

地球科学分野における複雑乱流プロセスの数値研究

課題責任者

松田 景吾 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター

著者

松田 景吾^{*1}, 大西 領^{*1}, Dmitry Kolomenskiy^{*1}, 後藤 浩二^{*2}, 竹内 伸太郎^{*3},
梶島 岳夫^{*3}, 渡邊 智昭^{*4}, 長田 孝二^{*4}, 伊藤 靖仁^{*4}, 高垣 直尚^{*5}

^{*1} 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター, ^{*2} 日本電気株式会社, ^{*3} 大阪大学, ^{*4} 名古屋大学, ^{*5} 兵庫県立大学

様々な複雑乱流プロセスを解明することは、地球科学シミュレーションの信頼性向上につながるのみならず、ミクロスケールの海洋・大気現象の理解にもつながる極めて重要な研究課題である。そこで、本課題では、物理過程を精緻に取り扱った大規模数値計算を実施することにより各種の複雑乱流プロセスの解明とモデル化を行う。本年度は、雲乱流プロセスについて、ラグランジアン雲シミュレータに大粒子解像計算手法を実装して乱流衝突統計量の解析を行い、質点近似手法では再現されないクラスタリングを再現した。また、乱流中での雲粒のクラスタリングが雲のレーダー反射強度に及ぼす影響について、重力沈降の影響を考慮した改良モデルを提案し、雲シミュレーションデータに適用して定量的影響を解明した。風波乱流プロセスについては、風波乱流場の発達過程でのスカラ輸送に及ぼす表面張力の影響を明らかにした。乱流混合・拡散プロセスについては、乱流中のスカラ散逸率の計算粒子群モデルの開発、および噴流場の乱流拡散に及ぼす初期乱れの影響の解明を行った。

キーワード：乱流, マルチスケールシミュレーション, 混相流, スカラ輸送, SGS モデル

1. 緒言

様々な複雑乱流プロセスを解明することは、地球科学シミュレーションの信頼性向上につながるのみならず、ミクロスケールの海洋・大気現象の理解にもつながる極めて重要な研究課題である。例えば、雲乱流プロセス、海洋表面の風波や波しぶきの形成プロセス、栄養塩・化学汚染物質の混合・反応プロセス等においては、乱流の影響を無視することはできない。これらの乱流プロセスについては、高レイノルズ数乱流計算に要する計算コストや混合・反応計算の困難さ等のために未解明の点が多く残されている。そのため、本課題では、乱流モデルを使わずにナビエ・ストークス方程式を計算する直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) 法による大規模シミュレーションを実施することにより、混相乱流現象や乱流混合・反応現象のメカニズムを解明し、新たなパラメタリゼーションの開発に資することを目的としている。本年度は、大粒子を解像したラグランジアン雲シミュレータによる乱流衝突統計量の解析、乱流中における雲粒のクラスタリングが雲のレーダー反射強度に及ぼす影響の解明、風波乱流場の発達および波しぶきの形成過程の解析、乱流中のスカラ散逸率の計算粒子群モデルの開発、および噴流場の乱流拡散に及ぼす初期乱れの影響の解明に取り組んだ。

2. 大粒子を解像した直接ラグランジアン雲モデルによる乱流衝突統計量

降水過程において、大気中の水蒸気の凝結によって発生した雲粒は、雲粒同士または雲粒と雨粒の衝突併合によって雨粒へと成長する。その際、衝突併合が乱流によ

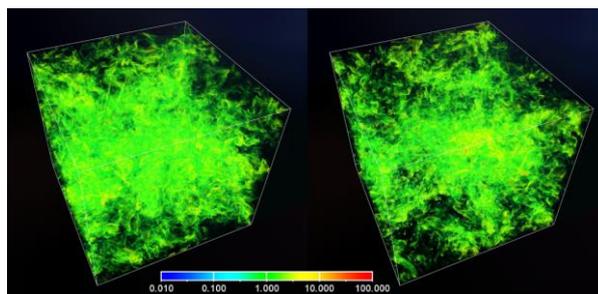


図 1 粒子計算手法の違いが乱流のエネルギー散逸に及ぼす影響 (512³ 格子, 4096 粒子); (左図) PP-BiSM (1-way), (右図) ISM. カラーはエネルギー散逸率 (log スケール) を表す. 可視化には VDVGE を用いた.

って促進されることが知られている。本研究ではこれまでに雲粒の乱流衝突成長プロセスを明らかにするために、乱流の DNS に基づく Lagrangian Cloud Simulator (LCS) の開発を行ってきた。従来の LCS では、雨粒 (大球形粒子, $D_p > \Delta$ and/or $Re_p > 1$) に対して、質点近似を用いて、粒子間の流体力学的相互作用力 (hydrodynamic interactions, HI) を考慮した計算を行う。しかし、落下する雨粒の周囲に誘起されるミクロ流れが周囲の粒子の成長に与える影響が考慮されていなかった。そこで、埋め込み境界法の一つである Immersed Solid Method (ISM) [1, 2, 3] を LCS に実装し、大規模並列計算により大球形粒子の乱流衝突統計量の取得を行った。512³ 格子の乱流場に 4096 個の粒子を投入した計算の結果、質点近似に基づき HI を考慮した手法 (PP-BiSM) に比べて、ISM を用いた計算ではエネルギー散逸が活発になった (図 1)。また、PP-BiSM では再現されない粒子クラス

タリングを、ISM を用いて再現することができた [4]. このLCS-ISMでは、さらに大きな格子点数・粒子数(2048³格子, 51.2万粒子)の大規模計算を実行可能であることを確認した.

3. 乱流中における雲粒のクラスタリングが雲のレーダー反射強度に及ぼす影響

雲粒などの慣性粒子は乱流渦からはじき出される効果によって、乱流クラスタリングと呼ばれる非一様な空間分布を示す. 雲粒が乱流クラスタリングによって非一様に分布する場合には、マイクロ波の干渉作用によってレーダー反射因子が増加する可能性が指摘されている. 雲粒の乱流クラスタリングが雲のレーダー反射因子に及ぼす影響を定量的に推定するために、LCSを用いて乱流のDNSを実施することにより、様々な粒径が混在する場合のクラスタリング(数密度変動)強度スペクトルのモデル開発を行ってきた. 今年度は、雲のレーダー反射因子の推定モデルにおいて、重力沈降による雲粒の乱流クラスタリング構造の変化が2粒径間のクラスタリングのマルチスケール相関特性に及ぼす影響を考慮した改良モデルを提案した. また、DNSの結果との比較により改良モデルが乱流クラスタリング特性を精度よく推定できることを明らかにした(図2).

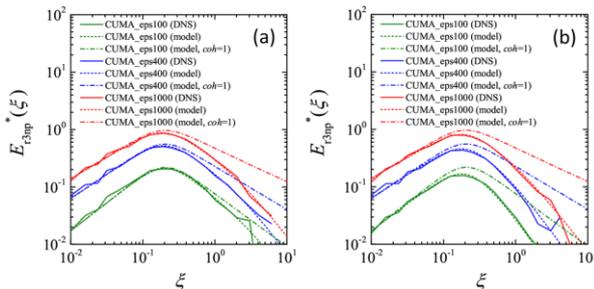


図2 積雲中の粒径分布をもつ雲粒の乱流クラスタリングによる数密度変動の重み付きスペクトル; (a) 重力沈降なし, (b) 重力沈降あり.

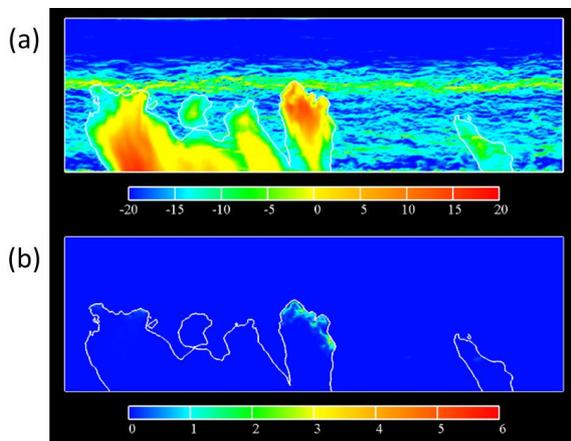


図3 改良モデルを用いて推定した (a) レーダー反射因子 (dBZ), および (b) 乱流クラスタリングによるレーダー反射因子の増加量 (dB).

さらに、マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG による高解像度雲シミュレーションのデータに対して改良モデルを適用し、重力沈降、積雲外部の空気の乱流エントレインメント、および大気屈折率変動の影響を考慮したレーダー反射因子の推定を行い、乱流クラスタリングが及ぼす影響を定量的に明らかにした(図3) [5].

4. 風波乱流場における風波の発達および波しぶき形成機構

海洋上を吹く風により海洋表面に風波が発生する. この風波界面近傍の乱流場や波頭から飛散する波しぶきが、大気海洋間での熱や水蒸気の交換を促進する可能性が議論されている. 本研究では、気液二相流のDNSにより、風波気液界面近傍の乱流場や波しぶきの形成過程を明らかにすることを目的とする. 今年度は、風波気液界面を通しての運動量および物質輸送量に及ぼす表面張力の影響について解析を行った. 主流方向に十分に長い計算領域を設定し、重力表面張力波の状態までの風波の発達のDNSを実施した. その結果、表面張力を水の半分にするによって、波高は高くなる一方、気側から液側へのスカラ輸送量は、表面張力の低下により減少することが明らかになった(図4). これは、風波の発達過程において、表面張力の低下により液側の乱流輸送が弱まることを示している [6].

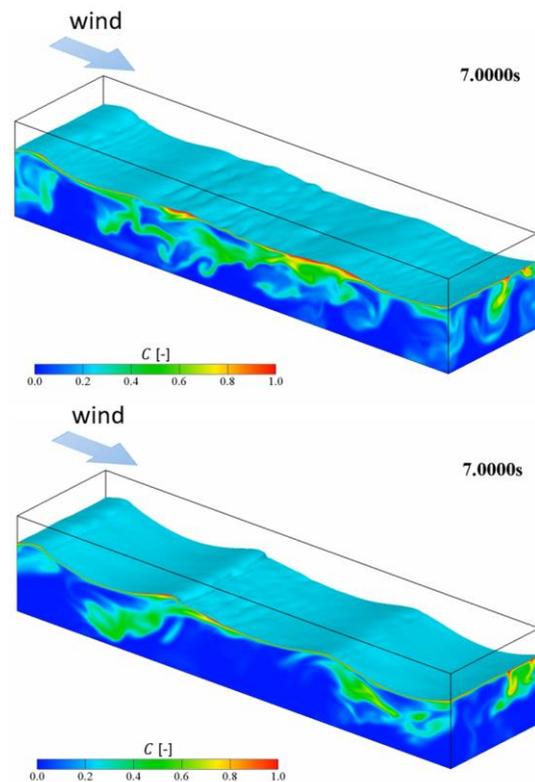


図4 DNSによる風波気液界面の様子; (上図) 水の表面張力の場合, (下図) 水の半分の表面張力の場合. 表面張力の違いが波高およびスカラ輸送量に影響を及ぼす.

5. 乱流中のスカラ散逸率の計算粒子群モデルの開発

高レイノルズ数乱流中におけるスカラの乱流混合・拡散現象をラージ・エディ・シミュレーション (LES) により精度よく予測するため、乱流中のスカラ散逸率に対して粒子群を用いたモデルの開発に取り組んだ [7]。まず、スカラ拡散を伴う高レイノルズ数二次元噴流の DNS を行い、乱流中のスカラ拡散現象に対する様々なモデルの検証が可能な高レイノルズ数の二次元噴流の DNS データベースを構築した (図 5)。この DNS データベースを基に、提案した粒子群モデルの有効性を検証し、平均スカラ散逸率について DNS と粒子群モデルの結果がよく一致することを *a priori* な試験により確かめた (図 6a)。さらに、LES と粒子法を組み合わせた計算手法に提案した粒子群モデルを適用することを試みた。その結果、この計算手法により、噴流中のスカラ統計量を低計算コストで精度良く予測できることがわかった (図 6b)。本結果は、スカラ散逸率に対する粒子群モデルが高レイノルズ数乱流中のスカラ散逸率の高精度な予測に有用であること、および、粒子群モデルを LES と粒子法の中で用いて、乱流中のスカラ拡散を実際に低計算コストで予測できることを示している。提案した計算手法は化学反応を伴う流れに対しても容易に適用可能である。

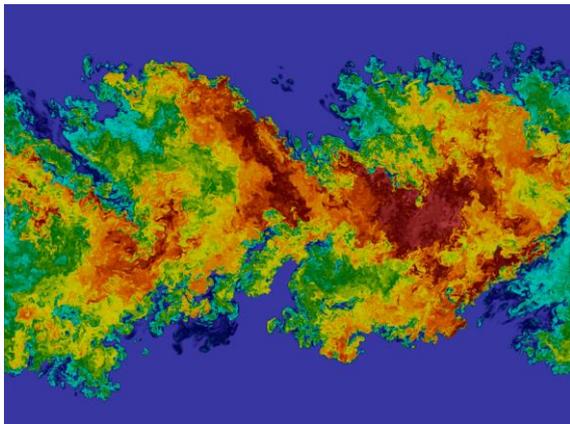


図 5 高レイノルズ数二次元噴流中のスカラ拡散場。せん断領域における乱流レイノルズ数=530。

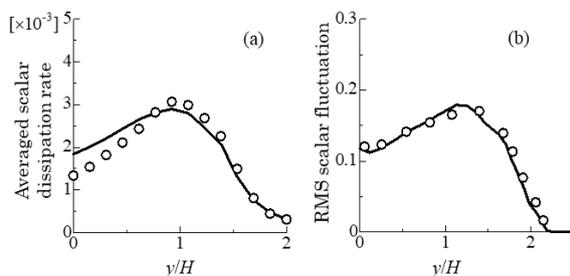


図 6 統計量の噴流広がり方向分布。(a) 平均スカラ散逸率 (線: 直接数値計算, ○: 粒子群モデル), (b) スカラ変動 RMS 値 (線: 直接数値計算, ○: 粒子群モデルを用いた LES-粒子法)。横軸は噴流中心からの距離 y を噴流出口幅 H で無次元化したもの。

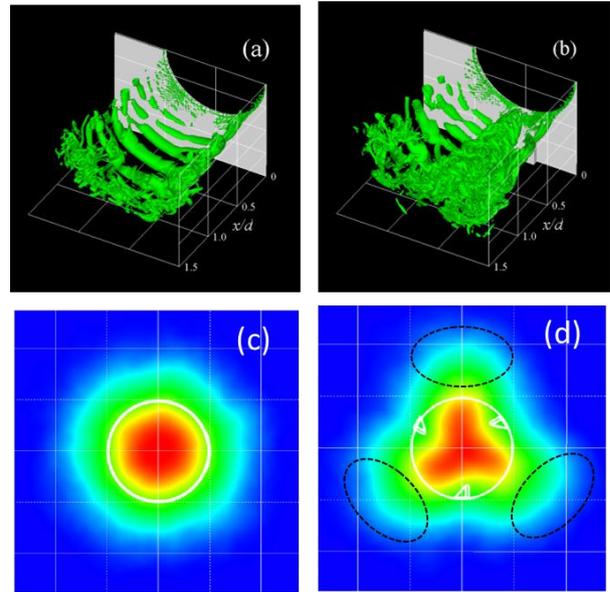


図 7 流れ場の可視化 ((a) 縦渦を伴わない場合, (b) 縦渦を伴う場合) および平均断面形状 ((c) 縦渦を伴わない場合, (d) 縦渦が 3 か所から発生した場合)。

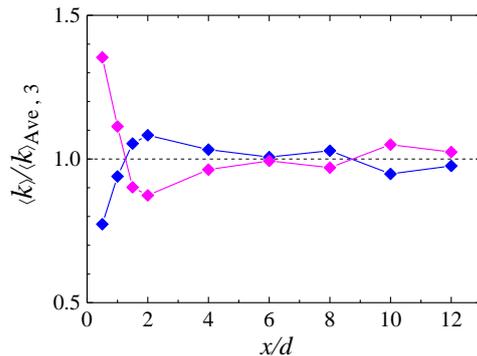


図 8 縦渦が 3 か所から発生した場合における乱流拡散係数の主流方向分布。青: 縦渦により平均的な拡散が抑制された領域 (図 7(d) 中黒線で囲まれた領域), ピンク: 縦渦により平均的な拡散が促進された領域 (それ以外)。

6. 噴流場の乱流拡散に及ぼす初期乱れの影響

海底のチムニーや工業煙突に見られるような軸対称噴流場での乱流拡散現象は古くから研究されてきたが、その軸対称性が崩れた場合にどのような乱流場となるかについては十分に明らかにされていない。そこで、初期乱れが噴流の運動量やスカラ輸送に及ぼす影響について DNS により解析を行った。ここでは特に初期乱れとして縦渦を伴う場合に、縦渦に起因する噴流形状の変形およびそれに伴う乱流構造の変化が、乱流拡散に及ぼす影響を調べた。その結果、縦渦の生成に伴って形成された小スケールの乱れは上流域でのみ作用する一方、縦渦に由来する大スケールの渦は下流域まで残り、噴流形状の変形に寄与することが明らかになった (図 7)。縦渦により拡散が促進された領域と抑制された領域では乱

流拡散係数の大小関係が主流方向位置によって逆転することが確認された (図 8)。これらの結果は、乱流が発達する下流域においても、平均流や上流からの積分値である拡散などには初期条件の影響が大きく残ることを示している。したがって、すぐに消えるような初期乱れでも、その影響を無視することには注意が必要である。

文献

- [1] T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki and Y. Miyake, “Turbulence structure of particle-laden flow in a vertical plane channel due to vortex shedding”, *JSME Int. J. Ser. B*, 44(4), pp.526-535 (2001).
- [2] T. Kajishima and S. Takiguchi, “Interaction between particle clusters and fluid turbulence”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 23(5), pp.639-646 (2002).
- [3] S. Takeuchi, Y. Yuki, A. Ueyama and T. Kajishima, “Interaction between multiple deformable particles and a fluid flow by a coupled finite-difference and finite-element technique with a Conservative Momentum-exchange Algorithm”, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 64(10-12), pp.1084-1101 (2010).
- [4] 大西 領, 竹内伸太郎, “粒子解像・直接ラグランジアン雲粒子計算”, 日本気象学会秋季大会, 仙台 (2018).
- [5] K. Matsuda and R. Onishi, “Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets”, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, pp.1785-1799 (2019).
- [6] 松田景吾, 小森 悟, 高垣直尚, 大西 領, “風波気液界面を通しての運動量及び物質輸送に及ぼす表面張力の影響”, 化学工学会第 50 回秋季大会, 鹿児島 (2018).
- [7] S. Tanaka, T. Watanabe and K. Nagata, “Multi-particle model of coarse-grained scalar dissipation rate with volumetric tensor in turbulence”, *J. Comput. Phys.*, 389, pp.128-146 (2019).
- [8] Y. Ito, K. Naganawa, Y. Sakai and K. Iwano, “Entrainment and Diffusion Mechanism in a Round Jet Modified by Vortex Generators”, *Proc. of 15th Int. Conf. Fluid Dyn.*, pp.772-773, Sendai, Japan (2018).

Numerical Study of Complex Turbulence Processes in Earth Science

Project Representative

Keigo Matsuda Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency
for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Keigo Matsuda^{*1}, Ryo Onishi^{*1}, Dmitry Kolomenskiy^{*1}, Koji Goto^{*2}, Shintaro Takeuchi^{*3},
Takeo Kajishima^{*3}, Tomoaki Watanabe^{*4}, Koji Nagata^{*4}, Yasumasa Ito^{*4} and Naohisa Takagaki^{*5}

^{*1} Center for Earth Information Science and Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,

^{*2} NEC Corporation, ^{*3} Osaka University, ^{*4} Nagoya University, ^{*5} University of Hyogo

Importance of micro-scale turbulence processes is increasing as the resolution of Earth science simulation models becomes higher. Thus, this project performs direct numerical simulations (DNS) for multiphase turbulent flows in order to clarify a part of the complex turbulent processes in Earth science. The main achievements are as follows: (i) Particle-resolving Lagrangian cloud model is developed, and the results are compared with a conventional method; (ii) multiscale turbulent clustering of polydisperse cloud droplets is modeled considering the gravitational settling; (iii) the scalar transfer across a wind-wave interface is investigated by using a DNS of air-water two-phase flow; (iv) a multi-particle model of the scalar dissipation rate in turbulence is proposed; (v) effects of initial disturbance on turbulent diffusion in a jet flow is investigated.

Keywords: turbulence, multi-scale simulation, multiphase flow, scalar transfer, sub-grid scale model

1. Particle-resolving direct Lagrangian cloud model

Collision coalescence of cloud droplets is an important process in rain drop formation. To investigate turbulent enhancement of droplet collisions, we have developed the Lagrangian Cloud Simulator (LCS), which is based on a three-dimensional direct numerical simulation (DNS) of particle-laden turbulence. The conventional LCS tracks large rain drops (which are spherical particles of $D_p > \Delta$ and/or $Re_p > 1$) using the point-particle (PP) approximation considering the hydrodynamic interaction (HI) between particles. However, it does not consider the influence of microscale wake flow from a falling rain drop on the collision growth of surrounding particles. Thus, we have implemented the immersed solid method (ISM) [1,2,3] to the LCS and conducted a highly-parallelized computation to obtain turbulent collision statistics. 4096 particles are imposed to a

fully developed turbulence, resolved by 512^3 grid points. The result shows that the energy dissipation rate for the case of ISM is larger than the case of PP-BiSM (the PP approximation with the HI effect) (Figure 1). In addition, the LCS with ISM can reproduce significant particle clustering, that was not observed using PP-BiSM. We have also confirmed that the present LCS-ISM is feasible for the larger computation using 2048^3 grid points and 5.12×10^5 particles.

2. Influence of cloud droplet clustering on radar reflectivity factor

Inertial motion of cloud droplets causes clustering in turbulence. Previous studies pointed out that turbulent clustering of cloud droplets can enhance a reflectivity factor in radar cloud observations. To estimate the quantitative influence, we have performed DNS of particle-laden homogeneous isotropic turbulence using the LCS and developed a clustering intensity (number density fluctuation) spectrum model for polydisperse cloud droplets. This fiscal year, we have improved the model to consider effects of gravitational settling. The comparison with the DNS results confirmed the reliability of the improved model (Figure 2) [4]. The improved model was applied to cloud simulation data, obtained using the multiscale atmosphere-ocean coupled model, MSSG. The quantitative influence of turbulent clustering on radar reflectivity factor has been confirmed in a realistic situation of maritime cumuli, considering the effects of gravitational settling, clear-air entrainment and refractive index fluctuation.

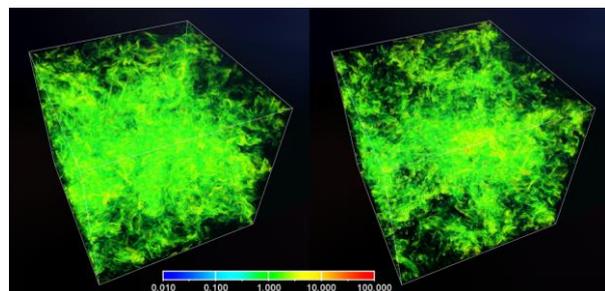


Fig. 1 Turbulent energy dissipation rate (512^3 grid points, 4096 particles); (left) PP-BiSM (1-way) and (right) ISM. Color indicates the energy dissipation rate in a logarithmic scale. The VDVGE was utilized for visualization.

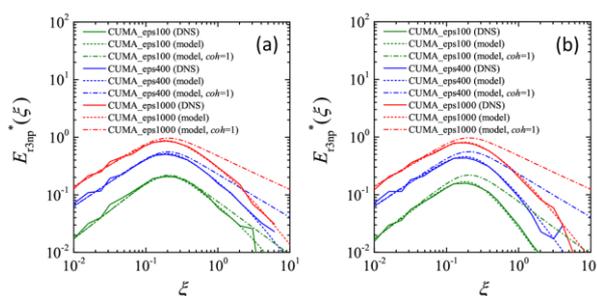


Fig. 2 Weighted number density spectra for turbulent clustering of droplets with a typical size distribution in cumuli for (a) $g = 0$ and (b) $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

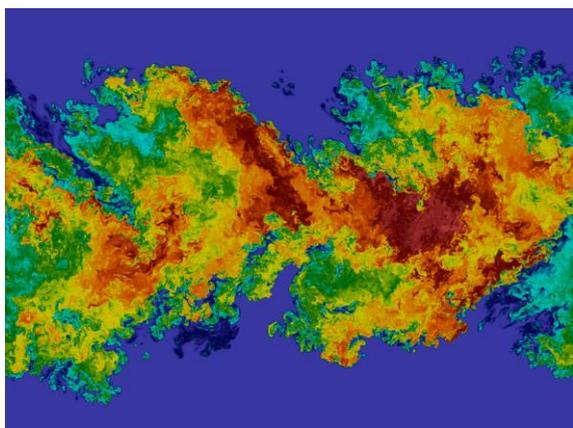


Fig. 3 Scalar distribution in a two-dimensional jet at high Reynolds number. Turbulent Reynolds number is 530 in the shear region.

3. Development of wind-wave turbulence

Wind waves and sea sprays enhance the heat and water vapor transfer at the air-water interface. Effects of surface tension reduction on the wind-wave development and the scalar transfer have been investigated using the DNS of air-water two-phase flow. The results show that the wave height increases significantly when the surface tension is reduced to half. In contrast, the scalar transfer (gas absorption) decreases due to the surface tension reduction. This indicates that turbulent scalar transfer is weaker for the smaller surface tension case.

4. Multi-particle model for scalar dissipation in turbulence

In order to accurately predict turbulent mixing and diffusion using large-eddy simulations for high Reynolds number turbulence, a multi-particle model of the scalar dissipation rate has been proposed [5]. The performance of the proposed model has been verified using DNS database of two-dimensional jets with scalar diffusion at high Reynolds number (Figure 3). The proposed model was then applied to an LES model. The results show that the proposed model predicts scalar statistics in jet flows in a good accuracy but

low computational cost. The proposed model is easily applicable to a flow with chemical reactions.

5. Effect of initial disturbance on turbulent diffusion in a jet

Axisymmetric jets are commonly observed at e.g. hydrothermal vents and industrial chimneys. The scalar diffusion in an axisymmetric jet has been studied in many literatures, but effects of breaking symmetry are not fully understood. Thus, the effects of initial disturbance on momentum and scalar transfer in a jet have been investigated. The disturbance is applied at the inlet of jet to form streamwise vortices. The results show that large-scale motion due to the streamwise vortices remains in the downstream region, while small eddies exist only in the upstream region. The vortices change the streamwise and azimuth distributions of turbulent diffusion coefficients. This result indicates that initial disturbances play important roles for scalar diffusion.

References

- [1] T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki and Y. Miyake, "Turbulence structure of particle-laden flow in a vertical plane channel due to vortex shedding", *JSME Int. J. Ser. B*, 44(4), pp.526-535 (2001).
- [2] T. Kajishima and S. Takiguchi, "Interaction between particle clusters and fluid turbulence", *Int. J. Heat Fluid Flow*, 23(5), pp.639-646 (2002).
- [3] S. Takeuchi, Y. Yuki, A. Ueyama and T. Kajishima, "Interaction between multiple deformable particles and a fluid flow by a coupled finite-difference and finite-element technique with a Conservative Momentum-exchange Algorithm", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 64(10-12), pp.1084-1101 (2010).
- [4] K. Matsuda and R. Onishi, "Turbulent enhancement of radar reflectivity factor for polydisperse cloud droplets", *Atmos. Chem. Phys.*, 19, pp.1785-1799 (2019).
- [5] S. Tanaka, T. Watanabe and K. Nagata, "Multi-particle model of coarse-grained scalar dissipation rate with volumetric tensor in turbulence", *J. Comput. Phys.*, 389, pp.128-146 (2019).
- [6] Y. Ito, K. Naganawa, Y. Sakai and K. Iwano, "Entrainment and Diffusion Mechanism in a Round Jet Modified by Vortex Generators", *Proc. of 15th Int. Conf. Fluid Dyn.*, pp.772-773, Sendai, Japan (2018).