

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

Aerodynamic Analysis of Speed Skating Pursuit Competition by LBM Simulation

瀧優太¹⁾, Tan Hong Guan²⁾, 渡辺勢也³⁾, 青木尊之⁴⁾

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

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

3) 九州大学 応用力学研究所 (E-mail: swatanabe@riam.kyushu-u.ac.jp)

4) 東京工業大学 学術国際情報センター (E-mail: taoki@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 40% smaller than that of the first, and there is not large difference between the second and third. It is confirmed that the distance between skaters is important.

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

1. 緒言

決められた距離をどれだけ速く移動できるかを競うスポーツ（陸上競技、自転車、スピードスケートなど）では、人が高速で移動するため、前方からの空気による抵抗力に打ち勝つために多くの力を必要とする。それらのようなスポーツでは、高速で動く人や物体の真後ろに張り付き、受ける抗力を小さくするという作戦が多用される。この現象は、高速で移動する物体の前方で空気を押しのけた分、物体の後流領域で気圧が下がり空気抵抗が下がるため、スリップストリームと呼ばれる^[1]。スリップストリームはスポーツだけでなく、より高速なモータースポーツなどでも特に効果を発揮し、競技成績を左右することもある。このような、前後に連なり高速で移動する物体と流れのシミュレーションが可能になれば、現象の解明および工学的な利用に繋がり、スポーツの記録向上や性能の良い周辺製品の開発に役立つ。

高速での移動を必要とするスポーツ、特にスピードスケートでは強い関心を持って取り組まれ、抗力の解析や実験が数多く行われている^[2,3]。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に対し、スケーターの態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相互作用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り当てる、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^[4]。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 $1/2, 1/4, 1/8, \dots$ 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次元的に計算領域を動的に分割している。

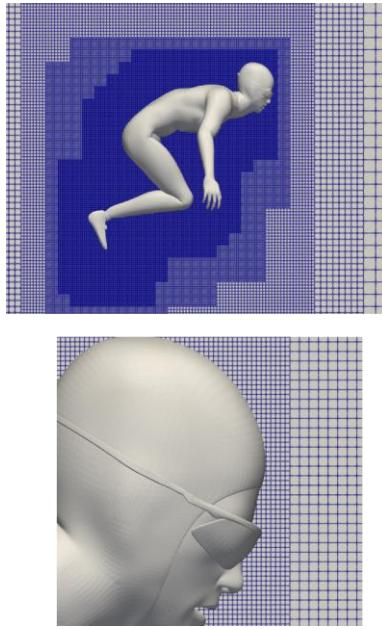


Fig. 1 Computational domain with implementation of tree-based AMR method.

(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の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。

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

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

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 \bar{C}_d とする。

(2) スケーターの条件設定

計算に用いるスケーターは、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歩前進することを1周期とし、32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。

Table 1 Physical quantities of a speed skater.

Height (when skating)	1.2 m
Speed	14.0 m/s
Pitch	1.5556 steps/s
Stride	9.0 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) 単独滑走での計算結果

本節では、1人のスケーターが 14.0 m/s で前進する場合の計算を行った。レイノルズ数は 9.26×10^5 である。計算には8台のGPU (NVIDIA Tesla V100) を使用した。この計算では、物理時間を 3.29 s 進めるのに、 13.8 時間ほどの

計算時間を要した。いくつかの時刻でのスケーター周囲の渦を図2に示す。また、スケーターの抗力係数の変化を図3に示す。

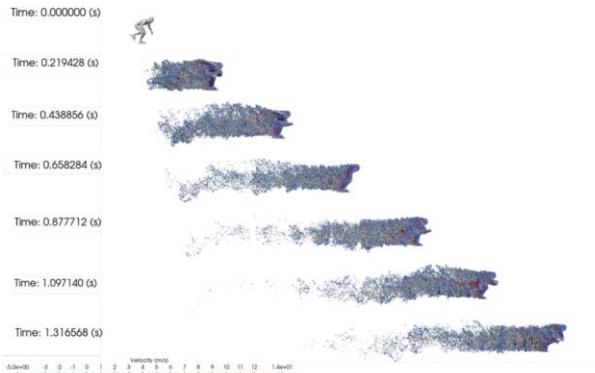


Fig. 2 Time series of the vortex structure when the skater moves at 14.0 m/s.

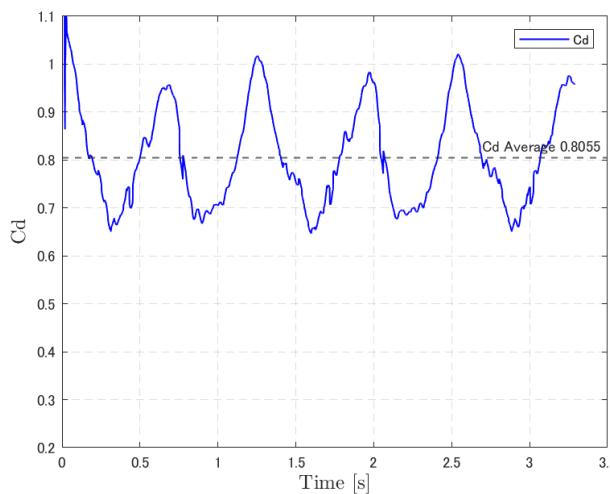


Fig. 3 Time history of the drag coefficient (C_d) for single skater.

図2より、スケーターが前進することで後方に渦が生成されることが確認でき、速度分布を確認すると後方内側の速度が高いことが分かる。このことからスケーター後方にカルマン渦が生じ、圧力が低下すると考えられる。また抗力係数の値より、スケーターの動きとともに周期的に抗力係数が変化することが確認でき、スケーターの両腕が体の左右に位置しているときにその値が高く、両腕を振り体の前後に動かしているときに値が低くなることが分かる。これは両腕が左右に位置しているときは前後方向の投影面積が大きくなることでより大きな抗力を受けるためであり、その一方で両腕が前後に位置しているときは前後方向の投影面積が小さくなり、受ける抗力が小さくなるためであると考えられる。

また、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^[5]。第3・1節で定義した \bar{C}_d を用いると、図3より

単独滑走の \bar{C}_d が0.81であったため、この計算結果も妥当であると考えられる。

(2) 2人滑走での計算結果

本節では、スケーターを2人前後に並べた状態で計算を行った。2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1.3 m、5 mでそれぞれ計算をし、そして、間隔が1.3 mの場合には前から2人目の動きを1/4周期遅れた状態でも計算を行い、それぞれの結果を比較した。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。間隔が1.3 mで動きが同位相の場合、物理時間を3.29 s進めるのに15.7時間ほどの計算時間を要し、間隔が5 mの場合、物理時間を3.29 s進めるのに15.5時間ほどの計算時間を要した。また、間隔が1.3 mで2人目の動きが1/4周期遅れた状態の場合、物理時間を3.29 s進めるのに15.6時間ほどの計算時間を要した。いくつかの時刻での1人目と2人目の C_p (間隔1.3 mの場合) のスナップショットを図4と図5に示す。また、2人のスケーターの抗力係数の時系列変化を図6に示す。

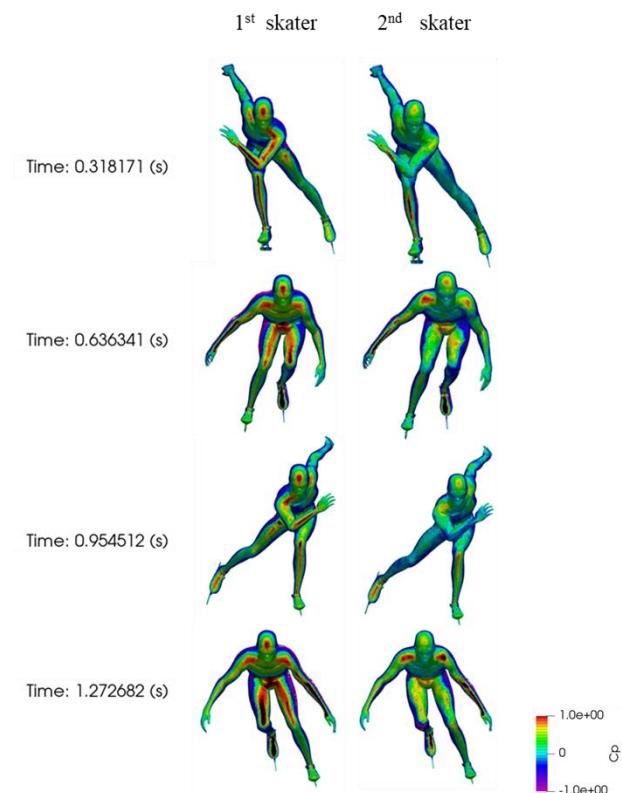


Fig. 4 Time series of the pressure distribution on the front surfaces of the first and second person.

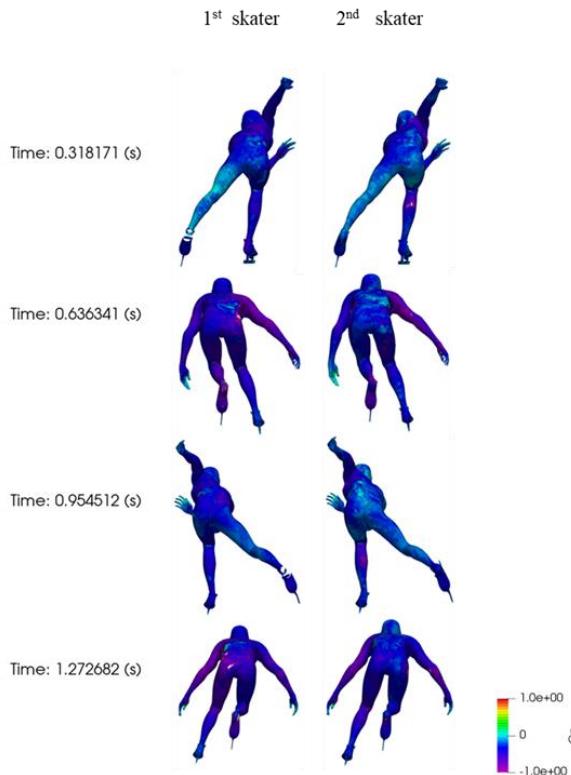


Fig. 5 Time series of the pressure distribution on the rear surfaces of the first and second person.

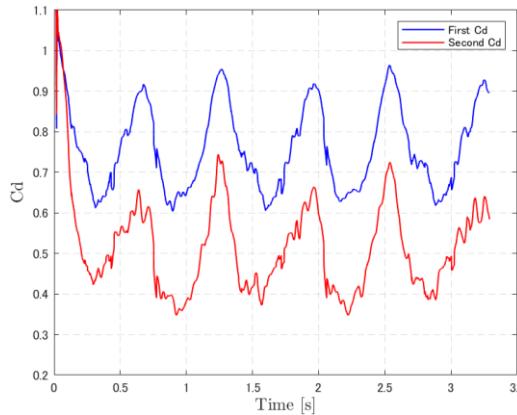


Fig. 6 Time history of the drag coefficient (C_d) for two skaters.

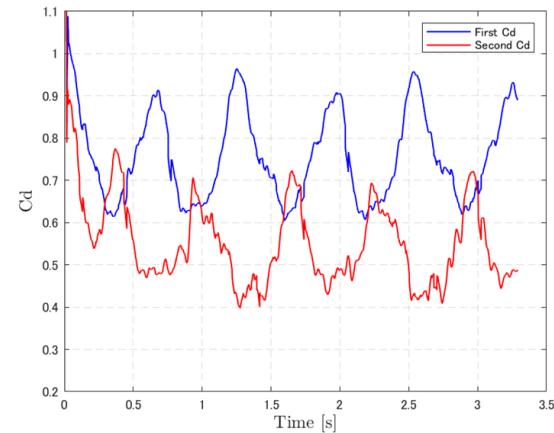
図4より、スケーター表面の圧力は、上腕、大腿、額など前方に位置している部分に高い圧力がかかることが確認でき、また2人目にかかる圧力は1人目よりも小さくなっていることが分かる。

滑走中の物体の真後ろ近辺では前方で空気を押しのけた分気圧が下がっており、その場所で空気の渦が発生し、周りの空気や物体などを吸引する効果を生む^[6]。よって、2人目の滑走者は1人目の滑走者の真後ろにいるため、1人後方の後流の影響を受けて圧力が低くなっていると考えられる。

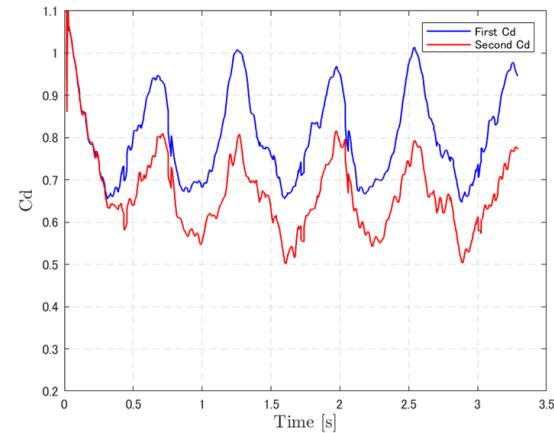
そして、図6より抗力係数を見ると、2人目の抗力係数は1人目の抗力係数より低くなっていることが分かる。1人

目、2人目の $\overline{C_d}$ はそれぞれ0.756、0.501であり2/3ほど小さくなっていることが分かり、また、2人のスケーターの位相は同じであるため、抗力係数のピークの時間もほぼ同じとなっている。

2人により、第二滑走者の受ける抗力が小さくなることが分かった。次に、スケーターの間隔や位相を変化させることで、計算結果にどのような変化が生じるか比較する。位相とスケーター間隔を変化させたときの抗力係数の違いをそれぞれ図7に示す。



(a) The phase of the second person is 1/4 cycle behind the first, and the distance between the two is 1.3 m.



(b) The first and second person are in the same phase, spacing 5.0 m.

Fig. 7 Comparison of drag coefficients for varying skater phase and spacing.

$\overline{C_d}$ を見ると、2人目の位相が1/4周期遅れた場合は、1人が0.751、2人が0.535であり、スケーターの間隔が5.0 mの場合は、1人が0.800、2人が0.651であった。そのため、図6と図7を比較すると、位相の変化により2人が受ける抗力はあまり変化しないが、一方で、スケーターの間隔の変化による2人が受ける抗力への影響は大きいと考えられる。

(3) 3人滑走での計算結果

本節では、スケーターを3人前後に並べた状態で計算を行った。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1.3 m, 2.5 mでそれぞれ計算を行った。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。間隔が1.3 mの場合、物理時間を3.29 s進めるのに21.1時間ほどの計算時間を要し、間隔が2.5 mの場合、物理時間を3.29 s進めるのに21.3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8、図9に示す。

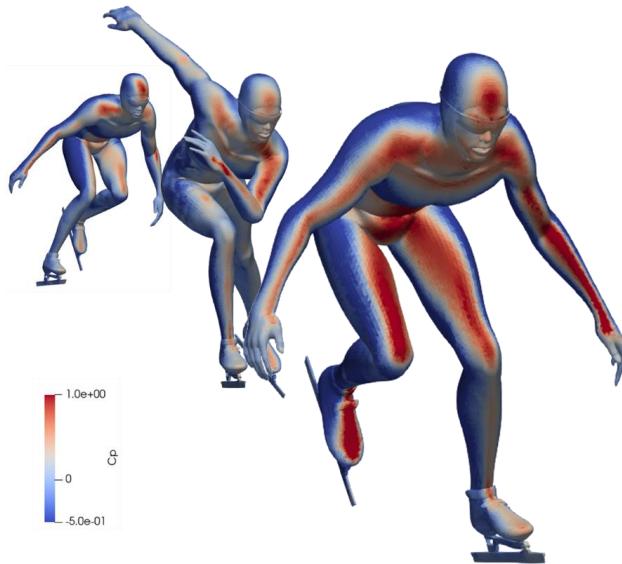
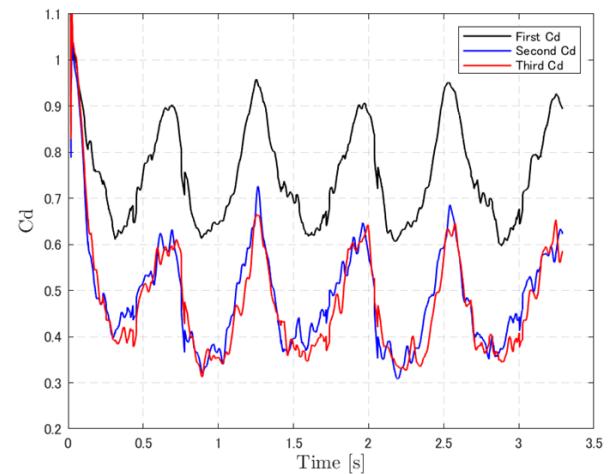


Fig. 9 Pressure coefficient in front of skater when skater spacing is 1.3 m.

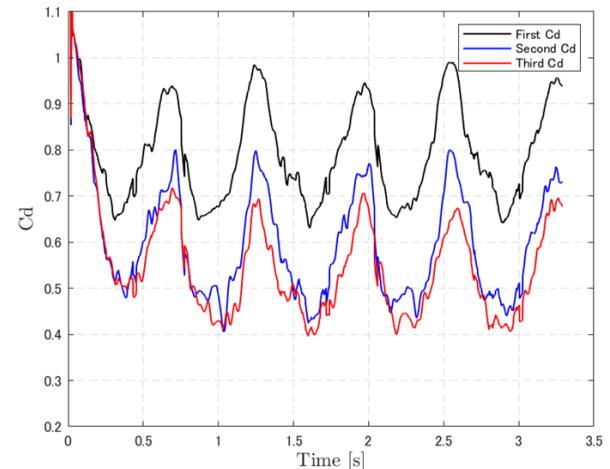
図8より、渦は後方まで大きく伸び、2人目、3人目のスケーターが前の人によって作られる渦に包まれていることが見られる。また速度分布を確認すると、スケーター真後ろの部分が赤くなっている。図2同様、外側から内側へカルマン渦が発生していることが分かる。図9より圧力分布を確認すると、2人目、3人目が受ける圧力は1人目よりも小さいことが分かる。4.2節と同様に、後方にいるスケーターは後流の影響を受けていると考えられる。

また、スケーター間隔が1.3 mの場合と、2.5 mの場合の抗力係数の時系列変化を図10に示す。 \bar{C}_d は、間隔が1.3

mの場合1人目が0.758、2人目が0.469、3人目が0.452であり、間隔が2.5 mの場合1人目が0.789、2人目が0.578、3人目が0.517であった。



(a) 1.3 m spacing between skaters



(b) 2.5 m spacing between skaters

Fig. 10 Comparison of drag coefficients for varying skater distance.

図10より、スケーター間隔が1.3 mの場合の抗力係数を確認すると、2人目と3人目の抗力係数が近い数値であることが分かる。また、図6と比較して、3人滑走における2人目の抗力係数は、2人滑走の場合よりも低くなっている。このことから、3人目が、2人目の抗力に影響を及

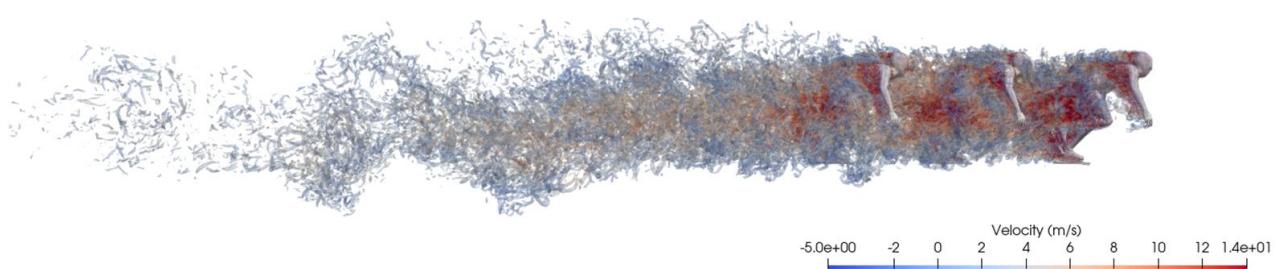


Fig. 8 The vortex structure when three skaters are skating at 14.0 m/s.

ぼしていると考えられる。その一方で、スケーター間隔が2.5 m の場合は、間隔が1.3 m の場合と比べて2人目と3人目の抗力係数が高く見られ、特に2人目の抗力係数が他の人に比べて大きく上がっている。このことから、間隔が2.5 m になると前方の人によってできる後流の影響を最大限受けられなくなると考えられる。また、3人目は前方に2人いることで2人の後流の影響を受けるため、2人目よりも受ける抗力がやや小さくなると考えられる。

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。

複数人での滑走の場合、前から2人目、3人目のスケーターは、前方を滑走するスケーターによってできる後流の影響を受け、抗力が小さくなることが明らかになった。また、スケーター同士の間隔が短いほど後ろを滑走するスケーターが受ける抗力が小さくなることが確認でき、スケーター同士の動きの位相のずれにより抗力がやや増加することが分かった。

複数人でのスケート滑走時の2人目、3人目の抗力が小さくなることを示したが、スケーター間隔を大きくすると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ことが分かった。今後の課題として、実際のパシュート種目で用いられるパッシュ・ポーズでのスケーティングでの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して頂いた。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] Dora, C. L., Murugan, T., De, S., and Das, D.: Role of slipstream instability in formation of counter-rotating vortex rings ahead of a compressible vortex ring, *Journal of fluid mechanics*, Vol.753, pp.29-48, 2014.
- [2] D'auteuil, 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] van Ingen Schenau, G. J.: The influence of air friction in speed skating, *Journal of Biomechanics*, Vol.15, No.6, pp.449-458, 1982.
- [6] Ueda, S., and Monji, H., Karin, P. and Hanamura, K.: Experiment on drag force of car models arranged in a line, *Advanced Experimental Mechanics*, Vol.3, pp.59-64, 2018.