

## 特集「衝突実験」

## レールガンによる超高速衝突実験

柳澤正久<sup>1</sup>，矢守 章<sup>2</sup>

レールガンは電磁力で飛翔体（プロジェクトイルあるいは弾丸）を発射する電磁飛翔体加速装置のひとつで，二段式軽ガス銃では不可能であった10km/s以上の飛翔体速度を達成できるのではないかと期待されている。我々は，1986年，これを科学実験用の装置として完成させることをめざして開発を始めた。現在では，飛翔体（約1g）の最高速度7.8 km/sと世界的にも数少ない超高速銃の一つとなっている。また，開発と並行して，これを使用した衝突破壊，および斜め衝突の実験を行ってきた。取り扱いがむずかしい，速度がまだ足りないなど解決しなければならない問題が多いが，将来性のある装置であることに変わりはない。

## 1. レールガン

レールガン[1, 2, 3]は電磁力で小は1g程度の弾丸から大は宇宙船までも発射しようという電磁飛翔体加速装置のひとつで，そのアイデアや簡単な実験は何十年か前にさかのぼる。しかし，当時は開発に不可欠な大電流を扱うための基礎技術が乏しく，本格的な研究が始まったのは10年程前からである。原理的には飛翔体をいくらでも速くすることができるため，飛翔体速度8km/sで頭打ちになっていた二段式軽ガス銃に代わるものとして期待されている。

レールガンの原理は実に簡単である（図1）。レールガンという名が示すように飛翔体は2本の金属レールにはさまれており，その後ろには金属あ

るいはプラズマのアーマチャ（電機子）と呼ばれる部分がついている。レールの後端に電源を接続し，電流をレール→アーマチャ→レールと流す。レール電流がどんな磁場を発生するかは"右ネジの法則"で知ることができ，2本のレールの間では紙面に垂直でむこう向きである。さて，レール電流の作る磁場はアーマチャの位置でも同じ向きで，ここでは電流がそれに直交して流れる。すると"フレミングの左手の法則"によって右方向に電磁力が働くことがわかる。電磁力がアーマチャに働き，アーマチャが飛翔体を押していくのである。ここで飛翔体とアーマチャの質量は一定であるとしよう。すると，電磁力をこの質量で割って得られる加速度で飛翔体はどんどん速くなる。電流を流し続ける限りいくらでも速くできるのである。ただし，実用的な加速度を得るための電流値は，1g程度の飛翔体につき100kAのオーダーになる。

一方，火薬を使った普通の銃を考えてみよう（図2）。速度を増すために火薬の量を増やすと，燃焼

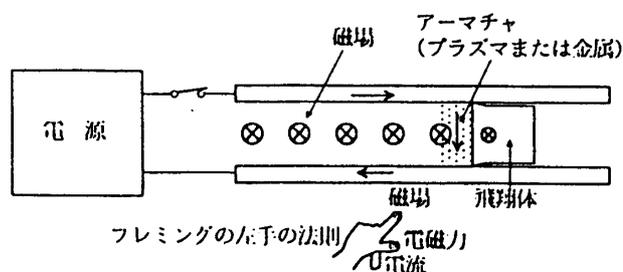


図1 レールガンの原理。レール電流による磁場とアーマチャ電流は直交し，フレミングの左手の法則で示される向きの電磁力がアーマチャと飛翔体を加速する。

<sup>1</sup>電気通信大学電子工学科，<sup>2</sup>宇宙科学研究所

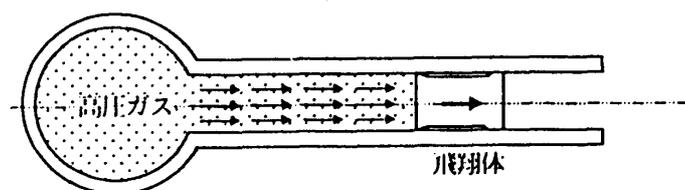


図2 火薬銃やガス銃では飛翔体を押し続けるためにはガスの一部も飛翔体速度に進まねばならず、火薬やガスを増すとその分だけ大きな質量を加速しなければならないことになる。

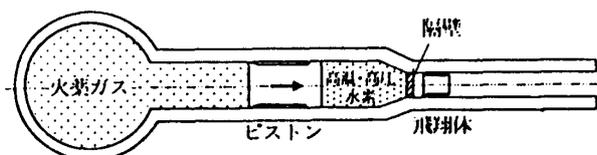


図3 二段式軽ガス銃。火薬でピストンを飛ばし、それが水素、ヘリウムなどの軽ガスを高温・高圧に圧縮する。そこで隔壁が破れ、飛翔体が加速される。

ガスの質量も増加する。そして、このガスはその先端が飛翔体とくっついていて、それを押し続けるような速さで膨張しなければならない。つまり、ガス自身も飛翔体速度に見合った速さに加速されなければならない。火薬を増やせば加速せねばならないガスも増える。こうして速度の上限は火薬1gあたりがもつ化学エネルギーで決まり、それは約2km/sである。実際、飛翔体質量の10倍以上の火薬が使われることも多い。こんな時、エネルギーの大部分は火薬自身の加速に使われてしまうのである。

圧縮ガスを使ったガス銃についても同じことが言える。飛翔体速度を増すには高圧室の圧力を上げればよいのだが、ガスの量を増やしたのでは膨張し、加速されなければならないガス質量が大きくなってしまい、最も軽い水素ガスを使っても常温では2km/s以上の速度を出すことはできない。

そこでガスの温度を上げて圧力を高めることを考える。図3のようにシリンダーの中に水素をつめておき、ピストンを火薬で飛ばしガスを断熱圧縮する。体積が縮むばかりでなく、温度も上がってガス圧は上昇し、 $\sim 1000^\circ\text{C}$ 、 $\sim 1000$ 気圧にも

なる。圧力が充分上がったところで加速管との間の隔壁が破れ、そこに置かれていた飛翔体が発射される。これが二段式軽ガス銃で、世界的には10g程度の飛翔体を7.5km/sまで加速できるものもある。技術のほぼ確立した装置で、広く応用されており、わが国にも4.5km/s位までだせるものが何台かある。しかし、やたらと温度と圧力を上げるわけにもいかず、今以上に速度を増すことはできそうにない。

こうした火薬銃やガス銃の根本的問題を解決するために考えられたのが電磁飛翔体加速装置である。レールガンと並んで開発の行なわれているものにコイルガンと呼ばれているものもある(図4)。こちらは、発射装置にも飛翔体の中にもコイルがあり、それぞれに流れる電流が作る磁場の反発力を利用している。高速を出すためには発射装置側のコイルを何段も並べなければならない、大がかりで複雑になるという欠点があるが、飛翔体が加速装置の内壁と機械的に接触していなくてもよいという大きな利点がある。

電磁力ではなく静電気力を使った静電微粒子加速装置というものもある。これは直径 $1\mu\text{m}$ ほどの微粒子に電荷を帯びさせ、それを静電場で加速する。加速できるのは静電気を帯びやすい物質の

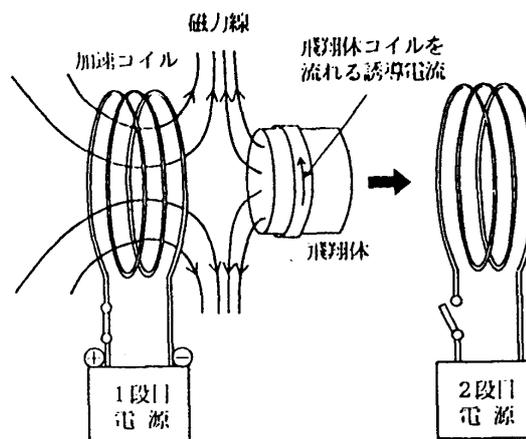


図4 コイルガン。1段目のスイッチを入れると加速コイルによる磁場が発生し、飛翔体のコイルに誘導電流が流れる。これによる磁場もとの磁場が反発し合い、飛翔体が加速される。加速コイルは飛翔体経路に沿って何段も置かれる。

塵だけであるが、10km/s以上を出すことができる。ハレー彗星探査機に搭載されたダスト質量分析計やダストカウンターの校正に使われた。今日、電気を使った飛翔体加速装置はこれらの他にも様々なアイデアのものが開発されている。

## 2. 宇宙科学研究所のレールガン

我々が開発してきたレールガン[1]は、宇宙科学研究所のプラズマ実験室にある。以前は、電離圏、磁気圏のプラズマ状態を実験室中で再現し、その性質を研究していた実験室であるが、最近では、重力波天文学や自由電子レーザーの実験などと並んで固体惑星科学の基礎研究にも力を入れている。我々は、9年前、世界中でレールガンの研究開発

が始まったのとはほぼ同時に、これを科学実験用の装置として完成させることをめざして開発を始めた。少し前に研究をスタートしていた東京工業大学、工業技術院・化学技術研究所（現在の物質工学工業技術研究所）の装置を勉強することから始めて、現在では7.8km/sという世界で最も速い飛翔体を発射することができるようになった[4]。科学実験に広く利用されており、レールガンの科学実験への利用では我が国が世界をリードしている。

宇宙科学研究所のレールガンは1回の発射に注ぎ込める電気エネルギーが最大300kJで、装置としては中型のものである。大型のレールガンはこの100倍ものエネルギーを使うし、小さなものでは1/100しか使わないものもある。図5が実験装置

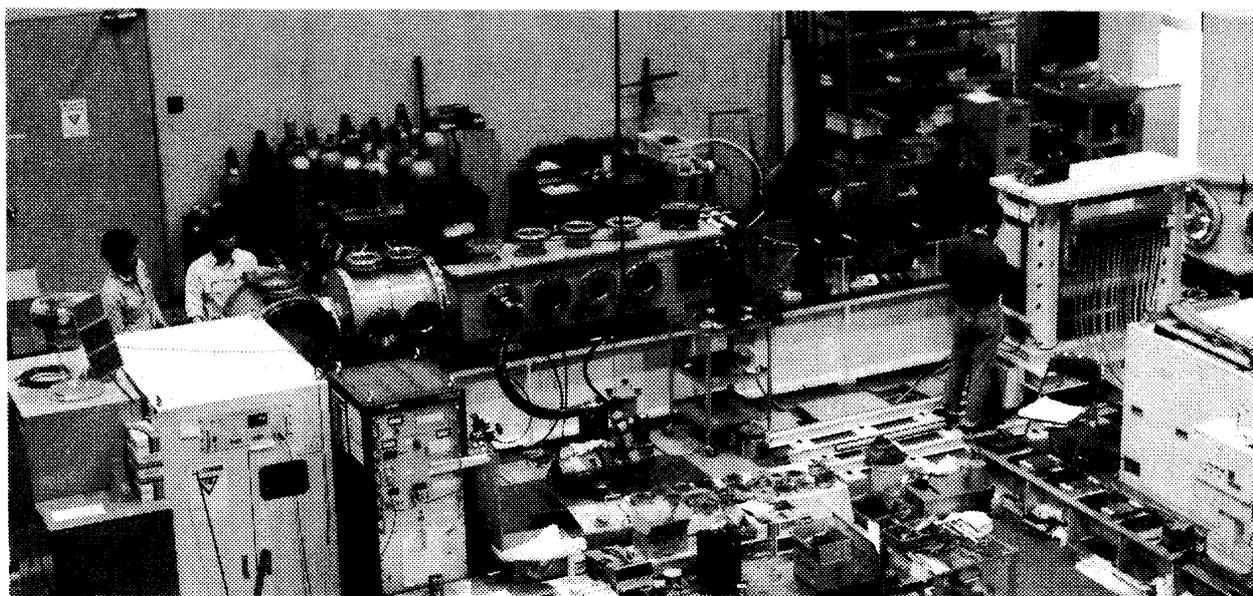


図5 科学実験用レールガン(宇宙科学研究所).



図6 レールガン本体。手前が銃口でチェンバーに接続されている。

のはほぼ全景である。右側に半分見える大きな箱の中に合計24個、全体で6mFのコンデンサが入っており、これが電源になっている。蓄積された電荷は、スイッチが入るとともに箱のすぐ左にあるパルス・トランスを経てレールガンの銃尾に供給される。レールガンには写真では左に向かって、プラズマ・塵除去チェンバー（四角い）、円筒型の実験チェンバーが接続されており、衝突実験はこの中で行なわれる。図6はレールガン本体で、銃尾から飛翔体を装填しているところである。全長は2mしかないが、この短い加速距離で飛翔体を7.8km/sまで加速するのである。側面にはアーマチュアの通過を検出する磁気プローブ三つと、速度計測用のX線管が二つ取り付けられている。図7も銃尾から飛翔体を装填しているところである。飛翔体自身は照準用のレーザーが当たってよく見えないが、直径13mmの飛翔体通路の上下をなす銅のレールが指の間に見える。左右はポリカーボネイトというプラスチックでできている。左側から何本も伸びてきているのはレールガンに電流を供給するための電線であり、0.5msという短い時間に数100kAという雷10個分の大電流が流れる。図8に示したのは典型的なポリカーボネイト製の飛翔体である。また、その飛翔中の様子を超高速度イメージ・コンバータ・カメラがとらえた像を図9に示す。

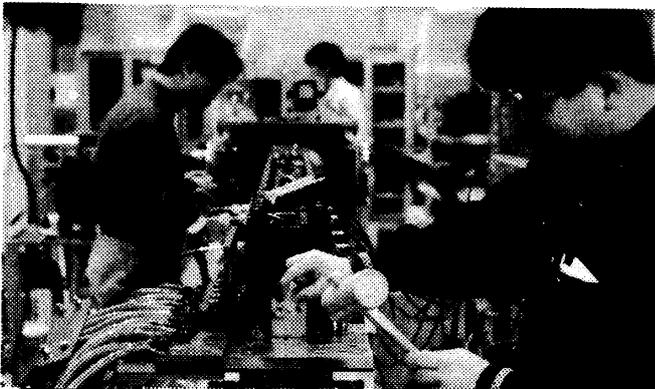


図7 レールガンの銃尾。上下のレールの断面は一辺2cmの正方形(飛翔体通路の部分は1/4円だけ加工されている)で、全体は鉄のブロックで締めつけられている。

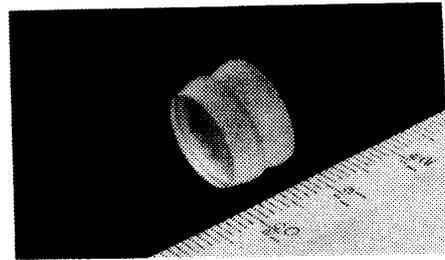


図8 レールガンの飛翔体。

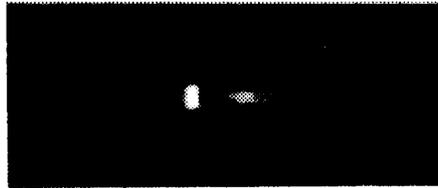


図9 右から左に1/3気圧大気中を光る尾を引いて飛翔する飛翔体(6.6km/s)。超高速度イメージ・コンバータ・カメラ(露光時間1 $\mu$ s)で撮影。NHK、株式会社nacの協力による。

### 3. レールガンによる実験

#### 3.1 衝突破壊と破片の速度

藤原と塚本[5]による実験以後、数多くの衝突破壊実験が行われてきたが、破片のサイズ分布を調べた研究が数多くある一方、破片の速度を調べる実験はむずかしく、数も少ない。しかし、小さいとはいえ自己重力を持つ小惑星や微惑星がバラバラになってしまうか、破壊はされても一つの天体として残るかは、破片の初速度で決まる。小惑星表面からの脱出速度は、直径10kmのもので6m/s、100kmでは60m/sほどである。破片速度がこれを越えないと、ひびが入るだけあるいは壊れてもすぐまた集まって、バラバラになってしまうことはない。従って、これらの天体の進化を研究するうえで、破片速度を決める要因が何であるかを突き止めることは大変重要である。

我々は、ターゲットの強度と空隙率が破片速度にどう影響するかを次のような4種類のターゲットを用いて調べた[6]。(a) モルタル:強度有, 空隙率小, (b) アルミナブロック:強度有, 空隙率大, (c) 紙風船に入れた砂:強度なし, 空隙率大, (d) ゴム風船に入れた水:強度なし, 空隙率0, と極端

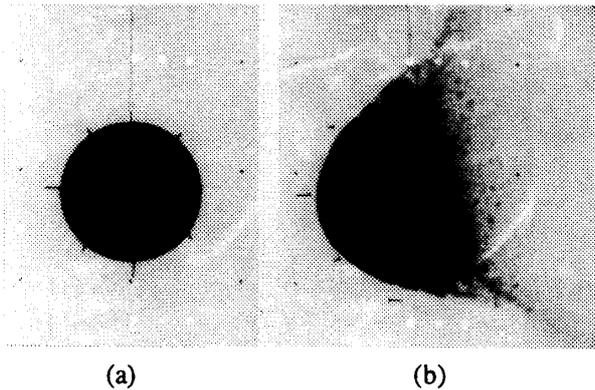


図10 セメント球のフラッシュX線像。右から水平に飛来した6.7km/sの飛翔体が直径11cmのセメント球に衝突した。(a)衝突前。(b)衝突後0.92ms。

な強度と空隙率をもっている。ターゲットはレーザガン実験チェンバー内につるされ、数km/sに加速されたプラスチック飛翔体(図8)が衝突する。衝突前と破壊直後の様子がフラッシュX線で撮像され(図10)、破片の移動距離を衝突から撮像までの時間で割って破片の速度を求めた。

衝突点の反対側での破片速度(Antipodal Velocity)を図11に示す。横軸は飛翔体が持っていた運動エネルギーをターゲットの質量で割った量である。ただし、ターゲットが球形のものと楕円体になっているものがあるので補正が加えられている。強度がなくて空隙率も大きい砂のターゲットで速度が著しく遅いのがわかる。砂粒を破碎したり空隙をつぶしたり砂粒同士がこすれあって熱を発生したりするのにエネルギーが消費されてしまうのだろう。常識的に考えられるのとは逆に、グズグズで弱い天体ほど衝突でバラバラに飛び散ってしまう確率が低いことになる。

"小惑星=母天体の破片"という概念が広くゆきわたっているが、クレーター形成にともなう浸食で少しずつサイズが小さくなっただけの物もかなりあるのではないだろうか。ガリレオ探査機によって撮影された小惑星"ガスプラ"や"イダ"にはかなり大きなクレーターらしき地形がいくつか認められる。岩石ターゲットを使った衝突破壊実験によれば、こんな大きなクレーターを作る衝突は

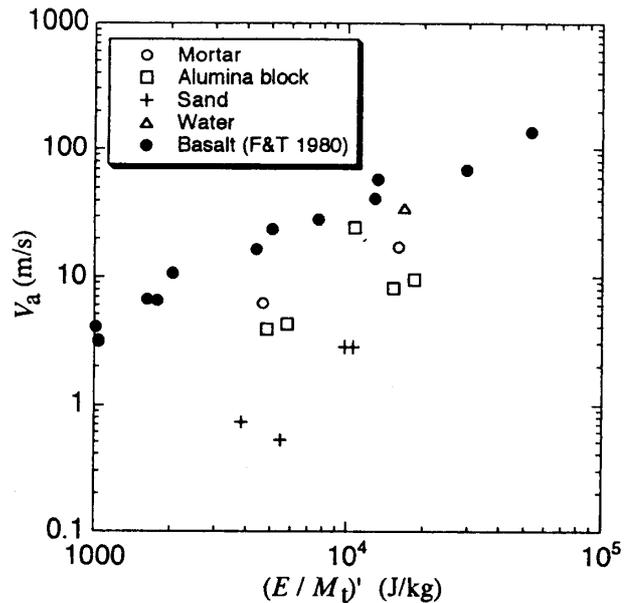


図11 衝突点の反対側の破片の速度を、横軸に(飛翔体運動エネルギー/ターゲット質量)をとってプロットした。[6]より。

天体をバラバラに壊してしまうはずである。自己重力が強度と同様に働くことも考えられる。しかし、弱い強度と空隙が大部分のエネルギーを熱化してしまうことにより破壊を免れている可能性もあると思う。

原始太陽系星雲中で生まれた10-100km程度の微惑星から1000km程度の原始惑星への進化も、微惑星が塵の集合体のようなものでは岩石的なものより速く進むことになるだろう。地球型惑星は、原始太陽系星雲中で星雲ガスによる相互衝突速度の緩和があると速く進むと考えられている。しかし、星雲が惑星形成前に散逸してしまったとしても、塵の集合体のような微惑星からなら惑星は結構速く成長するのではないだろうか。つまり、km/sオーダーの速度で衝突しても破片の運動エネルギーは小さく、大部分の破片は自己重力で一つの天体としてくっついてしまうことが考えられる。ただし、小惑星の話にせよ微惑星の話にせよ結論を出すには更に注意深く準備された実験をする必要があるのはもちろんである。

### 3.2 斜め衝突実験

月は無数のクレーターで覆われている。他の惑星や衛星の表面もまた然りで、今日では誰もが、それは小惑星や彗星など小天体の衝突によって作られたものであると知っている。しかし、今から30年程前までは、あれは火山のクレーターだと考える者もいた。なぜなら、小天体が月面に斜めに衝突すれば細長い凹みができるはずなのに、そのようなクレーターがほとんど見あたらないからである。その後、斜めに衝突しても、速度が2～3km/s以上のときには円いクレーターができることが実験によって示され、この問題は解決した。小天体の持っていた運動エネルギーが一瞬にして熱エネルギーに変わり、大爆発を起こすため、衝突点で火薬を爆発させたのと同じように入射角度によらず円いクレーターができるのである。以後クレーター形成で大事な要因は飛翔体の運動エネルギーであり、よほど斜めでない限り入射角の影響は小さいと考えられるようになった。一方、重力の有無にかかわらず実際の衝突はほとんどが斜め衝突である（入射角45°で最大確率）。惑星や衛星への小天体の衝突ばかりでなく、小惑星どうし微惑星どうしの衝突も正面衝突ではない。

破壊に至らずクレーターができるだけの斜め衝突においてプロジェクトイルの運動量、角運動量の何%がターゲットに輸送されるかがレールガンを使って調べられている[7]。これらの値は衝突による小惑星の軌道や自転の変化を予測、研究するうえで極めて重要である。小惑星の自転は斜め衝突の結果であると考えられるが、最近では変光観測から多くの小惑星について自転周期がわかってきた。観測とレールガンによる基礎データを組み合わせることにより、小惑星の自転の起源を明らかにできるのではないかと期待している。

更に興味深いのは、斜め衝突では下流側に光を発する流れ（雲）が生じることである（図12）。流

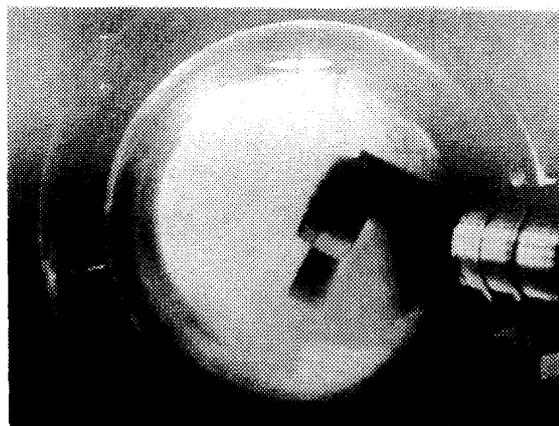


図12 右から水平に飛来した3km/sの飛翔体がモルタル・ターゲットに衝突した。下流側に高速流が噴き出している。[7]より。

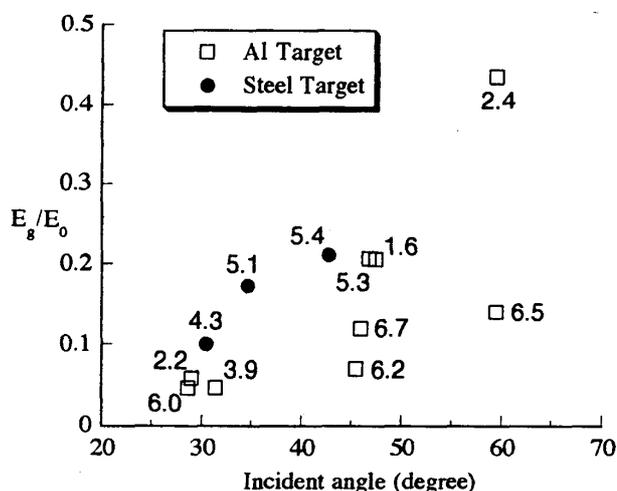


図13 縦軸は(高速流の重心の運動エネルギー/飛翔体運動エネルギー)。横軸は飛翔体入射角(衝突面の法線から測る)。添字は飛翔体速度(km/s)。

れはチェンバーの底に当たって更に光を発し、高速であることを示している。飛翔体入射角（衝突面の法線から測る）が27°と正面衝突に近いような場合でもこのような非対称な流れが生じる。アルミニウムのターゲットについて流れの重心が持つ運動エネルギーを飛翔体入射角を横軸にとってプロットした（図13）。流れは重心のまわりを運動しているし熱も持っている。つまり、この図で示した以上のエネルギーを持っている。アルミニウムは衝撃波特性が玄武岩とよく似ているので、岩石で覆われた惑星への小天体の衝突でも、衝突点

近傍から同様のエネルギーを持った流れが生ずると考えられる。入射角が大きいほど高速流は大きなエネルギーを持っているようである。しかも全エネルギーの10-20%以上とかなり大きな割合となる。6500万年前の恐竜絶滅の原因の一つとして地球への小天体の衝突が考えられている。衝突が本当に地球環境激変の原因になるのだろうか。斜め衝突における高速流が環境に大きく影響する可能性は十分にある。

### 3.3 その他の実験

必ずしも惑星科学に関係したものばかりではないが、我々以外のグループもレールガンを用いて次のような様々な実験を行っている。これらの報告は主に1991年以降のスペース・プラズマ研究会(宇宙科学研究所)で行われている。(a)鉱物の衝撃変成実験、(b)衝突脱ガス実験、(c)対隕石防御壁実験、(d)ダイヤモンドの合成、(e)生命関連物質の合成。

また、現在はまだ行なわれていないがレールガンを使った有望なテーマとしては次のようなものがある。(a)核融合炉への重水素ペレットの打ち込み。(b)衝撃圧を利用した惑星内部の研究。(c)衝突核融合。

## 4. 科学実験に利用する際の問題点

科学実験機器としてのレールガンは開発途上であり、レールガン特有の次のような問題点がある[8]。このことをよく考慮して利用すべきであるが、その多くは実験の仕方を工夫することにより、あるいは、近い将来に解決されるであろう。また、なぜ10km/s以上の速度が未だ達成されていないかについては[2]にまとめられている。

### 4.1 飛翔体の制限

金属飛翔体を飛ばすことが難しい。アーマチャ電流がそれに流れ込めば、少なくともその表面が

熔融、場合によっては全部が蒸発してしまう。飛翔体をサボ(一種のケース)に入れて加速する実験も行われたが、加速度の大きい宇宙科学研究所のレールガンではサボが破壊してしまう。このレールガンの飛翔体は現在のところポリカーボネートの円柱(サボなし)に限られている(図8)。一定の小さい電磁力で高速まで加速できるレールガン、または、強い加速に耐えるサボの開発が必要である。

### 4.2 電磁ノイズ

衝突現象を記録するオシロスコープ等に、発射時のノイズでトリガがかかってしまう。絶縁トランスを通して測定器の電源をとる、トリガ信号を数10V以上にするなど対策で解決することもできるが、測定系が大がかりなものになってしまう。センサがひろうノイズはこれ以上にやっかいである。著者らは市販の家庭用ビデオカメラで衝突現象を記録したことがあるが、発射時の像がノイズのために歪むことがあった。また、シンチレーション・プローブで衝突時に発生するX線の検出を試みたこともあるが、ノイズが大きすぎてうまくいかなかった。

### 4.3 ダストの発生

飛翔体と共に大量のダストが噴き出す。発射時の銃孔(飛翔体の通路)の浸食によって発生するものと思われるが、ガス銃、火薬銃に比べはるかに多い。高速度カメラによる衝突現象の撮影が難しいだけでなく、実験後のサンプルはダストにまみれており、回収が大変である。飛翔体だけが通る穴を開けた板(スキーマ)を設置することにより影響を軽減することはできる。

## 謝辞

宇宙科学研究所の河島信樹教授をはじめ、電気通信大学、湘南工科大学、長崎総合科学大学、武蔵工業大学、東京理科大学の多くの学生さんにお

世話になった。感謝いたします。また、図の一部は星の手帖社のご好意により使わせていただいた。

## 参考文献

- [1] 柳澤正久, 佐藤恵一, 原常典, 古矢勝彦, 内田昌文, 矢守 章, 河島信樹, 1987: 惑星科学実験用レールガンの開発. 宇宙科学研究所報告 第51号, 1-27.
- [2] 電磁加速技術応用システム協同研究委員会調査報告書(電気学会), 1995.
- [3] 柳澤正久, 1992: 惑星科学とレールガン. 星の手帖 **58**. 78-84.