

## 寄稿

# MIMOのふしぎ探検 —千手観音同士がキャッチボールをすると—

電気通信大学 教授  
唐 沢 好 男



高性能モバイル情報通信やユビキタスネットワーク時代の足音が近づき、それを支えるワイヤレス情報伝送技術の研究開発が元気である。本稿では、その要素技術の1つ、MIMOに焦点を当て、この技術の原点となっている不思議な魅力に迫ってみたい。ここで紹介する話題はMIMOの技術で言うとイロハのイにあたるが、MIMO理解には本質的な部分である。全体を通じて、MIMO情報伝送をキャッチボールに例え、ボールの投げ方・受け方にみられる先人の工夫を分かりやすく解説する。「切れない無線リンク」や「大容量のデータ伝送」を実現する仕組みを理解してほしい。なお、MIMOは「マイモ」と読むのが大勢であるが、「ミモ」と読んでも通用する。

## 1. MIMOの不思議

MIMOはMulti-Input Multi-Output(またはMultiple-Input Multiple-Output)の略語で、多入力・多出力システムの総称である。通信の分野では、送受信の双方にアレーアンテナを用いて情報伝送を行うシステムに用いられることが多い。広く解釈すれば、マルチユーザ環境での通信システム(多元接続方式)や干渉波除去・分離方式、直交偏波共用方式、周波数領域にデータを展開して並列伝送するOFDM(直交周波数分割多重)もMIMOと言えなくもないが、ここでは、送受信にアレーアンテナを用いるシステムを対象とする。

図1は、MIMOの伝送イメージと学問分野を示している。送り方(情報理論・符号理論)、受け方(アレーの適応信号処理)、途中の電波の伝わり方(電波伝搬)に、さまざまな研究領域をもつ複合技術ととらえられる。

本稿では、MIMOに関する3つの不思議に焦点を当てる。

- (1) 送信側と受信側の双方で制御するのに、混乱が起きないのだろうか？  
(相手の動作と場の状態を読むことが得意な、優秀なピッチャーと優秀なキャッチャーがキャッチボールをすると、どういう球筋になるか)
- (2) 送信側に伝送路の情報がないとき、アレー送信のメリットを最大に生かすにはどうしたらよいのか？

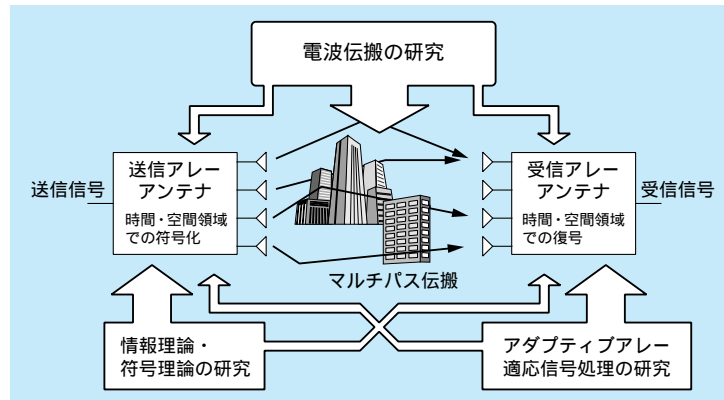


図1 MIMOの伝送イメージと関連する学問分野

- (濃い霧の中、相手が見えないとき、ピッチャーはどういう投げ方をすればよいか?)
- (3) アンテナ数を増やすと、なぜチャネル容量(送ることのできる情報量)が上がるのだろうか?
- (千手観音同士がキャッチボールをすると?)

## 2. 優秀なピッチャーとキャッチャーが向かい合い、さて、ボールをどう投げるか?

送受信双方のアンテナのウェイトを制御して、最大SN比受信を実現する伝送(最大比合成伝送)の話である。この背景技術である最大比合成ダイバーシチの技術から入りたい。以下、アレーは2素子の例で述べるが、任意の素子数に一般化しても成り立つ仕組みである。図2(a)に通常のスペースダイバーシチの構成を示す。受信側で、アンテナのウェイトを制御して信号合成を行ない、良好な受信特性を得る方法で、フェージング対策として最もポピュラーである。受信側で伝送路の特性(チャネル情報: CSI)を得ていれば、最大比合成は、ウェイト( $w_{r1}, w_{r2}$ )をチャネル特性の共役複素量( $h_1^*, h_2^*$ )に比例するものとすることで実現できる<sup>(1)</sup>。このとき、受信SN比のスペースダイバーシチ利得 $G_{SD}$ は、伝送路利得1の単一アンテナ対向システムに対して、

$$G_{SD} = |h_1|^2 + |h_2|^2 \quad (1)$$

となる。これは、キャッチボールにおいて、“優秀なキャッチャーが、ピッチャーの動作と場の状態を読んで、最適位置にミットを構え、どこに来るボールでも取りこぼさない、というイメージ”である。同じように、送信側でウェイト制御するダイバーシチ(送信ダイバーシチ: 図2(b))であっても、送り側にチャネル情報(CSI)があれば、受信側ダイバーシチと同じ性能が得られる。送信側でCSIを

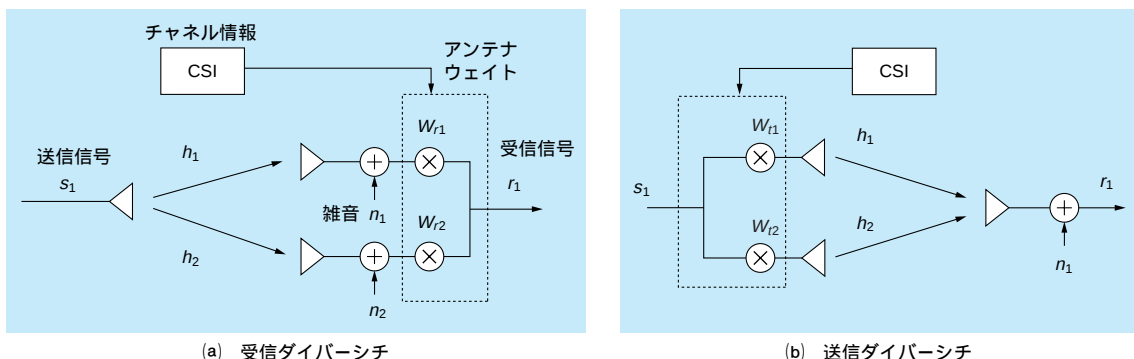


図2 スペースダイバーシチの構成 (アレー制御側にチャネル情報がある場合)

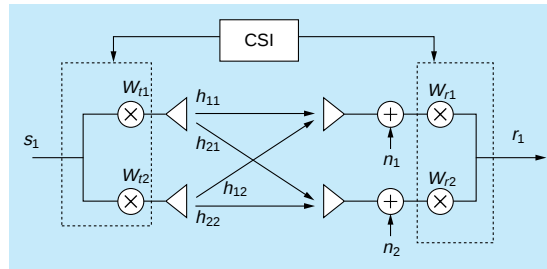


図3 送受信ウェイト制御型最大比合成伝送

得る方法としては、例えば、TDDと呼ばれる送受信で同じ周波数を用いる通信方式であれば、自分が受信のときに学習すればよい。こちらは、“優秀なピッチャーが、キャッチャーの動作と場の状態を読んで、キャッチャーが構えるミットに、ずばりボールを投げ込むイメージ”である。

問題は、図3のように、送受信の双方でウェイトを制御し、最大比合成受信をしたいという場合である。“優秀なピッチャーと優秀なキャッチャーが、場の状態と相手の動作を読みあい、どう投げてよいか分からなくなってしまうのではないか”，という心配である。これへの好奇心が、私のMIMO研究事始めである。実はこの問題は、数学が見事に解決してくれることになる。図3の例では、チャネル特性 $H$ は

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{Nr1} & h_{Nr2} & \cdots & h_{NrN_t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

の行列表現になる。送信アンテナの数を $N_t$ 、受信アンテナの数を $N_r$ として、一般化している。新たに作った行列： $HH^H$ （上付き文字 $H$ は複素共役転置の演算を示す）や $H^H H$ の固有値を計算し、この最大固有値をあたえる固有ベクトルが、求めるウェイトになる<sup>(1)</sup>。すなわち、答えはCSIの中にあり、“ピッチャー(キャッチャー)は監督(この場合は数学)の言うがままに投げ(受け)さえすればよい”ということになる。このメカニズム、新発見だと喜んだ時期があったが、既に1960年代(あるいはそれ以前)に扱われている数学問題にすべて帰着する<sup>(2)</sup>ということを知ることになった。MIMO出現以前にちゃんと道具を用意してくれている数学者は偉い！

### 3. 濃い霧の中でピッチャーはどう投げるべきか？

これは、時空間符号化(Space-Time Coding)の話である。図4がその問題である。図2(b)との違いは、送信側でCSIを持たないことである。ただし、受信側はCSIを得ていることとしよう。CSIを持たずに図2(b)の構成でのウェイトを決定しようとすると、必ず、不具合が生じる状況が存在する。例えば、送受信のウェイトを同じにすれば、アンテナの指向性は正面方向にピークを持つが、同時に、どこかの方向に利得が0になるヌル点も持ってしまう。その方向が、偶然、パスの方向だとすれば、アレーにすることによって、かえって性能が劣化したことになる。アンテナはむしろ1本の方が良い、ということになってしまう。2本あるなら、2本あることを生かす送信の方法はないのであろうか、という問題である。“ピッチャーの場所が濃い霧に覆われ、場の状態がまったく読めない中で、どのようにボールを投げればよいのか？”である。

これに、答えを与えたのが1998年に出たAlamoutiの論文<sup>(3)</sup>である。図5に示すように、送りたい情報( $s_1, s_2$ )を2つまとめてブロックにする。最初の時間にアンテナ1から $s_1$ を、アンテナ2から $s_2$ を、

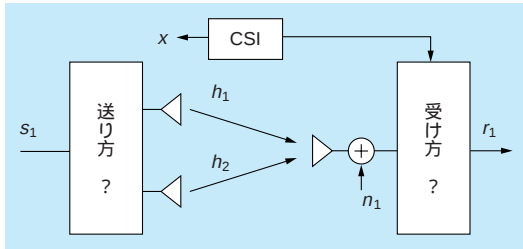


図4 チャンネル情報を持たない場合の最適な送り方とは？

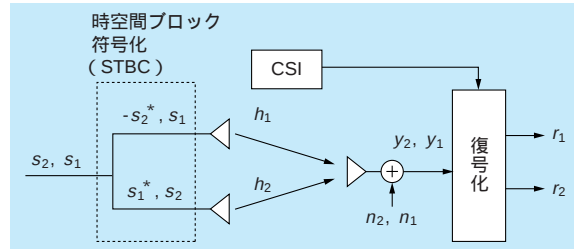


図5 時空間ブロック符号化伝送

次の時間に、アンテナ1から $-s_2^*$ を、アンテナ2から $s_1^*$ を送る。干渉が起きそうで心配な送り方であるが、以下で説明するような巧妙な仕掛けが働いている。この伝送における送受信信号を式で表すと、

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。この式は以下のようにも書き換えることができる。

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{pmatrix} \quad (4a)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{2}} H_e s + n \quad (4b)$$

式(4b)は、(4a)のベクトルや行列を記号に置き換えたものである。

受信側では、CSIを所有しているので、次の演算ができる。

$$r = H_e^H y = \frac{1}{\sqrt{2}} (|h_1|^2 + |h_2|^2) s + H_e^H n \quad (5)$$

時間領域や空間領域で混ぜこぜにされた信号成分が、受信信号処理 (= 復号化) によって、 $s$ として完全に分離識別されていることがわかる。それもちゃんと最大比合成という働きまで見せて。図2(a)や(b)の構成、すなわち式(1)の利得と比べると、SN比が半分になるものの、フェージングによる変動幅の抑圧という意味でのダイバーシチの効果は同じになっている。送信側にCSIがないというハンディを見事に克服しているといえる。この方法はデータの順序の交換という時間領域の符号化とアレー素子ごとに信号を変える空間領域の符号化が組み合わされているので、時空間符号化(STC)と呼ばれる。また、その信号処理においてブロック単位での処理になっているので、より具体的には、時空間ブロック符号化(STBC)と呼ばれる。

このポイントは、 $H_e^H H_e$ が対角行列になるような仕掛けを作ったことである。これはすなわち、それぞれのアンテナから出力される信号が直交化されている、ということである。言われてみればなるほどと思うが、最初に考え出したAlamoutiはやはり偉い！

2素子アンテナの場合は、入力信号をそのままの伝送速度(レート)で伝送できるので、フルレート (= 符号化率1)の伝送方式である。アレーによるフェージング変動の抑圧は、受信側2素子の最大比合成ダイバーシチの性能を持つ。このことを、フルダイバーシチの機能があると呼ぶ。このように、フルレート・フルダイバーシチはSTBC伝送の理想であるが、これを実現する符号は $N_t = 2$ の場合のみであることが知られている。そのため、 $N_t \geq 3$ については、それに準じるものとして、レートを落としたり、擬似直交符号とするなど、情報理論(符号理論)を駆使した様々な符号が提案されている<sup>(4)</sup>。

以上述べてきた方法は $N_t=2$ ，任意の $N_t$ に対するMIMOに容易に拡張できる。 $N_t=2$ 以外の場合も，上に述べたと同様に，レートを下したり，擬似直交符号とするなどで対処できる。上記の説明からも分かるように，STBCに代表される時空間符号化( STC )伝送は送信ダイバーシチの技術であり，MIMO独自の技術ではない。しかしながら，MIMOへの応用分野を得て，その力を発揮する場が広がったと位置づけられる。この伝送には複数の情報ストリームがあるように見えるが，情報そのものは1系統であり，送信アンテナが最悪1本になっても情報の欠落は無いため，これはシングルストリーム伝送と理解したい。

以上述べてきたシングルストリーム伝送は， $N=N_t \times N_r$ の最大比合成ダイバーシチを実現させるもので，送受信双方のアレーアンテナを用いてフェージングを抑圧する技術，すなわち，信頼度の高い無線リンクを得たいための技術と位置づけることができる。

## 4．千手観音同士がキャッチボールをすると？

### (1) シャノンの呪縛

ここは，アンテナごとに，あるいは，マルチビーム出力ごとに異なる情報を乗せて送るマルチストリーム伝送の話，すなわち，MIMOの特徴を利用して，複数情報を同時に送る話である。本稿の副題にもなっている“千手観音同士のキャッチボール”のイメージである。

なぜそれを必要とするかの背景説明から入りたい。

$$C = \log_2 (1 + P_S/P_N) \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (6)$$

はシャノンが導いたチャネル容量の式である。 $P_S$ は信号電力， $P_N$ は雑音電力であり，チャネル容量 $C$ は，1秒，1Hzあたりに送ることができるビット数である。どんなに送り方の工夫をしても，これ以上送ることができないという上限値である。SN比が大きいときは，

$$C \simeq \log_2 (P_S/P_N) \quad (P_S \gg P_N) \quad (7)$$

となる。これは，SN比の増加に対して，送ることができるビット数は対数的にしか増えないことを意味している。 $n$ ビット送ることができる伝送路があったとする。SN比がさらに2倍になると，1ビット増えて $n+1$ ビットを送ることができるが，増加の比率で見れば，例えば $n=10$ の時には，1割アップにしかない(図6(a))。これではあまりにも効率が悪い，しかしこれが情報伝送の宿命である。

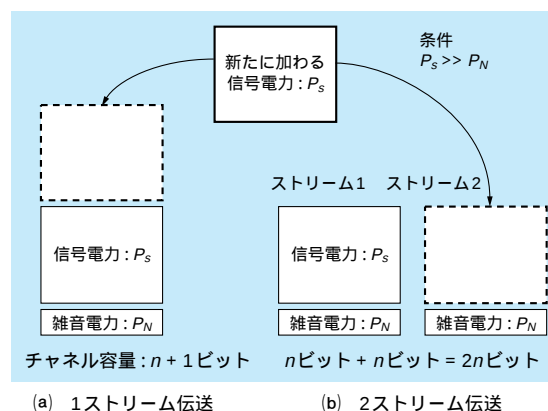


図6 信号電力増加に伴うチャネル容量の増加：  
シングルストリーム伝送 vs. マルチストリーム伝送

## (2) もし複数の道を手に入れることができたら

もし、複数の伝送路を手に入れることができたらどうであろう。図6(b)は伝送路2本を手に入れている場合について、この配分を示している。この場合は、合わせて $2n$ ビット送ることができ、 $n=10$ の場合は20ビット送ることができる。送信信号総電力一定の条件で、伝送路の数を増やすことによって、チャネル容量をどんどん増やすことができる。しかし、この算定ができるのは、(7)式の近似式が成立するSN比が大きいところでの話である。SN比が小さいときは、どんなに伝送路の数を増やしてもその効果が現れないことを、(6)式で確認してほしい。

では、複数の伝送路を手に入れるにはどうしたらよいであろうか。その答えが「MIMO」であり、かつ、電波環境が「マルチパス環境」であることによってである。しかもこの伝送路は、物理的に存在する個々のパスではなく、仮想的なものである。この説明には、2節の説明で割愛したと同じ数学的手段が必要であるが、ここではポイントだけを述べる(詳細は文献<sup>(5)</sup>を見てほしい)。

2節の最大比合成伝送で説明した行列 $HH^H$ (あるいは $H^H H$ )では、その最大固有値のみに着目した。しかし実際には、送受信のアンテナ本数の少ない方の数 $N_{\min}$ の固有値( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_{\min}}$ )が存在する。例えば $N_t=3, N_r=4$ であれば、固有値の数は3である。このようにして、固有値の数に対応する独立な伝送路(道)を手に入れることができる。ただし、その道の広さは固有値の平方根に比例する。図7(b)は、チャネルの行列関係を表す図7(a)を等価回路で表したものである。変換を表す行列 $E_t, E_r$ は相関行列の固有ベクトルで構成される行列である。チャネルの等価回路に整合するように、送信系のビームフォーミングネットワークを $E_t$ に、受信系を $E_r^H$ とすることにより、 $N_{\min}$ 個の信号が独立に $\lambda_i$ の利得でお互いに干渉なく伝送できる(図8)。このような固有値概念に基づくマルチストリーム伝送

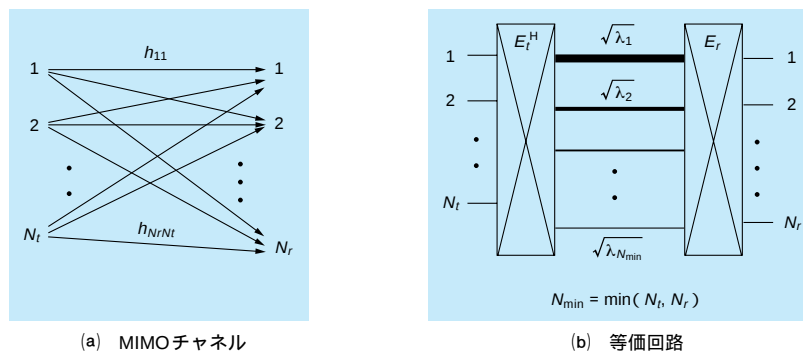
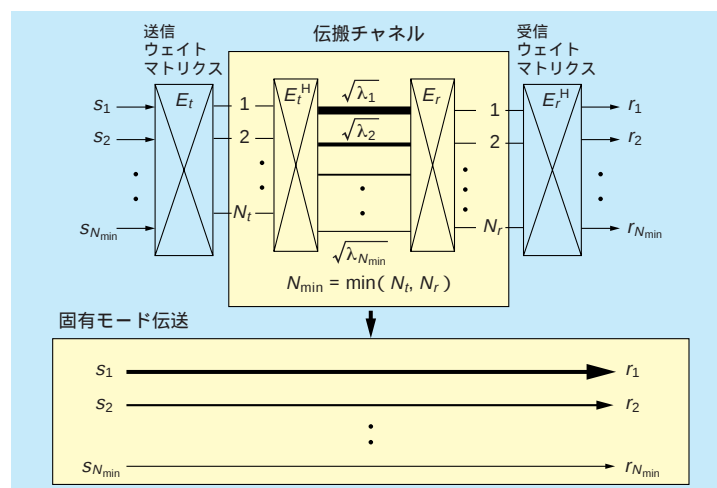


図7 MIMOチャネルとその等価回路表現

図8 固有モード伝送( $N_{\min}$ 本の分離された伝送路を手に入れることができる)

は、固有モード伝送と呼ばれる。2節で述べた最大比合成伝送は、固有モード伝送において、最大固有値のパスのみを利用し、それに全情報を送り込む伝送方式であったと理解できる。

### (3) MIMOのチカラ

マルチストリーム伝送もキャッチボールに例えられる。“普通のキャッチボールと違うのは、ピッチャーが千手観音のような複数の手でたくさんのボールを同時に投げ、キャッチャーもこれを複数の手で巧みに受ける点”にある。

レイリーフェージング環境において、MIMOが理想的に動作したときのチャンネル容量の計算結果を図9に示す。図では、シングルストリーム伝送の代表として、図3に示す送受信ウェイト制御型最大比合成伝送を、マルチストリーム伝送の代表として固有モード伝送(図8の構成で、各ストリームに最適な送信電力配分を行った最も理想的な伝送)の結果を示す。送受信でアンテナ数が等しい $N_t = N_r$ のケースを扱い、SN比は10dBで計算している。図より、シングルストリーム伝送では、アンテナ数が増加しても、チャンネル容量は飽和傾向になるが、マルチストリーム伝送、すなわち、千手観音同士のキャッチボールでは、アンテナ数(=投げるボールの数)に比例して、チャンネル容量も増加していくことが分かる。MIMOに期待が集まるのは、まさにこの点である。

大概、話はここで「めでたしめでたし」と終わるが、注意が必要である。図9は、マルチストリーム伝送がシングルストリーム伝送より、優れているということを一般的に言っているわけではない。あくまで、SN比が比較的高いときに、チャンネル容量を大きくできる(=たくさんの情報を送ることができる)ということであって、切れにくい信頼度の高いリンクを形成したいという場合には、ダイバーシチ機能がフルに働くシングルストリーム伝送の方が勝っている。優劣の評価は何を目的とするかによって決まり、単純ではない。

## 5. MIMOのゆくすえ

以上述べたことは、MIMOのイロハのイであるが、ここまでが感覚的に理解できれば、一つの見通しの良い場所にたどり着いたと言っても良い。以下、これらがベースになって進められている技術の

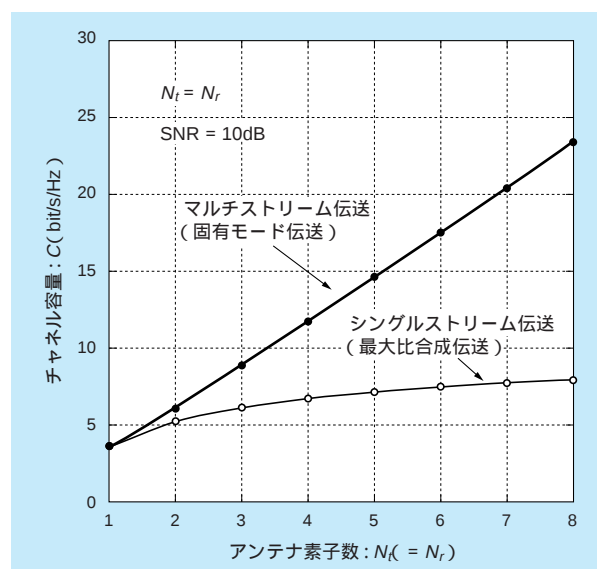


図9 シングルストリーム伝送とマルチストリーム伝送のチャンネル容量比較(SN比が比較的高い場合)

動向について少し触れたい。

現在，MIMOは無線LANへの導入を足がかりに，様々な分野への応用が期待されている。無線LANには，1) 広帯域情報伝送に強いニーズがあること，2) 利用される環境がMIMOの性能発揮に適したマルチパス環境であること，3) 利用する端末(パソコン等)に複数のアンテナを配置できるようなスペース的余裕があること，4) 5GHz帯周波数が用いられ，アレーサイズの小型化が実現できること，5) 環境の時間的変化が遅く，環境追従性に高速な動作が求められること，など，適用分野として好条件がそろっているためである。無線LANを対象とした標準化がIEEE 802委員会で行なわれており，MIMOの導入を目指した次世代無線LANの標準化活動はタスクグループIEEE 802.11nで行なわれている(最新情報は文献<sup>(6)</sup>に)。対象が現行無線LANの拡張と位置づけられるためOFDM方式への適用，すなわち，MIMO-OFDM方式となる。すでに製品開発(チップ開発)も始まっており，MIMOはまずここから実用化に入ることになる。これまでの一連の研究で，基礎技術がほぼ出そろい，一時のフィーバー感は収まってきたが，応用分野開拓・装置開発は，むしろこれからである。

先に述べたMIMOの2つの特徴「情報をたくさん送ることができる」，「切れにくいリンクを形成することができる」は，ワイヤレス通信の共通の理想であり，携帯電話(セルラー)や業務用無線，あるいは，ITS(高度道路交通システム)の車車間通信など，それらの将来システムに幅広い応用が期待され，研究開発が進められている。しかしながら，これらのシステムへの応用に際しては，MIMOの適用に都合の良い点として無線LANで挙げた5つの特徴のうち，1つまたは複数において，困難な点があり，実用に至るまでには，まだ多くの研究課題がある。高速移動(ファーストフェージング)，広帯域(周波数選択性フェージング，OFDMであれば，遅延の広がりガガードインターバルを超えるような環境)，マルチユーザ，MIMOブランチの多様化(偏波・空間・周波数・時間などの多次元領域融合)などが，キーワードである。

MIMOはアンテナをたくさん使うのだから，高い性能が出るのはあたりまえ(=良い性能が出なくては話にならない)とも言える。その能力を限界まで引き出すのがシステム設計者の腕の見せどころになる。過剰な期待は禁物，されどMIMOである。

## 参 考 文 献

- (1) 唐沢好男：“デジタル移動通信の電波伝搬基礎”，コロナ社，2003.
- (2) A.T. James：“Distribution of matrix variates and latent roots derived from normal samples”，Ann. Math. Statist., Vol.35, pp.475-501, 1964.
- (3) S.M. Alamouti：“A simple transmit technique for wireless communications”，IEEE Jour. Selec. Areas Commun., Vol.16, pp. 1451-1458, 1998.
- (4) A. Hottinen, O. Tirkkonen, and R. Wichman：“Multi-antenna transceiver techniques for 3G and beyond”，John Wiley & Sons td., 2003.
- (5) 唐沢好男：“MIMO伝搬チャネルモデリング”，信学論B, Vol.J86-B, No.9, pp.1706-1720, 2003.
- (6) <http://www.802wirelessworld.com>

## 【著者紹介】

昭52京都大学大学院修士課程了。同年国際電信電話(株)(現KDDI)入社。同社研究所にて，電波伝搬・アンテナ・デジタル伝送方式の研究に従事。平11電気通信大学教授。平17より同大学先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター(AWCC)センター長。工学博士。平10電波功績賞，平18電子情報通信学会論文賞(2件)等受賞。