

フライホイールバッテリーの研究

Research on Flywheel Battery

須 永 義 弘*
Yoshihiro SUNAGA

阿 部 昇 栄*
Shoei ABE

板 井 幸 彦**
Yukihiko ITAI

要 旨

フライホイールバッテリーシステムの実現向け、100 Wh モデルを製作すると共に、技術要素である炭素繊維強化複合材ロータの研究および磁気軸受の研究を行い、以下の成果を得た。ロータについては、設計・製作したロータの回転破壊試験によりロータの応力限界が理論強度の80%以上を有すること、また、常用回転数範囲における常温30 000 サイクルの耐久試験において繊維の切断、層間はく離の発生はなく耐久性を有することを確認した。磁気軸受については、自動バランス制御用の回転数追従型ディジタルフィルタを構築するとともに、ジャイロ効果によるコンカル共振の安定性低下を明らかにし、目標回転数50 000 rpmの低振動・安定支持を実現できる制御手法を確立した。

以上の成果により、安全性、耐久性を備えたフライホイールバッテリーの実現可能性を示すことができた。

ABSTRACT

A 100 Wh flywheel battery was fabricated and demonstrated. Research was conducted on the element technologies of the battery, a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) rotor and magnetic bearing control, with the following outcomes. Burst tests conducted on the rotor showed that its achieved strength was more than 80% of the theoretical strength. In addition, 25 000 - 50 000 rpm (operational speed range) cyclic stress tests carried out at ordinary temperatures demonstrated that the rotor is durable to 30 000 cycles without fiber breaking or delamination. The digital processing technique of a speed tracking type band-stop filter for automatic balancing control of magnetic bearing was proposed. It was clarified that the stability of conical forward mode decreases by a gyroscopic effect as speed increases. The control method of magnetic bearing providing low-vibration and stable suspension up to the maximum operating speed of 50 000 rpm was established.

The results described above confirm the feasibility of a safe and durable flywheel battery.

1. まえがき

フライホイールバッテリー (Flywheel battery: 以降 F/W Batt と略す) は機械式 (電気機械式) バッテリーとも呼ばれ、寿命、環境温度特性など化学バッテリーに対し優位な特徴を持つ。F/W Batt のエネルギー貯蔵の原理は回転体の運動であり、貯蔵エネルギーはフライホイールロータの慣性モーメントと回転数の2乗との積に比例する。これは同一重量、体積では回転数が高いほどより多くのエネルギーを貯蔵できることを意味し、従ってエネルギー密度を高めるためには高回転化が有効であり、高回転化技術が鍵となる。高回転に耐え得る高強度ロータや高回転ロータを安定かつ低損失で支持する軸受など、F/W Batt の技術課題の多くは高回転化に伴うものである。金属製ロータを用いた低回転のシステムを除き、高回転 F/W Batt は現在開発段

階にあり、実現へ向けた技術の確立と性能の把握あるいは安全性、耐久性の確保や安全認知度の向上が現在の中心的な課題である。本稿では、高回転 F/W Batt システムを実現する上で重要となる高回転ロータ技術および軸受技術の研究成果について述べるとともに、F/W Batt システムの実現へ向けて製作した 100 Wh モデルのシステム試験の成果について報告する。

2. フライホイールバッテリー (F/W Batt) の概要

2.1. システム概要

Fig. 1 に F/W Batt システムの概念図を示す。

F/W Batt は回転体に運動エネルギーを蓄え、内蔵するモータ/発電機を介して電気エネルギーの入出力を行う機械式バッテリーである。

* 栃木研究所

** 和光基礎技術センター

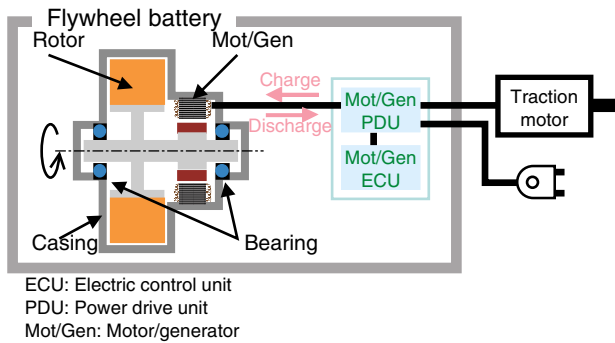


Fig. 1 Outline of flywheel battery system

2.2. 性能目標

シリーズ型ハイブリッド自動車に F/W Batt を搭載することを基本コンセプトとし、F/W Batt の性能目標の設定を行った。Table 1 に F/W Batt の性能目標を示す。

Table 1 Performance target of flywheel battery

Max. power (kW)	15 (@25 000 ~ 50 000 rpm)
Max. stored energy (Wh)	333
Max. operating speed (rpm)	50 000
Usable energy (Wh)	250
Operating speed range (rpm)	25 000 ~ 50 000
Total weight (kg)	50

本研究では、上記性能目標を満足する F/W Batt システムの達成へ向け、ロータ外径、回転数はそのままにロータの軸方向厚みを短縮した有効エネルギー 100 Wh の F/W Batt システムの実現を第一目標とする。

3. F/W Batt 技術要素

Fig. 1 に示した通り F/W Batt の構成技術要素は、エネルギー貯蔵機能を担うロータ、充電・放電(電気-運動エネルギーの相互変換)機能を担うモータ/発電機、風損を低減するための真空容器および、真空中でフライホイールロータを支持する軸受の大きく4つの要素からなる。以降、小型・軽量の F/W Batt を実現する上で特に重要となる高強度ロータおよび磁気軸受の要素研究について述べる。

3.1. 口一タ

ロータのエネルギー密度は材料の引張強度を密度で除した値である比強度で決まる。各種の高比強度材料を比較し、ロータ材料として炭素繊維強化プラスチック (Carbon fiber reinforced plastic : 以降 CFRP と略す) を選定した。ロータ成形方法にフィラメントワインディング成形を選択し、課題となるロータの層間はく離破壊を防止するため、Fig. 2 に示す圧入マルチリング構造を採用した。径方向でリングの密度、弾性率が異なる「高弾性 CFRP リング + 中弾性 CFRP リング + アルミニウムリング」の構成である。

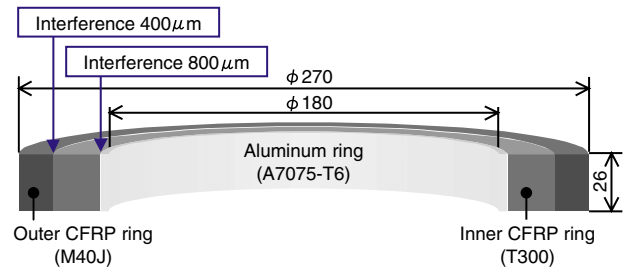


Fig. 2 Press fitted multi-ring rotor

(1). CFRP ロータは製作やテストの容易さを考慮し、有効エネルギー 250 Wh を 5 本の CFRP リングで構成することとした。100 Wh F/W Batt モデルでは CFRP 単リング 2 本を使用する。

3.1.1. CFRP ロータの応力限界と耐久性

ロータ研究における重要課題は安全性の確保である。本研究では F/W Batt システムの安全性確保のため、

- ロータの初期保証回転数 70 000 rpm として CFRP ロータ設計を行う(システムの最高回転数 50 000 rpm に対して応力的に安全率 2.0)
- システムとして 50 000 rpm 以上の過回転を防止すると設定した。ロータ設計に用いる CFRP リングの応力限界値は、繊維の強度バラツキを考慮して繊維の引張強度と繊維含有率(V_f)から計算される理論強度の 70%と仮定し、70 000 rpm でこの応力限界を超えない設計を行った。これまでの研究で、設計・製作したロータの回転試験により 70 000 rpm を実証し、この回転試験から、
- 応力が設計値通りであること
- 応力限界は理論強度の 66%を超えること

を確認した。安全性確保に対して残る課題は耐久性の確認である。また、今後のロータ設計の精度向上には応力限界の確認も重要である。本稿では、設計・製作した CFRP ロータの応力限界および耐久性能について述べる。

(1) CFRPロータの応力限界と評価方法 CFRPロータ ($V_f = 60\%$)の理論強度は、高弾性繊維 M40J を用いた外側リングが 2.64GPa、汎用繊維 T300 を用いた内側リングが 2.12GPa である。Fig. 3 に回転数と各 CFRP ロータの周方向応力の関係を示す。応力が理論強度限界に達する回転数は外側リング(M40J製)が88 600 rpm、内側リング(T300製)

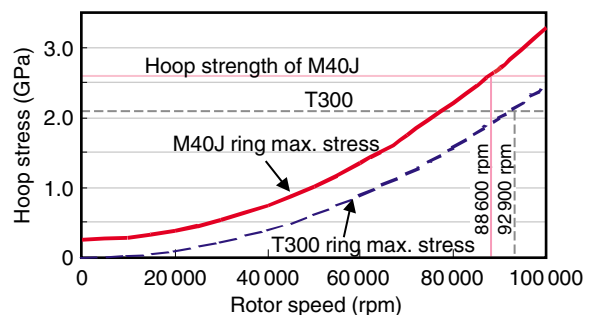


Fig. 3 Hoop stress of CFRP rotor

92 900 rpm である。実際の CFRP ロータでは成形時に張力を加えることやガイドローラとの接触による繊維破断、さらには加工による繊維切断などから、応力限界は理論強度より低いと考えられる。

複合材ロータの回転破壊現象を把握するためにロータの一部に欠陥を設け、回転破壊試験を行った例はあるものの、複合材ロータの強度評価に関する報告は見られない。CFRP ロータの強度評価はロータの最適設計を行う上で重要であり、また破壊に対する安全性を確保する上では破壊現象の把握も重要である。本研究では、CFRP ロータの応力限界の確認と回転破壊現象の把握を目的として、CFRP ロータの回転破壊試験を実施する。CFRP ロータの応力限界は破壊現象を解析し、破壊回転数から評価することとした。

Table 2 Mechanisms and inspections of fatigue

Mechanism	Phenomenon	Nondestructive inspection	Destructive inspection
Breaking of fiber	Deterioration of ・ Young's modulus ・ Strength	・ Dimension check ・ Evaluation of diameter during rotation	Burst test
Degradation of resin	Deterioration of strength	・ Ultrasonic inspection ・ Color check ・ X-ray analysis	
Delamination of layer	Deterioration of strength	—	

(2) CFRPロータの耐久劣化と検査方法 複合材料の劣化の原因は一般的な劣化と同様に次の2つに大別できる。

- 化学的作用(腐食/紫外線などによる化学変化)
- 物理的作用(疲労/クリープ)

CFRP ロータは真空環境にあることから、化学的な作用による劣化は無視できる。炭素繊維の疲労やクリープはほとんどないと言われ、試験データが数多く発表されている⁽²⁾。しかしながら、疲労メカニズムを明確に説明している例はなく、またロータの回転遠心力による劣化の研究報告もない。そこで CFRP ロータの各構成要素の物理的特性変化に着目し、劣化現象および劣化の検査手法を検討した。Table 2に劣化現象と検査手法を示す。本研究では、耐久試験中の測定を行うために非破壊検査を採用し、耐久試験前後の寸法測定および試験後の超音波探傷による評価を行うこととした。

3.1.2. CFRP ロータの応力限界の評価

(1) 破壊試験ロータ 破壊試験用ロータの外観をFig. 4に示す。破壊試験用のスポーク付きアルミニウムハブ(A7075-T6)を備え、破壊状況の撮影用に CFRP リングを白く着色した。ハブスポークは中心に向かってテーパ状に太くなる形状とし、軸心側スポーク付け根部への応力集中を緩和した。スポーク付け根部の応力が A7075-T6 の応力限界となる回転数は約 82 000 rpm で、この回転数で実証できる CFRP ロータの強度は理論強度の 85% となる。試験目標をハブ破壊に至る回転数までとし、破壊試験を実施する。

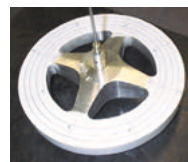


Fig. 4 Rotor for burst test

(2) 破壊試験 Fig. 5に試験の回転数推移を示す。2回の試験を行い、それぞれ 79 766 rpm(CFRP ロータの理論強度の 81.1%)、78 507 rpm(同 78.5%)で瞬間的に破壊した。破壊した CFRP ロータの破片を Fig. 6 に示す。CFRP ロータは最大長さ 80mm、最大幅 3mm の繊維束状に粉碎した。破壊の瞬間の撮影画像と破断したハブの解析から、いずれもハブのスポークの破壊(スポーク付け根のバランス取り加工部を起点)が先に生じ、その結果 CFRP ロータが破壊したとの結論に至った。

破壊がハブの破壊に起因したものであることから、CFRP ロータの応力限界は理論強度の 80% 以上を有することが確認できた。また、破壊現象がエネルギーの瞬時解放であることから、先に述べたように破壊させないというシステム安全性確保の考え方が重要であることが確認できた。

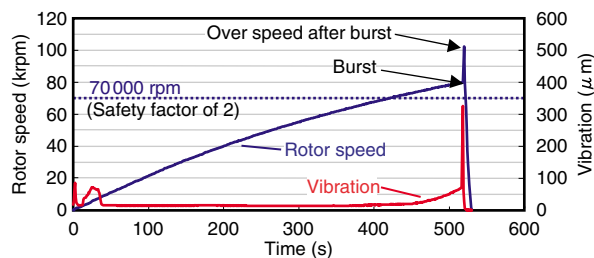


Fig. 5 Burst test of CFRP rotor

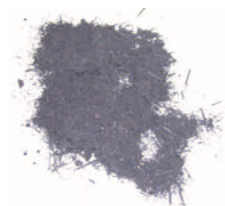


Fig. 6 Broken CFRP

3.1.3. CFRP ロータの耐久性能評価

(1) 耐久試験条件の設定 Fig. 3に示したように CFRP ロータには 50 000 rpm 時にその遠心力で約 1 Gpa の応力が発生する。この応力の繰り返しによる耐久疲労を評価する。試験パターンを常用範囲で応力変化幅が最大となる 25 000~50 000 rpm の繰り返し(1 サイクル: 25 000→50 000→25 000rpm)と設定した。繰り返し疲労が応力変化幅と繰り返し回数に依存すると仮定し、モード走行時の F/W Batt の充放電パターンを基に試験サイクル数を算出した。走行モードは 10-15 モード(日本)と City モード(US)を用いた。10 万 km を走行した場合のサイクル数は、10-15 モードで約 21 500 サイクル、City モードで約 20 500 サイクルとな

る。本研究では試験サイクル数を30 000サイクルと設定し、耐久性能評価の第一歩として常温での耐久試験を行う。試験条件を Table 3 に示す。

Table 3 Conditions of cyclic stress test

Speed range (rpm)	25 000 ~ 50 000
Number of cycles	30 000
Spin up/down time (sec/cycle)	60
Vacuum level (Pa)	< 10

(2) 耐久試験 耐久試験用ロータの外観を Fig. 7 に示す。Table 3 に示した試験条件に従い 30 000 サイクルの耐久試験を実施した。10 000 サイクル経過毎にロータの寸法測定と超音波探傷検査を、また耐久試験前後に回転時の外径変化を測定した。Fig. 8 に寸法測定結果を、Fig. 9 に回転時の外径測定結果を示す。以下に結果をまとめる。

- 各部寸法測定においては、直径が10 000サイクル後に約10 μm 変化したもののその後の変化はなく、厚みについても変化は10 μm 以下であった。

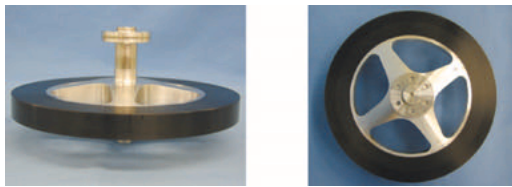


Fig. 7 Rotor for cyclic stress test

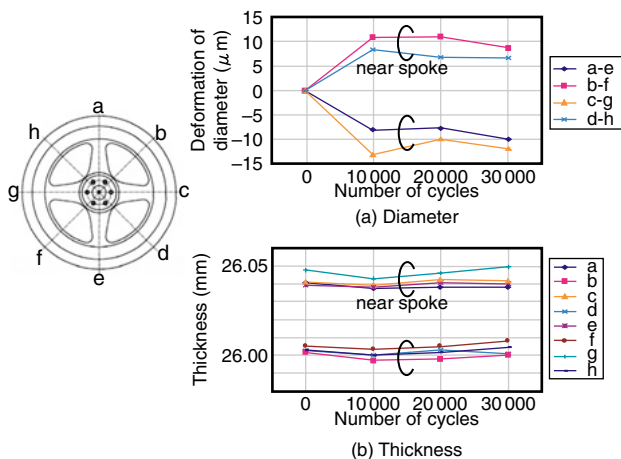


Fig. 8 Inspection of dimensions

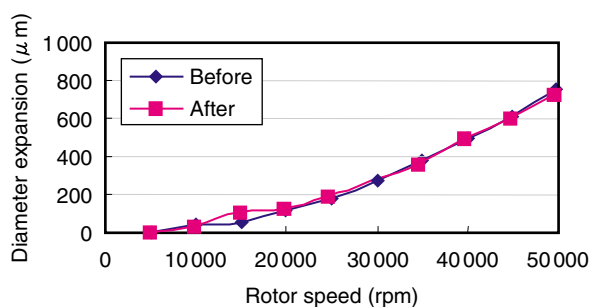


Fig. 9 Evaluation of diameter during rotation

- 超音波探傷検査においてはロータ全周に渡り層間には離れは確認されなかった。

- 耐久試験前後の回転時の外径変化量は一致した。

耐久試験中に CFRP ロータは破壊せず、形状には微小変化が生じたものの、CFRP ロータの超音波探傷や耐久試験後の回転時の外径変化測定において、樹脂の劣化を示す層間には離れや繊維の切断を示すヤング率の低下がないことから、本 CFRP ロータが常温 30 000 サイクルの耐久性を有することが確認できた。

3.2. 軸受

F/W Batt用の軸受への要求は、高回転、低損失、真空中での使用などである。種々の軸受の中から、これらの要求を満足する軸受として磁気軸受(Magnetic Bearing: 以降 MB と略す)を選定した。

3.2.1. 磁気軸受(MB)

MB は磁力により回転体を支持する非接触軸受である。物体(剛体)の運動自由度は並進3自由度、回転3自由度の計6自由度あり、回転軸回りの回転を除く5自由度が MB の支持すべき自由度となる。本システムにおいては、5自由度全てに対してアクティブ制御を行う5軸制御型 MB を採用する。Fig. 10 に一般的な MB の構成図を示す。ラジアル方向を支持するラジアル MB が軸方向2箇所に、スラスト方向を支持するスラスト MB が軸端に配置される。また、ロータの運動を検出するための非接触式の変位センサが各電磁石近傍に配置される。

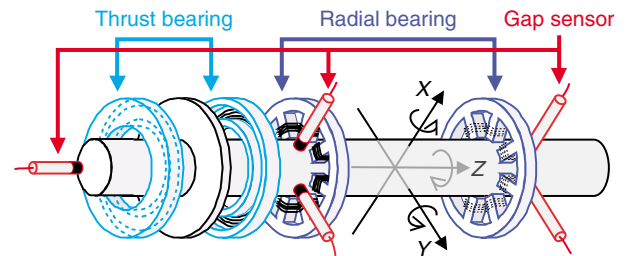


Fig. 10 Schematic of 5 DOF active magnetic bearing

3.2.2. MB のモデリング

MB のモデリングを行う。Fig. 11 に座標を定義する。

本システムは多入出力(多変数)系である。ここでは多入出力系の扱いが容易であり、系統的に制御系設計を行える現代制御理論の適用を前提として、ラジアル MB の状態方

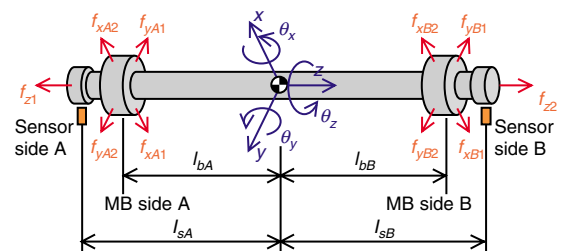


Fig. 11 Definition of Axes

程式の導出を行う。

ロータ重量を m , z 軸, $x(y)$ 軸回りの慣性モーメントを J_p , J_d とするとラジアル方向運動方程式は次式で表現される。

$$\begin{cases} m\ddot{x} = (f_{xA2} - f_{xA1}) + (f_{xB2} - f_{xB1}) \\ m\ddot{y} = (f_{yA2} - f_{yA1}) + (f_{yB2} - f_{yB1}) \\ J_d \ddot{\theta}_x = -J_p \omega \dot{\theta}_y + (f_{yA2} - f_{yA1}) l_{bA} - (f_{yB2} - f_{yB1}) l_{bB} \\ J_d \ddot{\theta}_y = J_p \omega \dot{\theta}_x - (f_{xA2} - f_{xA1}) l_{bA} + (f_{xB2} - f_{xB1}) l_{bB} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)を状態方程式表現に変形すると次式となる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_g \\ \dot{x}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ O_{4 \times 4} & A_{r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ \dot{x}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} \\ B_{r1} \end{bmatrix} f_r \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_g &= [x \ y \ \theta_x \ \theta_y]^T \\ f_r &= [f_{xA2} - f_{xA1} \ f_{yA2} - f_{yA1} \ f_{xB2} - f_{xB1} \ f_{yB2} - f_{yB1}]^T \\ A_{r1} &= \begin{bmatrix} O_{2 \times 2} & O_{2 \times 2} \\ O_{2 \times 2} & A_{r2} \end{bmatrix}, A_{r2} = \frac{J_p}{J_d} \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ B_{r1} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 & \frac{1}{m} \\ 0 & \frac{l_{bA}}{J_d} & 0 & -\frac{l_{bB}}{J_d} \\ -\frac{l_{bA}}{J_d} & 0 & \frac{l_{bB}}{J_d} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

MB 部のクリアランスを g , 電磁石電流を i とすると, 電磁石吸引力は次式で表現できる。 N は電磁石コイルのターン数, S は鉄心断面積, μ_0 は真空中の透磁率($= 4 \pi \times 10^{-7}$), k は電磁石吸引力定数である。

$$f = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left(\frac{i}{g} \right)^2 = k \left(\frac{i}{g} \right)^2 \quad (3)$$

ラジアル各部の吸引力を平衡点近傍で線形化するとラジアル方向吸引力ベクトル f_r は次式で表現できる。

$$f_r = C_{r1} x_{rb} + C_{r2} i_r \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_r &= [i_{xA} \ i_{yA} \ i_{xB} \ i_{yB}]^T \\ C_{r1} &= \text{diag} \left(\left[4k_{rA} \frac{I_{rA}^2}{G_{rBA}^3} \ 4k_{rA} \frac{I_{rA}^2}{G_{rBA}^3} \ 4k_{rB} \frac{I_{rB}^2}{G_{rBB}^3} \ 4k_{rB} \frac{I_{rB}^2}{G_{rBB}^3} \right] \right) \\ C_{r2} &= -\text{diag} \left(\left[4k_{rA} \frac{I_{rA}}{G_{rBA}^2} \ 4k_{rA} \frac{I_{rA}}{G_{rBA}^2} \ 4k_{rB} \frac{I_{rB}}{G_{rBB}^2} \ 4k_{rB} \frac{I_{rB}}{G_{rBB}^2} \right] \right) \end{aligned}$$

x_{rb} は変位ベクトル(ラジアル MB 部), i_{rb} は制御電流ベクトル, G_{rBA} , G_{rBB} は MB 平衡クリアランス, I_{rA} , I_{rB} はバイアス電流である。制御電圧と制御電流および, 変位ベクトル x_{rb} , x_{rs} (ラジアル変位センサ部)と x_g との関係式,

$$e_r = L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r \quad (5)$$

$$\begin{aligned} e_r &= [e_{xA} \ e_{yA} \ e_{xB} \ e_{yB}]^T \\ L_r &= \text{diag}(L_{rA} \ L_{rA} \ L_{rB} \ L_{rB}) \\ R_r &= \text{diag}(R_{rA} \ R_{rA} \ R_{rB} \ R_{rB}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{rb} &= \begin{bmatrix} x_{bA} \\ y_{bA} \\ x_{bB} \\ y_{bB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_{bA} \\ 0 & 1 & l_{bA} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_{bB} \\ 0 & 1 & -l_{bB} & 0 \end{bmatrix} x_g = T_{gb} x_g \\ x_{rs} &= \begin{bmatrix} x_{sA} \\ y_{sA} \\ x_{sB} \\ y_{sB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -l_{sA} \\ 0 & 1 & l_{sA} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_{sB} \\ 0 & 1 & -l_{sB} & 0 \end{bmatrix} x_g = T_{gs} x_g \end{aligned} \quad (6)$$

を用いて式(2), 式(4)をまとめると状態方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{rs} \\ \dot{x}_{rs} \\ i_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} \\ T_{gs} B_{r1} C_{r1} T_{gb} T_{gs}^{-1} & T_{gs} A_{r1} T_{gs}^{-1} & T_{gs} B_{r1} C_{r2} \\ O_{4 \times 4} & O_{4 \times 4} & -L_r^{-1} R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{rs} \\ \dot{x}_{rs} \\ i_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} O_{4 \times 4} \\ O_{4 \times 4} \\ L_r^{-1} \end{bmatrix} e_r \end{aligned} \quad (7)$$

3.2.3. MB 制御

高回転ロータを支持する上での課題は回転振動であり, 要因は次の2つに大別できる。

- ロータ不釣り合い
- 共振

以下にこれらの対策について述べる。

(1) 不釣り合い振動の低減 回転体には残留不釣り合いが存在し, この不釣り合いにより回転振動が発生する。不釣り合い振動を抑制するため, オブザーバやフィルタを用いる種々の手法が提案されており⁽³⁾, 次の2つに大別できる。不釣り合いによる遠心力を相殺する制御力でロータを回転軸(幾何学軸)回りに支持するものと, 逆に不釣り合い振動に対しては制御力を発生させずロータを重心軸(慣性主軸)回りに回転支持するものである。後者は自動バランス(慣性主軸回転)制御とも呼ばれる。

本研究においては, 帯域除去フィルタを用いた自動バランス制御を選択した。検出信号中の不釣り合い振動, 即ち回転1次の振れ回り振動成分をフィルタにて除去してフィードバックし, 振れ回り振動に対する制御力(支持剛性)をゼロとする。特に, 本研究においては中心周波数(除去周波数)が回転数に追従する帯域除去フィルタ処理をデジタル演算にて行う手法を考案した。そのブロック図を Fig. 12 に示す。モータ/発電機制御用に備える回転数信号に基づき, フィルタ特性を変化させる。Fig. 13に本フィルタを用いた自動バランス制御による回転振動の低減効果を示す。

(2) 共振の回避 MB にて支持された回転体の共振は, 剛体モードと曲げモードに大別できる。前者はMBの支持剛性(バネ・ダンパ支持)により生じるモードで, 並進(パレル), 傾き(コニカル)の2つのモードが存在する。後者はいわゆる回転体の曲げ共振である。回転時の課題はこれら

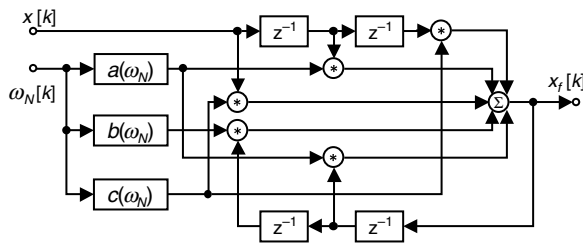


Fig. 12 Block diagram of a speed tracking band stop filter

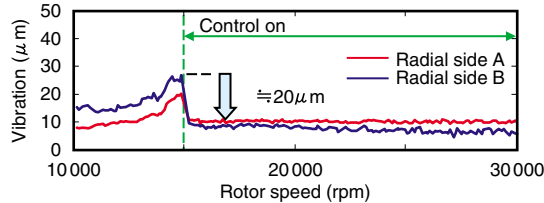


Fig. 13 Effect of automatic balancing control

共振の励起および不安定化(発散)であり、危険速度とジャイロ効果とその要因となる。危険速度とは、先のロータ不釣り合い力により共振が励起される回転数、すなわち回転周波数が共振周波数と一致する回転数を指す。ジャイロ効果は回転体特有の現象で、式(1)に示したようにラジアル軸回りの回転2自由度の右辺第一項にはジャイロ効果による干渉項が存在する。この効果により、回転体は静止時($\omega=0$)の各共振周波数が、回転数の上昇に伴い高低2つの周波数に分岐する。この現象を Fig. 14 に模式的に示した。高周波数、低周波数へ変化するモードをそれぞれ前回り(Forward)モード、後ろ回り(Backward)モードと呼ぶ。高回転でかつ慣性モーメント J_p が大きいフライホイールロータではジャイロ効果の影響が大きく、回転数に対して動特性が変化するシステムとなる。

剛体モードの危険速度はMB制御による減衰(ダンパ)特性の付与により基本的に通過が可能である。回転数の上昇に伴う不安定化の可能性を評価するため、式(7)においてジャイロ干渉項をゼロとしたモデルに対してフィードバック(F/B)ゲインを導出し、このF/Bゲインで制御した場合の閉ループシステムの固有値計算を行った。結果をFig. 15に示す。回転数の上昇に伴い、コンカル前回りモードに対する減衰比が減少することが明らかとなった。実際の制御ではセンサ、フィルタなどの位相遅れ特性の影響も加わるので、このモードが不安定化する可能性がある。従って、回転数に応じたF/Bゲイン調整手段を設け、コンカル前回りモードの減衰特性の改善(不安定化回避)を行う。

機械式軸受など高剛性軸受にて支持される回転体の曲げ共振とジャイロ効果については参考文献(4)に詳細に説明されている。MB制御により曲げモードの危険速度を通過させる研究も行われているが、一般的には使用回転数範囲内

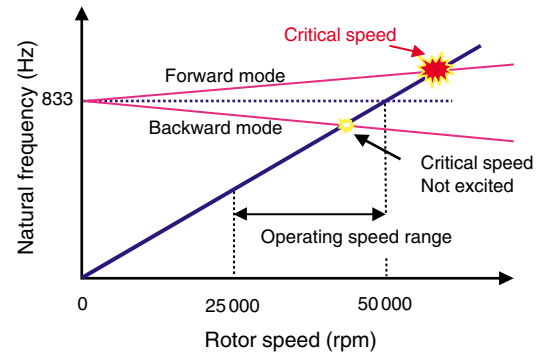


Fig. 14 Gyroscopic effect

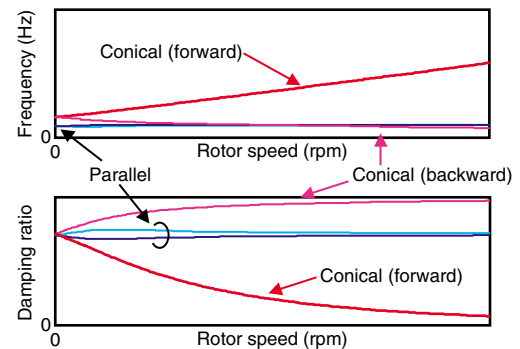


Fig. 15 Rigid mode natural frequencies and damping ratios as a function of rotor speed (closed loop simulation)

に危険速度を持たないよう回転体の高剛性化が行われる。本研究においては、フライホイールロータの固有値目標を833 Hz 以上とし、危険速度と不安定化の回避を行う。

3.2.4. 制御システム

制御ハードウェアは、Fig. 16 に示すような DSP(Digital signal processor)をベースとした市販のラピッドプロトタイプング環境を採用し、MB のデジタル制御を行う。

Fig. 17 に制御ブロック図を示す。各サンプリング信号(変位、電流)に対して、適切なフィルタ処理、状態ベクトル算出、F/B ゲイン処理を行い、制御指令値を算出する。制御は最適レギュレータを基本に前述の回転数に応じたフィルタ、F/B ゲインの各パラメータ調整手段を設けている。

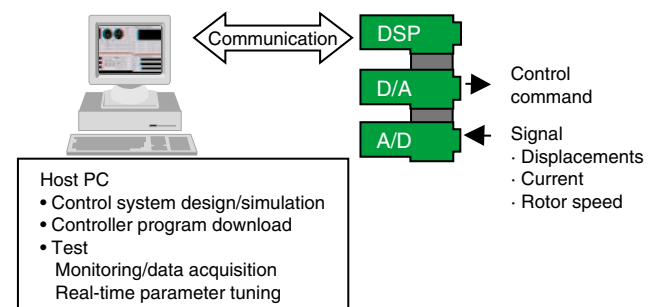


Fig. 16 Rapid prototyping system

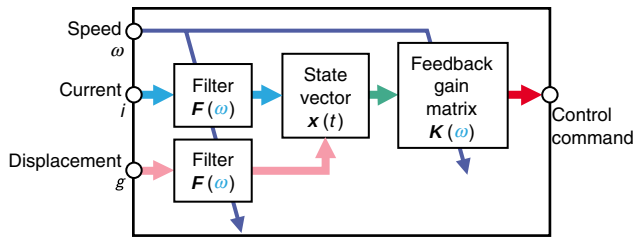


Fig. 17 Block diagram of a magnetic bearing controller

4. F/W Batt システム研究

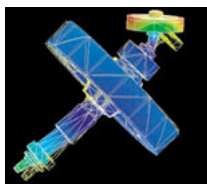
4.1. 100 Wh モデル

ロータ、軸受技術を適用したF/W Battシステム研究について述べる。目標である 250 Wh F/W Batt システムの実現へ向け、第1ステップとして100 Whモデルを製作した。100 Wh モデルの主な仕様を Table 4 に示す。最終的な 250 Wh システムはCFRP 単リング5本構成とするのに対して、100 Wh モデルはCFRP 単リングを2本用いたモデルである。

設計したフライホイールロータの固有値解析結果を Fig. 18 に示す。固有値目標として設定した 833 Hz 以上を満足するフライホイールロータを設計できた。Fig. 19に製作した 100 Wh モデルのロータアセンブリ(重量 7.6 kg)および本体外観を示す。

Table 4 Specifications of 100 Wh model

Max. operating speed (rpm)	50 000
Operating speed range (rpm)	25 000 ~ 50 000
Max. power (kW)	15 (@25 000 ~ 50 000 rpm)
Usable energy (Wh)	100 (CFRP ring × 2)
Natural freq. (Hz)	> 833
Bearing type	5 DOF Active magnetic bearing
Mot/Gen type	Brushless DC

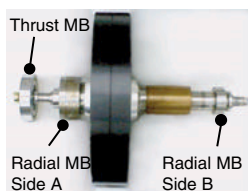


(a) 1st mode 872 Hz

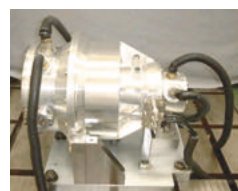


(b) 2nd mode 1083 Hz

Fig. 18 Bending mode shapes and frequencies



(a) Rotor assembly



(b) External view

Fig. 19 100 Wh model

4.2. 回転試験

MB の制御パラメータの設定、調整の後に行った回転試験結果を Fig. 20, Fig. 21 および Fig. 22 に示す。Fig. 20 は回転時の各部の振動振幅(片振幅)を示したものである。ラジアル方向およびスラスト方向の振動はいずれも回転全域に渡り低振幅(最大約 20 μm)で、目標回転数 50 000 rpm までの安定回転を達成した。Fig. 21 は 50 000 rpm におけるロータの振れ回り軌跡(Side A, B)を示したもので、安定した回転であることが確認できる。Fig. 22 は回転時のロータ振動のFFT解析結果である。回転1次の振れ回り振動成分以外に共振などの異常振動成分はない。剛体コンカル前回りモードの不安定化現象はなく、回転全域に渡り適正に制御が行われていることを示している。回転試験の結果から採用した MB 制御の有効性が確認できた。

本試験の目標である 50 000 rpm を達成し、有効エネルギー 100 Wh 貯蔵を実証できた。

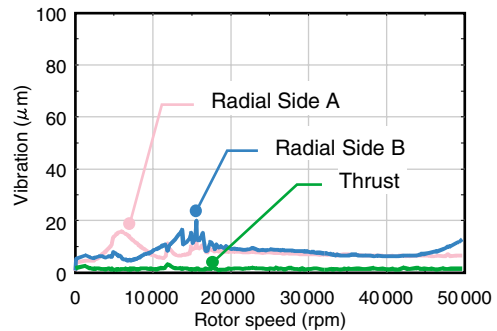
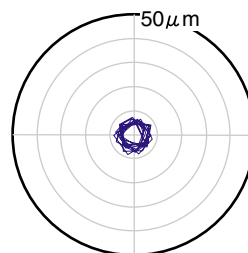
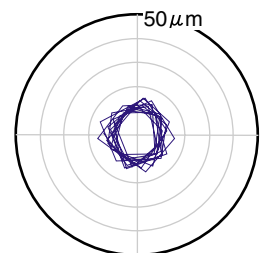


Fig. 20 Synchronous displacement up to full speed



(a) Side A



(a) Side B

Fig. 21 Whirling orbit @ 50 000 rpm

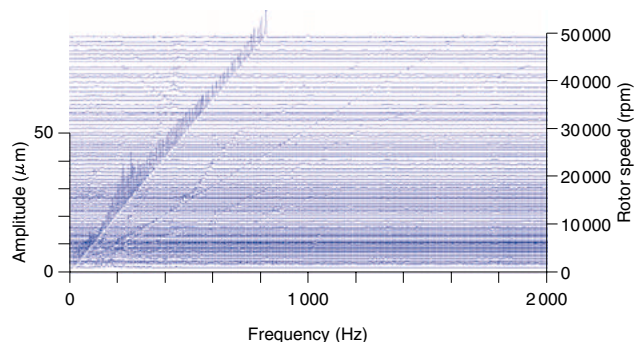


Fig. 22 Waterfall plot

4.3. 充放電試験

F/W Battシステムの充放電の確認試験を実施した。内蔵のモータ／発電機の駆動／回生出力を7.5 kW一定とし、充放電を行った。結果をFig. 23に示す。25 000 rpmから50 000 rpmの充放電を1サイクルとして計2サイクルの充放電を行ったものである。バッテリーの基本機能である充放電動作が行えること、また安定した充放電の繰り返しが行えることを確認し、バッテリーとしての成立性を実証した。1サイクルの充放電効率は86.3%となった。

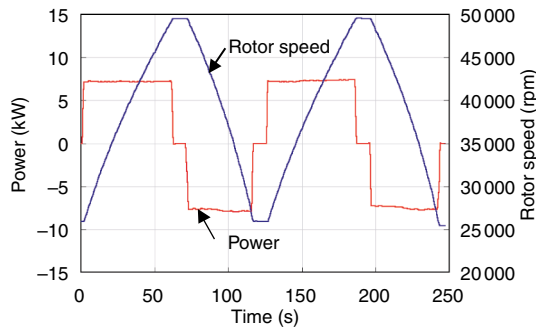


Fig. 23 Results of charge/discharge test

5. まとめ

250 Wh F/W Batt システムの実現へ向け、技術要素である炭素繊維複合材ロータの研究および磁気軸受の研究を行うとともに、これらの成果を適用した F/W Batt システムの研究を行った。ロータについては、設計・製作したロータの回転破壊試験による CFRP ロータの強度評価を行い、応力限界が理論強度の80%以上を有すること、常用回転数範囲における常温 30 000 サイクルの繰り返し試験による CFRP ロータの耐久性能の評価を行い、繊維の切断、層間はく離の発生はなく耐久性を有することを確認した。磁気軸受については、自動バランス制御用の回転数追従型ディジタルフィルタを構築するとともに、ジャイロ効果によるコニカル共振の安定性劣化を明らかにし、その制御手法を確立した。これら要素研究の成果を採用した 100 Wh F/W Batt を製作し、目標回転数 50 000 rpm の達成および充放電機能の実証により 100 Wh F/W Batt システムを実現した。

本研究の成果により、安全性、耐久性を有した F/W Batt システムの実現可能性を示すことができたと考える。

6. おわりに

今後、これらの研究成果を適用した 250 Wh F/W Batt システムを製作し、目標性能の実証を行う予定である。

なお、本研究はその一部を経済産業省主導の『高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発』プロジェクトと連動し、実施している。このプロジェクトは石油代替のクリーン

エネルギーとハイブリッドシステムとの組み合わせで CO₂ 排出量が既存車の1/2以下となる自動車の開発を目的とし、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受けた研究である。本報の一部は平成 11～14 年度の研究^{(5)～(8)}の成果である。

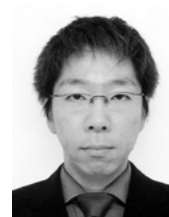
謝 辞

本研究にあたり御指導、御協力を頂きました社内外の関係者の方々に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 小林裕幸：フライホイールバッテリー用 CFRP ロータの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12 No.1, p.85-92 (2000)
- (2) 島村昭治：カーボンファイバ, オーム社, 1984, 217p.
- (3) 電気学会 磁気浮上応用技術調査専門委員会：オブザーバを併用した制御系設計, 磁気浮上と磁気軸受, コロナ社, 1993, p.203-210
- (4) 日本機械学会：機械工学便覧, 新版, A3, p.153-173 (1987)
- (5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発, 平成11年度成果報告書
- (6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発, 平成12年度成果報告書
- (7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発, 平成13年度成果報告書
- (8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発, 平成14年度成果報告書

■ 著 者 ■



須永 義 弘



阿部 昇 栄



板井 幸 彦