

## 惑星科学実験用レールガンの開発

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

(1987年10月20日受理)

## Development of railgun accelerator for planetary science experiments

by

Masahisa YANAGISAWA, Keiichi SATO, Tunenori HARA  
Tokuro NAKAZAWA, Katsuhiko FURUYA, Masafumi UCHIDA  
Akira YAMORI and Nobuki KAWASHIMA

**Abstract:** The two stage light gas guns have been used widely to study the collisions between planetesimals, from which the planets were believed to be made, meteorite impacts on the surface of the moon and planets, and high pressure states in the planetary interiors. The electromagnetic guns, especially rail-guns, are expected to make these researches with much higher velocity (more than 10 km/sec) possible. The railgun accelerator system was set up in the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) in 1986, having more than 10 km/sec with 1 g projectile as a goal. The energy source is a 300 kJ capacitor bank. The maximum velocity so far is 2.4 km/sec at 108 kJ with 2.4 g projectile and 1.8 m barrel.

---

\* 相模工業大学，現在，ニチコン株式会社

\*\* ニチコン株式会社

## 目 次

1. 惑星科学とレーलगガン	2
2. レールガンの基礎	4
3. 実験設備, 実験方法	7
4. レールガンのシミュレーション	10
5. 実験結果	12
6. 議論	20
7. まとめ	22

## 1. 惑星科学とレーलगガン

実験室内で高速飛翔体を標的に衝突させ、人工のクレーターを作る実験は、月や惑星のクレーター地形を作った隕石衝突の規模を推定したり、表面の地質構造を調べるための基礎データを与える[1]。たとえば、飛翔体の運動エネルギーとクレーターの直径との関係が調べられ、天然のクレーターを作った隕石の大きさ、速度が推定されている。また、クレーター周辺では、標的が堀りおこされ、より深部にあった物質が、より表面近くに堆積

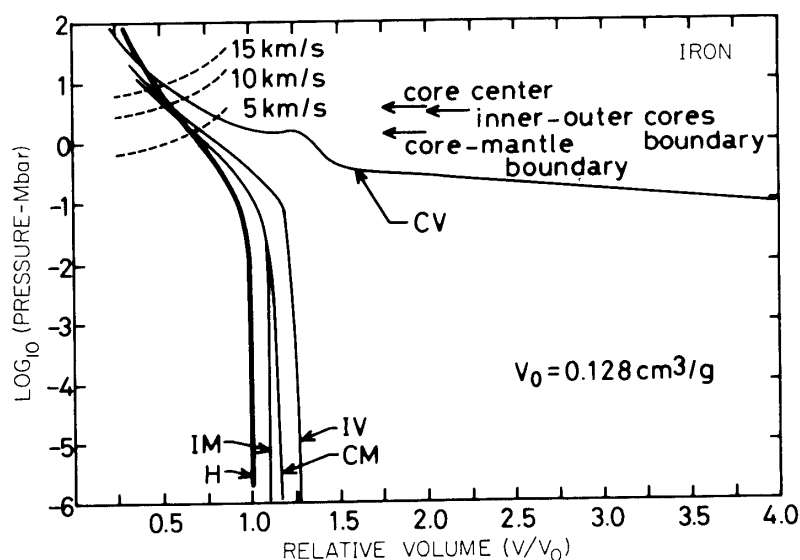


図1 鉄のユグニオ(H)および断熱膨張曲線。鉄どうしが衝突した場合の圧力、体積はHと速度に対応した破線との交点として求まる。通常圧力に解放される場合には、断熱膨張曲線に沿う。IM, CM, IV, CVは、常圧での溶融開始、完全溶融、気化開始、完全気化に対応する膨張曲線である。Ahrens and O'Keefe [5] の図に一部追加。

することが知られ、月や惑星表面の層構造が調べられたりしている。

一方、飛翔体と標的との合体や標的の破壊がどのような、大きさ、速度、物質などのパラメーターで起こるかを調べることは、微惑星どうしの衝突、合体による惑星の形成を研究する上で非常に重要である。一例として、岩石どうしに比べ、鉄どうしの衝突では合体が起こり易いこと、その合体も、小惑星軌道より太陽から離れた低温領域では起こりにくくなることなどが明らかにされ、地球型惑星と木星型惑星の形成過程の違いなどが議論されている[2]。

このような実験は主に 2 段式軽ガス銃[3, 4]を使って、5 km/秒ぐらいまでの衝突速度で行われてきた。一方、これ以上の速度領域では、飛翔体と標的の溶融、気化、電離といった現象が起こるようになる。こうしたことは天然のクレーター形成の際にも当然起こり得ることで、事実、月には、底に熔岩らしきもののあるクレーターがいくつかある。図 1 には、鉄と鉄が衝突した時どのようなことが起こるかを理論的に求めた結果が示してある[5]。衝突の際の圧力と体積(単位質量当り)は、ユゴニオ曲線(“H”)と速度に対応する破線の交点として求まる。その後、IM(溶融開始)、CM(完全溶融)、IV(気化開始)、CV(完全気化)の曲線に平行に断熱膨張して常圧にもどるが、IM、CM などに沿う場合には、最後にそれぞれの現象が起こる。たとえば、5 km/秒ではまだ溶融も始まらないが、10 km/秒では気化が始まり、15 km/秒ではかなりの部分が蒸発してしまうことがわかる。図 2 は、月の高地の岩石である斜長岩どうしの場合であるが、5 km/秒で気化が始まることが予想される。

溶融、気化により、後に残った飛翔体と標的の組成はもとのものとは違ってくる。実験によりその様子を調べることは、我々の知っている隕石から惑星を作ったら、その組成と構造はどのようなものになるのか、逆に、地球や月の材料物質は何だったのかを研究する

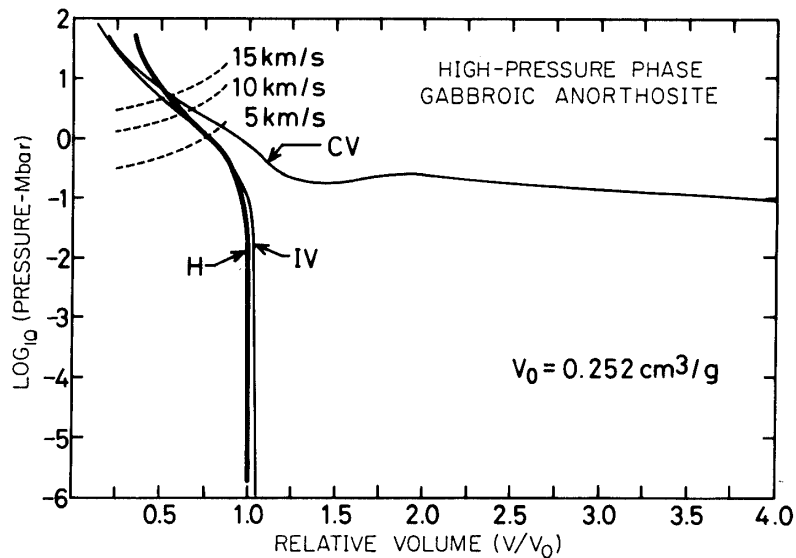


図 2 斜長岩の高圧相のユゴニオ(H)および断熱膨張曲線。他は図 1 と同様。Ahrens and O'Keefe [5] の図に一部追加。

のに貴重な情報を与える。最近、衝突した飛翔体から水がどのくらい抜けるかについて実験が行われ[6]，そのデータを使って，海水の隕石起源説が議論されている[7]。

さらに衝突速度が増すと，蒸発したガスが電離するようになる。その中で，瞬間的ではあるが，電流と磁場を発生する可能性が指摘されており，やはり瞬間的に高温となった標的を磁化することが考えられている[8]。月には局所的に磁化の強い部分があり，その有力な原因の一つとして考えられているが[9, 10]，実験的検証には未だ成功していない。

衝突による衝撃波圧縮は，短い時間ではあるが，高温高压状態をつくりだし，惑星の内部の研究を可能にしている[11]。図1には，地球中心，内・外核の境界，核とマントルの境界での圧力も示してあるが，5～10 km/秒での衝突でこれらの圧力が発生することがわかる。静的な圧縮でこのような圧力を達成するのはきわめて難しい。物質が高压下でどのようなになるかは，惑星の内部を理解するための基礎となるにもかかわらず，そのデータはきわめて乏しい。

飛翔体の速度が15 km/秒ぐらいになると，水素を圧縮して金属水素ができる可能性がでてくる[12]。未だ実現していないが，これは木星や土星内部にあって，磁場の発生など重要な役割を果たしていると考えられている。最も簡単な金属で，惑星科学のみならず，物理学的にも興味をもたれている。この他にも，高压物性物理学，宇宙ステーションを隕石などから守るその外壁の工学的研究など，10 km/秒以上での衝突実験が，新しい世界を開き，また，必要とされる分野は多い。

以上のように，飛翔体を5～15 km/秒に加速できる装置は惑星科学の新しい分野を開くことができる。2段式軽ガス銃でも8 km/秒ぐらいの速度が達成されているが，このあたりが限界のようである[4]。我々は，更に速い領域での実験をめざして，原理的には100 km/秒以上も可能[13]とされているレールガンの開発を始めた。

## 2. レールガンの基礎

レールガンのアイデアはかなり昔からあり，実験も行われたが，2段式軽ガス銃が進歩し，実用化された影で高速を実現することができず，実用化にも致らなかった[4]。しか

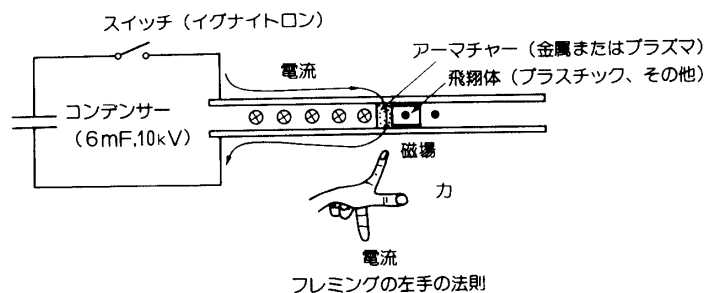


図3 レールガンの加速原理。レールを流れる電流の作る磁場とアーマチャー電流による電磁力がアーマチャー，そして飛翔体を加速する。

し、2 段式軽ガス銃の速度がその上限に近づくに従い、それを越えるために、1970 年代後半から再び活発な研究が始められ[14]、国際シンポジウムも開かれるようになった[15, 16, 17]。我国での本格的な実験は 1980 年代前半、薄葉らによって始められ[18, 19]、東京工業大学で 4 km/秒が達成され[20]、化学技術研究所では再現性の良い 2 km/秒での発射に成功している[21]。

レールガンの原理を図 3 を使って説明する。2 本の導体レールの間にそれに沿って動ける飛翔体をはさまれている。そのすぐ後には金属またはプラズマでできたアーマチャーという部分がある（プラズマの場合をプラズマ・アーマチャー、金属の場合を金属アーマチャー、その両者を含んだものを金属・プラズマ・アーマチャーと呼ぶ）。一端から電流を供給すると図のように流れ、レールを流れる電流がアーマチャーのところで作る紙面に垂直な磁場と、上から下へと流れるアーマチャー電流により生じる電磁力がアーマチャーに働き、飛翔体を押していく。

レールの太さ、アーマチャーの長さ（レール方向）は小さいとして、飛翔体を押す力を計算する。互いに平行な無限に長い 2 本のレールに逆向きの電流が流れている場合、その単位長さ当りのインダクタンスを  $L_x$  とすると、レール間の磁束は単位長さ当り  $L_x I$  となる（ $I$  は電流）。図 3 で電流を半無限と仮定すると、アーマチャーの位置での単位長さ当りの磁束は、この半分になるが、これは、磁束密度をアーマチャーでの電流経路に沿って積分した値に他ならない。即ち、

$$\int_a B dz = \frac{1}{2} L_x I \quad (2-1)$$

故に、電磁力  $F$  は次のように表される。

$$F = \int_a B I dz = \frac{1}{2} L_x I^2 \quad (2-2)$$

アーマチャー前後では、アーマチャー電流の作る磁場のために、磁場強度が大きく違う。磁場の圧力差により飛翔体が加速されると考えることもできる（補足 1）。

通常のレールガンでは、 $L_x = 4 \times 10^{-7}$  (H)、 $I = 3 \times 10^5$  (A) 程度であり、 $F = 2 \times 10^4$  (N)、1 g の飛翔体なら、わずか 1 m の加速で、6 km/秒になる。

銃尾（レールに電流が供給される場所）でのレール間の電圧を  $V_b$ 、レールの全インダクタンス、全抵抗（銃尾からアーマチャーまで）を  $L$ ,  $R$  とし、また、飛翔体の速度を  $v$  として、エネルギーのバランスを表わすと次のようになる（アーマチャーの抵抗は無視する）。

$$\begin{aligned} V_b I &= Fv + \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} L I^2 \right) + R I^2 \\ &= Fv + \frac{1}{2} L_x I^2 v + L I \frac{dI}{dt} + R I^2 \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで、

$$V_b = \frac{d}{dt}(LI) + RI = L_x I v + L \frac{dI}{dt} + RI \quad (2-4)$$

を代入すると、電磁力  $F$  が(2-2)式と同様に求まる。

さて、(2-3)式の左辺はレールガンに供給されるエネルギーを表わし、右辺の第1項は運動エネルギー、第2、3項は磁場エネルギー、第4項はジュール熱にそれぞれ変換される量を表わしている。普通のレールガンでは、 $R=1 \times 10^{-3} (\Omega)$  程度であり、先程と同じように、 $F=2 \times 10^4$  (N)、 $I=3 \times 10^5$  (A)、更に、 $v=1 \times 10^3$  (m/秒) とすると、運動エネルギーには、 $2 \times 10^7$  (J/秒)、ジュール熱には、 $1 \times 10^8$  (J/秒) で変換される。前者が速度に比例することから、速度が上がれば上がるほど効率が良い。

飛翔体およびアーマチャーがレール電流の作る磁場中を運動することによって、その両端にかかる電圧は、(2-1)式より、

$$\int_a B v dz = \frac{1}{2} L_x I v \quad (2-5)$$

となる。加速に使われるエネルギー、(2-3)式の第1項は、この電圧に抗して電流を流すのに必要なエネルギーに等しい。また、この電圧と、アーマチャー抵抗による電圧の和が、銃口電圧（銃口でのレール間の電圧）で、アーマチャーの構造を研究する上で重要な値である。

最後に、レール間に働く力について述べる。電磁力は飛翔体を押すばかりでなく、2本のレールを開こうとする向きにも働く。通常、レールの太さは2 cm、銃孔の大きさは1 cm 程度であるが、これを、 $z=3$  cm 離れた十分細いレールで近似する。 $I=3 \times 10^5$  (A) の電流が逆向きに流れると、レールどうしの反発力は、単位長さ当たり、

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi z} \cdot I = 6 \times 10^5 \text{ (N/m)} \quad (2-6)$$

となる。この力は銃孔を变形させ、レールガンの設計を非常に難しいものになっている。

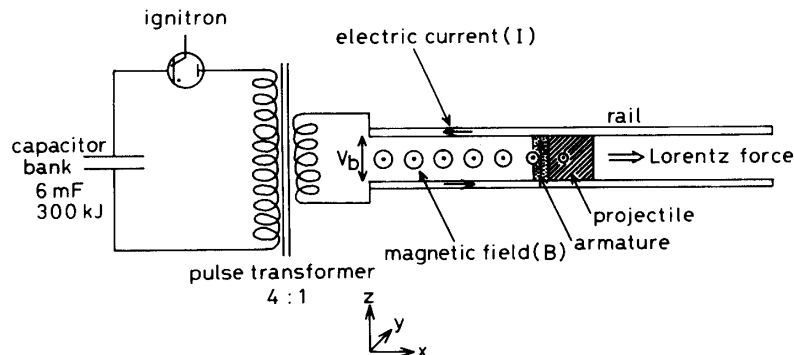


図4 宇宙科学研究所のレールガン・システム概略図。他に、コンデンサ充電器、制御盤などがある。

### 3. 実験設備, 実験方法

宇宙科学研究所・スペースプラズマ実験設備[22]のレールガン・システム概略図を図 4 に示す。パルストランスは、1 次側（コンデンサー・バンク側）でのジュール損失を小さくするためにある。回路定数は、電線のつなぎ方、放電時間（表皮効果）により変わってくるが、概略は表 1 の通りである。表には大型レールガンの定数も含めた。回路抵抗およびインダクタンスは、レールガンへの電流導入部まで全体の値で、イグナイトロンでの電圧降下の影響なども含んでいる。これらはトランスの 2 次側（レールガン側）から見た値であり、1 次側の抵抗、インダクタンスは実際の値の 1/16 になって入ってきている。これらの値は、次節で述べるシミュレーションによって、電流、コンデンサー電圧が振動波形にならないように設定されている。

表 1 レールガン・システムの回路定数（概略値）

コンデンサー・バンク	: 6 mF, 最大 10 kV 充電で 300 kJ
パルストランス	: 巻線比 (1 次 : 2 次) 4 : 1
トランス鉄芯容量	: 0.2 V sec
回路低抗	: 1 mΩ (2 次換算)
回路インダクタンス	: 0.2 μH (2 次換算)
銃身の電気抵抗	: 0.4 mΩ/m
銃身のインダクタンス	: 0.6 μH/m
最大電流	: 750 kA (2 次側)

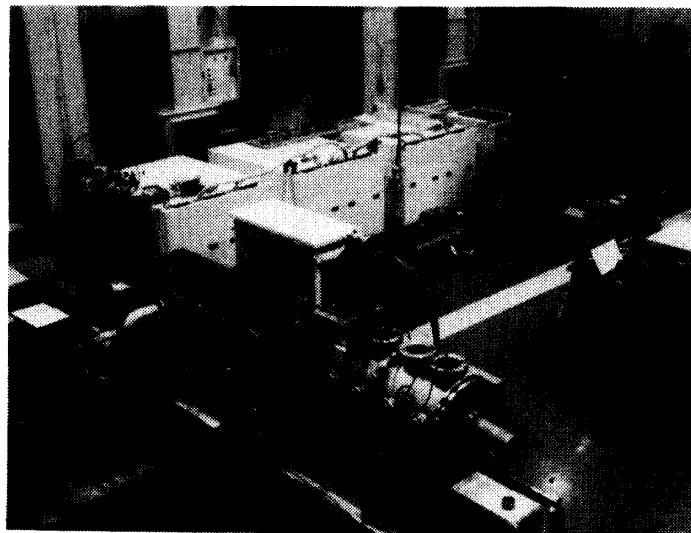


写真 1 レールガン・システム全体。後方の 3 つの箱がコンデンサー・バンク、その手前がパルストランス、そして真空チェンバーである。

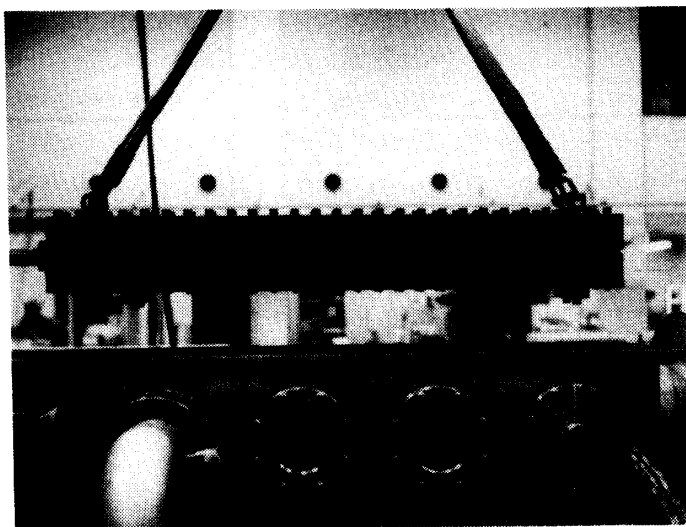


写真 2 レールガン。左が銃尾、右が銃孔。鉄の V ブロック部の長さは 1.6 m, 全体で 1.8 m ある。

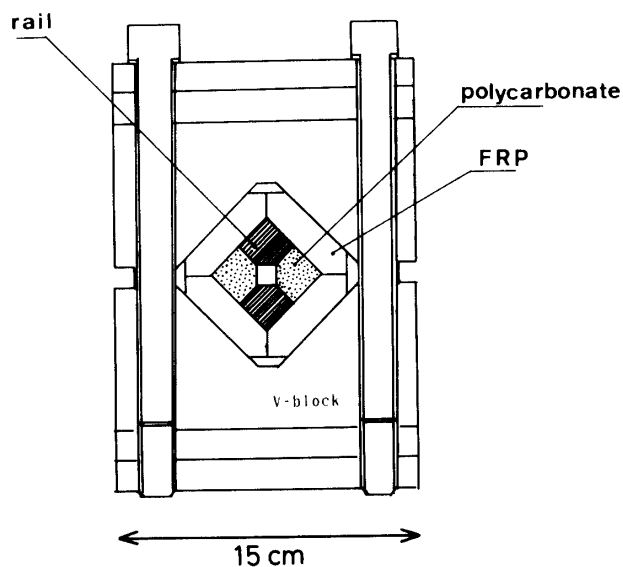


図 5 レールガンの断面図。

写真 1 にシステム全体を示す。レールガンを設置する四角い真空チェンバーの長さは約 1.8 m, 円筒形の計測チェンバーは長さ 1.2 m, 直径 0.4 m あり, 全体の体積は約 600 l である。

写真 2 は大型レールガンである (今後, 単にレールガンと言った場合には, これを指すことにする)。また, 図 5 はその断面を示す。長さ 1.8 m の銅のレールとポリカーボネイトの絶縁体が  $1 \times 1$  cm の正方形の銃孔を成し, これをガラスエポキシの板材で囲い, 全体を

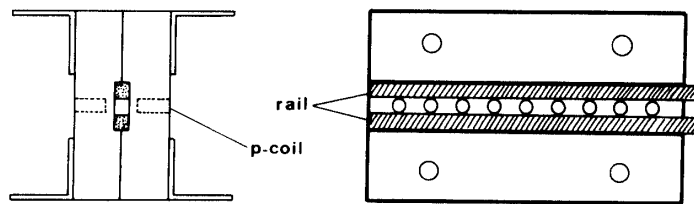


図 6 ミニ・レール。2つのガラスエポキシのブロックで銅のレールをはさみ、左右からボルトで締めつける。銃孔わきのいくつかの穴は、計測用のコイルを入れるためのもの。

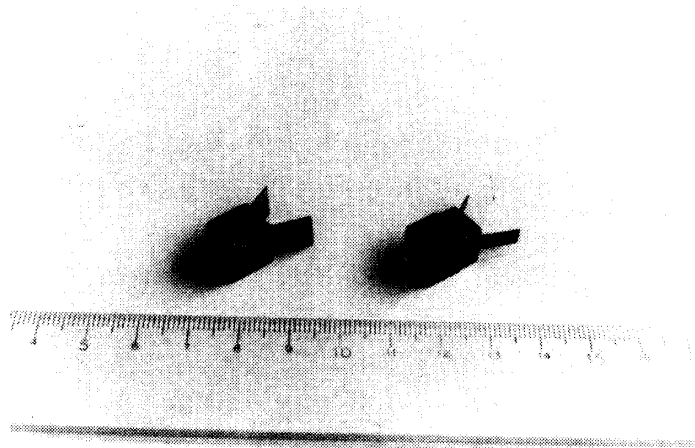


写真 3 典型的な飛翔体。

鉄の V ブロックで締めつけている。銃孔のサイズは $\pm 0.5 \text{ mm}$  ぐらいの精度で場所によって違うようである。

図 6 は、小型レールガンである（以後、ミニ・レールと呼ぶ）。1 cm 角の銅材 2 本をガラスエポキシのブロックではさみ、1 cm 角の銃孔をつくっている。

写真 3 は、実験に使用した典型的な飛翔体である。大きさ約 1 cm 角のポリカーボネイト製の立方体で、左側のものには、先端に、速度計測用のフェライト磁石が入っている。後端に付いている羽は、リン青銅で、これが蒸発、電離して、プラズマ・アーマチャーとなる。右側のものでは、更に小さな銅のブロックを付け、それが金属アーマチャーとして働くようになっている。

図 7 に性能を調べるための電氣的計測法を示す。電流はログスキー・コイルを用いて測る。また、銃尾、銃口電圧は  $1 \text{ k}\Omega$  程度の抵抗に流れる電流をログスキー・コイルで測ることによって得られる。電流は、正常な飛翔体の加速が行われたかどうかを知り、回路の抵抗やインダクタンス、電磁力の大きさの概略値を得るための重要なパラメータである。また、銃尾電圧と電流の積を積分すれば、レールガンに入力されたエネルギーがわかり、銃

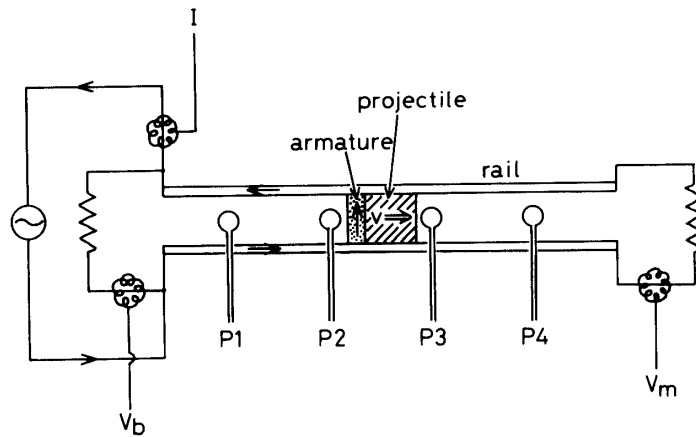


図7 レールガンの研究に用いられる主な電氣的計測。

口電圧からは、アーマチャーでの電圧降下、エネルギーの損失が計算できる（レールのインダクタンスが表皮効果により複雑に変わるので、(2-5)式で示された速度の補正をするのは、それほど易しくはない）。

P1からP4で示したのは、直径5mm、100巻程度のコイルで、その軸がレール電流による磁場の向きになるように銃孔のすぐわきに設置され、アーマチャーの通過による磁場の急激な増加をピックアップする。銃孔内でのアーマチャーと飛翔体の動きを知る上で有力な方法で、プラズマ・アーマチャーの飛翔体前方へのもれ、アーマチャーの長さなどを知るのにも使われる。コイルの軸をレールと平行にして、アーマチャー電流を測定することもある。

性能を評価する上で重要なパラメータとなる飛翔体速度の計測については[23, 24]、実験設備の詳しい説明について[22]に述べられている。

#### 4. レールガンのシミュレーション

レールガンでの電流波形や飛翔体加速の様子を計算機シミュレーションによって予測することができる。我々は宇宙科学研究所のレールガンについて最も初歩的なシミュレーションを行った。

図4および写真1に示したように、コンデンサー・バンクとレールガン間にパルストランスが入っているが、この影響を考えると、電気回路的に、よい近似で図8と等価になる(補足2)。ここで、コンデンサーの容量、トランスの1次側、2次側での回路インダクタンス、抵抗(レールガンは含まない)、イグナイトロンでの電圧降下の実際の値を、 $C_0$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $V_{s0}$  とすれば、

$$C = k^2 C_0 \quad (4-1)$$

$$l = \frac{1}{k^2} l_1 + l_2 \quad (4-2)$$

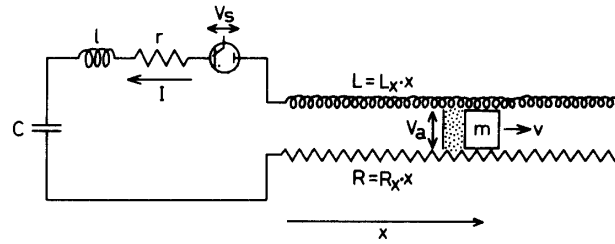


図 8 電気回路としてみたレールガン。

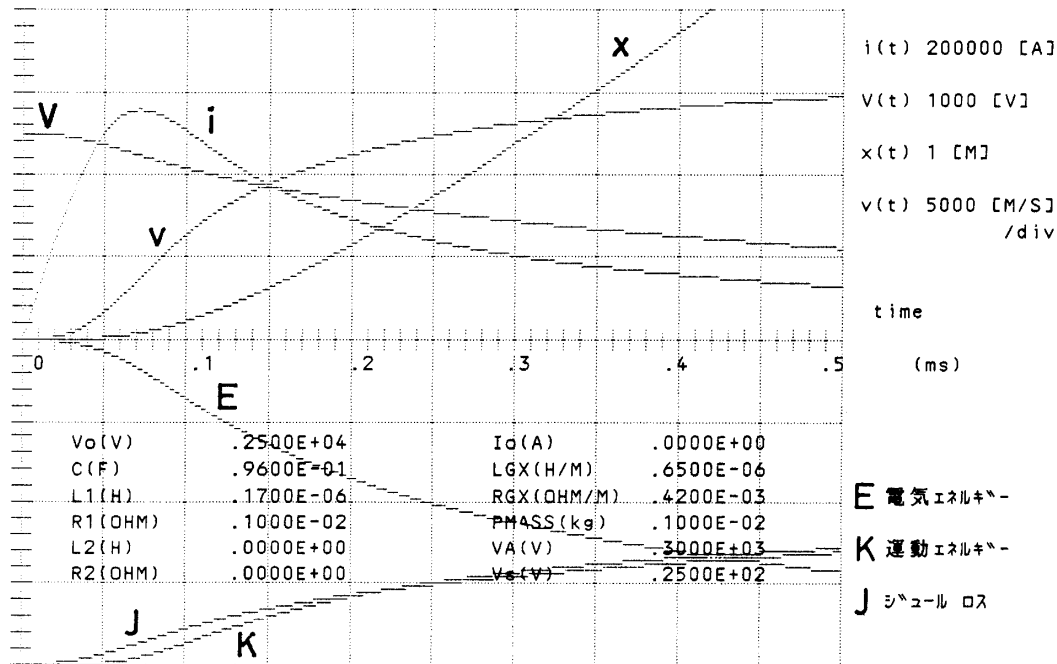


図 9 宇宙科学研究所のレールガンで、1 g の飛翔体を 10 kV 充電 (300 kJ) で発射した場合のシミュレーション。横軸は時間。縦軸は、電流 ( $i$ )、コンデンサー電圧 ( $V$ )、速度 ( $v$ )、位置 ( $x$ ) については図の真中が 0 レベル。E, K, J については、真中が 100 %, 下端が 0 である。

$$r = \frac{1}{k^2} r_1 + r_2 \quad (4-3)$$

$$V_s = \frac{1}{k} V_{s0} \quad (4-4)$$

となり、また、コンデンサー電圧 ( $V$ ) は実際の値の  $1/k$  に、電流 ( $I$ ) は 2 次側でレールガンに流れる値になる。ここで、 $k=4$  (パルストランス巻数比) である。

電圧のバランスから ( $V_a$  はアーマチャーでの放電電圧),

$$V = l \frac{dI}{dt} + rI + V_s + \frac{d}{dt}(LI) + RI + V_a \quad (4-5)$$

レールガン単位長さ当りの  $L$ ,  $R$  を  $L_x$ ,  $R_x$  とすれば,

$$V = l \frac{dI}{dt} + rI + V_s + L_x v I + L_x x \frac{dI}{dt} + R_x x I + V_a \quad (4-6)$$

ゆえに,

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V - rI - V_s - L_x v I - R_x x I - V_a}{l + L_x x} \quad (4-7)$$

さらに,

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{I}{C} \quad (4-8)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} \left( \frac{1}{2} L_x I^2 \right) \quad (4-9)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4-10)$$

(4-9)の左辺では、飛翔体に働く力(2-2)を質量  $m$  で割っている。

表1に示した回路定数に対応したパラメータを使い、更に、 $V_{s0}=100(\text{V})$ ,  $V_a=300(\text{V})$ ,  $m=1(\text{g})$ , 初期条件として、10 kV 充電を与え、(4-7)から(4-10)を、ルンゲ・クッタ法で数値積分して得られた結果を図9に示す。図には、コンデンサーとインダクタンスにたまった電気エネルギー、飛翔体の運動エネルギー、ジュール損失の積算値も、初期電気エネルギーを100%として示してある。

## 5. 実験結果

1986年に行ったレールガンおよびミニ・レールによる発射実験のまとめを表2, 3に示す。

備考の欄にある「Vブロック間放電」とは、図5でレールや絶縁体を締付けている鉄のVブロック間にアークが発生する事故で、レールへの電流導入を、銃尾で、このブロックを通して行っているために、真空中での実験でしばしば発生した。電流を直接レールに供給するよう改修後はこの事故はなくなった。「電流導入部放電」とは、アークがVブロック、またはレールへの供电部で起こる事故である。表には書いていない場合でも、実験後の導入部にはしばしば放電痕があり、小さなアークが起こっていたことを示している。

イグナイトロン・スイッチを入れた時点で、飛翔体に付けた羽(写真3)がレールと電氣的に接触していない時には「パルストランス飽和」が起こった。2次コイルに電流が流れないために、1次コイルが鉄芯中に作る磁場が打ち消されることなく増大し、最後には鉄芯が飽和してしまう。すると磁束の時間変化、即ち、逆起電力がきわめて小さくなり、1次側に大電流が流れるという事故になる。鉄芯容量が0.2 Vsec(表1)(1次側4ターン)であるために、10 kV 充電時(2次側で2.5 kV)には80  $\mu\text{sec}$ で飽和してしまう。Pre-injector(空気銃)で100~200 m/sに飛翔体を加速した後、スイッチを入れるという実験

表 2 1986 年度レールガン発射実験一覧

Shot No.	充電電圧 (kV)	エネルギー (kJ)	飛翔体質量 (g)	真空度 (Torr)	速度 (km/s)	備 考
1	3	27	2.2	真空	0.33	
2	〃	〃	〃	3	0.52	
3	〃	〃	〃	0.4	0	Vブロック間放電
4	〃	〃	〃	大気中	0.59	
5	〃	〃	〃	〃	0.64	
6	〃	〃	〃	〃	0.61	
7	〃	〃	〃	10	0.50	
8	5	75	〃	〃	0	Vブロック間放電
9	〃	〃	〃	$10^{-2}$	0.23	〃
10 } 11 }	pre-injector (空気銃) のみの試験					
12	10	50	2.2	$5 \times 10^{-4}$	0.24	
13	〃	100	〃	$6 \times 10^{-4}$		Vブロック間放電
14	1.3	0.8		大気中		
15	10	50	2.3	〃		電流導入部放電
16	〃	〃	2.9	N <sub>2</sub> 1気圧		トランス飽和
17	〃	〃	〃	〃	0.88	
18	〃	〃	2.5	〃		トランス飽和
19	〃	〃	3.0	〃	0.89	
20	5	75	〃	〃	1.2	
21	7	147	〃	〃	1.1	
22	〃	〃	〃	〃	1.6	
23	10	300	〃	〃	1.4	
24	〃	100		$2 \times 10^{-4}$		
25	〃	50		$\sim 10^{-4}$	0.45	
26	〃	〃		〃		
27	5	75	2.2	$1 \times 10^{-4}$	1.6	
28	〃	〃	〃	$\sim 10^{-5}$		
29	〃	〃	〃	$9 \times 10^{-5}$	1.3	
30	〃	〃	1.2	$8 \times 10^{-5}$		
31	〃	〃	2.8	$4 \times 10^{-5}$	1.4	Al飛翔体
32	7	147	3.7	$3 \times 10^{-5}$	1.4	
33	10	300	1.1	真空		
34			2.9	大気中		BN飛翔体
35	3	27	〃	〃	0.68	〃
36	5	75	〃	〃	0.78	〃
37	7	147	〃	〃	0.48	〃
38	3	27	5.3	〃	0.92	5 tCuアーマチャー

Shot No.	充電電圧 (kV)	エネルギー (kJ)	飛翔体質量 (g)	真空度 (Torr)	速度 (km/s)	備 考
39	5	75		大気中		BN飛翔体
40	〃	〃	5.3	〃	1.8	5 tCuアーマチャー
41	7	147	〃	〃	2.2	〃
42	〃	〃		〃		5 tCアーマチャー
43	〃	〃	2.6	〃	1.5	5 tAlアーマチャー
44	〃	〃	5.0	真空	1.3	5 tCuアーマチャー
45	〃	〃	3.0	〃	1.6	0.2t×5リン青銅アーマチャー
46	〃	〃	3.4	〃	2.0	3 tCuアーマチャー
47	〃	〃	10.6	〃		5 tWアーマチャー
48	6	108	9.6	大気中	1.7	〃
49	〃	〃	8.1	〃	1.8	5 tTaアーマチャー
50	〃	〃	9.3	〃	0.80	W溶射 5 tCuアーマチャー 長い飛翔体
51	〃	〃	5.1	〃	1.9	W溶射 5 tCuアーマチャー
52	〃	〃	2.4	〃	2.0	5 tAlアーマチャー
53	〃	〃	1.7	〃	0.81	飛翔体とアーマチャーを離す
54	〃	〃	1.8	〃	2.0	〃
55	〃	〃	7.9	〃	1.7	10 tCuアーマチャー
56	〃	〃	4.6	〃	1.9	5 tCuアーマチャー
57	〃	〃	2.4	〃	2.4	2 tCuアーマチャー
58	〃	〃	1.7	〃	2.2	1 tCuアーマチャー
59	〃	〃	1.4	〃	〃	0.5 tCuアーマチャー
60	〃	〃	4.5	〃	1.9	5 tCu・Agアーマチャー
61	〃	〃	2.9	〃	1.3	5 tI型Cuアーマチャー
62	2.5	19	2.0	〃	0.41	ET Gun
63	〃	〃	〃	〃	0.32	〃
64	〃	〃	1.1	〃	0.51	〃
65	1.4	5.9	〃	〃	0.20	〃
66	2.5	19	〃	〃	0.17	〃
67	〃	〃	〃	〃	0.53	〃

注1. コンデンサー容量が必ずしも 6 mFではないため、充電電圧とエネルギーは1対1に対応しない。

注2. 飛翔体質量には、アーマチャーとして付けた金属片の質量も含んでいる。

注3. 空欄は測定できなかったことを示す。

をした時起こった。

写真4, 5に, それぞれ, 3 kV (27 kJ), 7 kV (147 kJ), 大気中での発射の様子を示す。レールガンは四角いチェンバーの中に設置されとおり, 左側が銃口である。レールガンでは銃孔の銃尾が開いているため, そこから, 電離した, 又は中性のガスが熱膨張で噴き出

表 3 ミニ・レール発射実験一覧

Shot No.	充電電圧 (kV)	エネルギー (kJ)	飛翔体質量 (g)	真空度 (Torr)	速度 (km/s)	備 考
M-1	1	0.5		$5 \times 10^{-2}$		銃身長 1 m
2	4	8		$3 \times 10^{-2}$		〃
3	1.4	5.88				
4	〃	〃		$2 \times 10^{-4}$		
5	〃	〃	1.2	$3 \times 10^{-4}$		
6	〃	〃	〃	$9 \times 10^{-5}$	0.37	
7	〃	〃	1.3	$7 \times 10^{-5}$	0.34	
8	〃	〃	〃	$4 \times 10^{-5}$	0.36	飛翔体断面 銃孔断面積 = 0.95
9	〃	〃	1.2	$6 \times 10^{-5}$	0.31	0.90
10	〃	〃	1.3	〃	0.25	0.95
11	〃	〃	1.2	$3 \times 10^{-5}$	0.31	0.98
12	〃	〃	〃	大気中	0.26	〃
13	〃	〃	〃	$7 \times 10^{-5}$	0.21	0.85
14	〃	〃	1.4	$5 \times 10^{-5}$	0.35	
15	〃	〃		$2 \times 10^{-5}$		0.90
16	〃	〃		$4 \times 10^{-5}$	0.17	〃
17	〃	〃		$2 \times 10^{-5}$	0.38	〃
18	〃	〃		〃	0.44	〃
19	〃	〃	1.3	$\sim 10^{-5}$	0.19	
20	〃	〃		$3 \times 10^{-5}$	0.32	
21	〃	〃	2.1	真空	0.24	W溶射Cuレール
22	〃	〃	2.4	〃	0.34	〃
23	〃	〃	2.1	〃	0.15	Mo溶射Cuレール
24	〃	〃		〃	0.24	〃
25	〃	〃		〃	0.29	W溶射Cuレール

(表 2 の注, 参照)

しているのがわかる。またチェンバー側面の窓から、電磁力、あるいはガス圧によって銃孔が開き、プラズマがもれ出しているのが見える。真空中での実験では、これらが V ブロック間や電流導入部での放電の原因になっているらしい。

図 10 に Shot No. 37 (写真 5) での電流波形と、銃孔のわきに付けたレール電流ピックアップ用コイルの信号を示す。後者は積分して、それぞれの点でのレール電流を表わすようになっている。2つのコイルは 26 cm 離れており、アーマチャーの致達時間差が 70  $\mu\text{sec}$  であることから、その速度が 3.7 km/秒であることがわかる。この時の飛翔体速度は 0.48 km/秒にすぎず、大部分のアーマチャーが飛翔体前方に抜け出してしまっていることがわ

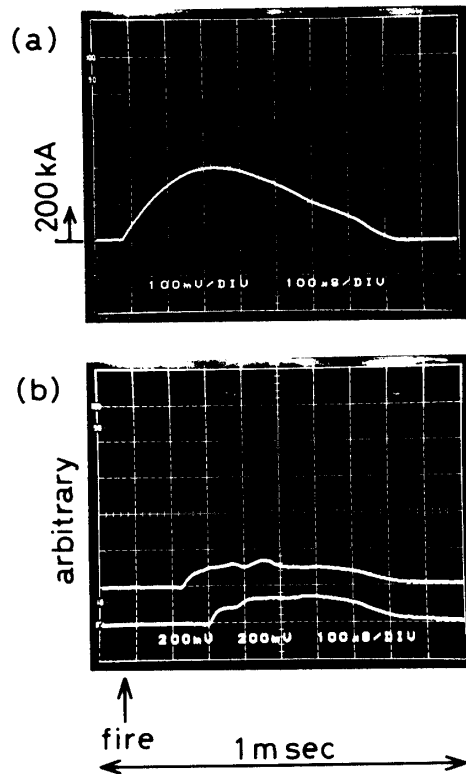


図 10 Shot No. 37 での電流波形(a)と、銃孔わきに設置し、レール電流による磁場を検出するためのコイルの信号(b). 後者は積分されレール電流を表わすようになっている. 2つのコイルは飛翔体の初期位置から 15 および 41 cm 先にあり、アーマチャーが通過するまで信号が現れない.

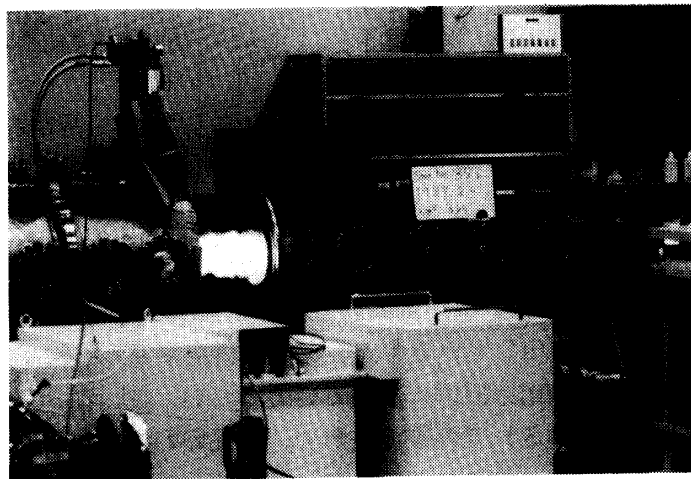


写真 4 3 kV, 27 kJ, 大気中でのレールガン発射 (Shot No. 35). ガンは四角いチェンバーの中に設置されており, 左側が銃口. シャッタースピードをバルブにして, 実験の全期間露出.

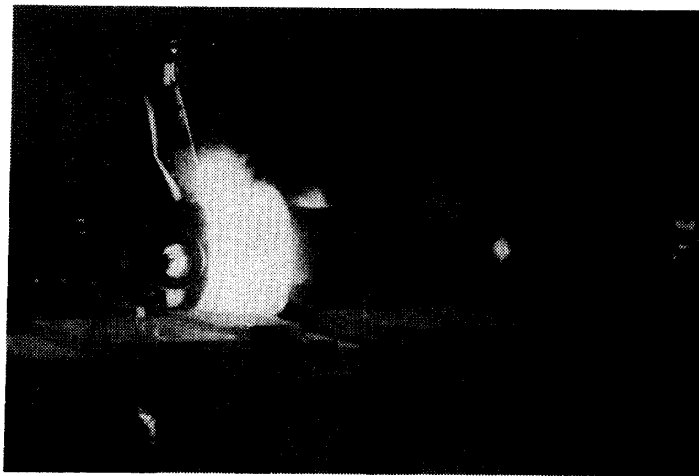


写真 5 7 kV, 147 kJ での発射 (Shot No. 37).

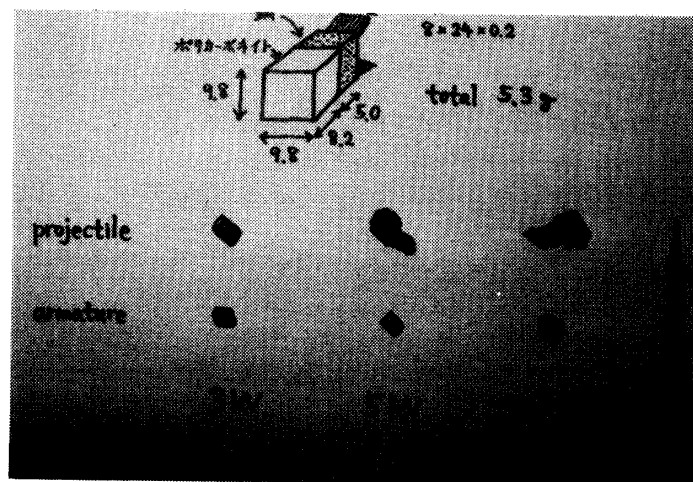


写真 6 Shot No. 38, 40, 41 において回収された飛翔体と金属アーマチャー。

かる。

写真 6 は, Shot No. 38, 40, 41 において回収された飛翔体と金属アーマチャーである。飛翔体としてはポリカーボネイト, アーマチャーとしては, 5 mm 厚の銅片を用いた。ただし, 銅片の断面積は, 銃孔のそれより少し小さく, 銅片とレールとの電氣的接触はプラズマを介する金属・プラズマ・アーマチャーとして働いた。最初は正方形だったアーマチャーの断面が, レールに近い面が浸食され長方形になっている。他の面の損傷は著しくわずかで, 飛翔体, アーマチャー, 羽を付けるのに使った接着剤が残っている場合もあった。

写真 7 は数回の実験を行った後のレールであり, 正方形の銃孔をなす 1 つの面を真上から見たところである。写真 8 は同様のものを真横から撮ったものである。ほぼ中央が飛翔体の初期位置で, 左向きに加速が行われた。初期位置から 10 cm ぐらいにわたって損傷が



写真 7 数回の実験後のレールを銃孔面から見たところ。銃孔面の幅は 1 cm, 中央が飛翔体の初期位置で左に向かって飛んでいった。



写真 8 写真 7 と同じものを真横から見たところ。

はなはだしい。

すべての実験中、速度の測られたものについて、それをコンデンサー充電電圧の関数として、図 11 に示す。コンデンサー容量が 6 mF でなかったものについては、6 mF を充電したとしてエネルギーの等しくなる電圧にプロットし、横軸とエネルギーが 1 対 1 対応するようにしてある。図中、黒丸はリン青銅などの羽が蒸発、電離してプラズマ・アーマチャーとなる場合、黒四角は、約 2 mm 厚以上の金属片を付け、それがアーマチャーとして働く場合に対応している。同じエネルギーでは後者の方が速度が大きい傾向が明らかである。図 12 では縦軸をシステム効率にとっている。ここで効率は次式で与えられ、

$$\frac{1}{2}mv^2 / \frac{1}{2}CV^2 \quad (5-1)$$

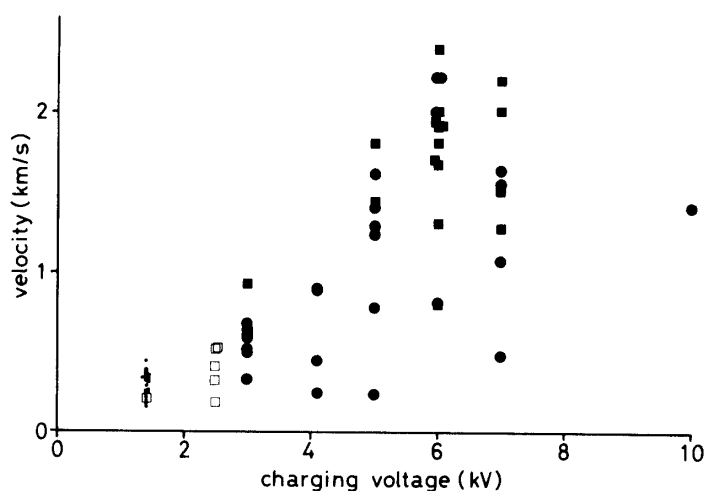


図 11 コンデンサー充電電圧と速度の関係。コンデンサー容量が 6 mF でなかった場合には、それが 6 mF であったとして、エネルギーが等しくなるよう変換してある。黒丸はプラズマ・アーマチャー、黒四角は金属・プラズマ・アーマチャーに対応している。白四角は Shot No. 62 以降の Electro Thermal Gun, 点はミニ・レールを示している。

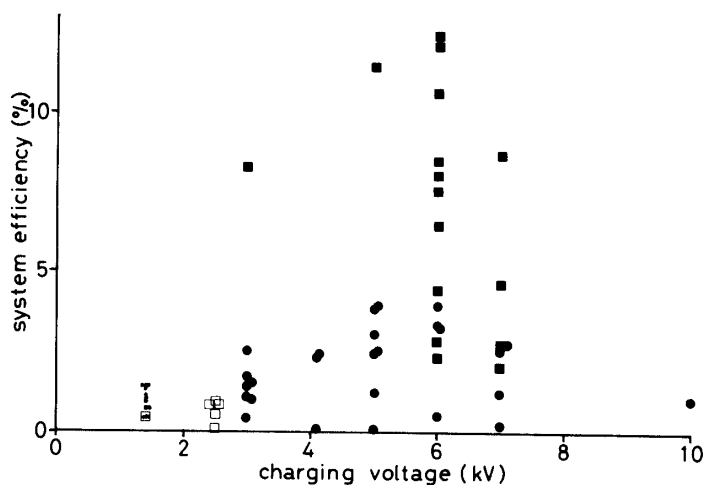


図 12 コンデンサー充電電圧とシステム効率の関係。システム効率は、飛翔体とアーマチャー用金属片および羽の運動エネルギーの充電エネルギーに対する割合である。他は、図 11 と同様。

$v$  (速度),  $C$  (コンデンサー容量),  $V$  (充電電圧) で,  $m$  としては飛翔体, アーマチャー, 羽の初期全質量を使っている。金属片を付けた場合, 質量も大きくなるので, プラズマ・アーマチャーの場合との違いが, より顕著である。

## 6. 議 論

レールガン全体を真空チェンバーに入れて実験する場合には、銃口以外からプラズマが漏れ出さないようにしないと、それが放電の原因となる。又は、レール以外の部分は電氣的に完全にシールする必要がある。放電が起こるとレールガンに供給されるエネルギーが小さくなり、実験の再現性を悪くする原因となる。しかし、レールガンの銃孔はレールと絶縁体という異った材質で構成され、レール間の電磁反発力が銃孔を変形しようとするため、プラズマの漏れを防ぐのは易しくない。また、レールや絶縁材の物質が電食され、多量のススが発生する。電流導入部などの絶縁材にススが付着し、沿面放電の原因となるが、実験ごとにこれを除去しては実験効率が著しく下がる。

大気中で実験を行えば、放電の心配はないが、空気の抵抗により、加速終了後、速度が減衰し、また、飛翔体の姿勢が変わったりする。そこで、速度計測や衝突実験を銃口の近くで行わなければならないが、アーマチャーとなったプラズマが飛翔体といっしょに噴き出してくるので好ましくない。また、アーマチャーの構造はよくわかっておらず、レールガン研究の一つの重要なテーマとなっているが、これが更に複雑になる可能性もある。惑星科学実験用としても真空中に飛翔体を打ち出せることが必要で、現在、銃孔内のみを真空にする方法を試験中である。

飛翔体をあらかじめ他の方法で加速してからレールガンに導入する方法は、レールや絶縁材の損傷を防ぐ 1 つの方法である[25, 26, 27]。損傷はアーマチャーを介してのレール間の放電、アーマチャー・プラズマからの熱が原因であるが、その速度が速ければ速いほど、単位面積当たり、単位時間に受けるエネルギーが小さくなり、侵食も小くなる。写真 7, 8 を見てもわかるように、損傷の激しいのは飛翔体の初期位置から 10 cm 程の範囲であり、速度が増せば侵食をあまり受けないのがわかる。

我々も圧搾ヘリウム、圧搾窒素を使って、飛翔体を 100~200 m/秒に初期加速することを試みたが、アーマチャーとなる羽とレールとの接触が、コンデンサー・バンク放電時に保たれていないことが多く、パルストランスが飽和してしまうことがあった。羽の材質や形状を工夫してはみたが、本質的解決はされていない。また、この程度の初期速度では、電食の様子はほとんど変わらないようである。スイッチを入れた時に接触が悪いと、あっという間（最小 80  $\mu$ sec）に鉄芯が飽和してしまうのは、パルストランスを使ったシステムの欠点であるが、1 次側回路でのジュール損失を小さくするという大きな長所もある。

表 2 および図 11 に示された速度は、いずれも第 4 節で述べたシミュレーションで予測された値よりかなり小さい。このような、簡単なシミュレーション通りの速度が得られない原因は現在、世界中で研究されているが、レールガン本体までの電気回路については良くわかっており、未知の部分はほとんどない。レール間の電流が流れ、電磁力が発生するアーマチャーに問題が集中しているようである。

まず考えられるのが、アーマチャーの質量増加である[28]。飛翔体の後に付けた羽だけがプラズマになることを期待しているが、実際には、写真 7, 8 のようにレールが電食を受け、ガスやプラズマとなってアーマチャーに付け加わる。絶縁材についても同様のことが

言える。しかし、損傷の様子からみて、質量増加はせいぜい飛翔体の質量と同じ 1 g 程度で、これによる速度減は、30 % 位であろう。実際の速度は、予測値の 20 % 以下であり、現段階では、この影響が大きくてはいないようである。

次に考えられるのが、プラズマの粘性抵抗である[27, 28]。プラズマ・アーマチャーの場合はもちろん、金属片をアーマチャーに用いたときでも、レールとの接触が完全でないため、電食により 0.1~1 g 程度のプラズマが発生する。この性質がどのようなものであるかはよくわかってないが、その成分は、羽やレールから発生した Cu, 絶縁材起源の C, O, H などと考えられ、また温度についても、 $\sim 10,000$  K の値が報告されている[29, 30]。定量的な見積りは行っていないが、かなり大きな値になる可能性がある。粘性抵抗の効果をシミュレーションに組み込み、加速の様子が、実験と良い一致をみたという報告もなされている[28]。

レールや絶縁材を電食したり、プラズマの温度を上げるのにエネルギーが費やされている可能性もある。銅およびポリカーボネイト 1 g をばらばらの原子にするのには、それぞれ約 6 kJ, 30 kJ が必要である[31]。また、ガスの平均的な比熱 1 J/gK を仮定すれば、1 g のプラズマ・アーマチャーを 50,000 K にするには 50 kJ いる。これらは、コンデンサー・バンクの最大充電エネルギー、300 kJ と比べて決して小さな量ではない。この様に消費されたエネルギーは、アーマチャー両端の電圧と、電流の積を時間で積分すれば得られる。第 3 節でも述べたように、前者を銃口電圧から求めるのは易しくないが、エネルギー損失を見積る重要な量であり、今後の研究が必要である。

飛翔体と銃孔壁との機械的摩擦は、今日ほとんど考慮されていない。飛翔体を加速する電磁力に比べ、無視できると思われるらしい。しかし、飛翔体には、 $\sim 10^7$  m/秒<sup>2</sup> という大きな加速度が加わり、それが変形し、壁に強く押しつけられ、大きな摩擦が発生する可能性がある。Shot No. 50 では、長さ 8 cm という他とは違った長い飛翔体を飛ばしているが、ほぼ同じ質量とエネルギーの他の実験と比べ、速度が異常に小さい。同じ加速度では、長い飛翔体の方が変形も大きいはずで、この実線は機械的摩擦が無視できないことを示しているようである。

最後に、図 10 は、プラズマの雲が飛翔体より先行していることを示しているが、飛翔体背後のアーマチャーがなくなってしまうばかりでなく、エネルギーがプラズマ雲加速に使われてしまう。図 11 で、金属片をアーマチャーとした場合の方が概して速いのも、少なくともアーマチャーがなくなってしまうということがないためであろう。これについては[32]に詳しく議論されている。今回の一連の実験では銃孔精度が不十分だったようである。比較的銃孔精度の良いミニ・レールで、飛翔体の断面積を銃孔よりも小さくし、わざとプラズマが逃げるようにした実験でも飛翔体断面積が小さいほど速度が小さい傾向が見られている[23]。速度の減少は 30 % 程度と意外と小さいが、これは、充電エネルギーが 5.88 kJ と小さいため、プラズマ・アーマチャーとなるべき羽が、加速の初期に融けきらずに、金属アーマチャーとしての性格をもったためであろう。銃孔を精度良く仕上げるためには、円形の銃孔では、一般にリーマー装置が使われる[20, 21]。四角い銃孔を仕上げるのは容易でないが、5  $\mu$ m の精度を出すことによって、わずか 1 m 長のガンで、5 km/秒を達成し

たという報告もある[33].

## 7. ま と め

微惑星どうしの衝突、隕石の落下、惑星内部の高温高压の研究など、惑星科学にとって高速度衝突実験は非常に重要である。これまでの実験は主に2段式軽ガス銃により行われてきたが、速度に約8 km/秒という限界がある。レールガンは電磁力で飛翔体を加速する装置であるが、これにより更に高速領域での実験が可能になろう。

宇宙科学研究所ではスペース・プラズマ実験設備の1つとして、最大エネルギー300 kJのコンデンサー・バンクを電源としたレールガンの開発を始めたが、簡単なシミュレーションによれば、この設備で、1 gの飛翔体を15 km/秒まで加速できる。この速度が実現すれば、衝突による微惑星や惑星物質の溶融、蒸発、プラズマ化、地球ばかりでなく巨大惑星の内部構造の研究も可能になる。

現在、初歩的なノーハウの修得をほぼ終え、最高2.4 km/秒の速度に達している。これ以上スピードが出ない原因としては、プラズマの粘性、レールの電食やプラズマの加熱によるエネルギー消費などが考えられるが、これらを研究していくための基礎が確立したといえよう。

## 謝 辞

当設備を作るにあたっては、東京工業大学、工業技術院化学技術研究所のものを参考にさせていただいた。これらの機関の澤岡、近藤両氏、藤原、角館、薄葉氏をはじめとする方々に感謝いたします。特に薄葉氏からは実験期間中、終始有役な助言を頂き、貴重な資料を貸していただいた。設備の改修にあたっては宇宙科学研究所・工作室の野殿、佐藤両氏にお世話になった。

## 参 考 文 献

- [1] 水谷 仁, クレーター科学, 東京大学出版会, 1980.
- [2] 名出智彦, 水谷 仁, 川上紳一, 高木靖彦, 金属-金属の衝突実験について, 第17回月・惑星シンポジウム, 宇宙科学研究所, 29-30, 1984.
- [3] 澤岡 昭, 超高压に挑む二段式軽ガス銃, サイエンス (日本版), **14**, 26-37, 1984.
- [4] A. J. Cable, Hypervelocity accelerators, in High-Velocity Impact Phenomena, edited by R. Kinslow, Academic Press, 1-21, 1970.
- [5] T. J. Ahrens and J. D. O'keefe, Equation of state and impact-induced shock-wave attenuation on the moon, in Impact and Explosion Cratering, edited by D. J. Roddy, R. O. Pepin, and R. B. Merrill, Pergamon Press, 639-656, 1977.
- [6] J. A. Tyburczy, B. Frisch and T. J. Ahrens, Shock-induced volatile loss from a carbonaceous chondrite: implications for planetary accretion, Earth Planet. Sci. Lett., **80**, 201-207, 1986.
- [7] Y. Abe and T. Matsui, The formation of an impact-generated H<sub>2</sub>O atmosphere and its implications for the early thermal history of the earth, J. Geophys. Res., **90** (suppl.), C545-C559, 1985.

- [ 8 ] L. J. Srnka, Spontaneous magnetic field generation in hypervelocity impacts, Proc. Lunar Sci. Cont. 8th, 785-792, 1977.
- [ 9 ] M. Fuller, Lunar magnetism, Rev. Geophys. Space Phys. **12**, 23-70, 1974.
- [10] P. Dyal, C. W. Parkin and W. D. Daily, Magnetism and the interior of the moon, Rev. Geophys. Space Phys., **12**, 568-591, 1974.
- [11] 庄野安彦, 衝撃波実験と地球内部, 岩波講座・地球科学 2, 秋本俊一, 水谷 仁編, 岩波書店, 245-292, 1978.
- [12] 薄葉 州, 澤岡 昭, 水素を金属にするために, 金属, **54**, 41-46, 1984.
- [13] R. S. Hawke, Devices for launching 0.1 g projectile to 150 km/s or more to initiate fusion, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, Calif. Report UCRL-52778, Part 2, 1979.
- [14] S. C. Rashleigh and R. A. Marshall, Electromagnetic acceleration of macroparticles to high velocities, J. Appl. Phys., **49**, 2540-2542, 1978.
- [15] Proc. 1980 Conf. Electromag. Guns and Launchers, IEEE Trans. Mag., *MAG-18*, 1982.
- [16] Proc. 2nd Sym. Electromag. Launch Tech., IEEE Trans. Mag., *MAG-20*, 1984.
- [17] Proc. 3rd Sym. Electromag. Launch Tech., IEEE Trans. Mag., *MAG-22*, 1986.
- [18] S. Usuba, K. Kondo and A. Sawaoka, Status of electromagnetic mass-accelerator development and prospect of application to impact fusion research, Report Res. Lab. Engineer. Material, Tokyo Inst. Tech., No. 8, 1983.
- [19] S. Usuba, K. Kondo and A. Sawaoka, Development of railgun accelerator combined with two-stage light gas gun, IEEE Trans. Mag., *MAG-20*, 260-263, 1984.
- [20] S. Usuba, K. Kondo and A. Sawaoka, Railgun experiment at Tokyo Institute of Technology, IEEE Trans. Mag., *MAG-22*, 1790-1792, 1986.
- [21] S. Usuba, Y. Kakudate, K. Aoki, M. Yoshida, K. Tanaka and S. Fujiwara, Development of railgun accelerator at NCL, IEEE Trans. Mag., *MAG-22*, 1785-1789, 1986.
- [22] 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.
- [23] 原 常典, レール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.
- [24] 原 常典, 柳澤正久, 河野 汀, 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, 宇宙科学研究所報告, 本号, 宇宙科学研究所, 1987.
- [25] R. S. Hawke, W. J. Nellis, J. Rego, A. R. Susoeff and G. H. Newman, Rail accelerator development for ultra-high pressure research, IEEE Trans. Mag., *MAG-20*, 291-293, 1984.
- [26] R. L. Burton, S. A. Goldstein, D. A. Tidman, S. Y. Wang, N. K. Winsor and F. D. Witherspoon, EMET technology for rail launchers, IEEE Trans. Mag., *MAG-22*, 1410-1415, 1986.
- [27] N. M. Schnurr, J. F. Kerrisk and J. V. Parker, Numerical predictions of railgun performance including the effects of ablation and arc drag, IEEE Tans. Mag., *MAG-22*, 1733-1738, 1986.
- [28] P. K. Ray, Rail gun performance and plasma characteristics due to wall ablation, IEEE Trans. Mag., *MAG-22*, 1699-1705, 1986.
- [29] R. A. Marshall, Plasma puffing from a railgun armature, IEEE Trans. Mag., *MAG-20*, 264-267, 1984.

- [30] R. A. Marshall, Structure of plasma armature of railgun, IEEE Trans. Mag., MAG-22, 1609-1612, 1986.
- [31] R. F. Askew, B. A. Chin, B. J. Tatarchuk, J. L. Brown and D. B. Jensen, Rail and insulator erosion in rail guns, IEEE Trans. Mag., MAG-22, 1380-1385, 1986.
- [32] 佐藤恵一, 柳澤正久, レールガンにおける armature の研究 I, 宇宙科学研究所報告, 本号, 宇宙科学研究所, 1987.
- [33] D. R. Peterson, D. A. Weeks, R. C. Zowarka, R. W. Cook and W. F. Weldon, Testing of a high performance precision-bore railgun, IEEE Trans. Mag., MAG-22, 1662-1668, 1986.

### 補 促 1

#### 磁場の圧力で飛翔体を加速するという考え方

図3において紙面と垂直方向にレールの幅,  $w$  を考え, その間で磁場は一樣であるとする. レール電流が作るアーマチャーでの磁束密度,  $B$  は(2-1)式と同様に,

$$\int_a B dz = \frac{1}{2} L_x I$$

アーマチャー電流が作る. その前後での磁場,  $B_a$  は, 前では  $B$  と反平行, 後では平行で, その大きさはアンペールの法則から,

$$B_a = \frac{\mu I}{2w}$$

磁場の圧力差からアーマチャーが受ける力,  $F$  は,

$$F = \int_a \int_w \left\{ \frac{(B+B_a)^2}{2\mu} - \frac{(B-B_a)^2}{2\mu} \right\} dy dz = \frac{2B_a}{\mu} \cdot w \cdot \int_a B dz = \frac{1}{2} L_x I^2$$

となって, (2-2)式に等しい. ここで,  $\int_w dy$  はレールの幅方向の積分である.

### 補 促 2

#### レールガン・シミュレーションにおけるパルストランスの省略について

レールガン本体での電圧降下は, アーマチャーでの放電電圧を無視すると,

$$\frac{d}{dt}(L_x x I) + R_x x I = L_x x \frac{dI}{dt} + (L_x v + R_x x) I \quad (\text{A-1})$$

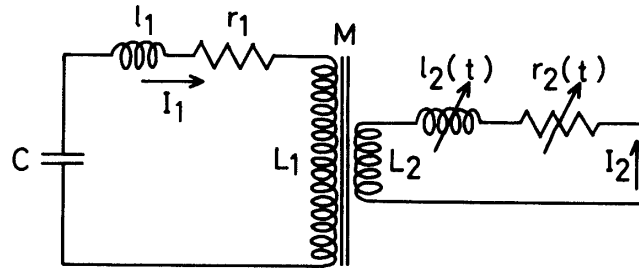
$L_x$ : 単位長さ当りのレール・インダクタンス

$R_x$ : 単位長さ当りのレール抵抗

$x$ : 銃尾から計った飛翔体の位置

$v$ : 速度

(a)



(b)

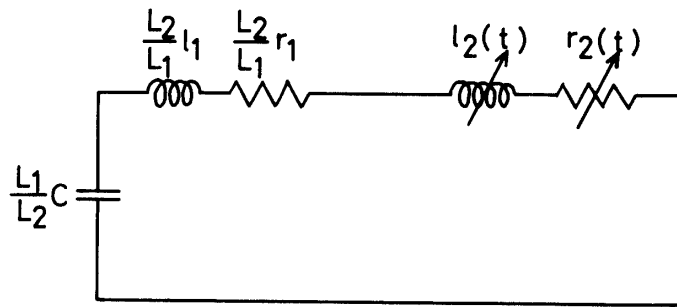


図 A-1 パルストランスを含むレールガンの回路(a)は、よい近似で回路(b)と等価である。

となる。 $x$  と  $v$  は時間変化量であるから、レールガン本体を、時間変化する  $L, R$  の回路として取り扱うことができる。図 A-1(a)はこのように考えたシステムの回路図である。ここでスイッチ用イグナイトロンの放電電圧は無視している。トランスの 1, 2 次側での電圧バランスを考えると、

$$-\frac{1}{C} \int I_1 dt = r_1 I_1 + (L_1 + l_1) \frac{dI_1}{dt} - M \frac{dI_2}{dt} \quad (\text{A-2})$$

$$M \frac{dI_1}{dt} = r_2(t) I_2 + (L_2 + l_2(t)) \frac{dI_2}{dt} \quad (\text{A-3})$$

ここで、 $M$  はパルストランスの相互インダクタンスで、磁束の漏れはないとし、

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{A-4})$$

である。

(A-2) 式を時間で微分し、

$$I_1 = I_{10} e^{\lambda t} \quad (\text{A-5})$$

$$I_2 = I_{20} e^{\lambda t} \quad (\text{A-6})$$

を代入すると,

$$-\frac{I_{10}}{C} = r_1 \lambda I_{10} + (L_1 + l_1) \lambda^2 I_{10} - M \lambda^2 I_{20} \quad (\text{A-7})$$

$$M \lambda I_{10} = r_2(t) I_{20} + (L_2 + l_2(t)) \lambda I_{20} \quad (\text{A-8})$$

2 つの式から  $I_{10}$  を消去すると,  $I_{20}$  も消えて, 次式を得る.

$$\begin{aligned} & \{(L_1 + l_1)(L_2 + l_2(t)) - M^2\} \lambda^3 + \{r_1(L_2 + l_2(t)) + r_2(t)(L_1 + l_1)\} \lambda^2 \\ & + \left( r_1 r_2(t) + \frac{L_2 + l_2(t)}{C} \right) \lambda + \frac{r_2(t)}{C} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

当設備のパルストランスでは,  $L_1 = 27 \text{ mH}$ ,  $L_2 = 1.7 \text{ mH}$ . 一方,  $l_1, l_2(t)$  は  $1 \mu\text{H}$  程度 (表 1) と小さいので, (A-9) 式は次のように近似できる.

$$(L_1 l_2(t) + L_2 l_1) \lambda^3 + (r_1 L_2 + r_2(t) L_1) \lambda^2 + \left( r_1 r_2(t) + \frac{L_2}{C} \right) \lambda + \frac{r_2(t)}{C} = 0 \quad (\text{A-10})$$

各パラメーターの大きさ, そして  $\lambda$  の概略値は, 表 1 および図 10 から,

$$L_1 = 3 \times 10^{-2} \text{ (H)}$$

$$L_2 = 2 \times 10^{-3} \text{ (H)}$$

$$l_1 = 3 \times 10^{-6} \text{ (H)}$$

$$l_2(t) = 1 \times 10^{-6} \text{ (H)}$$

$$r_1 = 1 \times 10^{-2} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$r_2(t) = 7 \times 10^{-3} \text{ (}\Omega\text{)}$$

(速度  $10 \text{ km/秒}$  での  $L_{xv}$  と抵抗の和)

$$C = 6 \times 10^{-3} \text{ (F)}$$

$$\lambda = 2 \times 10^3 \text{ (秒}^{-1}\text{)}$$

この時, 各項の値は,

$$\lambda^3 \text{ の項} = 3 \times 10^2$$

$$\lambda^2 \text{ の項} = 9 \times 10^2$$

$$\lambda^1 \text{ の項} = 7 \times 10^2$$

$$\lambda^0 \text{ の項} = 1$$

よって、(A-10)式で、 $\lambda^0$ の項を省略するという近似が成り立ち、また、 $r_1 r_2(t) \ll \frac{L_2}{C}$  だから、

$$\left(l_2(t) + \frac{L_2}{L_1} l_1\right) \lambda^2 + \left(r_2(t) + \frac{L_2}{L_1} r_1\right) \lambda + \frac{1}{(L_1/L_2)C} = 0 \quad (\text{A-11})$$

これは、図 A-1(b)のような回路について、電圧バランスの式を立て、 $e^{\lambda t}$  で変化する電流を考えて、得られる式に他ならない。

$$k = \frac{1 \text{ 次側巻数}}{2 \text{ 次側巻数}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = 4 \quad (\text{A-12})$$

とおけば、一次側のコンデンサー容量を  $k^2$  倍、抵抗やインダクタンスを  $1/k^2$  にして、パルストランスのない回路を考えればよい。

この時、1次側での実際の電流は、良い近似で、シミュレーション値の  $1/k$  に、電圧は  $k$  倍となる。

なお最初に見捨てた、アーマチャー、イグナイトロンの放電電圧は、約  $1 \text{ m}\Omega$  に相当する。 $r_1, r_2(t)$  の値より十分小さく、これらを加えても今回の議論に変わりはない。