

平成30年6月12日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26286089

研究課題名(和文) 超水滴法の高度化によるエクサスケール時代を見据えた先駆的雲解像モデルの開発

研究課題名(英文) Advanced Modeling of Cloud Microphysics for Exascale Computers using the Super-Droplet Method

研究代表者

島 伸一郎 (Shima, Shin-ichiro)

兵庫県立大学・シミュレーション学研究科・准教授

研究者番号：70415983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,700,000円

研究成果の概要(和文)：エクサスケールスパコンの時代の到来を見据え、超水滴法という雲の微視的ふるまいを原理的法則に基づいて高速に計算することができる革新的な数値計算手法を、さらに高度化した。雲の中では氷晶・あられ・ひょう・雪片などの多様な形態の氷粒子が形成される。これらを扱えるように超水滴法を拡張した結果、積乱雲の中で氷粒子の形状が変化する様子を直接的に計算できるようになった。また、水雲の数値的研究も進めた。特に、貿易風帯の積雲群を正確に数値計算するためには10m程度の格子サイズが必要であることを示し、その理由も明らかにした。雲と乱流の相互作用などに着目し、モデルをさらに高速化する方法についても検討した。

研究成果の概要(英文)：The super-droplet method (SDM) is a particle-based and probabilistic numerical scheme, which enables the accurate simulation of cloud microphysics with less demand on computation. In the SDM, the time evolution of particles is calculated explicitly by solving the fundamental governing equations. In this project, anticipating the advent of exascale computing era, we extended and advanced the SDM to construct a more sophisticated cloud resolving model. The new model can explicitly predict the time evolution of the diverse morphology of ice particles in deep convection. We also conducted several numerical studies on warm clouds. In particular, we elucidated for the first time that grid resolution less than about 10m is necessary to obtain an accurate numerical solution of trade-wind shallow maritime cumuli field. We also examined the possibility to accelerate the calculation, with some attention to cloud-turbulence interaction.

研究分野：シミュレーション科学

キーワード：雲微物理学 気象学 超水滴法 高性能計算(HPC)

1. 研究開始当初の背景

地球の気候システムにおいて雲は極めて重要な役割を果たしており、それ自体が降水を引き起こすだけでなく、放射を介して地球のエネルギーバランスに大きな影響を与える。近年は数値シミュレーションにより、台風や前線の活動といった気象現象の予測、及び地球温暖化といった気候変動の予測が行われている。しかしながら、雲微物理モデルの計算コストは気象・気候モデルにおける他のコンポーネントより群を抜いて高い。そのため、ほとんどの場合非常に簡略化された半経験的なパラメタリゼーションに基づいた雲微物理モデルが使われているのが現状であり、気象・気候予測に大きな不確実性をもたらしている。このように、雲をどのように数値モデルに取り込むのかは依然として大きな課題であり、国内外の研究機関において雲微物理モデルの改良や新規開発の取り組みが続けられている。

このような背景の下、代表者の島は「超水滴法」(Super-Droplet Method, SDM)と名付けた全く新しい雲微物理モデルの開発を独自に行なった[1]。超水滴法はエアロゾル粒子・雲粒・降水粒子の運動と状態変化を、確率的な粒子法を使って統一的に計算する数値計算手法である。従来の手法と違い、時間発展を原理的な物理法則に基づいて高速に計算することができる。海洋性の暖かい雲に関しては観測との比較を通し超水滴法の有効性の実証が進んでいる[2]。なお、同様に原理的な物理法則に基づく手法として、従来の手法を拡張する「多次元ビン法」も研究されているが、計算コストの面から超水滴法にメリットがある。

2013年当時、世界最速のスーパーコンピュータは中国の天河2号で、その実行性能は約30PFLOPSであった。日本の京コンピュータは約10PFLOPSで4位であった。そして、その当時から、これらの約100倍の性能を持つエクサスケールのスーパーコンピュータを2020年頃実現するべく国家レベルの施策が中国、米国や日本を初めとする世界の各国で動いていた。

2. 研究の目的

エクサスケール時代の到来を見据え、超水滴法という雲の微視的ふるまいを原理的法則に基づいて高速に計算することができる革新的な数値計算手法をさらに高度化し、世界に先駆けて豪雨をもたらす積乱雲のふるまいを高精度かつ高速に計算できる雲解像モデルを開発することが本研究の主たる目的である。

将来的には、この新しい雲解像モデルを活用することで、エクサスケールコンピュータ上で台風や梅雨前線などのより広域的な気象現象の直接シミュレーションを行うことができるようになると考えられる。本研究は、突発的な集中豪雨や台風などの気象現象の

予測精度向上により防災・減災に資する。さらに、この新しい雲解像モデルにより雲の性質やふるまいが明らかになれば、地球温暖化といった長期的な気候変動の予測精度も大幅に改善されるため、ひいては人類社会の持続的発展にも貢献することができる。

3. 研究の方法

研究体制としては、超水滴法の開発者でありシミュレーション科学が専門の島と、雲物理が専門の佐藤がチームを組む。大気力学モデルとしては、佐藤が所属する理化学研究所計算科学研究センターの複合系気候科学研究チームが開発を行っているSCALE-LESを採用し、これに我々が開発する超水滴雲微物理モデルの実装を行う。(以下これをSCALE-SDMと呼ぶ。) 計算資源としては京コンピュータの利用を第一候補として考えているが、必要な計算資源を確保できない場合には他大学に設置されている京コンピュータと互換性のあるFX10を利用する。

4. 研究成果

(1) 貿易風帯の積雲群への適用

貿易風帯の浅い積雲の数値的研究はこれまでも数多くなされてきた。しかし、正確な数値解を得るために必要な空間解像度はどの程度であるのかという、基本的な知見が実はまだ明らかになっていなかった。そこで我々はSCALE-SDMを用い、貿易風帯にできる積雲群の詳細なシミュレーションを行った。特に、格子間隔を細かくしていった際の数値的収束性を徹底的に調査した。その結果、数値的に十分収束した正確なシミュレーションを行うためには10m程度の格子間隔が必要であることを初めて示した。また、このような積雲場がこれまで知られていなかった興味深い乱流構造を示すことも発見した[3]。

さらに、従来の雲微物理モデルを使った場合の解像度収束性についても調べ、超水滴法と同様に10m程度の格子サイズで結果がよく収束していることを確認した。既往研究では50m程度の格子サイズが使われてきたが、それでは不十分であったということの意味する。また、10m程度の格子サイズが必要となる理由について分析を進めた。その結果、この事例では雲の下の乱流が本来ロール対流状の構造を成すはずであるが、低解像度ではこのロール構造が再現できず、このことが雲のふるまいにも影響を及ぼしていることを明らかにした[4]。

(2) エアロゾル生成率と層積雲の双安定性

雲の双安定性仮説とは、層積雲の生成と消滅が持続的に保たれる様な洋上の気象場において、その定常状態の安定性に関する未解決の重要な問題であり、状況によって系が双安定になる可能性が示唆されている[5]。例えば、雲の生成・消滅のサイクルが進むにつれ、エアロゾルが多く雨があまり降らない層

雲ができる状態 A に落ち着く場合と、エアロゾルが少なく雨が降る積雲ができる状態 B に落ち着く場合とが、共に系の安定な状態として共存し得る事が考えられる。

そこで、カリフォルニア沖で発生する層積雲を対象として、エアロゾルの生成率がシステムの定常状態に与える影響を調べることに、その分岐構造の解析を行った。その結果、層積雲の定常状態が数日後に定常な状態に落ち着くこと、そしてその定常状態はエアロゾル生成率が大きくなるに伴い積雲から層雲に転移することを発見した。ただし、定常状態が双安定かどうかについては引き続き詳しい調査が必要である。

(3) 超水滴法の氷相過程への拡張

水を伴う混相雲を扱えるように超水滴法の拡張をした。氷粒子には氷晶・霰・雹・雪片などの多様な形態があり、その形成メカニズムも複雑である。そのため、水雲と比べ、混相雲の雲微物理過程にはまだ理解が不十分な点が多い。今回、氷粒子を多孔性の回転楕円体で近似する Chen and Lamb (1994) [6] のモデルをベースに、氷晶核の組成や凍結メカニズムなどに関する最先端の知見をモデルに反映し、混相雲用 SCALE-SDM を開発した。この様に氷粒子の形状の時間発展を陽に計算することができる雲解像モデルは世界で初めてである。実際に積乱雲をシミュレーションすることによりモデルの性能検証を行ったところ、氷粒子の大きさや質量分布は観測をよく再現した。モデルと性能評価の詳細を近々学術論文として公表する予定である。

(4) 大気粒子の帯電が雲に及ぼす影響の評価

帯電した雲粒の衝突併合を通した雨粒の形成速度の変化 (Electrocoalescence) を評価する研究を進めている。まずは、雲粒の帯電過程のモデルと、Zhou らが考案した帯電した雲粒同士の衝突併合確率のモデルを、プログラムに実装した。その上で、理想化された晴天積雲に対して感度実験を行い、帯電により雨粒の形成が大きく抑制されるという予備的結果を得ることができた。

(5) 雲凝結核の活性化・凝結成長ダイナミクスにおける分岐現象

水蒸気が飽和すると、雲凝結核の活性化により雲粒が形成され、水蒸気の凝結により成長する。この現象を記述する非線形力学系の持つ分岐構造を解析した。その結果、雲粒の活性化はサドルノード分岐と捉えられること、また、活性化の時間スケールがサドルノード分岐のボトルネック滞在時間でよく見積もれることを示した。さらに、エアロゾルの数密度が大きい状況では、カスプ型のカタストロフィーによりサドル構造が消失するため、活性化と成長が区別できなくなることを初めて示した [7]。今後この成果を発展させることにより、雲粒の活性化・凝結成長計

算を完全に陰的に解くことができるようになり、モデルの高速化につながると期待される。

(6) 過飽和度の SGS 乱流ゆらぎモデルの開発と検証

発達する積雲の中の水滴の粒径分布は大きな分散をもっており、そのような分布は大気の乱流による混合を考慮しないと説明できないことが知られる。Grabowski と Abade (2017) [8] は、SGS 乱流によって断熱的にパーセルが動くことで過飽和度にゆらぎが生じる効果を超水滴法の枠組みで表すことで、ゆらぎの影響によってパーセルモデルでも大きな分散をもつ粒径分布が得られることを示した。

そこで、SCALE-SDM に Grabowski と Abade の手法を実装した。そして、様々な解像度で三次元の積雲の数値実験を行い、水滴の粒径分布の違いを比較することにより、モデルの妥当性を評価と改良を進めている。これにより、比較的大きな空間格子を使った解像度の低いシミュレーションであっても、速く正確に計算ができるようになると期待される。

(7) Twomey の CCN 活性化モデルの導入による超水滴法の高速化の検討

Grabowski et al. (2018) [9] は、従来型の超水滴法に Twomey の CCN 活性化モデルを導入し、雲の存在する所にだけ超水滴を配置する計算手法を考案した。これを実際に SCALE-SDM に実装する方策を検討した。これにより、計算時間の厳しい制約がある数値天気予報においても超水滴法が活用できる可能性が見えてきた。

(8) SCALE-SDM のコア性能・スレッド並列性能チューニング

現状で SCALE-SDM の京や FX10 上での実行性能はピーク性能比で 5% 程度である。エクサスケールのスパコンでの利用を見据え、プログラムの性能チューニングの方法を検討した。粒子の情報は一次元状の配列上に格納しているが、これを流体格子と親和するようにソーティングすることなどにより、20% の実行性能が見込めることが明らかになった。

<引用文献>

- ① Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T. and Kawahara, S. (2009), The super - droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle - based and probabilistic microphysics model coupled with a non - hydrostatic model. Q. J. R. Meteorol. Soc., 135: 1307-1320. doi:10.1002/qj.441
- ② Arabas, S. and S. Shima, 2013: Large-Eddy Simulations of Trade Wind

Cumuli Using Particle-Based Microphysics with Monte Carlo Coalescence. *J. Atmos. Sci.*, 70, 2768-2777,

<https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0295.1>

- ③ Sato, Y., Shima, S. and Tomita, H. (2017), A grid refinement study of trade wind cumuli simulated by a Lagrangian cloud microphysical model: the super-droplet method. *Atmos. Sci. Lett.*, 18: 359-365. doi:10.1002/asl.764
- ④ Sato, Y., Shima, S. and Tomita, H. (2018), Numerical Convergence of Shallow Convection Cloud Field Simulations: Comparison Between Double-Moment Eulerian and Particle-Based Lagrangian Microphysics Coupled to the Same Dynamical Core. *J. Adv. Model. Earth Syst.*. Accepted Author Manuscript. doi:10.1029/2018MS001285
- ⑤ Baker and Charlson, Bistability of CCN concentrations and thermodynamics in the cloud-topped boundary layer, *Nature* 345, 142-145 (1990).
- ⑥ Chen, J. and D. Lamb, 1994: The Theoretical Basis for the Parameterization of Ice Crystal Habits: Growth by Vapor Deposition. *J. Atmos. Sci.*, 51, 1206-1222, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<1206:TTBFTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<1206:TTBFTP>2.0.CO;2)
- ⑦ Arabas, S. and Shima, S.-I.: On the CCN (de)activation nonlinearities, *Nonlin. Processes Geophys.*, 24, 535-542, <https://doi.org/10.5194/npg-24-535-2017>, 2017.
- ⑧ Grabowski, W.W. and G.C. Abade, 2017: Broadening of Cloud Droplet Spectra through Eddy Hopping: Turbulent Adiabatic Parcel Simulations. *J. Atmos. Sci.*, 74, 1485-1493, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0043.1>
- ⑨ Grabowski, W. W., Dziekan, P., and Pawlowska, H.: Lagrangian condensation microphysics with Twomey CCN activation, *Geosci. Model Dev.*, 11, 103-120, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-103-2018>, 2018.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① Sato, Y., Shima, S. and Tomita, H. (2018), Numerical Convergence of Shallow Convection Cloud Field Simulations: Comparison Between

Double-Moment Eulerian and Particle-Based Lagrangian Microphysics Coupled to the Same Dynamical Core. *J. Adv. Model. Earth Syst.*. Accepted Author Manuscript.

doi:10.1029/2018MS001285

- ② “A grid refinement study of trade wind cumuli simulated by a Lagrangian cloud microphysical model: the super-droplet method”, Sato, Y., Shima, S.-i. and Tomita, H. (2017), *Atmos. Sci. Lett.*, 18: 359-365. doi:10.1002/asl.764.

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asl.764/full>

- ③ “On the CCN (de)activation nonlinearities”, Arabas, S. and Shima, S.-I., *Nonlin. Processes Geophys.*, 24, 535-542, <https://doi.org/10.5194/npg-24-535-2017>, 2017.

[学会発表] (計35件)

International

- ① S. Arabas and S. Shima, “Bifurcations in a dynamical system describing formation of cloud droplets on atmospheric particulate matter”, seminar @ NCSR Demokritos, Athens, Greece, 2018-03-21. (oral)
- ② S. Arabas and S. Shima, “Bifurcations in a dynamical system describing formation of cloud droplets on atmospheric particulate matter”, seminar @ Jagiellonian University, Cracow, Poland, 2018-03-1. (oral)
- ③ S. Arabas and S. Shima, “On the CCN (de)activation nonlinearities”, seminar @ LAQS / University of Patras, Patras, Greece, 2018-2-6. (oral)
- ④ Y. Sato, S. Shima, H. Tomita, “A grid refinement study on shallow cumuli using a large eddy simulation model”, NITech Lectures on Turbulence and Cloud, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan, Mar 8-9, 2018. (invited)
- ⑤ S. Shima, Y. Sato, A. Hashimoto, “Progress of the application of the super-droplet method to mixed-phase clouds”, Workshop on particle-based modeling of cloud microphysics, University of Hyogo, Kobe Campus for Information Science, Kobe, Japan, Nov 22, 2017. (oral)
- ⑥ K. Takeda, S. Shima, “Numerical study on marine stratocumulus and their turbulence structure using the super-droplet method”, Workshop on particle-based modeling of cloud

- microphysics, University of Hyogo, Kobe Campus for Information Science, Kobe, Japan, Nov 22, 2017. (oral)
- ⑦ Y. Sato, S. Shima(speaker), H. Tomita, “Grid convergence of the large-eddy simulation of shallow maritime cumuli field and a comparison of the super-droplet and bulk cloud microphysics model”, ZFA Seminars, University of Warsaw, Warsaw, Poland, 2017-06-02 13:15, http://www.igf.fuw.edu.pl/old/igf/?option=com_seminars&Itemid=41&lang=en&func=view&seminar=10000613. (oral)
- ⑧ K. Moriki, S. Shima, K. Tsuboki, “Numerical experiments of aerosol impacts on warm clouds using a cloud-resolving model with the super droplet method”, JpGU-AGU joint meeting 2017, Makuhari Messe, Chiba, Japan, May 20-25, 2017. (poster)
- ⑨ Y. Sato, S. Shima(speaker), H. Tomita, “Grid convergence of the large-eddy simulation of shallow maritime cumuli field: a case study using the super-droplet method as the cloud microphysics model”, 2nd International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan, Mar 8-10, 2017. (invited)
- ⑩ K. Moriki, S. Shima, K. Tsuboki, “Numerical experiments of aerosol impacts on warm clouds using a cloud-resolving model with the super droplet method”, 2nd International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan, Mar 8-10, 2017. (invited)
- ⑪ S. Shima, “Roadmap to develop a cloud and aerosol resolving model: extension of the super - droplet method to ice phase, aerosol, and electricity”, International Workshop on Cloud Microphysics - Turbulence Interaction, Leibniz Institute for Tropospheric Research, Leipzig, Germany, Feb 28-Mar 1, 2017. (invited)
- ⑫ S. Shima, “Numerical study of shallow maritime clouds using the super-droplet method”, International Symposium on Mathematical Modeling 2016, Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico City, Mexico, December 7-9, 2016. (plenary)
- ⑬ Y. Sato, S. Shima, and H. Tomita, “Impacts of spatial grid resolution on the cloud cover of marine shallow cumulus”, The 4th International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models (NHM2016), Hakone, Japan, Nov. 30 (Wed) - Dec. 2 (Fri), 2016. (poster).
- ⑭ Y. Sato, S. Shima(speaker), H. Tomita, “Numerical study of shallow maritime clouds using the super-droplet method”, the 2nd International workshop on “Numerical Simulations of Particle/Droplet/Bubble-laden Multiphase Flows”, Yokohama Institute for Earth Sciences JAMSTEC, 13 Oct. 2016. (invited).
- ⑮ Y. Sato and S. Shima, “Impacts of grid resolution on the maritime cumulus simulated by the stochastic Lagrangian cloud microphysical scheme”, The 17th International Conference on Clouds & Precipitation, Manchester, UK, 25 - 29 July 2016. (poster)
- ⑯ S. Shima, “Particle-based and probabilistic methods for warm-rain cloud microphysics”, Workshop on Eulerian vs. Lagrangian methods for cloud microphysics, U. of Warsaw, Warsaw, Poland, Apr 20, 2015. (invited)
- ⑰ S. Shima, K. Hasegawa, K. Kusano, “Preliminary numerical study on the cumulus-stratus transition induced by the increase of formation rate of aerosols”, EGU General Assembly 2015, held 12-17 April, 2015 in Vienna, Austria. id.4496. (poster)
- ⑱ S. Shima, “Numerical study on the cumulus-stratus transition using the super-droplet method”, International Workshop on Cloud Turbulence, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan, March 4 to 6, 2015. (invited)
- ⑲ “Preliminary numerical study on the cumulus-stratus transition induced by the increase of formation rate of aerosol”, Shima, S., The 6th GCRM and 3rd NHM WS, Kobe, Japan, 24-26 Sep 2014. (oral)

日本語

- ⑳ 島伸一郎, “超水滴法による雲の精密シミュレーション”, KOBE HPC Spring School 2018, 神戸大学計算科学教育センター (兵庫県神戸市), 2018年3月14日. (口頭発表)
- 21 島伸一郎, “Smoluchowski 方程式と超水滴法”, 第7回兵庫県立大学計算科学連携セミナー～非平衡現象のダイナミクス～, 兵庫県立大学情報科学キャンパス (兵庫県神戸市), 2018年3月8日. (口頭発表)
- 22 島伸一郎, 佐藤陽祐, 橋本明弘, “超水滴法の混相雲へ適用に関する進捗報告”,

2017年度エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会，国立極地研究所（東京），2018年2月14日（水）。（口頭発表）

- 23 島伸一郎，佐藤陽祐，“超並列計算により明らかにする対流雲の高精度再現のための要求解像度”，第4回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会，コクヨホール（東京・品川），2017年11月2日。（ポスター）
- 24 武田和弥，島伸一郎：「超水滴法による海洋層積雲のシミュレーションと乱流モデルの影響評価」，日本気象学会2017年度秋季大会，北海道大学学術交流会館（北海道札幌市），2017年10月30日。（ポスター）
- 25 島伸一郎，“雲とエアロゾルの混合状態完全解像モデルの実現に向けて”，エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会，国立極地研究所（東京都立川市）2017年2月16日（木）～17日（金）。（口頭発表）
- 26 島伸一郎，佐藤陽祐*，“超水滴法を用いた発雷予測の基盤となる雲氷粒子の微物理モデリング”，第3回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会，コクヨホール（東京・品川），2016年10月21日。（ポスター），（*発表者）
- 27 島伸一郎，“超水滴法によるエアロゾル-雲相互作用の定量化に向けた取り組み”，平成27年度 国立極地研究所・研究集会 エアロゾル-雲相互作用について語る会，国立極地研究所（東京），2016年2月26日（金）。（口頭発表）
- 28 島伸一郎，佐藤陽祐，“超水滴法による雲の精密シミュレーションと衛星リモートセンシングの高度化”，第2回「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会，日本科学未来館（東京・お台場），10月26日。（ポスター）
- 29 島伸一郎，“雲とエアロゾルの統合シミュレーションと課題”，日本応用数理学会2015年度年会，金沢大学角間キャンパス（金沢），2015年9月9日。（口頭発表）
- 30 島伸一郎，“超水滴法による雲の精密シミュレーションとその工学的応用”，イノベーション・ジャパン2015，東京ビッグサイト（江東区），2015年8月27日。（ポスター）
- 31 佐藤陽祐，島伸一郎，“超水滴法を用いた洋上の浅い積雲の再現実験と妥当性評価”，日本気象学会2015年度春季大会，2015年5月21日（木）～24日（日），つくば国際会議場（つくば市）。（ポスター）

〔その他〕

ソフトウェア

- ① SCALE-SDM_BOMEX_Sato2018,
<http://doi.org/10.5281/zenodo.124691>

研究会の主催

- ① Workshop on particle-based modeling of cloud microphysics, University of Hyogo, Kobe Campus for Information Science, Kobe, Japan, 2017/11/22.
http://192.244.104.178/events/ws_pbc_m_1711/
- ② Workshop on Cloud Microphysics and Turbulence, 兵庫県立大学神戸ポートアイランドキャンパス, 2016/11/24.
https://s-shima-lab.bitbucket.io/WS_on_Cloud_Microphysics_and_Turbulence.html
- ③ 大気放射と衛星リモートセンシングに関するワークショップ，兵庫県立大学神戸ポートアイランドキャンパス，2016/11/2.
https://s-shima-lab.bitbucket.io/ws2016_radiation_remosen.html

解説記事

- ① “シンポジウム「エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会」報告”，19人中4番目（佐藤）と12番目（島），天気64(7)，483-491，2017-07
- ② “超水滴法による雲の精密シミュレーションとその工学応用”，島伸一郎，前田晃佑，化学工学誌 81巻5号(2017)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島伸一郎 (SHIMA, Shin-ichiro)

兵庫県立大学・シミュレーション学研究科・准教授

研究者番号：70415983

(2) 研究分担者

佐藤陽祐 (SATO, Yosuke)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：10633505

(3) 連携研究者

富田浩文 (TOMITA, Hirofumi)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：00399578

(4) 研究協力者

Arabas, Sylwester

AETHON (Greece)・H2020 SME Innovation Associate

Grabowski, Wojciech W.

NCAR (USA)・Senior Scientist