

機械式 2 次電池の開発

Development of Mechanical Secondary Battery (Flywheel Rechargeable Battery)

齊 藤 修	技術開発本部基盤技術研究所機械要素研究部 部長
桑 田 巖	技術開発本部基盤技術研究所機械要素研究部
温 見 寿 範	技術開発本部プロジェクトセンター開発部 主査
岩 崎 郁 夫	技術開発本部総合開発センター制御システムプロジェクト部 主査
真 島 隆 司	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部 部長

低損失磁気軸受を用いて、フライホイールに回転エネルギーとして電力を貯蔵する機械式 2 次電池を開発した。磁気軸受には小型ヘテロポラ磁極を用い、制御にはゼロパワー制御を用いた。また、フライホイールのロータ設計では振動制御に問題が生じない程度に磁気軸受の径を小さくした。これらの結果、ロータ表面に流れる渦電流が抑制され、定格回転速度において 16 W という極めて少ない回転損失を達成できた。さらに、1 000 h の連続運転を行い、長時間運転が可能であることを確認した。

The mechanical secondary battery capable of providing 200 kW electric power within 20 seconds was developed using small homo magnetic poles and the zero-power control algorithm. Magnetic bearing diameter was strictly minimized to maintain eddy current loss at level low enough to permit stable operation. Minimum loss of 16 W could be achieved at a speed of 13 000 min⁻¹, and 1 000 h operation was proved to be possible without significant rise of temperature.

1. 緒 言

停電・瞬時電圧低下（以下、瞬低と呼ぶ）によって、半導体製造装置などのような重要な機械やコンピュータが突然停止すると多大な損害が発生する。このため、重要な設備（装置）にはバックアップ電源（以下、UPS と呼ぶ）が取り付けられ、この電力貯蔵部には主に鉛蓄電池が使用されている。しかし、鉛蓄電池は定期的な交換が必要で、使用済みの鉛は産業廃棄物になるなどの環境問題が内在している。

鉛蓄電池の代替として、フライホイールに電力を一時的に回転エネルギーとして蓄え、必要に応じて電気エネルギーとして取り出す蓄電方式がある。しかし、フライホイールでは軸受などの機械損失によって消費される回転エネルギーを補充しなければならない問題がある。

本稿では、フライホイールに極めて損失を小さくした磁気軸受（Active Magnetic Bearing：以下、AMB と呼ぶ）を適用することで、効率的にエネルギーの貯蔵を可能にした機械式 2 次電池を開発したので報告する。

2. 機械式 2 次電池の構造および仕様

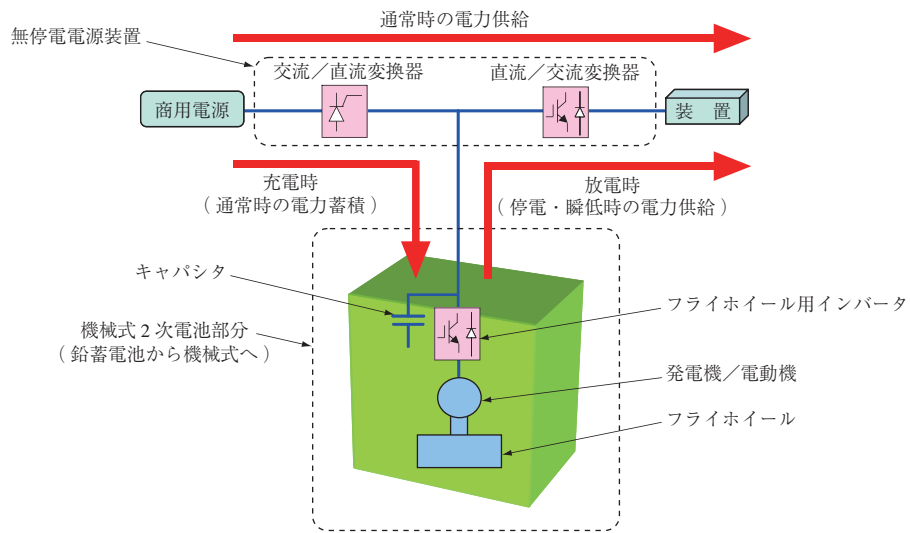
2.1 機械式 2 次電池の概要

機械式 2 次電池を用いた UPS システムの構成を第 1 図に示す。通常時は商用電源を交流／直流変換器で直流に変換し、その後に直流／交流変換器を通して交流に変換して装置に供給される。機械式 2 次電池は直流部分に接続され、停電・瞬低時の直流電圧の降下を検知して電力を供給する。鉛蓄電池を使用している一般的な UPS の場合は、第 1 図の機械式 2 次電池の部分に鉛蓄電池が使用されている。

第 2 図に機械式 2 次電池の装置外観を、第 1 表に仕様を示す。フライホイールの 13 000 min⁻¹（定格回転速度）時の電力貯蔵量は 1.7 kW・h で 7 000 min⁻¹ まで減速することによって、200 kW の電力を 20 秒間放出させることが可能である。また、フライホイールは風損を低減させるため、真空チャンバ内に格納されている。

2.2 フライホイールおよび AMB 構造

フライホイールおよび AMB 構造（回転体部分）を第 3 図に示す。ロータ中央に誘導型の発電電動機、下部に CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics：炭素繊維強化

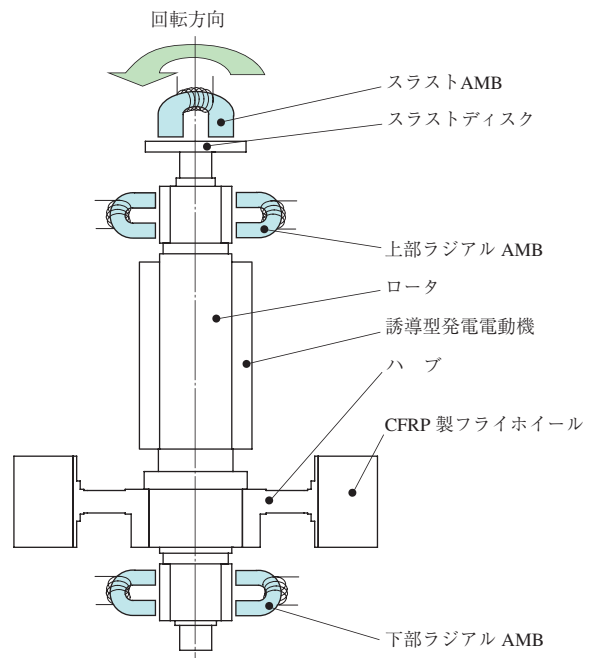


(注) 1. 図は機械式2次電池の充電/放電のイメージを示す。
2. UPS : Uninterruptible Power Supply

第1図 機械式2次電池を用いたUPSシステム
Fig. 1 UPS system using mechanical secondary battery



第2図 機械式2次電池の装置外観
Fig. 2 Overview of mechanical secondary battery



第3図 フライホイールおよびAMB構造
Fig. 3 Composition of flywheel and AMB

第1表 機械式2次電池の仕様
Table 1 Specifications of mechanical secondary battery

項目	単位	仕様	
貯蔵エネルギー量	kW·h	1.7	
発電電動機の形式	-	誘導型	
出力	kW	200	
補償時間	s	20	
フライホイール	回転速度	min ⁻¹	13 000
	質量	kg	254
	直径	mm	700
	周速	m/s	476
真空度	Pa	0.1 以下	

プラスチック) 製フライホイールがハブを介してロータに締結されている。AMB はロータの最上部にスラストAMBが設置され、フライホイールの全質量を支持している。また、ロータ上・下部にはそれぞれラジアルAMBが設置され、フライホイールの水平方向の振動抑制および位置制御を行っている。

真空中で高速回転するフライホイールにAMBを使用し

ているので、ロータは完全に非接触状態にある。このため、ロータからの発熱は輻射によって排熱せざるをえない。したがって、ロータの温度上昇を制限するためにはAMBに極限までの低損失特性が必要となる。そこで、磁極には従来のヘテロポーラ型に代わりホモポーラ磁極を、制御にはバイアス電流を用いないゼロパワー制御^{(1),(2)}からなる低損失AMB⁽³⁾を用いた。また、高周波領域の磁極特性を改善するために小型磁極とした。ここでは、通常は1個として用いる磁極を2個に分割し、両者を直列に配線した。

以上の対策を講じたが、さらに、ロータ表面に励起される渦電流による発熱の低減化を図るためには、AMB部分の周速をできるだけ遅くする必要がある。一方で、むやみにAMBの軸径を小さくすると振動特性が悪化し、制御が難しくなる。そこで振動特性が許容される範囲で軸径を可能な限り小さくした。以上の結果から得られた最終的なAMBの仕様を第2表に示す。

第2表 AMBの仕様
Table 2 Specifications of AMB

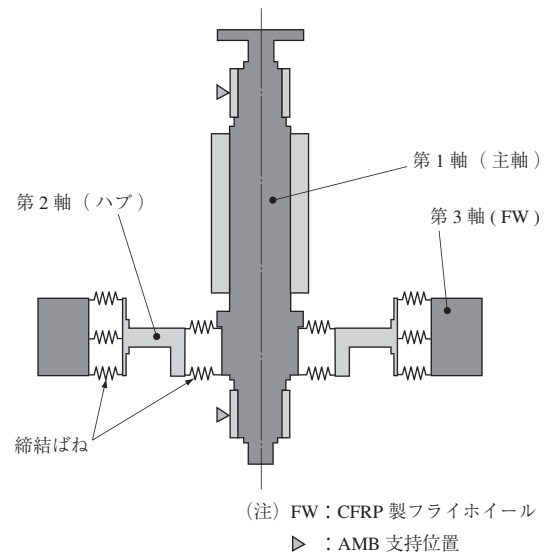
項	目	単位	仕様
AMB部ロータ	外径	mm	140
	周速	m/s	95
磁極	面積	mm ²	1064
	コイルターン数		200
	インダクタンス	mH	28
エアギャップ		mm	0.45
タッチダウンすき間		mm	0.2

3. フライホイールの振動特性

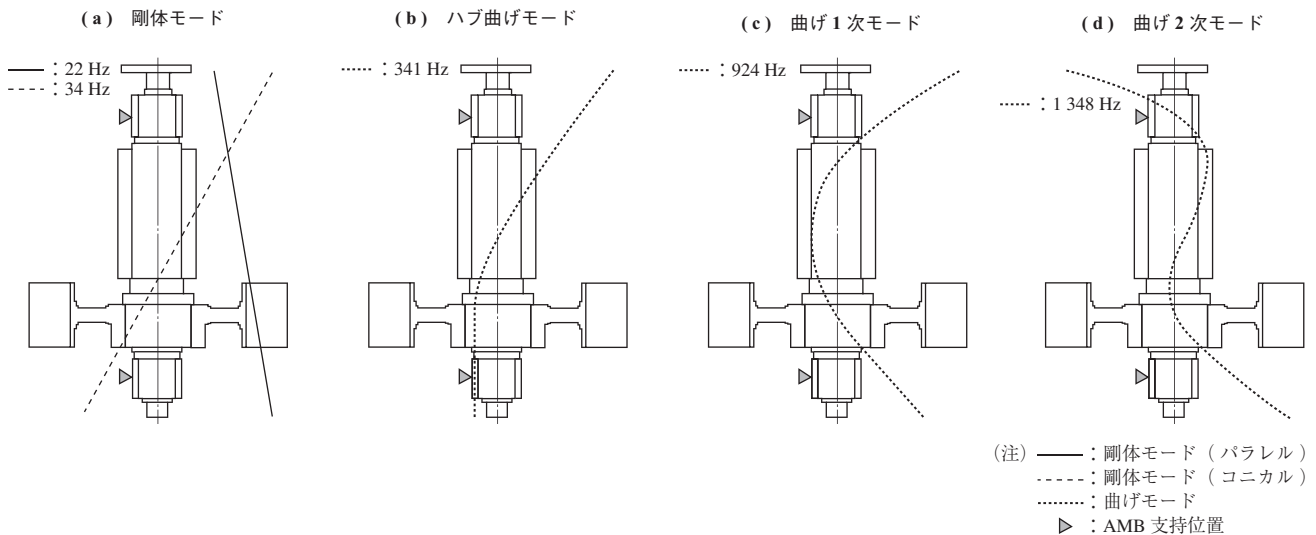
3.1 軸系のモデル化と振動モード

軸系全体を主軸（第1軸）、ハブ（第2軸）、CFRP製フライホイール（第3軸）の3本の軸からなる複合ロータでモデル化した。解析モデルを第4図に示す。各軸の連結には両者の間のはめあい剛性を表す結合ばねを用いている。

第5図に上記のモデルで計算した軸が非回転時における振動モードの計算結果を示す。第5図-(a)には剛体モードを、-(b)には上記のハブの変形を意味する固有振動モード（以下、ハブ曲げモードと呼ぶ）を、また-(c)と-(d)には軸の曲げ1次と曲げ2次のモード



第4図 解析モデル
Fig. 4 Analytical model for rotor dynamics



第5図 振動モード (0 min⁻¹)
Fig. 5 Mode shapes at 0 min⁻¹

を示す。このうち - (b) のハブ曲げモードをより詳しく調べるため、梁モデルの代わりに有限要素法で振動モードを求めた。

この結果を第 6 図に示す。ハブの部分があたかも鏡板のような変形をしていることが分かる。この軸の回転速度の増加とともに当然のことながら固有振動数が変化するが、この変化に関する計算結果は 3.3 節の回転試験結果で述べる。

3.2 制御回路とその周波数特性

採用した制御回路の構成 (AMB 制御システム) を第 7 図に示す。ゼロパワー制御回路は回転軸のセンタリングを



第 6 図 ハブ曲げ振動モード
Fig. 6 Hub bending mode

補償しているが、高周波領域における不安定を表すスピルオーバーの防止には関与していない。

そこで、ここではスピルオーバー制御のため、ハブ曲げモードに対しては微分補償回路を、軸の曲げ 1 次と 2 次モードに対してはノッチフィルタを設けている。

また、モータと AMB の磁気センタは一般的には一致しないため、モータの不均衡吸引力に抵抗する目的で積分補償回路を設けている。この制御回路で得られるゲインと位相を第 8 図に示す。

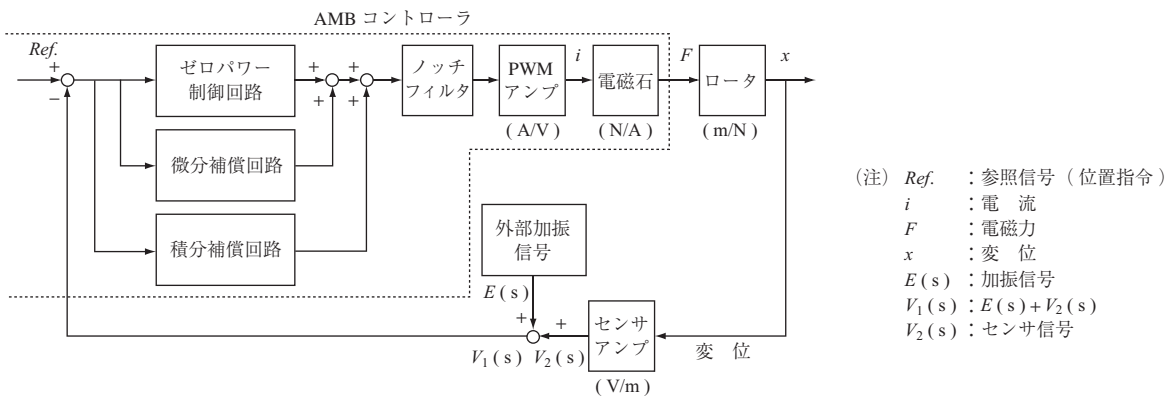
3.3 回転試験結果

第 9 図に試験および解析による固有振動数の比較を示す。

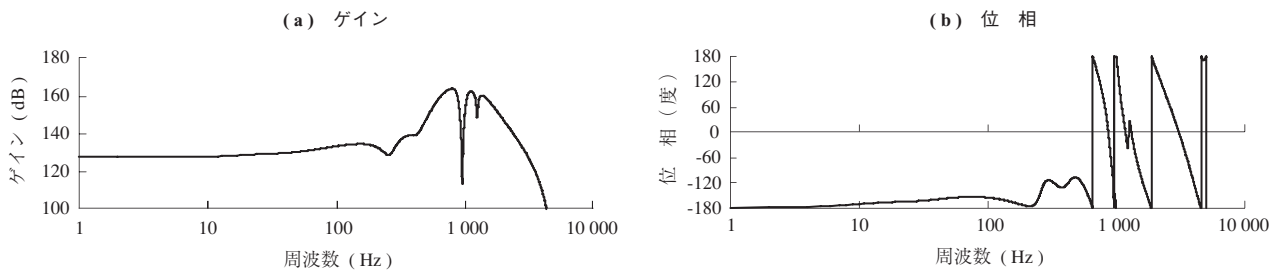
これは、AMB から加振信号を入力して、固有振動数と減衰比をできるだけ正確に測定しつつ回転試験を行った最終試験結果である。

軸の曲げ 2 次モードの固有振動数が計算値と実測値を比べると実測値の変化の方がやや大きいですが、そのほかのモードは比較的計算値と実測値は良い一致を示している。ハブ曲げモードに関して $9\,000\text{ min}^{-1}$ 以上で固有振動数の増加が見られる。

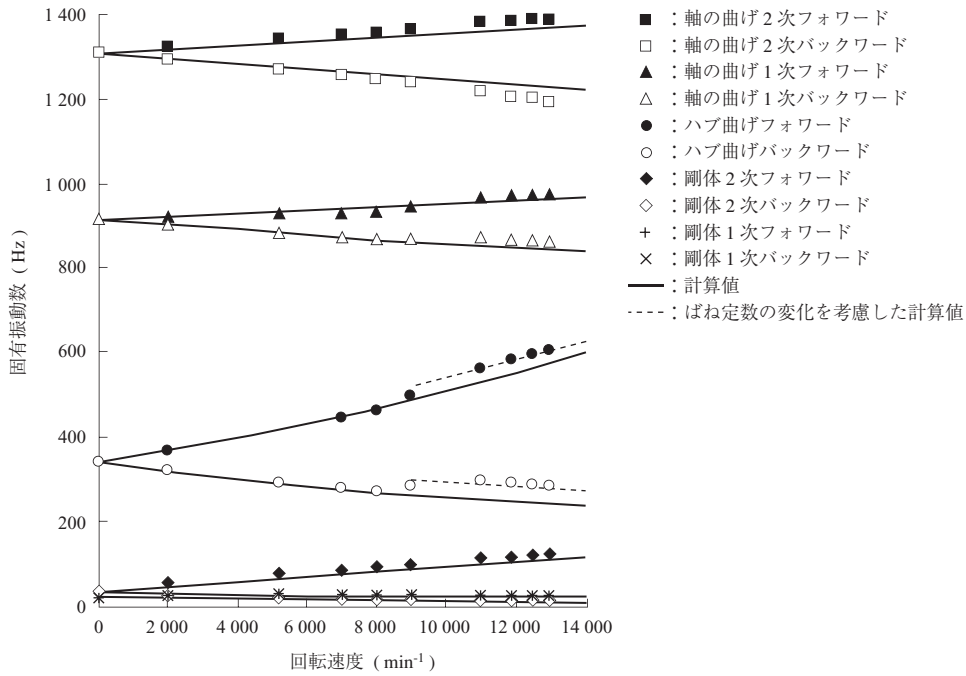
この理由は、ハブとフライホイール間のはめあいが回転



第 7 図 AMB 制御システム
Fig. 7 Block diagram of AMB feed back system



第 8 図 AMB コントローラの伝達関数
Fig. 8 Transfer function of AMB controller

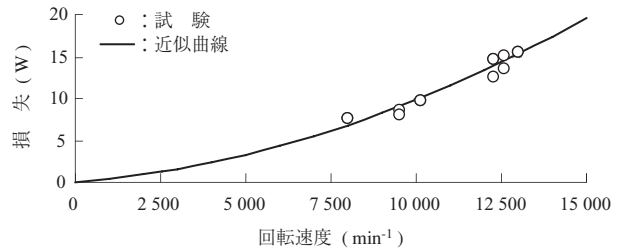


第 9 図 試験および解析による固有振動数の比較
 Fig. 9 Comparison of natural frequency between analysis and experiment

速度の上昇とともに増加し、この間のばね定数が増加したものと考えられる。この増加を考慮して計算した固有振動数を点線で示す。両者は良く一致している。

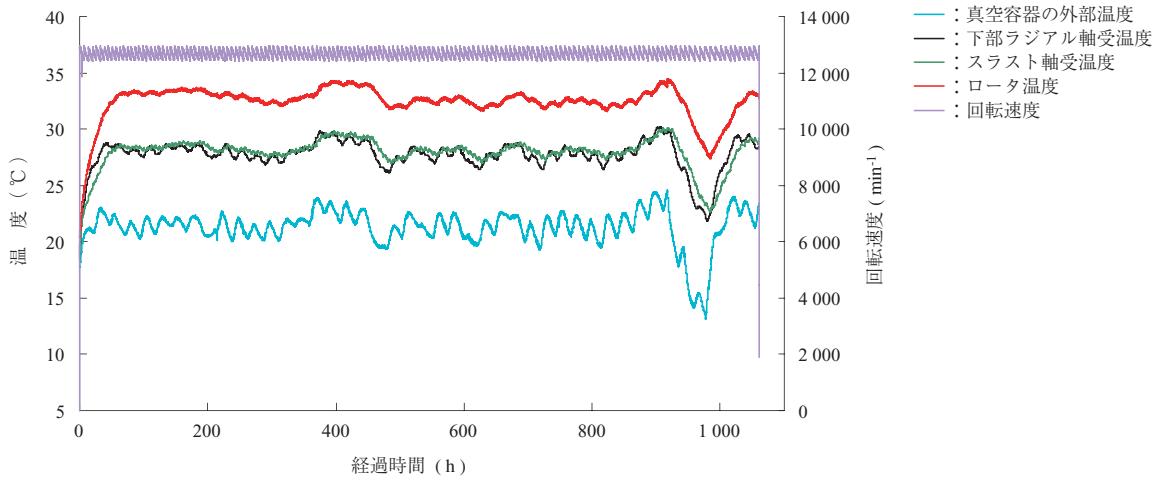
3.4 損失と温度上昇

第 10 図に回転損失の試験結果を示す。これは、最高回転速度まで増速させた後、モータをオフにし、なんら人為的な力を加えることなくフリーランさせて測定した機械的な損失である。定格回転速度 13 000 min⁻¹ で 16 W という画期的な低ロスに抑えられている。



第 10 図 回転損失の試験結果
 Fig. 10 Measurement results of rotational loss

また、第 11 図に 1 000 h 連続運転したときの回転速度



第 11 図 1 000 h 連続試験結果
 Fig. 11 1 000 h operation test results

の変化と各部の温度変化を示す。図中、回転速度が変動しているが、これは $12\,500\text{ min}^{-1}$ まで回転速度が低下すると自動的に $12\,900\text{ min}^{-1}$ まで増速するという操作を繰り返しているためである。

温度変化は主としてフライホイールが格納されている真空チャンバの外部温度の変化に追随しているように思われる。ロータの温度が最も高くなったが、それでも 35°C を下回っている。900 h 経過後に真空チャンバの外部温度が低下し、それに伴ってすべての温度が下がっているが、これは冷却ファンの動作確認を行ったことによる変動である。

4. 結 言

フライホイールを用いた 200 kW の電力を 20 秒間取り出せる機械式 2 次電池を開発した。AMB の磁極には小型ホモポーラ磁極を用いた。制御にはゼロパワー制御を用い、微分補償、ノッチフィルタおよび積分補償を組み合わせた。また、振動制御に問題が生じない程度に AMB の軸径を小さくした。

この結果、定格回転速度 $13\,000\text{ min}^{-1}$ で 16 W という極めて低い損失の機械式 2 次電池を作ることができた。

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の産業技術実用化助成事業によって実施したものである。本研究の実施に当たり、ご指導とご協力をいただいた NEDO および関係各位のご厚誼に対し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 有我祐一, 野波健蔵, 酒井克章: ゼロパワー磁気軸受系の非線形制御 (第 1 報, リアプノフの直接法を基礎とした制御アルゴリズムの提案) 日本機械学会論文集 (C 編) 第 67 巻第 654 号 2001 年 2 月 pp. 392 - 400
- (2) 有我祐一, 野波健蔵, 酒井克章: ゼロパワー磁気軸受系の非線形制御 (第 2 報, 実験的検証) 日本機械学会論文集 (C 編) 第 67 巻第 654 号 2001 年 2 月 pp. 401 - 406
- (3) 齊藤 修, 栗原昭和, 齊藤 忍: 真空中で高速回転するフライホイールの開発 (極低損失磁気軸受とスピルオーバー抑制技術) 日本機械学会論文集 (C 編) 投稿中 2009 年 6 月 (予定)