

P20

ジャイロトロン出力ビームの 宇宙ロケットへの応用研究

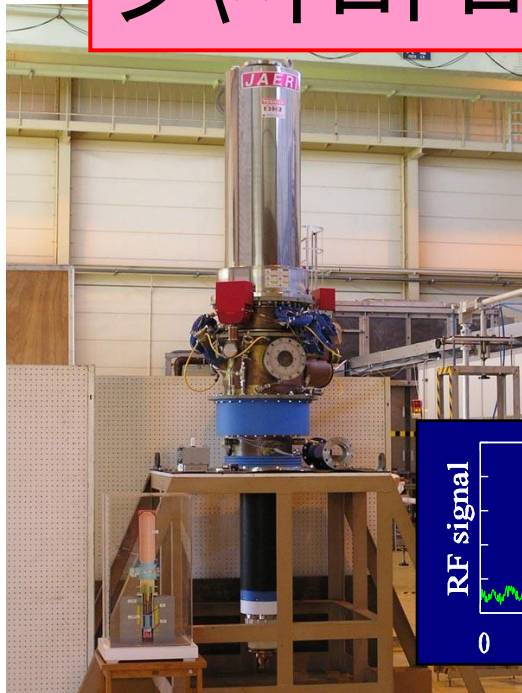
○山口敏和¹, 小田靖久², 小紫公也¹, 坂本慶司²

1) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻

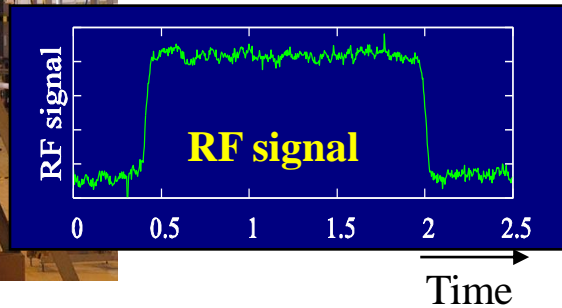
2) 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所 加熱工学研究グループ

ジャイロトロン出力の宇宙ロケットへの応用

ジャイロトロン

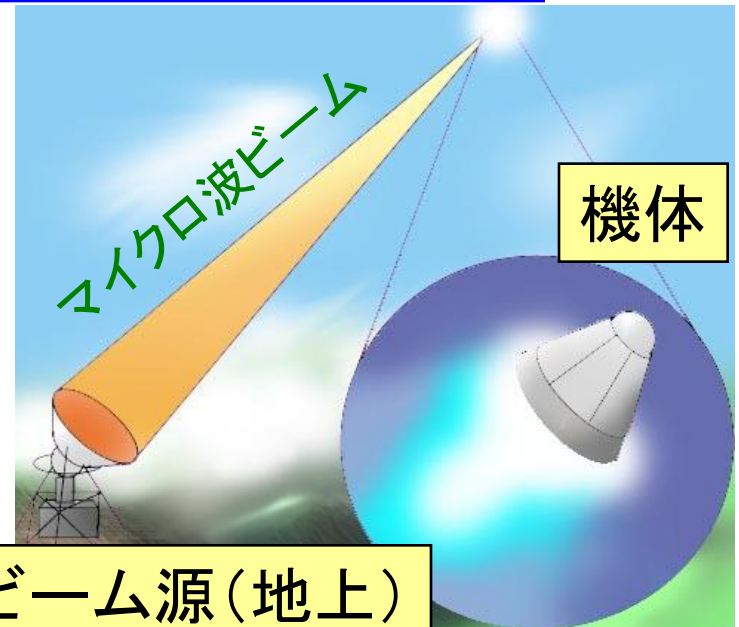


大電力
ミリ波ビーム



マイクロ波発振器
レーザー装置に比べて、
高出力(MW級を実現)、
高効率、安価、既に技術的実証

ビーミング推進



ビーム源(地上)

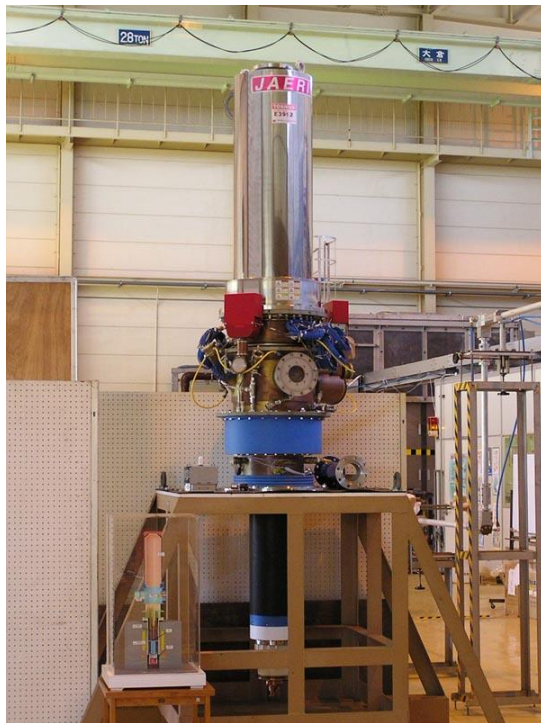
外部からのビーム照射による
エネルギー供給で推進

マイクロ波ロケット

(地上から宇宙への打ち上げロケット)

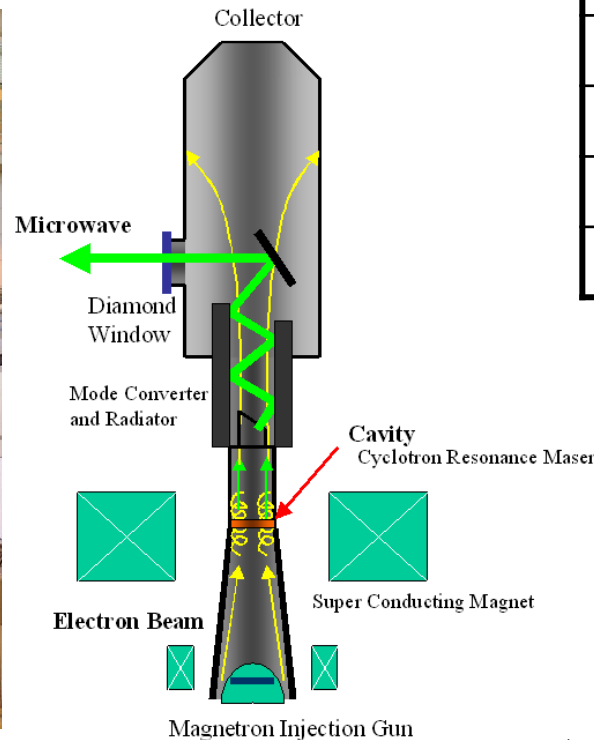
大電力マイクロ波(ミリ波)照射装置

1MW級ジャイロトロン for ITER (by JAEA/TOSHIBA)



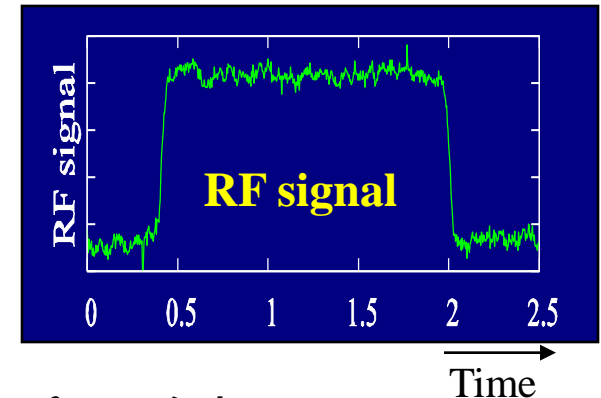
高さ 3m / 重さ 800kg

日本原子力研究開発機構との共同研究
(JAEA : Japan Atomic Energy Agency)



ジャイロトロンの仕様

Frequency	170GHz
Output Power P	< 1MW
Beam Profile	Gaussian
Beam waist	40mm
Electrical efficiency	60%

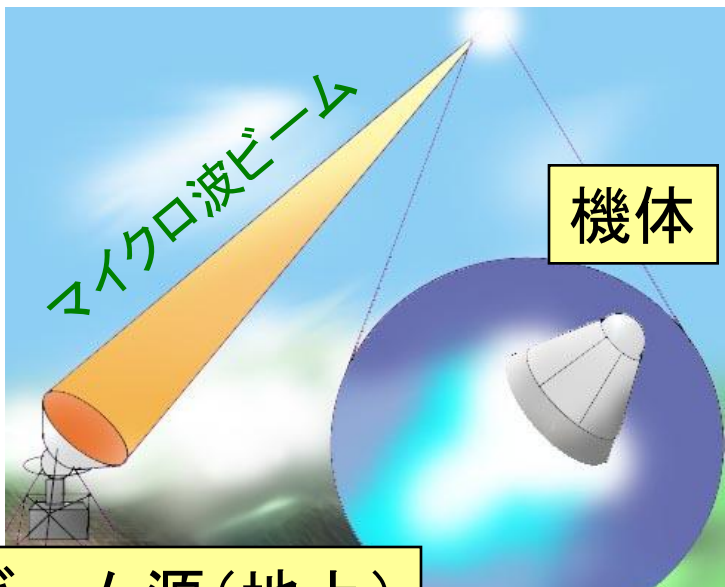


- ・ MW級のパワーを実現
- ・ レーザーより安価
- ・ 1パルスにおけるRFパワーがほぼ一定
- ・ パルス幅 0.1msec から 1,000sec

最近の開発により、マイクロ波パルスビームを
高い繰り返し周波数(~数kHz)で照射できるようになった。

マイクロ波ロケットとは？

次世代の地上からの打ち上げ用ロケット (ハワイ, マウナケア山から?)



特徴

・ビームエネルギー
(地上側施設からの
「電磁波ビーム」)

→ 推力
(機体を受ける
「爆風波」)

少ない搭載燃料

簡素・軽量な機体

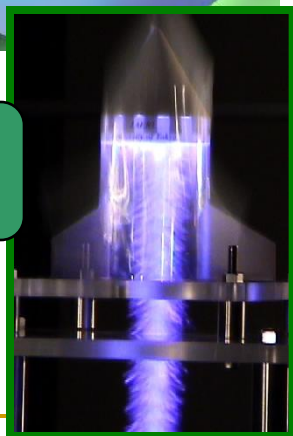
高ペイロード比

ビーム源(地上)

マイクロ波

レーザー

レーザー推進



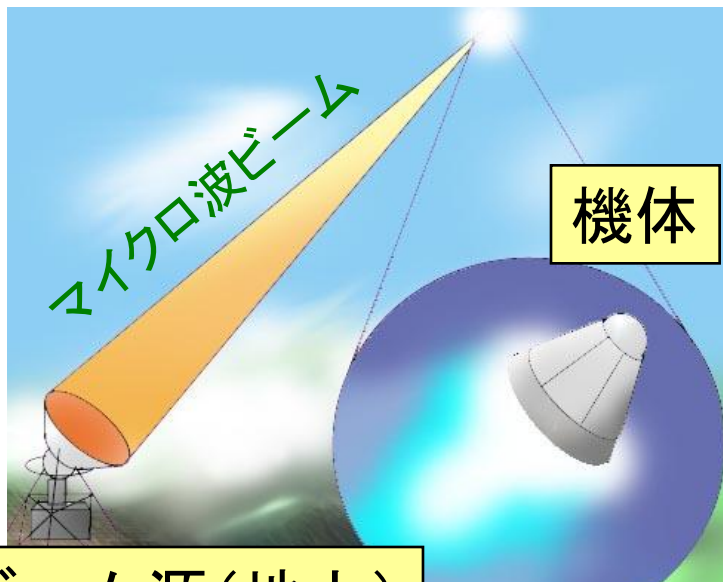
打ち上げコストの低減

打ち上げ頻度の増加で
さらなるコスト低下

マイクロ波ロケット

マイクロ波ロケットとは？

次世代の地上からの打ち上げ用ロケット

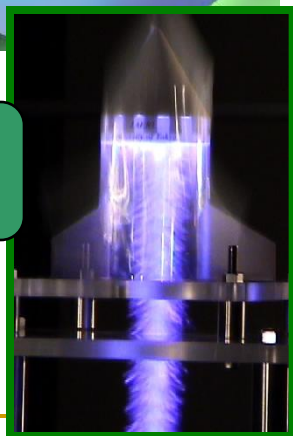


ビーム源(地上)

マイクロ波

レーザー

レーザー推進

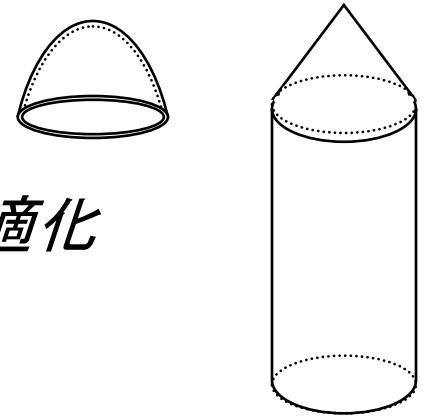


重要な要素

- ・ビーム
ビーム源: より強かに
伝送: より遠くまで
- ・ロケット機体
単純な構造で
高効率なエネルギー変換

マイクロ波ロケット

機体に関する過去の研究

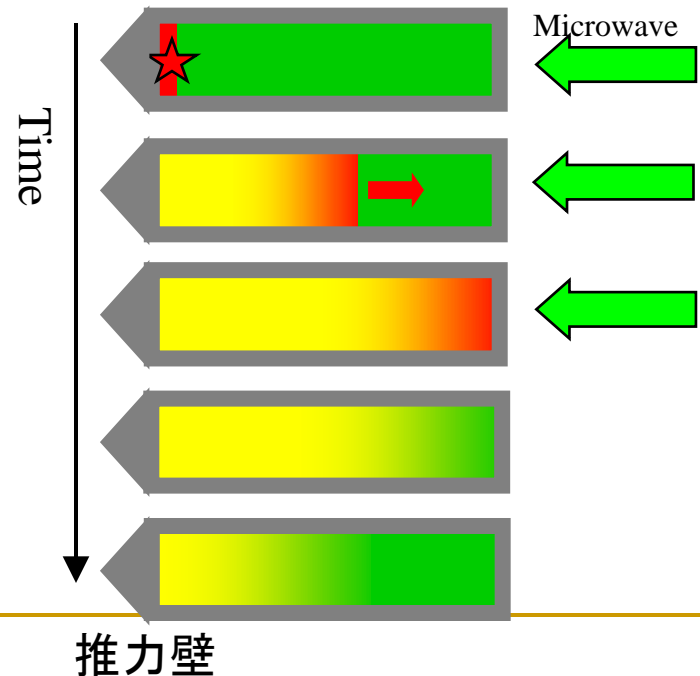
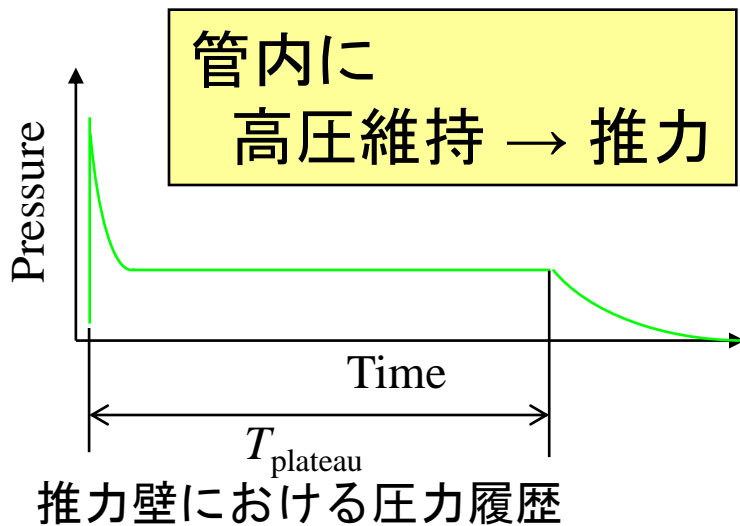


単パルス照射での推力向上:

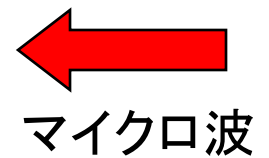
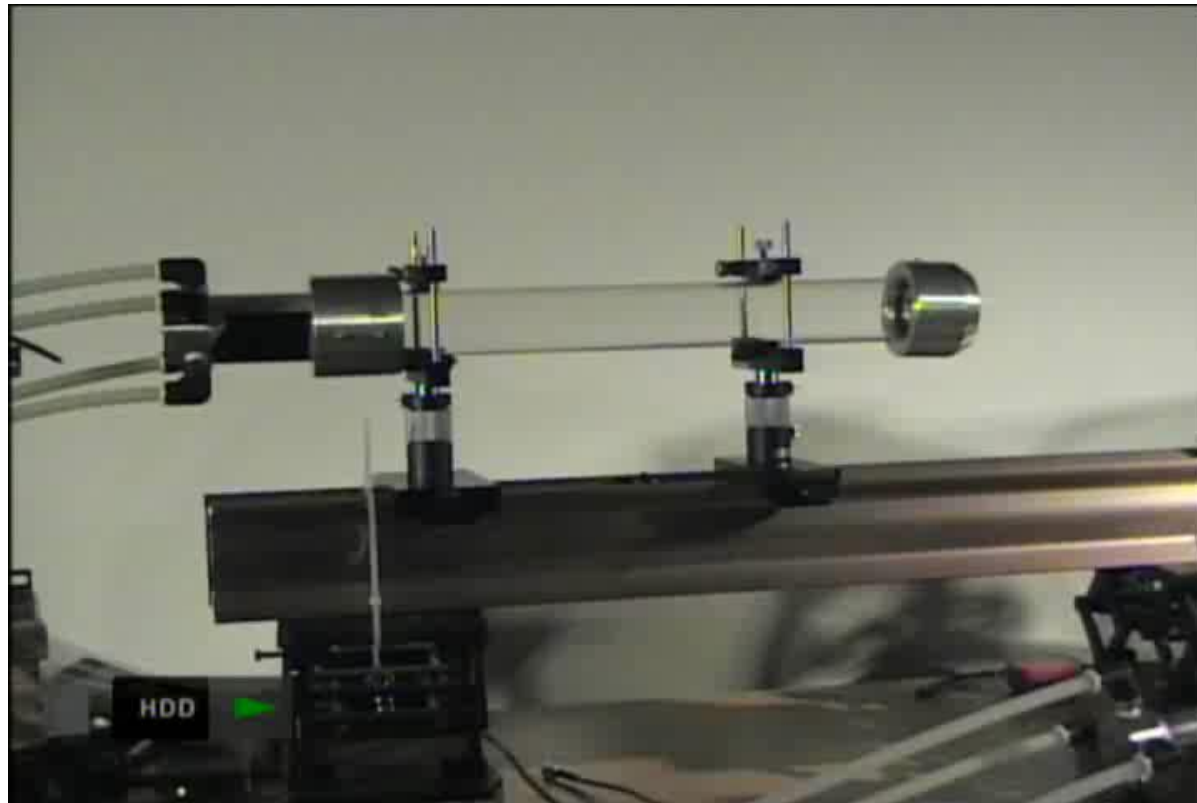
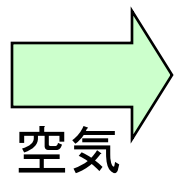
投入パワー増大, 筒の効果, パルス幅の最適化

繰り返しパルス照射による定常推力生成

→ 推力低下という課題 → 強制吸排気機構による改善
(推力3N, $C_m=400\text{N/MW}$ を実現. ただし地上設備にくっついた系)



マイクロ波ロケット 推力発生



これまで: 同じ投入ビーム, 機体側の形状を変化 → 性能向上
これから: 投入するビームも工夫する

・長距離ビーム伝送技術

+ ジャイロトロン の 性能向上

(より高い繰り返し周波数でパルスを打てるようになった)

長距離ビーム伝送技術の応用

マイクロ波の指向性はレーザーに比べて格段に劣るが、
回折を考慮したガウスビーム波の伝搬に関する式より

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{2z_0}{k_0 n}}$$

$w(z)$: 伝搬距離 z におけるスポットサイズ

w_0 : ビームウェスト(半径)

z_0 : レイリー長

k_0 : 真空中の波数

n : 屈折率

ミリ波帯マイクロ波では、ビーム径を大きくすれば十分な指向性を
得られる可能性がある。

(例) 370GHz, 直径15mのガウスビーム: 10%拡散(100km伝送)

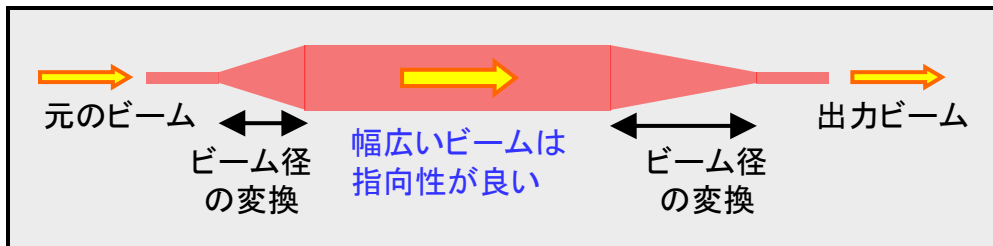
※100kmまでの加速で低軌道への投入が可能とされている。

<目的>

- ・ミラー系を介してマイクロ波を長距離ビーム伝送した上で、遠方でも推力を生成できることを確認する。
- ・この実験系において、高い繰り返し周波数でパルスビームを照射し、推力を生成する。

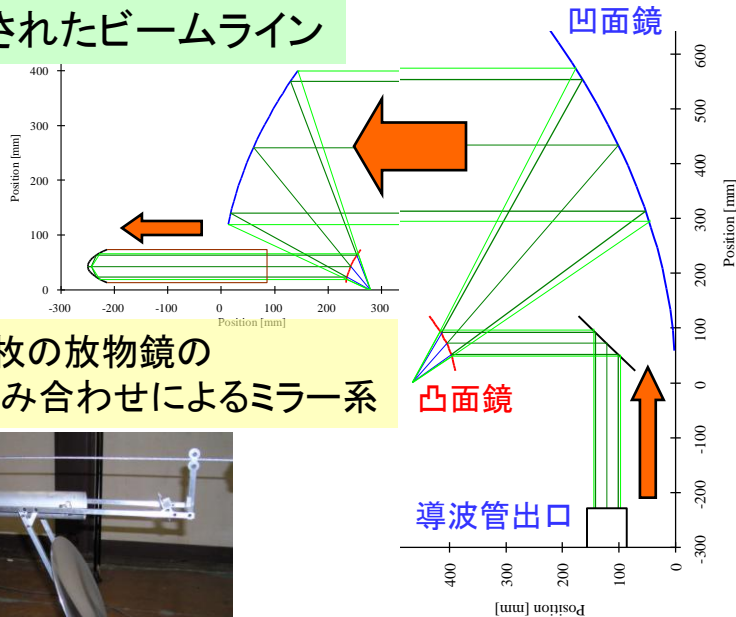
ビーム径の選定・ミラー系の設計

フラウンホーファー回折を考慮したガウスビームの伝搬の式から計算
ITER用などのミリ波光学のためのミラー系設計には数値計算を要しているが、
手計算の延長レベルの設計で問題ないと想定した。

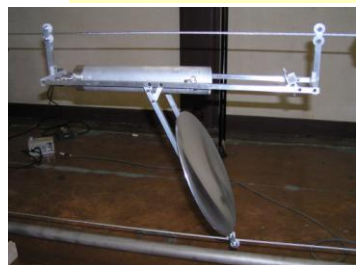


元のビームでは拡散するが
広げたビームでは拡散が抑えられる

設計されたビームライン



2枚の放物鏡の
組み合わせによるミラー系



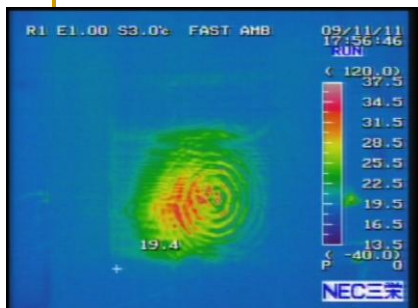
過去の実験で →
用いられてきた領域

↑
今回の実験に
用いた領域

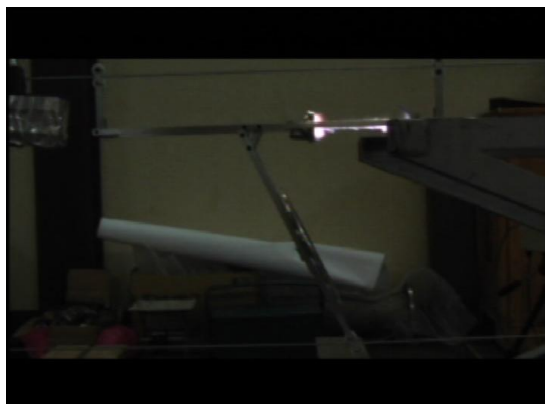
伝送距離	広げたビーム (直径240mm)	元のビーム (直径40mm)
0.5m	1.000	1.222
1m	1.001	1.723
2m	1.003	2.979
5m	1.019	7.088
10m	1.073	14.069

ミラー系を介して、
ビーム径を $40\text{mm} \rightarrow 240\text{mm}$ へ変換
(ビームウェイスト直径)

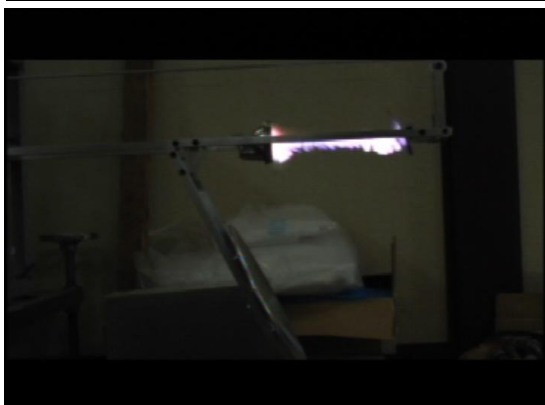
長距離伝送 伝送試験・放電実験



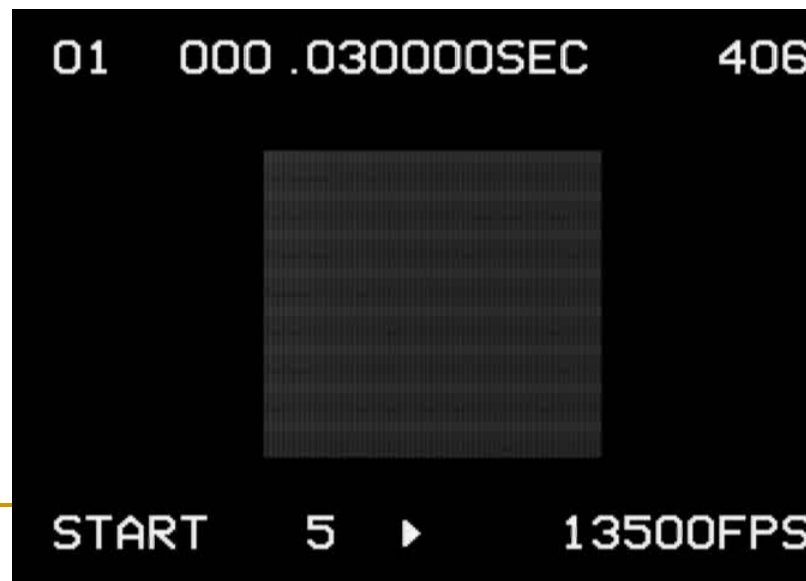
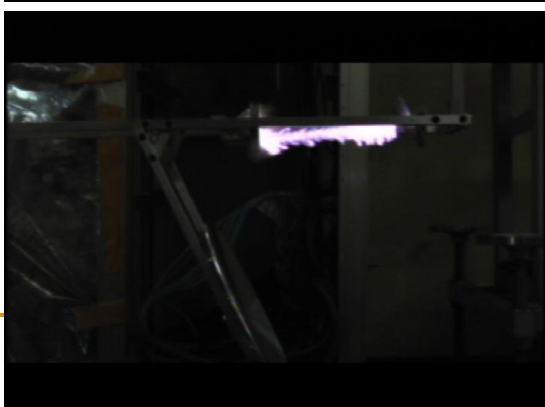
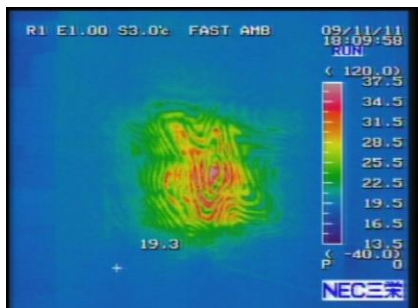
1m point →



3m point →

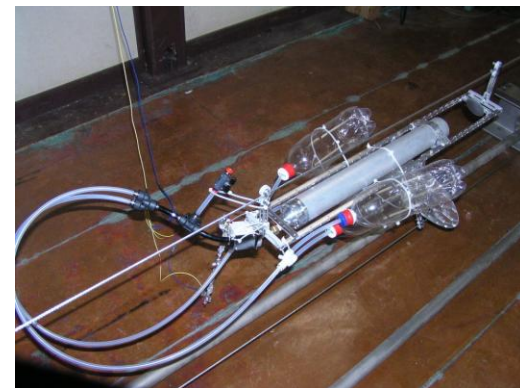
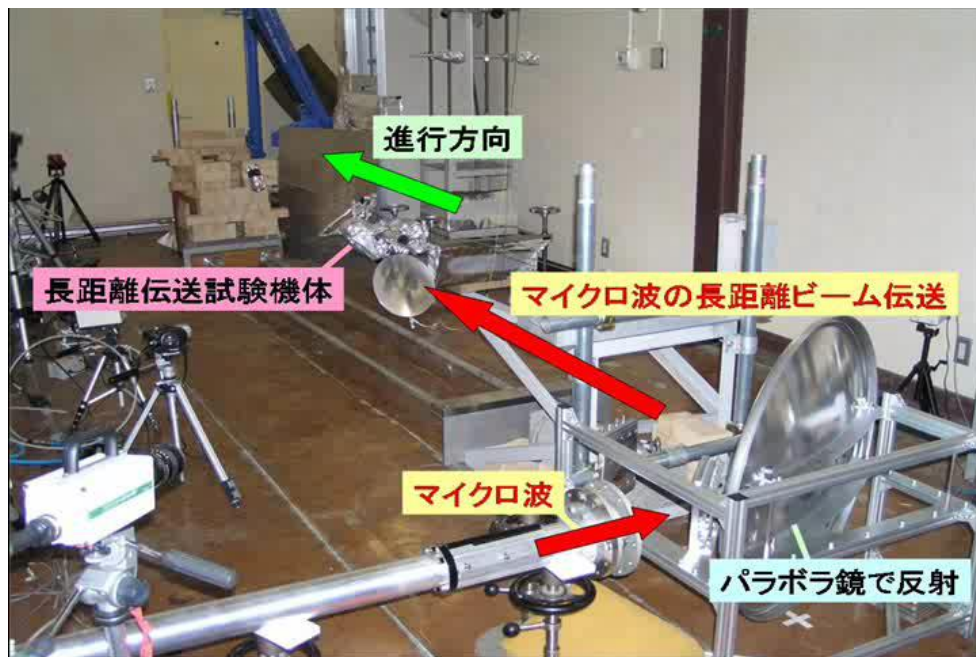


5m point →



長距離伝送による走行試験

繰り返しパルスビームの有効活用(高推力化)
より高い繰り返し周波数へ
(ジャイロトロン技術向上)



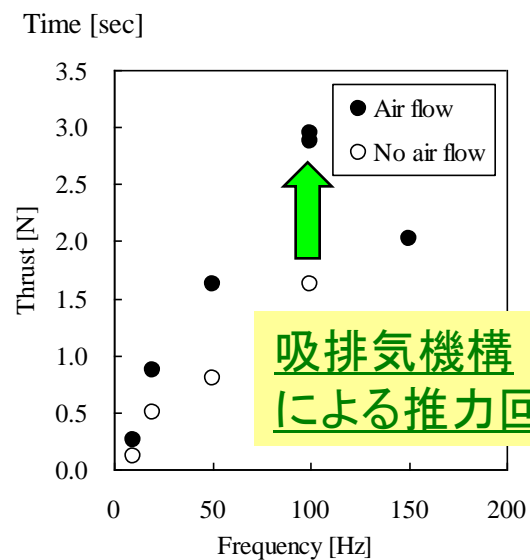
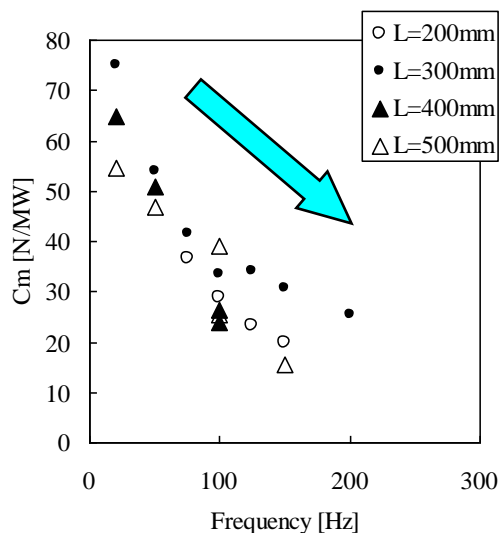
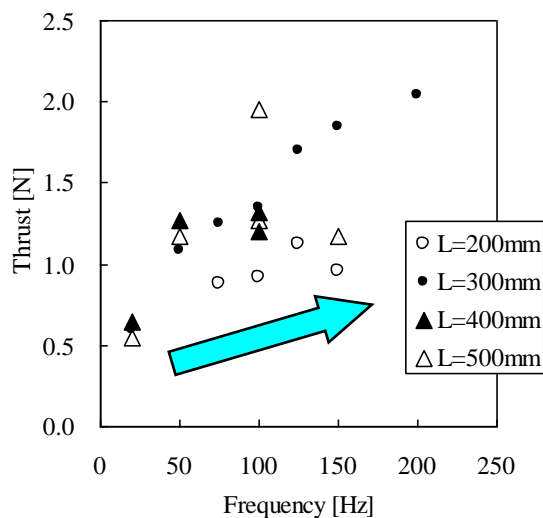
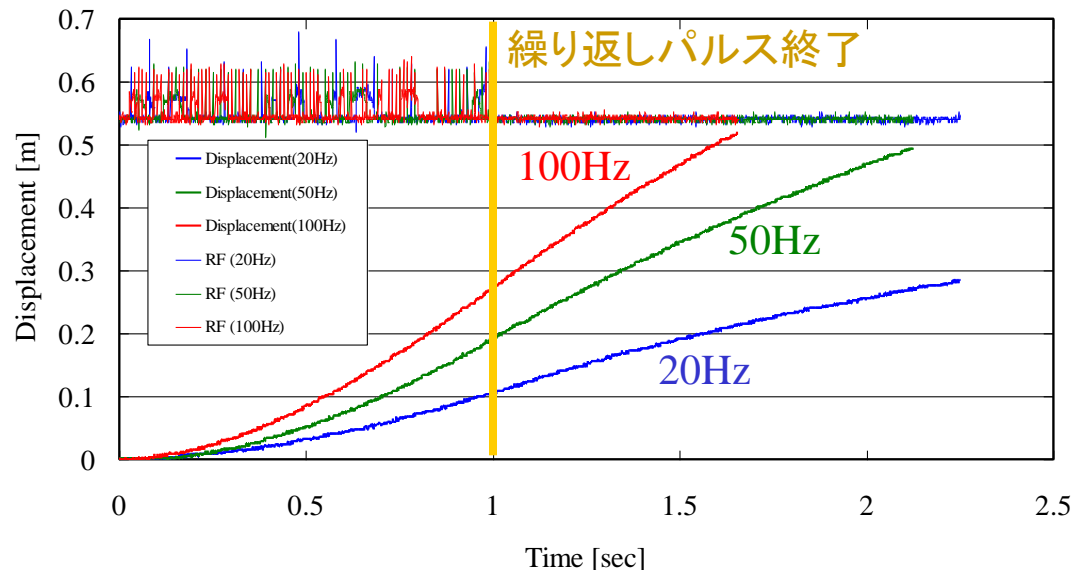
<タンク搭載型>
約2kg, 3N

ビーム径を従来の6倍に拡げることで
従来よりも遠方まで推力を生成し
続けることに成功した。

ジャイロトロン電源の高調波作動に合わせて
RFパルスの繰り返し周波数100Hzという
過去にない高繰り返し条件により、
2kgの機体を3Nの推力で押し続けた。
(出力パワー:400kW)

レーザー変位計による推力測定

変位量→加速度→推力
(2m空間伝送地点)



高繰り返しによる推力上昇と C_m 低下, 筒の効果

軽量モデル機打ち上げ実証実験

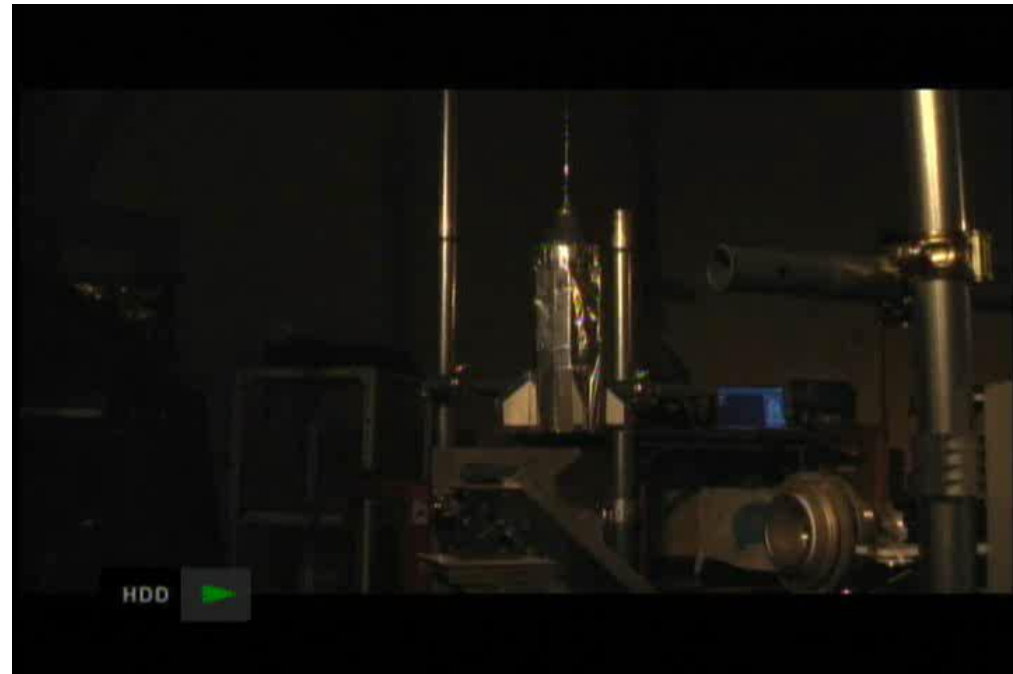
実験系

軽量モデル機体



φ56→90
L300taper
126g
(SUS製)

φ100
L300
109g
(Al製)



小型モデル機

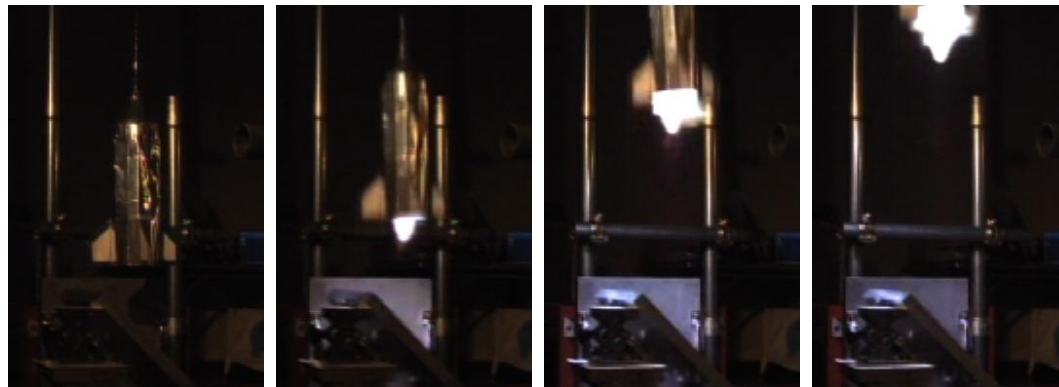
マイクロ波

平板鏡で反射

過去に例のない高い繰り返し周波数のパルス投入により
両機体ともに 1.2m まで持続的な推力生成による飛翔を実証した。

(出力パワー: 600kW, パルス繰り返し周波数: 100Hz, パルス幅: 1.25msec, 全照射時間: 0.7sec)

2003年のデモンストレーション実験では、
9.5g のプラスチック製機体を 930kW の
RF で約 2m 打ち上げたが、これは単発の
推力での上昇だったのに対して、
今回の実験ではマルチパルスによる
持続的な推力生成での飛翔を実証した。



2m以上の飛翔のためには・・・

1.2mまでの飛翔にとどまったのは、ビームアライメントがずれたからではなく、プラズマはついていても推力に寄与できていないため。
(衝撃波が弱い ← 電力密度が低すぎる ← ビームの拡散)

2m離れた地点からではこれ以上飛び上がらなかった。



→ 何らかのビーム伝送技術が必要

まとめ

ジャイロトロン → 大電力ミリ波ビーム → マイクロ波ロケット

<ビーム側を工夫する>

- ・ミラー系による長距離ビーム伝送

ミリ波でもレーザー光のように光学部品を介して自由に径変換・集光ができた。

- ・過去にない高い繰り返し周波数パルスビームでの推力測定

繰り返し周波数増加による著しい効率低下

空気吸い込み機構による推力回復

[今後の計画]

「kg級ロケット機体の10m打ち上げ, ホバリング・姿勢保持, 軟着陸」
を実証することを目指して, 改良を加える。

END
