

# ジャイロ型振動発電機の試作と性能評価

66777 石井 智裕  
指導教員 保坂 寛 教授

In order to solve the energy supply problem for ubiquitous equipments, a gyroscopic power generator is proposed which utilizes kinetic energy of human movement. In the generator, a rotor increases spinning velocity by the precession and friction caused by input vibration. In this research, first, the prototype of generator is developed. Next, the experimental apparatuses that can input oblique spinning and vibration into the gyroscopic generator are developed. Thirdly, the analysis verified characteristics by comparing experimental value and calculated value. Finally, the amount of the maximum power generation is forecasted to show the potential ability and the stable control of the gyroscopic power generator.

Key Words: Electromagnetic power generator, Gyroscope, Precession, Vibration

## 1. 序 論

情報通信デバイスの小型化により、人間及びあらゆる人工物、自然物にセンサを装着し、インターネット上で情報交換を行うユビキタス情報システムが実現しつつある。最大の課題はエネルギーの確保であり、その解決策として、歳差運動と摩擦を用いたジャイロ型発電機が挙げられる。このジャイロ型発電機は先行論文において理論構築、安定条件の近似解が導出されているが精細な実験検証がなされていない。そこで本研究では、ジャイロ型発電機実現のため、高性能な試作機と振動入力装置を製作し、それを用いた実験検証、理論と実験値にもとづく発電量の推定を行う。さらに、自律型発電機実現の方法を示すことでジャイロ型発電機の有効性を示す。

## 2. ジャイロ型発電機

### 2.1 発電機構

発電機の構成を Fig.1 に示す。y 軸回りに  $\dot{\gamma}$  で回転するロータがあり、その軸はトラックにより支えられている。トラックの間隔はロータ軸の直径よりわずかに大きく、ロータ軸はトラックの円周方向 (z 軸回り) に自由に回転できるようになっている。トラックを x 軸回りに  $\dot{\theta}$  で回転した場合、ロータに  $\dot{\alpha}$  方向のトルクが加わり、角運動量の法則により、ロータは z 軸回りの歳差運動  $\dot{\alpha}$  を始める。すると、ロータ軸には、トラックから摩擦力が加わる。これを x 軸方向から見ると、Fig.2 のようになる。トラック間には隙間があるので、ロータ軸は片方のトラッ

ク面とだけ接触する。入力トルクが  $\dot{\theta}$  の方向なので、ロータ軸の右端は下側面と、左端は上側面と接触し、歳差運動によりロータ軸右端は x 軸正方向に、左端は負方向に移動する。すると、摩擦力は、右端では下側トラックから -x 方向に、左端では上側トラックから +x 方向に働き、共にロータの自転  $\dot{\gamma}$  を増大する方向のトルクを発生する。入力回転  $\dot{\theta}$  が上記と逆向きのときも、やはり摩擦力はロータの回転を増大する方向に働く。この結果、トラックを回転振動させると、ロータの回転数が増大する。この回転原理はダイナビーロという遊具に用いられている。Fig.3 は Fig.1 を y 軸方向から見た図であり、電磁誘導の原理を示している。本発電機ではロータ軸の方向が変わるため、通常発電機やモータと異なり、コイルをロータと直交して配置している。永久磁石の N 極が上端にあるとき、コイルを貫く磁束の z 方向成分は最大である。ロータが  $\dot{\alpha}$  方向に回転すると磁束が減少し、永久磁石が水平位置のときゼロとなり、その後 -z 方向の磁束が増大し、N 極が下端のとき最大となる。この結果、コイルには、ロータの回転数と同じ周波数の交流電圧が発生する。

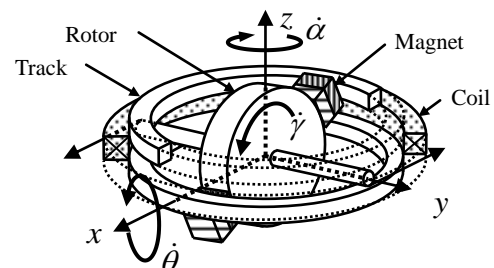


Fig.1 Structure of gyro generator

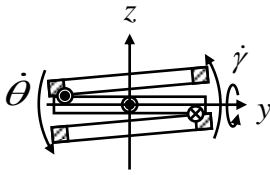


Fig.2 Principle of increasing in revolution of gyro generator

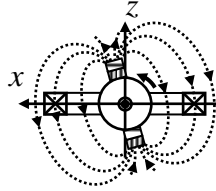


Fig.3 Magnetic-field distribution

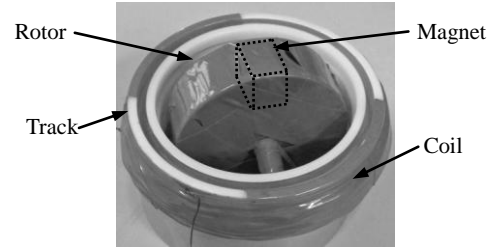


Fig.6 Prototype generator

## 2.2 理論解析

先行論文で示されている安定条件を解説する． $\xi$ を半径比と呼び， $R_t$ をトラック半径と $R_a$ をロータ軸半径とすれば

$$\xi = \frac{R_t}{R_a} = \frac{1}{\tan \beta} \quad (1)$$

である．ロータは複雑な3次元回転をするため，時間と共に慣性主軸の方向が変わり空間座標系での運動方程式を導出することが困難である．慣性主軸から見た角運動量を求めさらに，オイラーの方程式( $\partial \vec{L} / \partial t + \vec{\Omega} \times \vec{L} = \vec{M}$ )を利用することで(2)～(4)式を求められる．

$$\ddot{\alpha}(\xi^2 I_1 + I_2) + \xi I_1 \dot{\theta} \sin \alpha + (I_2 - I_1) \dot{\theta}^2 \sin \alpha \cos \alpha + \xi^2 \sigma \dot{\alpha} = 0 \quad (2)$$

$$I_2 \ddot{\theta} \cos \alpha + (I_1 - 2I_2) \dot{\theta}^2 \sin \alpha + I_1 \xi \dot{\alpha}^2 = \kappa_2 \quad (3)$$

$$\ddot{\alpha} \xi (I_2 - I_1) - I_1 \dot{\theta} \sin \alpha - \dot{\alpha} \dot{\theta} (1 + \xi) \cos \alpha + \xi (I_2 - I_1) \dot{\theta} \cos^2 \alpha - \xi \sigma \dot{\alpha} = \kappa_3 / \sin \beta \quad (4)$$

ここで求められた解が非線形の運動方程式となり解析解の導出が不可能であるため定常状態における近似解を求める． $\alpha = \phi + \pi$ ， $\ddot{\phi} = \dot{\phi} = 0$ を代入し1周期に対して平均化を行うと $\phi$ に関する条件式が求まり存在条件により

$$\sigma \leq \frac{I_1 \theta_0 \tau}{2\xi} \quad (5)$$

$$\sigma \leq \frac{I_1 \tau \mu_s}{\xi} \quad (6)$$

が導出される．この(5)，(6)式が定常状態における安定条件式となる．

## 3. 実験装置の製作

### 3.1 ジャイロ型発電機の試作

まずは，安定回転可能なジャイロ型発電機の製作を行った．製作の過程で3自由度の回転の確保，大きさ，重量，慣性モーメント，適切な摩擦係数を持つ材料の検討などを行った．実験に用いた発電機をFig.6に示す．ロータ半径60 mm，ロータ幅16 mm， $R_a=1.5$  mm， $R_t=39$  mm， $I_t=6.31 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ， $\xi=26$  コイルは100巻であり，材料には，ロータに鋼，トラックにアクリル，磁石にネオジウムを用いている．

### 3.2 傾頭3次元入力装置の製作

ジャイロ型発電機の最適入力は傾頭3次元運動 $\omega$ である(Fig.7)．従来，3つの回転による複雑な回転であり再現することが出来なかったためこの入力に対する実験検証を行うことが出来なかった．しかし，本研究では2軸の回転機構の組み合わせとリンク機構により傾頭3次元入力を再現した(Fig.8)．本機構によりジャイロ型発電機がフィードバック制御を行わなくても安定な系であることが示された．入力装置の構造をFig.9に示す．

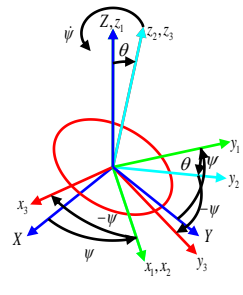


Fig.7 Oblique spinning input

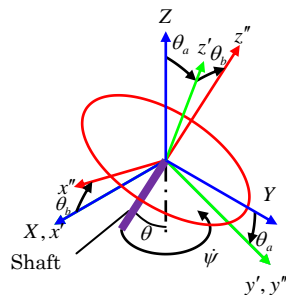


Fig.8 Input by device

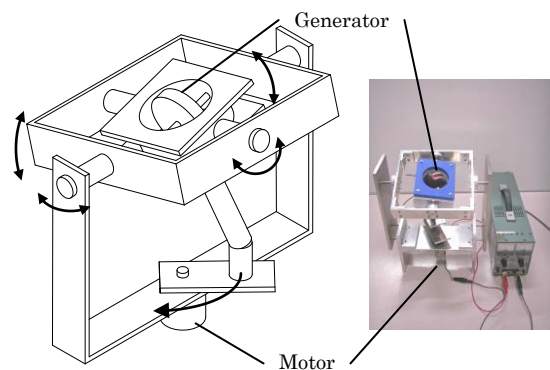


Fig.9 Experimental apparatus of oblique spinning input

### 3.3 振動入力装置の製作

ジャイロ型発電機を安定回転させるためには傾頭3次元入力，もしくはそれに似た2次元の回転の組み合わせが必要だと考えられていた．

それに対し本研究では人体の姿勢変化から起こりうる 1 次の揺動振動に関する理論の検証を行う必要がある。そこで、機械的に発電機の自由度を拘束し 1 次の回転振動で安定回転可能なことを確認し、振動の安定領域を実験的に見積もり、それに必要なトルクや回転数を算出し振動入力装置を製作した(Fig.10)。サーボモータを用いることで発電機の回転によるトルクの変動が生じても正確な振動入力が可能である。

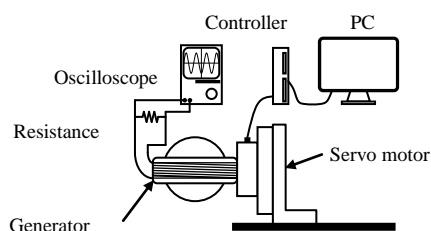


Fig.10 Experimental apparatus of vibration input

## 4. 検証実験

### 4.1 傾頭 3 次元入力比較実験

傾頭 3 次元入力において入力回転と歳差回転の位相差  $\delta$  と  $\sigma$  の関係を求めた。  $\sigma$  は電氣的ダンピングであり、インピーダンスや磁石配置、発電量などにより変化する。また位相差が違う場合にはトラックがロータを押し付ける角度が変わり加わるトルクが変化する。ここで定常状態を仮定すれば位相差によりロータに加わるトルクが定まり、そのトルクと釣り合う大きさのダンピングを定まる<sup>2)</sup>。

また、ロータの仕事がすべて発電に使われると仮定するとコイルの発電量  $P$  から  $\sigma$  を計算することが可能である。

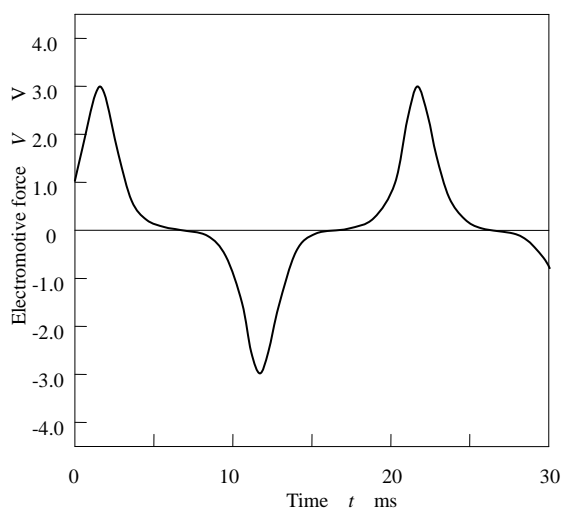


Fig.11 Generated voltage

Fig11 に安定回転時における  $R=2.9 \Omega$ ,  $R_o=5.2 \Omega$  の時の端子間電圧の測定例を示す。  $V$  は時間とともに変化するため、  $V^2$  の 1 周期 ( $2\pi/\tau$ ) あたりの平均をとった後に  $P$  を求め  $\sigma$  を求める。このとき、  $\sigma$  は  $V$  により次式で表される。

$$\sigma = \frac{1}{2\pi\xi^2\tau(R_i + R_o)} \int_0^{2\pi/\tau} V^2 dt \quad (7)$$

今回の実験では  $\tau$  を一定としているので、ロータの自転速度も一定である。このため  $V$  は、  $\theta_0, R_o$  によらず Fig.11 と同一になるはずである。そこで、式(7)の計算においては、  $V^2$  の積分は Fig.9 から求まる値 ( $1.93 \text{ V}^2\text{s}$ ) を用い、  $R_o$  のみ各実験での値を用いた。

Fig.12 に計算結果と式(7)をまとめる。ここで式(7)に関しては機械的損失を含まない。回路をオープンにしたときは発電量が 0 であるため、このときの計算結果を機械的損失  $M$  とし式(7)に加えることにより非常に近い値となり定性的な一致を確認した。ショートの際は不安定だったため  $\delta=0$  の時とした。

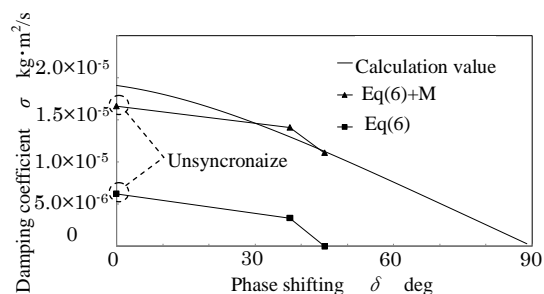


Fig.12 phase shifting and critical damping

### 4.2 振動入力理論検証実験

安定限界の  $\sigma$  は以下のようにして求めた。まずロータに手動で自転を与え、安定回転が起こるように十分大きな  $\theta_0$  の揺動振動を加える。次に  $\tau$  を一定に保って  $\theta_0$  を徐々に減少させ、失速する直前の  $\theta_0$  を記録した。コイルの外部抵抗  $R_o$  を種々変化させて同一の実験を行なった。発電機を、角度と角速度をともに制御可能なサーボモータに固定し、入力振動数を  $2.0\text{Hz}$  ( $\tau=12.6 \text{ rad/s}$ ) で一定とし、  $PC$  により振幅を変化させるようになっている。  $I_1, \tau$  等のパラメータを式(5) 右辺に代入し、安定限界の  $\sigma$  を求めた。

ここで、振動入力時において入力振動数と自転速度の関係を半径比より求めた結果、ほぼ一致しロータは滑らず転がっていることがわかった。式(6)は摩擦に関する式であり摩擦係数が高

ければ満たし、ロータが滑らずに転がっていることより十分に摩擦係数が高いことを表し、式(6)は満たしているといえる。

安定回転条件(5)により求めた  $\sigma$ 、および、発電量の式(7)から求めた  $\sigma$  を、 $R_o$  に対してプロットした結果を Fig.13 に示す。本来両者は一致するはずであるが、式(5)の値が式(7)の値より大きくなっている。この原因として、傾頭 3 次元入力時と同様に式(7)において機械的損失を無視したことが考えられる。

上記実験で、ロータの自転および歳差速度は一定であるから、機械的損失はほぼ一定と考えられる。そこで、発電量ゼロ ( $R_o = \infty$ ) における式(5)の  $\sigma$  ( $=\sigma_m$ ) を機械的損失分とみなして、式(7)の結果を  $\sigma_m$  だけシフトしたものが  $\sigma'$  (破線) である。 $\sigma'$  は式(5)の結果とよく一致しており、理論式の妥当性を示せたと言える。

なお、今回の実験で得られた最大発電量は、 $R_o = 2.5 \Omega$  における  $0.17W$  であった。Fig.6 の発電機は最適構造となっておらず、コイル内部抵抗の低減、磁石個数の増加、ロータ軸のガタの低減などを行えば、発電量が向上する可能性がある。発電量の上限を見積もるために、コイルの内部抵抗と機械的損失がない、理想的な発電機の出力を計算してみる。発電量  $P$  であり  $\sigma$  を式(4)の安定限界に設定すると、 $P$  は以下となる。

$$P = \frac{I_1 \theta_0 \zeta \tau^3}{2} \quad (8)$$

すなわち  $P$  は、入力振幅  $\theta_0$  と周波数  $\tau$  の 3 乗に比例する。またロータが相似形であれば、 $I_1$  すなわち  $P$  は寸法の 5 乗に比例する。

また、理想発電機と本試作機の発電量を比較したグラフが Fig.14 である。一例として、歩行中のひじや手首への装着を想定して  $\tau = 1.0 \text{ Hz}$ 、 $\theta_0 = 30^\circ$  とし、また  $I_1$  と  $\zeta$  に試作機の値を用いると、理想発電機の出力は  $0.11W$  となる。さらに走行時を想定して  $\tau = 2.0 \text{ Hz}$  とすると、出力は  $0.85W$  が期待できる。

さらに前節において安定回転時における発電量と機械的損失の関係を求めた。そこで、外部抵抗のインピーダンスを変化させることにより出力される仕事を制限し安定領域の拡大を図り、小さな入力振動に対して安定させることが可能であり、さらに位相差と入力振動を検知することでジャイロ型発電機は自動発電が可能である事を示している。

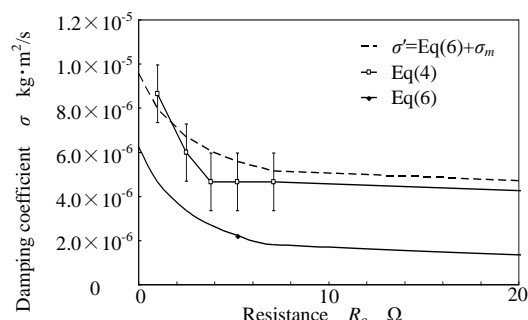


Fig.13 External resistance and critical damping coefficient

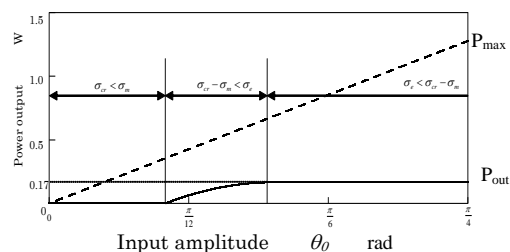


Fig.14 Power output

## 5. 結論

人体運動を用いた高効率な発電機を実現するため、歳差運動により高速なロータ回転を得るジャイロ型発電機を製作した。主な成果は以下である。

(1)従来、運動遊具に用いられていた回転機構のロータに永久磁石装着し、その歳差運動面にコイルを装着することで、発電機として作用することを確認した。

(2)回転振動実験検証を行うために安定回転可能な試作機、および、定常状態を再現するための入力装置の製作を行った。これによりジャイロ型発電機が入力に対してフィードバック制御を行わなくても安定な系であることが示された。

(3)発電機の試作機を用いて安定回転条件を測定した。その結果、機械的損失を適切に仮定すれば理論値と一致することが分かった。

(4)今回の実験による最大平均発電量は  $0.17W$  であった。またコイル抵抗と機械損失がない理想状態では、発電量は入力振幅、周波数の 3 乗、ロータ寸法の 5 乗に比例することを示した。

## 文献

- 1) Archie L. Mishler : U. S. Pat., 3726146, (1973).
- 2) D.W. Gulick, O.M.O' Reilly : On the Dynamics of the Dynabee, Journal of Applied Mechanics, 67, 2, (2000), 321.