

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02091

研究課題名(和文) 摩擦駆動ランダム振動ジャイロ発電機の研究

研究課題名(英文) Study on gyroscopic power generator rotated by friction force caused by random vibration

研究代表者

保坂 寛 (Hosaka, Hiroshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：50292892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：小型大出力のジャイロ発電機を開発した。フライホイール(FW)の自転増速に摩擦、モータ、歯車の3駆動方式を採用し、発電量の理論解析を行い、実験により妥当性を確認した。摩擦方式では、体積1L、入力1.7Hz、出力1.7Wの人体装着機を製作した。モータ方式では、体積25cm³、発電量の計算値2.5Wの波力発電ブイを製作した。また任意方向の波で発電し、共振周波数可変の2自由度発電機を製作した。歯車方式では、FW 300、ギヤ比3、入力0.5Hz、自転200rpm、出力0.13Wの実験機を製作した。波力用に最適設計した場合の計算値は10Wとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

体装着発電機による1.73Wの出力は、従来に比べ10以上の発電量である。水槽実験により、25cm³角3.2kgの発電ブイにより2.5Wの見込みを得たことは、従来に比べ1/100以下の小型化である。これらは理論解析、実験検証による最適設計により得られたもので、開発した装置と解析手法は斬新かつ有用である。基本技術が完成したため、商品化検討の段階であり、有望市場は浮体型波力発電である。10Wの出力により魚探や衛星通信が可能となり、海洋IoTの基盤となる。

研究成果の概要(英文)：Small and high-power gyro generators were developed. Three types of spin acceleration mechanisms, friction, motor, and gear were adopted. Their output power was theoretically calculated and its validity was confirmed by the experiment. In the friction type, a wearable generator with a volume of 1 L, an input of 1.7 Hz, and an output of 1.73 W was developed. In the motor type, a wave power generation buoy with a volume of 25 cm³ and a calculated power of 2.5 W was manufactured, and LED light emission was confirmed by a water tank experiment. Also a two-degree-of-freedom generator with the variable resonance frequency was made. In the gear type, it rotated at 200 rpm with FW 300, gear ratio 3, input 0.5 Hz, and generated 0.13 W. By calculation, when optimized for wave power generation, the power generation amount was 10 W at FW 600, 20 kg, input 0.17 Hz, and gear ratio 50.

研究分野：機械振動

キーワード：ジャイロ 発電機 エネルギーハーベスト

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoTの普及拡大に伴い、エネルギーハーベストへの期待が高まり、多くの振動発電機が研究されてきた。従来の振動発電機は、多くがおもりの単振動を用い、発電量は1mW以下であった。2000年頃からジャイロ効果を用いる発電機が試作され、発電量が10倍以上に増大した。またフライホイール(FW)の自転発生にモータ駆動と摩擦駆動が考案された。しかし前者では数メートルサイズでのみ発電量が自転駆動電力を越え、後者では歳差回転と入力振動が同期するときのみに自転トルクが発生するという欠点があった。これに対して報告者は、摩擦型に対して歳差ばねによる死点回避により任意振動での発電を可能とし、モータ型に対して増速ギヤと電力フィードバックにより卓上サイズに小型化した。しかし、人体に装着して、日常の動きで発電する発電機には至らなかった。

2. 研究の目的

小型大出力かつ任意振動で発電するジャイロ発電機を実現する。大きさ1L、入力振動1Hzで1Wの出力を目指す。

3. 研究の方法

フライホイールの自転増速方式として、摩擦、モータ、新方式の3方式を並行して研究し、理論解析と実験検証により小型高出力化を進めた。人体装着に加え、ニーズが大きい波力発電を応用に加えた。摩擦増速型は、構造が簡単、かつ、自転電力が不要であり小型化に適する。報告者が考案した任意振動方式の損失要因を理論と実験により解明し、高効率化により、人体装着型のプロトタイプを開発した。モータ増速型は、多自由度化が可能であり、また電気機械変換効率が体積に比例して高まる。そこで、やや大きなIoT用の波力発電機として、FW重量20kg、出力10Wのブイ内蔵型の設計条件を明らかにした。新方式は、摩擦型とモータ型の利点を併せ持つ歯車型を考案し、基本性能を求めた。

4. 研究成果

(1) 摩擦増速型

人体装着用に小型化するため、以下の改良を行った。電磁誘導効率を高めるためにコイルをジンバルに、磁石をFWに組み込み、実効的なモータ体積を増大させた。歳差振幅を最大化するため、トラックを円形化し±90度の歳差を可能とした。反転損失を低減するため、ジンバルストッパをジンバル間に設け、自転軸の衝突を排除した。

理論解析により発電性能を求めた。本機構の特徴は、入力角速度の符号に応じて歳差速度が反転することにある。発電機のすべての自由度を計測できる実験装置(図1)を製作し、反転時の挙動を観察した。その結果、入力の反転前後に歳差が停止し、ジンバル傾斜が振動し、自転が減速することが判明した。これらを運動エネルギーの減少として単純化し、ジャイロの運動方程式と組合せ、数値計算により解いた。3秒間の入力、歳差、傾斜、自転および150秒間の自転を図2、3に示す。実験値と計算値はほぼ一致している。

さらに、人体装着用のプロトタイプを製作した(図4)。体積1L、FWφ70、入力1.7Hz、110度において出力1.73Wとなった。本装置により、空調服を駆動出来た。

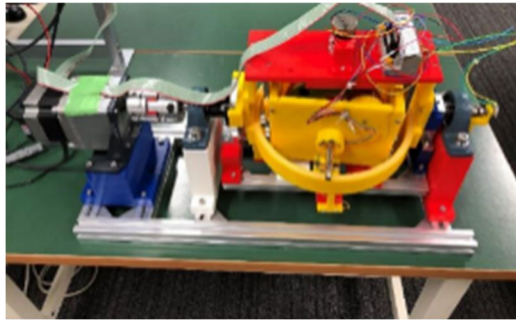


図1 摩擦型の実験機

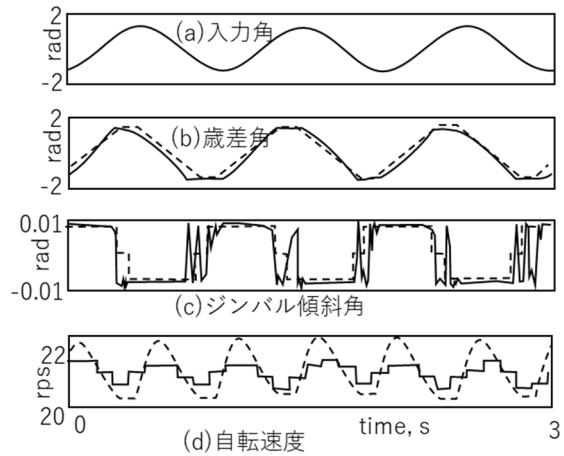


図2 摩擦型における3秒間の回転
(実線：実験・破線：計算)

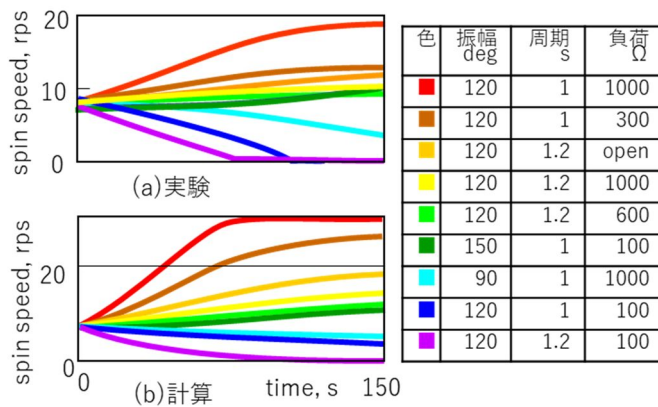


図3 摩擦型における150秒間の自転速度変化

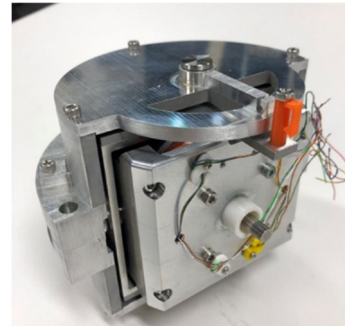


図4 摩擦型の人体装着発電機

(2) モータ増速型

波力発電用としての利用可能性を明らかにするため、以下の実験を行った。沿岸での係留ブイへの応用を目的に、報告者の既開発の方式により浮体内蔵の発電機を製作し(図5)、造波水槽で波力による発電を確認した。発電機の仕様は、他の発電方式(太陽電池と風力発電)より優位であり、従来の波力発電の欠点(巨大なための保守困難)を回避し、かつ具体的なニーズのある仕様として、重量20kg、入力0.5Hz、出力10Wの魚採用とした。FWφ150、自転1500rpm、ブイを含めた全体積25cm角、質量3.2kgで、計算上は2.5Wである。これを4個組み合わせることで(図6)10Wとなる。水槽深さ4.5m、波高10cm、周期1.5secの波でブイ1個あたり0.6Wを発電した。実験の様子を図7に示す。出力が計算値の1/4となった理由は、負荷をLEDとし、インピーダンスが最適値より大きかったためである。

遠洋ブイへの応用を目的に、2自由度のジャイロ発電機を考案した。遠洋では係留出来ないため、あらゆる方法からの波で発電する必要がある。自転軸を鉛直、ジンバルを3重化し、水平面内の任意の波で発電可能とした。また、2自由度化により固有振動数を自転速度により可変とし、任意の入力振動に対して共振可能とした。図8の実験装置を製作し、図9に示すように歳差角の実験値と計算値は一致した。理論を用いて、波力発電用に最適設計した場合の発電量を計算した。FW質量20kg、半径0.3m、自転速度2400rpm、加振振幅10°、周波数0.2Hzのとき、発電量47.9Wとなった。

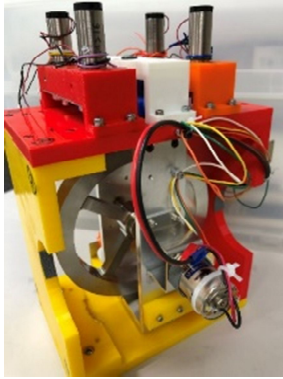


図5 波力発電用モータ自転発電機

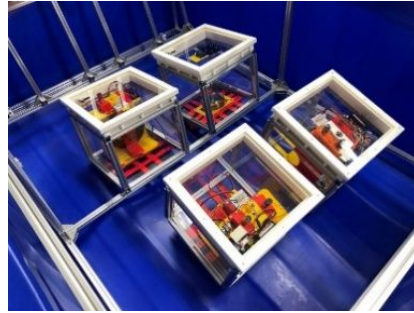


図6 浮体に装着した発電機



図7 水槽実験

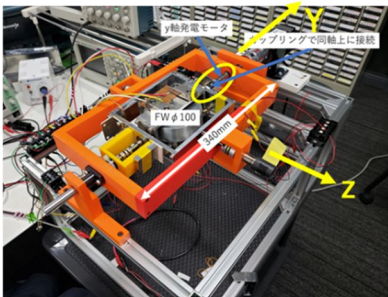


図8 2自由度発電機

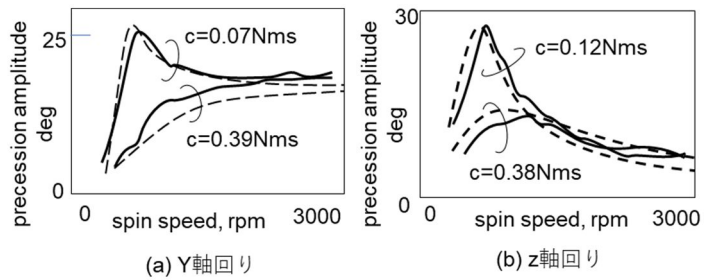


図9 2自由度発電機の歳差角
(実線：実験，破線：計算)

(3) 歯車増速型

ジャイロ発電の新方式として、傘歯車とクラッチによる自転増速法を考案した(図10)。トラックが無いので小型であり、歯車の多段化により増速比を増大でき、自転モータが不要なため正味発電量が多い。増速比3、フライホイールφ300、ギヤ比3、磁石32個、コイル4個の実験機を製作した(図11)。0.5Hzの振動で200rpmで自転し、0.14Wを発電した。発電量が小さい理由は、製作を容易にするため、増速比を $N=3$ と小さくしたためである。

理論解析を行った。他のジャイロ発電機と異なる点は、クラッチの噛み合いと空転が交互に生じることにある。空転時は自転と歳差が独立とし、噛み合い時は両者が従属でギヤ比倍で比例とし、それぞれの状態の運動方程式を立てた。シャフト・スリーブ間のトルクと相対速度により、空転と噛み合いを判別し、両方程式を交互に解いた。次に、実験により理論を検証した。両者で回転数の実験値と計算値が一致した。(図12)

発電機は多くの設定パラメータを有するため、数値計算による最適設計は煩雑である。そこで、定常状態の発電量を求める近似式を導いた。定常状態では自転速度と歳差振幅が一定なこと、入力と歳差の位相が一致することを用い、さらに運動方程式を入力1周期で積分平均することで、手計算で発電量を得られる簡易式を導いた。数値計算結果と比較し、最大3倍の誤差で一致することを確認した(図13)。この式を用いて、波力発電用に最適設計した場合の発電量は、FWφ600mm、20kg、入力振動10度0.17Hz、ギヤ比50のとき、10Wの発電となった。

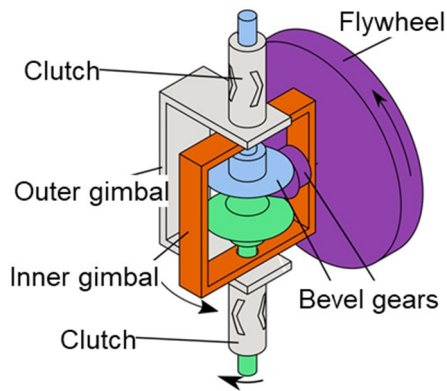


図 10 歯車型の増速機構

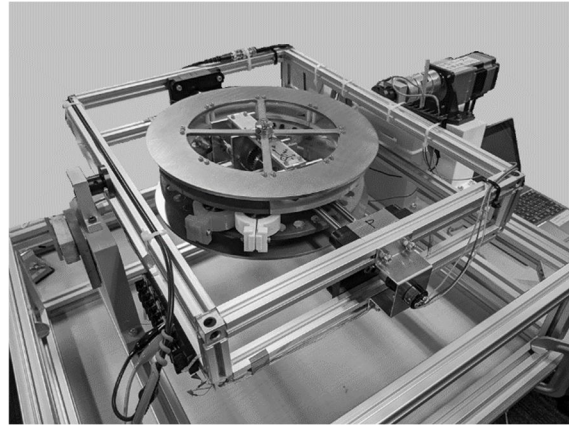


図 11 歯車型の実験機

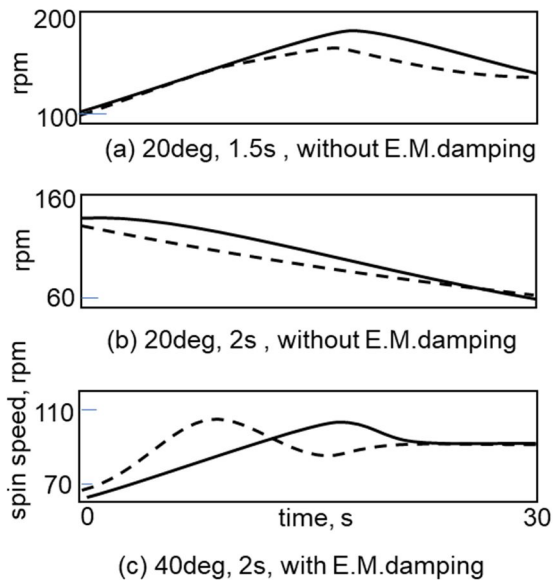


図 12 歯車型の自転速度
(実験：実験，破線：計算)

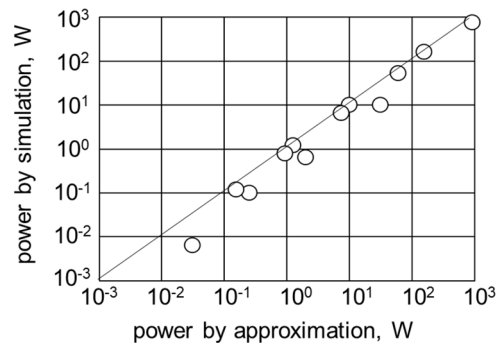


図 13 歯車型の発電量の簡易計算と
数値計算結果の比較

(4) 研究のインパクトと今後の展望

人体装着発電機による 1.7W の出力は、従来に比べ 10 倍以上の発電量である。また水槽実験により、25cm 角 3.2kg の発電パイにより 2.5W の見込みを得たことは、従来に比べ 1/100 以下の小型化である。これらは理論解析、実験検証による最適設計により得られたもので、開発した装置と解析手法は振動発電の基盤技術として有用性が高い。今後は開発技術の商品化が望まれる。人体装着の場合、通常環境では 2 次電池でも 1 日 1 回の充電が可能のため、振動発電の有用性は限定的である。波力発電の場合、系統電源からの充電が不可能のため、振動発電の有用性は高い。漁業用の海洋 IoT の整備が進んでおり、その電源基盤として期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroshi Hosaka, Yuki Tajima	4. 巻 32
2. 論文標題 Analytical and Experimental Study on Gyroscopic Power Generator with Power Feedback	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2551-2567
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2846	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akio Toyoshima, Hiroshi Hosaka	4. 巻 332
2. 論文標題 Spin acceleration mechanism for wave energy converter using gyroscopic effect and geared feedback	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A	6. 最初と最後の頁 113186
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2021.113186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 豊島萌生, 保坂寛	4. 巻 87
2. 論文標題 歯車増速型ジャイロ発電機の研究 - 自転増速機構 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 588-592
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.87.588	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Akio Toyoshima, Hiroshi Hosaka
2. 発表標題 Spin Accelerating Mechanism for Gyroscopic Wave Energy Converter
3. 学会等名 IMECE2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aya Watanabe, Ryouzuke Yuyama, Hiroshi Hosaka, Akira Yamashita
2. 発表標題 Fundamental Study on Friction-Driven Gyroscopic Power Generator Works under Arbitrary Vibration
3. 学会等名 IMECE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 回転運動機構	発明者 保坂寛, 豊島萌生, 池田泰久	権利者 東京大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-129397	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 発電装置	発明者 保坂寛, 池田泰久, 西村眞次, 覚張功	権利者 東京大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-070235	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------