

スピードスケート・パシュート競技の空力解析

Aerodynamic Analysis of Speed Skating Team Pursuit

瀧優太¹⁾, 青木尊之²⁾, 渡辺勢也³⁾, Tan Hong Guan⁴⁾, 北川翔⁵⁾

Yuta Taki, Takayuki Aoki, Seiya Watanabe, Tan Hong Guan and Sho Kitagawa

1) 東京工業大学大学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1, E-mail: taki@sim.gsic.titech.ac.jp)

2) 東京工業大学 学術国際情報センター (E-mail: taoki@gsic.titech.ac.jp)

3) 九州大学 応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1, E-mail: swatanabe@riam.kyushu-u.ac.jp)

4) 東京工業大学大学院 (E-mail: hgtan@sim.gsic.titech.ac.jp)

5) 東京工業大学大学院 (E-mail: shok@sim.gsic.titech.ac.jp)

The aerodynamics of moving 3D skater models is numerically studied by the cumulant-collision LBM using Adaptive Mesh Refinement method. We focus on the team pursuit of speed skating with 3 skaters. The second and third skaters are subject to the wake of the forward skaters. It is found that the drag force of the second skater is smallest of the three skaters and the drag force of the second skater is 55% smaller than that of the first.

Key Words : Lattice Boltzmann method, Immersed-boundary method, Karman vortex, Pressure coefficient, Drag force, Speed skating

1. 緒言

スポーツは人の運動能力が最も発揮される場面であり、オリンピックなどでも周囲の気流の影響を受ける競技が数多くある。陸上の短距離走などでは追い風が2.0 m/s以上になると記録は参考値になってしまう。また、冬季競技のスケートやジャンプなどでは、選手が空力を如何にうまく利用するかが勝敗に大きく影響する。

スポーツの中でも特にスピードスケートでは激しく複雑な動きを伴うため、これまで抗力の解析や実験が数多く行われてきた^[1,2]。しかしこれらの解析は静止モデルを対象に行われ、また殆どが単独滑走での実験に限られていた。複数のスケーターの時系列モデルを用いた流体構造シミュレーションは、数値安定性の問題や微小な渦を解像するための高い格子解像度の要求など、その計算の複雑さなどの理由でこれまで多くは行われてこなかった。

本研究ではDirect-forcing埋め込み境界法型格子ボルツマン法を用いて、複数人が前後に並んで滑走するスピードスケート・パシュート種目において、スケーターの姿勢が時々刻々と変化する時系列形状モデルを基に空力特性を解析し、スケーターの動きと周囲の流体との関係を明らかにすることを目的とする。流体計算にはLBMソルバーを使用する。物体や渦近傍には細かい格子を割当て、遠方では解像度を粗くするAdaptive Mesh Refinement (AMR) 法が導入されている^[3]。これにより、高解像度計算が必要な領域に高解像度(細かい)格子を集めることができ、省メモリかつ高効率に計算を行うことができる。

2. 計算手法

(1) Adaptive Mesh Refinement法

高い格子解像度が必要な領域は物体や渦近傍であり、全計算領域に対して高解像度の格子を割り当てる計算は非効率的である。AMR法を採用することにより、計算メモリが有効的に活用され、計算効率が上がる。本稿では、図1に示すような木構造アルゴリズムに従うAMR法を使用する。格子間隔を1/2, 1/4, 1/8, ...と再帰的に分割することにより、任意の局所空間に任意の格子解像度を割り当てる。流体計算が行われるのは末端のリーフと呼ばれる部分で、3次元の場合には1つのリーフに対応する領域が細分化されると8つのリーフが生成される

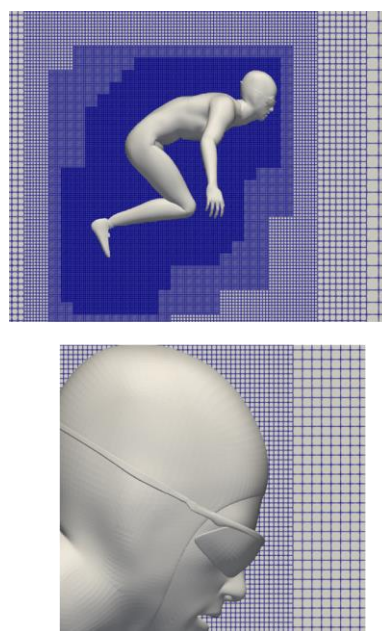


図1 octree-based AMR 法を実装した計算領域

八分木のデータ構造になる。また、複数台のGPUで効率よく計算を行うため、空間充填曲線を用いて計算領域を1次元空間にマッピングし、各GPUで計算するリーフ数が同程度になるよう曲線を切断することで、3次的に計算領域を動的に分割している。

(2) 格子ボルツマン法

格子ボルツマン法は流体を各格子点上で衝突、並進する仮想的な粒子の集合とみなし、その速度分布関数の時間発展方程式を解く手法である。本稿では、SGSモデルを用いない陰的なLESとして作用し、高レイノルズ数でも数値安定性の高いCumulantモデルを使用した。

(3) Direct-forcing埋め込み境界法

Direct-forcing埋め込み境界法は直交座標系で複雑形状物体を扱う際に有効な手法であり、物体を構成するラグランジュ的なマーカーに対し、non-slip条件を満たすような体積力を計算し、周囲の流体に分散させて、物体と流体の相互作用を表現する。本稿では体積力の計算を反復的に行うことでnon-slip条件を精度良く満たすことができるMulti direct-forcing method (MDFM)を採用した。

b 番目のマーカー $\mathbf{X}_b$ に対し、マーカー上での流速 $\mathbf{U}^{(m)}(\mathbf{X}_b, t)$ は式 (2.2) のように表される。

$$\mathbf{u}^{(m)}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + \frac{\Delta t}{2\rho} \mathbf{f}^{(m-1)}(\mathbf{x}, t) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{U}^{(m)}(\mathbf{X}_b, t) = \sum_{\mathbf{x}} \mathbf{u}^{(m)}(\mathbf{x}, t) D(\mathbf{x} - \mathbf{X}_b) \Delta x^3 \quad (2.2)$$

ここで、 m を反復計算のステップ数、 ρ と $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ を格子ボルツマン法で計算される密度および流速、 $\mathbf{f}^{(m-1)}(\mathbf{x}, t)$ を前ステップの格子点での体積力とする。 $D(\mathbf{x} - \mathbf{X}_b)$ は重み関数で、離散化されたディラックのデルタ関数 $\delta(r)$ が用いられる。

マーカー $\mathbf{X}_b$ 上での体積力 $\mathbf{F}_b^{(m)}$ は式 (2.3) のように計算されて、式 (2.4) のように重み関数を用いてマーカーから流体へ体積力の分散を行う。

$$\mathbf{F}_b^{(m)} = 2\rho_0 \frac{\mathbf{U}^d - \mathbf{U}^{(m)}(\mathbf{X}_b, t)}{\Delta t} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{f}^{(m)}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f}^{(m-1)}(\mathbf{x}, t) + \sum_b \mathbf{F}_b^{(m)} D(\mathbf{x} - \mathbf{X}_b) \Delta V_b \quad (2.4)$$

ここで、 $\mathbf{U}^d$ を境界の速度、 ρ_0 を初期状態の流体の密度、 ΔV_b は b 番目のマーカーの検査体積とする。

3. 計算条件

(1) 無次元数の定義

本研究では、レイノルズ数 Re 、圧力係数 C_p 、抗力係数

C_d の3つの無次元数を定義し、計算結果の解析に使用する。

ここで、 $U_0 = 14.0$ m/s を代表速度とし、本研究ではスケーターの前進速度とする。また、 $L = 1.0$ m を代表長さとし、代表面積を本研究ではスケーターに働く抗力と前後方向の投影面積とする。

また、1.29 s から 2.57 s (第2周期目) のスケーター全身が受ける抗力を時間平均したものを $\overline{C_d}$ とする。

(2) スケートターの条件設定

計算に用いるスケーターは、実際の競技フォームをモーションキャプチャした人型の3Dモデルを使用する。このモデルはスケーターが2歩前進することで1周期とし、176枚のスケーターモデルで1周期分の姿勢を生成する。また、3 mm × 3 mm に1つの間隔でマーカーを設置する。諸物理量は表1の通りとする。

表1 スケートターの諸物理量

Height (when skating)	1.2 m
Speed	14.0 m/s
Pitch	1.136 steps/s
Stride	12.32 m

また、複数のスケーターが存在する条件では、1人目、2人目、3人目のスケーターは、それぞれ前から1人目、2人目、3人目のスケーターを指示することと定義する。

(3) 流体の条件設定

計算領域は 98.304 m × 32.768 m × 32.768 m、格子幅は物体近傍で 4.0 mm、遠方で 512 mm とする。壁での境界条件は、静止境界条件を適用した。流体は常温の空気を想定し、初期状態での密度 ρ_f を 1.205 kg/m³、動粘度 ν を 1.512 × 10⁻⁵ m²/s とする。

4. 計算結果

(1) ヘルメットの装着の有無による比較

本節では、1人のスケーターが 14.0 m/s で前進する場合においてヘルメット装着、未装着で計算を行い、ヘルメットの有無による比較を行った。レイノルズ数は 9.26 × 10⁵ である。計算には8台のGPU (NVIDIA Tesla V100) を使用した。ヘルメットを装着していない場合、物理時間を 5.49

Time: 0.641828 (s)

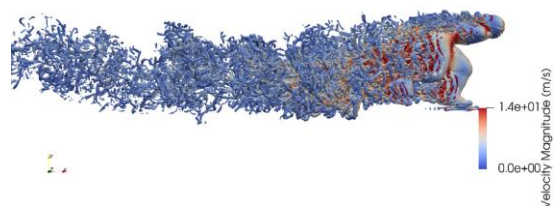


図2 速度14.0 m/s、単独滑走、ヘルメット未装着時のスケーター後方の渦

秒進めるのに31.8時間ほどの計算時間を要し、ヘルメットを装着している場合、物理時間を5.49 s進めるのに32.4時間ほどの計算時間を要した。ヘルメットを装着していない場合の渦を図2に示し、ヘルメット装着、未装着時の圧力係数、抗力係数を図3、図4に示す。

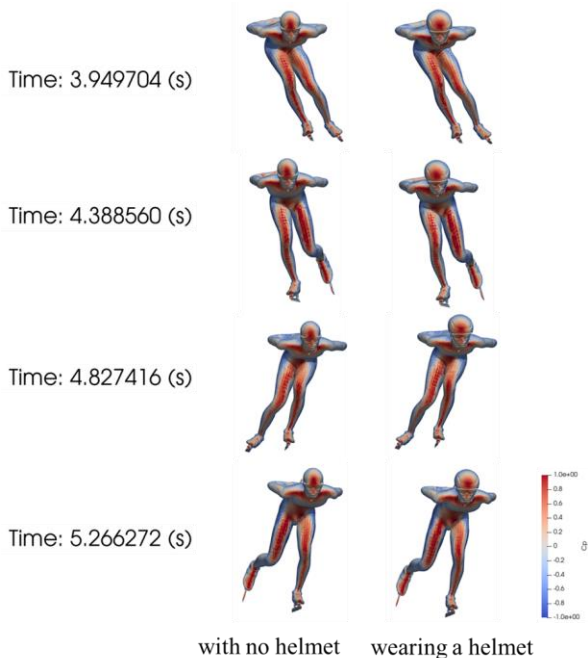


図3 ヘルメット装着、未装着でのスケーター前面の圧力係数

図2より、スケーターの前進により後方に渦が生成され、後方内側の渦の速度が高いことが確認できる。また、スケーターの後方5mほどまで渦が発生しているため、この範囲ではスケーターによってできる後流で圧力が低下していると考えられる。

図3よりスケーター表面の圧力は、頭部、肩、大腿部を中心に高い圧力であることが確認できる。頭部にも高い圧力がかかっているため、ヘルメットの装着により頭部

Time: 0.000000 (s)

Time: 5.485700 (s)

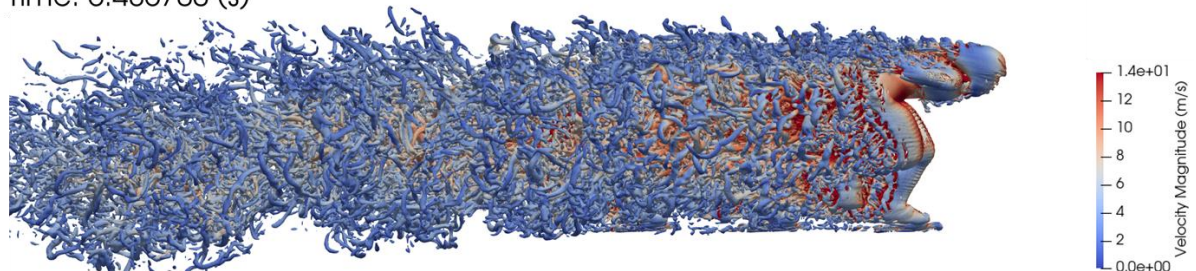


図5 パシュート競技でのスケーター周囲の渦

付近の流れが変化し、後流に変化を及ぼすと考えられる。

また、抗力係数を確認すると、スケーターの動きの周期に合わせて抗力係数に変化していることが分かる。第3・1節で定義した $\overline{C_d}$ を用いると、ヘルメット未装着時、装着の $\overline{C_d}$ はそれぞれ0.732, 0.745であり、ヘルメットを装着することでわずかに抗力係数が高くなった。過去の実験により、身長、体重などが異なるスケーターに12 m/sの風を当てた場合、抗力係数が0.79~0.99であった^[4]が、計算結果がそれらの値より低くなったのは選手が大きく屈んでおり、受け止める流れが小さくなったからであると考えられる。

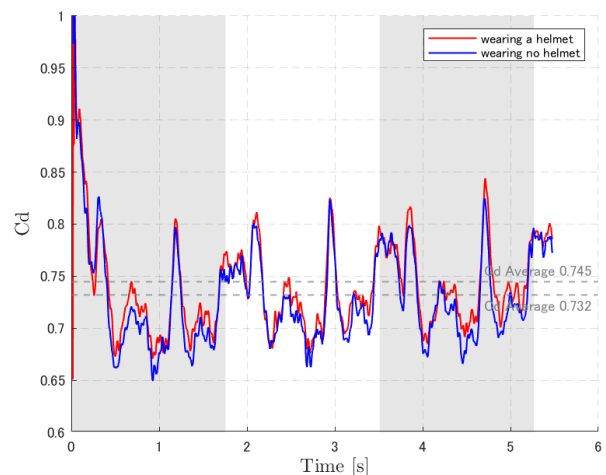


図4 ヘルメット装着時、未装着時の抗力係数

(2) パシュート競技での計算結果

本節では速度14.0 m/s、縦に3人並んだ滑走の計算を行った。3人の動きの周期に位相の差はない状態で、スケーター同士の間隔を85 cmとして計算を行った。レイノルズ数は前節同様 9.26×10^5 であり、計算には16台のGPU (NVIDIA Tesla V100)を使用した。物理時間を5.49 s進めるのに72.6時間ほどの計算時間を要した。ある時刻でのスケーター周囲の渦、スケーター前面の圧力係数を図5、図

6に示す。



図6 パシュート競技でのスケーター前面の圧力係数

図5より、渦は後方まで大きく伸び、2人目、3人目のスケーターが前の人によって作られる渦に包まれていることが見られる。速度分布を確認すると、スケーター真後ろの部分が赤くなっており、2人目、3人目は渦の速度が高い場所に位置している。また図6より圧力分布を確認すると、2人目、3人目が受ける圧力は1人目よりも小さいことが分かる。このことより2人目、3人目は前方のスケーターによってできる後流の影響を大きく受けていると考えられる。

次に、各スケーターの抗力係数の時系列変化を図7に示す。 $\bar{C}_d$ は1人目が0.669、2人目が0.297、3人目が0.364であった。

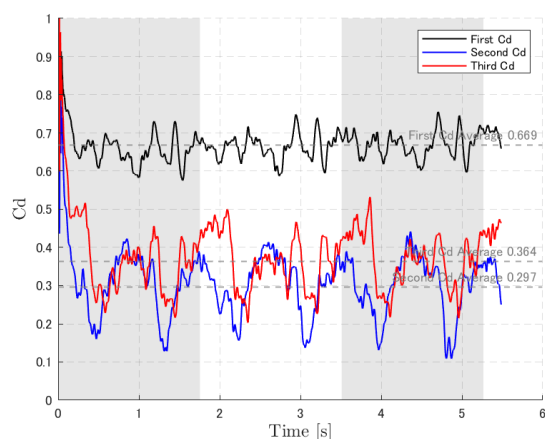


図7 パシュート競技での各スケーターの抗力係数

従来の3人滑走の計算^[5]と比較すると、従来の計算では抗力係数の振れ幅が約0.3と大きく、3人目の抗力係数が最も低いのにに対し、パシュート競技の滑走は抗力係数の振れ幅が小さく、また3人目よりも2人目の抗力係数が低い。これは今回用いたモデルがプッシュ・ポーズであることで、腕の振りが小さく、スケーター間隔も85 cmと小さくできたためであると考えられる。また2人目は、前方からの後流による圧力低減と、後方のスケーターによる負圧の抑制の影響を受けたため、抗力係数が最も低くなった

と考えられる。

5. 結言

埋め込み境界法型格子ボルツマン法を用いて、スケーターモデルの流体構造シミュレーションを行った。

単独滑走の場合、ヘルメットを装着することで頭部の前面投影面積が増加し、抗力係数がわずかに増加した。

パシュート競技での計算では、各スケーターが触れるほど小さい間隔で計算を行ったことで、2人目、3人目の受ける抗力が1人目の約半分まで小さくなることを示した。また、2人目は前後のスケーターによる空力の影響を受け、抗力係数が最も小さくなることが分かった。

複人数滑走の計算では、高解像度格子が必要な領域が増え、より多くの計算資源が必要になる。今後の課題として、走者の順番入れ替えや各走者の体格を考慮した空力解析を進める必要がある。

謝辞

本研究は革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(HPCI)の一般課題 hp230065「革新的スポーツ空力解析」として進めた研究である。また、科学研究費補助金・基盤研究(S) 課題番号19H05613および学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)の共同研究課題jh22042「人と衣服と気流の連成相互作用シミュレーション・フレームワークの構築」から一部支援を頂いた。本研究の計算には、名古屋大学・情報基盤センター「不老」Type-IIサブシステムを利用させて頂いた。また、国立スポーツ科学センターの山辺 芳氏、木村 裕也氏、鈴木 功士氏には、実際のスケート競技での空力の影響について多くのアドバイスを頂いた。記して謝意を記す。

参考文献

- [1] D'outeuil, A., Larose, G. L. and Zan, S.J.: Wind turbulence in speed skating: measurement, simulation and its effect on aerodynamic drag, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol.104, pp.585-593, 2012.
- [2] Oggiano, L., and Sætran, L. R.: Experimental analysis on parameters affecting drag force on speed skaters, Sports technology, Vol.3, No.4, pp.223-234, 2010.
- [3] 渡辺勢也, 青木尊之, 長谷川雄太: 動的AMR法を導入した格子ボルツマン法の複数GPUによる大規模計算, 計算力学講演会講演論文集, Vol 31, pp. 214, 2018.
- [4] van Ingen Schenau, G. J.: The influence of air friction in speed skating, Journal of Biomechanics, Vol.15, No.6, pp.449-458, 1982.
- [5] 瀧優太, Tan Hong Guan, 渡辺勢也, 青木尊之: スピードスケート・パシュート競技のLBMシミュレーションによる空力解析, 計算工学講演会論文集, Vol.28, pp.888-893, 2023.