

[10 km/s レールガンは可能か]

矢守 章 (JAXA宇宙科学研究所)

序]

質量がグラム程度よりキログラム位までの範囲の飛翔体を高速度に加速させる装置で、最も一般的で歴史があるのは火薬銃及び軽ガス銃であろう。しかし、これらの加速装置には飛翔体を推進させるガスの移動速度に物理的な限界があるため、それらによって得られる飛翔体速度には限界がある。一方、電磁飛翔体加速装置 (Electromagnetic Launcher: EML) は速度を原理的に制限する要素がないため、飛翔体を超高速度にまで加速させられる可能性を持っている。しかし、電磁飛翔体加速装置の開発が始められてより30年が経過した現在でもその最高飛翔体速度が8 km/sを超えた報告はない。本論文において電磁飛翔体加速装置の飛翔体速度の増加を抑制している原因を、JAXA宇宙研電磁飛翔体加速装置 (レールガン) によって得られた実験結果をもとにして述べ、10 km/s 飛翔体速度を可能せしめるレールガン構成を提案する。

(1) 電磁飛翔体加速装置 (レールガン) の説明

電磁飛翔体加速装置には数種類のタイプがあるが、その内でもレールガンが最も早い飛翔体速度を可能とする。Fig.1 に宇宙研レールガンの概略を示す。2本の金属レール (主に銅レール) の間に設置された飛翔体はレールに接続された電源 (主にコンデンサーバンク) よりの大電流が発生させる磁場と飛翔体後部のアーマチャを流れる電流との相互作用で加速される。アーマチャとして金属固体で構成されているソリッドアーマチャとプラズマを推進媒体とするプラズマアーマチャがあるが、高速度レールガンにおいてはプラズマアーマチャが使用される。宇宙研レールガンは、口径約14 mm、長さ2 mの円形銃身を電氣的に絶縁した2個の金属Vブロックで強く締め付けるVブロック型レールガンである。Vブロック型レールガンは重量が大きくなるという欠点を持つが、製作費用の安さ、組み立てが比較的簡単であるため広く使用されているレールガンである。

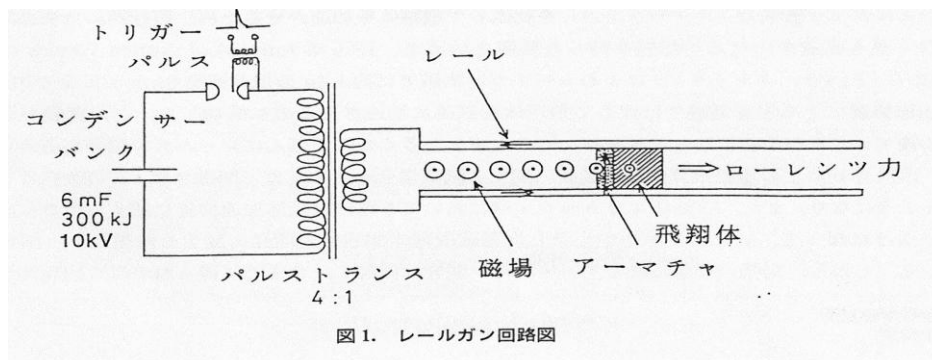


図1. レールガン回路図

計測系として

- 1、レールガン本体への入力電流を計測するログスキーコイル
- 2、銃身に沿って複数個配置された磁場コイル。銃身内部のプラズマアーマチャ及び飛翔体の移動はレール電流によって発生する磁場をこれらの磁場コイルが計測することによって知ることができる。
- 3、銃口より打ち出される飛翔体の速度を計測する2組のX線装置。

が主な測定装置である。これらの計測装置の中でも特に磁場コイルはレールガン銃身内部のプラズマ挙動を知るのに重要な計測手段であり、本論文ではこの磁場プローブによって得られた信号をもとに10 km/s という超高速を達成させるレールガン構成を提案するものである。

レールガンによる飛翔体推進力は下の式で表される。

$$F = (1/2) \cdot L I^2 \quad (L: \text{レールの単位長当たりのインダクタンス。} \quad I: \text{レール電流。})$$

宇宙研レールガンはLとして約 $0.5 \mu\text{H/m}$ 、レールガン長2mであるが、 7 km/s 以上の高速を得るには大きなレール電流が必要とされ、最大 800 kA （放電周期は約 1 ms ）の大電流をコンデンサバンク電源より供給している。上記の推進力のみが飛翔体に働くものとして得られる飛翔体速度は電源エネルギー 300 kJ の場合で 10 km/s にも達する。しかし、上記の推進力以外に下記のような加速を妨げる力が働く。

- ①プラズマアーマチャと銃身壁との摩擦力。これは速度の二乗に比例するので、高速になるとより加速を妨げる効果が大きくなる。
- ②高温プラズマよりの輻射熱による銃身壁よりのアブレーション物質がプラズマアーマチャに混入する。この結果、プラズマアーマチャ質量が増加して加速を妨げる。プラズマアーマチャ質量増加を測定することは出来ないが、シミュレーション計算によると電源エネルギー 1 MJ に対して数 g 程度になり、 g 程度の飛翔体質量を加速させる場合、飛翔体速度にたいする影響は大きくなる。この実質加速質量の増加はレールガンに投入されるエネルギーが大きくなればなる程大きくなるので、電源エネルギーを増大させた時の飛翔体加速効率の減少を招くひとつの要因となっている。
- ③プラズマアーマチャの分裂による影響。プラズマアーマチャが加速中に分裂することによってプラズマアーマチャ電流が減少して、飛翔体加速が低下する。プラズマアーマチャの分裂は主に加速後半に発生するが、放電直後の飛翔体加速期間にも発生することが我々の実験によって明らかにされた。

これらの阻害要因が飛翔体速度の増加を妨げているが、特に③のプラズマアーマチャの分裂は最も大きな影響を与えているもので、このプラズマアーマチャの分裂を防ぐことが 10 km/s 達成には必要不可欠なことと思われる。

(2) 実験結果

銃身内部のプラズマアーマチャの挙動は銃身に沿って配置された複数の磁場コイルによって観測が可能である。これら複数の磁場コイルによって得られたプラズマアーマチャの分裂を放電経過時間に沿って述べる。

1) 放電直後の飛翔体加速におけるプラズマアーマチャの分裂

上記の減速要素③に述べられた内、放電直後の飛翔体加速におけるプラズマアーマチャの分裂に関する報告は過去なかったが、我々の実験によってその存在が確認された。プラズマアーマチャの発生は飛翔体後部に置かれた 0.2 mm 厚のアルミニウム片に大電流を流して、そのジュール損失によって発生した熱による蒸発・電離を通して行われる。我々はアルミニウム片位置を挟んでその前後 20 cm 領域に複数の磁場コイルを配置して、プラズマアーマチャ発生直後のプラズマアーマチャの挙動を観測した。その結果、初期位置よりプラズマはプラズマ圧力によって後方に膨張するが、コンデンサバンクの充電エネルギーの値によらず初期位置より後方約 5 cm の位置で電磁力によって停止し、その後プラズマアーマチャ全体が前方へと加速されることが分かった。この結果、プラズマアーマチャの前半部分（飛翔体のすぐ後ろの領域）と後半部分（飛翔体より少し離れた領域）の前方への移動速度に差が生じて、プラズマアーマチャが分裂し、全体の3割程度のプラズマアーマチャが飛翔体の移動より遅れて後方に残される事が分かった。この後方に残されたプラズマは飛翔体を加速させているプラズマアーマチャの熱によって発生した銃身壁よりの大量のアブレーション物質によって、その前方への移動が妨げられて後方に取り残される。後方に残されたプラズマに印加される電圧は放電電流減少による負の $L_0 dI/dt$ （ L_0 : 両プラズマ間のインダクタンス）によってその電圧値は時間とともに徐々に下がっていくので、後方に取り残された後方プラズマは時間の経過と共に徐々に減少していく。

2) 放電電流ピーク値より後半にかけてのプラズマアーマチャの分裂

電源エネルギーから飛翔体の運動エネルギーへと変換される変換効率（加速効率）は電源エネルギー 150 kJ の約 11% をピーク値としてそれ以上の電源エネルギー値では減少し、電源エネルギー 300 kJ では約 8% にまで減少する。Fig.2、Fig.3に電源エネルギー 150 kJ 、 300 kJ 実験において得られた複数の磁場コイルによって得られた電圧波形の時間変化を示す。（レール電流による磁場の時間変化が磁場コイル出力電圧となるが、その出力電圧を積分した波形が本波形なので、本波形はレ

ール電流すなわちプラズマアーマチャ電流そのものの波形を表している。)

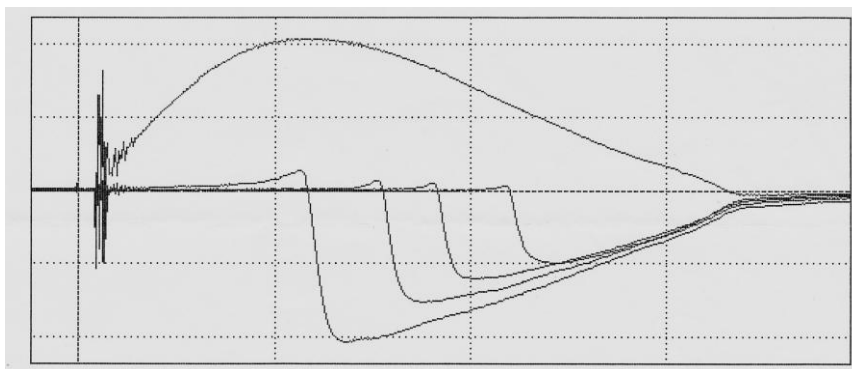


Fig.2 Integrated B-dot Signals (E=150 kJ, 200 μ s/div)

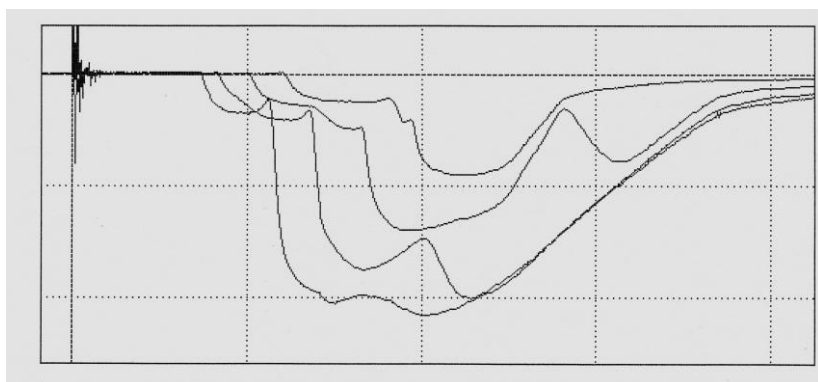


Fig.3 Integrated B-dot Signals (E=300 kJ, 200 μ s/div)

各々の実験条件は以下の通りである。

- ①電源エネルギー：150 kJ 飛翔体質量：1.1 g 飛翔体速度：5.5 km/s 変換効率：11%
- ②電源エネルギー：300 kJ 飛翔体質量：1.1 g 飛翔体速度：6.6 km/s 変換効率：8%

Fig.2（電源エネルギー150 kJ）より、放電後約200 μ sでプラズマアーマチャが最初の磁場プローブ位置に到達し、プラズマアーマチャ通過に伴うレール電流増加によって磁場値は直線的に増大していくことが分かる。磁場コイル電圧（負方向）はプラズマアーマチャ通過時点で最大値となり、その後は放電電流の減少と共に減少していく。一方、Fig.3（電源エネルギー300 kJ）においてはプラズマアーマチャ到来の前に漏れプラズマによる磁場電圧波形が見られる。この漏れプラズマはプラズマの圧力とレール同士の反発力によって飛翔体と銃身壁との間に隙間が生じたことで発生する。一番目の磁場コイルによる磁場電圧波形はプラズマアーマチャ通過と共に増加していくが、最大値後の波形は Fig.2 の波形とは異なっていて、ほぼ一定の値を約200 μ sの間持続した後放電電流の減少と共に減少している。他の磁場コイルによる磁場波形は Fig.2 とは更に大きく異なっていて、ふたこぶ形状を示している。

この二つの図を比較すると次のことが分かる。

- ①電源エネルギー150 kJの場合、プラズマアーマチャは放電初期より飛翔体が銃口より発射されるまでの間、コンパクトな形状を保っている。このことはプラズマアーマチャが電磁力によって飛翔体後部の狭い領域に電磁力によって閉じ込められ、飛翔体を有効に加速させていることを示している。
- ②電源エネルギー300 kJの場合、飛翔体加速初期段階においてプラズマアーマチャは比較的コンパクトな形状をしているが、飛翔体速度が上昇するに従いプラズマアーマチャの一部が後方に漏れて二次アークと呼ばれるプラズマを発生させている。この二次アークの発生は、プラズマアーマチャと銃身壁との摩擦力が速度増加及びプラズマ密度の増加によってプラズマアーマチャに働く電磁力より大きくなることによって起きるものと思われる。二次アーク発生直後の加速前半において二次アークはプラズマアーマチャの直ぐ後部領域に存在しているが、プラズマアーマチャが発生させたアブレーション物質によってその加速が制限

されて、時間の経過と共にプラズマアーマチャより離れた後部の狭い領域に集中するようになる（プラズマアーマチャによる磁場とそれに続く二次アークによる磁場を作るふたこぶ磁場波形がこのことを表している）。この二次アークは飛翔体が銃口より発射されるまでの間にプラズマアーマチャに追いつくことはなく、飛翔体がレールガンより発射された後も銃身内部に存在している。二次アークはプラズマアーマチャより電源側に位置するために電気回路的にはプラズマアーマチャを短絡する回路となるので、その結果プラズマアーマチャ電流を大きく減衰させ、飛翔体加速に大きな影響を与えている。

3) 銃身口径を変えた場合のプラズマアーマチャ分裂

Fig. 3、Fig. 4、Fig. 5 に銃身口径を変えた時の磁場プローブ波形を示す。いずれの場合も電源エネルギーは300 kJである。

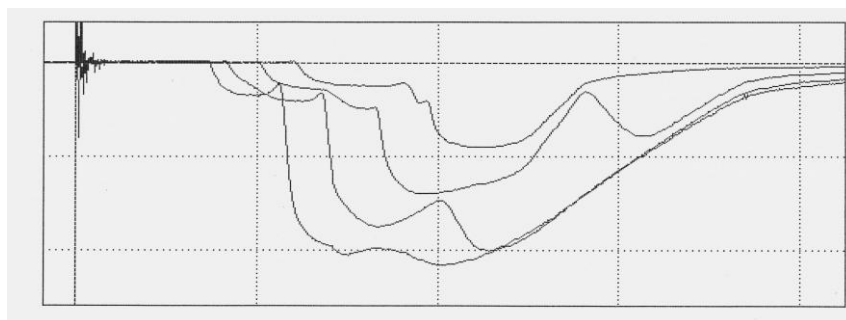


Fig. 3 Integrated B-dot Signals. (銃身口径13 mm Φ)

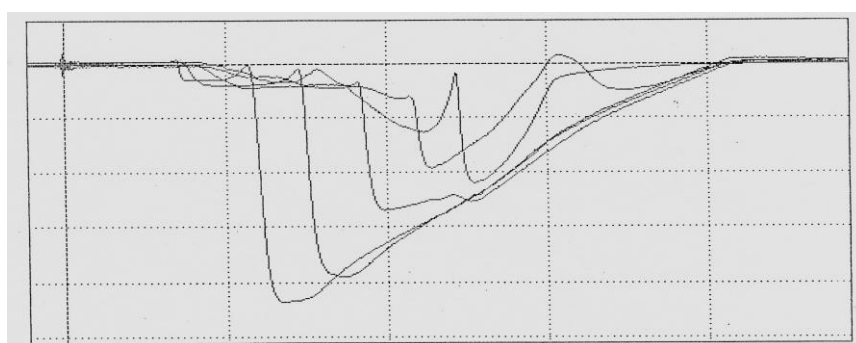


Fig. 4 Integrated B-dot Signals. (銃身口径17 mm Φ)

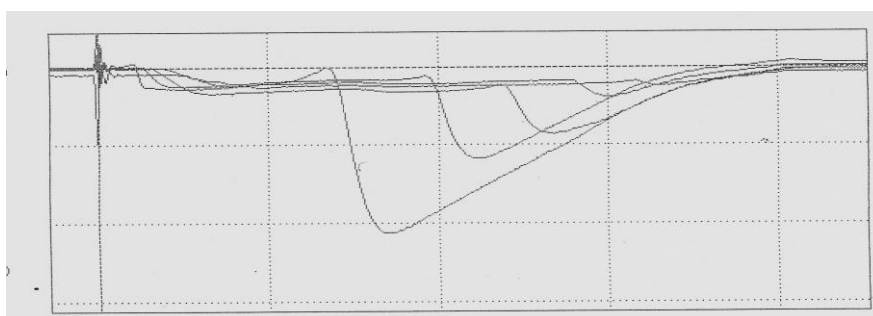


Fig. 5 Integrated B-dot Signals. (銃身口径25 mm Φ)

Fig. 3、Fig. 4、Fig. 5より銃身口径を大きくなるに従い、プラズマアーマチャ分裂は小さくなり、口径25 mm Φ ではプラズマアーマチャ分裂は消滅していることが分かる。

以上の実験結果よりプラズマアーマチャ分裂はプラズマ圧力と磁場圧力のバランスで決まり、プラズマ圧力が磁場圧力より大きくなった時にプラズマアーマチャが分裂することが推測される。

Fig. 6、Fig. 7に150 kJ、300 kJにおける飛翔体位置に対する飛翔体速度、全放電電流に占めるプラズマアーマチャ電流の割合の変化を示す。(縦軸はアーマチャ電流割合に対してはarbitrary scale、飛翔体速度に対しては速度値を表す)

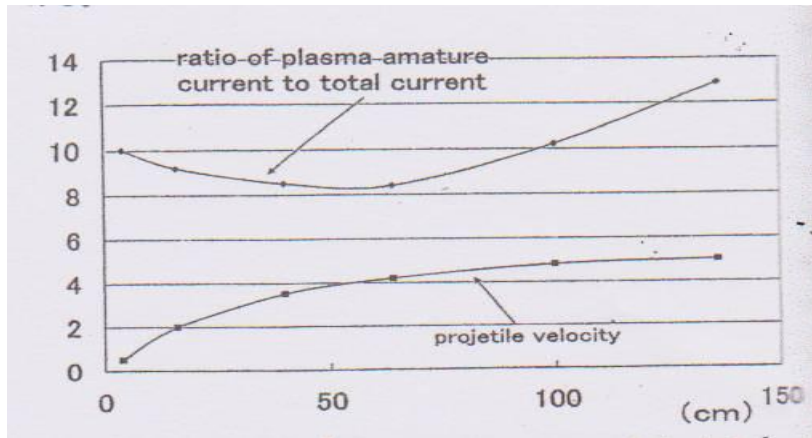


Fig. 6 The ratio of plasma armature current to total current and projectile velocity vs. projectile position.

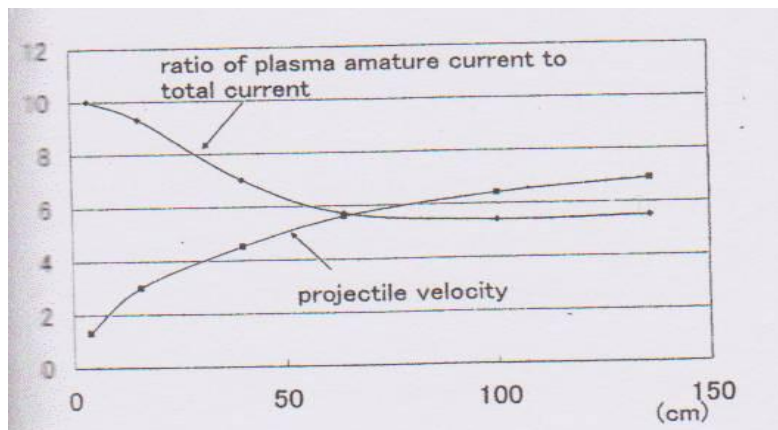


Fig. 7 The ratio of plasma armature current to total current and projectile velocity vs. projectile position.

この2つの図より以下の事が分かる。

- ① 150 kJ の場合、全放電電流に対するプラズマアーマチャ電流の割合は、加速前半においてはほぼ一定の値を維持し、加速後半にはその値が増加しているが、これはプラズマアーマチャが全加速期間中コンパクト形状を維持している結果である。
- ② 300 kJ の場合、飛翔体が前方に加速されるに従い全放電電流に対するプラズマアーマチャ電流の割合は大きく減少していくが、これは Fig. 3 に示されている二次アークの発生によるものと思われる。300 kJ 実験においてはプラズマアーマチャの後方で二次アークが大きく成長し、銃身に供給される電源よりの放電電流はプラズマアーマチャに集中されずに他の放電経路に分散されることを示している。

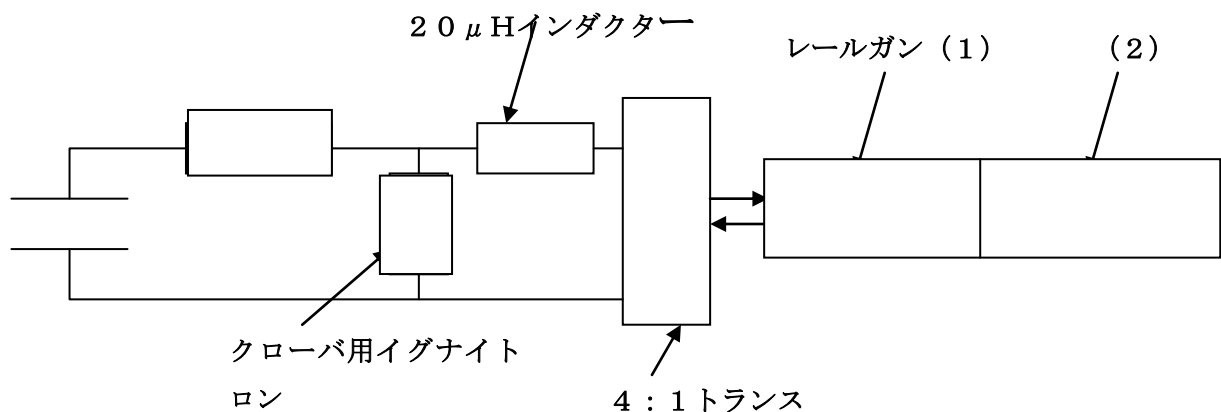
以上の実験結果よりプラズマアーマチャの分裂に関しては下記の事が言える。

- (1) 銃身口径が 13 mmΦ の場合、電源エネルギー 150 kJ 以上 (放電電流のピーク値が 500 kA) で発生するようになる。
- (2) 銃身口径が大きくなると (銃身内部体積が大きくなる) 発生しなくなる。

(3) 10 km/s レールガン構成

上記に述べたように電源エネルギーの増加はプラズマアーマチャの分裂を招いて、飛翔体速度の増加を抑制する事が分かり、10 km/s を達成させるには下記の対策が必要なものと思われる。

- (1) 放電電流のピーク値を500 (kA) 以下 (現在の電源エネルギー150 kJに相当) にする。
 - (2) 銃身の変形を抑えている、鉄製Vブロックを非鉄製Vブロックにする。これによって、レール間の磁場が約20%増加することが確認されている。
 - (3) レールガン放電回路をクローバー回路にして、コンデンサーに蓄えられた充電エネルギーを有効に活用する。
- 電源エネルギー300 kJ、飛翔体質量0.8 g、変換効率13%で10 km/sが達成できるが、上記3項目を備えたレールガンを使用すれば、10 km/s以上の速度達成も可能であろうと思われるが、これらの条件を兼ね備えたレールガン構成図を下に示す。



(4) まとめ

超高速度達成の可能性を有しているレールガンの開発・研究が始まってより約30年が過ぎたが、その最大飛翔体速度が8 km/sを越える報告は今日に至ってもなされていない。超高速度達成を阻害している大きな原因として挙げられるのがプラズマアーマチャの分裂であろうが、本論文では宇宙研レールガンの実験結果を基にして加速初期段階、加速後半におけるプラズマアーマチャの分裂について述べた。これらの実験結果をもとにして10 km/s 飛翔体速度を目指したレールガン構成を提案したが、その可能性は充分にあり、その実現を切に願うものである。