

# 論文 | マイクロマシンに対するマイクロ波エネルギー 伝送システム\*

## Microwave Energy Transmission System for Micromachine

柴田 貴行      青木   豊   大塚まなぶ  
Takayuki SHIBATA   Yutaka AOKI   Manabu OTSUKA

Micromachine is a small mechatronic system with the size up to several centimeters, which can carry out complicated tasks in small or narrow area. Micromachine technologies are expected to be utilized in various fields ; telecommunication, precise machinery, micro surgery, artificial organs, lowinvasive diagnostics, etc.

The majority of independent locomotion micromachines pack batteries as their energy source. However, because the energy that can be stored in a battery is proportional to its volume, the operating time becomes shorter as the micromachine becomes smaller. To solve this problem the energy must be supplied from outside by wireless transmission. We propose a microwave energy transmission system for micromachines in metal piping. Because microwave is rectified and converted in the form of electric energy in this system, we developed a receiving antenna for micromachines in piping and a microwave rectifying circuit to generate high voltage. These were loaded on a micromachine, tested to drive a locomotive mechanism, and the efficiency of the proposed system was confirmed.

**Key Words :** Micromachine, Microwave, Energy Transmission, Wireless

### 1. ま え が き

マイクロマシンとは、微細で複雑な作業を行うために大きさ数 mm 以下の高度な機能要素から構成された数 cm から数 mm の小さな機械を指す。マイクロマシン技術により、各種の小型高精度なメカトロニクス技術を必要とする情報通信機器や精密機器、また、マイクロサージェリー、人工臓器、診断や治療に伴う苦痛を低減させる高度医療システム、更に、小型機器等の生産分野で用いられるシステム等、社会を構成している多様な機械システムの飛躍的な高度化や高信頼化に就くことができ、21 世紀には産業分野、医療分野をはじめとし、福祉・衛生分野、余暇生活分野、住宅環境分野、家電・情報機器分野、宇宙・航空分野など幅広い分野での応用が期待できる。

近年、自律移動が可能なマイクロマシンの研究が進んでいるが、その大部分はバッテリーを積み込んでエ

ネルギー源としている。しかし、バッテリーに蓄えられるエネルギーは体積に比例するので、バッテリーの寿命はロボットの小型化にともなって短くならざるを得ない。一方、電磁波を受けてエネルギー源とする方法では、受信可能なエネルギーが面積に比例するため、ロボットが小さくなくても十分なエネルギーを供給することができる。

自律移動するマイクロマシンの応用分野としては、例えば発電プラントなどの配管内壁の検査がある。この場合、マイクロマシンは屈曲のある配管の中で検査作業を行う必要がある。配管内のマイクロマシンに電磁波でエネルギーを供給する場合、電磁波の波長を配管径と同じ程度にすると、配管はマイクロ波帯で常用される導波管と等価になる。導波管モードの電磁波は屈曲配管でも減衰は少なく、高効率なエネルギー伝送が行える。

開空間においては、最初のマイクロ波電力伝送実験<sup>1)</sup>が1964年に行われた。その後、マイクロ波電力伝送は、宇宙太陽発電所 (SPS) の提案<sup>2),3)</sup>により注目され、現在も研究が進められている。地上での応用とし

\* IEICE Trans. Electron. Vol. E80-C (1977) より和文翻訳、加筆転載

ては飛行機、飛行船に対するマイクロ波送電<sup>4)~6)</sup>や、無電池カードシステム<sup>7)</sup>などが研究されている。送信周波数はいずれも 2.45 GHz である。我々は配管中のマイクロマシンに対してマイクロ波でエネルギー供給を行う概念を提示し<sup>8)</sup>、直径 28 mm の拡大スケールモデルで基礎的な実験を行うとともに、高いブレイクダウン電圧を有するマイクロ波帯 (K-band) のダイオードの研究を行ってきた<sup>9)~10)</sup>。

本報告は、配管内のマイクロマシンに対してマイクロ波でエネルギーを伝送するシステムを提案するものである。第 2 章では配管内マイクロ波エネルギー伝送の概念と実現の可能性に関して、第 3 章ではマイクロ波エネルギー伝送システムの構成について、第 4 章では必要となる要素技術である受信アンテナと整流回路について述べ、第 5 章では試作したマイクロマシンとマイクロ波エネルギー伝送システムについて述べる。

## 2. 配管内マイクロ波エネルギー伝送の原理

### 2.1 システム基本概念

提案するマイクロ波エネルギー伝送システムは、マイクロ波をマイクロマシン上のアンテナで受信し整流することによりマイクロマシンに必要なエネルギーを供給するものである。その基本的なシステム構成を Fig. 1 に示す。発振器で発生したマイクロ波は増幅器で増幅され、配管に導かれる。配管中のマイクロマシンにはアンテナが取り付けられておりマイクロ波を受信する。受信したマイクロ波は整流回路で直流に変換され、マイクロマシンのエネルギー源となる。

### 2.2 マイクロ波伝送路としての配管

#### 2.2.1 マイクロ波の伝送モード

このシステムでは配管を円形導波管とみなし、マイクロ波の伝送路として使用するため、配管径と周波数には密接な関係がある。導波管には遮断周波数が存在し、それ以下の周波数になるともはや電磁波を通すこ

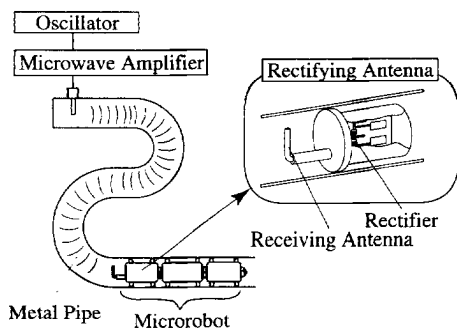


Fig.1 Microwave energy transmission system

とはできない。また周波数が高くなると高次モードが発生し、損失が増大する。そのためマイクロ波伝送モードには円形導波管の基本モード TE<sub>11</sub> を用いた。Fig. 2 に TE<sub>11</sub> モードを使用したときの配管径と周波数の関係を示す。この図から、対象とする配管径に合った適切な周波数がわかる。図中の遮断領域と高次モード領域の中間点を伝送周波数とすると、配管径 10 mm では 21 GHz、配管径 3 mm では 65 GHz となる。現状の整流ダイオードの整流効率から考えると配管径 3 mm 程度までがマイクロ波でエネルギー供給できる範囲といえる。

### 2.2.2 配管の伝送損失

円形導波管の伝送損失は次式で示される<sup>11)</sup>

$$\alpha = 5.040 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \cdot D^{-1.5} \cdot \frac{1 + 0.4185 \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}{\sqrt{\frac{f}{f_c}} \cdot \sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1}} \text{ [dB]} \quad (1)$$

但し  $\rho$  は導波管材料の固有抵抗、 $\rho_0$  は銅の固有抵抗、 $D$  は導波管内径、 $f_c$  は TE<sub>11</sub> モードの遮断周波数、 $f$  は減衰量を計算するマイクロ波の周波数である。内径 10 mm の銅管の減衰量を計算すると 0.36 dB/m となる。

ここでマイクロマシンの作動に必要な電力を 200 mW とした場合、送信に必要な電力はどの程度になるかを見積もる。マイクロ波を送信アンプから円形配管に導くまでの損失が 2 dB、後述する定在波の発生防止対策が 6 dB、銅配管の減衰量が 0.36 dB/m、マイクロマシンに届いた電磁波がアンテナと整流回路で直流に変換される際に 5 dB の損失があると仮定すると、配管長さ 1 m で 4.3 W、10 m でも 9.1 W の送信電力となり、数十 m 先のマイクロマシンにマイクロ波でエネルギー伝送することが可能であることが分かる。

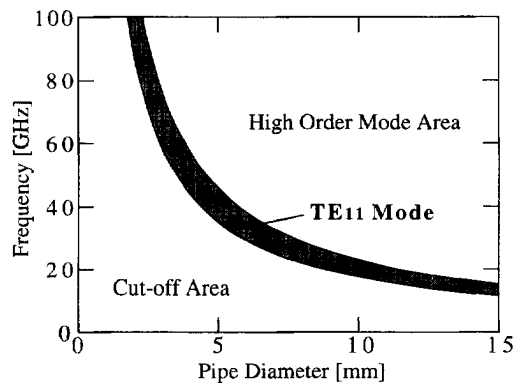


Fig.2 Relation of pipe diameter and frequency

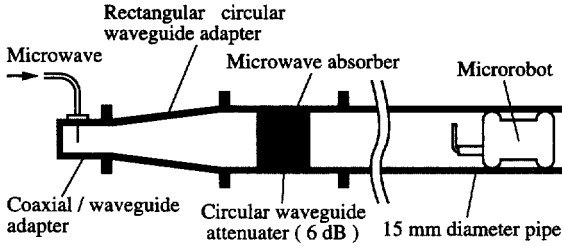


Fig.3 Transmission-side configuration

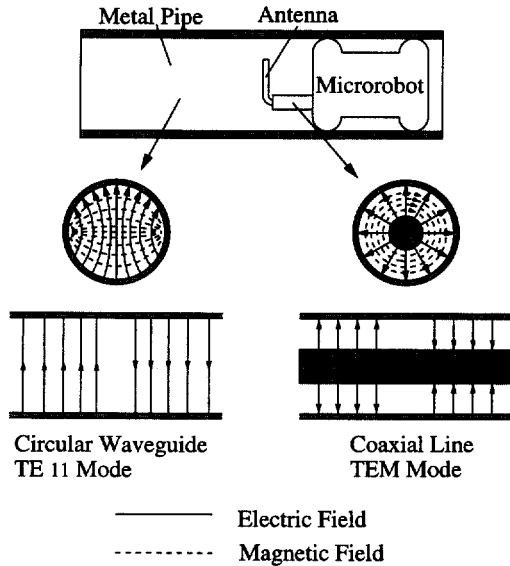


Fig.4 Conventional method for conversion from circular waveguide to coaxial cable

### 3. システム構成

#### 3.1 送信側構成

今回試作したシステムは配管径が15mmなので送信周波数はFig.2より14GHz付近である。しかし実際にマイクロ波の送信を行う際は送信側の同軸導波管変換器とマイクロマシンに取り付けた受信アンテナの間で定在波が生じ、そのマイクロマシンの移動にともなう受信電力の変動が10dB以上になる。そのためFig.3に示すように電波吸収体を用いた6dB減衰器を配管の入り口近くに入れて、定在波を減少させると共に、14GHz~14.5GHzの間を連続的にスイープすることで配管の共振周波数をずらし、安定したエネルギー伝送を実現した。

本報の試作システムではマイクロマシンの移動方式として圧電バイモルフを用いた慣性駆動方式を用いた<sup>12),13)</sup>。この慣性駆動方式のアクチュエータはのこぎり波の駆動波形が必要となるが、その波形を得るために、送信側であらかじめマイクロ波をのこぎり波でAM変調する方式をとった。のこぎり波の周波数は

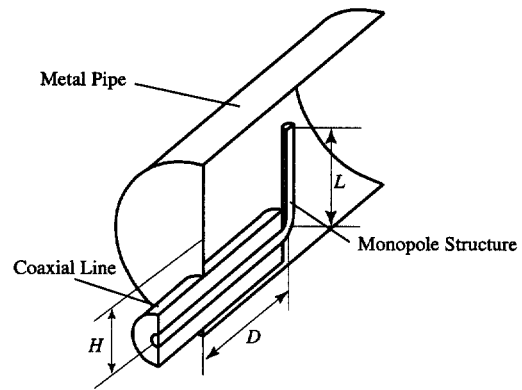


Fig.5 Construction of receiving antenna

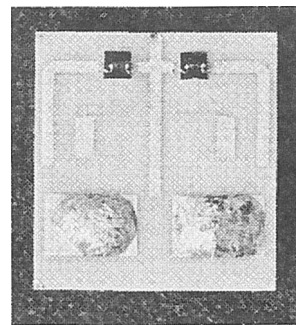


Fig.6 Voltage doubler (7.9x8.6mm)

600 Hzで、上りのこぎり波と下りのこぎり波を切り替えることで外部からのマイクロマシンの前進、後退の制御が可能である。

#### 3.2 受信側構成

##### 3.2.1 受信アンテナ

配管内のマイクロ波を整流回路に導くためにはFig.4に示すように円形導波管のTE<sub>11</sub>モードのマイクロ波を同軸線路やマイクロストリップ線路などの基本伝送モードであるTEMモードに変換する必要がある。一般的には、Fig.3に示すように円形導波管のTE<sub>11</sub>モードから同軸線路のTEMモードに変換する場合、円形/矩形変換器により一旦矩形導波管のTE<sub>10</sub>モードに変換し、その後、矩形/同軸変換器で同軸線路のTEMモードにする方法が用いられる。しかしこの方法を配管内のマイクロマシンに適用するには、配管内で伝送モードを変換する構造のアンテナが必要となる。

そこで、Fig.5のような構造の受信アンテナを考案した。マイクロマシンの端部に配管を塞ぐような金属円盤を取り付け、そこからセミリジッドケーブルを約1/4波長突き出し、内部導体を電界方向に折り曲げた構造になっている。

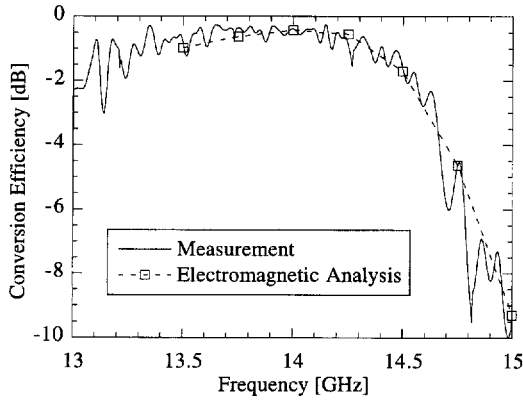


Fig.7 Conversion efficiency of the antenna

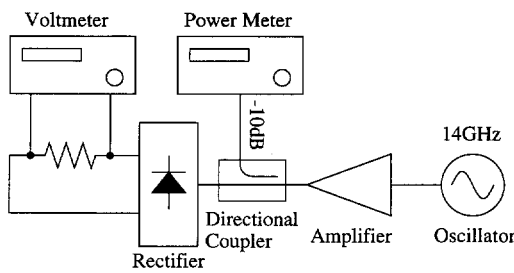


Fig.8 RE/DC conversion efficiency measurement system

### 3・2・2 整流回路

試作したシステムでは圧電素子による移動機構を用いており、15 V 以上の駆動電圧が必要である。従来のマイクロ波帯の整流素子は耐圧が 5 V 程度であるので、駆動のための高電圧を得るためには多くの素子が必要となり、整流回路の小型化の障害となる。そこで、新たに高周波動作と高耐圧を両立する整流素子を開発した。従来のマイクロ波帯の整流素子の耐圧が 5 V 程度であるのに比べ、試作した整流素子は 107 GHz という高い遮断周波数を持ちつつ、耐圧 27 V を達成している。この素子を 2 個用いて Fig. 6 に示す倍電圧整流回路を試作した。

## 4. 測定結果と検討

### 4・1 受信アンテナの特性

受信アンテナは Fig. 5 に示されるアンテナ素子の長さ  $L$ 、短絡面からの距離  $D$ 、中心からのオフセットの距離  $H$  により変換効率（金属配管中を伝わる円形  $TE_{11}$  モードがアンテナにより同軸の TEM モードに変換される効率で、配管、同軸線、定在波防止用のアッテネータ等の損失は除く）が変化する。そこでこのアンテナについて有限要素法による電磁界解析を行い、各パラメータを最適化した。その結果、 $L=5$  mm、 $D=$

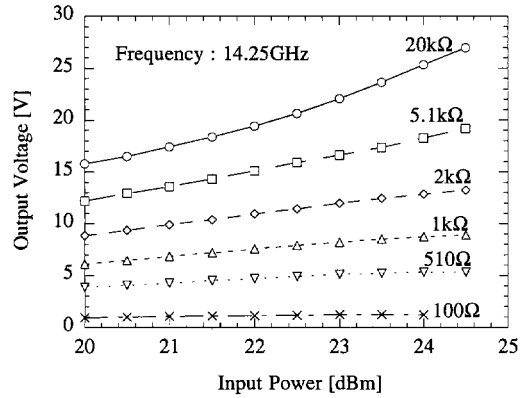


Fig.9 Relation of input power and output voltage of voltage doubler

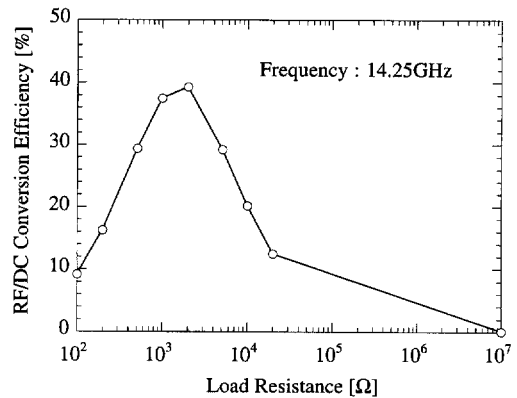


Fig.10 Load resistance versus RF/DC conversion efficiency of voltage doubler

13 mm、 $H=6$  mm で、変換効率が  $-0.4$  dB と良好な結果が得られたので、その結果を用いてアンテナの試作を行った。アンテナの測定にはネットワークアナライザを用いた。アンテナの変換損失の周波数特性を図 7 に示す。試作したアンテナの周波数特性は、電磁界解析とはほぼ一致し、良好な性能を得ることができた。

### 4・2 整流回路の特性

試作した倍電圧整流回路の RF/DC 変換効率（回路に入力したマイクロ波が直流電力に変換される効率）を Fig. 8 に示す測定系で測定した。実験は負荷抵抗が  $100 \Omega$  から  $20 \text{ k}\Omega$  まで、入力電力は  $20 \text{ dBm}$  から  $24.5 \text{ dBm}$  まで測定した。Fig. 9 に入力電力に対する出力電圧の関係を、Fig. 10 に負荷抵抗に対する RF/DC 変換効率を示す。最高電圧は  $33.5 \text{ V}$ （入力電力  $24.5 \text{ dBm}$ 、負荷抵抗  $20 \text{ k}\Omega$ ）、最大効率は  $39\%$ （入力電力  $20 \text{ dBm}$ 、負荷抵抗  $2 \text{ k}\Omega$ ）で得られた。負荷抵抗  $2 \text{ k}\Omega$  では約  $100 \text{ mW}$  の電力供給が可能である。今回試作した整流素子による整流回路は高めの負荷抵抗で最大効率を得ており、数  $100 \Omega$  の負荷抵抗で最大効率を得る従来の整流

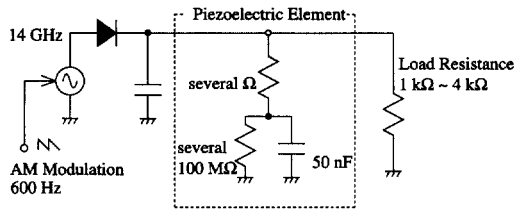


Fig.11 Equivalent circuit of microrobot including piezoelectric

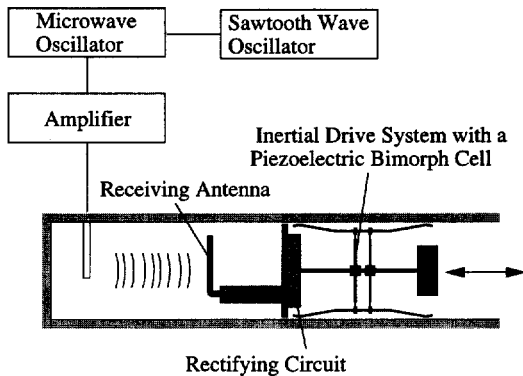


Fig.12 Configuration of prototype energy transmission system

素子とは異なった特性となった。これは整流素子の内部抵抗が高いことに起因すると考えられる。

#### 4・3 圧電素子駆動の検討

試作したシステムでは圧電素子による移動機構を用いており、その駆動のために圧電素子にのこぎり波の電圧を印加する必要がある。そこで、のこぎり波変調されたマイクロ波を整流して圧電素子へ印加する方式を検討した。

圧電素子の共振周波数以下の電気的な周波数特性のみを考慮すると、圧電素子は Fig. 11 の点線内の等価回路で表現することができる。このような回路にのこぎり波変調されたマイクロ波を整流して送り込むと、圧電素子に電荷が溜まり、のこぎり波の電圧による駆動はできなくなる。そこで、駆動周波数 600 Hz と圧電素子の容量 50 nF から計算される数 kΩ の抵抗を圧電素子に並列に取り付けることによって電荷を放電し、駆動を実現することとした。電荷を放電する抵抗の値は実際にマイクロマシンを動かしながら最大速度になるように調整した結果、4 kΩ となった。しかし、この方法では常時抵抗に無駄な電力が消費されることになり、高効率なエネルギー伝送を行うためには、電荷を溜める過程では電荷を放電する抵抗を OFF する必要がある。

Table 1 Major specifications

Pipe Diameter	15 mm
Microwave Frequency	14 GHz ~ 14.5 GHz
Transmission Loss	< 1dB / m
Type of Receiving Antenna	Monopole , Linear Polarization
Rectifying Device	Prototype Diode × 2 ( Breakdown Voltage : 27 V )
Transmitting Power	1 W
Receiving Power	50 mW
Locomotion Velocity	1 mm / sec

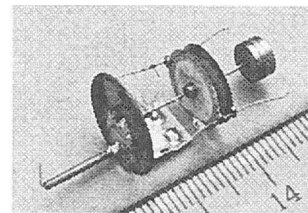


Fig.13 Prototype of microrobot

### 5. マイクロ波エネルギー伝送システム

以上の検討結果を元にマイクロ波エネルギー伝送システムを試作した。Fig. 12 にシステムの構成を、Fig. 13 に受信アンテナと整流回路を取り付けたマイクロマシンを示す。このマイクロマシンは 50 mW のマイクロ波を受信し、1 mm/sec で移動することができた。Table 1 に主要な緒元をまとめる。

### 6. むすび

本論文では金属配管内のマイクロマシンに対してマイクロ波でエネルギーを伝送するシステムを提案した。このシステムの実現に必要な不可欠であり、従来のマイクロ波技術には無かった、配管内でマイクロ波を受信するアンテナと、高電圧の出力が可能な整流回路を開発した。受信アンテナの効率は -0.4 dB、整流回路の効率は 39% で、最高出力電圧は 33.5 V となった。そして、これらの技術を統合して、φ 15 mm 配管の中のマイクロマシンに対してマイクロ波でエネルギーを伝送するシステムを試作し、初めてマイクロ波エネルギーによるマイクロマシンの駆動に成功した。

今回試作した整流回路はダイオードを 2 個用いており、約 200 mW のマイクロ波を整流する能力を持つが、マイクロマシンの駆動波形でマイクロ波を変復調する必要から、供給電力は 50 mW となった。さらに供給電力を増やすためには整流回路を複数個搭載し、マイクロ波を分配して整流する回路構成にする必要がある。

る。今後はマイクロマシンの駆動用以外の電力(CPU, センサ等)も供給する予定なので, 送信するマイクロ波には無変調波(CW)を用い, マイクロマシンの駆動波形はマイクロマシン内部で生成するのが望ましい。また, 配管の伝送損失と配管内の定在波のため, マイクロマシンの移動にともない受信電力が変化することがわかったので, 送信電力を自動的に調整する手段が必要不可欠となる。

謝辞

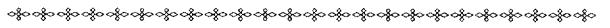
本研究開発は, 通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として, NEDO から委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として実施したものである。

〈参 考 文 献〉

- 1) W. C. Brown: "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. MTT-32, no. 9 (1984), p. 1230.
- 2) "Satellite power system concept development and evaluation program plan", DOE/NASA Report, DOE/ET-0034 (1978).
- 3) F. A. Koomanoff: "Satellite power system concept development and evaluation program", The assessment process, Proc. DOE/NASA SPS Program Review, DOE Report CONF-800491 (1980) p. 15.
- 4) 篠原真毅, 松本紘, 賀谷信幸: "マイクロ波送受電用軽量小型受電素子「レクテナ」の開発", 1993 信学春季大会, B-36.
- 5) 賀谷信幸, 藤野義之, 藤田正晴, 沢田寿, 小野寺利浩, 川端一彰: "マイクロ波受電用レクテナの高効率化", 1993 信学春季大会, B-35.
- 6) 藤野義之, 賀谷信幸, 日下規夫, 荻原則夫, 國見真志, 石井美紀: "マイクロ波受電用二重偏波パッチレクテナ", 1996 信学総合大会, SB-1-2.
- 7) 藤田卓, 遠藤春良, 佐川守一, 平林宏英: "準マイクロ波帯レクテナの実験的検討", 1994 信学春季大会, B-141.
- 8) K. Sasaki, T. Shibata, S. Akita, and T. Hattori: "Technique of Wireless Energy Service for Micro-robots Using Microwave", Proc. of 4th Intern. Sympo. Micromachine & Human Science

(1993), p. 113.

- 9) 柴田貴行, 青木豊, 井戸垣孝治, 服部正: "マイクロ波による配管内エネルギー伝送システムの開発" 信学技報, MW 94-86 (1994-11).
- 10) Y. Aoki, T. Shibata, T. Taguti, K. Sasaki, T. Kurahashi, and T. Hattori: "High frequency schottkey barrier diode with high breakdown voltage for application to micromachines in narrow metal tubes", Space Energy and Transportation, vol. 1, no. 3 and 4(1995).
- 11) マイクロ波部品カタログ, 島田理化工業 (1994), p. 132.
- 12) T. Idogaki, H. Kanayama, N. Ohya, H. Suzuki, and T. Hattori: "Characteristics of Piezoelectric Locomotive Mechanism for an In-Pipe Micro Inspection Machine", Proc. of 6th Intern. Sympo. on Micro Machine and Human Science (1995), p. 193.
- 13) S. Kawakita, N. Ohya, H. Kanayama, T. Idogaki, and T. Hattori: "In-Pipe Micro Locomotion Mechanism with Low Energy Consumption", 1996 National Convention of IEE-Japan, vol. 3, p. 146.



〈著 者〉



柴田 貴行 (しばた たかゆき)  
研究1部  
マイクロマシンの研究に従事



青木 豊 (あおき ゆたか)  
研究2部  
ミリ波デバイスの研究開発に従事。



大塚まなぶ (おおつか まなぶ)  
研究1部  
マイクロマシンの研究に従事。工学博士。