

## インラインスピードスケート競技のカーブ滑走動作における 腕振り動作と下肢のキネマティクスの関係性

岡部文武<sup>1)</sup>, 浅野佑樹<sup>2)</sup>, 高尾千穂<sup>2)</sup>, 藤田善也<sup>1)</sup>, 土屋純<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 早稲田大学スポーツ科学学術院

<sup>2)</sup> 早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

キーワード: 世界ローラースピードスケート選手権大会, 滑走速度, 動作頻度,  
腕振り動作, プッシュオフ動作.

### 【抄 録】

本研究の目的は, インラインスピードスケート競技のカーブ滑走動作における腕振動作と下肢のキネマティクスの関係性を明らかにすることであった. 分析対象者は, 2016 年世界ローラースピードスケート選手権大会に出場した男性競技者 20 名とした. 分析対象者の 3 次元座標値は 3 次元 DLT 法を用いて算出した後, 身体重心速度ベクトルを Y'軸とする右手系の移動座標系を構築した. 分析項目は, 競技記録, 滑走速度, 動作頻度, 曲走路外側への移動距離, 移動座標系の矢状面(Y'Z'平面)上の大腿部と下腿部の動作範囲, 移動座標系の前額面(X'Z'平面)上の身体と下腿部の動作範囲, 移動座標系の水平面(X'Y'平面)上の体幹部の動作範囲とした. 本研究にて得られた知見は以下の通りである.

- 1) 競技記録と左ストロークの動作頻度( $3.29 \pm 0.43 \text{ Hz}$ ), 右ストロークの滑走速度( $9.83 \pm 0.40 \text{ m/s}$ )の間に中程度の有意な負の相関関係が認められた( $p < 0.05$ ).
- 2) 左ストロークにて, 動作頻度と X'Z'平面上の下腿部の動作範囲( $10.0 \pm 5.9 \text{ deg.}$ )の間に中程度の有意な負の相関関係が認められた( $p < 0.05$ ). また, X'Z'平面上の下腿部と Y'Z'平面上の右肩関節( $151.0 \pm 52.0 \text{ deg.}$ )の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた( $p < 0.05$ ).
- 3) 右ストロークにて, 滑走速度と Y'Z'平面上大腿部の動作範囲( $50.4 \pm 11.5 \text{ deg.}$ )に中程度の有意な正の相関関係がみられた( $p < 0.05$ ). また, Y'Z'平面上の大腿部と X'Y'平面上の体幹部( $13.4 \pm 3.2 \text{ deg.}$ )の動作範囲の間に中程度の有意な負の相関関係がみられた( $p < 0.05$ ).

以上のことから, 競技記録を短縮するうえで, 左ストロークを高い動作頻度, 右ストロークを高い滑走速度で滑走することが有効と考えられる. 左ストロークでは下腿部の内傾動作を抑制することが, 高い動作頻度の獲得に影響しうることが示唆された. また, 左ストロークにて下腿部の内傾動作を抑制した競技者は, 右肩関節の伸展範囲が小さな腕振り動作を実施していることが示唆された. 一方, 右ストロークでは, 膝関節を回転中心とする大腿部の前方回転を抑制することが, 高い滑走速度の獲得に影響しうることが示唆された. その際には, 自転車のハンドル操作のように体幹部を曲走路内側に向けることが, 膝関節を回転中心とする大腿部の前方回転の抑制に影響知ることが示唆された.

スポーツ科学研究, 19, 8-20, 2022 年, 受付日:2021 年 2 月 3 日, 受理日:2022 年 2 月 19 日

連絡先: 岡部文武 早稲田大学 スポーツ科学学術院 359-1192 所沢市三ヶ島 2-579-15

f.okabe@aoni.waseda.jp

## I 緒言

インラインスピードスケート競技 300m タイムトライアル種目(以下,「300mTT」と略す)では,曲走路にて高い移動速度を維持する必要があることから(岡部ほか, 2019b),カーブ滑走動作の重要性が示されている.同競技のカーブ滑走動作では,下腿部をより前傾させることで支持脚側足部が離地するまでの所要時間を短縮し,身体重心の曲走路内側への移動頻度を高め,曲走路外側への移動を抑制することが高い移動速度を維持するために必要とされている(Okabe et al., 2019).また,外見上の滑走動作が類似するスピードスケート競技のカーブ滑走動作では,足関節を回転中心とする下腿部の前傾と膝関節を回転中心とする大腿部の滑走方向への回転(以下,「前方回転」と略す)を大きくすることに加え(Yuda and Ae, 2002; Yuda et al., 2007),身体を曲走路内側に大きく傾斜(以下,「内傾」と略す)させながら滑走する必要があることが報告されている(Yuda et al., 2004).さらに,スピードスケート競技のカーブ滑走動作における遊脚のキネティクスを検討した研究では,遊脚側股関節,膝関節,足関節の順番に仕事量が大きくなるように移動させることが,高い移動速度の獲得に資するとされている(湯田ほか, 2006).これらのように,スピードスケート競技では下肢の動態と高い滑走速度の関係に着目した研究がなされている.

高い移動速度を獲得するための下肢の動態が着目される一方で,歩行や疾走動作では腕振り動作が高い移動速度の獲得に貢献していることが報告されている(笠井, 1982).腕振り動作と下肢筋群の関係を検討した研究では,肩関節の外転が小さな「脇を閉めた」腕振り動作において,下肢筋群の筋活動がより活性化したことが報告されている(笠井, 1982).また,上肢と下肢の筋活動の関係について,上肢の筋放電によって,上肢と同側方向の下肢筋群の活動を抑制,対角線方向の下肢筋群の活動を促進させる相互干渉作用があることが報告されている(笠井, 1984).

陸上競技の直走路における腕振り動作について, Mann and Herman(1985)は, 1984 年夏季オリンピック競技大会陸上競技 200m 種目に出場し

た競技者の肩および肘関節の動態に着目し,競技成績の優れた競技者は肩関節の屈曲伸展の動作範囲が大きく,屈曲伸展角速度が高いことを報告している.また,高い移動速度を獲得した競技者は,上肢を後方に振り上げる際には肘関節を伸展させることで,腕振り動作の方向を素早く転換させていることが報告されている(木越, 2015).腕振り動作が疾走動作に及ぼす影響を検討した研究では,腕振り動作を制限することで股関節の屈曲や内転が小さくなることや(Julien et al., 2009; Ross et al., 2009),遊脚側の股関節や膝関節の屈曲伸展角速度が低下することで,動作頻度が低下(平野ほか, 2018)し,移動速度が低下する(Grant et al., 2003; 笠井, 1982; Ropret et al., 1998)ことが報告されている.さらに,腕振り動作を制限することで体幹部をより捻転させるような疾走動作になることが報告されている(辻本ほか, 2009)が,体幹部を過度に捻転させることは移動速度を低下させる要因であることも指摘されている(小木曾, 2001).これらのことから,腕振り動作の有無やその動態が下肢の動態に影響することで,獲得できる移動速度が変化すると考えられる.

一方,曲走路における疾走動作の腕振り動作と移動速度の関係性を検討した研究は見当たらない.疾走動作では,直走路と曲走路において前後方向への腕振り動作が実施される.佐藤・矢内(2015)は,曲走路における方位変化のメカニズムを解明する際に,直走路と曲走路において腕振り動作が獲得した鉛直軸回りの角運動量を検討し,両走路における腕振り動作の角運動量の変化様態が類似することを報告している.また,佐藤・矢内(2015)が検討した腕振り動作の角運動量は, Hinrichs et al.(1987)や Hinrichs(1987)が検討した腕振り動作の角運動量の変化様態と類似することが示されている. Hinrichs et al.(1987)と Hinrichs(1987)は,直線走疾走動作の腕振り動作を検討し,移動速度が変化すると腕振り動作の角運動量が変化すること,両上肢の鉛直方向への加速は,地面反力の鉛直成分の増大に貢献することを報告している.移動運動では外界に発揮した力により獲得された地面反

力を推進力とすることに加え、疾走動作では、最大疾走局面における地面反力の鉛直成分の増大が高い移動速度を獲得するうえで重要である(豊嶋・桜井, 2019)ことや、直線曲線といった走路の形状に関わらず腕振り動作の役割は類似することを踏まえると、高い移動速度の獲得に資する腕振り動作と下肢の動態の関係性を把握することが競技成績を向上させるうえで重要といえよう。

インラインスピードスケート競技の指導現場では「腕を大きく振る」ことが強調されるものの、どのような腕振り動作を実施すれば良いのかは、指導者により見解が異なるのが現状である。さらに同競技では、優れた競技成績の獲得に資する曲走路「岡部ほか, 2019」にて、どのような腕振り動作を実施すれば高い移動速度を獲得できるかが明らかにされていない。そのため、同競技にて優れた競技成績を獲得するためには、カーブ滑走動作における下肢の動態と腕振り動作、移動速度との関係を明確にすることが有効といえよう。

そこで本研究の目的は、インラインスピードスケート競技における腕振り動作と下肢のキネマティクスの関係を明らかにすることを目的とした。

## II 方法

### 1. 分析対象者

本研究では、2016 World Roller Speed Skating Championships(以下、「世界選手権大会」と略す)300mTTに出場した競技者 52 名のうち、研究参加に同意した競技者 20 名を分析対象者(記録,  $24.98 \pm 0.86$ s; 平均順位,  $15.6 \pm 12.5$  位; 年齢,  $24.6 \pm 3.3$  歳; 身長,  $1.80 \pm 0.10$ m; 体重,  $73.8 \pm 5.6$ kg; 平均値 $\pm$ 標準偏差)とした。インライ

ンスピードスケート競技では、一足のインラインスケートに最大 5 個のタイヤを装着することができるが、タイヤの最大直径は 110mm であり、装着した複数のタイヤの先端から後端までの長さが 50cm 以下と定められている。分析対象者は、直径 110mm、質量 150–170g のタイヤが 4 個並んだインラインスケートを装着していた。なお、世界選手権大会で使用されたトラックは、1 周 200m のバンクトラックであった。

本研究は、早稲田大学学術研究倫理委員会の倫理承認(承認番号, 2019–340)を得たうえで実施した。映像の収集に先立ち、所属チームの責任者および競技者に口頭で研究の趣旨を説明したうえで、書面にて研究参加の同意を得た。

### 2. 映像収集

Figure 1 に、本研究における実験設定図を示した。撮影範囲は、スタート地点から 110m 地点通過直後の曲走路とした。傾斜面の座標値は、傾斜面に貼付した 187 点の較正点間の角度と距離を測定した後、三角比を用いて、較正点間の水平距離と高さを算出した。その結果、曲走路中央から曲走路出口にかけて構築した 3 次元計測範囲は幅 4.89m、長さ 12.40m、高さ 2.89m であり、それぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸と定義した。曲走路入口と出口付近に 2 台の高速度カメラ(EX-100Pro, CASIO 社製)を固定し、3 次元計測範囲内を滑走する分析対象者のカーブ滑走動作を撮影した。収集した映像から、タイヤの離地時点を目視にて確認することで 2 台の高速度カメラを同期した。なお、高速度カメラの設定は、毎秒 240 フレーム、露出時間 1/2000 秒であった。

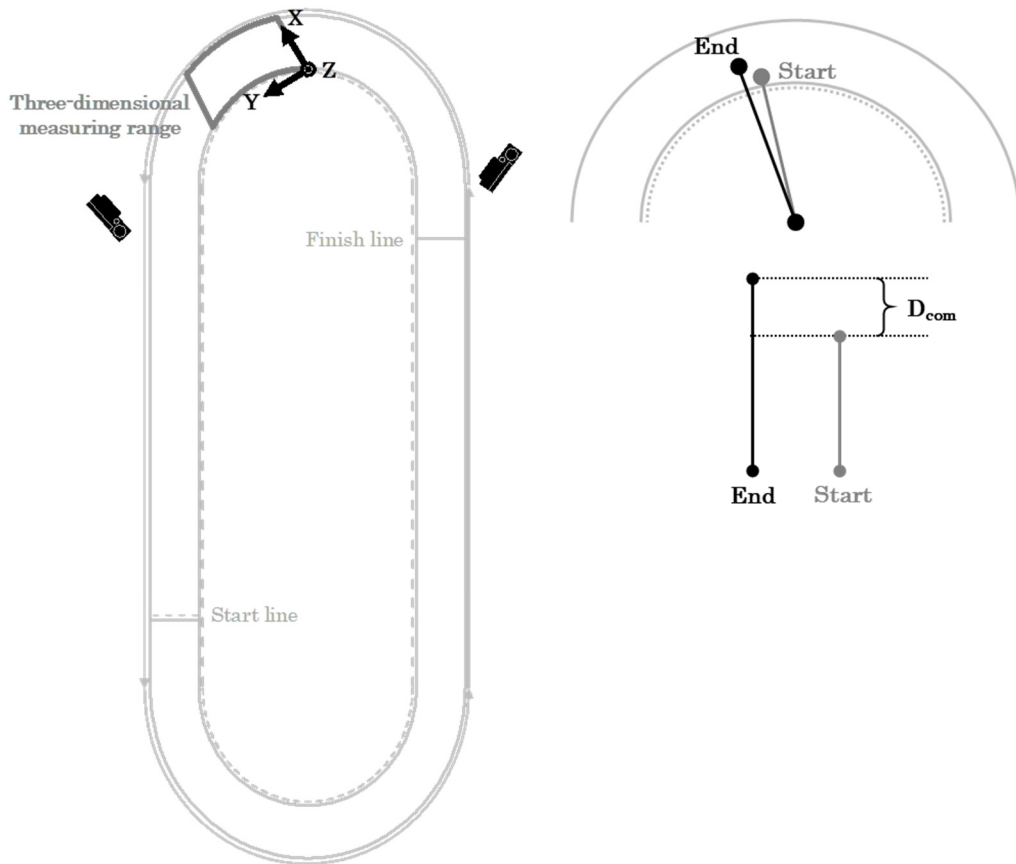


Figure 1. Collecting the movies and three-dimensional measuring range and the definition of Dcom

### 3. ストロークの定義

本研究では、インラインスケートに装着されたタイヤの離地時点を目視にて確認し、右タイヤの離地から左タイヤの離地までを左ストローク、左タイヤの離地から右タイヤの離地までを右ストロークと定義した。そのため、左ストロークでは左脚を左支持脚、右脚を右遊脚とし、右ストロークでは右脚を右支持脚、左脚を左遊脚と定義した。

### 4. 分析方法と分析項目

#### 4.1 身体部分の 3 次元座標値と身体重心位置と速度の算出

撮影された映像から、3次元動作解析システム (Frame-DIAS V, DKH 社製) を用いて、身体分析点 21 点 (頭頂, 左右耳珠点の midpoint, 胸骨上縁, 左右肩峰, 左右肘関節 midpoint, 左右手関節 midpoint, 左右第 3 中手指関節, 左右大転子, 左右膝関節 midpoint, 左右足関節 midpoint, 左右踵骨隆起, 左右足先) をデジタル化した後、デジタル化された身体各部位の座標値を 3 次元 DLT 法により実長換算し、分析点 21 点の 3 次元座標値を算出した。

さらに、算出された 3 次元座標値から左右大転子の midpoint を算出した。算出された 3 次元座標値は、残差分析法 (Wells and Winter, 1980) により最適遮断周波数 (11.5–25.9 Hz) を決定し、4 次のバターワース型ローパスフィルタにより平滑化した。その後、身体を 14 つの身体部分 (頭部, 体幹部, 左右上肢の上腕部, 前腕部, 手部, 左右下肢の大腿部, 下腿部, 足部) で構成される剛体リンクモデルに置き換え、身体部分慣性係数 (阿江ほか, 1992) を用いて、身体重心位置を算出した。また、算出した身体重心位置を時間微分し、身体重心の移動速度を算出した。なお、本研究は世界選手権大会にて映像を収集したが、競技開始直前にタイヤを交換する競技者や、競技終了後は速やかに宿泊施設に向かう競技者が多く存在したため、身体重心位置の算出に必要なスケート靴やタイヤ、ヘルメットの質量や規格を計測することができなかった。そのため、本研究では、これら道具を考慮せずに身体重心位置を算出した。

#### 4.2 移動座標系の定義

本研究では、身体重心を原点、XY 面上の身体重心速度ベクトルを Y'軸、水平面上で Y'軸と直交する軸を X'軸、鉛直方向を Z'軸とする右手系の身体移動座標系を構築した。

#### 4.3 分析項目と算出方法

ストローク変数として、滑走速度、動作頻度、曲走路外側への移動距離(以下、「D<sub>com</sub>」と略す)を算出した。支持脚の動態に関して、Y'Z'平面における大腿部と下腿部、X'Z'平面における身体と下腿部の動作範囲を算出した。また、腕振り動作に関して、X'Y'平面における体幹部、Y'Z'平面における体幹部、左右上肢の肩関節および肘関節の動作範囲を算出した。なお、分析項目を算出する際には、技術計算言語 (MATLAB R2018a, MathWorks 社製)を用いた。

滑走速度は XY 面上の身体重心速度の平均値とした。動作頻度は各ストロークに要した時間の逆数として算出した。D<sub>com</sub> は、ストローク開始と終了時点における曲率中心と XY 平面上の身体重心を結ぶ線分の変位量とした。Figure 2 に、支持脚や腕振り動作に関する動作範囲の算出に用いた角度変数の定義を示した。Y'Z'平面にて大腿部と下腿部の動作範囲を評価するために、大

腿角度と下腿角度を算出した。これらの角度は Y'Z'平面にて、Y'軸と大腿部あるいは下腿部がなす角度とした。X'Z'平面にて身体と下腿部の動作範囲を評価するために、身体傾斜角度と下腿傾斜角度を算出した。これらの角度は X'Z'平面にて、Z'軸と支持脚外踝と身体重心を結ぶ線分あるいは下腿部がなす角度とした。身体および下腿傾斜角度は Z'軸を基準に時計回りを負とし、負方向への変化を内傾と定義した。X'Y'平面にて体幹部の動作範囲を評価するために、体幹方向角度を算出した。体幹方向角度は Y'軸と体幹部のなす角度とし、Y'軸を基準に反時計回りを正とし、正方向への変化を内向き、負方向への変化を外向きと定義した。Y'Z'平面にて体幹部、肩関節、肘関節の動作範囲を評価するために、体幹角度、肩関節角度、肘関節角度を算出した。体幹角度は Y'軸と体幹部、肩関節角度は体幹部と上腕部、肘関節角度は上腕部と前腕部がなす角度と定義した。また、肩関節角度は体幹部を基準に時計回りを負とし、負方向への変化を伸展、正方向への変化を屈曲と定義した。支持脚や腕振り動作に関する角度変数を算出した後、ストローク開始と終了時点の角度変位量を動作範囲として算出した。

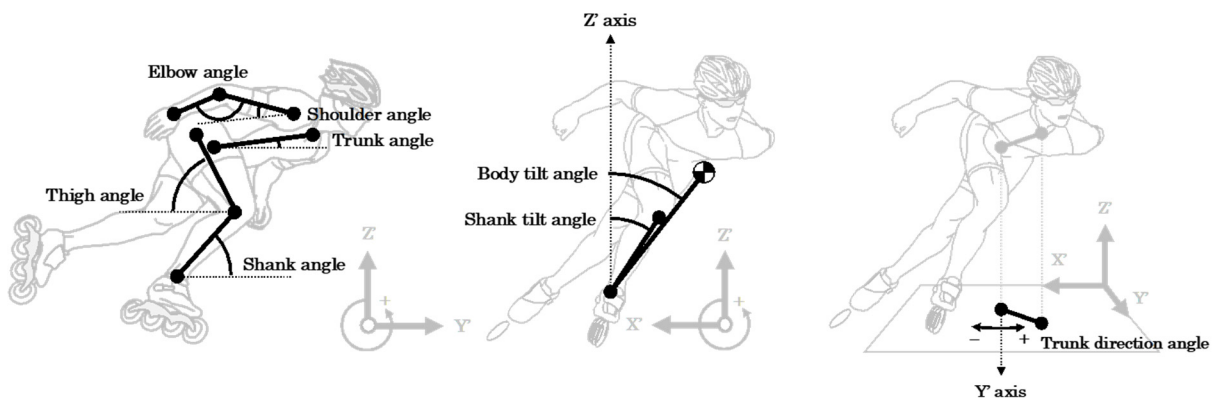


Figure 2. The definition of the angle

#### 5. 統計処理

すべてのデータは、平均値±標準偏差で表記した。統計処理には、統計解析ソフトウェア (SPSS Statistics ver.26, IBM 社製)を用いた。本研究では、Pearson の積率相関係数を用いて、競

技記録と滑走速度、左右ストロークの滑走速度、左右ストロークにおける滑走速度とストローク変数の関係性を検討した後、競技記録や滑走速度と有意な相関関係がみられたストローク変数と支持脚に関する動作範囲の関係性を検討した。さら

に、ストローク変数と有意な相関関係がみられた支持脚に関する動作範囲と腕振り動作に関する動作範囲の関係性を検討した。すべての統計解析において、危険率 5%未満( $p<0.05$ )を有意水準とした。相関係数の強度に関しては、相関係数の大きさが 0.4 以上 0.7 未満を中程度、0.7 以上を強い相関関係とした(出村, 2007)。

### III 結果

#### 1. 競技記録と滑走速度、左右ストロークにおける滑走速度とストローク変数の関係に関する結果

Figure 3 に、競技記録と滑走速度、左右ストロークの滑走速度に関する散布図を示した。競技記録は、右ストロークの滑走速度( $9.83\pm 0.40$ s)との間に強い有意な負の相関関係が認められた。右ストロークの滑走速度と左ストロークの滑走速度( $10.82\pm 0.97$ s)との間に中程度の有意な正の相関関係が認められた。

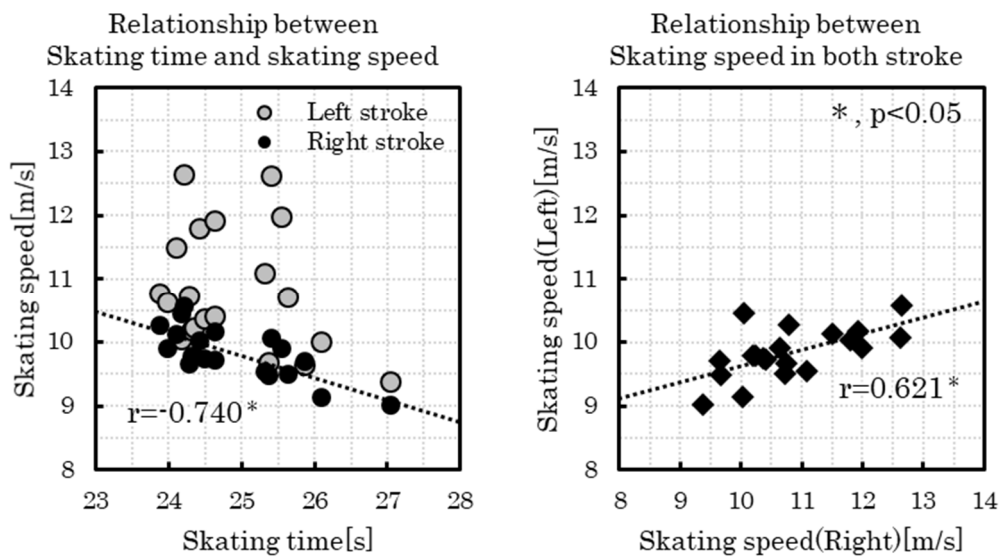


Figure 3. The relationships between the skating time and skating speed, and skating speed in both stroke.

Figure 4 に、左右ストロークにおける滑走速度とストローク変数に関する散布図を示した。左ストロークにおいて、滑走速度は動作頻度

( $3.29\pm 0.43$ Hz)と  $D_{com}$ ( $0.56\pm 0.16$ s)の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた。

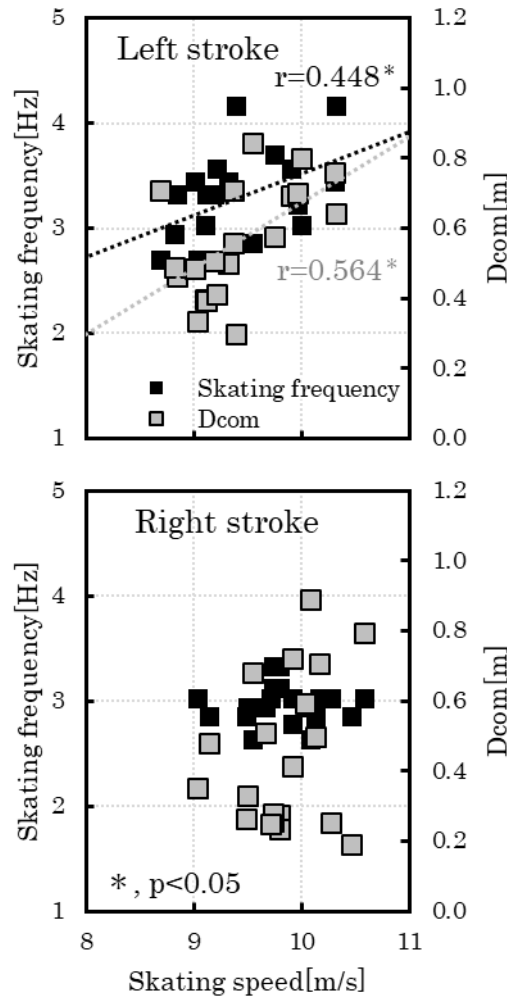


Figure 4. The relationships between the skating speed and parameters on stroke in both stroke.  
 † Dcom shows the movement distance of COM.

2. ストローク変数と支持脚変数の関係に関する結果

Table 1 に、競技記録と有意な相関関係が認められたストローク変数と支持脚に関する動作範囲の相関係数を示した。左ストロークでは動作頻

度とX'Z'平面における下腿部の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた。右ストロークでは滑走速度とY'Z'平面における大腿部の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた。

Table 1. The correlation coefficient between the motion range of support leg and skating speed, frequency in each stroke

	The angle of support leg			vs. Speed r	vs. Frequency r
	0%	100%	Range		
Left	Thigh angle[deg.]	-25.6 ± 4.4	-89.5 ± 12.5	64.0 ± 12.0	0.431
	Shank angle[deg.]	80.9 ± 9.9	47.2 ± 10.8	33.7 ± 10.6	0.284
	Body tilt angle[deg.]	-30.8 ± 4.3	-47.1 ± 3.7	16.3 ± 4.8	0.011
	Shank tilt angle[deg.]	-44.8 ± 5.5	-54.8 ± 4.9	10.0 ± 5.9	0.477 *
Right	Thigh angle[deg.]	-49.0 ± 5.6	-99.4 ± 11.2	50.4 ± 11.5	0.473 *
	Shank angle[deg.]	80.6 ± 5.5	50.6 ± 7.1	30.0 ± 6.1	-0.175
	Body tilt angle[deg.]	-36.6 ± 3.4	-58.9 ± 3.1	22.29 ± 3.6	-0.227
	Shank tilt angle[deg.]	-35.8 ± 4.9	-53.2 ± 5.0	17.4 ± 6.6	-0.237

\*, p<0.05

3. 左右ストロークにおける支持脚と腕振り動作変数の関係に関する結果

Table 2 に, ストローク変数と有意な相関関係がみられた支持脚に関する動作範囲と, 腕振り動作に関する動作範囲の相関係数を示した. 左ストロークでは, X'Z'平面上の下腿部の内傾に関する

動作範囲と Y'Z'平面上の右肩関節の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた. 右ストロークでは, Y'Z'平面上の大腿部と X'Y'平面上の体幹部の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた.

Table 2. The correlation coefficient between the motion range of the support leg and both arm in each stroke

	The angle of trunk and upper arm			vs. Thigh angle	vs. Shankt tilt angle
	0%	100%	Range	r	r
Left	Trunk angle[deg.]	31.1±4.6	30.6±4.2	0.5±5.3	0.047
	Lateral trunk angle[deg.]	-20.8±23.2	3.7±8.1	24.5±16.0	-0.097
	Left shoulder angle[deg.]	-36.5±25.3	9.7±32.8	46.2±36.3	0.124
	Right shoulder angle[deg.]	97.3±45.7	-53.7±14.1	151.0±52.0	0.597 *
	Left elbow angle[deg.]	152.8±22.8	87.0±34.5	65.8±47.5	0.154
	Right elbow angle[deg.]	144.3±35.0	124.7±36.6	19.6±47.2	0.144
Right	Trunk angle[deg.]	30.6±4.2	20.8±3.9	9.8±4.6	0.076
	Lateral trunk angle[deg.]	3.7±8.1	17.1±5.3	13.4±3.2	0.651 *
	Left shoulder angle[deg.]	9.7±32.8	-45.9±16.9	55.7±37.6	0.327
	Right shoulder angle[deg.]	-53.7±14.1	92.2±19.2	145.9±28.1	0.222
	Left elbow angle[deg.]	87.0±34.5	153.4±15.3	66.4±40.4	0.068
	Right elbow angle[deg.]	124.7±36.6	123.2±32.1	1.5±46.6	0.108

\*, p<0.05

IV 考察

1. 曲走路におけるストローク特性に関する考察

本研究において, 右ストロークの滑走速度は競技記録と強い相関関係, 左ストロークの滑走速度と中程度の有意な相関関係が認められた (Figure 3). このことから, インラインスピードスケート競技 300mTT 種目では, 右ストロークにて高い滑走速度を獲得することが競技記録の短縮に資するが, その際に左ストロークを高い速度で滑走することが有効であることが示唆された. さらに, 左ストロークの滑走速度は, 動作頻度や Dcom の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた (Figure 4). Dcom は曲走路外側への移動距離を評価する変数であるため, 左ストロークでは, 高い速度で滑走した競技者は, 曲走路外側に移動していたと考えられる. 曲走路にて競技者に作用する遠心力は, 滑走速度を 2 乗した値に比例する. そのため, 左ストロークの滑走速度と Dcom の間に有意な相関関係が認められたのは, 大きな遠心力によって, 曲走路外側に移動したためと考えられる.

インラインスピードスケート競技 300mTT 種目は

曲走路が傾斜したバンクトラックにて実施される. 曲走路外側への移動は傾斜面を登るような滑走になるため, 滑走速度を低下させる要因である. スピードスケート競技では, 曲走路にて高い滑走速度を獲得するためには, 支持脚伸展動作により身体重心を曲走路内側に移動させるか, 高い動作頻度によって身体重心の移動方向を曲走路内側に転換する必要があるとされる (de Boer et al., 1989). また, 身体重心を曲走路内側に移動するためには, 下腿部の内傾位を大きくした状態で支持脚を伸展する必要があるとされる (湯田ほか, 2003). さらに, インラインスピードスケート競技とスピードスケート競技のカーブ滑走動作を比較した研究にて, インラインスピードスケート競技では左ストローク開始時点にて下腿部の内傾位が大きかったことが報告されている (岡部ほか, 2019a). しかし, 下腿部の過度な内傾はタイヤが横滑りする要因である. これらを考慮すると, 左ストロークでは支持脚伸展動作によって身体重心を曲走路内側に移動させることが困難なため, 高い動作頻度により曲走路外側への移動を抑制していたと考えられる. 一方, 右ストロークでは, 左右



の脚を交差させた状態から右支持脚伸展動作を実施する必要があることから、右支持脚の内傾位を大きくすることは困難と推察される。そのため、右ストロークではタイヤの横滑りが発生しにくいいため、支持脚伸展動作によって身体重心を曲走路内側に移動させていると考えられる。これらのことから、タイヤが横滑りしやすい左ストロークでは高い動作頻度、タイヤが横滑りしにくい右ストロークでは支持脚伸展動作によって、曲走路外側への移動を抑制していることが示唆された。

以上のことを踏まえ、本研究では、競技記録の短縮に関係する右ストロークにおける高い滑走速度と、左ストロークを高い速度で滑走するために有効な高い動作頻度の獲得に資するカーブ滑走動作の支持脚伸展動作と腕振り動作の関係性を考察することとした。

## 2. 曲走路内側への左支持脚と上肢の動作に関する考察

本研究では、左ストロークの動作頻度と X'Z' 平面上の下腿部の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた (Table 1)。また、X'Z' 平面上の下腿部の動作範囲は  $10.0 \pm 5.9 \text{deg}$  を示した (Table 1)。これらのことから、左ストロークにて高い動作頻度を獲得する際には、下腿部の内傾を抑制することが有効と考えられる。スピードスケート競技では、競技記録の優れた競技者は、ブレードの内傾位が  $25.8 \pm 3.8 \text{deg}$  の姿勢から、ストロークを通じて  $17.0 \text{deg}$  程度内傾させたことが報告されている (Yuda et al., 2004)。また、ブレードの内傾位は、下腿傾斜角度によって評価できるとされる (湯田ほか, 2003; Yuda et al., 2004)。本研究では、ストローク開始時点では  $44.8 \pm 5.5 \text{deg}$  内傾した状態から  $10.0 \pm 5.9 \text{deg}$  内傾することが示された (Table 1)。そのため、インラインスピードスケート競技では、スピードスケート競技に比べて下腿部の内傾位が大きな姿勢で滑走していると考えられる。しかし、このような姿勢から下腿部を内傾させることで、タイヤの横滑りが発生しやすくなる。タイヤの横滑りは転倒の要因であるため、これを防止するために下腿部の内傾を抑制したと考えられる。ここで、左ストローク終了時点におけ

る下腿部の前傾位と下腿部の内傾範囲 (Table 1) に着目すると、両変数の間に中程度の有意な負の相関関係が認められた ( $r = -0.498$ ,  $p < 0.05$ )。このことは、左ストローク終了時点にて下腿部をより前傾させていた競技者は、下腿部の内傾を抑制していたことを示唆するものである。下腿部をより前傾させた場合、支持脚側足部の踵が挙上しやすくなるため、タイヤが離地しやすくなると推察される。左ストロークでは、曲走路外側への移動を抑制する際に、高い動作頻度を獲得し、曲走路内側に滑走方向を転換することが有効と考えられた。これらのことから、左ストロークにて動作頻度と下腿部の内傾範囲の関係性が中程度と判定されたのは、タイヤの横滑りを抑制した状態で、下腿部の前傾位を大きくすることが、タイヤの離地を促したため、高い動作頻度の獲得に影響したためと考えられる。

左ストロークにて、X'Z' 平面上の下腿部と右肩関節の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた (Table 2)。また、右肩関節は伸展するように変化した (Table 2)。これらのことから、下腿部の内傾範囲を抑制した競技者は、右肩関節の伸展範囲が小さいことが示唆された。腕振り動作には、下肢の運動によって獲得された不要な角運動量を相殺する役割があり、上肢と下肢は体幹部を介して相反的な運動をされるとされる (佐藤・丸山, 2008)。このことを鑑みると、右肩関節の伸展範囲を小さくすることで、左支持脚の伸展範囲も小さくすると推察される。支持脚の伸展範囲は膝関節角度によって評価でき、本研究では大腿角度と下腿角度の大きさの和として算出できる。本研究における膝関節角度はストロークを通じて  $30.3 \pm 14.7 \text{deg}$  伸展したが、右肩関節の動作範囲との間に有意な相関関係は認められなかった。右肩関節角度の動作範囲と大腿角度や下腿角度の動作範囲の間に有意な相関関係が認められなかったことを鑑みると、左支持脚の動態に影響しないことが示唆された。そのため、左支持脚側下腿部の内傾を抑制した競技者は、右肩関節の伸展範囲が小さな腕振り動作を実施する傾向にあると考えられる。上肢にて獲得された角運動量が、下肢の運動に影響する研究結

果が報告されていることを考慮すると、今後は支持脚だけではなく遊脚側の関節にて獲得された角運動量を踏まえて、インラインスピードスケート競技における腕振り動作を検討する必要がある。

また、スピードスケート競技では、優れた競技成績を獲得した競技者は、左ストローク前半部にて遊脚側股関節屈曲トルクを發揮していることが報告されている(湯田ほか, 2006)。このことは、左ストロークでは遊脚のキネティクスも、競技成績の獲得に資することを示している。本研究では、上肢と下肢のキネティクスを分析していないが、今後は腕振り動作が下肢の運動に及ぼすキネティクス研究を実施する必要がある。

### 3. 右支持脚と上肢の伸展, 屈曲動作に関する考察

本研究では、右ストロークの滑走速度と Y'Z' 平面上の大腿部の動作範囲の間に中程度の有意な負の相関関係が認められた(Table 1)。このことは、大腿部の前方回転を抑えることが高い滑走速度の獲得に影響することを示唆するものである。この結果は、大腿部の前方回転が身体重心をより前方移動させるうえで重要な動作(de Boer et al., 1989)であり、高い滑走速度の獲得に資する(湯田ほか, 2003)とするスピードスケート競技とは異なる結果である。この要因として、両競技におけるトラックの曲率半径が異なることが考えられる。インラインスピードスケート競技における曲率半径(13.42m)は、スピードスケート競技(26.00m)と比べて小さく設計されている。曲走路では曲率半径に沿うように滑走することが競技記録を短縮するうえで重要であるとされる(van Ingen Schenau et al., 1985, 1987; 横澤ほか, 2018)。また、曲走路では曲走路外側に移動するような滑走になるため、高い動作頻度によって身体重心の移動方向を曲走路内側に転換する必要があるとされている(van Ingen Schenau et al., 1987)。さらに、スピードスケート競技における一流競技者は、曲走路においても大腿部をより前方に回転させ、身体重心の前方移動を大きくしていたことが報告されている(湯田ほか, 2003)。これは、スピードスケート競技における曲率半径が大きく、曲走路内側への移

動に加え、身体重心をより前方に移動させる必要であったためと考えられる。しかし、曲率半径が小さな曲走路にて大腿部を起すような支持脚伸展動作を実施した場合、身体重心は曲走路の外側に移動するため、曲率半径に沿うような滑走が困難になる。そこで、右ストロークにおける Y'Z' 平面上の大腿部の動作範囲と  $D_{com}(0.45 \pm 0.22m)$  の関係性に着目すると、両者間に中程度の有意な負の相関関係が認められた( $r=0.630$ ,  $p<0.05$ )。このことは、右大腿部をより前方回転させることは、曲走路外側への移動を抑制することに影響することを示唆するものである。インラインスピードスケート競技の曲走路では、右ストロークにて支持脚伸展動作により身体重心を曲走路内側に移動させることが有効と考えられる。そのため、右大腿部をより前方回転させることで支持脚伸展度合いは大きくなるため、曲走路内側に身体重心が大きく移動、すなわち、 $D_{com}$  の抑制に影響したため、高い滑走速度の獲得に関係したと考えられる。

右ストロークにて、Y'Z' 平面上の大腿部と X'Y' 平面上の体幹部の動作範囲の間に中程度の有意な負の相関関係が認められた(Table 2)。また、X'Y' 平面上の体幹部の動作範囲は、 $13.4 \pm 3.2 \text{deg}$  を示した(Table 2)。これらのことは、右ストロークにて大腿部の前方回転を抑制した競技者は、体幹部を曲走路内側に向けていたことを示唆するものである。体幹部を内向きにすることにより身体重心は曲走路内側に移動するため、大腿部の前方回転中に体幹部を内向きにすることで、前方移動する身体重心の移動方向を曲走路内側に転換できると推察される。インラインスピードスケート競技の国内一流競技者のカーブ滑走動作を解明した研究では、曲率半径の小さい曲走路にて曲走路内側に方向転換をする場合、体幹部を内向きにするような動作によって、身体を内傾させていることが示されている(岡部ほか, 2017)。また、同競技にて装着するインラインスケートは、側面に曲率のあるタイヤがフレームで固定されているため、体幹部を内向きにすることは、自転車のハンドル操作のような役割を担っていると考えられる。しかし、このような動作によってタイヤのスピンの誘発される。タイヤがスピンしている

状態で支持脚伸展動作を実施することは困難であることから、体幹部を内向きにするによって、大腿部の前方回転が困難になったため、両者の間に有意な相関関係が認められたと考えられる。そのため、大腿部の前方回転と体幹部を内向きにするとの関係性が中程度と判定されたのは、下腿部の内傾動作によるタイヤの横滑りが、大腿部の前方回転の抑制に影響した可能性があるためと考えられる。

#### 4. 本研究の限界と今後の課題

本研究は、国際競技大会に出場した競技者を対象とした横断的研究であり、被験者に測定器具を装着した介入実験ができなかった。腕振り動作には下肢により獲得された角運動量を相殺する役割があることを考慮すると、実験環境を整備した介入実験や縦断的な研究によって、その関係性を明らかにすることが今後の課題といえよう。

#### V 結論

本研究の目的は、インラインスピードスケート競技における腕振り動作と下肢のキネマティクスとの関係を明らかにすることであった。本研究では、以下の結果を得た。

- 1) 競技記録と左ストロークの動作頻度 ( $3.29 \pm 0.43 \text{ Hz}$ )、右ストロークの滑走速度 ( $9.83 \pm 0.40 \text{ m/s}$ ) の間に中程度の有意な負の相関関係が認められた ( $p < 0.05$ )。
- 2) 左ストロークにて、動作頻度と X'Z' 平面上の下腿部の動作範囲 ( $10.0 \pm 5.9 \text{ deg.}$ ) の間に中程度の有意な負の相関関係が認められた ( $p < 0.05$ )。また、X'Z' 平面上の下腿部と Y'Z' 平面上の右肩関節 ( $151.0 \pm 52.0 \text{ deg.}$ ) の動作範囲の間に中程度の有意な正の相関関係が認められた ( $p < 0.05$ )。
- 3) 右ストロークにて、滑走速度と Y'Z' 平面上大腿部の動作範囲 ( $50.4 \pm 11.5 \text{ deg.}$ ) に中程度の有意な負の相関関係がみられた ( $p < 0.05$ )。また、Y'Z' 平面上の大腿部と X'Y' 平面上の体幹部 ( $13.4 \pm 3.2 \text{ deg.}$ ) の動作範囲の間に中程度の有意な負の相関関係がみられた ( $p < 0.05$ )。

以上のことから、左ストロークでは下腿部の内傾動作を抑制することが、高い動作頻度の獲得に影響しうることが示唆された。その際には、右肩関節の伸展動作により、遊脚側の屈曲動作を促通させることで、下腿部の内傾動作の抑制に影響しうることが示唆された。一方、右ストロークでは、大腿部の前方回転を抑制することが、高い滑走速度の獲得に影響しうることが示唆された。その際には、自転車のハンドル操作のように体幹部を内向きにするのが、大腿部の前方回転の抑制に影響知ることが示唆された。

#### 文献

- ・ 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志 (1992) 日本人アスリートの身体部分慣性係数の推定, バイオメカニズム, (11), 22-33
- ・ de Boer, R. W., Ettema, G. J. C., van Gorkum, H., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1987) Biomechanical aspects of push-off techniques in speed skating the curves, *International Journal of Sport Biomechanics*, 3, 69-79
- ・ de Boer R. W. and Nilsen, K. L. (1989) Work per stroke and stroke frequency regulation in Olympic speed skating, *Int. J. Sport Biomech.*, 5, 135-140
- ・ 出村慎一 (2007) [例解]健康・スポーツ科学のための統計学 改訂版(第2版), 大修館書店, pp.189-208.
- ・ Grant, S. J., Oommen, G., McColl, G., Taylor, J., Watkins, L., Friel, N., Watt, I., and McLean, D. (2003) The effect of ball carrying method on sprint speed in rugby union football players, *J. Sport Sci.*, 21, 1009-1015
- ・ Hinrichs, R. N., Cavanagh, P. R., and Williams, K. R. (1987) Upper extremity function in running. I: Center of mass and propulsion considerations, *Int. J. Sport Biomech.*, 3, 222-241
- ・ Hinrichs, H. N. (1987) Upper extremity function in running. II: Angular momentum consideration, *Int. J. Sport Biomech.*, 3,

242-263

- ・ 平野智也, 柏木悠, 袴田智子, 水野洋子, 水野増彦(2018) 義手の着用が片側前腕切断短距離選手のスプリント走におけるパフォーマンスとキネマティクスに与える効果, デサントスポーツ科学, 39, 114-120
- ・ 伊藤章(1991) 腕振りにおける腕の役割, 体育の科学, 41, 688-692
- ・ Julien, F., Didier, C., Claire, T. C. (2009) Assessment of the influence of pole carriage on sprint kinematics: A case study of novice athletes, *Int. J. Sports Sci. Eng.*, 3, 3-10
- ・ 笠井達哉(1982) 走における腕振り動作の効果, 国士舘大学体育研究所報, 2, 61-66
- ・ 笠井達哉(1984) 上肢肢位変化が下腿部運動ニューロンに及ぼす影響, 国士舘大学体育研究所報, 4, 25-32
- ・ 木越清信(2015) 短距離走における腕振り動作の反動効果が疾走速度に及ぼす影響, 筑波大学体育系紀要, 38, 133-138.
- ・ Mann, R. and Herman, J. (1985) Kinematic analysis of Olympic sprint performance: men's 200 meters, *J. Appl. Biomech*, 1, 151-162
- ・ Marcelloni, P. (2005) La tecnica del pattinaggio in linea. Editrice Stampa Nova, pp. 277-284(in Italian).
- ・ 岡部文武, 高尾千穂, 藤田善也, 土屋純(2019a) ローラースピードスケート競技 300m タイムトライアル種目における日本人選手のカーブ滑走動作のキネマティクスの特徴, コーチング学研究, 33, 55-64
- ・ 岡部文武, 高尾千穂, 藤田善也, 土屋純(2019b) ローラースピードスケート競技 300m タイムトライアル種目における世界選手権大会出場選手のレース分析, 体育学研究, 64, 869-876
- ・ Okabe, F., Takao, C., Fujita, Z., and Tsuchiya, J. (2019) Kinematic characteristics of curve skating in a 300m time trial race among top roller speed skaters, *Int. J. Sport Health Sci.*, 17, 235-242
- ・ 小木曾一之(2001) 走運動時の体幹の役割, 体育の科学, 51, 438-443
- ・ Ropret, R., Kukolj, M., Ugarkovic, D., Matavulj, D., and Jaric, S. (1998) Effects of arm and leg loading on sprint performance, *Appl., Physiol.*, 77, 547-550
- ・ Ross, H. M., Graham, E. C., Richard, E. A. E., Brian R. U., and Joseph, H. (2009) Ground reaction force and lower extremity kinematics when running with suppressed arm swing, *J. Biomech. Eng.*, 131, 124502-1-5
- ・ 佐藤仁, 丸山仁司(2008) 一側上肢の異なる運動パターンへの等尺性抵抗運動域の違いが両側下肢伸展筋力におよぼす影響, 理学療法科学, 23, 175-180
- ・ 佐藤隆彦, 矢内利政(2015) 半径の小さな曲線走動作における身体の方位変化メカニズム, 体育学研究, 60, 577-588
- ・ 豊嶋陵司, 桜井伸二(2019) 短距離走の最大速度局面における滞空比と上肢および回復脚の相対鉛直加速力との関係, 体育学研究, 64, 89-99
- ・ 辻本典央, 水藤弘吏, 新海宏成, 布目寛幸, 池上康男(2009) 腕振りの制約が走動作に及ぼす影響, バイオメカニクス研究, 13, 38-50
- ・ van Ingen Schenau, G. J., de Groot, G., and de Boer R. W. (1985) The control of speed in elite female speed skaters, *J. Biomech.*, 18, 91-96
- ・ van Ingen Schenau, G. J., de Boer, R. W. and de Groot, G. (1987) On the technique of speed skating, *Int. J. Sport Biomech.*, 3, 419-431
- ・ Wells, R. P., and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal noise in the kinematics of normal pathological and sporting gaits, *Human Locomotion*, 1, 92-93
- ・ 横澤俊治, 加藤恭章, 紅楳英信, 熊川大介(2018) 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
- ・ Yuda, J., and Ae, M. (2002). A comparison of the skating technique in the curve for elite and junior sprint speed skates, ISBS-conference

proceedings archive, 96-99

- ・ 湯田 淳, 結城 匡啓, 阿江 通良 (2003) 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の研究-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
- ・ Yuda, J., Yuki, M., Aoyanagi, T., Fujii, N., and Ae, M. (2004). 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
- ・ 湯田 淳, 結城 匡啓, 藤井 範久, 阿江 通良 (2005) 一流男子長距離スピードスケート選手のカーブ滑走における遊脚のキネティクス, バイオメカニクス研究, 10, 92-106
- ・ 湯田 淳, 結城 匡啓, 藤井 範久, 阿江 通良 (2006) 一流男子長距離スピードスケート選手のカーブ滑走における遊脚のキネティクス, バイオメカニクス研究, 10, 92-106
- ・ Yuda, J., Yuki, M., Aoyanagi, T., Fujii, N., and Ae, M. (2007) Kinematic analysis of the technique for elite male long-distance speed skaters in curving, *J. Appl. Biomech.*, 23, 128-138
- ・ 結城 匡啓 (2013) スポーツ動作を科学する(19) スピードスケートのバイオメカニクス, *体育の科学*, 63, 139-147