

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760152

研究課題名(和文)乱流混合が微小慣性液滴の蒸発過程に与える影響の解明

研究課題名(英文) Numerical study of turbulent mixing of evaporating inertial droplets

研究代表者

大西 領 (Onishi, Ryo)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球情報基盤センター・グループリーダー

研究者番号：30414361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：定常等方性乱流場を直接数値計算により計算し、その中を運動する微小慣性粒子の運動および成長をラグランジアン法によって追跡する数値計算法(Lagrangian Cloud Simulator, LCS)を開発した。LCSのプログラムコードは並列計算向けに最適化されており、共有メモリ型と分散メモリ型のハイブリッド並列計算を効率的に実行できる。このLCSを用いて、粒子ストークス数、過飽和度、レイノルズ数を変化させた時の粒子径分布の時間変化データを得た。これにより、乱流混合が微小慣性液滴の蒸発過程に及ぼす影響を初めて定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed the Lagrangian cloud simulator (LCS), which simulates droplet growth in air turbulence. The LCS adopts the Euler-Lagrangian framework and can provide reference data for cloud microphysical models by tracking the growth of particles individually. The LCS code is highly optimized for massive parallel simulations by means of the shared- and distributed-memory parallelizations. We have performed the LCS for different particle Stokes numbers, different saturation levels and different Reynolds numbers. The results quantify the influence of the turbulent mixing of droplets on the evaporation process for the first time.

研究分野：環境流体工学

キーワード：混相乱流 直接数値計算 微小慣性粒子 粒子径発展

1. 研究開始当初の背景

豪雨による被害は社会の大きな関心事である。2011年には台風12号が大きな被害をもたらした。2008年の夏は突発的な局地的豪雨が首都圏を幾度も襲った。2000年7月の新潟・福島豪雨や2004年9月の東海豪雨、海外では2005年8月末にアメリカ南部を襲ったハリケーン・カトリーナによる被害など、豪雨被害による被害は枚挙に暇がない。甚大な人的・経済的被害を最小限に抑えるために、豪雨の発生を出来るだけ早くかつ正確に予測すること、つまり豪雨予測の高精度化が急務の課題である。

豪雨予測の高精度化のために、これまでも観測と数値シミュレーションの両面から研究が進められてきた。その結果、時間・空間解像度の向上によって、豪雨予測の高精度化が着々と進みつつある。しかし、解像度の向上だけによる予測精度の向上には限界がある。さらなる豪雨予測の高精度化のためには、気象数値シミュレーションで扱われる物理モデルの高精度化が必要不可欠である。その一つとして、雲粒の成長プロセスの高精度化が考えられる。本研究では、液滴の蒸発・凝縮に与える乱流混合の影響に着目する。豪雨をもたらす雲は鉛直方向に発達する対流雲であり、その中では上昇気流によって強い乱流場が形成されている。雲境界では、乱流エントレインメントによって不飽和気塊が雲内に取り込まれる。不飽和気塊と飽和気塊が混ざり合う中で、雲粒は蒸発させられる。現状の雲シミュレーションでは、不飽和気塊と飽和気塊は一瞬にして完全に混合すると仮定されており、雲粒はバルクの不飽和度によって蒸発する。そのため、蒸発速度が過大に見積もられていると考えられる。また、乱流エントレインメントは、対流雲の中で水滴が半径10 μm 程度から50 μm 程度の大きさまで急激に成長する現象の要因の一つであるとも言われている。つまり、乱流が雲粒子の成長に及ぼす影響を正確に予測することが気象シミュレーションの信頼性を向上させるために必要不可欠である。

2. 研究の目的

乱流混合は、工業装置内流れだけでなく環境流れの中にも見られる重要な現象である。例えば、雲境界では不飽和気塊が雲内に取り込まれ、飽和度が不均一になる。この作用によって雲粒の大きさに差が生まれ、衝突成長が促進される結果、速やかな降雨開始をもたらすとの説がある。さらに、近年、わずかながらも慣性を持った液滴が蒸発する場合、乱流混合によって液滴と蒸気の分布にマイクロスケールの偏りが生じる結果、完全混合を仮定した場合よりも蒸発速度が緩慢になることが定性的に明らかにされた。このことは、エネルギースケールだけでなくマイクロスケールの乱流混合も液滴径分布を広げる効果を持つことを示唆している。本研究では上

記乱流混合が液滴の蒸発過程に及ぼす効果を直接数値計算によって解明することを目的とする。

3. 研究の方法

3次元気相乱流場の時間発展をNavier-Stokes方程式を直接計算することによって計算し、微小慣性粒子の個々の運動と成長をラグランジアン法により追跡計算する先進的な数値計算コード(LCS; Lagrangian Cloud Simulator)を開発した。LCSの基礎となったのは既に関係していたPIPIT(Parallel code of Interacting inertial Particles in homogeneous Isotropic Turbulence, Onishi et al. (2013) *J. Comput. Phys.*)と衝突合体コンポーネント(Onishi et al. (2011) *Int. J. Multiphase Flow*)であり、それらを結合するとともに、新たにスカラー(水蒸気と温度)の計算コンポーネントを実装した。また、大規模計算を見据えて、並列計算コンポーネントの検証と最適化も行った。これまで共有メモリ並列化には自動並列化のみを用いていたが、openMPも併用するように修正した。すべてのコンポーネントをMPIライブラリによる分散メモリ並列にも対応させ、超並列計算も可能なプログラムコードを開発できた。

このLCSの信頼性を確認するために、ある一つの粒子から一定の速度で水蒸気が出されるという理想的な系の計算を行った。この単純な径に対してはフーリエ解析による理論解が存在する。水蒸気の濃度変動強度の時間変化に関して、理論解と計算結果を比較し、それらが一致することを確認した。また、多数の粒子が乱流中を運動しながら蒸発するという系に関して検証実験を複数行い、乱流エネルギーや濃度変動強度の収支が正確に評価されることも確認した。並列プログラム実行の検証も行った。具体的には96³流体格子を用いて乱流場を形成させ、その中に約7万個の粒子を混入させるケースを対象として、プロセス数を変化させた。その結果、計算実行時間がプロセス数に反比例して減少すること、統計結果が同一であることを確認した。

このLCSの信頼性を理想的な系で確認した後、乱流混合が微小慣性液滴の蒸発過程に与える影響を調べた。

4. 研究成果

開発したLCS(Lagrangian Cloud Simulator)の支配方程式は下記の連続の式(式(1))、Navier-Stokes方程式(式(2))、慣性粒子の運動方程式(式(3))、温度の輸送拡散方程式(式(4))、水蒸気の輸送拡散方程式(式(5))である。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \beta(T - T_0) \mathbf{g} + \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{f_{NL}}{\tau_p} (\mathbf{V} - (\mathbf{U}(\mathbf{x}_p, t) + \mathbf{u}(\mathbf{x}_p, t))) + \mathbf{F}_{impulse} + \mathbf{g} \quad (3)$$

$$\frac{\partial L_v}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) L_v = \nu_v \nabla^2 L_v + S_p(\mathbf{x}_p, t) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) T = \nu_T \nabla^2 T + H_p(\mathbf{x}_p, t) \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{U} は流体速度ベクトル、 \mathbf{V} は粒子速度ベクトル、 L_v は水蒸気量、 T は温度を表し、 \mathbf{x}_p は粒子位置ベクトルを表す。

式(2)中の ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数、 $\mathbf{g} = (-g, 0, 0)^T$ は重力ベクトル、 β は体膨張係数、 \mathbf{F} は外力項を表す。定常等方性乱流場を得るための外力としては RCF

(Reduced-Communication Forcing, Onishi et al. (2011) *J. Comput. Phys.*) を用いて、高い並列性能を確保した。

式(3)中の τ_p は粒子の緩和時間、 \mathbf{u} は近傍粒子による速度かく乱ベクトル(粒子間の hydrodynamic 相互作用を表す)、 $\mathbf{F}_{impulse}$ は衝突合体力を表し、 f_{NL} は次式で表される非線形抗力係数である。

$$f_{NL} = (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (6)$$

ここで、 Re_p は粒子レイノルズ数である。 \mathbf{u} の計算には既に開発した BiSM (Binary-based superposition method; Onishi et al. (2013) *J. Comput. Phys.*) を用いた。この BiSM を用いることにより、十分な精度を確保しつつも、粒子と流体の相対速度が誘起する粒子周り流れを介した粒子間の相互作用

(hydrodynamic interaction) の計算にかかる計算コストを大幅に抑えることに成功した。なお、従来の直接数値計算ではこの相互作用を無視してしまうがために、実際の雲現象への適用が疑問視されてきた。本研究では、この点を克服することに成功した。

式(4)および(5)中の ν_v と ν_T はそれぞれ水蒸気と温度の拡散係数、 S_p と H_p はそれぞれ粒子の蒸発・凝縮に伴う潜熱放出、顕熱放出を表す。

開発した LCS の weak scaling を調べた結果を表 1 に示す。この表から、計算格子数を増やしてもそれに比例して計算プロセッサ数を増やせば、計算に要する時間を一定に保つことができることがわかる。つまり、開発した LCS は高い並列性能を持つ。

Number of grids	Number of nodes used	Elapsed time for 1step
2,000 ³	1,000	0.651 s
4,000 ³	8,000	0.650 s
6,000 ³	27,000	0.670 s

表 1 : 計算格子数と 1 時間ステップに要する計算時間

乱流混合が微小慣性液滴の蒸発過程に与える影響を解明するために、開発した LCS を用いて、微小液滴が蒸発する過程を再現した。乱流場や初期液滴径、過飽和度などを様々に変化させただけでなく、図 1 に示すように初期の混合状態も変化させた。具体的には、雲内部を想定し、粒子数濃度と湿度が一様な場合(図 1 左)と雲境界部を想定し、粒子数濃度が濃い半領域で湿度が高い場合(図 1 右)を想定した。両ケースで、粒子の総数、領域平均水蒸気濃度は同じに設定した。なお、本研究ではスカラーとしては水蒸気だけを考慮し、温度は考慮しない。このため蒸発による温度変化を介しての流体場の変化は起こらない。

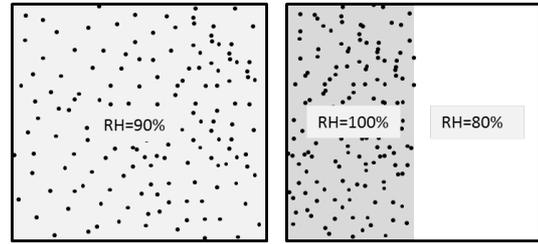


図 1 : 予混合ケース(左)と未混合ケース(右)の概略図

図 2 にエネルギー散逸率 ε が $400 [\text{cm}^2/\text{s}^3]$ の場合の、飽和度の時間発展を示す。本ケースでは初期の粒子直径を $40 \mu\text{m}$ に設定した。このとき、粒子ストークス数 St は 0.22 であった。初期混合状態によって有意な差異が見られることから、初期の混合状態が蒸発速度に大きな影響を及ぼす。特にこの場合、大スケールの混合状態が大きな影響を持つことが明らかになった。

図 3 に蒸発開始から 100 秒後の液滴径分布を示す。初期には分散ゼロ(単一径)であったにもかかわらず、全てのケースで液滴径分布に分散が見られる。特に未混合ケースでは、径分布の分散が大きい。一方、予混合ケースの中で、静止流体の場合と乱流の場合とでは、径分の分散に大きな差異は見られない。つまり、本計算条件の場合、径分布の分散に対して、大スケールの乱流混合は大きな影響を与えた一方、小スケールの乱流混合の影響は小さかった。

図 4 に水蒸気濃度の変動強度の時間変化を示す。初期に未混合で乱流状態の場合、初期に予混合で乱流状態の場合、初期に予混合で静止状態の場合、の順に濃度変動強度が大きい。乱流状態の場合に、予混合ケースでも未混

合ケースでも 20 秒程度経過後に結果が一致する。これは、蒸発潜熱による乱流場の変調を考慮しないため、初期の混合状態の情報が失われる程度に十分時間が経過すると、液滴蒸発による濃度変動生成と乱流拡散による散逸のバランスから求まる濃度変動強度に収束するからである。さらに時間が経過し、(過飽和に達するか、液滴が全て消滅するなど)液滴蒸発が終了すれば、濃度変動強度はやがてゼロになる。乱流状態の未混合ケース(赤線)と予混合ケース(黒線)の差異が大スケール乱流混合の影響を表し、予混合ケースの中でも乱流状態(黒線)と静止流体(青線)の差異が小スケール乱流混合の影響を表す。縦軸が対数を表していることを考慮すると、本計算設定の場合、水蒸気の濃度変動に及ぼす小スケール乱流混合の影響は大スケール乱流混合の影響に比べて無視できるほど小さいことがわかる。

以上のように、開発した LCS を用いて乱流混合が微小慣性液滴の蒸発過程に与える影響を調べた。その結果、乱流混合が蒸発速度を増大させること、特に大スケール乱流混合が大きな影響を持つことを、粒子周り流れを介した粒子間相互作用までを詳細に考慮した上で、世界で初めて明らかにすることができた。

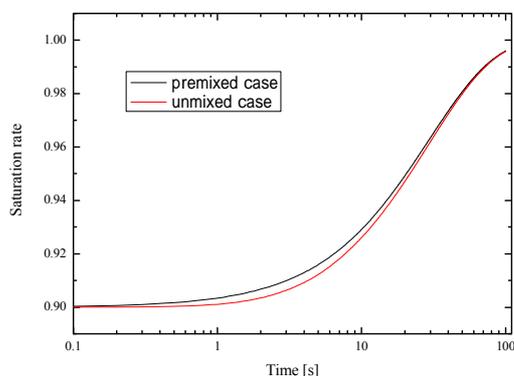


図 2 : 飽和度の時間変化

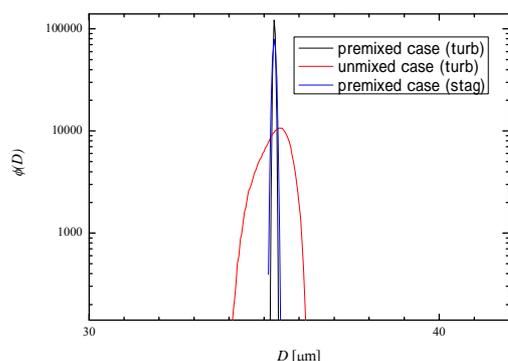


図 3 : 蒸発開始 100s 後の粒子径分布。初期には全ての液滴は直径 40 μm であった。

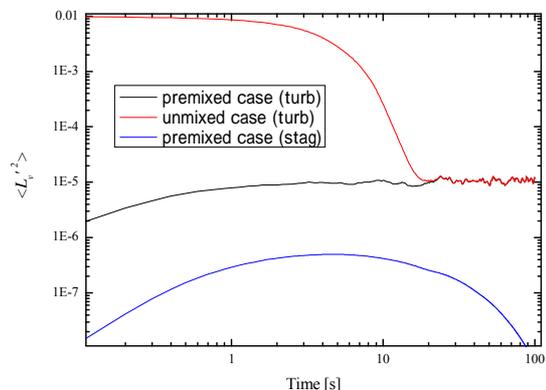


図 4 : 水蒸気の濃度変動強度の時間変化

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 2 件)

Ryo Onishi, Keigo Matsuda and Keiko Takahashi, Lagrangian Tracking Simulation of Droplet Growth in Turbulence - Turbulence enhancement of autoconversion rate, Journal of the Atmospheric Sciences, in print, 2015

大西 領, 高橋桂子、等方性乱流中における粒子間衝突に対する直接数値計算, 微粒化, 23, pp.2-10, 2014

[学会発表](計 12 件)

Ryo Onishi, Droplet growth in clouds, International Symposium on Environmental Multiphase Flow (招待講演), 2015 年 5 月 29 日~30 日, 华中科技大学, 武漢, 中国

Ryo Onishi, Keigo Matsuda and Keiko Takahashi, Lagrangian Tracking Simulation of Droplet Collision Growth in Cloud Turbulence, International Workshop on Cloud Turbulence (招待講演), 2015 年 3 月 4 日~6 日, 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市

大西 領, 微小慣性粒子の乱流衝突現象に対する数値研究, 日本機械学会中部支部「流体サロン」(招待講演), 2015 年 1 月 16 日, 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市

Ryo Onishi and J. C. Vassilicos, Collision statistics of inertial particles in two-dimensional homogeneous isotropic turbulence with an inverse cascade, 67th Annual

meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2014年11月23日~25日, San Francisco, USA

Ryo Onishi, Keiko Takahashi and J. C. Vassilicos, Direct numerical simulation of hydrodynamically-interacting cloud droplets, 1st international conference on computational engineering and science for safety and environmental problems, 2014年4月14日~16日, 仙台国際会議場, 宮城県仙台市

Ryo Onishi, Bogdan Rosa, Lain-Ping Wang, Orlando Ayala, Keiko Takahashi, Efficient numerical simulation for full-range hydrodynamic interactions among cloud droplets in isotropic turbulence, International Conference on Multiphase Flow, 2013年5月29日, International Conference Center, Jeju, Korea

Ryo Onishi, High-Performance Computing of Interacting Droplets in Homogeneous Isotropic Turbulence, International Workshop on "Of Rainfall and Marine Snow" (招待講演), 2014年3月17日, Lorentz center, Leiden, the Netherlands

大西 領, 微小管性粒子の乱流衝突に対する大規模直接数値計算, 第46回計算粉体力学研究会(招待講演), 2013年12月2日, 同志社大学, 京都府京都市

Ryo Onishi, Lagrangian Cloud Simulator for droplet growth in cloud turbulence, International Workshop on Numerical Simulations of Particle/Droplet/Bubble-laden multiphase flows, 2013年5月24日, JAMSTEC 東京事務所, 東京都千代田区

Ryo Onishi, Keiko Takahashi, and J.C. Vassilicos, An efficient parallel simulation of interacting inertial particles in homogeneous isotropic turbulence, Particles in Turbulence, 2012年05月14日~2012年05月16日, Lorentz center, Leiden, the Netherlands

Ryo Onishi, J.C. Vassilicos, and Keiko Takahashi, Interactions between large-scale flows and small-scale droplet motions in turbulent clouds, International Conference on Frontiers in Computational Physics(招待講演), 2012年12月16日~2012年12月20日, Boulder, USA

Ryo Onishi, J.C. Vassilicos, and Keiko Takahashi, Direct numerical simulation of interacting inertial

particles in homogeneous isotropic turbulence, 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT12), 2012年09月24日~2012年09月27日, Palermo, Italy

〔その他〕

ホームページ等

混走乱流データベース公開ホームページ:
http://www.jamstec.go.jp/ceist/esrg/onishi/wakate_B24760152.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大西 領 (Onishi, Ryo)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球情報
基盤センター・グループリーダー

研究者番号: 30414361