

令和元年6月9日現在

機関番号：30117

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K01561

研究課題名(和文) スキージャンプ・初期飛行局面における姿勢変化が流体特性に及ぼす影響

研究課題名(英文) Effect of postural change on characteristics of the fluid during early flight phase in ski jumping

研究代表者

山本 敬三 (Yamamoto, Keizo)

北翔大学・生涯スポーツ学部・教授

研究者番号：00405698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではスキージャンプの初期飛行局面の気流特性を明らかにすることを目的とした。スキー板を含むスキージャンパーの3次元CGモデルを制作した。実際のジャンプ動作を対象に、助走から初期飛行局面まで関節角度の変化を計測し、CGアニメーションを制作した。数値流体解析により、ジャンパー周囲の流体特性を求めた。被験者15名について飛距離成績と流体特性との関連性について検討を行った。飛距離成績をもとに3グループ(各5名)に分類し、比較した。身体周辺の流線と揚抗比の経時変化でグループ間の違いが観察された。飛距離成績の良い選手ほど、頭部、背面部付近での気流剥離が少なく、助走姿勢時の揚抗比が高い傾向が観察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、ダイナミックな姿勢変化を伴う身体運動を対象に、連続的な流体解析のフレームワークを構築したことである。高速滑降、飛行するスキージャンプの研究において、流体解析は不可欠なテーマであるが、これを移動境界問題として取り扱った研究は過去にはない。本研究で構築したフレームワークは、2次元動作分析から得られる関節角度から3次元アニメーションを制作し、不可視の流体情報を短時間に可視化できるため、指導や競技の現場で活用できる。その社会的意義は大きい。今後、体型やジャンプスタイルによって、最適動作の提案や、スーツやヘルメット等の用具開発にも有効活用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to clarify the airflow characteristics of the early flight phase of ski jumping. A 3D CG model of a ski jumper including skis were produced. The time history of joint angles of the body from the approach to the early flight in actual ski jumping was measured, and the CG animation was produced. The fluid characteristics around the jumper were obtained by numerical fluid analysis. The relationship between flight distance and fluid characteristics was investigated for 15 subjects. Based on the flight distance results, they were divided into 3 groups (5 each) and compared. The differences in streamlines around the body and lift-drag ratios were observed among the groups. It was observed that the better the flight distance, the less the airflow separation around the head and the back, and the higher the lift-drag ratio in the approach posture.

研究分野：スポーツ・バイオメカニクス

キーワード：スキージャンプ バイオメカニクス 気流可視化 数値流体解析 CFD

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

スキージャンプのバイオメカニクスの分析では、一連の動作を助走、踏切、初期飛行、安定飛行、着地準備および着地の6局面に分類される。このうち、競技パフォーマンスの大部分を決定するのは飛行局面であるが、最適な飛行姿勢を形成するためには、踏切～初期飛行における動作が重要であることは周知の事実である。踏切動作における主な力学的目的は、「身体を伸展させて重心を上昇させること」と「重心に前回りの角運動量を獲得させること」とされる (Schwameder, 2008)。本研究に関連する先行研究では、スキージャンプを対象としたものでは Virmavirta et al. (2001, 2011) の報告がある。彼らは風洞実験室内で有風・無風条件における踏切動作中の踏切力を計測し、その力積の差から空気力を推測している。しかし、この手法では姿勢変化に伴う空力の変化過程を明らかにすることはできない。近年ではコンピュータの高性能化によって、スポーツ動作を対象とした流体解析では数値流体解析（以下、CFD: Computer Fluid Dynamics）が多く用いられている。流体解析が不可欠な水泳や自転車競技にも CFD が適用され、身体周辺の流体特性の解析が行われている。

### 2. 研究の目的

本研究では、スキージャンプの初期飛行局面の気流特性を明らかにすることを目的とした。まず、①一連の解析のためのフレームワークの構築する。次に、②実際のジャンプ動作のビデオ映像をもとに、3次元 CG アニメーションを制作し、構築したフレームワークを用いて流体解析を行う。

### 3. 研究の方法

#### ① 一連の解析のためのフレームワークの構築

CFD を用いて空力特性およびその変化過程を定量化するため、次の4つの作業工程を遂行した。つまり、1) 初期飛行局面の姿勢変化計測（3次元動作分析）、2) スキージャンプ用スキー板の表面形状データの取得、3) CG アニメーションの制作、4) 初期飛行局面の CFD。姿勢変化の計測では、光学式3次元動作分析装置を用いて、実際のジャンパーが、トレーニングで行うテイクオフ模擬動作中の動作計測を行い、関節角度やスキー板の角度を求めた。ジャンプ用スーツやゴーグル、ブーツを着用したスキージャンパーの表面形状データとスキージャンプ用のスキー板の表面形状データと組み合わせて、スキージャンパー系の CG モデルを制作した。この CG モデルに動作計測から得られた関節角度データ（オイラー角）を入力して、3次元 CG アニメーションを制作した（以下、3次元モデル、図1）。本研究では練習や競技会等で簡便に撮影し、短時間に動作分析と流体解析することを想定し、関節角度の2次元投影角度データ（屈伸角度成分）を用いて3次元 CG アニメーション（以下、2次元投影角度モデル）を制作し、3次元モデルと比較した。比較パラメータは、圧力分布、流速分布、流線、空力特性（揚力、抗力および揚抗比）とした。

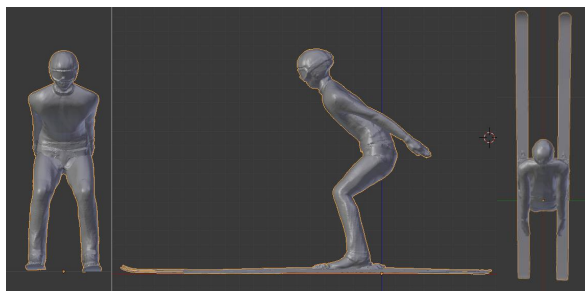


図1 流体解析用の制作されたスキージャンパーの3次元 CG アニメーション

CFD の計算手法について、非圧縮性流体を仮定した。基礎方程式は連続の式と Navier-Stokes 方程式とした。格子系の構築では、直交格子積み上げ法 (Building Cube Method, 以下、BCM) を用いた。姿勢変化中の流体解析を行うため、本研究では、移動境界手法を取り入れた。移動境界問題に対する数値計算手法として、壁面の境界条件には Euler 的手法と Lagrange 的

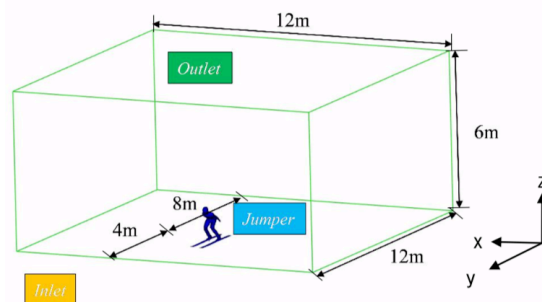


図2 計算領域

手法の混成法である Lagrangian-Eulerian Interpolation を用いた。計算領域を図2に示す。最小格子幅は 6.0mm とした。流入速度は 23.23 m/s に統一した。時間刻みは  $2.0 \times 10^{-5}$ s、解析時間は 0.51s とした。計算開始から 0.167s 間は計算領域の安定化のため、姿勢変化を行わせなかった。計算には九州大学所有のスーパーコンピュータ「ITO」を用いた。各姿勢モデルは  $4.16 \times 10^{-2}$ s の時間幅で 20 個ずつ読み込まれ、その間の姿勢は前後のモデルの姿勢から線形補間される。

#### ② 実際のジャンプ動作のビデオ映像をもとにした流体解析

実際のジャンプ動作のビデオ映像を基に、構築したフレームワークを用いて流体解析を行い、流体特性と飛距離成績との関連性について検討を行った。実ジャンプでの踏切動作のビデオ撮影は、宮の森ジャンプ競技場で行われた競技会で行い、選手を側方から計測した。成年組参加選手 45 名のうち、飛距離成績が優れた上位 5 名と、それ以外の選手からランダムに選出された 10 名の計 15 名を分析対象とした。ここでは、2 次元動作分析から身体各関節の屈伸角度を求め、3 次元 CG モデルに角度データを入力して 3 次元アニメーションを制作した。上記の CFD のフレームワークを用いて、流体解析を行った。飛距離成績の順に最上位から 5 人ずつグルーピング（それぞれ LONG, MIDDLE, SHORT）し、3 グループの流体特性を比較した。なお、今回は、踏切動作中の流体特性に大きく影響を及ぼすと考えられる体幹迎角 (t- $\text{AOA}$ ; trunk Angle Of Attack) に着目した。流体特性として、揚抗比、風速分布および流線についてグループ間で比較した。

#### 4. 研究成果

##### ① 一連の解析のためのフレームワークの構築

2 種類の角度データからそれぞれ復元した姿勢変化データについて数値流体解析した結果の比較を行う。以下に、3 次元モデルと、2 次元投影角度モデルから得た解析結果を示す。図 3 に流線の比較を示す。3 次元モデルではジャンパー後部に回り込む流線が、2 次元投影角度モデルのそれに対して、少し膨らんでいることが観察された。これは、3 次元モデルでは、腕と体幹の間に空間があり、通った空気がジャンパー後部に大きく回り込んだため、流線が膨らんだと考えられる。対して、2 次元投影角度モデルでは、腕と体幹の間の空間が少なく、流れを遮ったために、身体の上部へと流れて多くの他の気流と同じ道をたどったために、あまり流線が外側へ膨らまなかったためと考えられた。

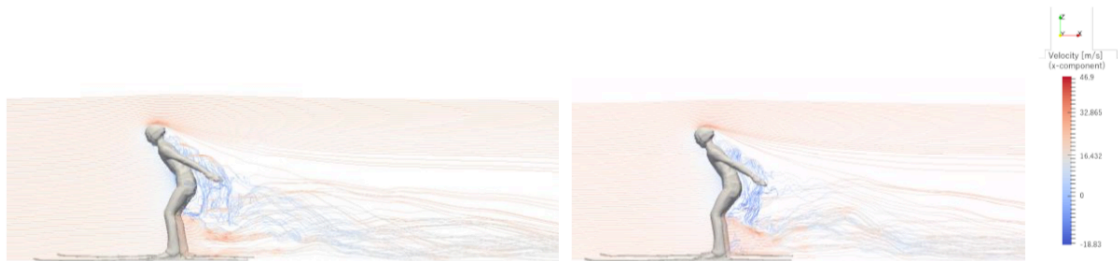


図 3 流線の比較. 左：3 次元モデル，右：2 次元投影角度モデル

空力特性の比較については、揚抗比の経時変化を図 4 に示す。図中、0.2 s までは 3 次元モデルの揚抗比に比較的大きな振幅が現れたが、それ以降では揚抗比が徐々に減少する傾向やその増減の傾向がよく似ていることがわかる。本研究では、その手法として、ジャンプ場の定点カメラで得られる 2 次元画像から姿勢変化を再現すること想定し、ジャンパーのテイクオフ動作

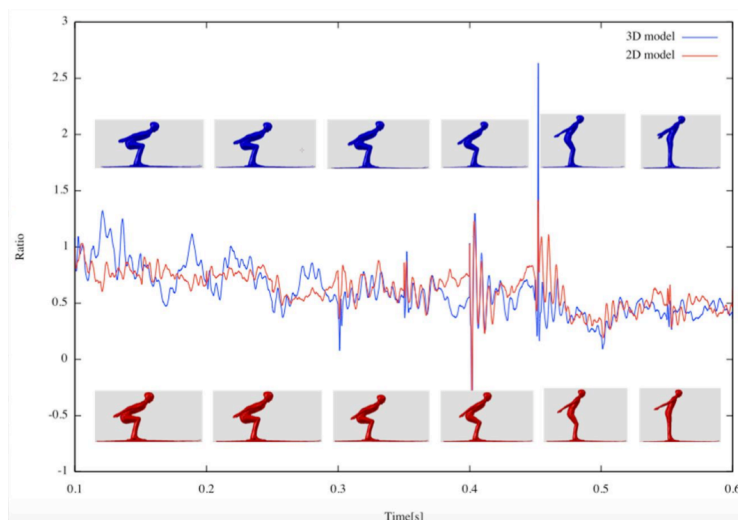


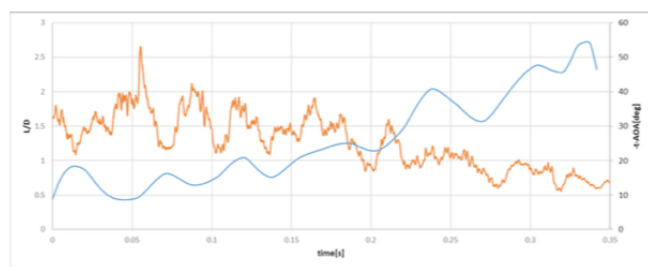
図 4 揚抗比の時間変化. 青：3 次元モデル，赤：2 次元投影角度モデル

を数値流体解析するためのフレームワークを構築した。また、その妥当性を確認するために、モーションキャプチャで得られた 3 次元的なテイクオフ動作の姿勢変化のデータと、そのデータを 2 次元情報に落とし込んだ姿勢変化のデータを用意し、それぞれのデータからテイクオフ動作を再現したモデルを生成し、数値流体解析を行った。その結果を流速分布、圧力分布、流れ構造、空力特性で比較したところ、構築したフレームワークの妥当性が確認された。

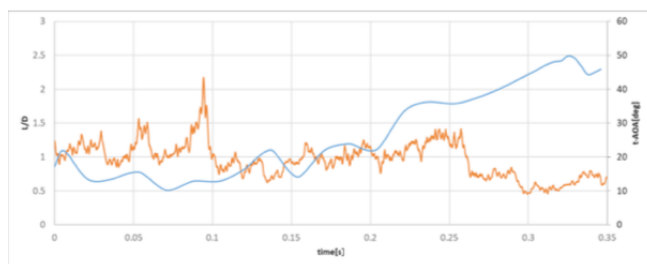
##### ② 実際のジャンプ動作のビデオ映像をもとにした流体解析

3 グループ (LONG, MIDDLE, SHORT) について、各グループから 1 人を代表して、揚抗比(L/D)と体幹迎角 (t- $\text{AOA}$ ) の時間変化を図 5 に示す。グラフの 0.3 秒以降の揚抗比の推移は 3 グループとも似通っているが、計算開始時 (time=0s) で大きな差が観察された。LONG は計算開始時の揚抗比が 1.5 と大きな値であり、0.2 秒までの揚抗比が 1.5 付近で推移してい

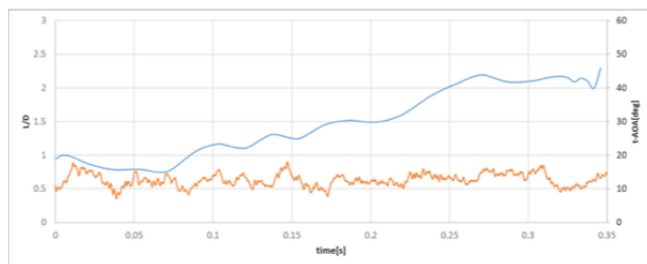
る.MIDDLE は計算開始時の揚抗比が 1.0 であり, 0.2 秒までの揚抗比が 1.0 程度と LONG よりも小さいことがわかる. 一方, SHORT は計算開始時の揚抗比が 0.5 であり, 全体として揚抗比が 1.0 を超えることはなかった.次に体幹迎角に注目すると, 体幹迎角が 20 度を超え始める時間(本研究では起き上がりの時間と定義する)に差が表れている.MIDDLE, LONG は起き上がりの時間が 0.15 秒であるのに対し, SHORT は起き上がりの時間が 0.08 秒と他 2 グループよりも早かった.これらから, 姿勢変化のタイミングが早いと全体的な揚抗比が小さく,



(a) LONG (91.0m)



(b) MIDDLE (84.0m)



(c) SHORT (68.5m)

タイミングが遅いと全体的な揚抗比が大きくなると推察される.

図 5 体幹迎角 (t- $\text{AOA}$ ) と揚抗比 (L/D) の経時変化. (a)-(c)はそれぞれ LONG, MIDDLE, SHORT の各グループからの代表者 1 名のグラフを示す.

姿勢変化を始めた時の揚抗比の大きさの考察を行うため, 計算開始から 0.16 s 時点での頭頂部付近の気流を可視化する.図 6 にジャンパーの頭頂部付近の流線を示す. 左図 (LONG) の流線は一部が背面に沿っているが, 中図 (MIDDLE) の流線は左図 (LONG) ほど背面に沿っておらず, 右図 (SHORT) の流線は完全に頭頂部で剥離している.流れに対して迎角が大きくなりすぎると気流が剥離し, 揚力が著しく低下して抗力が大きくなる失速状態に陥り, 揚抗比も小さくなる.したがって, 流れの剥離の度合いが大きいほど計算初期の揚抗比が小さくなり, 飛距離が短くなると言える.



図 6 頭頂部付近の流線の比較. 計算開始時から 0.16s 時点での気流状態を示す.

それぞれ LONG (左), MIDDLE (中), SHORT (右) グループからの代表例

表 1 に LONG, MIDDLE, SHORT の体幹迎角の平均(初期姿勢時と 0.30 s 時), 体幹迎角の角速度の平均, 揚力・抗力の力積の平均, 力積の揚抗比を示す.LONG と MIDDLE において, LONG の方が力積の揚抗比が大きいことがわかる.これは LONG の異常値を除外した場合でも同様である.LONG の異常値を除外した場合は角速度の大きさが MIDDLE よりも小さくなるが, 0.30 s 時点での体幹迎角の大きさは MIDDLE よりも大きいことと, 抗力の力



積は 3 ケースともほとんど差が見られないことから、飛距離の差を生む原因は揚力の力積であり、角速度の大きさとテイクオフ完了時点の体幹迎角に由来すると推測される。また、SHORT の抗力の力積が LONG, MIDDLE と比べて大きく、全体としてより大きな抗力を受けていたことが読み取れる。

以上より、テイクオフ時に飛距離を伸ばす動作として、「テイクオフ直前まで体幹迎角 10 度程度を維持し、テイクオフ時に上半身をごく短時間で大きく起こす」が有用であると考えられる。

表 1 各グループの体幹迎角 (t- $\text{AOA}$ ) と空力特性の平均

Group	t- $\text{AOA}$ (deg) 計算開始時 (助走姿勢)	t- $\text{AOA}$ (deg) (踏切時)	t- $\text{AOA}$ の角 速度の最大 値 (deg/s)	抗力の 力積 ( $\text{N} \cdot \text{t}$ )	揚力の 力積 ( $\text{N} \cdot \text{t}$ )	揚抗比 (L/D)
LONG (n=5)	11.86	39.09	90.80	18.10	16.36	0.90
MIDDLE (n=5)	9.23	35.26	86.79	18.46	15.08	0.77
SHORT (n=5)	15.55	38.65	76.99	25.12	15.29	0.61

<引用文献>

- ① Schwameder H. Biomechanics research in ski jumping, 1991–2006. Sports Biomech 2008;7:114–36.
- ② Virnavirta M, Kiveka J, Komi P V. Take-off aerodynamics in ski jumping. J Biomech 2001;34:465–70.
- ③ Virnavirta M, Kivekäs J, Komi P. Ski jumping takeoff in a wind tunnel with skis. J Appl Biomech 2011;27:375–9.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Keizo Yamamoto, Makoto Tsubokura, Keiji Onishi, Denis Vuillemin and Guanghao Wu, Numerical simulation of airflow around a ski jumper during takeoff, Science and Skiing VI, 査読あり, Vol.6, 2015, 536-542.
- ② Keizo Yamamoto, Relationship of Asymmetry between In-run Posture and Takeoff Motion in Ski Jumping, 北翔大学北方圏生涯スポーツ研究センター年報, 査読あり, Vol.6, 2015, 1-6.
- ③ Yamamoto, Keizo Tsubokura, Makoto Ikeda, Jun Onishi, Keiji Baleriola, Sophie, Effect of posture on the aerodynamic characteristics during take-off in ski jumping, Journal of Biomechanics, 査読あり, Vol.49, 2016, 3688-3696.
- ④ Keizo Yamamoto, Yuki Ito, Fukashi Shinkaiya, Biomechanical role of joints of lower limb during shock absorbing phase in race walking, 北翔大学生涯スポーツ学研究紀要, 査読なし, Vol.8, 2017, 1-6.
- ⑤ 山本敬三, スキージャンプに関する流体力学, バイオメカニクス研究, 査読なし, Vol.21, 2017, 163-168.
- ⑥ 山本敬三, 坪倉 誠, スキージャンプの流体力学, バイオメカニクス学会誌, 査読なし, Vol.42(3), 2018, 159-164.
- ⑦ 渡部 峻, 近藤雄一郎, 竹田唯史, 山本 敬三, 平昌 2018 パラリンピック冬季競技大会のパイアスロン競技におけるシットスキーの滑走速度の分析, 北翔大学北方圏生涯スポーツ研究センター年報, 査読あり, 北翔大学北方圏生涯スポーツ研究センター年報, Vol.9, 2019, 1-6.
- ⑧ 竹田唯史, 小坂井留美, 山本敬三, 吉田真, 吉田昌弘, 瀧澤聡, 鈴木聡一郎, 齋藤隆憲, 近藤雄一郎, 田畑竜平, 伊藤秀吉, 北翔大学における障がい者スポーツアスリート強化支援に向けた活動, 北翔大学北方圏生涯スポーツ研究センター年報, 査読なし, Vol.8, 2018, 75-80.

[学会発表] (計 14 件)

- ① Keizo Yamamoto, Makoto Tsubokura, Sophie Baleriola, Keiji Onishi, Unsteady aerodynamics of a ski jumper during the takeoff motion, European College of Sport Science(国際学会), 2015.
- ② 山本敬三、坪倉 誠、Sophie Baleriola、大西慶治、スキージャンプ・テイクオフ動作中の揚力獲得の動作戦略, 第 26 回冬季スポーツ科学研究フォーラム, 2015.

- ③ Keizo Yamamoto, Tadashi Takeda, Makoto Tsubokura, Sophie Baleriola, Keiji Onishi, Contribution of body segments to aerodynamic forces during takeoff in ski jumping, European College of Sport Science(国際学会),2016.
- ④ Keizo Yamamoto, Makoto Tsubokura, Sophie Baleriola, Keiji Onishi, EFFECT OF POSTURAL CHANGE ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS DURING TAKEOFF IN SKI JUMPING, 34th International Conference on Biomechanics in Sports(国際学会),2016.
- ⑤ Yuki Ito, Keizo Yamamoto, THE ROLE OF JOINTS OF LOWER LIMB DURING SHOCK ABSORBING PHASE IN RACE WALKING, The 34th International Conference on Biomechanics in Sports(国際学会),2016.
- ⑥ Fukashi Shinkaiya and Keizo Yamamoto, THE EFFECT OF STANCE WIDTH AND ANGLE ON THE ROTATIONAL RANGE OF MOTION OF PELVIS AND TRUNK, The 34th International Conference on Biomechanics in Sports(国際学会),2016.
- ⑦ Keizo Yamamoto, Yuki Ito and Fukashi Shinkaiya, EFFECT OF FOOT ROTATION ANGLE ON THE ROTATIONAL RANGE OF MOTION OF TRUNK AND PELVIS, The 35th International Society of Biomechanics in Sports(国際学会),2017.
- ⑧ Fukashi Shinkaiya, Yuki Ito and Keizo Yamamoto, EFFECT OF FOOT ROTATION ANGLE ON TRUNK ROTATIONAL STRENGTH AND PHYSICAL QUANTITY TO ROTATE THE BODY, The 35th International Society of Biomechanics in Sports(国際学会),2017.
- ⑨ 山本敬三,バイオメカニクスの視点からみたスキージャンプ～スキージャンパーの驚異的な能力～, 第28回冬季スポーツ科学フォーラム(シンポジウム)(招待講演), 2017.
- ⑩ 山本敬三、新開谷深, 立位時のスタンスアングルが体幹の回旋運動に及ぼす影響, 第28回冬季スポーツ科学フォーラム,2017.
- ⑪ 竹田唯史、山本敬三、鈴木聡一郎、齋藤隆憲、近藤雄一郎、田畑竜平、伊藤秀吉, パラリンピック出場を目指したクロスカントリー用シットスキー開発, 第28回冬季スポーツ科学フォーラム,2017.
- ⑫ Hiromasa Kajimoto, Shumpei Koyama, Bale Rahul, Jun Ikeda, Keizo Yamamoto and Makoto Tsubokura, DEVELOPMENT OF AERODYNAMICS SIMULATION FRAMEWORK FOR SKI-JUMPING, The 36th International Society of Biomechanics in Sports(国際学会),2018.
- ⑬ 田畑竜平、渡部 峻、山本敬三, 心理的プレッシャーがスキージャンプ踏切動作に及ぼす影響, 第25回日本バイオメカニクス学会大会,2018.
- ⑭ Takeda T, Yamamoto K, and Watanabe S, Research for the development of the sit ski for the cross country ski events in PyeongChang 2018 Paralympic Winter Games, 4th Asia-Pacific Conference on Coaching(国際学会),2018.

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：坪倉 誠

ローマ字氏名：Tsubokura Makoto

所属研究機関名：神戸大学大学院

部局名：システム情報科学

職名：教授

研究者番号（8桁）：40313366

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。