

# 特集 | ワイヤレス管内マイクロマシンの開発\*

## In-Pipe Wireless Micromachine

川原 伸章

Nobuaki KAWAHARA

We have been developing an In-Pipe Inspection Micromachine for inspection on the inner surface of thermoconduction tubes of power plants, in the collaboration with DENSO, Toshiba and SANYO. The machine consists of many devices, CCD camera for inspection, actuator for locomotion, communication circuit for control, microwave antenna and photovoltaic device for energy supply and communication. Through the project, the technologies of the component devices and the system have been developed. Several prominent results were also obtained on the both technologies. As for the device technologies, the component devices have been developed. As for the systematization technologies, the functions, simulation, packaging and assembling of the system have been studied.

**Key Words** : Micromachine, In-Pipe Inspection Micromachine,

### 1. はじめに

熱交換器の細管を検査することができる管内自走環境認識マイクロマシンを、デンソー、東芝、三洋の協力下で開発中である<sup>1)</sup>。このマイクロマシンは、発電所等の熱交換器配管の内面を検査する機能を持っており、開発は国家プロジェクト(通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度の「マイクロマシン技術の研究開発」プロジェクト)として、支援を受けている。

このマイクロマシンは2000年末までに完成させることを目標としているが、本稿では開発状況を報告する。開発中のマイクロマシンは、CCDカメラ、移動機構、マイクロ波エネルギー供給デバイス、通信デバイス、マイクロ波アンテナ、光電変換デバイス、制御回路等から構成されている。

それぞれの構成デバイスについて、これまで小型化、軽量化低消費電力化を図ってきており、要素技術で成果が得られた。また、これらのデバイスを集積化するシステム化技術においても成果が得られた。

Fig.1に開発目標の管内自走環境認識マイクロマシンのシステム構成を示す。大きさは直径9.5mm、長さ50mm程度の円筒形になる予定で、このマイクロマシンはワイヤレスで直径10mmの配管の中を進み、管内の様子を搭載したCCDカメラで観察し、その画像データを外部に送信する機能を持っている。このマイクロマシンはバッテリーを搭載せず、必要なエネルギー(650mW)はマイクロ波と光を用いて外部から供給される。また、画像通信とマイクロマシンの制御は

\* 2000年4月13日原稿受理

24GHzのマイクロ波を用い、画像はトランスポンダ方式のデジタル通信を行っている。

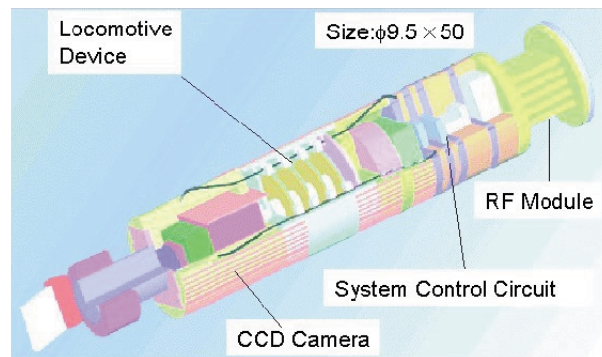


Fig. 1 Wireless in-pipe inspection micromachine

### 2. 搭載デバイスの開発状況

#### 2.1 CCDマイクロカメラ

CCDカメラの先端には静電アクチュエータとモーターが一体化したミラーが取り付けられている。ミラーを跳ね上げるとCCDは前方を観察し、45度倒して回転することにより、管壁を詳細に観察することができる。CCD撮像素子は3mmで10万画素あり、画像データはデジタル出力される。CCD制御、信号生成等のすべての回路は4.4×5.2×11.5mmのブロック内に3次元的に実装されている。また、焦点調節のためのレンズは、静電リニアアクチュエータのスライダに固定され、視線を変えた時の焦点調節ができるようになっている。Fig.2は、内部回路が見えるようにしたCCDカメラで、最終的には、金属管体によるシールドが施される。

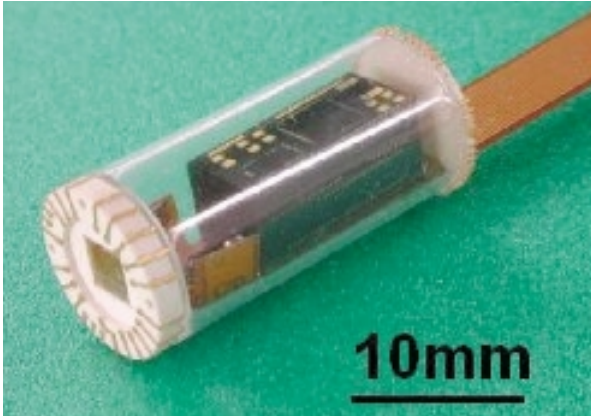


Fig. 2 CCD microcamera for inspection

### 2.2 マイクロ波エネルギー供給デバイス

本マイクロマシンシステムは、外部ホスト(以後、ホスト)及び管内マイクロマシンよりなっており、ホストは配線を用いることなくマイクロマシンにエネルギーを供給し、かつ無線通信を行う役割を担っている。このシステムの実現のために、我々はマイクロ波を用いたエネルギー供給及び通信方法を提案している<sup>2)</sup>。

金属製配管はマイクロ波にとって円形の導波管として働くため、管の中を低損失で伝搬させることが可能である。直径10mmの配管では、22～24GHzが導波管モードとして使えるため、エネルギー供給には22GHz、通信には24GHzを採用した。

マイクロ波エネルギー供給においては、発信器で生成されたマイクロ波は増幅されて管内に導入され、マイクロマシンに搭載されたアンテナで受信される。受信されたマイクロ波は搭載した整流回路で直流に変換される。整流回路はマイクロ波を直流に変換する機能を持ち、Fig.3に示すように分配器と4つのMMIC整流器より構成されている。

回路のサイズは7×9.5mmである。一つのMMICの最大変換エネルギーは60mWであり、最大消費電力480mWを供給するため8つのMMICを搭載する必要がある。アンテナで受信されたマイクロ波は、整流回路から分配器を介してMMICに供給される。今回試作した整流回路の変換効率は約30%であった。回路と分配器サイズの縮小のために、電磁界シミュレーションを行った。

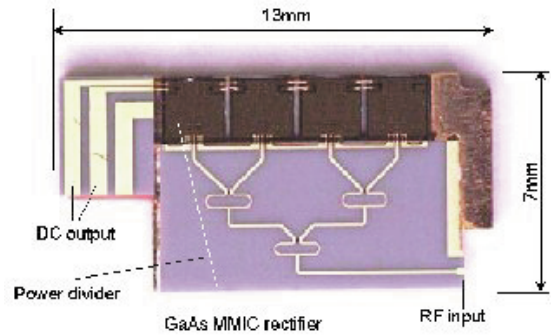


Fig. 3 Rectifying circuit

### 2.3 マイクロ波通信デバイス

マイクロマシンとホスト間の通信は、24.125GHzのマイクロ波を用いた。マイクロマシンに与えられる命令は、ASK( Amplitude Shift Keying )法により送信した。こうすることにより、ロボットに搭載する復調回路構成が簡単になり、搭載回路の小型化が可能となった。

また、マイクロマシンからの通信はPSK( Phase Shift Keying )で、トランスポンダ方式で行った。この方式は反射波の位相を反転するだけで、ロボットに発信器を搭載する必要がないため、通信におけるロボット側の消費電力を大幅に削減することができた。

Fig.4にマイクロ波通信デバイスを示す。エネルギー用のマイクロ波と通信信号を分離するためのフィルタと変復調MMICから構成されている。回路サイズは7×9.5mm、通信速度は2.5Mbpsである。

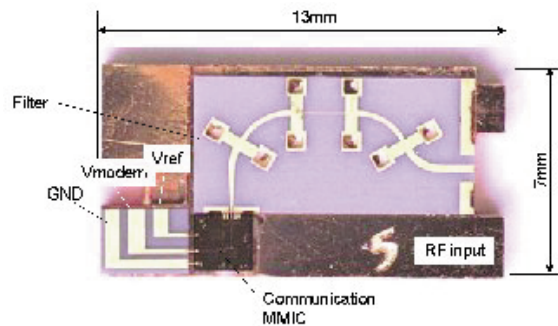


Fig. 4 Communication circuit

### 2.4 積層型パッチアンテナ

アンテナは2種類のパッチアンテナ、すなわちエネルギー供給用の22GHz対応アンテナと、通信用24GHz対応のアンテナから構成されている。このアンテナはFig.5に示すように2層構造をとっており、3枚の金属板、すなわち2枚のアンテナ素子と基板より構成されている。

エネルギー供給用の、大きい方のアンテナ素子と基板の間は空気で分離されているが、もう片方の通信用の小さいアンテナ素子 - 基板間はテフロン(誘電率: 約6)で分離されている。これは、通信用アンテナのアンテナ素子 - 基板間ギャップの材料に比誘電率の大きいものを使うと、アンテナを小さくかつ帯域を狭くすることができるからである。

またアンテナの設計には、有限要素法による電磁界シミュレーションを用い、パラメータ最適化のための設計ツールを新たに開発した。

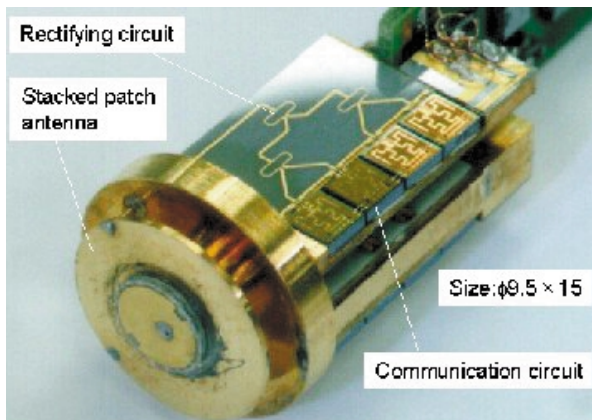


Fig. 5 Structure of the RF module

### 2.5 移動デバイス

配管内検査マシンの移動機構の低消費電力化を実現する高効率なアクチュエータとして、新規な積層圧電バイモルフアクチュエータを開発した<sup>3)</sup>。この積層圧電バイモルフアクチュエータは、圧電体で弾性板である金属をサンドイッチしたバイモルフ構造により圧電体の変形量を拡大し、このバイモルフを積層することで必要な発生力を得ることができる。

圧電体は、電圧を加えるとその体積を変えずに電界方向に伸び縮みする。すなわち電圧を加えた垂直方向では電界方向の場合と逆の動きをする。この圧電体を弾性板(金属板)と張り合わせることで圧電体自身の小さな変位を弾性板のたわみとして拡大する。必要な発生力に応じて圧電バイモルフを積層し、積層圧電バイモルフアクチュエータが構成される (Fig.6)。

積層された圧電バイモルフは、中央支柱と外周支柱で連結され、それぞれの圧電バイモルフが同じ方向に変形することで大きな発生力を得る。この積層圧電バイモルフアクチュエータの中心支柱に慣性体となる重りを、外周支柱にクランプを付けることで移動機構が構成できる。

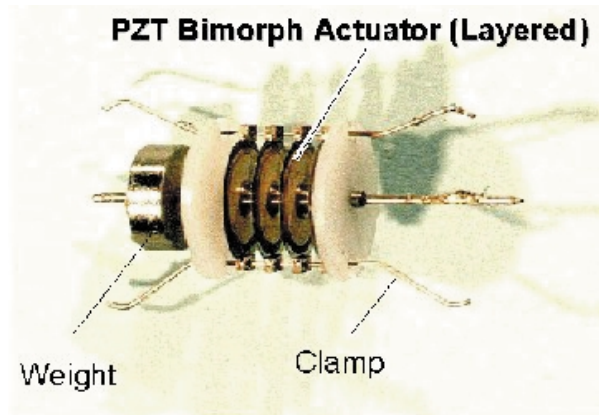


Fig. 6 Photo of a layered PZT bimorph actuator

この移動機構は、従来のスタック型圧電アクチュエータを用いたものに対して約1/40の消費電力で約2.5倍もの速度で移動することが可能である。このような低消費電力で高速に移動する移動機構が実現されたことで、無線によるエネルギー供給での配管内移動が現実的なものとなった。

Fig.7に慣性駆動<sup>4)</sup>による移動機構の動作原理を示す。移動機構は、圧電アクチュエータに鋸波状の電圧波形を印加することで駆動される。ゆっくりと電圧が上昇し、急激に電圧が低下する鋸波状の電圧波形に対しては、アクチュエータはゆっくりと伸び、急激に縮む。アクチュエータがゆっくりと伸びるときは、クランプの位置は変わらずに慣性体がアクチュエータに押されて移動する。

これは、慣性体が移動するときを生ずる慣性力がクランプと管壁の摩擦力よりも十分小さいためである。一方、アクチュエータが急激に縮むときには、慣性体の急激な移動により生ずる慣性力がクランプと管壁の摩擦力より十分大きくなるためにクランプが移動する。この1サイクルの動作により検査マシンは、配管内を5 ~ 10 $\mu$ m程度移動し、鋸波状の電圧波形を連続的に数kHz程度の周期で加えることで検査マシンは配管内を数mm/s程度の速度で滑らかに移動することができる。また、鋸波の方向を変えることで移動方向を反転することができる。

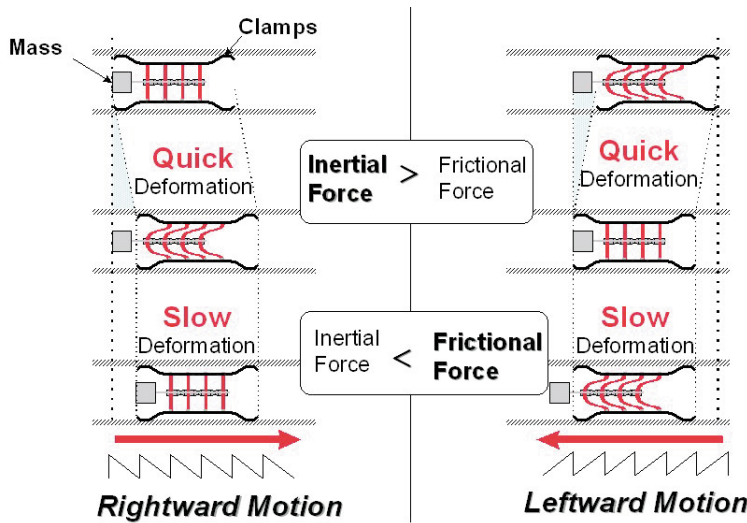


Fig. 7 In-pipe transfer mechanism based on inertial force

2.6 制御回路

制御回路の機能は外部からのコマンドにより、マイクロマシンに搭載した電圧制御器と電圧モニタ、移動機構駆動回路、CCD、視線変更機構、焦点調節機構等を制御する。また、CCDの画像信号を外部に送信する機能を持っている。画像通信するLSIとしてMPEG2 などがあるが、画像通信するデータ単位がフレーム(1画面)のため、大量のメモリを必要とし、チップサイズも大きく( 10mm 以上)、消費電力も大きいためマイクロマシンへ搭載することはできない。

そのため、今回、東芝と共同で、データ単位を走査線とし、わずかなラインメモリだけでデジタル画像通信ができる通信方式を開発した。Fig.8に開発した制御用LSIを示す。サイズはわずかに 4mm で、4万ゲート、消費電力は45mWである。

実装技術は、直径10mmの管内で移動するマイクロマシン実現のためには、非常に重要な問題である。マイクロ移動機構の出力が限られている中では、マイクロマシンの重量は軽い必要がある。

そこで小型回路を実現するために、ゲートアレイと8つのMMICの実装にはフリップチップ法を採用した。ゲートアレイは線幅0.35 $\mu$ mのCMOSルールで作られ

ており、パッドのピッチ及び直径はそれぞれ120 $\mu$ mと88 $\mu$ mである。スタッドバンプがベアチップの各パッド位置に形成され、それらのバンプは異方性導電ペースト(ACP)を用いて微細ピッチ6層プリント基板(PCB)に接着される。

チップは、チップ接合機により、正確に位置合わせを行って、加熱されることでPCBと接合される。ACPは熱硬化樹脂と多数の導電性粒子より成っていて、接着力の強化と、ベアチップと基板間の熱膨張係数の違いにより発生する応力を緩和する作用がある。

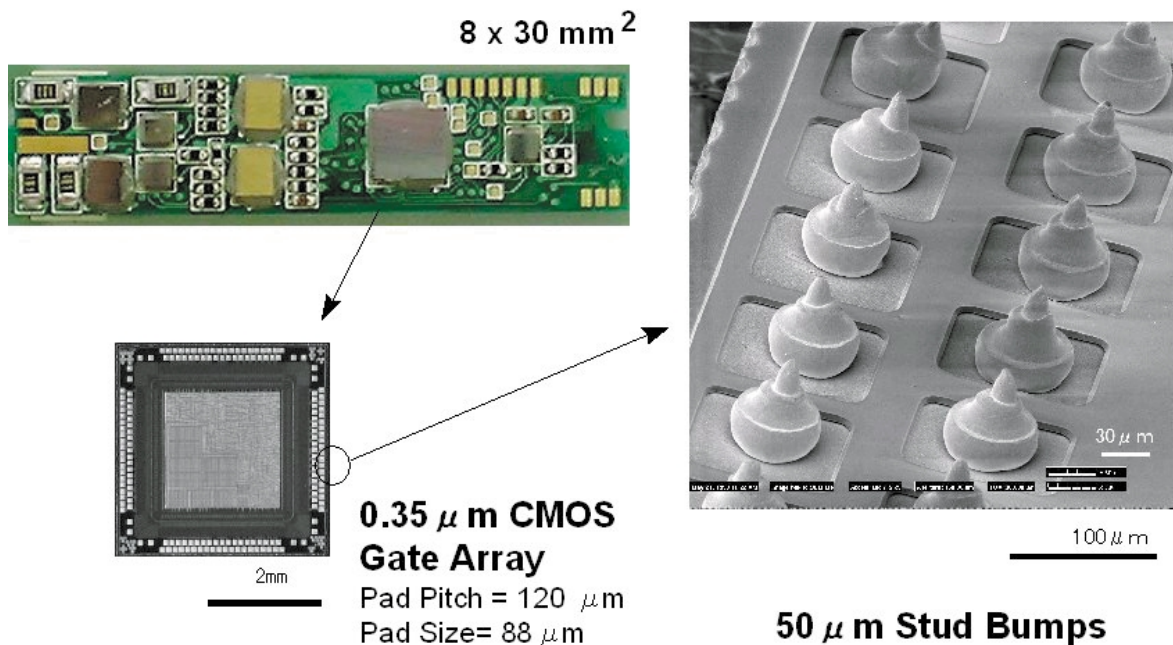


Fig. 8 Newly developed control LSI and packaging technology

### 3. システム化技術

上記の各コンポーネントを組み立てて、図9に示すマイクロマシンのプロトタイプを製作した。このシステムはマイクロ波を通して480mWのエネルギーを受けて、直径10mmの配管内を移動することができる。マイクロマシンの移動方向や速度は、外部から与えるコマンドにより制御可能である。

Fig.9は、1999年度に開発した管内マイクロマシンの一例を示す<sup>5)</sup>。Fig.1に示したマイクロマシンは2000年末完成を目指しており、1999年度はその前段階として、3つのプロトマイクロマシンを試作し、最終マイクロマシンの持つ機能を個別に検証した。全長5mm、直径9.5mmのこのマイクロマシンは、外部からからのコマンドにより、直径10mmの配管内を移動することができ、すべてのエネルギーはマイクロ波を用いて外部から供給される。

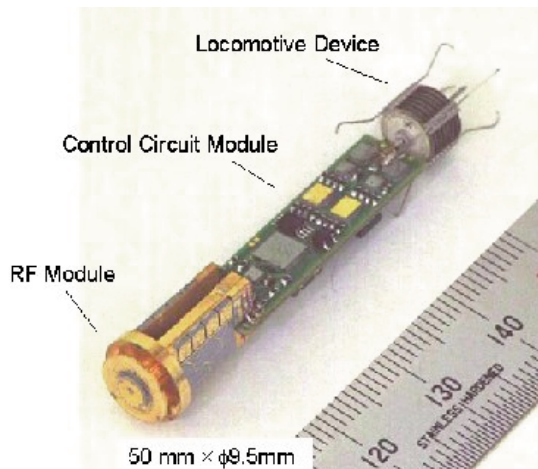


Fig. 9 Developed micro robot

この他にも、マイクロ波と光により、最終マイクロマシンに必要な4種類の電圧を供給できるタイプ、CCDの画像を管内無線通信するタイプを開発した。今後、Fig.1のマイクロマシンを完成するために、1999年度に完成させた3つのプロトマイクロマシンの小型集積化を図って行く予定である。

具体的には、積層実装技術による回路部の小型化、マイクロ波供給電力の向上と、画像通信の両立を実現した小型RF部の開発、マイクロ波アンテナと光電変換デバイスの小型集積化、小型CCDカメラとの一体化を行う。将来、完成したマイクロマシンは配管内のメンテナンスに使われるだけでなく、その他のメンテナンス、セキュリティ、IT分野で使われることを期待している。

### 謝辞

なお、本研究は通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDOから委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として、(株)デンソー、(株)東芝、三洋電機(株)が実施したものである。

### <参考文献>

- 1) N. Kawahara, T. Shibata, and T. Sasaya, "In-pipe Wireless Micro Robot", Proceedings of the SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly, vol. 3834, pp. 166-171, 1999.
- 2) T. Shibata, T. Sasaya, and N. Kawahara, "Microwave Energy Supply System for In-Pipe Micromachine", Proceedings of the 1998 International Symposium on Micro-mechatronics and Human Science, pp. 237-242, 1998, IEEE.
- 3) S. Kawakita, T. Isogai, N. Ohya, and N. Kawahara, "Multi-Layered Piezoelectric Bimorph Actuator", Proceedings of the 1997 International Symposium on Micro-mechatronics and Human Science, pp. 73-78, 1997, IEEE.
- 4) T. Higuchi, M. Watanabe, and K. Kondou, "Precise positioner utilizing rapid deformations of a Piezoelectric Element", JSPE-54-11, pp. 2107-2112, 1988.
- 5) T. Sasaya, T. Shibata and N. Kawahara, "In-Pipe Wireless Micro Robot", Transducers '99 Digest of Technical Papers Vol. 2, pp. 1058-1061, 1999.

### <著者>



川原 伸章  
(かわはらのぶあき)

基礎研究所  
マイクロデバイス、マイクロマシン研究に従事。  
マイクロマシンセンター管内自走環境認識システム開発W/G主査  
工学博士