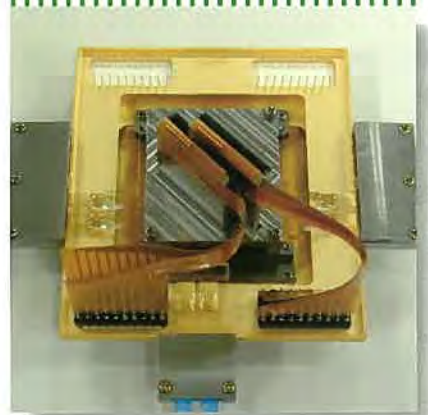
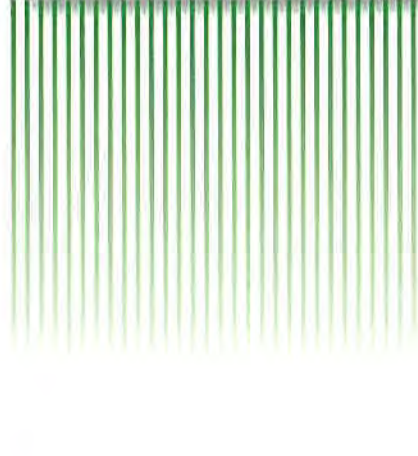
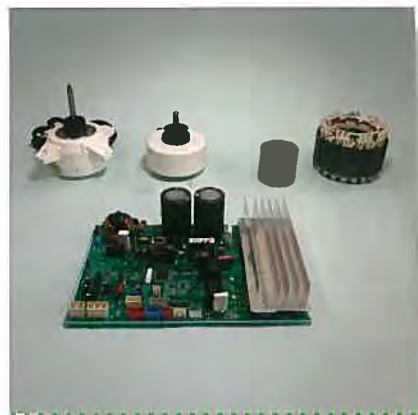


# MITSUBISHI

## 三菱電機技報 Vol.79 No.7

2005 7

特集Ⅰ「パワーエレクトロニクス技術」  
特集Ⅱ「ユビキタスアクセスネットワーク技術」



目 次

特集Ⅰ「パワーエレクトロニクス技術」

パワーエレクトロニクス技術の発展に思う ..... 1  
赤木泰文

パワーエレクトロニクス技術の現状と展望 ..... 2  
小山正人

モータ制御における高精度モデル化技術 ..... 7  
木全政弘・米谷哨之

階調制御型インバータとその応用 ..... 11  
岩田明彦・山田正樹・森 修・畠山善博・石井康裕

電力変換回路からの電磁ノイズ  
発生メカニズムと抑制技術 ..... 15  
西沢昭則・東 聖・田邊信二

パワーモジュールの信頼性評価・接合技術 ..... 19  
松永俊宏・上貝康己・吉原邦裕・須藤進吾

SiCデバイスとその応用技術 ..... 23  
木ノ内伸一・中武 浩・今泉昌之

空調・家電機器におけるパワーエレクトロニクス技術 ..... 27  
川久保 守・矢部正明

特集Ⅱ「ユビキタスアクセスネットワーク技術」

ユビキタスアクセスネットワーク技術小特集に寄せて ..... 31  
肥塚裕至

ユビキタスサービスに向けた  
アクセスネットワークの構築について ..... 32  
菊地克昭・安土哲次郎・横谷哲也

ギガビットイーサネットPON技術 ..... 37  
山中秀昭・村上 謙・中川潤一・酒井謙行・山中重雄

メトロアクセス技術 ..... 41  
八田竜夫・河村敦志・松本啓資・齋藤 健

大容量無線アクセス技術 ..... 45  
城倉義彦・久保博嗣・永井幸政・東中雅嗣・平 明德・須賀寛祥

IPモビリティ技術 ..... 49  
矢野雅嗣・伊藤一彦・鈴木由美子・堀 貴彦

ホームネットワーク技術 ..... 53  
赤津慎二・松原雅美・加藤嘉明・松尾英治・小坂英明

ワイヤレスセンサネットワーク技術 ..... 57  
平岡精一・三部 健・齋藤 隆

ユビキタスセキュリティ技術 ..... 61  
松井 充・反町 亨・佐伯 稔・山田敬喜・時田俊雄

携帯電話アンテナ技術 ..... 65  
深沢 徹・田中徹哉

Power Electronics Technology

A Thought of Developments in Power Electronics Technology  
*Hirofumi Akagi*

Present State and Prospect of Power Electronics Technology  
*Masato Koyama*

High-Precision Modeling Technique on Motor Control  
*Masahiro Kimata, Haryuaki Kometani*

Gradationally Controlled Voltage Inverter and Its Applications  
*Akihiko Iwata, Masaki Yamada, Osamu Mori, Yoshihiro Hatakeyama, Yasuhiro Ishii*

Electromagnetic Noises from Power Devices and Filter Design  
*Akinori Nishizawa, Satoshi Azuma, Shunji Tanabe*

Evaluation of Fatigue Life Reliability and New Lead Bonding Technology for Power Modules  
*Toshihiro Matsumaga, Yasumi Uegai, Kumihiro Yoshihara, Shingo Sudo*

SiC Devices and Their Application Technologies  
*Shin-ichi Kinouchi, Hiroshi Nakatake, Masayuki Imatsumi*

Technologies of Power Electronics for the Air Conditioner and Household Electric Appliances  
*Mamoru Kawakubo, Masaaki Yabe*

Ubiquitous Access Networking Technology

On Ubiquitous Access Network Technologies  
*Hiroshi Koecuka*

Next Generation Access Network toward Ubiquitous Services  
*Katsuki Kikuchi, Tetsujiro Yasushi, Tetsuya Yokotani*

Gigabit Ethernet PON Technology  
*Hideaki Yamanaka, Ken Murakami, Junichi Nakagawa, Kaneyuki Sakai, Sigeo Yamanaka*

Metro-Access Technology  
*Tatsuo Hatta, Atsushi Kawamura, Keisuke Matsumoto, Takeshi Saitoh*

Broadband Wireless Access Technologies  
*Yoshihiko Shirokura, Hiroshi Kubo, Yukimasa Nagai, Masatsugu Higashinaka, Akinori Taira, Hiroyoshi Suga*

IP Mobility Technologies  
*Masatsugu Yano, Kazuhiko Itoh, Yumiko Suzuki, Takahiko Hori*

Home Network Technologies  
*Shinji Akatsu, Masami Matsubara, Yoshiaki Kato, Eiji Matsuo, Hideaki Kosaka*

Wireless Sensor Network  
*Seiichi Hiraoka, Ken Sanbu, Takashi Saito*

Security Technology for Ubiquitous Network  
*Mitsuru Matsui, Tohru Sorimachi, Minoru Saeiki, Keiki Yamada, Toshio Tokita*

Antenna Technology for Portable Telephone  
*Toru Fukasawa, Tetsuya Tanaka*

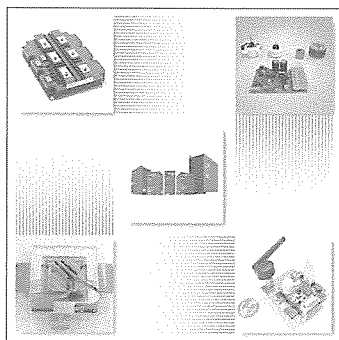
特許と新案

「電池」「誘導電動機の制御装置」 ..... 69

「データ変換装置」 ..... 70

スポットライト

新型UPS階調制御インバータ搭載AXラックマウントシリーズ  
FTTH用標準GE-PONシステム



表紙

最新のパワーエレクトロニクス応用製品

インバータを代表とするパワーエレクトロニクス機器は、家電、産業など様々な分野で、省エネルギー化や高性能化・高機能化に貢献している。三菱電機は、長年培ってきた技術力を結集して、最新のパワーエレクトロニクス機器の製品化を進め、エネルギー問題や地球環境保護問題の解決に取り組んでいく。

ユビキタスアクセスネットワーク技術

この小特集では、ユビキタス社会を実現するためのネットワークインフラ技術にかかわる最新の研究成果について述べた。

表紙写真には、その一例として、メトロアクセス網を伝送する光信号のスイッチング及び可変減衰機能を備えた跳ね橋型光スイッチ(下段左)と、ワイヤレスセンサネットワークにおいて自律的にネットワークを構築しセンサデータや制御情報を無線通信で送受信するZigBee対応センサノード(下段右)を掲載している。



## パワーエレクトロニクス技術の発展に思う

A Thought of Developments in Power Electronics Technology



赤木泰文  
Hirofumi Akagi

2005年4月4日～8日まで、新潟市の朱鷺メッセを会場にIPEC(International Power Electronics Conference)-Niigata 2005が開催された。これは、電気学会が主催する国際会議であり、1983年の第1回IPEC-Tokyo、1990年の第2回IPEC-Tokyo、1995年の第3回IPEC-Yokohama、2000年の第4回IPEC-Tokyoに続いて、今回が5回目の開催である。

IPEC-Niigataの参加者は約570名(外国からの参加者140名を含む)であり、310件の論文が発表された。IPECの特長は、①Paper Qualityが高い、②日本で開催する国際会議の中では海外からの参加者の割合が高い、③海外からの参加者のリピータ(常連客)が多く、海外の研究者・技術者からの評価が高い、ことなどである。

1983年からのすべてのIPECに出席した筆者にとっては、IPECの歴史がパワーエレクトロニクス技術の発展そのものように思われる。手元にある第1回IPEC-Tokyoの論文集を読み返してみると、当時のパワーデバイスはサイリスタとGTO(Gate Turn Off)サイリスタが中心で、現在主流のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)は姿形もない。ベクトル制御やマイコン制御の論文からは、22年間でモータドライブがいかに進歩したかよく分かる。

IPEC-Niigata 2005の基調講演では、講演者の一人のMIT(マサチューセッツ工科大学)のProf. John G. Kassakianは、パワーエレクトロニクスの更なるチャレンジとしてコストダウン、信頼性向上、小型・軽量化が今後とも不可欠であることを指摘した。さらに、最近の性能向上が著しい燃料電池や電気二重層キャパシタの現状と将来予測を紹介し、“Power electronics is not all about power converters and motor drives.”という懐疑の念を抱きながら、

今後の進むべき一方向としてMEMS(Micro Electro Mechanical System)や医療技術とパワーエレクトロニクス技術との融合を力説した。もちろん、電力変換やモータドライブの研究開発を軽視しているのではない。Prof. KassakianもSiC(シリコンカーバイド)やGaN(窒化ガリウム)などのワイドギャップ半導体を使用した次世代パワーデバイスに熱い期待を寄せている。

パワーエレクトロニクス技術は、デバイス(スイッチングデバイス、センサ、コンデンサ、リアクトルなど)とシステム(回路・実装、計測・制御、解析・シミュレーション)をベースとした総合技術である。このため、デバイスとシステムが両輪のごとく有機的に機能して始めて、number one又はonly oneのパワーエレクトロニクス応用機器の開発・製品化に成功するものである。換言すれば、一人の天才技術者ではなく、社内のチームワークが成否を決定する。しかし今後は、産官学からなるパワーエレクトロニクス研究センターを構築し、デバイスとシステムの包括的な共同研究を推進することが急務である。欧米では既に、パワーエレクトロニクス研究センター(米国ではCPES(Center for Power Electronics Systems))を設立し、民間企業も巻き込んで活発に研究を行っている。

今回の特集は、最新のパワーエレクトロニクス技術を紹介している。これらは企業の研究者・技術者が執筆した技術論文であり、大学の研究者にとっても大変に興味深い内容である。パワーエレクトロニクス技術は省エネルギーと環境問題を解決する基盤技術である。今後とも日本のパワーエレクトロニクス技術が世界をリードし、社会に貢献しながら、更なる発展を期待したい。



小山正人\*

# パワーエレクトロニクス技術の現状と展望

Present State and Prospect of Power Electronics Technology

Masato Koyama

## 要旨

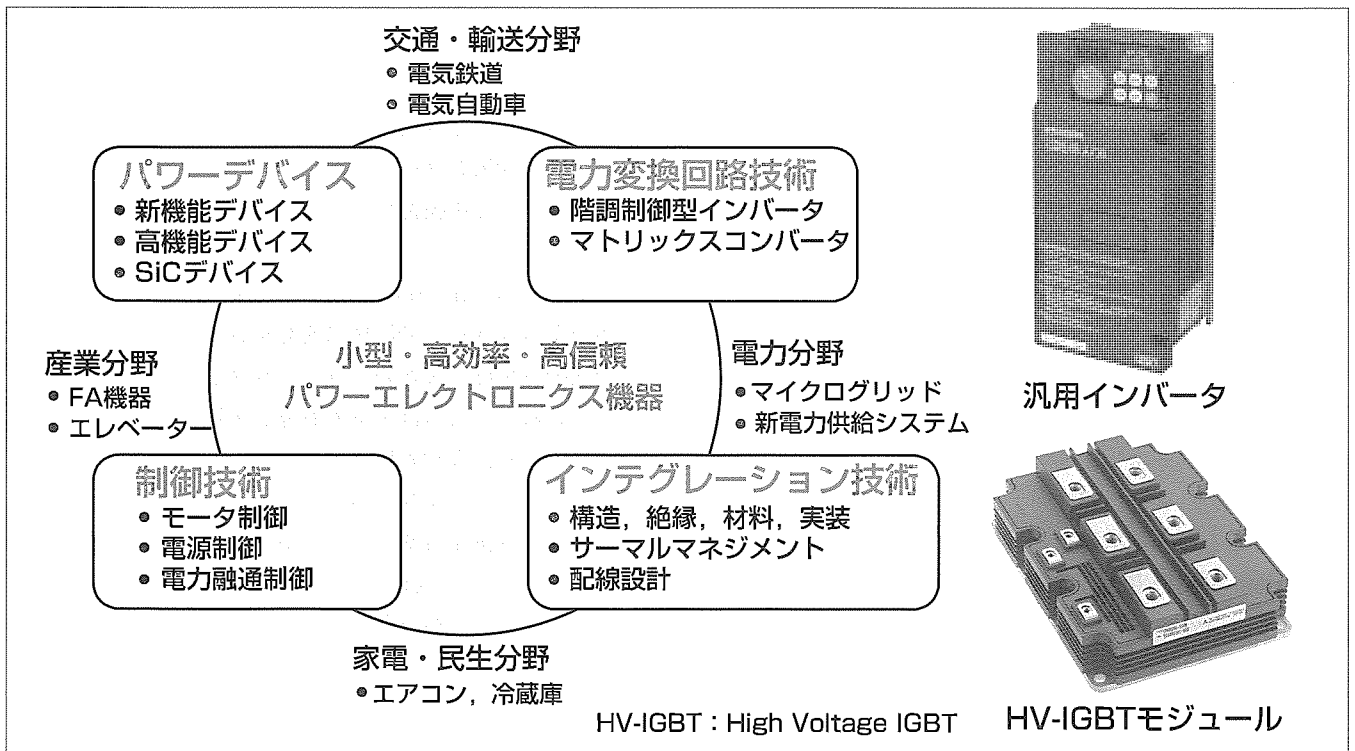
インバータを代表とするパワーエレクトロニクス機器は、家電、産業、交通、電力のあらゆる分野において、省エネルギー化や高性能化・高機能化に貢献している。さらに、近年の地球温暖化や環境汚染などの地球環境問題や、世界的なエネルギー事情の逼迫(ひっばく)により、クリーンな電力を利用し、かつ省エネルギー効果の高いパワーエレクトロニクス機器に対する期待がますます高まっている。

これらのパワーエレクトロニクス機器に対する主な市場ニーズとして、小型化・高効率化・高性能化・高信頼化、環境調和が挙げられる。これらの市場ニーズにこたえるため、パワーエレクトロニクス技術は、パワーデバイス、電力変換回路技術、制御技術及びインテグレーション技術の4つを柱として技術開発が活発に進められている。

パワーデバイスとしては、逆導通IGBT (Reverse Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor : RC-

IGBT)や逆阻止IGBT (Reverse Blocking IGBT : RB-IGBT)などの新機能デバイスや、SiC (Silicon Carbide) デバイスのような新材料デバイスの実用化が期待されている。電力変換回路技術としては、階調制御型インバータやマトリックスコンバータなどの新方式インバータが開発され、実用化が始まっている。制御技術では、モータのセンサレス制御技術の改良や制御パラメータの自動調整技術の開発が着実に進歩している。さらに、将来のマイクログリッドを始めとする新電力供給システムの実用化のためには、システムに使用される多数のパワーエレクトロニクス機器間の電力融通制御も重要な技術課題となる。また、サーマルマネジメントや構造・実装技術などのインテグレーション技術は、パワーエレクトロニクス機器のより一層の小型化や高信頼化に不可欠であり、今後の技術進歩が期待される。

特集  
I



## パワーエレクトロニクスのコア技術と主な応用分野

パワーデバイス、電力変換回路技術、制御技術及びインテグレーション技術の進歩によって、パワーエレクトロニクス機器の小型化・高効率化・高信頼化が進んでいる。クリーンな電力を利用する高効率のパワーエレクトロニクス機器は、エネルギー問題や地球環境保護問題の解決に貢献できるので、今後ますます需要が高まっていくとともに、応用分野の拡大が期待される。

## 1. ま え が き

各種モータ駆動用インバータやスイッチング電源を始めとするパワーエレクトロニクス機器は、エアコンや照明器具などの家電・民生製品から電力システムシステムなどの社会インフラまで幅広い分野において、省エネルギーや高性能化・高機能化に貢献している。

三菱電機は、これらパワーエレクトロニクス機器のキーコンポーネントであるパワーデバイスを含めて、家電、産業、交通、電力などあらゆる分野で使用されるパワーエレクトロニクス機器の製造に携わり、パワーエレクトロニクス技術の発展に貢献してきた。この特集号では、当社が培ってきたパワーデバイス、電力変換回路技術、制御技術などのパワーエレクトロニクス技術を中心に述べる。

## 2. 市場ニーズと技術課題

パワーエレクトロニクス機器は、パワーデバイスを応用した電力変換装置と、電力変換装置の入出力電圧・電流を制御するための制御装置とから構成される。

電力変換装置の入出力をエネルギー形態に着目して大別すると図1のようになる。入力側の電気エネルギー源としては、商用電源のほかに、エンジンや風車に直結された発電機、太陽電池や燃料電池などの発電型電池がある。一方、出力側の負荷機器としては、電気エネルギーを機械エネルギーとして利用するモータ、電力システムシステムのように電気エネルギーとして利用する電氣的負荷、及び照明器具のように光エネルギーとして利用する物理的負荷がある。なお、電力変換装置には電力を蓄える機能がないため、電力貯蔵が必要な場合は電気二重層キャパシタやバッテリーが使用される。

図2に示すように、代表的なパワーエレクトロニクス応用製品のひとつとして、交流モータ駆動用のインバータがある。当社では、ファン・ポンプの省エネルギー駆動用の汎用インバータや、鉄道車両推進制御装置、エレベーター巻上機駆動用インバータ、HEV(Hybrid Electric Vehicle)モータ駆動用IPU(Integrated intelligent Power drive Unit)、エアコン圧縮機モータ駆動用インバータなどを製造している。また、電氣的負荷対応の応用製品として、無

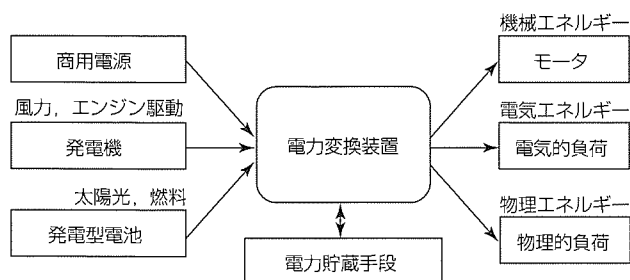


図1. 電力変換装置の入出力形態

停電電源装置や太陽光発電用パワーコンディショナなどがある。さらに、物理的負荷対応の応用製品としては、照明器具用インバータ、自動車用HID(High Intensity Discharge)ランプ点灯装置、レーザ加工機用レーザ発振電源などがある。これらのパワーエレクトロニクス応用製品を支えるキーパーツがパワーデバイスやパワーモジュールである。

このように現在ではパワーエレクトロニクス機器は世の中の様々な分野で普及しているが、これらパワーエレクトロニクス機器に対する市場ニーズとして以下が挙げられる。

### (1) 小型化

パワーデバイスの小型化・低損失化、高周波スイッチング回路技術や実装技術の進歩によってパワーエレクトロニクス機器の小型化が進展してきたが、更なる小型化が要求されている。

### (2) 高効率化

パワーデバイスのスイッチング動作によって発生する損失を限りなく零にまで低減していくことが継続的な技術課題である。損失が減ると冷却が容易になるので、機器の小型化にもつながる。

### (3) 環境調和

パワーエレクトロニクス機器が周囲環境と調和するためには、パワーデバイスのスイッチング動作に起因する電源高調波、騒音や電磁ノイズの低減が必要である。原理的な対策手段は既知であるが、対策コストや装置寸法とのトレードオフがあるため、適用用途ごとに対策の工夫がなされている。

### (4) 高性能化・高機能化

モータ駆動用インバータでは、速度やトルクの制御応答の向上や、速度センサ等のセンサの省略、制御パラメータの自動調整などが要求されている。速度センサレス化によりモータとインバータとの間の信号線が不要となるため、インバータの高信頼化にもつながる。

### (5) 高信頼化

生産工場で使用されるインバータが故障すると生産に影響

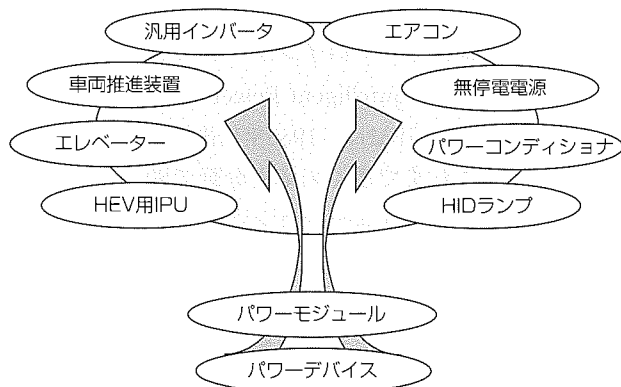


図2. 代表的なパワーエレクトロニクス応用製品



響を及ぼすため、インバータには高信頼性が要求される。そのため、電解コンデンサのような寿命部品の取替え時期の予測技術や寿命部品を使用しない電力変換回路方式の開発が必要とされる。さらに、部品故障が発生しても運転継続が可能な冗長システムが要求される用途もある。

これらの市場ニーズにこたえるために、従来のパワーエレクトロニクス技術は、“パワーデバイス”，それを適用した“電力変換回路”，及びこの回路の“制御”を三本柱として開発が進められてきた。しかし、近年の小型化・低コスト化ニーズの増加に伴って、冷却技術，絶縁技術，材料技術などの関連技術を結集した“インテグレーション技術”の必要性がますます高まりつつある。

そこで、この特集号では、パワーデバイス，電力変換回路，制御技術及びインテグレーション技術の4つをキーワードとして、当社の最近の技術開発の取り組み状況を紹介する。なお、本稿では、これらの技術の現状と将来動向を述べる。

### 3. パワーデバイス

パワーデバイスの歴史は1950年代に始まったが、バイポーラ系デバイスとMOS(Metal Oxide Semiconductor)系デバイスに大別される。前者には、サイリスタ，GTO(Gate Turn Off)サイリスタ，GCT(Gate Commutated Turn-off)サイリスタ，パワートランジスタがあり，後者にはIGBT，パワーMOSFET(MOS Field Effect Transistor)がある。現在は，1980年代に製品化されたIGBTがパワーデバイスの主役の座を占めている。設計ルールの微細化，プレーナ構造からトレンチ構造への移行，ウェーハの薄厚化などの技術進歩により，2000年代に製品化された第五世代IGBTは第一世代品に対し，チップの電流密度が約2倍，飽和電圧が約65%まで改良されている。また，インバータに適用したときの電力損失は1/3にまで低減されている<sup>(1)</sup>。

さらに，IGBTの発展に大きな役割を果たしたものとして，IGBTチップ及びその最適な駆動・保護機能をマルチチップ構成でコンパクトなモジュールパッケージに集積化した当社独自コンセプトのインテリジェントパワーモジュール(Intelligent Power Module：IPM)がある。IPMは，1980年代後半に製品化され，これまで多くの応用分野で顧客の要求や悩みのソリューションとして発展するとともに，技術進捗(しんちよく)も遂げてきた。1990年代になって，家電用インバータや他の小容量モータ駆動分野において，システムの更なる小型化・高性能化，低コスト化へのニーズが高まったため，最適

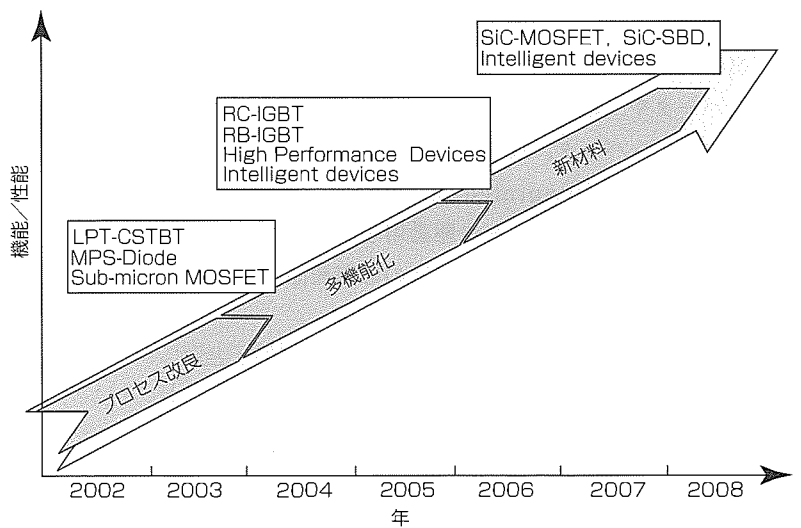
なソリューションとして，HVIC(High Voltage Integrated Circuit)技術及びトランスファモールドパッケージ構造技術を適用した業界初のDIP-IPM(Dual In-line Package IPM)シリーズを製品化した。DIP-IPMは，市場投入後，急速に普及し，現在では，インバータ家電製品においてデファクト品として注目を浴びている。

パワーデバイス(チップ)やその駆動回路を内蔵したパワーモジュールでは，①スイッチング時のサージ電圧抑制のためのモジュール内部インピーダンスの最小化，②内部電極による電磁界の影響の抑制，③最適な絶縁構造，④はんだやアルミワイヤの長寿命・高信頼の接合技術が重要課題である。そのため，これらを解決するためのインテグレーション技術やパッケージング技術の開発が不可欠である。

当社では，IGBTモジュールのパッケージとして，ケースタイプとトランスファモールドタイプの二種類を製品化している。トランスファモールドタイプのDIP-IPMは，上述したように，小型・低コストかつ高信頼という特長により，その適用用途が大幅に拡大しつつある。

ケースタイプでは，4.5kV定格のモジュールまで製品化しており，電気鉄道用車両推進装置などの大容量パワーエレクトロニクス機器の小型化・高効率化に貢献している。また，6.5kV定格モジュールの製品化開発も進めている。

当社では，更なる小型化・高機能化を目的として，インテグレーション技術やパッケージング技術の開発に力を注いでいる。また，図3に示すように，新機能素子であるRC-IGBTやRB-IGBTの実用化開発も進めている。将来的には，SiCを適用したMOSFETやSBD(Shottky Barrier Diode)などが超低損失パワーデバイスとして市場に登場し，パワーエレクトロニクス技術の新展開が期待される。



CSTBT : Carrier Stored Trench-gate Bipolar Transistor  
LPT-CSTBT : Light Punch-Through CSTBT  
MPS-Diode : Merged PiN Schottky Diode

図3. パワーデバイスの開発ロードマップ

#### 4. 電力変換回路

現在、モータ駆動用インバータを始めとして、図4の2レベルインバータ回路が幅広い用途に使用されている。この回路は、構成が簡単で、使用するパワーデバイスの数も少ないことから、回路的には一つの理想形であると言える。

しかし、パワーデバイスのスイッチング動作に起因する耳障りな磁気騒音が駆動されるモータから生じる。そこで、この磁気騒音を低減するために、高周波スイッチングが通常行われているが、スイッチング損失の増加により変換効率が低下する。さらに、電磁ノイズが増加するためノイズ低減フィルタを付加する必要がある。

また、コンデンサ入力型のダイオード整流回路は、電源高調波電流成分が多いため、電源高調波成分が規制される用途に適用する場合は高調波低減対策が必要である。対策例としては、ダイオード整流回路をインバータ回路と同じ構成の回路に置き換えればよい。しかし、スイッチングによって発生する高調波電流を抑制するためのLCフィルタを付加する必要があり、装置の寸法増やコストアップの問題が生じる。

そこで、適用分野や用途によって異なる顧客ニーズに合わせて、電力変換回路には様々な工夫がなされている。

図5は、当社が技術開発を行った階調制御型インバータの原理図である。このインバータは、入力直流電圧の比が2進数又は3進数となる複数台の単相インバータを直列接続し、それぞれの出力電圧の和が擬似正弦波となるように各インバータのスイッチングを行うものである。高周波ス

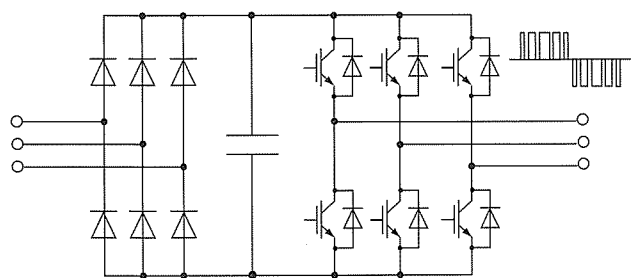


図4. 2レベルインバータ回路

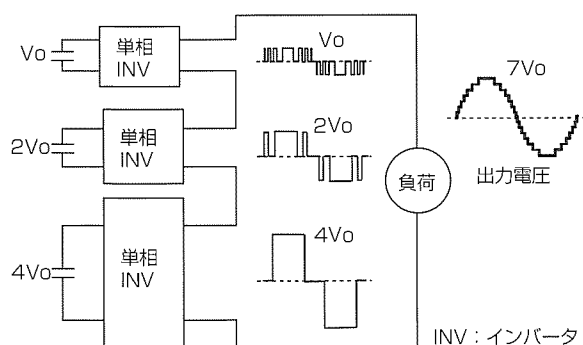


図5. 階調制御型インバータの原理

スイッチングが不要であるので、変換効率がよく、かつ電磁ノイズが少ないため、電力変換装置の小型化・高効率化が可能である。詳細は特集論文の中で紹介するが、電力品質改善に利用される瞬低保護装置や無停電電源装置に適用すると、装置の小型化や高効率化に顕著な効果が得られることが確認されている。今後の適用範囲の拡大が期待される。

また、実用化が期待される他の電力変換回路には、マトリックスコンバータがある。この回路には、直流リンク部を介さず直接AC-AC変換を行う直接形と直流リンク部を持つ間接形の2方式がある。いずれの方式でも平滑コンデンサが不要なので、装置の小型化や高信頼化が期待できる。ただ、平滑コンデンサによる電力の平滑・蓄積機能がないため、電源電圧擾乱(じょうらん)時や瞬時停電発生時の入力電力変動がモータなどの負荷機器に影響を与えないように制御アルゴリズムを工夫する必要がある。パワーエレクトロニクス機器をより一層小型化するためには、受動部品であるリアクトルやコンデンサの小型化や省略が可能な電力変換回路方式が望ましいため、高周波スイッチングのマトリックスコンバータも実用化されると期待される。

#### 5. 制御技術

モータ制御については、誘導モータ、同期モータともベクトル制御の適用による高速応答・高精度の制御技術がほぼ完成の域に達している。速度センサレス化や制御パラメータの自動調整化などの高機能化に関しては、市場の要求レベルの高度化に伴い、今後も改良開発が継続すると予想される。

今後、太陽光や風力などの再生可能エネルギーを利用した分散電源システムの本格的普及が予想される。これらのシステムに使用されるパワーエレクトロニクス機器については、太陽電池、風力発電機、燃料電池などの負荷それぞれの特性に合致した機器個別の制御技術の開発に加え、分散電源システム全体の電力マネジメントのための制御技術開発が重要になるであろう。

モータや発電機のような電気機器は、電気的等価回路モデルの導出が容易なため、制御理論を適用しやすい。これに対し、バッテリーや燃料電池のように化学エネルギーを電気エネルギーに変換する機器や、照明器具やレーザーのように電気エネルギーを光エネルギーに変換する機器は、電気的等価回路モデルの導出が困難なため、電力変換回路によってこれらの機器を最適制御するためには等価回路モデルの導出が重要課題となる<sup>(2)</sup>。今後、これらの物理的負荷を持つ電力変換回路の制御技術の進歩が期待される。

#### 6. インテグレーション技術

パワーモジュールの開発では、3章で述べたような課題がある。当社では、パワーデバイスの持つ性能を最大限に

引き出すために、パワーモジュール内部の分布定数抽出とスイッチング特性解析によるモジュール内部配線の設計技術の開発を進めてきた<sup>(3)</sup>。これにより、パワーデバイスのターンオフ時のサージ電圧だけでなく、配線間の電磁結合によるゲート電圧変動や配線の寄生インダクタンスによる並列素子間の分流アンバランスなどの解析が可能となり、パワーモジュールの最適配線設計に威力を発揮している。また、この解析技術は、パワーモジュールだけでなく、電力変換回路の主回路構造設計にも適用可能である。

また、6.5kV定格IGBTモジュールに見られるように、最近のパワーモジュールは高電圧化が進展しており、信頼性の高い絶縁構造が要求されている。当社では、高信頼の絶縁構造を実現するために、高感度な絶縁評価手法を開発し、材料や構造の高信頼化への適用を進めている<sup>(4)</sup>。さらに、モジュール内部の絶縁材料に印加される電界は数kV/mmと高くなりつつあり、このような高電界下では絶縁材料中の分極や空間電荷の蓄積が起き絶縁特性やデバイスの動作に影響を及ぼす可能性がある<sup>(5)</sup>。これらの新たな課題に対しても、物理現象を解明した上で絶縁信頼性の高い構造開発を進めている。

パワーエレクトロニクス機器の小型化・高信頼化のために、パワーデバイス/モジュールの最適配置、高熱伝導材料、高性能ヒートシンクによるサーマルマネジメントが重要課題となってきた。当社では、パワーモジュールの熱負荷や用途に応じた高信頼性な材料選定や冷却構造の採用を行っている。空冷/水冷ヒートシンクや熱輸送機器の冷却性能向上や形状最適化により、小型・低コスト実装が可能となってきた。さらに、SiCパワーデバイスの実用化も視野に入れて、高ジャンクション温度対応の絶縁材料や実装構造技術の開発も進めている。

## 7. む す び

以上、パワーエレクトロニクス技術の現状と将来動向、及び当社の取り組みについて述べた。クリーンエネルギーの電力を利用しかつ高効率のパワーエレクトロニクス機器は、化石燃料枯渇や地球温暖化といったエネルギー問題や地球環境保護問題の解決に貢献するので、今後ますます需要が高まっていくとともに、適用分野の広がりが期待される。

これらの期待にこたえるため、当社の技術力を結集して、新技術・新製品の開発を行っていく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 長山安治, ほか: 未来社会を支えるパワーデバイス技術の進展, 三菱電機技報, 77, No.9, 554~558 (2003)
- (2) Tamida, T., et al.: Novel Electrical Modeling of Arc Discharges of Fluorescent Lamps, Journal of Light & Visual Environment, 29, No.1 (2005)
- (3) 大井健史, ほか: パワーモジュールの分布定数抽出と動特性解析, 三菱電機技報, 77, No.9, 611~614 (2003)
- (4) 長谷川武敏, ほか: 高耐圧パワーモジュールパッケージの欠陥検査技術, 三菱電機技報, 78, No.11, 747~750 (2004)
- (5) 塩田裕基, ほか: シリコンゲルの電荷挙動が絶縁特性に及ぼす影響, 電気学会全国大会, 講演予稿集分冊2, 講演番号2-007 (2005)



# モータ制御における高精度モデル化技術

木全政弘\*  
米谷晴之\*\*

High-Precision Modeling Technique on Motor Control

Masahiro Kimata, Haruyuki Kometani

## 要旨

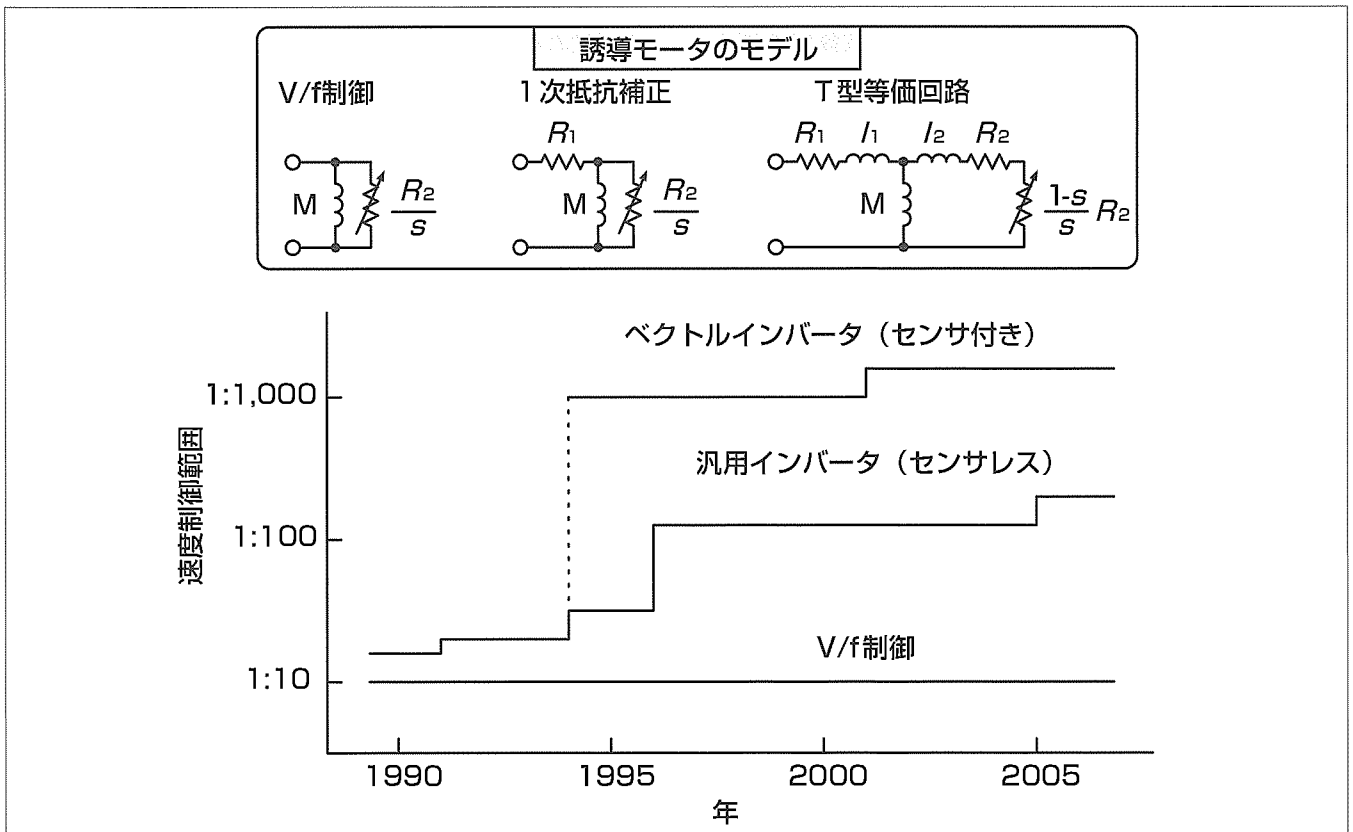
インバータやサーボに代表される可変速モータ制御用パワーエレクトロニクス機器は、半導体製造技術、回路実装技術の進歩により、高性能化・小型化・軽量化が進められてきた。これらのハードウェア技術の進歩とともにモータ制御技術も進歩してきており、例えば、汎用インバータの速度制御範囲は、ここ15年で10倍に拡大している。

これらの制御性能向上は、モデルの高精度化に支えられている。CPU(Central Processing Unit)の能力が十分でなかった時代では制御に使用できるモータモデルも簡単なものとならざるを得なかったが、CPU能力の向上により高精度なモデルの使用が可能となり、モータ回路方程式をそのままモデルとして使用するようになった。これにより、誘導モータ、同期モータともに理論どおりのベクトル制御

を適用することが可能となり、モータ制御技術はほぼ完成の域に達したと言える。しかし、温度や磁気飽和によるモータ定数の変動、高調波や鉄損の影響等、誤差を生じる要因はまだ多く、精度向上のための研究開発はいまだ途上にあると考えられる。

また、近年、モータ制御分野においても、リアルタイムシミュレータの導入による開発効率の向上が進められている。これは、実際のモータやインバータに代えて実時間で動作するシミュレータを用い、実験検証の効率化を図るものであり、実機との等価性を向上するためモデルの高精度化が求められている。

本稿では、これらモータ制御における高精度モデルについて述べる。



## 汎用インバータにおける速度制御範囲の進展

汎用インバータの速度制御範囲は年々向上してきており、速度検出器を使用しない機種と比較では、ここ15年度で約10倍に拡大した。この性能向上は、制御に使用するモータモデルの進歩でもある。最も簡便なV/f制御は、単純なモデルしか持たずモータ定数が未知でもほとんどの誘導モータを駆動できるが、速度制御範囲は1:10程度である。ベクトル制御は、より厳密なモデルを持ち正確なモータ定数と速度検出器を必要とするが、1:1,500という幅広い速度制御範囲で使用することができる。

1. ま え が き

可変速モータ駆動用パワーエレクトロニクス機器の制御性能は年々向上してきており、例えば、汎用インバータの可変速範囲はここ15年で約10倍に広がった。これは、CPUやパワー半導体デバイス、センサ等のハードウェアの進歩に依存する面もあるが、モータ制御技術の進歩を見逃すことはできない。モータ制御技術の進歩を示すものとして、制御に使用しているモータモデルの高精度化を挙げることができる。

また、近年適用が広がりつつあるリアルタイムシミュレータ等のバーチャル開発環境では、実機との等価性を高めるためにモデルの高精度化が必要である。

これらモデルの高精度化を実現するための手段として、電磁気解析との連携、モータ構造を考慮したモデルが考えられる。

本稿では、高精度モデルとモータ制御の取り組みについて述べる。

2. モータ制御とモデル

2.1 モータ制御方式

モータ制御におけるモデルの働きが分かりやすい例として誘導モータの制御方式を取り上げる。誘導モータの制御方式で最も簡便なものはV/f制御であり、周波数(f)を変えるときに出力電圧(V)との比率が一定となるようにすることで励磁電流を一定に保つ。このV/f制御では、モータを励磁インダクタンスと2次抵抗のみでモデル化しており、過渡項は考慮していない。これは、一般に定常状態における誘導モータの等価回路モデルとして知られているT型等価回路を更に簡単化したものである。V/f制御は、モデルで無視したモータ1次巻線での電圧降下によって実際の有効電圧が減少するため、特に低速において特性が劣化する。

これに対して、ベクトル制御は、モータ回路方程式をそのままモデルとして使用しており、例えば、固定された直交するd-q軸において次式でモデル化されている。

$$\begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + PL_s & 0 & PM & 0 \\ 0 & R_s + PL_s & 0 & PM \\ PM & \omega_{re}M & R_r + PL_r & \omega_{re}L_r \\ -\omega_{re}M & PM & -\omega_{re}L_r & R_r + PL_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad \dots(1)$$

ただし、 $V_{ds}, V_{qs}, i_{ds}, i_{qs}$  : d-q軸固定子電圧、電流  
 $i_{dr}, i_{qr}$  : d-q軸回転子電流  
 $R_s, R_r, L_s, L_r, M$  : モータ定数  
 $\omega_{re}$  : 回転角速度 (電気角)  
 $P$  : 微分演算子

このモデルを用いてセンサレスベクトル制御を行う場合の適応磁束オブザーバーの構成を図1に示す。式(1)のモータ回路方程式を変形した次式の状態方程式を使用している。

$$\begin{pmatrix} P(\Phi_s) \\ \Phi_r \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{pmatrix} + B V_s \quad \dots(2)$$

$$i_s = C \begin{pmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{pmatrix}$$

ただし、 $\Phi_s, \Phi_r$  : 固定子・回転子磁束ベクトル  
 $V_s, i_s$  : 固定子電圧、電流ベクトル  
 $A, B, C$  : システム行列  
 $P$  : 微分演算子

制御対象である誘導モータも、制御で用いる誘導モータモデルも式(2)で表され、かつモータ定数が一致していれば、同じ入力 $V_s$ に対する出力 $i_s$ は同じである。したがって、互いの出力の誤差が零に漸近するように制御すれば、状態変数である磁束 $\Phi$ は $t = \infty$ において等しくなり、制御対象である誘導モータの磁束を知ることができる<sup>(1)</sup>。

以上のように、モータモデルは回路方程式と等価なレベルに達しており、ほぼ完成の域にある。しかし、市場の要求の高度化に伴い、更なる改良開発が進められている。

2.2 オートチューニング

前節からも明らかなように、制御方法が高度になるほどモータ定数に正確な値を必要とされ、正しいモータ定数を把握するためにオートチューニングが行われる。オフラインオートチューニングは、インバータ自身がオフラインでモータ定数を測定・記憶する機能である。オフラインオートチューニングで測定したモータ定数を用いてモータを駆動する場合、損失による温度上昇のために測定条件と異なる温度となると、測定したモータ定数と実際のモータ定数の間に誤差を生じて制御性能が劣化する。この対策としては、モータ始動時にモータ定数をチューニングするオンラインオートチューニングが有効である。

オフラインオートチューニングによるモータ定数の測定は負荷による制約を受ける。負荷の都合でモータを回転させられない場合は、無負荷試験ができないため、すべてのモータ定数を得ることができない。この対策として、モータを回転させないで交番電圧を印加する繰り返し試験を多数行うことで、伝達特性からモータ定数を得る図2の方法が提案されている。

2.3 リアルタイムシミュレータ<sup>(2)</sup>

リアルタイムシミュレータは、パワーエレクトロニクス機器のマイクロ秒オーダーの現象と、モータや負荷などの

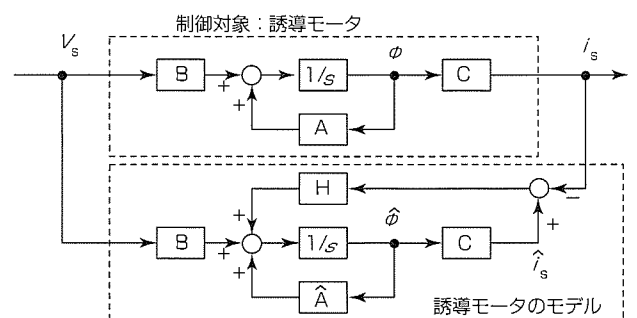


図1. 適応磁束オブザーバー

秒～分オーダーの現象を同時に取り扱うことが可能な装置である。リアルタイムシミュレータは、電力系統の瞬時値解析計算を実時間で行うために古くから用いられてきており、昨今のCPU及びデジタルシミュレーション技術の進歩により、モータ制御の分野にも広まりつつある。

図3に、その適用形態を示す。図の(a)は、インバータとモータの挙動を実時間で模擬するもので、実機に代えてコントローラの試験に使用できる。実機がない段階での実験が可能、実験の条件設定が容易、実機では危険が伴う実験が可能などのメリットがある。図の(b)は、制御アルゴリズムを実時間で実行し、実機のインバータとモータを駆動するもので、ラピッドプロトタイプと呼ばれる。専用のプロトタイプを試作しなくても実時間での試験ができるといったメリットがある。最近のリアルタイムシミュレータは、市販パソコンベースのユーザーインターフェースを持ったユーザーフレンドリな作りになっており、通常のデジ

タルシミュレーションと同様の使い勝手で実時間の実験が可能である。性能を測る目安であるサンプル周期に関しても50μs程度が実現されており、さらに、FPGA(Field Programmable Gate Array)等の適用により10μs程度にまで高速化されつつある。今後も速度面での改良が続き、適用範囲の拡大が進むものと期待される。

リアルタイムシミュレータにおけるモデルの重要性は説明するまでもない。実機との等価性向上のためのモデル高精度化とリアルタイム性向上のための演算時間短縮はトレードオフの関係にあり、モデルの性能向上が強く求められている分野である。

### 3. モデルの高精度化

#### 3.1 モデルの課題

可変速モータ駆動システムで使用するモデルの高精度化の例として、永久磁石同期モータのモデルを取り上げる。このモデルは、界磁の作る磁束の方向にd軸をそれと直行する方向にq軸をとった回転座標系で表されており、電圧電流ともに直流として扱うことができるという利点がある。

$$\begin{pmatrix} v_{da} \\ v_{qa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a + PL_d & -\omega_{re} L_q \\ \omega_{re} L_d & R_a + PL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{da} \\ i_{qa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_{re} \Phi_{fa} \end{pmatrix} \dots\dots(3)$$

ただし、 $V_{da}, V_{qa}, i_{da}, i_{qa}$  : d-q軸電機子電圧、電流  
 $R_a, L_d, L_q, \Phi_{fa}, p$  : モータ定数  
 $T_e$  : トルク  
 $\omega_{re}$  : 回転角速度 (電気角)  
 $P$  : 微分演算子

このモデルは簡単に扱えるため多用されているが、モータの発生するトルクリプルを制御で抑制する場合や、インバータとモータを含んだシステム全体で損失の最適化を行うような場合などには上式をそのまま適用することはできず、モデル定数をテーブル化する等の改造が必要となる。その場合の課題は、以下の3点である。

- (1) モデル定数の抽出：上式から明らかなようにモータモデルは回路方程式で記述されており、モータ構造や鉄心等の材料特性を反映していない。したがって、詳細なモデル定数を得るには、実機の電気的特性を測定する必要がある。
- (2) モデルの動作範囲：特定の電圧、電流、回転数条件下におけるモデル定数を得るだけであれば測定は1点でよいが、可変速モータ駆動においては、モータの電圧、電流、回転数は0～100%以上に变化する。モデル定数の電圧、電流、回転数依存性が問題となるため、条件を変えた測定を行い、依存性テーブル又は近似式による定数変化を模擬する必要がある。
- (3) 高調波成分の影響：上記の基本波特性に加えて、トルクリプルの模擬を行うためには、高調波成分の影響を考慮する必要がある。 $\Phi_{fa}$ に回転子位置依存性を持たせて簡易的にトルクリプルをモデル化することが可能である

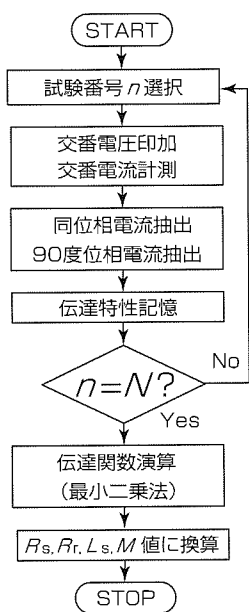


図2. オートチューニング

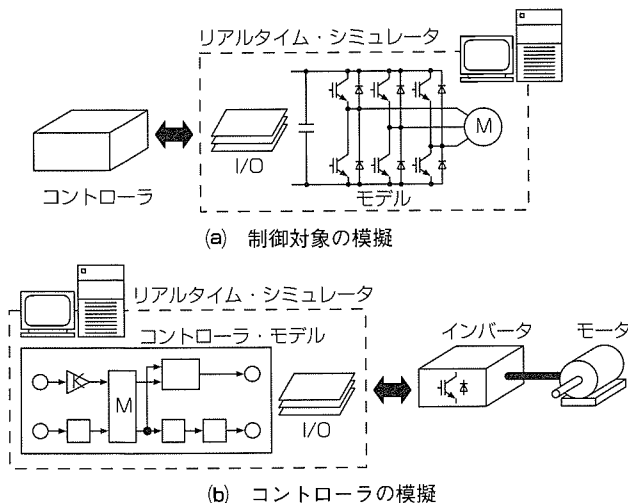


図3. リアルタイムシミュレータの適用

表1. モータモデルの高精度化

| 精度 | モータ設計          | モータモデル         | 制御適用 |
|----|----------------|----------------|------|
| 低  | 基礎理論による設計      | 基本波モデル         | 済み   |
|    | 設計要覧, 経験則による設計 | 基本波モデル+モータ定数補正 | 済み   |
|    | パーミアンス法による設計   | 高調波モデル         | 未    |
| 高  | パーミアンス法による設計   | 構造依存モデル        | 未    |
|    | 有限要素法による設計     | 有限要素法モデル       | 未    |

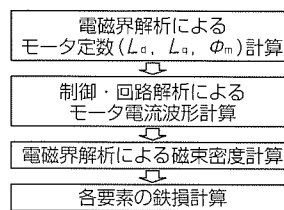


図4. 連携解析

が、正確に特性を模擬するためにはきめ細かなテーブルを必要とする。

これらの課題を解決する手段として、電磁界解析との連携が挙げられる。電磁界解析によりモータ定数の依存性を求めることで、現状のd-q軸モデルを用いながら、より詳細なモデルを実現することができる。

表1にモータモデルの高精度化を概観したが、現状のd-q軸モデルの改良だけではなく、モータモデル自体にモータ構造や材料特性を反映した詳細モデルに対する要求も存在する。この詳細モデルは、パワーエレクトロニクスシステムの制御や解析に用いるものであるため、現状のd-q軸モデルと同様に制御プログラムへの組み込み、制御シミュレータや回路シミュレータとの連携が容易であることが求められる。現状では具体的な解が得られておらず適用されていないが、将来の開発が望まれている。

### 3.2 電磁界解析との連携<sup>(3)</sup>

前節で示した電磁界解析との連携によるモータモデルの高精度化は成果を上げつつある。電磁界解析では永久磁石モータの負荷時の鎖交磁束を解析することができるため、以下の電圧方程式に基づいてインダクタンスを計算することが可能である。

$$\begin{aligned} \phi_d &= \phi_m - L_d I_d \\ \phi_q &= L_q I_q \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 $\phi_d, \phi_q, I_d, I_q$  : d-q軸磁束, 電流  
 $L_d, L_q$  : d-q軸インダクタンス  
 $\phi_m$  : 永久磁石磁束

この場合、磁石による磁束 $\phi_m$ とd軸電流による磁束 $L_d I_d$ を分離することができないため、d軸電流を微小変化させた解析を行い、この微小変化に対して磁気飽和による影響は同じであると仮定して、2つの解析結果から $\phi_m$ と $L_d I_d$ を分離する。この方法によれば、磁気飽和の影響を考慮して電流依存性を持ったモータ定数 $\phi_m, L_d, L_q$ が求められる。したがって、このモータ定数を用いれば、固定定数のモデルに比べてより広い範囲で高性能を実現することができる。

この手法は、可変速モータ駆動用パワーエレクトロニクス機器のシステム最適化に使用することが可能である。その一例を図4に示す。電磁界解析により高精度なモータ定数が得られると、制御及び回路シミュレーションにより、

制御系の最適設計及び回路損失の計算ができる。その際に、モータに流れる電流波形及びその位相が計算で求められる。これを基に電磁界解析を行うと、モータのトルク、電圧、損失が計算でき、特にインバータキャリアによる鉄損(漂遊負荷損)も計算可能となる。したがって、図の一連の解析を実施すれば、高精度に制御特性が得られるとともにインバータとモータの損失も得られるため、実機を試作することなく解析のみでシステムの最適化が可能となる。

## 4. む す び

可変速モータ駆動用パワーエレクトロニクス機器の制御性能は年々向上してきており、使用されているモータモデルは回路方程式をそのまま使用するレベルに達している。市場の要求の高度化に伴い、今後も、オートチューニングの高精度化、モータ構造を考慮したモデル、電磁界解析との連携など、改良開発が進むと予想される。

また、本稿では割愛したが、可変速モータ駆動用パワーエレクトロニクス機器の高性能化のためには、インバータの出力電圧誤差も低減する必要があるため、モータのみではなくインバータやアンプに関しても高精度モデルが必要となる。さらには、モータが駆動する負荷の挙動を制御するためには、負荷の高精度モデルが必要となる。

これら各種モデルの高精度化を進め、可変速モータ駆動用パワーエレクトロニクス機器の性能向上を図っていく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) 金原義彦, ほか: 低速・回生領域を含む誘導電動機の速度センサレスベクトル制御法, 電気学会論文誌D, 120-D, No.2, 223~229 (2000)
- (2) 木全政弘, ほか: リアルタイムシミュレータ, 平成16年度電気学会産業応用部門大会, S11-4 (2004)
- (3) Kometani, H., et al.: Practical Application of Electro-magnetic Analysis Coupled with Simulation of Drive Systems for Rotating Machines, IPEC-Niigata, 2069~2074 (2005)

# 階調制御型インバータとその応用

岩田明彦\* 畠山善博\*\*\*  
 山田正樹\*\* 石井康裕\*\*\*  
 森 修\*\*

*Gradationally Controlled Voltage Inverter and Its Applications*

*Akihiko Iwata, Masaki Yamada, Osamu Mori, Yoshihiro Hatakeyama, Yasuhiro Ishii*

## 要 旨

パワーエレクトロニクス機器を代表するインバータ装置では、より高精度な波形を負荷に出力し、かつ、より高速に負荷を制御するために、スイッチングの高周波化が進められてきた。

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) や IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などの電圧制御型パワーデバイスの出現によってスイッチング周波数は飛躍的に増加し、小容量のスイッチング電源ではMHzを超えるものが当たり前になってきている。

しかし、スイッチング周波数が増加するとパワーデバイスの損失が増加し、素子の負担が大きくなる。さらに、電磁ノイズや出力配線との干渉によるマイクロサージが増加するという問題が生じる。

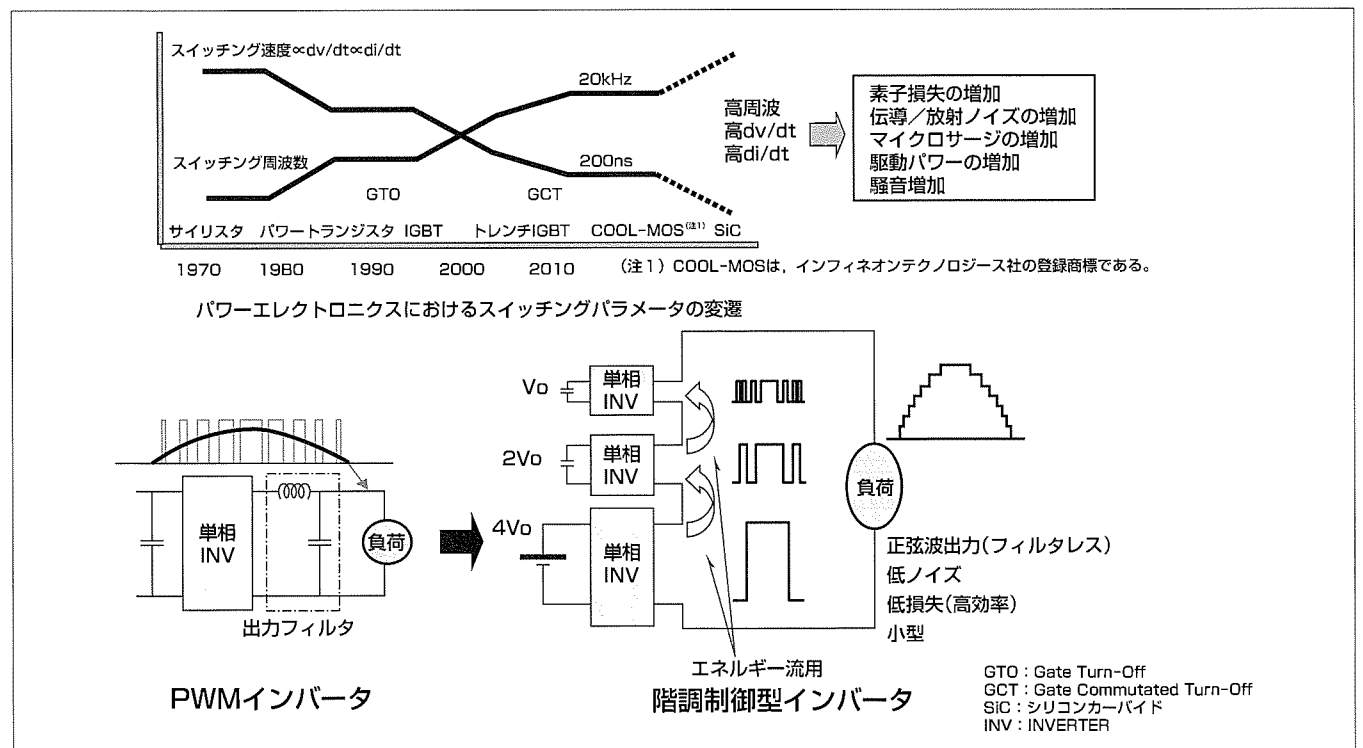
これらの問題を解決するために、三菱電機では、“階調制御型インバータ (Gradationally Controlled Voltage Inverter)” と命名した新方式のインバータの開発を進めて

いる。このインバータは、直流入力電圧の比が2進数又は3進数となる複数台のインバータを直列接続し、それぞれの出力電圧の和が擬似正弦波となるように各インバータ出力を組み合わせるものである。

これにより、パワーデバイスのスイッチング周波数を大幅に低減でき、電磁ノイズの低減やインバータ効率の向上が可能となる。さらに、高周波スイッチングを採用した従来のPWM (Pulse Width Modulation) インバータに必要な出力平滑用LCフィルタを省略することができ、インバータの小型化・低コスト化を図ることができる。

本稿では、階調制御型インバータの基本構成と動作について述べるとともに、パワーエレクトロニクス機器として実用化するための課題と対策について述べる。さらに、電力品質改善のための瞬低保護装置や無停電電源装置 (Uninterruptible Power Supply : UPS) への応用例についても述べる。

特集  
I



## 近年におけるパワーエレクトロニクスの課題を解決する階調制御型インバータ

階調制御型インバータは2進や3進の電圧関係を持つ複数のインバータによって構成され、各インバータの出力電圧を組み合わせることにより擬似正弦波を負荷に供給する。スイッチング周波数を大幅に低減できるため、低損失化・低ノイズ化を図ることができる。また、擬似正弦波を直接形成できるため出力平滑フィルタが不要で、小型化が実現できる。

\*先端技術総合研究所(工博) \*\*同研究所 \*\*\*福山製作所

## 1. ま え が き

UPSなど配電系統に接続されるパワーエレクトロニクス機器では、正弦波電圧を負荷に出力する必要がある。そのため、PWMインバータを用いる場合、インバータの後段に平滑用のLCフィルタを設置して矩形(くけい)波状の電圧を正弦波化するのが一般的である。

しかし、フィルタを構成するリアクトルは、重量部品のため装置軽量化の妨げとなるばかりでなく、無効電力を発生しインバータの皮相電力を増加させるという問題がある。パワーデバイスのスイッチング周波数を増加させればLCフィルタを小型化できるが、逆に、スイッチング損失や電磁ノイズが増加するという問題を生じる。

これらの問題を解決するために、当社は階調制御型インバータと命名した新方式のインバータの開発を行ってきた<sup>(1)~(3)</sup>。

本稿では、階調制御型インバータの基本構成や動作について述べるとともに、瞬低保護装置とUPSへの適用例についても述べる。

## 2. 階調制御型インバータの基本構成と動作

図1のように、階調制御型インバータは、直流電圧が異なる複数台の電圧型インバータを直列接続したものである。各インバータの直流電圧の比は2進数又は3進数の関係を持ち、これらの電圧の組合せでトータルの出力電圧を制御する。各インバータを“ビットインバータ”と名付け、直流電圧の低い方から順に1ビット(B1)、2ビット(B2)、・・・と呼ぶ。

2進3ビット構成の場合は片極7階調の電圧を出力可能であり、ゼロを加えて両極では15階調となる。また、3進3ビット構成の場合、マイナス出力を利用することにより、片極13階調、両極27階調の電圧を出力することができる。

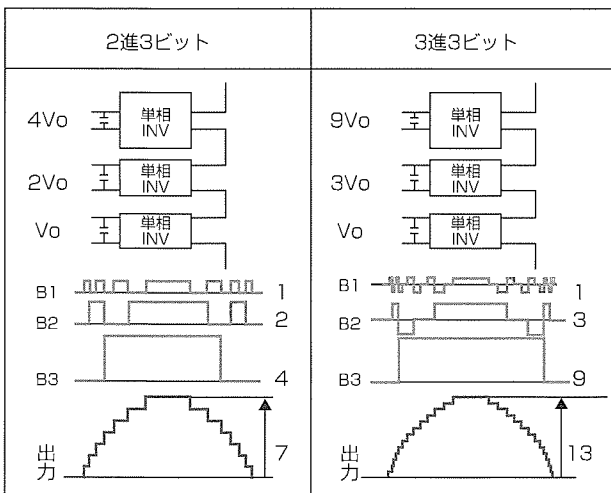


図1. 階調制御型インバータの構成例

ビット数を増加すれば容易に階調数を増加でき、3進4ビット構成の場合には両極81階調もの電圧を出力することができる。

この階調制御型インバータの最大の特長は、スイッチング周波数を大幅に低減できることである。例えば2進3ビット構成の例では、B3は基本波1周期に対して1回しかスイッチングしない。またB2、B1もそれぞれ3回と7回と非常に少ない。したがって、従来のPWMインバータに対し、スイッチング損失の大幅な低減が可能である。さらに、各ビットインバータの直流電圧が異なることから、ビットインバータごとに損失最小となるパワーデバイスを使用することができる。

図2は、2進3ビット構成の階調制御型インバータと従来のPWMインバータの出力電圧高調波のFFT (Fast Fourier Transform)解析結果である。階調制御型インバータは出力高調波成分が非常に小さく、ノイズフィルタを省略することもできる。

## 3. 実用化のための課題と対策

階調制御型インバータを実用化するための課題は、①周辺付属回路の削減、②出力制御性の向上である。

### 3.1 周辺付属回路の削減

例えば2進3ビットの階調制御型インバータでは、B1、B2、B3のビットインバータの電力比はその電圧比におおよそ比例する。そのため、B1、B2にも直流側に大容量のコンバータが必要となり、回路を複雑に、また高コストにしてしまう。

この問題を解決するのがビット間エネルギー流用制御技術である<sup>(3)</sup>。波形出力のパターンを制御することにより各ビット間でエネルギーをやり取りし、B1、B2の直流電源電力の平均値をゼロにするものである。

表1に示すように、同一の出力階調に対し、ビットインバータの出力電圧の組合せは複数組存在する。今、負荷電流の極性を正と仮定する。各組合せにおいて、正の電圧を出力するビットインバータは、直流コンデンサからエネル

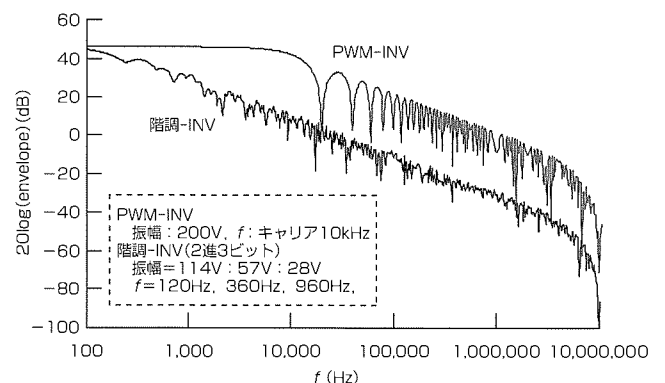


図2. 階調制御型インバータのFFT解析



ギヤを放電するように動作する。反対に、負の電圧を出力するビットインバータは、直流コンデンサにエネルギーを充電するように動作する。この充電と放電の二つの動作モードを選択制御することにより、ビットインバータの平均出力電力をゼロにすることが可能となる。その結果、直流コンデンサの充電用電源を省略することができる。例えば、出力階調が1の場合、パターン1-①を選べばB1の直流コンデンサは放電し、パターン1-②を選べばB1の直流コンデンサを充電できる。B2についても、パターン3-①などの正の出力パターンを選べば直流コンデンサを放電でき、逆にパターン3-③などの負の出力パターンを選べば充電が可能である。

### 3.2 電圧制御性の向上

階調制御型インバータの出力精度をより高めるために、各階調電圧の間を更に微細化する技術を開発した。

図3は、3進4ビット構成の場合の例である。B1~B4の直流電圧比は1:1:3:9であり、B2~B4は3進動作により13階調を出力する。一方、B1はB2~B4によって出力された階段状の電圧と正弦波電圧指令との差電圧を出力

表1. 出力階調とビットインバータ出力電圧の関係

| 出力階調 |   | B3: 4V <sub>0</sub> | B2: 2V <sub>0</sub> | B1: V <sub>0</sub> |
|------|---|---------------------|---------------------|--------------------|
| 1    | ① | 0                   | 0                   | V <sub>0</sub>     |
|      | ② | 0                   | 2V <sub>0</sub>     | -V <sub>0</sub>    |
|      | ③ | 4V <sub>0</sub>     | -2V <sub>0</sub>    | -V <sub>0</sub>    |
| 2    | ① | 0                   | 2V <sub>0</sub>     | 0                  |
|      | ② | 4V <sub>0</sub>     | -2V <sub>0</sub>    | 0                  |
| 3    | ① | 0                   | 2V <sub>0</sub>     | V <sub>0</sub>     |
|      | ② | 4V <sub>0</sub>     | 0                   | -V <sub>0</sub>    |
|      | ③ | 4V <sub>0</sub>     | -2V <sub>0</sub>    | V <sub>0</sub>     |
| 4    |   | 4V <sub>0</sub>     | 0                   | 0                  |
| 5    | ① | 4V <sub>0</sub>     | 0                   | V <sub>0</sub>     |
|      | ② | 4V <sub>0</sub>     | 2V <sub>0</sub>     | -V <sub>0</sub>    |
| 6    |   | 4V <sub>0</sub>     | 2V <sub>0</sub>     | 0                  |
| 7    |   | 4V <sub>0</sub>     | 2V <sub>0</sub>     | V <sub>0</sub>     |

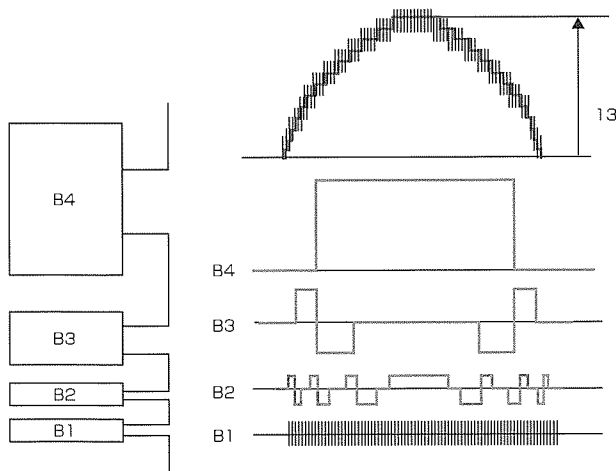


図3. 高精度電圧制御アルゴリズム

するようにPWM制御される。これにより、B2~B4のスイッチング回数を増加させることなく、かつ小さなフィルタを設置するだけで、きめ細かな正弦波電圧を得ることができる。

## 4. 階調制御型インバータの応用例

### 4.1 階調制御型瞬低保護装置

図4に、2進4ビットの階調制御型瞬低保護装置の構成を示す。階調制御型インバータは系統に直列に挿入されており、電圧の不足分のみを補う不足電圧直列補償方式を採用している。系統が正常なときはリレーを導通させインバータをバイパスし、損失を低減する。瞬低が発生すると、リレーを開放し階調制御型インバータが不足電圧を補償する。

各ビットインバータの直流コンデンサ間ではビット間エネルギー流用制御が行われ、補償出力電圧が小さい場合でもほぼ全ビットのコンデンサエネルギーを有効利用することができる。その結果、半導体製造装置の規格SEMI-F47を満足する長時間の補償能力を実現した。

図5は、100%の瞬低を保護した場合の負荷電圧波形である。保護装置は4ms以下で保護を開始し、以後安定な保護動作を示していることが分かる。

開発した単相5kVAの瞬低保護装置は、階調制御型インバータと不足電圧直列補償方式の採用により、同一容量のUPSに対し、体積1/10(当社比)まで小型化することができた。

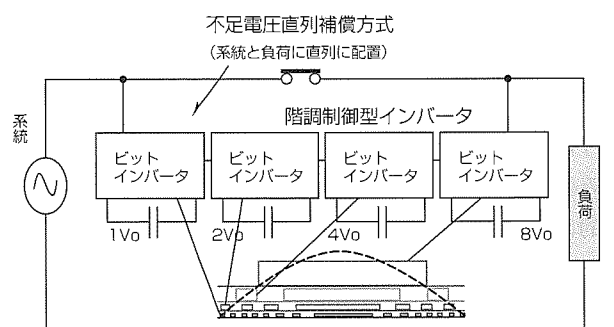


図4. 瞬低保護装置の回路構成

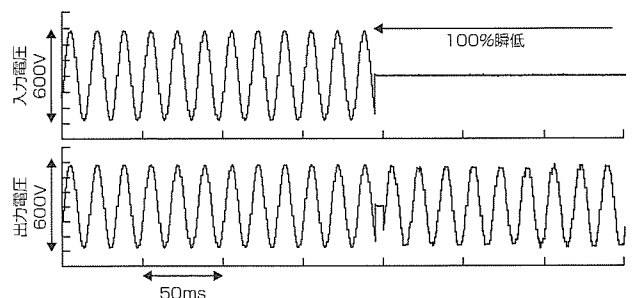


図5. 200V-5kVA機の瞬低発生時の保護波形

#### 4.2 階調制御型UPS

図6は、3進4ビット構成の階調制御型インバータを適用したUPSの回路構成を示している。系統に並列接続した3ビットインバータと、系統に直列に接続したビットインバータにより階調制御型インバータを構成する。停電時バックアップ補償、過不足電圧補償、アクティブフィルタ補償の各機能を備えた階調制御型トランスレスラインインタラクティブ方式である。

図7は、試作したUPSにおける停電補償時の出力電圧波形である。図から、直並列のビットインバータが4ビットの階調制御型インバータとして働き、高精度の波形を形成していることが分かる。

階調制御型UPSでは、従来のトランス式ラインインタラクティブUPSで発生していたトランス励磁損がなくなるため高効率化が可能である。試作した1.5kVAのUPSでは、入力100V時に98%の最大効率、その他の入力電圧範囲で95%以上の効率を得ることができた。

#### 5. む す び

20世紀のパワーエレクトロニクスを代表するPWMインバータは、今、EMI(Electro Magnetic Interference)ノイズやマイクロサージなど、高周波化による課題を抱えている。

21世紀のパワーエレクトロニクス技術を更に大きく進化させていくためには、これらの課題を解決する新しい技術が必要である。本稿では、その有力な候補の一つとして階調制御型インバータを提案した。

階調制御型インバータを用いることにより平均的なスイッチング周波数を2けたほど低下させることができ、高周波化に伴う問題を大幅に緩和可能である。

今後、階調制御型インバータとSiCなどの新デバイスと組み合わせることにより、21世紀のPWMインバータを飛躍的に進化させていくつもりである。

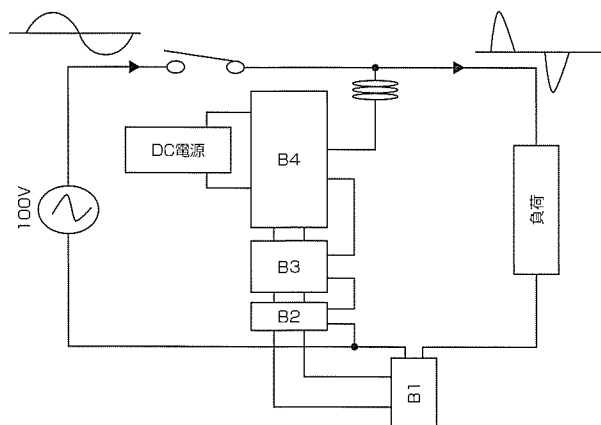


図6. 階調制御型UPSの回路構成

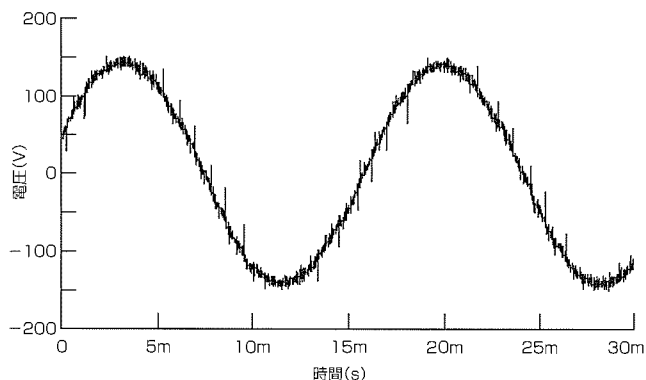


図7. 停電補償時の出力電圧波形

#### 参考文献

- (1) 鈴木昭弘, ほか: 階調制御方式サグ補償パルス電源, 電気学会論文誌D, **123**, No.9, 1012~1020 (2003)
- (2) 山田正樹, ほか: 階調制御型瞬低補償装置の提案, 電気学会論文誌D, **125**, No.2, 119~125 (2005)
- (3) 山田正樹, ほか: 階調制御型瞬低補償装置におけるエネルギー流用制御, 電気学会論文誌D, **125**, No.2, 126~132 (2005)

# 電力変換回路からの電磁ノイズ発生メカニズムと抑制技術

西沢昭則\*  
東 聖\*  
田邊信二\*\*

Electromagnetic Noises from Power Devices and Filter Design

Akinori Nishizawa, Satoshi Azuma, Shinji Tanabe

## 要 旨

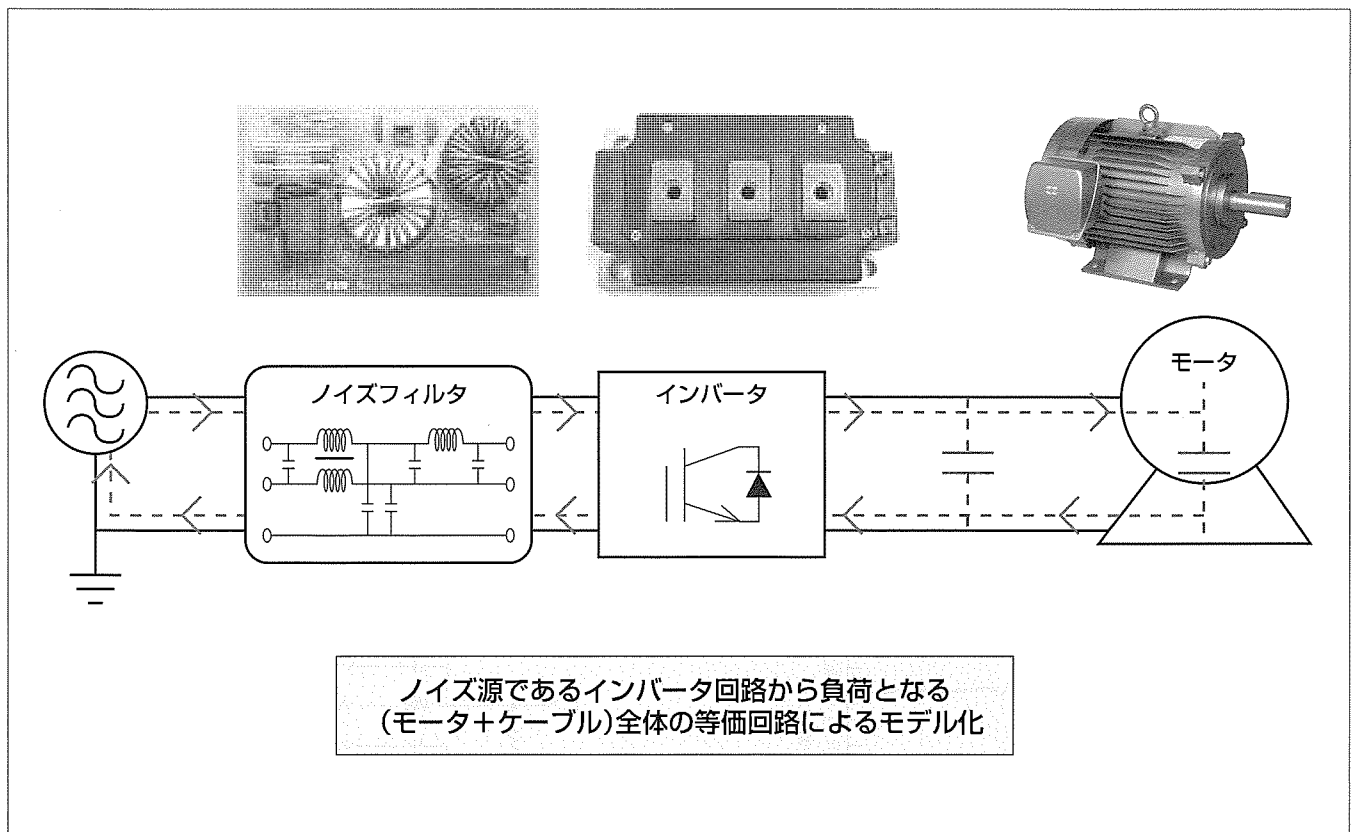
産業機器から家電・通信機器に至るまで電力変換回路の重要性はますます高くなってきている。IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などのパワーデバイスを用いた電力変換回路では、伝導性や放射性的EMI (Electromagnetic Interference) ノイズが発生し、EMC (Electromagnetic Compatibility) 規格や他の機器への障害といった問題を引き起こす可能性がある。製品化の段階で電力変換回路に起因するEMIノイズに苦しめられた経験を持つエンジニアも多い。

本稿では、インバータ機器のEMIノイズへの影響、シミュレーション技術、ノイズフィルタ設計技術(パッシブ、アクティブ)に関して述べる。

インバータ機器からの電磁ノイズををシミュレーション

するに当たり、発生源としてIGBTのスイッチングモデルについて述べる。スイッチングの周波数は通常10kHz程度であるが、立ち上がり/立ち下がり時間は100ns程度であり、高調波ノイズが発生する。伝導ノイズの解析に際しては、SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) <sup>(1)(2)</sup>に基づき、各コンポーネントの等価回路を作成した。

一方、発生したノイズを低減させるためには、ノイズフィルタの設計が重要である。本稿では、従来型のパッシブノイズフィルタの設計指針について述べるとともに、ノイズを逆相の電圧により打ち消すアクティブ型のフィルタについて提案をする。



## インバータシステムのEMIノイズ解析

ノイズ源となるインバータ回路から負荷となるケーブル・モータなどの等価回路モデルを構築し、回路解析シミュレータによりEMIノイズの定量化を行う。ノイズ解析で重要となるのは、インバータのスイッチング波形の正確な再現、モータなどの複雑な構造を持つ要素の広い周波数範囲で適用可能な等価回路モデルの確立にある。この図は、インバータ機器のEMI解析の全体形のイメージを模式的に示したものである。

## 1. ま え が き

産業機器から家電・通信機器に至るまで、電力変換回路の設計技術は、製品の品質・コストを決める重要な要素となっている。近年、電磁ノイズEMCに関する規制が強化され、欧州におけるCISPR(Comie International Special Des Perturbations Radioelectriques(仏語))などに基づくCE(Commuäute Europeene(仏語))マーケティングの取得、北米でのFCC(Federal Communications Commission)規格などの認証が海外への製品出荷には必要である。国内においても規制の強化が進んでいる。

このような状況の下で、電力変換回路から発生するノイズを設計段階でシミュレーションシフィルタ構成などを確立する技術は、製品の信頼性向上・コスト低減のためますます重要な技術となってきている<sup>(3)</sup>。また、ノイズのフィルタリング技術に関しては、従来のパッシブ型のフィルタに加え、アクティブ素子を用い逆相の電圧を発生させることによりノイズを打ち消すアクティブフィルタ<sup>(4)</sup>の検討が進んでいる。

## 2. 電磁ノイズのシミュレーション

### 2.1 電磁ノイズ源のモデル化

インバータなどの電力変換回路から発生する電磁ノイズ源は、インバータを構成するトランジスタや還流ダイオードの高速なスイッチング動作である。例として、600V/150AのIGBTモジュールによるターンオン・ターンオフ波形を図1に示す。このようなターンオン・ターンオフ動作の繰り返しにより伝導ノイズの大きさが決まる。昨今の

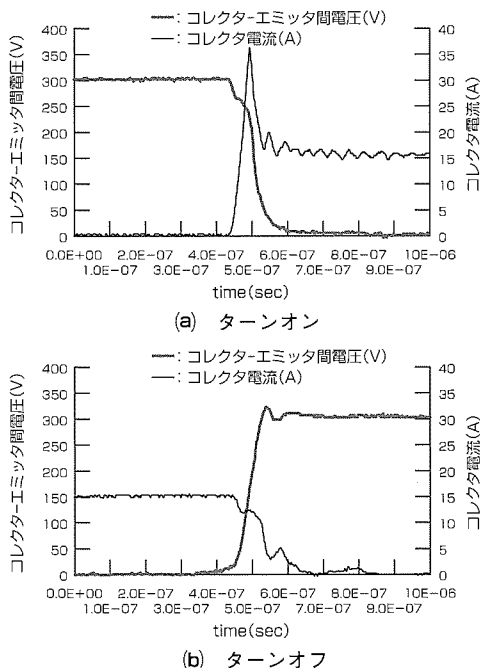


図1. IGBTモジュールによるスイッチング波形例

IGBTによるスイッチング動作は電圧の立ち上がり/立ち下りの時間が100ns程度にあり、スイッチング動作を多少緩めても伝導ノイズの低減効果は得られないため、ノイズフィルタによる対策が不可欠である。一方、放射ノイズに対しては、トランジスタを駆動するゲート抵抗の増加により、特に還流ダイオードの逆回復時の振動が抑制されるため、スイッチングに伴う損失が増加するものの放射ノイズ低減の効果が期待できる。こうした電磁ノイズ源のモデル化は設計段階での電磁ノイズ予測に重要であり、伝導ノイズと放射ノイズの発生要因における特徴を反映させた解析モデルの構築が望まれる。

### 2.2 伝導ノイズの解析

インバータ機器のEMIノイズ発生源はパワーデバイスのスイッチング動作であり、通常、キャリア周波数は10kHz程度である。伝導性EMIノイズは各種EMI規格では150kHzから規定されていることが多く、伝導性EMIノイズで最も考慮しなければならないのはこの150kHz付近の帯域である。この帯域はインバータキャリア周波数に対して高調波の次数も低く、スイッチングキャリアのフーリエ高調波成分が直接見えてくる帯域で、伝導ノイズ(雑音端子電圧)が一番大きく発生する帯域である。この帯域の伝導ノイズを抑制するために、通常、ノイズフィルタを取り付ける。ノイズフィルタの仕様を決定するためにもこの帯域のノイズ量を見積もる必要がある。

ここでは、負荷がモータであるようなインバータ機器を考える。インバータ機器の雑音端子電圧の一般的な測定構成は、系統電源をLISN(Line Impedance Stabilization Network)を介してインバータ機器につなぎ(その間にノイズフィルタがある)、出力ケーブルを介して負荷(この場合はモータ)を接続する。LISNの出力は、スペクトラムアナライザなどを用いることにより、雑音端子電圧を計測する。

回路シミュレーションで雑音端子電圧を計算する場合、上記のような構成の等価回路モデルを用意しなければならない。ここで、出力ケーブル、負荷(モータ)は対地間インピーダンスを表現する等価回路を構築する必要がある。モータに関しては、図2に示したような等価回路を仮定した。対地間インピーダンス特性、位相特性を図3に示す。

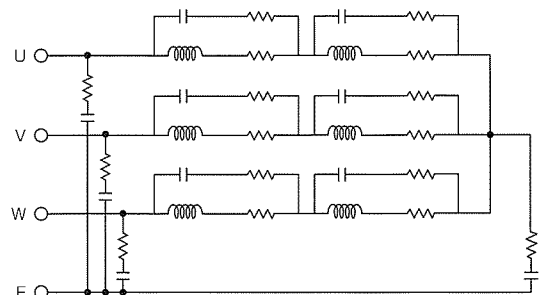


図2. モータ等価回路

図3のインピーダンス特性を見ると、低周波の領域(数十kHz以下)では、モータの対地間インピーダンスは容量性で見えていることが分かる。この(浮遊)容量は、モータ巻線とステータ(モータ筐体(きょうたい))間の浮遊容量であり、モータ構造から見積もることができる。100kHz以上では、幾つかの共振モードが現れている。この領域では、モータ巻線自身のインピーダンス特性が大きく影響している。このように、低周波では容量性(巻線-筐体間)で見え、高周波では幾つかの共振モードが見えるという特性を表現するために図2のような等価回路を仮定したところ、図3のように非常に実測を良く再現できるモデルであるということを確認した。

上記のようなモータモデルを用いて、また、系統電源、LISN、ノイズフィルタ、インバータ駆動部、出力ケーブルをそれぞれモデル化し、雑音端子電圧を回路シミュレーションを用いて計算することができる。

出力ケーブル長をパラメータにした場合の150kHz帯の雑音端子電圧の計算結果、実測結果を図4に示す。それぞれのケーブル長における解析結果は数dBの精度で実測結果を良く再現している。また、ケーブル長2m、5m、8mでは雑音端子電圧に大きな違いが見られないが、ケーブル

長50mやシールドケーブル30mでは10dB以上も端子電圧が増加している。これは、ケーブル長2m、5m、8mと短い場合には端子電圧はモータに依存している状態で、ケーブル長が長くなった50m、30m(シールド)では端子電圧はケーブル長によって決まっている状態と考えられる。モータの対地間インピーダンスはモータ構造によって決まっており、EMIノイズを考える場合、モータ構造も重要な要素である。また、ケーブルの対地間インピーダンスはケーブルの構造、長さから概算することができる。注意すべき点は、シールドケーブルを使った場合、シールド金属のため、ケーブルの対地間インピーダンスが小さくなり、シールドがないケーブルに対して雑音端子電圧が大きくなるということである。このように端子電圧は、インバータ機器のケーブル、負荷の対地間インピーダンスに依存しており、ケーブル、負荷、それぞれの対地間インピーダンスの大きさを考慮する必要がある。これにより、対象となるインバータ機器の伝導ノイズを計算することができ、EMI規定値に抑えるためのノイズフィルタ設計、ケーブル長を伸ばした場合の影響などを見積もることができる。

### 3. ノイズフィルタ設計

#### 3.1 パッシブノイズフィルタ

インバータ機器は、EMI規格を考えた場合、ノイズフィルタはほぼ不可欠である。パッシブ型のノイズフィルタとしては、通常、コモンモードコイル、対地間コンデンサ、相間コンデンサで構成される、これらの定数(特性)によりフィルタ減衰量が決まる。ノイズフィルタ設計において所望の減衰量を理論上確保するのは当然であるが、それだけでは不十分で、①取付け位置、②コイルコアの磁気飽和、③漏洩(ろうえい)電流、などの注意点がある。

小型で減衰量の大きいノイズフィルタを構成しようと小さなコアに多くのターン数を巻いたコモンモードコイルを用いると、コイルコアが磁気飽和を起こすことがある。発生するコモンモード電流を見積もり、飽和が起きないコアサイズ、ターン数にする必要がある。また、ノイズフィルタはLC回路で構成しているため、共振周波数を持っている。この共振周波数がキャリア周波数と重なった場合には、大きなコモンモード電流が発生するので注意が必要である。また、一般的には、コイルコアに発生する磁束はコモンモード電流からのみを考えることが多いが、ノーマルモード(商用周波)の電流からも漏れインダクタンスによる磁束が発生する。ノーマルモードは電流値も大きく、コイルコアに発生する磁束としてはコモンモードからの磁束とノーマルモードからの磁束を合わせた量で飽和耐力を見積もる必要がある。

フィルタ減衰量を稼ぐために対地間コンデンサを大きくするという手段もある。しかし、容量を大きくすると、低

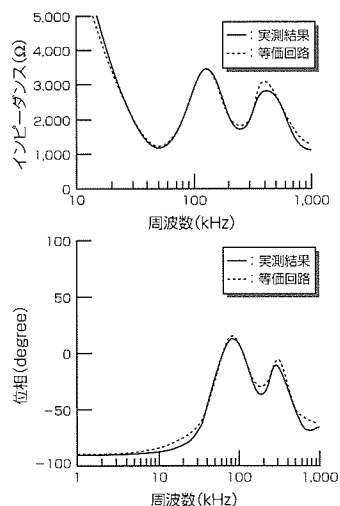


図3. モータ対地間インピーダンス/位相特性

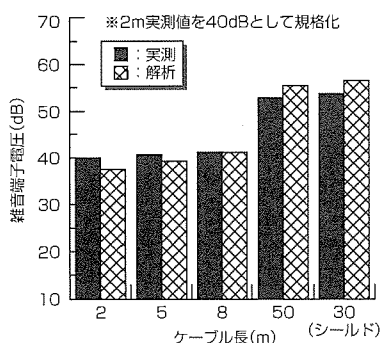


図4. 雑音端子電圧のケーブル長依存性

周波漏洩電流が大きくなってしまったため、商用電源の構成を考慮して、問題が起きない余裕を持ったコンデンサ容量にする必要がある。また漏洩電流は、対地間コンデンサのほかに、負荷(例えばモータ)の対地間インピーダンスが大きく影響している。対地間インピーダンスが小さい(浮遊容量が大きい)負荷を取り付けた場合、対地間コンデンサに比べて大きな漏洩電流を誘発するため、注意が必要である。

### 3.2 アクティブノイズフィルタ

電磁ノイズを低減する手法としては一般的にパッシブフィルタを接続することが挙げられるが、インバータシステム全体の体積及びコストのアップは避けられない。また、パッシブフィルタを構成するリアクトルとコンデンサの共振や、リアクトルの鉄心における磁気飽和の問題がある。そこで、ノーマルモード及びコモンモードいずれも低減可能なこと、コモンモードトランスを必要としないこと、及び能動素子であるトランジスタの耐圧を低減することを特長とする“アクティブノイズフィルタ”を提案する。これは、伝導ノイズを直接検出し、上記伝導ノイズがゼロとなるようにトランジスタで出力される電流を各相においてフィードバック制御するものである。アクティブノイズフィルタの1相分の機能ブロックを図5に示す。図においてCNVは整流器、INVはインバータ、IMは誘導電動機である。ここで、系統ケーブル等に存在する浮遊容量 $C_y$ に現れる高周波電圧 $v_{cy}$ がLISNで観測される伝導ノイズに相当する。したがって、高周波電圧 $v_{cy}$ を抑制するために、アクティブノイズフィルタは以下の機能を持っている。

- (1)  $C_y$ の電圧 $v_{cy}$ を検出
- (2) ハイパスフィルタ(HPF)により伝導ノイズ抑制対象の高周波電圧成分(例: 150kHz以上の成分)を抽出
- (3) 上記高周波電圧成分がゼロとなるように比例ゲイン $K$ による電流指令 $i_{com}^*$ を作成
- (4) 電圧信号 $i_{com}^*$ を±15V系の電圧-電流変換回路(V-I変換, V-to-I Conv.)により電流 $i_{com}$ に変換し、コンデンサ $C_{in}$ を介して $i_{com}$ を $C_y$ に注入

次に、インバータを運転したときのLISNによる伝導ノイズ測定結果を図6に示す。系統電源は三相入力であるため図5の1相分の機能ブロックを3相分接続した。アクティブノイズフィルタによりボード線図による設計どおりに150kHz近傍で約20dBの減衰が得られる。MHz帯のノイズについては別途線間コンデンサを接続することにより低減される。アクティブノイズフィルタと簡易なパッシブノイズフィルタによる最適設計につき検証を進めている。

### 4. む す び

本稿では、電力変換回路・ノイズ伝搬のモデル化、ノイ

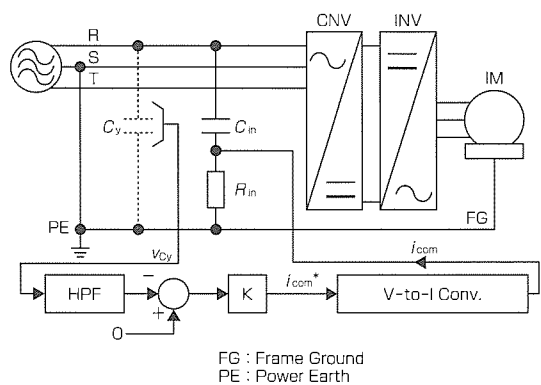


図5. アクティブノイズフィルタの1相分機能ブロック

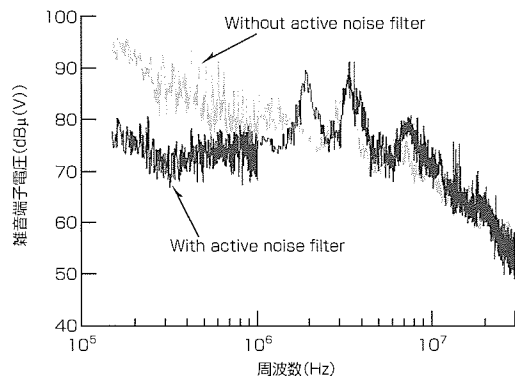


図6. LISNによる伝導ノイズ測定結果

ズフィルタの設計技術について述べた。インバータ回路からケーブル、負荷となるモータなども含めて等価回路モデルを構築することで、任意の組み合わせに対するEMIノイズの定量的評価が可能となった。この技術により、フィルタの定数選定、設計が図面の段階から可能となり、開発期間の短縮・コストの低減が加速された。さらに、アクティブフィルタのようなよりアダプティブなフィルタリング技術の実用化の検討も進めている。

### 参考文献

- (1) Rohrer, R., et al. : Computationally efficient electronic-circuit noise calculations, IEEE Journal of Solid-State Circuits, **SC-6**, No.4, 204~213 (1971)
- (2) Nagel, L. W. : SPICE 2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits, Ph. D. dissertation, University of California at Berkeley (1975)
- (3) 西沢昭則, ほか: パワエレ素子応用によるスイッチング障害, J. IEIE Jpn, **24**, No.4, 275~278 (2004)
- (4) 東 聖, ほか: ノーマルモードとコモンモードの伝導ノイズを低減するアクティブノイズフィルタ, IEEJ Trans. IA, **124**, No.9, 893~900 (2004)



# パワーモジュールの信頼性評価・接合技術

Evaluation of Fatigue Life Reliability and New Lead Bonding Technology for Power Modules

Toshihiro Matsunaga, Yasumi Uegai, Kunihiro Yoshihara, Shingo Sudo

## 要旨

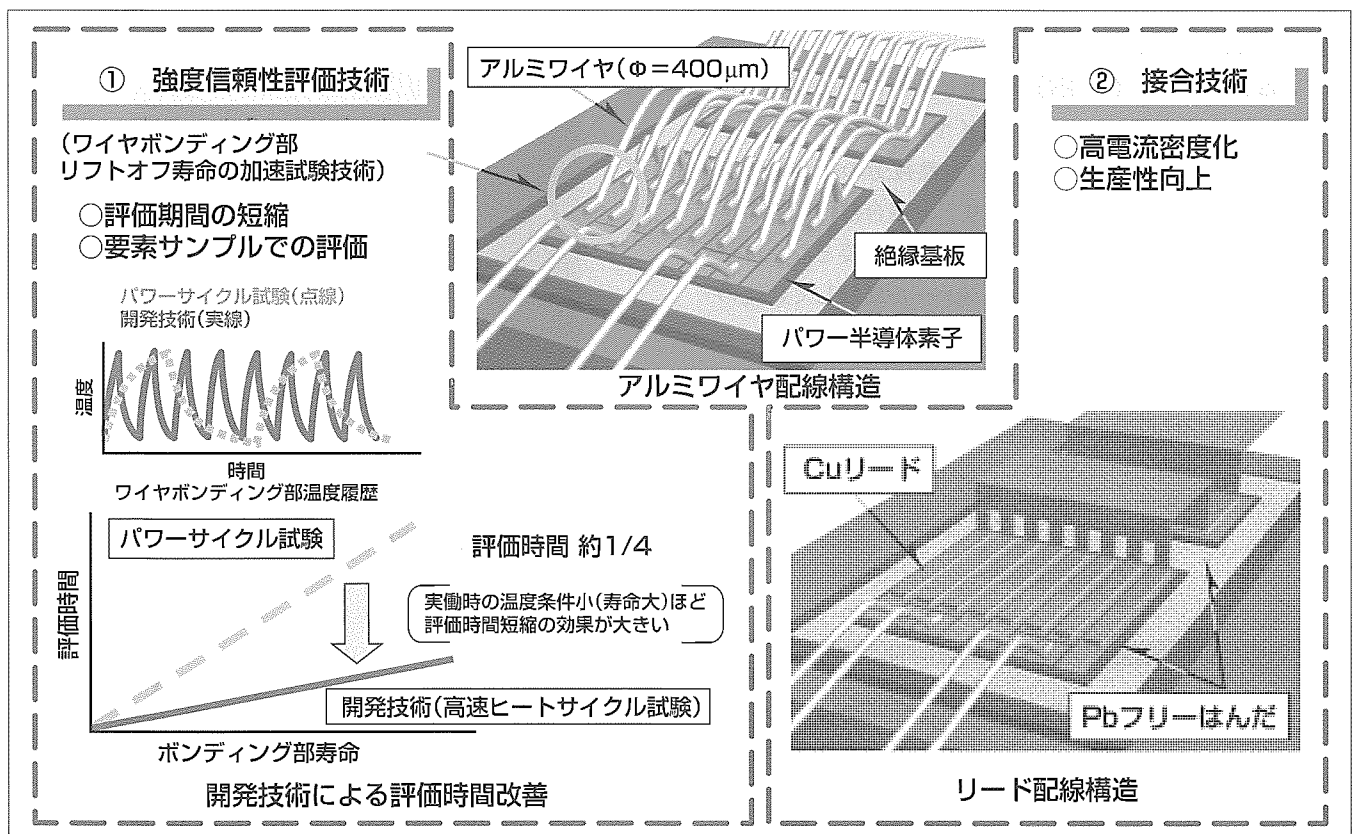
インバータ制御技術の核となるパワーモジュールは、その適用される産業分野の拡大とともに、モジュール自身にも更に高い信頼性が求められる。そこで、本稿では、パワーモジュール主電極配線構造についての信頼性に注目し、①強度信頼性評価技術、及び②新しい接合技術への三菱電機の取り組み内容について述べる。

強度信頼性評価技術としては、パワーモジュールの主電極配線方法として用いられているアルミワイヤボンディング部の熱疲労によるワイヤリフトオフ寿命の加速評価試験技術について述べる。従来、この疲労寿命評価には実動作が可能なモジュールでのパワーサイクル試験が実施され、長期信頼性評価には膨大な時間を必要としたが、ワイヤボンディングされた素子部分のみを評価対象とすることによ

り、実機モジュールを準備することなく、さらに従来方法に比べ短期間でワイヤボンディング部の寿命評価を可能とした高速ヒートサイクル試験法を開発した。

接合技術としては、Cuリードによる配線構造について述べる。パワー半導体チップの進歩によりチップの高電流密度化が進み、同じ電流値を扱う半導体チップの面積が縮小していく傾向にあることから、ワイヤボンディングで電流を引き出す方式に限界が迫っている。そこで、アルミワイヤに代わる新たな配線技術として、チップ上の配線をアルミワイヤボンディングから、Cuリードのはんだ付へと置き換えた。ワイヤ配線構造とリード配線構造の信頼性比較を行った結果、リードの形状変更による低剛性化により高信頼性を確保可能となった。

特集  
I



## ワイヤボンディング部寿命評価技術及びリード配線構造

開発した高速ヒートサイクル試験では、従来のパワーサイクル試験に比べ約1/4の時間でアルミワイヤボンディング部の寿命評価が可能である。リード配線構造では、Cuリードをはんだ付することによりワイヤピッチによることなく、一括で配線することが可能となり、チップの高電流密度化、生産性の向上に対応することができる。

## 1. ま え が き

パワーモジュールはその適用される産業分野が拡大しており、家電等のインバータ制御から自動車、さらに電鉄・電力などの大電力分野などに幅広く使用されている。近年、モジュールに求められる信頼性は、電気・絶縁的、熱的、強度的な側面で一段と厳しさを増しており、より一層の仕様改善が求められつつある。また同時に、低コストで信頼性の高い製品を短期間に開発し、製品化する必要がある。これらの要求に対応するためには、信頼性評価技術の高精度化と加速化が求められるとともに、更に新しい技術コンセプトに基づいた製品化開発が重要となる。

そこで、本稿では、パワーモジュール配線構造の信頼性に関し強度信頼性評価技術として、パワーモジュールの主要配線方法として用いられているアルミワイヤボンディング部の熱疲労によるワイヤリフトオフ寿命に対する加速評価試験技術、及び新しい接合技術としてワイヤボンディング配線に代わる今後の高電流密度化に対応するためCuリードによる配線構造について述べる。

## 2. 強度信頼性評価技術 (ワイヤリフトオフ寿命の加速試験技術)

パワーモジュールの半導体素子(Siチップ)への電気配線方法として、アルミワイヤの超音波接合方法が広く用いられている。アルミワイヤ配線を利用したパワーモジュールの断面の模式図を図1に示す。ワイヤの接合部(ボンディング部)はチップの発熱・冷却に伴う熱疲労の繰り返しを受け、疲労損傷を生じる場合があり<sup>(1)</sup>、接合部信頼性の点から疲労特性を十分に把握しておくことが必要となる。信頼性評価試験としては、実際のモジュールに対して電流の通電・遮断を繰り返すパワーサイクル試験を実施しているが、多くの時間を必要としている。そこで、パワーサイクル試験に代わる評価方法として、アルミワイヤをボンディングしたチップ部分のみをサンプルとして、外部加熱によりパワーサイクル時と等価な熱応力を発生させ、熱疲労寿

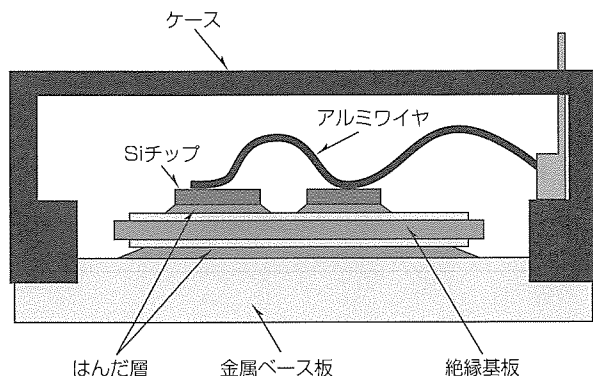


図1. パワーモジュール断面図

命を加速評価する寿命評価技術(高速ヒートサイクル試験技術)を開発した。

高速ヒートサイクル試験装置での評価部分を図2に示す。試験装置には、急速加熱及び冷却のための高性能セラミックスヒーター並びに冷却用Cuヒートシンクを用いた。試験には、加熱・冷却時の過渡的な温度変化を利用するため、精密な温度制御が必要であり、高速サンプリングが可能なデジタル温度調節器を用いて制御した。その結果、図3に示す温度履歴の一例のように、チップ表面温度範囲 $\Delta T=100\text{K}$ の条件では、約2sのヒートサイクル周期で温度制御を実現し、パワーサイクル試験に比べ約1/4の時間でワイヤボンディング部寿命を評価できるようになった。

高速ヒートサイクル試験においてヒートサイクル温度範囲 $\Delta T$ を50~100K(ヒートサイクル最小温度は $T_{\min}=25^{\circ}\text{C}$ )に設定し、 $\Delta T$ のワイヤボンディング部寿命に対する影響を評価した結果を図4に示す。Covaらによるパワーサイクル試験でのボンディング部寿命の結果<sup>(1)</sup>と一致する結果が得られている。開発した高速ヒートサイクル試験により、実機モジュールを準備することなしに、かつ従来方法に比べ短期間でワイヤボンディング部の寿命評価が可能であることが確認された。今後、この評価方法を用いることにより、例えば、チップ仕様やワイヤボン条件などの影響を

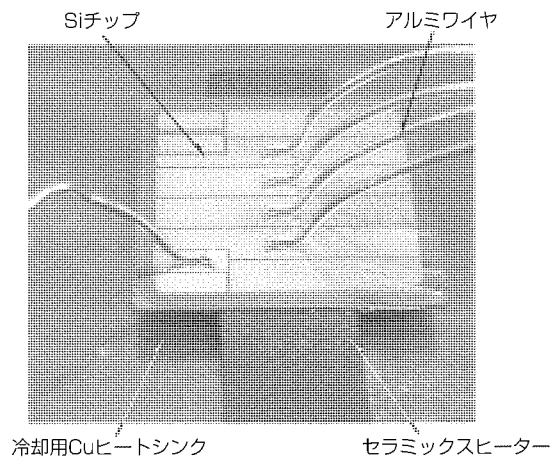


図2. 高速ヒートサイクル試験装置

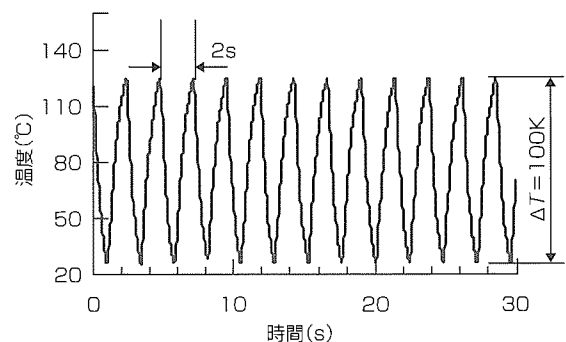


図3. 高速ヒートサイクル試験における温度履歴の一例

短時間で評価できるため、製品開発期間の短縮が期待される。

### 3. 接合技術 (Cuリード配線構造)

近年のパワー半導体チップの開発によってチップの高電流密度化が進み、同じ電流値を扱う半導体チップの面積が縮小しており、ワイヤボンディングで電流を引き出す方式に限界が迫ってきている。また、電流数百Aクラスのパワーモジュールになると、モジュール内のアルミワイヤ本数が多数になり、生産性が低下していく傾向があり、アルミワイヤに代わる配線技術が求められている。これまでは、フリップチップボンディングの技術に応用したメタルポスト構造などが提案されている<sup>(2)</sup>。

当社では、現在のアルミワイヤ配線と同様のモジュール構成においてチップの高電流密度化や生産性の向上へ対応する新配線構造への取り組みとして、大電流パワーモジュールにおけるチップ上の配線をアルミワイヤ配線からCuリードをはんだ付することによるCuリード配線に置き換える構造を開発中である<sup>(3)</sup>。

パワーモジュールではその使用環境から温度サイクルに対する信頼性を強く求められるため、リード配線構造では、はんだ接合部の熱サイクルによる破壊による電気特性の劣化が懸念される。そこで、リード配線モジュールを温度サイクル試験に投入し特性の変化について調査した。

□12mm、厚さ0.3mmのパワーMOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)チップ上にアルミワイヤを配線した写真を図5に、同じ半導体チップ上にCuリードを接合した写真を図6に示す。リード接合構造の断面模式図を図7に示す。アルミワイヤ構造はφ=400μmのワイヤを16本チップ上に接合したものであり、リード配線は厚さ0.2mm、幅11mmのCu板をチップ上に厚さ約0.1mmのSn-Ag-Cuはんだで接合したものである。

温度サイクルは-40~+125℃(各10分)で実施し、中間測定ではMOSFETチップのオン抵抗( $R_{DS(ON)}$ )を測定し、モジュールとしての特性劣化を確認した。

温度サイクル試験におけるサイクル数と $R_{DS(ON)}$ の変動を図8に示す。ワイヤ構造では3,000サイクルまで抵抗の変動が見られなかったが、リード配線では1,000サイクルでの測定で抵抗が約1.5倍に増大し始め、2,000サイクル以降では、チップ-リード間のはんだ全面にクラックが進展し、回路オープンとなった。はんだクラックは温度サイクル時におけるSiチップとCuリードの熱膨張率差に起因して発生するはんだ層のひずみで進展する。したがって、クラック

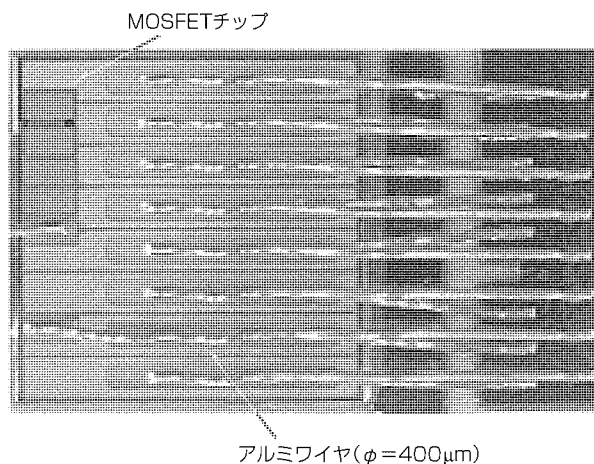


図5. ワイヤ配線構造

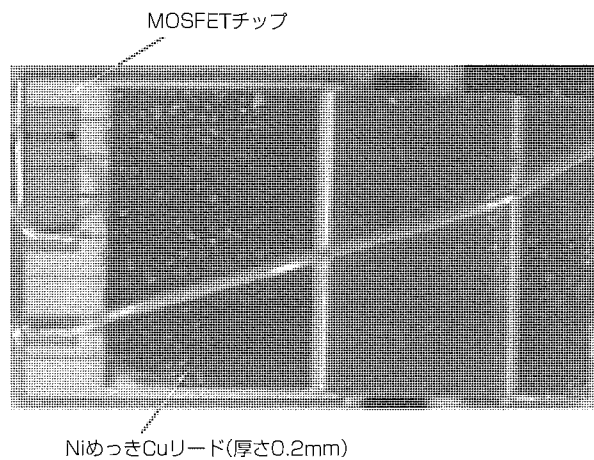


図6. リード配線構造

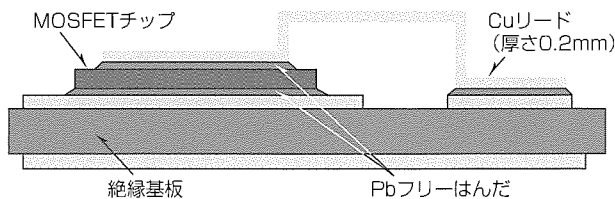


図7. リード配線断面模式図

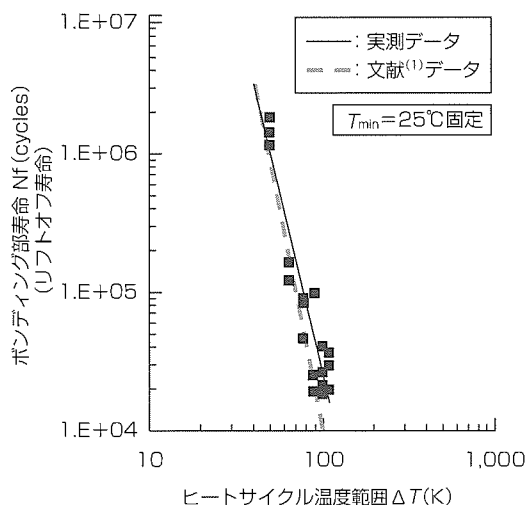


図4. ΔTに対するアルミワイヤボンディング部寿命

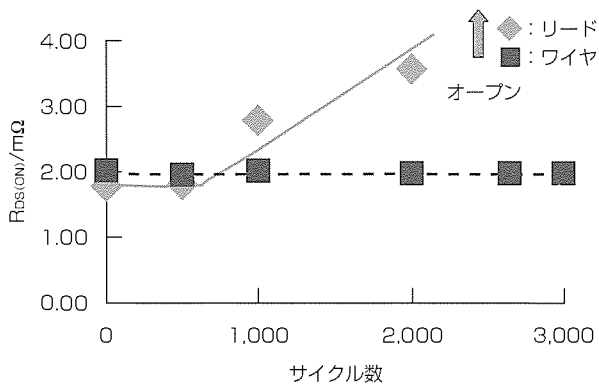


図8. 温度サイクル試験におけるサイクル数とオン抵抗の関係

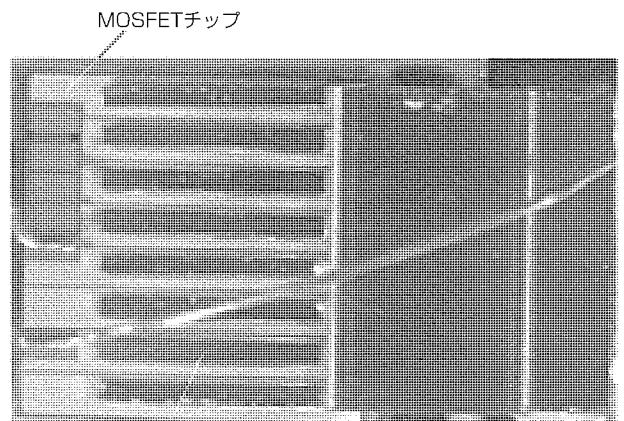
クの進展を抑制するにははんだひずみを軽減することが有効である。これに対して、板厚の小さいリードを用いてリードの剛性を低減することが考えられるが、配線全体の抵抗が増大することが否めない。そこで、同じ板厚でチップ面上での接合領域を櫛(くし)歯状に分割し、はんだ接合部におけるリードの剛性を低下させることで、熱膨張率差に起因して発生するはんだ層のひずみを抑制するリード形状を適用することとした。櫛歯リード配線の写真を図9に示す。櫛歯形状はチップ面上のゲート配線で分割された8つの領域に対応するように形成し、はんだ付により接合した。それぞれの櫛歯の幅は0.8mmである。

櫛歯リード配線構造のモジュールに対しても-40~+125℃の温度サイクル試験における $R_{DS(ON)}$ の変動を確認した。サイクル数と $R_{DS(ON)}$ の変動を図10に示す。

櫛歯リード配線構造を適用することにより、温度サイクルで1,000サイクル以上 $R_{DS(ON)}$ 増加を抑制可能であることを確認した。また、3,000サイクルでも回路オープンとならず、 $R_{DS(ON)}$ の増大は10%まで抑制されていることも確認された。

#### 4. む す び

パワーモジュールの信頼性評価方法として、アルミワイヤボンディング部の寿命評価を短時間で実施可能な高速ヒートサイクル試験技術を開発し、その有効性を確認した。また、新しい配線構造としてCuリード配線構造を提案し、温度サイクル時のチップとリードを接合するはんだのクラックを抑制するため、櫛歯状に分割した櫛歯リードが有効



Niめっき櫛歯Cuリード(厚さ0.2mm)

図9. 櫛歯リード配線構造

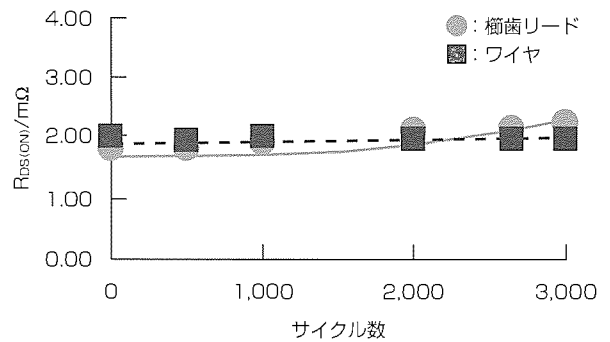


図10. 櫛歯リードを用いた場合の温度サイクル試験におけるサイクル数とオン抵抗の関係

であることを明らかとした。

#### 参 考 文 献

- (1) Cova, P., et al. : On the effect of power cycling stress on IGBT modules, *Microelectronics Reliability* 38, 1347~1352 (1998)
- (2) Liu, X., et al. : Power Chip Interconnection : From Wire bonding to Area Bonding, *IMAPS2000*, Boston, 264~269 (2000)
- (3) Sudo, S., et al. : Wire-Bonding-Less Interconnection Technique for High Current Power Modules, *IMAPS2004*, Long Beach (2004)

# SiCデバイスとその応用技術

木ノ内伸一\*  
中武 浩\*  
今泉昌之\*\*

SiC Devices and Their Application Technologies

Shin-ichi Kinouchi, Hiroshi Nakatake, Masayuki Imaizumi

## 要 旨

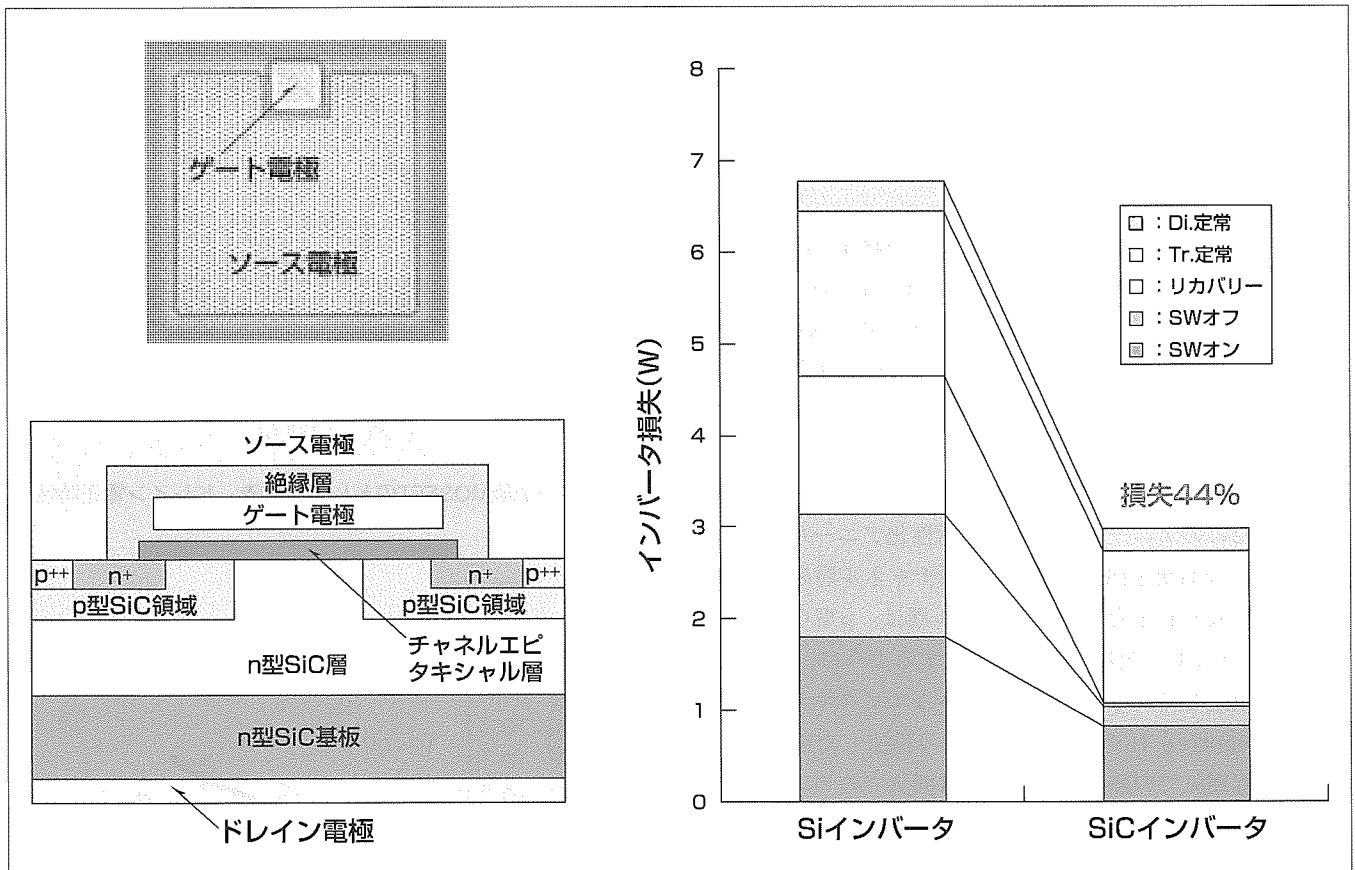
半導体シリコンカーバイド (SiC) は物性値が優れていることから次世代のパワーデバイス用材料として期待されており、世界的に研究開発が進められている。三菱電機では、SiCに固有のプロセス技術、デバイスの高耐圧化、MOS (Metal Oxide Semiconductor) チャンネルの低抵抗化などの基礎技術開発を行ってきたが、最近に至って10A級のデバイスの試作が可能になった。

試作したSiC-MOSFET (MOS Field Effect Transistor) とSiC-SBD (Schottky Barrier Diode) とを組み合わせ、評価用モジュールを製作し、モータ駆動による連続動作試験とスイッチング特性の評価を実施した。1A級のSiC-

MOSFETとSiC-SBDとを組み合わせたSiCインバータモジュールでは、ギヤードモータ0.1kW (三相) は正常に動作し、連続動作においてデバイスの特性に変化は見られなかった。10A級のSiCハーフブリッジモジュールによるスイッチング特性評価では、定格が同クラスのSiモジュールと比べ、スイッチング損失の大きな低減を確認した。これは、SiCモジュールがユニポーラデバイスにより構成されていることに起因する。

今後、SiC-MOSFET及びSiC-SBDの更なる高性能化・高信頼性化を図り、応用システムでの評価を進めてSiCモジュールの実用化を目指す。

特集  
I



## 1,200V/10A級SiC-MOSFETモジュールとSi-IGBTモジュールのインバータ損失比較

10A級のSiC-MOSFETとSiC-SBDとを組み合わせたハーフブリッジモジュールのパルス試験を行い、スイッチング損失を求めてインバータ動作時の損失を試算した。その結果、従来のSi-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) インバータと比較し56%の損失低減が見込まれた。当社では、SiCデバイスの更なる高性能化・高信頼性化を図ってSiCインバータの実用化を目指す。

1. ま え が き

半導体シリコンカーバイド(SiC)は物性値が優れていることから次世代のパワーデバイス用材料として期待されており、日本、ヨーロッパ、アメリカで研究開発が活発に進められている。現在、市場の大幅な拡大が期待できるスイッチングデバイス及びパワーモジュールの製品化と大容量化に向けて開発が加速している。

スイッチングデバイスであるSiC-MOSFETの開発には大きな期待が寄せられている。しかし、SiC-MOSFETの開発には、

- チャンネル移動度が低い
- 製作プロセス技術が未熟
- 基板欠陥が多く大容量化が困難

等の問題が残されている。

当社では、SiC-SBDとSiC-MOSFETの開発を同時に進めて、SiCデバイスの実用化を目指した開発を進めている<sup>(1)~(5)</sup>。

今回試作したSiC-MOSFETとSiC-SBDとを組み合わせる評価用モジュールを製作し、スイッチング特性評価とモータ駆動による連続動作試験を実施した。

本稿では、SiC-MOSFETの製作プロセスの概略を記し、SiCモジュールによるモータ駆動及びスイッチング特性評価に関する結果を述べる。

2. SiC-MOSFETの製作と静特性評価

2.1 デバイス製作プロセス

冒頭のデバイス構造図は今回製作した高耐圧SiC-MOSFETの単位セルの断面構造である。基板には4H型ポリタイプn型SiCを用い、まず、ドナー濃度 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、厚さ $12 \mu\text{m}$ のドリフト層をエピタキシャル成長させた。ウェル領域、JTE(Junction Termination Extension)領域にはp型ドーパントとしてAlを、ソース領域にはn型ドーパントとしてNをイオン注入し、減圧Ar雰囲気中でドーパント活性化のためのアニールを行った。活性化アニールにより形成される表面層を除去した後、n型チャンネル層のエピタキシャル成長を行った。このチャンネル層は、p型ウェル層とのpn接合により全体がほぼ空乏化するように、層厚及び濃度を設定している。不要なチャンネルエピタキシャル層をRIE(Reactive Ion Etching)により除去した後、水蒸気/酸素雰囲気での熱酸化及び $\text{N}_2\text{O}$ 雰囲気でのアニールを行ってゲート酸化膜を形成した。ゲート電極はPを添加したポリSiとし、層間絶縁膜を堆積(たいせき)させた後、ソース、ドレイン、ゲートの金属電極を形成した。最後に、表面保護膜として、ポリイミド膜を形成した。

今回試作したMOSFETの単位セルの大きさは $25 \times 25 \mu\text{m}$ 、ゲート長は $2 \mu\text{m}$ とした。チップ当たりのアクティブ面積

として、 $0.88 \text{mm}^2$ 、 $7.8 \text{mm}^2$ の二種類のMOSFETを試作したが、電流容量として、それぞれ1A、10A級に相当する。

2.2 電気的静特性

試作した1A級MOSFETのドレイン電流、ドレイン電圧特性(オン特性)の典型例を図1に示す。良好なドレイン特性を示しており、ゲート電圧12V(ゲート酸化膜中の電界強度 $3 \text{MV/cm}$ )、電流密度 $50 \text{A/cm}^2$ における特性オン抵抗率として、 $12.9 \text{m}\Omega \text{cm}^2$ が得られている。Siとの比較のために、仮にこの電流密度での値を示している。図2に、図1に示したMOSFETの耐圧特性(オフ特性)を示す。ゲート電圧0VでMOSチャンネル部からの電流リークがあるが、 $1.2 \text{kV}$ 以上のアバランシェ降伏電圧が得られている。ゲート電圧 $-5 \text{V}$ 以下では電流値に差はなく(チャンネル性のリーク電流がない)、ほぼ設計した耐圧が得られている。今回製作したMOSFETのしきい値電圧はおおむね $-0.5 \text{V}$ から $0.5 \text{V}$ の範囲にあり、オン抵抗が低くなるに従いしきい値電圧は低くなる傾向がある。確実にMOSFETをオフさせるためには $-5 \text{V}$ 程度以下のゲート電圧が必要であり、しきい値電圧の制御は今後の課題である。10A級のMOSFETについては、オン抵抗率として $13 \text{m}\Omega \text{cm}^2$ 程度のもの

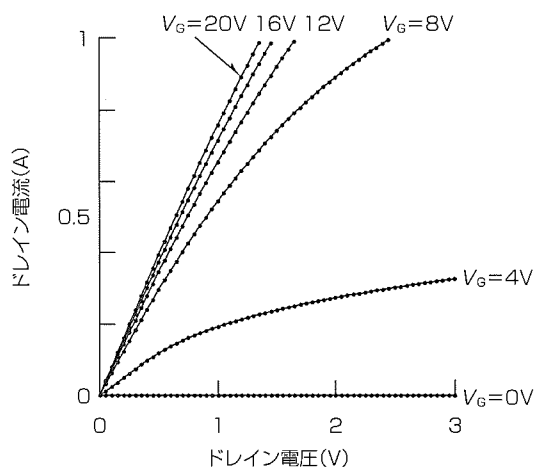


図1. 1A級MOSFETのドレイン電流、ドレイン電圧特性

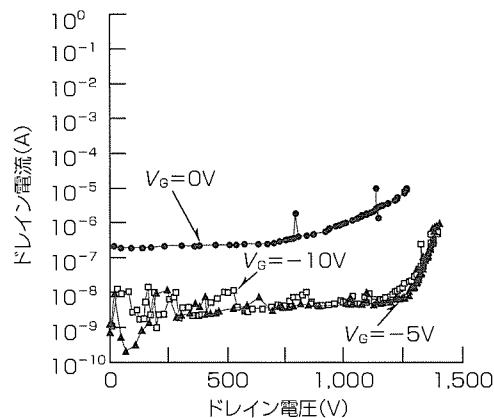


図2. 1A級MOSFETの耐圧特性



が得られており、ゲート電圧 $-5\text{V}$ において、 $1.2\text{kV}$ 以上の耐圧が得られている。

### 3. SiCモジュールによるモータ駆動及びスイッチング特性評価

#### 3.1 SiCモジュールの製作

モータ駆動試験のために、 $1\text{A}$ 級のSiC-MOSFETとSiC-SBDとを組み合わせることでSiCインバータモジュールを製作した。パッケージには $1,200\text{V}/10\text{A}$ 定格のSi-IGBTモジュールパッケージを使用した。このパッケージはSiC用として最適なものではなく、試作の目的で既存外形を利用した。また、SiCモジュールのスイッチング特性の評価用に、 $10\text{A}$ 級のSiC-MOSFETとSiC-SBDを組み合わせることでハーフブリッジモジュールを製作した。

#### 3.2 SiCモジュールによるモータ駆動

図3に $1\text{A}$ 級のSiCインバータモジュールによるモータ駆動回路とインバータ出力電流波形を示す。また図4に、モータ駆動時の装置構成を示す。使用したモータはギヤードモータ $0.1\text{kW}$ (三相)である。駆動条件は、 $V_{cc}=200\text{V}$ 、 $I_{rms}=0.3\text{A}$ 、基本波周波数 $60\text{Hz}$ 、キャリア周波数 $4.5\text{kHz}$ である。モータは正常に動作し、連続動作を行ったがデバイスの特性に変化は見られなかった。デバイス特性の経時変化や信頼性については今後評価を継続する予定である。

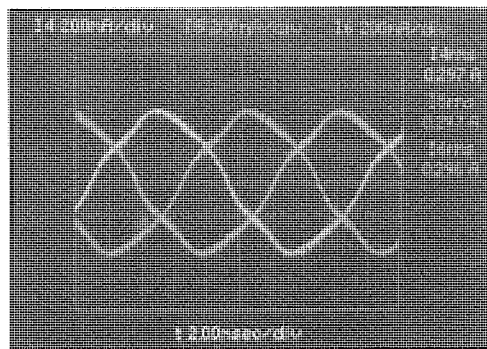
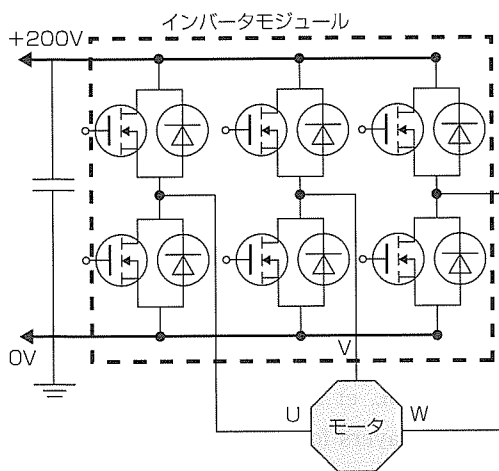


図3. SiCインバータモジュールによるモータ駆動回路とインバータ出力電流波形

#### 3.3 スwitchング特性の評価方法

$10\text{A}$ 級のSiC-MOSFETとSiC-SBDによるSiCモジュールを使用してスイッチング特性評価を実施した。スイッチング特性評価にはダブルパルス法を用いた。また、性能比較のために、 $1,200\text{V}/10\text{A}$ 定格のSi-IGBTとSi-PiNダイオードをSiCモジュールと同一のパッケージで評価した。

スイッチングデバイスの駆動にはダブルパルス測定専用のゲートドライバを使用した。このゲートドライバではスイッチングのオン時とオフ時で異なるゲート抵抗を用いることが可能で、オン時とオフ時で独立にスイッチングスピードを調整できる。

SiC-SBDを用いた場合、ダイオードのリカバリー時の電流電圧波形が振動的になりやすい。スイッチングオン時の特性に関しては、ダイオードのリカバリー時に生じる放射ノイズEMI(Electro Magnetic Interference)の観点から重要であるため、放射ノイズを基準に特性の比較を行った。スイッチングオフ時の損失特性に関しては、オフ時のサージ電圧を基準にして比較した。

#### 3.4 スwitchング特性の測定結果

図5にスイッチングデバイスのオン波形、図6にスイッチングデバイスのオフ波形を示す。測定条件は、主電圧 $600\text{V}$ 、オン電流 $11\text{A}$ 、モジュール温度 $125^\circ\text{C}$ である。

オン波形でのSiC-MOSFETとSi-IGBTの比較に関しては、放射ノイズレベルがSiモジュールとSiCモジュールで等しくなるゲート抵抗を使用した。オフ波形でのSiC-MOSFETとSi-IGBTの比較に関しては、オフサージ電圧がSiモジュールとSiCモジュールで等しくなるゲート抵抗を使用した。オン時のSiC-MOSFETに使用したゲート抵抗は $20\Omega$ 、Si-IGBTでは $47\Omega$ である。オフ時のSiC-MOSFETに使用したゲート抵抗は $47\Omega$ 、Si-IGBTでは $47\Omega$ である。

図5からダイオードのリカバリー動作の相違がオン損失に大きく影響していることが分かる。SiCモジュールにおいてSiC-SBDの空乏層容量に起因する $2\text{A}$ 強のリカバリー電流が見られるが、Si-PiNダイオードのリカバリー電

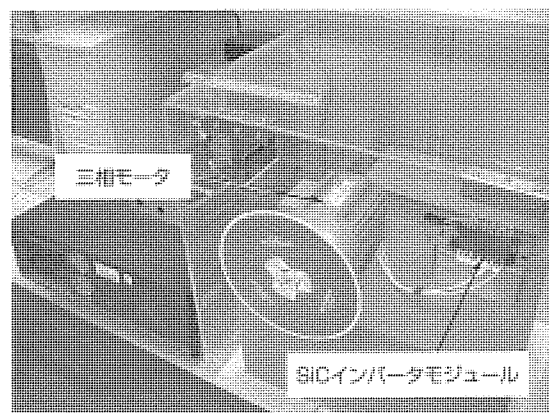


図4. モータ駆動時の装置構成

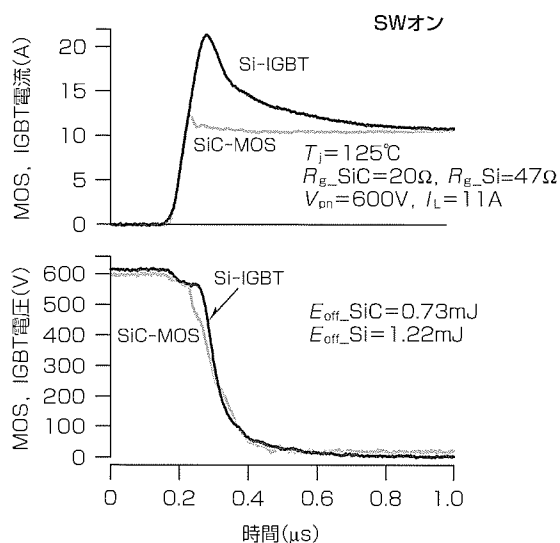


図5. スwitchingデバイスのオン波形

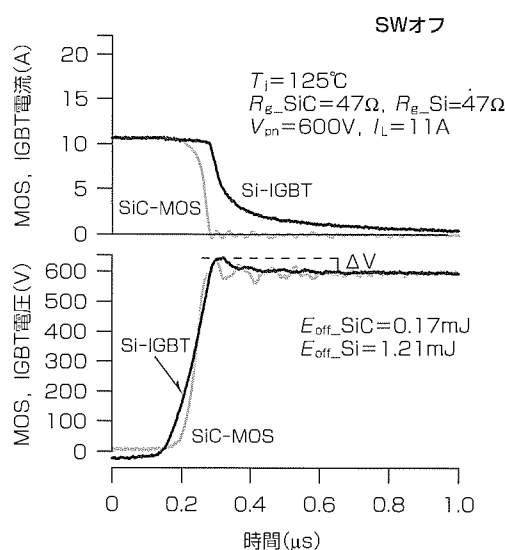


図6. スwitchingデバイスのオフ波形

流に比べて極めて小さい。図6から、スイッチングデバイスのテール電流の大きさに大きな違いがあることが分かる。SiC-MOSFETはユニポーラデバイスであるためオフ時に電荷の蓄積がなく、基本的にテール電流が生じない。ユニポーラデバイスであるSiC-MOSFETが、SiCモジュールのオフ損失の低減に大きく寄与している。

上記測定条件においてスイッチング損失をSiCモジュールとSi-IGBTモジュールで比較すると、Siモジュールに対するSiCモジュールの値として、オン損失は0.60倍、オフ損失は0.14倍、ダイオードのリカバリー損失は0.02倍の値が得られた。

### 3.5 インバータ動作損失の試算

スイッチング特性結果と今回用いたSiC-MOSFETの静特性結果から、三相PWM(Pulse Width Modulation)インバータ動作時の損失を試算した(冒頭の棒グラフ)。計算した損失はインバータ1アームの損失である。損失計算条件は1,200V/10A級汎用インバータの代表的な動作モードであり、モジュール温度125℃、主電圧 $V_{cc} = 600\text{V}$ 、相電流 $I_{rms} = 3.5\text{A}$ 、キャリア周波数10kHz、変調率1.0、力率0.8である。SiCインバータとSiインバータで比較した場合、SiCインバータのスイッチング損失(SWオン+SWオフ+リカバリー)がSiインバータと比べて大きく低減し、SiCインバータ全損失が大きく低減することが分かる。この試算からオン時の放射ノイズとオフ時のサージ電圧を同一レベルに維持しながらSiインバータをSiCインバータにすることにより56%の損失低減を見込めることが分かった。

## 4. むすび

1 A級のSiC-MOSFETとSiC-SBDで製作したSiCインバータモジュールを使用してギヤードモータ0.1kW(三相)を駆動した。モータは正常に動作し、その連続動作ではデ

バイスの特性に変化は見られなかった。

10A級のSiC-MOSFETとSiC-SBDによるSiCモジュールを使用してスイッチング特性の評価を実施した。同容量のSiモジュールと比べSiCモジュールでは、スイッチング損失を大幅に低減できることが分かった。これはSiモジュールのバイポーラ動作とSiCモジュールのユニポーラ動作の相違によるものである。

今後、SiC-MOSFET及びSiC-SBDの更なる高性能化・高信頼性化を図っていくとともに詳細な特性検討を行い、SiCモジュールの実用化を目指す。

この研究の一部は、経済産業省からの交付金を原資として実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして、NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)技術開発機構の共同研究契約に基づき実施している。

## 参考文献

- (1) Imaizumi, M., et al.: SiC homoepitaxy on Al-ion-implanted layers for fabricating power device structures, J. Cryst. Growth, 237~239, 1219 (2002)
- (2) 今泉昌之, ほか: 2 kV耐圧SiC-MOSFET技術, 三菱電機技報, 77, No.9, 607~610 (2003)
- (3) Fujihira, K., et al.: Successful Enhancement of Lifetime for SiO<sub>2</sub> on 4H-SiC by N<sub>2</sub>O Anneal, Electron Device Lett., 25, No.11, 734 (2004)
- (4) 今泉昌之, ほか: 低オン抵抗4H-SiCエピ層チャンネルMOSFETの作製, 第52回応用物理学関係連合講演会, 1p-YK-6 (2005)
- (5) 渡辺友勝, ほか: 低オン抵抗4H-SiCエピ層チャンネルMOSFETの特性評価, 第52回応用物理学関係連合講演会, 1p-YK-7 (2005)

# 空調・家電機器における パワーエレクトロニクス技術

川久保 守\*  
矢部正明\*

*Technologies of Power Electronics for the Air Conditioner and Household Electric Appliances*

*Mamoru Kawakubo, Masaaki Yabe*

## 要 旨

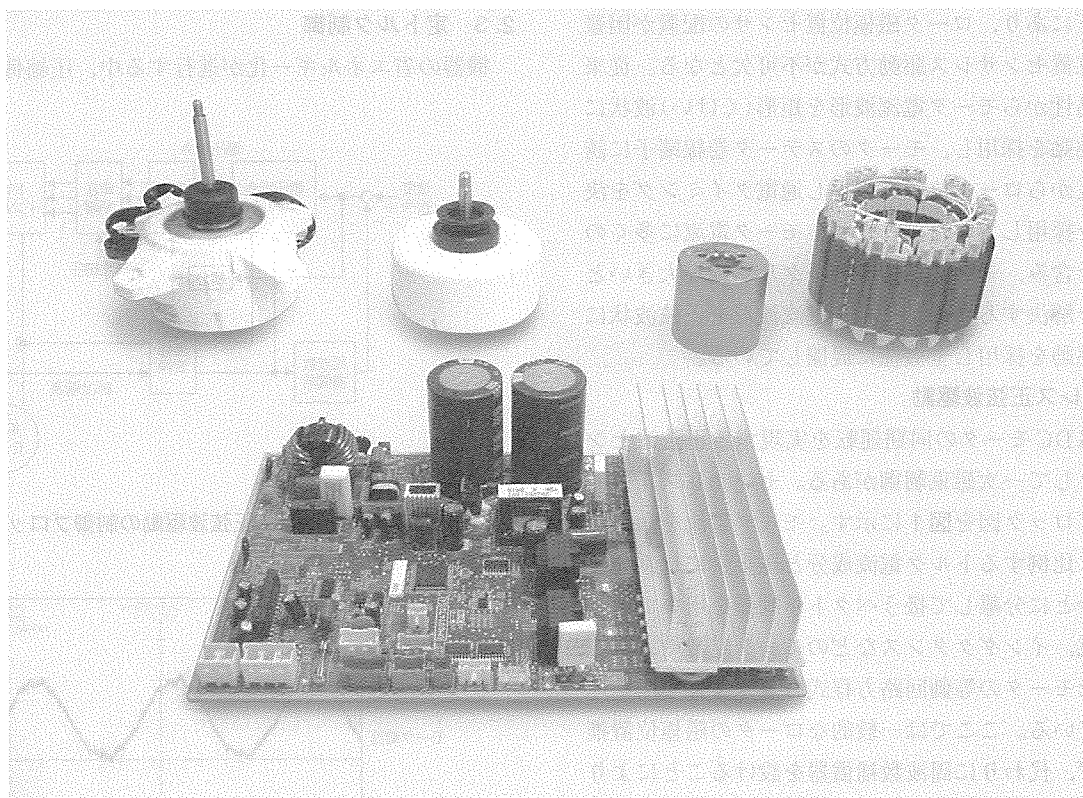
近年、地球環境保全を目的とした省エネルギー関連法の施行や省エネルギーに対する意識の高まりなどから、エアコン、冷蔵庫、IH(Induction Heating)クッキングヒーター、洗濯機など、パワーエレクトロニクス技術を適用した空調・家電機器が一般家庭に広く普及してきている。これらの機器はインバータを搭載することで消費電力量を大幅に低減してきており、現在も省エネルギー化、高性能化に向けソフトウェア及びハードウェア両面から技術開発が盛んに行われている。同時に、省資源化に向けて使用材料の削減も図られている。

エアコンや冷蔵庫は、圧縮機に搭載した高効率なブラシレスDCモータと正弦波駆動を採用したインバータにより消費電力量を低減した。正弦波駆動は、独自の過変調

PWM(Pulse Width Modulation)の適用、圧縮機特有の脈動負荷に起因するピーク電流の抑制により消費電力量低減に大きく寄与している。また、最大効率制御は、異なる負荷条件下においてもブラシレスDCモータを高効率に駆動できる。

圧縮機及びファン用ブラシレスDCモータは、関節型連結分割コア及び薄肉連結コア、磁石材料の高エネルギー積材の適用により小型化・高効率化などを図った。

本稿では、一般家庭における全消費電力量に占める割合の大きい空調・家電機器の代表機種であるエアコン、冷蔵庫へのパワーエレクトロニクス技術適用事例として、ブラシレスDCモータとこれを駆動するインバータの高効率化技術、省資源化について述べる。



## ブラシレスDCモータとインバータ

写真は、三菱電機のルームエアコンに用いられている圧縮機用モータ及びインバータ、室内・室外機に搭載するファンモータを示す。いずれのモータも高効率なブラシレスDCモータである。インバータ制御技術により高効率に駆動するなど、ルームエアコン、冷蔵庫を始め空調・家電機器の省エネルギー化、高性能化に大きく貢献している。また、モータの使用材料削減などにより省資源化も図っている。

1. ま え が き

地球環境保全を目的とした省エネルギー関連法の施行や省エネルギーに対する意識の高まりなどから、エアコン、冷蔵庫、IHクッキングヒーター、洗濯機など、パワーエレクトロニクス技術を適用した空調・家電機器が一般家庭に広く普及してきている。これらの機器は、インバータを搭載することで消費電力量を大幅に低減してきており、省エネルギー化、高性能化に向けソフトウェア及びハードウェア両面から技術開発が盛んに行われている。また、同時に省資源化に向けて使用材料の削減も図られている。

本稿では、一般家庭における全消費電力量に占める割合の大きい空調・家電機器の代表機種であるエアコン、冷蔵庫へのパワーエレクトロニクス技術適用事例として、ブラシレスDCモータとこれを駆動するインバータの高効率化技術、省資源化について述べる。

2. 圧縮機用インバータの高効率技術

エアコン、冷蔵庫は、ファンモータや圧縮機用モータにブラシレスDCモータを採用しインバータで高効率に駆動している。なかでも圧縮機用途は扱う電力が大きく、この性能改善が機器の省エネルギー化に大きく貢献することになる。圧縮機内部は、高温・高圧・冷媒ガス雰囲気といった特殊環境下にあり、ロータ磁極位置センサの配置が困難であるため位置センサレス駆動方式が不可欠となる。従来は制御の簡易性からモータ電流波形を矩形(くけい)波状にする矩形波駆動を採用し、モータのステータ巻線端子に誘起される電圧からロータ位置を把握し通電タイミングを決定する方法を採用していた。しかし、モータ電流に多くの高調波成分を含み、モータ鉄損やトルクリプルが大きいといった課題を解決するため、モータ電流波形を正弦波状にする正弦波駆動を採用し全機種に展開している。

2.1 センサレス正弦波駆動

ブラシレスDCモータの同期運転を実現する正弦波センサレス制御として一次磁束制御がある。センサレス正弦波駆動の制御ブロック図を図1に示す。モータ電流を永久磁石のトルクに比例するトルク電流成分と磁束量に比例する励磁電流成分とに分離して扱うベクトル制御を用いており、モータの抵抗、インダクタンスなどのモータ定数や、電圧、電流を用いたモータの等価回路方程式を解くことで同期運転を実現している。ここでは一般的なロータの磁極位置推定器を設けず、代わりに周波数補償器を設けることによりモータの負荷トルク変動時における速度安定化と制御の演算負荷軽減を図っている。

2.2 過変調PWM

圧縮機駆動用インバータは、低速から高速まで広範囲の運転が求められ、運転時間の長い中速及び低速運転時の高

効率化が強く要求される。一般的には高巻数仕様のモータを使用することでモータ電流を低減できる。しかし、速度の上昇とともにモータ巻線に誘起される電圧が上昇し、インバータの出力電圧限界に早く到達するため運転限界が低下してしまう。また、磁石の磁束と逆方向の減磁界を発生させる電流を流すことによりモータのエアギャップの磁束を減少させる弱め磁束制御を行うことで高速運転領域まで運転範囲を拡大できるが、電流増加による効率悪化、回路の大型化などの課題があった。

過変調PWMは、変調率を1より大きくしてPWMを部分的に100%デューティにしているため、実効出力電圧の上昇が可能となる。ここで、変調率 $a$ を式(1)に示す。

$$a = A_1 / A_2 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $A_1$ ：電圧指令値、 $A_2$ ：キャリア電圧

一般的な変調率は最大 $a = 1$ であるが、 $a = 2$ としたことにより出力電圧が最大約10%増加し、出力電圧限界が改善された。この結果、高巻数仕様のモータが使用可能となり高速側の運転範囲が拡大した。また、モータ電流が低減できたことにより、モータの銅損やインバータ回路のスイッチングデバイスの導通損及びスイッチング損が低減し、モータ及びインバータ回路の効率が改善された<sup>(2)</sup>。図2に過変調時のモータ電流及びPWM信号波形を示す。PWMが部分的に100%デューティになっているのが分かる。

2.3 定トルク制御

機器の省エネルギー化が進行する中、圧縮機は低速運転

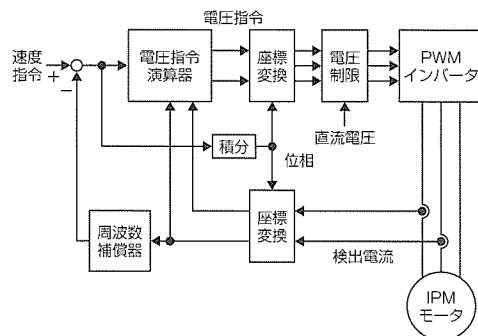


図1. センサレス正弦波駆動の制御ブロック図

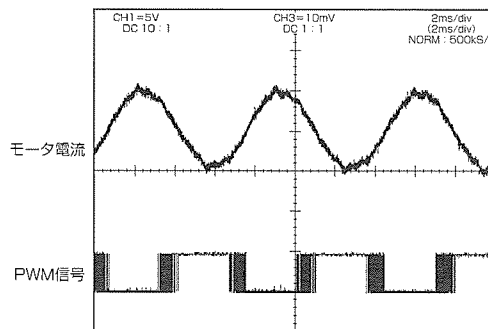


図2. 過変調時のモータ電流及びPWM信号波形

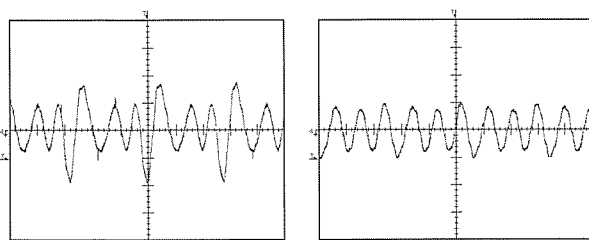
時間が長くなってきている。しかし、低速運転時は、吸入・圧縮・吐出に起因する負荷トルク変動からピーク電流が発生し大きな損失要因となっていた。図3の(a)にピーク電流発生時のモータ電流波形を示す。

定トルク制御は、負荷トルク変動時の電流を検出してインバータの出力電圧と周波数を制御することによりモータの出力トルクを一定にしている。図の(b)にピーク電流抑制時の電流波形を示す。ピーク電流が約1/2まで低減しているのが分かる。この制御により、低速運転時におけるモータとインバータを組み合わせた総合効率は、従来の周波数一定制御に比べて最大4%改善した<sup>(1)</sup>。ここでは冷蔵庫用圧縮機のレシプロ方式の例を示したが、エアコン用圧縮機のロータリ方式についても効率改善効果がある。

### 2.4 最大効率制御

圧縮機用ブラシレスDCモータは、冷蔵庫を始めルームエアコンから業務用エアコンなど数多くの機種に搭載され、これらの多くのモータ仕様に対して高効率に駆動する必要がある。ブラシレスDCモータは、出力トルクの大きさに応じて電圧や電流を制御することで高効率に駆動できるが、効率が最大になる電圧値は負荷トルクやモータ仕様により変化する。このため、広い運転範囲や多種のモータに対して効率を最大にする制御が求められていた。

最大効率制御は、同一回転数において、モータ電流検出値とモータ定数を用いてインバータの出力電圧を電流最小となる電圧値に収束させる制御を行っている。図4に従来(一次磁束一定)制御と最大効率制御におけるモータ電流波



(a) ピーク電流発生時 (b) ピーク電流抑制時

図3. モータ電流波形

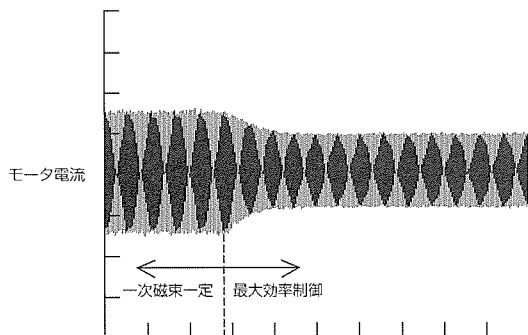


図4. 従来制御と最大効率制御時の電流波形

形を示す。最大効率制御で電流が大幅に低減しているのが分かる。この制御により、業務用エアコンは低速運転時のモータ効率を最大6%改善した。また、前述の過変調PWMの特長を損なわずに制御への組み込みが可能である。

### 3. 圧縮機用ブラシレスDCモータの高効率技術

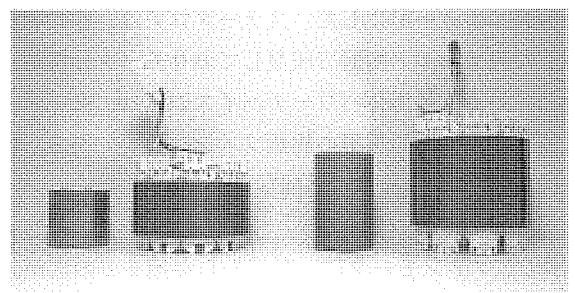
ブラシレスDCモータは、構造及び材料面から高効率化と省資源化を同時に図る必要がある。モータの小型化、モータ損失の大半を占める銅損と鉄損の低減の両立が大きな課題であった。ここで、モータの銅損はモータ電流により巻線抵抗に発生する熱損失、鉄損は磁束の変化により電磁鋼板内に発生する損失である。現在は性能及び製造面などから永久磁石をロータ内部に埋め込んだ埋込永久磁石形(Interior Permanent Magnet: IPM)を採用している。発生トルクは式(2)で示され、右辺第1項の磁石トルクと第2項のリラクタンストルクの合成となる。

$$T_m = P_m \{ \Phi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q \} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $T_m$ : 発生トルク、 $i_d$ : モータ電流d軸成分、 $i_q$ : モータ電流q軸成分、 $L_d$ : d軸インダクタンス、 $L_q$ : q軸インダクタンス、 $\Phi_f$ : 永久磁石の電機子鎖交磁束、 $P_m$ : 極対数。

発生トルク同一の条件では、極数、鎖交磁束、d-q軸インダクタンス差を増加することでモータ電流が低減する。

最新のモータは、磁界解析で永久磁石の配置の最適化、磁束密度の均一化、多極数(6極)化を図っている。また、永久磁石は焼結フェライトに対しよりエネルギー積の高い希土類(Ne-Fe-B)を採用することで鎖交磁束を増加した。ここで、鎖交磁束増加によるコア積厚の縮小や集中巻による周長削減は、巻線抵抗の低減につながっている。また、占積率向上を図るため、巻線は関節型連結分割コアを開いてから巻いている。この方法により完全整列巻を実現しており、製造方法も高効率化に大きく寄与している<sup>(3)</sup>。図5にロータとステータを、図6に効率、体積、質量の比較結果を示す。総合効率はエアコン運転範囲中の代表点である。希土類磁石を用いた新モータは、従来モータに比べて効率



(a) 希土類磁石 (b) 焼結フェライト磁石

図5. ロータとステータ

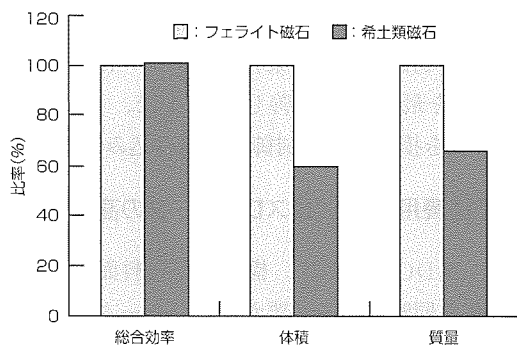
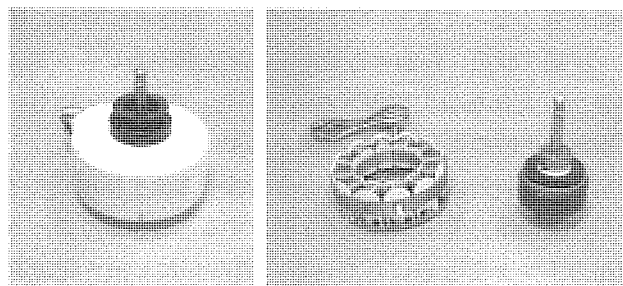


図6. 圧縮機用モータの比較



(a) モールド後 (b) モールド前

図7. 室内DCファンモータ

を約1%改善, 体積を約40%低減, 質量を約35%低減し, 省資源化にも大きく貢献している。

#### 4. DCファンモータ

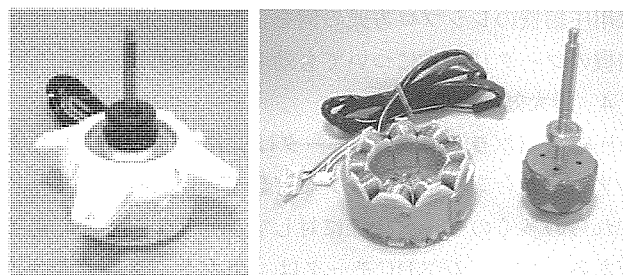
エアコンの省エネルギー化を図るため, 室外機及び室内機に搭載するファンモータは, 高効率なブラシレスDCモータを採用している。ファンモータは高効率化のほか, 特に, 低騒音化の要求が非常に強くこの両立が課題であった。ファンモータは圧縮機用途のように高出力及び耐冷媒性, 耐オイル性を要求されないため, 樹脂成型が採用できる。ロータコアは成形性に優れたプラスチックマグネットを採用した。また, 永久磁石をロータ表面に配置した表面磁石形(Surface Permanent Magnet: SPM)ロータ構造にしており, 発生トルク式(2)のうち右辺第1項の磁石トルクのみを利用し, 振動及び騒音の原因となる第2項のリラクトランストルクをゼロにした。ステータはコア幅に対するコイルエンドの比率を低くするため集中巻にした。一般的に電磁鋼板をドーナツ状に1枚ごとに打ち抜き積層して作るが, このモータは, 薄肉部に連結されたコアティースを直線状に展開して巻線作業を行い, 円形状に折り曲げる薄肉連結コアを採用した。この結果, 巻線の占積率やティース形状の設計自由度が向上し, 性能改善を図ることができた。

##### 4.1 室内DCファンモータ

室内機は熱交換器などの占有スペースが広く, DCファンモータ及び駆動回路を狭いスペースに設置する必要がある。このため, インバータ回路は小型電子部品の採用と高密度実装により小型化した。ステータコアは, 駆動回路を搭載した後モールド樹脂で成型しておりモータの構造体を形成している。半導体パワーデバイスの熱は, モールド樹脂で放熱できるため専用の放熱フィンは不要である。図7に室内DCファンモータの外観写真を示す。

##### 4.2 室外DCファンモータ

室外DCファンモータは, 低速から高速までの広範囲を高効率かつ低騒音・低振動に駆動するほか, 外風などの外乱に対しても目標回転数で駆動することが求められる。このため, モータにロータの磁極位置検出用センサを搭載し,



(a) モールド後 (b) モールド前

図8. 室外DCファンモータ

センサの出力信号に基づいて通電するセンサ付き正弦波駆動を採用し, 各回転数で最適通電位相となるよう自動調整を行い要求にこたえている。図8に室外DCファンモータの外観写真を示す。

#### 5. む す び

本稿では, 空調・家電機器のうちエアコン, 冷蔵庫を例に, 圧縮機及びDCファンモータとインバータの高効率化・小型化などを図る技術に関して述べた。これらの技術は他の機器への展開も可能であり, 今後の拡大が期待できる。空調・家電機器では, 省エネルギー化, 省資源化に対する要求は依然強く, 今後もこれらの要望にこたえるため開発を継続する所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 矢部正明: 冷蔵庫用インバータにおける省エネ技術, 第24回モータ技術シンポジウム, D-6セッション(2004-4)
- (2) 矢部正明, ほか: 過変調PWMを併用したIPMモータのセンサレス駆動, 電気学会回転機研究会資料, RM-01-160, 7~12(2001)
- (3) 馬場和彦, ほか: ブラシレスDCモータの高性能化検討, 電気学会回転機研究会資料, RM-00-141, 13~18(2000)



## ユビキタスアクセスネットワーク技術小特集に寄せて

On Ubiquitous Access Network Technologies



肥塚裕至  
Hiroshi Koezuka

インターネットはパケットベースのシンプルな転送メカニズムを用い、ベストエフォート、常時接続(定額制料金)という旧来の電話サービスとは全く異なるサービスを実現しており、その普及は通信網に大きなインパクトを与えている。インターネットが普及の兆しを見せ始めたおよそ10年前を振り返ってみると、インターネットが将来の社会生活基盤になるということは共通認識となりつつあったが、IP(Internet Protocol)層を当時の通信網の中にどのように組み込むかという議論、すなわち、IP over ATM(Asynchronous Transfer Mode)かIP over WDM(Wavelength Division Multiplexing)(Pure IP)かという議論が盛んに行われていた。しかし、インターネットはそのような議論を吹き飛ばす勢いで普及し、いまやEverything over IPの時代になり、IP技術は次世代のネットワークインフラ技術として定着しつつある。この間、IP技術は急速に進歩しており、品質制御技術、コネクション制御技術等の確立により、リアルタイムサービスが実現できるまでになってきている。

インターネットによるもう一つのインパクトは、ブロードバンド化の加速である。従来から、ブロードバンド化のキラーアプリケーションは映像と考えられており、そのためインターネットでのダウンロードの高速化要求とともに、ブロードバンド化が一気に加速されている。我が国では、e-Japan戦略の推進により、DSL(Digital Subscriber Line)加入者は1,000万を超え、FTTH(Fiber To The Home)サービス加入者も200万を超えるなど、世界で最も高速かつ低廉なブロードバンドサービスが実現している。一方、無線アクセスシステムは、通信のパーソナル化に大きな役割を果たしている携帯電話、無線LAN(Local Area Network)を中心にブロードバンド化・高機能化の流れが加速している。

このIP化とブロードバンド化を背景に、ユビキタスネッ

トワーク社会という概念が提唱されている。これは、情報のデジタル化とネットワーク化の高度化によって“いつでも、どこでも、何でも、だれとでも”ネットワークにつながるにより、今後のあらゆる産業及び社会生活に大きな恩恵をもたらすことが期待されている。しかし、ユビキタスネットワーク社会実現の過程では、ワークスタイルやライフスタイルの変化が起きるとともに、大量の情報が瞬時に流通することに対する新たな不安が発生するリスクを抱えている。現在以上に、情報セキュリティの確保や個人情報の保護が求められるようになり、ユビキタス時代にふさわしい新たなセキュリティ技術により、“便利で、安心、安全”なネットワーク社会の実現が求められている。このユビキタスネットワーク社会という言葉は、日本発の新しいIT社会の概念であり、基盤技術開発に加えて、情報と人間とのかかわりという社会科学的側面からの検討も加えることにより大きく発展し、産業の活性化、国際競争力の向上に貢献するものと期待している。

安全・安心・便利を享受できるユビキタスネットワーク社会の実現には、ネットワークインフラ技術、センサ技術、セキュリティ技術、情報端末技術等の幅広い技術が必要である。三菱電機は、重電システム、産業メカトロニクス、情報通信システム、電子デバイス、家庭電器の幅広い分野に携わる総合電機メーカーとして、多岐にわたる技術を保有し、これらの技術を組み合わせた製品開発を通じて、ユビキタスネットワーク社会の実現に取り組んでいる。今回お届けする“ユビキタスアクセスネットワーク技術小特集”では、ネットワークインフラ技術にかかわる最新の研究成果について述べる。

皆様の一層のご助言、ご指導をいただきたくお願い申し上げます。ご挨拶の次第である。

# ユビキタスサービスに向けた アクセスネットワークの構築について



菊地克昭\*



安士哲次郎\*\*



横谷哲也\*\*\*

Next Generation Access Network toward Ubiquitous Services

Katsuaki Kikuchi, Tetsujiro Yasushi, Tetsuya Yokotani

## 要 旨

近年のインターネットを利用する生活習慣の定着やパソコン等の端末機器の低価格化により、ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)やFTTH(Fiber To The Home)等のブロードバンドインフラを利用したサービスが多様化している。これにより、“いつでも”“どこでも”“だれとでも”を謳(うた)い文句にしてきたユビキタスサービスにおいて、“どんな情報も”が加わり、ブロードバンド・ユビキタスサービスという新しい世界が作られようとしている。一方、ブロードバンドインフラについては、国家政策としてのe-Japan計画の下、急伸を続けている。特に、PON(Passive Optical Network)方式の普及によりFTTHは著しい成長を続けている。これらについては、今後は、ブロードバンド・ユビキタスサービスに向けた機能高度化が必要とされる。

本稿では、これらブロードバンド・ユビキタスサービスに向けたネットワークインフラのアーキテクチャ、具備すべき機能、及び今後の課題について述べ、ブロードバンド・ユビキタスサービスに向けたネットワーク機器及びそれを支える要素技術開発に対する方向性を示す。

## 1. ま え が き

国家政策としてのe-Japan計画によりブロードバンドインフラが急速に普及している。今まではダイヤルアップがインターネットへの主なアクセス手段であったが、これにより、ADSL、ケーブルモデム、光ファイバ等高速なアクセス手段が普及した。また、これらは高速性に加えて定額料金で利用できる手軽さもあり、ユーザーの強い関心を集めた。次の段階として、これらのブロードバンドインフラを利用したサービスの多様化が考えられる。その一つがユビキタスサービスと言える。従来、ユビキタスサービスは、いつでも、どこでも、だれとでもを謳い文句にした通信のモビリティに力点が置かれていた。しかし、これらのブロードバンドインフラを利用して、どんな情報もやり取りできるように拡張されている。これにより、ブロードバンド・ユビキタスサービスという新しい世界ができつつある。

一方、このようなサービスの高度化により、ネットワークインフラもこれに対応した高度化が必要となる可能性が高い。従来は、前に述べたようにe-Japan計画の下、伝送

容量の拡大を主眼としてきたが、これらのサービスの高度化により、伝送容量の拡大に加えて高度な通信制御機能の具備が必要とされる。このためITU-T(International Telecommunications Union-Telecommunication Standardization Sector)では、NGN(Next Generation Network)と称して次世代のキャリアネットワークインフラに対する標準化の検討グループ(FGNGN: Focus Group NGN)を組織した。

本稿では、これらの状況を踏まえ、今後のブロードバンド・ユビキタスサービスを実現するための、ネットワークアーキテクチャ、具備すべき通信制御機能、及び今後の課題について述べる。さらに、ブロードバンド・ユビキタスサービスに向けたネットワーク機器及びそれを支える要素技術開発に対する方向性を示す。

## 2. インターネットの普及と利用サービスについて

この章では、近年のインターネット及びブロードバンドサービスの普及動向及びこれらを利用したサービスに対するユーザーニーズについて述べる。

インターネットの普及動向については参考文献(1)等で報じられている。図1及び図2に普及傾向を示す。図1に示すように、絶対的な加入者数ではADSLが多いが伸び率ではFTTHが著しいと言える。また、図2に示すように、1年間ですべての世代で普及率が向上し、中高生から中年層

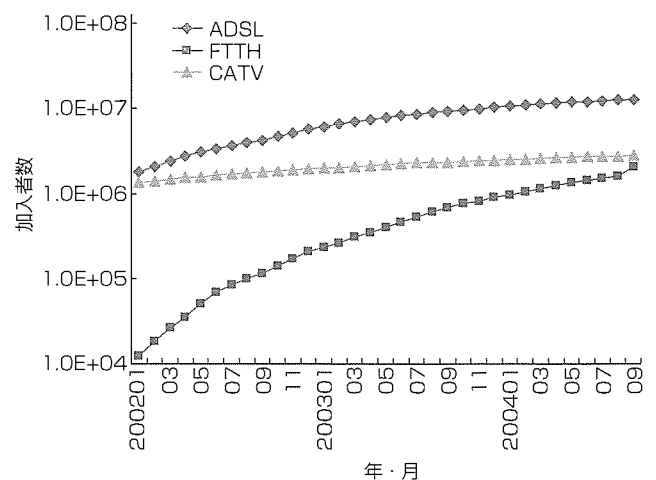


図1. ブロードバンドサービスの加入者推移(1)

では90%を超える普及率となっておりネットワークに依存した生活基盤が確立したと言える。また、60歳代以降のいわゆる高齢者層での普及率の伸びが大きく、医療・福祉用途での活用にも期待が寄せられていると言える。この傾向は、表1に示すユーザーが期待するネットワークを介した提供サービス<sup>(1)</sup>にも表れている。高齢者を中心に医療関係のサービスに高い関心が集まっている。表に示すように、種々のユビキタスサービスに期待が高まっており、近年の急激なトラフィックの増加から考えて、これらのサービスがマルチメディアで提供されることを意味していることは間違いないと言える。

### 3. ブロードバンド・ユビキタスサービスに向けたネットワークアーキテクチャ

次に、これらのブロードバンド・ユビキタスサービスを支えるネットワークインフラについて論じる。ブロードバンド・ユビキタスサービスを含めた多様なネットワークサービス提供のためにNGNの検討が急がれている。ITU-Tで各国キャリアを中心としたこれらの検討が開始されている<sup>(2)(3)</sup>。例えば、NTTでは、具体的な方針としてRENA (Resonant Network Architecture)<sup>(3)(4)</sup>の構築を打ち出している。RENAの具体的なネットワーク構成を図3に示す。これらのネットワークプラットフォームを用いて、RENAでは、下記に示す4つの要求条件の達成を目指す。

- 経済的な高速情報転送機能の実現
- セキュアなエンド・ツー・エンド通信の実現
- アクセス手段や端末種別に依存しないフレキシビリティに富む接続性の実現

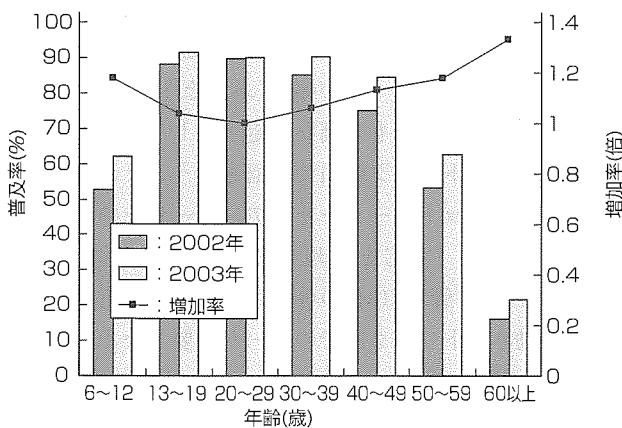


図2. 年別インターネット普及率<sup>(1)</sup>

表1. ユーザーが期待するネットワークサービスの順位<sup>(1)</sup>

| サービス                  | 全体 | 勤労者 | 家庭生活者 | 高齢者 | 若者 |
|-----------------------|----|-----|-------|-----|----|
| 自己の所有物・家族の遠隔監視/危険通知   | 1  | 1   | 1     | 3   | 2  |
| 電子カルテ・診療予約            | 2  | 2   | 2     | 1   | 8  |
| 遠隔診療                  | 3  | 3   | 3     | 2   | 5  |
| 自宅の遠隔監視/自動危機通知        | 4  | 4   | 4     | 4   | 4  |
| 自己の所有物(小物類, 日用品)の所在検索 | 5  | 6   | 6     | 6   | 1  |

- ユーザーの要求を基にした多彩な品質制御、高信頼性制御の実現

### 4. RENAに向けた技術課題の現状と今後の見通し

この章では、上記に示したRENAにおける4つの要求条件の達成に向けたアプローチと将来の課題について示す。図4にこれらを実現するための技術マップを示す。

#### 4.1 経済的な高速情報転送機能の実現

高速伝送のためには光デバイスの発展に大きな期待がかかる。今後、高速化と並び低価格化・低消費電力化が必要とされる。システム的な観点では、従来主としてLANの分野で適用されてきたEthernet技術の適用が考えられる。Ethernet技術は経済的かつ高速な情報転送が可能とされ

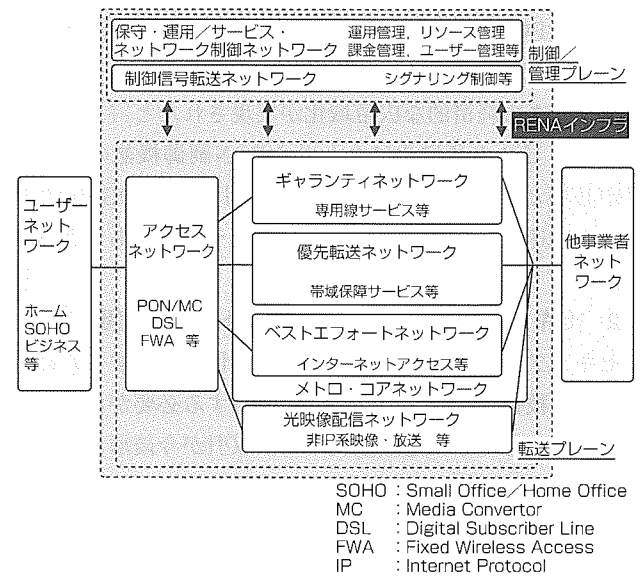


図3. RENAに向けたネットワーク構成<sup>(3)</sup>

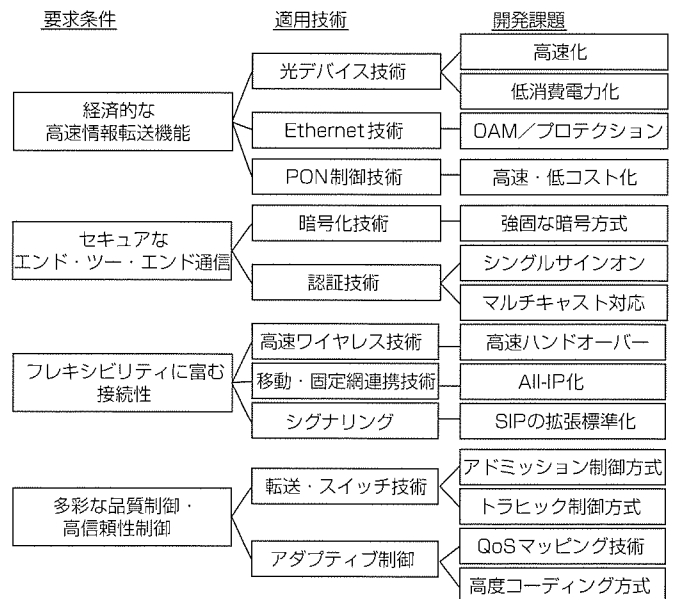


図4. RENA実現のための技術マップ

ている。Ethernetの転送速度は4年で10倍になると言われており、2007年ごろには10Gbps、2011年ごろには100Gbpsインタフェースが普及の兆しを見せると言われている。RENA構築のためには、Ethernet技術を用いた経済的な高速転送機能の実現が必要と考えられる。ただし、キャリアネットワークとして運用するための保守管理性、耐障害性が必要とされる。これについては、Ethernet OAM (Operation Administration and Maintenance) / プロテクションスイッチと呼ばれるSDH (Synchronous Digital Hierarchy) や ATM (Asynchronous Transfer Mode) と言った従来のキャリアネットワークで用いられてきた保守管理、障害回復機能を踏襲する方式がITU-T SG15で検討が開始されている。今後、これらの適用が一つの解決策と考えられる。

また、FTTHの牽引(けんいん)役として重要な役割を担ってきたPON技術がある。特に、Ethernetの特性を生かしたGE-PON (Giga-bit Ethernet PON) によりアクセスネットワークの経済的な広帯域化が実現されたと言える。今後、サービスの多様化に合わせたPON制御機能の高度化等が必要とされる。また、数年後を目指した10Gbpsクラスへの高速化・低コスト化の検討も行う必要があると言える。

#### 4.2 セキュアなエンド・ツー・エンド通信の実現

セキュアなエンド・ツー・エンド通信を実現するためには暗号化技術と認証技術について検討する必要がある。ネットワークを介した遠隔監視や商品取引が今後増加する環境下において情報の秘匿性が大きな課題となっている。このために、暗号化技術に対する重要性が高まっている。今後、NTTと当社が共同開発した“Camellia”や米国政府標準の“AES”といった強固な暗号方式の導入及び応答性能を向上させるための高速処理技術が必要とされる。一方、認証は強固なセキュリティ性とユーザー利便性の両面で検討する必要がある。認証は、端末認証とユーザー認証に大別されるが、ユビキタス環境ではユーザーが複数のアクセス手段を持つため、ユーザーの利便性を考慮して使用端末に依存しないユーザー認証が用いられるべきである。また、ネットワークへ接続する際の認証と上位のサービスでの認証を連動させる“シングルサインオン”を実現すべきと言える。そのために、各種認証サーバ間の連携が不可欠となる。さらに、認証技術においてマルチキャスト通信への対応がある。今後普及する映像配信等のマルチキャスト通信に対応するためマルチキャストツリーのためのプロトコルと認証プロトコルを連携させる必要がある。これについては、NTTを中心としてIETF (Internet Engineering Task Force) において議論がなされている。具体的には、IPv4、IPv6でそれぞれ用いられているマルチキャストツリーへのメンバー登録を行うIGMP (Internet Group Manage-

ment Protocol)、MLD (Multicast Listener Discovery) に認証機能を組み込んだIGAP (IGMP for user Authentication Protocol)、MLDA (MLD Authentication protocol) の標準化の確立と、さらに、これらと映像プログラム選択等のサービスレベルでの認証の連携が必要と言える。

#### 4.3 フレキシビリティに富む接続性

ユビキタス環境では、表1に示したように、自宅やオフィスと等の固定された場所間の通信ばかりではない。むしろ、携帯電話等の移動端末を含めた通信が主流と考えてよい。これに対して、ワイヤレスネットワークのブロードバンド化が挙げられる。これに向けては、MIMO (Multiple Input Multiple Output) による物理レイヤの高速化やMAC (Media Access Control) の高効率化が重要課題と言える。また、ワイヤレスネットワークの利便性の柱である接続性の向上が課題として挙げられる。具体的には、接続性を保証するハンドオーバー技術、FMC (Fixed Mobile Convergence) と呼ばれる固定ネットワーク・移動ネットワークの融合連携技術がある。ハンドオーバー技術については、異なったワイヤレス環境下でのシームレスハンドオーバー技術と高速移動中にブロードバンド環境を維持する高速ハンドオーバー技術が必要とされる。高速ハンドオーバーについては、ここ数年以内に120km/hでの移動中に30Mbps程度までの通信のハンドオーバーが可能となる見込みであるが、さらに、ブロードバンド化に備えて100Mbpsクラスのハンドオーバーの研究開発が必要と考えられる。

次に、FMCの動向と課題について述べる。FMCの実現によりVoIP (Voice over IP) やTV電話等のリアルタイムマルチメディア通信が均一の品質で行うことができる。これに加えて、固定ネットワークと移動ネットワーク間でのリソースの共用等が可能となる。例えば、携帯電話を使用する場合、移動ネットワークが輻輳(ふくそう)している又は移動ネットワークよりも安価な固定ネットワークがあった場合、固定ネットワーク経由で通信を行うことが可能となる。これは、ネットワークキャリア、ユーザーの双方に利益をもたらす。FMCを実現するためには、ユーザー(U) / 制御(C) / 管理(M)の各プレーンでの固定ネットワーク、移動ネットワーク間での統一が必要となる。具体的には、ユーザーデータを扱うUプレーンではAll-IP化による統一、制御データを扱うCプレーンではシグナリングプロトコルの統一が必要と言える。この候補として、セッションベースに種々の制御が可能なSIP (Session Initiation Protocol) が有力と考えられている。SIPは主としてVoIPに用いられているが、これをあらゆるメディアや通信形態に拡張していく必要がある。現状、IETFでRFC3261としてこれらの拡張性を視野に入れた規格が標準としてあるが、具体的なサービスに合わせた適用を目指してMSF (Multi-

Service Forum)<sup>(5)</sup> やITU-T FGNGNで検討が進められている。これらの標準仕様策定、サービス規定、装置への実装が急がれる。

一方、ブロードバンド化とは少し異なる方向であるが、表1にある“自己の所有物(小物類、日用品)の所在検索”というユーザーニーズからも分かるように、フレキシビリティのある接続性を提供するためには、従来通信機能を持たなかった日用品等を含めたネットワークを構築することが重要になる。このためには、センサネットワーク技術の開発が不可欠と言える。現状では、まだ研究の段階と云ってよいが、センサの小型化・低消費電力化・低コスト化の様々な観点での技術開発が急がれる。

#### 4.4 多彩な品質制御, 高信頼制御の実現

最後に、多彩な品質制御, 高信頼制御の実現に向けた方策と課題について述べる。これらの実現のためには、①ネットワークインフラとしてこれらの要求を満たすための手段の具備, ②ユーザーの要求をネットワークインフラ側に伝える手段の具備, ③アプリケーションと連携したアダプティブな制御機能の具備の3つの側面がある。①の場合、図3に示すように品質・信頼性の異なる転送網を用意することで対応する。細かな制御を行うため4.3節で述べたSIPを用いて該当通信に対する要求品質や要求する信頼性をネットワーク側に申告することによりセッション単位に最適な品質・信頼性の提供を行うことができる。この場合、必要となる技術としてネットワーク側で要求品質を保証できるか否かを判定するアドミッション制御がある。アドミッション制御についてはATMの時代から様々な研究がされてきたが、判定精度と必要処理時間との間のトレードオフが十分に解決されていない。NGNに対応したアドミッション制御についてITU-T等で検討されているが<sup>(6)</sup>、今後、高速広帯域・マルチメディア通信を収容し、実現容易なアドミッション制御方式の開発が望まれる。

次に、②について述べる。一般にユーザーの要求する品質等の要求は曖昧(あいまい)なものである。例えば、“もっと綺麗(きれい)な画質で見たい”“ダウンロードを早く”“動画の動きを滑らかに”等の感覚に基づいたものである。一方、ネットワーク側のQoS(Quality of Service)等の要求条件はITU-T. Y.1540やY.1541に規定されているように画一的なものである。これらの間の対応付けを図る技術としてQoSマッピング技術がある<sup>(7)</sup>。QoSマッピング技術に対するアプローチは幾つかあるが、ユーザー環境(ユーザーの端末機器の能力や加入しているサービス等)、動作アプリケーション、ネットワークの輻輳等の状況といった複数の観点を有機的に連携させた制御アルゴリズムの開発が必要と言える。これに関係するものとして③がある。近年のMPEG(Moving Picture Experts Group)等における階層型符号化により、必要帯域にストームの情報量を合わせるこ

とが考えられている。これらは、スケーラブルコーディング又はトランスコーディングと呼ばれマルチメディア通信の主要技術と考えられている。これらの技術と通信インフラの負荷状態、ユーザーの要求等が連携してアダプティブな品質制御を行うことが今後の課題と言える。図5に、この節で述べた種々の機能連携について示す。

### 5. 新しいネットワーク機器の必要性

4章でブロードバンド・ユビキタスサービスを実現するRENAの要求条件に対する方策と課題について述べた。総じて言うと、今後キャリアインフラの高速広帯域化は更に進むと考えられる一方で複雑な通信制御機能も導入される。このために、ユーザーデータの転送能力の阻害を防ぐために、これらの通信制御機能はネットワークのエッジ部分に配置されるSphere構造となる。これにより、キャリアネットワークとユーザーネットワークの分解点に位置するゲートウェイ機器の役割が非常に重要となる。特に、ネットワークの利用世代や使用アプリケーション・サービスのメニュー幅の広いホームユースでは、RENA対応のネットワークサービスと連携する新しいタイプのホームゲートウェイが必要となる。図6にこれらのホームゲートウェイの機能概略を示す。図に示すように、これらのホームゲートウェイでは、種々の端末が収容され、かつそれらのインタフェースの種別に関係なくネットワークインフラに接続することができる。また、既存のホームネットワークとは独立に4章で述べたようにネットワークインフラが提供する種々の通信制御機能に対応することができる。このホームゲートウェイでは、将来的にはパソコン系とAV(Audio Visual)系との融合の役割も担い、DLNA(Digital Living Network Alliance)仕様<sup>(8)</sup>やDRM(Digital Right Management)機能についても実装されると考えられる。

### 6. むすび

以上、ブロードバンド環境でユビキタスサービスを提供

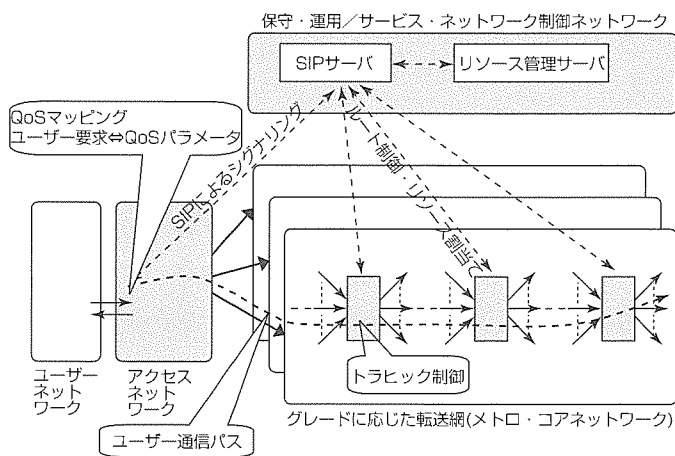


図5. 多彩な品質制御のための機能連携

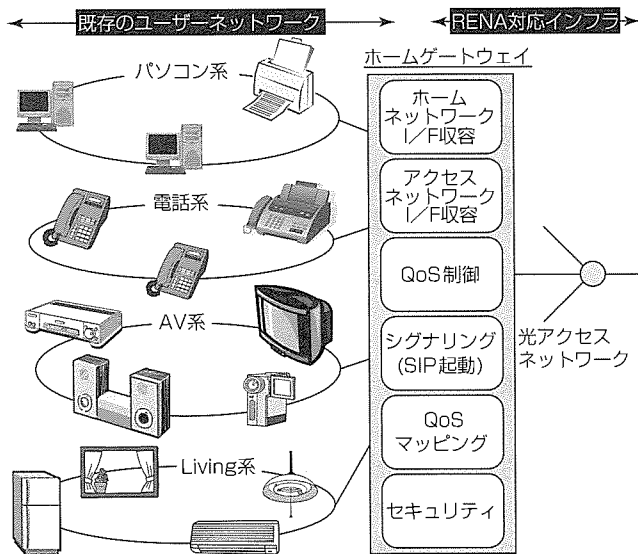


図6. RENA対応ホームゲートウェイの機能概略

るが、それらサービスの変化に柔軟に対応できるネットワーク構築とそれを支える関連要素技術開発及び装置開発が重要と言える。

参考文献

- (1) 総務省：平成16年版 情報通信白書：特集「世界に広がるユビキタスネットワーク社会の構築」(2004)
- (2) 情報通信技術委員会：ITU世界通信標準化総会(WTSA-04)の結果について，19, No.2, TTC Report (2005)
- (3) 松尾一紀：NGNの標準化動向(ITU-T, ETSI, TTC等)，電子情報通信学会 技術報告，CS2004-87 (2004)
- (4) NTTの光新世代ビジョン，日経ニューメディア別冊(2003)
- (5) 三宅 功，ほか：MSFの標準化動向，電子情報通信学会誌，85, No.12, 914~918 (2002)
- (6) 太田 宏：キャリアクラスイーサネットのOAM, QoS標準化動向，電子情報通信学会 技術報告，CS 2004-84 (2004)
- (7) 山崎達也，ほか：マルチメディアQoSマッピング技術，電子情報通信学会誌，86, No.6, 396~399 (2003)
- (8) DLNA：Overview and vision：White paper, [http://www.dlna.org/news/DLNA\\_Overview.pdf](http://www.dlna.org/news/DLNA_Overview.pdf) (2004)

特集  
II

するブロードバンド・ユビキタスサービスの概要を述べ、これを実現するためのキャリアネットワークアーキテクチャ、具備すべき機能、将来に向けての課題について述べた。また、これらのネットワークを実現するアプローチとして、高速の転送機能と複雑な通信制御機能を終端するゲートウェイ機能の開発が重要である点に触れた。今後、ユビキタスサービスはユーザーニーズに応じて変貌(へんぼう)していくと思われる。その過程をすべて見通すことは困難であ

# ギガビットイーサネットPON技術

山中秀昭\* 酒井謙行\*\*\*  
 村上 謙\* 山中重雄\*\*\*  
 中川潤一\*\*

## Gigabit Ethernet PON Technology

Hideaki Yamanaka, Ken Murakami, Junichi Nakagawa, Kaneyuki Sakai, Sigeo Yamanaka

### 要 旨

ユビキタスネットワーク社会では、家庭/事業所とセンター間のトラフィックが増大し、光ファイバによるブロードバンドアクセスが普及する。GE-PON(Gigabit Ethernet Passive Optical Network)システムは、イーサネット<sup>(注1)</sup>の標準化団体で知られるIEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers)の802.3ahにおいて標準化が進められてきた次世代アクセス方式の一つである。この方式では、アクセス区間に光カプラを用いて光ファイバを光レベルで分岐し、ファイバの効率的な利用を可能とするPON構成にギガビットイーサネット技術をベースとしたアクセス制御を取り込んだもので、通信速度として1 Gbpsを実現した。従来のPONシステムに比べて高速であり、これにより、ユーザー一人当たりの通信容量を大幅に拡大させた。また、LANで普及しているイーサネット技術を活用することによる大幅なコストダウンを実現した上に、PON構成による共有化効果によりユーザー当たりのファイバコストや局側の機器コストの低減を可能にした。

今回開発したGE-PONシステムは、以下の特長を持っている。

(1) 距離に無関係な高速アクセスサービスを提供

ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)と異なり、センターとユーザーの間の距離による伝送速度の減衰がなく、20kmまでのサービスが可能である。さらに、ベストエフォートでは上り及び下りそれぞれで最大1 Gbpsの超広帯域サービスを実現する。

(2) 高度な帯域制御と優先制御

遅延を抑え、帯域効率を向上させる独自の動的帯域割当アルゴリズムを搭載している。これにより、ユーザー間の公平性を保ちつつ、IP(Internet Protocol)電話やデータ通信といったメディアを意識した優先制御を行う。

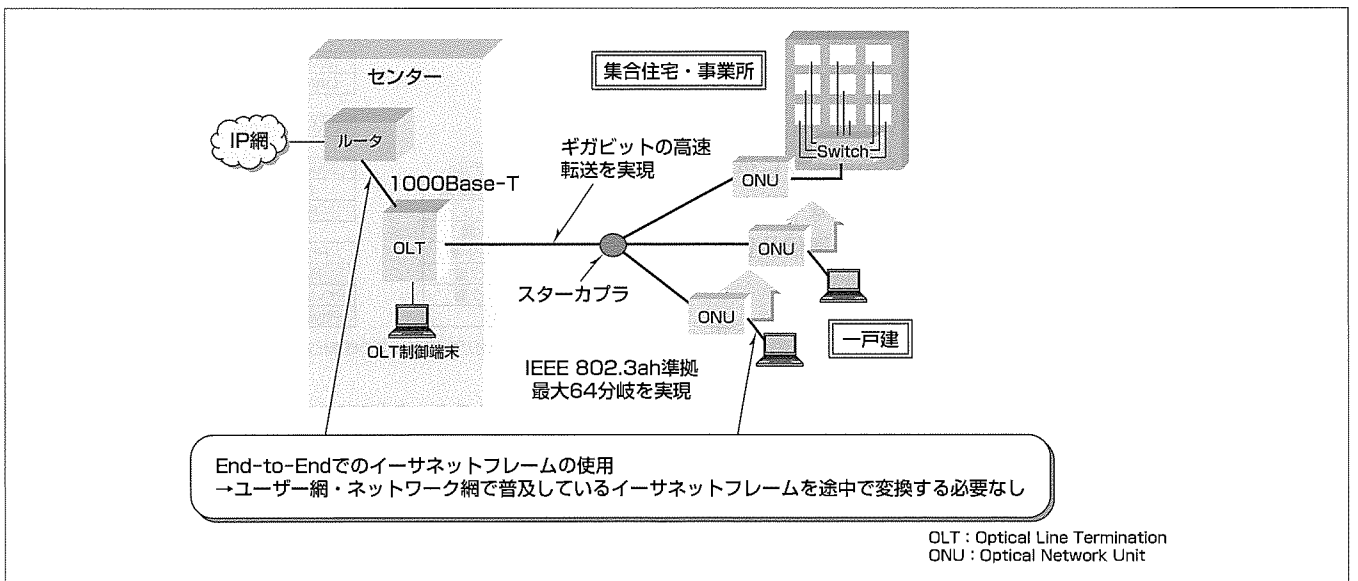
(3) 多数のユーザーを効率的に収容

高性能光モジュールを搭載している。物理レイヤは、IEEE規格を完全に満足しているだけでなく、例えば64分岐など規格以上の仕様を満たす。

(4) サービス運用に不可欠となる機能を搭載

実運用には不可欠である警報監視機能、認証機能、セキュリティ機能を三菱電機仕様で実現している。また、カスタマイズも可能となっている。

(注1) イーサネット(Ethernet)は、米国XEROX社の登録商標である。



### GE-PONシステム

GE-PONシステムは、アクセス区間に光カプラを用いて光ファイバを光レベルで分岐したPON構成にギガビットイーサネット技術をベースとしたアクセス制御を取り込んだものである。光カプラのほか、センターに配備される局内装置OLTとユーザー宅に設置される宅内装置ONUから構成される。

1. ま え が き

PONとは、安価にFTTH(Fiber To The Home)サービスを提供する方式であり、1本の光ファイバを複数のユーザーで共有する構成をとる。光ファイバの途中にスターカプラを設けて分岐させ、スター型ネットワークとも呼ばれるが、スターカプラは電源が要らず、保守も不要なので、伝送路の複数個所に設置しながら柔軟なネットワークを設計できる。また、敷設する光ファイバを節約でき、局舎面積を小さくできるため、今後のユーザー数の増加に伴い、光アクセスネットワークの主流になっていくと考えられている<sup>(1)</sup>。

このPON方式において、イーサネットフレームを基本としたギガビットでのデータ転送を行うGE-PONの標準化が、IEEE802.3ahタスクフォースで進められてきた。PONにイーサネット技術を適用するメリットとして以下がある。

- (1) イーサネットは、これまで十分な技術蓄積があり、デバイスも普及しているため、安価なシステムを構築できる。
- (2) 広く普及しているIP通信を効率良く収容できる。
- (3) レイヤ2スイッチングを行うためプロトコル的にシンプルであり、プロビジョニング情報も少なく、簡易な保守管理が可能である。

ここでは、GE-PONの概略を説明し、標準化動向を述べた後、開発したGE-PONシステムの主要技術としてバーストピット同期技術について述べる。

2. GE-PONシステムの概要

GE-PONシステムは、スターカプラのほか、センターに設置するOLTとユーザー宅に設置するONUから構成されている。両者の間は下り(センターからユーザー方向)に1,490nm, 上り(ユーザーからセンター方向)に1,310nmの波長を割り当てたWDM(Wavelength Division Multiplexing)方式を使って、1本を複数の光ファイバのように扱いながら通信を行う。また、帯域制御と優先制御も可能なので、IP電話や画像配信などのサービス多重時の通信品質も確保できる。

今日LANで使われている技術であるギガビットイーサネットを応用し、センターからユーザー宅までイーサネットのフレームをそのまま送受信する。従来の光アクセス技術と異なり、この区間に他のプロトコルへの変換機能はない。

GE-PONは、従来のIEEE802.1Dブリッジアクセスをベースとしており、物理的には一つのPON上に複数のブリッジポートを見せるため、論理リンクと呼ばれる仮想的なブリッジポートを導入している。図1にGE-PONのアーキテクチャを示す。なお、同図では、一つのONUに一つの論理リンクが存在する様子を示しているが、複数の論理

リンクを一つのONUに設定することも可能である。

3. 国際標準化動向

アクセスネットワークへのイーサネット技術の適用を目的として、2000年11月のCFI(Call For Interest)を皮切りに、IEEE802.3ahにおいてEFM(Ethernet in the First Mile)の議論が開始された<sup>(2)</sup>。802.3ahは、2001年1月から2004年4月までの間に計22回の会合を行い、2004年6月、IEEE-SA Standards Board Review Committee(RevCom)にP802.3ah Draft 3.3を提出した。現在RevComでは、Maintenance revision #8 task forceにおいてSponsor Ballotを行っており、Sponsor Ballotを完了させ、Standard Ballotに進む予定である<sup>(3)</sup>。

GE-PONにおけるプロトコルスタックと、802.3ahにおける標準化対象範囲の関係を図2に示す。

802.3ahでは、3つのサブタスクフォース(Optics, OAM(Operation Administration and Maintenance), P2MP(Point-to-MultiPoint))に分かれた審議が行われた。それぞれの審議内容を表1に示す。

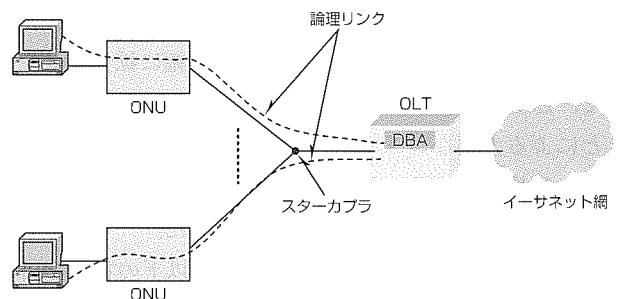
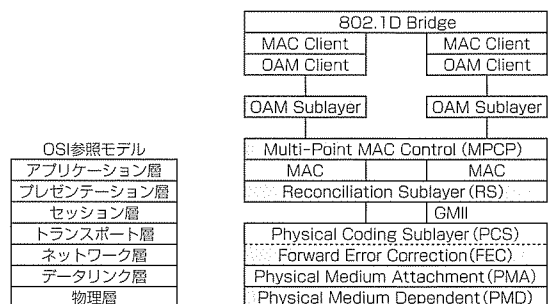


図1. GE-PONのアーキテクチャ



(注) 網掛け部分が802.3ahでの標準化対象範囲を示す。

図2. プロトコルスタックと802.3ahにおける標準化対象範囲の関係

表1. サブタスクフォースの審議内容

|        |                                      |
|--------|--------------------------------------|
| Optics | PMD(PX10及びPX20)における光パラメータ            |
| OAM    | OAMサブレイヤにおけるフレームOAM(警報監視・通知, ループバック) |
| P2MP   | MPCPプロトコル, RSにおけるロジカルリンク処理, FEC      |



802.3ahでは、PONの帯域制御方法(Dynamic Bandwidth Allocation : DBA)や優先制御方法といった機能についての規定は行っていない。これらの機能を実現する枠組みを規定するのみであり、実システムでは802.3ahの枠組みに則った上位機能の実現が必要となる。

また、802.3ahでは、GE-PONにおけるセキュリティ機能(ONUの認証方法やPON区間の暗号方法)の議論も行われた。現在は802.1AEにおいてレイヤ2のセキュリティ機能全般(MAC(Media Access Control) Security)を、802.1afにおいてレイヤ2の認証キー管理(MAC Key Security)を議論している。

#### 4. バーストビット同期技術

##### 4.1 バーストビット同期機能の必要性

GE-PONシステムにおいては、OLTの受信部、すなわち、各ONUからの上り信号(バースト)の同期を確立する技術が鍵(かぎ)となる。ここでは、バーストビット同期技術を説明した後に、開発したLSI(Large Scale Integration)の仕様を述べる<sup>(4)</sup>。

図2に示したように、GE-PONシステムのプロトコルスタックにおいて、物理レイヤはPMD, PMA, PCSの各レイヤから構成され、PMDは伝送メディアである光ファイバに対する伝送信号の送受信機能を実現する。PMAは伝送速度に従ったビットタイミングやSerialize/Deserializeを行い、PCSは伝送符号の付加及び解除を行う。図3に示すように、OLTの上り方向受信部におけるPMAレイヤには、各ONUから到着する信号(バースト信号)の同期をとる機能が必要となる。

GE-PONは、従来のPoint to Pointの規格である802.3zのフレームフォーマットをベースとしており、ラインコードも同じ8B10B符号である。また、バースト伝送に使用するオーバーヘッドについても、8B10B符号のIDLEパターンが指定されている。図4に上りバーストデータのフォーマットを示す。バーストオーバーヘッドには光送信のOn/Off制御の収束時間(T-on/T-off)、光2R機能の収束時間(Treceiver\_settling)、ビット同期機能の収束時間(T\_CDR)、及びコードグループアライメント(バイト同期)の収束時間(T-Code\_group\_align)の各領域が定義されて

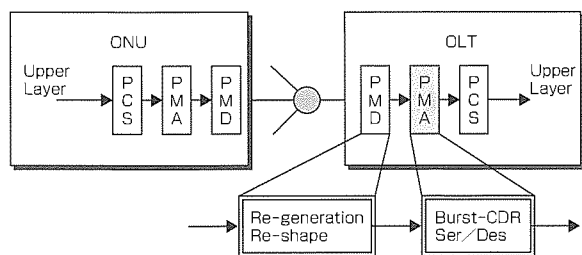


図3. GE-PONのバーストビット同期機能

いるが、同図に示すようにそれらの領域はすべてIDLEパターンであり、主信号上にそれらの境界を識別するものは存在しない。

##### 4.2 バーストビット同期機能の要求条件

GE-PONシステム適用条件を示す。

- (1) バースト長：94~131,072バイト
- (2) 無信号期間(バースト間隔)：規定なし
- (3) パルス幅ひずみ：PON上(光信号)で44%以上
- (4) 引き込み時間：光受信と合わせ800ns以下
- (5) ジッタ耐力：IEEE802.3ah規定準拠
- (6) 伝送路ビット誤り率：10e-12以下

当初、市販のSERDES(SERialize/DESerialize)LSIの適用を検討したが、もともと連続信号への適用を前提とした設計がされているLSIであるため、バースト信号への適用はLSIメーカーの保証外である上に、実機による評価で上記要求条件の最悪ケースを満たせなかった経緯があり、当社で専用LSIの開発に踏み切った。

##### 4.3 多相サンプリング方式の採用

OLTにはPONの伝送レートを決定する基準クロックが存在するため、クロック再生を行う必要はなく、また、クロック再生をバーストで行うと同期引き込み時間が非常に長くなる。したがって、基準クロックから生成した多相クロックで受信データを高速サンプリングし、エッジ判定及び最適位相選択によりデータ識別を行う方式を採用した。この多相サンプリング方式には、上記のほか、特性がばらばらなく、性能見積りが容易である等の利点がある。この方式によるバーストCDR(Clock and Data Recovery)回路のブロック構成を図5に示す。

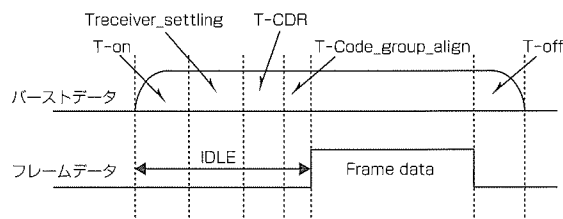


図4. GE-PONの上りバーストデータのフォーマット

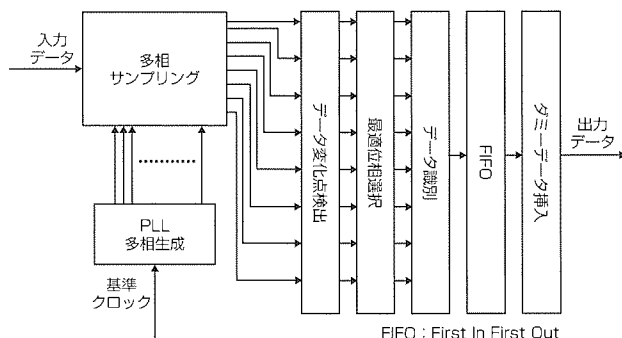


図5. 多層サンプリング方式による最適位相選択回路

表 2. LSI主要諸元

| 項目    | 内容                    |
|-------|-----------------------|
| プロセス  | SiGe (0.25 $\mu$ m)   |
| 回路構造  | BiCMOS                |
| ゲート規模 | 約80kゲート               |
| 動作周波数 | 1.25GHz/625MHz/125MHz |

表 3. 主要評価結果

| 項目        | 特性                 |
|-----------|--------------------|
| パルス幅ひずみ耐力 | $\pm 64\%$ 以上      |
| 同期引き込み時間  | 40ns以下             |
| 周波数範囲     | 1.25G $\pm$ 100ppm |
| バースト長     | 94~131,072バイト      |
| ジッタ耐力     | IEEE802.3ah規定満足    |

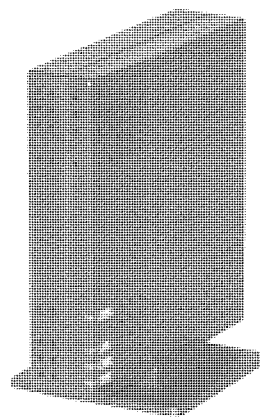


図 6. ONUの外観

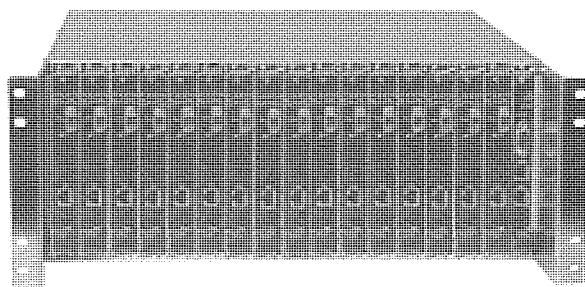


図 7. OLTの外観

#### 4.4 開発したLSIの概要

多相サンプリング方式における基本パラメータであるサンプリング相数について、パルス幅ひずみ、同符号連続ビット数、ジッタ等の条件から8相が最適との検討結果を得た。

また、バーストオーバーヘッドのパターンや伝送路ビット誤り率の条件を基に、誤同期及び同期見逃しが発生する頻度が年に数回以下となるよう、同期保護段数及び誤り許容ビット数を計算し、同期引き込み条件を定めた。これによりキャリアクラスの伝送品質を保つことができる。

LSI化設計において、高速動作が必要となるサンプリング部及びPLL (Phase Lock Loop)・多相クロック生成回路にはBipolarプロセスを採用し、他のロジック部にはCMOS (Complementary Meta Oxide Semiconductor)プロセスを使用することにより、消費電力の効率化を図った。

#### 4.5 バーストビット同期LSIの主要諸元と諸特性

開発したLSIの主要諸元を表2に示す。また、このLSIの機能・特性評価を行い、所期の動作及び性能を確認した。主な評価項目と内容を表3に示す。

### 5. 開発したGE-PONシステム

#### 5.1 システムの特長

特長を以下に示す。

- (1) 最大1Gbpsの高速アクセスサービスを安価に提供可能
- (2) 高度な帯域制御と優先制御
- (3) 多数のユーザーを効率的に収容
- (4) サービス運用に不可欠となる機能を搭載

#### 5.2 外観

図6と図7に、ONU及びOLTの外観をそれぞれ示す。

### 6. むすび

ユビキタスネットワーク社会の到来で、あらゆる設備や

機器に情報処理デバイスが組み込まれ、あらゆるものが接続されるようになると言われている。その結果、ネットワークへの常時接続が不可欠となり、端末数の増加でブロードバンドアクセスが不可欠となる。各家庭とセンター間のトラフィックが顕著に増大し、FTTHに向けた動きが活発化される。

国内の主要通信事業者の多くは、GE-PONでの光アクセスサービス戦略を明らかにしている。来るべき本格的なブロードバンド・ユビキタス時代において、当社は、FTTHのリーディングベンダーとして貢献していきたいと考えている。

#### 参考文献

- (1) 中西健治, ほか:ブロードバンド光アクセスシステムの標準化動向, 電子情報通信学会技術研究報告, CS2002-114, 37~42 (2002-11)
- (2) IEEE Draft P802.3ah.
- (3) 村上 謙, ほか:IEEE802.3ahにおける標準化動向とシステム構築上の課題, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2003-24, 1~6 (2003-6)
- (4) 小崎成治, ほか:ギガビット対応バーストビット同期回路の開発, 電子情報通信学会技術研究報告, CS2003-61, 43~48 (2003-7)

# メトロアクセス技術

## Metro-Access Technology

Tatsuo Hatta, Atsushi Kawamura, Keisuke Matsumoto, Takeshi Saitoh

### 要 旨

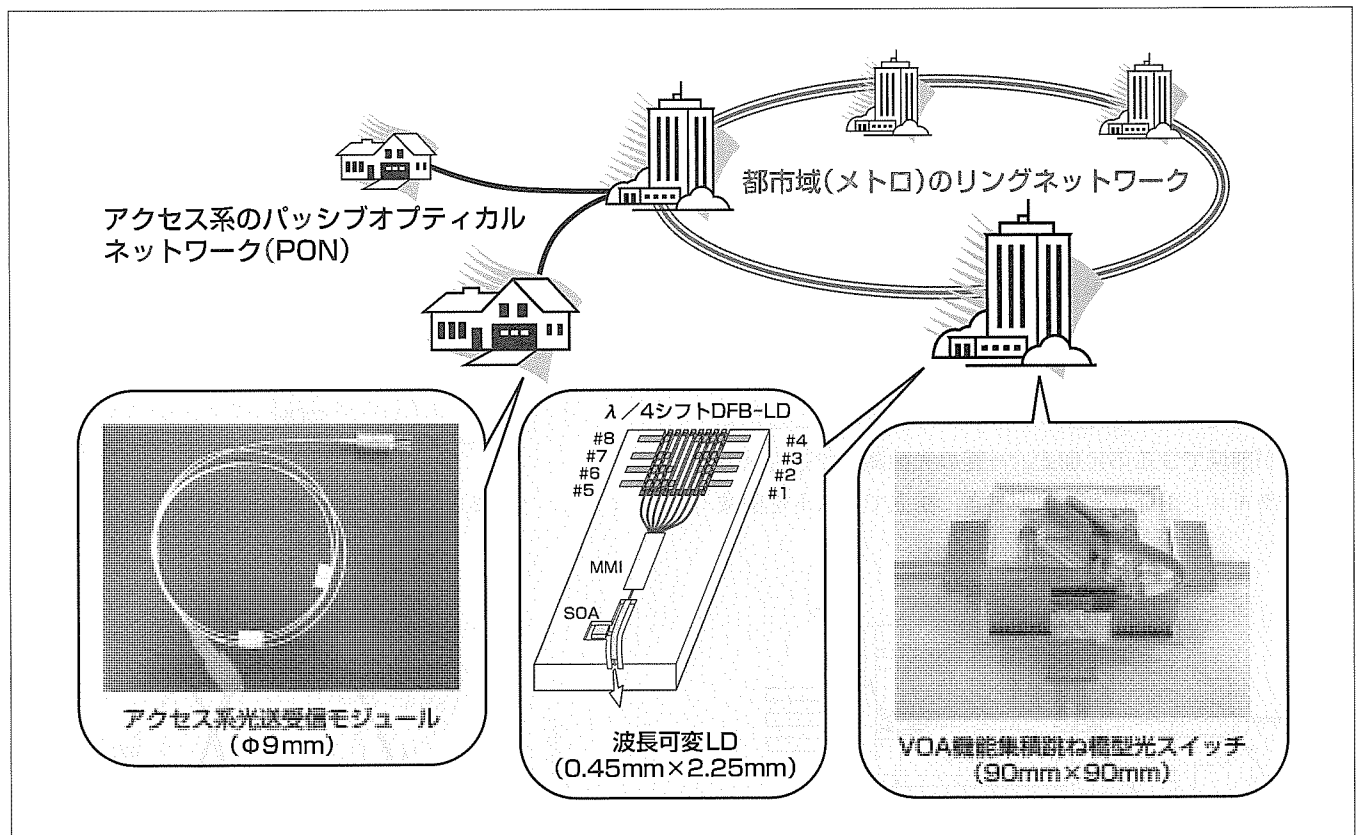
都市域内のアクセス系ネットワークやその上位のメトロネットワークへの適用に向け開発が進む光送受信モジュール、波長可変LD (Laser Diode)、跳ね橋型光スイッチについて、その技術を述べる。

一家庭を一本の光ファイバで結ぶため、アクセス系光送受信モジュールには2波長の多重機能が必要となる。この機能を回折光学で実現した。回折格子の材料に通常のガラス材よりも2倍以上高い屈折率を持つシリコンを採用することで、回折損失を低減している。

波長可変LDは、単一波長で発振するDFB (Distributed Feedback) -LDを同一基板上にアレー集積化した構成である。30nm以上の可変帯域を持つため、Cバンド全域又はLバンド全域を一つの波長可変LDでこなすことができる。

さらに、波長の固定されたDFB-LDの集積であるため、波長安定性に優れ、高い信頼性が得られるのが利点である。

跳ね橋型光スイッチは、32経路の光スイッチングに加え、信号の可変減衰機構を備えた機械式駆動のポリマ導波路型光スイッチである。9 cm四方のパッケージの中に導波路フィルムと圧電素子を搭載したシンプルな構成ながら、各経路独立に400 $\mu$ sの短時間で任意の減衰量を設定することができる。メトロアクセス網ではネットワークの切換え操作やメンテナンスが頻繁に発生するが、そのような損失変動がWDM (Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重) 伝送に及ぼす影響を最小限に抑える等、新しい活用法が期待される機能である。



### メトロアクセス網とキーデバイス群

FTTH (Fiber To The Home) の広がりによってメトロアクセス網の大容量化が進む。その役割は、アクセス系で発生した大量の情報を低コストに効率良く束ね転送することにある。家庭とネットワークをつなぐ一方向の光送受信モジュール、また、その上位のリングネットワークで使われる波長可変LDやVOA (Variable Optical Attenuator : 光可変減衰器) 機能集積光スイッチは、いずれもネットワークの柔軟性と大容量転送を実現するキーデバイスである。

1. ま え が き

家庭まで光ファイバが届く社会が現実のものとなり、安価で需要の増減に柔軟に対応できるネットワークの整備が急ピッチで進んでいる。本稿では、このような流れに沿って実用化に向け開発が進むアクセス系光送受信モジュール、波長可変LD、跳ね橋型光スイッチの技術について述べる。

アクセス系光送受信モジュールは、一般家庭に置かれる最も身近な光通信デバイスである。このモジュールは、一本の光ファイバで双方向通信ができるよう2波長の多重機能を持っている。家庭に置かれることから低コスト化が最も重要視されるが、そのようなニーズにこたえ得る手段の一つとして、三菱電機は回折光学素子を用いたモジュールの開発を進めている。

また、一般家庭から集められた大容量の情報を効率的に転送する上位のネットワークでも、光レイヤでの処理が進む光ファイバの伝送容量を高めるWDM技術を用いれば、敷設済みの光ファイバの伝送能力を一気に数十倍以上に高めることができる。任意波長対応のOADM(Optical Add Drop Multiplexing：光挿入分岐多重)用途として、波長可変LDと光スイッチの必要性も高まっている。波長可変LDとしては、波長制御が容易なアレー集積構成をとった。また、光スイッチとしては、独自の跳ね橋構造をスイッチング動作のみならずVOAにも適用して、1枚のポリマ導波路に機能を集積した。

2. アクセス系光送受信モジュール

DOE(Diffractive Optical Element：回折光学素子)を使った光送受信モジュールの構造を図1に示す。回折による損失を補う高い結合効率と、LD、PD(Photo Diode)の分離距離を得るため、LDと微小球レンズをシリコンサブマウント上に一体に実装し、2枚レンズ構成にしている<sup>(1)</sup>。

LDとPDを一つのCANパッケージに搭載することにより部品が削減できるのに加え、一度の光軸調心で送受双方光のアライメントを行うことができ、組立てコストを削減

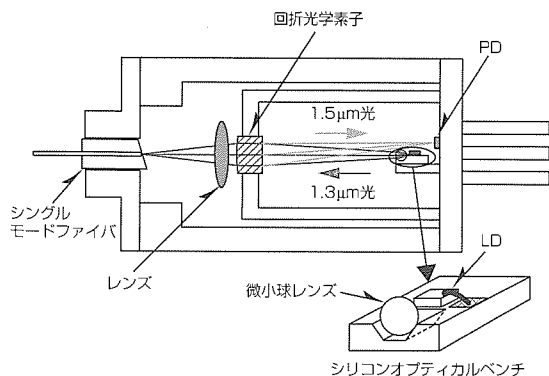


図1. 光送受信モジュールの構造

できる。

次に、回折光学格子の設計について述べる。送信側LDの波長変動の影響を回避し、より大きな分離角を得るため、送信側の1.3μm光にとって0次の、受信側の1.5μm光に対しては-1次の回折効率が最大となるような回折格子の設計を行った。このような波長選択性を得るためには、エシュロン型の回折格子<sup>(2)</sup>が適している。図2にエシュロン型回折格子の構造を示す。構造を決定するパラメータは、一段の高さp、階段の段数m、格子周期Λ、回折格子材料の屈折率nである。一般に、格子周期Λが波長λに対して十分大きい場合、1次の回折効率η<sub>1</sub>は次式で与えられる。

$$\eta_1 = \left| \frac{1}{\Lambda} \int_0^\Lambda \exp\{j\phi(\chi)\} \exp\left(-j\frac{2\pi\lambda\chi}{\Lambda}\right) d\chi \right|^2 \dots\dots(1)$$

ここで、φ(χ)は位相シフトを表す関数であり、エシュロン型の回折格子の場合、

$$\phi(\chi) = \frac{2\pi(n-1)p}{\lambda} \left[ \frac{m\chi}{\Lambda} \right] \dots\dots\dots(2)$$

と表すことができる。ただし[y]は、ガウス関数であり、yを超えない最大の整数を表す。

式(1)を基に、両波長の位相条件を満たす解をシミュレーションで確認した。図3は、横軸にエシュロン格子の高さpをとり、段数を6段としたときの、回折効率の計算結果を示している。回折格子の高さpとしては、1.3μm光の0次回折と1.5μm光の-1次回折が同時に最大値をとる0.52μmを選択した。回折格子の材料には、通常のガラス材よりも2倍以上高い屈折率を持つシリコンを採用するこ

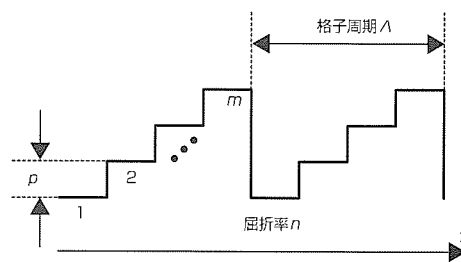


図2. エシュロン型回折格子の構造

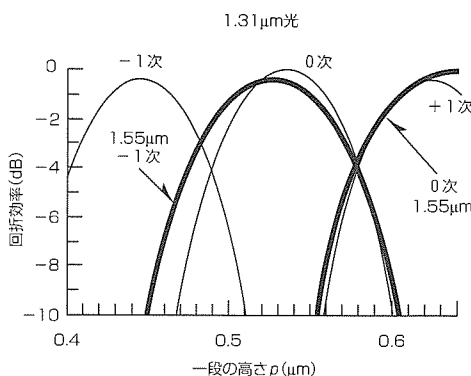


図3. 回折効率の高さp依存性計算結果

とで、回折損失を低減している。

LDとPDを一体にすることで部品数を減らすことができる一方で、送受間干渉の影響を受けやすいという課題も存在した。送受間干渉には光学的なものや電気的なものの2種類がある。光学的クロストークの主因はLDの背面光にあるため、機構設計を工夫して、背面光が受光用PDへ当たらない構造とした。一方、電気的クロストークは、空間を伝搬する電磁界の結合が主因となる。そこで、モジュール内部の電磁界解析を行い、不要放射電界を遮蔽(しゃへい)するシールド構造を適用した。

表1に、試作したモジュールの主要特性を示す。LDとファイバの結合効率に関しては、設計どおりの良好な特性が得られている。ファイバとPDの結合効率についても回折効率の理論限界に近い-2 dBが得られているが、アクセス系のネットワークの主流であるPON(Passive Optical Network)システムでは受信感度が非常に重要であるため、今後も引き続き回折効率の向上に向け改良を加えていく予定である。

### 3. 波長可変LD

ネットワークに柔軟性を付与するキーデバイスである波長可変LDは、単一波長で発振するDFB-LDを同一基板上にアレー集積化した構成で実現した。異なる発振波長のDFB-LDが集積化されており、そのうちのひとつを選択することで波長を変えるものである。出力される波長は離散的であるが、温度制御を行うことで広い波長範囲を動作させることができる。また、他の波長可変方式と比較すると、波長安定性に優れ、波長制御が容易という利点がある。さらに、既存のDFB-LDを組み合わせた構造のため、高い信頼性が期待できることも大きな利点である。

以下に、素子の作製結果、及び長期信頼性試験結果について述べる。8エレメントのレーザアレーをMMI(Multi-Mode Interference: マルチモード干渉)カプラを用いて一つの出力に束ねる構成をとった。出力側には半導体増幅器(SOA)を集積化して導波路での伝搬損失を補償している。SOA部分には端面付近に曲がり導波路構造を導入している。レーザアレーは波長単一性の高い $\lambda/4$ シフト回折格子構造のDFBレーザで構成され、EB(Electron Beam)

表1. 試作したモジュールの主要特性

| 項目          | 特性       | 備考                          |
|-------------|----------|-----------------------------|
| ファイバ端光出力    | 2 dBm    |                             |
| 最小受信感度      | -24.7dBm | 1.25Gbps, 消光比 6 dB          |
| LD-ファイバ結合効率 | -5 dB    | 回折損失を含む                     |
| ファイバ-PD結合効率 | -2 dB    |                             |
| 反射減衰量       | 15dB     | $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ |
| 電気的クロストーク   | -100dB   | 測定周波数400MHz                 |
| 光学的クロストーク   | -50dB    |                             |

露光により8エレメントそれぞれの発振波長間隔が異なるように回折格子ピッチを変化させている。素子全体のサイズは $450\mu\text{m} \times 2,250\mu\text{m}$ 、レーザの共振器長は $400\mu\text{m}$ 、SOA長は $600\mu\text{m}$ である。素子両端面にAR(Anti-Reflect)コーティングを施している。

図4に一つのエレメントレーザの駆動電流を固定したときの光出力-SOA電流依存性を示す。30mW以上の高い光出力が得られている。

図5に各エレメントの発振スペクトルを重ね書きした結果を示す。サイドモード抑圧比40dB以上の良好な発振特性が得られている。波長帯域は12.3nmである。

SOAを150mA一定電流で駆動し、50℃で光出力が10mW、20mWになるようにLD電流をAPC(Automatic Power Control)駆動し、動作電流の変化を測定した。図6に4,000時間の寿命試験を行った結果を示す。顕著な劣化

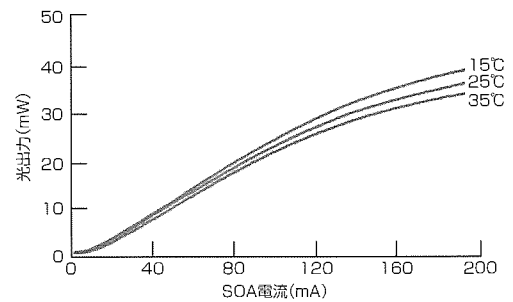


図4. 波長可変LDの光出力-電流特性

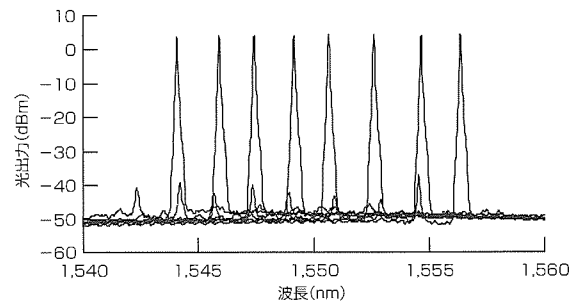


図5. 波長可変LDの発振スペクトル

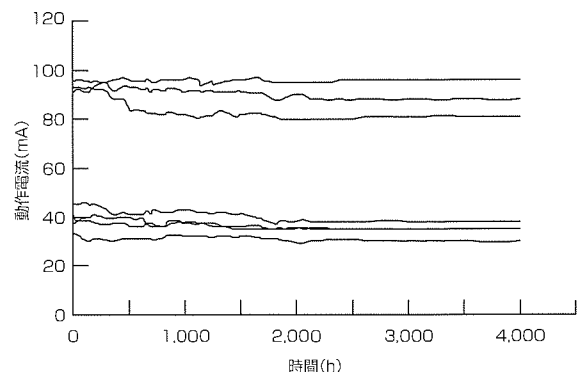


図6. 波長可変LDの長期寿命試験結果

は見られず、既存のDFBレーザと同程度の高い信頼性が期待できることが分かった。

#### 4. 跳ね橋型光スイッチ

簡単な操作で柔軟に制御できる任意波長対応のOADMを実現するため、32経路の光スイッチングと信号の可変減衰機構を備えた機能集積型の光スイッチを開発した。

9 cm四方のパッケージの中に導波路フィルムと圧電素子を搭載したシンプルな構成で32経路のVOA機能集積光スイッチを実現した。光スイッチの心臓部はポリマ導波路フィルムであり、素材の柔軟性を利用して機械的に光信号経路を切り換える跳ね橋構造をとる<sup>(3)</sup>。図7に導波路及び各機能素子のレイアウトを示す。スイッチアレーで信号の分岐・多重を切り換え、さらに、後段のVOAで信号のパワーを調節することができる。VOA機構にも図8に示すような機械式駆動を適用した。圧電素子とばねの間に挟まれた導波路を上下させることにより、減衰量を調整する。減衰範囲は寸法 $L_1$ と $L_2$ を選択することにより最適化することができる。図9に、圧電素子への印加電圧と光減衰量との関係を示す。この開発では、100Vで30dB以上の減衰を得るため、 $L_1=1,050\mu\text{m}$ とした。

機械式駆動を用いる跳ね橋型光スイッチの最大の特長はその応答速度にあり、光スイッチの切り換え、又は所望の減衰量への設定を400 $\mu\text{s}$ の短時間で完了することができる。このような高速のVOAを集積したスイッチは、波長多重信号を頻繁に切り換える将来型のネットワークの制御に重要な役割を果たすものと考えられる。

#### 5. むすび

メトロアクセス技術を支える次世代のキーデバイスのうち、アクセス系光送受信モジュール、波長可変LD、跳ね橋型光スイッチについて述べた。低コストと高機能を同時に提供するこれらのデバイスが、ネットワークの利便性を向上させるものと期待している。

#### 参考文献

- (1) Kawamura, A., et al.: Bidirectional Module Based on a Diffractive Optical Element, 30th European Conference on Optical Communication, WE3.6.2 (2004)
- (2) Swason, G. J., et al.: Optical Engineering, 28, 605

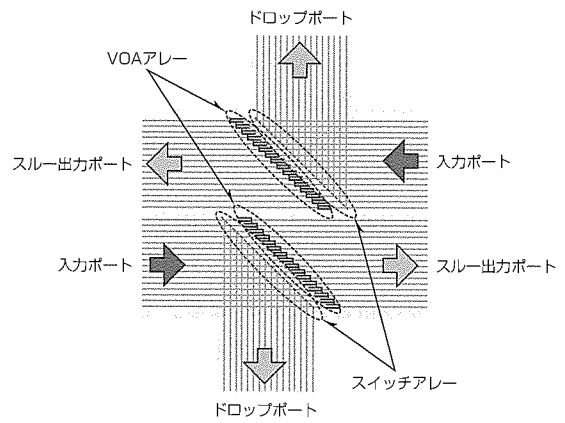


図7. ポリマ導波路上への機能素子レイアウト

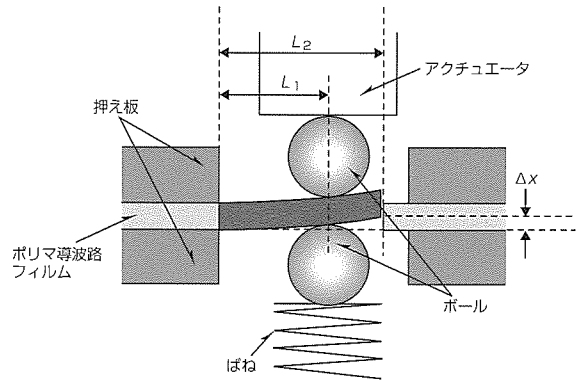


図8. VOA機構

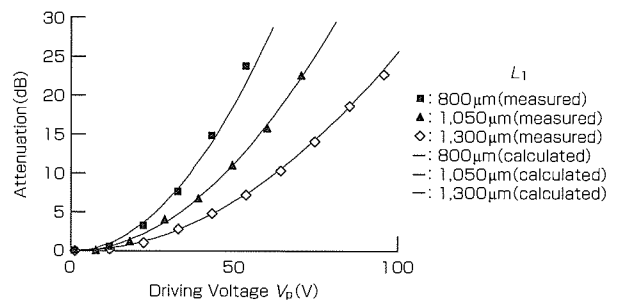


図9. 印加電圧と光減衰量の関係

(1989)

- (3) Tabata, S., et al.: 32x32 Bascule Optical Switch with Polymer Waveguide, 29th European Conference on Optical Communication, Tu3.5.2 (2003)

# 大容量無線アクセス技術

城倉義彦\* 東中雅嗣\*  
 久保博嗣\*\* 平 明德\*  
 永井幸政\* 須賀寛祥\*

Broadband Wireless Access Technologies

Yoshihiko Shirokura, Hiroshi Kubo, Yukimasa Nagai, Masatsugu Higashinaka, Akinori Taira, Hiroyoshi Suga

## 要 旨

低コストで簡易に家庭やオフィスにIPネットワーク環境を提供する無線LANが急速に普及している。最も普及しているIEEE802.11 a/b/gでは物理速度が54Mbps, 実効速度が30Mbps程度まで大容量化されている。しかし、画像伝送, 高速ファイル転送, 等の高速信号をマルチユーザー環境でかつ品質を確保して使用するには無線帯域の容量が不足している。また、無線による簡易接続性を維持したまま、有線通信(ADLS(Asymmetric Digital Subscriber Line), FTTH(Fiber To The Home))と同等な大容量化も求められている。

本稿では、無線アクセスの大容量化技術として、以下の技術について述べる。

- (1) 無線LANの更なる大容量化として、実効速度100Mbps以上の技術開発を進めているIEEE 802.11n
- (2) 物理レイヤの通信品質向上・通信容量拡大技術として最も注目されているMIMO(Multiple Input Multiple

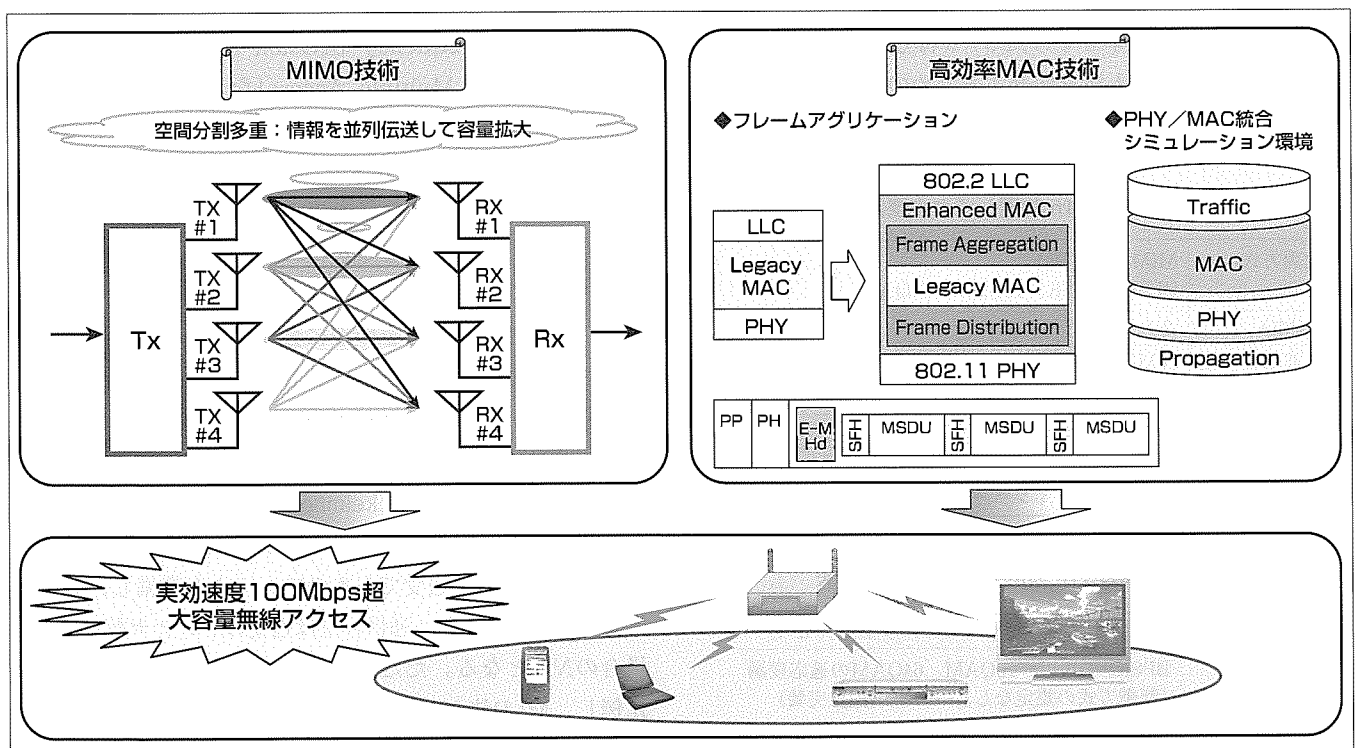
Output)技術

- (3) 物理レイヤの大容量パスを効率良くユーザーに提供する高効率MAC(Medium Access Control)技術, 及びその性能評価に不可欠のPHY(PHYSical layer)/MAC統合シミュレーション環境

MIMO技術は、複数の送信・受信アンテナを使用することにより、周波数帯域を拡大することなく、通信品質向上・通信容量拡大を実現する技術である。これに加えて、複数のアンテナを活用することにより、干渉波の除去も可能となり、無線LANのみでなく、セルラ通信システム、更にはその他の無線通信システムへの適用が計画されている。

高効率MAC技術は、現在の802.11a/b/gのMACでは物理レイヤが数百Mbpsに大容量化してもユーザーに対する実効速度は数十Mbps程度で飽和してしまう問題をフレームアグリゲーション等により解決する技術である。

特集 II



## 無線アクセスの大容量化技術

無線アクセスの大容量化には物理レイヤの大容量技術とその大容量物理パスを効率良く使用する高効率MAC技術が不可欠である。物理レイヤの大容量化にはアンテナ数に応じた大容量化が可能なMIMO技術が注目されている。高効率MACは、複数のフレームを結合して無線伝送効率を向上させるチャネルアグリゲーション技術が有力である。高効率MAC開発にはPHY/MACを統合評価できるシミュレーション環境も必要である。

\*情報技術総合研究所 \*\*同研究所(工博)

1. ま え が き

無線LAN等の無線アクセスシステムにおいて、画像伝送、高速ファイル転送、等の高速信号をマルチユーザー環境でかつ品質を確保して使用するためには無線帯域の更なる大容量化が必要であり、そのための技術開発が積極的に進められている。

無線アクセスの大容量化のためには、物理レイヤの大容量化技術とその大容量物理パスをユーザーに効率良く提供する高効率MAC技術が不可欠である。

本稿では、次世代高速無線LANの開発、標準化を行っているIEEE802.11nの概要、物理レイヤの大容量化技術として最も注目されているMIMO技術、及び物理レイヤの大容量パスを効率良くユーザーに提供する高効率MAC技術について述べる。

2. 次世代高速無線LAN IEEE802.11n

現在最も普及しているIEEE802.11 a/b/gでは、物理速度が54Mbps、実効速度が30Mbps程度まで大容量化されている。802.11nでは、既存規格との後方互換性を確保しつつ実効速度100Mbps以上の大容量化技術の標準化に取り組んでいる。802.11nで検討中の物理レイヤの主要諸元素を表1に、MACレイヤの主要諸元素を表2に示す。主要諸元は今後の検討により順次改定される見込みである。

802.11nでは、変調方式、周波数帯域幅、アクセス方式(802.11eベース)は従来そのままとし、MIMOの適用、誤り訂正のための符号化率を下げた5/6符号化率の適用、及びマルチパス遅延波干渉を回避するためのガードインタバルを従来の1/2にするモードを用意することにより、物

表1. IEEE802.11n 物理レイヤ主要諸元素

|        |                                       |
|--------|---------------------------------------|
| 変調方式   | MIMO-OFDM<br>BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM |
| MIMO   | 2×2(不可欠) 3×3, 4×4(オプション)              |
| 周波数帯域幅 | 20MHz, 40MHz(日本では20MHzのみ)             |
| 符号化率   | 1/2, 2/3, 3/4, 5/6(5/6を追加)            |
| GI     | 400nS, 800nS(400nSを追加)                |
| 物理伝送容量 | 144Mbps(2×2, 20MHz, 5/6, 400nS)       |
| その他    | ビームフォーミング, LDPC(オプション)                |

表2. IEEE802.11n MACレイヤ主要諸元素

|         |  |
|---------|--|
| アクセス方式  | CSMA/CA(キャリアセンス多重アクセス)   |
| レート制御   | BPSK/QPSK/16QAM/64QAMの適応変調<br>(制御方式の規定なし, ベンダー独自実装)                    |
| 高効率化方式  | フレームアグリゲーション<br>IAC/RAC制御<br>ブロックAck拡張<br>802.11e拡張(HCCA, EDCA, QoS保障) |
| MAC伝送容量 | 100Mbps(物理144Mbps) (参考値)   |

理伝送容量を大容量化し、高効率MACと組み合わせ実効速度(MACレイヤが上位レイヤにサービスできる伝送容量)100Mbps以上を達成する。

3. MIMO伝送技術

MIMO伝送技術は、送受に複数のアンテナを用いた伝送方式であり、単なる要素技術ではなく、無線伝送そのものを示す広範な技術である。この技術は目的からは次のように大きく分類できる。

- 通信品質を改善する送信ダイバーシチ技術
- 通信容量を拡大する空間分割多重技術

ここで、送信ダイバーシチのことをSTC(Space-Time Coding)と呼ぶ場合もあり、空間分割多重のことを狭義にMIMOと呼ぶ場合もある。これらMIMO伝送技術に関しては、伝送路の状況をいかに知るかが重要なポイントとなり、次の3通りに分類される。

- (1) 送受で伝送路特性を保有する条件
- (2) 受信側のみで伝送路特性を保有する条件
- (3) 送受ともに伝送路特性を保有しない条件

通常これらの伝送路特性は、パイロットシンボルなどあらかじめ決まった信号を送信することにより得られる。ここで、方式のロバスト性は(1), (2), (3)の順で高くなるが、特性はその逆となる。上記分類に関して、大容量無線アクセス技術として最も期待されている技術は、空間分割多重技術を伝送路特性が(1)又は(2)の条件で動作させた場合である。MIMO伝送方式のもう一つの特長は、OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex)やCDMA(Code-Division Multiple Access)などの耐マルチパス遅延無線アクセス方式の整合性の高さであり、この性質が大容量無線アクセスへの要求とマッチし、現在のMIMO伝送技術の興隆を迎えていると考えられる。

本稿では、空間分割多重技術に関して、伝送路特性を(2)の条件とした場合の技術に関して述べる。空間分割多重技術は、多重化した信号をいかに分離するかが重要なポイントとなる。空間分割多重技術として、最も簡単な方式は連立方程式を活用するZF(Zero Forcing)法、最も特性が良好な方式はすべての候補から最もふさわしい信号点を選択するMLD(Maximum-Likelihood Detection)法である。どちらの方式を選択するかは、その演算量が重要なファクタとなる。例えば、送受でN本のアンテナを準備し、変調信号点数をMとすると、通信容量は送受のアンテナ数が1本の場合のN倍となる。ただし、その演算量は、ZF法が $N^3$ に比例し、MLD法が $M^N$ に比例して増加する。すなわち、大容量化を目的として空間多重技術を採用する場合、MLD法が有効であるが、その演算量削減が重要となる。MLD法の演算量削減手法としては、信号の候補点数を球体で制限するSD(Sphere Decoding)法が知られている。このSD



法ではその球体の半径設定が重要となる。すなわち、半径が大きすぎると候補点数の削減が十分でなく、半径が小さすぎると正常動作しなくなる。この問題を解決するため、この球体の半径を複数個準備し、小さい方の半径で候補点数の増加を防ぎ、大きい方の半径で正常動作を保証する技術を提案している<sup>(3)</sup>。三菱電機はこの手法をMR(Multiple Radius)-SD法と呼んでおり、その概念を図1に示す。

図2に、独立レイラフェージング下での、ZF法とMR-SD法のBER(Bit Error Rate)特性のシミュレーション結果を比較する。ここで、 $N=4$ 、 $M=16$ (変調方式は16QAM(Quadrature Amplitude Modulation))とする。なお、このシミュレーションでは、MR-SD法の特性はMLD法からの劣化はなく、その演算量を平均で3けた以上削減するものである。図から明らかなように、MR-SD(MLD)法はZF法から大きな特性改善効果があり、大容量無線アクセス方式への適用が期待できる。

当社は、空間分割多重技術に関して、MR-SD法のみでなく、MLDとZFアルゴリズムを組み合わせることで演算量を大幅に削減する信号分離方式も開発しており、MLDからある程度の特性劣化が生じるものの、条件によっては演算量を1/1,000に削減するという特長を実現している。

また、これまで述べてきたような大容量無線アクセス技術とは別に、MIMO伝送方式は各種無線アクセス方式にも適用可能である。特に、狭帯域無線方式においてもMIMO伝送技術の効果が強く期待されている。このような条件では、シンボル周期当たりの伝送路変動速度が無視

できなくなり、送受ともに伝送路特性を必要とせず動作可能な方式が重要となる。当社では、この方式に関しては、送信アンテナごとに異なったマッピング則を導入するPADM(Per transmit Antenna Differential Mapping)法を開発している<sup>(4)</sup>。

#### 4. 高効率MAC技術

802.11のMACはCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)であり、各装置は自装置が送信する前に他の装置が送信していないかを確認(キャリアセンス)し、空いていることを確認した後、送信を開始する。他局が使用していた場合は、一定時間(Inter Frame Space: IFS)+ランダム待ち時間(バックオフ)を空けた後、送信を開始する。さらに、各無線フレームにはMACヘッダ、PLCP(Physical Layer Convergence Protocol)ヘッダ及びACK(ACKnowledgement)信号の送出時間が付加される。物理レイヤの高速化はデータ部分の送信時間は短縮するが、送信待ち時間、ヘッダ等の時間は高速化しないため、MACが上位レイヤに提供する実効速度を上げられない問題があった。

フレームアグリゲーション技術は、複数のフレームを多重することにより、送信待ち時間、ヘッダ等の時間を圧縮しMACの効率を向上する。図3に既存MAC方式とフレームアグリゲーションを適用した高効率MAC方式との実効速度の比較を示す。

既存MAC方式では物理速度が高速化しても実効速度が60Mbps程度で飽和するが、高効率MAC方式では物理速度の高速化とともに実効速度を向上できることが分かる。数値は当社独自の条件によるシミュレーション例である。フレームアグリゲーションは以下の3つの方式が有力方式である。

##### (1) アグリゲートMSDU

上位レイヤからの信号(MAC Service Data Unit: MSDU)を複数多重し一つのMACフレームに多重する方式

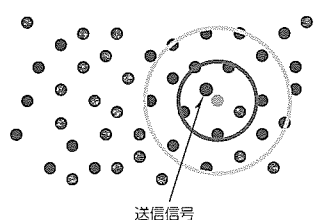


図1. MR-SD方式

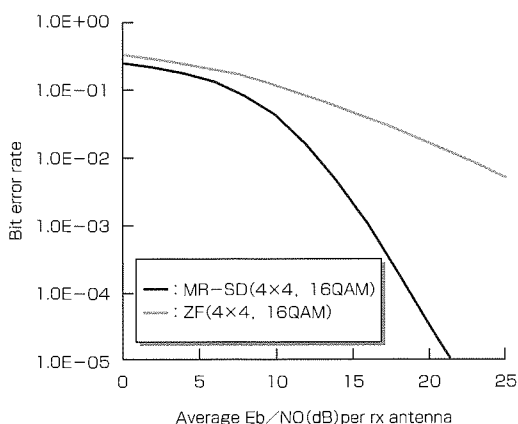


図2. MR-SDを用いた特性改善効果

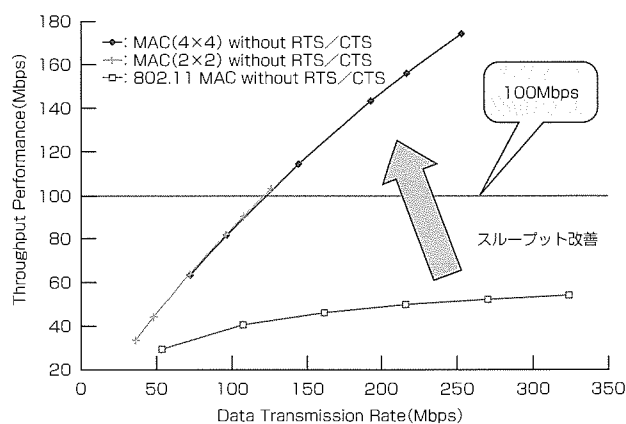


図3. 既存MAC/高効率MACスループット特性

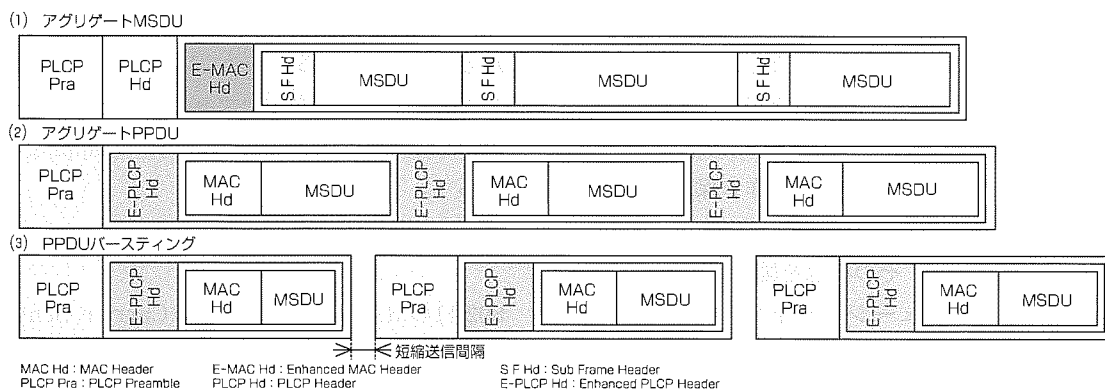


図4. フレームアグリゲーション時の無線フレーム構成

である。純粹にMACレイヤ処理で実現可能で、複数宛先(あてさき)にも拡張しやすい。

(2) アグリゲートPPDU

複数の無線フレーム(PLCP Payload Data Unit: PPDU)をPLCPプリアンプルのみ共有し、PLCPヘッダは個別に多重する方式である。サブフレームごとに送信レート(=変調方式)を変更できる。

(3) PPDUバーステイング

複数の無線フレームを短縮送信間隔で連続送信する。フレームは多重されないが、連続送信によりフレーム多重と同等の効果がある。既存方式からの変更が最小になる。

図4に上記(1)~(3)のフレームアグリゲーションのフレーム構成を示す。

フレームアグリゲーションをどういう条件でどのように行うかは標準化対象外であり、ベンダーごとの独自方式となる。当社では、無線伝送状況に応じて最大多重長を制御する方式を提案した。

高効率MACの開発には各種改善アイデアを定量的に評価し最善の方式を選択する必要がある。さらに、有線環境とは違い、無線環境ではパケットエラーの影響を無視することができない。このため、画像、高速データ等のアプリケーション特性や通信距離等の電波伝搬環境を考慮できるシミュレーション環境が必要となる。

図5に高効率MAC開発と並行し開発したPHY/MAC統合シミュレーション環境を示す。物理レベルシミュレータにより電波伝搬条件から想定パケットエラーを算出し、その結果をMACレベルシミュレータに統合することにより、電波伝搬条件を考慮した実行スループット評価を実現した。このシミュレーション環境は、高効率MAC開発だけでなく、複数基地局間の干渉を考慮した置局設計等にも応用している。

5. む す び

大容量無線アクセス技術として、IEEE802.11nの概要を

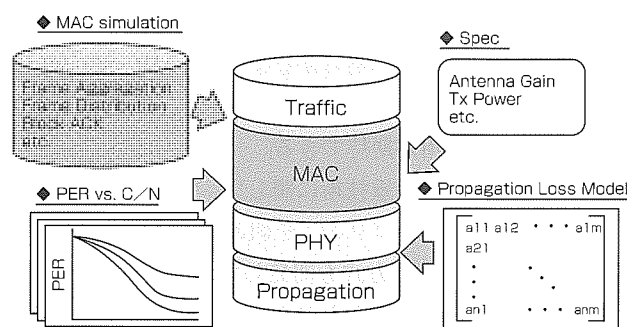


図5. PHY/MAC統合シミュレーション環境

説明し、中核となる物理レイヤの大容量化技術であるMIMO技術、及び大容量物理パスを効率良くユーザーに提供する高効率MAC技術について述べた。また、高効率MAC開発評価に必要なシミュレーション環境についても述べた。

MIMO技術、高効率MAC技術は、無線LANだけでなく、次世代の大容量無線アクセスで広く応用されていく技術と考えている。

参考文献

- (1) IEEE Std 802.11-1999: Wireless LAN Medium Access Control(MAC)and Physical Layer(PHY) Specifications
- (2) Mujtaba, S. A., et al.: TGnSync Proposal Technical Specification (2004-8)
- (3) 東中雅嗣, ほか: 複数の超球を用いるSphere DecodingによるMLDの演算量削減に関する検討, 電子情報通信学会論文誌(B), J87-B, 12, 2090~2093 (2004-12)
- (4) Kubo, H., et al.: MIMO transmission systems employing per transmit antenna differential mapping (PADM), VTC2004-Spring, 613~617 (2004-5)

# IPモビリティ技術

## IP Mobility Technologies

Masatsugu Yano, Kazuhiko Itoh, Yumiko Suzuki, Takahiko Hori

### 要 旨

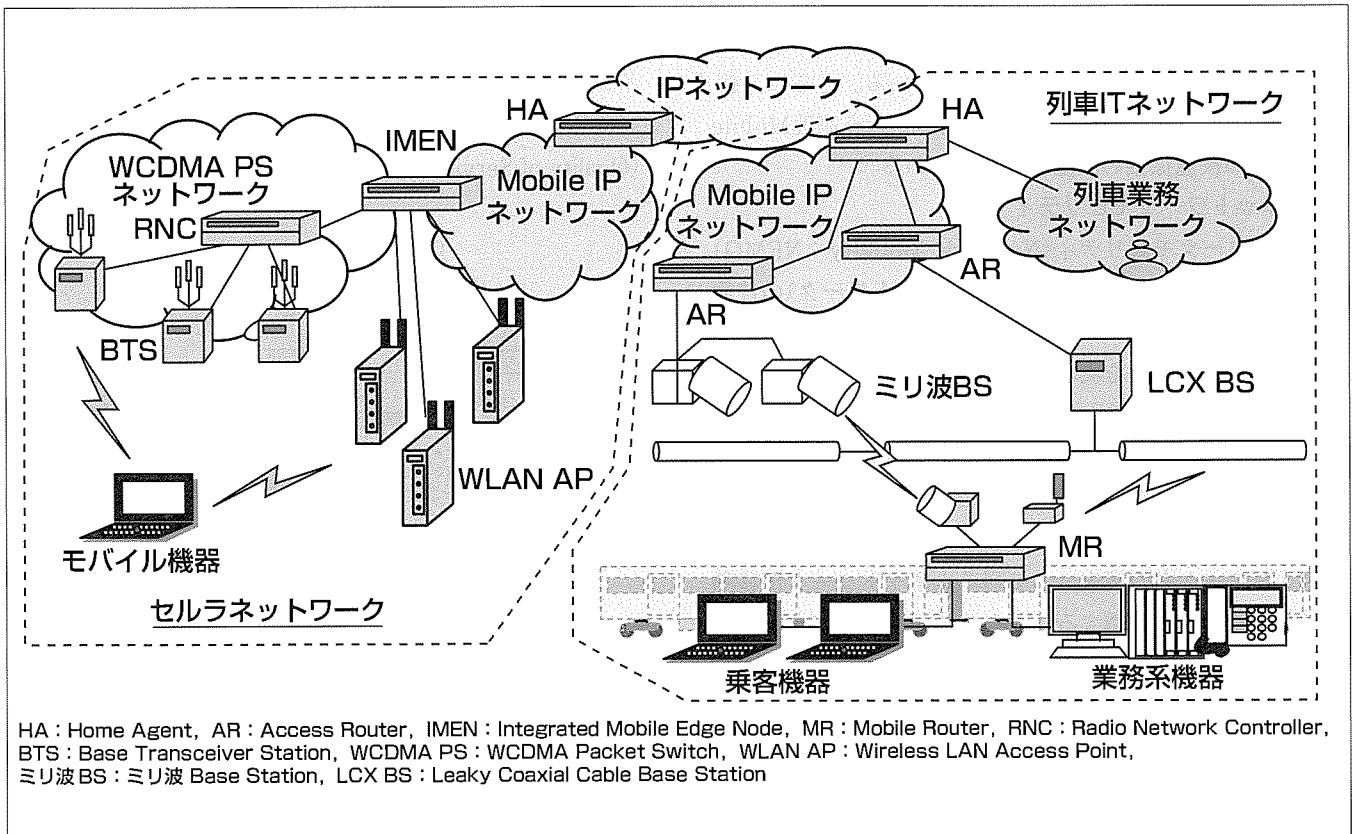
次世代通信ネットワークの実現に当たっては、異なる複数の無線アクセス網をまたがる端末の移動又は高速移動車両内の端末群の移動など、多様な移動形態をサポートする必要がある。その実現技術として、無線アクセスの相違をアプリケーションに対して隠蔽(いんぺい)でき、IP(Internet Protocol)端末/ネットワークの移動時にもIP通信サービスの継続が可能なIPモビリティ技術が注目されている。

本稿では、IPモビリティの実現プロトコルであるモバイルIPを用いてWCDMA(Wideband Code Division Multiple Access)とWLAN(Wireless Local Area Network)間の異種無線ハンドオーバー(HO)を実現するWCDMA-WLAN統合アクセスシステム、及び高速移動車両上のIPネットワ

ークの追跡管理を実現するモバイルルータについて述べる。

WCDMA-WLAN統合アクセスシステムは、端末に近い位置で二つの無線アクセス網を收容し、HO処理時間を短縮することにより、VoIP(Voice over IP)などのリアルタイムアプリケーションに対応したシームレスな異種無線HOを実現している。

また、モバイルルータは、列車ITシステムへの適用を想定し、スポット接続、常時接続など多様な無線アクセス形態に対応し、IPフローごとに最適な無線経路を選択するマルチホーミング機能(複数無線の同時アクセス)、及び移動車両の線の移動を前提とした移動予測に基づく高速HOを実現している。



### IPモビリティのセルラ、及び列車ITネットワークへの適用

セルラネットワークは、今後、ユーザーニーズの多様化、通信速度の高速化の要求に対応するために、無線LANなどの異種無線アクセスを組み込んだ複合無線サービスの提供が必要になる。また、列車無線システムなど高速移動車両の追跡管理を必要とするシステムは、ネットワークのAll IP化の進展に伴い、IPベースでの移動管理が必要になる。IPモビリティは、これらのサービス、システムの実現のキーとなる技術である。

## 1. ま え が き

次世代通信ネットワークの実現に向け、多様な端末の移動形態に対応し、移動中においてもIP通信サービスの継続が可能なIPモビリティ技術が注目されている。

本稿では、このIPモビリティ技術の概要と技術動向を解説し、その応用システムとして開発した異種無線間HOを実現するWCDMA-WLAN統合アクセスシステム、及びネットワークモビリティを実現するモバイルルータについて述べる。

## 2. IPモビリティ技術動向

### 2.1 モバイルIP

モバイルIPは、IP端末がサブネットワークをまたがって移動したときでも、同一IPアドレスを使って通信継続を可能とするIPモビリティプロトコルである。

モバイルIPでは、HAと呼ばれるルータが移動端末(Mobile Node: MN)のホームアドレス(HoA)と移動先のアドレス(CoA: 気付けアドレス)を管理する。MNは移動先でCoAを取得した後、HAにCoAを登録する。MNあてのパケットはHAで、登録されているCoAにカプセル化されてMNに転送される(図1)。

モバイルIPは、IETF(Internet Engineering Task Force)で標準化が行われ、Mobile IPv4(RFC3344)、Mobile IPv6(RFC3775)<sup>(1)</sup>が規定されている。さらに、接続先変更(HO)時のパケットロスの削減を行う高速Mobile IPv6などの機能拡張の議論が行われている。

### 2.2 ネットワークモビリティ

ネットワークモビリティ(Network Mobility: NEMO)は、移動するネットワーク(モバイルネットワーク)の位置管理を行い、IPネットワークとモバイルネットワーク間でのIPパケットの転送を実現するプロトコルである。ここで、モバイルネットワークとは、列車等の移動車両内に配置されたルータ及び端末群で構成されたネットワークを指し、モバイルルータ(Mobile Router: MR)と呼ぶデフォルトゲートウェイを介してIPネットワークと接続する。モバイルネットワーク内の端末は、モバイルネットワークが移動してもその移動を意識することなく通信を継続できる。

MRはMobile IPv6におけるMNと同じ位置付けであるが、

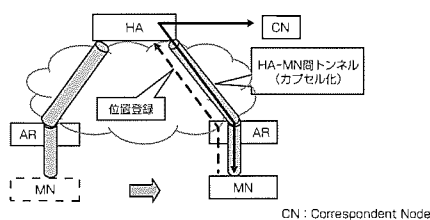


図1. モバイルIPの概要

MRの移動時にMRのHoAとCoAに加え、配下のサブネットワークアドレスをHAに登録する点異なる。MR配下のサブネットワーク向けIPパケットは、HAに登録されているMRのCoAあてにカプセル化されて転送される。MRはカプセル化を解き、配下の端末に送信する(図2)。

NEMOは、基本機能がNEMO Basic Support Protocolとして2005年1月にRFC3963<sup>(2)</sup>として承認された。

## 3. WCDMA-WLAN統合アクセスシステム

### 3.1 概 要

3G/WLAN Interworkingに関する検討が国内外で進められている<sup>(3)</sup>。現状は第三世代セルラ(3G)とWLANでの認証・課金の共通化が議論の中心であるが、将来的には、3G網とWLAN網をIPレイヤで統合し、シームレスなサービスを実現することが重要になる。

今回開発したWCDMA-WLAN統合アクセスシステムは、3G-WLAN間でのシームレスなHOを実現することを目的に、IPv6ベースのMobile IPv6を適用している。

### 3.2 システム構成

図3にWCDMA-WLAN統合アクセスシステムの構成を示す。IMENはWCDMAアクセス網<sup>(4)</sup>、及びWLANアクセス網の双方を収容するパケットノードであり、それぞれの無線アクセス網にIPサブネットワークを割り当てている。

WCDMAとWLAN間のHO時には、IMENをアンカーポイントルータとして動作させ、事前移動予測に基づくFast Mobile IPv6(FMIPv6)<sup>(5)</sup>を用いてHOの高速化及びQoS(Quality of Service)制御を実現している。

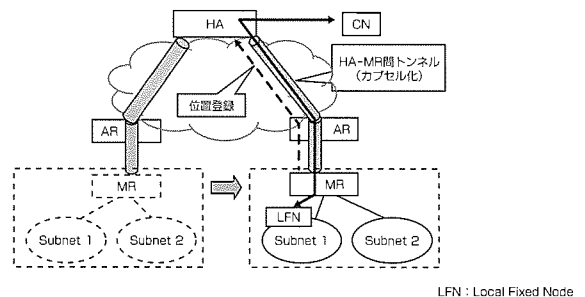


図2. NEMOの概要

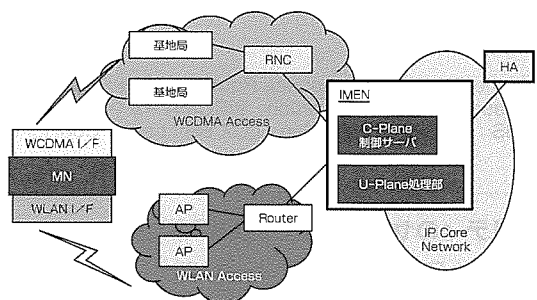


図3. WCDMA-WLAN統合アクセスシステム構成

また、IMENは、GPRS(General Packet Radio Service)セッション、及びFMIPv6の制御メッセージを終端するC-plane、ユーザーデータを転送するU-Planeを装置として分離した分散アーキテクチャを採用している。

### 3.3 統合アクセス機能

#### (1) 高速HO

MNがWCDMAからWLANにHOするシーケンス(図4)を用いて、FMIPv6による高速HOの機構を説明する。MNとIMEN間には、GPRSセッション、及びPPP(Point to Point Protocol)を設定し、IPv6パケットを転送できるようにしている。

MNはWLAN I/Fの電界強度をモニタし、それが閾(しきい)値を超えた場合、WLANへのHOを決定し、FMIPv6手順を起動する。

MNは移動先のWLAN側でのCoAを生成するため、RtSolPr(Router Solicitation for Proxy)をIMENに送信し、ネットワークプレフィックスを取得し、CoAを生成する。

次に、HO前後二つのCoAを通知するため、FBU(Fast Binding Update)をIMENに送信する。IMENはFBU受信後、HO前後の二つのCoAに対して、IPパケットのバイキャスト(同報送信)を開始する。

MNはFBackをIMENから受信後、WCDMAからWLANへHOする。前記バイキャストにより、MNはHO直後からパケットの受信が可能となる。

#### (2) QoS制御

WCDMAにおける現在のパケットチャネルの速度MAX384kbpsに対して、WLANでは11Mbps(802.11b)、54Mbps(802.11a)であり、伝送速度に大きな差がある。

伝送速度が異なるアクセス網をまたがるHOでは、転送速度差により、一時的に輻輳(ふくそう)が発生し、アプリケーションごとの品質が維持できなくなる可能性がある。

そこで、MNごとにトラフィック制御情報をコンテキストとして管理し、FMIPv6の手順を用いてHO直前に制御パラメータを切り換え、以下の処理を実行する。

(a) シューピング：伝送速度に応じた帯域抑制

(b) 優先制御：リアルタイムフローの優先転送

これにより、HOに同期して、MNごとにアプリケーションの品質を維持し、伝送レートを調整することができる。

### 3.4 試作システム評価

試作したシステムを用いて、データ、VoIP通信中におけるHO動作を確認している。WCDMAアクセス網は、インタリーブなどの品質向上手法のため、WLANに比べ伝送遅延が大きく、無線切換え方向によりバイキャストの効果に差異があることが判明しており、今後、アクセス網の伝送遅延差を考慮した方式の検討/検証を行う予定である。

## 4. モバイルルータ

### 4.1 概要

列車ITシステムへの適用を想定し、高速移動車両に対するネットワークモビリティを実現するシステムを開発した。ここでは、その中核となるモバイルルータ(MR)について述べる。

### 4.2 システム構成

MRを含む全体のシステム構成を図5に示す。MRは複数の無線アクセス網に接続可能であり、無線アクセスを終端する無線アダプタ(ADP)を複数収容する。また、MRは、IPv6で動作するが、IPv4 over IPv6トンネル機能を持ち、IPv6、IPv4ドメイン双方を収容可能である。

### 4.3 モバイルルータ機能

#### (1) 線的移動を考慮した高速HO

列車は線的に決められた方向に移動するため、移動前に次に移動するサブネットワークを確定可能である。これを利用してHOの高速化を行った。このシステムでは、移動先サブネットワーク情報をARがRA(Router広告)に付加して通知する。次サブネットワーク情報としては、次サブネットワークアドレス、無線種別、エリアID、移動先ARのIPアドレス、MAC(Media Access Control)アドレスを含む。MRは、この情報から移動後のCoA等を準備し、ADPから新エリアに移動したこ

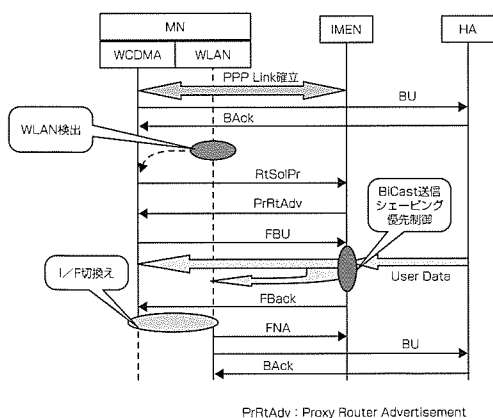


図4. WCDMA→WLAN HOシーケンス図

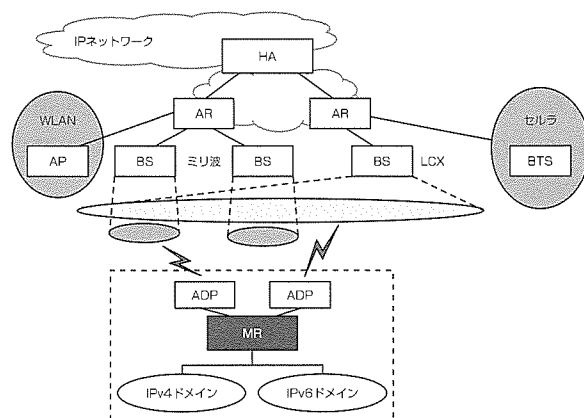


図5. モバイルルータシステム構成

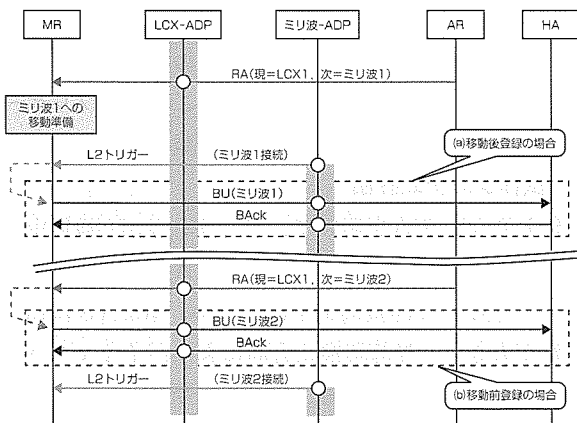


図6. 線の移動を考慮した高速HO

とを通知するL2トリガー受信後、直ちに位置登録(BU)を行うことにより、新エリアでRAを受信し、CoAを取得する時間を削減している(図6の(a))。また、常時接続無線を用いて、スポット的に存在する無線エリアに対する位置登録を事前に行い、移動後の位置登録時間を削減することも選択可能である(図6の(b))。

(2) アプリケーションに応じた無線経路選択

転送速度やカバー範囲など無線アクセス網にはそれぞれの特徴があり、ユーザーアプリケーションに適した無線経路の選択が重要である。

このシステムでは、サブネットアドレスとパケット優先度でアプリケーションを分類し、使用する無線の優先順位を規定する経路選択テーブルを保持する。その上で、ロケーションに応じて利用可能な無線から最適なものを選択することにより、例えば、高速大容量転送が必要なコンテンツ配信に対してはミリ波スポットを、転送容量は大きくないが常時接続の必要な業務用アプリケーションに対してはLCX網を利用するといった使い分けが可能となる。

(3) L2トリガーの利用と汎用化

HOの高速化を行うため、また、無線接続状況に応じた適切な無線経路選択を行うためには、無線レイヤとの密接な連携が必要である。このシステムでは、ADPがMRにL2トリガーとして無線接続情報を通知する。無線接続情報としては、無線種別、エリアID、接続/切断/変更等である。MRは、L2トリガーから無線接続状況を把握し、IPレイヤの情報であるRAを待つことなく、HOの処理を開始することができる(図6)。

また、L2トリガーフォーマットの共通化、及び無線ケーパビリティの通知規定を設けた。これにより、MRの任意のインタフェースにADPをプラグ&プレイで接続できるため、無線アクセスの追加/変更が容易になる。

4.4 試作システム評価

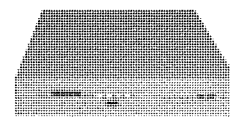


図7. モバイルルータ

表1. HAとMRの主要諸元

| HA           |  |
|--------------|--|
| 収容インタフェース数   | Fast Ether - 4Port   |
| 移動管理プロトコル    | RFC3775 (Mobile Support in IPv6)<br>RFC3963 (NEMO Basic Support) |
| カプセルパケット転送能力 | 10万pps, 100Mbps (IPパケット46バイト時)                                   |
| トンネルエンター     | 32Kエンター  |
| 位置登録処理性能     | 100回/秒   |
| MR           |  |
| 収容インタフェース数   | Fast Ether - 4Port (LAN側: 2, 無線側: 2)                             |
| 無線インタフェース    | WLAN (802.11a, b/g), ミリ波 (60GHz)<br>WCDMA (FOMA (注1)), LCX       |
| IPv4カプセル化転送  | RFC2473  |
| QoS制御        | 優先制御: 256 (Flow) × 4 (Class)<br>帯域制御: 32kbps ~ 32Mbps/Flow       |

(注1) FOMAは、(株)NTTドコモの登録商標である。

ミリ波スポットとLCXの併用環境における大容量コンテンツ配信、インターネットアクセスを用いた評価実験を行い、機能及び性能を確認した。

なお、MR(図7)、HAは、いずれもパケット転送エンジンとしてネットワークプロセッサを用いて、高速化を図っている。表1に各装置の主要諸元を示す。

5. むすび

多様な端末の移動形態をサポートし移動中においてもIP通信サービスの継続が可能なIPモビリティ技術の動向、及びその応用システムとして開発したWCDMA-WLAN統合アクセスシステム、並びにモバイルルータの構成と特長について述べた。

参考文献

- (1) Johnson, D., et al.: Mobility support in IPv6, RFC3775 (2004)
- (2) Devarapalli, V., et al.: Network mobility (NEMO) basic support protocol, RFC3963 (2005)
- (3) 3 GPP TR23.934 v6.0 (2002)
- (4) 武 啓二郎, ほか: IP-RANゲートウェイ, 三菱電機技報, 78, No.2, 131~134 (2004)
- (5) Koodli, R., et al.: Fast handovers for mobile IPv6, draft-ietf-mipshop-fast-mipv6-03 (2004)

# ホームネットワーク技術

赤津慎二\* 松尾英治\*\*  
 松原雅美\* 小坂英明\*\*\*  
 加藤嘉明\*

Home Network Technologies

Shinji Akatsu, Masami Matsubara, Yoshiaki Kato, Eiji Matsuo, Hideaki Kosaka

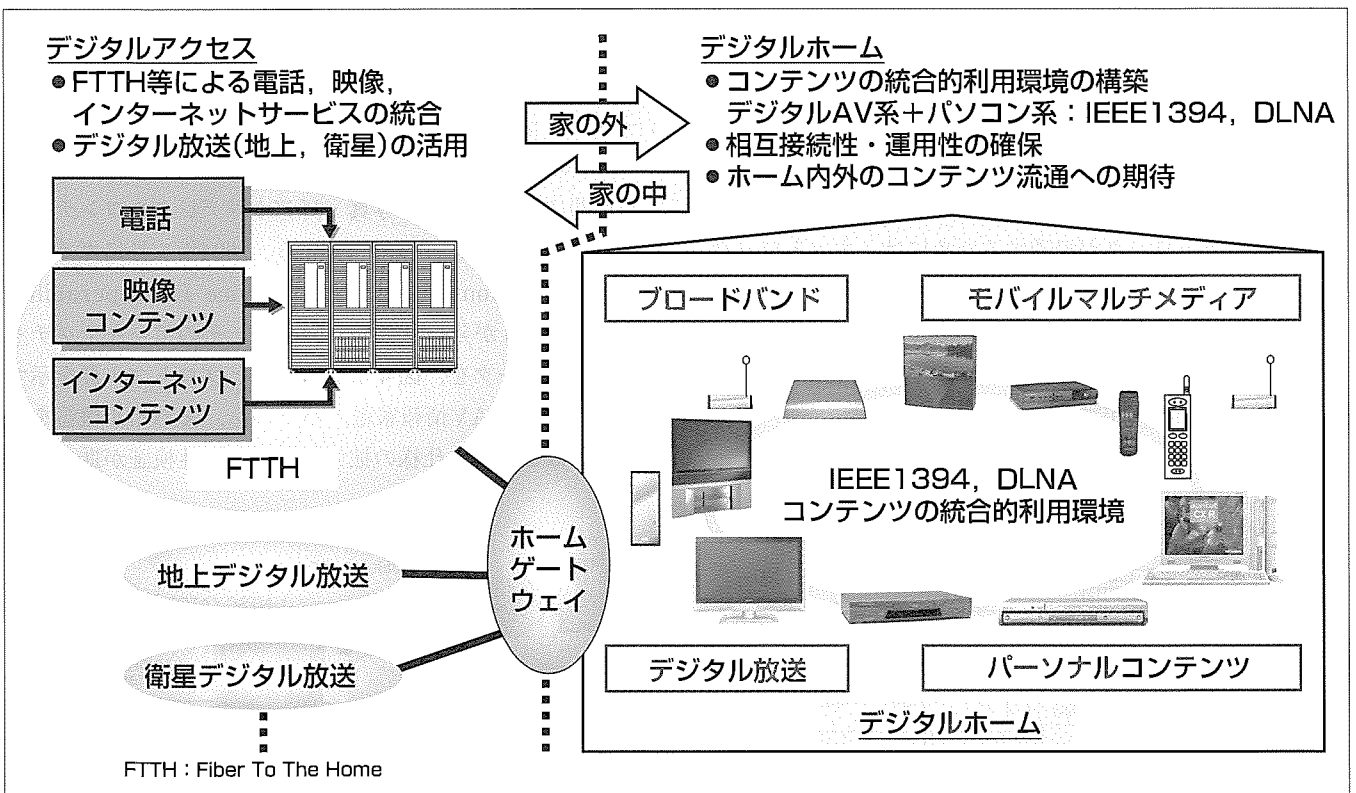
## 要旨

ブロードバンドサービスの普及、デジタル放送の本格化など、ホームを取り巻くネットワーク環境の整備が進んでいる。一方、ホーム内では、AV(Audio Visual)情報家電の普及によりデジタルコンテンツの利用が急速に進んでいる。これに対して、三菱電機では、MPEG(Moving Picture Experts Group)を始めとする映像処理技術、光通信等のアクセス通信技術、HAVi(Home AV interoperability)やDLNA(Digital Living Network Alliance)等のネットワーク技術の国際標準化及び技術開発に取り組み、例えば、北米のIEEE1394/HAVi搭載大画面プロジェクションテレビ等、ホーム内でのコンテンツ流通へのニーズにこたえる製品群を市場投入してきた。

ホームネットワークの本格普及に向けては、次の3つの技術要素が課題である。

- (1) 容易なネットワーク接続、機器・コンテンツの制御：複雑な設定や手順なしにネットワーク経由で所望のコンテンツを享受する技術(例：IEEE1394/HAVi, DLNA)
- (2) 異種ドメインネットワーク間の相互接続性・運用性：異なる規格のドメインを意識せずに情報家電を相互接続させる技術(例：JEITA(電子情報技術産業協会), NEDO(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)での取り組み)
- (3) コンテンツ流通技術：ホーム内外をつないでコンテンツを流通させるための技術(例：MPEG-21, DMP(Digital Media Project))

本稿では、ユビキタス社会でのホームネットワーク技術として、特に、ホームのマルチメディアシステムにおける上記の3技術要素に関して、当社の取り組みと展開について述べる。



## マルチメディア・ホームネットワーク

“使いやすさ”重視のユーザー視点からは、①ホーム内では、容易なネットワーク接続と機器・コンテンツ制御によるコンテンツ共有が可能であること、②ホームの内外をシームレスにつなぐことにより、個人からの情報発信やコンテンツ共有を簡単・安全に実現することが期待されている。

当社は、MPEGを始めとする映像処理技術、光通信等のアクセス通信技術、DLNA等のネットワーク技術の研究開発に取り組み、顧客のニーズを実現する機器・システムを提供していく。

## 1. ま え が き

ブロードバンドサービスの普及、デジタル放送の本格化など、ユビキタスネットワーク社会でのホームを取り巻くネットワーク環境の整備が進んでいる。一方、ホーム内では、デジタルテレビ、デジタルビデオレコーダ、デジタルカメラや携帯型音楽機器などAV情報家電の普及により、マルチメディア・デジタルコンテンツの利用が急速に進み、ホーム内外でのコンテンツ流通への要求が高まっている。

これに対して、当社では、MPEGを始めとする映像処理技術、光通信を始めとするアクセス通信技術、HAViやDLNAを始めとするネットワーク技術の国際標準化及び技術開発に取り組み、例えば、北米において、2001年からIEEE1394/HAViを搭載した大画面プロジェクションテレビ中心のホームAVシステムを製品化する等、ホーム内のコンテンツ流通へのニーズにこたえる製品群を市場投入してきた<sup>(1)~(3)</sup>。

“使いやすさ”重視のユーザー視点からは、①ホーム内では、容易なネットワーク接続と機器・コンテンツ制御によるコンテンツ共有が可能であること、②ホームの内外をシームレスにつなぐことにより、個人からの情報発信やコンテンツ共有を簡単・安全に実現することが期待されている。

本稿では、ユビキタス社会でのホームネットワーク技術として、特に、ホームのマルチメディアシステムに関する当社の取り組みと展開について述べる。

## 2. ホームネットワークの主要な技術課題

図1に、ホームネットワークの基本モデルの1例を示す。

ホームネットワークが浸透するためには、ネットワークを活用した高度なサービスを実現し、ユーザーの利便性を向上させるものでなければならない。このモデルから読み取れるように、ホームネットワークの本格普及に向けては、次の3つの技術要素が課題である。

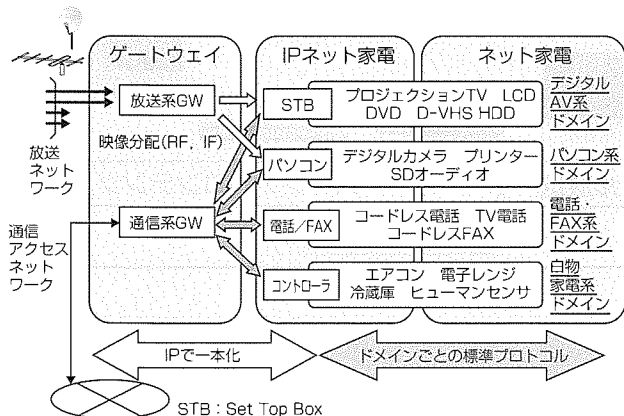


図1. ホームネットワークの基本モデル例

- (1) 容易なネットワーク接続と機器・コンテンツの制御：複雑な設定や手順なしにネットワーク経由で所望のコンテンツを享受する技術(例：IEEE1394/HAVi, DLNA)
  - (2) 異種ドメインネットワーク間の相互接続性・運用性：異なる規格のドメインを意識せずに情報家電を相互接続させる技術(例：JEITA, NEDO技術開発機構での取り組み)
  - (3) コンテンツ流通技術：ホーム内外をつないでコンテンツを流通させるための技術(例：MPEG-21, DMP)
- 以下では、各技術要素について述べる。

## 3. 容易なネットワーク接続と機器・コンテンツの制御

この課題に対するソリューションとして、IEEE1394/HAViによるAVネットワークが挙げられる。図2に、当社の北米AV事業におけるホームAVシステムの構成を示す。IEEE1394によりデジタル機器をケーブル1本で接続し、HDTV(High Definition Television)映像のデジタル再生・録画が可能である。また、プロジェクションTVが周辺機器のコマンド情報を内蔵しており、ユーザーが機器の属性(メーカー名、機種等)を意識せずに、1リモコンですべてを操作可能である<sup>(3)</sup>。

一方、ホーム内での有線/無線LAN(Local Area Network)の普及やAV対応パソコンの登場等により、IP(Internet Protocol)ベースのLANを活用したパソコンとAV機器のネットワーク化への期待が大きくなってきた。2003年6月に設立されたDLNAは、この課題に対してIPベース・ネットワーク技術を活用したソリューションである。

DLNAは、ホーム内のAV情報家電、パソコン、モバイル機器における音楽・写真・ビデオ等デジタルコンテンツの容易な共有化を目的としている。2004年6月にガイドラインver1.0(Home Networked Device Interoperability Guidelines)が発行された。図3に、そのアーキテクチャフレームワークを、図4に機能要素とプロトコル群を示す。

DLNAは、AV情報家電、パソコン、モバイル機器をつなぐ仕様として、仕様の拡大と相互接続性検証が進められ

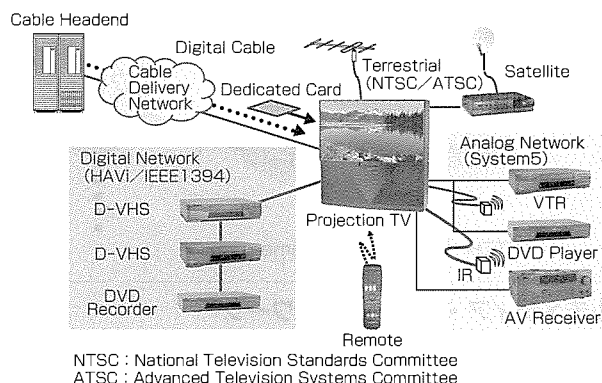


図2. IEEE1394/HAViによるAVネットワーク



ている。ただし、ユーザーが重視する使いやすさは、標準仕様ではなく、機器ベンダーの独自技術での差別化に依存する。当社は、IEEE1394/HAViによるAVネットワークのコンセプトを発展させ、DLNAや著作権保護技術と統合し、さらに、IEEE802.11やUWB(Ultra Wide Band)等の高速無線技術を適材適所に利用しながら、使いやすさ重視のAVシステムを構築していく<sup>(4)</sup>。

#### 4. 異種ドメインネットワーク間の相互接続性・運用性

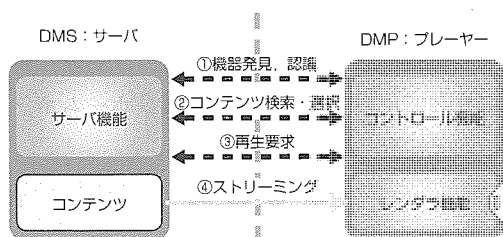
国内ではホームネットワーク普及のための様々な取り組みがなされている。

その一つとして、JEITAでは情報家電産業を活性化させるためにe-Life推進特別委員会が設置されており、当社は、この委員会に参加して情報家電の普及にかかわる状況調査と情報提供の基盤整備を行う活動を行っている。

この委員会では、相互接続・実証実験に向けて相互接続の範囲、課題と解決策、実証実験システム、実現できるアプリケーションなどを議論している。さらに、標準化が必要な重要項目について最新の技術内容を調査し、サービスモデルによる共通化の整理を行う活動を行っている。

一方、NEDOの助成事業活動として、デジタル情報機器相互運用基盤(AV系デジタル情報家電ホームネットワーク)

(注1) この研究は、NEDO技術開発機構の平成15年度課題設定型産業技術開発費助成事業(デジタル情報機器相互運用基盤プロジェクト<情報家電分野>)において開発した成果の一部に基づくものである。



DMS : Digital Media Server (コンテンツの蓄積と供給)  
DMP : Digital Media Player (ユーザーインタフェースとコンテンツ再生)

図3. DLNA ver.1.0 アーキテクチャフレームワーク

|                            |  |                    |
|----------------------------|--|--------------------|
| Media Formats              | LPCM<br>MPEG-1 PS<br>MPEG-2 TS<br>JPEG               | Optional Formats   |
| Media Management           | UPnP AV 1.0  |                    |
| Device Discovery & Control | UPnP DA 1.0  |                    |
| Media Transport            | HTTP 1.0, 1.1 on TCP                                 | Optional Transport |
| Networking & Connectivity  | IPv4 Suite<br>(802.3i and 3u) or (802.11a or b or g) |                    |

LPCM : Linear PCM, MPEG : Moving Picture Experts Group,  
PS/TS : Program Stream / Transport Stream,  
JPEG : Joint Photographic Experts Group, UPnP : Universal Plug and Play,  
DA : Device Architecture, HTTP : HyperText Transfer Protocol

図4. DLNAの機能要素とプロトコル群

の研究が実施されている<sup>(注1)</sup>。これは、既存のIEEE1394搭載AV製品に対して存在する以下のような問題点を解決する方策を研究することが目的となっている。

- テレビにつながるAV機器の増加で接続が煩雑になり、保守性が著しく低下する。
- 1394ケーブル(最長4.5m)の制約がホームネットワーク普及を阻害している。
- 有線のネットワークは、配線工事等が発生し、手間がかかる。

これらを解決するため、有線(IEEE1394)と無線(IEEE 802.11x)を相互に接続できるネットワーク技術や、AV機器とパソコンの接続と融合の技術、さらに、コンテンツを配信する技術に取り組んでいる。これらをまとめると図5に示すようなホームネットワークの構成となる。

##### (1) AV機器間の有線/無線相互接続技術

ケーブル長に制限のあるIEEE1394ネットワークとケーブルにとらわれない無線IEEE802.11xを相互接続するための技術と、無線区間でHDTVレベルの映像を途切れなく伝送できる伝送品質の確保技術(ネットワークQoS(Quality of Service)技術)を研究している。

##### (2) コンテンツ蓄積/配信技術

AV系有線/無線ネットワーク経由で接続された種々の受信表示端末からホームAVサーバを共有するため、ネットワーク帯域に応じてコンテンツ配信を制御する技術(コンテンツ最適配信技術)を研究している。また、ネットワーク経由で別の部屋にある有線/無線AV系ネットワーク上のホームAVサーバを制御する技術(ネットワーク対応GUI(Graphical User Interface)技術)も検討中である。

##### (3) AVドメインゲートウェイ技術

IEEE1394ネットワーク上に存在するAV機器とIPネットワークに存在するパソコン、パソコン周辺機器、AV機器などの機器を統合的に認識・管理・制御するための技術(AVドメインゲートウェイプラグアンドプレイ技術)を研

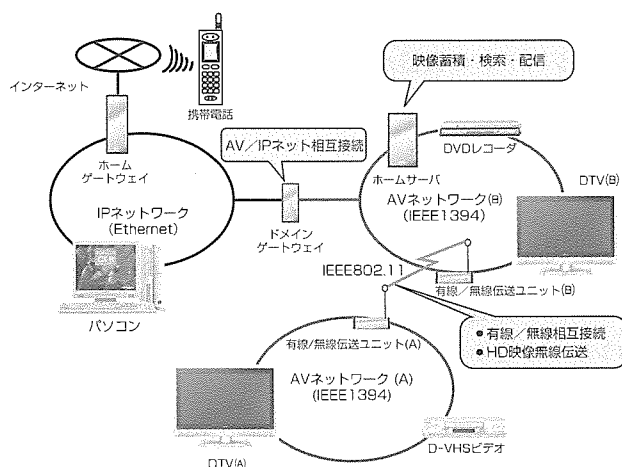


図5. AV系デジタル情報家電ホームネットワーク

究している。

## 5. コンテンツ流通技術

ホーム内の各機器がネットワークで接続されるようになってくると、機器間でのAVコンテンツのコピーや移動、外部からのコンテンツの購入やポータブルデバイスへの転送など、様々な利用形態が考えられる。これらの利用では、それぞれの視聴端末や接続されているネットワーク帯域などに応じたコンテンツの符号化変換などが必要となってくる。コンテンツをユーザー環境に合わせてアダプテーション(適応変換)する仕様として、MPEG-21 Part 7 (Digital Item Adaptation : DIA)がある。MPEG-21 DIAでは、端末やネットワーク環境によらずにシームレスなコンテンツアクセスを可能にするために、ユーザー環境、端末属性、ネットワーク環境等の記述方式、及び環境に応じてメタデータやコンテンツの適応化を効率的に行うための記述方法について標準化が行われている。コンテンツ適応化の例として、高品質なMPEG-2ビデオコンテンツをモバイル端末で視聴するためにMPEG-4ビデオへの符号化変換(トランスコード)などがある。また、当社が提案を行い規格に盛り込まれたMPEG-21メタデータアダプテーションヒント記述を利用することにより、AVコンテンツに付随したメタデータ(タイトルや出演者、あらすじなど)を視聴者の好みに応じて適応化し、視聴者に合ったメタデータを生成することが可能となる<sup>(5)</sup>。

一方、乱立する著作権管理(Digital Right Management : DRM)技術の相互運用性を実現しコンテンツ流通を促進するための国際的な業界標準化団体として、DMP (Digital Media Project)<sup>(6)</sup>が2004年2月から活動を開始している。DMPでは、DRMとして必要となる技術(コンテンツ識別やデバイス認証、暗号化、視聴制御など)の基本機能をそれぞれツールとして整理し、メッセージ交換プロトコルやメッセージ内容などの検討を行っており、DRM相互運用が可能な共通プラットフォーム作りを進めている。これが実現すれば、購入した有料コンテンツを異なるDRMシステムの機器やデバイスでも利用することが可能となり、ユーザーにとっての利便性が向上するものと期待される。

## 6. ホームネットワークの将来像

DLNAや無線映像伝送技術、さらにMPEG-21のようなコンテンツ流通技術が統合化され、近い将来デジタル映像コンテンツをホーム内のどの部屋でも視聴できる環境が普及すると考えられる。

最近のストレージ機器の容量は既に400Gバイトが主流になりつつあり、ユーザーは番組をますます大量に録画し

て蓄積していくものと思われる。しかし、録画された番組数が膨大になると、ユーザーはこれらを管理しきれなくなってしまうおそれがある。

そこで、将来像として考えられるのは、ホームネットワークとそれらに接続されたAV機器間の連携動作である。ネットワークの利用は接続された機器のリソースの共用と再利用を行ってこそ意味が出てくる。リソース利用として①蓄積されたコンテンツの共用視聴、②離れた部屋に設置された機器の利用、③蓄積媒体を分散させて容量や並列処理を向上させる蓄積分散、④各機器の持つ機能を分散させて処理する機能分散処理、などが考えられ、これらのバックボーンとしてホームネットワークは重要な位置を占めていくものと思われる。また、宅内のネットワークと宅外の広域ネットワークをホームゲートウェイで接続することで、外部のプロードバンドサービスの利用もますます盛んになっていくと予想される。

今後は、機器リソースの共用と外部サービスとの接続により、人に優しく豊かで便利なホームネットワークを構築していくべきであると考えられる。

## 7. むすび

本稿では、ユビキタス社会でのホームネットワーク技術として、特に、ホームのマルチメディアシステムにかかわる当社の取り組みと展開について述べた。

e-Japan政策により情報インフラの整備と利活用が進展するに伴い、ユビキタスネットワークの一端を担うホームネットワークが進展していく。当社は、ユーザー視点に立ち、真に便利で使いやすい情報家電及びホームネットワークの技術開発に取り組んでいく。

## 参考文献

- (1) 村上篤道, ほか: デジタル放送の現状と課題, 三菱電機技報, 72, No8, 641~647 (1998)
- (2) 加藤嘉明, ほか: デジタル放送と家庭内ネットワークの融合-DAVIC-, 三菱電機技報, 72, No8, 655~661 (1998)
- (3) 赤津慎二, ほか: AVネットワークテレビと周辺機器, 三菱電機技報, 76, No11, 723~726 (2002)
- (4) Matsubara, M., et al.: DTV Architecture Design for Multimedia Network Environments, IEEE ICCE (International Conference on Consumer Electronics) (2005-1)
- (5) 乙井研二, ほか: MPEG-21メタデータアダプテーションヒントの提案(2), 2003年電子情報通信学会総合全国大会, D-11-80 (2003)
- (6) <http://www.digital-media-project.org/>

# ワイヤレスセンサネットワーク技術

平岡精一\*  
 三部 健\*  
 斎藤 隆\*

Wireless Sensor Network

Seiichi Hiraoka, Ken Sanbu, Takashi Saito

## 要 旨

あらゆるものがネットワークに接続されるユビキタスネットワークを活用してセキュリティ、省エネルギー、設備維持管理、環境モニタリング、防災、など様々な分野で安全・安心・快適で豊かな社会を実現するためのサービスを提供するには、人・モノ・環境などの実世界情報を情報ネットワークに取り込み、フィードバックをする必要がある。そのために設置される膨大な数のセンサやアクチュエータを低コストで簡単に接続するための仕組みとして、センサネットワークが期待されている。

センサネットワーク上で交信されるセンサデータや制御データはサイズが小さく、数が多い。三菱電機は、これに適した低コスト・低消費電力を特長とする近距離無線通信方式ZigBee<sup>(注1)</sup>の普及を目指すZigBee Allianceの設立メン

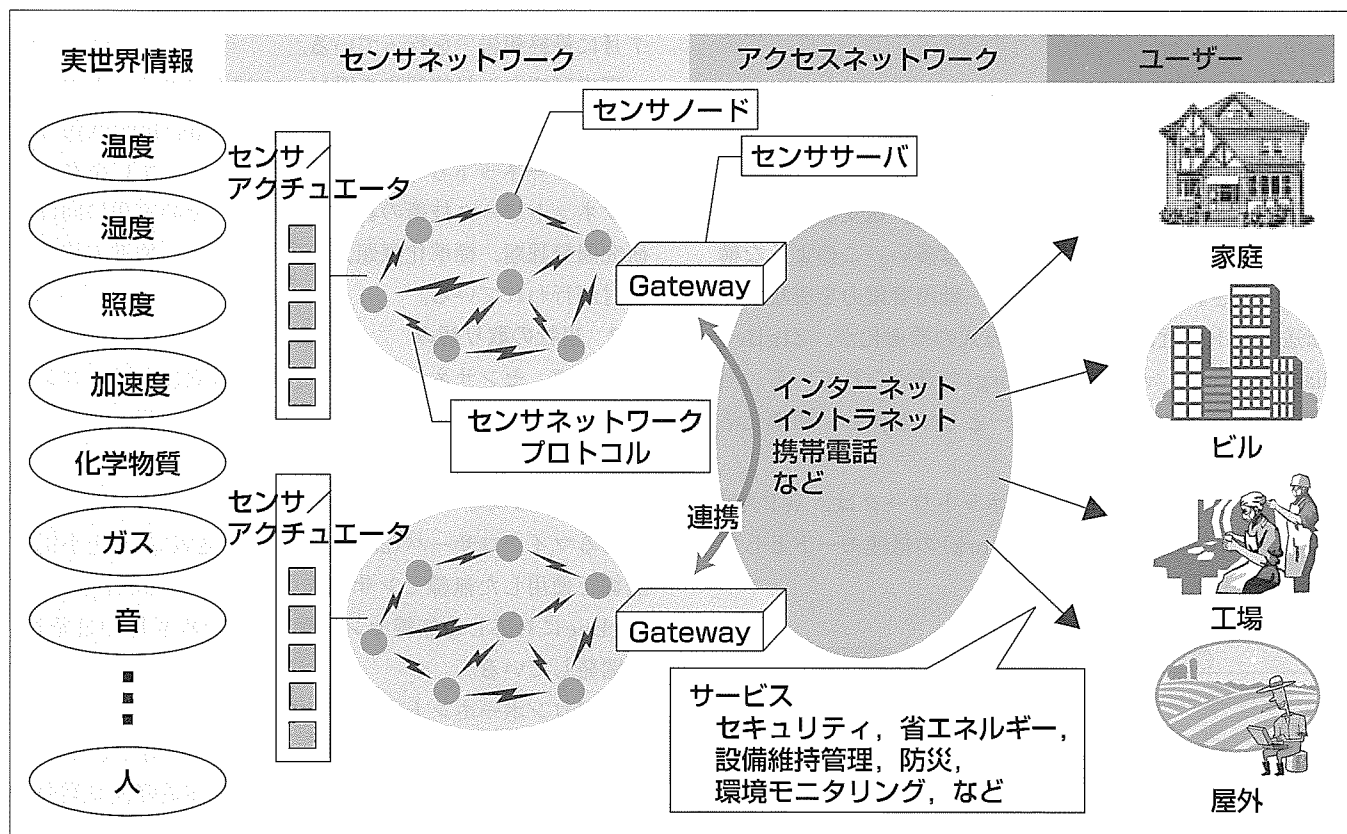
バーとして参画し、標準化活動に取り組んでいる。国内においても、総務省「ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会」、ユビキタスネットワークフォーラム「センサーネットワーク部会」の設立など、産学官一体となった推進活動が行われている。

センサネットワークは、センサや制御データを無線通信で送受信するセンサノード、それらを相互に接続するためのセンサネットワークプロトコル、センサネットワークを既存の通信インフラに接続するセンササーバで構成される。

これらの技術開発を進め、多彩なアプリケーションのコアとなるプラットフォームを今後提供していく。

(注1) ZigBeeは、Koninklijke Philips Electronics N.V.の登録商標である。

特集  
II



## ワイヤレスセンサネットワークのシステム構成

人、モノ、環境などの実世界情報を家庭、ビル、工場、屋外に偏在するセンサノードで観測し、アドホックネットワーク技術を活用したセンサネットワークプロトコルでセンサノードを相互に接続し、センササーバを介して既存通信インフラによるアクセスネットワークにセンサデータを送出する。この仕組みでセンサデータを情報ネットワークに取り込みフィードバック(制御、アクチュエーション)することで、ユビキタスネットワークを活用した多種多様なサービスを提供することが可能となる。

## 1. ま え が き

コンピュータ技術，ネットワーク技術など，いわゆるIT技術の進歩に伴い，あらゆるモノがネットワークに接続されるユビキタスネットワークが実現に向かいつつある。このネットワークインフラを活用することにより，生活の豊かさの向上や経済の活性化，社会上の問題の軽減などの恩恵がもたらされるユビキタスネットワーク社会の実現が期待される。

セキュリティ，省エネルギー，設備維持管理，環境モニタリング，防災，など様々な分野で安全・安心・快適で豊かな社会を実現するためのサービスを提供するには，人・モノ・環境などの実世界情報をリアルタイムに情報ネットワークに取り込み，フィードバックする必要がある。実世界情報を取り込むために設置する膨大なセンサやアクチュエータを低コストで簡単に接続する仕組みとして，ワイヤレスセンサネットワーク技術が期待されている。

そこで本稿では，ユビキタスネットワーク社会に向けたワイヤレスセンサネットワーク技術を取り巻く環境と当社の取り組み，ワイヤレスセンサネットワークを構成する技術であるセンサノード，センササーバとセンサネットワークプロトコル，及びその応用分野について述べる。

## 2. センサネットワークを取り巻く環境と当社の取り組み

### 2.1 ZigBee Alliance

センサネットワークで取り扱うデータは，センサで採取した情報や機器のスイッチのON/OFFなどの比較的単純な制御情報を対象としている。そのため，送受信されるデータサイズは小さく，送受信点の数は多い。このような構成に最適化された簡単・低コスト・低消費電力を実現する低転送レートの近距離無線通信方式の標準化が，ZigBee Alliance (<http://www.zigbee.org>) で進められている。当社はアライアンスの設立メンバーとして参画し，標準化活動に取り組んでいる。

図1に示すように，ZigBeeネットワークは，WPAN (Wireless Personal Area Network) の低速モードとして

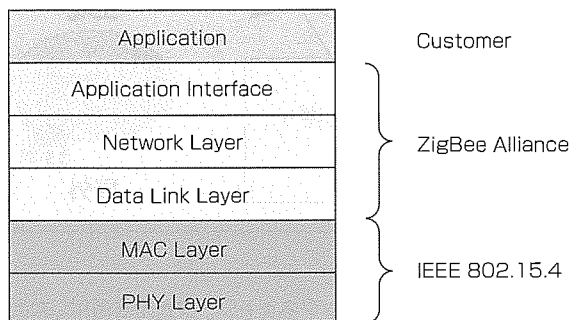


図1. ZigBeeネットワークの位置付け

IEEEで規格化されたIEEE 802.15.4を物理層 (PHY (PHYSical) 層/MAC(Media Access Control) 層) として採用し，その上のData Link層とNetwork層，及びApplication Interfaceを規定している。

### 2.2 国内の推進状況

平成16年度版情報通信白書で「世界に広がるユビキタスネットワーク社会の構築」が特集テーマとして掲げられていることから分かる通り，“ユビキタスネットワーク”が次世代のネットワークインフラとして注目を集めている。これに対して，総務省は，ユビキタスネットワーク社会の実現に不可欠なユビキタスセンサネットワーク技術に関して，その実現に向けた研究開発課題，標準化課題，社会的受容性，推進方策等の検討を行うため，「ユビキタスセンサネットワーク技術に関する調査研究会」<sup>(1)</sup>を2004年3月から7月の期間に開催した。研究会では，検討の対象範囲を「センサーへ接続するインターフェースをオープン化し機器間の連携性を高めたOPEN型センサーネットワーク」と「通信機能のコンポーネントがセンサーに内蔵できるほど小型化することにより機器が至る所に遍在するユビキタスセンサネットワーク」と定め，ユビキタスセンサネットワークの実現に向け，国内外の研究開発の動向等を調査・分析し，ユビキタスセンサネットワークに求められる機能，実現に向けた推進方策等について検討を行い，2004年7月に最終報告<sup>(2)</sup>を行っている。

調査研究会の最終報告を受け，ユビキタスネットワークングフォーラム (<http://www.ubiquitous-forum.jp/>) に「センサーネットワーク部会」が設置され，ユビキタスセンサネットワーク技術の将来イメージ，その実現に向けた研究開発課題，標準化課題，社会的受容性，推進方策等の検討が行われている。

### 2.3 当社の取り組み

当社は，センサネットワーク技術の確立に向け，コンポーネントの開発，実証実験，標準化活動を並行して進めている。

まず，コンポーネントであるが，センササーバのベースとなるマイクロサーバ(2003年10月8日発表)，特定小電力無線を使用した無線センサ端末(2004年1月26日発表)，ZigBeeに対応した無線センサ端末(2004年9月29日発表)を開発している。

上記コンポーネントを使用した実証実験を進めることで，実使用状態における評価を進めている。事例としては，2003～2004年度に実施した経済産業省北海道経済産業局の地域新生コンソーシアム研究開発事業「低消費電力無線センサネットによる次世代生活支援システムの開発」，2004年度に実施した総務省東北総合通信局の「電波利用による高度農業支援システム実証実験」がある。

また，ZigBee Allianceのプロモータメンバー，前記総

務省の調査研究会及びユビキタスネットワークフォーラム「センサーネットワーク部会」への参画などを通じ、標準化及び普及活動を進めている。

### 3. センサネットワークを構成する技術

#### 3.1 システム構成

図2にセンサネットワークのシステム構成例を示す。楕円(だえん)で示した部分がセンサネットワークの一つのゾーンを示している。このセンサネットワークのゾーンを、センササーバを介してインターネットなどの広域ネットワークに接続する。これによって、センサネットワークの各ゾーンは携帯電話やパソコンなどの情報端末から簡単にアクセス(情報の採取や制御)することができる。また、センサネットワークの各ゾーンが自律的に連携する機能をセンササーバに実装しゾーン間を連携させていくことにより、面的な広がりが実現する。

#### 3.2 センサノード

図3にセンサノードの例を示す。センサノードは、人・モノの状況や周辺環境の状況を認識するセンサを搭載したセンサボード、センサから採取した情報をデータ変換しセンサネットワークに情報伝達する無線ボード、各ボードに電力を供給する電源から構成される。センサボードは、セ

ンサ情報の送信だけでなく、センサネットワークからの指示に従い、スイッチのON/OFFなどといった比較的単純な機器制御機能も併せ持っている。無線通信によるセンサネットワークでは、センサ情報の漏洩(ろうえい)や、成りすましによる機器制御をガードすることが不可欠であり、無線ボードにはそのためのセキュリティ機能を実装する。

センサノードの電源としては、電池や太陽光や圧力、振動などの自然エネルギーの活用が考えられる。電池は交換が必要であり、メンテナンスコストを削減するには電池の交換回数を減らす必要がある。また、自然から取り出されるエネルギーは非常に微弱である。すなわち、供給される電力は微小ということであり、対策としてセンサノードは徹底的に消費電力を削減する必要がある。省電力化には、通信回数の削減や、端末の動作・負荷状態に応じた電力制御などの低消費電力技術<sup>(3)</sup>の実装が必要である。

#### 3.3 センササーバ

センササーバは、センサネットワークとインターネットに代表される広域ネットワークをつなぐゲートウェイ機能を提供する。センサネットワークの各ゾーンに必ず1台置かれ、センサネットワークの各ゾーン間を連携させる自律連携機能や、パソコンや携帯電話などの情報端末からのアクセスを可能にするWebサーバ機能などを持っている。

センサネットワークが至る所に構築される状況では、ゲートウェイ機能を提供するセンササーバもどこにでも設置できる必要がある。このためのプラットフォームとして超小型のLinuxサーバであるマイクロサーバ(図4)がセンサネットワークのキーデバイスとなる。

#### 3.4 センサネットワークプロトコル

簡単、低コスト、低消費電力を実現する低転送レートの近距離無線通信を採用し、センサの情報や機器のスイッチのON/OFFなどの比較的単純な制御情報の通信に最適化されたネットワークである。微弱無線や特定小電力無線を使った独自プロトコルのものが出てきている。

センサネットワークが普及するためには、ネットワークプロトコルの標準化が必要である。この標準化活動は前述

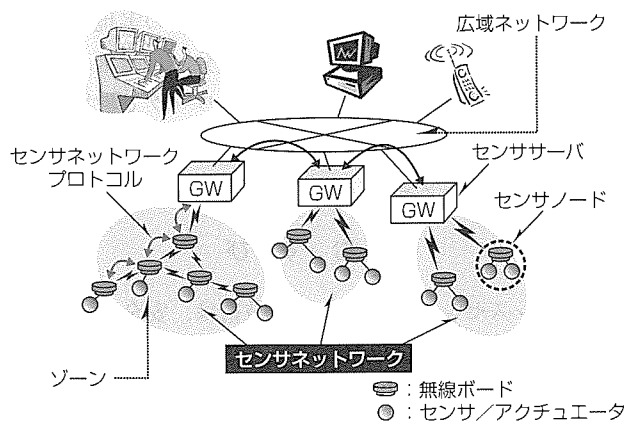


図2. センサネットワークシステム構成例

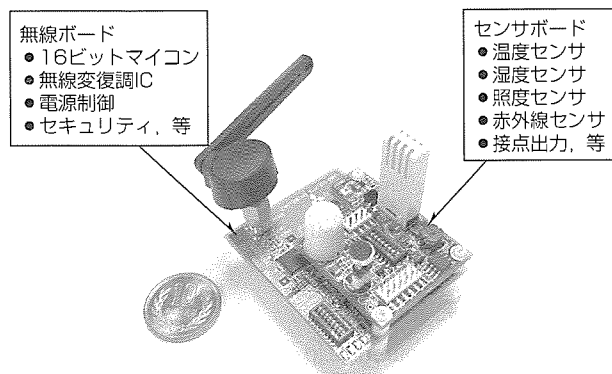


図3. センサノードの例

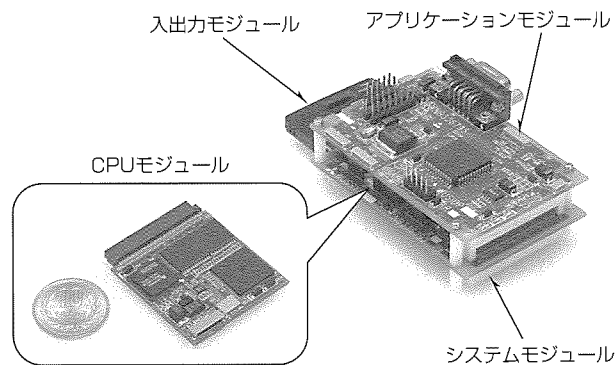


図4. マイクロサーバの例

のとおりZigBee Allianceが進めている。ZigBeeの概要は以下のとおりである。

- ZigBee Allianceが、簡単、低コスト、低消費電力を目標に仕様策定した低転送レート近距離無線通信方式
- 物理層にはWPANの低速モードとしてIEEEで標準化されたIEEE 802.15.4(2003.10.1 Released)を採用
- 物理チャンネルは16チャンネルの2.4GHz(世界共通)、10チャンネルの915MHz(USのみ)と1チャンネルの868MHz(ヨーロッパ)の3種類
- データ転送レートは、2.4GHz:250kbps, 915MHz:40kbps, 868MHz:20kbps
- 変調方式はDS-SS(Direct Sequence Spread Spectrum)
- アクセス方式は、CSMA-CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
- 応用分野として、産業、家電、ビル・住宅、ヘルスケア、ゲーム、などを想定

図5にZigBeeネットワークのトポロジーを示す。ZigBeeネットワークには、PAN(Personal Area Network) Coordinatorが最低一つあり、それを核にして、Full Function Device(FFD)と、Reduced Function Device(RFD)によりネットワークを構成する。

各デバイスの概要を以下に示す。

- (1) PAN Coordinator
  - ネットワークを制御するすべての機能を持つ
  - 十分なメモリ容量とコンピューティング・パワーを持つ
  - ネットワーク中に最低一つ配置する
- (2) Full Function Device(FFD)
  - IEEE802.15.4の全機能を持つ
  - ルーティングに必要なメモリ、コンピューティング・パワーを持つ
  - 末端デバイスとしても利用できる
- (3) Reduced Function Device(RFD)
  - ネットワークの末端デバイスとして使用
  - ルーティング機能などを排除し、末端デバイスとしてコスト優先で最適化

#### 4. 応用分野

ワイヤレスセンサネットワーク技術により、人やモノの状況、及びその周辺環境などを認識して、利用者の状況に即した様々なサービスを提供することが可能になると考えられる。

実現の近い分野としては、現時点では配線工事を行ってセンサやアクチュエータを設置しているシステムのワイヤレス化による設置容易化が考えられる。例えば、ビルや工

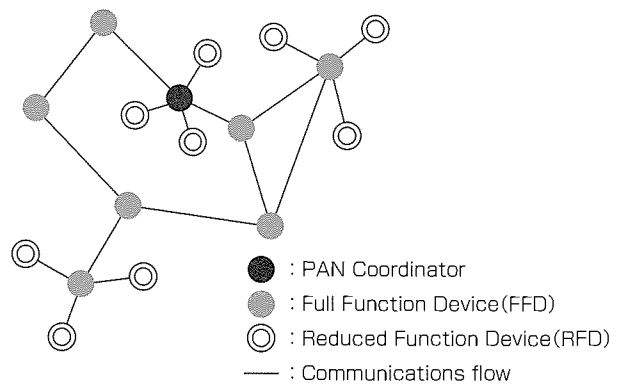


図5. ZigBeeネットワークのトポロジー

場、施設などの設備監視システムや環境管理・省エネルギーシステム、ホームセキュリティシステム、などが考えられる。

将来の利用イメージについては、総務省「ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会」が、医療・健康、防犯・セキュリティ、防災、環境リスクへの対応、農作物などの各種生産過程、などの応用分野を提示している。例えば、災害発生時に、人が入りにくい場所や広範囲にわたる地域にセンサを散布・配布し、これらがアドホックネットワークを形成してデータを収集して、水害、林野火災、土砂崩壊、液状化などの被害状況のモニタリングと、モニタリング情報に基づく最適な災害支援の実現が考えられる。また、農作物生産現場で土壌成分、日照量、温度、湿度、雨量、風向などをセンサネットワークで把握し、最適な肥料の種類や散布時期、最適な収穫時期を推奨するような農業支援システムの実現が期待されている。

#### 5. むすび

ワイヤレスセンサネットワーク技術は、安全、安心、快適で豊かなユビキタス社会を実現するキーテクノロジーの一つである。今回紹介したセンサノード、センササーバ、センサネットワークプロトコルに関する技術開発を進め、多彩なアプリケーションのコアとなるプラットフォームを今後提供していく。

#### 参考文献

- (1) ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会、総務省ホームページ  
[http://www.soumu.go.jp/joho\\_tsusin/policyreports/chousa/yubikitasu\\_c/index.html](http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/chousa/yubikitasu_c/index.html)
- (2) 総務省:「ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会」最終報告  
[http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040806\\_4.html](http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040806_4.html)
- (3) 平岡精一、ほか:センサネットワーク技術、三菱電機技報、78, No.8, 557~560 (2004)

# ユビキタスセキュリティ技術

松井 充\* 山田敬喜\*  
反町 亨\* 時田俊雄\*\*  
佐伯 稔\*

Security Technology for Ubiquitous Network

Mitsuru Matsui, Tohru Sorimachi, Minoru Saeki, Keiki Yamada, Toshio Tokita

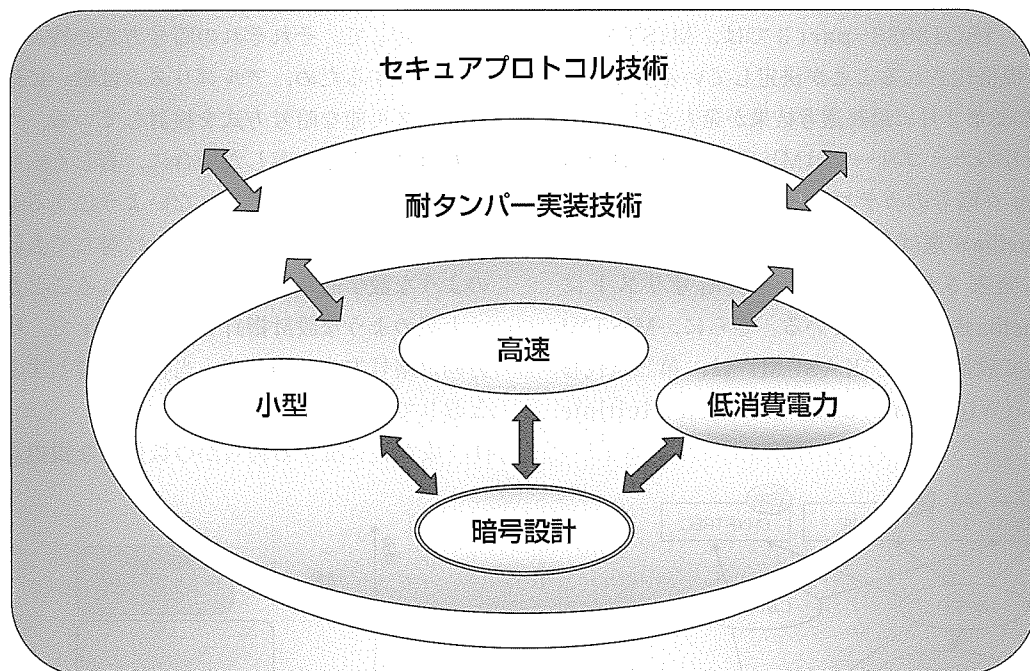
## 要 旨

ユビキタスネットワークの進展に伴い、データの盗聴・偽造・改ざんなどの防止又は検出などを実現する情報セキュリティ技術の重要性は更に増していくものと思われる。その中でも暗号技術は、情報セキュリティ技術の最重要な基盤技術の一つとして今後とも不可欠であろう。本稿では、ユビキタスネットワークに望まれる暗号技術について述べる。三菱電機は、これまで、“MISTY”やNTT(株)との共同開発の“Camellia”など安全性と実用性の両面に優れた暗号アルゴリズムを開発してきた。これらは、安全であるとともに、ハードウェアやソフトウェアのいずれにおいても、小型・高速実装可能なマルチプラットフォーム対応を特長としてきた。ユビキタスネットワークにおいてもこれらの

暗号アルゴリズムで大部分の領域をカバーできる。しかし、あらゆる機器やセンサに通信機能を持たせることを前提とするユビキタスネットワークにおいては、更に省実装(小型・低消費電力)で高速な暗号が必要となるケースが発生すると予測される。

本稿では、ユビキタスネットワークで必要とされる暗号アルゴリズムの性能要件について整理し、当社がユビキタスネットワークへの適用をターゲットとする暗号アルゴリズムの性能仕様を示す。また、それら暗号アルゴリズムを実装する上で考慮する必要のある耐タンパー実装技術やセキュアプロトコル技術についても、最新の研究開発動向を中心に述べる。

## ユビキタスネットワークに適応した暗号アルゴリズムとは？



## 暗号アルゴリズムの設計と実装への要求(イメージ)

今後ユビキタスネットワークの進展に伴い、暗号アルゴリズムの設計と実装への要求はますます拡大していくものと思われる。



1. ま え が き

本稿では、ユビキタスネットワークで必要とされる暗号アルゴリズムの性能要件について整理し、当社がユビキタスネットワークへの適用をターゲットとする暗号アルゴリズムの性能仕様(設計指針)を示す。また、それら暗号アルゴリズムを実装する上で考慮する必要のある耐タンパー実装技術やセキュアプロトコル技術についても、最新の研究開発動向を中心に述べる。

2. ユビキタスに適した暗号アルゴリズム

2.1 暗号化技術におけるこれまでの取り組み

これまで新規の暗号アルゴリズムを設計開発する場合には、数学的な安全性を確保しつつ、マルチプラットフォームに対応可能なアルゴリズムをターゲットとしてきた。その設計方針の下、これまでに開発し仕様を詳細に公開したアルゴリズムは、当社が1995年に発表した64ビットブロック暗号アルゴリズム“MISTY1”とNTT(株)と当社が2000年に共同開発した128ビットブロック暗号アルゴリズム“Camellia”がある。この二つのアルゴリズムは、図1に示すように、ISO(国際標準化機構)や総務省/経済産業省による暗号技術評価プロジェクト“CRYPTREC(CRYPTography Research and Evaluation Committees)”, 欧州のセキュリティプロジェクト“NESSIE(New European Schemes for Signature, Integrity and Encryption)”において、高い評価を得ている。ISO18033-part 3では、MISTY1とCamelliaが共に規格化されることが決定している。また、NESSIEでは、2003年2月に最終選考結果が発表され、64ビットブロック暗号のカテゴリーではMISTY1が唯一選ばれ、128ビットブロック暗号のカテゴリーでは米国標準であるAESと並びCamelliaが選ばれた。また、CRYPTRECでは、2003年3月に発表された電子政府推奨暗号リストにMISTY1, Camellia共に選ばれている。さらに、MISTY1の構成を基にして設計された“KASUMI”は、第三代移動通信システム(Wideband-Code Division Multiple

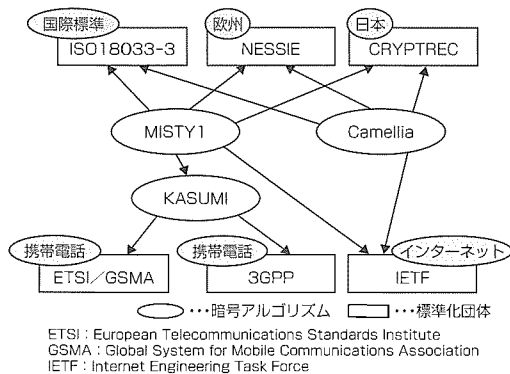


図1. 各種標準化に対する暗号アルゴリズムの関係

Access : W-CDMA)の標準化を行う3GPP(3rd Generation Partnership Project)において認定され、W-CDMAの無線部分の世界標準暗号化技術として、現在、世界に広く普及している。

2.2 ユビキタスに適した暗号アルゴリズムの設計指針

今後広く普及していくと予想されるユビキタスネットワークにおいて、セキュリティを確保するには暗号化技術が不可欠であり、その根幹を担うものが暗号アルゴリズムである。これまでに提案されている暗号アルゴリズムは、主に専用通信装置やインターネット環境を実現するパソコンなどの利用を想定されて設計されているものが大部分であった。しかし、RFID(Radio Frequency Identification)やセンサネットワーク、自動車間通信などでは今まで以上に低消費電力や実装規模の削減が要求されるようになるとともに、ストリーミング配信等の映像系の分野ではこれまで以上の高速性が求められているのが現状である。過去に提案されているセキュリティシステムでは、コスト面の問題からセキュリティ部分を犠牲としたものもあった。当社は、ユビキタスネットワークにおける情報セキュリティの適用拡大と安全性向上を目指し、リソースの限られた小型デバイス上に実装可能な暗号方式の開発を手掛けている。

ユビキタスに適した暗号方式には、図2に示すように、小型・低消費電力を実現する暗号方式と画像など大量のデータをソフトウェアで超高速処理を実現する暗号方式の二つのタイプが存在する。適用対象とする小型デバイスの制約に対して、それぞれの暗号方式の特長を最大限に生かすようにするため、アルゴリズムは唯一に固定しないカスタマイズ可能な暗号方式を検討している。ただし、複数のアルゴリズムを許容した場合に、著しく安全性が損なわれるアルゴリズムが選択されないようにする必要がある。そのため、どの暗号アルゴリズムに対しても証明可能安全性のような数学的安全性が担保されることが重要である。

上記のような設計指針を踏まえた上で、小型・低消費電力向け暗号方式に関して、当社が目標とするものは以下のとおりである。

- (1) 安全性に関する何らかの数値的な根拠を保持

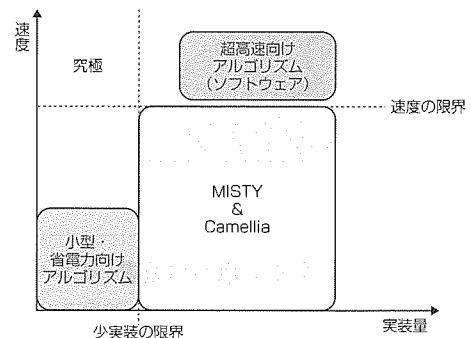


図2. 各暗号アルゴリズムへの適用ターゲット

- (2) 鍵(かぎ)長を可変とする方式
- (3) 安全性を損なわずアルゴリズムをカスタマイズ可能
- (4) ソフトウェアサイズはMISTYの1/2程度で実現
- (5) ハードウェアサイズはMISTYの1/2程度で実現

安全性に関する数値的な根拠に関しては、MISTYで実証されている差分解読法と線形解読法に対する証明可能安全性の考え方を継承し、最大平均差分確率、最大平均線形確率により示されるブロック暗号における暗号強度指標を用いることとする。また、安全性を損なわずにアルゴリズムのカスタマイズを可能とするために、アルゴリズムのカスタマイズツールを計画中である。カスタマイズツールを利用し、ユーザー自身がシステムの要求仕様を満たす適切なアルゴリズムの設定が可能となる。

### 3. ユビキタスに適した安全な暗号実装

前章で述べたように、現代暗号の安全性は主に暗号アルゴリズム自体の数学的な安全性を根拠としており、暗号に対する攻撃(解読)も数学的な手法に基づくものが大半であった。一方、1990年代後半から、暗号アルゴリズムではなく暗号装置をねらった様々な攻撃法が登場し、情報セキュリティに対する脅威となってきた。これらは、暗号装置の処理時間や消費電力といったいわゆるサイドチャネル情報を解析することから“サイドチャネル攻撃”と呼ばれている(“実装攻撃”と呼ばれることもある)。サイドチャネル攻撃は、暗号装置のサイドチャネル情報を測定する必要上、端末系の暗号装置(例えば、ICカード、携帯電話、RFIDなど)が主な攻撃対象となる。ユビキタス社会では、このような暗号装置が多数遍在することになるため、安全なユビキタス社会の実現に向けて、暗号装置には数学的な安全性だけでなく、実装面での安全性(耐タンパー性)も求められる。

#### 3.1 サイドチャネル攻撃

サイドチャネル攻撃は、例えば図3のようにして、攻撃対象である暗号装置のサイドチャネル情報を測定し、得られたデータを解析することで秘密情報を推定する攻撃法で

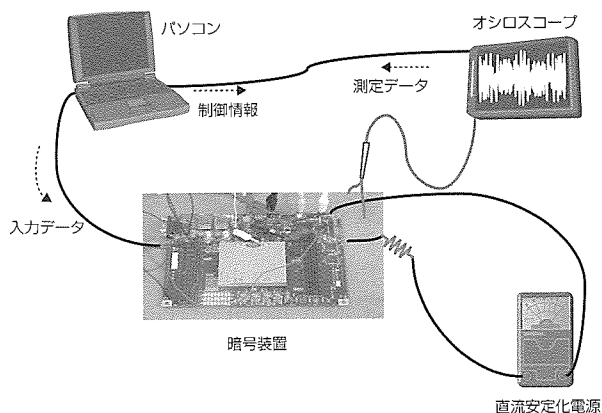


図3. 電力攻撃の基本的な測定系

ある(図は電力攻撃の例)。

様々なサイドチャネル攻撃が存在するが、今までに提案されている代表的なものを以下に幾つか示す。

- タイミング攻撃：条件分岐の成立の有無、キャッシュのヒット/ミスヒットなどによって変化する処理時間の違いから秘密情報を推定する攻撃法である。
- 電力攻撃：データに依存した暗号装置の消費電力の変化を解析して秘密情報を推定する攻撃法で、単純電力攻撃(SPA)、差分電力攻撃(DPA)などがある。
- 電磁波攻撃：暗号装置から発生する電磁波を解析する攻撃法である。

上記以外にも、これらを組み合わせた攻撃や、暗号装置の瞬間的な誤動作を利用した攻撃など、多くの攻撃法が知られており、今後もその種類は増えていくと予想される。

#### 3.2 サイドチャネル攻撃に関する動向

サイドチャネル攻撃が提案されて以来、その解析方法や対策方法が国内外で盛んに研究されてきたが、十分なメカニズムの解明や対策方法の確立など、今後の研究成果に期待するところが大きいのが現状である。

将来的に、様々なサイドチャネル攻撃に対して暗号装置の耐タンパー性を保証していくためには、客観的な安全性評価基準や公式な評価機関が必要となる。CRYPTRECや(財)日本規格協会 情報技術標準化研究センター(INSTAC)などでは、サイドチャネル攻撃や耐タンパー技術の調査を進め、世界標準の基準を提案するために活動を行っている。

#### 3.3 当社の取り組み

いかに数学的な安全性が高い暗号アルゴリズムであっても、サイドチャネル攻撃に対して全く無防備な実装を行うと、秘密情報を盗まれないとも限らない。当社では、暗号装置のハードウェアレベル、ソフトウェアレベル、システムレベルといった各階層で耐タンパー性に注意を払った実装を考慮している。本稿では、紙面の都合上、この中から、当社が開発した半導体素子レベルの差分電力攻撃対策であるRSL(Random Switching Logic)<sup>(1)</sup>について述べる。図4は、既存の対策回路とRSL回路を著者等がFPGA(Field Programmable Gate Array)に実装し、攻撃結果を比較したものである。図中のスパイクが秘密情報の漏洩(ろうえい)であるが、RSLの効果が特に高いことが分かる。RSLはあらゆる暗号アルゴリズムに適用可能な汎用的な技術である。

### 4. ユビキタスに適したセキュアプロトコル技術

ユビキタスネットワークに接続されている機器やデバイスはパソコンで使用されているプロセッサよりも遥かに非力なプロセッサと限られたメモリで動作している。IP(Internet Protocol)系のセキュアプロトコルとしてはSSL

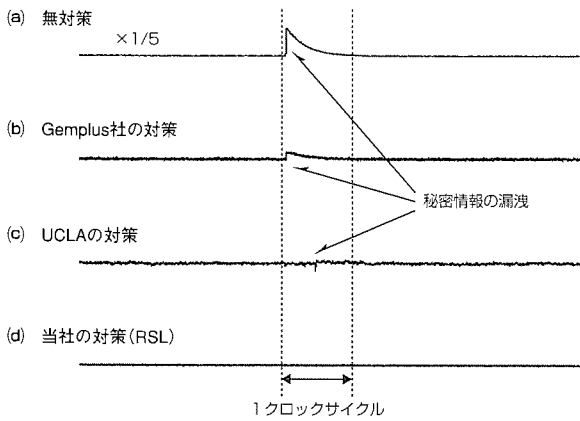


図4. 差分電力攻撃結果の比較例

(Secure Socket Layer)などが有名であるが、リソースの少ない組み込み機器などで使用される非IP系のセキュアプロトコルはアプリケーションごとに個別対応することが多く、一般的には次のような要件を満たすことが好ましい。

- 5～6kバイト程度のメモリでも実装可能
- 10～100kbps程度の低速通信でも安全で効率的
- 100ms以下で通信接続可能なリアルタイム性

#### 4.1 非IP系セキュアプロトコル

セキュアな通信路を確立するための非IP系セキュアプロトコル例を図5に示す。非IP系セキュアプロトコルは、相互認証と鍵共有を行う“Authセッション”と共有されたセッション鍵でデータを暗号化する“Appセッション”から構成される。RFIDやセンサネットワーク、自動車間通信などに使用される非IP系セキュアプロトコルの基本機能を以下に示す。

##### (1) 認証機能

Authセッションにおいてチャレンジと呼ばれる乱数を送信し、暗号化されたレスポンスの正当性を検証することで認証を行う。認証方式としては実績豊富なISO/IEC9798規格の3パス相互認証方式をベースとし、アプリケーションの特性に合わせて高度化する。繰返し攻撃やサイドチャネル攻撃に対抗するためには、次のような対策を施すことが効果的である。

- チャレンジ空間を  $2^{64}$ 以上とする。
- 耐タンパー性の低い方からトランザクションを開始するとともに、シーケンス番号を挿入する。
- 規定回数以上の認証エラーを検出したときには秘密鍵を消去するか無応答とする。

##### (2) 鍵共有機能

Appセッションで使用するセッション鍵はAuthセッションで交換した乱数などから生成する。必要に応じてデータ認証のためのMAC(Message Authentication Code)鍵を共有してもよい。また、1:n通信を行う場合には、機器やデバイス固有のIDとマスタ鍵からAuthセッションの鍵

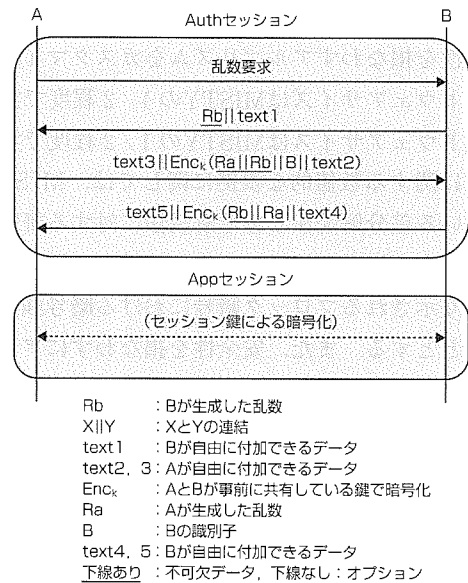


図5. ISO/IEC9798ベースの非IP系セキュアプロトコル

を生成する。

##### (3) 暗号化機能

暗号方式としては軽量で十分な速度が見込める共通鍵暗号方式を選択する。また、暗号を解読する技術は年々向上するため、複数暗号に対応できる切替え方式を実装することが望ましい。

#### 4.2 セキュアプロトコルの安全性

セキュアプロトコルの安全性は、プロトコル仕様及びプロトコルに要求される特性をモデル化し、評価ツールを用いて評価される。例えば、形式的な表現法のCSP(Communicating Sequential Processes)でプロトコルを表現し、FDR(Failure Divergence Refinement)で要求される特性を満たすかどうかを検査する<sup>(2)</sup>。1:n通信への応用やサイドチャネル攻撃に対する考慮など、今後は急速に発展するものと予想される。

## 5. む す び

ユビキタス時代に適応した情報セキュリティ技術として、安全性と実用性に優れた省実装暗号アルゴリズムの設計指針を中心に、耐タンパー実装技術及びセキュアプロトコル技術について述べた。今後は、ここで示した設計指針に基づく暗号アルゴリズム設計を実施する予定である。

## 参考文献

- (1) Suzuki, D., et al.: Random Switching Logic: A Countermeasure against DPA based on Transition Probability, Cryptology ePrint Archive, 2004/236 (2004)
- (2) Tabet, A., et al.: Formal Verification of EKE Protocol Using Casper/CSP and FDR Model Checking, Proceedings of SCIS2005 (2005)

# 携帯電話アンテナ技術

深沢 徹\*  
田中徹哉\*\*

Antenna Technology for Portable Telephone

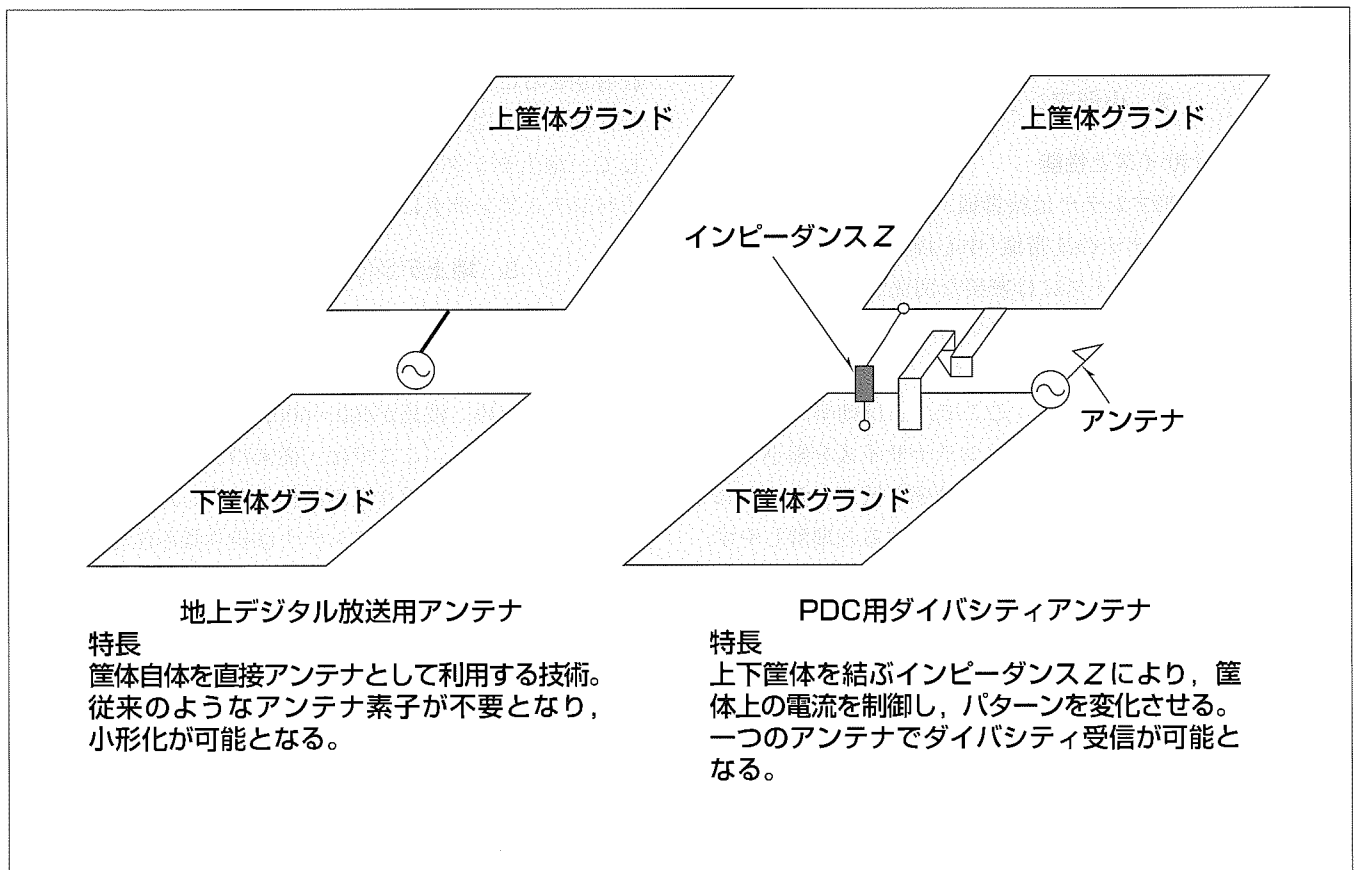
Toru Fukasawa, Tetsuya Tanaka

## 要 旨

携帯電話に限らず、アンテナの大きさと性能には密接な関係がある。アンテナの大きさを議論する際には、物理長を使用する周波数の波長で規格化した電気長を用いる。電気長が $1/2\pi$ 以下のアンテナは電気的小形アンテナ(以下“小形アンテナ”という。)と定義される。携帯電話に搭載されるアンテナはほとんどが小形アンテナの範疇(はんちゆう)に入る。小形アンテナの欠点として狭帯域、低効率が挙げられる。さらに、狭帯域、低効率はアンテナを小形化するほど顕著になるため、アンテナ性能を維持するためにはアンテナの小形化に限界が生じる。これは、携帯電話に要求される小形化と相反することとなる。一方、アンテナに必要な部材は空間に開かれた良導体である。この導体

の大きさが波長に比べてある程度の大きさを持っていれば高性能なアンテナが実現できる。携帯電話の構造物でこれらの条件を満たすものとして携帯電話の筐体(きやうたい)が挙げられる。現在携帯電話に主に用いられる周波数は800MHzや2GHzがあり、これらの波長は150~350mm程度となるため、現在の端末サイズ100~200mmは小形アンテナにとって十分な大きさとなる。つまり、携帯電話の筐体自体をアンテナに有効利用することで小形かつ高性能なアンテナが実現できる可能性がある。ここでは、携帯電話の筐体を有効に利用したアンテナの例として、地上デジタル放送用アンテナ、及びPDC(Personal Digital Cellular)用のダイバシティアンテナについて述べる。

特集  
II



## 携帯電話の筐体を有効に利用した小形アンテナ

小形アンテナの大きさと性能は比例関係にある。携帯電話では比較的サイズの大きい筐体をアンテナとして有効に利用することで、小形で高性能なアンテナが実現できる可能性がある。上図は、この応用例として、地上デジタル放送用のアンテナ、及びPDC用のダイバシティアンテナを示したものである。

## 1. ま え が き

一般的にアンテナの大きさと性能には密接な関係があり、携帯電話に搭載されるアンテナはほとんどが小形アンテナに分類される。小形アンテナとは物理長を使用する波長で規格化した電気長が $1/2\pi$ 以下のものである<sup>(1)</sup>。小形アンテナは小さいという利点があるものの、狭帯域、低効率という欠点があり、その度合いは小形化するほど顕著になるため、アンテナ性能を維持するためにはアンテナをある程度大きくする必要はある。これは、携帯電話に要求される小形化と相反することとなる。一方、アンテナに必要な部材は空間に開かれた良導体である。この導体の大きさが波長に比べてある程度の大きさを持っていれば高性能なアンテナが実現できる。携帯電話の構造物でこれらの条件を満たすものとして筐体が挙げられる。現在携帯電話では主に800MHzや2GHzの帯域が用いられているが、これらの波長は150~350mm程度となるため、現在の端末サイズ100~200mmは小形アンテナにとって十分な大きさとなる。つまり、携帯電話の筐体自体をアンテナに有効利用することで小形な高性能アンテナが実現できる可能性がある。ここでは、携帯電話の筐体を有効に利用したアンテナの例として、地上デジタル放送受信アンテナ、及びPDC用のダイバシティアンテナについて述べる。

## 2. 小形アンテナの特徴

### 2.1 アンテナサイズと性能

一般的に、小形アンテナは狭帯域、低効率という特徴を持っている。アンテナの比帯域(中心周波数で規格化した帯域幅)とアンテナサイズには密接な関係があり、小形アンテナに関しては帯域とアンテナの体積が比例関係にあることが明らかとなっている<sup>(1)</sup>。また、アンテナの効率は $\eta = P_r / (P_r + P_d)$ と表される。ここで、 $\eta$ は効率、 $P_r$ は放射電力、 $P_d$ は損失電力である。アンテナサイズを縮小すると、 $P_r$ が $P_d$ に比べ小さくなり、放射効率が低下する。これらの現象はアンテナ近傍の電磁界を観測すると理解しやすい。

図1は2種類のアンテナに同じ電力を給電した場合のアンテナ近傍の電界強度を示したものである。モノポールアンテナは、アンテナ高が $\lambda/4$ あり、中程度のサイズである。ここで、 $\lambda$ は使用する周波数における波長を表す。逆Fアンテナは、アンテナ高を $\lambda/10$ 以下に小形化した代表的な小形アンテナである。これらの図を見ると、モノポールアンテナでは最大でも-20dB程度の強度であるが、逆Fアンテナでは0dB程度となっている。小形アンテナは、同じ電力を放射するために、アンテナ近傍により強い電界(電圧)が生じるということを示している。同様なことが磁界(電流)にも言える。それゆえ、小形アンテナでは、アン

テナを構成する導体やアンテナ周囲の空間に若干でも損失性の媒質があると、大きな損失電力となり、効率が劣化しやすいくということが言える。

### 2.2 筐体の有効利用

参考文献(1)には、これまで実用化されてきたアンテナに対し、アンテナ利得 $G$ とアンテナの物理長 $L$ の関係が示されている。 $G = 8 \log(2L/\lambda)$  [dBd]である。dBdという単位は半波長ダイポールに比べた場合にどのくらい電波を強く受けるかという指標であり、小形アンテナでは効率 $\eta$ とおおむね一致する。実際に発売されている携帯電話には900MHz帯で20mm以下のアンテナが実現されている。このアンテナの利得を上式に入れて計算すると、-7.7dBという効率になる。しかし、実際には-1dB程度の効率が実現できている。これは一見矛盾(むじゅん)するように見えるが、図2を見るとその理由が明らかになる。

図は、携帯電話を模擬したモデル(直方体の筐体上にアンテナを設置)に対し、アンテナの給電点にパルス電界を与え、周囲の電界の時間変化を示したものである。右側の図を見ると、電界はアンテナの部分だけではなく、筐体の上下で強くなっていることが確認できる。つまり、アンテナ素子のみならず、筐体自体が放射素子として動作していることを表している。それゆえ、アンテナ素子自体を小形化しても比較的大きなサイズを持つ筐体から電波を有効に放射させることでアンテナとしての性能を維持することができる。以下に、筐体をアンテナとして有効利用した例として、地上デジタル放送用のアンテナ、及びPDC用のダイバシティアンテナについて述べる。

## 3. 地上デジタル放送用アンテナ

### 3.1 アンテナ形状

地上波デジタル放送はUHF(Ultra High Frequency)帯で行われるため、波長が400~600mmであり、物理的な小形化が困難である。ここでは、従来のアンテナに代わる小形アンテナとして、折り畳み筐体を利用したダイポールアンテナを提案する。このアンテナは折り畳み筐体において上下筐体を直接励振するアンテナであり、アンテナ専用の

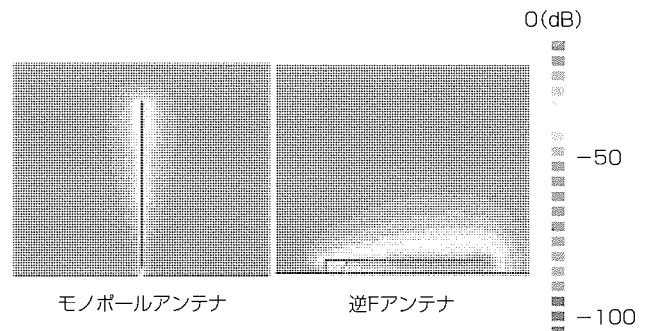


図1. アンテナ近傍の電界分布

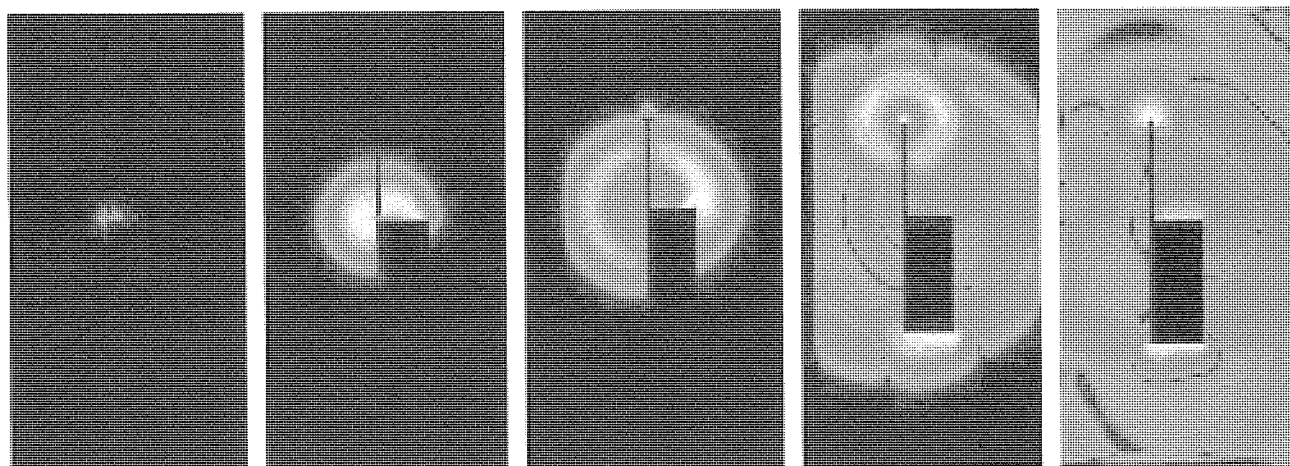


図2. 携帯電話の周囲の電界分布

構造物がほとんど要らない小形な内蔵アンテナが実現できる。従来のモノポールアンテナ(アンテナA)と提案するダイポールアンテナ(アンテナB)を図3に示す。

### 3.2 放射特性

電波暗室内で測定した各アンテナの水平面内の放射パターンを示す。アンテナの特性は人体を含めた使用環境に大きく影響を受けるため、人体が保持した実使用に近い状態で測定する。また、電波の到来方向はおおむね水平方向であるため、水平面内の放射パターンで議論する。放射パターンを図4に示し、その利得を平均化した値(平均化利得)を表1に示す。表は基準となるダイポールアンテナとの比で示す。表から、アンテナAとアンテナBは同程度の平均化利得を持っており、その値は-2.5~-2.8dBであることが分かる。

次に、各アンテナに対し、長野市内の屋内2か所、屋外2か所の実フィールドで試験放送の受信試験を行った。屋内は人体が保持した状態で1周回転し、その平均受信電力を算出する。屋外は10分程度の周回コースを歩行し、その間の平均受信電力を算出する。標準ダイポールで同じ試験を行い、各アンテナとの比を表1に示す。表から、4か所の平均値はアンテナAとアンテナBでほぼ同一の値を示している。このことは、実フィールドにおいても、筐体を利用して小形化したアンテナBが従来のアンテナAと同程度の利得を持っていることを示している。また、この傾向は暗室内の測定とおおむね相関がとれている。

## 4. PDC用ダイバシティアンテナ

### 4.1 アンテナ形状

移動体通信システムでは、フェージングによる通信品質の劣化を抑制するため、ダイバシティ方式が用いられる。これまでのダイバシティアンテナは受信用に二つのアンテナを用いるものであり、受信状態の良い方のアンテナに切り換えていた。そのため、二つのアンテナ分の設置エリア

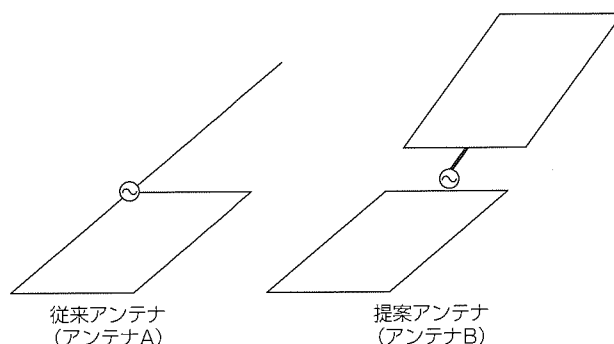


図3. 地上デジタル放送用アンテナ

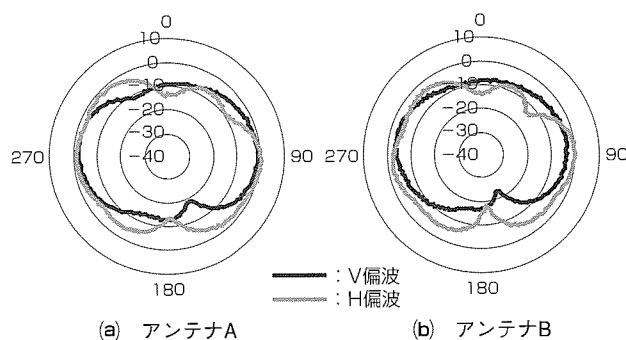


図4. 各アンテナの放射パターン

表1. 各アンテナの利得

|       | 暗室内利得(dB) | フィールドにおける利得(dB) |      |      |      |      |
|-------|-----------|-----------------|------|------|------|------|
|       |           | 屋内1             | 屋内2  | 屋外1  | 屋外2  | 平均   |
| アンテナA | -2.5      | -2.6            | -1.1 | -1.1 | 0.8  | -1.0 |
| アンテナB | -2.8      | -0.5            | -0.9 | -1.8 | -0.5 | -0.9 |

と構造物を必要としていた。ここで提案する方式は、折り畳み筐体を接続するインピーダンスZを変化させ、一つのアンテナで異なる放射パターンを得るというものである。アンテナ素子が一つになるため、設置エリアやアンテナの構造物を小さくできるという利点がある。図5にその構造

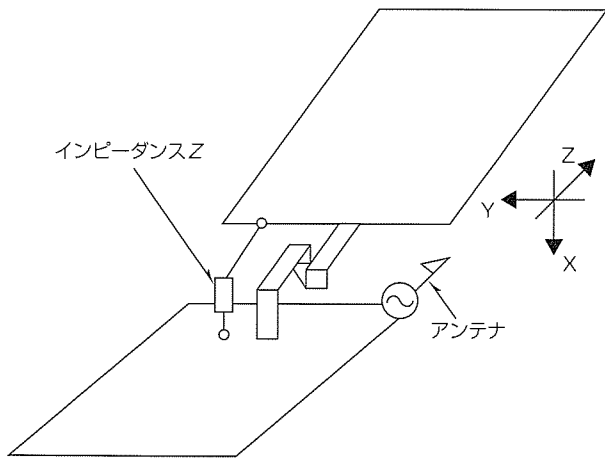


図5. ダイバシティアンテナの構造

を示す。折り畳み筐体の二つのグラウンドの中央部にアンテナを設置する。グラウンド間には信号線が配置され、それと並列にインピーダンス $Z$ を介して接続する。

#### 4.2 放射特性

インピーダンス $Z$ を変化させながら放射パターンを観測した結果、 $Z=Z_0$  (開放)とした場合と、 $Z=Z_1$  (容量性)とで大きく放射パターンが変化することが確認できた。図6にそれぞれの $Z$ に対する放射パターンを示す。 $Z=Z_0$ の場合は横向きに8の字パターンを描いているのに対し、 $Z=Z_1$ では、それとは大きく異なる放射パターンとなっている。つまり、 $Z$ を $Z_0$ と $Z_1$ で切り換えることで、アンテナが同一でありながら、異なる放射パターンが実現できる。

図のように放射パターンが変化する原理を調べるため、筐体上を流れる電流分布を調べた。その結果、 $Z=Z_0$ の場合は上下筐体に同相で電流が流れるのに対し、 $Z=Z_1$ では逆相になっていることが確認できた。それぞれの筐体上の電流の放射パターンは図7のように8の字パターンを描く。 $Z=Z_0$ の場合は同相であるため、横方向で電界が加算され、全体として8の字パターンを描く。これに対し、 $Z=Z_1$ の状態では逆相のため、横方向で打ち消し、全体として蝶(ちょう)の羽のようなパターンになる。つまり、 $Z$ を変化させることで筐体上の電流を制御し、筐体上の電流からの放射パターンを変化させているのである。

### 5. む す び

携帯電話において、筐体をアンテナとして有効に利用することで小形な高性能アンテナが実現できることを述べた。

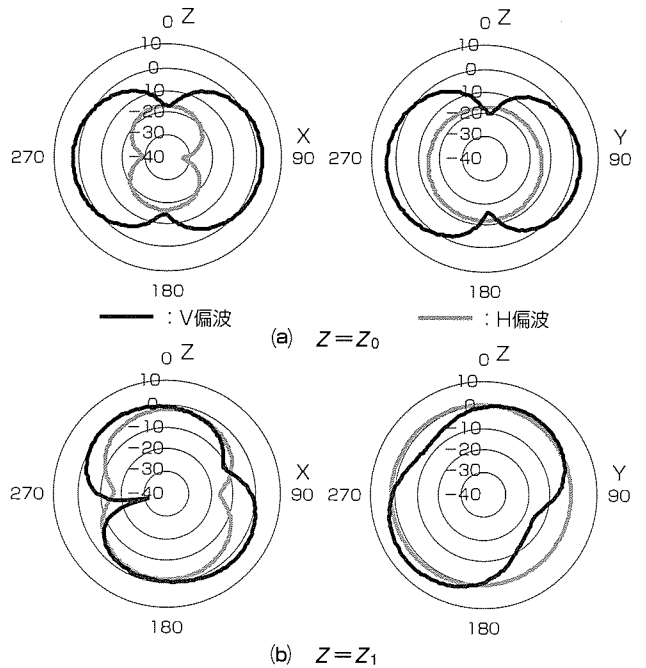


図6. 各 $Z$ に対する放射パターン

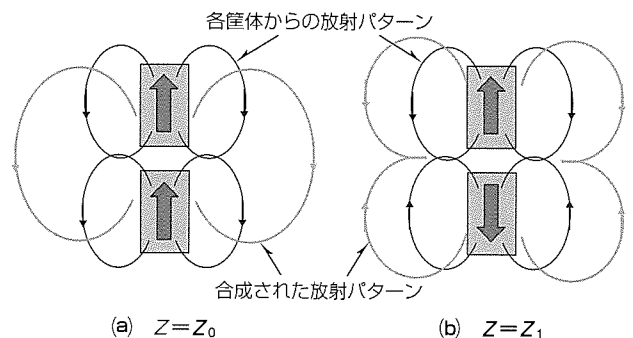


図7. ダイバシティアンテナの動作原理

その一例として、地上デジタル放送受信アンテナ及びPDC用ダイバシティアンテナを紹介し、良好な特性が得られることを述べた。

#### 参考文献

- (1) 進士昌明：小形・薄型アンテナと無線通信システム，電子情報通信学会論文誌B，71-B，No.11，1198～1205 (1988-11)
- (2) 藤本京平：小形アンテナに関する研究動向，電子情報通信学会誌，830～838 (1987-8)



# 特許と新案 \* \* \*

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

## 電池 特許第3527858号(特開2000-200585)

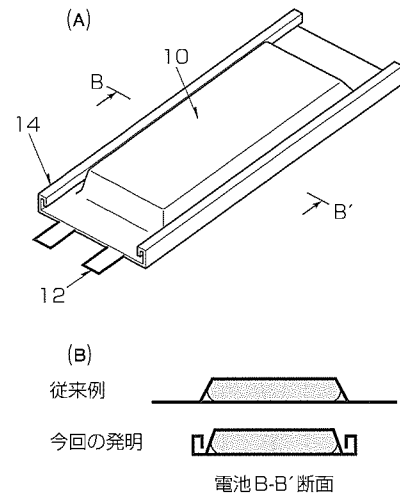
発明者 塩田 久, 相原 茂, 竹村大吾, 吉岡省二  
吉瀬万希子, 荒金 淳, 漆畑広明, 吉田育弘  
村井道雄, 川口憲治, 尾崎博規, 市村英男  
森安雅治, 中出口真治, 西村 隆, 塚本 寿

この発明は、電池体を封入するための軽量の電池パッケージに関するものである。

軽量のラミネートシートをパッケージに用いた電池においては、外気の水分遮断や電解液の漏液防止のため、シール幅を広くする必要があり、電池の体積エネルギー密度が低下する問題があった。このシール部分は電池側面より張り出したフランジ形状となるため、電池の占有面積が大きくなり、体積エネルギー密度低下の原因となる。

この発明では、電池のパッケージを構成するラミネートシートを、ラミネートシートに塑性変形性を付与できる厚みの金属シートと、ラミネートシートに耐曲げ加工性を付与できる厚みの高分子シートとを積層した構造とし、電池パッケージシール部分を折り畳み又は巻き込み加工することにより、シール部分の幅を減少することなく、シール部

分の占有面積を縮小して電池の体積エネルギー密度を向上できる。



## 誘導電動機の制御装置 特許第2074954号(特公平07-093839)

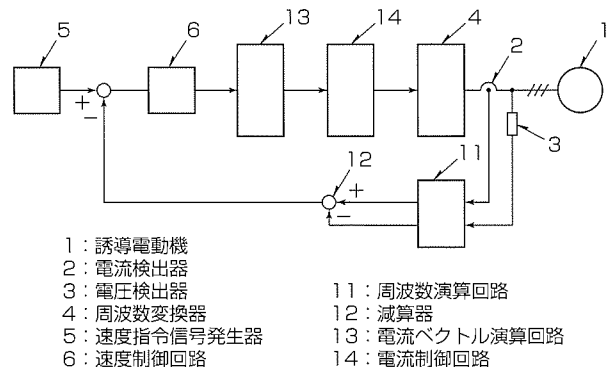
発明者 小山正人

この発明は、誘導電動機の回転速度を検出する速度検出器を用いることなく速度制御可能な誘導電動機の制御装置に関するものである。

従来は、誘導電動機の一次電圧、一次電流から演算によって求めた二次磁束を利用して誘導電動機のすべり周波数を推定し、この推定値が指令値と一致するように、その差を積分して誘導電動機の回転速度を推定していた。しかし、低速回転時には積分器のドリフトが原因ですべり周波数が正しく推定できず、良好な速度制御性能が得られないという問題があった。

この発明では、周波数演算回路(11)において、誘導電動機の一次電圧と一次電流から二次磁束の時間変化率である二次誘起電圧を演算し、この誘起電圧を利用して一次周波数とすべり周波数を積分器を用いずに推定するようにしたの

で、全運転領域において常に正確な一次周波数とすべり周波数が検出できる。さらに、一次周波数とすべり周波数の差として回転速度が検出できるので、優れた過渡応答特性を持つ誘導電動機の制御装置が得られる。



- 1: 誘導電動機
- 2: 電流検出器
- 3: 電圧検出器
- 4: 周波数変換器
- 5: 速度指令信号発生器
- 6: 速度制御回路
- 11: 周波数演算回路
- 12: 減算器
- 13: 電流ベクトル演算回路
- 14: 電流制御回路





# 特許と新案\*\*\*

三菱電機は特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

## データ変換装置 特許第3035358号(国際公開番号WO 090/-09705)

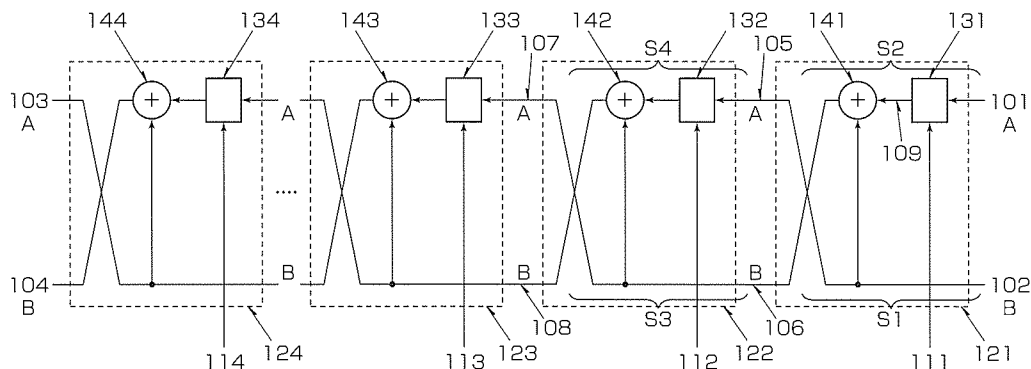
発明者 松井 充, 時田俊雄

この発明は、情報通信等においてデジタル情報を保護する入力データの暗号化と復号、及びデータ拡散等のためのデータ変換装置に関するものである。従来のデータ変換装置は、順次処理であるため処理が遅くなるという課題があった。

この発明は、上記の課題を解決するためになされたもので、複数の副変換処理を並列で行えるように構成して、暗号化・復号、及びデータ拡散等のデータ変換処理の高速化を目的とする。図はこの発明による暗号化回路である。この発明にかかわるデータ変換装置は、任意の二つのA入力データとB入力データに対し、二つの非線形変換(131,

132)と二つの鍵(かぎ)パラメータ(111, 112)を並列に作用させる機構を備え、その二組の変換結果の各々を二組の排他的論理和(141, 142)を介して次の段への入力とする構成をとっている。この構成を従属接続することで、奇数段相当の演算と偶数段相当の演算を並行して処理でき、演算の高速化を図ることができる。

この発明は、当社の暗号アルゴリズムMISTYや、第三代携帯電話W-CDMA方式の国際標準暗号であるKASUMIに使われている。また、この発明は、平成16年度全国発明表彰において恩賜発明賞を受賞した。



### 〈本号記載の商標について〉

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 〈次号予定〉三菱電機技報 Vol.79 No.8 特集「利用される宇宙」

|  |   |
|--|---|
| <p>三菱電機技報編集委員</p> <p>委員長 三嶋吉一</p> <p>委員 小林智里 増田正幸 山木比呂志<br/>佐野康之 長谷川裕 堤清英<br/>浜敬三 村松洋 松本修<br/>瀬尾和男 藤原正人 光永一正<br/>黒畑幸雄 部谷文伸</p> <p>事務局 園田克己</p> <p>本号取りまとめ委員 小山正人<br/>本島邦明</p>  | <p>三菱電機技報 79巻7号 2005年7月22日 印刷<br/>(無断転載・複製を禁ず) 2005年7月25日 発行</p> <p>編集人 三嶋吉一</p> <p>発行人 園田克己</p> <p>発行所 三菱電機エンジニアリング株式会社 e-ソリューション&amp;サービス事業部<br/>〒102-0073 東京都千代田区九段北一丁目13番5号<br/>日本地所第一ビル 電話 (03)3288局1847</p> <p>印刷所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス</p> <p>発売元 株式会社 オーム社<br/>〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地<br/>電話 (03)3233局0641</p> <p>定価 1部945円(本体900円) 送料別</p> |
| <p>URL <a href="http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/">http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/</a></p>   | <p>三菱電機技報に関するお問い合わせ先 cep.giho@ml.hq.melco.co.jp</p>   |
| <p>英文季刊誌「MITSUBISHI ELECTRIC ADVANCE」がご覧いただけます URL <a href="http://global.mitsubishielectric.com/company/r_and_d/advance/advance.html">http://global.mitsubishielectric.com/company/r_and_d/advance/advance.html</a></p> |   |

# スポットライト

## ●新型UPS 階調制御インバータ搭載AXラックマウントシリーズ

“PowerUPS AXラックマウント”は、高効率、電圧調整機能、力率調整機能を持ち、低価格、小型化を実現する三菱電機独自の新技术であるAMIT(Advanced Multi Inverter Technology)を採用した新しいUPSです。サーババックアップ分野で使用していただくため、薄型、小型のラックマウントタイプで1.5kVA、3.0kVAの2容量タイプ、バックアップ時間に標準時間タイプ(5分間/Sタイプ)と長時間タイプ(10分間又は15分間/Lタイプ)の4種類を開発しました。AMITにより実現される階調制御インバータ

方式はPWMインバータ方式と比較して次の特長があります。

- (1) 常時商用方式と同等な高効率(95%以上)、かつ、高速切換え(1/4周期以下)を実現
- (2) ラインインタラクティブ方式の代表機能である電圧調整AVR機能を搭載
- (3) 常時インバータ方式で実現される力率調整機能を搭載
- (4) 出力・EMIフィルタの小型化で小型・薄型ラックマウントを実現(1.5kVA:1U 43mm, 3.0kVA:2U 87mm)



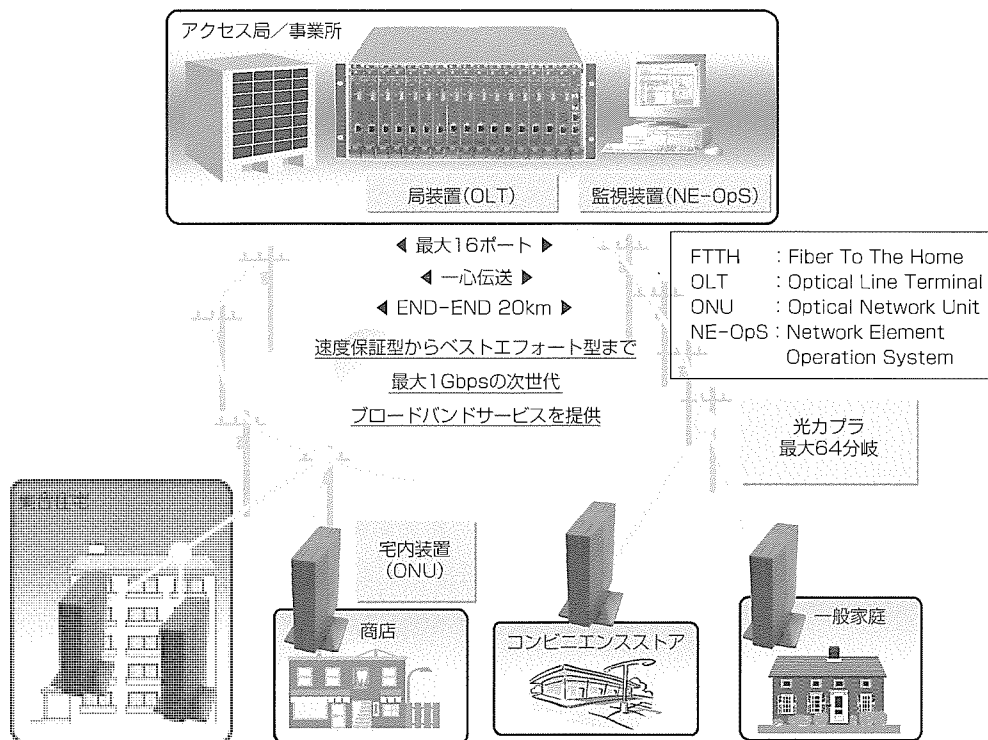
住所：〒104-6215 東京都中央区晴海1-8-12 (オフィスタワーZ棟15階)

会社名：三菱電機株式会社 お問い合わせ先：本社 機器営業第二部 TEL 03-6221-2210

## ●FTTH用標準GE-PONシステム

ユビキタスネットワーク社会の到来に対して、三菱電機は、従来保有技術であるギガビットイーサネット技術とPON技術の融合により、経済的に最大1Gbpsの超高速ア

クセス回線を提供するGE-PONアクセスシステムを市場投入し、多くのFTTHサービス事業者にご利用いただいております。



GE-PONシステム構成

住所：〒104-6212 東京都中央区晴海1-8-12 (オフィスタワーZ棟13階)

会社名：三菱電機株式会社 お問い合わせ先：通信システム事業部 通信第一部 TEL 03-6221-2652