

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：30117

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500750

研究課題名(和文) スキージャンプ・テイクオフ動作の数値流体解析

研究課題名(英文) Computational Fluid Dynamics during takeoff motion 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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、数値流体解析手法を用い、スキージャンプ・踏切動作中の空力特性を定量化することとした。計算結果の妥当性を検証するために、選手の体表面形状を計測し、風洞実験用の人体模型を製作して空力特性を実測した。異なる二動作の流体解析を行い踏切動作中の空力特性を定量化・比較した。両者の空気力には大きな違いが観察され、抗力は最大で2.2倍の差があった。また、技術レベルの高い選手の揚力は動作後半に急激に増加し、この時、左右上肢で形成される渦流れが後流に下方向の流れを形成していた。この結果から上肢の揚力への影響が比較的に大きいことが分かり、動作中の上肢の動作も空力的に無視できないことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to quantify the aerodynamic characteristics during takeoff movement in ski jumping using computational fluid dynamics (CFD). To validate the CFD method, the human dummy models for the wind tunnel test were made. The aerodynamic characteristics were measured in the wind tunnel test. The numerical simulations of two different movements were performed and quantified aerodynamic characteristics during the motion. There were big differences in the aerodynamic forces between the motions, and there was a difference of up to 2.2 times in the drag. In addition, it was in the latter half of the movement, and the lift of the technically high-level player was suddenly increased. The down stream was formed in a wake of the player; this down stream was created by the two symmetric vortexes coming from the upper extremities. This results suggested that influence on lift of the arms was relatively big, and the motion of the arms could not ignore aerodynamically.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：スキージャンプ テイクオフ 数値流体解析

### 1. 研究開始当初の背景

スキージャンプの一連の動作は、主に助走、テイクオフ、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、そのためにはテイクオフ局面で最適な飛行姿勢を形成することが重要であることは周知の事実である。Schwameder (2008)によると、テイクオフ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「身体に前回りの角運動量を与えること」とされる。前者は踏切力を増加することで実現されるが、過度な力発揮は身体を過度に伸展させるため、抗力(空気抵抗)を増大させる結果となって不利である。そのため、踏切力には最適値があることが予想される。後者についても同様に、選手は空気力による後ろ回りのモーメント(回転作用)を受けるため、それに合わせた最適な前回りモーメントを発揮する必要がある。テイクオフ動作では選手の姿勢は短時間にダイナミックに変化するため、選手にはたらく空気力は劇的に変化することが予測され、選手はこの空気力に合わせて最適なテイクオフ動作を模索している。しかし、空気力が定量化されていない為、科学者は力学的な最適動作を示すことができずにいる。流体力学的にも、形状変化する物体におよぼされる空気力の計測や計算は容易ではなく、現在も重要な研究テーマの一つである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、数値流体解析手法を用いて、テイクオフ動作中の空力特性を定量化することとした。スキージャンプのテイクオフ(踏切)動作とは、選手が助走姿勢から身体を伸展させて飛行姿勢へと移行する動作である。時速約90kmの高速滑降中に短時間に姿勢変化を行うため、選手が受ける空気力(揚力、抗力)はダイナミックに変化する。選手は最適な飛行姿勢を形づくるために、空気力に対して適切なテイクオフ動作を行う必要がある。しかし、姿勢変化中の空気力の測定は困難であり、いまだ定量化には至っていないことが、研究の動機であった。

### 3. 研究の方法

本研究は主に下記5つの作業工程で遂行された。最終的な検討課題は、CFDを用いてテイクオフ動作中の選手の空力特性およびその変化過程を定量化することである。そのために初年時にCFD解析用の準備データを取得し(下記①~③)、2年目に流体解析と成果報告を行った(同④,⑤)。

- ① 身体表面形状データの計測
- ② CGアニメーションの制作
- ③ CFD計算条件の決定(風洞実験)
- ④ テイクオフ動作中の流体解析(CFD)
- ⑤ 最適動作の考察、研究報告および指導

### 現場へのフィードバック

本研究の解析範囲は「助走姿勢から選手が助走路の終端を通過するまで」とした。選手はスキー滑走中に踏切動作を行っているため、選手・スキー系に及ぼされる空気力のほとんどは身体姿勢に影響されると仮定できる。従って、本研究ではスキー板を除いた身体の空力特性の解析に焦点を当てた。

本研究では3名の研究者の専門知識と技術を融合させて遂行された。まず、研究代表者(山本敬三)がCFDを行うために人体の表面形状データ(静止立位姿勢)を計測した。次に、CGアニメーションの専門家である分担者(松澤 衛)が実際のスキージャンプ・テイクオフ動作をもとに上記の形状データからCGアニメーションの制作を担当した。最後に、CFDの専門家である分担者(坪倉 誠)がCGアニメーションをCFDに適用し、動作中の空気力学的な特性を定量化した。これらの工程に加え、CFDの計算条件の決定のための風洞実験を行った(研究代表者と坪倉が担当)。風洞実験ではスキージャンパー模型を用いて空力特性を計測した。風洞実験による計測データは計算結果の妥当性を検証する際に用いられた。

### 4. 研究成果

#### (1) スキージャンパーの体表面形状データの計測とCFD計算条件の決定(風洞実験)

風洞実験用のスキージャンパー模型(1/2スケール)を作成し、CFD計算条件の決定を行った。模型の作成にあたっては、まず3次元人体模型計測システム「ボディラインスキャナ C9036(浜松ホトニクス)」を用いて、現役の男性スキージャンプ選手の体表面形状のスキャニングを行った。選手には、スキー板以外の装備品(ヘルメット、ゴーグル、競技用スーツ、グローブ、ブーツ)を装着させ、実試技中の状態に近い形状データを取得した(立位姿勢)。次に、コンピュータ・グラフィックス(CG)技術を用いて、取得した形状データの関節に可動性を与え、スキージャンプ・テイクオフ動作中の2つの姿勢を制作した。人体形状データを14体節に分割し、関節部には球状の形状データを当てはめ、関節可動性に自由度を与えた(図1)。



図1 人体形状データの関節に球関節を当てはめ、関節可動性を与えた形状データ

模型の姿勢形成にあたっては、データのモデルになった選手の実動作を撮影し、ビデオ分析から姿勢を決定した。形成した姿勢は助走姿勢と踏切動作の最終姿勢の2体（助走モデル、踏切モデル）とした（図2）。最後に、形状データを基に風洞実験で空力計測を行うための固定方法について検討を行った後に、粉末造形手法を用いて1/2スケールのジャンパー模型を2体製作した。

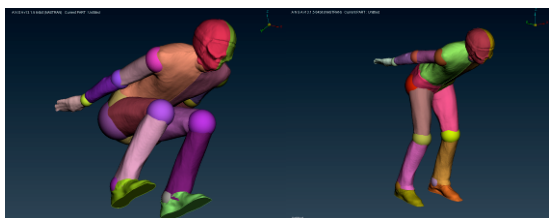


図2 CGによって形成された2姿勢（左：助走モデル、右：踏切モデル）

風洞実験では、空気力（揚力・抗力）と表面圧力分布の計測を行うことを目的とし、そのための加工をジャンパー模型に施した。空気力の計測には、風洞施設内に力覚センサへの模型の固定が必要であったため、模型とセンサを固定する治具を製作した。表面圧力分布の計測のために、模型正面と背面に圧力孔（φ1.1mm）を約80点設け、チューブで各孔から圧力センサまでの配管加工を施した。加工された模型を風洞内に固定し、空力特性の計測を行った（図3）。風洞の断面積は2.8m×2.8mで、風速条件を10-40m/s（5m/sステップ）に変化させて模型が受ける空気力と模型の表面圧力分布を計測した。この風洞実験で得られた空力特性は、CFD計算結果の妥当性の検証として用いた。



図3 風洞実験風景

風洞内に模型を固定し、模型が受ける空気力、表面圧力分布を計測した。また、煙法により、模型周辺の気流状態を可視化した。

## (2) CFD 計算条件の決定

CFDの計算領域は、風洞内の装置の配置を考慮して再現した。流体計算には、流れ場に計算格子を作成する必要があるため、この格子数や構造が計算結果に影響を及ぼすため、計算条件を変化させて、風洞実験で得られた空力

特性に近づく計算条件を模索した。結果、最大で8000万要素の格子作成が必要とされた（図4）。

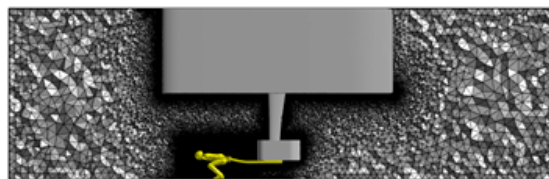


図4 CFDの計算格子

風洞施設内の計測装置を含む計算領域内に、計算格子を作成した。ジャンパー模型周辺は、更に細かい計算格子が作成されている。

この計算条件による結果では、踏切モデルにおいて風洞実験の空力特性に近いデータを得ることができた。表面圧力分布は、実測データと計算データとで、概ね一致した値を示した。しかし、助走モデルでは、揚力値が低く見積もられた。この原因として、頸部背面の凹部で起こる気流剥離がCFDで再現できないことと考えられた。テイクオフ動作中のスキージャンパーの空力特性を明らかにするために、踏切モデルの計算条件を用いて、頭部、体幹、上肢を剛体とみなし、迎角変化中の空力特性の変化を計算した。迎角変化の異なる2選手の動作について分析した結果、揚力や抗力に比較して、ピッチングモーメントに大きな差が現れることが分かった。

## (3) CGアニメーションの制作とテイクオフ動作中の流体解析（CFD）

上記の計算条件を用いて、テイクオフ動作中の気流解析を行い、最適動作の考察を行った。CFDの計算については、共同研究者の坪倉と相談の上、文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」によって開発されたLES(Large Eddy Simulation)解析コード”FrontFlow/red”を用いた。このコードは非定常な渦構造を計算することに優れているため、本研究課題に適していた（Tsubokura et al., 2009）。また、移動境界問題で最も重要である計算格子の作成法については、非構造格子で構成し、流出領域面では数値振動を抑えるため、プリズムメッシュを貼って計算した。流体解析に先立ち、2名の女子選手（世界トップクラスの選手 jumper A とその同年齢で競技レベルの劣る選手 jumper B）の協力を得て、実際のテイクオフ動作のビデオ分析を行い、計算対象の動作データを得た。対象動作を基に、3次元人体形状データからCGアニメーションを制作し、CFD解析を行った。結果、両モデルが受ける空気力には大きな違いが観察され、jumper Bの抗力は、最大でjumper Aの2.2倍に達していた（図5）。一方でjumper Bの揚力は、動作後半で減少に転ずるなど空力的に不利であることが示された。一方、jumper

A の揚力値は動作後半に急激に増加した。 jumper A の後流を観察したところ、左右上肢で形成される渦流れによって、身体正中線付近に下方向の流れが形成される様子が確認された。一方、 jumper B では、上肢は体幹付近にあり、上肢と体幹で生成された渦が後流で合成され、複雑な渦流れが拡大する様子が観察された。 jumper B の空力特性が jumper A と比較して非効率であることが示唆された。更に、身体各部の空力への影響度を検討した結果、上肢の空気力への影響が相対的に大きいことが分かった。テイクオフ動作中の上肢の動作も空力的、特に揚力発生に対して無視できないことが示唆された。計算された空気力（揚力・抗力）の妥当性について、検討した。Virmavirta et al (2001)の報告では、風洞実験によって助走姿勢時の抗力値が計測されており、概ね本研究結果と近似していることを確認した。上記の報告では、テイクオフ動作中にジャンパーが受ける空気力の総量を推量しているが、本研究では、CFD によって空気力の変化の過程とその原因となった気流状態を特定できた点で、新規性の高い研究成果が得られたと考えられる。

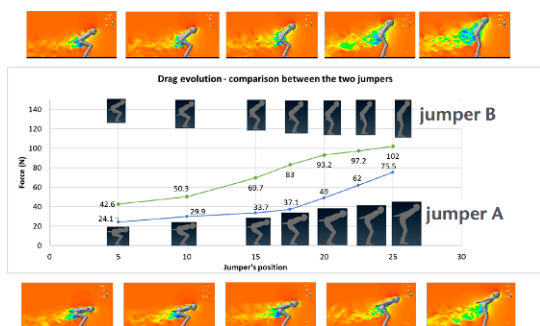


図5 ジャンパー周辺の気流状態とジャンパーが受ける抗力の時間変化

#### <引用文献>

- ① Schwameder, H., Biomechanics research in ski jumping, 1991–2006, *Sports Biomechanics*, 7(1), 2008, 114-136.
- ② Tsubokura, M., Nakashima, T., Kitoh, K., Sasaki, Y., Oshima, N., Kobayashi, T., 2009. Development of an unsteady aerodynamic simulator using large-eddy simulation based on high-performance computing technique. *SAE International Journal of Passenger Cars; Mechanical Systems* 2-1, 168–178.
- ③ Virmavirta, M., Kivekäs, J., & Komi, P. V. (2001). Take-off aerodynamics in ski jumping., *34*(4), 465–470.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

#### [雑誌論文] (計4件)

- ① Keizo Yamamoto, Mamoru Matsuzawa, Validity of jump training apparatus using Wii Balance Board, *Gait and Posture*, 査読有, 38, 2012, 132-135
- ② 竹田唯史、近藤雄一郎、山本敬三、吉田真、吉田昌弘、山本敏美、北方圏生涯スポーツ研究センターにおけるスキー選手の体力測定結果、北方圏生涯スポーツ研究センター年報、査読無、第3号、2012、29-34
- ③ 吉田昌弘、山本敬三、吉田真、2011年度スポルアカデミー実施報告、北方圏生涯スポーツ研究センター年報、査読無、第3号、2012、51-54
- ④ Keizo Yamamoto, Makoto Tsubokura, Keiji Onishi, Denis Vuillemin and Guanghao Wu, Numerical simulation of airflow around a ski jumper during takeoff, *Science and Skiing*, 査読有, 6, 2015, 536-542

#### [学会発表] (計7件)

- ① 山本敬三、坪倉誠、呉広鎬、杉本つばさ、スキージャンプ・テイクオフ動作における空力特性の計測、日本体育学会第64回大会(立命館大学)、2013.8.28-30
- ② Keizo Yamamoto, Makoto Tsubokura, Keiji Onishi, Tsubasa Sugimoto and Kaoru Yamanobe, Wind tunnel measurement of airflow around a ski jumper during takeoff, *International Congress on Science and Skiing (Austria)*, 2013.12.14-19
- ③ Makoto Tsubokura, Keizo Yamamoto, Keiji Onishi, Denis Vuillemin and Guanghao Wu, Numerical simulation airflow around a ski jumper during takeoff, *International Congress on Science and Skiing (Austria)*, 2013.12.14-19
- ④ Keizo Yamamoto, Makoto Tsubokura, Sophie Baleriola, Keiji Onishi, Unsteady aerodynamics of a ski jumper during the takeoff motion, *European College of Sport Science (Sweden)*, 2015.6.24-27
- ⑤ Yasuhito Inagawa, Keizo Yamamoto, Analysis of anterior cruciate ligament tensile force during drop vertical jump, *World Confederation of Physical Therapy Congress 2015 (Singapore)*, 2015.5.1-4
- ⑥ Masaki Kotani, Keizo Yamamoto, Vibration frequency effects on trunk and hip joint alignment during prone bridge exercise with a sling, *World Confederation of Physical Therapy*

- Congress 2015 (Singapore), 2015.5.1-4  
⑦ Keizo Yamamoto, Masashi Ninokami,  
Analysis of biomechanical mechanisms  
of stepping from kneeling position,  
World Confederation of Physical  
Therapy Congress 2015 (Singapore),  
2015.5.1-4

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

### (1)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

### (2)研究分担者

松澤 衛 (MATSUZAWA, Mamoru)

北翔大学・教育文化学部・准教授

研究者番号：20433469

坪倉 誠 (TSUBOKURA, Makoto)

神戸大学大学院・システム情報工学研究  
科・教授

研究者番号：40313366