

実験と数値流体解析を統合した スポーツエアロダイナミクス解析システムの開発と展開研究

筑波大学 浅井 武
(共同研究者) 同 洪 性 賛

Research and Development for a Sports Aerodynamic Analysis System Based on an Integrated Experimental and Computational Fluid Mechanics

by

Takeshi Asai, Songchan Hong
Faculty of Health and Sport Sciences, The University of Tsukuba

ABSTRACT

In downhill alpine skiing, racers often exceed speeds of 120 km/h, with air resistance substantially affecting the overall race times. 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 (the downhill racer's speed) 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).

要 旨

アルペンスキー競技のダウンヒルでは、最高速度が 120 km/h を超えることが少なくなく、空気抵抗が競技タイムに大きく影響を与えている。これまで、アルペンスキー競技の空気抵抗に関する研究では、実際のレーサーを対象に、実験風洞を用いて、滑走フォームと抗力の関係や、スーツを含むスキー用具のデザインが検討されてきた。しかし、レーサー回りの流速分布や渦構造は明らかではなかった。そこで本研究では、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流速（ダウンヒルレーサーの速度）と全抗力の関係を示した。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モデルの全抗力は、流速 15 m/s 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。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）であると考えられた。本研究では、実験と数値流体解析を統合したスポーツエアロダイナミクス解析システムの開発を試み、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。

まえがき

アルペンスキー競技のダウンヒルやスーパージアアントスラローム等では、最高速度が 120 km/h を超えることが少なくなく¹⁾、空気抵抗が

競技タイムに大きく影響を与えている。これまで、アルペンスキー競技の空気抵抗に関する研究では、実際のレーサーを対象に実験風洞（Wind tunnel）を用いて、滑走フォームと抗力の関係や、スーツを含むスキー用具のデザインが検討されてきた²⁻⁴⁾。しかし、風洞を用いた実験では、レーサーの全抗力は計測できるものの、身体各部分の抗力分布を計測することは、極めて困難である。また、レーサー周りの流れを可視化して、その空力特性を検討するためには、風洞を用いた実験流体力学（Experimental Fluid Dynamics (EFD)）と共に、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics (CFD)）を活用することが効果的である⁵⁾。とりわけ、レーサー各身体部分の抗力分布を推定することは重要であり、CFD を用いることによって、効率的に実現可能になると考えられる。そして、レーサー周りの流れ場を把握し、その抗力分布を明らかにすることは、新たな滑走フォームやスーツを含むスキー用具のデザインの基礎を与えると考えられる。

そこで本研究では、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、レーサー各部分の抗力分布を明らかにする。さらに、本研究で検討した、実験と数値流体解析を統合したスポーツエアロダイナミクス解析システムのアウトラインを示す。

1. 方 法

1.1 格子ボルツマン法を用いた数値流体解析

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

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 1 mm とし、最大格子サイズは 4 mm 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^{6,7)}。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業用 CFD ソフトウェア (PowerFLOW 5.0, Exa Inc.) を用いた⁸⁾。乱流モデルはベリラーエディシミュレーションモデル (VLES)⁹⁾ 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。

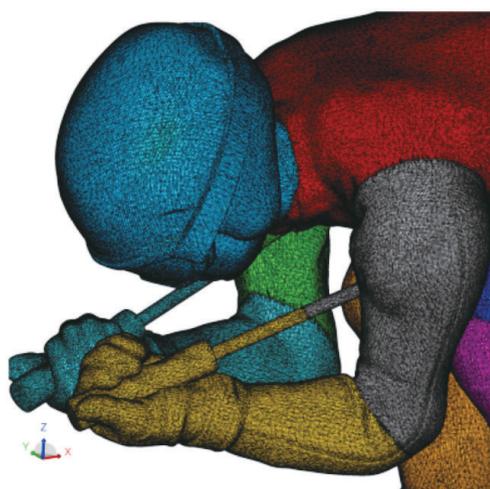


図 1 3次元CFD用ダウンヒルレーサーモデル

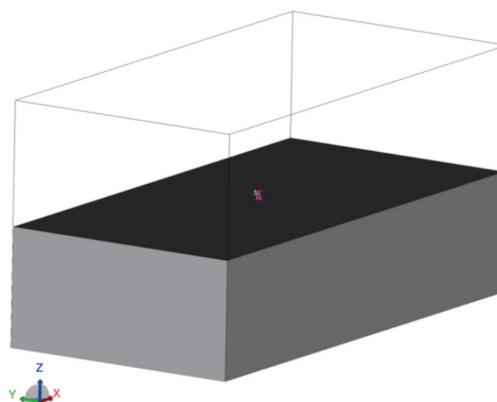


図 2 CFD用カーテシアン解析空間 (W20m xH20m xL40m)

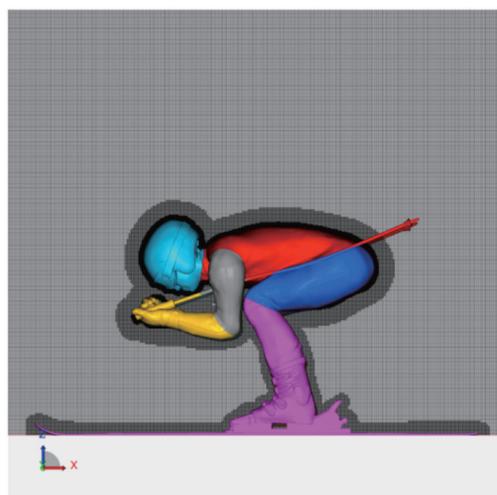


図 3 領域グリッド技術によるCFD用計算格子分布

1.2 風洞を用いた実験流体解析

風洞実験は、循環型 (Göttingen type) 筑波大学体育科学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ザ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。

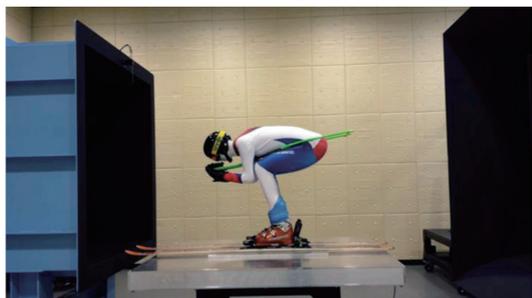


図4 実物大フルスケールダウンヒルレーザーモデルを用いた風洞実験のセットアップ

2. 結果及び考察

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ザ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ザ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 ($r = .99, p < 0.01$). Brownlie et al.¹⁾ は、実際のレーザーの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。

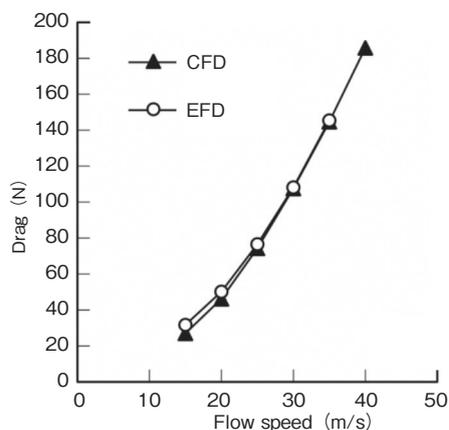


図5 ダウンヒルレーザーモデルの全抗力におけるCFDとEFDの比較

流速 40 m/s におけるダウンヒルレーザ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、ダウンヒルレーザ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、ダウンヒルレーザ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)^{10,11)}。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ザ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。

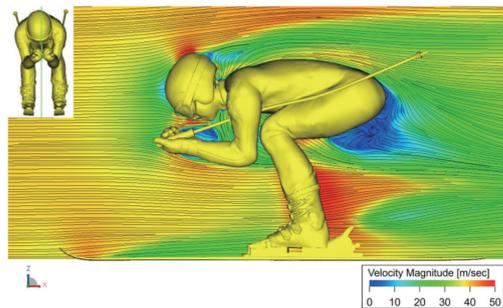


図6 流速 40 m/s 時におけるダウンヒルレーザーモデル周りの流速分布 (頭頂を通る矢状面)

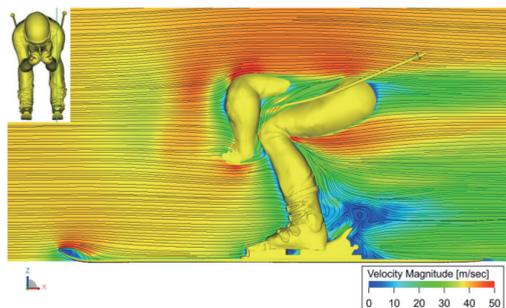


図7 流速40 m/s時におけるダウンヒルレーサーモデル周りの流速分布（左下腿部を通る矢状面）

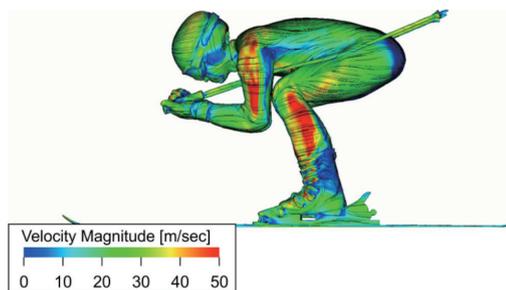


図8 流速40 m/s時におけるダウンヒルレーサーモデル表面の流速分布

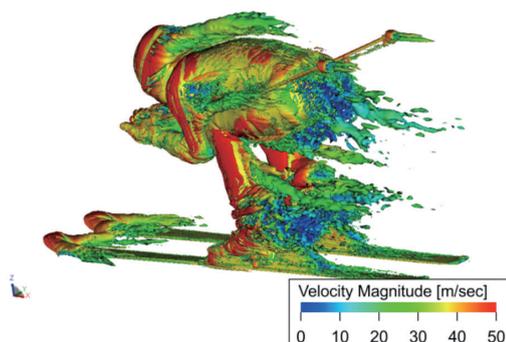


図9 流速40 m/s時におけるダウンヒルレーサーモデル周りのラムダ2による渦構造表示

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。

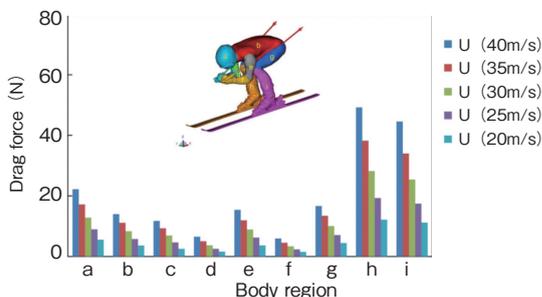


図10 ダウンヒルレーサーモデルの各部位における抗力分布

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, i: 左下腿部

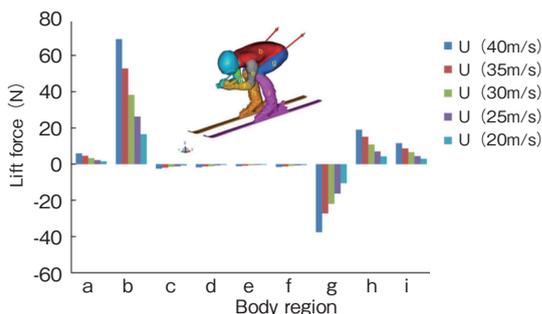


図11 ダウンヒルレーサーモデルの各部位における揚力分布

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, i: 左下腿部

本研究では、実験と数値流体解析を統合したスポーツエアロダイナミクス解析システムの開発を試み、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（図 12）。

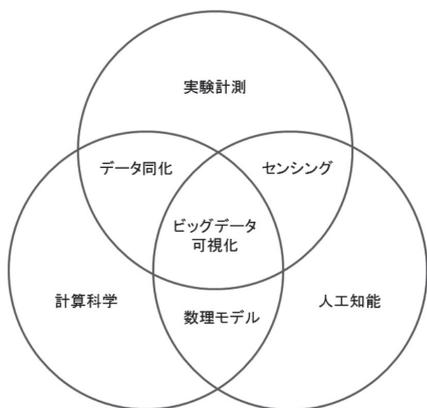


図12 実験と数値流体解析を統合したスポーツエアロダイナミクス解析システムのアウトライン (含む将来構想)

3. まとめ

本研究では、風洞を用いた空力実験と格子ボルツマン法を用いた数値流体解析を統合することにより、アルペンスキーのダウンヒルレーサー周りの流れ場の可視化すると共に、各身体部位の抗力分布を検討した。ダウンヒルレーサーモデルに関する流れ場の可視化と各身体部位の抗力分布より、クラウチング姿勢における抗力の発生源は、主に頭部、上腕部、下腿部、大腿部 (含む臀部) であると考えられた。したがって、これら各部位の抗力を低下させる姿勢がスポーツ技術として重要になると思われる。また、スポーツ用具の研究開発では、これら各部位の抗力を低下させるスーツや用具のデザインが必要になると考えられる。

一方、クラウチング姿勢における揚力の発生源は、主に、体幹部と大腿部であったが、体幹部は上方に、大腿部は下方に働いていた。身体重心に働く揚力は、これらの合力であり、ある程度相殺されていると推測されるが、レーサーに必要な揚力は明らかでなく、今後の課題の一つであると考えられる。

本研究では、格子ボルツマン法を用いて、ダウンヒルレーサーモデルのクラウチング姿勢のみを解析したが、実際のレースは、常に姿勢変化が伴

う非定常運動であり、それらが考慮可能な非定常解析を行っていくことが求められる。また、計算資源の制約から、乱流モデルとして VLES を用いているが、計算資源が増大するに従って、直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation (DNS)) による解析も可能になってくると思われる。さらに、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。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深く感謝致します。また、実験、分析に協力頂きました筑波大学大学院コーチング学専攻院生の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Brownlie L., Larose G., D'Auteuil A., Allinger T., Meinert F., Kristofic P., Dugas S., Boyd R., Stephens D., Factors affecting the aerodynamic drag of alpine skiers, 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA), *Procedia Eng.*, 2:2375-80(2010)
- 2) Luethi S.M., Denoth J., The influence of aerodynamic and anthropometric factors on speed in skiing, *Int. J. Sport Biomech.*, 3:345-52(1987)
- 3) Barelle C., Ruby A., Tavernier M., Experimental model of the aerodynamic drag coefficient in alpine skiing, *J. Appl. Biomech.*, 20:167-76(2004)
- 4) Thompson B.E., Friess W.A., Knapp K.N. II., Aerodynamics of speed skiers, *Sports. Eng.*, 4:103-12 (2001)
- 5) Fares E., Nölting S., Unsteady flow simulation of a high-lift configuration using a lattice Boltzmann approach, *AIAA Paper*, 2011-869(2011)
- 6) Chen J., Volumetric formulation of the lattice Boltzmann method for fluid dynamics: Basic concept, *Phys. Rev. E.*, 58(3) :3955-3963(1998)
- 7) Yu D., Mei R., Shyy W., A multi-block lattice

- Boltzmann method for viscous fluid flows, *Int. J. Numer. Meth. Fluids.*, **39**:99-120(2002)
- 8) Chen S., Doolen G., Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, **30**:329-64(1998)
- 9) Kotapati R., Keating A., Kandasamy S., Duncan B., Shock R., Chen H., The lattice-Boltzmann-VLES method for automotive dynamics simulation, a review, *SAE Paper*, 2009-26-057(2009)
- 10) Jeong J., Hussain F., On the identification of a vortex, *J. Fluid. Mech.*, **285**:69-94(1995)
- 11) Chakraborty P., Balachandar S., Adrian R. J., On the relationships between local vortex identification schemes, *J. Fluid. Mech.*, **535**:189-214(2005)