

磁気浮上式鉄道の構造物に用いる 鋼材の磁気抗力に関する研究

市川篤司¹・穴見源八²・松浦章夫³・辺見茂⁴

¹正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 前(財)鉄道総合技術研究所 橋梁研究室(〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 工博 金沢工業大学教授 工学部土木工学科(〒921 石川県金沢南局区内野々市町扇が丘 7-1)

⁴理博 (株)CRC総合研究所 科学システム事業部(〒136 東京都江東区南砂 2-7-5)

超電導磁気浮上式鉄道の構造物に用いる鋼材には、超電導磁石を搭載した車両が通過する時、移動する磁界によって鋼材内部に電流が誘起され、磁気抗力と言われる走行抵抗やエネルギー損失が発生する。そのため、磁気抗力のある限度内に抑えることが要求されている。本研究では、磁気抗力を定量的に評価しその低減対策を確立する目的で、実験および解析的な検討を行った。その結果、有限要素法を利用して低磁性鋼の磁気抗力を近似的に解析する手法を示した。また、実験および解析により鋼材の磁気抗力の特性について検討し、設計上考慮すべき低減対策を示した。

Key Words : *superconducting magnetic vehicle system (Maglev), drag force, low magnetic steels, ferromagnetic steels*

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道(以下、磁気浮上式鉄道)は、リニアモーターカー(以下、車両)に超電導磁石を搭載し、その超電導磁石と地上に敷設した推進コイルおよび浮上案内コイルとの間に働く電磁力により約10cm浮上し、500km/hの高速走行を目指す新しい大量高速輸送システムである^{1)・2)}。

しかしこのシステムでは、構造物上を車両が通過する時に、移動する磁界によって構造物を構成する鋼材内部に電流が誘起され、同時に電磁力が発生する。このうちの誘導電流は熱に変わるため(ジュール損として消費され)システムのエネルギー損失につながる。また、電磁力は鋼材および走行中の車両の相互に力として作用する。この力を構造物の側からみても、列車荷重等通常の設計荷重に比べてそれほど大きなものではないので、力学的な観点からは設計上特に考慮する必要はない。しかし、車両の側からみるとその進行を妨げる走行抵抗になるため、乗り心地および推進力に大きな影響を与えることになり、これを無視することができない。また、普通鋼(通常の土木構造物に用いる強磁性を示す鋼材)の場合には、そのほかに磁化にともなうエネルギー損失や超電導磁石との間に磁気吸引力も作用する。これらの電磁気的な影響のうち、エネルギー損失お

よび車両の走行抵抗となる橋軸方向の力を磁気抗力と言っている^{1)・2)}。なお、磁気吸引力は、一般に車両の進行方向と直角に作用するため、磁気抗力には含まない。

磁気浮上式鉄道に用いる構造物では、システムおよび車両への影響を小さくするために、これらの電磁気の影響をできる限り小さくすることが要求される。特に磁気抗力(走行抵抗)に対しては、構造物ごとにその大きさが制限されている。その許容値は速度に比例して定められており、例えば山梨実験線の橋梁区間では500km/h走行時に2.5kN/台車である。

このような電磁気の問題は、構造物に鋼材を用いる限り避けることのできないものであり、その評価と対策はこれまでの土木構造物が経験したことのない全く新しいタイプの課題でもある。この課題に対して、鋼材の使用量をできるだけ制限する、低磁性鋼(ステンレス鋼あるいは高マンガン鋼のように透磁率の小さな常磁性を示す鋼材)を用いる等、宮崎実験線での実験^{3)・4)}を通して得られた知見を利用して設計することも考えられていた。しかし、それだけでは鋼材の使用量が多い鋼構造物、あるいはSRC構造物などを利用することはできない。磁気浮上式鉄道においてもこれらの構造物の利用価値は高いが、その利用に際しては、磁気抗力を定量的に評

表-1 実験に用いた鋼板の磁氣的性質

鋼材種別	低磁性鋼 (SUS304)	普通鋼 (SS400)
電気抵抗率 ($10^{-8} \Omega \cdot m$)	70.0	19.6
最大比透磁率	1.002	1350

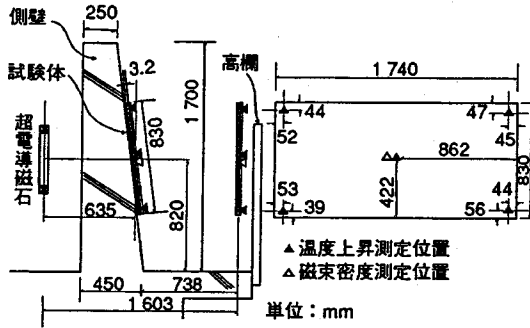


図-1 鋼板の磁気抗力測定実験概要

価し、許容値内に収まるように適切な対策を講ずることが不可欠である。

このような背景のもとに、本研究は、構造物に用いる鋼材の磁気抗力の大きさおよび性質を定量的に評価する実用的な手法について検討し、効果的な対策法を確立することを目的とする。最初に、磁気抗力の特性を把握するために、宮崎実験線（国鉄，現在（財）鉄道総合技術研究所の所有する浮上式鉄道用実験線）において鋼板およびH形鋼を用いた測定実験を行った。次に、その結果を利用して、磁気の影響を受けにくく解析的に取り扱いの容易な低磁性鋼を対象に、磁気抗力を実用上許される精度で求める近似的な解析手法について検討した。また、上記実験の結果、既往の実験結果および解析的な検討をもとに、低磁性鋼の磁気抗力特性について検討した。普通鋼の磁気抗力特性については低磁性鋼との比較を行った。さらに、それらの結果を基に、実設計のための磁気抗力低減対策の検討を行った。

2. 宮崎実験線における測定実験

宮崎実験線において鋼板およびH形鋼を用いた測定実験を行い、磁気抗力の特性に関する基礎データを得た。

(1) 鋼板を用いた実験

a) 実験概要

図-1に示すように、宮崎実験線ガイドウェイの側壁部および高欄部に低磁性鋼（ステンレス鋼）および普通鋼（SS400）の鋼板試験体を設置し、試験体中央部でガウスメータを用いて車両通過時の磁場の大きさ（磁束密度）を測定した。また、中央部と4隅の計5カ所で温度センサーを用いて試験体の温度上昇を測定した。温度上昇の測定は、試験体に

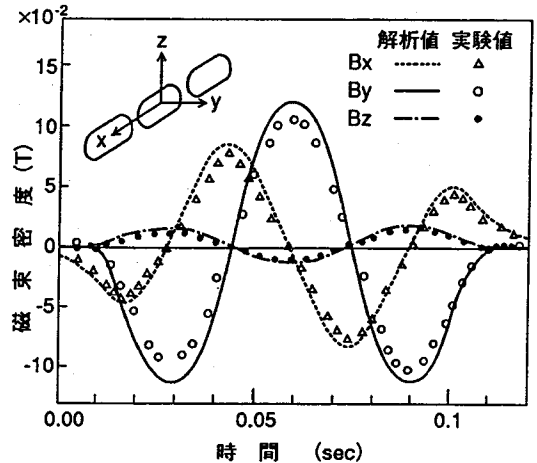


図-2 磁束密度の時間変化

発生する誘導電流がジュール熱となって鋼材の温度を上昇させることに着目し、温度変化から直接的にエネルギー損失を把握しようとするものである。

この実験では、風や外気温の変化などの影響を受けないように鋼板全体を断熱材で覆った。また、コードがループを形成するとそのループに誘導電流が流れノイズが発生するため、配線コードをより合わせて用いた。表-1に、実験に用いた鋼板の電気抵抗率および最大比透磁率を示す。

実験に用いた車両は MLU002¹⁾で、超電導磁石の諸元は以下のとおりである。なお、車両の走行速度は、100~320km/hである。

コイル配置 : 1車両あたり左右2列・片側3コイル

コイル寸法 : 長1,700mm×幅500mm（レーストック形状）

コイルピッチ : 2,100mm

起磁力 : 700kA

b) 実験結果

図-2は、側壁部の超電導磁石のほぼ真横にあたる位置の、試験体を設置していない状態での磁束密度の測定結果で、1台車通過時（時速200km/h）の時間変化を方向別に示したものである。図には後述す

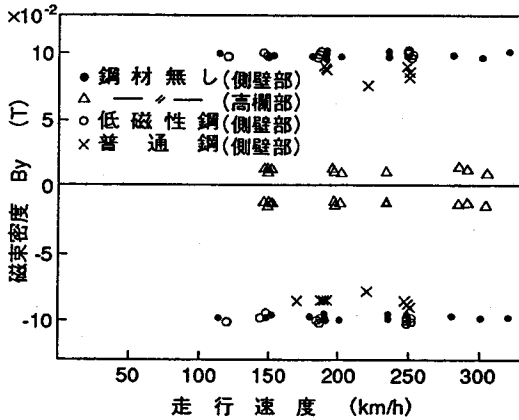


図-3 磁束密度(B_y)と走行速度

る解析手法による値も示している。測定点は、側壁の外側部分で鋼材が磁界の影響を最も大きく受ける位置にあるが、この位置では橋軸直角方向の磁束密度(B_y)が最も大きく、橋軸方向の磁束密度(B_x)がそれに次いでいる。鉛直方向の磁束密度(B_z)はそれらに比べてかなり小さい。また、これらの磁束密度は、超電導磁石の通過とともにピークが発生し、その方向も変化(交番)している。

図-3は、試験体を設置した場合および設置しない場合の磁束密度の測定値のうち、磁気抗力に密接に関係する橋軸直角方向の最大値を車両の走行速度で整理したものである。この図から明らかな点は以下のとおりである。

- ①ガイドウェイの側壁部外側の、超電導磁石中心から635mm離れた位置では、0.1テスラ程度の磁束密度となる。距離が離れると急激に減少し、超電導磁石中心から1603mm離れた高欄部付近では、1/10以下になる。
- ②低磁性鋼試験体を配置した場合、鋼材がない場合と比較して、磁束密度の大きさに変化はない。一方、普通鋼試験体の場合は10%程度小さくなる。これは、普通鋼試験体には磁化および渦電流による反磁界⁵⁾の影響が現れているのに対し、低磁性鋼試験体ではその影響が小さいからと考えられる。

また、図-4は、側壁部に設置した試験体の温度上昇の測定結果(測定点5箇所平均)と走行速度との関係を示したものである。なお、高欄部に設置した普通鋼試験体の温度上昇は測定精度が保証される限界(0.01℃)以下であり、低磁性鋼試験体では観測されなかった。図から、低磁性鋼試験体の温度上昇は、試験で走行した走行速度の範囲で速度にほぼ比例することがわかる。一方、普通鋼試験体の温度

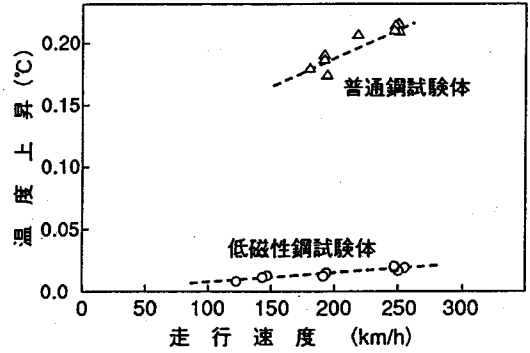


図-4 鋼板試験体の温度上昇と走行速度

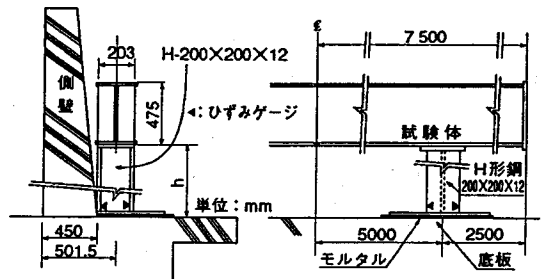


図-5 H形鋼の磁気抗力測定実験概要

上昇は、低磁性鋼試験体の場合に比べて大きく、速度とともに増加する傾向にあるものの正比例の関係にはない。このような両者の違いは、鋼材の電気抵抗率および透磁率の差に起因しているものと考えられるが、この点については4.(2)に詳述する。

(2) H形鋼を用いた実験^{4), 6)}

a) 実験概要

図-5および表-2に示すように、宮崎実験線のガイドウェイ側壁の外側に低磁性鋼(高マンガン鋼)および普通鋼(SS400)のH形鋼試験体を、高さ(図中のh)を変えた支柱の上に設置し、それぞれのケースで支柱下部に生じる曲げ歪を測定した。この実験は、試験体に加わる作用力を支柱の曲げ歪値から直接的に求めようとしたものである。曲げ歪と作用力との関係は、事前に荷重ジャッキおよびロードセルにより検証した。また、この実験でも半導体ゲージを用いたほか配線コードをより合わせる等の誘導電流によるノイズ対策を施した。

実験に用いた車両は、2両編成のMLU001¹⁾で、超電導磁石の諸元は以下の通りである。

コイル配置 : 1車両あたり左右2列、片側4コイル

表-2 H形鋼の磁気抗力測定実験条件

試験条件	鋼材	設置高さ：h (mm)
ケース I	普通鋼	低位：588
ケース II	普通鋼	高位：1188
ケース III	低磁性鋼	低位：588
ケース IV	低磁性鋼	高位：1188

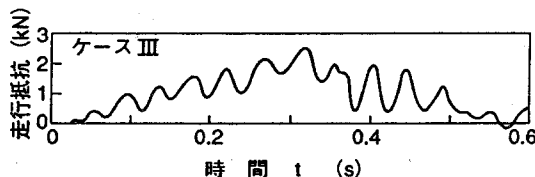


図-6 H形鋼磁気抗力の測定波形例

コイル寸法：長 1,700mm×幅 500mm (レーストラック形状)

コイルピッチ：2,100mm

起磁力：650kA

b) 実験結果

図-6 は、走行速度 200km/h での低磁性鋼試験体の磁気抗力測定波形（支柱に貼付した合計 8 枚のひずみゲージ出力を合成したもの）の一例である。波形には周期約 0.04 秒の主たる振動成分が見られ、その周期は超電導磁石の通過周期 0.038 秒とほぼ一致することから、支柱等の振動の影響は少なく超電導磁石の極通過時に受ける磁気抗力波形を表していると考えられる。

また、それぞれの実験ケースでの測定結果のうち、磁気抗力の最大値と車両の走行速度との関係を図-7 に示す。図中の実線は、後述する手法による低磁性鋼の解析値である。図から、前述した鋼板の実験と同様に低磁性鋼試験体に作用する磁気抗力は、実験で走行した 230km/h 程度までの範囲で、設置位置に係わらず速度にほぼ比例して増加することがわかる。また、普通鋼試験体に作用する磁気抗力は低磁性鋼試験体の場合に比べて大きく、正比例の関係はないが速度とともに多少増加する傾向にあるのも鋼板実験の結果と同様である。

3. 低磁性鋼の磁気抗力解析

(1) 概要

鋼材に発生する磁気抗力の解析は電磁力学の問題

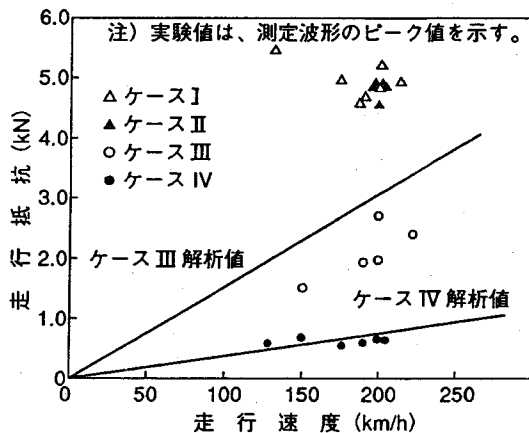


図-7 H形鋼磁気抗力 (1台車あたり)

に帰着し、一般に Maxwell の方程式をある条件のもとで解くことが必要になる⁷⁾。しかし、普通鋼のような強磁性体に関する電磁気現象は、磁束の集中やヒステリシス損等を考慮すると厳密な解析は難しく、その解法について種々の研究が行われている⁷⁾。ここで対象とする超電導磁石の移動に伴う磁気抗力の問題に対しては、酒井等により磁気ベクトルポテンシャル法 (A-φ法) を用いた解析手法が提案されている⁸⁾が、部材寸法が大きくかつ形状も複雑な実際の構造物に適用するには計算時間が膨大となり必ずしも実用的ではない。そこでここでは、磁気の影響を受けにくく比較的解析的な取扱いが容易な低磁性鋼を対象に、大型の土木構造物にも適用可能な解析手法に関する検討を行った。

なお、ここに示す手法では、2. の実験結果を基に誘導電流を表す式を簡略化し、有限要素法の手法を用いて定式化を行っている。

(2) 基本式

a) 基本式の誘導

車両の走行、即ち超電導磁石の運動に伴って鋼材との間に生じる電磁場には、主に次のものが考えられる。

- ① 運動している超電導磁石による磁場および電場
- ② 主に鋼材表面に生じる電流量分布によって作られる電場
- ③ 鋼材自身に発生する渦電流によって作られる磁場およびその磁場の変動に伴う電場

その他地上コイルによる磁場も考えられるが、その影響は①などに比べてはるかに小さく無視できる。ところで、ここで対象とする動磁場では、次のよ

うな Maxwell の方程式が成り立つ⁸⁾。

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

ここに、

\mathbf{B} : 磁束密度 (T), \mathbf{E} : 電場 (V/m)

\mathbf{H} : 磁場 (A/m), \mathbf{J} : 電流密度 (A/m²)

\mathbf{D} : 電束密度 (C/m²)

なお、これらの物理量は、ベクトル量である。以下、太文字は全てベクトル量を表す。

式(3)は、電磁場の時間的変動が大きくないので変位電流 $\partial \mathbf{D} / \partial t$ が無視でき次のようになる^{8), 9)}。

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4)$$

また、同様に、誘導電流も時間的な変動が小さいので次のような Ohm の法則が成立する。

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} - \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0) \quad (5)$$

ここに、

σ : 鋼材の導電率 (S/m)

\mathbf{v} : 超電導磁石の移動速度 (m/s)

\mathbf{B}_0 : 超電導磁石が構造物内につくる磁束密度 (T)

ここで、式(1)より次のような磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} が定義できる⁹⁾。

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (6)$$

この関係を用いて、式(2) は次のように変形できる。

$$\operatorname{rot} (\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) = 0 \quad (7)$$

上式より () 内は、保存場であることを意味するので、電位を表すスカラーポテンシャル ϕ が定義でき、次の関係が成り立つ⁹⁾。

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \phi \quad (8)$$

したがって、式(8)を式(5)に代入すれば、鋼材に発生する電流密度は次式で与えられる。

$$\mathbf{J} = \sigma \left(-\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \phi \right) \quad (9)$$

また、式(4)の div をとると、 $\operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{H} \equiv 0$ より、下式で表される電流保存則が得られる。

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0 \quad (10)$$

すなわち、鋼材に発生する誘導電流は式(9)で与えられ、式(10)の電流保存則に従って流れることにな

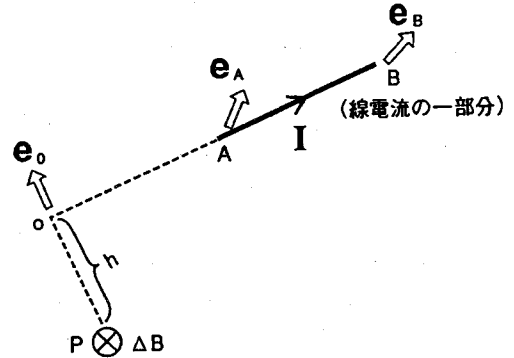


図-8 磁束密度の計算に用いるベクトル図

る。鋼材の電流密度は、両式を連立させることによって得ることができる。

前述したように、この問題に対しては有限要素法を利用した磁気ベクトルポテンシャル法 (A-φ法) を利用することが考えられるが実用的ではない。これは、この方法がベクトルポテンシャル \mathbf{A} を求めるために空間をメッシュ分割する必要があり、そのため演算時間を膨大に必要とするからである。一方、電流ベクトルポテンシャル法 (T-Ω法) は、空間をメッシュ分割しない方法も提案されており有利であるが、それでも土木構造物に適用するには必ずしも実用的ではない。そこで本研究では、上式について計算の簡略化の可能性について検討した。

式(9)の第1項は前述の①に相当するもので、誘導電流の発生に最も大きな影響を与えると考えられる。

第2項は、主に鋼材自身に発生する渦電流によって作られる磁場および電場 (前述の③)、すなわち自己インダクタンスの影響を表している。しかし、前述したように宮崎実験線における実験結果からは、少なくとも走行速度 320km/h 程度までは磁束密度が低磁性鋼の有無によって変化がないこと (図-3)、また低磁性鋼の磁気抗力が走行速度にほぼ比例する結果が得られており (図-4 および図-7)、これらの点を考慮するとこの項の影響は超電導磁石による磁場および電場 (前述の①) に比べて小さいと考えられる。これは、この項の影響が大きいと鋼材の有無によって観測される磁束密度に差が生じる (鋼材があると小さくなる) とともに、速度の増加とともに磁気抗力が増加する割合が小さくなると考えられるからである。

また、第3項の $-\operatorname{grad} \phi$ は、鋼材の表面電荷に起因する電位であり (前述の②) 無視できないものと考えられる¹⁰⁾。このようなことから本解析法では、

式(9)の第1項の $-\partial A / \partial t$ を無視できるものと仮定した。

したがって、本解析法において次式が低磁性鋼に発生する電流密度を表す近似式となる。ただし、車両速度が非常に高速になった場合などでは、式(9)の第2項の影響が顕著になり近似の精度が悪くなることも考えられる。

$$\mathbf{J} = \sigma(-\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 - \text{grad } \phi) \quad (11)$$

b) \mathbf{B}_0 の計算

式(11)における \mathbf{B}_0 は、Biot-Savart 則により求めることができる。すなわち、超電導磁石のコイルを図-8のようにレーストラック形状の1本の線電流と考える。図中のIはコイル電流、hは観測点Pから直線ABまでの距離を表す。また $\mathbf{e}_0, \mathbf{e}_A$ および \mathbf{e}_B は観測点Pから点O, A, Bに結んだ向きの単位ベクトルとする。ここで、点Oから観測点に向かうベクトル、および点Aから点Bに向かうベクトルを $\mathbf{e}_0, \mathbf{e}_A$ および \mathbf{e}_B で表し、Biot-Savart 則を適用すると以下ようになる。

$$d\mathbf{B}_0 = \frac{\mu_0 I h}{4\pi r^2} \mathbf{e}_0 \times (\mathbf{e}_B - \mathbf{e}_A) \quad (12)$$

本解析法では、これをコイルの全長にわたって積分して \mathbf{B}_0 を求めている。

(3) 有限要素法による定式化

式(11)において、 σ, \mathbf{v} および \mathbf{B}_0 はそれぞれ既知であるので、電流密度 \mathbf{J} を求めるためには ϕ の分布を知ることが必要になる。そこで、式(10)で表される電流保存則が最小発熱の原理と等価¹¹⁾であることに着目した。すなわち、電流保存則に従う電流密度は次式で表される散逸関数Fが最小になると同等であることを利用する。

$$F = \frac{1}{2} \int_V \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma} dV \quad (13)$$

ここで、式(11)を式(13)で表される散逸関数に代入し、それが最小になるように ϕ を決定すれば式(11)から鋼材に発生する電流密度を求めることが可能になる。この時、積分の離散化を行うことにより鋼材の節点上の電位 ϕ が未知量であるような有限要素法の問題に帰着させることができる。以下に、本解析法における離散化の方法について述べる。

最初に、外部起電力である $-\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$ を一定と考え、 \mathbf{E}_d とおき、式(11)を式(13)に代入し、積分範囲を要素の分割に対応させて分割すると、式(13)は次のように書くことができる。

$$F = \frac{1}{2} \sum_{[e]} \int_{[e]} \sigma \{ (\text{grad } \phi)^2 - 2 \mathbf{E}_d^t \cdot \text{grad } \phi \} dV + \text{Const} \quad (14)$$

ここに、 \mathbf{E}_d^t は、起電力場の鋼材面内成分を持つベクトルである。

なお、本解析法では、任意形状の低磁性鋼板の解析が可能ないように平面要素(三角形要素および四角形要素)および立体要素について定式化を行ったが、ここではその内最も一般的に用いる四角形要素について示す。

次に、式(14)を定式化するために、全体座標系の他に局所座標系を設ける。局所座標系としては、一つの要素に着目し要素面を含む面に u, v, w 座標系を設けるほか、要素を含む平面内($w=0$)にアイソパラメトリック座標系 (ξ, η) を考える。この時、四頂点在同一平面内にある場合のみを扱うこととすれば、厚さ方向の電位勾配が $-\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$ の厚さ方向成分によって打ち消され無視できることから、局所座標系で式(14)を以下のように表すことができる。

$$F = \frac{1}{2} \sum_{[e]} \int_{[e]} \sigma \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial v} \right)^2 - 2 \mathbf{E}_d^t \cdot \mathbf{e}_u \frac{\partial \phi}{\partial u} - 2 \mathbf{E}_d^t \cdot \mathbf{e}_v \frac{\partial \phi}{\partial v} \right\} du dv + \text{Const} \quad (15)$$

ここで $\mathbf{e}_u, \mathbf{e}_v$ は、局所座標系において原点を通り座標軸 (u, v) と同じ向きの単位ベクトルである。また、局所座標系 (u, v, w) から局所座標系 (ξ, η) への変換は、平面内のアイソパラメトリック要素を用いて次の形状関数により与えられる。

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4} (1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) \quad (16)$$

ここで、 $i=1, 2, 3, 4$ に対して、 ξ_i はそれぞれ $-1, 1, 1, -1$ 、 η_i は $-1, -1, 1, 1$ である。

したがって、 ξ, η が与えられた時、実空間で対応する点の座標 (u, v) およびポテンシャル (ϕ) は、各節点の値を内挿して得られる。すなわち、アイソパラメトリック要素の仮定から次式のようになる。

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \mathbf{u}_i, \quad \mathbf{v} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \mathbf{v}_i \\ \phi = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \phi_i \quad (17)$$

ここで、 $\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i$ は、 u, v, w 座標系の4節点の座標で既知量である。一方、 ϕ_i は4節点のポテンシャルで未知量である。ところで面積要素は、Jacobiのマトリックスを用いて次式で与えられるので、

$$dS = du dv = \det J \cdot d\xi d\eta \quad (18)$$

式(15)は次のように変形される。

$$\begin{aligned}
 F = & \sum_{[e]} \left[\frac{\sigma}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \phi_i h_{ij} \phi_j \right. \\
 & - \sigma \mathbf{E}_d^t \cdot \mathbf{e}_u \sum_{i=1}^4 \int \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right. \\
 & \left. \left. - \frac{\partial v}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) d\xi d\eta \cdot \phi_i \right. \\
 & \left. - \sigma \mathbf{E}_d^t \cdot \mathbf{e}_v \sum_{i=1}^4 \int \left(-\frac{\partial u}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\partial u}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) d\xi d\eta \cdot \phi_i \right] \\
 & + \text{Const} \quad (19)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 h_{ij} = & \int \left(\frac{\partial N_i}{\partial \xi}, \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \right) [J^{-1}]^t [J^{-1}] \\
 & \left(\frac{\partial N_j}{\partial \xi}, \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \right)^t \det J d\xi d\eta \quad (20)
 \end{aligned}$$

なお、上記の積分は、積分範囲が-1から1までのため Gauss 積分公式が利用できる。

結局、式(19)および式(20)は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 F = & \frac{1}{2} \{ \phi_i \}^t [H] \{ \phi_i \} - \{ \phi_i \}^t \{ b_i \} \\
 & + \text{Const} \quad (21)
 \end{aligned}$$

ここで、散逸関数Fが最小となる条件 $\partial F / \partial \phi_i = 0$ より、次の連立方程式を得る。

$$[H] \{ \phi_i \} = \{ b_i \} \quad (22)$$

上式において、 $\{ \phi_i \}$ は節点上の電位を縦に並べたベクトルであり、 $\{ b_i \}$ のベクトルは式(21)から求めることができる。また、 $[H]$ は全体行列である。

したがって、式(22)を解いて電位 ϕ を求めれば、式(11)より電流密度が得られ、それから渦電流損等の必要な物理量を得ることができる。なお、本論文では、上記の方法で求めた単位時間あたりの発熱量を走行速度で除すことにより走行抵抗を求めた。

(4) 実験結果との比較

上記の低磁性鋼に関する磁気抗力解析手法の検証のため、前述の実験結果(2.(1), 2.(2))および既往の実験結果との比較を行った。なお、解析にあたって、モデルは全て平面要素とした。

a) 鋼板を用いた実験結果との比較

式(11)からわかるように、磁気抗力の大きな要因

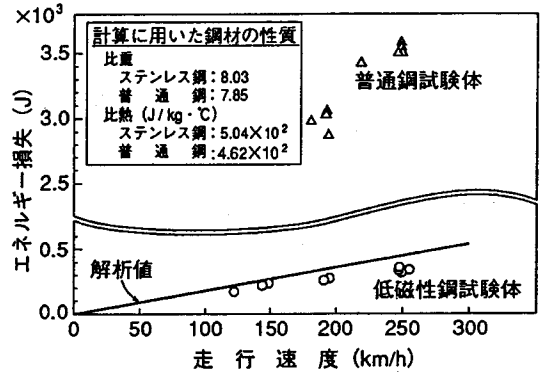


図-9 平鋼板試験体のエネルギー損失と走行速度

の一つは磁束密度(の変化)である。そこで、磁束密度の測定結果と解析値との比較を行った。前出の図-2には、鋼板のない状態での磁束密度の時間変化の実験値および解析値を示す。両者は比較的よく一致しているが、解析値が多少大きくなる傾向にある。このように解析値が大きくなるのは、宮崎実験線の側壁部には普通鋼鉄筋が用いられており、そのシールド効果の影響が現れていると考えられること、実際の超電導磁石にもコイルを格納する鋼材等に渦電流が発生しその反磁界の影響で磁場の強さが多少小さくなると考えられるが、解析ではその点を考慮していないことなどに起因すると考えられる。

また、磁気抗力(エネルギー損失)について両者を比較するため、この実験で得られた温度上昇の測定結果をジュール損に変換し、図-9に速度との関係で整理した。図中の白丸が低磁性鋼試験体の実験値を示し、実線は実験と同じ条件で行った解析結果である。解析ではエネルギー効率を1.0として計算した。なお、図には普通鋼の測定結果も合わせて記している。図からわかるように、温度上昇の測定結果から求めた低磁性鋼試験体のエネルギー損失は走行速度にほぼ比例しており、また解析値は実験値に比べて多少大きいものの両者は比較的よく一致している。磁気抗力が走行速度に比例するのは、解析法の仮定において述べたように、鋼材の渦電流に起因する磁場および電場の影響が小さく、式(11)に示すように走行速度に比例する項である $-\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$ の影響が卓越しているからと考えられる。

b) H形鋼を用いた実験結果との比較

図-7に示すH形鋼低磁性鋼試験体の磁気抗力の実験値と解析値を見ると、この実験でも実験値に比べて解析値が大きくなっている。特に、試験体が低位の場合(ケースⅢ)にその傾向が強い。

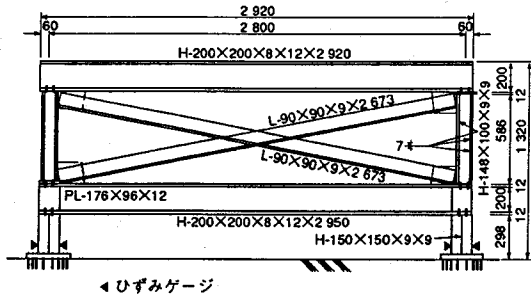


図-10 トラス模型の磁気抗力測定実験概要

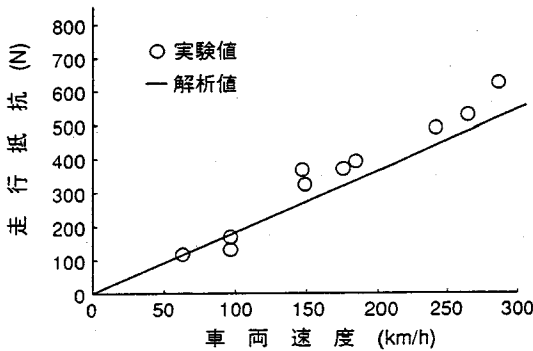


図-11 トラス模型の磁気抗力の実験値と解析値

c) 既往のトラス模型による実験結果との比較

宮崎実験線でトラス模型を用いた磁気抗力の測定実験が奥田等によって行われており³⁾、この実験結果と解析との比較を行った。この実験では、図-10のように高マンガン鋼製のトラス模型をガイドウェイ側壁の外側に取り付け、磁気抗力を試験体を取り付けた支柱の歪から求めたものである。この時の走行車両は、2両編成のMLU001で、超電導磁石の諸元は前項のH形鋼の場合と同じである。なお、各部材は電氣的に絶縁していないため、試験体には渦電流の他、部材が形成するループに沿って流れるループ電流も発生する。

鋼材の電気抵抗率を $70 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 、部材接合部の接触抵抗については、実測データがないため別途実施した摩擦接合継手試験体での測定データ^{1,3)}を参考に $10^{-5} \Omega$ として解析し、実験値と比較した結果を図-11に示す。両者はよく一致しているが、a)およびb)の結果から考えると解析に用いた部材接触抵抗が実際の値より多少大きいと考えられる。なお、実験値はこの場合も速度に比例している。

また、図-12に、解析の結果得られた誘導電流の分布状態を示す。これから、上下弦材、垂直材および斜材が形成するループに沿って流れるループ電流

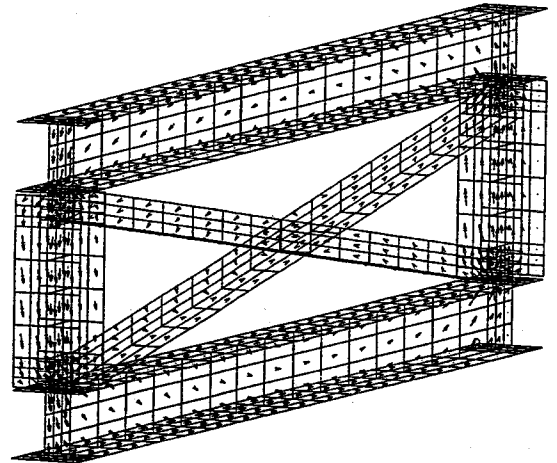


図-12 トラス模型における誘導電流の分布

が支配的であることがわかる。したがって、このように部材がループを形成する構造では、ループ電流を遮断することが磁気抗力対策上有効であると考えられる。

d) 解析値の精度に関するまとめ

本論文に示した解析法は、磁気抗力を実際より多少大きく評価すると推測される。これは、a)に述べたようにこの解析法では超電導磁石の磁束密度が多少大きく計算されることに起因しており、また誘導電流による自己インダクタンスの影響を無視している(式(9)において $\partial A / \partial t$ を省略する)ことも多少影響していると考えられる。しかし、構造物の設計時の検討に用いるには十分許容できる精度と考えられる。

4. 磁気抗力の特性

(1) 低磁性鋼の磁気抗力に及ぼす諸因子の影響

宮崎実験線での実験結果および3.に述べた解析手法をもとに、低磁性鋼の磁気抗力特性についての検討を行った。

① 車両の走行速度の影響

実験で行った260km/h程度までの走行速度の範囲では、磁気抗力は車両の走行速度にほぼ比例する(図-7および図-9)。なお、図-2に示す鋼材の有無による磁束密度の測定結果において、低磁性鋼では320km/h程度の走行速度でも差がでないことから、少なくともそのような速度域までは磁気抗力と走行速度が比例すると考えてよいと思われる。さらに高速になった場合については、山梨実験線で確認したいと考えている。

表-3 H形鋼の分割の有無による磁気抗力

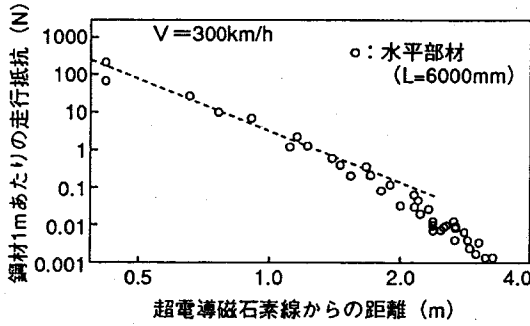


図-13 磁気抗力の超電導磁石からの距離との関係

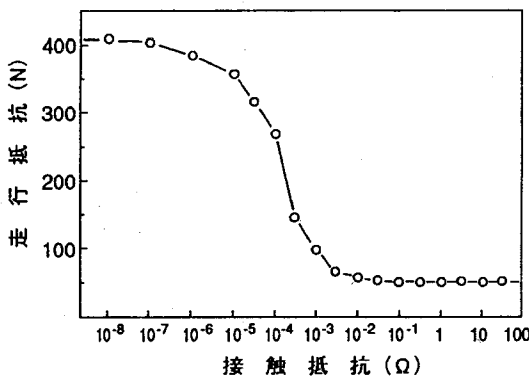


図-14 トラス模型の継手部接触抵抗と磁気抗力

② 超電導磁石からの距離の影響

図-13 は、低磁性のH形鋼 (H-200×200×6000) を、車両 (ここでは、MLU002 の諸元を用いた) の回りの様々な位置に橋軸方向に水平に配置した時の解析値を超電導磁石の素線中心からの距離で整理したものである。このように、磁気抗力の大きさは超電導磁石からの距離に密接に関係し、距離とともに大幅に低減する。この時、磁気抗力の大きさは、超電導磁石の1.5m付近までは距離の4乗に反比例し、それより離れるとさらに減少している。電流密度が距離の2乗に反比例の関係にあること (式(11)および式(12)) およびエネルギー損は電流密度の2乗に比例することから、(超電導磁石から同一の方向に対して) エネルギー損は距離の4乗に反比例の関係にあり、超電導磁石から見て様々な方向にある場合の上記解析結果もほぼそれに対応していると考えられる。

③ 部材継手の接触抵抗による影響

3. (4) c) に述べたように、部材がループを形成すると、渦電流による磁気抗力の他にループ電流によ

分割の有無	配置	走行抵抗(N)
分割前	水平	3,060
	鉛直	970
分割後	水平	450
	鉛直	120

る磁気抗力も発生する。この時、部材間の接触抵抗の大きさによって磁気抗力も変化すると考えられた。その検討のため、前述のトラス模型において、部材間の接触抵抗値を同一にし、かつ変化させた場合の解析を行った。図-14 にその結果を示す。図からわかるように、部材間の接触抵抗の大きさによって磁気抗力は変化し、継手の接触抵抗が $10^{-1} \sim 10^{-2} \Omega$ 程度以上になると、ループ電流に起因する磁気抗力は無視できる大きさになる。

④ 鋼材分割の影響

鋼材の大きさによって渦電流の流れ方が変わるため、磁気抗力の大きさも変化すると考えられた。そこでその影響を検討するため、2. (2) に述べたH形鋼の実験におけるケースⅢの場合について、フランジとウェブの付け根で3分割した場合の磁気抗力の解析を行った。その結果を表-3 に示す。この時、分割された部材は電氣的に絶縁されているものと考えている。これから、同じ鋼材でも分割するほど磁気抗力は小さくなるのがわかる。このケースでは、分割することによって分割しない場合の $1/7 \sim 1/8$ 程度になっている。このような鋼材の分割による磁気抗力の差は、鋼材面積が小さくなると渦電流の流れる範囲が限定され電流密度が小さくなり、その影響で磁気抗力も小さくなるためと考えられる。

⑤ 鋼材配置の影響

実構造物では、鋼材は様々な方向に配置される。ここではその影響を把握するための検討を行った。

図-15 は、2. (2) のH形鋼について、橋軸方向を含む鉛直面内で水平から徐々に角度だけを変化させ

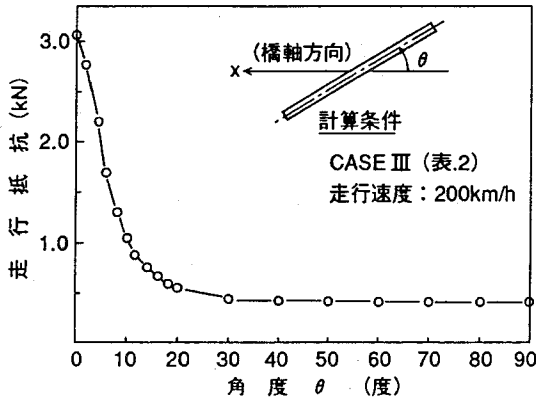


図-15 鋼材の方向による磁気抗力の大きさ

て（他は同じ条件で）計算した場合の磁気抗力である。図からわかるように、鋼材の方向（角度）によって磁気抗力に差が生じ、水平に近い程大きくなる。これは、水平に近い程超電導磁石に近く磁場の影響を強く受ける面が増えるためと考えられる。したがって、水平部材を磁界の影響を強く受ける箇所に配置する場合には、磁気抗力対策に十分な検討が必要になる。

(2) 低磁性鋼と普通鋼の磁気抗力の関係

(1) では低磁性鋼の磁気抗力について述べたが、普通鋼の場合には、磁極の異なる超電導磁石の通過により鋼材がN極とS極に交互に磁化されるために（図-2参照）ヒステリシス損が発生するほか、鋼材の形状等によって磁場が変化するなどその挙動は複雑である。ここでは、宮崎実験線での実験結果をもとに、普通鋼の磁気抗力を低磁性鋼の場合と比較検討した。

2. に述べた実験において、低磁性鋼試験体の他、普通鋼試験体についても磁気抗力の測定を行っている。図-7および図-9には両者の測定結果を併記している。これらの図から、普通鋼の磁気抗力には以下のような特性が認められる。

- ① 普通鋼と低磁性鋼の磁気抗力の大きさを比較すると、試験体形状や速度によって異なり、幅があるが走行速度 260km/h 程度までの範囲で 3~10 倍程度普通鋼の方が大きい。
- ② 低磁性鋼の磁気抗力が速度にほぼ比例するのに対し、普通鋼の磁気抗力は、速度の増加とともに多少大きくなる傾向は見られるものの速度に比例しない。

このように普通鋼で磁気抗力が大きくなるのは、低磁性鋼に比べて電気抵抗率が小さいために電流が流れやすく、ヒステリシス損等による低磁性鋼にはない磁気抗力も発生するためと考えられる。また、透磁率の大きい普通鋼は鋼材の形状によって磁場の状態が大きく変化し、3. (2) に述べた自己インダクタンスの影響も現れるなど複雑な現象を呈し、これが実験における両者の磁気抗力の差に幅が生じる原因になっていると考えられる。

なお、(1) 項に述べた低磁性鋼の磁気抗力特性のうち、②~⑤に関しては、それらが誘導電流に起因するものであることから、普通鋼の場合も同様の性質があると考えられる。

5. 磁気抗力低減のための対策

磁気浮上式鉄道の構造物の設計に際し、4. に述べた磁気抗力の特性を利用すると、以下のような低減対策が考えられる。

- ① 4. (1)② に述べたように、超電導磁石から離れるほど磁気抗力は減少する。したがって、設計上許される範囲で、鋼材を少しでも超電導磁石から離して配置する。
- ② 4. (2) に述べたように、低磁性鋼に発生する磁気抗力は普通鋼の場合に比較して小さい。したがって、磁気の影響の大きな範囲では鋼材に低磁性鋼を利用する。なお、山梨実験線の構造物の設計では、普通鋼の磁気抗力が低磁性鋼の7倍と仮定して、標準的なトラス構造での試算結果を基に、超電導磁石から 1.5m 以内に低磁性鋼を用いることを提案した⁶⁾。
- ③ ループ電流により磁気抗力を発生させないために、ループを構成する部材接合部の接触抵抗を少なくとも $10^{-1} \sim 10^{-2} \Omega$ 程度以上とする（図-15 参照）。
- ④ 超電導磁石の近傍で大きな部材を用いる場合には分割する。この時、分割する部材の接合部の接触抵抗を③に述べた程度確保する。
- ⑤ 上記の対策を組み合わせることでより大きな効果を得ることができる。

6. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 磁気浮上式鉄道において、鋼材に発生する磁気抗力を、車両通過時の試験体の温度上昇、あるいは試験体を支持する支柱のひずみによって把握することができる。
- (2) 低磁性鋼の磁気抗力に関し、有限要素法を利

用した実用的な解析手法を提案した。宮崎実験線での実験結果と比較して多少大きくなるが、実用上問題ない精度が得られると考えられる。

(3) 宮崎実験線での実験および解析により、次の磁気抗力に及ぼす諸因子の影響を明らかにした。

- ① 低磁性鋼の磁気抗力の大きさは、車両の走行速度が少なくとも 320km/h 程度までは走行速度に比例する。
- ② 超電導磁石から鋼材までの距離に密接に関係し、低磁性鋼では超電導磁石の近傍 (1.5m 程度以内) で、その素線中心から約 4 乗に反比例する。
- ③ 部材の継手の接触抵抗の大きさに密接に関係する。
- ④ 同じ鋼材量でも鋼材を分割するほど小さくなる。
- ⑤ 鋼材の配置方向によって異なる。
- ⑥ 普通鋼の磁気抗力は、車両の走行速度 260km/h 程度までの宮崎実験線での実験結果から見ると、低磁性鋼の場合の 3~10 倍程度大きい。

(4) 磁気浮上式鉄道の鋼構造物を設計する場合の磁気抗力低減対策には、以下のような対策が考えられる。

- ① 鋼材を出来るだけ超電導磁石から離れるように配置する。
- ② 超電導磁石から近い部材には低磁性鋼を用いる。
- ③ 電氣的にループを構成する部材の接合部の接触抵抗を少なくとも $10^{-1} \sim 10^{-2} \Omega$ 程度以上とする。
- ④ 大きな部材を用いる時には分割する。
- ⑤ ①~④の対策を組み合わせる。

なお、現在実用化を目指した山梨実験線の建設が進んでいる。今後はこの実験線の構造物を利用して低減対策の効果を確認するとともに、低磁性鋼の磁気抗力と走行速度との関係、普通鋼の磁気抗力特性等に関する 500km/h の高速走行下での実験を行う予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、これまでに行われて

きたいいくつかの宮崎実験線での測定実験の成果を利用させていただいた。ここに記して関係各位に深謝いたします。なお、本研究は国庫補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：リニアモーターカー・マグレブ、清文社、1988
- 2) 宮田尚彦、松浦章夫、高木肇：研究展望—超電導磁気浮上式鉄道、土木学会論文集、第 415 号/VI-12, pp.17-25, 1990.3
- 3) 奥田寿夫、志村雄三：[6]低磁性鋼トラス模型による磁気抗力試験、鉄道技術研究報告 No.1313, 1986.3
- 4) 松浦章夫、岩井徳雄、志村雄三：[2]ガイドウェイ周辺磁界に関する試験、鉄道技術研究報告 No.1281, pp.21-28, 1984.11
- 5) 近角聰信：強磁性体の物理(上)、裳華房、1978
- 6) 市川篤司、村田清満、穴見源八、松浦章夫：高マンガン鋼の浮上式鉄道構造物への利用に関する研究、鋼構造論文集、第 1 巻第 1 号, pp.63-72, 1994.4
- 7) 例えば、宮健三：電磁弾性論とその応用(I), (II), (III), 日本造船学会誌、第 681-683 号, 1986.3-1986.5
- 8) 酒井謙、田中良幸、山下彰彦：リニアモーターカーに発生する渦電流および磁気力に関する研究、日本機械学会論文集(A編), 58 巻 551 号, pp.265-272, 1992.7
- 9) 砂川重信：物理テキストシリーズ — 電磁気学, 岩波書店, 1987
- 10) 宅間薫：考えるとわからなくなる電磁界, 電学誌, 113 巻, 11 月号, pp.964-967, 1993.11
- 11) 平川浩正：新物理学シリーズ 2 — 電磁学, 培風館, 1968
- 12) 安達三郎：電磁気学, 昭晃堂, 1989
- 13) 市川篤司、穴見源八、長嶋文雄他：絶縁性能を有する高力ボルト摩擦接合継手に関する研究、鋼構造年次論文報告集, Vol.1, 1993.7

(1995.9.26 受付)

STUDY ON THE DRAG FORCE OF STEELS USED FOR THE SUPERCONDUCTING MAGNETIC LEVITATION VEHICLE SYSTEM (MAGLEV) GUIDEWAY

Atsushi ICHIKAWA, Genpachi ANAMI, Akio MATSUURA and Sigeru HENMI

The superconducting magnetic levitation vehicle system (Maglev) is being developed. In the guideway steel structures, the energy loss and the resistance to the movement of vehicle, called a magnetic drag force, are induced by the passage of vehicle. It is very important to evaluate the magnitude of the drag force quantitatively and to make it small below the limit value when we use the steel as a member of guideway structure. In the accordance with magnetic drag force, the approximate analysis method is proposed, and also the characteristics and the reducing measures are investigated by our experiments and the analysis.