

超音速飛行時における マイクロ波ロケットの空気吸気性能と生成推力 に関する数値計算



2017.09.13

東京大学小紫研究室
マイクロ波ロケットグループ
修士1年 田畑邦佳



概要

1. 研究背景
2. 数値計算手法
3. 結果
4. 結論
5. 今後の課題

研究背景



背景



推進剤 ▶

ロケット周りの空気
【高ペイロード比の実現】

エネルギー ▶

地上からマイクロ波ビーム
【繰り返し利用が可能】

推進方法 ▶

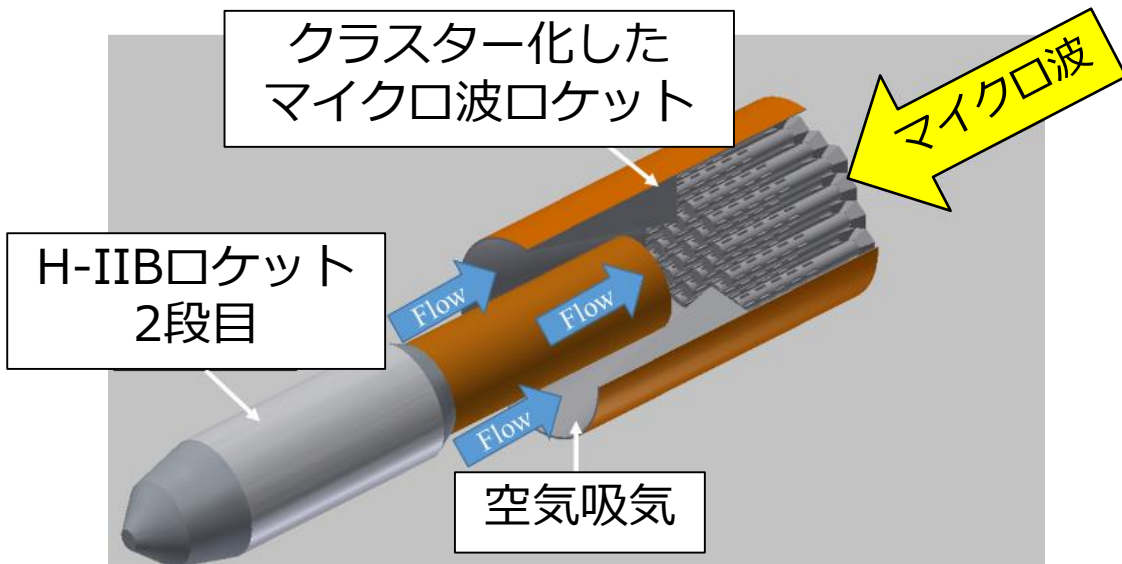
パルスデトネーション方式
【機体構造の簡素化】



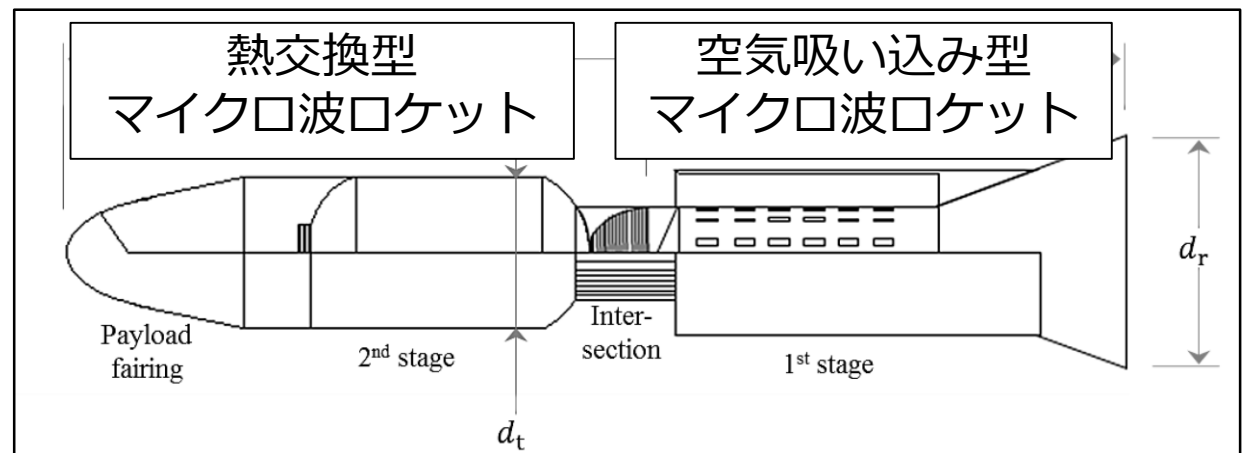
高頻度での打ち上げや
打ち上げコストの大幅な削減が可能



2 段式マイクロ波ロケット



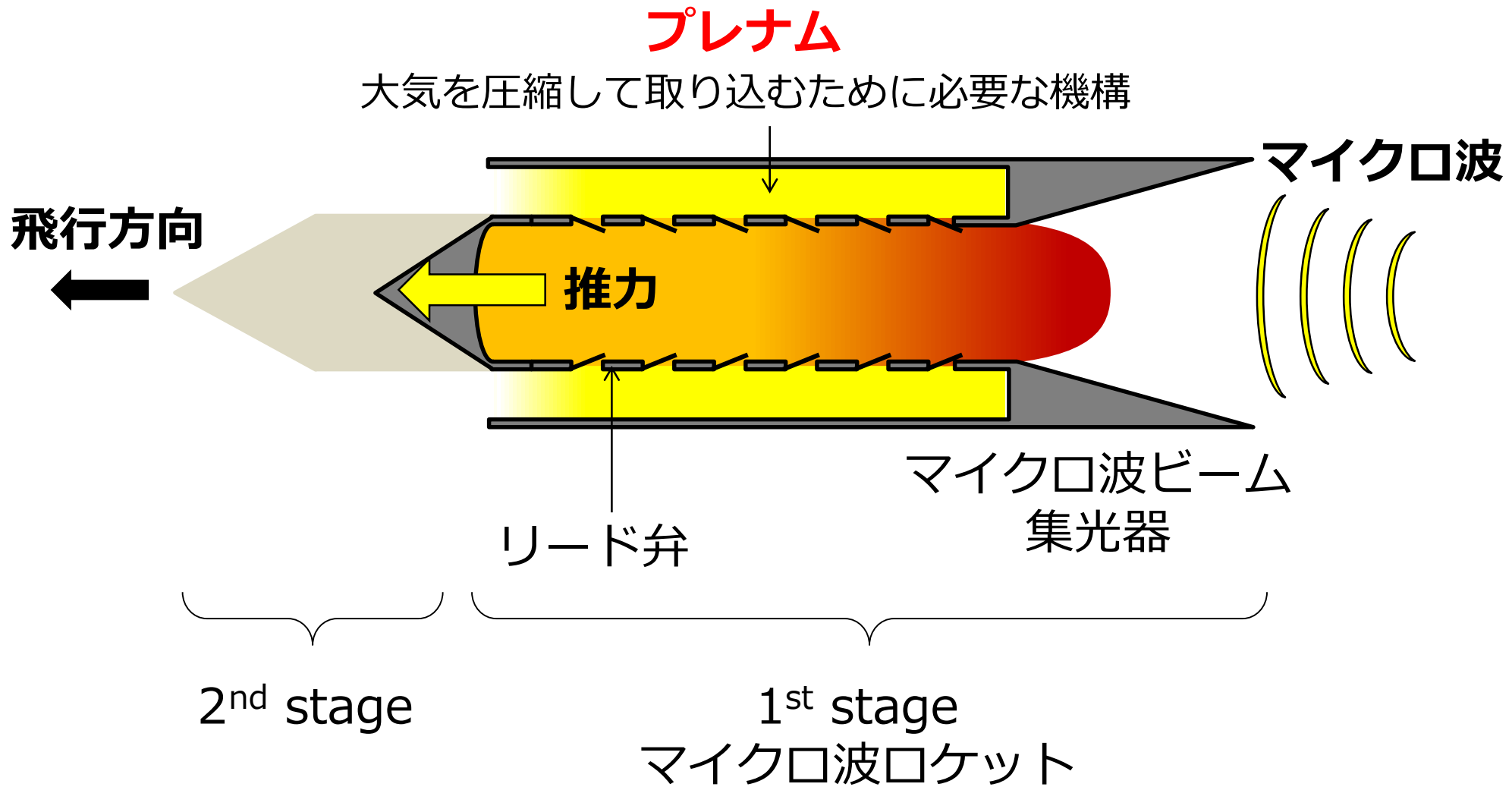
M. Fukunari et.al., "Replacement of chemical rocket launchers by beamed energy propulsion"



K. Kakinuma, "マイクロ波ビームで駆動する二段式宇宙輸送システム"



2 段式マイクロ波ロケット





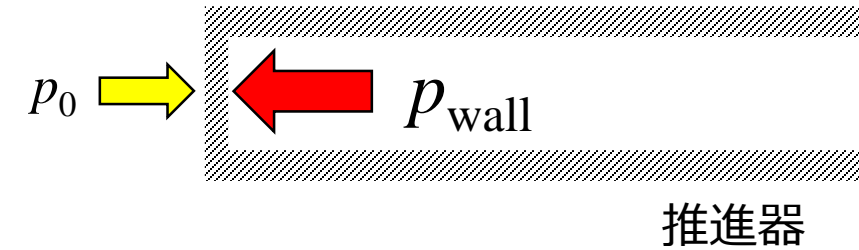
空気吸気性能と推力の関係

推力

$$T(t) = (p_{\text{wall}}(t) - p_0) \cdot A_{\text{wall}}$$

インパルス

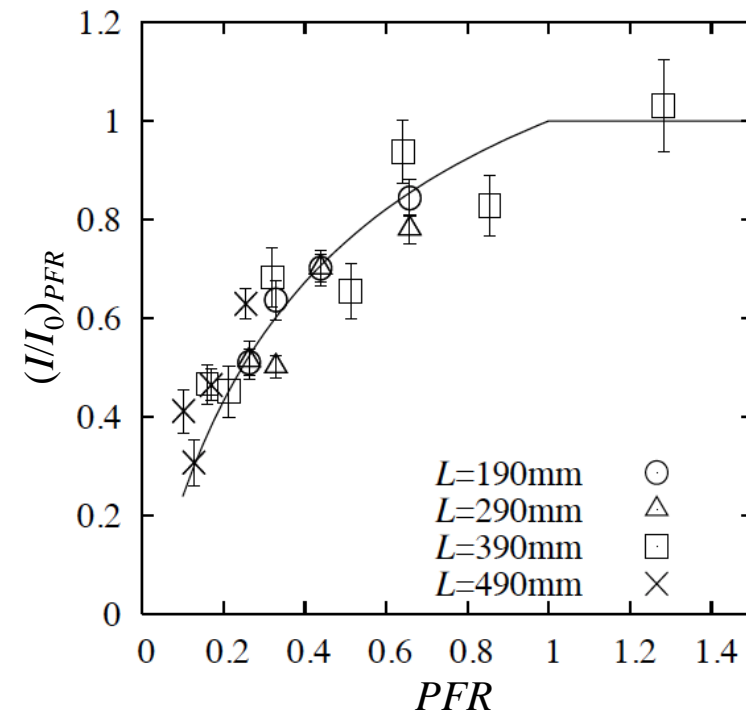
$$I_0 = \int_0^{\tau_{\text{cycle}}} T(t) dt = T_0 \cdot \tau_{\text{thrust}}$$



✓ 部分充填率

PFR (Partial Filling Rate)

✓ 推力デューティ比 Φ_{thrust}



Y. Oda et. al., "Thrust Performance of a Microwave Rocket under Repetitive Pulse Operation"



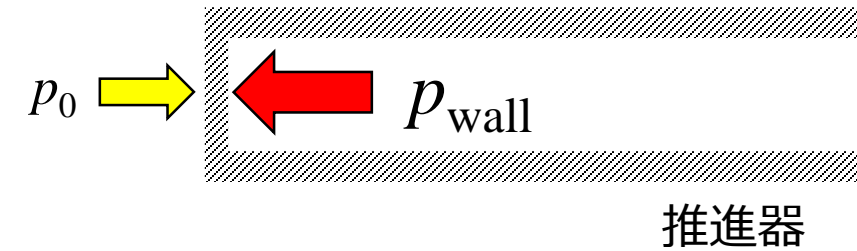
空気吸気性能と推力の関係

推力

$$T(t) = (p_{\text{wall}}(t) - p_0) \cdot A_{\text{wall}}$$

インパルス

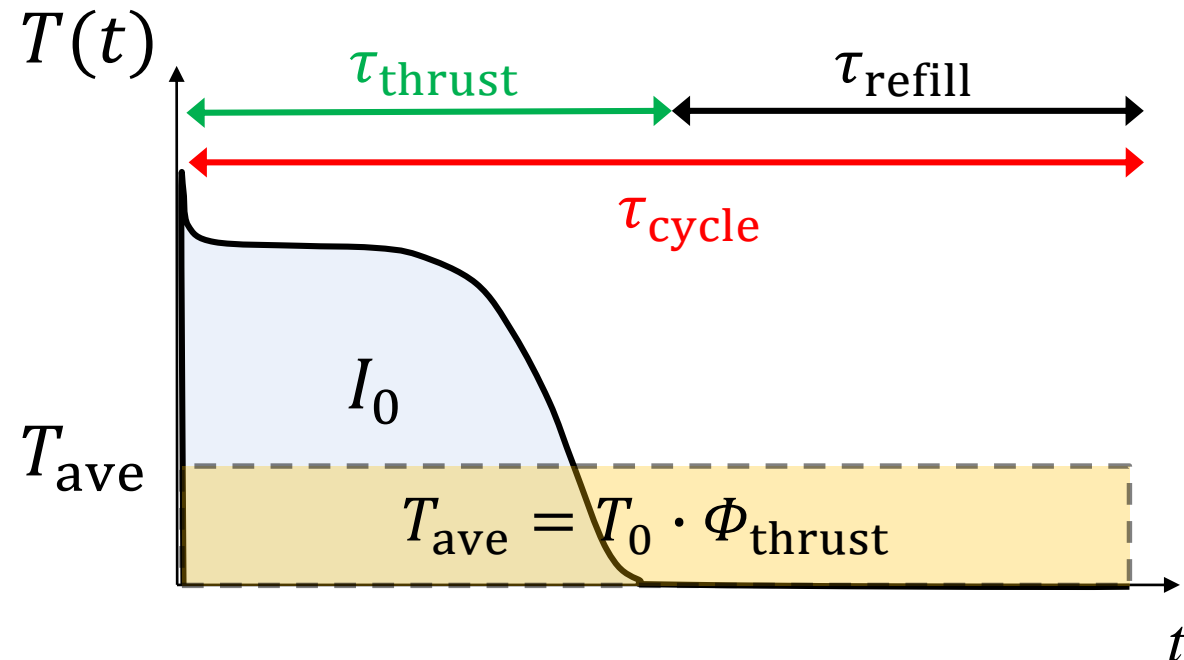
$$I_0 = \int_0^{\tau_{\text{cycle}}} T(t) dt = T_0 \cdot \tau_{\text{thrust}}$$



✓ 部分充填率
PFR (Partial Filling Rate)

✓ 推力デューティ比 Φ_{thrust}

$$\Phi_{\text{thrust}} = \frac{\tau_{\text{thrust}}}{\tau_{\text{cycle}}}$$





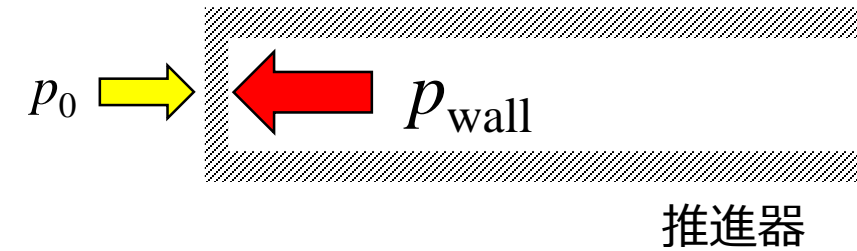
空気吸気性能と推力の関係

推力

$$T(t) = (p_{\text{wall}}(t) - p_0) \cdot A_{\text{wall}}$$

インパルス

$$I_0 = \int_0^{\tau_{\text{cycle}}} T(t) dt = T_0 \cdot \tau_{\text{thrust}}$$



- ✓ 部分充填率

PFR (Partial Filling Rate)

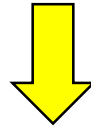
- ✓ 推力デューティ比 Φ_{thrust}

$$\text{繰り返し作動} \rightarrow T_{\text{ave}} = T_0 \cdot \Phi_{\text{thrust}} \cdot \left(\frac{I}{I_0} \right)_{PFR}$$



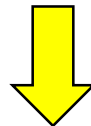
研究目的

推力生成に空気吸気性能がどう寄与するかを調べたい。
ただ、吸気性能を実験により検証することは難しい。



**数値計算によりプレナムとリード弁の動作をモデル化し、
吸気性能の調査、推力計算を行う。**

プレナムの最適なデザインは検討されていない。



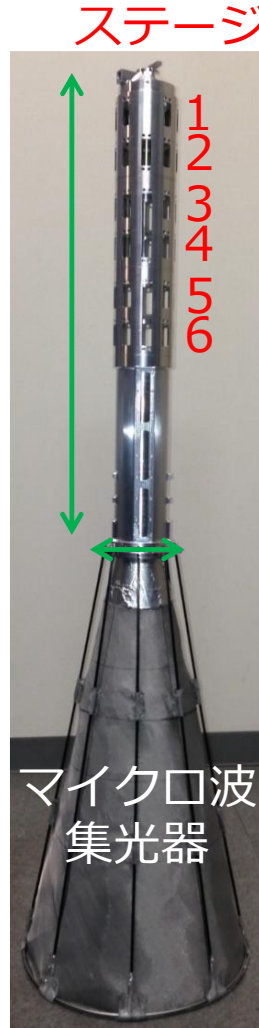
**プレナムの大きさが吸気性能に与える影響を調べ、
生じる推力の大きさからプレナムサイズを最適化する。**

数值计算手法



ロケットのデザイン

推進機長
 $L = 0.5 \text{ m}$



マイクロ波
集光器

ステージ No.

リード弁

推進機径
 $D = 56 \text{ mm}$

今回の計算では
無視する



1ステージに
8コのリード弁





計算方法

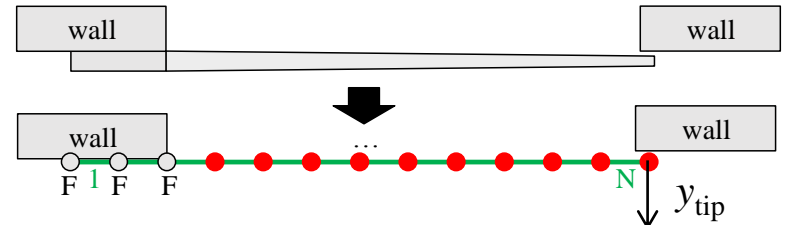
プレナムと推進器内の
圧力比の計算

有限要素法によるリード弁の変位計算

$$[M]\ddot{X}(t) + [C]\dot{X}(t) + [K]X(t) = F(t)$$

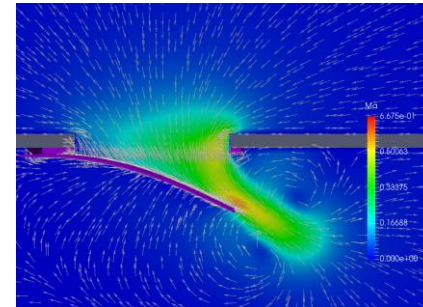
$$\frac{p_{\text{tube}}}{p_{\text{plenum}}}$$

y_{tip}



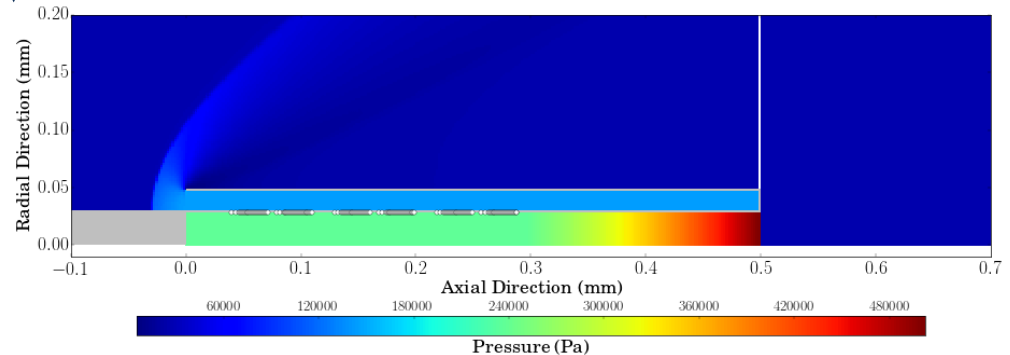
3次元 CFD による
リード弁からの質量流量の計算

$$\dot{m}_{\text{valve}} = f\left(\frac{p_{\text{tube}}}{p_{\text{plenum}}}, y_{\text{tip}}\right)$$



2次元軸対称 CFD による
流体方程式の計算

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_r}{\partial r} + \frac{1}{r}H_r = S_{\text{reed valve}}$$





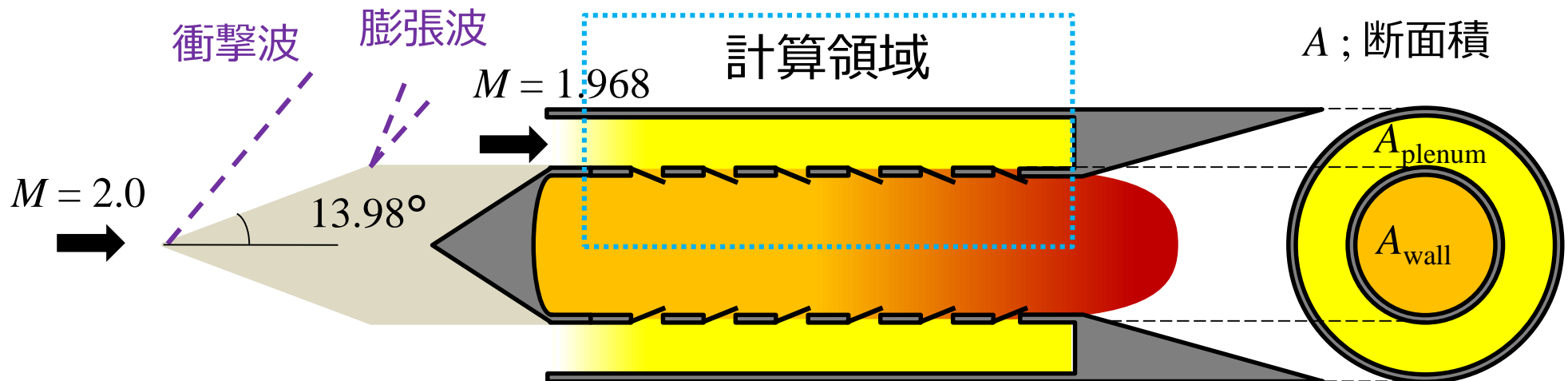
計算条件

飛行条件 ▶ $H = 10 \text{ km}$, $V = 600 \text{ m/s}$ ($M = 2.0$)

ロケットデザイン ▶ $L = 0.5 \text{ m}$, $D = 56 \text{ mm}$, A_{wall}

プレナムデザイン ▶ 変数; $\alpha = A_{\text{plenum}}/A_{\text{wall}}$
($\alpha = 0.6, 0.8, 1.0, 1.6, 2.1, 3.0$)

照射マイクロ波パワー ▶ 2 MW





推力の計算方法

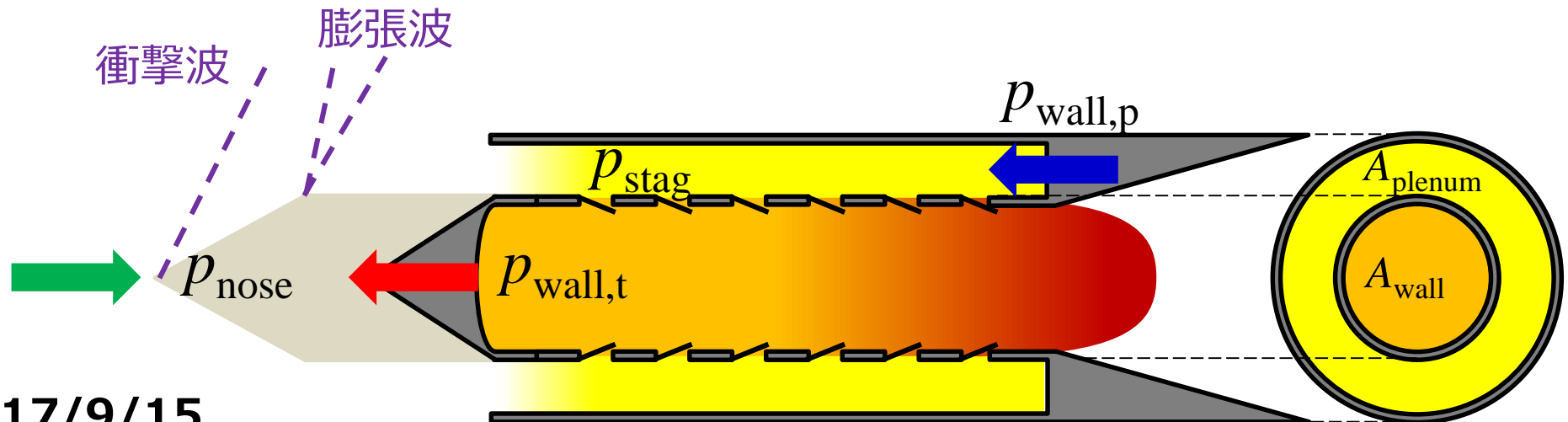
空気抵抗を考慮した1サイクルにおける合計推力の算出

$$T_{\text{ave}} = A_{\text{wall}} \times \overline{(p_{\text{wall,t}}(t) - p_{\text{nose}})} \times \left(\frac{I}{I_0}\right)_{PFR} \quad \text{推力壁で生じる推力}$$

$$+ A_{\text{plenum}} \times \overline{(p_{\text{stag}} - p_{\text{wall,p}}(t))} \quad \text{リード弁開口時の空気抵抗減少を補うための推力}$$

$$- \frac{1}{2} \rho_{\infty} (A_{\text{wall}} + A_{\text{plenum}}) \underline{C_D} V_{\infty}^2 \quad \text{空気抵抗}$$

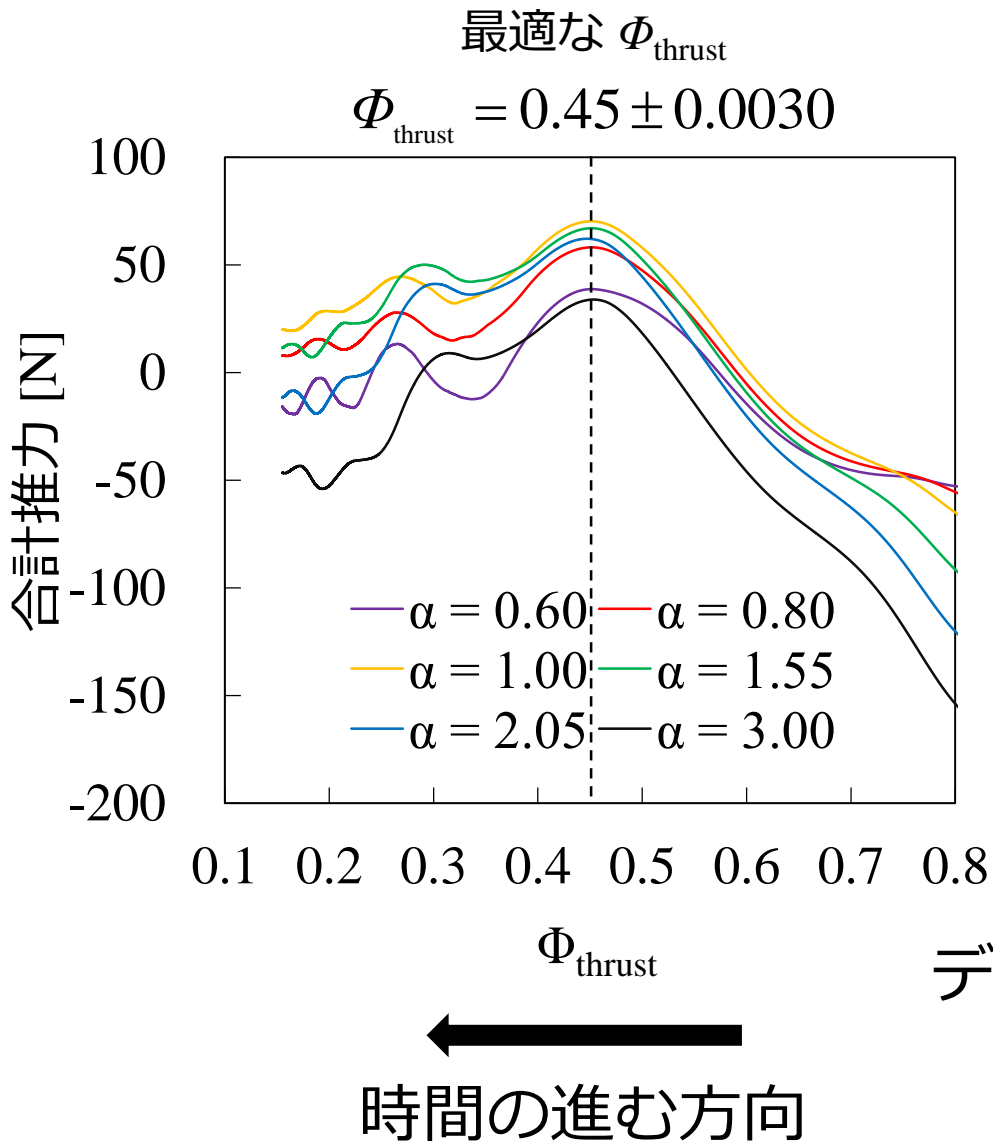
C_D は先行研究を参考に 0.3 とした。



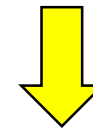
結果



推力の時間変化

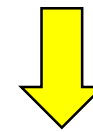


最適なデューティ比が存在



吸気時間による *PFR* の変化が
影響している

どんな α に対しても
最適なデューティ比は約 0.45 である

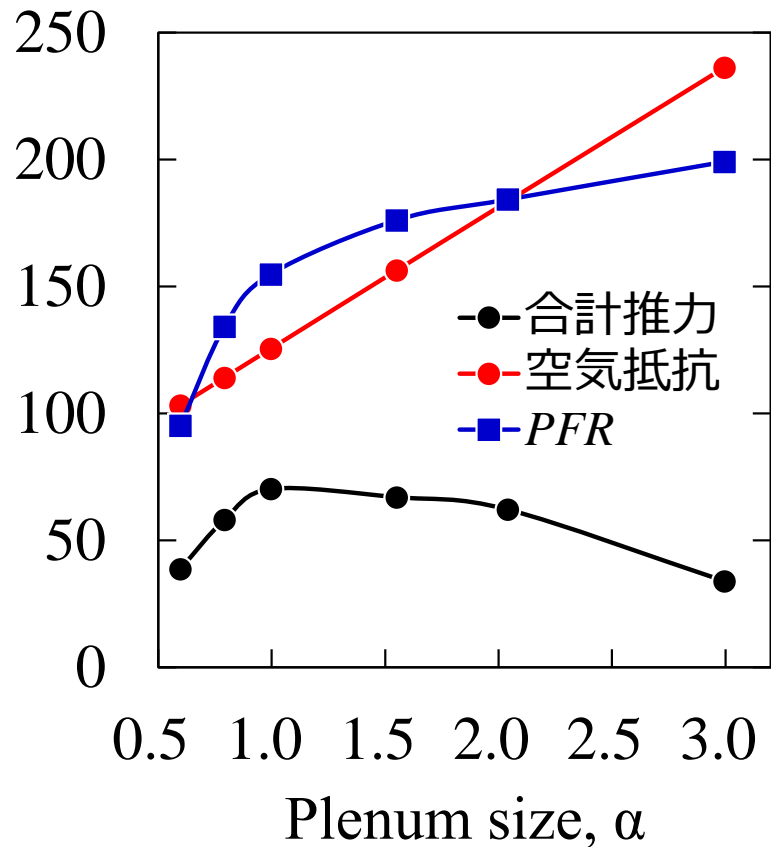


デューティ比 0.45 のときの推力を比較
→ 次スライド

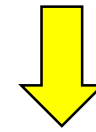


プレナムサイズの推力への影響

推力と空気抵抗 [N]



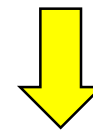
プレナムサイズに最適な点が存在



PFR と空気抵抗のトレードオフ

PFR

α が 1.00 から 2.05 という広い範囲で最大推力の 80% 以上の推力が得られる



プレナム設計に余裕が生まれる

結論



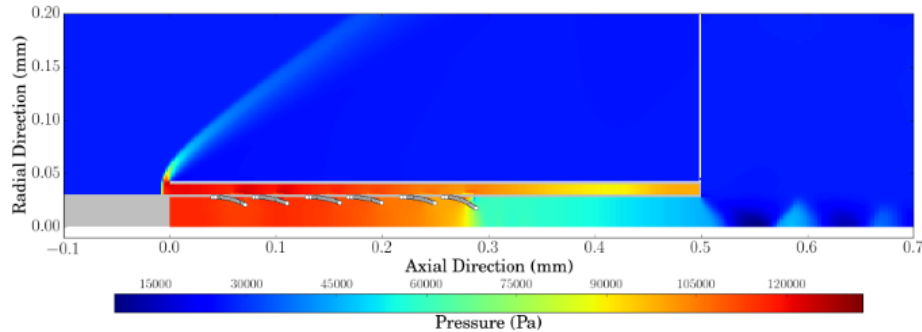
結論

- プレナムサイズには、 PFR と空気抵抗のトレードオフより最適な点が存在。2 MW のマイクロ波ビームにより高度 10 km, 飛行マッハ数 2.0 のときに、最大 70 N が得られる。
- 広い範囲のプレナムサイズで大きな推力を得ることが分かった。これにより、一つのプレナムデザインで大きな推力を飛行時中維持できる可能性がある。

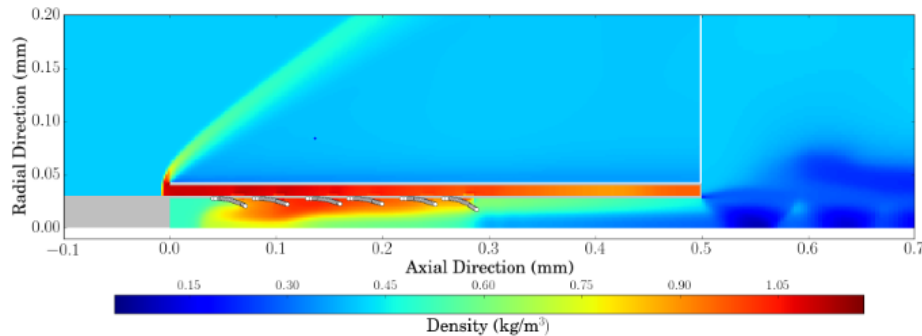
今後の課題



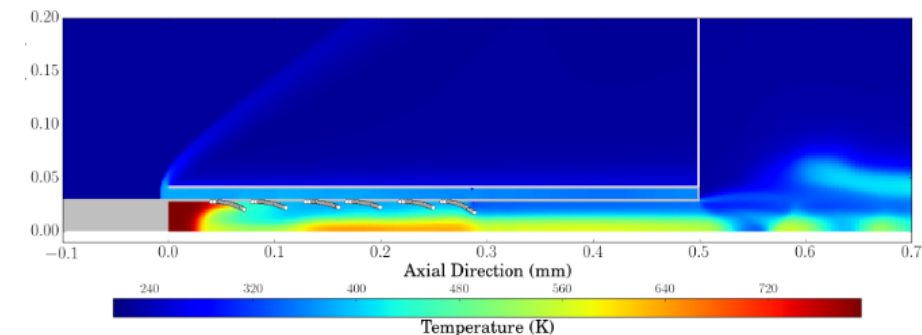
吸気終了時の2次元分布とPFR



(a) 圧力分布



(b) 密度分布



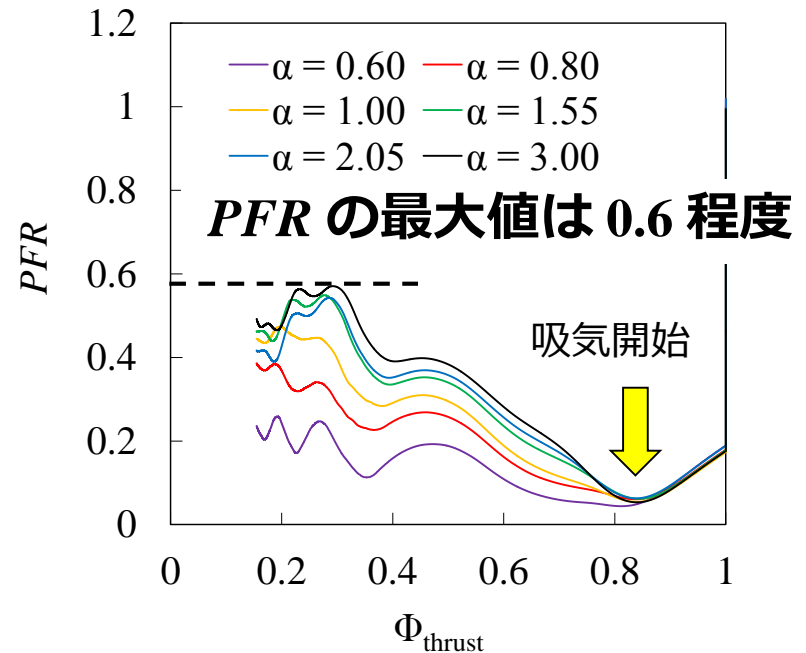
(c) 温度分布

- 温度、圧力ともに推力壁付近で高い
- 密度は推力壁付近で低い



推力壁での吸気が不十分

PFR の時間変化



PFR の最大値は 0.6 程度



時間の進む方向



今後の課題

- リード弁の形状や配置を変えて吸気性能の改善を図る。これにより、より大きな推力が得られるようになる。
- 飛行条件が変われば最適なプレナムサイズは変化する。他の飛行条件でも同様な調査を行い、その最適範囲がどれほど変化するかを調べる。これによりプレナム設計が可能になる。



ご清聴ありがとうございました。