



# 業績賞贈呈

(写真：敬称略)

本会選奨規程第9条イ号（電子工学および情報通信に関する新しい発明，理論，実験，手法などの基礎的研究で，その成果の学問分野への貢献が明確であるもの），ロ号（電子工学および情報通信に関する新しい機器，または方式の開発，改良，国際標準化で，その効果が顕著であり，近年その業績が明確になったもの）による業績に対し，下記の6件を選び贈呈した。

## アドホックネットワーク・ 無線メッシュネットワーク技術の 先導的研究開発



受賞者 間瀬憲一

近距離の相手であれば，電話網などの通信インフラに頼らず随時通信を行いたいというニーズに応じて，移動端末のみで即時にその場だけのネットワークを作るという発想がある。そのようなネットワークはアドホックネットワークと呼ばれ，同じく無線マルチホップ通信を利用する無線メッシュネットワークとも密接に関連する。これらのネットワーク概念は自律分散制御，信頼性，スケーラビリティなどの面で挑戦に値する研究領域を創出する。

受賞者はアドホックネットワーク・無線メッシュネットワーク分野の研究開発の第一人者として長年中心的な役割を果たし，卓越した構想力，熱意と強力なリーダーシップにより，本分野の基盤技術の確立<sup>(1)</sup>，大規模災害時の利用技術確立などに顕著な功績を上げた。

2004年から2008年にかけて，ノード数90を超える世界有数の大規模屋外テストベッドを開発・構築した(図1)<sup>(2),(3)</sup>。本テストベッドを利用して，2005年には産学官11機関が参加する実験チームを指揮し，アドホックネットワークの安定運用に成功した。2006年に

はアドホックネットワーク・ルーティングプロトコルOLSRv2の国際標準化推進グループ(仏，米，ノルウェー，カナダ，日本の5か国)による国際共同実験，OLSRv2の仕様策定への協力，実装開発などを主導した。また，OLSRv2シミュレータの開発を指揮し，米Scalable Network Technologies社のネットワークシミュレータQualNetに，2006年標準搭載された。

大規模災害復旧時，避難所などに係留する複数の気球間を空中アドホックネットワークで接続し，1か所に衛星地球局を置くことにより被災地内外の通信を確保する構想「スカイメッシュ」を2006年に提唱し，実証実験を重ねてきた<sup>(4)</sup>。その後類似の構想が内外の産業界から相次いで発表され，その先駆けとなったものである。広域被災地のモニタリングにおいて電気自動車と無人超小形ヘリコプターを活用し，ヘリコプター駆動用モータのバッテリーを電気自動車バッテリーにより充電する構想は内外の関心を集めている<sup>(5),(6)</sup>。小容量の仮設回線などを用いて避難所で多くの避難者に対して鉛筆と紙があれば被災地外のインターネット利用者とのメッセージ交換が可能になる避難所通信サービスの構想を2010年に実用化した<sup>(7)</sup>。

2004年の新潟県中越地震により被災した旧山古志村の復興に資するため，2006年に無線メッシュネットワークを構築し，住民モニタにインターネット接続サービスを提供した。2011年の東日本大震災に際して，東松島市長の要請に基づき，宮戸地区に無線マルチホップに基づくインターネット接続回線を構築し，避難所利用者に避難所通信サービスを提供する活動により，大規模災害時の通信確保の実践を行うとともに諸課題を明らかにした(図2)<sup>(5)</sup>。

本分野の研究開発，国際標準化，産業利用などの促進を目指して産学官連携(27機関)のアドホックネット

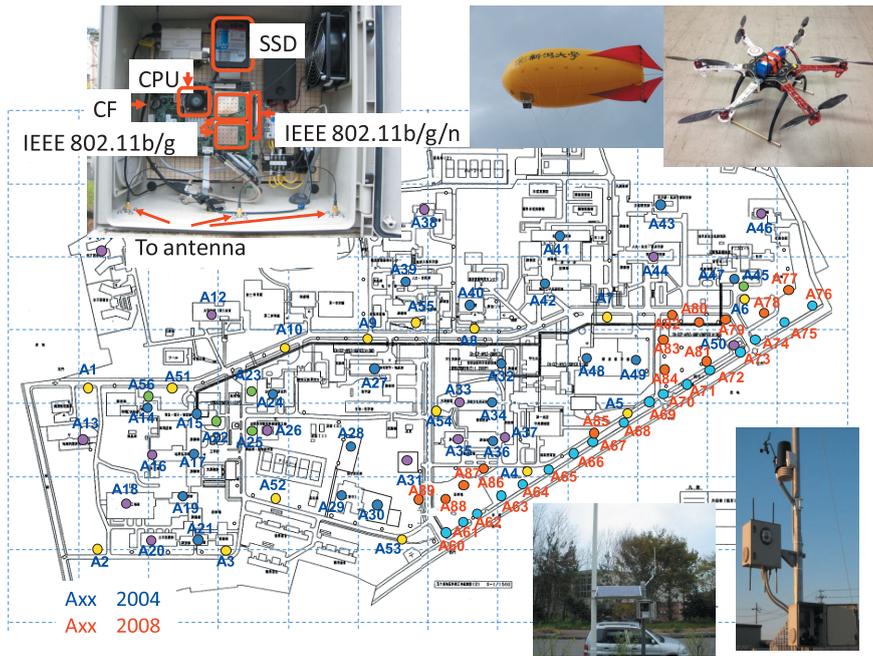


図1 新潟大学五十嵐キャンパスを中心とする大規模屋外テストベッド

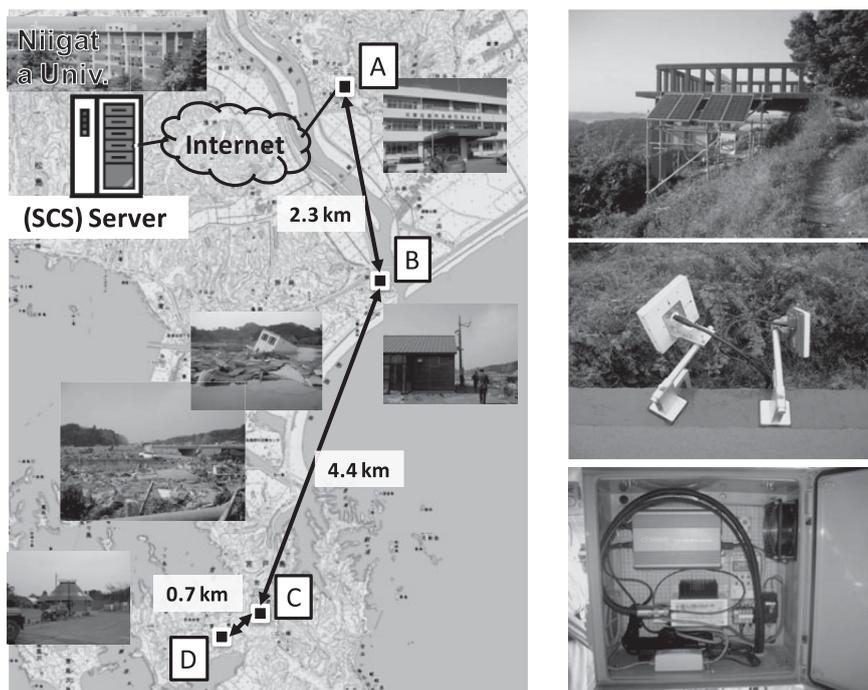


図2 東松島市に構築した避難所通信サービスを提供する無線マルチホップネットワーク

ワークプラットフォームに関するコンソーシアムを2003年12月に設立し、2013年3月まで運営委員会委員長を務め、本分野の共同研究推進、研究プロジェクト創出、技術開発と産業化の促進に貢献した。

以上のように、候補者は世界有数のアドホックネットワーク・無線メッシュネットワークの大規模テストベッ

ドを開発し、本分野の技術体系化、実証的研究開発をけん引してきた。これらの成果は、IEEE Fellow (2005)、IEEE CQR (Communications Quality and Reliability) Chairman's Award (2010)、The Ninth International Conference on Networking and Services Best Paper Award (2013) 受賞、また、一連の招待論文・招待講

演<sup>(2), (5), (7)-(10)</sup>を依頼されるなど、高く評価され、その業績は極めて顕著であり、本会業績賞にふさわしいものである。

## 文 献

- (1) K. Mase, "Layer3 wireless mesh networks : Mobility management issues," vol. 49, no. 7, IEEE Commun. Mag., pp. 156-163, 2011.
- (2) S. Obana, B. Komiyama, and K. Mase, "Test-bed based research on ad hoc networks in Japan," IEICE Trans. Commun., vol. E88-B, no. 9, pp. 3508-3514, Sept. 2005.
- (3) K. Mase, Y. Owada, H. Okada, and T. Imai, "A testbed-based approach to develop layer 3 wireless mesh network protocols," International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communications, March 2008.
- (4) H. Okada, H. Oka, and K. Mase, "Network construction management for emergency communication system SKYMESH in large scale disaster," IEEE International Workshop on Management of Emerging Networks and Services, pp. 875-880, 2012.
- (5) K. Mase, "Information and communication technology and electric vehicles—Paving the way towards a smart community," IEICE Trans. Commun., vol. E95-B, no. 6, pp. 1902-1910, June 2012.
- (6) K. Mase and T. Saito, "Electric-vehicle-based ad hoc networking and surveillance for disaster recovery—Proposal of three-dimensional mobile surveillance using electric helicopters," The Ninth International Conference on Networking and Services, March 2013.
- (7) K. Mase, "How to deliver your message from/to disaster area," IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 1, pp. 52-57, Jan. 2011.
- (8) K. Mase, M. Sengoku, and S. Shinoda, "A perspective on next-generation ad hoc networks—A proposal for an open community network—," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, no. 1, pp. 98-106, Jan. 2001.
- (9) K. Mase, "The electric vehicle—A sacred treasure supporting a smart community," The Fifth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2012), May 2012.
- (10) K. Mase, "Wide-area real-time surveillance using electric vehicles and helicopters for disaster recovery," International Conference on Computing, Networking and Communication (ICNC2014), Feb. 2014.



## 暗号解読の世界記録を達成し、 次世代暗号の安全性を確立する先駆的研究



受賞者 高木 剛



受賞者 下山武司



受賞者 篠原直行

ネットショッピングやネットバンキング、公的機関への電子申請など、現代の情報システムでは機密情報を扱う場面が非常に多くなっている。更に近年、スマートフォンやタブレットPCなどの普及により、クラウドを利用した様々なサービスの利用が進む一方、プライバシー情報や、企業機密データの保護並びに利活用の両立が課題となっている。この課題を解決する切り札として、幅広い応用が可能な次世代暗号「ペアリング暗号」が注目されている。ペアリング暗号とは、だ円曲線上の

ペアリングと呼ばれる双線形写像を使った公開鍵暗号の一種で、その応用として、既存の暗号では難しかった、例えば暗号文のままデータ検索可能な機能や、復号アクセス制御情報等を暗号文に埋め込む機能、ユーザ自身のメールアドレス等のIDを使って暗号化ができる機能など、様々な応用が実現できることが知られており、クラウド型情報サービスの安全性と利便性向上、サービスの多様化が期待されている。その一方でペアリング暗号は、2000年に開発されてからまだ歴史が浅く、普及に先立って精密な安全性評価が強く望まれていた。

受賞者らは、各人の専門である暗号理論、解読技術、整数論、計算機プログラミングを結集することで、解読に数十万年かかると見積もられていた278桁のペアリング暗号を、僅か148日で解読するという世界記録を樹立し、それと同時に解読に必要な計算資源や時間を正確に見積もることに成功した(図1)。

同グループが解読に用いた手法は、標数3の拡大体上の離散対数問題を解く方法として現時点で最も効率的な方法である「関数体篩法」をベースとしている。関数体篩法は、多項式選択部、関係式探索部、線形代数部、個別離散対数部の四つの処理から構成されており、特に関係式探索部と線形代数部の処理に最も多くの計算量を必要とすることが知られている。

彼らによる解読成功の主なポイントは次の二点である。一点目は、関係式探索部において、既存手段として利用されていた一次元探索の「線形篩法」を二次元探索の「格子篩法」に拡張し、更に探索を行う多項式空間の範囲を次数ごとに縮小するアルゴリズムを開発した点。二点目は、関係式探索部と線形代数部の各相対的計算量

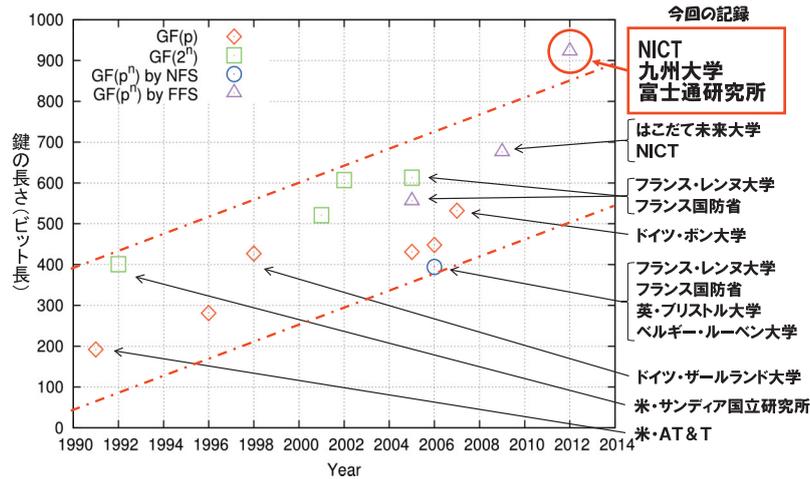


図1 離散対数問題の解読世界記録

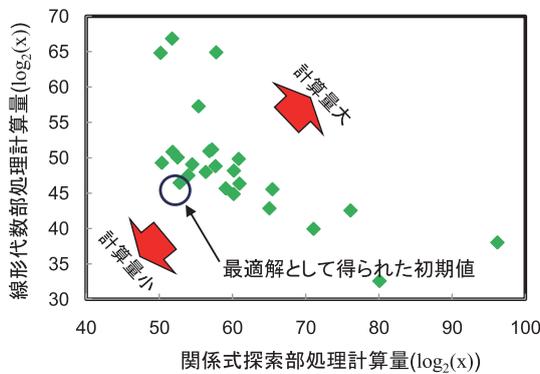


図2 解読計算量を最小化する初期値探索

を導出する理論を構築し、初期値ごとに算出された関係式探索部計算量と線形代数部計算量から、総計算量を最小化するパラメータを導いた点である (図2)。

暗号解読の世界記録は、現時点の世界最高の解読力を示す証であり、その解読時間は、より大きな桁長の解読に必要な解読計算量を具体的に導く基準となり得る。例えば、最高性能スパコンの能力向上が今後も同程度に推移すると仮定した場合、今回用いた解読技術によって、離散対数問題のサイズが1,011桁以上のペアリング暗号は、今から20年後の最高性能スパコンを1年間占有したとしても解読に必要な計算量に至らないことが示される。本成果は今後ペアリング暗号の実用化を進める上で、安全に利用するための指標策定につながるものである。

以上のように、受賞者らは、次世代暗号の普及を促進し、クラウドの安全な利用に貢献する技術として優れた業績を導いたことが認められ、2012年度情報処理学会喜安記念業績賞、並びに第12回ドコモ・モバイル・サイエンス賞先端技術部門優秀賞を受賞する等、その功績は極めて顕著であり、本会業績賞にふさわしいものである。

#### 文 献

- (1) T. Hayashi, T. Shimoyama, N. Shinohara, and T. Takagi, "Breaking pairing-based cryptosystems using  $\eta_T$  pairing over  $GF(3^{97})$ ," ASIA-CRYPT 2012, LNCS 7658, pp. 43-60, Springer, 2012.
- (2) N. Shinohara, T. Shimoyama, T. Hayashi, and T. Takagi, "Key length estimation of pairing-based cryptosystems using  $\eta_T$  pairing over  $GF(3^9)$ ," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E97-A, no. 1, pp. 236-244, Jan. 2014.
- (3) T. Hayashi, N. Shinohara, L. Wang, S. Matsuo, M. Shirase, and T. Takagi, "Solving a 676-bit discrete logarithm problem in  $GF(3^{66})$ ," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E95-A, no. 1, pp. 204-212, Jan. 2012.
- (4) 井山政志, 清本晋作, 福島和英, 田中俊昭, 高木 剛, "携帯電話におけるペアリング暗号の実装," 信学論(A), vol. J95-A, no. 7, pp. 579-587, July 2012.
- (5) J.-L. Beuchat, H. Doi, K. Fujita, A. Inomata, P. Ith, A. Kanaoka, M. Katouno, M. Mambo, E. Okamoto, T. Okamoto, T. Shiga, M. Shirase, R. Soga, T. Takagi, A. Vithanage, and H. Yamamoto, "FPGA and ASIC implementations of the  $\eta_T$  pairing in characteristic three," Comput. Electr. Eng., vol. 36, no. 1, pp. 73-87, 2010.
- (6) 林 卓也, 白勢政明, 高木 剛, "GF(3^9)上の関数体篩法の実装実験," 情処学論, vol. 50, no. 9, pp. 1956-1967, 2009.
- (7) J.-L. Beuchat, N. Brisebarre, J. Detrey, E. Okamoto, M. Shirase, and T. Takagi, "Algorithms and arithmetic operators for computing the  $\eta_T$  pairing in characteristic three," IEEE Trans. Comput., vol. 57, no. 11, pp. 1454-1468, 2008.

## 移動通信における 信号処理アンテナの先駆的研究



受賞者 小川恭孝

今日の携帯電話の普及、高速伝送の実現には目を見張るものがある。しかも、今後更に大量のトラフィックを収容することが必要になると予想されている。受賞者の業績は、移動通信に用いられる、信号処理機能を有するアンテナ技術の発展に寄与したものである。

アダプティブアンテナ、あるいは、スマートアンテナとも呼ばれる信号処理アンテナは、複数のアンテナ素子の振幅と位相を制御することにより、指向性などの送受信特性を環境に応じて最適化するものである。これは、1960年代に妨害電波を抑圧する軍用技術として研究が開始された。受賞者は1980年代の初頭、世界に先駆けて商用のデジタル移動通信への適用を提案し<sup>(1)</sup>、その挙動を明らかにした<sup>(2)~(4)</sup>。当時、移動通信にデジタル変調方式を導入することが検討されていたが、シンボル長に比較して無視できないほど長い遅延時間差を有するマルチパス波による波形ひずみが重大な問題となっていた。シンボル長が短い高速伝送系ほど、その影響が甚大となる。受賞者は図1に示したように信号処理アンテナにより、指向性を適応的に制御し、マルチパス波到来方向の利得を下げることによって、それを抑圧することを提案した。この方式は、遅延時間差が長いほど、マルチパス波の抑圧効果が大きい特長を有している。一方、ヨーロッパにおいて同趣旨の研究を含む TSUNAMI (Technology in Smart antennas for the UNiversal

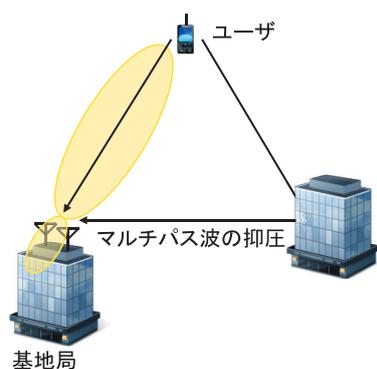


図1 信号処理アンテナによるマルチパス波抑圧の概念図

Advanced Mobile Infrastructure) と呼ばれるプロジェクトが1994年から1995年にかけて実施されたが、受賞者の研究はそれに先立つこと約10年の先駆性のあるものである。

また、図2に示したようにマルチビームを有する信号処理アンテナにより、同じ周波数帯域に同時に複数のユーザを収容することによって、チャンネルの利用効率を高めることが可能である。これは空間分割多元接続、すなわち、SDMA (Space Division Multiple Access) と呼ばれるものである。ユーザ端末から送られる信号を受信する上り回線では、基地局の信号処理アンテナは指向性の制御により、複数ユーザの信号を分離して受信する。基地局からの信号をユーザに送信する下り回線においては、ユーザ端末側での干渉除去が必ずしも容易ではないことから、各ユーザに干渉を与えないように送信時の指向性を制御する必要がある。受賞者は下り回線の制御にチャンネル予測を取り入れた手法を提案し、時変動環境におけるSDMAの特性を改善することを提案した<sup>(5)</sup>。更に、1999年12月から2001年3月まで、電波産業会においてSDMAに関する調査検討会の主査として、この技術が実環境で動作することを実証し、世界で初となる、PHS (Personal Handy-phone System) におけるSDMAの実用化に貢献した<sup>(6)</sup>。

送信側と受信側の双方(基地局とユーザ端末に相当)に複数のアンテナ素子を設置したものをMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムと呼んでいる。これは、信号処理アンテナを高度化したものと位置付けられ、更なる高速伝送を実現することができる。図2に示したSDMAシステムにおいてユーザ端末に複数のアンテナ素子を配置したものは、マルチユーザMIMOシステムと呼ばれており、第4世代の移動通信LTE-Advancedにおいて標準化されるに至っている。受賞者のSDMAの研究は、マルチユーザMIMOシステムの基盤形成に貢献したと言える。受賞者は更に、チャンネル予測を用いることにより、時変動環境におけるマルチユーザMIMOシステムの特性を改善する研究を鋭意行ってい

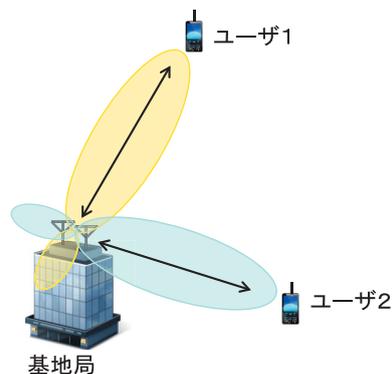


図2 空間分割多元接続 (SDMA) の概念図

る<sup>(7)~(10)</sup>.

受賞者のこれらの成果は、国内外で高く評価され、本会論文賞(2007年)、テレコムシステム技術賞(2008年)などを受賞するとともに、本会フェロー(2008年)、IEEE Fellow(2011年)に昇任するに至っている。このように受賞者の功績は極めて顕著であり、本会業績賞にふさわしいものである。

## 文 献

- (1) Y. Ogawa, M. Ohmiya, and K. Itoh, "Behaviors of an LMS adaptive array for multipath fading reduction," Trans. IECE of Japan, vol. E67, no. 7, pp. 395-396, July 1984.
- (2) Y. Ogawa, M. Ohmiya, and K. Itoh, "An LMS adaptive array for multipath fading reduction," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-23, no. 1, pp. 17-23, Jan. 1987.
- (3) Y. Ogawa, M. Ohmiya, and K. Itoh, "Fading equalization using an adaptive antenna for high-speed digital mobile communications," Proc. ISAP '89, vol. 4, 4A2-3, pp. 857-860, Aug. 1989.
- (4) Y. Ogawa, Y. Tanabe, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Basestation adaptive antennas for a high-speed FDD/TDMA system," 2001 IEEE International Conference on Communications (ICC2001), Conference Record, vol. 8, pp. 2558-2562, June 2001.
- (5) Y. Kishiyama, T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, and Y. Doi, "Weight estimation for downlink null steering in a TDD/SDMA system," Proc. IEEE VTC2000-Spring, vol. 1, pp. 346-350, May 2000.
- (6) Y. Doi, J. Kitakado, T. Ito, T. Miyata, S. Nakao, T. Ohgane, and Y. Ogawa, "Development and evaluation of the SDMA test bed for PHS in the field," IEICE Trans. Commun., vol. E86-B, no. 12, pp. 3433-3440, Dec. 2003.
- (7) H.P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Performance evaluation of multiuser MIMO E-SDM systems in time-varying fading environments," IEICE Trans. Commun., vol. E92-B, no. 7, pp. 2374-2388, July 2009.
- (8) H.P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Performance evaluation of a multi-user MIMO system with prediction of time-varying indoor channels," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 61, no. 1, pp. 371-379, Jan. 2013.
- (9) K. Yamaguchi, H.P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Considerations on a multi-user MIMO system using channel prediction based on an AR model," Proc. 2013 IEEE AP-S International Symposium, pp. 550-551, July 2013.
- (10) Y. Ogawa, K. Yamaguchi, H.P. Bui, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Behavior of a multi-user MIMO system in time-varying environments," IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 10, pp. 2364-2371, Oct. 2013.

## 100 G デジタルコヒーレント 光伝送方式の実用化



受賞者 富澤将人



受賞者 尾中 寛



受賞者 菊池和朗

インターネットにおいて世界中の誰もがどこにいても好きなコンテンツをストレスなく楽しめる今の状況は、世界規模の大容量光ネットワークにより支えられている。通信事業者は日々増大するインターネットトラフィックに先んじて光ネットワークの大容量化を経済的に推し進めていくことが必要な状況だ。

2004年に菊池和朗君が世界で初めて提案・検証したデジタルコヒーレント光伝送方式は、コヒーレント光通信とデジタル信号処理を融合した技術であり、受信した光信号の電界複素振幅を高速サンプリングしてデジタルデータに変換し、デジタル信号処理により信号ひずみを補償して元の信号を復元する。光の位相情報と振幅情報をフルに活用して情報を伝達できるコヒーレント光通信方式は、1980年代に盛んに研究されたが、1990年代以降の光ファイバ増幅器を用いたIDMM方式の大発展により中断されていた。デジタルコヒーレント光伝送方式では、信号光の位相雑音や偏波変動をデジタル領域で処理するので、従来のコヒーレント光通信に比べてシステムの安定度が劇的に改善される。この方式では電気領域での波長分散補償が可能であり、従来は長距離伝送システムでは必須であった波長分散補償デバイス(ファイバ等)の光中継器への設置を不用にできる。多値変復調、更には偏波分離も可能であるので、偏波多重方式併用による1波長での伝送容量倍増も実現できる。これらの特長により、経済的で大容量のシステムの実現が期待できる一方で、その実現には、光信号のボーレートを上回る高速のA-D変換器と大規模なデジタル信号処理回路が必要という課題があった。

富澤将人君、尾中 寛君らは、複数組織(NTT, NEC, 富士通, 三菱電機)が優位技術を持ち寄って参画するオープンイノベーションの体制を構築し、菊池和朗君らの助言の下、1波長当り100 Gbit/sの長距離伝送を可能

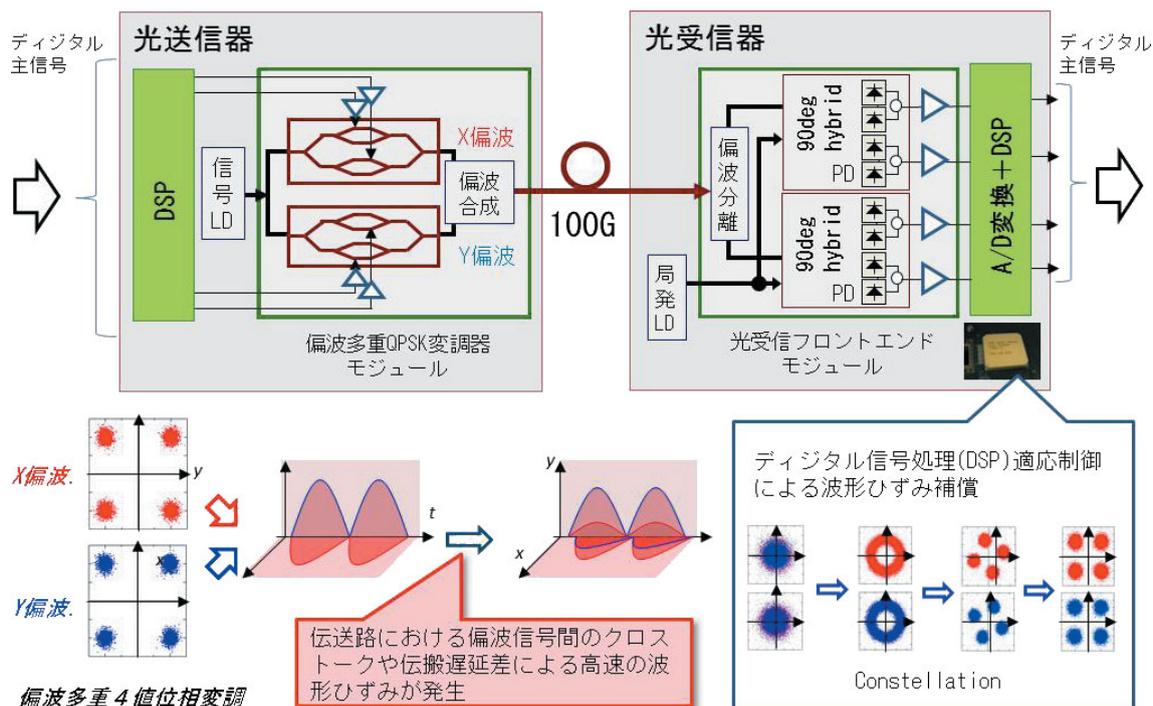


図1 デジタルコヒーレント方式の概要<sup>(7)</sup>

とするデジタル信号処理 LSI の技術開発を 2009 年からの 3 年間という短期間で成功させた。開発したデジタル信号処理 LSI は 127 Gbit/s の偏波多重 4 値位相変調 (QPSK: Quadrature Phase Shift Keying) の伝送方式に対応し、2,000 km 以上の単一モードファイバ伝送路の波長分散を高速に推定し補償する技術、敷設された光ファイバ伝送路中で生じ得る高速な偏波変動に追従しつつ垂直偏波と水平偏波の信号成分を分離する高速偏波制御技術、偏波モード分散補償技術、高効率な軟判定誤り訂正技術など、多くの機能を集積・統合している。この LSI を採用した波長多重システムはファイバ伝送容量を従来の 5 倍に拡大できる。このような先進的な機能が実用システムでは非常に有効であると評価された結果、この LSI は日本の企業はもちろん世界の主要ベンダの波長多重システムに採用されている。受賞者らのこれらの貢献は、大容量光伝送システムの潮流がデジタルコヒーレント方式に移行することを決定付けるものとなった。

以上のように、受賞者らはデジタルコヒーレント光伝送方式を世界で初めて提案・実現し、組織の枠を超えたオールジャパン体制を構築し、我が国の知的財産の結集と具現化を実施、世界最高性能となる 100 Gbit/s 級光送受信技術を世界に先んじて開発・実用化した。これらの成果は、桜井健二郎賞、情報通信技術委員会総務大臣表彰、内閣府内閣総理大臣賞、NEC C & C 財団 C & C 賞受賞など高く評価されており、受賞者らの功績は極

めて顕著で、本会業績賞にふさわしいものである。

#### 文 献

- (1) D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent demodulation of differential 8-phase-shift keying with optical phase diversity and digital signal processing," IEEE LEOS Annual Meeting, no. WR2, Rio Grande, Puerto Rico, Nov. 2004.
- (2) S. Tsukamoto, D. L.-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent demodulation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission," OFC/NFOEC2005, no. PDP29, 2005.
- (3) 尾中 寛, 池内 公, "光ネットワークにおける省電力・高速 CMOS LSI 技術の動向," 信学誌, vol. 93, no. 8, pp. 688-692, Aug. 2010.
- (4) E. Yamazaki, S. Yamanaka, Y. Kisaka, T. Nakagawa, K. Murata, E. Yoshida, T. Sakano, M. Tomizawa, Y. Miyamoto, S. Matsuoka, J. Matsui, A. Shibayama, J. Abe, Y. Nakamura, H. Noguchi, K. Fukuchi, H. Onaka, K. Fukumitsu, K. Komaki, O. Takeuchi, Y. Sakamoto, H. Nakashima, T. Mizuochi, K. Kubo, Y. Miyata, H. Nishimoto, S. Hirano, and K. Onohara, "Fast optical channel recovery in field demonstration of 100-Gbit/s Ethernet over OTN using real-time DSP," Opt. Express, vol. 19, pp. 13179-13184, 2011.
- (5) M. Tomizawa, "DSP aspects for deployment of 100G-DWDM systems in carrier networks," OFC/NFOEC, 2012.
- (6) 尾中 寛, "Beyond 100G に向けたデジタルコヒーレント信号処理 LSI の展開," 信学光通信システム研究会 (OCS) 第二種研究会, 2012.
- (7) 鈴木扇太, 宮本 裕, 富澤将人, 坂野寿和, 村田浩一, 美野真司, 柴山充文, 渋谷 真, 福知 清, 尾中 寛, 星田剛司, 小牧浩輔, 水落隆司, 久保和夫, 宮田好邦, 神尾享秀, "光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発," 信学誌, vol. 95, no. 12, pp. 1100-1116, Dec. 2012.

## スーパーコンピュータ「京」の研究開発



受賞者 庄司文由



受賞者 草野義博



受賞者 横川三津夫

分散メモリ型並列スーパーコンピュータ「京」は、科学技術計算を高速に実行する技術 HPC-ACE, Tofu と呼ぶ直接結合ネットワーク<sup>(1)</sup>、電力性能の良い実装方式及び冷却方式など、新しい技術を駆使した CPU 数 88,128 個 (705,024 コア) からなる大規模計算機システムである (図 1, 2)。平成 18 年度から平成 24 年度にかけて独立



図 1 分散メモリ型スーパーコンピュータ「京」



図 2 スーパーコンピュータ「京」のラック

行政法人理化学研究所と富士通株式会社によって開発、製作が進められ、平成 23 年 10 月には目標性能 LINPACK 10.51 ペタフロップスを達成し、TOP500 において世界一と認められた<sup>(2)~(5)</sup>。また HPC チャレンジでは、HPL 9.796TFLOPS, GlobalRandomAccess 472 GUPS, EP Stream 3,857TByte/s, Global FFT 205.9 TFLOPS を達成し、それぞれ世界一の性能を達成した。当初の予定どおり平成 24 年 6 月に当該システムが完成、平成 24 年 9 月末に通常運用が開始され、現在一般利用に供されている。既に「京」を計算科学の強力な計算基盤として利用した様々な研究成果が得られている<sup>(6)・(7)</sup>。

「京」のハードウェアには、新規に開発された CPU 及びインタコネクタが用いられている。CPU (SPARC 64 VIIIfx) は、8 個のプロセッサコアを備え、コア当りの演算は 2way-SIMD 動作により 8 演算 (4 積和算)/サイクルの実行が可能である<sup>(8)</sup>。LSI チップ当たり 128 GFLOPS, 64 GByte/s という高いメモリバンド幅を持つことで広範なアプリケーションに対する高性能化を実現させた。インタコネクタネットワーク Tofu は、高性能・高信頼性を両立する超大規模並列システム用に新規開発された。物理的な接続トポロジーは六次元メッシュ/トラスであり、各ノードは論理的に各方向に対して 5 GByte/s (双方向) の帯域幅を持つリンクで接続される。また、ネットワークに経路障害が発生しても、代替経路やルーティングの変更により自動的にう回ルートを構成し、運用に影響を与えない特徴を有する。

「京」のシステムソフトウェアは、大規模なシステムの安定運用のため、階層構造を運用ソフトウェアに取り入れるとともに、負荷分散及び効率の良いジョブ管理システムを実現している。ファイルシステムは、オープンソースの Lustre ファイルシステムをベースとし、エクサバイトオーダのストレージに対応するための機能拡張が行われている。また、「京」のハードウェアが持つ様々な機能を最大限活用するための Fortran, C/C++ 言語コンパイラを最適化するとともに、RDMA 通信をベースにインタコネクタ Tofu の特徴を最大限に生かす集団通信アルゴリズムや低遅延通信を実現するアルゴリズムによる MPI ライブラリが実装されている<sup>(9)・(10)</sup>。

以上に記したとおり、スーパーコンピュータ「京」にはハードウェアからソフトウェアに至る多くの新技術の研究開発成果が投入されており、計算科学の強力な計算基盤として様々な研究分野において優れた成果を上げることにも貢献している。これらの業績は極めて顕著であり、本会業績賞にふさわしいものである。「京」の研究開発に携わった多くの方々に敬意を表すが、本賞規定により研究開発をリードされた 3 名の受賞者を推薦させて頂いた。

## 文 献

- (1) Y. Ajima, S. Sumimoto, and T. Shimizu, "Tofu: a 6D mesh/torus interconnect for exascale computers," *Computer*, vol. 42, no. 11, pp. 36-40, 2009.
- (2) M. Yokokawa, F. Shoji, A. Uno, M. Kurokawa, and T. Watanabe, "The K computer: Japanese next-generation supercomputer development project," *Proc. of 17 IEEE/ACM Int. Symposium on Low-Power Electronics and Design*, pp. 371-372, 2011.
- (3) 横川三津夫, "スーパーコンピュータ「京」が 10PFLOPS を達成," *信学誌*, vol. 95, no. 3, pp. 266-267, Dec. 2012.
- (4) 特集: スーパーコンピュータ「京」, *情報処理*, vol. 53, no. 8, Aug. 2012.
- (5) 清水俊幸, 安島雄一郎, 吉田利雄, 安里 彰, 志田直之, 三浦健一, 住元真司, 長屋忠男, 三吉郁夫, 青木正樹, 原口正寿, 山中栄次, 宮崎博行, 草野義博, 新庄直樹, 追永勇次, 宇野篤也, 黒川原佳, 塚本俊之, 村井 均, 庄司文由, 井上俊介, 黒田明義, 寺井優晃, 長谷川幸弘, 南 一生, 横川三津夫, "スーパーコンピュータ「京」の構成と評価," *信学論 (D)*, vol. J96-D, no. 10, pp. 2118-2129, Oct. 2013.
- (6) Y. Hasegawa, J. Iwata, M. Tsuji, D. Takahashi, A. Oshiyama, K. Minami, T. Boku, F. Shoji, A. Uno, M. Kurokawa, H. Inoue, I. Miyoshi, and M. Yokokawa, "First-principles calculations of electron states of a silicon nanowire with 100, 000 atoms on the K computer," *Proc. of 2011 Int. Conf. for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC'11)*, Seattle, Nov. 2011.
- (7) Y. Hasegawa, J. Iwata, M. Tsuji, D. Takahashi, A. Oshiyama, K. Minami, T. Boku, H. Inoue, Y. Kitazawa, I. Miyoshi, and M. Yokokawa, "Performance evaluation of ultra-large-scale first-principles electronic structure calculation code on the K computer," *Int. J. High Perform. Comput. Appl.*, doi: 10.1177/1094342013508163, Oct. 2013.
- (8) T. Maruyama, T. Yoshida, R. Kan, I. Yamazaki, S. Yamamura, N. Takahashi, M. Hondou, and H. Okano, "Sparc64 VIIIfx: A new-generation octocore processor for petascale computing," *IEEE Micro*, vol. 30, no. 2, pp. 30-40, March-April 2010.
- (9) 松本 幸, 安達知也, 住元真司, 南里豪志, 曾我武史, 宇野篤也, 黒川原佳, 庄司文由, 横川三津夫, "MPI\_Allreduce の「京」上での実装と評価," *情処学論: コンピューティングシステム*, vol. 5, no. 5, pp. 152-162, 2012.
- (10) T. Adachi, N. Shida, K. Miura, S. Sumimoto, A. Uno, M. Kurokawa, F. Shoji, and M. Yokokawa, "The design of ultra scalable MPI collective communication on the K computer," *Comput. Sc.-Research and Development*, vol. 28, no. 2-3, pp. 147-155, 2013.



## マルチポートアンプの発明と マルチビーム移動体衛星通信実用化への貢献



受賞者 江上俊一郎



受賞者 川合 誠

衛星通信の最大の特徴は、サービスの広域性である。サービスの広域性と衛星搭載アンテナの利得は裏腹の関係にある。サービスの広域性を保ちながら衛星搭載アンテナを高利得化して端末の小形化を可能とし、更に周波数再利用によって加入者数を増大させた方式がマルチビーム方式である。ロケット及び衛星技術が、1970年代から1990年代にかけて急速に進展し、大形マルチビームアンテナを搭載したマルチビーム通信衛星の打上げが可能となった。

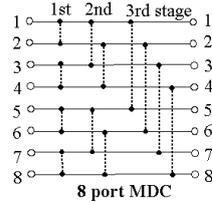
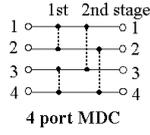
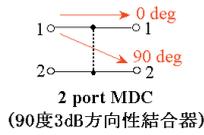
しかし、マルチビーム方式では、ビームごとに通信トラフィックが異なり、かつ変動することに対処し、各ビームの信頼性を確保することが新たな課題となった。受賞者らが考案したマルチポートアンプは、マルチビーム方式におけるこのような課題を解決した画期的な発明である。

受賞者らが考案したマルチポート方向性結合器

(MDC) とマルチポートアンプ (MPA) の概念を図1に示す。図では、2, 4, 8ポートのMDCとそれを用いたMPAの構成を示している。MDCは2ポートの3dB方向性結合器の概念を $2^n$ ポート ( $n$ : 自然数) へ拡張したものである。MPAは $2^n$ 個の増幅器の入力側と出力側に $2^n$ ポートのMDCを対称に接続したものである。入出力ポート数は、実際には不要なポートをダミー終端すればよいので任意に選択できる。MPAの各ポートへの入力、入力側MDCによって各増幅器へ分割され、各増幅器の出力は出力側MDCによって対応する各ポートへ合成出力される。対応しないポートへは出力されない。MPAの各ポートの最大出力は各増幅器の最大出力の合計となり、各ポートへの出力配分は任意である。また、増幅器の一部に故障が発生したとしても、故障数に応じて出力は低下するが、いずれかの出力が全断となることはない。

受賞者らは、このMPAを1980年代に計画された国内移動体衛星通信方式に適用することを提案した。MPAを最初に搭載した技術試験衛星ETS-VIの移動体衛星通信系ダウンリンクの構成を図2に示す。ETS-VIは5ビームであったため5ポートを用いる8ポートMPAの構成としている。MPAへの入力電力は同一特性の各増幅器に均等に分配され、各増幅器の飽和出力を合わせた最大送信出力の範囲であれば、各ビームに対して任意の比率で出力すなわち通信回線数を割り当てることができる。また、各増幅器の故障は、最大送信出力の低下にはつながるが、特定のビームが使用不能となるような致命的な障害とはならない。

マルチポート方向性結合器 (MDC)



マルチポートアンプ (MPA)

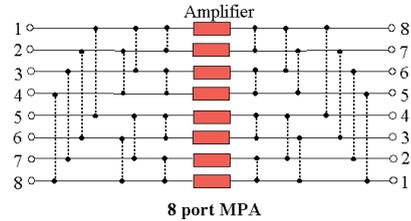
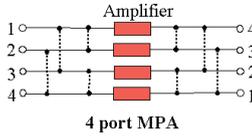
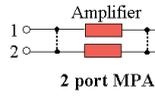


図1 マルチポート方向性結合器 (MDC) とマルチポートアンプ (MPA) の概念

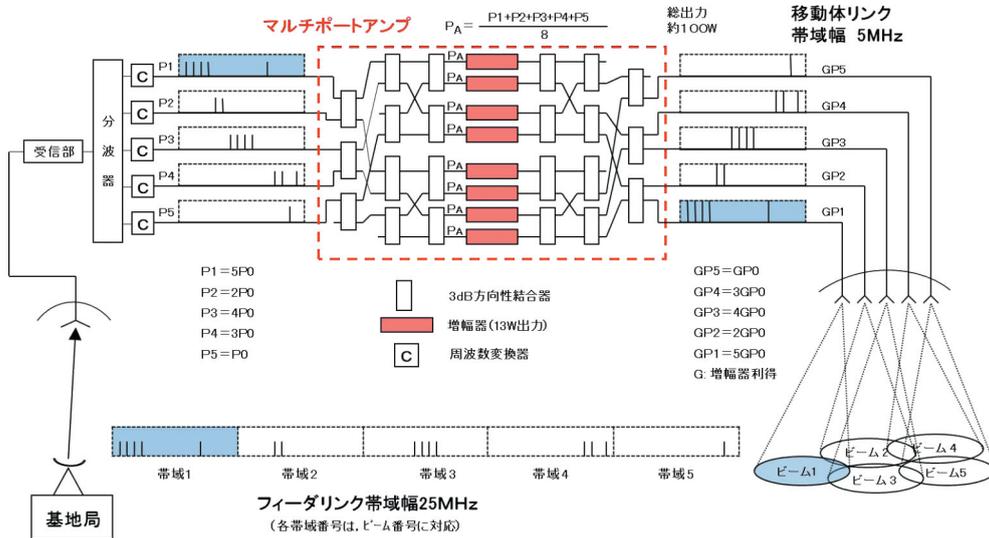


図2 マルチポートアンプ (MPA) を適用した ETS-VI 移動体衛星通信系ダウンリンクの構成

MPA は、1994 年に技術試験衛星 ETS-VI に搭載されて宇宙実証され、1995、1996 年に実用通信衛星 N-STAR a, b 号機に搭載され、国内最初の移動体衛星通信サービスが開始された。次世代 N-STAR でも 4 ポートの MPA が 3 系統搭載され現在サービス中である。

国内では運輸多目的衛星 MTSAT、超高速インターネット衛星 WINDS に用いられた。国外では、AMSC/MSAT (1995~1996)、Inmarsat-3 (1996~1998) などの多ビーム移動体通信衛星にすぐに適用されている。最近では大形反射鏡を照射する多数ビームのアレー給電系

にも用いられ、アレー素子の電力分布変動への対応を可能にしている。受賞者らの衛星通信技術の進展への功績は極めて顕著で、本会業績賞にふさわしいものである。

文 献

- (1) 江上俊一郎, 川合 誠, “多端子電力合成形マルチビーム送信系,” 信学論(B), vol. J69-B, no. 2, pp. 206-212, Feb. 1986.
- (2) S. Egami and M. Kawai, “An adaptive multiple beam system concept,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. SAC-5, no. 4, pp. 630-636, May 1987.