

# Outlook of Microwave Rocket as a low cost space transportation system \*

Masafumi Fukunari, Toshikazu Yamaguchi (The University of Tokyo),

Hiroshi Katsurayama(Yamaguchi University),

Kimiya Komurasaki, Yoshihiro Arakawa(The University of Tokyo)

## Abstract

There are several innovative plans to develop huge space infrastructures like SSPS, however they are suspended because of their high transportation costs using conventional chemical rockets launchers. In this paper, three approaches were presented to achieve low cost space transportation.

The first approach is to enhance  $I_{sp}$  by applying air-breathing engine cycle. Because maximum  $I_{sp}$  of conventional chemical rockets is around 430s, a large amount of onboard propellant is required to reach the GEO, resulting in quite low payload ratio of about 1%. If atmospheric air can be used as a propellant, high  $I_{sp}$  and high payload ratio will be achievable.

The second approach is to remove the turbo pump system from the vehicle using Pulse detonation engine can generate high pressure without turbo pumps and pressure vessels. In the conventional system, those complicated and expensive systems are expended. This is wasteful and cause the cost to became large.

The last is to specialize in massive material transportation, a mass-driver. It is more effective and smart to choose transportation methods for human or for materials. Considering human transportation, it requires to achieve low acceleration, returning to the earth, and low accident ratio. In contrast, for material transportation it don't.

We have proposed an air-breathing, microwave energy beamed, pulse-detonation engine, Microwave Rocket as an alternative to conventional chemical rockets.

---

\* Presented at the Thirteenth SPS Symposium, 28-29 October, 2010

# マイクロ波ロケットによる低コスト打ち上げ手法の検討\*

○福成雅史、山口敏和(東京大学・新領域創成科学研究科)

葛山浩(山口大学・理工学研究科)

小紫公也(東京大学・新領域創成科学研究科)、荒川義博(東京大学・工学系研究科)

## 1. 安価な宇宙輸送システムを実現するための3つのアプローチ

現在、宇宙太陽発電衛星(SSPS)、宇宙ホテルなど大規模宇宙構造物の建設需要が高まりつつある。しかしその実現にはまず宇宙への安価な物資の輸送手段の確立が必要不可欠の前提条件となっている。安価な宇宙輸送システムを実現するための3つの要素について述べ、マイクロ波ロケットがその条件を満たす有望なシステムであることを紹介する。

### ① 空気吸い込みで比推力を向上する

現在、打ち上げに主に用いられている化学ロケットの比推力は440s程度である。ここでツィオルコフスキーのロケット方程式を用いて単段式ロケットのペイロード1kgあたりに必要な燃料質量と速度増分の関係式を解くと(1)式に導ける。

$$\frac{m_{\text{prop}}}{m_{\text{pay}}} = \left[ \exp\left(\frac{\Delta V}{g I_{\text{sp}}}\right) - 1 \right] \frac{1 - f_{\text{inert}}}{1 - f_{\text{inert}} \exp\left(\frac{\Delta V}{g I_{\text{sp}}}\right)} \quad (1)$$

このとき  $m_{\text{prop}}$ 、 $m_{\text{pay}}$ 、 $I_{\text{sp}}$ 、 $\Delta V$ 、 $g$ 、 $f_{\text{inert}}$  はそれぞれ燃料質量、ペイロード質量、比推力、速度増分、重力加速度、構造質量係数( $f_{\text{inert}}=0.08$ )である。 $I_{\text{sp}}=440$  の場合、Fig.1 より単段式ロケットではどんなに燃料を積んでも約11km/s程度の速度増分までしか得られないことがわかる。静止移行軌道(GTO)投入を考えた際に速度増分は約13km/s必要となるため、原理上、静止移行軌道投入には多段化が不可欠となる。このように、SSPS 打ち上げで要求されるような静止軌道(GEO)への資材投入は化学ロケットの限界に近いミッションであると言え、大量の燃料搭載、巨大な燃料タンクを必要としペイロード比を低くする足かせとなっている。

もし大気圏内の飛行中に大気を推進剤とする空気吸い込み方式を利用すれば、高い比推力を実現し、単段式での静止軌道投入も期待できる。またペイロード比を大幅に増大できる。超音速エンジンとして研究されているラムジェットエンジンやスクラムジェットエンジンなども同様のコンセプトである。もちろん大気圏外における加速には搭載した推進剤

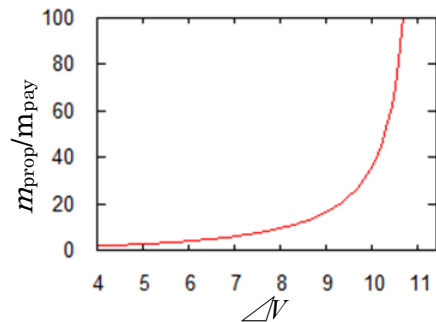


Fig.1 速度増分に対する

ペイロード1kgあたりに必要な燃料

\*第13回SPSシンポジウム、2010年10月28-29日に発表

の利用が必要となるが、空気吸い込み方式による速度増分に応じて指数関数的にペイロード比が向上するため大変有効な要素といえる。

## ② 高価で精密なターボポンプシステムを用いない

次に機体構造の簡略化が挙げられる。現在の商用打ち上げロケットシステムの心臓部である、ターボポンプシステムと燃焼器システムは低燃費なロケットを実現するため、たとえばスペースシャトルのポンプ吐出圧は 500 気圧に、回転数は毎分数万回転に達し、またコンパクトで安定な燃焼のための噴射器や圧力容器など、精密で高価なシステムが搭載されている。現在、これらは 1 回使い捨てであり、コストを引き上げる要因となっている。

ターボポンプシステムや高圧燃焼器を用いずに高圧を得ることのできる推進方法としてパルスデトネーション推進がある。パルスデトネーション推進とは推進器内部で爆発的な燃焼を用い高圧のデトネーション波(爆轟波)を生じさせ推力を得る推進手法である。これを用いれば複雑なターボポンプシステムなどは不要となり不具合の起こる可能性も低減される。またエネルギー供給のための装置など高価で主要なものを地上に残し、繰り返し使用できればシステムの大幅な価格低減につながる。

## ③ 物資の輸送に特化する(マストライバー)

高い技術力や安全性が要求される宇宙への輸送を考える際には、人も資材も同じシステムで輸送するのは非効率的である。人間の輸送には超低事故率、打ち上げ時不具合用バックアップ、地球への安全な帰還技術、打ち上げ時の最大加速度の制限といった要求がある。しかしながら、資材の輸送に特化すれば、このような要求のレベルはそれほど高くなくて済む。大きな加速度が許容される荷物もあり得る。人と資材を同一のシステムで打ち上げること一面では効率化を図れているように見えるが、その用途やニーズによっては高価な人間輸送の方法に合わせざるを得ないという面も併せ持つ。これはロケットの開発から運用に至るまで全てのコストを増大させてしまう。

物資輸送に特化したシステム、すなわち「マストライバー」を考えると、使い捨て型は故障発生時に柔軟な対応が可能となる。再使用型の往還機は一台の故障がその後の輸送計画に大きな影響を及ぼす。メンテナンスに費用も時間も必要となる。これに対し使い捨て型であれば一機の重要性が高くなく、建築資材のような質量当たりの価値が低く輸送価格の低減が全体のコスト減に大きく寄与する場合には、事故率・故障発生率と輸送価格とのトレードオフも可能となる。例えば事故率が 1% あったとしても、全体のコストを 1% 上昇するだけで済むということも不可能ではない。

## 2、マイクロ波ロケット

### 2.1 マイクロ波ロケットとは

マイクロ波ロケットとは地上から照射したマイクロ波で空気を瞬間的に加熱することによりデトネーション波(爆轟波)を生じさせ、得られた推力により飛行するロケットである。空気吸い込み式であり大気を推進剤として使い、機体構造もパルスデトネーション推進を行うため極めて単純にできる。地上基地となるマイクロ波発振基地は高価だが繰り返し使用でき、保守が容易な地上側に設備を維持できる。地上

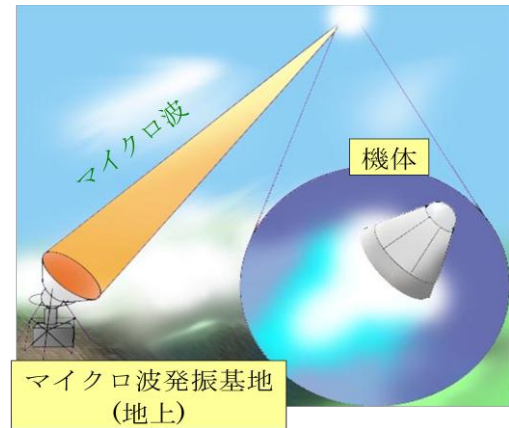


Fig.2 Microwave Rocket

基地のコストは打ち上げ回数が増えれば償還でき、また重量の制限なく冗長な系を設けられる。これらの特徴よりマイクロ波ロケットは1章での要求を全て満足する。

### 2.2 マイクロ波ロケットの推進原理と飛行モード

マイクロ波ロケットのモデルを Fig.3 に示す。推進原理は以下の4過程で説明される。

①吸気弁から機体周辺大気が推進器内に流入する。②機体に向かって入射されたマイクロ波が集光され、大気を絶縁破壊しプラズマと衝撃波を生じる。③このプラズマが後続のマイクロ波のエネルギーを吸収し新たなプラズマが形成され、マイクロ波照射源方向へデトネーション波が伝播していく。このときプラズマがピストンの役割を果たし衝撃波を駆動し後方に高圧を維持する。これをマイクロ波支持デトネーション(MSD)と呼ぶ。衝撃波の通過時に高圧により吸気弁は閉じる。④衝撃波が機体後方から排気されるとその高圧によって推力が発生する。また膨張波が機体前方に向けて伝播し吸気弁が開き①の初期状態へ戻る。このサイクルを繰り返すことで持続的な推力を得る。

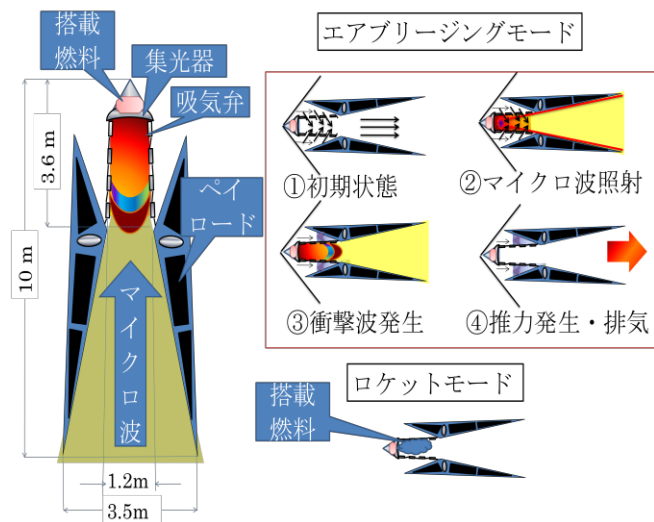


Fig.3 Schematic figures and thrust generation mechanism

### 2.3 マイクロ波発振器とマイクロ波伝搬<sup>1)2)</sup>

マイクロ波発振器として磁場閉じ込め核融合のプラズマ加熱・電流駆動用に開発が進むジャイロトロンを想定する。ジャイロトロンは電力からマイクロ波へのエネルギー変換効率が高く、レーザーと比べて発振コストも2桁近く安価である。また既に1MW級の出力の発振器が開発されている。

Table.1 Specification of Gyrotron

マイクロ波のような電磁波のビーム半径は伝搬によって次の式に従い拡散していく。

$$w_v = \frac{\lambda l}{\pi w_0} \quad (2)$$

ここで  $w_v$ 、 $w_0$ 、 $l$ 、 $\lambda$  はそれぞれ機体側でのビーム半径、地上側でのビーム半径、伝播距離、マイクロ波の波長である。110GHzのマイクロ波の波長は約2.72mmのため機体の受光部の半径を1.5~2.5mとするとマイクロ波の発振点でのビーム半径は約50~80mと巨大になる。しかしジャイロトロン複数台をアレイ化する技術も現在、研究が進んでおり将来的には50~80mクラスのビーム半径をもつ発振機が実現が期待できる。

Frequency	110GHz
Output Power $P$	< 1MW
Beam Profile	Gaussian
Beam waist	40mm
Electrical efficiency	60%

### 3、まとめと今後の課題

既存のロケットに変わる低コストな打ち上げ手法としてマイクロ波ロケットについて述べた。今後の課題はマイクロ波ロケットの性能評価と既存のロケットとの比較である。

マイクロ波ロケットの性能評価指数として下記の運動量結合係数  $C_m$  がある。

$$C_m = \frac{\text{平均推力[N]}}{\text{平均投入ビーム電力[MW]}}$$

マイクロ波ロケットの性能評価を行うために、この  $C_m$  を機体高度、速度でモデル化し打ち上げ軌道解析を行っていく。

#### 参考文献

- 1)白石裕也、山口敏和、小紫公也、小田靖久、梶原健、高橋幸司、春日井敦、坂本慶司：マイクロ波電力および雰囲気圧力によるマイクロ波ロケットの推力最適化、航空原動機・宇宙推進講演会論文集、第49巻、A21頁、2009
- 2)小田靖久、小紫公也、高橋幸司、春日井敦、坂本慶司：大電力ジャイロトロンを用いたマイクロ波ロケットの推進性能の大気圧依存性、プラズマ・核融合学会誌、第83巻、3号、pp296-299、2007