

**A1** Components

## 水滴接触角測定による鋼球と樹脂平板の 摩擦係数の推定

Estimation of Friction Coefficient between the Steel Ball and the Resin Plate by Measuring Contact Angle of the Water Droplet

キーワード ■ 極軽荷重・無潤滑・すべり摩擦・凝着力・吸着力・水滴接触角

富山大学学術研究部工学系

教授 小熊 規泰 Noriyasu Oguma

## 要 旨

回転型エレクトレット発電機はわずかな外力で回転し、固定子と回転子の表面に装着された電極の相対移動によって静電誘導発電する自己完結型発電装置である。十分な発電量を得るためには回転子が回転し始めるトルクを低減させ、各接触部の摩擦抵抗を低減させる必要がある。すなわち、回転要素に対する潤滑は粘性抵抗が大きく不利であるため、無潤滑環境における樹脂材と鋼球の摩擦を評価する必要がある。

本稿では、様々な樹脂に対して極低荷重域での摩擦特性が容易に把握することを目的とし、摩擦実験を行わずに摩擦係数を推定できる手法について解説する。具体的には、極低荷重域で現れる鋼球-樹脂間の凝着力と、平板-水滴間の吸着力との相関を調査し、簡易的に評価可能な後者の結果に基づいて、鋼球と種々の樹脂との摩擦係数を推定する手法を紹介する。

## Abstract

The rotary electret generator is a self-contained power generation device that rotates with a slight external force and generates electrostatic induction power by the relative movement of the stator and the electrodes mounted on the surface of the rotor. In order to obtain a sufficient amount of power generation, it is necessary to reduce the torque at which the rotor starts to rotate and reduce the friction of each contact part. That is, since lubricating oil has a large viscous resistance, the friction between the resin material and the steel ball is evaluated on the precondition of a dry environment.

In this paper, the method that can easily grasp the friction characteristics of various resins in the extremely low load range and estimate the friction coefficient without conducting friction experiments is explained. Specifically, the correlation between the adhesive force of a steel ball appearing in the extremely low load range on the resin plate and the adsorption force of a water droplet was investigated. Based on the latter results which can be easily evaluated, the method for estimating the coefficient of friction between a steel ball and various resins is reviewed.

## 1. はじめに

近年のデジタル技術の進歩によってSociety 4.0からSociety 5.0への変革が加速している。内閣府が掲げる第5期科学技術基本計画において、めざすべき未来社会の姿として提唱され<sup>1)</sup>、「IoT、ロボット、AIなどの先端技術をあらゆる産業や社会生活に取り入れ、格差なく、多様なニーズにきめ細かく対応したモノやサービスを提供」する経済発展と社会的課題の解決を両立していく社会である。IoT (Internet of Things)、AI(Artificial Intelligence)、AR (Augmented Reality)、VR(Virtual Reality)、CC (Cognitive Computing) などのデジタル技術の駆使によって新たな価値が創出されていく変革はデジタルトランスフォーメーション(Digital Transformation: 以下DX) と呼ばれている。

IoTはモノのインターネットのことであり、モノ同士あるいはモノと人がインターネットを介して通信を行って新たな付加価値を生み出す仕組みである。Society 5.0に向けてIoTを充実させていくためには、あらゆるモノが情報発信するための電源が必要である。しかしながら、モノの中にはAC電源による電力の供給が困難な場合もあり、これがIoT社会実現への大きな壁となっている。仮にバッテリーを内蔵したとしても、それらには使用寿命があり、必ず交換時期が訪れることから実用性を考えると課題は多い。このようなことから、近年では電池に代替する電源装置として自己完結型蓄電技術への期待が高まっている。自己完結型蓄電技術とは系統電源からの電力の供給を必要とせず、自身で発電、蓄電する技術であり、一般的には環境発電<sup>2)</sup>と称される。この技術はメンテナンスの必要性がなく、様々なニーズへの対応が可能になるとされており、IoT社会実現に大きく寄与すると考えられている。

そこで本稿では、自己完結型蓄電技術の一つである回転型マイクロ発電機<sup>3)</sup>に注目し、回転機能に必要な軸受特性を解説するとともに、とくに重要な起動トルクの低減のためのすべり摩擦係数の測定に基づく低摩擦材料の選定に関して触れる。具体的には鋼球と樹脂平板のすべり摩擦係数を簡易的な方法である水滴の接触角測定によって推定する手法について述べる。

## 2. 回転型マイクロ発電機

図1は回転型マイクロ発電機の構成例である。上部筐体、側面筐体、鋼球、樹脂保持器、上部平板、下部平板という主要部品から構成されている。上部平板と下部平板の間に転動体である鋼球が配置されており、保持器によって一定の間隔に保たれている。すなわち、発電機の構造は一種のスラスト軸受となっている。上部平板下面および、下部平板上面はエレクトレット電極となっており、重力で錘の付いた上部平板が回転し、電極が相対運動することで静電誘導発電する仕組みである。鋼球の大きさが電極のクリアランスであり、この空間に潤滑剤が存在すると発電の邪魔になるため無潤滑が必須である。また、IoT用途を目的として小型軽量に拘っているため、上下平板および、保持器は樹脂材料を採用している。大きな発電量を与えるための改良策が種々行なわれているが、機構

設計の観点から発電効率を向上させるためには回転抵抗の削減、とくに無潤滑下における起動トルクの低減が最も有効であると考えられる。

起動トルクを低減させるためには、回転要素の接触部で発生する摩擦抵抗を低減させることが重要となる。この発電機の構造上、発生する摩擦抵抗としては図2に示すように、鋼球と上下平板間で発生する転がり摩擦、および、鋼球と樹脂保持器ポケット間で発生するすべり摩擦に大別できる。一般に、転がり摩擦はすべり摩擦に比べて非常に小さいため<sup>4)</sup>、鋼球と樹脂保持器ポケット間で発生するすべり摩擦を低減させることが最も重要であると考えられる。したがって、鋼球と樹脂材料のすべり摩擦特性を把握する必要がある。

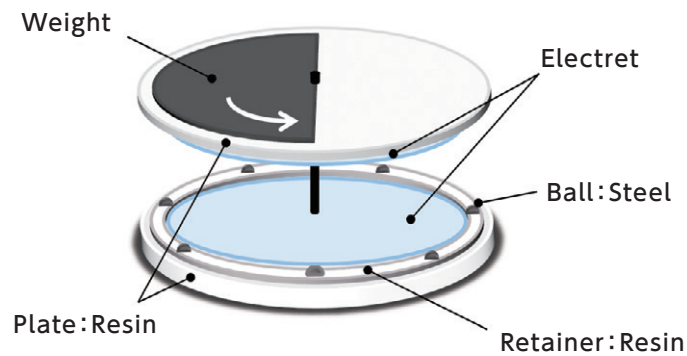


図1 回転型マイクロ発電機の構成例

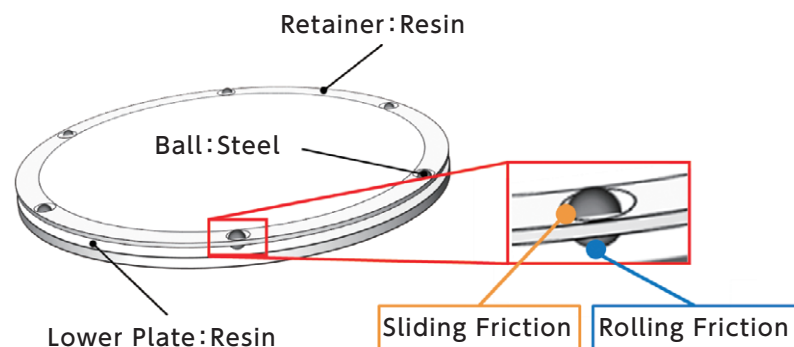


図2 回転型マイクロ発電機で発生する摩擦抵抗

## 3. すべり摩擦測定実験

### 1) 供試材

すべり摩擦測定実験に用いた鋼球は市販の直径1mmの軸受鋼製である。樹脂平板も市販されているものであり、PVC、ABS、PMMA、PTFEを準備した。それらの表面粗さは極めて小さく光沢のある状態である。参考までに、OLYMPUS社製LEXIT OLS4100で面粗さを測定した結果、算術平均面粗さは $0.007\mu\text{m}$ であった。

また、Hertz接触解析に用いた機械的性質は表1に示すとおりである。

表1 回転型マイクロ発電機で発生する摩擦抵抗

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio
SUJ2	207	0.30
PTFE	0.49	0.46
PVC	3.24	0.38
ABS	1.47	0.37
PMMA	2.94	0.39

### 2) 実験装置および、実験方法

すべり摩擦抵抗の測定実験はJIS P 8147で規格化されている傾斜法で行なった。この方法は最も簡易的に摩擦抵抗を求めることができる手法であり、低荷重域における測定も可能である。図3に実験装置の概略と供試材の配置を示す。図のように、ゴニオメータ上に樹脂平板を固定し、3つの鋼球を貼り付けた薄板を鋼球が樹脂に接触するように配置する。徐々にゴニオを傾けていき、すべり出したとき(図3では左から右へ移動)の角度を摩擦角として測定するものである。なお、実験結果に影響を与える可能性のある要因(湿度、荷重保持時間、静電気)を制御して繰返し誤差を評価した結果、標準偏差は5%以内であった。

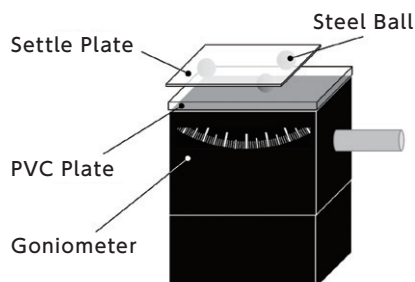


図3 摩擦角測定装置と供試材の配置図

### 3) 実験結果

図4にPVC樹脂平板と鋼球の接触における傾斜角および、摩擦力と垂直荷重の関係を示す。鋼球の垂直荷重は傾斜によって重心がずれることによる荷重配分を考慮して算出した結果、後方の1つ配置の鋼球の荷重を採用することにした。図4(a)より、垂直荷重が小さいほど傾斜角は大きくなる傾向が認められるが、図4(b)のように摩擦力として表わすと線形関係にあるように見える。しかしながら、極低荷重域の関係を拡大して(本稿では図を割愛するが)考察すると、実験値は近似直線から離れていることが分かっている。このような現象に関して、安藤らは鋼球と金属平板を微小荷重で接触させたときの摩擦係数と垂直荷重の関係について、本結果と同様の荷重依存性を示しており、極低荷重域で摩擦係数が大きくなるのは垂直荷重の他に凝着力の影響が顕著になることが原因であると結論づけている<sup>5) 6)</sup>。また、凝着力は接触面積に比例することも報告している。

そこで、安藤らの説を支持して、Hertzの接触面積に比例して大きくなる凝着力が作用していると仮定し、その凝着力を差し引いた垂直荷重を有効垂直荷重と定義した。図5に有効垂直荷重で整理した場合の摩擦係数との関係を示す。凝着力を差し引いて整理すると摩擦係数(修正摩擦係数)はほぼ一定となることが分かる。

他の樹脂平板も同様に実験を行ない、データを整理した。

## 4. 水滴接触角測定実験

### 1) 実験方法および、吸着力の算出

樹脂平板上に水滴を滴下し、その接触角を測定した。測定装置は協和界面科学株式会社製Drop Master 700であり、液滴量 $2\mu\ell$ で5回の実験を行ない、図6に水滴の観察例を示すが、接線法によって算出した角度の平均を代表値とした。

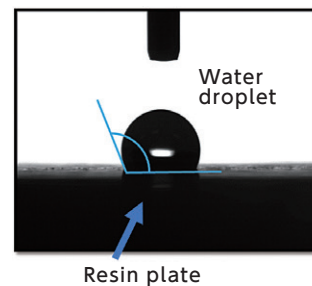


図6 液滴画像の代表例

材料表面に形づくられる水滴のエネルギーバランスは、図7に示すように、Youngによって固相、液相、気相の3重点における界面エネルギーのつり合いが提案されている。

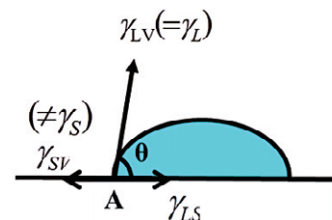


図7 相の境界3重点でのエネルギーバランス

また、Dupreによって濡れ仕事の概念が加味され、界面科学の分野では接着している物体同士を引き離すためのエネルギーなどとして表現され<sup>7)</sup>、次式が用いられている。

$$W_B = \gamma_L (1 + \cos \theta) \quad (1)$$

なお、液体が水の場合は $\gamma_L = 72.8 [\text{mJ}/\text{m}^2]$ である。

固体と固体の接触表面に働く凝着力と、固体と液体の表面に働く吸着力の相関関係の検討を行なうことが目的であるので、定数 $\gamma_L$ の単位を $[\text{mN}/\text{m}]$ とし、水滴の接触円周の単位長さあたりの力で評価することとした。

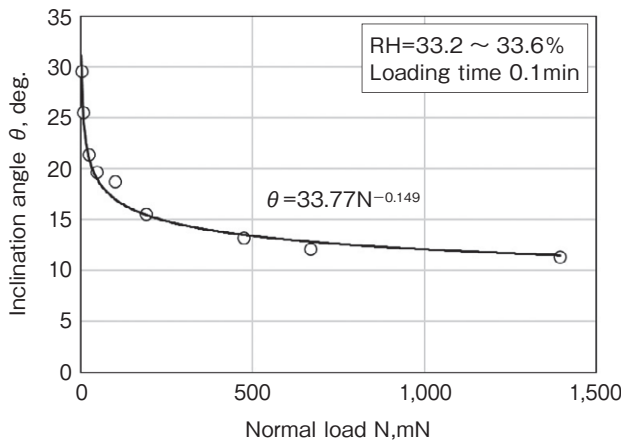


図4(a) 傾斜角と垂直荷重の関係

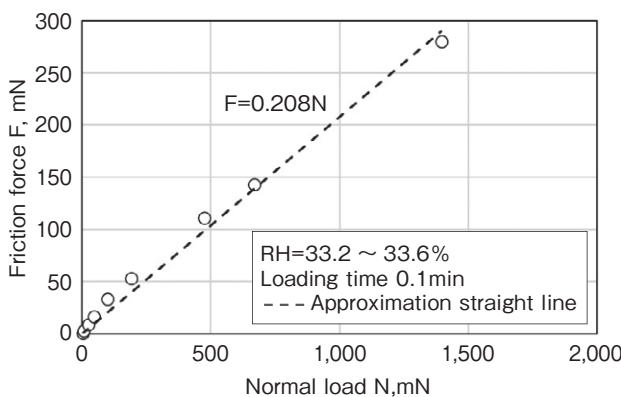


図4(b) 摩擦力と垂直荷重の関係

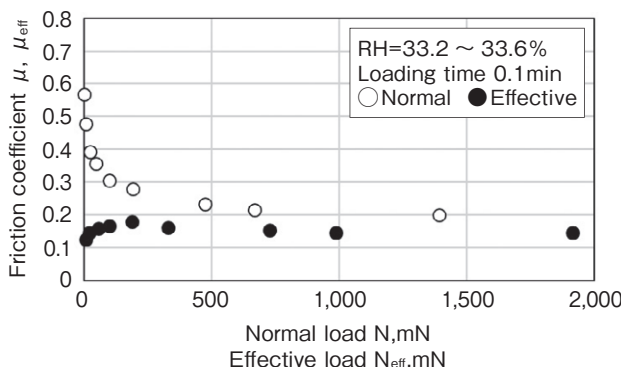


図5 有効垂直荷重と修正摩擦係数の関係

## 5. おわりに

### 2) 実験結果

図8は樹脂平板に滴下させた水滴の接触角と鋼球がHertz接触している時の接触円面積で除した単位面積あたりの凝着力の関係を示したものである。凝着力が大きくなるほど水滴の接触角が小さくなる傾向が認められる。言い換えると、凝着力(吸着力)が大きいと樹脂表面の親水性が強いと考えられる。このようにして、任意の樹脂平板に滴下した水滴の接触角を測定することで単位面積あたりの凝着力を推定できる可能性があるが、さらに、検討を行なう。

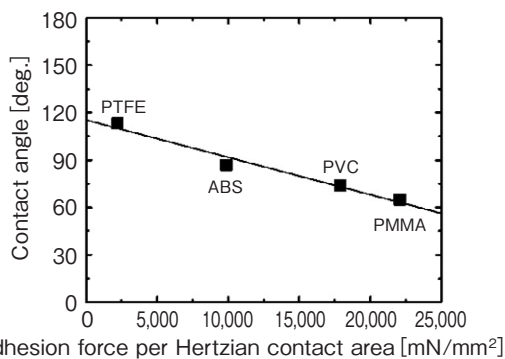


図8 単位面積あたりの凝着力と水滴の接触角の関係

式(1)で示したYoung-Dupreの式によって求められる力は水滴の円周の単位長さあたりに作用している吸着力である。そこで、樹脂平板に対する鋼球の凝着力(単位面積あたり)と水滴の吸着力(単位長さあたり)の関係を図9に示す。円の面積と円周の関係から、2乗の回帰式で近似できることが分かる。その相関係数は0.969であり、高い相関関係にあるといえる。

以上から、この実験における吸着力と凝着力の関連性は妥当であるという考察が付加できる。

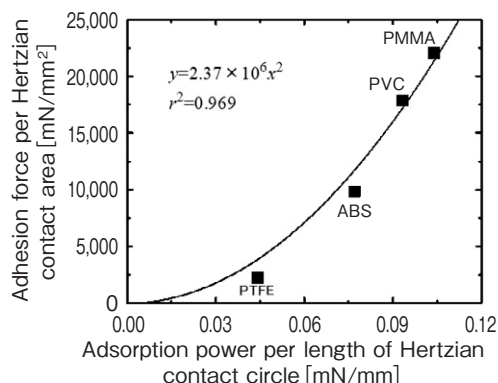


図9 単位面積あたりの凝着力と単位長さあたりの水滴吸着力の関係

平板の表面粗さが粗くなると水滴の接触角は変化することが分かっている。すなわち、本実験の結果は光沢のある材料表面において成立する関係であり、表面粗さは極低荷重域における摩擦力にも影響するものと推察される。実用面を考えると、光沢のある表面性状のモノを製作することが極めて重要となる。

また、今回紹介した樹脂平板のうち、PTFEが最も小さい摩擦係数を示した。この特性を活かすために、バルク材のみならず、PTFE薄膜コーティングに対しても評価中である。しかしながら、コーティング膜の材料物性値の同定が困難であり、カタログ値では誤差が大きくなっている。今後、薄膜の物性値の測定技術を確認し本手法の拡大適用を図っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) [https://www8.cao.go.jp/cstsp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstsp/society5_0/index.html)
- 2) 鈴木：環境発電技術の展望、日本AEM学会誌 22, 3 (2014) 339.
- 3) [https://www.hdk.co.jp/japanese/topics\\_j/tpc138\\_j.htm](https://www.hdk.co.jp/japanese/topics_j/tpc138_j.htm)
- 4) 曾田：摩擦の話、岩波新書(1954)。
- 5) 安藤・石川・北原：  
微小接触面の摩擦特性、トライボロジスト 38, 9 (1993) 837-843.
- 6) 安藤・小川・石川・北原：  
微小接触面の摩擦と凝着力、トライボロジスト 39, 9 (1994) 814-820.
- 7) 三刀、表面技術 40, 11 (1989) 1152-1160.