

自励振動型及びジャイロ型発電機の安定解析

76815 吉川 覚
指導教員 保坂 寛 教授

In order to solve energy supply problems for mobile and ubiquitous equipment, generators of two types – a wind power generator utilizing the self-excited vibration and a gyroscopic power generator- are studied.

As for the wind power generator, an approximate calculation method of the self-excited vibration of the electrode film is contrived and the effect of the input air pressure, film tension, boundary pressure on the vibration frequency and easiness of vibration generation are clarified and verified by experiment. As for the gyroscopic generator, the transient response is analyzed by using Euler's equation, and the input vibration and initial conditions for stable rotation are obtained.

Key words : self excited vibration, electrostatic power generator, elasto-hydrodynamic lubrication, precession movement, electromagnetic power generation, gyroscopic power generator

1 緒言

センサネットワークの構築のために、環境中の光、熱、運動などを電力とする小型エネルギー源の研究が各種行われている。本研究では、環境中に無駄に放出されるエネルギーを用いた発電機の実現を目的とし、自励振動型風力発電機とジャイロ型発電機の2種類の発電機について安定解析を行い、その有効性を検証した。

2 自励振動型風力発電機²⁾

2.1. 発電機の駆動原理

概念図を Fig.1 に示す。流入端より送り込まれた空気流により、導電性フィルムに自励振動が起こる。すると、フィルム・固定電極間距離が変化し、両者で構成される静電容量が変化する。するとエレクトレットに蓄えられた電荷が可変コンデンサとの間で移動し、負荷抵抗部分で電力として仕事をさせることが出来る。

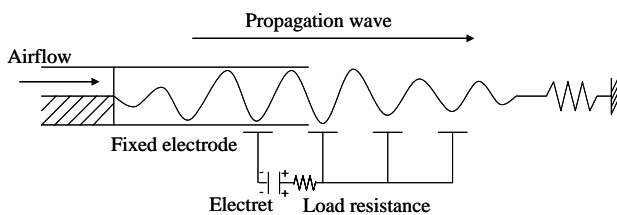


Fig.1 Mechanism of electrostatic generator

2.2. 理論解析

流路と振動体の隙間を流れる空気の圧力 P は、隙間が微小であるために以下のレイノルズ方程式を満たす。但し x は流れ方向、 y は流れ直角方向、 ρ は空気の密度、 μ は粘性係数を表す。

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) \quad (1)$$

一方、フィルムの変形を決定する式は以下である。

$$\rho_{LD} A \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = -EI \frac{\partial^4 h}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + F(x, t) \quad (2)$$

ここで ρ_{LD} は線密度、 A は断面積、 E はヤング率、 I は断面2次モーメント、 T は張力である。また F は単位長さの圧力差であり、上側圧力 P_{above} 、下側圧力 P_{under} 、フィ

ルム幅 b により次式で与えられる。

$$F = \int_{-b/2}^{b/2} (P_{under} - P_{above}) dy \quad (3)$$

予備実験により、流れ方向にはフィルムが波状に変形することを確認した。これにより圧力も複雑に変化すると考えられる。一方、流れ直角方向にはフィルムに固定端での拘束が働くため変形が小さく、また幅が狭いので、圧力変化が単純であると考えられる。そこで、流れに直角方向のフィルム変形を一定値で、圧力分布を単純な凸関数 $g(y)$ で近似する。

$$P = f(x, t) \cdot g(y) + P_a \quad (4)$$

P_a は大気圧を、 $g(y)$ は幅方向の圧力分布形状を表し、 $f(x, t)$ は未知関数である。

流れ直角方向のフィルム形状を直線で、圧力分布を直線と放物線からなるカマボコ型の関数で近似し、両方程式を幅方向に積分平均した。この近似により2次元問題が1次元問題となり、かつ、フィルム端での空気漏れを考慮でき、さらに、幅が狭い極限と広い極限において、圧縮性を無視したレイノルズ方程式を厳密に満たす。

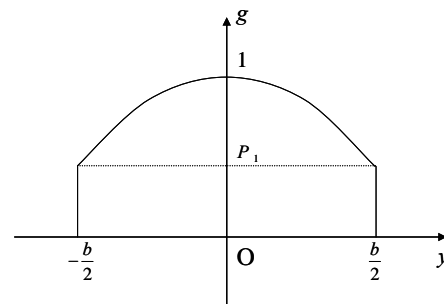


Fig.2 Pressure distribution function g

2.3. 計算・実験結果

張力 T を 1N、入力圧力を 7kPa、 P_1 を 0.65 としたときの x 軸上 ($y=0$) のフィルムの変位と圧力分布を Fig.3 に示す。フィルムが大きく波打っており、自励振動が発生していることが分かる。この自励振動は x 軸正方向への進行波であり、実験によっても確認された。

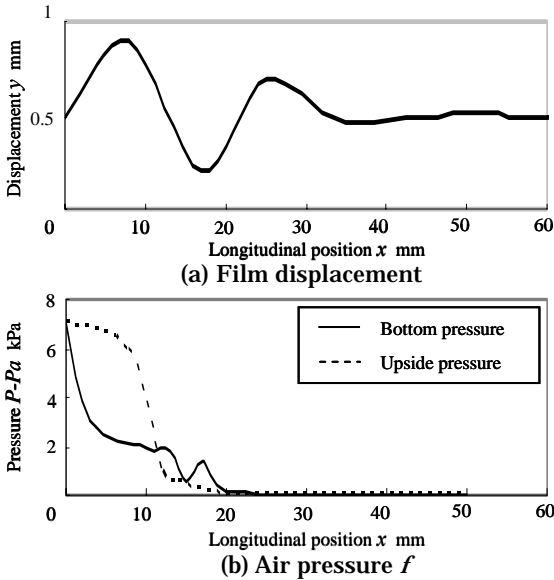


Fig.3 Calculated displacement and pressure

Fig.4 は、流路内圧力分布の計算値である。流入端では高い圧力が生じるが、下流では急激に低下している。これは、本解析法により横漏れすなわち幅方向流れを表現できていることを示す。また、圧力が x 軸に沿って振動していることがわかる。

自励振動発生時における入力圧力と周波数の関係を Fig.5 に示す。計算値、実験値ともに圧力が大きいほど周波数が高く、また計算値では、 $P_1=0.65$ (P_1 はカマボコ関数両端の高さ)より $P_1=1$ の方が周波数が高くなっている。これは、入力圧力と P_1 が大きいほど長手方向の流速が大きくなり、フィルム上の進行波の速度を増大させるためと考えられる。

2.4. 自励振動発生メカニズム

フィルム・空気系を単純なモデルで置き換え、自励振動発生メカニズムを考察する。Fig.6 に示すように、フィルムに微小振幅 Δh の進行波が存在すると仮定し、その位相速度を v_p とする。また空気流は粘性力が支配的であるので、多数の移動ダンパーで置き換え、その速度を v_d 、単位長さ当りの減衰係数を c とする³⁾。このとき、単位長さのダンパーが発生する上向きの力 F は次式となる。

$$F = c(v_p - v_d) \cdot \frac{\partial \Delta h}{\partial x} \tag{5}$$

また、フィルムの上下方向の移動速度 w について次式が成り立つ。

$$w = \frac{\partial \Delta h}{\partial t} = -v_p \frac{\partial \Delta h}{\partial x} \tag{6}$$

流速が大きく、 $v_d > v_p$ の場合を考えると、点 A では $F < 0$ 、 $w < 0$ 、点 B では $F > 0$ 、 $w > 0$ となり、いずれの位置でもフィルムの移動方向とダンパー発生力の方向が一致する。よって、ダンパーはフィルムに対して正の仕事をし、フィルムの振幅は時間とともに増大する。逆に流速が低く $v_d < v_p$ の場合は、いずれの位置でもフィルムの移動方向とダンパ

ー発生力の方向が反対になり、ダンパーはフィルムに対して負の仕事をする。これが空気流による自励振動発生メカニズムであると考えられる。

実験および計算結果によれば、張力が大きいほど、入力圧力が大きいほど、横漏れが小さいほど自励振動が発生しやすくなっている。これらは、進行波の速度を減少、または、空気平均速度を増大させる効果があり、上記の考察とよく一致している。

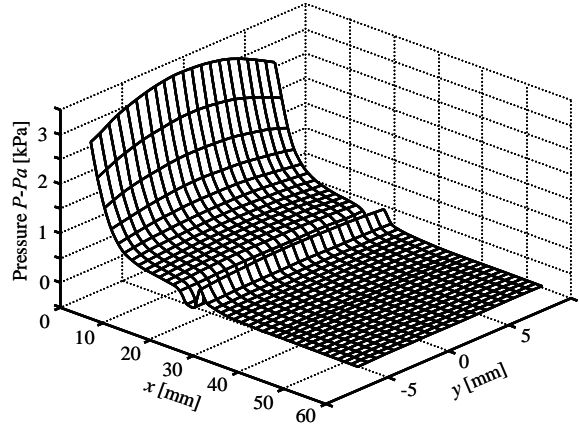


Fig.4 Internal pressure distribution

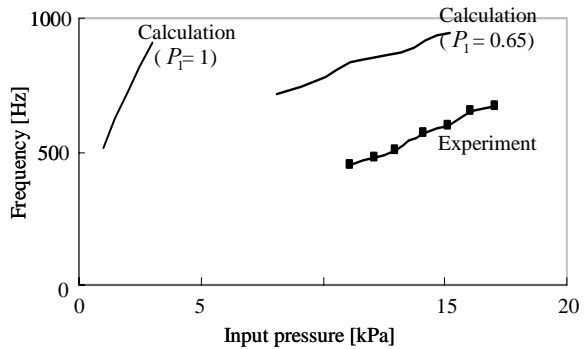


Fig.5 Relationships between input pressure and vibration frequency

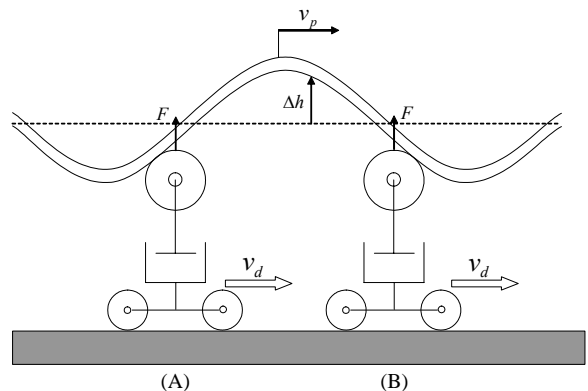


Fig.6 Mechanism of self-excited vibration

3. ジャイロ型発電機⁴⁾

3.1. 発電機の駆動原理

概念図を Fig.7 に示す .y 軸回りに自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 .トラックを x 軸回りに回転振動させると ,角運動量の法則により ,ロータは z 軸回りに歳差運動を行う .トラックと軸の摩擦により ,ロータは入力振動の数十倍の周波数で自転する .先行研究において ,2Hz の入力振動で出力 1W が確認されている⁵⁾ .

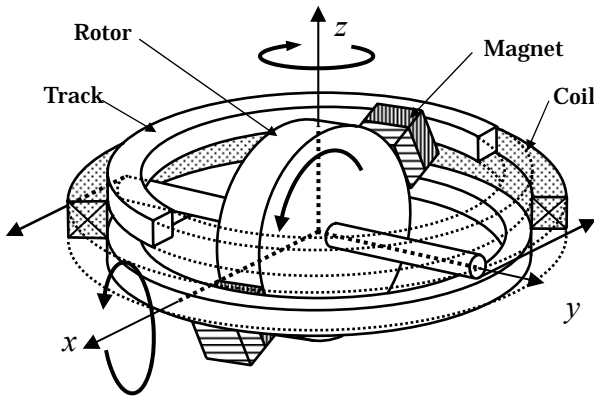


Fig.7 Structure of gyro generator

3.2. 理論解析

ロータは複雑な運動を行うので ,非慣性系の剛体運動方程式であるオイラー方程式を用いる .

$$\frac{\partial \vec{L}}{\partial t} + \vec{\Omega} \times \vec{L} = \vec{M} \quad (7)$$

$\theta = \theta_0 \sin(\pi)$ を加振角度、 π をロータの歳差回転角、 π を自転角として ,ロータ軸に固定した座標系で上記を解くと ,自転に関する方程式が得られる .

$$\ddot{\alpha}(\xi^2 I_1 + I_2) + \xi I_1 \ddot{\theta} \sin \alpha + (I_2 - I_1) \dot{\theta}^2 \sin \alpha \cos \alpha + \xi^2 \sigma \dot{\alpha} = 0 \quad (8)$$

これらの式は非線形形の微分方程式であり ,解析解は求められない .そこで数値解析により過渡応答を見る .なお , ϕ は歳差運動と入力との位相差を表し ,

$$\phi = \alpha - \pi \quad (9)$$

である .(9)を(8)に代入する事により ,次式が導かれる .

$$\ddot{\phi}(\xi^2 I_1 + I_2) + \xi I_1 \ddot{\theta} \sin(\phi + \pi) + \xi^2 \sigma \dot{\phi} + (I_2 - I_1) \dot{\theta}^2 \sin(\phi + \pi) \cos(\phi + \pi) = 0 \quad (10)$$

本研究ではこの位相差 ϕ についてみていく .なお , σ は ,機械的損失の実験値 $\sigma_m = 5.0 \times 10^{-6}$ を用いた .

3.3. 計算・実験結果

3.3.1 過渡応答解析

まず , ϕ と $\dot{\phi}$ の初期値を定常解近傍の値に取った .その結果を Fig.8 に示す . ϕ が減衰振動しながら収束していることがわかる .これはロータが一定の周期で回転していることを示している .一方 ,初期値 $\phi=0$ $\dot{\phi}=0.6\pi$ の時は , Fig.9 に示すように失速した .

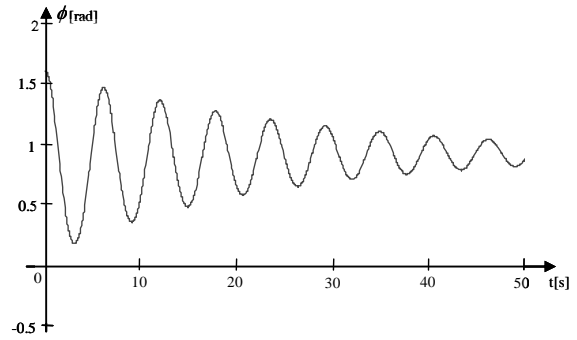


Fig.8 Change of ϕ for stable rotation

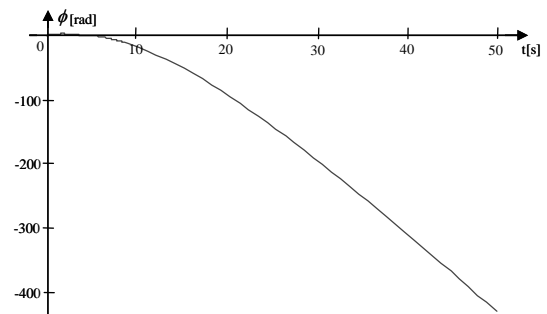


Fig.9 Change of ϕ for unstable rotation

ϕ の初期値を 0 , $\dot{\phi}$ の初期値を 0.3π , 0.4π , 1.25π , 1.27π , 1.31π , 1.81π , 1.85π , 1.87π [rad/s]としたときの計算結果を位相平面で表したものを Fig.10 に示す .この時の入力の安定条件は , $\phi=0$ ならば , $0 < \dot{\phi} < 0.28\pi$ $1.26\pi < \dot{\phi} < 1.3\pi$ $1.84\pi < \dot{\phi} < 1.86\pi$ であった .

上記から ,初期値によって ,位相差がゼロに収束し ,回転が安定化する場合 ,安定だが角度の収束値が異なる場合 ,不安定になる場合があることが分かった .また ,先行研究における定常状態の近似解を点で示した .ここから ,定常状態の解が安定領域のほぼ真中にあることが確認できる .これは ,定常解を求める時に行った近似計算法(積分平均)の正しさを裏付けるものである .

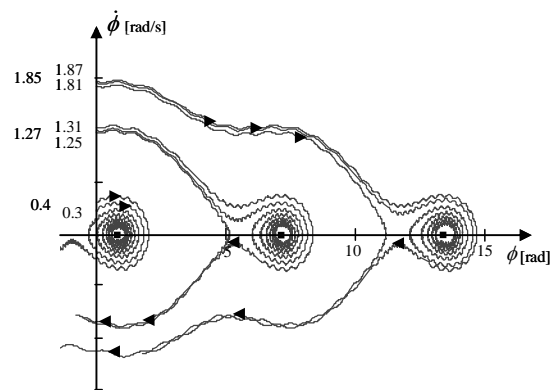


Fig.10 Phase curve of ϕ and $\dot{\phi}$ [$\sigma = 5.0 \times 10^{-6}$]

3.3.2 インピーダンス制御

次に ,途中で負荷抵抗の値を変えることで ,本来安定領域になかった回転を安定に導く事を考える Fig.11 では ,

まず 0.5 の抵抗を繋ぎ、回転が不安定になった所で回路をオープンにした(抵抗を 1にした)シミュレーションの結果を示す。ここでは、黒丸で示した点($t=2s$)で不安定化したと判断し、外部抵抗を外した場合を計算した。途中で不安定化した振動が、安定に向かっていく事がわかる。これより、外部抵抗を変化させる事で回転の増幅を制御できる可能性があることが示された。

つまり、センシングコイル⁶⁾を用いて、位相差 ϕ をモニタリングすれば、あらかじめ基準となる位相差 ϕ_0 を決めておき、 ϕ_0 に対する余裕度を見て、余裕があるならば($\phi > \phi_0$ ならば)抵抗を加え、余裕がなければ($\phi < \phi_0$ ならば)抵抗を減らすという制御をする事で、未知の入力振動に対して高い発電量と安定した回転を同時に達成する事ができると考えられる。なお Fig.8の周波数と減衰比は、実験値とも一致する事が確認されている。⁷⁾

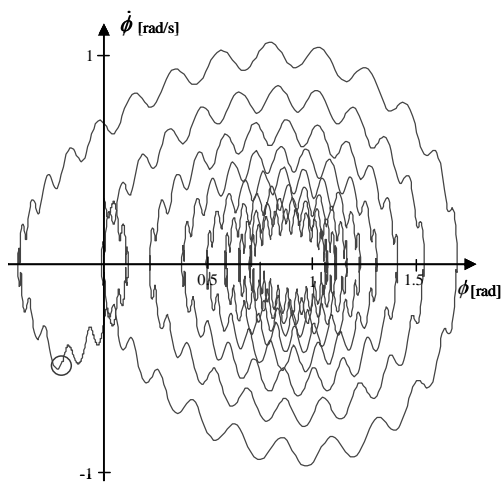


Fig.11 Phase curve of ϕ and $\dot{\phi}$ for impedance control

3.4. 回転増幅メカニズム

Fig.7に示すように、ある瞬間に、片方のロータ軸の上端と上側トラックが点Pで接しているものとすれば、理想状態ではその軸は常に同じ上側トラックを転がり続け、逆側のロータ軸は下端で下側のトラックを転がり続けることになる。以上の点を踏まえ、トラックとロータを単純なモデルで置き換え、回転増幅のメカニズムを考察する。

まず、トラックにはsin波形の定常波入力を与えているので、モデルとしてはFig.12のようになる。

上側トラックとの接点の位置を考える。定常状態においては入力1周期に対して1回転するため、初期位置をFig.12に示されるAの位置であったとすると、矢印の向きに接点がトラックの上を移動し、入力1周期後に同じ位置A'に戻る。この時、Xの部分においては加速し、Yの部分においては減速する向きにトラックはロータ軸に力を加えるということになるため、この場合回転は増幅傾向にあることを示す。

このように、初期位置、つまり初期位相 ϕ_0 の値によって回転が増幅するかどうかが決まる可能性があることがこの図からもわかる。

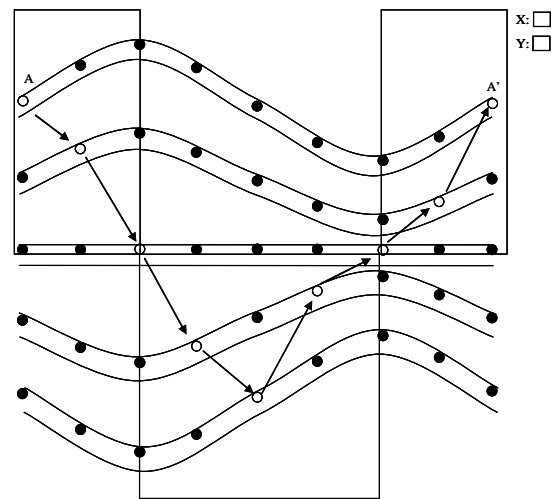


Fig.12 Mechanism of Rotation amplification

4. 結論

自励振動と静電誘導を用いる平面型発電機の実現を目的に、空気流によるフィルム自励振動の近似解析を行った。実験結果に基づき、流れ直角方向の変形をゼロとし、圧力分布を放物線と直線で表す近似計算法を考案した。また、近似計算式を元に、自励振動発生メカニズムを解明した。

次に、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の実現を目的に、過渡応答解析を行った。結果から、一定の初速、初期位相を与えると、減衰振動しながら安定回転に向かう事、初速度・初期位相には安定限界がある事を確認し、インピーダンス制御により回転を制御できる可能性を示した。また、実験との定性的な一致を示し、手法の有効性を確認した。最後に、計算結果を元にロータ回転増幅のメカニズムを解明した。

参考文献

- 1) Roundy, S., Kenneth, P., Rabaey, J. M. : Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibrations, Kluwer Academic Publishers, Norwell, M.A., (2003), 15.
- 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, Vol.74, No.10, (2008) p1101-1106
- 3) H. Hosaka, Crandall, S. H. : Self-excited vibrations of a flexible disk rotating on an air film above a flat surface, Acta Mechanica, 3, (1992) 115-127.
- 4) 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), 764-768
- 5) 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長, 精密工学会春季大会(2009), 掲載予定
- 6) Jun Iwasaki, Tomohiro Ishii, Satoru Yoshikawa, Hiroshi Hosaka and Ken Sasaki : Steady State Analysis of Gyroscopic Power Generator, ICMA, (2008)
- 7) 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, 精密工学会春季大会(2009), 掲載予定