

1 GeV リニアック検討資料

1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) DTL用PQM配列治具の試験結果報告

著者(AUTHOR) 内藤富士雄

概要(ABSTRACT)

ドリフトチューブに収納するPQMを精度よく円形に配列させる治具の試験を実際の磁石を使用してKEKで行った。組上がったPQMは磁場測定を行い機械中心と4極磁場中心のずれを評価した。

治具の操作で細かい手直しの必要はでてきたが、基本的な考えに問題はなかった事が確認できた。ただし操作に熟練は要する。

3個スタックを作らず、磁石片が16個ばらばらでもPQMは組めた。しかし、治具が3個スタックを前提としているので、やはり今後の試験は3個スタックでやるべきである。

PQMの磁場勾配の実測値は206 T/mであり、PANDIRAの計算値と良くあった。この値は必要とされる磁場強度より10%強い。

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

高エネルギー物理学研究所 KEK

DTL用PQM配列治具試験結果

1991/06/11 K E K 内藤富士雄

5月21,22日にKEKに於てDTL用PQMの組立試験を行った。その結果を報告する。

*目的

PQM組立行程中のバンド掛け前までの過程を、改修した治具を使用して行ない治具と作業行程の虫出しを行う。そして組み上げたPQMのQ0測定も行い、機械的中心と磁場中心のずれ等の評価を行う。

*結果

治具に関して.

- (a). 磁石片の組み込み時の位置測定は新しい治具では問題なく遂行できた。
- (b). ダミーセルの周囲を磁石片は容易に回転はしない。即ち特定箇所に隙間を全体に分配させるには単に磁石を押すだけでは無理で、全体を引き出し再度組まねばならない。
- (c). 治具中心にあるダミーセルの真棒（ピン）が $\pm 10\mu\text{m}$ 程度移動する。従って対称位置に同時に一对の磁石片が組み込まない限り、中心軸は移動する。
- (d). 3個スタックを使用せず16個ばらばらでも、組立は可能である。ただし8個きり位置測定できないので、治具を改修しない場合は最初の予定通り3個スタックを使用したほうが有利である。
- (e). 一体化の手順を同じにすれば全体の位置の再現性は $\pm 10\mu\text{m}$ 程度はある。
- (f). 治具中に磁石片の反発力に対抗するためバネを入れているがまだ力が不十分である。反発力の見積がまだおかしい。("FORCE"を独自に開発する必要あり)
- (g). 組み上げた磁石を磁場測定のためセルごと中心のピンからはずすと、再挿入は滑らかにはいかない。ピンに横方向の無理な力が加わる。(ピンの改良が必要)

シム厚さに関して.

シム厚の変化に対する磁石の侵入量の関係は、16個ばらばらの場合、3個スタックを仮定した計算結果よりも約2倍大きい。隣接する磁石片の接触の仕方が3個スタックの場合と異なっているためである。（詳細は後述するが、現在のシム決定方法でやる限り3個スタックを使用したほうが良い。）

この場合でも最適なシム厚の実験値は計算結果と一致する。

4極磁場に関して.

- (a). 機械中心（M0）と4極磁場中心（Q0）のずれは#1PQMでは $30\mu\text{m}$ であり、#3では $42\mu\text{m}$ であった。磁石自体の性能で、ほぼずれ量は決まっているように思える。
- (b). 16個中1個の磁石片を外側へ引き出しても、Q0の変化量は引き出し量の1/16程度である。これは計算結果と良く一致する。
- (c). 磁場勾配の実測値は磁石の有効長を30mmとすれば206 T/mであった。カタログ性能からの予想値205 T/mと非常に良く一致する。

最初は磁石片の寸法測定治具の寸法の評価である。1個及び3個スタック用治具の真棒の位置を上中下の3箇所測定した。図1に結果を示す。縦軸は基準からのずれを表す。●は1個用、他は3個スタック用の治具の結果である。横軸のdownは真棒の下側、upは上側を意味する。△の1点を除いて全てup側がdown側より小さい。つまり真棒が傾いている。以後この治具を使用して測定した結果には真棒の傾きの効果が必ず含まれる。

図2、3、4はPQM#1用の磁石片を1個ずつ測定した結果である。測定時にはすでに磁石の背にはカマボコが接着されている。磁化方向別にまとめてプロットしてある。ばらつきが非常に大きい。原因はカマボコに使用した接着材の量が制御されていなかったためと思われる。

図5、6、7もPQM#3についての同様の図である。データのばらつきはこちらの方が小さい。

図8、9、10はPQM#2用である。これにはカマボコはついていない。PQM#1と3の結果と比較するとばらつきの小さい事が分かる。さらに殆どのデータでup側がdown側よりも小さい。その大きさは治具の真棒の傾き程度(約10 μ m)である。

このPQM#2のデータは製作した住友特種金属(以下「住特金」)のデータと直接比較できる。住特金のデータは顕微鏡と投影器の2種類あるが両者と比較した結果を6ページの図11と12に示す。

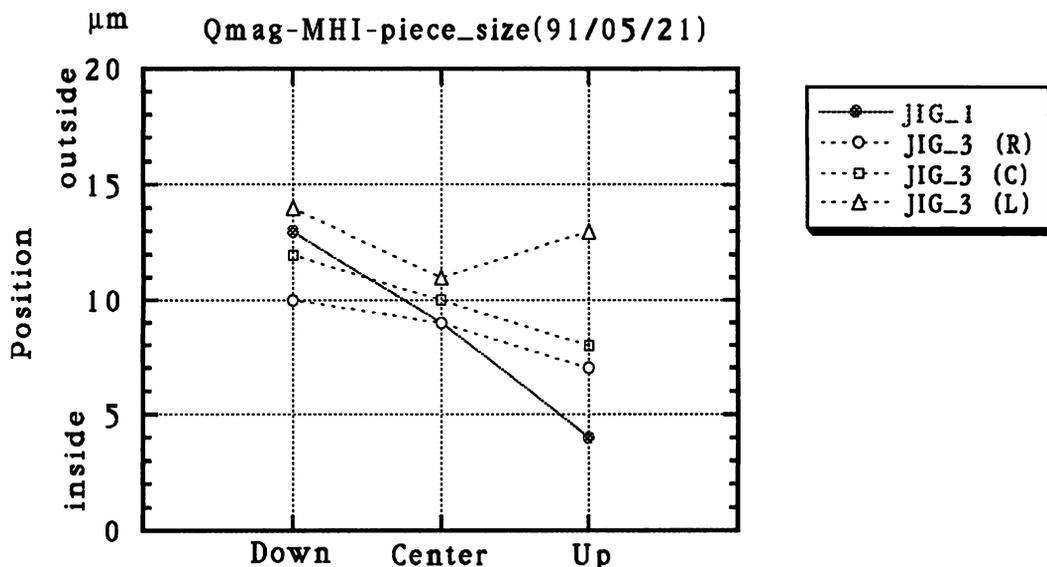


図. 1. 磁石片寸法測定治具の真棒の位置

●は一個用の治具の寸法測定結果、○は3個スタック用の右側、□は中央、△は左側を示す。

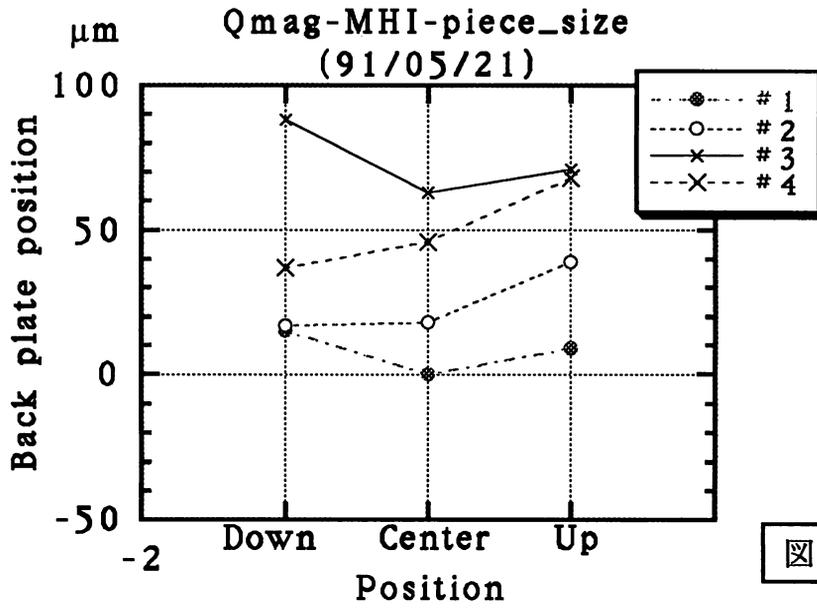


图. 2.

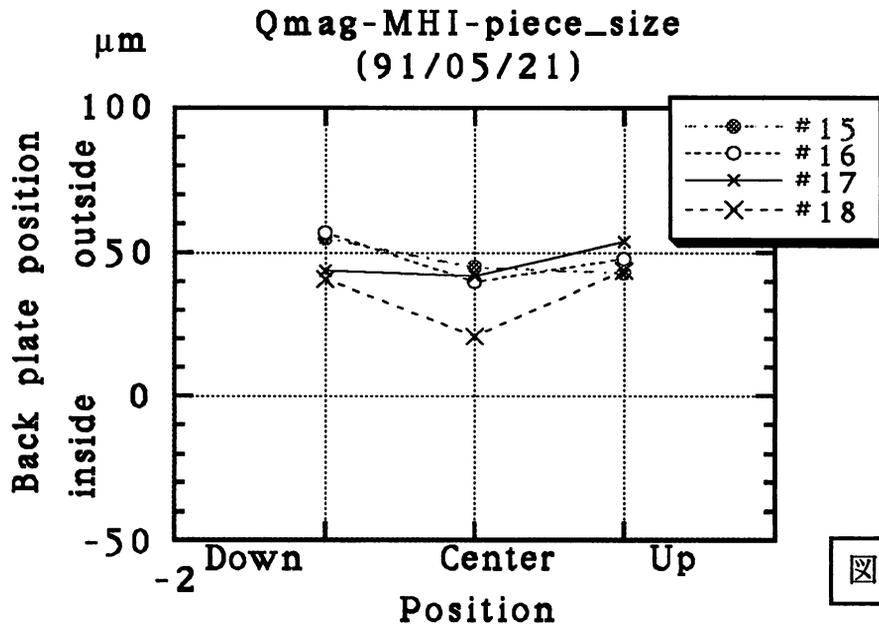


图. 3.

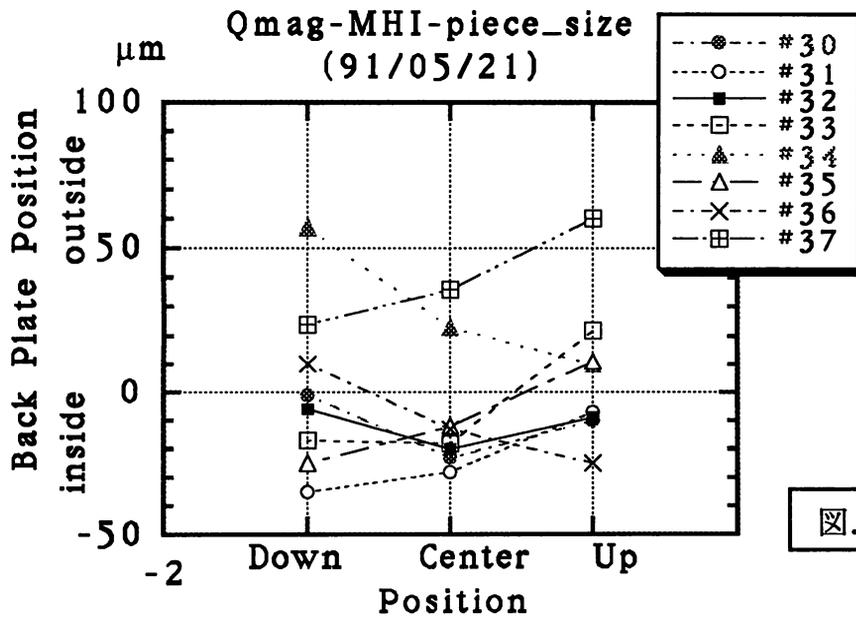
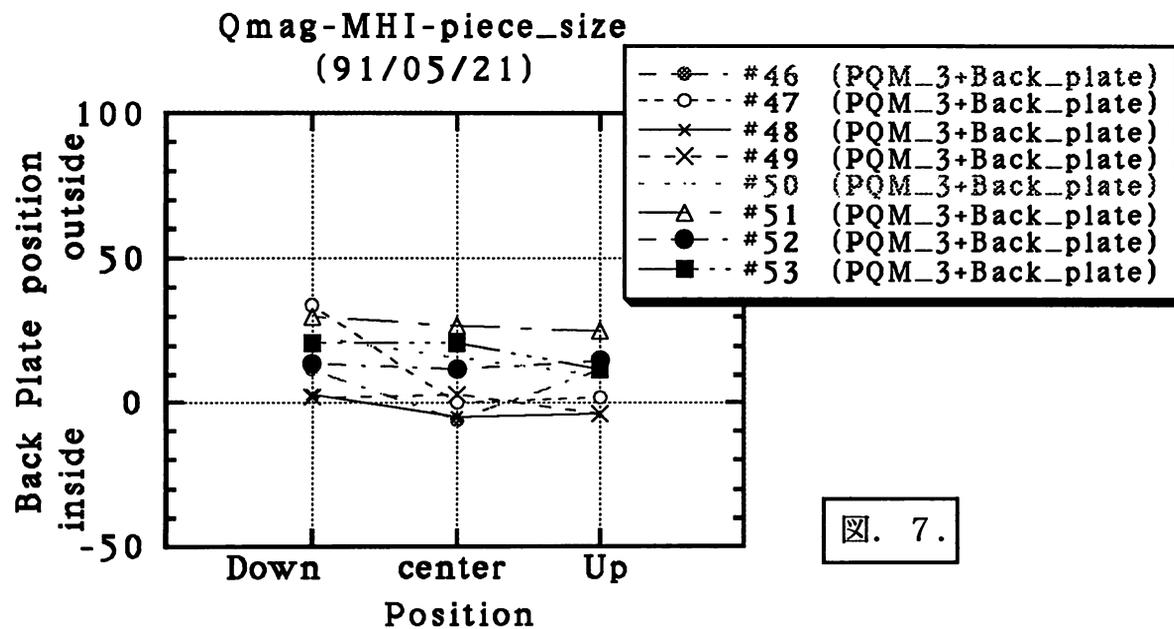
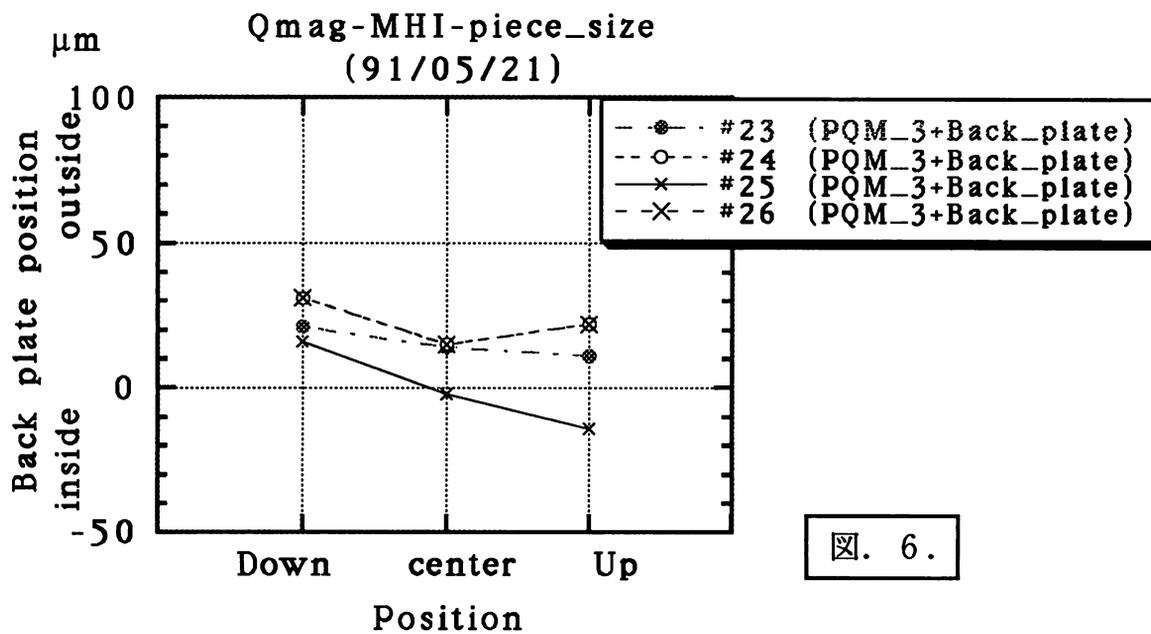
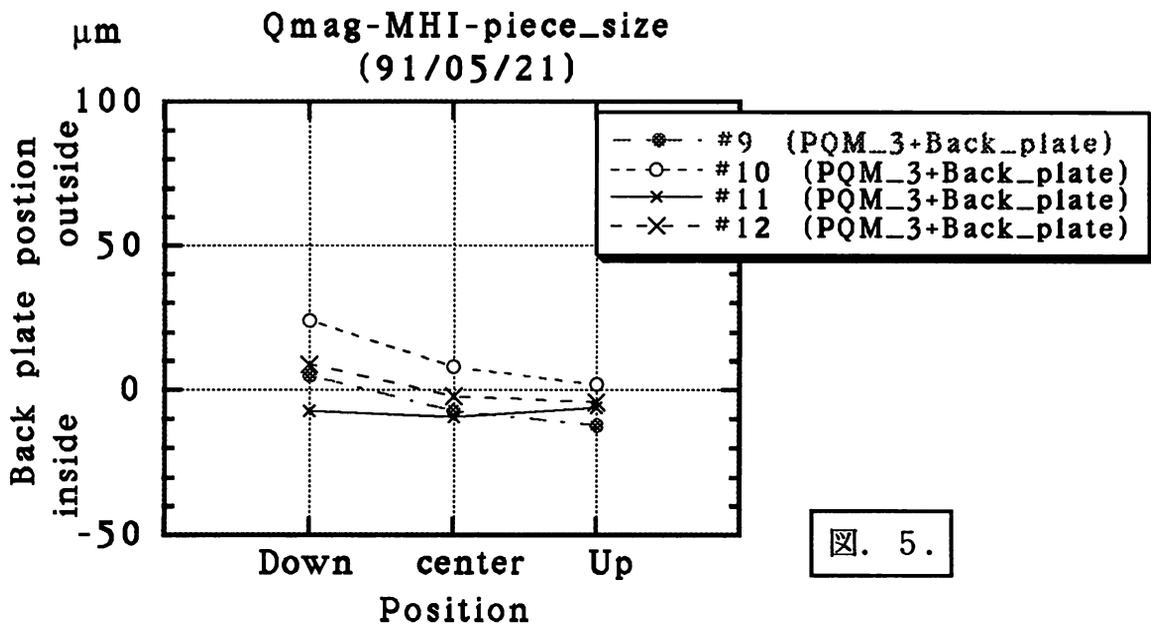
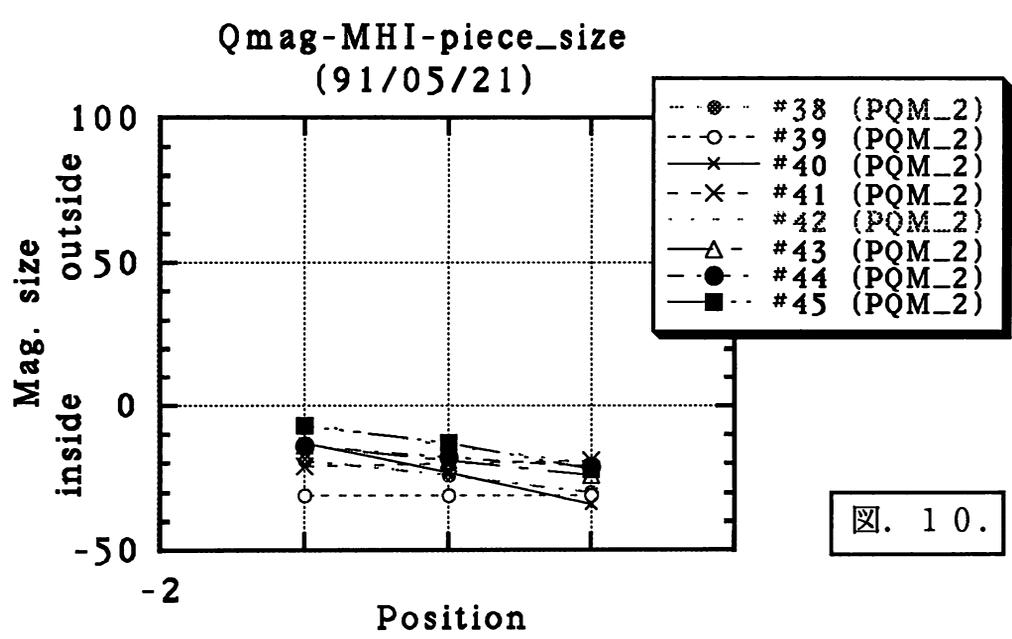
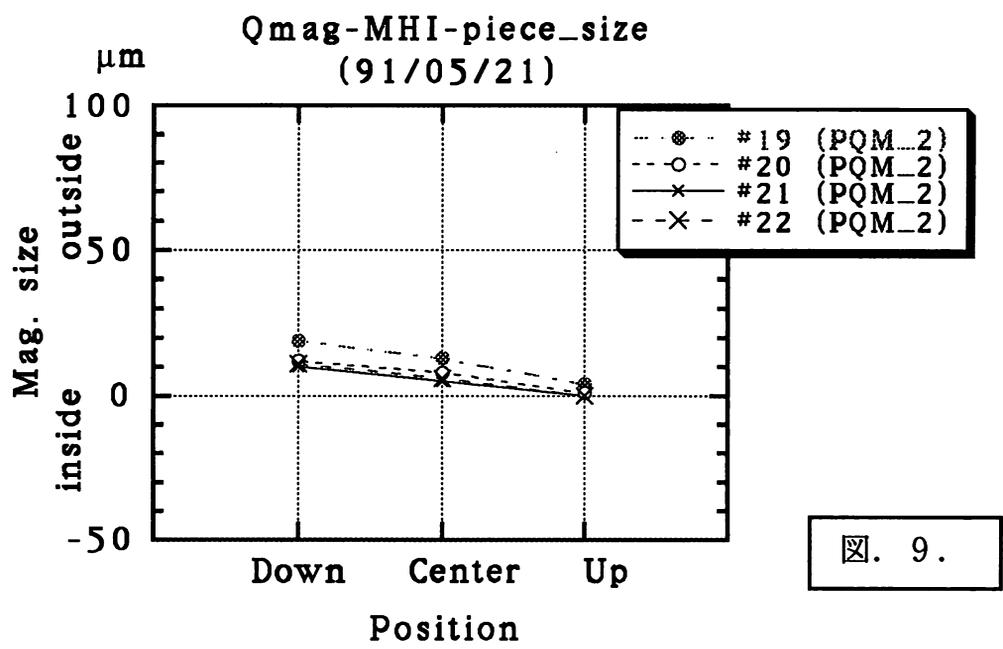
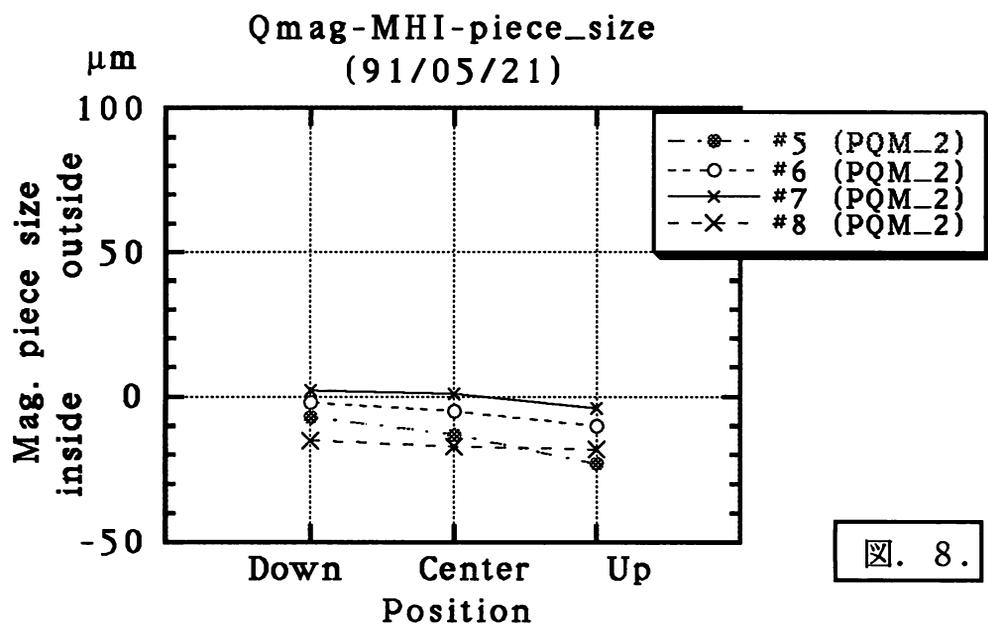


图. 4.





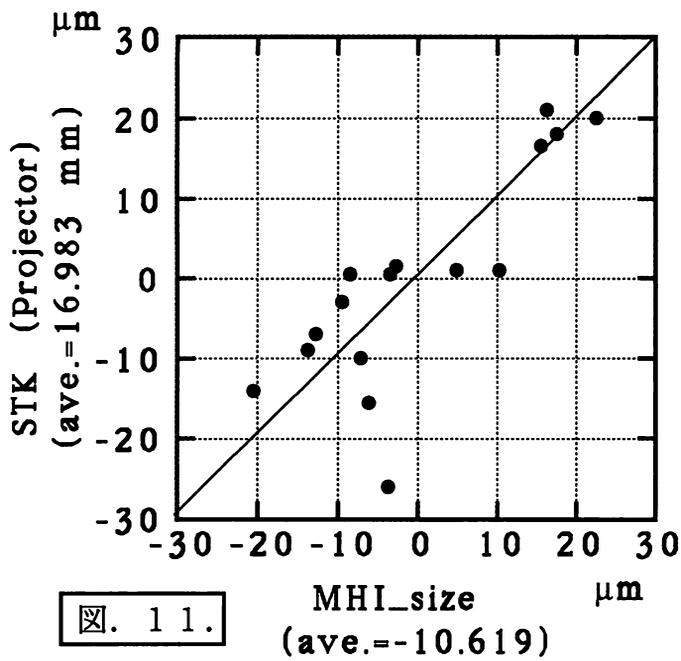


図11の横軸は名航のデータ、縦軸は住特金の投影器のデータである。名航のデータは相対値なので両者の平均値を0に合わせてプロットしてある。図12は住特金の顕微鏡のデータとの比較である。

両者共良い相関を示している。両データの差は±10μm程度である。

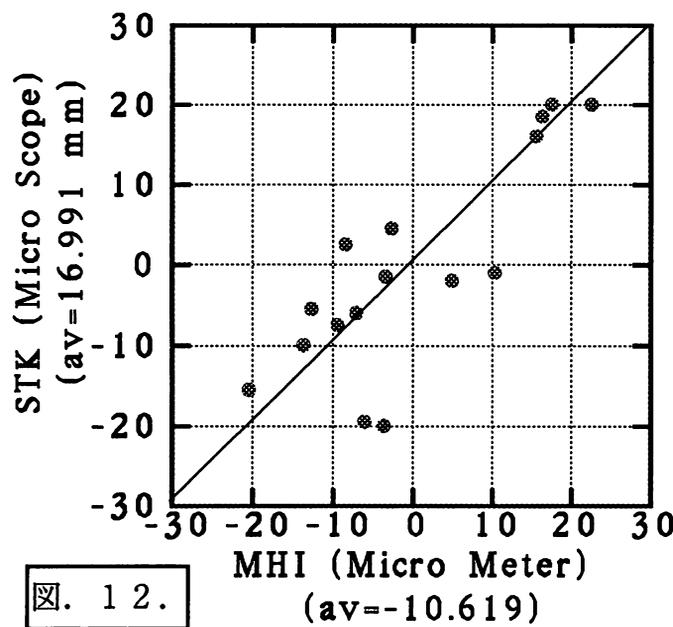
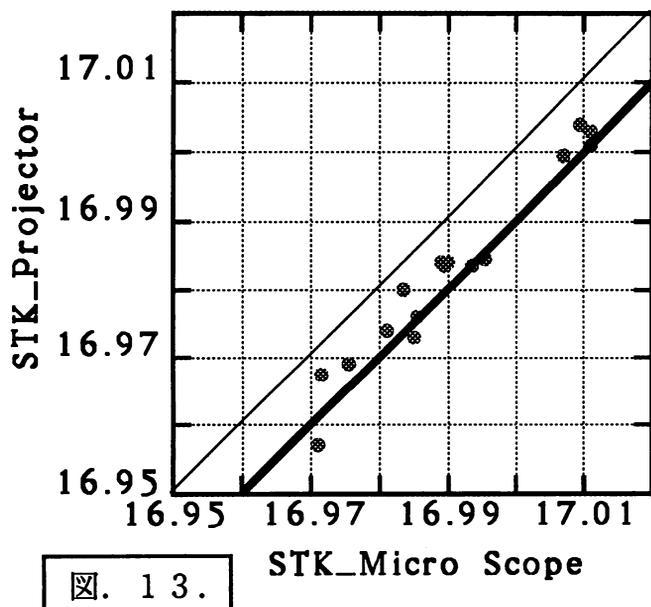


図13は住特金の顕微鏡（横軸）と投影器（縦軸）のデータの比較である。きれいに45度の直線上に乗っているが絶対値は顕微鏡の結果の方が10μm程投影器より大きくなっている。



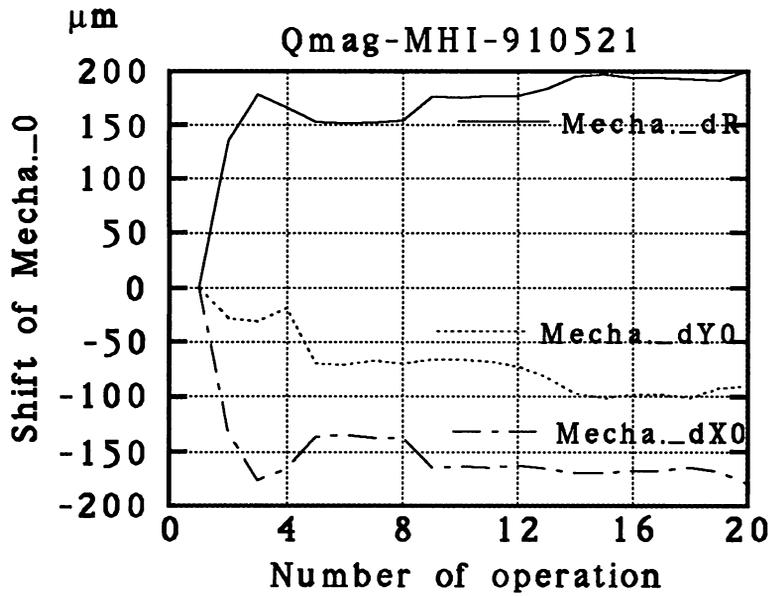


図. 14.

図14は磁場測定を繰り返したとき磁石の機械中心がずれた量をプロットしたものである。磁場測定器の測定テーブルの位置の再現性と等価である。

横軸は作業回数であり、縦軸はずれ量である。

$dR = \sqrt{dX0^2 + dY0^2}$ でずれの大きさを表している。最初はなれていなかったため、作業中にテーブルに衝撃等を与えたので大きくずれている。

治具のテーブルへの着脱を行うとずれは生じる。今回のデータからはどの時点でどの程度テーブルに力が加わったか定かでないので、取付け後単に上下運動のみ繰り返した時に生じる変動が許容範囲にあるか判断できない。従ってこれから再度実測する予定である。

図15は#3PQM（3個スタックなし）に3種類の厚さのシムを挟んだ時の磁石外周の出入りを測定した結果である。シム厚は108,114,125 μm である。図の軸上のデータが半径方向に磁化軸を持った磁石片のものである。

つぎに図15のデータからシム厚と磁石片の侵入量の関係を求めた。結果を図16に示す。横軸はシム厚、縦軸は2個の磁石片の侵入量の和である。侵入量を計算する際、基準となる位置は治具の真棒に接して半径方向に動かない他の磁石片の位置の平均値を使用した。磁石の侵入量の変化はシム100 μm あたり3.4mmであった。この値は計算結果の約2倍の移動量である。違いが生じた原因は次ページで検討する。

磁石片の出入りが0となるシム厚は126 μm でありこの値は計算結果(120 μm)と一致する。

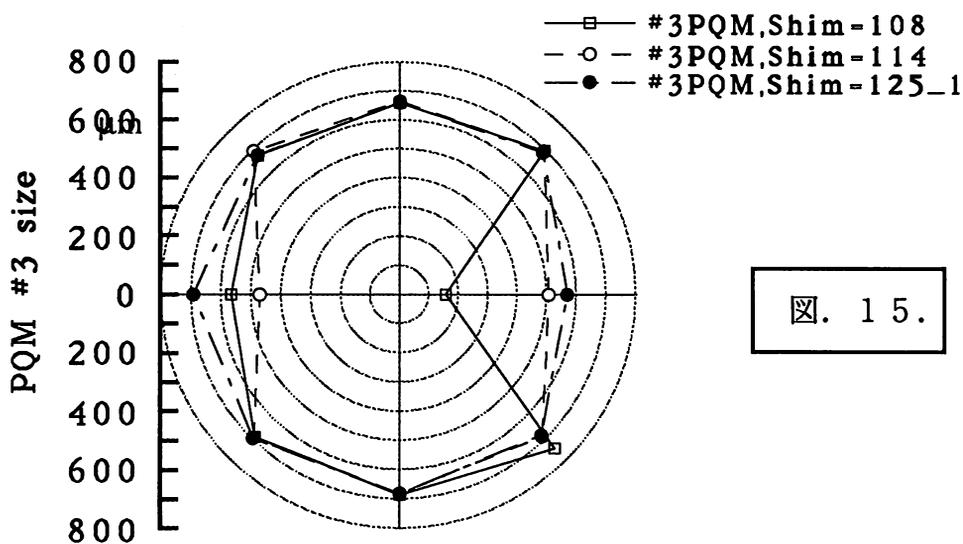


図. 15.

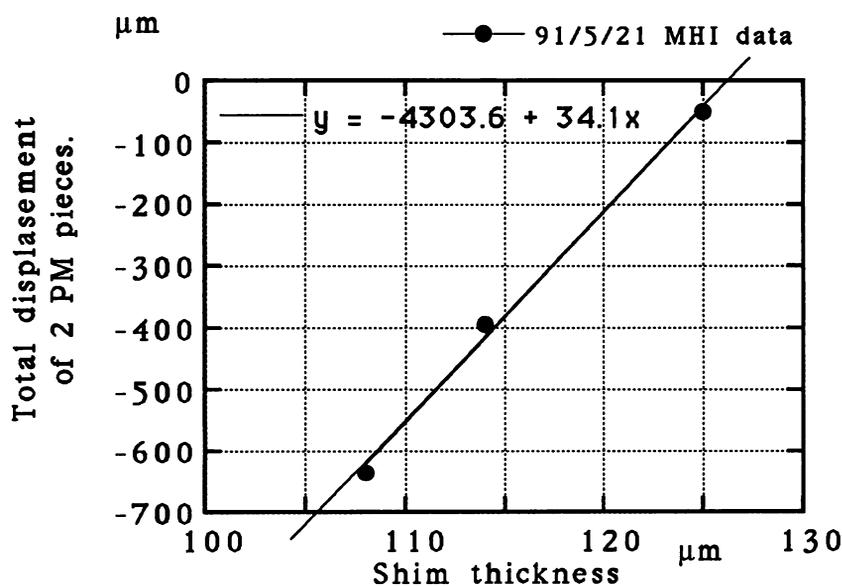


図. 16.

シム厚と磁石の侵入量の関係が実験値と計算値で約2倍違う原因について考察してみる。図17に計算結果を示す。磁石片が内部に侵入しているとき図のデータの傾きは

$$\text{Tilt(in)} = 1.4 \text{ mm}/100\mu\text{m}$$

しかし外に出してしまうと、

$$\text{Tilt(out)} = 3.3 \text{ mm}/100\mu\text{m}$$

となる。理由はこのレポートの付録に書いてある様に磁石片の当たる位置がテーパ上部の角から下部の角に移動するからである。計算機上の理想的な状況ではその移動は磁石の侵入量がほぼ0の近傍で起こる。今回の測定結果は前ページにあるように、

$$\text{Tilt(exp)} = 3.4 \text{ mm}/100\mu\text{m}$$

であり、Tilt(out)と一致している。

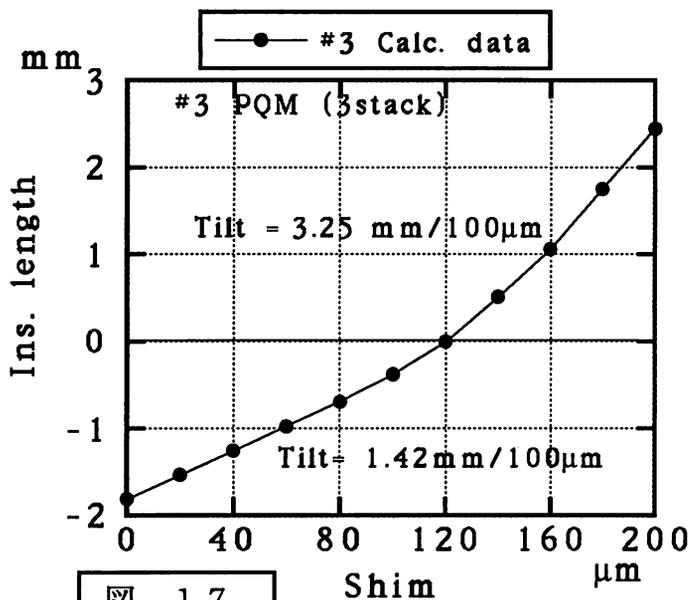


図. 17.

故に、3個スタックなしで組んだ場合自由度が大きいので内部に侵入する2個の磁石片の両隣の磁石の配列角度が変化し、最初からTilt(out)の状態であったと推定される。図18に3個スタックを使用した#1 P Q Mの実験値と計算結果を示す。実験と計算値は比較的良く一致している。これは先の推論を指示する結果である。

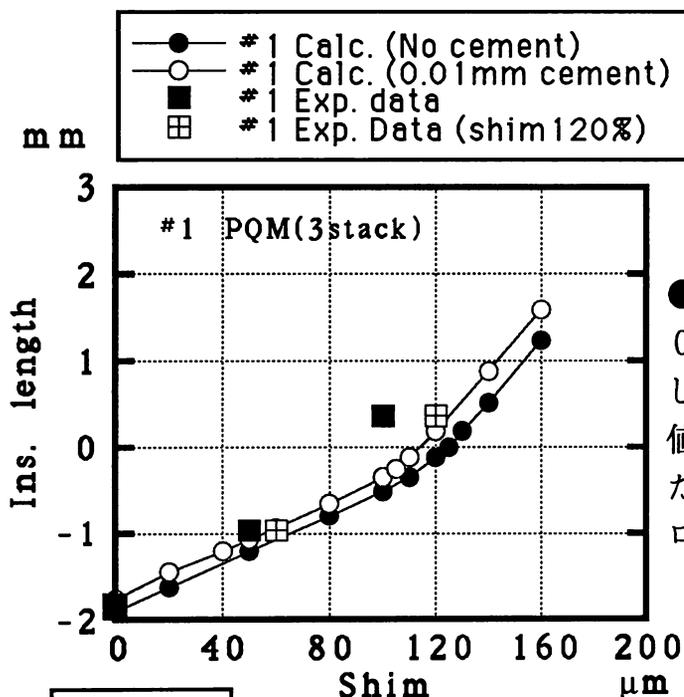


図. 18.

●は3個スタック間の接着材の厚さを0と仮定した場合、○はそれを10μmとした場合の計算値である。■は実験値。シム厚が正確に定まっていなかったので20%増しと仮定した場合を□でプロットした。

3 P Q Mに125 μ mのシムを入れて組み上げた後、磁化軸が半径方向を向いた磁石片1個を外へ一定量抜き出し（他は固定したまま）、Q0のずれを測定した。図19は磁石のずれた方向へのQ0のずれを、図20は磁石のずれと直交する方向へのずれを示す。

図19には2回の測定結果（直交する2個の磁石を各々使用）がプロットしてある。両者の傾きの平均から、Q0のずれは磁石片のずれ量の約6%であり非常に小さい事が確認された。PANDIRAの計算結果（5%）と良く一致している。この結果は1個の磁石片の効果は大体全個数16個分の1であることを意味する。影響が小さいので磁石の組立時に配列位置をずらせてQ0を合わせることは難しい。Q0の位置は殆ど個々の磁石片の特性で決まってしまう。

図20に示す磁石移動と直交方向にはQ0の移動はない。

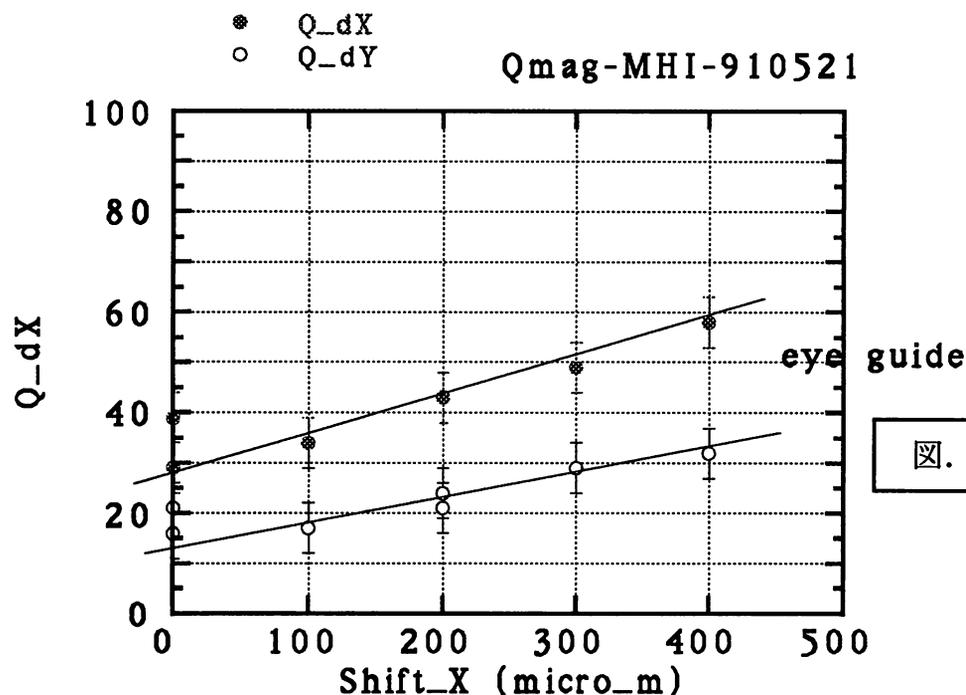


図. 19.

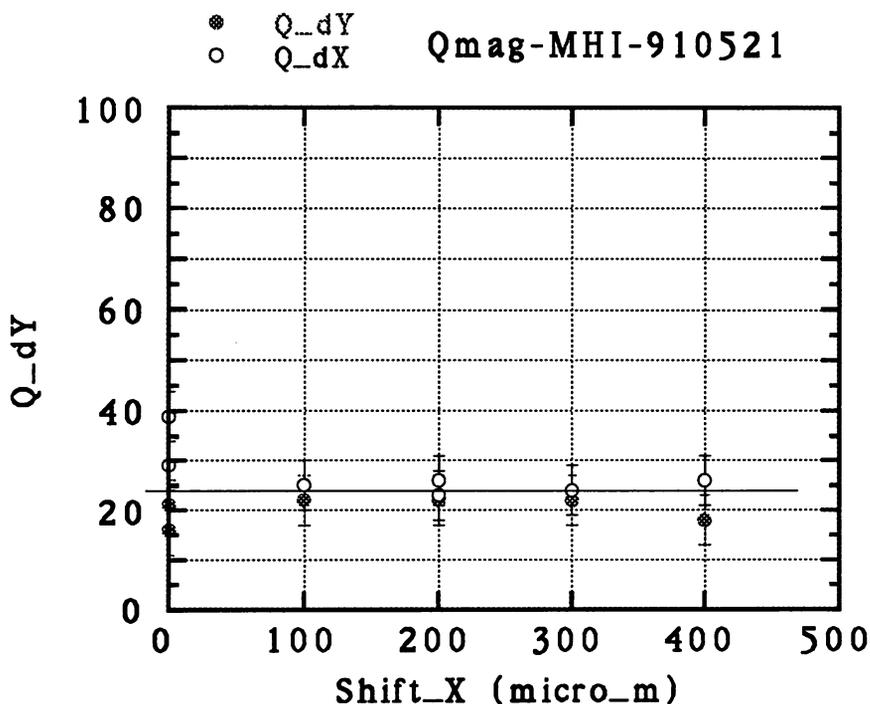


図. 20.

Q0を求めるために使用したサーチコイルの出力の絶対値から磁場強度が計算できる。まず以下に計算に使用した記号の説明をしておく。

x_0, y_0 : サーチコイルの回転中心

r_1, r_2 : サーチコイルの回転中心からの半径 ($r_1 \neq r_2$)

n : コイルの巻数

$B = (a y, a x)$: 4極磁場の成分 (a : 磁場勾配 T/m)

l : 磁石有効長

ω : サーチコイルの回転角速度

計算するとトータルフラックス ϕ は、

$$\phi = (nla/2) (r_2^2 - r_1^2) \cos(2\omega t) + (nla) (r_1 + r_2) [x_0 \cos(\omega t) - y_0 \sin(\omega t)]$$

$$\therefore v = -d\phi/dt = (nla) (r_2^2 - r_1^2) \omega \sin(2\omega t) + (nla) (r_1 + r_2) \omega [x_0 \sin(\omega t) + y_0 \cos(\omega t)]$$

第1項が4極磁場による起電力、第2項が2重極成分である。測定されるのは振幅であり、その実測値は 4極磁場： $V_4(\text{exp.}) = (nla) (r_2^2 - r_1^2) \omega = 10.4 \times 10^{-3}$ (volt)

$$2\text{極磁場} : V_2(\text{exp}) = (nla) (r_1 + r_2) \omega = 16.8 \quad (\text{volt/m})$$

r_1, r_2 の設計寸法は3.5mmと4.2mmである。4極磁場の計算には式から分かる様に $(r_2 + r_1)$ と $(r_2 - r_1)$ が必要であるが差は2極磁場の変化率から求めた実測値を使用する。和は誤差の相対値が小さいので設計寸法を使用する。下図が磁石を移動しながら測定した2極磁場の変化率 V_2 の測定結果である。補正は2.00倍、従って磁場 $V_2 = 8.42 \times 2.0 = 16.8 \times 10^{-3}$ 。 $\therefore V_4/V_2 = (r_2 - r_1) = 0.62 \times 10^{-3}$ (m) 。 $\omega = 2\pi \times 8\text{Hz}$, $n=7$ なので

$$V_4(\text{calc}) = 1.68 \times 10^{-3} \times (la) \text{ (volt)} = V_4(\text{exp}) \quad \therefore (la) = 6.19 \text{ T}$$

必要な磁場は5.52Tであるので、実測値は約10%強く十分な事が分かる。磁場勾配は $l=30\text{mm}$ とすると $a=206 \pm 3 \text{ T/m}$ となる。(誤差の内訳は、 $r_1 + r_2$ が1%、電圧測定値 V_4 、 V_2 はともに0.5%、故に全体で $\pm 12\%$) この誤差範囲内で実験値とPANDIRAの計算結果($a=205 \text{ T/m}$, 磁石片間の隙間を16箇所とも50 μm と仮定、磁石性能はカタログ値を使用)は良く一致している。

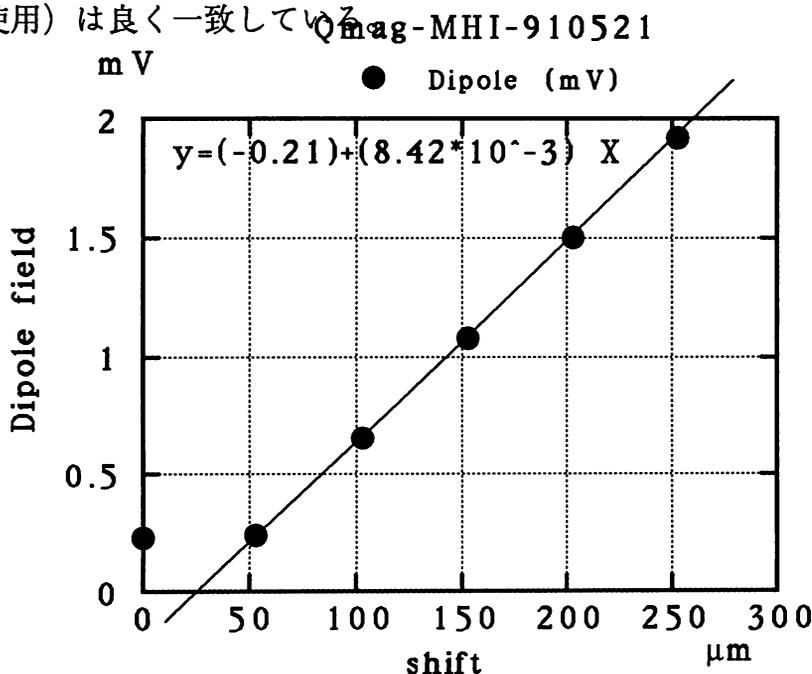
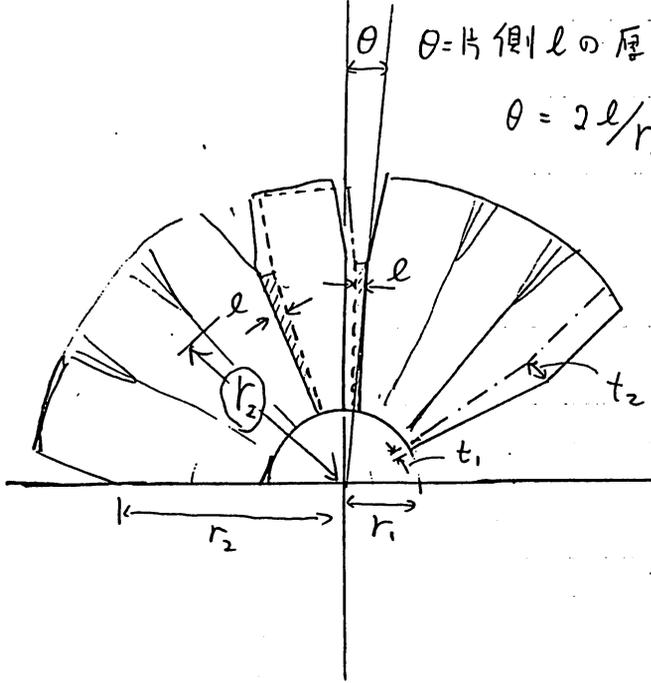


図. 21.

'91 4/4

①

図-1



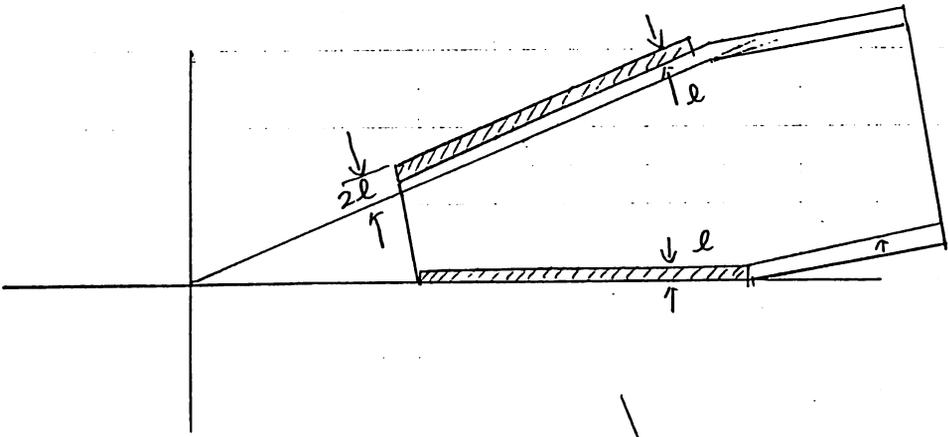
θ = 片側 l の厚さの \sin を入れた事による回転移動量

$$\theta = 2l/r_2$$

3個スタックのテ-パ-部角の移動

$$\begin{cases} t_2 = r_2 \theta = 2l \\ t_1 = r_1 \theta = 2l r_1/r_2 \end{cases}$$

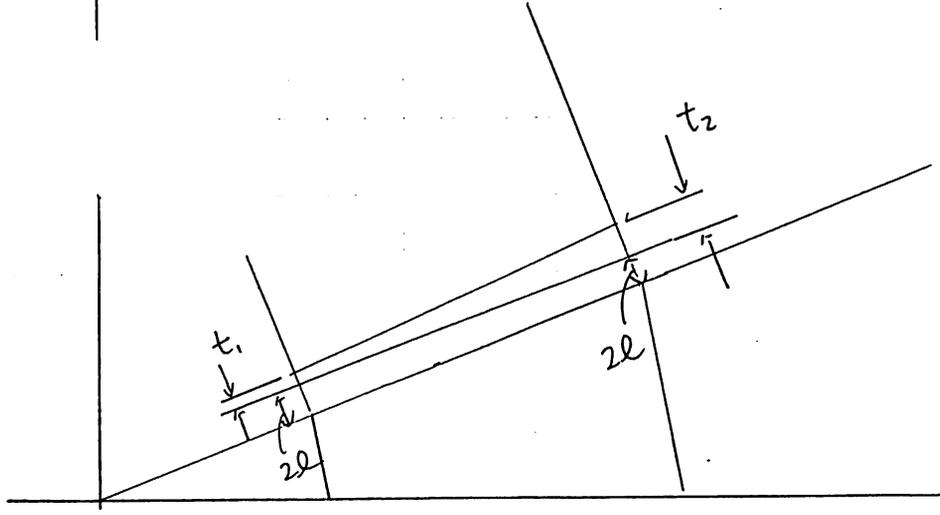
図-2



挿入する磁石片の角の移動量は
テ-パ-部の
位置によらず

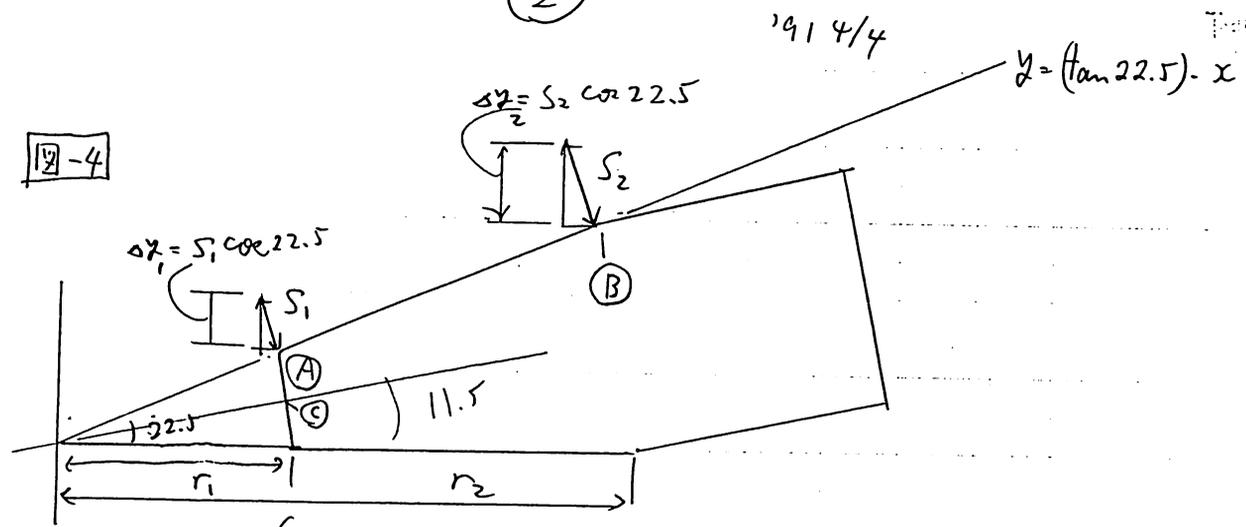
$$2l$$

図-3



(2)

12-4



$$\begin{cases} S_1 = 2l + t_1 = 2l (1 + r_1/r_2) \\ S_2 = 2l + t_2 = 4l \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_1 = 7 \text{ mm} \\ r_2 = 19 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\therefore \Delta x = \frac{\Delta y}{\tan 22.5}$$

$$\therefore \Delta x_1 = \frac{S_1 \cos 22.5}{\tan 22.5} = \frac{\cos 22.5}{\tan 22.5} 2l (1 + r_1/r_2) = 2.23 \times 2l \times 1.37 = 6.1 \cdot l$$

$$\Delta x_2 = \frac{S_2 \cos 22.5}{\tan 22.5} = 2.23 \times 4l = 8.9 \cdot l$$

③点の半径方向の変化に対するには $1/\cos 11.25$ を乗ずる。

$$\begin{cases} \Delta r_1 = \Delta x_1 / \cos 11.25 = 6.2 l \\ \Delta r_2 = \Delta x_2 / \cos 11.25 = 9.1 l \end{cases}$$

2個の磁石片の合計移動は2倍すべし。

$$\begin{cases} \Delta r_1' = 12.4 l \\ \Delta r_2' = 18.2 l \end{cases}$$

つまりこの厚さの磁石の侵入量の内分は、磁石の格納位置がA点からB点に変化したと、値が増加する。

③

'91 4/4

シム厚 100 μ m Z² 出入り 0 と仮定すると、下図の様に?

