

宇宙科学研究所・レールガンにおける飛翔体速度計測について

原 常典*・柳澤正久・河野 汀**

(1987年10月20日受理)

On the velocity measurement in the ISAS railgun experiments

by

Tunenori HARA, Masahisa YANAGISAWA and Migiwa KONO

Abstract: The railgun system was set up in the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) and about a hundred shots were carried out preliminarily in 1986. The following four methods of projectile velocity measurement were tried in the experiments.

(1) laser fence, (2) magnetoflyer, (3) wire cut, (4) thin plate

The third method appeared to be the simplest and most reliable one, while the laser fence was affected severely by the dust and plasma which were blown off with the projectile. The second and fourth ones suffered the electromagnetic noise. The wire cut would be the best way just to measure the velocity itself, but it affects the projectile attitude and its front surface. For the railgun application, the improvement of the laser fence method or ones with X-ray, which have no effect on the projectile, would be necessary.

1. はじめに

レールガンは電磁力を使って、1g以上の物体をこれまでの加速器(銃)よりはるかに速く打ち出せる可能性をもった装置で、宇宙科学研究所においても、1986年から惑星科学実験用として開発を進めている[1]。レールガンの研究、およびその応用において、飛翔体

* 相模工業大学, 現在 ニチコン株式会社

** 相模工業大学

の速度計測は極めて重要であるが、火薬や圧縮ガスを使った加速器と違い、強いプラズマの発光や電磁ノイズが計測を困難にすることが予想される。

従来の加速器では、レーザー光線を飛翔体が横切るのを2点で観測し、2点間の距離と時間差から速度を求める、レーザーフェンス法が多く使われてきた。しかし、レールガンでは、なかなかうまくいかないようで[2]、この方法で速度を計測した例はあまり見当たらない。理由として、発射に伴う空気中の衝撃波や機械的振動が考えられているが、これらは、これまでの加速器にも伴っていたはずで、別に大きな原因があると思われる。

レールガンの速度計測で最も成功を収めているのが、レーザーの代わりに X 線を使った方法であり[3]、飛翔体の通過を検知するばかりでなく、フラッシュ X 線による、飛行中の撮像も行われている。しかし、装置が大がかりになり、実験者が被曝する危険性があるという欠点がある。

我々は、宇宙科学研究所・スペースプラズマ実験設備[4]の惑星科学実験用レールガンについて、簡便で確実な速度計測法の確立をめざし、研究を行った。

2. 実験方法

全部で92回の実験が、最大エネルギー300 kJでの発射が可能な大型レールガン(以後単にレールガンと呼ぶ)、6 kJ用のミニレールにより行われた[1]。実験環境は真空中または大気中、あるいは1気圧の窒素中である。速度計測は、飛翔体が銃口から出て、約1.4 m進むまでの間に行われた。計測方法としては、次の4つの方法を試みた。

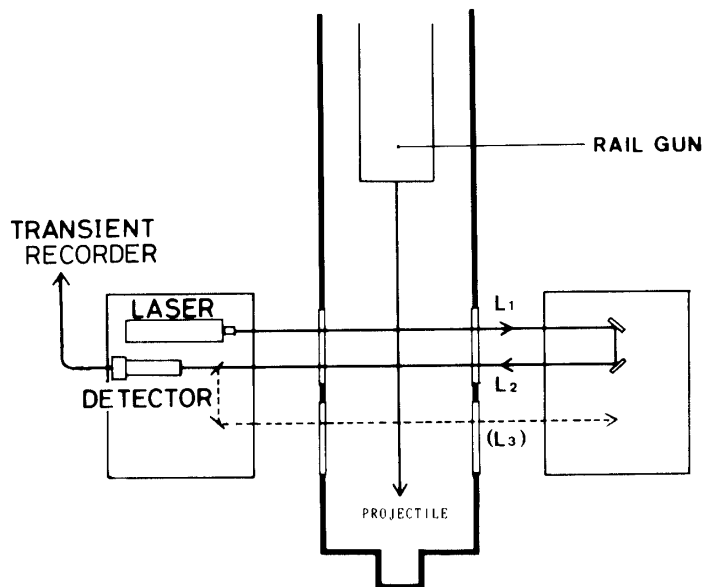


図1 レーザー光線は、ディテクターの窓に入るまでに鏡によって反射され、2本または3本のパスを形成する。飛翔体がそれぞれのパスを横切った時刻とパス間の距離から速度を計算する。

(1) レーザーフェンス法 (図1)

鏡を用いて、光線が2回遮られるよう、2本のレーザー・パスを作る。パスの間隔は約10 cm, 1本の長さは約3 mで、計測を確実なものとするため、破線のようにパスを3本にすることもある。銃口からパスまでの距離は約50 cmである。出力30 mWのHe-Neレーザーを用いているが、チェンバーの窓での反射、吸収などにより、ディテクターに入射するのはその10%程度である。プラズマ発光の影響をおさえるために、ディテクターの窓は直径5 mmの穴2つ20 cm間隔でおいたコリメーターとなっており、その後、レーザー

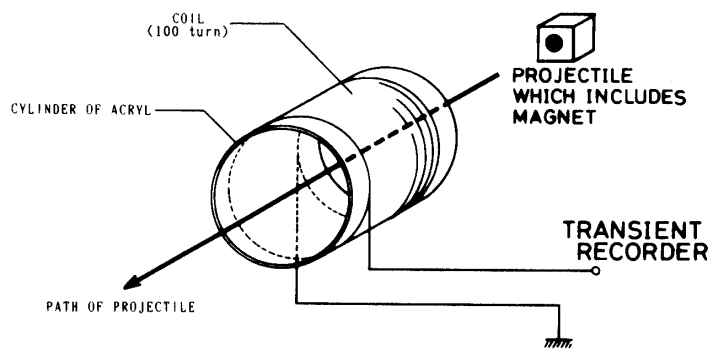


図2 飛翔体に磁石を埋め込んでおけば、それがコイルを通過する時、コイル内の磁束が変化して電圧を発生し、通過時刻を知ることができる。2つのコイルを離して設置し、速度を計算する。

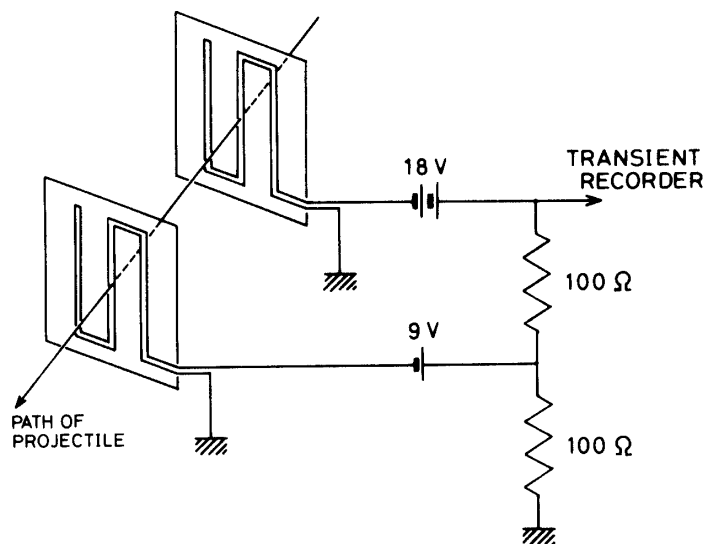


図3 飛翔体が細い導線を次々に切断すると、レコーダーの出力は、18→9V, 9→0Vと変化し、それぞれの位置での飛翔体の通過を知ることができる。導線は、この図のようによるなどして電磁ノイズを拾わないようにする。

光のみを通す。バンド幅、8 nm, 4 nm の干渉フィルターがある。また、レーザーが直線偏波していることを利用して、100 対 1 の偏光素子を入れ、外来光をカットしている。光はピン・フォトダイオードで受け、オペアンプで増幅しているが、適当な透過率をもった ND フィルターを使って、レーザー入射時に数 V の出力電圧が得られるようになっている。レーザー、鏡、ディテクターは防振台にのせ、床からの振動を防いでいる。

(2) マグネトフライヤー法 (図 2)

飛翔体に小さな磁石を埋め込み、それがコイルの中を通過すると、コイルを貫く磁束の変化に応じて、電圧が発生し、飛翔体通過を検知できる [5]。2 つのコイルを用意し、time of flight で速度を計算する。4 mm ϕ × 4 mm の円筒形のフェライト磁石を、その双極子軸が進行方向に一致するよう、飛翔体の前面に穴をあけ、接着剤で埋め込んだ。コイルとしては、直径 3 cm のアクリル・パイプにホルマル線を 100 回巻いたものを作り、銃口から 1 m ぐらいのところ約 30 cm 離して 2 つ設置した。

(3) ワイヤークット法 (図 3)

飛翔体が導線を切断するのを電氣的に検知して、その通過を知る。飛翔体の速度に影響を与えないよう細い導線 (0.2 mm ϕ のホルマル線) を使用し、飛翔体が確実に導線に当たるよう、それを蜘蛛の巣状に張る。図のように配線すれば、2 カ所でのワイヤーの切断で、出力電圧が段階的に変化し、トランジェント・レコーダ、1 チャンネルで速度を得ることができる。銃口から、1.2 m 程のところ、30 cm 離して導線を設置した。

(4) 薄膜法 (図 4)

狭い間隔で平行においた 2 枚の導体薄膜を飛翔体が貫くと、2 枚の薄膜が電氣的に導通し、その通過を電氣的に検知できる。銃口から 1.4 m のところに設置した。

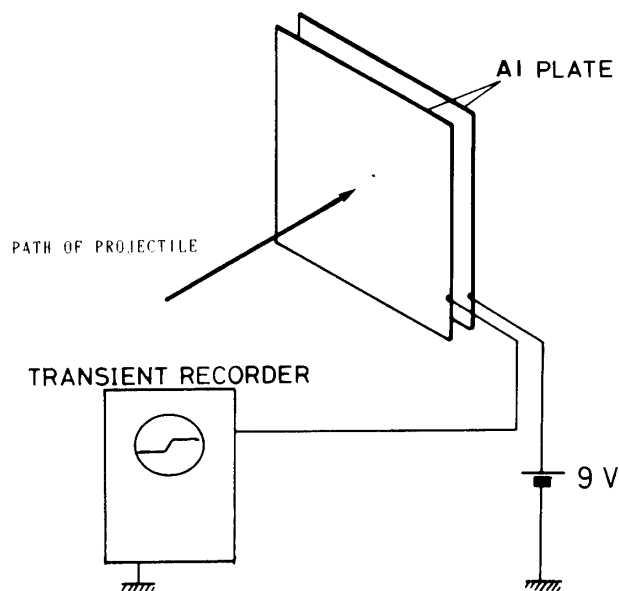


図 4 近接させた 2 枚の薄い導体板を飛翔体が貫くと、板が導通し、飛翔体の通過を知ることができる。

いずれの方法も、銃口から0.5~1.4 mのところでは用いられたが、発射に伴う、プラズマ雲、ダスト、衝撃波の影響を小さくするため、1 mm厚のアルミ板に飛翔体の通る3 cm角の穴をあけたもの(スキーマ、[6])を、銃口と測定点との間に2, 3枚置いた。

3. 結 果

(1) レーザーフェンス法

真空中の場合、低エネルギーの実験では問題なく速度を測れたが、充電エネルギーが50 kJを越えるようになると、飛翔体通過以前のレーザーの吸収、散乱などが激しくなり、測定が難しくなった。図5に、ミニ・レール、6 kJでの測定例を示す。飛翔体がレーザー・パスを2回横切っているのが明瞭にわかるが、飛翔体以外にも、光を吸収、散乱している

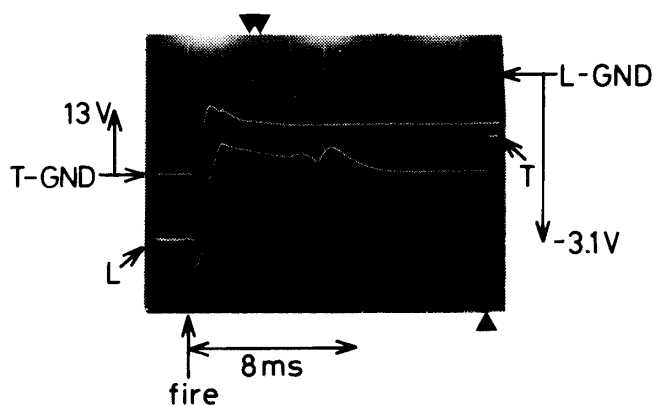


図5 6 kJのショットにおけるレーザーフェンス法(L)、薄膜法(T)による速度計測。上の2つの三角印は、飛翔体が2本のレーザー・パスを次々に横切った瞬間を示し、下のは薄膜を貫いた瞬間を示す。

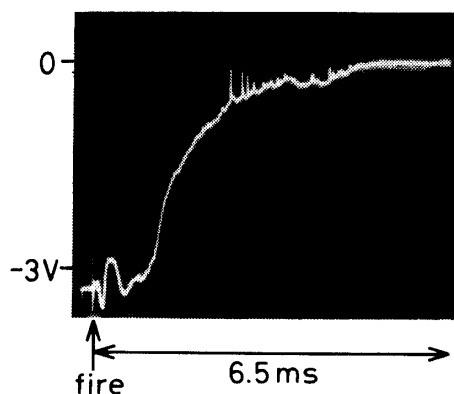


図6 50 kJのショットにおけるレーザーフェンス法による速度計測。レーザーが、ダストあるいはプラズマによりかなり遮られて、どこが飛翔体の通過を示しているのかよくわからない。

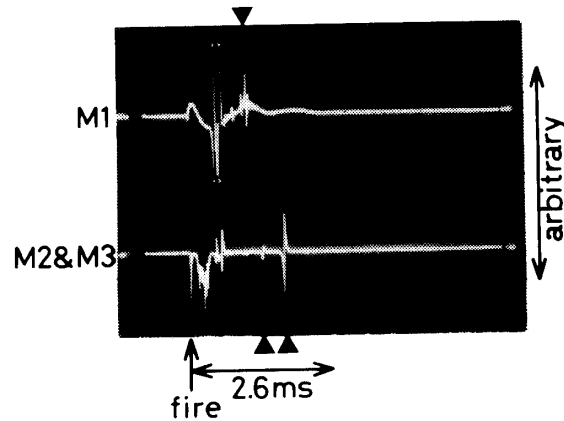


図7 147 kJのショットにおけるマグネットフライヤー法による速度計測。三角印は、それぞれ3つのコイルを通過した時刻を示している。下のトレースは、2つのコイル(M2とM3)の信号の和である。

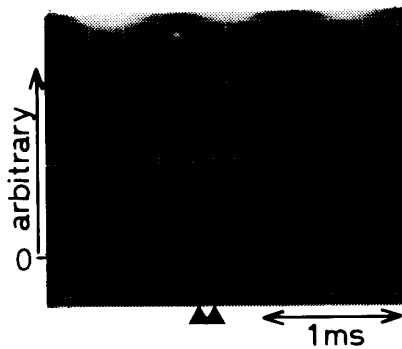


図8 108 kJのショットにおけるワイヤーカット法による速度計測。2つの三角印は、2本の導線を次々に切った時刻を示している。

ものがあるのがわかる。入射光はもとのレベルより強くなっていることはなく、プラズマの発光の影響はよく抑えられている。図6は50 kJでの結果であるが、飛翔体以外に起因する吸収、散乱が激しくなり、飛翔体通過による信号の確認が難しい。初めの数100 μsec に現われているのは発射時のノイズである。防振台は、ゴム足と空気バネで床からの振動を防ぐようになっているが、後者は使っても使わなくても変わらなかった。即ち、床からの衝撃はそれほど強くない。

大気中又は1気圧窒素中での実験では、一度も成功しなかった。飛翔体が通過したと思われる時以前から、ディテクターに入るレーザー光は、ひどく弱まり、その変化も激しい。銃口から飛翔体に先行して出た衝撃波がレーザーを散乱している可能性が強いが、大気、窒素の存在によって、塵やプラズマが大量に発生しているためかも知れない。

(2) マグネットフライヤー法

真空中、大気中変わりなく、75 kJ ぐらいまでの実験では問題ないが、それ以上では電磁ノイズが大きくなり、測定が難しくなる。これは、レールガンでの放電がまだ残っているうちに、飛翔体がコイルを通過するためであろう。また、飛翔体に先行するプラズマ雲があり、それが影響しているのかも知れない。図7に一例を示すが、ここでは、フィルターで高周波ノイズを除去しており、飛翔体の通過を確認しやすくなっている。M2とM3での通過信号の大きさの違いは、飛翔体の姿勢が変化しているためである。

(3) ワイヤークット法

36回の実験中、34回信頼性の高い計測ができるという非常に確実な方法である。2回の失敗は、飛翔体がワイヤーに当たらなかったためである。他の方法が高エネルギーでの実験でうまくいかないのに対し、この方法は、発射エネルギーや真空中、大気中の別なく成功した。図8は、これまでの実験で最高速度を記録した時の結果で、2つの導線の間隔は30 cm、時間差125 μsec で、速度は2.4 km/秒となる。図3にも示したように、往復の電線をよったものを張るなどして、導線のつくる回路を横切る磁束がないようにすることによって、電磁ノイズを避けることができた。また、切断された導線が、機械的に、あるいはプラズマによって再び導通するということがほとんどなかった。導線を薄い絶縁物のフィルム上に張って、それにあいた穴の形から飛翔体の姿勢についてもある程度知ることができ、さらに、導線を切ったのが飛翔体であり、いっしょに飛び出した破片やダスト、プラズマ雲ではないことも確認できた。しかし、回収された飛翔体には導線を切った時の跡が残っており、速度に影響は与えなくても、その姿勢を変えた可能性がある。また、切られた導線の破片が、チェンバーを傷つけたり汚したりする。

(4) 薄膜法

電磁ノイズ、プラズマの影響が大きかった。図5に一例を示す。発射の瞬間、-18 V まで振れているが、これはノイズであろう。その後、+6 V 付近で変化しているが、これはプラズマによる2枚の電極板の導通、または、電極板の間隔の変化による容量変化によるものであろう。最後に飛翔体が当たって確実に導通し、+7 V の一定電圧となっている。プラズマによる導通を防ぐために電極板をマイラーのフィルムで覆うなどしたが、被覆が十分でなかったらしく、改善されなかった。電極板間隔が狭すぎたり、厚みが薄すぎたりすると、飛翔体に先行するプラズマ雲の衝突圧で導通してしまう可能性があり、厚すぎると、飛翔体を著しく減速しかねない。

4. 議 論

今回実験に使ったレールガンは、銃孔精度が悪く、飛翔体に先行して、塵やプラズマが大量に噴き出していたらしく[1]、速度計測環境としてはかなり厳しいものであった。にもかかわらずワイヤークット法がうまくいった理由としては、

- ① 初期が導通状態であるため、電場ノイズやプラズマの影響を受けにくい。更に磁場ノイズを受けにくい構造にすることもできる。
- ② 飛翔体と共に飛び出す破片が、導線に当たる確率が十分小さく（導線を張る密度は

飛翔体の大きさ程度), 銃口から 1.2 m も離れば, プラズマ雲によって破られることもない。

が考えられる。一方, 薄膜法では, 電通板が平板コンデンサーを成しており, 電場ノイズに弱く, プラズマでも導通が起こってしまい, 更に, 小さな破片による導通を飛翔体通過と見誤る確率も高い。しかし, ワイヤークット法も, あまり銃口近くに設置すると, それがプラズマ雲によって破られる可能性がある。今回の実験でも, 1.2 m 程離してあるが, さらに間に 3 cm 角の, 飛翔体を通るだけの穴をあけた 1 mm 厚のアルミ板 (スキーマー) を 2 枚入れて, これを防いでいる。大気中の場合, 飛翔体は銃口から出た後, 空気抵抗によって減速する。銃口からの距離を取りすぎると, 精密な発射速度は測れないが, 充電電圧など実験条件を変えての速度の比較という目的には十分であろう。しかし, レールガンを惑星科学実験に応用する際には, 飛翔体の姿勢が変わったり, 前面が傷ついたり, ワイヤの破片が飛び散ったりするので好ましくない。

薄膜法はあまり有効な方法ではなかったが, 飛翔体を原形に近い形で回収することをあきらめ, 衝突の瞬間を検出することのみを目的として, 電極板を 0.5 mm 程度の厚いものに換え, 電極板間の距離を大きめにとれば, 破片 (銃孔や飛翔体の一部が壊れてできるらしい) によって破られることもなくなり, 衝撃波で板が曲がり導通してしまうことも防げる。この場合でも, 銃口からある程度離すことは必要で, これによってコンデンサー・バンクの放電が十分終了し, 電磁ノイズのない状態で測定できるようにもなる。プラズマによる導通が起こらない構造にすることも重要である。

マグネトフライヤー法の場合にも, コイルを銃口から十分離し, ノイズ発生が終了してから飛翔体が通過するようにする必要がある。しかし, 大気中の実験では, 飛翔体の減速ばかりでなく, 姿勢が変わって, コイルを貫く磁束の様子が変わり, うまく信号が出ない可能性がある。もちろん, これを逆に使えば, 姿勢をモニターすることができる。また, 磁石が飛翔体から分離したり, その破片が発生したりしないよう, しっかりと埋め込み, 接着することが重要である。

レーザーフェンス法は, 今回のように, 飛翔体に先行して, プラズマ雲やダスト (更に大気中では衝撃波) が噴き出す場合には, 非常に難しい。それらによるレーザー光線の屈折, 散乱, 吸収はかなり激しく, また, 時間変動している。スキーマーを用いて, これを防ぐ努力をしたが, 銃口からの距離が 0.5~1.2 m ではだめであった。レールガンの応用という点では最も良い方法であるが, ガンの銃孔精度を上げて, プラズマ雲やダストの先行をなくし, 銃口と測定点を十分離さなければならないだろう。その場合でも, 飛翔体に続いてプラズマやダストが来たり, 大気中での実験で, 飛翔体に衝撃波が伴っている場合には, 飛翔体による吸収に続いて, これらが光を遮り, 飛翔体のみによるパルス状のきれいな信号を得るのは難しいだろう。

レーザーのかわりに X 線を用いれば, プラズマ雲で屈折することもなく, ダストによる吸収も, その全質量は飛翔体に比べて小さいので, ほとんどない。飛翔体がプラズマやダストといっしょになっても, 飛翔体の通過のみを検知できる。更に, 大気中での実験でも, 飛翔体に伴う衝撃波の影響を受けることがなく, 銃口のすぐ近くでも測定可能なの

で、空気抵抗による減速を気にする必要もなくなる。レールガンの応用という面から見ても理想的である。

現在、先行するプラズマやダストをなくすため、レールガンの銃孔精度を高め、また、飛翔体の飛ぶ計測用真空チェンバーを長くし、銃口と測定点を離す改良を進めており、真空中では、レーザーフェンス法が成功するものと期待している。それと並んでX線を用いた方法も検討している。

5. ま と め

宇宙科学研究所のレールガンにおける飛翔体速度計測では、飛翔体と共に噴き出すプラズマ、ダストなどが、測定を妨害している。特に、レーザーフェンス法は、これらによるレーザー光線の屈折、散乱、吸収がひどく、高い充電エネルギーでの測定が困難である。最も影響を受けなかったのはワイヤーカット法で、エネルギーの大きさや、真空中、大気中の別なく、確実に計測が行なわれた。

プラズマやダストが飛翔体に先行することのないようレールガンを改良し、銃口から速度計測点までの距離を十分とすことによって、測定は容易になろう。後者は、また、コンデンサー・バンク放電中の電磁ノイズが計測に影響しないようにする上でも重要である。しかし、大気中の実験では、空気抵抗による減速があるので、できるだけ、銃口近くで計測したいが、この場合には、X線を用いた方法が最適であろう。

謝 辞

実験においては、宇宙科学研究所の佐藤恵一氏、ニチコン株式会社の中沢徳郎、古矢勝彦、内田昌文氏をはじめとする多くの方々に手伝っていただいた。また、宇宙科学研究所の河島信樹教授からは有役な助言をいただき、同研究所・プラズマ実験室の矢守章氏には、設備や機器の使用、その他、大変お世話になった。なお、本論文は、相模工業大学に卒業論文として提出されたもの[7]を短くまとめたものである。

参 考 文 献

- [1] 柳澤正久, 佐藤恵一, 原 常典, 中沢徳郎, 古矢勝彦, 内田昌文, 矢守 章, 河島信樹, 惑星科学実験用レールガンの開発, 宇宙科学研究所報告, 本号, 宇宙科学研究所, 1987.
- [2] K. E. Nalty, R. C. Zowarka and L. D. Holland, Instrumentation for EM launcher systems, IEEE Trans. Mag., MAG-20, 328-331, 1984.
- [3] S. Usuba, Y. Kakudate, K. Aoki, M. Yoshida, K. Tanaka and S. Fujiwara, Development of railgun accelerator at NCLI, IEEE Trans. Mag., MAG-22, 1785-1789, 1986.
- [4] スペースプラズマ委員会, スペースプラズマ実験設備中間報告書, ISAS Res. Note, No. 361, 宇宙科学研究所, 1986.
- [5] K. Kondo, A. Sawaoka and S. Saito, Magnetoflyer method for measuring gas-gun projectile velocities, Rev. Sci. Instrum., 48, 1581-1582, 1977.
- [6] 曾我國男, 井上安敏, 白水正男, 山崎 喬, 超高速飛翔体の観測技術の開発, 大型超高压力

発生システムに関する研究報告，科学技術庁研究調整局，73-85，1986.

- [7] 原 常典，レーザガン発射実験における飛翔体速度計測について，卒業論文，相模工大・電気工学，1987.