Journal of High Performance Sport 10(2022)24-35

原著論文

スピードスケート男子 500m における世界一流選手のレース分析
ー区間ごとの推進力推定の試みー

An analysis of the performance characteristics of world-class male speed skaters in the 500m race estimating the propulsive force per section

横澤俊治[1)], 木村裕也[2)], 斉川史徳[3)], 加藤恭章[4)], 熊川大介[5)]
Toshiharu Yokozawa[1)], Yuya Kimura[2)], Fuminori Saikawa[3)], Takanori Kato[4)], Daisuke Kumagawa[5)]

Abstract : This study aimed to investigate the average speed, estimated propulsive force, and excess distance in each section of the 500m race for men at a senior international competition and to assess the race patterns of world-class speed skaters. The motion of the top 12 speed skaters who started in the inner and outer lanes (IL and OL), respectively (n=24), was captured at 60 frames/s using a local position measurement system that automatically identifies the skaters' trajectory and speed. The 500m lane was divided into six sections, and the average speed in each section was calculated. Additionally, the propulsive force for each section was estimated by the change in the speed and assumed magnitude of the air resistance during the corresponding section. The excess distance in the curved sections was calculated as the difference between the actual skating distance and official lane distance. As a result, for both the IL and OL, the skaters with an overall greater average speed had a greater average speed from the crossing straight to the second curved section and a greater estimated propulsive force to the first curved section. Among the excellent skaters, sections for which estimated propulsive forces were larger differed depending on the skater in both the IL and OL. Skaters with a higher official record for the IL had a smaller excess distance. Our observations suggest that the higher average speed in a particular section could be attributed to the larger propulsive force in the previous section, and the propulsive force to the first curved section was important for the 500m race for men.

Key words : speed analysis, local position measurement system, skating speed, propulsive force, skating trajectory
キーワード：スピード分析, 位置計測システム, 滑走スピード, 推進力, 滑走軌跡

[1)]国立スポーツ科学センター, [2)]鹿屋体育大学大学院, [3)]松本市役所, [4)]大学スポーツ協会, [5)]国士舘大学
[1)] Japan Institute of Sports Sciences, [2)] Graduate School, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya, [3)] Matsumoto City Hall, [4)] Japan Association for University Athletics and Sport, [5)] Kokushikan University
E-mail : toshiharu.yokozawa@jpnsport.go.jp

受付日：2021 年 10 月 8 日
受理日：2022 年 1 月 12 日

Ⅰ．緒言

スピードスケートの中で、500m は距離が最も短い種目である。この種目では、号砲後に下肢の爆発的なパワー発揮を伴って加速した後、徐々に滑走スピードが増加し、300m 前後で滑走スピードがピークに達し、その後は疲労を伴ってわずかに減速するというスピード変化パターンを示すことが知られている[6), 7), 9)]。他の種目と比較して到達する最高スピードが大きく、より大きな滑走スピードの獲得が重要となることから[7)]、500m のレース分析によって大きな滑走スピードを得るために重要な要素を知ることが可能となると考えられる。また、男子 500m はこれまで日本にとってオリンピックなどの国際大会において好成績を収めてきた有望種目である。しかし、2018 年平昌大会ではオリンピックレコードが更新され、その翌シーズンには世界記録が大幅に更新されているように、国際的な記録向上が著しい種目であるため、強化のためにもレース分析が急務である。スピードスケート 500m のレース分析については、5 区間の滑走スピードをスラップスケート導入前後で比較したもの[9)]、2002 年冬季オリンピックソルトレーク大会女子 500m を対象に 500m を 6 区間に分けて滑走スピードを分析したもの[7)]がわずかに報告されているが、高速化が進んだ現在の男子 500m にこれらの知見をそのまま適用することはできないであろう。さらに、これらの報告はいずれも区間に要した時間から区間の平均スピードを算出しているが、カーブではコースロスをともなうため、この平均スピードの大小にはコースロスの影響と実際の滑走スピードの影響が混在しているという限界がある[3)]。

我々は、長野市オリンピックアリーナ（以下、エムウェーブ）に設置された位置計測（Local position measurement；以下 LPM）システムを用いて、中長距離種目を中心に滑走スピードと滑走軌跡の分析を行ってきた[5)]。LPM システムを用いた分析の結果、長距離種目ではストレートで減速、カーブで加速を繰り返す周期的なスピードの変化パターンを示すことや、カーブのコースロスの程度が順位に影響することなどがわかってきた[3)]。500m においても同様に LPM システムを用いて滑走スピードや滑走軌跡を算出することは有意義と考えられるが、ストレートは 3 回、カーブは 2 回（インナーカーブとアウターカーブを 1 回ずつ）しか通過しないため、一つ一つの区間のスピード変化やコースロスを詳細に分析することが重要となる。

レースの記録は、スタートの反応時間やフィニッシュ時の姿勢といった微細な要素を除けば、レース全体の平均スピード（以下、v_{race}）と滑走距離（コースロスの大小によって変化）のみで決定される。v_{race} に対する各区間の影響について検討しようとする際、区間タイムや区間平均スピードには直前の区間の終了時のスピードが影響している点には注意が必要である[4)]。たとえば、区間平均スピードは低かったとしても区間内で大きく加速し、区間の出口でスピードが大きくなっていればその区間では優れた加速ができていたと解釈できるだろう。また、スピードスケートは空気抵抗の影響を大きく受けるスポーツであるため[2)]、スピードが大きければ大きいほど加速は困難になる。これらのことから、v_{race} に対する各区間の影響を検討するためには、滑走スピードによって空気抵抗が異なることを考慮した加速に関連した指標が必要と考えられる。スケーターのスピード変化は氷反力（以下、推進力）と空気抵抗の 2 つによってのみ生じることから[1)]、滑走スピードに応じた空気抵抗が推定できれば区間ごとに推進力を算出することが理論上可能と考えられる。

以上のことから、区間の推定推進力を一つの変量としてレース分析することにより、男子 500m の記録向上のための要点を導くことができると考えられる。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 500m に出場した選手を対象に、LPM システムを用いて区間ごとの平均スピード、推定推進力、およびカーブのコースロスを分析し、世界一流選手のレースパターンを評価することとした。なお、本研究ではワールドカップランキング上位選手がほぼ全て出場していた対

象競技会において、分析対象とした記録上位 12 名のうちさらに記録上位であった者を世界一流選手と考え、12 名の中で公式記録や v_{race} と相関関係がみられた変量について、その変量が大きい（もしくは小さい）ことが世界一流選手の特性の 1 つと判断した。

Ⅱ．方法

1．分析対象

エムウェーブで開催されたシニアの国際競技会において 2 日間にわたって行われた男子 500m を対象とした。日本スケート連盟と国立スポーツ科学センターが共同で実施した科学サポート活動の一環でデータ収集した。

男子 500m に出場した 49 名は各日 1 本ずつ滑走し、1 日ごとに順位が決定する。選手によって 2 日間とも同じレーンでスタートした選手もいたため、この場合には公式記録が下位だったレースを除外した。そして、インナーレーンスタート（以下、IL）とアウターレーンスタート（OL）それぞれ公式記録上位 12 レース、計 24 レース（IL、OL ともに対象となった選手が 6 名いたため、選手数としては計 18 名）を対象とした。なお、対象レースの公式記録の平均値と標準偏差は、IL では 34.86 ± 0.21 s、OL では 34.85 ± 0.19 s だった。

2．データ収集

本研究におけるレース分析は、エムウェーブのコース全周の直上に設置された LPM システムにより実施した。28 台のモノクロカメラ（UI-5240CP-M-GL、iDS 社製；1280 × 1024 ピクセル）を用い、60 frames/s で撮影された同期画像を PC に取り込んだ。頭部および胴体を模式化したテンプレートを準備し、保存された画像からカメラごとにテンプレートにマッチする選手を自動的に識別し、頭頂部の水平面内の 2 次元座標値を同定した [5]。

LPM システムより得られた滑走軌跡の 2 次元座標を平滑化することなく時間微分し、その速度ベクトルの大きさを滑走スピードとして算出した。

3．区間定義

スタート地点、1,000m レースフィニッシュライン、第 1 カーブ入口、第 1 カーブ出口、第 2 カーブ入口、第 2 カーブ出口、フィニッシュラインの 7 地点を基準に、隣接する地点間をそれぞれ S1-1、S1-2、C1、S2、C2、S3 と定義し、6 局面に分けた（S はストレート、C はカーブを表す；Figure 1）[7]。さらに、スタート地点から第 1 カーブ入口までを S1 とした。また、IL と OL では各区間の距離が異なるため、平均値や公式記録との相関係数を算出する際、別々に取り扱った

4．算出項目

1）スプリットタイムと区間タイム

LPM システムより各地点を通過する時刻を読み取り、スタートから各区間終了までに要した時間をスプリットタイム、区間内に要した時間を区間タイムと定義した。

2）平均スピードと区間終了時スピード

各区間における滑走スピードの平均値を区間平均スピードと定義した。この区間平均スピードは、各区間のルール上の距離を時間で除すことにより得られるスピード [7, 9] と異なり、コースロスの影響を受けず、スケーターの実際の滑走スピードに由来する。また、スタートからゴールまでの滑走スピードの平均値（v_{race}）も算出した。また、区間終了時のスピードには通過前後 1 秒の平均値を用いた [4]。

3）推定推進力

区間 i の進行方向の平均力 F_i は、

$$F_i = F_{drag,i} + F_{irf,i} \quad (1)$$

となる。ここで、$F_{drag,i}$ は区間 i の平均空気抵抗力、$F_{irf,i}$ は区間 i の平均推進力を示している。また、F_i は身体質量 m と区間平均加速度との積であることから、

$$F_i = m \cdot \Delta v_i / \Delta t_i \quad (2)$$

と表される。ここで Δv_i は区間 i のスピード変化量（区間終了時のスピードから区間進入時のス

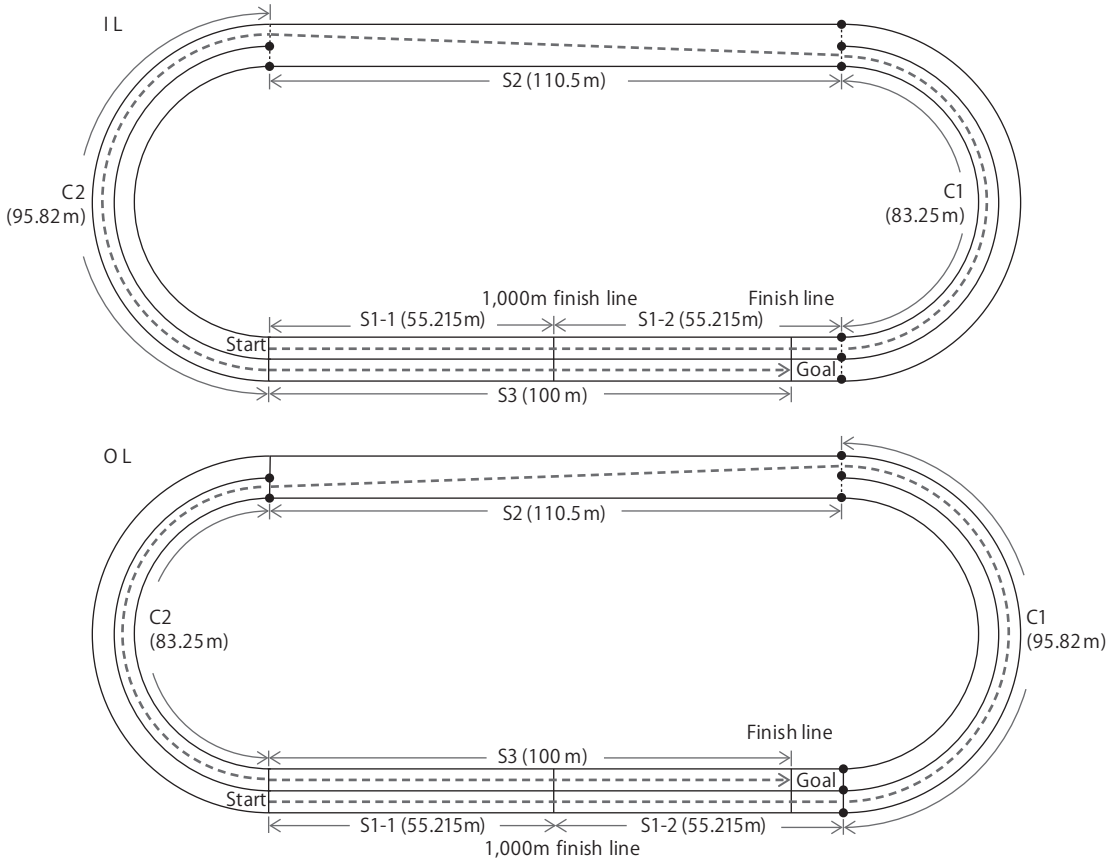

Figure 1. Definition of the sections on the track. IL and OL represent skaters who started in the inner and outer lanes, respectively.

ピードを引いたもの）、Δt_i は区間タイムである。一方、$F_{drag,i}$ は、

$$F_{drag,i}=-\frac{1}{2}\rho C_D A v_i^2=-\frac{1}{2}\rho m S v_i^2 \quad (3)$$

と表される。ここで、ρ は空気密度（kg/m^3）、C_D は抗力係数（単位無し）、A は前面投影面積（m^2）、v_i は区間 i の平均スピード（m/s）、S は身体質量あたりの抗力面積（$=C_DA/m$）である。式（2）と式(3)を式(1)に代入すると、

$$m\cdot\Delta v_i/\Delta t_i=-\frac{1}{2}\rho m S v_i^2+F_{irf,i} \quad (4)$$

と書ける。整理すると、

$$F_{irf,i}/m=\Delta v_i/\Delta t_i+\frac{1}{2}\Delta\rho S v_i^2 \quad (5)$$

が得られる。一方、空気密度 1.163 kg/m^3 の環境下で平均身体質量 63.9 kg の被験者に通常の滑走姿勢を取らせ、風速 14m/s の気流を発生させた際の空気抵抗が 17.2 N であったという報告 [8] を用いると、式（3）より S=0.00236 m^2/kg が得られる。また、本研究の対象競技会中の気温（初日：14.2 ℃、2 日目：13.7 ℃）と気圧（初日：984 hPa、2 日目：982 hPa）から空気密度を求めた（両日とも 1.193 kg/m^3）。以上の先行研究と環境データを活用し、式（5）より体重 1kg あたりの区間の平均推進力（$F_{irf,i}$/m）を推定した（以下、推定推進力）。

4）カーブ超過距離

C1 および C2 において 1 フレームごとに移動した距離を区間内で合計することにより実際に滑走した距離を求め、各区間の内側ラインの長さとの差により超過距離を算出した [3]。

5．統計処理と典型例の選定

算出した区間ごとの変量と公式記録との関係

を検討するために、各変量について Kolmogorov-Smirnov の正規性の検定を行った後、Pearson の積率相関係数を算出した。正規性が認められなかった一部の変量（OL における S2 区間終了時スピード）については Spearman の順位相関係数を算出した。また、スピードや推定推進力に関する変量については公式記録との相関係数に加えて v_{race} との相関係数も同様に算出した。これは、v_{race} が公式記録を決定する要素のうちコースロスの影響を除いたものであり、これらの変量は直接的には v_{race} に影響すると考えられるためである。有意水準はいずれも 5% とした。

また、推定推進力による v_{race} の説明率（決定係数）を確認するために、v_{race} を目的変数、6 区間の推定推進力を説明変数として重回帰分析を行った。さらに、v_{race} の実測値に対する予測値の二乗平均平方根誤差（RMSE）を算出した。

また、世界一流選手における区間平均スピードと推定推進力との関係性や個人差を確認するため、区間平均スピードと推定推進力については、IL、OL それぞれ典型例 2 名（いずれも各スタートレーンで対象者平均よりも公式記録と v_{race} が上位、すなわち世界一流選手で且つ当該データが特徴的だった者）を選定して詳細に結果を示した。

Ⅲ．結果

1．スプリットタイムと区間タイム

Table 1 に示したように、スプリットタイムは、IL の全区間および OL の C1 以降において公式記録との間に有意な正の相関関係がみられた。また区間タイムは、IL の S1 から S2 および OL の C1 から C2 において公式記録との間に有意な正の相関関係がみられた。

2．平均スピードと区間終了時スピード

Table 2 は、区間ごとの平均スピードおよび区間終了時スピードの平均値、ならびに公式記録および v_{race} との相関係数を示したものである。また、v_{race} 自体についてもその平均値と公式記録との相関係数を示した。区間ごとの平均スピードと区間終了時スピードの平均値をみると、一般に滑走スピードは、スタートから徐々に増加し、IL では C2 付近、OL では S2 から C2 付近で大きな値を示していたことがわかる。

v_{race} は、IL と OL ともに公式記録との間に有意な負の相関関係がみられた。IL の区間平均スピー

Table 1. The split times at the end of each section and section times in each section (s) and their correlation coefficients with the official record (r (record)).
The symbols * and ** indicate significant correlations at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

			S1-1	S1-2	S1	C1	S2	C2	S3
IL	Split time	Mean	6.44	10.45	–	15.90	22.74	28.62	34.86
		S.D.	0.11	0.15	-	0.20	0.21	0.22	0.21
		r (record)	0.673*	0.749**	-	0.820**	0.893**	0.946**	1.000**
	Section time	Mean	6.44	4.01	10.45	5.44	6.84	5.88	6.24
		S.D.	0.11	0.05	0.15	0.06	0.04	0.05	0.07
		r (record)	0.673*	0.755**	0.749**	0.838**	0.577*	0.498	0.027
OL	Split time	Mean	6.40	10.43	-	16.58	23.36	28.58	34.85
		S.D.	0.10	0.12	-	0.14	0.15	0.16	0.19
		r (record)	0.444	0.520	-	0.646*	0.814**	0.912**	1.000**
	Section time	Mean	6.40	4.02	10.43	6.15	6.79	5.21	6.27
		S.D.	0.10	0.04	0.12	0.03	0.05	0.05	0.08
		r (record)	0.444	0.540	0.520	0.737**	0.577*	0.582*	0.482

Table 2. The average speeds in each section and the speeds at the end of each section (m/s) and their correlation coefficients with the official record (r (record)) and average speed in the race (r (v_{race})).
The symbols * and ** indicate significant correlations at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.
Italic characters indicate Spearman's rank correlation coefficients.

			S1-1	S1-2	S1	C1	S2	C2	S3	v_{race}
IL	Average speed	Mean	8.69	13.85	10. 67	15.39	16.19	16.30	16.09	14.41
		S.D.	0.13	0.20	0.15	0.12	0.10	0.14	0.18	0.08
		r (record)	-0.671*	-0.835**	-0.799**	-0.609*	-0.540	-0.364	0.003	-0.919**
		r (v_{race})	0.507	0.644*	0.607*	0.682*	0.681*	0.609*	0.300	-
	Speed at the end of each section	Mean	12.66	14.53	-	15.90	16.20	16.19	15.69	-
		S.D.	0.22	0.18	-	0.09	0.12	0.16	0.28	-
		r (record)	-0.917**	-0.763**	-	-0.486	-0.504	-0.063	-0.473	-
		r (v_{race})	0.797**	0.663*	-	0.642*	0.665*	0.364	0.592*	-
OL	Average speed	Mean	8.74	13.83	10.70	15.46	16.32	16.26	16.00	14.42
		S.D.	0.13	0.14	0.12	0.14	0.13	0.16	0.20	0.08
		r (record)	-0.371	-0.628*	-0.522	-0.448	-0.572	-0.378	-0.408	-0.897**
		r (v_{race})	0.222	0.432	0.339	0.620*	0.723**	0.594*	0.544	-
	Speed at the end of each section	Mean	12.70	14.47	-	16.08	16.23	16.06	15.69	-
		S.D.	0.14	0.15	-	0.15	0.14	0.19	0.26	-
		r (record)	-0.487	-0.541	-	-0.364	*-0.469*	-0.357	-0.351	-
		r (v_{race})	0.296	0.421	-	0.658*	*0.678**	0.492	0.334	-

ドは、S1 から C1 において公式記録との間に有意な負の相関関係がみられ、S1-2 から C2 において v_{race} との間に有意な正の相関関係がみられた。OL の区間平均スピードは、S1-2 において公式記録との間に有意な負の相関関係がみられ、C1 から C2 にかけて v_{race} との間に有意な正の相関関係がみられた。

IL の区間終了時スピードは、S1-1、S1-2 において公式記録との間に有意な負の相関関係がみられ、S1-1、S1-2、C1、S2、S3 において v_{race} との間に意な正の相関関係がみられた。OL の区間終了時スピードは、いずれの区間においても公式記録との間に有意な相関関係はみられなかったが、C1 と S2 において v_{race} との間に有意な正の相関関係がみられた。

3．推定推進力

Table 3 は、v_{race} と各区間の推定推進力の重回帰分析の結果を示したものである。OL における S3 を除く全ての区間の推定推進力の t 値が有意だった。重回帰式の係数は、IL における S3 と OL における C2 と S3 が他区間よりも小さかった。また、v_{race} に対する各区間の推定推進力の影響度を示す標準化偏回帰係数は、IL では S1 において大きく、OL では S1-1 と C1 において大きかった。推定推進力による v_{race} の決定係数は、IL では 0.997（自由度調整後では 0.994）、OL では 0.980（0.956）で、RMSE は IL では 0.004 m/s、OL では 0.010 m/s であった。

Table 4 に示したように、IL の推定推進力は、S1-1 と S1 において公式記録との有意な負の相関関係ならびに v_{race} との有意な正の相関関係がみられた。OL の推定推進力は、S1 において公式記録と有意な負の相関関係がみられ、いずれの区間においても v_{race} との有意な相関関係はみられなかった。表には示していないが、OL に関して S1 から C1 までを合わせて平均推進力を再計算すると、v_{race} との間に有意な正の相関関係がみられた

Table 3. The coefficients, standard partial regression coefficients, t values, coefficient of determination (R^2), and root mean squared error (RMSE) in a multiple regression analysis for the v_{race} by the estimated propulsive forces in each section.
The symbols * and ** indicate significance for t values and R^2 at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

	IL			OL		
	Coefficient	Standard partial regression coefficient	t	Coefficient	Standard partial regression coefficient	t
Intercept	6.344	-	24.87*	7.482	-	16.48**
S1-1	1.686	1.384	33.12**	1.643	1.040	11.99**
S1-2	2.183	0.971	14.16**	1.663	0.546	6.38**
C1	2.005	0.640	14.57**	2.435	1.112	12.50**
S2	2.093	0.450	8.66**	1.402	0.296	3.32*
C2	1.794	0.717	21.17**	0.696	0.356	4.71**
S3	0.906	0.482	6.10**	0.237	0.099	1.46
R^2		0.997**			0.980**	
R^2: Degree of freedom adjusted		0.994**			0.956**	
RMSE (m/s)		0.004			0.010	

Table 4. The estimated propulsive forces (N/kg) in each section and their correlation coefficients with the official record (r (record)) and average speed in the race (r (v_{race})).
The symbols * and ** indicate significant correlations at $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

		S1-1	S1-2	S1	C1	S2	C2	S3
IL	Mean	2.07	0.74	1. 55	0.59	0.41	0.37	0.28
	S.D.	0.07	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04
	r (record)	-0.850**	0.186	-0.836**	0.437	-0.273	0.192	-0.467
	r (v_{race})	0.673*	-0.199	0.648*	-0.208	0.351	0.015	0.463
OL	Mean	2.09	0.71	1.55	0.60	0.40	0.34	0.30
	S.D.	0.05	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03
	r (record)	-0.506	-0.379	-0.594*	0.016	-0.501	0.029	-0.215
	r (v_{race})	0.305	0.375	0.401	0.303	0.316	0.049	0.103

（r=0.874、p<0.01）。

4．カーブ超過距離

Table 5 に示したように、IL における C1 の超過距離は、公式記録との間に有意な正の相関関係がみられた。一方、OL では超過距離と公式記録との間に有意な相関関係はみられなかった。

5．典型例の平均スピードと推定推進力

Figure 2 および Figure 3 は、それぞれ区間平均スピードと推定推進力について、IL、OL の記録上位の典型例 2 名ずつの個々の値と全対象者（n=12）の平均値を示したものである。なお、個人の特定を防ぐために公式記録は記載しないが、v_{race} は A 選手が 14.50 m/s、B 選手が 14.53 m/s、C 選手が 14.45 m/s、D 選手が 14.54 m/s であり、いずれも IL の平均値（14.41 ± 0.08 m/s）と OL の平均値（14.42 ± 0.08 m/s）を上回っていた。IL における A 選手と B 選手、ならびに OL における C 選手は、全対象者平均値と比較して S1 の区

Table 5. The excess distances (m) in each curved section and their correlation coefficients with the official record (r (record)).
The symbol * indicates significant correlation at $p<0.05$.

		C1	C2
IL	Mean	2.12	1.49
	S.D.	0.59	0.59
	r (record)	0.691*	0.150
OL	Mean	0.86	3.07
	S.D.	0.49	0.80
	r (record)	-0.030	0.203

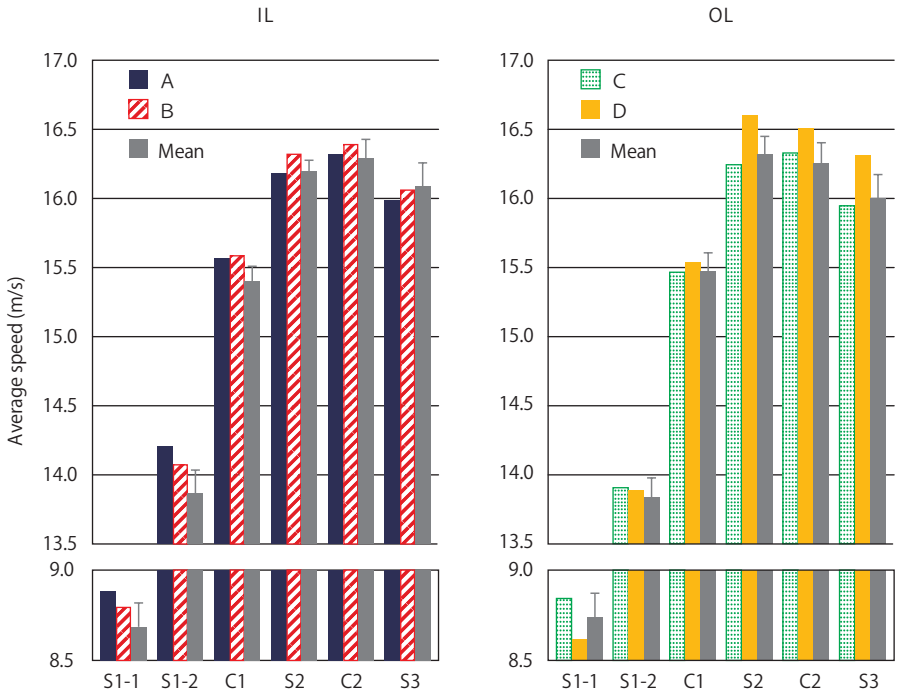

Figure 2. The average speeds in each section for the typical data on excellent skaters and overall mean in each of the IL and OL.
IL and OL represent skaters who started in the inner and outer lanes, respectively. The series "A", "B", "C", and "D" indicate the data for excellent skaters. "Mean" represent mean value of all 12 skaters.

間平均スピードと S1-1 の推定推進力が大きかった。一方、OL における D 選手は、S2 以降の区間平均スピードと S1-2、C1、S2 における推定推進力が大きかった。さらに、A 選手と C 選手における C1 や D 選手における S1-1 のように、記録上位の選手であってもレース前半で推定推進力が小さい区間があるケースがあった。

Ⅳ. 考察

本研究では、スピードスケート男子 500m について IL、OL それぞれ 12 名の選手を対象に、区間ごとの平均スピード、推定推進力、およびカー

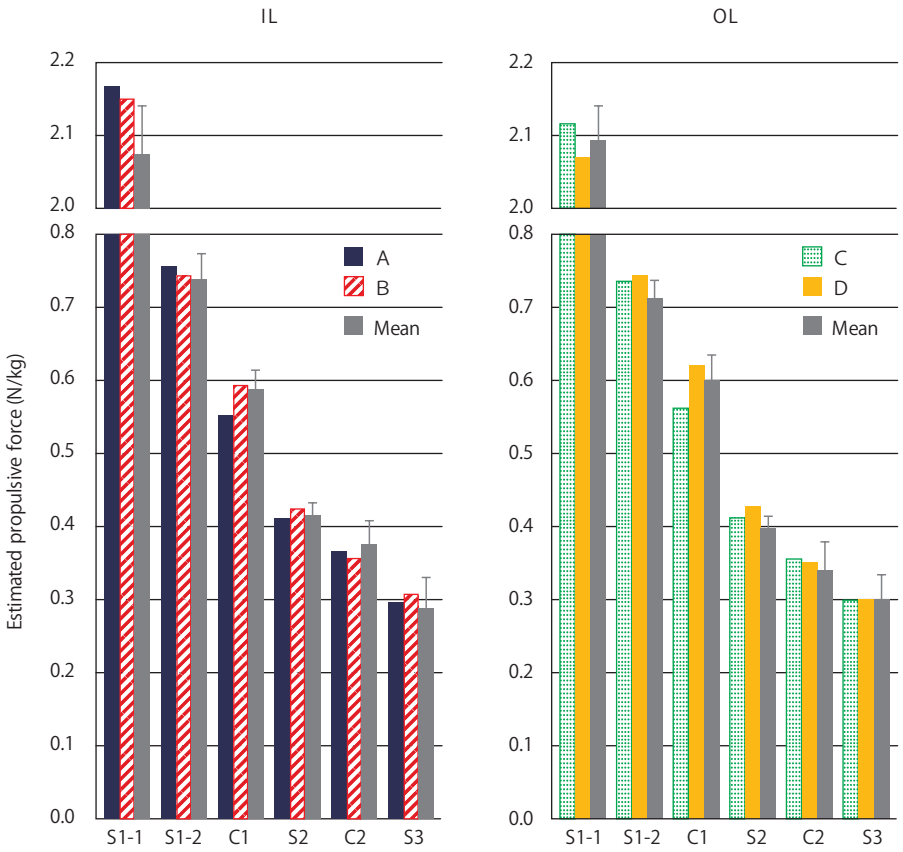

Figure 3. The estimated propulsive forces in each section for the typical data on excellent skaters and overall mean in each of the IL and OL.
IL and OL represent skaters who started in the inner and outer lanes, respectively. The series "A", "B", "C", and "D" indicate the data for excellent skaters. "Mean" represent mean value of all 12 skaters.

ブのコースロスを分析した。その結果、IL、OLともに高速滑走区間である S2、C2 の平均スピードが大きい者ほど v_{race} が大きかった。また、IL では S1-1 における推定推進力が大きい者ほど v_{race} が大きかった。一方、IL では C1 の超過距離が小さい者ほど公式記録が優れていた。さらに公式記録上位選手を個別にみると、IL、OL ともに、S1 における平均スピードと推定推進力が大きかったが C1 の推定推進力が小さかった者もいれば、S1-2、C1、S2 の推定推進力が大きかった者もおり、個人差がみられた。

本研究の新たな試みの一つは、区間ごとの平均推進力を推定し、v_{race} への影響を検討することであった。算出に必要な係数は先行研究における風洞実験の平均値から得た。これは、同じスピードで滑走していれば身体質量あたりの抗力面積は誰でも等しいという仮定に基づいている。実際には 1 人 1 人の形態や滑走姿勢によってこの係数は異なると考えられるが、競技会において滑走中の前面投影面積を取得することは極めて困難である。ただし、本研究において、6 区間の推定推進力のみで v_{race} が 95% 以上説明できたことから、どの区間の推進力が大きな滑走速度に貢献したかといった検討は十分可能と考えられる。なお、S1-1 における推定推進力は他区間よりも非常に大きかった。これは、スタート直後は陸上での疾走動作のように固定点を後方にプッシュすることによって前方への推進力が獲得できるが、その後は

ブレード自体を移動（滑走）させながら推進力を得なければならないためと推察される [6]。

v_{race} は公式記録との間に高い相関関係がみられたが（Table 2）、決定係数（相関係数の二乗）は 0.8 前後にとどまり、v_{race} のみでは十分に公式記録を説明できなかった。選手が実際に滑走した距離を公式記録で除したものが v_{race} に相当するため、v_{race} のみで公式記録を説明できない部分は滑走距離の影響である。横澤ら（2018）[3] は、中長距離種目においてカーブの超過距離がレースの順位に影響するほど大きかったことを報告している。男子 500m を対象とした本研究においても、IL では C1 の超過距離が公式記録との間に正の相関関係がみられた。また、OL では超過距離と公式記録との間に相関関係はみられなかったが、C2 の超過距離の標準偏差は 0.80 m に達した（Table 5）。この OL の C2 超過距離の標準偏差は、記録に換算すると 0.05 s 以上に相当し、OL における対象者 12 名の公式記録の標準偏差が 0.19 s に過ぎないことを考慮すると、C2 の超過距離の個人差は無視できない大きさだったと考えられる。なお、IL の C1 と OL の C2 はともにインカーブであるが、インカーブはアウトカーブよりもコース半径が小さいという特徴がある（インカーブ：26m、アウトカーブ：30m）。コース半径が小さくなるほど同じ滑走速度でコース形状に沿って滑走するために必要とされる求心力が大きくなるため、インカーブにおいて十分な求心力が得られずにコースロスが大きくなった選手が存在したと考えられる。以上のことから、優れた公式記録のためには v_{race} が大きいことが前提であるが、インカーブのコースロスも実力が拮抗した世界水準の選手間では無視できないと考えられる。

IL では、S1-2 から C2 の平均スピードが大きい者ほど v_{race} が大きく、S1-1 における推定推進力が大きい者ほど v_{race} が大きかった（Table 2 および Table 4）。また、重回帰分析における標準化偏回帰係数は、IL においては S1-1 が最も大きく（Table 3）、S1-1 の推定推進力は v_{race} に大きく影響する変量であった。これらのことから、IL ではレース中盤の滑走スピードが大きいことが重要であるが、そのためにはスタート直後に推進力を大きくし、速やかに滑走スピードを増加させることが重要と考えられる。OL については C1 から C2 の平均スピードが大きい者ほど v_{race} が大きかったが、推定推進力はいずれの区間においても v_{race} との相関係数が有意ではなかった。IL と OL では S1 の推定推進力の v_{race} に対する統計結果が異なっていたことになるが、OL においても S1 の推定推進力は公式記録とは有意な負の相関関係がみられたこと、S1 については IL と OL でコース形状に相違がないこと（Figure 1）、OL について S1 から C1 までを合わせて平均推進力を再計算すると v_{race} との間に有意な正の相関関係がみられたことから、OL においても C1 までのいずれかの区間で大きな推進力を得ることがその後の滑走スピードを大きくする上で重要と考えられる。

公式記録上位者、すなわち世界一流選手を個別にみると、C1 までのいずれかの区間で大きな推進力を得ていたという点は共通していた（Figure 3）。これらの区間では重回帰式の係数（Table 3）も大きかったことからも、これらの選手の好記録の要因であったと考えられる。ただし、詳細にみると選手によって平均スピードと推定推進力の特徴は異なっていた。例えば、IL の A 選手は S1-1 の大きな推定推進力がレース前半の大きな平均スピードをもたらしたが、C1 の推定推進力が小さかったために、S2 以降の平均スピードは選手 B に及ばなかったと考えられる。また、OL の C 選手については S1-1、D 選手については S1-2、C1、S2 の推定推進力がその後の平均スピードに貢献して好記録に繋がったと考えられる。これらのことから、他の選手のほうが優れていた区間を改善することにより世界一流選手にとってもさらなる記録向上の余地があると考えられる。

本研究はシニア国際競技会の男子 500m を対象としたものである。大きな推進力が必要とされる区間やコースロスの影響に関する知見を他種目にそのまま適用することはできず、同じ種目の他の競技会でも異なる結果が得られる可能性もある。

しかし、本研究の手法を今後の研究や科学サポートにおいて応用することにより、それぞれの種目の特性や個人の課題の抽出に役立てられると考えられる。特に、区間の平均スピードの相違がそれより前の区間の推進力の相違に起因する場合があることが示された点で本研究の意義は大きいと考える。

Ⅴ．まとめ

本研究では、スピードスケート国際競技会における男子 500m に出場した選手を対象に、LPM システムを用いて区間ごとの平均スピード、推定推進力、およびカーブのコースロスを分析した。本研究で得られた結果と知見をまとめると以下のようになる。

① IL、OL ともに C1、S2、および C2 の平均スピードが大きい者ほど v_{race} が大きかった。また、推定推進力については、IL では S1-1 において、OL については C1 までで大きいことが重要であり、それ以降における滑走スピードの増大に影響すると考えられた。

②世界一流選手を個別にみると、IL、OL ともに選手によって大きな推定推進力を示す区間が異なっていたことから、他の選手のほうが優れていた区間を改善することにより世界一流選手にとってもさらなる記録向上の余地があると考えられた。

③ IL では C1 の超過距離が小さい者ほど公式記録が優れていたこと、ならびに OL における C2 の超過距離の個人差が大きかったことから、インカーブ（IL の C1 と OL の C2）でコースロスを最小限にすることも重要と考えられた。

本研究により、区間の平均スピードの相違がそれより前の区間の推進力の相違に起因する場合があること、ならびに世界一流選手は C1 までのいずれかの区間で大きな推進力を得ていたがその区間は選手によって異なることが示された。

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、ならびに大会実行委員会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）de Koning JJ, de Groot G, van Ingen Schenau GJ. Ice friction during speed skating. J Biomech, 25(6): 565-571, 1992.

2）van Ingen Schenau GJ. The influence of air friction in speed skating. J Biomech, 15(6): 449-458, 1982.

3）横澤俊治 , 加藤恭章 , 紅楳英信 , 熊川大介 . 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 . Sports Science in Elite Athlete Support, 3: 27-38, 2018.

4）横澤俊治 , 加藤恭章 , 紅楳英信 , 斉川史徳 , 熊川大介 . ビデオカメラを用いたスピードスケートにおけるストレートとカーブの加減速およびカーブのコースロスの評価 . Journal of High Performance Sport, 4: 165-175, 2019.

5）横澤俊治 , 高橋裕信 . スピードスケート滑走軌跡即時フィードバックシステムの開発と活用 . 映像情報メディア学会技術報告 , 40(43): 29-33, 2016.

6）湯田淳 . スピードスケートにおけるスタート動作 . バイオメカニクス研究 , 22(4): 206-212, 2018.

7）湯田淳 , 青柳徹 , 高松潤二 . スピードスケート女子 500m 競技における世界一流短距離選手のレースパターン . トレーニング科学 , 18(4): 387-395, 2006.

8）湯田淳 , 青柳徹 , 高松潤二 , 山辺芳 , 鈴木恵一 . スピードスケートにおける滑走姿勢の相違が空気抵抗力に及ぼす影響 . 日本女子体育大学紀要 , 39: 9-15, 2009.

9）結城匡啓 , 河合季信 , 伊藤静夫 , 阿江通良 . 97-98 ワールドカップ前半戦の 500m のレース分析およびスラップスケート対策－長野オリンピックに向けた科学的知見のフィードバック－ . 日本体育協会スポーツ科学委員会

編 , 平成 9 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告 . 日本体育協会スポーツ科学委員会 , pp.355-361, 1998.