

原著論文

スピードスケート国際競技会の中長距離レースにおける滑走軌跡と速度の分析
Analysis of skaters' trajectory and velocity at distance events in a speed skating
international competition

横澤俊治¹⁾, 加藤恭章¹⁾, 紅碓英信²⁾, 熊川大介³⁾
Toshiharu Yokozawa¹⁾, Takanori Kato¹⁾, Hidenobu Kobai²⁾, Daisuke Kumagawa³⁾

Abstract: We analyzed the skating trajectory and velocity in men's 1,500-m and 5,000-m races in a speed skating international competition using a local position measurement (LPM) system. The aim was to identify the characteristics of these races and the association with skaters' performance. Twenty-five 1,500-m contestants and 31 5,000-m contestants were captured at 60 frames/s with the LPM system, which can automatically identify the top of a skater's head using 28 cameras mounted on the ceiling of the skating oval and a template matching method. Excess distance was defined as the difference between the actual distance, which was calculated by summing the travel distance at every frame, and the shortest course distance. The change in velocity was calculated for the straight and curve, respectively. The excess distance per lap was over 4 m in both the 1,500-m and 5,000-m races, and was mostly attributed to the curve. In addition, the individual variability of excess distance was large enough to replace the rank. The excess distance in the curve may not always be derived from inadequate centripetal force because some skaters passed more than 0.5 m away from the inner line, not only in the approach and exit from the curve, but also in the middle of the curve. In the 1,500-m race, skaters generally decelerated on the straight, and maintained velocity or accelerated on the curve. On the other hand, all 5,000-m contestants decelerated on the straight and accelerated on the curve. The decrease in velocity on the straight was significantly correlated with the decreased rate of the pace and the official time in the 5,000-m race ($p<0.05$). The results indicate that a smaller decrease in velocity on the straight was important in maintaining the lap time and achieving superior performance in long distance events.

Key words: local position measurement, straight, curve, excess distance, change in velocity
キーワード: 位置計測、ストレート、カーブ、超過距離、速度変化

¹ 国立スポーツ科学センター、² 相澤病院、³ 国士館大学

¹ Japan Institute of Sports Sciences、² Aizawa Hospital、³ Kokushikan University

I. 緒言

これまでオリンピックのスピードスケート競技における男子中長距離種目（1,500m、5,000m、10,000m）においては、日本選手は表彰台に上がっていない。これらの種目は国際的に注目度が高く、日本のスピードスケート界の躍進にはこれらの種目での活躍が不可欠と考えられる。日本のスピードスケートの競技力向上のためには、体力の強化とともに、いかにその体力を氷上でのパフォーマンスにつなげられるかが課題となっている⁷⁾。

スピードスケート競技では、一般にバックストレートにおいてインレーンを滑走する選手とアウトレーンを滑走する選手が入れ替わりながら1周400mのトラックを滑走してタイムを競う。したがって、タイムの短縮のためには高い滑走速度を得ることが重要なだけでなく、1周につき一度ずつ通過するインナーカーブとアウターカーブにおいて、その入口や出口でレーンのどこを通過すべきかということがコーチング場面においてしばしば話題となる。さらに、スピードスケートはストレートとカーブで動作が大きく異なるため、1回のストレートやカーブにおいて速度がどのように推移するかに関する情報が技術的課題を抽出する前提となると考えられる。しかし、公式記録には1周のラップが表示されるのみでその詳細は分からない。これらのことから、滑走軌跡や速度に関する分析の需要が高まっていると言える。

これまで、スピードスケートの滑走における加速メカニズムに関する研究^{3), 11)}や、滑走技術に関する研究^{2), 9)}がいくつか報告されており、ストレートとカーブそれぞれにおける1ストローク(2歩)内の速度の大小には焦点が当てられている。しかし、滑走軌跡や1周回における速度変化に着目した研究はほとんどないようである。

他競技に目を向けると、移動運動中の軌跡や速度を得る方法として、GPSや慣性センサーが多く

の競技において用いられている^{1), 4), 5), 6)}。しかし、これらの手法では選手自身にセンサーを取り付ける必要があるため、競技会における計測は困難であり、トレーニング中も選手の負担となり得る。一方、ビデオカメラを用いた画像マッチング手法を用いたシステムであれば選手への負担が一切なく、競技会でも使用可能となる。これらの背景を踏まえ、文部科学省事業チーム「ニッポン」マルチサポート事業(当時)の一環として、長野市オリンピック記念アリーナ(エムウェーブ)における競技会や練習で滑走する選手の滑走軌跡と速度を精密に計測するシステム(Local Position Measurement System; 以下, LPMシステム)が構築され、画像にもとづく滑走軌跡の算出が可能となった。

以上のことから本研究では、LPMシステムを用いてスピードスケート国際競技会における男子中長距離レース出場者の滑走軌跡および滑走速度を分析し、各種目の特性および記録との関係を明らかにするとともに、日本選手の課題を抽出することを目的とした。

II. 方法

1. 計測システム概要

LPMシステムによる滑走軌跡の算出手順は以下の通りである。長野市オリンピック記念アリーナ(エムウェーブ)のコース全周の直上に28台のモノクロカメラUI-5240CP-M-GL(iDS社製; 1280×1024ピクセル)を設置した(図1)。タイミング制御装置を用いて厳密に同期された60frames/sのカメラ画像を6台のPCに取り込んだ。カメラパラメータは、事前にマーカーをコース上に設置し、28台のカメラ画像上でのマーカーの撮影位置とカメラの絶対位置をもとに算出した。図2に示したように、頭部および胴体を模式化したテンプレートにマッチする選手を自動的に識別し、頭頂

部の二次元座標値を同定した。

2. 分析対象

2016 年 11 月に行われた ISU ワールドカップ長野大会を対象とした。事前に日本スケート連盟から大会実行委員会へ申請し、データ収集の許可を得た。

対象種目は男子 1,500m と男子 5,000m とし、対象選手は事前に上位候補と予想された選手および日本人出場選手全員（1,500m：25 名、5,000m：31 名）とした。画像の保存枚数に限界があるために対象選手を事前に選抜する必要があったが、結果として入賞者（8 位以内）全員を対象とすることができた。表 1 には公式記録とラップ維持率につ

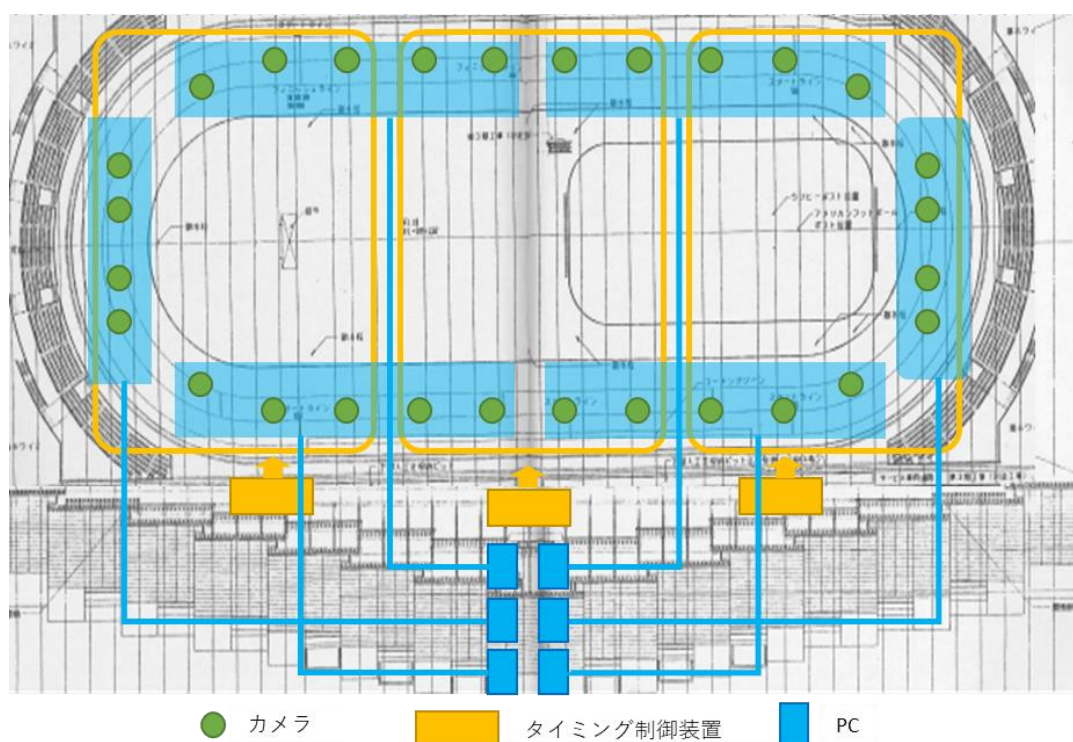


図 1 ビデオカメラおよび主要システムの配置



図 2 テンプレートマッチング

いて全対象者平均値と日本選手全員（JPN1～JPN10）の値を示した。なお、ラップ維持率は、レースの後半において前半のペースをどの程度維持していたかを示す指標であり、前半の平均ラップタイムを後半の平均ラップタイムで除したものとした。5,000m については、湯田ら（2002）¹⁰⁾と同様に、静止状態から徐々に加速する 1 周目を除外して 2～6 周目を前半、7～12 周目を後半とした。1,500m については、1 周目を除いた残りの周回が奇数（3 周）のため 3 周目はどちらにも含めず 2 周目を前半、4 周目を後半とした。

3. データ処理と算出項目

滑走速度は滑走軌跡の二次元座標を数値微分し、その絶対値とした。

ホームストレート、バックストレート、インナーカーブ、アウターカーブの各区間において 1 コマごとに移動した距離を区間入口から出口まで足すことにより実際に滑走した距離を求め、区間の最短距離との差を超過距離と定義した。区間の最短距離については、バックストレートはコース設計にもとづきインナーカーブ出口からアウターカーブ入口までもしくはアウターカーブ出口からインナーカーブ入口までの距離とし、カーブはレーン内側のラインの長さとした。超過距離を各区間通過回数（たとえば 1,500m インナーレーンスタートの選手ではホームストレート、バックストレート、インナーカーブが各 4 回、アウターカーブが 3 回）で平均したものを各区間の 1 周回あたりの超過距離として算出した。

また、カーブにおける超過距離の原因となっている地点を特定するために、カーブ入口、中央地点、出口通過時のレーン内側ラインからの距離、すなわち内側のラインからどの程度外を通過したかを算出した。

ストレート滑走中およびカーブ滑走中の速度の増減を定量するため、まず各区間の最後 1 秒の平均速度を算出し、それぞれストレート出口速度、カーブ出口速度と定義した。次に、ストレート出口速度から直前のカーブ出口速度を引いたものをストレート速度変化量、同様にカーブ出口速度から直前のストレート出口速度を引いたものをカーブ速度変化量とし、急激に加速する 1 周目を除いて平均した。

4. 統計処理

カーブ入口、中央、出口通過時の内側ラインからの距離と各カーブの超過距離との関係、および各区間の速度変化量と公式記録およびラップ維持率との関係を検討するために、ピアソンの積率相関係数を算出した。有意水準は 5%未満とした。

III. 結果

1. 滑走軌跡と速度の一般的傾向

表 1 対象者の公式記録とラップ維持率

Mean は全対象者平均値と標準偏差、JPN1～JPN 10 は日本選手を示す。

1,500m	Mean (n=25)	JPN1	JPN2	JPN3	JPN4	JPN5
公式記録 (s)	107.8 ± 1.2	109.71	107.76	107.24	107.84	107.66
ラップ維持率 (%)	91.3 ± 3.3	94.6	89.9	92.6	86.9	92.8
5,000m	Mean (n=31)	JPN6	JPN7	JPN8	JPN9	JPN10
公式記録 (s)	386.7 ± 6.8	395.14	383.99	390.00	388.77	392.29
ラップ維持率 (%)	97.7 ± 2.1	98.2	97.9	96.1	95.8	97.6

図3は、各種目の滑走軌跡と速度について、上位選手1名と日本選手1名を典型例として示したものである。前者は表彰台に上がった3名の中で滑走軌跡と速度パターンに関して上位選手の特徴を最もよく表していた選手、後者は日本選手の中で滑走軌跡と速度パターンが上位選手と対照的だった選手である。1,500mでは、日本選手は上位選手と比べてカーブ全体でやや外側を通過していた（図3-1）。また、上位選手は最高速度が16m/sに達し、その後徐々に速度が低下していた。一方、日本選手では最高速度は15m/s台にとどまり、前

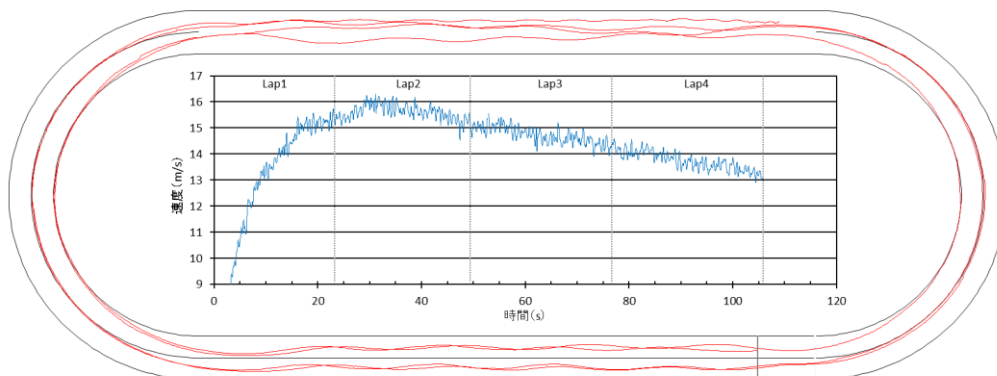
半ではストレートで大きく減速していた。

5,000mについてみると、上位選手はスタート直後を除いてカーブの内側ラインギリギリを通過していたのに対し、日本選手はカーブ全体でラインよりも外側を通過していた（図3-2）。また、日本選手は上位選手と比べてストレートにおいて大きく減速し、カーブにおいて大きく加速していた。

2. 滑走軌跡の種目間比較と選手間比較

図4は、1周回あたりの超過距離の全対象者平均値と日本選手の値を示したものである。1周回

a) 1,500m上位選手



b) 1,500m JPN5

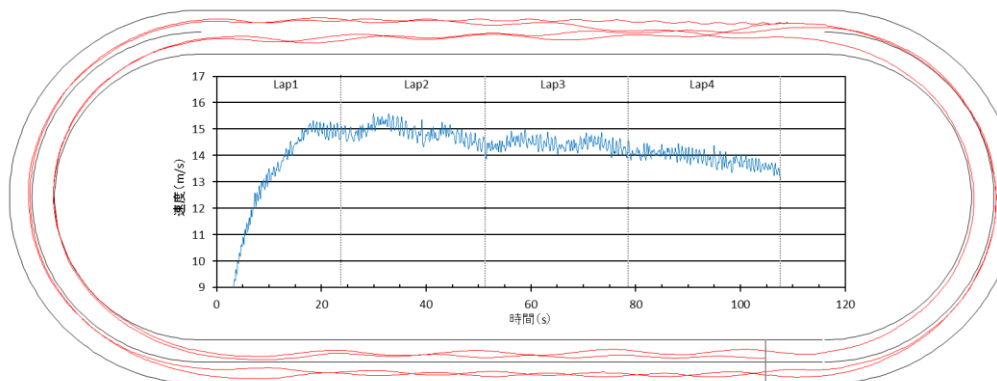


図3-1 1,500mレースにおける滑走軌跡と速度の典型例

赤線が軌跡、青線が速度を示している。

a) 上位選手（公式記録 105.63s）、b) 日本選手 JPN5（107.66s）

あたりの超過距離の平均値は 1,500m が $4.62 \pm 0.83\text{m}$ 、5,000m が $5.26 \pm 1.25\text{m}$ であった。また、1,500m、5,000m とともにカーブの超過距離はストレートよりも大きく、その個人差についてもカーブのほうが大きかった。さらに、日本選手には 1,500m、5,000m とともに平均値の+1SD 以上に超過距離が大きい選手が複数名おり、主にカーブの超過距離が影響していた。

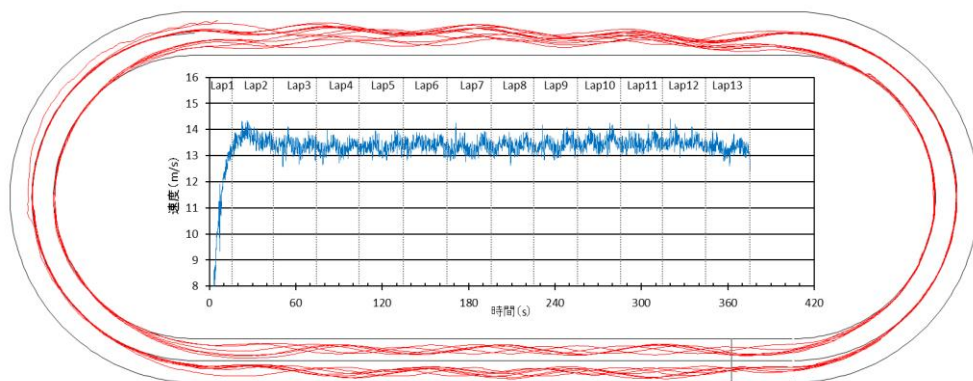
表 2 には、カーブ入口、中央、出口通過時のレーン内側ラインからの距離、およびそれらと各カーブの超過距離との相関係数を示した。1,500m のインナーカーブについては入口と出口、アウト

カーブについては入口と中央で超過距離との間に有意な正の相関関係がみられた ($p < 0.01$)。また、5,000m ではインナーカーブとアウトカーブとともに、入口、中央、出口いずれも超過距離との間に有意な正の相関関係がみられた ($p < 0.01$)。日本選手についてみると、5,000m の JPN7 のアウトカーブおよび JPN10 の両カーブについては、中央で平均値よりも約 0.5m 外を通過していた。

3. 速度の種目間比較と選手間比較

図 5 は、ストレートとカーブそれぞれの出口速度について全対象者平均値と日本選手の値を示し

c) 5,000m 上位選手



d) 5,000m JPN7

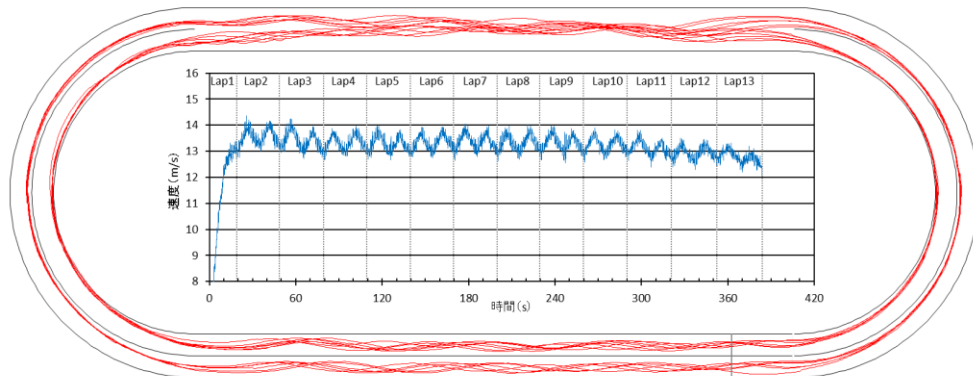


図 3-2 5,000m レースにおける滑走軌跡と速度の典型例
赤線が軌跡、青線が速度を示している。

c) 上位選手 (375.70s)、d) 日本選手 JPN7 (383.99s)

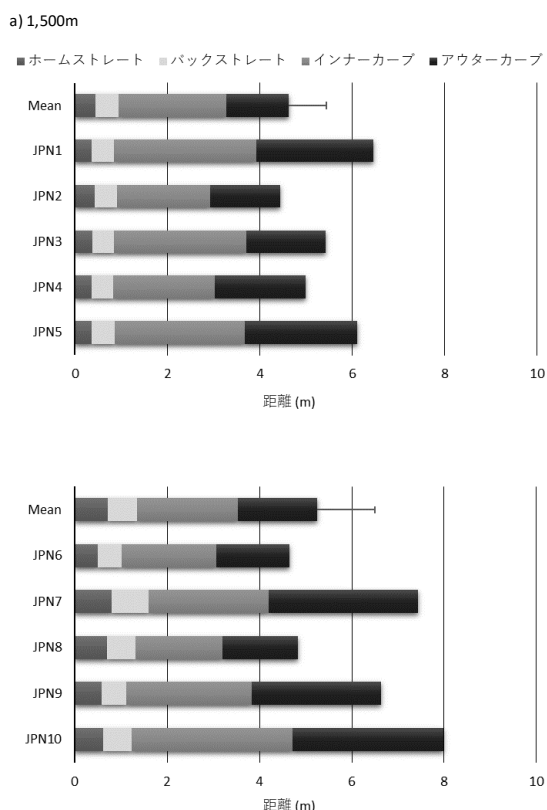


図4 1,500m レース (a) および 5,000m レース

(b) における1周回あたりの超過距離

Mean は全対象者平均値と標準偏差、JPN1～JPN10 は日本選手を示す。

たものである。1,500m では一般的に2周目の最初のカーブまで加速したのち、ストレートのたびに大きく減速していた。5,000m については、いずれの選手もスタート直後を除いてストレートで減速し、カーブで加速していた。

表3は、ストレート速度変化量とカーブ速度変化量、およびそれらと公式記録およびラップ維持率との相関を示したものである。1,500m におけるストレート速度変化量は全対象選手が負の値を示していたのに対し、カーブ速度変化量は概ね正の値を示したがその絶対値はストレート速度変化量よりも小さかった。5,000m では全対象選手におい

てストレート速度変化量は負の値、カーブ速度変化量は正の値を示し、カーブ速度変化量は概ねストレート速度変化量の絶対値に近い値を示していた。1,500m の速度変化量は、公式記録との間には有意な相関関係はなかったが、ラップ維持率との間にはストレートとカーブともに正の相関関係がみられた ($p<0.01$)。5,000m では、ストレート速度変化量が公式記録との間に負の相関関係、ラップ維持率との間に正の相関関係がみられた ($p<0.05$)。また、5,000m の JPN6 および JPN7 のストレートの減速量 (速度変化量の絶対値) とカーブの加速量は、平均値の+1SD よりも大きかった。

IV. 考察

1. 滑走軌跡について

図4に示した超過距離をスタートからゴールまで合計すると、1,500m では $16.63 \pm 2.81\text{m}$ 、5,000m では $65.88 \pm 15.58\text{m}$ に達する。レース全体の超過距離は例えば5,000m 上位選手 (図3c と同一の選手) は46.0m、日本選手 JPN7 は92.6m であり、その差はタイムに換算すると約3.5秒に相当し、これは第1位と第5位のタイム差と同等である。これらのことから滑走軌跡の個人差は記録や順位に影響すると考えられる。

超過距離はカーブによるものが大きく、個人差が大きいのもカーブであった。カーブの滑走ラインをみると、外側から進入した後、一旦内側ラインに近づき、再び出口に向かって外側に膨らんでいくのが一般的であった (図3および表2)。すなわち、実際のレーンの形状よりも大きな半径の円を描いていると解釈できる。円運動で必要となる求心力は回転半径に反比例することを考えると、外側へのプッシュによって得られる求心力の大きさが制限要因となって、ラインと同じ半径の弧を回り切れずに過剰距離が発生している可能性が考えられる。半径30mのアウターカーブよりも半径

表 2 カーブ入口、中央、出口通過時のレーン内側ラインからの距離 (m)、およびそれらと各カーブの超過距離との相関係数

Mean は全対象者平均値と標準偏差、JPN1～JPN10 は日本選手を示す。*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

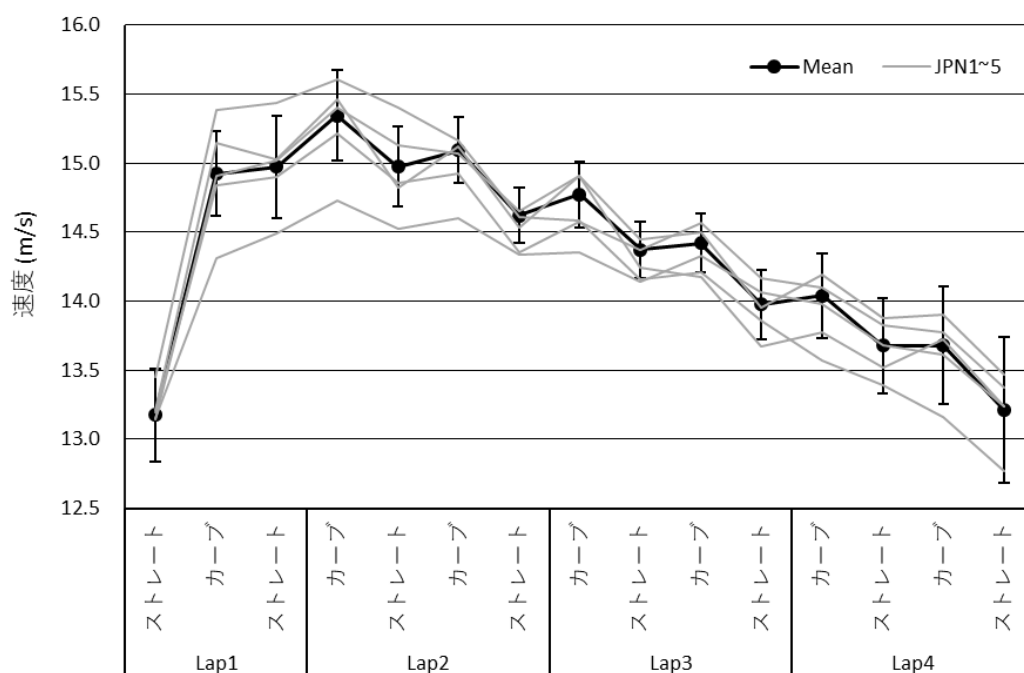
1,500m		Mean (n=25)	JPN1	JPN2	JPN3	JPN4	JPN5	v.s.超過距離
インナーカーブ	入口	2.18±0.38	1.98	2.45	2.43	2.20	2.52	0.52**
	中央	0.16±0.07	0.24	0.13	0.10	0.08	0.30	0.36
	出口	2.60±0.24	2.99	2.34	2.92	2.83	2.39	0.68**
アウターカーブ	入口	1.45±0.30	1.40	1.31	1.46	1.58	1.99	0.52**
	中央	0.16±0.12	0.50	0.12	0.09	0.37	0.46	0.63**
	出口	1.61±0.27	1.97	1.48	2.20	1.72	1.43	0.34
5,000m		Mean (n=31)	JPN6	JPN7	JPN8	JPN9	JPN10	v.s.超過距離
インナーカーブ	入口	1.81±0.33	1.49	1.84	1.48	1.81	1.73	0.58**
	中央	0.16±0.13	0.18	0.28	0.11	0.29	0.68	0.72**
	出口	2.45±0.33	2.31	2.12	2.54	2.68	2.73	0.50**
アウターカーブ	入口	1.33±0.34	1.11	1.57	1.45	1.99	1.65	0.74**
	中央	0.21±0.18	0.24	0.74	0.26	0.35	0.71	0.83**
	出口	1.70±0.40	1.43	1.77	1.40	2.30	2.09	0.73**

26m のインナーカーブのほうが入口と出口で外側を通過していたこともこの考えに沿う結果と言える。

一方、求心力は速度の 2 乗に比例することを考えると、速度が小さい 5,000m のほうが 1,500m よりも 1 周回あたりの超過距離が小さくなると予想されたが実際にはそのような傾向はなかった。5,000m において超過距離が大きかった JPN7 と JPN10 に着目すると、カーブ（特にアウターカーブ）中央におけるレーン内側ラインからの距離が大きいことが分かる（表 2）。平均値についてもインナーカーブ、アウターカーブともに入口、出口だけでなく中央の滑走位置も当該カーブの超過距離と高い相関関係がみられた。5,000m のアウターカーブはレーンの半径が大きく滑走速度が小さいこと、およびカーブ中央で外目を通過していた選手がいたことは、求心力とは別の原因でカーブ全体にわたり外を回ってしまう場合があることを示している。

図 6 は 5,000m レースにおける上位選手（図 3c と同一の選手）と日本選手 2 名のアウターカーブ滑走中の一時点の写真である。LPM システムは頭頂部の座標値を検出しているが、頭頂部だけでなく着氷しているブレードの位置なども選手間で顕著に異なっていることが分かる。そして、JPN7 および JPN10 はこの写真のようにアウターカーブ全体で内側ラインよりも外側を通過していた。レーン内側には「ポイント」と呼ばれる小さなブロックが等間隔で設置されており、これに触れると失格となる。今回の結果をフィードバックした際に JPN7 に該当する選手から、通常のトレーニングではポイントを設置していないため、競技会ではポイントを怖がっていた可能性がある点と、トレーニング中の 1 週のラップタイムに比べて競技会になると感覚よりもラップタイムが悪いと感じていた点が指摘された。そこで、ポイントを設置した状況でのトレーニングを数回実施した。JPN7 に該当する選手のその後の 2 回の 5,000m レースを追

a) 1,500m



b) 5,000m

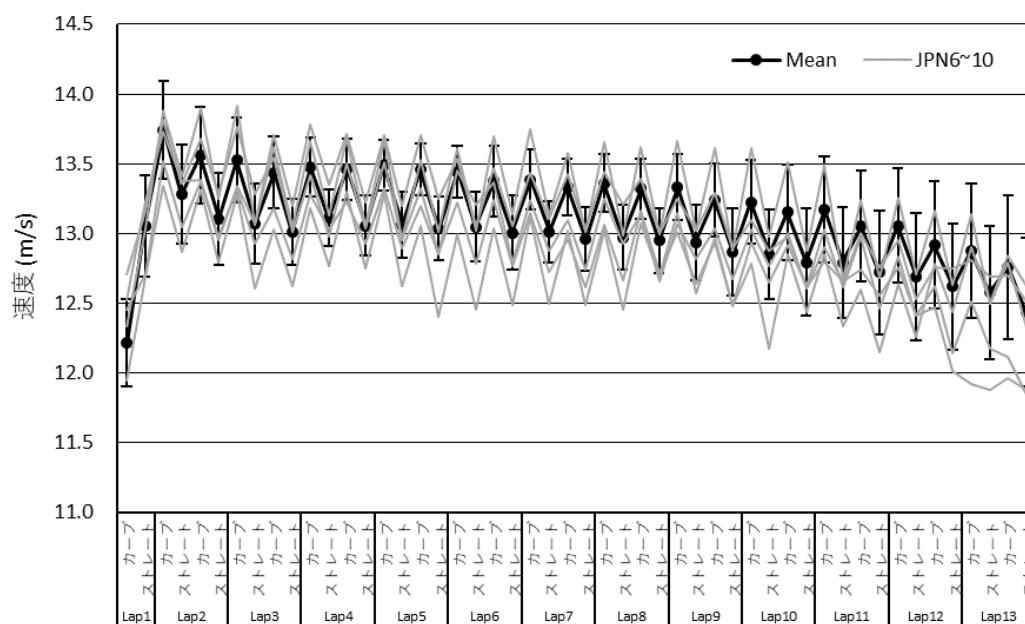


図5 1,500m レース (a) および 5,000m レース (b) におけるストレートとカーブそれぞれの出口速度

Mean は全対象者平均値と標準偏差、JPN1~JPN10 は日本選手を示す。

表3 ストレート速度変化量とカーブ速度変化量 (m/s)、およびそれらと公式記録およびラップ維持率との相関

Mean は全対象者平均値と標準偏差、JPN1～JPN10 は日本選手を示す。*: $p<0.05$, **: $p<0.01$

1,500m	Mean (n=25)	JPN1	JPN2	JPN3	JPN4	JPN5	v.s.公式記録	v.s.ラップ維持率
ストレート	-0.42±0.10	-0.27	-0.43	-0.50	-0.35	-0.36	0.15	0.51**
カーブ	0.13±0.12	0.06	0.13	0.23	-0.09	0.11	-0.17	0.61**
5,000m	Mean (n=31)	JPN6	JPN7	JPN8	JPN9	JPN10	v.s.公式記録	v.s.ラップ維持率
ストレート	-0.38±0.09	-0.50	-0.62	-0.42	-0.35	-0.32	-0.42*	0.45*
カーブ	0.36±0.08	0.49	0.59	0.37	0.31	0.29	0.34	-0.25

跡した結果、本研究の対象競技会で 7.43m だった 1 周回あたりの超過距離は 5.69m と 5.20m に、対象競技会で 0.74m だったアウターカーブ中央の内側ラインからの距離は 0.32m と 0.17m に改善された。これらのことから、原因次第では比較的容易に超過距離を減少させられる場合があると考えられる。

2. 滑走速度について

1,500m では一般的にストレートのたびに大きく減速し、5,000m については、ストレートで減速し、カーブで加速していた (図 5)。長距離種目ではストレートが減速局面、カーブが加速局面であるという知見は、スピードスケート界において極めて基本的な情報ではあるにもかかわらず、これまで報告されていなかった。ストレートは左右対称にストロークを繰り返すのに対し、カーブでは右脚を内側にクロスさせる非対称な動作となる。一般に、滑走中の身体重心速度ベクトルよりもわずかにブレードが外を向いていることにより、内向きの水平ブレード反力が身体重心速度方向の成分を持ち、この成分が加速に貢献する¹²⁾。しかし、ストレートにおける着氷直後では、ブレードが外傾しているため水平ブレード反力がわずかに外向きとなる¹²⁾。一方、カーブでは、ストローク全体

を通してブレードがコース内側に傾斜しており、水平ブレード反力も内向きとなる⁸⁾。以上のことから、カーブでは水平ブレード反力が常に身体重心加速方向の成分を持つことがストレートよりも加速する一要因と推察される。しかし、これらは複数の報告と理論を部分的に重ねた推論であり、滑走動作の分析やブレード反力の分析から詳細に今後検討する必要がある。

1,500m では、ストレートの減速が小さく、カーブの加速が大きかったもののほどラップタイムを維持していたが、これらの加減速は公式記録とは相関がなかった (表 3)。ラップ維持率と記録との間にも有意な相関がなかったことから、1,500m の好記録のためには、各区間の速度変化よりもスタートからトップスピードに至るまでの加速が重要であると考えられる。一方、5,000m では、ストレートにおける減速が小さかったもののほどラップタイムを維持し、公式記録も優れていた。すなわち、ストレートで大きく減速し、カーブで挽回することを繰り返すよりもストレートにおける減速を抑えることがラップタイムの維持と好記録につながると考えられる。たとえば、JPN7 は上位選手と比較して速度の増減が顕著に大きかったことから (図 3-2)、ストレートの減速が大きかったことが課題の一つである可能性がある。ただし、JPN7 は

ラップ維持率については平均的であったことから（表 1）、ストレートに技術的な問題があるというよりもストレートを楽に滑走してカーブで意図的に加速していた可能性がある。したがって、この選手がもしストレートの減速を抑えることを意識した場合にどのような速度パターンを示すかは興

味深いところである。

V. まとめ

本研究の目的は、スピードスケート国際競技会における男子中長距離レース出場者の滑走軌跡および滑走速度を分析し、各種目の特性および記録との関係を明らかにするとともに、日本選手の課題を抽出することであった。本研究で得られた結果と知見をまとめると以下ようになる。

① 1 周回あたりの超過距離は、1,500m が $4.62 \pm 0.83\text{m}$ 、5,000m が $5.26 \pm 1.25\text{m}$ であり、カーブの入口と出口で外を通過していることが主な原因であった。超過距離の個人差は順位に影響し得る大きさであり、1,500m と比べて速度が遅い 5,000m についても同様であった。

② 日本選手では、比較的回りやすいと考えられる 5,000m レースのアウトカーブ中央でも内側のラインから 0.5m 以上離れている場合があり、必ずしも外側にプッシュすることにより得られる求心力だけが超過距離の制限要因ではないと考えられた。そのような場合に、フィードバックと簡単なトレーニングによって比較的容易に改善される事例もあった。

③ 原則として 1,500m はストレートで減速し、カーブでは維持または加速しており、5,000m についてはストレートが減速局面、カーブが加速局面であることが明らかになった。

④ 5,000m ではストレートで大きく減速してカーブで挽回することを繰り返す選手よりも、ストレートにおける減速を抑えていた選手のほうがラップタイムを維持し、好記録につながっていた。

今後は、求心力と滑走軌跡との関係、カーブの加速のメカニズム、ストレートで減速する要因などを多方面から究明することが課題であろう。

a) 上位選手



b) 日本選手（JPN7）



c) 日本選手（JPN10）



図 6 5,000m レースにおける上位選手

(a) と日本選手 2 名 (b および c) のアウトカーブ滑走

謝辞

本研究の実施にあたっては、公益財団法人日本スケート連盟の多くの関係者の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 1) Carling, C, Bloomfield J, Nelsen L, and Reilly T. The role of motion analysis in elite soccer: Contemporary performance measurement techniques and work rate data. *Sports Med*, 38: 839–862, 2008.
- 2) de Boer RW, Ettema GJC, Gorkum H van, de Groot G, and Ingen Schenau GJ van. Biomechanical aspects of push-off techniques in speed skating the curves. *Int J Sport Biomech*, 3: 69-79, 1987.
- 3) Ingen Schenau GJ van, de Groot G, and de Boer RW. The control of speed in elite female speed-skaters. *J Biomech*, 18(2): 91-96, 1985.
- 4) Seidl T, Linke D, and Lames M. Estimation and validation of spatio-temporal parameters for sprint running using a radio-based tracking system. *J Biomech* 65: 89–95, 2017.
- 5) Stevens TGA, de Ruiter CJ, Niel C van, de Rhee R van, Beek PJ, and Savelsbergh GJ. Measuring acceleration and deceleration in soccer-specific movements using a local position measurement (LPM) system. *Int J Sports Physiol Perform*. 9(3):446-56, 2014.
- 6) Vickery WM, Dascombe BJ, Baker JD, Higham DG, Spratford WA, and Duffield R. Accuracy and reliability of GPS devices for measurement of sports-specific movement patterns related to cricket, tennis, and field-based team sports. *J Strength Cond Res*, 28(6): 1697–1705, 2014.
- 7) 湯田淳. スピードスケート競技における科学サポート. *バイオメカニクス研究*, 17(4) : 216-226, 2013.
- 8) 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 Health Sci* 2: 195-204, 2004.
- 9) Yuda J, Yuki M, Aoyanagi T, Fujii N, and Ae M. Kinematic analysis of the technique for elite male long-distance speed skaters in curving. *J Appl Biomech*, 23(2): 128-138, 2007.
- 10) 湯田淳, 結城匡啓, 藤井範久, 阿江通良. スピードスケート 5,000m 競技における世界一流長距離選手のレースペースの分析. *バイオメカニクス研究*, 6(2) : 116-124, 2002.
- 11) 結城匡啓, 阿江通良, 浅見高明. スピードスケートにおける加速理論の再検討. *バイオメカニズム*, 11 : 111-121, 1992.
- 12) 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. *バイオメカニズム*, 13 : 41-51, 1996.