

クロスカンリースキー・V2 スケーティング走法中の推進力に対する上肢と下肢の貢献
**Contribution of upper- and lower-limb to propulsive force
during V2 skate in Cross-country skiing**

藤田善也¹⁾, 吉岡伸輔²⁾, 石毛勇介¹⁾, 田内健二³⁾, 土屋純⁴⁾

Zenya FUJITA¹⁾, Shinsuke YOSHIOKA²⁾, Yusuke ISHIGE¹⁾, Kenji TAUCHI³⁾, Jun TSUCHIYA⁴⁾

¹⁾ 国立スポーツ科学センタースポーツ科学研究部,

²⁾ 立命館大学スポーツ健康科学部,

³⁾ 中京大学スポーツ科学部,

⁴⁾ 早稲田大学スポーツ科学学術院

¹⁾ Department of Sports Sciences, Japan Institute of Sports Sciences

²⁾ Faculty of Sport and Health Science, Ritsumeikan University,

³⁾ Department of Sport Sciences, Chukyo University,

⁴⁾ Faculty of Sport Sciences, Waseda University

キーワード: 滑走, キネティクス, 3 軸力センサ

Keyword: skating, kinetics, three-axis force transducer

Abstract

This study aims to quantify the degree of contribution of arms and legs during V2 skate in cross-country skiing from the viewpoint of the force along the direction of acceleration. Method: Six male cross-country skiers performed V2 skate at a speed of 6 m/s, and the pole and ski reaction forces were measured. In addition, using a high-speed camera, the three-dimensional coordinates of each part of the body were obtained, and the velocity, the pole, and ski angles were calculated, which were then converted to the force along the direction of movement. Results: The peak and mean forces along the direction of movement were 100 ± 20 and 63 ± 12 N, respectively, for the pole (one side) and 202 ± 48 and 106 ± 18 N, respectively, for the ski (one side). Those suggested that in V2 skate at a speed of 6 m/s, the degree of contribution of the force due to arms (push of both poles) and leg (push-off of right or left ski) are approximately the same. Furthermore, when pushing off with the ski, although the force component perpendicular to the ski comprises a large proportion, it was shown that the force can be divided into lateral and horizontal directions by converting it to a global coordinate system using the ski edge and orientation angle. In addition, ski edge angle was changed depending on abduction of hip joint. Ski force propulsion was generated by abduction of hip joint and extension of hip and knee joint. Hence, this implies that in order to increase the force of push-off for hip abduction and extension and knee extension movement, it is important to point the force along the direction of movement while exerting a force perpendicular to the ski.

スポーツ科学研究, 9, 41-55, 2012 年, 受付日:2011 年 10 月 18 日, 受理日:2012 年 4 月 30 日

連絡先: 藤田善也 〒115-0056 東京都北区西が丘 3-15-1

TEL & FAX: 03-5963-2019, E-mail: fujita.zenya@jiss.naash.go.jp

I. 緒言

クロスカントリースキー競技は、雪上に整備されたコースで数種類の走法を用いて滑走し、その所要時間を競う競技である。選手は、滑走速度を高めるためにポールとスキー板を用いて推進力を獲得しており、これまでいくつかの走法について推進力の獲得方法の研究が行われてきた。クラシカル種目において用いられるダイアゴナル走法は、左右の手足を交互に動かし、片手のポールを利用したプッシュ動作と対側のスキー板を利用したキック動作を行い、推進力を得て滑走する動作である。Pierce et al.(1987)は、一流選手のダイアゴナル走法中のスキー板とポールにかかる反力(以下、それぞれをスキー反力、ポール反力とする。)を計測した。スキー反力の進行方向のピーク値は、鉛直方向のピーク値の 9%であり、ポール反力の長軸方向のピーク値の 190%であることを示した。なお、Pierce et al.(1987)の研究では、測定時のコースの傾斜については記されていない。Vähäsöyrinki et al.(2008)は、2.5 度の上り斜面での高速(5.6 m/s)のダイアゴナル走法において、ポール反力の進行方向の平均値が鉛直方向の平均値の 84%であること、スキー反力の進行方向の平均値が鉛直方向の平均値の 15%であり、ポール反力の進行方向の平均値の 313%であることを示した。これらの報告は、ダイアゴナル走法において、ポールが進行方向に力を発揮しやすいが比較的大きな力を発揮しない特徴をもつものに対し、スキー板は、全体の割合から見ると進行方向への力発揮はあまり大きくないものの、ポール反力と比較すると大きな力発揮をする特徴をもっていることを示すものである。したがって、ポール反力およびスキー反力の進行方向の成分を滑

走速度を獲得するための上肢と下肢の貢献としてとらえると、ダイアゴナル走法は下肢の貢献が高いといえる。

ダブルポーリング走法は、両方のポールによるプッシュ動作によって滑走する走法であり、ポール反力に着目した研究が多い。Nilsson et al.(2003)は、平地でのダブルポーリング走法中のポール反力の鉛直および進行方向の成分を測定し、進行方向のピーク値が鉛直方向のピーク値の 92%であること、ポールによるプッシュ動作の開始時には鉛直方向の成分が大きいこと、後半にかけて進行方向の成分が大きくなることを示した。また、Millet et al.(1998b)は、平地での異なる速度におけるダブルポーリング走法中のポール反力の長軸方向の成分を測定し、速度の増加に伴い、ポールの接地から離地までのプッシュ局面のポール反力の平均値およびピーク値が有意に増加することを示した。これらの研究は、ダブルポーリング走法において、プッシュ動作中の後半に進行方向の成分を獲得していること、プッシュ動作によって大きな推進力を得ることが速度獲得のために重要であることを示すものである。

スケーティング走法は、スキー板を V 字に開き、身体重心を進行方向に対して側方に移動しながら滑走する走法である(Smith and Heagy, 1994)。スケーティング走法中の下肢は、これまでに述べたクラシカル種目の走法と大きく異なり、進行方向に対して外側方向に脚を外転させて力を発揮し、推進力を得ることが特徴である。ただし、上肢は、クラシカル種目の走法と同様に進行方向と同じ方向に力を発揮する。一般的に、下肢は上肢と比較して相対的に大きな力発揮ができる機能的特性をもっているが、スケーティング走法の場合

合, 力の伝達方向という点を考慮すると, 股関節の外転を伴う下肢の動作よりも, 肩関節の屈曲伸展によって行われる上肢の動作のほうが進行方向へと力を発揮しやすい動作であるといえる. V1 スケーティング走法は, 1 サイクル中に左右どちらかのスキー板を用いたプッシュオフ動作に合わせて1度だけ両方のポールを用いたプッシュ動作を行う走法である. Street and Frederick (1995) は, V1 スケーティング走法中のスキー反力の進行方向のピーク値は, 外側方向のピーク値の 21 %, 鉛直方向のピーク値の 8 % であり, ポールによるプッシュ局面のポール反力の進行方向のピーク値の 40 % であることを報告している. また, プッシュオフ動作を行う脚の膝関節がプッシュオフ動作のために伸展し始めてから, スキー板が離地するまでのプッシュオフ局面中のスキー反力の進行方向の平均値は, 同局面中の外側方向の平均値の 20 %, 鉛直方向の平均値の 5 %, ポール反力の進行方向の平均値の 30 % であることを報告した. これらの結果は, スキー板を用いたプッシュオフ動作によって獲得される進行方向の力が大きくないこと, ポールを用いたプッシュ動作による進行方向の力が滑走速度の獲得に重要な役割をもつことを示すものである. 上肢と下肢の貢献の割合を走法間で比較すると, ダイアゴナル走法では下肢の割合が高く, ダブルポーリング走法および V1 スケーティング走法では上肢の割合が高いといえる.

Street and Frederick (1995) が対象とした V1 スケーティング走法は, フリー種目が正式競技種目となってから用いられている一般的な走法であり, フリー種目について研究する上で適したものであった. しかしながら, 近年, フリー種目のスプリント競技において競技の高速化が進んでおり (Stöggl et al., 2009), 競技が変化してきている. この変化の一因には, V1 スケーティング走法に代わり, V2 スケーティング走法が使用されるようになり, 滑走

速度を高める滑走技術が明らかになってきていること (Fujita et al., 2010) や, 新たな走法が発表されていること (Stöggl et al., 2008; 2010) が挙げられる. V2 スケーティング走法は, 1 サイクル中に左右両方のスキー板によるプッシュオフ動作に合わせて 2 度の両方のポールによるプッシュ動作を行う走法であり, V1 スケーティング走法と比較してストライドが大きく, ピッチが少ない特徴がある (Bilodeau et al., 1992). 現在, V1 スケーティング走法は急な上り坂, V2 スケーティング走法は平地や緩やかな上り坂, ラストスパートなどで用いられることが一般的である. V2 スケーティング走法は, 滑走技術が進歩して考案された走法であり. V1 スケーティング走法に比較して新しい走法である. そのため, Street and Frederick (1995) が行ったような上肢および下肢それぞれの貢献について力学的視点から調べた研究がない. 先に述べたとおり, ダイアゴナル走法では下肢の貢献の割合が高く, ダブルポーリング走法および V1 スケーティング走法では上肢の貢献の割合が高いことが示されている. そのため, ダイアゴナル走法中の滑走速度を高められない選手に対して, 貢献の高い下肢に着目して力発揮を高める筋力トレーニングや技術指導を行うなどの方策を考えることが可能であるが, V2 スケーティング走法に関しては貢献の割合をもとにトレーニングの方策を考えることができないのが現状である. また, 上肢および下肢の貢献度合いに加え, それぞれの動作を評価することは, 技術指導や筋力トレーニングなどを実施するうえで有益な情報になると考えられる.

そこで本研究では, V2 スケーティング走法における上肢と下肢の貢献度合いについて, 推進方向への力と動作の観点から定量することを目的とした.

II. 方法

1 カセンサシステムの製作

本研究で使用したポールは、競技用のポール (Platinum power grip, Karhu ski Oy, Finland) であった。ポールセンサには、ポールの長軸方向の力を計測するために、アルミ製の切削したパーツを取り付け、左右に 1000 Ω 型ストレインゲージ (N11-FA-5-1000-11, Showa Measuring Instruments Co. Ltd., Japan) を貼り付けた (Fig. 1)。ポールは被験者の身長に合わせ、150 cm, 155 cm の 2 種類を製作し、被験者に最適な長さを選択させた。製作したセンサポールの片方の総重量は 750 g であった。ポール反力は、ロードセル (LUR-A-1KNSA1, Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd., Japan) とプレス機 (Yuatsu Power R-1, Riken Seiki Co. Ltd., Japan) によって得た校正値を用いて求めた (Fig. 2)。

本研究で使用したスキー板は、競技用のスキー板 (Volkan sk sr wet, Kalhusport Co. Ltd., Finland) であり、実験にあたり、グライダーワックス (CH6, Swix sports A S, Norway) を説明書の手順に従って塗布した。スキーセンサには、スキー板の左右、前後、上下方向の力を計測するために、チャージアンプ内蔵 3 成分力センサ (9602, Kistler Japan Co. Ltd., Germany) を用いた。Fig. 3 のように各スキー板に穴を開けて、2 個組み込んでプリロードしたセンサ部を取り付けた。プリロ

ードしたセンサ部には、2 種類のビンディング (SNS Pilot Equip Skate, Salomon SAS, France, および NNN Racing R3 Skate, Rottefella AS, Norway) が取り付けられるよう穴をあけ、被験者のブーツの種類に応じて、取り換えられるようにした。製作したセンサスキー板の片方の総重量は、約 2.6 kg であった。センサ部のプリロードおよびキャリブレーションは、日本キスラー株式会社に依頼して、校正値を得た。

なお、左右のポール (2 channels) とスキー板 (12 channels) の出力信号は、被験者の背部に装着したデータロガー (NR-600, Keyence corporation, Japan) にてサンプリングレート 1000 Hz で収集した。

2 被験者

被験者は、日本代表を含む男子クロスカントリースキー競技者 6 名 (年齢: 20 ± 1 歳, 身長: 169.9 ± 2.4 cm, 体重 68.1 ± 2.4 kg) とした。各被験者の競技年数は 10 年以上であり、全被験者が国内の主要大会での入賞経験を有していた。実験に先立って、東京大学倫理審査委員会の承認を受けた。各被験者に本研究の目的と実験方法を説明した上で、実験のインフォームドコンセントを得た。

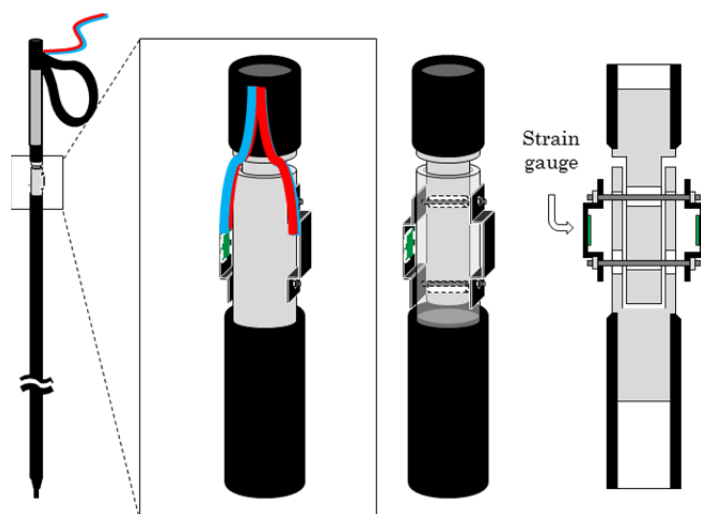


Fig. 1 Schematic of the poling force measurement system.

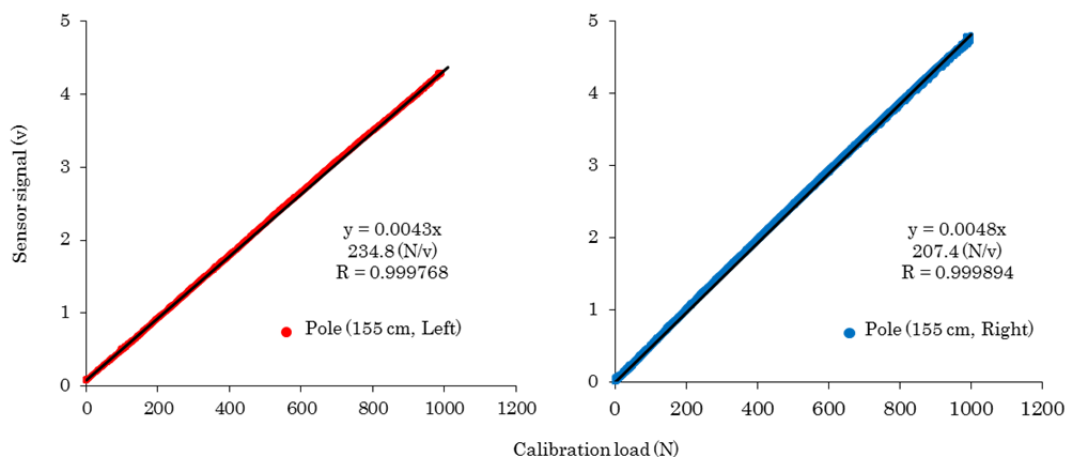


Fig. 2 Typical examples of calibration results for the pole sensors are shown. The correlation coefficients derived from the calibration results exceeded 0.999. This result indicates that the linearity of the pole sensors were sufficient for the measurement of the pole forces.

3 動作の撮影

実験は、北海道美瑛町の美瑛白金ノルディックコースのスタート地点付近の平地にて行った。実験時の天候は、曇り、気温および雪温が摂氏-2度、新雪の雪質であった。ビデオ撮影は、特設した雪上コースの側方および前方に設置した2台のハイスピードカメラ(EX-F1,Casio, Japan)を用いて、毎秒300フレームで撮影した。また縦20m×横2.5m×高さ2.0mの画角を設定し(**Fig. 4**)、合計15ヶ所にキャリブレーションポール(マーク間0.4m)を立てた。2台のカメラの同期は、ビデオ撮影時にLEDを発光させ、2台のカメラに映すことで行った。2台のカメラによって撮影された映像をPCに取り込み、動作解析ソフト

(Frame-DIAS IV, DKH, Japan)を用いて、身体23点、両ポールの先端2点、両スキー板の前後端4点の計31点を毎秒100フレームでデジタル化した。デジタル化された座標値を3次元パンニングDLT法(高松ほか, 1997)により実長換算し、身体各部の3次元座標を求めた。算出された3次元座標は、4次のButterworth low-pass digital filterによって7Hzで平滑化した。その後Ae et al.(1992)の身体部分慣性係数を用いて身体重心の座標を求めた。なお、身体重心の算出にあたり、ポールおよびスキー板の質量は無視した。得られた身体重心高は、被験者の身長によって規格化した。

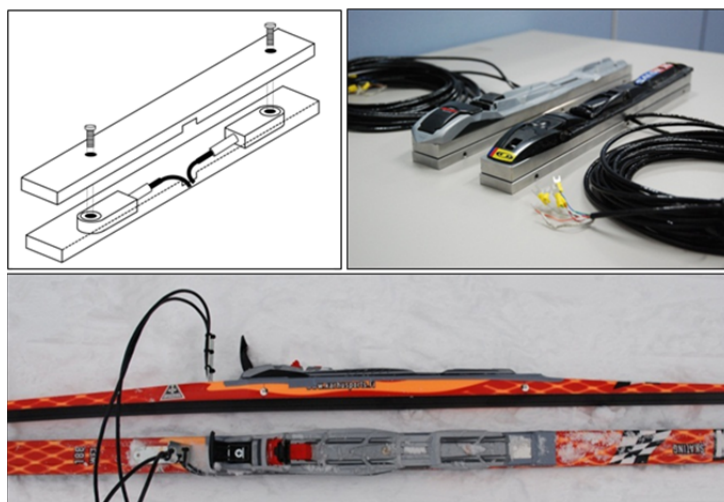


Fig. 3 Schematic of the ski reaction force measurement system

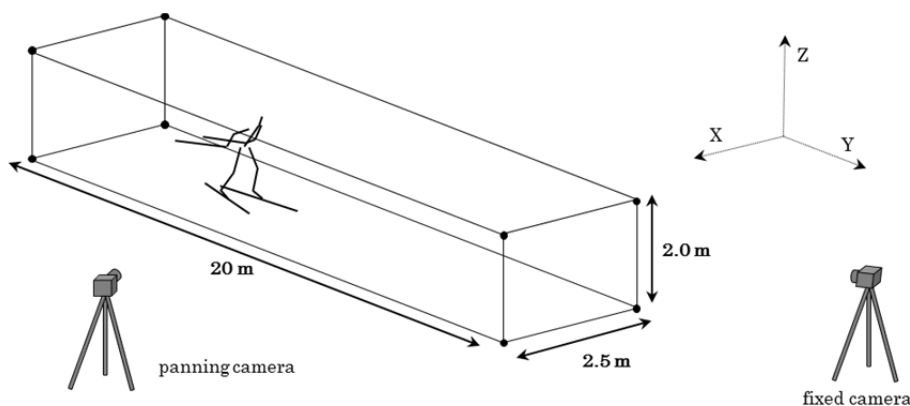


Fig. 4 Set up for three-dimension motion analysis

4 動作データの分析

V2 スケート走行中の身体動作およびポールとスキー板の運動学的変化を評価するために、1 サイクル中の各関節およびポールとスキー板の角度を算出した。各関節角度の定義は、上肢では肘関節角度が上腕セグメントと前腕セグメントとのなす角、肩関節屈曲伸展角度がYZ平面上においてY軸と上腕セグメントのなす角、肩関節内外転角度がXZ平面上においてX軸と上腕セグメントのなす角とした。また、YZ平面上においてY軸と体幹セグメントがなす角を体幹屈曲伸展角度とした。さらに、下肢では膝関節角度が大腿セグメントと下腿セグメントのなす角、股関節屈曲伸展角度がYZ平面上においてY軸と大腿セグメントのなす角、股関節内外転角度がXZ平面上においてX軸と大腿セグメントのなす角とした。なお、各関節角度は、伸展および外転方向を正とした。ポール角度の定義は、左右のポール角度がYZ平面上においてY軸とポールのなす角とし、Y軸を基準として反時計回りを正とした。スキー板の角度定義は、左右のスキー板の姿勢角度がXY平面上においてY軸とスキー板のなす角とし、Y軸を基準として右のスキー板では時計回り、左のスキー板では反時計回りを正とした。また、左右のスキー板の傾斜角度は、スキー板の先端と後端を結んだ線分と直交して膝関節中心を通るベクトルとZ軸とのなす角とし、スキー板の後端か

ら先端を軸に対して右のスキー板では反時計回り、左のスキー板では時計回りを正とした。それぞれの角度定義は Fig. 5 に示した。

5 力の計測

本研究では、グローバル座標系は、コースの進行方向に向かって右方向をX軸、進行方向をY軸、鉛直上方向をZ軸と定義した。ポールのセンサ座標系は、ポールの先端からポールのグリップ部の方向に向かう軸をポールの長軸とした。計測されたポールの力データは、ポールの長軸方向からグローバル座標系に変換後、各軸成分に分解して示した。また、スキー板のセンサ座標系は、スキー板の後端から先端方向をスキーセンサY軸、スキーセンサY軸方向に向かって体の外側方向をスキーセンサX軸(左スキー板:左を正方向、右スキー板:右を正方向)、滑走面に対して鉛直上方向をスキーセンサZ軸として定義した。計測されたスキー板の反力データは、センサ座標系からグローバル座標系に変換後、各軸成分に分解して示した。

本研究では、1 サイクル中の両ポールを用いた上肢の動作をポーリング、左右それぞれのスキー板を用いた下肢の動作をスケータリングと定義した。ポーリング中の各局面は、ポールの接地から離地までをプッシュ局面、ポールの離地から次の接地までをスイング局面とした。また、スケータリ

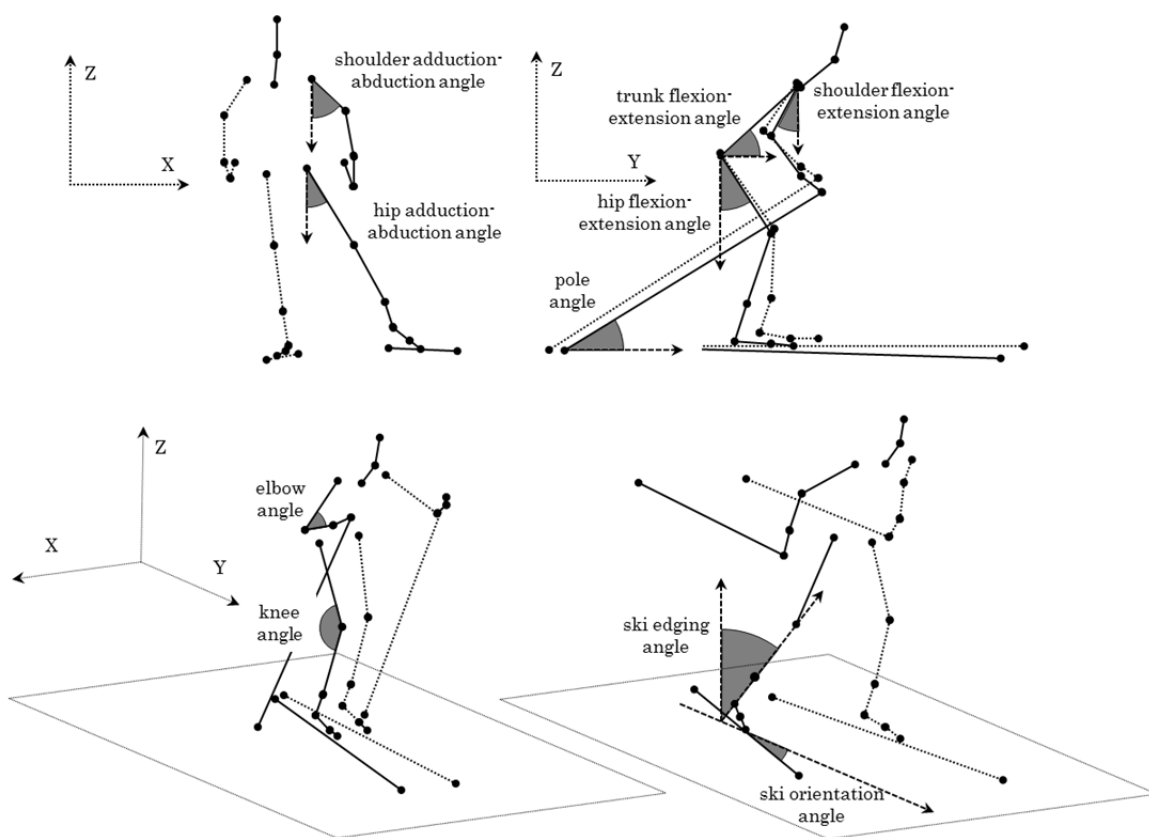


Fig. 5 Definition of joint, pole and ski angles.

グの各局面は、左右一方のスキー板の接地から鉛直方向の力成分が上昇し、その後下降して力成分が最小になるまでのスキー板を滑走させている局面をグライド局面、グライド局面終了時から膝関節が伸展し、股関節が伸展しながら外転する脚のプッシュオフ動作によってスキー板が離地するまでをプッシュオフ局面、スキー板が離地してから再度接地するまでをスキーリカバリ局面とした。

6 カデータの分析

本研究では、分析の対象とする滑走データを、ビデオ撮影区間内における左右の1サイクルとした。得られた身体重心の変位から滑走速度、ストライド、ピッチを算出した。ポールとスキー板それぞれの局面の所要時間を算出した。また、プッシュ局面とプッシュオフ局面中のピーク力、平均力を軸方向の成分ごとに算出した。また、V2 スケーティング走法では脚による1回のプッシュオフ動

作中に左右両方のポールでプッシュ動作を行うため、両方のポールの合力に対する片方のスキー板の力の割合についても求めた。なお、ポールとスキー板の左右それぞれの力データの平均値を被験者ごとの代表値とした。なお、データロガーと2台のカメラの同期は、データロガーの収集開始時に外部トリガによってLEDを発光させ、2台のカメラに映すことで行った。

7 統計処理

ポールのプッシュ局面時間とスキー板のプッシュオフ局面時間、グローバル座標系における両ポールのポール反力とスキー反力の進行方向のピーク値および平均値の比較は、ステューデントの t 検定を行った。また、グローバル座標系におけるポールおよびスキー反力それぞれの各軸方向のピーク値および平均値の比較は、反復測定の一要因分散分析を用い、 f 値が有意であった場合

には, Bonferroni の方法を用いて多重比較検定を行った. なお, 危険率は5%未満を有意水準とした.

III. 結 果

Table 1 は, 全被験者のサイクル特性を平均値と標準偏差で示したものである. 滑走速度は 6.07 ± 0.09 m/s であり, ストライドとピッチはそれぞれ, 5.56 ± 0.35 m, 1.1 ± 0.07 Hz であった. ポーリングのプッシュ局面時間 (0.28 ± 0.01 s) とスケーティングのプッシュオフ局面時間 (0.50 ± 0.04 s) を比較した結果, 両者間に有意差が認められた ($t=-13.734$).

反力(片側分)の進行方向のピーク値および平均値はそれぞれ, 100 ± 20 N, 63 ± 12 N であり, 体重あたりではそれぞれ, 15 ± 3 %BW, 9 ± 2 %BW であった. 両方のポールの合力の進行方向のピーク値と平均値はそれぞれ, 200 ± 39 N, 127 ± 24 N であり, 体重あたりではそれぞれ, 30 ± 6 %BW, 19 ± 4 %BW であった. プッシュオフ局面における片方のスキー板のスキー反力の進行方向のピーク値および平均値はそれぞれ, 202 ± 48 N, 106 ± 18 N であり, 体重あたりでは

それぞれ 30 ± 7 %BW, 16 ± 3 %BW であった. グローバル座標系におけるプッシュ局面の両方のポールのポール反力の合力の進行方向成分とプッシュオフ局面の片方のスキー板のスキー反力の進行方向成分のピーク値および平均値の間には有意差がみられなかった(ピーク値: $t=0.083$, 平均値: $t=1.681$). なお, 両方のポールの合力に対する片方のスキー板のスキー反力の進行方向成分のピーク値および平均値の割合はそれぞれ, 101 %, 84 %であった. グローバル座標系におけるプッシュ局面のポール反力の各軸方向のピーク値および平均値を比較した結果, 交互作用が認められた ($F=82.358$). 下位検定の結果, 進行方向および鉛直方向の成分が左右方向の成分より有意に高値を示したが, 進行方向と鉛直方向の成分の間には有意差がみられなかった. また, プッシュオフ局面のスキー反力の各軸方向のピーク値および平均値を比較した結果, 交互作用が認められた ($F=474.175$). 下位検定の結果, 鉛直方向の成分が左右方向および進行方向の成分より有意に高値を示し, 左右方向が進行方向より有意に高値を示した.

Fig. 6 は, 0-100%に規格化した1サイクル中の左右それぞれのポールおよびスキー板から発揮された反力の平均値を, センサ座標系とグローバル座標系でそれぞれ示したものである. センサ座標系におけるポールの長軸方向の成分は, ポーリング開始後, 急激に立ち上がってピークを迎え(ピーク値, 右ポール 1 回目: 122 ± 33 N, 2 回目: 124 ± 35 N, 左ポール 1 回目: 139 ± 45 N, 2 回目: 105 ± 20 N), 僅かな時間プラトーな波形を示して, 急激に低下した(Fig. 6-A). 長軸方向の成分をグローバル座標系(Fig. 6-B)に変換すると, ポールのプッシュ動作開始後(35, 80%)には, 鉛直方向の力成分のピーク(ピーク値: 100 ± 20 N)が出現し, その後(40, 85%), 進行方向の力成分のピーク(ピーク値: 104 ± 27 N)が出現することが示された. センサ座標系におけるスキー

Table 1 Cycle characteristics during V2 skating technique.

velocity (m/s)	6.07 ± 0.09
stride (m)	5.56 ± 0.35
pitch (Hz)	1.1 ± 0.07
poling time (s)	0.28 ± 0.01
pole swing time (s)	0.64 ± 0.05
glide time (s)	0.66 ± 0.09
push-off time (s)	$0.5 \pm 0.04^*$
ski recovery time (s)	0.68 ± 0.05

N = 6.

All values showed mean \pm SD.

*: vs. poling time, $p < 0.05$

Table 2 Generated forces on global axes during V2 skating technique.

		medial-lateral	anterior-posterior	vertical	
Pole peak force	(N)	9 ± 2	100 ± 20 a	104 ± 27	a
	(%BW)	1 ± 0.3	15 ± 3 a	16 ± 4	a
Pole mean force	(N)	5 ± 1	63 ± 12 a	57 ± 12	a
	(%BW)	1 ± 0.2	9 ± 2 a	9 ± 2	a
Ski peak force	(N)	630 ± 119	202 ± 48 a	1175 ± 106 a, b	
	(%BW)	94 ± 18	30 ± 7 a	176 ± 16 a, b	
Ski mean force	(N)	322 ± 37	106 ± 18 a	737 ± 50 a, b	
	(%BW)	48 ± 5	16 ± 3 a	110 ± 7 a, b	

N = 6. All values showed mean ± SD.

a: vs. medial-lateral, p < 0.05.

b: vs. anterior-posterior, p < 0.05.

板の各軸方向の力成分をみると、鉛直方向の力成分では接地から離地までに二峰性の力波形が示された。一方、左右方向および進行方向の成分には二峰性の力波形は示されなかった (Fig. 6-C)。このセンサ座標系の力成分をグローバル座標系に変換すると、グライド局面ではセンサ座

標系と同様に鉛直方向の成分が大きく立ち上がり、その後減少すること、プッシュオフ局面ではセンサ座標系で示された鉛直方向の成分が左右および進行方向の成分に分けられていることが示された (Fig. 6-D)。またポール反力とスキー反力の時系列変化をみると、ポーリングのプッシュ局面と

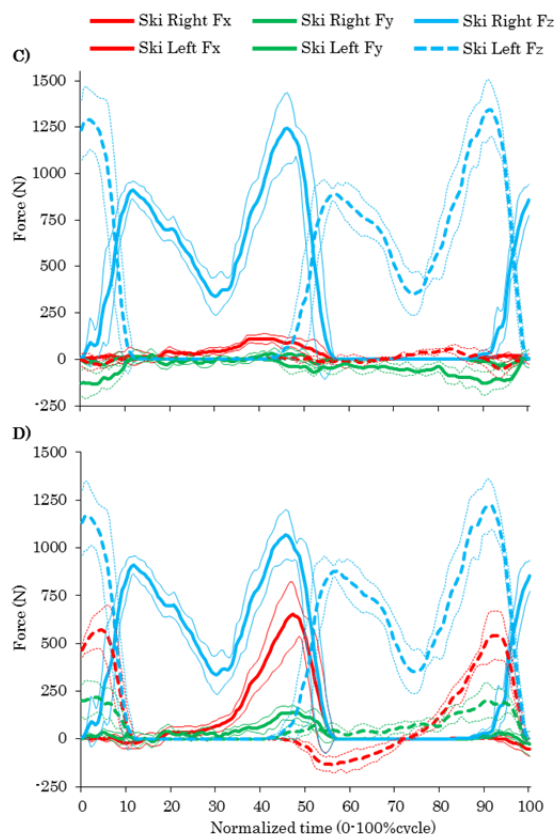
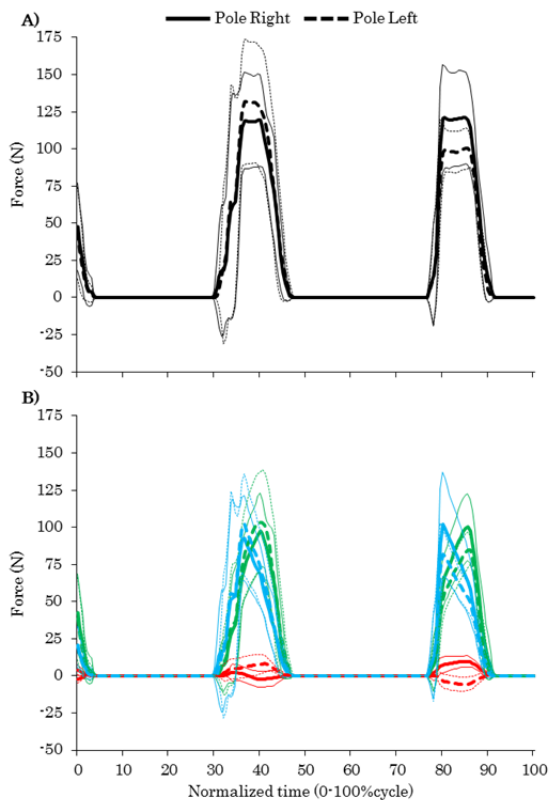


Fig. 6 Generated forces: pole forces of pole long axis A), pole forces of global axes B), ski reaction forces of sensor axes C), ski reaction forces of global axes D).

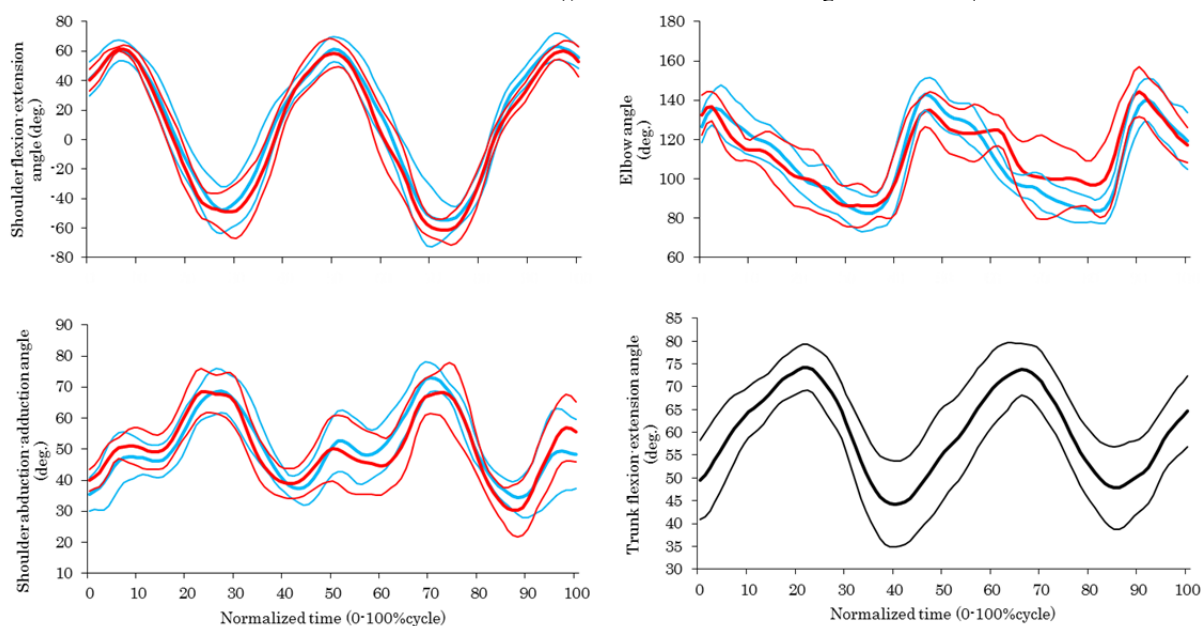


Fig.7 Upper body (Shoulder, elbow) angle and trunk angle during V2 skate.

スケーティングのプッシュオフ局面はほぼ同時に開始されており、まず上肢の力発揮がピークを迎え(40 および 85 %, Fig. 4-B), その後、プッシュ局面が終わるとほぼ同時に下肢の力発揮がピークを迎えていることが示された(45 および 90 %, Fig. 4-D).

Fig. 7 は、V2 スケーティング走法の 1 サイクル中の上肢および体幹の関節角度の変化を示したものである。ポーリングのプッシュ局面(30-45 %および 75-90 %)では、肘関節の伸展運動、肩関節の伸展および内転運動と体幹の屈曲運動が行われていることが示された。

Fig. 8 は、V2 スケーティング走法の 1 サイクル中の下肢の関節角度の変化を示したものである。スケーティングのグライド局面(右脚:0-30 %, 左脚:45-75 %)では、膝関節および股関節の伸展運動がみられたのちに屈曲運動へと切り替わること、股関節の内外転運動があまりみられないことが示された。また、スケーティングのプッシュオフ局面(右脚:30-55 %, 左脚:75-100 %)では、膝関節および股関節の屈曲運動がみられたのちに

伸展運動へと切り替わること、股関節の外転運動がみられることが示された。

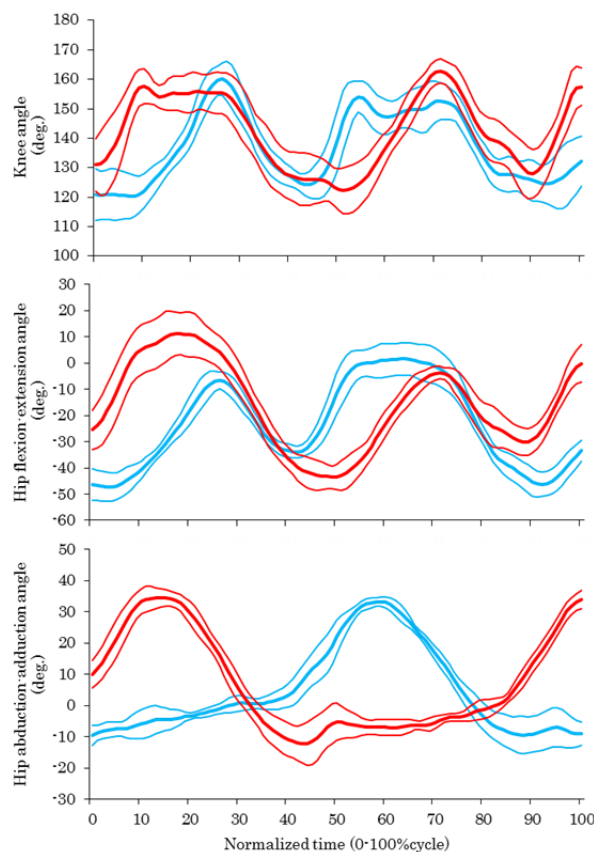


Fig. 8 Lower body (knee and hip) angle during V2 skate

Fig. 9 は、V2 スケート走行の 1 サイクル中のポールおよびスキー板の角度および身体重心高の変化を示したものである。ポーリングのプッシュ局面 (30-45 % および 75-90 %) では、ポール角度が減少することが示された。スケータイングのグライド局面 (右脚: 0-30 %, 左脚: 45-75 %) では、スキー板の姿勢角度は、右脚ではあまり変化がみられず、左脚では緩やかに増加する様相を示した。また同局面においてスキー板の傾斜角度は、あまり変化がみられなかった。一方、スケータイングのプッシュオフ局面 (右脚: 30-55 %, 左脚: 75-100 %) では、スキー板の姿勢角度およびスキー板の傾斜角度は増加する様相を示した。

1 サイクル中の身体重心は、スケータイングのグライド局面 (右脚: 0-30 %, 左脚: 45-75 %) で上昇し、ポーリングのプッシュ局面 (30-45 % および 75-90 %) およびスケータイングのプッシュオフ局面中期まで (右脚: 30-45 %, 左脚: 75-90 %) に下降し、スケータイングのプッシュオフ局面後期 (右脚: 45-55 %, 左脚: 90-100 %) に再度上昇することが示された。

IV. 考察

V2 スケート走行における下肢と上肢の

貢献比率を、ポールおよびスキー板の進行方向の力の観点から明らかにすることを目的として本研究を実施した。その結果、下肢は鉛直方向に大きな力を発揮しているものの、平地における滑走の場合、上肢 (両方のポール反力) と下肢 (片方のスキー反力) の貢献は進行方向については同程度であることが明らかとなった。

ポールから発揮された力とポール角度をみると、接地直後に鉛直方向の力成分がピークを迎え、続いて進行方向の成分がピークを迎えることから、ポール接地後から徐々に進行方向へと力が向くようにポールの角度を変化させて推進力を獲得していることが示された。これらの結果は、ダブルポポーリング走法中の力を測定した Nilsson et al. (2003) の報告と同様であった。つまり、V2 スケート走行中には力学的にはダブルポポーリング走法と同様の力発揮が行われているといえる。

スキーセンサから取得した力は、ほとんどがスキー板の底面に対して鉛直方向の成分であった (Fig. 4-C)。しかしながら、グローバル座標系では、グライド局面では鉛直方向に力が発揮されているものの、プッシュオフ局面では左右および進行方向の成分となることが明らかとなった。

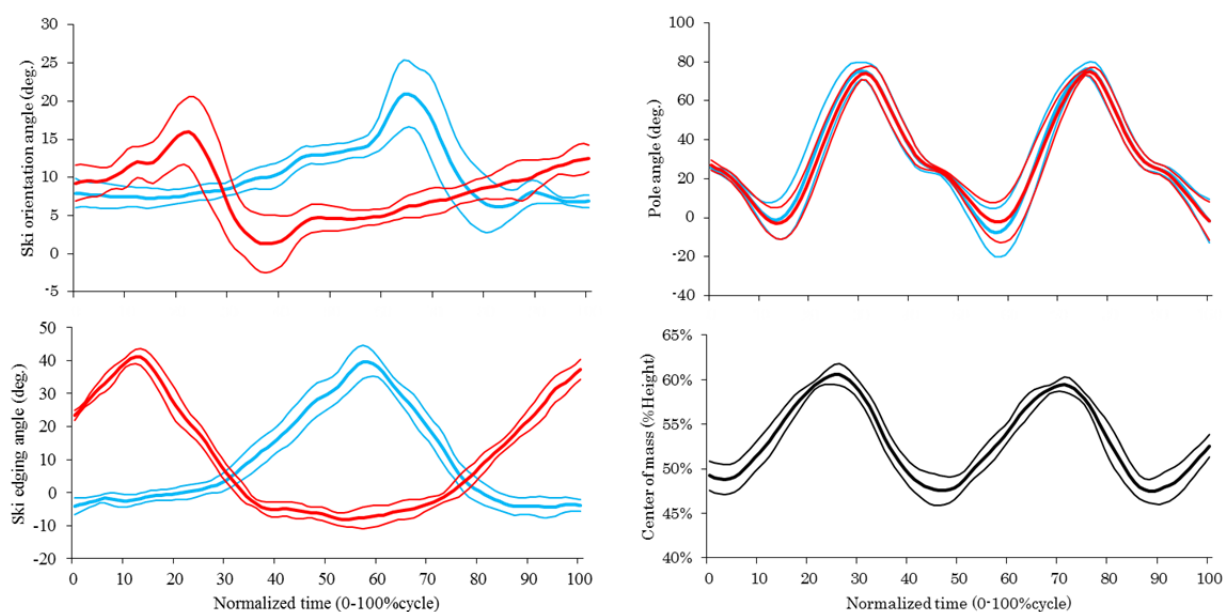


Fig. 9 Ski angles, pole angle, and center of mass during V2 skate.

さらにスキー板の角度をみると、グライド局面ではスキー板の底面と雪面とをほぼ平行に保ち、プッシュオフ局面では股関節の外転運動を行うことによって進行方向に対してスキー板を開きながら傾けていること、股関節の外転運動に加えて股関節と膝関節の伸展運動によって力発揮が行われていることが明らかとなった。これらの結果は、グライド局面ではスキー板に身体を乗せて滑走を行っている局面であり、進行方向には力を発揮していないこと、プッシュオフ局面では、スキー板の前後および横方向に対して力を発揮するのではなく、スキー板を傾けながらスキー板の底面に対して力を発揮して滑走に必要な推進方向の力成分を獲得していることを示すものである。Stöggli et al. (2008; 2010)は、インソール型の足圧センサ (Pedar mobile system, Novel GmbH, Germany) を用いてスキー板の滑走面に対して鉛直方向のスキー反力を計測し、滑走速度の増加に伴いスキー反力が増加することを示した。本研究の結果と合わせて考えると、滑走速度の増加にはスキー板の滑走面に対するスキー反力の増加およびプッシュオフ局面中のスキー板の傾け方が重要であることが示唆される。

本研究では、上肢(両方のポールを用いたプッシュ動作)と下肢(片方のスキー板を用いたプッシュオフ動作)において、力の発揮時間に有意差が認められた。この力発揮時間の差は、ポールの先端が接地後に滑らないため、肘関節および肩関節が伸展される時間で力発揮が完了されなければならないこと、および、スキー板は身体とともに滑走しているために比較的長時間の力発揮が可能であることから生じると考えられる。つまり、スケートイング走法はプッシュオフ動作中もスキー板が滑走しているという特性を有効に利用した合理的な技術であることが示唆される。

また上肢と下肢の進行方向に対する力発揮はほぼ同時に開始されるが、上肢の力発揮が先に

ピークを迎え、その後、下肢の力発揮がピークを迎えることが示された。つまり、V2 スケートイング走法における上肢と下肢の力の貢献の様相は、まずグライド局面中に滑走によってストライドを獲得しながらポールの振り戻しが行われる。その後、プッシュ局面とプッシュオフ局面が同時に開始され、力の立ち上がり早い上肢の動作によって推進力が獲得される。同時に下肢の動作によって徐々に推進力を増加させ、ポーリング局面の終了と同時に下肢の力発揮がピークを迎える。力発揮のピークのタイミングは、上肢と下肢とでは時間的な相違がみられる。これは、上肢および下肢の動作特性と滑走中の身体重心高の変化から説明できる。本研究では、V2 スケートイング走法中の身体重心高が、プッシュ局面およびプッシュオフ局面中期までに下降し、プッシュオフ局面後期では上昇することが示された。ポールのプッシュ局面では、肩関節の屈曲運動および内転運動、肘関節の伸展運動と体幹の屈曲運動によって、これらの動作を生み出す各セグメント重心は下降し、ポールによる力発揮がなされている。さらにプッシュオフ局面開始から中期では、股関節および膝関節がプッシュオフ局面後期の伸展運動のために屈曲されることにより、上肢と体幹セグメント重心に加えて下肢セグメント重心も下降する。つまり、プッシュ局面およびプッシュオフ局面中期までの身体重心の下降は、ポールを用いた力発揮をするための上肢および体幹の運動とスキー板を用いたプッシュオフ動作を行うための準備動作によって発生したといえる。また、プッシュオフ局面後期では、股関節および膝関節の伸展運動によって下肢セグメント重心が上昇し、スキー板による力発揮がなされている。さらに同局面においてはプッシュ局面で屈曲された体幹の伸展運動が行われ、体幹セグメント重心が上昇する。これらのことを踏まえると、プッシュ動作開始時には身体重心高を高めておく必要があり、プッシュオフ動作

中期には身体重心高を低めておく必要があることが考えられる。身体重心高からみると、上肢と下肢の動作が完了される条件は相反しており、これらを同時に遂行することは困難である。このことから、力発揮のピークのタイミングがずれたと考えられる。

Vähäsöyrinki et al. (2008)は、斜度 2.5 度の上り斜面におけるダイアゴナル走法中(速度 5.6 m/s)のスキー板の進行方向の平均力が 150 N、ポールの進行方向の平均力が 48 Nであることを示した。本研究の結果と比較すると、V2 スケーティング走法ではダイアゴナル走法と比較すると上肢による推進力の獲得が大きいといえる。この差は、V2 スケーティング走法では両腕のポーリングを行うが、ダイアゴナル走法では片腕のポーリングを行うことから生じる。一方、下肢による推進力はダイアゴナル走法のほうが大きい。ダイアゴナル走法では、キックワックスの使用によって、スケーティング走法よりも進行方向に対して効率良くキック動作を行うことが可能であることがその要因であると考えられる。両研究ともに滑走速度は約 6 m/s であるが、この速度を獲得するために、V2 スケーティング走法では両腕のポーリングの貢献度を大きく、ダイアゴナル走法ではキックによる貢献度を大きくして、効率良く推進力を獲得していることがわかる。

ダブルポーリング走法は、両腕のポーリングによって推進力を得ており、上肢の貢献が非常に高い走法であるといえる。Millet et al. (1998a)は、2.1 %の上り斜面において速度が 5.6 m/s のダブルポーリング走法の両側のポール反力の合力の平均値を計測し、264 Nであることを示した。本研究において、両側のポール反力の平均値は、126 Nであり、Millet et al.の結果の 48 %であった。これは V2 スケーティング走法では、ポーリングに加えてスケーティングのプッシュオフ動作によって推進力を獲得できるためであると考えられる。これら

の結果は、同速度下では下肢による貢献が可能な V2 スケーティング走法のほうが力発揮の点で有利な走法であることを定量的に示すものである。

スケーティング走法を用いるフリー種目では、平地や緩やかな上り斜面で V2 スケーティング走法を用いることが一般的である。Millet et al. (1998a)は、2.1 %の上り斜面において最大速度における V1 および V2 スケーティング走法中のポール反力を比較し、最大速度時には、V2 スケーティング走法中のポール反力のピーク値が有意に高いものの、平均値では走法間で変わらないことを示した。V1 スケーティング走法中の上肢に対する下肢の貢献度(ピーク値を指標とした貢献度:40 %, 平均値を指標とした貢献度:30 %, 斜面状況:12 %の上り斜面, Street and Frederick (1995))および V2 スケーティング走法中の上肢に対する下肢の貢献度(ピーク値を指標とした貢献度:101 %, 平均値を指標とした貢献度:84 %, 斜面状況:平地, 本研究)が大きく変わらないものとする、2.1 %の上り斜面において、下肢の貢献度が高い V2 スケーティング走法のほうが推進力の獲得に優れた走法であるといえる。

この現状を踏まえると、平地や緩やかな上り斜面では、下肢の貢献度が高い V2 スケーティング走法を用いることが有利であると考えられる。Bilodeau et al. (1992)は最大努力による V1 スケーティング走法および V2 スケーティング走法では、斜度の増加によって速度が減少すること、平地と斜度 8.7 %の上り斜面のどちらにおいても走法間に速度の差がないことを示した。一方、Stöggl et al. (2010)は同様に最大努力時における両走法間の速度を比較し、12.3 %の上り斜面においては V2 スケーティング走法の速度が有意に高く、17.6 %の急な上り斜面においては V1 スケーティング走法の速度が有意に高いことを示した。また、テレビ中継映像からフリー種目が 1985 年の世界

スキー選手権大会(現在の世界ノルディック選手権大会)から正式種目となって間もない, 1988 年に行われたカルガリーオリンピックのフリー種目では, 選手が V1 スケーティング走法を使用しており, V2 スケーティング走法を使用していないことが確認された. さらに, 2011 年のオスロ世界ノルディック選手権大会のフリー種目では, 選手は平地や緩やかな上り斜面で V2 スケーティング走法を使用し, 急な上り斜面で V1 スケーティング走法を使用していることが確認された. これらのことを踏まえると, フリー種目が正式種目となってから 20 数年の間に, V2 スケーティング走法が考案され, その後, 上り斜面で速度を獲得できる走法へと技術の研鑽がなされてきたといえる. 一方で V1 および V2 スケーティング走法の優劣が逆転する境界となる斜度が存在することから, 斜度によって上肢と下肢の貢献比率が異なる走法を選択することが高い滑走速度を獲得するために重要であることが示唆される. 貢献比率が異なる走法を使い分ける利点は, 斜度に応じてより滑走速度を高められることに加え, 走法を切り替えることによって貢献が高い部位の筋疲労を軽減させることで高い速度を維持できるようにしていることも考えられる.

本研究では, V2 スケーティング走法中の上肢と下肢の貢献の比率はおおよそ同程度であることが示された. この結果は, 本研究で対象とした平地および平地と近似できるような斜面についてのみ適用できるものであり, 斜面状況の変化に伴う各走法の特性や貢献比率の変化について検討することが今後の課題である.

V. まとめ

本研究の目的は, クロスカントリースキー競技における V2 スケーティング走法中の上肢と下肢の貢献度合いについて, 推進方向への力の観点から定量することであった. その結果, 進行方向

のピーク力および平均力は, 片方のポールが $100 \pm 20 \text{ N}$, $63 \pm 12 \text{ N}$ であり, 片方のスキー板が $202 \pm 48 \text{ N}$, $106 \pm 18 \text{ N}$ であった. このことは V2 スケーティング走法においては, 上肢(両方のポールのプッシュ動作)と下肢(片方のスキー板のプッシュオフ動作)による力の貢献がほぼ同等であることが示唆するものである. また, スキー板のプッシュオフ局面では, スキー板に対して鉛直方向の力成分の割合が大きいが, スキー板の角度を用いてグローバル座標系に変換すると, 左右および進行方向の力に分けられることが示された. さらに, 股関節の外転運動を行うことによってスキー板を傾けていること, 股関節の外転運動と股関節と膝関節の伸展運動によって力発揮が行われていることが示された. つまり, プッシュオフの力を高めるには, スキー板に対して股関節と膝関節の進展運動によって鉛直方向に力を発揮しながら, 股関節の外転運動によって力の向きを進行方向に向けることが重要であることが示唆された.

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いただきました. 本研究は, 公益財団法人ヤマハ発動機スポーツ振興財団スポーツチャレンジ研究助成を受けて実施されました. 本研究で使用したスキー板の製作には, ミヤコスポート株式会社藤本邦夫氏, 堀川祐介氏にご協力をいただきました. 心よりお礼を申し上げます.

参考文献

- ・ Ae, M., Tang, H.P., and Yokoi, T. (Eds.) (1992) Estimation of inertia properties of the body segment in Japanese athlete. *Biomechanisms* 11: 23-33.
- ・ Bilodeau B., Boulay, M. R., and Roy, B. (1992) Propulsive and gliding phases in four cross-country skiing techniques. *Medicine*

- and Science in Sports and Exercise, 24: 917-925.
- Fujita, Z., Ishige, Y., Yoshioka, S., Tauchi, K., Iso, S., Fukashiro, S., and Tsuchiya, J. (2010) A relationship between the occurrence of the flight phase and the increase in velocity during V2 skating. *International Journal of Sport and Health Science*, 8: 113-120.
 - Millet G. Y., Hoffman, M. D., Candeu, R. B., and Clifford, P. S. (1998a) Poling forces during roller skiing: effects of grade. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30: 1637-1644.
 - Millet, G. Y., Hoffman, M. D., Candeu, R. B., and Clifford, P. S. (1998b) Poling forces during roller skiing: effects of technique and speed. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30: 1645-1653.
 - Nilsson, J., Jakobsen, V., Tveit, P., and Eikrehagen, O. (2003) Pole length and ground reaction forces during maximal double poling in skiing. *Sport Biomechanics*, 2: 227-236.
 - Pierce, J. C., Pope, M. H., Renstrom, P., Johnson, R. J., Dufek, J., and Dillman, C. (1987) Force measurement in cross-country skiing. *International Journal of Sport Biomechanics*, 3: 382-391.
 - Smith, G. A., and Heagy, B. S. (1994) Kinematic analysis of skating technique of Olympic skiers in the men's 50-km race. *Journal of Applied Biomechanics*, 10: 79-88.
 - Street, G. M., and Frederick, E. C. (1995) Measurement of skier-generated forces during roller-ski skating. *Journal of Applied Biomechanics*, 11: 245-256.
 - Stöggl, T., Müller E., and Lindinger, S. (2008) Biomechanical comparison of the double-push technique and the conventional skate skiing technique in cross-country sprint skiing. *Journal of sport sciences*, 26: 1225-1233.
 - Stoggl, T., Stoggl, J., and Muller, E. (2009) Comparison analysis of the last decade (1996-2008) in cross-country skiing. *Science and Skiing IV*, pp. 657-677, published by MEYER and MEYER sport.
 - Stöggl, T, Kampel, W., Müller E., and Lindinger, S. (2010) Double-push skating versus V2 and V1 skating on uphill terrain in cross-country skiing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41: 187-196.
 - 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.
 - Vähäsöyrinki, P., Komi, P. V., Seppälä, S., Ishikawa, M., Kolehmainen, V., Salmi, J. A., and Linnamo, V. (2008) Effect of skiing speed on ski and pole forces in cross-country skiing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40: 1111-1116.