

フライホイールバッテリー用CFRPロータの開発

Development of CFRP Rotor for Flywheel Battery

小林 裕 幸*

Hiroyuki KOBAYASHI

要 旨

フライホイールバッテリー用のロータとして、達成しうるエネルギー密度の高さから炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のフィラメントワインディング成形を選択した。この成形方法で問題となる層間はく離を防止するために、高弾性 CFRP リング+中弾性 CFRP リング+アルミニウムリングという構成の圧入マルチリング構造を採用した。安全率を2.0と設定して各リングの材料、寸法の最適化を図ったロータを設計、製作した。70 000rpm までの回転テストを行い、安全率 2.0 が確保されていることを確認すると共に、50 000rpm までのひずみ測定を行うことで、設計手法の正しさを立証した。

ABSTRACT

Filament winding of CFRP (Carbon fiber reinforced plastic) was chosen as the shaping method of the rotor for the flywheel battery because it has the feature of high specific energy. To avoid the delamination problem in this method, press fitted multi-ring construction consisting of CFRP ring with high elastic modulus, CFRP ring with medium elastic modulus and aluminum ring was chosen. Taking the safety factor of 2.0, we designed and made the rotor with three rings, with optimal material and dimensions for each ring. Through the rotating test up to 70 000rpm, it was proved that this rotor has enough strength to meet the safety factor of 2.0, and stress measurement up to 50 000rpm demonstrated the exactitude of the calculation.

1. はじめに

近年、地球温暖化が環境に与える影響が問題視されており、その主原因の一つがCO₂の大量排出による温室効果であると考えられている。自動車会社各社は、燃料消費率の低減、代替燃料車、電気自動車(EV)、ハイブリッド電気自動車(HEV)等、広範囲なシステムの研究開発を行い、いくつかについては既に実用段階に入っている。

これら多くの研究の結果をふまえて、現在の開発の方向性は中期的にはガソリン/ディーゼル HEV もしくは代替燃料 HEV、長期的には燃料電池自動車(FCEV)の開発に定まりつつあると考えられる。

本報では、同一出力比で考えるとガソリンに対してCO₂排出量の少なくなる天然ガスエンジンを用いた HEV システムに、フライホイールバッテリーとANG(Adsorbed Natural Gas)燃料タンクという新規技術を組み合わせることでCO₂排出量の大幅削減の可能性を探るコンセプト(Fig.1)の一部であるフライホイールバッテリーのロータについての研究結果を述べる。

*栃木研究所

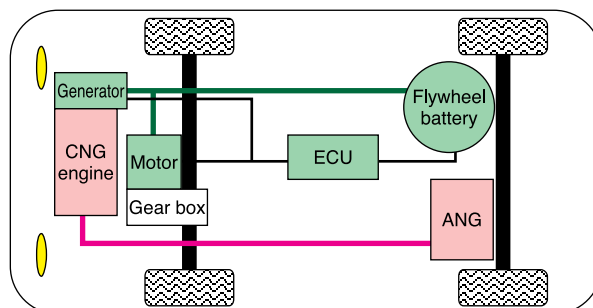


Fig.1 Outline of ANG-HEV system

フライホイールバッテリーにおいては、エネルギー密度を高めるためにロータ材料として繊維強化プラスチック(FRP)が選択されることが多い。FRPは繊維の引張方向は強いが90°方向には非常に弱いため、成形にさまざまな工夫が成されてきたが、材料強度から見込まれた性能は得られていない^{(1)~(4)}。また、回転時のひずみ、応力の理論計算はされているが、実測による検証はされていない。本研究においては、圧入マルチリング構造を採用して、各リングの材料、寸

法を最適化したロータを設計、製作して目標性能を達成すると共に、ひずみ計測を行い、計算と実測結果の比較から設計の正しさを立証した。

本研究は、石油代替のクリーンエネルギーと HEV システムとの組み合わせで走行エネルギー消費と CO₂ 排出量が既存車の 1/2 以下となる自動車を開発することを目的とする新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究、「高効率クリーンエネルギー自動車の研究開発」プロジェクトの 98 年度研究の一部である。

2. 性能目標設定

フライホイールバッテリーとは機械式電池の一種で、回転する円盤に運動エネルギーを蓄え、充電時にはモータとして、放電時には発電機として働くモータ/ジェネレータ(Mot/Gen)を介して電気形でそのエネルギーの出し入れを行う装置である。Fig.2にフライホイールバッテリーの概念図を示す。

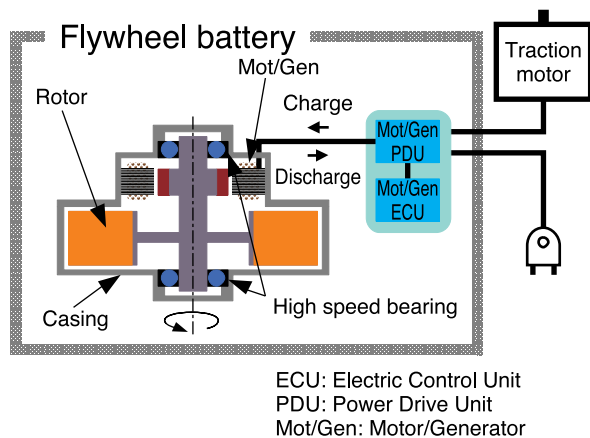


Fig.2 Outline of flywheel battery system

ANG-HEV 車両の燃費目標と動力性能目標を満足させるフライホイールバッテリーの性能目標を Table 1 に示す。

Table 1 Specifications of flywheel battery

Max power	30kW
Usable energy stored	500Wh
Total weight	100kg

3. 設計

3.1. 材料検討

バッテリーとしてのフライホイールも化学バッテリー同様、蓄えるエネルギー総量とともに高エネルギー密度、高出力密度、高効率が求められる。このうち、エネルギーを蓄える主体であるロータに求められるのは「高エネルギー密度」

である。従ってまず、どのような材料でロータを構成することが「高いエネルギー密度を得る」という要求に合致するかを検証する。

Fig.3 に示すような回転円盤を仮定して蓄えうるエネルギーを考える。簡単にするために等方性材料の中実円盤として考える。

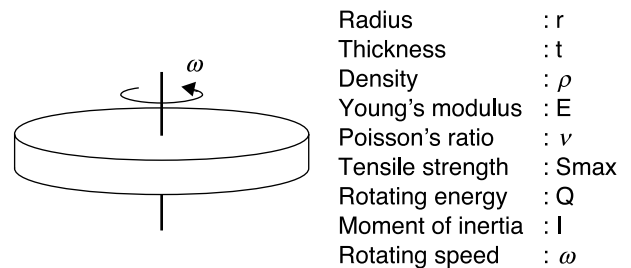


Fig.3 Rotating disk

回転する円盤に蓄えられる運動エネルギーは次の式で表される。

$$Q = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{4} \pi \rho r^4 t \omega^2$$

次にこの円盤に発生する回転応力を考えると、到達可能な最大回転数は、発生する最大応力が材料の引張強度と釣り合う回転数となる。

$$S_{\max} = \frac{1}{8} \rho r^2 (3 + \nu) \omega_{\max}^2$$

従って、ある材料で作られた回転円盤が達成しうる最大エネルギー密度は次の式で定義できる。

$$(Q/Wt)_{\max} = \frac{1}{4} (r \omega_{\max})^2 = \frac{2S_{\max}}{\rho (3 + \nu)}$$

この式から、回転円盤が達成しうる最大エネルギー密度は材料の引張強度を密度で割った値である比強度で決まることがわかる。

以上から、さまざまな材料の最大エネルギー密度を比較した結果を Table 2 に示す。

Table 2 Comparison of available specific energy

	Density ρ (kg/m ³)	Poisson's ratio ν	Tensile strength $S_{\max}$ (MPa)	Specific energy Q/Wt (Wh/kg)
Maraging steel (MAS2)	8000	0.31	2942	62
Carbon steel (SCM435)	7830	0.28	1373	30
Titanium (Ti-6Al-4V)	4430	0.19	1177	46
Aluminum (A7075-T6)	2800	0.29	569	34
Thermoplastic (Nylon66)	1140	0.3	78	12
Synthetic fiber (Nylon66)	1140	0.3	665	98
Aramido fiber (Kevlar129)	1368	0.3	2334	287
Glass fiber (S-Glass)	2103	0.3	3158	253
Carbon fiber (T1000G)	1620	0.3	4459	463

Table 2 から CFRP 製ロータが最も高いエネルギー密度を持つことがわかる。従って、ロータ材料として CFRP を選択する。

3.2. 成形手法検討

炭素繊維はその高い引張強度が糸の張力方向でのみ発揮される異方性材料である。そこで、その高い引張強度を十分に活用した設計、つまり回転によって発生する高い遠心応力を糸の張力方向で受け持つ構造とする必要がある。

- 遠心応力を糸の張力方向で受け持つための糸の配向は、
 (I)糸を中心から半径方向、放射状に配向する。
 (II)糸を周方向、リング状に配向する。

の2種類が考えられるが、(I)については径の小さい中心付近から径の大きい周辺部へ均質に糸を配置することができないため、実際に強度の高いロータを形成することは困難である。従って、繊維複合材料を用いてフライホイールロータを形成する場合には(II)のフィラメントワインディングによるロータ成形が選択される(Fig.4)。

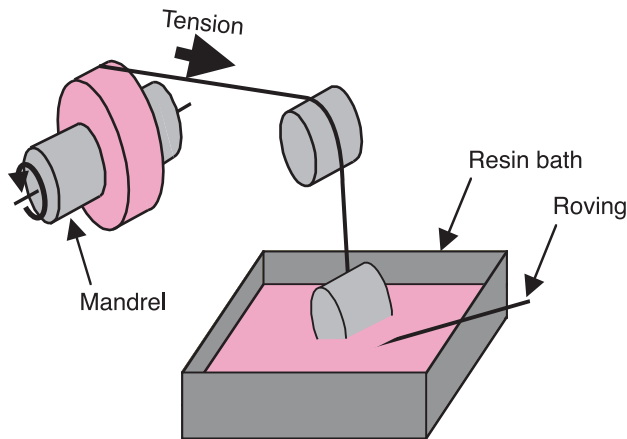


Fig.4 Filament winding

3.3. 回転応力計算式の提示

フィラメントワインディング成形されたロータは周方向と径方向で材料定数、強度の極端に異なる強い異方性を示す。従って、二次元極座標系を用いた応力計算を選択した⁽⁵⁾。以下にその回転応力計算式を示す。

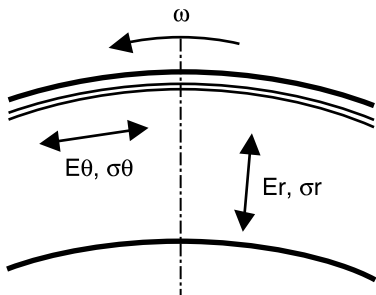


Fig.5 Stress and strain

計算の中で使用する記号は以下のように定める。

r : 半径	u : 半径方向変位
ε_{θ} : 周方向ひずみ	ε_r : 半径方向ひずみ
σ_{θ} : 周方向応力	σ_r : 半径方向応力
E_{θ} : 周方向ヤング率	E_r : 半径方向ヤング率
ν_{θ} : 周方向ポアソン比	ν_r : 半径方向ポアソン比
η_{θ} : 周方向熱膨張係数	η_r : 半径方向熱膨張係数
ΔT : 温度差	V_f : 繊維の体積含有率
E_f : 繊維のヤング率	E_m : 樹脂のヤング率
ν_f : 繊維のポアソン比	ν_m : 樹脂のポアソン比
ρ : 密度	ω : 回転角速度

応力とひずみの関係は次のようになる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \sigma_r / E_r - \nu_{\theta r} \cdot \sigma_{\theta} / E_{\theta} \\ \varepsilon_{\theta} &= \sigma_{\theta} / E_{\theta} - \nu_{r\theta} \cdot \sigma_r / E_r\end{aligned}$$

次のように簡略化する。

$$\begin{aligned}F &\equiv E_r \cdot \nu_{\theta r} = E_{\theta} \cdot \nu_{r\theta} \\ E_r &\equiv E_r / (1 - \nu_{r\theta} \cdot \nu_{\theta r}) \\ E_{\theta} &\equiv E_{\theta} / (1 - \nu_{\theta r} \cdot \nu_{r\theta}) \\ F &\equiv F / (1 - \nu_{\theta r} \cdot \nu_{r\theta})\end{aligned}$$

応力と回転遠心力との半径方向の釣合いは次式で表される。

$$d(r \cdot \sigma_r) / dr - \sigma_{\theta} = -\rho \cdot \omega^2 \cdot r^2$$

変位とひずみの関係は、

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= du / dr \\ \varepsilon_{\theta} &= u / r\end{aligned}$$

であるから、 E_r 、 E_{θ} 、 F が定数ならば次式が得られる。

$$E_r \cdot r^2 \cdot d^2u / dr^2 + E_r \cdot r \cdot du / dr - E_{\theta} \cdot u = -\rho \cdot \omega^2 \cdot r^3$$

これを解き、温度依存を考慮すると、変位、ひずみ、応力は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}u &= X \cdot r^{\alpha} + Y \cdot r^{-\alpha} + A \cdot r^3 + F \cdot r \\ \varepsilon_r &= \alpha \cdot X \cdot r^{(\alpha-1)} - \alpha \cdot Y \cdot r^{-(\alpha+1)} + 3A \cdot r^2 + F \\ \varepsilon_{\theta} &= X \cdot r^{(\alpha+1)} + Y \cdot r^{-(\alpha-1)} + A \cdot r^2 + F \\ \sigma_r &= B \cdot X \cdot r^{(\alpha-1)} - C \cdot Y \cdot r^{-(\alpha+1)} + D \cdot r^2 + G \\ \sigma_{\theta} &= B \cdot \alpha \cdot X \cdot r^{(\alpha-1)} + C \cdot \alpha \cdot Y \cdot r^{-(\alpha+1)} + E \cdot r^2 + G \\ A &= \rho \cdot \omega^2 \cdot (\alpha^2 - \nu_{\theta r}^2) / (E_{\theta} \cdot (\alpha^2 - 9)) \\ B &= E_{\theta} / (\alpha - \nu_{\theta r}) \\ C &= E_{\theta} / (\alpha + \nu_{\theta r}) \\ D &= \rho \cdot \omega^2 \cdot (3 + \nu_{\theta r}) / (\alpha^2 - 9) \\ E &= \rho \cdot \omega^2 \cdot (\alpha^2 + 3\nu_{\theta r}) / (\alpha^2 - 9) \\ F &= (\eta_{\theta} \cdot (\alpha^2 - \nu_{\theta r}) + \eta_r \cdot (\nu_{\theta r} - 1)) \cdot \Delta T / (\alpha^2 - 1) \\ G &= E_{\theta} \cdot (\eta_{\theta} - \eta_r) \cdot \Delta T / (\alpha^2 - 1)\end{aligned}$$

3.4. ロータ寸法の決定と強度検討

エネルギーを回転運動エネルギーとして蓄えるというフライホイールの特性から、回転数は高いほど多くのエネルギーを蓄えられるが、下記要求性能、制約より Table 3 のように設計要件を定めた。

- ・システムとしてのエネルギー密度要求
- ・逆回転2個使いによるジャイロモーメントの解消
- ・Mot/Gen の制御能力限界
- ・圧縮天然ガス(CNG)タンク等の実績から安全率 2.0 とする

Table 3 Rotor design requirements

Usable energy stored	250Wh ^{*1}
Total energy stored	333Wh
Available speed range	0 to 50 000rpm
Operating speed range	25 000 to 50 000rpm
Burst speed	over 70 000rpm
Rotor radius	≒ Rotor Thickness
Inside diameter/outside diameter	≒0.7

*1 Use two rotors for canceling out the gyro-moment

ロータ材料として CFRP を選択し、Table 3 の性能目標を満足させるために、ロータ外径を変化させてそのロータが蓄えることができるエネルギー量を計算したのが Fig.6 である。このグラフから 250Wh の有効エネルギーを蓄えるにはφ 270 のロータ径が必要であることがわかる。

以上から、ロータの寸法は、

外径：φ 270(mm)

内径：φ 190(mm)

厚さ： 130(mm) と決定する。

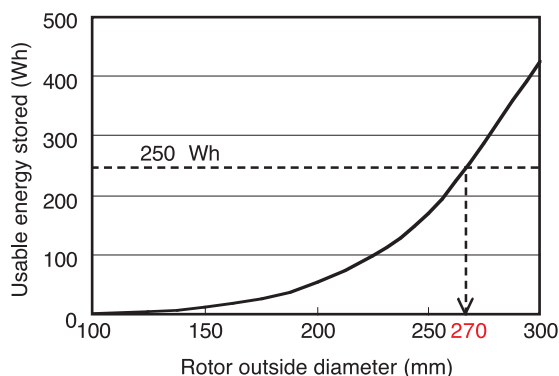


Fig.6 Relation between rotor outside diameter and stored energy

現在、入手可能な炭素繊維で最強の引張強度を持つ東レ T1000Gを用いてフィラメントワインディング成形した、外径 270mm、内径 190mm のロータの 70 000rpm での応力計算結果を Fig.7 に、東レ T1000G(Vf = 60%CFRP)の許容応力限界と計算に用いた材料定数を Table 4 に示す。

回転によって繊維を引っ張る方向の大きな周方向応力が発生するが、内周と外周では伸びの量が異なることから径方向にも応力が発生する。フィラメントワインディング成形したロータは極端な異方性を示し、径方向には層状に分布した繊維を樹脂が固めている構造のため、特に引っ張り強度が極端に低い。Fig.7から、CFRP 1層の単純周巻きロータでは回転によって発生する径方向応力が径方向引張強度を大幅に超えており、これにより繊維と繊維の間の層間ではく離破壊することになる。従って、回転による径方向応力

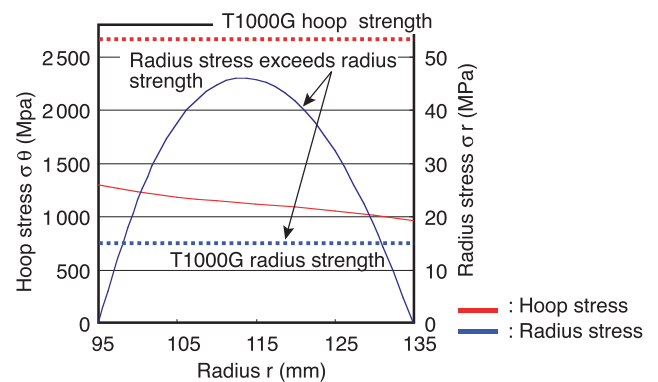


Fig.7 Stress of T1000G rotor at 70 000rpm

の発生を抑え、はく離を防止するロータ構造の改良が課題となる。

3.5. 構造検討

ロータの層間ではく離破壊を防止するためには、

- (I) 回転によって径方向圧縮力が発生する構造とする。
- (II) 発生する径方向引張応力を上回る初期圧縮応力をロータに与える。
- (III) マトリックス樹脂の強度向上。
- (IV) 径方向強化材料の付加。

といった考え方があり、それぞれの達成手法としては、

- (I)：径によって密度こう配を設け、内周ほど高密度とする。または、径によって弾性率こう配を設け、外周ほど高弾性率とする。
- (II)：複数のリングが締め代を持った圧入で一体化した構造とする。

Table 4 T1000G material specification

Hoop strength σ_{θ} max (MPa)	Radius strength σ_r max (MPa)	Density ρ (kg/m ³)	Hoop modulus E_{θ} (GPa)	Radius modulus E_r (GPa)	Poisson's ratio ν
2675	15	1568	167.6	10	0.33

(Ⅲ)：熱可塑性樹脂マトリックスを用いる。

(Ⅳ)：三次元織物構造を採用する。または、周巻き円盤と径方向配向円盤のはり合わせ構造を採用する。といったものが考えられる。

これらの手法のうち、(Ⅲ)の熱可塑性樹脂マトリックスと(Ⅳ)の三次元織物構造は現状、信頼性と必要強度を満足する成形技術が存在しない。(Ⅳ)のはり合わせ構造はFRPを扱う場合の日常的な手段であるが、強化繊維に沿って亀裂が発生するため実際には高強度の円盤を形成することが出来ないことが報告されている⁽³⁾ので除外し、(Ⅰ)と(Ⅱ)を検討した結果から内周に金属リングを持った複数リングの圧入構造(マルチリング構造)を選択し、リングによって繊維を変えることで各リングの密度、弾性率を変化させ、層間はく離破壊を防止する構造を採用した。各リングに用いる繊維は、最外周が高弾性炭素繊維である東レM40J、中間層には汎用炭素繊維である東レ T300 とし、内周の金属リングには A7075-T6 を採用する。

成形・加工の際に若干の糸が切れることから、95%の弾性率と仮定しての応力計算結果を Fig.8 に示す。

応力計算の判断基準は各部の応力が強度限界を超えないことと、圧入部分の応力が引っ張りにならない、つまり、圧入部分が分離しないこととしている。

Fig.8から各リングで最も周方向応力が高くなる最内周の応力が周方向強度を超えていないこと、径方向応力が径方向強度を超えていないこと、圧入部分の応力が圧縮であり、分離しないことがわかる。

以上によって、外径φ 270 mm、最高運転回転数 50 000rpm、限界回転数 70 000rpmのロータの仕様決定が成された。

Table 5 に決定されたロータ仕様を示す。

Table 5 Specification of flywheel rotor

Specification of flywheel rotor				
Item	Specification			Remarks
Outside diameter	φ 270 (mm)			
Inside diameter	φ 180 (mm)			
Thickness	26×5=130 (mm)			
Weight	6.87 (kg)			
Maximum energy stored	336 (Wh)			50 000rpm
	Outer ring		Middle ring	Inner ring
Material	M40J		T300	A7075-T6
Outside dia. (mm)	φ 270		φ 235	φ 190
Inside dia. (mm)	φ 235		φ 190	φ 180
Interference		400 (μm)		800 (μm)
Vf of CFRP	60 (%)		60 (%)	

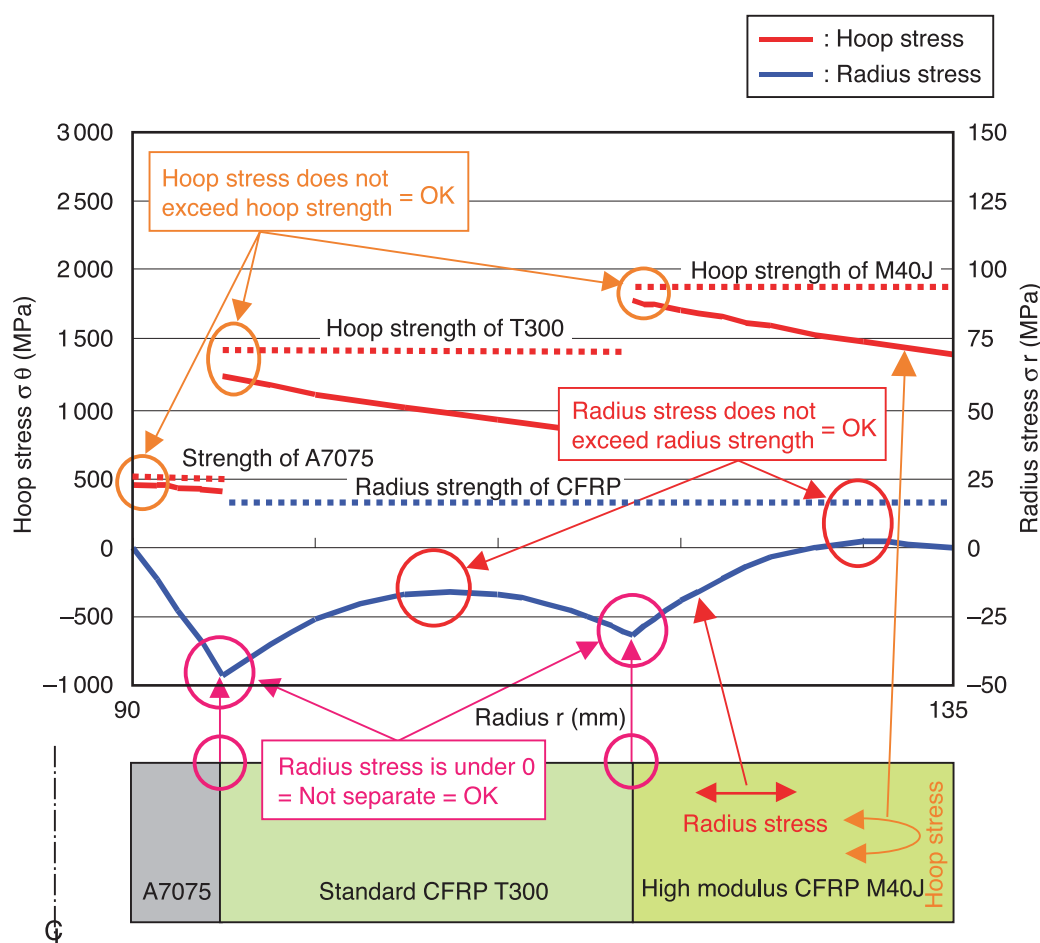


Fig.8 Stress calculation result

4. ロータの製作

Table 5 に示したロータ仕様に基づいて試作した CFRP 部分の単リング(厚さ 26mm)を Fig.9 に示す。内周側の若干色の薄く見える部分が T300 層で、外周側のより黒く見える部分が M40J 層である。M40J 層と T300 層は機械圧入されている。



Fig.9 CFRP ring

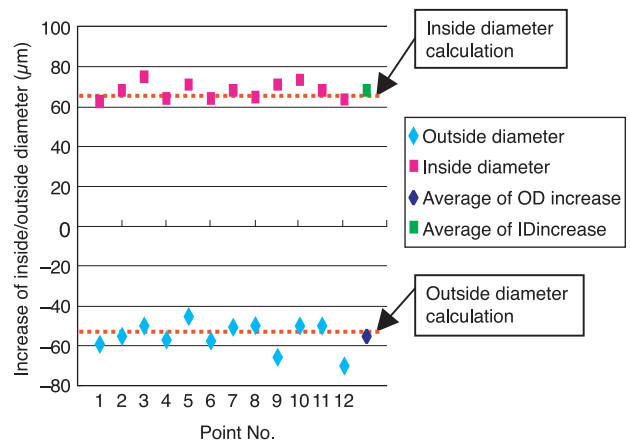


Fig.10 Increase of inside/outside diameter of CFRP ring at -40°C

5. テスト

5.1. 冷却による内外径変化の計測

炭素繊維そのものはゼロに近い負の熱膨張係数を持つ。この炭素繊維をフィラメントワインディング成形したリングを冷却した場合、樹脂のみが収縮し繊維方向には収縮しないため、外径は縮小し、内径は拡大する。そこで、試作した単リングの内外径を常温(27°C)と-40°Cとで測定し、その膨張・収縮量を計算結果と比較することで、ロータの応力計算のうち、温度に対する寸法変化特性の妥当性を検証した。

測定は3個の単リングで各4ポイントずつ、合計 12 ポイント行った。

Fig.10に測定結果と計算結果の比較を示す。これから、計算と測定結果はよく一致することがわかる。従って、内外径の温度変化に対する計算値は妥当であり、CFRP リングの内径拡大を前提にして決定した圧入代設定で冷やし始めが可能であると判断する。

Fig.11 に最内周のアルミリングを液体窒素温度で冷やし始めめて完成したロータを示す。

5.2. 70 000rpm までの回転テスト

試作したロータが 70 000rpm を達成できるか否かの確認のために、70 000rpm までの回転試験を行った。Fig.12 に



Fig.11 Complete rotor

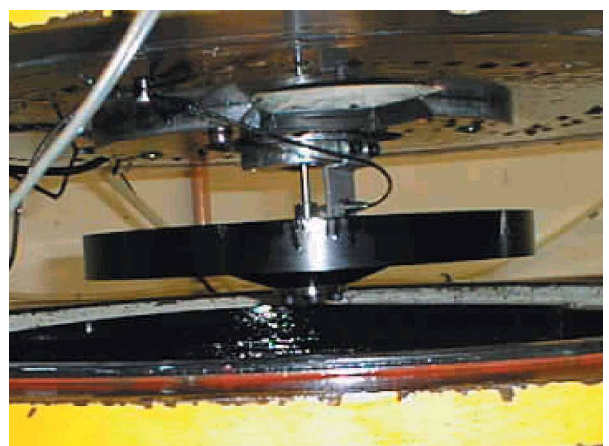


Fig.12 Rotor setting

セット状態のロータを示す。テストは内部を真空にし、ロータを吊してエアタービンで回転させるスピントスタを用いて行った。

テスト中は軸の振れをモニタし、破壊、あるいははく離等の何らかの理由で一定値以上に振れが大きくなった場合

にはトリガがかかってタービンへのエア供給が逆転し、減速するようになっている。

試験条件を以下に定めて、3個のロータで試験を行った結果を Fig.13 に示す。

- ・スピンテスタ内真空度：133Pa (1Torr)以下
- ・70000rpm 以上で3分間維持する

横軸は時間、縦軸は回転数である。全てのロータが、トリガーがかかることなく70000rpmを達成し、3分間維持できている。

この結果から、最高運転回転数50000rpmに対して安全率2.0のロータが得られたと判断する。

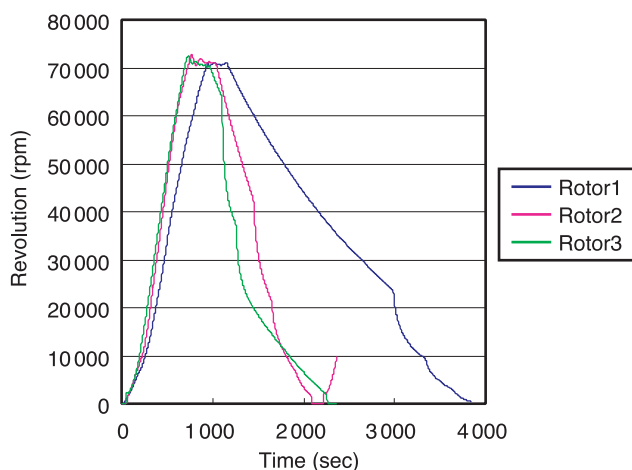


Fig.13 Result of 70 000rpm testing

5.3. 回転ひずみ計測

試作した単リングの内周にアルミリングを圧入し、ひずみゲージをはって回転ひずみ計測を行った。テストは70000rpm回転テスト同様、スピンテスタを用いて行った。Fig.14にひずみゲージをはったロータを示す。さらにFig.15に計測ポイントの模式図を示す。

計測ポイントは周方向ひずみが外周中央部、CFRP部中央側面、内周の3ポイント、径方向ひずみがCFRP部中央側面の1ポイントである。



Fig.14 Rotor with strain gauge

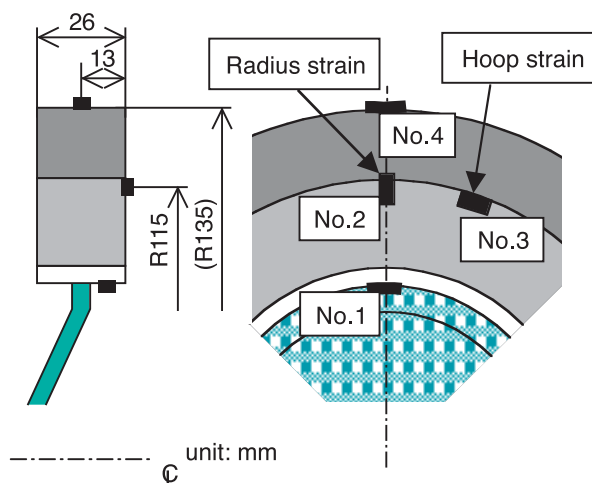


Fig.15 Outline of strain measuring points

Fig.16に50000rpmまでのひずみ計測結果と計算との比較を示す。計測はポイントによって2回から4回行っている。このグラフから計測としては非常に良好な値が得られていること、そして実測のひずみと計算値は非常によく合うことがわかり、フィラメントワインディング成形された異方性ロータの設計手法の正しさが立証されたと考える。

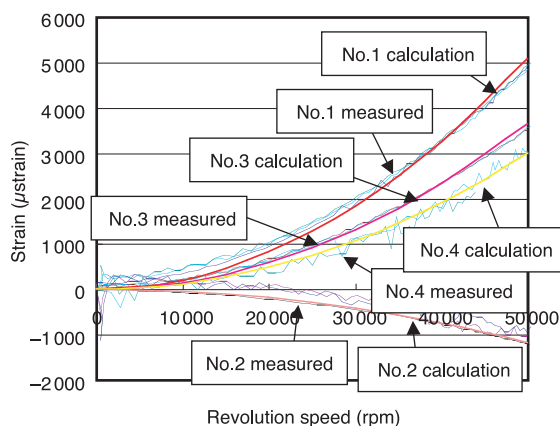


Fig.16 Comparison of calculation and measured strain

6. まとめ

フライホイールバッテリー用ロータについて、

- (1)高エネルギー密度化を可能とする材料および構造の決定
- (2)性能要求を満たすロータの寸法形状の決定
- (3)70000rpmまでの回転テスト
- (4)50000rpmまでのひずみ計測

を行い、50000rpmまでの運転領域に対して安全率2.0を確保したロータが得られると共に、計算と実測のひずみの良好な一致から設計手法の正しさを立証できた。

謝 辞

最後に本研究を進めるにあたり、多大なる御協力をいただいた石川島播磨重工業(株)殿に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 白鳥英亮ほか：円周方向繊維強化形回転円板の回転強度，日本機械学会論文集(第1部)，43巻371号，p.2473-2483 (1977)
- (2) 邊吾一ほか：繊維強化回転円板の最適積層について，日本機械学会論文集(A編)，45 巻 393 号，p.505-515 (1979)
- (3) 野口祐成：繊維強化プラスチック製蓄エネルギー用フライホイールの設計と試作，日本産業技術振興協会技術資料，No.122，p.45-54 (1982)
- (4) 小貝一夫ほか：エネルギー貯蔵用 FRP フライホイールに関する研究，石川島播磨技報，第22巻第5号，p.1-6 (1982)
- (5) 筒井康賢ほか：複合フライホイールの最適設計への一提案，日本機械学会論文集(A編)，49巻443号，p.812-817 (1983)

■ 著 者 ■



小林 裕 幸