

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成24年 6月 7日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656602

研究課題名（和文）

スピン球体への超高密度エネルギー貯蔵技術の開発：フライホイールの多軸回転化

研究課題名（英文）

Development of ultra-high density energy storage in spinning spherical body

研究代表者

山田 昇 (NOBORU YAMADA)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90321976

研究成果の概要（和文）：

本研究では、機械式バッテリーのエネルギー密度を高めることを目標として、従来1軸回転であったフライホイールを2軸回転にすることを検討した。解析により、球体の回転を互いに直交する回転軸まわりに2軸回転化することで1軸回転と比較して原理的には2倍のエネルギー貯蔵が可能であることを確認した。実際に2軸回転装置を試作し、解析と同様の結果が得られた。2軸回転化によりエネルギー貯蔵量を向上できる可能性が解析と実験により示された。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a concept of kinetic energy storage system with two-axis spinning sphere is introduced to improve the energy density of the mechanical battery, flywheel energy storage system. Fundamental analysis with finite element method and the first experiment of two-axis spinning sphere are carried out to clarify the proposed concept. Analytical and experimental results show that the two-axis spin can store kinetic energy by a factor of 2 over the conventional one-axis rotation for the same rotation speed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：エネルギー貯蔵，蓄電システム，エネルギー変換，電力平準化，自然エネルギー

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー・環境問題の緩和方策として太陽光・風力など再生可能エネルギーによる分散型発電システムが急速に普及している。しかし、これらは発電電力が変動しやすいため、電力を平準化させる蓄電デバイスが必要である。蓄電デバイスとして二次電池、キャパシタ、機械式バッテリーが挙げられる。機械式バッテリーは電気エネルギーと運動エネルギーとの変換デバイスであり、フライホイール (FW) と呼ばれる慣性体をモータで

高速回転させることでエネルギーを蓄える装置である。化学反応を使わないため、蓄電池等と比べて高寿命であり、高出力化、大容量化に向くなどの優位点がある。

従来型 FW でエネルギー密度を増加させるには、回転速度・サイズ・材料密度のいずれかを増加する必要があるが、ロータの応力増大、軸受損失・風損などの機械的損失が増大し、寿命低下、騒音、発熱などの問題が生じる。また、高速回転化では汎用モータの使用が困難となる。

2. 研究の目的

従来型 FW では回転体を1つの軸で回転させることによって運動エネルギーを貯蔵していたが、本研究では、回転速度やロータサイズを増大させることなく FW のエネルギー密度を抜本的に高める新たな手法として、従来1軸回転であった FW を2軸回転することの実現可能性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 解析により2軸回転化によるエネルギー密度の向上を検証した。新たに提案する2軸回転 FW では、図1に示すように縦回転と横回転を同時に行うことで貯蔵エネルギー量を縦回転分と横回転分の和にすることを狙いとしている。内側で回転する軸(従属軸)は外側で回転する軸によって回転させられるが、外側で回転する軸(独立軸)は常に一方方向に回転を行なう。

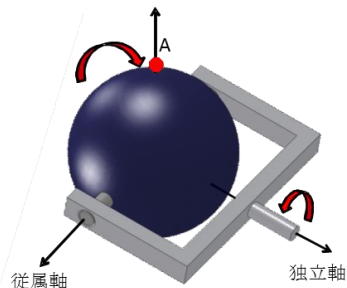


図1 2軸回転の座標系

1軸回転体に貯蔵される運動エネルギーは、回転体の慣性モーメントと回転速度から求めることができるが、2軸回転体の場合には適用できるか不明である。そこで、有限要素法を用いて回転体を微小体積要素に分割し、各要素の質量および接線方向並進速度から、各要素の運動エネルギーを算出して積算することで2軸回転体の貯蔵エネルギーを求めた。図2に解析モデルと2軸回転時における軌跡を示す。

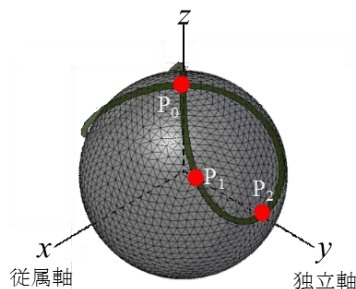


図2 解析モデル

(2) 2軸回転を実現する機構を設計し、実験による原理確認と機械的損失の評価を行なった。2軸回転には幾つかの方法が考えられるが、本研究では1つのモータで2軸回転

を簡単に実現できるギア方式、ロータ内にモータを組込んだモータ内蔵方式の2つを採用し、実験検証した。

① 1次試作機 (ギア方式)

図3および図4にギア方式実験装置の回転部概要及び外観を示す。図4に示すように装置は回転部、DCモータ、電磁クラッチおよびトルク計から成る。回転部は図3に示すように球体とその外側に設置されたギアボックス内蔵円盤で構成され、モータ駆動によって球体および円盤は縦回転(独立軸まわり)を行なうと同時に、円盤に内蔵されたギア的作用によって球体は横回転(従属軸まわり)を行なうことで2軸回転を行なう。ギア比は1:1であるため、縦回転と横回転の角速度は等しくなる。また、ギアを取り外すことにより回転部の1軸回転も行える。さらに、モータとトルク計の間に取付けられた電磁クラッチを切り離すことでフリーランが可能となっている。

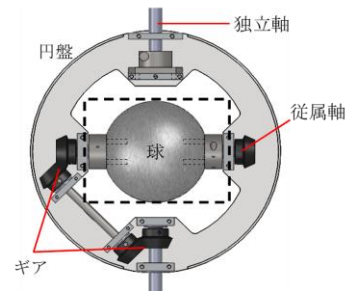


図3 ギア方式回転部

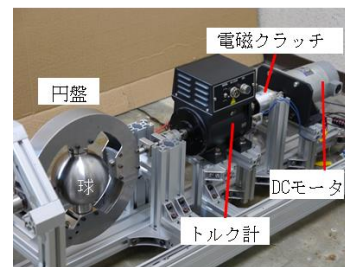


図4 ギア方式外観

② 2次試作機 (モータ内蔵方式)

ギア方式により2軸回転機構を実現したが、ギアによる損失が大きいことや2つの回転軸が同期するため、2軸回転の特性を知るには不便であった。そのため、2次試作機ではギアを廃止し、縦軸および横軸の回転数をそれぞれ変えられるように2つのモータを採用した。横軸(従属軸)のモータはロータ内部に搭載している。回転部は図5に示すように、ロータ、内蔵モータ、フレームで構成されている。1次試作のロータ形状は球体であったが、球体は慣性モーメントが小さいというデメリットがあるため、一般的なロータ

形状である円筒とした。内蔵モータはアウターロータを採用し、配線、構造を簡易にしている。アウターロータ方式であるため従属軸の主軸は回転せず、ロータのみが回転する構造になっている。また、ジャイロモーメントを低減するために、ロータの慣性モーメントは従属軸周り、独立軸周り共に等しくした。従属軸の回転は内蔵モータにより回転し、独立軸の回転は外部から DC モータでフレームごと回転することにより、2軸回転を実現している。内蔵モータへの電力はスリップリングにより供給される。実験装置外観を図6に示す。

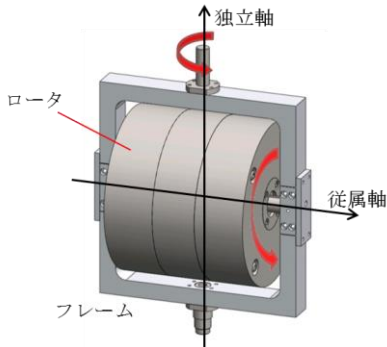


図5 モータ内蔵方式回転部

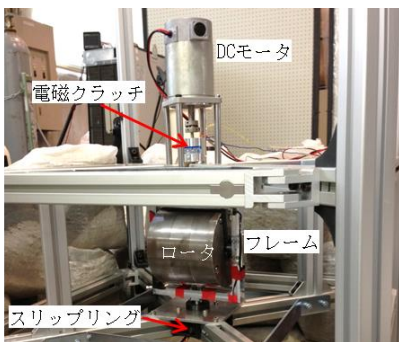


図6 モータ内蔵方式外観

③実験方法

モータ駆動により回転を与え、ある回転数に達したところで電磁クラッチを切り離し、回転体をフリーランさせると、機械的損失により徐々に回転数が下がり、やがて停止する。このとき、回転体に貯蔵されたエネルギーは全て機械的損失により失われる。フリーラン試験の時間と回転数の関係から損失エネルギーを積算し、設定回転数における貯蔵エネルギーとして算出できる。なお、ここで言う機械的損失には風損も含まれる。

4. 研究成果

(1) 図7に2軸スピンの貯蔵エネルギーを有限要素法により解析した結果を示す。比較のため、1軸回転させた際の貯蔵エネルギーも示す。2軸スピンの貯蔵エネルギーが大きく、その比率は常に2倍となる。つまり、2軸回転化では縦軸、横軸それぞれのエネルギーの重ね合せの原理が成り立つことを明らかにした。

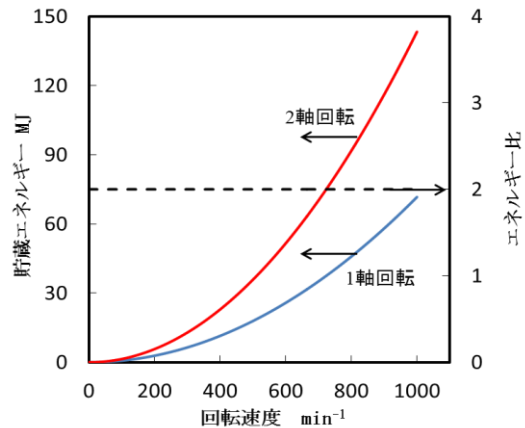


図7 2軸回転の貯蔵エネルギー

(2) 1次試作機 (ギヤ方式) のフリーラン試験結果を図8に示す。定常回転試験およびフリーラン試験により貯蔵エネルギーを算出した結果、解析結果と一致した (表1)。これにより2軸回転化によりエネルギー貯蔵量を向上できる可能性が解析と実験の両方により示された。しかし、同時にジャイロ効果によるものと思われる回転振動により機械損失が増大する課題が確認された。

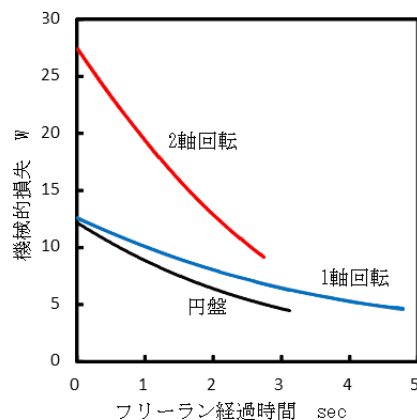


図8 フリーラン時間と機械的損失の関係

表1 1次試作機の貯蔵エネルギー比較

	貯蔵エネルギー [J]		2軸/1軸
	1軸	2軸	
解析値	14.54	25.76	1.78
実験値	13.10	23.30	1.78

(3) 1次試作機（ギヤ方式）では、ギヤ損失や風損による機械的損失が1軸回転と比較して2倍以上もあり、2軸回転化による貯蔵エネルギーの増加分は相殺されてしまった。つまり、1次試作機ではエネルギー貯蔵システムとしての実用上の優位性までは確認できなかった。2軸回転化のメリットを活かすためには機械的損失の低減が必要であり、回転機構の工夫が必要であることが示された。2次試作機（モータ内蔵方式）では、機械損失の低減化を試みた。

(4) 表2に1次試作機と2次試作機の2軸回転化による貯蔵エネルギー増加量と機械的損失の増加量、さらに、その比を示す（いずれも実験値）。1次試作機では貯蔵エネルギー増加量に対して機械的損失の増加量も大きいため、2軸回転してもエネルギー増加分≒損失増加分となり、2軸回転のメリットが活かせなかった。機械的損失を低減させた2次試作機では貯蔵エネルギー増加量に対して機械的損失の増加量が小さくなり、2軸回転の優位性を確認できた。

表2 2軸回転のエネルギー増加割合

	2軸回転による増加量		$\Delta L/\Delta Q$
	エネルギー ΔQ [J]	損失 ΔL [W]	
1次試作機 (ギヤ方式)	10.2 (178%)	10.0 (219%)	98%
2次試作機 (モータ内蔵 方式)	15.2 (200%)	0.393 (205%)	2.6%

※括弧内は同じ方式の1軸回転に対する増加率

(5) 2軸回転することで貯蔵エネルギーが2倍にすることが理論および実験により確認できた。ギヤ方式ではジャイロ効果等の影響でエネルギー増加量に対する機械的損失増加量の割合は98%となった。一方、モータ内蔵方式ではエネルギー増加量に対する機械的損失増加量の割合は2.6%となり、機械的損失を大幅に低減できた。このことは2軸回転化という手法がエネルギー密度増加という観点において優位であることを意味している。以上のように、回転速度、ロータの大きさを変えずに貯蔵エネルギーを倍増させる手法として2軸回転の実現可能性が示され、挑戦的萌芽研究として当初の目標に対して十分な結果が得られた。

(6) 今後は2軸回転のメリットを最大限に活かすため、機械的損失やジャイロ効果のさらなる低減化への構造・機構検討が必要である。さらに、実際の蓄電・充放電時における電氣的損失などに関する検証が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- [1] 山田昇, 藤森崇起, 平野佑太, 伊東淳一, 2軸スピン球へのエネルギー貯蔵に関する解析および実験, 日本機械学会論文集 C 編 78 巻 790 号 (2012-6), pp. 2109-2118.

[学会発表] (計1件)

- [1] 谷向一馬, 田中賢太, 折川幸司, ゴータックチャン, 伊東淳一, 平野佑太, 山田昇, エネルギー貯蔵用フライホイールの2軸化に向けたアウトロータ形永久磁石同期電動機の実機検証, 平成25年電気学会産業応用部門大会 (2013. 8. 28 予定)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: フライホイール装置、および、それを備えたエネルギー貯蔵装置

発明者: 山田昇, 伊東淳一, 伊東洋一

権利者: 長岡技術科学大学, サンケン電気

種類: 特許

番号: 2012-036436

出願年月日: 2012年02月22日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 昇 (YAMADA NOBORU)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 90321976

(2) 研究連携者

伊東 淳一 (ITO JUNICHI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 90377218

本間 智之 (HONMA TOMOYUKI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 50452082