

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360118

研究課題名（和文）同期回転型振動発電機の研究

研究課題名（英文）Study on Synchronous Vibration Generator

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：人の動きのような低周波振動から高速なロータ回転を生成し、電力に変換する同期型発電機を開発した。本発電機は Mishler らの考案した3次元回転機構に電磁変換機構を組み込んだもので、ロータに揺動振動を加え、ジャイロ効果と摩擦により自転を増速する。3Hz の入力により0.9W の出力を得、携帯電話に充電した。またロータ運動の解析により、最大発電量、安定性、過渡特性を明らかにし、実験によりその妥当性を検証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2007 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2008 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：情報機器工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：情報機器，発電機，振動，ジャイロ，オイラー方程式

## 1. 研究開始当初の背景

ユビキタス情報システムの課題はエネルギーの確保であり、その解決策として、振動を用いる発電機が種々考案されている。しかし従来の発電機は、人体運動のような低周波振動では効率が悪く、1mW 程度が出力の限界であった。一方 Mishler らは、回転体の自転と歳差運動を組合せ、入力振動の数十倍の周波数の回転運動を発生する3次元回転機構を考案した。本機構を用いれば高効率な発電機を実現できる可能性があるが、運動が複雑なため、発電機としての最適な設計条件や安定回転条件などは不明であった。

## 2. 研究の目的

前記の3次元回転機構を応用して、高効率な発電機を実現する。

- (1) コイルや磁石配置など、発電機の基本構成を明らかにする。
- (2) ロータ運動を解析し、最適設計条件を明らかにする。
- (3) 携帯電話などの情報機器を駆動する。

## 3. 研究の方法

- (1) 発電機の基本構成を考案し、試作機により性能を評価する。
- (2) ロータの運動方程式および近似解を求め安定回転条件と最大発電量を明らかにする。

- (3) 数値計算および実験により近似解の妥当性を明らかにする。
- (4) 計算結果に基づき、最適設計の指針を得る。

#### 4. 研究成果

##### (1) 発電機の構成と試作機の特徴

構成を図1に示す。y軸回りに $\omega$ で自転するロータがあり、その軸は上下2つのトラックにより支えられている。トラックにx軸回りの回転 $\phi$ を加えると、角運動量の法則によりロータにz軸回りのトルクが発生し、角速度 $\omega$ で歳差運動を始める。このとき、トラックからロータ軸に働く摩擦力が自転を増加させる方向のため、ロータの回転数が増大し、数Hzの入力振動で、数千rpmの自転が生じる。この結果、永久磁石とコイルの相対運動により誘導電圧が発生する。

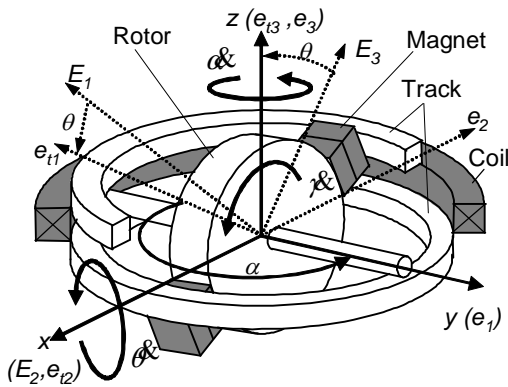


Fig.1 Structure of synchronous vibration generator

トラック半径 32mm, ロータの軸まわり慣性能率  $0.1\text{gm}^2$ , コイル巻数 1000 の発電機を製作した。3Hz, 30度の入力振動におけるコイル端開放時の電圧を図2に示す。ロータは 6000rpm で回転し、67.2Vpp を発生した。また、コイルを 500 の抵抗で終端した場合、出力 0.9W であった。さらに整流回路を接続して 6V の直流出力を得、携帯電話の充電が可能なることを確認した。なお次節に示す理論上の最大電力は 6.05W であり、装置の改良により発電量が増大する可能性がある。

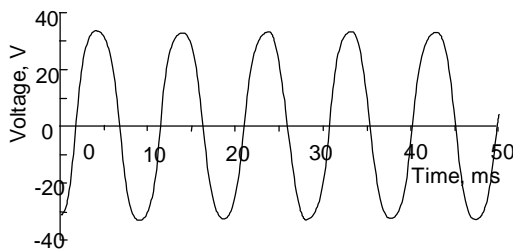


Fig.2 Generated voltage in open circuit

##### (2) ロータ運動の解析

###### 運動方程式

図1で、空間に固定された直角座標系を  $E$  座標系とし、トラックは初期状態で  $E_1, E_2$  面内にあり、 $E_2$  軸回りに  $\theta = \theta_0 \sin(\pi t)$  で揺動回転するものとする。トラックに固定した座標系を  $e_i$  座標系、ロータの歳差運動とともに回転する座標系を  $e$  座標系とし、歳差回転角を  $\alpha$ , 自転角を  $\gamma$  とする。ロータの角速度ベクトル  $\omega_r$  は、トラックの回転  $\omega_2$ , ロータの歳差運動  $\omega_{i3}$ , 自転  $\omega_1$  の和であり、 $E_2$  および  $E_{i3}$  を  $e$  座標系で表すことにより、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \omega_r &= \omega_2 + \omega_{i3} + \omega_1 \\ &= (\omega + \theta \sin \alpha) e_1 + (\theta \cos \alpha) e_2 + \omega_3 \end{aligned} \quad (1)$$

トラックとロータ軸の半径比を  $\xi$  とし、トラック・ロータ軸間にすべりがなければ、次式が成り立つ。

$$\omega = \xi \omega_2 \quad (2)$$

式(1)(2)を用い、またロータに自転速度に比例する粘性トルク  $\sigma \omega$  が働くものとして、 $e$  座標系のオイラー方程式を立てる。さらに、定常状態では、歳差運動  $\alpha$  は入力振動  $\theta$  に同期し、両者の位相差はほぼ一定となることに着目して、 $\alpha$  と入力位相  $\pi t$  の位相差を  $\phi$  (式(3)) とおくと、 $\phi$  に関する方程式(4)を得る。

$$\phi = \alpha - \pi t \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &(\xi^2 I_1 + I_2) + \xi I_1 \theta \sin(\phi + \pi) + \xi^2 \sigma (\phi + \pi) \\ &+ (I_2 - I_1) \theta \sin(\phi + \pi) \cos(\phi + \pi) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)がロータの運動方程式である。 $\phi$  が求まれば、式(3)(2)により  $\alpha, \gamma$  が求まる。なお  $I_1$  はロータの軸回りの慣性能率、 $I_2$  は半径回りの慣性能率である。

###### 定常特性の近似解

式(4)で  $\phi$  を定数、 $\xi \gg 1$  とおき、入力振動 1 周期について(4)を積分平均すると、近似解  $\phi_0$  が次式の形に求まる。

$$\cos \phi_0 = 2\xi \sigma / I_1 \tau \theta_0 \quad (5)$$

$\cos \phi_0 = 1$  より、定常解が存在する必要条件として次式が得られる。

$$2\xi \sigma / I_1 \tau \theta_0 \leq 1 \quad (6)$$

上式で、 $\sigma$  が小さいほど他のパラメータの設定範囲が広がるから、 $\sigma$  が小さいほど定常状態が存在し易くなる。

次に発電量の上限を求める．機械的損失もコイルの内部抵抗もない理想発電機では，発電量は粘性減衰のなす仕事に等しく次式となる．

$$P = \sigma \dot{\phi} \quad (7)$$

すなわち発電量の観点からは  $\sigma$  は大きいほど良く，安定性と背反する．両者を成立させるためには，安定な範囲で  $\sigma$  を最大化すればよく，これは式(6)の等号成立条件で与えられる．

$$\sigma = I_1 \tau \theta_0 / 2\xi \quad (8)$$

式(8)の  $\sigma$  を用い，また定常状態では  $\dot{\phi} = \zeta \tau$  であることを用いると，最大発電量は次式となる．

$$P = I_1 \theta_0 \xi \tau^3 / 2 \quad (9)$$

すなわち発電量は，入力振幅  $\theta_0$  と周波数  $\tau$  の3乗に比例し， $I_1$  及び  $\xi$  に比例する．

#### 過渡特性の近似解

定常解近傍で微小な振動  $\varepsilon$  が生じているものとする．

$$\alpha = \alpha_0 + \varepsilon = \pi + \phi_0 + \varepsilon \quad (10)$$

上式をロータの運動方程式(4)に代入し， $\varepsilon$  について線形化すると次式を得る．

$$(\xi^2 I_1 + I_2) \ddot{\varepsilon} + \xi^2 \sigma \dot{\varepsilon} + \left[ \xi I_1 \theta_0 \cos \alpha_0 + (I_2 - I_1) \theta_0^2 (\cos^2 \alpha_0 - \sin^2 \alpha_0) \right] \varepsilon = 0 \quad (11)$$

$\varepsilon$  の変動周期が入力振動の周期より十分長いと仮定し，式(11)を入力振動の1周期について積分平均し， $\varepsilon$ ， $\dot{\varepsilon}$ ， $\ddot{\varepsilon}$  はその間は一一定とみなす．すると次式を得る．

$$(\xi^2 I_1 + I_2) \ddot{\varepsilon} + \xi^2 \sigma \dot{\varepsilon} + \left[ \frac{1}{2} \xi I_1 \theta_0 \tau^2 \sin \phi_0 + \frac{1}{4} (I_2 - I_1) \theta_0^2 \tau^2 \cos 2\phi_0 \right] \varepsilon = 0 \quad (12)$$

さらに  $\sigma$  が小さいと仮定して，式(5)より  $\phi_0 = \pi/2$  とし，また  $\xi \gg 1$  を用いると，次式が得られる．

$$I_1 \xi \ddot{\varepsilon} + \sigma \xi \dot{\varepsilon} + \frac{1}{2} I_1 \theta_0 \tau^2 \varepsilon = 0 \quad (13)$$

上式から， $\varepsilon$  は減衰振動することが分る．固有角振動数  $\omega$  と減衰比  $\zeta$  は次式となる．

$$\omega = \tau \sqrt{\theta_0 / 2\xi} \quad (14)$$

$$\zeta = \frac{\sigma}{I_1 \tau} \sqrt{\frac{\xi}{2\theta_0}} \quad (15)$$

### (3) 数値計算結果とインピーダンス制御

#### 過渡特性の数値計算結果

機構のパラメータを次節の実験装置の値 ( $I_1=63 \text{ mgm}^2$ ,  $I_2=33 \text{ mgm}^2$ ,  $\xi=26$ ) とし， $\sigma$  は試作機で負荷抵抗  $\infty$  (機械的損失のみ) の値 ( $\sigma=5.0 \text{ mgm}^2/\text{s}$ )，入力振動は  $\theta_0=\pi/6 \text{ rad}$ ,  $\tau=4\pi \text{ rad/s}$  する．初期条件を定常解近傍の  $\phi=\pi/2$ ,  $\dot{\phi}=0$  とした場合の  $\phi$  の変化を図3に示す． $\phi$  は減衰振動し，近似計算と定性的に一致する．図4に速度  $\dot{\phi}$  の計算結果を示す． $\dot{\phi}$  と同様に減衰振動するが，さらに細かい振動が乗っている．周期は  $0.25\text{s}$  で入力振動の2倍に等しく，振幅はほぼ一定である．この振動は，トラックの角速度が周期的に変化し，ジャイロトルクが1周に2回ピークをもつために発生すると考えられる．

初期条件を種々変化させ，回転の安定性を計算した． $\phi$  の初期値を0とし， $\dot{\phi}$  の初期値を変化させ， $\phi$ - $\dot{\phi}$ 位相平面に表したものを図5に示す． $\dot{\phi}$  の初期値が  $0 < \dot{\phi} < 0.38\pi \text{ rad/s}$ ,  $1.26\pi < \dot{\phi} < 1.3\pi$ ,  $1.84\pi < \dot{\phi} < 1.86\pi$  のときに，定常回転に達することができた．曲線の意味を説明すると，例えば  $\dot{\phi}=0.3\pi \text{ rad/s}$  は安定な場合であり，右回りに渦を描き  $\phi=0.3\pi$  に収束している．渦の1周が図3に示した振動の1周期に相当する．位相曲線に現れる細かい振動は，図4で示した  $4\text{Hz}$  の振動に対応する．

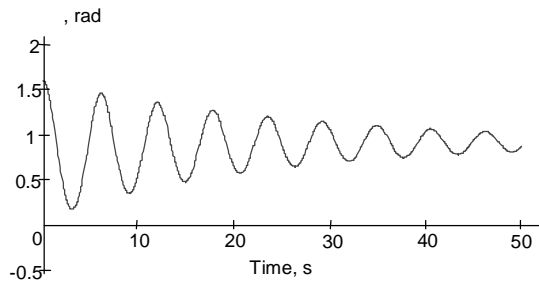


Fig.3 Numerical result of transient response  $\phi$

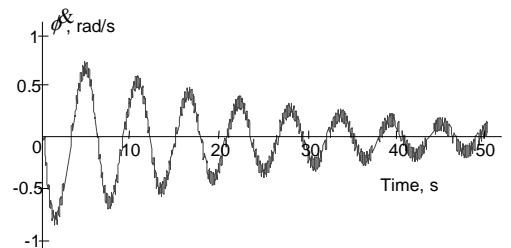


Fig.4 Numerical result of transient response  $\dot{\phi}$

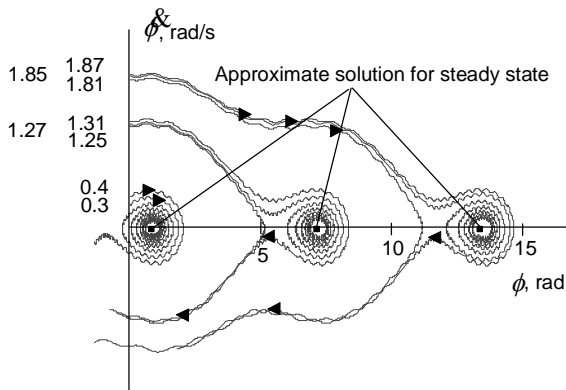


Fig.5 Phase curves for various initial conditions

図5で、 $\dot{\phi}=0.4\pi$  rad/s は不安定な場合であり、始めは $\dot{\phi}=0.3\pi$  rad/s と同様の軌跡を描くが、第3象限で左下に方向を変え、 $\phi$  は単調減少する。また $\dot{\phi}=1.27\pi, 1.85\pi$  rad/s では $\phi=2.3\pi, 4.3\pi$  に収束している。これらは、初速度が大きいため、定常回転よりも1周または2周早く回転し、歳差速度が入力速度と同程度となったところで、 $\dot{\phi}=0.3\pi$  rad/s の場合と同じ位置に収束したものである。以上により、初期条件によって、回転が安定な場合、安定で収束値が  $2n\pi$  ( $n$  は自然数) 進む場合、不安定な場合があることが分かる。なお図中の■は式(5)の定常解を示す。これらは渦の中心にあり、近似解の妥当性を示している。

同様に、粘性減衰  $\sigma$ 、慣性能率  $I_1, I_2$  および半径比  $\xi$  と安定性の関係を調べた。その結果、 $\sigma$  および  $\xi$  が小さいほど、 $I_1$  が大きいほど安定性が向上し、 $I_2$  は影響しないことが分かった。これらは定常状態の存在条件式(6)と一致する。

以上から、安定性と発電量をともに増大するためには、 $I_1$  はなるべく大きく設定することが望ましく、ロータ形状は球形が最適となる。 $\xi$  については安定性と出力が相反し、30程度が最適となる。粘性減衰  $\sigma$  は式(3)の安定限界値が最適である。

#### インピーダンス制御の数値計算

前項で述べたように、 $\sigma$  が大きいほど発電量が増大するが、安定性が低下する。一方  $\sigma$  は、コイルの巻数や、外部回路の入力インピーダンスにより変化させることが出来る。従って、入力に応じて  $\sigma$  を変化させれば、発電効率を増大させたり、失速した系を安定化させることが出来る。最も簡単な例として、 $0.5\Omega$  の抵抗を発電機の負荷とし ( $\sigma=6.0$   $\text{mgm}^2/\text{s}$ )、回転が不安定と判断した時点でコイル端を開放し ( $\sigma=5.0$   $\text{mgm}^2/\text{s}$ )、安定化させるシミュレーションを行った。入力振動は  $\theta_0=\pi/6$  rad,  $\tau=4\pi$  rad/s とした。図6に結果

を示す。ここでは、丸の点( $t=2\text{s}$ )で不安定化したと判断し、 $\sigma$  を低下させた。その結果、第3象限に入り不安定になりかけたロータの速度  $\dot{\phi}$  が増大し、定常回転に収束した。以上から、 $\sigma$  を変化させることにより、入力変動に対して安定性が高まることが分かった。

#### (4)実験による検証

図7の実験装置を用いて、安定限界における粘性減衰  $\sigma$  を測定した。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、入力振動を一定とし、PCにより振幅を変化させるようになっている。図8に発電機の外観を示す。ロータ半径 30mm, ロータ幅 16mm,  $I_1=631\text{gm}^2$ ,  $\xi=26$ , コイル巻き数 100 である。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。

ロータを安定回転させ、徐々に振幅を下げ、安定限界における振幅から式(8)により  $\sigma$  を求めた。これを  $\sigma_1$  とする。

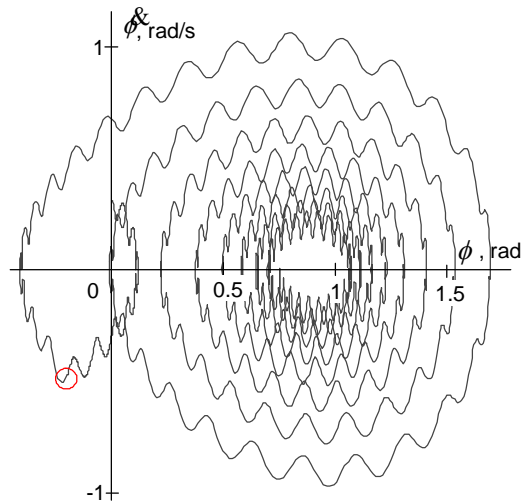


Fig.6 Stabilization by impedance control

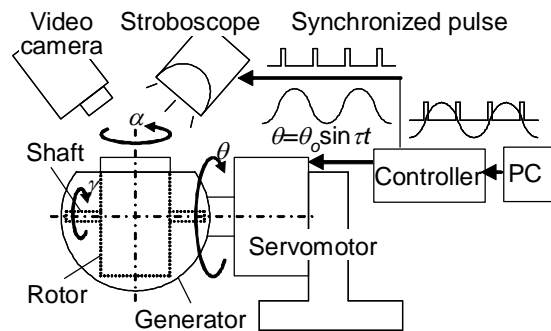


Fig.7 Experimental apparatus

一方、コイルの発生電圧を測定し、内部抵抗および負荷抵抗から電氣的損失を求め ( $\sigma_e$  とする)、これに機械的損失 ( $\sigma_m$  とする) を加えて  $\sigma$  を求めた (これを  $\sigma_2$  とする)。以上の値を図 9 に示す。 $\sigma_m$  は回路オープン時の  $\sigma_1$  により与えている。 $\sigma_1$  と  $\sigma_2$  はほぼ一致し、定常状態の安定条件式 (8) の妥当性が確認された。

次に、過渡応答の周波数と減衰比を測定した。実験装置は、図 7 において、位相差を測定できるようにしたものである。入力振動の位相 0 と (すなわちトラックが水平) の瞬間にストロボを発光させ、ビデオ画像により歳差回転角  $\alpha$  を測定する。 $\phi$  は  $\alpha$  または  $\alpha + \pi$  により与えられる。この方法では時間分解能が入力振動周期の  $1/2$  と粗いため、それより 1 桁長い周期をもつ減衰振動のみが観測される。入力振動に同期する強制振動成分はノイズとなるが、図 3 によればその変位振幅は小さく無視できる。

ロータに初速度を与え、一定周波数 3Hz、振幅  $\pi/6$  rad で入力振動を与え、回転が定常状態に達した後に周波数をステップ状に 2Hz に変化させ、その後の  $\phi$  を測定した結果を図 10 に示す。発電機のパラメータは  $\zeta=32.9$ 、 $I_1=95.2 \text{ gm}^2$ 、 $I_2=64 \text{ gm}^2$  である。 $\phi$  は減衰振動しており、周波数は 0.17Hz、減衰比は 0.020 である。同一条件での数値計算では、周波数は 0.15Hz、減衰比は 0.015、式 (14)、(15) による近似計算では、周波数は 0.18Hz、減衰比は 0.029 であった。以上を比較すると、振動の周波数については 2 割程度、減衰比については 5 割程度の誤差であり、3 種の方法による結果がほぼ一致している。以上から、ロータの運動方程式 (4)、過渡応答の近似解 (13) の妥当性が確認された。

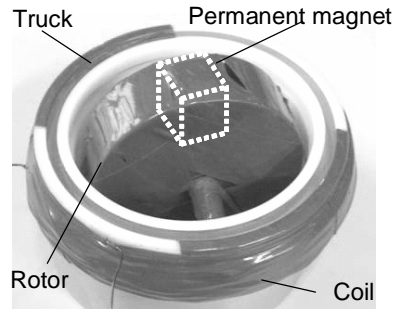


Fig.8 Prototype generator

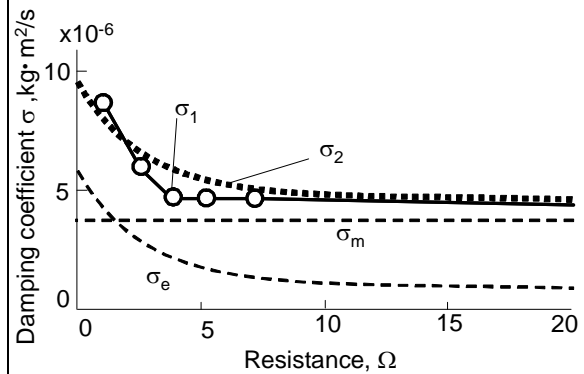


Fig.9 Experimental and calculated results of critical damping

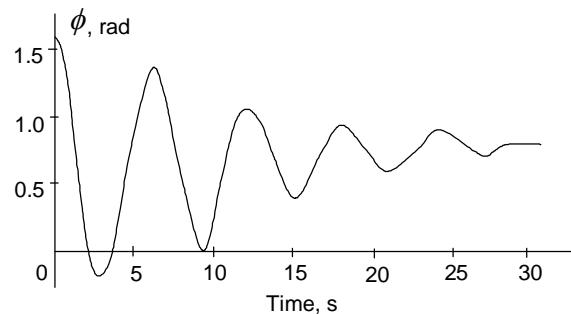


Fig.10 Experimental result of transient response

## 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4件)

- 1) 石井智裕, 後藤裕治, 小川達也, 保坂寛: ジャイロ型振動発電機の研究, 精密工学会誌, 74,7 (2008), pp.764-768, 査読有
- 2) 吉川覚, 田中生馬, 近藤智章, 廣田輝直, 保坂寛: 平面型風力発電のための EHL 自励振動解析, 精密工学会誌, 74,10 (2008), pp.1101-1106, 査読有
- 3) Hiroshi Hosaka: Technology of Electric Power Generators using Mechanical Vibrations for Wearable Information Equipment, IEEJ Transactions on Electrical and Electric Engineering, 2,1 (2007), pp.49-54, 査読無
- 4) 保坂寛: ウェアラブル情報機器のための振動発電技術, 電気学会誌, 126, 4 (2006), pp.225-230, 査読無

[学会発表](計12件)

- 1) 笠原学, 吉川覚, 保坂寛: ジャイロ型発電機の研究(1) 基本性能と試作機の特性, 2009年度精密工学会春季大会, 2009.3.11, 東京
- 2) 岩崎淳, 吉川覚, 笠原学, 保坂寛: ジャイロ型発電機の研究(2) 定常歳差特性, 2009年度精密工学会春季大会, 2009.3.11, 東京
- 3) 岸本幹史, 岩崎淳, 笠原学, 吉川覚, 保坂寛: ジャイロ型発電機の研究(3) 過渡特性と安定解析, 2009年度精密工学会春季大会, 2009.3.11, 東京
- 4) Satoru Yoshikawa, Tomohiro Ishii, Jun Iwasaki, Hiroshi Hosaka: Stability Analysis of Gyroscopic Generator, PowerMEMS 2008 +  $\mu$ MEMS 2008, 2008.11.11, Sendai, Japan
- 5) Jun Iwasaki, Tomohiro Ishii, Satoru Yoshikawa, Hiroshi Hosaka, Ken Sasaki: Steady State Analysis of Gyroscopic Power Generator, ICMA2008, 2008.9.26, Awaji, Japan
- 6) 吉川覚, 石井智裕, 岩崎淳, 保坂寛: ジャイロ型発電機の安定解析, 2008年度精密工学会春季大会, 2008.3, 川崎
- 7) 岩崎淳, 石井智裕, 吉川覚, 保坂寛: ジャイロ型発電機における最適インピーダンス制御, 2008年度精密工学会春季大会, 2008.3, 川崎
- 8) Tomohiro Ishii, Jun Iwasaki, Hiroshi Hosaka: Study on dynamics characteristics of gyroscopic power generator, Int. Conf. Mechatronics and Information Technology, 2007.12, Gifu, Japan
- 9) Satoru Yoshikawa, Ikema Tanaka, Tomoaki Kondo, Terunao Hirota, Hiroshi

Hosaka: Approximate analysis of self-excited vibration for flat-type wind generator, Proc. Int. Conf. Mechatronics and Information Technology, 2007.12, Gifu, Japan

10) 石井智裕, 後藤裕治, 保坂寛: ジャイロ型発電機の安定解析に関する研究, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 2007.9.14, 習志野

11) 石井智裕, 後藤裕治, 保坂寛: 人体振動を用いたジャイロ型発電機の研究, 2007年度精密工学会春季大会, 2007.3, 東京

12) 後藤裕治, 小川達也, 保坂寛: 移動体振動を用いるユビキタス発電機, 第24回日本ロボット学会学術講演会, 2006.9.15, 岡山

## 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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし