
マイクロ波ロケットシステムのための ビーム発振設備への要求

○葛山 浩(山口大・院)

柿沼薫、福成雅史、中村友祐、小紫公也(東大・院)

アウトライン

1. Parkinらのマイクロ波サーマルロケット (MTR) の計画
2. 柿沼らのマイクロ波支持デトネーションロケット (MSDR) / MTRのTSTO計画
3. 福成らのMSDR / H2ロケットのTSTO計画
4. プラ核論文の方針について

ParkinらのMTR打ち上げ構想

- X33の機体に熱交換型の推進機 ($I_{sp}=1,000$ s程度)
- SSTO to LEO (メインのマイクロ波基地からみると実質的にはTSTO)
- 140GHz・数百MW～1GWクラスのマイクロ波
- ペイロード比10%、機体重量1tonを想定

Parkinらのコスト試算とビーム設備要求

- あやふやな点がありますが...
- 20年でマイクロ波伝送基地の建設費を償却する想定

	化学推進	悲観	基準	楽観	
可搬ペイロード質量 (ton)	20	0.2	10	20	
MTR置き換え率(%)		1	50	100	
単位ペイロードあたりに必要なジェットパワー (MW/kg)		3	1	0.3	大パワーを伝送した方が C_m が良い?
マイクロ波の出力		600MW?	10GW?	20GW?	1MW/ペイロード1kgと仮定
コスト低減ファクター		6	24	144	
20年の総費用(\$Bn)	130	129	68	1	
マクロ波基地建設費 (\$/W)		1 (\$600M?)	6 (\$60Bn?)	22 (\$440Bn?)	\$5/Wは現状技術で可能

Parkinら (IHAP&ISBEP2014) の構想

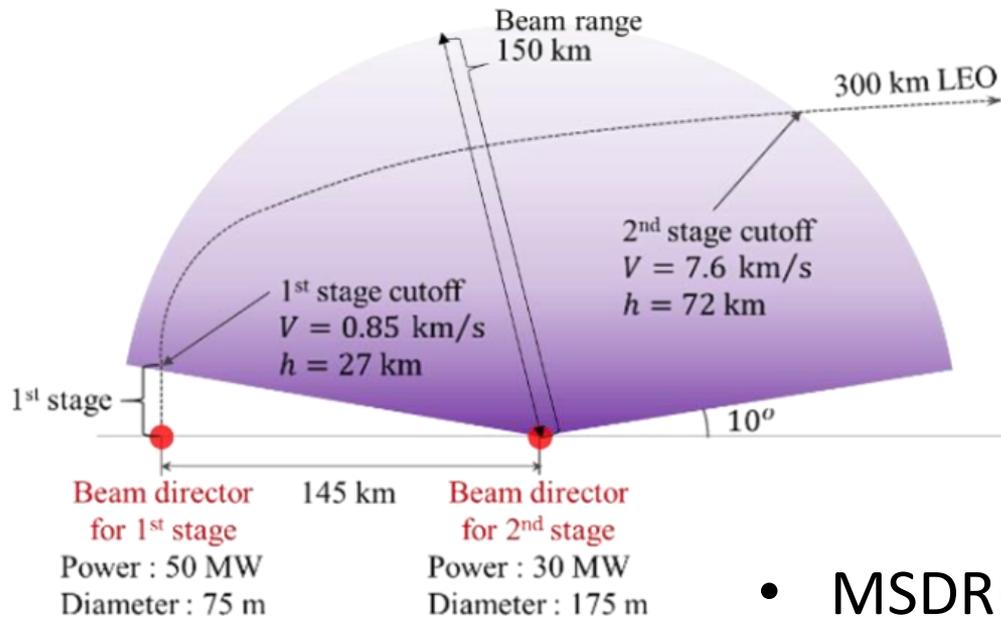
- 50kgの小型の機体を2020年に打ち上げ(LEO300km)
- 高度20kmまでUAVで機体を運搬(TSTO)
- フェーズドアレイアンテナ・ジャイロトロンクラスター(技術成熟度は?)
 - 直径 $D=130\text{m}$ 程度、ビームスポット径 $\omega_0=3\text{m}$ 程度(=機体受光面直径)、
伝送距離 $z=150\text{km}$ 程度

全質量	50 kg
構造重量	11 kg
燃料重量	37 kg
ペイロード重量	2 kg
ペイロード比	4 %
マイクロ波出力	30 MW
打ち上げ機費用	\$40 k
ビーム基地建設費	\$280 M

2. 柿沼らの計画

柿沼ら (Trans. JSASS 2016) の提案1

- UAVを空気吸込み式MSDRの垂直打上げに置き換える
- マイクロ波 (50MW+30MW、140GHz、伝送効率70%)



	UAV	MSDR
MR燃料質量	37 kg	35 kg
ペイロード質量	2 kg	4 kg
ペイロード比	4 %	7 %

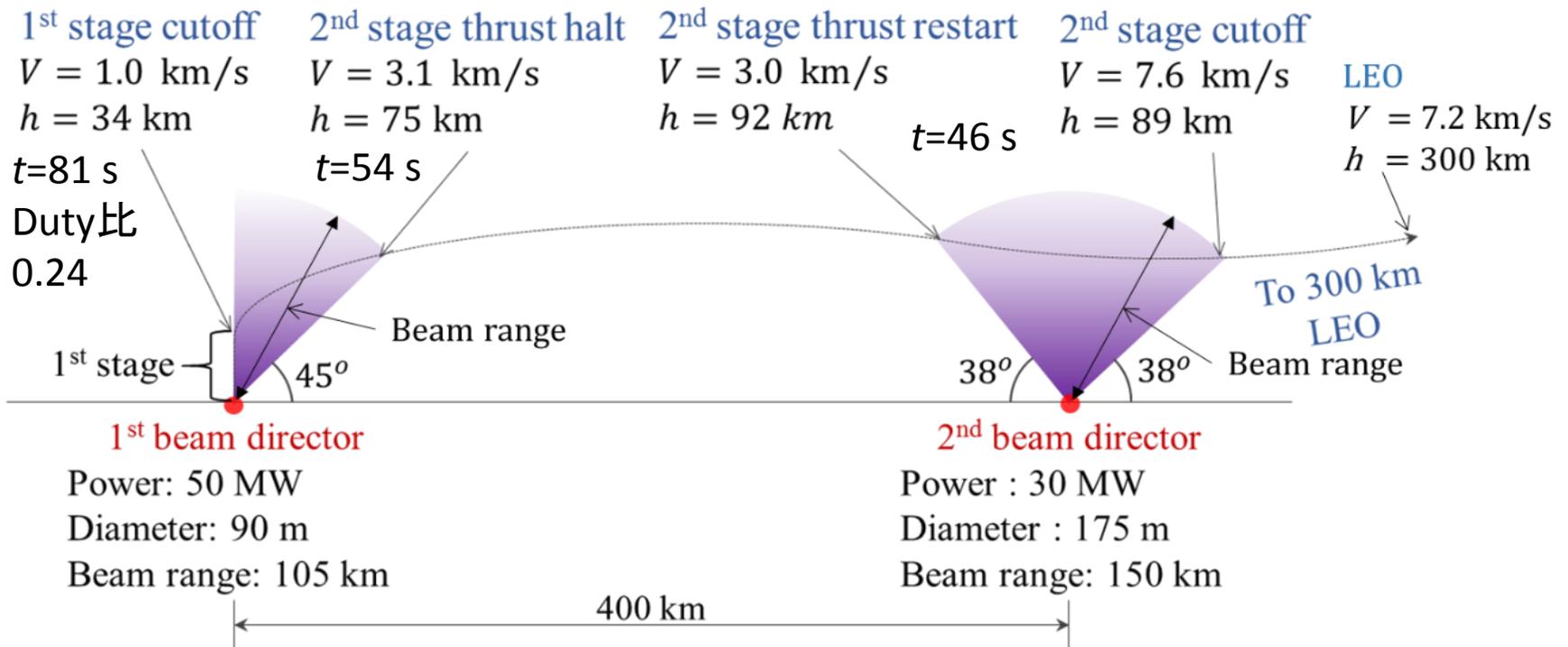


- MSDRの ΔV によりペイロード比は2倍になる
- 1stビーム基地を使って、MSDRで垂直加速しすぎると、2ndのビーム範囲を越えてしまう

Kakinuma et al. Trans.
JSASS Aerospace Tech.
Japan 2016

柿沼ら (Trans. JSASS 2016) の提案2

- 1stビーム基地は、初段MSDRで垂直加速 ($h=34$ km, $V=1.0$ km/s) した後、二段MTRの加速にも使う
- コースティングした後、2ndビーム基地で再加速を行う



柿沼ら (Trans. JSASS 2016) の提案2

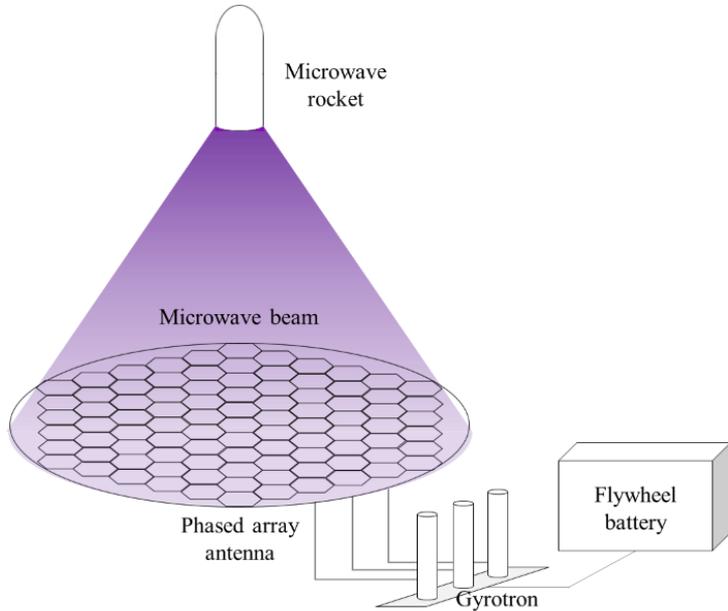
	UAV	MSDR
MR燃料質量	37 kg	37 kg
ペイロード質量	2 kg	48kg
ペイロード比	4 %	13%

ΔV (km/s)内訳

	MSDR (初段)	MTR (二段)	トータル
推力	6.38	6.97	13.35
抗力	-4.59	-0.17	-4.76
重力 損失	-0.79	-0.60	-1.39
	1.00	6.20	7.20

- MSDR(初段)は、低高度 ($h < 30$ km)での増速による抗力損失分をほぼ完全に補うことができる
- MSDRのお陰で、MTR(二段)はほぼ損失なく加速できる
- ペイロード比はUAVの場合の3倍まで増える

柿沼ら (Trans. JSASS 2016) のビーム設備試算



Kakinuma et al. Trans. JSASS
Aerospace Tech. Japan 2016

各部	規模	コスト	備考
ジャイロトロン	80 MW	\$8 M	\$0.1 M /MW
フライホイール	1403 kWh	\$14 M	\$0.01 M/kWh
1 st アンテナ	直径90 m	\$173 M	Parkinの試算
2 nd アンテナ	直径175m	\$293 M	Parkinの試算
トータル		\$488 M (488億円)	

- 1MW級 / 140GHzのジャイロトロンの50個+30個の二機のフェーズドアレイ
- 電力はフライホイールバッテリーで急放電可能
- 機体1機の打ち上げ費用(機体制作費・電気代: 約\$40 k(400万円))は、ビーム基地建設費の0.01%以下

UAV vs MS DR

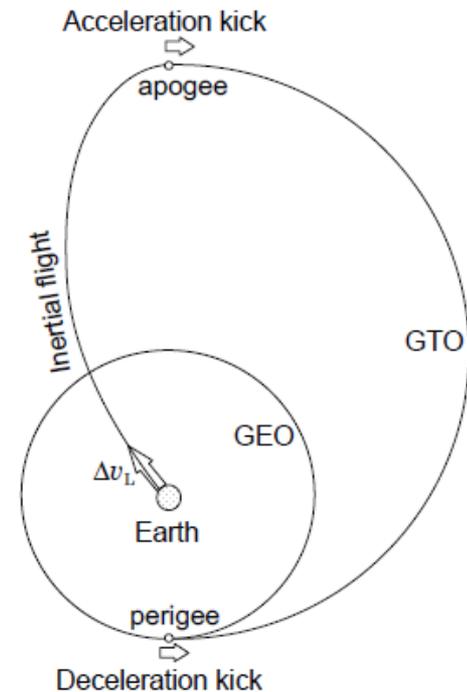
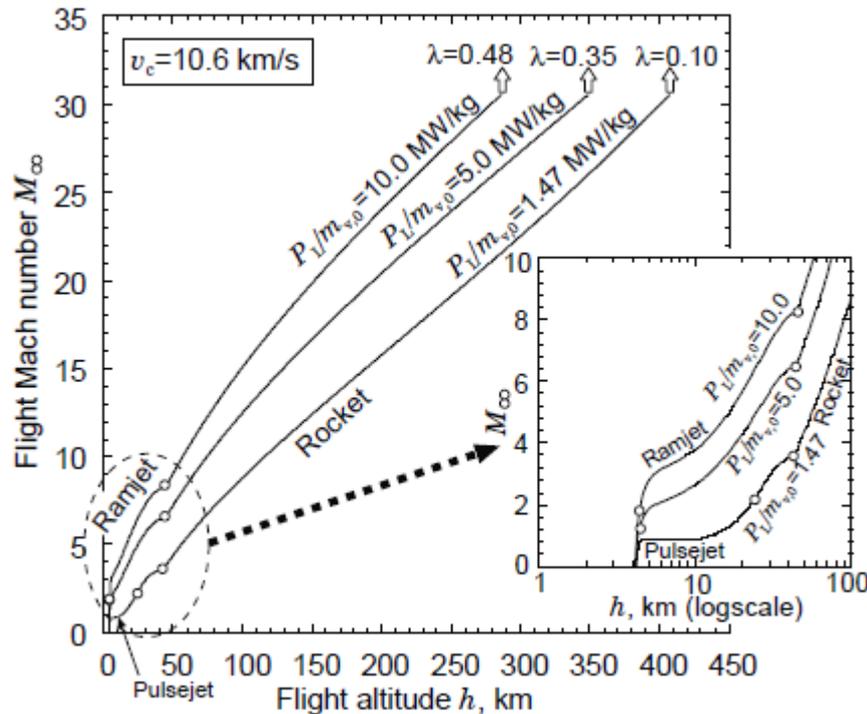
打ち上げシステム全体の比較

初段	UAV	MSDR	Ratio
ペイロード	2.0 kg	8.0 kg	4
ペイロード比	4.0 %	13 %	3.25
打ち上げ費用	\$ 40 k	\$ 46 k	1.15
打ち上げ費用/ペイロード	20 k\$/kg	5.8 k\$/kg	0.29
ビーム基地建設費	\$ 280 M	\$ 490 M	1.75

- 初段にMSDRを使うメリットは大きい
- ただ、MSDRをメインに据えたい気もするが...

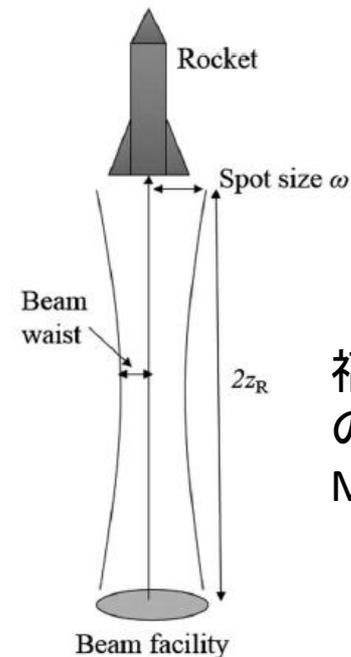
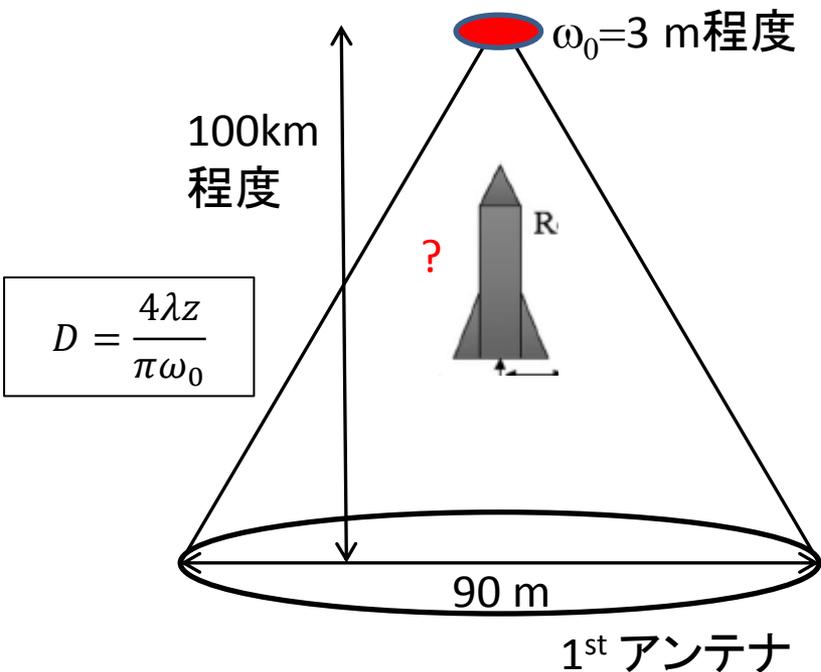
MSDRをメインで利用するのは難しい？

- 空気吸い込み式MSDRをメイン(SSTO)として利用できないか
 - MSDRは、垂直打ち上げを要求するので、単段でのLEO打ち上げには不向き？
 - レーザー推進のようにGTO軌道にMSDRを打ち上げると高くなりすぎる？
 - 350 km程度の伝送はアンテナ直径(300m程度)が大きくなり難しい？



疑問

- アンテナビームを機体(数km/sで飛行)に追従させる機構は既存技術で可能か？
- 2MWのジャイロトロンを束ねる(30~50個)
 - 各々のアンテナのアレイ化技術については、既存技術はあるか？
 - ジャイロトロンのカスタマー化技術
- 1stアンテナは、90 mの大きさだが、垂直打上げ(MSDR)は可能か？
 - 福成らは、ビーム径がほぼ一定(ビームウェスト径の $\sqrt{2}$ 倍内)の距離(レーリー距離)内で伝送



福成ら(2014)
の垂直打上げ
MSDR

3. 福成らの計画

福成ら (Appl. Opt. 2014) の計画

- H2-B (ペイロード20トン) の初段をMSDRに置き換える
- MSDRで初段垂直加速 $\Delta V=2$ km/s

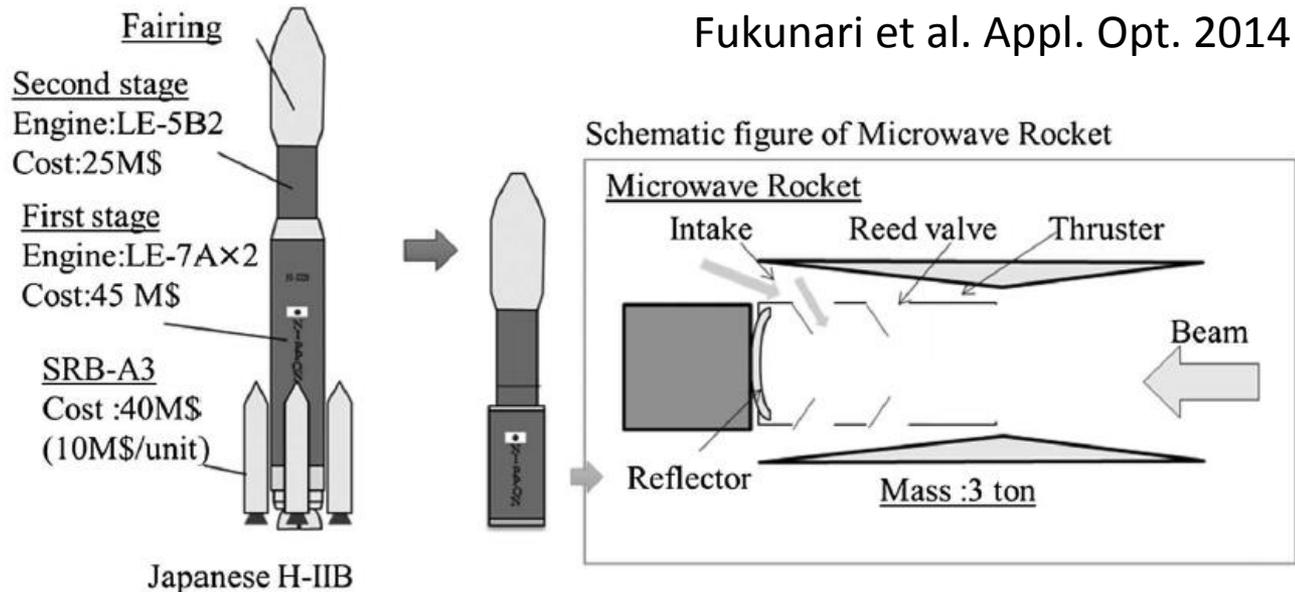
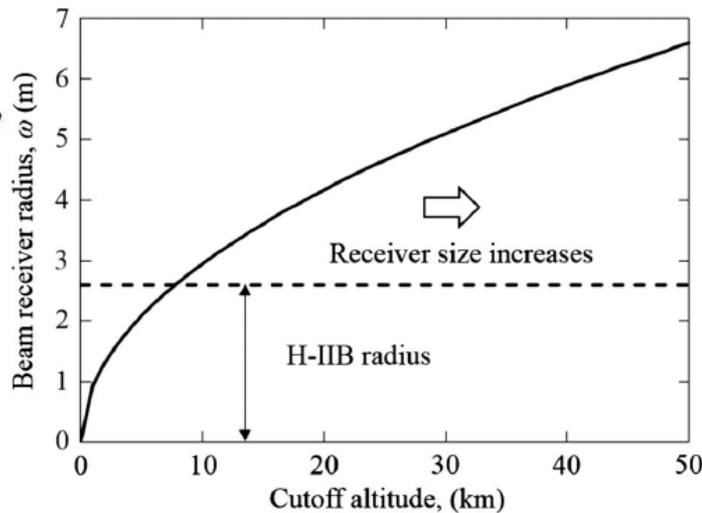
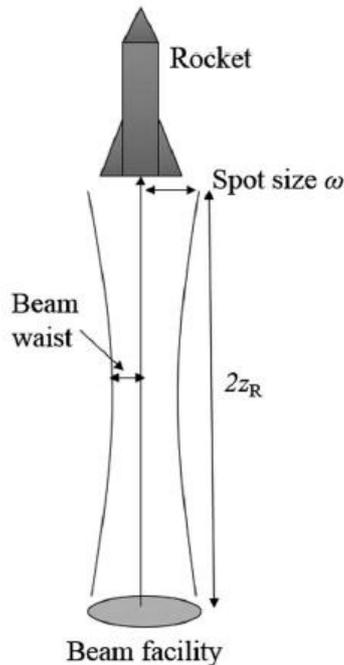


Table 1. Mass and Manufacturing Cost Breakdown of the Conventional H-IIIB and the Replacement System

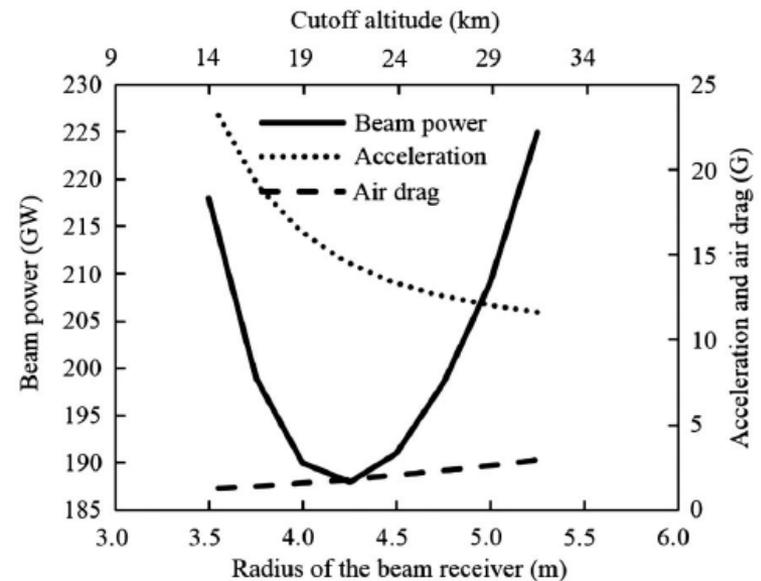
	First Stage		Second Stage			Total	Payload Ratio (%)
	LOX/LH ² Engines	SRBs	LOX/LH ² Engines	Fairing	Payload		
Conventional H-IIIB mass (ton)	202	306	20	3.2	19	550.2	3.45
Replaced H-IIIB mass (ton)	3	3	97	3.2	19	122.2	15.5
Estimated cost of Conventional (M\$)	45	40	25	-	-	110	-
Estimated cost of Replaced (M\$)	3	3	25	-	-	28	-

福成らの計画のビーム要求

- ビーム径を機体サイズとほぼ同じに保つ距離内で伝送
 - ビームスポットサイズ(=アンテナサイズ) 4.25 m
 - ビームパワー 188 GW (ビーム強度: $0.3 \text{ MW/cm}^2 \rightarrow$ 大丈夫か?)
 - カットオフ高度 20 km

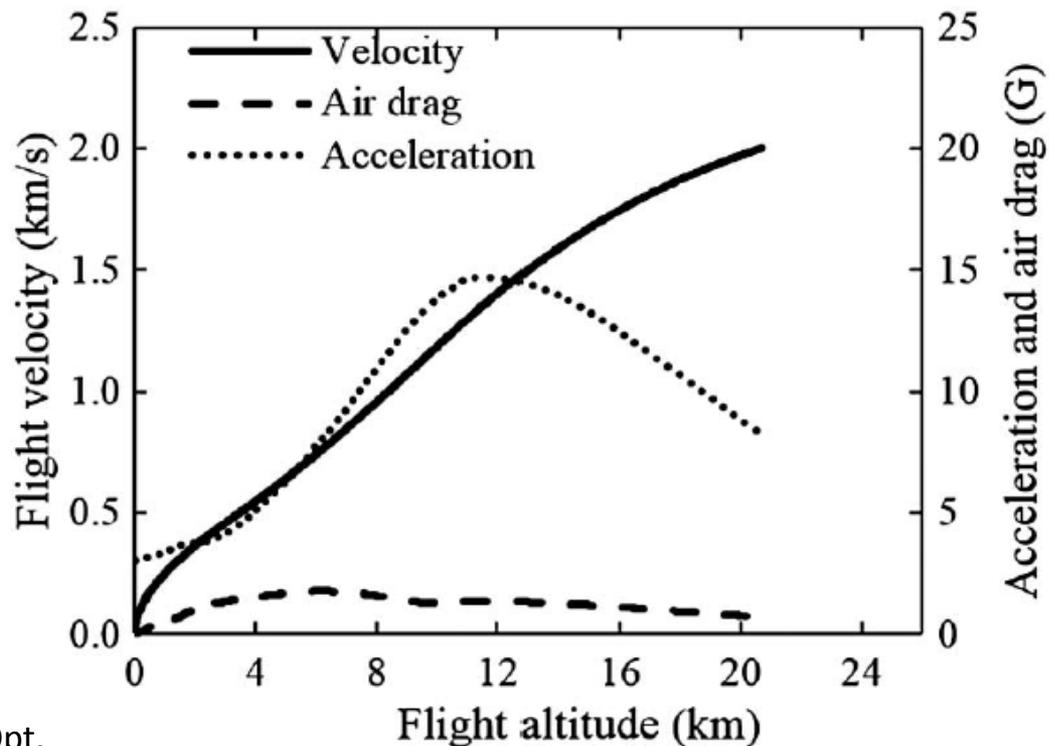


伝送距離とビームスポットサイズの ω



ビームパワー、カットオフ高度、
加速、抗力の ω 依存性?

福成らの軌道（垂直打上げ）



Fukunari et al. Appl. Opt.
2014

Table 2. Results of Trajectory Analysis

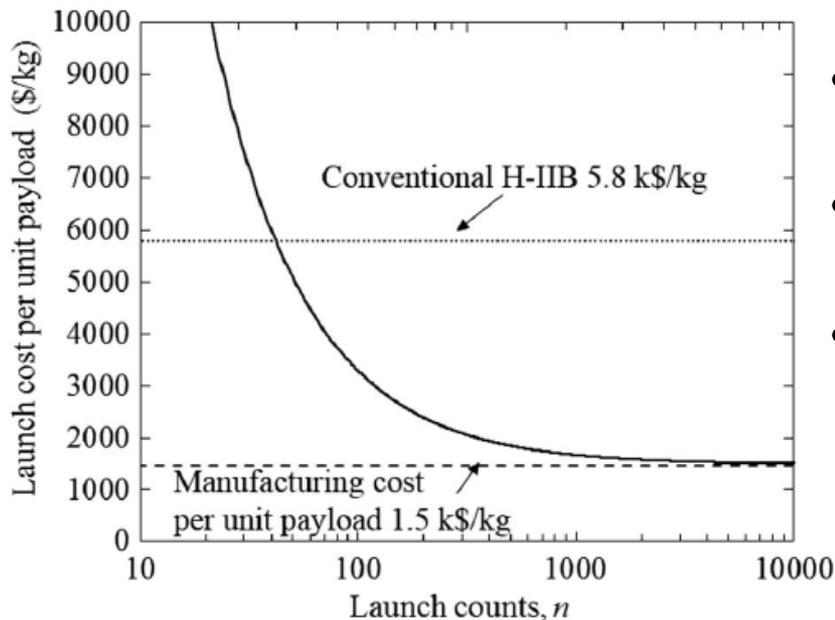
Beam power	(GW)	188
Cutoff altitude	(km)	20.7
Beaming time	(s)	29.8
Cutoff acceleration	(G)	8.2
Peak acceleration	(G)	14.7
Energy consumption	(MWh)	1431

福成らのコスト試算とビーム設備要求

- 2MWのジャイロトロンを大量生産
 - コスト減考慮(フライホイールはジャイロトロンと同じ値段と仮定)

Table 4. Beam Facility Construction Cost

Beam power	(GW)	188	
Number of gyrotrons	(-)	94,000	
Construction cost, C_{ground}	(M\$)	3350	(3350億円)
Electricity expense, C_{op}	(M\$)	0.179	



- 40回の打ち上げでH2Bのコスト下回る
- 2000回の打ち上げで、ビーム建設コストは償却
- 初期構想としては額もジャイロトロンの数も大きいので...



ペイロードを減らし、小型のロケットで初めはやるのはどうだろう(柿沼らのように)

プラ核の方針

- 柿沼らの計画をベースにする
 - 別の計画も紹介しつつ、そのまま行く？
 - MSDRをメインに据えるとしたらどうなるかの解析する？（GTO輸送などを検討？）
 - MTRに翼がついているので、MSDRも垂直打ち上げに拘らず、軌道を曲げて良い気もするが・・・
 - ✓ 機体の向きが傾いていると、後ろからビームが入らないから無理？
 - ✓ 空気吸込みの高度は限られていて、燃料の大幅減は見込めない？
 - ペイロード10トン（Parkinらの基準案）にスケールアップする？
- 福成らの計画（MSDRメイン）も利用できないか
 - ペイロードを100 kg程度に減らして、二段目は小型の化学ロケット（ISASのSS-520、北大のCAMUIなど）を使うとどうなる？

プラ核章立て(案)

1. はじめに
2. Parkinら/柿沼ら提案の紹介
3. マイクロ波ロケット(MSDR/MTR)推力モデル
4. 軌道解析の概要
5. 対象とする打ち上げの諸元について
6. 軌道解析結果について
7. ビーム基地の建設コストについてと既存の打ち上げからのコスト低減について

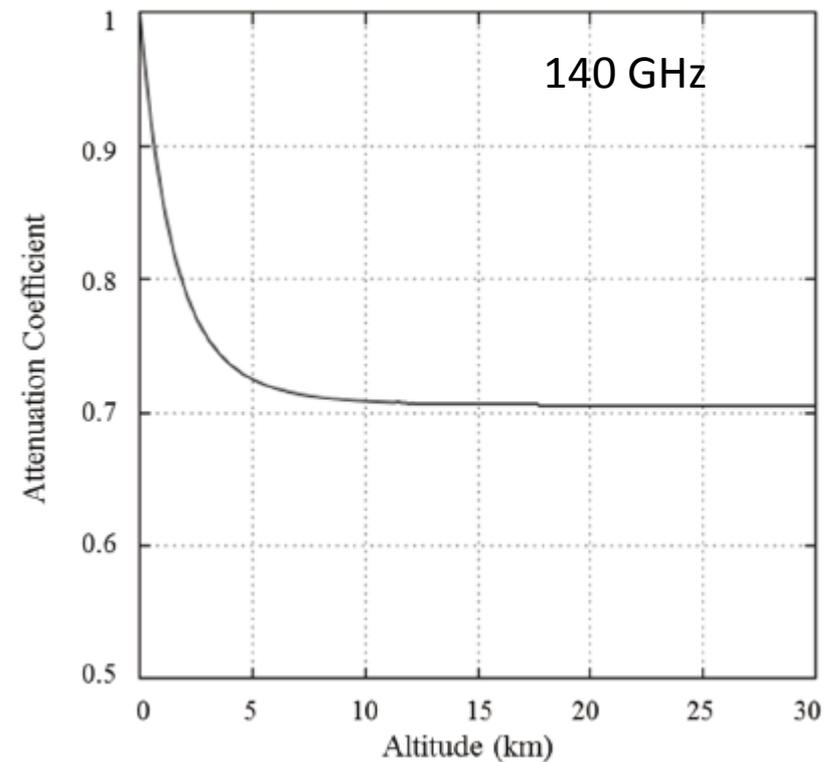
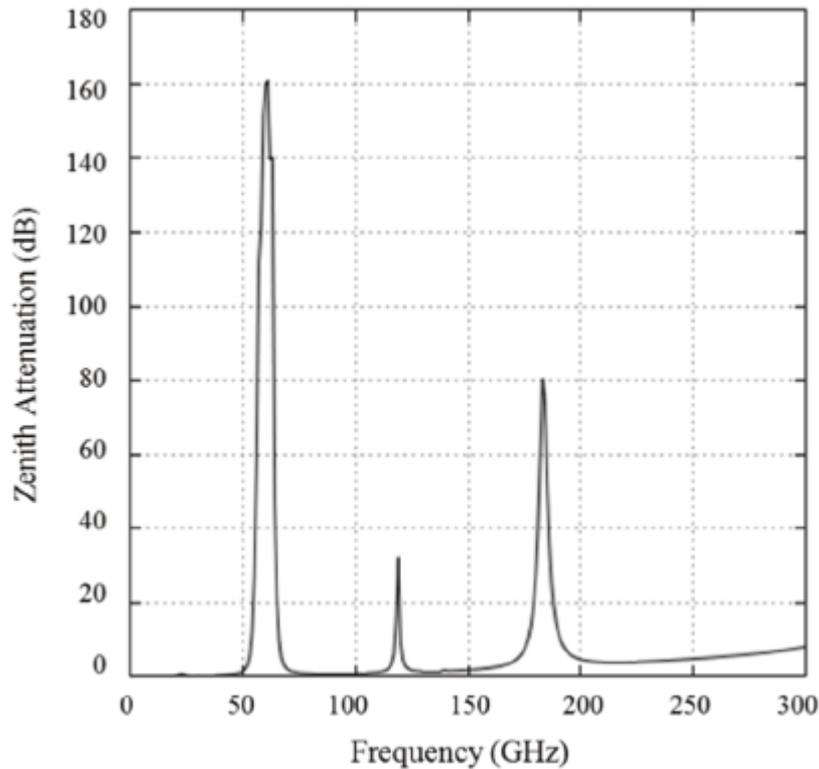
Appendix

Table 6. Vehicle launch cost estimate breakdown.

Component	Mass (kg)	Cost (\$)	Cost justification
MR	6.7	8,040	Complex short run aircraft rule of thumb: \$ 1,200/kg Based on Ref.9
MTR	46.688	15,062	
		23,102	
Integration		23,102	Assumed equal to component cost 1st stage: 50 MW (81 sec, duty ratio = 0.24), 2nd stage: 50 MW (54 sec), 30 MW (46 sec). Based on industrial rate of \$ 0.1055/kWh for California on May 1, 2013
Electricity		148	
			Exclude operational personnel cost and initial R&D + beam facility cost
Total	53.388	46,352	

ビーム減衰

- 柿沼さんの計算



Kakinuma et al. Trans. JSASS
Aerospace Tech. Japan 2016