

マイクロ波・ミリ波の移動伝搬

第5世代移動通信システム（5G）の標準化に向けた動きが活発となってくる中で、LTEの拡張と並行して、新たな無線アクセス技術（newRAT：new Radio Access Technology）の検討が進められている。これまで「電波の窓」として移動通信に相応しいとされてきた6GHz以下の周波数帯域はすでにひっ迫しており、より広い帯域を利用して大容量の伝送を行うために10GHz以上のマイクロ波・ミリ波の使用が議論されている。

通信路容量を表すシャノンの式を以下に記載する。

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

この式を見て明らかのように、信号対雑音電力比（SNR：Signal to Noise Ratio） S/N を一定とすれば通信路容量 C は帯域幅 B に比例する。一方、無線回路設計の観点からは、帯域幅 B を中心周波数 f_c で正規化した比帯域幅 B/f_c が意味をもつ。このため、周波数の割当てでは、中心周波数が高いほど帯域幅も広くなる。これが、伝送容量の増大のために高い周波数を用いる動機となる。

これだけで話が終われば簡単で良いのだが、雑音電力は帯域幅に比例するので、信号電力も帯域幅に比例して大きくしなければ同じSNRにはならない。

以上は信号理論であるが、次は伝搬路を考える必要がある。障害物のない自由空間ではフリスの伝送公式が成り立つ。

$$G = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \quad (2)$$

この式は見通し環境での回線設計にもっぱら用いられる式である。この式から読み取れるのは、伝搬路利得 G が距離 d の2乗に反比例して減衰すること、周波数が高くなり波長 λ が短くなるほど減衰が大きくなることである。そして、これらの不利益を補うためには距離を小さくするかアンテナ利得 G_r 、 G_t を

高くする必要がある。距離を小さくするにはセルの狭小化が、アンテナ利得を上げるにはアレーアンテナがそれぞれ必要な技術となる。アレーアンテナでは複数のアンテナが受信した信号を合成することで、特定の角度方向にビームを形成するが、ビームの広がりアンテナ利得の積はエネルギー保存則からほぼ一定となるため、アンテナ利得が高いほどビームは細くなり、より高い追従性能が要求されるため、高速なビーム制御が必要となる。

自分で書いていて見覚えがある文章だと思ったら、20年近く前に4Gのための伝搬研究を始めるときにも同じことを書いたことを思い出した。自然の法則は変わりようがないので、技術の進歩に求められていることも大きく変わる訳ではない。

それでも、システム技術やそれを支えるデバイス技術がこの20年の間に大きく進歩し、それが現在のマイクロ波・ミリ波の使用可能性の検討に弾みをつけている。制御チャンネルとトラフィックチャンネルの周波数を分離し、前者にUHF（Ultra High Frequency）を使い続けることで、後者にキャリアアグリゲーション*1とベストエフォートの考えを導入すれば、高い周波数が切れやすいという過去の常識は覆される。PHSで置局に苦勞し、ほとんどトラウマとなっていたマイクロセル技術は、光張出し無線装置により息を吹き返している。アンテナごとに無線機が付いているMIMO（Multiple Input Multiple Output）技術も20年前はまだ絵空事だった。マイクロ波やミリ波では高価な化合物半導体を使用するのが当然だと思っていたが、いつしか廉価でデジタル回路と親和性の高いシリコンCMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）*2を使用するのが前提の議論になっている。

この間の自分の電波伝搬研究を振り返ってみると、YRP移動通信基盤技術研究所との共同研究（1995～2001）では3.35、8.45、15.75GHzを、通信・放送機構のファンドによる富士通研究所・大阪大学との共

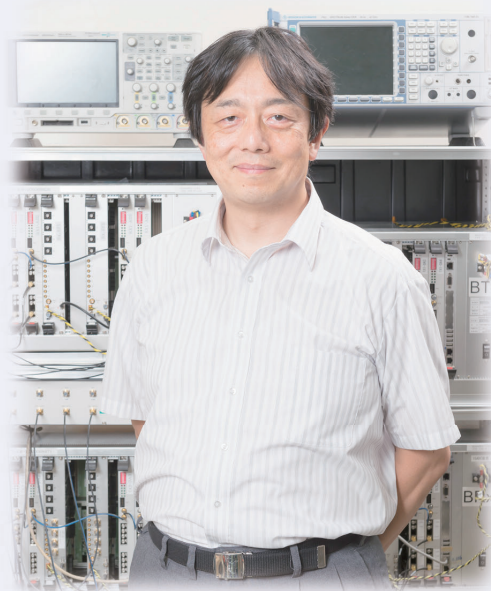
Profile

1992年東京工業大学大学院博士課程修了。千葉大学助教を経て1994年より東京工業大学助教授、2006年より同教授。無線通信のための電波伝搬、応用電波計測の研究に従事。2003年より2007年まで情報通信研究機構研究員を兼務し、ITU-RTG1/8でUWBの干渉計測に、IEEE802.15.6でBANのチャンネルモデルの標準化に携わる。大学での本務は国際開発工学で、ICTの社会開発への応用や工学高等教育協力に従事。信学会フェロー、IEEEシニア会員。

同研究（2002～2007）では4.5GHzを、そして総務省の電波利用料プロジェクトによるNTTドコモ・東北大学との共同研究（2009～2013）では11、60GHzを使用し、さまざまな環境における伝搬測定を行ってきた。マイクロ波・ミリ波における移動伝搬の先駆的なテーマに従事することができ、研究パートナーやスポンサーには本当に感謝している。

その一方で、自らの研究内容を振り返ってみると、後悔の気持ちがある。研究領域をMIMOには拡張しながらも、高所設置基地局による見通し外カバレッジを前提としたセルラの既成概念をうち壊すことができず、あくまでセルラコンセプトをそのまま高い周波数に移すことを前提に研究を進めてきた。マイクロセルにも重きを置かず、UHF帯との比較測定も行わず、従来型の環境を念頭にMIMOのための角度特性や物理的な散乱メカニズムを追い続けた。多数の論文を執筆できた反面、新しいシステム設計には貢献できておらず、忸怩たる思いがある。

セルラの殻を破れなかったことに対して、少しだけ言い訳をしておきたい。ゼロから伝搬研究を始めた頃、企業から廃棄品を払い下げてもらったベクトルネットワークアナライザ（VNA：Vector Network Analyzer）*3と、学生が作ったレイトレース伝搬シミュレータだけが資産だった。学生には「うちの研究室の資産は君たちの頭脳だけだ」と励ましながら、VNAでも実験可能な10m以下の近距離伝搬特性に一生懸命取り組んでいた。しかしながら、学会で発表しても、先輩の電波伝搬研究者からは「お遊び」「新規性がない」「移動しなければ無意味」など散々の評価で、何よりも一生懸命やっていた学生に気の毒だった。セルラの伝搬は基本的に統計モデルで、多数の散乱現象が巨視的にどのような統計的な振る舞いをするかが関心の中心であった。近距離伝搬での課題である、少数の周辺物体から個別に散乱される電波の振る舞いの各論は、全く関心外のトピックであった。各論は方式設計よりもサービス設計に資するもので、研究者が考えることではない、という雰囲気もあり、その一方で、サービス設計の各論はレイトレース伝搬シミュレーションが解決しつつあ



ると考えられていた。そのため、近距離伝搬の意義も新規性も全く評価されなかった。セルラでなければ伝搬ではないのだ、という意識がこの時に植え付けられたのだと思っている。それでも、今振り返って恥ずかしいのは、無線通信システムに関する知識が皆無だったため、伝統的なセルラ方式以外の置局コンセプトに思いが及ばなかったことである。今はVNAと指向性アンテナがあれば、5Gの新しい無線アクセス技術に関する伝搬実験ができてしまう、そのことを当時想像し得なかったことが残念でならない。

高い周波数と小さなカバレッジは、高速移動を前提としたセルラの伝統的なシステムモデルからの脱却を必要としている。システム設計と伝搬特性の相互作用が今こそ求められているとの思いを新たにしている。

- *1 キャリアアグリゲーション：複数のキャリアを用いて同時に送受信することによって広帯域化を行い、高速伝送を実現する技術。
- *2 シリコンCMOS：もっとも低コストな半導体材料であるシリコンウェハ上に形成可能な電界効果トランジスタ。LSIと同じ製造プロセスが使用できるため、ディスクリット部品を使用する場合に比べて大幅な小型化が可能。
- *3 ベクトルネットワークアナライザ（VNA）：元々は高周波回路素子の伝達関数を測定する装置であるが、回路素子の代わりにアンテナを接続することによって、伝搬路の伝達関数の測定が可能となるため、近年は近距離伝搬路の計測にもよく用いられている。