

トラポロールとスチールボールを
用いた原子核実験用電磁石の架台

藤野武夫

1973. 9. 25.

A Special Magnet Setting Table Using "TRAPOROULETT"
Mechanism and Steel Ball Rings

T. Fujino

Abstract

A 12ton magnet setting table for the polarization target was designed. Very small rotating radius and spinning action of the table was obtained with use of "TRAPOROULETT" mechanism. A simple position setting mechanism of the table in the horizontal plane was also designed using steel ball rings.

The table is now under construction in our INS machine shop.

原子核実験において、しばしば重量物の電磁石が加速粒子線（ビーム）中心に、その磁極中心を一致させて設置される。更にある種の電磁石の使用は恒久的でなく特定の試験期間だけに限られるので、その前後に移動の必要が生じる。従って、この種の電磁石には位置調整の装置と移動の装置を備えていなければならない。本架台は、この種の電磁石の中、偏極ターゲット用電磁石のために計画したもので、移動用の車輪としてトラポロール（商品名）また水平方向の位置調整にスチールボールを用いた。

トラポロールは、従来この種の移動用の走行器具として用いられた自在鉄車輪に比べ、一層その走行の方向性が自在なので方向変換が容易で、且つ車体の回転半径を極めて小さくすることが出来る。更に個々のトラポロールが小型に製品化されているから、このものを使った移動装置は限定されたスペースに形状寸法を納めることが比較的容易である。

位置調整装置としてスチールボールを用いることは、既製の装置に比較して簡単な機構により水平方向の微動調整が容易に出来る。更に高精度化、小型化と製作性に大いに有効であるばかりか、保守点検や経済的にも優れたものになる。

1. 装置概要

図 1 に装置の全体を示す。③のフレームを狭んで、下側に 91 個のトラポロール①を、上側に 10 組の水平方向位置調整装置②を配し、更に横の方向に 4 本の垂直方向位置調整用ネジジャッキを備えた。

走行用車輪として用いたトラポロールの詳細を図 2 に示した。このものは、1 個の本体車に 6 個の補助ロールが本体車の回転方向に直角の向きについており、それぞれが独立して回転する。即ち、図 2 の主軸を中心とする直径 D ($D = 120 \text{ mm}$) の円弧を持った補助ロールが図の如く 6 個配列されている。これらロールは各副軸を中心にそれぞれ回転出来る。主軸の回転と副軸の回転は互に直角方向になっているので、同時にこれら 2 方向の回転が得られ、ちょうど球をころがすように、瞬時にあらゆる方向へころがることが可能な車輪である。本装置で用いたトラポロールは 1 個当りの負荷容量が 250 Kg のもので、車およびロールはダイカスト製アルミ合金、軸は普通炭素鋼である。また軸受部はニードルベアリングが使われている。

図 3 に水平方向位置調整装置の詳細を示す。このものは 2 枚の焼入研削した皿と、36 個のスラストボールベアリング用のスチールボールとボールの保持危から成る。スチールボールを上下の 2 枚の平板が狭んでいる。

8 本の水平方向位置調整用押しボルト⑤の作用によって電磁石はスチールボールを介して非常に軽く所望の方向に移動出来る。スチールボールを狭んでいる 2 枚の皿には、市販のスラス

- ① ト ラ ポ ロ ー ル
- ② 水 平 方 向 位 置 調 整 装 置
- ③ フ レ ー ム

- ④ 垂 直 方 向 位 置 調 整 用 ね じ ジャ ッ キ
- ⑤ 水 平 方 向 位 置 調 整 用 押 し ホ ル ト
- ⑥ ロ ッ ク ネ ジ

- ⑦ ジ ャ キ ボ ル ト
- ⑧ 電 磁 石

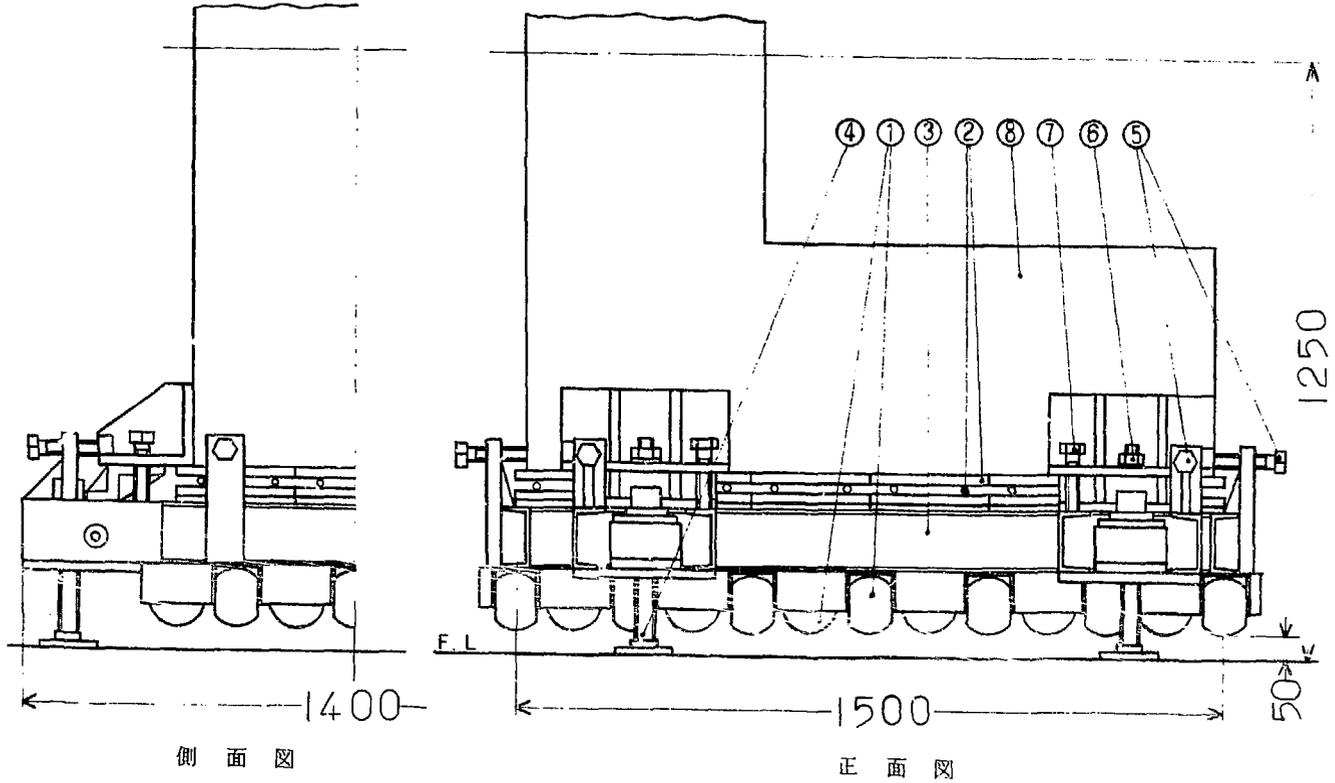


図1 電磁石架台

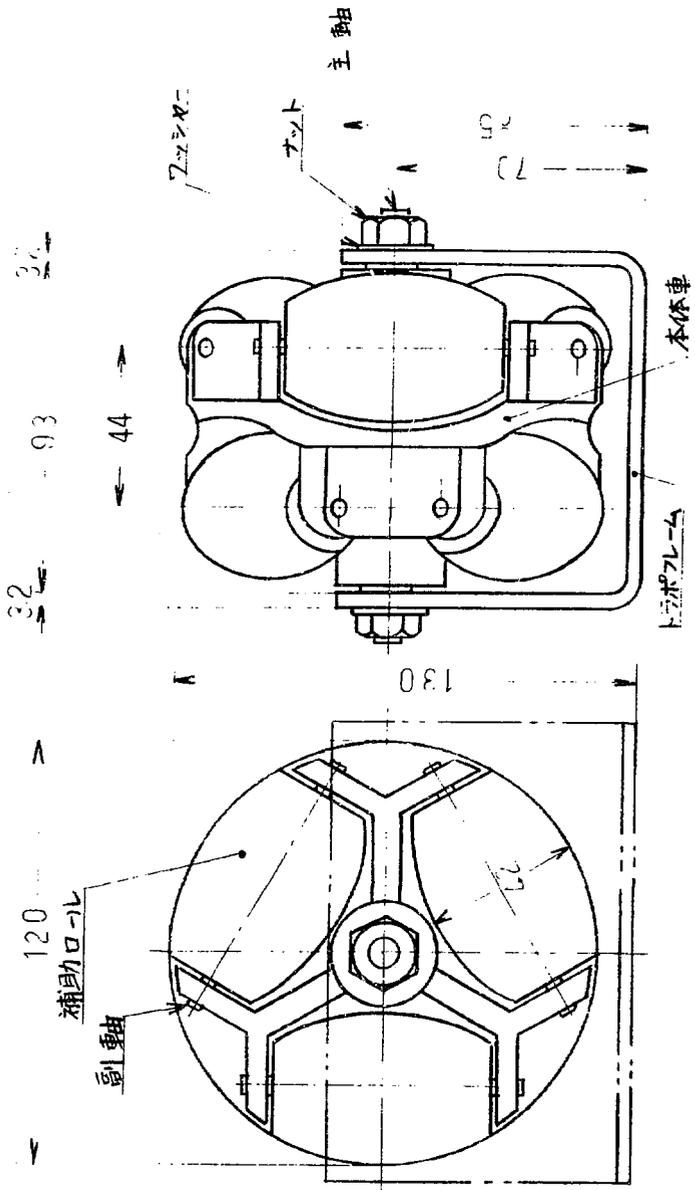


図2 トラボローラー

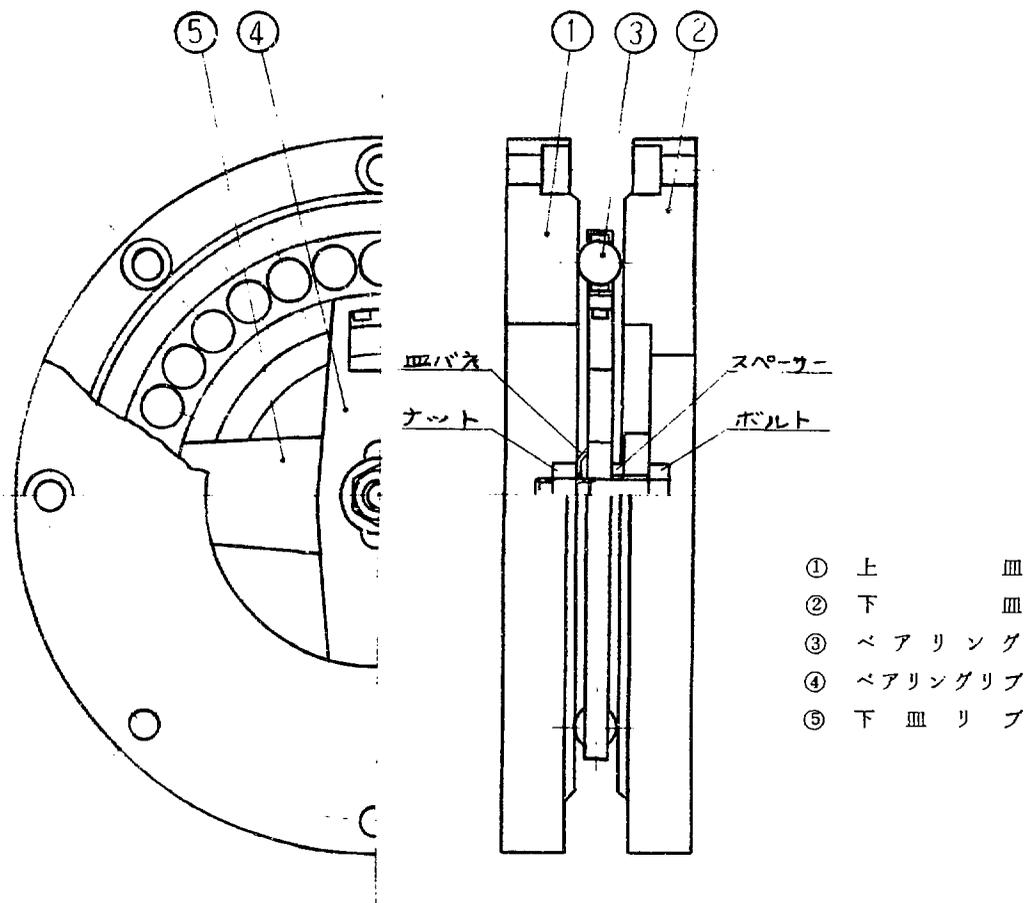


図 3. 水平方向位置調整装置

トボールベアリングのレース面のように、ボールの転動面をきめてしまう案内溝がないから、電磁石をいかなる方向へと移動出来る。

2 枚の皿はスチールボールと同材のベアリング鋼を用い、焼入研削しその硬度は $H_{RC} 60 \sim 64$ に指定した。

高さ方向を調整するための垂直方向位置調整用ネジジャッキは市販のもので、許容荷重 5 ton である。

この他に、電磁石をフレームに固定するためのロックネジ⑥やスチールボールが皿からはずれないようにするストッパーおよび位置調整作業時外はスチールボールに電磁石の荷重を掛けないようにするためのジャッキボルト⑦を装備した。

2. 装置の仕様（設計仕様）

設計に必要な電磁石の大きさおよび装置の主な仕様は次に示す如くである。

- 電磁石は、重量 12 ton，床面積 $1445\text{ mm} \times 680\text{ mm}$ ，全高 1740 mm とする。
- 床面よりビーム中心までの高さは $1250\text{ mm} \pm 25\text{ mm}$ である。
- 水平方向および垂直方向位置調整に必要な装置を備えていること。これの微動調整距離を $\pm 25\text{ mm}$ とする。
- 移動に際しては、あらゆる方向に容易に走行が可能なこと。（但し、走行距離は数十米とし、その走行面は鉄板上とする。）

3. 各部の設計または調査

3-1. 車輪（トラポロール）

前述の如く、トラポロールをこの種の装置の車輪に用いることは有効である。ここでは、このトラポロールの強度を調査する。

ここで使用するトラポロールは、日東鉄工機製で、型番は TA-120-NN，またトラポロールを支持するトラポフレームは TF120-150 を選定した。

トラポロールは装置の最下部に組込まれるから、これに掛る荷重は自重を差引いた残りの全重量となる。この荷重を約 13 ton と見積る。即ち、電磁石 12 ton，台車（フレーム，ネジジャッキ，水平方向位置調整装置等）約 0.8 ton と推定する。トラポロール 1 個当りの許容荷重は 250 Kg であるから、 $13000/250=52$ ，即ち最低 52 個のトラポロールが必要である。一方、電磁石床面積から割出した架台の必要床面積と、起動抵抗がどの方向にも一樣になるようなトラポロールの配列を考慮するとその必要個数は 91 個となる。91 個のトラポロールの配列を図 4 に示す。これに基づいて荷重計算を行うと次のようになる。

$250 \times 91 = 22750$ 即ち、全トラポロールが支持する荷重は 22750 Kg である。総荷重 13 ton であるから約 1.8 倍の安全を持つことになる。このことは仮に約半数近くの車輪がなんらかの原因により、荷重を受け持たなかった状態でも使用に不安はないことになる。

91 個のトラポロールの総重量は約 173 kg である。また移動始めの走行抵抗係数を 0.04 とすると、始動時に 520 Kg の力が必要である。

3-2. 水平方向位置調整装置

図 3 に示した如く、その機構はスラストボールベアリングと類似である。従って、設計は

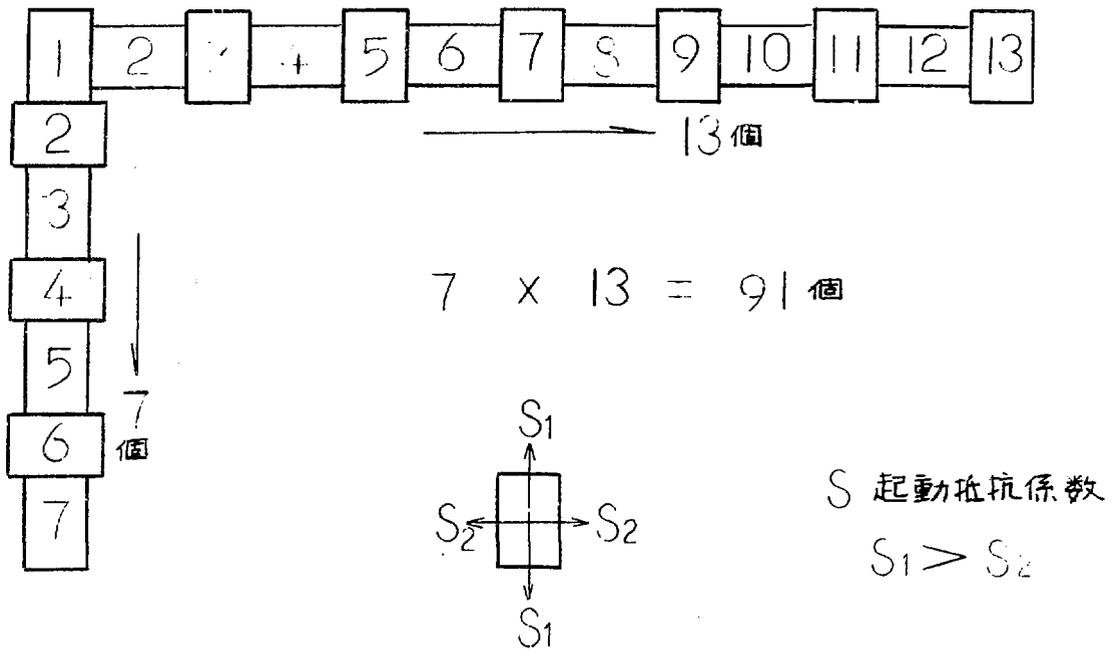


図4. トラボロールの配列

ころがり軸受として取扱った。

使用するスチールボールの直径と個数を求め、これに適合する型番のスラストボールベアリングを選定した。

玉と平板が図5に示す如く、弾性接触する時の接触幅 $2a$ 、接触変形量 δ および最大接触応力 σ_{max} はそれぞれ次式で示される。

$$a = 8640 \times 10^{-6} \sqrt[3]{Pr} \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta = 75 \times 10^{-6} \sqrt[3]{P^2/r} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{max} = 6400 \times \sqrt[3]{P/r^2} \dots\dots\dots (3)$$

(但し、玉および板のヤング係数は等しく、その値 $E = 2.1 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$ とした。)

今玉の動きは比較的遅く、即ち普通の軸受を対照に考えれば回転速度の低い場合であるから拵負荷容量の定義に基づいて、接触応力の最大値を 28000 kg/cm^2 に抑える。ここで玉の直径を仮に 14 mm とすると(3)式より、 $P = (\sigma_{max}/6400)^3 r^2 = (28000/6400)^3 \cdot 0.7^2 = 41 (\text{kg})$ となる。この値は1個の玉が受け持つ荷重量である。従って電磁石の重量 12 ton に対しては $12000/41 = 293$ となる。さらに普通の運転条件として安全係数 1.2 を考慮すると、 $293 \times 1.2 = 352$ となる。これが 12 ton の荷重に対して必要なスチールボールの数である。

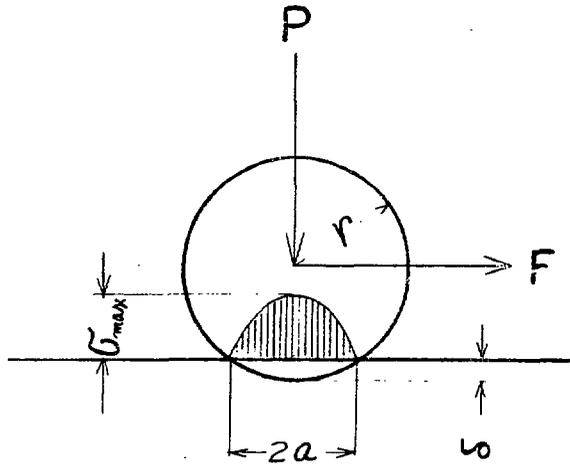


図 5. スチールボールと平板

今仮に 10 組のスラストベアリングを用いるとした時、1 組当りの玉数は 36 個である。これに見合う玉径 14 mm、数 36 個入りのスラストベアリングを選ぶ。

ここで用いたスラストベアリングは S.K.F 社の #51126 で、玉径 $9/16''$ (14.3 mm)、玉数 36 個、玉のピッチ円の径が 150 mm のものである。このものについて検討すると玉 1 個当りが受持つ最大荷重は 42.8 Kg となり 1.04 倍だけ修正される。このスチールボールに 12 ton の荷重を載せた時の a 、 δ 及び σ_{\max} の値は次のようになる。

$$a = 8640 \times 10^{-8} \sqrt[3]{P r} = 2.5 \times 10^{-2} \text{ (cm)}$$

$$\delta = 75 \times 10^{-8} \sqrt[3]{P^2 / r} = 87 \times 10^{-4} \text{ (cm)}$$

$$\sigma_{\max} = 6400 \times \sqrt[3]{P / r^2} = 26000 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

図 5 において、 F をボールの運動を続けるに必要な力とすれば、 $F(r - \delta) = l \cdot a$ 、即ち $F = P \cdot a / (r - \delta)$ となる。 δ は非常に小さいから $(r - \delta) \doteq r$ となり、 $F = P \cdot a / r \dots (4)$ となる。さらに a も r に比べ小さい値であるから一定のボール、一定の材質と考えれば a/r は常数と見なすことが出来る。即ち、 a をころがり摩擦の係数と考えることが出来る。ここで用いたスチールボールに関して a/r は 5.5×10^{-2} となる。実際にはボールの上下に板があり、各ボールと板の間に摩擦が発生するので $2 \cdot a/r$ となる。従って荷重 12 ton の電磁石を動かす場合、 $F = 2 \cdot P \cdot a / r = 2 \times 12000 \times 3.5 \times 10^{-2} = 840$ 、即ち 840 Kg の力を要す。

一方、皿に関しては、フレームに組込む時のスペースからその厚みを 23 mm とした。この厚みが力学的に妥当か否かと云うことは、このものの裏金の役目をしているフレームおよび電磁石のヨークの強度に依存する。即ち裏金が強固な物であれば、皿は適当な硬度を持った

薄板で良い。ここで、電磁石のヨークは形状から見て自重に対して十分な強度を持ち、その原形を保持するものと考えられ、変形量は無視出来る。また、フレームもそのたわみが高々 $4/100\text{ cm}$ なので十分裏金として役に立っている。従って、上記の厚みを持った皿は十分に使用に耐えるものと考えられる。

3-3. 垂直方向位置調整用ネジジャッキ

ネジジャッキは日本ギア工業⁴⁾製の型番 J 2 A を使った。このものの基本仕様は次の如きものである。

許容荷重 5 ton, 所要入力トルク 2.5 Kg-m , ネジ軸径 40 mm , リード 10 mm , ウォーム減速比 24, ストローク 10 mm につきウォームの回転 24, 重量 15 Kg である。また主寸法は床面積 $205 \times 150\text{ mm}$, 本体の全高 385 mm である。さらに、ネジ軸は最上昇点において本体より 43 mm 出しており、最下降点に来た時は 243 mm の張出しとなる(以上カタログ値)。

ネジジャッキは4個用いた。1個当りの許容荷重が5 ton であるので20 ton の容量があることになる。これに対して受持つ荷重が13 ton であるから約1.5倍の安全度となる。

さらにこのジャッキを手動で操作する場合、人間の力(人力)を約0.1馬力(HP)に見積ると、カタログの計算ノモグラフよりネジ軸速度は約 15 mm/min に求められる。また、この時、所要入力トルクが 2.5 Kg-m であるから、作動力を 10 Kg とすると 250 mm の長さのアームを持ったクランクハンドルが必要である(図6)。

3-4. フレーム

フレームは溝形鋼($125\text{ mm} \times 65\text{ mm}$)をアーク溶接で基盤目に組んだ構造物である。

図7はこのものに力が作用した場合の4つの状態を示したものである。この内1), 2)については車輪が接地している状態なので、個々の車輪が荷重に十分耐えうれば、フレームを極端に変形するような力は作用しない。3), 4)についてはフレームを両端支持梁として取扱う。さらに3)と4)を比べると、その梁に作用する力は3)の状態の方が大きく苛酷な条件となるので、この状態について検討する。

図8に3)の状態の時の力の作用点を示す。この図に於いて二通りの梁が考えられる。即ち、その一つはY-Y'軸を境にして左右どちらか一方の側についての梁、またX-X'を境にして図の上側か下側かの梁である。前者はスパン長 1200 mm の両端支持梁に $W=5P$ の力が作用している場合、また後者は 1030 mm のスパンに $W=5P$ の荷重が加わった場合である。この時、力の作用点は図の如く分散しているが、その状態はフレーム全面にほぼ均一に分散しているので、これらの力を一つの集中荷重に置きかえて梁の中央に作用すると考える。この時が最も苛酷な条件となる。両者の梁の中、スパン長 1200 mm の方について曲げ応力 σ_b とた

わみ δ を算出すると次のようになる。

$$\delta = Wl^3 / 48 EI = 650 \times (120)^3 / 48 \times 2.1 \times 10^8 \times 6.5 \times 425 = 0.004 \text{ (cm)}$$

$$\sigma_b = M/Z = Wl/4Z = 650 \times 120 / 4 \times 6.5 \times 68 = 44 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

[但し、梁は溝形鋼(125×65_{mm}) 6.5本分に力が作用するものとした。]

ここで軟鋼の曲げ許容応力は、安全率を9~10にした時300~500 Kg/cm²である。またたわみは普通スパン長の1/1000位に抑えるから荷重に対して十分な強度である。

3-5. 水平方向位置調整用押しボルトおよびジャッキボルト

水平方向位置調整用押しボルト⑤は、電磁石を微動させるためのものでも本用いている。前述の如く電磁石を動かすために840 Kgの作用力が必要である。今このためにM30の6

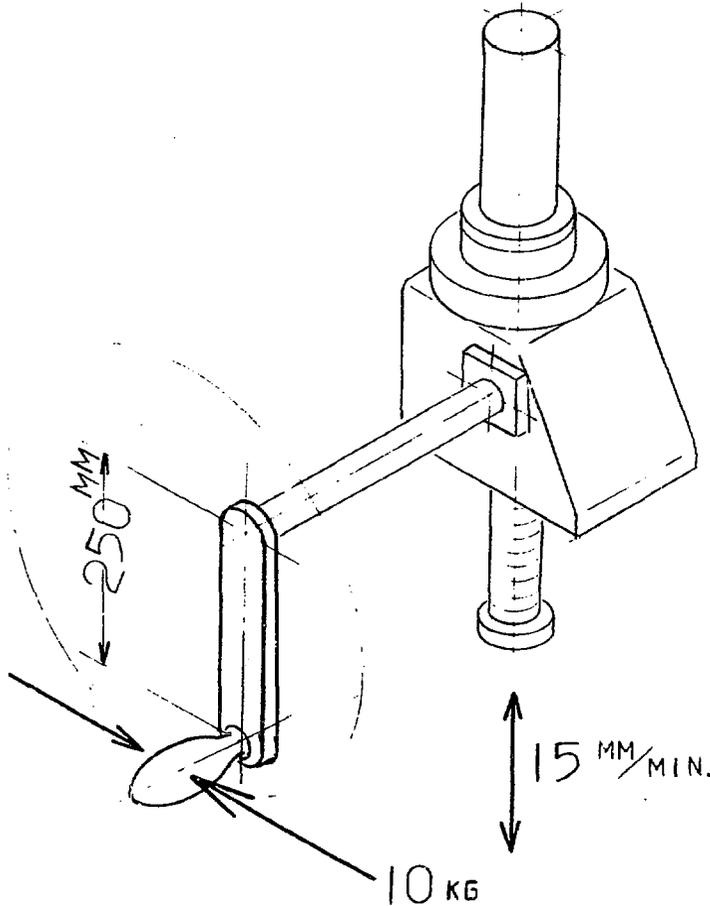


図 6. ジャッキのハンドル

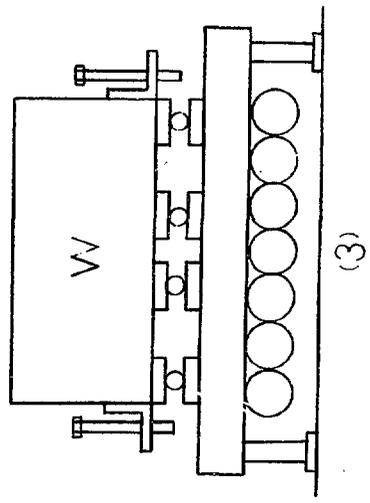
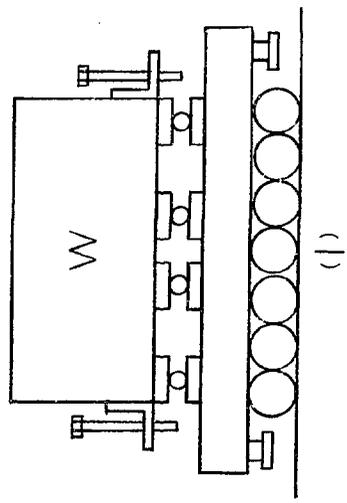
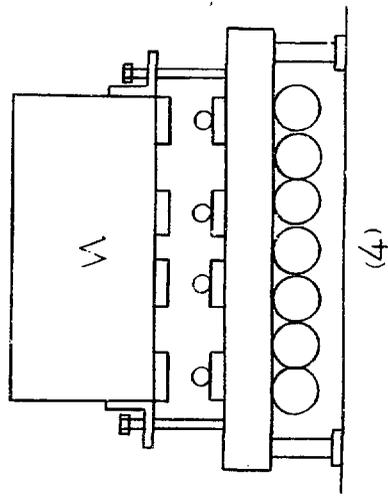
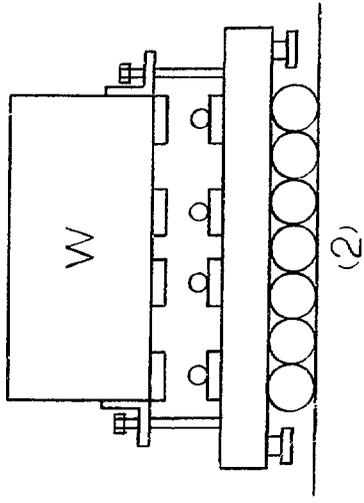


図7 台車の荷重状態

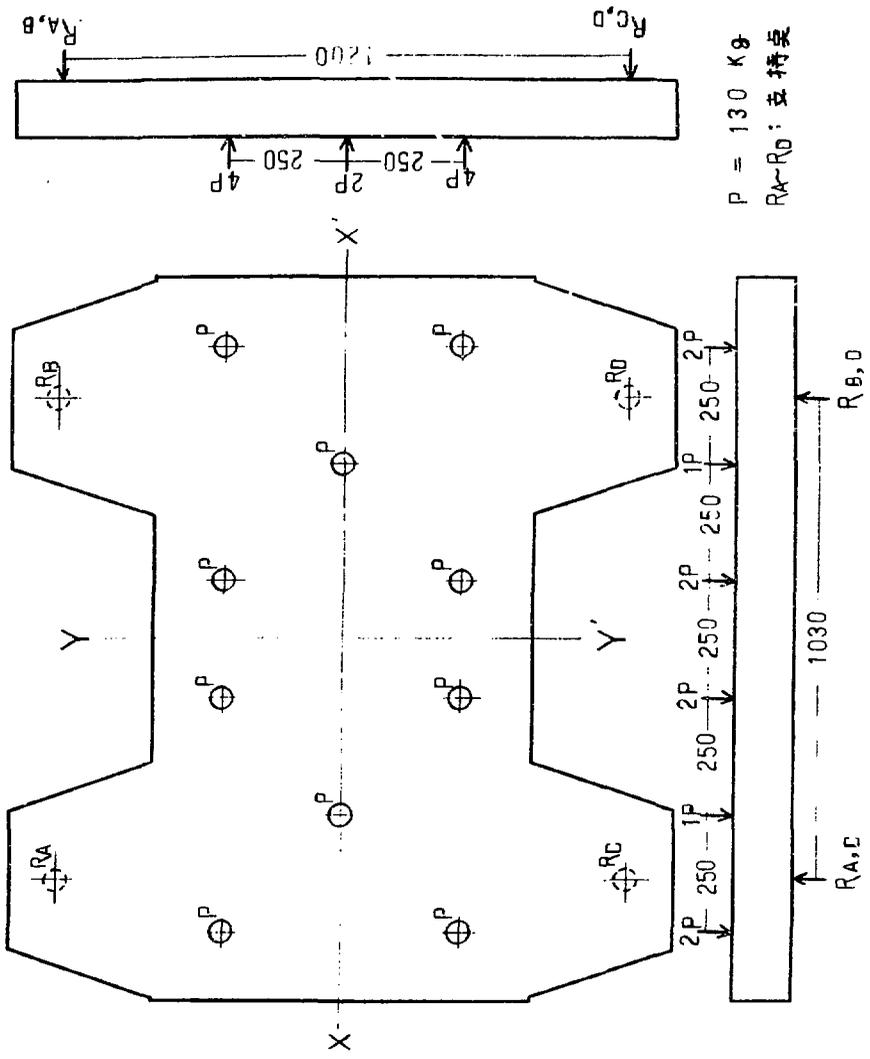


図8 フレームの力の作用点

角ボルトを用いる。

M 30 のネジの有効径は約 2.77 mm 、ピッチ 3.5 mm であるからつる巻角は $\tan \alpha = 3.5/\pi \cdot 2.77 = 0.0405$ である。また、このネジを廻すスパナの長さを 300 mm とすると、スパナに作用する力 P はボルトの有効径のところで約 $535 P$ に拡大される。即ち $P \cdot 300/2.77/2 = 21.7 P$ 、 $21.7 P/0.0405 = 535 P$ である。ここで仮にネジの効率を 50% としても約 $260 P$ となり、 840 Kg の力を出すには P を $3 \sim 4 \text{ Kg}$ にすれば良い。

また、水平位置調整装置を使用していない時スチールボールに予計な荷重を掛けないためのジャッキボルト⑦は M 42 の六角ボルトを 8 本用いた。

今仮にこの中のいずれか 3 本しか力を受持たなかったとする。この時 1 本当りに作用する荷重は $12000/3 = 4000 \text{ Kg}$ である。一方、このボルトの谷径は 36.2 mm であるから有効断面積は 10.3 cm^2 であり、従って軸方向の圧縮応力 σ_c は、 $\sigma_c = W/A = 4000/10.3 \div 400$ (Kg/cm^2) となる。軸方向に圧縮力が働くとネジ山の根元に曲げ応力およびせん断応力が附加される。普通ネジは作用力の約 40% が第一のネジ山に作用する。

従って、圧縮力 $0.4 Q$ によるネジ山の曲げ応力 σ_b は、 $0.4 Qx \div 1/6 \cdot \pi d_1 P^2 \sigma_b$ となって $\sigma_b \div 1.5 \sigma_c$ となる。一方、ネジ山の根元におけるせん断応力 τ_s は、 $0.4 Q = 0.4 \pi/4 \cdot d_1^2 \sigma_c = \pi d_1 P \tau_s$ であるから、 $\tau_s \div 0.65 \sigma_c$ となる。但し、 d_1 : ネジの谷径、 P : ネジのピッチ、 x : ネジの谷から有効径までの距離 (メートル並目ネジについては $0.325 P$ である) とする。これらについて算出した値はそれぞれ、 $\sigma_b \div 600 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\tau_s = 260 \text{ Kg/cm}^2$ である。ここで許容応力は圧縮および曲げに対しては 600 Kg/cm^2 であり、せん断については 480 Kg/cm^2 であるので、これらのボルトは使用に耐える。

以上電磁石架台の設計を示した。現在、この架台は当研究所工作室で製作中である。今後この架台が完成した時点でさらに各部分について検討したいと思う。

この設計に当たり、いろいろと議論して下さったり、指摘して下さいました池田弘先生に深く感謝致します。

[参 考 文 献]

曾 田 範 宗 軸 受 岩 波

機械設計ハンドブック編集委員会 機械設計ハンドブック 共 立 出 版

NTN Ball and Roller Bearing (CAT. NO 1050 1967)

トラボロールカタログ 日東鉄工株式会社

スクリージャッキカタログ 日本ギア工業株式会社