

ジャイロ発電機の自転正帰還制御

47136726 山本 花菜
指導教員 保坂 寛 教授

To improve efficiency of gyroscope generator using random vibrations, an experimental setup is developed that enables to positive feedback generated electricity to spinning motor. As a power generation part, an oil damper and a power supply are used instead of electromagnetic inductor to know ideal power generation by rotation. Moreover, for a new power generation part, the experimental model furnished with a hub dynamo was created as the model and basic experiment, and sufficient production of electricity was checked. By improving rotor to make its mechanical loss smaller, rotation speed was increased by electric power feed back.

Key words: Gyro, Energy harvesting, Power generator, Feedback

1 はじめに

近年、スマートフォンなど携帯電子機器が高性能化し、それに伴い必要な電力も増加の一途をたどっている。また、ウェアラブル機器を利用したユビキタス情報社会の実現のため、自立電源デバイスの開発が求められている。そのために注目されている技術として環境発電という分野がある。環境発電とは、光や熱など身の回りの環境からエネルギーを生産する技術だが、筆者らはその中でも、ジャイロ機構を用いた振動発電デバイスを作っている。本研究室ではまずダイナビー型発電機が製作された¹⁾。これは、出力は大きいものの入力振動と歳差運動との同期が必要であり、回転が安定しないという欠点があった。その原因として、入力振動が歳差振動と同期していないときに自転を阻害する向きのトルクが発生し、自転速度が下がってしまうという問題がある。そこで本研究室では発生トルクを一方向に整流することで常に自転速度が加速し、ランダム振動下においても発電が可能なランダム振動型ジャイロ発電機の開発に着手した²⁾。過去にいくつか試作機が作成されたが、発電効率の悪さや増速機構の摩擦損失等により、アンプなしでは自転速度は増加しなかった。本研究ではフィードバックシステム実現のため、ダンパーを使用した試作機とハブダイナモを使用した試作機による2種類の実験を提案する。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システムの原理について述べた後、新たな2つの試作機を示し、発電量のフィードバックによる自転速度増加を目指す。

2 ランダム振動型ジャイロ発電機

2.1 発電の原理

ジャイロ発電機では、高速で自転するロータの自転軸がわずかに傾いた際生じる大きな角運動量変化を利用し、発電部で磁石を回転させることで電磁誘導により発電を行っている。具体的には、自転軸についてロータをモータで回転させ、入力振動軸について装置に回転振動を加える。するとその角運動量の変化からジャイロ効果が発生し、自転軸と入力振動軸に直角な向きの軸に対して回転がおこる。これを歳差回転という (Fig. 1)。入力される振動の周波数と装置の固有振動数との関係を適切に定めてやることで、歳差振動は入力振動を大きく増幅させたものとなる。発生した歳差回転は発電部において永久磁石を回転させることで、コイルに誘導電圧を得る。ここで、歳差トルクはロータの自転速度に比例するので、自転速度を上げることで、微小な入力振動からいくらかでも大きな電力を得ら

れる。そこで、発生した電力を一方向に整流してモータへと返しロータの自転増速に用いることで更に発電量を上げるようなシステムが考えられた。これをフィードバックシステムという (Fig. 2) このシステムにより自転速度は指数的に増大し、それに伴い発電量も指数的に増大する。

2.2 実験方式の提案

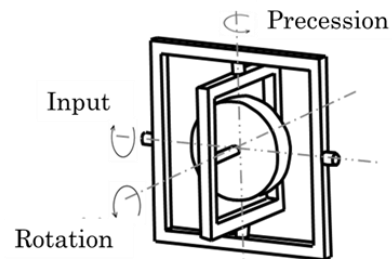


Fig. 1 Model of gyroscopic mechanism

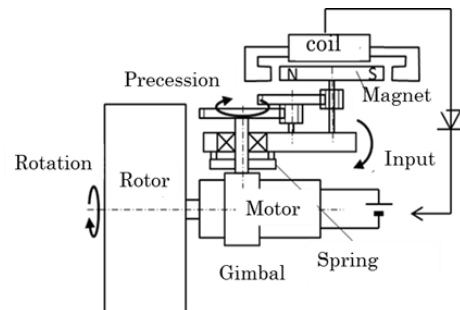


Fig. 2 Feedback system

前項で示したフィードバックシステムを実現するために試作機を用いて実験を行ったところ、発電量が小さく自転速度増大には及ばないことが確認されている。そこで、ダンパーを用いて歳差回転エネルギーとモータの消費エネルギーとを比較した後に、ハブダイナモを用いた試作機で実際にシステムが実現可能か考察する。

2.3 ダンパー式ジャイロ発電機

発電部の発電効率は100%を越さないため、フィードバックを行うには発電量に変換される前の歳差回転エネルギーがモータの消費電力を超えていなければ絶対に不可能である。そこで仮に歳差回転エネルギー全てが発電量に変換されたと仮定してフィードバック実験を行った。

Fig. 3に実験装置を示す。自転させるロータについては、フィードバックさせた際に発電効率が最大値となるような理論値から、14mmの厚さとし、それを回転させるモー

タは慣性能率の視点からなるべく歳差振動の邪魔にならないものを選んだ。入力振動軸については、定常振動やランダム振動等決められた振動を与えられるよう、また必要トルクの大きさを考え、ギアモータを使用した。自転軸、入力軸、歳差軸それぞれには光学式ロータリエンコーダを取り付けることができ、三軸の挙動を計測できるようになっている。また、装置下部の発電部についてはダンパーを取り付け、そこへ吸収されたエネルギーから歳差回転エネルギーを求め³⁾、フィードバック電力とした。

フィードバック実験を行ったところ、歳差振幅が 30 度程度の時歳差エネルギーが約 0.1W であったのに対し、最も低い増幅率で角度の上昇を確認したフィードバック電力として約 7W を必要とした。つまり約 70 倍の損失があると考えられる。先行研究から風損による損失はせいぜい 0.06W 程度であることから、この損失は主にモータの性能やロータの機会損失によるものであると考え、フィードバック実現のためにはこれらの改良が必要であると確認した。

2.4 ハブダイナモ式ジャイロ発電機

発電効率のよい発電機として、自転車に用いられるハブダイナモを採用した。これを発電部とする試作機を作成し、フィードバックによる自転速度増加を目指す。

Fig. 5 に作成した試作機を示す。装置上部のジャイロ機構部分については、前試作機と同型のロータ(Fig. 6)とした。装置下部に発電部としてハブダイナモを取り付け、ジャイロ機構部分から伝わる歳差回転により軸が回転し電圧を発生させる。

この試作機について、ロータを 2000rpm で自転させ、周波数 1Hz、振幅 10 度の入力振動を加えたところ、ハブダイナモから最大 12V 程度の出力電圧を確認した。しかしこれは開放端の場合であり、フィードバックのためモータに接続するとそこで流れる電流のためコギングトルクが発生し歳差振動を大きく阻害することとなり、結果として出力が大きく減少した。またこの時モータの消費電力はロータの定常回転のために 2A 程度がかかっており、ダイナモからの出力では全く足りないという結果となった。そこで、試作機を改良することとした。

まず、消費の大きい DC モータから、より低消費なコアレスモータへの取替えを行った。それに伴い、ロータの質量を小さくするため、厚さを従来の半分である 7mm とし、その分減少した慣性能率を補うため直径は従来よりも 10mm 大きい 74mm とした(Fig. 7)。また、装置上部の歳差軸に対して磁気ばねを取り付けることにより、歳差軸固有振動数と入力周波数が近いときには共振による歳差振動の更なる増幅を見込んだ。

改良した試作機について動作確認を行ったところ、ロータの回転数が 500rpm 付近より上昇しないという結果となった。これはロータの回転を阻害する抵抗トルクがどこかに発生しているということであるが、筆者はそれがベアリングが主な原因であると考えた。まず一つ目に、前ロータ(Fig. 6)と比較して現ロータ(Fig. 7)はロータ厚みが薄くなった分、ロータ軸を支えるベアリング間距離が短くなっている。そのため組み立て誤差による両ベアリングのずれ

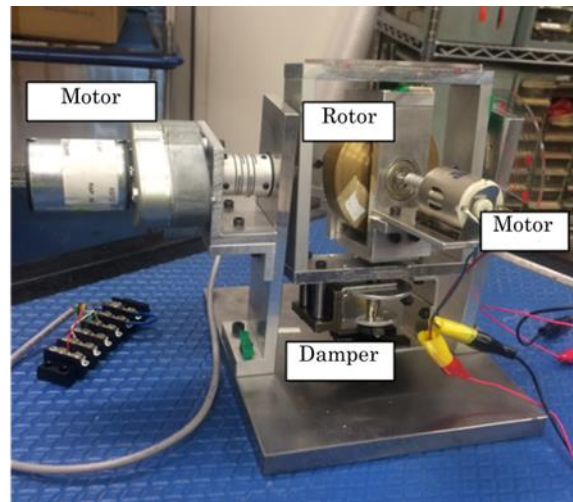


Fig. 3 Damper type experiment

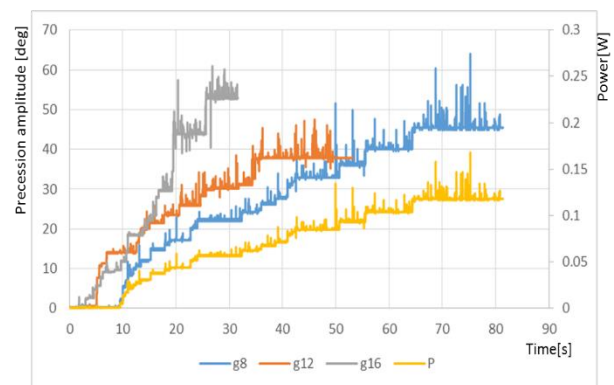


Fig. 4 Change of precessional amplitude and power

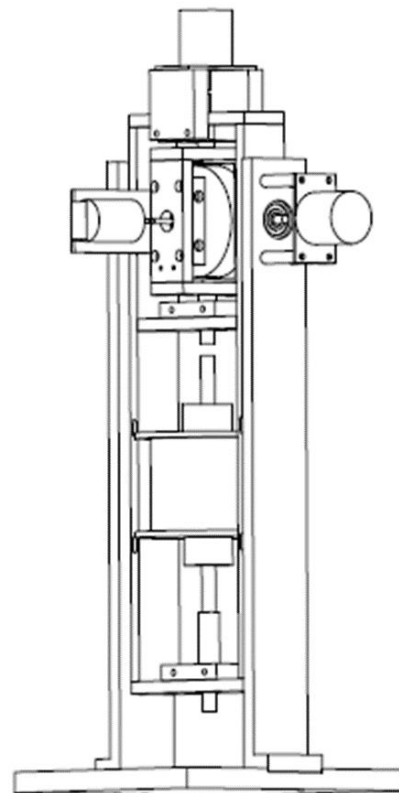


Fig. 5 Hub dynamo type experiment No.1

やねじれによる機械的損失の影響が大きくなったと考えられる。2つ目に、ベアリングの大きさも問題であると考えた。現ロータでは内径9mmのベアリングを使用しているが、これはロータが真鍮であった頃とサイズを変更していないためであり、ステンレス製でより軽くなった現ロータのラジアル荷重に対してはより小さなベアリングが最適といえる。3つ目に、ベアリングとロータ軸とのはめあいの問題である。今回の試作機では組み立ての簡単のため、ベアリング板にベアリングを圧入し、軸をすきまばめで挿入している。しかしベアリング内輪が回転する機構においてこのようなはめあいをすると軸とベアリング内輪間に発生した隙間により摩擦が生じることで大きな機械的損失となる。これをクリープ現象というが、このような現象を防ぐためには軸とベアリングを圧入し、ベアリング板へすきまばめで挿入する必要がある。

これらの問題を解決するため、再度ロータ部分の改良を行った。作成したロータ部が Fig. 8 である。このロータをコアレスモータにより回転させたところ、2000rpm 以上の速度で自転し、これは装置に取り付けたときに十分に歳差振動を発生させる回転数である。そこでこのロータを利用し再度フィードバック実験を行うこととした。また、作成した装置の全体図を Fig. 9 に示す。

実験の方針として、実際に発電部から発生した電力によりロータの自転速度が増大するかを確認する。具体的には歳差回転によりハブダイナモから発生した電力をダイオードブリッジにより整流しロータを回すモータへと返し、このときのロータの回転速度を計測する。実際には試作機内で動作しているロータへと電力を返すことが望ましいが歳差回転により激しく挙動しているため実験が難しい。そこで今回は簡単のため試作機には Fig. 6 のロータを搭載し、試作機外部に固定したロータ部(Fig. 8)へ電力を返してその自転数と試作機内のロータ自転数を比較することとした。なお、発生する歳差トルクはロータの慣性率と自転数を変数としており、Fig. 6~Fig. 8 においてロータ部の慣性率ほぼ同値である。そのため自転数のみで比較することができる。実験の図を Fig. 10 に示す。

まず、試作機内ロータの自転数 2000rpm に対し、周波数 2Hz、振幅 30 度の入力振動を加えた。この時、外部に置いたロータは停止状態から自転を始めなかった。その原因として、コアレスモータのインピーダンスの小ささが挙げられる。上でも述べたがハブダイナモは端子間に抵抗を繋ぐことで大きなコギングトルクが発生し、歳差回転を阻害する。この阻害トルクの大きさは流れる電流によるため、端子間のインピーダンスが高いほど阻害トルクは小さくなる。また、モータのインピーダンスは回転数が増大するにつれ高くなる。これらから、外部に置いたロータに初速度を与えておくことでより大きな歳差回転が起こると考えた。そこで次に、外部ロータを初速度 1000rpm で回転させておき、そこからダイナモの出力に切り替えるという実験を行った。その結果、歳差回転角度は大きくなったが外部ロータは減速してしまった。しかしその自転速度の減少はただ電源を外したときよりもかなり緩やかであった。これは、外部ロータには自転を加速させるトルクが加わっているものの、機械的損失など回転を阻害するトルクの方

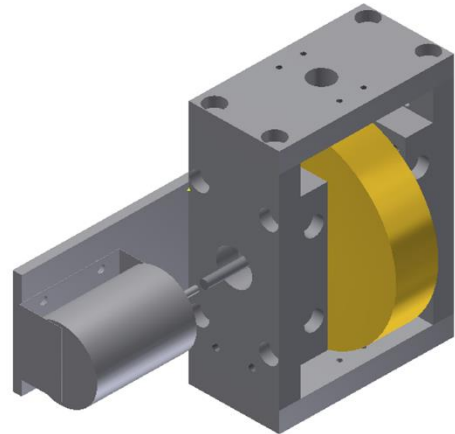


Fig. 6 Rotor (14mm, 64mm)

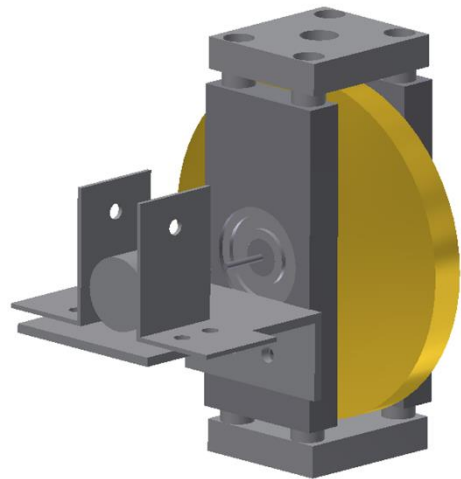


Fig. 7 Rotor (7mm, 74mm)

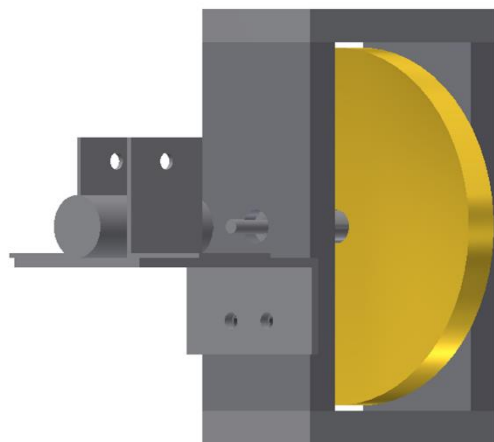


Fig. 8 Rotor (7mm, 74mm)

がわずかに大きいためである。つまり、これまでの改良によりかなり損失は抑えられているものの、更に精度を上げる必要がある。

そこで次は、同研究室中野氏が使用しているロータを用いて実験を行うこととした。そのロータ部を Fig. 11 に示す。ロータのサイズだが厚さ 5mm、直径 80mm となっており、慣性率はやはりこれまでのロータとほぼ同値であ

る。そのためフィードバック実験に用いても問題はない。Fig. 8のロータとの違いとして、使用されているコアレスモータがカメラ等に用いられるより高性能なモータであること、軸を固定するベアリングが更に小型の内径3mmのものであること、更にロータ軸とモータ軸が小型ギアにより精密に接続されており、これらのために回転阻害トルクが非常に小さいロータとなっている。

このロータを用いて、同じく試作機内ロータの自転数2000rpmに対し、周波数2Hz、振幅30度の入力振動を加えるという実験を行ったところ、ロータは僅かに回転を始めた。そこで先程と同様にモータのインピーダンスを高めるために外部ロータに初速度を与えた。その結果、1570rpmの自転速度で切り替えを行ったとき、ハブダイナモの出力によって外部ロータの自転速度は増大し、試作機内のロータと同程度の回転速度となった。このことからハブダイナモからの出力がモータの消費電力を超えたことが実験により確認され、フィードバックが可能であることが証明された。また初期自転速度を与えるモータの消費電力は0.06W程度であり、ダンパーフィードバック時の歳差エネルギー0.1Wと同程度であることから、問題であった約70倍の損失を改良したことによりフィードバックが実現したことが分かる。

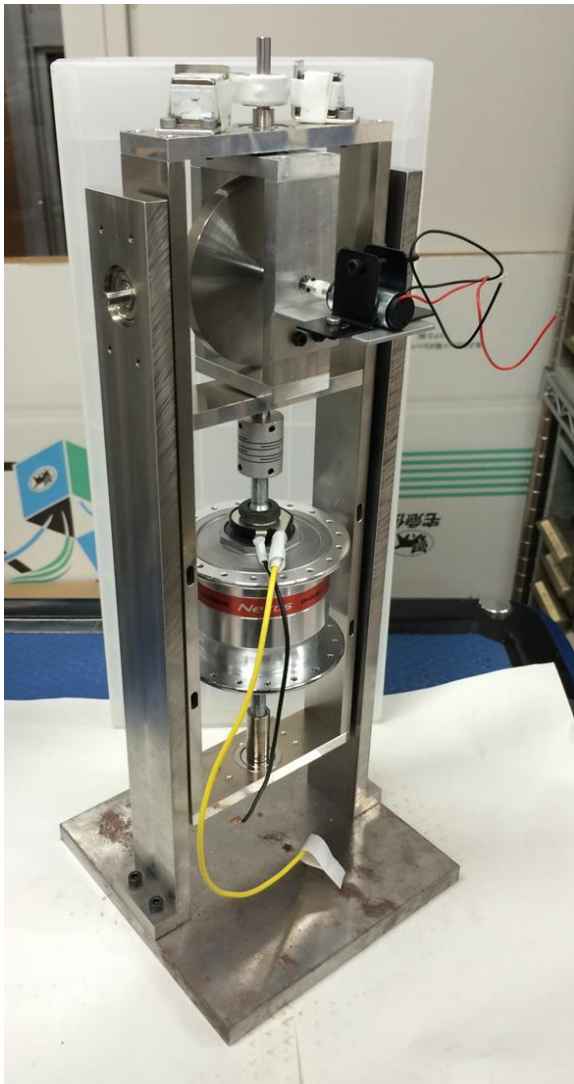


Fig. 9 Hub dynamo type experiment No.2

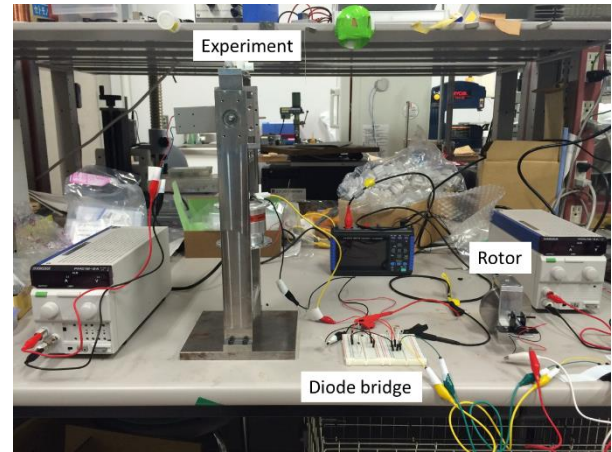


Fig. 10 Feedback experiment

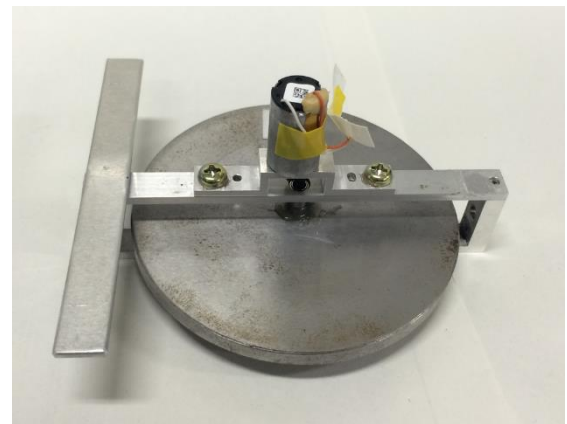


Fig. 11 Nakano's rotor

3 結論

物流における振動のエネルギーから発電することを目的として、ランダム振動型ジャイロ発電機のポジティブフィードバックシステムの研究を行った。

まず基礎実験としてダンパーを利用した試作機を作成し、歳差回転エネルギーとモータの消費電力に約70倍の差があることを確認した。

次にハブダイナモ型試作機の作成を行った。ロータの機械損失とモータの消費電力の減少を目的とした改良を重ねることにより、フィードバック電力によってロータの自転速度が増大することを確認した。これによりフィードバックシステムを備えたランダム形振動発電機実現の見通しを得た。

文献

- 1) 石井智弘, 後藤裕治, 小川達也, 保坂寛, ジャイロ型振動発電の研究, 精密工学会誌 vol.74, pp.761-768, (2008)
- 2) 良本真基他, ランダム振動型ジャイロ発電機の研究, 2012年度精密工学会春季大会講演論文集 pp.661-662.
- 3) 荒井洸, 正帰還ロータジャイロ発電機の動特性解析, 平成25年度卒業論文概要集, pp11-12