

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05817

研究課題名(和文)高レイノルズ数乱流噴流における微細スケールスカラー混合過程の解明

研究課題名(英文) Investigation of Fine-scale Scalar Mixing in High Reynolds Number Turbulent Jets

研究代表者

松山 新吾 (Matsuyama, Shingo)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：60392841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高レイノルズ数(Re)乱流噴流において微細スケールの乱流スカラー混合がマクロな混合過程に果たす役割を明らかにすることである。Re = 3000～30000の乱流噴流DNSデータに対して空間フィルタリングを施し、微細スケールの寄与について調査を行なった結果、Re = 3000, 10000, 30000の条件で、それぞれ、コルモゴロフ長の60, 110, 170倍までのスケールによる寄与が重要であることが示された。この知見により、高Re乱流噴流のスカラー混合過程において支配的な役割を果たす乱流スケールは積分長付近までの比較的大きなスケールである、ということが示された。

研究成果の概要(英文)：In this research, direct numerical simulations of a turbulent plane jet were performed to clarify the role of very small-scale turbulence in the scalar mixing process of high Reynolds (Re) number jet. By analyzing the results at Re = 3000, 10000, 30000, we evaluated the Re-dependence of turbulent scalar mixing process. Furthermore, a threshold value of length scale below which a fine-scale turbulence does not affect the mixing process of turbulent jet was evaluated. For this purpose, sub-grid scale (SGS) turbulent kinetic energy and scalar variance were evaluated by filtering the DNS data, and compared with the grid scale (GS) components. The results showed that the turbulent length scales up to 60, 110, and 170 times of Kolmogorov scale are important in the scalar mixing process of jet, for Re = 3000, 10000, and 30000, respectively.

研究分野：乱流工学

キーワード：乱流噴流 スカラー混合 高レイノルズ数乱流 DNS LES

1. 研究開始当初の背景

乱流噴流におけるスカラー混合は、ロケット・航空エンジンなどの燃焼器内で生じる燃料と酸化剤の混合過程において重要な役割を果たす。乱流速度場については長年にわたり研究の蓄積がなされているが、乱流スカラー混合についての研究事例はそれほど多くはない。そのため、微細なスケールの乱流混合がどのような役割を果たすのかを理解することなく、既存の乱流混合モデルを安易に適用して解析が行われる現状がある。

ロケット・航空用ガスタービンエンジンなどの燃焼器では、燃料と酸化剤の混合効率（すなわち燃焼効率）を高めることが重要な性能指標の一つである。より効率の高い燃料噴射器を設計するために LES による乱流解析を行うケースが増えてきているが、使用される乱流混合モデルは勾配拡散型モデルなどの初歩的なモデルがほとんどである。これは、主に予測精度よりもモデルの使い勝手が優先するためであるが、広範囲な噴射条件に対して妥当な予測結果が得られるかは極めて心許ない。LES による乱流解析では微細スケールの乱流をサブグリッドスケール (SGS) モデルによりモデル化する必要があるが、ロケット燃焼器などで生じる高レイノルズ数 ($Re > 10^4$) の噴流条件下では、積分長に対し 1/10 以下のスケールまで乱流が存在するため、微細なスケールで生じる乱流スカラー混合を正しく理解した上で適切な SGS 混合モデルを用いることが最も重要である。

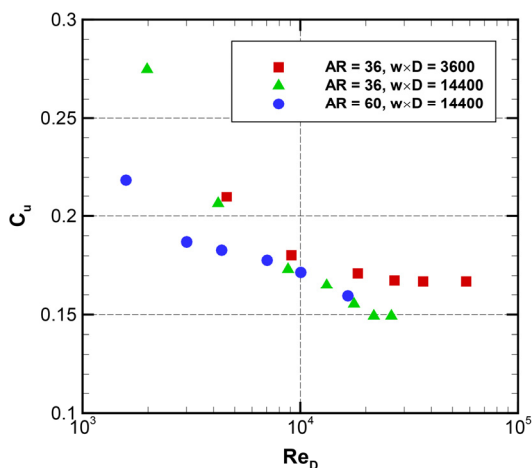


図 1 時間平均速度分布の Re 依存性 [1]

[1] Deo et al., *Physics of Fluids* 20, 075108.

学術的なテーマとしても、高レイノルズ数の乱流噴流において微細スケールの乱流が噴流全体のマクロなスカラー混合過程にどのように寄与するか、という点は興味深い。スカラー混合を伴わない平面乱流噴流について、レイノルズ数 (Re) による効果を調べた実験的研究は過去に多く実施されているが、その中から最近の Deo らによる実験の結果 [1] を図 1 に示す。平面乱流噴流では

時間平均速度分布が以下のような線形関係式

$$\left(\frac{U_0}{U_d}\right)^2 = C_u \left(\frac{x}{D} + C_{u,0}\right)$$

によって表現されることが知られており、図 1 はその線形関係式の傾き (C_u) をプロットした結果である。Deo らの実験結果が示すように、 Re が増加するのにしたがって C_u が小さくなっていくが、 2×10^4 を超えたあたりで Re による効果はほぼ消失してしまう。通常の流体 (シュミット数 = $O(10^0)$) では最小スケールがコルモゴロフスケール程度であるから、スカラー混合についても同様の結果が予想される。

以上の事実から、あるスケールよりも微細な乱流は噴流のマクロな混合過程に影響しなくなるのではないかと推測される。このことが正しければ、高 Re 条件の乱流噴流において微細なスケールの乱流による効果を SGS 混合モデルへ組み込む必要が無くなり、高 Re 条件での SGS モデリングが飛躍的に容易になる可能性がある。

2. 研究の目的

マクロな混合過程への影響が無くなる閾値となる微細スケールを明らかにするためには、 Re への依存性が消失する $Re = 3 \times 10^4$ 程度までの Re 条件について DNS による統計データが必要となる。

そこで、本研究では 3×10^4 までの Re 条件についてスカラー混合を伴う平面乱流噴流の DNS を実施し、微細スケールの乱流スカラー混合がマクロな混合過程に果たす役割を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、スカラー混合を伴う平面乱流噴流に対して $Re = 3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ の条件について乱流 DNS 解析を実施する。多くの条件で DNS 解析を実施することは容易ではないが、 $Re = 3 \times 10^3, 10^4, 3 \times 10^4$ の条件について解析を実施することで乱流スカラー混合における Re への依存性を評価する。さらに、マクロな混合過程への影響が無くなる閾値の乱流微細スケールを評価する手段として、まず、① $Re = 10^4$ と 3×10^4 の解析結果についてスカラー分布の時間平均値・RMS 変動などの統計量を比較する。簡易的な判定として、両者の統計量に違いが無ければ $Re = 10^4$ におけるスカラー混合の最小スケールよりも小さなスケールはマクロな混合過程に影響していないことになる。さらに、② DNS データに対してフィルタリングを施すことで SGS 乱流成分を評価し、グリッドスケール (GS) 乱流成分との定量的な比較を行う。具体的には、フィルター幅を変化させながら SGS 乱流成分が GS 乱流成分に対して何 %

になるのかを評価していく．あるフィルター幅において SGS 成分の寄与が GS 成分と比較して無視できるほど小さければ，そのフィルター幅以下の混合過程はマクロな過程に影響しないことになる．以上のようなアプローチにより，マクロな混合過程への影響が無くなる乱流微細スケールの閾値を明らかにすることを目指す．

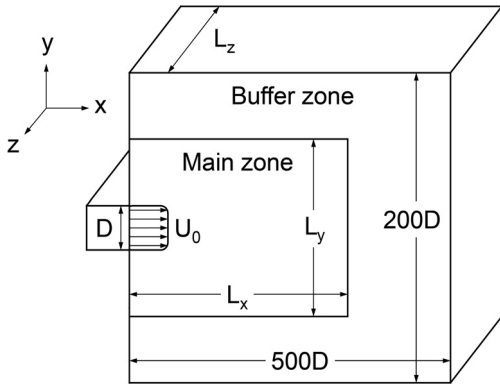


図 2 平面乱流噴流の問題設定

4. 研究成果

解析の対象はスカラー混合を伴う空間発展型の平面乱流噴流である．図 2 に示すように，計算領域として主流方向 (x)，垂直方向 (y)，および，スパン方向 (z) に $L_x \times L_y \times L_z$ の領域 (main zone) を設け，等間隔メッシュにより離散化する．各 Re 条件に対する main zone のサイズを表 1 に示す．計算コストの問題から $Re = 10^4, 3 \times 10^4$ の解析では main zone のサイズをそれぞれ $15D \times 14D \times 4.3D$ ， $15D \times 10D \times 4.3D$ へ縮小させた (D はノズル幅)．座標はノズル出口を $x = 0$ ，ノズル出口中心を $y = z = 0$ とする．また，外部境界での反射による影響が小さくなるように main zone の外側に buffer zone を設けて格子幅を徐々に粗くした．

表 1 計算領域サイズ

Re	L_x	L_y	L_z
3×10^3	$27D$	$28D$	$4.3D$
10^4	$15D$	$14D$	$4.3D$
3×10^4	$15D$	$10D$	$4.3D$

コルモゴロフスケール付近までを解像するという DNS の要請から，本解析では表 2 に示すように Re 条件ごとに格子の解像度を変化させる． $Re = 10^4, 3 \times 10^4$ の解析では，最小スケールが $Re^{-3/4}$ に比例することを仮定して，格子解像度を倍に細かくした．本解析で用いる計算格子は全ての Re 条件でコルモゴロフスケールの数倍程度の解像度になることを期待する．

本解析で用いた流れ場の支配方程式は三次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式であり，密度・運動量・エネルギー，および，スカラー (ξ) の保存式を解く．支配方程式は有限体

積的手法により離散化し，対流流束を SLAU スキームにより計算する．本研究では，空間精度の高次精度化にあたりセル界面での原始変数 (ρ, u, v, w, p, ξ) を 9 次多項式により再構築することで高次精度化を実現した．

表 2 格子解像度

Re	$\Delta x/D$	$\Delta y/D$	$\Delta z/D$	N_{grid}
3×10^3	0.0333	0.0333	0.0336	88×10^6
10^4	0.0167	0.0167	0.0168	195×10^6
3×10^4	0.0083	0.0083	0.0084	1.1×10^9

粘性流束は 4 次精度の中心差分的手法により求める．時間積分には 2 段階 2 次の Runge-Kutta 法を用いた．粘性係数はサザランドの式により評価し，熱伝導係数・拡散係数はプラントル数・シュミット数を 0.72, 1.0 として評価した．計算領域を 286 ~ 924 ブロックに分割することにより並列化し，宇宙航空研究開発機構 (JAXA) に設置されている JAXA スーパーコンピュータシステム (JSS2) 上で 72 ~ 143 CPU ($2304 \sim 4576$ コア) を用いて解析を実施した．

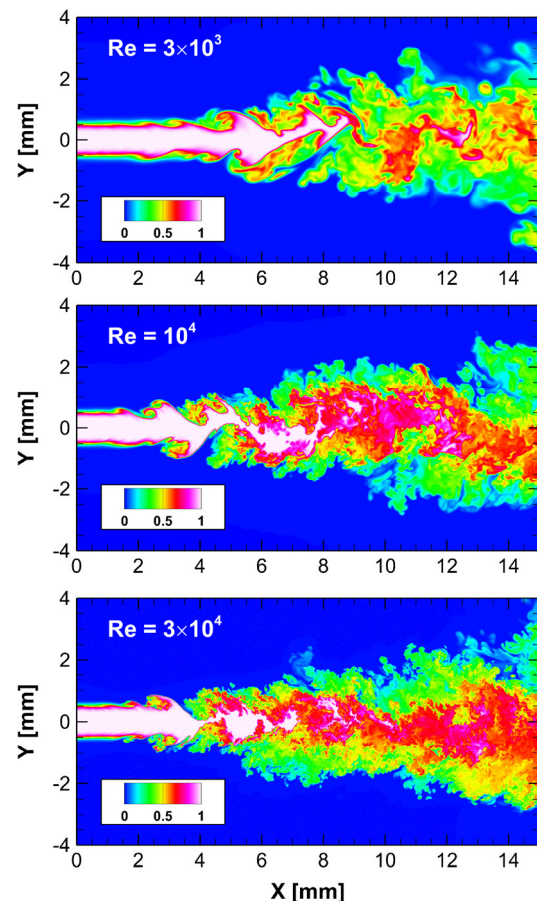


図 3 瞬時のスカラー質量分率分布 ($z = 0$)．

図 3 に， x - y 断面 ($z = 0$) における瞬時のスカラー質量分率分布について， $Re = 3 \times 10^3, 10^4$ および 3×10^4 に対する DNS 解析の結果を示す．まず，最もレイノルズ数が低い Re

$= 3 \times 10^3$ の解析結果を見ると, $x = 3D$ 付近から大きな構造の渦による混合が始まり, 下流に向かって微細な構造へ発達していく様子が確認できる. 次に $Re = 10^4$ に対する結果では, 混合の開始が早くなり $x = 2D$ 付近から大きな構造の渦が見え始め, 下流で形成される微細構造のサイズが小さくなっている. 最もレイノルズ数が高い $Re = 3 \times 10^4$ に対する結果は $Re = 10^4$ の結果と比較すると大きな見た目の変化は無いが, さらに微細な構造が形成されている.

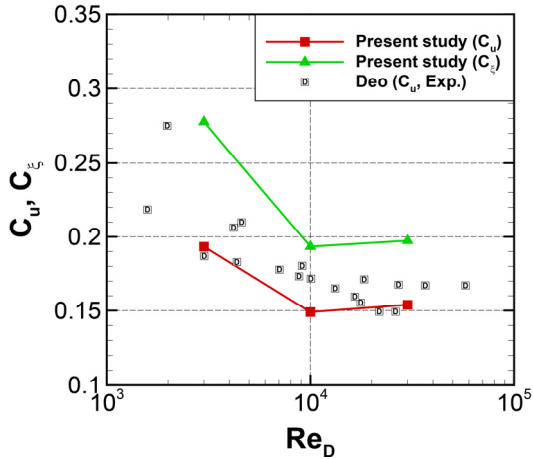


図 4 C_u, C_{ξ} の Re 依存性.

平面乱流噴流では, 自己相似領域における噴流の中心に沿った平均速度分布と平均スカラー分布は以下のような線形関係式によって近似できることが知られている.

$$\left(\frac{U_0}{U_{cl}}\right)^2 = C_u \left(\frac{x}{D} + C_{u,0}\right)$$

$$\left(\frac{\xi_0}{\xi_{cl}}\right)^2 = C_{\xi} \left(\frac{x}{D} + C_{\xi,0}\right)$$

ここで, U は x 方向速度, 下付き文字 0 , cl は, それぞれ, ジェットの噴射条件と中心線 ($y = 0$) での値を示す. また, C_u と C_{ξ} は線形関係式の傾き, $C_{u,0}, C_{\xi,0}$ は式の仮想的な原点を示す. 時間平均速度分布から C_u, C_{ξ} をカーブフィットにより求めた結果を, 先行研究による実験 [1] の結果と併せて, 図 4 に示す. C_u, C_{ξ} のいずれも $Re = 3 \times 10^4$ でわずかに増加する傾向はみられるが, 実験データと良く一致しており, Re 効果が正しく捉えられている.

さらに, 本研究では $Re = 3 \times 10^3$ および 10^4 の条件について空間高次精度スキームと格子解像度を変化させて LES 解析を行い, 解像度が不足した場合, すなわち, 微細な乱流が正確に捉えられなかった場合にマクロな統計量 (平均速度場) にどのような影響を及ぼすかを調査した. 図 5 に LES により解像される乱流の最小スケールと線形関係式の

傾き C_u, C_{ξ} の相関を $Re = 3 \times 10^3$ および 10^4 について示す. いずれのレイノルズ数条件についても, 解像度が十分である場合には C_u と C_{ξ} はほぼ DNS と同じ値になっている. $Re = 3 \times 10^3$ の場合については解像される最小スケールが $700 \mu\text{m}$ を越えたあたり, すなわち, $700 \mu\text{m}$ 以下の微細な乱流が捉えられなくなると線形関係式の傾きが変化して誤差が大きくなる. 同様に $Re = 10^4$ では最小スケールが $600 \mu\text{m}$ を越えたあたりから誤差が大きくなることわかる. $Re = 3 \times 10^3, 10^4$ におけるコルモゴロフスケール (η) はそれぞれ $11.9, 5.28 \mu\text{m}$ であるから ($x/D = 11$ において), 大まかにではあるが, コルモゴロフスケールの $60, 110$ 倍程度までの乱流を格子で解像できれば LES は良い結果を与えるということがわかる. この結果は $Re = 3 \times 10^3, 10^4$ の条件において, それぞれ, $60\eta, 110\eta$ より小さなスケールの乱流がマクロな混合過程に寄与していない可能性があることを示唆するものでもある.

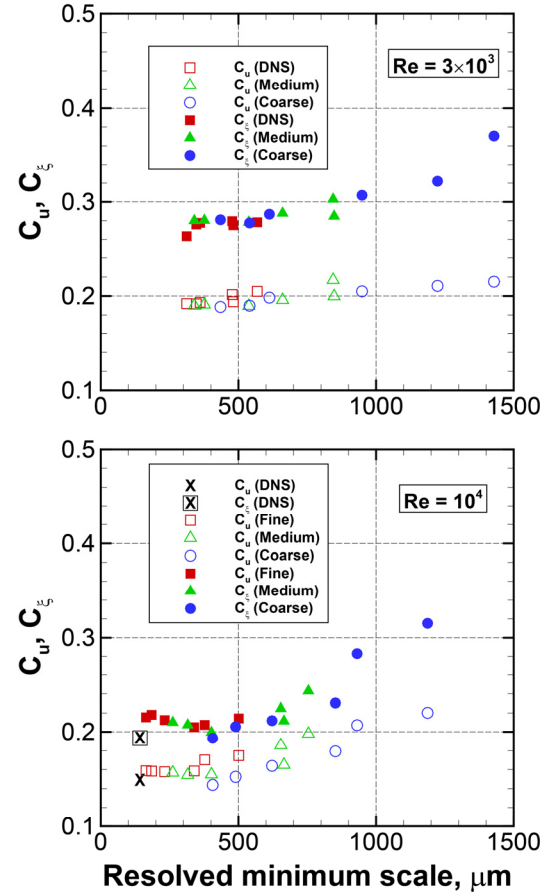


図 5 LES において解像される乱流の最小スケールと時間平均速度分布 (C_u, C_{ξ}) の相関. $Re = 3 \times 10^3$ および 10^4 に対する結果を示す.

さらに, DNS データに対して空間フィルタリングを施すことで GS 乱流成分と SGS 乱流成分を分離し, それぞれの寄与について定量的な比較を行なった結果を図 6 および 7 に示す. 図に示した結果は, フィルター幅を変化させながら GS 乱流成分が全乱流エ

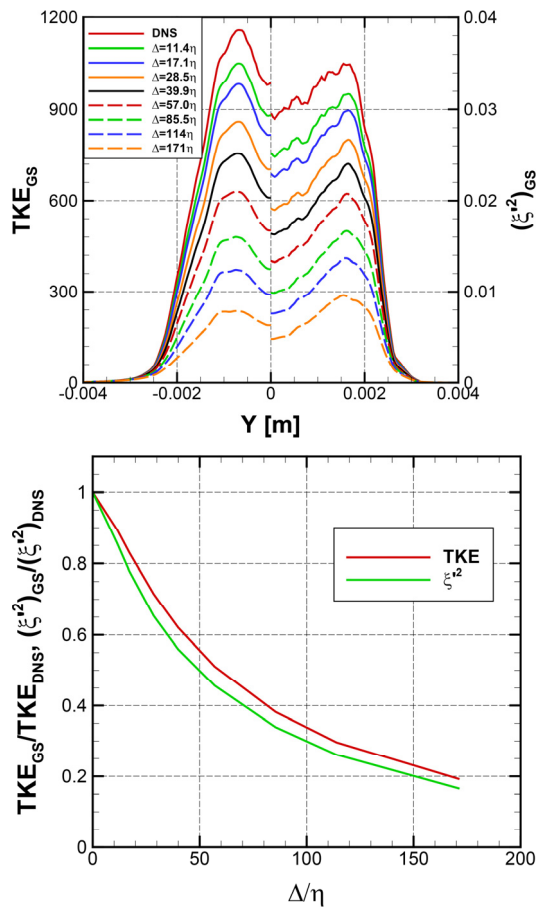


図 6 $x/D = 11$ における乱流エネルギー (TKE) とスカラー変動に対する空間フィルタリングで得られた GS 乱流成分の傾向. (上) フィルタサイズと GS 成分の関係, (下) 各フィルタサイズに対する GS 成分の比率. $Re = 3 \times 10^3$ に対する結果.

エネルギー (turbulent kinetic energy, TKE) と全スカラー変動 (scalar variance) に対して何 % になるのかを評価したものである. まず, $Re = 3 \times 10^3$ に対するデータ (図 6) から, フィルタサイズを大きくすることで TKE, scalar variance とともに GS 乱流成分は減少していく. 全乱流成分 (DNS データ) に対する GS 成分の割合とフィルタサイズの関係から, LES による結果 (図 5) で示された 60η というスケールは GS 成分が全乱流成分に対して約 50 % になる乱流スケールであることがわかる. また, 図 7 に示すように $Re = 10^4$ に対するデータについても同様の傾向であり, 110η というスケールはやはり GS 成分が 50 % 程度になる乱流スケールである.

本研究では, $Re = 3 \times 10^3, 10^4, 3 \times 10^4$ の 3 条件について, スカラー混合を伴う平面乱流噴流の DNS 解析を実施した. いずれの Re 条件についてもコルモゴロフスケール付近までの乱流構造を解像しており, Re 依存性を正しく捉えることに成功した. また, $Re = 3 \times 10^3$ および 10^4 の条件について空間高次精度スキームと格子解像度を変化させて LES 解析を行い, マクロな統計量 (平均場) にどのような影響を及ぼす

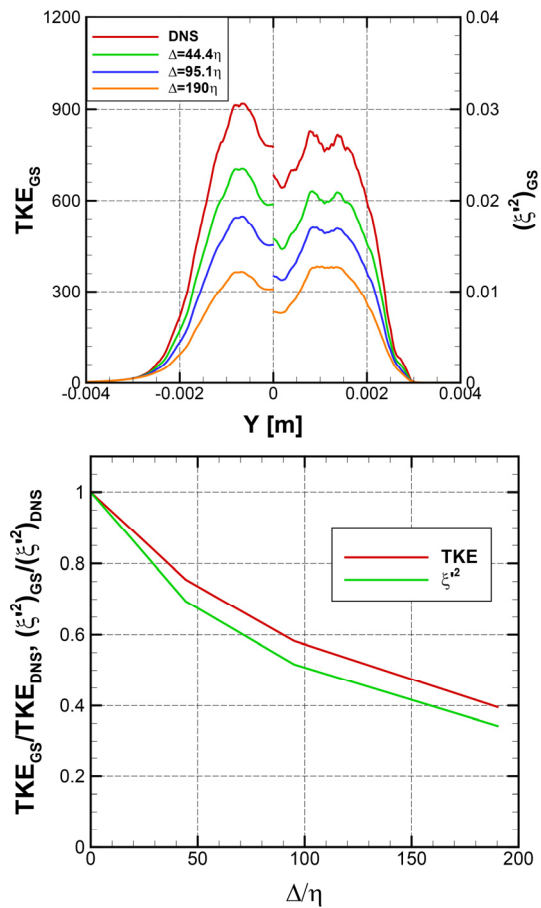


図 7 $x/D = 11$ における乱流エネルギー (TKE) とスカラー変動に対する空間フィルタリングで得られた GS 乱流成分の傾向. (上) フィルタサイズと GS 成分の関係, (下) 各フィルタサイズに対する GS 成分の比率. $Re = 10^4$ に対する結果.

かを調査した. 空間精度の低いスキームにより粗い格子で LES による解析を実施した場合, 微細なスケールの乱流は数値粘性により減衰してしまい, 速度・スカラーの統計量に無視できない影響を与えることが示された. また, LES による解析はコルモゴロフスケールの 60 ~ 110 倍程度の比較的大きなスケールの乱流を格子で解像できれば, マクロな統計量に関しては DNS と遜色の無い結果が得られることが示された. これらの LES による結果とあわせて, DNS データに対して空間フィルタリングを施すことで GS 乱流成分と SGS 乱流成分を分離して寄与を評価した結果, $Re = 3 \times 10^3$ および 10^4 の条件について, それぞれ, コルモゴロフスケールの 60, 110 倍までの乱流スケールがマクロな混合過程において重要な役割を果たしていることが示された.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 松山 新吾、安価な自作サーバーによる大規模乱流解析データのポスト処理、ながれ、査読無、36 巻、2017、pp.83-91
<http://www.nagare.or.jp/publication/nagare/archive/2017/2.html>

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 松山 新吾、水素乱流拡散火炎の Implicit Large Eddy Simulation、第 54 回燃焼シンポジウム、2016 年
- ② 松山 新吾、安価な自作サーバーによる大規模乱流解析データのポスト処理、第 30 回数値流体力学シンポジウム、2016 年
- ③ 松山 新吾、スカラー混合を伴う平面乱流噴流の Implicit Large-Eddy Simulation、日本航空宇宙学会北部支部創立 30 周年記念 2017 年講演会ならびに第 18 回再使用型宇宙推進系シンポジウム、2017 年
- ④ 松山 新吾、スカラー混合を伴う平面乱流噴流の Implicit Large-Eddy Simulation、第 32 回生研 TSFD シンポジウム、2017 年
- ⑤ 松山 新吾、スカラー混合を伴う平面乱流噴流の Direct Numerical Simulation、日本航空宇宙学会 第 48 期定時社員総会および年会講演会、2017 年
- ⑥ 松山 新吾、スカラー混合を伴う平面乱流噴流の DNS、日本流体力学会年会 2017、2017 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松山 新吾 (MATSUYAMA, Shingo)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・
航空技術部門・研究開発員
研究者番号：60392841