

ローブミキサによるヘリウム-空気流の混合に関する実験研究

兼田智章，吹場活佳（静岡大学），中田大将（室蘭工業大学），丸裕介（JAXA）

1. はじめに

現在 JAXA を中心とする WG で、「再使用型宇宙輸送システムにおける大気アシスト飛行の実証研究」が行われている。WG では垂直発射式の再使用観測ロケットを開発中であり、このロケットに搭載されるのが ATRIUM エンジンである（図 1）。このエンジンは、ロケットエンジンに大気吸込みエンジンを複合させることで飛行条件に依らず推力を維持することができ、広範囲なマッハ数に対応可能となる。^[1] ATRIUM エンジンではファンから取り込んだ空気と水素リッチな燃焼ガスをミキサによって十分に混合することが重要となる。ミキサによって短い距離でムラなく混合できればエンジンの小型化や燃焼効率の向上につながる。図 2 は実際に JAXA の ATRIUM エンジンに用いられているミキサで、ローブミキサと呼ばれている。特徴はそれぞれの流路に傾斜が設けられ、出口部において流れが上下に交差する。これにより縦渦が発生し気流混合が促進されると考えられている。^[2]

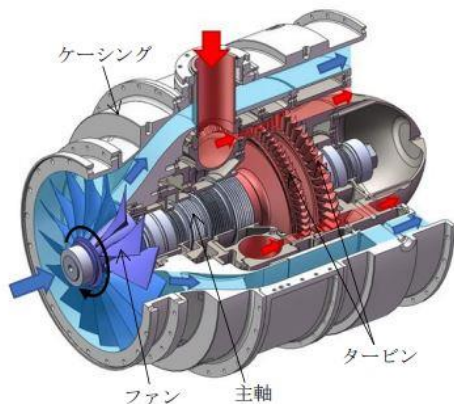


図 1 ATRIUM エンジン^[1]



図 2 ローブミキサ

これまで我々の研究では、空気側に常温空気を、水素ガス側に高温空気を流し、温度分布を測定することでミキサによる気流の混ざり具合を評価してきた。本実験では実験条件や評価方法はこれまでと変えず、水素ガス側に流す気体のみを空気からヘリウムガスに変え、温度分布を測定する。空気を流した場合とヘリウムを流した場合で温度分布が類似していれば、今後空気のみで実際の気流混合を再現できることになり、実験の簡単化やリスク低下、コスト削減につながる。本研究では、高温ヘリウム-常温空気流の混ざり具合を評価し、高温空気-常温空気流の場合と比較することで、空気のみで実際の気流混合を再現可能か調査することを目的とする。

2. 実験方法及び条件

図 3 に本実験の概要図を示す。高温気流側において空気を流す際はコンプレッサ、ヘリウムを流す際はヘリウムガスボンベから送風し、電熱線が設置された配管を通り高温に温められる。常温気流側はブローヤによって空気を送風する。これら 2 つの気流を測定部においてミキサで混合する。ミキサ出口部を $z=0\text{ mm}$ として流れ方向に $z=0, 50, 100\text{ mm}$ をとり、各地点で流路断面の温度を測定した。1 つの断面につき縦 7 点×横 5 点の計 35 点測定した。

本実験の実験条件を表 1 に示す。本実験では実際のエンジンでミキサに流入してくとされる体積流量比 $r=1.8$ （常温側流量 180 l/min：高温側流量 100 l/min）に加えて $r=2.6$ でも実験を行った。ローブミキサは傾斜角 $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の 3 種類を用意した。またローブミキサの効果を明確にするため平行ミキサと比較した。（図 4）また混ざり具合を評価する指標として温度の標準偏差を用いる。標準偏差の値が小さいほど、断面において温度のばらつきが小さく、ムラのない混合が行われていることになる。

表 1 実験条件

ミキサ傾斜角 θ	$15^\circ / 30^\circ / 45^\circ /$ 平行
体積流量比 $r(\text{normal} : \text{hot}) [-]$	1.8 / 2.6
常温側 / 高温側温度 $[\text{C}]$	25 / 70

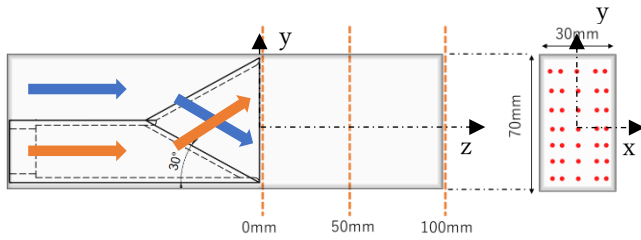


図3 測定部の概要図

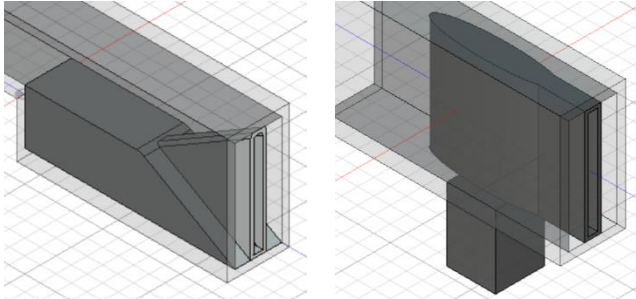


図4 製作したミキサ (左:ローブミキサ, 右:平行ミキサ)

3. 実験結果

3.1 温度分布への傾斜角 θ の影響

図5, 6, 7, 8に平行ミキサ及びミキサ傾斜角 $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の $z = 0, 50, 100$ mm 地点での温度分布 (体積流量比 $r = 1.8$) をそれぞれ示す. $z = 0$ mm において色の濃い中央縦列が高温ヘリウム側, 色の薄い左右の領域が常温空気側である. また混ざり具合を表す指標として温度標準偏差 σ ($^\circ\text{C}$) を求めた結果を表2に示す.

まず表2の温度標準偏差の値の比較より, 平行ミキサよりも3種類のローブミキサの方が値が小さくムラのない混合が行われていることが分かる. 平行ミキサの温度分布である図5より, 中央の列から高温のヘリウムガスが徐々に左右に広がっていく様子を読み取れる. しかし左端及び右端の列までは到達しておらず, 空気との混合が十分に行われていないことが分かる.

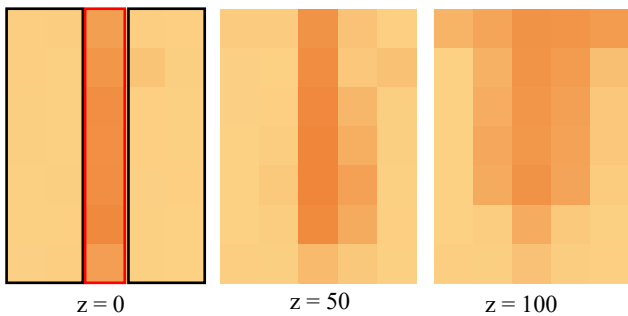


図5 温度分布 (平行, $r = 1.8$)

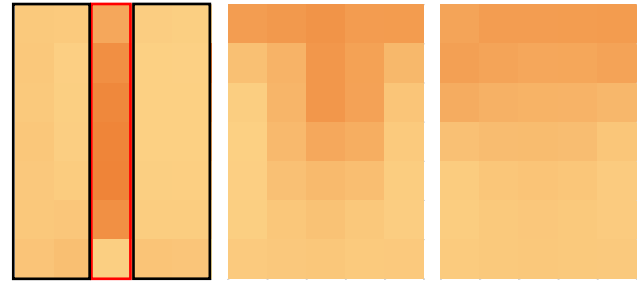


図6 温度分布 ($\theta = 15^\circ, r = 1.8$)

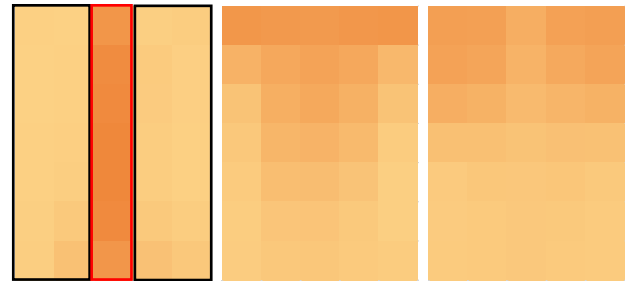


図7 温度分布 ($\theta = 30^\circ, r = 1.8$)

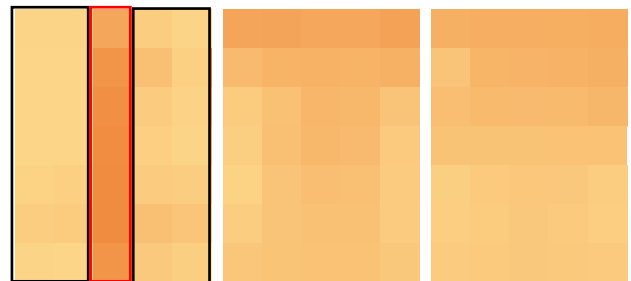


図8 温度分布 ($\theta = 45^\circ, r = 1.8$)

表2 各ミキサの温度標準偏差 σ ($^\circ\text{C}$)

θ	$z = 50$	$z = 100$
平行	12.50	11.17
15°	9.55	8.27
30°	8.84	7.60
45°	6.20	5.36

一方ローブミキサの温度分布である図6, 7, 8より, 平行ミキサの時と異なり $z = 50$ mm でヘリウムと空気が断面全体で混合されている様子を読み取れる. このことからローブミキサの方が短い距離でムラなく混合されていることが分かる. これはローブミキサの特徴である出口部の上下に交差する流れが, 縦渦を発生させ気流混合を促進させたためだと考えられる. またローブミキサ同士で比較すると, 傾斜角 θ が大きくなる

につれ温度分布の偏りが小さくなっているのが読み取れる。標準偏差の値からも $\theta = 45^\circ$ で最も均一に混ざっているのが分かる。

3. 2ヘリウムと空気の温度分布・混ざり具合の比較

ヘリウムと空気の温度分布を比較するため、各測定点の温度を正規化した。例として $z = 50 \text{ mm}$ において正規化した高温ヘリウム - 常温空気流と高温空気 - 常温空気流の温度分布 ($\theta = 45^\circ, r = 1.8$) を図 9 に示す。温度が高いほど黒く、低いほど白く表されている。

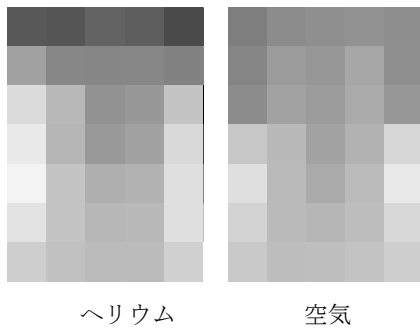


図 9 $z = 50 \text{ mm}$ 正規化温度分布 ($\theta = 45^\circ, r = 1.8$)

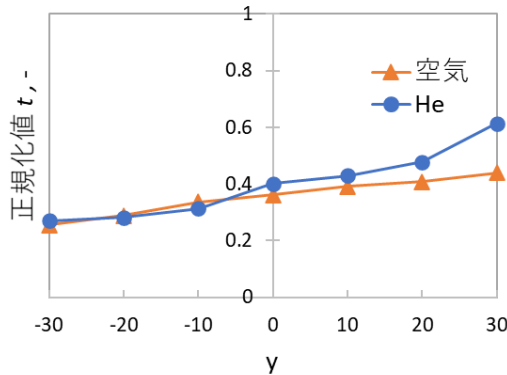


図 10 温度分布比較 ($x = 0, y = -30 \sim 30$)

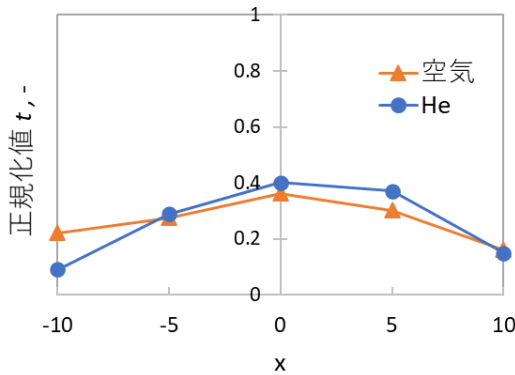


図 11 温度分布比較 ($x = -10 \sim 10, y = 0$)

図 9 の温度分布を中央縦の列 ($x = 0, y = -30 \sim 30$) で比較したグラフを図 10 に、中央横の列 ($y = 0, x = -10 \sim 10$) で比較したグラフを図 12 に示す。

図 10 より、ヘリウムを流した場合と空気を流した場合で比較すると列の上 ($y+$ 方向) に行くほど温度が高くなる傾向が一致している。一方図 11 でも、ヘリウムの場合と空気の場合で列の真ん中 ($x = 0$) で温度が高くなる傾向が一致している。このことから空気を流した場合でもヘリウムを流した場合の温度分布の特徴を再現できていることが分かる。

次に混ざり具合について、ヘリウムを流した場合と空気を流した場合で比較する。体積流量比 $r = 1.8$ の時、ヘリウムを流した場合の温度標準偏差を図 12 に、空気を流した場合の温度標準偏差を図 13 に示す。

ローブミキサに関しては傾斜角 θ が大きくなるにつれて温度標準偏差が小さくなる傾向が、ヘリウムを流した場合と空気を流した場合で一致している。

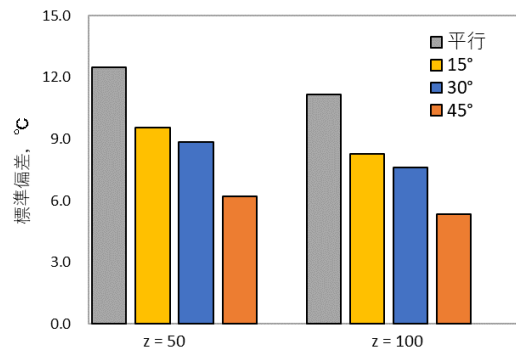


図 12 高温ヘリウム - 常温空気流 ($r = 1.8$)

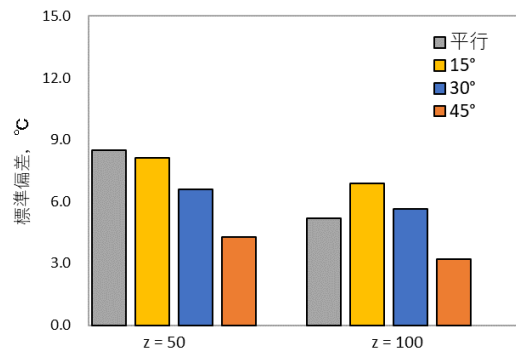


図 13 高温空気 - 常温空気流 ($r = 1.8$)

3. 3ヘリウムにおける温度分布と濃度分布の比較

体積流量比 $r = 1.8$ 、傾斜角 $\theta = 45^\circ$ のローブミキサにおいて、温度分布と同様に $z = 0, 50, 100 \text{ mm}$ 地点でヘリウム濃度分布を測定した。濃度 100% を 1, 0% を

0として、先程の正規化した温度分布と比較した。例として $z = 50 \text{ mm}$ において正規化した温度・濃度分布を図 14 に示す。

また図 14 の温度・濃度分布において中央縦列 ($x=0, y=-30 \sim 30$) で比較したグラフを図 15 に、中央横列 ($x = -10 \sim 10, y = 0$) で比較したグラフを図 16 に示す。

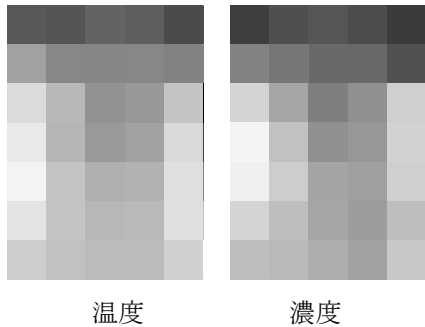


図 14 $z = 50 \text{ mm}$ 正規化分布 ($\theta = 45^\circ, r = 1.8$)

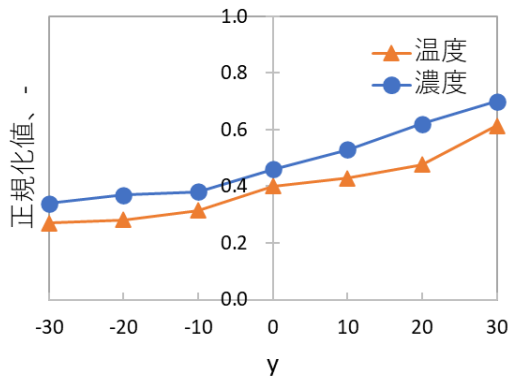


図 15 濃度 - 温度分布比較 ($x = 0, y = -30 \sim 30$)

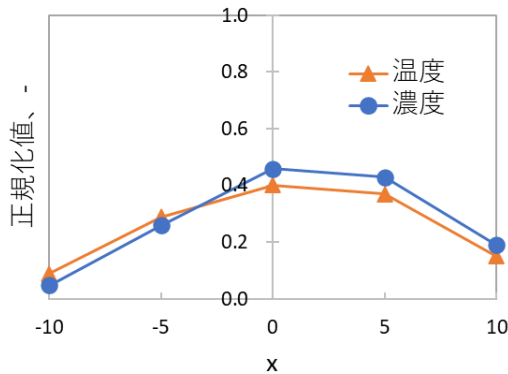


図 16 濃度 - 温度分布比較 ($x = -10 \sim 10, y = 0$)

図 15 より、温度分布と濃度分布を比較すると列の上 ($y+$ 方向) に行くほど温度が高くなる傾向が一致している。一方図 16 でも、温度分布と濃度分布ともに列の真ん中 ($x=0$) で温度が高くなる傾向が一致している。

これらの結果より温度分布でも濃度分布の傾向を再現できていることが分かる。このことから温度分布による混ざり具合の評価の妥当性を確認できた。

濃度分布と温度分布が一致した理由としては、ミキサ出口部の流れが乱流状態で、濃度及び温度の拡散が乱流拡散によって行われたためだと考えられる。層流状態においては濃度は濃度勾配、温度は温度勾配によって移動が行われる。しかし乱流状態はどちらも乱流拡散による分子の移動が支配的となる。このため本実験結果では温度と濃度の分布が一致したと考える。

5. 結言

本研究ではローブミキサの傾斜角、流量比をパラメータとし、ヘリウムガスを用いて温度分布や濃度分布より高温ヘリウム-常温空気流の混ざり具合の評価を行った。そして我々の研究でこれまでにを行った高温空気-常温空気流の結果と比較をした。

温度分布では、縦列で比較すると列の上に行くにしたがって温度が高く、横列で比較すると列中央で温度が高くなっていた。この分布傾向はヘリウム、空気に関わらず同様であった。

また混ざり具合を表す指標である温度標準偏差の値を比較した。流量比が同じ場合、気体の種類に関わらずローブミキサの傾斜角と混ざり具合の関係は一致し、傾斜角 $\theta = 45^\circ$ のローブミキサで最も混ざり具合が良かった。

最後にヘリウム-空気流において濃度分布と温度分布を正規化して比較した。縦列で比較すると列の上に行くにしたがって値が大きく、横列で比較すると列中央で値が大きくなっており、温度分布でも濃度分布の傾向を捉えられることが確認できた。

以上の結果より、温度分布で実際の気流の混ざり具合を評価できるとともに空気のみを用いて実際の気流混合を再現可能であると考える。

参考文献

- [1] 向江洋人, 天沼光博, 太田豊彦 (株式会社 ASI 総研), 2H14 ATR エンジンの施策研究について, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会, p1-2, 2020
- [2] M.N.O'Sullivan, J.K.Krasnodebski, I.A.Waitz, E.M.Greitzer, C.S.Tan, "Computational Study of Viscous Effects on Lobed Mixer Flow Features and Performance", JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol.12, No.3, May-June 1996.