- 11) D.G. Hannant & J.J. Zonsveld : *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, **294** (1980), 591-597.
 12) K.D. Raithby, J.W. Galloway & R.I.T. Wil-

liams : *Int. J. Cem. Compos.*, **3**, 4 (1981), 237-246.

解 説

FRP フライホイールローターの現状

浜 本 章*

1. はじめに

エネルギー貯蔵用のフライホイールに関する研究は欧米各国、とくに米国において盛んであるが、わが国でもこれまでにかなりの数の研究発表が見られる¹⁻¹²⁾。そのほか電力事情を背景とするエネルギー貯蔵システムの必要性、自動車や電車などへの利用法、またフライホイールの理論や問題点、開発状況などに関する解説、展望が多数記されている¹³⁻²³⁾。本学会誌においても1979年に、島村による「複合フライホイールの最近の研究開発」と題する展望²⁴⁾が掲載され、また社団法人強化プラスチック協会ではエネルギー関連 FRP 技術調査小委員会を設け、200 件以上にものぼるフライホイールに関する技術文献の調査を行ない、その標題集を収録^{25,26)}しているなど、FRP 関係方面でのフライホイールに対する期待は大きい。

本稿では、これまでの解説などとの重複をできるだけ避けることにし、FRP フライホイールに関する基本的な解説は最低限にとどめ、米国における研究開発において、実際に製作され、回転試験で成功を収めているフライホイールローターの実例と、筆者自身が携わってきたフライホイールローターに関する研究の一端を紹介し、FRP フライホイールローターの現状と問題について述べる。

2. なぜ FRP フライホイールか

エネルギー貯蔵用フライホイールに FRP が使われようとしているのは、他の材と比べて比強度が高く、フライホイールとしたときに、その単位重量あたりに蓄えうるエネルギー（重量エネルギー密度あるいはたんにエネルギー密度とよばれる）が大きいことによる。しかし、

FRP の比強度が高いといわれるときに使われる数値は一方強化材の繊維方向の強度をもとにした比強度であって、実際にフライホイールを作るとなると話はそれほど簡単ではない。

FRP でフライホイールのリングを作るとすればフィラメントワインディングによって繊維を周巻きにするのが最も簡単であるが、この場合には回転により生ずる半径方向の応力は繊維方向と直角な方向にも働くことになり、かなり低い応力でも周方向にクラックを生ずる。これをいかにして防ぐかが FRP フライホイールの一つのポイントである。後述の実例に示すように、その対策には大きく分けると次の三つの方法が見られる。

- A. 周巻きのリングをあまり厚肉にせず、クラックが入らない程度の薄肉にとどめる。
- B. 繊維の配向を工夫し、強度と発生応力のバランスをとる。
- C. 材質の異なるリングを組み合わせて、半径に生ずる応力を低減、あるいは圧縮応力となるようにする（マルチリングとよばれる）。

実際の例では、これらを組み合わせたものも多い。このうち A の方法では、FRP リングそのものの製作は比較的容易であるが、この場合にはリングと回転軸の結合方法がもう一つの重要なポイントとなる。周方向に強化して作られた FRP リングをフライホイールとして有効に利用するためには、そのリングの周方向最大応力がその許容応力に至る高速で回転させなければならない。このとき、リング内周の伸びは（許容応力/周方向のヤング率）となる。この値はリング内周の（半径方向の変位/半径）でもあり、ヤング率の高い CFRP でも 1% 近い値となり、Kevlar/epoxy や GFRP では数%にのぼる。このように半径方向に大きく変位するリングを支えることは非常にむずかしく、またフライホイール全体としての性能を高めるためにはリング以外の部分でもできるだけ

* Akira HAMAMOTO : 石川島播磨重工業(株) 技術研究所 (135-91 東京都江東区豊洲 3-1-15)

軽量でなければならず、かつ高速回転時の振動も考慮しなければならない。このため、Aのタイプのフライホイールの成否はリングと回転軸の結合方法にあるといえる。

以下に示す事例ではその評価としてエネルギー密度を示すが、ここでその数値について簡単に解説しておく。図1に示すような内径 $2r_i$ 、外径 $2r_o$ 、軸方向の長さ t の薄肉リングが角速度 ω で回転しているとき、このリングに蓄えられる運動エネルギー E は

$$E = (1/2) I \omega^2 \quad (1)$$

で表わされる。ここで I はリングの回転慣性モーメントで、円板では $I = (1/2) m r^2$ であるからこのリングでは、

$$I = (1/2) \rho \pi t (r_o^4 - r_i^4) \quad (2)$$

で表わされる。ここで ρ は密度である。したがって (1) 式は

$$E = (1/4) \rho \pi t r_o \{1 - (r_i/r_o)^4\} \quad (3)$$

となる。一方、周速 v で回転する薄肉リングに生ずる周方向の応力 σ_θ は

$$\sigma_\theta = \rho v^2 = \rho r_o^2 \omega^2 \quad (4)$$

である。(3) 式と (4) 式からエネルギー E は

$$E = (1/4) \pi t r_o \{1 - (r_i/r_o)^4\} \sigma_\theta \quad (5)$$

と表わされる。また、このリングの質量 M は、

$$M = \rho \cdot \pi \cdot t (r_o^2 - r_i^2) \quad (6)$$

であるからこのリング単位質量当りに蓄えられるエネルギー密度 e は

$$e = E/M = (1/4) \{1 + (r_i/r_o)^2\} (\sigma_\theta/\rho) \quad (7)$$

で表わされる。ここで薄肉リングでは $(r_i/r_o)^2 \sim 1$ と考えると

$$e = (1/2) (\sigma_\theta/\rho) \quad (8)$$

となる。(8) 式の係数 $1/2$ が従来からフライホイールの解説によく用いられてきた形状係数とよばれるもので、ここではリングについて考えたので $1/2$ であるが、回転体の形状によって異なる係数である。(8) 式で、たとえば比重が 1.6 の CFRP で発生応力を 100 kgf/mm^2 とすれば、 e の単位を $\text{W}\cdot\text{h/kg}$ とすると約 $85 \text{ W}\cdot\text{h/kg}$

が得られる。

このように、CFRP を使ったフライホイールでは、そのリングのみのエネルギー密度として、 $80 \sim 100 \text{ W}\cdot\text{h/kg}$ という数値が、一つの目安となって研究開発が行なわれてきている。

3. 米国におけるフライホイールの研究

米国におけるフライホイールに関する研究は、ほとんどが DOE (Department of Energy) がスポンサーとなつて行なわれているものである。とくに、ここ数年は、LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory, California) が主契約者となつて行なわれた研究の成果が多数報告されている。表1は LLNL で行なわれている MEST (Mechanical Energy Storage Technology) プロジェクトの 1980 年の Annual Report²⁷⁾ の各章のタイトルを示したものであるが、ここに見られるように、研究の内容はローターや応用はもちろん、ローター容器や真空技術まで非常に広い範囲にわたっている。この研究が目指すフライホイールの用途は自動車用と定置用のエネルギー貯蔵システムである。自動車のフライホイールはさらに、ガソリンエンジン車の燃費向上を目的とするガソリンエンジン/フライホイールハイブリッド車と、電気自動車の走行距離増加を目的とするシステムの二つの利用方法が考えられている。また、定置用のエネルギー貯蔵システムは風力あるいは太陽光発電などの出力平準化を目的とするもので、 $10 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 程度の比較的小型のものが考えられている。

以下では、この報告書および他の DOE レポートなどから、これまでに実験的に成功を収めていると見られるフライホイールローターについて紹介する。なお、この

表1 Mechanical Energy Storage Technology Project : Annual Report for Calendar Year 1980.

Contents
1. Project overview
2. Transportation applications
3. Fixed-base applications
4. Fiber-composite materials technology
5. Flywheel rotor and containment technology
6. Advanced component technology
7. Project management

図1 回転する薄肉リング

プロジェクトにおけるローターの目標値としては、破壊時のエネルギー密度 $89 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ($40 \text{ W} \cdot \text{h/lb}$)、通常運転時のエネルギー密度として $44 \sim 56 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ($20 \sim 25 \text{ W} \cdot \text{h/lb}$)、最大保有エネルギー $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ということである。

(1) Garrett AiResearch 社 (写真1)

Garrett AiResearch 社はフライホイールローターの試験に最も高い実績を示している。写真1のローターは外径が 584 mm で、リングは15層から成っている。内側2層はSガラス、次の5層が Kevlar 29、外側8層は Kevlar 49 を強化材とする FPR で、これらは内側から1層ずつフィラメントワインディングで成形硬化した後、次の層を前の層の上に重ねてワインディングするという方法で作られている。このローターの最大の特徴は、こうして作られた15層から成るリングと、その内側のハブの組み立て方にある。成形されたリングは、外側から4点を油圧で押してゆがめられ、その内径が広がったところに十字形のハブが挿入されている。こうし

写真1 Garrett AiResearch の Kevlar ローター

図2 Garrett AiResearch ローターの回転時の変形

て、ローターは静止状態では写真でも認められるように、内側からハブで突っ張った形になっており、図2に示すように回転速度が上がるにつれてリングが真円になろうとするために、高速でもハブとリングが離れることなく回転することができる。ハブは初期のころはアルミ合金のものが用いられていたが、最近のものは CFRP で作られ、エネルギー密度の向上が図られている。

写真のローターでは最高 $27,780 \text{ rpm}$ (周速 800 m/s) までの試験が行なわれ、この速度で振動が発生したために回転を下げる途中で破壊したということである。最大回転数におけるエネルギー量は $1.23 \text{ kW} \cdot \text{h}$ で、エネルギー密度は $80.2 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ となり、これらの値は上述の目標値をほぼ満足するものである。

(2) W.M. Brobecks (写真2)

このローターもリングの部分の内側から S ガラス、Kevlar 29、Kevlar 49 を強化材とする FRP のフィラメントワインディングによるもので、外径 350 mm 、軸方向の長さが 117 mm とやや小型である。このローターは、FRP リングと、アルミ合金製のハブを、Kevlar 29/エポキシを用いた円形のスポーク 16 本で結合しており、tension balance 形とよばれている。ローターは2個製作され回転試験が行なわれ、1個は低い回転速度でアルミのハブから破壊したが、残りの1個は $48,120 \text{ rpm}$ まで回転し、蓄えられるエネルギー $0.71 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、エネルギー密度 $64.2 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ を記録して、外側の Kevlar 49/エポキシの層とスポークから同時に破壊した。

(3) Hercules (写真3)

フィラメントワインディングにより製作された CFRP の円板形のローターで、その断面形状を変化させて高性能化をねらったものである。外径 590 mm 、厚さ 73 mm で、回転試験では $22,320 \text{ rpm}$ においてエネルギー量

写真2 W.M. Brobecks の Kevlar ローター

写真3 Herculesのカーボンローター

0.85 kW・h, エネルギー密度 37.8 W・h/kg を記録した。円板形のフライホイールでは、成形硬化時に生ずる残留応力が大きな問題であるが、このローターではこれを避けるためにマトリックスとしてポリサルフォン樹脂を用いている。しかし、横方向強度が設計値を下回り、繊維に沿う周方向のクラック、あるいは外周からの剥離により、試験がストップした。

(4) Rockwell-Rocketdyne (写真4)

高強度タイプと高弾性タイプの2種類のカーボン繊維を用いた周巻きリングの外側を、さらに繊維が接線方向となる層で包み込むようにワインディングし、アルミ合金製の円板2枚を用いて組んだもので、twin disk 形とよばれる。外径は 610 mm, 重量約 53 kg と大型で、22,920 rpm (周速 732 m/s) においてエネルギー量 1.94 kW・h, エネルギー密度 36.4 W・h/kg を得たときに、FRP リングとアルミ円板を結合するピンから破壊した。

写真4 Rockwell-Rocketdyneのtwin diskローター

写真5 LLNLのテーパローター

(5) LLNL

(a) tapered thickness (写真5)

一方向Sガラス/エポキシあるいは一方向カーボン/エポキシを擬似等方性に積層後、その断面形状を機械加工により taper 形にしたもので、外径 610 mm, 中心部の厚さが 25 mm である。S ガラス/エポキシのローターでは、25,690 rpm まで回り、エネルギー量 0.3 kW・h, エネルギー密度 28.9 W・h/kg を記録して、層間剝離をきっかけに破壊した。また、カーボン/エポキシのローターは 34,940 rpm (周速 1,115 m/s) という高速に至り、一瞬のうちに破壊した。このときのエネルギー量 0.71 kW・h, エネルギー密度 56 W・h/kg であった。

(b) constant thickness (写真6)

直径 380 mm, 厚さ 10 mm の等厚円板でSガラス/エポキシから成る。回転試験では 40,500 rpm で最初の破壊が始まったが最終的には 49,320 rpm まで回転して全体が破壊した。このときのエネルギー量は 0.157 kW・h と小さいが、エネルギー密度は 68 W・h/kg に

写真6 LLNLの等厚円板ローター

写真 7 General Electric の等厚円板ローター

達した。

(6) General Electric (写真7)

一方向 S ガラス/エポキシを積層した擬似等方性層の外側に CFRP のリングをもつ等厚円板形で、外径 450 mm、厚さ 35 mm である。回転試験では 32,100 rpm でホワールを生じてストップしたが、このときのエネルギー量は 0.38 kW・h、エネルギー密度は 36.9 W・h/kg であった。このほか、外径 380 mm の小型のものも試験されており、エネルギー密度の最大値としては 56.9 W・h/kg まで到達している。

以上に述べた各ローターの仕様と実績を表2にまとめて示す。エネルギー密度の最大値は Garrett AiResearch の 80.2 W・h/kg、エネルギー量の最大値は Rocketdyne の 1.94 W・h である。ここに示したように、各ローターともに、いろいろな工夫が凝らされており、そのアイデアが成否のポイントとなっている。リング形とするか円板形とするかが一つの大きな選択であ

り、リング形の場合には、リングと回転軸の結合方法が問題となる。また、どのような形にしても、FRP 材料に係る問題としては横方向強度があり、多くのローターの破壊原因となっている。着実に実績は上がってきてはいるが、まだ繊維方向の強度を十分に生かしきっているとはいえない現状である。

4. 国内の開発状況

わが国におけるフライホイールの研究は東大境界領域研究施設(旧宇宙航空研究所)、東工大精密工学研究所、工業技術院機械技術研究所などで理論的な面を中心に進められてきており、日本機械学会あるいは FRP 関係のシンポジウム、講演会などで発表されてきている。

一方、これらの研究とは別に企業において行なわれていたフライホイールの研究成果が、ここ1,2年の間にいくつかが発表されている²⁸⁻³²⁾。ここでは、それらのなかから、筆者自身も関係した CFRP フライホイールローターの研究について紹介する^{31,32)}。

この研究は、夜間の余剰電力を貯蔵するシステムとしてのフライホイールの可能性を調査する研究の一部として行なわれたもので、FRP フライホイールが理論どおりの高いポテンシャルを発揮することができるか否かを確かめるためのものである。いろいろな検討の結果、図3、図4ならびに写真8、9に示すような CFRP リングを本体とするローターを製作し、その回転試験を行なった。CFRP リングは外径 380 mm、内径 300 mm、厚さ 25 mm で、これを1本あるいは4本重ねてフライホイールの本体としたものである。CFRP リングと回転軸を結合するハブは高力アルミ合金のものと、炭素繊維

表 2 米国のフライホイールローターの実績

製 作 者	外 径 (mm)	エネルギー量 (kW・h)	エネルギー密度 (W・h/kg)	材料(強化材)
Garrett AiResearch	584	1.23	80.2	S ガラス, Kevlar
W.M. Brobecks	350	0.71	64.2	S ガラス, Kevlar
Hercules	590	0.85	37.8	カーボン
Rockwell Rocketdyne	610	1.94	36.4	カーボン
LLNL				
Tapered thickness	610	0.3	28.9	S ガラス
"	610	0.71	56.0	カーボン
Constant thickness	380	0.157	68.0	S ガラス
General Electric	450	0.38	36.9	S ガラス, カーボン
	380		56.9

図 3 アルミ合金ハブを用いた CFRP ローター

図 4 CFRP 擬似等方性ハブを用いた CFRP ローター

の織物を用いた CFRP 擬似等方性板によるものの 2 種類としたが、いずれのハブも、その断面形状の工夫により高速回転を可能としたものである。表 3 はこれらのフライホイールの試験結果で、最も高い周速を記録したのはアルミハブで 1 枚の CFRP リングから成るローター (AH-1) であるが、このローターは CFRP リングとアルミハブの重量がほぼ同等でエネルギー密度点では不利

写真 8 アルミ合金ハブを用いた CFRP ローター

写真 9 CFRP 擬似等方性ハブを用いた CFRP ローター

な構造ではあったが、それでも破壊時のエネルギー密度で $71 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ を得た。AH-1 と同じ形のハブ 2 枚と CFRP リング 4 本から成るローター (AH-500) は、回転時の発生応力は AH-1 とまったく等しいとみなすことができ、同周速程度まで回ることが可能であり、その場合にはエネルギー密度は $82.6 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ となるが、周速 800 m/s で保有エネルギー $548 \text{ W} \cdot \text{h}$ まで異常なく回転することを確認して試験を終了した。擬似等方性 CFRP ハブを用いたローターでは、表 3 に見るように重量は大きく軽減することができたが回転試験時の振動のため、現在のところ表に示すところまでしか至っていない。この振動の原因はハブの剛性不足と考えられ現在検討中である。

5. ま と め

以上に示したように、FRP フライホイールの性能は、まだ十分とはいえないまでも、エネルギー密度の点で見るとかなりのところに達してきていると見られる。今後

表 3 IHI におけるフライホイール試験結果

項 目	供試体 No.	高力アルミニウムハブ		擬似等方性 CFRP ハブ	
		AH-1	AH-500	CH-1	CH-500
最 高 回 転 数 (rpm)		49,300	40,240 49,330*	41,200	35,450
最 高 周 速 (m/s)		982	801 982*	820	705
保有エネルギー量 (W・h)		233	548 825*	140	393
リ ン グ 寸 法 (mm)					
外 径		300	300	300	300
内 径		380	380	380	380
厚 さ		25	100	25	100
重 量 (kg)					
リ ン グ		1.61	6.44	1.61	6.44
ハ ブ		1.67	3.54	0.52	1.73
合 計		3.28	9.98	2.13	8.17
エネルギー密度 (W・h/kg)		71.0	54.9 82.6*	65.7	48.1
備 考		破 壊	*: AH-1 と 同周速で計算		振動でストップ

性能をさらに向上させるためには、次のような検討が必要である。

- (1) 高速回転に適したフライホイールの形状、とくにリング形の場合には回転軸との結合方法
- (2) 厚肉 FRP の成形法
- (3) FRP の横方向強度の改善

ところで、FRP フライホイールが、その材料強度を十分に生かす高い性能を示したとしても、フライホイールシステムとして成り立つためには大きな問題が残されている。FRP フライホイールは周速 800 m/s 以上という高速で回転してはじめてその性能を発揮できる。ところがローターの径が小さい場合にはその回転数は非常に大きく、システムを構成する他の機械要素や入出力機器にとっては過酷な条件となる。逆に、低い回転数で利用するためには、ローターの径をかなり大きくしなければならず、現状の成形技術ではかなりのリスクを伴う。したがって、現在のフライホイールの研究としては、本稿で述べた FRP ローターの開発と、金属のローターを使った自動車用フライホイールあるいはその他のエネルギー貯蔵システムの試験研究が並行して行なわれている

が、それらを結びつける技術が一つのネックとなっており、ここが今後 FRP フライホイール実用化の鍵となるであろう。

参 考 文 献

- 1) 白鳥英亮, 池上皓三, 服部敏雄, 清水克実: 日本機械学会論文集, **40**, 340 (1974), 3298-3390.
- 2) 白鳥英亮, 池上皓三, 服部敏雄: 日本機械学会論文集, **43**, 371 (1977), 2473-2483.
- 3) 服部敏雄, 池上皓三, 白鳥英亮: 日本機械学会論文集, **44**, 379 (1978), 845-853.
- 4) 津田慎吾, 白鳥英亮, 池上皓三: 日本機械学会論文集, **45**, 398 (1979), 1198-1207.
- 5) 白鳥英亮, 池上皓三, 石井達久: 日本機械学会論文集, **46**, 407 (1980), 771-778.
- 6) 五十嵐純一, 池上皓三, 白鳥英亮: 日本機械学会論文集, **47**, 420 (1981), 781-789.
- 7) 植村益次, 井山向史, 山口芳子: 日本航空宇宙学会誌, **26**, 296 (1978), 471-479.
- 8) 辺 吾一, 植村益次, 遠藤真宏: 日本機械学会論文集, **45**, 393 (1979), 505-515.
- 9) 植村益次, 井山向史, 山口芳子: 第25回 FRP 総合講演会講演要旨集, 14-1~14-8 (1980).

- 10) 植村益次, 井山向史, 福永芳子: 材料, **30**, 339 (1981), 1177-1182.
- 11) 井山向史, 植村益次, 福永芳子: 第11回FRP シンポジウム前刷 (1982), pp.117-120.
- 12) 野口祐成, 浅野 清, 寺谷正守, 時田広士: 第24回 FRP 総合講演会講演要旨集, 32-1~32-7 (1979).
- 13) 島村昭治: 精密機械, **44**, 1 (1978), 91.
- 14) 植村益次: 機械の研究, **30**, 10-12 (1978), 1139, 1257, 1377.
- 15) 松野建一: 電気協会雑誌, **654** (1978), 13-24.
- 16) 矢田恒二: 機械の研究, **30**, 4 (1978), 47-52.
- 17) 上之園博: *KEK Rep.*, 78-26 (1979), 31-35.
- 18) 三井原彬: 別典化学工業, **24**, 8 (1980), 94-99.
- 19) 吉弘信夫: *ENERGY*, **14**, 9 (1981), 17-20.
- 20) 神沢 淳: *MOL*, **19**, 12 (1981), 28-33.
- 21) 松野建一: 省エネルギー, **34**, 4 (1982), 8-12.
- 22) 日経メカニカル (1981.8.3), 94-98.
- 23) 日経メカニカル (1981.12.21), 34-38.
- 24) 島村昭治: 日本複合材料学会誌, **5**, 2 (1979), 49-55.
- 25) 強化プラスチック, **27**, 4 (1981), 157-162.
- 26) 強化プラスチック, **27**, 5 (1981), 203-207.
- 27) T.M. Barlow, W.T. Crothers, T.T. Chiao, D.N. Frank, D.M. King & S.V. Kulkarni: *Mechanical Energy Storage Technology Project: Annual Report for Calendar Year 1980*, LLNL (1981).
- 28) 小貝一夫, 中西健一, 河野 廣, 松岡孝典, 竹下興二, 木田宏二, 堀江将人: 三菱重工技報, **19**, 3 (1982), 264-272.
- 29) 丸山信昭, 浅越泰男, 河村寿三, 木村好男, 菅波拓也: 三菱電機技報, **55**, 7 (1981), 494-496.
- 30) 石川島播磨技報, **22**, 4 (1982), 257-262.
- 31) 浜本 章, 犬竹紀弘, 只石保弘, 川村孝五, 小貝一夫: 強化プラスチック, **28**, 3 (1982), 88-92.
- 32) 小貝一夫, 犬竹紀弘, 浜本 章, 只石保弘, 川村孝五: 石川島播磨技報, **22**, 5 (1982), 297-302.