

2021年度正野賞の受賞者決まる

受賞者：伊藤純至（東北大学理学研究科）

研究業績：高解像度数値モデルを用いた大気境界層およびメソスケール現象の研究

選定理由：

大気境界層の乱流や組織構造は、熱や水蒸気・運動量・エアロゾルなどの鉛直輸送を通して、自由大気のような大気運動を駆動し、地球や惑星の気候に大きな影響を与え、人々の生活にも影響を与える。大気境界層内の多様な大気現象を理解し、予測することは、気象学的にも社会的にも重要である。

多くの気象モデルでは、乱流の効果をパラメタリゼーションにより表現している。近い将来、気象モデルの標準的な空間解像度は1 km 以下になると予想されるが、1 km から約100m までの解像度では、従来の鉛直1次元的なパラメタリゼーションも、Large Eddy Simulation (LES) で使われる等方乱流理論にもとづくパラメタリゼーションも適用し難い。この問題は、グレイゾーンあるいは Terra Incognita (未開拓の領域) と呼ばれており、その克服は気象学モデル研究において重要な課題と位置づけられている。

伊藤氏は、LES の結果を活用し、代表的な乱流パラメタリゼーションの一つである Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino のモデルをグレイスケールの領域に適用可能にした [業績7]。この研究では、格子スケールとサブグリッドスケールを合わせた乱流のエネルギー散逸率を一定に保つようしながら、最適な長さスケールを決めるという汎用性の高い方法を採用している。また、これまで物理的な実態を十分に考慮されてこなかった水平拡散についても、LES により長さスケールを調べて定式化を行った [業績6]。さらに、LES モデルの下部境界条件である地表面フラックスの計算には、通常用いられるバルク法を修正する必要があることを、シミュレーション

結果をもとに指摘した [業績9, 14]。

伊藤氏は、大気境界層の多様な現象を数値シミュレーションで再現し、その構造やメカニズムを明らかにする研究も行ってきた。その一つに、身近ではあるが理解が不十分であった塵旋風の研究がある [業績1-5]。LES モデルを用いた研究では、熱対流の揺らぎで作られた Kelvin 循環が、セル状対流の下降流で地表面近くに下降し、上昇流域に収束することで、塵旋風が発生することを示した [業績4]。アリゾナ州の砂漠で撮影したビデオ映像に粒子画像流速測定法 (PIV) を適用し、塵旋風の風速分布を推定することにも成功した [業績5]。この他にも、寒気の吹き出し時の済州島下流に生ずるカルマン渦に似た渦列 [業績8] や、愛媛県の大洲盆地から瀬戸内海に向けて霧が吹き出す冷氣流型地峡風「肱川あらし」 [業績11] などの興味深い現象の構造やメカニズムも明らかにしている。

伊藤氏は、大気境界層と同様のアプローチを、降水を伴う対流システムについても適用してきている。2017年7月の九州北部豪雨を対象にした理想化実験を行い、バックビルディング型の線状降水帯が、二つの海岸から侵入した海風の収束線をトリガーとして形成されるという線状降水帯に関する新しい形成機構を提案した [業績13]。この線状降水帯の形成・維持には、降水系内の潜熱の解放によって形成された低圧偏差が重要であり、高度と共に時計回りに回転する環境風や冷氣プールの存在は必ずしも重要でないことを示した。

伊藤氏は、フラッグシップのスーパーコンピュータを活用した研究にも尽力してきた。その一つに、世界で初めての LES による台風全体の再現実験がある。研究の結果、台風下の大気境界層内に従来知られていた1種類に加えて、新たに2種類の異なる水平ロール状組織構造が存在することを示した

[業績10]. また、成田空港で航空機の損傷を生ずる事故時の気象の再現実験を行い、事故の原因が鉛直シアと不安定成層によって生ずるロール状対流の鉛直流や乱流構造、およびそれらに伴う運動量輸送によることを示した[業績12]. 強風が卓越する晴天時のロール状対流が航空機の離発着に危険であり、数値モデルで予測可能であることを示した研究は世界で初めてである。

伊藤氏はLESを用いて、乱流のパラメタリゼーションを独自に改良してきた。これらの一連の成果は、将来の気象モデルの発展に資するものであり、高く評価できる。また、従来信頼できる形で再現できなかった大気境界層やメソスケールの多様な現象を再現しており、これまで十分な理解が得られていなかった現象の基礎過程や構造・メカニズムの理解・解明に大きく貢献してきた。以上の理由により、日本気象学会は伊藤純至氏に2021年度正野賞を贈呈するものである。

主な論文リスト

- Ito, J., R. Tanaka, H. Niino and M. Nakanishi, 2010: Large eddy simulation of dust devils in a diurnally-evolving convective mixed layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 63-77, doi:10.2151/jmsj.2010-105.
- Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi, 2010: Large eddy simulation on dust suspension in a convective mixed layer. *SOLA*, **6**, 133-136, doi:10.2151/sola.2010-034.
- Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi, 2011: Effects of ambient rotation on dust devils. *SOLA*, **7**, 165-168, doi:10.2151/sola.2011-042.
- Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi, 2013: Formation mechanism of dust devil-like vortices in idealized convective mixed layers. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1173-1186, doi:10.1175/JAS-D-12-085.1.
- Ito, J. and H. Niino, 2014: Particle image velocimetry of a dust devil observed in a desert. *SOLA*, **10**, 108-111, doi:10.2151/sola.2014-022.
- Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi, 2014: Horizontal turbulent diffusivity in convective mixed layer. *J. Fluid Mech.*, **758**, 553-564, doi:10.1017/jfm.2014.545.
- Ito, J., H. Niino, M. Nakanishi and C.-H. Moeng, 2015: An extension of the Mellor-Yamada model to the Terra Incognita zone for dry convective mixed layers in the free convection regime. *Bound.-Layer Meteor.*, **157**, 23-43, doi:10.1007/s10546-015-0045-5.
- Ito, J. and H. Niino, 2016: Atmospheric Kármán vortex shedding from Jeju Island, East China Sea: A numerical study. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 139-148, doi:10.1175/MWR-D-14-00406.1.
- Ito, J. and H. Niino, 2016: Wind-speed-surface-heat-flux feedback in dust devils. *Bound.-Layer Meteor.*, **161**, 229-235, doi:10.1007/s10546-016-0167-4.
- Ito, J., T. Oizumi and H. Niino, 2017: Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Sci. Rep.*, **7**, 3798, doi:10.1038/s41598-017-03848-w.
- Ito, J., T. Nagoshi and H. Niino, 2019: A numerical study of "Hijikawa-Arashi": a thermally-driven gap wind visualized by nocturnal fog. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **58**, 1293-1307, doi:10.1175/JAMC-D-18-0189.1.
- Ito, J., H. Niino and K. Yoshino, 2020: Large eddy simulation on horizontal convective rolls that caused an aircraft accident during its landing at Narita Airport. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL086999, doi:10.1029/2020GL086999.
- Ito, J., H. Tsuguchi, S. Hayashi and H. Niino, 2021: Idealized high-resolution simulations of a back-building convective system that causes torrential rain. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 117-132, doi:10.1175/JAS-D-19-0150.1.
- Kitamura, Y. and J. Ito, 2016: Revisiting the bulk relation for heat flux in the free convection limit. *Bound.-Layer Meteor.*, **158**, 99-103, doi:10.1007/s10546-015-0075-z.

受賞者：宮本佳明（慶應義塾大学環境情報学部）

研究業績：熱帯低気圧の強度変化過程の物理機構に関する数値的・理論的研究

選定理由：

台風は、海面から供給された水蒸気が、中心付近の対流性の雲（目の壁雲）で凝結することで駆動する渦である。このような対流と流れ場の間に働く相互作用を介した台風の発達機構は、半世紀以上前に提唱され、これまでに多くの研究によって理解が深められてきた。しかし、強度変化に関わる各過程や、その後発見された現象・過程には、多くの未解明点が残る。また、台風に伴う暴風雨による災害の軽減のためにも精度の高い予報が求められ、地球温暖化による中長期的な台風の強度変化の量的な予測も必要である。そのためにも、台風の強度変化メカニズムの理解を深めることは重要である。

宮本氏は、台風の強度変化に関して、理論と数値シミュレーションの両面から研究を行ってきた。台

風研究の中で近年特に注目されている過程が、台風の急発達である。過去の研究から、統計的に強い台風は生涯に一度は急発達を経験すると分かっているが、急発達を予測することは難しい。宮本氏は、数値シミュレーションで計算された台風の構造を調べて、まず台風が軸対称化し、中心付近の慣性安定度が増加し、目の壁雲が形成して急発達が始まるというメカニズムを提案した[業績3]。また、更なる考察から、この傾向は急発達開始前の台風のロスビー数が大きいほど顕著であることも示した[業績8]。さらに、渦・環境場のパラメータを系統的に変化させたアンサンブル計算の結果、背景風・鉛直シアがある環境場でも、上述のメカニズムが主に働くことを示した[業績11]。

台風は環境場に応じた強度までしか成長できないという理論的な限界強度(MPI)が提唱されており、実際の台風の上限強度を良く表すことが知られている。一方で、MPIまで発達しない場合も多い。宮本氏は、台風が海の表層をかき混ぜることで水温を下げる過程を定式化することに成功し、既存の理論に反映することで、海洋混合の影響を考慮したMPI理論式を構築した[業績10]。このMPIは、既存のものよりも実際の台風の上限強度を良く表すことが示された。

台風の目の壁雲の外側にはしばしば、もう一つ壁雲が形成して多重になり、やがて既存の壁雲が消失する。このような壁雲の交換過程が出現すると強度・構造が急激に変化するため、急発達と同様に、予測を難しくする現象として注目されているが、未解明の点が多い。新たな壁雲の生成要因については、既に10を超える理論が提案されているものの、統一的な理論は確立されていない。宮本氏は、過去の研究からこの現象が出現する最もシンプルな条件を考察し、1次元の境界層と自由大気の系で、自由大気の水平風速がある条件を満たした時に、エクマンポンピングを介した不安定現象が存在することを示した[業績12]。導出した安定性の指標を複数の計算結果より求めたところ、外側壁雲の形成前に不安定に対応する値に変化しており、構築した理論の妥当性を示すことに成功した。他にも、台風の強度を決める上で重要な海洋との関係などに関して、成果をあげてきた[業績1, 2, 5]。

台風研究とは別に、宮本氏は全球非静力学モデル(NICAM)を用いて、「京」コンピュータ上で実施

した全球を870mの格子間隔で覆う超高解像度大気シミュレーションの結果を解析した[業績4, 6, 9]。この結果、惑星スケールの大気の流れと積雲対流を同時に解くことに成功し、全球モデルにおいて積雲対流を解像するためには約2km程度の水平格子間隔が必要であることを示した。格子間隔870mは、8年たった現在でも全球大気シミュレーションの世界最高解像度であり、世界中の多くの研究に影響を与えている。

さらに宮本氏は、流体の数値計算を行う際に考慮しなくてはならない空間解像度依存性の問題に対して、離散化した系で熱対流の安定性解析を行うという新しい解決法を提案した[業績7]。この結果、成長率が最大となる波数が解像度によって変化し、旧来の理論で得られる解(連続系の解)に比べて、格子間隔が増大すると共に波数が低くなるという解が得られ、数値計算結果と定量的に合う結果が示された。この他にも、熱対流へのエアロゾルの影響[業績13]や、下層雲のエネルギー平衡を基にした雲被覆率の理論モデルの構築[業績14]など、対流現象に関する成果もあげている。

以上の宮本氏の熱帯低気圧強度変化過程の物理機構研究を中心とする多方面に及ぶ研究は、国内外の研究者に高く評価されている。以上の理由により、日本気象学会は宮本佳明氏に2021年度正野賞を贈呈するものである。

主な論文リスト

1. Miyamoto, Y. and T. Takemi, 2010: An effective radius of the sea surface enthalpy flux for the maintenance of a tropical cyclone. *Atmos. Sci. Lett.*, **11**, 278-282, doi:10.1002/asl.292.
2. Miyamoto, Y. and T. Takemi, 2011: Effects of surface exchange coefficients for high wind speeds on intensity and structure of tropical cyclones: numerical simulations for Typhoon Ioke (2006). *Theor. Appl. Mech. Japan*, **59**, 275-283, doi:10.11345/nctam.59.275.
3. Miyamoto, Y. and T. Takemi, 2013: A transition mechanism for the spontaneous axisymmetric intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 112-129, doi:10.1175/JAS-D-11-0285.1.
4. Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro and H. Tomita, 2013: Deep moist atmospheric convection in a sub-kilometer global simulation. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4922-4926, doi:10.1002/

- gr1.50944.
5. Miyamoto, Y., M. Satoh, H. Tomita, K. Oouchi, Y. Yamada, C. Kodama and J. Kinter III, 2014: Gradient wind balance in tropical cyclones in global experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 1908-1926, doi:10.1175/MWR-D-13-00115.1.
 6. Miyamoto, Y., R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, H. Tomita and Y. Kajikawa, 2015: Does convection vary in different cloudy disturbances? *Atmos. Sci. Lett.*, **16**, 305-309, doi:10.1002/asl2.558.
 7. Miyamoto, Y., J. Ito, S. Nishizawa and H. Tomita, 2015: A linear thermal stability analysis of discretized fluid equations. *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, **29**, 155-169, doi:10.1007/s00162-015-0345-x.
 8. Miyamoto, Y. and T. Takemi, 2015: A triggering mechanism of rapid intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 2666-2681, doi:10.1175/JAS-D-14-0193.1.
 9. Miyamoto, Y., T. Yamaura, R. Yoshida, H. Yashiro, H. Tomita and Y. Kajikawa, 2016: Precursors of deep atmospheric convection in a subkilometer global simulation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 12080-12088, doi:10.1002/2016JD024965.
 10. Miyamoto, Y., G. H. Bryan and R. Rotunno, 2017: An analytical model of maximum potential intensity for tropical cyclones incorporating the effect of ocean mixing. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 5826-5835, doi:10.1002/2017GL073670.
 11. Miyamoto, Y. and D. S. Nolan, 2018: Structural changes preceding rapid intensification in tropical cyclones as shown in a large ensemble of idealized simulations. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 555-569, doi:10.1175/JAS-D-17-0177.1
 12. Miyamoto, Y., D. S. Nolan and N. Sugimoto, 2018: A dynamical mechanism on secondary eyewall formation of tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3965-3986, doi:10.1175/JAS-D-18-0042.1.
 13. Miyamoto, Y., S. Nishizawa and H. Tomita, 2020: Impacts of number of cloud condensation nuclei on two-dimensional moist Rayleigh convection. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 437-453, doi:10.2151/jmsj.2020-023.
 14. Miyamoto, Y., Y. Sato, S. Nishizawa, H. Yashiro, T. Seiki and A. T. Noda, 2020: An energy balance model for low-level clouds based on a simulation resolving mesoscale motions. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 987-1004, doi:10.2151/jmsj.2020-051.
-