

MEMS 技術に基づくガスタービン発電機

田中 秀治*

*東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 01)

Gas Turbine Generator Based on MEMS Technology

Shuji TANAKA*

*Department of Mechatronics and Precision Engineering, Tohoku University (01, Aza Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Migagi 980-8579)

Key Words: Micro-electromechanical System (MEMS), Gas Turbine, Turbo Machinery, Fuel Cell

1. 携帯電源の新しい展開

携帯電源に特に求められることは、用途によって異なる種々の要求を置いておけば、できる限り小さな重量または体積から、できるだけ大きな出力またはエネルギーを生み出すこと、すなわち高出力密度または高エネルギー密度であると言ってよいだろう。現在、高性能携帯電源として用いられているリチウムイオン電池は、携帯電話、ノートパソコンなどの携帯情報機器からの要求に応じて、着実にそのエネルギー密度を上げてきた。最新のリチウムイオン電池は、150 Wh/kg を超える高いエネルギー密度を実現しているが、すでに負極活物質は理論限界に近い能力を発揮していると言われていた。したがって、高エネルギー密度をさらに追求するためには、リチウムイオン電池に代わるものも考えなくてはならない。

そこで、ガソリン、ブタン、メタノールなどの液体燃料が、5,000~15,000 kWh/kg と高いエネルギー密度を有している事実が、あらためて注目されている。何らかの方法によって、これらの液体燃料からある程度の効率で電力を取り出せれば、高エネルギー密度の携帯電源を実現できる。このような液体燃料を用いる携帯電源として、注目を集めているものが燃料電池である¹⁾。現在のところ小形燃料電池の液体燃料としてメタノールが有望であり、直接メタノール形燃料電池と燃料改質器付き燃料電池とが開発されている。これらの燃料電池は、室温付近で発電でき、しかも、低温でも発電効率が高いので、携帯電話、ノートパソコンなどの携帯情報機器の電源として適していると考えられている。このことは確かに実証された事実であり、我々も MEMS (micro-electromechanical system) 技術を用いて、超小形の燃料電池^{2),3)}、燃料改質器⁴⁾、および補機^{5),6)}を開発している。しかし、将来の携帯電源は、電池と燃料電池だけで決定であるとは必ずしも言い切れない。

2. 小形燃料電池の抱えている問題と内燃機関の超小形化との意外な関係

小形燃料電池の抱えている問題は、出力密度が低いことである。各社から携帯情報機器用直接メタノール形燃料電池の試作品が発表されているが、これらの試作品を見ると、燃料電池がノートパソコンや携帯電話の本体に収まりきっていないことがわかる。これは、ノートパソコンでは 20 W 程度、携帯電話では 2 W 程度の出力が必要であるが、これらの出力を得るために、燃料電池が本体に比べてかさばってしまうからである。直接メタノール形燃料電池の出力密度が上がらない原因として、メタノールクロスオーバー(メタノールがイオン伝導膜を通してアノードからカソードに透過する現象。簡単に言えば、燃料電池が内部で短絡している状態に相当し、出力と効率とを下げる原因となる。)やメタノールの電気化学的酸化反応速度の遅さがあげられており、世界中でこれらを解決するための研究が精力的に行われている。

まず、プロトン伝導度は高いが、メタノールを透過させにくい膜が開発されれば、燃料電池の出力密度の低さはかなり解消され、小形燃料電池は実用化されるであろう。酸性基で終端された側鎖がテフロンの主鎖からぶらさがった構造を有する従来のイオン伝導膜は、プロトンの伝導に水が必須であり、プロトンが伝導するときに水和水が引きずられ、それと同時にメタノールも移動してしまう。また、メタノールは水に任意の割合で混ざるので、含水したイオン伝導膜を介して、濃度差によってメタノールが拡散する。このようなメタノールクロスオーバーの原因から考えると、メタノールクロスオーバーを原理的に解決するためには、プロトンの伝導機構が上述のものとは異なる材料が必要である。現在、その候補として官能基を付けたフラーレンなどが研究されている⁷⁾。また、プロトン伝導機構は上述のものと同じものの、工学的な工夫によってメタノール透過率を減少させた膜、たとえば、表面改質膜⁸⁾、有機・無機複合膜⁹⁾、細孔フィリング膜^{10),11)}、なども開発されている。

第2段階として、メタノールクロスオーバーが解消された上

で、さらに出力密度を上げるためには、メタノールの電気化学的酸化反応速度を上げる必要がある。このためには、高活性の触媒を用いることと動作温度を上げることが有効である。前者に関しては、白金より高活性の画期的な触媒材料は、現在のところ見当たらず、白金に第2・第3の元素を加えたり、白金微粒子をより分散させたりすることが試みられている。後者に関しては、現在、動作温度の上限がイオン伝導膜の使用上限温度によって決まっているので、耐熱性を有するイオン伝導膜が開発されている^{12)~15)}。ただし、燃料電池の動作温度を上げるということは、室温でも使用でき、しかも、低温であればあるほど理論的には高効率であるという特長を生かすことに、多少なりとも逆行することになる。

第3段階として、メタノールクロスオーバーもメタノールの電気化学的酸化反応速度の遅さも解消されたとき、燃料電池の出力密度は燃料と空気の供給速度によって決まるはずである。実は、これはレシプロエンジンやガスタービンに代表される内燃機関の状況に等しい。内燃機関では、反応温度(燃焼温度)は十分に高く、出力密度は空気の供給速度によって律速されており、したがって、出力密度を上げるためには、給気抵抗を減らしたり、過給機(ターボチャージャーやスーパーチャージャー)を取り付けたり、回転数を上げたりする。燃料電池でも、出力密度を上げるためには、最終的には空気の供給速度を上げなくてはならないが、内燃機関と異なり、燃料電池自体には給気機構が備わっていないので、補機によって空気を供給する必要がある。

また、エネルギー変換では必ず損失(排熱)が発生し、しかも、その損失は得られる電力や動力に比べて同等以上に大きい。これは燃料電池でも内燃機関でも共通である。高出力密度の電源・動力源では、当然、小さい体積から大量の排熱が発生するはずなので、筐体の表面から熱放散させるだけではなく、排気によって積極的に排熱を取り除く必要がある。たとえば、後述する世界最小のガスタービン発電機 Dynajet 2.6¹⁶⁾ は、8~10%の発電効率で2.6kWの電力、すなわち24~30kWの排熱を出しているが、排熱は主に排気に乗って捨てられるので、筐体が熱くなったりしない。排気する機構を備えていない燃料電池では、排熱を取り除くためにも補機が必須である。これらのための補機は、出力密度が高い燃料電池、つまり小さな体積に大量の空気を供給しなくてはならない燃料電池では、容積式ポンプ、ターボポンプなどの発生圧力が高い装置であろうから、小形燃料電池の高出力化と内燃機関の小形化とは、同種の技術を必要としていることがわかる。

以上に述べたことから、多少の語弊を覚悟すれば、小形燃料電池の高出力密度化は、上述の第1~3段階を直列的にせよ並列的にせよ達成していくことであるのに対して、内燃機関の超小形化は第3段階、つまりいかに効率よく空気を取り入れるかをいきなり追求することであるとも言える(詳細は後述する)。蛇足であるが、動作温度を上げることは、燃料電池では、効率の点で理論的に目指す方向と逆行することになるのに対して、内燃機関では、出力密度と効率とを同時に向上させる。

Power MEMS¹⁷⁾ と呼ばれる技術領域では、ガスタービン、

レシプロエンジン^{18),19)}、ロータリエンジン²⁰⁾などの内燃機関を超小形化する研究が行われている。しかし、「燃料電池=高効率、内燃機関=低効率」という「反射」が頭の中に刷り込まれている人が少なからずいて、これらの研究の本質を理解している人は少ないのではないかと思う。超小形内燃機関はサイクルが閉じなければ全くの役立たずであり、技術が未成熟な段階では、小形燃料電池のようにできたりで発電してみせられないので、「おもちゃっぽく」見えがちであることも、こうした研究が理解を得にくい1つの理由であろう。しかし、内燃機関を超小形化する研究は、技術の進む方向から外れているわけではなく、高エネルギー密度かつ高出力密度の携帯電源を、液体燃料を用いて実現するという目的に対して、小形燃料電池にも共通の基盤技術を志向しているのである。もっとも、超小形内燃機関の研究をしている我々も、このような研究の本質を再認識して、興味本位な取り組みをしないようにしなくてはならない。

3. どうしてガスタービンを超小形するのか

ここまで、高エネルギー密度の液体燃料から電力または動力を取り出す方法として、内燃機関の超小形化が意義ある研究であることを述べてきた。しかし、誰もが認める通り、内燃機関の超小形化には難しい問題が山積している。すぐに思いつくことは、高温動作に由来する問題であろう。ただし、ここでの問題の本質は、メタノールクロスオーバーのような原理的な問題ではなく、工学的な問題であり、もし望みの材料を望みの構造にできる魔法の手があれば、超小形の内燃機関を実現することは可能であると、個人的には考えている。したがって、内燃機関の超小形化は、工学が挑戦すべき課題であると言える。

内燃機関の超小形化にともなう工学的な問題は、内燃機関として何を選択するかによって異なってくるので、その選択は重要である。ここで、我々はガスタービンを選択した。これは、ガスタービンは超小形化するのに都合がよい特長を有しているからである。まず、1)ガスタービンの運動部分は翼車と軸とが一体化されたロータだけであり、このロータが空気軸受によって支えられれば、擦動部は存在しない。擦動による摩擦・摩耗の問題は、微小機械では極めて難しい問題である。次に、2)ガスタービンは高速回転化によって空気吸入速度(圧縮率)を上げられるので、高出力密度化に向いている。さらに、吸入・圧縮・燃焼・膨張・排気の行程を時分割で行うレシプロエンジンやロータリエンジンと比べて、ガスタービンは各行程を各構成要素で分業して連続的に行うので、次にあげるような特長を有する。3)騒音や振動が少なく、しかも、騒音は主に高周波であるので、遮音が比較的容易である。4)到達燃焼温度が低いので、NOxの発生量が少ない。5)到達圧力が低いので、気密保持が容易である。しかし、連続的に燃焼が行われることは、燃焼器やタービンが常に高温にさらされるので、高い耐熱性を必要とするという欠点にもなる。我々は、1)と2)の特長を重要視してガスタービンを超小形化の対象として選択したが、材料の耐熱性や高速回転の問題を重要視すれば、他の選択肢もありうる。

上述のような特長を有する超小形ガスタービン発電機が実

現できた場合、どのような用途に向いているであろうか。ガスタービンの出力 P は、理論的には代表長さ L の 2 乗に比例するので、出力密度は L に反比例し ($P/L^3 \propto L^{-1}$)、小形化によって高くできる。このことから、小形化による効率の低下はあるであろうが、ガスタービンは超小形化されても、本来の特長である高出力密度を実現できると期待される。したがって、超小形ガスタービン発電機は、軽量であることが求められる自立ロボットの電源として有望である。特に、それらを工事現場や災害地域で使用することを想定すると、充電ではなく、重機のように燃料供給によって運転できることが望まれるが、この点でもガスタービン発電機は電池より優れている。さらに、放電済の重い電池を運ぶのはエネルギーの無駄なので、エネルギー消費にともなって次第に軽くなって欲しいという要望にも、ガスタービン発電機は応えることができる。

4. 研究・開発の現状

4.1 最重要課題は何か

ここであらためて述べるまでもなく、ガスタービンは圧縮した空気に燃料を混ぜ、それに火を付けた高温のガスをタービンで膨張させるエンジンである。圧縮機はタービンで得られた動力によって駆動され、余った動力が利用可能な出力になる。したがって、利用可能な出力を増やすためには、タービンの出力を増やすか、あるいは圧縮仕事を減らすかしくはならない。前者は一定の圧縮比のもとでは、タービン入口温度(燃焼器出口温度)とタービンの断熱効率とによって決まる。ここで、タービン入口温度はタービンの耐熱性によって決まり、タービンの断熱効率は圧縮機のそれより少し良い値になることが経験的に知られている。したがって、圧縮比とタービン入口温度とが種々の設計条件から決まれば、タービンの出力は圧縮機の断熱効率に対して相対的に決まり、結局、効率の良い圧縮機ができるかどうか、サイクルが成立するかどうかの鍵になる。これが、先に「内燃機関の超小形化は、いかに効率よく空気を取り入れるかをいきなり追求することである」と述べた理由である。一般的に、空気を取り入れ、圧縮するのは大変な仕事である。

それでは、超小形ガスタービン発電機はどこまでできているのであろうか。現在、実用化されている世界最小のガスタービン発電機は、IHI エアロスペース(旧日産自動車・宇宙航空事業部)が開発した Dynajet 2.6 である¹⁶⁾。これは大人が両手で持てる程度(60 kg 程度)の小形ガスタービン発電機であり、2.6 kW の電力を発生する。発電効率は 8~10% 程度であると言われている。Dynajet 2.6 は、自動車用ターボチャージャに広く用いられている既存のラジアル式圧縮機・タービンの技術に基づいている。同様の技術に基づいて、現在、Dynajet 2.6 より出力にして 10 分の 1 以下の超小形ガスタービン発電機が、いくつかのグループによって開発されている^{21)~23)}。東北大学は、石川島播磨重工業・三協精機製作所・東北学院大学と共同で、100 W 級のパームトップガスタービン発電機の実現を目指して、圧縮機²⁴⁾、空気軸受²⁴⁾、燃焼器²⁴⁾、および発電機を開発している。効率よく空気を取り入れるという最も重要な課題に対しては、直径 10 mm

の 3 次元翼車を有する超小形ターボチャージャを製作して、圧縮機の試験をしている²⁶⁾。しかし、現在までに得られている圧縮機性能は、主に翼端隙間が設計通りに製作できていないことから、予想値よりかなり低い。また、到達できた回転数は定格回転数(870,000 rpm)の 65% までであり、定格回転数まで回る超高速空気軸受を開発することが、最大の挑戦である。

4.2 MEMS 技術に基づくガスタービン発電機

超小形ガスタービン発電機は、既存技術を小形化の方向に突き詰めることから自然に生まれてきたわけではない。1995 年頃、Massachusetts Institute of Technology(MIT)はパームトップガスタービン発電機を 1 つ飛ばしに、MEMS 技術に基づいてガスタービン発電機を硬貨大に超小形化する研究を始めた²⁷⁾、²⁸⁾。図 1 に試作品の断面構造を示す。全体がシリコン基板の積み重ねでできており、全体の大きさは 21 mm × 21 mm × 3.7 mm、圧縮機翼車の直径は 8 mm、タービン翼車の直径は 6 mm しかない。MIT のあまりにも大胆な発想は、ガスタービン分野にも MEMS 分野にも大きな衝撃を与え、これまで説明したような研究が行われるようになった。MEMS ガスタービン発電機の研究・開発状況は、すでに本誌 2003 年 12 月号で解説した¹⁷⁾。本稿では、主要な課題をあらためてまとめ、表面技術と接点のある課題や研究成果を中心に取り上げる。

MEMS ガスタービン発電機の研究・開発でも、最も重要かつ困難な課題は、いかに効率よく空気を取り入れるかである。この課題を実現するためには、まず、翼車を高速で回転させなくてはならない。圧縮比は翼車の周速によって決まり、実用的に最低限の圧縮比である 3 程度を実現しようとする、翼車の周速は 500 m/s にもなる。これは直径 8 mm の翼車を 120 万 rpm で回転させなくてはならないことに相当する。そして、このような高速回転の実現に前には、次に述べるような加工の問題が立ちだかっている。

MEMS ガスタービンの翼車とジャーナル軸受とは、基本的に 1 枚のシリコン基板から Deep RIE(reactive ion etching)によって製作される。図 2 に我々が製作した赤外線偏光

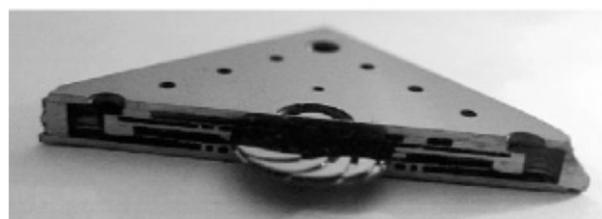
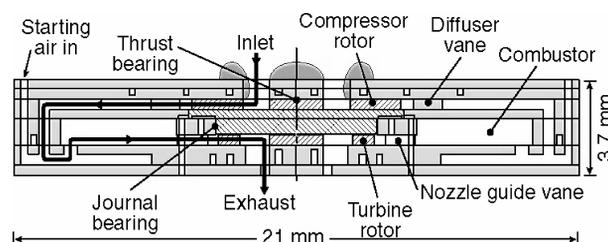


図 1 MEMS ガスタービンの断面構造(MIT²⁸⁾)

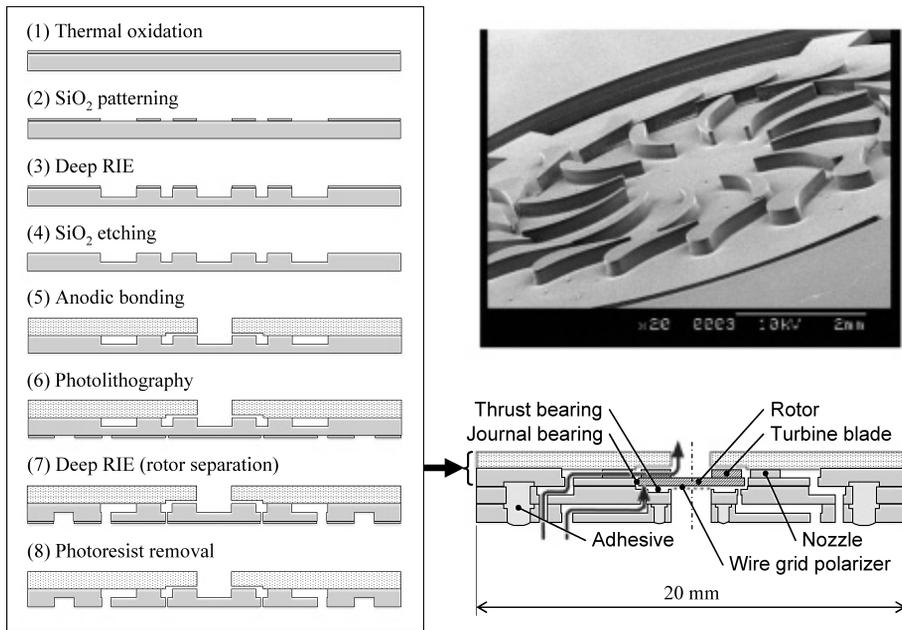


図2 MEMS エアタービンの製作法

子回転用 MEMS エアタービン²⁹⁾の製作法を示す。これからわかるように、翼や流路を Deep RIE によって形成した後、その裏面から翼車を Deep RIE によって切り離して、翼車とジャーナル軸受とを同時に形成する。この際、軸受隙間となる溝はできる限り細く深くまっすぐでなくてはならない。現状では、幅 10~20 μm 、深さ 200~300 μm の溝を加工するのが限界であるが、幅が 1 μm 程度にできると、動圧空気軸受が実現できて望ましい。MEMS の基盤技術である Deep RIE を高アスペクト比化・高精度化する研究はいくつかなされているが^{30)~33)}、表面技術の助けを借りて、さらに発展することが期待される。

Deep RIE によって加工されたシリコン基板は、直接接合によって積層される。これは、平坦かつ清浄なシリコン基板どうしを室温で接触させ、シリコン表面にある水酸基どうしの水素結合や吸着水の凝集力によって仮接合した後、1,000 $^{\circ}\text{C}$ 程度に加熱してシラノール基どうしの脱水縮合反応を起こさせ、強固な接合を得る方法である。シリコンの直接接合は SOI 基板の製作法として実用化されているが、Deep RIE などの加工を施したシリコン基板を何層も高精度に積層するとなると、さまざまな問題が発生する。具体的には、フォトレジストや重合膜に起因する何らかの付着物が接合面に残ったり、シリコン基板どうしを位置決めしている過程で治具などからごみが付着したり、接合によってシリコン基板どうしの界面にできる閉空間が反対面での凹凸の原因になったりする^{34),35)}。1つ目・2つ目の問題は広い意味での洗浄の問題である。3つ目の問題は、プラズマによる表面の活性化・親水化によって接合温度を数百 $^{\circ}\text{C}$ 以下に下げられれば^{36),37)}、解決すると期待される(シリコンは 500 $^{\circ}\text{C}$ 以下ではクリープしない)。また、接合時の位置決め精度の確保も問題である³⁴⁾。図1に示した構造では、タービン翼車と圧縮機翼車とが貼り合わされてロータを形成しているが、接合時に 1~2 μm の位置決め誤差があるだけで、ロータの回転バラ

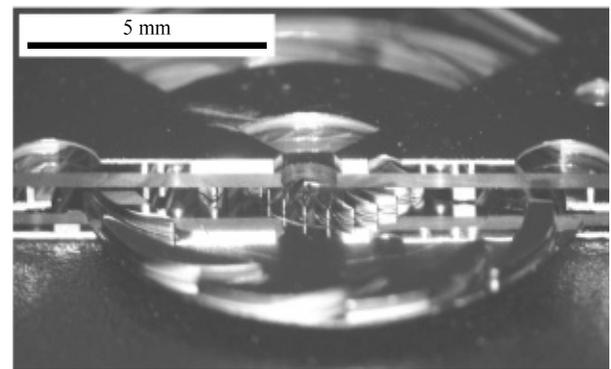
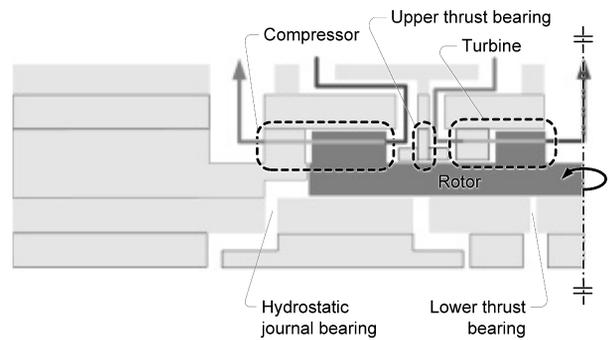


図3 MEMS ターボチャージャの断面構造

ンスは許容できない程度まで悪化する。我々はこの問題を回避するために、図3に示すようにタービンと圧縮機とが同一シリコン基板上に同心で配置された MEMS ターボチャージャを開発している³⁸⁾。

現在、MEMS ガスタービン発電機の研究・開発は、パームトップガスタービン発電機のそれと同様に、超高速空気軸受の実現に挑戦している段階である。MIT は静圧空気軸受を有する MEMS エアタービンを用いて、直径 4 mm の翼車を 140 万 rpm で回転させて見せたが³⁹⁾、これでもまだ定格

回転数の60%どまりである。圧縮機とタービンをとを組み合わせたもの(ターボチャージャ)を高速回転させるには、エッチング・接合精度のさらなる向上と軸受設計の進歩とが必要である。

さらに、圧縮機の高速度回転が実現できるだけでは、効率良く空気を取り入れるためには不十分であり、翼や流路を最適設計し、しかも、圧縮機を断熱することが必要である。前者に関しては、Deep RIEによって加工できる形状が2次元のものに限られるので、その制約による効率低下を最小限に抑える設計が必要である。また、流路が直角に曲がるとはく離による損失が発生するが、それを抑えるために、グレートン露光などによって面に深さ分布がある準3次元的な形状を精度良く加工できる技術が有効である。後者の断熱の必要性は、圧縮仕事の増加を防ぐためには、圧縮機への熱流入をできる限り抑えなくてはならないということである。しかし、MEMS ガスタービンは、硬貨程度の大きさの中に1,000~千数百°Cにもなる燃焼器やタービンが入っており、しかも、熱伝導率の高いシリコンでできているので、断熱は非常に難しい。MITの論文では、この課題に対する戦略はあまり述べられていないが、タービン入口温度を1,350°Cとシリコンの融点(約1,400°C)近くまで高くすることによって、圧縮機への熱流入による効率低下を補うつもりである。タービン入口温度を高くしすぎると、通常、タービンがもたないが、図1に示したような円盤形のロータでは、圧縮機内の空気によってタービンが冷却されるとしている。

4.3 MEMS 技術に基づく高出力発電機・電動機

MEMS が注目されるようになった1つのきっかけは、California 大学 Berkeley 校による静電マイクロモータの発表⁴⁰⁾であろう。MEMS ガスタービン発電機には、発電機兼始動用モータが必要であるが、ここで求められる性能は100万rpmを超える回転数と10~数十Wの出力であり、従来の静電マイクロモータの性能とは別次元のものである。現在、発電・駆動方式として電磁方式²⁸⁾と静電方式^{41)~43)}とが研究されているが、電磁方式には磁性体のキュリー点、鉄損、加工法などの問題があり、静電方式には出力密度、狭い静電隙間での空気の粘性損失、電気回路などの問題がある。

我々は、静電方式を選択して研究を進めている。静電方式はMEMSに一般的に用いられる材料と加工技術のみで実現可能であるが、出力が小さいことが欠点である。そこで、我々は半永久的に電荷を蓄え、表面電位を生み出す絶縁材料であるエレクトレットに注目した。図4に示すようにエレクトレットを用いてロータにも電位分布を発生させられれば、ロータ径6mm、印加電圧200V、および100万rpmの条件で、30Wの出力を発生できることを計算によって示した^{42),43)}。

我々の計算によると、上述の性能が得られるのは、エレクトレットの幅が数ミクロンのときであり、その最適値からエレクトレットの幅が大きくなるにつれて、出力はおおよそ反比例して低下する。従来、エレクトレットはコロナ放電によって帯電させていたが、エレクトレットを微細パターンングすると、コロナ放電からの電子またはイオンはわずかに帯電したエレクトレットに到達せず、接地された基板に流れる

ので、結局、エレクトレットはほとんど帯電しない⁴⁴⁾。これを解決するために、我々は水銀を用いた接触帯電によって微細パターンングされた酸化シリコンのエレクトレットを、はじめて帯電させることに成功した⁴⁴⁾。図5に接触帯電法を模式的に示す。エレクトレットを水銀に浸漬して引き上げるだけで、エレクトレットと水銀との接触電位差、およびエレクトレットの厚さによって決まる表面電位(厚さ1 μm の酸化シリコンであれば、約100V)が得られる。

我々の実験によると、エレクトレットの安定性は、幅が狭くなるのにしたがって急激に悪化する。幅5 μm のエレクトレットは、数日で完全に放電してしまう。これは吸着水中のイオンによって、電荷が表面を伝って基板に逃げるからであると考えている。エレクトレットの表面を疎水性にして吸着水を減らすと、表面電位も安定性も向上するが、依然、不十分である。微細なエレクトレットができれば、静電アクチュエータが多用されるMEMSに与える影響は大きい。ここでも表面技術は極めて重要である。

5. まとめ

携帯電源のエネルギー密度を上げる方法として、限界が見えつつある電池の改良以外の方法を考えるとすれば、高エネルギー密度の液体燃料から発電する方法が最も有望であろう。もちろん、体温や手足の運動を利用した自動発電機は、実質的に無限大のエネルギー密度を有しているが、使用者に発電を意識させない範囲では、携帯電話やノートパソコンを動かせるほどの大きな出力は望めない。炭化水素系の液体燃料からエネルギーを取り出すということは、電気化学反応によってにせよ燃焼によってにせよ、それを酸化することであるから、空気(酸素)が必須である。したがって、出力が燃料の供給速度で律速されている発電機では、空気をいかに供給するかが出力を決めることになる。また、高出力密度の携帯電源

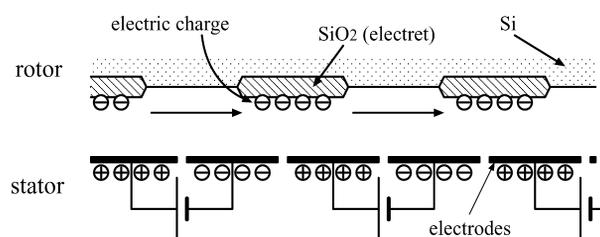


図4 エレクトレットを用いる静電発電機・モータの構成

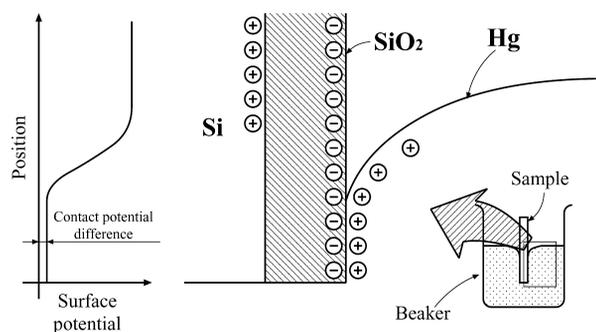


図5 エレクトレットの接触帯電法

では、電力に変換されなかったエネルギー、すなわち排熱を筐体表面から逃がすことには限界があるので、取り入れた空気、すなわち排気に乗せて捨てなくてはならない。結局、燃料を用いる携帯電源の行き着くところの課題は、小さな空間にいかにか空気を効率よく取り入れるかであろう。本稿では、このような視点から、ガスタービン発電機を超小形化する研究の意義を説明した。

超小形ガスタービン発電機、とりわけ MEMS 技術に基づくものは、その実証までにも多くの難しい課題を抱えている。一方、携帯情報機器用燃料電池に関しては、各メーカーから試作品の発表が相次ぎ、研究開発が加速している。現段階では、これらの燃料電池の出力密度は低く、空気供給と排熱の問題がシステムにとって最も深刻であるわけではないが、顕在化し始めているようである。我々も超小形ガスタービン発電機の技術を、小形燃料電池用空気ポンプに応用する検討をしているが、本稿で紹介したような技術は、まず、そのような応用に生かされるのかもしれない。

最後に確認しておきたいことは、「燃料電池は高効率であり、内燃機関より優れている」というよく聞かれる話は、実際にも、原理的にも思い込み過ぎないということである。ガスタービンは 50% を超える発電効率を商用に実現しており、実際に燃料電池と比べて効率でも負けていない。また、燃料電池の出力密度の問題が効率の犠牲なしに解決されるのであれば、上述の話は原理的に正しくなるかもしれないが、ガスタービンも高温や加工誤差に由来する問題を解決すれば、原理的にさらに高性能化できる。したがって、将来性のある両方の選択肢を追求していくべきであると考えている。

(2004-2-16 受理)

文 献

- 1) 田中秀治; 第3章マイクロ燃料電池・マイクロ改質器 (神谷信行, 梅田 実 編著), p. 40-69 (シーエムシー出版, 2003)
- 2) Kyong-Bok Min, S. Tanaka, M. Esashi; *Electrochem.*, **70**, 924 (2002)
- 3) Kyong-Bok Min, S. Tanaka, M. Esashi; Proc. IEEE 16th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, p. 379 (2003)
- 4) Kuei-Sung Chang, S. Tanaka, M. Esashi; 電気学会論文誌 E, **123**, 346 (2003)
- 5) Y. Hagihara, M. Saitou, M. Kamakura, H. Kawada, S. Tanaka, M. Esashi; Technical Digest of PowerMEMS 2003, p. 3-6 (2003)
- 6) D. Sato, S. Tanaka, M. Esashi, Y. Yoshida; Proc. 20th Sensor Symposium, p. 359 (2003)
- 7) K. Hinokuma, M. Ata; *Chem. Phys. Lett.*, **341**, 442 (2001)
- 8) L. J. Hobson, H. Ozu, M. Yamaguchi, S. Hayase; *J. Electrochem. Soc.*, **148**, A 1185 (2001)
- 9) H. Chang, J. R. Kim, J. H. Cho, H. K. Kim, K. H. Choi; *Solid State Ionics*, **148**, 601 (2002)
- 10) Robert G. Hockaday; U. S. Patent 5759712 (1998)
- 11) T. Yamaguchi, M. Ibe, B. N. Nair, S. Nakao; *J. Electrochem. Soc.*, **149**, A 1448 (2002)
- 12) S. Hara, H. Sakamoto, M. Miyahama, T. Kudo; *Solid State Ionics*, **154-155**, 679 (2002)
- 13) A. Matsuda, T. Kanzaki, K. Tadanaga, M. Tatsumisago, T. Minami; *Solid State Ionics*, **154-155**, 687 (2002)
- 14) H. Nakajima, I. Honma; *Solid State Ionics*, **158**, 607 (2002)
- 15) B., J. P. Fellner; *J. Power Sources*, **123**, 132 (2003)
- 16) 林 重雄, 伊藤 泰, 米 令二, 野村善征, 飯尾雅俊; 日産技報, **38**, 119 (1996)
- 17) 田中秀治, 江刺正喜; 表面技術, **54**, 908 (2003)
- 18) D. H. Lee, D. E. Park, J. B. Yoon, S. Kwon, E. Yoon; *J. Micromech. Microeng.*, **12**, 26 (2002)
- 19) 杉山 進, 鳥山寿之; 電気学会論文誌 E, **123**, 351 (2003)
- 20) A. C. Fernandez-Pello, A. P. Pisano, K. Fu, D. C. Walther, A. Knobloch, F. Martinez, M. Senesky, C. Stoldt, R. Maboudian, S. Sanders, D. Liepmann; 電気学会論文誌 E, **123**, 326 (2003)
- 21) S. Kang, J. P. Johnston, T. Arima, M. Matsunaga, H. Tsuru and F. B. Prinz; Proc. ASME Turbo Expo 2003, Power for Land, Sea, and Air, GT 2003-38933 (2003)
- 22) J. Peirs, D. Reynaerts and F. Verplaetsen; *J. Micromech. Microeng.*, **13**, S 190 (2003)
- 23) 吉識晴夫, 松尾栄人; 日本ガスタービン学会誌, **30**, 247 (2002)
- 24) K. Isomura, S. Tanaka, M. Murayama, H. Yamaguchi, N. Ijichi, T. Genda, N. Saji, O. Shiga, K. Takahashi, M. Esashi; Proc. ASME Turbo Expo 2003, Power for Land, Sea, and Air, GT 2003-38151 (2003)
- 25) 高橋克昌, 村山元英, 磯村浩介, 田中秀治; 日本ガスタービン学会誌, 印刷中.
- 26) 磯村浩介, 田中秀治, 十合晋一, 江刺正喜, 佐治脩好, 朝倉 啓, 志賀 修; 日本機械学会2003年度年次大会講演論文集, VI, p. 313 (2003)
- 27) A. H. Epstein, S. D. Senturia, O. Al-Midani, G. Anathasur-esh, A. Ayon, K. Breuer, K.-S. Chen, F. F. Ehrich, E. Esteve, L. Frechette, G. Gauba, R. Ghodssi, C. Groshenry, S. A. Jacobson, J. L. Kerrebrock, J. H. Lang, C.-C. Lin, A. London, J. Lopata, A. Mehra, J. O. Mur Miranda, S. Nagle, D. J. Orr, E. Piekos, M. A. Schmidt, G. Shirley, S. M. Spearing, C. S. Tan, Y.-S. Tzeng, I. A. Waitz; Proc. 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, 4th AIAA Shear Flow Control Conference, AIAA 97-1773 (1997)
- 28) A. H. Epstein; Proc. ASME Turbo Expo 2003, Power for Land, Sea, and Air, GT-2003-38866 (2003)
- 29) M. Hara, S. Tanaka, M. Esashi; *J. Micromech. Microeng.*, **13**, 223 (2003)
- 30) M. Chabloz, Y. Sakai, T. Matsuura and K. Tsutsumi; *Microsystem Technologies*, **6**, 86 (2000)
- 31) A. A. Ayón, X. Zhang and R. Khanna; *Sensors and Actuators A*, **91**, 381 (2001)
- 32) N. Miki, C. J. Teo, L. C. Ho, X. Zhang; *Sensors and Actuators A*, **104**, 263 (2003)
- 33) 大原淳士, 加納一彦, 竹内幸裕; 電気学会論文誌 E, **123**, 541 (2003)
- 34) A. A. Ayón, X. Zhang, K. T. Turner, D. Choi, B. Miller, S. F. Nagle and S. M. Spearing; *Sensors and Actuators A*, **103**, 1 (2003)
- 35) N. Miki, X. Zhang, R. Khanna, A. A. Ayón, D. Ward and S. M. Spearing; *Sensors and Actuators A*, **103**, 194 (2003)
- 36) T. Suni, K. Henttinen, I. Suni, J. Mäkinen; *J. Electrochem. Soc.*, **149**, G 348 (2002)
- 37) H. Takagi, R. Maeda, T. Suga; *Sensors and Actuators A*, **105**, 98 (2003)

- 38) P. Kang, S. Tanaka and M. Esashi ; Proc. 20 th Sensor Symposium, p. 365 (2003)
- 39) F. F. Ehrich, S. A. Jacobson ; *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, 125, 141 (2003)
- 40) Yu-Chang Tai, Richard S. Muller ; *Sensors and Actuators*, 20, 49 (1989)
- 41) C. Livermore, A. Forte, T. Lyszczarz, S. D. Umans and J. H. Lang ; Proc. Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop, p. 251 (2002)
- 42) T. Genda, S. Tanaka, M. Esashi ; Digest of Technical Papers, Transducers '03 (The 12 th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems), p. 492 (2003)
- 43) 源田敬史, 田中秀治, 江刺正喜 ; 電気学会論文誌 E, 123, 331 (2003)
- 44) T. Genda, S. Tanaka, M. Esashi ; Technical Digest, IEEE 17 th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, p. 470 (2004)

◆ 会誌編集委員会

特集号 論文募集!

テーマ：エレクトロニクス産業を支える表面技術
— その最前線と今後の動向を探る

我が国の国際競争力の低下や工場の海外移転による産業空洞化の危機が叫ばれて久しい。しかしながら、21世紀の我が国を支える基幹産業を考えると、広い裾野を持つエレクトロニクス産業が重要性であることに異論はないと思われる。その継続的なエレクトロニクス産業の発展のためには、絶え間ない研究開発による新技術、新製品の開発が必要となる。実際、高速LSI、高密度実装技術、記録媒体、表示素子、メモリーなどの最先端のエレクトロニクス製品において、表面技術は基幹技術として発展してきた。

このような状況を踏まえ、我が国のエレクトロニクス産業が目指すべき新しい技術開発に“表面技術”がどのように寄与するのか、その最新の研究と応用の動向とを探るために「エレクトロニクス産業を支える表面技術—その最前線と今後の動向を探る」というテーマで特集号を企画いたしました。本特集号では、エレクトロニクス産業およびその周辺製品における表面技術の適用や可能性について、会員諸氏から多くの情報をいただきたいと思っております。下記の要領で論文を募集いたしますので、積極的なご投稿をお待ちしております。なお、基礎的、萌芽的な研究内容を含む速報論文の投稿を歓迎いたします。

内 容	エレクトロニクスおよびその周辺に係わる表面技術に関連する研究	送 付 先	本会・会誌編集委員会 〒101-0041 東京都千代田区神田須田町2-7-1 福田ビル
原稿種別	(1)研究論文, (2)技術論文, (3)ノート, (4)速報論文		
投稿締切	研究論文・技術論文 平成16年6月30日(水) ノート・速報論文 平成16年8月31日(火)		*投稿の際、一般投稿論文と区別するため、投稿票に「エレクトロニクス特集号」と朱書きされるか、特集号用の投稿票を事務局宛ご請求ください。また、内容などについてのお問い合わせは編集係までお願いいたします。
投稿規程	通常の「表面技術」誌の投稿規程と同じです。		
発 行	第55巻12号(平成16年12月1日発行) 予定		