

ソレノイド型電磁ランチャによる 強磁性体の運動速度制御についての考察

山田 一* 山口昌樹** 郷戸右二***

太田 浩**** 竹内勝広****

山上 広*****

羽生田吉也*****

脇若 弘之*****

(昭和62年5月30日受理)

A Consideration on the Control of Movement Speed of Ferromagnetic Substances by a Solenoid-Coil Type Electromagnetic Launcher

Hajime YAMADA, Masaki YAMAGUCHI, Yuji GOHDO,
Hiroshi OTA, Katsuhiko TAKEUCHI, Hiroshi YAMAGAMI,
Yoshiya HANYUDA, and Hiroyuki WAKIWAKA

Experimental and theoretical characterizations of a continuous electromagnetic launcher were made toward its use as the linear electromagnetic actuator, which should allow magnetic substances like a steel ball to move at high speed. The launcher employs a gradient of magnetic field generated within a solenoid to produce large, instantaneous thrust.

The actuator arranged is featured in that it is capable of producing large, instantaneous thrusts without using any conversion mechanisms or applying any mechanical impacts on substances.

1. ま え が き

ソレノイド型電磁ランチャは、強磁性体に高速度の運動を与えることのできるリニア電磁アクチュエータの一種である。本電磁ランチャは、ソレノイドコイルを使用しているために装置構造が小型であり、かつ連続発射ができるという特徴を有している¹⁾²⁾。したがって、従来のルールガン³⁾とは異なり、磁気力を利用した特殊な高速リニア電磁アクチュエータということができる。

* 電気工学科 教授	***** 健正堂(株) 社長
** 大学院修士課程 学生 (現在ブラザー工業)	***** 大林組(株)技術研究所 副主任研究員
*** 電気工学科 学部生 (現在日産自動車)	***** 小野測器(株)商品技術部 課長
**** 大学院修士課程 学生	

本論文では、まずソレノイド型電磁ランチャの動作原理について説明するとともに磁気力の表現式を算出している。次に、実験装置における鋼球の発射制御回路及び速度測定について述べる。

さらに、本電磁ランチャによる解析結果を示して、コイル電流 I と磁気力 F 、磁束密度 B 及び鋼球の発射速度 v の関係を検討している。

2. ソレノイド型電磁ランチャの動作原理

2.1 磁気力による鋼球の挙動

図1に示した空心ソレノイドコイル（以下単にソレノイドと略す）に定常電流を流すと、その両端付近に磁気勾配が形成される。同図中に示すように、ソレノイドの一端に強磁性体（鋼球）を置くと、強磁性体はこの磁気勾配による磁気力を受け、ソレノイド中を往復運動する。

このことは、図2に示したソレノイドにおける磁気力 F と変位 x との関係によって説明することができる。つまり、ソレノイドの左端 $x = -l/2$ の位置にあった鋼球は磁気力 F の作用を受けて、同図中の右方向へと運動する。しかし、鋼球が右端 $x = +l/2$ に達した時、ここでは逆方向の磁気力 $-F$ を受けるために、鋼球はソレノイドの中央へと戻り、飛出すことができない。

図2に示した鋼球の運動を図3のようにモデル化して説明することもできる。図3において、すりばちの左端におかれた鋼球は力 $+F$ を受けて転がり落ち右端に向かうが、ここで逆力 $-F$ の力を受けてふたたび左端へと転がり行く。鋼球を右端へ転がり出すためには、鋼球が中央の位置 $x=0$ の位置まで運動して来たとき、すりばちの右側の“壁”がなければよいことになる。

本電磁ランチャでは、鋼球が左端から中央まで来たとき、電子制御によってその“壁”を取りはらうようにしている。

2.2 磁気力の表現式

一般に、磁界の強さ H の中に体積 V の物体がある時、その単位体積あたりの磁気モーメントを M とすると、それに作用する磁気力 F は次式で表される。

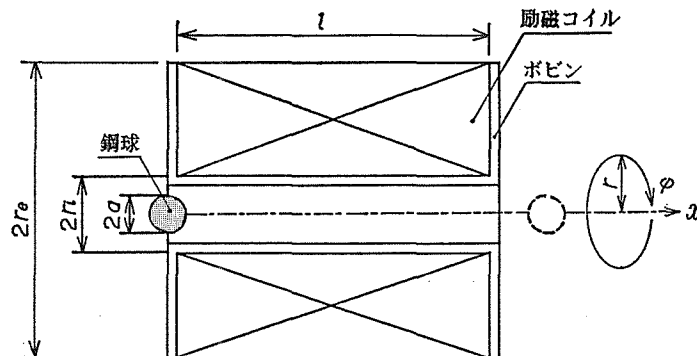


図1 ソレノイドコイルの構造

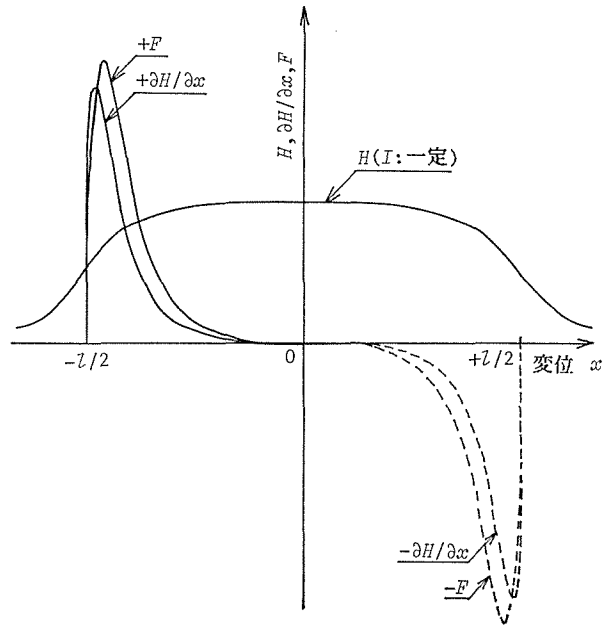


図2 ソレノイドにおける磁気力 F と変位 x との関係

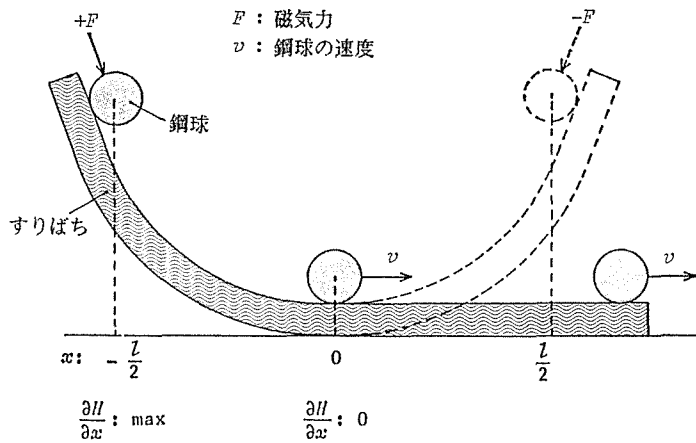


図3 ソレノイドにおける鋼球の運動モデル

$$F = \int_v \text{grad}(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}) dV \quad [\text{N}] \quad (1)$$

そこで、図1のような巻数 N のソレノイドに電流 I を流した時、ソレノイド中に置かれた強磁性体に作用する磁気力 F を考察する。磁気モーメントは物体の形状と材質によって決定されるため、ここでは便宜上強磁性体を半径 a の鋼球と考える。

鋼球がコイルの中心軸 (x 軸) 上を運動するとすれば、すべての成分が x 軸に関して対称となるので、円筒座標を用いて二次元問題として取り扱うことができる。以後 x, φ, r

方向の単位ベクトルを i, j, k で表わす. いま, 単位体積当りの磁気力を f とすると,

$$\begin{aligned} f &= \text{grad}(M \cdot H) \\ &= i \left(\frac{\partial M_x H_x}{\partial x} + \frac{\partial M_\varphi H_\varphi}{\partial x} + \frac{\partial M_r H_r}{\partial x} \right) \\ &\quad + j \left(\frac{\partial M_x H_x}{\partial \varphi} + \frac{\partial M_\varphi H_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial M_r H_r}{\partial \varphi} \right) \\ &\quad + k \left(\frac{\partial M_x H_x}{\partial r} + \frac{\partial M_\varphi H_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial M_r H_r}{\partial r} \right) \quad [\text{N/m}^3] \end{aligned} \quad (2)$$

で表わされる, ここで φ 方向のエネルギー $M_\varphi H_\varphi$ 及び x 方向の磁気モーメント M_x を一定とする. さらに磁気力の k 成分 f_k は軸対称であり鋼球に作用する力は相殺されるとすると, 式(2)は次式で与えられることになる,

$$f = i M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} \quad [\text{N/m}^3] \quad (3)$$

半径 a を持つ鋼球が x 軸上の任意の点にある時, x_1 を x 軸上の積分変数とすれば, 鋼球に作用する磁気力 F は, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} F &= \iiint f r d r d \varphi d x = 2\pi \int_{x-a}^{x+a} d x \int_0^{\sqrt{a^2 + (x_1 - x)^2}} f r d r \\ &= i \frac{4\pi a^3}{3} M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} \quad [\text{N}] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで, M_x は真空の透磁率を $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$, 鋼球の比透磁率を μ_r とし, 次式で表される.

$$M_x = \frac{3\mu_0(\mu_r - 1)}{\mu_r + 2} H_x \quad [\text{Wb} \cdot \text{m}] \quad (5)$$

そこで, 式(5)を式(4)に代入して, 鋼球に作用する磁気力を求めると, 次のようになる.

$$F = i \frac{4\pi\mu_0(\mu_r - 1)a^3}{\mu_r + 2} H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} = i K H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

ここに,

$$\begin{aligned} K &= \frac{4\pi\mu_0(\mu_r - 1)a^3}{\mu_r + 2} \quad [\text{H} \cdot \text{m}^2], \\ H_x &= \frac{NI}{2l(r_e - r_i)} \left[\left(x + \frac{l}{2} \right) \ln \frac{r_e + \sqrt{r_e^2 + (x + l/2)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + (x + l/2)^2}} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{l}{2} - x \right) \ln \frac{r_e + \sqrt{r_e^2 + (l/2 - x)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + (l/2 - x)^2}} \right] \quad [\text{A/m}] \end{aligned} \quad (7)$$

K : 定数 $[\text{H}\cdot\text{m}^2]$,

x : 原点からの距離 $[\text{m}]$

図4で示すようなパルス電流でソレノイドが励磁されると、磁界 H は電流とともにその大きさが変化する。このとき、ソレノイドの一端に置かれた鋼球は、ソレノイド中心 0 に向かって力を受け急激に加速される。鋼球が移動するにつれて、磁界の強さの勾配 $\partial H/\partial x$ も変化する。鋼球が中心 0 に達した時、つまり $t=t_{\text{off}}$ で電流を切れれば、逆力を受けずにソレノイドの外へ打ち出される。

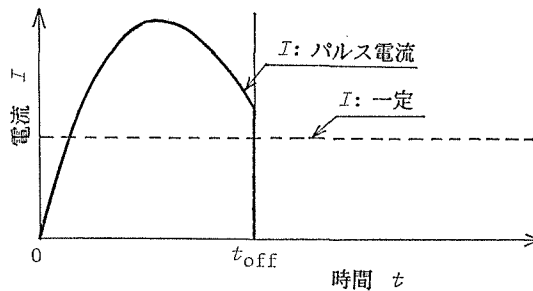


図4 電流の時間的变化

3. 実験装置

3.1 鋼球の発射制御回路

実験に使用したソレノイドの外観を図5に示した。ボビンがステンレス製であり、ソレノイドのみは全発射システムから簡単に取りはずすことができるようになっている。電流制御には、GTO サイリスタ等の高速スイッチング素子を使用した⁴⁾。GTO を用いた発射

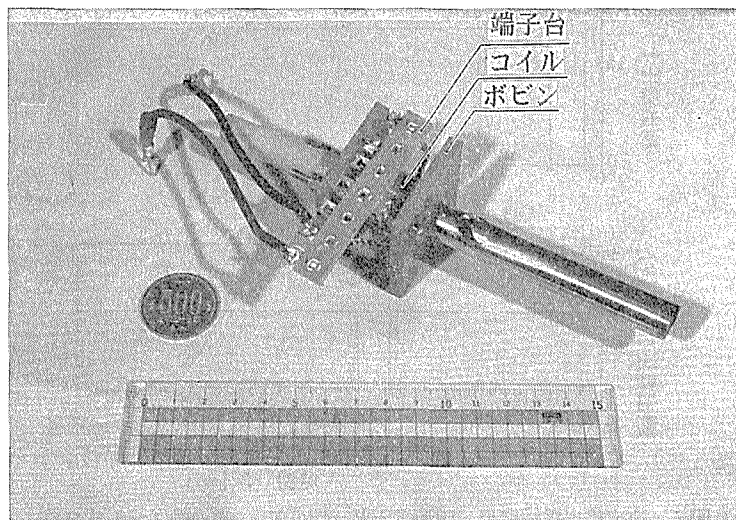


図5 ソレノイドコイルの外観

制御回路を図6に示す。励磁電流には、コンデンサの放電電流を利用している。本装置は、2つのGTOを交互にスイッチングし、コンデンサの充放電を繰り返すことによって、連続的な鋼球の発射を可能とするものである。コンデンサ容量を決めれば、鋼球がソレノイド中心に達する時間を理論式を用いて計算できるので、GTO2のオン時間はその値をもとに決定する。

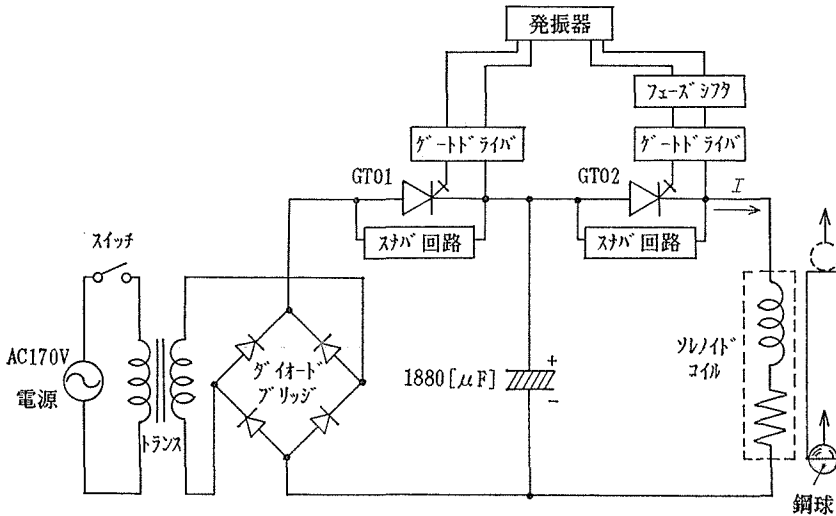


図6 GTOによる高速飛翔体装置の構成

3.2 鋼球の速度測定

速度測定には、鋼球が2点間を通過する時間から算出する方法をとった。位置センサに

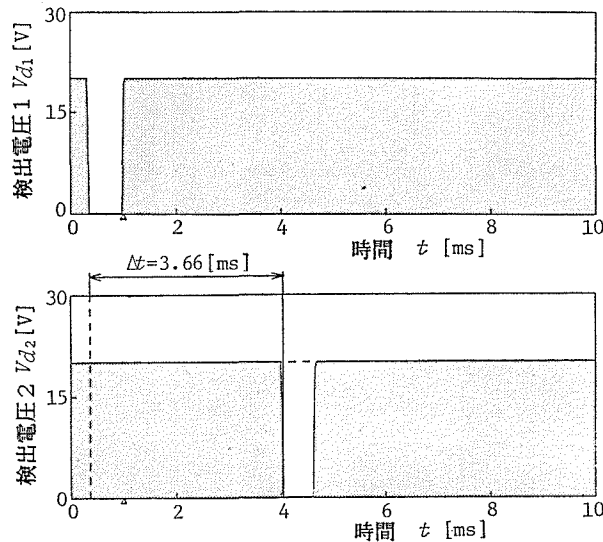


図7 速度検出電圧波形 (電源電圧 $V=240$ [V], 周波数 $f=0.1$ [Hz], コンデンサ容量 $C=3290$ [μ F])

表1 実験条件

項目	記号及び単位	数値
コンデンサ容量	C [μF]	3290
コイルの巻数	N [回]	70
コイルの長さ	l [mm]	23
線径	d [mm]	1
コイルの内径	r_i [mm]	6.5
鋼球の半径	a [mm]	4.78
鋼球の質量	m [g]	3.54

7に示す。2つのセンサ間の距離が105[mm]であるので、速度 $v=28.69$ [m/s]が得られることが判明した。光学式通過センサによる速度測定は、GTOのスイッチングによって発生するノイズの影響を受けないため速度の算出が正確に行える。

4. 解析結果

4.1 磁気力

図8に示した速度計算のフローチャートに従ってコンデンサ容量に対する磁気力 F 、磁束密度 B 、磁気勾配 $\partial H/\partial x$ 、速度 v を求めた⁵⁾⁶⁾⁷⁾。鋼球の発射速度は、コイルの仕様と密接な関係がある。そのため各パラメータの値は、コイルの長さや巻数を一定のステップで変化させ発射速度が最大となる時の値を算出した。

表2に解析条件を示した。鋼球の材質は実験に使用しているベアリング用材料(SUJ-2)とし、その比透磁率特性を図9に示した。本論文における解析では、便宜上比透磁率の値は50一定とした。

表2 解析条件

項目	記号及び単位	数値
鋼球の半径	a [mm]	4.78
鋼球の比透磁率	μ_r	50
コイルの内径半径	r_i [mm]	7.75
コイルの長さ	l [mm]	15
コイルの巻数	N [回]	2~29
コイルの線径	d [mm]	1.2~3.2

は光学式通過センサを用い、その誘起電圧から鋼球の通過を観察するものである。2つのセンサ間の距離を D 、通過時間を Δt とすると鋼球の速度は次式で示される。

$$v = \frac{D}{\Delta t} \quad [\text{m/s}] \quad (8)$$

表1に示した実験条件において、ソレノイドで鋼球を発射した時の2つの光学式通過センサの検出電圧の測定結果を図

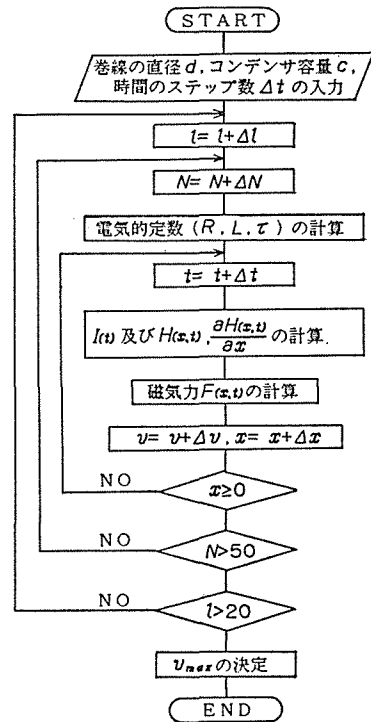


図8 速度計算のフローチャート

図10にコンデンサ容量に対する磁気力 F ，磁束密度 B ，磁気勾配 $\partial H/\partial x$ の計算結果を示した．同図において磁気力 $F = 0.819 \sim 8.899$ [kN]，磁束密度 $B = 3.34 \sim 11.05$ [T]，

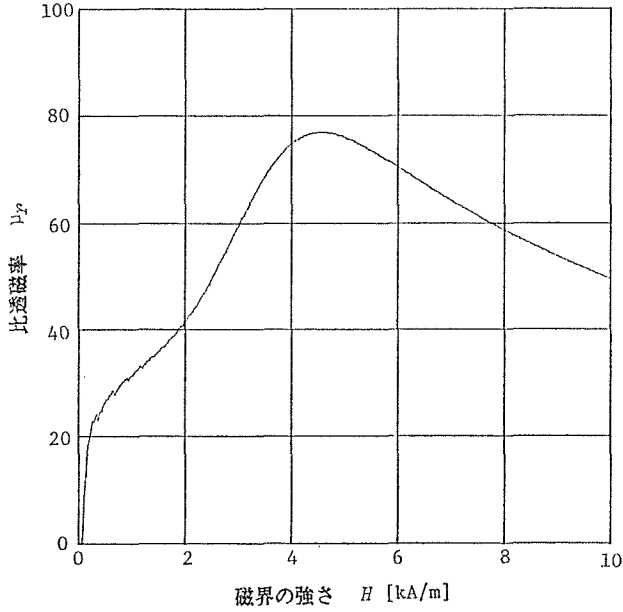


図9 鋼球試料 (SUJ-2) の比透磁率特性

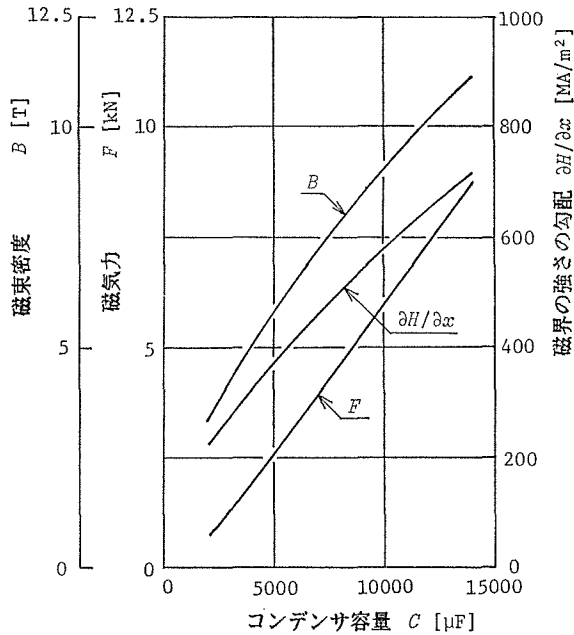


図10 コンデンサ容量に対する磁束密度 B ，磁気力 F ，磁界の強さの勾配 $\partial H/\partial x$ の依存性 (計算結果)

磁気勾配 $\partial H / \partial x = 222.9 \sim 713.6$ [MA/m²] の範囲にある。また、そのとき電流は $I = 2.6 \sim 57.57$ [kA] の範囲にある。

4.2 発射速度

本電磁ランチャによる発射速度 v と発射効率 η のコンデンサ容量に対する依存性を図11に示した。発射効率 η は、入力をコンデンサの充電エネルギー、出力を鋼球の運動エネルギーとして次式から求めた。

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\frac{1}{2}CV^2} \times 100 \quad [\%] \quad (9)$$

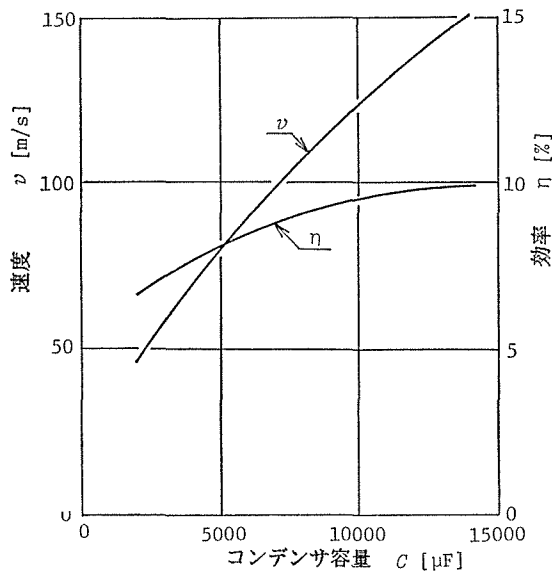


図11 コンデンサ容量に対する鋼球の速度 v と効率 η の関係 (計算結果)

同図から、発射速度は $v = 45.9 \sim 159.86$ [m/s]、発射効率 $\eta = 6.47 \sim 9.91$ [%] の範囲にある。効率はコンデンサ容量14000 [μF] でかなり飽和傾向にある。

4.3 実測結果

電磁ランチャの実験装置の外観を図12に示した。同図において実験者の左手方向は、ソレノイド、発射制御装置等があり、右手方向には鋼球のガイドパイプが配置されている。ソレノイドから連続的に発射された鋼球は、ガイドパイプを周り再び鋼球挿入装置に戻る。ただし長時間にわたり鋼球の連続発射を行なうためには、ソレノイドの冷却を行なう必要がある。

連続発射の本実験では、コンデンサ容量 $C = 1880$ [μF]、 $I = 0.96$ [kA] において、鋼球を $v = 23.9$ [m/s] で1秒当たり1個発射させることができた。

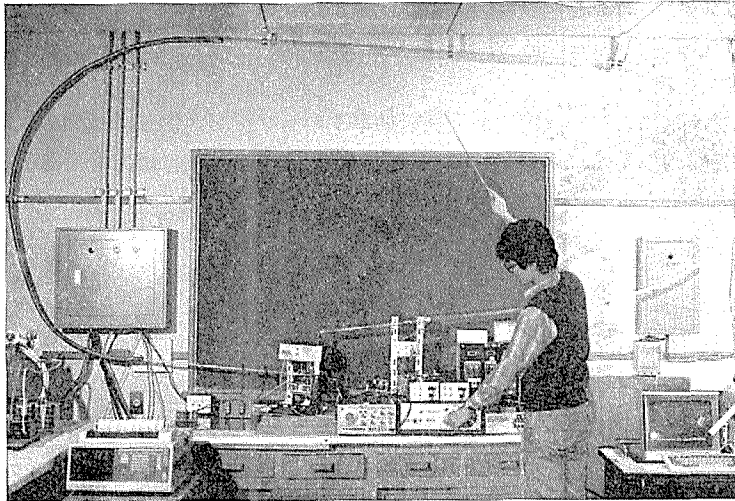


図12 電磁ランチャの実験装置の外観

5. あとがき

本論文で得られた結論をまとめると、以下のようになる。

1) 理論解析：本電磁ランチャは、発射制御回路におけるコンデンサ容量が $C = 2000 \sim 14000$ [μF] の範囲において、鋼球の運動速度を $v = 45.9 \sim 150.86$ [m/s] の範囲内で制御することができる。

2) 実測結果：ソレノイドに電流 $I = 0.96$ [kA] 流した時に質量 3.54 [g] の鋼球を、速度 $v = 23.9$ [m/s] で毎秒1個ずつ連続発射することができた。また質量 3.54 [g] の鋼球を単発発射したとき、電流 $I = 1.344$ [kA] において最大速度 $v = 28.69$ [m/s] が得られた。

鋼球試料の作製についてご尽力頂いたNTN 東洋ベアリング(株) 総合技術研究所大嶋三郎部長に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) H. Yamada, M. Yamaguchi, Y. Gohdo, H. Ota, K. Takeuchi & H. Yamagami : Continuous Electromagnetic Launcher Using Solenoid Coil, 25th International Magnetics Conference, FE-04 (1987).
- 2) 山田, 大谷, 杉田 : 「ソレノイドの磁界制御による鉄球の挙動」, マグネティックス研究会資料, MAG-77-28 (1977).
- 3) 例えば, H. Kolm et al : Electromagnetic Launchers, IEEE Trans. Magn. Vol. 16, No. 5, pp.719-721 (1980).
- 4) 関, 倉田, 竹内 : 「ターンオフサイリスタ」, 電気書院, pp.163-166 (1983)
- 5) 山田, 竹村, 山口, 内山 : 「ソレノイドコイルの磁界制御による鉄球の速度, 効率の計算法」, 電気学会全国大会, No. 876, p.1088 (1986).
- 6) 山田, 山口, 郷戸, 登坂 : 「磁気力による強磁性体の連続発射についての考察」, マグネティックス研究会資料, NAG-86-129, pp.111-120 (1986).
- 7) 山田, 山口, 郷戸, 太田, 竹内, 登坂 : 「磁気力による強磁性体の飛翔速度解析」, 電気学会全国大会, No. 831, p.1026 (1987).