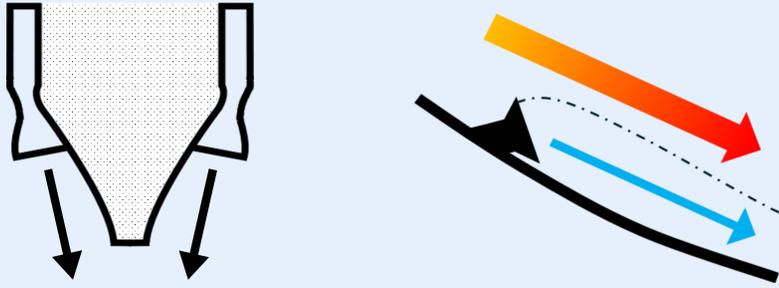


大気圧適応型エンジンの冷却解析

藤原宏大 (高2)【京都市立堀川高等学校】

背景

ラバルノズルは膨張率が外気圧に左右され、高度により過膨張・収縮が生じる。この点で、エアロスパイクノズルはガスを外側に開放することで外気圧に応じ自由膨張し、圧力推力が自己調整される高度補償性を持つ。^{1,2)}
一方でガスが集中する先端が過熱しやすく、冷却法の確立が課題である。本研究はフィルム冷却導入が推力と流れ場に与える影響を数値解析で評価し、LANの高度補償性と両立可能かを検証する。

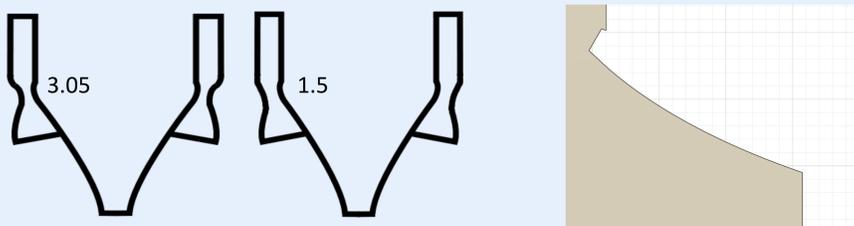


実験 I

目的

- ・ラバルノズルと比較して圧力推力で優位性があることを示す
- ・研究法の物理的な正当性を示す

エアロスパイクノズル2種(セルAR=1.5、3.05)とラバルノズル(AR=3.5)、外圧16,000/25,000/50,000/75,000/101,325 Paで推力を計算した。主ノズル曲線はPrandtl-Meyer理論を用いてpythonで作図した。³⁾

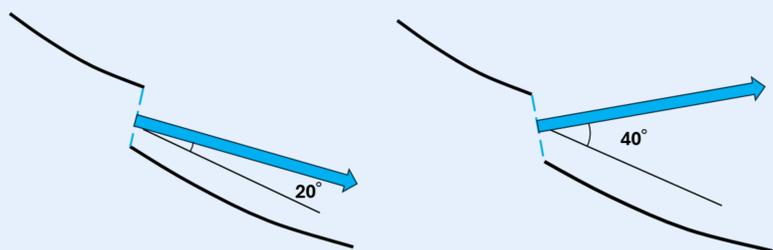


実験 II

目的

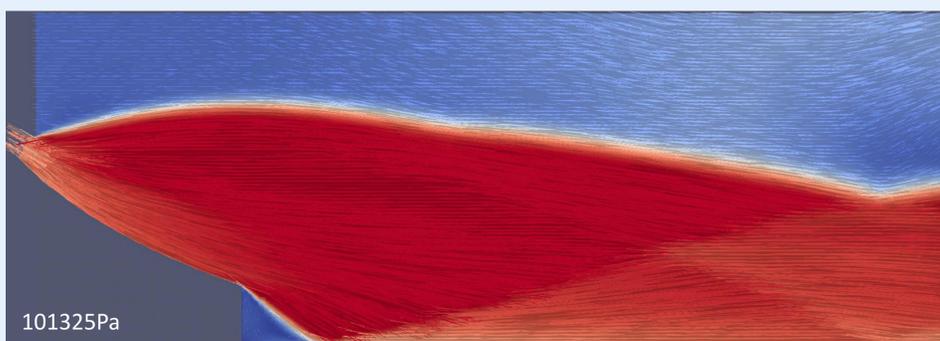
- ・冷却の導入が高度補償性に及ぼす影響を示す

Iのモデル(セルAR=1.5)に冷却器(冷却材GH₂、300 K)を追加し、⁴⁾接線基準流入角20°/40°、質量流量比2/3/4%の6ケースを解析する。冷却器はノズル長の40%の位置、開口比は1.5で、主流の質量流量はCEAのC* (2337.5 m/s)から算出した。



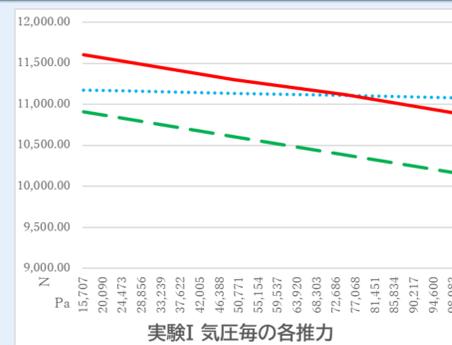
計算法

- ・超音速流体の解析に適したrhoCentralFoamを用いた。⁵⁾
- ・層流モデルで計算した。気体は理想空気と統一し、xy方向の疑似2D領域にモデルを導入した。負荷軽減のため初期流を与え、セルノズルを省略して計算した。
- ・実験IIの冷却解析では領域体積を約50%に縮小し、基準メッシュ体積を0.5倍、壁面層厚を一般より増加させ、計算リソース内に収めつつ壁面流入に伴う数値破綻を回避する。

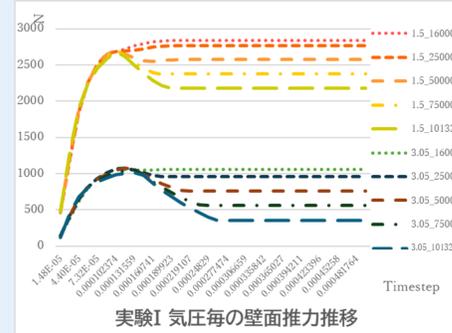


101325Pa
燃焼ガス流れの可視化例(冷却器なし、1気圧)

結果 I



実験I 気圧毎の各推力



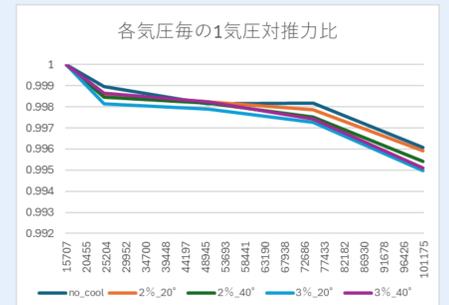
実験I 気圧毎の壁面推力推移

- ・セルAR=1.5は外圧750hPa以下の低～中圧域でラバルノズルより高い総推力を示し、時間発展も定常化して推力評価が安定する。セルAR=3.05は推移はエアロスパイクノズルと類似したものの基礎推力が低く、優位性を持たなかった。
- ・時間ごとの各気圧における推力について、AR=1.5のノズルは全体推力に占める減衰量の割合が小さく、高度補償性をより発揮したと言える。
- ・どのケースでも一定時間後の初期衝撃波経過後には推力の値が安定している。解の収束条件を持たない非定常解析であっても、推力の値を求めることは可能。

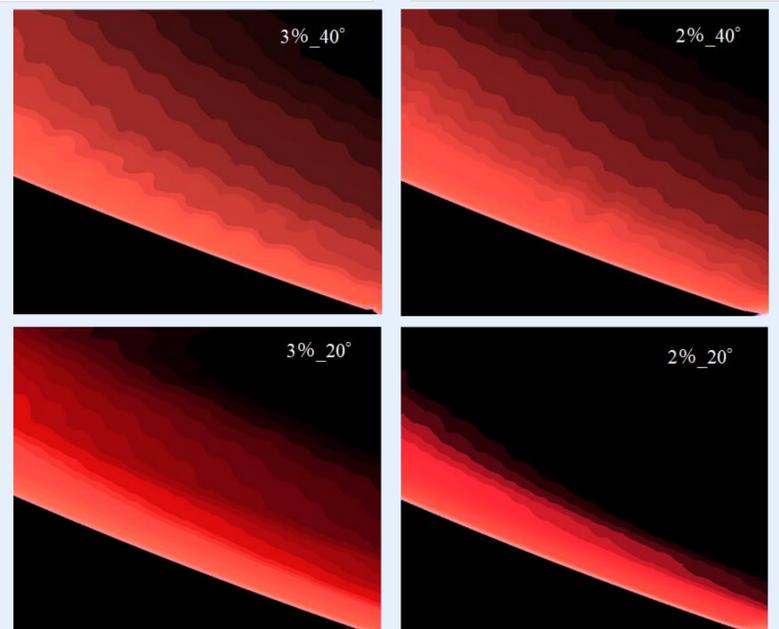
結果 II



実験 II 外気圧101325Paにおける各推力



各気圧毎の1気圧対推力比



- ・膜冷却の導入で壁面圧力が低下し、推力は一律に減少する。角度40°は20°より分離を強め、推力低下が大きい。流量増加でも推力は低下傾向で、4%は同冷却条件内では相対的に大きい。流れ場では角度の影響が強く、40°は冷却膜が厚く広がり持続し、20°は主流に圧迫され膜が薄い。
- ・冷却性能と推力がトレードオフにある従来の傾向は変わらないが、いずれの条件でも外圧毎の推力変化傾向は維持され、高度補償性は保持していると言える。

結論・考察

- ・4%での圧力推力の増加は層流モデルの限界による可能性が高く、流れの巻き込みなども考慮できる乱流モデルでの検証が必要である。
- ・エアロスパイクノズルに冷却流を導入した場合、高度補償性は保持しておりエアロスパイクノズル足りうることから、理論上はフィルム冷却は考慮の余地がある。
- ・従来よりも構造が複雑なノズルに冷却器を組み込むのは難易度が高く、短尺化や大径化による壁面形状そのものの最適化が解決すべき課題である。

参考文献

1. Multi-Objective Design Optimization of Linear Aerospike Engine - 2018/5/11 - Takahiro Fujikawa
2. Multidisciplinary Nozzle Approach to Aerospike Design - 1997/2 - J.J.Korte
3. Nasa-tn-1651 Supersonic Nozzle Design - 1948/6 - J.Conred Crown
4. CFD Analysis of a Linear Aerospike Engine with Film-cooling - 2019/8 - Paul Johnson
5. Prediction and visualization of supersonic nozzle flows using OpenFOAM - 2022/6/27 - Prasanth P.Nair