

論文

スピードスケート競技男子 500m 種目のストレート滑走動作における  
世界一流選手の両腕振り動作のキネマティクスの特徴

Kinematic Characteristics of Double Arm-Swing Motion  
in World-Class Skaters During Straight Skating Motion  
in Men's 500 m Speed Skating Race

岡部文武<sup>1)</sup>, 木村裕也<sup>2)</sup>, 熊川大介<sup>3)</sup>, 藤田善也<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 早稲田大学スポーツ科学学術院

<sup>2)</sup> 国立スポーツ科学センター

<sup>3)</sup> 国士舘大学体育学部

OKABE Fumitake<sup>1)</sup>, KIMURA Yuya<sup>2)</sup>, KUMAGAWA Daisuke<sup>3)</sup>, FUJITA Zenya<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Faculty of Sport Sciences, Waseda University

<sup>2)</sup> Japan Institute of Sport Sciences

<sup>3)</sup> Faculty of Physical Education, Kokushikan University

キーワード: 国際競技大会, 腕振り動作, プッシュオフ動作, 滑走速度, 3次元動作解析

Keywords: International competition, arm swing motion, push-off motion, skating velocity,  
three-dimensional motion analysis

【抄録】

本研究の目的は, スピードスケート競技男子 500m 種目世界一流選手のストレート滑走動作における  
プッシュオフ動作と両腕振り動作のキネマティクスを検討することであった. 被験者は 2016 World Cup 長  
野大会男子 500m 種目に出場した 18 名とした. 分析項目は滑走速度, 支持脚側関節(股関節, 膝関  
節, 足関節)角度と角速度, 支持脚側大転子と膝関節中心の相対距離(以下, 「 $D_{HK}$ 」と略す)と相対速  
度(以下, 「 $V_{HK}$ 」と略す), 体幹起こし角度と角速度, 上肢関節(肩関節, 肘関節)角度と角速度, 上肢  
肩峰と肘関節中心の相対距離(以下, 「 $D_{SE}$ 」と略す)と相対速度(以下, 「 $V_{SE}$ 」と略す), 左肩上昇角度  
と角速度とした. 算出した時系列データは, 右ブレード離氷が 0%時点, 左ブレード離氷時点が 100%時  
点となるように規格化した. 本研究にて得られた知見は以下の通りである:

- 1) 滑走速度は 50%—90%時点にて有意に増加した( $p < 0.05$ ).
- 2) 支持脚側関節角速度に関して, 股関節角速度が 30%時点, 膝関節角速度が 40%時点, 足関節角速  
度が 70%時点から有意に増加し始めた( $p < 0.05$ ).
- 3)  $D_{HK}$  は 0%時点にて負の値を示した後, 有意に増加し, 20%時点付近で正の値を示した( $p < 0.05$ ).
- 4) 肩関節伸展角度に関して, 60%—70%時点にて右上肢が屈曲位から伸展位に転じた. 肩関節伸展角  
速度に関して, 左上肢では 40%—90%時点にて有意に減少し, 右上肢では 30%—60%時点にて有意  
に増加した後, 70%—100%時点にて有意に減少した( $p < 0.05$ ).
- 5)  $V_{SE}$  に関して, 左上肢では 30%—60%時点にて有意に減少し, 右上肢では 0%—10%時点にて有意に  
増加した( $p < 0.05$ ).

以上のことから, 世界一流選手は滑走速度が高まる際に, 股関節伸展動作に先行して股関節を外  
転させているが, このとき, ストローク開始時点から支持脚と対角側上肢の外転動作を強調するとともに,  
同側上肢を素早く内転させていることが示唆された. また, 滑走速度が高まる際には, 世界一流選手は

1) 支持脚と同側上肢に先行して対角側上肢を素早く後方に振り上げていること, 2) 支持脚側上肢をゆっくり前方に振り上げていること, 3) 支持脚を伸展させる過程で後方に振り上げた上肢を伸展方向から屈曲方向に転換していることが示された.

### [Abstract]

This study aimed to investigate the kinematics of push-off and double arm swing motions of world-class skaters during straight skating in a men's 500 m speed skating race. The participants were 18 skaters who participated in the men's 500 m race for the World Cup held in Nagano, Japan, in 2016. The following parameters were analyzed: skating velocity, joint angle, and angular velocity on the supporting leg; distance ( $D_{HK}$ ) and velocity ( $V_{HK}$ ) between the greater trochanter and knee on the supporting leg; trunk elevation angle and angular velocity; joint angle and angular velocity on the arms; distance ( $D_{SE}$ ) and velocity ( $V_{SE}$ ) between the acromion and elbow; and rising angle and angular velocity of the left shoulder. The calculated data were normalized such that the timing at the right blade-off was 0% and that at the left blade-off was 100%. The following results were achieved:

- 1) Skating velocity significantly increased at 50%–90% ( $p < 0.05$ ).
- 2) The hip, knee, and foot joint angular velocities began to increase significantly at 30%, 40% and 70%, respectively ( $p < 0.05$ ).
- 3) After  $D_{HK}$  was negative at 0%, it significantly increased and became positive at 20%  $D_{HK}$  ( $p < 0.05$ ).
- 4) The shoulder joint angle on the right arm shifted by 60% and 70% from flexion to extension. The shoulder joint angular velocity on the left arm significantly increased by 40%–90%, and that on the right arm increased by 30%–60% and decreased by 70%–100% ( $p < 0.05$ ).
- 5) The  $V_{SE}$  of the left arm significantly decreased at 30%–60%, and that of the right arm significantly increased at 0%–10% ( $p < 0.05$ ).

These results revealed that the world-class skaters abducted their hip joint before extending their hip joint when they achieved a higher skating velocity, and that they emphasized on abducting their arm on the opposite side of the support leg and adducting their arm on the same side of the support leg. Furthermore, when the skating velocity increased, the world-class skaters 1) swung their arm on the opposite side of the support leg backward quickly prior to that on the same side of the support leg, 2) swung the arm on the same side of the support leg forward slowly, and 3) turned the position of the arm swinging backward from extension to flexion during the push-off motion.

スポーツ科学研究, 21, 1-14, 2024 年, 受付日:2024 年 3 月 31 日, 受理日:2024 年 10 月 16 日

連絡先: 岡部文武 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

f.okabe@aoni.waseda.jp

## I. 緒言

スピードスケート競技は, 1 周 400m のオーバルトラックにて指定距離の滑走時間を競う競技である. 滑走時間を短縮するためには, 支持脚伸展動作(以下, 「プッシュオフ動作」とする)によって

高い滑走速度を獲得する必要がある(結城ほか, 1992; van Ingen Schenau and Bakker, 1980). また, 同競技では滑走路によって実施される滑走動作が異なり, 直走路では身体重心を左右側方に移動させるストレート滑走動作, 曲走路では滑

走路内側に身体重心を移動させるカーブ滑走動作が実施される。左右いずれかのブレード離氷から他方のブレード離氷までの1ストロークにおいて、滑走速度の高い選手はストローク開始時に支持脚を深く屈曲させた滑走姿勢(van Ingen Schenau and Bakker, 1980)から、ストローク終盤に向けて下腿部を前傾させる(Yuda and Ae, 2002; 結城ほか, 1992)とともに、大腿部を大きく前方回転させている(Yuda and Ae, 2002; 湯田ほか, 2003)ことが報告されている。その際には、股関節伸筋群、膝関節伸筋群、足関節底屈筋群の順番に筋活動を増大させることが重要とされる(de Koning et al., 1991)。また、ストロークにおける滑走速度の増大は、スケートの曲線運動における求心力成分の増大によるもの(結城ほか, 1997)であり、その際にはストロークの早い段階で股関節外転トルクを発揮すること(結城, 1999)やブレードの傾斜角度を大きくすることが重要とされる(Yuda et al., 2004; 結城ほか, 1997)。とくに、カーブ滑走動作では大きな遠心力に抗するために、ストレート滑走動作に比べて大きな股関節外転トルクを発揮する(湯田ほか, 2005)とともに、ブレードを曲走路内側に大きく傾斜させる(Yuda et al., 2004)ことが重要とされる。これらの研究成果は指導教本(日本スケート連盟, 2010)に纏められ、指導者育成や選手強化に貢献している。

指導教本(日本スケート連盟, 2010)にはプッシュオフ動作とともに、これに影響しうる上肢の運動、すなわち腕振り動作に関する指導内容が記載されている。そこでは、①脇を締めて大きく腕を振ること、②前方に大きく腕を振ることでプッシュオフ動作を大きくすること、③力強く腕を振り上げた後、力を入れずに腕を振り切ることが重要とされている。しかし、これまでにプッシュオフ動作と腕振り動作を関連させた研究は実施されておらず、高い滑走速度の獲得に貢献する腕振り動作の実態が理解されないまま、腕振り動作の技術指導が実施されている可能性が高い。

スピードスケート競技に対して陸上競技では腕振り動作と移動速度や下肢の動態の関係性が検討され、200m 種目にて優れた競技成績を獲得した選手は肩関節の屈曲・伸展動作が大きく、その

角速度も高いことが報告されている(Mann and Herman, 1985)。また、高い移動速度を獲得する際には、肘関節を伸展させながら後方に振り上げて、腕振り動作の方向を素早く前方に転換することが重要とされる(木越, 2015)。さらに、腕振り動作を制限した疾走動作では①支持脚側股関節の屈曲および内転動作が制限されること(Julien et al., 2009; Ross et al. 1998)、②遊脚側股および膝関節の屈曲・伸展角速度が低下すること(Grant et al., 2009; 平野ほか, 2018; Ropret et al., 1998)、③体幹部の捻転が大きくなること(小木曾, 2001)が報告されている。また、直走路における疾走動作の腕振り動作を検討した研究では、移動速度の変化に伴って腕振り動作の角運動量も変化するが、両上肢を鉛直方向に加速させることで地面反力の鉛直成分が増大することが報告されている(Hinrichs, 1987; Hinrichs et al., 1987)。地面反力の鉛直成分が移動速度に影響すること(豊嶋・桜井, 2019)を鑑みると、より効果的に移動速度を獲得できる運動を検討するためには、下肢だけではなく、上肢の運動も考慮することが重要と考えられる。

スピードスケート競技で実施される腕振り動作は、両上肢を振る「フリーハンド」と右上肢のみを振る「ワンハンド」に分類される(Figure 1; 日本スケート連盟, 2010)。平均速度が最も高い500m 種目ではすべての選手がフリーハンドを実施するものの、平均速度が低い種目程フリーハンドの実施割合が低くなる傾向にある。しかし、ストレート滑走動作におけるフリーハンドの技術要素を検討した研究は見受けられない。スピードスケート競技500m 種目では、100m 地点の通過時間を短縮することが重要であり(結城, 2018)、そのなかでも50m—100m 区間における平均滑走速度を高めることが重要とされる(湯田ほか, 2006)。そのため、この区間は、ストレート滑走動作によって滑走速度を高める加速局面に該当すると考えられる。この局面にて、世界一流選手が滑走速度が高まる際に、どのようなプッシュオフ動作やフリーハンドを実施しているかを検討することで、フリーハンドの指導に資する知見を獲得できると考えられる。

そこで本研究の目的は、スピードスケート競技 500m 種目世界一流選手のストレート滑走動作に

おけるプッシュオフ動作とフリーハンドのキネマテイクスの特徴を検討することとした。

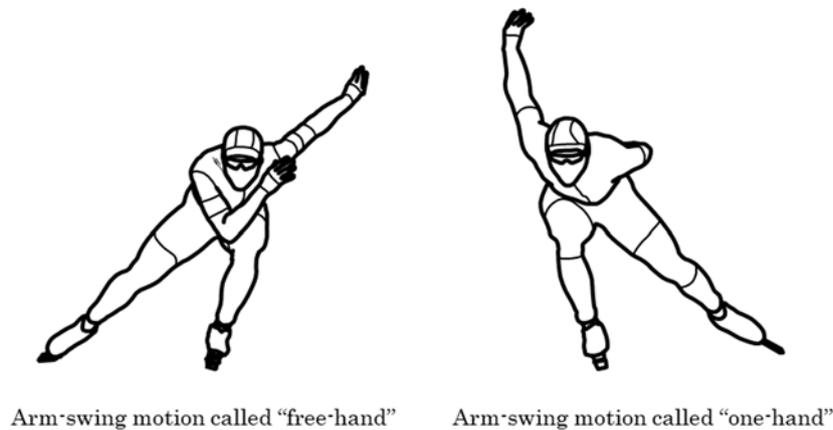


Figure 1. Two types of arm-swing motions in speed skating

## II. 方法

### 1. 被験者

本研究は、長野市オリンピック記念アリーナにて開催された 2016 World Cup 長野大会男子 500m 種目を対象種目とした。被験者は Division A と Division B の出場選手 49 名のうち、氷上でウォーミングアップをする選手と長時間重ならない映像を収集できた 18 名とした。競技大会での撮影に先立ち、公益財団法人日本スケート連盟を通じて大会実行委員会の承諾を得た。また、本研究の実施にあたり、早稲田大学研究倫理審査委員会の承認を得た(承認番号, 2022-339)。

### 2. 3次元計測範囲の構築と映像収集

Figure 2 に、3次元計測範囲と高速度カメラの設置位置を示した。本研究では、フィニッシュラインが設定された直走路の中央付近に幅 8m×長さ 48m×高さ 1.25m の 3次元計測範囲を構築し、それぞれ X 軸, Y 軸, Z 軸と定義した。4 台の高速度カメラ(Phantom v1611, v310, v311, Vision Research 社製)を用いて、前方と後方(固定)お

よび側方(追従)から 3次元計測範囲を通過する選手を撮影した(撮影速度, 300fps, 露出時間, 1/1000 秒)。また、ワイヤレス LED シンクロナイザ(PTS-168, DKH 社製)を用いて高速度カメラを同期した。

500m 種目では、100m 地点の通過時間を短縮することが重要とされる(結城, 2018)。100m 地点通過後はすぐに曲走路に進入するが、このとき、直走路からカーブ滑走動作を実施する選手が多く見受けられる。そのため、100m 地点のストロークを分析対象とすることは本研究の目的を達成するうえで適していない。また、本研究では、3次元計測範囲内で複数回のストロークを撮影した。撮影したストロークのうち、最も精度よく 3次元座標値を算出できる直走路中央(約 50m 地点)付近で実施されたストロークを分析対象とした。なお、分析対象とした 50m 通過地点以降のストロークは、滑走速度が漸増する(湯田ほか, 2006)加速局面におけるストロークであった。

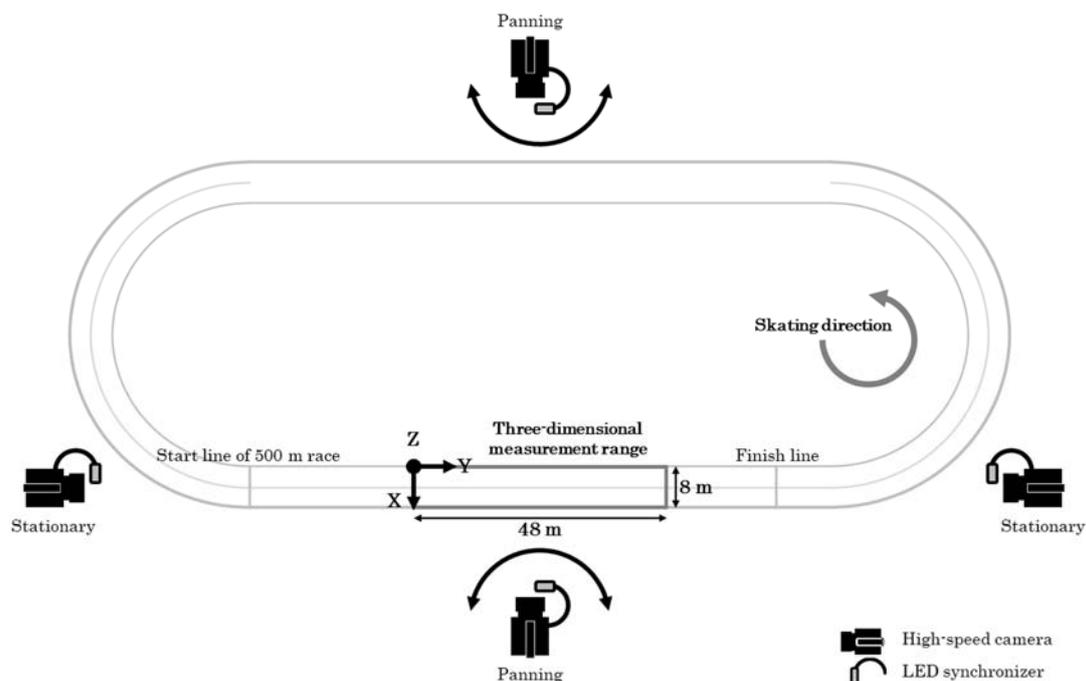


Figure 2. Three-dimensional measurement range and set-up of the high-speed cameras

### 3. 分析対象とするストローク

右ブレードの離氷から左ブレードの離氷を左ストローク、左ブレードの離氷から右ブレードの離氷を右ストロークと定義し(Kimura et al., 2022), 300 Hz の分解能で検出した. ストレート滑走動作は左右ストロークで対称的な運動様態を示すため, 本研究では左ストロークを分析対象とした.

### 4. 3次元座標値と身体重心座標値の算出

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, 左右肘関節中心, 左右手関節中心, 左右第 3 中手指関節中心, 左右大転子, 左右膝関節中心, 左右足関節中心, 左右踵骨隆起, 左右足部先端)と左右ブレード端点 4 点を 50Hz でデジタル化した(Kimura et al., 2022; 横澤ほか, 2020). デジタル化されたピクセル座標値を 3次元パニング DLT 法によって実長換算し, 分析点 25 点の 3次元座標値を算出した後, 残差分析法(Wells and Winter, 1980)により決定された最適遮断周波数(2.35—7.05Hz)を用いて, 4次 Butterworth low-pass filter によって平滑化した.

身体を 14 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た後, 身体部分慣性係数(阿江ほか, 1992)を用いて, 身体重心座標値を算出した.

### 5. 分析項目

#### 5.1 ストローク変数に関する分析項目

ストローク変数に関する分析項目は, 滑走速度とした. 滑走速度は, XY 平面上の身体重心座標値を時間微分することで算出した.

#### 5.2 プッシュオフ動作に関する分析項目

プッシュオフ動作に関する分析項目は, YZ 平面上の支持脚側関節(股関節, 膝関節, 足関節)角度と角速度, XZ 平面上の支持脚側大転子と膝関節中心の相対距離(以下, 「 $D_{HK}$ 」と略す)と相対速度(以下, 「 $V_{HK}$ 」と略す)とした.

Figure 3 に, 支持脚側関節角度と  $D_{HK}$  の定義を示した. 股関節角度は体幹部と大腿部, 膝関節角度は大腿部と下腿部, 足関節角度は下腿部と足部のなす角度と定義した(Figure 3(A)). スピードスケート競技では支持脚を深く屈曲させた滑走姿勢からプッシュオフ動作が開始されるが,

500m 種目では大腿部と氷面のなす角度が最も小さくなることが報告されている (van Ingen Schenau and Bakker, 1980). このような滑走姿勢においては, XZ 平面上で大転子と膝関節中心が重なることで大腿部が算出できず, 支持脚側股関節の外転や内転を評価できないことが危惧

された. そこで,  $D_{HK}$  は, 支持脚側大転子から膝関節中心に向かうベクトルの X 座標成分とした (Figure 3(B)).  $D_{HK}$  の変化に関して, 正方向を外転, 負方向を内転と定義した. 支持脚側関節角速度や  $V_{HK}$  は, それぞれ支持脚側関節角度や  $D_{HK}$  を時間微分することで算出した.

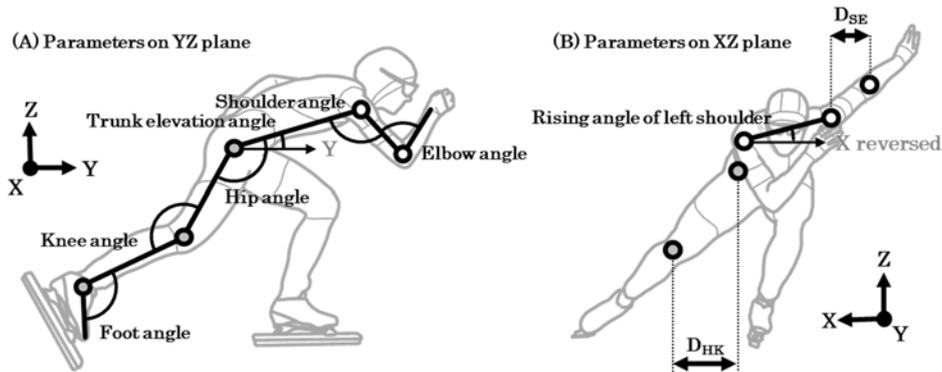


Figure 3. Kinematic parameters on the YZ and XZ planes

### 5.3 腕振り動作に関する分析項目

腕振り動作に関する分析項目は, YZ 平面上の上肢関節(肩関節, 肘関節)角度と角速度, 体幹起こし角度と角速度, XZ 平面上の肩峰から肘関節中心の相対距離(以下, 「 $D_{SE}$ 」と略す)と相対速度(以下, 「 $V_{SE}$ 」と略す), 左肩上昇角度と角速度とした.

Figure 3 に, 体幹起こし角度, 上肢関節角度と  $D_{SE}$  の定義を示した. 体幹起こし角度は, YZ 平面上の体幹部と Y 軸のなす角度とし, Y 軸を基準として反時計回りを正と定義した (Figure 3(A)). 肩関節伸展角度は体幹部と上腕部, 肘関節角度は上腕部と前腕部のなす角度と定義した (Figure 3(A)). 肩関節伸展角度は体幹部を基準として時計回りを正, 反時計回りを負とした. また, 肩関節伸展角度の変化に関して, 正方向を伸展, 負方向を屈曲と定義した. 左肩上昇角度は, XZ 平面にて右肩峰から左肩峰に向かうベクトルと反転された X 軸のなす角度と定義し, 反転された X 軸を基準として反時計回りを正, 時計回りを負と定義した (Figure 3(B)). 左肩上昇角度の変化に関して, 正方向を上昇, 負方向を下降と定義した. また, スピードスケート競技では, 体幹部を前傾させた滑走姿勢で体幹部の前後方

向に腕振り動作が実施される. このとき, XZ 平面上で肩峰と肘関節中心が重なることで上腕部を算出できず, 肩関節の外転や内転を適切に評価できないことが危惧される. そこで,  $D_{SE}$  は肩峰から肘関節中心に向かうベクトルの X 座標成分とした (Figure 3(B)).  $D_{SE}$  の変化に関して, 正方向を外転, 負方向を内転と定義した. 上肢関節角速度, 体幹起こし角速度, 左肩上昇角速度や  $V_{SE}$  は, それぞれ上肢関節角度, 体幹起こし角度, 左肩上昇角度,  $D_{SE}$  を時間微分することで算出した.

### 5.4 分析項目の時間規格化

本研究で算出した時系列データは, 左ストロークに要した時間で規格化し, 右ブレードの離氷時点を 0%時点, 左ブレード離氷時点を 100%時点とした.

### 5.5 算出された角速度の単位表記

角速度の表記が煩雑になることを回避するために, 算出された角速度[deg./s]に  $10^{-2}$  を乗じた表記 [ $10^{-2} \cdot \text{deg./s}$ ]とした.

## 6. 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.28, IBM 社製) を用いた。算出した時系列データの変化を検討するために、時点 (11 水準:0%, 10%, …, 100%) を主要因とする対応のある一元配置分散分析を行った。時点の主効果が認められた場合、Bonferroni の方法により、

隣接時点間を比較した。すべての統計処理にて、危険率 5%未満 ( $p<0.05$ ) を有意水準とした。

## III. 結果

### 1. 滑走速度に関する結果

Figure 4 に滑走速度の変化を示した。滑走速度は 50%—90%時点にて有意に増加した。

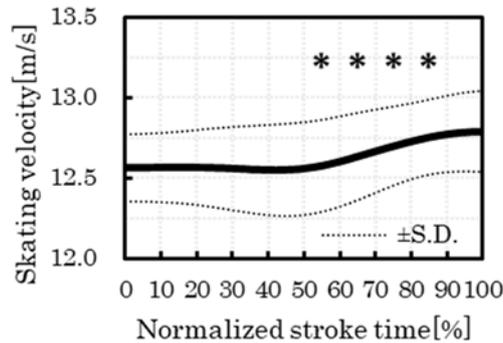


Figure 4. Change of skating velocity

### 2. プッシュオフ動作に関する結果

Figure 5 に YZ 平面上の支持脚側関節角度と角速度の変化を示した。股関節角度は 0%—100% 時点にて有意に増加した (Figure 5 (A))。膝関節角度は 20%—100% 時点にて有意に増加した (Figure 5 (B))。足関節角度は 10%—70% 時点にて有意に減少した後、80%—100% 時点にて有意に増加した (Figure 5 (C))。股関節角速度は 0%—30% 時点と 40%—80% 時点にて有意に増加し、90%—100% 時点にて有意に減少した (Figure 5 (D))。膝関節角速度は 0%—30% 時点と

50%—80% 時点にて有意に増加し、90%—100% 時点にて有意に減少した (Figure 5 (E))。足関節角速度は 0%—20% 時点にて有意に減少し、70%—90% 時点にて有意に増加した (Figure 5 (F))。

Figure 6 に、 $D_{HK}$  と  $V_{HK}$  の変化を示した。 $D_{HK}$  は 0%—90% 時点にて有意に増加した (Figure 6 (A))。 $V_{HK}$  は 30%—60% 時点にて有意に増加し、70%—100% 時点にて有意に減少した (Figure 6 (B))。

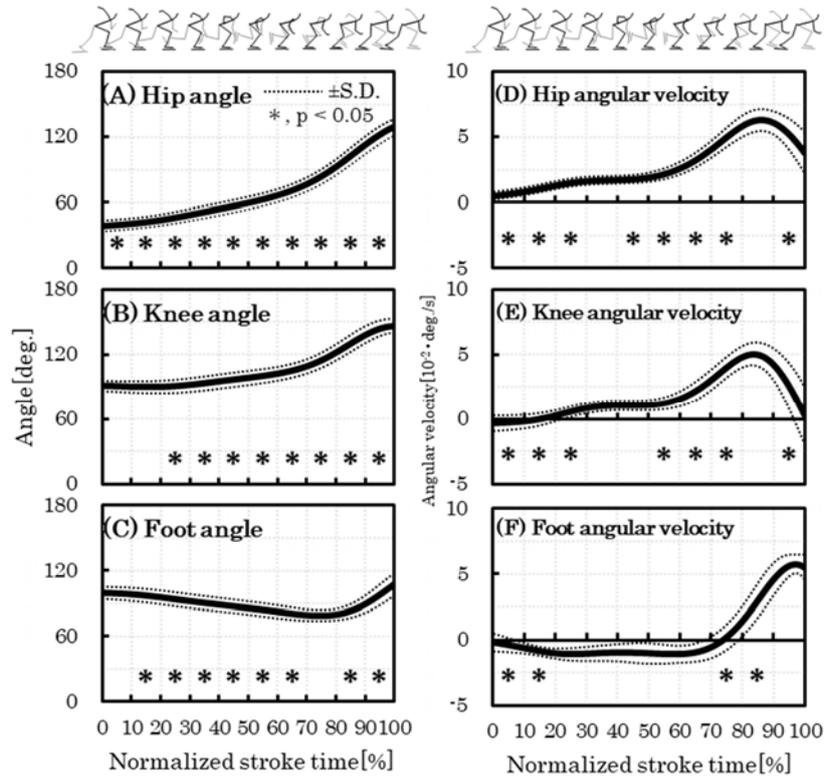


Figure 5. Joint angle and angular velocity on the support leg in the YZ plane

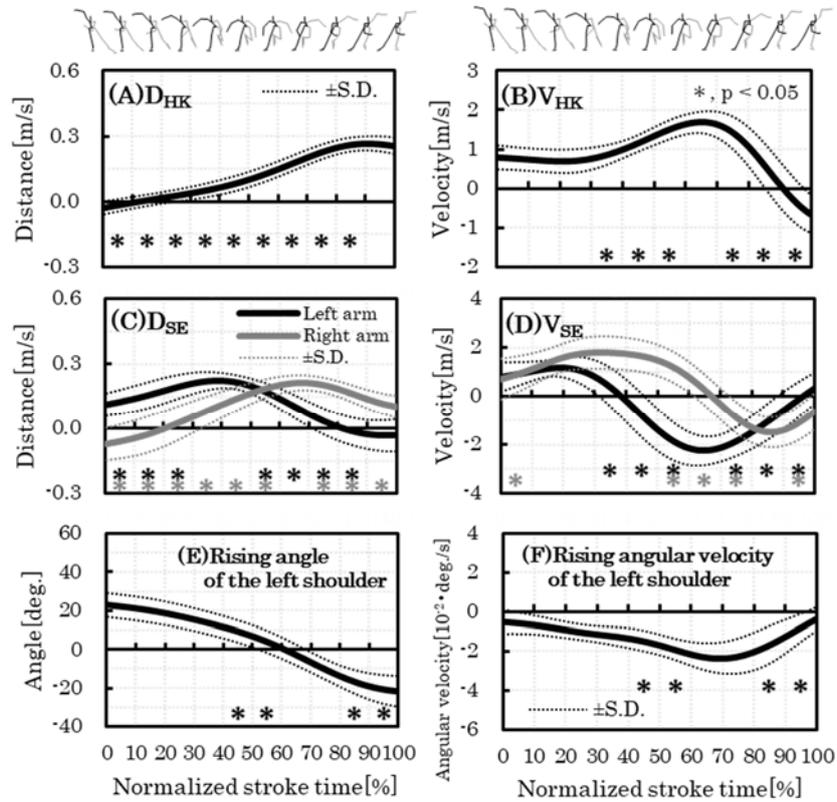


Figure 6. Changes in the kinematic parameters on the support leg and arm in the XZ plane

The parameters of the support leg were DHK and VHK. The parameters of the arm were DSE, VHK, and the rising angle and angular velocity of the left shoulder.

### 3. 腕振り動作に関する結果

Figure 6 に  $D_{SE}$  と  $V_{SE}$  の変化を示した。  $D_{SE}$  に関して、左上肢では 0%—30%時点にて有意に増加した後、50%—90%時点にて有意に減少し、右上肢では 0%—60%時点にて有意に増加した後、70%—100%時点にて有意に減少した (Figure 6 (C))。  $V_{SE}$  に関して、左上肢では 30%—60%時点にて有意に減少した後、70%—100%時点にて有意に増加し、右上肢では 0%—10%と 90%—100%時点にて有意に増加、50%—80%時点にて有意に減少した (Figure 6 (D))。

Figure 6 に左肩上昇角度と角速度の変化を示した。左肩上昇角度は 40%—60%時点と 80%—100%時点にて有意に減少した (Figure 6 (E))。左肩上昇角速度は 40%—60%時点にて有意に減少した後、80%—100%時点にて有意に増加した (Figure 6 (F))。

Figure 7 に体幹起こし角度と角速度の変化を示した。体幹起こし角度は 20%—60%時点にて有意に減少し、80%—100%時点にて有意に増加した (Figure 7 (A))。体幹起こし角速度は 0%—30%

時点にて有意に減少し、40%—90%時点にて有意に増加した (Figure 7 (B))。

Figure 8 に上肢関節角度と角速度の変化を示した。肩関節伸展角度に関して、左上肢では 0%—90%時点にて有意に減少し、右上肢では 0%—100%時点にて有意に増加した (Figure 8 (A))。肘関節角度に関して、左上肢では 10%—30%時点と 60%—100%時点にて有意に減少し、右上肢では 10%—50%時点と 80%—90%時点にて有意に増加した (Figure 8 (B))。肩関節伸展角速度に関して、左上肢では 0%—30%時点にて有意に減少した後、40%—100%時点にて有意に増加し、右上肢では 30%—60%時点にて有意に増加した後、70%—100%時点にて有意に減少した (Figure 8 (C))。肘関節角速度に関して、左上肢では 0%—20%時点と 50%—70%時点にて有意に減少、30%—40%時点と 90%—100%時点にて有意に増加し、右上肢では 0%—20%時点にて有意に増加、30%—60%時点と 90%—100%時点にて有意に減少した (Figure 8 (D))。

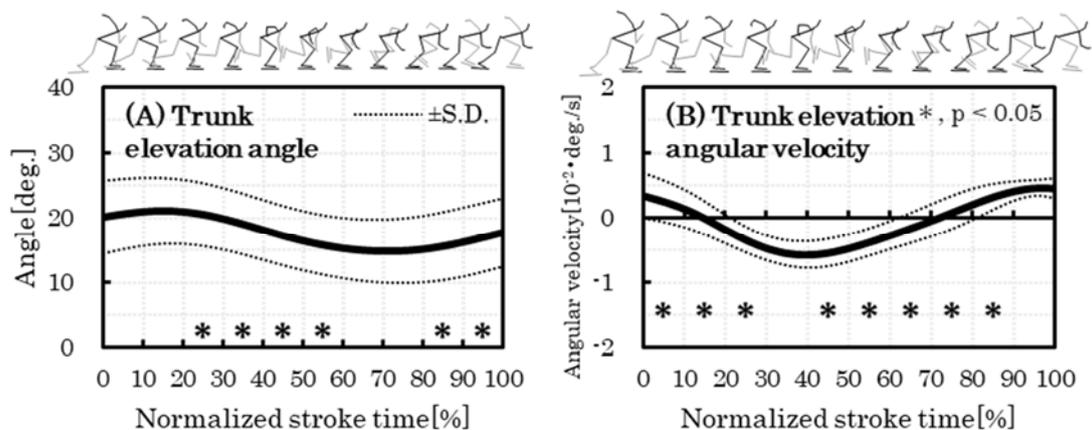


Figure 7. Trunk elevation angle in the YZ plane

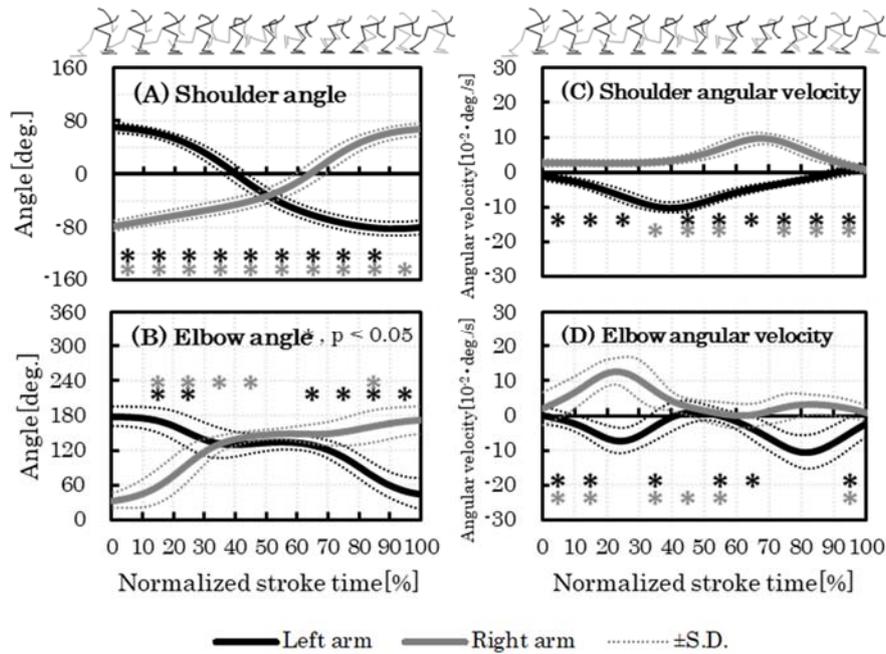


Figure 8. Joint angle and angular velocity of the arms in the YZ plane

#### IV. 考察

##### 1. 世界一流選手のプッシュオフ動作のキネマティクス

スピードスケート競技では摩擦力が極めて小さく、ブレードの移動方向に沿って支持脚を伸展させても高い滑走速度を獲得することが困難であるため、高い滑走速度を獲得する際には、ブレードの移動方向と垂直な方向に支持脚を伸展し(van Ingen Schenau and Bakker, 1980), 求心力成分を高めることが重要とされる(結城, 1999). ブレードの移動方向と垂直方向に支持脚を伸展させる際には、股関節を外転させる必要があるが、競技成績の優れた選手はストロークの早い段階で支持脚側股関節外転トルクを発揮していることが報告されている(結城, 1999). そこで、滑走速度が有意に増加する 50%—90%時点(Figure 4)付近の支持脚の運動様態に着目すると、 $V_{HK}$  が 30%—60%時点(Figure 6(B)), 股関節角速度が 40%—80%時点, 膝関節角速度が 50%—80%時点, 足関節角速度が 70%—90%時点にて有意に増加することが示された(Figure 5(D), (E), (F)). このことは、股関節伸展動作に先行して、股関節の外転動作が実施されていることを示唆するものである. 一方、股関節および膝関節角速度が有意に増加する 0%—30%時点(Figure 5(D), (E))

では、滑走速度があまり変化しないことが示された(Figure 4). この結果は、単に支持脚を伸展させるだけでは高い滑走速度を獲得することが困難とする先行研究(van Ingen Schenau and Bakker, 1980)と一致する. さらに、支持脚側股関節の外転動作が重要とされる一方で、プッシュオフ動作によって身体重心をより前方に移動させることが重要とされる(結城ほか, 1992). また、競技成績の優れた選手のプッシュオフ動作では股関節伸筋群、膝関節伸筋群、足関節底屈筋群の順番に筋活動が増大していたことが報告されている(de Koning et al., 1991). 本研究では、股関節角速度が 40%時点, 膝関節角速度が 50%時点, 足関節角速度が 80%時点から有意に増加することが示された(Figure 5(D), (E), (F)). このことは、本研究においても股関節伸筋群、膝関節伸筋群、足関節底屈筋群の順番に筋活動が増大したことを示唆するものであろう.

以上のことから、世界一流選手は支持脚側股関節を外転させた後、体幹部と近位にある股関節から足関節に向かって順番に伸展あるいは底屈させることで滑走速度を高めていたと考えられる.

## 2. プッシュオフ動作と腕振り動作のキネマティクス

上肢と下肢の運動の間には相互干渉作用があることが報告されている(笠井, 1984). これによって, 例えば, 右上肢の伸展動作は左下肢の伸展動作を促進する一方で, 右下肢の伸展動作は抑制される. そこで, 本研究では上肢と下肢の外転動作や伸展動作を考察する.

### 2.1 世界一流選手の上肢と下肢の外転動作

スピードスケート競技の指導教本(日本スケート連盟, 2010)では, 脇を締めた腕振り動作が重要とされている.  $D_{SE}$  に着目すると, 左上肢では 0%—30%時点にて有意に増加した後, 50%—90%時点にて有意に減少し, 右上肢では 0%—60%時点にて有意に増大した後, 70%—100%時点にて有意に減少することが示された(Figure 6(C)). これは, ストローク前半では脇を開いた後, ストローク後半にて脇を締めるような腕振り動作が実施されていることを示唆するものである. 本研究の結果が指導教本(日本スケート連盟, 2010)と異なる要因として, 指導教本ではフリーハンドとワンハンドに共通する腕振り動作が示されていることが挙げられる. スピードスケート競技のストレート滑走動作では, 平均速度が最も高い 500m 種目ではすべての選手がフリーハンドを実施し, 500m 種目よりも平均速度が低い種目程ワンハンドが実施される傾向にある. また, ストレート滑走動作ではストロークの早い段階で支持脚側股関節外転トルクを発揮することが重要であるが, 競技成績の劣る選手はストローク前半にて支持脚側股関節内転トルクを発揮していたことが報告されている(結城, 1999). 上肢と下肢の相互干渉効果(笠井, 1984)を考慮すると, 脇を開くように右上肢の腕振り動作を実施することで, 支持脚側股関節の外転動作が促進されると考えられる.  $D_{HK}$  に着目すると, 0%時点にて $-0.03 \pm 0.03m$ を示した後, 有意に増加し, 20%時点付近で正の値を示した(Figure 6(A)). また,  $V_{HK}$  は 30%—60%時点にて有意に増加することが示された(Figure 6(B)). このとき,  $V_{HK}$  があまり変化しなかったものの(Figure 6(B)), 0%—10%時点にて右上肢の  $V_{SE}$

が有意に増加することが示された(Figure 6(D)). 0%—10%時点にて左上肢の  $V_{SE}$  があまり変化しなかった(Figure 6(D))ことを鑑みると, ストローク開始時点から右上肢の外転動作を強調したことで, 内転位にある支持脚をストロークの早い段階で外転位に転じさせることができたと考えられる.

$V_{HK}$  が有意に増加する 30%—60%時点(Figure 6(B))における両上肢や体幹部の運動様態に着目すると, 30%—60%時点にて左上肢の  $V_{SE}$  は有意に低下するとともに, 40%—60%時点にて負の値を示した(Figure 6(D)). また, 40%—60%時点にて左肩上昇角速度(Figure 6(F)), 50%—60%時点にて右上肢の  $V_{SE}$  が有意に減少することが示された(Figure 6(D)). これらのことは, 30%—60%時点では左上肢の内転動作を開始させた後, 左肩を下降させるように左上肢の腕振り動作を実施していたことを示唆するものである. 左上肢の内転動作(Figure 6(C))に伴って身体重心は右上肢側に移動し, 身体が右上肢側に傾斜することで支持脚である左脚はより外転位を示す(Figure 6(D)). また, 近位の身体部分を素早く回転させることで, 遠位の身体部分も素早く回転する. 30%—50%時点では右上肢の  $V_{SE}$  があまり変化しない(Figure 6(D))ことを鑑みると, 世界一流選手は支持脚である左脚の外転動作を開始する際には, 左上肢を外転方向から内転方向に転換した後, 肩を素早く内旋させたうえで左上肢の内転速度を高めていたと考えられる.

### 2.2 世界一流選手の上肢と下肢の伸展動作

素早いプッシュオフ動作が実施される 40%—90%時点(Figure 5(D), (E), (F))付近の上肢や体幹部の運動様態に着目すると, 右上肢の肩関節伸展角速度が 30%—60%時点にて有意に増大した後, 70%—100%時点にて有意に減少する一方で, 左上肢の肩関節伸展角速度が 40%—100%時点にて有意に増加することが示された(Figure 8(C)). また, 左上肢の肩関節伸展角速度は 40%—90%時点にて負の値を示すとともに, 有意に増加することが示された(Figure 8(C)). これらのことから, ストレート滑走動作ではプッシュオフ動作に先行して右上肢を体幹部後

方に素早く振り上げた後、左上肢をゆっくりと体幹部前方に振り上げていることが示唆された。YZ平面上にて身体重心を前方移動させる場合、着氷する足部を回転中心として支持脚を移動方向、すなわち時計回りに素早く伸展させる必要がある(結城ほか, 1992)。右上肢を素早く体幹部後方に振り上げる動作は、右肩関節を回転中心として時計回りの運動であり、プッシュオフ動作の方向と一致するため、素早いプッシュオフ動作の実施に貢献する運動と考えられる。一方、左上肢を体幹部の前方にて素早く振り上げる動作は左肩関節を回転中心とした反時計回りの運動であり、素早いプッシュオフ動作を抑制しうる運動である。両上肢の後方あるいは前方振り上げ動作が同時に実施されると、左上肢の運動によって右上肢が獲得した時計回りの勢いが軽減され、プッシュオフ動作の開始時点が遅延する可能性がある。このことから、左上肢に先行して右上肢の後方振り上げ動作を開始したことで、プッシュオフ動作の開始時点を早めていたと考えられる。

また、40%—90%時点にて体幹起こし角速度と左上肢の肩関節伸展角速度が有意に増加することが示された(Figure 7(B), 8(C))。このことは、左上肢の前方振り上げ動作に伴って、体幹部が起こされるように変化することを示唆するものである。体幹部が起こされることで前投影面積は増加する。これは空気抵抗を増加させる要因であり、空気抵抗は滑走速度を低下させる要因である(van Ingen Schenau, 1992; 湯田ほか, 2009)。これらのことから、左上肢を前方に振り上げる際に、その勢いを弱めることで、体幹部を起こすことなくプッシュオフ動作を開始し、効率よく滑走速度を高めていたと考えられる。

右上肢の肩関節伸展角速度は70%時点から有意に減少し、100%時点にて負の値に転じるように変化した(Figure 8(C))。60%—70%時点にて右上肢が屈曲位から伸展位に転じた(Figure 8(A))ことを鑑みると、世界一流選手は右上肢を体幹部のより後方まで振り上げるのではなく、体幹部の近位付近で腕振り動作の方向を切り返していたと考えられる。右肩関節を回転中心として右上肢を体幹部後方に振り上げることは、素早い

プッシュオフ動作に影響する(笠井, 1984)と考えられる。これによって、足関節を回転中心として股関節と膝関節が大きく伸展することで、着氷する足部がより後方に位置するように変化すると推察される。しかし、氷面の摩擦力は極めて小さく、支持脚をより前方に伸展させても推進力を効率よく獲得することは困難である(van Ingen Schenau and Bakker, 1980)。ここで、70%—100%時点における支持脚の各関節角速度に着目すると、股関節および膝関節角速度は70%—80%時点にて有意に増加した後、90%—100%時点で有意に減少することが示された(Figure 5(D), (E))。そのため、支持脚を伸展させる過程で支持脚と対角側上肢を伸展方向から屈曲方向に転じさせることで、支持脚の過度な伸展動作を抑制していたと考えられる。

### 3. 本研究の限界と今後の展望

陸上における腕振り動作には、下肢の運動により獲得された不要な角運動量を相殺するだけではなく、より大きな推進力を獲得する役割があるとされる(Hinrichs et al., 1987; 伊藤, 1991)。本研究では、世界一流選手を分析対象とするために国際競技大会にて映像収集をしたため、角運動量や推進力を測定することはできなかった。今後は、「フリーハンド」「ワンハンド」「腕振りなし」の実験条件下で獲得されたブレード反力の測定や関節トルクや角運動量を算出し、氷上における腕振り動作の役割を解明する必要がある。

また、本研究では世界一流選手に関するキネマティクスの特徴を検討できたが、優れた競技成績の獲得に資するキネマティクスの特徴は明らかにできていない。今後は、競技成績の異なる集団の滑走動作を比較し、競技成績と関連するキネマティクスの特徴を検討する必要がある。

## V. 結論

本研究の目的は、スピードスケート競技男子500m種目世界一流選手のストレート滑走動作におけるプッシュオフ動作とフリーハンドのキネマティクスを検討することであった。本研究では滑走速度、支持脚側関節角度と角速度、 $D_{HK}$ と $V_{HK}$ 、

体幹起こし角度, 上肢関節角度と角速度, 左肩  
上昇角度と角速度,  $D_{SE}$  と  $V_{SE}$  を分析し, 以下の  
結果を得た.

- 1) 滑走速度は 50%—90%時点にて有意に増加した( $p<0.05$ ).
- 2) 支持脚側関節角速度に関して, 股関節角速度が 30%時点, 膝関節角速度が 40%時点, 足関節角速度が 70%時点から有意に増加し始めた( $p<0.05$ ).
- 3)  $D_{HK}$  は 0%時点にて負の値を示した後, 有意に増加し, 20%時点付近で正の値を示した( $p<0.05$ ).
- 4) 肩関節伸展角度に関して, 60%—70%時点にて右上肢が屈曲位から伸展位に転じた. 肩関節伸展角速度に関して, 左上肢では 40%—90%時点にて有意に減少し, 右上肢では 30%—60%時点にて有意に増加した後, 70%—100%時点にて有意に減少した( $p<0.05$ ).
- 5)  $V_{SE}$  に関して, 左上肢では 30%—60%時点にて有意に減少し, 右上肢では 0%—10%時点にて有意に増加した( $p<0.05$ ).

以上のことから, 世界一流選手は滑走速度が高まる際に, 股関節伸展動作に先行して股関節を外転させているが, このとき, ストローク開始時点から支持脚と対角側上肢の外転動作を強調するとともに, 同側上肢を素早く内転させていることが示唆された. また, 滑走速度が高まる際には, 世界一流選手は支持脚と同側上肢に先行して対角側上肢を素早く後方に振り上げていること, 支持脚側上肢をゆっくり前方に振り上げていること, 支持脚を伸展させる過程で後方に振り上げた上肢を伸展方向から屈曲方向に転換していることが示された.

## 謝辞

本研究では, 公益財団法人日本スケート連盟と国立スポーツ科学センターが協力して収集した映像を, 両団体の許可を得たうえで利用させていただいた. ここに記して感謝の意を表す.

## 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, 22-23.
- ・de Koning, J. J., de Groot, G., and van Ingen Schenau, G. J. (1991) Speed skating the curves: A study of muscle coordination and power production. *Int J Sport Biomech*, 7(4), 344-358.
- ・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(12), 1009-1015.
- ・Hinrichs, H. N. (1987) Upper extremity function in running. II: Angular momentum consideration. *Int J Sport Biomech*, 3(3), 242-263.
- ・Hinrichs, R. N., Cavanagh, R. R., and Williams, K. R. (1987) Upper extremity function in running. I: Center of mass and propulsion considerations. *Int J Sport Biomech*, 3(3), 222-241.
- ・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., and Claire, T. C. (2009) Assessment of the influence of pole carriage on sprint kinematics: A case study of novice athletes. *Int J. Sport Sci Eng*, 3(1), 3-10.
- ・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ふ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.
- ・Kimura, Y., Yokozawa, T., Maeda, A., and Yuda, J. (2022) Changes in straight skating motions in world-class long-distance speed skaters during

- the ladies' 3,000-m race. *Int J Sport Health Sci*, 20, 37-47.
- Mann, R., and Herman, J. (1985) Kinematic analysis of Olympic sprint performance: men's 200 meters. *J Appl Biomech*, 1(2), 151-162.
  - 日本スケート連盟 (2010) スピードスケート指導教本[滑走技術初級編]. 財団法人日本スケート連盟スピードスケート強化部, p.9.
  - 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(12), 124502-1-5.
  - 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(1), 89-99.
  - van Ingen Schenau, G. J. (1982) The influence of air friction in speed skating. *J Biomech*, 15(6), 449-458.
  - van Ingen Schenau, G. J., and Bakker, K. (1980) A biomechanical model of speed skating. *J Hum Mov Stud*, 6, 1-18.
  - Wells, R. P., and Winter, D. A. (1980) Assessment of signal noise in the kinematics of normal pathological and sporting gaits. *Proceedings of the special conference of the Canadian society for biomechanics-Human Locomotion I-*, 92-93.
  - 横澤俊治・斉川史徳・熊川大介 (2020) スピードスケート男子 1,500m 競技における世界一flow スケートのカーブ滑走技術. *J High Perform Sport*, 6, 139-151.
  - Yuda, J., and Ae, M. (2002) A comparison of the skating technique in the curve for elite and junior sprint speed skaters. *ISBS-conference proceedings archive*, 96-99.
  - 湯田淳・青柳徹・高松潤二 (2006) スピードスケート女子 500m 競技における世界一flow 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.
  - 湯田淳・青柳徹・高松潤二・山辺芳・鈴木恵一 (2009) スピードスケートにおける滑走姿勢の相違が空気抵抗に及ぼす影響. *日本女子体育大学紀要*, 39, 9-15.
  - 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的研究-世界一flow 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・青柳徹・藤井範久・阿江通良 (2005) スピードスケート長距離種目におけるカーブ滑走中の下肢キネティクスの変化. *バイオメカニクス研究*, 9(2), 53-68.
  - 結城匡啓 (1999) スピードスケートの動作解析. *計測と制御*, 38(4), 236-241.
  - 結城匡啓 (2018) スピードスケートにおけるスプリント能力. *日本スプリント学会編, スプリント学ハンドブック すべてのスポーツパフォーマンスの基盤*. 西村書店, pp.132-144.
  - 結城匡啓・阿江通良・浅見高明 (1992) 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.
  - 結城匡啓・阿江通良・藤井範久 (1997) 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*, 211-217.