

# MEMSを用いた振動エネルギーハーベスト技術

おの かずよし さとう のりお  
**小野 一善 / 佐藤 昇男**  
 さかた ともみ こだて じゅんいち  
**阪田 知巳 / 小舘 淳一**  
 じん よしと  
**神 好人**

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所

近年、身の周りに存在するエネルギーから電気エネルギーを得るエネルギーハーベスト（環境発電）技術が注目されています。本稿では、センサネットワーク端末の自立動作へ向けて、NTTマイクロシステムインテグレーション研究所で開発しているマイクロ振動発電技術について紹介します。

## エネルギーハーベスト（環境発電）技術とは

私たちの身の周りや自然界は、振動や熱、光といった普段あまり意識することなく使用されていないエネルギーであふれています。エネルギーハーベスト（環境発電）技術とは、環境中の広く薄く存在するこれらのエネルギーを収穫（ハーベスト）し、電気エネルギーとして有効活用する技術のことをいいます。近年、半導体デバイスの低消費電力化の進展により、微弱なエネルギーでも駆動できる回路やデバイスが開発されつつあり、上記のエネルギーの利活用が現実的になってきました。NTTマイクロシステムインテグレーション研究所においても、身の周りの情報を大量に集めることを目的としたユビキタスセンサ端末やその回路の低消費電力化技術の研究に取り組んでいます<sup>(1)</sup>。私たちは、超小型化バッテリーレスワイヤレス端末などのようなユビキタス端末に向けた基盤技術の1つとして、微小電気機械システム（MEMS: Micro ElectroMechanical Systems）技術による振動エネルギーハーベスト技術の研究開発に取り組んでいます。本稿では、振動エネ

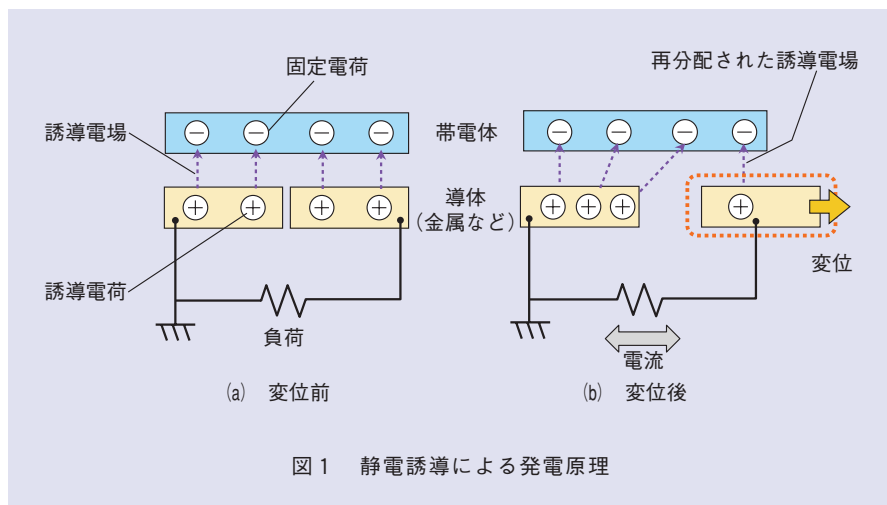
ルギーを電気エネルギーに変換するエレクトレット（Electret）を用いた静電誘導型発電デバイスの原理や、構造、作製プロセスおよび基本特性について紹介します。

## 静電誘導による発電原理

振動エネルギーを電気エネルギーに変換する方式には、静電誘導方式、電磁誘導方式、圧電方式などがあります<sup>(2)</sup>。前述したような超小型センサネットワーク用の各種集積回路への電源供給を考えた場合、変換効率が高いこと、半導体プロセスとの親和性が高いことから、私たちは静電誘導を利用した方式に着目しました。

静電誘導とは、金属のような導体に静電気が帯電した物体（帯電体）を近づけると、帯電体の電荷（固定電荷）とは逆の電荷（誘導電荷）が生じる現象のことをいいます。このような静電気にまつわる身近な現象としては、プラスチックの下敷きを衣服などで擦り、人間の髪の毛に近づけると髪の毛が引きつけられる現象がよく知られています。

静電誘導による発電の原理を図1に示します。帯電体に2つの金属などの導体を近づけます。すると上述した静電誘導により、帯電体付近の導体の表面には、帯電体の電荷とは逆の極性を持つ誘導電荷が生じ、固定電荷と



誘導電荷との間には電場が形成されま  
す。例えば、帯電体に対して、2つの  
導体を近づけた場合も同様な関係が成  
り立ちます(図1(a))。この状態から、  
2つの導体のうち、1つを相対的に変  
位させると、変位に応じて誘導電荷  
(電場)が再分配されます。2つの導  
体の間に負荷を接続しておくと、電荷  
の移動に応じて、負荷には電流が発生  
します(図1(b))。帯電体からの誘導  
電荷を継続的に発生させるために、帯  
電体には静電気を常時保持することが  
必要となります。そのために半永久的  
に電荷を保持できるエレクトレットと  
いう材料を使用することが一般的です。  
このエレクトレットは、身近な例とし  
ては、集塵機のフィルタや携帯電話の  
マイクなどに利用されています。また、  
静電誘導を効率良く発生させるため  
には、図1の帯電体と2つの導体の間隔  
を数10 $\mu$ m程度に制御することが必要  
となります。

### スリットアンドスライダ―構造

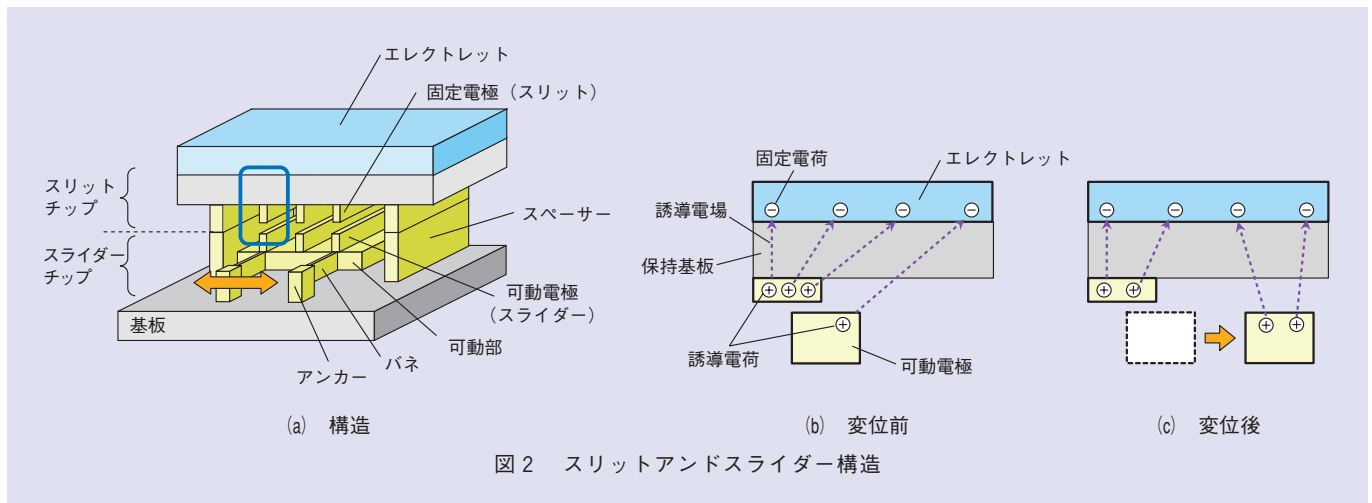
振動エネルギーを電気エネルギーに  
変換するための構造として、図2に示  
すようなスリットアンドスライダ―構  
造を考案しました<sup>(3),(4)</sup>。

本構造は、エレクトレット、エルク  
トレットを保持し固定電極(スリット)  
構造を有するスリットチップ、可動電  
極(スライダ―)構造を有するスライ  
ダ―チップより構成されます(図2  
(a)、可動部のサイズは1mm角)。そ  
れぞれのチップはスペーサーを介して  
接続されています。スペーサーの高さ  
を変えることで、固定電極と可動電極  
との間隔(25 $\mu$ m程度)を制御する  
ことができます。可動電極を有する可動  
部はバネにより吊られています。外部  
から振動を加えた場合、基板に対して  
矢印の方向に相対的に変位し、静電  
誘導の原理により電流が発生します。  
本構造における電流発生メカニズム

についてさらに詳細に示します。図2  
(b)に、固定電極と可動電極の基本要  
素(図2(a)青枠内)を示します。固  
定電極と可動電極の位置関係が図の  
ようになっている場合、エレクトレ  
ットの固定電荷に対応した誘導電荷が固  
定電極に現れます。次に、図2(c)に  
示すように、固定電極に対して可動電  
極が水平方向に移動した場合、固定  
電極に局在していた誘導電荷の一部が  
可動電極にも現れます。以上のように、  
スライダ―が固定電極に対して、相対  
的に変位することで、誘導電荷の変化  
が起こり両電極間の負荷には電荷の移  
動(電流)が発生します。

### 作製プロセス

スリットアンドスライダ―構造を  
MEMSプロセス<sup>(5)</sup>により、作製しま  
す。図2(a)に示したスリットチップと  
スライダ―チップとを独立に作製した  
後、フリップチップ接合にて貼り合わ



せることで、1つのチップを作製します。各々のチップの構造体は厚膜めっき技術により形成します。この作製プロセスについて、**図3**を用いて説明します。まず、スライダチップの作製方法について説明します。配線層が形成されたSiウエハ上に、フォトリソグラフィによりレジストパターンを形成した後、金めっきによりスペーサーなどの下部構造を形成します(**図3(a)**)。レジストおよびシード層を除去した後、感光性の有機樹脂を用いて、下部構造を平坦化します(**図3(b)**)。この有機樹脂は、犠牲層として可動素子構造を形成するために一時的に形成されます。平坦化されたウエハ上に、同様のプロセスを複数回繰り返すことで、可動部や可動電極などの構造を積層します(**図3(c)~(e)**)。最後に、ウエハ

をチップに切り出した後、犠牲層である有機樹脂をアッシング処理により除去することで、バネで吊られた可動部が動く状態になります(**図3(f)**)。スリットチップに関しても、同様な手法により作製します。第1層目には、金めっきにより固定電極やスペーサーの下部構造を形成し(**図3(g)**)、第2層目にはスペーサーの上部構造を形成し(**図3(h), (i)**)、チップに切り出します。これらの上下チップをフリップチップボンディングにより貼り合わせることで構造が完成します(**図3(j), (k)**)。

上記の作製プロセスを用いて実際に製造したチップの写真を**図4**に示します。1mm角の可動部と、その周囲には10 $\mu$ m級の構造が作製され、静電誘導方式のエネルギーハーベスタの素子としては、世界最小レベルの非常に小

さな構造を作製することができました。また**図5**はチップに外部から振動を加え、その様子を撮影したものです。外部振動によって、可動部が振動していることが分かります(**図5(b)**)。

### 発電実験

**図6**に示すような評価系を用いて発電の基礎実験を行いました。**図3(k)**のチップの上に帯電させたエレクトレットを載せます。エレクトレットの上にシールド板を配置し、エレクトレットをチップに固定します。このチップを加振器によって水平方向に振動させ、振動に同期した電流をロックインアンプによって測定しました。可動部が加振器からの振動により、初期状態から相対的に変位した場合、電流が発生します。加振器による外部振動とし

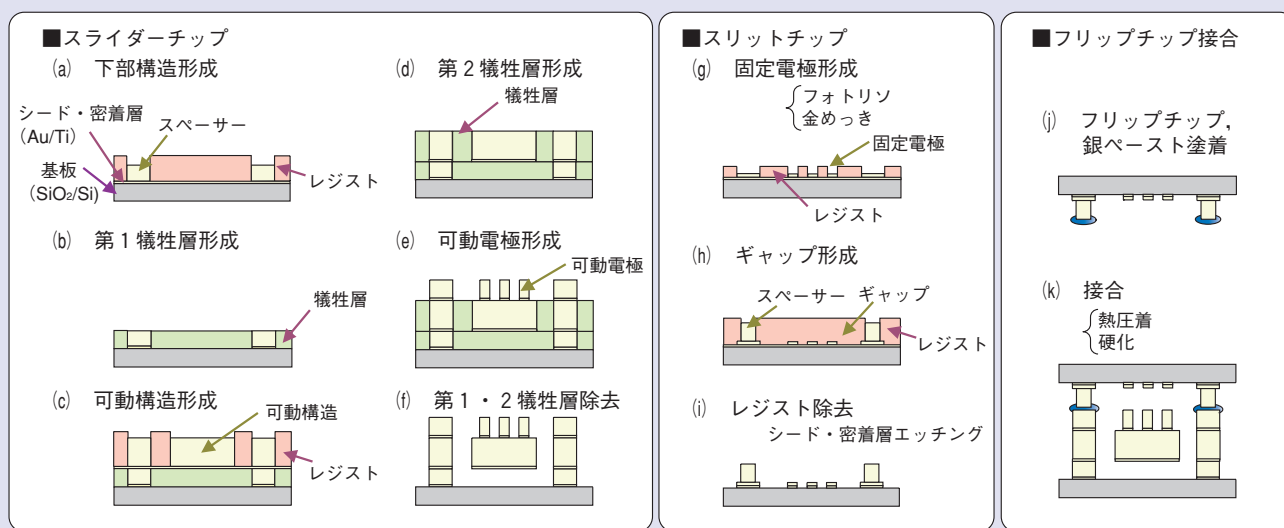
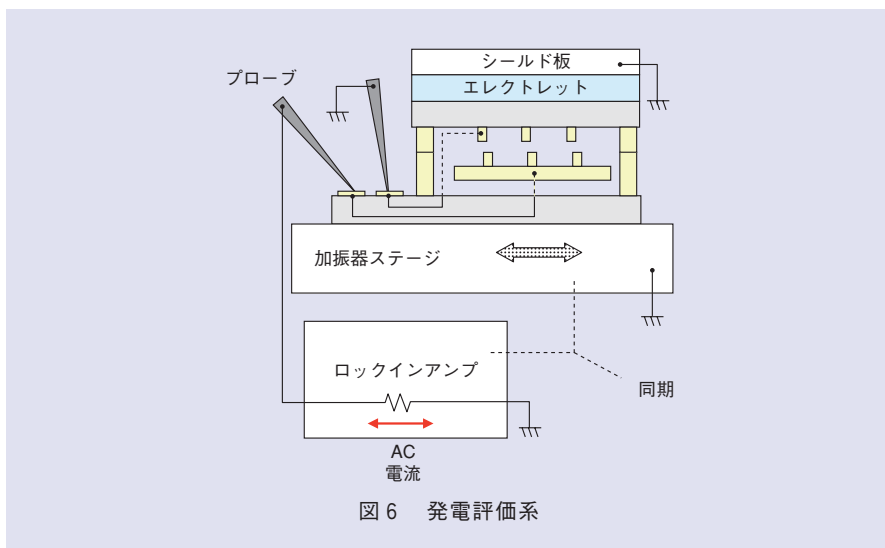
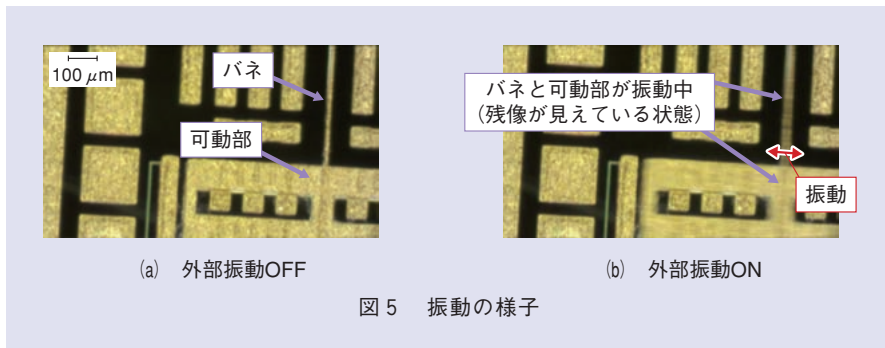
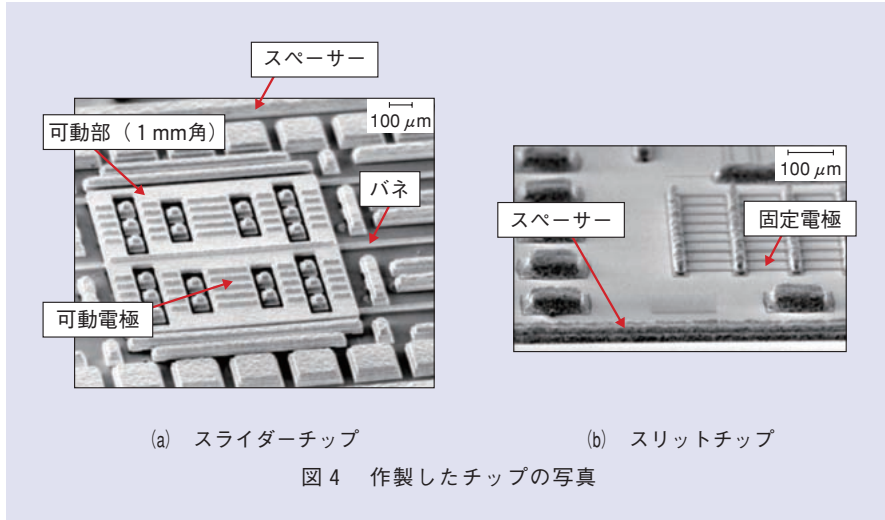


図3 作製プロセス



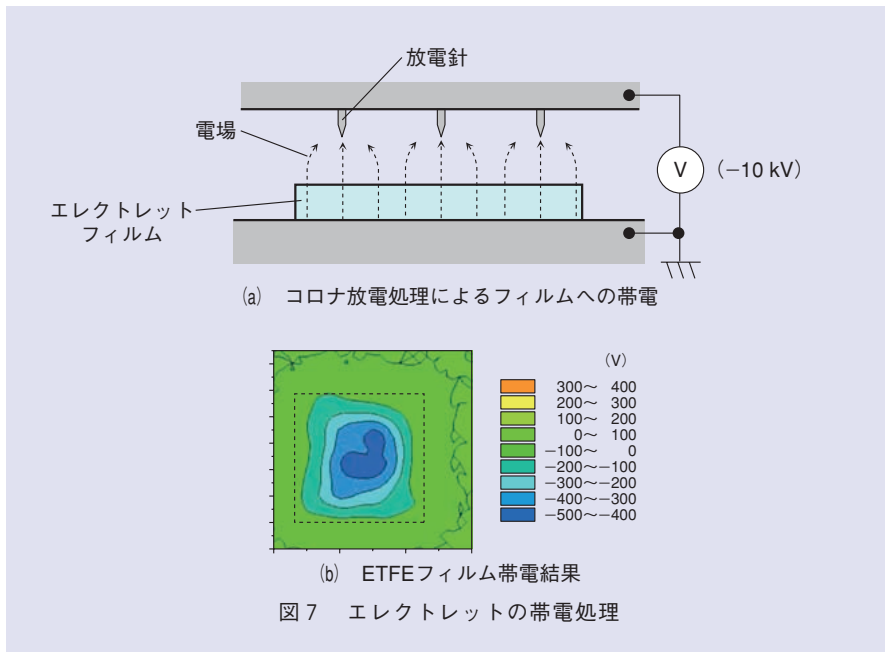
て、 $1 \text{ m/s}^2$ の加速度の振動を、周波数を掃引させながら印加しました。

今回の評価では、エレクトレットとして、ETFE (Ethylene-TetraFluoro Ethylene copolymer) という世の中で広く使用されている一般的な材料のフィルムを用いました。100  $\mu\text{m}$ 厚のフィルムを、図7(a)に示すようなコロナ放電処理により帯電させました。図7(b)に、コロナ放電処理後のETFEフィルムの帯電結果を示します。フィルムの表面には、 $-450 \text{ V}$ の帯電圧があることが分かります。

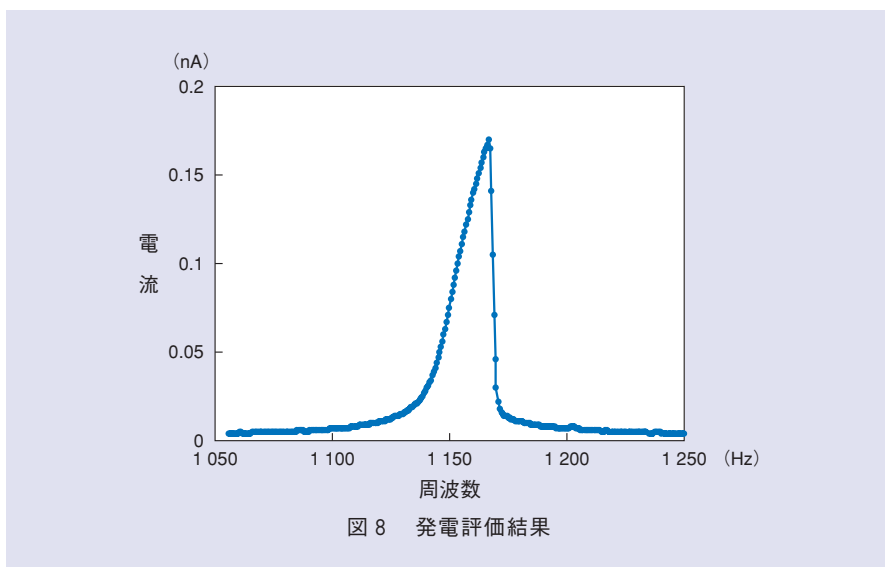
また、発電評価の結果を図8に示します。これは、外部からの振動によって、可動部の共振周波数において、電流が発生していることを示しています。これらの結果より、外部からの振動で、スリットアンドスライダー構造を有するMEMS素子が発電していることを確認しました。

### 今後の展開

今回紹介したMEMSによる振動エネルギーハーベスト技術を発展させ、発電デバイスのさらなる高性能化を図るとともに、私たちは今後とも発電をマネジメントする回路や各種センサおよびセンサ回路とのインテグレーションに取り組んでいきます。そして将来的には、エネルギーハーベスト技術の研究開発により、安心・安全・快適な生活を支えるユビキタスサービスの創出につなげていきたいと考えています。



- (4) K. Ono, N. Sato, T. Shimamura, M. Ugajin, T. Sakata, S. Mutoh, and Y. Sato : "A Millimeter-sized electret-energy-harvester with microfabricated horizontal arrays and vertical protrusions for power generation enhancement," Digest Tech. Papers, TRANSDUCERS2011, pp.1863-1866, Beijing, China, June 2011.
- (5) 石井・森村・小舘：“ユビキタスサービスに向けたMEMSデバイス技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.19, No.7, pp.8-10, 2007.



(左から) 阪田 知巳/ 佐藤 昇男/  
小野 一善/ 小舘 淳一/  
神 好人

NTTグループの事業拡大へ向け、付加価値の高いMEMSデバイス技術の研究開発に取り組んでいます。

◆問い合わせ先

NTTマイクロシステムインテグレーション研究所  
ネットワーク装置インテグレーション研究部  
MEMSデバイス研究グループ  
TEL 046-240-2720  
FAX 046-270-2322  
E-mail ono.kazuyoshi@lab.ntt.co.jp

■参考文献

- (1) 大嶋・松永・島村・森村・原田：“ナノワット級超小型バッテリーレス・無線センサ端末技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.24, No.12, pp.24-27, 2012.
- (2) S. Roundy, P. K.Wright, and J.M. Rabaey : "Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks," Kluwer Academic Publishers, p.22, 2004.
- (3) N. Sato, K. Ono, T. Shimamura, K. Kuwabara, M.Ugajin, S. Mutoh, H. Morimura, H. Ishii, J. Kodate, and Y. Sato: "Energy Harvesting by MEMS Vibrational Devices with Electrets," Digest Tech. Papers, TRANSDUCERS2009, pp.513-516, Denver, U.S.A. , June 2009.