

帰還増速型ジャイロ発電機の試作

47-146694 荒井 洸
指導教員 保坂 寛 教授

As the study to increase power density of the gyro generator generating electricity from random vibration, simultaneous equation that takes into account the characteristics of the rotation motor and the power generation unit has been made a formula and simulation was conducted. Then approximate efficiency of the generator was found. And possibility of efficiency by utilizing a reduction gear was given. The experiment to verify feedback mechanism is possibility was conducted and it was confirmed that feedback mechanism work well.

Key words: gyro, energy harvesting, electric generation, vibration, motor

1 序論

近年、ユビキタス社会が実現しつつあり、それに伴う携帯型電子機器の増加により、それらへのエネルギー供給源の確保が大きな問題になっている⁽¹⁾。その解決策の一つとして環境発電が注目されている。環境発電とは、光や熱、その他我々の身の回りに拡散してしまっているエネルギーから発電を行う技術であるが、筆者の研究室ではその中でも物流で利用される位置即位センサへの電力供給源としてジャイロ効果を利用した振動発電デバイスを制作している。まずダイナビー型ジャイロ発電機が制作された。これは出力は大きいものの入力振動と歳差運動が同期しないとロータの回転を妨げる方向にトルクが発生してしまい自転速度が下がり、ランダム振動では回転が安定しないという問題があった。そこで本研究室では発生トルクを一方方向に整流してロータに与えることでランダム振動下でも安定した発電が可能なランダム振動型ジャイロ発電機⁽³⁾の開発に着手した。過去に制作された試作機では発電部の磁気効率の悪さや増速歯車部の摩擦損失、自転軸の機械損失が原因でアンプなしでは自転速度を増大できなかったが、今回機械損失が小さく磁気効率の良い発電部を搭載した試作機を開発し、フィードバックにより自転速度を増速することに成功した。以下ではランダム振動型ジャイロ発電機とフィードバック機構の原理について述べた後、フィードバック下での入力角変位、歳差角変位、自転速度の変化を計測した結果を示す。またフィードバック下で発電部や自転モータに発生する電氣的損失を軽減するため、自転モータに減速ギアを取り付ける方法を提案する。

2 ランダム振動型ジャイロ発電機

2.1 発電の原理

ジャイロ効果とは、高速で回転する物体がその回転の軸を一定方向に保とうとする性質である。ジャイロ発電機では、高速で回転するロータの軸がわずかにずれた際の大きな角運動量の変化を利用し入力振動を増幅し発電をする。図1にジャイロ発電機の原理図を示す。ロータをモータで回転させ、この状態で入力振動軸に回転振動を入力することでジャイロ効果が発生し、入力振動軸と自転軸に垂直な軸(歳差軸)回りに回転運動がおこる。この回転運動から電磁誘導の法則を用いて発電をする。図2はジャイロ発電機のモデル図である。ここで、歳差軸が1軸、入力振動軸が2軸、ロータの自転軸が3軸である。この時、歳差トルクはロータの自転速度に応じて大きくなるので、自転速度を大きくすれば微小な振動からでも大きな発電を行えるようになる。そこで筆者らは、発電した電力をロータに

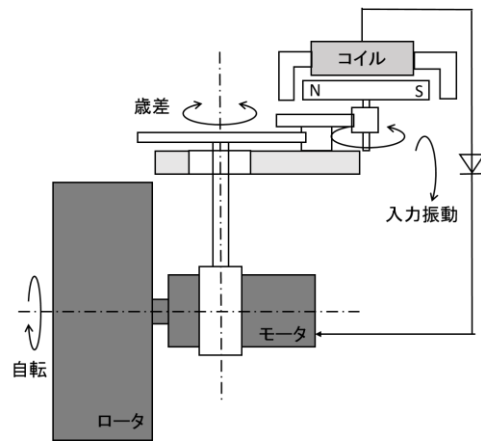


図1 ジャイロ発電機原理図

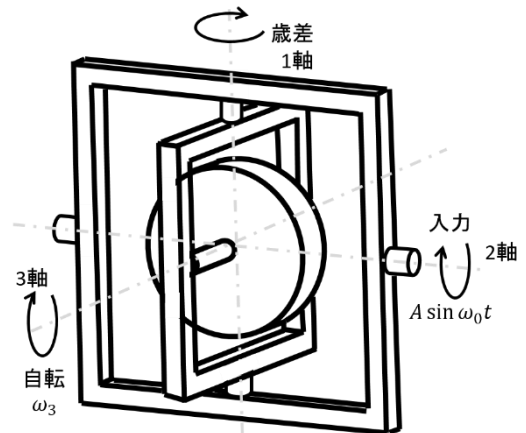


図2 ジャイロ機構モデル図

回転エネルギーとして正帰還させるフィードバック機構を導入することでロータの回転速度を上げ、より大きな発電量を得ようと試みた。

2.2 理論式

フィードバックの理論解析にはジャイロ機構の運動方程式、ロータに電力を帰還させるエネルギー方程式、発電部と自転モータを結ぶ回路の方程式が必要となり、それぞれ式(1)(2)(3)(4)で表される。

$$I_1 \ddot{\xi}_1 + k\xi_1 + I_3 \omega_3 A \omega \cos \omega t \cos \xi_1 + b_g k_T g i = 0 \quad (1)$$

$$I_2 \ddot{\xi}_2 - I_3 \omega_3 \xi_1 \cos \xi_1 = e_g f_2 \quad (2)$$

$$I_3 \omega_3 \dot{\omega}_3 = e_m b_m k_{em} i \omega_3 - M(\omega_3) \quad (3)$$

$$b_g k_{eg} \dot{\xi}_1 = Ri + L \frac{di}{dt} + b_m k_{em} \omega_3 \quad (4)$$

(1)は歳差軸周り、(2)は入力振動軸周りの運動方程式を表す。fは各軸に加わるトルク、Iは各軸周りの慣性率、 ξ は各軸周りの角変位、 ω, ω_3 はそれぞれ入力振動の角速度と自転速度、Aは入力振動の振幅、ロータの回転速度、kはばね定数、 k_{em}, k_{eg} は自転モータ及び発電部の逆起電圧定数、 k_{Tg} は発電部のトルク定数、 b_m, b_g は自転モータ及び発電部に取り付けられたギア比、 e_m, e_g は自転モータと発電部のギア効率、R,Lは発電部と自転モータの内部抵抗とコイルのインダクタンスの和である。M(ω_3)は ω_3 を変数とした関数で、回転軸の機械損失を表す。式(2)(2)は入力振動軸に振幅Aの正弦波を入力した場合を想定している。

3 理論解析

3.1 自転軸損失の導出

本節では実験によりM(ω_3)を導出した。図3はロータを一定の回転数から自由回転させた際の回転速度の時間変化から回転数ごとのエネルギー損失を計算したものである。

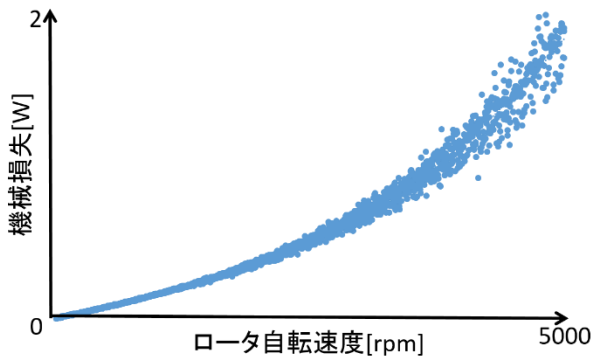


図3 回転数ごとの機械損失

M(ω_3)はこの近似式から、式のように定めた。

$$M(\omega_3) = 9 \times 10^{-9} \omega_3^3 - 5 \times 10^{-7} \omega_3^2 + 1.5 \times 10^{-3} \omega_3 \quad (5)$$

3.2 ギア無モータ

式(2)(3)(4)(4)(5)を元に、自転モータに減速ギアを取り付けない場合について数値解析を行った。この時、試作機における整流素子や歳差振動による自転軸の損失増大を考慮して、自転軸の機械損失を1.5倍として数値解析を行った。各パラメータには試作機に近い値として $I_1 = I_2 = 0.000445 \text{ [kg.m}^2\text{]}$, $I_3 = 0.000795 \text{ [kg.m}^2\text{]}$, $k_{em} = 0.68 \text{ [mV/rpm]}$, $k_{Tg} = 6.5 \text{ [mNm/A]}$, $k_1 = 3.206 \text{ [N.mm/deg]}$, $C_m = 0 \text{ [Ns]}$, $b_m = 1$, $b_g = 105$, $e_m = 1$, $e_g = 0.61$ を与えた。またロータには初速として 1000 [rpm] 与え、入力振動の振幅は 18 [deg] , 周波数は 2.5 [Hz] とした。図4~図8はその時の結果で、それぞれロータ回転速度、歳差角変位、入力エネルギー、発電量、自転モータ出力を表す。数値解析により、本発電機はフィードバックにより自転速度が増大する見込みがあることが分かった。図6と図8から入力エネルギーの10%程度がロータの運動エネルギーになっていることが分かる。図6と図7から入力エネルギーの60%程度が電気エネルギーに変換され、図7と図8から発電された電気エネルギーの20%程度がロータの運動エネルギーになることが分かる。

3.3 ギア有モータ

自転モータに減速ギアを取り付けた場合の発電機の挙動を数値解析により明らかにした。前節と同様、自転軸の

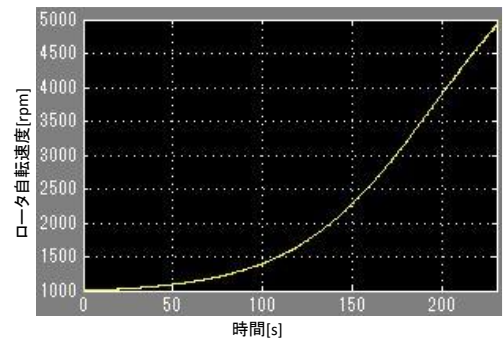


図4 ロータ自転速度

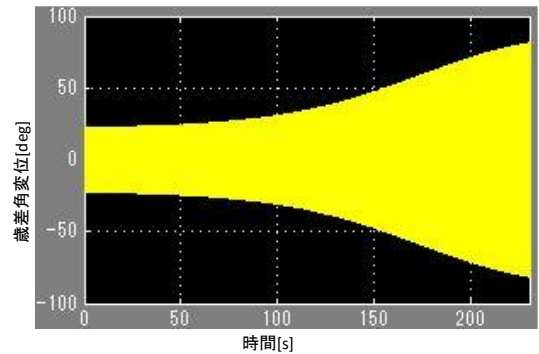


図5 歳差角変位

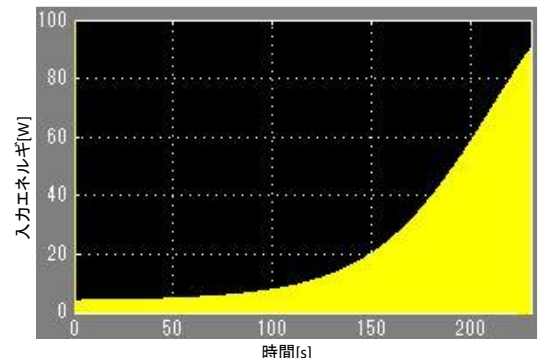


図6 入力エネルギー

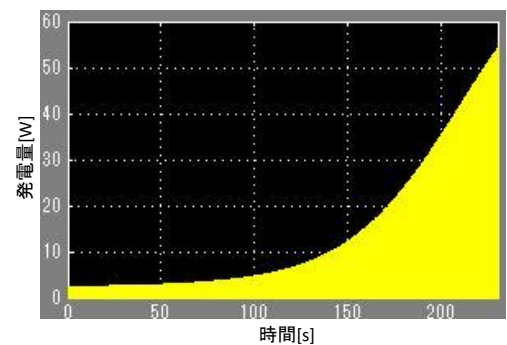


図7 発電量

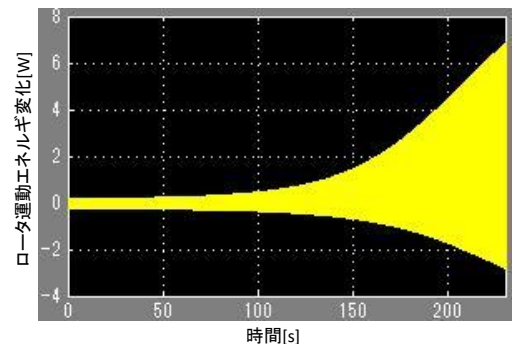


図8 ロータ運動エネルギー変化

機械損失を 3 倍にして数値解析を行った。各パラメータは前節の物と基本的に同じだが、 $e_m = 0.85, b_m = 3.6$ とし、入力振動の振幅を $7.5[\text{deg}]$ 、周波数を $2[\text{Hz}]$ とした。結果を図 9～図 13 に示す。数値解析により、本発電機は回転軸に減速ギアを取り付けても機械損失に打ち勝ちフィードバックにより自転速度を増大させることができる見込みがあることが分かった。また減速ギアにより自転モータへの負荷トルクが減少したため、より急速に自転速度が増大するようになった。図 11 と図 13 から入力エネルギーの 20%程度がロータの運動エネルギーに変換されていることが分かる。図 11 と図 12 から入力エネルギーの 50%程度が電気エネルギーに変換され、図 12 と図 13 から発電されたエネルギーの 30%程度がロータ運動エネルギーに変換されることが分かる。自転モータに減速ギアを取り付けない場合に比べ電氣的損失が軽減し、全体としても効率が向上することが分かった。

4 実験

4.1 実験方針

本章では計算結果を実験により検証した。図 14 は実験装置全体図である。発電機の歳差軸、入力振動軸、回転軸にはエンコーダまたはフォトフレクタが取り付けられており、各軸の角変位または角速度を測定することができる。自転軸にはモータが取り付けられており、直流電源を用いてモータに電流を流し、ロータに初速を与え、その後発電部とつなぎなおし実験を行う。発電された電力は整流素子により整流され、自転モータへと帰還される。また歳差軸に取り付けるパネについては、設計の容易さからねじりばねを採用した。各エンコーダ・フォトフレクタからの信号はマイコンで処理され、各角変位や角速度はパソコンに CSV ファイルとして逐次的に記録される。

4.2 実験

入力振動を手動で与え、その際の入力振動軸、歳差振動軸の角変位とロータの自転速度を計測し、パソコンに記録した。実験は自転モータに減速ギアを取り付けた場合と取り付けない場合の二回行い、それぞれの結果を比較した。

4.3 実験結果

4.3.1 ギア無モータ

図 15～17 は減速ギアを用いない場合の入力振動角変位、歳差角変位、ロータ自転速度のグラフである。

時間経過とともに自転速度が増大していく様子が確認できた。歳差振動の振幅はほとんど変化していないが入力振動の振幅は小さくなっている。これはロータの自転速度増大に伴いジャイロトルクが増大し、小さな入力角変位で大きな歳差角変位を生むことができるようになったためである。

4.3.2 ギア有モータ

図 18～20 は減速ギアを用いた場合の入力角変位、歳差角変位、ロータ自転速度のグラフである。フィードバックにより自転速度が増大していく様子が確認できた。また減速ギアを用いない場合よりも手ごたえが軽く、容易に加速

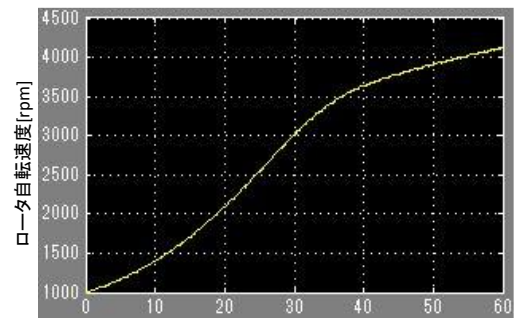


図 9 ロータ自転速度

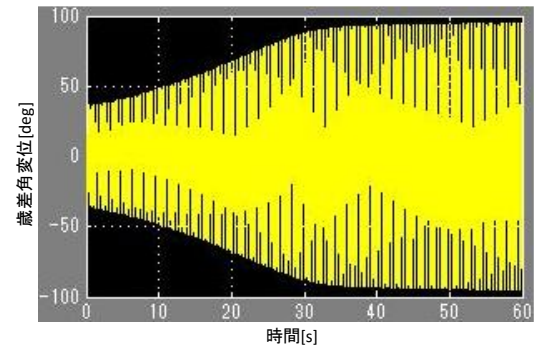


図 10 歳差角変位

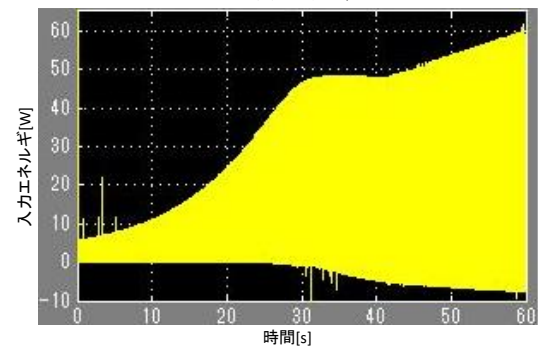


図 11 入力エネルギー



図 12 発電量

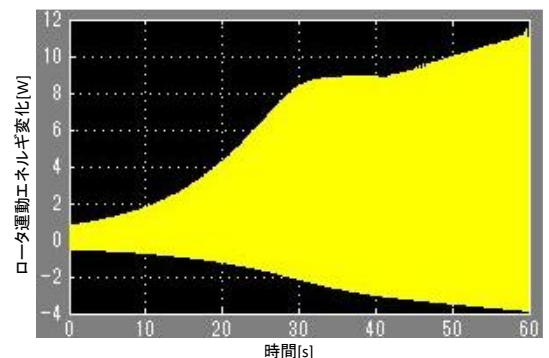


図 13 ロータ運動エネルギー変化

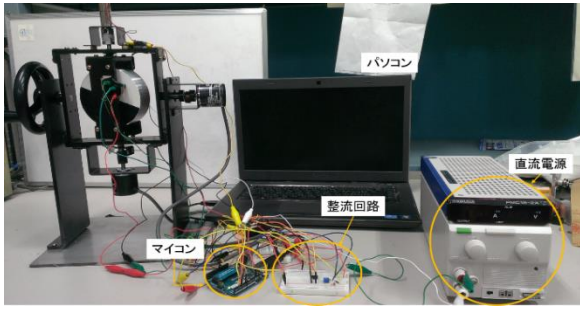


図 14 実験装置全体図

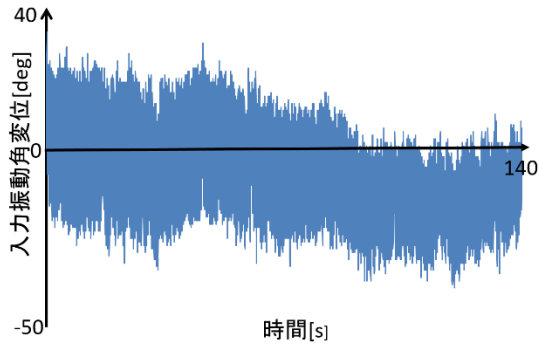


図 15 入力振動角変位 (ギア無)

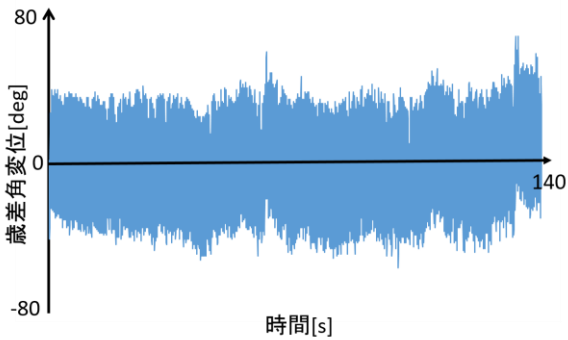


図 16 歳差角変位 (ギア無)

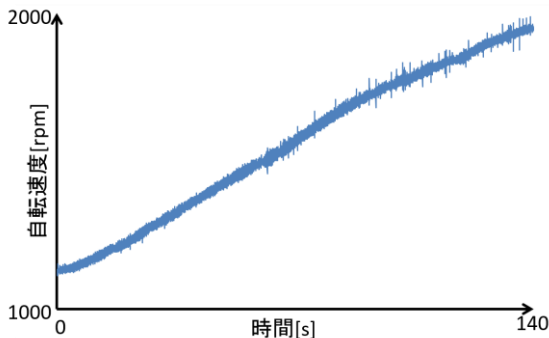


図 17 ロータ回転速度 (ギア無)

させることができた。これは電氣的損失が減少したことで全体としてのフィードバック効率が高まったためである。

5 結論

フィードバック下での発電機の挙動について、発電部と自転モータの特性を考慮した連立方程式を立式し、数値解析により明らかにした。これにより発電部や自転モータ選定の基準を示すことができた。また先行研究を踏まえ、電磁効率が良い発電部を搭載し、機械損失の小さい試作機を制作し、フィードバックが可能か検証を行った。その結果自転速度の増速が確認でき、実機においてフィードバック

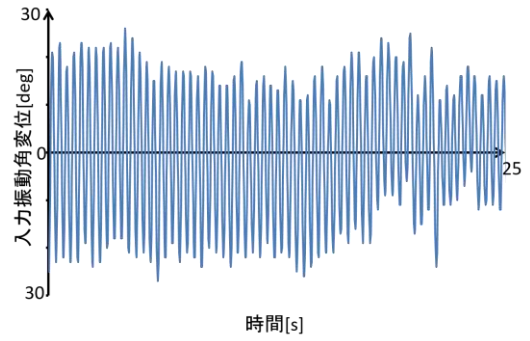


図 18 入力振動角変位 (ギア有)

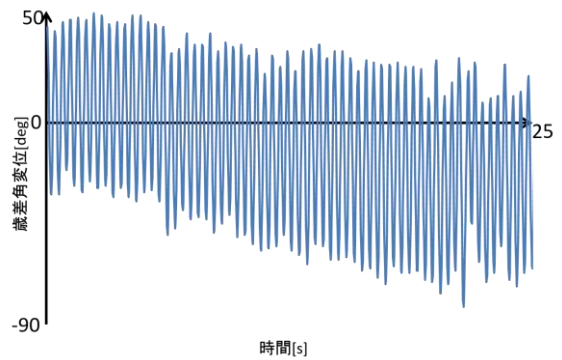


図 19 歳差角変位 (ギア有)

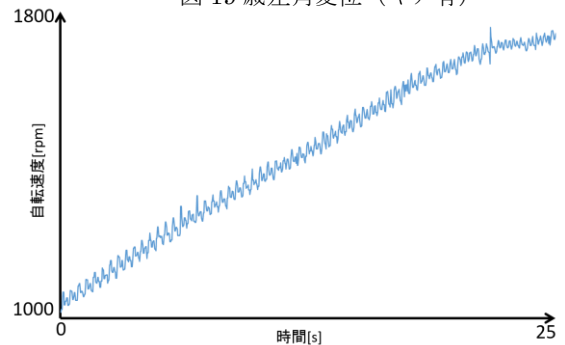


図 20 ロータ回転速度 (ギア有)

が可能であることが示された。また自転軸モータに減速ギアを用いることで、フィードバックにおける電氣的損失を減少させることができる見通しを得た。数値解析と実験結果から、歳差振動による自転軸損失の増大と整流素子の電圧降下といったわずかな損失の差が大きな影響を与えることが分かった。

参考文献

- 1) 鈴木雄二, 篠原 真毅, 竹内 敬治, 中寺 和哉, 宮崎康次, 環境発電ハンドブック, NTS, 2011
- 2) 小川 達也/Ogawa Tatsuya, 大崎雄治, 保坂寛, 佐々木健, 板生清: 自励回転型自動発電機の最適制御, 2005 年度春季大会学術講演会, pp. 1229-1230, (2005. 3)
- 3) 良本真基, "ランダム振動型ジャイロ発電機の研究", 2011 年度東京大学卒業論文