UDC 621.318.38:537.312.62
625.2.012

論 文

49-B 25

超電導磁石による車両の磁気浮上特性の研究

東京芝浦電気株式会社

東京芝浦電気株式会社

東京芝浦電気株式会社

東京芝浦電気株式会社

斎藤 幸 信

高 野 一 郎

松 田 正 治

荻 原 宏 康

1. ま え が き

列車輸送を時速 500km にして、将来の交通量を消化するという計画が進められている。このように現東海道新幹線の2倍以上、航空機なみの速度で列車を走らせるために乗り越えなければならない技術の壁がいくつか存在している。⁽¹⁾ これらの壁を乗り越える手だての一つとして、磁気浮上といわれる車体の支持方式が提案され、具体的な開発活動もすでに報告されている。⁽²⁾ 磁気浮上方式の中でも、特に超電導磁石を用いた、いわゆる超電導磁気浮上方式は、超電導技術の数々の特質を生かした有望な方式と考えられている。

超電導磁気浮上方式超高速列車において超電導電磁石は、現在の車輪のように車体の下に設置されて、軌道面に対向する。軌道には大きく分けて、二つの方式が提案されている。一つは銅板やアルミニウム板のような非磁性導体の板を敷きつめた軌道を使うシート軌道方式⁽⁴⁾であり、もう一つは常温のコイルをレールのように並べたループ軌道方式⁽⁵⁾である。

この二つの方式の差違は、車上側の超電導磁石が作る磁束を軌道側が利用する電流利用率⁽⁶⁾の違いにあって、それはシート方式で大きくループ方式で小さい。このことは地上側の常温の導体で発生するジュール損失の違いとなって現われ、二つの方式で必要となる推

進電力の差となる。この点ではループ方式が有利とされている。⁽⁵⁾

推進駆動の手段としても、非接触の方式を必要とする。これにはリニアインダクションモータ、リニアシンクロナスマータの二方式が考えられている。⁽⁷⁾ この二つの方式のうちでは駆動の一、二次間のエアギャップの大きさが、浮上のエアギャップと協調がとれている点、及び駆動力の作用対象として、浮上用の超電導磁石を兼用させ得る点で、リニアシンクロナスマータのほうが魅力的であると考えられている。

この選択は前述の軌道方式とも関連している。リニアシンクロナスマータ推進のためには、相手となる超電導磁石の起磁力は、大きいほうが推力も大きく出せる。一方、電磁走行抵抗（磁気ドラッグ）の小さいほうが推進も有効に行なえるし、磁気ドラッグの小さなループ方式のほうが電流移行率の点からも大きな起磁力の超電導磁石を必要としている、という点でループ方式、リニアシンクロナスマータ推進は一組みの技術と考えられている。実際にはこのような考え方に異論もあるが、いずれにしても確実な根拠といえる実験事実や開発経験が皆無に等しい未来の技術なので、このへんの検討を確かなものにするためにも具体的な実験、研究を積み重ねてゆくことが必要と思われる。

特にループ軌道では、その断続的な構造からいっても車体の周期的な振動の問題、超電導コイルにはいつてくる交番磁界の問題など、明りょうにはあくして対策の要するものなら、その対策を検討しつつしておくことが超電導磁気浮上方式超高速列車の実現のために大切なことであるといえる。

一方、これに使われる超電導磁石の側からいうと、

Experimental Studies for a Magnetically Suspended High Speed Train Using the Superconducting Magnet. By Y. SAITO, Member I. TAKANO, Member S. MATSUDA, Member & H. OGIWARA, Member (Toshiba Research and Development Center).

斎藤幸信：正員，東京芝浦電気株式会社総合研究所

高野一郎：正員，東京芝浦電気株式会社総合研究所

松田正治：正員，東京芝浦電気株式会社総合研究所

荻原宏康：正員，東京芝浦電気株式会社総合研究所

車体に組み込むという使用状態からくる形のうえでの制約の他に、超電導磁石としての動作の安定性、さらに超高速列車の運転費の一部として、その経済性を考えるうえで重要な事項となる液体ヘリウムの蒸発量に結びつく問題が何かを見きわめて、その対策をたてることなどが必要となる。

単に超電導コイルそのものを使って浮上特性を調べる研究は従来用いてこられた物理実験用の小さな超電導磁石に多少手を加えることによって可能で、実際そのような実験により浮上特性を検討した結果は、これまでにもいくつか報告されたことがある。^{(8)~(10)}

このような研究に続くものとして、実際に車体に組み込んで、少くとも現状での試験線でいどの実用研究を可能にするような超電導磁石の試作の検討がある。そのようなモデル超電導磁石の設計、試作、性能試験を通じて、試験線車両用、実車用の超電導磁石の設計法、製作技術、運転技術を蓄積してゆくことが必要と考えられる。実用規模に近いモデル超電導磁石の試作目標の選定と開発結果に関しては、すでに報告したとおりである。⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

この報告では、以上の目的、方針によって試作されたモデル超電導磁石 M-1 を用いて行なった浮上特性関係の実験結果について検討を行なった。

この報告中、第2章ではモデル超電導磁石とその試験装置を説明し、第3章ではループ方式及びシート方式の回転円板軌道を用いて行なった浮上実験の結果を述べる。第4章では実験結果に検討を加えた。

2. 実験装置

実験装置はモデル超電導磁石 M-1 と、これに静的に電磁力を加えて、超電導磁石の内部構造の強靱性や浮上力、横方向力の大きさを測定して超電導磁石の軽量を調べる静的浮上実験装置と、直径 3.1m、外周速 120 km/h までの速度の出せる回転円板軌道を用いて誘導反発方式の浮上特性を調べる動的浮上実験装置から成り立っている。

〈2.1〉 モデル超電導磁石 M-1 超電導コイルはニオブチタン合金超電導線を変形レーストラック形に巻いたもので、後述の回転円板軌道の半径に合わせて 1.2×0.3 m のレーストラック形ソレノイドコイルをアーク状に変形している。この超電導コイルの構造、電気的性質は第1表に示したとおりである。超電導コイルは第1図に示した外形のクライオスタットに収納し全体として高さ 0.55m、長さ 1.55m、幅 0.67m の超電導磁石にまとめた。超電導コイルに加わる力は、垂直方向には図に見える四本の円筒（タワーまたはエ

第1表 超電導コイルの諸元

Table 1. Specification of superconducting magnet.

超電導線材	0.25mmφ NbTi
超電導線外形	5.0×1.2 mm ²
コイル寸法	300×1,200 mm
起磁力	200 kAT
巻線方式	ソレノイド
形状	変形レーストラック
自己インダクタンス	190 mH
中心磁界量	5.6 kG at 200 kAT
重	60 kg

第1図 磁気浮上用超電導磁石

Fig. 1. View of superconducting magnet for magnetically suspended vehicles.

第2図 静止浮上実験装置

Fig. 2. Static levitation test facility.

ントツと呼ぶ)を通してクライオスタットの上面のふたで受け、横方向にはサスペンションワイヤを使って固定してある。このクライオスタットの液体ヘリウム蒸発量は、液体ヘリウム液面の高さによって変わり、通電時、非通電時とも 4~10 l/h であった。さらに詳細については先に報告したとおりである。⁽¹²⁾

〈2.2〉 静止浮上実験装置 超電導磁石に、外部から加えられた静的な電磁力の超電導性に及ぼす影響を調べ、車上コイルと軌道コイルの相対的位置による浮上力や横方向力の発生の様子をみ、さらに実際に大きな超電導磁石を電磁的に浮かせてみるために、第2図に示したように超電導磁石をつり下げておき、その下に外部直流電源で励起される常温（水冷中空の）コ

第3図 静止浮上実験の概念図

Fig. 3. Concept of static levitation tests.

イル三群を設けた静止浮上実験装置を作った。これら三群の地上コイルと超電導コイルは第3図に示すように配置されている。三群のコイルのうちコイル1は超電導コイルと同形同大のコイル、コイル2は超電導コイルの半分の長さの四個のコイルから成っており、これらはいずれも水平に置かれていて、超電導コイルと対面している。第3の地上コイルは垂直に置かれていて、主に車上コイルを中心位置に引き寄せるように使われる安定化コイルといわれるものであり、大きさはコイル1と同じである。これらのコイルは架台の上にまとめて設置され、超電導コイルに対してそれらの位置を前後左右及び上下に別々に移動することができるようになっており、超電導コイルと地上コイル相互の位置を任意に変えて試験できるように構成されている。そして、いずれも起磁力が超電導コイルのその1/10 になるように作られていて、設計値において超電導コイル 800 kg にの浮上力を発生できているようになっている。

〈2・3〉 動的浮上実験装置 超電導磁石(車上コイル)とクローズドループにした常電導コイル(軌道コイル)の間に相対速度を持たせて、いわゆる誘導反発方式で浮上実験をするために、第4図に示すようにロ

第4図 動的浮上実験の概念図

Fig. 4. Concept of dynamic levitation tests.

ードセルを介して超電導磁石を支持装置に取り付けて固定し、その下で浮上用の水平コイルと安定化用の垂直コイルを一組にしたもの12個が埋めこまれている回転円板を回転させる方法を使うことにした。浮上用コイルの中心は直径2.5mの周上にあって空間的な位置は固定されているので、超電導磁石を取り付けた支持装置を上下及び左右(半径)方向に可動式にして、両コイル間の相対的な位置を変えられるようにした。回転円板一式はピット内に設置されており、円板は直流電動機によって駆動される。

一般に磁気浮上系の浮上特性は第5図のように、浮上力は高速で飽和傾向を示し、磁気ドラッグは低速側に顕著な山を持ち、高速側では減少する。⁽³⁾⁽⁴⁾ 実験する最大の速度の値としては浮上力が十分飽和領域に入り、磁気ドラッグも単調減少領域にはいつている値として100 km/hを選んだ。実際にはコイル規模の選定のときに、コイル長さとその曲率の決定でもこの点が加味されていた。現状で作りうる周速100 km/h(実際には最外周で120 km/h)の回転円板として、直径3.1

第5図 浮上力と制動力の一般的な速度特性

Fig. 5. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

第6図 回転円板

Fig. 6. Section of rotating disk.

第2表 コイル軌道とシート軌道の概要

Table 2. Specifications of coil track and sheet track.

コイル軌道	コイル寸法	300×550 mm
	断面	100×60 mm
	材料	中空平角銅線
	抵抗	0.1 Ω
	自己インダクタンス	7.32 mH
シート軌道	コイルピッチ	654 mm
	直径	3,100 mm
	厚さ	10 mm 及び 30 mm
	材料	アルミニウム

m, 超電導コイルに対して半分の長さのピッチで常電導コイル, 浮上用 12 個, 安定化用 12 個を周上に第 6 図のように埋設したエポキシ・ファイバグラス製の回転円板軌道を作った。シート軌道方式の実験では, この円板上にこれと同半径のアルミニウム円板をのせて回転させた。軌道側のコイル及びシートに関する定数を第 2 表に示した。

〈2.4〉測定 測定は浮上力などの力に関する測定, 磁束関係, 軌道コイルに誘起される電流などの測定, 液体ヘリウムの蒸発量や各部温度の測定を行っている。

〈力の測定〉浮上力, 横方向力, 前後方向の力, 第 2 図, 第 4 図に示したように超電導磁石を懸垂固定したワイヤの途中にロードセルを組み込んで測定した。ロードセル出力は直流増幅器を通してペン書きオシログラフに記録, または電圧計に, 個々に表示させたほか, 垂直方向の四つのロードセルの出力の和を表示させて, 超電導磁石全体にかかる浮上力も読んでいる。なお, このような測定法では電磁力が大きいところでは各方向のワイヤが相互作用をしていて浮上力と横方向力の正確な分離が困難になる。ここでは超電導コイルと地上コイルの中心のずれの大きさを制限したり, 横方向のワイヤを外したりして, この問題を小さくしようとしている。しかし, コイル成形精度や超電導磁石の重量の分布, 力の支持点の選び方などのために, この点の精度の高い定量的な議論には限界がある。この他, 円板駆動用電動機の入力からも磁気ドラッグを測定している。

〈磁束の測定〉超電導コイルの発生磁束は, コイル成形わくに取り付けた磁わい素子, ホール素子によって行なった。軌道コイルの磁束の影響は, この他, 超電導磁石の底面や回転円板上に取り付けたサーチコイルによって測定している。この他, ホール素子を使った磁束計を用いて超電導磁石の周辺の磁束分布を測定した。

〈軌道コイル電流の測定〉軌道コイルに誘起される電流は, 軌道コイルの一つに組み込んだ電流シャントの出力を, 円板中央のスリッピングから出して測定している。安定化コイルの電流も同じ方法によった。

〈軌道コイル, シートの温度測定〉軌道コイルの温度上昇はコイルに取り付けた銅コンスタンタン熱電対によって測定した。また, これらのコイルの冷却水の出口温度も測定している。実験中の水温上昇は 10°C 以内であった。シートの温度上昇は, シート面に銅コンスタンタン熱電対を取り付け, その出力をスリッピングから取りだして記録, 測定した。シート温度の上昇は最大のもので, 10 mm 厚アルミシートの 8°C であった。

3. 実験結果

〈3.1〉静止浮上実験 超電導磁石と軌道コイルの間隔を一定に保って, ある一定の電流値に励磁してある超電導コイルに対向している常電導コイルの電流を増加してゆくと, 浮上力が超電導磁石の重量を上まわらない範囲で, 浮上力が測定できる。第 7 図に超電導コイル電流 400, 500 A, 二つのコイルが間隔 183 mm で正対しているときの浮上力を示した。一方, 電磁力を受けた超電導磁石が浮上してゆく様子を第 8 図に示した。超電導磁石の転覆というような不測の事態を回避するために, 四本のつりワイヤには, それぞれ 50 kg ずつのカウンタウェイトを付けてある。浮上高さは超電導磁石の前後端で測った値の平均を記録してある。浮上が早めにはじまっているのは, 二つのコイルの中心が厳密には一致していないため, 超電導磁石が横に移動したためである。この実験は超電導コイル

第 7 図 浮上力と軌道コイル起磁力の関係
Fig. 7. Magnetic lift force versus m.m.f. of track coil.

第 8 図 実浮上高さと軌道コイル起磁力の関係

Fig. 8. Visual suspension characteristics.

が外部から働く電磁力に対して安定なこと、超電導磁石の内部構造が所要の浮上力を生み出すような電磁力に対して堅固なこと、十分に軽く作られていて実際に浮かすことができることを明らかにするために行ったもので設計どおりの満足すべき結果が得られたものと判断した。この他の静止浮上実験で得られた結果はさきに報告してあるとおりである。⁽⁵⁾

〈3・2〉 動的浮上実験-コイル軌道 コイル軌動の回転円板実験は第 3 表のような条件で行なわれた。実験は超電導磁石の高さと超電導電流を一定に設定したのち、円板軌道の回転を起動させ 10, 20, 40, 60, 80, 100 km/h ごとに計測を行ないながら回転を早め、再び 0 にもどしたあとで、次の超電導磁石の高さ、超電導電流を設定して回転をはじめる、というような順に行なわれた。浮上力と磁気ドラッグの測定結果の一例

第 3 表 コイル軌道実験項目

Table 3. Details of coil track experiments.

安定化コイル	超電導コイル起磁力 (AT)	ギャップ (cm)	径方向変位 (cm)	速度 (km/h)	備考
開	0.4×10^5	22	0	0~100	SC コイル電流特性
"	0.8×10^5	"	"	"	
"	1.2×10^5	"	"	"	
開	0.8×10^5	18	0	0~100	浮上高さ特性
"	1.2×10^5	26	"	"	
開	0.8×10^5	22	5	0~100	横方向力特性
"	"	"	10	"	
"	"	"	15	"	
"	"	"	20	"	
開	0.8×10^5	22	20	0~100	シールド特性
"	"	"	15	"	
"	"	"	10	"	
"	"	"	5	"	
"	"	"	0	"	
閉	0.8×10^5	22	0	0~100	安定化コイル特性
"	"	"	5	"	
"	"	"	10	"	
"	"	"	15	"	
"	"	"	20	"	

を第 9 図、第 10 図に示した。

ここに記録した値は浮上力、磁気ドラッグの平均の指示をそのまま用いたものである。しかし実際には、軌道コイルが小さなコイルの配列という断続構造のものであるため、これに対応した電磁力の変動が、平均値の上に重畳している。この様子を明らかにするため浮上力と磁気ドラッグを同時にペン書きオシログラフに描かせるとともに、X-Y 記録計で記録した。その一例を第 11 図に示した。どちらも振動成分をもって

第 9 図 浮上力と制動力の速度特性 (コイル軌道)

Fig. 9. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

第 10 図 浮上力と制動力の速度特性 (コイル軌道)

Fig. 10. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

第 11 図 浮上力と制動力の速度特性 (コイル軌道)

Fig. 11. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

第 12 図 動的浮上実験装置

Fig. 12. View of dynamic levitation test facility.

第 13 図 軌道コイル電流波形

Fig. 13. Wave form of track coil current.

第 14 図 横方向力の横方向変位特性

Fig. 14. Transverse force versus transverse displacement.

おり、特に低速域で浮上力に現れる振動は顕著である。これは超電導磁石のつり機構、架台、冷却系配管などの共振により著しく目だっていることが後に全構成に種々の機械的衝撃を与えて、種々の部位の振動モードを検討することによって明らかになった。超電導磁石、その架台、回転円板軌道、冷却配管などを含む

全実験構成を第 12 図に示した。もちろんこのような振動、共振の原因は軌道コイルの断続構造にあるもので、個々の軌道コイルに流れる第 13 図のような電流のいくつかの軌道コイルからの寄与が浮上力、磁気ドラッグとなっていることは明らかである。

超電導磁石を、回転軌道の中心線から横方向にずらしていったときの横方向の測定結果を第 14 図に示した。この図には安定化コイルを開放にしたときと短絡したときの横方向力を比較してある。安定化コイルの影響は、ずれの大きいところでわずかにきいている。超電導磁石を外に押しやろうとする横方向力を多少減少させているだけであることがわかる。

〈3・3〉 動的浮上実験-シート軌道

シートはアルミニウム製で二枚を中央で溶接して一枚の円板にしている。厚さ 30, 10 mm の二種の円板を用意した。この円板をコイル軌道円板の上に乗せて固定し回転させた。コイルは埋め込んでしまっていてははずせない。

実験の進め方はコイル軌道の場合と同じである。しかし、ここで用いた回転円板の駆動系はもともとコイル軌道方式の実験のために用意されたものなので、はじめに述べたようにシート軌道の磁気ドラッグに勝って円板を回すために、超電導磁石のつりあげる高さも超電導電流も、コイル軌道実験の場合より高く、また小さく設定しなければならなかった。浮上力と磁気ドラッグの測定結果の例を第 15 図、第 16 図に示した。30 mm 厚のシートの場合の浮上力、磁気ドラッグを

第 15 図 浮上力と制動力の速度特性

Fig. 15. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

第 16 図 浮上力と制動力の速度特性 (シート軌道)

Fig. 16. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

第 17 図 浮上力と制動力の速度特性
(シート軌道)

Fig. 17. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

第 18 図 浮上力と制動力の速度特性
(シート幅効果)

Fig. 18. Magnetic lift and drag forces versus train speed.

X-Y 記録計に描かせた結果の一例を第 17 図に示した。シート実験で印象的だったのは実験構成に振動がほとんど現われなかったことであった。コイル軌道実験では全体で 15 トンにもなる超電導磁石と架台、定盤、配管系が、低速域で目に見えるほど大きい振動を見せたのに、シート軌道実験とくに 30 mm のシートを使ったときにはそのような振動は全く見られなかった。しかし第 17 図によると浮上力、磁気ドラッグともに振動成分を持っているが、これは後に検討するようにシートの下のコイルの影響が入っているためと考えられる。

超電導磁石を回転円板の端のほうへずらしていったときの浮上力特性の変化の測定結果を第 18 図に示した。

4. 実験結果の検討

〈4・1〉 浮上力、磁気ドラッグ コイル軌道の浮上特性の計算は高野氏などの理論⁽¹³⁾ によった。この理論は水平に置かれた一個のコイルに、一定の高さに保たれた水平コイルが近づき、遠ざかるときの相互誘導係数の変化をもとに、軌道コイルの誘起電流を求め全コイル系の電磁エネルギーの微分から浮上力、磁気

第 19 図 アルミニウム板の表皮深さと速度の関係

Fig. 19. Skin depth of aluminum plate versus train speed.

ドラッグなどを計算する方法で、軌道コイル列の影響は、この単位系の結果の総和として決めることができる。この方法の特徴は、はじめから軌道コイル列を考えに入れた周期解⁽³⁾の方法に比べて、試験線車両などの段階にでてくる短い車両構成の影響や車上コイル群の端部効果を調べることのできる点にある。計算の結果は第 9 図、第 10 図に描き込んである。

また、一個の軌道コイルに誘起される電流波形も、第 13 図に実験結果と比較のために書き込んである。理論との一致は比較的良いが、実験の波形に見られる振動分の原因は不明である。この点はさらに詳細な検討が必要である。

シート軌道に関する浮上特性の計算は Reitz 氏らの理論⁽¹⁶⁾に従った。計算で求めた浮上特性は、実験結果よりも大きく、コイル軌道の場合の理論と実験との対応性に比べて良くない。この実験で用いたアルミニウムシートの、軌道コイルのくり返しピッチと速度に対応する、表皮効果の厚みは第 19 図のようになるから厚さ 30 mm のシートが 100 km/h 近くで回転する場合以外は、土台の円板の中に埋められているコイル軌道にも電流が誘起されている。このコイル中の電流の変化は超電導磁石側からみると、シートによってしゃへいされる。しゃへい電流は超電導磁石を浮かすシート電流を減少させる方向に流れて、浮上特性を理論より低くしているものである。

〈4・2〉 コイル軌道とシート軌道の比較 はじめに述べたように二つの軌道方式の大きな差違は、軌道コイルとシートで、同じ大きさの浮上力を生み出すための電流の配分の違いである。このことは軌道コイルでのジュール損、すなわち磁気ドラッグの差違として現われてくる。このことに着目して二つの軌道方式の比較を電磁揚抗比、すなわち浮上力と磁気ドラッグの比によって検討することができる。第 9 図、第 10 図

第 20 図 揚抗比の速度依存性

Fig. 20. Magnetic lift-to-drag ratio versus train speed.

及び第 15 図, 第 16 図から求めた電磁揚抗比を第 20 図に示した。この図によると電磁揚抗比に関する限り二つの方式はほとんど同じ特性をもつといえる。

〈4・3〉 横方向力, 安定性, 案内性 第 14 図, 第 18 図で示したように超電導磁石をコイル軌道の中心線やシート軌道のシート端から横方向にずらしてゆくと浮上力が減少すると同時に, 超電導磁石をさらに横方向に押し出そうとする力が動く。この横方向の力は, 第 14 図から明らかなようにずれがコイル幅ほどにならないうちに, 浮上力の大きさを上まわる。この力にうち勝って超電導磁石を軌道コイル中心線やシート軌道上に保っておく力を発生する手段を付加しないかぎり誘導反発方式の超高速列車は実現できない。ここで調べたたて置の安定化コイルがほとんど役に立たないものであることは第 14 図に示されているとおりである。横方向力が浮上力とほぼ同程度の大きさであることを考えれば, 案内のためにも浮上のためと同程度の力を出せるものが必要となることがわかる。このような系を一つの超電導磁石で構成する方法はさきに提案したとおりである。⁽¹⁷⁾

5. ま と め

超高速列車の磁気浮上のために用いられる超電導磁石の設計法, 製作技術, 運転法を検討するために開発された実規模のモデル超電導磁石を用いて行なった浮上実験について報告した。

浮上特性は静止した常電導コイルを用いて静的に,

また周速 120 km/h の回転円板を用いてコイル軌道方式及びシート軌道方式の浮上特性を動的に測定した。同じ程度の浮上力を得るために, シート軌道のほうがより少い超電導コイル電流, より大きな浮上高さであった。このときの電磁揚抗比はほぼ同程度であった。

一方, 超電導磁石に作用する電磁力は, コイル軌道ではその断続的な配列構造に対応して, 大きな変動成分を含んでいた。

超電導磁石を横にずらしたときに生じる横方向力はわずかなずれで浮上力と同程度の大きさになって, たて置きコイルではほとんど役に立たないことが確かめられた。

磁気浮上特性の理論とそれによるモデル浮上系の計算結果,⁽³⁾ モデル超電導磁石の構造と規模を決めるための検討,⁽⁷⁾ モデル超電導磁石の開発経過とその低温技術的な特性⁽²⁾については, 先に報告したとおりである。本実験結果に基づいた理論の検討, 実験系の詳細な検討については別に報告する。

この研究は一部昭和 46 年運輸省試験研究補助金によって行なわれたものである。研究の遂行にあたってご援助をいただいた, 国鉄本社開発室 京谷好泰主幹及び日大理工学部教授 安河内 昂博士に感謝の意を表するものである。また, この研究の推進に力を注がれた昭和電線電纜株式会社及び東京芝浦電気株式会社交通事業部, 府中工場回転機設計課, 総合研究所工務部, 材料研究所, 電気機械研究所の諸氏に心から感謝の意を表明するものである。(昭和 48 年 5 月 26 日受付)

文 献

- (1) 奥・京谷・佐賀: 超高速新幹線 (昭 46) 中央公論社
- (2) J. R. Powell & G. T. Danby: Cryogenics 192 (1971-6)
- (3) 山村: 電学誌 91, 2215 (昭 46-12)
- (4) C. Guderjahn & S. Wipf: Cryogenics 11, 3, 171 (1970)
- (5) J. R. Powell & G. T. Danby: Cryogenics 11, 3, 192 (1970)
- (6) 石川・山村: 昭 47 電気学会全国大会論文集 783
- (7) 萩原, 他: 東芝レビュー 27, 7, 625 (昭 47)
- (8) 松田, 他: 第 7 回低温工学研究発表会予稿集 22a-S-9 (昭 46)
- (9) 宇佐美・葛生・岩花: 昭 47 電気学会全国大会 No. 11
- (10) R. H. Borcherts: ICEC-4 予稿集 J-1 (1972)
- (11) N. Takano: ICEC-4 予稿集 J-3 (1972)
- (12) 鈴木, 他: 低温工学 7, 5, 18 (昭 47)
- (13) 高野・斎藤・萩原: 第 9 回低温工学研究発表会予稿集 2-4 (1971)
- (14) 山田・岩本: 電学誌 92, 19 (昭 47-1)
- (15) H. Ogiwara: ICEC-4 予稿集 J-4 (1972)
- (16) J. R. Reitz: J. Appl. Phys. 41, 2067 (1970)
- (17) 松田・斎藤・萩原: 低温工学 7, 3, 124 (1972)