格子ボルツマン法による自転車競技の集団走行の大規模 LES 空力解析

長谷川 雄太^{*1}, 青木 尊之^{*2}, 小林 宏充^{*3}, 白崎 啓太^{*4}

Large-scale LES analysis for aerodynamics of a group of racing bicycles by lattice Boltzmann method

Yuta HASEGAWA^{*1}, Takayuki AOKI^{*2}, Hiromichi KOBAYASHI^{*3} and Keita SHIRASAKI^{*4}^{*1}Department of Mechanical Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Oookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan^{*2}Global Scientific Information and Computing Center, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Oookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan^{*3}Department of Physics & Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University
4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 223-8521, Japan^{*4}High-Performance Center, Japan Cycling Federation
1826 Ono, Izu-shi, Shizuoka 410-2402 Japan

Received: 14 November 2018; Revised: 31 December 2018; Accepted: 31 January 2019

Abstract

We implement and perform large-scale LES analysis for running groups of cyclists. The mesh-refined lattice Boltzmann method (LBM) and coherent-structure Smagorinsky model (CSM) are adopted for the simulations to achieve a high performance computing on the recent GPU supercomputer. In the simulation with 16 cyclists, the mesh spacing around cyclists is 4 mm, and the total number of the mesh is up to 8.1×10^8 and the number of GPUs utilized is up to 64. Each calculation took 4 or 5 days for the 8~11 seconds of physical duration. The flow around 16 cyclists in various arrangement is calculated, and the results show that the in-line arrangement is more effective than the rhomboid arrangement in the viewpoint of the total aerodynamic drag of the group; however, a specific person in rhomboid arrangement can obtain larger drag reduction and save the endurance. Results on two groups also suggest that the frontal group in rhomboid arrangement will be exploited as the wind protection of the backward groups.

Keywords : Aerodynamics, Racing bicycles, Lattice Boltzmann method, Mesh refinement, LES

1. 緒 言

高速で走行する自転車は空力の影響を強く受けることが知られている。選手が受ける空気抵抗は平地の走行において全抵抗の90%以上を占めており (Kyle and Burke, 1984), 空気抵抗を低減することは自転車競技のパフォーマンスを向上させる上で非常に重要となる。複数の選手が集団で走行する際には、他の選手の後方を走り、風除けとして利用することで空気抵抗を大幅に削減することができる。たとえば、2人の選手が縦列で走行する際には、後方の選手にかかる空気抗力は単体走行時の半分程度まで低減される (Barry et al., 2014)。4人の選手の縦列走行でも後方の選手の抗力が低減されることは同様であるが、前方の1人だけが高い抗力を受け、後方の3人の抗力は低くなるため、集団全体で見ると2人よりも4人の集団のほうが空力的な効率が良くなる (Barry et al., 2015)。空力解析によって集団走行時の各選手に掛かる空気抗力を評価することで、空力的に効率の良い形状の集団の形成や集団内の位置取りなどの戦略策定に貢献し、自転車競技のパフォーマンスの向上に寄与することが期待される。

No.18-00441 [DOI:10.1299/transjsme.18-00441], J-STAGE Advance Publication date : 7 February, 2019

^{*1} 正員, 東京工業大学 工学院機械系 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)^{*2} 正員, フェロー, 東京工業大学 学術国際情報センター^{*3} 正員, 慶應義塾大学 自然科学研究教育センター (〒223-8521 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1)^{*4} 公益財団法人日本自転車競技連盟 ハイパフォーマンスセンター (〒410-2402 静岡県伊豆市大野 1826)

E-mail of corresponding author: hasegawa@sim.gsic.titech.ac.jp

空力解析の方法には一般に風洞実験によるものと数値流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) による解析があるが、このうち本稿では CFD による解析を行う。CFD による解析は、計算精度や規模が計算資源に大きく依存するため、比較的少ない資源で計算できる RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) モデルが用いられる場合が多い。既往研究における自転車の CFD 解析として、単体走行の計算 (Defraeye et al., 2011, Griffith et al., 2014) や 4 人のチームパシュートの計算 (Blocken et al., 2013), 121 人のペロトン集団の計算 (Blocken et al., 2018) が挙げられるが、いずれも RANS 解析である。計算機の発展に伴い、Defraeye らによる単体走行の解析 (2010a, 2010b) のように一部では LES (Large eddy simulation) による計算も利用され始めているが、計算資源の要求が厳しく、単体走行の解析のみで集団走行への LES の適用事例はまだない。

本稿では、多数の自転車を含む集団を LES で解析することを目的として、スパコンで実行可能な大規模 LES 計算の実装および実行を行う。大規模計算に適した手法として格子ボルツマン法を採用し、細分化格子法を導入することで高効率な LES 計算を行う。さらに、複数 GPU 計算に実装してスパコン上で実行することで、多数の自転車を含む集団走行の空力解析を実現する。

2. 計算手法

2・1 格子ボルツマン法

格子ボルツマン法は、非圧縮性流体の弱圧縮近似解法のひとつであり、空力解析に代表される等温・単相非圧縮性流体の大規模計算に広く用いられている手法である。従来の差分法のように Navier-Stokes 方程式を解くのではなく、気体分子の統計的な振る舞いを記述するボルツマン方程式を離散化して解くことで、流れ場を計算する。ボルツマン方程式は空間 3 次元、分子速度 3 次元、時間 1 次元で構成されるが、このうち、空間を格子幅 Δx の等間隔格子、時間を一定の時間幅 Δt で離散化する。分子速度については、上記の格子幅と時間刻みにおいて 1 時刻ステップでちょうど隣に移流するような速度として $c = \Delta x / \Delta t$ を定義し、 $\mathbf{c}_\alpha \in \{-c, 0, c\}^3$ なる 3 次元 27 速度 (D3Q27) モデルで離散化する。これらの離散化により、支配方程式である格子ボルツマン方程式が以下のように得られる。

$$f_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{c}_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) - f_\alpha(\mathbf{x}, t) = \Omega_\alpha(\mathbf{x}, t). \quad (1)$$

f_α は速度 $\mathbf{c}_\alpha$ を持つ分子の密度を表す速度分布関数である。速度分布関数について以下のような総和計算を行うことにより、流体の密度、速度を求めることができる。

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{\alpha} f_{\alpha}(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\rho(\mathbf{x}, t)} \sum_{\alpha} \mathbf{c}_{\alpha} f_{\alpha}(\mathbf{x}, t) \quad (3)$$

また、 Ω_α は同一格子点上の速度分布関数の相互作用を表す衝突項である。本稿では、衝突項として、乱流計算での数値安定性の高いキュムラントモデルを用いる。キュムラントモデルの実装は Geier らの文献 (2015) に従う。さらに、乱流の LES 計算を行うため、コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル (Kobayashi, 2005) に基づき、次式の渦粘性 ν_{SGS} を求める。

$$\begin{aligned} \nu_{\text{SGS}} &= C \Delta x^2 |S|, \\ C &= \frac{1}{20} |F_{\text{CS}}|^{3/2}, \quad F_{\text{CS}} = \frac{Q}{E}, \quad Q = -\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad E = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2, \\ |S| &= \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Q および E における速度勾配は、式 (4) で計算された速度の 2 次中心差分から求める。ひずみ速度テンソル S_{ij} については、速度の差分を取るのではなく、分布関数から下記の式で求める。

$$S_{ij} = -\frac{1}{2\rho c_s^2 \tau \Delta t} \sum_{\alpha} c_{\alpha i} c_{\alpha j} (f_{\alpha} - f_{\alpha}^{\text{eq}}),$$

$$\tau = \frac{1}{2} + \frac{\nu}{c_s^2 \Delta t}, \quad f_{\alpha}^{\text{eq}} = w_{\alpha} \rho \left(1 + \frac{\mathbf{c}_{\alpha} \cdot \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{c}_{\alpha} \cdot \mathbf{u})^2 - c_s^2 |\mathbf{u}|^2}{2c_s^4} \right). \quad (5)$$

ただし、 ν は分子粘性である。格子ボルツマン法に渦粘性を導入するには、キュムラントモデルにおける粘性散逸成分に対する緩和係数 ω_1 を、下記のように置き換える。

$$\omega_{1,\text{CSM}} = \tau_{\text{CSM}}^{-1} = \left(\frac{1}{2} + \frac{\nu + \nu_{\text{SGS}}}{c_s^2 \Delta t} \right)^{-1}. \quad (6)$$

自転車および選手の物体境界は Bouzidi らの Interpolated bounce-back (2001) の線形補間式を用いた滑りなし壁とし、空気抗力は Yu らの Momentum-exchange method (2003) を用いて求める。

これらのモデルはすべて完全陽解法で記述され、従来の差分法における圧力のポアソン方程式のような反復計算を含まないため、大規模計算で高い計算性能を得ることができる。

2・2 細分化格子法

流体解析において、高い空間解像度で計算することが必要な領域は限定されていることが多く、計算領域全域に等間隔格子を割り当てることは非効率的である。本稿では自転車近傍に高解像度格子を集中させ、より少ない格子点数で高精度な計算を行うため、細分化格子法を導入する。格子の生成には図 1 に示す Forest-of-octree 構造 (Burstedde et al., 2011) を用いる。

Fig. 1 The forest-of-octree structure and its refined-mesh, (left) forest expression and (right) mesh expression.

3 次元格子では、1 回の領域分割によって元の領域を 8 つに分割し、木データ構造は octree (八分木) となる。Octree の根ノードから分割を再帰的に繰り返し、末端のリーフには $9 \times 9 \times 9$ の格子を割り当てる。複数の Octree を並べることで、直方体の計算領域を表現する。格子ボルツマン法においては、格子幅に比例して時間刻み幅を決定する。空間補間および時間補間は線形補間とする。数値安定性を最優先するため、Rohde ら (2006) と同様、分布関数のリスケージングは計算していない。

複数 GPU 計算を行う際には、図 2 に示す空間充填曲線に基づく領域分割法による負荷分散を行う。すべてのリーフを空間充填曲線の順序で通り、各 GPU でリーフ数が等しくなる位置で充填曲線を切断する。

Fig. 2 Rectangular space-filling curve for the forest shown in Fig. 1. Red arrow indicates 1D-order of leaves. Blue, green and yellow colors indicate the domains partitioned into three subdomains, (left) forest expression and (right) mesh expression.

2・3 自転車の3Dモデル

自転車の3Dモデルには、オンラインで販売されているモデル (dmk76, 2018) を用いる。同モデルを編集し、選手の姿勢の異なる2種類の形状データを作成する。第1は、図3のように上体を起こした Upright である。前面面積が大きい空力的には不利だが、無理のない姿勢で長時間走行できるため、ロードレースにおける巡航でよく用いられる。第2は、図4のように下ハンドルを持って上体を前方に大きく傾けた Drop である。Upright よりも前面面積が小さく空力的に有利だが、疲労しやすく、姿勢を長時間維持することが難しいため、ゴール直前のスプリントなど瞬間的に高い速度を出したい場面で用いられる。なお、本モデルでは足は右足を前、左足を後ろにした位置で静止させている。実際の競技ではペダルを漕ぐため足は回転しているが、ペダルの回転に伴う足の移動速度は、たとえば走行速度 60 km/h, ケイデンス 100 rpm, クランク長さ 20 cm の条件で自転車の走行速度の 3%に満たず、十分に小さいため無視できる。ペダルの回転に伴い物体形状が変化するため抗力も変動するが、単体走行においていくつかの足の角度で確認の計算を実施し、抗力の変化は大きくないことを確認している。また、ペダルを漕ぐことで体の揺動が起こることも考えられるが、本稿では考慮していない。

Fig. 3 Specification of the 3D cyclist model in upright posture. Left is the side view and right is the frontal view. The frontal area of the model is 0.5588 m². See TurboSquid, royalty free license (dmk76, 2018).

Fig. 4 Specification of the 3D cyclist model in drop posture. Left is the side view and right is the frontal view. The frontal area of the model is 0.4872 m². See TurboSquid, royalty free license (dmk76, 2018).

3. 検証計算

3・1 単体走行の検証計算

計算手法の検証として、自転車の単体走行の計算を行い、既往研究における風洞実験の結果と比較する。図 3 の Upright と図 4 の Drop それぞれの形状について空力計算を実施し、抗力を求める。抗力の指標として、本研究では抗力面積 ($C_D A$) を用いる。一般には抗力係数 (C_D) が用いられることが多いが、自転車競技においては被計測体の前面面積 (A) の測定が困難であるため、前面面積の測定が不要な抗力面積が広く用いられている。抗力面積は次の式で定義される。

$$C_D A = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (7)$$

ここで、 F_D は空気抗力、 ρ は空気の密度、 U は自転車の走行速度または風洞の風速である。本計算では、 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 、 $U = 16.67 \text{ m/s}$ と設定する。空気の動粘度は $1.512 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ である。流れのレイノルズ数は、代表長さとして地面から選手の頭までの高さを採った場合、Upright 姿勢で 180 万、Drop 姿勢で 157 万となる。

計算領域の大きさは $2097 \text{ m} \times 2097 \text{ m} \times 4194 \text{ m}$ とした。自転車近傍には 4 mm の解像度の格子、四方に数メートルの範囲には最大で 16 mm の解像度の格子、さらに遠方には最大で 16384 mm の解像度の粗い格子を配置する。Drop 姿勢時の自転車近傍の格子配置は図 5 に示す通りである。格子ボルツマン法の分子速度は $U/c = 0.03$ で設定しており、音速は 320.8 m/s 、マッハ数は 0.052 、時間刻み幅は最も細かい格子において $7.20 \text{ } \mu\text{s}$ となる。

計算領域前方の流入口および後方の流出口の境界は密度および速度固定のディリクレ条件とし、格子ボルツマン法の分布関数に平衡分布関数を設定した。一般に流出口における速度の境界条件は勾配零のノイマン条件が与えられるが、本計算は流出口が自転車から 2 km 以上と十分遠方の位置にあるため、自転車周辺の流れにほとんど影響していない。計算領域の左右端は周期境界とした。下面のうち自転車周辺の 16 mm 以下の解像度の格子には Interpolated bounce-back による滑りなし壁を設定し、 32 mm 以上の粗い格子には上下面で周期境界条件を適用した。実際の競技では自転車が移動しているため本計算条件とは異なるが、下面を静止させた条件は風洞実験でもよく用いられる (Barry et al., 2015, Crouch et al., 2017, Shirasaki et al., 2017, Blocken et al., 2018)。

Fig. 5 Computational domain and the mesh around the cyclist with drop posture. The up figure shows whole domain, and the low-left and low-right figure shows the detail of mesh near the cyclist. The grid spacing of the nearest from the cyclist is 4 mm. The resolution of the mesh around the cyclist is 16 mm at maximum. The resolution of the coarsest mesh far from the cyclist is 16384 mm. Blockage ratio is lower than 0.1% on both upright and drop posture.

4 台の GPU (NVIDIA® Tesla® P100) を用いた並列計算により物理時間 5 秒に相当する計算を行い、約 1 日の計算時間を要した。Drop 姿勢における抗力面積の時刻歴を図 6 に示す。LES は非定常計算であるから抗力は時間的に変動する。0～2 秒の区間では初期条件から流れが発達している段階にあり、抗力の変動は安定していない。2 秒以降の区間では抗力の変動は一定の範囲に収まっており、流れが十分に発達していると考えられる。2 秒以降の区間において抗力の時間変動を周波数スペクトル解析すると、図 7 に示す結果が得られる。80 Hz 以上のスペクトルはエネルギーカスケードの $-5/3$ 乗則に従っており、乱流を妥当に計算できていることが確認できる。抗力の 80 Hz の変動は、主流流速が 16.67 m/s であることから 21 cm 程度の渦に相当すると推測できる。自転車周辺および自転車後流で関心のある領域は 4 mm～16 mm で解像しており、十分な解像度がある。また、図 8 に示す速度場のように、関心のある領域を総て 4 mm で解像した場合と同様の後流が得られており、16 mm の格子で後流を十分に解像できることが確認できる。次章以降の集団走行においても、自転車間の空隙は 16 mm 以下の格子を配置するため、後流を十分に捉えられると考えられる。

Fig. 6 Time history of the drag area on the cyclist with drop posture. In the flow-developing interval (time <2 sec), flow is still affected by initial condition and not in steady state. In the averaging interval (time >2 sec), flow is fully developed and averaging the drag area is valid in this interval.

Fig. 7 Frequency spectrum of the drag area on the cyclist with drop posture. Horizontal axis is frequency and vertical axis is amplitude of the spectrum. In the frequency over 80 Hz, the spectrum obeys $-5/3$ power law.

Fig. 8 Velocity field behind a cyclist with drop posture. The top view on the horizontal plane at 0.5 m above the floor is shown. The mesh is drawn in every $2\Delta x$ for right-hand side of the cyclist. Black frame indicates the area of interest around the cyclist. (a) mesh ≤ 16 mm around the cyclist. (b) 4 mm mesh around the cyclist. The width of the wake is almost same between the two cases.

単体走行の2つの姿勢における抗力の計算結果および既往研究の実験結果を図9に示す。実験は異なる選手の体格および姿勢、自転車、風洞設備の条件で行われ、各実験で得られた抗力面積の平均値が報告されている。足を静止させた条件とペダルを漕ぐ条件の両方の実験があるが、ペダリングの有無よりも選手の体格差に依存して結果が大きく異なっているため、文献からペダリングの影響を評価することは困難である。本計算と完全に同一の条件で行われた実験はなく、定量的な検証は難しい。しかし、本計算結果は、様々な選手による実験結果と同程度の値であり、また、Upright 姿勢に比べ Drop 姿勢の抗力面積が小さくなる傾向を再現している。検証のため最も細かい格子を 8 mm または 2 mm とした場合についても計算を行ったが、2 mm と 4 mm の格子の解像度による抗力面積の差異は最大 5.0% であり、有意な差は見られない。なお、変動の幅は平均値に比べて小さく、また、既往研究においても平均値のみが評価されているため、本稿でも次節以降は平均値のみを議論する。

Fig. 9 Result of the drag area on alone running cyclist in upright/drop posture. Vertical axis is drag area $C_D A$. Filled bars are results of the simulation with various resolution, and their error bars indicate the fluctuation range of the drag area. Black-filled circles are survey of experimental data in Crouch et al., 2017.

3・2 集団走行の検証計算

自転車競技における集団走行の検証計算として、4人の選手の縦列走行を計算する。選手の姿勢は Drop とし、自転車間の距離は 0.15 m に設定する。自転車周辺の格子配置を図10に示す。自転車近傍の格子解像度は 4 mm、自転車間の空隙には、後流を解像するのに必要な 16 mm の格子を置く。その他の計算条件は単体走行の計算と同様である。

Fig. 10 Mesh arrangement around the cyclists. The mesh resolution is 4 mm for the finest mesh near each cyclist, 16 mm for middle-fine mesh around the cyclists and in the gap between cyclists, and 16,384 mm for the coarsest mesh far from the cyclists.

8 台の GPU (NVIDIA® Tesla® P100) を用いた並列計算により物理時間 4 秒に相当する計算を行い、2 日の計算時間を要した。計算結果および参照値 (Barry et al., 2015, Shirasaki et al., 2017, Blocken et al., 2018) を図 11 に示す。

いずれの参照値も下面は静止している。Shirasaki らと Blocken らの結果(Shirasaki et al., 2017, Blocken et al., 2018)では競技者も静止しているが、Barry らの結果(Barry et al., 2015) はペダリングを含む条件の実験である。Blocken らの CFD 解析(Blocken et al., 2018)は、商用コード ANSYS Fluent を用いた γ - $\text{Re}\theta$ 遷移モデルに基づく RANS 解析である。それぞれの既往研究と本計算で条件を完全に一致させることは難しく、本計算結果は他の結果に比べて 2 人目、3 人目の抗力の低減が強すぎる傾向が見られる。また、本計算では 4 人目の抗力が 3 人目よりも高くなる傾向が見られるが、これは集団後端の負圧の影響によるものと考えられる。自転車競技において経験的に知られている現象であり、実際 Blocken らの風洞実験でも 3 人目の抗力よりも 4 人目の抗力が 1.0%と僅かに高くなっている。先頭の選手に比べて後方の 3 人に掛かる抗力が大幅に小さくなっていることや、後方の 3 人に掛かる抗力が近い値を示すことなどの傾向はよく一致しており、十分コントロールされた実験条件下では、本 LES 解析結果に近づくと思われる。

Fig. 11 Result of the drag on the group running of 4 cyclists. Vertical axis is scaled by the drag on the leading cyclist in each research. Blue-filled boxes are the result of present study, and other results are those of the previous studies (Barry et al., 2015, Shirasaki et al., 2017, Blocken et al., 2018).

次に、縦列走行において隊列が乱れた条件で空力計算を行う。図 12 のように、最後方の選手を規定の位置から縦方向に $X[\text{m}]$ または横方向に $Y[\text{m}]$ だけずらして配置する。図 12 は 4 人の隊列の例であるが、2 人の隊列についても同様に計算を行う。その他の計算条件は通常の縦列走行の計算と同様とする。

Fig. 12 Top view of the relative spatial condition: the distance of the trailing cyclist from the other 3 riders, (left) the longitudinal distance X and (right) the lateral distance Y .

計算結果および参照値を図 13 および図 14 に示す。風洞実験 (Shirasaki, et al., 2017) は下面および競技者を静止させた条件で行われている。これらの結果から、縦方向のずれが空力に与える影響は小さいが、横方向のずれは空力に大きな影響を与えることが確認できる。この傾向は風洞実験 (Shirasaki, et al., 2017) においても見られる。実験は自転車を固定する治具や風洞の閉塞率により結果に誤差を含んでいると考えられる。また、計算と実験で選手の体格や姿勢、自転車の形状などの諸条件が異なるため結果は厳密には一致し得ない。しかし、いずれにせよ本計算は実験で得られる傾向を再現しており、妥当な計算結果であるといえる。

Fig. 13 Result of the drag on the trailing cyclist with longitudinal distance X in the group of 2 or 4 cyclists. Vertical axis is the drag ratio scaled by the drag on the alone cyclist.

Fig. 14 Result of the drag on the trailing cyclist with lateral distance Y in the group of 2 or 4 cyclists. Vertical axis is the drag ratio scaled by the drag on the alone cyclist.

4. 自転車の集団走行の大規模計算

本計算コードによる自転車競技の応用計算として、多数の自転車を含む集団走行の大規模計算を実施する。8人の選手でひとつの集団を構成し、集団内の配置として図15の縦列配置または図16のひし形配置を設定する。それぞれの配置について、単一の集団の計算および2集団の計算を行う。2集団の計算については、前後の集団間の距離を0, 10, 20 mと変化させ、各選手に加わる抗力を求める。計算領域の大きさ、自転車近傍および遠方の格子解像度など、他の計算条件は検証計算と同様である。集団の配置に応じてGPU数を40~64に設定し、流れが十分に発達するまで計算を行った。自転車の配置に応じて物理時間8~11秒の計算を必要とし、4~5日の計算時間を要した。

Fig. 15 Arrangement of the in-line group of eight cyclists. The distance between cyclists (wheel-to-wheel distance) is 0.5 m.

Fig. 16 Arrangement of the rhomboid group of eight cyclists. The length of longitudinal distance between cyclists (wheel-to-wheel distance) is 0.5 m, and the distance of lateral offset (center-to-center distance) is 1 m.

単一の集団の計算結果を図 17 および図 18 に示す．縦列配置では先頭の 1 台に単体走行時の 99.5%と高い抗力が集中し，後方の 7 人に掛かる抗力は 50%程度まで小さくなっているため，全選手の平均値も 55.6%と小さい．一方，ひし形配置では，前方外側の 5 人の選手に 90%前後と高い抗力が掛かっており，全選手の平均値は 74.4%と縦列配置に比べて高い．しかし，ひし形配置において後方左側の選手に掛かる抗力は 35.0%と，縦列配置における最小値 45.5%に比べて小さい．これらの結果から，8 人全体の平均では縦列配置のほうが効率的であるが，特定の選手に掛かる抗力を最小化し，選手の体力を温存させたい場合にはひし形配置のように横に広がる配置も有効であると考えられる．なお，ひし形配置で抗力が左右非対称分布しているのは，ペダルおよび足の角度，ギアなどが左右非対称に配置されているためであり，逆の足の角度にした結果では左右の非対象分布がほぼ逆になることを確認している．

Fig. 17 Drag on each cyclist in a group with in-line arrangement. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

Fig. 18 Drag on each cyclist in a rhomboid group. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

2 集団の計算について，2 つの集団が前後に接近しているときの計算結果を図 19 および図 20 に，前後の集団間の距離が 10 m 離れている条件での計算結果を図 21 および図 22 に，集団間の距離が 20 m であるときの計算結果を図 23 および図 24 に示す．縦列配置およびひし形配置のいずれの配置においても，前方の集団の各選手に掛かる抗力は集団間の距離によらずほぼ一定であるが，集団間の距離が近いほど後方集団の各選手に掛かる抗力は小さくなっている．また，集団間の距離が同じ条件での縦列配置とひし形配置の計算結果を比較すると，ひし形配置のほうが後方集団の抗力の減少が強い傾向がある．これらの計算結果から，前方集団は後方集団に風除けと

して利用されてしまうこと、ひし形配置のように横に広がると風除けの効果が増大し後方集団にとって有利（前方集団にとって不利）となってしまうことがいえる。したがって、前方の集団が空力的に不利にならないようにするための戦略として、たとえば、

- なるべく後方の集団から距離を取って走行すること
 - ひし形配置を取っているときに、後方集団に追いつかれてしまった場合には縦列配置に転換すること
- といった提案をすることができる。なお、ひし形配置の2集団の走行では、後方集団において1集団の計算よりも左右非対称性が強く、非対称性が2倍以上に達するところもあるが、これは、1集団のときと同様に足の角度による選手の形状の左右非対称性に起因していると考えられる。すべての選手が同じ足の角度を採るため、人数が増えるほど非対称性が累積されることが想定される。後方集団においては、自身の形状の左右非対称性と、前方集団の作り出した非対称な後流の影響が加算された結果、より強い左右非対称性が得られたと考えられる。実際、Blockenらのペロトン集団のRANS解析 (Blocken et al., 2018) においても同様の非対称性が見られる。足の角度に起因する非対称性を取り除くため、今後、足の角度を変えた計算またはペダルの回転を含む計算が必要である。

Fig. 19 Drag on each cyclist in the closer two in-line groups. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

Fig. 20 Drag on each cyclist in the closer two rhomboid groups. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

Fig. 21 Drag on each cyclist in the two in-line groups with 10 m distance. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

Fig. 22 Drag on each cyclist in the two rhomboid groups with 10 m distance. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

Fig. 23 Drag on each cyclist in the two in-line groups with 20 m distance. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

Fig. 24 Drag on each cyclist in the two rhomboid groups with 20 m distance. Color contour indicates the drag area on each cyclist. Percentage shows the ratio of drag on each cyclist compared with the drag on the alone cyclist.

5. 結 言

細分化格子を導入した格子ボルツマン法に基づく大規模 LES 計算により、自転車競技の単体走行および集団走行の空力解析を実施した。単体走行および 4 人の集団走行の検証計算を行い、実験値と比較して本手法の妥当性を確認した。8 人の選手で構成される集団を 1 つまたは 2 つ含む空力計算を実施した。集団の形状や 2 つの集団間の距離を変化させて計算を行い、各選手に掛かる抗力の変化を定量的に評価した。計算結果から、8 人の集団の平均の抗力は縦列配置が良いが、ある特定の選手に掛かる抗力を最小化したい場合にはひし形配置のように横にも広がる配置が有効であること、2 つの集団が存在する場合には前方の集団がひし形配置を取ると後方の集団に風除けとして利用されるおそれがあることなど、いくつかの知見が得られた。すべての計算は 1 ケースにつき 64 GPU 以下かつ 5 日以内と実用可能な資源で計算でき、本手法に基づく大規模 LES 計算による自転車競技の戦略策定への貢献の可能性を示した。また、本計算は LES 計算であり非定常現象を取り扱うことができるため、今後、ペダルの回転や体の揺動を含む解析、路面上を走行する条件での空力計算など、これまでの風洞実験や RANS 解析では実施できなかったような条件で、実際の自転車競技に近い解析を行える可能性がある。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金・基盤研究（S）課題番号 26220002「ものづくり HPC アプリケーションのエクサスケールへの進化」、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 平成 30 年度 A 期 HPCI

システム利用研究課題 hp180146 から支援を頂いた。計算には東京工業大学・学術国際情報センターのスパコン TSUBAME3.0 を利用した。記して謝意を表す。

References

- Barry, N., Sheridan, J., Burton, D. and Brown, N. A. T., The effect of spatial position on the aerodynamic interactions between cyclists, *Procedia Engineering*, Vol. 72 (2014), pp. 774–779.
- Barry, N., Burton, D., Sheridan, J., Thompson, M. and Brown, N. A. T., Aerodynamic drag interactions between cyclists in a team pursuit, *Sports Engineering*, Vol. 18, No. 2 (2015), pp. 93–103.
- Blocken, B., Defraeye, T., Koninckx, E., Carmeliet, J. and Hespel, P., CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists, *Computers and Fluids*, Vol. 71 (2013), pp. 435–445.
- Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y., Malizia, F., Mannion, P., Andrianne, T., Marchal, T., Maas, G.-J. and Diepens, J., Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 179 (2018), pp. 319–337.
- Bouzidi, M., Firdaouss, M. and Lallemand, P., Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries, *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 11 (2001), pp. 3452–3459.
- Burstedde, C., Wilcox, L. C. and Ghattas, O., p4est: Scalable algorithms for parallel adaptive mesh refinement on forests of octrees, *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 33, No. 3 (2011), pp. 1103–1133.
- Crouch, T. N., Burton, D., LaBry, Z. A. and Blair, K. B., Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics, *Sports Engineering*, Vol. 20, No. 2 (2017), pp. 81–110.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P. and Carmeliet, J., Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests, *Journal of Biomechanics*, Vol. 43, No. 7 (2010a), pp. 1262–1268.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P. and Carmeliet, J., Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches, *Journal of Biomechanics*, Vol. 43, No. 12 (2010b), pp. 2281–2287.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., Verboven, P., Nicolai, P. and Carmeliet, J., Cyclist drag in team pursuit: influence of cyclist sequence, stature, and arm spacing, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 136, No. 1 (2013), p. 011005.
- dmk76, 3D model of ‘Cycler On Bike’, TurboSquid, available from
<<https://www.turbosquid.com/FullPreview/Index.cfm/ID/722423>> (accessed on 6 October, 2018).
- Geier, M., Schönherr, M., Pasquali, A. and Krafczyk, M., The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: theory and validation, *Computers and Mathematics with Application*, Vol. 70, No. 4 (2015), pp. 507–547.
- Griffith, M. D., Crouch, T., Thompson, M. C., Burton, D., Sheridan, J. and Brown, N. A. T., Computational fluid dynamics study of the effect of leg position on cyclist aerodynamic drag, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136, No. 10 (2014), p. 101105.
- Kobayashi, H., The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 4 (2005), p. 045104.
- Kyle, C. R. and Burke, E. R., Improving the racing bicycle, *Mechanical Engineering*, Vol. 106, No. 9 (1984), pp. 34–45.
- Rohde, M., Kandhai, D., Derksen, J. J. and van den Akker, H. E. A., A generic, mass, conservative local grid refinement technique for lattice-Boltzmann schemes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 51, No. 4 (2006), pp. 439–468.
- Shirasaki, K., Yamanobe, K., Akashi, K. and Takashima, W., Variation of the drafting effect on the trailing rider for different numbers of riders in a cycling group, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, Special Issue* (2017), pp. 1–8.
- Yu, D., Mei, R., Luo, L.-S. and Shyy, W., Viscous flow computations with the method of Lattice Boltzmann Equation, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 39, No. 5 (2003), pp. 329–338.