

# 1509 ハイブリッド車両用滑り軸受式フライホイール蓄電装置の開発

Development of Sliding Bearing Type of Flywheel Battery for Hybrid vehicles

正 [機] ○ 川口 清 (鉄道総合技術研究所)  
高門 祐三 (神鋼電機) 近藤 弘之 (神鋼電機)  
準 松村 秀弓 (大同メタル工業) 準 市野 孝雄 (大同メタル工業)

Kiyoshi Kawaguchi, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo  
Yuzou Takakado, Shinko electric Co.,LTD, 7-2-14, Toyo-cho, Koto-ku, Tokyo  
Horoyuki Kondo, Shinko electric Co.,LTD, Motoyasiki-150, Sanya-cho, koto-ku, Toyohashi-shi, Aichi  
Hideyumi Matsumura, Daido metal Co.,LTD, Tendo-shinden, Maehara, Inuyama-shi, Aichi  
Hideyumi Matsumura, Daido metal Co.,LTD, Tendo-shinden, Maehara, Inuyama-shi, Aichi

Flywheel energy storage equipment has more excellent merit compared with other energy storage device, like as electric double layer capacitor or rechargeable battery. For example, flywheel can be easily energy condensed by designed rotating speed, higher voltage can be obtained, there occurs little chemical damage in repetition of high rate charge and discharge, and researching development may be on the electrical motor technology extension.

In this paper, we show an outline of new developed flywheel energy storage equipment, using sliding bearing for the first time as vehicle on-board. Running test result on an automobile test course hauled by an electric vehicle is also mentioned.

Keywords: hybrid vehicle, energy storage, flywheel, sliding bearing, splash lubrication, permanent-field motor, gimbal

## 1. まえがき

現在、次代の省エネ・省保守車両の核となるハイブリッド車両蓄電装置の開発が内外で行われている。その蓄電媒体には、電気二重層キャパシタ、ニッケル水素やリチウムイオンなどの高性能二次電池があり、日本では一般に馴染みがないがフライホイール式がある。

通勤電車や気動車、LRT、バスに対し、この種の蓄電媒体をハイブリッド用として適用するにあたっては、家電製品とは桁違いの高電圧・大出力・高電圧・多頻度の急速充放電を要する。そのため、大型車両蓄電媒体の性能向上に加え、実用的な長寿命化と低コスト化が本格的普及の上での難題となっている。こうした状況の下、大型の地上用蓄電媒体として欧米で普及し始めているのが新世代のフライホイール式である。

フライホイール式蓄電装置は、他の蓄電媒体に較べて、単体で高電圧化し易く、電極が無いので急速充放電を繰り返して行っても化学的劣化がない、要素技術が確立された電動機技術、安価、回転数や大きき次第でエネルギー密度も上げることが可能、などの利点がある。

一方、従来の一般的なフライホイール式は、冷却装置等の付属機器を多く要する、増速ギヤや転がり軸受などの疲労部品が多い、高速回転時の空気抵抗等による発熱損失が大きい、衝撃による軸受破壊の発生、といった課

題がある。そのため、車載用では未だに普及しなかった。

ところが、近年の磁石などの材料、軸受と潤滑油の性能、電動機制御技術の進歩により、フライホイール式の適用分野が広がり始めた。そして欧米では、Urenco社等の施設用大型無停電電源装置や地下鉄等の地上電源装置に加え、DBのハイブリッド気動車、Phileas-APTS(ハイブリッド式連接バス)等で実施例が増えてきた。<sup>(1)</sup>

鉄道総研では種々の蓄電媒体の鉄道への適用について研究開発を行っている。その中で、比較的短期間のうちに現実的な価格で実用化が望める方法の一つとして、気動車や電車やLRT等のハイブリッド車両フライホイール式蓄電装置の研究開発を進めている。

筆者らは今回、大型ハイブリッド車両の低コスト長寿命蓄電装置として、初のすべり軸受方式クラグ形状回転体によるフライホイール式蓄電装置を開発した。従来の課題解決のため、簡易減圧、ダイレクトポンプ強制潤滑すべり軸受、磁気吸引併用油膜浮上式動圧軸受、自冷空冷式容器、安価な合金鋼製ローター、油回収装置などを開発した。こうして車載用フライホイール式の実用化の上で長年の課題となっていた種々の課題解決について、実用化にほぼ目途をつけた。本論文では、原理試作した装置の概要と、フライホイールハイブリッド車によるテストコース牽引走行試験などの結果の概略を紹介する。

## 2. フライホイール式蓄電装置の仕様

原理試作したフライホイール装置（第1次原理試作機：比較用従来型、第2次原理試作機とも共通）の諸元を表1に、断面図を図1に示す。

また、開発した動圧式すべり軸受による油浴潤滑の原理を図2に示す。なお、図中の回転軸の実際の軸端は平面であり、油溝は軸受底面側（油溜りの中にある。）

表1. 原理試作したフライホイール式蓄電装置の諸元  
Table.1. Technical data of test & prototype flywheel energy storage equipment

| 主要部                         |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| 回転姿勢                        | 鉛直方向(回転軸が鉛直)           |
| 最大蓄積エネルギー[MJ]               | 1.1(at.9,000rpm)       |
| 最大出力[kW]                    | 63/126(4,500/9,000rpm) |
| 常用最大回転数[rpm]                | 9,000(許容10,000)        |
| 連続出力[kW]                    | 21/42(4,500/9,000rpm)  |
| 最大許容振動加速度[G]                | ±0.5(軸受負荷)             |
| 誘起電圧(設計値)[V]                | 268(at.9,000rpm)       |
| 荷重軽減用アシスト磁石                 | サマリウムコバルト磁石            |
| 使用周囲温度[°C]                  | -10~+55                |
| アウターロータ(フライホイール回転体)         |                        |
| 材質                          | 特殊鋼 SCM435             |
| 慣性モーメント[kg・m <sup>2</sup> ] | 3.16                   |
| ステータ(モータ・ジェネレータ)            |                        |
| 方式                          | 永久磁石回転界磁               |
| 極数                          | 4                      |
| 相数                          | 3相3線式                  |
| 絶縁                          | F種                     |
| 冷却構造                        | 自冷                     |
| トルク(最大/連続)[N・m]             | 133/44.6               |

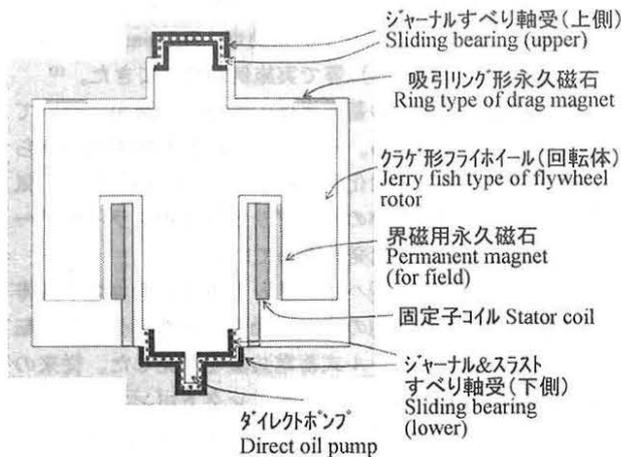


図1. 試作したフライホイール式蓄電装置

Fig.1. Prototype flywheel energy storage equipment

## 3. 基礎試験

第1次試作機（玉軸受）の基礎試験結果と第2次試作機（すべり軸受）の基礎試験を行い、改善結果を比較した。

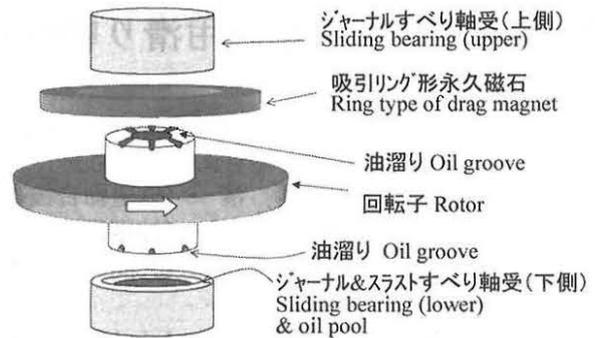


図2. すべり軸受の浮上原理

Fig.2. Principle of sliding bearing splash levitation

### <3-1> 無負荷温度特性試験

フライホイール回転体を9,000rpmまで加速し、既設の熱電対により各部温度（各箇所の軸受、回転体内側空気、鉄心、巻線各部）の経時変化を測定する。温度飽和の状況から、冷却手段の検討が可能となる。

第1次試作機は、特に風損による発熱が大きく、長時間試験が出来なかった。

一方、第2次試作機は、ケーシングの熱伝達率改善（鉄からアルミに変更）、放熱面積の拡大を実施した。9,000rpmで3時間連続ヒートランの結果、自冷でも鉄心の飽和温度は90°Cであり、F種巻線（155°C）に対して余裕があった。夏場においても自冷・空冷だけで十分な冷却効果を得ることが可能である。

### <3-2> フリーラン特性試験

9,000rpmまで加速した状態でインバータ制御を切り、回転数の経時変化を測定した（図3）。停止時間と回転数ごとの全損失（モータ鉄損、風損、軸受の機械損失の合計値）が求まる。温度上昇試験結果を併せて各部の損失を計算すると、損失の内訳が求まる。

潤滑と絶縁を考慮して20Kpaまで減圧し、風損を大幅に低減させた。それ以外の損失は、すべり軸受化により

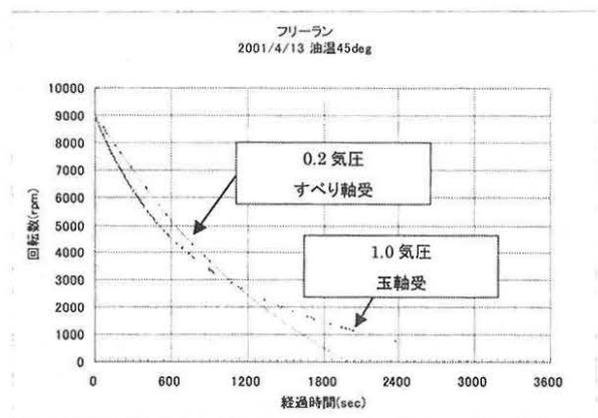


図3. フリーラン停止時間

Fig.3. Free running time to halt

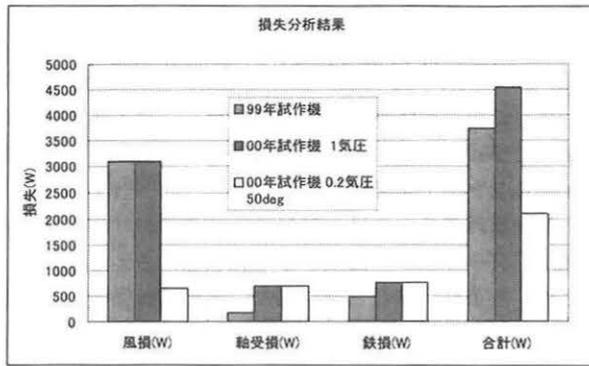


図4. 損失内訳 (at. 9,000rpm)  
Fig.4. Loss items (at.9,000rpm)

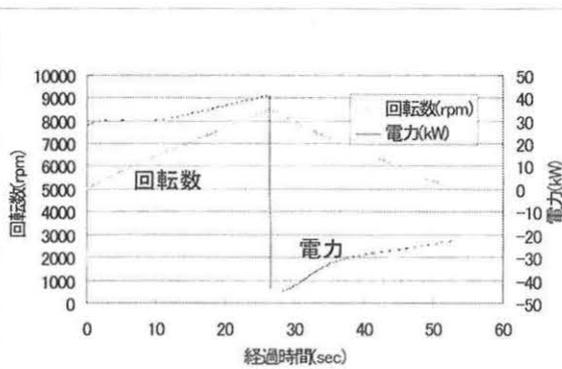


図5. エネルギー授受試験結果  
(エネルギー効率: 単体 94%, インバータ直流端 84%)  
Fig.5. Energy charge and discharge test result  
(Energy efficiency: Motor 94%, Inverter terminal 84%)

軸受損が特に低速で増大し、磁石の増加で誘起電圧上昇 (実測値 210V→320V) により鉄損が増大し (鉄心の薄板化 0.35mm→0.1mm による損失低下を上回った) した。9,000rpm における全損失は、3.7kW から 2.1kW まで低減し (図4)、さらなる大幅な低減の可能性も得た。

### ＜3・3＞ 力行・回生特性

定置でフライホイール入出力端子、インバータ直流入力 (600V) 端子で電力を測定した。

25秒の加速 (車両としては回生ブレーキ中に相当) の直後、25秒の減速 (車両としては力行中に相当) を行って、エネルギー効率を求めたところ、フライホイール単体として瞬時最大 94%、インバータ端のフライホイールシステムとして 84% の値を得た (図5)。

### ＜3・4＞ 振動特性

フライホイール回転体を 9,000rpm まで加速させながら、埋込変位センサにより各部 (フライホイール回転子のスラスト方向、ラジアル方向) の振動測定を行う。回転体のアンバランスによるふれや、フライホイール回転体の固有振動数のチェックが行える。

第1次試作では 2,000rpm 付近に 1次共振 (設計上も予想され、十分なダンピングがかかっており問題はなかった) が出たが、第2次試作では運転域で振動振幅が増大することはなかった。つまり、バランスが良好であり、運転域で回転体の共振が存在しないことが確認された。

### ＜3・5＞ 騒音特性

9,000rpm 回転状態のフライホイール装置本体から 1m 離れた点で騒音測定を行い、運転中の最大騒音レベルをチェックする。本体 4 方向の平均値を求める。第1次試作では 65dBA であったが、第2次試作では 73dBA と、約 8 dB 上昇した。要因は、ケーシング材が鉄からアルミに変わったこと、固定子外部に付設した冷却用フィン (ひれ形状のもの: 図6参照) による表面積が大きくなったことで説明できる。

## 4. 車載のための方策 (ジンバル支持機構)

フライホイールを車載する場合、バネ上での振動が軸受に悪影響を与えないように、また加減速時や曲線通過時に回転体に作用するコリオリ力を打消すことが可能なように、支持機構を考慮する必要がある。上下方向のバネと回転に対する自由度を与える機構として、ジンバル支持機構 (図6) を試作し、重心位置での支持により走行時の揺動荷重の影響を排除できる構成とした。



図6. フライホイール式蓄電装置とジンバル支持機構

Fig.6. Flywheel energy storage equipment and gimbal suspension

## 5. 電気自動車による走行エネルギー授受試験

フライホイール式蓄電装置をジンバル支持して電気自動車に搭載 (図7) し、テストコースで走行エネルギー授受試験を行った。走行試験は速度 45km/h までの加速減速によって行った。

### ＜5・1＞ 機械系

ジンバル支持機構による曲線通過時のコリオリ力抑制、軸受温度上昇の最大値など、機械的部分で問題ないこと

が確認できた(表2)。

#### 〈5・2〉電気系

回生時の制御は直流電圧のみを監視し、閾値を越えたらフライホイールを動作させるフィードバック系を構築している。なお、常時も、フライホイール回転数が閾値まで低下した際に鉛蓄電池からエネルギーが供給されるよう、定速度制御が高位優先で組まれている。

試験の結果、電気自動車の鉛蓄電池(150Ah)の電圧降下率を25.5%→6.8%に改善するとともに、負荷電流に対する蓄電池電流最大値を36%までピークカットすることができた。



図7. 電気自動車による牽引走行試験

Fig.7. Running test result hauled by an electric vehicle

表2. 機械部分における技術的課題、解決策と効果  
Table.2. Technical challenge and resolution, effect (mechanical part)

| 技術的課題          | 解決策と効果  |
|----------------|---|
| 損失(特に風損)<br>放熱 | 0.2気圧までの簡易減圧 :1/5に低減<br>永久磁石同期電動機 → ロータ発熱小<br>ステータ外部のアルミフィン自然冷却<br>非蒸発・高冷却性の軸受潤滑油 |
| 軸受耐久性          | 車載としては世界初のすべり軸受採用<br>油膜形成 → 通常使用8年間無保守  |
| 支持機構<br>支持中心   | シンバル支持機構 → 慣性力を逃がす<br>FW重心との一致化<br>→ 加減速に伴う外力発生を抑制                                |
| 関係の定量化         | 回転数、外力値と軸受荷重の関係<br>傾斜合成、回転数、外力値の関係  |

### 6. フライホイール軸受の耐久性評価

荷重が常時負荷され摩耗が懸念される下側スラスト軸受の耐摩耗性を確認し、軸受摩耗を予測するため、JIS K 7218-1986 に基づく単体試験機、フライホイール式蓄電装置を用いて試験時間に対する摩耗量を測定した。

短時間に起動と停止を繰り返す厳しい試験条件下での100時間後の実測値でも摩耗量飽和が確認されたことから、初期摩耗後の飽和曲線(流体油潤滑領域)をもとに、エンジンメタル軸受業界の経験式に当てはめて摩耗量を

推定することが可能となる。

通常よりも数倍厳しい条件下の実測結果からさらに52,560時間(=18時間/日で8年間)の摩耗量予測を行ったところ、単体試験機で300μm、フライホイール試験機で250μmとなり、当初設計値の半分以下の摩耗量となることが予測できる。

この摩耗量であれば、軸受設計寸法における中間相である“ブロンズ”の露出する摩耗状態にさえも達しないため、悪条件が重ならない限り、8年間無保守、条件を整えることで15年程度無保守が可能との結論を得た。

### 7. 車載フライホイール蓄電装置の今後

フライホイール蓄電装置としての、車両搭載への技術的課題をクリアすることができた。現在、欧米ではフライホイール式エネルギー蓄積装置が地上用で普及段階に入り、車載用でもオランダのPhileas-APTSなどで営業に導入され、ドイツのLIREXでも開発が進んでいる。

新しいフライホイール式の要素技術は、確立されて普及している交流電動機とその制御技術であり、大型車用として最も安価に実用化できる可能性がある。事業用車両での実用化上の目標値は、価格が数万円/kw以下、充放電サイクル寿命が140万サイクル、電圧が600V以上、出力が少なくとも100kw以上、重量が車両重量比で数%以下などと考えられる。新しいフライホイール式は、二次電池や電気二重層キャパシタに比べ、価格や温度環境や寿命やパワーといった現実的な実用性の面で強みがあり、ここに来て新たな展開が期待されている。

### 8. まとめ

本論分における結論は以下のとおりである。

- (1) 車載用として初めてのすべり軸受式フライホイール装置を開発した。
- (2) 表2に示す方策により蓄電装置の寿命が少なくとも140万回を見込めるレベルに達した。
- (3) 電気自動車によるフライホイールとのエネルギー授受試験を実施し、鉛蓄電池の電圧降下抑制と最大電流の低減を確認した。
- (4) 要素技術は確立された安価な交流電動機技術であり、大型車用として安価に実用化できる可能性がある。

### 9. 謝辞

この研究開発を進めるにあたって、お世話になった、神鋼電機(株)の星谷様、石黒様、大同メタル工業(株)の大川様、花橋様、福谷様、藤原様、当鉄道総研の小笠様はじめとする関係各位に感謝申し上げます。

### 文献

- (1) 川口：フライホイール技術とその車両への適用、鉄道車両と技術、2000/09, pp21-31