

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13611

研究課題名（和文）乱流統計理論による大気エアロゾルの粒径分布形成メカニズムの解明

研究課題名（英文）Study on the formation mechanism of the size-distribution spectrum of atmospheric aerosol particles using the statistical theory of turbulence

研究代表者

齋藤 泉 (Saito, Izumi)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：70798602

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）：大気中における微小なエアロゾル粒子の衝突・合体成長によって生じる粒径分布スペクトルの形成メカニズムを、乱流統計理論と直接数値シミュレーションによって調べた。乱流中における微小粒子群の衝突・合体により、傾き-2の粒径分布が形成されることを理論解析により明らかにし、大規模直接数値シミュレーションによって確かめた。微小粒子群の摩擦抵抗による乱流変調が、流れの緩和時間と呼ばれる新たなパラメータにより特徴付けられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気中に存在する微小なエアロゾル粒子は、大気の放射特性や降雨との関係を通じて気象・気候に重要な影響を与える。本研究は、乱流統計理論と大規模数値シミュレーションにより、これら微小粒子の乱流中における衝突・合体によって、粒径分布スペクトルが形成されるメカニズムを明らかにした。この成果は、今後の気象予報のためのモデル開発や精度向上に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We investigated the mechanism for the formation of the size-distribution spectrum of atmospheric aerosol particles using the statistical theory of turbulence and direct numerical simulations. We showed theoretically that the size-distribution spectrum due to collision/coalescence of particles in turbulence shows the slope of -2 and confirmed the prediction by direct numerical simulations. We also found that turbulence modulation by small particles due to drag force is characterized by a novel parameter referred to as the flow relaxation time.

研究分野：流体工学、大気科学

キーワード：乱流理論 衝突 エアロゾル粒子 乱流変調

## 1. 研究開始当初の背景

大気中には、数 nm から数十  $\mu\text{m}$  以上に至るまで、様々な大きさのエアロゾル(微小粒子)が存在している。エアロゾルは大気の放射特性や降雨との関係を通じて気象・気候に影響を与えるため、その振舞を理解することは極めて重要である。

エアロゾルには様々な生成・除去プロセスがあるにも関わらず、その粒径分布(各サイズのエアロゾル数密度分布)はしばしば共通の特徴を持つことが観測により明らかにされている。粒径分布を両対数グラフ上にプロットすると傾きが-4 から-5 の直線に近い分布となる。この特徴は半世紀以上に発見されており、これまで国内外問わず多くの研究によって原因の解明が試みられてきた。しかし、その原因は未解明のままである。解明を阻んできた主な要因は、第1にエアロゾルの成長が衝突・合体を含む本質的に非線形で複雑な物理現象であり理論的扱いが困難なこと、第2にそのような物理現象を数値シミュレーションによって正確に再現することも困難であったことである。

## 2. 研究の目的

大気中で観測されるエアロゾルの粒径分布の形成メカニズムを、乱流統計理論および大規模直接数値シミュレーションを組み合わせることにより解明する。本研究の第1の特徴は、波動乱流の理論体系を、衝突・合体成長する微小なエアロゾル粒子群の運動に応用することで、粒径分布の厳密解の導出や実現メカニズムの解明を行う点にある。第2の特徴は、粒子1つ1つの時間発展を計算する直接数値シミュレーションを駆使し粒子の衝突・合体成長を第一原理に基づいて正確に再現する点にある。これにより、エアロゾルの粒径分布形成メカニズムを理論・シミュレーションの両側面から解明するとともに、気象・気候モデルの精度向上および乱流理論の深化・一般化に貢献することを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) エアロゾルの粒径分布の厳密解の導出および解析

エアロゾル粒子の衝突を駆動するメカニズムは、粒子の大きさによって異なる。およそ  $1\mu\text{m}$  以下ではブラウン運動、 $10\mu\text{m}$  以上では終端速度の差による衝突、その間では乱流による衝突が卓越すると見積もられている。そこでまずは、これら3つの衝突メカニズムの中でそれぞれ1つが卓越する場合について、スモルコフスキ方程式から平衡状態における粒径分布の厳密解を導出する。方程式に波動乱流で用いられるザカロフ変換と呼ばれる変数変換を施すことで、平衡状態における厳密解を導出する。

### (2) 数値シミュレーションによる(1)の理論の検証

先行研究で開発したDNSモデル「雲マイクロ物理シミュレータ」を、エアロゾルのシミュレーション用に改変する。3次元の計算領域内において、衝突・合体成長する微小粒子群のシミュレーションを行う。粒子は質点近似し、粒子位置における流体速度を周囲の流体格子点から内挿によって求め、各粒子の時間発展を運動方程式に基づいて計算する。シミュレーション結果を(1)の厳密解と比較することで、無次元定数などのパラメータ推定や結果の妥当性を明らかにする。また、観測されている粒径分布との比較を行う。

## 4. 研究成果

(1) 大気中で衝突・合体成長するエアロゾル粒子群の最もシンプルなモデルとして、3次元一様等方乱流中で衝突・合体成長する球形の非慣性粒子を考えた。この系における粒子の衝突率は、いわゆるサフマン・ターナーの衝突カーネル(Saffman and Turner, 1956, JFM)で与えられる。あるサイズで粒子が継続的に生成され、それらが衝突・合体によって成長し、より大きな別のサイズで(例えば重力沈降等により)除去されることで、平衡状態が達成されるとした。粒径分布の時間発展を記述するスモルコフスキ方程式に波動乱流の理論を応用することにより、平衡状態における粒径分布が(粒子体積について)マイナス2のべき則を示すことを示し、また無次元係数の解析的表現を得た。このべき則は2次元乱流のエinstロフイーカスケードレンジと同様の特徴を持つことが明らかになった。

(2) 大型計算機を用いた直接数値シミュレーションにより、平衡状態における粒径分布を調べ、(1) で求めた理論予測と一致することを確認した。3次元の周期箱中において一様等方な乱流をランダム外力により駆動し、半径 20~30 ミクロン程度の微小な粒子群を一定の割合で継続的に注入する。粒子群は乱流速度場に移流され、衝突・合体によって成長する。半径が 1000 ミクロンを超えた粒子を領域から除去し、平衡状態の粒径分布を達成した。図 1(a) は、粒径分布の時間発展を示している。衝突・合体成長によって、より大きなサイズの粒子が形成され、粒径分布は時間と共に右へ広がっていく。分布の傾きは (1) の理論から予測される -2 と一致し、また理論予測から求められる粒径分布の無次元係数も、シミュレーション結果と良く一致することを確認した (図 1(b))。これより、波動乱流の理論が、乱流中で衝突・合体する粒子群の粒径分布の予測に有効であることが確かめられた。更に、乱流シミュレーションにおいて報告されている「ボトルネック効果」と類似の現象が、本研究における粒子群の衝突・合体のシミュレーションにおいても現れることが明らかになった。

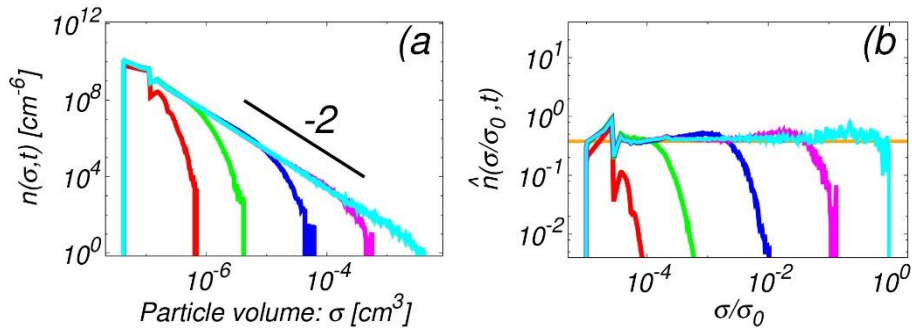


図 1: (a) 粒子の粒径分布 (サイズ分布) の時間発展。横軸は粒子の体積、縦軸は粒子の数密度。黒実線は理論予測による -2 の傾きを表す。(b) の図を規格化し、-2 の傾きが水平になるようにしたもの。橙色実線は理論予測による無次元係数の値。

(3) 粒子群の合体・凝縮成長は周囲の流れの特徴に依存する。例えば、流れの乱れの強度が変化したり、せん断が存在したりすることで、粒子群の衝突頻度は大きく変化する。このため、本研究の中心テーマである、粒子群による合体成長の物理を解明するには、周囲の流れの物理も理解することが不可欠である。ところが、粒子群は周囲の流れから影響を受けるだけでなく、凝縮・蒸発や摩擦抵抗、熱輸送を通じて周囲の流れを変化させる。このような粒子群と流れの相互作用を理解することが、新たな課題として浮かび上がってきた。

以上の経緯により、粒子群による乱流変調のメカニズムについて調査を開始した。摩擦抵抗による慣性粒子群と乱流速度場の相互作用を調べ、摩擦抵抗を通じた乱流変調の新たな時間スケール「流れの緩和時間」(flow relaxation time) を発見した。この時間スケールを用いることで乱流変調を定量的に予測できることを、統計理論による解析と直接数値シミュレーションによって示した。図 2 は、シミュレーション結果の一例を示している。縦軸は微小な慣性粒子群の摩擦抵抗によって乱流運動エネルギーが減衰される度合いを表しており、横軸は流れの緩和時間を用いて定義される無次元パラメータである。シミュレーション結果 (点々) が、理論予測 (橙色実線) と良く一致している。これより、流れの緩和時間が乱流変調を特徴付ける重要なパラメータであることが明らかになった。

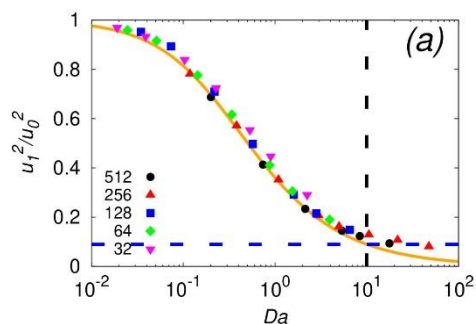


図 2: 摩擦抵抗を通じた微小粒子群による乱流変調。縦軸は粒子群による乱流運動エネルギーの変化、横軸はダムケラ数と呼ばれる、流れの緩和時間に基づいて定義される無次元数。点々は直接数値シミュレーションの結果、橙色実線は理論予測。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe  | 4. 巻<br>26            |
| 2. 論文標題<br>Cloud Turbulence and Droplets  | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Turbulent Cascades II. ERCOFTAC Series 26   | 6. 最初と最後の頁<br>179-187 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/978-3-030-12547-9_19  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe  | 4. 巻<br>97            |
| 2. 論文標題<br>Broadening of cloud droplet size distributions by condensation in turbulence                         | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Meteorological Society of Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>867-891 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2151/jmsj.2019-049   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh  | 4. 巻<br>880           |
| 2. 論文標題<br>A new time scale for turbulence modulation by particles  | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Fluid Mechanics  | 6. 最初と最後の頁<br>R6      |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1017/jfm.2019.775  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |
| 1. 著者名<br>Kamal Kant Chandrakar, Izumi Saito, Fan Yang, Will Cantrell, Toshiyuki Gotoh, Raymond A. Shaw         | 4. 巻<br>146           |
| 2. 論文標題<br>Droplet size distributions in turbulent clouds: experimental evaluation of theoretical distributions | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society   | 6. 最初と最後の頁<br>483-504 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/qj.3692   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する          |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe                     | 4. 巻<br>97          |
| 2. 論文標題<br>Size distribution spectrum of noninertial particles in turbulence | 5. 発行年<br>2018年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review E  | 6. 最初と最後の頁<br>53108 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevE.97.053108                       | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                                       | 国際共著<br>-           |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>渡邊友貴, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸          | 4. 巻<br>37            |
| 2. 論文標題<br>乱流と固体粒子群の相互作用に関する大規模シミュレーション | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>ながれ (注目研究 in CFD31)           | 6. 最初と最後の頁<br>123-128 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし          | 査読の有無<br>無            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Tomoki Kozawa, Kenichiro Sugitani, Dorothy Z. Oehler, Christopher H. House, Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh | 4. 巻<br>17            |
| 2. 論文標題<br>Early Archean planktonic mode of life: Implications from fluid dynamics of lenticular microfossils                        | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Geobiology   | 6. 最初と最後の頁<br>113-126 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1111/gbi.12319  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-             |

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威, 安田達哉                         |
| 2. 発表標題<br>室内雲乱流実験を想定した大規模DNSにおいて得られた雲粒径分布および雲水混合比スペクトル |
| 3. 学会等名<br>日本気象学会2019年度春季大会                             |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh, Tatsuya Yasuda  |
| 2. 発表標題<br>Flow relaxation time: A counterpart of the phase relaxation time in particle-turbulence interaction through Stokes drag |
| 3. 学会等名<br>Pi Chamber Modeling Workshop (Michigan Technological University) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, Yatsuya Yasuda              |
| 2. 発表標題<br>DNS on stochastic condensation and broadening of droplet size distributions |
| 3. 学会等名<br>Pi Chamber Modeling Workshop (Michigan Technological University) (国際学会)     |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>齋藤泉, 渡邊威, 後藤俊幸, 安田達哉         |
| 2. 発表標題<br>乱流と粒子群の相互作用を特徴付ける新しい時間スケール   |
| 3. 学会等名<br>京都大学数理解析研究所研究集会「乱流基礎相似則の再検討」 |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, Tatsuya Yasuda                                 |
| 2. 発表標題<br>Broadening of cloud droplet size distributions and liquid water content spectrum in turbulence |
| 3. 学会等名<br>17th European Turbulence Conference 2019 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>齋藤泉, 安田達哉, 渡邊威, 後藤俊幸      |
| 2. 発表標題<br>雲乱流DNSにおける雲水混合比の揺らぎのスペクトル |
| 3. 学会等名<br>日本流体力学会年会2019             |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh                   |
| 2. 発表標題<br>A new timescale for turbulence modulation by particles           |
| 3. 学会等名<br>72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe   |
| 2. 発表標題<br>Scale dependence of droplet spectra broadening by stochastic condensation in a rising air parcel |
| 3. 学会等名<br>3rd International Workshop on Cloud Turbulence (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Takeshi Watanabe, Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh  |
| 2. 発表標題<br>New insights into turbulence modulation by small particles obtained using point-particle and particle-resolved DNSs |
| 3. 学会等名<br>3rd International Workshop on Cloud Turbulence (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kamal Kant Chandrakar, Izumi Saito, Fan Yang, Will Cantrell, Toshiyuki Gotoh, Raymond Shaw           |
| 2. 発表標題<br>Droplet size distributions in turbulent clouds: experimental evaluation of theoretical distributions |
| 3. 学会等名<br>3rd International Workshop on Cloud Turbulence (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Tatsuya Yasuda, Takeshi Watanabe                                   |
| 2. 発表標題<br>Broadening of droplet size distribution in turbulence in cloud microphysics simulator            |
| 3. 学会等名<br>Workshop on particle-based modeling of cloud microphysics 2018 (RIKEN R-CCS, Kobe, Japan) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, Tatsuya Yasuda  |
| 2. 発表標題<br>Growth of cloud droplets in turbulence in cloud micro-physics simulator                                   |
| 3. 学会等名<br>Physics Colloquium (Department of Physics) (Michigan Technological University, Houghton, Michigan) (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe   |
| 2. 発表標題<br>On the modification of scalar variance spectra due to cloud droplets in cloud microphysics simulator |
| 3. 学会等名<br>12th European Fluid Mechanics Conference (Vienna, Austria) (国際学会)                                    |
| 4. 発表年<br>2018年   |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe                        |
| 2. 発表標題<br>Turbulence-cloud droplet interaction in cloud micro-physics simulator |
| 3. 学会等名<br>15th Conference on Cloud Physics (Vancouver, Canada) (国際学会)           |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Toshiyuki Gotoh, Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Tatsuya Yasuda     |
| 2. 発表標題<br>Cloud Turbulence   |
| 3. 学会等名<br>Perspective on Turbulence Workshop (Texas A&M) (Texas, USA) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Toshiyuki Gotoh, Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Tatsuya Yasuda                                 |
| 2. 発表標題<br>Cloud Turbulence   |
| 3. 学会等名<br>Special seminar on Cloud Physics (Michigan Technological University) (Houghton, Michigan, USA) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Toshiyuki Gotoh, Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Tatsuya Yasuda   |
| 2. 発表標題<br>Interaction between cloud droplets and turbulence  |
| 3. 学会等名<br>71st Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Fluid Dynamics (Atlanta, USA) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威                       |
| 2. 発表標題<br>乱流中で衝突・合体成長する粒子スペクトルの統計理論            |
| 3. 学会等名<br>京都大学数理解析研究所研究集会「乱流と遷移：構造、多重スケール、モデル」 |
| 4. 発表年<br>2018年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威                 |
| 2. 発表標題<br>雲乱流実験において形成される粒径分布に関する統計理論について |
| 3. 学会等名<br>日本気象学会2018春季大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|                           |                       |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|         |         |