

細分化格子 LBM の複数 GPU 計算に基づく自転車の集団走行の空力計算

Aerodynamics Simulation on Bicycle Racing by Multi-GPU Computing with Mesh-refined LBM

- 長谷川雄太, 東工大, 〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail : hasegawa@sim.gsic.titech.ac.jp
青木尊之, 東工大, 〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail : taoki@gsic.titech.ac.jp

Yuta Hasegawa, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Oookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

Takayuki Aoki, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Oookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

A aerodynamics simulation for a running group of bicycle is performed. We employ lattice Boltzmann method with cumulant collision operator to improve numerical stability of the turbulent flow calculation. We also adopt coherent-structure Smagorinski model for eddy viscosity of LES. These methods are implemented with a refined mesh to enhance computational efficiency. Each calculation of the cyclist(s) took one or two day(s) to get the result of 4 seconds in physical duration. We calculate and validate the flow around the alone cyclist and a group of four cyclists, and confirm that the result is suitable compared with the previous wind tunnel experiments. Finally we perform a large-scale simulation of 16 cyclists in various arrangement using 40–64 GPUs. Results show that the serial arrangement is more effective than rhomboid in the view point of the total aerodynamics drag of the group; however, rhomboid has a potential to save the endurance of a specific person. Results also suggest that rhomboid arrangement will be misused as the wind protection of backward groups.

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おり, 空気抵抗を低減することは自転車の走行速度を高めたり選手の疲労を抑えたりする上で重要である. 特に, 自転車の集団走行では, 他の選手の後ろにつき, 風除けとして利用することで抗力が単体走行時の半分程度まで低減するなど, 集団内での位置取りが空力に大きな影響を与える. 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, 集団の形状の変更や集団内での位置取り等の戦略策定に貢献し, 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.

自転車の空力解析を数値シミュレーションによって行う場合, 人体や自転車の複雑な形状を表現し, 集団内を構成する複数の自転車を同時に計算するため, 大規模計算が必須となる. また, 流れは高レイノルズ数の乱流であり, 高解像度格子の LES 計算が必要となる. 本稿では, 乱流の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. 複数 GPU 計算に実装し, スパコン上で大規模 LES 計算を行うことで, 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

流れ場の計算には, 单相非圧縮性流体の解析において実績のある格子ボルツマン法を用いる. 格子ボルツマン法は BGK 近似されたボルツマン方程式を離散化することで導かれ, 支配方程式は以下のように表される.

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

f_{ijk} は速度分布関数, $(i, j, k) \in \{-1, 0, 1\}^3$ は位相空間の速度方向成分である. \mathbf{c}_{ijk} はそれぞれの速度分布関数の移動速度であり, $c = \Delta x / \Delta t$ として $\mathbf{c}_{ijk} = c(i, j, k)^T$ と定められる. Ω_{ijk} は衝突項であり, 本稿では乱流計算における数値安定性の高い Cumulant モデル⁽¹⁾を用いる. また, LES 計算を行うため, 流体の粘性について, コヒーレント構造スマゴリンスキーモデル⁽²⁾に基づく渦粘性を導入する. 流体の巨視的質量である密度, 速度は, 速度分布関数の 0 次, 1 次のモーメントとして以下のよ

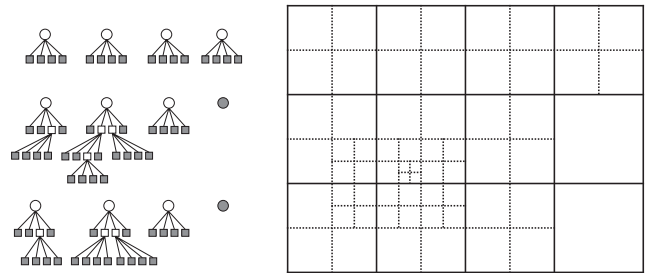


Fig. 1: Data and mesh structure of forest-of-octrees for rectangular computational domain.

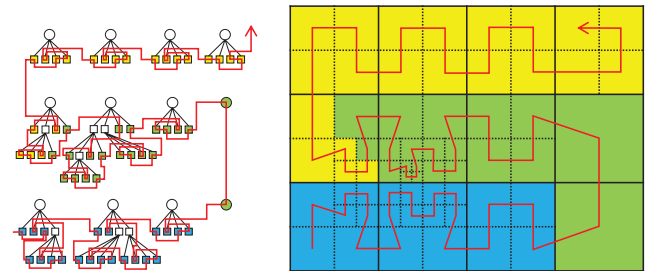


Fig. 2: Rectangular space-filling curve for forest-of-octrees.

うに求められる.

$$\rho = \sum_{i,j,k} f_{ijk} \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \sum_{i,j,k} \mathbf{c}_{ijk} f_{ijk} \quad (3)$$

物体 (自転車および選手) の壁境界には Interpolated bounce-back⁽³⁾境界条件を適用し, momentum-exchange method⁽⁴⁾により物体に掛かる抗力を計算する.

格子ボルツマン法は等間隔格子を前提とした計算手法であるため、物体遠方に不必要に細い格子を取ってしまう、計算効率が悪い。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、細分化格法を導入する。Fig. 1 に示す forest-of-octrees 構造⁽⁵⁾に基づく再帰的な細分化を行うことで細分化格子を生成する。はじめに複数の八分木を並べることで直方体の計算領域を表現し、それぞれの八分木の根ノードから細分化を再帰的に繰り返す。末端のリーフには $9 \times 9 \times 9$ の小規模な等間隔格子を割り当て、GPU 計算におけるメモリアクセスの効率を向上させる。

複数 GPU 計算を行う際には、Fig. 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辿り、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 の例では、計算領域を 3 GPU に分散して割り当てている。

3. 検証計算

本計算手法の妥当性を検証するため、自転車の単体走行及び集団走行の計算を行い、実験値と比較する。それぞれの計算について、自転車に掛かる抗力を計算し、次式により抗力断面積 ($C_D A$) を求める。

$$C_D A = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (4)$$

F_D は空気抗力である。 ρ は空気の密度、 U は自転車の走行速度または風洞の流入風速であり、本計算では $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 、 $U = 16.67 \text{ m/s}$ と設定する。

単体走行の計算では、Fig. 3 に示す Upright 姿勢および Fig. 4 に示す Drop 姿勢の 2 種類の姿勢についてそれぞれ抗力を求める。 $1 \times 1 \times 2$ の forest-of-octree を用いて $2 \text{ km} \times 2 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ の計算領域を取り、自転車近傍には 4 mm の解像度の格子、遠方には最大で 16.4 m まで粗い格子を割り当てる。時間刻み幅は 4 mm の格子に対して $7.20 \mu\text{s}$ である。4 台の GPU (NVIDIA Tesla P100) を用いて計算し、物理時間 4 秒に対して 1 日の計算時間を要した。計算結果を Fig. 5 に示す。棒グラフは本手法の計算結果、点は実験値⁽⁶⁾である。Upright および Drop 姿勢のそれぞれについて、抗力断面積が実験値の範囲に収まっており、本手法が妥当であることが確認できた。

次に集団走行の検証計算を行う。Drop 姿勢の選手を 4 人、 0.15 m の間隔で縦に配置する。自転車近傍には 4 mm の格子、自転車間の空隙には $4 \sim 16 \text{ mm}$ の格子を置き、Fig. 6 に示すような細分化格子を割り当てる。8 台の GPU (NVIDIA Tesla P100) を用いて計算し、物理時間 4 秒に対して 2 日の計算時間を要した。計算結果を Fig. 7 に示す。横軸はそれぞれの選手の位置、縦軸は戦闘の選手の抗力を 100% としたときの各選手に掛かる抗力の比率である。棒グラフは本手法の計算結果、折れ線は既往研究^{(7) (8) (9)}の実験値または計算結果である。本計算結果および既往研究の結果のいずれも、先頭の選手に比べて他の 3 人に掛かる抗力はおおよそ半分に低下していること、2 人目に比べて 3 人目の抗力が僅かに小さくなることなどの傾向が一致しており、したがって本計算の妥当性が確認できた。

4. 自転車の集団走行の大規模計算

本手法による自転車競技の応用計算として、1 つまたは 2 つの集団を含む空力計算を実施する。8 人の選手で 1 つの集団を構成し、Fig. 8 に示す縦列配置または Fig. 9 に示すしし形配置を設定する。2 つの集団間の距離を 0, 10, 20 m とし、それぞれの距離で前後の集団内の各選手に掛かる抗力を求める。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、主な計算条件は 3. と同様とする。集団の配置に応じて GPU 数を 40~64 GPU に設定し、流れが十分に発達するまで計算を行った。物理時間 8~11 秒間の計算を必要とし、4~5 日の計算時間を要した。



Fig. 3: Shape of the bicycle and the cyclist in upright posture.

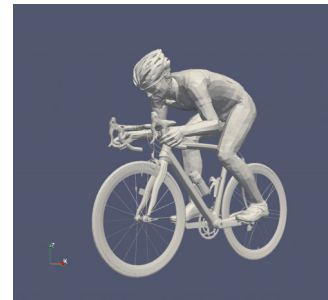


Fig. 4: Shape of the bicycle and the cyclist in drop posture.

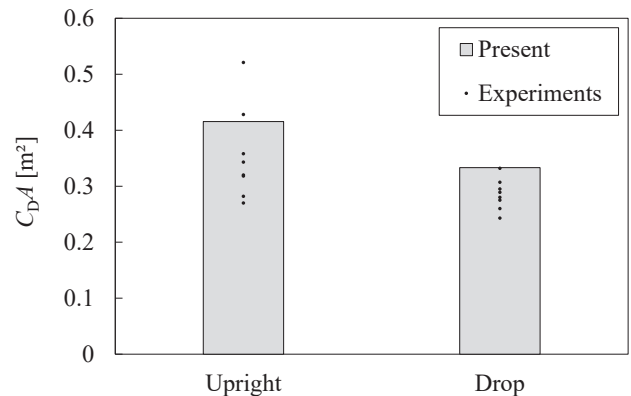


Fig. 5: Drag area on the alone cyclist in upright and drop posture.

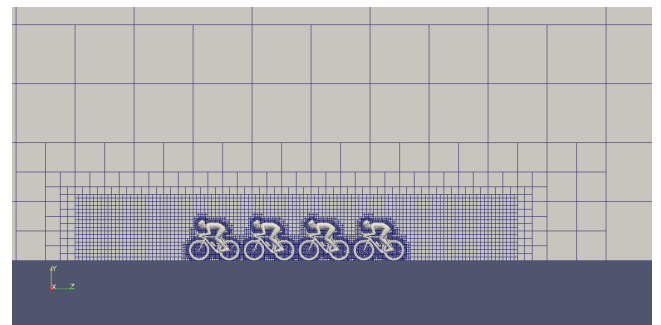


Fig. 6: Refined mesh around the running group of four cyclists.

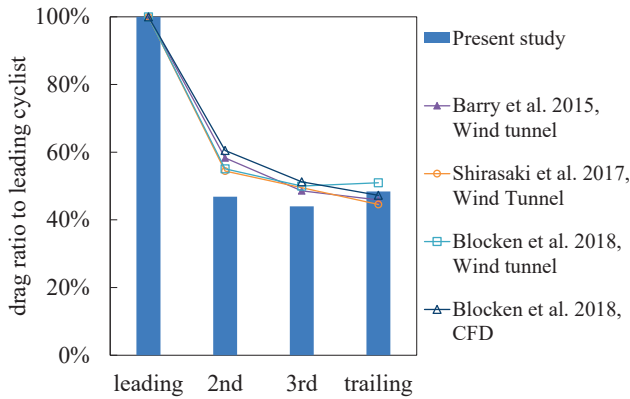


Fig. 7: Result of the drag on each cyclist of the running group of four cyclists.



Fig. 8: Serial arrangement of eight cyclists.

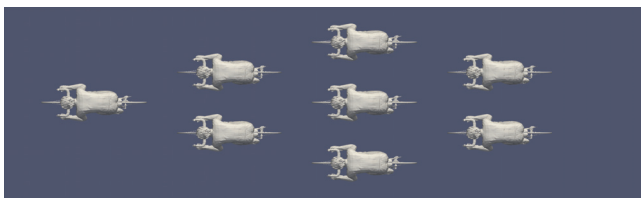


Fig. 9: Rhomboid arrangement of eight cyclists.

単一の集団の計算結果を Fig. 10 および Fig. 11 に示す。各選手の抗力断面積をカラーコンターで表すとともに、抗力の単体走行時との比率を数字で示している。縦列配置では先頭の 1 台のみに高い抗力が集中し、他の 7 人に掛かる抗力は 50%程度と小さいため、全体の平均も比較的小さい値となっている。ひし形配置では前方外側の 5 人の選手が高い抗力を受けており全体の平均も高い値となるが、後方左側の選手に掛かる抗力は単体走行時の 33.5%と、縦列配置での最小値 44.4%に比べて極めて小さい。これらの結果から、8 人全体の平均を考えれば縦列配置で走行するほうが効率的であるが、特定の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。

2 つの集団を含む計算について、集団が接近しているときの計算結果を Fig. 12 および Fig. 13 に、前後の集団が 10 m 離れているときの結果を Fig. 14 および Fig. 15 に、集団間の距離が 20 m であるときの結果を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。いずれの配置も、前方の集団に掛かる抗力は集団間の距離によらず一定に近いが、集団間の距離が近いほど後方の集団内の選手に掛かる抗力が小さくなっている。また、いずれの距離においても、ひし形配置のほうが後方集団の抗力の減少が強い傾向にある。これらの結果から、前方集団は常に後方集団に風除けとして利用されるリスクを抱えており、ひし形配置ではそのリスクが特に大きくなることはいえる。

5. 結言

細分化格子を導入した格子ボルツマン法の複数 GPU 計算により、自転車競技における集団走行の空力解析を実施した。単体走行および 4 人の集団走行の計算結果を実験値と比較し、本手法の妥当性を確認した。また、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

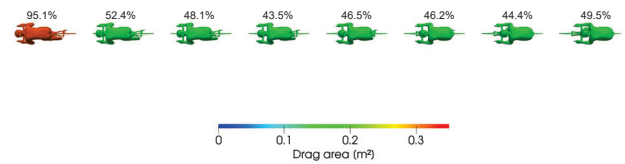


Fig. 10: Drag on isolated group of serial arrangement.

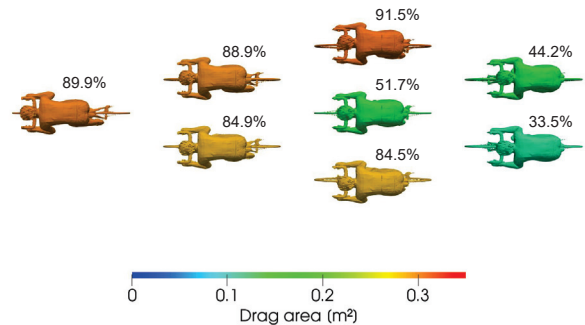


Fig. 11: Drag on isolated group of rhomboid arrangement.

を実施した。集団の形状や 2 つの集団間の距離をいくつか変化させて計算し、それぞれの条件の計算結果を比較して得られるいくつかの知見を提示した。これらにより、本手法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。

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。

参考文献

- (1) M. Geier, M. Schönherr, A. Pasquali, and M. Krafczyk, "The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 70, no. 4, pp. 507–547, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2015.05.001>
- (2) H. Kobayashi, "The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow," *Physics of Fluids*, vol. 17, no. 4, p. 045104, 2005. [Online]. Available: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/17/4/10.1063/1.1874212>
- (3) M. Bouzidi, M. Firdaouss, and P. Lallemand, "Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries," *Physics of Fluids*, vol. 13, no. 11, pp. 3452–3459, 2001.
- (4) D. Yu, R. Mei, L. L.-S. Luo, and W. Shyy, "Viscous flow computations with the method of Lattice Boltzmann Equation," *Prog. Aerospace Sci.*, vol. 39, no. 5, pp. 329–338, 2003.

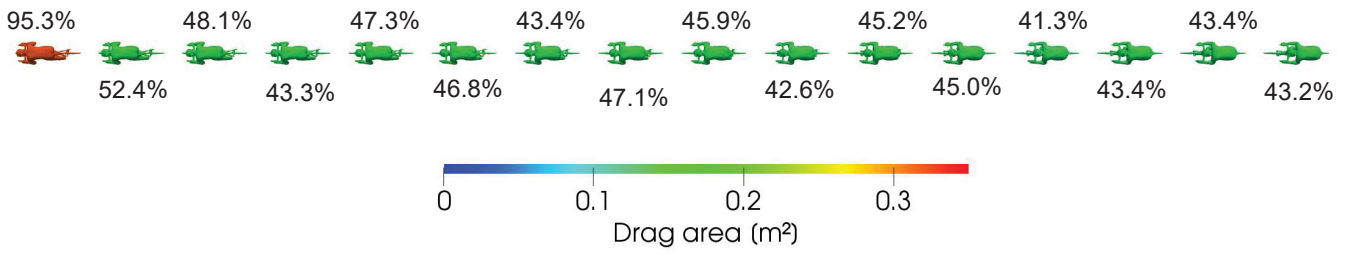


Fig. 12: Drag on closer two groups of serial arrangement.

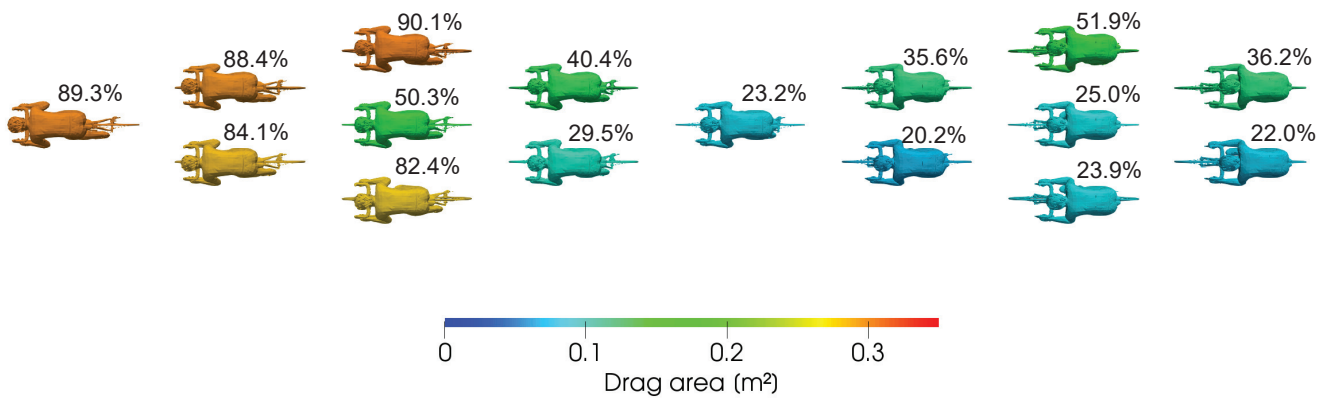


Fig. 13: Drag on closer two groups of rhomboid arrangement.

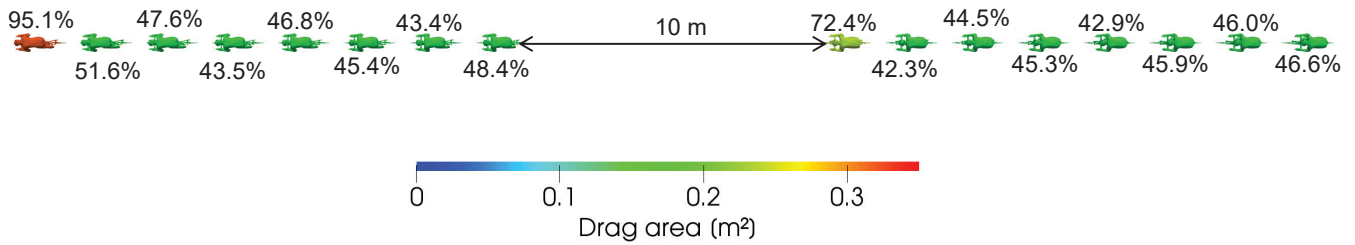


Fig. 14: Drag on two groups of serial arrangement (10 m interval between the groups).

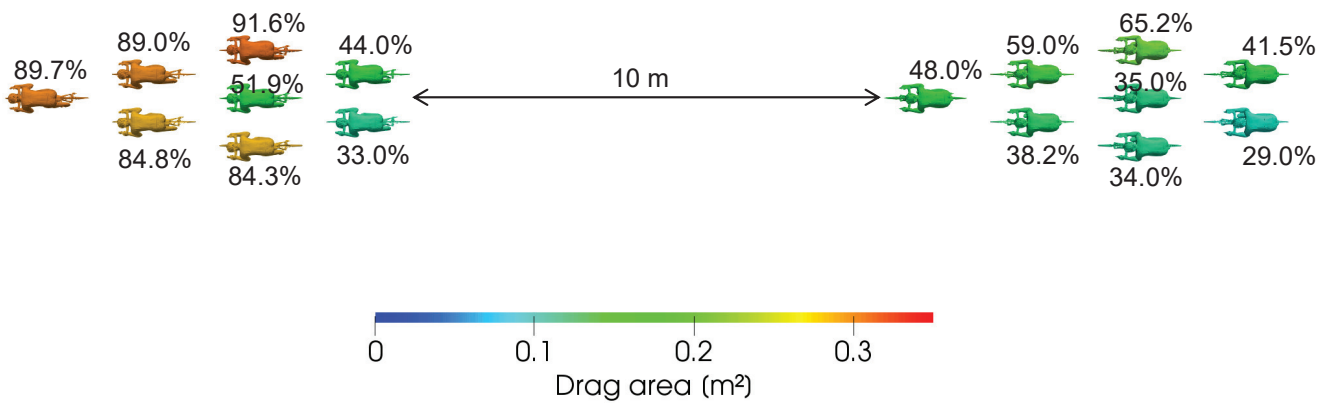


Fig. 15: Drag on two closer groups of rhomboid arrangement (10 m interval between the groups).

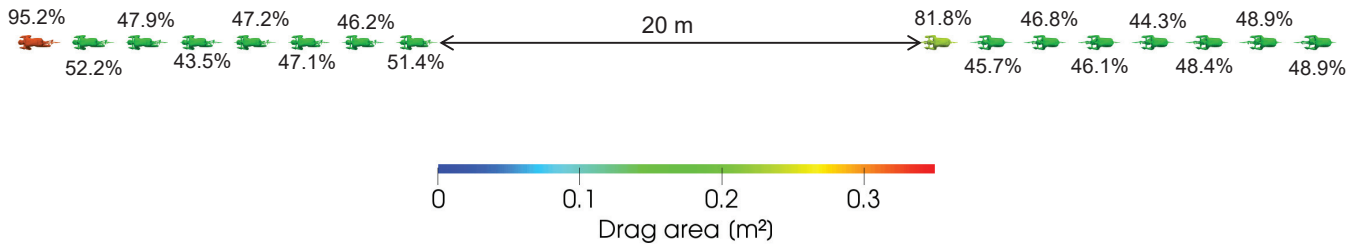


Fig. 16: Drag on two groups of serial arrangement (20 m interval between the groups).

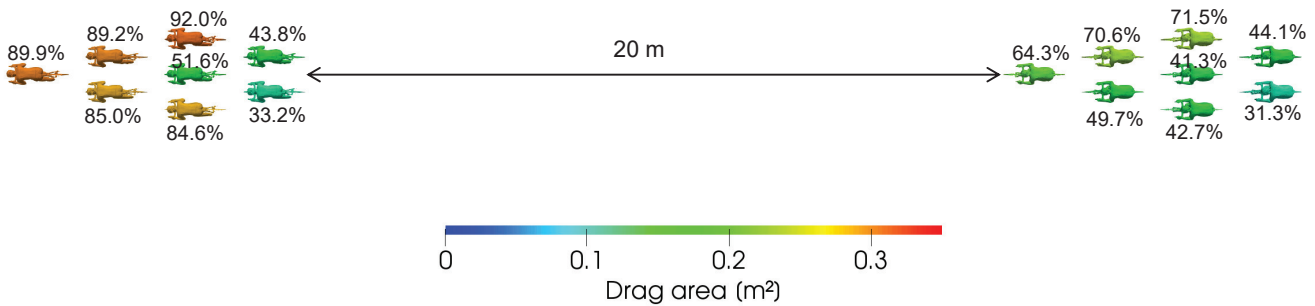


Fig. 17: Drag on two closer groups of rhomboid arrangement (20 m interval between the groups).

- (5) C. Burstedde, L. C. Wilcox, and O. Ghattas, “p4est: Scalable Algorithms for Parallel Adaptive Mesh Refinement on Forests of Octrees,” *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 33, no. 3, pp. 1103–1133, 2011. [Online]. Available: <http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/100791634>
- (6) T. N. Crouch, D. Burton, Z. A. LaBry, and K. B. Blair, “Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics,” *Sports Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 81–110, 2017.
- (7) N. Barry, D. Burton, J. Sheridan, M. Thompson, and N. A. Brown, “Aerodynamic performance and riding posture in road cycling and triathlon,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, vol. 229, no. 1, pp. 28–38, 2015.
- (8) K. Shirasaki, K. Yamanobe, K. Akashi, and W. Takashima, “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*, no. Special Issue, pp. 1–8, 2017. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1754337117736617>
- (9) B. Blocken, T. van Druenen, Y. Toparlar, F. Malizia, P. Mannion, T. Andrienne, T. Marchal, G.-J. Maas, and J. Diepens, “Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, pp. 319–337, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610518303751>