

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20686015

研究課題名（和文） 大気乱流中の雲とエアロゾルを通しての太陽光による熱エネルギー伝達メカニズムの解明

研究課題名（英文） Heat transfer mechanism on solar radiation through clouds and aerosols in atmospheric turbulence

研究代表者

黒瀬 良一（KUROSE RYOICHI）

京都大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70371622

研究成果の概要（和文）：気候変化の数値予測精度を向上させるためには、大気乱流中の雲やエアロゾルを通しての太陽からの熱エネルギー伝達のメカニズムを解明し、それを正確にモデル化することが重要である。本研究では、室内実験と数値シミュレーションにより、液滴（雲粒）の蒸発や液滴一周周囲流体間の温度差が液滴に働く抗力や液滴の後流渦特性に及ぼす影響、および雲内の放射特性（反射・吸収・透過特性）に及ぼす乱流の影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to increase the accuracy of numerical predictions of climate change, it is of importance to clarify the mechanism of energy transfer from sun through clouds and aerosols in atmospheric turbulence and to precisely model it. In this study, we clarified the effects of droplet (i.e. cloud droplet) evaporation and temperature difference between droplet and ambient air on the drag force and wake structure behind droplet, and the effects of turbulence on the solar radiation, namely transmittance, reflectance and absorptance in clouds, in terms of lab-scale experiments and numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2009年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
総計	19,500,000	5,850,000	25,350,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：環境流体、乱流、混相流、雲物理

1. 研究開始当初の背景

地球の温暖化予測に関する研究では、地球全体の気候変化を数値的に模擬する大気海洋大循環モデル（GCM）を用い、大気中 CO₂ 濃度の将来の上昇速度（年1%増加など）を仮定したうえで、地球がどのように温暖化する

るかをスーパーコンピュータにより数値予測している。しかし、その予測結果の信頼性は必ずしも高くないのが現状であり、この主な原因として、GCMを構成する種々の要素モデル中に不確定な部分が数多く残されていることが挙げられている。

その不確定要素の中でも最も深刻なものとして、温暖化の進行過程において非常に重要となる地球の熱収支に及ぼす雲やエアロゾルの影響が正確に評価されていないことが指摘されている。大気に入射する太陽光の熱エネルギーは、雲やエアロゾルを通して反射、吸収、透過し、地球表面に達するが、その割合は、雲水や雲氷などの雲粒の相状態や、雲やエアロゾルの層厚さおよび地表からの距離、さらには雲粒やエアロゾル粒子のサイズや分散状態など（衝突合体現象を含む）によっても大きく変化すると考えられる。また、第3次 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) レポートでは、雲とエアロゾルは相互に作用し合い（例えば、エアロゾルの増減によって雲粒径および雲寿命が変化し、降水および放射収支が変化する）、その相互効果に起因する熱収支の見積もり誤差が大気中二酸化炭素による温室効果に匹敵する可能性があると言及されているが、その詳細なメカニズムは全く明らかにされていない。このメカニズムの解明とモデリングに向けて、気象学や地球環境科学の分野では観測実験による検討が進められているが、温度や湿度などの様々な気象条件が時々刻々変化する大気乱流中での計測は極めて困難であるため、計測値には大きなばらつきが生じ、これまで十分な成果は得られていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、精巧な室内実験と高精度の数値シミュレーションにより、大気乱流における太陽からの熱エネルギーの反射・吸収・透過プロセスに及ぼす雲の影響を明らかにすることを目的とした。本研究は以下の2つの要素研究から構成される。

- (1) 単一液滴の内外部流と熱輸送に関する研究
- (2) 大気環境乱流中の雲を模した分散二相乱流の熱輸送に関する研究

3. 研究の方法

(1) 単一液滴の内外部流と熱輸送に関する研究

雲の内部において、雲を構成する乱流中の液滴（雲粒）は蒸発による縮小と、衝突による増大を同時に伴う。そこで、単一液滴を対象とした実験（図1）と数値シミュレーション（図2）により、気流中に存在する液滴の蒸発速度に及ぼすレイノルズ数、空気温度および相対湿度の影響を検討した。また、液滴の蒸発に伴う潜熱が熱エネルギーの気液間収支に及ぼす影響を詳しく調べた。

(2) 大気環境乱流中の雲を模した分散二相乱流の熱輸送に関する研究

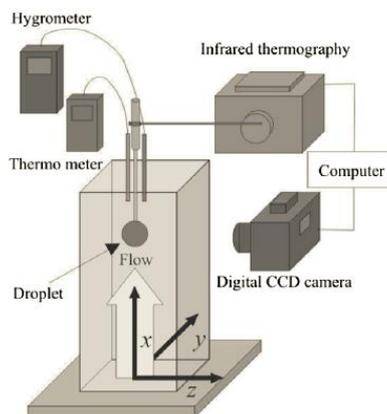


図1 単一液滴の蒸発実験

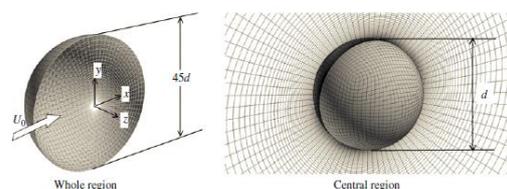


図2 蒸発を伴う単一液滴内外部流の数値シミュレーションのための計算領域

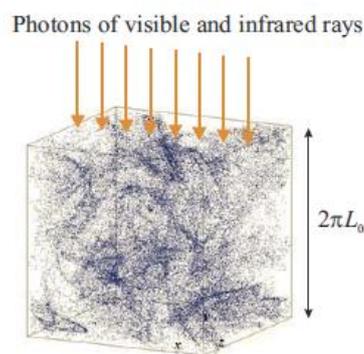


図3 液滴を気相乱流中に分散させた二相乱流の数値シミュレーション

数値シミュレーション（図3）により、多数の液滴を気相乱流中に分散させた二相乱流中における熱エネルギーの反射・吸収・透過メカニズムについて検討を行った。具体的には、太陽からの熱エネルギーの反射・吸収・透過率に及ぼす液滴の濃度、層厚み、および乱流分散挙動の影響を光の波長ごとに詳しく調べた。

4. 研究成果

(1) 単一液滴の内外部流と熱輸送に関する研究

蒸発を伴う単一液滴の内外部流れを解くための三次元直接数値シミュレーション (DNS) コードを開発した。また、本コードを用いた

数値シミュレーションおよび風洞実験を実施することにより以下の知見を得た。

- ① 水分の蒸発量は液滴の後方部よりも前方部の方が多く、この傾向は Reynolds 数が大きいほど顕著になる。これは、液滴の背後に発生する渦に起因する。
- ② 雰囲気湿度は液滴に対する Sherwood 数および Nusselt 数に影響を及ぼさない。
- ③ 液滴球に作用する抗力係数 C_D の値は、液滴球と周囲気体の温度が同じ場合に比べて、液滴球が高温の場合は増加するが、低温の場合は減少する (図 4)。
- ④ 液滴球一周流間の温度差は、剥離点の位置、後流渦の形状、および Strouhal 数にも影響を及ぼす (図 5)。

(2) 大気環境乱流中の雲を模した分散二相乱流の熱輸送に関する研究

太陽光による熱エネルギーの反射・吸収・透過プロセスを模擬可能な三次元直接数値シミュレーション (DNS) コードを開発した。また、本コードを用いた数値シミュレーションを実施することにより以下の知見を得た。

- ① 液滴に吸収されない可視光線の場合、液滴のクラスタリング (図 6) によって雲の透過率や反射率はほとんど変化しないが、透過率のうち液滴により散乱されずに透過する割合は増加する。
- ② 液滴に吸収される赤外線の場合、液滴のクラスタリングによって雲の透過率が増加し、反射率が減少する。
- ③ 乱流 Reynolds 数の増加に伴い、液滴のクラスタリングによる透過率の増加および反射率の減少は抑制される (図 7)。
- ④ 液滴によるマイクロ波の散乱強度は、液滴のクラスタリングによって著しく増加する。
- ⑤ 液滴のクラスタリングの影響を無視した場合、実際の雲のレーザ観測に用いられる反射因子 Z を過小評価する危険性がある (図 8)。

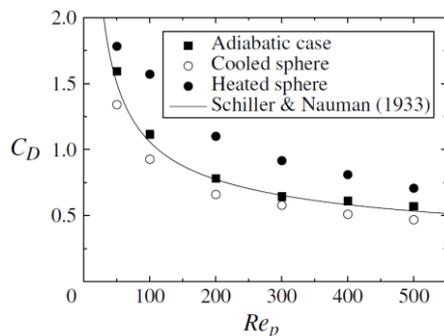


図 4 抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re_p の関係

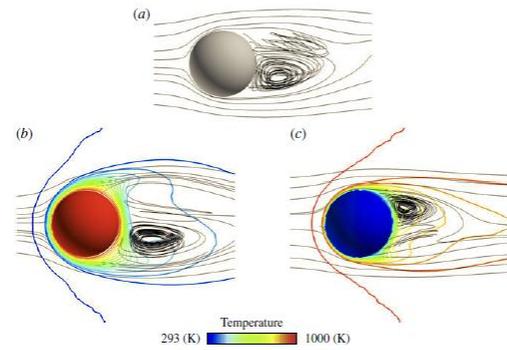


図 5 流線と温度分布：(a) 一様温度；(b) 高温液滴；(c) 低温液滴

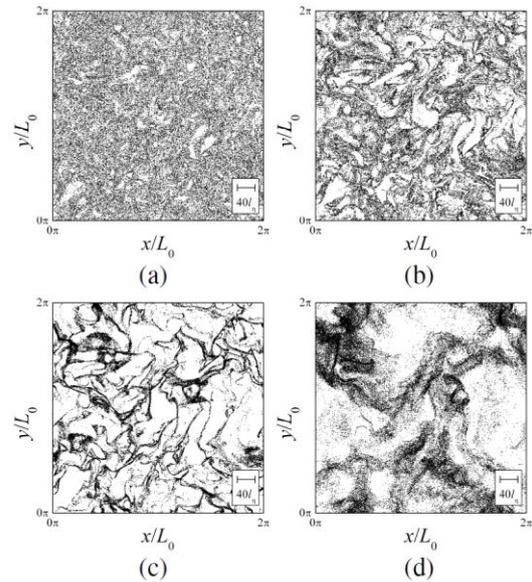


図 6 液滴のクラスタリングに及ぼす Stokes 数 St の影響：(a) $St = 0.05$ ；(b) $St = 0.2$ ；(c) $St = 1.0$ ；(d) $St = 5.0$

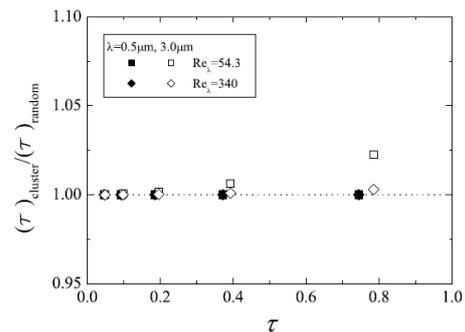


図 7 液滴のクラスタリングによる透過率の増加割合 (縦軸) と雲の光学厚さ τ の関係

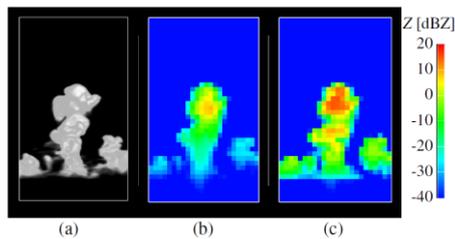


図8 雲の反射因子 Z [dBZ] 分布: (a) 雲の可視化: (b) クラスタリングの影響を無視した場合の Z 分布: (c) クラスタリング影響を考慮した場合の Z 分布

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 4 件)

- ① K. Matsuda, R. Onishi, R. Kurose, S. Komori, “Turbulence effect on cloud radiation”, *Physical Review Letters*, in press. 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.224502
- ② R. Kurose, M. Anami, A. Fujita, S. Komori, “Numerical simulation of flow past a heated/cooled sphere”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 692, pp. 332-346 (2012). 査読有
DOI:10.1017/jfm.2011.517
- ③ A. Fujita, R. Kurose, S. Komori, “Experimental study on effect of relative humidity on heat transfer of an evaporating water droplet in air flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, pp. 244-247 (2010). 査読有
DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.10.004
- ④ R. Kurose, A. Fujita, S. Komori, “Effect of relative humidity on heat transfer across the surface of an evaporating water droplet in air flow”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 624, pp. 57-67 (2009). 査読有
DOI:10.1017/S0022112009005862

[学会発表] (計 6 件)

- ① K. Matsuda, R. Kurose, S. Komori, R. Onishi, “Effect of stokes number on radiative properties of turbulent clustering droplets”, *The Third Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT2011)*, Kyoto University, Kyoto, Japan, 2011. 9. 22-26.
- ② K. Matsuda, R. Onishi, R. Kurose, S. Komori, “Turbulence effect on

radiative transfer in clouds”, *The Seventh International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP7)*, Toronto, Canada, 2011. 7. 28-31.

- ③ 松田景吾, 大西領, 黒瀬良一, 小森悟, 「雲の放射特性に及ぼす乱流の影響」, 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2010. 12. 22.
- ④ K. Matsuda, R. Kurose, S. Komori, “Effect of turbulence on radiative transfer in clouds”, *The Tenth Kyoto-Seoul National-Tsinghua University Thermal Engineering Conference*, Tsinghua University, Beijing, China, 2010. 10. 23.
- ⑤ 穴見真実子, 藤田彰利, 黒瀬良一, 小森悟, 「球周りの流れ特性に及ぼす熱移動の影響」, 日本流体力学会年会 2010, 北海道大学, 2010. 09. 10 .
- ⑥ 松田景吾, 黒瀬良一, 小森悟, 「分散系二相乱流場の放射伝達シミュレーション」, 化学工学会第 75 年会, 鹿児島大学郡元キャンパス, 2010. 3. 18.

[図書] (計 1 件)

- ① 藤田彰利, 黒瀬良一, 小森悟, 「微小単一液滴の蒸発・流動・伝熱挙動」, 微小液滴の物性制御と吐出・衝突・蒸発メカニズム、挙動解析 事例集, 技術情報協会, 281-291, 2009.

[その他]

ホームページ

<http://www.fluid.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/kurose.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒瀬 良一 (KUROSE RYOICHI)
京都大学 大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70371622

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

小森 悟 (KOMORI SATORU)
京都大学 大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60127082
大西 領 (ONISHI RYO)
海洋研究開発機構地球シミュレータセンター・研究員

研究者番号 : 30414361