昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成16年3月10日発行（年6回1，3，5，7，9，11月の10日発行）富士時報　第77巻　第2号（通巻第825号）　ISSN 0367-3332

e-Front runners

富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

3
Mar. 2004
Vol. 77 No. 2

特集　最近の研究開発

富士電機グループ

富士時報
FUJI ELECTRIC JOURNAL

3
Mar. 2004
Vol. 77 No. 2

特集 最近の研究開発

目 次

特集 最近の研究開発

交差相関物性学のすすめ 101（1）
十倉 好紀

最近の研究開発動向 102（2）
古庄 昇

有機電子材料を用いた双安定性素子 103（3）
川上 春雄 ・ 加藤 久人 ・ 山城 啓輔

環境調和型材料の開発 107（7）
渡邉 裕彦 ・ 管野 敏之 ・ 古川 雅晴

コンビナトリアル成膜による誘電体薄膜材料の高速合成 112（12）
米澤 喜幸 ・ 小西 義則 ・ 清水 了典

新型半導体素子とトレンチ加工技術 117（17）
長安 芳彦 ・ 望月 邦雄 ・ 藤島 直人

垂直磁気記録膜の構造制御 121（21）
竹野入俊司 ・ 酒井 泰志 ・ 渡辺 貞幸

微生物の迅速検査技術 124（24）
野田 直広 ・ 浅野 貴正 ・ 北出雄二郎

トップエミッション型CCM方式有機EL 128（28）
木村 浩

無線設計技術と非接触ICカード 133（33）
近藤 史郎 ・ 四蔵 達之

最新の最適化手法とソリューションの展開 137（37）
北川 慎治 ・ 竹中 道夫 ・ 福山 良和

マトリックスコンバータを利用した高効率電力変換 142（42）
伊東 淳一 ・ 小高 章弘 ・ 佐藤以久也

蒸気タービンロータの異種材料溶接技術 146（46）
今村 清治 ・ 和泉 栄 ・ 飯塚 実

放射光X線によるナノレベル結晶構造解析 150（50）
田沼 良平 ・ 久保登士和 ・ 大沢 通夫

エッチングプロセスのシミュレーション技術 154（54）
金子 公寿

零相変流器における三次元非線形動的電磁界解析 158（58）
松本 廣太 ・ 工藤 高裕 ・ 浅野 久伸

パワーエレクトロニクス主回路構造の解析技術 162（62）
滝沢 聡毅 ・ ジニー オルゲス

普通論文

原動力設備プラントの最適運用と適用事例 166（66）
項 東輝 ・ 川森 亨 ・ 福山 良和

表紙写真

グローバル化の進展により，企業間の競争は激しさを増している。メーカー間の業績も「勝ち組」と「負け組」に二極化しつつあり，真に技術力がある企業しか生き残れない状況にある。メーカーにとって，研究開発はまさに生命線である。

富士電機は，事業に直結した製品開発のほか，次世代製品や新事業の技術開発，基礎研究に取り組んでいる。他社にない独自技術の確立を目指すとともに，開発効率向上のための解析評価技術やシミュレーション技術にも注力している。

表紙写真は，薄膜成膜装置を背景に，現在開発中の色変換方式有機EL，トレンチ横型MOSFET，メタヒューリスティク手法による最適化手法のイメージを配して，基礎研究からの新製品の創出を表現した。

交差相関物性学のすすめ

十倉　好紀（とくら　よしのり）
東京大学大学院工学系研究科教授 工学博士

ピエール・キュリーは，キュリー夫人との放射能に関する研究，特にラジウムの発見（1898 年）で知られているが，それ以前の仕事として，圧電性や強磁性体の温度効果（キュリー温度）の発見が有名である。その彼が，1896 年にある予言をしている。「世の中には，磁場をかけると電気分極が発生し，電場をかけると磁化が発生する，そのような物質が存在するのではないか。」今日，電気磁気（ME）効果として知られる現象であるが，ピエール・キュリーは，おそらく当時の最先端科学技術であった電磁気学の諸法則のアナロジーを固体に求めたものであろう。その ME 効果は，ようやく 1960 年になって酸化クロム結晶において実在することが発見され，その後，学問的には着実な進展があったが，あまりに小さい効果のため，今まで実用に供されることはなかった。

電場と分極，磁場と磁化という，一見して自明な共役量の結合のほかに，非対角的に結合した示量・示強変数，たとえば上記の ME 効果では，電場ー磁化，磁場ー分極，をもつ交差相関（cross-correlation）系は，実は限りない機能応用の宝庫である。たとえば，交差相関物性としての熱電変換，光電変換の，環境・エネルギー問題における重要性は言うまでもない。また，磁場による巨大な抵抗変化（巨大磁気抵抗）を利用するスピントロニクスもその原理自体を交差相関物性に置いている。

交差相関系の魅力のひとつは，「逆効果」の存在である。たとえば，熱で電位差を生じるゼーベック効果に対して，電流によって熱冷却が可能なペルチェ効果の存在を思い出すとよい。現在のスピントロニクスの重要な課題のひとつは，電界や電流による磁化ベクトルの制御にあるが，これをビオ・サバール則（電磁石）のような古典電磁気学を利用するのではなく，ピエール・キュリーが夢想したように，新原理にもとづく固体機能としていかに実現するかが現在大きな問題となっている。この意味では，上記の ME 効果も，もしその効果を充分巨大化できれば，スピントロニクスに革新的な進展をもたらすだろう。ちょうど巨大磁気抵抗素子が高密度磁気記録のエポックをなしたように。

それでは，その巨大化の処方はいかなるものであろうか。交差相関効果を現象論的に記述し，群論にしたがって効果の有無と対称性を議論する，美しい理論的処方はすでに完成している。この世紀をまたぐ（19 世紀から 21 世紀へと）効果を現代的な視点から巨大化して機能化を果たすのには，これを微視的な電子論から記述する理論手法の開拓と人工格子を含む新しい材料設計・開発が不可欠である。現在では，これに必要な周辺科学技術も成熟して出番をまっている。たとえば，結晶中の磁性と電気伝導との絡み合いを記述する強相関電子科学は，高温超伝導研究で面目を一新し，超巨大磁気抵抗現象によって大きく進展した。実際，ME 効果については，その巨大化と関連する新しい磁気光学現象の探索を目指して，強誘電性・焦電性（フェロエレクトリックス）と強磁性（フェロマグネティックス）がひとつの物質中に同居した，いわゆるマルチフェロイックス系の材料設計と新機能探索が再び関心を集めつつある。

現在の電子材料の研究者についての脅迫観念は，半導体の集積密度が 1.5 年で 2 倍になるという，例の「ムーアの法則」であり，それを上回るスピードで進展する磁気記録密度の過酷なロードマップであろう。システム・インテグレーションと絶えざるイノベーションが，驚異的な集積密度と情報社会の発展をもたらしたことは間違いないが，一方で一元的価値観の世界からは到達できない科学技術領域もあることを忘れるべきではない。そのひとつの考え方は，文字通り，デシプリンの間に架け橋を架け，融合化によって新しいベクトルをもった科学技術概念を創成することであろう。ここに述べたような，複数の「物理量」の間の架け橋を考える交差相関物性学は，そのような「斜視的思考」の一例に過ぎないが，このような楽観論を語ることは，私のように大学教師として禄を食む身の特権とマナーではある。

最近の研究開発動向

特集

古庄　　昇（ふるしょう　のぼる）

1　まえがき

1990 年以降のグローバリゼーションの進展に伴い，国内市場および海外市場での競争が激化している。かつて「ものづくり」で世界をリードしてきた日本も，近年は海外の安価な製品の流入により，その優位性が揺らいできている。この状況を打破するためには，競合相手に対して圧倒的優位に立てる製品を提供していく必要があり，それを実現するための研究開発は企業の生命線である。

2　研究開発状況

富士電機は，基幹事業の重点機種を選別するとともに，次代を担う新事業機種や基礎研究に開発資源を重点配分する戦略をとっている。また，中期的な視野に立った技術ロードマップを作成し，コア技術の育成，強化を図っている。

環境分野では，水処理技術と廃棄物処理技術に注力している。水処理技術では，従来からの浄水場システムに加え，膜利用の浄水システムを開発し，2003 年度中には(財)水道技術研究センターの技術認定を取得できる見込みである。廃棄物処理技術では，有機性廃棄物資源化のコア技術となるメタン発酵技術を開発し，パイロットプラントが 2003 年から稼動中である。

情報・サービス分野では，ソリューション事業や従来からのメンテナンスやアフターサービスだけではない新しいサービスの提供に取り組んでいる。電子自治体システム，生産現場の監視制御システムと生産管理システムの統合，製造プラントやパワープラントのコストミニマム運用システムの構築，非接触 IC カードシステムが代表例である。

コンポーネント分野は，パワーエレクトロニクス応用製品，低圧遮断器・開閉制御機器のさらなる売上げ拡大を目指し，製品の差別化を図る開発に取り組んでいる。パワーエレクトロニクス応用製品では，逆阻止 IGBT を適用した AC-AC 直接変換方式のマトリックスコンバータや，高速制御や超高精度を実現する変換回路技術，オートチューニング技術を開発し，差別化を目指している。低圧遮断器・開閉制御機器では，10 %の世界シェア獲得を目指し，小型で高い遮断容量を実現する技術を開発している。

半導体分野では，トレンチ技術のポリッシュアップにより，パワー MOSFET，IGBT の低損失化と高性能化のほか，新構造のトレンチ横型パワー MOS の開発を進めている。また，世界最小のマイクロ電源モジュールや逆耐圧を有する逆阻止 IGBT など，富士電機独自の新型デバイスの製品化にも注力している。

磁気記録媒体分野では，垂直磁気記録媒体技術で世界最高の 1 平方インチあたり 150 G ビット相当の面記録密度を達成し，今後も市場の高密度化の要求に対応していく。

センサ分野では，バイオ技術を応用したユニークなセンサ開発に注力し，生きている菌数を迅速に測定する検査技術を開発している。

新事業機種では，フルカラー化の最大の課題である発光効率とコントラストを両立させた色変換方式有機 EL ディスプレイ，フィルム基板アモルファス太陽電池，固体高分子形燃料電池の製品化，りん酸形燃料電池の事業拡大に注力し，今後，開発体制の強化と事業化の加速を図っていく。

基礎研究では，世界の最先端をいく有機双安定材料や酸化物高誘電体材料，環境に配慮した鉛フリーはんだやノンハロゲン樹脂，使用条件の異なる蒸気タービンの異種材料接合技術などの開発を進めている。また，開発スピードの向上を図るため，大型放射光施設（SPring-8）を利用したシリコンの高感度ひずみ計測や媒体の磁性層ナノレベル結晶解析などの微視解析技術にも取り組んでいる。

3　あとがき

競争の激化で，製品のライサイクルはますます短くなってきている。このため，企業存続には絶え間ない製品開発と市場開拓が必要である。富士電機グループの基盤になっている事業の新製品投入による拡大，インキュベーション機種・新規事業の早期事業化，基礎研究の充実による継続的な発展の礎作りを，着実にかつスピーディに達成すべく，今まで以上に努力していく所存である。

古庄　　昇

材料開発，評価，デバイス適用の研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)取締役兼研究企画部長。日本化学会会員，高分子学会会員。

有機電子材料を用いた双安定性素子

川上　春雄（かわかみ　はるお）　　加藤　久人（かとう　ひさと）　　山城　啓輔（やましろ　けいすけ）

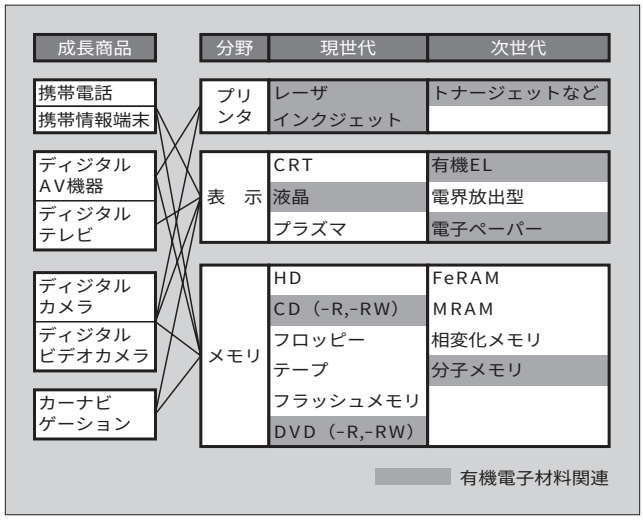
1　まえがき

製品開発，とりわけ電子技術分野の新製品開発においては，高い機能を持つ新材料の適用が強く求められる。有機電子材料は，その基本性能ではシリコンなどにいまだ及ばないものの，光との相互作用，低コストプロセス，大面積素子などの特徴を生かした実用化検討が進められている。**図1**は，今後市場が広がると言われる情報機器分野の製品群と，それに適用が予想される新技術をまとめたものであるが，そこにおいても有機電子材料の占める位置はきわめて高いものがある。

富士電機は，有機感光体で世界有数のシェアを持ち，また有機エレクトロルミネッセンス（EL）を次世代製品として開発しつつある。これらの事業の根幹である有機電子材料の開発を推進していくことは重要な課題である。

本稿では，この有機電子材料を用いた次世代製品の一つとして開発を進めている双安定性素子の開発の現状と今後の方向について述べる。

図1　成長商品分野の技術動向



2　有機電子材料の特徴

表1は，代表的な有機電子材料の電荷移動度をシリコンと比較したものである。最も高いペンタセン単結晶でも正孔移動度は3.2 cm^2/Vs 程度であり，電子移動度はさらに小さい。このため，これらの有機電子材料を用いたデバイスは一般的に応答性に限界がある。また，材料によっては大気環境で不安定な場合があり，封止などの対策をとる必要がある。しかしながら，有機電子材料には以下に示すような従来の電子材料にはない特徴があり，それを生かしたデバイス開発が推進されている。

(1)　材料設計によるバンド幅の制御が可能であり，光との相互作用の自由度が高い。
(2)　大面積素子の製造が容易である。
(3)　低コストプロセス（塗布など）の適用が可能である。
(4)　有機分子特有の物性（分子配向，双極子モーメント，相転移など）を利用した新規デバイスの可能性がある。例えば，本稿で述べる有機双安定性材料のスイッチング速度は10 ns 程度と言われており，多くの応用には十分な速度を確保できる可能性がある。

3　有機双安定性材料とその開発動向

特定の化学構造を有する有機電子材料においては，一つの電圧値に対して二つの安定な抵抗値が存在する双安定性が観測される。**図2**にはその特性例を示す。例えば電圧を0 V から徐々に上げていくと，低電圧領域ではほとんど電流が流れない高抵抗状態（オフ状態）であるが，あるしき

表1　有機電子材料の電荷移動度

	シリコン	ペンタセン単結晶	チオフェン配向膜	共役系導電ポリマー	液晶	共役系低分子材料
正孔移動度（cm^2/Vs）	450	3.2	0.1	0.1	1×10^{-3}	1×10^{-5}
電子移動度（cm^2/Vs）	1,500	0.5	0.02	—	1×10^{-3}	1×10^{-6}

川上　春雄

光機能材料，有機電子材料の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)材料技術研究所技師長。工学博士。応用物理学会会員。

加藤　久人

無機 EL ディスプレイ，酸化物磁性材料，有機電子材料の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)材料技術研究所。博士（工学）。応用物理学会会員，日本物理学会会員。

山城　啓輔

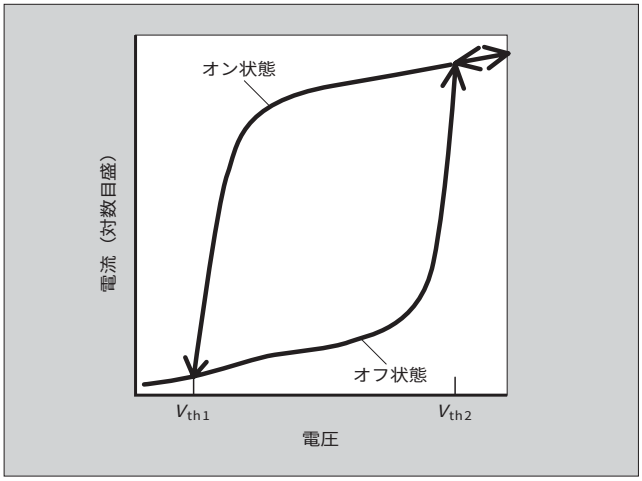
有機電子材料の研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)材料技術研究所。電気学会会員，応用物理学会会員，放電学会会員。

い値電圧（V_{th2}）で急激に電流が数けたにわたって増加する。この低抵抗状態（オン状態）は電圧を V_{th2} より下げても安定に継続するが，電圧が別のしきい値電圧（V_{th1}）より低くなると，再びオフ状態に復帰する。

このような特性を示す有機双安定性材料としては，従来から電荷移動錯体と呼ばれる有機材料が知られていた[(1)〜(3)]。これらの電荷移動錯体は，電子吸引性分子と電子受容性分子の二つの分子からなる分子間化合物であり，その組成比を厳密に制御することが必要である。それに対し，最近，カリフォルニア大学のグループは，有機双安定性材料薄膜層内にきわめて薄い金属中間層を設けることにより，単一成分の有機双安定材料で上記電荷移動錯体と同様な双安定性を得ることに成功した[(4)]。この構成では，従来の２成分系である電荷移動錯体と比較して組成制御性が改善されるが，金属中間層の作製という新たな工程が追加されるという難点があった。

富士電機では，独自の有機双安定材料開発とプロセス開発により，有機膜層内に上記のような金属中間層を設けることなく，かつ，単一成分の有機材料を用いて上記電荷移動錯体と同様な双安定性を得ることに成功した[(5)〜(7)]。これにより，単一の有機膜を金属電極で挟んだだけの簡単な構造で，双安定素子を作製することが可能となった。

図２　双安定電気特性



これらの材料における双安定性現象の詳細なメカニズムはいまだ明らかになっていない。特に，比較的新規に開発された単一分子で双安定性を示す材料系については，未知の部分が多く残されているのが現状である。富士電機が開発した双安定性素子については，①有機双安定性材料層と金属電極の界面に存在する電荷注入障壁により電流が抑制される（オフ状態），②電荷注入障壁に電荷が蓄積し局部的に電界が上昇する，③電界の上昇によって電荷注入障壁が破れ，有機双安定性材料膜への電荷の流れ込みが発生する（オフ状態からオン状態への遷移），などのメカニズムを推定しているが，その詳細特性や有機材料物性との関連などについては検証すべき点がまだ多く残されているのが現状である。

この双安定性は，高密度記録媒体やスイッチング素子として適用できる可能性があり，ここ数年，当技術の開発を行う機関が増加している。また，有機材料のほか，無機材料についても注目すべき材料系が開発されつつある。主要なものを**表２**にまとめた[(4)〜(13)]。

4　富士電機における開発と成果

富士電機では，この双安定性を応用したデバイス開発を進めている。このデバイスは有機材料を原料として用いるため，低温プロセスで大面積素子の製造が可能であり，かつプラスチック基板などへの適用も可能なため，特に，有機 EL などのディスプレイパネルの駆動素子などへの適用性が高いと考えている。

現在，ディスプレイパネルの駆動方式は，各画素を時系列的に順番に発光させるパッシブマトリックス方式と，各画素に制御回路を設けて発光を継続させるアクティブマトリックス方式に分類される（パッシブマトリックスとアクティブマトリックスについては 111 ページの「解説」参照）。前者の方式はパネル中の画素は各行ごとに順次発光するため，各画素の発光素子は発光時間が制限され，かつ，発光時間内に瞬間的に強く発光する必要がある。このため低コスト化が可能であるものの，消費電力や寿命の点では課題を有している。これに対し後者の方式では，各画素に薄膜

表２　双安定性素子の開発動向

機　関	材　料	概　要	電流密度（mA/cm²）	転移電圧（V）	オンオフ比	参考文献
Indian A.C.S.	Rose Bengalなど，色素系	電解自己組織化膜，スピンコート膜	0.3	4.5	10^5	(8)
ウェールズ大学	チィオフェンポリマー	ITO/電解膜/Al	0.004	5.0	10	(9)
九州大学	Melamine cyanurate	蒸着膜	16.0	12.0	10	(10)
千歳科学技術大学	Cu-TCNQ	蒸着膜	8.0	10.0	10^2	(11)
カリフォルニア大学	AlDCN	蒸着膜	100.0	3.0	10^6	(4)
エール大学，ライス大学	ニトロアミノ分子	自己組織化膜	—	5.0	—	(14)
ヒューレットパッカード	rotaxanes	自己組織化膜	—	1.5	10^3	(15)
富士電機	DODMT	蒸着膜	2.0	20.0	10^3	(6)
フィリップス	ZnCdS	スパッタ膜	80.0	0.5	10^6	(12)
東京農工大学	porous Si	—	1.0	17.0	10^5	(13)

トランジスタなどからなる制御回路を有し発光状態を連続して維持できるため，各画素の発光素子は平均的に低輝度で発光すればよい。一般に有機 EL は輝度が低いほど発光効率が高く発光寿命は長くなるので，消費電力や寿命の点でメリットはあるものの，コストが高いのが難点である。

これに対し，例えば**図 3** に示すように有機 EL と双安定素子を直列に接続し，両端にバイアス電圧を印加することにより双安定素子のオンオフ状態を維持させれば，パッシブマトリックス方式と同様の構成でも発光を継続させることができる。オンオフ状態はそれぞれの転移電圧に相当する電圧を制御パルスとして印加することにより切り換えられる。これにより高価な制御回路を用いることなく，ディスプレイの消費電力や寿命を改善することが可能となる。

図 4 は，上記の有機 EL と双安定素子を直列に接続した画素での動作を詳細に示したものである。双安定素子がオン状態では，両素子に印加される電圧 V_T は双安定素子と有機 EL の抵抗値に応じて分割される。このときの各電圧値をそれぞれ V_B，V_O とすると，V_O は有機 EL の動作電圧となり一般には最大 10 V 程度の値が必要とされる。また，オフ状態では双安定素子はコンデンサと等価になり，両素子に印加される電圧 V_T の全部が双安定素子に印加される。双安定素子の状態が安定であるためには，両状態で印加される電圧 V_B（オン状態），V_T（オフ状態）が前述の V_{th1} と V_{th2} の間にあることが必要となる。すなわち，この用途には，有機 EL の駆動電圧と電流に対応するために，オフ状態からオン状態への転移電圧 V_{th2} は V_T より高い（一般には 15 V 以上）必要があり，かつオン状態での電流密度が高いという特性が必要とされる。富士電機は，独自に開発した有機双安定性材料を用いることにより，単一組成，単層構造での双安定性を実現するとともに，この種のデバイスでは世界最高となる転移電圧 V_{th2} として 20 V を達成した。

図 5，**図 6** にはその特性例を示す。このうち**図 5** は単層構造における各種材料の特性を示したものである。このうち材料 A は，従来，中間層構造でのみ双安定性が得られるとされていた材料であるが，富士電機では構造が単純な単層構造（有機双安定材料層を金属電極で挟んだ構造）にて双安定性を得た。また，材料 B と材料 C は富士電機が独自に開発した有機双安定性材料である。このうち，材料 B は正の電荷（正孔）を伝導する材料であり，材料 A よりも高い電流が得られている。また材料 C は負の電荷（電子）を伝導する材料である。有機 EL と接続する場合には素子構成に応じてこれらの極性の異なる材料を使い分けることができる。また，**図 6** は材料 C を用い，電極と有機双安定性材料層との中間に界面層を設けた素子の特性を示したものであるが，この構成で，オフ状態からオン状態への転移電圧を 20 V 以上に向上させることに成功した。界面層は導電性微粒子を有機材料中に分散したものであり，双安定素子に印加される電圧の一部を分担するとともに，素子への電荷注入を制御して転移電圧を向上させる役割を

図 3　双安定性素子と有機 EL 発光素子の構成例

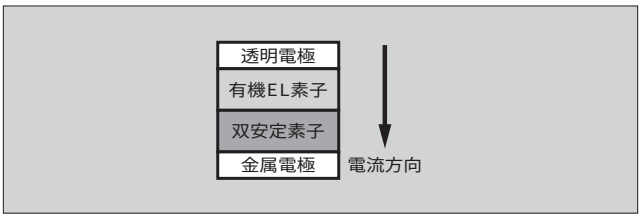


図 4　双安定性素子と有機 EL 発光素子の動作条件

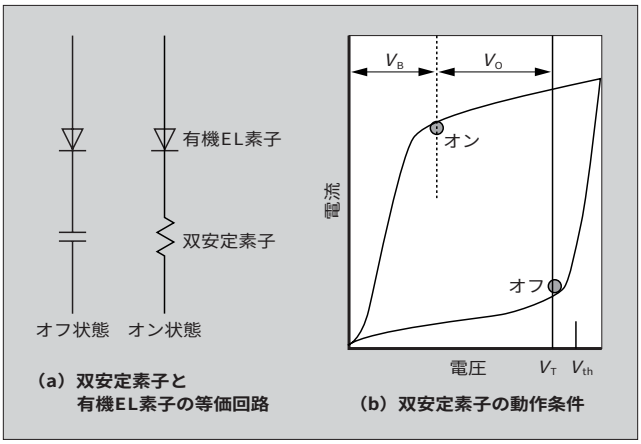


図 5　双安定性素子の電流電圧特性（単層構造）

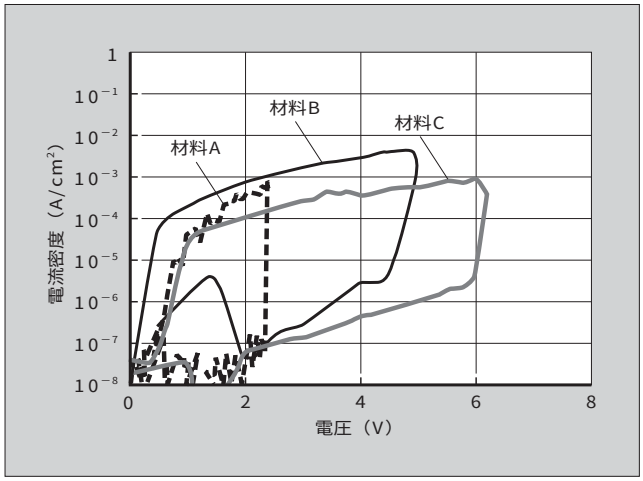


図 6　双安定性素子の電流電圧特性（材料 C）

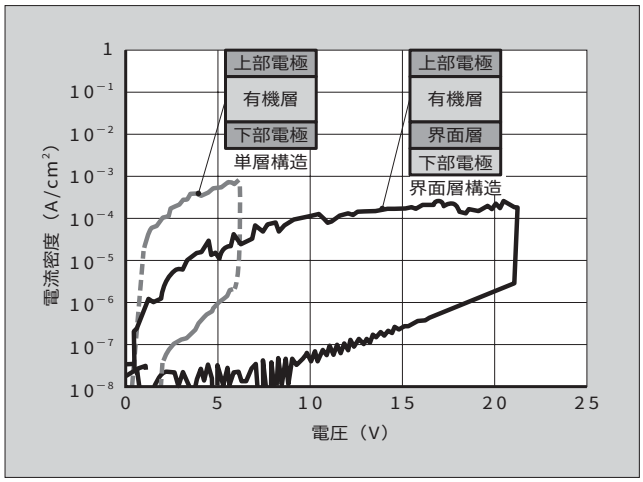
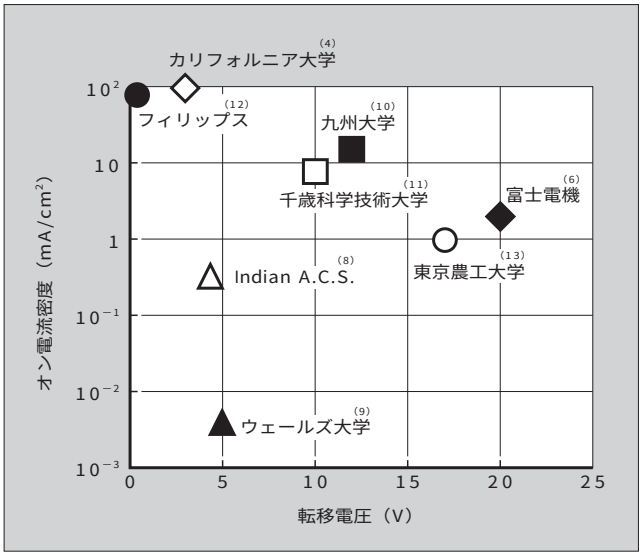


図７　双安定性素子の初期特性比較[(4)～(13)]



果たしていると考えている。

図７は，現在各研究機関から公表されている双安定素子の転移電圧とオン電流密度を比較したものである。転移電圧は富士電機の界面層構造を用いた材料Ｃでのデータが最も高く，オン電流密度はカリフォルニア大学の中間層構造を用いた材料Ａが最も高くなっている[(4)～(13)]。富士電機では，現在，さらなる特性の改善を目指して，新しい有機材料の開発と層構成の最適化を継続している。

5　あとがき

本開発は緒についたばかりであり，今後解決すべき課題が数多く残されている。特に，オン状態での電流密度のほか，繰返し特性，環境特性など，信頼性，安定性にかかわる課題には高いハードルが予想される。また，これらの技術課題を解決するには，双安定性という現象のメカニズムの解明が不可欠であるが，前述のようにこれについても不明な点が多く残されているのが現状である。

これらの課題を解決していくには，社内のみならず社外各機関との幅広い連携が不可欠と考えている。今後，これらの協力を仰ぎながら，実用化を目指して開発を推進していく所存である。

参考文献

(1) Potember, R. S. et al. Electrical switching and memory phenomena in Cu-TCNQ thin films. Appl. Phys. Lett. vol.34, 1979, p.405–407.

(2) Kumai, R. et al. Current-induced insulator-metal transition and pattern formation in an organic charge-transfer complex. Science. vol.284, 1999, p.1645–1647.

(3) Gao, H. J. et al. Using a new kind of organic complex system of electrical bistability for ultrahigh density data storage. J. Vac. Sci. Technol. vol.B 15, 1997, p.1581–1583.

(4) Ma, L. et al. Nonvolatile electrical bistability of organic/metal-nanocluster/organic system. Appl. Phys. Lett. vol.82, 2003, p.1419–1421.

(5) Kawakami, H. et al. Electrical Bistable Behavior of Organic Materials in Single Layer Structure. Proc. The International Symposium on Optical Science and Technology SPIE's 48th Annual Meeting. vol.5217, 2003, p.71–79.

(6) 川上春雄ほか．アミノイミダゾールジカーボニトリルの電気的双安定特性．第 50 回応用物理学会連合講演会予稿集．29p–B–8，2003．

(7) 加藤久人ほか．ビスキノメタン系有機材料の電気特性における電極依存性，(2)双安定性．第 64 回応用物理学会学術講演会予稿集．2a–S10，2003．

(8) Bandyopadhyay, A. et al. Large conductance switching and memory effects in organic molecules for data-storage applications. Appl. Phys. Lett. vol.82, 2003, p.1215.

(9) Taylor, D. M. et al. Memory effect in the current-voltage characteristic of a low-band gap conjugated polymer. J. Appl. Phys. vol.90, 2001, p.306.

(10) Gao, X. et al. Switchable organic electroluminescence. Appl. Phys. Lett. vol.81, 2001, p.4508.

(11) Oyamada, T. et al. Switching effect in Cu:TCNQ charge transfer-complex thin films by vacuum codeposition. Appl. Phys. Lett. vol.83, 2003, p.1252.

(12) van der Sluis, P. et al. Non-volatile memory cells based on $Zn_xCd_{1-x}S$ ferroelectric Schottky diodes. Appl. Phys. Lett. vol.82, 2003, p.4089.

(13) Ueno, K. et al. Light-emissive nonvolatile memory effects in porous silicon diodes. Appl. Phys. Lett. vol.74, 1999, p.93.

(14) Reed, M. A. et al. Molecular random access memory cell. Appl. Phys. Lett. vol.78, 2001, p.3735.

(15) Chen, Y. et al. Nanoscale molecular-switch devices fabricated by imprint lithography. Appl. Phys. Lett. vol.82, 2003, p.1610.

環境調和型材料の開発

渡邉　裕彦（わたなべ　ひろひこ）　　管野　敏之（かんの　としゆき）　　古川　雅晴（ふるかわ　まさはる）

1　まえがき

欧州連合（EU）の WEEE 指令「使用済み電気・電子機器に関する指令」による回収，リサイクルへの対応や RoHS 指令「有害物質の使用禁止指令」による 6 物質（鉛，水銀，カドミウム，六価クロム，特定臭素系難燃剤 2 種）の電気・電子機器への使用禁止期日がそれぞれ 2005 年 8 月 13 日，2006 年 7 月 1 日と決定した。鉛フリーはんだや樹脂加工品のノンハロゲン化への製品展開が急務となっている。

富士電機は，積極的に電子機器製品の環境調和型化へ取組みを推進している。

本稿では，この規制に対応した材料開発の取組みのうち，成形樹脂用反応型ノンハロゲン難燃化技術の開発と，電子機器に使用されている鉛を使用しない，鉛フリーはんだ材料の開発の 2 テーマについて，その取組みと内容を紹介する。

2　成形樹脂用反応型ノンハロゲン難燃化技術の開発

2.1　背　景

富士電機製品の樹脂加工品は，難燃グレードが UL94 規格 V-1 以上の難燃性強化仕様が多くを占め，主にハロゲン系難燃剤や赤りん系を使用してきた。ハロゲン系難燃剤は，ダイオキシンなどが発生し環境に悪影響を与える。また，赤りんは危険ガスが発生し有害である。そこで，高い難燃グレードを有し，樹脂本来の特性と機能性を付与し，リサイクル性，コストなどを考慮した新材料開発が求められている。

2.2　従来剤と反応型ノンハロゲン難燃剤の特徴

反応型ノンハロゲン難燃化技術を開発し，環境に優しい機能性樹脂技術を製品に反映することで，①環境規制への対応，②熱硬化性樹脂成形品の熱可塑性樹脂代替，③薄肉成形による小型・軽量化などを進めている。

現状のノンハロゲン系難燃剤は，樹脂中に多量に添加分散しなければならず，耐環境性を低下させ，本来の樹脂特性（機械的，熱的，電気的など）の悪化や表面への析出・分離などによる特性低下といったトラブルが発生する。

本開発の反応型難燃剤は，分子構造内にりん（P），窒素（N）を含有し，さらに樹脂と反応基を末端に有した**図 1** に示す基本骨格構造の難燃剤である。

これを樹脂中に添加し，成形加工後，熱・放射線照射により，**図 2** に示すように樹脂分子内に付加し，網目構造を形成することで機能性を発現させる。これにより P・N 元素が樹脂の燃焼現象を抑制し，網目構造が耐熱性・機械特性などの低下を防止し，表面への析出・分離現象を抑制す

図 1　反応型難燃剤の基本骨格構造例

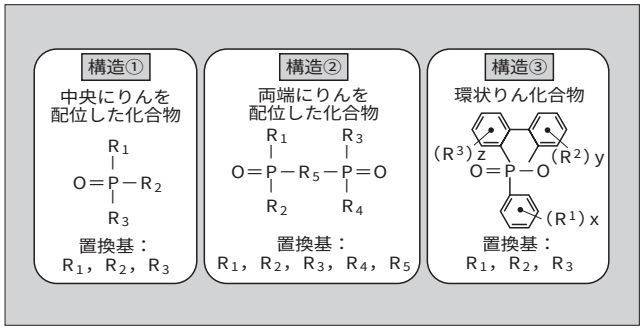
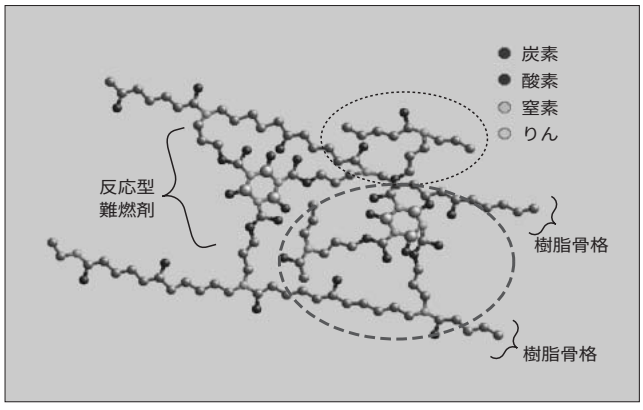


図 2　反応型難燃剤と樹脂分子構造モデル



渡邉　裕彦

プリント配線板の実装技術，特に鉛フリーはんだの実装技術の研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)生産技術研究所。溶接学会会員。

管野　敏之

有機・高分子材料と有機デバイス技術の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)生産技術研究所。高分子学会会員，応用物理学会会員，電気学会会員。

古川　雅晴

プラスチック成形加工技術の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)生産技術研究所。プラスチック成形加工学会会員。

る。

2.3　反応型難燃剤に対する要求特性

可燃物質，酸素，熱の存在下で燃焼現象が起こる。その際，熱の放射・伝達により樹脂が酸化分解・溶融分解し，発生・拡散した可燃性ガスと酸素とが反応して燃焼する。これの繰返しにより，連鎖的に燃焼現象が進む。難燃化には，熱分解速度，熱分解生成物，気相反応，熱伝達などの制御が必要となり，P・N 元素が分子内に存在すると炭化皮膜の形成と酸素遮断効果により，難燃性の制御効果を得られる。

難燃剤への要求特性は，難燃剤としての難燃効果はもとより，①混練・成形時に分解・ガス化しない，②樹脂との相溶性がよい，③成形流動性がよい，④反応性が高い，⑤樹脂の燃焼時に分解することなどが要求される。

図 3 に製品化までのプロセスフローを示す。本難燃剤の構造開発においては，目的とする樹脂骨格内に反応性と難燃性を付加できる最適な分子構造を設計し，合成試作を進めている。さらに，最適な材料設計により配合・コンパウンド化を行い，成形加工条件を確立しながら加工品を作製し，その後，ラジカル重合反応（架橋）処理を施し樹脂を網目構造化している。各工程での樹脂の状態変化は，化学的，熱的，機械的な材料物性という観点から，分子構造同定，結合状態，熱分解温度，機械的強度などの分析評価を行っている。さらに難燃特性を評価し，難燃剤の分子構造・材料設計（組成）へフィードバックしながら開発を推進している。現在までに，製品化プロセス，および各工程で不可欠な要素技術を構築した。

2.4　反応型難燃剤を添加した成形品の貯蔵弾性率と温度依存性

図 4 に，「構造②」タイプ反応型難燃剤を添加した成形品の貯蔵弾性率の温度依存性を示す。架橋反応前の貯蔵弾性率は 250 ℃付近で融解・軟化現象が起こり，急激に低下するが，架橋反応後は低下が少なく，反応により網目構造化していることが分かる。

図 5 は，各構造における架橋反応前後の 250 ℃での貯蔵弾性率を示している。構造②の貯蔵弾性率は反応後に最も増加しており，分子の基本骨格と反応基の数や配位によって反応が異なることを示している。

2.5　反応型難燃剤の構造と難燃特性

図 6 に各構造と残炎時間の関係を示す。ベンゼン環を有する環状りん化合物「構造③」は，他の構造に比較して難燃効果が高く，UL94 規格 V-2 ～ V-1 相当の難燃性を有することが分かった。また，「構造①」の場合，熱分解温度が低く，混練・成形時のガス化により難燃剤の添加量が減少し，難燃性が低下した可能性がある。一方，反応性については，構造①の場合，官能基の結合強度が弱く，架橋度が低下したと考えられる。

図３　製品化までのプロセス

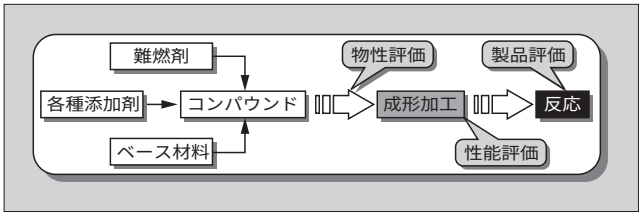


図４　架橋反応前後の貯蔵弾性率

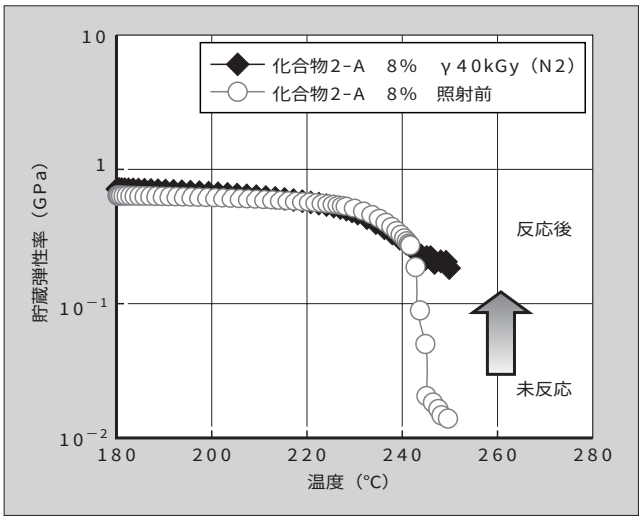


図５　250 ℃における貯蔵弾性率

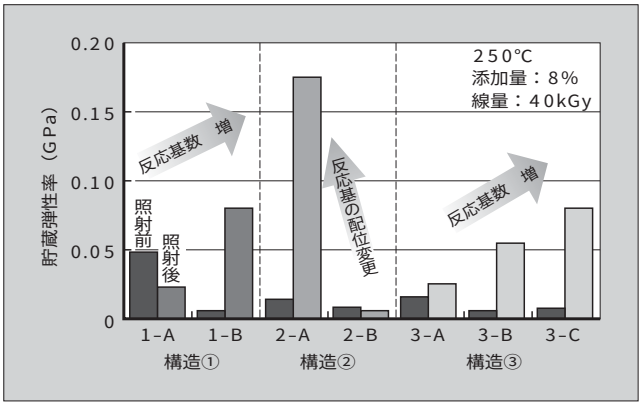
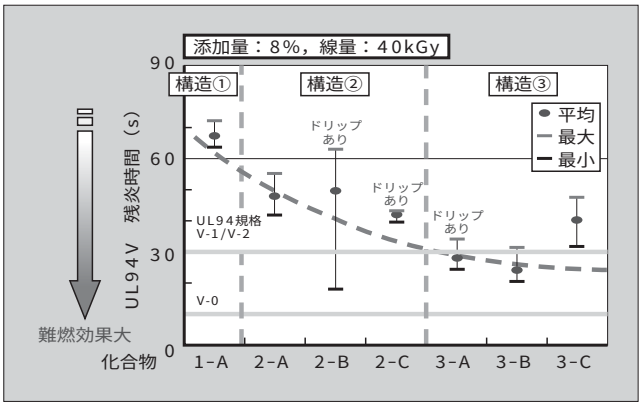


図６　難燃性の構造依存性



2.6　今後の成形材料技術の研究

反応型ノンハロゲン系難燃剤の開発を行い，反応による網目構造化で樹脂本来の機械特性・耐熱性などを達成することができた。樹脂骨格の分子内に難燃特性を有する分子を導入することで難燃性を向上し，難燃効果に適した構造を見いだし，UL94 規格 V-1 以上の難燃性を実現できる指針を構築した。今後は熱硬化性樹脂の代替，全社製品へのノンハロゲン難燃化技術の適用を進め，環境に配慮した製品作りに貢献する。

本技術は，材料の機能化への足掛かりとなり独自の材料開発として多くの分野に展開していきたい。

3　鉛フリーはんだ材料の開発

富士電機が独自に開発した，5 元系鉛フリーはんだ（SnAgCuNiGe）の特徴について紹介する。本はんだは，SnAgCu が主成分で，微量の Ni と Ge を含有することが特徴である。現在，国内，米国およびドイツで特許を取得している。

3.1　背　景

産業用エレクトロニクス製品の特徴は，大電流製品や屋外の厳しい環境下で使用されることが多く，大容量から小容量の電子部品までさまざまな品種を採用している。さらには，ベアチップもフリップチップ実装形態で基板上に混載実装される。このような背景の中，富士電機では多様な接合工法（例えば，リフロー，フロー，水素還元無フラックスリフロー工法など）に適用可能で，加えて熱ひずみ変化や熱疲労に対する耐久性，はんだ接合部を介した熱伝導性（放熱性）などのはんだ接合部性状の安定性を重視した鉛フリーはんだ材料を選定し，材料と製造プロセス技術の両面で開発を進めている。

3.2　従来はんだ材料と鉛フリーはんだの特徴

表 1 に，従来から使用されてきた Sn37Pb 共晶と，富士電機が開発した SnAgCu 系材料である Sn3.5Ag0.5CuNiGe はんだの代表基礎物性一覧を示す。これ以降，5 元系はんだの Sn3.5Ag0.5CuNiGe はんだを SACNG，（社）電子情報技術産業協会（JEITA）推奨組成である Sn3.0Ag0.5Cu はんだを SAC，Sn37Pb 共晶はんだを SP と記す。SACNG を含む SnAgCu 系の鉛フリーはんだは，SP よりも機械的特性，信頼性が高い合金組成のはんだが幾つもあるが，SP 特性と大きく異なる点は，SP よりも融点が高く，弾性率，熱伝導率が高い，亜共晶合金である点だといえ，鉛フリーはんだの適用に際しては，物性値を把握し活用することが重要であると考えている。

表 1　SPとSACNGの代表特性

項　目	Sn37Pb	Sn3.5Ag0.5CuNiGe
融点（溶解，凝固）	共晶合金183℃ Snリッチで亜共晶（β-Sn初晶） Pbリッチで過共晶（α-Pb初晶）	亜共晶合金217～221℃ β-Snの過冷却発生（条件により20℃）
強度0.2%/s（MPa）	38	42.0
伸び（%）	50	40 →
弾性率（GPa）	27	50 ↑
線膨張係数（ppm/℃）	21～24	22.3 →
熱伝導率〔W/(m・K)〕	54	61 ↑
硬さHV	15～20	15～23 →
表面張力（mN） n＝10平均	311 （σ_{n-1}=4.9）	325 （σ_{n-1}=11）

3.3　機械特性のひずみ速度依存性

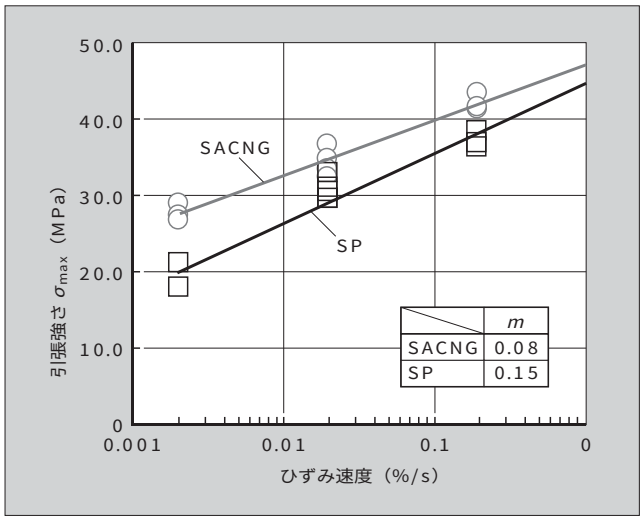
バルク試験片を用いた材料試験では，一般的に非常に速いひずみ速度にて材料間の比較試験を行う。しかし，製品の使用環境によるひずみ条件とは大きく異なる。**図 7** に SACNG の引張強度のひずみ速度依存性を示す。また，材料間の比較としてひずみ速度感受性指数 m 値も併せて表記した。

図 7 から，SACNG はひずみ速度による変化が小さく，安定性が高いことが分かる。また，SnAgCu 系はんだの代表的な組成である SAC よりも，高温・長時間保持による強度低下が小さいことも確認している[(4)]。

これは，**図 8**(a)に示すように，SnAgCu 系はんだの組織は，Ag3Sn と Cu6Sn5 の化合物が晶出し，Sn 初晶を取り巻くように Ag3Sn/Sn 共晶組織が微細結晶として析出する分散析出強化型のはんだ組織であるのに対し，SACNG では**図 8**(b)のように，その Sn 初晶と Ag3Sn 共晶の晶出した結晶が，SAC よりも微細組織となっているためで，先に述べた強度変化が小さく，安定性が高いことに寄与していると考えている。

また，SAC に対して本稿で述べる SACNG は Ag 添加量が多く，Ag 量による影響も大きいが，はんだ接合における通常の冷却速度範囲では，初晶 Sn が晶出しそれを包むように Ag3Sn/Sn 共晶がネットワークを形成する。Sn

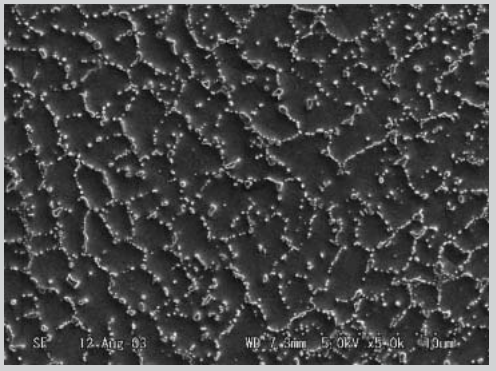
図 7　引張強度のひずみ速度依存性



合金は過冷却しやすく核生成の不均一性により粗大な初晶Snが晶出するが，先に述べたSACNGの微細組織は，Ni/Geが添加されていることにより核生成を助け，過冷却時の初晶Snの成長を抑止している効果も無視できないと考えている。

図9に，125 ℃× 1,000 h高温時効した組織の電界放出型走査オージェ電子分光装置によるマッピング像を示す。長時間製品使用時の劣化や高温発熱したときの劣化（以下，高温時効という）に対する感受性については，高温時効による析出物の成長を，晶出した結晶にNiが分散していることで抑止していると推察する。

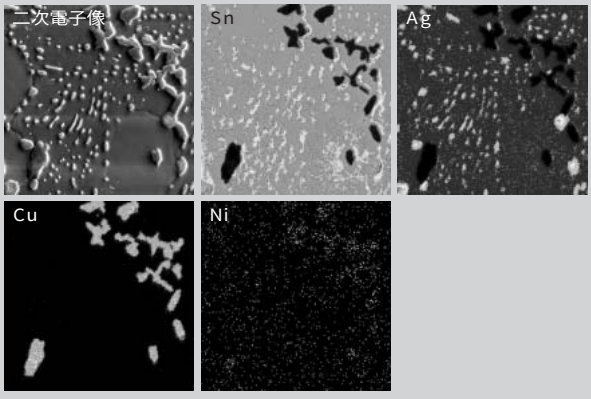
図8　はんだ組成と組織



（a）SACのはんだ組織（5,000倍）

（b）SACNGのはんだ組織（5,000倍）

図9　SACNGのFE-SAMによるマッピング像



3.4　ぬれ性

JIS Z 3198に規定されているバルクウエッティングバランス試験法を用い，メニスカス曲線から各種鉛フリーはんだをのぬれ性を求めた。**図10**に各種はんだの評価結果を示す。ここで，ぬれ力は$2/3F_{max}$，ゼロクロスタイムはぬれ曲線上の特徴点（ゼロクロス点）に到達するのに要した時間を示す。試験片には10 × 30 × 0.3（mm）のりん脱酸銅C1201Pを用いた。本試験法は，供試する試験片の表面形態による値のばらつきが非常に大きいため，前処理として，①脱脂，②キリンス液による酸洗処理を行ったものを使用した。

また，図の横軸には試験に供した各種鉛フリーはんだの成分元素の頭文字をとり，Sn3.5Ag0.5CuNiGeをSACNG，Sn3.5AgをSA，Sn3Ag2BiをSAB，Sn3.0Ag0.5CuをSAC，Sn0.75CuをSC，Sn37PbをSPと記した。

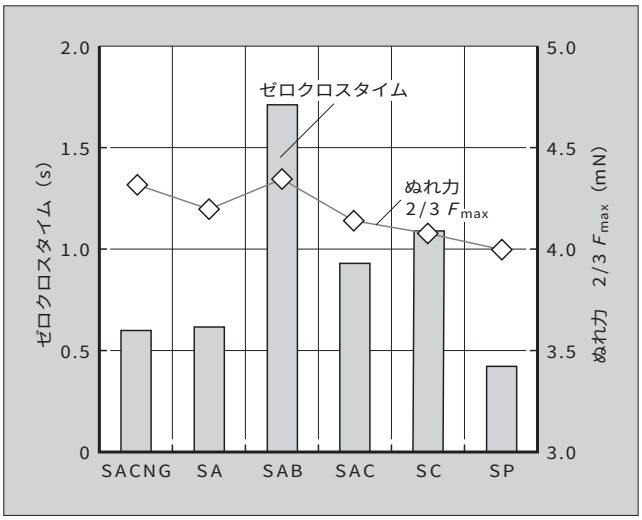
代表的な鉛フリーはんだは，いずれもSPに比べ，ぬれ時間が長く，ぬれ開始に要する時間が必要であることが分かる。SACNGのはんだ組成は，他の鉛フリーはんだに比べぬれ時間（ゼロクロスタイム）が速いことが分かる。

3.5　今後の鉛フリーはんだ材料の研究

従来から使用してきた鉛含有はんだのSPは，製品の使用環境や発熱による熱応力などで発生するひずみを，自らが塑性変形することで緩和してきた。

今後は，弾性率が高く，熱ひずみ劣化の小さいSnAgCu系はんだを採用するうえで，電子部品や基板など異種材料間の接合母材に対して応力が集中しひずみが発生することが懸念され，従来のはんだ接合形状の見直しや，はんだ接合された構造体の構造設計や製造プロセスに適応した物理物性の取得が，SACNGの製品適用展開に重要な技術課題であると考えている。

図10　各種鉛フリーはんだのぬれ性



4　あとがき

環境調和型材料の先行開発は，他社との優位性確保に大きく貢献する社会環境にある。金属，高分子，有機・無機材料など微量元素の添加が大きな効果をもたらす。今後も，大学，中立機関，素材･原料メーカーなどとの幅広い協業により，系全体の最適化を図り，環境に優しい製品の提供を進めていく所存である。

参考文献

(1)　西沢仁ほか監修．難燃材料活用便覧―難燃化の課題と実際技術―．テクノネット社．2002-5.

(2)　幕内恵三．ポリマーの放射線加工．ラバーダイジェスト社．2002-4.

(3)　Feng, W. et al. Radiation Physics and Chemistry. vol.63, 2002, p.494-496.

(4)　Suhartini, M. et al. Radiation Crosslinking of Poly（butylene succinate）in the Presence of Low Concentrations of Trimethally Isocyanurate and Its Properties. Journal of Applied Polymer Science. vol.88, 2003, p.2238-2246.

(5)　新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書．環境負荷低減化に対応したはんだ接続に必要な試験方法等の標準化．日本溶接協会．2002-3.

(6)　下田正義ほか．鉛フリーはんだの時効による強度および組織変化．Mate2003. 2003-2, p.325-330.

(7)　山下満男ほか．鉛フリーはんだ材料における評価技術．富士時報．vol.73, no.9, 2000, p.488-492.

(8)　出川公雄ほか．鉛フリーはんだ接合に及ぼす基板めっきの影響．Mate97. 1997.

(9)　菅沼克昭．鉛フリーはんだ実装技術の基礎．大阪大学産業科学研究所.

解　説　パッシブマトリックスとアクティブマトリックス

ディスプレイパネルの駆動方式はパッシブマトリックスとアクティブマトリックスの二つの方式に分類される。パッシブマトリックス方式では１行ずつ順次発光させるので，例えば 100 行の画素からなるディスプレイパネルの場合，ある画素が発光する時間は全体の 1/100 となる。したがって，例えばディスプレイパネル面の平均輝度を 300 cd/m^2 とするには，画素の発光は 100 倍の 30,000 cd/m^2 とする必要がある。有機 EL を高輝度で発光させることは消費電力などの点で課題があり，この方式では駆動できるパネルの寸法などに限界がある。

一方，アクティブマトリックス方式では，各画素に薄膜トランジスタ，もしくは薄膜ダイオードからなる制御回路が設けられており，これにより各画素はディスプレイパネルの行数にかかわらず発光を継続することができるので，ディスプレイパネル面の明るさと同程度の明るさで発光していればよい。したがってアクティブマトリックス方式は，パネルの寸法などで制限要素が少なく，現在多く用いられているカラー液晶ディスプレイパネルではこの方式が多く用いられている。この方式に用いられる薄膜トランジスタは現在，アモルファスシリコンやポリシリコンなどで作製されているが，低コスト化などの目的で有機電子材料の適用検討が進められている。

コンビナトリアル成膜による誘電体薄膜材料の高速合成

特集

米澤　喜幸（よねざわ よしゆき）　小西　義則（こにし よしのり）　清水　了典（しみず りょうすけ）

1　まえがき

薄膜キャパシタなど，酸化物薄膜デバイス応用を念頭におきながら誘電体薄膜の高性能化の研究を進めている。キャパシタ応用を考えた場合，目標値は非鉛系材料で高比誘電率（>1,200）と高耐圧（>1 MV/cm）を両立させなければならない。このためには，従来の非鉛系材料の高誘電率化とともに新しい材料探索を進めていく必要がある。

現在，富士電機では，新規誘電体材料 $SnTiO_3$，電荷移動型誘電体などの開発を行っているが，このような材料探索には材料合成のみならず，その評価も合わせて大きな労力と時間がかかる。これを解決する方法として，コンビナトリアル成膜法を利用した超高速材料スクリーニング技術が提唱されている。ここではコンビナトリアル成膜法の概要とこれらの結果，および可能性について報告する。また，富士電機の複合コンビナトリアル PLD（Pulse Laser Deposition）装置導入，およびこれを用いた今後の新規薄膜合成の展開についても述べる。

2　コンビナトリアル成膜法および評価技術

コンビナトリアル法とは，もともと 1990 年代に創薬の分野で考え出された概念であり，「組合せを利用して多種多様な化合物を合成することにより，短期間に有望な化合物を見つけ出し，その見いだされた化合物を効率よく最適化するための技術」と説明できる。この概念を薄膜合成に応用すると，1 枚の基板上に複数の条件を作り込み，評価を行うことによって，材料および成膜条件探索のスループットを大きく向上することができる。

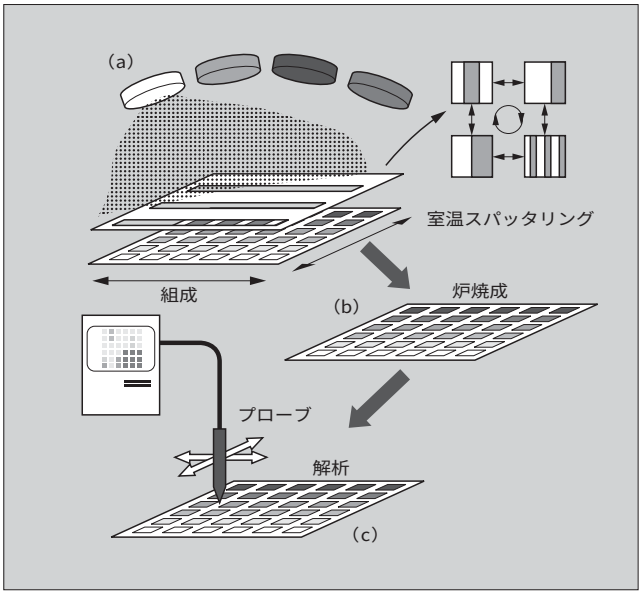
図 1 に Xiang らによって行われたコンビナトリアル法を示す[1), 2)]。誘電体材料の場合，$BaCO_3$，$SrCO_3$，TiO_2 などのプリカーソルをスパッタリングによって密着マスクを通して成膜し，大気中で拡散アニールを行い，本焼成を行う（1 週間程度）。この後プローブを用いて各組成の評価を行う。しかしながらこの方法では，熱力学的に安定な相しか得られず，ヘテロエピタキシャルによる単結晶薄膜，超格子といったヘテロ構造を作成することはできない。

これに対して，現在共同研究を行っている東京工業大学鯉沼研究室では，その場で 1 枚の基板上にさまざまな条件を成膜し，合成を行う「コンビナトリアルレーザ MBE（Molecular Beam Epitaxy）」を開発し，国家プロジェクトにて評価法まで含めて精力的に研究を行っている[3), 4)]。

一方，PLD 成膜法は，ターゲット上にエキシマレーザ光（波長 248 nm）を集光して 10 万℃以上とすることにより生ずるプルームと呼ばれる熱プラズマを適用して，ターゲット組成を基板に忠実に転写することができる。この PLD 法は非平衡状態で成膜が可能であるとともに，昇華面積が小さいために直線性がよくマスクによる遮へいを容易に行うことができる。また，パルス成膜であるために，例えば $SrTiO_3$ などを 50 パルス/分子層というようにディジタルに成膜をコントロールできる。

図 2 にコンビナトリアル PLD 装置を示す。この装置は PLD と可動マスク，その場で薄膜形成がモニタ可能な RHEED（反射高速電子線回折）装置を組み合わせること

図 1　密着マスク形コンビナトリアル法



米澤　喜幸

酸化物薄膜，合成，材料研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。MRS 会員。

小西　義則

酸化物薄膜形成技術の基礎研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。工学博士。日本物理学会会員，応用物理学会会員，MRS 会員。

清水　了典

CMOSIC プロセスの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所技師長兼グループマネージャー。工学博士。応用物理学会会員。

によって，熱力学的準安定構造を並行して合成することができ，薄膜特有の物性まで評価することが可能となる。富士電機は東京工業大学との共同研究にて，レーザ加熱温度コンビナトリアル成膜装置を用いて，世界で初めて$SnTiO_3$相を合成することに成功した[5]。さらに最近になって，3種類のターゲットを用いて打ち分けを行い，可動マスクを用いて基板上に三元の相図を作りこむ三元コンビナトリアルの概念が導入された。**図3**にカルーセル形三元コンビナトリアル法の模式図を示す。

評価方法としては，例えば蛍光体の場合は紫外線ランプ光を当てることによって全面の蛍光効率を測定する方法があるし，また，誘電率については後述するマイクロ波誘電率顕微鏡を用いて評価を行うことができる。

今回，$(Ba_{1-x}Sr_x)TiO_3$の組成および膜厚の最適化を目的として，コンビナトリアル薄膜合成を行い，マイクロ波誘電率顕微鏡による評価を行った。

図2　コンビナトリアル PLD 装置

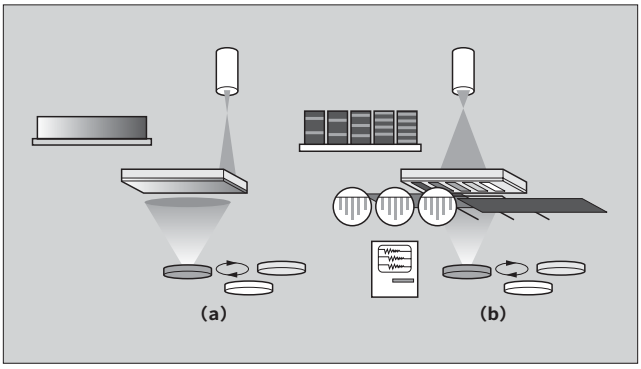
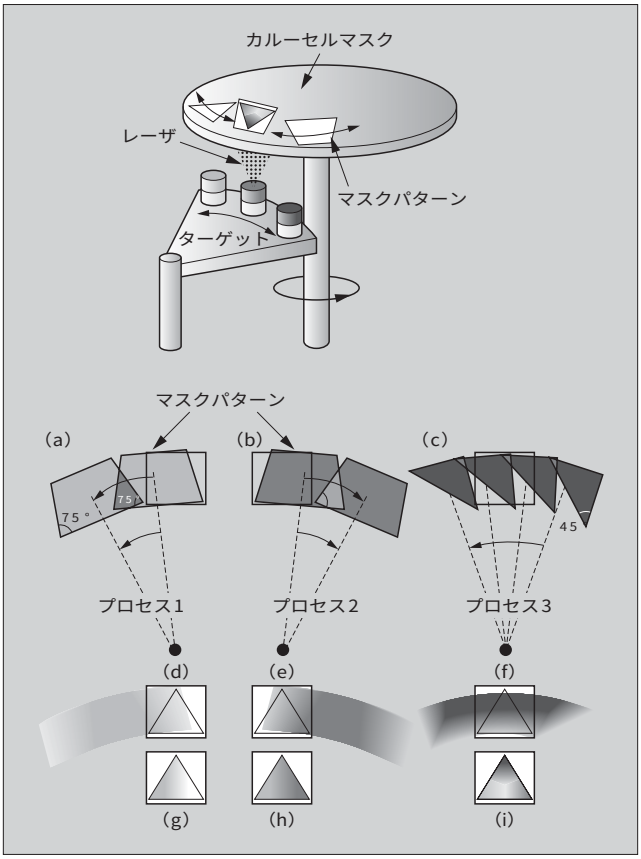


図3　カルーセル形三元コンビナトリアル法



③ コンビナトリアル成膜法による（$Ba_{1-x}Sr_x$）TiO_3の最適化

3.1　組成・膜厚の最適化

（$Ba_{1-x}Sr_x$）TiO_3の誘電率はBa，Sr比および格子のひずみに大きく依存する。そこで今回はまず（$Ba_{1-x}Sr_x$）TiO_3誘電率の組成および膜厚依存性を三元コンビナトリアル法で行った。具体的には，前記三元コンビナトリアル法にて，二元コンビナトリアル，すなわち$BaTiO_3$（BTO），$SrTiO_3$（STO）二つのターゲットのみを用いて行うと，**図4**のように組成および膜厚を連続的に変えることができる。基板には15 mm角，格子定数3.788 Åの$LaAlO_3$と3.905 Åの Nb ドープ STO を用いた。PLD による成膜分布および膜質は，ターゲット上でのレーザエネルギー照射密度に大きく左右される。そこで本成膜に先立ち，レーザエネルギーおよび焦点からの集光レンズの位置をさまざまに調整し，ステンレス鋼板マスクを用いて，実際の成膜時のコンビナトリアルマスク移動を模擬し条件出しを行った。

今回用いた装置を**図5**に示す。成膜は膜厚140 nmを目

図4　（$Ba_{1-x}Sr_x$）TiO_3組成，膜厚コンビナトリアル

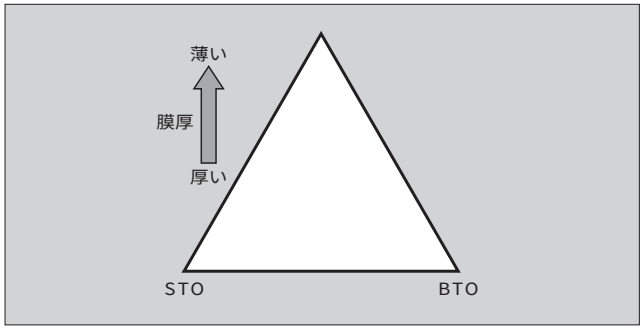
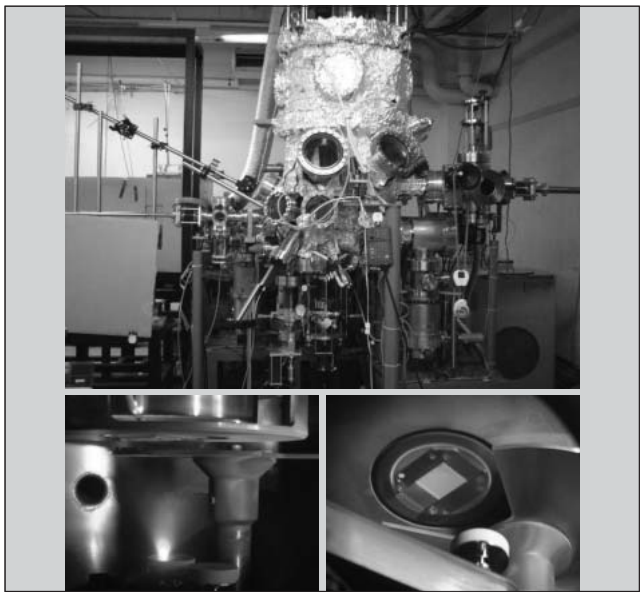


図5　コンビナトリアル成膜装置



標とし，1 周期 58 パルスで 350 周期行い，成膜時間は約 5 時間であった。

特集

3.2　測定法の検討

コンビナトリアル法では，多量のサンプルが合成される。しかし同時に評価の高速化も行わねば，評価がボトルネックとなってしまう。

マイクロ波誘電率顕微鏡は，もともと強誘電体のドメインの二次元的な分布状態を計測する技術として開発された。原理を**図 6** に示す。プローブは，リング状のグラウンド電極と，電界研磨した先端が非常にシャープなニードル，外付けの L と C が帰還増幅器に接続されている構造である。図中にニードルの先端から試料を貫通してリング電極へたどる電界のパスがあり，これが容量（コンデンサ）となる。すなわち試料がない場合の容量を C_0 とし，このときの発信周波数を f_0 とすれば，試料の容量 C_s および発信周波数のずれ Δf_r は次の式により表される。

$$f_0+\Delta f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0+C_s)}}$$

ニードルを二次元的にスキャンし，発信周波数変化 Δf_r をスペクトラムアナライザで測定することによって，試料の容量の二次元分布を知ることができる。プローブの先端径は 20 μm であり，発信周波数は 1.2 GHz，スキャンエリアは 20 × 20（mm），ステップは 1 μm である。基板には膜組成とは異なる基板を用いる必要がある。得られたキャパシタンス分布から，最も高い誘電率を持つ組成の位置で上部電極を形成し誘電率を測定した。

3.3　マイクロ波誘電率顕微鏡による測定結果

$LaAlO_3$ 基板上の STO–BTO 組成，膜厚コンビナトリアル試料をマイクロ波誘電率顕微鏡を用いて評価した。容量の組成，膜厚依存性を**図 7** に示す。

最も誘電率の高くなる組成は Ba：Sr ＝ 0.8：0.2 近辺であった。また，膜厚依存を見てみると 90 nm 以下では膜厚が減っているにもかかわらず，容量は減少している。このことは誘電率の膜厚依存性を示している。すなわち BST 膜では，90 nm 以上で評価しなければならないことが分かる。

一方，同様に導電性 Nb：STO 基板上に作成したコンビナトリアル STO–BTO にφ 0.5 mm の Pt 上部電極を形成することによって誘電率を評価した。この結果，組成（$Ba_{0.8}Sr_{0.2}$）TiO_3 において比誘電率 820 を得ることができた。しかしながら，耐圧は 0.2 MV/cm 程度であり不純物ドープによる耐圧向上を検討している。

4　複合コンビナトリアル PLD 装置の導入

4.1　コンビナトリアル機構，マスク設計

富士電機では，材料探索の加速を目的として複合 PLD 装置のコンビナトリアル化を行い，これを完了した。ここでは，設計思想および装置の立上げに関して述べる。

富士電機の複合 PLD 装置の概念図を**図 8** に示す。Si 基板と酸化物プロセスとの融合を目的とした装置であり，背圧 10^{-8}Pa，ガラス封止ヒータ構造によって酸素雰囲気中でも基板温度 1,200 ℃を達成でき，酸素，窒素ラジカル，スパッタガン，k–cell などを備えた装置である。

図 6　マイクロ波誘電率顕微鏡

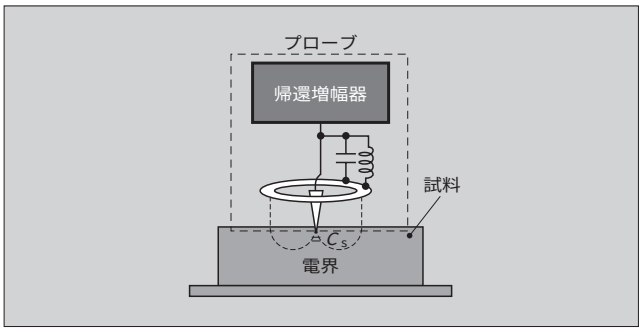


図 7　（$Ba_{1-x}Sr_x$）TiO_3 マイクロ波誘電率顕微鏡測定結果

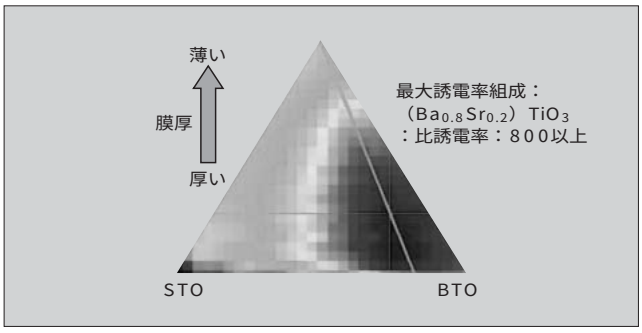
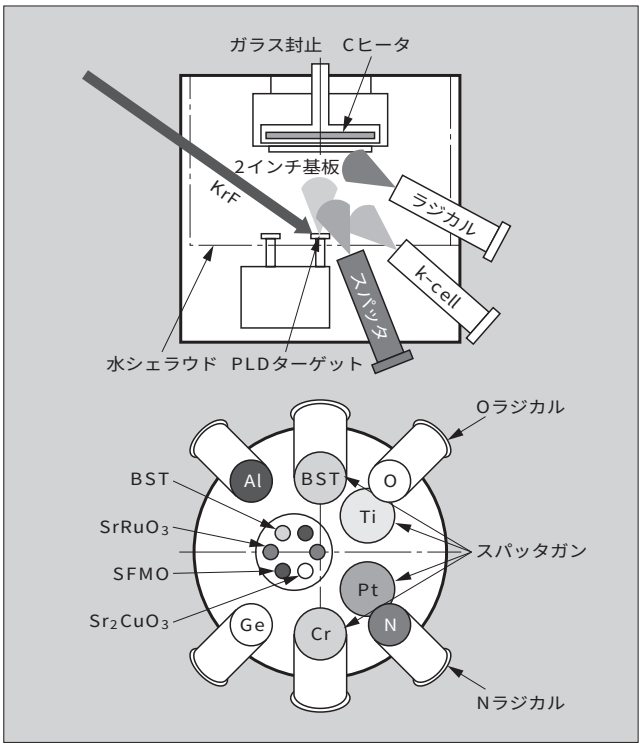


図 8　複合 PLD 装置



さて，1枚の基板上に三元の相図を描くためには遮へいマスクと基板回転を組み合わせるのが一番単純である。しかしながら，①基板回転→②ターゲット交換→③マスクセット→④成膜開始という手順を踏むと成膜時間よりも基板回転の時間がかかり，500層積むのに10時間も要してしまう。さらに，ホルダと基板のずれ，マスクと基板回転中心の公差を非常に厳しくしなければならない。

一方，**図3**に示したカルーセルマスクは，機構が複雑であるため，今回は**図9**に示すような，三角形のエッジを利用するエッジ型直線マスクを設計し導入した。

現在検討している（Ba, Sr, Sn）TiO_3を例として，具体的なプロセスを以下に説明する。

頂角30°を持つ直角三角形マスクを2枚形成し，プロセス1にて，マスクを移動させながら，物質1（BaO）を基板上の正三角形の頂点で，厚さが単位格子（0.4 nm）の半分となるように成膜する。次にプロセス2にてもう一つのマスクを使用し，物質2（SnO）を他方の頂点から成膜を行う。さらにマスクの底辺を使用して，物質3（SrO）を同様に成膜する。最後に全面にTiO_2を半単位格子成膜を行う。

これを所定のサイクル，例えば400サイクル繰り返すと160 nmの膜厚の三元状態図を基板上に描くことができる。

4.2　制御系

制御系は東京工業大学にて開発された統合制御ソフトウェアを基本に，新たにレーザ制御系，RHEEDモニタを加え，仕様決定を行った。それぞれの詳細を以下に記す。

(1)　レーザ制御系：エネルギー調整

PLDでは，ターゲットの結合エネルギー，焼結密度，吸収係数の差によって成膜レートは異なってくる。従来は1単位格子に要するパルス数を50～100パルス程度に調整し，各ターゲットに対してパルス数を変えることによりレートを制御していた。しかしながら，SnOなどの二元系酸化物と$SrTiO_3$などの安定な酸化物とでは大きくレートが異なってくる。

そこで今回は，レーザエネルギーモニタ信号をフィードバックし，照射エネルギーを変化させるとともにゲートを設けることによって，エネルギーが安定した後に，レーザ照射を行う構成とした。

(2)　差動排気RHEEDおよびRHEEDモニタシステム

図10にRHEEDによる薄膜表面，その場観察の様子を示す。**図10**中，矢印で示した鏡面反射点の強度は，原子レベルでフラットな表面の場合非常に強く，表面が粗くなると強度は弱くなる。すなわちこの変化をモニタすることによって，一分子層ずつの酸化物成長，Layer-by-layerの分子層成長をモニタすることができる。またストリーク間距離を観察することによって，面内の格子定数をモニタでき，どこで格子緩和が起こったか，臨界膜厚などの把握が可能となる。

さて，酸化物薄膜を成長させる場合，数Paの酸素

図9　エッジ型直線三元コンビナトリアル法

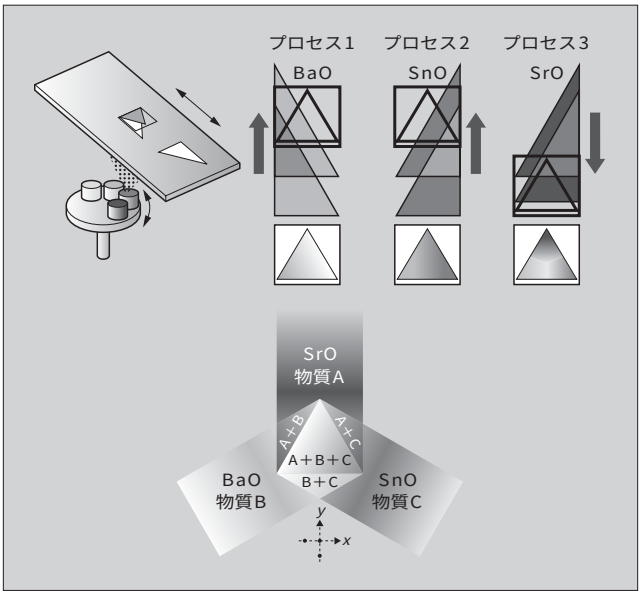


図10　RHEED鏡面反射点強度振動と薄膜表面

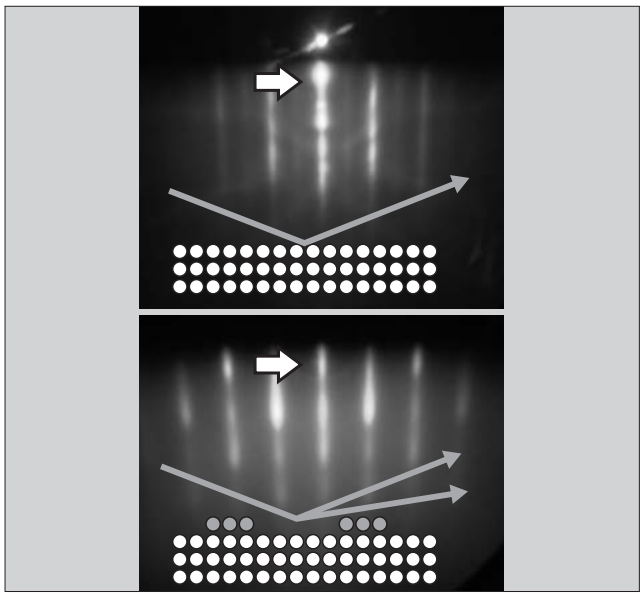


図11　RHEED輝点トラッキングとSTO，SrO/STO成膜時RHEED振動

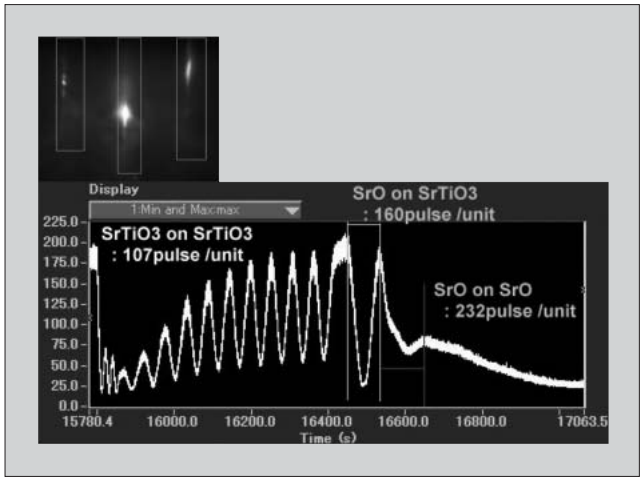
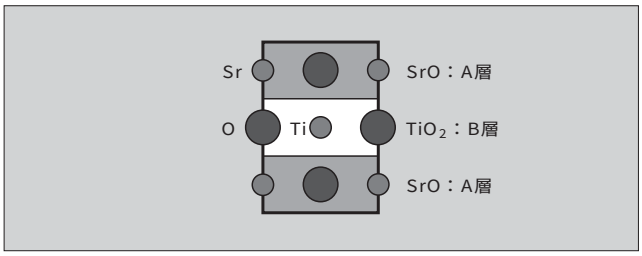


図12　ペロブスカイト構造と A，B 層



雰囲気が必要な場合がある。しかしながら，RHEED はフィラメント周辺を 10^{-4}Pa 以下に保つ必要がある。富士電機では小型ターボポンプによって差動排気を行う構造として数 Pa でも RHEED パターンのその場観察を行うことができる構成とした。

図11に STO/STO ホモエピタキシャル時および SrO/STO を成膜したときの RHEED 振動観察の様子を示す。この振動から 1 分子層成膜に必要なパルス数を計算し，成膜を行うことによって薄膜のナノレベル制御が可能となる。

5　複合コンビナトリアル PLD の応用

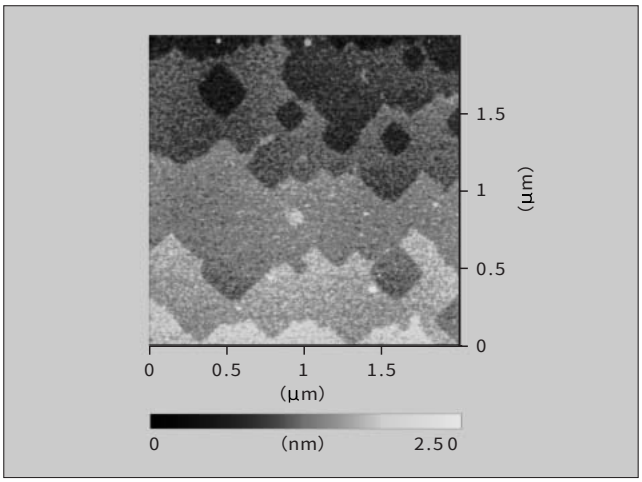
冒頭に述べたように，現在富士電機では新規誘電体 $SnTiO_3$ と電荷移動型誘電体を検討している。ここでは新規誘電体 $SnTiO_3$ について述べる。

鉛系誘電体は比誘電率 3,000 以上を示すために，これまで広くコンデンサなどに使われてきたが，欧州の環境規制などによって代替材料が望まれている。**図12**に代表的なペロブスカイト構造を示す。鉛系は A サイトの Pb の 6s，6p 電子が酸素の 2p 電子と混成軌道を作り，これが高い誘電率に寄与しているといわれている[5), 6)]。Pb の代わりに同様の電子配置を持つ Sn をAサイト原子に，B サイト原子に Ti を持つ，化学組成が $SnTiO_3$ のペロブスカイト構造酸化物を考えると同じ効果が期待できる。このような発想から温度組成コンビナトリアルを実施し，この物質の合成に成功した。しかし，Sn は＋4 価になりやすく，収率は 1～2 %と非常に低いものであった。

今回，収率向上と絶縁性確保を目的として，単位格子の半分，すなわち半格子を単位とする成膜法，半格子超格子成膜を発案し，多岐にわたる合成条件の検討をコンビナトリアル法を用いて行った。半格子超格子とはペロブスカイト型酸化物の単位格子を電気的中性面で A，B 層二つ，特に $SnTiO_3$ の場合，SnO と TiO_2 に分け，それぞれ別の成膜ソースによって成膜を行い，順次これを繰り返すことによって薄膜形成を行う。これによって Sn は強制的に＋2 価の SnO の形で A 層として成膜でき，収率を大幅に向上できる可能性がある。

結果として A 層に SrO と SnO を混ぜた状態において，RHEED 振動の強度はしっかりと回復し，非常に平坦（へいたん）な表面が得られた（**図13**）。今後，電気特性および高強度 X 線による解析によって Sn の価数測定を予定している。

図13　（Sn，Sr）TiO_3 AFM 表面モフォロジー



6　あとがき

酸化物薄膜はコンデンサ応用にとどまらず，磁気，光学，圧電性などの多彩な機能を有する。製品の本質的な差別化は材料からと考えており，ここで紹介した装置の開発とともに電気特性評価システムの開発，コンビナトリアル X 線装置の導入もすでに行い立ち上がりつつある。20 年の材料開発期間を 3 か月に短縮するといわれているコンビナトリアル成膜法を用いて[3)]，材料開発の大幅なスピードアップを狙い，シミュレーション技術と合わせて新規デバイスに応用可能な材料を開発していく所存である。

本研究は，東京工業大学鯉沼研究室殿，材料・物質研究機構ナノマテリアル研究所殿，東北大学宮本研究室殿との共同研究の成果である。関係各位に心から謝意を表する次第である。

参考文献

(1)　Xiang, X.-D. et al. Combinatorial Approach to Materials Discovery. Science. vol.268, 1995, p.1738.
(2)　Takeuchi, I. et al. Microstructual properties of（Ba, Sr）TiO_3 films fabricated from $BaF_2/SrF_2/TiO_2$ amorphous multilayers using the combinatorial precursor method. J. Appl. Phys. vol.90, no.5, 2001, p.2474–2478.
(3)　鯉沼秀臣ほか．コンビナトリアルケミストリー特集．現代化学．no.332, 1998.
(4)　川崎雅司ほか．コンビナトリアル酸化亜鉛超格子研究．応用物理．vol.70, 2001, p.523–529.
(5)　Konishi, Y. et al. Possible Ferroelectricity in $SnTiO_3$ by First-Principles Calculation, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol.748, 2003, p.211.
(6)　Cohen, R. E. Origin of ferroelectricity in perovskite oxides. Nature. vol.358, 1992, p.136–138.
(7)　Miyazawa, H. et al. Electric States of Perovskite-type Oxides and Ferroelectricity. Jpn. J. Appl. Phys. vol.39, 2000, p.5679–5682.

新型半導体素子とトレンチ加工技術

長安　芳彦（ながやす　よしひこ）　**望月　邦雄**（もちづき　くにお）　**藤島　直人**（ふじしま　なおと）

1　まえがき

富士電機では，半導体プロセス開発にあたっては，「不良を出さない真に制御されたプロセス」と「他社に対し決定的な優位性を持つデバイス」を主眼に置いて研究開発を推進してきた。酸化膜・エッチング・薄膜形成という化学的な反応を伴って，問題の生じやすいプロセスについて専用の設備を用いて集中的に取り組み，さらにデバイスの微視解析技術[(1)]を駆使して，不具合の真の原因を追求し，高信頼性・低不良率を実現した。

また，シリコン（Si）を立体的に極限まで使用することで，平面時のオン抵抗・耐圧などの特性限界を打ち破ることを意図して，トレンチ（溝）技術をコア技術と位置づけ，通常のトレンチ MOSFET に加えて，トレンチ横型パワー MOS（Trench Lateral Power MOS：TLPM[(2)]），超接合（Super Junction：SJ）デバイス，700 V 高耐圧横型 MOS（Trench Offset Drain-Lateral DMOS：TOD-LDMOS）などの新型半導体素子の研究開発を推進してきた。

TOD-LDMOS[(3)]は，トレンチ加工して Si 基板を三次元的に使うコンセプトを高耐圧実現に初めて適用した新型半導体素子で，それを支えるキープロセス技術として，トレンチエッチング（溝掘り）技術，CVD〔埋込み・平坦（へいたん）化〕技術，ゲート酸化膜（形成・高耐圧）技術について開発を行ったので報告する。

2　新型半導体素子（TOD-LDMOS）構造

従来，700 V 以上の高耐圧を得るための構造（オフセットドレーン領域）として**図 1** のように基板表面に 60 μm 程度の長さを必要としていた。これは，低濃度の n 型領域に空乏層を長く（X μm）広げることで，接合付近に生じる最大電界（E_{max} V/μm）が Si に逆方向電流が流れ始める電界（E_c V/μm）を超えることなく，高耐圧 $V=\int E(X)\,dx$（V は E が一様で X が大のときに高い）を得るためである。V の理論的限界は，$V < E_c \cdot X$ であり，X は理論的に短くできず，距離は耐圧を得るために原理的に必要不可欠なものであった。

新技術では，**図 2** のように Si 基板に深さ 20 μm，幅 20 μm のトレンチを形成し，トレンチに沿ってオフセットドレーン領域を U 字形に設けることにより，基板を立体的に活用して距離を確保し，高耐圧を維持したままデバイスの集積度を高めるものである。

図 3 は，TOD-LDMOS の電位分布（等電位線の間隔が電界の強さ）を示したものである。トレンチに沿ったオフセットドレーンで電界が Si 内ではかなり均等に緩和され，さらに最大電界が Si の耐圧よりも 1 けた高い酸化膜中に存在することで，直線距離が短くてもブレークダウンしない構造にしている。

しかしながら，このままの構造では Si 基板に深く幅広

図 1　従来技術による 700 V クラス高耐圧横型 MOS の断面構造図

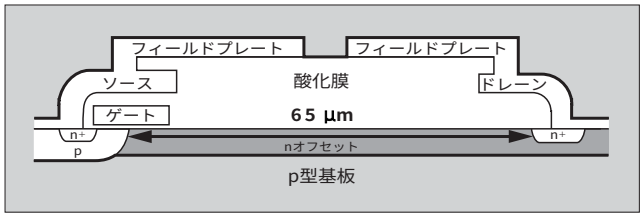
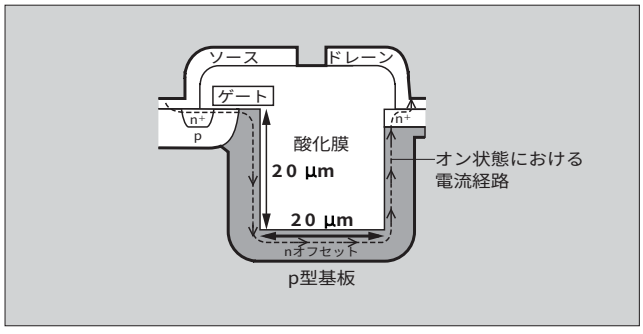


図 2　トレンチを用いた 700 V クラス高耐圧横型 MOS の断面構造図



長安　芳彦

半導体デバイス・プロセスの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所副所長兼グループマネージャー。応用物理学会会員。

望月　邦雄

半導体プロセスの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所主任研究員。応用物理学会会員。

藤島　直人

高耐圧パワー IC の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所グループマネージャー。工学博士。電気学会会員。

図３　TOD-LDMOS の二次元電位分布のシミュレーション結果
〔600 V バイアスをかけたとき（20 V/線間）〕

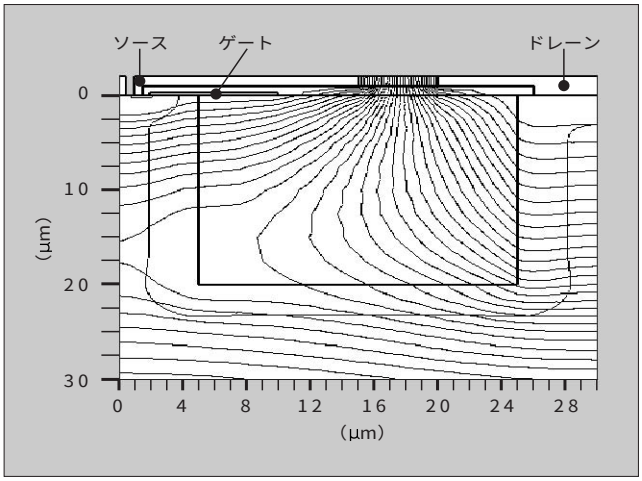
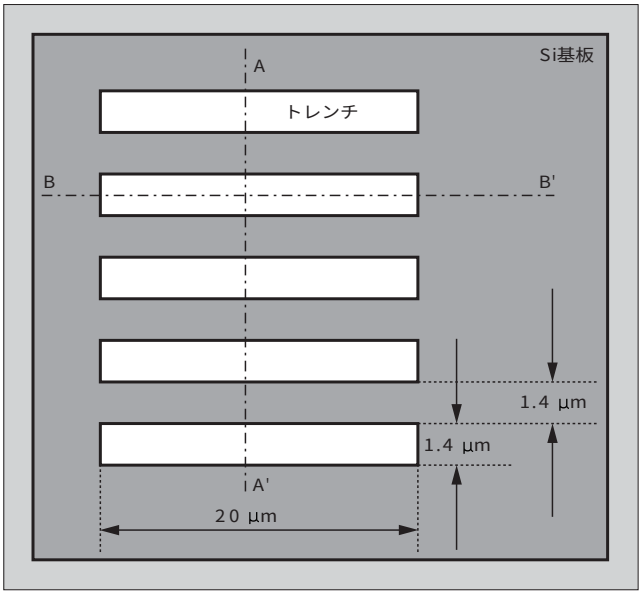


図４　ストライプ状トレンチ形成時の Si 基板平面図
〔ソース－ドレーン間方向（トレンチ深さ 20 μm）〕



い（20 μm × 20 μm）トレンチを形成しその中に（高温印加などの信頼性試験で電荷が移動して）耐圧を低下させることのない良質の絶縁領域を形成することと，トレンチ壁にイオンを低濃度で拡散させたオフセットドレーン領域を形成することが必要であり，プロセスの実現が難しい。高アスペクト比を有するストライプ状トレンチを形成して斜めイオン注入を行い，酸化・CVD によって絶縁膜を形成した独自の製造方法で目的とするデバイス構造を実現したのでそれを解説する。

③　TOD-LDMOS のキープロセス技術

プロセスのポイントであるトレンチ加工技術を主に述べる。

(1)　高アスペクト比のストライプ状トレンチ形成

図４に形状を示す。幅 1.4 μm，深さ 20 μm のストライプ状トレンチをソース－ドレーン間方向に形成することで，一度に 20 μm × 20 μm の酸化膜形成をするのではなく，実現可能な膜厚に領域を分割して形成することができる。このような形状を得るために必要なトレンチエッチング技術として次の点をポイントに開発を行った。

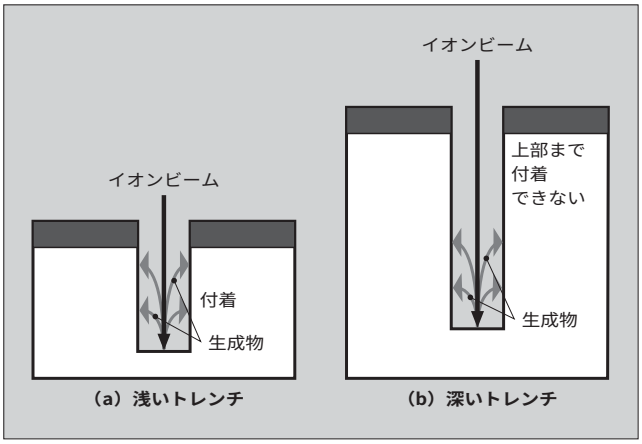
○側壁角度　90 °

○Si 柱状残渣（ざんさ）がないこと

○トレンチ側壁の保護

トレンチエッチングは**図５**に示すように，側壁をエッチングガス中に含まれる酸素（O_2）と Si 基板が反応して形成される生成物（SiO_2）で保護しながらエッチングを行っている。しかし，深さ 20 μm になると底面で発生した生成物がトレンチ上部まで付着できず，底面だけでなく上部側壁までがエッチングされる。また，エッチングが深くなるにつれ，底面で発生した生成物が除去されず，これを核とした Si 柱状残渣が発生しやすくなる。そこで側壁保護のために，Si 基板にかけるバイアス電圧を増加させることにより，イオンビームの直進性を高めて側壁をアタックするビームを減少させた。また，生成物の発生を抑えるために，ガス中に含まれるふっ素量を最適化し固体状の SiO_2 から気体状の SiF_4 と O_2 へ分解し，排気されやすくした。その結果，本デバイスに適用できる形状を得ることができた。

図５　トレンチエッチングの模式断面図



(2)　斜めイオン注入によるオフセットドレーン形成

図６に示すようにトレンチに沿って斜めイオン注入・熱拡散を実施してトレンチ壁にオフセットドレーン領域を形成する。

トレンチ開口部が横長であることを利用して，BB'に平行にイオン注入することで底面と両側面に，45 度程度の比較的ばらつきの少ない角度の斜めイオン注入で不純物を導入するという方式を採った。

(3)　くし歯状トレンチ間に残る Si 基板の熱酸化

図７に熱酸化後の Si 基板の断面図を示す。

くし歯状トレンチの間の Si はすべて酸化膜（SiO_2）に

図6　斜めイオン注入によるオフセットドレーン領域形成後のSi基板断面図

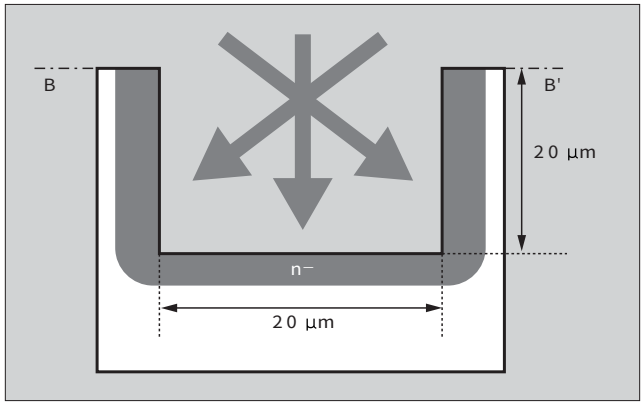


図7　くし歯状トレンチ間に残るSi基板の熱酸化を行った後のSi基板断面図

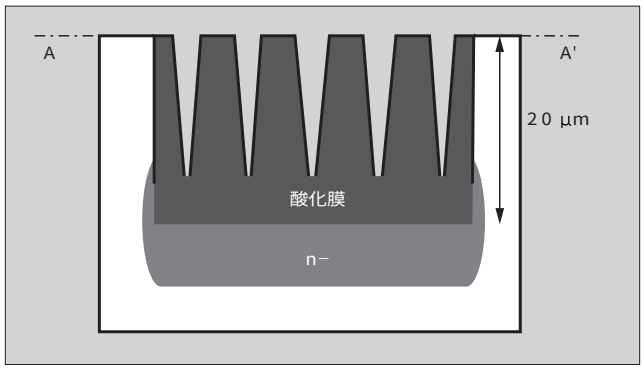
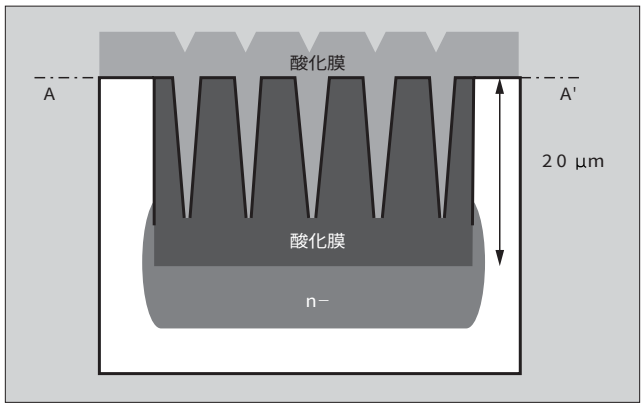


図8　トレンチ領域へ絶縁膜堆積を行った後のSi基板断面図



なっており，SiO_2の体積がSiの約2倍で，上部にはこの時点ではすきまが開いている。この熱酸化のピッチ抜き残しの幅と応力の緩和を科学的に精密に制御する技術によって，Siの芯（しん）が残ったり応力によって酸化膜柱が変形したり倒れたりすることなく形成できた。

(4)　トレンチ領域への絶縁膜堆積（たいせき）

図8に絶縁膜堆積後のSi基板の断面図を示す。

すきまを埋めるように絶縁膜（SiO_2）を堆積させるとき

図9　試作した700 Vクラス高耐圧横型MOSの断面写真

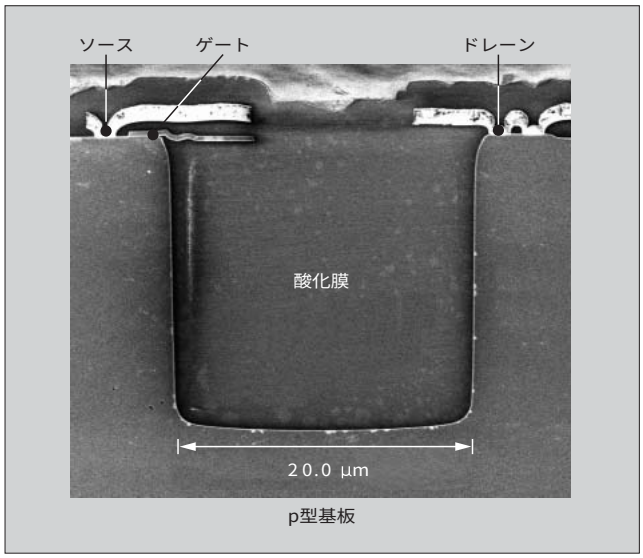
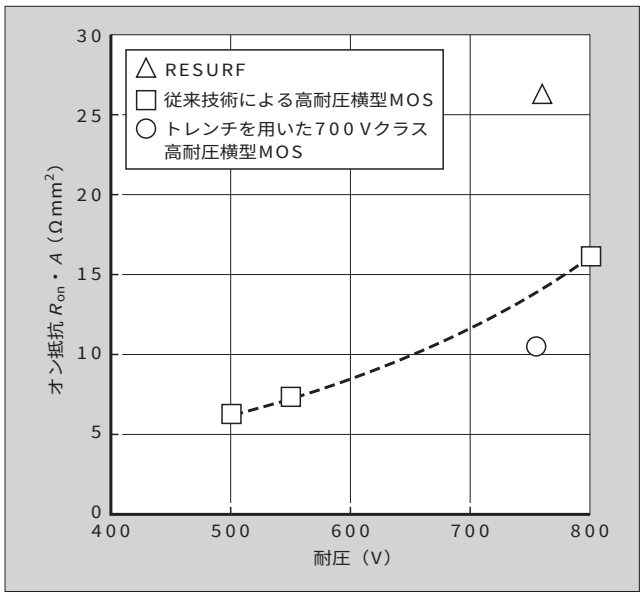


図10　出力オン抵抗（実測値）の比較グラフ



に，堆積SiO_2中に生じる空域を応力緩和領域として制御し，Si面（AA'）より下部に形成することがポイントである。**図9**が実際に形成したTOD-LDMOSの断面写真である。

これにより，従来と比べて出力オン抵抗を約3割低減した業界トップの11 Ω mm²（素子耐圧750 V）を実現し（**図10**），デバイスピッチ縮小でチップサイズを低減して，ワンチップパワーICの製造コスト低減を図る。この技術によりACアダプタなどの電子機器のコストダウンを実現できると考えている。

4　あとがき

今後もトレンチ技術に加えて，エピタキシャル成長技術，

埋込み技術，配線技術を駆使して，Si を三次元的に最大限利用した新型素子の開発を進めていく。また，エッチングの素過程解析[4]や各種可視化技術・インライン評価による定量的なプロセス設計，洗浄や表面処理技術[5],[6]の向上，パーティクルの組成分析やクリーンルームモニタリング技術などによって，製造プロセスの改革を行い富士電機グループのプロセス技術の向上，新製品の開発に寄与していく所存である。

参考文献

(1) 大井明彦．半導体デバイスの微視解析技術．富士時報．vol.76, no.3, 2003, p.197–200.

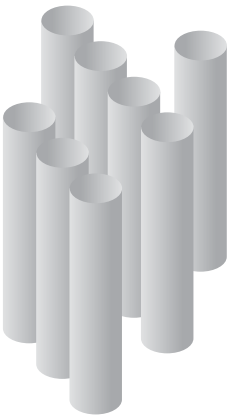
(2) Fujishima, N. et al. A Low On-resistance Trench Lateral Power MOSFET in a 0.6 μm Smart Power Technology for 20–30 V Applications. IEDM Technical Digest 2002, p.455–458.

(3) Teranishi, H. et al. A High Density, Low On-resistance 700 V Class Trench Offset Drain LDMOSFET（TOD-LDMOS）. IEDM Technical Digest 2003, p.757–760.

(4) Wakimoto, S. et al. Characteristics of Si Trench Etching. 25th International Symposium on Dry Process（DPS 2003）.

(5) Kuribayashi, H. et al. Investigation of shape transformation of silicon trenches during hydrogen annealing. To be published in Japanese Journal of Applied Physics. 2004.

(6) Ogino, M. et al. Degradation of Gate Oxide Reliability Due to Plasma-Deposited Silicon Nitride. To be published in Japanese Journal of Applied Physics. vol.43, no.3, 2004.



垂直磁気記録膜の構造制御

竹野入　俊司（たけのいり　しゅんじ）　　**酒井　泰志**（さかい　やすし）　　**渡辺　貞幸**（わたなべ　さだゆき）

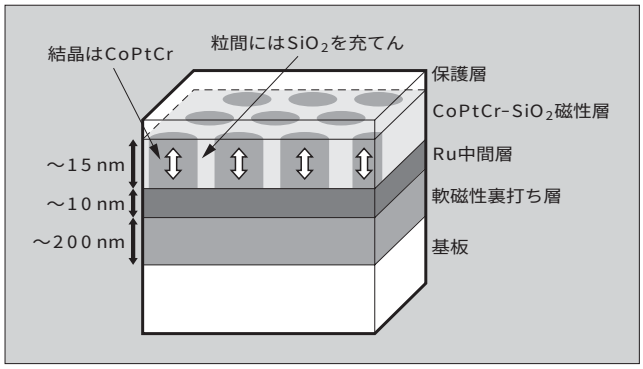
1　まえがき

1997 年以降，HDD（Hard Disk Drive）の記録密度は年率 60 ～ 100 %の割合で急速に増加してきた。最近ではその勢いを減じつつあるものの，今後も毎年 30 ～ 60 %の割合で増加し続けると予測されている。このような著しい成長の結果，これまで用いられてきた面内記録方式が，「熱揺らぎ」問題のため，いよいよその限界に近づこうとしている。「熱揺らぎ」とは，記録した信号を安定に保持できなくなる現象であり，面内記録方式では記録密度が上昇するほど「熱揺らぎ」が大きくなってしまう。このような状況から，面内記録方式と正反対の特徴，すなわち記録密度の増大に伴いビットの安定性が増すという特性を有する垂直記録方式の開発が活発化している。

垂直磁気記録方式は，1975 年に Iwasaki らにより提案[(1)]されて以来，さまざまな機関でその研究開発がなされてきた。しかし，垂直磁気記録方式が原理的に有利であることは明らかなものの，面内磁気記録方式のパフォーマンスを超える媒体は最近まで得られていなかった。ここでブレイクスルーとなったのが，CoPtCrO[(2)] や CoPtCr–SiO_2 の磁性層への適用である。これらの媒体では，金属と相分離を起こしやすい酸化物を磁性材料に加えることで良好な偏析構造を実現している。富士電機では，CoPtCr–SiO_2 を磁性層材料として用いることで，大きな一軸異方性と良好な偏析構造を有する垂直磁気記録媒体が実現できること，また面内媒体と同様の材料を使用した CoCrPt 垂直媒体と比較して良好な記録・再生特性と高い「熱揺らぎ」耐性を示すことなどをこれまでに報告してきた[(3)～(5)]。これらの特性から，酸化物グラニュラ媒体は将来の高密度記録媒体として有望であると考えている。富士電機の垂直磁気記録媒体の模式図を**図 1** に示す。磁性層として前述の CoPtCr–SiO_2 を，中間層として Ru を用いているのが特徴である。

一般的に，優れた特性を有する媒体を得るためには，磁性層の結晶粒径を均一化・微細化し，個々の磁性結晶粒を磁気的に分断された理想的な偏析状態に近づけることが必要となる。このような状態を実現するためには，磁性層の材料や成膜条件を工夫するだけではなく，下地層の構造制御が重要であることが知られている[(6)]。CoPtCr–SiO_2 を磁性層として用いた場合も例外ではなく，媒体特性は下地層の結晶粒径や表面形状の影響を強く受ける。

図 1　CoPtCr-SiO_2 垂直磁気記録媒体の模式図



本稿では，下地層に Ru を用いた CoPtCr–SiO_2 媒体において，Ru の結晶粒径や表面構造を制御することにより磁性結晶粒の粒径や磁気的な分離構造を制御した例について，その解析手法とともに紹介する。

2　磁性層結晶粒径の制御

磁性層の結晶粒径微細化が媒体の特性向上に寄与するかというと，必ずしもそうとは言えない。特に，SiO_2 を添加したグラニュラ磁性層を用いると結晶粒径が微細になりすぎる傾向があり，微細すぎる結晶粒は「熱揺らぎ」を生じたり，ひどい場合には室温で磁性を失う可能性もある。そこで，下地層である Ru 膜の粒径制御が重要な役割を果たす。次にその例を紹介する。

図 2 に，Ru の結晶粒径をそれぞれ(a) 9.9 nm，(b) 12.4 nm として，その上に磁性層を成膜したサンプルの平面透過電子顕微鏡（TEM）像を示す。磁性層の平均結晶粒径は，(a) 6.9 nm，(b) 5.5 nm である。興味深いことに，Ru の結晶粒径が大きいサンプルにおいて，磁性層の結晶粒径が小さくなっている。これは，SiO_2 を添加したグラニュラ

竹野入　俊司

固体電解質形燃料電池，磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。日本応用磁気学会会員。

酒井　泰志

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機ストレージデバイス(株)技術開発部。日本応用磁気学会会員。

渡辺　貞幸

磁気記録媒体の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)デバイス技術研究所。日本応用磁気学会会員。

図２　Ru 結晶粒径を変化させたサンプルの平面 TEM 像

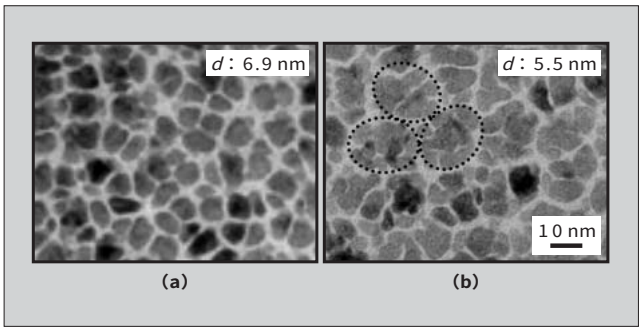


表１　媒体（a），（b）の磁気特性および電磁変換特性

媒体	H_c (kOe)	電磁変換特性〔370 kfci 時〕		Decay 〔30 kfci 時〕 (%decade)
		規格化媒体ノイズ	SN_mR (dB)	
(a)	6.39	52.9	12.4	1.5
(b)	4.98	90.8	8.98	0.5

磁性層の結晶粒がもともと微細になりやすい性質を持っており，Ru の結晶粒径がある大きさ以上になると Ru 結晶粒１個の上に複数の磁性結晶粒が成長するようになるためであると考えている。**図２**(b)中に点線で Ru 結晶粒の大きさを示したが，その中に複数の磁性結晶粒が存在していることが分かる。それに対し(a)では，Ru 結晶粒１個の上に磁性結晶粒１個が成長している。磁気特性および電磁変換特性（**表１**）を見ると，(b)は磁性層結晶粒径が(a)より小さいにもかかわらず，媒体ノイズが高く，信号ーノイズ比（SN_mR）が低く，そして Decay（信号の劣化割合)が小さく，すなわち「熱揺らぎ」に強くなっている。また，磁気特性も(b)が大きく劣っている。これらの結果から，(b)では結晶粒径は小さいものの，磁化反転単位は大きくなっている（結晶粒同士が磁気的に強くつながっている）ものと考えられる。これに対し(a)では，結晶粒径は(b)よりも大きいが，結晶粒間の磁気的な分離が進んでいると考えられる。

以上のように，Ru の結晶粒径を制御し，Ru と磁性層の結晶粒を１対１で成長させることで，磁性層の結晶粒径を制御し，結晶粒の磁気的な分離を促進できる。

③　磁気クラスタサイズの制御

3.1　磁気クラスタ

微細な結晶粒子からなる媒体の磁性膜では，結晶粒子間の交換相互作用や静磁気的な相互作用の影響で，磁化反転は結晶粒子ごとに起こらず，幾つかの結晶が磁気的につながり一つの反転単位として振る舞うことが知られている。このような磁化反転単位は磁気クラスタと呼ばれており，磁気力顕微鏡（MFM）などを用いて測定した磁気クラスタサイズ（$D_{cluster}$）により媒体の遷移ノイズがよく説明できる。[7]

例えば面内媒体では，結晶粒子間の交換相互作用がない場合でも飽和磁化の増加に従い媒体ノイズが増加するが，これは飽和磁化の増加に伴い結晶粒子間の静磁気相互作用が増加し，それにより $D_{cluster}$ が増加してジグザグな磁化転移が引き起こされることが原因であると報告されている。[8]一方，垂直媒体でも，媒体ノイズは遷移ノイズが支配的であると報告されていることから，[9]ノイズ低減のためには磁化遷移領域のジグザグを低減すること，すなわち $D_{cluster}$ を低減することが必須である。

3.2　$D_{cluster}$ の評価方法

$D_{cluster}$ の評価方法としては，前述のように MFM を用いるのが一般的であり，富士電機でもすでに検討しているが，[10]今回は磁化曲線の傾き α から見積もる方法を用いた。[11]その方法とは，α が下記のように表記できることを利用するものである（単位は CGS 系)。

$$\alpha = 4\pi / (N_z^f - N_z) \quad \cdots\cdots (1)$$

（N_z^f および N_z は，それぞれ膜全体および磁化反転単位の鉛直方向反磁界係数）

反磁界係数は磁性体の形状のみで決まる定数であり，磁化方向に対して無限に細長い針金のような形状であれば 0，無限に広い薄板のような形状であれば 4π になる。媒体の磁性膜は膜表面のサイズに対して膜厚が非常に薄いので，式(1)で N_z^f は 4π とみなせる。よって，α を決めれば式(1)から N_z を求めることができる。ここで，磁化反転単位として円柱を仮定すると，円柱の N_z は寸法比（長径/短径）の関数として実験的に求められているので，[12]膜厚と N_z から $D_{cluster}$ を求めることができる。逆に，適当な $D_{cluster}$ を仮定すれば，式(1)から α－膜厚曲線を求めることができる。実際は，磁性層膜厚を変化させて α を実測し，それを $D_{cluster}$ を変化させて計算した α－膜厚曲線でフィッティングして，実測値に最もよく合う曲線から $D_{cluster}$ を決定した。

3.3　Ru 成膜プロセスの影響

図３にプロセス A，B という２種類の方法で Ru 中間層を成膜したサンプルの平面 TEM 像を，また**表２**に磁性層の膜厚を 8 nm としたときの磁気特性および線記録密度 300 kfci における電磁変換特性を示す。なお詳細は述べないが，プロセス A と B では Ru の表面状態を変化させている。**図３**から，結晶粒径や偏析状態など外観上両者に大きな差を見いだすことはできない（結晶粒径はほぼ同じ)。また，**表２**に示した一軸異方性定数 K_u と H_c の値も両者に大きな差はない。しかし，電磁変換特性（**表２**）から，プロセス B のサンプルは A と比較して，規格化媒体ノイズが約 60 %に低減し，SN_mR が 4.7 dB 向上している。このように電磁変換特性は大きく異なるが，その違いは結晶粒径や磁気特性では説明できない。そこでこの原因を調べるため，$D_{cluster}$ を評価した。

図４に α の磁性層膜厚依存を示す。図中，丸および四角の点は実験値を，実線および点線は前節で示した方法により実験値をフィッティングした結果を示している。図から，

図３　プロセス A，B を用いた媒体の平面 TEM 像

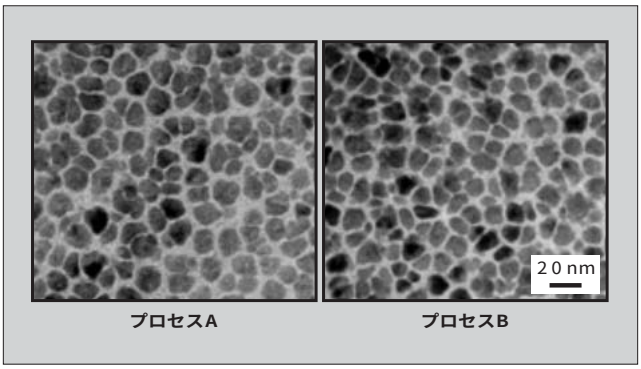
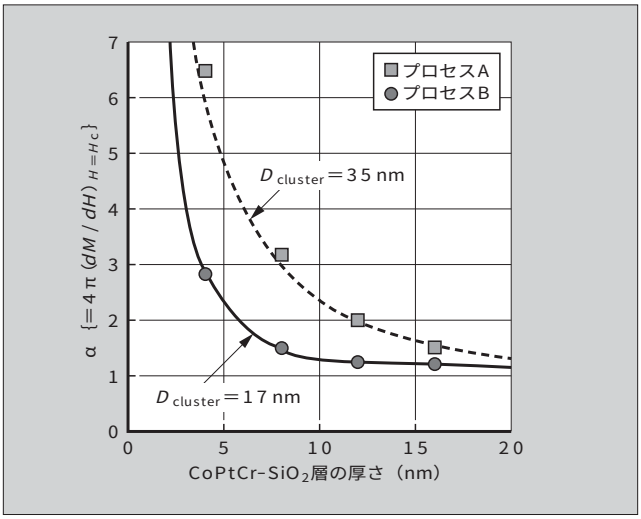


表２　プロセス A，B により作製した媒体の磁気特性および電磁変換特性

プロセス	K_u (erg/cm^3)	H_c (kOe)	電磁変換特性〔300 kfci 時〕	
			規格化媒体ノイズ	SN_mR (dB)
A	3.55×10^6	2.09	47.5	12.6
B	3.21×10^6	2.04	29.6	17.3

図４　磁化曲線の傾きパラメータαの磁性層膜厚依存



実験値は計算値でよくフィッティングされ，プロセス A，B の媒体の $D_{cluster}$ はそれぞれ 35 nm，17 nm と見積もられた。また，磁気的な特性をさらに詳しく調べたところ，プロセス A 媒体の $D_{cluster}$ は，磁性層成長初期の部分，すなわち Ru 表面の影響を受ける部分で粗大化しているという結果を得た[6]。

このように，Ru の表面状態の違いは $D_{cluster}$ の違いとなって現れ，それが電磁変換特性に直接反映されることが明らかとなった。今後，Ru の成膜条件の最適化を進めることで，さらなる $D_{cluster}$ の低減と媒体特性の向上が狙えるものと考えている。

4　あとがき

CoPtCr–SiO$_2$ グラニュラ垂直媒体の構造制御について，Ru 中間層の結晶粒径や表面状態が及ぼす影響に着目して紹介した。中でも，Ru 中間層と磁性層の界面付近（あるいは磁性層の初期成長層）における磁気クラスタサイズの粗大化については，TEM や通常の磁気特性の計測では要因の特定が難しく，磁気クラスタ解析などのさらに詳しい解析手法が必要であることが明らかとなった。実際の媒体では，Ru 中間層だけではなく，基板・軟磁性裏打ち層の表面状態や磁性層自身の成膜プロセスなど，媒体特性に影響を及ぼす構造因子は数多く挙げられる。今後はこれらの最適化を行い，面記録密度 200 G ビット/in^2 を狙うとともに，垂直媒体の早期実用化に向けてコスト面なども含めた検討を進める考えである。

近い将来，垂直記録方式がその特長を生かし，パソコンだけではなく，小型・大容量が求められる AV（Audio Visual）用途にも採用されていくものと期待している。

参考文献

(1)　Iwasaki, S. ; Takemura, K. An analysis for the circular mode magnetization in short wave length recording. IEEE Trans. Magn. vol. Mag–11, 1975, p.1173.
(2)　Oikawa, S. et al. High Performance CoPtCrO Single Layered Perpendicular Media with No Recording Demagnetization. IEEE Trans. Magn. vol. 36, 2000, p.2393.
(3)　Oikawa, T. et al. Microstructure and Magnetic Properties of CoPtCr-SiO$_2$ Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.38, 2002, p.1976.
(4)　竹野入俊司ほか．CoPtCr-SiO$_2$ グラニュラー垂直媒体の微細構造と電磁変換特性，信学技報．MR2002–6, 2002, p.31.
(5)　渡辺貞幸ほか．CoPtCr-SiO$_2$ 垂直磁気記録媒体の微細構造と諸特性．信学技報．MR2002–76, 2003, p.13.
(6)　及川忠昭ほか．CoPtCr-SiO$_2$ を用いた垂直磁気記録媒体の磁気特性と記録再生特性．日本応用磁気学会誌．vol.27, 2003, p.196.
(7)　Takahashi, M. et al. The Dependence of Media Noise on the Magnetic Cluster Size for Co Based Thin Film Media Fabricated under Ultra Clean Sputtering Process. IEEE Trans. Magn. vol.34, 1998, p.1573.
(8)　Chen, J. et al. Magnetic cluster and medium noise in CoCrTa/Cr longitudinal film media studied by magnetic force microscopy. J. Appl. Phys. vol.85, 1999, p.1037.
(9)　Miura, K. SRC 第 12 回技術報告会全体会議資料．2001, p.185.
(10)　Takenoiri, S. et al. Magnetic Properties, Magnetic Cluster Size and Read-write Performance of CoPtCr-SiO$_2$ Perpendicular Recording Media. IEEE Trans. Magn. vol.39, 2003, p.2279.
(11)　Honda, N. et al. Simulation Analysis for Ring Head Recording on Single-layered Perpendicular Recording Media. IEICE Trans. Electron. vol. E82–C, no.12, 1999, p.2184.
(12)　大田恵三．磁気工学の基礎 I．共立全書．1997.

微生物の迅速検査技術

特集

野田　直広（のだ　なおひろ）　浅野　貴正（あさの　たかまさ）　北出 雄二郎（きたいで　ゆうじろう）

1　まえがき

近年，病原性大腸菌 O157 や牛乳による集団食中毒事故，抗生物質耐性菌による院内感染，SARS（重症急性呼吸器症候群）など，微生物にかかわるリスクが社会問題となっている。この傾向は，食流通の広域化や高齢化社会への移行，海外旅行者の増加により，今後，一層強まっていくだろう。こうした背景を受け，微生物汚染の迅速検査に対するニーズは非常に高くなっている。

一方，微生物の迅速検査技術は 1990 年代以降，大きく進展している[1), (2)]。富士電機では，これまで水や環境分野を中心に微生物の検査技術を培ってきた[(3), (4)]。また，食品分野への適用を考えた生菌の自動計数装置「スマートバクテリアカウンタ」を開発し[(5)]，大腸菌の標準菌株を約 15 分で迅速検査できることを実証した[(6)]。

さらに現在は，微生物種の識別が可能な迅速検査手法として，マイクロコロニー法の技術確立に取り組んでいる。

本稿では，以下の取組みを紹介する。

(1)　微生物の検査技術とマイクロコロニー法

(2)　マイクロコロニーの迅速な形成と自動検出

2　微生物の検査技術とマイクロコロニー法

2.1　微生物の検査技術

微生物の検査にはさまざまな方法があるが，公定法およびそれに準ずる方法は，(1)培養法，(2)染色法であり，これらを発展させた方法が，(3)マイクロコロニー法，(4)抗原抗体反応や遺伝子を利用する染色法である。

(1)　培養法

微生物をその増殖能に基づいて検知する方法である。培地組成や培養温度，嫌気好気状態の設定によって，目的とする種の微生物を選択的に増殖させ，検出することが可能で，100 年以上にわたり微生物検査の主流となってきた。この方法の最大の問題は，検査時間が長く[(7)]，後追い検査からの脱却が困難な点である。食中毒や院内感染といった問題を解決するには，きわめて短時間で微生物汚染を検査できる手段が必要である。

(2)　染色法

微生物を試薬で染色し検出する方法である[(7)]。培養に依存しないことから，迅速な測定が可能な点が特長である。スマートバクテリアカウンタは染色法に含まれる技術であり，酵素活性を持つ細菌をカルボキシフルオレセイン･ジアセテート（CFDA）試薬で蛍光染色し，それを自動計数している。従来は，染色した微生物の検出を，手間のかかる顕微鏡観察や高度な実験機器に依存してきた。スマートバクテリアカウンタのような迅速簡便な自動装置の登場により，今後，染色法は食品製造現場などで広く用いられるようになるだろう。

(3)　マイクロコロニー法

マイクロコロニー法は，培養法を発展させた技術であり，微生物の成長を微視的な段階で検知することで，培養法より検査時間を短縮できる。次節以降で詳述する。

(4)　抗原抗体反応や遺伝子を利用する染色法

抗原抗体反応や遺伝子を利用する染色法は，現在，大学など研究レベルで最も活発に取り組まれている技術である。特に遺伝子をターゲットとする方法は，多くの検討が行われている[(8), (9)]。

2.2　マイクロコロニー法

マイクロコロニー法の概念を**図 1** に示す。図中のカーブは細菌や真菌の成長過程を模式的に示している。細菌や真菌は，培養開始後，誘導期を経てから分裂あるいは成長を始める。コロニーのサイズ（縦軸）が A に達すると，マイクロコロニー法で検出できる。目視で検出できるのは，コロニーが B のサイズになった時点であり，これが培養法の検査時間である。検出するコロニーのサイズを小さくすることで，マイクロコロニー法は，従来の培養法に対して検査時間を大幅に短縮できる。以下に，マイクロコロニー法の特長を列挙する。

(1)　培養法より検査時間が短い。

(2)　培養条件の選択で目的の微生物だけを検出できる。

(3)　培養法同様，微生物の増殖能をとらえており，衛生上

野田　直広

微生物迅速検査装置，水質計測機器の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)機器技術研究所副主任研究員。日本薬学会会員。日本防菌防黴学会会員。

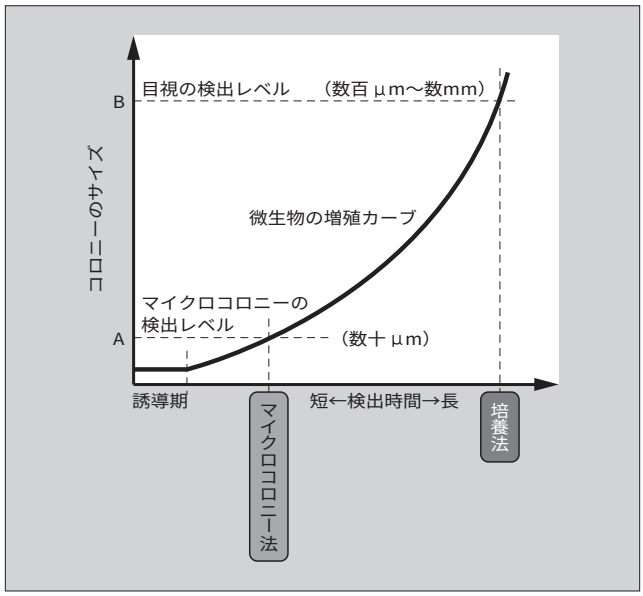
浅野　貴正

微生物迅速検査装置の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)機器技術研究所。日本機械学会会員。

北出 雄二郎

情報機器，制御機器，計測機器の研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)機器技術研究所長。日本機械学会会員，日本デザイン学会会員。

図１　マイクロコロニー法の概念



のリスクに直結する指標である。

(4)　特殊な試薬が要らない。

3　マイクロコロニーの迅速な形成と自動検出

3.1　マイクロコロニーの迅速な形成

(1)　食中毒原因微生物

食中毒の原因微生物はサルモネラ菌，腸炎ビブリオなど数多いが，特に重要なのは，汚染指標微生物として検査される大腸菌（127 ページの「解説」参照）である。**図 2** は，大腸菌（Escherichia coli K-12）のマイクロコロニー形成過程を顕微鏡観察したものである。培地は複数の比較で最もコロニー形成が速かった LB 寒天培地，培養温度は 37 ℃である。培養開始時，シングルセル（図中黒丸内の粒）の段階で画像中の大腸菌を認識するのは容易ではない。特に，微生物と同じような大きさや形状の粒子が混在する場合，画像から微生物を認識するのは困難である。一方，2 〜 3 時間の培養を経ると，菌体の分裂･増殖によって，大腸菌は明瞭（めいりょう）なマイクロコロニーを形成した。マイクロコロニー法では，このような「成長する粒」を生きている微生物と判断する。したがってこの例では，大腸菌を 2 〜 3 時間で検出できる。これは，従来の培養法，例えば，食品分野の公定法となっているデソキシコレート寒天培地による大腸菌群の推定試験が 20 時間を要するのに比べて[(7)]，マイクロコロニー法はきわめて迅速な検査が可能なことを示している。

(2)　腐敗原因微生物

微生物の被害には，食中毒のほかにも腐敗の問題がある。腐敗原因微生物の代表例は，加熱殺菌で死滅しない耐熱性細菌，冷蔵状態のような低温でも増殖できる細菌である。耐熱性細菌としては，芽胞の形成によって耐熱性を発揮するバチルス属細菌およびクロストリジウム属細菌が挙げられる。低温で増殖する細菌としては，シュードモナス属細菌が知られている。

図２　大腸菌のマイクロコロニー

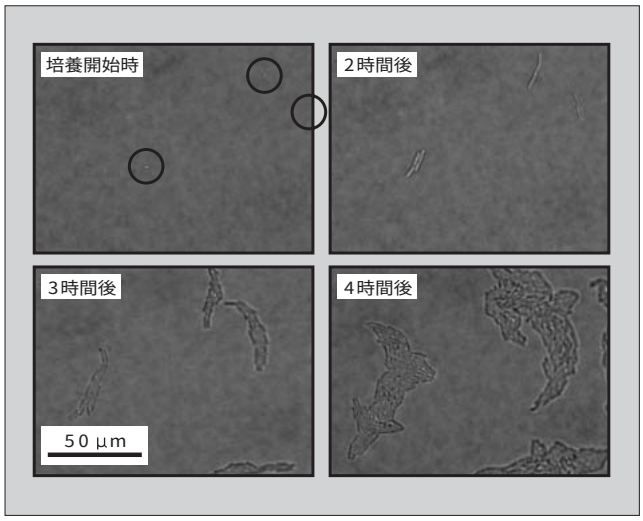


図３　セレウス菌のマイクロコロニー

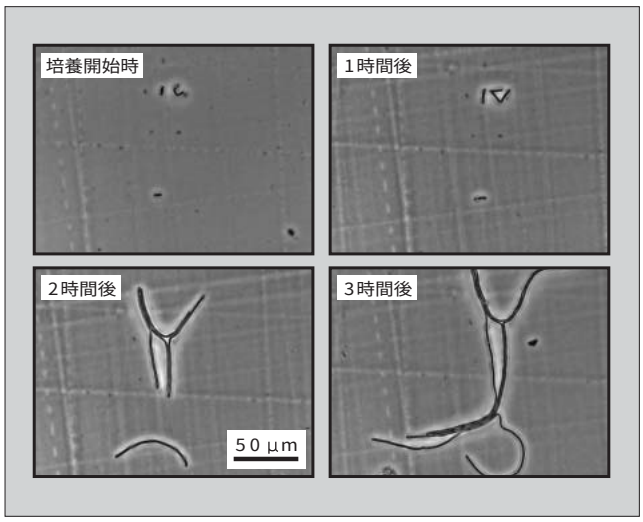


図 3 はバチルス属の一種であるセレウス菌（Bacillus cereus）のマイクロコロニーを観察した顕微鏡画像である。大腸菌とは異なり，マイクロコロニーは線状に成長している。セレウス菌の場合，2 時間以内にはマイクロコロニーを検出することができ，従来の培養法が 18 〜 24 時間を要するのに対して[(7)]，大幅に検査時間が短縮できる。

腐敗原因微生物としては真菌（かび）も重要である。真菌は胞子を形成して空中に飛散し，乾燥にも耐えるため，多くの分野で汚染が問題になっている。しかし，真菌の検査には 1 週間程度の培養を要しており[(7)]，特に，食品や製薬分野で迅速検査が求められている。

図 4 は，食品分野の代表的な汚染原因真菌であるこうじかび（Aspergillus niger）の発芽過程を観察した顕微鏡画像である。真菌は増殖プロセスが細菌と異なっている。こうじかびの場合，細胞分裂で増殖するのではなく，胞子からの発芽，菌糸の伸長という過程で成長する。マイクロコロニー法で真菌を検知するには，胞子の膨張，あるいは発芽後の菌糸の成長をとらえ，増殖能を持つ微生物と判断す

特集

る。特に，発芽が起こるとサイズや形状が大きく変化するため，容易に検知できる。今回のこうじかびの場合，6～9時間で胞子が発芽し，検出できることが分かった。従来，マイクロコロニー法は細菌の検出に適用された研究が多かったが，今回，同じ原理が真菌の検出にも有効であることが分かった。

3.2　マイクロコロニー形成の特徴による微生物種判別

培養によって目視検知可能なサイズまで成長したコロニーは，微生物の種類によらずほぼ円形になる。それは，数μm程度の微生物が肉眼でとらえられるサイズまで成長するには数百～数千倍に増殖しなくてはならず，その中で成長方向がランダム，すなわち等方的になるためである。

一方，マイクロコロニーの段階では，コロニー形成の様子は，微生物の種類によってそれぞれ固有の特徴を示す。それは，増殖・成長のプロセスが，微生物おのおので異なるためである。このことを利用すれば，コロニー形成状況の違いから微生物種の判別が可能である。具体的な特徴としては，

(1)　コロニーの形状（複雑度，円形度，縦横比）
(2)　コロニー形状の変化のパターン（重心位置）
(3)　変化のタイミング

などが挙げられる。

表1は，上述の大腸菌，セレウス菌，こうじかびについて，マイクロコロニー形成の特徴を整理したものである。大腸菌はコロニー形状やその変化のパターンが異なることから，明らかにセレウス菌やこうじかびと区別ができる。セレウス菌とこうじかびとは，増殖速度の違いのために，複雑度など形状変化のタイミングが異なり，区別することができる。

従来，培養法における微生物種の判別は，培養条件（培地，温度，嫌気好気条件など）の設定に依存してきた。今回，新たな手法として，マイクロコロニーの形状に基づいて微生物種の判別を行うことができた。これは，マイクロコロニー法が単に培養法を時間短縮しただけでないことを示しており，マイクロコロニー法の有効性として重要である。

3.3　マイクロコロニー自動検出の検討

従来，形成したコロニーの検出は顕微鏡で行うケースが一般的であったが，今後，マイクロコロニー法の普及の課題となるのは検出の自動化である。今回，富士電機では，マイクロコロニー検出の自動化を検討したので紹介する。

図5は，マイクロコロニー検出実験の状況である。この実験では，φ 90 mm のシャーレの中で大腸菌のマイクロコロニーを寒天培地上に形成させ，それを CCD カメラで画像としてとらえて画像データをパソコンに伝送した。パソコンで受けた画像（**図6**）に対してエッジ検出を行った結果，画像中のマイクロコロニーを検知することができた。

表1　微生物種によるマイクロコロニー形状の違い

微生物 / 特徴量	大腸菌	セレウス菌	こうじかび
複雑度	増殖により増大。3～4時間後ピーク。その後減少。	増殖により1～2時間後から急激に増大。	6～9時間で発芽した後，増大。
円形度	増殖により減少。その後増大。	増殖により減少。	発芽後，減少。
縦横比	増殖により増大。その後減少。	増殖により増大。	発芽後，増大。
重心位置	常にコロニー領域に含まれる。	増殖によりコロニー領域から外れる場合がある。	増殖によりコロニー領域から外れる場合がある。

図4　こうじかびのマイクロコロニー（発芽過程）

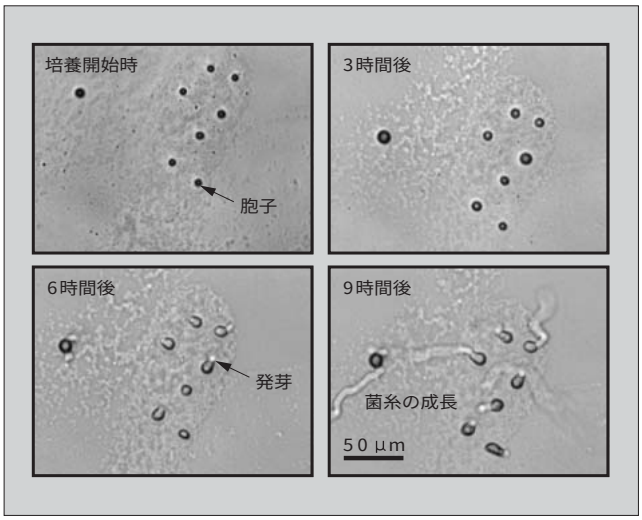


図5　マイクロコロニー検出実験の状況

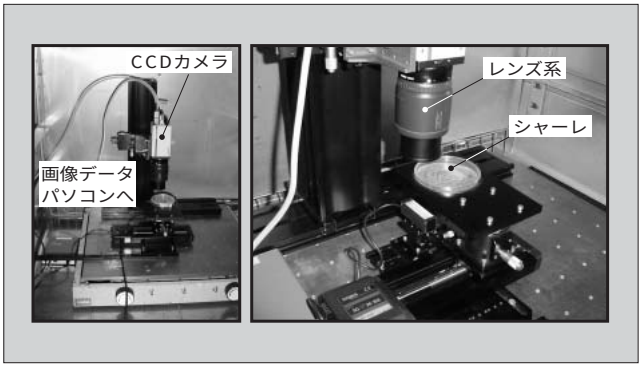
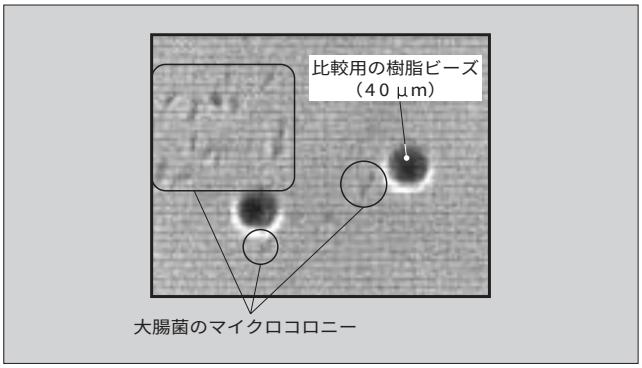


図6　実験装置でとらえたマイクロコロニーの画像



今回は5μmの分解能を持つ光学系で，幅10μm以上に成長したコロニーを認識できた。また，標準的に用いられるφ90mmのシャーレでは10秒程度の短時間で全面をスキャンできることが分かった。これらの結果から，マイクロコロニーを迅速簡便にとらえる自動装置は，十分実現可能であることが分かった。

4　あとがき

迅速簡便な微生物検査技術として，マイクロコロニー法を紹介した。今回得られた成果を以下に列挙する。

(1)　マイクロコロニー法により，食中毒原因菌をはじめ，耐熱性細菌，真菌などの汚染原因菌を検出できる。

(2)　検出時間は培養法より大幅に短縮できるほか，マイクロコロニーの形状から微生物種の判別が可能である。

(3)　コロニーの検出は自動装置によって迅速簡便に行うことが可能である。

微生物検査の迅速化は，食品や製薬，医療などさまざまな分野で衛生管理を向上させ，汚染や感染のリスクを低減し，社会的なコスト削減にも大きく寄与すると期待される[10]。今回の成果を踏まえ，今後，マイクロコロニー法を用いる迅速検査の商品化に取り組んでいきたい。

本件に関しては，大阪大学大学院薬学研究科那須正夫教授，山口進康助手，九州大学大学院農学研究院宮本敬久助教授から多くのご指導をいただいた。末筆ながら謝意を表する。

参考文献

(1)　谷佳津治ほか．微生物生態学の手法にみる90年代の進展．Microbes and Environments. vol.12, no.2, 1997, p.41–56.

(2)　宮本敬久．食品衛生細菌の簡易迅速検査法．日本食品科学工学会誌．vol.47, no.3, 2000, p.173–180.

(3)　Nogami, T. et al. Estimation of bacterial contamination in ultrapure water: Application of the anti-DNA antibody. Anal. Chem. vol.70, no.24, 1998, p.5296–5301.

(4)　野田直広ほか．バクテリオファージを用いた大腸菌迅速計測技術の開発．環境システム計測制御学会．vol.4, no.1, 1999, p.9–13.

(5)　高橋一仁ほか．食品衛生管理ソリューション．富士時報．vol.75, no.6, 2002, p.363–366.

(6)　野田直広ほか．細菌迅速定量装置の開発．日本薬学会第123年会要旨集．no.3, 2003, p.199.

(7)　厚生労働省生活衛生局監修．食品衛生検査指針（微生物編）．1990.

(8)　Yamaguchi, N. et al. Detection of Specific Bacterial Cells with 2-Hydroxy-3-Naphthoic Acid-2'-Phenylanilide Phosphate and Fast Red TR In Situ Hybridization. Appl. Environ. Microbiol. vol.62, no.1, 1996, p.275–278.

(9)　黒川顕ほか．In Situ PCR法による腸管出血性大腸菌の検出．日本細菌学会誌．vol.52, no.2, 1997, p.513–518.

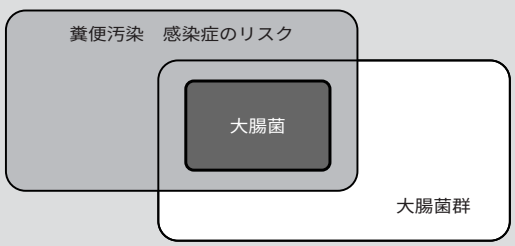
(10)　清水潮．食中毒の社会的費用．日本食品微生物学会雑誌．vol.19, no.3, 2002, p.87–94.

解　説　汚染指標微生物として検査される大腸菌

微生物学的な安全を保障するには，汚染の可能性のあるあらゆる病原微生物を検査しなくてはならない。しかし，コストや手間を考慮すると，すべての病原微生物を日常的に検査するのは困難である。そこで，汚染の程度を評価する指標としている微生物が「汚染指標微生物」である。

病原微生物の多くは動物の糞便（ふんべん）に由来するため，汚染指標微生物は糞便汚染を反映する必要がある。従来，食品や水道など，多くの分野で糞便汚染の指標微生物とされてきたのは「大腸菌群」である。

ところが，大腸菌群には糞便に由来しない細菌も含まれている。より正確に糞便汚染を評価するには「大腸菌」の方が適している（右図参照）。これまで大腸菌群を汚染指標としてきたのは，大腸菌だけを簡単に検出できる方法がなかったからである。しかし近年，大腸菌だけを検出する技術が確立された。これを受け，水道水の試験では2004年4月から，大腸菌を汚染指標とすることが決定した。今後，食品をはじめ多くの分野で，糞便汚染指標として大腸菌を重視するようになると考えられる。



トップエミッション型 CCM 方式有機 EL

特集

木村　浩（きむら　ひろし）

1　まえがき

最近，有機エレクトロルミネッセンス（有機 EL）は，専門誌ばかりでなく一般誌でも記事になり話題となっている。有機 EL がこのように注目される理由は，液晶にはない自発光，高速応答など非常に高いポテンシャルを有しており，次世代フラットパネルディスプレイとして期待されているからである。

有機 EL は，モノクロパネルやエリアカラーパネルが製品化されているが，その高いポテンシャルを発揮できるのはフルカラーパネルにおいてである。本稿では富士電機の有機 EL フルカラーパネルの大画面，高精細化のキーテクノロジーであるトップエミッション型色変換（CCM：Color Conversion Materials）方式有機 EL への取組みについて紹介する。

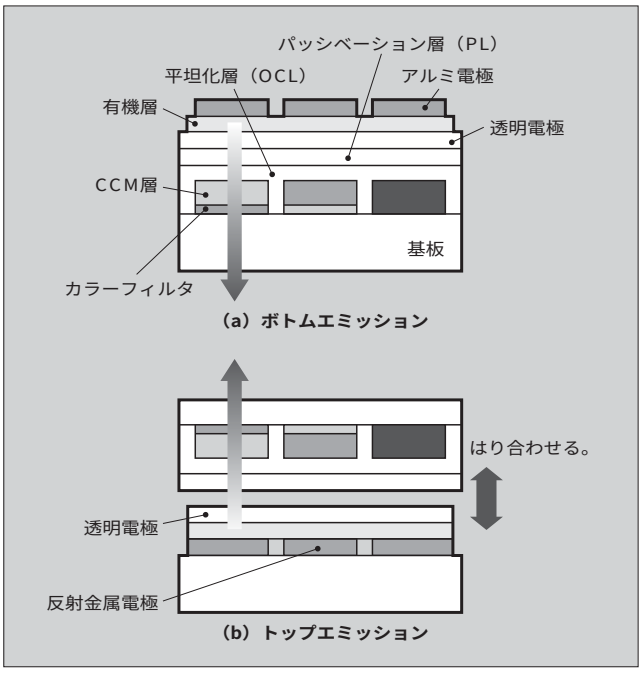
2　トップエミッション型 CCM 方式有機 EL の必要性

CCM 法は 3 色塗り分け法，カラーフィルタ法と比較して優れている点が多い[(1)]。富士電機は CCM 方式有機 EL をさらに優位にするためはり合せトップエミッション型 CCM 方式有機 EL デバイスの開発に着手している。このデバイスは，CCM 方式を用いたアクティブマトリックス駆動（AM 駆動）有機 EL を実現するためのキーテクノロジーである。TFT（Thin Film Transistor）を用いた AM 駆動は，高輝度，低消費電流，大面積化を可能にし，現在，市場投入されているパッシブマトリックス駆動の次にくる有機 EL として期待されているため，各社で開発が盛んに行われている。

図 1 にボトムエミッションとトップエミッションの構造比較を示す。ボトムエミッションデバイスでは，ガラス基板上に作製されたカラーフィルタ/CCM 層に平坦（へいたん）化層（OCL）とパッシベーション層（PL）を堆積（たいせき）させた後，有機 EL 層を成膜する。OCL は，カラーフィルタと CCM 層の凹凸を平坦にさせる機能を有し，PL はカラーフィルタや CCM 層に少量含有される水分が有機 EL デバイスに浸入しないよう保護する働きをする。

このボトムエミッションデバイスを用いて，AM 駆動パネルを作製しようとすると，基板と有機層間に CCM 層などが存在し直接両方を結線させることができない。そのため，パッシベーション層にコンタクトホールと呼ばれる穴を形成しなければならないが，コンタクトホールを作製すると，パッシベーション層の水分防御機能が低下しデバイスに致命的なダメージを与えてしまう。そのため，CCM 方式では，いかに AM 駆動を実現するかが重要な課題であった。富士電機が確立したトップエミッション構造は，TFT 基板上に有機 EL デバイスを形成した後，別に作製した CCM 基板をはり合わせる方式なので，TFT 電極と有機 EL 用電極が直接結線できる。そのため，コンタクトホールを作製する必要がなく，AM 駆動 CCM 方式有機

図 1　ボトムエミッションとトップエミッションの構造比較



木村　浩

無機薄膜・デバイス研究に従事。
現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)有機 EL 開発部課長。
応用物理学会会員。

図２　AM 駆動 CCM 方式有機 EL パネルの概念

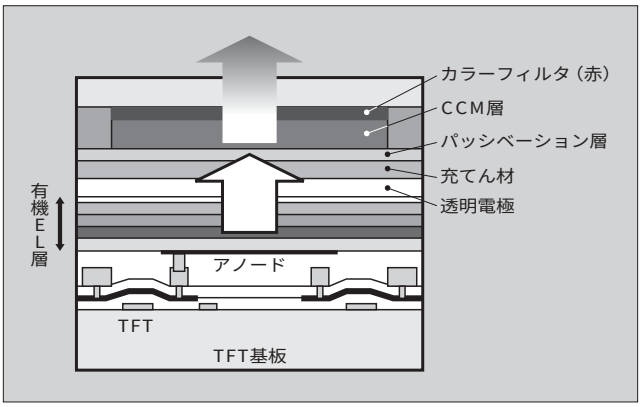
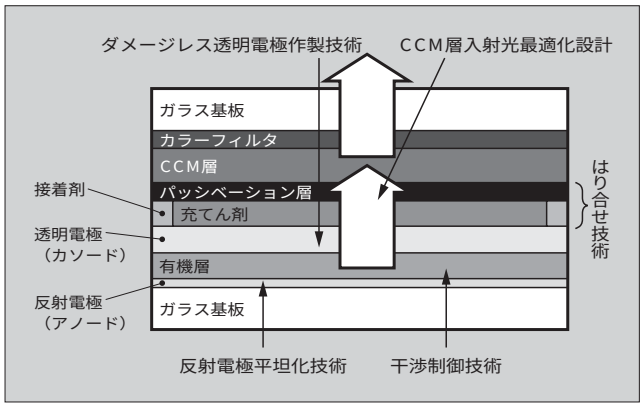


図３　トップエミッション素子の技術課題



EL パネルの作製を実現できる。**図２**に TFT 基板を用いたパネルの概念を示す。

3　トップエミッションデバイス作製のための技術課題

トップエミッションパネルを，トップエミッション発光部（有機 EL デバイス）と CCM 部分とに分けて，それぞれの技術課題について述べる（**図３**）。

3.1　デバイス部分の課題

(1)　上部透明電極作製法の確立

透明電極は，In 酸化物（ITO，IZO）や ZnO などの無機透明酸化物が知られている。これら透明酸化物は，有機 EL で一般に使用される蒸着法では成膜できず，スパッタ法で作製される。スパッタ法は堆積する粒子の運動エネルギーが大きく（数十倍～数百倍），プラズマ（酸素やアルゴン）も発生するため，有機 EL 層にダメージが入りやすい。ダメージが入った有機 EL デバイスは駆動電圧が増加し，発光効率の低下，低寿命などさまざまな問題を引き起こす。そのため，トップエミッションデバイスでは，いかに有機 EL 層にダメージを与えず透明導電膜を作製するかが一つの技術課題となっている。

(2)　下部電極の平坦性・光学的反射性の確保

トップエミッションデバイスは有機成膜前に反射電極（陽極）を形成しなければならない。そのため反射電極には反射率が大きいだけではなく，表面平坦性の確保が重要課題になる。表面平坦性は素子のリーク，ショートに密接に関係していることが分かっている。

(3)　光学干渉の最適化

富士電機が開発しているトップエミッションデバイスは，反射金属（陽極），正孔注入層，正孔輸送層，発光層，電子輸送層，電子注入層，透明陰極の順に積層されている。この構造は，発光層と反射電極間に正孔注入層と正孔輸送層があるため，ボトムエミッションと比べて発光層と反射電極間の距離が大きくなる。（ボトムエミッションでは電子注入層トリス（8-キノリノラト）アルミニウム（Alq_3）がこの間に挟まるが，膜厚が 20 ～ 50 nm と比較的小さい）。発光層と反射層との光学距離が発光波長（励起光）460 nm（青緑）の半波長程度になると，光学的な干渉を強く受けるため，各層の膜厚を最適化しないと発光特性（スペクトルや効率）を制御できない。したがって，光学設計が非常に重要になる。さらに CCM 層は，正面光ばかりでなく広い角度から入射した光を取り入れて発光するので，有機 EL デバイス部で発光した光を効果的に CCM 層に入れる工夫が必要である。そのために，有機 EL デバイス部から出射される光の角度分布（全光量）の設計も必要になる。

3.2　CCM 基板はり合せ法の課題

(1)　内部充てん剤の選定

デバイス部分と CCM 基板部分の間に内部充てん材を注入する。この充てん材は，有機 EL デバイスに影響を与えないことが第一だが，デバイス部の発光を CCM 基板に伝達する大切な役割を持っているため，屈折率の最適化が必要になる。さらに内部充てん材を空孔なしに充てんさせる技術も今回開発した。

(2)　ギャップ調整技術

ギャップ間の距離は光学的な見地から，隣の画素が光らない（クロストーク）間げき（数 μm）を保つ必要がある。

(3)　位置精度（アライメント）技術

ギャップ調整が垂直軸を制御するのに対して，水平方向の精度も必要になる。水平方向は，デバイス部分のサブピクセルと色変換のサブピクセルが重なるような精度（±1 μm）が要求される。

はり合せ工程は，有機 EL 層が劣化しない雰囲気中（酸素，水分 <1 ppm）で実施する必要がある。そのため，雰囲気制御されたグローブボックス中に装置を設置し，はり合せ・充てん材注入を実施している。

4　トップエミッションデバイスの開発

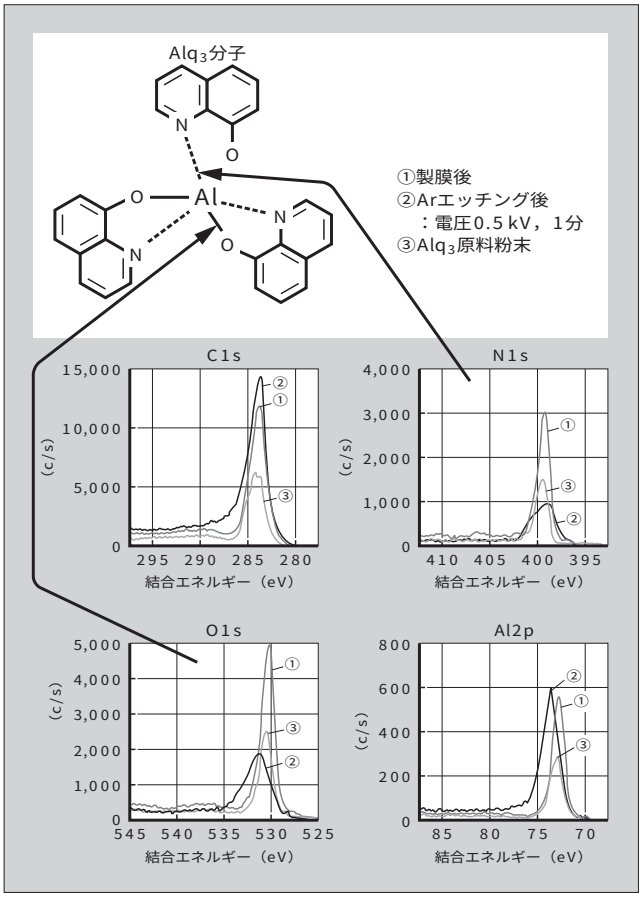
4.1　上部透明電極作製

まず通常の DC スパッタ装置で有機層上への透明電極作製を試みたが，有機膜にダメージが入り期待した特性が得られなかった。ダメージ部分の分析を行ったところ，スパッタ中の高エネルギー粒子の衝突，プラズマや紫外線の

基板への照射などが原因と判明した。**図4**にガラス基板上に Alq_3 を堆積させて，真空中で Ar イオンを照射したときの Alq_3 表面のX線光電子分光分析（ESCA：Electron Spectroscopy for Chemical Analysis）データを示す。また，比較対照として粉末の ESCA データも示す。Ar イオンを Alq_3 表面に照射すると，C1s 結合エネルギーは変化しないが，N1s，O1s，Al2p の結合エネルギーが変化した。したがって，Ar イオン照射は，Alq_3 の Al-O 結合と Al-N 結合にダメージを与えてしまうことが判明した。これらの結果は紫外線光電子分光分析（UPS：Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy）を使用した測定でも報告されている[2]。**図5**は，Alq_3 表面を 40 W の Ar と O_2 プラズマで 10 秒間さらした後に大気中光電子分光法（AC-1）で表面を測定した結果である。O_2 プラズマ照射後の AC-1 信号の傾きは小さくなり，さらに仕事関数の変化が見られた。これらのことは，Alq_3 表面の酸化に起因していると考えられる[3]。**図5**からは，Ar より O_2 プラズマの方が Alq_3 に対してよりダメージを与えることも分かった。

以上のような分析結果を考慮し，改良を加えた対向スパッタ装置を用いて透明電極の作製を行った。対向スパッタのターゲットは向かい合って設置されているため，エネルギーの高い粒子は直接基板に到達できない。また，プラズマは対向ターゲット間に閉じ込められるため，直接基板がプラズマにさらされることもない。さらにプラズマ密度を高める工夫をすることでターゲット組成に近い膜を作製可能にし，有機層にダメージを与える酸素ガス供給を最小限にすることにした。こうして有機膜上へ透明電極をダメージなく作製することに成功した。

図4　Ar ビーム照射後の Alq_3 表面の ESCA プロファイル



4.2　光学干渉制御技術

(1)　反射金属の選定

反射金属は前述のように平坦性の確保が必要になる。一般に，スパッタや蒸着で金属薄膜を作製すると結晶膜が生成する。結晶化した膜は粒が多数存在し表面粗さが増大するので，平坦化するためには結晶粒を微細化するか表面研磨が必要になる。富士電機は，Cr 金属にある種の元素を添加すると薄膜が非晶質になることを見いだした。非晶質膜は粒や粒界が存在しないので，表面平坦性が良好である。**図6**に開発した Cr 系材料の原子間力顕微鏡（AFM：Atomic Force Microscopy）像を示す。開発した材料は Cr と同様の性質を持ち，かつ表明平坦性は中心線平均粗さ $R_a = 0.26$ nm であった。

(2)　光学距離と正面スペクトルの関係

CCM 方式カラーパネルは，赤，緑には色変換を，青はカラーフィルタを通した透過光を利用してカラー化を実現している。色再現性のよいカラーパネルを実現するために，励起光には，CCM 層が吸収しやすい光で，かつ青成分を多く含むスペクトルが要求される。そのため，発光スペクトル設計が重要になる。さらに CCM への入射光を最大にするため，出射光の角度分布を最適化する必要もある。

以上の理由から出射光の光学シミュレータを独自開発した。

(3)　光学設計の実際

正面輝度スペクトルの光学シミュレーションは多層マトリックス法により行った。シミュレーションでは発光層上下の薄膜の光学干渉を考慮して計算を行った。なお，発光スペクトルには，光学干渉の影響をできるだけ避けるために発光層単膜（ドーパントを含む）のフォトルミネッセンスのスペクトルを使用した。シミュレーション方法の概略を**図7**に示す。**図8**はトップエミッションの透明電極膜厚を変化させたときのスペクトルのシミュレーションと実験

図5　O_2，Ar プラズマ処理後の Alq_3 表面の AC-1 測定結果

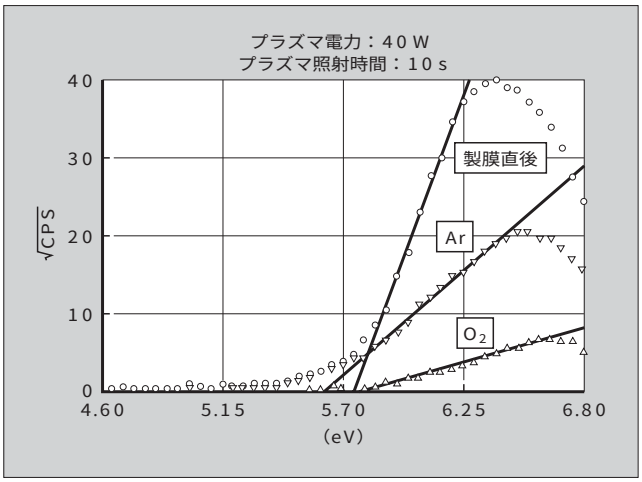
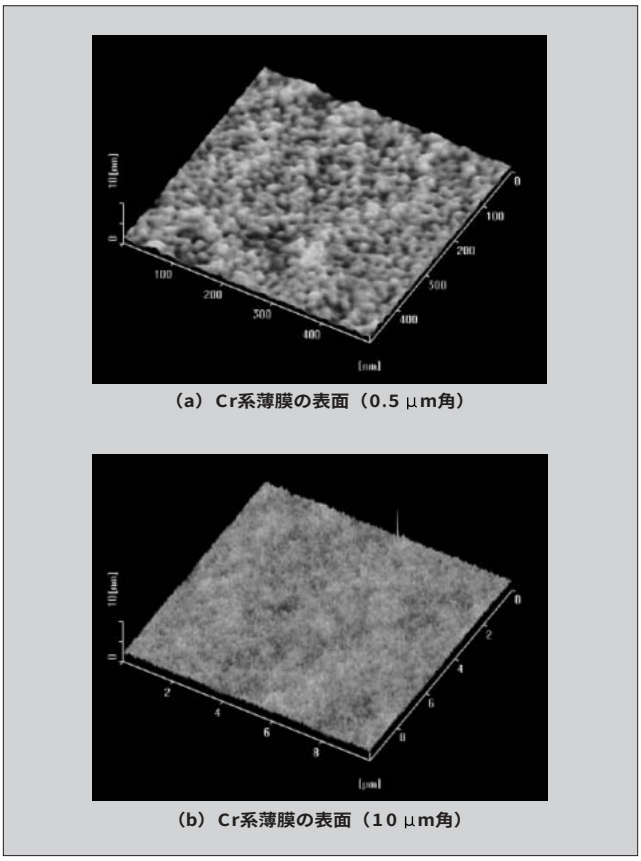


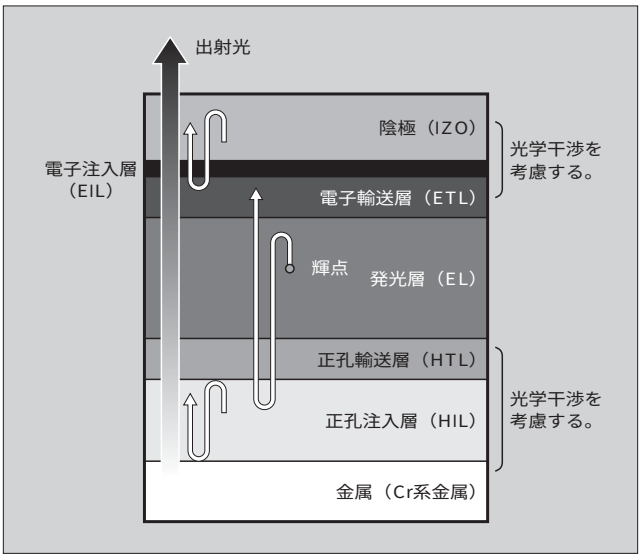
図６　Cr 系薄膜表面の AFM 像



（a）Cr系薄膜の表面（0.5 μm角）

（b）Cr系薄膜の表面（10 μm角）

図７　光学シミュレーション（マトリックス方式）模式図



値との比較である。シミュレーションと実験値はよい一致を示した。

角度分布のシミュレーションは４×４マトリックス法を用いた[4]。**図９**に測定値とシミュレーション値を示す。この結果から，ガラスから空気中に出射される励起光の任意波長の角度分布を計算した。この二つのシミュレーション結果をもとに，青色発光（カラーフィルタ）に最適な正面スペクトルを持ち，かつ緑，赤（CCM）に最適な全光量の大きな励起光を発光するデバイス層構成を設計した。

図８　発光スペクトルの上部透明電極膜厚依存性のシミュレーション結果

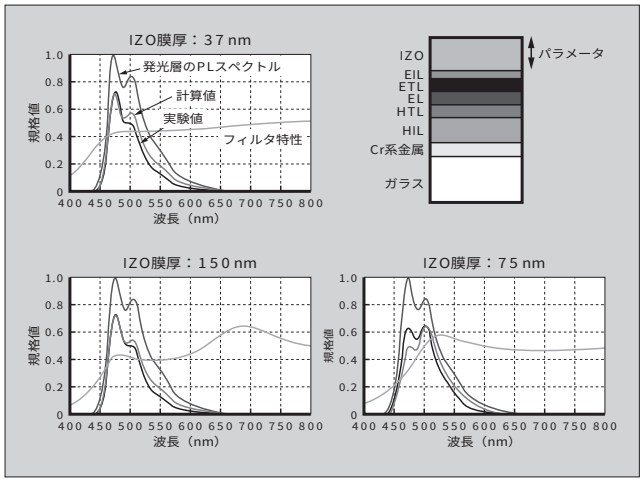
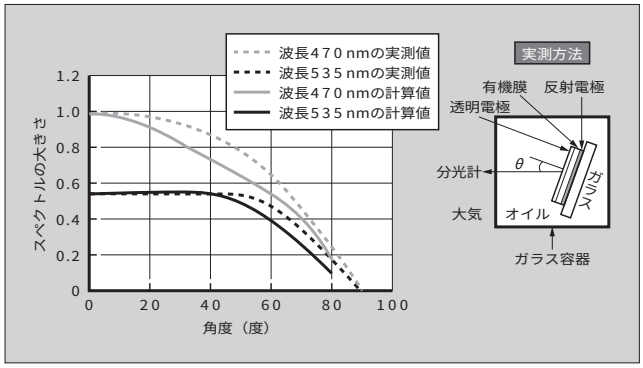


図９　発光の角度分布シミュレーションと実測値比較
（470 nm の正面輝度の大きさで規格化）



5　トップエミッションプロトタイプ素子の作製

以上に述べたトップエミッション型 CCM 素子のプロトタイプを作製し動作の検証を行った。**図10**にプロトタイプの模式図を示す。2 mm 角デバイスを 50 mm 角基板に 10 × 10 個配置し，それぞれ個別に点灯させ文字を表すようにした。デバイス部分はトップエミッション構造になっており，下部電極には Cr 系非晶質金属を用いている。透明電極は IZO を使用し，対向スパッタにより所定膜厚を堆積させた。有機層は発光色の正面輝度が青緑になり，かつ全出射光量が最大になるようシミュレータにより最適化した膜厚で構成した。

一方，CCM 部分は，デバイス部分と重なるよう 2 mm 角のカラーフィルタ/CCM 層を 42 mm 角基板に作製し，その上から OCL と PL（シリコン酸化物系）を積層させた。カラーフィルタ/CCM 層（青はカラーフィルタのみ）は赤，緑，青の三原色を 100 個ずつ並べたものを用意した。こうして作製したトップエミッションデバイス部と CCM 基板をグローブボックス中ではり合わせた。ギャップ間には CCM 層に励起光が伝達されやすいよう屈折率を最適化した充てん剤を注入した。このようにして作製したプロタ

図 10　トップエミッション CCM 方式プロトタイプデバイス模式図

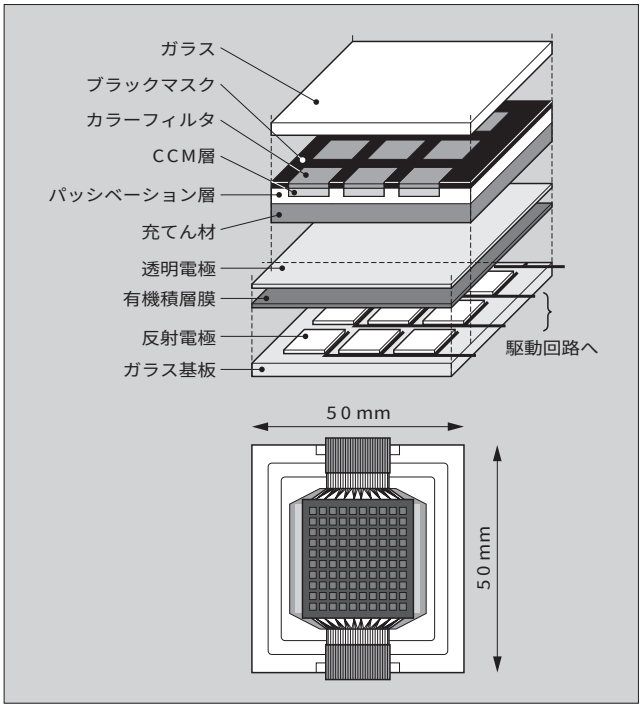


図 11　トップエミッション CCM 方式プロトタイプデバイス写真

イプ素子の写真を**図11**に示す。作製した素子の CIE 色座標は，青（0.11，0.19），緑（0.26，0.68），赤（0.66，0.33）であり，印加電圧 8 V の輝度が青 350 cd/m^2，緑 800 cd/m^2，赤 250 cd/m^2 であった。

6　あとがき

本稿では，トップエミッション CCM の作製に関してデバイス部分を中心に紹介した。紹介できなかったはり合せ法も新たに開発した技術が数多くある。今回は 2 mm 角 10 × 10 個プロトタイプデバイスを作製したが，今後は，この技術をさらに発展させ TFT 基板上にトップエミッションパネルを作製し，AM駆動型 CCM 方式フルカラー有機 EL パネルの開発をしていくつもりである。

参考文献

(1)　桜井建弥．色変換法によるフルカラー有機 EL の技術開発状況と展望．月刊ディスプレイ．vol.8, no.10, 2002, p.59–64.
(2)　中島嘉之，山下大輔．大気中光電子分光法を用いた有機 EL 材料の仕事関数測定．月間ディスプレイ．vol.8, no.10, 2002, p.82–88.
(3)　Liao, L. S. et al. Ion-beam-induced surface damages on tris-（8-hydroxyquinoline）aluminum. Appl. Phys. Lett. 1999, p.1619.
(4)　Berreman, D. W. Optics in Stratified and Anisotropic Media：4 × 4 Matrix Formulation. J. Optical Society of America. 1972, p.502.

無線設計技術と非接触 IC カード

近藤　史郎（こんどう　しろう）　　**四蔵　達之**（しくら　たつゆき）

1　まえがき

富士電機は以前から，特定小電力無線や高周波利用設備などの適用を受ける比較的小さい電力を扱う近距離無線通信技術に力を入れてきた。これらの無線装置では，無線免許不要などの簡便さがある一方で，回線品質の確保が不十分なためにトラブルとなる場合も多い。この問題に対して，富士電機では無線チャネルの特性と送るべき情報の性質を考慮した無線システムのあり方の研究を通して，無線装置を実用化してきた。特に，近年その用途を大きく拡大しつつある非接触 IC カードにおいては，高速性，高セキュリティ性に優れているソニー(株)の FeliCa カード用各種リーダライタ（RW）を商品化している。(1)

本稿では，非接触 IC カードの無線通信技術にスポットをあて，その技術的ポイントと富士電機の取組みを報告する。

2　無線システムとしての非接触 IC カード

2.1　無線システムモデル

ディジタル化された情報を，情報ソースから情報伝達先（情報デスティネーション）に送る部分に着目すると，無線通信システムは，一般に**図 1** のようにモデル化できる。**図 1** における変調方式，符号化方式などにはきわめて多様な方法が提案されているが，これは通信しようとする情報の性質と，通信チャネルの特性の多様性に対応してきた結果である。

非接触 IC カードシステムにおいては，扱う情報は電子マネー情報に代表されるようなディジタルデータであり，完全なエラーフリーが要求される。また，通信距離 d が十数 cm 程度であるのに対して，搬送波波長が約 2.2 m（周波数 13.56 MHz）であり，$d < \lambda / 2\pi$ が成り立つ。これは，電磁結合領域を使った通信を意味し，さまざまな要因により，片方の特性（例えば，インピーダンスなど）の変動が通信に影響を与えるという問題も同時に持つものとなっている。

図 1　通信システムモデル

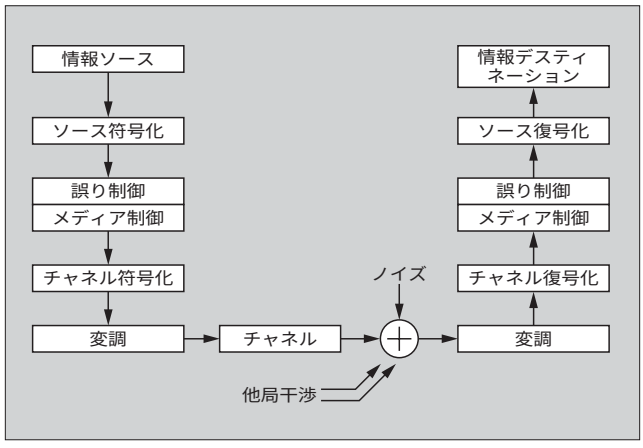


図 2　動作原理

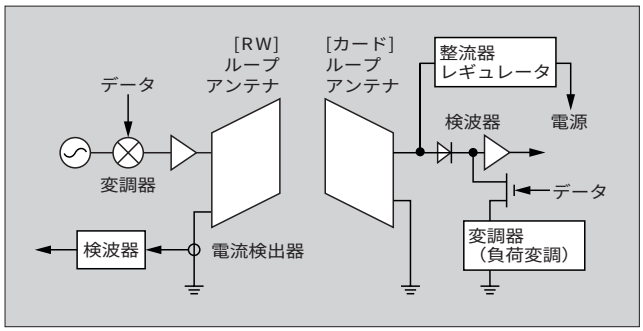


表 1　物理層・データリンク層の仕様

項　目		仕　様
搬送波周波数		13.56 MHz
変調方式	RW→カード	ASK（変調度：約10 %）
	カード→RW	LM（負荷変調）
通信レート		211.875 kビット/秒
ビットコーディング		マンチェスタ
誤り制御		FCSによる誤り検出＋再送制御

近藤　史郎

無線通信方式および非接触 IC カードの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)情報通信制御部グループマネージャー。IEEE 会員。

四蔵　達之

電磁界解析技術および非接触 IC カードリーダライタの研究開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)情報通信制御部主任。電気学会会員。

特集

2.2　RW 動作原理

RW の動作原理を**図 2** に示す。まず IC カードには電源がないため，RW はカードに電源を供給しながら同時に通信を実行する。RW とカードのループアンテナ（カードアンテナ）が電磁的に結合している状態で，RW は 13.56 MHz の搬送波によりカードに電源を送る。同時に，RW からカードにデータを送る場合は RW から変調度約 10 % の ASK（振幅変調）信号を送信，カードはそれを検波してデータに直す。逆にカードから RW にデータを送る場合は，カードが RW からの無変調信号を受信している状態で，カード内の変調器により負荷変動を発生させる。RW はこの負荷変動を自己のループアンテナ（RW アンテナ）の電圧・電流の変化として検出し，データを復調する。

なお，FeliCa の物理層およびデータリンク層の主要仕様は，**表 1** のとおりである。

3　非接触 IC カード通信の課題

3.1　要求回線品質と誤り制御

エラーフリーを実現する回線品質と誤り制御について以下に述べる。近年，エラーフリー化のために強力な誤り訂正が適用される場合も多いが，非接触 IC カードシステムの場合はパケット長が数百ビット程度であるため，誤り訂正の効果はランダム誤りのみにほぼ限定されると考えてよい。

このことから比較的良好なビット誤り率が確保できれば，符号化効率の悪い誤り訂正符号を採用するよりも，冗長度が低くて済む誤り検出符号に再送制御を組み合わせた方式が妥当であると考えられる。FeliCa もこのような考えに沿って，誤りの救済は再送制御によっている。

ただし，この方式では，回線のビット誤り率が悪くなると再送回数ばかりが増え，急速に通信成功率が悪化することが知られている。例えば，パケット長 256，再送を 2 回実行した場合，通信誤り率として 10^{-8} 程度を得るには，回線のビット誤り率は 10^{-5} 程度にする必要がある。一方，ASK の非同期検波で 10^{-5} のビット誤り率を得るために必要な SN 比は 15 dB 程度であり，これが RW として確保すべき目標値と考えることができる。

3.2　課　題

以上のようなビット誤り率の目標値実現の鍵が，2 章で触れたインピーダンスなどの特性変動への対応であり，具体的には，カード特性変動への対応と RW 設置環境への適応である。近年は非接触 IC カードと呼ばれながら，その形状はカードに限る必要性のない利点を生かして，リストバンドや時計にチップを埋め込んだものが商品化されており，さらには，携帯電話へのチップ内蔵も本格普及期を迎えようとしている。このような多様なメディア特性に対して富士電機の RW は汎用的に使えるものを目指しており，相互接続性の確保が非常に重要である。

また，実際のシステムでは，複数カードが識別できることや複数の RW 間で干渉を受けないように設計することも課題となる。以上から課題をまとめると次のようになる。

(1)　多様なメディアへの対応と周囲環境への適応
(2)　複数カード識別
(3)　複数 RW の相互干渉抑制

これらの課題について，次章以降で取組みの詳細を述べる。

4　多様なメディアへの対応と周囲環境への適応技術

メディアの特性が通信に与える影響の一例を**図 3** に示す。これは，カード－RW 間距離とカード→RW の信号強度の関係[2]を，幾つかのカード共振周波数 f_c をパラメータに表したものであり，f_c が異なれば特性が大きく異なることは明らかである。さらに，f_c = 15 MHz の特性に注目すると，距離 10 mm 程度の所で信号強度がゼロクロスしている。これがデッドポイントであり，カードが RW との通信エリア内にありながら通信不能に陥る点である。

また**図 4** は，RW アンテナに金属が近接して設置されることで，RW アンテナのインピーダンスがどのように影響を受けるかについて解析したものである。金属に渦電流が流れることで自己インダクタンス成分が減少し，共振周波数が高い方向へシフトしていることが分かる。

上記のようにメディア特性，周囲環境が通信に与える影響は大きい。このため現状では，例えば自動販売機の正面に取り付けられる RW は，その設置条件でパラメータの最適化が必要である。富士電機ではこの開発設計作業の合理化のために，**図 5** に示すような電磁界解析と回路解析の連成解析手法を開発してきた[3,4]。具体的には，線状アンテナおよび面状アンテナの解析が可能な高周波電磁界解析プログラムによって，金属の影響などを考慮した RW およびカードアンテナの自己・相互インダクタンスや抵抗などの定数を解析する。一方，回路解析では上記定数を取り込んで，通信距離や整合インピーダンスなどの RW 特性を解析する。これにより，試作する前から，特性の予測や RW アンテナ形状などの最適化が可能となっている。

図 3　通信距離と信号強度の関係

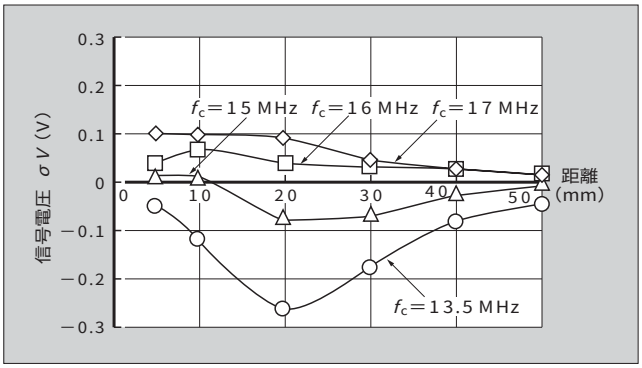


図４　金属の影響

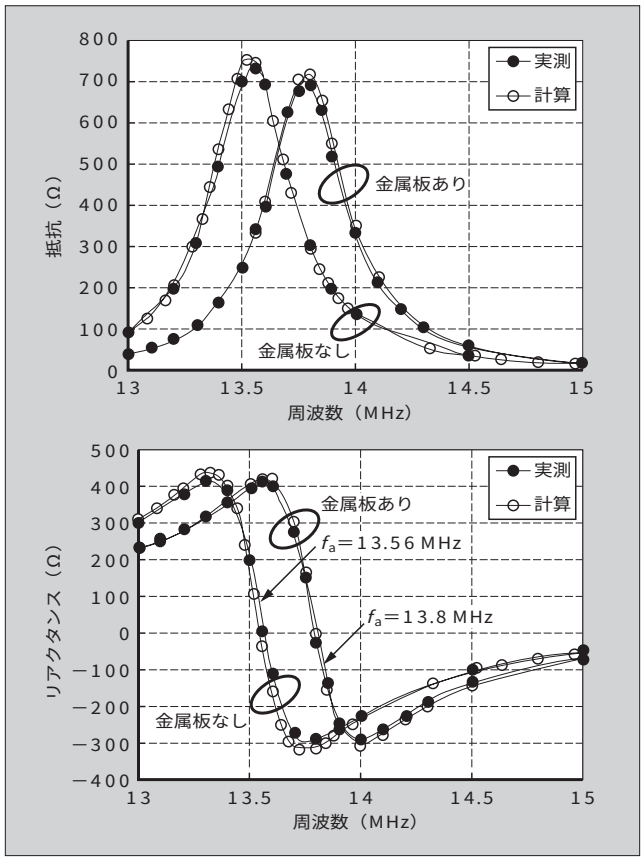
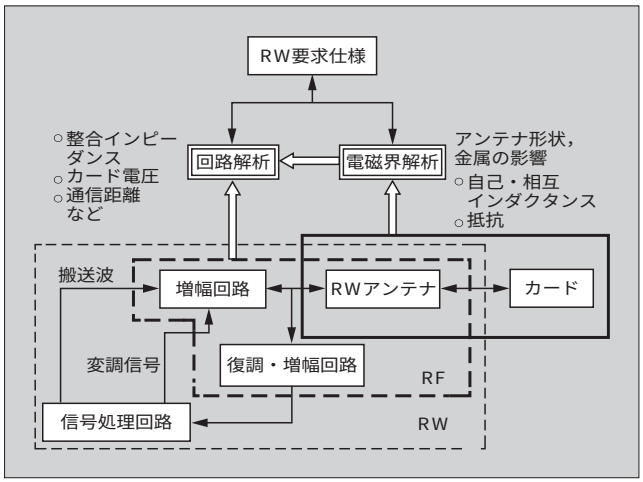


図５　連成解析技術



これらの技術を適用して開発した RW の外観を**図６**に示す。**図７**は，この RW の通信距離とカード周波数との関係[5]を示したものであり，図中の「試作カード」とは，カード周波数を可変にしたカードアンテナと IC チップで構成された評価用カードである。幅広いカード周波数に対して，90 mm 以上の通信距離を実現した。また，定数の最適化によりデッドポイントのない通信を実現し，機器への組込み時には，その設置環境の応じて容易に調整できるように，調整箇所を最少とした設計としている。

図６　RW の外観

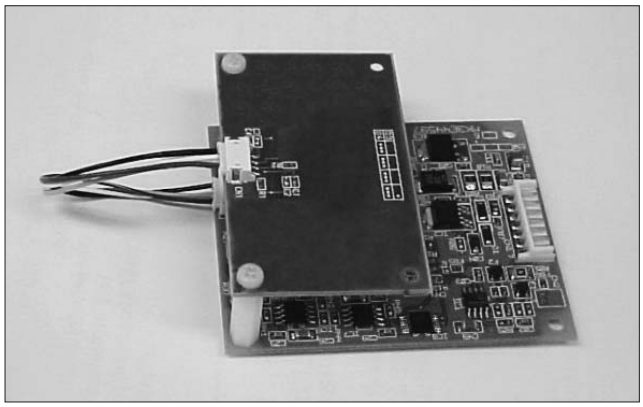
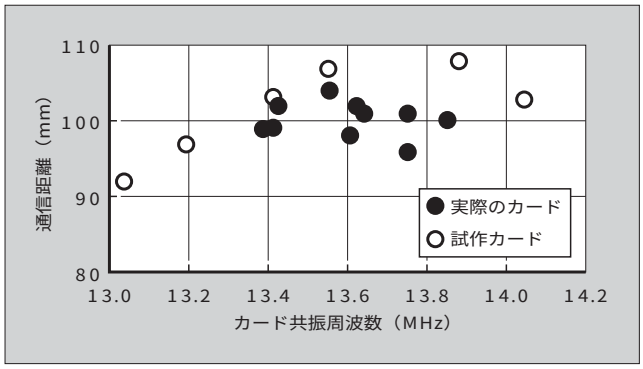


図７　RW 通信距離



⑤　複数カード識別

非接触 IC カード通信では複数のカードを同時に識別する技術が必須である。これを可能とする技術は大きく二つである。

一つは，衝突防止（アンチコリジョン）技術であり，カード ID をスロット ALOHA 手順[6]で取得することで解決している。

もう一つは複数のカードが重なることにより電磁的なカップリングが生じて，カード特性が大きく変動する問題の解決である。これについては，アンチコリジョンカード[7]というアンテナおよび f_c の工夫が提案されており，4章で述べた解析技術を適用することによって，これらの特性に対応した RW の最適設計を可能としている。

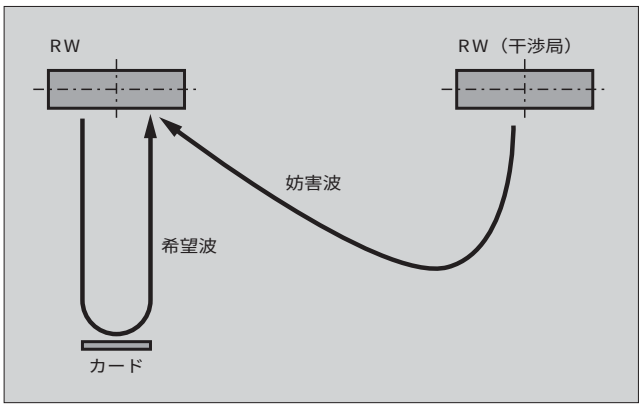
⑥　RW 間干渉

図８はロッカーの鍵開閉を非接触のリストバンドで行う実用化例であるが，多数の RW が近接して配置されるため，一つの RW が生成する電磁界が他の RW に影響する可能性がある。

RW 間干渉モデルを**図９**に示す。ここで，RW 間干渉が最も大きな影響を及ぼすのは，当該 RW がカードからの信号を受信しているときに，隣接の RW がダウンリンク信号を発生している場合である。RW からのダウンリンク

図８　ロッカーシステム

図９　RW 間干渉モデル



信号は無変調の場合と，ASK 変調の場合がある。

まず無変調信号の場合を考えると，希望局と干渉局の搬送波周波数に差がある場合，これらが検波回路で混変調を起こしてビートを打つ現象として現れる。しかし，実際の RW では，搬送波周波数偏差が 50 ppm 程度に抑えられているため，ビートの周波数はたかだか数百 Hz にしかならない。また，ビットコーディングにマンチェスタ符号を採用していることにより，受信機は低周波領域をカットしており，無変調信号は実際には大きな問題とはならない。

一方，ASK 変調信号の場合，干渉する信号の周波数帯域が希望波の周波数帯域に重なるために問題となりうる。この場合，いくら SN 比を改善すべく信号出力を上げても，まったくビット誤り率が改善しないという現象として現れるため，RW の設計などを見直して干渉電力を下げる，隣接する RW が同時に動作しないように制御する，などの対策を施すことが必要となる。ただし，これらの対策は，カードに対する反応を悪化させるという悪影響も同時にもたらすことになるため，先の例では，これらの課題を最適化した設計となっている。

7　あとがき

実用化期を迎えた非接触 IC カードの無線通信に焦点を当て，特にカードと RW の相互接続性やシステムへの適用上，鍵になる技術を紹介した。今後も，これらの RW 技術のさらなるブラッシュアップを通じて，非接触 IC カードの発展に努める所存である。

参考文献

(1)　近藤史郎，四蔵達之．非接触 IC カードリーダライタ．富士時報．vol.75, no.7, 2002, p.405-408.
(2)　四蔵達之ほか．非接触 IC カードリーダライタにおける受信電圧とカード距離の関係．平成 16 年電気学会全国大会．vol.3, no.026, 2004, p.29-30.
(3)　四蔵達之ほか．非接触 IC カードリーダライタのシミュレーション技術．富士時報．vol.75, no.9, 2002, p.527-529.
(4)　四蔵達之ほか．RW アンテナインピーダンスにおける IC カード共振周波数の影響．平成 14 年電気学会電子・情報・システム部門大会．GS7-3, 2002, p.813-814.
(5)　村上益雄ほか．非接触 IC カードリーダライタの開発．平成 16 年電子情報通信学会総合大会．B-5-144, 2004, p.631.
(6)　例えば，Finkenzeller, K.（ソフト工学研究所訳）．RFID ハンドブック．日刊工業新聞社．2001, p.147-150.
(7)　例えば，特開 2002-222400.

最新の最適化手法とソリューションの展開

北川　慎治（きたがわ　しんじ）　竹中　道夫（たけなか　みちお）　福山　良和（ふくやま　よしかず）

1　まえがき

企業活動では，さまざまな業務において目標を立て，その目標を達成するために活動が行われる。最適化手法は，対象とする問題に対して立てた目標にできるだけ近づくための操作（意思決定）を求める方法の一つである。これにより，例えば運用コスト最小化，制御品質最良化，機器最小化設計などのソリューションを実現することができる。

最適化手法は，第二次世界大戦時のミサイル弾道の最適化から開発が始まり，数学的な手法により最適化を実現する数理計画法が開発されてきた。これに続き，1970 年代からは物理現象や生物の進化などを模倣した最適化手法であるメタヒューリスティク（MH）手法が開発されてきている[(1)]。また，富士電機では，従来の MH 手法を超える最適化手法の開発に着手している[(2)]。従来，顧客ソリューションを実現するため，時代ごとに最新の最適化手法が開発されてきており，最適化は古くて新しいソリューションの実現手段である。

本稿では，最新の最適化手法とそれを利用したソリューションの展開について紹介する。

2　最新の最適化手法

2.1　従来の意思決定手法の問題点と求められる手法

ある目的を達成するための意思決定をする場合，対象問題が数式で表現できるときは，数理計画法などの数学的な最適化手法が利用されてきた（**図 1** の従来法 1）。これに対し，対象問題が数式で表現できない場合，ニューロ，ファジィ，エキスパートシステムなどの意思決定手法が利用されてきている（**図 1** の従来法 2）。従来法 1 では，近似的にしか数式で表現できない場合，実質的には利用が困難となる可能性があった。従来法 2 では，検証していないケースに対し，良質な解を生成できる保証が難しいという問題があった。また，対象問題ごとに汎用プログラム（例えば，有限要素法のパッケージなど）で解析計算が可能である場合が多いが，従来法 1 では，**図 1** で示すように対象問題と最適化プログラムの切り分けはできず，対象問題の解析などを行うための独立した汎用プログラムとの連携が困難であった。

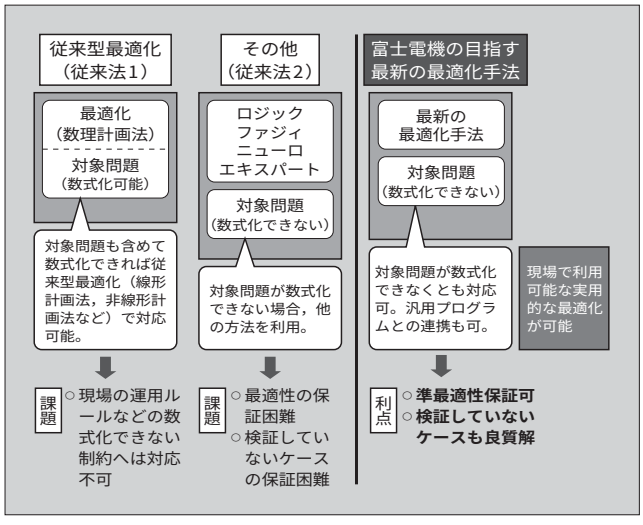
これに対し，現場の泥臭い運用制約などの if-then ルールでしか表現できない制約を考慮し，また独立した汎用プログラムとの連携なども考慮し，検証されていないようなケースでも，良い解が得られるような手法が必要となる。このようなニーズに対応できる最新の最適化手法として，富士電機では，以下に述べるような MH 手法と非線形システムの安定性理論を用いた新たな最適化手法を研究開発している。

2.2　メタヒューリスティク手法

MH 手法は，物理現象や生物・生命にかかわる動きの模擬を利用して問題に依存しない一般的な最適化の探索の枠組みを実現した手法である。

MH 手法には，遺伝的アルゴリズム（GA[(3)]），シミュレーティッドアニーリング（SA[(4)]），タブサーチ（TS[(5)]），Particle Swarm Optimization（PSO[(6)]）などのさまざまな方法が

図 1　従来型意思決定手法と富士電機の目指す最新の最適化手法



北川　慎治

数理アルゴリズムを利用した顧客ソリューション研究開発業務に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)情報通信制御部。電気学会会員。

竹中　道夫

数理アルゴリズムを利用した顧客ソリューション研究開発業務に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)情報通信制御部主任。電気学会会員，情報処理学会会員。

福山　良和

数理アルゴリズムを利用した顧客ソリューション研究開発業務に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)情報通信制御部グループマネージャー。工学博士。電気学会会員，IEEE 会員。

表１　メタヒューリスティク手法の比較

	GA	SA	TS	PSO	非線形システムの安定性理論を用いた最新の最適化手法
開発時期	1970年代	1983年	1989年	1995年	2003年
対象問題	組合せ最適化問題	組合せ最適化問題	組合せ最適化問題	連続型最適化問題 混合整数非線形最適化問題	組合せ最適化問題 連続型最適化問題 混合整数非線形最適化問題
状態変数	離散変数	離散変数	離散変数	連続変数，離散変数	連続変数，離散変数
探索点数	多点探索	一点探索	一点探索	多点探索	一点探索
解の保証	解全体が良い方向に行くことは保証されている。	大域最適解が得られることが保証されている。	数学的な保証はない。	探索の振る舞いを数学的に解析する試みが始められている。	数学的な理論に基づいた探索方式で保証可能（理論を構築中）
実行時間	○	△	◎	◎	○
特　徴	近年は，多目的最適化問題への適用有効性が検討されている。	長時間をかければ良質な解が得られる。	組合せ最適化問題に対し，一般的にGA，SAより短時間に良質な解が得られる。	従来法では解を求めることが困難であった混合整数非線形最適化問題に対し，短時間で良質な解が得られる。	大規模な問題に対して，最も効率的かつ確実に良い解が得られる。

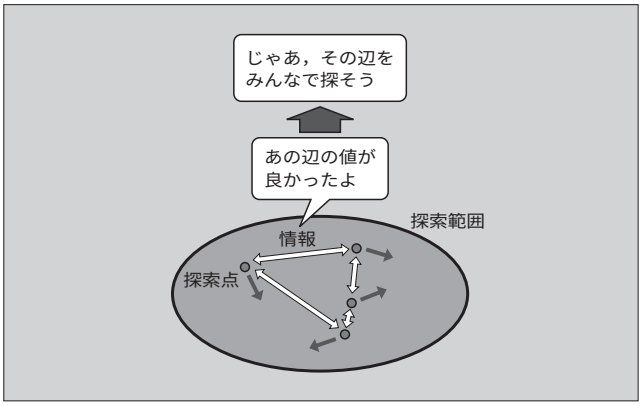
〈注〉実行時間は相対的に◎，○，△の順番に短い。

ある（**表１**）。

GA は問題を遺伝子で表現し，複数の遺伝子を用いた交差・突然変異などの遺伝子操作および自然淘汰による世代交代により解を探索する。SA は，鉄が液体状態から固体状態に冷えて固まる際に，分子レベルでは振動が徐々に小さくなりエネルギー最小の状態になることを模擬して解を探索する。TS は，前に探索した解に戻ることを禁止し（タブー），新しい解のみを探索していくことにより効率的な探索を実現する。PSO は，渡り鳥などの群れがうまく集団で行動する様子や，人間の集団が個人の情報を集団内でうまく共有しながら意思決定する過程を模擬することにより解を探索する。ここで，PSO が対象としている混合整数非線形最適化問題とは，離散変数（例えば，変圧器のタップ値など）と連続変数（例えば，発電機の出力）を両方含む状態変数に対して，最適な値の組合せを見つける問題である。一般的な最適化問題では，離散変数と連続変数を両方考慮し混合整数非線形最適化問題となる場合が多い。富士電機は，電力・エネルギー分野において，世界で初めて PSO の適用を成功させている[(7)]。

ここでは，さまざまな分野に適用可能で最新の PSO の概要について述べる。PSO は，パデュー大学のエバーハート教授らによって 1995 年に開発された。Particle は粒子，Swarm は群れである。したがって，PSO は粒子が群れになって解を探索する手法である。PSO の開発の背景には二つの技術がある。一つは，動物などの群れの動きの模倣技術であり，もう一つは認知心理学である。渡り鳥の群れの動きは，簡単なベクトルの合成で表現できる。つまり，群れの中心に向かうベクトルと隣の鳥との距離を一定に保つベクトルと，群れの向かう方向のベクトルである。この三つのベクトルに適当な乱数を加えると群れの動きは非常に正確に模擬できることが知られている。また，認知心理学の分野では，人間が自分の経験と他人の経験をもとに意思決定していることが知られている。エバーハート教授は，解の探索点を複数用意し（複数の鳥に相当），式(1)のように，個々の探索点の評価が最も良かった点（Personal Best：Pbest，自分の経験に相当）と探索点の群れ全体で評価が最も良かった点（Group Best：Gbest，他人も含めた経験に相当）と現在の探索方向の合成ベクトル方向に探索の向きを変更しながら解を探索することにより，従来型の MH 手法より探索効率の良い PSO を開発した。

図２　PSO の探索の概念



次の探索方向＝現在の探索方向

＋ Pbest 方向＋ Gbest 方向 ……(1)

実際には，右辺の各項には乱数や重み係数（関数）がかけられており，現在の探索方向は，最初はランダムに設定する。これにより，複数の鳥（探索点）が探索領域において，評価の良い探索点の情報を交換しながら最適解を探索していることになる（**図２**）。

富士電機では，この最新の PSO 技術に対して，さらなる改良を加えた Constriction Factor Approach，ハイブリッド PSO，適応的 PSO などを利用したソリューションを実現している[(7)〜(9)]。

2.3　非線形システムの安定性理論を用いた新しい最適化手法

MH 手法は，対象問題が式で表現できなかったり，汎用ソフトウェアを利用する必要があっても，良質な解が得られる利点がある。しかし，実用的には，大規模な問題に対

しては良質な解を生成する確率が小さくなってしまうことがある。ユーザーニーズは狭い範囲の最適化ではなく，よく「全体最適化」といわれるように，一つの建屋から工場全体，生産業務全体のように広い範囲に拡大しており，今後はますます大規模な問題を取り扱う必要がある。また，GA，SA，PSO などは確率的な方法であるため，いつでも良質な解が得られる保証がなく，解が毎回異なってしまう可能性がある。毎回同じような解が生成されるようにすると自由度が減り，良い解が得られる確率も減ってしまう。このため，実用化のためには，探索のチューニングを注意深く行う必要がある。富士電機では，このような MH 手法の欠点を補い，大規模な問題に対して常に良質な解が得られるような方法として，非線形システムの安定性理論に基づく新しい最適化手法を開発している（**表１**）。以下に概要を説明する。

最適化において，各探索点における目的関数の傾きを計算することにより局所最適解へ至る方法は数理計画法として開発されてきている（**図３**の①）。しかし，この方法では，局所最適解から抜け出し，他の谷にある大域最適解へ至ることができない（**図３**の②）。このような数理計画法の欠点を克服するため，生物の世代交代や群れの動きを模倣して局所最適解から抜け出す方法として MH 手法が開発された。

ここで，もう少し詳しく目的関数の形状を考えてみると，局所最適解に至った後，次の谷に行く際に，山の尾根の一番低い所を通って行くと効率的であることが分かる。このように，局所最適解が得られたら，山の尾根の一番低い所を経て，次の谷の局所最適解に至るということを繰り返すことにより，最短時間で周りの局所最適解を得ることができる（**図４**）。一定時間内に得られた局所最適解のうち，最も良い解を最適解（大域最適解に近い解）として求めることができる。このような方法が米国コーネル大学のチャン教授らによって提案されたが[10]，時間がかかるという欠点があった。

富士電機では，この方法を改良し，連続法および固有値解析により，高速に尾根の一番低い所を探し出し局所最適解を最短時間で探し出していく方法を開発している[2]。本手法により，大規模で複雑な形状の目的関数でも，短時間に大域最適解が得られることが検証されている。本手法は，まだ研究段階であるが，各種分野への適用を実現するために実用的な研究開発を進めている。

３　最新の最適化手法を用いたソリューションの例

ここでは，最新の最適化手法を用いたソリューションの

図３　局所最適解からの脱出

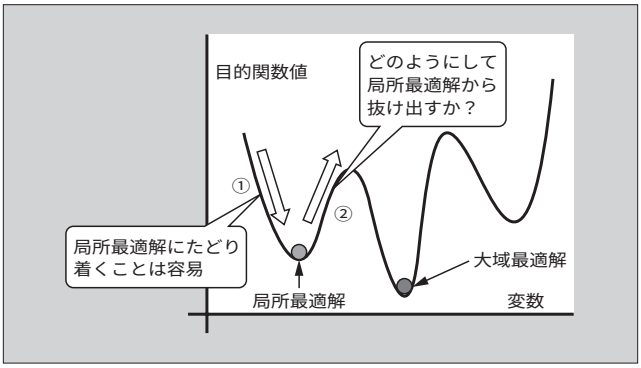


図４　効率的な局所最適解の探索方法

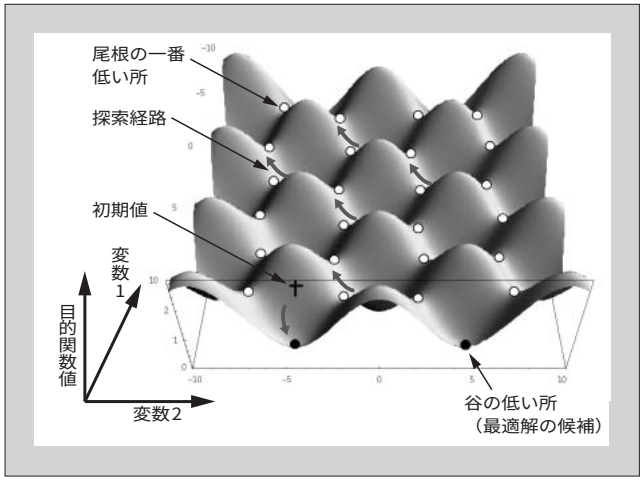
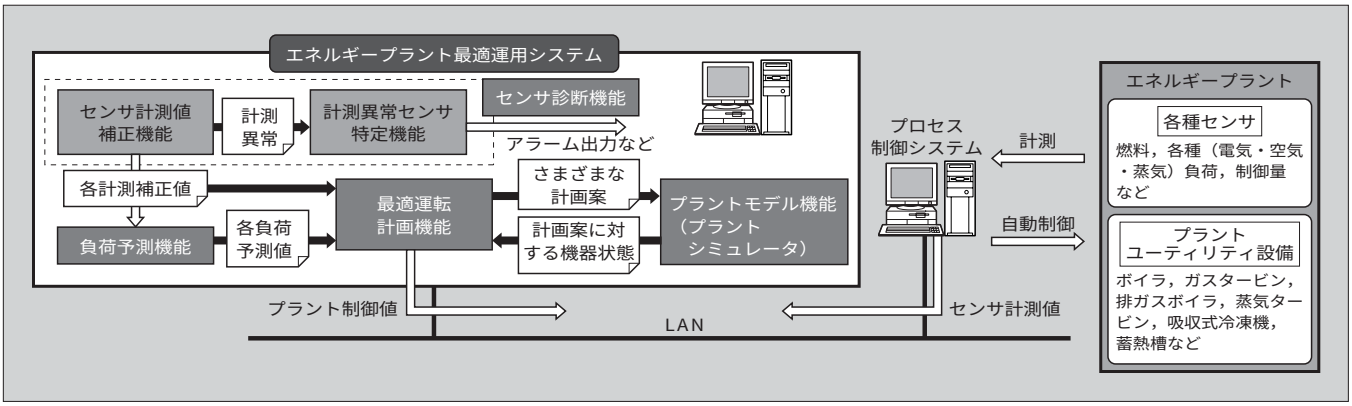


図５　センサ診断機能を含んだエネルギープラント最適運用システム



例として，エネルギープラントの最適運用[9],[11]～[13]におけるセンサ診断[14]を示す。

エネルギープラント最適運用システムのシステム構成を**図5**に示す。センサ診断機能は実績データ管理として，最適運用システムの各種機能へのデータ入力の前段階に実行される機能であり，LAN経由で入手されたセンサ計測値に対し計測誤差を自動補正し，その補正量が大きい場合には計測異常センサを特定し運用者に通知するなど，センサ診断機能は主に以下の二つの機能から構成される。

3.1　センサ計測値補正機能

実運用においては計測誤差がセンサ情報に含まれていても最適運用システムの各種機能が妥当な結果を出力する継続運用を実現する必要がある。これを実現するため，センサ計測値補正機能はセンサ計測値とプラントシミュレータ計算結果との誤差が最小となるようにセンサ計測値を自動補正する。この問題は以下のような最適化問題として定式化できる。

状態変数：プラントシミュレータ入力値（各種燃料，負荷値など）

目的関数：計測値と計算値の誤差最小化

つまり，目的関数値が最小となるプラントシミュレータ入力値の組合せを求め，そのときのプラントシミュレータ計算結果を基にセンサ計測値を自動補正している。本機能は，MH手法の一つであるPSOをベースとして実現している。

3.2　計測異常センサ特定機能

上記の機能による補正量が大きい場合にその要因と考えられるセンサを特定する機能である。この問題は以下のような組合せ最適化問題として定式化できる。

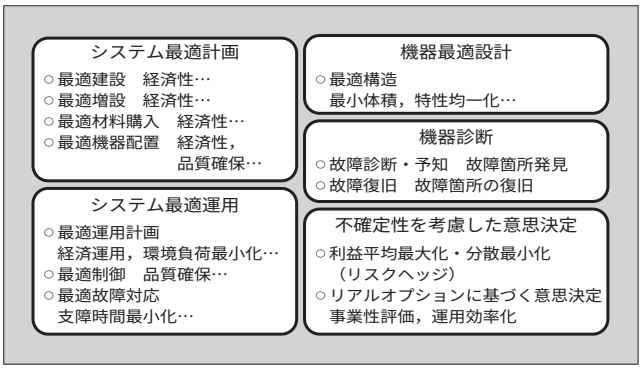
状態変数：正常計測と計測異常のセンサ状態の組合せ

目的関数：正常計測値と計算値の誤差最小化および正常計測センサが存在する事象確率最大化

つまり，正常計測センサの計測値とプラントシミュレータ計算結果との誤差や正常計測センサの存在台数などを総合的に判断し，最良の目的関数値を得るセンサ状態の組合せを求め，その組合せの中で計測異常状態にあるものを計測異常センサとして特定している。また，**3.1**節の機能と同様の方式により，最良の目的関数値を得るときのプラントシミュレータ計算結果を基にセンサ計測値の補正も同時に実現することが可能である。

これらの機能は，プラントシミュレータという外部プログラムの結果を利用するため，従来の数理計画法では実現ができず，MH手法を利用する必要があり，PSOをベースとして実現している。このような機能により，現在の定期的にメンテナンスを行うTime-based Maintenance（TBM）から，必要に応じてメンテナンスを行うCondition-based Maintenance （CBM）に移行でき，メンテナンス費用の削減が可能となる。富士電機では，このようなセンサ診断機能を組み込んだエネルギープラント最適運用ツールとしてFeTOP[15]やPowerCC[12]を提供している。

図6　最新最適化技術の適用分野例



このような最新の最適化手法の適用分野の例を**図6**に示す。

なお，MH手法の電力分野への適用については，参考文献⑯にまとめた。

4　あとがき

本稿では，富士電機で開発を進めている最新の最適化手法とソリューションへの適用例について述べた。今後も顧客ソリューションを実現するべく，最適化手法の研究開発を進めていく所存である。

参考文献

(1)　森啓之，福山良和．電力系統におけるインテリジェントシステム―メタヒューリスティク手法―．電気学会雑誌．vol.121, no.7, 2001, p.454–457.

(2)　中澤親志ほか．Quasi-Stability Regionの大域的最適解最有力候補探索への応用．第2回情報科学技術フォーラム．2003–9.

(3)　Holland, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems : An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Bradford Books. 1975.

(4)　Krikpatrick, S. et al. Optimization by Simulated Annealing. Science. vol.220, no.4598, 1983, p.671–680.

(5)　Glover, F. Tabu Search Part I. ORSA Journal of Computing. vol.1, no.3, 1989.

(6)　Kennedy, J. ; Eberhart, R. Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. vol.Ⅳ, 1995, p.1942–1948.

(7)　福山良和ほか．電圧信頼度を考慮したParticle Swarm Optimizationによる電圧無効電力制御方式の検討．電気学会論文誌B. vol.119, no.12, 1999, p.1462–1469.

(8)　Fukuyama, Y. et al. A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation. IEEE Trans. on Power Sytems. vol.18, no.1, 2003.

(9)　Fukuyama, Y. et al. Particle Swarm Optimization for

Optimal Operational Planning of a Cogeneration Plant. Proc. of Meta-heuristic International Conference（MIC 2003）.

⑽ Chiang, H. D. ; Chu, C. C. A Systematic Search Method for Obtaining Multiple Local Optimal Solutions of Nonlinear Programming Problems. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I. vol.43, no.2, 1996, p.99-109.

⑾ 福山良和ほか．プラントユーティリティ設備最適運用への知能化技術の適用．電気設備学会誌．2002-11.

⑿ 北川慎治ほか．エネルギープラント最適運用ツール．富士時報．vol.75, no.11, 2002, p.625-629.

⒀ 項東輝ほか．原動力設備プラントの最適運用と適用事例．富士時報．vol.77, no.2, 2004, p.166-170.

⒁ 高山信一ほか．プラントユーティリティー設備のセンサー診断機能の開発．電気学会全国大会．2004-3. 発表予定.

⒂ 神俊裕ほか．最適化エネルギーマネージメントシステムFeTOP の開発．第 4 回 SICE システムインテグレーション部門講演会．2003-12.

⒃ 高山信一ほか．電力系統分野への最適化技術の適用―新しい最適化技術「メタヒューリスティクス」の適用―．富士時報．vol.74, no.12, 2001, p.669-673.

特集

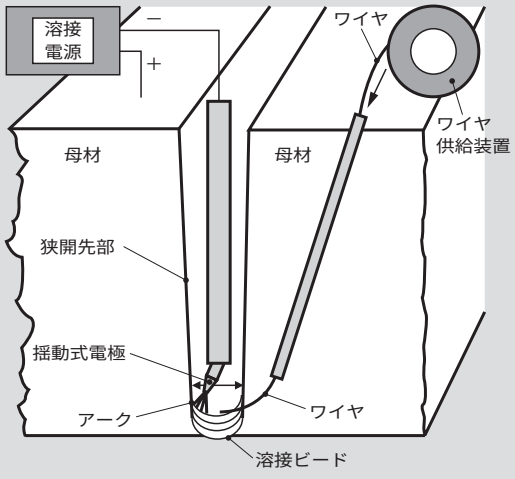
解　説　狭開先溶接

厚板の溶接は，一般的には開先を V 形，レ形，X 形などの形状にして溶接ビードを何層・何パスにもわたって積層していく。しかし溶接箇所は大入熱を受けるので，結晶粒の粗大化，熱影響部の劣化，溶接変形は避けられない。これに対して，開先を U 形にして開先幅を非常に狭く（6 ～ 12 mm）して溶接するのが狭開先溶接法である。この方法では溶接入熱を低減できるので母材の組織変質を抑制して高能率に溶接できる。これには TIG 溶接法〈注 1〉，MIG/MAG 溶接法〈注 2〉，サブマージアーク溶接法〈注 3〉などがある。狭開先溶接の特長は，①溶接継手の強度，靭性が向上する，②溶接時間が短縮できる，③溶接材が節約できる，などがある。

〈注 1〉TIG 溶接法：非消耗式のタングステン電極とシールドガスに不活性ガスを用いたアーク溶接方法

〈注 2〉MIG/MAG 溶接法：消耗式溶接ワイヤを電極としてシールドガスに Ar や He などの不活性ガス，CO_2 や CO_2 ＋ Ar などの酸化性ガスを用いたアーク溶接方法

〈注 3〉サブマージアーク溶接法：フラックス中において溶接ワイヤと母材との間にアークを発生させて溶接する方法



マトリックスコンバータを利用した高効率電力変換

特集

伊東　淳一（いとう　じゅんいち）　小高　章弘（おだか　あきひろ）　佐藤 以久也（さとう　いくや）

1　まえがき

近年，省エネルギー化の要求に伴いインバータの適用範囲は広がっているが，今後，インバータのさらなる普及拡大には，今まで以上の低コスト化，小型化，高効率化が求められる。また，環境への整合性もより重視される傾向にあり，インバータの入力電流に含まれる高調波への何らかの対策が必要である。

富士電機では，インバータのように直流に変換することなく，電源電圧から直接任意の大きさ，周波数の出力電圧を発生できるマトリックスコンバータを開発している。これはインバータに対して，高効率，小型，長寿命，低入力電流高調波といった特長があり，前述の要求を実現できる可能性が高い。本稿では，マトリックスコンバータとその実用化を実現する新技術について紹介する。

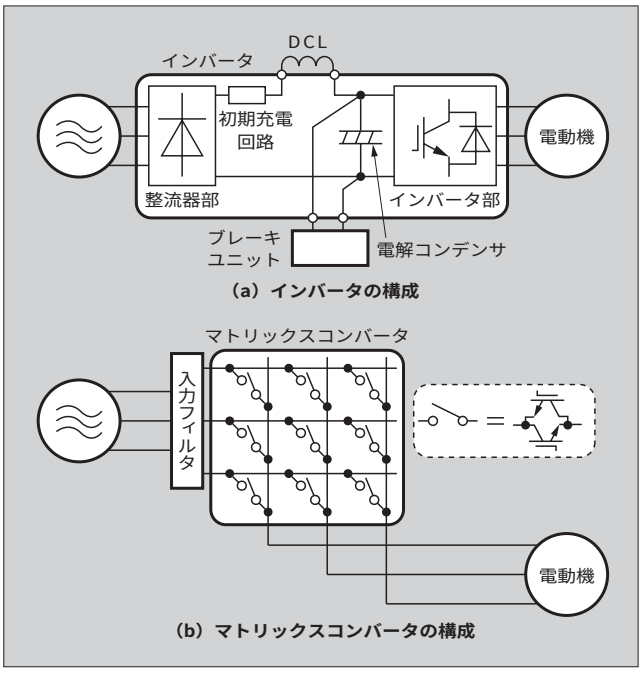
2　マトリックスコンバータの原理

図1にインバータとマトリックスコンバータとの回路構成を対比して示す。インバータはよく知られるとおり，整流器部により入力された交流電圧を直流電圧に変換し，インバータ部で IGBT などのスイッチング素子を高速でオンオフすることにより，直流電圧を短冊状に切り出して所望の交流電圧に変換する。直流部には，電圧リプルを抑制するために電解コンデンサが使われている。これに対し，マトリックスコンバータは交流スイッチを格子（Matrix）状に並べ，これらを高速でオンオフし，入力交流電圧を短冊状に切り出すことで所望の出力電圧を直接得る。ここでは，電解コンデンサのような大きなエネルギー蓄積要素が不要となる。ただし，スイッチング素子には交流電圧が印加されるため順逆両方向の電圧をオンオフできる機能が必要である。

図1(a)に示すように，インバータでは直流中間部に接続された電解コンデンサの突入電流を抑制するため，初期充電回路が必要となる。また，整流器部にダイオード整流器を用いると入力電流に多くの高調波が発生する。そこで入力電流の高調波を低減するため，直流リアクトル（DCL）が挿入される。加えて，電動機に大きな制動トルクを発生させる場合，直流部にブレーキユニットを接続する必要がある。用途によっては，入力電流の高調波の低減や制動時のエネルギー処理のため回生コンバータが用いられる。しかし，マトリックスコンバータは入力電流と出力電圧を同時に制御できるので，回生コンバータとインバータを用いたシステムと同等である。すなわち，入力電流を正弦波状に制御することにより，入力電流に低次の高調波はほとんど発生せず，加えて制動時の電力回生動作もできる。さらに，直流中間部の大型電解コンデンサが不要なため，初期充電回路は必要なく，小型化と長寿命化が可能である。

図2に回生コンバータとインバータとを用いたシステムとマトリックスコンバータの損失と盤構成の比較を示す。マトリックスコンバータではインバータと回生コンバータのほかに，フィルタコンデンサ，リアクトルや昇圧リアク

図1　インバータとマトリックスコンバータの比較



伊東　淳一

パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所副主任研究員。電気学会会員。博士（工学）。

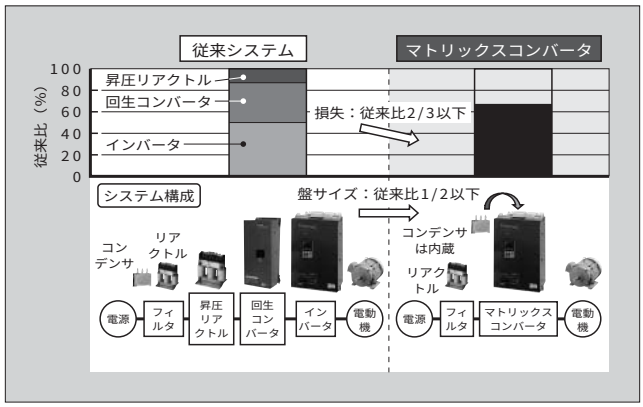
小高　章弘

パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所副主任研究員。電気学会会員。

佐藤 以久也

パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

図２　回生コンバータとインバータのシステムに対する
マトリックスコンバータの比較



トルが必要となるが，マトリックスコンバータではフィルタだけでよい。したがって，システムを盤内に構成した場合，内部を簡素化でき，盤のサイズを 1/2 以下と大幅に省スペース化できる。また，交流から交流へ１回で変換するため，損失が従来のシステムの 2/3 以下と少なく，低損失化を実現できる。

3　マトリックスコンバータを実用化する新技術

マトリックスコンバータの回路構成と原理は古くから知られているが，実用化するには幾つかの課題があった。ここでは，これらの課題を解決する新技術を紹介する。

3.1　高速自己消弧形デバイスの逆阻止化技術

表１にマトリックスコンバータに用いる交流スイッチの実現方法を示す。従来の IGBT をはじめとする高速の自己消弧形デバイスは逆方向に電圧を印加できない。そのため，従来は**表１**(a)のように，IGBT に直列にダイオードを接続する必要があった。このダイオードにより導通損失が増加し，効率が低下する。

富士電機では，逆方向にも耐圧がある逆阻止 IGBT を新たに開発した[(1)]。従来の IGBT は，逆電圧を印加すると IGBT チップをウェーハから切り離すときにできるダイシング面に漏れ電流が流れ，耐圧を確保できない。そこで，開発した逆阻止 IGBT ではダイシング部に深い分離層を形成し，ダイシング面を覆うことで漏れ電流が流れるのを防ぎ逆耐圧を確保する。これは近年の IGBT 製造技術の発達により実現可能になった。逆阻止 IGBT は従来の IGBT と基本構造は同じ構造であるため，スイッチングスピードやオン電圧のトレードオフカーブは従来の IGBT と同様である。また，逆方向電圧を印加したときのリカバリー特性についても従来の還流ダイオードとほぼ同等の特性が得られている。**図３**にマトリックスコンバータを**表１**(a)および**表１**(b)で示す各交流スイッチで実現した場合の損失の比較を示す。逆阻止 IGBT を適用すると直列ダイオードの導通損失がなくなるため，スイッチング損失はほぼそのままで，導通損失を約 30 %低減できる。

表１　交流スイッチの実現法

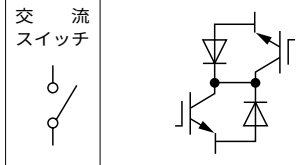
	(a)	(b)
交流スイッチ		
素子数	IGBT 2個，ダイオード 2個	逆阻止 IGBT 2個
オン電圧	約4 V	約2 V

図３　マトリックスコンバータの損失比較

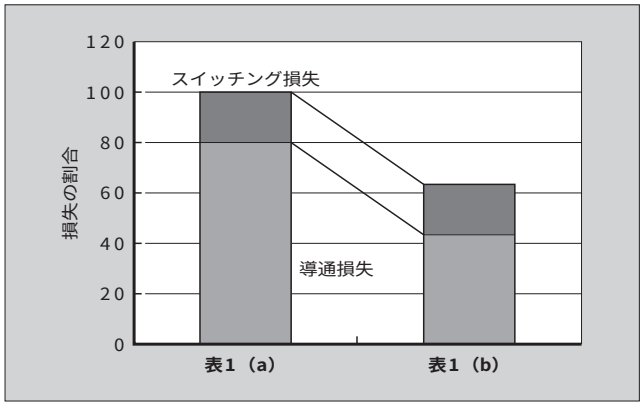
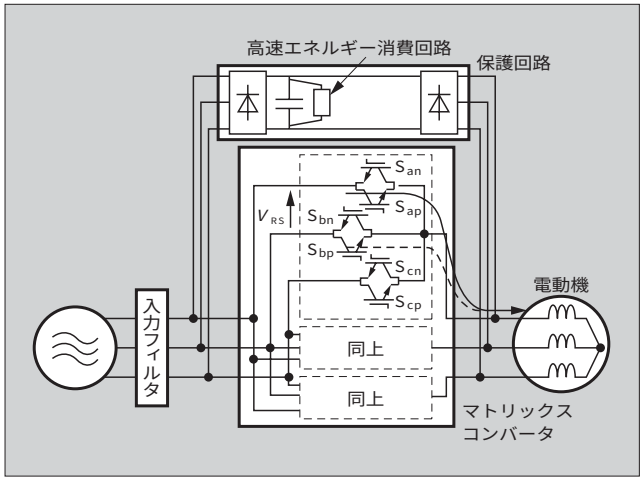


図４　転流動作と保護回路



3.2　保護技術

図４にマトリックスコンバータの転流動作について示す。転流とは，例えば，S_a に流れている電流を，S_b をオンして S_a をオフすることにより，S_b に移すことである。このとき，スイッチの切換は電源短絡を防止しつつ，負荷電流の還流経路を確保しなくはならず，S_a，S_b は同時オンも同時オフもできない。負荷の誘導性エネルギーの還流経路がなくなると，スイッチの両端に大きなサージ電圧が発生し，スイッチを破壊する。また，過電流，過電圧などにより保護動作が働いた場合，インバータでは IGBT をすべて遮断しても還流ダイオードにより負荷電流の還流経路は確保され，誘導性エネルギーは自動的に電解コンデンサに吸

収されるが，マトリックスコンバータでは，負荷電流を保護回路に転流させなくてはならない。

そこで，従来はインバータと同様に電源短絡を防止するデッドタイムを設け，同時オフの期間に発生するサージ電圧は保護回路により吸収する。このため，損失の増加や保護回路が大型化し，加えて保護回路にはエネルギーを吸収する大型の電解コンデンサが必要になるため，マトリックスコンバータの利点を損なう結果となる。

今回の開発では，交流スイッチを構成する二つの逆阻止IGBTを別々のタイミングでオンオフすることにより，転流の問題を解決した。すなわち，IGBTに逆電圧が印加されても逆方向（エミッタからコレクタ方向）へは電流が流れないことに着目し，逆電圧が印加されているスイッチを常にオンすることにより，従来のインバータの還流ダイオードの働きをさせ，負荷電流の還流経路を確保する。順方向に電圧が印加されているスイッチは従来のインバータと同じくデッドタイムを設けてスイッチングすることにより，電源短絡を防止する。例えば，**図4**において，$v_{RS}>0$とすれば，S_{an}とS_{bp}は逆電圧が印加されるので，常時オンとし，S_{ap}とS_{bn}はデッドタイムを設けてスイッチングすることにより，負荷電流をS_{ap}とS_{bn}の間で転流する。過電流や過電圧時の保護についても，誘導性エネルギーを大型の電解コンデンサに蓄えることなく，抵抗やダイナミッククランプ動作により高速にエネルギーを消費することで，電解コンデンサレス化を実現する。

3.3　制御技術

マトリックスコンバータでは出力電圧を制御すると同時に入力電流を制御できるが，同時に独立して制御するのは容易ではない。その理由は，ある電圧を出力するために，交流スイッチを一つ切り換えると入力電流の状態も変わるため，制御が複雑になる。しかし，近年，制御装置の高速化と高性能化，低コスト化により，複雑な制御でも容易に実現できるようになっている。従来から用いられてきたマトリックスコンバータの制御法は電源電圧から所望の交流電圧を得る条件と，入力電流が正弦波状になるように負荷電流を分配する条件から，各交流スイッチのオンオフパターンを直接計算する方法である[2]。この方法はマトリックスコンバータ固有の制御法であり，変換器の違いを生かしたさまざまなオンオフパターンを作り出すことができる。しかし，オンオフパターンを直接求めることから，入力電流の制御と出力電圧の制御を分離して考えることは難しい。

そこで今回は，**図5**のように，マトリックスコンバータを仮想の整流器部と仮想のインバータ部に分け，入力電流と出力電圧についてそれぞれ制御を行い，最後に仮想整流器と仮想インバータのオンオフパターンを合成して，マトリックスコンバータのオンオフパターンを得る方法（仮想AC-DC-AC方式）を開発した[3]。この方法は，従来のインバータの延長線上で制御を行えるので，これまでに培った技術がほぼそのまま適用できる。

仮想AC-DC-AC方式は**図6**に示す仮想の整流器とインバータからなる仮想AC-DC-AC変換器を想定し，入力電流および出力電圧の制御を行う。

仮想AC-DC-AC方式は，

「三相電力変換器において，電力変換器の最終的な入力と出力の接続関係が等しければ，入出力波形は電力変換器の回路方式に依存しない」

という原理に基づいている[4]。例えば，**図6**において仮想整流器側でS_{rp}，S_{tn}をオンし，仮想インバータ側で，S_{up}，S_{vp}，S_{wn}をオンする期間があるとすると，入出力の接続関係は，R相とU相，V相，およびT相とW相が接続されていることになる。そこでマトリックスコンバータでも同様にS_{ru}，S_{rv}，S_{tw}をオンすることによりR相とU相，V相，およびT相とW相をそれぞれ接続するスイッチをオンすることによって，従来のAC-DC-AC変換と同様な動作ができる。仮想インバータの制御は従来のインバータと同様に行う。

図7に仮想AC-DC-AC方式により制御を行った場合のマトリックスコンバータの動作波形を示す。負荷は誘導機であり，誘導機の制御にはベクトル制御を用いている。入力電流は電源電圧と同期しており，ほぼ力率1の正弦波状の電流になっている。また，出力電流も低次ひずみのない良好な正弦波状の電流が得られている。

図8に負荷を変化させたときの入力電流のひずみ率と入

図5　マトリックスコンバータの制御方式

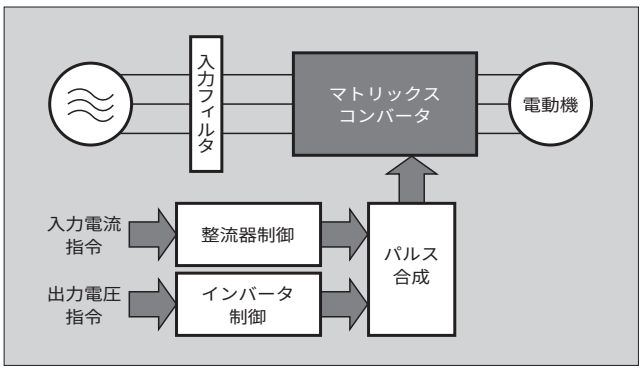


図6　仮想AC-DC-AC方式の原理

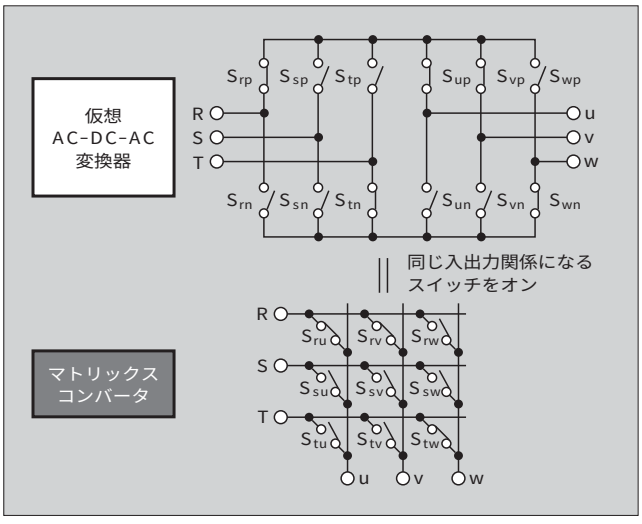


図７　マトリックスコンバータの入出力波形

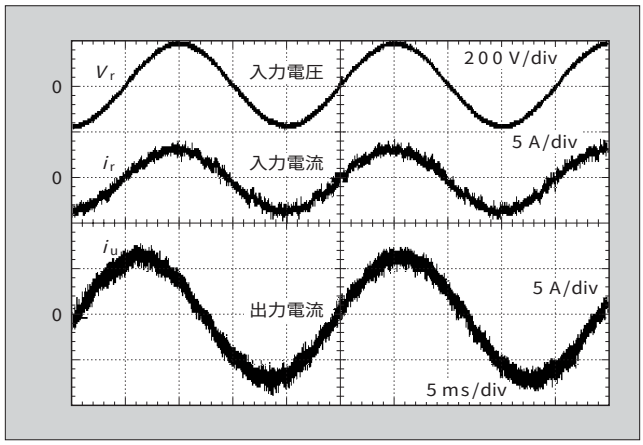
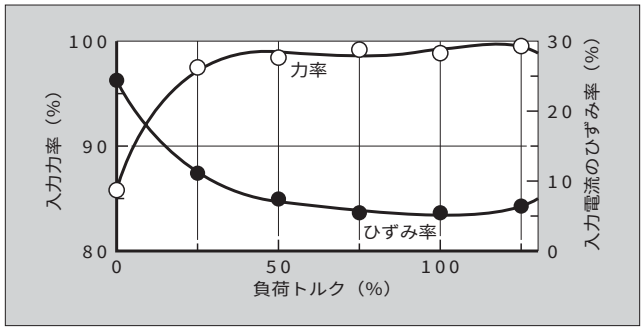


図８　入力力率と入力電流のひずみ率



力力率を示す。入力力率は 40 %以上の負荷で 99 %以上が得られており，入力電流のひずみ率も定格時 5.1 %と低い値が得られている。マトリックスコンバータでは入力電流に低次高調波が含まれないため，高調波抑制対策ガイドラインを満足できる。

図９，**図10**にベクトル制御時における加減速運転波形と負荷インパクトの波形をそれぞれ示す。トルクがステップ的に変化し，トルク電流が変化しても磁化電流は一定を保っており，従来の電動機制御と同様にベクトル制御が良好に行えることが確認できる。また，減速時には入力電流が増加し，入力側に電力を回生していることが分かる。

4　あとがき

マトリックスコンバータを実用化する新技術について紹介してきた。本稿では割愛したが，マトリックスコンバータが持つ原理上の下記の制約を克服する技術についても開発している。

(1)　スイッチングに用いられる線間電圧の最小値は入力電圧の 0.866 倍であるため，出力電圧を正弦波状に出力できる最大電圧は入力電圧の 0.866 倍に限られる。

(2)　エネルギーバッファがないため，停電，ひずみなどの電源じょう乱に弱い。

マトリックスコンバータは電力回生ができることからエレベータやクレーンをはじめとする垂直搬送に適用できる。また入力電流高調波を大幅に低減できることから，高調波

図９　加減速運転（100 r/min → 1,200 r/min → 100 r/min）

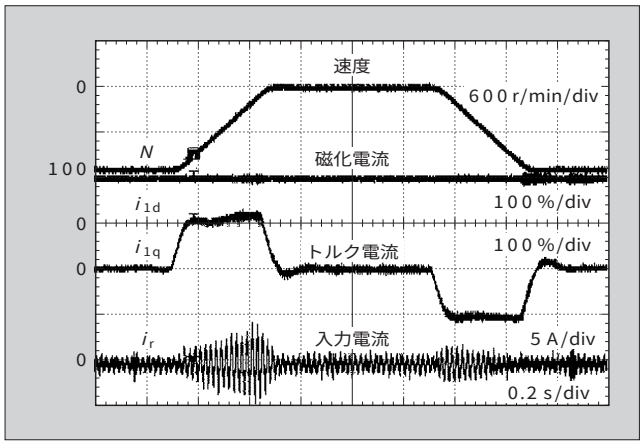
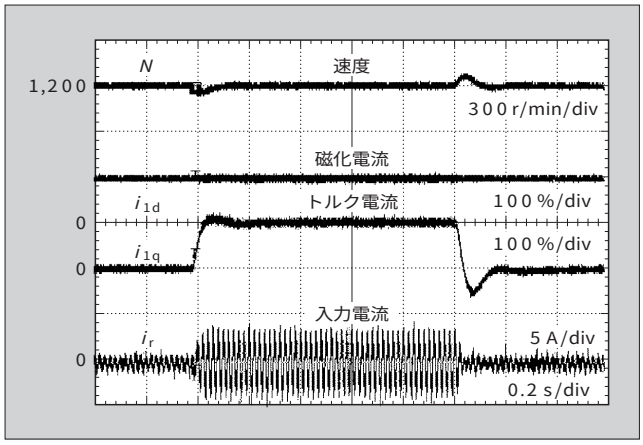


図10　負荷インパクト特性（0 %→ 100 %→ 0 %）



対策品としても期待される。

将来的にはフライホイールによるエネルギー貯蔵，マイクロガスタービンなど，従来回生コンバータとインバータを用いてシステムを構築していた分野への適用が期待できる。逆阻止 IGBT についても，今後さらに従来の IGBT と同様に高耐圧化，大電流化が進むと思われる。これらに伴いマトリックスコンバータの適用範囲も広がることが予想され，課題解決に向けて全力で取り組む所存である。

参考文献

(1)　Takei, M. et al. The Reverse Blocking IGBT for Matrix Converter With Ultra-Thin Wafer Technology. Proceedings of The 15th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs （ISPSD). 2003, p. 156-159.

(2)　Oyama, J. et al. New Control Strategy for Matrix Converter. Proceedings of Power Electronics Society Conference. 1989, p.360-367.

(3)　伊東淳一ほか．仮想 AC/DC/AC 変換方式によるマトリックスコンバータの入出力波形改善法．半導体電力変換研究会．SPC02-90/IEA-02-31, 2002.

(4)　伊藤里恵，高橋勲．マトリクスコンバータにおける入出力無効電力の非干渉制御法．半導体電力変換研究会．SPC-01-121, 2002.

蒸気タービンロータの異種材料溶接技術

特集

今村　清治（いまむら　せいじ）　　和泉　　栄（いずみ　さかえ）　　飯塚　　実（いいづか　みのる）

1　まえがき

コンバインドサイクルプラントやIPP（電力卸供給事業者）プラントの市場拡大に伴い，中容量蒸気タービンの発注台数が近年増大している。従来の中容量機の標準構成は，高中圧一体形タービンと低圧タービンをタンデムに結合した2気筒2流排気式であったが，長大低圧翼の開発に伴い，初期コスト，保守コストの安価な高中低圧一体形タービンに対するニーズが高まっている。

蒸気タービン用ロータ材は，使用される部位により要求される材料特性が異なる。すなわち，軸径は小さいが高温下で使用される高中圧部においては高温クリープ強度が，また使用される温度は低いが軸径が大きい低圧部においては引張強度と靭性が，それぞれ要求される。

1 % CrMoNiV鋼は良好な高温クリープ強度を持ち低コストで製作可能なロータ材であるが，引張強度・靭性はそれほど高くない。3.5 % NiCrMoV鋼は高い引張強度と靭性を持ち低コストで製作可能なロータ材であるが，高温下では脆化する特性がある。2 % CrMoNiWV鋼は良好な高温クリープ強度と高い引張強度と靭性とを併せ持つロータ材であるが，製作プロセスが複雑で製作コストが高い。

図1はタービンの構成とロータ材の使用範囲を示したものであるが，それぞれのロータ材には前述した強度特性があるため，従来は上段に示す材料選定がされていた。

本稿では，中容量高中低圧一体ロータ材を低コスト，短納期で提供するために，**図1**の下段に示す1 % CrMoNiV鋼と3.5 % NiCrMoV鋼の異種材料を溶接する技術を開発したので紹介する。

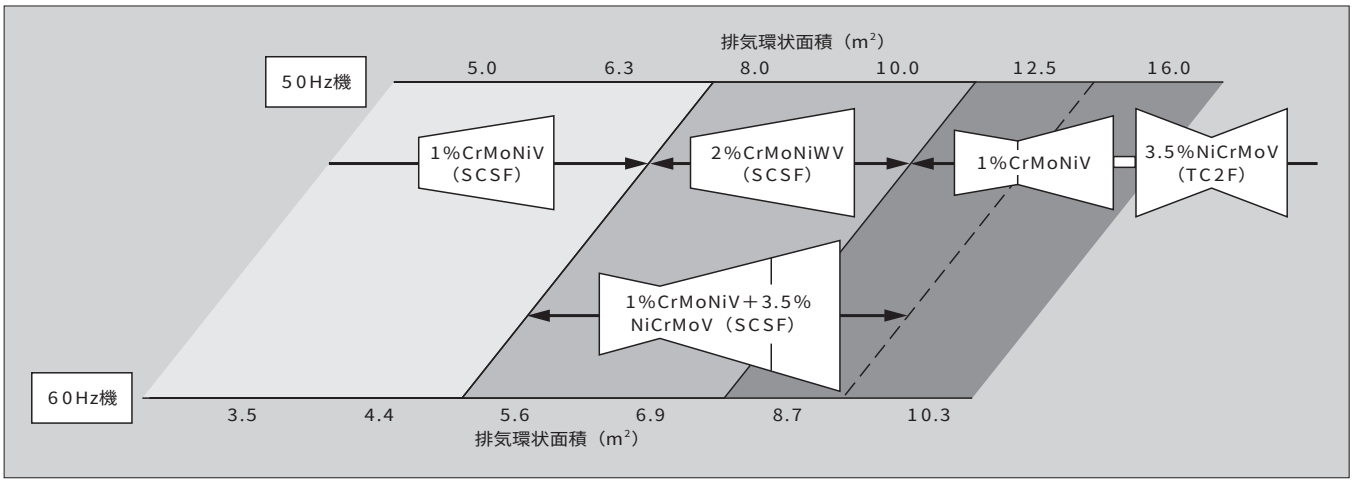
地熱タービンは，蒸気中に腐食性物質が含まれる環境下で使用されるため，経年的にロータ材は腐食減肉し，高応力の作用する翼溝部には腐食ピットやクラックが生じる場合がある。本稿では，腐食により損傷した地熱ロータ材（1 % CrMoNiV鋼）の補修技術として，耐腐食性に優れた12 % CrMoV鋼の肉盛溶接についても開発したので併せて紹介する。

2　ロータ溶接

2.1　異種材料の溶接

高温・高中圧側ロータの1 % CrMoNiV鋼と低温・低圧側ロータの3.5 % NiCrMoV鋼は，上述したように蒸気タービンロータとしての使用条件が，それぞれ異なるため

図1　タービンの構成とロータ材の使用範囲



今村　清治

レーザ加工，溶接加工の研究・開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)生産技術研究所担当課長。レーザ加工学会会員。

和泉　　栄

蒸気タービンの設計に従事。現在，富士電機システムズ(株)川崎工場火力タービン部課長。

飯塚　　実

製缶・溶接構造物の製造技術および製造合理化業務に従事。現在，富士電機システムズ(株)川崎工場製造部。

に要求される機械的特性も異なる。**図2**は，両ロータの突合せ部の概略図である。すなわち，両ロータの継手部は異種材料同士の溶接となる。このロータ材は Cr，Mo などの合金成分を含有し，比較的炭素量も多いことから溶接部において焼入れ性が高くなる。溶接のままでは靭性も乏しく，低温割れの発生も起こりやすくなるので，実際の溶接施工では溶接棒の選定，バタリング溶接（下盛溶接），初層裏波溶接（第一層目完全溶け込み溶接），多層溶接，そして予熱や後熱処理など溶接プロセスの一つ一つが重要な要素となる。

溶接方法はワイヤ供給式の狭開先 TIG 溶接方法（狭い開先部内を不活性ガス雰囲気にして非消耗式タングステン電極と供給ワイヤとによりアーク溶接する方法。狭開先溶接については 141 ページの「解説」参照）を用いた。供給ワイヤには 1 % CrMoNiV 鋼と 3.5 % NiCrMoV 鋼の中間成分となる組成のものを選定した。

まず 1 % CrMoNiV 鋼側の突合せ面にバタリング溶接を行った。一種の中間層として，3.5 % NiCrMoV 鋼との溶接において成分調整の働きをするためである。溶接の際は急冷硬化を防ぐため予熱を行った。これは拡散性水素を放出して低温割れ防止に有効となるためである。そしてバタリング溶接後は，延性・靭性の回復，硬度の低減のため後熱処理を行った。

図3に異種材料溶接前のロータの外観を示す。

1 % CrMoNiV 鋼側ロータと 3.5 % NiCrMoV 鋼側ロータの溶接前突合せ作業はロータの軸心調整後に，両ロータのつなぎ固定のためのブリッジ溶接や狭開先底部の仮付け溶接など，いずれも異種材料溶接となる。このような箇所は短時間の溶接となるため急冷硬化しやすい。したがって，異種材料溶接となるすべての箇所に対して，予熱の考慮が重要となる。

タービンロータは，高速回転（3,000/3,600 r/min）するため狭開先部の初層溶接では，内径側継手部全周において裏波が出ることが必要となる。溶接時におけるバッキングガス（Ar ガス）の給排気によるロータ内径側空洞部の内部ガス圧力（ゲージ圧）の最適化と低い酸素濃度（およそ 0.5 %以内）の維持が必要で，これが裏波の安定化に重要となる。**図4**は，ロータ内径側空洞部の Ar バッキングガスの内部圧力が，全周の溶接線（突合せ部）上に事前にあけられた複数個の Ar ガス給排気穴をアークが通過する際に，アークに及ぼす影響を調べたもので，30 ～ 40 Pa を超えない内部ガス圧力のときにきわめてアークが安定した。ここでの裏波溶接は，溶け落ち（穴あき）や裏波途切れの発生がロータ製作のうえで致命的なものとなるため最も溶接難易度の高い箇所となった。次に，2 層目以降の多層溶接（67 層）は正味アーク溶接時間だけでも 30 ～ 40 時間にも及ぶ。ここでは入熱量，ワイヤ溶着量，ビード高さなどの選定において，溶接部の結晶粒サイズの肥大化・脆化などの防止配慮をした最適条件出しが重要となった。**図5**に多層溶接部の断面組織（溶接後熱処理後）を示す。多層溶接では狭開先面の片方の側，すなわちバタリング側の溶接部は，ほぼ同材質の溶接となり，もう片方の側の 3.5 %

図2　両ロータの突合せ部の概略図

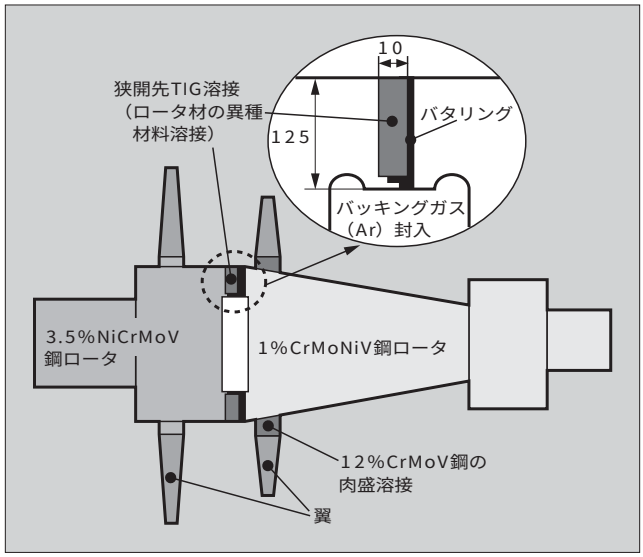


図3　溶接前のロータの外観

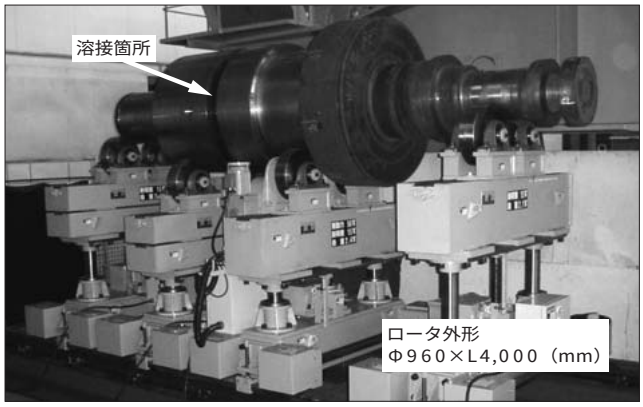


図4　アーク変動と内部ガス圧力

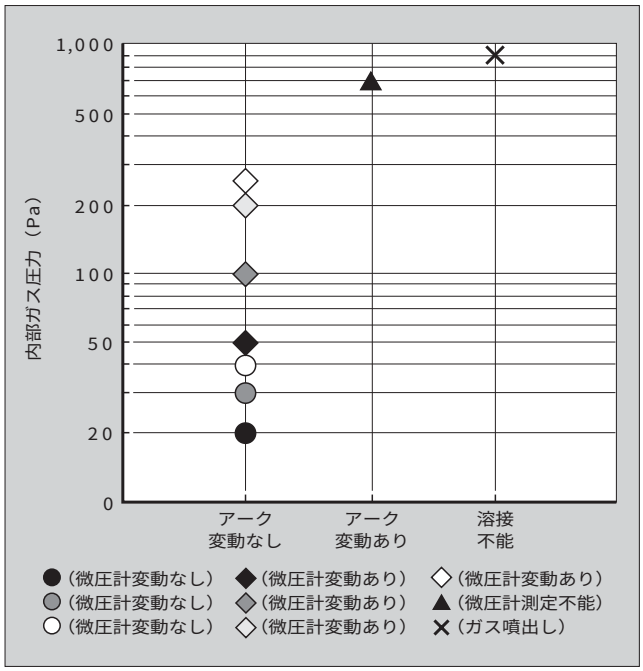
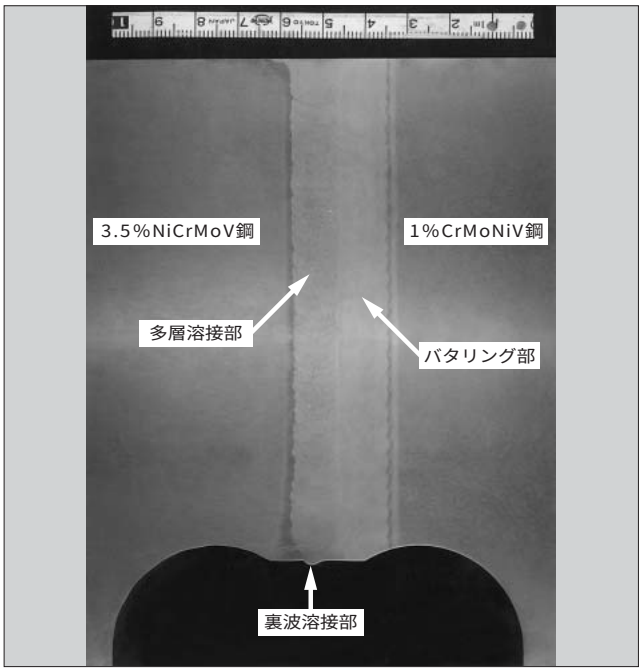


図５　狭開先溶接部の断面（図２の〇内に対応）



NiCrMoV 鋼側では異種材料溶接部となる。本溶接では狭開先１層１パス溶接であるので，この両面の溶接部は異なる希釈率を呈することになり予熱温度の選定が重要となる。

2.2　溶接部の検査

溶接部検査の方法は，非破壊検査方法ではＸ線透過撮影試験，超音波探傷試験，Ｘ線残留応力測定，溶接部変形量の測定など，破壊検査方法では引張試験，衝撃試験，回転曲げ試験，断面組織検査，応力腐食割れ試験などである。

非破壊検査では，初層溶接部にＸ線透過撮影試験を，また多層溶接部には超音波探傷試験（Ultrasonic Testing：UT）を用いた。このうちの TOFD 法〈注〉試験では，溶接内部におけるきず（気孔など）の深さ方向の位置やそのサイズがφ１mm の精度で検出でき，これを超える溶接内部のきずは検出されなかった。

図６はロータ材の特性と，溶接部の引張強度，衝撃試験の結果である。各溶接箇所を切り出した試験片から調べたもので，ロータ材の特性値（規格値）を上回る結果を得た。

図７における溶接後熱処理後の溶接部の硬さ分布では 3.5 % NiCrMoV 鋼側の HAZ（熱影響部）で最も高い硬さを示すが，これは異種材料間における浸炭現象と考えられ機械的特性にはまったく影響を及ぼすものではなかった。

③　地熱タービンロータの肉盛補修溶接

蒸気中に腐食性物質が含まれる環境下で地熱タービンは使用されるため，ロータ材翼溝部は経年的に腐食を生じる

〈注〉TOFD 法：飛行時間回折法。きずの上端と下端で発生した回折波の到達時間差からきずのサイズ・深さなどを調べる方法

図６　ロータ材および溶接部の機械的特性

ロータ材質	降伏点（0.2%Y.S）MPa	引張強さ（U.T.S）MPa	伸び（E.L%）	絞り（RA%）	シャルピー衝撃値（20℃）J
1%CrMoNiV鋼	550〜700	700〜850	≧15	≧40	≧24
3.5%NiCrMoV鋼	705〜805	≦980	≧15	≧45	≧100

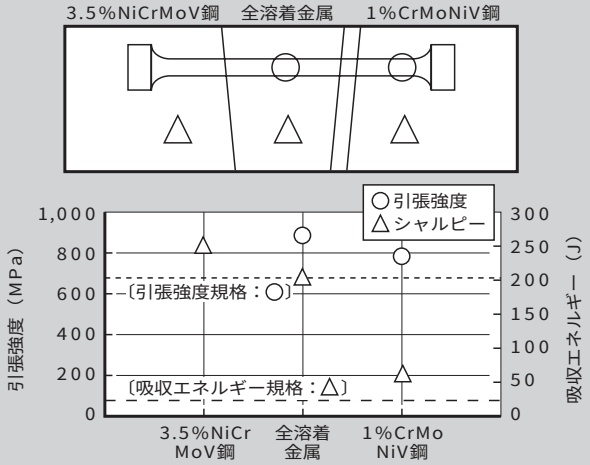
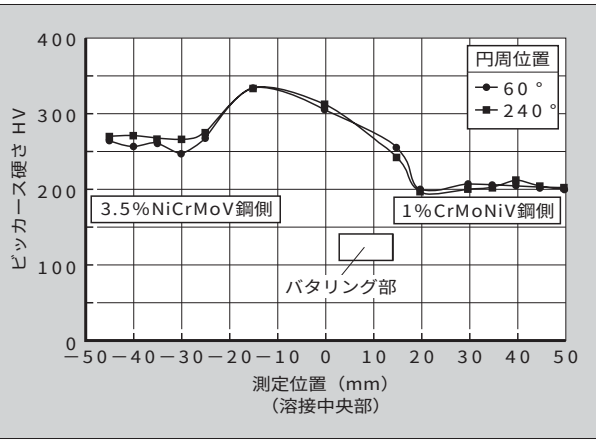


図７　溶接部の硬さ分布



場合がある。そこで，この翼溝部を補修する溶接方法について紹介する。

この翼溝部はロータ本体側の１% CrMoNiV 鋼の翼溝部を補修するもので，まずロータ本体側劣化部を切削削除した後，下盛溶接（5 % Cr 鋼），肉盛溶接（12 % CrMoV 鋼），溶接後熱処理（焼鈍），翼溝加工という工程で行われる。

3.1　溶接方法の選定

肉盛溶接方法としてはサブマージアーク溶接を選定した。この溶接方法は，太径のワイヤを使用し，かつ大電流が使用できるので高能率・高品質の特長を持つ。

3.2　予備実験

溶接ワイヤ，溶接条件および溶接後熱処理の組合せを変えた平板溶接実験を行い，各組合せにおける溶接部の機械

表１　肉盛溶接部の機械的特性試験結果

	規格値	部　位		
		母材（1%CrMoNiV鋼）	母材と溶接境界部	溶接部
引張強度	686～833 MPa	686～833 MPa	690～698 MPa	849 MPa
降伏点	549～686 MPa	565～577 MPa	549～566 MPa	692 MPa
伸　び	15 %以上	21.5～22.8 %	15.3～16.3 %	13.3～15.5 %
絞　り	40 %以上	70.7～71.6 %	69.7～72.4 %	52.7～56.1 %
吸収エネルギー	24 J以上	46.2～55.8 J	60.8～95.1J	30.0～39.3 J
ビッカース硬さHV	—	190～220	220～270	260

図８　ロータ翼溝部の肉盛補修溶接の施工状況

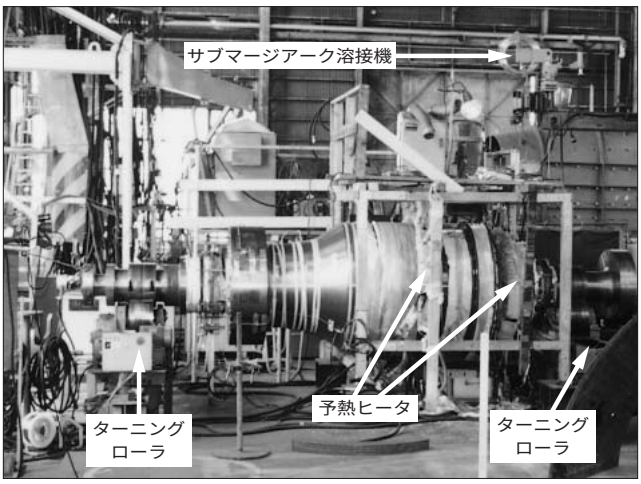
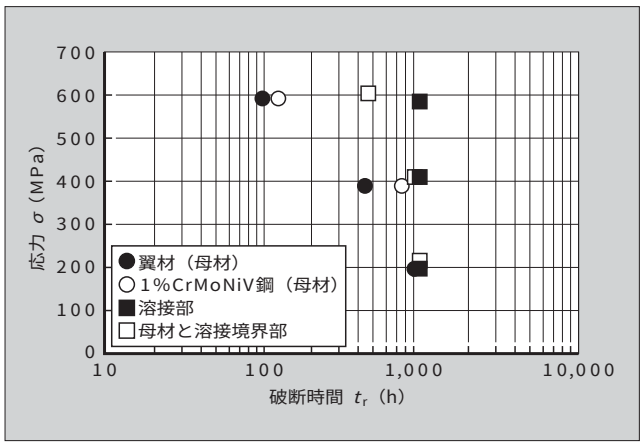


図９　肉盛溶接部の応力腐食割れ試験結果



的特性の確認により最適条件の絞込みを行った。その結果，下盛材 5 % Cr 鋼，本溶接材 12 % CrMoV 鋼，焼鈍温度 720 ℃の組合せにおいて継手引張強度 729 MPa（母材強度 686 ～ 833 MPa），衝撃試験のシャルピー吸収エネルギー 24.4 ～ 108.4 J（母材吸収エネルギー 23.5 J 以上），溶接部のビッカース硬さ HV190 ～ 265 という機械的特性が得られ，実機への適用が可能であることを確認した。

3.3　実物大モデルによる肉盛溶接実験

予備実験により決定した施行条件により，実物大モデルの肉盛溶接実験を実施した。肉盛溶接は，ロータを回転ローラ上で水平姿勢で回転・予熱しながら行う。特に溶接後熱処理（焼鈍）もロータを回転させながら実施した。ロータ翼溝部の肉盛補修溶接の施行状況を**図８**に示す。溶接後熱処理後，肉盛部を粗引き加工した後，超音波探傷試験（UT）および残留応力測定を実施した。UT 結果では判定基準であるφ 1 mm 以上の欠陥は検出されなかった。また，肉盛溶接部の機械的特性試験およびその他評価試験では，引張試験，シャルピー衝撃試験，硬さ試験，組織観察，Cr 量分析，応力腐食割れ（Stress Crack Corrosion：SCC）試験，腐食疲労試験を実施した。いずれも良好な結果が得られたが，その主な結果は**表１**および**図９**に示すとおりである。SCC 試験では，溶接部およびその境界部は，いずれも母材（ロータ材：１% CrMoNiV 鋼と翼材）の破断時間を上回っている。これは溶接表層部における不動態皮膜（Cr 酸化物）の変化により腐食モードが，応力集中を受けやすい局部腐食モードから受けにくい全面腐食モードに移行したことによるものと考えられる。

以上から，翼溝部への肉盛溶接が下盛材 5 % Cr 鋼，肉盛溶接材 12 % Cr 鋼，焼鈍温度 720 ℃の組合せにより，実機ロータへの補修が可能であることを確認した。

4　あとがき

本稿では，中容量蒸気タービンの高中低圧一体形タービンを製作するうえで欠かせない高中圧側ロータと低圧側ロータの異種材料を溶接する技術，および地熱タービンなどのような腐食環境下で経年腐食した場合のタービン翼溝部の補修を肉盛溶接で対応する技術について紹介した。

今後は，高中低圧一体形タービン，すなわち 1 ケーシング再熱・非再熱タービンへの適用，および地熱ロータ補修への適用を図っていく所存である。

放射光 X 線によるナノレベル結晶構造解析

特集

田沼　良平（たぬま　りょうへい）　　久保 登士和（くぼ　としかず）　　大沢　通夫（おおさわ　みちお）

1　まえがき

SPring-8（Super Photon ring-8GeV）は世界最高性能の放射光 X 線を発生することができる大型放射光施設で，材料科学，地球科学，生命科学，環境科学，医学などの広い分野への活用が期待されている。放射光 X 線はきわめて明るく指向性の強い光で，輝度は実験室の X 線装置の 10^8 倍に達する。またエネルギー（波長）を自由に変えられる（5 ～ 60 keV）ことも大きな特長である。富士電機を含む 13 社は SPring-8 に材料解析を目的とした産業用専用ビームラインを共同で建設し，1999 年 10 月から各社交代で利用している。富士電機は，SPring-8 の優れた放射光 X 線を利用した革新的な材料解析技術を世の中へ提案するとともに，富士電機製品の高性能化・高品質化，および新製品開発に活用している[(1)]。

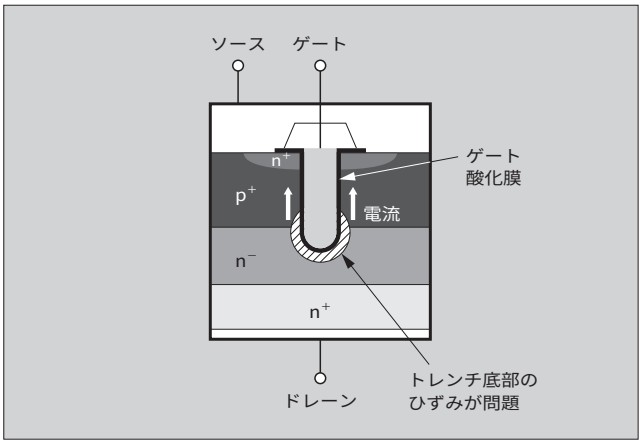
本稿では，半導体トレンチひずみ解析と磁気記録媒体磁性層の結晶構造解析の事例を紹介する。

2　フレネルゾーンプレート拡大法によるトレンチひずみ解析

携帯電話機やモバイル機器などのバッテリー駆動機器に広く用いられるパワー MOSFET には，一般にトレンチゲート構造（**図 1**）が採用されている。これはシリコン（Si）基板に幅 1 μm 以下の溝（トレンチ）を形成し，その内面にゲート酸化膜を形成するものであり，素子の微細化が可能でオン抵抗を低減できる構造として注目されている。しかしこの構造ではトレンチ周辺にひずみが残留するといった問題があり，このひずみがゲート酸化膜の絶縁耐圧低下などを引き起こす原因の一つと考えられている。

こうした問題を解決するためには，微細構造のひずみを正しく評価する方法が必要である。局所的なひずみを解析する方法としては，放射光 X 線のマイクロビームを用いる方法が一般的であるが，X 線ビームの径 D を絞ると発散角 θ が大きくなる性質（θD ＞波長，光の回折限界）により，要求される空間分解能（1 μm）とひずみ感度（10^{-5}）の両立は不可能であった。

図 1　トレンチ MOSFET の構造



富士電機は，X 線ビームの微細化とは逆に，回折 X 線像を拡大する独自の方法でこの限界を克服した。その一つは X 線特有の現象である非対称反射拡大を用いる方法[(2),(3)]であり，他の一つはレンズとして機能するフレネルゾーンプレート（FZP）を用いる方法[(4),(5)]である。このうち後者は利用可能なエネルギー範囲が広く，一つの FZP で二次元拡大が可能であるなどの利点がある。以下では，この FZP 方式の Si トレンチひずみ測定への適用例を紹介する。

2.1　FZP 光学系の設計

FZP 拡大法は FZP で試料面上の X 線像を拡大し，拡大像の一部を取り出すことにより特定の位置で回折される X 線のみをとらえて，高空間分解能 X 線回折を実現する。**図 2** に FZP 拡大法の光学系を示す。拡大像は検出器手前の可変スリット上に結像する。今回用いた回折計の試料から結像面までの距離 L は約 900 mm である。実験において拡大倍率 m を 15 ～ 20 倍と見込んで，焦点距離 f を 50 mm とした。

今回用いた FZP〔NTT アドバンステクノロジ(株)製〕の構造を**図 3** に示す。素子はいずれも厚さ 1 μm の窒化 Si 膜とタンタル（Ta）膜を重ねたもので，Ta 膜に同心円状

田沼　良平

レーザ，燃料電池，磁気記録媒体，放射光などの研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)材料技術研究所主任研究員。工学博士。応用物理学会会員。

久保 登士和

金属材料の腐食防食，X 線による結晶構造解析の研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)材料技術研究所。

大沢　通夫

薄膜材料・デバイスなどの解析・評価の研究に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)材料技術研究所主席研究員。応用物理学会会員，放射光学会会員。

図２　FZP 拡大法の光学系

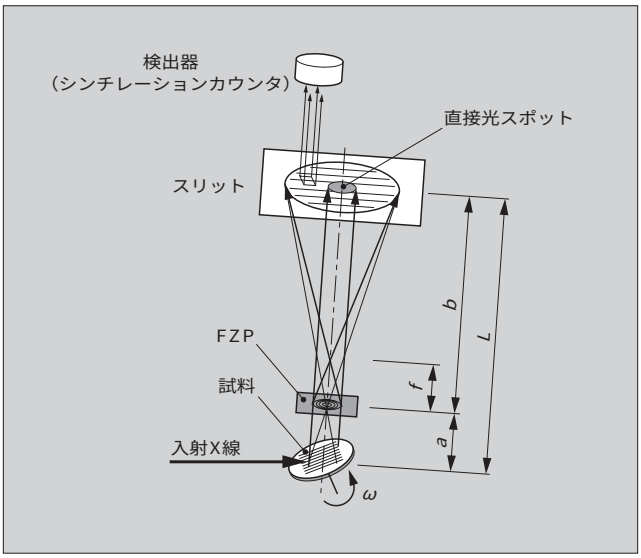
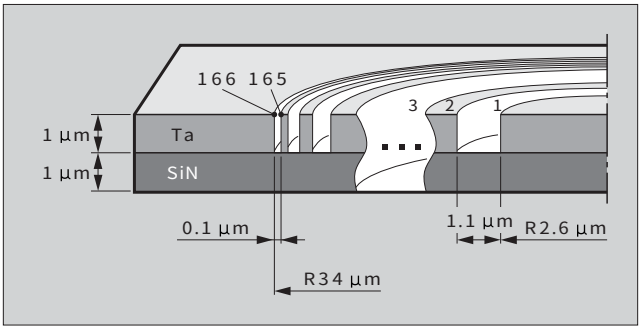


図３　FZP の構造



の欠落部を形成している。この FZP は Ta 層の有無で生じる位相のずれを利用しており，位相変調型と呼ばれる。X 線のエネルギー E は 9 keV（波長 λ は 0.138 nm）と設定しており，Ta 層の厚みから FZP の回折効率は約 15 % である。[6]

FZP パターンの n 番目の円の半径は，

$$r_n = \sqrt{nf\lambda} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$n = 1, 2, \cdots, N$$

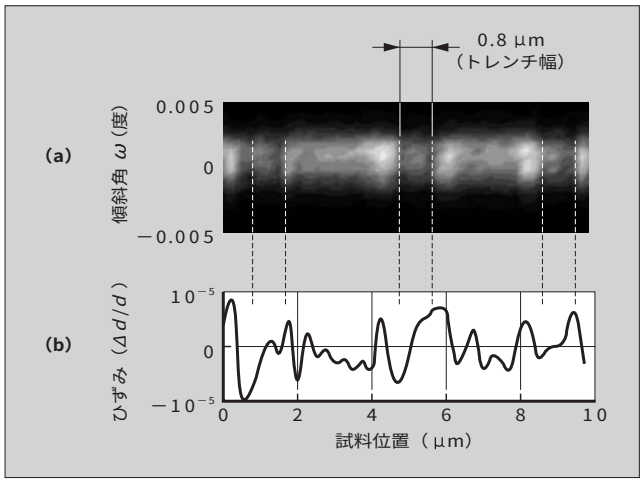
で表される。[7] 現在，製作可能な最小輪帯幅 Δr_N（$= r_N - r_{N-1}$）は 0.1 μm であるため，式(1)から総輪帯数 N は 166 となる。この FZP の空間分解能 δ は，$\delta = 1.22\ \Delta r_N$ の関係から[7]，0.12 nm となる。

以上の拡大光学系により，**図２**のスリット上には試料上の X 線像が約 16 倍に拡大投影される。中央部には FZP で回折されない直接光も投影されるため，スリットの開口（約 5 μm 角）を中心からずらした位置にセットしている。拡大像の目的部分をこのスリットで抽出すると，空間分解能 5 μm/16　0.3 μm の X 線回折測定が可能となる。

2.2　実験方法

実験は産業用専用ビームライン（BL16XU）内の回折装置に上記の光学系を設置して実施した。このビームラインでは Si（111）2 結晶分光器を通った X 線が実験ハッチに導かれる。本実験での X 線のエネルギーは 8.8 keV，拡大倍率は約 17 倍である。この拡大像の目的部分の X 線をスリット（約 5 μm 角）で抽出し，その強度をシンチレーションカウンタで測定した。試料は Si（100）ウェーハに幅 0.8 μm，深さ 3 μm，加工周期 4 μm のトレンチ加工を施したものである。トレンチ側面は{100}面であり，入射 X 線の方向はトレンチ側面に対して平行とした。

図４　FZP 拡大法によるトレンチ加工 Si ウェーハのひずみ解析



2.3　実験結果

今回の実験では，試料を入射 X 線に対して直角方向に移動（ステップ幅 0.25 μm）しながら，各ステップでロッキングカーブ（視射角 ω に対する回折強度変化）を測定した。**図 4**(a)はこの結果を等高線表示したものである。図に示したように，強度の小さい部分が幅 0.8 μm のトレンチに対応している。この結果はトレンチ側壁近傍の回折光強度が高いことを示している。これはひずみによる結晶格子の乱れによって回折条件を満たすエネルギーの幅が広がり，より広いエネルギー範囲の入射 X 線が回折されたためと考えられる。ロッキングカーブ〔**図 4**(a)〕のピーク位置の変動 $\Delta\omega$ を $\Delta d/d = -\Delta\omega/\tan\theta_B$ により格子面間隔の変化に換算した結果を**図 4**(b)に示す。式中の θ_B はブラッグ角である。この結果はトレンチ構造により 10^{-5} 以下の周期的なひずみの存在を示している。また同様の測定により，トレンチ加工後のひずみ除去工程において，実際にひずみが低減していることを確認した。

以上の結果，FZP 拡大法によりトレンチ構造に対応した 10^{-5} 以下のひずみの変化を 1 μm 以下の空間分解能で評価できることが分かった。前述のように，この性能は光の回折限界の制約を受けるマイクロビーム法では不可能な領域であり，回折像を拡大する新しい方法により初めて可能となった。

3　ハードディスク用磁気記録媒体の結晶構造解析

ハードディスク（HD）はこれまでのパソコンへの用途のほかに，AV（Audio Visual）機器などへも用途を拡大

特集

しつつあり，記録密度のさらなる向上を目指して活発に研究開発が進められている。記録媒体としては Co 系の薄い（10 ～ 20 nm）多結晶薄膜を用いており，ナノメートルレベルの薄膜の結晶制御（配向性・結晶性，微細化，均一化）が記録密度向上の鍵を握っている。ところが最近では，1 nm 以下の薄膜まで使われるようになり，透過型電子顕微鏡などの従来法では，磁気記録媒体の結晶構造解析が難しい状況となっている。

富士電機は，このような磁気記録媒体の結晶評価を SPring-8 における微小角入射 X 線回折法により可能とした。この方法では X 線ビームを試料面に対し全反射臨界角以下の微小な角度（視射角）で入射させ，試料から出てくる回折 X 線を選択的に検出する。このような微小視射角では，試料に対する X 線の侵入深さが数 nm 程度であり，厚さ 1 nm 以下の極薄膜の評価が可能となる。以下では，反強磁性結合媒体の極薄層の結晶構造，および垂直磁気記録媒体磁性層中の面心立方構造（fcc）相の解析結果を述べ，微小角入射 X 線回折法が磁気記録媒体の評価に有効な手法であることを示す。

3.1　反強磁性結合媒体の薄い Ru 層の X 線面内回折

HD 媒体の記録密度はすでに 60 G ビット /in^2 に達し，120 G ビット /in^2 が可能になりつつある。記録ビットがこのように小さくなるに従って顕在化してきた問題は，記録した磁気情報が熱の影響で消去する現象（熱揺らぎ現象）である。この問題を解決するため，二つの磁性層の間に薄い Ru 層を入れて反強磁性結合（AFC）により磁気情報を安定化する方法が提案されている[8]。この Ru 層の厚さは約 0.8 nm（約 6 原子層）と非常に薄いため，微小角入射 X 線面内回折法の適用を試みた[9),(10]。

図 5 に示すように X 線ビームを全反射臨界角以下の微小な角度で HD 媒体に入射させるとともに，試料から微小な角度で出てくる回折線を測定した。この回折線は試料表面に垂直な結晶面からのものであり，円周方向と半径方向について測定することによって結晶の配向性が評価できる。測定は SPring-8 の産業用専用ビームライン（BL16XU）を用い，X 線のエネルギーは 10 keV（波長 0.124 nm），入射角は 0.2 °（反射率 90 %以上）とした。

AFC 媒体は DC スパッタ法で成膜され，基板，Cr 系下地層，CoCr ボトム磁性層，Ru スペーサ層，CoCrPt トップ磁性層，a-C 保護層で構成される。各層の結晶構造を調べるために，測定する層まで形成した試料を準備した。

図 6(a)と(b)は AFC 媒体の各層に対する面内回折の 2θ スキャンのプロファイルを示す。Ru 層（0.8 nm）の回折プロファイルは，ボトム磁性層から回折された六方最密構造（hcp）の（002），（101） および（102）格子面からの回折ピークを含んではいるが，Ru 層から回折された hcp-（100），（002），（101），および（102）格子面からの回折ピークが明瞭（めいりょう）に観測されている。このように AFC 媒体の 0.8 nm の Ru 層の結晶構造が評価できたことから，この手法が極薄膜の結晶構造解析法として有効であることが明らかとなった。

図 6 の(a)と(b)を比較すると，下地層は体心立方構造（bcc）をとっているが，円周方向の（110）回折角が半径方向より大きく，結晶格子が円周方向に圧縮されていることが分かる。また上下の磁性層と Ru 層については，円周方向の hcp（002）ピークが明瞭である〔**図 6**(a)〕のに対し，半径方向ではわずかに観測されるのみである〔**図 6**(b)〕ことから，hcp 構造の c 軸（[001] 方向）が円周方向へ配向していることが分かる。これは各層の結晶粒が下の層の影響を受けてエピタキシャル的に成長することを示している。ひずんだ bcc 下地層の影響でボトム磁性層の c 軸が配向し，さらに Ru 層やトップ磁性層へと受け継がれている。これらは Ru 層が反強磁性結合のための非磁性ス

図５　微小角入射 X 線面内回折法の説明図

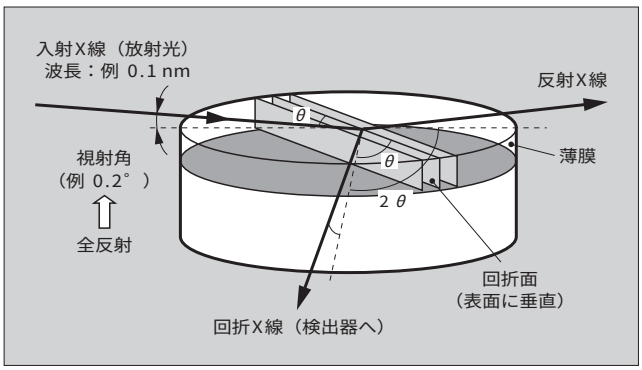
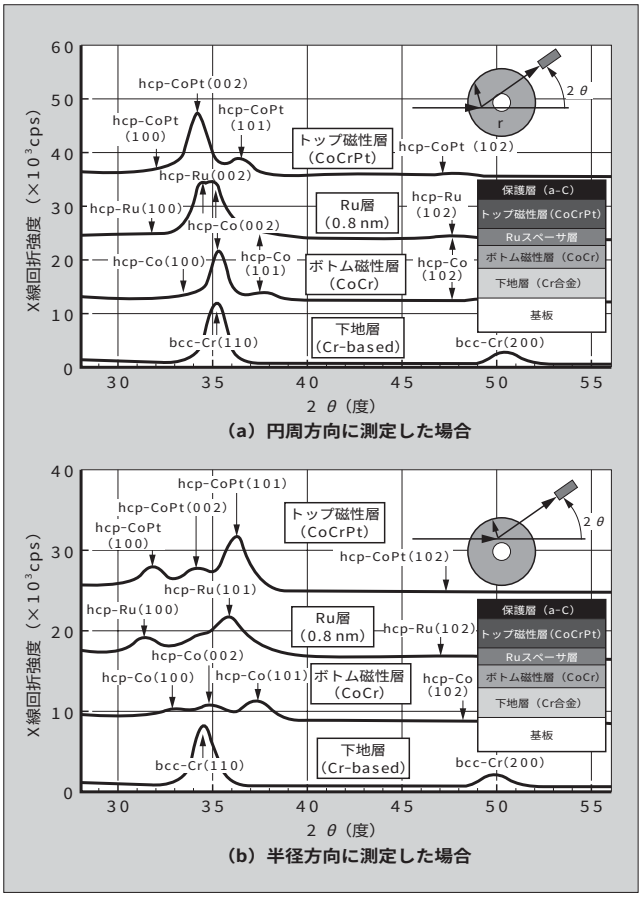


図６　反強磁性結合媒体の面内回折パターン



ペーサの役割だけでなく，トップ磁性層のための結晶制御層としての役割も担っていることを示している。

3.2　垂直磁気記録媒体磁性層中の fcc 相の検出

磁気記録媒体の記録密度をさらに上げるために，円周方向に磁化する長手磁気記録に代わって，媒体表面に垂直な方向に磁化する垂直磁気記録方式への期待が高まっている。富士電機はグラニュラ磁性層を採用した垂直磁気記録媒体により 150 G ビット/in^2 を達成し，さらなる改良を進めている[11]。磁性層である hcp-Co 合金の中には fcc 相が含まれ，これが磁気異方性の劣化やノイズ発生の要因の一つと考えられている。垂直磁気記録媒体の磁性層は hcp-Co 合金の c 軸（磁気容易軸）が垂直に配向しているため，通常の面内回折では fcc の回折ピークが hcp と重なり，これまで fcc 相を評価することができなかった。このため，結晶学的に hcp と重ならない試料表面に対して傾いた格子面を観測することで，ナノメートルレベルの薄い膜の fcc 相を検出するという新規な手法を開発した[10]。

図 7 に示すように X 線ビームを全反射臨界角以下の微小な角度で入射させるとともに，4 軸回折計を用いて試料を適当な角度 χ だけ傾け，回折線を測定する。その他の測定条件は前記の面内回折と同様である。試料としては CoCrPt と SiO_2 からなるグラニュラ磁性層を 20 nm 形成した垂直磁気記録媒体を用いた。

異なる χ に対する 2θ スキャンのプロファイルを**図 8** に示す。面内回折条件（χ ＝ 90 °）では hcp（110）と fcc（220）のピークが重なるため fcc 相を分離できないが，χ ＝ 52 °では fcc（200）のみの回折ピークが検出でき，垂直磁気記録媒体の磁性層中に fcc 相が存在することを初めて確認した。また，fcc（200）ピークと hcp（100）ピーク，あるいは hcp（101）ピークとの強度比から fcc 相の相対的な量が分かり，Pt の組成を増やすと fcc 相が増える傾向なども観測された。

図 7　4 軸回折計を用いた微小角入射 X 線回折法の説明図

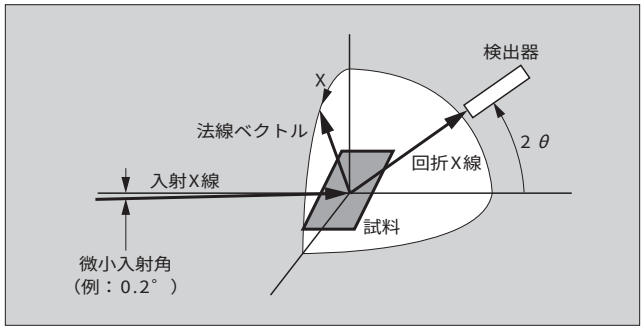
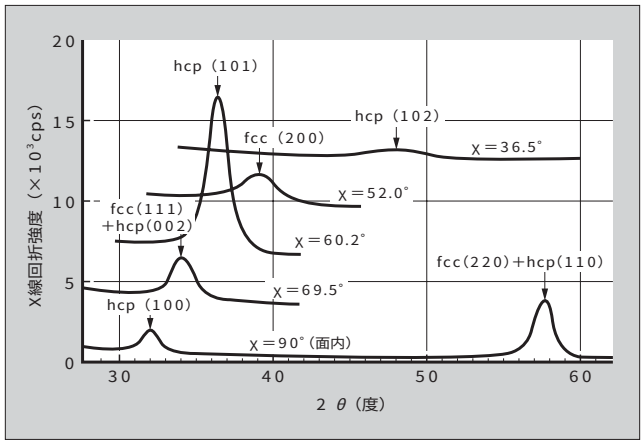


図 8　垂直磁気記録媒体の磁性層の微小角入射 X 線回折パターン



4　あとがき

SPring-8 の強力な X 線の利用として，Si のトレンチ加工に伴う微小領域のひずみの評価および磁気記録媒体の極薄層の結晶構造解析について報告した。今後はこれらの分析手法をデバイス開発や媒体開発に適用し，開発の促進を図る。SPring-8 を有効に活用し，材料解析を通して富士電機の事業に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　大沢通夫，田沼良平．放射光（SPring-8）利用による磁気記録媒体などの解析．富士時報．vol.75, no.9, 2002, p.501-504.
(2)　田沼良平，大沢通夫．非対称反射拡大による高空間分解能 X 線トポグラフィー．第 63 回応用物理学会学術講演会．2002, 24p-T-6.
(3)　Tanuma, R. ; Ohsawa, M. Submicron-Resolved X-ray Topography using Asymmetric-Reflection Magnifier. 17th International Congress on X-ray Optics and Microanalysis. Program and Abstracts. 2003, p.103.
(4)　田沼良平，大沢通夫．フレネルゾーンプレート拡大結像による高空間分解能 X 線トポグラフィー．第 63 回応用物理学会学術講演会．2002, 24p-T-7.
(5)　田沼良平ほか．フレネルゾーンプレート拡大結像による高空間分解能 X 線回折．第 64 回応用物理学会学術講演会．2003, 30a-ZK-3.
(6)　Lai, B. et al. Hard x-ray phase zone plate fabricated by lithographic techniques. Appl. Phys. Lett. vol.61, no.16, 1992, p.1877-1879.
(7)　波岡武，山下広順．X 線結像光学．培風館．1999.
(8)　Abrra, E. N. et al. Longitudinal magnetic recording media with thermal stabilization layers. J. Appl. Phys. Let. vol.77, 2000, p.2581-2583.
(9)　Ohsawa, M. et al. In-Plane Diffraction of Antiferromagnetically Coupled Magnetic Recording Media. SPring-8 User Experiment Report. no.11, 2003A, p.301.
(10)　Ohsawa, M. et al. Grazing Incidence X-ray Diffraction of Longitudinal and Perpendicular Magnetic Recording Media for HDD. Proceeding of the 3rd SUNBEAM Workshop. 2003, p.49-53.
(11)　大月章弘．21 世紀の外部メモリを担う磁気記録媒体．富士時報．vol.76, no.7, 2003, p.415-420.

エッチングプロセスのシミュレーション技術

特集

金子　公寿（かねこ　きみひさ）

1　まえがき

半導体のプロセスでは，微細な回路を加工するため，エッチング技術が用いられる。このエッチング技術は，ドライエッチングとウエットエッチングに大別できる。ドライエッチングとは，プラズマ励起された雰囲気中にウェーハをおき，活性ガスによって物理的および化学的にエッチングする方法である。ウエットエッチングとは，溶液中で化学反応によってエッチングする方法である。二つの方法は，コストや回路パターン寸法などによって使い分けされる。

回路の作成には，成膜とエッチングを繰り返し行い，多層の配線膜を形成する。エッチングされた配線膜の断面形状によっては，次の成膜時に影響を及ぼし，ヒートサイクルおよびパワーサイクル時に配線膜に多大な応力が作用することがある。この応力により配線膜にクラックが入り，回路が正常に動作しないことがあるため，高品質・高寿命の半導体素子製造技術を確立するうえで，この断面形状の生成メカニズムおよび製造条件の違いによる形状の予測をすることが重要である。

エッチング形状生成のシミュレーションについては，化学反応による拡散現象支配下での形状生成について検討が行われている[(1)]。しかし，溶液の流れによって濃度が変わり，形状が変化することは考慮できない。この現象は，流れおよび拡散による溶液濃度によってエッチング形状が変化し，形状変化によって流れおよび濃度も変化するため，現象が非常に複雑である。

本稿では，エッチング形状変化と流れの連成が可能な解析手法を用い，この解析手法の検証として拡散のみを考慮した静止溶液中でのエッチングについて検討したので紹介する。

2　解析評価方法

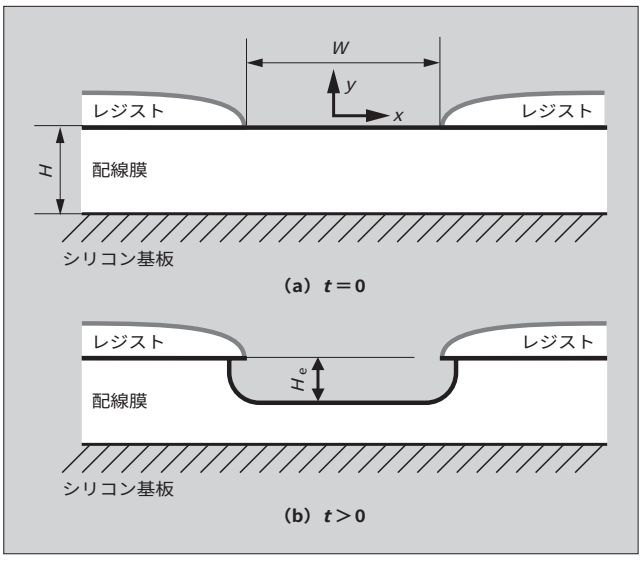
一般的に，ウエットエッチングは，回転するウェーハ上にエッチング液を供給するものと，複数枚のウェーハを一度にエッチング液中に入れる方法がある。いずれのプロセスでも溶液との化学反応により配線膜がエッチングされる。このプロセスでは，エッチングの進行とともに配線膜の断面形状が変化するため，エッチング液の流動，エッチング液と配線膜との化学反応によるエッチング速度およびエッチング液中の反応物質の拡散が考えられる。

2.1　数値解析方法[(2)]

数値解析では，ウエットエッチングで生じている現象について以下の方程式を考慮して数値解析をしている。エッチング溶液流れの計算では，流れの基礎方程式（連続の式 Navier-Stokes 方程式），反応物質拡散の計算では，拡散方程式を用いている。エッチングの進行による配線膜表面の移動は，ALE 法[(3)]を用いている。以上の式をもとに有限要素法による二次元数値解析をしている。

解析対象とした形状は，**図1**(a)に示すように，エッチング開始前の初期状態（時間 $t = 0$）では，シリコン基板上に厚さ H で成膜された配線膜，その上部に幅 W を空けたレジストがある。ここで，W は数十 μm 以下を対象とし

図1　エッチングの概略形状



金子　公寿

生産技術に関する CAE 技術開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)生産技術研究所。可視化情報学会会員，エレクトロニクス実装学会会員。

ている。時間の経過とともに，**図1**(b)に示すように時間 t 後には，深さ H_e で配線膜がエッチングされる。

初期状態（$t = 0$）における解析領域と要素分割を**図2**(a)に示す。配線膜の表面近傍には，**図2**(b)に示すように深さ h のエッチングをあらかじめ仮定し，要素分割してある。これはエッチングされる配線膜の領域をこれらの要素で分割するためである。速度は初期状態および固体表面でゼロとする。濃度の境界条件は，以下のとおりである。領域上部〔**図2**(a)中の境界 B_1〕では一様な濃度 C_0 を与える。レジスト表面（境界 B_2）とシリコン基板表面（境界 B_4）ではフラックスがないものとする。したがって，配線膜表面（境界 B_3）では，配線膜とエッチング液との化学反応によって，配線膜表面が溶けて形状が変化する。反応によってエッチング溶液の濃度が低下し，濃度低下量はフラックスの大きさとして与え，アルミニウム（Al）表面で濃度に比例するものと仮定する。エッチングは配線膜表面の法線方向に進むものとし，解析時間刻みごとのエッチング量は濃度に比例するものと仮定する。

2.2　評価方法

数値解析手法の妥当性を評価するため，**表1**に示す条件で実験を行い，形状評価を行った。一定温度に保たれた静止したエッチング液中に試料を入れ，エッチングを実施した。本来の製造条件では，エッチング液はウェーハ上を流れている。しかし，流れの影響と反応による拡散の影響が複雑に影響してしまい，現象を把握するのが困難になる。そこで，拡散現象が支配的になる，流れ場がない**表1**の条件下で実験を行った。試料のレジスト幅 W は3種類とした。所定の時間が経過した試料を溶液から取り出し洗浄と乾燥を行った。エッチング形状の評価には，レジストとエッチングした形状との相対関係を知ることが必要なため，レジストを残した状態での観察が必要である。観察用試料は，集束イオンビーム加工装置（FIB：Focused Ion Beam）で断面を作成し，断面観察には二次イオン像（分解能 7 nm）を用いた。FIB 加工時のレジスト保護膜には，加工時間を短縮するため，低粘度の光硬化樹脂を試料表面に薄く塗布した。

図2　解析領域

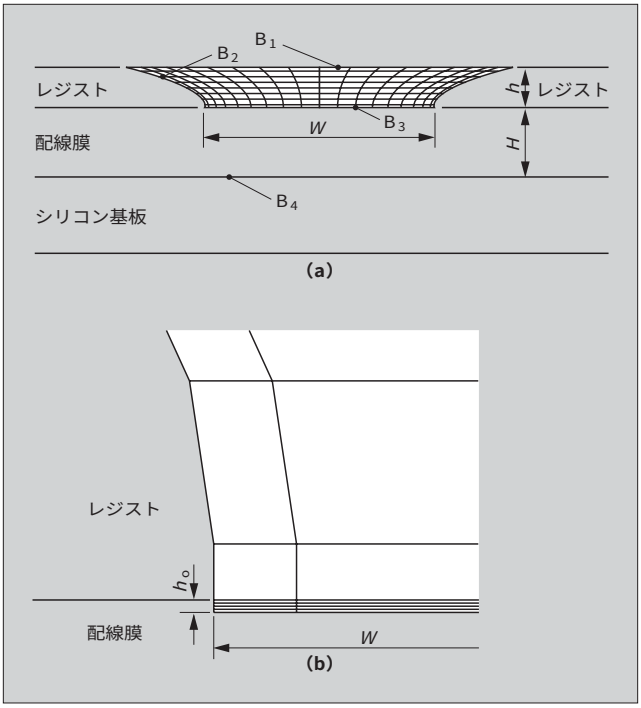


表1　実験条件

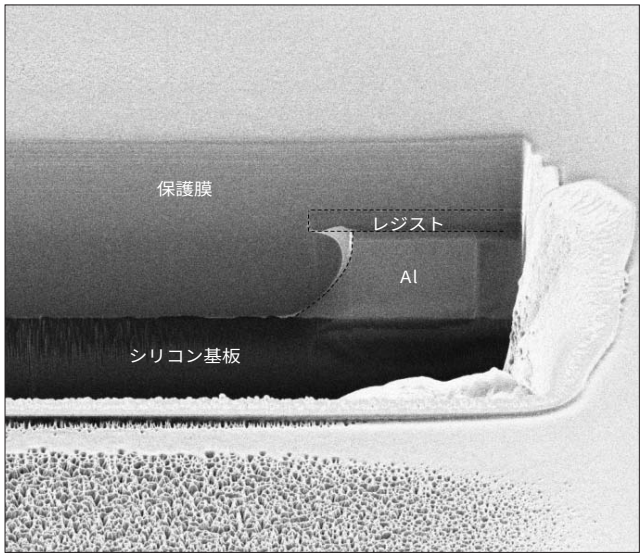
配線膜材質	アルミニウム（Al）
エッチング液	りん酸・硝酸・酢酸混合液
エッチング液温度	333 K
エッチング時間	1〜5分
レジスト幅 W	3種類（$W_2 < W_1 < W_3$）

3　エッチング断面の観察結果と考察

レジスト幅 W_1 のエッチング断面の撮影結果を**図3**に示す。**図3**は，エッチング開始時から5分後の結果である。シリコン基板，配線膜（Al膜），レジストおよびコーティング樹脂が明瞭（めいりょう）に観察できる。Al膜はシリコン基板表面までエッチングされ，レジスト端部下面では横方向にもエッチングが進んでいることが分かる。この結果から，各時間での Al 膜の形状を画像処理によって測定し，形状を評価した。

図4は，レジスト幅 W_1 での試料をエッチング開始1分後から5分後までエッチングさせ，そのときの Al 膜形状の時間変化を示す。実線が計算結果であり，記号が実験結果である。ただし，レジスト幅方向（x）および Al 膜厚さ方向（y）の座標値をレジスト幅 W と Al 膜の厚さ H で無次元化してある。x 軸の値が±0.5のとき，エッチングされる Al 膜の幅は，レジスト幅と同じであり，x 軸値が

図3　断面観察結果（レジスト幅 $W = W_1$）



0.5 よりも大きく，または−0.5 よりも小さくなると，Al 膜はレジスト端部下面で x 方向にエッチングが進み，エッチングされる Al 膜の幅は，レジスト幅よりも大きくなる。図中で，エッチングは x 方向および y 方向に進むが，y 方向へのエッチング量の方が大きい。いずれの時間においても，Al 膜底面はほとんど平坦（へいたん）であり，その幅はレジスト幅 W にほぼ等しい。Al 膜が溶け底面の位置が移動した量，すなわちエッチング量 H_e が実験よりもやや少ない。しかし，平坦な底面と x 方向へのエッチング量は，正確に求められている。

エッチング開始から 1，3，5 分が経過したときの，レジスト幅 W_1 の試料におけるエッチング液濃度と Al 膜の断面形状の数値解析結果を**図 5** に示す。濃度分布は，初期エッチング液濃度 C_0 と，反応による濃度 C との比で表示している。時間の経過とともに Al 膜がエッチングされ，レジスト端部下面で x 方向にもエッチングが進行していることがよく分かる。濃度は，1 分後にはほぼ一様に分布し，その後，時間が経過すると Al 膜表面近傍で低下する。

エッチングされた Al 膜の厚さ H_e を**図 4** から求め，その時間変化を示すと**図 6** のようになる。時間の経過とともに H_e は増加するが，増加割合は低下していることが分かる。これは，反応の進行に伴い，反応物質の濃度が低下して反応速度が減じることと，反応によるガス発生によって反応面積を減少したことが考えられる。ガス発生については，エッチング液中の硝酸と Al が式(1)に示す反応によって水素ガスが発生することが分かっている[4]。また，エッチング中の状態を観察したところ微小な気泡が発生していることも確認している。より厳密なシミュレーションが必要な場合には，水素ガス発生の影響も考慮した数値モデル化が必要である。

$$2Al + 6HNO_3 \rightarrow 2Al(NO_3)_3 + 3H_2 \quad \cdots\cdots (1)$$

図 7 は，レジスト幅 W_2 および W_3 の試料のエッチング形状を示す。**図 7** は，レジスト幅を変えた場合のエッチング開始から 5 分後の結果である。**図 4** と同様に x 方向および y 方向で無次元化してある。したがって，レジスト幅が

図4　エッチング形状の計算結果と実験結果の比較
（レジスト幅 $W = W_1$）

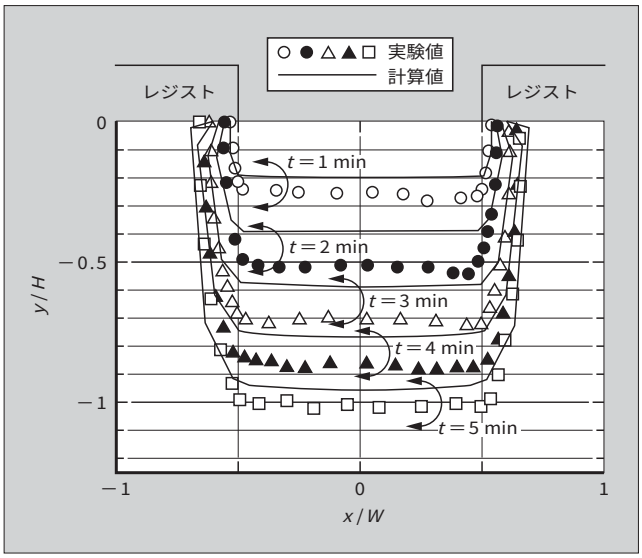


図5　エッチング液の濃度および形状（レジスト幅 $W = W_1$）

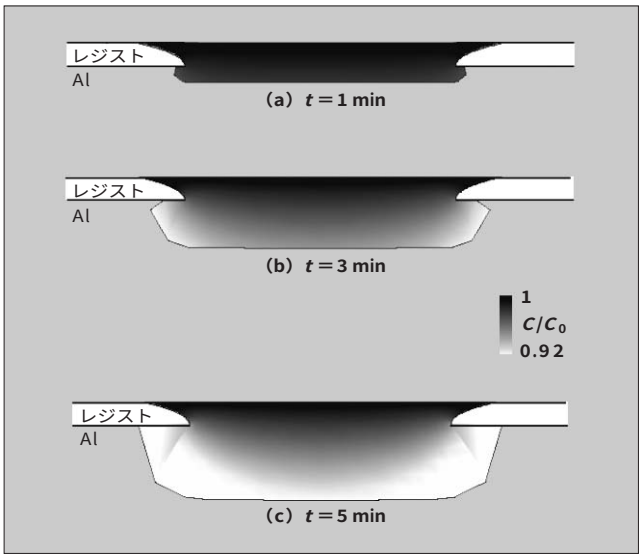


図6　時間ごとのエッチング量（レジスト幅 $W = W_1$）

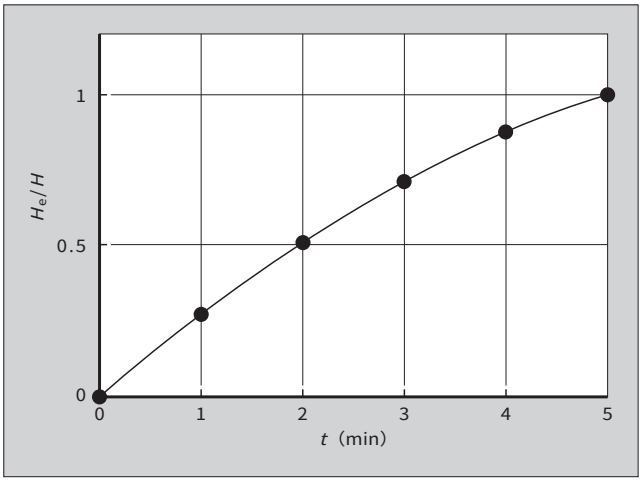
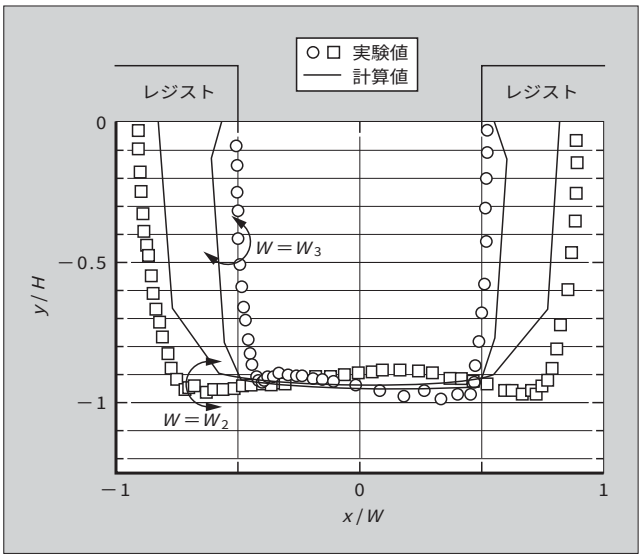


図7　レジスト幅とエッチング形状（レジスト幅 $W = W_2$，W_3）



異なっていても，x 軸値±0.5 は，レジスト幅と同じエッチングされる Al 膜の幅である。この結果から，レジスト幅の狭い W_2 は，広い W_3 よりも x 方向のエッチングが進みやすいことが分かる。レジスト幅が狭いと，エッチングする Al 膜の体積も少ないため，厚さ方向のエッチングが早く終了する。その結果，同じエッチング時間（5 分）の場合，エッチングは，Al 膜の x 方向へ進むためである。実験結果と解析結果はよく一致している。

4　あとがき

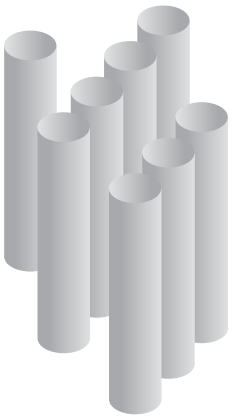
エッチングプロセスのシミュレーション技術として，今回，ウエットエッチングプロセスにおけるシミュレーション技術について紹介した。今回，拡散場支配の条件で解析を行ったが，次のステップとしてより製造プロセスに近い流れ場の影響を考慮した条件での解析評価を進めている。

半導体プロセスの場合は，非常にミクロな現象であるため，実際のプロセス中の現象を評価することは，現時点で困難である。そのため，数値解析によって，現象を把握することが最も有効な手段である。また，ウェーハ内ばらつきを評価する場合は，マクロ的視野からの解析も併用させながら進めていく必要もある。これによって，過去の経験や勘に依存したものづくりから，数値解析を利用して現象を把握し，より最適なものづくりへ発展させ，顧客の満足する機能，品質，コストを満足した製品開発を支援する所存である。

本研究は，名古屋大学情報メディア教育センター内山助教授との共同による成果であり，始終懇切にご指導いただき謝意を表す次第である。

参考文献

(1) Fujinaga, M. et al. Technical digest of IEDM’88, 1988, p.332.
(2) Kaneko, K. et al. Observation and Numerical Simulation for Wet Chemical Etching Process of Semiconductor. Proc. 4th ASME/JSME Joint Fluids Eng. Conf. FEDSM 2003-45707, 2003.
(3) Donea, J. et al. An arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions. Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg. vol.33, 1982, p.689-723.
(4) 中村洋．分析試料前処理ハンドブック，丸善，2003.



零相変流器における三次元非線形動的電磁界解析

特集

松本　廣太（まつもと　こうた）　　工藤　高裕（くどう　たかひろ）　　浅野　久伸（あさの　ひさのぶ）

1　まえがき

漏電遮断器は低圧電路の地絡・過電流保護の主要機器として大いに発展・普及しており，近年，省施工性や省スペース化などの要求に対して，小型化・外形寸法の標準化など柔軟な対応を図ってきた。零相変流器（ZCT）は漏電検出部の主要部品であり，一次側導体に地絡による漏れ電流が発生した場合に誘起電流が発生し，二次側コイルで検出する。電磁界解析については有限要素法や並列計算技術[(1)〜(3)]などの各種手法により三次元解析，大規模解析への対応が図られて，コンピュータの高性能化と相まって実用的な解析が可能となってきている[(4)]。

三次元非線形動的電磁界解析により誘導電流を求め実機に適用した例はあまりないが[(5)]，今回漏電遮断器の主要部品の ZCT に適用して実用的な結果を得た。解析法は，空間のメッシュ分割が不要で要素分割も比較的粗くてよいという特徴がある積分要素法を用いた。ZCT の三次元非線形動的電磁界解析の適用例を，解析モデルと実機データとの比較検証を中心として紹介する。

2　零相変流器

図1に ZCT の外観を示す。ZCT は，微小な地絡電流を検出し，漏電遮断器を動作させる重要な働きをする。

漏電遮断器に電動機が接続された場合，過渡突入電流により，ZCT の二次側に電圧が生じ，あたかも地絡が発生したときと同じ現象が発生する。過渡突入電流において ZCT の二次側に電圧を生じさせない性能は平衡特性と呼ばれる。ZCT は，この平衡特性を定格電流の 10 倍以上保つこと，微小な地絡電流を正確に検出することが要求される。

ZCT の構造は，鉄心に透磁率の高いパーマロイを用いて微小電流の検知を可能にし，30 〜 500 mA までの定格感度電流に対して正確に検出する。また，過渡突入電流により，ZCT の二次側に電圧を生じさせるのを防ぐために鉄心をシールド板とシールドケースで囲んでいる。**図2**に ZCT の構造を示す。

図1　ZCT の外観

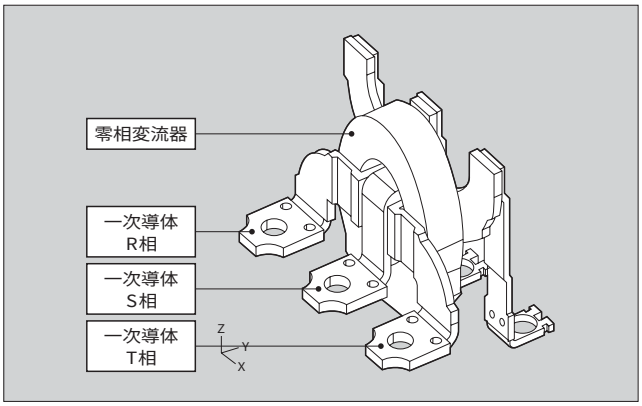
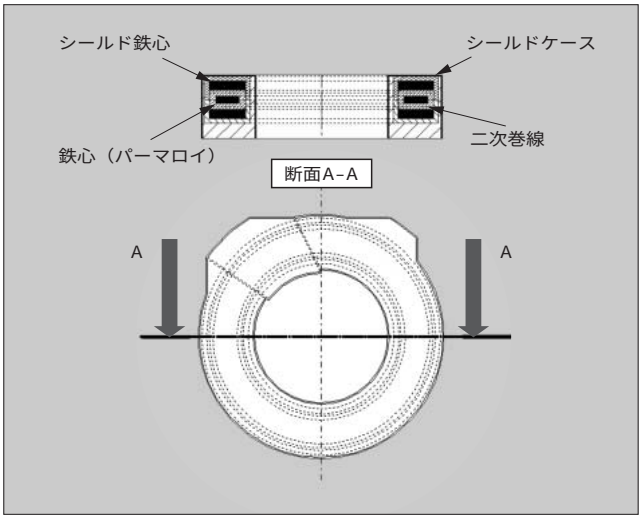


図2　ZCT の構造



3　三次元非線形動的電磁界解析

近年，電磁界解析においては有限要素法（FEM[(6)]），境界要素法（BEM），モーメント法，時間領域差分法（FDTD）などの解析手法が適用され，コンピュータの高速化や並列

松本　廣太

技術計算支援業務および技術計算運用管理業務に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)機器技術研究所。日本機械学会会員。

工藤　高裕

低圧遮断器などの開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)機器技術研究所副主任研究員。電気学会会員，日本応用磁気学会会員。

浅野　久伸

低圧遮断器の開発設計に従事。現在，富士電機機器制御(株)器具事業部技術開発・生産センター開発部。

計算により，高精度化，大規模化，高速化が図られている。電磁界解析においては空間も解析範囲に含む解析手法があるが，この場合，空間もメッシュ分割が必要になる。解析対象が複雑な場合，解析全体に占めるメッシュ分割の負荷は現在もなお大きい。空間のメッシュ分割を必要としない解析手法の一つとして積分要素法がある。また，積分要素法の場合は，有限要素法などに比較して一般的には要素分割を細かくする必要がないという特徴もある。今回，精度的な面も考慮し，さまざまな形状に柔軟に対応するため積分要素法による電磁界解析汎用プログラム ELF/MAGIC〈注〉を適用した。積分要素法は積分方程式法をベースとし各種の手法（磁気モーメント法，表面磁荷法など）をハイブリッドした解析手法である。

4　解析結果と検証

3 極の ZCT を用いて，通電の有無による地絡特性，平衡特性について検証を行った。**図 3**(a)に 3 極品全体のメッシュモデルを，**図 3**(b)に ZCT のメッシュモデルをそれぞれ示す。

4.1　通電時の地絡特性解析

ZCT の負荷側に地絡事故が生じた場合，地絡電流に比例した磁束が ZCT の鉄心に発生し，その磁束により二次巻線に電流が誘導され，これにより地絡を検出する。本解析にて二次巻線に誘導される起電力値の検証を行った。

解析条件は，R－T 相に 50 Hz，225 A を通電し，地絡電流は R 相に 30 mA を流している。

図 4 に地絡の有無による鉄心の磁束密度の比較を示す。

〈注〉ELF/MAGIC：(株)エルフの登録商標

図 3　メッシュモデル

地絡がない場合（上図）は，すべての位相において，磁束密度が小さく（0.01 T），ほぼ一様であるのに対して，地絡のある場合（下図）は，地絡相の近傍に磁束が発生しているのが分かる。**図 5** に一次側電流 225 A で地絡電流 30 mA における二次側誘導電流波形について実測値と解析結果を示す。解析値と実測値との最大誤差は 3 %以内に収まっている。

4.2　無通電時の地絡特性解析

無通電時も地絡電流に比例した磁束が鉄心に発生するので，早期に鉄心が飽和する。飽和が進んで比透磁率が低下すると最終的には空心状態（比透磁率が 1）となる。本解析により鉄心の飽和特性を検証した。

一次側電流値が低い場合は ZCT の二次側電流値は正弦波となっているが，高い場合は正弦波形がひずむ。ZCT

図 4　鉄心内の磁束密度分布

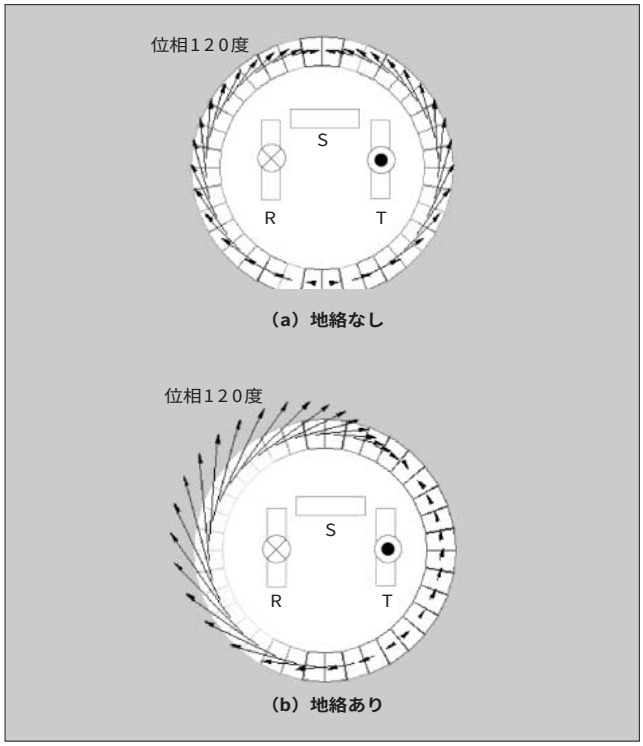
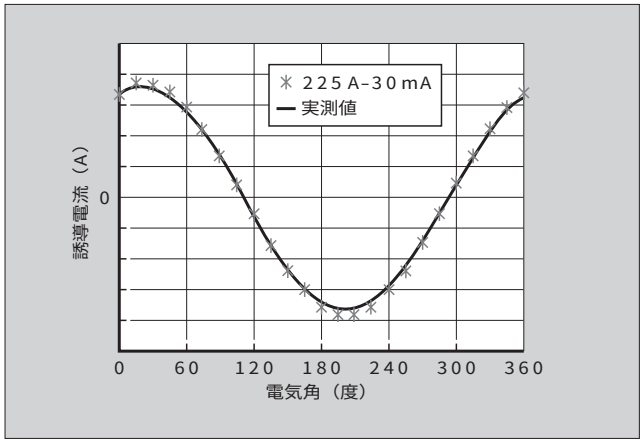


図 5　30 mA 地絡時の誘導電流波形



特集

の負荷抵抗が大きくなると正弦波形がひずむ電流値が小さくなってくる。正弦波形をなしている一次側電流値の範囲は実測と一致している。

図6に，ZCT の一次側電流に対する ZCT の二次側出力の関係を示す。ZCT の二次側出力は二次側電圧があるしきい値を超えた時間で表している。一次側電流が一定値を超えると鉄心の磁気飽和が発生し，比透磁率の低下に合わせて二次側出力も低下する。鉄心の比透磁率が 1，すなわち二次コイルが空心状態になったところで最も出力が低下し，その後，一次側電流の増加とともに二次側出力が増加する。**図6**における実測値と解析値の最大誤差は 10 %以下である。**図7**，**図8**に 1 A と 10 A における二次側電圧波形の実測値と解析値を示す。一次側電流が 10 A ともなると鉄心の飽和により正弦波形がひずんでいる部分で，ピーク値の解析値と実測値の誤差が大きいが，ピーク値の近傍の解析時間刻みを細かくすることで誤差は小さくすることができる。

図6　*I*－*V* 特性

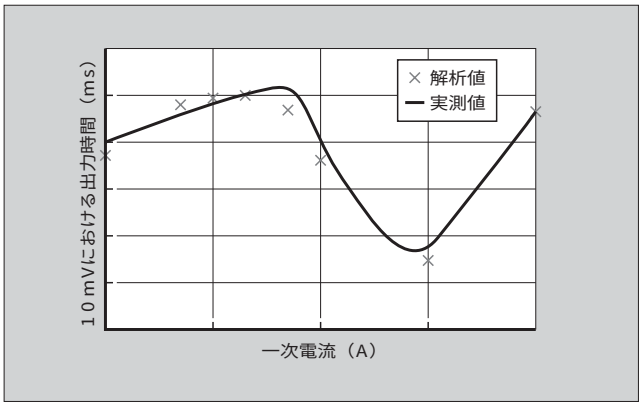


図7　1 A 通電時の出力波形

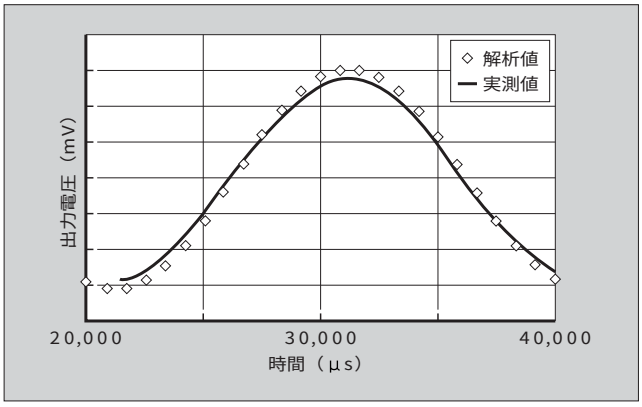
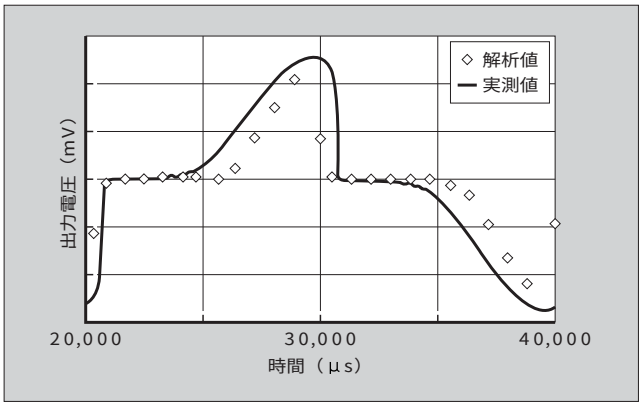


図8　10 A 通電時の出力波形



4.3　平衡特性解析

一次電流が平衡している場合，各電流により発生した磁束を鉄心と二次巻線で周回積分することにより，二次側への誘導起電力を零にしているが，ZCT を本体に組み込む場合，収納スペースの制約から ZCT と貫通導体が密接しており，導体からの磁束の回込みによる影響を受けやすい。一次電流の増加に伴い，回込み磁束が増加し，鉄心やシールドが飽和することにより，磁束のアンバランスによる誘導起電力が ZCT の二次側に出力されると考えられる。本解析により，鉄心，シールドの飽和特性の検証を行った。

図9に，一次側の R－S 相に 450 A，1,800 A，3,111 A の平衡電流を通電した場合の図中の矢印の方向から鉄心を見た鉄心の磁束密度分布を示す。**図9**から，一次電流の増加により導体近傍の鉄心の磁束密度が高くなっていることが確認できる。この磁束密度が高い状態では鉄心は飽和して

図9　鉄心の磁束密度分布

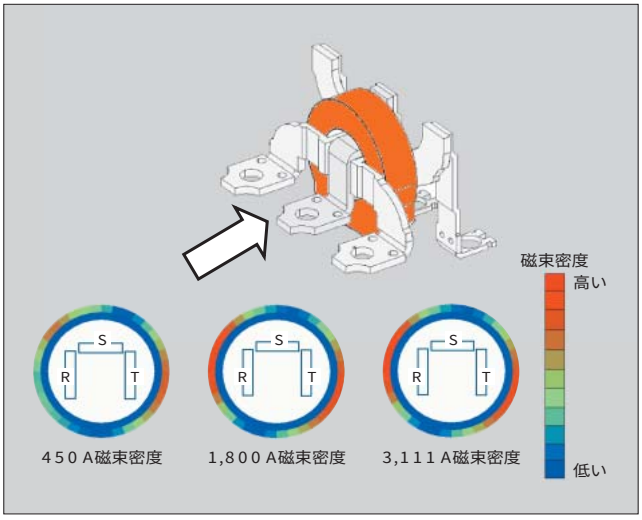


図10　1,800 A 通電時の ZCT の二次出力電圧波形

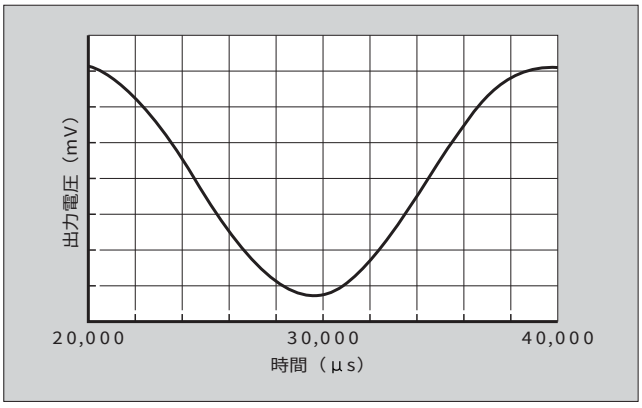


図 11　3,111 A 通電時の ZCT の二次出力電圧波形

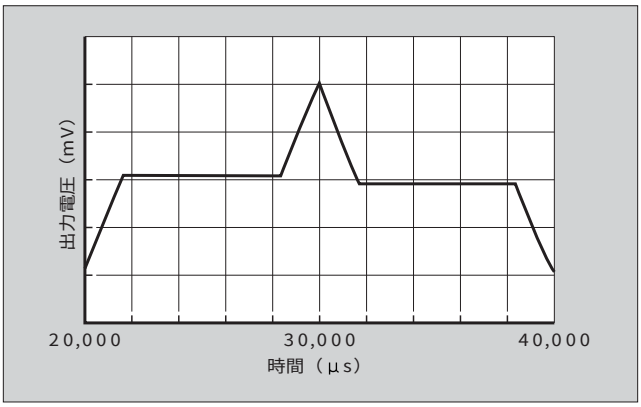
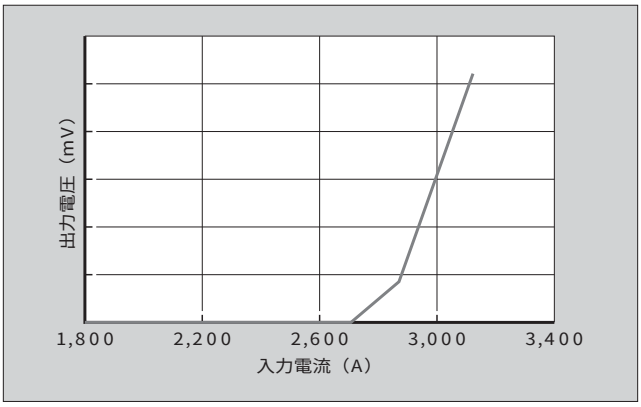


図 12　一次電流に対する二次側出力電圧の解析結果



おり，一次電流の増加による磁気飽和により，ZCT の二次側電流波形が飽和することも確認できた。

なお，**図 10** に 1,800 A，**図 11** に 3,111 A の平衡電流を通電した場合の ZCT の二次出力電圧波形を示す。**図 12** には一次電流に対する二次側出力電圧の解析結果を示す。一次側電流を増加させていくと，ZCT の二次出力電圧は急激に増加することが確認できる。

5　あとがき

ZCT に三次元電磁界動的非線形解析を適用した例として，3 極品の解析結果と実測による検証について紹介した。電磁界解析は解析手法の進展とコンピュータの性能向上と相まって実用的になってきている。解析により形状，配置などの変更などに柔軟に対応できるとともに，さまざまな現象を詳細に把握でき改良などに対して有用な情報を得られる。電磁界解析をはじめとする解析の適用範囲をさらに他製品の開発にも広げていく予定である。

参考文献

(1)　ADVENTURE Project Home Page. 〈http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp〉.
(2)　金山寛ほか．大規模磁場解析モジュール ADVENTURE_Magnetic．日本計算学会論文集．vol.7, no.2, 2002, p.719-720.
(3)　松本悟史，藤井清．並列計算による変圧器の三次元電磁界解析技術．富士時報，vol.76, no.4, 2003, p.212-216.
(4)　松本廣太，浅川修二．技術計算サーバとその解析事例．富士時報，vol.74, no.6, 2001, p.335-339.
(5)　回転機技術委員会．回転機の三次元 CAE のための電磁界解析技術．電気学会技術報告，第 855 号，2001.
(6)　金山寛．計算電磁気学．岩波講座 現代工学の基礎≪空間系IV≫．岩波書店．2000.
(7)　(株)エルフ ELF/MAGIC リファレンス．2003.

パワーエレクトロニクス主回路構造の解析技術

特集

滝沢　聡毅（たきざわ　さとき）　　ジニー　オルゲス（Gjini Orges）

1　まえがき

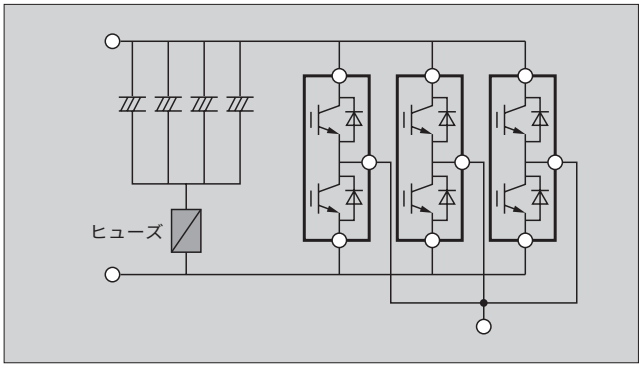
汎用インバータやUPSに代表されるパワーエレクトロニクス装置においては，年々小型，低コスト，高効率，高性能および高信頼性化の要望が非常に強まってきている。[1] それに伴いこれら装置に適用されるIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を代表とした電力変換用パワー半導体素子についても，その技術進歩は目覚ましく，年々小型化，低損失化が進められている。[2]

富士電機では，これらパワーエレクトロニクス装置を開発するうえで，その基盤となる主回路技術および素子適用技術の開発を，シミュレーション技術の適用と実験実測に基づいた検証により実施している。[3] 特に昨今のパワー半導体素子の高速スイッチング化に伴い，主回路構造に起因する配線インダクタンス値や構造体の電流分布および放射電磁界を把握することが，非常に重要となってきている。

このことからシミュレーション技術の適用は，開発効率を大幅に向上させるとともに，パワーエレクトロニクス製品の一層の高性能化および高信頼化を実現する有効な手段となる。

本稿ではその一例として，パワーエレクトロニクスの基幹部となるインバータの主回路配線構造と，IGBTモジュールの内部構造を対象とした電磁界解析を中心とするシミュレーション技術を紹介する。

図1　IGBT3並列スタック回路図



2　インバータスタック解析例

インバータスタックの構造解析例として，600 A/600 V定格のIGBTを3並列した1相分インバータスタックの直流中間部ブスバー配線インダクタンスの解析例を示す。解析したスタックの回路図を**図1**に，試作器の外観を**図2**に，シミュレーションモデル図を**図3**に示す。直流中間部の配線インダクタンスを把握することは，スナバ回路の設計や，並列接続されているIGBTや電解コンデンサの電流分布を知るうえで重要であり，主回路構造設計を実施する際に必要不可欠となる。

図2　試作器の外観

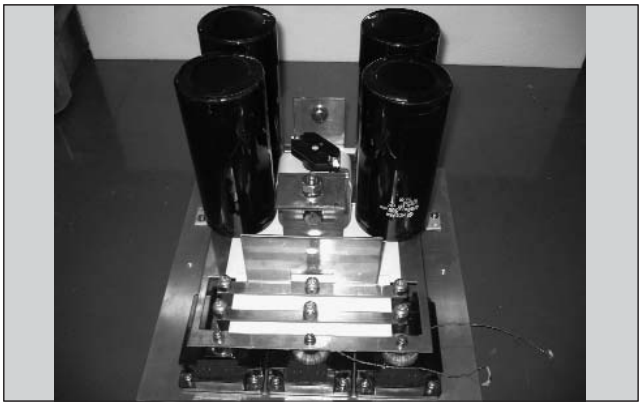
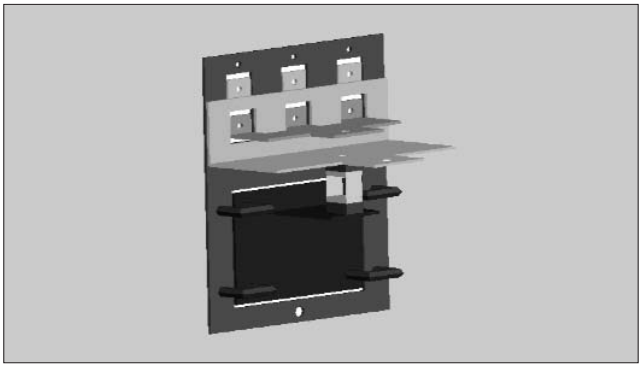


図3　シミュレーションモデル図



滝沢　聡毅

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

ジニー　オルゲス

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

表１　インバータスタック配線インダクタンス値の比較結果

配線インダクタンス	シミュレーション結果	実測結果
左端配置モジュール	53.5 nH	54.0 nH
中央配置モジュール	45.1 nH	42.0 nH

表１に，3 並列の中で左端に配置された IGBT モジュールと中央に配置された IGBT モジュールの直流端子間の配線インダクタンスのシミュレーション解析結果と実測結果を示す。両者はほぼ一致した結果となっており，本解析技術がインバータスタックのような大型の構造体についても有効であるといえる。

3　IGBT モジュールの内部構造シミュレーション

3.1　IGBT モジュールの現状

図４(a),(b)に富士電機製 IGBT モジュール（2MBI50N-060，600 V/50 A，2 素子入り）の外観とその内部構造の写真を，**図５**にその解析モデルを示す。DCB（Direct Copper Base）上に IGBT チップと FWD（Free Wheeling Diode）チップが搭載され，DCB の銅はくパターン上で直流出力導体電極（P，N）と交流出力導体電極（U）が接続される構造である。

IGBT がターンオフする際には，ターンオフ電流変化率（di/dt）と，以下の(1)〜(3)の各配線部のインダクタンスによって，式(1)で示すサージ電圧が各配線部に発生する。

(1)　直流出力導体電極（P 導体，N 導体）
(2)　DCB の銅はくパターン
(3)　チップと銅はくパターン間のワイヤボンディング

$$\Delta V = L \cdot di/dt \quad \cdots\cdots (1)$$

従来の IGBT においては，di/dt 値自体が大きな値ではなかったため，式(1)で示すサージ電圧の発生が大きな問題とはなっていなかった。ところが昨今の高速スイッチング化に伴い，式(1)による ΔV が高くなり，スナバ回路の設計など，耐圧設計が非常に厳しくなってきている。

通常，汎用インバータや UPS などの装置には，IGBT を最低 6 素子分必要とするが，特に大容量装置の場合は，多並列接続化などで大電流，高 di/dt 遮断を実施するため，高サージ電圧化の問題は，装置設計において重要課題となる。

3.2　低インダクタンス化技術とその解析

上記の高サージ電圧化の解決策として，IGBT モジュール内部の出力導体電極などの配線インダクタンスを低減する方法が考えられる。

具体的には，モジュール内部における P 導体と N 導体の出力導体電極をモジュール内部において近接配置し，その箇所において負の相互インダクタンスを大きくする方法が，従来から提案されている[(4)〜(6)]。しかし，この方法は配線の低インダクタンス化には有効であるが，配線構造が複雑になることや，絶縁材が新たに必要となるなどコストアップの要因となる。

そこで，近接構造を採らずに低配線インダクタンス化と低放射ノイズ化を図るべく，IGBT がスイッチングする際の電流分布解析および電磁界解析に基づく DCB 構造の設計とその検証を行った。

図６にその検証例の構造（シミュレーションモデル）を，**図７**，**図８**にそのシミュレーション解析例を示す。

図６では，DCB の銅はくパターンと各出力導体電極との結線位置を DCB 上のほぼ中央部付近に配置し，かつ IGBT と FWD チップをその両端に配置した構造としている。また**図７**(a),(b)に，**図５**の従来品構造と**図６**の検証例構造それぞれについて，下アーム側 IGBT がスイッチングする際の DCB 上の電流密度ベクトル図を示す。また，**図８**には同様に電流密度分布図を示す。

従来品構造は，**図７**(a)または**図８**(b)に示すように，DCB 上の電流密度は比較的一様な分布となっている。さらに，DCB 間の絶縁帯に沿って流れる電流の経路が長くなっており，配線インダクタンス値が大きくなっている様子がう

図４　IGBT モジュールの外観（2MBI50N-060）

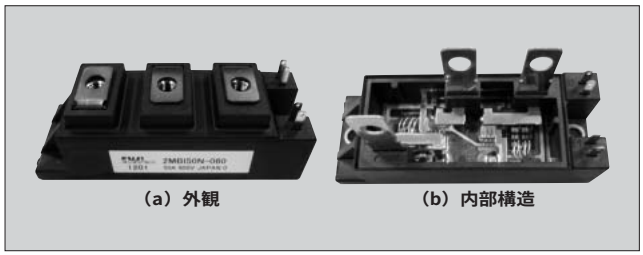


図５　IGBT モジュールモデル図

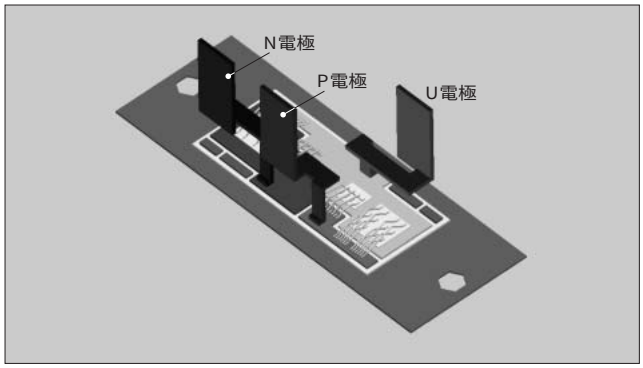


図６　IGBT モジュールモデル図（検証例構造）

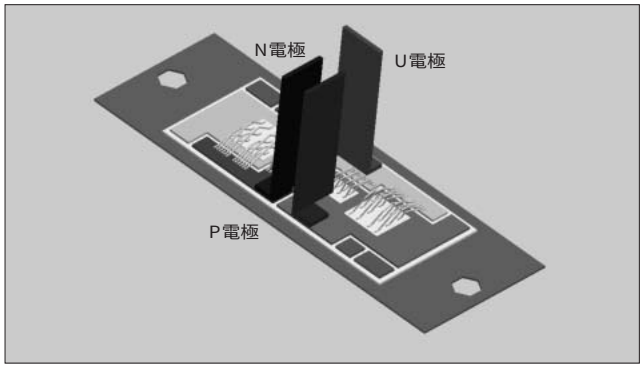


図７　従来品と検証例品モジュールとの電流密度ベクトル比較図

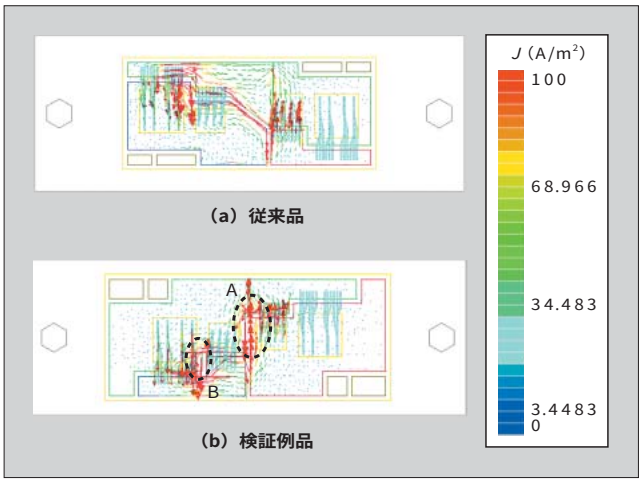
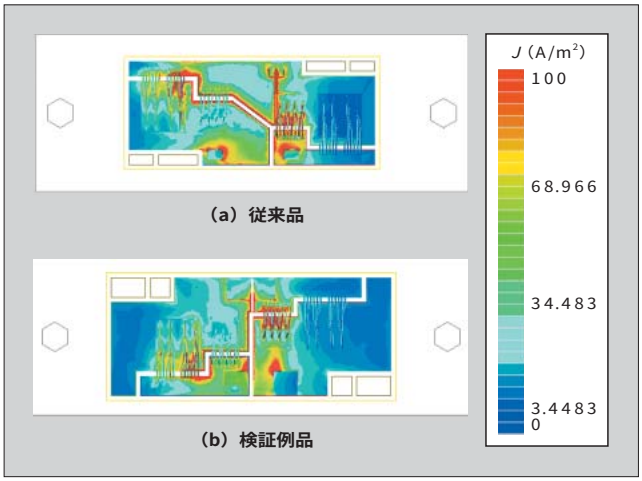


図８　従来品と検証例品モジュールとの電流密度分布比較図



かがえる。

一方，検証例の**図７**(b)の結果からは，特に地点 A，B 付近で，絶縁帯を挟んだ対抗する DCB パターン間で，大きな電流が反対方向に近接して流れていることが分かる。これはこの箇所において，負の相互インダクタンスが発生し，大幅に低インダクタンス化が図られていることを意味する。**図８**(b)の電流密度分布図において，DCB の中央付近に電流が集中していることからも分かる。

表２に以下の 3 方式による下アーム IGBT 側の配線インダクタンス値（U 電極→下アーム IGBT→N 電極のインダクタンス値）のシミュレーション結果と実機試験結果を示す。

方式 1 ：従来品モジュール

方式 2 ：従来 DCB＋P・N 導体電極近接構造モジュール

方式 3 ：**図６**の検証例モジュール

表２から，**図６**のモジュールは従来品モジュールに対して，実測上で約 47 %のインダクタンス低減効果を示しており，さらに P・N 導体を近接させた構造のモジュールに対しても同等レベルとなっている。以上のことから，P・N 導体を積極的に近接させずとも DCB 構造の最適化により低インダクタンス化が図れることがシミュレーション結果と実測により確認できた。

表２　各方式によるインダクタンス値の比較結果

方式１（従来品：図５）		方式2（従来DCB＋P・N導体電極近接）		方式3（検証例品：図６）	
シミュレーション	実測	シミュレーション	実測	シミュレーション	実測
22 nH	26.6 nH	13.4 nH	—	12.9 nH	14.0 nH

これら低インダクタンス化技術は，今後もますます進むパワー半導体の高速スイッチング化に対応する重要なアイテムであり，その開発にはシミュレーション技術が有効である。

3.3　放射電磁界解析

現在，パワー半導体の適用技術として，上述のスイッチング時の高サージ電圧化とともに，高レベルの放射ノイズ発生も大きな問題となっている。

富士電機では，構造に起因した放射電磁界についてもシミュレーション技術を適用し，低放射ノイズ IGBT モジュールを開発している。**図９**，**図10**に従来品と検証例品の DCB 部から発生するノルマルモードのニアフィールド放射電界のシミュレーション結果を，また**図11**，**図12**に導体部から発生する上記と同様の放射電界のシミュレーション結果を示す。なお，各図は(d)がシミュレーションモデル，(a)が XY 面上の電界のポーラー図（E vs. ϕ，100 mm），(b)が XZ 面上の電界のポーラー図（E vs. θ，100 mm），(c)が三次元空間図である。

図９(a)または(c)において，XY 面の $\phi = 90°$ 方向（N 導体電極が置かれている方向）に高いレベルの電界が発生していることが分かる。

一方，**図10**（DCB 部から発生する放射電界），**図12**（DCB と導体電極を組み合わせた構造）に**図６**の検証例構造に対するシミュレーション結果を示す。**図９**，**図11**の従来構造と比較して，ポーラー図の領域が狭まり，また三次元空間図から全体的に放射電界レベルが低減していることが確認できる。

以上のように，従来は測定が中心であった放射電磁界の評価も，上記例に示すようにシミュレーションが適用でき，放射ノイズの低減を図る構造を従来より容易に設計できるようになった。

4　あとがき

パワーエレクトロニクス装置の主回路設計技術の一翼を担う電磁界解析を中心としたシミュレーション技術について紹介した。本稿では，インバータなどの直流中間回路ブスバー構造とパワー半導体の内部構造の電磁界解析を中心に紹介したが，その応用範囲は広い。

今後とも，信頼されるパワー半導体モジュールおよび本パワー半導体モジュールを適用したパワーエレクトロニク

図９　DCB 部から発生する放射電界シミュレーション結果（従来品）

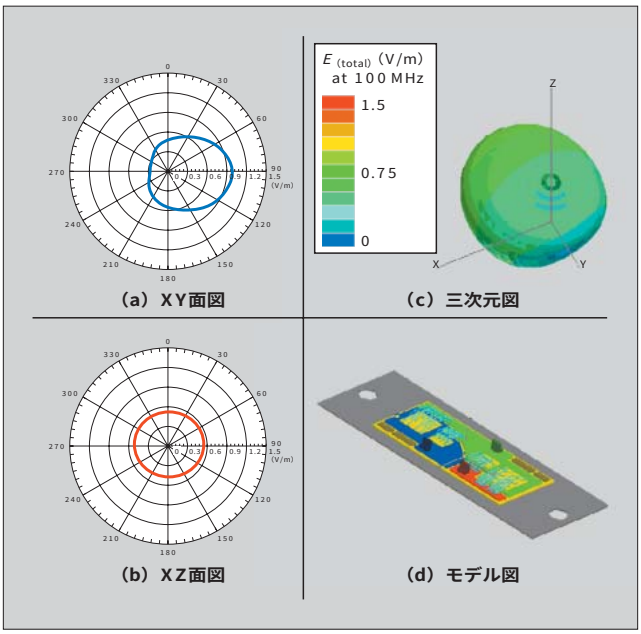


図 10　DCB 部から発生する放射電界シミュレーション結果（検証例品）

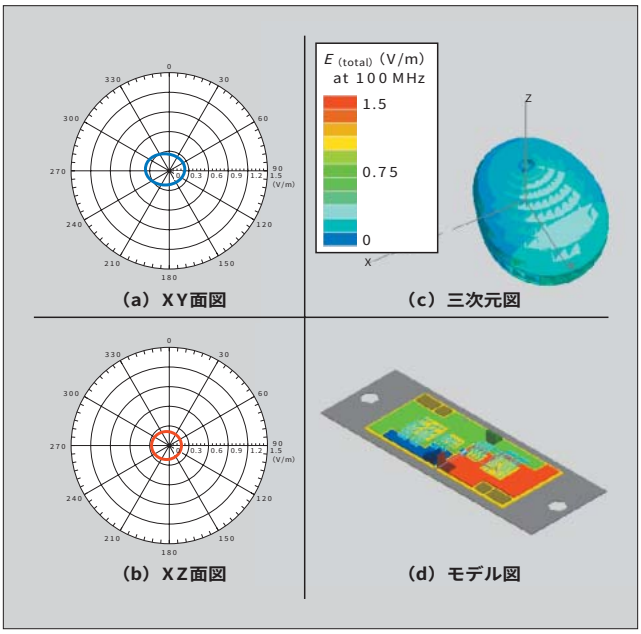


図 11　導体部から発生する放射電界シミュレーション結果（従来品）

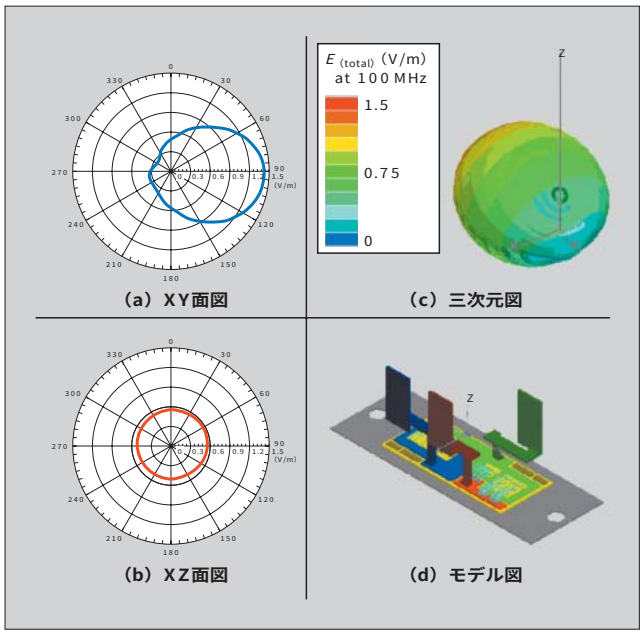
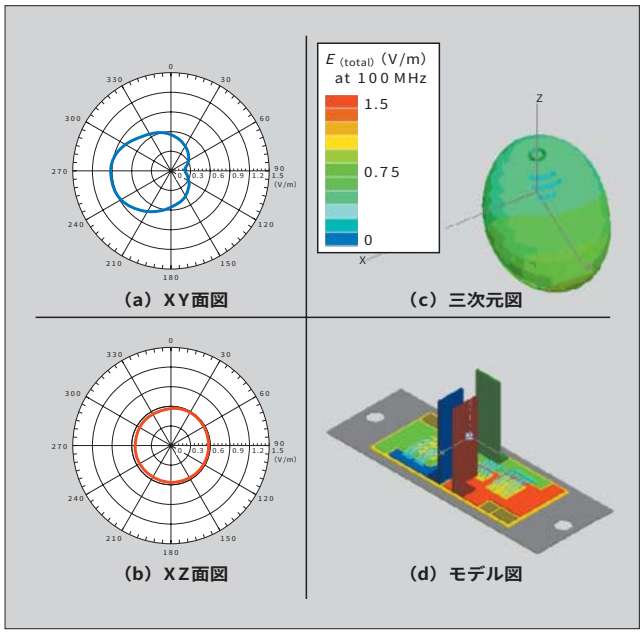


図 12　導体部から発生する放射電界シミュレーション結果（検証例品）



ス装置の製品化に，より一層注力していく所存である。

参考文献

(1)　滝沢聡毅ほか．大容量 6 in 1 IGBT モジュールの適用技術．富士時報．vol.75, no.8, 2002, p.449–452.

(2)　吉渡新一，別田惣彦．大容量 6 in 1 IGBT モジュール「EconoPACK–Plus」．富士時報．vol.74, no.2, 2001, p.110–113.

(3)　阿部康，丸山宏二．半導体デバイスと回路の連成シミュレーション解析技術．富士時報．vol.76, no.4, 2003, p.221–224.

(4)　Marco, C. C. et al. Low Stray Inductance Bus Bar Design and Construction for Good EMC Performance in Power Electronic Circuits. IEEE Transactions on Power Electronics. vol.17, no.2, 2002, p.225–231.

(5)　菊永敏之ほか．パワーモジュール高信頼性設計のための解析・シミュレーション技術．三菱電機技報．vol.75, no.6, 2001. p.55–58.

(6)　三島彰．電磁場連成系のモデリングとシミュレーション．平成 13 年電気学会産業応用部門大会．S10–5, p.1103–1106.

原動力設備プラントの最適運用と適用事例

項　　東輝（こう　とうき）　　川森　　亨（かわもり　とおる）　　福山　良和（ふくやま　よしかず）

普通論文

1　まえがき

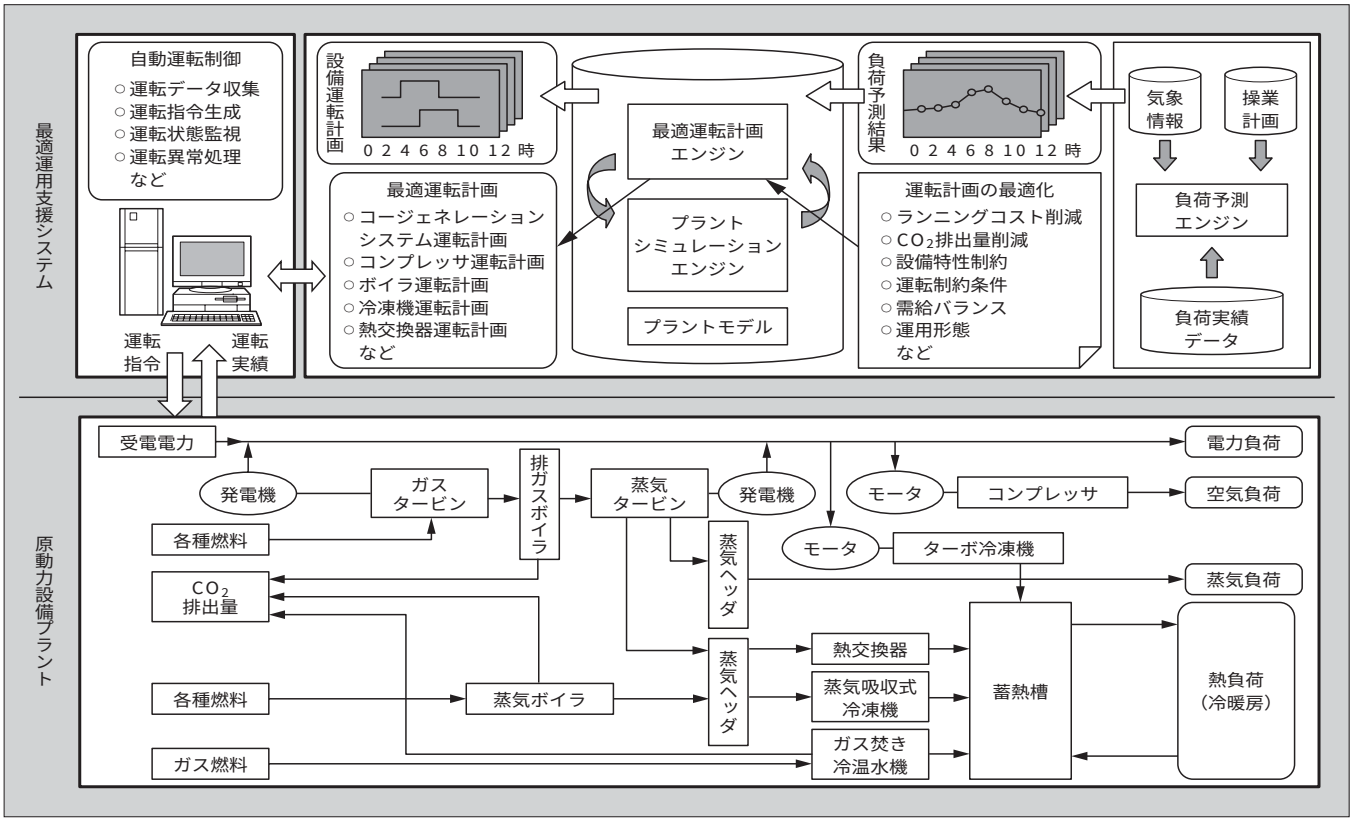
電気・熱・蒸気・空気などのエネルギーを必要とする工場，事務所，病院，大型ビルなどにおいては，コージェネレーションシステム，ボイラ，冷凍機，コンプレッサなどさまざまな原動力設備が用いられている。これらの原動力設備プラントの運用においてエネルギー費用を含め年間多大な運用費用がかかっており，この運用費用の削減および近年脚光を浴びている環境負荷の低減，つまり原動力設備プラントの最適運用が大きな課題となっている。このような課題を解決するために，設備個々の効率化を図ると同時に，構成される設備全体の連携を考慮したトータル最適化を行うことが非常に重要な手段である。

本稿では，原動力設備プラントの運用の全体最適化を実現する富士電機独自のソリューションおよびそれを支える各種要素技術の概要について説明する。また，トヨタ自動車(株)の生産工場の原動力設備プラントに対して，共同で最適運用制御システムを開発したので，その適用事例を紹介する。

2　原動力設備プラントの最適運用

図1には典型的な原動力設備プラントおよび最適運用支援システムの構成を示す。

図1　原動力設備プラントおよび最適運用支援システムの構成



項　　東輝

企業情報・制御システムの企画・設計・開発に従事。現在，富士電機システムズ(株)e-ソリューション本部情報システム統括部ソリューション二部主任。工学博士。計測自動制御学会会員，電気学会会員。

川森　　亨

トヨタ自動車(株)プラント・エンジニアリング部。

福山　良和

数理アルゴリズムを利用した顧客ソリューション研究開発業務に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー(株)情報通信制御部グループマネージャー。工学博士。電気学会会員，IEEE 会員。

一般的に電気・熱などを供給する個々の設備では効率化・自動化が図られているが，各種設備の運用は現状オペレーターの判断にゆだねられている場合が多く，プラント全体からみた場合必ずしも最適な運用とはなっていない。富士電機では長年培ってきた予測・最適化技術を生かした原動力設備プラントの最適運用支援ソリューションを提供している[(1)]。

設備運用においては，各種負荷状況に応じて「いつ」「何を」「何台」「どのくらい」などを決める運用計画を立てなければならない。富士電機が提供する原動力設備の最適運用支援システムでは，オペレーターが介在することなく，システマティックに運用計画を立案し，下位の設備の制御システムとの連携により，計画立案から制御まで完全な自動化運転を実現する。

最適運用を実現するためには，大きく分けて負荷予測機能，プラントモデル機能および最適運用計画の決定機能という三つの基本機能が必要となる。

処理の流れとしては，まず各種負荷に対して，気象情報，操業計画，過去の実績などにより，未来方向の負荷予測を行う。

次に予測された各種負荷に基づいて，最適運用計画の決定機能により，各種エネルギーバランスおよび設備制約を考慮したうえで，運用費用および環境負荷の最小化を達成できるように運用計画の候補を生成する。

そしてプラントの設備特性および設備連携を模擬したプラントモデル化機能にこの運用計画の候補を与え，運用計画の妥当性をシミュレーションにより検証する。運用計画とプラントシミュレーションの繰返し計算により評価目標値が最小となる最適な運用計画を決定し，下位の制御システムに各設備の運転指令を与えて，運転の自動化を実現する。

以下では，原動力設備プラントの最適運用を支える富士電機の要素技術の概要を説明する[(2)]。

3　最適運用における要素技術

3.1　負荷予測

電気，熱（空調用冷温水，湯など），蒸気，工業用エアなどの負荷は，工場オフィスの操業または勤務形態や気象条件などに影響されたりするなど，さまざまな特性を有している。富士電機では高精度の負荷予測を実現するために，負荷特性に応じて構造化ニューロ，パターン予測方式，重回帰方式などさまざまの予測方法を適用している。

パターン予測方式は過去の負荷実績のうち，現在の状況に最も類似している実績を検索し，負荷予測値とする方式である。重回帰方式は気温・湿度などの感度を線形式で近似し利用する重回帰式による方法である。これらの予測手法に対して実用上高精度の予測結果を得るためにさまざまな補正オプション機能が開発・適用されている。

ニューラルネットワークは過去の実績を学習して非線形予測モデルを構築し，現在の状況に最も合う負荷を予測する方式である。最適なネットワーク構造が事前に得られないため試行錯誤的に学習しなければならず，内部がブラックボックスであるため，出力理由の説明が困難であったが，富士電機が独自に開発した構造化ニューラルネットワークは，内部を入力因子ごとに構造化することで出力理由の説明を可能とし，学習過程で不要な素子や結合を削除するため構造を最適化できる。

3.2　プラントのモデル化

プラントのモデル化においては，各種プラント設備の入力と出力の関係を入出力特性式として数式で表現する。例えば，ボイラであれば，燃料流量を入力として蒸気流量を出力するような特性式で表現する。この特性式は線形式で表現できる場合もあるが，二次式のような非線形の高次多項式によるモデルが必要な場合もある。また，数式では表現できないような現場の運用ルールなどを考慮する必要がある。例えば，設備の起動の優先順位や，設備の稼動時間の平滑化などがあり，運用上の制約条件として考慮が必要である。また，モデル化については，重回帰に基づいた線形式でプラント特性を近似する方法，非線形な特性を考慮するために，化学プラントのモデル化などで利用されている応答曲面法，非線形特性を容易にモデル化可能であるニューラルネットワークなどの方法を開発している。

3.3　運用計画の最適化

原動力設備プラントの最適運用の決定においては，以下のような課題がある。

(1)　発電機，ボイラ，熱交換器などの出力は連続量であり，設備の起動停止などは起動か停止の 2 値の離散値となる。したがって，連続量と離散量を同時に扱うことが必要となる。

(2)　前述のように，設備の特性として数式で表現できないものがある場合，これを考慮した最適化を行う必要がある。

課題(1)については，線形および非線形の混合整数計画問題を解く必要がある。従来の線形混合整数計画問題の場合，分枝限定法などの数理計画法を利用することが可能である。しかし，非線形混合整数計画問題については，従来，有効な方法が存在しなかった。これに対し，近年脚光をあびているメタヒューリスティクス（Meta-Heuristics：MH）と呼ばれる最適化技術は，非線形混合整数計画問題を容易に扱うことができ，原動力設備プラントの最適運用に有効である。

課題(2)については，従来の数理計画法ではすべて数式で表現し，**図 1** の最適運用決定機能とプラントモデル化機能を同時に数学的に解かなければならなかったため，扱うことができなかった。これに対し，MH では設備の特性を表現するプラントモデルと最適運用決定を完全に独立させることが可能であるため，プラントモデルは自由に作成することが可能である。

富士電機では，PSO（Particle Swarm Optimization）

普通論文

をはじめ，GA（Genetic Algorithm），SA（Simulated Annealing），TS（Tabu Search）など，各種 MH 手法による最適化手法の適用技術を開発し，実システムへの適用を行っている。

4　適用事例

4.1　背　景

トヨタ自動車(株)では長年にわたって，国内工場において省エネルギーと環境負荷の低減に貢献するコージェネレーションシステムを積極的に導入し，電気，熱，蒸気，工業用エアなどさまざまな形態のエネルギーを供給する原動力設備プラントの安全かつ効率的な運用におけるさまざまな課題に精力的に取り組み，豊富な運用経験やノウハウを蓄積してきた。2000 年度から，2005 年度の原動力総費用半減を目標に掲げ，運転のワンタッチ化，点検のレス化，監視のながら化および保全の適正化・長寿命化により運転保全費の低減を図っている。その中で今回，電気，熱，蒸気の各種供給エネルギーの相互作用をとらえて，プラント全体の最適化を図った最適運用計画により，エネルギー費用の低減，設備の完全自動運転による運転費用の低減を実現することを図っている。

4.2　プラント構成

対象の原動力設備プラントの構成を**図 2** に示す。

プラントの構成および運用形態の概要を以下にまとめる。

(1)　ガスタービン発電機（Gas Turbine Generator：GTG）と蒸気タービン発電機（Steam Turbine Generator：STG）からなるコンバインドサイクル発電システムを有する。

(2)　冷暖房用の冷温水は蓄熱槽から供給される。蓄熱槽の蓄熱は蒸気吸収式冷凍機（3 台），ガス焚（だ）き冷温水機（2 台），熱交換器（2 台）を運転することにより行われている。

(3)　蒸気式熱源設備の使用蒸気は主に蒸気タービンの抽気から供給され，不足分は貫流ボイラ（6 台）から供給される。

(4)　熱源設備に蒸気を供給する以外に，生産用などの蒸気負荷がある。

(5)　熱源設備の運用は，その日の気温，湿度，蓄熱槽の蓄熱量，工場の操業状況（操業開始・停止時間，残業時間，1 直稼働，2 直稼働，休憩時間帯など）を運転員が過去の経験をベースに運転操作（設備の入・切操作，蒸気弁の開閉・調節）を行っていた。

4.3　最適運用制御システムの構成と機能

(1)　システムの概要

最適運用制御システムの構成を**図 3** に示す。最適運用制御システムは，実績収集サーバ，予測計画サーバおよびクライアントパソコンから構成されている。

実績サーバにおいては，TECS（Toyota Energy Control System）との TCP/IP 通信から，1 分周期に実績収集し，運用計画用の 30 分周期のデータを作成し，計画サーバへセットする。予測計画サーバにおいては，負荷予測および運用計画の立案を行う。立案された設備の運用計画は，実績収集サーバを介して TECS へ転送され，TECS から下位制御システムに運転指令値を設定し，設備の自動運転を行う。クライアントパソコンにおいては，システムの運転監視，負荷予測・運用計画の表示および各種パラメータの設定などを行う。画面系は Web ＋ Java〈注〉から構築

図 2　原動力設備プラントの構成

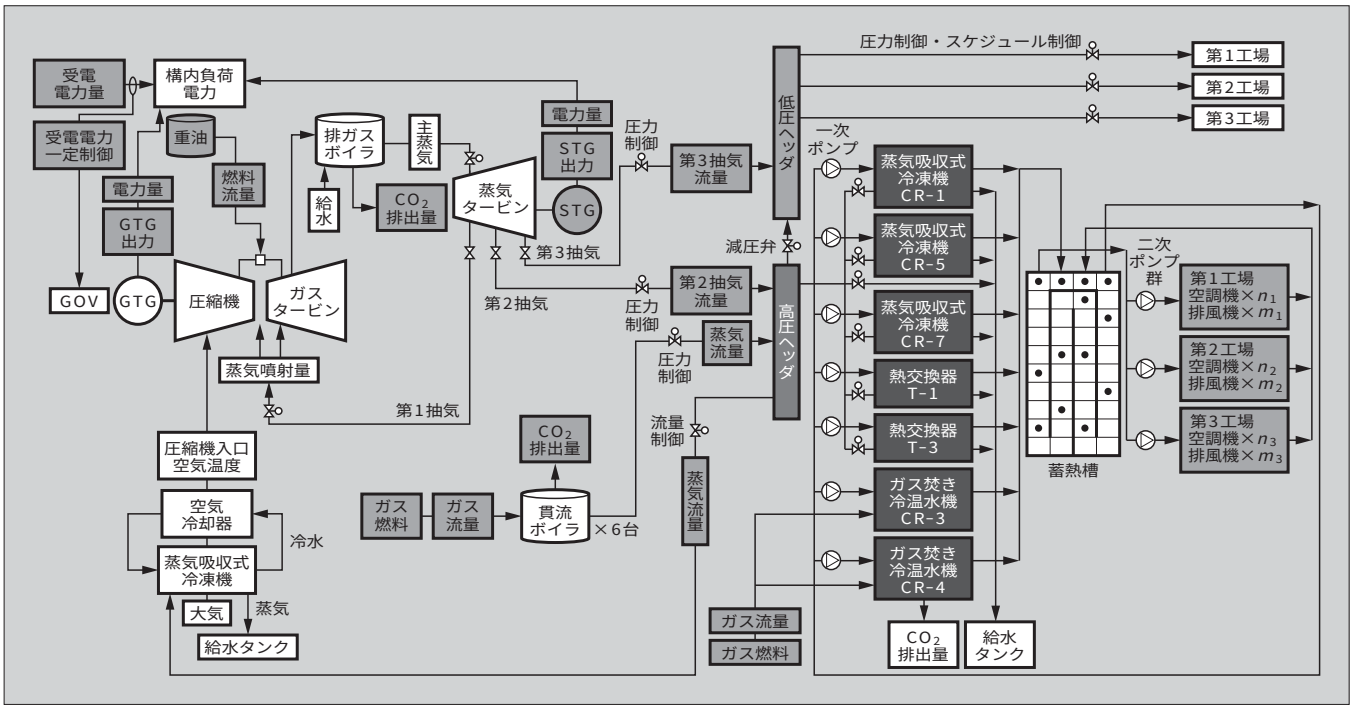
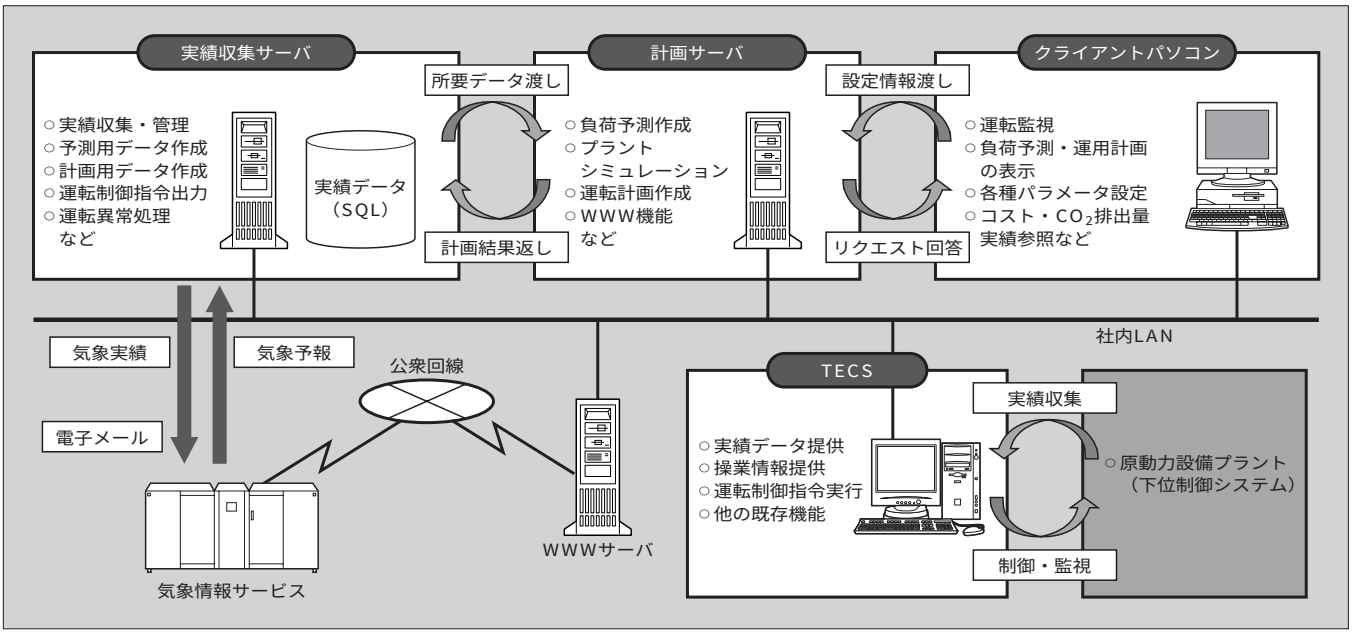


図３　最適運用制御システムの構成



されている。主な画面機能は次のとおりである。

○システム監視画面
○操業計画設定画面
○設備運用優先順位設定画面
○計画・実績表示画面
○計画表示修正画面
○パラメータ設定画面
○運用コスト・ CO_2 排出量実績表示画面

(2)　負荷予測機能

本システムでは，電気・熱（空調）・蒸気の負荷に対して，30 分周期で 48 時間先まで予測を行っている。電気・蒸気負荷予測はパターン予測をベースに，温度・直近実績などを利用した補正を加えて行われている。電気負荷予測では 30 分平均値の予測以外に，電気負荷の急変に対応できるために 30 分最小値の予測も行っている。熱負荷予測は構造化ニューロによって行われている。予測で利用する気象予報情報は気象情報配信会社から，3 時間ごとに電子メールで提供され，局所地域（豊田市）の気象予報と工場付近の気象実績に基づいて計算されている。

(3)　プラントモデル機能

図２の対象プラントに対して，基本的には，統計手法を利用した機器特性と運用ルールなどを統合してプラントモデルを作成している。ガスタービン，排ガスボイラ，蒸気タービンなどの重要設備の運転状態により分類される 8 パターンのシミュレーションができるように構築されている。

(4)　最適運用計画機能

本プラントの最適運用においては，離散変数と連続変数を両方含む非線形混合整数最適化問題となり，最適運用計画は前述の PSO 手法によって実現している。

計画周期は 30 分で計画期間は 38 時間（76 点）である。同一計画期間において，実績期間の運転状態を固定値として計画周期ごとに補正計画を行い，常に最新の運転状況を反映した運用計画を得るような仕組みとしている。最適化問題定式化の概要は次のとおりである。

(a)　状態変数

各計画点における以下の量を状態変数としている。

①　蒸気吸収式冷凍機（× 3 台）の起動停止状態（夏期）
②　ガス焚き冷温水機（× 2 台）の起動停止状態（夏期・冬期）
③　熱交換器（× 2 台）の起動停止状態（冬期）
④　熱交換器（× 2 台）の蒸気流量（冬期）
⑤　GTG 用蒸気吸収式冷凍機の起動停止状態（夏期）

(b)　目的関数

運用コストおよび環境負荷の最小を図るために計画期間における下記項目の加重合計値を最小化としている。なお，各項目の重みは自由に調整可能となっている。

①　全設備のエネルギー費用
②　全設備の CO_2 排出量の最小化
③　蒸気・熱の需給バランス不均衡量および蓄熱量制約逸脱量を考慮したペナルティ

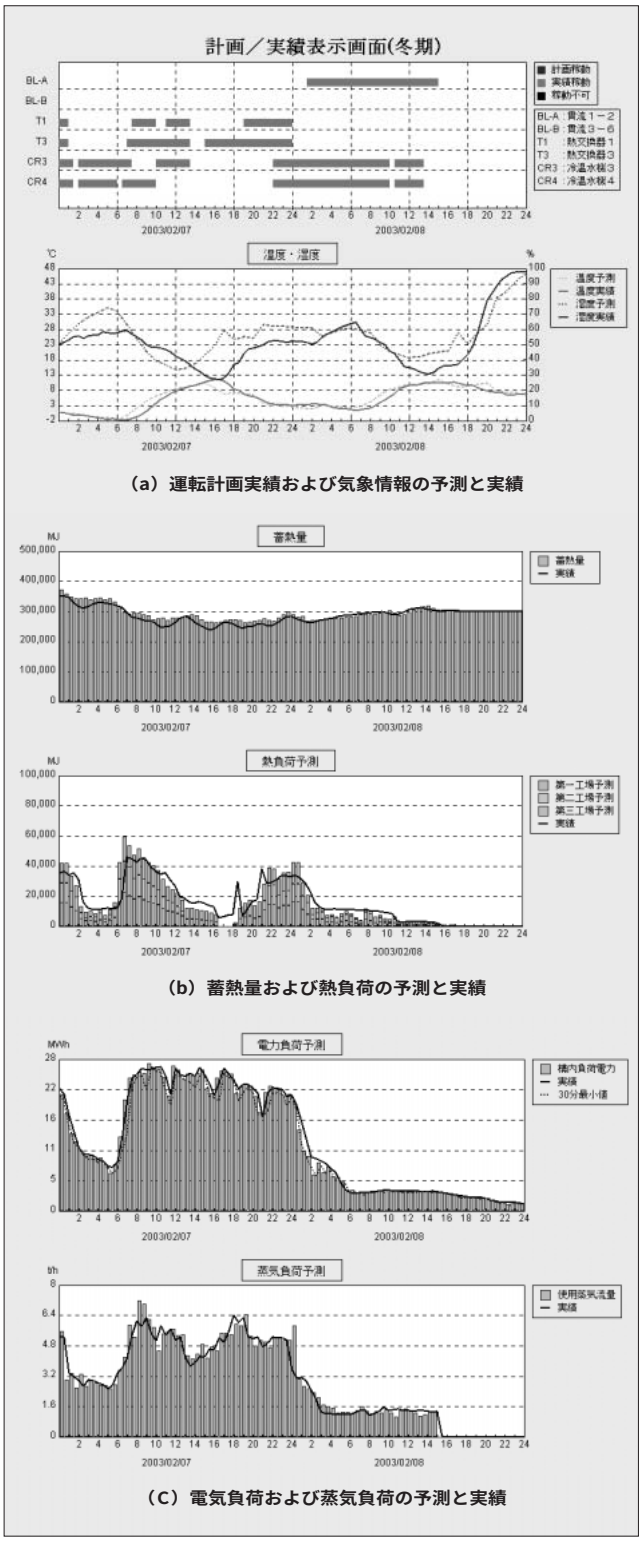
(c)　制約条件

設備の特性上の制約や現場の運用ルールを考慮し下記のような制約条件を取り入れている。

①　熱交換器蒸気流量の上下限
②　同一機種の各熱源設備の起動停止優先順序
③　蒸気式熱源設備の同時起動制約
④　熱源設備の最低連続運転時間および最低連続停止時間
⑤　メンテナンスなどによる設備の起動停止状態固定
⑥　休憩時間などによる電気負荷急変時の蒸気式熱源設備の起動制約

〈注〉Java ：米国 Sun Microsystems, Inc. の登録商標

図４　最適運用制御システムの画面例



（a）運転計画実績および気象情報の予測と実績

（b）蓄熱量および熱負荷の予測と実績

（C）電気負荷および蒸気負荷の予測と実績

以上のように，最適運用計画機能ではさまざまな制約条件を満足しながら，運用コストと CO_2 排出量が最小となるような対象設備の運用計画を立案している。

4.4　負荷予測・運用計画のシステム画面例

図４にある期間の負荷予測・運用計画の画面例を示す。各種負荷予測は，予測誤差が２～４％以内で，高精度の予測結果を得ている。

最適運用計画はさまざまな制約条件に対し，柔軟に対応できているので，説明のできる計画結果が得られている。計画結果はそのまま設備の起動停止の制御指令として出力され，対象設備の完全な自動運転を実現している。

4.5　導入効果

本システムは 2002 年夏に導入が完了し，現在稼動中である。冬期および夏期の評価期間において，供給品質を維持しつつ，運転員のミニマム化を達成している。また，省エネルギー効果としても，従来の運用に比べて，約 10 ％の低減が得られている。

5　あとがき

本稿では，富士電機の原動力設備プラントの最適運用制御システムおよび要素技術の概要について説明し，また，トヨタ自動車(株)と共同で取り組んだ適用事例を紹介した。本システムの導入により，運用コスト・ CO_2 排出量の最小化を実現すると同時に，手動運転の支援や自動運転が可能となる。さらに，最適計画のシミュレータ機能を追加することにより，プラントの最適構成の検証，設備計画，設備投資の策定などにも活用できる。今後もお客様の環境・省エネルギー活動を強力的に支援し，ベストソリューションを提供していく所存である。

参考文献

(1)　水谷博成ほか．エネルギーソリューション．富士時報．vol.75, no.6, 2002, p.353-357.
(2)　北川慎治ほか．エネルギープラント最適運用ツール．富士時報．vol.75, no.11, 2002, p.625-629.

もっと豊かな明日のために。

私たち富士電機グループは，グループ各社が「業界最強の専業」として，
それぞれの事業分野で，つねに最先端を走りつづけます。
同時に，集合体としての総合力を発揮し，お客様によりご満足いただける
ソリューション，サービス，商品を提供していきます。
豊かな暮らしと社会の実現を目指す富士電機グループに，どうぞご期待ください。

富士電機グループ
e-Front runners

主要営業品目

富士電機システムズ(株)

情報・通信・制御システム，水処理・計測システム，電力システム，放射線管理システム，FA・物流システム，環境システム，電動力応用システム，産業用電源，車両用電機品，クリーンルーム設備，レーザ機器，ビジョン機器，電力量計，変電システム，火力機器，水力機器，原子力機器，省エネルギーシステム，新エネルギーシステム，UPS

富士電機機器制御(株)

電磁開閉器，操作表示機器，制御リレー，タイマ，ガス関連機器，配線用遮断器，漏電遮断器，限流ヒューズ，高圧受配電機器，電力制御機器，電力監視機器，交流電力調整器，検出用スイッチ，プログラマブルコントローラ，プログラマブル操作表示器，ネットワーク機器，インダクションモータ，同期モータ，ギヤードモータ，ブレーキモータ，ファン，クーラントポンプ，ブロワ，汎用インバータ，サーボシステム，加熱用インバータ，ミニ UPS

富士電機デバイステクノロジー(株)

磁気記録媒体，パワートランジスタ，パワーモジュール，スマートパワーデバイス，整流ダイオード，モノリシック IC，ハイブリッド IC，半導体センサ，サージアブソーバ，感光体，画像周辺機器

富士電機リテイルシステムズ(株)

自動販売機，コインメカニズム，紙幣識別装置，貨幣処理システム，飲料ディスペンサ，自動給茶機，冷凍冷蔵ショーケース，カードシステム

富士時報	**第 77 巻　第 2 号**	平成 16 年 2 月 28 日　印刷 平成 16 年 3 月 10 日　発行 定価 735 円（本体 700 円・送料別）
編集兼発行人	原嶋孝一	
発行所	富士電機ホールディングス株式会社 技術企画室	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号 （ゲートシティ大崎イーストタワー）
編集室	富士電機情報サービス株式会社内 「富士時報」編集室	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 （新宿コヤマビル） 電話（03）5388 －7826 FAX（03）5388 －7369
印刷所	富士電機情報サービス株式会社	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 （新宿コヤマビル） 電話（03）5388 －8241
発売元	株式会社オーム社	〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 電話（03）3233 －0641 振替口座 東京 6－20018

© 2004 Fuji Electric Holdings Co., Ltd., Printed in Japan（禁無断転載）

富士時報論文抄録

最近の研究開発動向

古庄　昇
富士時報　Vol.77 No.2 p.102（2004）

1990 年以降のグローバリゼーションの進展に伴い，国内市場および海外市場での競争が激化し，日本の製品の優位性が揺らいできている。この状況を打破するためには，競合相手に対して圧倒的優位に立てる製品を提供していく必要があり，それを実現するための研究開発は企業の生命線である。富士電機アドバンストテクノロジー(株)は，新製品投入による基盤事業の拡大，インキュベーション機種・新規事業の早期事業化，基礎研究の充実による継続的な発展の礎作りに注力している。

有機電子材料を用いた双安定性素子

川上　春雄　　加藤　久人　　山城　啓輔
富士時報　Vol.77 No.2 p.103-106（2004）

有機電子材料を用いた双安定性素子を開発中である。本素子では一つの電圧に対し二つの安定な電気抵抗が存在し，高密度記録媒体や有機 EL（Electroluminescence）の駆動素子への適用が有望である。これに用いる独自の有機双安定性材料を開発し，有機双安定性材料層を金属電極で挟んだ単純な構造で，高い電流密度を実現した。さらに，これらの材料と，新規界面層を設けた素子構造の適用により，この技術では世界最高の駆動電圧（20 V）を達成した。

環境調和型材料の開発

渡邉　裕彦　　管野　敏之　　古川　雅晴
富士時報　Vol.77 No.2 p.107-111（2004）

EU の WEEE 指令「使用済み電気・電子機器に関する指令」による回収，リサイクルへの対応や RoHS 指令「有害物質の使用禁止指令」による 6 物質（鉛，水銀，カドミウム，六価クロム，特定臭素系難燃剤 2 種）の電気電子機器への使用禁止期日がそれぞれ 2005 年 8 月 13 日，2006 年 7 月 1 日に決定した。富士電機では環境調和型材料の開発に積極的に取り組んでおり，この規制に対応した材料開発のうち，成形樹脂用反応型ノンハロゲン難燃化技術の開発と電子機器に使用されている鉛を使用しない，鉛フリーはんだ材料の 2 テーマについて，その取組みと特徴について紹介する。

コンビナトリアル成膜による誘電体薄膜材料の高速合成

米澤　喜幸　　小西　義則　　清水　了典
富士時報　Vol.77 No.2 p.112-116（2004）

薄膜キャパシタなど，酸化物薄膜デバイス応用を念頭におきながら，誘電体薄膜の高性能化の研究を進めている。キャパシタ応用を考えた場合，目標値は非鉛系材料で高比誘電率（>1,200）と，高耐圧（>1 MV/cm）を両立させなくてはならない。現在，富士電機では，従来の非鉛系材料の高誘電率化とともに新規誘電体材料 $SnTiO_3$，電荷移動型誘電体などの開発を行っているが，このような材料探索には材料合成のみならず，その評価も合わせて大きな労力と時間がかかる。これを解決する方法として，20 年を 3 か月に短縮するといわれる，コンビナトリアル成膜法を利用した超高速材料スクリーニング技術が提唱されている。本稿ではコンビナトリアル成膜法の概要と富士電機における導入および応用について述べる。

新型半導体素子とトレンチ加工技術

長安　芳彦　　藤島　直人　　望月　邦雄
富士時報　Vol.77 No.2 p.117-120（2004）

トレンチ（溝）構造を用いることによりシリコン基板を立体的に活用して，業界トップの低出力オン抵抗を示す 700 V クラス高耐圧横型 MOS 技術を開発した。高アスペクト比を有する深い（20 μm ）ストライプ状トレンチを形成し，斜めイオン注入でオフセットドレーン領域をトレンチに沿って設け，酸化・ CVD によって絶縁膜を形成した独自の製造方法で集積度を高めた。これにより，従来と比べて出力オン抵抗を約 3 割低減した業界トップの 11 Ω mm^2（素子耐圧 750 V）を実現した。

垂直磁気記録膜の構造制御

竹野入 俊司　　酒井　泰志　　渡辺　貞幸
富士時報　Vol.77 No.2 p.121-123（2004）

垂直磁気記録媒体の実用化に向けた開発が活発化しているが，中でも富士電機が採用している CoPtCr-SiO_2 を磁性層とするグラニュラ媒体は 200 G ビット/in^2 を目指す高密度記録媒体として有望である。一方，優れた媒体を得るためには，磁性結晶粒の均一化・微細化および磁気的な分断が必要である。本稿では，下地層に Ru を用いた CoPtCr-SiO_2 媒体において，Ru の結晶粒径や表面構造を制御することにより，磁性結晶粒の粒径や磁気的な分離構造を制御した例について紹介する。

微生物の迅速検査技術

野田　直広　　浅野　貴正　　北出　雄二郎
富士時報　Vol.77 No.2 p.124-127（2004）

食品や製薬など多くの分野で，微生物の迅速検査が求められている。今回，迅速簡便な微生物検査技術としてマイクロコロニー法を検討した結果，食中毒原因菌をはじめ，耐熱性細菌，真菌などの汚染原因菌を検出できることが分かった。検出時間を従来の培養法に比べて大幅に短縮できるほか，マイクロコロニーの形状から微生物種を判別することが可能であった。また，コロニーの検出は自動装置によって迅速簡便に行える見通しが得られた。

トップエミッション型 CCM 方式有機 EL

木村　浩
富士時報　Vol.77 No.2 p.128-132（2004）

CCM（Color Conversion Materials）方式でアクティブマトリックス駆動を可能にするトップエミッション構造を解説する。対向スパッタ装置を用いたトップエミッション上部透明陰極作製方法，および光学シミュレータを利用した素子構造の光学設計法について説明する。また，CCM 基板とトップエミッションデバイスをはり合わせたプロトタイプデバイスについても紹介する。

Abstracts (Fuji Electric Journal)

Electrical Bistable Devices Using Organic Materials

Haruo Kawakami Hisato Kato Keisuke Yamashiro
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.103–106 (2004)

Electrical bistable devices made from organic materials are being developed at Fuji Electric. In these devices, two stable values of conductance exist for a single voltage value. Promising applications include high-density memory devices and driving devices for organic electroluminescence display panels. High current density is obtained using a simple structure in which a layer of organic material, developed by Fuji Electric, is sandwiched between metal electrodes. Moreover, a high transition voltage of 20 V, the highest value achieved in the industry, has been realized through the development of a new structure using these materials.

Latest Trends of Research and Development

Noboru Furusho
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.102 (2004)

With the expansion of globalization since 1990, the advantages of Japanese-made products have been fading due to increased competition in both domestic and international markets. To rectify this situation requires that Japanese-made products be provided with overwhelming competitive advantages. The keys to achieving this goal are the research and development of technology by the manufacturers.

Fuji Electric Advanced Technology Co., Ltd. is focusing its efforts on expanding fundamental businesses by launching new products, shortening the incubation periods for new products and new business ventures, and increasing basic research in order to establish a solid foundation for continuous development.

High-speed Synthesis of Dielectric Thin Film Materials by Combinatorial Film Deposition

Yoshiyuki Yonezawa Yoshinori Konishi Ryosuke Shimizu
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.112–116 (2004)

Fuji Electric is working on the development of new dielectric thin films with the prospect of application to integrated thin film capacitors and oxide thin film devices. In consideration of application to capacitors, the targeted specification calls for a lead-free material having both a high dielectric constant (>1,200) and high breakdown voltage (>1 MV/cm). Fuji Electric is working to increase the dielectric constants of conventional lead-free materials and also to develop $SnTiO_3$, a new dielectric material, charge-transfer type dielectric materials, and the like, but this type of search involving the synthesis and evaluation of new materials is extremely labor and time intensive. To solve this problem, combinatorial thin film technology, a high-speed screening technique said to compress 20 years into three months, has been advocated. This paper presents an overview of combinatorial thin film technology and its use at Fuji Electric.

Development of Environmentally Conscious Products

Hirohiko Watanabe Toshiyuki Kanno Masaharu Furukawa
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.107–111 (2004)

The date for compliance with collection and recycling regulations according to the EU's Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) directive and the date on which usage of six materials (lead, mercury, cadmium, hexavalent chromium, and two types of specially designated bromine-based fire retardants) is banned according to the "Restriction of Hazardous Substances" (RoHS) directive have been decided as August 13, 2005 and July 1, 2006, respectively.

Fuji Electric is actively involved in the development of environmentally conscious products. Of the materials developed in compliance with the above regulations, this paper focuses on Fuji Electric's efforts and describes the material characteristics regarding the two themes of reactive non-halogen fire-resistant materials for molding resin and lead-free solder materials for use in lead-free electronic devices.

Structural Control Method for Perpendicular Magnetic Recording Film

Shunji Takenoiri Yasushi Sakai Sadayuki Watanabe
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.120–122 (2004)

Development efforts to commercialize perpendicular magnetic recording film are intensifying. The granular media of CoPtCr-SiO_2 that Fuji Electric uses as a magnetic layer is a promising high-density recording media that aims to achieve 200 Gbits/in^2. However, in order to obtain excellent characteristics in a recording medium, the magnetic crystal grains must be made uniform, miniaturized and magnetically separated. This paper presents an example in which the size of magnetic crystal grains and the structure that magnetically separates them were controlled by controlling the size of Ru crystal grains and the surface structure in a CoPtCr-SiO_2 medium that uses Ru in the foundation layer.

A New Semiconductor Device with Trench Technology

Yoshihiko Nagayasu Naoto Fujishima Kunio Mochizuki
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.117–119 (2004)

By using a trench structure to enable the three-dimensional utilization of a silicon substrate, Fuji Electric has developed 700 V-class high voltage lateral MOS technology that exhibits the lowest output on-resistance in the industry. In Fuji Electric's proprietary method for manufacture, a deep (20 μm) stripe-shaped trench having a high aspect ratio is formed, ions are injected obliquely to create an offset drain region along the trench, and then an insulating layer is formed by oxidation and CVD. This method increases the cell density and realizes the best output on-resistance of 11 Ω mm^2 (device breakdown voltage of 750 V), which is the approximately 30 % less than that of a conventional high voltage MOSFET.

Top-emitting CCM-organic Light Emitting Displays

Hiroshi Kimura
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.127–131 (2004)

A top-emitting device has been developed for CCM-AM-OLED displays. The fabrication method for the transparent cathodes at the upper portion of the top-emitting device using opposing-targets sputtering and the optical design method of the OLED device structure utilizing optical simulation are introduced. A prototype of the CCM top-emitting device was fabricated by laminating a CCM substrate to a top-emitting device.

Rapid Inspection Technology for Microorganisms

Naohiro Noda Takamasa Asano Yujiro Kitaide
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.123–126 (2004)

In the food, pharmaceutical and many other industries, the capability to inspect microorganisms rapidly is required. Fuji Electric has studied the micro-colony technique as a method for quickly and easily inspecting microorganisms. From the results of the study, we learned by using the micro-colony technique it is possible to detect contamination by bacteria that causes food poisoning, heat-resistant bacteria, and fungi. The time required for detection was much shorter than in the case of using the conventional culture method, and the type of microorganism could be determined from the shape of the micro-colony. Moreover, it is predicted that automated machines will be used in the future to detect colonies quickly and easily.

無線設計技術と非接触 IC カード

近藤　史郎　　四蔵　達之
富士時報　Vol.77 No.2 p.133-136（2004）

非接触 IC カードアプリケーションが急速に広まりを見せている。それに伴いさまざまな特性のカードや，カード用チップを内蔵したリストバンド，時計，携帯電話などの異形媒体が市場に投入されつつあり，これら多様なメディアとリーダライタ（RW）との相互接続性確保が重要な課題となっている。本稿では，非接触 IC カードの無線通信技術に焦点をあててその課題と富士電機の取組みについて紹介する。主にデータリンク層と物理層の設計思想から，具体的な開発・設計手法までを解説する。

最新の最適化手法とソリューションの展開

北川　慎治　　竹中　道夫　　福山　良和
富士時報　Vol.77 No.2 p.137-141（2004）

本稿では，富士電機で研究開発している最新の最適化手法とそれを利用したソリューションの展開について紹介する。最適化手法としては，メタヒューリスティク手法および非線形システムの安定性理論に基づく手法を開発してきており，これらの技術により運用コスト最小化，制御品質最良化，機器最小化などのさまざまな顧客ソリューションを実現可能である。一例としてエネルギープラント最適運用におけるセンサ診断を示した。今後も顧客ソリューションを実現するべく，最適化技術の研究開発を進めていく。

マトリックスコンバータを利用した高効率電力変換

伊東　淳一　　小高　章弘　　佐藤 以久也
富士時報　Vol.77 No.2 p.142-145（2004）

マトリックスコンバータは交流電源から任意の交流電圧を直接変換するため，インバータに比べ変換効率が高い。また，直流中間部の電解コンデンサが不要であり，小型，長寿命などの特徴を持つ。富士電機では，マトリックスコンバータを実用化する新技術を開発した。本稿では，①低損失で交流スイッチを実現する逆阻止 IGBT，②小型化，高効率化を可能とする保護技術，③従来のインバータ制御が容易に適用できる仮想 AC-DC-AC 方式による制御技術，について紹介する。

蒸気タービンロータの異種材料溶接技術

今村　清治　　和泉　栄　　飯塚　実
富士時報　Vol.77 No.2 p.146-149（2004）

蒸気タービンの高温・高圧部と低温・低圧部のロータには，それぞれ使用条件に適した機械的特性を有する材料が用いられる。富士電機では，この両者のロータを溶接によって一体化する異種材料の狭開先溶接技術を開発した。実機サイズのロータを試作し，狭開先部の初層裏波溶接および多層溶接を実施し，さらに溶接部の非破壊試験，機械的特性試験など一連の検証試験を行った。また，地熱用ロータ翼溝部の補修技術として肉盛溶接（異種材料の溶接）技術も開発した。今後は製品としての 1 ケーシング再熱・非再熱タービンへの適用および地熱ロータ補修への適用を図る。

放射光 X 線によるナノレベル結晶構造解析

田沼　良平　　久保 登士和　　大沢　通夫
富士時報　Vol.77 No.2 p.150-153（2004）

放射光施設 SPring-8 に 13 社で設置した産業用専用ビームラインを利用して，Si のトレンチ加工に伴う微小領域のひずみ解析および磁気記録媒体の極薄膜の結晶構造解析について報告する。前者については，X 線をフレネルゾーンプレートで拡大することにより 1 μm 以下の空間分解能で 10^{-5} のひずみ測定に成功した。後者については，微小入射角 X 線回折法により 0.8 nm の Ru 層の結晶構造解析および 20 nm の hcp 磁性層中の fcc 相検出を実現した。SPring-8 の利用によりナノレベルの結晶構造解析が可能となった。

エッチングプロセスのシミュレーション技術

金子　公寿
富士時報　Vol.77 No.2 p.154-157（2004）

半導体製造分野のエッチングプロセスにおけるシミュレーション技術を開発したので紹介する。数値解析では，連続の式，Navier-Stokes 方程式および拡散方程式を用いた。さらに，配線膜のエッチングによる界面形状変化に ALE 法を適用している。この手法によって得られたエッチング断面の時間変化が観察結果とほぼ一致することを確認し，エッチング形状の予測に本数値解析が有効に利用できることを示した。

零相変流器における三次元非線形動的電磁界解析

松本　廣太　　工藤　高裕　　浅野　久伸
富士時報　Vol.77 No.2 p.158-161（2004）

漏電遮断器は小型化や世界の主要規格への対応を図ってきている。電磁界解析も各種手法の開発やコンピュータの高性能化と相まって三次元大規模解析が実用的になってきている。今回，漏電遮断器の零相変流器に積分要素法による電磁界解析を適用した。 3 極の零相変流器の地絡特性，単極特性，平衡特性に対して解析と実測との比較による検証を行ったので紹介する。各特性とも実用上，十分な精度が得られた。今後， 4 極の開発への適用をはじめ，電磁界解析を有効に活用していく予定である。

パワーエレクトロニクス主回路構造の解析技術

滝沢　聡毅　　ジニー オルゲス
富士時報　Vol.77 No.2 p.162-165（2004）

パワーエレクトロニクスの分野では，パワー半導体の進歩，特に高速スイッチング化の進展によって，電力変換装置の小型・高性能化が進んでいる。その反面，高速スイッチング化によるサージの高電圧化や放射ノイズの増大の問題が顕在化しつつある。富士電機では，これらの課題に対して，パワー半導体モジュールの内部構造や主回路配線構造のシミュレーションによる電磁界解析を行い，低サージ電圧化，低放射ノイズ化の検討を実施している。本稿では，これら検討事例について紹介する。

Recent Optimization Techniques and Applications to Customer Solutions

Shinji Kitagawa Michio Takenaka Yoshikazu Fukuyama
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.136–139 (2004)

This paper introduces recent optimization techniques developed at Fuji Electric and applications of those techniques to customer solutions. We have developed optimization techniques that are meta-heuristic techniques and techniques based on the theory of stability of non-linear systems, and these techniques enable various customer solutions including a reduction in operating costs, optimization of control quality, and device miniaturization. Sensor-based diagnosis in a system for the optimal operation of an energy plant is presented as an example. Fuji Electric will continue to develop optimization techniques to realize customer solutions.

Wireless Link Design for Contactless Smart Cards

Shiro Kondo Tatsuyuki Shikura
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.132–135 (2004)

Recently, contactless smart card applications have rapidly been spreading in popularity, and various types of cards and differently shaped media such as wristbands, watches and cell phones containing built-in ICs for smart cards are appearing on the market. Hence the inter-connectivity between such media and reading and writing devices (RWs) is an important issue. Focusing on the wireless communications technology for contactless smart cards, this paper describes design concepts for the data link and physical layers as well as specific examples of Fuji Electric's development and design methodology.

Welding Technology for Different Steel Materials in a Steam Turbine Rotor

Seiji Imamura Sakae Izumi Minoru Iizuka
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.144–147 (2004)

In high-temperature high-pressure and low-temperature low-pressure steam turbine rotors, different materials are utilized that have mechanical properties suitable for the respective conditions of use.

Fuji Electric has developed narrow gap welding technology for different steel materials to integrate both rotors by welding. A prototype rotor of actual size was made, first layer welding and multi-layer welding were implemented, and a series of verification tests such as nondestructive tests and mechanical properties tests were performed.

Fuji Electric has also developed cladding by welding technology (technology for welding different types of materials) as a technique for repairing the grooved part of rotor blades in a geothermal turbine.

Fuji Electric aims to apply this welding technology to single-casing reheat/non-reheat turbine products and to the repair of geothermal rotors.

High-efficiency Power Conversion with Matrix Converter

Junichi Itoh Akihiro Odaka Ikuya Sato
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.140–143 (2004)

Since a matrix converter directly converts arbitrary AC voltages from an AC power source, its conversion efficiency is higher than that of an inverter. Moreover, the matrix converter has the characteristics of small size and long operating life, and it does not require an electrolytic capacitor in an intermediate DC stage. Fuji Electric has developed new technology for commercializing matrix converters and this paper describes: (1) a reverse blocking IGBT that achieves AC switching with low loss, (2) protection technology that enables smaller sizes and higher efficiency, and (3) control technology based on a virtual AC-DC-AC system that simplifies the application of conventional inverter control.

Technique for Numerical Simulation of the Etching Process

Kimihisa Kaneko
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.152–155 (2004)

This paper describes a technique for numerical simulation of the etching process during semiconductor manufacture. The numerical analysis utilizes an equation of continuity, the Navier-Stokes equation and a diffusion equation. Furthermore, the ALE method is applied to the change in interface shape due to etching of the thin film. A time-varying profile of an etching cross-section simulated by this technique was largely in agreement with actual observed results, demonstrating that this numerical analysis technique can be used effectively to predict the actual etching form.

Nano-level Crystal Structure Analyses for Semiconductor Devices and Magnetic Recording Media using Synchrotron Radiation

Ryohei Tanuma Toshikazu Kubo Michio Ohsawa
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.148–151 (2004)

Using the industrial-use beamlines that were established at SPring-8 by a consortium of 13 companies, the microscopic strain accompanied by Si trench processing and the crystalline structures of extremely thin film magnetic recording media were analyzed. In the case of the former, X-rays were expanded with a Fresnel zone plate to successfully measure strain of 10^{-5} with submicron spatial resolution. For the latter, a grazing incidence X-ray diffraction technique was used to analyze the crystalline structure of a 0.8 nm Ru layer and to detect the fcc phase in a 20 nm hcp magnetic layer. Use of the SPring-8 facilities enable nano-level analysis of crystalline structures.

Technology for Simulating Power Electronics Circuit Structures

Satoki Takizawa Gjini Orges
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.160–163 (2004)

In the field of power electronics, advances in power semiconductors and the realization of high-speed switching, in particular, are enabling power converters to be made smaller and with higher performance. However, as switching speeds increase, the problems of higher surge voltages and radiation noise are becoming more conspicuous.

In response to these problems, Fuji Electric is studying ways to lower surge voltages and radiation noise by analyzing electromagnetic fields through the simulation of the internal structures of power semiconductor modules and the simulation of power circuit bus bar structures. This paper describes examples of those studies.

3-D Electromagnetic Computation for Zero Phase-sequence Current Transformers

Kota Matsumoto Takahiro Kudo Hisanobu Asano
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.156–159 (2004)

Earth leakage circuit breakers are being made smaller and in compliance with major global standards. Electromagnetic analysis is used in practical applications as 3D large-scale analysis made possible by the combination of various developmental methods and the higher performance of computers. Using the integral element method, we have applied electromagnetic analysis to zero phase-sequence current transformers for earth leakage circuit breakers.

The ground fault characteristics, single pole characteristic and equilibrium characteristic of a 3-pole zero phase-sequence current transformer were verified by analysis and measurement, and those results are reported in this paper. Each of the characteristics was obtained with a level of accuracy sufficient for practical use. In the future, we plan to apply this technology to the development of 4-pole devices and to effectively use electromagnetic analysis.

原動力設備プラントの最適運用と適用事例

項　東輝　　川森　亨　　福山　良和
富士時報　Vol.77 No.2 p.166−170（2004）

電気，熱，蒸気，空気などのエネルギーを必要とする工場，事務所，病院，大型ビルなどにおいては，コージェネレーションシステム，ボイラ，冷凍機，コンプレッサなどさまざまな原動力設備が用いられている。本稿では，原動力設備プラントの運用の全体最適化を実現する富士電機独自のソリューションおよびそれを支える各種要素技術の概要について説明する。また，トヨタ自動車(株)の生産工場の原動力設備プラントに対して，共同で最適運用制御システムを開発したので，その適用事例を紹介する。

Optimal Operation of Energy Utility Equipment and its Application to a Practical System

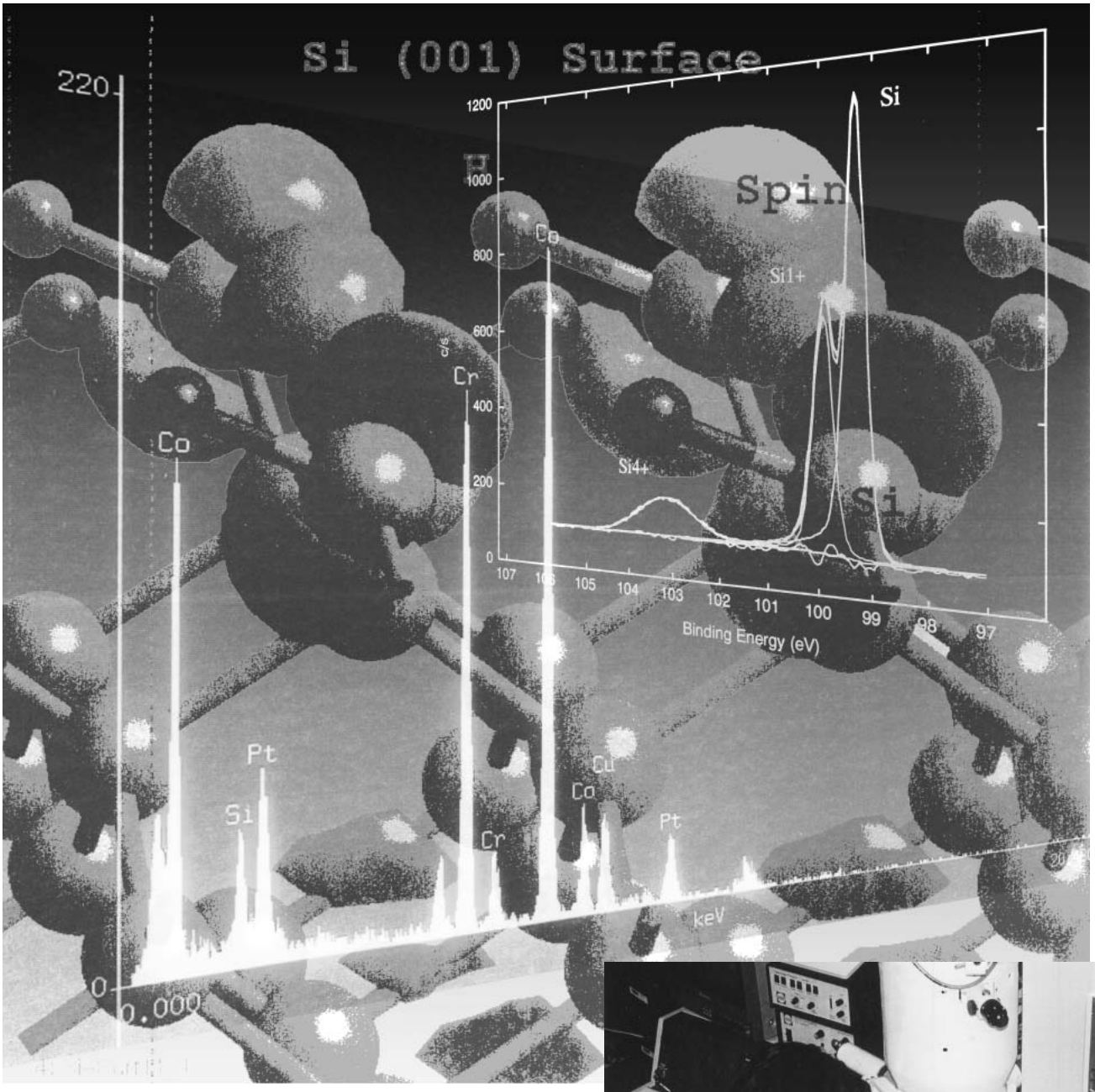
Donghui Xiang Tooru Kawamori Yoshikazu Fukuyama

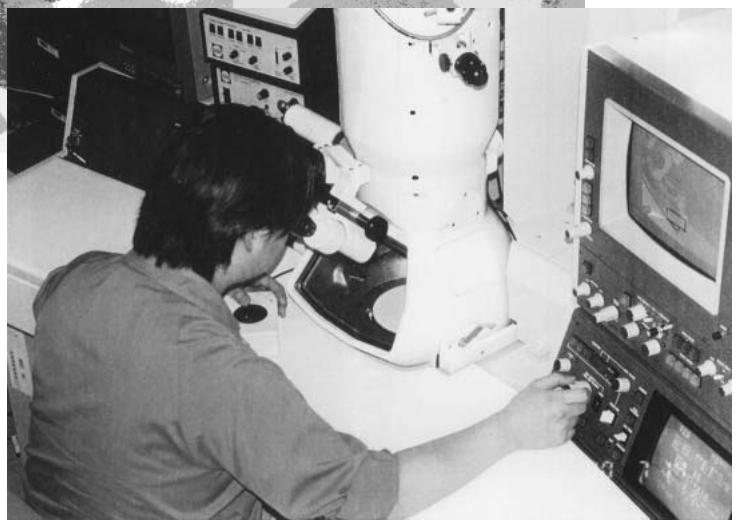
Fuji Electric Journal Vol.77 No.2 p.164–168 (2004)

Various types of energies such as electrical, thermal, steam energies and compressed air are required in factories, large offices, and hospitals. These energies are produced by various energy utility equipment such as cogeneration systems (CGSs), boilers, refrigerators, and compressors. This paper describes Fuji Electric's unique solution for total optimal operation of energy utility equipment, and shows an overview of the technologies utilized in the solution. In addition, a practical control system of the optimal operation for production facilities, which has been developed by a Toyota Motor Corporation and Fuji Electric jointly, is presented.

e-Front runners

環境，情報，サービス，コンポーネントをキーワードとして独創的な技術開発を蓄積しています。





富士電機は，地球環境と調和した技術とシステムづくりにより，明るく豊かな社会をめざして，たゆまず進化したいと考えています。
このテーマの実現に向けて，分子・原子の制御により，新しいものの性質や現象の発見につながる基礎研究を積み重ねて，新しい技術の時代を拓きます。

富士電機アドバンストテクノロジー株式会社

昭和40年6月3日　第三種郵便物認可　平成16年3月10日発行（年6回1，3，5，7，9，11月の10日発行）富士時報　第77巻　第2号（通巻第825号）

本誌は再生紙を使用しています。

雑誌コード 07797-3　　定価 735円（本体 700円）