

# モータ自転型ジャイロ発電機の自己増速特性

2019年3月  
47-176720 田島 雄貴  
指導教員 保坂 寛 教授

A motor-driven gyroscopic generator was developed that self-accelerates by power feedback. A method is presented to apply the power generated from the precession movement to the spindle motor. It enables not only eliminating the power source but also accelerates the spinning velocity. To achieve acceleration, however, the feedback circuit must boost the generated voltage since the counter voltage of the spindle motor also increases with its velocity. Also, there is an optimum boosting rate that depends on the spinning velocity. In this research, numerical simulations and experiments are conducted, the power acceleration by boosting is verified, and an output power of 0.1 W is obtained. Finally, the prospect of miniaturization was obtained by calculation.

Key words: Energy Harvesting, Gyroscope, Vibration, Wearable Device

## 1 緒言

今日、IoT 社会に向けて環境発電デバイスへの要求が高まっており、盛んに研究が行われている。環境発電の方式の一つには振動発電がある。他の環境発電方式に比して、使用場所の制限が少ないこと、利用可能な潜在エネルギーが多いことに利点がある。しかし、振動発電では慣性力がおもりの大きさに依存し、例えば腕時計発電機では  $10[\mu\text{W}]$  程度しか発電しなかった<sup>1)</sup>。慣性力を増大させる方法として、2000年頃からジャイロ効果を用いる発電機が開発されている。おもりを自転させることで、見かけの質量を2桁程度大きくする。ロータ重量  $200[\text{kg}]$ 、全長  $4[\text{m}]$ 、機械出力  $250[\text{W}]$  の波力発電機の試作例があるが、機械電気変換効率が低く、実用に至っていない<sup>2)</sup>。

筆者らは以前に、モータ自転型ジャイロ発電機において、直径  $100[\text{mm}]$  のロータで  $1.8[\text{W}]$  の発電を確認した<sup>3)</sup>。ただし、自転のエネルギーを外部電源から供給し、一定回転時の特性のみを考察した。

本研究では、歳差運動で発電した電力を自転に帰還する方法を提案する。これにより外部電源が不要となるだけでなく、発電エネルギーが自転を増速し、ジャイロ効果を増大し、さらに発電量が增大する正帰還系となる。自転速度は発電電圧が自転モータの逆起電圧に一致するまで増大するので、上限の自転速度を如何にして高め、かつ速くそこに達するかが発電機の出力増大を決定する。本研究では、上限速度を高めるため、帰還電圧の昇圧を提案する。さらには、昇圧比を動的に変化させることで歳差インピーダンスが制御でき、発電量が最大化できることを計算により示す。ついで、実験により昇圧比制御の妥当性を検証する。最後に、小型化した場合の性能を計算により見積もる。

## 2 ジャイロ発電機の原理

発電機の構成を Fig. 1 に示す。ロータと二重ジンバルからなる。ロータをモータで回転し、外ジンバルを揺動すると、内ジンバルに歳差トルクが加わり回転を行う。ギアで増速し、磁石を回転し、コイルに発電する。発電電力は、整流、昇圧しモータに返す。するとロータの自転速度が増大し、ジャイロ効果が増大し、歳差角速度が増大し、発電量が增大する正帰還となる。実用上は自転速度を一定に保ち、残りは外部に貯めるか利用することになるが、本研究ではすべて増速に利用し、その特性を調べる。発電電力はフライホイール電池として蓄えられる。

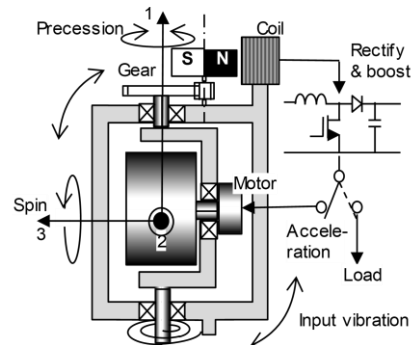


Fig. 1 Configuration of gyro generator

## 3 理論

### 3.1 理論計算

ジャイロ発電の解析には、Fig. 2 の方程式群を連立し、数値計算により解く。ただし一部の式を省いている。

(1)：入力強制振動。(2)(17)：ロータの傾斜および自転の運動方程式。(3)(4)(15)(16)：モータのギアによる角速度とトルク変換。(5)(6)(13)(14)：モータの電気機械変換。(7)(12)：発電側及び自転側回路の式。(8)(9)：整流回路の式。(10)(11)：昇圧回路の式。

記号 A：振幅、 $\omega$ ：角速度、 $\tau$ ：トルク、k：ばね定数、 $\theta$ ：角変位、n：ギア比、 $\eta$ ：ギア効率、K：トルク定数、I：電流、V：電圧、R：電気抵抗、N：昇圧比。

添え字 z：歳差軸、Y：傾斜軸、s,x：自転軸、pm：発電モータ、pg：発電ギア、sm：自転モータ、sg：自転ギア、ri：整流回路への入力、rb：昇圧回路への入力、bo：昇圧回路の出力、sbf：ロータの摩擦トルク。

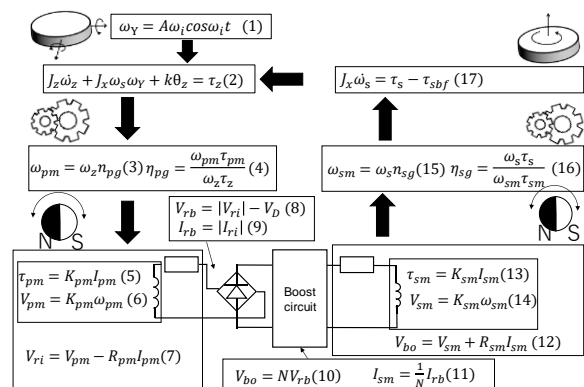


Fig. 2 Equation set of gyro generator

### 3.2 昇圧による自転速度の増大

ロータの自転速度が高いほどジャイロ効果が増大し、発電量が増大する。しかし自転速度が増大すると自転モータの逆起電圧が増大し、発電電圧より高くなると電力の帰還ができなくなる。そこで、本発電機では、発電モータの電圧を Fig. 3 のように DCDC コンバータで昇圧する。

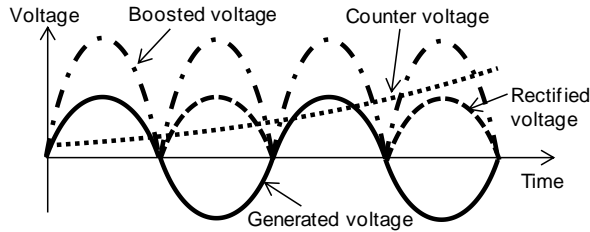


Fig. 3 Effective voltage

しかし昇圧すると発電モータの電流が増大し、電磁ダンピングが増大し、歳差振幅が低下し、発電電圧が低下する。このため昇圧比には最適値が存在する。自転速度と歳差トルクが一定とすると、自転軸トルクと歳差速度は次式である。

$$\tau_s = \frac{\eta_{sg} n_{sg} K_{sm}}{N K_{pm}} \left( \frac{\eta_{pg}}{n_{pg}} |\tau_z| - |\tau_{pmf}| \right) - \tau_{sbf} \quad (20)$$

$$|\omega_z| = \frac{n_{sg} K_{sm}}{N n_{pg} K_{pm}} \omega_s + \frac{R_{pm} + R_{sm}/N^2}{n_{pg}^2 K_{pm}^2} (\eta_{pg} |\tau_z| - n_{pg} |\tau_{pmf}|) + \frac{R_{sm}}{N^2 n_{pg} K_{pm}} V_f \quad (21)$$

$\tau_s$  は  $N$  に対して単調に減少する。一方  $N$  が減少すると  $|\omega_z|$  は増大し、これは歳差振幅が増大することを意味する。歳差振幅には装置サイズによって決まる最大許容値が存在するため、 $N$  には下限が存在する。よって、歳差振幅が許容値となるように  $N$  を設定すれば、 $\tau_s$  が最大となる。

### 4 数値計算

昇圧比および発電モータの特性を変化させ、歳差、自転、発電特性への影響を求める。発電機にはウェアラブル発電機に使用できる大きさのモータとして小型高効率なアダマンド並木精密製の SCL18-3328 および、やや大型だがより高性能なシチズン千葉精密製の NC-256402 を選定した。100 倍程度の増速ギアがついている。モータには SCL18-3328 を用いた。歳差軸にはねじりばねがついている。ジャイロ発電では歳差 0 度は不安定平衡点であるが、ばねを用いることで、0 度周辺での振動が可能となる。計算に用いたパラメータを Table 1 に示す。

Table1 Parameters of calculation

慣性率(歳差軸回り)	7.95e-4[kgm <sup>2</sup> ]
慣性率(自転軸回り)	1.73e-3[kgm <sup>2</sup> ]
歳差ばね定数	8.16[mNm/deg]
歳差許容振幅	±45[deg]
入力周波数	2.5[Hz]
入力振幅	±30[deg]
自転の初速度	800[rpm]

昇圧比一定で 1 倍, 1.2 倍, 1.4 倍, 1.6 倍, 5 倍, および昇圧比を動的制御する 6 条件で計算を行った。昇圧比固定の条件では、歳差角が許容振幅である 45[deg] に達した時点でフィードバックをやめ、自転速度を一定とし外部抵抗への出力に切り替えている。外部抵抗は、歳差振幅が 45[deg] となるように決めている。

昇圧比制御では、昇圧比の初期値を 0.8 とし、歳差の半周期ごとに振幅を求め、振幅が 45[deg] 以上なら昇圧比を 2% 増加し、以下なら 2% 減少させた。ただし、最初に 45[deg] に達するまでは過渡状態とし、昇圧比を変化させていない。

各モータにおける回転速度の変化を Fig. 4, Fig. 5 に、両モータの制御条件での昇圧比の変化を Fig. 6 に示す。両モータともに、昇圧比固定の場合、昇圧比が大きいほど立ち上がりが遅く、最大回転数が増大している。これは、昇圧比が高いほど自転モータへの入力電流が小さく、電圧が高いためである。昇圧比 5 では失速している。これは、昇圧比が高いとロータの摩擦トルクを越える自転モータ電流が得られないためである。これらは、自転速度に応じて最適な昇圧比が存在することを意味する。この結果、昇圧比は自転増速が最大となる昇圧比に自動的に設定され、固定昇圧比における最大傾斜を連ねた傾斜をもっている。ただし半周期の間は昇圧比が一定のため、最短時間での立ち上がりではない。

いずれの昇圧比でも自転速度は約 2 倍異なる。発電モータの性能を表す電磁ダンピングが、一桁以上異なるためである。

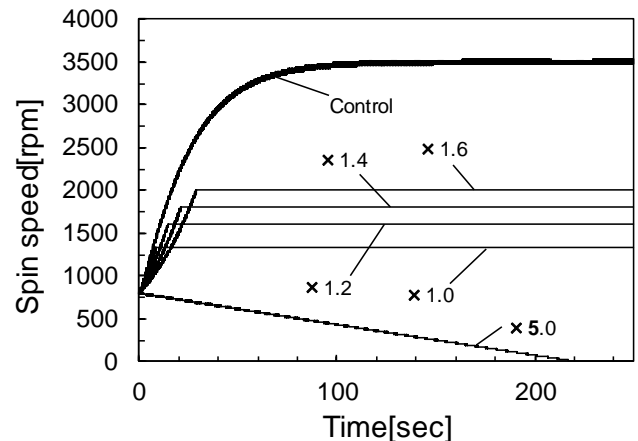


Fig. 4 Calculation result of spin speed(SCL18-3328)

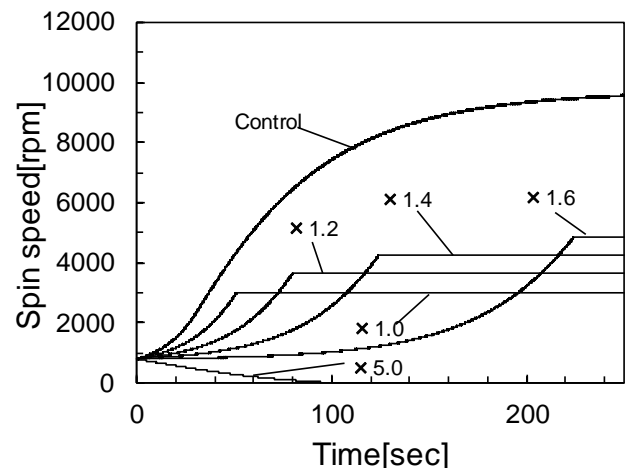


Fig. 5 Calculation result of spin speed(NC-256402)

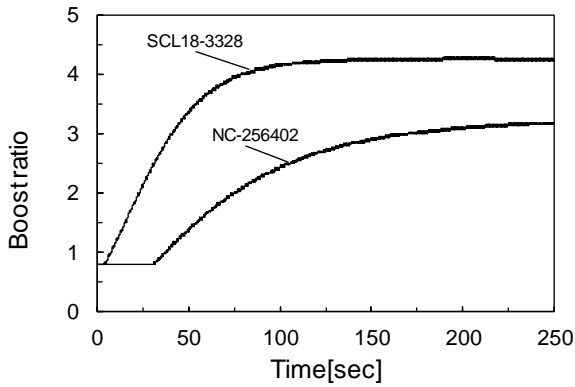


Fig. 6 Calculation result of boost ratio

5 実験検証

実験機を Fig.7 に示す。ロータはアルミ製、直径 100[mm]、厚さ 30[mm]で、水平な軸回りに回転する。ロータは、二重ジンバルに搭載されている。入力振動は水平軸回りに、手で加える。ジャイロ効果による歳差回転は鉛直軸回りの回転であり、発電用モータによって電力に変換される。入力と歳差の角度はエンコーダで、自転速度はフォトフレクタで測定される。発電モータにはアダマント並木精密製の CMS16-3317 を、自転モータには SCL18-3328 を用いる。発電側は歯車で 22 倍に増速し、自転側は 3.6 倍に減速している。すなわち実質のギア比は  $22/3.6=6.1$  倍である。

ロータに初速度 300[rpm]を与え、その後、入力軸を手動で加振した。周波数は 2.5[Hz]である。入力振幅は最初 8[deg]であり、歳差振幅が装置の限界である 45[deg]を超えないよう徐々に小さくした。これは発電モータのギア比が小さく、電磁ダンピングが小さいため、傾斜振幅の上限に達するためである。実験では、歳差が 45[deg]を超えないように手で傾斜振幅を調整したが、計算では歳差が 45[deg]を超えるたびに 0.08[deg]ずつ減じた。

昇圧比一定で 1 倍、1.2 倍、1.4 倍、1.6 倍、5 倍の 5 条件、および昇圧比制御条件で実験を行った。昇圧比の制御方法は、一周ごとに、歳差振幅が 45[deg]を超えていれば 5%昇圧比を増加し、そうでなければ 5%減少する。ただし、実験で用いた昇圧回路では昇圧比を 1 より低くできないため、計算でもそのように設定した。

自転速度の変化を Fig.8 に、昇圧比と運動エネルギーの変化を Fig.9 に示す。実験結果と計算結果はよく一致している。昇圧制御条件で、20 秒付近から回転速度、昇圧比ともに計算値より実験値が少し低くなっている。これは、振動を手で行っているためであり、入力振幅が少し足りず、昇圧比の上昇が遅くなったために回転速度の増加も少し遅くなっている。正確に 8[deg]の入力が維持できれば計算と一致すると考えられる。運動エネルギーの増分を発電量とすれば、グラフの傾きから最大 0.1[W]発電していることがわかる。

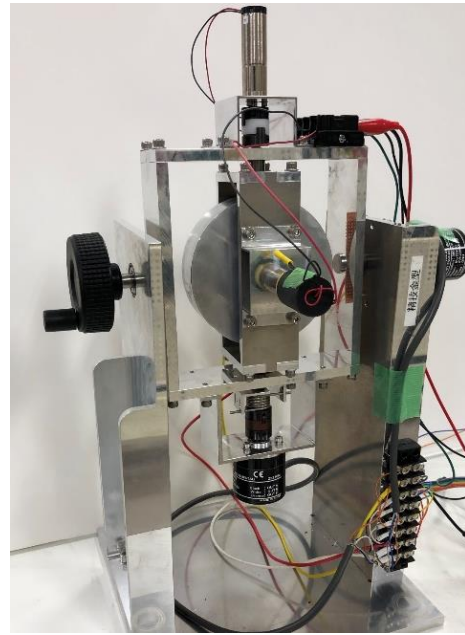


Fig. 7 Experimental unit of gyro generator

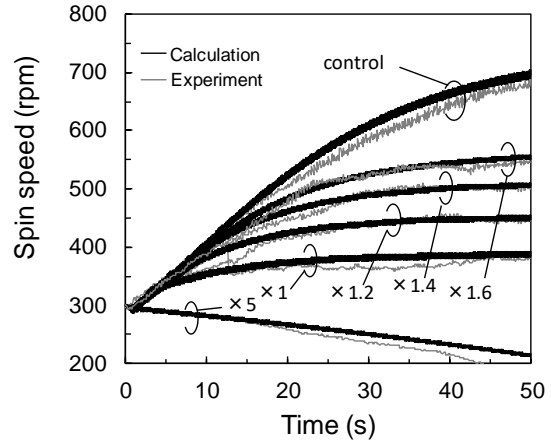


Fig. 8 Experimental result of spin speed

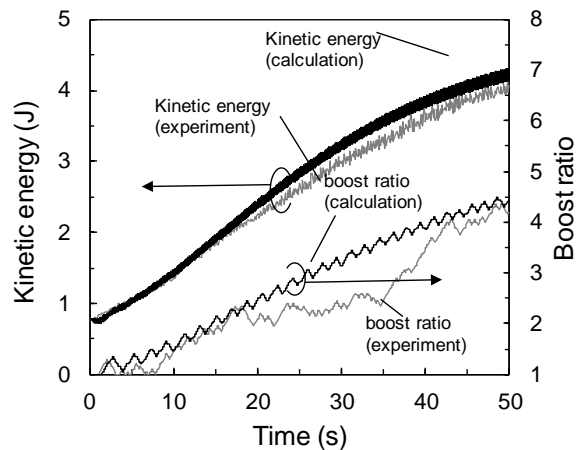


Fig. 9 Change of kinetic energy and boost ratio

## 6 小型化の検討

ウェアラブルサイズの発電機の性能を計算により求める。量産部品の使用を可能とするため、2.5 インチおよび3.5 インチの内蔵 HDD と同等の装置サイズ、回転数とする。試作モデルを Fig.10 に示す。これは共同研究企業において、寸法検討用に市販の 2.5 インチ HDD を改造して製作された発電機である。軸受の強度が低く、また、帰還回路がないため検討品そのものではないが、ロータと発電モータは 2.5 インチ型と同等であり、全体寸法はこれと同等となる見込みである。

2.5 インチ型と 3.5 インチ型 2 通りについて、シミュレーションにより性能を計算する。自転モータにはマクソン製 EC 45 flat を用いるとし、ロータ材質はタングステン合金(比重 18.5[ $\text{g}/\text{cm}^3$ ])とする。初期昇圧比はどちらも 1 とする。歳差が上限値に達するまでは過渡状態とする。制御幅は 0.05 である。入力是一片側振幅 45[deg]、周波数 2[Hz] である。ロータ初速度は 2000[rpm] である。

その他のパラメータは、Table 2 のように決める。

Table 2 Parameters of small model calculation

	2.5 インチ	3.5 インチ
歳差可能振幅	片側 12[deg]	片側 13[deg]
自転慣性能率	0.35[ $\text{gm}^2$ ]	0.56[ $\text{gm}^2$ ]
歳差慣性能率	0.18[ $\text{gm}^2$ ]	0.28[ $\text{gm}^2$ ]
発電モータ	CMS16-3317	NC-256402
トルク定数	19.7[mNm/A]	31.9[mNm/A]
内部抵抗	16[ $\Omega$ ]	3.75[ $\Omega$ ]
ギア倍率	200	88
ギア効率	0.6	0.6

計算結果を以下に示す。Fig.11, Fig.12 はそれぞれ回転速度、発電量のグラフである。2.5 インチでは、最終的な自転速度は 4000[rpm]、平均発電量は 0.8[W] となった。これは GPS 等のセンサに加え、LPWA 等の遠距離無線も駆動できる大きさである。3.5 インチでは、最終的な自転速度は 6500[rpm]、平均発電量は 2[W] となった。これは空調服用などの小型モータや照明用 LED を駆動できる大きさである。

## 7 結言

モータ自転型ジャイロ発電機において、昇圧比制御によって歳差軸のインピーダンスを制御し、入力振動のエネルギーを最大限利用することが可能となった。この発電機およびインピーダンス制御について、数値解析および実験を行った。これらの結果はよく一致した。小型化した場合の特性を計算によって見積もり、ウェアラブルサイズの発電機を開発できる見込みを得た。

### 文献

- 1) 小池 信宏: “KINETIC の技術動向と展望”, 日本時計学会誌, Vol.53, No.200, pp. 100-p.113, 2009.
- 2) G.Bracco, et.al.: “A gyroscopic mechanism for wave power exploitation, Mechanism and Machine Theory”, Vol.46, No.10, pp.1411-1424, 2011
- 3) 大西 吉徳, 田島 雄貴, 保坂 寛, 山下 明: “モータ自転型ジャイロ発電機の研究— 一定回転時の発電特性 —”, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 10, pp. 876-880, 2018.



Fig. 10 Small model of gyro generator

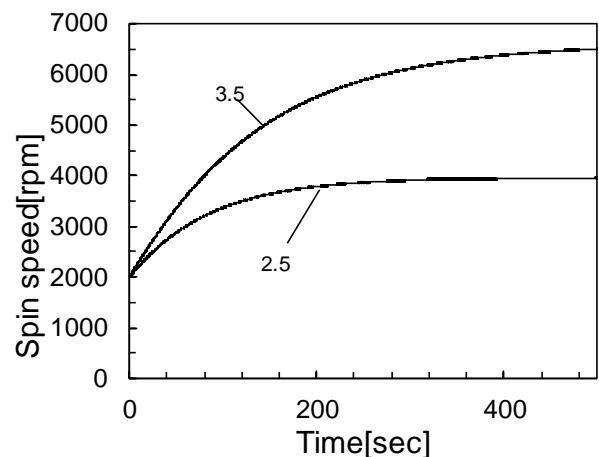


Fig. 11 Spin speed of small model

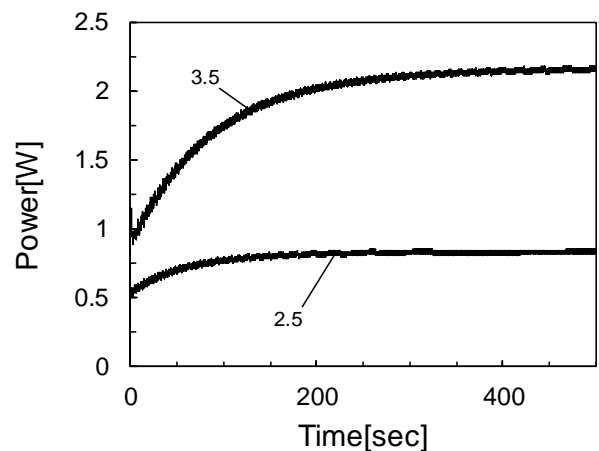


Fig. 12 Power of small model