

高温超電導フライホイール電力貯蔵装置の研究開発

高畑良一 宮川裕豊 亀野浩徳 上山拓知

Development of High Temperature Superconducting Flywheel Energy Storage System

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

For a practical model of 10MWh high temperature-superconductor flywheel energy storage system, studies of rotor vibration controll and superconducting magnetic bearing loss have been carried out.

Two flywheels having 400mm in diameter were accelerated up to 30 000 min⁻¹ with no contact bearings, a superconducting magnetic bearing and active magnetic bearings, in a 0.5kWh class small size flywheel model. A middle size flywheel having 1 000mm in diameter has been accelerated up to 8 000 min⁻¹ in a test equipment. A loss of axial and radial type superconducting magnetic bearings consisted of Bulk YB₂C₃O_{7-x} and permanent magnet was clarified in several load conditions.

Key Words: superconducting magnetic bearing, active magnetic bearing, flywheel energy storage system, rotation loss

1. はじめに

電力需要の増加に伴い、昼夜間の電力格差が広がっていることから、電力系統の負荷平準化対策が重要な課題とされ、電力需要地に近接した配電変電所に分散配置して効果的な日負荷平準化を行う電力貯蔵装置の開発と導入が求められている。

従来より、フライホイール(以下FWと称す)による電力貯蔵は、機械式軸受などによる回転損失の関係から短時間貯蔵のものに限られていた。近年の高温超電導材料の研究進展および高強度複合材料の開発に伴い、回転制御を含めたフライホイールおよび高温超電導材と永久磁石を組み合わせた高温超電導磁気軸受(以下SMBと称す)に関する要素技術開発でシステムの実現可能性および実現に向けての課題を明らかにする必要があった。このような背景のもと、当社ではその基礎試験として0.2kWh級のシステムの基礎試験を実施した¹⁾。

その後、1995年度より5年間、通産省資源エネルギー庁の意向を受け、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託研究が計画された。当社は日本の他企業7社および2財団法人とともに研究を受託した。1999年度研究を終了したのでその概要について以下に報告する。

2. 研究の概要

2.1 基本計画

最終目標は、電力会社からの要求で、10MWh級システムの2010年実用化である。試算例によると、FW外径が4 800mm、SMBの径は1 200mm規模で大型である。そこで、第1フェーズの5年間は、その実現可能性評価と課題の明確化が計画として掲げられた²⁾(図1)。

具体的には、下記2点である。

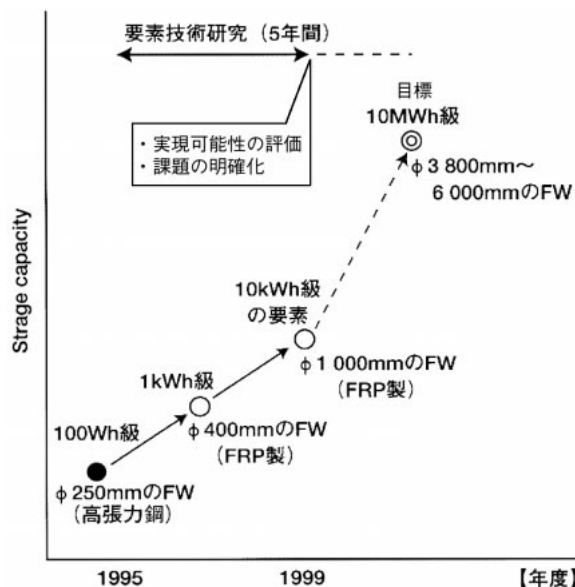


図1 研究開発のスケジュール概要
Schedule of research and development

- (1)回転制御(振動安定化)の研究開発
 - F W外径400mm, エネルギー貯蔵量 1 kWh 級システム(小型モデル)の試作・運転研究
 - F W外径1 000mm, エネルギー貯蔵量10kWh 級システムの要素技術研究(中型F W回転制御試験装置)
- (2)超電導磁気軸受(SMB)の研究開発
 - 直径180mm級SMBの載荷力密度の向上
 - 直径180mm級SMBの回転損失の評価

2.2 研究体制

図2に研究の分担と体制をまとめた。この中で、当社は以下の2テーマについて研究を受託した。

- (1)回転制御の研究開発
 - ・小型モデルの設計・製作・評価
 - ・中型F W回転制御試験装置の振動制御
- (2)超電導磁気軸受製作の研究開発
 - ・直径180mm級超電導磁気軸受の回転損失評価

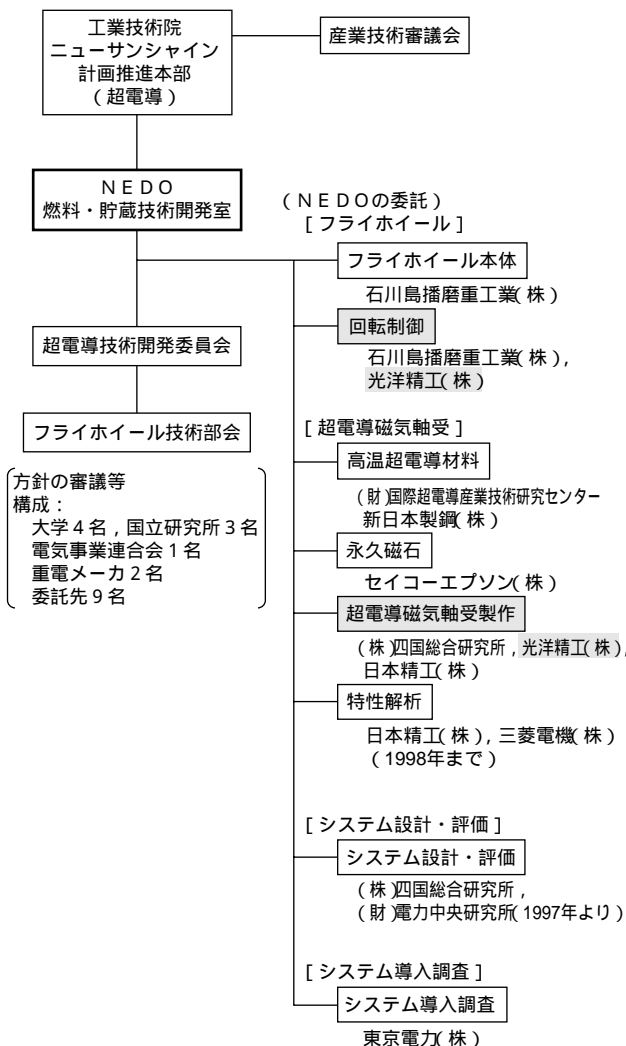


図2 研究体制とその分担
Research organization

3. 当社の主な成果概要

3.1 回転制御の研究開発

フライホイールが固定された回転体はジャイロ作用が大きい。したがって、回転速度変化に対する固有振動数の変化も大きくなり、磁気軸受にとってはその制御帯域が増加する。また、構造が複雑なためモデリング精度の向上が課題となる。したがって、大型F W回転体が安定して回転するための技術開発として、まず、小型モデルを設計・試作しロータダイナミクスを検証したあと、その結果をさらに中型F W試験装置に反映、検証する必要がある。

(1)小型モデルの設計・試作・評価

図3, 4, 表1に示す直径400mm F Wの小型モデルを設計製作し、アキシアル型超電導磁気軸受(A x SMB)で支持し、目標回転速度30 000min⁻¹までの振動をデジタル型回転振動制御装置で抑制し安定した回転ができることを実証した^{3),4)}。さらに、松山市F W研究センターにて1年5ヶ月の長期運転を終え、その基本性能に問題のないことが確認された。

表1 小型モデル回転体の仕様
Specifications of small model rotor system

項目	仕様
貯蔵エネルギー, kWh	0.5 (30 000min ⁻¹)
慣性モーメント, g・cm ²	3.5 × 10 ⁶
回転体全長, mm	495
回転体重量, kg	37
F W寸法, mm	400 × 250 × 40 × 2
モータ/発電機	誘導モータ(2 kW)

本研究における最大の成果としては、回転体のFEMモデリング技術精度向上によるロータダイナミクスを検証することができたことであり、この要素技術により、世界でも未踏レベルの超電導軸受フライホイールの振動安定化が実現できたことである。

一方、得られた技術課題としては、アキシアル型超電導軸受用回転永久磁石の遠心破壊防止用のCFRP材料に劣化確認があげられる。この回転永久磁石は、設計段階で応力限界の制約を受け、1 kWh級を実現するために必要な目標回転速度40 000min⁻¹を30 000min⁻¹に低下させた背景がある。この課題については、次期フェーズでラジアル型超電導磁気軸受(後述)の採用に方向転換することで、対策の見通しを得ることができた。

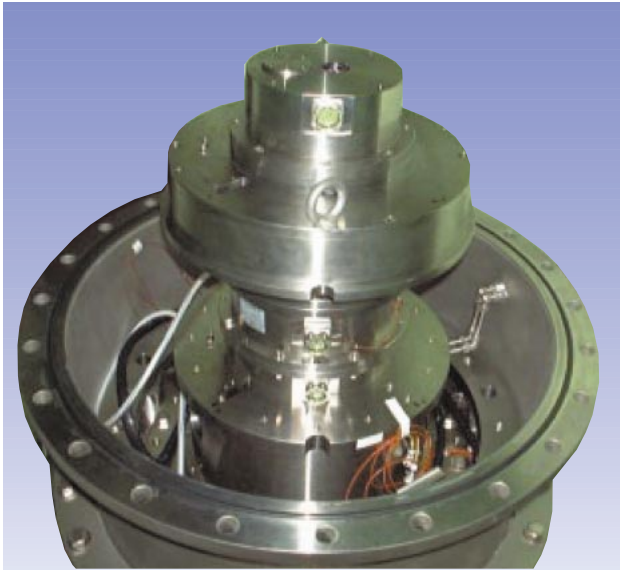


図3 小型モデル
Small model system

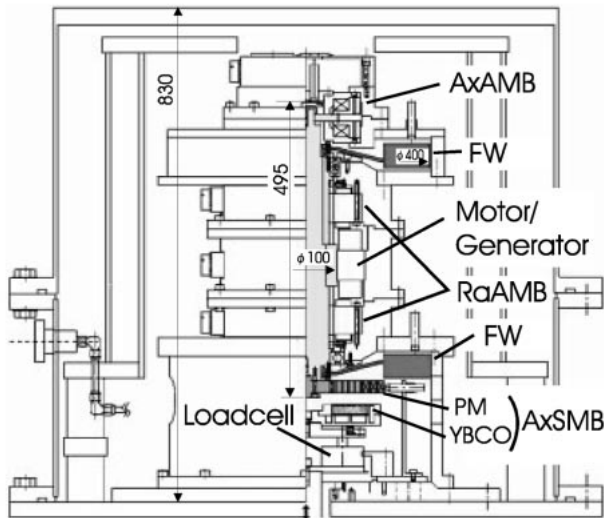


図4 小型モデルの構造
Structure of small model system

超電導体特有の現象であるフラックスクリープで超電導磁気軸受の浮上力が時間とともに減少する。本システムでもこの現象が確認された。この対策として、予荷重を付与することでそれが緩和できる方式を採用し^{5),6)}、その効果をシステムで確認した。その結果を図5に示す。

(2) 中型 F W 回転制御試験装置(エネルギー貯蔵量 10kWh) の振動制御

小型モデルで培ったロータダイナミクスの成果を反映して、石川島播磨重工業(株)殿により設計・製作された直径 1 m F W 回転体⁷⁾を当社製造の制御型磁気軸受で浮上⁸⁾、8 000min⁻¹までの振動安定化を完了した⁹⁾。図6にその中型 F W 試験装置の構造図、表2にその仕様を示す。さらなる回転速度増加試験は次期フェーズで継続して実施する予定である。

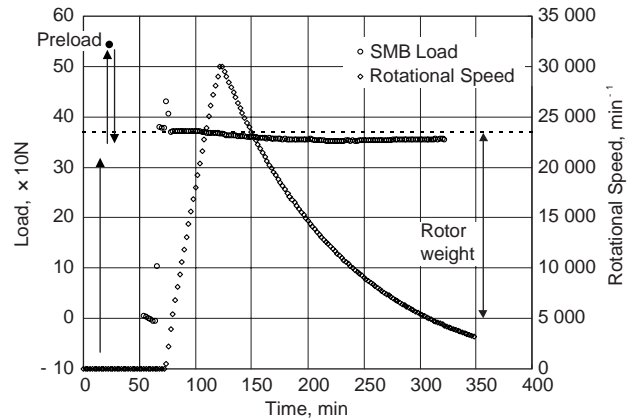


図5 小型モデルのSMBの負荷状況
Measured SMB load of 0.5kWh system

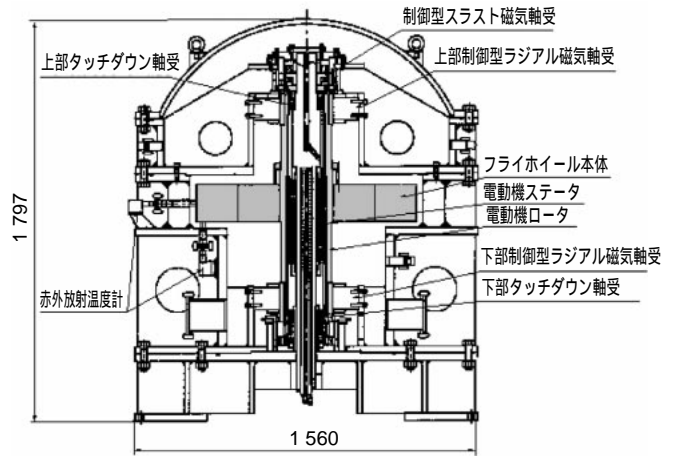


図6 中型FW回転制御試験装置の構造
Structure of middle class flywheel test equipment

表2 中型FW回転体の仕様
Specifications of middle class flywheel rotor

項目	仕様
貯蔵エネルギー, kWh	10(17 200min ⁻¹)
慣性モーメント, g・cm ²	2.79 × 10 ⁸
回転体全長, mm	1 060
回転体重量, kg	385
F W 寸法, mm	1 000 × 625 × 165
モータ / 発電機	同期モータ(2 kW)

3.2 超電導磁気軸受の研究開発

超電導磁気軸受の回転損失は理想的にはゼロといわれている。しかし、永久磁石の回転による不整磁場により、損失が発生する可能性がある。そこで、試作された軸受について、さまざまな負荷条件が損失に与える影響を測定されたデータは存在せず、ここで明らかにする必要があった。

(1) 超電導軸受の構造

超電導磁気軸受(SMB) の代表的な 2 種の軸受

構造としては小型モデルで採用したアキシャル型が一般的に研究されている。しかし、載荷力を向上させるためには、面積を増加させねばならず、前述した回転体の高速化には遠心破壊防止技術の開発が避けられない。そこで、代案として永久磁石と超電導体を径方向に対向させたラジアル型(図7)が提案された^{10),11)}。

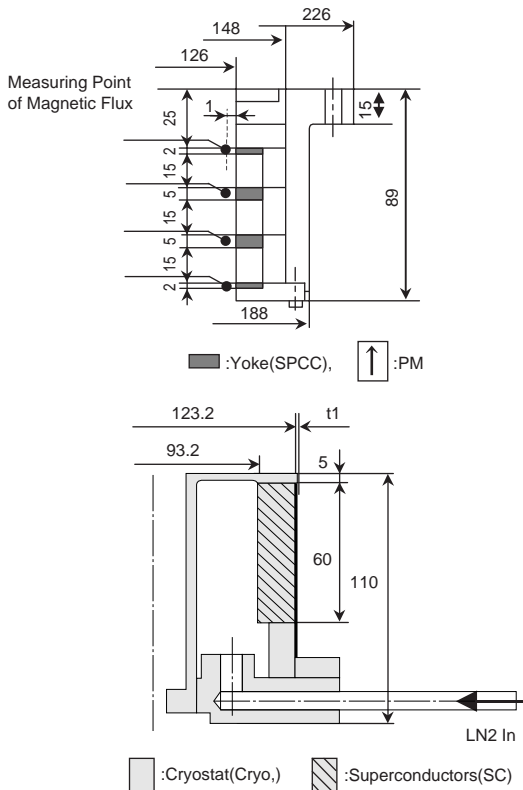


図7 ラジアル型超電導軸受の断面図
Cross section view of radial SMB (RaSMB)

(2) 180mm級 S M B 回転損失試験機

両者の軸受について回転損失を測定するための試験機(図8)を設計・製作した^{10),11)}。試験機の要求仕様として、下記2点があげられた。

S M B 部の振れまわり振動を一定に保持できる

S M B の負荷条件を変更できる

この仕様を満足するために、S M B 用回転永久磁石を制御型磁気軸受で支持した回転軸に固定させて回転させ、その回転減衰特性から S M B 損失を算出する方法で解決した。この場合、回転減衰特性から求められる損失は、風損 + A M B 損失 + S M B 損失(クライオスタット(Cryo) + 超電導体(SC))となり、小さい S M B 損失の測定精度向上には、現状の A M B 損失をさらに低下させる必要があり、その構造については新しいホモポーラ型を採用したことが特徴である。

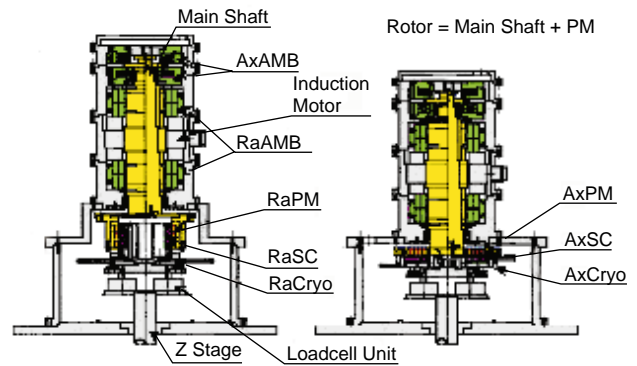


図8 180mm級 S M B 回転損失測定試験機
Rotational loss measurement equipment for φ180 class SMB

(3) S M B 回転損失測定結果

以下に紹介するデータにおいては、アキシャル、ラジアル型いずれの場合も同様の傾向が得られており¹²⁾、ここでは図7に示すラジアル型についていくつか紹介する。

図9より軸受に与えた初期負荷(Finit)を増大するにつれて回転損失が増大している。この結果は装置の制約から金属製クライオスタット(Cryo)と制御型磁気軸受(A M B)の損失を含んでいるがそれらを差し引くと超電導体(SC)の損失が増加することがわかる。つまり、システム設計では超電導磁気軸受の損失が負荷により左右されることを考慮する必要があることが初めて明らかになった。

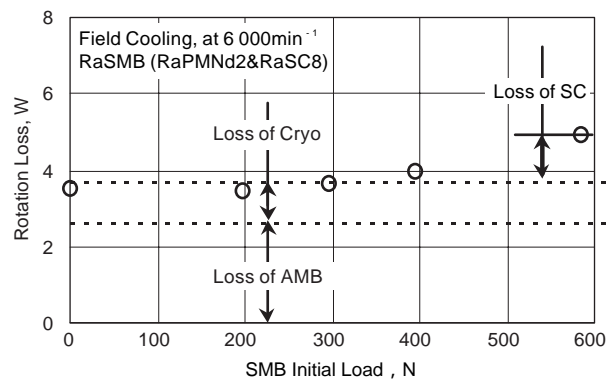


図9 S M B の初期荷重に対する超電導体の回転損失
Rotation loss of SC, C/S (Cryo) and AMB vs SMB initial load

一方、前述したようにフラックスクリープによる超電導磁気軸受の浮上力低下の対策として、超電導体に予荷重を付与する方法があるが、この手法はアキシャル型だけでなく、ラジアル型においても有効であることが初めて確認できた。浮上力低下現象を緩和できたデータを図10に示す。

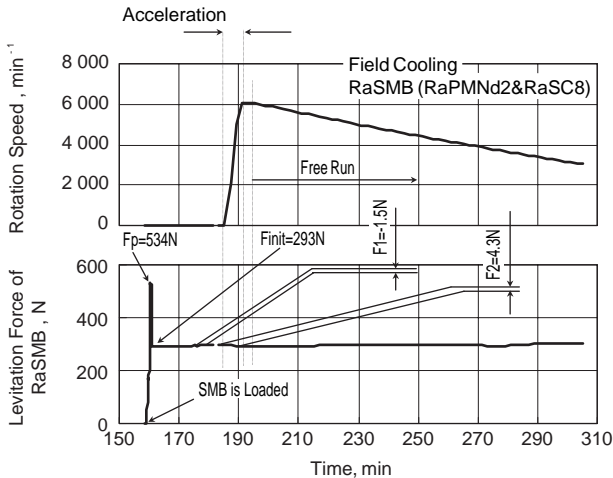


図10 超電導磁気軸受で浮上した回転体の浮上高さ
Levitation height of rotor suspended by SMB

初期負荷(F_{init}) 296Nで回転試験を実施する前に、予荷重(F_p)を534N付与した場合であるが、回転前、回転時においてほとんど浮上高さは変化していないことがわかる¹³⁾。この効果が、長期的な運転においても継続するかについて確認することは今後の課題となる。また、予荷重(F_p)を付与しない場合に対して付与した場合は、初期負荷(F_{init})に対するその割合を増加するにつれて、損失も増加する傾向が図11よりわかる。したがって、システム設計の段階では、この影響も考慮して最適な運転方法を確立することが必要であることが明らかになった。

また、超電導体に供給する液体窒素を減圧することにより超電導体を過冷却する方法でも、浮上力低下現象は若干ながら改善されることを確認したが、この場合は温度を下げることにより損失を下げる効果が大きいことが明らかになった¹⁴⁾。したがって、システム設計時はこの手法も含めて考慮する必要がある。

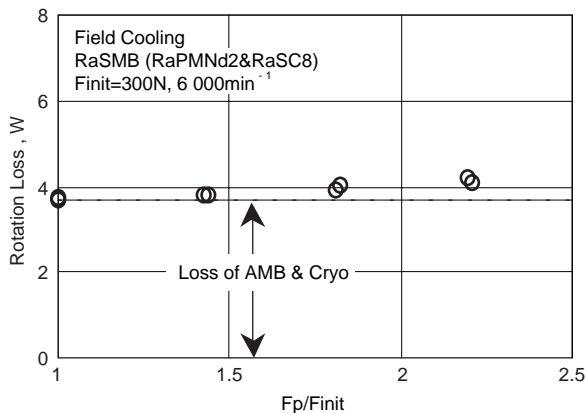


図11 初期負荷に対する予荷重の割合と超電導磁気軸受の回転損失
Rotation loss of SMB vs F_p/F_{init}

4. おわりに

第1フェーズでの研究を終了し、当社の大きな成果としては小型モデルの試験において、システムの成立を実証したことが挙げられる。また、中型、大型システムへの各技術課題も明確化できた。

これらを受けて2000年7月より第2フェーズ「フライホイール電力貯蔵用超電導軸受技術研究開発」が5年計画で開始された。主な内容は、中型FW回転制御試験機装置に180mm級ラジアル型超電導軸受を組み込んだ中型モデルのシステム開発と300mm級ラジアル型超電導軸受の要素技術開発である。当社は、前フェーズで明確化した課題を受けて下記について実施する予定である。

- (1) 中型モデルの軸振動安定化とその消費電力低減化
- (2) 300mm級超電導軸受の回転損失の測定評価

第2フェーズの成果を反映して、第3フェーズでは大型モデルシステムの試作検証を計画している。2010年民間での実用化をめざし、精力的に研究開発が推進されることを期待したい。

最後になりましたが、本研究にあたりご指導ご協力頂きました工業技術院、NEDO、参加各社殿に対し厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高畑良一, 上山拓知, 宮川裕豊, 亀野浩徳, 樋笠博正, 石川文彦: Koyo Engineering Journal, no. 151 (1997) 12.
- 2) NEDO: 「高温超電導フライホイール電力貯蔵システム」技術紹介資料.
- 3) 宮川裕豊, 高畑良一, 亀野浩徳, 上山拓知: 第10回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, No98-251 (1998) 245.
- 4) R. Takahata, Y. Miyagawa, H. Kamenno, H. Ueyama: IEEE Tras. On Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2 (1999).
- 5) 宮 健三, 吉田義勝: 超電導の数理と応用, 養賢堂(1997).
- 6) 岡野真他, 1997年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集(1997).
- 7) Osamu Saito, Soichiro Une, Hisayuki Motoi, Hironori Kamenno, Yasukata Miyagawa, Ryoichi Takahata, and Hirochika Ueyama: 5th International Symposium on Magnetic

- Suspension Technology, Santa Barbara, CA (1999. 12) .
- 8) Osamu Saito, Soichiro Une, Hisayuki Motoi, Hironori Kamenno, Yasukata Miyagawa, Ryoichi Takahata and Hirochika Ueyama : 5th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Santa Barbara, CA (1999. 12) .
- 9) 齋藤修, 宇根総一郎, 齋藤忍, 高畑良一, 上山拓知 : 第12回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演論文集(2000. 6) 371 .
- 10) 亀野浩徳, 高畑良一, 宮川裕豊, 上山拓知 : 第10回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演論文集(1998. 6) 239 .
- 11) Hironori Kamenno et al, IEEE Trans. on Applied Superconductivity vol. 9, no. 2 (1999) 972 .
- 12) 亀野浩徳, 宮川裕豊, 高畑良一, 上山拓知 : 低温工学 vol. 34 , no. 11 (1999) 140 .
- 13) Hironori Kamenno et al, Advances in Superconductivity XI , (1999) 1337 .
- 14) 亀野浩徳, 高畑良一, 宮川裕豊, 上山拓知 : 1998年度秋季低温工学・超電導学会 予稿集 , (1998. 10) .

筆者



高畑良一*
R. TAKAHATA



宮川裕豊**
Y. MIYAGAWA



亀野浩徳***
H. KAMENO



上山拓知**
H. UEYAMA

* 総合技術研究所 システム技術研究所
機械システム研究部 工学博士

** 軸受事業本部 軸受技術センター
航空・精密機器技術部

*** 総合技術研究所 システム技術研究所
機械システム研究部