

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26560341

研究課題名(和文) スポーツ用次世代数値流体解析システムの構築と展開研究

研究課題名(英文) System development and application of a next generation computational fluid dynamics for sports

研究代表者

浅井 武 (ASAI, Takeshi)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：00167868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、空力特性の重要性が高いスキーのダウンヒル競技を対象として、格子ボルツマン法を用いた数値流体解析により、クラウチング姿勢における全抗力の関係を解析した。さらに、数値流体解析によりダウンヒルレーサー周りの流れを可視化し、その渦構造を検討した。その結果、ダウンヒルレーサーの全抗力は、流速15 m/s時が27.0 N、40 m/sが185.8 Nとなっていた。また、流れ場の可視化により、流速40 m/sにおけるダウンヒルレーサーの大きな抗力の、主な発生部位は、頭部、上腕部、下腿部、大腿部(含む臀部)であると考えられた。

研究成果の概要(英文)：To date, studies on air resistance in alpine skiing have used wind tunnels and actual skiers to examine the relationship between the gliding posture and magnitude of drag, as well as for the design of skiing equipment. However, these studies have not revealed the flow velocity distribution and vortex structure around the skier. In the present study, we used computational fluid dynamics with the lattice Boltzmann method to derive the relationship between flow velocity in the full tuck position and total drag. Furthermore, we visualized the flow around the downhill racer and examined its vortex structure. The results show that the total drag force in the downhill racer model is 27.0 N at a flow velocity of 15 m/s, increasing to 185.8 N at 40 m/s. Moreover, the visualization of the flow field indicates that the primary drag locations at a flow velocity of 40 m/s are the head, upper arms, lower legs, and thighs (including the buttocks).

研究分野：スポーツテクノロジー

キーワード：数値流体解析 CFD 空力 スポーツ 抗力 スキー

### 1. 研究開始当初の背景

オリンピックや世界選手権等のトップレベル競技では、1/100 秒差でメダルの色が異なるとされており、流体工学的研究・開発は世界各国の最重要課題の一つになってきている。これまでの流体工学では、実験風洞等を用いて、対象物にかかる定常的な（平均的、静的な）流体力を計測、分析してきたが、その原因となる境界層や渦構造の詳細な可視化や空気力の分離は極めて困難であった。また、従来の数値流体解析は、定常状態の流れ場や圧力分布の記述に留まっており、非定常状態の空気力を精度よく予測するレベルには達していない。しかし、実際のスポーツ競技では、複雑な形状をした人体や用具（ウェアを含む）が多様な運動をすることになり、非定常状態での空気力の計測や予測が強く求められている（Asai & Kamemoto, 2011, *Journal of Fluids and Structures*）。また、新たなスポーツ技術や用具を研究、開発するためには、流体力の原因となる境界層や渦構造の詳細な記述、予測が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、メッシュレス格子ボルツマン法を基に、境界層や渦構造の非定常動態を、より正確に記述することが可能な、スポーツ用次世代数値流体解析システムを構築する。そして、本研究では、空力特性の重要性が高いスキーのダウンヒル競技を対象として、実験風洞を用いた EFD と格子ボルツマン法 (Lattice-Boltzmann method) を用いた CFD を併用して、クラウチング姿勢におけるレーサーの速度と全抗力の関係を示す。また、CFD により、レーサー周りの流れを可視化し、その渦構造を検討すると共に、レーサー各パーツの抗力分布を明らかにする。さらに、本研究で検討した、スポーツ用次世代数値流体解析システムのアウトラインを示す。

### 3. 研究の方法

#### (1) CFD

3次元ダウンヒルレーサーモデル（含むスキー、スキーポール、スキーブーツ、ヘルメット）は、3次元レーザースキャナ（AICON 3D; Breuckmann GmbH）を用いて、実際のダウンヒル選手をスキャンすることによって作成した（図1）。計算格子は、解析空間に適合させて作成し、全計算格子数は約5億とした（図2）。領域グリッド技術により、最小格子サイズは1mmとし、最大格子サイズは4mmとした（図3）。本グリッドサイズは、最小渦サイズより大きなものとなっており、直接計算シミュレーションは適用不可であるが、計算資源及び計算時間の制限より、本グリッドサイズを採用した。流入口からの流速は、それぞれ、20, 25, 30, 35 and 40 m/s の5ケースとし、流出口の圧力は1013.25 hPa と定義した。ダウ

ンヒルレーサーモデルの境界表面はノンスリップ条件とし、他の地面を含む境界壁はスリップ条件と定義した。本研究における数値流体解析は、格子ボルツマン法に基づく商用 CFD ソフトウェア（PowerFLOW 5.0, Exa Inc.）を用いた。乱流モデルはベリラージエディシミュレーションモデル（VLES）を用いており、直接計算できない渦スケールは、RNG k-epsilon モデルを用いて計算した。計算格子は3次元立方体セルによるボクセル構造とした。ダウンヒルレーサーモデルの全抗力は、0.4秒間における非定常抗力計算から求めた。

#### (2) EFD

風洞実験は、循環型（Göttingen type）筑波大学体育系スポーツ風洞を用いて実施した。本風洞の最大風速は、55 m/s であり、吹き出し口のサイズは、1.5 m × 1.5 m、乱流度は0.1%であった。実物大フルスケールダウンヒルレーサーモデルは、スチールシャフトで骨組みした人体マネキンを改造して作成した（図4）。スキー、スキーポール、スキーブーツ、ヘルメットは、実際に選手が使っている競技用具を用いた。ダウンヒルレーサーモデルの姿勢は、クラウチング姿勢（full tuck position）のみの1姿勢であった。レーサーモデルのスキーは、地面に設置されたフォースプラットフォーム（9287C, Kistler AG）に接続され、サンプリング周波数1000 Hzで3分力を計測した。風洞実験におけるレーサーモデルの全抗力は、10秒間の非定常抗力の平均値から算出した。

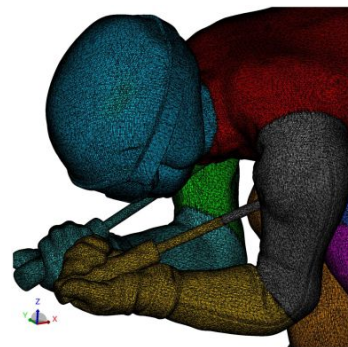


図1 3次元CFD用ダウンヒルレーサーモデル。

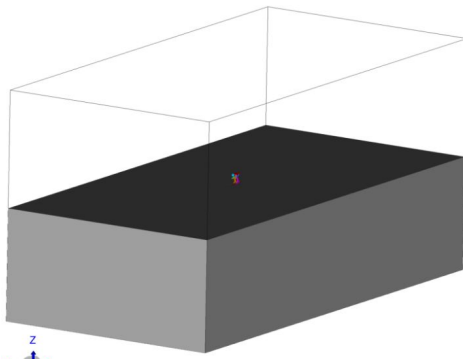


図2 CFD用カーテシアン解析空間 (W 20 m × H 20 m × L 40 m) .

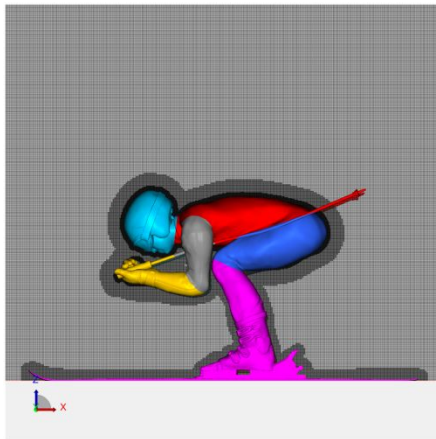


図3 領域グリッド技術による CFD 用計算格子分布 .

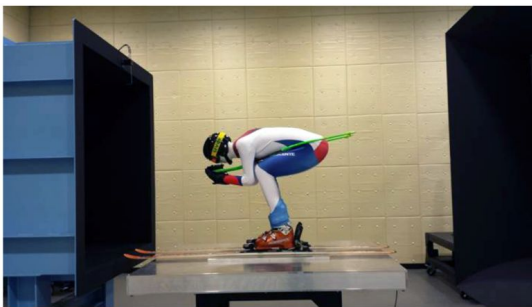


図4 実物大フルスケールダウンヒルレーサーモデルを用いた風洞実験のセットアップ .

#### 4. 研究成果

格子ボルツマン法を用いた数値流体解析におけるダウンヒルレーサーモデルの全抗力は、流速 15 m/s 時が 27.0 N、20 m/s が 46.2 N、25 m/s が 74.3 N、30 m/s が 107.6 N、35 m/s が 144.7 N、40 m/s が 185.8 N となっていた (図 5) . 一方、風洞を用いた実験におけるダウンヒルレーサーモデルの全抗力は、流速 15 m/s 時が 31.7 N、20 m/s が 50.2 N、25 m/s が 76.6 N、30 m/s が 108.2 N、35 m/s が 145.4 N となっており、高い相関がみられた ( $r = .99, p < .01$ ) . Brownlie et al. は、実際のレーサーの f クラウチング姿勢を対象とした風洞実験において、27.8 m/s で 88.8

N の全抗力を示した事を報告している . 本 CFD 解析の、流速 27.8 m/s における、2 次元多項式を用いた抗力推定値は、91.9 N となっており、実験値と近い値を示している . これらのことから、本研究における CFD の結果は、EFD の結果と高い相関が得られており、ほぼ妥当な数値解析が行われていると判断される .

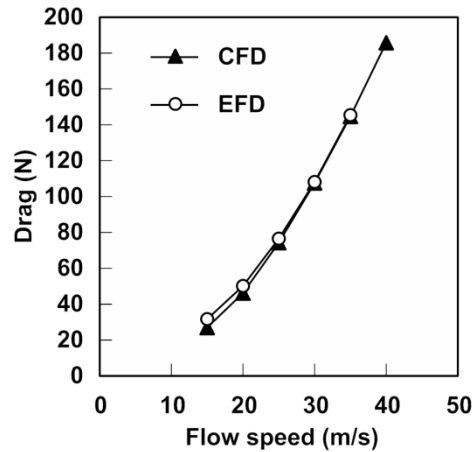


図5 ダウンヒルレーサーモデルの全抗力における CFD と EFD の比較 .

流速 40 m/s におけるダウンヒルレーサーモデルの矢状面上の流速分布では、頭部、手部、臀部の後方に低速領域が観察された (図 6) . 同様に、左足部を通過する矢状面上の流速分布では、上腕部、下腿部、臀部の後方に低速領域が観察された (図 7) . また、ダウンヒルレーサーモデルの表面流速分布では、頭部、上腕部、下腿部、臀部の後方に低速領域が観察された (図 8) . さらに、ダウンヒルレーサーモデル周りにおけるラムダ 2 の等値面図では、頭部、上腕部、下腿部、臀部、スキー先端、ポール後端の後方に、強い渦核が観察された (図 9) . これらの流れ場の観察により、流速 40 m/s におけるダウンヒルレーサーモデルの大きな抗力の、主な発生部位は、頭部、上腕部、下腿部、大腿部 (含む臀部) であると考えられる .

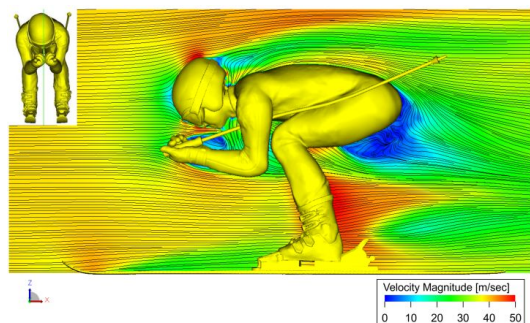


図6 流速 40 m/s 時におけるダウンヒルレーサーモデル周りの流速分布 (頭頂を通る矢状面) .



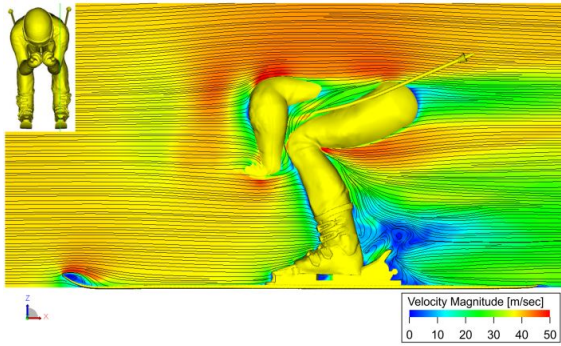


図7 流速40 m/s時におけるダウンヒルレーサーモデル周りの流速分布（左下腿部を通る矢状面）。

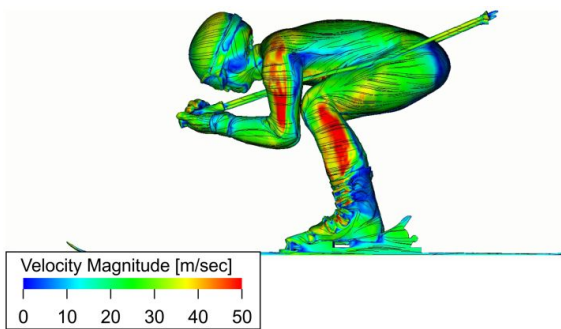


図8 流速40 m/s時におけるダウンヒルレーサーモデル表面の流速分布。

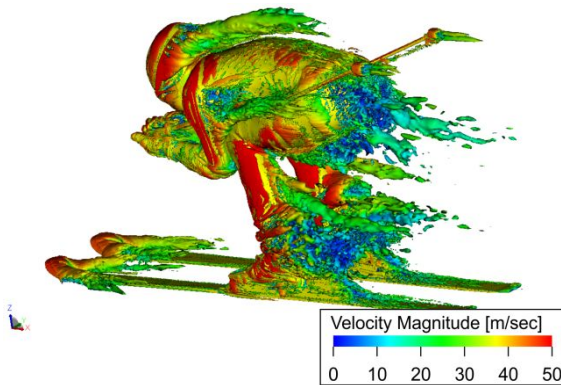


図9 流速40 m/s時におけるダウンヒルレーサーモデル周りのラムダ<sub>2</sub>による渦構造表示。

40 m/s 時における各身体部位の抗力分布では、頭部の抗力は 22.2 N、体幹部の抗力は 14.0 N、上腕部の抗力は 13.6 N（左右の平均値）、前腕部の抗力は 6.2 N（左右の平均値）、大腿部の抗力は 16.6 N、下腿部の抗力は 46.9 N（左右の平均値）を示した（図 10）。また、40 m/s 時における各身体部位の揚力分布では、頭部の揚力は 5.9 N、体幹部の揚力は 69.0 N、上腕部の揚力は -1.8 N（左右の平均値）、前腕部の揚力は -1.7 N（左右の平均値）、大腿部の揚力は -37.6 N、下腿部の揚力は 15.3 N（左右の平均値）を

示した（図 11）。そして、各流速（20, 25, 30, 35, 40 m/s）における身体部位の抗力、及び揚力分布は、流速が大きくなるほど、それぞれの部位ごとに大きくなる傾向を示した。

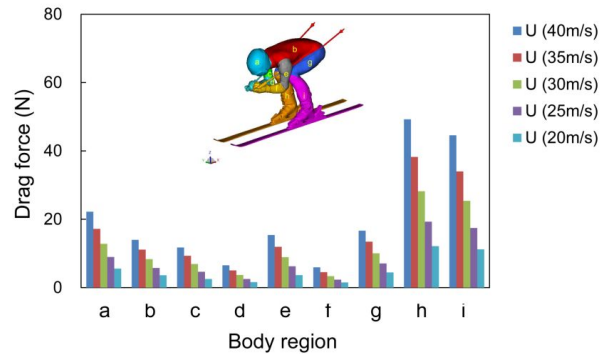


図10 ダウンヒルレーサーモデルの各部位における抗力分布(a:頭部,b:体幹部,c:右上腕部,d:右前腕部,e:左上腕部,f:左前腕部,g:大腿部,h:右下腿部,;左下腿部)。

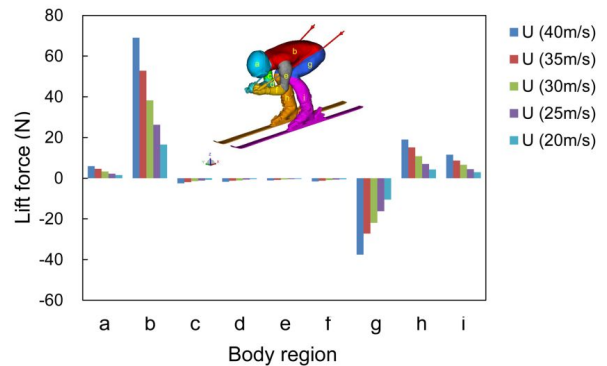


図11 ダウンヒルレーサーモデルの各部位における揚力分布(a:頭部,b:体幹部,c:右上腕部,d:右前腕部,e:左上腕部,f:左前腕部,g:大腿部,h:右下腿部,;左下腿部)。

本研究では、スポーツ用次世代数値流体解析システムの構築を試み、アルペンスキーのダウンヒルレーサーの空力解析に適用した。実験精度の向上は勿論の事、数値流体解析の精度向上も大きな課題である。それと同時に、近年、急速に発展している、ビッグデータテクノロジーや人工知能（AI）テクノロジー等の最新テクノロジーとの連携、応用も今後の重要な課題の一つと考えられる。

<引用文献>

Asai, T. and Kamemoto, K. (2011) Flow structure of knuckling effect in footballs, *Journal of Fluids and Structures*, 27, 727-733.

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 5 件 )

Asai, T., Hong, S. & Ijuin, K. (2017) Flow visualisation of downhill skiers using the lattice Boltzmann method, *Eur. J. Phys.* 38, 024002 (11pp). doi:10.1088/1361-6404/38/2/024002 ( 査読有 )

Asai, T. & Hong, S. (2017) Investigation of Kinematics of Knuckling Shot in Soccer, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, edited by Hiroyuki Shiraga, Takeharu Goji Etoh, *Proc. of SPIE Vol. 10328*, 103281S1-6. doi: 10.1117/12.2269157 ( 査読有 )

Asai, T., Hong, S., Ijuin, K. (2016) Flow visualization of downhill ski racers using computational fluid dynamics, 11th conference of the International Sports Engineering Association, *Procedia Engineering*, 147, 44 – 49. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.187 ( 査読有 )

Hong, S., Asai, T. & Seo, K. (2015) Visualization of air flow around soccer ball using a particle image velocimetry, *Scientific Reports*, 5: 10158. doi:10.1038/srep15108 ( 査読有 )

Asai, T. & Kamemoto, K. (2014) Flow Visualisation of a Soccer Ball in Flight, *Proceedings of the 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models*, ICVFM , (in CD). ( 査読有 )

[ 学会発表 ] ( 計 3 件 )

Asai, T. & Hong, S. Aerodynamics of modern soccer balls, the 28<sup>th</sup> International Sport Science Congress, Hanyang (Korea), 2016, 8/25 (Key note)

Asai, T. Engineering and technology for sports, the 6<sup>th</sup> TSME-ICoME, Hua Hin (Thailand), 2015, 12/16 (Key note)

Asai, T. Trying to understand soccer ball aerodynamics, 7<sup>th</sup> ASAI-Pacific Congress on Sports Technology, The Impact of Technology on Sports, Barcelona (Spain), 2015, 9/24 (Key note)

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

浅井 武 ( ASAI, Takeshi )  
筑波大学・体育系・教授  
研究者番号 : 00167868

(2)研究分担者

小池 関也 ( KOIKE, Sekiya )  
筑波大学・体育系・准教授  
研究者番号 : 50272670