

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月23日現在

機関番号：32671

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22700627

研究課題名（和文） スピードスケートにおけるスタート動作の力学的メカニズムの解明

研究課題名（英文） Mechanical mechanism of movements during start in speed skating

研究代表者

湯田 淳 (YUDA JUN)

日本女子体育大学・体育学部・准教授

研究者番号：80415835

研究成果の概要（和文）：

力覚検出型センサースケートを用いて計測されたブレード反力と3次元画像解析法によって求められたキネマティクスのパラメータから、スピードスケートにおけるスタート動作中の下肢キネティクスを検討した。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が明らかとなった。また、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。

研究成果の概要（英文）：

We investigated the kinetics of the support leg during the start in speed skating by analyzing blade reaction forces measured by instrumented sensor klapskates and kinematical parameters measured by three-dimensional motion analysis. In this study, the 3rd step (left support leg) at approximately 5 m from the start line was analyzed. The peak value in the vertical blade reaction force during start movement (2.93 N/bw) 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 of straight skating and 4 times that of curve skating). Thus, a great exertion of the knee extension torque would be a characteristic of the start in speed skating.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学，スポーツ科学

キーワード：スピードスケート，ブレード反力，3次元動作分析，キネティクス，関節トルク

1. 研究開始当初の背景

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ので、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、動作の力学的原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、ストレー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（ブレード反力）が発表され（de Koning et al., 1987）、その後、同様の方法を用いたいくつかの研究が報告されている。しかし、これらの研究では、ブレード反力と滑走速度との関係が十分に検討されておらず、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。結城ら（1996）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。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、冬季の運動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。一方、カーブ滑走は、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の右方向へプッシュオフを行うというストレートとは異なる運動様式を持ち、下肢筋群の負荷が大きく、難易度が高いという特徴を有している。しかし、カーブ滑走は、これまでの国内外の研究でその重要性は指摘されていたものの、メカニズムについては詳細に検討されていないというのが現状であった。そこで、筆者は、カーブ滑走中のブレード反力が計測可能な特製センサースケートを用い、ブレード反力（Yuda et al., 2004）や3次元下肢関節トルク発揮（湯田ら, 2005）などといったキネティクスの分析を進め、カーブ滑走におけるプッシュオフ動作のメカニズムについて明らかにしている。

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

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。この動作は「走る」という動作に似ているため、そのメカニズムはこれまでのストレートやカーブ滑走でのものとは大きく異なるといえる。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、そのメカニズムについて検討したキネティクスの研究はほとんどない。

2. 研究の目的

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計測できる力覚検出型センサースケートを開発し、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のキネティクスのパラメータなどを検討することによって、スタート動作の力学的メカニズムを明らかにすることである。

3. 研究の方法

(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。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。

(2) データ収集法

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）にストレーンゲージ（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・引張りおよび曲げが計測可能な力覚検出型センサースケートを開発した（図1）。被験者の左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。

400mオーバルリンクにおける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台の高速度ビデオカメラ（CASIO社製、EX-F1）により左右側方（パンニング）、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）。4台の高速度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）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。



図1 力覚検出型センサースケート

(3) 測定項目およびその算出法

①3次元座標の算出

得られた画像から VTR digitizer (DKH 社製, Frame-DiasIV) 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 10.5~18.0 Hz 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. 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.

②下肢関節トルクの算出

画像分析から得られたキネマティクスのパラメータと, 力覚検出型センサースケートでの計測から得られたブレード反力を用い, Yuda et al. (2004) および湯田ら (2005) 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. 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.

③局面分け

本研究では, ブレード着氷から引き続く反対脚のブレード離氷 (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を強く含む局面は分析範囲から除外した.

④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.

4. 研究成果

図 2 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 (van Ingen Schenau et al., 1987) 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わかる. 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. 本研究では, 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, 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.

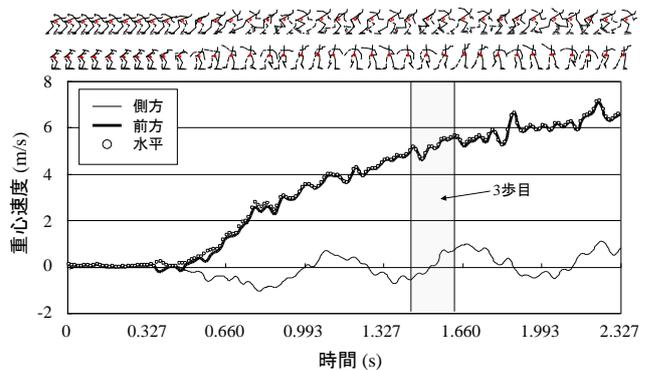


図2 スタート動作における重心速度の変化

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 (結城, 1996) およびカーブ滑走 (Yuda et al., 2004; 湯田ら, 2005) 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. 図 3 にスタート動作 3 歩目におけるブレード

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 Yuda et al. (2004) 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。ストローク初期にみられる、極めて大きな値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、陸上でのスタート動作における地面反力変化パターン (伊藤ら, 1997) 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。

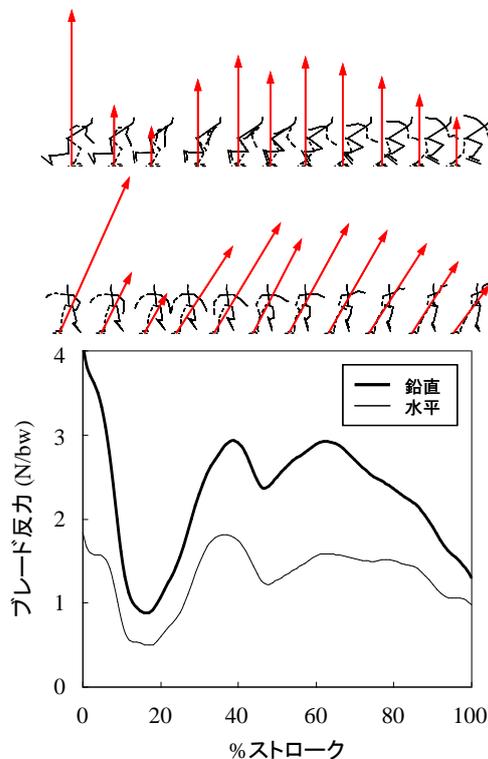


図3 スタート動作3歩目におけるブレード反力の変化

図4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。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、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。

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。ここで本研究の関節トルクパワーをみると、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、後方へと勢い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、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。

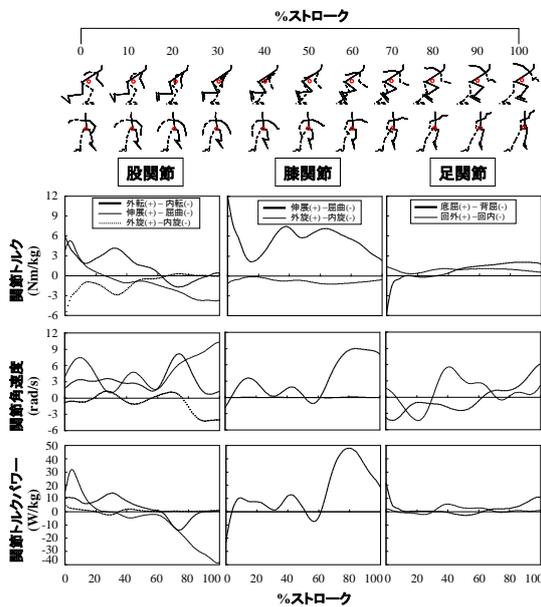


図4 スタート動作3歩目における股、膝および足関節の各軸回りの関節トルク、関節角速度および関節トルクパワーの変化

参考文献

- 阿江通良：日本人幼少年およびアスリーートの身体部分慣性係数, Jpn. J Sports Sci., 15 (3): 155-162, 1996.
- de Koning, J. J., de Boer, R. W., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. : Push-off force in speed skating, Int. J Sport Biomechanics, 3: 103-109, 1987.
- 伊藤章, 斉藤昌久, 淵本隆文 : 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, 1997.
- van Ingen Schenau, G. J., de Boer, R. W., and de Groot, G. : On the technique of speed skating, Int. J Sport Biomechanics, 3: 419-431, 1987.
- Winter, D. A. : Biomechanics and motor control of human movement, John Wiley and Sons Inc, New York, pp.41-43, 1990.
- Yuda, J., Yuki, M., Aoyanagi, T., Fujii, N., and Ae, M. : Changes in blade reaction forces during the curve phase due to fatigue in long distance speed skating, Int. J Sport and Health Sci., 2: 195-204, 2004.

- 湯田淳, 結城匡啓, 青柳徹, 藤井範久, 阿江通良 : 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 (2): 53-68, 2005.
- 結城匡啓 : 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, 1996.
- 結城匡啓, 阿江通良, 藤井範久 : 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編 バイオメカニズム 13: 41-51, 1996.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ①湯田淳, レース分析から動作分析へ～スピードスケートにおける競技力向上へのスポーツ科学の活用～, 日本体育学会第62回大会バイオメカニクス分科会シンポジウム, 2011年9月25～27日, 鹿屋体育大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯田 淳 (YUDA JUN)

日本女子体育大学・体育学部・准教授

研究者番号 : 80415835