

P20 (ポスターセッション用)

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

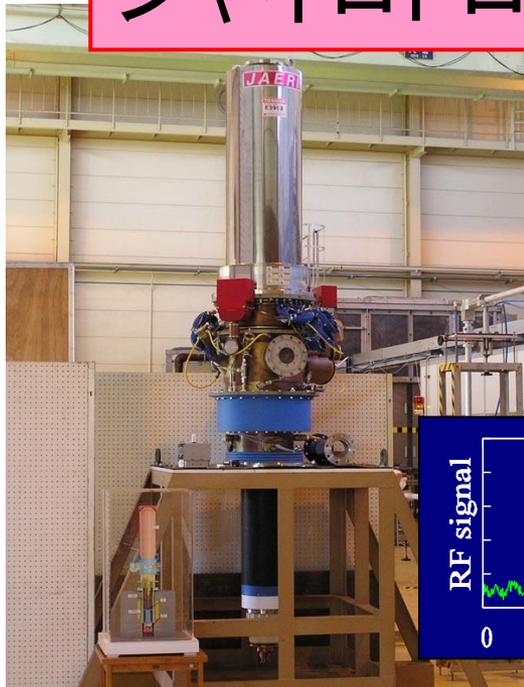
○山口敏和¹, 小田靖久², 小紫公也¹, 坂本慶司²

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

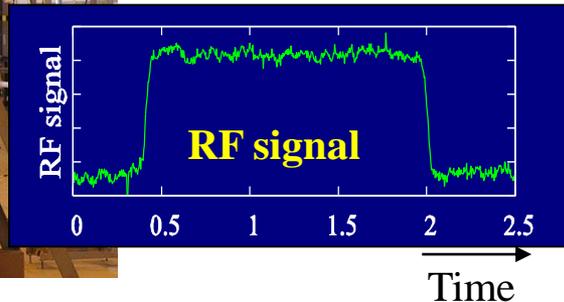
2) 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所 加熱工学研究グループ

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

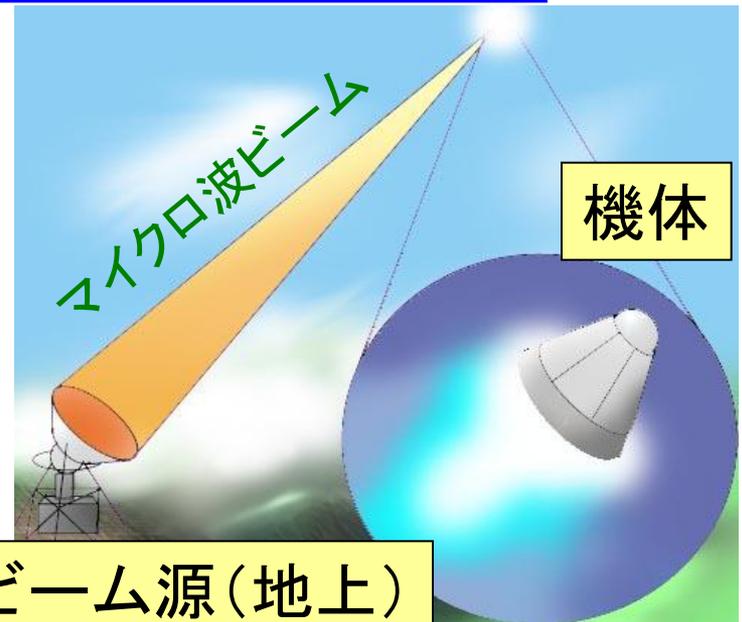


大電力
ミリ波ビーム



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)

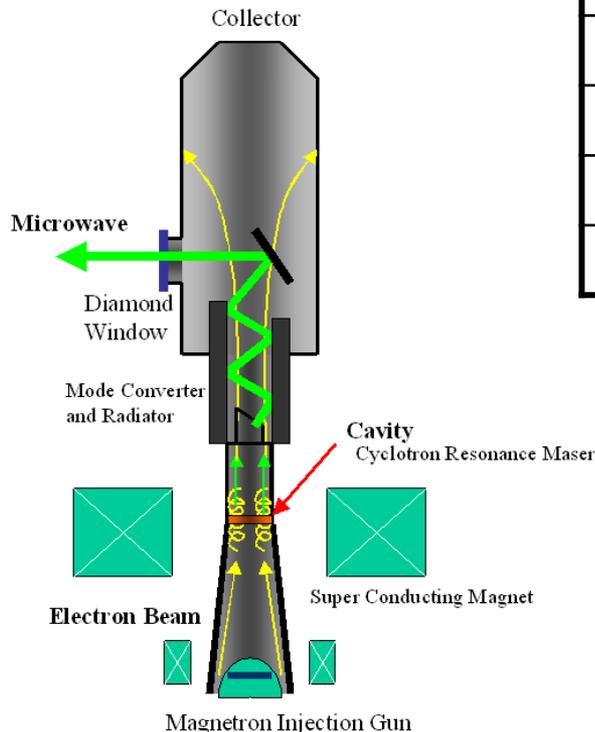
大電力マイクロ波(ミリ波)照射装置

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



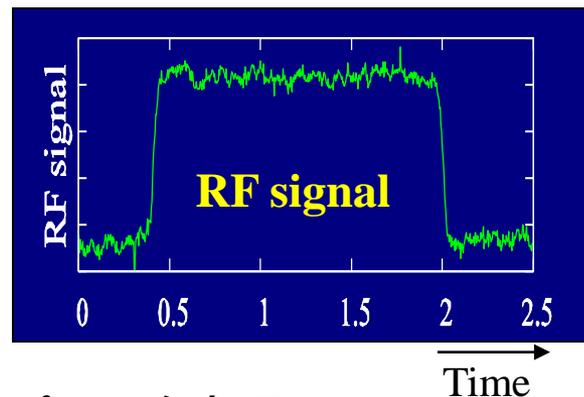
高さ 3m / 重さ 800kg

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%

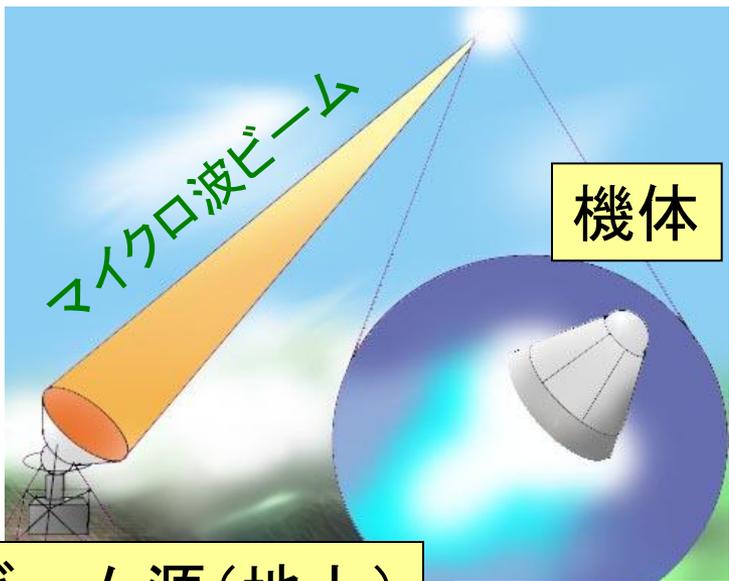


- ・ MW級のパワーを実現
- ・ レーザーより安価
- ・ 1パルスにおけるRFパワーがほぼ一定
- ・ パルス幅 0.1msec から 1,000sec

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
(機体が受ける「爆風波」)

少ない搭載燃料

簡素・軽量な機体

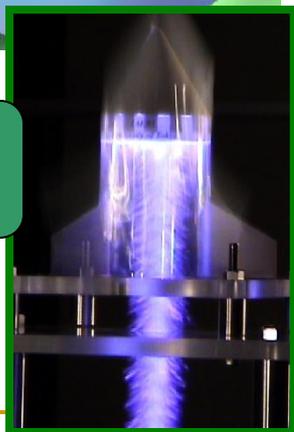
高ペイロード比

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

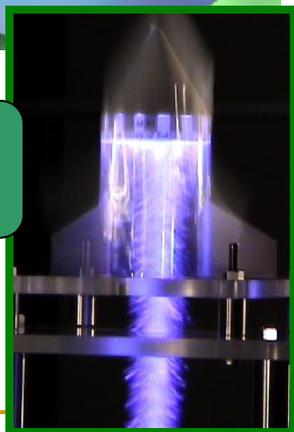


ビーム源(地上)

マイクロ波

レーザー

レーザー推進

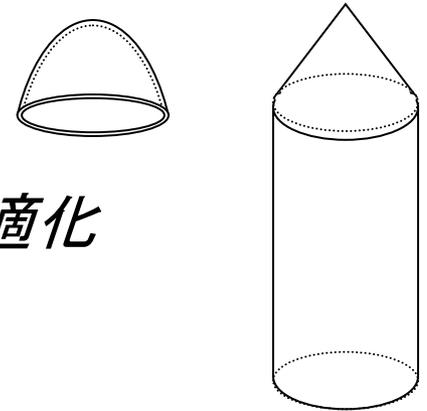


重要な要素

- ・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

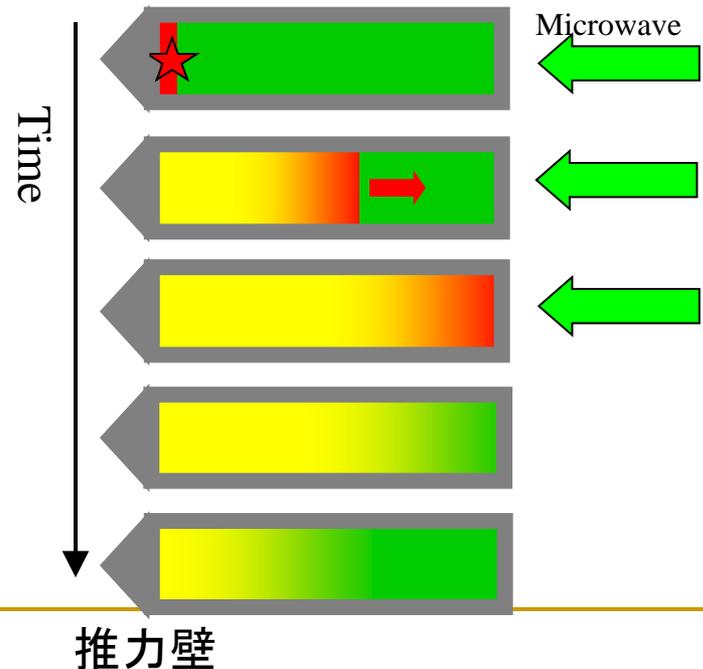
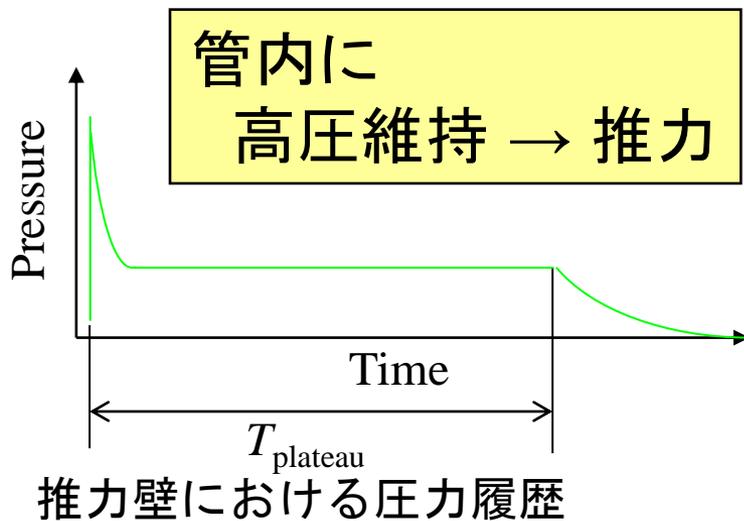


単パルス照射での推力向上:

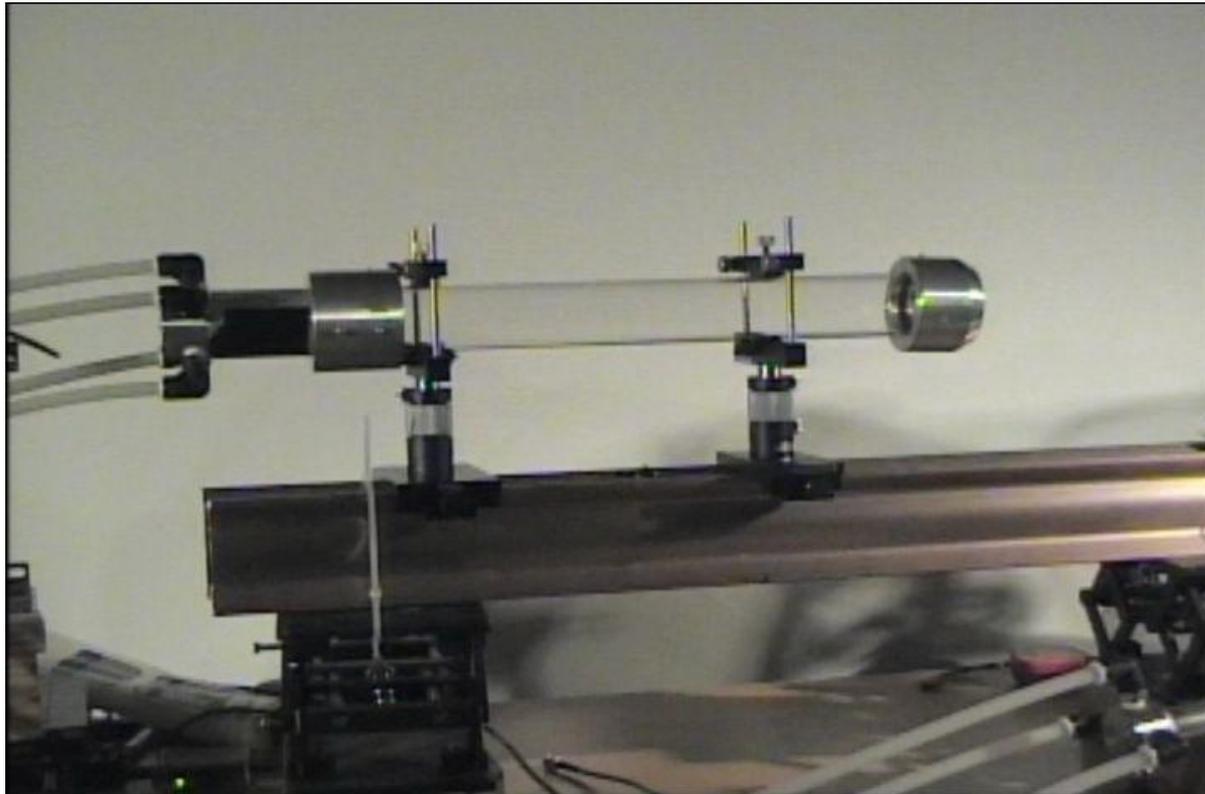
投入パワー増大, 筒の効果, パルス幅の最適化

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)

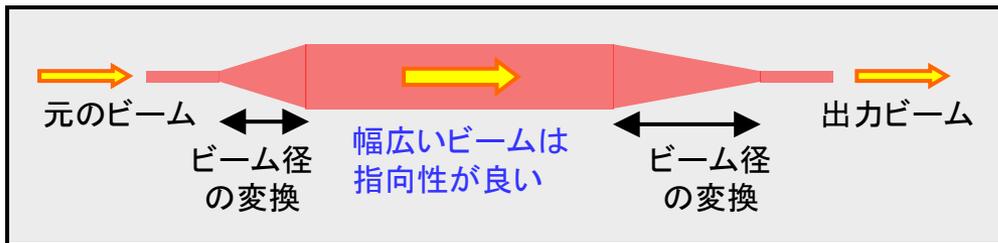
※100kmまでの加速で低軌道への投入が可能とされている。

<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。

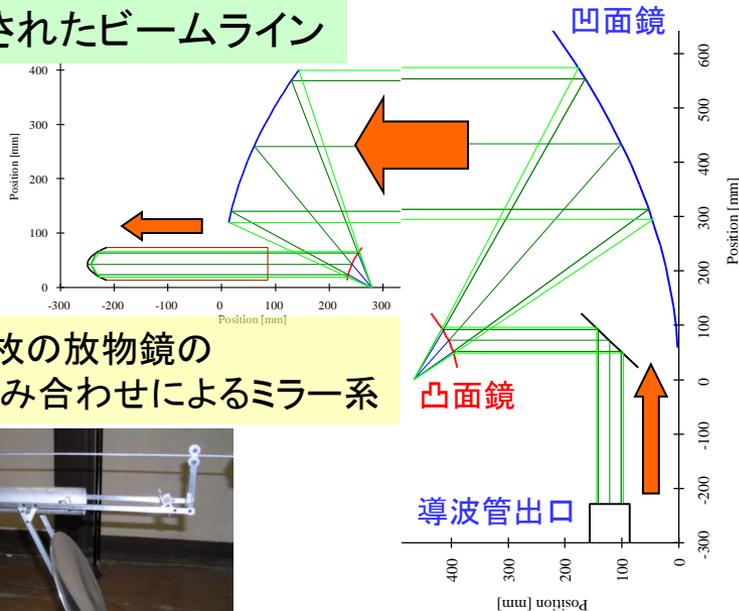
ビーム径の選定・ミラー系の設計

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



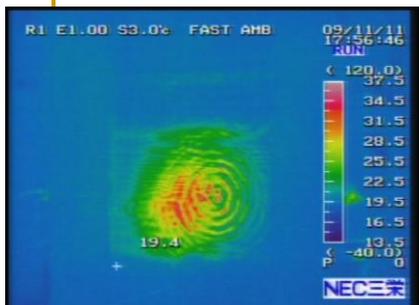
過去の実験で →
用いられてきた領域

↑
今回の実験に
用いた領域

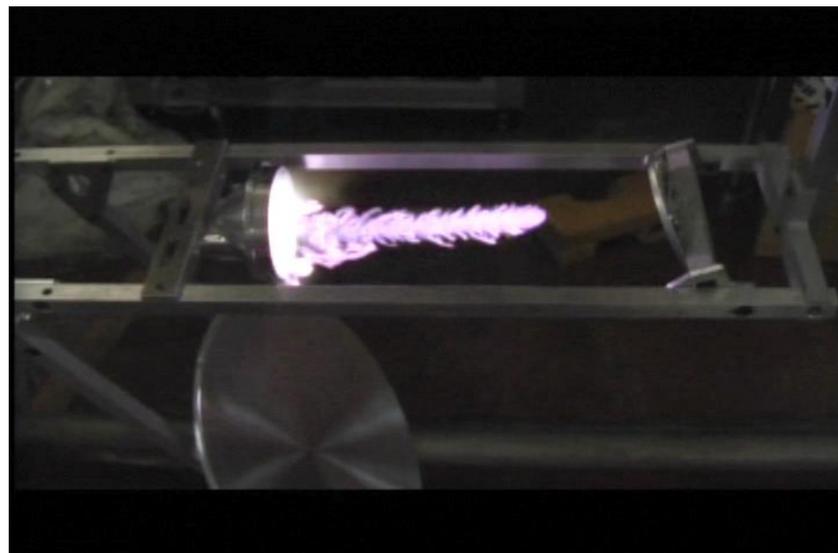
伝送距離	広げたビーム (直径240mm)	元のビーム (直径40mm)
0.5m	1.000	1.222
1m	1.001	1.723
2m	1.003	2.979
5m	1.019	7.088
10m	1.073	14.069

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)

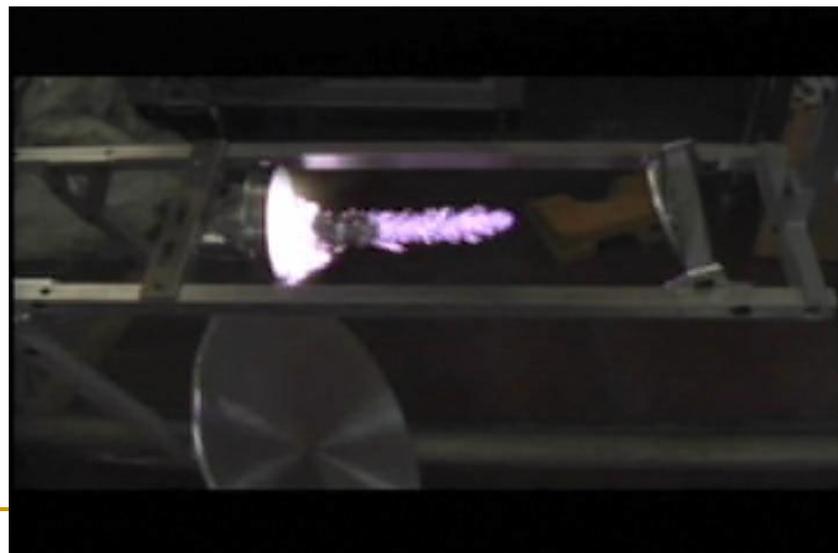
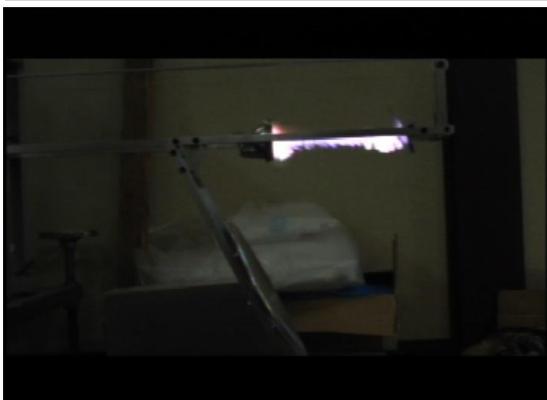
長距離伝送 伝送試験・放電実験



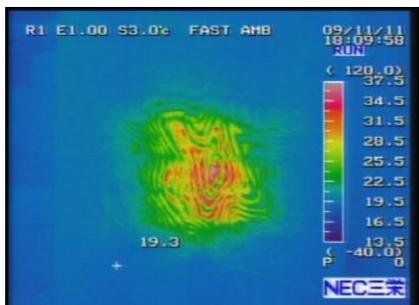
1m point →



3m point →



5m point →



01 000 .030148SEC 408



START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030222SEC 409



START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030296SEC 410



START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030370SEC 411



01 000 .030444SEC 412



START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030518SEC 413



START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030592SEC 414



START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030666SEC 415



01 000 .030740SEC 416



START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030814SEC 417



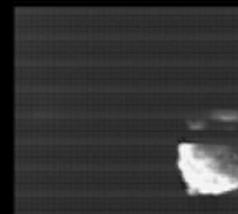
START 5 ▶ 13500FPS

01 000 .030888SEC 418



START 5 ▶ 13500FPS

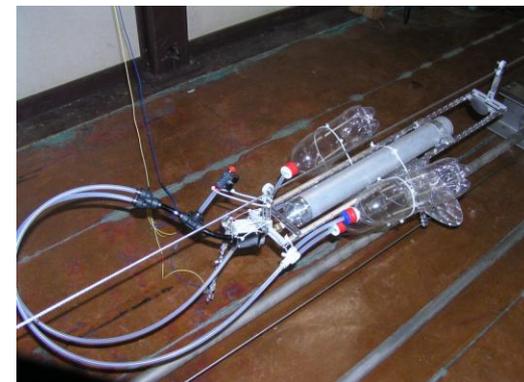
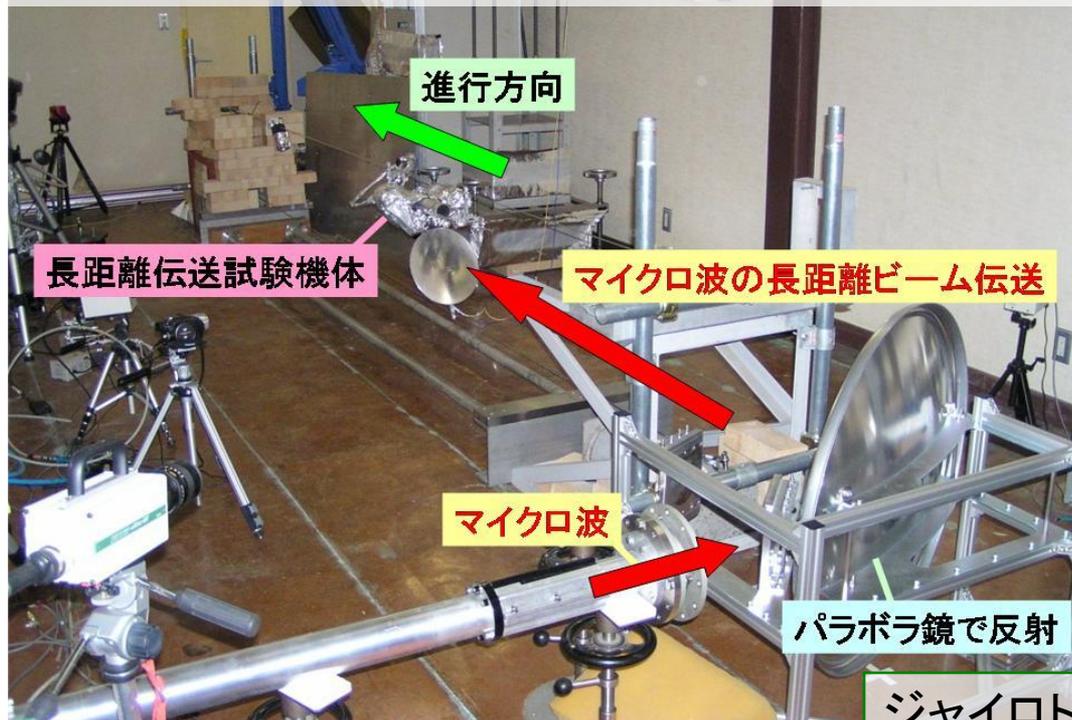
01 000 .030962SEC 419



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

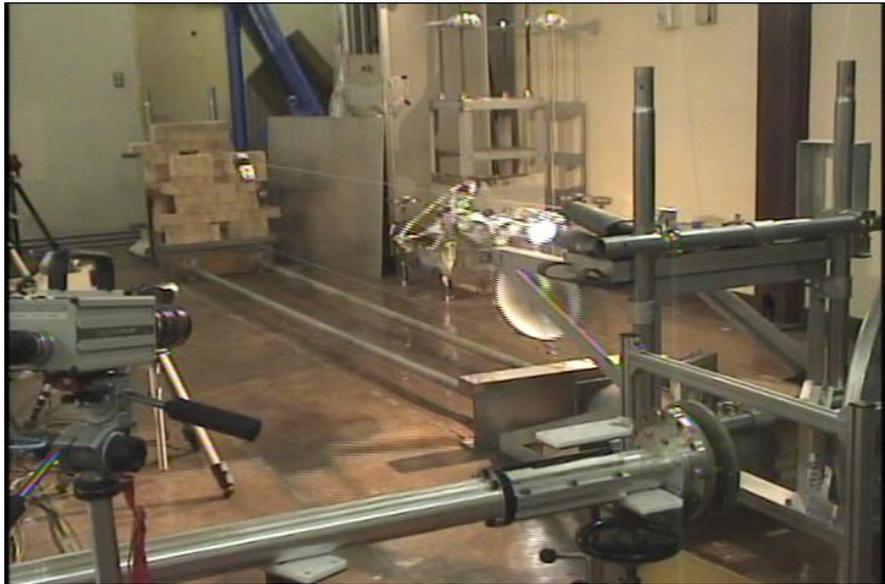
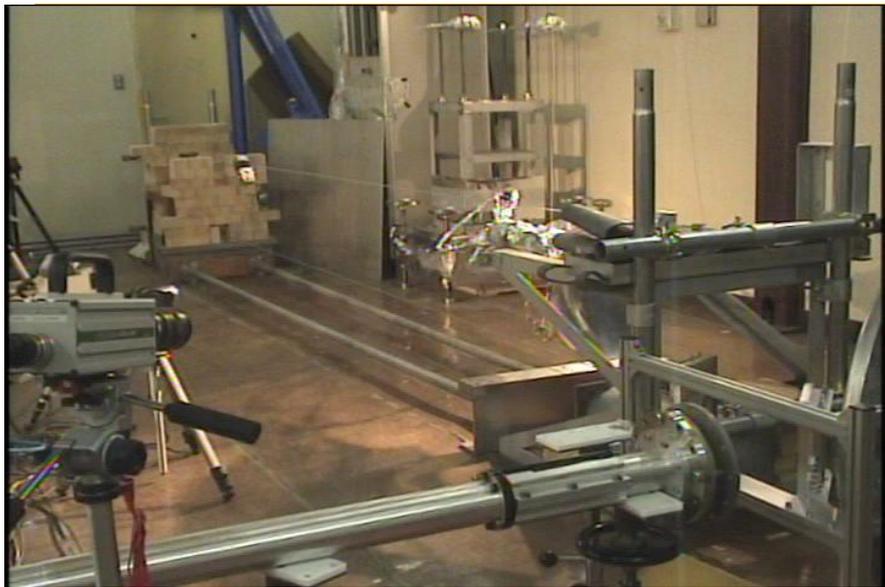
(ジャイロトロン技術向上)



<タンク搭載型>
約2kg, 3N

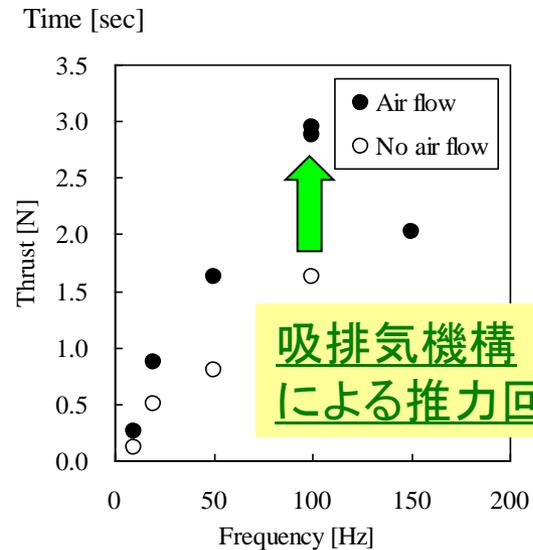
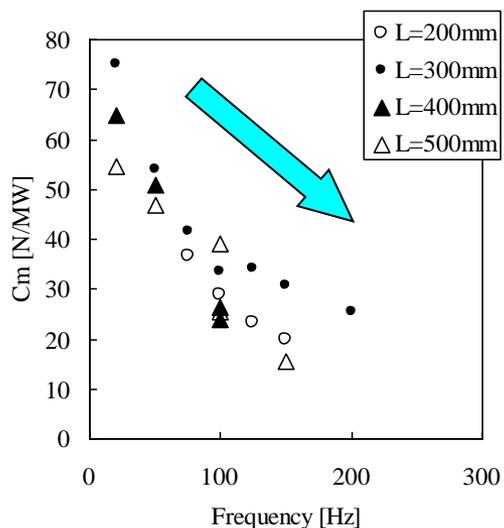
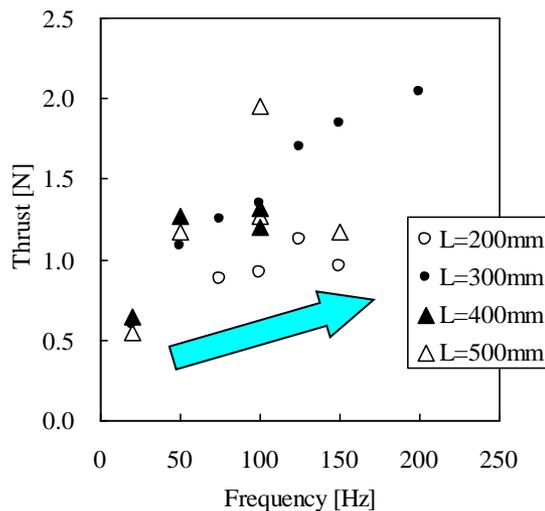
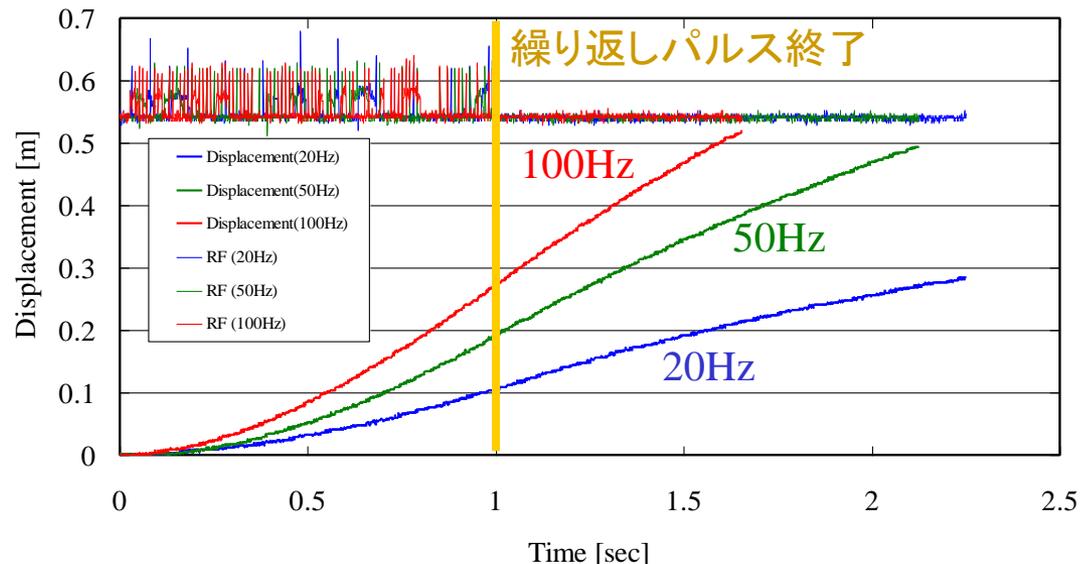
ビーム径を従来の6倍に拡げることで
従来よりも遠方まで推力を生成し
続けることに成功した。

ジャイロトロン電源の高調波作動に合わせ
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



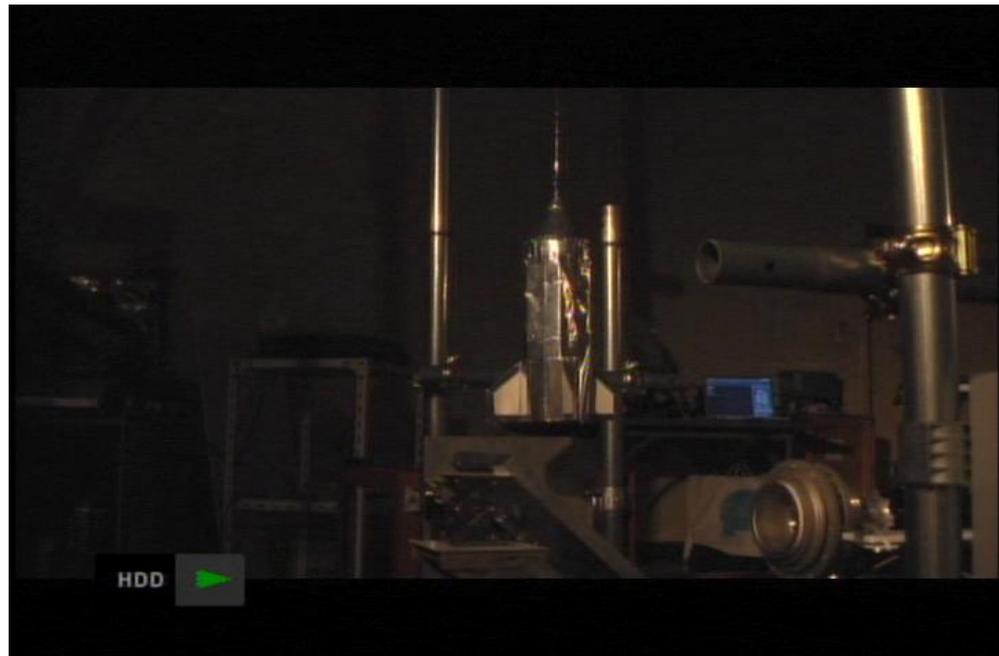
軽量モデル機体



φ56→90
L300taper
126g
(SUS製)



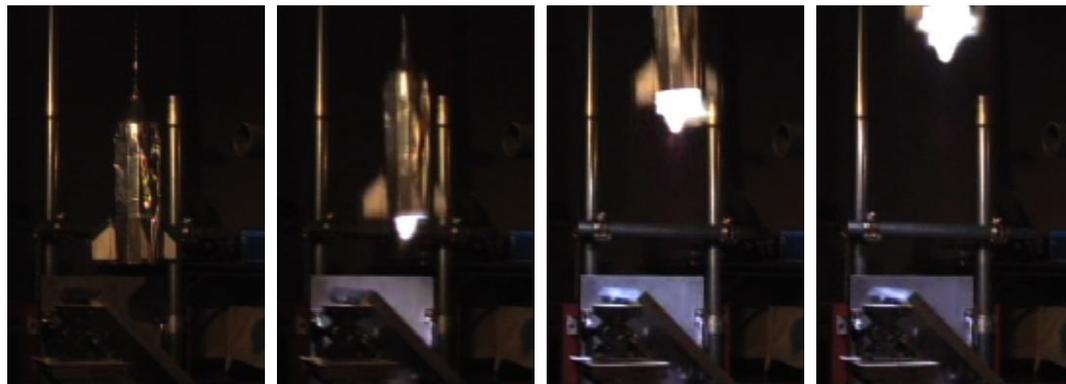
φ100
L300
109g
(Al製)



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。



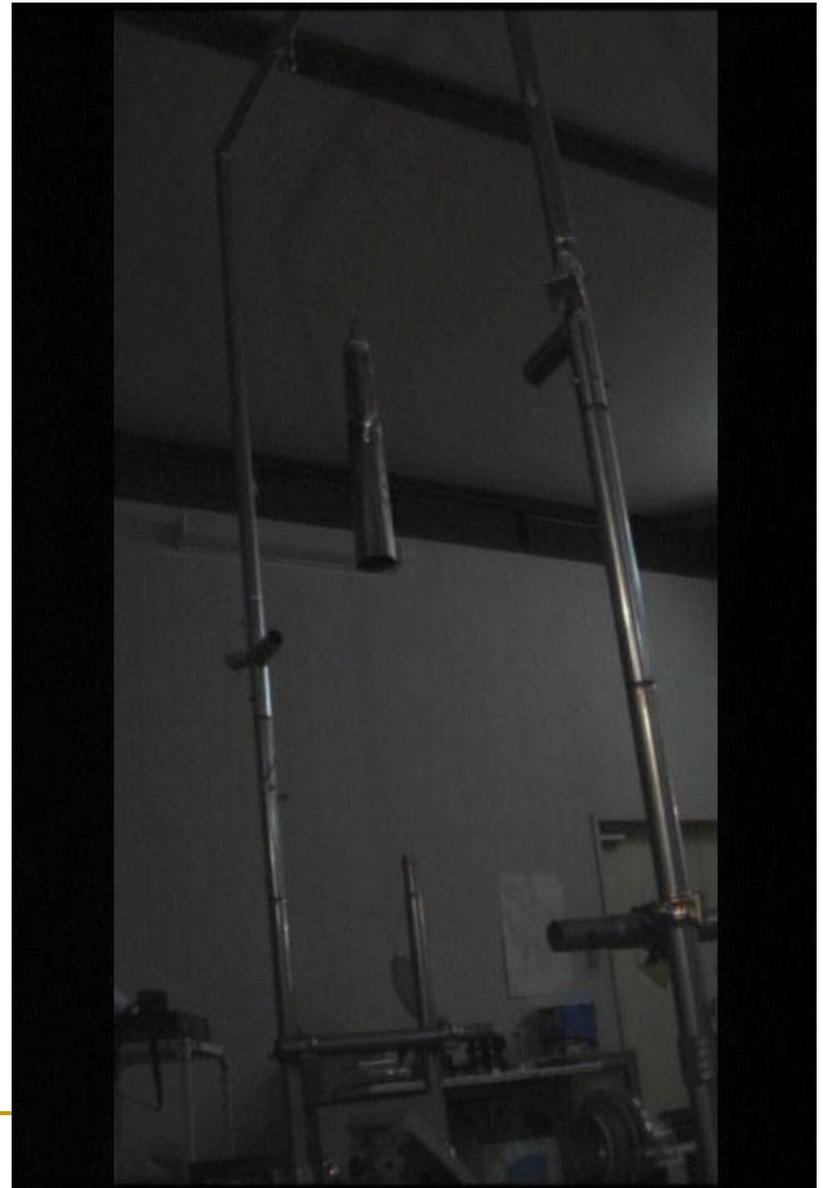
2m以上の飛翔のためには・・・

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。

今後の可能性

<性能向上の余地>

C_m 値が100程度で、まだ3~4倍まで引き上げられる可能性がある。
(吸排気機構, 排気流の最適化)

<高繰り返し周波数運転>

換気ができれば(途中でプラズマがつかなければ), さらに繰り返し周波数を上げて運転ができる可能性がある。

<ジャイロトロンの高出力化>

投入マイクロ波のパワーレベルは2倍(800kW)までは比較的容易に上げられる。
またジャイロトン1台での出力は1~2MWが当面の限界と見込まれるが
ジャイロトロン複数台同時運転によりビームを合成する技術の検討を始めた。

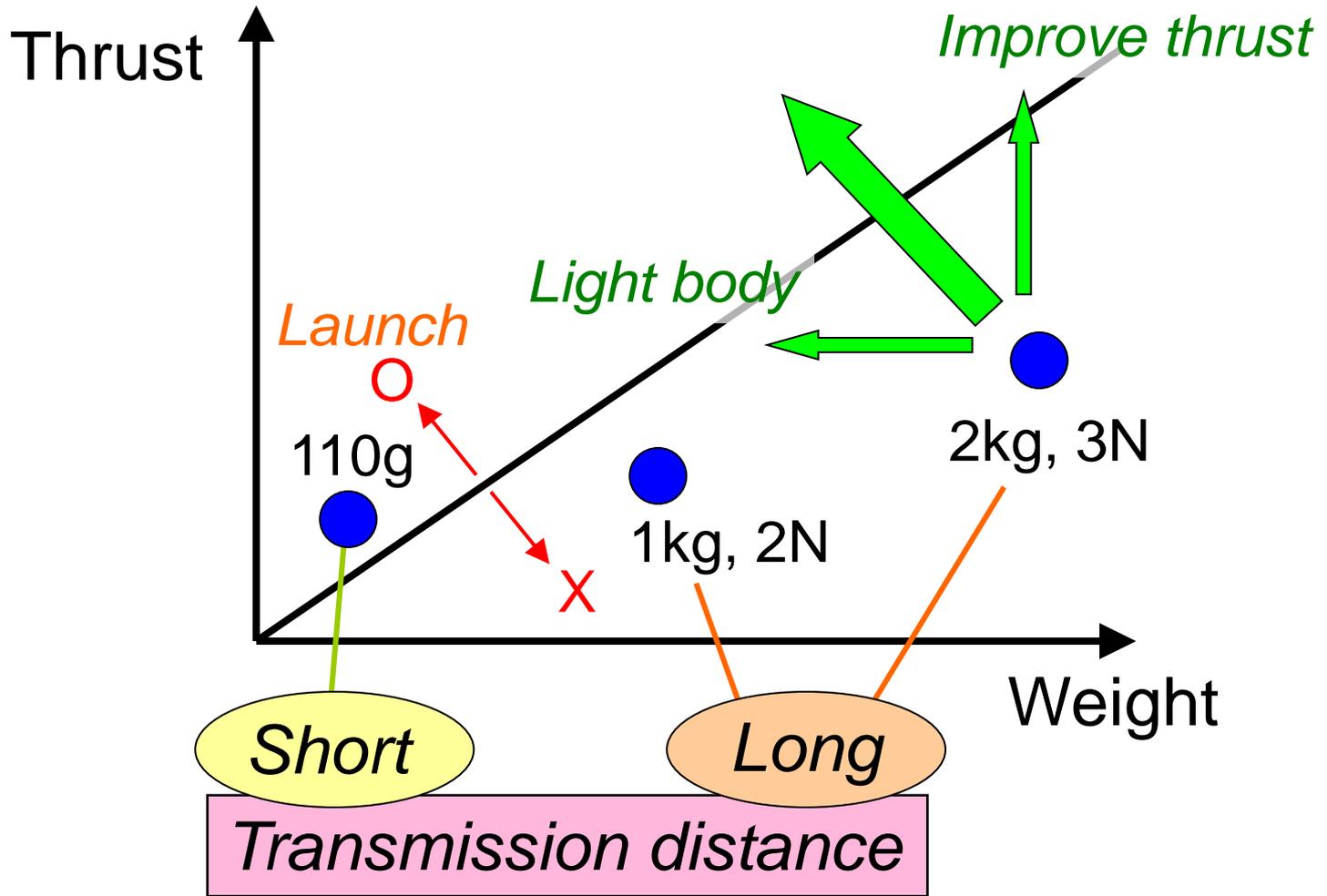
<多気筒化>

さらに, 単気筒モデルから多気筒モデルへの発展による推力増強策も検討中。

<RF波形の自由度利用>

RF波形の自由度がある: 従来のロケットの概念にはなかった特徴
(オペレーション途中で出力・パルス幅・繰り返し周波数を変更できる)

Next step



マイクロ波ロケットで想定される飛行モード

