U.D.C. 621.318.3:629.4.027

吸引式磁気浮上車用電磁石の特性計算

Characteristics of Magnets for Electro-Magnetic Levitation Vehicles

高橋孝夫* *Takao Takahashi*
白倉利治* *Toshiharu Shirakura*

都心と郊外，あるいは空港を高速で結ぶ輸送機関として，車載されている常電導電磁石と軌道に置いた鉄製レールとの間に働く磁気吸引力を利用して，車体を非接触で浮上支持する方式の開発が検討されている。

吸引式磁気浮上車に用いられる電磁石の磁界及び発生電磁力を算定するために，鉄の非直線性を考慮した計算プログラムを開発するとともに，モデル電磁石を作って実測を行ない計算方法の妥当性を実証した。

次に，電磁石及びレールの形状，寸法を変えて，磁界，電磁力及び電磁石重量と吸引力の関係を調べ，浮上用電磁石の最適化を図る条件を明確にした。

1 緒　　言

粘着駆動の限界を超える超高速化，振動騒音の低減及び保守点検の省力化に重点を置き，車両を軌道に対して非接触で浮上案内支持及び推進する浮上車両の研究開発が各国で行なわれている。磁気浮上の中で広く検討されているのは，誘導反発方式と磁気吸引方式の二つである。

誘導反発方式は，軌道に置いた導体に誘起されたうず電流と車載された超電導電磁石との間に働く電磁反発力を利用するものである。その特長は，無損失で強大な起磁力を有する超電導電磁石を使用することにより，車両と軌道間のクリアランスが大きくとれる点にある。従って，時速350km以上の超高速で長距離を走行する車両に適していると考えられる。我が国では日本国有鉄道を中心に研究開発が進められている[1]。

一方，磁気吸引方式は鉄製レールと車上常電導電磁石との間に働く磁気吸引力を利用するもので，ギャップ制御は不可欠であるが，超電導とは異なり従来の技術を流用し得る。しかし，軌道と電磁石間のクリアランスが小さいため，超高速よりは時速300km以下で比較的近距離の，例えば郊外～都心，空港～都心間といった輸送機関用としてその適用が検討されている。

吸引式磁気浮上車については，ギャップ制御，走行時軌道レールに発生するうず電流損による磁気制動力などに関しては基礎的な研究発表[2][3]があるが，電磁石形状と磁界及び発生電磁力の関係を定量的に検討したものは少ない。ここで，鉄の非直線性を考慮した磁界計算プログラムを用いて，吸引式磁気浮上車用電磁石の最適化条件を研究した。

2 浮上原理

吸引式磁気浮上車の断面概念図及び浮上原理図を**図1**に示す。車上に置いたU字形の電磁石を軌道側の鉄製レールに対向して置き，電磁石とレールとの間に働く磁気吸引力で車体

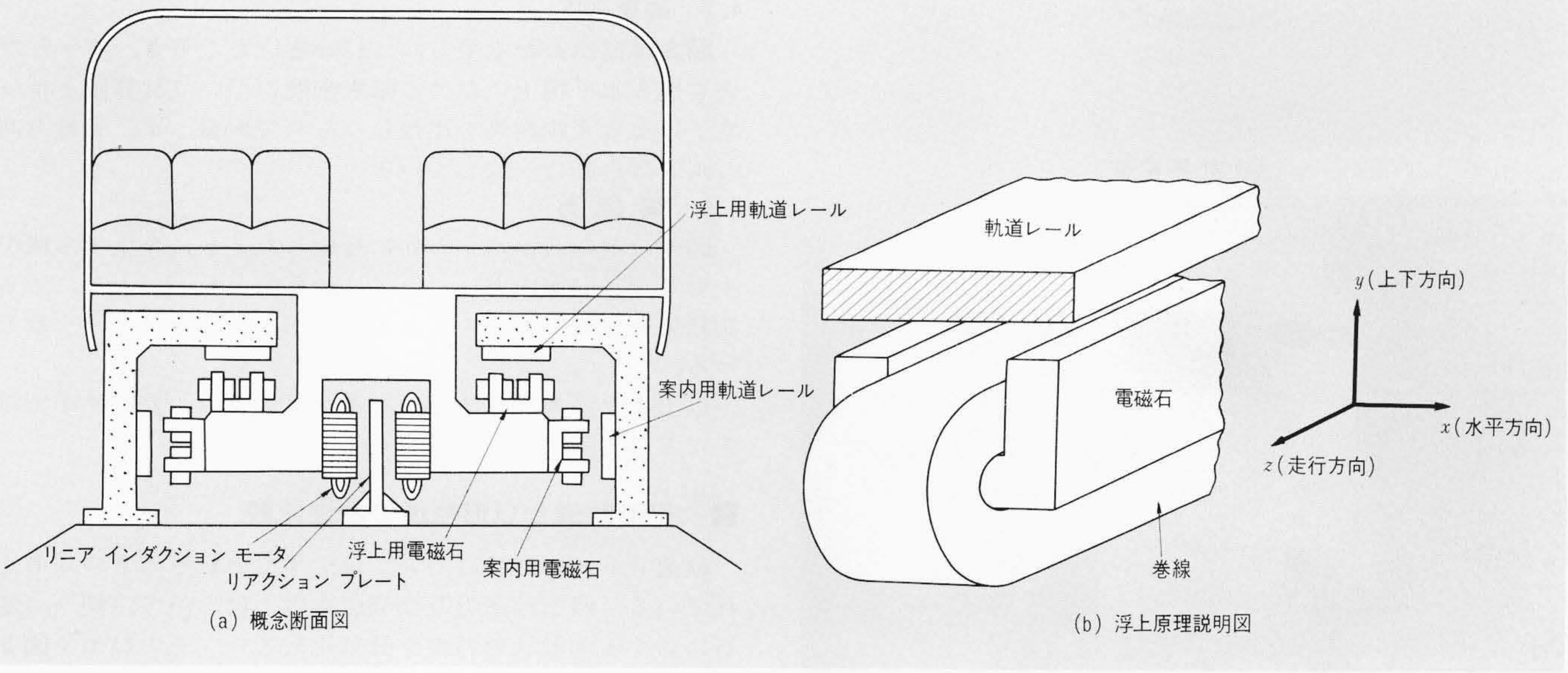


図1　吸引式磁気浮上車　浮上用及び案内用電磁石を備え，リニア インダクション モータで推進する磁気浮上車の一構成例を示す。

* 日立製作所日立研究所

をつり下げ支持する。電磁石がレールに近づくと吸引力は増大し，更にますます近づき，反対に遠ざかると吸引力は小さくなり重力によりレールからますます遠ざかる。従って，所定の吸引力及び所定のクリアランスを確保するために電磁石の通流電流を制御する必要がある。

水平方向の案内については，案内専用の電磁石を用いる方式のほかに，浮上用の軌道レールをU字形にし磁極面に水平な吸引力を利用する方式が知られている。

3 磁気特性計算法(4)

吸引式磁気浮上車に用いられる電磁石は，磁気制動力を低減するために幅に比べて走行方向に十分長くなっている。従って，走行方向に垂直な面で切った x，y の二次元直角座標で考えることができる。励磁電流は走行方向(z 方向)のみとみなせるから，マクスウェル(Maxwell)の基礎電磁方程式

$$\mathrm{rot}\frac{1}{\mu}\mathrm{rot}A=i \quad \cdots\cdots(1)$$

は次式のように表示できる。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_Z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_Z}{\partial y}\right)=-i_Z \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで，A_Zはベクトル ポテンシャル，μは透磁率，i_Z は電流密度である。x，y はそれぞれ左右及び上下方向を意味する。直流電磁石の基本特性算出を主目的としているため，i_Z は直流分のみとし，制御電流の変化及び走行時に発生するうず電流は含めない。

(2)式を差分表示し，緩和法による繰返し収束計算を行なった。このとき，磁性材の μ の非直線性を考慮した。磁束密度 B はベクトル ポテンシャル A より，$B=\mathrm{rot}\ A$ として計算できるから，x，y 方向の磁束密度はそれぞれ，

$$B_x=\frac{\partial A_Z}{\partial y} \qquad B_y=-\frac{\partial A_Z}{\partial x} \quad \cdots\cdots(3)$$

として求めることができる。

電磁石の発生する電磁力は，軌道レール又は電磁石を囲む面に働くマクスウェル応力の総和として計算される。単位面積当たりに作用する x，y方向のマクスウェル応力 P_x，P_y(5)は，

$$P_x=\frac{1}{2\mu}(B_x^2-B_y^2)\cos(n,\ x)+\frac{B_xB_y}{\mu}\cos(n,\ y) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$P_y=\frac{1}{2\mu}B_xB_y\cos(n,\ x)+\frac{1}{2}(B_y^2-B_x^2)\cos(n,\ y) \quad \cdots\cdots(5)$$

で与えられる。ここで，$\cos(n,\ x)$，$\cos(n,\ y)$はそれぞれ面の外向き法線と x 軸，y 軸がなす角の余弦である。

従って，電磁石が走行方向単位長当たり発生する軌道レール面に垂直な吸引力 F_y(以下，吸引浮上力と呼ぶ)と，レール面に平行な吸引力 F_x(以下，吸引案内力と呼ぶ)は，(4)，(5)式を軌道レールを囲む面に沿って数値計算による周積分を行ない，

$$F_y=\oint P_y dl \quad F_x=\oint P_x dl \quad (\mathrm{N/m}) \quad \cdots\cdots(6)$$

として計算した。

4 計算と実測の比較

モデル電磁石について計算と実測の比較を行なった。

4.1 磁界分布

図2 は電磁石が水平方向に22mm変位した場合の磁界マッピングの結果である。同図(a)は等ベクトル ポテンシャル線をプロットした計算結果であり，(b)は磁粉法で求めた実測結果である。ギャップにおける磁束の流れが良好に一致していることが分かる。

4.2 磁束密度

図3 は電磁石が水平方向に11mm変位したとき，ギャップ中央を通る水平線上における磁束密度について計算値とホール素子による実測結果を比較したものである。x，y 軸方向とも両者は良好に一致している。

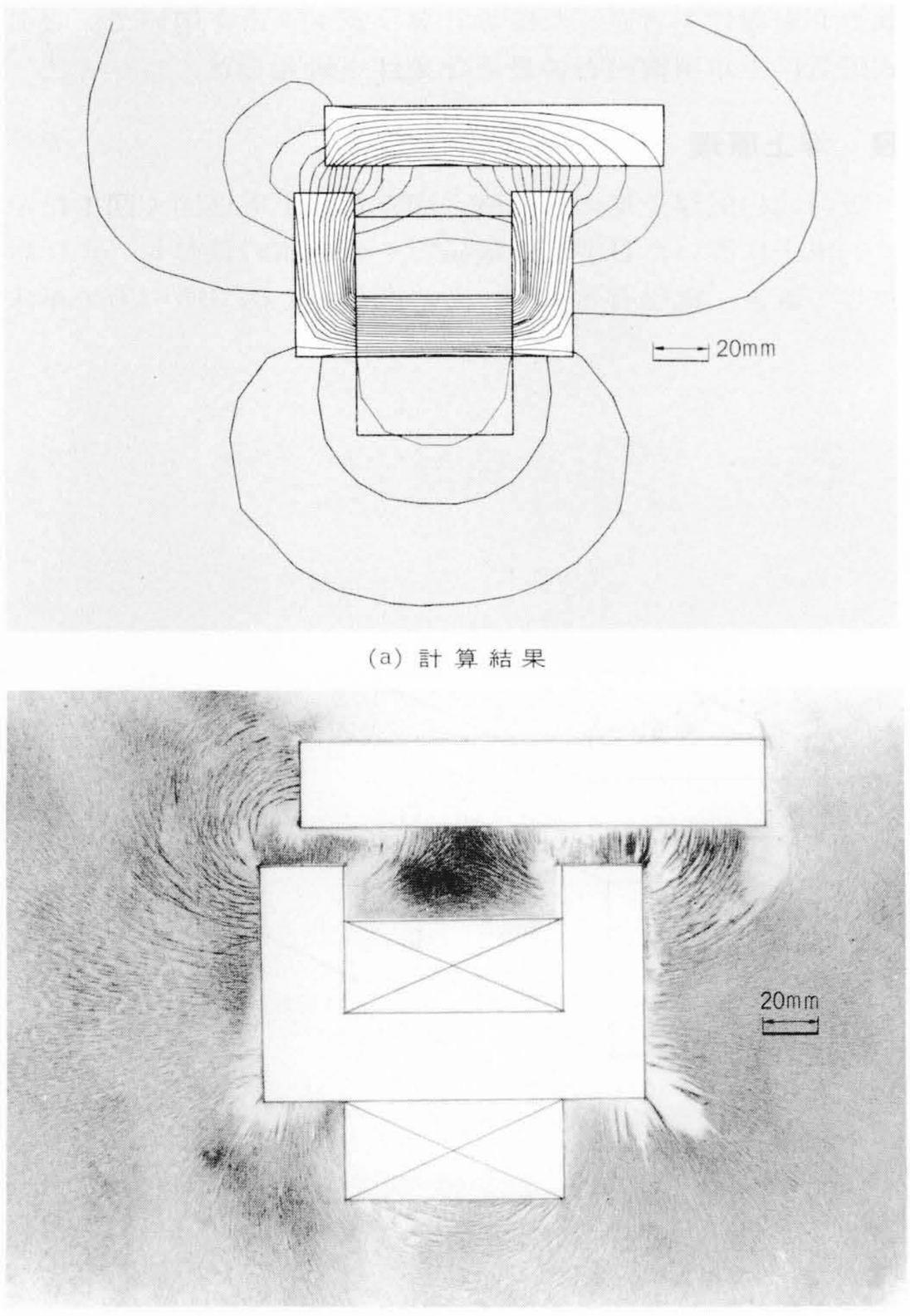
4.3 電 磁 力

図4 は電磁石が水平方向に変位したときに発生する吸引浮上力及び吸引案内力について，計算値とロード セルによる実測結果を比較したものである。実測と計算とはよく一致している。

以上より，本計算法及び計算プログラムの妥当性が実証できたと言える。

5 平形軌道とU形軌道の特性比較

軌道レールの形状については，平形とU形のものが考えられている。吸引浮上力及び吸引案内力について，同一の電磁石に対する両形状の特性を計算比較した。その結果を**図5** に示す。吸引浮上力についてみると，平形軌道のほうが大きく，水平方向変位に対する浮上力の低下も小さい。一方，吸引案内力についてみると，U形軌道のほうが大きく，特に小さな変位に対する復元性能の優れていることが分かる。このように，U形軌道では浮上用電磁石を案内用に兼用し得る可能性



(a) 計 算 結 果

(b) 実 測 結 果

図2 磁界マッピング(Δx=22mm変位したとき) 磁束の流れ方は，計算と実測結果が良好に一致している。

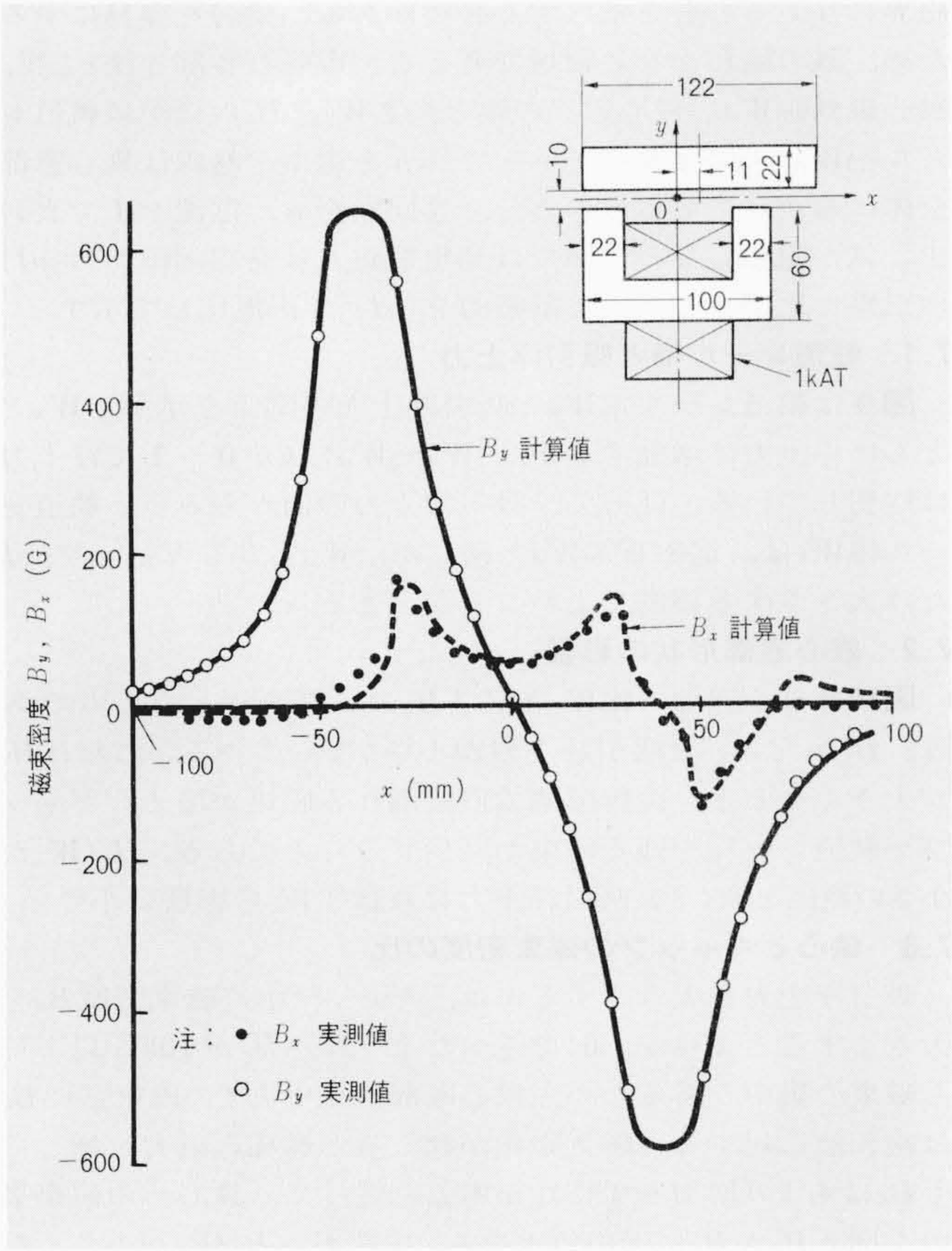


図3　磁束密度　ギャップ中央水平線上の磁束密度を示す。

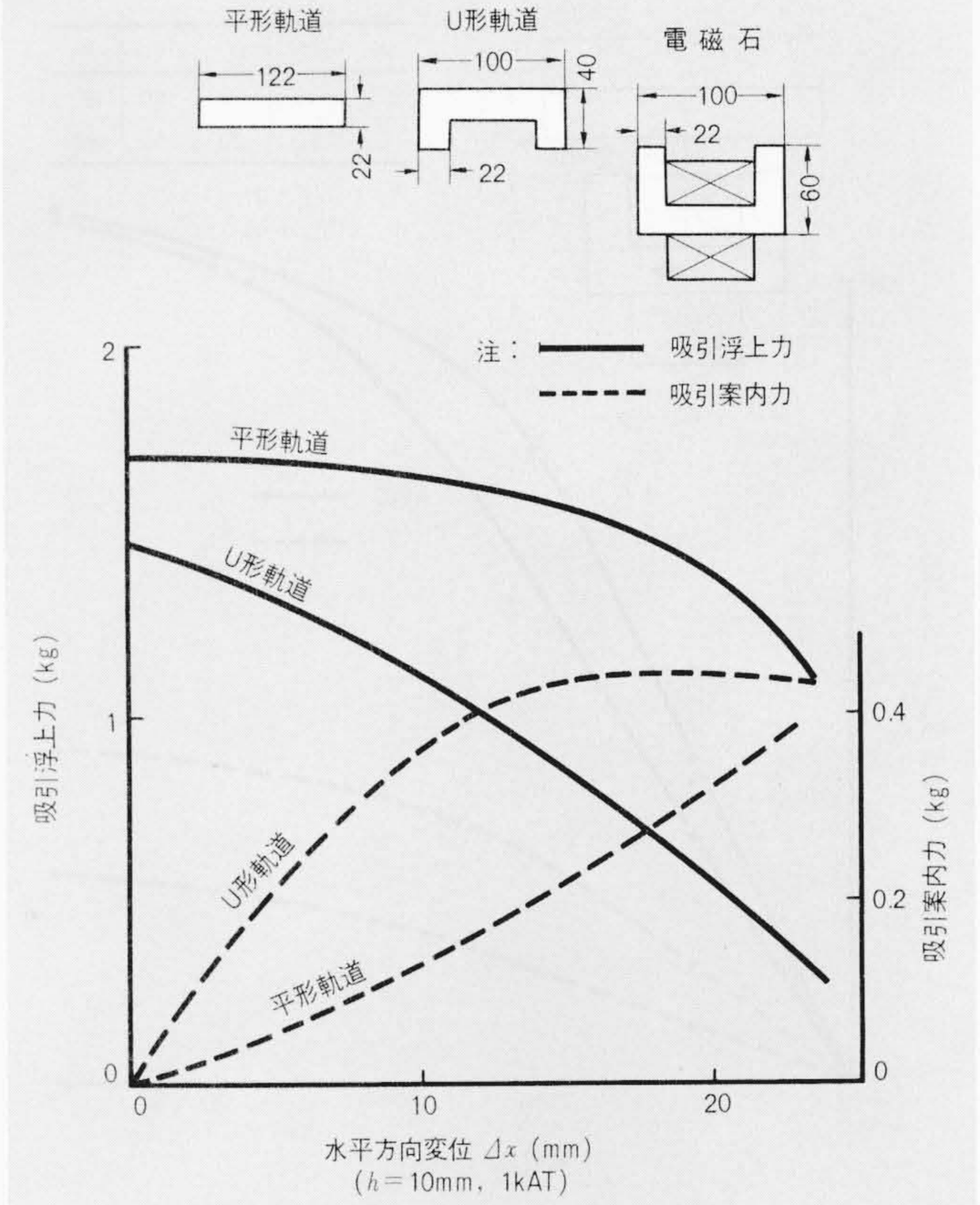


図5　平形軌道とU形軌道の比較　同一条件の電磁石に対して平形軌道のほうが大きな吸引浮上力が得られる。

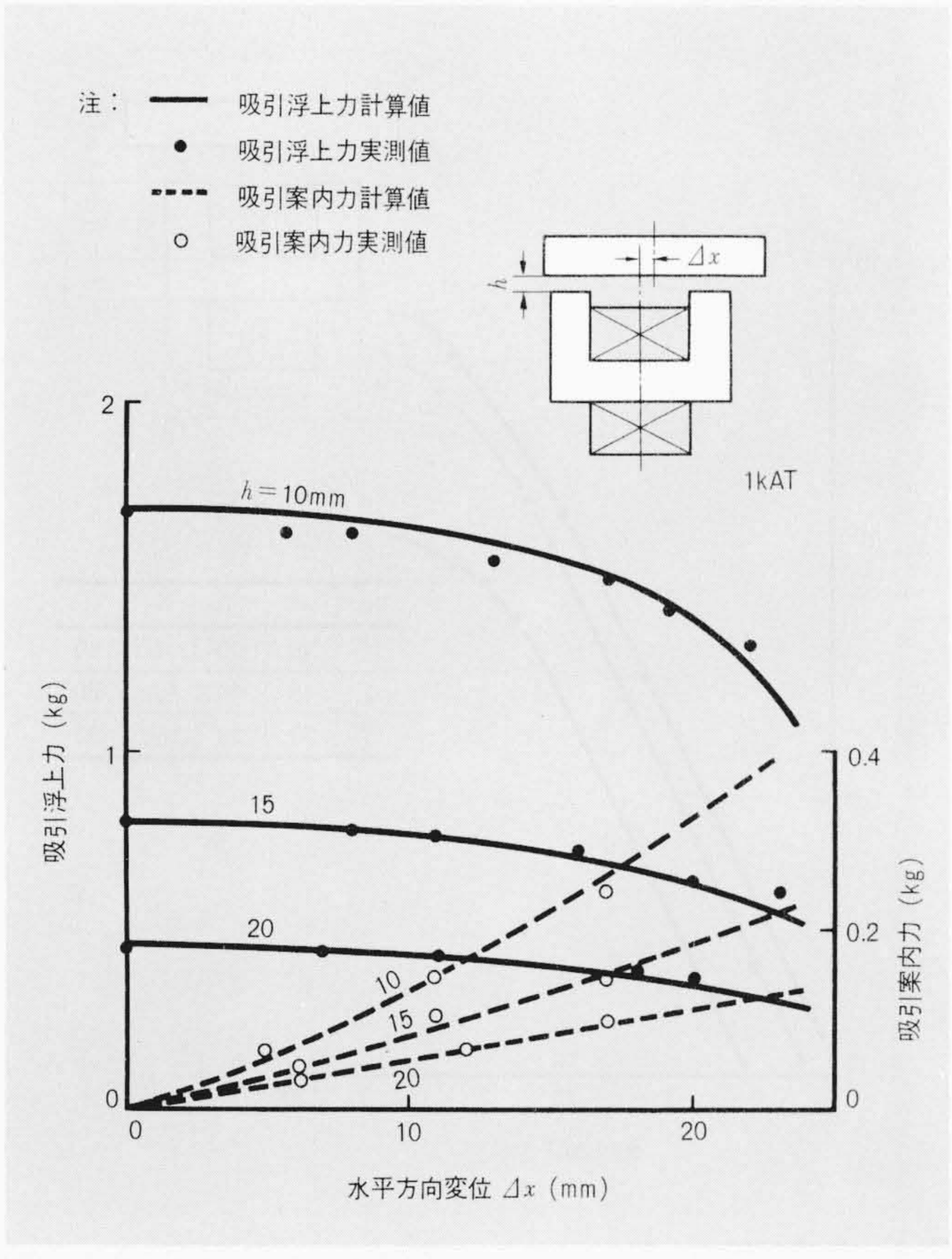


図4　発生電磁力　変位に対しては，復元吸引力が発生する。

があるが，制御面から浮上系と案内系を独立すべきだとの意見もある。基礎検討の段階では，平形とU形の優劣は決めにくく，車両運動，磁気制動力を含めた走行特性の実証検討が必要である。

本稿では紙幅の関係から平形軌道について行なった電磁石各部寸法の影響及び最適寸法の検討結果を示す。

6　磁気飽和特性

図6 は巻線の起磁力ATに対するギャップ，及び鉄心底部継鉄における磁束密度B_g，B_cをそれぞれ示す。B_cが約15kGで飽和するとその影響を受けて，B_gはより低い磁束密度で飽和し始めることが分かる。飽和しない領域では，B_gはギャップ長をl_gとしたときに従来知られている$B_g=(\mu_0 \mathrm{AT})/(2\,l_g)$にほぼ一致している。ここで，$B_g$が$B_c$よりも半分以上小さいことに注意したい。これは**図7** に示す鉄心各部分を通る磁束量の計算値から明らかなように，ギャップ近傍に比べて巻線が巻かれている鉄心底部継鉄中心に磁束が集中する結果である。浮上力はB_g^2にほぼ比例するから，性能の良い電磁石を作るには，形状及び巻線位置を考えてB_gをできる限りB_cに近づける必要がある。

図8 は巻線起磁力ATと浮上力の関係を示す。ATが小さい範囲では，浮上力はATの二乗に比例して増加する。しかし，大きなATに対してはATに対する浮上力の増加が飽和することが分かる。これは前述したように，鉄の飽和のためギャップでの磁束密度がATに比例して増加しないためである。

7　電磁石各部寸法の影響

電磁石の最適化を図るには，電磁石各部寸法が電磁力及び

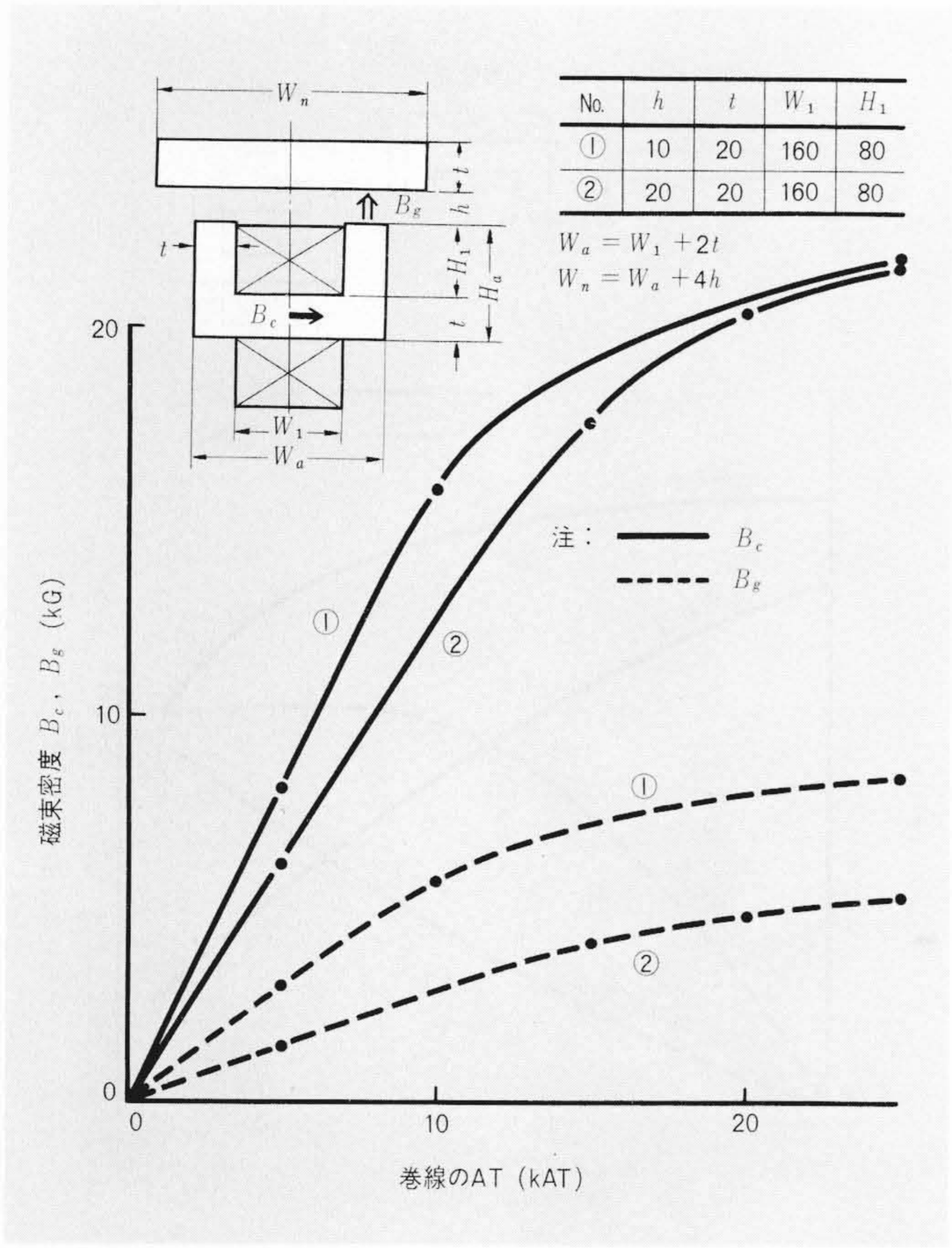


図 6　巻線起磁力と鉄心及びギャップ中の磁束密度　ギャップ中の磁束密度に比べて，鉄心中の磁束密度は 2 倍以上大きい。

磁界に与える影響を把握する必要がある。検討を容易にするため，鉄の飽和がない領域で考える。電磁石各部寸法として，鉄心継鉄幅W_a，鉄心窓部の幅と高さW_1，H_1のほかに軌道レール幅W_n，厚さt及びギャップ長hを選ぶ。巻線は鉄心窓部全体に巻かれているものとし，巻回数をn，電流をIで表わす。鉄が飽和しない領域では発生電磁力は巻線起磁力($=nI$)の二乗に比例するから，電磁力を$(nI)^2$で正規化して示す。

7.1　軌道レール幅と吸引浮上力

図 9 は軌道レール幅W_nと吸引浮上力の関係を示す。W_nとともに浮上力は増加するが，$(W_n - W_a)/h$が 0 ～ 1 で浮上力は飽和している。従って，吸引浮上力の面からみると軌道レール幅W_nは，電磁石幅W_aと同じか，W_aよりもギャップ長hだけ大きくする程度でよいことが言える。

7.2　鉄心窓部形状の影響

図10は鉄心窓部の幅W_1と高さH_1の影響を調べたものである。H_1が大きいと吸引浮上力が小さくなっている。これはH_1が大きくなると，両脚部間で直接漏れる磁束が増え，ギャップ～軌道レールを通る磁束が減少するためである。H_1/W_1が小さい範囲を除くと，吸引浮上力に及ぼすW_1の影響は小さい。

7.3　鉄心とギャップの磁束密度の比

吸引浮上力を大きくするには，ギャップ中の磁束密度B_gを大きくするとよいが，6. で述べたように，B_gが 10kG 以下でも磁束の集中があるため，鉄心底部継鉄中央での磁束密度B_cは飽和値に対する。磁気飽和が起こると巻線起磁力を増してもB_gはあまり増加せず特性が劣る。従って，鉄心への磁束集中を抑えB_cがB_gに近い値となる，すなわちB_c/B_gが小さくなる電磁石形状を検討する必要がある。

図11は軌道レール幅W_nがB_c/B_gに与える影響を調べたもの

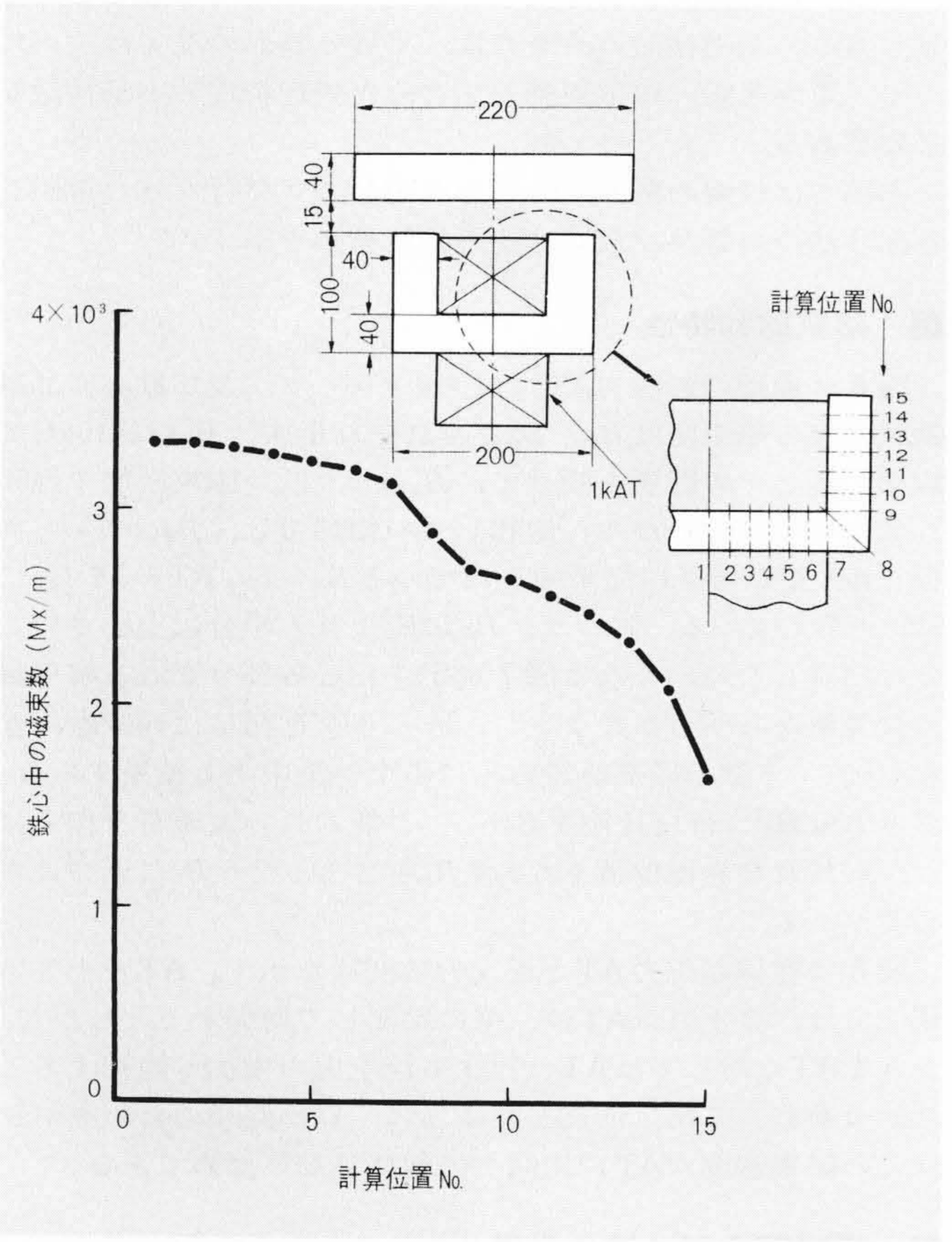


図 7　鉄心中の磁束量　鉄心底部継鉄中央(計算位置No. 1)に磁束が集中する。

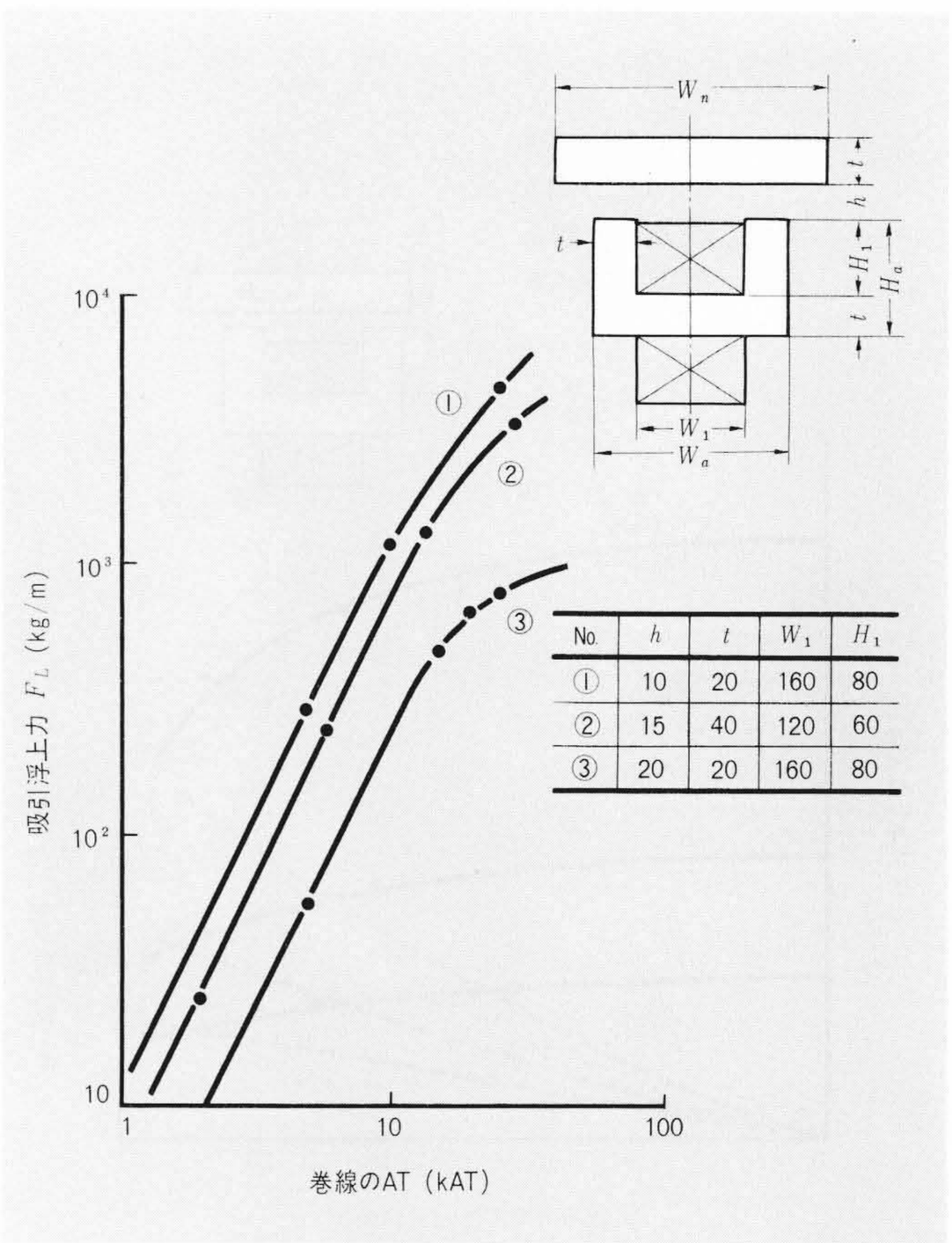


図 8　巻線起磁力と吸引浮上力　巻線起磁力ATが小さいときは，吸引浮上力はATの二乗に比例するが，大きくなると磁気飽和の影響を受ける。

である。$(W_n-W_a)/h$が0近傍でB_c/B_gは極小となる。これは7.1で示した吸引浮上力の最適値とも一致している。

図12は鉄心厚さtの影響を調べたものである。tを厚くするとB_c/B_gは減少し，t/hが2～4で飽和する。B_c/B_gの飽和値は2～3となっている。

図13は鉄窓部の幅W_1と高さH_1の影響を調べたものである。H_1/W_1が0.5近傍でB_c/B_gが極小となることが分かる。

8　吸引浮上力と電磁石重量及び励磁電力

電磁石の性能を決める要素として，前述した電磁特性のほかに軽量で励磁電力が小さいことが要求される。電磁石が走行方向に十分長いものとすると，電磁石重量を単位長当たりで評価でき，次式で表示できる。但し，鉄心の厚さは一様とし，巻線は窓部全体に巻かれているものとする。

$$M=(W_1 t+2H_1 t+2t^2+2W_1 H_1 k)\gamma_c\times10^{-3}(\mathrm{kg/m}) \quad \cdots\cdots(7)$$

ここで，W_1：鉄心窓部の幅（m）　　η_w：巻線の占積率
H_1：鉄心窓部の高さ（m）　　γ_c：鉄心材料の比重
t：鉄心の厚さ（m）　　γ_w：巻線材料の比重
$k=S_f\gamma_w/\gamma_c$

単位長当たりの浮上力F_Lはギャップ部の磁束密度B_gより次式で近似できる。

$$F_L=tB_g^2/(9.8\mu_0) \quad \cdots\cdots(8)$$

B_gは巻線起磁力nIとギャップ長hから，

$$B_g=nI\mu_0/(2h) \quad \cdots\cdots(9)$$

で与えられる。電流密度をσとすると，所要の巻線断面積S（$=W_1 H_1$）は，

$$S=(2B_g h)/(\mu_0\sigma\eta_w) \quad \cdots\cdots(10)$$

となる。巻線の固有抵抗をρ_wとすると単位長当たりの励磁損失Pは，

$$P=(nI)^2(2\rho_w)/(S\eta_w) \quad \cdots\cdots(11)$$

となる。従って，(7)，(8)，(11)各式からF_L/M及びP/F_Lは，

$$F_L/M=(B_g^2\times10^3)t/(9.8\mu_0\gamma_c)(W_1 t+2H_1 t+2t^2+2W_1 H_1 k) \quad \cdots\cdots(12)$$

$$P/F_L=(4.0\times9.8)(\rho_w\sigma h)/(B_g t) \quad \cdots\cdots(13)$$

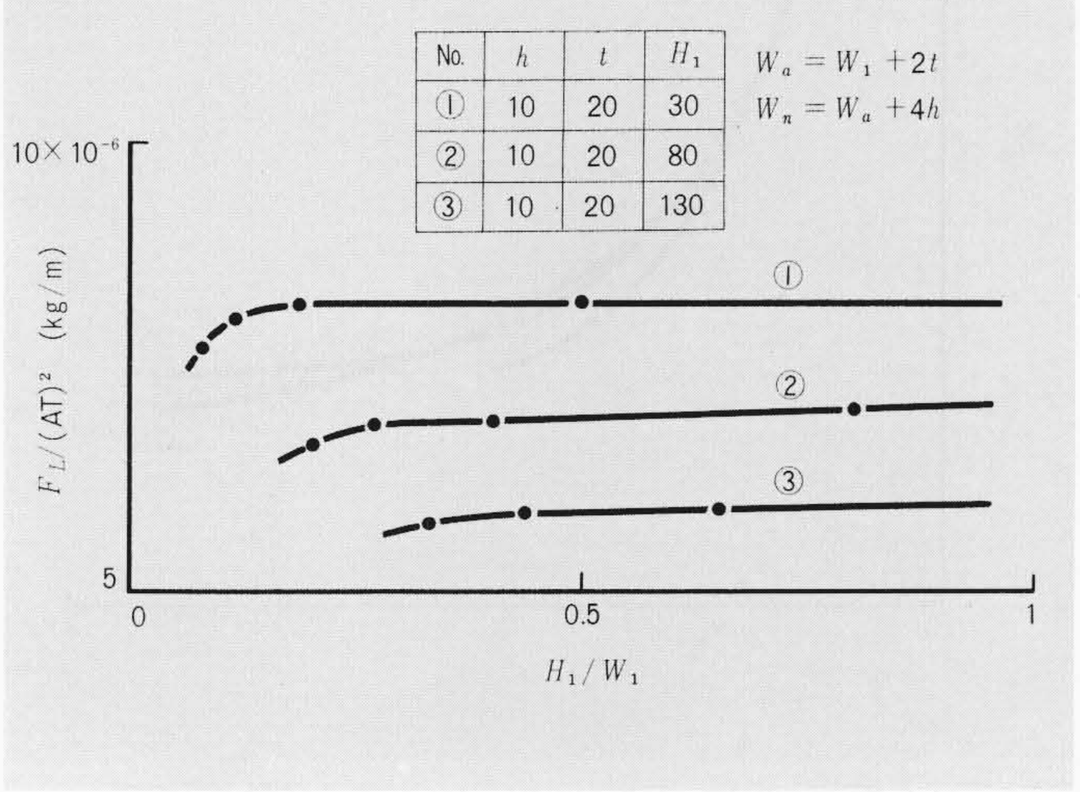


図10　鉄心窓部の影響　　H_1を大きくすると，ギャップ～軌道レールを通る磁束が減少し浮上力が低下する。

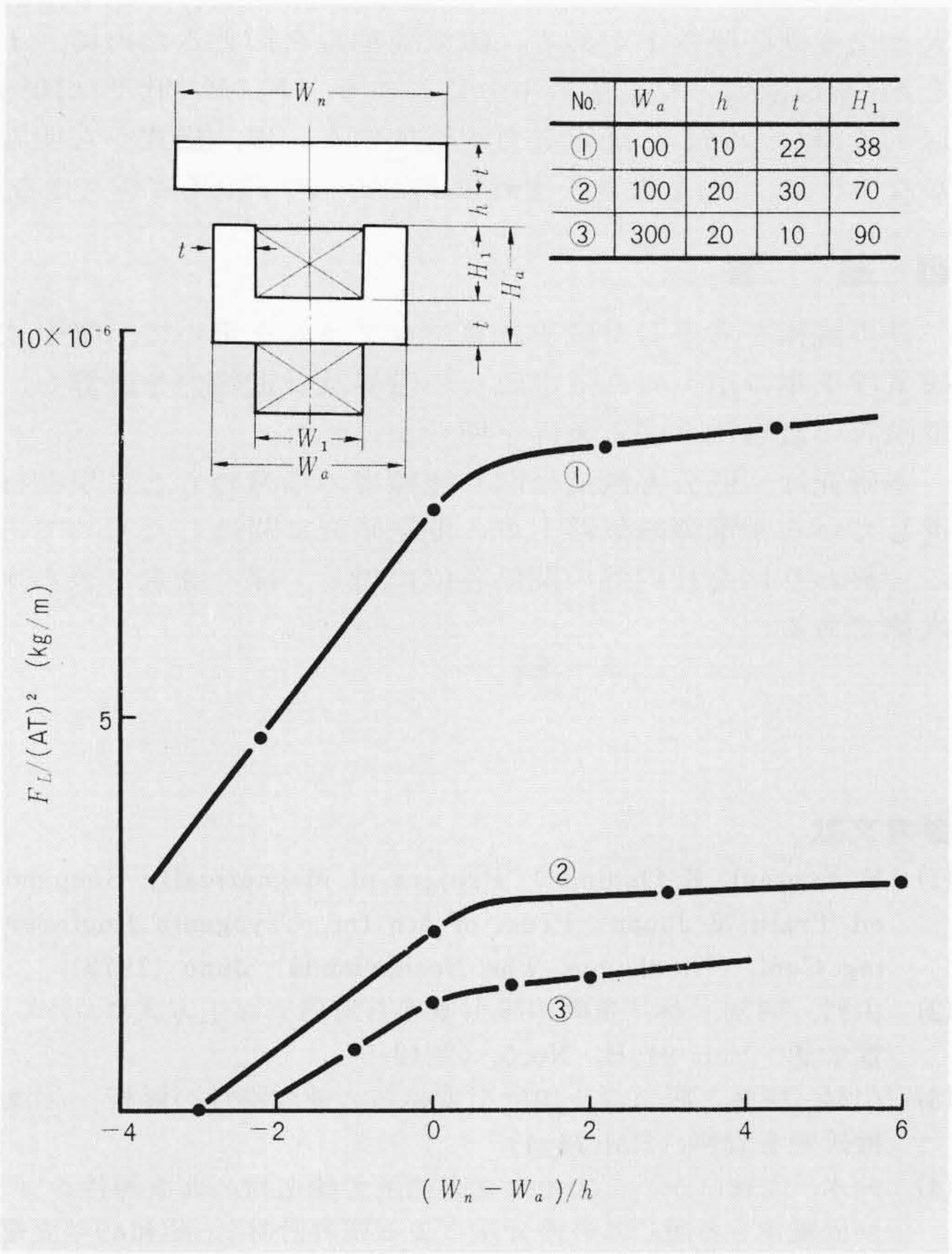


図9　軌道幅の影響　　軌道幅を電磁石幅よりも大きくしても，浮上力の増加は小さい。

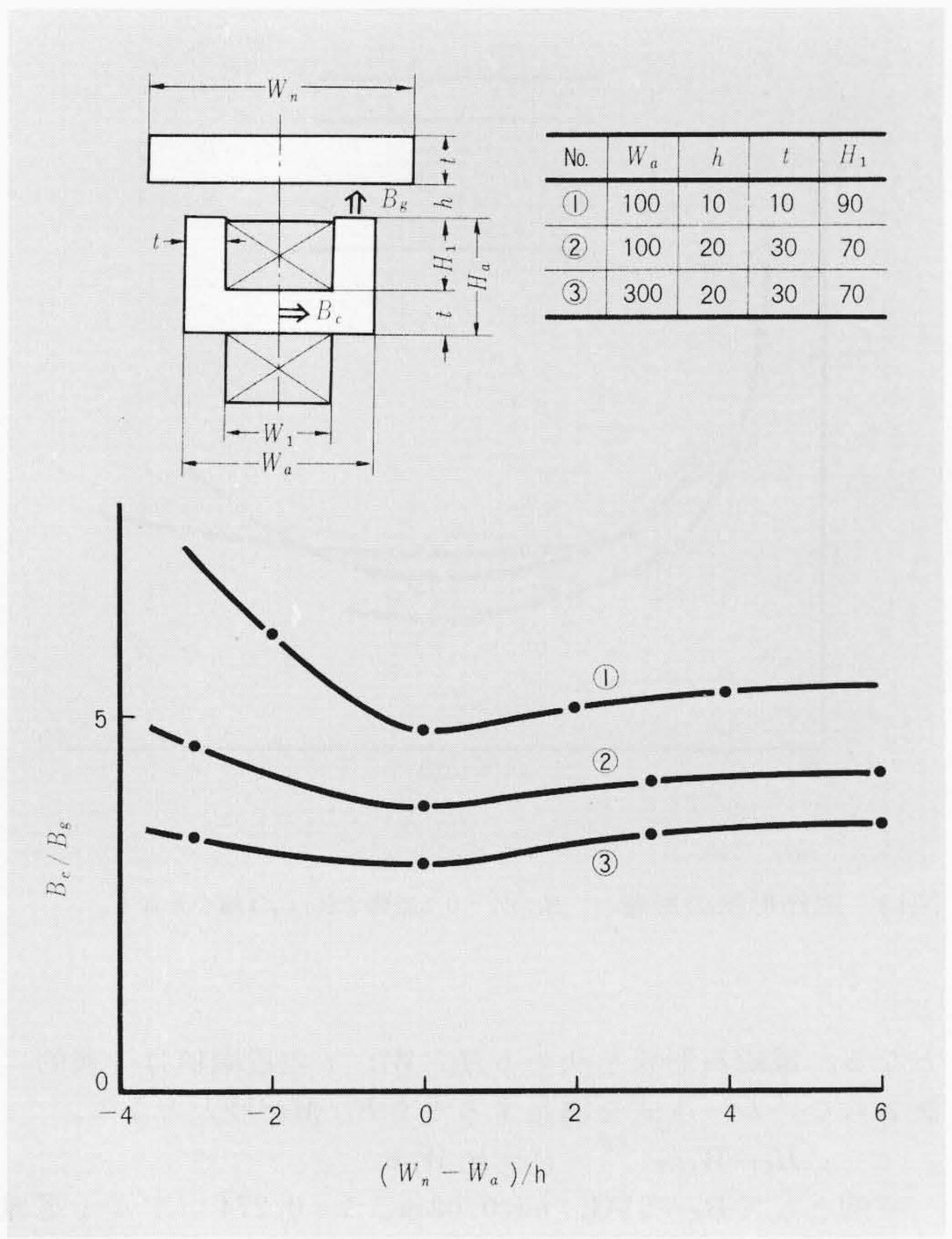


図11　軌道レール幅の影響　　$(W_n-W_a)/h$が0近傍でB_c/B_gは極小となり，鉄心への磁束集中が軽減できる。

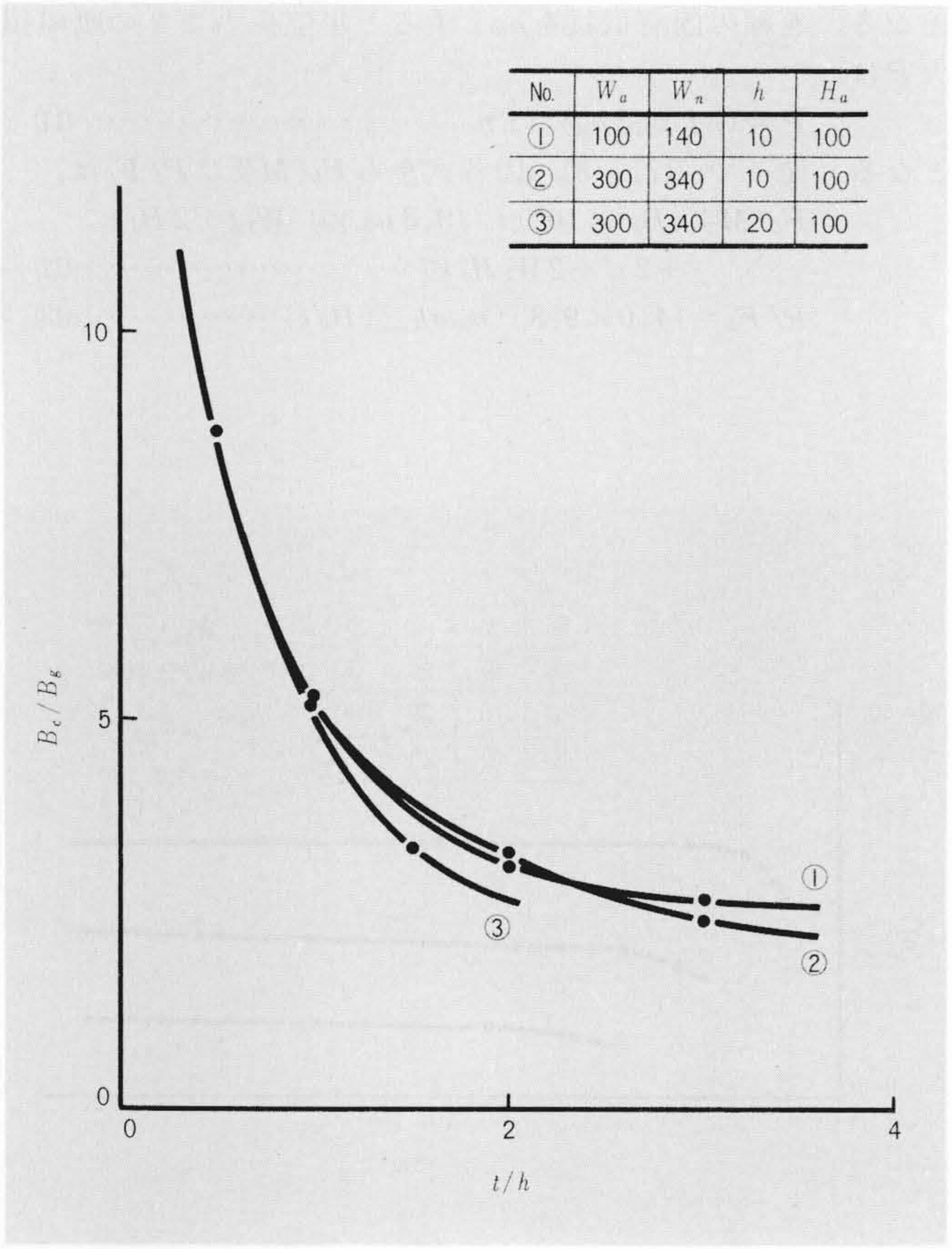


図12 鉄心厚さの影響 B_c/B_gを2以下にすることは難しい。

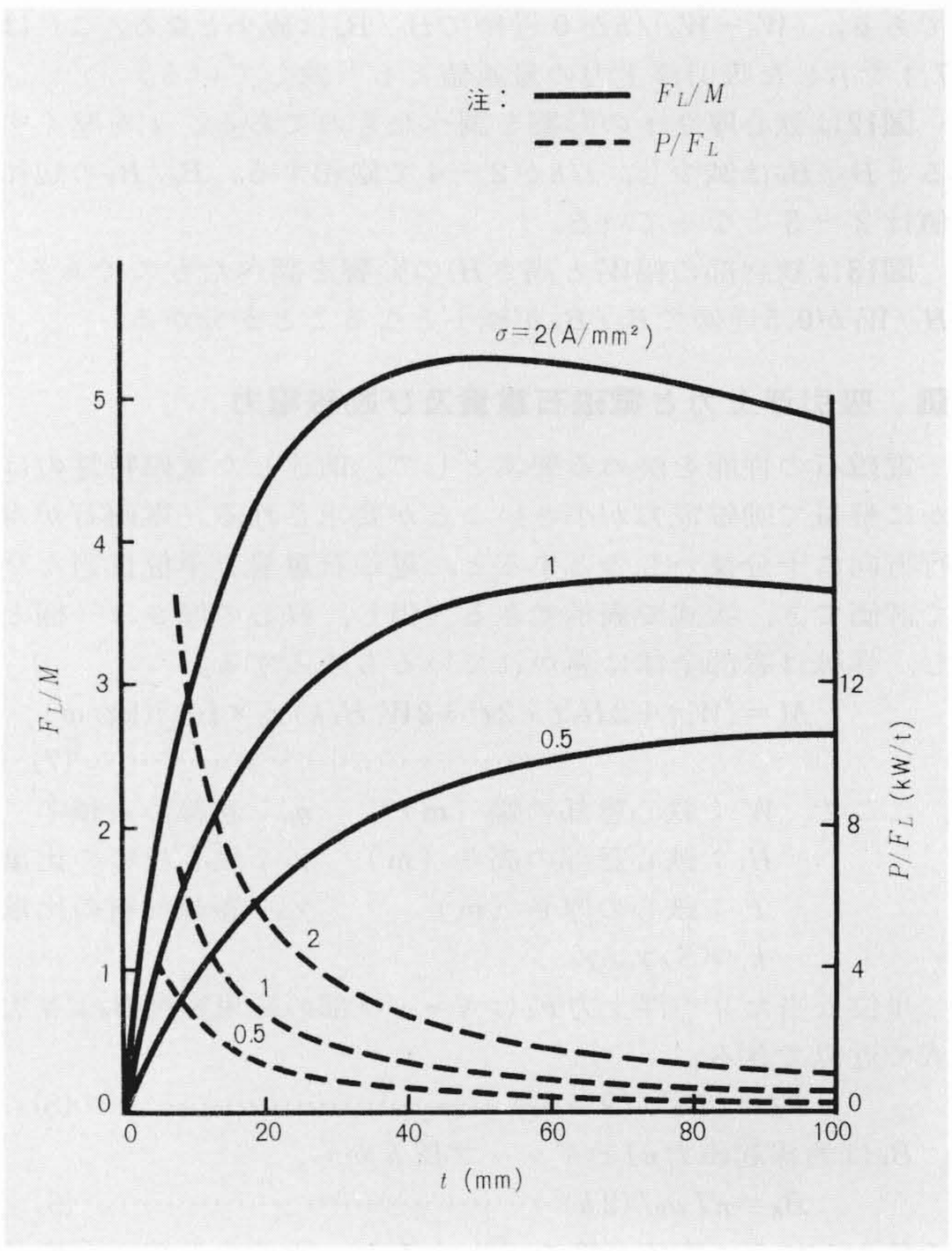


図14 電磁石重量及び励磁電力 F_L/Mは大きく，P/F_Lは小さい電磁石が性能は良い。

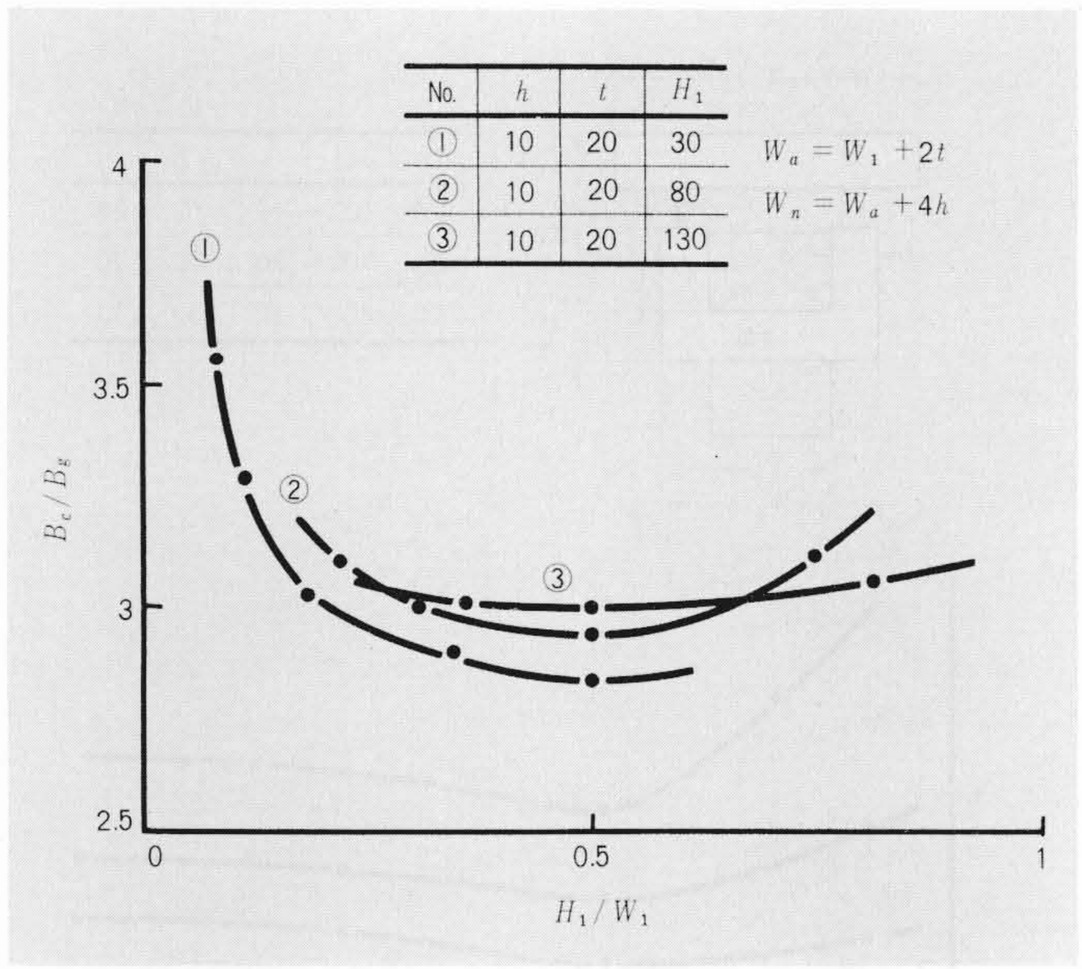


図13 窓部形状の影響 $H_1/W_1=0.5$近傍でB_c/B_gは極小となる。

となる。電磁石形状を決めるH_1，W_1，tの最適値は一義的に決まらないが，次式を満足するときF_L/Mが最大となる。

$$H_1 = W_1/2 \qquad t^2 = H_1 W_1 k$$

一例として$B_g=5$kG，$h=0.02$m，$k=0.274$（アルミ電線使用）の場合について電流密度σをパラメータとしてtとF_L/M及びP/F_Lの関係を計算した。結果を**図14**に示す。F_L/Mが極大となる鉄心厚さtがある。磁気制動力を抑えるために，tをF_L/Mが極大となる値の半分にしても，F_L/Mの低下は10%以下で済む。但し，励磁電力が増加する。(12)，(13)式から明らかなように，B_gを大きくすればF_L/M，P/F_Lとも改善できる。

9 結 言

鉄の飽和を考慮した磁界計算プログラムを用いて，吸引式磁気浮上車に用いられる電磁石の磁界及び電磁力を計算し，電磁石の最適化を図る条件を明らかにした。

本研究は，低公害鉄道に関し運輸省の指導のもとに現在推進している常電導磁気浮上車の開発研究に関連したものである。終わりに会社内外の関係各位に対し，深く謝意を表わす次第である。

参考文献

(1) Y. Kyotani, K. Oshima：“Project of Magnetically Suspended Train in Japan” Proc. of 4th Int. Cryogenic Engineering Conf.（Eindhoven, The Netherlands), June (1972)
(2) 山村，阿部，林「車両の吸引電磁石形磁気浮上方式について」電学誌 Vol. 94-B, No. 5 (昭49-5)
(3) 山村，伊藤「磁気浮上用吸引電磁石の速度特性の解析」 回転機研究会資料 (RM-74-4)
(4) 鈴木，佐藤ほか「二次元直交座標系で構造材の非直線性および渦電流を考慮しての差分法による磁界計算」 昭和49年度電気学会全国大会講演論文集 627
(5) 例えば，竹山：電磁気学現象理論（昭19-3丸善）