

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17766

研究課題名（和文）次世代数値気象ライブラリで拓く、低層雲の地域横断的研究

研究課題名（英文）Investigation of regional variability of shallow clouds by using next-generation weather modeling

研究代表者

佐藤 陽祐 (Yousuke, Sato)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：10633505

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では気候予測において最大の不確定性要素である低層雲の微物理特性に関する地域特性（東西太平洋の差異）を明らかにすることを目指した。予備的な解析から低層雲の計算に従来より用いられてきた解像度が十分でないことが明らかとなった。そのため解像度に関する数値実験を行った。感度実験の結果から低層雲の再現に必要な解像度は水平12.5m、鉛直10mであると明らかにした。同時に西部太平洋の低層雲を対象とした数値実験を行い、東部太平洋の低層雲との違いの原因の一つは、海面温度が大気最下層の温度より低いため、雲底において長波放射による加熱が起こらないことが原因である可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the difference of the microphysical properties of shallow clouds over east Pacific and those over west Pacific. Through preliminary analyses, it was clarified that the grid resolution, which has been used for the simulation of shallow clouds, are insufficient to reproduce the shallow clouds. We firstly conducted the sensitivity experiment of grid resolution to simulated shallow clouds. The results of the sensitivity experiment indicated that the horizontal/vertical grid resolution of 12.5/10 m is required for simulating shallow clouds accurately. We next conducted the numerical simulation targeting on the shallow clouds over the west Pacific, and compared with the results of the simulation targeting on the shallow clouds over the east Pacific. The results indicated that the difference of cloud microphysical properties over the east Pacific and those over the west Pacific was originated from the difference in the longwave radiation below cloud.

研究分野：気象学

キーワード：雲物理

1. 研究開始当初の背景

層積雲、層雲、積雲などの低層雲は長期間大気中にとどまる雲である。この低層雲は激しい降水現象を引き起こすことはないが、大気中で太陽からの太陽放射を反射し、地球を冷やす働きがあるだけでなく、地球から放出される地球放射を吸収するため、地球のエネルギー収支に大きな影響を持つ (Bretherton et al. 2009)。気候変動に関する政府間パネルの第5次報告書 (IPCC AR5) でもその重要性が指摘されているように、気候予測に用いられる数値モデル (気候モデル) で計算される低層雲と、低層雲とエアロゾル (大気中の塵) との相互作用は、複数のモデル間で結果に大きなばらつきがあり、低層雲は気候予測における最大の不確定性要素である。そのため、2000年代から低層雲を対象とした研究が観測・数値シミュレーション (数値モデル) の両面から数多く行われてきた。そして、これらの研究から得られた知見を用いて、気候予測に用いられる気候モデルが改良されてきた。

これまでに行われた低層雲に関する研究のほとんどはカリフォルニア西岸や、ペルー西岸など東部太平洋に発生する低層雲を対象としたものである。そのため、一部の領域で発生する雲を対象とした知見のみで気候モデルを改良してきたと言える。

しかしながら西部太平洋 (日本の東海上) を対象とした研究事例は少ない。西部太平洋は世界でもっとも汚染された地域であり、雲エアロゾル相互作用に関しても他の地域とは異なる特性がある。そのため、低層雲の地域依存性を理解し、地域依存性を加味して気候モデルを改良することが重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、数値実験を用いた先行研究ではほとんど対象とされていない、西部太平洋に発生する低層雲を対象として、「1、数値実験を行い、低層雲を再現すること」、「2、雲の微物理特性や雲エアロゾル相互作用の特性に関する、**東西太平洋の差異を明らかにし、その地域依存性を理解すること**」を目指した。

3. 研究の方法

本研究では LES を用いた高解像実験を行う予備的な解析として、現在の気候モデルで表現される雲エアロゾル相互作用の地域特性について調査を行った。具体的には気候モデルの結果を衛星観測、および、雲を直接計算する全球雲解像モデルの結果と比較し、雲を直接計算しない気候モデルで雲エアロゾル相互作用の地域特性が再現されているかを調べた。

次に LES モデルを用いた実験を行った。低層雲は低い高度で発生するため、数値実験でその微物理特性を直接再現するには数百 m という高解像度での数値実験が必要である。そ

のため、これらの高解像度での実験が可能な LES モデルを用いた数値実験を行った。

LES モデルでは、まず、先行研究の数値実験と同条件で数値実験を行った。次に西部太平洋を対象とした数値実験を行い、両者を比較することを通して、東西太平洋の差異を明らかにし、それらの差異を生み出す原因を明らかにすることを目指した。

4. 研究成果

はじめに気候モデルと全球雲解像モデルで計算される、低層雲の雲エアロゾルの相互作用の地域特性を比較した。従来行われてきた、東部太平洋を対象とした研究では、エアロゾルが増加した時、雲エアロゾル相互作用によって、雲の量は増えると考えられていた。近年の衛星観測の結果では、エアロゾルの量が増えた時に、東部太平洋では雲の量は増えるものの、西部太平洋では雲の量は減少しており、雲エアロゾル相互作用の地域特性があることが明らかになってきている (Michibata et al. 2016、図1上)。本研究の解析により、気候モデルは、東部太平洋を対象とした研究によって得られた知見で改良を重ねてきたため、エアロゾルが増えた時に雲の量が全球で増えており (図1下の気候モデルの結果では、エアロゾルの増加に伴い雲の量は全球どこでも雲の量が増える)、雲エアロゾル相互作用を過大に見積もっていることが明らかになった。

本研究では、雲を直接計算し、雲エアロゾル相互作用を直接計算できる全球雲解像モデルによる計算を行い、雲エアロゾル相互作用の大きさを見積もった。

全球雲解像モデルの結果 (図1中) はエアロゾルの増加に伴い、雲の量が減る領域と増える領域があり、従来の気候モデルとは大きく異なる挙動を示した。この全球雲解像モデルの結果は図1上で示す人工衛星観測の結果を非常によく再現しており、**雲エアロゾル相互作用を直接計算できる高解像度な全球雲解像モデルを用いることにより、雲エアロゾル相互作用の地域特性を数値モデル再現できることを世界で初めて示すことができた (図1上)**。この結果は Nature Communications という著名な雑誌に掲載された。

本研究では、全球雲解像モデルの結果を詳細に解析し、雲とエアロゾルの相互作用の地域特性が生じる原因を明らかにした。

エアロゾルの増加に伴い、雲の量が増加している地域では、「エアロゾルの増加に伴って、雲粒のサイズが小さくなるため、降水がおきにくくなる結果、雲の量が増加する」という従来から考えられてきた雲エアロゾル相互作用と同様の傾向を示した。

一方、エアロゾルの増加に伴い雲の量が減っている地域では、従来から言われている、雲の量が増える効果も働いているが、同時に「エアロゾルの増加に伴って、雲粒のサイズ

が小さくなる結果、蒸発が促進され雲の量が減る」という効果が働き、後者の効果が支配的であるため、雲の量が減っていることが明らかになった。

このことは本研究で行った全球スケールでの高解像な計算によって初めて明らかにすることができた点である。

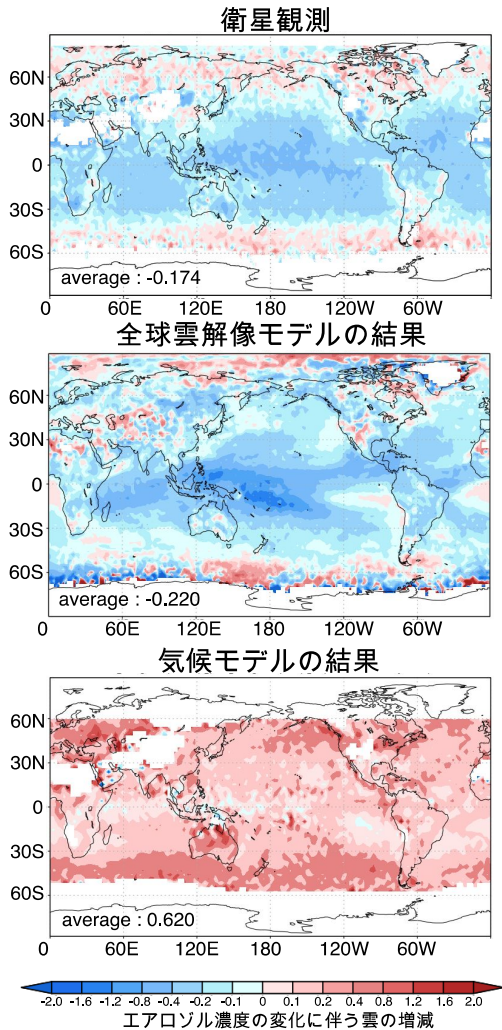


図1: (上)人工衛星、(中)、全球雲解像モデル、(下)気候モデルによって計算されたエアロゾルの量が変化した際の雲の量の増減の全球分布 (暖色系はエアロゾルが増えた時に雲の量が増えることを、寒色系はエアロゾルが増えた時に雲の量が減ることを示す、Sato et al. 2018 を抜粋し編集)

次に雲エアロゾル相互作用の地域特性をより詳細に明らかにするため、LES モデルを用いた数値実験を行った。

まず、数多くの先行研究が行われている、東部太平洋を対象とした数値実験を行った。実験を行う過程で、先行研究によって LES を用いて行われた低層雲の数値実験の解像度は必ずしも十分でないことが明らかになった。そこで、まず解像度に関する感度実験を行い、低層雲を再現するために必要な解像度を調べた。

感度実験の結果から、低層雲の雲量を再現するために必要な水平(鉛直)解像度は 12.5

(10) m であることが明らかになった(図 2)。このような水平解像度 12.5 m という超高解像度の計算は世界でも類を見ないものであり、本研究により、従来行われてきた低層雲の数値実験の解像度が不十分であることを示すことができた。これらの結果は 1 編の投稿論文として、国際誌から発表され、さらにもう 1 編の論文を投稿中である。

次に、西部太平洋の低層雲を対象とした LES モデルの数値実験を行った。まず西部太平洋を対象として行われた航空機観測の結果と、LES モデルによって再現された結果を比較し、本研究で用いた LES モデルは、西部太平洋の低層雲をよく再現できることを示した。また、西部太平洋の低層雲と東部太平洋の低層雲の物理特性の違いを明らかにするため、複数の物理量を変えた感度実験を行った。

これらの感度実験を通して、低層雲の地域特性を生み出す要因が、

1. 雲頂にできる逆転層が西部太平洋では東部太平洋に比べ弱いこと
2. 西部太平洋では、海水温度が海面付近の大気の気温よりも低いが、東部太平洋では海水温度が海面付近の大気の気温よりも高いという違いがあること

の 2 点であることを明らかにできた。

これらの成果は、LES を用いた研究が不足していた西部太平洋を対象とした LES の数値実験であり、東部太平洋の数値実験の結果と比較を通して議論した点が新しい。

今後、本研究で行った計算を発展させ、LES を用いたさらなる数値実験や、航空機観測との詳細な比較、さらには、本研究の結果を元に気候モデルを改良するなどの取り組みにつなげていくことが、次のステップとして必要である。

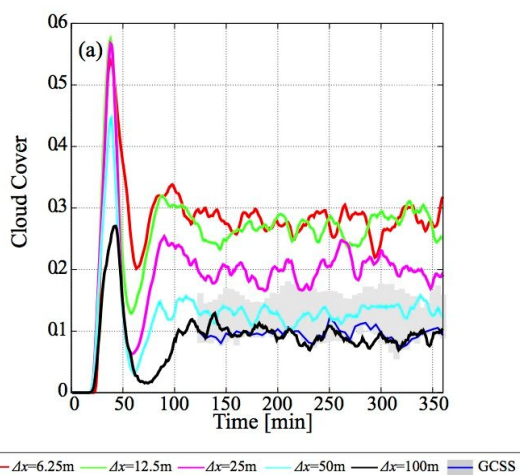


図2: LES で計算された低層雲の雲量の時間変化(線の色の違いは解像度(Δx)の違いを示す)。解像度が 6.25 m と 12.5 m がほぼ同じ結果を示しており、低解像度では雲量が小さいため、12.5 m より高い解像度が必要であることを示す(Sato et al. 2017 より抜粋)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6件)

1. Y. Sato, D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima, (2018), Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model, *Nature Communications*, 9, 985, doi:10.1038/s41467-018-03379-6 (査読有)
 2. Y. Sato, S. Shima, and H. Tomita, (2017), A grid refinement study of trade wind cumuli simulated by a Lagrangian cloud microphysical model: the super-droplet method, *Atmos. Sci. Lett.*, 18, 350-365, doi:10.1002/asl.764 (査読有)
 3. T. Michibata, K. Suzuki, Y. Sato, and T. Takemura (2016), The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals, *Atoms. Chem. Phys.*, 16, 15413-15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016(査読有)
 4. S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita (2015), Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations, *Geosci. Model Dev.*, 8, 3393-3419, doi:10.5194/gmd-8-3393-2015 (査読有)
 5. Y. Sato, S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa, and H. Tomita (2015), Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation?, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2, 23, doi:10.1186/s40645-015-0053-6(査読有)
 6. Y. Sato, Y. Miyamoto, S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, and H. Tomita 2015: Horizontal Distance of Each Cumulus and Cloud Broadening Distance Determine Cloud Cover, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 11, 75-79, doi:10.2151/sola.2015-019 (査読有)
- [学会発表](計 11件)
1. Y. Sato, The second indirect effect estimated by global cloud system resolving simulation (GCRM) and GCM, *Bounding the aerosol effective radiative forcing*, 26, Kreuth, Germany, February, 2018
 2. Y. Sato, D. Goto, T. Michibata, K. Suzuki, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima, Estimation of the second indirect effect by using a global cloud system resolving model, *2017 CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity*, PW 43, Tokyo, Tokyo, Japan, 2017
 3. Y. Sato, H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, T. Michibata, K. Suzuki, T. Nakajima, Suggestions from a global cloud system resolving simulation to global climate model -Transportation of black carbon aerosol to the Arctic-, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, AAS02-06, Chiba, Japan, May, 2017
 4. 佐藤陽祐、五藤大輔、道端拓朗、鈴木健太郎、竹村俊彦、富田浩文、中島映至、全球モデルにおける第2種間接効果の精緻な表現に必要な要素～全球雲解像モデルとGCMの比較から～、*日本気象学会春季大会*, B209, 東京, 5月2017年
 5. 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*, P14, Kanagawa, Japan, Nov.-Dec., 2016
 6. 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*, P14, Kanagawa, Japan, Nov.-Dec., 2016
 7. Y. Sato, H. Miura, H. Yashiro, D. Goto, T. Takemura, H. Tomita, and T. Nakajima, Current-generation global climate models inevitably underestimate pollutant transports to the Arctic, *The 4th International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models*, Kanagawa, Japan, Dec., 2016
 8. Y. Sato and S. Shima, Impacts of grid resolution on the maritime cumulus simulated by the stochastic lagrangian cloud microphysical scheme, *17th International Conference on Clouds and Precipitations*, P2.12, Manchester, UK, Jul., 2016
 9. Y. Sato, K. Suzuki, T. Michibata, H. Yashiro, D. Goto, T. M. Nagao, H. Tomita, and T. Nakajima, Impacts of the autoconversion scheme on the clouds as simulated by a global cloud system-resolving model: regional variability of the impacts, *AGU Fall meeting 2015*, A51M-0253, San Francisco, CA, USA, Dec., 2015
 10. 佐藤陽祐、八代尚、五藤大輔、鈴木健太郎、永尾隆、Autoconversionが暖か

い降水に与える影響の領域間比較、日本気象学会秋季大会、D112、京都、10月2015年

11. 佐藤陽祐、西澤誠也、八代尚、宮本佳明、梶川義幸、吉田龍二、山浦剛、富田浩文、浅い雲の雲被覆率に対する積雲の広がり、積雲間距離の影響、日本地球惑星科学連合2015年連合大会、AAS22-08、千葉、5月2015年

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 陽祐 (SATO, Yousuke)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10633505

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()