

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K10850

研究課題名（和文）スピードスケートの遊脚動作が速度獲得に及ぼす影響に関するバイオメカニクス的研究

研究課題名（英文）A biomechanical study on the effect of swing motion on speed skating

研究代表者

結城 匡啓（YUKI, Masahiro）

信州大学・学術研究院教育学系・教授

研究者番号：90302398

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：スピードスケートのイミテーション動作を3次元的に解析した結果、当初の仮説とは異なり、金メダリストの上半身の運動が、遊脚による加速動作に先行して生じており、そのことが競技レベルの劣る大学段階の国内レベルの選手とはもっとも大きく異なる点であること、金メダリストであっても、遊脚の動きには左右差が認められ、左ストロークでの加速が小さいことが明らかとなった。その動きは、重心の回転運動、すなわち側方への倒れこみ動作のスピードに影響し、質量の体幹の大きな角運動量を大きくする可能性を見出した。また、骨盤を後傾する意識は、体幹下部の筋放電量に大きく影響し、上半身と下半身を連動させることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スポーツの動作解析において現行で最も多用されている剛体リンクモデルでは、骨盤を含む体幹部を1つまたは2つの剛体と仮定して解析するため、骨盤の微小な動きが四肢に及ぼす影響について検討することができない。本研究では、特殊なマーカーを配置することによりとらえようとした（学術的意義）。本研究の結果から『骨盤を後傾させる意識』が体幹と股関節の筋活動に連動を生じさせ、体幹の安定性が増すとともに下肢の発揮パワーが大きくなることが示唆された。この指導言語は、交付中に開催された冬季オリンピックの金メダル獲得に貢献する金言となった（社会的意義）。

研究成果の概要（英文）：Various imitation exercises in speed skating were analyzed in three dimensional. Contrary to the initial hypothesis, in many of the exercises, the movement of the upper body of the Olympic Gold medalist occurred before the acceleration movement of the swing free leg. This was the biggest difference between gold medalist and university-domestic level athletes with a lower level of competition. Even in Gold medalist, there was a difference between the left and right movements of the swing leg, and it was found that the acceleration in the left stroke was small. Furthermore, this movement may affect the rotational movement of the center of gravity, that is, the speed of the lateral collapse movement, and may increase the large angular momentum of the trunk mass of the body. It was concluded that awareness of controlling the tilt angle of the pelvis greatly affects the amount of muscle discharge from the lower trunk, linking the upper and lower body in speed skating.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：スピードスケート 3次元解析 バイオメカニクス 遊脚 骨盤 体幹 金メダリスト 指導言語

### 1. 研究開始当初の背景

(1) いまやスポーツは健康を増進させ豊かな人生を送るために必要不可欠なものといえる。また、見るためのスポーツも時には国民を元気づける大きな力が潜在すると考えられ、オリンピックなどの国際競技会での日本選手の活躍は国民を勇気づけ、子どもに夢を与えるという意味で極めて大きな国益をもたらす。最近では、国際競技力の向上を目的とした国ぐるみのスポーツ競技力向上対策が各国で政策として練られている。いわゆるスポーツ科学研究センターやナショナルトレーニングセンターなどの専門施設がその象徴である。このようにスポーツの科学的な取り組みは、選手やコーチの努力を競技成績という結果に効果的に導く。

(2) 研究代表者は、スピードスケート競技で2016/17シーズン国内外の500mで全勝し、世界選手権を含む世界タイトルをすべて勝ち取った世界チャンピオンを13年間指導している(2018年当時)。この躍進の背景には、スケート滑走動作中の遊脚の動かし方の改善と、それを支える体幹部の安定性の獲得という2つの技術的要因が滑走スピードの獲得に大きく関与したとみている。申請者らは、これまで支持脚の動きの分析に重きをおいて研究を重ねてきたが、上述のような現場での指導を通して遊脚の動かし方の重要性に気づいた。一方で、世界チャンピオンの他に16名の大学段階の選手を指導する過程で、遊脚の動きを改善するためにはそれを支持脚側の体幹部、とりわけ骨盤周辺部位の関わりが根底にあることを経験的に認識させることにより、支持脚側の骨盤と遊脚側の骨盤、すなわち左右の骨盤をそれぞれ別々に機能させるコントロールがスピードスケートの滑走技術改善のKeyファクターになると着想するに至った。これまでの我々の研究を含む国内外のスピードスケートの技術的要因に関連する研究は、支持脚の動きを対象にしたものが多く、遊脚の動かし方が競技パフォーマンスに影響するという知見は見当たらないという背景がある。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、世界チャンピオンを含む国内トップ選手のスピードスケート滑走動作を対象に体幹の多分節剛体リンクモデル化により骨盤周辺部位の動きに注目して3次元的にとらえ、骨盤・体幹部を介した両脚間の身体重心の移動メカニズムについて検討することにより、遊脚の動きが滑走速度の獲得に及ぼす影響について明らかにすることである。

(2) 研究目的を達成するために、4つの研究課題を設定した。

課題1：世界チャンピオンを含む15名の国内トップ選手の陸上トレーニング手段として用いられるイミテーション動作を遊脚および骨盤周辺部位の動きに着目して3次元的に分析し、競技成績レベルと関連づけて検討することにより、優れた体幹部および遊脚の技術的要因についてバイオメカニクス的に検討する(実験1)。

課題2：陸上イミテーション動作において異なる3種類の遊脚の動きで全力の側方ジャンプを行わせ、遊脚を積極的に活動させたときの支持脚の発揮パワーについて分析し、遊脚の動きが滑走速度に及ぼす影響についてバイオメカニクス的に検討する(実験2)。

課題3：陸上イミテーション動作において異なる2種類の骨盤角度の動きと筋電図法を3次元動作解析に併用し、骨盤の角度が滑走速度に及ぼす影響についてバイオメカニクス的に検討する(実験3)。

課題4：スピードスケートにおける骨盤部位を介した両脚間の身体重心の移動メカニズムについて検討し、遊脚の動きが滑走速度の獲得に及ぼす影響について明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 研究課題1に関連して

よく鍛錬された被験者15名(男子3名、女子12名)に9種類のドリル運動を行わせ、ビデオカメラを用いてその動作を撮影するとともに地面反力を測定した。得られた映像を用いて被験者のドリル動作を3次元的に解析し、指導現場で意識されている内容と関連付けて検討した。

(2) 研究課題2に関連して

よく鍛錬されたスピードスケート選手に異なる5つの側方ジャンプ動作(以下SJ)を「なるべく遠くに跳ぶように」指示して行わせ、2台のカメラを用いてその動作を撮影するとともに地面反力を測定した。得られた映像を用いて被験者の動作をDLT法により3次元的に解析した。

(3) 研究課題3に関連して

よく鍛錬されたスピードスケート選手に骨盤の傾斜に関する2つの異なる意識で4種類の陸上トレーニング動作を行わせ、表面筋電計を用いて計測するとともに、2台のVTRカメラで撮影して3次元的に解析した。

骨盤傾斜について以下の2つの意識で試技を行わせた(図1)。

「骨盤前傾」意識：骨盤を前傾させる(図1左)。

「骨盤水平」意識：骨盤の上辺(腸骨稜ライン)が水平に

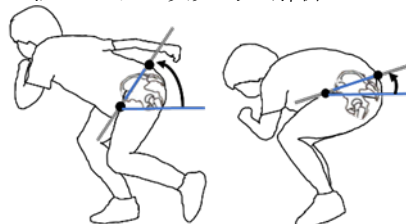


図1 骨盤角の定義と特殊マーカー位置。左は「骨盤前傾」、右は「骨盤水平」のイメージ

なるように骨盤を後傾させる（右）。

スピードスケートは水平方向の重心速度を大きくすることが優れたゴールタイムを達成するために重要である（結城ほか（1997））。そこで4種類の動作の合理性を判定するためのパフォーマンスの評価は、図2に示すように、ジャンプ動作の着地時の重心速度の水平成分を  $V_{h1}$ 、離地時の水平成分を  $V_{h2}$  とし、所要時間を  $t$  とするとき、質量  $M$  のスケーターが発揮した力積  $Ft$  を以下の式(1)により求めることができる。

$$Ft = M \cdot V_{h1} - M \cdot V_{h2} \dots\dots\dots (1)$$

本研究では、式(1)を  $F$  について解くことにより（式(2)）スケーターが発揮した平均水平反力  $F$ （単位は kgf）をパフォーマンス評価に用いた。

$$F = M(V_{h1} - V_{h2}) / t \dots\dots\dots (2)$$

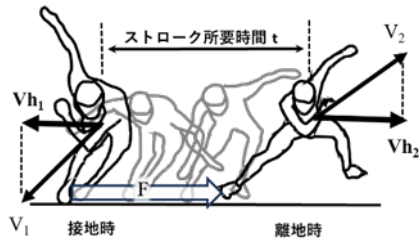


図2 水平力積の概念図。水平速度  $V_{h1}$  で右足接地し、ストローク終了時に  $V_{h2}$  で離地する

#### 4. 研究成果

##### (1) 研究課題1に関連して

本研究の結果、優れた選手（オリンピック2名、うち1名は金メダリスト）のドリル動作の特徴について以下のことが明らかとなった。①「踏台昇降」および「押しジャンプ」において、支持脚の膝を固定して大腿を起こしている。②「スローウォーク」および「押し」において、支持脚下腿の前傾速度を抑え、重心を等速に前傾させている。③「横倒れ」において、支持脚の外傾が大きく遊脚大腿が外転位になっている。④スライドボードにおいて、支持脚を大きく内傾させ、地面反力の側方成分を大きくしている。⑤「スネ揃え」および「バックスケートジャンプ」において、支持脚下腿の傾斜を小さくしたまま、支持脚でプッシュしている。⑥「連続サイドジャンプ」において、遊脚の大きな振り出しにあわせて支持脚をプッシュしている。

また、上記の特徴と指導現場で意識されている内容を関連させて検討し、各ドリルで目指されるべき技術課題について以下の示唆を引き出した。①「踏台昇降」および「押しジャンプ」では、支持脚の膝を止め、前方へ乗り込むように支持脚を伸展させること。②「スローウォーク」および「押し」では、肩の位置を固定して支持脚膝または足関節を伸展させること。③「横倒れ」では、支持脚を外傾位で伸展させ、遊脚大腿を外転位にして次のストロークの着地動作に移行すること。④スライドボードでは、横に力を発揮しながら、遊脚の振り入れに合わせて支持脚のプッシュを開始すること。⑤「スネ揃え」および「バックスケートジャンプ」では、すばやく両脚下腿を揃え、支持脚の膝を支持脚側へ残すようにジャンプすること。⑥「連続サイドジャンプ」では、できるだけ移動方向側に接地し、遊脚をすばやく前方へ振り出すと同時に側方へジャンプすること。

##### (2) 研究課題2に関連して

ジャンプ長と重心の動きについてみると、静止 SJ で跳躍動作を始めてから踏切までにかかった時間は、遊脚意識で固有よりも長くなる傾向にあった。ジャンプ長は遊脚意識で固有よりも有意に大きかった ( $p < 0.05$ )。連続 SJ の踏切時間およびジャンプ長に試技間で有意な差は見られなかった。静止 SJ の踏切角は、遊脚意識で固有よりも大きい傾向が見られ、より鉛直方向に跳んでいたのに対して、連続 SJ では条件間で統計的な差は見られなかった。

発揮パワーについてみると、静止 SJ の地面反力のピーク値は、側方成分では遊脚意識で固有よりも大きい傾向が見られ、鉛直成分では遊脚意識で固有よりも有意に大きかった ( $p < 0.05$ )。静止 SJ の発揮パワーのピーク値は、遊脚意識で固有に比べて大きかった ( $p < 0.05$ )。連続 SJ では条件間で統計的な差は見られなかった。

角運動量についてみると、全身の角運動量のピーク値は固有に比べて遊脚意識で大きかった ( $p < 0.05$ )。部位別では、遊脚と体幹の角運動量が遊脚意識で大きくなっていった ( $p < 0.05$ )。このことから、遊脚を意識して後方に大きく動かすことで体幹の動きも大きくなり、大きな角運動量が獲得できたと考えられる。連続 SJ では、固有に比べて骨盤水平意識で体幹方向角が大きくなる傾向があった。

以上のことから、スピードスケートの模倣動作としての側方ジャンプにおいて、遊脚を意識的に大きく動かすことによって、質量の大きな体幹の側方の動きを生み出すことにつながるが、反作用としての側方への発揮パワーが大きくなるこ

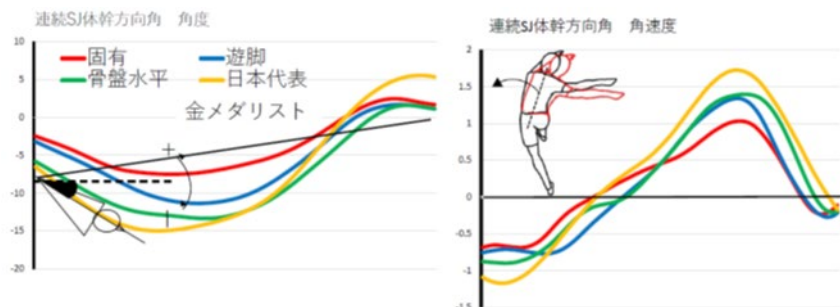


図3 連続サイドジャンプにおける体幹方向角および角速度

とが明らかとなった。また、連続 SJ のバイオメカニクスの特徴として、発揮パワーや角運動量に統計的な差は見られなかった。しかし、体幹方向角では、骨盤水平意識で遊脚意識と同様に固有よりも角度が大きくなる傾向がみられ、金メダリストを含む日本代表選手は、学生選手と比べて、支持脚側により大きく捻ることで、タメを生み出しすばやく跳躍方向へと体幹を動かしていることがわかった (図 3)。

### (3) 研究課題 3 に関連して

課題 3 では、実際のスピードスケート 500m レースを想定し、スタート動作から、高いピッチのバックスケートジャンプ、コーナーロープ牽引、そして側方移動の大きいスライドボード滑走の 4 種類の陸上トレーニング動作を設定した。もっとも氷上滑走に類似したイミテーションとして、図 4 にはバックスケートジャンプ動作における角度 (上段) および角速度 (下段) の変化を示した。左側が「骨盤前傾」試技、右側が「骨盤水平」試技である。角度は、上から順に、体幹角、骨盤角、股関節、膝関節、足関節角度 (単位は deg) で、下段の角速度は、股関節、膝関節、足関節 (rad/s) である。分析範囲の右接地から次の右接地までを示しており、縦の補助線は左足接地である。

両試技を比較すると、最上段に示したように体幹角には両試技で相違は小さいが、骨盤角は大きく異なっていることがわかる。「骨盤水平」試技における股関節と膝関節のストローク開始時の角度が小さく、股関節、膝関節、足関節の伸展角速度が大きい。股関節と膝関節のストローク開始時の角度がより屈曲していたことは、その後の伸展動作における関節可動域が大きくなり、伸展角速度が大きかった要因であると考えられる。また、伸展角速度が大きいことが、側方へのキック力を大きくし、跳躍水平距離を大きくしたと推測される。

図 5 は、被験筋の筋電図を示したもので、左側が「骨盤前傾」試技、右が「骨盤水平」試技のものである。「骨盤水平」試技における大臀筋・中殿筋の筋放電は振幅も大きく、かつ波形が連続している「ワンモーション」であるのに対し、「骨盤前傾」試技では、支持局面における波形が途中で途切れるような、いわゆる「ツーモーション」になっているのがわかる。また、「骨盤水平」試技では、BSJ 着地時に腹直筋・腹斜筋・前鋸筋の筋放電がみられている。これらのことは、「骨盤水平」試技の筋活動は、タイミングが早いことに加えて着地と跳躍が一連の動作となっていることを示すと考えられ、ストローク時間が短いことの要因ととらえられる。

以上のように課題 3 では、スピードスケートにおいて骨盤を水平にする意識が陸上トレーニング手段として用いられている模倣動作にどのような影響を及ぼすのかについて表面筋電図及び 3 次元解析を用いて明らかにすることを目的とした。

その結果、以下のことがわかった。①スタート模倣動作では、下肢の伸展筋群の活性が大きくなり、重心速度の立ち上がりが早まり、水平速度も大きくなる。②バックスケートジャンプでは、殿筋群と腹筋群の筋活動が継続して大きく、股関節が深く屈曲して伸展速度が大きくなる。③カーブロープ牽引では、左ストローク時の大内転筋の活性が高まり特に左ストロークの牽引速度が顕著に大きくなる。④スライドボードでは、殿筋群と腹筋群の筋活動が連動して大きく、下肢関節の屈曲が深く安定滑走する。

以上のように、実際の 500m レースをモデル化した上記スピードスケートの陸上トレーニング動作では、いずれも「骨盤水平」意識の試技で優れたパフォーマンスを達成しており、スピードスケートでは「骨盤を後傾させるように水平に保つ意識」が合理的であると結論された。

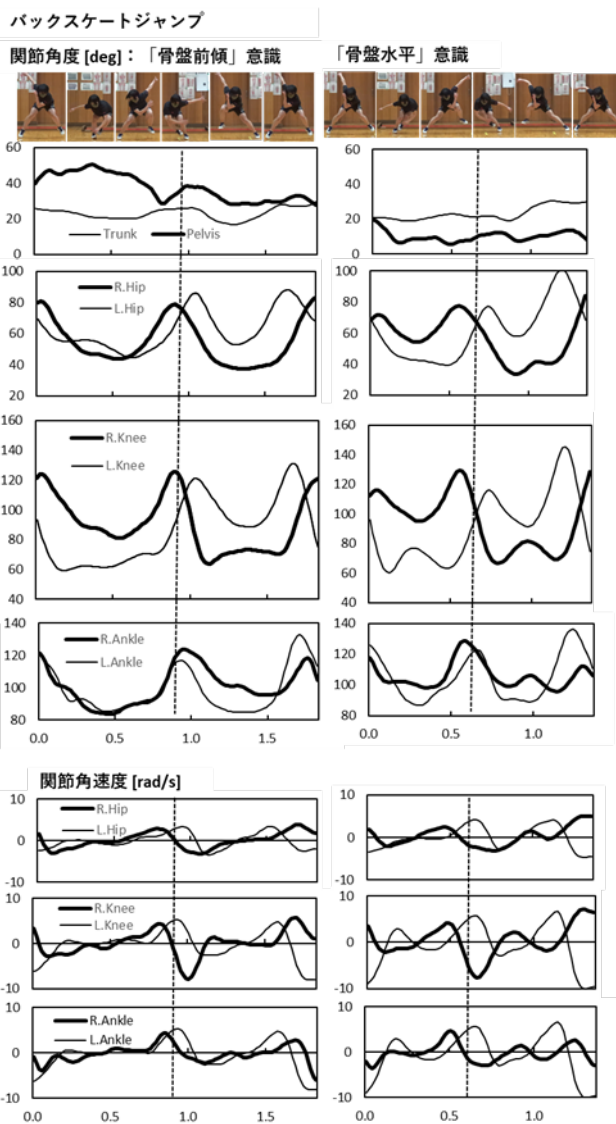


図4 両試技におけるバックスケートジャンプ中の角度 (上段) および角速度 (下段) の変化。左側が「骨盤前傾」試技、右側が「骨盤水平」試技。上から順に、体幹角、骨盤角、股関節、膝関節、足関節の角度 (単位はdeg)。下段は、股関節、膝関節、足関節の角速度 (rad/s)。縦の補助線は、左足接地を示す。

(4) 研究課題4に関連して

研究課題1から3を通して、様々なスピードスケートのイミテーションエクササイズにおける選手の下肢の動作を3次元的に解析した結果、当初の予想(仮説)とは異なり、多くのエクササイズで金メダリストの上肢を含めた上半身の運動が、遊脚による加速動作に先行して生じており、そのことが競技レベルの劣る大学段階の国内レベルの選手とはもっとも大きく異なる点であること、金メダリストを含む優れた選手であっても、遊脚の動きには左右差が認められ、左ストロークでの加速が小さいことが明らかとなった。さらに、その動きは、重心の回転運動、すなわち側方への倒れこみ動作のスピードに影響し、質量の体幹の大きな角運動量を大きくする可能性を見出した。また、骨盤の傾斜角度を制御する意識は、体幹下部の筋放電量に大きく影響し、上半身と下半身を連動させる意識づけが重要であることを結論された。

一般に、スピードスケートの指導においては、『骨盤を後傾させる意識』は、身体が滑走スケートに対して遅れる、いわゆる「腰が引けた」姿勢を避けるために用いられることが少ない指導言語であるように思われる。しかし、本研究の結果からは、『骨盤を後傾させる意識』は、体幹と股関節の筋活動に連動を生じさせ、体幹の安定性が増すとともに下肢の発揮パワーが大きくなることが示唆された。

今後は、さらに被験者を増やした追加検討や、持久性が要求される中・長距離種目をターゲットにした骨盤の角度に関する合理性が究明されれば、さらに競技現場に役立つ知見が見出されるであろう。

<引用文献>

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. 日本バイオメカニクス学会編. 身体運動のバイオメカニクス, pp. 211-217

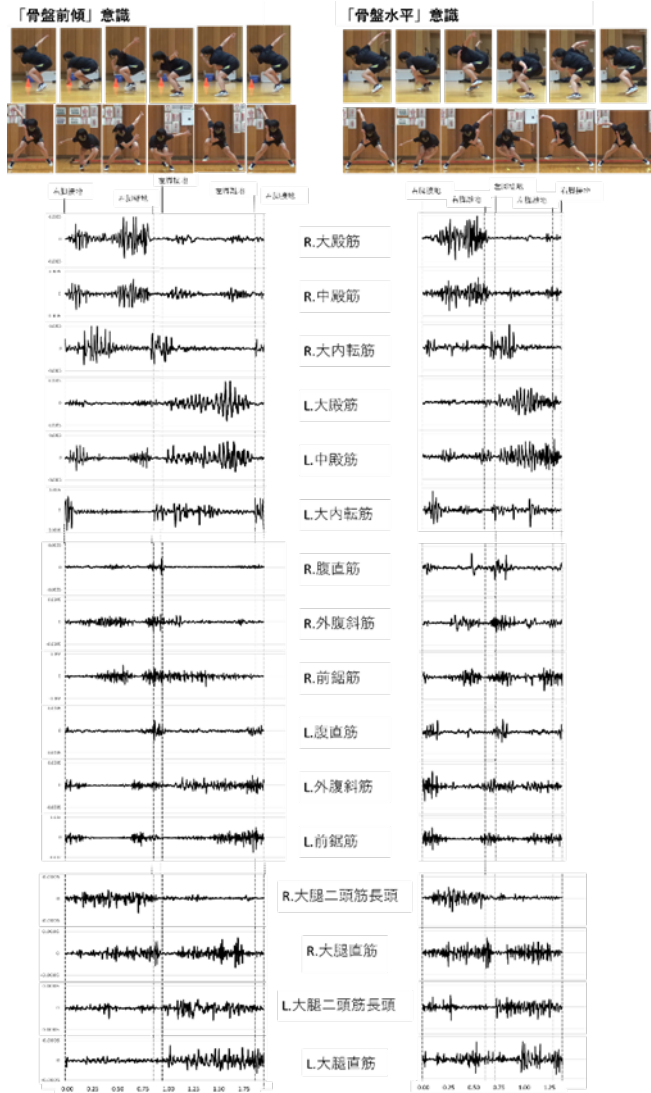


図5 Back Skate Jumpの筋活動パターン. 左が「骨盤前傾」意識、右が「骨盤水平」意識

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 結城匡啓	4. 巻 26
2. 論文標題 科学的コーチング実践を目指して～スピードスケート金メダリストへのコーチングを通して～	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Strength & Conditioning Journal	6. 最初と最後の頁 2-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 4件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松浦孝則 結城匡啓
2. 発表標題 スピードスケートにおける陸上ドリルに関するバイオメカニクスの分析
3. 学会等名 水上スポーツ学会第4回研究大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦孝則 結城匡啓
2. 発表標題 スピードスケートにおける3種の氷上ドリルエクササイズがスタート動作に及ぼす即時的効果
3. 学会等名 長野体育学会第58回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松浦孝則 結城匡啓
2. 発表標題 スピードスケートの陸上トレーニング手段としての『ドロップスケートジャンプ』に関するバイオメカニクスの分析
3. 学会等名 日本体育・スポーツ・健康学会 第71回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro YUKI
2. 発表標題 Science in coaching a World-class female speed skater
3. 学会等名 The 2020 Yokohama Sport Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松浦孝則 結城匡啓
2. 発表標題 スピードスケートにおける陸上トレーニング手段としての連続サイドジャンプのバイオメカニクスの研究
3. 学会等名 第32回日本コーチング学会 (優秀発表賞受賞)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松浦孝則 結城匡啓
2. 発表標題 スピードスケートにおける陸上トレーニング手段としてのスライドボード滑走に関するバイオメカニクスの分析
3. 学会等名 第56回長野体育学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 YUKI Masahiro
2. 発表標題 Towards the summit with sport science
3. 学会等名 9th Asian and Oceanian Physiological Societies Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 結城匡啓
2. 発表標題 金メダリストのコーチングにおける科学的な取組み
3. 学会等名 第25回日本バイオメカニクス学会・シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 結城匡啓
2. 発表標題 「オリンピック・パラリンピック」金メダリストの成長を支えて
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学会 2019年年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------