

原著論文

スピードスケート女子 3,000m 競技における世界一流選手の滑走スピードおよび
ストレートストロークパラメータの推移

Characteristics of female world-class skaters associated with changes in skating
speed and stroke parameters in the straight section for 3,000 m speed skating race

木村裕也¹⁾, 横澤俊治²⁾, 湯田淳³⁾
Yuya Kimura¹⁾, Toshiharu Yokozawa²⁾, Jun Yuda³⁾

Abstract : The purpose of this study was to identify the characteristics of female world-class skaters associated with the changes in skating speed and stroke parameters in the straight section for 3,000 m race in the speed skating international competition. Sixteen contestants were categorized into top (n=8) and second groups (n=8) according to the official records. The horizontal speeds of the end of the straight and curved sections of the skaters were recorded with the local position measurement system. In addition, 4 synchronized high-speed cameras (300 frames/s) were used to record the skaters' motions at the mid portion of the inner finishing straight lane in the initial phase (2nd or 3rd lap), middle phase (4th or 5th lap), and final phase (6th or 7th lap) and to calculate the skating velocity, stroke frequency, gliding time, push-off time, and stroke length. The skating velocity of the top group was significantly greater than that of the second group in each phase ($p<0.001$). In the middle phase, the skating velocity negatively correlated with stroke frequency ($r=-0.53$, $p<0.05$) and positively correlated with gliding time ($r=0.62$, $p<0.01$) and stroke length ($r=0.71$, $p<0.01$). In the final phase, the change in speed during the straight section positively correlated with stroke frequency ($r=0.67$, $p<0.01$), and negatively correlated with gliding time ($r=-0.60$, $p<0.05$) and stroke length ($r=-0.64$, $p<0.01$). The skaters who maintained large skating velocity in the middle phase would acquire a larger stroke length in the straight section by pushing-off the ice effectively. In the final phase, increasing the stroke frequency was important for suppression of the decrease in speed during the straight section.

Key words : local position measurement, skating velocity, stroke frequency, stroke length, elite athlete

キーワード : 位置計測, 滑走速度, ストローク頻度, ストローク距離, エリートアスリート

¹⁾ 鹿屋体育大学大学院, ²⁾ 国立スポーツ科学センター, ³⁾ 日本女子体育大学

¹⁾National Institute of Fitness and Sports in Kanoya, ²⁾Japan Institute of Sports Sciences, ³⁾Japan Women's College of Physical Education

E-mail : kimurayuya9476@gmail.com

受付日 : 2020 年 3 月 4 日

受理日 : 2020 年 6 月 22 日

I. 緒言

スピードスケート競技シニア大会の長距離種目には、男子 5,000m、男子 10,000m、女子 3,000m、女子 5,000m が該当するが、距離によってレース展開が異なっている。2015 年から 2019 年に行われた世界距離別選手権および冬季オリンピックにおいてメダルを獲得した選手のラップ維持率（2 周目以降のレース前半の平均ラップタイムをレース後半の平均ラップタイムで除したものの^{9),15)}）を比較すると³⁾、男子 10,000m 競技では $100.2 \pm 0.7\%$ 、男子 5,000m 競技では $99.1 \pm 1.4\%$ 、女子 5,000m 競技では $99.0 \pm 1.3\%$ とレース後半でもラップタイムを維持していたのに対し、女子 3,000m 競技では $95.1 \pm 1.9\%$ とレース後半におけるスピードの低下が大きい。また、男子 5,000m 競技では、レース序盤のスピードが大きいことよりもレース終盤でスピードを維持することのほうが好記録に繋がること明らかにになっているが⁹⁾、女子 3,000m 競技では、上位選手であってもレース終盤にスピードが低下するため、他の長距離種目とは理想的なペース配分が異なる可能性がある。そこで、最終的にできるだけ短時間で 3,000m を滑りきるために、世界一流競技者がレース経過に伴いどのようにペースを調整しているかについて調査すべきと考えられる。

スケーターは、2 つのストレートと 2 つのカーブからなる 1 周 400m のリンクを繰り返し周回する際に、ストレートとカーブで大きく異なる運動様式を用いて滑走することとなる²⁾。長距離種目のストレートおよびカーブ滑走に関して、湯田¹¹⁾は、靴の踵部分がブレードと離れるスラップスケート登場直後の 1998 年オリンピック長野大会と 8 年後の 2006 年オリンピックトリノ大会の男子 5,000m 競技における上位 8 選手のサイクル（左右どちらかのブレード離氷から他方のブレード離氷までを 1 ストロークとし、連続して行われた左右ストローク）頻度（ストレートとカーブそれぞれを滑走するのに要したサイクル数を各測定区間の所要時間で除したもの）を比較した。その結果、カーブでは大会間に有意差がみられなかったが、

ストレートではトリノ大会の方が長野大会に比べてサイクル頻度が有意に小さかったことを報告している。また、横澤ら⁹⁾は、男子 5,000m 競技に関して、ストレートで大きく減速してカーブで挽回する選手よりも、ストレートにおける減速を抑えていた選手の方がラップタイムを維持し、記録が良かったことを明らかにしている。これらのことから、現在の長距離種目では、ストレート滑走が特に大きく記録に影響すると考えられる。

国際競技会における男子 5,000m レース中のストレート滑走におけるストロークパラメータ分析から、レース後半ではストローク開始から支持脚膝関節伸展角速度が 50 deg/s 以上となる時点までの時間が短縮することでストローク頻度が増大し、前方滑走距離が短くなることが報告されている¹³⁾。しかし、このような研究では、レース全体におけるストレートとカーブのスピード変化が捉えられていないため、例えばストレートの分析区間のスピードが大きかったとしても直前のカーブで大きく加速したことが影響している可能性もあり、分析区間のデータの解釈に限界がある。一方、近年では選手の滑走軌跡とスピードを精密に計測するシステム（Local Position Measurement System；以下、LPM システム）によって、レース全体にわたりストレートとカーブそれぞれの区間内におけるスピードの変化を測定できるようになってきた^{9),10)}。これらのデータを分析区間のストローク分析と併せて検討することによって、分析区間として切り取った 1 ストロークのパラメータの変化について、レース全体のスピード変化から要因を探ることができると考えられる。一方、スケーターは主にストローク頻度をコントロールすることによって異なる速度でのストレート滑走を行っていたという報告⁷⁾や、コースの特性上ストレートでは左ストロークから始まり右ストロークで終える必要がある、すなわちストレートを偶数歩で滑走しなければならないという制約があることを踏まえると、ストレート区間のストローク数がレースのペース配分に大きく影響すると考えられる。したがって、レース全体におけるスピー

ド変化とストレート区間を滑走するのに要したストローク数、分析区間のストロークパラメータを総合的に検討することによって、一流競技者の滑走パターンの合理性を説明できると考えられる。しかし、スピードスケートのレース全体のスピード変化とストローク数やストロークパラメータを関連付けて検討した研究はみられていない。

以上のことから、レース中のスピードの低下が大きい女子 3,000m 競技において、記録の良い選手がレース経過に伴ってどのように滑走スピードを変化させ、特にストレートにおいてどのようにストロークパラメータを変化もしくは維持させているのかに関して、レース展開を踏まえたうえで包括的に分析することが重要と考えられる。そこで本研究では、スピードスケート国際競技会における女子 3,000m レース中の滑走スピードとストローク数、ならびにストレート滑走におけるストロークパラメータについて、レース経過に伴う変化と競技成績との関係を明らかにすることを目的とした。

II. 方法

1. 分析対象

長野市オリンピック記念アリーナ（エムウェーブ）で開催された 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を通じて大会実行委員会へ申請し、データ収集の許可を得た。なお、本研究については「独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター倫理審査委員会」による承認が得られている。

女子 3,000m 競技出場者の記録上位 24 位以内の選手のうち、全項目について有効なデータが得られた 16 名を分析対象とした。なお、本研究では、各群の人数が同数になるよう記録上位 8 名を上位群（図表では Top）、下位 8 名を下位群（Second）に分類した。

2. データ収集

1) LPM システム

エムウェーブのコース全周の直上に設置された 28 台のモノクロカメラ（UI-5240CP-M-GL、iDS 社製）を用い、レース全体を通して同期撮影した（60 frames/s、露出時間 1/1000s ; Figure 1）。カメラパラメータは、予めコース上に設置された基準点のカメラ画像上における位置、ならびにカメラの絶対位置にもとづいて算出した。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

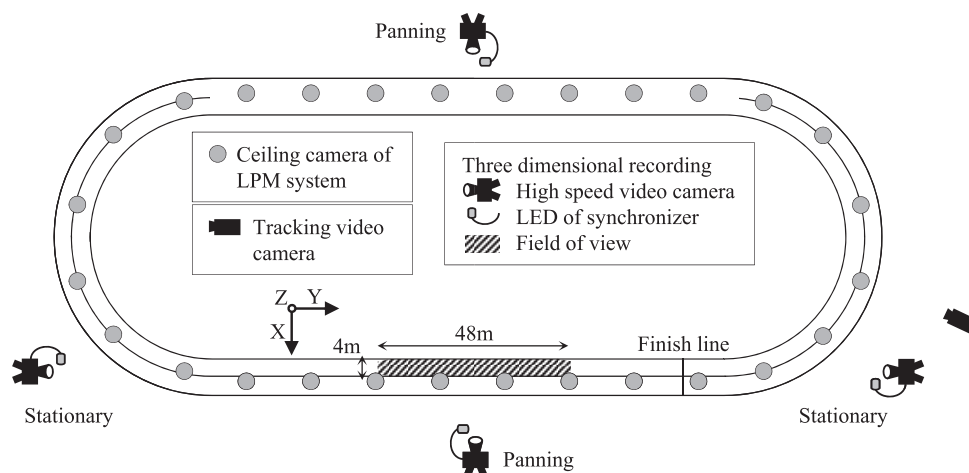


Figure 1. Set-up for the local position measurement (LPM) system, the tracking video camera to calculate the number of strokes, and three-dimensional recording.

る選手を自動識別し、頭頂部の水平面内の 2 次元座標値を同定した⁹⁾。

2) 追従撮影

各ストレートとカーブのストローク数を算出するために、観客席からビデオカメラ (HC-VZX992M-T、Panasonic 社製) を用いてレース全体を追従撮影した (60 frames/s、露出時間 1/350s ; Figure 1)。

3) 3 次元撮影

ホームストレート中央付近のインナーレーンに幅 4m、長さ 48m、高さ 1.25m の計測範囲を設定し、4 台の高速度ビデオカメラ (Phantom v1611、v310、v311、Vision Research 社製) により前方、後方 (固定) および側方 (パンニング) から通過中の選手を撮影した (300 frames/s、露出時間 1/1000s ; Figure 1)。ビデオカメラ間の同期はワイヤレス LED 型シンクロナイザ (PTS-168、DKH 社製) を用いて行った。アウターレーンスタートの場合はインナーレーンを通過する 2 周目 (550m 付近)、4 周目 (1,350m 付近)、6 周目 (2,150m 付近) を、インナーレーンスタートの場合は 3 周目 (950m 付近)、5 周目 (1,750m 付近)、7 周目 (2,550m 付近) をそれぞれレース序盤 (Initial)、レース中盤 (Middle)、レース終盤 (Final) と定義し、3 次元撮影区間とした。なお、滑走コースと平行な方向を Y 軸、水平面内で Y 軸と直交する方向を X 軸、鉛直方向を Z 軸とした。

3. 測定項目および算出方法

1) レースパラメータ

LPM によって得られた滑走軌跡の 2 次元座標値を数値微分し、その絶対値をスピードとした。また、先行研究に倣い、ストレートおよびカーブ滑走中のスピードの変化量を定量するため、まずストレートからカーブ、およびカーブからストレートの境目を通過する前後 1 秒の平均スピードを算出し、それぞれストレート出口スピード、カーブ出口スピードと定義した¹⁰⁾。続いて、ストレート出口スピードから直前のカーブ出口スピードを減じたものをストレートスピード変化量、同様に

カーブ出口スピードから直前のストレート出口スピードを減じたものをカーブスピード変化量とした。さらに、ストレートスピード変化量とカーブスピード変化量は、急激に加速する 1 周目を除いて平均し、それぞれストレート平均スピード変化量、カーブ平均スピード変化量と定義した⁹⁾。

また、追従撮影により得られた画像から、各ストレート区間にて行われたストレート滑走中のブレード離氷、および各カーブ区間にて行われたカーブ滑走中のブレード離氷の回数を、急激に加速する 1 周目を除いてカウントし、ストローク数とした。

これらレースパラメータは、各周回の第 1 カーブ (First curve)、バックストレート (Crossing straight)、第 2 カーブ (Second curve) およびホームストレート (Finishing straight) の区間ごとに収集した。

2) ストロークパラメータ

高速度ビデオカメラ撮影より得られたストレート滑走映像から、ビデオ動作解析システム (Frame-Dias IV、DKH 社製) により身体各部位 21 点およびブレード端点 4 点をデジタイズした。パンニング DLT 法⁴⁾により得られた分析点 25 点の 3 次元座標を、4 次の Butterworth low-pass digital filter により平滑化した⁸⁾。

本研究では、左右どちらかのブレード離氷から他方のブレード離氷までを 1 ストロークと定義し¹³⁾、計測範囲における連続する 2 ストローク (1 サイクル) について分析を行った。また、支持脚膝関節の伸展角速度が 50 deg/s 以上になった時点をプッシュオフ開始点と定義し^{12), 13), 14)}、その時点を基準にストロークをグライディング局面とプッシュオフ局面の 2 つに分け、各所要時間を算出した。さらに、阿江¹⁾の身体部分慣性係数を用いて身体重心の座標を求め、1 サイクル中に身体重心が Y 方向に移動した距離をそれに要した時間で除すことによって滑走速度を算出した。また、1 ストロークに要した時間の逆数を求め、これをストローク頻度とした。さらに、ストローク終了時の身体重心の Y 座標値からストローク開始時

のY座標値を減じたものをストローク距離とした。なお、ストローク頻度、グライディング時間、ブッシュオフ時間、およびストローク距離については左右で平均した。

4. 統計処理

レースパラメータとストロークパラメータに関して、競技水準（上位群と下位群）間の相違とレース経過に伴う変化を明らかにするために、繰り返しのある2要因分散分析を行った。レースパラメータに関しては、競技水準×区間（1回1回のストレートもしくはカーブ）の交互作用が有意だった場合、区間ごとに競技水準間の単純主効果を検定した。ストロークパラメータに関しては、競技水準×レース局面（レース序盤、レース中盤、レース終盤）の交互作用が有意だった場合、競技水準間およびレース局面間の単純主効果を検定した。交互作用が認められなかった場合は、各要因の主効果を検定した。多重比較には Bonferroni 法を用いた。

また、ストローク数増加前後（詳細は結果で述べる）のストレートスピード変化量を比較するために、競技水準×ストローク数増加前後の区間を要因とする繰り返しのある2要因分散分析を行った。交互作用が有意もしくは有意傾向だった場合は、単純主効果の検定を行い、交互作用が認められなかった場合は、各要因の主効果を検定した。

競技水準間における公式記録および平均スピード変化量の比較には、対応のないt検定を用いた。

公式記録と平均スピード変化量および滑走速度との関係、ならびに、ストレート滑走における各レース局面のストロークパラメータと同局面における滑走速度およびストレートスピード変化量との関係をみるために、Pearsonの積率相関係数を算出した。なお、2つ以上の説明変数を用いて目的変数を予測する方法として重回帰分析があるが、多重共線性が認められたため、適切な偏回帰係数が求められなくなる可能性を考慮して重回帰分析は用いなかった。

算出した各変数は、平均値±標準偏差で示した。

上記の統計処理は、統計解析ソフトウェア（IBM SPSS Statistics ver.24）を使用して行った。いずれも有意水準は5%未満とした。

5. 用語の定義

本研究では、LPMシステムより算出された速さ情報に「スピード」、3次元撮影より算出された速度情報に「滑走速度」という語句を用いた。また、考察中においては、これら速さおよび速度を広義で指す語句として「滑走スピード」を用いた。

Ⅲ. 結果

対象選手の公式記録は、上位群が4分5秒54±1秒13（4分3秒56—4分7秒25）、下位群が4分10秒01±1秒97（4分7秒30—4分13秒16）であった。上位群の公式記録は、下位群よりも有意に小さかった（ $p<0.001$ ）。

1. レースパラメータについて

Figure 2は、上位群および下位群におけるストレートとカーブの出口スピードの推移を示したものである。出口スピードは、両群ともにスタートから2周目第1カーブ（300m）まで上昇した後、徐々に低下する傾向であったが、その内訳をみるとストレート区間のたびに低下し、カーブ区間ではむしろ上昇していた。分析の結果、競技水準および区間の主効果は有意であり（競技水準： $F(1,14)=26.15$, $p<0.001$ 、区間： $F(29,406)=50.09$, $p<0.001$ ）、交互作用も有意であった（ $F(29,406)=1.59$, $p<0.05$ ）。区間ごとに競技水準間の単純主効果を検定した結果、3周目ホームストレート（1,000m）および4周目バックストレート（1,200m）、ならびに4周目ホームストレート（1,400m）から8周目バックストレート（2,800m）にかけて上位群の出口スピードが下位群よりも有意に大きかった（3周目ホームストレート、4周目バックストレート、5周目第1カーブ、6周目第2カーブ、7周目第1カーブ、7周目バックストレート、7周目第2カーブ、7周目ホームスト

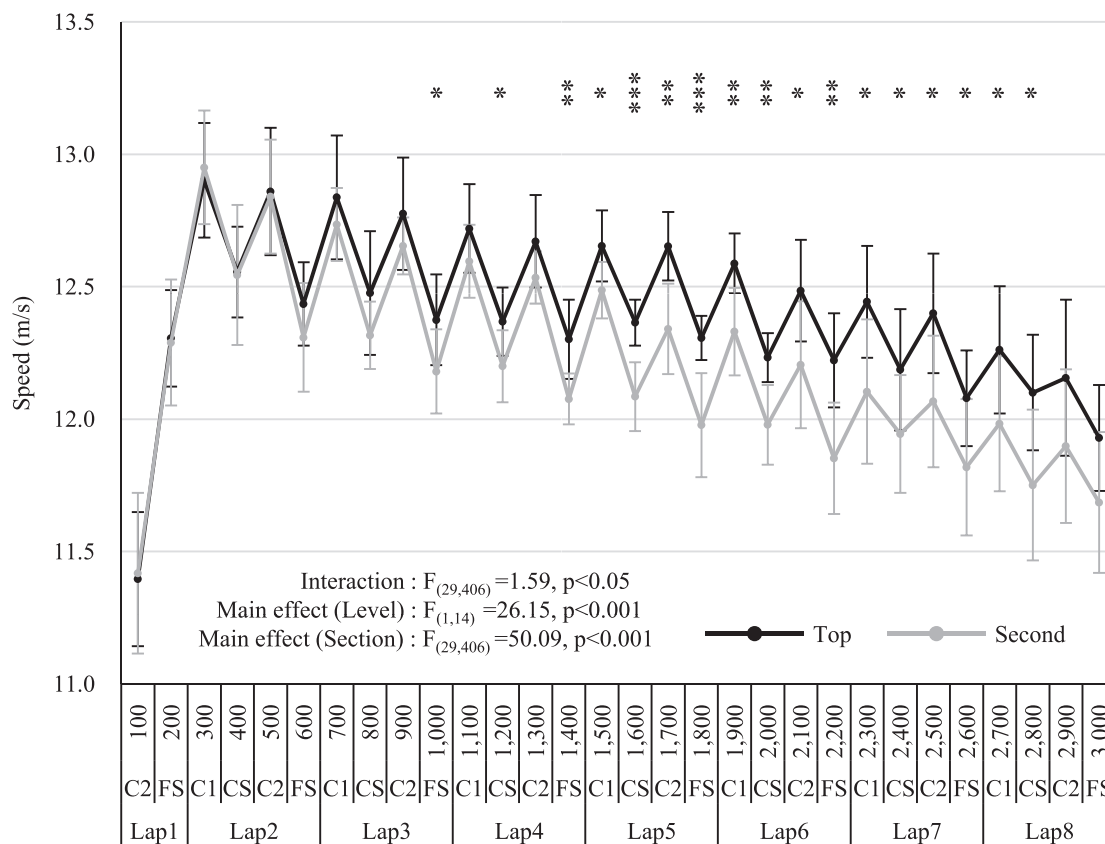


Figure 2. Horizontal speeds of the end of the straight and curved sections for the top and second groups. C1, CS, C2, and FS indicate the first curve, crossing straight, second curve, and finishing straight, respectively. Asterisks indicate significant differences between the top and second groups (*: $p<0.05$, **: $p<0.01$, ***: $p<0.001$).

レート、8周目第1カーブ、8周目バックストレート: $p<0.05$ 、4周目ホームストレート、5周目第2カーブ、6周目第1カーブ、6周目バックストレート、6周目ホームストレート: $p<0.01$ 、5周目バックストレート、5周目ホームストレート: $p<0.001$ 。

Table 1 は、ストレート平均スピード変化量とカーブ平均スピード変化量、ならびにそれらと公式記録との相関係数を示したものである。上位群、下位群ともに、ストレート平均スピード変化量は負の値、カーブ平均スピード変化量は正の値であった。両平均スピード変化量とも競技水準間に有意な差はみられず、公式記録との相関係数もみられなかった。

Figure 3 は、ストレートとカーブのストローク数の推移を示したものである。ストレートストローク数に関して、競技水準の有意な主効果は認められなかったが、区間に有意な主効果が認められ ($F(13,182)=32.96, p<0.001$)、両群とも2周目バックストレート (400m) に比べて、7周目バックストレート (2,400m) 以後のストローク数が有意に多かった ($p<0.001$)。有意な交互作用は認められなかった。一方、カーブストローク数については、競技水準に有意な主効果が認められ ($F(1,14)=4.87, p<0.05$)、周回に関わらず上位群は下位群に比べて有意に少なかった。一方、区間に有意な主効果は認められず、両群ともレース中における有意な変化はみられなかった。有意な交互

Table 1. Average values of the changes in speed during the straight and curved sections, and correlation coefficients to the official time. Data are expressed as means $\pm$ standard deviations (min – max).

(m/s)	Top (n=8)	Second (n=8)	Significant difference	Correlation coefficient to the official time
Straight	-0.32 $\pm$ 0.09	-0.36 $\pm$ 0.04	n.s.	-0.12
	(-0.54 – -0.26)	(-0.41 – -0.27)		
Curve	0.29 $\pm$ 0.09	0.31 $\pm$ 0.06	n.s.	-0.03
	(0.22 – 0.51)	(0.19 – 0.39)		

n.s. : no significant

作用は認められなかった。また、ストレート区間のストローク数が増加することによってストレートスピード変化量がどのように変化するかを評価するために、ストローク数が増加する直前のストレート区間（上位群のうち1名が1,000m地点、2名が2,000m地点、2名が2,200m地点、1名が2,400m地点、2名が2,600m地点、下位群のうち3名が1,800m地点、5名が2,200m地点）と増加した最初のストレート区間（上位群のうち1名が1,200m地点、2名が2,200m地点、2名が2,400m地点、1名が2,600m地点、2名が2,800m地点、下位群のうち3名が2,000m地点、5名が2,400m地点）のストレートスピード変化量を比較した（Table 2）。その結果、競技水準の有意な主効果は認められなかったが、ストローク数増加前後に有意な主効果が認められた（ $F(1,14) = 34.06$, $p < 0.001$ ）。すなわち、両群ともストローク数が増加した最初のストレート区間では、増加直前に比べてストレート区間内のスピードの低下が有意に小さかった。有意な交互作用は認められなかった。

2. ストロークパラメータについて

Table 3 は、レース序盤、レース中盤、およびレース終盤におけるストレートの滑走速度と公式記録との相関係数を示したものである。いずれのレース局面においても、滑走速度と公式記録との間に有意な負の相関がみられた（レース序盤： $r = -$

0.58, $p < 0.05$ 、レース中盤： $r = -0.82$, $p < 0.001$ 、レース終盤： $r = -0.82$, $p < 0.001$ ）。

Table 4 は、レース序盤、レース中盤、およびレース終盤におけるストレート滑走のストロークパラメータの結果を示したものである。滑走速度に関して、競技水準およびレース局面の主効果は有意であり（競技水準： $F(1,14) = 17.32$, $p < 0.001$ 、レース局面： $F(2,28) = 24.71$, $p < 0.001$ ）、有意な交互作用は認められなかった。上位群の滑走速度は、いずれのレース局面においても下位群よりも有意に大きかった（ $p < 0.001$ ）。また、両群ともレース序盤からレース中盤、ならびにレース中盤からレース終盤で滑走速度が有意に減少した（それぞれ $p < 0.01$, $p < 0.001$ ）。ストローク頻度に関しては、競技水準の有意な主効果は認められなかったが、レース局面には有意な主効果が認められ（ $F(2,28) = 37.48$, $p < 0.001$ ）、両群ともレース序盤からレース中盤、ならびにレース中盤からレース終盤でストローク頻度が有意に増加した（それぞれ $p < 0.01$, $p < 0.001$ ）。グライディング時間に関して、競技水準の有意な主効果は認められなかったが、レース局面には有意な主効果が認められ（ $F(2,28) = 31.77$, $p < 0.001$ ）、両群ともレース序盤からレース中盤、ならびにレース中盤からレース終盤でグライディング時間が有意に短かった（それぞれ $p < 0.05$, $p < 0.001$ ）。有意な交互作用は認められなかった。プッシュオフ時間に関しては、競技

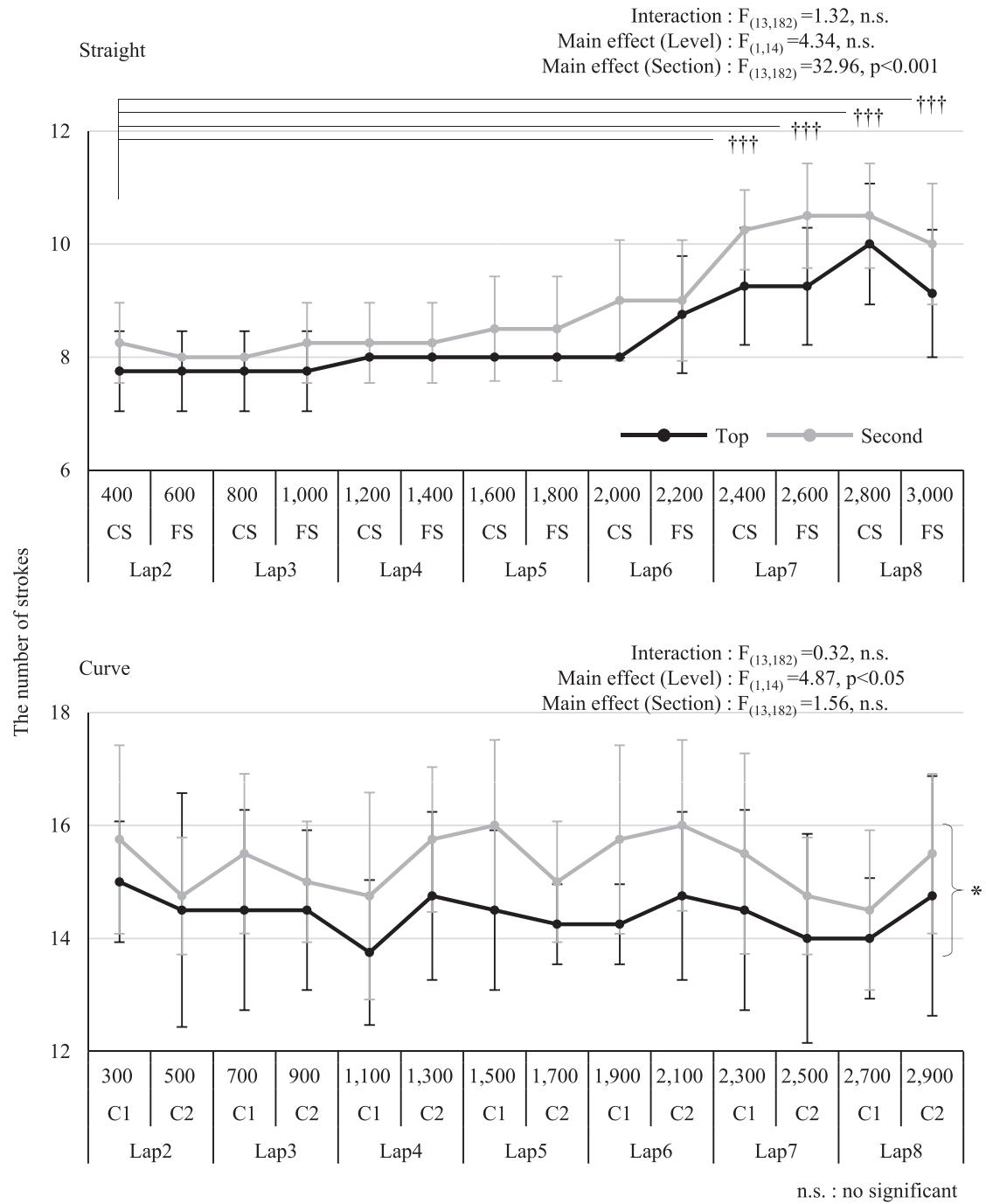


Figure 3. Number of strokes in the straight and curved sections. C1, C2, CS, and FS indicate the first curve, second curve, crossing straight, and finishing straight, respectively. Asterisks indicate significant differences between the top and second groups in every sections (*: $p<0.05$). Daggers indicate significant differences from CS of Lap2 (†††: $p<0.001$).

Table 2. Changes in speed during the straight section just before the number of strokes increased and the first straight section in which the number of strokes increased. Data are expressed as means $\pm$ standard deviations (min – max).

(m/s)	The straight section just before the number of strokes increased (A)	The first straight section in which the number of strokes increased (B)	Interaction	Main effect	
				Level	A–B
Top (n=8)	-0.39 $\pm$ 0.17 (-0.64 – -0.17)	-0.19 $\pm$ 0.14 (-0.51 – -0.06)	$F_{(1,14)}=0.05$ n.s.	$F_{(1,14)}=0.27$ n.s.	$F_{(1,14)}=34.06$ ***
Second (n=8)	-0.41 $\pm$ 0.05 (-0.49 – -0.35)	-0.22 $\pm$ 0.14 (-0.42 – -0.04)			

*** : $p<0.001$, n.s. : no significant

Table 3. Correlation coefficients between the official time and skating velocity in the straight section in the initial, middle, and final phases of the race.

n=16	v.s. Skating velocity		
	Initial	Middle	Final
Official time	-0.58 *	-0.82 ***	-0.82 ***

*** : $p<0.001$, * : $p<0.05$

水準の主効果、レース局面の主効果、交互作用いずれも有意ではなかった。ストローク距離に関しては、競技水準およびレース局面の主効果は有意であり（競技水準： $F(1,14)=5.78$, $p<0.05$ 、レース局面： $F(2,28)=71.11$, $p<0.001$ ）、有意な交互作用は認められなかった。上位群のストローク距離は、いずれのレース局面においても下位群よりも有意に大きかった（ $p<0.05$ ）。また、両群ともレース序盤からレース中盤、ならびにレース中盤からレース終盤でストローク距離が有意に減少した（ $p<0.001$ ）。

Table 5 は、ストレート滑走における各レース局面のストロークパラメータと、同局面における滑走速度およびストレートスピード変化量との相関係数を示したものである。レース序盤およびレース終盤では、いずれのストロークパラメータも滑走速度との間に有意な関係はみられなかつ

た。レース中盤では、ストローク頻度と滑走速度との間に有意な負の相関（ $r=-0.53$, $p<0.05$ ）、グライディング時間およびストローク距離と滑走速度との間に有意な正の相関がみられた（それぞれ $r=0.62$, $p<0.01$, $r=0.71$, $p<0.01$ ）。

また、レース序盤およびレース中盤では、いずれのストロークパラメータもストレートスピード変化量との間に有意な関係はみられなかった。レース終盤では、ストローク頻度とストレートスピード変化量との間に有意な正の相関（ $r=0.67$, $p<0.01$ ）、グライディング時間およびストローク距離とストレートスピード変化量との間に有意な負の相関（それぞれ $r=-0.60$, $p<0.05$, $r=-0.64$, $p<0.01$ ）がみられた。

IV. 考察

本研究の目的は、女子 3,000m レース中の滑走

スピードスケート女子 3,000m の滑走スピードとストレートストローク変数

Table 4. Results of stroke parameters in the straight section in the initial, middle, and final phases of the race for the top and second groups. Data are expressed as means $\pm$ standard deviations (min – max).

	Group	Phase			Interaction	Main effect		Significant difference	
		Initial	Middle	Final		Level	Phase	Level	Phase
Skating velocity (m/s)	Top (n=8)	12.52 $\pm$ 0.15 (12.31 – 12.82)	12.44 $\pm$ 0.13 (12.30 – 12.67)	12.27 $\pm$ 0.18 (11.88 – 12.48)	$F_{(2,28)}=3.12$ n.s.	$F_{(1,14)}=17.32$ ***	$F_{(2,28)}=24.71$ ***	Top >>> Second	Initial >> Middle >>> Final
	Second (n=8)	12.40 $\pm$ 0.20 (12.08 – 12.61)	12.14 $\pm$ 0.17 (11.97 – 12.39)	11.88 $\pm$ 0.24 (11.57 – 12.22)					
Stroke frequency (stroke/s)	Top (n=8)	0.92 $\pm$ 0.04 (0.83 – 0.96)	0.96 $\pm$ 0.04 (0.88 – 1.02)	1.06 $\pm$ 0.11 (0.92 – 1.22)	$F_{(2,28)}=0.12$ n.s.	$F_{(1,14)}=2.91$ n.s.	$F_{(2,28)}=37.48$ ***	n.s.	Initial << Middle <<< Final
	Second (n=8)	0.97 $\pm$ 0.08 (0.90 – 1.16)	1.01 $\pm$ 0.06 (0.95 – 1.14)	1.12 $\pm$ 0.09 (1.03 – 1.27)					
Gliding time (s)	Top (n=8)	0.89 $\pm$ 0.07 (0.84 – 1.04)	0.85 $\pm$ 0.06 (0.76 – 0.93)	0.76 $\pm$ 0.11 (0.59 – 0.91)	$F_{(2,28)}=0.03$ n.s.	$F_{(1,14)}=3.90$ n.s.	$F_{(2,28)}=31.77$ ***	n.s.	Initial > Middle >>> Final
	Second (n=8)	0.83 $\pm$ 0.08 (0.69 – 0.91)	0.78 $\pm$ 0.05 (0.68 – 0.84)	0.70 $\pm$ 0.06 (0.62 – 0.77)					
Push-off time (s)	Top (n=8)	0.21 $\pm$ 0.03 (0.17 – 0.27)	0.21 $\pm$ 0.02 (0.18 – 0.23)	0.20 $\pm$ 0.21 (0.17 – 0.24)	$F_{(2,28)}=0.04$ n.s.	$F_{(1,14)}=1.04$ n.s.	$F_{(2,28)}=0.64$ n.s.	n.s.	n.s.
	Second (n=8)	0.22 $\pm$ 0.03 (0.18 – 0.27)	0.22 $\pm$ 0.02 (0.20 – 0.27)	0.21 $\pm$ 0.03 (0.18 – 0.26)					
Stroke length (m)	Top (n=8)	13.47 $\pm$ 0.63 (12.98 – 14.89)	12.91 $\pm$ 0.65 (12.68 – 13.97)	11.57 $\pm$ 1.17 (10.11 – 13.39)	$F_{(2,28)}=0.50$ n.s.	$F_{(1,14)}=5.78$ *	$F_{(2,28)}=71.11$ ***	Top > Second	Initial >>> Middle >>> Final
	Second (n=8)	12.78 $\pm$ 0.95 (10.69 – 13.74)	11.93 $\pm$ 0.71 (10.48 – 12.68)	10.55 $\pm$ 0.85 (9.03 – 11.56)					

***, <<<: $p < 0.001$, <<: $p < 0.01$, *, <: $p < 0.05$, n.s.: no significant

スピードとストローク数、ならびにストレート滑走におけるストロークパラメータについて、レース経過に伴う変化と競技成績との関係を明らかにすることであった。その結果、競技水準間のスピードの差は4周目から生じ始め、ストレートにおける滑走速度はレース中盤および終盤において公式記録との間に強い負の相関がみられた。また、上位群、下位群ともにレース経過に伴いストレート

滑走中のストローク頻度が増加し、グライディング時間が短縮し、滑走速度およびストローク距離が減少した。さらに、ストレート滑走中の滑走速度およびストローク距離は、いずれのレース局面においても上位群のほうが下位群よりも有意に大きかったという結果が得られた。これらの結果を踏まえて、以下では女子 3,000m 競技における滑走スピード変化の特徴と、競技成績との関連がよ

Table 5. Correlation coefficients between the stroke parameters in the straight section and skating velocity and between the stroke parameters in the straight section and changes in speed during the straight sections in the initial, middle, and final phases of the race.

n=16	v.s. Skating velocity			v.s. Change in speed during straight		
	Initial	Middle	Final	Initial	Middle	Final
Skating velocity				-0.03	0.16	-0.12
Stroke frequency	0.16	-0.53 *	-0.27	0.44	0.37	0.67 **
Gliding time	0.06	0.62 **	0.31	-0.39	-0.30	-0.60 *
Push-off time	-0.44	-0.46	-0.20	-0.06	-0.08	0.02
Stroke length	0.07	0.71 **	0.49	-0.48	-0.27	-0.64 **

** : p<0.01, * : p<0.05

り強いと考えられるレース中盤および終盤のストレート滑走について考察する。

1. 女子 3,000m 競技における滑走スピード変化の特徴

男子 5,000m 競技に関する報告⁹⁾と同様、競技水準に関わらずストレート区間でスピードが低下し、カーブ区間でスピードが上昇していた (Figure 2)。一方、ストレート平均スピード変化量およびカーブ平均スピード変化量と公式記録の間に有意な相関関係はみられず、上位群と下位群との間にも有意差はみられなかった (Table 1)。このことは、ストレート区間内のスピード低下量やカーブ区間内のスピード増加量は記録とほぼ関係がないことを示すものであり、男子 5,000m 競技に関してストレートの減速が小さかった選手ほど記録が良かったという報告⁹⁾とは異なっていた。ストレート区間のスピード変化量と記録との間に有意な関係性がみられなかった理由としては、上位選手の中に、ストレート区間で意図的に体力を温存させていた選手や、ストレートの滑走技術に課題がある選手が含まれていた可能性が挙げられるが、今後動作解析や力学的指標および生理学的指標等を用いた実験による知見を集約することによって原因を追究できると考えられる。一方、男

子 1,500m 競技に関しては⁹⁾、ストレートおよびカーブの平均スピード変化量と公式記録の間には有意な相関がなく、2 周目以降徐々にスピードが低下していたと報告されており、これらの点で本研究の女子 3,000m 競技と共通していた。したがって、女子 3,000m 競技の滑走スピードのパターンはむしろ中距離種目に近いと考えられる。

2. レース中盤のストレート滑走について

ストレートおよびカーブの出口スピードについては、3 周目まで上位群と下位群との有意差がなく、4 周目から競技水準間の差が生じ始めた (Figure 2)。また、ストレートの 3 次元撮影区間における滑走速度についても、レース中盤および終盤において公式記録との間に強い負の相関がみられた (Table 3)。これらのことから、女子 3,000m 競技において国際的なトップ水準に達するためには、レース中盤以降における滑走スピードの低下を抑えることが特に重要であると考えられる。一方、滑走速度およびストローク距離は、いずれのレース局面においても上位群のほうが下位群よりも有意に大きかったことから (Table 4)、レース序盤から競技水準間で滑走技術などに何らかの相違があり、そのことが滑走速度および公式記録に影響したと考えられる。しかし、本研究では、競

技成績との関連がより強かったレース中盤以降に着目して考察を進めることとする。

レース中盤におけるストローク頻度は、滑走速度との間に有意な負の相関関係がみられた (Table 5)。すなわち、レース中盤においてはストローク頻度が小さかった選手ほど滑走速度が大きかったと言える。滑走速度は、ストローク頻度とストロークごとの仕事の積で算出される出力パワーに依存すると考えられているが⁶⁾、本研究の結果からは、レース中盤においてストローク頻度を増加させることは滑走速度の持続につながらなかったと言える。一方、レース中盤におけるグライディング時間およびストローク距離は、滑走速度との間に有意な正の相関関係がみられた (Table 5)。すなわち、レース中盤においてはグライディング時間が長くストローク距離が大きかった選手ほど滑走速度が大きかったと言える。湯田ら¹³⁾は、男子 5,000m 競技においてみられたレース序盤に対するレース終盤 (レース中盤については分析していない) のグライディング時間短縮について、1つ前のストロークにおけるプッシュオフ中の水平ブレード反力が低下することによって、下腿および身体の外傾が小さい姿勢で着氷してしまうことが要因であると推察している。したがって、本研究におけるレース中盤のストレート滑走では、効果的なプッシュオフができなくなった者ほど結果的に次のグライディング局面が短くなり、大きなストローク距離が得られなくなった可能性がある。今後、レース中盤におけるプッシュオフ動作や水平ブレード反力などを分析することによって、このストローク距離減少の要因を特定できると考えられる。

3. レース終盤のストレート滑走について

ストレート滑走速度は、レース終盤においても上位群の方が下位群に比べて有意に大きかった (Table 4)。また、レース終盤のストローク距離に関して、滑走速度との間の相関関係は有意ではなかったが ($r=0.49$, $p=0.053$; Table 5)、上位群の方が下位群に比べて有意に大きかった (Table 4)。

これらのことから、競技水準が高い選手ほど大きなストローク距離と滑走速度を維持しているという特徴は、レース終盤まで継続していたことが明らかになった。

一方、ストレートストローク数をみると、競技水準に関わらず2周目バックストレート (400m) に比べ、7周目バックストレート (2,400m) 以後でストローク数が増加していた (Figure 3)。また、レース終盤のストローク頻度は、レース序盤および中盤よりも大きかった (Table 4)。スケーターは主にストローク頻度をコントロールすることによって異なる速度でのストレート滑走を行っていたという報告⁷⁾を踏まえると、競技水準に関わらず、効果的なプッシュオフが困難となったレース終盤においてストローク頻度を増加させることで滑走スピードの持続を試みていたと考えられる。ストローク頻度の逆数、すなわち1ストロークの所要時間をグライディング時間とプッシュオフ時間に分けると、プッシュオフ時間はレース局面間および競技水準間における有意差がなかったのに対し、グライディング時間は、上位群、下位群ともにレース経過に伴い短くなっていた (Table 4)。したがって、ストローク頻度の増加とグライディング時間の短縮は連動して引き起こされていた現象であると考えられる。

競技水準に関わらず、ストローク数が増加した最初のストレート区間では、その直前のストレート区間に比べて区間内のスピード低下量が有意に小さかった (Table 2)。また、レース終盤におけるストレートスピード変化量は、ストローク頻度との間に有意な正の相関関係、ストローク距離との間に有意な負の相関関係がみられた (Table 5)。すなわち、レース終盤においてはストローク頻度が大きくストローク距離が小さかった選手ほどストレート区間内のスピード低下が小さかったと言える。これらの結果は、有効なプッシュオフ動作が困難となったレース終盤では、ストレートのストローク数およびストローク頻度の増加が、ストレート区間内におけるスピード低下を抑えることにつながることを示していると考えられる。この

結果は上位群、下位群ともにみられた変化であることを踏まえると、記録に直接影響を及ぼす要因であるとは言えないが、レース終盤においてストレート区間のスピード低下を抑えるためには重要な対応であろう。また、レース終盤におけるグライディング時間は、ストレートスピード変化量との間に有意な負の相関関係がみられた (Table 5)。すなわち、レース終盤においてはグライディング時間が短かった選手ほどストレート区間のスピード低下が小さかったと言える。グライディング局面では加速に貢献する方向へのブレード反力が小さいことを考慮すると^{5), 16), 17)}、レース終盤にみられたグライディング時間の短縮は、疲労した状況において推進力が得づらい局面を短縮する効果があると考えられる。これらの知見は、LPM システムで得られた情報より算出された区間のスピード変化量とストロークパラメータを併せて評価したことによって得られた知見であり、スピードスケートにおいてこのような視点でパフォーマンスを評価することの重要性が本研究によって示された。

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女子 3,000m レース中の滑走スピードとストローク数、ならびにストレート滑走におけるストロークパラメータについて、レース経過に伴う変化と競技成績との関係を明らかにすることであった。本研究で得られた結果をまとめると、以下ようになる。

①上位群、下位群ともにストレート区間でスピードが低下し、カーブ区間でスピードが上昇していた。また、ストレートおよびカーブの出口スピードは、4 周目ホームストレートから最終周バックストレートにかけて上位群のほうが下位群よりも有意に大きかった。

②上位群、下位群ともに、2 周目に比べて 7 周目以降のストレートストローク数が有意に大きかった。また、ストローク数がそれまでのストレート区間よりも増加した最初のストレート区間

では、ストローク数増加直前に比べてストレート区間内のスピード低下量が有意に小さかった。

③ストレートにおける滑走速度は、上位群、下位群ともにレース経過に伴って減少し、いずれのレース局面においても上位群のほうが下位群よりも有意に大きかった。また、レース中盤および終盤においてストレートにおける滑走速度と公式記録との間に強い負の相関がみられた (それぞれ $r=-0.82$, $p<0.001$, $r=-0.82$, $p<0.001$)。

④上位群、下位群ともにレース経過に伴いストレート滑走中のストローク頻度が増加し、グライディング時間が短縮した。一方、ストレート滑走中のストローク距離は、上位群、下位群ともにレース経過に伴って減少し、いずれのレース局面においても上位群のほうが下位群よりも有意に大きかった。

⑤レース中盤におけるストレート滑走中の滑走速度は、ストローク頻度との間に有意な負の相関が ($r=-0.53$, $p<0.05$)、グライディング時間、ストローク距離との間に有意な正の相関がみられた (それぞれ $r=0.62$, $p<0.01$, $r=0.71$, $p<0.01$)。

⑥レース終盤のストレート区間内におけるスピード変化量は、同区間のストローク頻度との間に有意な正の相関が ($r=0.67$, $p<0.01$)、グライディング時間およびストローク距離との間に有意な負の相関がみられた (それぞれ $r=-0.60$, $p<0.05$, $r=-0.64$, $p<0.01$)。

以上のことから、女子 3,000m レースでは、ストレートでのスピード低下とカーブでのスピード上昇を繰り返しながら、レース全体では徐々に滑走スピードが低下するという中距離種目のようなレースパターンを示すことが明らかになった。また、競技水準間において滑走スピードの差が生じ始めるのは 4 周目からであり、レース中盤および終盤における滑走スピードが大きい選手ほど公式記録が優れていた。レース中盤のストレート滑走では、効果的なプッシュオフができなくなった者ほど結果的に次のグライディング局面が短くなり、大きなストローク距離が得られなくなった可能性がある。一方、レース終盤においては、グラ

イディング時間が短く、ストローク頻度の大きなストレート滑走を行うことが、ストレート区間内におけるスピード低下を抑えるために重要であることが示唆された。

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国立スポーツ科学センターの多くの関係者の協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表します。

文献

- 1) 阿江通良. 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 15(3): 155-162, 1996.
- 2) de Boer RW, Ettema GJC, van Gorkum H, de Groot G, van Ingen Schenau GJ. Biomechanical aspects of push-off techniques in speed skating the curves. *Int J Sport Biomech*, 3: 69-79, 1987.
- 3) International Skating Union. ISU Speed Skating Results.
<https://live.isuresults.eu/events> (2020 年 2 月 2 日)
- 4) 高松潤二, 阿江通良, 藤井範久. 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, 1997.
- 5) van der Kruk E, den Braver O, Schwab AL, van der Helm FCT, Veeger HEJ. Wireless instrumented klapskates for long-track speed skating. *J Sports Eng*, 19(4): 273-281, 2016.
- 6) van Ingen Schenau GJ, Bakker K. A biomechanical model of speed skating. *J Hum Mov Studies*, 6: 1-18, 1980.
- 7) van Ingen Schenau GJ, de Groot G, de Boer RW. The control of speed in elite female speed skaters. *J Biomech*, 18(2): 91-96, 1985.
- 8) Winter DA. Kinematics. In: Winter DA (Ed.) *Biomechanics and motor control of human movement*. 3rd edition, John Wiley and Sons, pp.13-58, 2005.
- 9) 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距離と速度の分析. *Sports Science in Elite Athlete Support*, 3: 27-38, 2018.
- 10) 横澤俊治, 加藤恭章, 紅楳英信, 齊川史徳, 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.
- 11) 湯田淳. スポーツパフォーマンスを解き明かす ふたたび 12 スピードスケート. *体育の科学*, 56(11): 907-912, 2006.
- 12) 湯田淳, 結城匡啓, 阿江通良. 日本ジュニア長距離スピードスケート選手のカーブ滑走動作に関するバイオメカニクス的研究—世界一流選手との比較から—. *スポーツ方法学研究*, 16(1): 1-11, 2003.
- 13) 湯田淳, 結城匡啓, 青柳徹, 阿江通良. 世界一流男子長距離スピードスケート選手の疲労に伴うストレート滑走動作の変化. *スポーツ方法学研究*, 22(2): 63-74, 2009.
- 14) Yuda J, Yuki M, Aoyanagi T, Fujii N, Ae M. Kinematic analysis of the technique for elite male long-distance speed skaters in curving. *J Appl Biomech*, 23(2): 128-138, 2007.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 結城匡啓, 阿江通良, 藤井範久. スピードスケートの直線ストロークにおける加速の力学的メカニズム. 身体運動のバイオメカニクス—第 13 回日本バイオメカニクス学会大会論文集—, 211-217, 1997.