

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360067

研究課題名（和文） ジャイロ型振動発電機の研究

研究課題名（英文） Study on Gyroscopic Power Generator Excited by 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

研究成果の概要（和文）：

人や移動体の振動を電力に変換する高効率な発電機を開発した。ジャイロ効果を用いてロータを 3 次元回転させ、2Hz 程度の低周波振動から 3600rpm 程度の回転を生成し、従来より 100 倍以上高効率な、ロータφ26mm で 0.1W の出力を得た。ロータを安定回転させるため、理論解析による安定条件の解明、電磁ダンピングの受動制御、発電機をモータとして作用させる自己起動の各技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：

A highly efficient power generator is developed that uses human movement as the energy source. The generator has a rotor with diameter of 26mm and generates power of 0.1W. It is more than 100 times higher in power generation than that of conventional vibration generators. It produces 3 dimensional rotations of about 3600 rpm from vibration of 2Hz. In order to stabilize the rotor rotation, several techniques are developed such as a theoretical stability analysis, a passive control of electro-magnetic damping and a self-activation of rotation using the generator as a motor.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2011 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機構学，機械力学，ジャイロ，発電機

1. 研究開始当初の背景

人，物流機器，動物などの移動体にセンサを装着し，無線でつなぐユビキタス情報システムの最大の課題はエネルギーの確保である。この解決のため，被装着物の振動を用いる発電機が各種研究されている。代表例はセイコーエプソンの腕時計用であり，慣性体の

揺動を用いて電機子を回転し， $10\mu\text{W}$ 程度の出力を得ている。英サザンプトン大のベンチャー企業 Perpetuum は無線送信用に 55mm 角，0.5mW の発電機を商品化している。研究レベルでは，MIT の Jeon らのフィルム圧電型，U. C. Berkely の Roudy らの静電型および圧電型，東大の鈴木らのエレクト

レット型があり、いずれも梁などの単振動を用い、寸法数 cm 角の場合、出力は 1mW 未満である。以上は携帯電話 (1W) 等情報機器の必要電力より数桁小さい。大出力のものでは、靴底に装着し出力 1 W 程度の発電機が、申請者、MIT、英国 The Electric Shoe 社、NTT などから発表されているが、耐久性や送電の問題で照明用以外には利用されていない。

一方申請者は、発電機内部に備えた回転体に外部から傾斜振動を加え、ジャイロ効果による歳差運動を起こし、その発生モーメントにより自転速度を増速するジャイロ型発電機を考案した (ジャイロ型振動発電機の研究、保坂寛他、精密工学会誌、74, 7, pp764-768, 2008)。外形 80mm の球状で、2Hz の振動で数千 rpm のロータ回転を発生し、1W の出力と携帯電話への充電を確認した。これは腕時計発電機に比べ出力で 10 万倍、体積効率で 2-3 桁上回る。また発生電圧が数十 V と高いため、周辺回路の損失も小さい。靴底形に比べ任意の位置に設置できる利点がある。ここで用いた回転原理は、ダイナビーと呼ばれる運動遊具用に開発されたもので、簡単な構成で高速回転が得られる点に特徴がある。ジャイロ発電機には、神戸大の神吉らの波力発電機 (大きさ数 m) があるが、歳差運動による自転増速がないため体積効率は従来と同等であり、また別途モータが必要なため小型化が難しい。

このように、本研究のジャイロ型発電機は極めて高い発電能力をもつが、回転の安定性が低いことが実用化の課題となっている。発電機の形状によってきまる特定の周波数、振幅の振動でのみ回転が持続し、自然界のランダムな振動では失速してしまう。また起動時には手で初速度を与えねばならない。この解決には、3次元のロータ運動を理論的に解明すること、ロータ運動を簡便かつ精密に計測すること、安定化の制御方法を考案し簡単な機構で実現すること、実際の情報機器に応用して周辺回路を含めた実用性を確認することが必要である。これには、機械運動、電磁気、制御に関する新たな発想を組み合わせる必要がある。本研究では、申請者らのこれまでの研究を発展させて、ジャイロ型発電機を安定に動作させる方法を明らかにし、実用的な発電機を製作する。

2. 研究の目的

携帯情報機器やセンサネットワークの電源確保のため、人や移動体の振動を電力に変換する高効率な発電機を開発する。ジャイロ効果を用いてロータを3次元回転させ、1 Hz 程度の低周波振動から 1000rpm 以上の高速回転を生成し、従来より 100 倍~1000 倍高効率な、1W (大きさ ϕ 80mm), 1mW (ϕ

20mm) の出力を得る。本発電機は高効率だが不安定という欠点がある。ロータ運動の数値計算と近似計算、自転と歳差を同時計測する誘導電圧の振幅変調、可変インピーダンスによる電磁ダンピング制御、発電機をモータとして作用させる自己起動の各技術を開発し、任意の振動で安定に発電する設計条件を見出す。

3. 研究の方法

ジャイロ型発電機の安定化のため、ロータの運動解析、安定性評価手法の開発、安定化制御法の開発を行う。まず、定常状態近傍での理論解析、3次元角度位置の計測法の開発、定常解近傍でのインピーダンス制御による安定化、オープンループでの自己起動など、基本的な手法を一通り明らかにする。ついで、より複雑な、入力が大きく変動した場合に生じる歳差の反転を考慮した理論解析、歳差速度の検出法、非定常状態での安定化制御、クローズドループでの最小エネルギー起動を扱う。以上は、製作・測定が容易な ϕ 80 の発電機を対象とする。さらに、同様の手法を用いて、 ϕ 20 の小型発電機を製作する。

4. 研究成果

(1) ロータ運動の理論解析

①定常状態の運動解析

振動的な入力に対するロータの運動方程式を導き、まず、数値計算により運動特性を求めた。ついで、安定な発電機の設計指針を得るため、安定性の支配要因であるロータの長周期振動と入力同期振動のみに着目した近似解を導いた。数値計算、近似計算、試作機による実験を行い、3者の振幅と周波数の一致を確認した。また近似解により、安定性を向上させる設計指針として、入力振動の振幅および周波数が高いこと、ロータの慣性モーメントが大きいこと、電磁ダンピングが小さいこと、ロータ軸直径が大きいことを明らかにした。一方発電量は、電磁ダンピングが大きいほど増大し、安定性と相反する。運動が安定限界にあるとき発電量が最大となり、そのとき、入力振動と歳差角が直交することを明らかにした。この結果は(2)の受動制御で用いられる。

②非定常状態の運動解析

入力変動が大きく、ロータ軸が転がるトラックが反転する場合も扱える運動解析法を開発した。トラックからロータ軸に加わる押し付け力が負の場合にトラックが反転するとし、滑りによる反転前後の自転速度変動を考慮して、ロータの運動方程式を数値的に解いた。その結果、入力振動の位相急変時には自転方向が一定のまま歳差回転が反転し、また、すべりによる運動エネルギー損失が大きい

場合には失速することが分かった。さらに実験により理論の妥当性を確認した。以上により、任意の入力条件での運動解析が可能となった。また、初速度の影響を求め、定常状態の安定速度に近い初速度が必要なことを明らかにした。この実現方法は(2)の自己起動で述べる。

(2) 安定回転制御の実験

①受動制御による回転の安定化

定常状態の理論解析結果に基づき、歳差角を用いて、安定かつ出力最大の条件（歳差角と入力との位相差 90 度）が成り立つように電磁ダンピングを変化させた。このためまず、ロータの歳差角を測定する方法を開発した。発電コイルに直角にセンシングコイルを設置し、自転同期信号を歳差角で変調した電圧を取得し、その包絡線から歳差角を求めた。ついで、発電コイルを分割巻し、スイッチで合計巻き数を変化させ、電磁ダンピングを変化させた。位相差が 90 度より十分小さければ巻き数を増大してダンピングを上げ、90 度に十分近ければ安定限界と判断して巻き数を減少させた。この方法は、スイッチの切り替えでインピーダンスを変化させるだけであるので、制御に要するエネルギー消費は無視でき、受動的な制御になっている。本方法により、発電量が従来の 6 倍になることを確認した。

②開ループ自己起動

非定常状態の理論解析に基づき、ロータに初速度を与える方法を開発した。外部から発電コイルに交流電流を加えることで、発電機を同期モータとして作用させる方法である。発電コイルに電流を流すと、ロータ内の永久磁石がコイル磁界の方向へ引き寄せられる。印加電圧の周波数をゼロから徐々に増大させると、ロータの向きが外部電圧と同期して反転し、さらに慣性力により、同一方向に回転する。実験により、本手法によりロータを安定回転状態まで回転させられること、その後の加振により、携帯電話の充電も可能なことを確認した。

③閉ループ自己起動と回転の安定化

自己起動のエネルギー効率を高めるため、ロータの自転角をホール素子で測り、半回転ごとに印加電圧を反転する閉ループ起動法を開発した。本方法により、最適なタイミングで電圧が切り替わり、最短時間で起動する。実験により、消費電力、起動時間ともに閉ループは開ループより 1 桁以上優れ、3000rpm まで 1 秒、8.7J 以下で起動できることが分かった。さらに、本手法を、入力変動が大きい場合の回転安定化に応用した。自転速度が安定限界以下となったら発電機をモータとして作用させ、以上となったら発電機に復帰させる。試作機を図 1 に示す。実験により、本

手法により任意の入力振動に対して安定回転が可能であることを確認した。ただし、入力変動が大きい場合には、平均発電量が負となることが判明した。



図 1 閉ループ自己起動発電機

④発電機の小型化

以上の解析、実験結果を用いて、ロータ直径 26mm の自己起動型発電機を製作した。平均出力 0.1W を得た。また、理論上の発電量は 0.22W である。試作機の写真を図 2 に示す。以上により、当初目標を達成した。



図 2 小型発電機の機構部

(3) 発電と起動の分離による安定化

最終年度に、閉ループ自己起動を発展させた、ランダム振動でも発電可能な発電機の研究に着手した。

①発電の原理

これまで対象としてきたダイナビーによる回転増速では、入力振動とロータの歳差回転が同期することが安定回転の条件となる。これは、ジャイロ効果によりロータの自転を増速するには、ジャイロトルクと自転の向きが一致する必要があるためである。振動がランダムな場合は、ジャイロトルクの向きが自転と無関係に反転してしまう。しかしもし負のジャイロトルクを除去できれば、ランダムな振動でも自転が増速するはずである。この方法としては、ランダムなジャイロトルクで発電し、それを電氣的に整流した後、閉ループ自己起動回路に入力し、ロータを自転させ

ればよい。すなわち、発電と起動を分離し、電氣的に負のジャイロトルクを除去すればよい。

②理論解析

ロータの歳差、章動角に対して線形化したロータの運動方程式を導いた。計算結果より、摩擦や電気抵抗が無く、かつ正弦波入力の場合、発電パワーは自転速度、入力振幅、軸回り慣性能率の2乗、入力周波数の1乗、半径回り慣性能率の-1乗に比例することが分かった。

③実験機

ロータの自転を外部モータにより強制的に与え、これに加わる振動によりロータを歳差運動させ、そのトルクにより発電し、整流した後にモータに正帰還する実験機を製作した。2重ジンバルによりロータとモータを2次元回転可能なように支持した。写真を図3に示す。振幅1度、2Hzの入力振動から、10度以上の歳差振動を生成できた。ただし、電氣的、機械的損失が大きく、発生電力は1mW以下と小さく、発電電力単独では自転が不可能であり、外部電源による電流増幅を必要とした。本助成期間内には発電機として機能させることは出来なかったが、ランダム振動による発電が、原理的には可能なことを示せた。

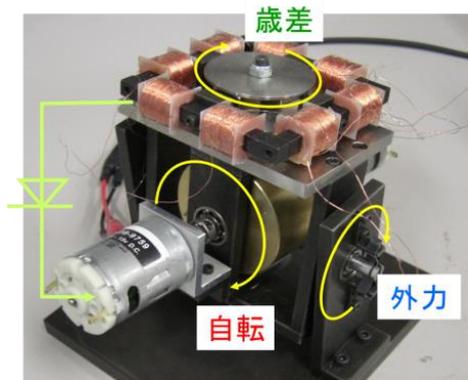


図3 ランダム振動型発電機

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2件)

①高橋智幸, 岩崎淳, 保坂寛, ジャイロ型発電機の受動制御, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 29, No. 8, 2011, 661-666

②保坂寛, ジャイロ型振動発電機, 設計工学, 査読無, Vol. 46, No. 2, 2011, 57-6

[学会発表] (計10件)

① Yohei Kamiya, Hiroshi Hosaka, Self

Activation of the Gyroscopic Power Generator, ASME 2011 IMECE, 2011.11.15, 米国, Denver

② Tomoyuki Takahashi, Jun Iwasaki, Hiroshi Hosaka, Impedance Control of Gyroscopic Power Generator, ASME 2011 IMECE, 2011.11.15, 米国, Denver

[その他]

ホームページ等

<http://www.ems.k.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 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