

# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network



新井 宏之 (Hiroyuki ARAI, Dr. Eng.)

横浜国立大学大学院教授

(Graduate school of Yokohama National University, Professor)

電子情報通信学会 IEEE 会員 2009年電子情報通信学会 フェロー

受賞：1990年 電子情報通信学会篠原記念学術奨励賞 1997, 2006, 2011年 第8回, 17回 22回 (社) 電波産業会電波功績賞

著書：基本を学ぶ電磁気学 オーム社 2011年 Measurement of Mobile Antenna Systems Artech House 2001 新アンテナ工学

総合電子出版社 1996年 電波工学 昭晃堂 1992年

研究専門分野：電磁波工学 アンテナ工学

**あらまし** 本稿では服のようなフレキシブルな素材を用いて、近距離無線通信システムを構築するためのシート状伝送路について解説する。無線通信の新たな用途として 1m~2m 程度の近距離通信エリアとして、PAN(Personal Area Network) やセンサネットワークを構築することが望まれている。このような用途には、無線通信を行う領域を限定し、かつフレキシブルな構造を持った、導波路上の任意な場所で情報をやりとりできる新しい構造の導波路が必要である。そこで、マイクロストリップ形共振器を二層構造で二次元的に配置し、共振器間を電磁的に強く結合させることで、伝送路として電磁波の閉じこめが良く、伝送路近傍に無線機器のアンテナ(共振器)が配置されたとき、電磁結合によって伝送路からアンテナに容易に結合させる方式を実現できる。さらに、この伝送路をシート状の柔軟な素材で構成することで、ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路として情報と電力伝送が行える。

## 1. 研究の目的

同軸ケーブルや光ファイバーを用いた有線通信、アンテナを用いて自由空間中に電磁波を伝搬させる無線通信が一般的な通信の形態である。有線通信は通信路による伝搬損失が少なく、高速な通信に有利で、セキュリティ性も高い。一方、無線通信はケーブルをなくすことで作業環境を劇的に改善するため、近距離通信においてもその応用が広がっている。

シート状の導波路は両方の長所を取り入れた通信の形態で、無線通信に比べ通信路による損失が少なくセキュリティ性が高い。また通信路がシート状であるため床や机の上に敷いて使用できるため作業環境の改善にもなる。特にフレキシブルな素材で伝送路を構成できれば服として着衣し、生体活動情報のセンシングやその伝送などウェアラブルデバイスと親和性のよいものが実現できるので、医療用データのモニタやレスキュー隊員用の多機能スーツ等の新たな情報通信用途が期待される。またケーブルによる有線通信を一次元通信、アンテナの放射を用いた無線通信を三次元通信と表現すれば、シート状導波路による通信は二次元通信と表現でき、通信の新しい物理層と考えることもできる。

シート状の導波路に関する取り組みとして、センサネットワークに応用するためマイクロコイルと電磁石の配列を用いて電源の供給、位置探索、時刻同期、方向探索、通信などの機能を面に統合し面のインテリジェント化を実現した MAGIC-Surface が研究されているが<sup>(1),(2)</sup>、磁気デバイスを用いているためコストの問題がある。また地板と導電メッシュ層の間に発砲ウレタンなどの絶縁体を挟んだ構造を用いて、製作が容易な二次元通信シートが研究されているが<sup>(3)-(5)</sup>、そのシート内に電磁波を励振させるためには専用のコネクタが必要である。

製作が容易で任意のアンテナで導波路を励振することが可能なシート状の導波路(フリーアクセスマット)が提案されている<sup>(6)</sup>。本稿では、この導波路の基本となる線路を交差させるときに用いる電磁結合型リボンワイヤーインターコネクタについて説明し<sup>(7)</sup>、この構造を用いた一次元、および二次元線路の特性について

# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

## A study of thin flexible waveguides for wearable network

解説する。そして、導電性布を利用した二次元導波路をウェアラブル伝送路に応用する例を示す。また、情報だけでなく電力も供給できることも明らかにする。

### 2. シート状伝送路

#### 2.1 シート状伝送路による情報伝送

ミリ波帯集積回路 (MMIC) パッケージや高周波帯 (RF) モジュールで、直交する線路をまたぐものはリボンワイヤーボンディングとよばれ、ミリ波のように波長が短くなると交差部分の電氣的寸法が無視できなくなり伝送特性が劣化する。この解決法とし層状に配置した共振器の近接結合によるリボンワイヤーインターコネクタが提案されている<sup>(6)</sup>。

リボンワイヤーインターコネクタは図1に示すように二層構造で、地板付きマイクロストリップ共振器を対向させその上に結合用の共振器を装荷している。下層の共振器はマイクロストリップ線路により励振し、上下層の電磁的に結合した共振器を低損失で伝搬する。これにより幅  $g$  のギャップができるので、この部分に直交するマイクロストリップ線路を交差させることができる。この構造はリボンワイヤーインターコネクタだけでなくパワーディバイダ<sup>(8)</sup>、移相器 (DPS)<sup>(9)</sup> など

に応用されている。構造が簡単で、製作には印刷技術が使える利点がある。文献(7)では 6 GHz において 33.1% の帯域内で挿入損失は 1.25 dB 以下となっている。

この構造を縦列接続すればシート状の一次元線路が実現できる。この線路は寄生素子に共振器を用いているため、近傍に他の共振器、すなわちアンテナを配置すると強い結合が得られ外部機器との電磁的な接続が容易になる。さらに、下層の共振器と上層の寄生素子を互い違いになるように配置すれば二次元構造の線路となりシート状線路が構成される。

図2に一次元構造の導波路とその伝送特性を示す。ポート1から入力された電力が効率よくポート2に伝送されていることが分かる。次に二次元的に配列させた構造の伝送路は、図3に示すように地板で裏打ちされた共振器アレー層の上で、4つの共振器の中央に上層の寄生共振器を配置した構造で実現される<sup>(10),(11)</sup>。上層の寄生素子共振器の寸法を最適化によって伝送損失を抑制し、下層共振器の寸法で使用する周波数を決める。マイクロストリップ共振長は半波長 ( $\lambda/2$ ) を基準として設計するが、上方からみて下層共振器と寄生素子の重なる面積が広いほど結合が強く伝送損失は減少するので隣接共振器間の距離をパラメータとして最

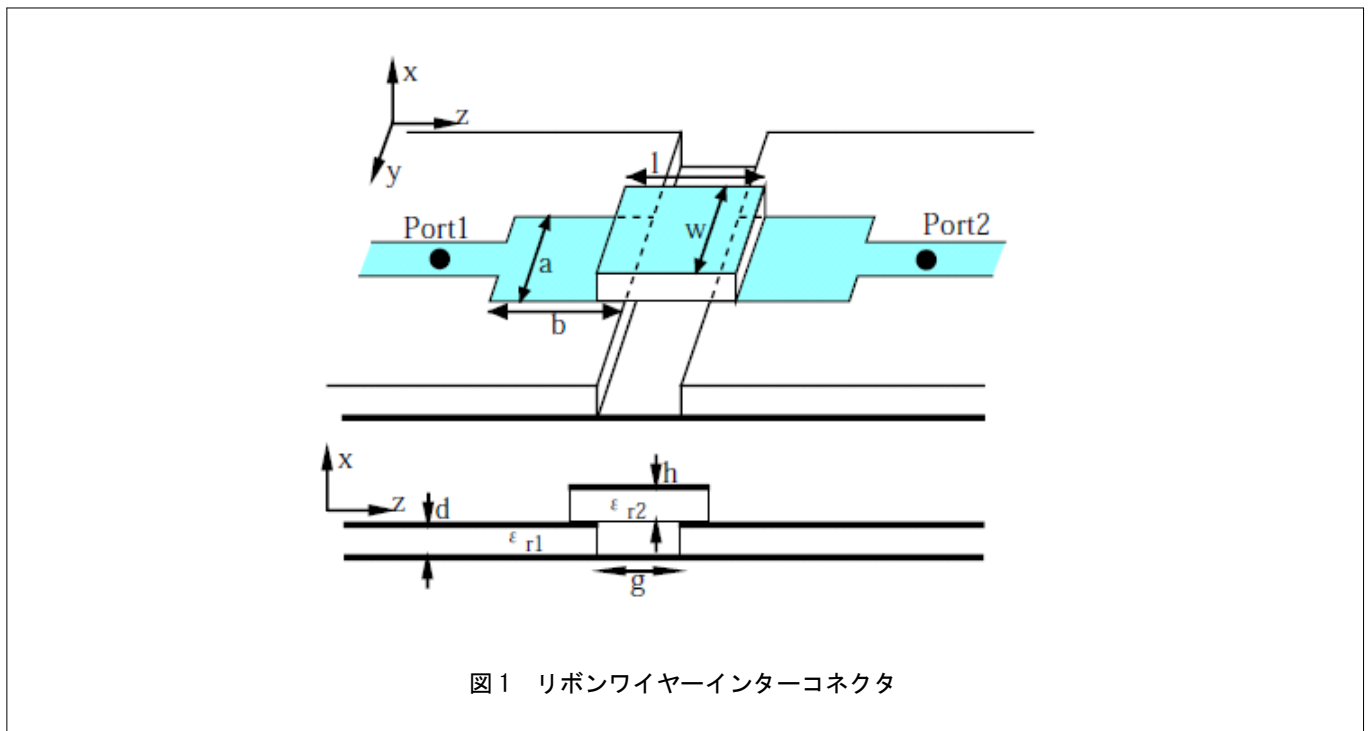
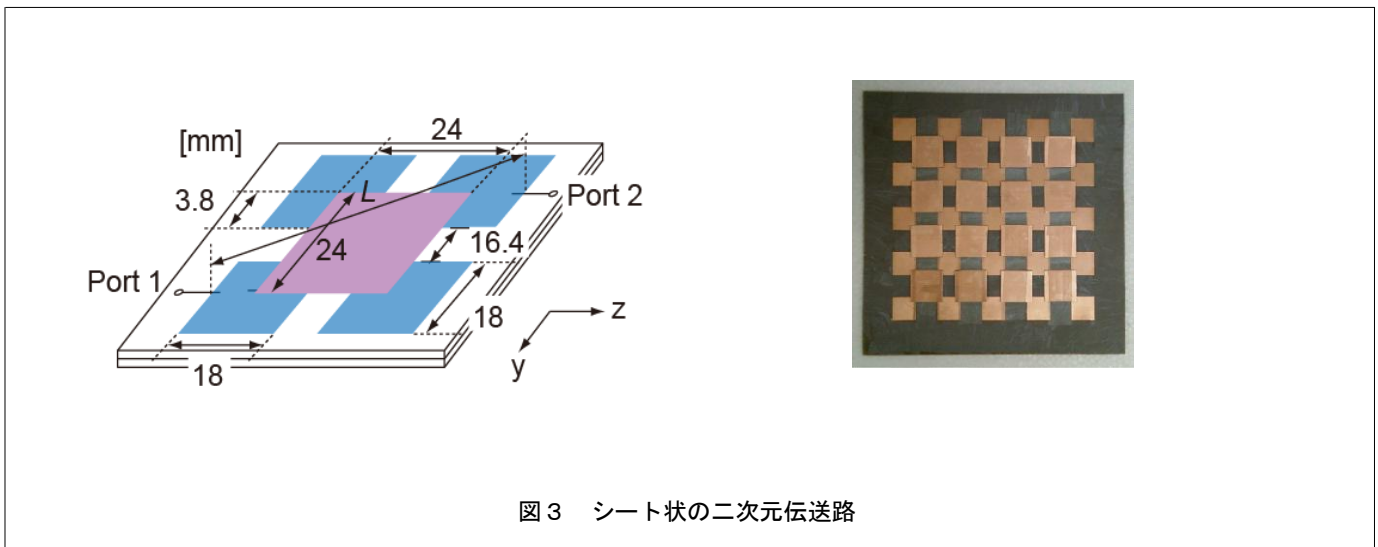
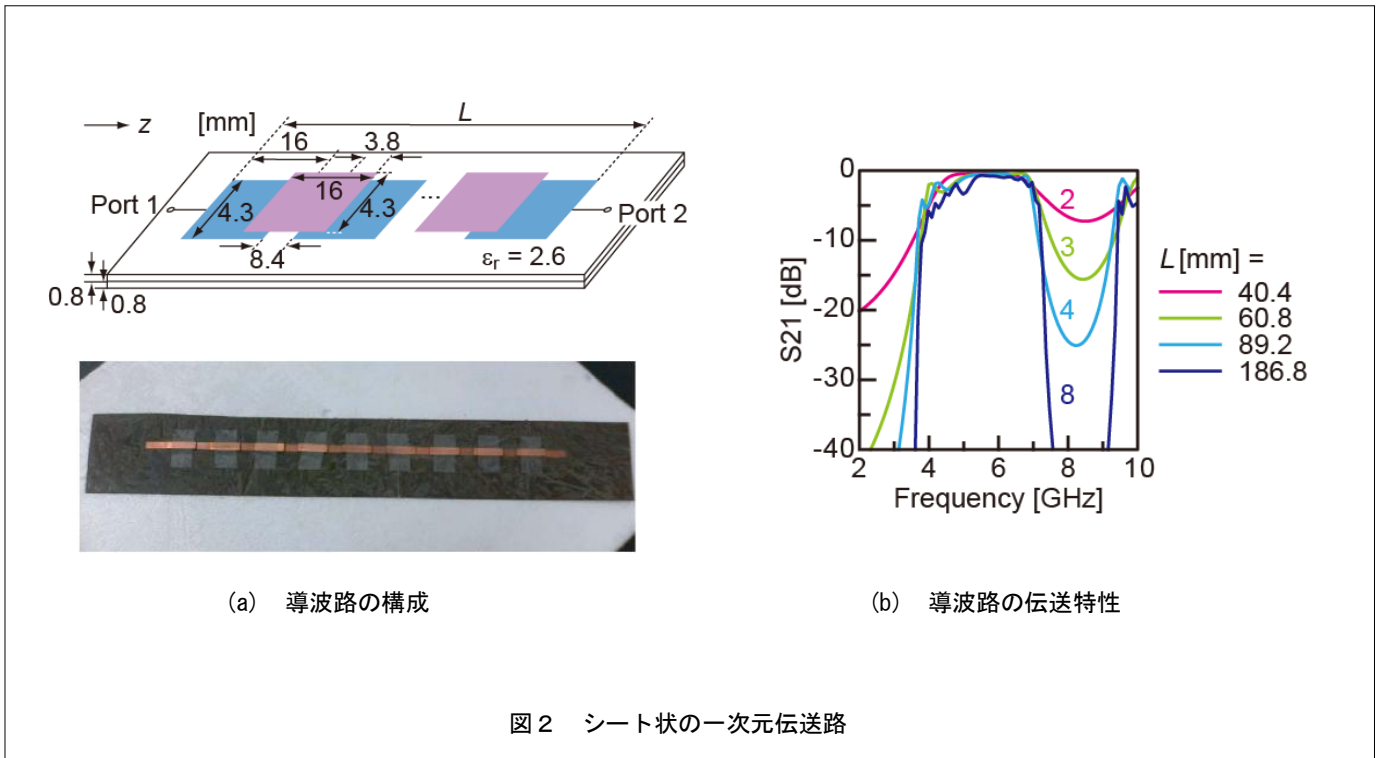


図1 リボンワイヤーインターコネクタ

# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network



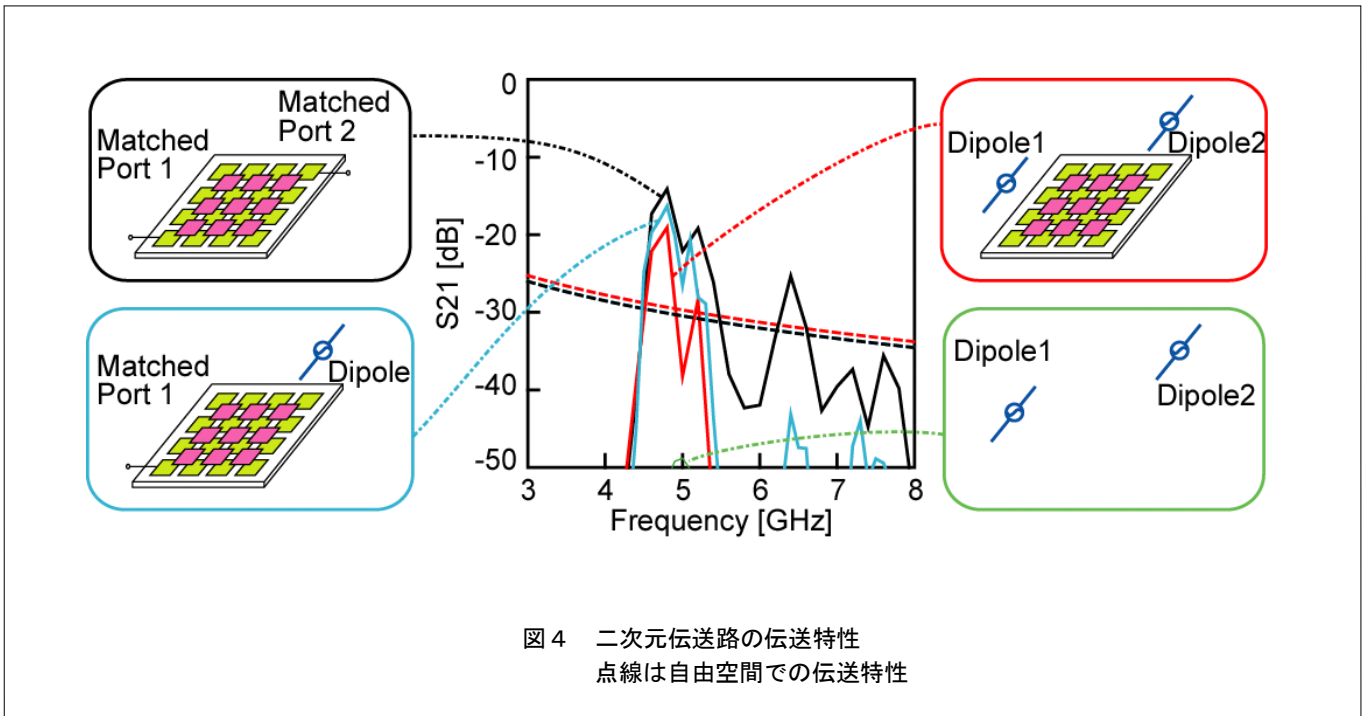
適化する。また、高次モードの発生を抑えるために対称的な構造とする。

モーメント法を用いたシミュレーションにより 5 GHz で設計した下層共振器が 4×4 素子のときの伝送特性を図4に示す。伝送路特性を明確にするため、(a) 下層共振器に入出力ポート 1、2 を設けた導波路のみの伝送特性、(b)ポート 1 を線路に接続し、ポート 2 と

して半波長ダイポールを伝送路の上方に置いたときの特性、(c)ポート 1、2 を共に伝送路上方に設置した半波長ダイポールとしたときの特性、(d)半波長ダイポールを(c)と同一に配置して伝送路を取り除いたときの特性、以上4つの伝送特性を比較している。図4の破線は(a)と(c)のポート間距離から計算した自由空間の伝送損失である。二次元伝送路内は円筒波が伝搬する

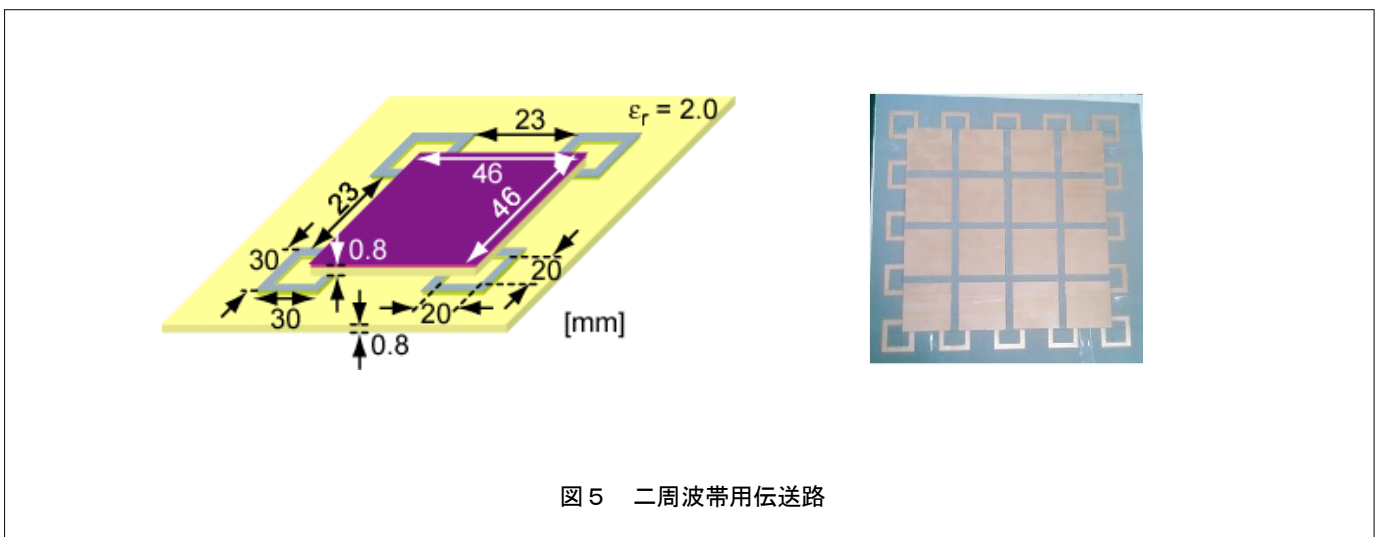
# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network



ため伝送損失が自由空間に比べて 10~15dB 以上小さくなる。また、(b),(c)の結果よりダイポールと伝送路の結合損失は 3dB と見積もることができる。結合用のアンテナは共振器と共振周波数が一致すれば良く、伝送路に電磁波を結合させる専用の結合器が不要なのは実用上大きな利点である。なお、伝送路に結合可能なアンテナの距離はシートの表面から  $\lambda/4$  程度までで、小形ワイヤレス機器の内蔵アンテナから伝送路に容易に電磁波を励振できる。この結合させるアンテナの位

置は伝送路上の任意の位置で対応でき、アンテナの偏波方向にも依存しない。伝送路は物理的に切り離すことで 30dB 以上結合が減衰するので、伝送路を隣接させても互いに結合することはない、異なる伝送路間の情報を遮断する利点がある。二つの周波数帯で利用するには下層共振器の形状を変更して対応できる。図5に示すようなリング型共振器を下層に用いると二共振特性を持たせることが可能となり、2.4GHz と 5GHz の二つの無線 LAN 周波数帯で利用できる<sup>(12)</sup>。



# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network

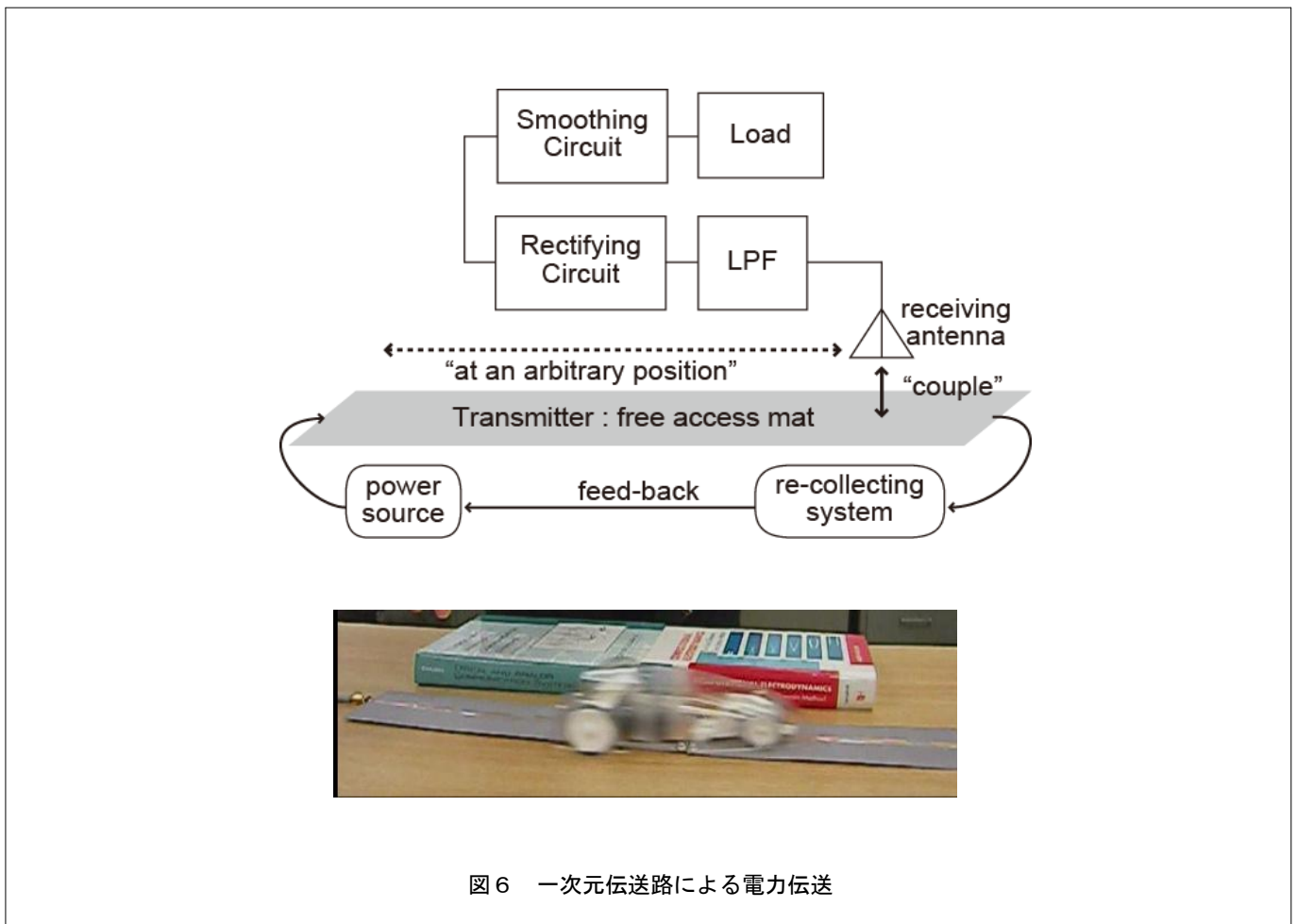
## 2.2 シート状伝送路による電力伝送

ここまで情報伝送を中心としてシート状導波路の特性を解説したが、情報と同時に電力も伝送可能である。まず、一次元構造の線路を電力供給用のレールとして用い、レクテナ(アンテナに整流回路を直結させたもの)によって電力供給させた模型の車が走る例を示す。図6のように電力源として2.4GHzの信号源を用い、一次元線路上に電力を供給する。線路から5mm上方にアンテナと整流回路を一体化したレクテナを設置し、受電された電力で車のモーターを回す。供給された全ての電力をレクテナで受電できないので、線路の終端には電力回収器を設置することが望ましい。

電力伝送を効率よく行うためパッチアンテナを受電用アンテナとし、全波整流回路をレクテナとして組み込む。線路近傍の電界は線路と平行な電界成分が主であるが、任意の偏波面に対応できるように受電アンテナ

には円偏波素子を用いる。このときレクテナへの結合は-5dBとダイポールに比べて大幅に改善している。このパッチアンテナに整流回路を接続した図6の構成で2.4GHzの40dBmの入力電力時に、モーターの負荷抵抗3.8Ωに対して出力電圧は5.1Vとなり、このシステムでの電力伝送効率約70%である。レクテナパラメータの最適化により更なる高効率化が期待できる。

以上のように一次元シート状伝送路による電力伝送が可能であることを示した。なお、二次元シートによる電力伝送も同様にして実現できる。このように、近接結合された機器に対してのみ使うことのできるシート状伝送路を用いた方法は有効である。例えば、電気自動車に乗ったままアクセスエリアを徐行することで充電できるような応用や、駐車場の床に一枚一枚マットを敷いて置くことで隣の車と干渉せず駐車している間に充電をすることも可能である。



# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network

### 3. フレキシブル伝送路

シート状伝送路は誘電体基板により制作できるが柔軟な構造を持った材料を用いることで衣服にも装着可能となる。まず、銅とニッケルを組成とする導電性の布を用いてシート状伝送路を構成したときの伝送特性を図7に示す。組成の異なる二種類の導電性布での特性は、銅箔を用いて発泡フォーム状構成された伝送路と周波数のずれはあるものの、ほぼ同等な伝送特性が得られていることが分かる。導電性布で構成された伝送路はフレキシブルな構造であるので、線路を曲げたり折ったりすることが可能である。図8にフレキシブル構造の伝送路を折り曲げたときの伝送特性を示す。折り曲げたことによる伝送特性の劣化はほとんど生じない。また、参考のために入出力に用いた半波長ダイポールの間に反射板をおいてアンテナ間の空間結合の影響についても検討しているが、伝送特性に影響はなく、電磁波は伝送路内に閉じ込められていることが分かる。

次に、このフレキシブル伝送路を用いて人体に装着可能なチョッキ状導波路を作成する。図9に示すように導電性布によって地板と上下層の共振器を作成し、

フォームで挟み込む構造でチョッキを作成する。このチョッキを用いて人体近傍に設置されたセンサ等の機器間通信を効率よく行うことができる。特に、人体の前後に無線機器を配置した場合、人体が損失の大きな媒質として存在するので通信回線を保持することが難しくなるが、このチョッキ(スマートスーツとよぶ)を用いることで伝送特性を飛躍的に改善できる。図10にスマートスーツを介して人体前後に配置した半波長ダイポール間の伝送特性と、二つのダイポールを共に人体全面に配置したときの伝送特性を示す。図10(a)に示すように、人体前後に半波長ダイポールを配置するとS21特性は-70dB以下とノイズレベル程度の伝送特性となるのに対して、スマートスーツを用いることで人体の前後でも十分な伝送が得られることが分かる。また、スマートスーツ単体とスーツを人体に装着したときでの伝送特性では大きな差はなく、スマートスーツの有効性が示されている。また、図10(b)では送受信アンテナを人体の全面に置いたときの伝送特性であるが、この場合でもスマートスーツを用いると伝送損失が20dB以上改善され、その効果が明らかである。

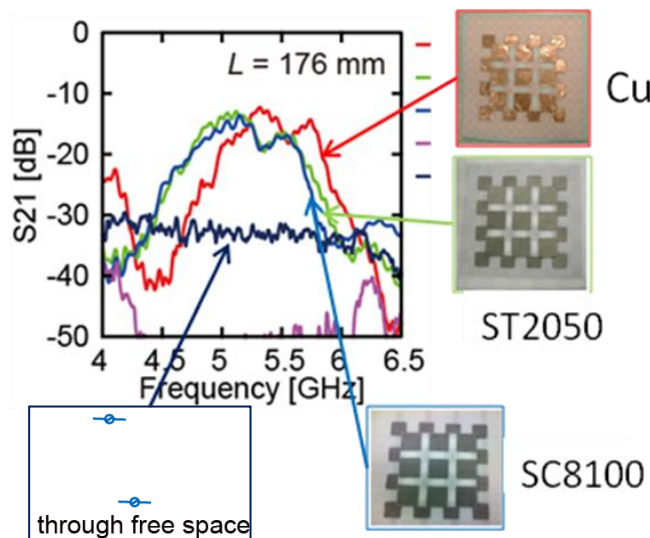


図7 導電性布による二次元伝送路の伝送特性

# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network

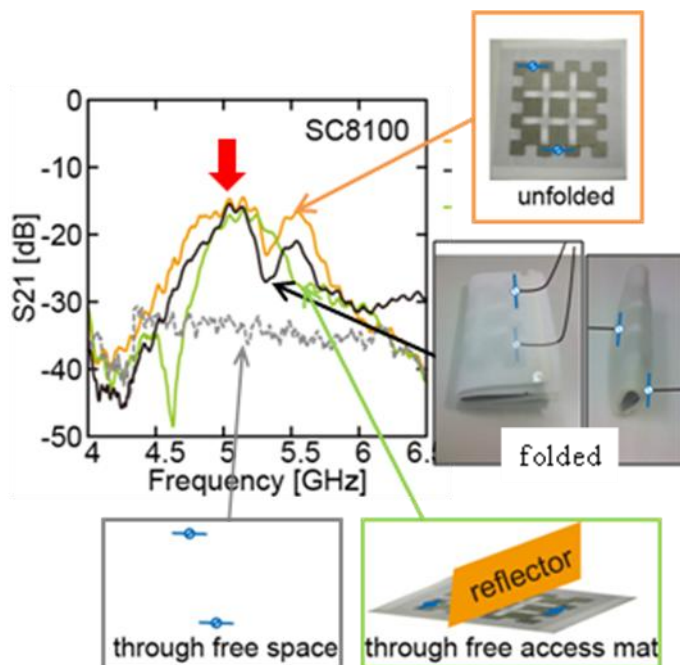


図8 フレキシブル構造二次元伝送路の伝送特性

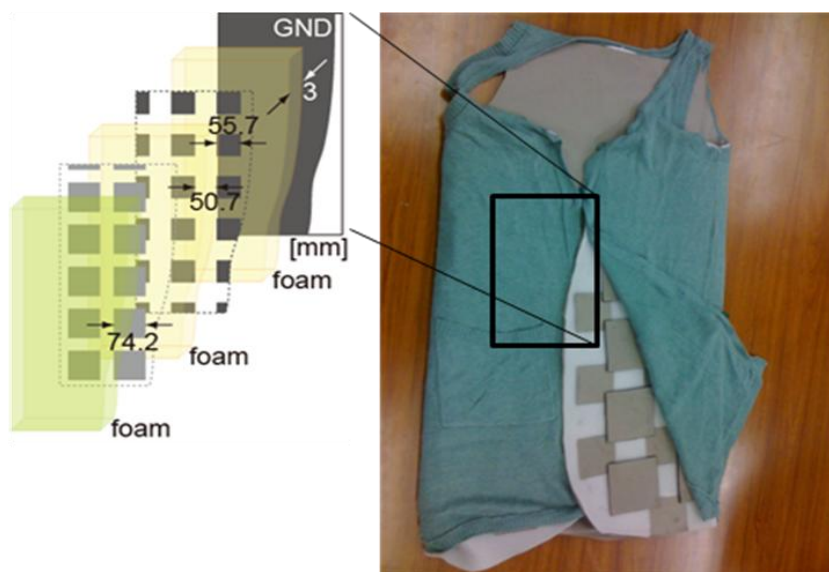
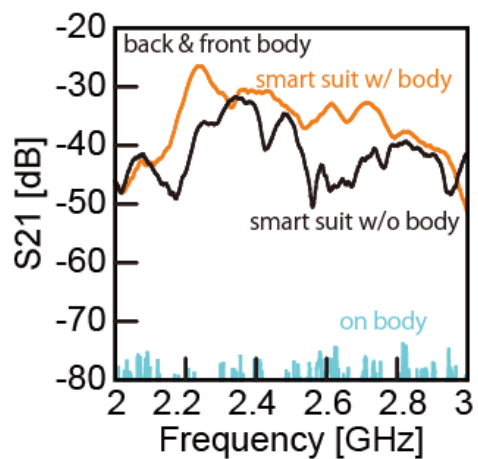
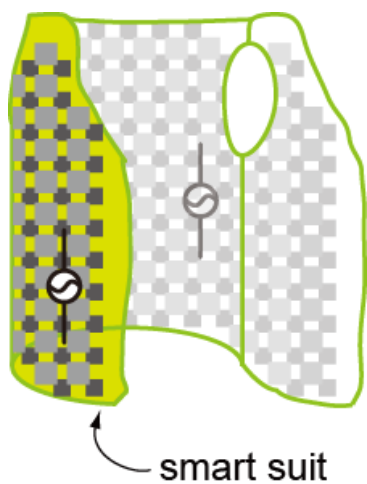


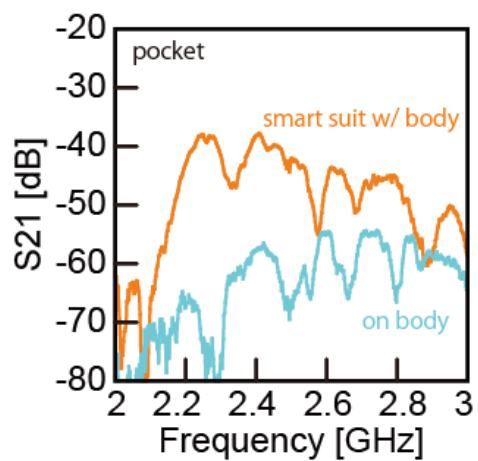
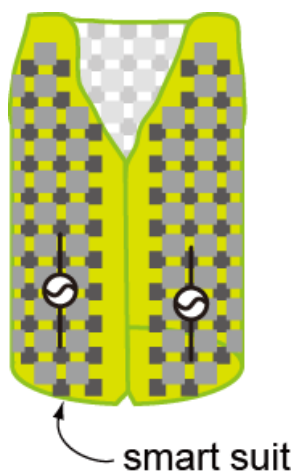
図9 フレキシブル伝送路を組み込んだチョッキ

# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network



(a) 人体前後での伝送特性



(b) 人体全面での伝送特性

図10 スマートスーツの伝送特性



# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

## A study of thin flexible waveguides for wearable network

### 4. 将来展望

通信の新しい物理層を提供するシート状導波路の応用分野として、これまで有線通信の一部を置き換える方向と、無線通信の活用が期待される新たな分野への展開が考えられる。本章では通信範囲の広さによってセンサ/パーソナル/ボディーエリアネットワークへの応用例について考察する。

屋内外を問わず、いつでもどこにでも対応可能なユビキタスセンサネットワークへの関心が高まっている。それに伴いアプリケーションは増え続け、全てに対して統一化されたネットワークの作成は難しい。アプリケーションに依存した多様な無線センサネットワークが存在するため<sup>(13)</sup>、それらを支えるインフラ技術が必要となる。このインフラには電力を無線で提供すること、位置推定、時刻同期などの機能が求められる。生態観測や森林モニタリングなどの屋外無線センサネットワークでは太陽電池や GPS システム、携帯電話などを用いてこれらの機能をセンサネットワークに提供できる。しかし、屋内環境では携帯電話により時刻同期は可能だがそれ以外は現状では難しい。屋内でのインフラ構築のために、センサを **smart building material** として面状の建物の壁などに埋め込み、その表面でネットワークを接続させることが提案されており<sup>(2)</sup>、そのネットワーク形成にシート状導波路を応用することが考えられる。例えば、シート状導波路に高周波電源を接続しシート上で結合するセンサに電力を供給することも可能である。また、シート上に予めアンテナを複数個結合させることで、到来方向が推定できるのでセンサの位置推定が可能で、時刻同期等は伝送路による通信で簡単に実現できる。以上のように無線センサネットワークのためのインフラストラクチャとして応用するにはシート状導波路は適している。

また、シート状導波路により狭い範囲に限定した通信を行うことも可能である。オフィスなどで無線 LAN は一般的に使用されているが、オフィス外への情報の漏洩やオフィス外からの侵入などが問題化され様々なセキュリティ対策が研究されている。オフィス内においては多数の端末がアクセスポイントに接続するため接続の安定性や通信速度の保障は難しく、それらの問題を解決するため、通信するデータ、パケットを暗号化

する方式や設備面においては漏洩同軸ケーブルを用いた方法などが考えられている<sup>(14)</sup>。しかし、暗号化技術は解読技術・ハッキングより常に進んでいなければならず、実際暗号化を破る方法が知られておりインターネットなどで容易に手に入る。新幹線などの鉄道無線、トンネル内の無線通信や地下街の防災無線システムなどに応用されている漏洩同軸を用いて無線 LAN システムを構築する方法も考えられているが、多くの場合、数百 MHz 帯のもので、無線 LAN のような 5 GHz 帯や 2.4 GHz 帯では漏洩同軸の損失が問題となり実現は難しい。また数十 m のケーブルはオフィス全体をカバーする応用には使えるが、高いセキュリティ性をもつ個人の無線環境、すなわち数 m 程度での LAN には適していない。

机の大きさ、1 ~ 2 m はユーザが管理できる範囲と考えられるのでシート状導波路に近接した無線機器だけに通信を許すシステムはセキュリティ性の高い無線 LAN への応用が期待できる。シート状導波路上に携帯型オーディオ端末とスピーカを置くだけで音楽が聴けたり、ノート PC を置くだけでデータの同期を行ったり、携帯端末を置くだけで充電するなどの用途は豊富にある。

オフィス以外での例としては医療用の用途が考えられる。検査のために長時間、ケーブルに接続されたセンサを体に取り付けておくのは望ましくない。ベッドの上にシート状導波路を敷くことで、例えば背中に設置されたセンサからの情報も伝送可能となる。シート状導波路ではアクセスできる範囲が制限されているので他のセンサとの干渉という問題も生じない。

ウェアラブルネットワークや人体通信など **Body Centric Network** に関する研究が最近注目されている<sup>(15),(16)</sup>。人に体に沿った通信を行う人体通信用のリストバンド形電極などの研究があるが、2.4 GHz などの高周波数帯域では体に沿った電磁波の伝搬より体の外側への放射が大きいという問題がある。ウェアラブルな素材で作成したシート状導波路を着ることが許される応用では効率の良い伝送が可能になる。導電性の布で構成されたスマートスーツは BAN の補助伝送路として優れており、各種センサを人体に取り付け電力供給とセンサからの情報取得を同時に行えるため、災害

# ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

## A study of thin flexible waveguides for wearable network

救助や軍事用の情報伝達手段としての利用が可能である<sup>(17),(18)</sup>。

また、GPSをはじめ各種センサを身に付けているロボットに柔軟性のある素材で製作したシート状導波路を着用させることでロボットに巻き付かれているセンサ間のケーブルを除去しロボットの寸法や動作に自由度を与える応用が考えられる。導電性織物などを用いたウェアラブルなアンテナに関する研究も活発に行われており、その技術が応用できる<sup>(17),(18)</sup>。また靴の底にアンテナを装着してカード形電子マネーを取り出す必要もなく改札口付近を踏むだけで電車に乗れるような状況や、立つだけでカードへのチャージをする応用も考えられる。

以上のように、シート状導波路およびフレキシブルな素材で構成されたウェアラブル導波路には様々な応用分野が期待され、今後の活用が望まれる。

### 参考文献

- (1) M. Minami, Y. Nishizawa, K. Hirasawa, H. Morikawa, and T. Aoyama, "MAGIC-Surfaces: magnetically interfaced surfaces for smart space applications," *In Adjunct Proceedings of the the 3rd International Conference on Pervasive Computing* (Pervasive2005), pp. 59-64, Munich, Germany, (May 2005).
- (2) 南 正輝、森戸 貴、鞍掛 隆一、鈴木 渉、渡辺 貴文、猿渡 俊介、森川 博之、"デプロイメントスケーラブルセンサネットワーク、" ISSN 0913-5685、信学技報、**Vol. 107, No. 53**, USN2007-18(2007-5), (May 2007).
- (3) Y. Makino, K. Minamizawa, and H. Shinoda, "Sensor Networking Using Two-Dimensional Electromagnetic Wave," *Proc. IEEEJ 22nd Sensor Symposium*, pp.83-88, (2005).
- (4) 篠田裕之、"素材表面に形成する高速センサネットワーク、" 計測と制御、**Vol. 46, No. 2**, pp. 98-103, (Feb. 2007).
- (5) H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, "Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer," *Proc. Fourth International Conference on Networked Sensing System (INSS07)*, June 6-8, Braunschweig, Germany, pp. 201-206, (2007).
- (6) K. Eom and H. Arai, "An open waveguide by tightly coupled patch array for short range wireless access," 信学ソ大、B-1-103,(Sep. 2006).
- (7) H. Izumi, H. Arai, and T. Itoh, "Ribbon-wire interconnect using parasitic element," *IEICE Transactions on Electronics*, **vol. E82-C, No. 4**, pp. 662-664, (April 1999).
- (8) H. Izumi and H. Arai, "Electromagnetically coupled power divider using parasitic element," *IEICE Transactions on Electronics*, **vol. E84-C, No. 10**, pp. 1597-1601, (October 2001).
- (9) H. Izumi and H. Arai, "Dielectric phase shifter (DSP) using contact-less connector," *IEICE Transactions on Communications*, **Vol. E86-B, No. 10**, pp. 2982-2986, (October 2003).
- (10) K. Eom and H. Arai, "An open waveguide by tightly coupled patch array for short range wireless access," KJJC-AP/EMCJ/EMT'06, P-AP-8, (Sep. 2006).
- (11) K. Eom and H. Arai, "A free access mat by tightly coupled patch array for short range wireless access," *IEEE Antenna and Propagation Society (AP-S) International Symposium 2007*, **No. 114.1**, Honolulu, Hawaii, (June 2007).
- (12) Kunsun Eom and Hiroyuki Arai, "Sheet like Waveguide for 2.4 GHz and 5 GHz Bands," *ETRI Journal*, **vol.32, no.1**, pp.112-119, (Feb. 2010).
- (13) 猿渡 俊介、川西 直、川原 佳博、南 正輝、森川 博之、"アプリケーション指向無線センサネットワーク、" ISSN 0913-5685、信学技報、**Vol. 107, No. 53**, USN2007-17(2007-5), (May 2007).

## ウェアラブルネットワーク用薄型フレキシブル伝送路の研究

A study of thin flexible waveguides for wearable network

- (14) S. P. Morgan, "Prediction of indoor wireless coverage by leaky coaxial using ray tracing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **Vol. 48, No. 6**, (Nov. 1999).
- (15) K. Fujii, "Study on the electromagnetic transmission modeling for wearable devices," *Doctoral dissertation, Chiba university*, (Jan. 2006).
- (16) J. Oh, J. Park, H. Lee, and S. Nam, "The electrode structure to reduce channel loss for human body communication using human body as transmission medium," *IEEE Antenna and Propagation Society (AP-S) International Symposium 2007*, **No. 145.5**, Honolulu, Hawaii, (June 2007).
- (17) M. Tanaka and J. H. Jang, "Wearable microstrip antenna for satellite communications," *IEICE Transactions on Communications*, **Vol. E87-B, No. 8**, (Aug. 2004).
- (18) D. V. Thiel and A. Galehdar, "Flexible, light-weight antenna at 2.4 GHz for athlete clothing," *IEEE Antenna and Propagation Society (AP-S) International Symposium 2007*, **No. IF325.2**, Honolulu, Hawaii, (June 2007).

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。