

乱流噴流場における高シュミット数物質の拡散・混合過程の解明
Study on the mixing of high Schmidt number scalar in turbulent jet

研究代表者：岩野 耕治（名古屋大学）

研究協力者：福岡 大悟，大島 聡史（名古屋大学）

高シュミット数物質が乱流中で混合されるとき，濃度揺らぎの最小スケールは速度揺らぎの最小スケールよりも小さくなる．このとき，最小渦よりも小さい微小スケールの濃度揺らぎには，流れ場の大スケールの構造によらない普遍領域が存在することが乱流統計理論により予想されているが，過去の実験では流れ場により特性が変化する可能性が指摘されており，詳細は未だ明らかにされていない．そこで本研究では，高シュミット数物質の混合・拡散過程に及ぼす大スケールの流れ構造の影響を明らかにすることを旨とし，大スケールの組織的渦構造を持つ軸対称乱流噴流場の大規模三次元直接数値シミュレーション（DNS）を行った．

計算は噴流出口流速と出口直径 d に基づく Reynolds 数を 1000 とし，噴流に含まれるスカラの Schmidt 数（ Sc 数）を 1, 2, 4, 8 の 4 条件とした．計算領域を噴流流れ方向(x)に $40d$ スパン方向(y)と鉛直方向(z)に $25d$ とし，それぞれの方向に 1904, 860, 860 点の格子点を用いた．また格子点は噴流中心で密になるように配置した．数値計算コードは部分段階法に基づいており，時間進行には三次 Runge-Kutta 法を，空間離散化には二次精度中心差分を用いた．計算には不老クラウドシステムを用い，MPI 並列を行った．

昨年度の研究により，噴流中心軸上のスカラの相対変動強度は Sc 数が大きいほど大きな値を取ることが明らかになった．この原因を明らかにするために， $x=25d$ の噴流断面におけるスカラ変動収支を解析した．スカラ変動 c'^2 の輸送方程式は次式で表され，右辺は左から順に対流項，生成項，乱流拡散項，分子拡散項，散逸項である．

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\langle \frac{1}{2} c'^2 \right\rangle = -U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left\langle \frac{1}{2} c'^2 \right\rangle - \langle u'_j c' \rangle \frac{\partial C}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\langle \frac{1}{2} u'_j c'^2 \right\rangle + D \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} \left\langle \frac{1}{2} c'^2 \right\rangle - D \left\langle \frac{\partial c'}{\partial x_j} \frac{\partial c'}{\partial x_j} \right\rangle$$

図 1 に $Sc=1, 8$ の場合のスカラ変動収支の半径方向分布を示す．図より，対流項と散逸項の絶対値は， Sc 数が大きい場合の方が大きな値を取ることがわかる．一方で，他の項には Sc 数の影響が顕著に表れていないことがわかる．このことから，噴流中心軸上の相対変動強度が Sc 数とともに大きくなるのは，変動の生成自体が大きくなったためではなく，噴流の上流から対流してくる変動が大きくなったためであると推測される．さらに，大スケールで生成されたスカラ変動は時間の経過（＝下流へと対流する）とともに小さなスケールの変動へとカスケードしていくため，噴流の下流位置における小スケールのスカラ変動は，

その位置で生成されたものではなく上流位置で生成されたものであると考えられる。Sc 数が大きくなると、スカラー変動の最小スケールが小さくなりカスケードにかかる時間が長くなるため、低 Sc 数の場合よりも上流で生成された大きな変動が検出されることになる。以上のような理由から、Sc 数が大きくなるほど、相対変動強度が大きな値を取るものと考えられる。

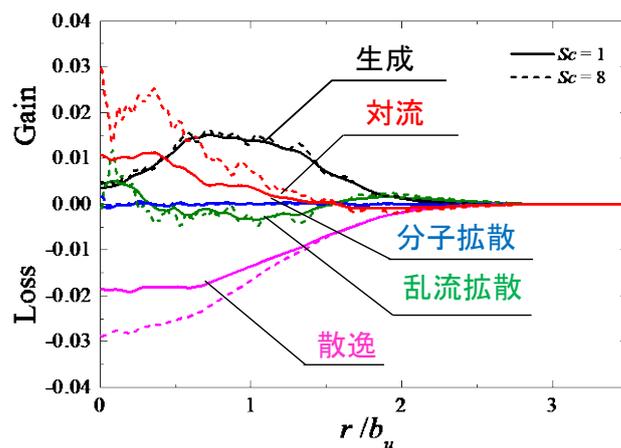


図 1. 噴流のスカラー変動収支の半径方向分布

成果発表

1. 福岡 大悟, 岩野 耕治, 伊藤 靖仁, DNS を用いた乱流噴流拡散場におけるスカラー統計量のシュミット数依存性の研究, 日本機械学会 2022 年度年次大会, 2022 年 9 月 12 日.
2. 福岡 大悟, 岩野 耕治, 伊藤 靖仁, DNS を用いた乱流噴流拡散場のシュミット数依存性に関する研究, 日本機械学会東海支部 第 7 2 期講演会, 2023 年 3 月 8 日.