

## 地球科学分野における複雑乱流プロセスの数値研究

大西 領 (海洋研究開発機構 地球情報基盤センター)

### 1. 課題概要

海洋地球科学シミュレーションの高解像度化に伴いミクروسケールの複雑乱流プロセスの重要性が増しており、その解明と詳細なモデリングは予測シミュレーションの信頼性向上に直結する。例えば、乱流中で慣性粒子がクラスタリングを形成する現象や、乱流によって衝突頻度が増大される現象は、レーダー観測や雲微物理モデルにとって重要であることがわかっている。また、都市街区のような複雑な土地被覆に対する高解像度計算では非平衡乱流現象が重要となる可能性が指摘されている。そこで、本研究課題では、大規模直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) を用いて、混相乱流現象や非平衡乱流現象を解明し、新たなパラメタリゼーションを開発することを目的とする。さらに、開発したパラメタリゼーションを実際に、当機構が開発を進めているマルチスケール大気・海洋結合モデル MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment; メッセージと呼ぶ) に実装し、そのモデルの有効性を検証することも目的とする。

本年度は、新しい地球シミュレータを用いた大規模混相乱流 DNS によって、乱流中で慣性粒子がクラスタリングを形成する現象がレーダー観測に与える影響を明らかにすること、雲乱流が雲粒子の成長を促進する効果を考慮した新たな雲微物理モデルを構築することを目的とした。

### 2. 乱流クラスタリングとレーダー反射因子に及ぼす重力の影響

乱流中での慣性粒子の偏分布 (乱流クラスタリング) を高精度に再現可能な混相乱流直接数値計算 (direct numerical simulation, DNS) により、雲粒の重力沈降が乱流クラスタリングとレーダー反射因子に及ぼす影響について、解析を行った。DNS により得られた乱流クラスタリングデータを可視化することにより、

重力沈降速度とコルモゴロフ速度の比 ( $S_v$ ) が大きい場合には、乱流クラスタリングが鉛直方向に引き伸ばされた構造を持つことを明らかにした (図 1)。さらに、粒子の緩和時間とコルモゴロフ時間の比 ( $St$ ) が 1 の場合について、乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増加量を調べた。その結果、粒子径が大きく  $S_v$  が大きいほど、重力沈降がレーダー反射因子の増加に及ぼす影響が顕著になる様子を定量的に明らかにした (図 2)。これらの成果は、レーダー観測の精度向上に資する。

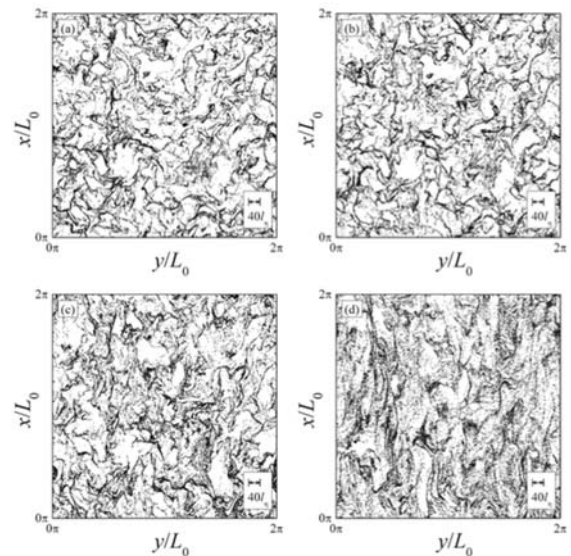


図 1 :  $Re_\lambda=204$  の乱流中における  $St=1$  の粒子の  $x$ - $y$  断面分布 ( $0 < z < 4l_\eta$  の範囲にある粒子)。(a) $S_v=0$ , (b) $S_v=2.68$ , (c) $S_v=6.79$  and (d) $S_v=19.3$ .

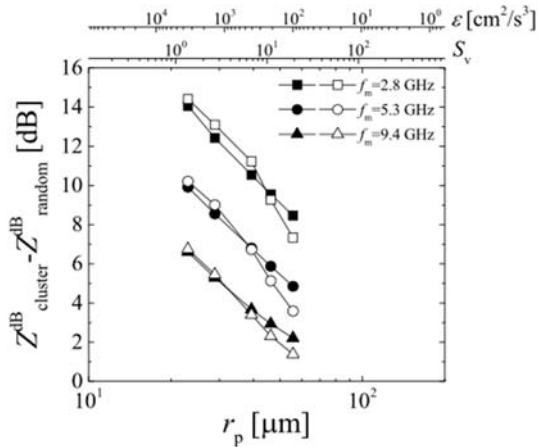


図 2 : 粒子体積率を  $10^{-6}$  と想定した場合の、乱流クラスタリングによるレーダ反射因子の増加量。

### 3. 雲乱流の効果を考慮した新たな雲微物理モデルの開発

大スケール強制法により定常 3 次元等方性乱流場を再現した上で、その中を運動する慣性粒子の運動をラグランジアン追跡法により計算し、粒子の乱流衝突統計量を取得した。本年度、新地球シミュレータシステムを用いて、 $8,192^3$  の流体格子と 82 億粒子を用いた大規模計算を実施した。この計算は新地球シミュレータクラスのスパコンでないと実施することはできない。

得られた乱流衝突統計量を用いて、近接粒子分布関数（クラスタリング効果）のレイノルズ数依存性を調べるとともに、そのモデル化を行った（図 3）。さらに、雲粒子から雨粒子への成長速度を表すバルク autoconversion 項に与える乱流の影響をモデル化し、そのモデルの検証を行った（図 4）。本研究で開発したモデルによる予測結果は DNS による結果とよく一致する。一方、現実の雲のような高レイノルズ数域（例えば、 $Re_\lambda=10,000$ ）では、既存モデル（Ayala モデル）と本モデルでは倍以上も異なることが明らかになった。これは、さらなる高レイノルズ数データを用いた検証が必要なことを示唆している。

格子数	粒子数	計算機	参考
$512^3$	$1.7 \times 10^7$	ES2	Onishi et al. (2013)
$1,000^3$	$1.3 \times 10^8$	ES2	Onishi et al. (2013)
$2,000^3$	$1.0 \times 10^9$	ES2	Onishi et al. (2013)

$4,000^3$	$1.6 \times 10^9$	K	Onishi&Seifert (2016) submitted
$6,000^3$	$5.4 \times 10^9$	K	Onishi & Seifert (2016) submitted
$8,192^3$	$8.2 \times 10^9$	ES	現行版 ES

表 1 : 計算格子数と計算粒子数の一覧

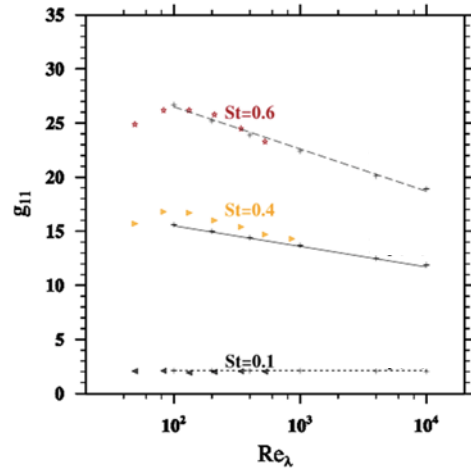


図 3 :  $St < 1$  の慣性粒子同士の近接粒子分布関数のレイノルズ数依存性。線は間欠性理論 (Onishi & Vassilicos 2014) に基づく予測値を表す。

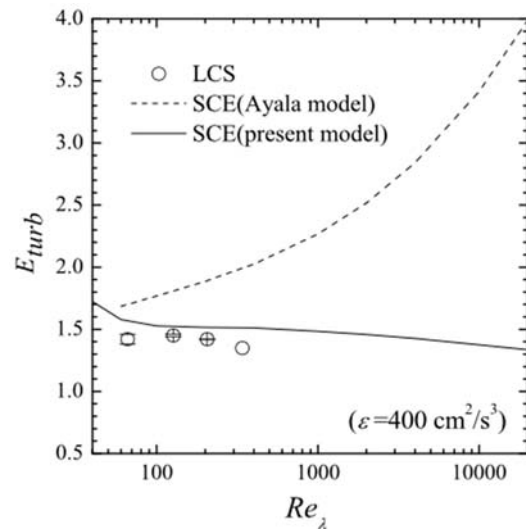


図 4 : 雲乱流による autoconversion 項の増大率のレイノルズ数依存性。プロットは粒子成長をラグランジアン追跡法により直接計算した結果。本研究で開発したモデル結果(実線)がプロットとよく一致する。