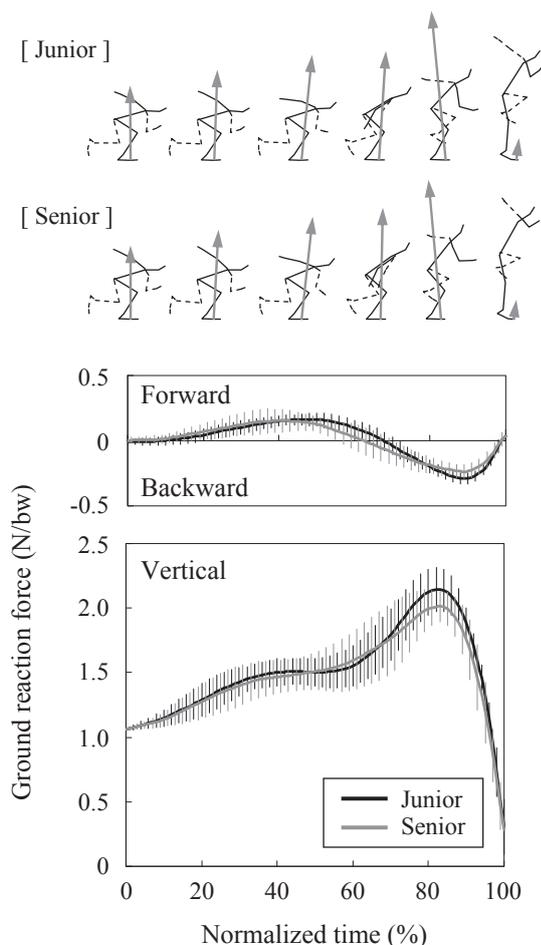


Fig. 6 Ground reaction forces during the single leg skate jump test in the junior and senior groups.

重レベルから増大し、80%付近でピークに達した後には動作終了へ向けて急激に減少していた。また、最大値はジュニア群（83%時で 2.14 ± 0.17 N/bw）の方がシニア群（83%時で 2.01 ± 0.12 N/bw）よりも大きい傾向（ $p < 0.1$ ）がみられた。

Fig. 7にジュニア群およびシニア群における片脚スケートジャンプでの右支持脚の股、膝および足の各関節の関節トルク、関節角速度および関節トルクパワーを平均値および標準偏差で示した。股関節屈伸軸において、関節トルクは、いずれの群も動作開始時には比較的大きな伸展トルクを示しており、40%付近まで増大した後に80%付近まで漸減し、その後は動作終了へ向けて急激に減少していた。40-80%付近においてはジュニア群の方がシニア群よりも大きな伸展トルクを示し、60%時（Junior, 3.50 ± 0.24 Nm/kg vs. Senior, 3.11 ± 0.48 Nm/kg）および70%時（Junior, 3.20 ± 0.37 Nm/kg vs. Senior, 2.68 ± 0.49 Nm/kg）においてはいずれも有意差がみられた（ $p < 0.05$ ）。角速度は、いずれ

の群も伸展方向を示し、動作開始から終了へ向けて漸増していた。関節トルクパワーは、いずれの群も動作開始後20%付近から正パワーが急増し、60%付近でピークに達した後には、動作終了へ向けて減少していた。50-80%付近においてはジュニア群の方がシニア群よりも大きな正パワーを示し、70%時（Junior, 12.23 ± 2.32 W/kg vs. Senior, 9.29 ± 3.02 W/kg）においては有意差がみられた（ $p < 0.05$ ）。

膝関節屈伸軸において、関節トルクは、いずれの群も動作開始から伸展トルクを保ち、80%付近でピークに達した後には、動作終了へ向けて減少していた。40-80%付近においてはシニア群の方がジュニア群よりも大きな伸展トルクを示し、60%時においてはシニア群（ 1.03 ± 0.53 Nm/kg）の方がジュニア群（ 0.61 ± 0.38 Nm/kg）よりも大きい傾向（ $p < 0.1$ ）がみられた。角速度は、いずれの群も動作開始後わずかに伸展方向を示し、80%付近から急増していた。関節トルクパワーは、いずれの群も動作開始から値は小さく、60%付近から正パワーが急増して90%付近でピークに達した後、動作終了へ向けて急激に減少していた。

足関節底背屈軸において、関節トルクは、いずれの群も80%付近まで底屈トルクが漸増し、80%付近でピークに達した後には、動作終了へ向けて減少していた。角速度は、いずれの群も動作開始から値は小さく、80%付近から底屈方向に値が急増していた。関節トルクパワーは、いずれの群も動作開始から値は小さく、80%付近から正パワーが急増して90%付近でピークに達した後、動作終了へ向けて急激に減少していた。

IV. 考察

1. 優れたストレート加速動作のキネマティクスの特徴

500mレースにおいて、ゴールタイムはシニア群の方がジュニア群よりも有意に小さく、競技力はシニア群の方が優れていた。また、100m通過時間においても同様の結果が得られており、本研究におけるシニア群はスタート後のストレートにおける加速能力が高いという特徴を有していたといえる。本研究における被験者は全日本ジュニアおよびシニア強化指定選手を含む高い競技水準にある高校生、大学生および社会人であり、シニア群には500mレースの元世界記録保持者やワールドカップ入賞者を含んでいた。これらは本研究の対象が高い競技水準にあることを示しており、本研究における群間の比較によってスピードスケート短

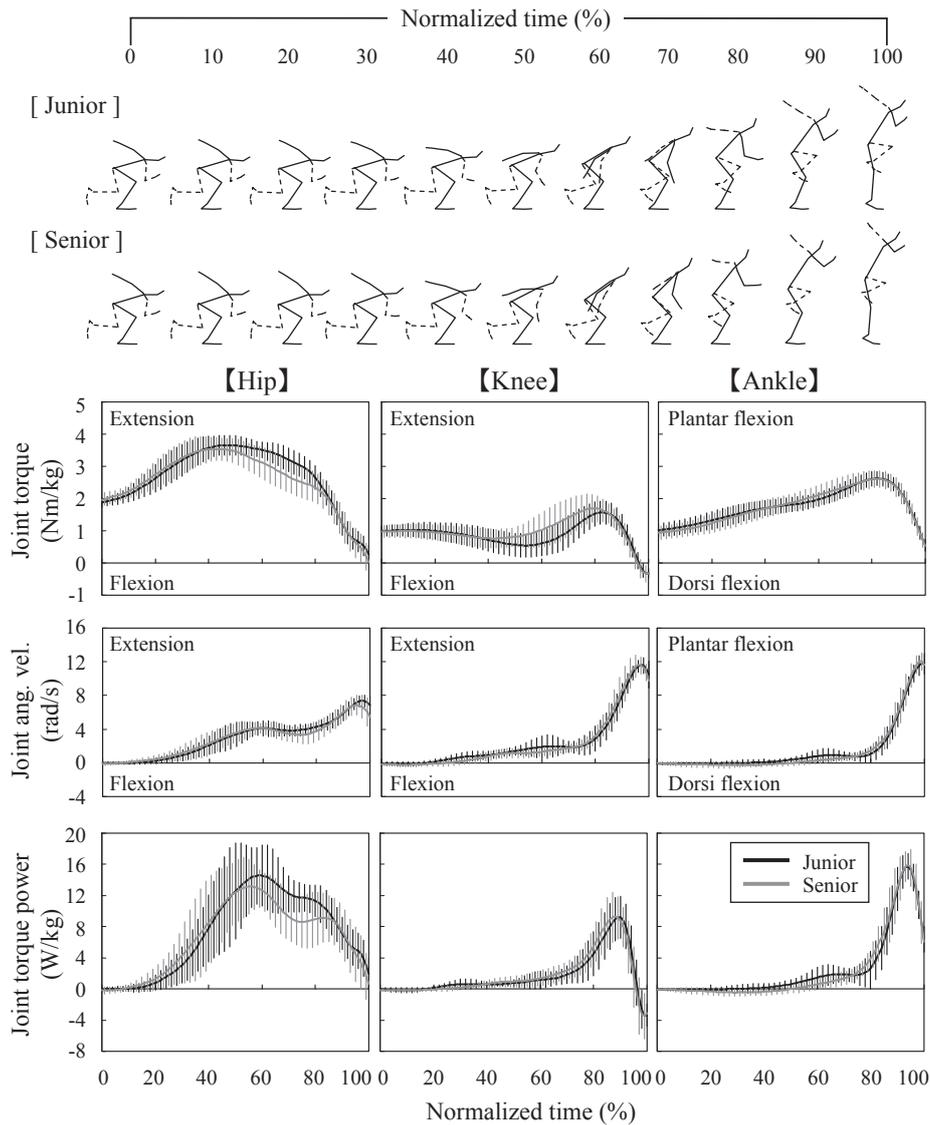


Fig. 7 Joint torques, joint angular velocities and joint torque powers of the right support leg during the single leg skate jump test in the junior and senior groups.

距離種目の競技力向上にとって重要な低速からの急激な加速技術が検討できると考えられる。

氷上での有効な加速動作を検討するにあたり、緒言において述べた先行研究（結城ほか，1991，1996；結城，1999）を考慮し，ここでは前頭面および矢状面からみた加速動作について順に考察を進めることとする。まず初めに，前頭面からの分析となるストレート滑走における傾斜角についてみると（Fig.3），身体傾斜角は結城ほか（1991）と同様の変化パターンを示し，群間にも顕著な差はみられなかった。一方，下腿傾斜角をみると，外傾を伴うストローク開始から30%付近まではシニア群の方が大きな値を示しており，下腿が外傾から内傾に転じるタイミングはシニア群の方が早

かった。これは，シニア群ではストローク開始時において下腿の外傾はみられるもののその程度は小さく，ストローク初期において素早く下腿を内傾させるような動きをしていたことを示している。また，全被験者（ $n = 19$ ）について10%ストロークごとに下腿傾斜角と100m通過時間との相関をみたところ，ストローク開始時，10%時および20%時においては有意な負の相関がみられた（それぞれ $r = -0.500$ ， -0.535 および -0.559 ； $p < 0.05$ ）。これは下腿の外傾が小さいほど100m通過時間が小さいことを意味しており，ストローク初期における素早い下腿の内傾は急激な加速が行われる局面においては特に重要となると考えられる。ストレート滑走での加速に影響を及ぼすキネティ

クスの要因としてブレード反力の水平成分が挙げられ、その立ち上がりを早めることが重要であることが示唆されている(結城ほか, 1996)。水平ブレード反力は、スケーターの発揮するプッシュオフ力の水平成分とスケートの曲線運動における求心力成分の和として捉えられるため(結城ほか, 1996)、氷上での加速における課題はいかに早いタイミングでプッシュオフ力の水平成分を大きくするかにあるといえる。ここで、スケーターの発揮するプッシュオフ力はブレード傾斜角によって鉛直および水平成分に分けられるため(結城ほか, 1996)、プッシュオフ力の水平成分を大きくするためにはスケートブレードの内傾を大きくすることが有効といえる。本研究ではスケートブレードの傾斜角度は測定しなかったが、下腿の傾斜角はスケートブレードの傾斜を反映すると考えられるため、本研究のシニア群でみられた素早い下腿の内傾は、水平ブレード反力の立ち上がりを早めるための効果的な加速技術であると推察される。なお、結城ほか(1991)は、競技力に優れたスケーターではストローク前半で膝をより内側へ倒し込む動作を行っているという報告しているが、彼らの報告ではストローク開始から20%付近までにみられる下腿の外傾においては群間に顕著な差はみられていない。これらのことを考え合わせると、低速からの急激な加速においては、ストローク開始後、外傾している下腿をより早いタイミングで内傾させることが重要となることが示唆される。

次に、矢状面からの分析となるストレート滑走における部分角についてみると(Fig.2)、ストロークを通してシニア群の方が下腿角は小さく、より下腿が前傾していた。結城ほか(1991)は、ストレート滑走においては足背屈を伴う支持脚伸展動作によって下腿が前傾し、これが重心の前方変位を大きくするといった有効な加速に繋がることを報告している。本研究でみられたシニア群での下腿の大きな前傾は結城ほか(1991)の報告と類似していたが、重心の前方変位量においては群間で有意差はみられておらず(Fig.4)、シニア群においてストローク終了時に重心がより前方へ移動しているという特徴はみられなかった。結城ほか(1991)の報告では、下腿部分角に強く関連する足関節角度において群間で差がみられ始めるのは40%ストローク以降であり、前方への重心変位で顕著な差がみられているのはストローク後半である。スピードスケート滑走におけるストロークでは、スケートブレードが着氷してから離氷するまでのストローク全体に渡って支持脚は伸展することとなるが、急激に支持脚の伸展が開

始される時点を基準として、それ以前は滑走路局面、以後はプッシュオフ局面として分けられる(van Ingen Schenau and Bakker, 1980)。このため、結城ほか(1991)の報告しているストローク後半でみられた加速動作の特徴は支持脚の急激な伸展が行われているプッシュオフ局面におけるものと位置づけられる。これに対して、本研究の下腿角において群間に有意差がみられるなどその差が顕著であったのは滑走路局面に相当するストローク前半であった(Fig.2)。また、ストローク前半となる20-40%時においてはシニア群の方が重心の前方変位量が大きい傾向がみられている(Fig.4)。このように、本研究の結果からは、下腿の前傾によって重心をより前方に運ぶという優れた加速動作の特徴は、プッシュオフ局面ではなく滑走路局面において確認された。これらのことから、低速からの急激な加速においては、ストローク開始から下腿を十分に前傾させることが重要であり、このことは特にストローク前半といった滑走路局面において重心を前方に運ぶために有効な支持脚伸展技術であることが示唆される。

以上のことから、低速からの急激な加速における効果的なストレート滑走技術として、ストローク開始後に外傾している下腿をより早いタイミングで内傾させること、ストロークを通して下腿を十分に前傾しておくことが重要であることが明らかとなった。特に、ストローク開始から下腿を十分に前傾させておくことは、ストローク前半といった滑走路局面において重心を前方に運ぶために有効な支持脚伸展技術であることが示唆された。

2. 陸上での模倣動作からみたスピードスケート短距離選手の合理的な支持脚伸展技術

片脚スケートジャンプにおいて、最大重心高には群間に有意差はみられなかった(Table1)。また、上方への運動量の変化に大きく影響を及ぼすと考えられる鉛直力積(Table1)に加え、地面反力の鉛直成分の最大値(Fig.6)においても群間に有意差はみられなかった。これらのパラメータは、身体を上方にどの程度移動させたかという片脚スケートジャンプにおける運動課題の達成度を表すパラメータと捉えることができ、下肢による無酸素性パワー発揮の指標として用いることができると考えられる。しかし、ここで捉えた、運動課題の達成度を表すパラメータのみでは高い競技水準を有するスケーターの競技力の差を説明することはできず、本研究の結果はvan Ingen Schenau et al.

(1992) や湯田ほか (2008b) の報告を支持するといえる。一方、高い競技力を有するスピードスケート短距離選手を対象とした湯田ほか (2008b) の報告では、氷上での加速局面中のストローク頻度と片脚スケートジャンプでの膝関節最大伸展パワーとの間に有意な正の相関がみられている。ここでの、ストローク頻度は滑走動作を表すパラメータの一つであり、膝関節最大伸展パワーは上方へのジャンプという運動課題遂行中の任意の時点に得られた指標である。これらのことを考慮すると、加速動作へ影響を及ぼす体力的要因の検討を進めるうえでは、下肢のキネティクスの特徴を関節ごとにそして経時的变化を踏まえて詳細に分析する必要があるといえる。

矢状面からの分析となる、ストレート滑走および片脚スケートジャンプにおける部分角の変化を比較すると (Fig.2 および 5)、大腿角はいずれも同様の変化パターンを示したが、体幹角および下腿角は片脚スケートジャンプではストローク終了へ向けて急激に値が増大しており、その変化パターンは異なっていた。特に、下腿角においては、ストレート滑走ではストローク終了へ向けて前傾し続けるという動きであったのに対して、片脚スケートジャンプでは一定の角度で前傾していた下腿がストローク終盤となる80%付近以降で急激に後方に起き上がるという変化を示した。これは、重心の移動方向がストレート滑走では主に前方であるのに対して、片脚スケートジャンプでは上方であるといった、移動方向の相違のためと考えられる。このような、片脚スケートジャンプでは急激に下腿が後方に引き戻されるといった支持脚伸展動作の相違は80%以降に顕著となるため、本研究ではそれ以前の動作について氷上ストレート滑走と関連づけて検討を進めることとする。

片脚スケートジャンプにおける部分角についてみると (Fig.5)、下腿角はいずれの群もストローク開始から一定の角度を保持していたが、ジュニア群では40%付近から値が増大し始め、60、70および80%時点においてはジュニア群の方が有意に大きかった。ここで、地面反力の変化をみると (Fig.6)、60-80%付近は鉛直反力が急激に増大する局面であることがわかる。これらのことは、下肢に急激に負荷がかかる局面において、シニア群では下腿の前傾を保ち、支持脚を深く屈曲し続けているのに対して、ジュニア群では下腿が後方に引き起こされるというキネマティクスの相違があることを示している。一方、関節トルクの変化についてみると (Fig.7)、シニア群ではストローク開

始から膝関節伸展トルク発揮を持続しながら80%付近のピーク値を迎えているのに対して、ジュニア群ではストローク中盤において一時的に膝関節伸展トルク発揮が低下し、40-80%付近においてシニア群よりも値が小さいという特徴がみられた。このように、下肢を深く屈曲した姿勢からの支持脚伸展において、下肢の負荷が急激に増大し始める局面中、シニア群では大きな膝関節伸展トルク発揮を保持できているという特徴を有していたといえる。ここで、地面反力の前後成分をみると (Fig.6)、シニア群では、ストローク開始からみられた前方成分が40%以降から減少し、早いタイミングで後方成分へと転じるという変化を示した。特に、膝関節伸展トルクにおいてシニア群の方が大きい傾向を示した60%時点においては、シニア群における地面反力の前方成分も小さい傾向がみられた。下肢の伸展動作を矢状面からみた場合、各関節におけるトルク発揮はそれぞれの関節中心と地面反力ベクトルとの位置関係から以下の通り推察することができる。本研究において、シニア群では支持脚での力発揮に伴い、地面反力ベクトルを後方に向けるタイミングを早めるような伸展動作を行っており、これによって地面反力ベクトルが膝関節の遠くを通過し、膝関節のモーメントアームが長くなったことによって膝関節伸展トルク発揮を維持できたと推察される。また、シニア群では40%付近以降も下腿の前傾を保っており、このことも膝関節をより前方に位置させることによって膝関節のモーメントアームを長くし続けることに繋がったと考えられる。これらのことから、シニア群は力発揮の方向を最適に調節することによって、下肢への負荷が増大する局面においても大きな膝関節での伸展トルク発揮を保持していたと考えられる。

氷上での加速にとって重要な水平ブレード反力を増大させるためには、前項で述べたスケートブレードの内傾を大きくすることに加え、スケーターが発揮するプッシュオフ力そのものを大きくする必要がある。プッシュオフ力はスケートブレードを鉛直方向から圧縮する力として捉えることができ、これには支持脚伸展時の股および膝関節伸展トルク、足底屈トルクが大きく影響を及ぼしていると推察される。したがって、片脚スケートジャンプにおいて支持脚伸展動作を通して大きな膝関節伸展トルクを示したシニア群では氷上においてもブレード圧縮力が大きい可能性が推察されるが、片脚スケートジャンプにおいて膝関節伸展トルクが大きかった局面 (40-80%付近) では逆に股関節伸展トルクは小さいという変化を示した (Fig.7)。こ

の際の地面反力の鉛直成分も群間で顕著な差はみられておらず (Fig.6), シニア群における膝関節伸展トルクを強調するという動作が氷上での水平ブレード反力を大きくするという特徴を反映したものであるとは言い難い。一方, 氷上での急激な加速局面においては極めて大きなパワー発揮が求められるため (de Koning et al., 1992b), 滑走中は氷から大きな反力を得ていると推察される。また, 前項で述べた通り, 本研究においてはストロークを通してジュニア群よりもシニア群の方がより下腿が前傾しており, このことが有効な支持脚伸展技術の一つであることが示唆されている。さらに, 前述の通り, 下腿の前傾は膝関節のモーメントアームに影響を及ぼし, これは大きな膝関節伸展トルク発揮に繋がることが示唆されている。これらのように, 本研究の片脚スケートジャンプでみられたシニア群による膝関節伸展トルク発揮の強調という支持脚伸展動作の特徴は, 氷上滑走での支持脚伸展動作においてみられる特徴と類似しており, 氷上での有効な支持脚伸展技術の特徴を強く反映していると考えられる。氷上加速動作におけるキネティクスの特徴については本研究の結果のみではこれ以上言及できないため, 今後詳細に検討していく必要がある。なお, 片脚スケートジャンプでみられた前述のシニア群における40-80%付近での股関節伸展トルクの低下 (Fig.7) は, この局面においてシニア群の地面反力ベクトルが前方から後方へと向くタイミングが早かったためと推察される。地面反力ベクトルは後方へ向くほど股関節の近くを通過するため, 股関節のモーメントアームは短くなり, 股関節伸展トルクは減少するといえる。シニア群では膝関節での伸展トルク発揮を強調するような支持脚伸展動作を行った結果, 股関節でのトルク発揮が低下し, この局面での股関節伸展パワーも小さかったと推察される。

本研究から, 陸上での片脚スケートジャンプにおいてジュニア群では急激な負荷が加わるときに下腿が後方に引き起こされやすいという特徴がみられた (Fig.5)。急激な加速をともなうレース初期において, スケーターはより大きなパワー発揮が要求されるため (de Koning et al., 1992b), 下肢にかかる負荷も大きい。したがって, このようなジュニア群における体力的要因からみた支持脚伸展における特徴が, ストレート加速動作においても十分に下腿が前傾しないといった動作の特徴を引き起こしたと推察される。これらのことから, ジュニア群では急激な力発揮がなされる際も下腿の前傾を保持し, 膝関節での伸展トルク発

揮を維持し続けるような支持脚伸展技術が要求されるといえる。そして, シニア群でみられたような, 急激な力発揮がなされる際の地面反力ベクトルの方向づけといった力発揮の方策は, スピードスケート短距離種目の競技力に影響を及ぼす要因の一つであると考えられ, 陸上での滑走技術の評価のための指標として活用できる可能性が示唆される。

以上のことから, 片脚スケートジャンプのような下肢を深く屈曲した姿勢からの支持脚伸展において, 下肢の負荷が急激に増大し始める時点においても大きな膝関節伸展トルク発揮を保持し続けることは, ストレート滑走での加速動作に影響を及ぼす重要な要因であることが明らかとなった。そして, 支持脚伸展動作において膝関節の伸展トルク発揮を強調するためには, 下肢への負荷が増大する局面においても下腿を十分に前傾させておくことや, 矢状面において地面反力ベクトルが膝関節のより後方を通るように力発揮の方向を調節することが有効であることが示唆された。

V. まとめ

本研究の目的は, スピードスケート短距離種目での急激な加速局面におけるストレート滑走動作のキネマティクスの特徴を明らかにし, 陸上でのスピードスケート模倣動作の一つである片脚スケートジャンプのキネティクスの特徴と関連づけて検討することにより, 加速にとって有効な支持脚伸展技術を獲得するためのトレーニング指導に役立つ知見を得ることであった。良くトレーニングされたスピードスケート短距離選手を分析対象とし, ジュニア群およびシニア群として比較した本研究から得られた結果をまとめると, 以下ようになる。

- 1) 500mレースにおける100m通過時間およびゴールタイムはシニア群の方が有意に小さかったが, 片脚スケートジャンプにおける最大重心高, 支持脚伸展時間および鉛直力積ではいずれにおいても群間に有意差はみられなかった。
- 2) ストレート滑走において, 下腿角はストロークを通してシニア群の方が小さく, より下腿が前傾していた。また, 群間に有意差がみられるなどその差が顕著であったのは滑走局面に相当するストローク前半であり, 重心の前方変位量は20-40%時においてシニア群の方が大きい傾向にあった。
- 3) ストレート滑走において, 下腿傾斜角は, 外傾を伴うストローク開始から30%付近まではシニア群

の方が大きな値を示し、下腿が外傾から内傾に転じるタイミングはシニア群の方が早かった。また、ストローク開始時、10%時および20%時において、下腿傾斜角と100m通過時間との間に有意な負の相関がみられた。

- 4) 片脚スケートジャンプでの地面反力の鉛直成分が急激に増大する40-80%付近において、シニア群では大きな膝関節伸展トルク発揮を維持していたのに対して、ジュニア群では一時的に低下していた。また、この局面において、シニア群では下腿の前傾を一定に保持していたのに対して、ジュニア群では下腿が後方に引き戻されるという変化を示した。
- 5) 片脚スケートジャンプにおいて、シニア群では、ストローク開始からみられた地面反力の前方成分が40%以降から減少し、早いタイミングで後方成分へと転じるという変化を示した。

以上のことから、低速からの急激な加速における効果的なストレート滑走技術として、ストローク開始後に外傾している下腿をより早いタイミングで内傾させること、ストロークを通して下腿を十分に前傾しておくことが重要であることが明らかとなった。また、片脚スケートジャンプのような下肢を深く屈曲した姿勢からの支持脚伸展において、下肢の負荷が急激に増大し始める時点においても大きな膝関節伸展トルク発揮を保持し続ける能力は、ストローク開始から下腿を十分に前傾させておくといったストレート滑走での加速動作にとって重要となることが示唆された。そして、支持脚伸展動作において膝関節の伸展トルク発揮を強調するためには、下肢への負荷が増大する局面においても下腿を十分に前傾させておくことや、矢状面において地面反力ベクトルが膝関節のより後方を通るように力発揮の方向を調節することが有効であることが示唆された。

本研究は文部科学省の科研費(18700524)の助成を受けたものである。

謝辞

本研究のデータを収集するにあたり選手各位には被験者として実験に快くご協力頂いた。また、氷上でのデータ収集においては全日本距離別選手権大会組織委員会から快諾を頂き、トライアルレース実施に際しては同実行委員および長野市立長野高等学校の井出敏彦先生からの多大なるご協力を頂いた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

文献

- 阿江通良(1996)日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 15(3):155-162.
- de Boer, R. W., Ettema, G. J. C., Faessen, B. G. M., Krekels, H., Hollander, A. P., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1987) Specific characteristics of speed skating: implications for summer training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19(5):504-510.
- de Boer, R. W., and Nilsen, K. (1989a) The gliding and push-off technique of male and female Olympic speed skaters. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5:119-134.
- de Boer, R. W., and Nilsen, K. (1989b) Work per stroke and stroke frequency regulation in Olympic speed skating. *International Journal of Sport Biomechanics*, 5:135-150.
- de Boer, R. W., Schermerhorn, P., Gademan, J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1986) Characteristic stroke mechanics of elite and trained male speed skaters. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2:175-185.
- de Groot, G., de Boer, R. W., and van Ingen Schenau, G. J. (1985) Power output during cycling and speed skating. In: *Biomechanics IX-B*. Winter, D. A., Norman, R. W., Wells, R. P., Hayes, K. C., and Patla, A. E. (eds.), Human Kinetics: Champaign, pp.555-559.
- de Koning, J. J., de Boer, R. W., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1987) Push-off force in speed skating. *International Journal of Sport Biomechanics*, 3:103-109.
- de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1992a) Ice friction during speed skating. *Journal of Biomechanics*, 25:565-571.
- de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1992b) A power equation for the sprint in speed skating. *Journal of Biomechanics*, 25:573-580.
- Fokichev, S. R., Inkin, V. A., and Plakhtienko, V. A. (1990) A study of the speed potentials of speed skaters (sprinters) for the purpose of increasing their competitive reliability. *Soviet Sports Review*, 25:176-178.
- Geijsel, J., Bomhoff, G., van Velzen, J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1984) Bicycle ergometry and speed skating performance. *International Journal of Sports Medicine*, 5(5):241-245.
- 池上康男・桜井伸二・矢部京之助(1991)DLT法. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 10(3):191-195.
- Kandou, T. W. A., Houtman, I. L. D., Bol, E. V. D., de Boer, R. W., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1987) Comparison of physiology and biomechanics of speed skating with cycling and with skateboard exercise. *Canadian Journal of Sport Sciences*, 12:31-36.
- Kloosterboer, T. (1999) Training in speed skating. In: *Handbook of competitive speed skating*. Gemser, H., de Koning, J. J., and van Ingen Schenau, G. J. (eds.), International Skating Union: Lausanne, pp.138-174.
- 根本 勇・入沢孝一・吉岡伸彦・金久博昭・宮下充正(1984)スピード・スケート選手の等速性筋出力と競技成績との関

- 係. デサントスポーツ科学, 5:206-212.
- 高松潤二・阿江通良・藤井範久 (1997) 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, 42:19-29.
- van Ingen Schenau, G. J. (1982) The influence of air friction in speed skating. *Journal of Biomechanics*, 15:449-458.
- van Ingen Schenau, G. J., and Bakker, K. (1980) A biomechanical model of speed skating. *Journal of Human Movement Studies*, 6:1-18.
- van Ingen Schenau, G. J., Bakker, F. C., de Groot, G., and de Koning, J. J. (1992) Supramaximal cycle tests do not detect seasonal progression in performance in groups of elite speed skaters. *European Journal of Applied Physiology*, 64:292-297.
- van Ingen Schenau, G. J., de Boer, R. W., and de Groot, G. (1987) On the technique of speed skating. *International Journal of Sport Biomechanics*, 3:419-431.
- van Ingen Schenau, G. J., de Groot, G., and de Boer, R. W. (1985) The control of speed in elite female speed skaters. *Journal of Biomechanics*, 18:91-96.
- van Ingen Schenau, G. J., de Groot, G., and Hollander, A. P. (1983) Some technical, physiological and anthropometrical aspects of speed skating. *European Journal of Applied Physiology*, 50:343-354.
- Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley and Sons Inc.: New York, pp.41-43.
- 湯田 淳・青柳 徹・高松潤二 (2006) スピードスケート女子500m競技における世界一流短距離選手のレースパターン. *トレーニング科学*, 18(4):387-395.
- 湯田 淳・青柳 徹・高松潤二・阿江通良 (2002) ソルトレイクシティーオリンピックにおけるスピードスケート男子500m競技のレース分析. 第17回日本バイオメカニクス学会大会論集, pp.188-189.
- 湯田 淳・村田正洋・田内健二・青柳 徹 (2008a) 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.
- 湯田 淳・村田正洋・山辺 芳・田内健二・青柳 徹 (2007) スピードスケート選手のサイドジャンプにおける支持脚のキネティクス. *バイオメカニクス研究*, 11(1):9-24.
- 湯田 淳・村田正洋・横澤俊治・山辺 芳・山田 哲・青柳 徹 (2008b) スピードスケート短距離選手における加速能力と下肢パワー発揮能力との関係. *トレーニング科学*, 20(1):43-53.
- 結城匡啓 (1999) スピードスケートの動作解析. 計測と制御, 38(4):236-241.
- 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.
- 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. *バイオメカニクス*13, pp.41-51.
- 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 (1999) 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. 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—, pp.247-251.
- 結城匡啓・河合季信・伊藤静夫・阿江通良 (1998) 97/98ワールドカップ前半戦500mのレース分析およびスラップスケート対策—長野オリンピックに向けた科学的知見のフィードバック—. 平成9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21報—, pp.335-361.

平成23年10月20日受付

平成24年3月23日受理