

超電導磁気軸受の回転損失特性の研究

亀野浩徳 宮川裕豊 高畑良一 上山拓知

Rotation Loss Characteristics of High-Tc Superconducting Magnetic Bearings

H. KAMENO Y. MIYAGAWA R. TAKAHATA H. UEYAMA

As electric power requirement has been increasing steadily, introduction of a flywheel energy storage system (FESS) using a superconducting magnetic bearing (SMB) is needed to level daily required electric load as much as possible. We have studied rotation loss characteristics of SMBs with high-Tc superconductors (YBCO) & permanent magnets (PM) for supporting a flywheel in FESS. We have designed and manufactured a testing machine for measuring rotation loss characteristics of SMBs. The rotor is suspended by two sets of radial active magnetic bearings (RaAMBs), a set of axial active magnetic bearings (AxAMB) and a set of SMB. Then, we obtained rotation loss characteristics of the rotor levitated by RaAMBs, AxAMB and SMB on this testing machine.

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. はじめに 2. 実験装置および実験方法 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 実験装置 2.2 超電導磁気軸受の浮上力特性 2.3 実験方法 | <ul style="list-style-type: none"> 3. 実験結果および考察 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 超電導磁気軸受の回転損失特性 3.2 超電導磁気軸受の浮上力低下 3.3 超電導体過冷却の効果 4. 結論 5. おわりに |
|--|---|

1. はじめに

1987年にChuらは臨界温度が90Kの高温超電導体 Y-Ba-Cu-Oを発見した¹⁾。それ以来、液体ヘリウム(4.2K)よりも取扱いの容易な液体窒素(77K)による冷却で、比較的簡単に超電導現象が得られるようになった。そして、バルク超電導体の反磁性効果を利用し、永久磁石を非接触浮上させる超電導磁気軸受(SMB)の応用研究が進められるようになった。一般に、SMBの磁気浮上は制御が不要で、SMBの回転損失は理想的にはゼロといわれている。

一方、近年の電力需要増大とともに、電力の日負荷平準化を目的としてフライホイール電力貯蔵装置(FESS)の導入が求められている。FESSは過去にも研究されていたが、転がり軸受を使用していたため回転損失が大きく、長時間の電力貯蔵には問題があった。また、金属製フライホイールを使用していたため、高速回転には向かなかった。

そこで近年、回転損失の小さいといわれるSMBと、比強度の高い炭素繊維強化プラスチック

ク(CFRP)製フライホイールを利用したFESSについて、種々の研究が活発に行なわれるようになってきた²⁾。

現在、SMBの回転損失については、非常に小さいとの報告はあるものの、実際的な条件下での特性については不明な点が多い³⁾⁴⁾⁵⁾。また、SMB浮上力の低下についても報告されており、FESSに应用する場合、その改善は重要な課題となっている⁶⁾⁷⁾。

そこで本研究では、SMB負荷と回転数を種々に設定した実際的な条件下において、SMBの回転損失特性およびSMB浮上力の低下の改善方法を明らかにすることを目的として、本研究を実施した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

設計・製作した回転損失測定試験機の概略図を図1に示す⁸⁾。本試験機は真空チャンバ内に設置され、以下の部品で構成される。①主軸(main

shaft) ②誘導モータ(induction motor) ③2組のラジアル制御型磁気軸受(RaAMB) ④1組のアキシャル制御型磁気軸受(AxAMB) ⑤SMB [超電導体(SC), クライオスタット(C/S)および永久磁石(PM)で構成される]

なお, SMBの固定側(SCとC/S)はZ stageによりロードセルを介して軸方向に移動可能である.

また, 本試験機では供試SMBとして, ラジアル超電導磁気軸受(RaSMB)とアキシャル超電導磁気軸受(AxSMB)のどちらでも取付けることが可能であるが, 本研究ではRaSMB(以下SMBと称す)を供試SMBとした.

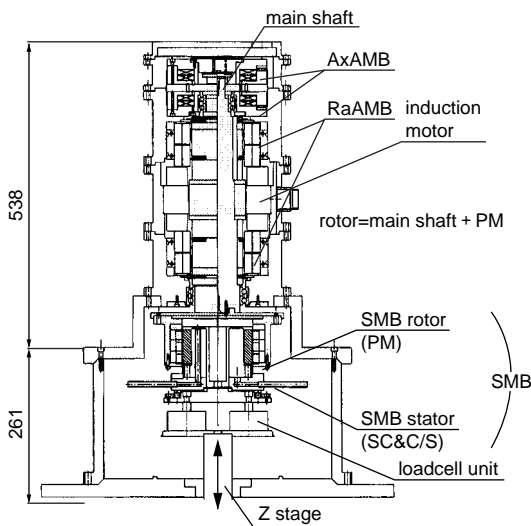
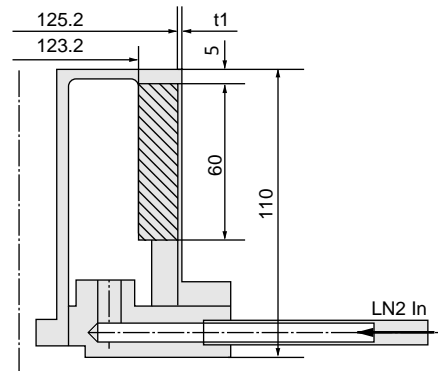


図1 回転損失測定試験機の概略図

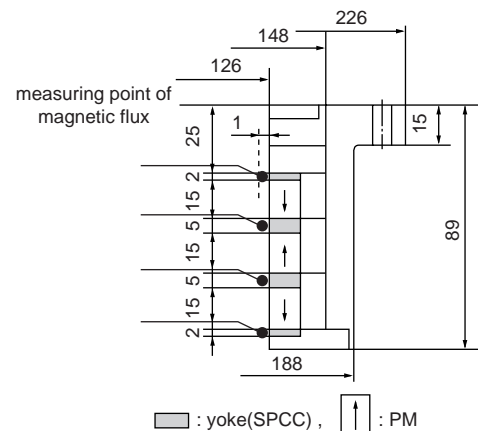
Cross section view of apparatus



□: cryostat(C/S), ▨: superconductors(SC)

図2 SMB固定側の概略図

Cross section view of SMB stator (SC&C/S)



□: yoke(SPCC), ▮: PM

図3 SMB回転側の概略図

Cross section view of SMB rotor (PM)

2.2 超電導磁気軸受の浮上力特性

SMBの固定側には, 8個のYBCO系SCを周方向に接着し, SUS304製のC/S内部に内蔵したものをを用いた(図2). 一方, SMBの回転側には, 図3のように矢印方向(↑↓)に着磁されたPMを軸方向に3層積層したものをを用いた. なお, PMとSCのギャップは1.4mm(半径方向:C/Sのシールプレート厚1mmを含む)である.

また表1に示すように, 本研究では, 周方向磁場のむら B/B_{max} の異なる2種類のPMを用意した. 同表より, Pr系磁石(RaPMPr)よりもNd系磁石(RaPMNd2)の方が磁束密度 B_{max} が大きく, B/B_{max} の小さいことがわかる.

ここで, SMBの浮上力性能を図4に示すが, SMB浮上力はRaPMNd2を用いた方が大きい.

表1 RaPMPrとRaPMNd2の周方向磁場のむら
Irregularity of magnetic flux of RaPMPr & RaPMNd2

RaPM	point	flux density, T			
		B_{max}	B_{min}	$\Delta B = B_{max} - B_{min}$	$\Delta B / B_{max}$
RaPMPr	①	0.43	0.28	0.15	0.349
	②	-0.55	-0.58	0.03	0.052
	③	0.60	0.55	0.05	0.083
	④	-0.41	-0.44	0.03	0.068
RaPMNd2	①	0.52	0.48	0.04	0.077
	②	-0.72	-0.74	0.02	0.027
	③	0.75	0.72	0.03	0.040
	④	-0.49	-0.52	0.03	0.058

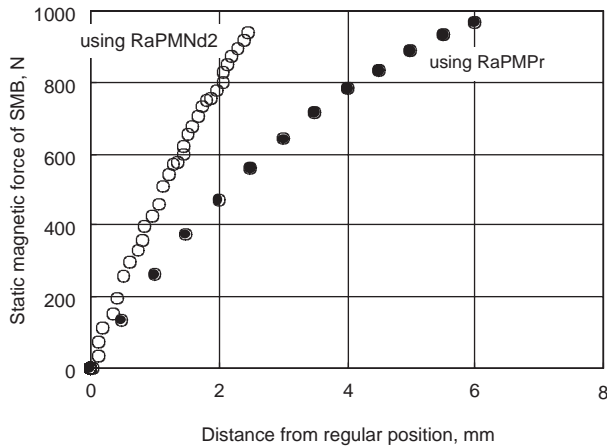


図4 SMBの浮上力性能

Static magnetic force of SMB in axial direction

2.3 実験方法

実験は次の手順で行なった。

- ①回転体(主軸+PM)をRaAMBとAxAMBで浮上させる。このとき、回転体自重はAxAMBに支持される。
- ②SMBの固定側を回転側に対して正規の位置に配置し、SCをPMの磁場中で液体窒素により冷却する。
- ③SCが臨界温度以下まで冷却されたら、SMBの固定側を軸方向上側へ移動させる。このとき、SCはPMに対して磁気力を発生するので、SMBは回転体自重を支持し始める。(それとともにAxAMBの支持力は小さくなる)
- ④約20分経過後、回転体を目標回転数まで増速し、その後モータ駆動を停止し、回転体をフリーランさせる。
- ⑤次式によりフリーラン時の回転減衰から、RaAMB、AxAMBおよびSMBにより非接触支持された回転体の回転損失を算出する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{回転エネルギー} : E(t) = [I_z \omega(t)^2] / 2 \quad (1) \\ \text{回転損失} : W(t) = [E(t) - E(t + \Delta t)] / \Delta t \quad (2) \end{array} \right.$$

ここで、 I_z : 慣性モーメント
 Δt : 経過時間
 $\omega(t)$: 角速度
 Δt : サンプリング時間

なお本論文では、ステップ③においてSCの発生する磁気力を初期負荷(F_{init} : initial SMB load)と呼ぶ。

本研究の基本条件を表2に示す。

表2 基本条件
Experimental conditions

	pressure	less than 0.27Pa(0.002Torr)
rotor	rotation speed	6 000min ⁻¹ (max.)
	length of rotor	504mm
	diameter of rotor	100mm(max. of Main Shaft) 226mm(max. of PM Unit)
	mass of rotor	32.25kg
AMB	bias current of RaAMB	1.5A(material of rotor core : Amolphas)
	bias current of AxAMB	1.0A
SMB	permanent magnet	· Pr(RaPMPr) · Nd(RaPMNd2)
	superconductor	YBCO(RaSC8)

3. 実験結果および考察

3.1 超電導磁気軸受の回転損失特性

表3に示す実験条件下において、SMBの回転損失特性試験を行なった。

図5にRaPMPrを用いたSMBの回転損失特性を示す。ここで、同図の印はSMBの固定側を真空チャンバから取外し、AMBのみで回転体を支持した場合の結果で、AMB損失を示す。なお、AMB損失はAMBの状態やSMBの作動・非作動に関わらずほぼ一定である⁸⁾。一方、印はSMBの固定側を真空チャンバ内の正規位置に配置し、AMBのみで回転体を支持した場合の結果で、AMBとC/Sの損失を示す。このとき、印との差はC/S損失に相当する。ただし、このC/S損失は室温時の結果なので、厳密にはSMBを作動させた場合の低温時のC/S損失とは異なる。次に、その他の結果は、AMBおよびSMBで回転体を支持し、初期負荷を種々に設定した場合の結果で、AMB、C/SおよびSCの損失を示す。印との差は各初期負荷でのSC損失に相当する。

この結果より、SC損失はAMB損失に比較して相対的に大きいことがわかる。さらに、初期負荷が大きいほどSC損失の増大することもわかる。

次に、6 000min⁻¹におけるSC損失と初期負荷の関係を図6の印に示す。同図より、初期負荷の増加とともに、SC損失の増大することがわかる。

これらの結果よりSC内部には次の現象の発生していることが考えられる。①PMの磁場中で超電導状態に達したSCに磁気力を発生させるために、SCを軸方向上方へ移動させた時、SCの磁化が移動前とは変化する。②そのため、SCの磁化における周方向のムラが大きくなる。③その結果、回転時のヒステリシス損失が増加し、SC損失が増大する。(これらについては、今後より詳細な検討が必要である。)

なお、図6にはRaPMNd2を用いたSMBの結果(印)も示してある。同図より、RaPMNd2を用いた場合のSC損失はRaPMPPrの場合よりも小さいことがわかる。これは表1に示したように、RaPMNd2の周方向磁場のムラがRaPMPPrよりも小さいことによる効果である。この結果は、PMの周方向磁場のムラをさらに小さくすれば、SC損失を低減できることを示唆している。

表3 実験条件①
Experimental conditions ①

permanent magnet	・ Pr (RaPMPPr) ・ Nd (RaPMNd2)
parameter	・ Loss of AMB & C/S&SC (600N) ・ Loss of AMB & C/S&SC (400N) ・ Loss of AMB & C/S&SC (300N) ・ Loss of AMB & C/S&SC (200N) ・ Loss of AMB & C/S&SC (0N) ・ Loss of AMB & C/S ・ Loss of AMB
inner of () means initial SMB load. F_{init}	

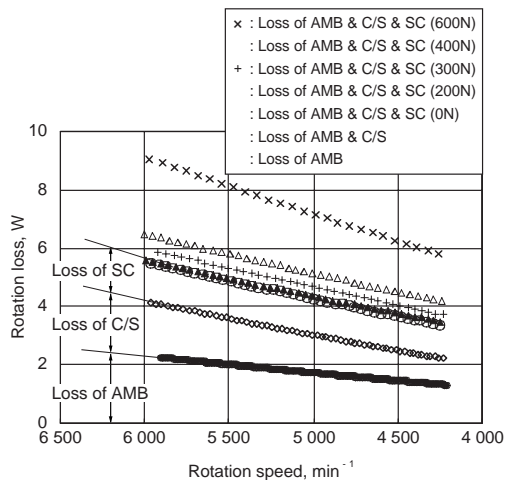


図5 回転損失特性(using RaPMPPr)
Characteristics of rotation loss (using RaPMPPr)

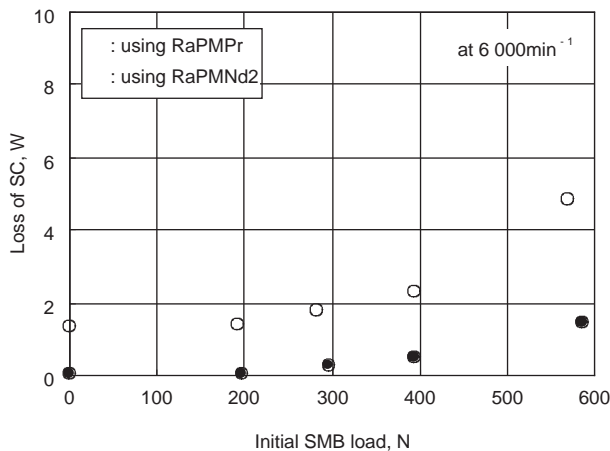


図6 超電導体の損失
Loss of SC about initial SMB load

3.2 超電導磁気軸受の浮上力低下

SMBの浮上力は時間の経過とともに低下し、次のA)、B)の過程で顕著であった。代表的な結果として、 $F_{init}=296N$ の場合の結果を図7に示す⁹⁾。

A) SMB初期負荷を付与した直後の数分間：主にSCのフラックスクリープに起因する。(図7の場合、浮上力低下は $F1=6.3N$)

B) 回転体の増速過程：主にSCの交流損失に起因する(図7の場合、浮上力低下は $F2=26.7N$)

SMBの浮上力低下への対策としては、初期負荷を付与する直前に、初期負荷よりも大きな一時的な予備負荷(F_p)付与の効果についての報告がある¹⁰⁾。そこで、本試験機において、予備負荷付与の効果を探るため、次の実験を行なった。実験条件を表4に示す。

代表的な結果として、 $F_{init}=293N$ を付与する直前に $F_p=534N$ の予備負荷を付与した場合の結果を図8に示す。同図より、 $F1$ および $F2$ が図7のそれよりも低減されたことが分かる。図9は $F2$ と F_p / F_{init} の関係を示すが、 F_{init} に関わらず、 F_p / F_{init} が大きいほど(つまり予備負荷が大きいほど) $F2$ は低減される。さらに、 $F_p / F_{init} \approx 2$ のとき $F2$ はほぼ0Nになった。このように、より大きな予備負荷を付与すれば、SMB浮上力の低下の改善されることがわかる。

このとき、SC内部には次の現象の発生していることが考えられる。①SMBに F_p を発生させるためSCを軸方向上方に移動させた時、SCの磁化は移動前とは変化する。②このとき、SCは F_p 付与時のPM磁場の影響を受け始める。③次に、SCを軸方向下方へ移動させ磁気力を F_{init} まで下げると、SC内には F_p 付与前のPM磁場の影響を受ける領域aと F_p 付与時のPM磁場の影響を受ける領域bが混在する。④ここで、SCの磁気力は、領域aでは時間の経過とともに低下するが、領域bでは増加する。⑤その結果、全体としてのSMB浮上力の低下は改善される。

ここで、予備負荷と回転損失の関係について検討する。6000min⁻¹における回転損失と F_p / F_{init} の関係を図10に示す。同図は $F_{init}=300N$ の結果であるが、 F_p / F_{init} が大きいほど回転損失(AMB、C/SおよびSCの損失)の増大することがわかる。

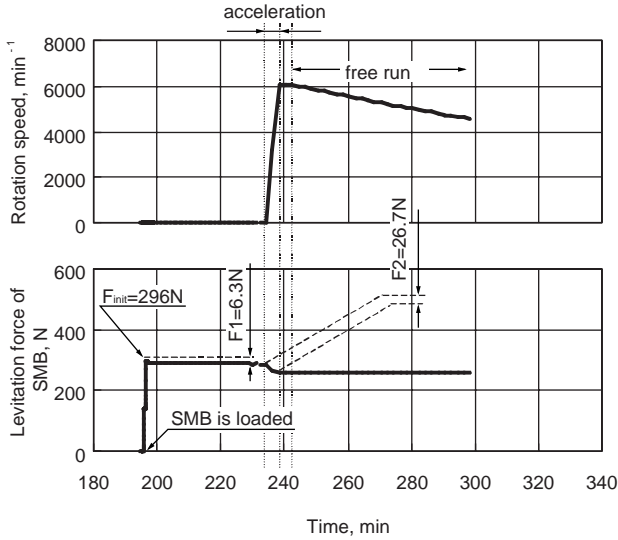


図7 SMB浮上力の低下($F_{init}=296N$)
Levitation force of SMB (without pre-load)

表4 実験条件②
Experimental condition ②

permanent magnet	Nd (RaPMNd2)
initial SMB load F_{init}	200, 300, 400N
pre-load F_p	1.4, 1.8, 2.2 $\times F_{init}$ N

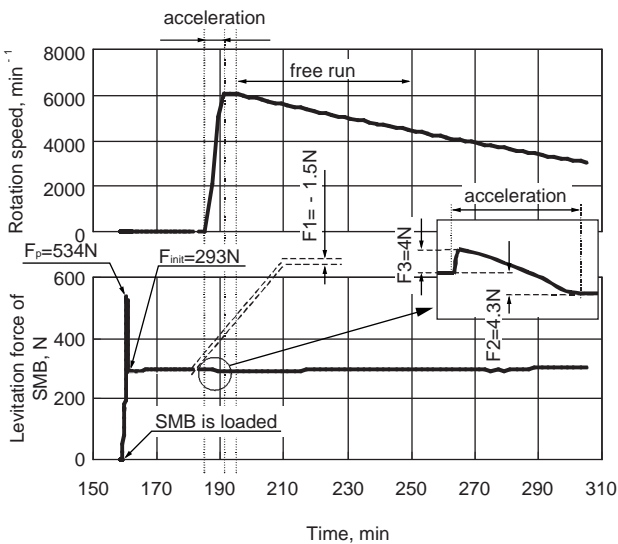


図8 SMB浮上力の低下($F_{init}=293N, F_p=534N$)
Levitation force of SMB (with pre-load)

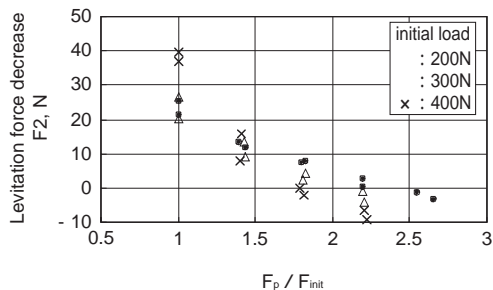


図9 $F_2 - F_p / F_{init}$ 線図
 F_2 v.s. F_p / F_{init}

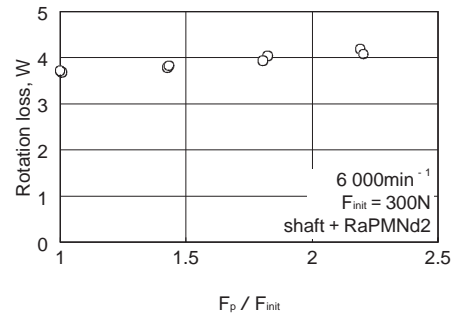


図10 予備負荷付与の影響
Rotation loss V.S. F_p / F_{init}

3.3 超電導体過冷却の効果

前述のように、SC損失はAMB損失に比較して相対的に大きかった。そこで、SC損失の低減を目的として、SCを77Kから66Kまで過冷却した場合の効果について検討した¹¹⁾。

実験条件を表5に、結果を図11に示す。同図より、初期負荷が同一の場合、SC冷却温度が低いほど、回転損失(AMB, C/SおよびSCの損失)の低減されることがわかる。

なお、予備負荷付与の手法ほど顕著ではなかったが、SMB浮上力の低下が若干ながら改善された。

表5 実験条件③

Experimental condition ③

permanent magnet	Nd (RaPMNd2)
initial SMB load F_{init}	0, 200, 300, 400, 600N
temperature of superconductors	66, 70, 77K

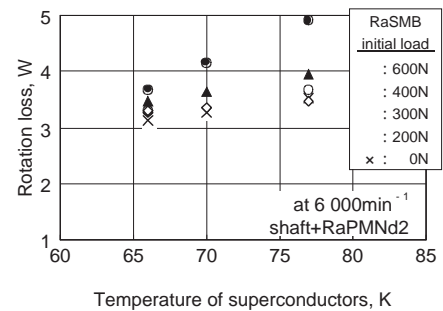


図11 超電導体過冷却の効果

Rotation loss V.S. temperature of superconductors

4. 結論

以上の結果を以下にまとめる。

- ①回転損失測定試験機により、制御型磁気軸受と超電導磁気軸受で非接触支持された回転体の回転損失特性を各種負荷条件下において測定できた。
- ②超電導体の損失は、超電導磁気軸受の初期負荷が大きいかほど増大した。一方、永久磁石の周方

向磁場のムラが小さいほど，超電導体の損失は低減された。

- ③超電導磁気軸受の浮上力低下は次の過程で発生した．A) 初期負荷を付与した直後の数分間 B) 増速の過程
- ④超電導磁気軸受に予備負荷を付与することによって，浮上力低下は改善された．ただし，予備負荷が大きいくほど，超電導体の損失は増大した．
- ⑤超電導体の損失は冷却温度が低いほど低減された．

5. おわりに

本研究により，SMB損失は低負荷では小さいものの，高負荷では大きくなり，AMB損失と同レベルであることがわかった．今後，SMB損失をさらに低減するには，周方向磁場のムラが極微小なPMの開発や，材質の均一なSCの開発が必要といえる．

一方，本試験機では，RaAMBの電磁石構造に低損失のホモポーラタイプを採用した．その効果により，従来のヘテロポーラタイプを採用した場合に比べ，AMB損失を約20%まで低減できた⁸⁾．これは，本研究の成果でもある．

本研究は『高温超電導フライホイール電力貯蔵研究開発(平成7～11年度)の一環として，新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託により実施した．

参考文献

- 1) C. W. Chu : Superconductivity at 93K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure, Phys. Rev. Lett., no.58 (1987) 908.
- 2) Y. Miyagawa, et al : A trial manufacturing of flywheel energy storage system using a high-Tc superconducting magnetic bearing, Preprint of Applied Superconductivity Conference, (1998) .
- 3) H. J. Bornemann, et al : Low Friction in A Flywheel System with Passive Superconducting Magnetic Bearings, Applied Superconductivity vol. 2, no.7 / 8, 439-447 (1994) .
- 4) J. Hull, et al : REDUCED HYSTERESIS LOSS IN SUPERCONDUCTING BEARINGS, Applied Superconductivity, vol.4, no.1 / 2, 1-10 (1996) .
- 5) J. Hull, et al : Low Rotational Drag In High-Temperature Superconducting Bearings, IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 5,

626-629 (1995) .

- 6) T. Hikihara, F. C. Moon : Levitation drift of a magnet supported by a High-Tc superconductor under vibration, Physica C 250, 121 ~ 127 (1995) .
- 7) 高畑良一，上山拓知，宮川裕豊，亀野浩徳：超電導磁気軸受支持 0.2kWh級電力貯蔵フライホイール回転体の試作, KOYO Engineering Journal, no.151 (1997) 12.
- 8) H. Kameno, et al : A Measurement of Rotation Loss Characteristics of High-Tc Superconducting Magnetic Bearings and Active Magnetic Bearings, Preprint of Applied Superconductivity Conference, (1998) .
- 9) H. Kameno, et al : Improvement on Levitation Force Decrease of Superconducting Magnetic Bearing, Preprint of International Symposium on Superconductivity, (1998) .
- 10) 岡野 他：軸振動下における超電導軸受の浮上力, 1997年度秋季低温工学・超電導学会 講演概要集(1997) .
- 11) 亀野浩徳 他：高温超電導磁気軸受の回転損失(過冷却の効果), 第59回 1998年度秋季低温工学・超電導学会 講演概要集(1998) .

筆者



亀野浩徳*
H. KAMENO



宮川裕豊**
Y. MIYAGAWA



高畑良一***
R. TAKAHATA



上山拓知*
H. UEYAMA

* 総合技術研究所 電子システム研究所
電子システム技術開発部

** 軸受事業本部 製品技術センター
航空・精密機器技術部

*** 総合技術研究所 電子システム研究所
電子システム技術開発部 工学博士