

スピードスケートのスタート動作における支持脚のキネティクスの特徴

Kinetic characteristics of the support leg during the start in speed skating

湯田 淳¹⁾ 小池 関也²⁾ 横澤 俊治³⁾ 皆川 唯⁴⁾

Jun YUDA, Sekiya KOIKE, Toshiharu YOKOZAWA, Yui MINAKAWA

Abstract

We investigated the kinetic characteristics of the support leg during the start in speed skating. A well-trained male speed skater was videotaped using four synchronized high-speed video cameras (300 fps) in the initial portion of a straight track, and the kinetic characteristics of the support leg were investigated using the panning direct linear transformation technique. The blade reaction forces (BRFs) and three-dimensional coordinates of the segment end-points and the blades were determined to calculate the kinetic parameters of the support leg during the start movement by an inverse dynamics. The BRFs were determined using instrumented sensor klapskates (500 Hz) equipped with strain gauges. In this study, the third step (left support leg), which was taken at approximately 5 m from the start line, was analyzed. The peak value of the vertical BRF during the start movement (2.93 N/bw) in speed skating was greater than those in straight and curve skating. This indicates that the external load at the lower limb during the start in speed skating is extremely large. Moreover, the knee joint exerted a large extension power during the second half of the stroke (this peak value was approximately 12 times that in straight skating and 4 times that in curve skating). Thus, great exertion of the knee extension torque would be a characteristic of the start in speed skating.

Keywords: start in speed skating, blade reaction force, three-dimensional motion analysis, kinetics, joint torque

I. 緒 言

移動運動では外界に力を発揮することによって得られる反力を推進力とするため、動作中の反力を測定することによって移動運動のメカニズムを明らかにするための重要な情報を得ることができる。また、ここで得られた力データを画像解析法と併用することによって関節トルクなどのキネティクスの分析を進めることが可能であり、動作の力学的要因を探るための極めて重要な知見を引き出すことができる。

スケート滑走中の反力測定ではフォースプレートを用いることができないため、これまで国内外の研究者が様々な工夫を凝らしてデータ収集を行ってきた。1987年に、ストレインゲージを貼り付けた特製スケートを用いたストレート滑走中にスケートに作用

する鉛直方向の力が計測され²⁾、プッシュオフ力（スケーターが発揮する力）と滑走速度との関係が報告されている。その後、de Koning et al.⁴⁾は、同様の特製スケートを用いて5名のジュニア一流スケーターのストレート滑走動作、プッシュオフ力を測定し、ストローク中の矢状面内における下肢関節トルクパワーは股関節、膝関節、足関節の順に出現したことを報告している。また、de Koning et al.⁵⁾は、7名の男子一流スケーターを用いてカーブ滑走における同様の測定を行い、左右脚におけるプッシュオフ動作の相違についてキネティクスの検討している。その結果、プッシュオフ動作において、右脚では股関節伸筋群、膝関節伸筋群、足底屈筋群の順に筋活動が増大するといった近位—遠位性の原則にそっているのが確認されたのに対し、左脚ではこのような傾向はみられなかったと述べている。このようなキネティクスの研究の推進によってスピードスケート滑走動作の力学的理解は深まってきたといえよう。しかし、上述の研究ではキネティクスのパラメータと滑走速度との関係は十分に検

1) 日本女子体育大学 (准教授)

2) 筑波大学 (准教授)

3) 国立スポーツ科学センタースポーツ科学研究部 (研究員)

4) 筑波大学大学院 (大学院生)

討されておらず、競技力に密接に関連する滑走速度に影響を及ぼす力学的要因は明らかとなっていない。結城ほか¹⁷⁾は、この原因を、ブレードの上下方向に作用する圧縮力のみしか測定されていないためと考え、ブレードの圧縮方向だけではなく左右方向の力についても計測している。その結果、加速にはブレード反力の水平成分が大きく影響を及ぼすことが明らかとなっており、ストレート滑走における下肢のプッシュオフ動作（伸展動作）のメカニズムが報告されている¹⁶⁾。これらの研究は「滑る」運動の解明という学術的意義に加え、冬季種目としてのスケートを指導する際の基礎理論の確立という重要な意味を持つといえよう。

スケート競技は1周400mのリンクを滑走して勝敗が争われ、スケーターはストレートとカーブとで異なる運動様式を用いて滑走することとなる。カーブ滑走では、遠心力に抗するために身体をリンク内側に傾斜させながら常に身体を右方向へプッシュオフを行う必要があり、このため下肢筋群の負担が大きく、難易度が高いという特徴が挙げられる⁵⁾。このようなカーブ滑走における力学的特徴を検討するため、特製センサースケートを用いたカーブ滑走中のブレード反力の計測が行われている¹⁴⁾。そして、湯田ほか¹⁵⁾は、カーブ滑走中の左支持脚における3次元関節トルクおよびトルクパワーなどを検討し、左脚のプッシュオフ動作には膝関節が大きく貢献していること、ストローク後半では身体の急激な倒れを制御するためストレート滑走と比較して大きな股関節外転トルクが要求されることを報告している。

このように、測定が困難な滑走中の力を計測することによって多くの有用な知見が得られてきた。しかし、これまでの研究でメカニズムが明らかにされてきたのはストレートおよびカーブにおける滑走動作である。スピードスケートにおいてはこの2つの局面に加えてスタート局面が挙げられ、ここでは摩擦抵抗の小さな氷面を下肢での爆発的なパワー発揮を伴いながらより効果的に氷に力を伝える技術が要求される^{3) 12)}。この動作は「走る」という動作に似ているため⁷⁾、そのメカニズムはこれまでのストレート滑走やカーブ滑走でのものとは大きく異なると推察される。このように、スピードスケートのスタート動作は、下肢による大きなパワー発揮とともに正確性（巧緻性）も同時に求められるという高い難度の運動課題を有しているにも関わらず、下肢関節トルク等のキネティクスのパラメータを用いてそのメカニズムについて検討した研究

は見当たらない。

本研究の目的は、スピードスケートにおけるスタート動作中のブレード反力をセンサースケートを用いて計測し、3次元画像解析法との併用によって算出された3次元下肢関節トルクなどからスタート動作のキネティクスの特徴を検討することである。

Ⅱ. 方 法

1. 被験者

被験者には、スピードスケート競技を専門とする社会人1名（身長1.73m、体重73.0kg、年齢23歳、500mベストタイム36秒03）を用いた。なお、被験者の500mベストタイム（36秒03）は、日本スケート連盟による2009—2010シーズン国内タイムランキング13位の成績である。計測に先立って被験者には、研究のねらいや意義、計測状況、安全性などを説明し、協力の同意を得た。なお、本研究は、日本女子体育大学ファカルティ・ディベロップメント委員会倫理部会の承認を得たものである（承認番号：2010-7）。

2. センサースケート

滑走中のプッシュオフ力を計測するために、スケートブレード（Viking社製、長さ0.41m、ロック曲率半径24m）にひずみゲージ（共和電業社製、KFG-1-120-C1-11およびKFG-1-120-D16-11）を貼付し、圧縮・引張力および曲げモーメントが計測可能な力覚検出型センサースケートを開発した（Figure 1）。なお、ひずみゲージはスケートブレード両面の対称の位置に貼付されており、2アクティブゲージ法によってスケートブレード左右方向の曲げモーメント（2組）、スケートブレード長手方向の曲げモーメント（3組）および圧縮・引張力（3組）といった8つのひずみ量が測定可能となっている。

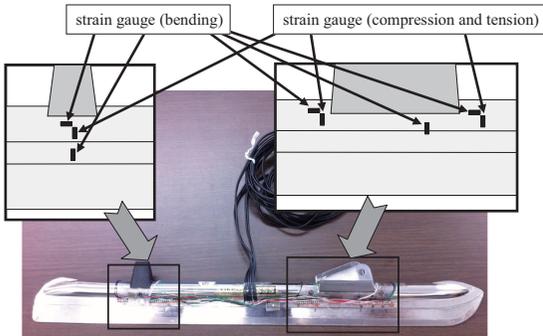


Figure 1 An instrumented skate blade

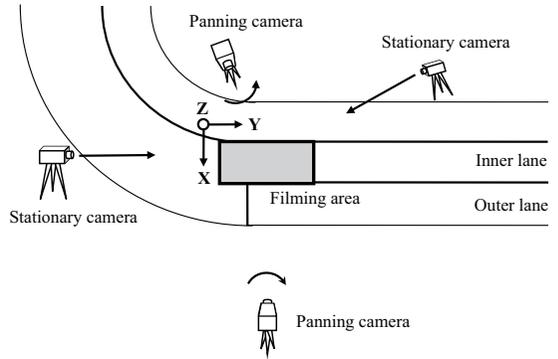


Figure 2 Camera positions and filming area

3. VTR 撮影および力計測

被験者の両足にセンサースケートを装着し、最大努力でのスタート滑走を行わせた。試技回数は1回であり、被験者の内省により成功試技と判断された。なお、本研究におけるデータには被験者のスタート動作ごとに生じるであろう誤差が僅かながらも含まれていると考えられるが、本研究はスタート動作そのもののキネティクスの特徴を検討するものであるため、ここでの誤差は本研究の結果には重大な影響を及ぼさないといえる。400m オールリンクにおける500m スタート地点（インレーン）に幅4m、長さ12m、高さ1.6mの計測範囲を設置し、4台の高速ビデオカメラ（CASIO社製、EX-F1）により左右側方（パニング）、後方（固定）および右斜め前方（固定）から選手を撮影した（撮影スピードは300 fps、露出時間は1/500 s、Figure 2）。4台の高速ビデオカメラの同期は、シンクロナイザ（DKH社製、PTS-166）を用いて発光ダイオードの光信号をカメラに写し込むことによって行った。センサースケートからの信号は、腰部に装着した小型データロガー（テック技販社製、HDL-18A、重量0.65kg、Figure 3）に500 Hzでサンプリングし、小型無線トリガ（キッセイコムテック社製、無線トリガキット）を用いてセンサースケートからの信号と画像との同期を行った。



Figure 3 Scene of the experiment

4. 測定項目およびその算出法

1) 3次元座標の算出

得られた画像からVTR digitizer（DKH社製、Frame-Dias IV）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次元座標をパニングDLT法により算出した。得られた3次元座標は、残差分析法¹³⁾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10.5～18.0 Hzであった。その後、阿江¹⁾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。なお、本研究では足セグメントとスケート靴を1つの剛体（足-スケート系セグメント）とみなした。このようにして得られた変位データを数値微分することによって速度を算出し、重心については静止座標系のX、Y方向の速度成分を合成することによって重心水平速度を算出した。

2) ブレード反力の算出

検者が足部に装着したセンサースケートを実験室内のフロアに埋設されたフォースプラットフォーム（Kistler社製、Type 9281B）上に置き、検者の力発揮によってセンサースケートに力およびモーメントを作用させた（Figure 4）。なお、フォースプラットフォーム表面にはセンサースケートの滑りを防ぐためのシートを貼付した。得られた地面反力データおよびセンサースケートからのひずみ信号を用いて、試技中にセンサースケートから出力された信号をスケートブレードに作用する力（ブレード座標系）に変換するための校正係数を算出した。ブレードに作用する力のキャリブレーションでは、センサースケートを垂直に保ったまま鉛直および水平にそれぞれ加重し、それぞれで得られたひずみ信号（8つ）を用いて鉛直および水平方向成分を求めるための校正係数を算出した。なお、滑走中のブレードに作用する前後方向の力は最大で10 Nであり、これは同じ瞬間における圧縮方向の力の1%以下であること⁶⁾から、Houdijk et al.⁸⁾は滑走中の前後方向の力は無視できると述べている。したがって、本研究においてもブレード座標系における前後方向成分は算出しなかった。このようにして算出された校正係数を用い、試技中にセンサースケートから出力された信号はブレード座標系における力の鉛直および水平方向成分に変換され、その後、Yuda et al.¹⁴⁾の方法に従って氷上の静止座標系における力（ブレード反力）に変換された。一方、力の作用点のキャリブレーションでは、センサースケートを垂直に保ったまま鉛直に加重し、得られた圧縮・引張り検出用ひずみ信号（3つ）を用いて校正係数を算出した。また、フリーモーメントのキャリブレーションでは、センサースケートを垂直に保ったまま鉛直軸回りに回転させ、得られたスケートブレード長手方向の曲げモーメント検出用ひずみ信号（3つ）を用いて校正係数を算出した。試技中の力の作用点およびフリーモーメントもこれらの校正係数を用いて求められた。

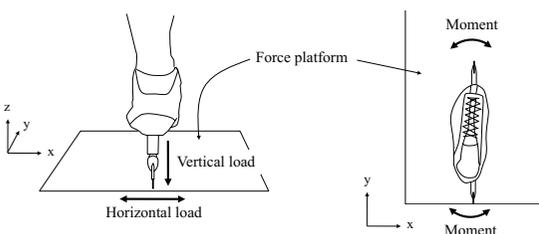


Figure 4 Calibration of the sensor skate

3) 下肢関節トルクおよびトルクパワーの算出

画像分析から得られたキネマティクスのパラメータと、前項で算出されたブレード反力、力の作用点およびフリーモーメントを用い、湯田ほか¹⁵⁾の方法にしたがって左支持脚の3次元関節トルクおよび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軸である。

5. 局面分け

本研究では、ブレード着氷（鉛直ブレード反力においてインパクト波形が生じた時点）からブレード離氷（スラップスケートが開き始めた時点）までを1ストロークと定義し、スタート後3歩目に相当する左ストローク（左支持脚）について分析を行った。なお、ストローク初期での衝撃力（主にブレードに作用する鉛直方向の力）を強く含む局面は、力の作用点算出において精度の低下をもたらすため分析範囲から除外した。

6. 規格化

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、ブレード反力は被験者の体重（身体質量と重力加速度の積で、本研究ではbwと表記）で規格化した。また、本研究で算出した時系列データは、ストロークに要した時間で規格化した。

Ⅲ. 結果および考察

Figure 5にスタート動作における重心速度の側方、前方および水平成分の変化を示した。陸上での走運動など多くの移動運動では進行方向とは逆の方向に力を発揮することによって推進力を得ているが、スピードスケートでは氷面の摩擦抵抗が著しく小さいため、他の運動と同様に後方への力発揮（プッシュオフ）によって前方への推進力を得ることは極めて困難となる。このため、「滑走方向に対して垂直な、横方向へのプッシュオフのみが加速に貢献する」とした加速理論¹⁰⁾が提唱されており、滑走中にスケーターは左右に移動（蛇行）しながら前方に進むこととなる。本研究でのスタート動作においても、スケーターはスケートブレード先端を外側に開き、図中の側方成分の増減

に示される通り左右への身体の移動を繰り返しながら前方へ加速していることが確認された。また、前方成分は、スタート1歩目となる左脚の着氷後(0.8秒付近)、ほぼ一定の割合で増大し続けており、ストロークを経るごとに徐々に速度を増大させていることがわかる。スタート動作は低く構えた静止姿勢から動作が開始されるため、1歩目から2歩目にかけては体幹の前傾角度や水平面内における進行方向に対するスケートブレードの開き角などが大きく変化していることが報告されている¹⁸⁾。このため、本研究では、静止時からの急激な姿勢の変化の影響を除くため、スタート後5m付近となる3歩目(左ストローク)に焦点を当てて、そのメカニズムを明らかにするための検討を進めることとした。

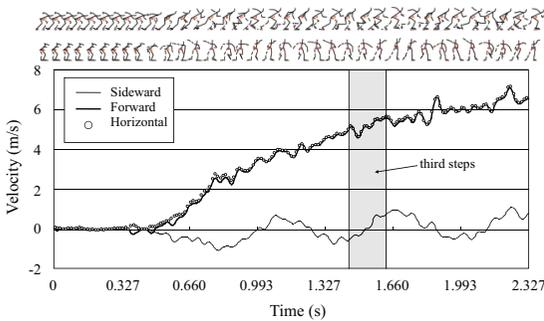


Figure 5 Changes in velocity of center of mass during the start in speed skating

スピードスケート滑走中のキネティクスの分析は、ストレート滑走^{16) 17)} およびカーブ滑走^{14) 15)} において詳細に報告されている(カーブ滑走では左支持脚のみ)。したがって、本研究では、これらの先行研究で得られたデータとの比較から、スタート動作中の下肢のキネティクスの特徴を検討することとする。Figure 6にスタート動作3歩目におけるブレード反力の鉛直および水平成分の変化を示した。なお、ここで示されているブレード反力は、結城ほか¹⁷⁾ および Yuda et al.¹⁴⁾ と同様の方法で算出された、氷上での静止座標系に変換されたブレード反力である。鉛直成分をみると、ストローク開始後20%付近まで値は急激に減少し、その後急激に増大して40%付近にはピークに達していた。ストローク初期には極めて大きな値がみられ、これは着氷時の衝撃力の影響を示していると考えられる。鉛直成分の変化パターンをみると、ストレート滑走およびカーブ滑走のいずれもスト

ローク終盤でピーク値がみられていたが、スタート動作ではストローク中盤(39%時)で出現していた。このような特徴は、陸上でのスタート疾走動作における地面反力変化パターン⁹⁾ と類似しており、スピードスケートのスタートでは、滑走動作よりも疾走動作としての要素がより強調されていることが確認された。また、ピーク値をみると、スタート動作(2.93 N/bw)では、ストレート滑走(1.38 ± 0.14 N/bw)およびカーブ滑走(1.99 ± 0.48 N/bw)よりも著しく大きく(体重の約3倍)、下肢にかかる負担が極めて大きいことが明らかとなった。一方、水平成分をみると、変化パターンは鉛直成分とほぼ同様であり、ピーク値(37%時, 1.81 N/bw)もストレート滑走(0.81 ± 0.12 N/bw)およびカーブ滑走(0.66 ± 0.22 N/bw)よりも著しく大きいという特徴がみられた。

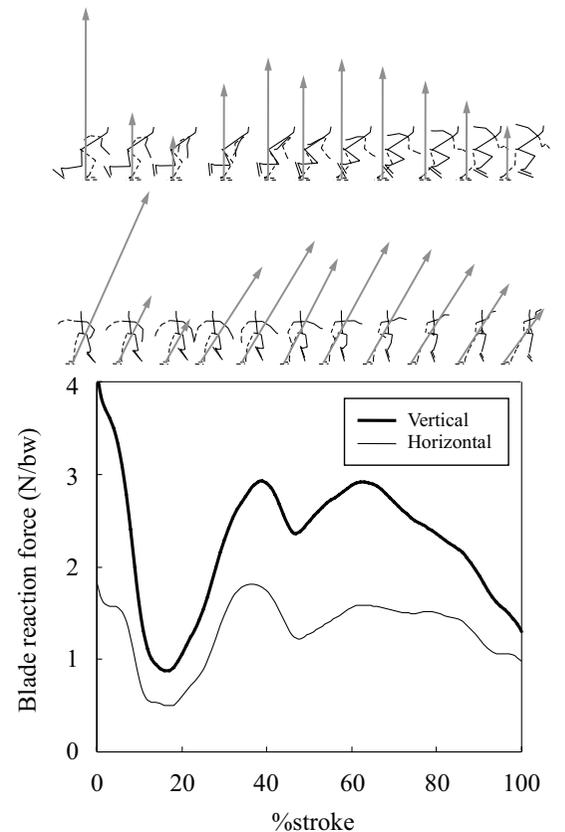


Figure 6 Changes in blade reaction forces in vertical and horizontal directions during the third steps of the start in speed skating

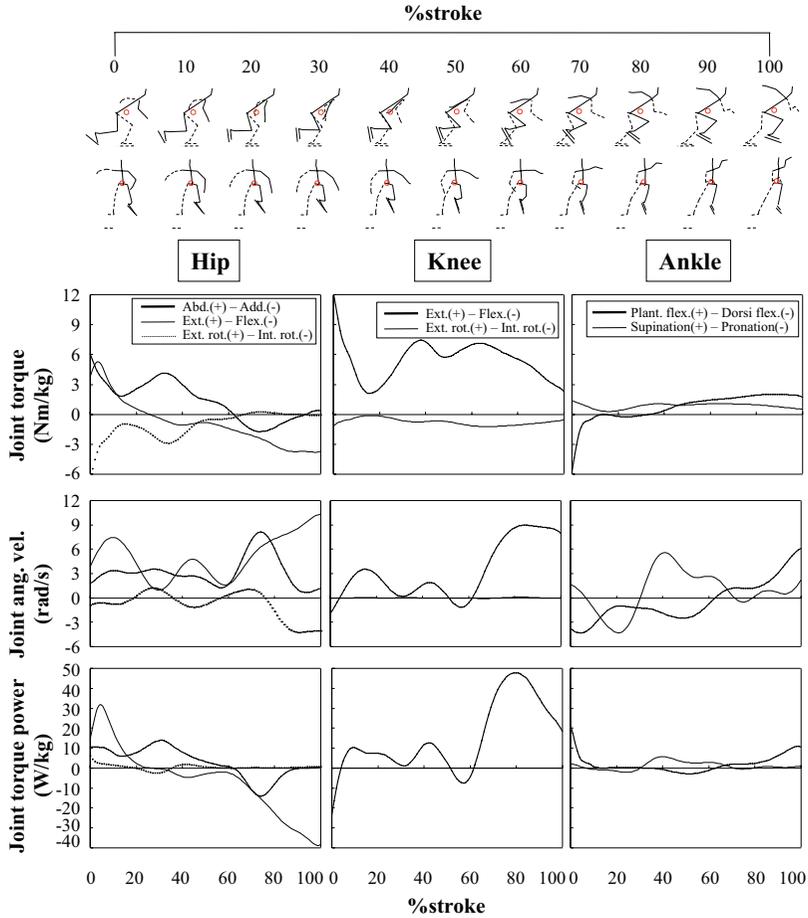


Figure 7 Joint torques, joint angular velocities and joint torque powers of the support left leg during the third steps of the start in speed skating

Figure 7にスタート動作3歩目における股、膝および足関節の各軸回りの関節トルク、関節角速度および関節トルクパワーの変化を示した。滑走速度はスケーターの発揮パワー（支持脚伸展パワー）に依存するため¹¹⁾、身体の加速に大きく貢献すると考えられる正の関節トルクパワーをみると、膝関節のストローク後半において著しく大きな伸展パワー発揮がみられた。ここでみられたピーク値（80%時、47.84 W/kg）は股または足関節を含めた他の運動軸の中で最も大きく、ストレート滑走（約4 W/kg）およびカーブ滑走（ 11.85 ± 4.08 W/kg）での膝伸展パワーよりも著しく大きかった。なお、このピーク値は、ストレート滑走の約12倍、カーブ滑走の約4倍という値である。ここで、膝関節では、ストローク中に最も大きな伸展

トルクが発揮されており、このときの関節角速度も伸展方向であることから、膝関節伸筋群がコンセントリックな筋活動によって正（伸展）パワーを発揮していたと推察できる。これらのことから、スタート動作においては膝関節伸筋群での力発揮が重要であり、これによる大きな膝伸展パワーが求められることが明らかとなった。

股関節をみると（Figure 7）、ストローク前半において比較的大きな外転トルク発揮がみられ、10 W/kg程度で一定の外転パワーが発揮されていた。これは、着氷後に、足部を外側に開き（移動させ）ながら支持脚の内傾を大きくし、その後続く大きな膝伸展パワー発揮に備えるためのものと推察される。また、ストローク初期をみると、約30 W/kgという大きな

伸展パワーがみられ、この時の伸展トルクも大きな値を示していた。スタート動作でのプッシュオフの課題は重心を前方へ運ぶものと捉えられるため、ここでの股関節伸展パワー発揮も、着氷後、素早くプッシュに移行するために重心を素早く支持脚に乗せていくためのものと推察される。結城ほか¹⁸⁾は、スタート後1歩目以降のスケート速度が大きい「滑る」タイプのスタート動作では、股関節の深い屈曲姿勢からの素早い伸展動作が要求されるため、屈曲位での股関節伸筋群の発揮パワーを高めるトレーニングが必要であることを示唆している。トレーニングにおいては過負荷の原則に従う必要があるため、本研究で定量化されたスタート動作中の股関節伸展トルクおよびパワー値は、スタートのパフォーマンス向上を目指した陸上での各種トレーニングでの適正な負荷設定などに活用できると考えられる。

関節トルクパワーにおいて、正の値は重心を加速させるためのパワー発揮として捉えられるが、負の値は衝撃力や力学的エネルギーの関節による吸収と解釈することができる。本研究の関節トルクパワーをみると (Figure 7)、60%以降からストローク終了にかけて股関節屈伸軸において著しく大きな負のパワーが発揮されていた。ここでの関節トルクは屈曲トルク、関節角速度は伸展方向であることから、股関節屈筋群がエキセントリックな筋活動によって負パワーを発揮していたと推察される。このような筋活動は、後方へと勢よく伸展していった左大腿の動きを止めるための役割を果たしていると考えられる。なお、一流スピードスケート選手が、氷上トレーニングにおいて繰り返しスタート練習を行った際、翌日などに、股関節の屈筋である腸腰筋に強い疲労感を訴えることが経験的に知られている。このことは、スタート動作における股関節屈筋群への負担の大きさを示すものと考えられ、本研究はこれを裏付ける重要な根拠として位置づけられよう。

IV. ま と め

本研究の目的は、スピードスケートにおけるスタート動作中のブレード反力をセンサースケートを用いて計測し、3次元画像解析法との併用によって算出された3次元下肢関節トルクなどからスタート動作のキネティクスの特徴を検討することであった。スタート後5m付近となる3歩目 (左支持脚) を分析した結果、鉛直ブレード反力のピーク値 (2.93 N/bw) は、

ストレート滑走およびカーブ滑走よりも著しく大きく、下肢にかかる負担が極めて大きいこと、スタート動作ではストローク後半における膝関節での伸展パワー発揮が著しく大きく (ピーク値はストレート滑走の約12倍、カーブ滑走の約4倍)、ストロークを通して大きな膝伸展トルク発揮が求められることが明らかとなった。

本研究は文部科学省の科研費 (22700627) の助成を受けたものである。

引用文献

- 1) 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: 155-162.
- 2) de Koning, J. J., de Boer, R. W., de Groot, G., et al. (1987) Push-off force in speed skating, *International Journal of Sport Biomechanics* 3: 103-109.
- 3) de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1989) Mechanical aspects of the sprint start in Olympic speed skating, *International Journal of Sport Biomechanics* 5: 151-168.
- 4) de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1989) Muscle coordination in speed skating, In: de Groot, G., Hollander, A. P., Huijing, P. A., et al. (eds.), *Biomechanics XI-B*, p.878-882, Free University Press, Amsterdam.
- 5) de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1991) Speed skating the curves: a study of muscle coordination and power production, *International Journal of Sport Biomechanics* 7: 344-358.
- 6) de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1992) Ice friction during speed skating, *Journal of Biomechanics* 25: 565-571.
- 7) de Koning, J. J., R. Thomas, M. B., de Groot, G., et al. (1995) The start in speed skating: from running to gliding, *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29: 765-771.
- 8) Houdijk, H., de Koning, J. J., de Groot, G., et al. (2000) Push-off mechanics in speed skating with conventional skate and klapskates, *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32: 635-641.
- 9) 伊藤章, 齊藤昌久, 淵本隆文 (1997) スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー, および筋放電パターンの変化, *体育学研究* 42: 71-83.
- 10) 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.

- 11) 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.
- 12) van Ingen Schenau, G. J., de Koning, J. J., and de Groot, G. (1990) A simulation of speed skating performances based on a power equation, *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22 : 718-728.
- 13) Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*, p.41-43, John Wiley and Sons Inc., New York.
- 14) Yuda, J., Yuki, M., Aoyanagi, T., et al. (2004) Changes in blade reaction forces during the curve phase due to fatigue in long distance speed skating, *International Journal of Sport and Health Science* 2 : 195-204.
- 15) 湯田淳, 結城匡啓, 青柳徹ほか (2005) スピードスケート長距離種目におけるカーブ滑走中の下肢キネティクスの変化, *バイオメカニクス研究* 9 : 53-68.
- 16) 結城匡啓 (1996) 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博士論文.
- 17) 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, *バイオメカニクス学会* p.41-51, (バイオメカニクス, 13).
- 18) 結城匡啓, 阿江通良, 河合季信ほか (1997) 世界一流スピードスケート選手におけるスタート動作の三次元的分析: 平成8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20報— (浅見俊雄), p.337-341, (財)日本体育協会, 東京.

(平成24年9月11日受付)
(平成24年11月28日受理)