

アルペンスキー競技ダウンヒルにおいてレーサーが受ける空気抵抗は下腿部が最大
～身体部位ごとの空力特性を初めて解明～

研究成果のポイント

1. アルペンスキー競技ダウンヒルにおける、レーサーの身体全体と、各身体部分の空気抵抗(抗力)を、世界に先駆けて明らかにしました。
2. 風洞実験と数値流体解析の結果、クラウチング姿勢におけるレーサー身体各部位の抵抗の大きさは、下腿部(～50%)、上腕部(～15%)、頭部(～12%)、大腿部(含む臀部)(～9%)の順になることを示しました。
3. 数値流体解析により、ダウンヒルレーサー周りの空気の流れを可視化し、レーサー近傍に生じる渦構造を明らかにしました。

国立大学法人筑波大学(以下「筑波大学」という)体育系 浅井武教授、洪性賛助教、及びエクサ・ジャパン株式会社の伊集院浩一技術ディレクターとの研究グループは、筑波大学スポーツ流体工学実験棟の低速低乱風洞実験装置(San Technologies社製)と筑波大学情報メディアセンタークラスターサーバーの数値流体解析システムを用い、アルペンスキー競技ダウンヒルのレーサーに対する空力特性を検討しました。その結果、クラウチング姿勢におけるレーサー身体各部位の空気抵抗(抗力)の大きさは、下腿部(～50%)、上腕部(～15%)、頭部(～12%)、大腿部(含む臀部)(～9%)の順になることが明らかになりました。また、本研究で用いた風洞実験と数値流体解析を連携させた計測と可視化システムを用いることにより、ダウンヒルレーサーやダウンヒルスーツの空気抵抗や気流の渦構造が予測可能になりました。

これまで、アルペンスキー競技の競技者にかかる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ました。しかし、風洞を用いた実験では、レーサーの全身にかかる抗力は計測できるものの、身体各パーツの抗力分布を計測することは極めて困難であり、抗力を生じる原因となる気流の渦構造も不明のままでした。

本研究では、風洞実験を用いた実験流体解析と格子ボルツマン法(Lattice-Boltzmann method)(PowerFLOW 5.0, Exa Corp.)を用いた数値流体解析を連携させて、クラウチング姿勢におけるレーサーの速度と全抗力及び部分抗力の関係を検討しました。また、数値流体解析により、レーサー周りの気流を可視化し、その渦構造を明らかにしました。さらに、風洞実験の結果と数値流体解析の結果は良好に一致し、風洞実験と数値流体解析を連携させたスポーツ空力解析の可能性が拡大されました。

このような研究結果は、新しいスポーツウェアの開発やデザインに応用できるだけでなく、最新スポーツ技術の理解・習得にも活用されるものと期待されます。

本研究成果は、Institute of Physics (IOP) Publishing が発行する科学誌「European Journal of Physics」に2016年12月29日付けでオンライン公開されました。

* 本研究の一部は、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の助成を受けたものです。

研究の背景

これまで、アルペンスキー競技の競技者にかかる空気抵抗(抗力)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、滑走フォームと空気抵抗の関係や、スーツを含むスキー用具のデザインが検討されてきました。しかし、風洞を用いた実験では、レーサーの全身にかかる抗力は計測できるものの、身体各パーツの抗力分布を計測することは極めて困難であり、抗力を生じる原因となる気流の渦構造もよくわかっていませんでした。

研究内容と成果

本研究では、風洞実験を用いた実験流体解析(図1)と格子ボルツマン法(Lattice-Boltzmann method)(PowerFLOW 5.0, Exa Corp.)を用いた数値流体解析(図2)を連携させて、クラウチング姿勢におけるレーサーの速度と全抗力及び部分抗力を検討しました。また、数値流体解析により、レーサー周りの流れを可視化し、その渦構造を明らかにしました。

まず、3Dフルスケールダウンヒルレーサーマネキンを用いた風洞実験により、風速を15 m/sから35 m/sまで5m/s刻みに変化させ、レーサーモデルにかかる抗力(主流方向の抵抗力)と揚力(主流に対して垂直方向の力)を計測しました。抗力が大きいほど進行方向とは逆方向から受ける力(空気抵抗)が大きく、レーサーが進みにくいことを示しています。また、3Dダウンヒルレーサーモデルを用いた数値流体解析モデルを作成し、風速を15 m/sから40 m/sまで5m/s刻みに変化させ、レーサーモデルの全抗力を求めました。

次に、風洞実験における全抗力の測定結果と、数値流体解析における全抗力の計算結果を比較検討したところ、いずれの風速においても良好な一致がみられ($r = 0.99$, $p < 0.01$)、数値流体解析の妥当性、信頼性は担保されると考えられました(図3)。

そして、数値流体解析により、流速40 m/sにおけるレーサーモデル周りの渦構造を可視化しました。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ました(図4)。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ました(図5)。また、ダウンヒルレーサーモデル周りにおけるラムダ2(渦可視化法の一つ)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ました(図6, 図7)。これらのことから、下腿部、上腕部、頭部が大きな抗力の発生源になっていることがわかり、この渦領域を小さくすることは、空気抵抗の減少につながる事が推測されました。さらに、数値流体解析により、レーサーモデル各部位の抗力の大きさは、下腿部(～50%)、上腕部(～15%)、頭部(～12%)、大腿部(含む臀部)(～9%)の順になることがわかりました(図8)。

以上の結果より、クラウチング姿勢におけるダウンヒルレーサーの下腿部、上腕部、頭部、大腿部(含む臀部)下流側には、大きな渦が発生していることが示唆されるとともに、その部分抗力が定量的に明らかになりました。

今後の展開

本研究により、今まで究明できなかったダウンヒルレーサー周りの渦構造が可視化されるとともに、部分抗力が定量的に明らかになり、新型ダウンヒルスーツの開発やデザインへの適用、さらには最新スポーツ技術の理解・習得が促進されるものと考えられます。また、本システムは他のスポーツ流体特性の解明にも応用可能であり、様々なスポーツウェアやスポーツ技術の開発、実装が期待されます。

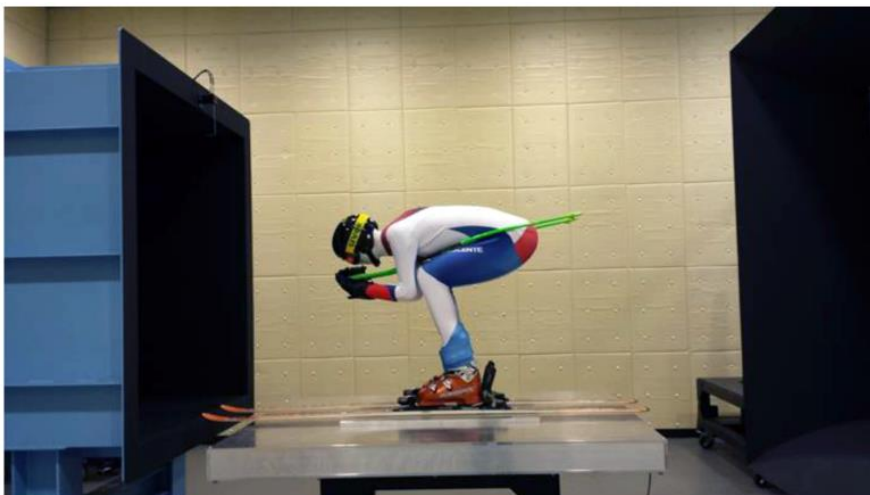


図1. 実物大フルスケールダウンヒルレーサーマネキンを用いた風洞実験のセットアップ.

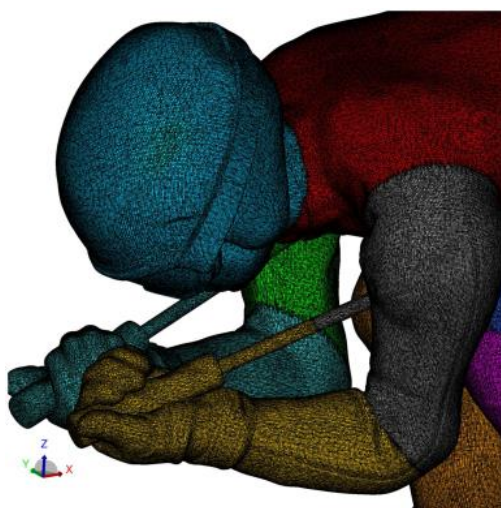


図2. 3次元数値流体解析用ダウンヒルレーサーモデル.

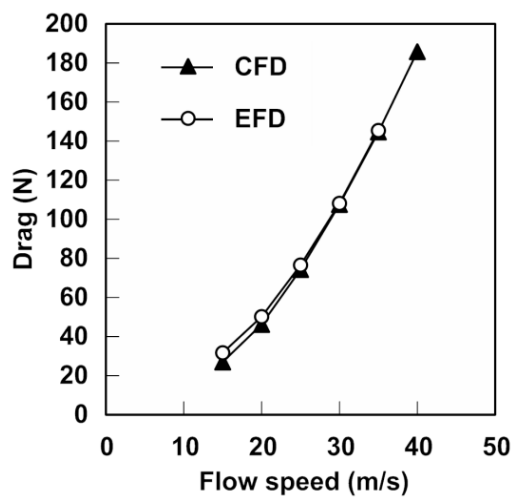


図3. ダウンヒルレーサーモデルにおける風洞実験(EFD)と数値流体解析(CFD)の全抗力の比較($r = 0.99$, $p < 0.01$).

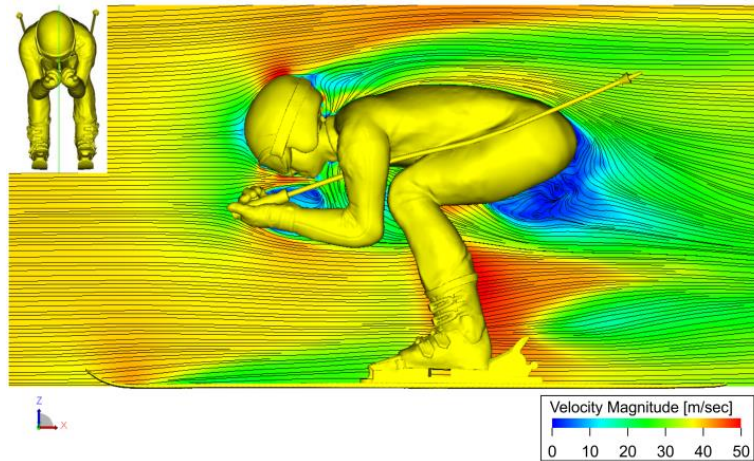


図 4. 流速 40 m/s 時におけるダウンヒルレーサーモデル周りの流速分布(頭頂を通る矢状面).
赤い領域は流速が大きい部分を示し、青い領域は流速が小さい部分を示す.

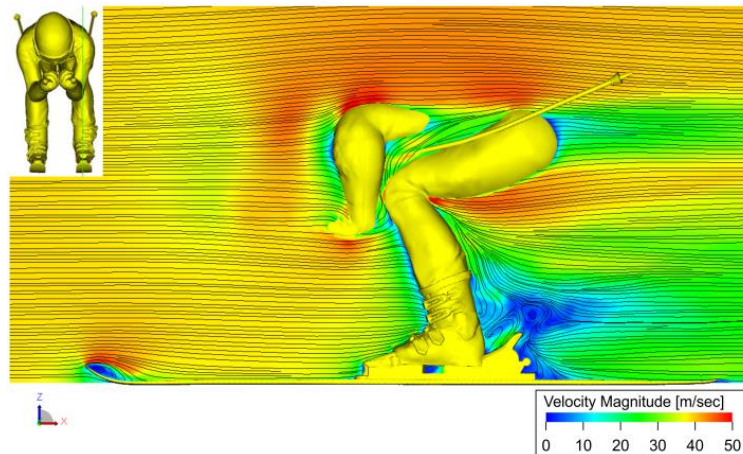


図 5. 流速 40 m/s 時におけるダウンヒルレーサーモデル周りの流速分布(左下腿部を通る矢状面).
赤い領域は流速が大きい部分を示し、青い領域は流速が小さい部分を示す.

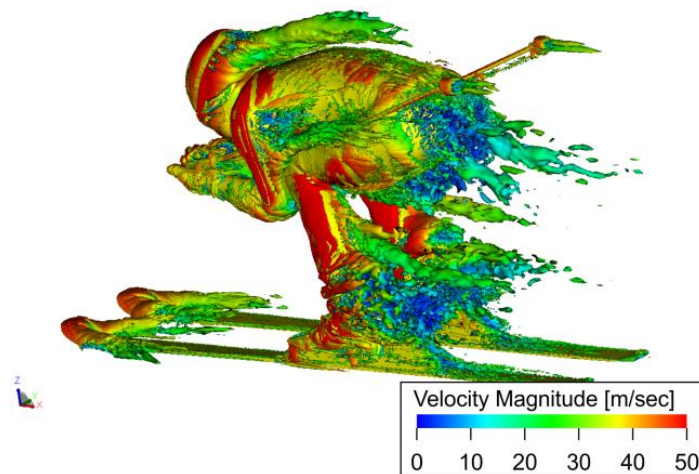


図 6. 流速 40 m/s 時におけるダウンヒルレーサーモデル周りのラムダ 2 による渦構造表示.
ラムダ 2 は渦構造可視化法の一つで、渦が表示されている領域は、強い渦構造の存在を表す.

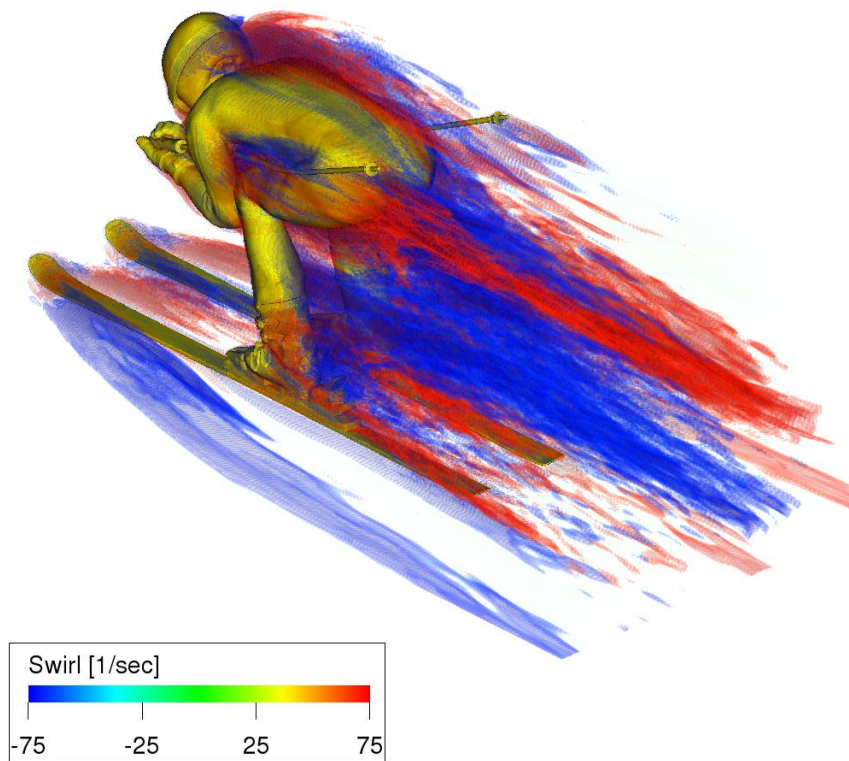


図 7. 流速 40 m/s 時におけるダウンヒルレーサーモデル周りの渦度による渦構造表示.
後方から見て赤色は反時計回りの渦, 青色は時計回りの渦を示す.

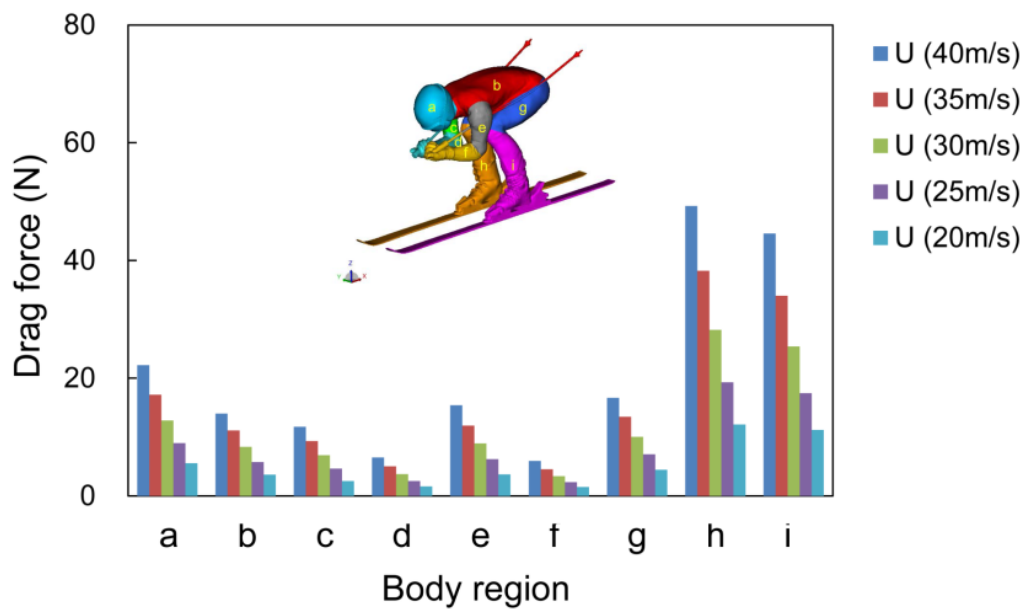


図 8. ダウンヒルレーサーモデルの各部位における抗力分布(a:頭部, b:体幹部, c:右上腕部, d:右前腕部, e:左上腕部, f:左前腕部, g:大腿部, h:右下腿部, i:左下腿部).

掲載論文

【題名】 Flow visualization of downhill skiers using the lattice Boltzmann method

(和訳) 格子ボルツマン法を用いたダウンヒルスキーヤー周りの流体の可視化

【著者名】 浅井 武, 洪 性賛, 伊集院浩一

【掲載誌】 European Journal of Physics (<http://dx.doi.org/10.1088/1361-6404/38/2/024002>)

問合わせ先

浅井 武(あさい たけし)

筑波大学体育系 教授

洪 性賛(ほん そんなちゃん)

筑波大学体育系 助教