

クロスカントリースキー競技における用具の長さ情報を利用した クラシカル走法のサイクル特性分析アプリケーションの開発

藤田善也¹⁾, 石毛勇介²⁾, 吉岡伸輔³⁾

¹⁾早稲田大学スポーツ科学学術院

²⁾国立スポーツ科学センタースポーツ科学部

³⁾東京大学大学院総合文化研究科

キーワード: 速度, スライド長, サイクル頻度, 局面構造, アプリケーション開発

【抄 録】

クロスカントリースキー競技において、競技パフォーマンスである滑走速度とサイクル特性との関係は深く、走法によって異なる関係性があることが知られている。本研究の目的は、競技現場で取得可能な用具の長さ情報を用いたサイクル特性の分析アプリケーションを開発し、その精度を検証したうえで、選手のサイクル特性を事例的に明らかにすることであった。その結果、1) 簡単なマウス操作とキーボード操作によって、競技現場のコーチや選手が滑走速度、スライド長、サイクル頻度、ポーリング時間およびスイング時間を容易に取得できること、2) 開発したアプリケーションの精度について、従来の DLT 法と同程度であることが示された。また、今回開発したアプリケーションを用いて日本代表選手と大学生選手のダブルポーリング走法中のサイクル特性を比較した結果、日本代表選手の滑走速度が高いこと、男子日本代表選手はスライド長を長くしてより高い滑走速度を獲得していること、女子日本代表選手はサイクル頻度を高くしてより高い滑走速度を獲得していることが示唆された。

スポーツ科学研究, 16, 26-32, 2019 年, 受付日: 2019 年 5 月 13 日, 受理日: 2019 年 9 月 3 日

連絡先: 藤田善也 〒359-1192 所沢市三ヶ島 2-579-15 早稲田大学スポーツ科学学術院

zenya.fujita@aoni.waseda.jp

I. 緒言

クロスカントリースキー競技は、雪上に設けられたコースを滑走し、その所要時間を競う競技である。選手はポールとスキー板を装着し、コースの起伏に応じていくつかの走法を使い分けることで所要時間の短縮を図っており、各走法で用いられる滑走技術の良し悪しが競技成績を左右する要因になるといえる。そのため、各走法の滑走技術について競技会を対象としたバイオメカニクス的研究がなされてきた。

1994 年に開催されたカナダ選手権男子 50km 競技では、競技中の平均速度と上り坂のダイアゴナル走法中の速度、スライド長との間に正の相関関係がみられることが示されている (Bilodeau et al., 1996)。また全日本選手権男子 10km 競技において、ダブルポーリング走法ではスライド長を

長くした上でさらにサイクル頻度を高めることで高い滑走速度を獲得していること、ダイアゴナル走法ではスライド長を長くすることで高い滑走速度を獲得していることが示されている (藤田ら, 2014)。また世界一流選手と日本人選手のダブルポーリング走法の特徴を比較した研究では、日本人選手のスライド長は世界一流選手と比較して約 1m 程度短いこと、この差がスイング局面において顕著であることが示されている (藤田, 2013)。これらの結果は、各走法の滑走速度とサイクル特性の間には一様ではない関係性があること、サイクル特性の評価によって選手の技術的特徴が明らかとなることを示唆するものである。

先行研究で用いられてきたクラシカル走法のサイクル特性は、コースの側方に固定したビデオカメラによって選手の矢状面上の滑走運動を撮影

したうえで、選手の腰部や身体重心座標を算出し、既知の長さのコントロールポイントを映し込ませて実長換算することで分析されている。しかしながら競技会場によっては、側方からの撮影場所が限られる上に選手以外のコースへの立ち入りが制限されることがあり、側方からの撮影は可能であるものの、コントロールポイントによるキャリブレーション作業が不可能となる場合がある。一方、他競技のサイクル特性の分析には、陸上競技のトラックに設置されているライン、競泳のプールの全長やコースロープの色などの既知の長さを利用したキャリブレーション方法が用いられている (Krzysztof and Mero, 2013; Mason and Fowlie, 1997; 窪, 2006)。屋外の自然環境を利用して設けられるクロスカントリースキー競技用コースには、他競技で利用されるような既知の長さのコントロールポイントがないものの、選手が使用するポールやスキー板の長さをコントロールポイントとして利用できる可能性がある。さらに、ビデオ映像と用具の長さ情報をもとにしてサイクル特性を分析できるアプリケーションがあれば、選手の技術的特徴を競技現場で映像を撮影したコーチがサイクル特性を分析し、競技会後に評価・フィードバックすることが可能となる。

そこで本研究の目的は、ポールおよびスキー板の長さ情報を用いたサイクル特性の分析アプリケーションを開発し、その精度を検証したうえで、選手のサイクル特性を事例的に明らかにすることとした。

II. 方法

1. 分析対象および分析項目

本研究では、コースの進行方向に対して直線的に移動を行うクラシカル走法での滑走運動を分析対象とし、左右方向への移動を伴うスケータイング走法での滑走運動は対象から除外することとした。先行研究をもとに、ポールの接地から次のポールの接地までを1サイクルと定義したうえで、ポールが雪面に接地している局面をポーリング局面、ポールが離地している局面をスイング局面とした。滑走速度、ストライド長、サイクル頻度、ポー

リング局面時間およびスイング局面時間を分析項目とした。

2. アプリケーションの開発

開発するアプリケーションは、競技現場のコーチが簡単に操作できることを基本コンセプトとし、ユーザーインターフェースはマウス操作と簡単かつ最小限のキーボード入力によって行えるようにデザインした。開発ソフトウェアは、Matlab R2017b (Mathworks, Inc., United States) とし、Windows 10 Professional 64ビット、16GB RAM、3.10GHz プロセッサを搭載したノート型 PC で行った。完成したアプリケーションは、Matlab 内のアプリケーションコンパイラによってスタンドアロンアプリケーションとして作成した。完成したアプリケーションを「Speed Analyzer」と名付けた。

アプリケーションの全体的なフローチャートは図1に示した。アプリケーション内での作業を簡単にするために、1 サイクルの長さにトリミングした映像に、映像のプロパティ情報がファイル名に記載された AVI もしくは MP4 ファイル(「撮影年月日_氏名_走法.拡張子」)を準備したうえでアプリケーション内に取り込むこととした。次に取り込んだ映像の開始フレームを表示し、腰部(大転子点)をクリック入力して画像の座標値を取得した。その後、映像の終了フレームを表示し、同様に腰部をクリック入力して画像の座標値を取得した。それぞれの座標値より、水平方向および垂直方向に移動した絶対変位(各方向の合成成分)を算出した。さらに映像の50%時点のフレームを表示し、ポールの上端点と下端点あるいはローラースキーの両端にあるタイヤの車軸の点をそれぞれクリック入力したうえで、あらかじめ計測しておいた用具の長さ情報を入力することで1ピクセルあたりのキャリブレーション係数を算出した。次に、ポール離地の時点を特定するために、開始フレームの映像を再度表示し、クリックによって次のフレームを表示させ、離地が確認された場合にはEnterキーを入力することで離地のフレーム数を取得できるようにした。

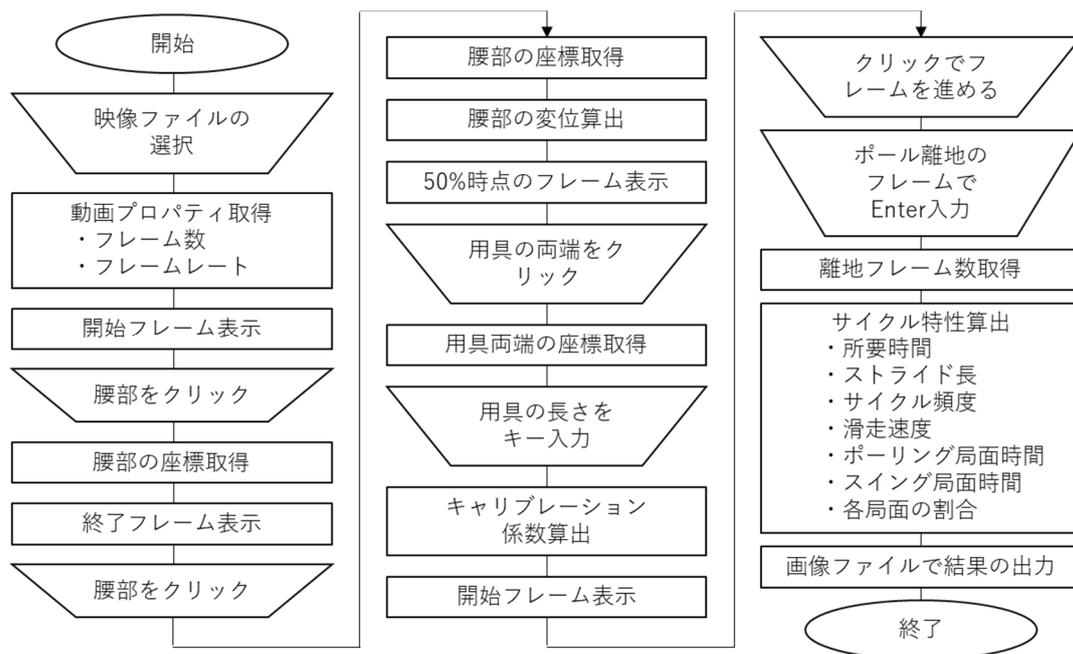


図1. アプリケーション実行のフローチャート

所要時間は、取り込んだ映像のフレーム数にフレームレートを乗じて求めた。またストライド長は、キャリブレーション係数を用いて進行方向に移動した変位を実長換算して求めた。サイクル頻度は1を所要時間で除して求めた。さらに滑走速度は、ストライド長とサイクル頻度の積で求めた。ポーリング局面およびスイング局面の所要時間は、それぞれに要したフレーム数にフレームレートを乗じて

求めた。さらに両局面の所要時間の割合を求めた。算出されたデータは、映像ファイルの開始および終了フレームを左右で分割した画像ファイルにテキストで埋め込み、各データをファイル名に記載したJPGファイル(「撮影年月日_氏名(滑走速度, ストライド長, サイクル頻度[両局面の割合])」)を出力した(図2)。



図2. 出力された画像とサイクル特性

3. アプリケーションの精度検証

1) 研究対象

競技会の映像を用いたアプリケーションの利用を想定し、競技会を再現した実験デザインによって精度を検証した。被験者は、国内外の公認競技会において入賞経験を有するクロスカントリースキー選手 9 名とした。分析対象はローラースキーによる平地でのダブルポーリング走法をとした。なお本研究は、早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を得て実施された(申請番号:2018-045)。

2) 撮影および分析

各選手には、競技会を想定したスピードでダブルポーリング走法による滑走運動を行うように指示した。選手の滑走運動は、20mの撮影区間を設定したうえで、ハイスピードカメラ(W970M, Panasonic corporation, Japan)をコース進行方向に対して右側に三脚で固定し、毎秒 120 フレーム、露出時間 1/1500 秒で撮影した。なお、撮影区間にはテープで滑走ラインを明示し、選手がコースを直線的に滑走するようにしたうえで 30m の助走区間を設けた。また、各被験者のポールおよびローラースキーの長さはメジャーを用いて計測した。

得られた映像は PC に取り込み、動作分析ソフトウェア(Frame-dias V, DKH, Japan)を用いて、1 サイクルの開始と終了時点の右大転子点および 50%時点の右ポールの上下端をデジタル化した。デジタル化によって得られた座標値は、カメラに移し込ませたキャリブレーションポール(2.0m)の長さをもとに 2 次元 DLT 法を用いて実長換算した。較正点の実測値と推定値との標準誤差は、静止座標系の X 軸方向(水平方向)が 12mm, Y 軸方向(鉛直方向)が 17mm であった。精度検証の基準に用いる変数は、滑走速度およびストライド長とした。ストライド長は、1 ストロークの開始から終了時点までの右大転子の変位とした。滑走速度は、ストライド長と 1 サイクルの所要時間の逆数との積とした。

開発されたアプリケーションと動作分析によってそれぞれ算出された滑走速度およびストライド長の関係は、ピアソンの積率相関係数によって求めた。有意水準は 5%未満とした。

4. 日本代表選手のダブルポーリング走法の事例的評価

アプリケーションの有用性を示すため、精度検証において得られたデータをもとに、2018-19 シーズンにおいて日本代表経験を有する選手(男子2名, 女子2名)と国内大会において入賞経験を有する選手(男子3名, 女子2名)のダブルポーリング走法中のサイクル特性を事例的に評価した。評価項目は、滑走速度、ストライド長、サイクル頻度、ポーリング時間およびスイング時間の割合とした。

III. 結果

1. アプリケーションの精度検証

精度検証の基準に用いた 2 次元 DLT 法で求めたローラースキーの長さは $710.8 \pm 8.5\text{mm}$ であり、メジャーで計測したローラースキーの長さはすべて 703mm であった。

アプリケーションにおいてポールおよびローラースキーの長さ情報をもとに算出された滑走速度はそれぞれ $6.85 \pm 0.36\text{m/s}$, $6.96 \pm 0.39\text{m/s}$ であり、ストライド長はそれぞれ $4.41 \pm 0.27\text{m}$, $4.48 \pm 0.28\text{m}$ であった。また動作分析によって算出された滑走速度は $7.00 \pm 0.33\text{m/s}$ であり、ストライド長は $4.50 \pm 0.27\text{m}$ であった。動作分析とポールの長さ情報をもとに算出された滑走速度およびストライド長の間には、非常に高い正の相関関係が認められた(滑走速度: $r=0.967$, $p<0.001$; ストライド長: $r=0.975$, $p<0.001$; 図3)。また動作分析とローラースキーの長さ情報をもとに算出された滑走速度およびストライド長との間には、非常に高い正の相関関係が認められた(滑走速度: $r=0.954$, $p<0.001$; ストライド長: $r=0.962$, $p<0.001$)。

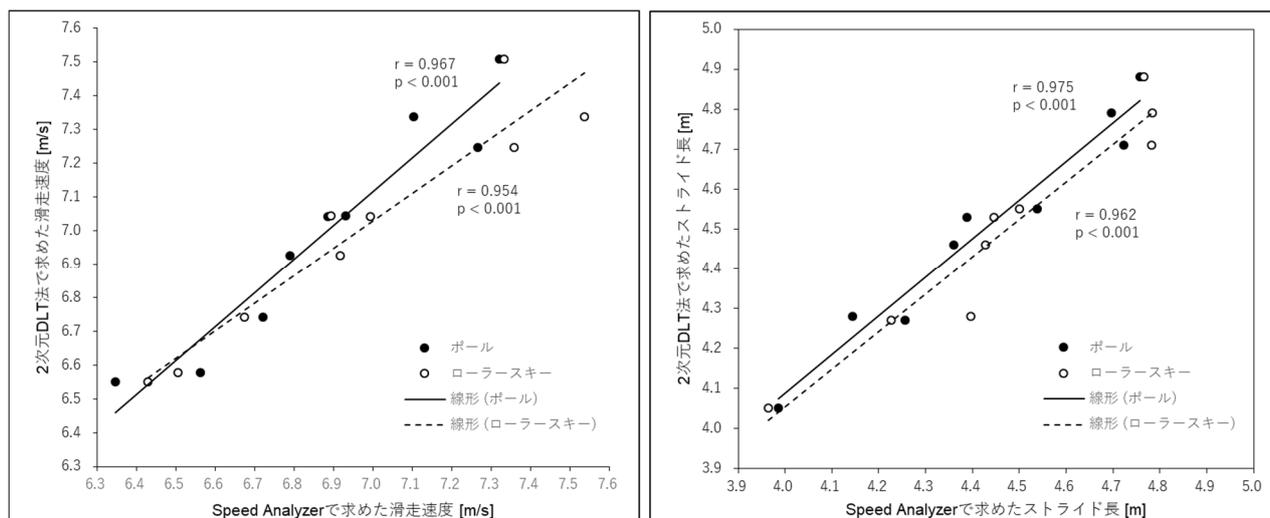


図3. 本アプリケーションおよび2次元 DLT 法を用いた動作分析によって得られたそれぞれの滑走速度(左)およびストライド長(右)の相関関係

2. 日本代表選手のダブルポーリング走法の特徴

表1には、日本代表選手を含む9名のダブルポーリング走法のサイクル特性を示した。滑走速度は日本代表男子選手が7.42±0.12m/sであるのに対し、大学生男子選手が7.11m/sであった。また、日本代表女子選手が6.83m/sであるのに

対し、大学生女子選手は6.56m/sであった。日本代表選手と大学生選手を比較すると、男子日本代表選手ではストライド長がより長いこと、女子日本代表選手ではサイクル頻度がより高いことが示された。

表1 日本代表選手と大学生選手のサイクル特性

	滑走速度 [m/s]	ストライド長 [m]	サイクル頻度 [Hz]	ポーリング時間 [s]	スイング時間 [s]
日本代表男子 (n=2)	7.42±0.12	4.58±0.42	1.63±0.12	0.21±0.00	0.41±0.05
大学生男子 (n=3)	7.11±0.12	4.41±0.33	1.62±0.11	0.21±0.01	0.41±0.04
日本代表女子 (n=2)	6.83±0.13	4.53±0.37	1.51±0.09	0.22±0.02	0.45±0.04
大学生女子 (n=2)	6.56±0.02	4.54±0.01	1.45±0.00	0.23±0.00	0.46±0.00

IV. 考察

これまでクロスカントリースキー競技のサイクル特性の分析には、実座標への実長換算のためにキャリブレーションポールを計測区間に立てるキャリブレーション作業が必須であった。本研究で開発されたアプリケーションでは、用具の両端の座標と用具の実測値によってキャリブレーションを行うため、撮影現場でのキャリブレーション作業を簡略化することができ、コース内への立ち入りが制限される区間においてもサイクル特性の評価が可能となった点で新規性があるといえる。

精度検証の基準に用いた2次元 DLT 法において、較正点の実測値と推定値との標準誤差は

20mの撮影区間に対しX軸では12mm、Y軸では17mmであった。また2次元 DLT 法で求めたローラースキーの長さは、実際の長さに対して8mm程度の差があることが示された。これらのことを踏まえると、2次元 DLT 法で算出された滑走速度やストライド長をアプリケーションの精度検証の基準に用いるのに十分な精度であるといえる。

精度検証の結果、開発されたアプリケーションをもとに算出された滑走速度およびストライド長は、基準値と非常に高い相関関係が認められ、データに高い信頼性があることが示唆された。ローラースキーの長さ情報をもとにした場合には、滑走速度では0.04m/s、ストライド長では0.02m程度と差

が少ないことが示唆された。一方でポールの長さ情報をもとにした場合には、滑走速度では 0.15m/s, スライド長では 0.09m 程度低く算出されており、2%程度サイクル特性を過小評価している可能性が示唆された。ポールとローラースキーでキャリブレーションの精度に差が出る要因には、両者の用具の特性が関与していることが考えられる。クラシカル走法において、平行に並んだ左右のスキー板やローラースキーは長軸方向へと直線的に滑走する構造となっていることから、常に進行方向を向いているといえる。一方、ポールはポール下端が上端よりも外側に位置する(正面から見てハの字状になる)ようなスイング動作を行っている場合やポール自体がしなっている場合に、実際の長さよりも短く映りこんでいる可能性があることが考えられる。ダブルポーリング走法中のポールの矢状面上の傾きを明らかにした研究では、ポーリング局面において 3.4~10.6 度の傾きがあることが示されている(Stöggli and Holmberg, 2011)。仮に 10.6 度の傾きがある場合、側方からはポール全長が 1.7%短くみえるため、サイクル特性の過小評価の要因となるといえる。ポールの傾きやしなりを側方に設置したビデオカメラの映像で補正することは困難だが、対象ごとのポールの長さ情報を用いて個別にキャリブレーションをするのではなく、1名の選手のポールの長さをもとにすべての対象のキャリブレーションを行うことで、相対的なサイクル特性の評価がより正確となることが考えられる。それぞれの精度検証の結果を踏まえると、ローラースキー滑走の場合にはローラースキーの長さ情報をもとにしたキャリブレーションが推奨されるだろう。

また、実際の競技現場では、撮影場所の制限から選手を斜めから撮影せざるを得ない状況もある。撮影角度や対象物がカメラセンサ面から θ (rad)ずれた場合、画面に映る長さ L は、 $L \cdot \cos \theta$ となる。このずれは、5 度では約 1.0%、10 度では約 1.5%となることから、ずれによる影響度は比較的小さいといえる。しかし、ずれが大きくなるにつれて測定精度への影響が大きくなることを踏まえた、ずれの少ない撮影が必要であろう。

本研究では、開発されたアプリケーションを用

いて日本代表選手と大学生選手のサイクル特性を事例的に評価した。その結果、日本代表選手は男女ともに、より高い滑走速度を有していることが示された。また、男子ではスライド長を長くして滑走速度を獲得していること、女子ではサイクル頻度を高くして滑走速度を獲得していることが示された。ダブルポーリング走法では滑走速度の増加によって、スライド長とサイクル頻度の両方が増加することが知られている(Lindinger et al., 2009)。また滑走速度はスライド長とサイクル頻度の積で決定されるため、滑走速度を増加させるためにはその両方を増加させるか、どちらか一方を維持しながら他方を増加させる必要がある。これらのことを踏まえると、対象の大学生男子選手においては、より素早く大きなスイング動作によってより前方にポールを接地するなどして、ポール反力の力積の水平方向成分を高めることでスライド長を伸ばすような技能練習がより重要な課題となるだろう。また、対象の大学生女子選手においては、ポール反力の力積の水平方向成分を維持しつつ、各局面の動作を素早く行い、ポーリング時間およびスイング時間を短縮することでサイクル頻度を高めるような技能練習がより重要な課題となるといえよう。また技能練習の際や、練習の前後において本アプリケーションを継続的に活用することで、練習の効果を評価することができ、縦断的な技能の評価が可能となる。

V. 結論

本研究の目的は、競技現場で取得可能な用具の長さ情報を用いたサイクル特性の分析アプリケーションを開発し、その精度を検証したうえで、選手のサイクル特性を事例的に明らかにすることであった。その結果、(1)簡単な操作だけで、競技現場でサイクル特性を容易に取得できることが示された。(2)開発したアプリケーションについて、従来の DLT 法と同程度の精度でサイクル特性を計測可能であることが示された。(3)日本代表選手と大学生選手のダブルポーリング走法中のサイクル特性を事例的に比較した結果、日本代表選手の滑走速度が高いこと、男子日本代表選手はスライド長を長くしてより高い滑走速度を獲得し

ていること, 女子日本代表選手はサイクル頻度を高くしてより高い滑走速度を獲得していることが示唆された。

本アプリケーションは, 従来フィードバックまでに時間を要したサイクル特性の情報を, 競技会後に素早くフィードバック可能にすることから, より実践的に役立つツールとなる。加えて, 研究者や専門スタッフを介さず, コーチや選手自らが簡単に情報を得られる点で有用性が高い。

参考文献

- ・ Bilodeau, B., Rundell, W. K., Roy, B., Boulay, R. M. (1996) Kinematics of cross-country ski racing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(1): 128-138.
- ・ 藤田善也 (2013) クロスカントリースキー競技におけるバイオメカニクスの観点からの競技サポート. *バイオメカニクス研究*, 17(4): 189-200.
- ・ 藤田善也, 石毛勇介, 吉岡伸輔, 竹田正樹 (2014) クロスカントリースキー競技における競技パフォーマンスとサイクル特性との関係: 男子 10km クラシカル競技種目を対象として. *体育学研究*, 59: 275-282.
- ・ Krzysztof, M., Mero A. A. (2013) A kinematics analysis of three best 100 m performances ever. *Journal of Human Kinetics*, 36: 149-160.
- ・ Lindinger, S. J., Stöggl, T., Müller, E., Holmberg, H. -C. (2009) Control of speed during the double poling technique performed by elite cross-country skiers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1): 210-220.
- ・ 窪康之 (2006) スポーツデータ(4) 競泳サポートにおけるデータの役割. *オペレーションズ・リサーチ*, 51(4): 230-232.
- ・ Mason, R. B., Fowlie, J. (1997) Competition analysis for high performance swimming. *The AIS International Swim Seminar Proceedings*, Australian College of Sports Education, pp.5-18.
- ・ Stöggl, T., Holmberg, H. -C. (2011) Force interaction and 3D pole movement in double poling. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6): 393-404.

付記

本研究で開発されたアプリケーション「Speed Analyzer」は, 下記 URL よりダウンロードできる。
<https://1drv.ms/u/s!AnORmtGfMUdAhJgeozzZufdnNXJhPQ?e=TiXcii>