

2軸スピニング球へのエネルギー貯蔵に関する解析および実験*

山田 昇^{*1}, 藤森 崇起^{*2}, 平野 佑太^{*3}, 伊東 淳一^{*4}

Analysis and Experiment of Energy Storage to 2-Axis Spinning Sphere

Noboru YAMADA^{*1}, Takayuki FUJIMORI, Yuta HIRANO and Junichi ITOH

^{*1} Dept. of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology
Kamitomiokamachi 1603-1, Nagaoka-shi, Niigata, 940-2188 Japan

Concept of kinetic energy storage system with 2-axis spinning sphere is described to improve energy density of mechanical battery, i.e., flywheel energy storage system. Fundamental analysis with finite element method and the first experiment of 2-axis spinning sphere are carried out to clarify the proposed concept. Analytical and experimental results verify that the 2-axis spin makes it possible to storage kinetic energy by a factor of 2 over the conventional 1-axis rotation for the same rotation speed. However, it is shown that the mechanical losses of the prototype system with a geared-type 2-axis spin mechanism is approximately twice as large as the 1-axis rotation sphere. Exploring a novel 2-axis spin mechanism with the least mechanical losses is a critical issue to realize the concept.

Key Words : Energy Storage, Flywheel, Mechanical Battery, Kinetic Energy Recovery System, Smart Grid

1. 緒 言

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, 再生可能エネルギーの多くは発電電力が変動しやすいため, そのまま電力網に接続すると電力品質の悪化を招く問題がある. そこで, 要求電力に対する過不足分の電力を瞬時に充放電し, 電力を平準化させる大容量蓄電デバイスの開発が急務となっている. 蓄電デバイスとして二次電池, 電気二重層キャパシタ, 機械式バッテリーなどが挙げられる. このうち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運動エネルギーを蓄え, 必要時にはモータを発電機として駆動し, 再び電気エネルギーに変換するデバイスである. 機械式バッテリーは化学反応を使わないため, 蓄電池やキャパシタに比べて本質的に長寿命であり, 高出力化, 大容量化に向くなどの優位点がある.

FW を用いた機械式バッテリーに関する研究として, 電気自動車への適用例^{(1)~(3)}や, 無停電電源装置への適用例⁽⁴⁾がある. また, FW 容器の工夫や容器封入ガスによる風損低減対策^{(5)~(6)}, 磁気浮上および磁気軸受一体化 FW などに関する研究報告がある^{(7)~(9)}. また, 大容量 FW システムとして, 核融合用電動発電機への適用⁽¹⁰⁾や, 超伝導磁気軸受を用いたシステム⁽¹¹⁾, 系統電力の平準化(周波数制御)への実用例として米国 Beacon Power 社の 25kWh システムがある⁽¹²⁾. さらに小型 FW として, Yoo らによるシステム⁽¹³⁾, 著者らによる 2.5kWh システム^{(14)~(16)}の開発がある. 関連して, 電力に変換せずに動力として充放電を行う FW システムとしては, Formula-1 車両などに導入検討された KERS (Kinetic Energy Recovery System) 用 FW がある⁽¹⁷⁾. これら FW システムの出力および容量は様々であり, 大型のものでは Li-ion 電池などの二次電池のエネルギー密度を上回る報告例もあるが, 概して, 小型で簡易な装置ほど諸損失は大きく, エネルギー密度は二次電池よりも低い傾向がある.

* 原稿受付 2012 年 2 月 4 日

^{*1} 正員, 長岡技術科学大学工学部機械系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603)

^{*2} 学生員, 長岡技術科学大学大学院工学研究科機械創造工学専攻

^{*3} 学生員, 長岡技術科学大学工学部

^{*4} 長岡技術科学大学工学部電気系

E-mail: noboru@nagaokaut.ac.jp



これら従来型 FW においてエネルギー密度を増加させるためには、①FW ローターの回転速度、②FW ローターのサイズ、③ FW ローター材料の密度、のいずれかを増加する必要があるが、FW ローター材料への応力増大は避けられず、炭素繊維複合材料などの高強度軽量材が必要となる。また、磁気軸受や真空ローター容器を使用しない場合には軸受損および風損などの機械的損失が増大し、構成部品の寿命低下、騒音、発熱などの問題が生じる。高速回転化ではモータ選定の幅が狭まり汎用モータの使用が困難となる。以上の点から従来型 FW ではコストパフォーマンスの向上には限界がある。

本研究では、FW のエネルギー密度を抜本的に高めることを目標として、従来 1 軸回転であった FW を 2 軸回転（以下、2 軸スピニングと呼ぶ）にすることを新たに検討した。慣性モーメントが回転方向に依存しない球体を回転体とする 2 軸スピニング球エネルギー貯蔵システムについて、まず解析により 2 軸スピニング化によるエネルギー密度の向上を検証し、次いで小型ギヤ式 2 軸スピニング球による実験を実施して原理確認と機械的損失の検証を行った結果について報告する。

2. 解 析

2・1 2軸スピニング

図 1(a)(b)に 2 軸スピニングの概略図および回転軌跡を示す。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、新たに提案する 2 軸スピニングでは図 1(a)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、外側で回転する軸は常に一方向に回転を行う。本報では前者を従属軸 (Dependent axis)、後者を独立軸 (Independent axis) と定義する。図 1 (b)は 2 軸スピニング球上のある点 A の回転軌跡である。2 軸スピニングでは球上の地点によって軌跡が異なる。

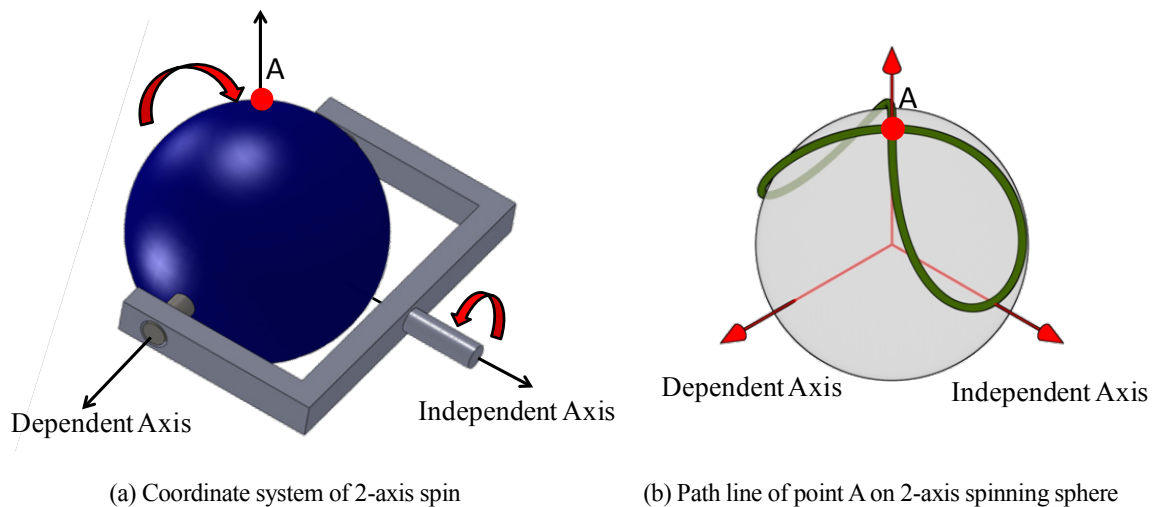


Fig. 1 Schematic diagram of 2-axis spin

2・2 解析モデルおよび解析手法

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 I と回転速度 N から次式により求めることができる。

$$E = \frac{1}{2} I \left(\frac{\pi N}{30} \right)^2 \quad (1)$$

I : 慣性モーメント [kg・m²]
 N : 回転速度 [min⁻¹]

しかし、2軸スピニング体の場合には式(1)の重ね合わせを単純に適用できるかどうか不明である。そこで、有限要素法(FEM)を用いて回転体を微小体積要素に分割し、各要素の重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軸スピニング体の貯蔵エネルギーを求めた。本手法はスピニング体が球以外の形状の場合にも適用できる。図2に2軸スピニング球のFEMモデルを示す。回転体はy軸に独立軸、x軸に従属軸をもつ半径Rの球体とした。ただし、ここでの座標は、空間に固定された絶対座標である。いま、この球体が独立軸まわりに角速度 ω_i 、従属軸まわりに角速度 ω_d で2軸スピニングするとき(ただし、 $\omega_i = \omega_d$)、ある時間において球体内の絶対座標P(x, y, z)に重心がある微小要素の回転軌跡および速度変化について考える。この微小要素の従属軸および独立軸まわりの並進速度 v_d および v_i は、それぞれ式(2)および式(3)で示される。

$$v_d = \omega_d \sqrt{(y^2 + z^2)} \quad (2)$$

$$v_i = \omega_i \sqrt{(x^2 + z^2)} \quad (3)$$

微小要素の並進移動速度 v は式(2)および式(3)の合成速度となり、式(4)で示される。

$$v = \sqrt{v_d^2 + v_i^2} = \sqrt{\omega_d^2 (y^2 + z^2) + \omega_i^2 (x^2 + z^2)} \quad (4)$$

式(4)より、点Pにある微小要素に貯蔵される運動エネルギー e は、次式のようになる。

$$e = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left\{ \omega_d^2 (y^2 + z^2) + \omega_i^2 (x^2 + z^2) \right\} \quad (5)$$

式(5)を用いて、球体を構成する全微小要素の運動エネルギーを足し合わせることで、球体に貯蔵される運動エネルギーを求めることができる。なお、ある微小要素の座標の時間変化(軌跡)は各要素の初期座標に依存する。たとえば、図2に示すように回転開始時に $P_0(x=0, y=0, z=R)$ に重心をもつ要素は、回転開始時は従属軸まわりの速度成分と独立軸まわりの速度成分が等しく、且つ、最も高速で移動するが、回転が進むにつれて独立軸まわりの速度成分は減少し(座標 P_1)、座標 $P_2(x=0, y=0, z=0)$ において独立軸まわりの速度成分は無くなり、従属軸まわりのみ速度成分を有する状態となる。

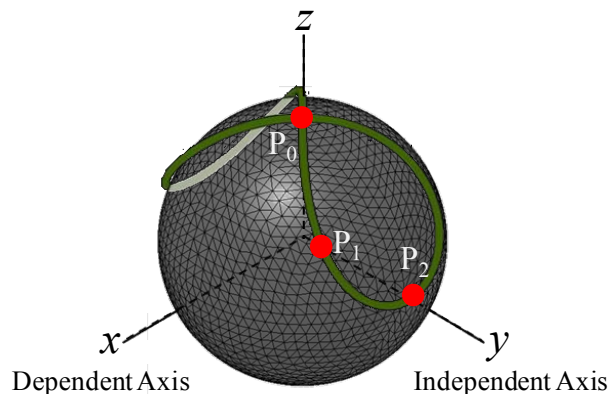


Fig. 2 FEM model of 2-axis spinning sphere

2・3 解析結果

図3に解析モデル、表1にこのときの解析条件を示す。解析には球体と楕円体を用いた。図4に2軸スピニング体の貯蔵エネルギーを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。楕円体の場合はどの回転軸で回転させるかによって慣性モーメントに違いがあるため、独立軸および従属軸まわりで1軸回転させた場合の結果をそれぞれ示した。図4(a)より、いずれの回転速度においても2軸スピニング球が1軸回転球よりも貯蔵エネルギーが大きく、その比率は常に2倍となる。また、図4(b)より、楕円体の2軸スピニングについても同様に、2軸スピニングした場合のほうが常に貯蔵エネルギー量は大きく、その比率は各軸まわりの慣性モーメントを足し合わせて式(1)により算出した貯蔵エネルギーの比率と一致する。つまり、物体を互いに直交する2つの軸まわりで2軸スピニングしたときの貯蔵エネルギー量には重ね合わせの原理が適用できる。従属軸と独立軸の回転速度が同じ2軸スピニングでは各軸まわりの慣性モーメントの重ね合わせとなるため、楕円体のように異方性のある物体の2軸スピニングの場合、慣性モーメントが大きい軸周りの1軸回転に対する貯蔵エネルギー増加のメリットは小さく、球体のように等方性の慣性モーメントを有する物体の方が2軸スピニング化のメリットが大きい。

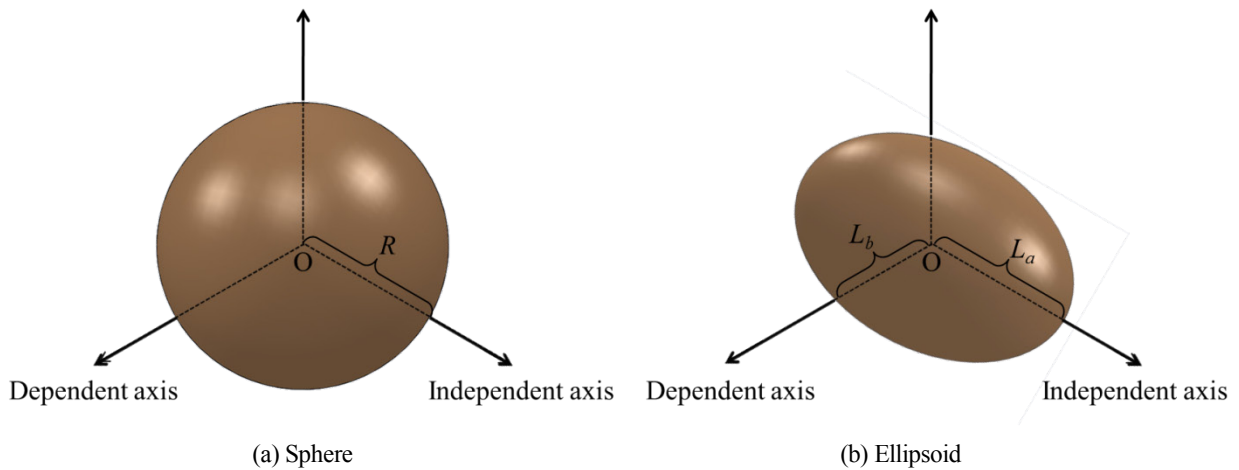


Fig. 3 Model of spinning object for FEM analysis

Table 1 Condition of FEM analysis

Sphere	Radius, R	[m]	0.5
	Density(SCM440)	[kg/m ³]	7800
	Moment of inertia	[kg·m ²]	13069
	Total number of FEM elements		4.2×10^9
Ellipsoid	Length of major axis, L_a	[m]	0.5
	Length of minor axis, L_b	[m]	0.35
	Focal length	[m]	0.7
	Density(SCM440)	[kg/m ³]	7800
	Moment of inertia on dependent axis	[kg·m ²]	4771
	Moment of inertia on independent axis	[kg·m ²]	3138
	Total number of FEM elements		2.1×10^9
Rotation speed	N_i	[min ⁻¹]	0~1000
	N_d	[min ⁻¹]	0~1000

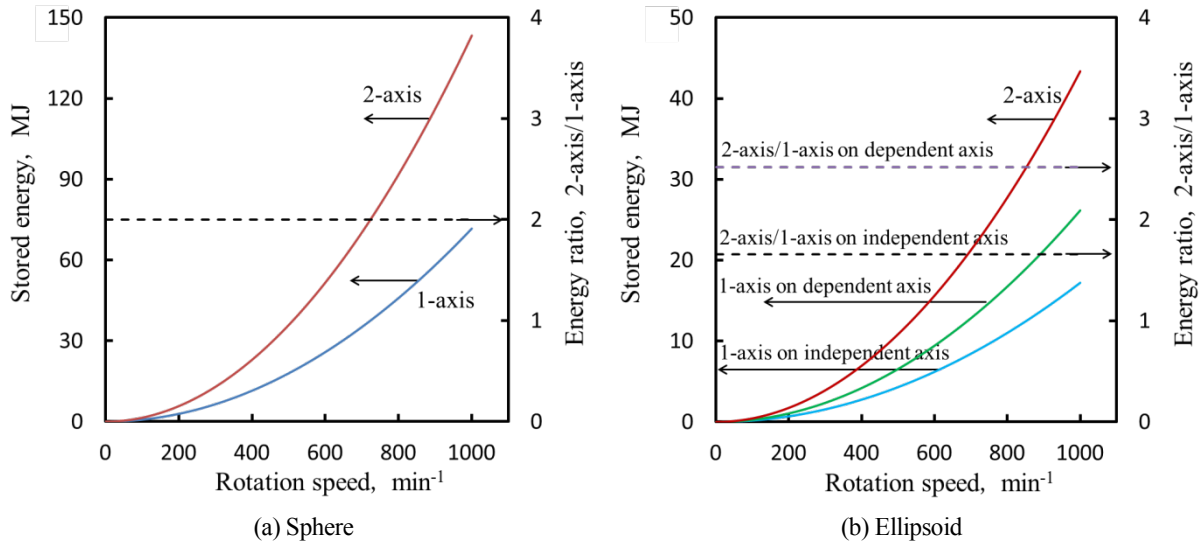


Fig. 4 Stored energy of 2-axis spin as compared with 1-axis rotation

3. 実験

3・1 実験装置

解析により2軸スピンによる貯蔵エネルギー倍増が予想できたため、実際に2軸スピン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った。2軸スピンには幾つかの方法が考えられるが、本報では1つのモータで2軸スピンを簡単に実現できるギア方式を採用した。図5および図6に実験装置の概要および概観を示す。また、表2にその仕様を示す。表中の従属軸および独立軸の各軸まわりの慣性モーメントは解析値によるものであり、球の慣性モーメントは図5(b)の破線で囲まれた部分の値である。図5(a)に示すように装置は回転部(Rotating section)、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5(b)に示すように球体(Sphere)とその外側に設置されたギアボックス内蔵円盤(Disk)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)を行うことで2軸スピンを行う。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り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。

Table 2 Specifications of experimental system

Sphere	Material	SCM440	
	Diameter	[mm]	100
	Weight	[kg]	4.30
	Moment of Inertia on independent axis	[kg·m ²]	5.86×10^{-3}
	Moment of Inertia on dependent axis	[kg·m ²]	4.57×10^{-3}
Disc	Material	SUS304	
	Inside diameter	[mm]	130
	Outside diameter	[mm]	240
	Moment of Inertia	[kg·m ²]	1.18×10^{-2}
Torque convertor/detector	Onosokki TS-2700/SS-005		
Motor	Unitech DTM-5230NS		
Gear ratio	1:1		

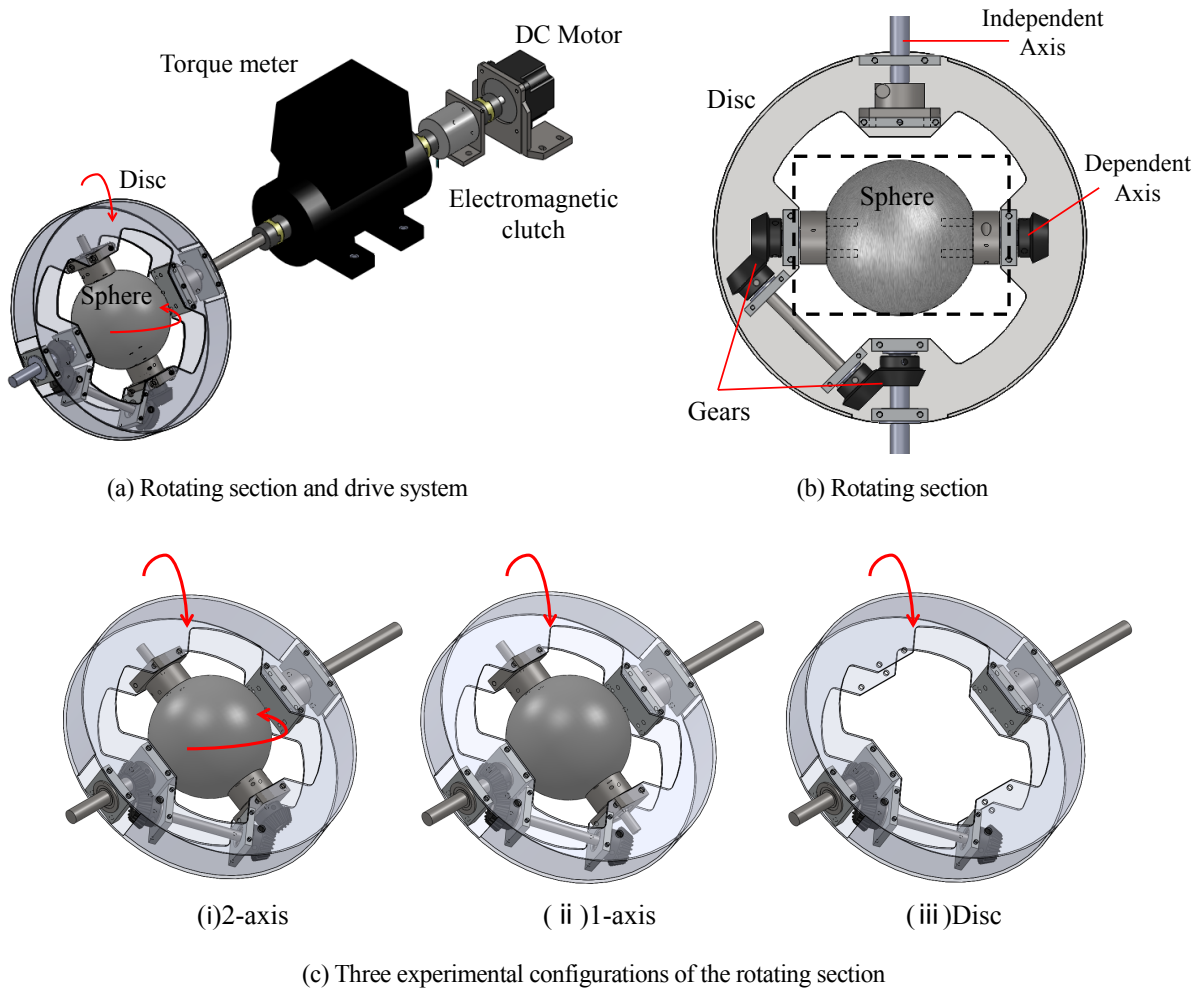


Fig. 5 Experimental apparatus of 2-axis spinning sphere

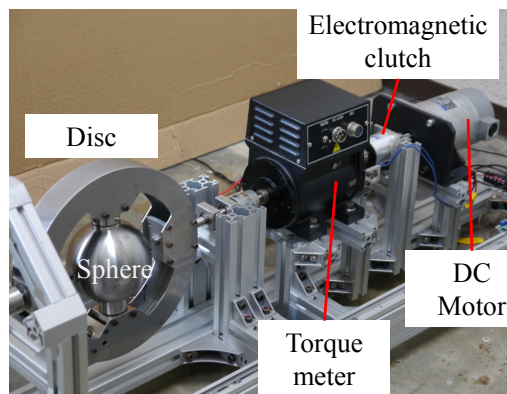


Fig. 6 Photo of experimental system

3・2 実験方法

上述の装置を用いて、2軸スピンのエネルギー貯蔵される運動エネルギーを実験検証した。モータ駆動により回転を与え、ある設定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(以下、機械損)により徐々に回転数が下がり、やがて停止する。このとき、回転体に貯蔵されていたエネルギーはすべて機械損により失われる。したがって、あらかじめ機械損の回転速度依存を計測しておくことにより、フリーラン時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、ここで言う機械損には風損も含まれる。

まず、ある回転速度 N における機械損 Q_N は、回転速度 N の定常回転を維持するために必要なトルク T_N を測定すれば、次式により求められる。

$$Q_N = \frac{\pi N}{30} T_N \quad (6)$$

Q_N : 機械損 [W]
 T_N : トルク [N・m]

実験では、図 5(c)に示すように回転部を (i) “2軸スピン (2-axis) ”, (ii) “1軸スピン (1-axis) ”, および (iii) “円盤のみ (Disc) ” とした場合の3つのケースにおいて、回転速度 $N = 600 \sim 1000 \text{ min}^{-1}$ の間における定常回転試験を行い、機械損と回転速度の関係を明らかにした。

次に、 N_{\max} で定常回転中の回転部をモータから切り離して自然減速させるフリーラン試験を行った。フリーラン時に回転を減速させる因子は機械損のみであるから、回転部に貯蔵されていたエネルギーは全て機械損によって消費されることになる。定常回転時における機械損と回転速度の関係と、フリーラン時における回転速度と経過時間の関係より、 N_{\max} 時に回転部に貯蔵されていたエネルギーのうち、測定下限回転数 N_{\min} 時になるまでに消費されるエネルギー E は次式によって求められる。

$$E = \sum_{N=N_{\max}}^{N=N_{\min}} Q_{N(t)} dt \quad (7)$$

E : エネルギー [J]
 dt : 時間ステップ [s]

実験では、モータ出力の制限、トルク回転計の測定精度の制限および電磁クラッチの切り離し伝達速度の制限によりフリーラン開始回転速度 $N_{\max} = 900 \text{ min}^{-1}$ 、測定下限回転数 $N_{\min} = 600 \text{ min}^{-1}$ とし、定常回転試験と同様に3つのケースにおける貯蔵エネルギー E を算出した。これより、ケース (i) あるいはケース (ii) からケース (iii) の貯蔵エネルギーを差し引くことで、球体部 (図 5(b)の点線で示す部分) に貯蔵されたエネルギーを逆算できる。なお、前節の FEM 解析のように、完全な球体の場合には従属軸および独立軸の各軸周まわりの慣性モーメントが等しいため、重ね合せの原理を適用すると貯蔵エネルギーはちょうど2倍となるが、本実験に用いた球体部は取付け部品およびギヤ等の存在により完全な球体ではなく、表 2 に示すように慣性モーメントに異方性がある。これに重ね合せの原理を適用すると2倍よりもやや小さく、1.78倍となる。

なお、式(7)で求められるのは N_{\max} 時の回転体に貯蔵されていたエネルギーのうち、 N_{\min} になるまでに消費されたエネルギーである。一般的にフライホイールエネルギー貯蔵システムの貯蔵エネルギーは N_{\max} から 0 min^{-1} までに搾り出せる全エネルギーを指す場合が多く、この定義に基づけば式(7)で求められるエネルギーは貯蔵エネルギーの一部である。本実験の主目的は、2軸スピン体の貯蔵エネルギーが同じ回転速度の1軸回転体の貯蔵エネルギーの何倍になっているかを比較することであるため、回転速度範囲 (N_{\max} , N_{\min}) が同じであればよく、必ずしも 0 min^{-1} まで全貯蔵エネルギーを消費させる必要はない。したがって、以降の実験結果の議論では式(7)で求められるエネルギーも敢えて貯蔵エネルギーと称することにする。

3・3 実験結果

図7に定常回転試験により得られた機械損と回転速度との関係を示す。機械損は2軸スピンの場合が最も大きく、回転速度 N_{\max} においては1軸回転の2.13倍にもなった。これは、2軸スピンでは作動するギアおよび軸受の数が1軸回転と円盤のみの場合よりも3個多いためにギヤ損失が増加したためと考えられる、また、1軸回転と円盤のみでは大きな差は見られず、円盤の風損の影響が支配的であることがわかる。

図8にフリーラン試験により得られた回転速度とフリーラン経過時間の関係を示す。2軸スピンでは高回転での機械損が大きいため、他よりも回転速度の減少が早く、1軸回転の約1/2の時間で計測下限 600 min^{-1} に達した。また、(iii)円盤のみと(ii)1軸回転では機械損が同程度であるにもかかわらず、フリーラン時間は1軸回転の方が長くなっている。これは1軸回転した場合の慣性モーメントが円盤よりも大きく、フリーラン開始時に貯蔵されているエネルギーが多いためである。

図7および図8の結果を機械損とフリーラン経過時間との関係に変換したものを図9に示す。式(7)より、この図において、機械損をフリーラン時間で積分(グラフの面積)すればフリーラン開始時における貯蔵エネルギーが求められる。このとき、球体部への貯蔵エネルギーは、1軸回転、2軸スピンともに、それぞれの積分値から円盤のみの場合の積分値を差し引いたものとなる。

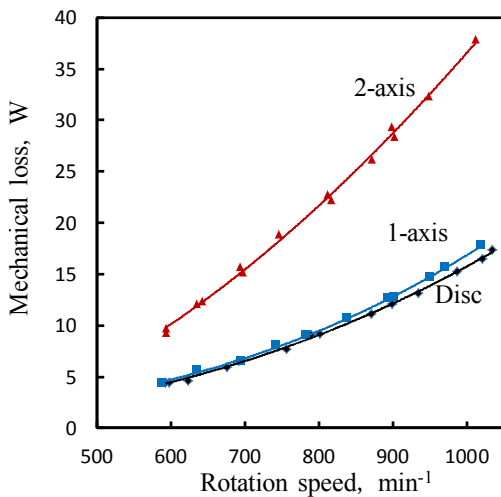


Fig. 7 Relation between mechanical loss and rotation speed

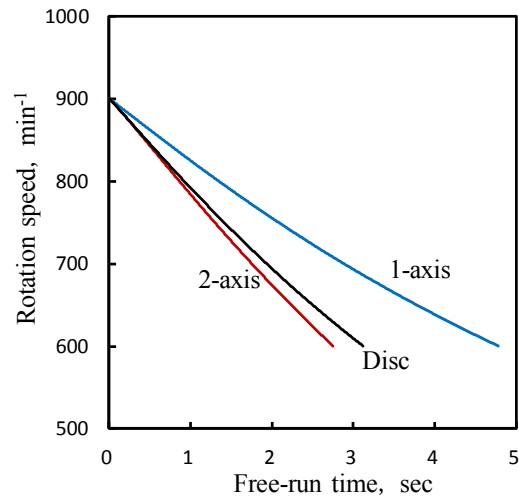


Fig. 8 Relation between rotation speed and free-run time

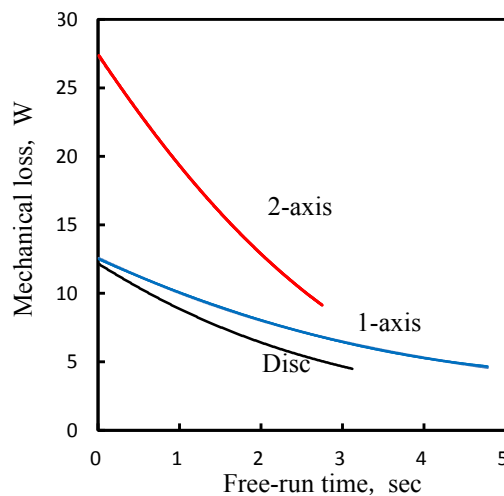


Fig. 9 Relation between mechanical loss and free-run time

表3に式(7)により算出した貯蔵エネルギーの実測値と解析値との比較を示す。1軸回転, 2軸スピンともに貯蔵エネルギーの実測値は解析値より約10%小さいものの, 貯蔵エネルギーの比率は解析値(1.78倍)と一致する結果となった。これより, 2軸回転化によって貯蔵エネルギーの向上が可能であることが原理確認できた。一方で課題も明らかとなった。試作したギア方式の2軸スピン機構では実験結果(図7)より, 機械損が1軸回転の2.13倍となり, 2軸回転化による貯蔵エネルギーの増加分以上にエネルギーを損失として消化している。この要因は軸受やギア等の機械損失の増大であり, そのメカニズムの1つとしては2軸回転によるジャイロ効果で発生する力が軸受やギア等に周期的に作用することも予想される。つまり, 本実験装置をエネルギー貯蔵システムとして評価した場合には優位性は得られておらず, 本概念の実用化には, 低損失な2軸回転機構の探究が必要である。応力特性の評価, ジャイロ効果の影響検証などと合わせて今後さらに検討する必要がある。

Table 3 Comparison of stored energy

	Stored energy [J]		Stored energy ratio
	1-axis	2-axis	2-axis/1-axis
FEM analysis	14.45	25.76	1.78
Experiment	13.10	23.30	1.78

4. 結 言

本研究では, 2軸スピン球へのエネルギー貯蔵について解析と実験を行い, 以下の知見を得た。

- (1) 有限要素法を用いた解析により, 球体の回転を互いに直交する回転軸まわりに2軸回転(2軸スピン)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。つまり, 2軸回転化では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。
- (2) 小型のギア式2軸スピン球装置を試作し, 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。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。
- (3) しかし, 今回の試作装置ではギア損失や風損による機械損が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, 本研究では, 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損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。

謝 辞

本研究の経費の一部は, 日本学術振興会学術研究助成基金助成金(挑戦的萌芽研究)(No. 23656602)「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」によるものであることを記し, 謝意を示します。

文 献

- (1) 齋藤武雄, 小笠原弘丞, 山田昇, “フライホイールエネルギー貯蔵と電気自動車への応用に関する研究”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 70, No. 697 (2004), pp.244-251.
- (2) 関本守満, 高橋勲, 田中裕弥, 劉小紅, 永田雅裕, “フライホイールを用いたハイブリッド電気自動車の開発”, 電気学会半導体電力変換・産業電力応用合同研究会講演論文集(2000), pp.89-94.
- (3) B. Rachmanto, K. Nonami, K. Kuriyama, H. Shimazaki, T. Kagamishi and T. Moriya, “A Study on AMB Flywheel Powered Electric Vehicle”, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 3, No. 4 (2009), pp.659-670.
- (4) 竹内彰, 高橋勲, “フライホイールエネルギー貯蔵装置による短時間大容量電源の試作”, 電気学会半導体電力変換・産業電力応用合同研究会講演論文集, pp.83-88,(2000).
- (5) 青山浩一, 伊東孝彦, 島田悟, 関純子, “電力貯蔵用フライホイール”, 日本機械学会第 8 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp.365-368.
- (6) J. Kobuchi, K. Oobayashi, R. Shimada, “Windage Loss Reduction of Flywheel/Generator System Using He and SF6 Gas Mixtures”, *Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, pp. 1754-1757.
- (7) 栗田信幸, 黒木昇, 岡田養二, “電力貯蔵フライホイールへの応用を目的としたローレンツ力型磁気軸受の開発”, 日本 AEM 学会誌, Vol. 17, No. 2 (2009), pp47-51.
- (8) J.P. Lee, B.J Park, Y.H. Han, S.Y. Jung, T.H. Sung, “Energy Loss by Drag Force of Superconductor Flywheel Energy Storage System with Permanent Magnet Rotor”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 11 (2008), pp. 4397-4400.
- (9) 村上岩範, 都丸瞬, 関口隆弘, 後藤桂孝, “高温超電導浮上フライホイールの開発”, 日本 AEM 学会誌, Vol. 17, No. 1(2009), pp.132-137.
- (10) 嶋田隆一, “ここまで来た大型電力設備の性能と将来展望”, 日本プラズマ・核融合学会誌, Vol.80, No.7(2004), pp.572-577.
- (11) B. Bolund, H. Bernhoff, M. Leijon, “Flywheel Energy and Power Storage Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11 (2007), pp. 235-258.
- (12) Beacon Power Corporation, “Smart Energy 25”, Sustainable Energy Storage Solutions for the New Electricity Grid, <http://beaconpower.com/products/smart-energy-25.asp> (参照日 2012 年 2 月 4 日).
- (13) S.Y. Yoo, H.C. Lee, M.D. Noh, “Optimal Design of Micro Flywheel Energy Storage System”, *International Conference on Control, Automation and Systems 2008*, pp. 492-496.
- (14) 藤森崇起, 平野佑太, 山田昇, 伊東淳一, “エネルギーキャッシュシステム用機械式バッテリーの特性評価”, 日本機械学会北陸信越支部第 48 期総会・講演会講演論文集(2010), pp.225-226.
- (15) J. Haruna, K. Murai, J. Itoh, N. Yamada, Y. Hirano, T. Fujimori, T. Homma, “Experimental Evaluation of a High Speed Flywheel for an Energy Cache System”, *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering 21* (2011).
- (16) 田中賢太, 大沼喜也, 藤森崇起, 伊東淳一, 山田昇, “エネルギーキャッシュ向けフライホイールの損失分離”, 電気学会半導体電力変換・モータードライブ合同研究会講演論文集(2011), pp.61-66.
- (17) J. Cibulka, “Kinetic Energy Recovery System by Means of Flywheel Energy Storage”, *Advanced Engineering*, Vol. 1, No. 3 (2009), pp. 27-38.