

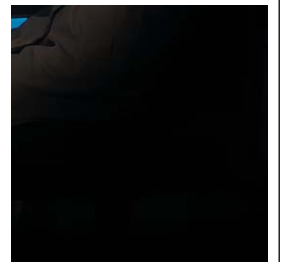
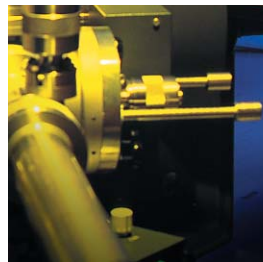
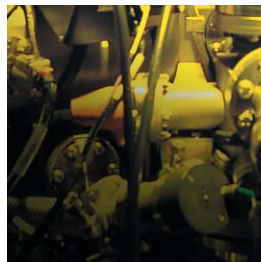
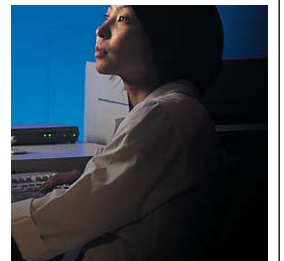
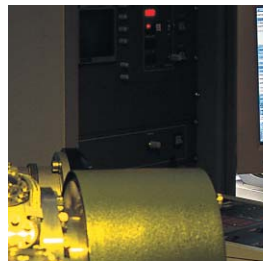
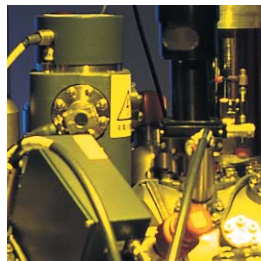
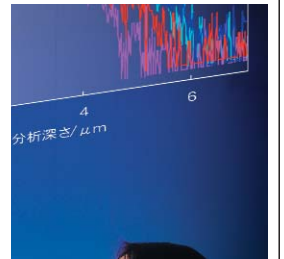
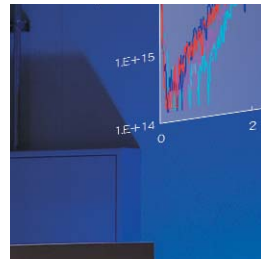
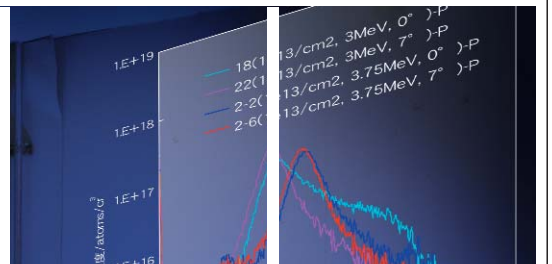
# 富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

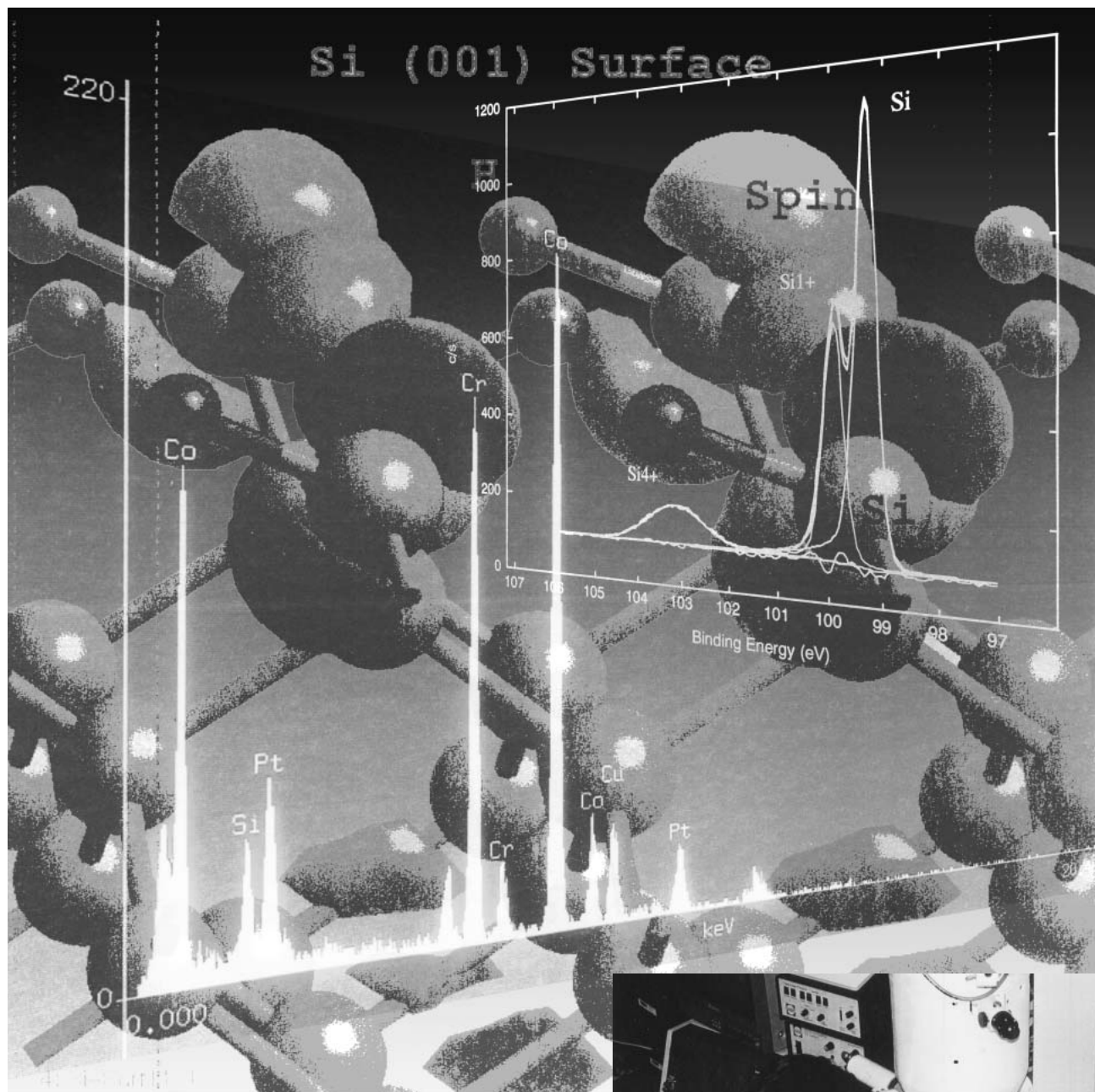


2002 VOL.75

## 解析・評価技術特集



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。



# 富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

9

2002 VOL.75

## 解析・評価技術特集

## 目次

曲がり角の「ものづくり」における解析・評価技術の役割 小林紘二郎	494 (2)
富士電機の解析・評価技術への取り組み 長野 恵 ・ 松山 秀昭 ・ 坂田 昌良	495 (3)
シリコントレンチ構造微視変形の解析 栗林 均 ・ 蛭田 玲子	497 (5)
放射光 (SPring-8) 利用による磁気記録媒体などの解析 大沢 通夫 ・ 田沼 良平	501 (9)
二次イオン質量分析技術の向上 植木 裕子 ・ 前田 賢彦	505 (13)
半導体製品の樹脂技術と解析 市村 裕司 ・ 伊藤 秀昭 ・ 石渡 統	509 (17)
マイクロ加工・直接接合における無機材料の表面界面評価 後藤 友彰 ・ 片倉 英明 ・ 塩川 国夫	513 (21)
はんだ付けのメカニズムと解析技術 渡邊 裕彦 ・ 下田 将義 ・ 金子 公寿	516 (24)
自動販売機における臭気・味覚の分析評価技術 内田 勝啓 ・ 永田 睦美 ・ 西脇 正剛	520 (28)
固体高分子形燃料電池における面内分布の解析 榎並 義晶	524 (32)
非接触 IC カードリーダーライタのシミュレーション技術 四蔵 達之 ・ 村上 益雄 ・ 近藤 史郎	527 (35)
パワーエレクトロニクス機器の電気系・機械系動作解析技術 松本 康 ・ 真下 明秀 ・ 佐藤以久也	530 (38)
交流電磁接触器の動的挙動の解析 和田 正義 ・ 吉本 博 ・ 北出雄二郎	535 (43)
有接点機器の長寿命化とその寿命予測 潮崎 克郎 ・ 河原木 豊 ・ 宮沢 秀和	539 (47)
大容量空気冷却タービン発電機における解析・評価技術 木村 誠 ・ 星 昌博	544 (52)

### 表紙写真



製品の高品质・高機能化を目指した「ものづくり」のために、物理モデルに基づく「解析・シミュレーション」技術やさまざまな「分析・評価」技術が多用されている。

富士電機では多くの物理現象を同時に連成させた手法によるシミュレーション技術や、半導体デバイス、磁気記録媒体など微小領域化および薄膜化に対応できる分析・評価技術の応用を進めている。

表紙写真は ppm から ppb に及ぶ高感度元素分析が可能な二次イオン質量分析装置とそれにより得られた薄膜デバイスの解析データの一部であり、「解析・シミュレーション」技術、「分析・評価」技術をイメージ的に表している。

# 富士電機の解析・評価技術への取組み

長野 恵 (ながの めぐみ)

松山 秀昭 (まつやま ひであき)

坂田 昌良 (さかた まさよし)

## 1 まえがき

近年では、「ものづくり」のためにやみくもにトライアンドエラーの実験を繰り返すのではなく、コンピュータという仮想空間の中で、一定の物理法則に基づいて仮想実験を行う「解析」または「シミュレーション」と呼ばれる技術が多用されている。しかしながら「シミュレーション」だけで現実世界のすべてのことが分かる訳ではなく、コンピュータの能力の制限や、物理量、物性値としてどのような数値を入れるかによって結果がまったく逆転することがしばしば起こりうる。口の悪い人に言わせれば、「シミュレーション」はいくらでもうそをつくことができるのである。

したがって、「シミュレーション」にあたっては、可能な限り実際の系に近い物理モデルや物性値を採用することが望ましく、また、その結果を何らかのかたちで実際に検証しておくことが、重要かつ不可欠になってくる。

このため、的確な物性値を把握したり、「シミュレーション」で予測したとおりの結果になっているかを確認する、あるいは意図したものとどこが違うかを見いだす手段として、さまざまな物理的・化学的原理に基づく「分析・評価技術」が用いられている。すなわち「分析・評価技術」と「解析・シミュレーション技術」は、「ものづくり」世界での車の両輪ともいえるのである。

本特集号は、このような背景のもとで、富士電機の技術開発や製品開発におけるこれら技術の最近の取組みについて紹介する。

## 2 分析・評価技術

分析・評価技術は、半導体デバイスの界面の構造や組成の特性に対する影響、磁気記録密度と磁性層微細構造との関係を明らかにするために微小領域化、薄膜化対応を進めている。

微細構造観察には透過電子顕微鏡 (TEM) が多用される。特に、電界放射型電子銃を備えた高分解能 TEM では

原子レベルの観察ができ、極微小部での構造や形態、結晶欠陥などの情報を得ることができる。さらに、エネルギー分散型 X 線分析装置を付加することにより 1 nm 以下の領域での元素分析を可能にしている。<sup>(1)(2)</sup>

結晶構造解析、特に微小領域や極薄の試料に対して、高輝度放射光 (SPring-8) を用いた X 線面内回折法により磁気記録媒体の磁性層の結晶性・配向性の解析が可能となり、結晶学的な観点から磁気特性の発現メカニズムを解明してきた。また、X 線吸収微細構造 (XAFS) による誘電体薄膜中の添加原子に対する配置評価を行ってきた。<sup>(3)</sup> さらに X 線トポグラフィ法などによってトレンチ型半導体デバイス内に発生する微小領域のひずみの評価にも挑戦している。

電界放射型走査オージェ電子分光法は 50 nm 程度の微小部の元素分析が可能であり、半導体デバイス・磁気記録媒体の表面分析に用いられている。イオンエッチングの併用によって深さ方向の元素分布を分析できることから、多層薄膜などの分析に有効な手法である。X 線光電子分光法 (XPS) は表面の酸化や吸着状態の分析および界面の状態分析に広く用いられている。X 線光学系の進歩により従来困難であった微小物の分析も約 10 μm まで可能になっている。

二次イオン質量分析法 (SIMS) は ppm から ppb までの高感度の元素分析が可能であるが、半導体デバイスにおいてはさらなる空間分解能向上が求められ、数十 nm の微小部の分析が可能な装置の出現が待たれる。SIMS ではこれまで困難であった絶縁材料の分析や、表面の高濃度の存在が深さ方向濃度分布に与える影響を回避するために、試料の裏面から測定する手法などを紹介する。

走査プローブ顕微鏡 (SPM) では摩擦力を検出することによって磁気記録媒体表面の潤滑層の局所的な分布を評価している。<sup>(5)</sup> また、磁気力を検出する磁気力顕微鏡では磁気記録パターンが観察でき、垂直磁気記録膜において約 20 kfc/mm の線記録密度が実証されている。<sup>(6)</sup>

さらに、キャパシタンスの変化をとらえる走査容量顕微鏡を用いて、半導体デバイスの微小領域での不純物の二次



長野 恵

材料技術開発および分析評価技術、機能デバイス開発に従事。現在、生産技術研究所長。応用物理学会会員。



松山 秀昭

薄膜材料の開発と解析の業務に従事。現在、(株)富士電機総合研究所材料技術研究所グループマネージャー。応用物理学会会員。



坂田 昌良

機械系シミュレーション技術の開発に従事。現在、生産技術研究所第三開発部。日本機械学会会員。精密工学会会員。電気学会会員。

元分布の評価を試みている。SPM に関しては今後のさらなる進展が期待される。

### ③ 解析・シミュレーション技術

昨今では、設計段階で、機能、性能を解析・評価する手段として、コンピュータを利用したシミュレーション技術が日常的に活用されるようになってきている。

パワー半導体デバイスはシリコン、銅、セラミックス、はんだなど、多くの異種材料で構成されている。温度自体は百数十とタービンなどに比較するとはるかに低いが、温度変化に対する熱膨張差が異なるため、内部に発生する熱応力は、原子力機器や火力タービンなどよりも厳しい状況になっている。このためにシミュレーション技術では、デバイス内部の温度分布や、その温度分布に対する熱応力、熱変形を定量的に予測し、構造・寸法の最適化を行ったり、寿命を確保するための材料選定により、性能、信頼性を確保できる製品設計を可能にしている。

インバータ装置、各種電子機器などの小型化にあたって、熱伝導解析や数値流体解析 (CFD) の適用により、筐体 (きょうたい) 内での流れや温度分布を直感的に把握することができ、回路パターン上での最適な部品配置や冷却フィンの最適化、乱流の利用などにより課題を解決している。

圧力センサなどの各種センサ機器の開発では、高精度化の追求により、従来は問題にならなかった温度変化に対するわずかな変形が特性に大きく影響する。温度変化に対する影響を小さくする構造をシミュレーション上で検討することによって、開発のスピードアップや性能向上を図ることができる。

最近では、樹脂成形、プレス加工、鋳造、はんだ付け、溶接、ワイヤボンディングなどの製造技術に適用し、最適条件の設定やメカニズム自体の論理的な解明による新しい製造方法への模索を進めている。<sup>(7)</sup>

さらに、電子デバイスの特性予測や回路、制御シミュレータ、EMC (Electromagnetic Compatibility) など、製品、製造開発におけるシミュレーション技術は必須の基盤技術<sup>(8)</sup>となっている。

より現実に近い状態を模擬するためには、多くの物理現象を加味したモデルが必要になってくる。従来、単一の物理現象を再現するだけであったシミュレーション技術も、電磁力、熱、流れ、振動、というように、多くの物理現象を同時に連成させて解析し、現実の現象の再現を目指している。

さらに、これらの物理モデルを決定するためには、論理的な検討に加えて、材料分析、実験測定などの評価技術が重要となる。例えばパワー半導体デバイスでは、接合界面の観察や、はんだ材料の分析などの実験的なデータを取得することで、ようやく物理モデルの構築ができ、次のステップとしてシミュレーションへの展開が可能になる。

最新の分析技術は、よりミクロの現象をつかまえること

が可能となり、構造全体をとらえていたシミュレーション技術も、材料物性、接合界面などのミクロな現象への適用を進めようとしている。

一方、タービンや水車、回転機などの性能確認における振動、ひずみ、温度測定などは、何十年となく続けられている評価手段であるが、これらの技術は今後とも永久になくなることはない。これらのデータの積み重ねが、シミュレーションの予測精度の向上につながっている。タービン発電機の試験では数百点に及ぶ、温度、振動、ひずみ、磁界などのデータをリアルタイムで処理し、グラフ化し、LAN を用いてこれらの情報を、多くの技術者に共有化することで、新しい知見が見いだされている。

解析・シミュレーション技術は、その前提にどれだけの技術的な積み重ねがあるかで結果が変わることを十分に認識する必要がある。

### ④ あとがき

富士電機の「分析・評価技術」と「解析・シミュレーション技術」への取組みの一端を紹介した。これらの技術はともに日進月歩の技術であり、最新の技術に着目し、有効な手法を活用していくことが重要である。今後、応用展開を進め、新製品の開発はもとより、生産ラインの「ものづくり」技術の開発、最適化に大いに役立てていく所存である。

#### 参考文献

- (1) Tsuji, T. et al. Analysis of High Leakage Current in 4H-SiC Schottky Barrier Diodes Using Optical Beam-Induced Current Measurement. Materials Science Forum. vol.389-393, 2002, p.1141-1144.
- (2) 久保木孔之ほか. CrW 下地膜構造の CoCrTaPt 膜成長へ与える影響. 日本応用磁気学会誌. vol.24, 2000, p.295-298.
- (3) Yonezawa, Y. Growth and Electrical Properties of Fe Doped (Ba, Sr) TiO<sub>3</sub> Thin Films Deposited by Pulsed Laser Deposition. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol.688, 2002. in press.
- (4) 植木裕子ほか. SIMS による Si 窒化膜を含む多層絶縁膜の評価. 第 60 回応用物理学会学術講演会予稿集 2. 1999, p.572.
- (5) Kumagai, A. et al. High Spatial Resolutive Method Observing the Lubricant Distribution on Magnetic Recording Media. J. of Tribology. vol.122, 2000, p.776-779.
- (6) 北野真弓ほか. 非晶質 Tb-Co/Co-Cr-Pt-B 複合垂直媒体の記録特性と熱緩和特性. 日本応用磁気学会誌. vol.26, 2002, p.238-242.
- (7) 坂田昌良ほか. 製造プロセスにおけるシミュレーション技術. 富士時報. vol.73, no.9, 2000, p.513-516.
- (8) 黒谷憲一. シミュレーション技術の動向と富士電機の取組み. 富士時報. vol.74, no.6, 2001, p.331-334.

# シリコントレンチ構造微視変形の解析

栗林 均(くりばやし ひとし)

蛭田 玲子(ひるた れいこ)

## 1 まえがき

半導体デバイスの目覚ましい高性能化，特に，低オン抵抗に伴い，シリコン(Si)基板への三次元的な素子形成が注目されている。富士電機では，トレンチ横型パワーMOS(Metal Oxide Semiconductor)デバイス<sup>(1)</sup>をはじめとし，シリコン基板にトレンチ(溝)を掘って，その側壁にゲートを形成する，トレンチゲート素子の開発・系列化を進めている。トレンチゲート素子は，チャンネル密度が高く，オン抵抗が小さい。そのため小型化・低消費電力化が可能となり，パワーICの主スイッチをはじめさまざまな電源・モータ制御分野で適用が期待されている。

また，トレンチゲート素子では，トレンチ構造が素子特性・信頼性に大きな影響を及ぼすため，その最適化が重要な課題になっている。ゲート耐圧，信頼性，さらに電子や正孔などのモビリティを改善するためには，トレンチのコーナが丸まっいて，側壁が平たんであることが望まれる。このようなトレンチ構造を得るために，トレンチ構造改善のためのプロセス技術，およびトレンチ構造の評価・解析技術の開発が進められている。トレンチ構造の評価としては，トレンチのマクロな形状についての走査電子顕微鏡(SEM)による評価，トレンチ側壁のミクロな凸凹についての原子間力顕微鏡(AFM)による評価，トレンチ内の局所領域の形態や応力などについての透過電子顕微鏡(TEM)による評価などが挙げられる。

富士電機では，水素雰囲気中，高温(1,000 ~ 1,100 )でのアニール処理により，シリコン構造体の変形が起こることに着目し，高温水素アニールによるシリコントレンチ構造微視変形についての研究を行っている。

本稿では，高温水素アニール処理によるトレンチ形状のマクロな変形とトレンチ側壁のミクロな凸凹の変化について，解析・評価結果を紹介する。

## 2 実験

サンプルとしてストライプ状トレンチを形成した6イン

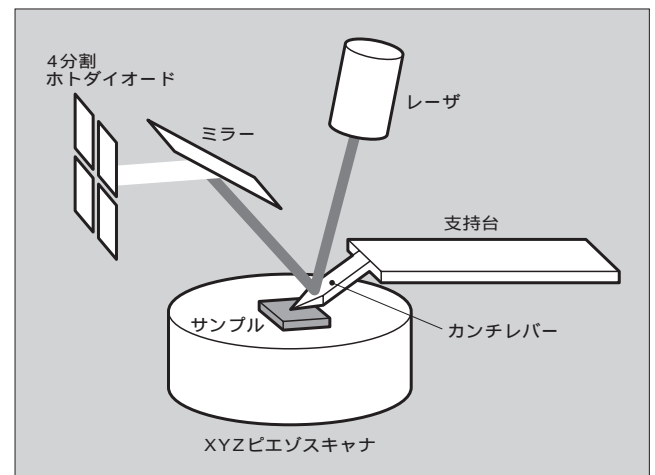
チシリコン基板を用いた。トレンチエッチングはHBr系のRIE(Reactive Ion Etching)装置で行い，トレンチの側壁は{110}面になるように加工した。

高温水素アニール処理は枚葉式の熱処理炉を用い，温度・圧力・処理時間をパラメータとして実験を行った。

トレンチ形状のマクロな変形については，シリコン基板をストライプ状トレンチの長手方向に垂直にへき開し，トレンチの断面形状をSEM(S-4700)により評価した。

トレンチ側壁のミクロな凸凹については，シリコン基板をストライプ状トレンチの長手方向に平行にへき開することによって側壁を表面に出し，AFM(NanoScope)により評価した。AFMの観察原理を図1に示す。先鋭化された探針の付いたカンチレバーとサンプルとの原子間力を検出している。カンチレバーに反射されたレーザー光を4分割ホトダイオードで受け，その出力が一定になるようにZ軸ピエゾスキャナを駆動する。その状態でカンチレバーがサンプル表面を走査し，そのときのピエゾスキャナ駆動信号変化から，サンプル表面での原子レベルでの凸凹評価ができる。本実験では，サンプルにかかる力が小さく，摩擦の影響を受けにくい，タッピングモードでの評価を行った。

図1 AFMの観察原理



栗林 均

半導体プロセスの研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所デバイス技術研究所。応用物理学会会員。



蛭田 玲子

半導体デバイスの分析・解析技術の研究開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所デバイス技術研究所。応用物理学会会員。

③ 結果および考察

3.1 トレンチ形状のマクロな変形

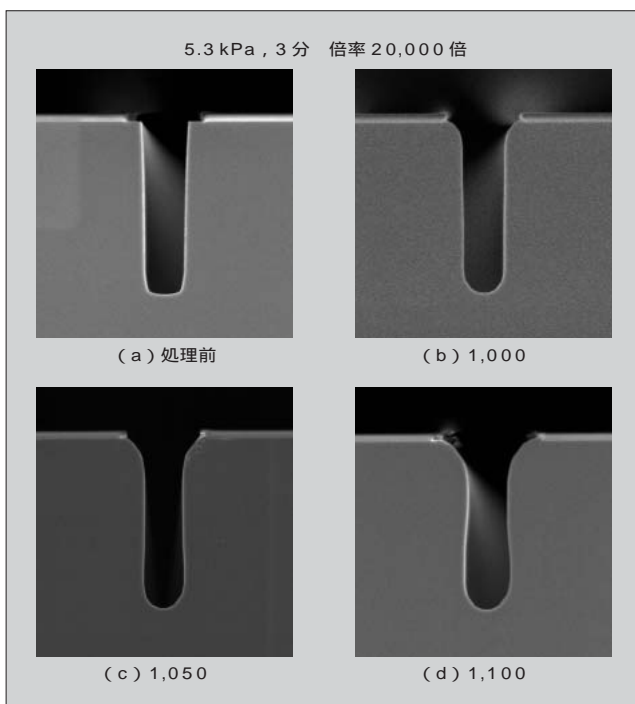
水素アニール温度を変えたときのトレンチ形状断面 SEM 像を図 2 に示す ( 圧力は 5.3 kPa, 処理時間は 3 分 )。高温水素アニール処理によりトレンチコーナが丸まっている。また, その傾向は温度が高いほど顕著である。ここで, シリコンの融点は 1 気圧で 1,412 °C であることから, この変形は融解によるものではない。また, シリコン原子の蒸発・エッチングについても, 実験の温度範囲ではほとんど起こらない。高温水素アニールによるトレンチの変形はシリコン原子の表面拡散によるものと考えられる。シリコン原子が基板表面を動き回ることによって, 結果的に, トレンチ上部コーナ凸部の原子が, 基板表面やトレンチ底部に移動し, 底部コーナ ( 凹部 ) が周辺の原子を吸収することで変形が起きている。実際に素子を作製するためには, プロセスに適したトレンチ形状にする必要がある。例えば, 図 2(d) の形状では, コーナは丸まっているが, 変形が進みすぎて開口部付近が狭くなり, トレンチ内に逆テーパが形成されている。このような形状では, 後に続くポリシリコン埋込みの際に空孔ができてしまい, ポリシリコンのエッチング工程で不具合の発生が懸念される。プロセスに適したトレンチ形状を検討するために, 以下の数値解析を行った。

一般に, 表面拡散による変形は式 1 で表される。<sup>(4)(5)</sup>

$$v_n = \frac{D_s}{kT} \frac{X_s}{s^2} \frac{2K}{s^2} = B \frac{2K}{s^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで,  $v_n$ : 表面の法線方向への移動速度 ( m/s )  
 $D_s$ : 拡散定数 ( m<sup>2</sup>/s )

図 2 高温水素アニール処理でのトレンチ構造変化



- : 表面エネルギー ( eV/m<sup>2</sup> )
- : 原子 1 個あたりの体積 ( m<sup>3</sup> )
- $X_s$ : 表面上単位面積あたりの原子の個数 ( m<sup>-2</sup> )
- $K$ : 曲率 ( m<sup>-1</sup> )
- $s$ : 表面に沿った弧長 ( m )

式 1 から計算されるトレンチ形状を図 3 に示す。ここで,  $B$  は式 1 の拡散方程式を計算する際の係数であり, 拡散定数, 表面エネルギーをパラメータとして含んでいる。  $t$  は処理時間であり, 両者の積  $Bt$  はトレンチ変形の進行を表す。トレンチ変形前 (  $Bt = 0$  ), さらに変形が  $Bt = 0.002$ , 0.02 で進んだときのトレンチ形状を重ねて示している。SEM 像 ( 図 2 ) と変形の様子を比較することによって, 計算結果は高温水素アニールによるトレンチ変形の特徴をよく表していることが分かる。シリコンの表面エネルギー = 6.24 × 10<sup>18</sup> eV/m<sup>2</sup> の値を使用し, 実験結果 [ 図 2 b ) ] と比較することによって, シリコン原子表面拡散の拡散定数として約 2 × 10<sup>6</sup> nm<sup>2</sup>/s ( 1,000 °C, 5.3 kPa ) の値を得た。

次に, 水素圧力を変えたときのトレンチ上部コーナの形状を図 4 に示す ( 温度は 1,000 °C, 処理時間は 3 分 )。トレンチの変形は大きな圧力依存性を持ち, 圧力を下げるほど大きく変形することが分かった。SEM 像からコーナ部の曲率 (  $K$  ) を読み取り, 曲率と圧力 (  $P$  ) との相関を図 5 に示す ( 温度は 1,000 °C, 処理時間は 3 分 )。曲率は圧力に比例して変化しており, 次式で表される。

$$K \propto P \dots\dots\dots (2)$$

さらに, 式 1 から計算されるトレンチの変形について, 処理時間と曲率の相関を図 6 に示す。曲率が処理時間の - 1/4 乗で減少しており, 次式で表される。

$$K \propto (Bt)^{-1/4} = \left( \frac{D_s(P)}{kT} t \right)^{-1/4} \dots\dots\dots (3)$$

表面拡散の拡散定数  $D_s$  のみ圧力依存があると考えられるので, 式 2), 式 3) から次式が得られる。

$$D_s(P) \propto P^{-4} \dots\dots\dots (4)$$

よって, 表面拡散の拡散定数が圧力の - 4 乗に比例して減少することが分かった。

トレンチ形状のマクロな変形の評価・解析によって, 変形が表面拡散によって起こること, また拡散定数の値およびその圧力依存性が明らかになった。このことにより, さ

図 3 トレンチ変形の数値計算結果

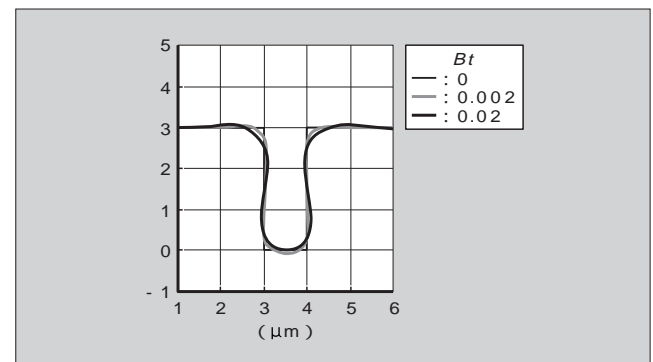
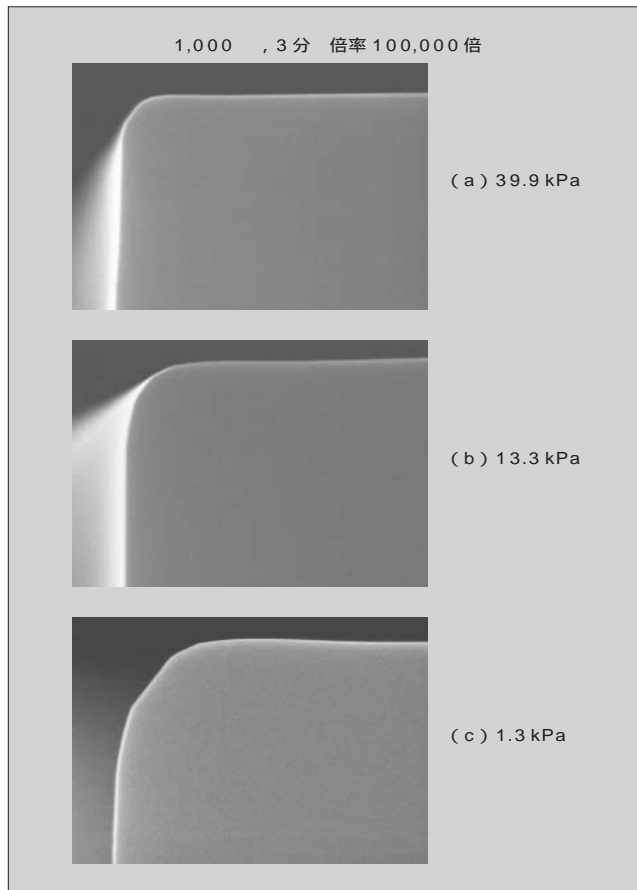


図4 トレンチコーナ拡大像



さまざまなデバイス・プロセスに合わせて、数値計算によるトレンチ形状最適化の検討が可能となった。

図5 高温水素アニールによる圧力とコーナ曲率

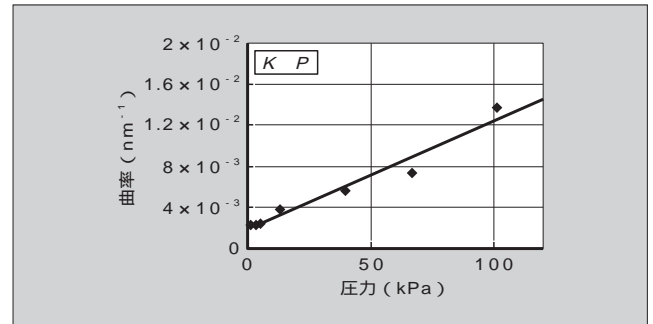


図6 高温水素アニールによる処理時間とコーナ曲率

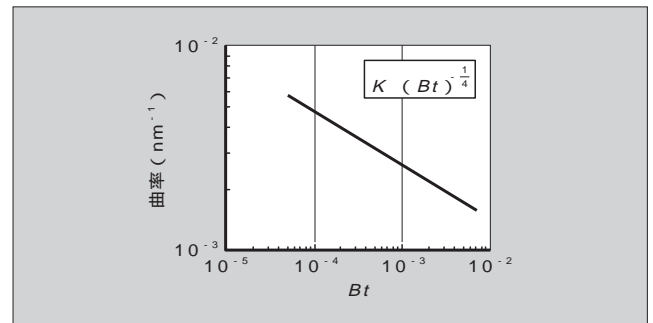
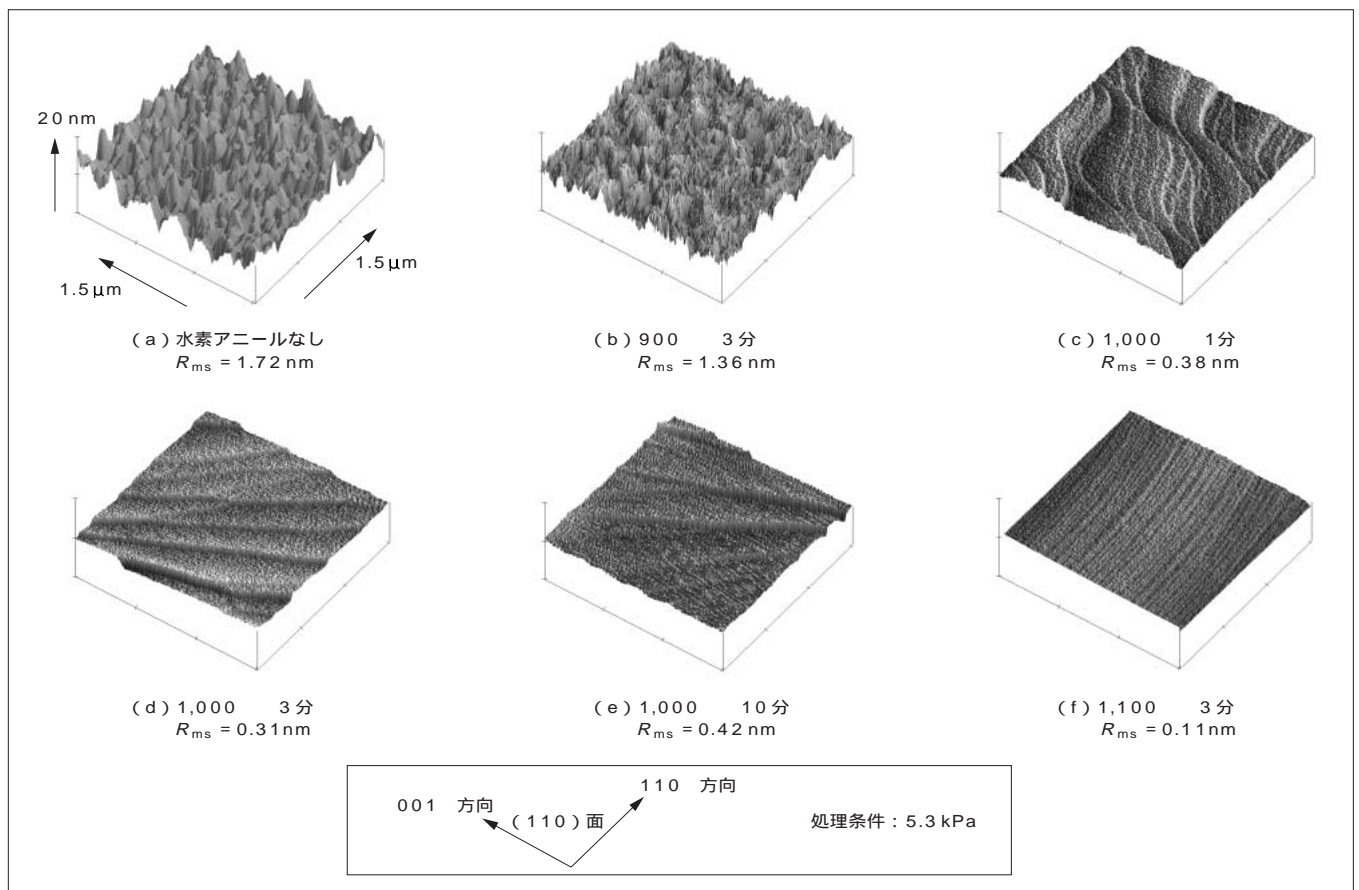


図7 トレンチ側壁のAFM像





### 3.2 トレンチ側壁のミクロな変化

水素アニール処理温度を変えたときのトレンチ側壁のAFM像を図7に示す(圧力は5.3 kPa)。また、それぞれの側壁表面の粗さを $R_{ms}$ (平方根平均ラフネス)で示している。処理が進むに従い、平坦になっていることが分かった。さらに、側壁表面に原子ステップが形成され、処理に伴って特徴的な振舞い<sup>(9,10)</sup>をしている。(a)はトレンチエッチング後、高温水素アニール処理前の側壁の状態である。トレンチエッチングの際に形成された大きな凸凹が見られる。bは900℃3分の処理後で、大きな凸凹の表面に細かい凸凹ができており、表面拡散が起こり始めていることが分かる。(c)は1,000℃1分の処理後で、トレンチエッチングの際に形成された大きな凸凹が、蛇行した原子ステップの形成とともになくなっている。(d)は1,000℃3分の処理後で、ステップバンチング(原子ステップの重なり)した直線状の原子ステップが見られる。(e)は1,000℃10分の処理後で、(d)に比べ原子ステップの間隔(テラス幅)が広がっている。(f)は1,100℃3分の処理後で、1原子ステップから成る非常に平坦な表面となっている。

原子ステップは、シリコン原子が表面拡散により動いて平坦化が起こる過程で、表面エネルギーを下げるために形成される。特に、トレンチ側壁においては、トレンチ形状のマクロな変形に伴って、トレンチの表面側から底部へ、シリコン原子の動きが生じている。このことによって、トレンチ側壁において原子ステップの特徴的な振舞い<sup>(9,10)</sup>が起こっていると考えられる。

トレンチ側壁のミクロな凸凹の評価によって、高温水素アニールにより、側壁が平坦になり、原子ステップが形成されることが明らかになった。さらに、トレンチ形状に起因する、特徴的な原子ステップの振舞い<sup>(9,10)</sup>が見いだされた。

## 4 あとがき

高温水素アニール処理による、シリコントレンチ構造微視変形の解析・評価を行い、次の結果を得た。

- (1) トレンチ形状のマクロな変形は、表面拡散によって起こる。表面拡散の拡散定数は約 $2 \times 10^6 \text{ nm}^2/\text{s}$ (1,000℃、

5.3 kPa)である。また、拡散定数は圧力の $-4$ 乗で減少する。

- (2) トレンチ側壁の凸凹は原子レベルで平坦になる。

今後、トレンチゲート素子の高性能化・高信頼性を、さらに進めるためには、トレンチ構造の評価技術がますます重要になってくる。評価技術の確立を迅速に進め、高性能化・高信頼性に貢献できるよう取り組む所存である。

本研究、特にトレンチ構造変形の解析は、大阪大学産業科学研究所岩崎研究室との共同研究による成果であり、始終懇切なご指導をいただいた岩崎裕教授、須藤孝一助手に謝意を表する次第である。

### 参考文献

- (1) Fujishima, N. et al. A Trench Lateral Power MOSFET using Self-Aligned Trench Bottom Contact Holes. IEDM Tech. Dig. 1997, p.359-362.
- (2) Kim, J. et al. A Novel Process Technique for Fabricating High Reliable Trench DMOSFETs using Self-Align Technique and Hydrogen Annealing. Proceedings of ISPSD. 2001, p.139-142.
- (3) Hakuba, H. et al. Roughness of Silicon Surface Heated in Hydrogen Ambient. J.Electrochem.Soc. vol.142, no.9, 1995, p.3092-3098.
- (4) Mullins, W.W. Theory of Thermal Grooving. JAP. vol.28, no.3, 1957, p.333-339.
- (5) Mitsutake, K. et al. Theoretical Study on the Formation Process of Empty Space in Silicon (ESS). Solid State Device and Materials. 2000, p.198-199.
- (6) Bermond, J.M. et al. The Equilibrium Shape of Silicon. Surf. Sci. vol.330, 1995, p.48-60.
- (7) 栗林均. 第49回応用物理学関係連合講演会. 29p-G-11, 2002.
- (8) Kuribayashi, H. et al. to be published in J. Vac. Sci. Technol.
- (9) 蛭田玲子. 第49回応用物理学関係連合講演会. 29p-G-12, 2002.
- (10) Hiruta, R. et al. to be published in J. Vac. Sci. Technol.

# 放射光 ( SPring-8 ) 利用による磁気記録媒体などの解析

大沢 通夫 (おおさわ みちお)

田沼 良平 (たぬま りょうへい)

## 1 まえがき

世界一の放射光施設「SPring-8」に、富士電機を含む13社で、材料解析を目的とした産業用専用ビームライン「サンビーム」を建設し、立上げを行い、1999年10月から各社交代で利用している<sup>(1)</sup>。SPring-8の放射光は、X線領域で世界一の輝度を持つため、これをいかに活用するかが重要である。各社はさまざまな分野で、材料解析の課題に取り組んでおり、2001年8月には、「サンビーム研究発表会」を開き、これまでの各社の成果を発表した。各社は、エレクトロニクス分野をはじめ、素材、エネルギー、環境分野におけるさまざまな材料の解析課題に取り組んでいる。

富士電機は、これまで、X線面内回折法を用いて、HDD (Hard Disk Drive) 用磁気記録媒体の磁性層解析に重点的に取り組んできており、SPring-8の高輝度放射光を利用することにより、磁性層中に存在する積層欠陥やfcc相の評価ができることを示してきた<sup>(1)(3)</sup>。また、サンビ-

ーム研究発表会では、Al基板磁気記録媒体の基板表面テクスチャ方向への磁気異方性発現メカニズムについても報告した<sup>(3)</sup>。ここでは、最近の成果として、非加熱成膜磁気記録媒体の解析結果を中心に報告する。この内容の一部は、すでに他でも報告している<sup>(4)(5)</sup>。

この他に、利用分野を広げるために、幾つかの材料的課題に対し、放射光を利用した解析の試みを行ってきている。その概要についても報告する。富士電機がこれまでに、SPring-8を利用して行ってきた材料解析の成果および現在の検討状況をまとめて表1に示す。

## 2 X線面内回折法による非加熱成膜磁気記録媒体の解析

HDD用磁気記録媒体は、最密六方構造(hcp構造)のCo系の薄い(10~20nm)多結晶薄膜を用いており、結晶のc軸方向が磁化容易軸であるため、結晶の方位(配向

表1 SPring-8放射光を利用した富士電機の材料解析の成果および取組みの現状

手法	利用したSPring-8のビームライン	対象と課題	成果および検討状況	参考文献
X線回折	産業用専用ビームライン (BL16XU)	X線面内回折法による磁気記録媒体の結晶性・配向性解析	磁性層に存在する積層欠陥およびfcc相の評価が可能	(1), (3)
			Al基板磁気記録媒体の磁気異方性発現メカニズムの解明	(3)
			非加熱成膜磁気記録媒体の結晶性・配向性向上メカニズムの解明	本論文, (4), (5)
XAFS (X線吸収微細構造)	産業用専用ビームライン (BL16B2)	りん酸形燃料電池のPt系合金触媒のXAFS解析	PtCo合金触媒は、Coとの合金化によりPtの電子状態(5d軌道)が変化する。	(10)
		磁気記録媒体磁性層の原子周辺構造解析(全反射蛍光XAFS法)	CoとPtの合金形成状況の原子レベルでの解析(継続中)	(12)
	共用ビームライン (BL01B2)	新しい表面XAFS法(GG-XAFS法)	新しい表面層のXAFS解析法としての可能性を示した。	(13)
		酸化物強誘電体BST薄膜への添加原子の原子周辺構造解析(多素子SSD蛍光XAFS法)	BST膜へ添加したFe原子は、原子価が3価であり、Tiサイトに存在することを明らかにした。	(11)
X線反射率	産業用専用ビームライン (BL16B2)	磁気記録媒体多層膜のX線反射率解析	磁気記録媒体保護層および磁性層の膜厚、密度、表面・界面粗さの評価が可能	(14)
X線回折 X線トポグラフィー	産業用専用ビームライン (BL16XU, BL16B2)	Si微細加工部のひずみ評価法の検討	X線トポグラフィー像の拡大観察法について検討中	—



大沢 通夫

材料解析の研究に従事。現在、(株)富士電機総合研究所材料技術研究所参与。応用物理学会会員、放射光学会会員。



田沼 良平

水処理、レーザ、燃料電池、磁気記録媒体、放射光技術の研究に従事。現在、(株)富士電機総合研究所材料技術研究所副参与。工学博士。応用物理学会会員。

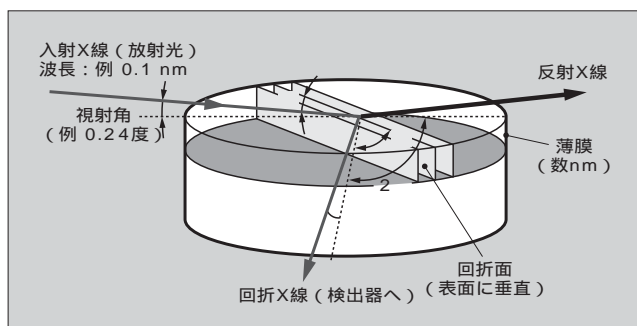
性)の制御が重要である。また、記録密度を向上させていくうえで、結晶の微細化・均一化とともに良好な結晶性を実現させることも重要である。このような薄い多結晶薄膜の結晶性および配向性を評価するうえで、放射光を利用したX線面内回折法が強力な評価手法となることを、富士電機はこれまでに、つくばの放射光施設「PF」(Photon Factory)を利用した解析により示してきている。

図1は、X線面内回折法の説明図である。放射光(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線のうち、特に、試料面から微小な角度(出射角)で出てくる回折線を選択的に検出する。この方法では、放射光(入射X線)が全反射され、試料に対するX線の進入深さが10nm程度以下となるため、10nm程度以下の表面層の情報だけが得られ、さらに、微小な出射角で出てくる回折線だけを検出することにより、基板に対し垂直な結晶面だけを選択的に検出するため、磁性層の結晶性と配向性の両者を、下地層などの情報による妨害を受けずに、正確に評価することができる。SPring-8の放射光は、輝度が世界一高いため、世界一高感度かつ高精度なX線面内回折測定が可能である。

HDD用の磁気記録媒体は、これまでのパソコンへの用途他に、AV(Audio Visual)機器などへも用途を拡大しつつあり、記録密度のさらなる向上を目指し、磁性層の薄膜化、磁性層組成の改良、下地層や層構成の検討などの研究開発が活発に行われている。これまでは、結晶粒の微細化のために、CoCr系の磁性材料が使われ、スパッタ法により基板を加熱して成膜することにより、Crリッチな相を結晶粒界に偏析させてCoリッチな磁性結晶粒の微細化、均一化および磁氣的孤立化を実現させてきた。また、Co結晶粒のc軸を面内に配向させるため、体心立方構造(bcc構造)であるCr系下地層が用いられてきたが、これまでの解析によれば、成膜時の基板加熱により、Co結晶粒のc軸の面内への良好な配向性も実現していた。

このようなCoCr系磁性層/Cr系下地層の構成を持つ磁気記録媒体に対し、最近、Ruを下地層としてCoPt系の磁性層を用いた場合に、成膜時の基板加熱なしで、良好な磁気特性が得られることが報告された<sup>(9)</sup>。しかし、この層構成により基板加熱なしで良好な磁気特性が得られるメカニズムは明らかではなかった。そこで、Ru下地を用いた磁気記録媒体が、いかなるメカニズムにより、基板加熱なし

図1 X線面内回折法の説明図



で良好な磁気特性を示すのかを解明するために、SPring-8を利用したX線面内回折法により、各層の結晶性と結晶配向性を詳細に調べる実験を行った。磁性層の厚さは、良好な特性を得るために10nm以下であり、このような薄い膜の解析に、SPring-8は威力を発揮した。

図2に、実験に用いた磁気記録媒体の層構成を示す。ガラス基板上に、W系の下地層、Ru中間層、CoPt系磁性層、a-C保護層を順次スパッタ法で形成する。CoPt系磁性層材料には、結晶粒の微細化、均一化および磁氣的孤立化を促進させるためにSiO<sub>2</sub>を添加した、グラニューラ型の磁性材料を用いた。各層の結晶性、配向性を調べるために、各層で成膜を止めて、その上に保護層であるa-C膜(5nm)を形成した試料を作製した。

SPring-8でのX線面内回折測定は、産業用専用ビームラインBL16XUのX線回折装置を用いて、10keV(波長:0.124nm)または12.4keV(波長:0.1nm)の入射X線エネルギー条件で測定した。a-C膜は金属に比べ、全反射臨界角が小さいため、視射角は、a-C膜の全反射臨界角とその下の金属膜の全反射臨界角の中間の角度(0.2~0.3度)に設定した。そのように視射角を設定することにより、非晶質であるa-C膜は結晶ピークを示さないため、その下の薄い(10nm程度以下)磁性層などの金属層のみの面内回折パターンが得られ、さらに下にある下地層などの金属層は検出されない。

図3は、そのような条件で、各層で成膜を止めた試料について測定したX線面内回折パターンである。下地層、中

図2 非加熱成膜磁気記録媒体の層構成

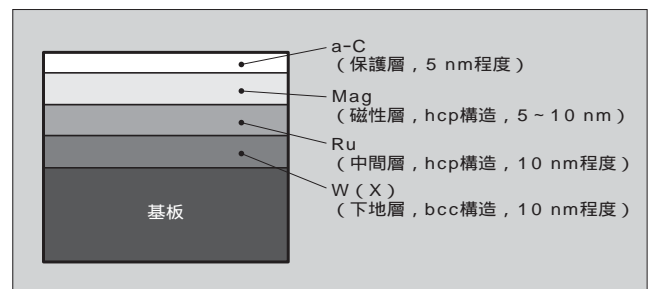
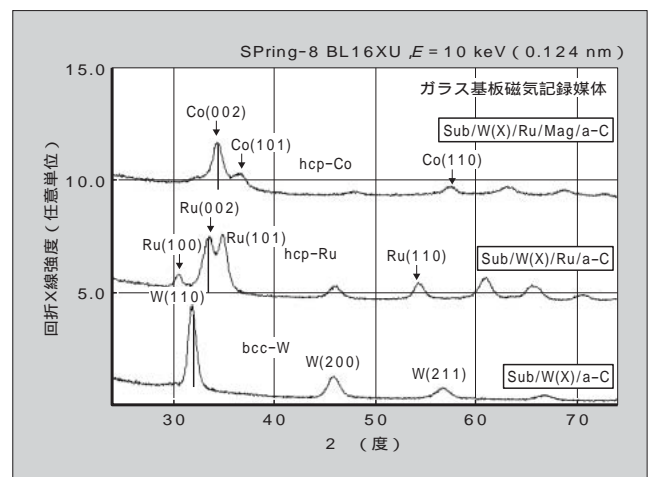


図3 非加熱成膜磁気記録媒体の各層のX線面内回折結果



間層, 磁性層それぞれの単独のX線面内回折パターンが得られ, それぞれの下に存在する層からの回折パターンの混在はない。この結果は, 下地層, 中間層, 磁性層が, それぞれ, bcc 構造のW, hcp 構造のRu, hcp 構造のCoであることを示している。ここで, 同じhcp 構造であるRuと磁性層のCoの回折パターンを比較すると, c軸の面内への配向度を示すと考えられる(002)/(101)回折強度比が, RuよりもCoの方が大きく, Ruに比べCoの方がc軸の面内への配向度が高いことを示している。この結果は, Ru中間層のc軸が, ある程度, 面内に配向すると, その上の磁性層のc軸は, Ru層よりも強く面内に配向することを示しており, 磁性層のc軸を面内に配向させるうえで, Ruが重要な役割を果たしていることを示唆している。下地のbcc構造のWは, 基板に垂直な(110)面を形成することにより, Ru(002)面を基板に垂直に優先配向させ, Ruのc軸を面内に優先配向させる作用をしているものと考えられる。

図4は, Ruの成膜条件をA, B, Cと変えた場合の磁性層の面内回折結果を示し, 図5は, Ru層まで成膜した場合のRu層の面内回折結果を示す。図5は, Ruの成膜条件をA, B, Cと変えるに従い, Ruの(002)/(101)

図4 磁性層のX線面内回折パターンのRu成膜条件依存性

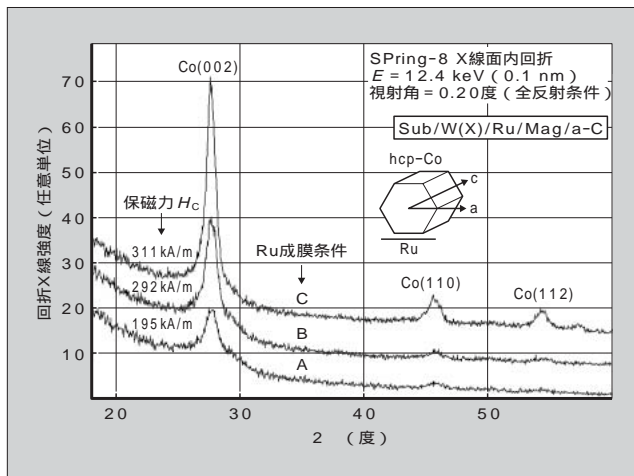
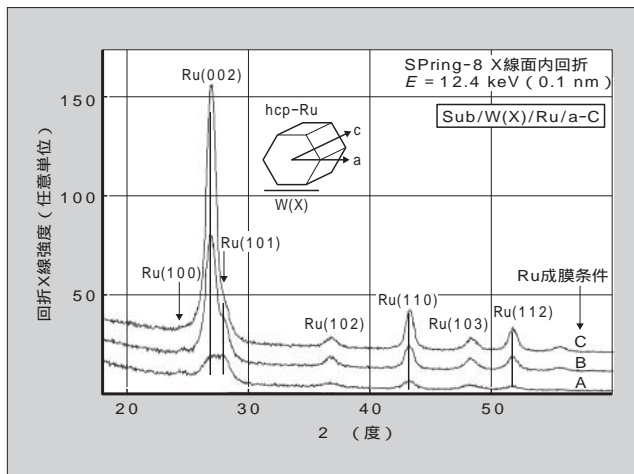


図5 Ru中間層のX線面内回折パターンの成膜条件依存性



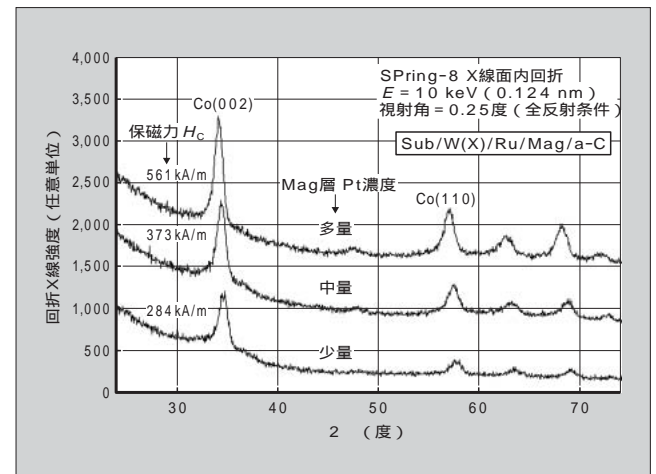
回折強度比が顕著に増加すること, すなわちRuのc軸の面内への配向性が著しく強まっていくことを示している。また図4は, そのRuの配向性の変化に対応して, 磁性層のCoの(002)/(101)回折強度比も増加すること, すなわち磁性層のc軸の面内への配向性も強まっていくことを示している。この結果は, 面内方向の保磁力Hcの増大にも対応しており, Ruの成膜条件の重要性を示すとともに, 磁性層のc軸配向制御におけるRuの重要な役割を示唆している。

図6は, 磁性層のPt濃度を変えた場合の, 磁性層の面内回折パターンの変化を示すが, Pt濃度の増加とともに, 磁性層の(002)回折強度が強まり, c軸の面内への配向が強まっていくことを示している。保磁力Hcは, Pt濃度の増加とともに非常に大きく増大しているが, この要因として, c軸の面内への配向度の向上が関与している可能性がある。

このように室温成膜で磁性層のc軸の面内への良好な配向性が実現する現象には, RuがCoと同じhcp構造であり, 室温で良好な結晶性を示すこととともに, Ru(001)面上へのCo(001)面のエピタキシャル的な成長が関与しているものと考えられる。RuはCoに比べ格子定数が大きく, そのため, 図3, 図4, 図5に示すように, Ruの回折ピーク位置は, Coのそれに比べ低角度側に位置しており, 基板に垂直な結晶格子面間隔は, Ruの方が磁性層のCoよりも大きい。そのため, Co/Ru界面には比較的大きな格子ミスフィットが存在するが, 磁性層中のPt濃度の増加とともに, Co結晶の格子面間隔が広がって, Ruとの格子ミスフィットが比較的小さくなり, その結果, Co(001)/Ru(001)エピタキシーが強まり, Coの結晶配向性の向上が実現しているものと考えられる。実際, 図6では, 磁性層中のPt濃度の増加とともに, 回折ピーク位置は低角度側に若干シフトしており, 磁性層の格子面間隔が増加していることを示している。その結果, 下地Ruとの格子ミスフィットは減少している。

このように, HDD用の磁気記録媒体の結晶性, 配向性

図6 磁性層のX線面内回折パターンのPt濃度依存性



を、放射光を用いた X 線面内回折法により詳細かつ正確に評価することができ、この手法を用いることで、Ru 層を用いた CoPt 系磁気記録媒体が非加熱で良好な磁気特性を示すメカニズムをほぼ解明することができた。

これまでの HDD 用磁気記録媒体は、すべて水平記録方式であり、Co 系の磁性層の c 軸を面内に配向せざるものであるが、今後、さらに記録密度を向上させていくうえで、垂直記録方式が有望と考えられ、開発が進められている。このような垂直記録磁気記録媒体においても、放射光を利用した X 線面内回折法は評価法として有力であり、現在、垂直記録磁気記録媒体についても、同様な実験を進めている。

### ③ その他の放射光利用分野の検討

その他、SPring-8 放射光の利用分野を拡大するために、幾つかの試みを行ってきた (表 1 参照)。

X 線吸収微細構造 (XAFS: X-ray Absorption Fine Structure) については、幾つかの課題への適用を検討した。りん酸形燃料電池の PtCo 合金触媒については透過 XAFS 法で解析し、Pt L 吸収端近傍のスペクトル (XANES: X-ray Absorption Near Edge Structure) の解析により、Co との合金化が進むとともに、触媒活性に関連すると思われる Pt-5d 軌道の空状態密度が増加していることを示した<sup>(10)</sup>。酸化物強誘電体 BST 薄膜については、蛍光 XAFS 法により、耐圧向上に有効な添加元素である Fe 原子は、原子価が 3 価であり、Ti サイトに置換して存在していることを示した<sup>(11)</sup>。磁気記録媒体では、全反射蛍光 XAFS 法による磁性層構成元素の存在状態解析を進めた<sup>(12)</sup>。その他、新たな全反射 XAFS 法として、平面試料間の微小ギャップに放射光を通して表面層の XAFS 測定を行う方法 (GG-XAFS 法) を開発した<sup>(13)</sup>。

X 線反射率法では、磁気記録媒体の薄い (5 nm 程度) 表面保護層の評価法を検討し、膜厚、密度、表面・界面粗さの評価法として有効であることを確認した<sup>(14)</sup>。

Si デバイスでは、トレンチ部などの微細加工部のひずみを評価することが、プロセス開発上重要と考えられている。X 線トポグラフィーはウェーハ全体のひずみや結晶欠陥の非破壊評価法として有力な手法であるが、位置分解能が低いという問題点があり、1 μm 以下の分解能を実現することは困難である。SPring-8 の強力な放射光により、この限界に挑戦すべく、X 線トポグラフィー像の拡大方法についても検討を行っている。

### ④ あとがき

SPring-8 の高輝度放射光 (X 線) を利用した、X 線面内回折法による磁気記録媒体の解析、特に、非加熱成膜磁気記録媒体に関する最近の成果を中心に、富士電機の放射光利用への取組みの状況を報告した。SPring-8 は世界一

強力な放射光施設であり、産業利用という面でも、期待が大きい。これまで、13 社で 2 本のビームラインを建設し、交代で利用することにより、放射光利用技術の蓄積と材料解析の経験を重ねてきた。この技術と経験を生かし、今後とも、富士電機の重要な材料解析的な課題に取り組み、高いレベルの成果を上げることにより、SPring-8 の産業利用の進展にも貢献していきたい。

### 参考文献

- (1) 大沢通夫ほか。放射光 (SPring-8) 利用による材料解析技術。富士時報。vol.73, no.9, 2000, p.493-496。
- (2) 産業用専用ビームライン建設利用共同体。サンビーム研究発表会報告書。2001。
- (3) 大沢通夫。HD 用磁気記録媒体の X 線面内回折。サンビーム研究発表会報告書。2001。
- (4) 大沢通夫。HDD 用磁性薄膜の評価, SPring-8 産業利用成果報告会講演予講集。2002, p.6。
- (5) Ohsawa, M. et al. In-Plane X-ray Diffraction of Co-based Magnetic Thin-Film Media, SPring-8 User Experiment Report no.8。2001B。
- (6) 寺西秀明ほか: CoCrTaPt 薄膜磁気記録媒体の内の結晶学的構造と保磁力, 日本応用磁気学会誌, vol.21, no.4-2, 1997, p.209-212。
- (7) Hirose, T. et al. In-Plane Anisotropy in Thin-Film Media Analyzed by Grazing Incidence X-Ray Diffraction. IEEE Transactions on Magnetics. vol.33, no.5, 1997, p.2971-2973。
- (8) Ohsawa, M. et al. In-Plane Structural Analysis of CoCr Thin-Film Magnetic Media by Grazing Incidence X-Ray Diffraction, Jpn. J. Appl. Phys. vol.38, Suppl.38-1, 1999, p.365-368。
- (9) 大森広之ほか。Ru 下地を用いた Co-Pt 膜の構造と磁気特性, 日本応用磁気学会誌, vol.26, 2002, p.269-273。
- (10) Okuda, N. et al. XANES Study of Pt-Co Alloy Catalysts. SPring-8 User Experiment Report no.5, 2000A, p.401。
- (11) Okuda, N. et al. XAFS Analysis of Impurities Doped in BST Ferroelectric Thin Films. SPring-8 User Experiment Report no.8, 2001B。
- (12) Ohsawa, M. et al. Fluorescence XAFS Study of Co-based Alloy Magnetic Thin Films. SPring-8 User Experiment Report no.8, 2001B。
- (13) 田沼良平ほか: ギャップ伝播による全反射 XAFS 測定法, 第 4 回 XAFS 討論会講演予講集, 2001, p.13。
- (14) Okuda, N. et al. X-ray Reflectivity of Amorphous Carbon Thin Films grown on magnetic Recording Media. SPring-8 User Experiment Report no.5, 2000A, p.405。
- (15) Ohsawa, M. et al. In-Plane X-ray Diffraction of Co-based Magnetic Thin Film Media. SPring-8 User Experiment Report no.7, 2001A, p.236。

# 二次イオン質量分析技術の向上

植木 裕子(うえき ゆうこ)

前田 賢彦(まえだ たかひこ)

## 1 まえがき

二次イオン質量分析法 (SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry) は、水素からウランまでの全元素の分析が可能で、検出感度が ppm から ppb と高く、深さ方向分析が可能であることから、半導体デバイス中の微量不純物分析をはじめ金属、有機物などの広い分野に用いられている。

近年では、半導体デバイス技術の高集積化に伴い、数 nm レベルの極浅領域での解析に関する研究などが盛んであるが、二次イオン発生に関する知見はまだまだに十分とはいえず、精度や再現性の点でも改善の余地がある。一方、SIMS やデプスプロファイリングの国際標準化の動きがあり、国内でもこれに対応するべく産学共同の SIMS のワーキンググループが発足し、富士電機も参加している。

本稿では、富士電機で行った技術向上の幾つかの事例と、SIMS ワーキンググループで行ったラウンドロビン試験について紹介する。

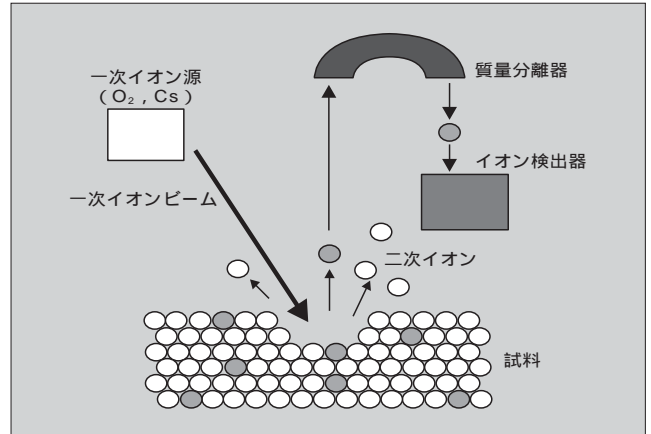
## 2 SIMS の原理

SIMS には深さ方向高感度分析に適したダイナミック SIMS と、より表面に敏感な分析を行うスタティック SIMS があり、ここでは富士電機で所有しているダイナミック SIMS 装置 [IMS-6f, カメカインストルメント(株)製] について述べる。図 1 に SIMS の原理を示す。一次イオン源 ( $O_2$ , Cs) から一次イオンビームを発生させ、電氣的に軌道を調整しつつ細束化し、試料表面に照射する。スパッタリングにより試料表面から飛び出した粒子のうち、電荷を持つイオン (二次イオン) を加速して質量分離器まで到達させ、質量分析するものである。

## 3 測定精度の向上

SIMS では微量な二次イオンの検出を行うため、装置の状態のわずかな違いが測定精度に影響を与える。同日にお

図 1 SIMS 原理図



ける同試料の再現性に関する測定精度は、数%以下に抑えることができるが、日を変えての再測定時に測定値の誤差が大きく、場合によっては十数%まで悪化する。そこで、これらの測定精度向上に取り組んだ。

SIMS 測定では通常、複数個の試料を同条件で測定できるようにサンプルホルダの天板に測定窓が幾つか開いている [図 2(a)]。天板は引出し電界の乱れを抑えるために、薄く作られている。また試料は、裏面からばねで天板に押し付けられるかたちで固定される。以上の理由から、サンプルホルダに複数個の試料をセットしたときに、天板がわずかに外側に湾曲し、試料間で傾斜のばらつきが出る。試料が傾斜すると IMS-6f 装置の構成上、二次イオンの引出し電界の向きがずれて、同じ強度の一次イオンを照射しても、質量分離器に到達する二次イオンの量が異なる。つまり、同じ試料を測定しても試料の傾斜が異なると異なる値を示すことになり、これが測定値のばらつきとなる。

セッティングのたびに湾曲の度合いは異なると考えられ、SIMS 測定精度に影響を及ぼしていることが分かった。<sup>(1)</sup> 改善策として図 2 b に示すような天板のたわまない構造の改良サンプルホルダを作製した。主な改良点を以下に記す。

- (1) 天板裏側にはりを施す。
- (2) 測定窓を隅へ寄せる。



植木 裕子

半導体デバイスの解析・評価業務に従事。現在、(株)富士電機総合研究所材料技術研究所。応用物理学协会会员。



前田 賢彦

表面分析技術の開発、応用に従事。現在、(株)富士電機総合研究所材料技術研究所。日本表面科学会会員、表面分析研究会会員。

図2 サンプルホルダ写真および概観図

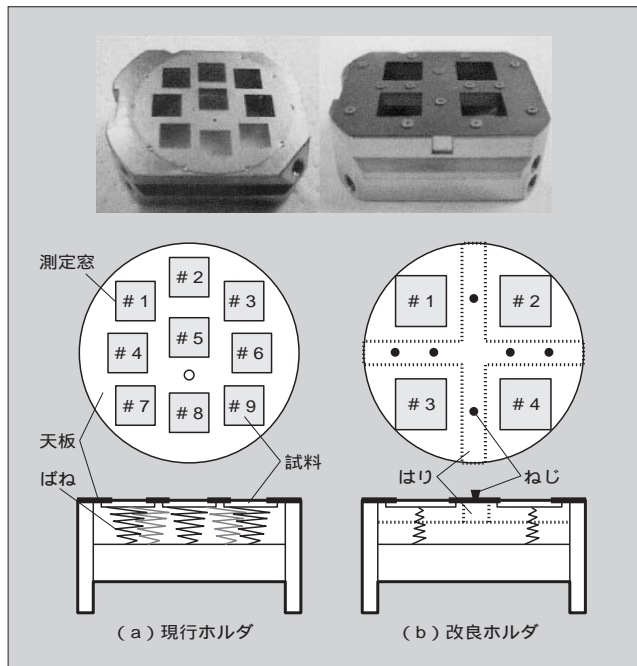
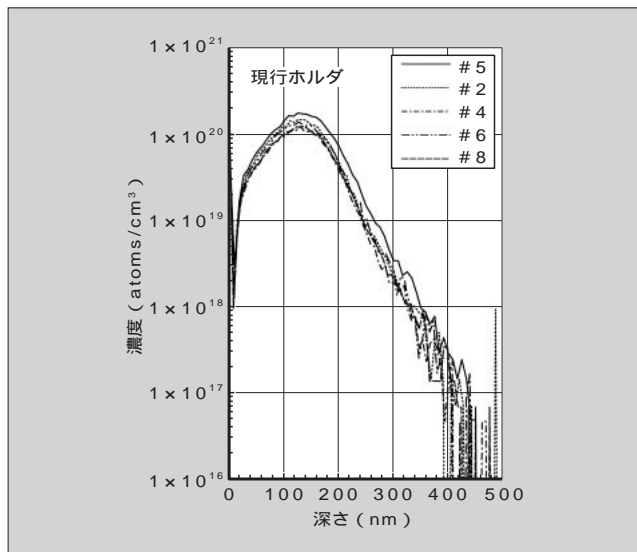


図3 現行ホルダにおけるボロンの深さ方向分布



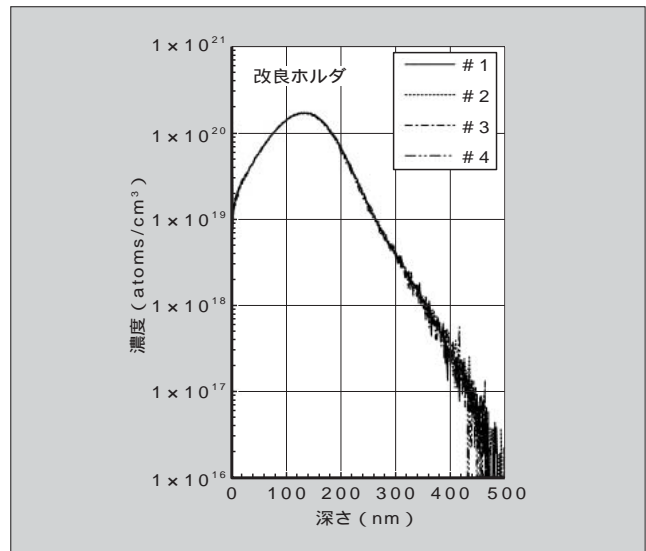
(3) 試料を押さえるばねを弱くする。

図3に示すようにこれまでのサンプルホルダを用いて、B(ボロン)をドーパしたシリコン基板の同じ試料を別の測定窓に置いて測定した場合、ピーク濃度で最高30%のばらつきが発生した。これに対して、改良サンプルホルダを使用して同様な測定をすると、図4に示すように、ばらつきを1%以内に低減できた。

④ 深さ分解能の向上

半導体デバイス開発で、多層膜試料の基板界面近傍で微量元素の深さ方向分布を評価する場合、試料表層の凹凸や膜が厚いことによる深さ方向分解能低下が見られる。また、バリヤメタル層などの評価のため、基板側への拡散を分析

図4 改良ホルダにおけるボロンの深さ方向分布



する場合、表面側に高濃度で存在する元素が一次イオンビームにより基板内部にたたき込まれ(ノックオン)、正確な測定の妨げとなることがある。これらを解決するには、裏面側からの測定が有効であるが、その際厚い基板(600 μm程度)を数百nm以下に、かつ平行に薄膜にする技術が必要となる。

この技術確立のため、目標の深さ分解能を3nmとして以下に示す課題について検討した。

(1) 1 μm以下の薄膜化

厚さ600 μm程度の基板の裏面を機械研磨で薄膜にする。まず、マイクロメータを用いて数 μmほどまで荒削りをする。さらに、干渉じまを観察しながら、基板を薄膜にする。

(2) 平行度の保持

研磨面と測定対象の界面の平行度は、SIMS測定条件から要求される平行度が決定する。SIMSの通常測定条件では、データ取り込み範囲が直径30 μmの円である。高深さ分解能を達成するには、界面の高低差が1 nm以下になるようにする必要がある。つまり平行度は、0.002度が要求される(図5)。そこで被研磨面の平行性を精密に調整できる研磨装置を用いて条件出しをした。この研磨装置(図6)の主な機能は次の2点である。

(a) 回転軸校正

研磨面である2枚の対向する回転円盤の回転軸とが平行になるように微調整する。回転軸とが平行でない場合は、円盤の面振れによる影響を受ける。

(b) 平行度校正

上部回転円盤のマイクロメータを調整して、上下の回転円盤の面同士が平行になるように調整する。これにより、上部回転円盤背面(上側)の0.002度以下の角度調整を可能にした。

(3) 研磨きずの除去

高深さ分解能SIMS分析面の粗さは1 nm以下でなければならず、研磨きずの深さも1 nm以下にする必要がある。そこで粗い研磨紙から順次細かい研磨紙(数段階)で研磨

をすることにより、SIMS測定に影響を及ぼすようなきずの少ない薄膜研磨ができた。表1に研磨条件を示す。

実際に研磨した試料についてのSIMS分析結果を図7に示す。B層における深さ分解能を算出すると2.3nmであり、目標の3nmを達成した。また、基板の厚さも0.2μmであり、これに関しても目標を達成していることが分かる。

5 SIMS ワーキンググループの活動

1998年9月に日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会主催で、SIMS-デプスプロファイリングワーキンググループ(現SIMS新技術ワーキンググループ)が発足した。関連分野の研究活動を活性化させるとともに、SIMSやデプスプロファイルの国際標準化を視野においた基礎検討や共同実験を推進する場として設けられたもので、産学から30を超える機関が参加している。

これまでに3回のラウンドロビン試験(1機関が提供する同等と判断される試料を一定の測定条件で参加機関が測定する)を行い、その結果は各回の幹事が取りまとめ、SI

MSの国際会議や米国真空学会国際シンポジウムなどで発表された。

5.1 第1回Si中イオン注入B(ボロン)のデプスプロファイリングに関する共同実験

半導体デバイスの主要な不純物であるBを用い、基本的なSi中のBドーズ量とイオン強度の直線性や注入プロファイルの形状などについての検討を行った。

SIMSは試料の主要構成元素(マトリックス)によって二次イオンの生成状態が変化するマトリックス効果が大きい。今回作製した試料のうち、 $1 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{17}$  atoms/cm<sup>2</sup>のものはB量が全体の数%以上になるため、マトリックス効果による変化の可能性も考えられた。

結果は、図8に示すようにドーズ量とイオン強度の直線性がほぼ確認できた。しかし、検出イオンによる相違があること、また、ドーズ量が $1 \times 10^{16}$  atoms/cm<sup>2</sup>を超えるとプロファイルに異常がみられ、図9に示すようにR<sub>p</sub>(projected range)よりも1割ほど浅い領域に微小なピークが観察されることなどが判明した。

図5 SIMS分析において要求される平行度の略図

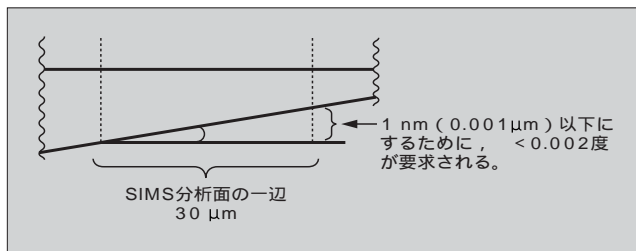


図6 研磨装置の概略

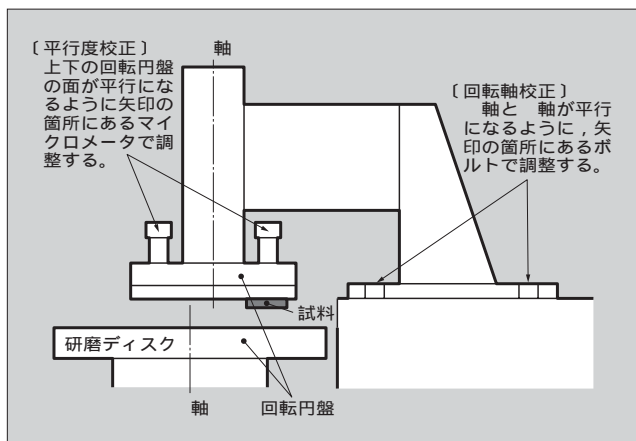


表1 研磨条件

ステップ	1	2	3	4	5	6	7
項目							
研磨紙	ダイヤモンドラッピングフィルム						パフ
研磨紙粗さ(μm)	30	15	6	3	1	0.5	0.05
研磨する厚さ(μm)	—	80~100	30~50	7~14	6~10	2~3	1>
研磨後の厚さ(μm)	155~165	65~75	25~30	10~13	3~4	1	1>

研磨液, ディスク回転数, 荷重は最適なものを選択。

5.2 第2回GaAsデルタドープ試料の日韓共同ラウンドロビンテスト

Si基板上に5層のGaAsのデルタドープ層を作製した試料について深さ方向分析のラウンドロビン実験を行った。

図7 バックサイドSIMS分析結果

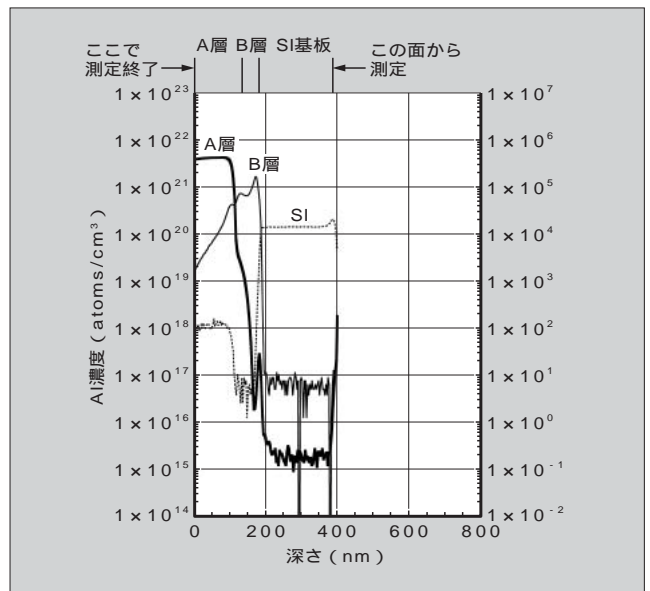




図8 B デプスプロファイル共同実験 (B ドーズ量とイオン強度の関係)

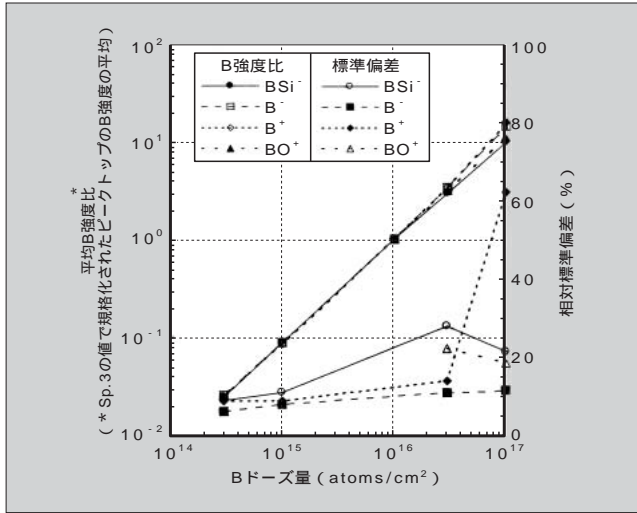
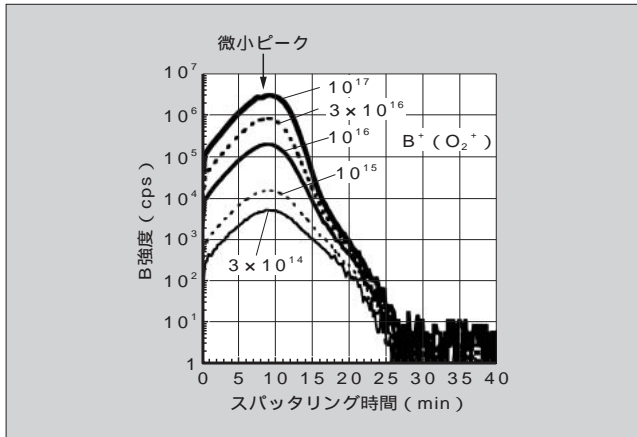


図9 B デプスプロファイル比較



これは日韓共同実験で、国内からは 11 機関が参加した。

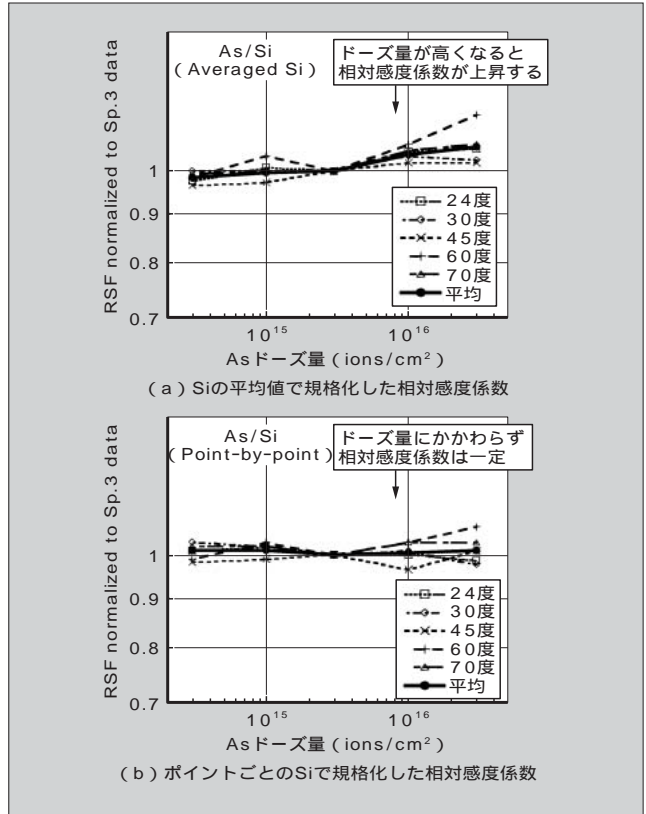
その結果、酸素イオンビームで測定した Ga と、Cs イオンビームで測定した AsSi とでプロファイルが異なることが分かった。これは Ga の測定でイオン照射誘起拡散が生じていることが原因と考えられる。

5.3 第 3 回イオン注入試料を用いた Si 中 As の定量分析<sup>(3)</sup>

第 1 回の B と同様、半導体デバイスの主要な不純物の一つである As について、ドーズ量とイオン強度の直線性や注入プロファイルの形状などについての検討を行った。

その結果、データの規格化の際に Si の平均値を用いた場合、As のドーズ量が高くなると RSF (相対感度係数) が変化するが [図10(a)], point to point の Si で As データを規格化することにより 10% 以上の高濃度の As が含まれる場合でも RSF はほぼ一定となり [図10(b)], マトリックス効果の影響を回避できることが判明した。

図10 As デプスプロファイル共同実験 (マトリックス効果の回避)



6 あとがき

製品の開発技術の高度化に対応すべく、分析・解析技術もさらなる進化が求められている。ワーキンググループのラウンドロビン試験結果は ISO (国際標準化機構) の表面化学分析関連における日本および韓国の規格提案に反映されている。この活動を通して二次イオン質量分析法の幾つかの課題も明確にされてきており、通常では難しい具体的な技術上の意見交換も行えるこのような活動を継続して行っていくことが重要である。そして、今後も基礎的なデータの蓄積と新しい応用法の検討を合わせて進め、二次イオン質量分析法の技術向上を目指していく。

参考文献

- (1) Maeda, T.; Ishiwata, O. Improvement of precision of quantitative SIMS analysis. SIMS Europe 2000, Muenster, 2000-09, University of Muenster, 2000, p.73.
- (2) Okamoto, Y. et al. SIMS ROUND-ROBIN STUDY OF DEPTH PROFILING OF BORON IMPLANTS IN SILICON. Proceedings of Secondary Ion Mass Spectrometry SIMS XI, 1997, p.1047-1050.
- (3) Tomita, M. et al. SIMS ROUND-ROBIN STUDY OF DEPTH PROFILING OF ARSENIC IMPLANTS IN SILICON. Program & Abstracts SIMS X, 2001, p.156.

# 半導体製品の樹脂技術と解析

市村 裕司 (いちむら ゆうじ)

伊藤 秀昭 (いとう ひであき)

石渡 統 (いしわた おさむ)

## 1 まえがき

電子機器の小型軽量化の要求により、半導体パッケージ製品は、マルチチップ化、大型化、高集積化に対応すべく、その形態が大きく変化している。

現在、半導体製品は賦形性に優れたエポキシ樹脂を中心とした樹脂封止が主流になっている。この樹脂封止では、樹脂の硬化収縮およびその構成材料の放熱基板、樹脂、シリコンチップなどの物性の違いから、残留ひずみや、反り変形が発生する。このことが、チップの特性変動、パッシベーションクラック、はく離などを誘引させる要因になっている。

また、エポキシ樹脂の線膨張係数は、ある温度で急激に上昇する。この温度を、ガラス転移温度 ( $T_g$ ) と呼ぶ。この  $T_g$  は、架橋密度と相関関係があるので、エポキシ樹脂の硬化条件の最適化に適用されている。また、反り変形をコントロールするうえで、重要な物性値<sup>(1)</sup>になっている。

以上のことから、 $T_g$  値を高精度に解析できる評価技術の開発と、成形加工後の放熱基板の反り低減化技術の確立に取り組んでいる。

本稿では、熱機械分析 (TMA) 法を駆使した TMA フィッティング (TF) 法による高精度な  $T_g$  解析技術の開発と、フィラー (充てん剤)、触媒に着目したアルミ放熱基板の反り低減化技術の事例について紹介する。

## 2 TMA 法によるエポキシ樹脂の $T_g$ 解析方法

TMA 法は各種材料を加熱した際の温度、変形量を同時に測定し、変形量の温度依存性を分析する手法である<sup>(2)</sup>。そのため、主に熱硬化性樹脂の  $T_g$  を評価する手法として多用される。中でも半導体封止樹脂の場合、 $T_g$  は、線膨張係数、弾性率、抵抗率など、半導体素子の信頼性に影響する物性が大きく変化する温度であるため、材料組成、成形加工条件などを決定する際の判断基準にされることも多く、特に精度の高いデータが要求される。

TMA 法では、樹脂を加熱した際の時間 ( $t$ )、樹脂温度

( $T$ ) の関数として、熱変形量 ( $L$ ) のデータが得られる。結果として、図 1 に示すような TMA チャートと呼ばれるグラフが得られる。 $T_g$  は、図 1 に見られる  $L$  の折れ曲がり点 (変曲点) の温度と定義され、従来の解析方法では、図 1 に示すように、 $T_g$  より低温領域 (ガラス領域)、および高温領域 (ゴム領域) のそれぞれに  $L$  の接線を引き、それら接線が交わる温度として算出される。

ここで図 2 に、従来法によりアフターキュア (Post Mold Cure : PMC) 条件をパラメータとした半導体封止材用エポキシ樹脂について行った  $T_g$  の解析結果を示す。エポキシ樹脂の  $T_g$  は、樹脂の架橋密度と相関のある物性

図 1 エポキシ樹脂の TMA チャート

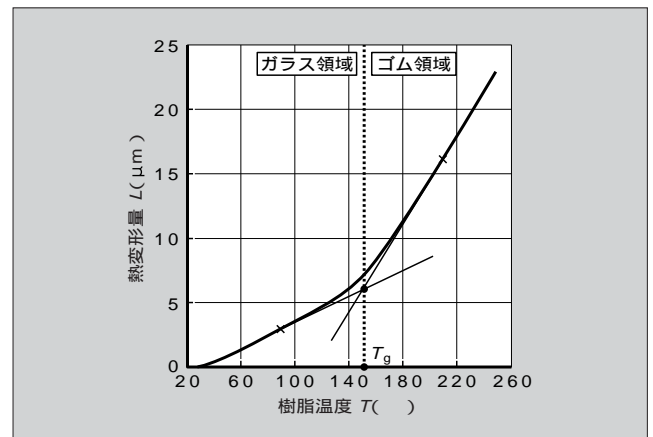
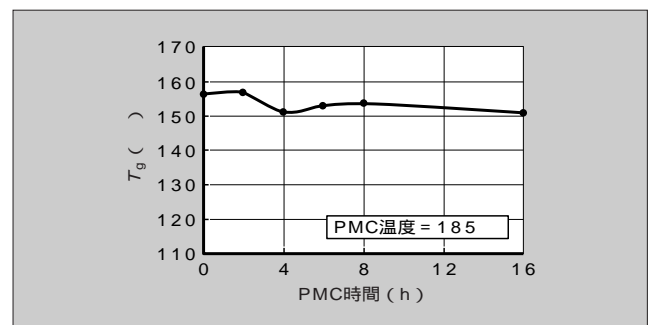


図 2 従来法による  $T_g$  の解析結果



市村 裕司  
半導体封止樹脂の開発に従事。現在、松本工場共通技術部課長補佐。日本接着学会会員。



伊藤 秀昭  
半導体封止材料の開発に従事。現在、松本工場共通技術部。



石渡 統  
分析・解析技術の開発と応用に従事。現在、松本工場共通技術部課長。応用物理学学会会員。

値であるため、PMC 温度が一定の場合、理論的には PMC 時間とともに増加し、ある一定時間以上で飽和する傾向を示すはずである<sup>(4)</sup>。しかし、図2ではそのような傾向がまったく見られない。このことは、従来法では  $T_g$  を正確に解析できないという問題を提起している。

ここで図3に、図1で扱ったデータの  $dL/dT$  チャートを示す。図3から、 $dL/dT$  は 100 前後から徐々に増加し始め、150 前後までは一様に増加するものの、それ以上の温度になると増減する傾向が確認される。100 ~ 150 程度に見られる増加傾向は、ガラス転移の影響によるものであり、150 程度以上の増減傾向は樹脂の残留ひずみによるものと考えられる。従来法では、 $T_g$  を求めるためにガラス領域とゴム領域のそれぞれに  $L$  の接線を引くが、図3のようにガラス転移成分と残留ひずみ成分が混在しているような場合には、残留ひずみ成分の影響で接線の傾きが変化してしまうため、接線を引くことにより  $T_g$  を求めることはできないはずである。これが従来法では  $T_g$  を正確に解析できない原因である。

そこで、従来法が抱える問題を解決するため、TMA 法による新たな  $T_g$  の解析手法「TMA フィッティング法」(TF 法)を開発した。

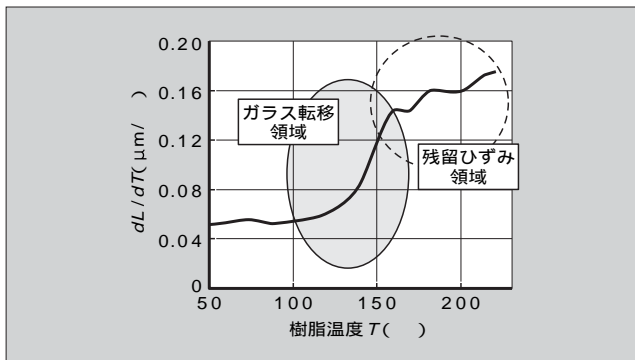
TF 法は、TMA 法で得られる生データを基に、 $L$  の  $T$  による二次微分値 ( $d^2L/dT^2$ ) の温度関数をフィッティングにより求め、その温度関数の係数から  $T_g$  を算出するという解析手法である。

$L$  の二次微分値を求め、そのピーク点の温度から  $T_g$  を読み取るという方法は従来から提案されている。しかしこの方法は、ガラス転移成分のみを含むデータに対しては有効であるが、今回扱っているような残留ひずみ成分を含むデータに対しては、その影響によりピーク位置が変化するため、正確な  $T_g$  の解析を行うことができない。

一方、今回開発した TF 法では、 $d^2L/dT^2$  の温度関数を求めることにより、残留ひずみ成分を考慮しているから、ガラス転移成分のみの情報から  $T_g$  を算出できることが特徴である。

図4に、図1、図3で扱ったデータの  $d^2L/dT^2$  チャート、およびそのフィッティング結果を示す。図4において、150 前後にピークを形成しているのがガラス転移成分であるが、それより高温側には明らかに残留ひずみ成分が認

図3 エポキシ樹脂の  $dL/dT$  チャート



められる。そこで、このデータのフィッティングは、ガラス転移成分に二つの残留ひずみ成分が含まれているというモデルにより行い、ガラス転移成分はガウス関数、残留ひずみ成分はガウス関数の微分関数で表した。図4から、このフィッティング結果は生データをほぼ再現していることが確認できる。

最後に  $T_g$  の解析であるが、フィッティングで求めた  $d^2L/dT^2$  の温度関数の中で、ガラス転移成分を表すガウス関数のピーク点の温度を読み取ることで行う。図5に、図2で扱ったデータの TF 法による  $T_g$  の解析結果を示す。図5では図2と異なり、 $T_g$  が PMC 時間とともに増加し、ある一定時間以上で飽和するという、理論的に考えられる傾向をほぼ示していることが確認できる。このことは、TF 法による  $T_g$  の解析が正確に行われていることを裏付けている。

TF 法によれば、従来では明らかにできなかった残留ひずみ成分も含め、樹脂の熱変形挙動を正確にとらえることができる。その結果として、図2と図5の比較から明らかであるが、TF 法は従来法に比べ、 $T_g$  の解析精度を飛躍的に向上させることが今回確認できた。

以上、TF 法の概要、および TF 法による  $T_g$  の解析結果を紹介した。

今回は  $T_g$  のみに着目したが、TF 法は熱変形量の温度依存性を詳細に解析することができるから、残留ひずみ成分の熱変形挙動など、材料の熱変形に関する物理的な解明

図4 TF 法による  $d^2L/dT^2$  フィッティング

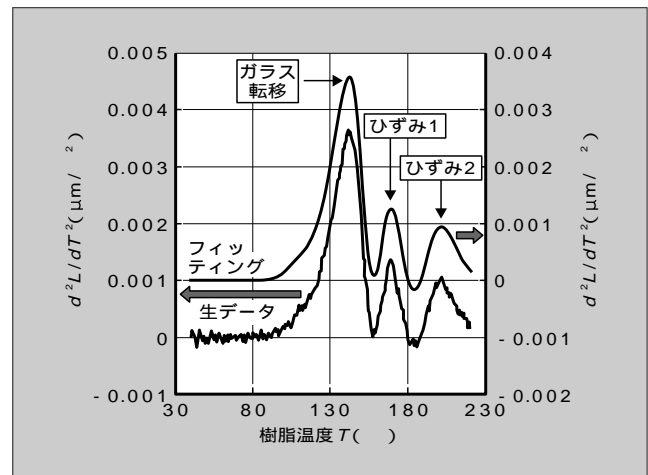
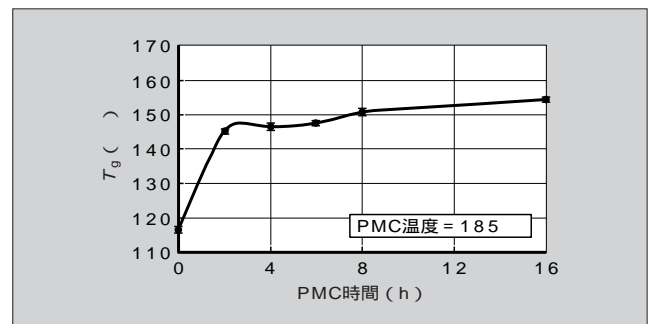


図5 TF 法による  $T_g$  の解析結果



に寄与することができる。今後は、組成、加工条件などの異なるさまざまな材料についてTF法を適用した解析を行い、材料の熱変形に関する物理的な解明を進めていく。

③ 反り低減技術

COB (Chip On Board) など、アルミ回路基板に接合したチップに封止樹脂をポッティングする形態では、封止樹脂の硬化冷却後に、成形収縮により、図6に示すような反り変形が発生する。この反り変形が、実装時の各種の熱プロセスを受ける過程で、封止樹脂の界面はく離、クラックなどの原因になる。そのため、反り低減が重要な技術的課題になっている。

アルミ基板 (30 mm × 80 mm × 2 mm) 上に液状封止樹脂を厚さ2mmで均一に塗布するモデルについて、反りの変形挙動を調査した。封止樹脂は、エポキシ樹脂、フィラー、硬化剤と、硬化を促進させる各種の触媒が配合されている。

まず、アルミ基板との熱膨張の整合性を確認するために、液状封止樹脂のフィラー (シリカ) の充てん量を変動させた。図7に、そのフィラー充てん量と  $\alpha_1$  ( $T_g$  以下の線膨張係数) との関係を示す。 $\alpha_1$  は、フィラーの充てん量により制御され、フィラーを増量すると、リニアな関係で低減することができる。

図8に、封止樹脂の  $\alpha_1$  と基板の反りの関係を示す。

$\alpha_1$  が反りに大きな影響を及ぼしていることが分かる。また、封止樹脂の  $\alpha_1$  をアルミニウムの線膨張係数 (約 24 ppm/ $^{\circ}$ ) に調整してもアルミ基板の反りは、完全にフラットにはならない。アルミニウムとの整合性を得るためには封止樹脂の  $\alpha_1$  を、20 ppm/ $^{\circ}$  以下にすることで、そ

図6 反りの概略図

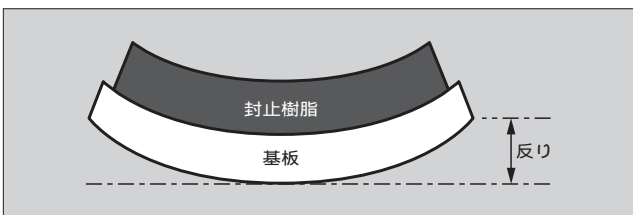
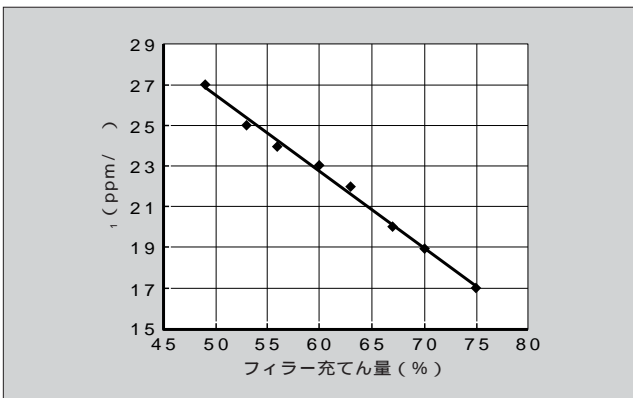


図7 フィラー充てん量と封止樹脂の  $\alpha_1$



の抑制効果が認められた。

反りは、封止樹脂が硬化過程において、アルミ基板に接着するため、接着界面で封止樹脂の膨張や収縮が拘束されるので生じるものと推測される。

アルミ基板に接着する速度は、封止樹脂に配合されている触媒の量により制御できる。また、触媒は熱的特性を改質する効果のあることが知られている。図9に、りん系とアミン系の2種類の触媒について、その配合量と  $T_g$  との関係を示す。今回用いた触媒の場合、アミン系では、0.5 phr (per hundred rate), りん系では、1 phr で、 $T_g$  が最大値を示し、この配合量が最適添加量になっている。

図10に、触媒量と反りとの関係を示す。いずれの触媒も、最適添加量よりもやや多い量で、反りが最低値を示している。また、今回用いた触媒の場合、りん系はアミン系に比べ反りの抑制効果が大きく、その最適添加量 (1 phr) で  $T_g$  を犠牲にすることなく、反りをほぼフラットにするこ

図8 封止樹脂の  $\alpha_1$  と反り

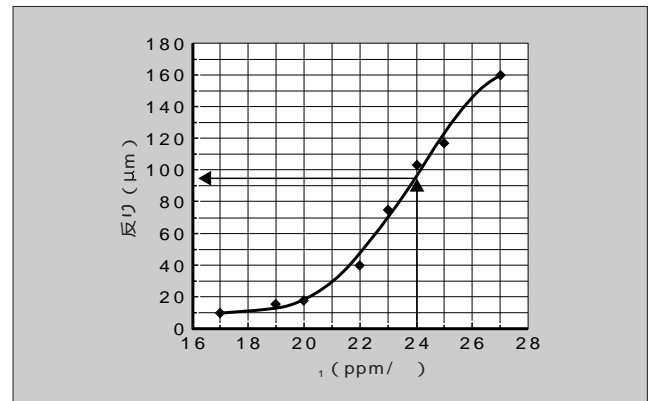


図9 触媒配合量と  $T_g$

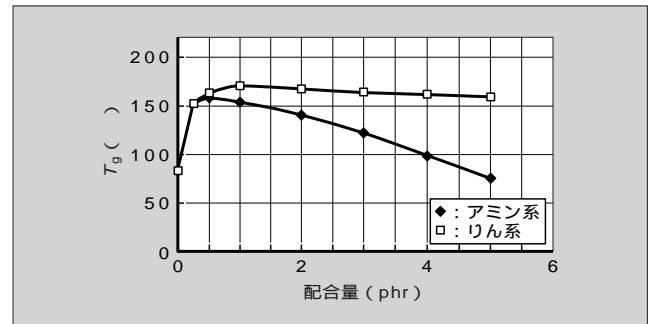
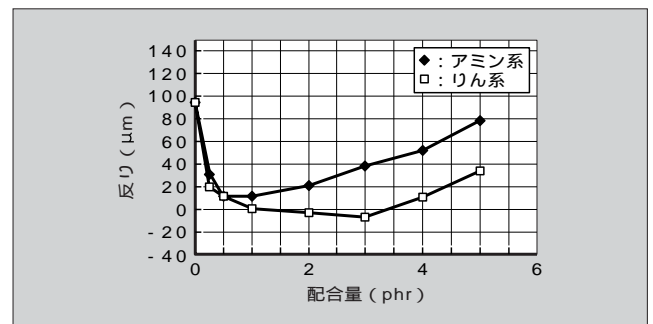


図10 触媒配合量と反り



とができた。

以上のことから、封止樹脂側からの反り低減のアプローチとしては、フィラーの高充填化および触媒の選定と量の最適化を図ることが重要ポイントに挙げられる。

今後は、さまざまなパッケージ構造にマッチした材料処方標準化を推進するために、さらに反り低減に有効な制御因子を追求し、封止樹脂に要求される設計指針を明確にしていく。

4 あとがき

以上、半導体製品の樹脂技術と解析について、封止樹脂の重要な基本物性である  $T_g$  を高精度に評価できる TF 法の開発事例と、アルミ基板の反り変形を、フィラー、触媒により低減できることを紹介した。

今後は、TF 法の応用展開を図るとともに、さらに高精度な動的粘弾性（本ページの「解説」参照）評価・応力解

析支援ツールを考案することにより、封止樹脂の応力解析技術の高度化と、パッケージの構造にマッチした材料処方、成形加工技術の標準化に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 高薄一弘．半導体封止材料の開発と信頼性技術．技術情報協会．2000．
- (2) 日本熱測定学会編．新熱分析の基礎と応用．リアライズ社．1989．
- (3) 前園明一．マイクロメートルからナノメートルでの材料評価．金属．vol.68, no.7, 1998, p.13-22．
- (4) Neilsen, L.E．高分子と複合材料の力学的性質．化学同人．1976．
- (5) 成沢郁夫．プラスチックの強度設計と選び方．工業調査会．1986．
- (6) 室井宗一，石井修一．入門エポキシ樹脂．高分子刊行会．1988．

解説 動的粘弾性

動的粘弾性とは、物質に周期的な刺激（応力やひずみ）を加えた場合の応答特性のことである。

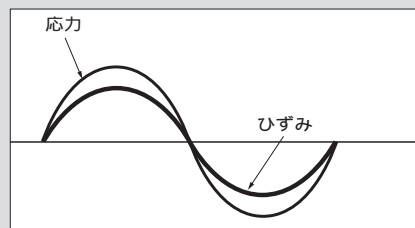
物質に正弦振動を作用させると、物質が完全弾性体であれば、図 a のように、ひずみと応力は同時に変化し、エネルギーの損失は起きない。物質が完全粘性体であれば、図 b のように、ひずみと応力は、ちょうど  $90^\circ$  位相がずれ、粘性によるエネルギー損失に関係する。物質が粘弾性体の場合は、弾性挙動と粘性挙動が混在することになり、図 c のように、ひずみは応力より ( $0 < < 90^\circ$ ) だけ、位相が遅れた正弦振動を示す。

粘弾性を示す身近な例としては、チューインガムがある。チューインガムに、印鑑を押しつけて離すと、印鑑の印字が転写される。チューインガムは、チクルなど植物性樹脂、酢酸ビニル樹脂が原料に用いられている高分子材料で、網の目構造を形成している。チューインガムの表面に印字が転写されたのは、高分子鎖の絡み合いがほどけ、ずるずると伸びて、印鑑の印字の溝に流れ込み変形したものである。したがって、チューインガムは液体の性質が強いということになるが、印鑑を離れた後も、印字が残ったままであるということから、固体でもあるという二面性を持っている。

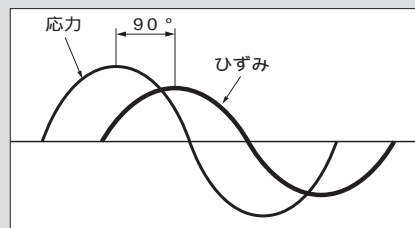
しかしながら、チューインガムに転写された印字は、長時間放置すると、滑らかな面になり、判読できなくなる。また、雰囲気温度が高いほど、早く転写された面が滑らかになっていく。このように、高分子材料は、固体でありながら、液体の性質を兼ね備えた粘弾性体という特徴を持ち、時間、温度によって、物質の性状

が違って観察される。

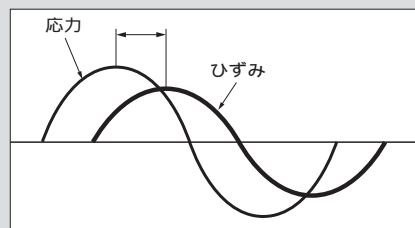
以上のことから、高寸法が要求される製品に高分子材料を適用する場合は、粘弾性の周波数、温度依存性を十分に把握しておく必要がある。



(a) 完全弾性体の応力とひずみの関係



(b) 完全粘性体の応力とひずみの関係



(c) 粘弾性体の応力とひずみの関係

# マイクロ加工・直接接合における無機材料の表面界面評価

後藤 友彰(ごとう ともあき)

片倉 英明(かたくら ひであき)

塩川 国夫(しおかわ くにお)

## 1 まえがき

新製品の高機能化，小型化およびコストダウンに伴い，高度な微細加工技術や接合技術が要求されている。これらの要求に対して富士電機では無機材料のマイクロ加工技術や直接接合技術<sup>(1)</sup>の開発に取り組んできた。この際，材料の表面性状評価および表面に付着した不純物などの解析を行ってきた。同時に，材料物性や結晶状態などが新製品の特性に影響することが懸念されるため，加工表面や接合界面の詳細な評価・分析を行うことも重要である。ひいてはマイクロ加工，直接接合によって構成される高信頼性製品の創出につながる。

そこで，本稿では，無機材料のマイクロ加工と直接接合についての解析・評価事例を紹介する。

## 2 シリコン薄板化における加工ひずみ層の評価

パワー半導体関連の新製品はスイッチング速度の向上や低損失化などの特性向上のために，シリコン基板の薄板化が要求される。

シリコン基板を薄く加工する方法としては，加工速度が速く，加工厚さ精度に優れる研削加工（515ページの「解説」参照）が最適と考えられる。この場合，シリコン基板が薄くなるに従い基板の反りは大きくなり，割れやすく従来の方法では自動搬送ができないという問題が起こる。

シリコン基板が反る原因としては，基板自体の剛性低下や研削加工による加工ひずみによるものと推測されるが，加工ひずみが生じる要因は明確にされていない。そこで研削加工における加工ひずみの発生メカニズムを解明し，反りが限りなく少ないシリコン基板の薄板化技術を確立する。

### 2.1 研削加工面の断面観察

研削加工面の表面状態を把握するために，透過電子顕微鏡（TEM）で研削加工表面の断面観察を行った。図1に研削加工表面の断面 TEM 写真を示す。

写真から研削加工表面に加工ひずみ層と思われる，通常

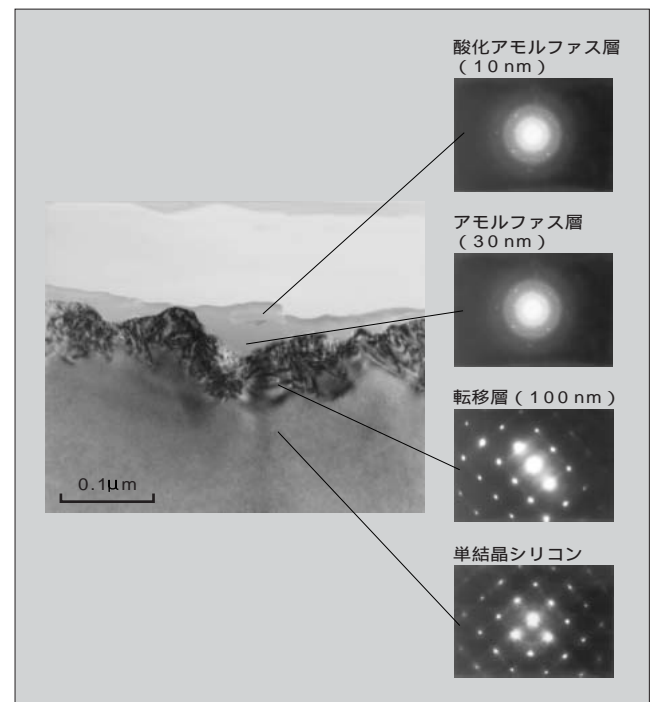
のシリコンの結晶状態とは異なる層が確認できる。そこで，この箇所の結晶状態を解析したところ，加工表面側から順に以下の結晶状態であることが判明した。

- (1) 酸化アモルファス層（10 nm）
- (2) アモルファス層（30 nm）
- (3) 転移層（100 nm）
- (4) 単結晶シリコン

酸化アモルファス層は，熱酸化膜のようなシリコン原子と酸素原子が結合した状態（ $\text{SiO}_2$ ）ではなく，シリコンの中に酸素元素が混入している状態である。アモルファス層はシリコンの転移密度が高い状態である。

解析結果から，研削加工により単結晶シリコンの結晶が転移すること，加工表面側でより転移密度が高いこと，反応層のようなものはないことが判明した。このことから，シリコン表面に力が加わることで結晶が転移し，加工ひず

図1 研削加工表面の断面 TEM 写真



後藤 友彰

半導体マイクロマシニング技術の研究開発に従事。現在，生産技術研究所第一開発部グループマネージャー。応用物理学会会員，精密工学会会員。



片倉 英明

マイクロ加工技術の研究開発に従事。現在，生産技術研究所第一開発部。



塩川 国夫

構造材料の研究開発および材料評価技術の業務に従事。現在，生産技術研究所第三開発部。

みが発生している可能性が高い。そこで、あえて単結晶シリコンに力を加えるだけで、研削加工表面に存在するような転移が発生するのを確認した。

2.2 ピッカース圧こんの断面観察

シリコン基板に圧こんをつける手段としてピッカース硬度計を用いた。その圧こん断面の結晶状態を TEM 観察した写真を図 2 に示す。写真から、硬度計の端子が接触した箇所では結晶がアモルファス状態になり、その下層に転移層が存在している。加圧力が大きいため転移層が深くまで発生しているが、結晶の転移状態は研削加工面に類似している。

以上の結果から、反りの原因となる加工ひずみ層は、研削の圧力により発生していることが明らかとなった。

2.3 低圧力研削加工方法

加工ひずみ層が研削の圧力で発生することが判明したため、研削加工の砥石を改良することで、低圧力研削加工が可能であるのか検討した。図 3 に従来砥石と改良砥石による研削加工表面の断面 TEM 写真を示す。写真から、従来砥石の加工ひずみ層と比べて、改良砥石による加工ひずみ層が減少していることが分かる。また、別にシリコン基板の反りを評価したところ、改良砥石で研削を行うことで反りが低減していることを確認した。

以上のように反りの要因となる加工ひずみ層の発生メカ

図 2 ピッカース圧こん断面の TEM 写真

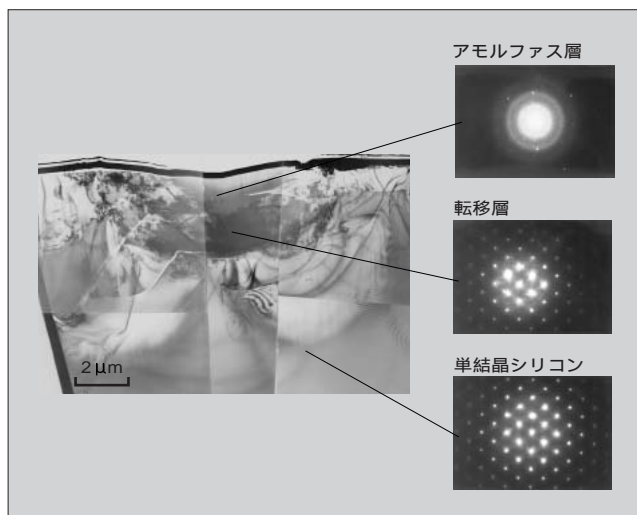
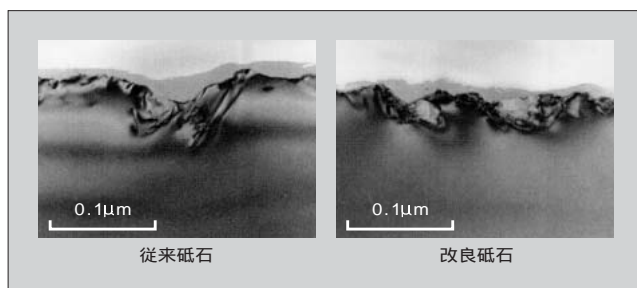


図 3 研削加工表面の断面 TEM 写真



ニズムを解明し、砥石を最適化することで、厚さ 100 μm 以下のシリコン基板の薄板化技術を確立した。

③ シリコンとセラミックスの陽極接合界面評価

マイクロセンサやマイクロアクチュエータは、シリコンに異種材料（セラミックス）を接合して製作されることが多い。接合を高精度に行うためには、はんだなどの接合材を使用しない直接接合技術が適している。直接接合方法としては、シリコンとほうけい酸ガラス<sup>(2)(3)</sup>を使用する陽極接合が広く行われている。図 4 に陽極接合の概要を示す。

シリコンとほうけい酸ガラスを成膜したセラミックスの接合面の不純物を除去した後、密着させて 500 程度に加熱する。次に 500 V 程度の負電圧をガラス側に印加することで接合される。

陽極接合は、高温で接合するために熱膨張係数の違いから応力が発生し、この応力が製品の特性に影響する。このため、接合温度は可能な限り低いほうがよい。そこで、陽極接合の接合メカニズムを解明し、接合温度の低温化の可能性について検討する。

3.1 陽極接合界面観察

陽極接合の界面状態を確認するため、TEM で断面の観察を行った。図 5 に陽極接合界面の TEM 写真を示す。写真から、シリコンとほうけい酸ガラスの間にすきまはなく、原子レベルで接合されていることが分かる。次に、接合温度と接合界面状態の関係を把握した。

3.2 接合温度と接合界面状態の関係

接合温度 350 と 450 で接合したサンプルの接合界面

図 4 陽極接合の概要

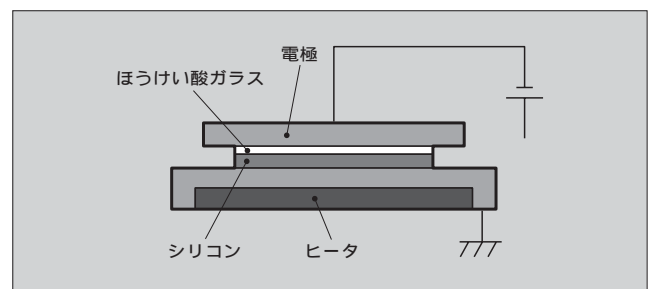


図 5 陽極接合界面の TEM 写真

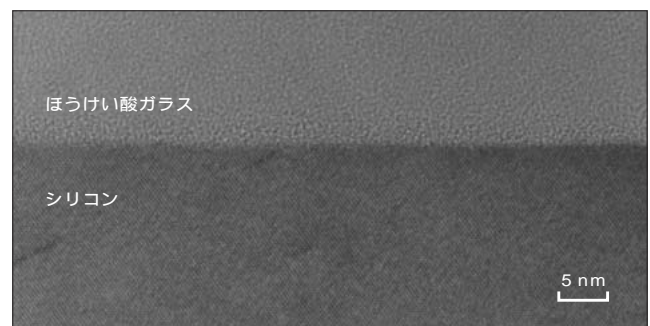
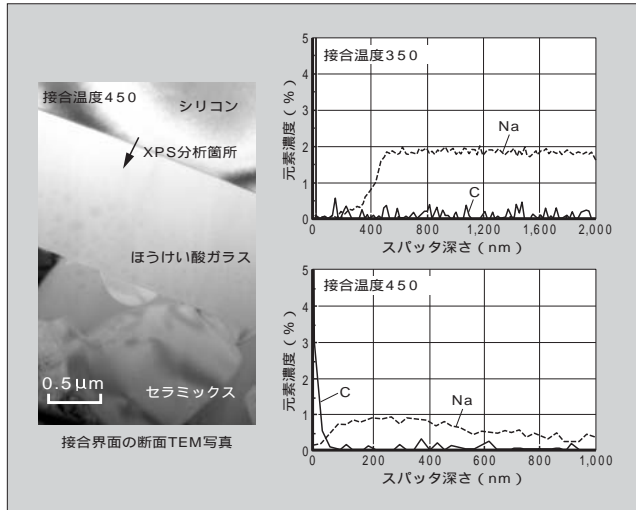


図6 接合界面の解析結果



状態を比較した。接合界面の TEM 観察写真からは、接合温度による違いが見られないことから、X線光電子分光分析 (XPS) で接合界面の元素分析を行った。図6に接合界面の解析箇所と、解析結果を示す。

この結果から、ほうけい酸ガラス中のナトリウム (Na) の量に違いが現れた。接合温度が 350 の場合、シリコンとの接合界面では Na が減少しているが、400 nm の深さでは本来ほうけい酸ガラス中に含まれる Na 元素含有量 (2%) と同じになる。接合温度が 450 の場合、シリコンとの接合界面から 1,000 nm の深さまで Na 含有量が減少している。

3.3 陽極接合メカニズム

接合界面の TEM 観察と元素分析の結果から、陽極接合のメカニズムは次のようになると考えられる。

ほうけい酸ガラス中の Na 原子は、酸素原子 (O) と結合して Na<sub>2</sub>O として存在する。これを加熱して負電圧をガラス側に印加すると Na イオン (Na<sup>+</sup>) と O イオン (O<sup>-</sup>) に電離し、負電圧を印加したガラス側に Na<sup>+</sup> が引き寄せられる。電離して活性化した O<sup>-</sup> はシリコン原子と共有結合して、強固に接合される。

3.4 接合温度の低温化検討

陽極接合において Na イオンの移動が起こる温度に達すれば接合が可能であることが判明した。ガラスの組成によって Na イオンの移動のしやすさは異なることから、ガラスの種類を選定する、またはガラスの成膜条件を選定することで接合温度の低温化が可能になると思われる。

4 あとがき

マイクロ加工後の材料の表面性状や直接接合界面の状態評価は、製品開発に不可欠な技術である。今後は、さらに微小な領域における材料の状態などが問題になると思われる。解析・評価技術の重要性は増すものと考えられる。

参考文献

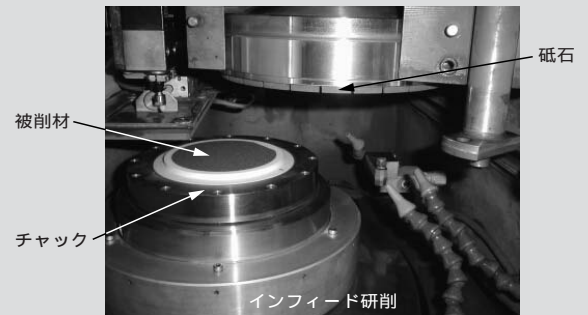
- (1) 後藤友彰ほか. シリコンとセラミックスの陽極接合技術. 6th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics. 2000, p.197-200.
- (2) Anthony, T. R. Anodic bonding of imperfect surfaces. J. Appl. Phys. vol.54, 1983, p.2419.
- (3) Esashi, M. Low temperature Silicon to Silicon Anodic Bonding with Intermediate Low Melting Point Glass. Sensor and Actuators. vol.A21-A23, 1990, p.931.

**解説** シリコンの研削加工 (グライディング)

研削加工とは、砥石の砥粒で被削材の表面を削り取り平滑にする加工方法である。シリコンなどの脆性材料を研削加工する場合、一般的には、砥石と被削材を回転させながら、切り込みを行うインフィード研削が行われる。

研削加工の特徴としては、砥粒 (切れ刃) の自生作用が挙げられる。砥粒が被削材に接触して摩耗すると、砥粒と被削材の接触面積が増加し、負荷抵抗が大きくなる。負荷抵抗がある値以上になると、砥粒が破碎、もしくは脱落して新しい砥粒が現れる。このため、常に切れ味のよい状態で加工が可能となる。このとき、砥粒が摩耗して負荷が増大しているにもかかわらず自生作用が起こらない状態をみつづれ、切りくずなどが

砥粒のすきまに埋まり加工できなくなることを目づまりと呼び、被削材が正常に削れない状態を指し、正常な自生作用が起こる研削条件を選定することが重要になる。





# はんだ付けのメカニズムと解析技術

渡邊 裕彦(わたなべ ひろひこ)

下田 将義(しもだ まさよし)

金子 公寿(かねこ きみひさ)

## 1 まえがき

電子機器の実装は、IC や部品などの発達によって急激な発展を遂げてきた。はんだ実装が手はんだに始まり、IMT (Insertion Mount Technology) から SMT (surface Mount Technology) へと順次発展して、電子機器の高機能化を実現してきた。

富士電機のエレクトロニクス製品の特徴は、産業用として使用され、大電流製品や屋外の厳しい環境下で使用される製品が多く、電気容量の大きい電子部品から小さい電子部品まで、さまざまな部品が基板上に混載実装される。混載実装製品の実装の生産は、IMT や SMT など複数の実装工法を組み合わせ、ますます複雑なプロセスになってきている。

一方、世の中の動向として地球環境への負荷低減がクローズアップされ、鉛フリーはんだの展開など有害物質の廃止や欧米 EMS (Electronic Manufacturing System) 事業の参入、アジア諸国へのアウトソーシングが積極的に計画されている。

このような状況の中、電子機器の実装は新しい製造プロセスの変革が求められている。

富士電機では新たな製造プロセスの変革に向けてさまざまな取組みを進めてきている。その一つとして、電子機器実装時のはんだ付け不良撲滅がある。生産プロセス上で発生するはんだ付けは製品の高い信頼性を追求するうえで取組まなければならないことがらと判断している。

本稿では、はんだ付け不良撲滅へ向けはんだ付けの現象に立ち入ったはんだ付けメカニズムの解明、そのメカニズムを数値的に解明するためのはんだ、そしてその他の構成材料の物性取得への取組みとその解析事例について紹介する。

## 2 はんだ付けメカニズム

### 2.1 電子機器のはんだ付け不良撲滅へのアプローチ

はんだ付け技術は、電子機器を製造するうえで最も一般

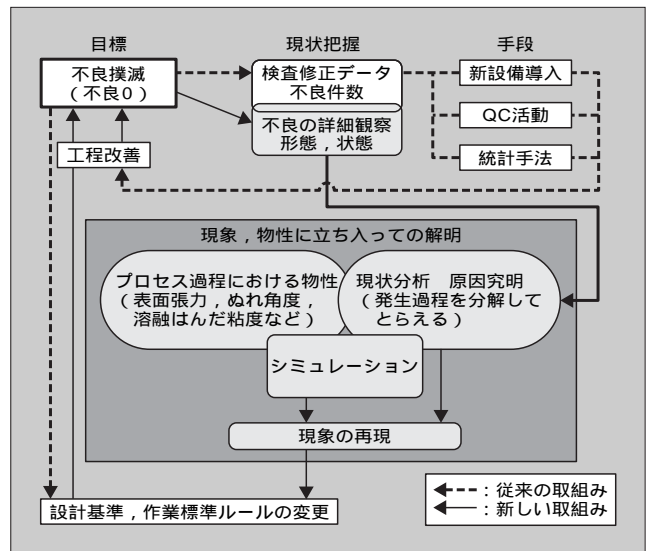
的な工法であるといえる。この古くから使用されているはんだ付け技術にもかかわらず、いまだにはんだブリッジ(端子間の短絡)、はんだボール、未はんだなどの製造工程における不良はなくなる<sup>(1)(2)</sup>ない。

なぜはんだ付け不良はなくなるかを考えてみる必要がある。それについて従来までのはんだ付け品質に対する取組みを次に述べる。

はんだ付け不良に対する従来からの取組みは図1のように、製造工程中の外観やインサーキットテストの検査データの不良件数を統計的に整理し、例えば不良発生部品やブリッジ、はんだ少などの不良モードで分類され、製造工程の条件変更や材料の変更などの取組みから、不良低減を行っていた。すなわち不良を発生させないことではなく、不良を低減することが狙いとなっていたといえる。

改めて、不良撲滅の実現を考えると、冒頭で述べたように、今後の電子機器の実装分野におかれた状況は、必ずしも管理の行き届いた環境下で電子機器の製造が行われるとは限らない。これに対して新たな取組みは、製造プロセスで起こっている現象を、物理現象としてとらえることで

図1 はんだ付け不良に対する取組み



渡邊 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、生産技術研究所第一開発部。



下田 将義

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、生産技術研究所第一開発部。



金子 公寿

生産技術に関する CAE 技術開発に従事。現在、生産技術研究所第三開発部。精密工学会会員、可視化情報学会会員、エレクトロニクス実装学会会員。

不良撲滅を達成しようとする取組みといえる。新しい視点を取り入れることにより、従来達成できなかった自動化・無人化プロセスや検査工程のないプロセスへの展開がひらける。

③ 製造プロセスの品質に対する取組み

電子機器の製造量産プロセスでは、設備（機械精度）、人、部品などのおおのほかに許容値（ばらつき）がある。この製造条件のばらつきにより不良発生率は変動し不良撲滅、すなわち量産における不良発生0は確率的にありえない。そこで図2に示す、チップ部品の立ち不良（マンハッタン現象）をモデルに、シミュレーションおよび物性（不良の発生した現象）に立ち入った説明手法を紹介する。

プロセス過程の物性として、部品を立たせようとする促進モーメントに影響するはんだのぬれ力、例えば図3に示す接合母材である銅に対する溶融はんだのぬれに影響する接触角や表面張力、そして部品を立たせない抑止モーメントに影響の大きい、リフロー温度プロファイルに対応した溶融フラックスの接触角や粘着力など取得した。さらには高速ビデオカメラによるリフロー加熱過程のはんだ挙動観察を行った。

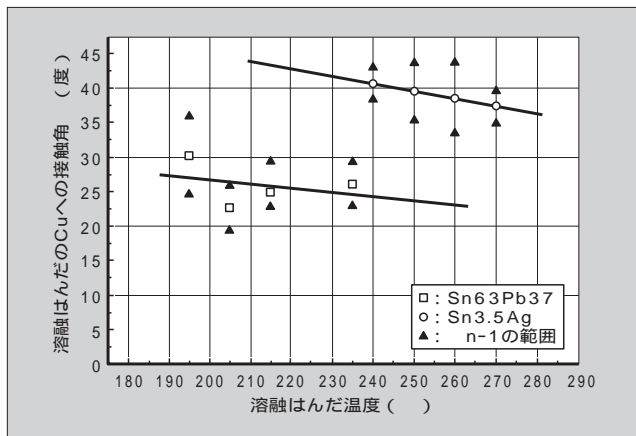
このデータを基に不良発生率をシミュレーションにより算出する。すなわち、マンハッタン現象の発生過程を把握する。

これらのデータを基に経済性を考慮し、製造プロセス条件を満足し、そして経済性を考えた不良率範囲内で生産す

図2 マンハッタン現象の代表例（部品：1608抵抗）



図3 接合母材Cuに対する溶融はんだの接触角



るために、各種製造条件で発生するばらつきを確率的な現象として、乱数を用いてコンピュータ上で再現する。

3.1 モンテカルロ法によるはんだ付け不良率の推定

図4にモンテカルロ法（519ページの「解説」参照）によるはんだ付け不良率評価方法の流れを示す。流れとしては、まず製造条件のばらつきを測定し、正規分布として推定を行い、標準偏差および平均値を求める。次に、この正規分布と同様な傾向になる乱数<sup>(3)</sup>を発生させる。用意した乱数列を用いマンハッタン現象を再現する物理モデルに当てはめ、そこから出力される評価指数によって不良率を推定する。

3.2 物理モデル

マンハッタン現象の物理モデルとして、解析モデルを図4に示し、はんだの表面張力によるモーメントの釣合い状態を考える。ここで、マンハッタン現象は、回転中心を支点すると、モーメントの合力が時計回りの方向に生じた場合に発生すると考えられる。この図5は、はんだがチップ電極にぬれあがった状態での力の作用方向を表している。

図4 評価方法の流れ

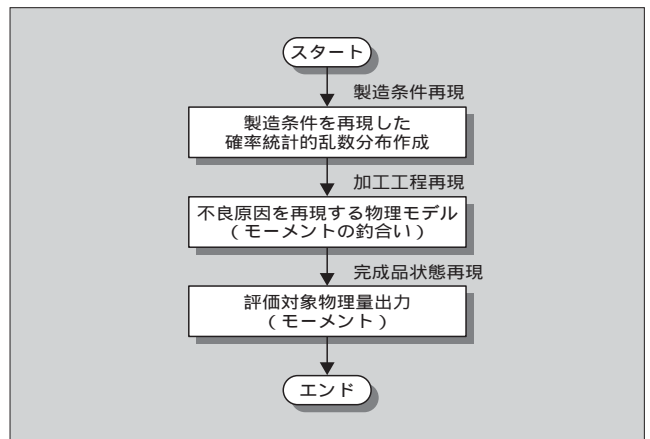
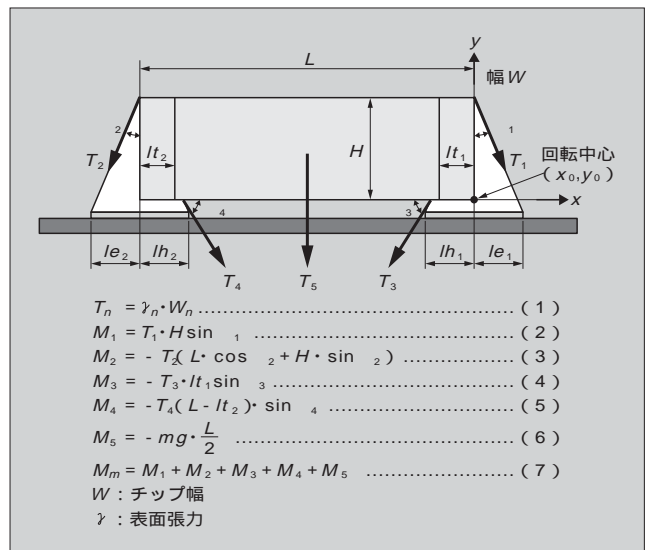


図5 物理モデル（モーメント釣合い）



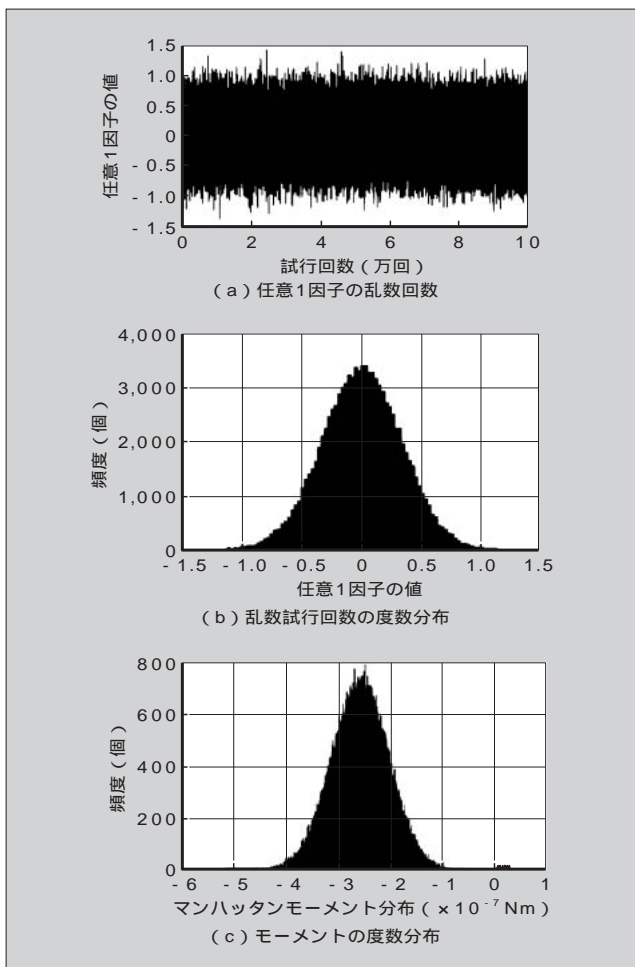
$T_1, T_2, T_3$  および  $T_4$  は、はんだの表面張力による作用力を表し、 $T_5$  はチップ自重による重力方向の力を表している。シミュレーションでは、 $T_1 \sim T_5$  による作用力からモーメントの釣合いを考えた。回転中心はチップ右下端とし、時計回りを正モーメントとすると各作用力によるモーメントは、式(1)~(6)で示される。マンハッタンを起こす条件は、式(7)に示す合モーメントが正の値になる場合である。

境界条件として、各種製造ばらつきによって、チップ電極の下にはんだが存在しない場合も考えられるので、そのときはその電極側の表面張力によるモーメントは発生しないとした。製造条件上のばらつきは、実装機精度を考慮し算出する。

3.3 モンテカルロ法における製造条件

製造条件のばらつきは正規分布を持った乱数によって仮定している。この条件は、マンハッタン現象を発生させたサンプルのチップ断面観察、材料組成などの分析を行い、製造条件を決定する。決めた因子についてはばらつきを測定し、正規分布などの確率分布として推定する。平均値  $\mu = 0.000$ 、標準偏差  $\sigma = 0.333$  とした正規分布を持つ1因子について、乱数試行回数での値を図6(a)に示す。そのときの度数分布を図6(b)に示す。この分布は、 $N(\mu, \sigma^2)$  の正

図6 マンハッタンモーメントの度数分布



規分布であることが分かる。計算試行数は、10万回以上とする。各製造条件を代表する因子の値は、超周期乱数であるため、お互いの組合せには相関がない。したがって、不良の事象が1回発生すれば0.001%となり、これよりも低い発生確率を求めるには、試行回数を増やす必要がある。

3.4 評価結果

モンテカルロ法および物理モデル〔式(1)~(7)〕を用いてモーメントを計算し、そのモーメントを度数分布に示したものを図6(c)に示す。

分布は、負のモーメント領域に多くあるが(正常実装品)、正のモーメント領域にも少し存在している。分布が分割されているのは、製造条件によって、モーメントの釣合い式に不釣合い、すなわち促進モーメントが大きくなることが

図7 パターン寸法と不良率の関係

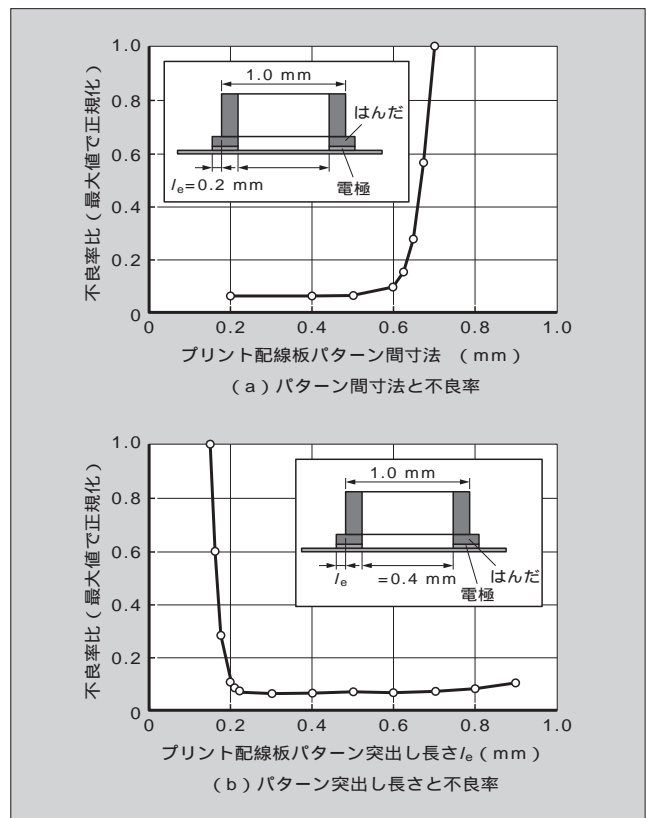
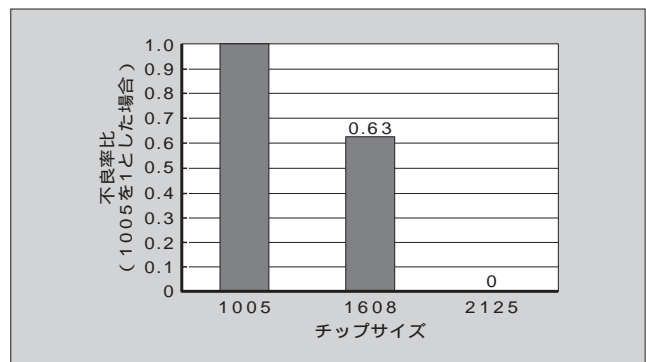


図8 チップサイズ不良率推定値



起こるからである。マンハッタン現象の生じる範囲は、式(7)からモーメントが正の範囲である。したがってこの個数から、不良率を推定した。抵抗部品(1.0mm x 0.5mm サイズ)のマンハッタン現象発生率に与える電極寸法の影響を図7に示す。このように、各パラメータの数値が不良率にどう影響するか定量的に評価することができる。また図8に、チップサイズの違いによる不良率を示すが、サイズの大きいチップほど不良率も低く、実際、製造現場での不良率と同様な傾向である。

**4** あとがき

電子機器のはんだ付け接合プロセスは、非常に多種の異種材料を同一プロセスで接合するため、きわめて高度な接合技術が要求される。そのこともあって、実験と製造プロセスで起こる現象が異なるケースを完全に再現することは困難を極める。

そういった、製造プロセス現象の定説とプロセスで実際

に起こる現象との乖離(かいり)をなくすため、今回紹介した製造プロセスで起こる現象の定量的な解析を今後も展開することで、鉛フリーはんだへの代替えに反映させ、電子機器製造プロセスでこれまでに困難を極めたはんだ付け不良の撲滅が達成に近づくものと判断する。この技術によって高い製造品質の確保を目指していく所存である。

参考文献

- (1) 浜田正和．ソルダリング不良の原因と対策．電子技術．vol.42, no.15, 1988, p.95．
- (2) 安部可伸．表面実装はんだ付け．溶接技術．vol.36, no.6, 1988, p.88-92．
- (3) Brown, B. W. ; Lovato, J. Library of Fortran Routines for Random Number Generation. Department of Biomathematics, M. D. Anderson Cancer Center, University of Texas, Houston．
- (4) 金子公寿．モンテカルロ法によるはんだ付け不良率の推定．第16回エレクトロニクス実装学会．2002．

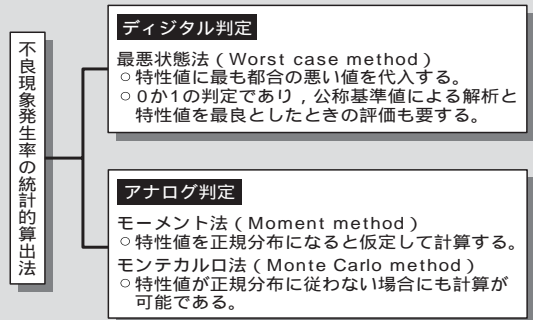
**解説** モンテカルロ法

モンテカルロ法(Monte Carlo method)は「確率論的方法」といわれ、統計力学に基づいた数値計算法である。この計算法は、一般に電子部品・装置の劣化に対する信頼度予測に適用されており、その他の手法として、最悪状態法(Worst case method)、モーメント法(Moment method)などがある。

最悪状態法では、不良現象が発生する要因のうち、最も都合の悪い組合せの値を代入することで、不良発生率が規定範囲にとどまるかどうかを算出できるが、一般に変動範囲を必要以上に広く設定する傾向があり、不良率の増大を招きやすいという欠点がある。

モーメント法では、物性値分布(ばらつき)が初期と経時後を問わず正規分布になると仮定する。ある時点での平均値と分散から、全特性値の平均値と分散を求め、これにより特性が規定の限界値外にとびだす確率、すなわち、不信頼度を算出できる。また、最悪状態法に対して、モーメント法は統計的な考え方が取り入れられており、信頼度予測精度はより高くなるが、仮定した分布の妥当性や公称値のずれが問題となる。

モンテカルロ法はモーメント法と違い、与えられた物性値分布からランダムに一つずつ値を抽出し、その組合せを関係式に代入することで特性値を求める。この手順を何回も繰り返し、全特性値の分布を求めることで、許容値外にとびだす確率(不信頼度)を算出できる。また、部品の物性値分布がどのような形であっても適用できるという利点がある。



# 自動販売機における臭気・味覚の分析評価技術

内田 勝啓(うちだ かつひろ)

永田 睦美(ながた むつみ)

西脇 正剛(にしわき せいごう)

## 1 まえがき

自動販売機は24時間気軽に簡単に利用でき、安全で衛生的である利点から、屋内外を問わず数多く設置されている。しかし、幾つかの社会問題発生以来、消費者の安全性、衛生性への要求は一段と厳しいものになり、従来の常識はまったく通用しなくなった。

自動販売機に使用する材料の選択を誤ると、発生する極微量成分が、缶容器に付着したり、カップ飲料に溶解したりして消費者の臭氣的、味覚的な嗜好(しこう)感覚に悪影響を及ぼす。安全で衛生的な自動販売機を供給していくためには、高感度で高信頼性の臭気・味覚の分析評価技術が必要不可欠である。

本稿では、飲料用自動販売機における臭気・味覚の分析評価技術を紹介する。

## 2 缶自動販売機における臭気の評価技術

### 2.1 臭気物質

缶および瓶缶併売自動販売機は、金属材料、高分子材料、複合材料などから構成されており、商品と同一雰囲気を使用する材料から極微量発生するアウトガスが容器外装に付着、蓄積し、利用者の嗜好感覚に悪影響を及ぼすことが過去に発生している。鉄やアルミニウム製容器の場合、容器外装のコーティング材にある種の極性有機化合物が吸着することが分かっている。特に高分子材料から発生する臭気物質は、材料中の残存モノマーや添加剤、およびその分解生成物である。

飲料容器(主に金属容器)表面に吸着して臭気に悪影響を与える物質としてはフェノール系物質を確認しており、特にクレゾールは数 $\mu\text{g}$ /缶の吸着量でも消毒臭を感じ、嗜好感覚を阻害する。現在までに確認されているフェノール系臭気物質を表1に示す。

また、ある種の添加剤は経年変化で分解し、分解生成物がフェノール系物質になるものがある。例えば、高分子材料の添加剤として用いられるTCP(りん酸トリクレシル)

表1 フェノール系臭気物質

においの種類	物質名	嗅覚いき値
絵の具臭	フェノール	5.6 ppb
消毒臭	P-クレゾール	$5.4 \times 10^{-2}$ ppb
消毒臭	ジプロモフェノール	$6.1 \times 10^{-5}$ ppb

は、成形加工時、あるいは使用環境によって、加水分解してクレゾールを生成する。

### 2.2 臭気の評価方法

#### 2.2.1 臭気の特徴

臭気の特徴について以下に簡単に述べる。

- (1) 大部分の臭気は低濃度成分の混合気体である。また、臭気を構成している各成分の嗅覚(きゅうかく)いき値濃度は、1 ppb 以下のものも多い。例えば、消毒臭であるクレゾールのいき値濃度は0.05 ppb である。
- (2) 臭気各成分間には相乗作用、相殺作用がある。
- (3) 臭気成分物質濃度と人間の嗅覚に感じる感覚量の関係にはウェーバー・フェヒナーの法則がある。この法則はにおいの物質濃度が10倍になっても人間の感覚量ではおよそ2倍にしか感じないことを表している。

このような特徴を持つ臭気について、官能評価と機器分析により、自動販売機の臭気評価を実施している。

#### 2.2.2 臭気官能評価

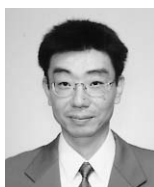
缶自動販売機の臭気官能評価は、まず鋭い人の嗅覚で評価し、合否判定を行う。

##### (1) 臭気パネル

臭気パネルはあらゆるにおいに正常に反応する嗅覚を持っていることが必要である。社内臭気パネルの選定には医療用の嗅覚検査診断薬や、1995年の改正悪臭防止法の施工規則の「臭気判定士」の嗅覚検査にも採用されている「T & T オルファクトメータ」を使用している。図1にパネル選定時の嗅覚検査方法を示す。

##### (2) 臭気評価方法

一般に臭気の評価方法は表2に示す評価方法が採用され



内田 勝啓

自動販売機の材料研究開発に従事。現在、三重工場品質管理部課長補佐。日本化学会会員。



永田 睦美

自動販売機の材料研究開発に従事。現在、三重工場品質管理部。



西脇 正剛

自動販売機の開発評価試験、材料研究開発に従事。現在、三重工場品質管理部課長。

ている。この中から実際に自動販売機や材料のにおいを評価し、定量的かつ簡便な評価項目を選定した。においの評価方法は「臭気強度」「快・不快度」「におい種類」とした。また、特に消毒臭については、臭気の有無や強度についても評価を行っている。

(3) 臭気試験条件

これまで経験したにおいの発生要因を分析し、臭気試験条件を決定した。

(a) 缶自動販売機の運転モードを想定して温度サイクルをかける。

b) 水分を添加する。

水分が存在すると物質が加水分解し、強いにおいを出す特性を持つ材料がある。

自動販売機本体の臭気試験では、運転モードをホットからコールドに切換後、商品のにおいと商品の取出口より自動販売機庫内の臭気について評価を行う。

材料の臭気試験では、自動販売機の密閉された庫内雰囲気ariumを想定し、密閉容器内においを発生させ評価を行う。材料を臭気試験用袋に入れ、袋内に活性炭を通した無臭空気を充てんし、温度サイクルをかけて袋内においを発生させ、発生したにおいについて評価を行う。試験に使用する器材はすべて無臭性が確保されているものを使用し、また、先入観を排除するために中身が見えない状態にすることが重要である。富士電機では、金属を蒸着したポリエチレンテレフタレート製の袋を採用した。また、発生させるにおいは、材料の表面積や質量調整を行い、適度な濃度で

行う。

2.2.3 機器分析評価

臭気分析の目的は、開発段階の官能評価で不合格判定が出された場合の改善策に具体的な指針を示すことである。臭気成分は、前述のとおり低濃度かつ混合物質であるため、臭気分析には、濃縮方法と分離方法を含めた高感度の分析技術の確立が必要である。自動販売機では、庫内材料、庫内雰囲気、商品について分析を行う。

(1) 商品分析

商品外面を高純度有機溶媒で洗浄後、濃縮を行い、GC-MS (ガスクロマトグラフ質量分析計) により定性・定量分析する。

(2) 庫内雰囲気分析

捕集剤を充てんしたガラス管をトラップ管として用い、庫内雰囲気を濃縮サンプリングする。これを加熱脱着、コールドトラップ後、GC-MS により定性・定量分析する。

(3) 材料分析

材料を粉碎し、高純度有機溶媒で抽出、濃縮後、GC-MS で定性・定量分析する。

上記分析方法により、クレゾールの検出下限は商品で 10 ng/缶、庫内雰囲気 で 0.1 ng/L、材料で 10 ng/g を達成した。また、特に材料の経年劣化に注目し、各種材料を加熱劣化させ、分解生成物の分析も行っている。図 2 に軟質塩化ビニル樹脂の可塑剤に用いられる TCP の加水分解反応機構を示す。

これらの分析技術を駆使することにより、缶自動販売機

図 1 嗅覚検査方法

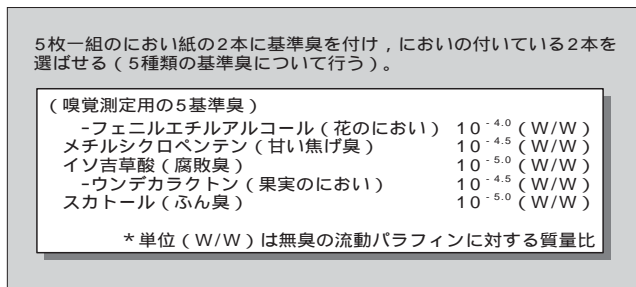


図 2 TCP の加水分解反応機構

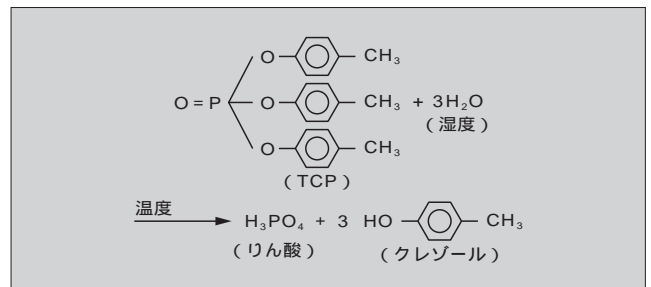


表 2 臭気評価方法

評価方法	臭気指数	臭気強度	快・不快度	においの序列 (不快順)	においの種類
評価の概要	においのいき値を数値化	においの強さを数値化	においの不快の度合いを数値化	においの不快順に序列をつける。	においの質を表す。
表示方法	$N = 10 \times \log S$ N: 臭気指数 S: 臭気濃度	0: 無臭 5: 強烈なにおいの6段階評価	+4: 極端に快 0: 快でも不快でもない -4: 極端に不快の9段階評価	嫌いなにおい順位を表示	言葉で表示
尺度の幅	広い(0~)	狭い(0~5)	狭い(+4~-4)	—	—
測定値	定量的	やや定量的	定性的	定性的	定性的
評価尺度	臭気の有無(客観的)	臭気の程度(主観的)	臭気の程度(主観的)	臭気の程度(主観的)	臭気の程度(主観的)
評価時間	長い	短い	短い	短い	短い
採用の有無	×			×	

から臭気物質の排除を可能にしている。

### ③ カップ自動販売機における味覚の評価技術

#### 3.1 味覚物質

カップ自動販売機は、機内に原料（シロップ、パウダー、コーヒー豆など）を保管しており、販売ごとに原料を水（冷却水、炭酸水、氷、湯）で希釈、あるいは抽出を行い、飲料を調理している。カップ自動販売機の接液材料（配管材料、原料容器材料など）は、飲料が直接接触するため、食品衛生法に定められた材料、あるいは同法で定められた溶出試験に合格した材料を使用している。しかし、材料から溶出した極微量成分が飲料の味に悪影響を与えることがある。

特に、高分子材料から溶出する味覚物質は、主に材料中の添加剤である。多くの高分子材料には添加剤として酸化防止剤が含まれおり、その中でもある種のフェノール系酸化防止剤は飲料に溶解して、ごく微量でも飲料の味覚に悪影響を与える。現在までに確認している味覚物質を表3に示す。

また、上水道などでは、フェノール類を含む水を塩素処理して生じるクロロフェノール類が異臭味を発生することが報告されている。

最近では、衛生性向上のため、機内に塩素発生器が搭載されているカップ自動販売機も多く、機内で発生したガスとフェノール系酸化防止剤が反応して、薬品臭味が発生することが分かっている。

#### 3.2 味覚の分析評価方法

##### 3.2.1 味の特徴

味の特徴について以下に簡単に述べる。

- (1) 味を構成している各成分の味覚いき値濃度は、非常に低濃度であり、人の好まない味成分物質ほど低い。例えば、苦み成分である硫酸キニーネのいき値は0.000049 (wt%) に対し、甘み成分であるしょ糖のいき値は0.086 (wt%) である。
- (2) 味の各成分間には相乗作用、相殺作用がある。
- (3) 味の成分物質濃度と人の感じる感覚量は、物質濃度が10倍になっても人間の感覚量ではおよそ2倍にしか感じない。

このような特徴を持つ味について、官能評価と機器分析

表3 味覚物質

味の種類	物質名	発生源
樹脂臭味 (薬品臭)	○BHT (+Cl <sub>2</sub> ) ○ターシャルブチルメチルフェノール (+Cl <sub>2</sub> ) ○ジターシャルブチルメチルフェノール (+Cl <sub>2</sub> )	高分子材料の添加剤 (塩素反応)
硫化水素臭	○H <sub>2</sub> S	ステンレス鋼中のS
かび臭	○2-メチルイソボルネオール ○ジオスミン	放線菌や藍藻類

により、カップ自動販売機で提供する飲料の味覚評価を実施している。

#### 3.2.2 味覚官能評価

カップ自動販売機では、飲料本来の味をそのまま提供することが重要であるため、飲料中の味覚に影響を与える要因を検出する分析型の官能評価を行っている。

##### (1) 味覚パネル

人が感じる味は五つの味（甘み、辛み、酸み、苦み、うまみ）がある。味覚パネルは、あらゆる味に対して正常に反応する味覚を持ち、また、味の濃度差が判別できる能力が必要である。社内味覚パネルの選定には、人が感じる五つの味を用いて、5味識別テストと味の濃度差識別テストを実施している。表4にパネル選定時の味覚検査方法を示す。

##### (2) 味覚評価方法

カップ自動販売機では分析型3点識別法を採用している。3点識別法とは、二つは同じ試料、一つは違う試料の3試料を一組にしてパネルに与え、三つの試料の中から一つの違う試料を選ばせる方法である。

実際の味覚評価では、表5に示す評価表を用い、評価点および味の種類を記入する。結果は、有意差検定を行い、正解したパネルの評価のみを採用し、正解パネルの味覚評価値の平均値を使用する。また、味の種類は評価判定が不合格の場合、味覚物質の原因追求の手段として用いる。

##### (3) 味覚試験条件

味覚試験条件は、接液材料の実機での使用環境を想定して決定する。試験条件は、表6の内容を検討し、条件設定を行う。

表4 味覚検査方法

味の種類	物質名	5味識別試料濃度 (wt%)	濃度差識別試料濃度 (wt%)
甘み	しょ糖	0.4	5/5.25/5.5
辛み	塩化ナトリウム	0.13	1.0/1.03/1.06
酸み	酒石酸	0.005	0.02/0.022/0.024
苦み	硫酸キニーネ	0.0004	実施せず
うまみ	グルタミン酸ナトリウム	0.05	0.2/0.242/0.266

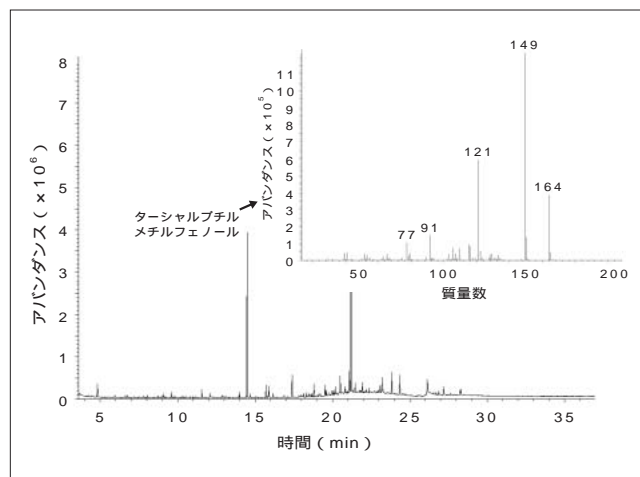
表5 味覚評価表

評価項目	3点識別	味の差の評価	味の種類評価
評価内容	試料とブランクをパネルに与え、パネルが味の差を識別できるかどうか評価する。	識別した試料とブランクとの間で味にどの程度差があるか6段階で評価する。 【評価点】 0：味の差なし 1：きわめてわずかに 2：小さい 3：中程度 4：大きい 5：非常に大きい	識別した試料にどのような味（におい）がするか味の種類について評価する。 【種類】 ○甘い ○渋い ○塩素、カルキ ○金属の味 ○薬くさい ○溶剤のような味 ○ゴムのような味 ○腐敗した味 など

表6 味覚試験条件

項目	内容
飲料温度	ホット飲料, コールド飲料
接液時間	飲料が通過するのみ, 滞留する
接液飲料	水, シロップ飲料, アルコール飲料
接液面積	材料が飲料と接触する面積
塩素発生器適合性	塩素発生の有無

図3 ナイロン樹脂浸漬水の分析結果



3.2.3 機器分析評価

味覚分析の目的は、官能検査（523ページの「解説」参照）との相関を重視するため、水または飲料に溶出した成分を分析する。分析方法としては、自動販売機本体の水や飲料、または材料単体を浸漬した水や飲料を試料とし、高純度有機溶媒で2回溶媒抽出、無水硫酸ナトリウムで脱水、減圧および窒素気流下で濃縮後、GC-MSにより分析する。複雑な前処理を経るため、ガラス器具類は不活性処理および十分な洗浄で、コンタミネーションを防止する。図3に、

味覚物質を含むナイロン樹脂の分析例を示す。

フェノール類は通常 100 µg/L 以上程度含まれていても、そのままでは臭味を感じないが、クロロフェノールは 2 µg/L で強い薬品臭を生じる。味覚分析では、この味覚物質に対しても評価が可能である。

富士電機では、これらの味覚分析技術を用いたカップ自動販売機の開発を行っている。

4 あとがき

人の嗜好感覚である臭気・味覚に関する評価はまだまだ人間による官能検査に頼るところが大きく、今後も継続した評価は実施する。機器分析的見地からも、さらにさまざまなトライを行い臭気、味覚の定量化を行っていく。

また、自動販売機は嗜好飲料を販売している。年々高まる利用者の嗜好特性の要求に追従しつつ、今後は嗜好に影響を与える要因を排除し、あるべき品質を維持するための評価だけではなく、さらにおいしさを向上させるような魅力ある自動販売機の開発時の評価にも応用する所存である。

参考文献

- (1) 岩崎好陽．臭気の嗅覚測定法．第1版．臭気対策研究協会，1997，p.120．
- (2) 岩崎好陽．臭気の嗅覚測定法．第1版．臭気対策研究協会，1997，p.4-5．
- (3) 佐藤昌康．味覚の化学．第1版．朝倉書店，1981，p.221．
- (4) 増山英太郎，小林茂雄．センサー・エバリュエーション．第1版．垣内出版，1989，p.276-277．
- (5) 岩本啓治．異臭味水対策の指針．日本水道協会，1980，p.1-5．
- (6) Burtshell, R. H. et al. Chlorine Derivatives of Phenol Causing Taste and Odor, Jour. American Water Works Association, vol.51, 1959, p.209．

**解説** 官能検査

人間の五感〔味覚，嗅覚（きゅうかく），視覚，聴覚，触覚〕による検査法を官能検査という。官能検査は分析型と嗜好（しこう）型の2種類がある。分析型の官能検査は人間の感覚器を測定器として品物の特性を測定したり、品物の差を検出したりする場合に使用し、品質検査・管理や工程管理などに利用する。また、

嗜好型官能検査は人間の嗜好特性（好み）を知るために使用し、製品開発や市場調査などに用いられる。

自動販売機では、嗅覚，味覚を使った臭気官能評価，味覚官能評価を行い、製品開発，品質管理を行っている。



# 固体高分子形燃料電池における面内分布の解析

榎並 義晶 (えなみ よしあき)

## 1 まえがき

固体高分子形燃料電池 (PEFC) は、運転温度が低く出力密度が高いという特徴があることから、次世代自動車の動力源として、また電気と熱を供給するコージェネレーションシステムとして各社で開発が進められている。富士電機では、出力 1 ~ 10 kW 程度の定置型燃料電池を目標として研究開発に取り組んでいる<sup>(1)</sup>。

PEFC の電解質膜は、乾燥すると性能が低下するので、一定以上の水分量を維持する必要がある。また過剰な水分は反応ガスの供給を妨げ電池特性を低下させるので、適切な水分管理、すなわち望ましい水分量の分布を実現することが高出力と高信頼性とを両立させるために重要である。電池の内部では反応に伴うガスの消費と水の生成により水分量や電流密度の分布ができるが、これを実測するには特殊な実験装置と多くの時間が必要になる。開発した面内分布解析は小面積電池の実測データに基づくシミュレーションで、電池面内の各パラメータの分布を計算する技術であり、これを活用することで電池設計や故障解析を効率的に行うことができる。

## 2 解析方法

### 2.1 電極反応と水の移動

PEFC の単電池はセルと呼ばれ、セルは図 1 の断面図のように、電解質膜、触媒層、拡散層、セパレータを備えている。燃料と空気はセパレータに作られた溝に沿って流れる。燃料中の水素と空気中の酸素はそれぞれ拡散層を通過して触媒層で反応して発電するとともに水ができる。反応によってできた水は燃料、空気の流路に排出されるが、その比率は燃料と空気の湿度差および電流密度によって変化する。燃料と空気の湿度は電解質の抵抗を変化させて電流密度に大きく影響するので、正確な面内分布を計算するにはセルの各部における水の移動量を把握する必要がある。そこでセル面内の各部位を模擬するために、電極面積 5 cm<sup>2</sup> のセルの電流電圧特性と水の移動量をさまざまな加湿条件

で測定し、面内分布解析の基礎データとした。

### 2.2 計算モデル

図 2 は面内分布解析に用いた計算モデルの概念図である。一つのセルを幾つかの分割セルに分けて、ガス流路で接続する。各分割セルの電流電圧曲線と水移動量は、反応ガスの濃度や湿度に応じた実測データを補間して計算される。通常のシミュレーションでは適当なパラメータを与えた理論式や実験式から電流密度と水移動量を計算するが、現象が複雑かつ条件の幅が広いいため十分な精度が得られない。そこで 5 cm<sup>2</sup> セルでの詳細な実測データを用いて推定精度

図 1 固体高分子形燃料電池のセル構造

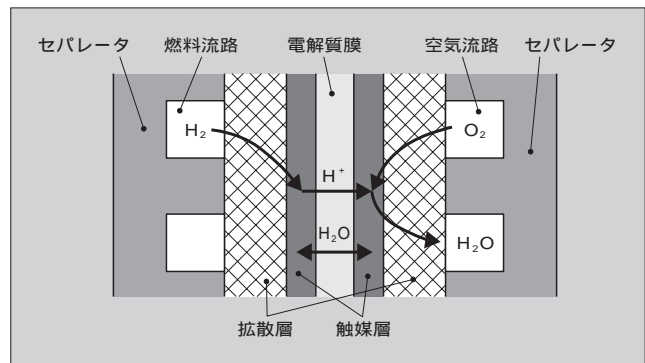
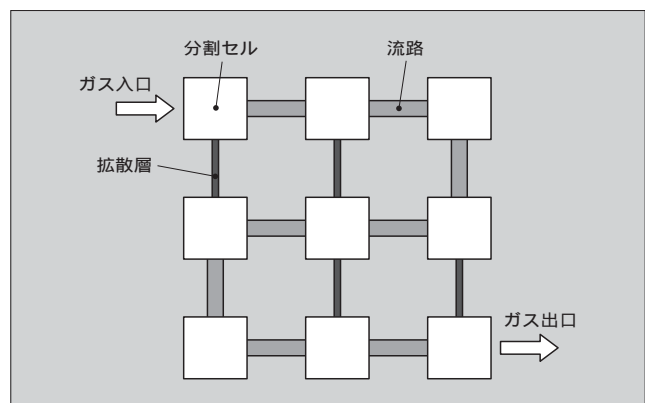


図 2 計算モデルの概念図



榎並 義晶

固体高分子形燃料電池の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所環境技術研究所。電気学会会員。

を高めたことがこのシミュレーションの特徴である。

ガス流路のないセル境界は、図2のように拡散層によって接続されていると考えることで後述のようなガス流速の分布を計算することができるが、ここでは簡便のため完全に遮断されているものとみなす。燃料・空気にはそれぞれこのようなガス流路が複数あって、反応ガスを供給する役割を果たす。

分割セルでは電流密度に応じてガスが消費され、ガスの流量と組成が変化する。すべての分割セルでセル電圧が同じと仮定して、平均電流密度が設定値に等しくなるまで計算を繰り返すことで面内分布が得られる。離散化方程式の導出や基本的な計算法は参考文献3を参考にしている。

### ③ 解析結果

#### 3.1 100 cm<sup>2</sup> セルの面内分布

図3のような流路形状をした電極面積 100 cm<sup>2</sup> のセルで、面内分布を計算した結果が図4の電流密度分布である。高電流部位は空気入口に近い下部に、低電流部位は燃料入口に近い上部にある。燃料と空気が逆方向から流れることで電解質膜の透過とガス流れによって水がセル内部を循環するために、ガスの湿度が低いガス入口部分でも電流密度の低下は小さく抑えられている。

図3 100 cm<sup>2</sup> セルのガス流路

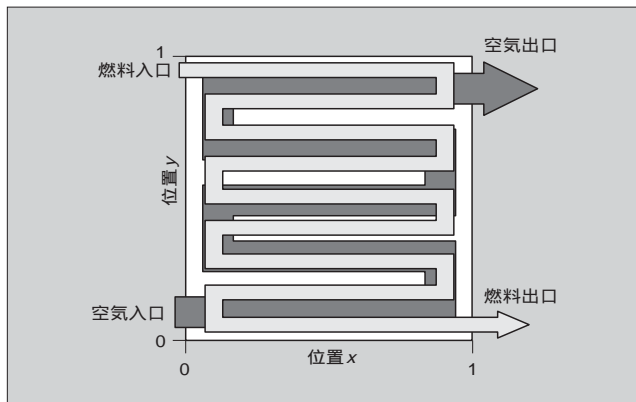
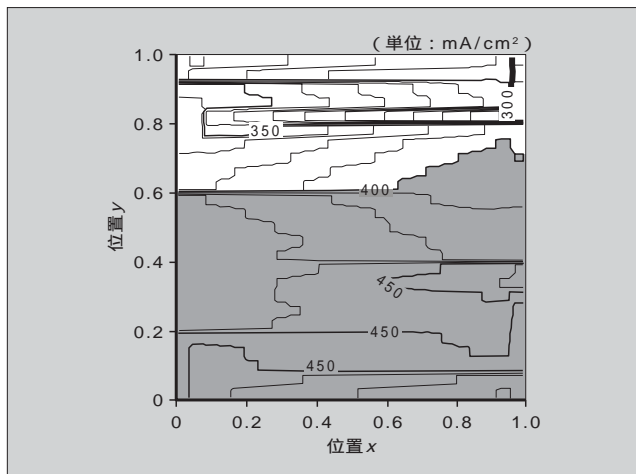


図4 100 cm<sup>2</sup> セルの電流密度分布



#### 3.2 実験結果との比較

空気の流量を変えた場合のセル電圧とガス出口の露点について、電極面積 100 cm<sup>2</sup> セルの実測値とシミュレーションの結果を比較したのが図5である。横軸の酸素利用率は、理論的な酸素消費量を供給した酸素流量で割った値である。右縦軸のセル電圧は、酸素利用率 55 %のセル電圧との差で示されている。

反応によって生成する水の量は酸素利用率に関係なく一定なので、供給する空気が少なく酸素利用率が高いほど空気の出口露点は高くなる。また、電解質膜を通して水が移動するので燃料の出口露点も同時に高くなり、セル電圧は空気の出口で酸素濃度が減少するために低くなる。

シミュレーションの結果は電圧、露点ともに実測値に非常に近い値となっていて、燃料側についても同様の結果が得られたことから、面内分布解析の精度が高いことを検証できたと考えている。

#### 3.3 凝縮部位の予測

面内分布解析を利用してガス流路での水蒸気の凝縮条件を調べることができる。図6は燃料ガスの相対湿度分布を計算した結果で、燃料ガスの出口では相対湿度が1を超え

図5 面内分布解析の検証（酸素利用率の影響）

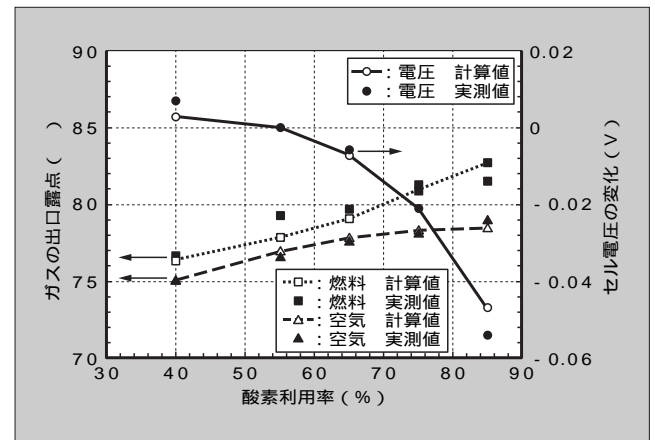


図6 燃料ガスの相対湿度分布

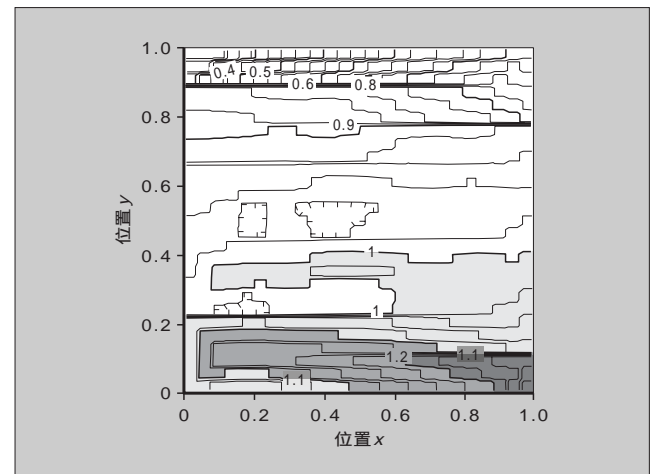
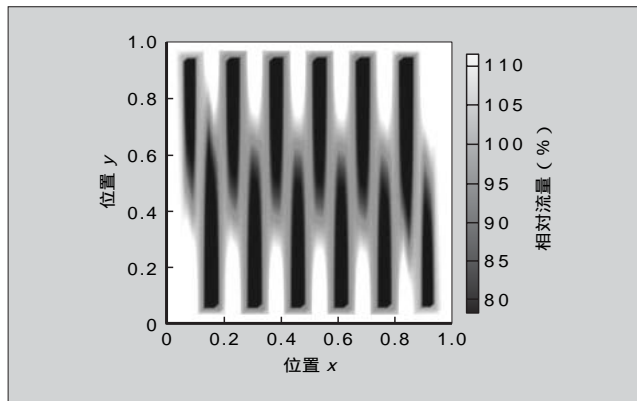


図7 拡散層の透過を考えたガス流量分布



るため水蒸気が凝縮することが分かる。

複数のセルを積み重ねた燃料電池では、凝縮した水がガスの通りを悪くして各セルのガス流量が不均等になることがあるため、できるだけ凝縮量を減らすことが求められる。面内分布解析により凝縮部位と凝縮量を予測することで、凝縮量の少ないガス流路の設計や運転条件の設定ができる。

### 3.4 拡散層のガス透過と流量分布

これまで述べてきた面内分布解析では面方向に拡散層を透過するガス流れの影響は無視してきたが、図2の計算モデルで拡散層に透過率を設定し、圧力と流速の方程式を解くことで拡散層の影響を調べることができる。

典型的な拡散層のガス透過率はガス流路の0.1%以下で

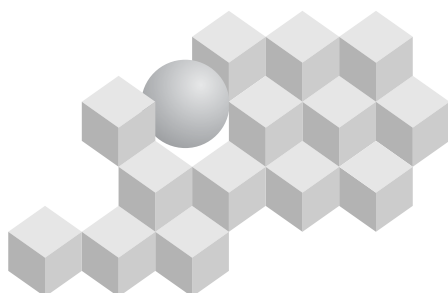
あるが、折り返したガス流路の境界では拡散層に大きな圧力差がかかること、セル全体では拡散層は大きな透過断面積を持つことから、拡散層のガス透過率が大きい場合にはその影響を無視できないことが分かった。図7はガス透過率の大きな拡散層を使用した場合のガス流量分布を、電流密度が0という条件で計算した結果である。平均より20%以上流量が少ない場所もあり、拡散層のガス透過による影響がはっきり表れている。

### 4 あとがき

固体高分子形燃料電池の面内分布解析について、富士電機での計算方法と計算例を紹介した。実際の電極特性をシミュレーションに組み入れることで実用的な精度での面内分布解析ができるようになり、電池の設計に活用できると期待している。今後は、ガス透過率が大きい拡散層に対応するために、電流密度分布とガス流速分布を連成させられるようにプログラムを拡張する予定である。

### 参考文献

- (1) 瀬谷彰利, 大賀俊輔. 固体高分子形燃料電池の開発. 富士時報. vol.75, no.5, 2002, p.285-287.
- (2) Zawodzinski, T. A. et al. Water Uptake by and Transport Through Nafion 117 Membranes. Journal of Electrochemical Society. vol.140, no.4, 1993, p.1041-1047.
- (3) パタンカー, S. V. コンピュータによる熱移動と流れの数値解析. 東京, 森北出版. 1985.



# 非接触 IC カードリーダーダライタのシミュレーション技術

四蔵 達之(しくら たつゆき)

村上 益雄(むらかみ ますお)

近藤 史郎(こんどう しろう)

## 1 まえがき

非接触 IC カードは、金属端子などの電氣的接続を伴わずにデータのやり取りを行うことができるカードであり、富士電機では、13.56 MHz 帯非接触 IC カードとして、ソニー(株)製 FeliCa カードを利用した電子マネー決済機器搭載用各種リーダーダライタ(以下、RW と略す)を開発してきた。FeliCa カード応用の広がりに伴って、複数カードの同時識別を考慮したアンチコリジョンカードや磁気ストライプを1枚のカードに実装したコンビネーションカードなど、多様なメディアが登場してきている。さらに、RW 組込み環境への対応も重要であり、この場合、RW 側のアンテナ設計とのマッチング問題が出てくる。

富士電機では、これらの状況に柔軟かつ迅速に対応していくため、アンテナおよび電子回路部の特性解析ツール高度化研究を推進しており、本稿ではその概要を紹介する。

## 2 RW の動作原理と解析技術

### 2.1 動作原理

初めに、RW と非接触 IC カードの動作原理を図1により説明する。前述のように、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(以下、カードアン

テナと称す)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 は変調度約 10% の ASK 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(以下、RW アンテナと称す)の電圧・電流の変化として検出し、データを復調する。

### 2.2 RW 特性の解析技術

図2に解析技術の適用を示す。富士電機では、アンテナ解析ツールとして、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の開発に取り組んできた。RW アンテナやカードアンテナ、アンテナへの金属の影響などにはこの技術を適用し、アンテナの自己および相互インダクタンスや抵抗などの定数を解析する。一方、RW 電子回路の主要部である、搬送波および ASK 信号を RW アンテナに供給する「増幅回路」とカードとの信号を復調する「検波・増幅回路」を回路シミュレータで実現する。これに電磁界解析により得られたアンテナデータを組み入れて、通信距離や整合インピーダンスなどの RW 特

図1 RW 動作原理

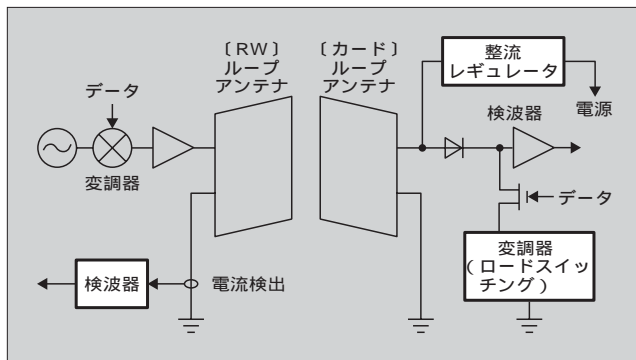
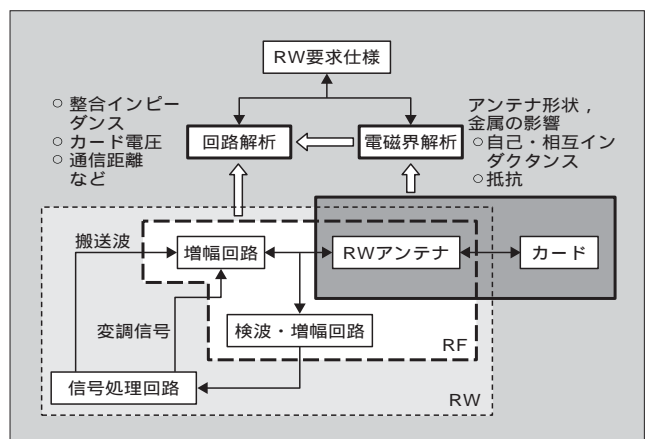


図2 RW 特性の解析技術



四蔵 達之

EMC、高周波電磁界の解析技術の研究に従事。現在、事業開発室ネットワークソリューション部主任。電気学会会員。



村上 益雄

非接触式のメディアに対応するアンテナおよびリーダーダライタなどのハードウェア開発に従事。現在、事業開発室ネットワークソリューション部。



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、事業開発室ネットワークソリューション部グループマネージャー。IEEE 会員。

性を解析する。具体例を次章で説明する。

### ③ RW 特性の解析例

#### 3.1 電磁界解析例

図3にアンテナを示す。RW アンテナは、幅1mmの導体を一次側ループ2ターン、二次側ループ2ターンとし、二次側ループはコンデンサ  $C_a$  と抵抗  $R_a$  を並列に接続している。カードアンテナは、幅0.5mmの導体を3ターンし、共振用コンデンサ  $C_c$  を接続している。図4は、金属板がある場合の解析モデル(要素分割図)であり、RW アンテナから30mm離れた場所に金属板がある場合のRW アンテナインピーダンスを解析する。

図5に、RW アンテナ入力インピーダンスの実測と解析結果を示す。金属板あり・なしともに、解析結果は実測とよく一致している。また、金属板がある場合、RW アンテナの共振周波数  $f_a$  が大きくなっている。共振周波数は、導体インダクタンスとコンデンサの値により決まるが、金属板があると、図6の電流分布解析結果に示すとおり渦状の

図3 RW アンテナ解析モデル

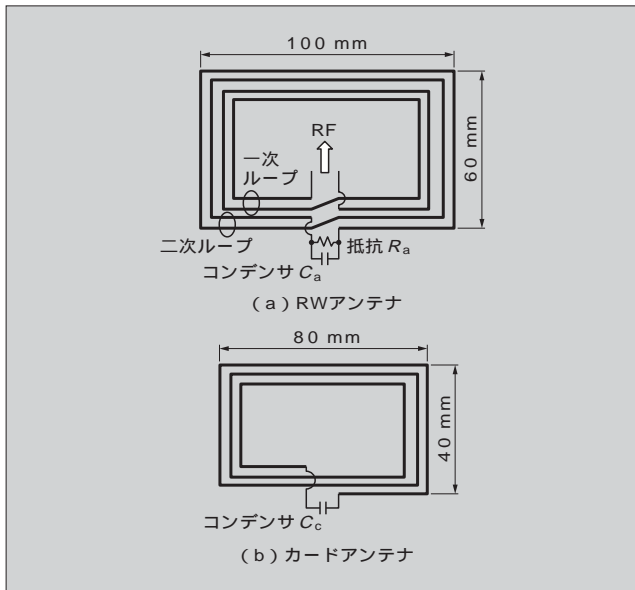
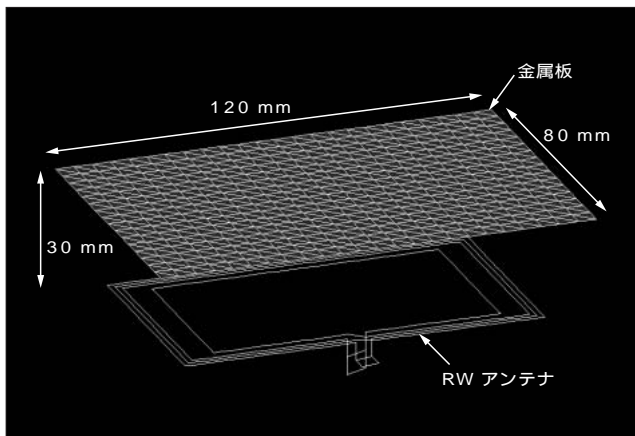


図4 金属がある場合の解析モデル



電流が金属板に流れる。この渦電流発生により、導体のインダクタンスが小さくなるため共振周波数が大きくなる。

図7に、RW アンテナとカードアンテナを対向させ、アンテナ間距離を変えた場合のRW アンテナの入力インピーダンス変化を、カードアンテナの共振周波数  $f_c$  を変えて解析した結果の一例を示す。 $f_c$  が異なると、インピーダンスが異なる特性を示すことが分かる。一般的に、 $f_c$  は13.56 MHz であるが、製造上のばらつきや先に示したように金属がある場合には共振周波数が変化する。したがって、RW としては、このようなインピーダンス変化を考慮して調整する必要がある。

図5 RW アンテナインピーダンスの周波数特性

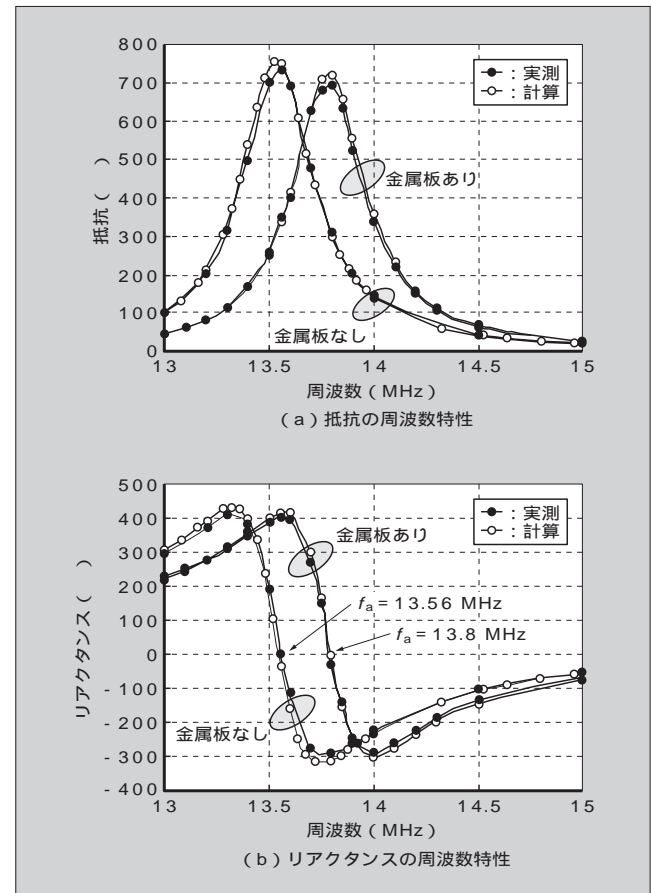


図6 電流分布解析結果

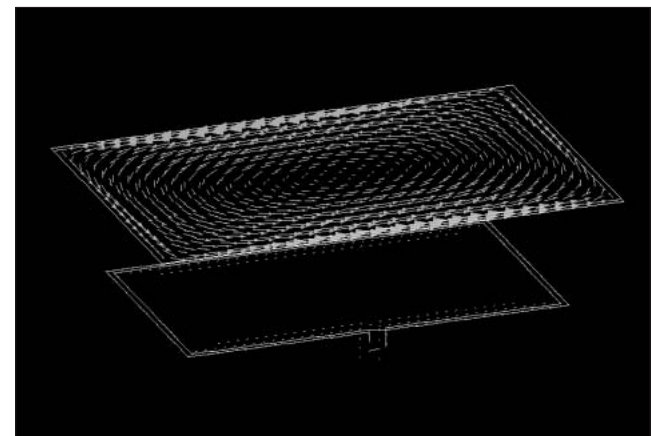


図7 RW アンテナインピーダンスの変化

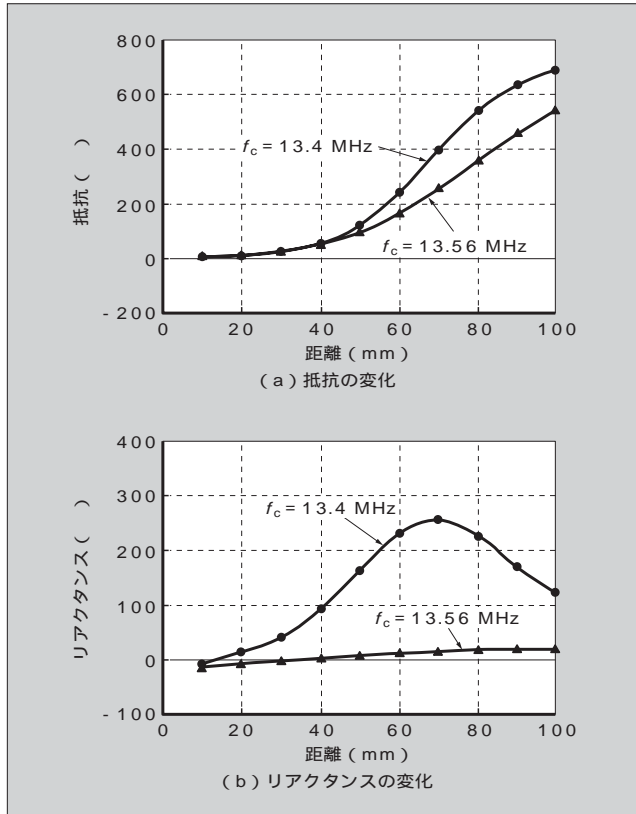
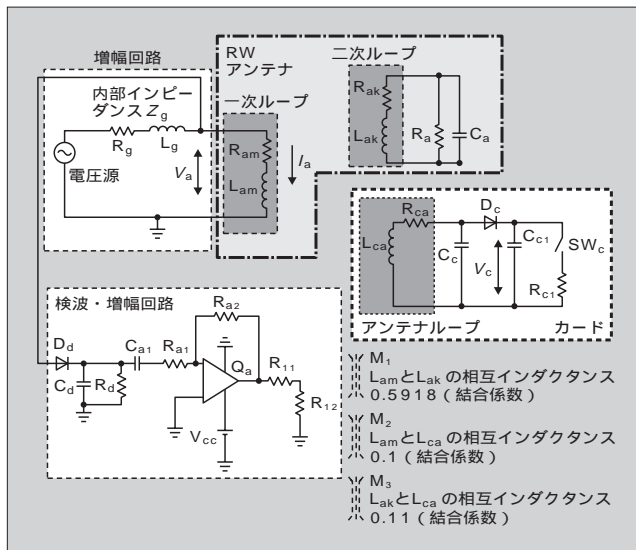


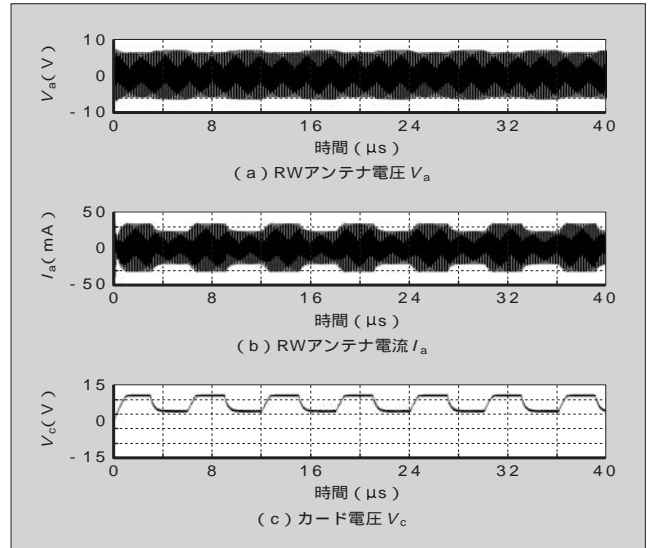
図8 回路解析モデル



3.2 回路・電磁界の連成解析例

ここでは、先に示したRWアンテナとカードアンテナを例として、その解析方法を説明する。図8は、回路シミュレータ上で作成した回路例である。電磁界解析では、RWアンテナの二つのループ（一次ループと二次ループ）、カードアンテナのループ、計三つのループコイルの自己インダクタンスと抵抗および各ループ間の相互インダクタン

図9 回路解析結果



スを求め、それぞれ電気回路素子  $L$ ,  $R$  および  $M$  で表現する。RWの「増幅回路」は、実際にはトランジスタやコンデンサなどの電子部品で構成されているが、ここでは開放電圧  $V$  の電圧源と内部インピーダンス  $Z_g$  で表現している。また、「検波・増幅回路」は、ダイオード、RCフィルタ、増幅アンプ  $Q_a$  など、実回路部品で構成する。一方、カードは、ループコイルのインダクタンス  $L_{ca}$  と抵抗  $R_{ca}$ 、共振コンデンサ  $C_c$  とダイオード  $D_c$  で構成し、スイッチ  $SW_c$  で負荷変動を発生させる。図9に、各部の計算波形を示す。このように、実際の回路構成を入力して各部の電圧・電流波形を解析することにより、カードからの返信信号の大きさや増幅回路のマッチング状態を把握することができる。

4 あとがき

RW 特性のシミュレーション技術として、任意形状アンテナの解析技術と回路解析ツールとの組合せによる、RW 主要部全体を解析する技術を紹介した。今後、これらの技術の完成度を高めることによって、幅広いニーズに最適なRWを提供していく所存である。

参考文献

- (1) 近藤史郎, 四蔵達之. 非接触 IC カードリーダーライタ. 富士時報. vol.75, no.7, 2002, p.405-408.
- (2) Tsuboi, H. et al. Electromagnetic field analysis of RF antenna for MRI. IEEE Transactions on Magnetics. vol.24, no.6, 1988, p.2591-2593.
- (3) 四蔵達之, 志賀悟. パッチモデルによるストリップラインアンテナの解析. 平成5年電気学会全国大会. no.1403, 1993.

# パワーエレクトロニクス機器の電気系・機械系動作解析技術

松本 康(まつもと やすし)

真下 明秀(ましもと あきひで)

佐藤 以久也(さとう いくや)

## 1 まえがき

パワーエレクトロニクス機器は、電力用半導体デバイスを用いて電圧・電流の大きさや周波数を制御して、所望の電力を負荷側に供給する装置である。現在では、電力用半導体デバイスとこれを制御するマイクロエレクトロニクス技術の進歩により適用範囲が広がり、電源高調波低減、無効電力補償などの電源分野や、一般産業や交通輸送の電動機駆動分野など多方面で用いられている。また、機器の容量も幅広く、数十 W クラスから数十 MW クラスでの製品化が行われている。用途の異なる多くの機種を開発を進めるうえで、シミュレーション技術を駆使して効率よく評価・解析を行うことが、小型化、低コスト化、高性能化の観点から不可欠となっている。

本稿では、パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に用いている電気回路動作を主眼としたコンピュータシミュレーションによる電気系の動作解析技術、および電動機駆動を主眼とした機械系リアルタイムシミュレータによる機械系の動作解析技術について紹介する。

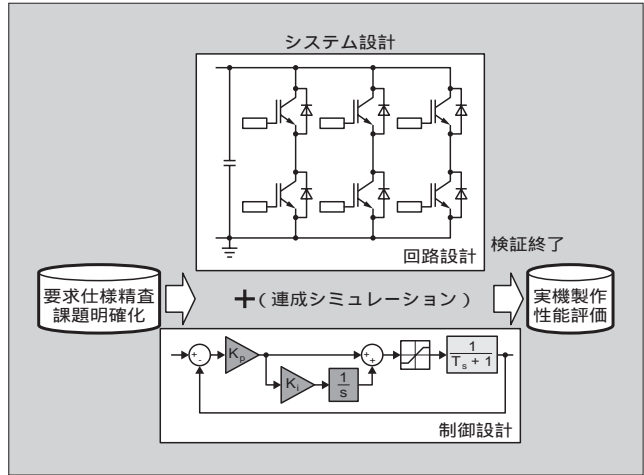
## 2 電気系の動作解析技術

### 2.1 解析・評価手法と特徴

図 1 に、特定用途向けパワーエレクトロニクス機器の電気回路構成とその制御方式の開発・設計フロー例を示す。

従来は、要求仕様の精査、課題の明確化の後に、制御方式に関する設計・検証をシミュレーションで行い、電気回路と制御とを組み合わせさせたシステム全体での評価は実際の機器を試作してから行っていた。この場合、特に回路構成を対象として評価を行う場合には、試作の回数が増えて効率・コストの点で問題となっていた。これに対し、図 1 に示すフローでは、回路動作と制御方式とを組み合わせさせたシステム全体の設計・検証をコンピュータシミュレーションの段階で行っている。最近では、シミュレーションツールの進歩により、インバータ部に用いる電力用半導体デバイスのみならず、電力用半導体デバイスのドライブ回路やス

図 1 パワーエレクトロニクス機器の電気系開発・設計フロー例



イッチング時の電圧変化を抑制するスナバ回路などの周辺部をも含め、現実に即した電気回路の動作と制御動作との連成解析が可能となり、実機と同等レベルの評価が可能となってきている。また、同時に何箇所もの動作を表示できるので、複雑な回路や多くの構成要素から成る機器でも、全体の動作を容易に把握することができる。

### 2.2 電気系解析・評価事例

#### 2.2.1 電源電圧高調波解析への適用

パワーエレクトロニクス機器を使用する際、電源電圧の高調波が問題となることがある。特に、分散電源などで電力を供給する小規模配電系では、配電系全体を考慮して高調波の評価・対策を行うことが重要となる。ここでは、図 2 に示す発電機を電源とし、PWM (パルス幅変調: Pulse Width Modulation) 整流器と PWM インバータとで電動機駆動するパワーエレクトロニクス機器が接続されている配電系において、負荷側電圧の波形ひずみを少なくするフィルタの評価例について紹介する。

解析は、<sup>注1</sup> Simulink と <sup>注2</sup> PSpice との連成シミュレーションにより行った。解析で用いたプログラムを図 3 に示す。図 3 に示すとおり、電力変換部の動作信号を生成する PWM



松本 康

パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所副主任研究員。工学博士。電気学会会員、IEEE 会員。



真下 明秀

パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所。電気学会会員。



佐藤 以久也

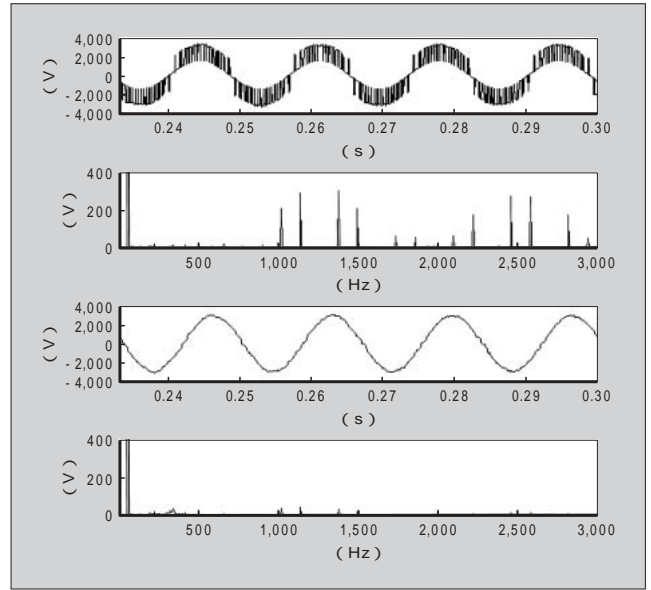
パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所。電気学会会員。

部および電流制御・電圧制御を行う制御部は Simulink で記述して制御ブロックとしてまとめ、その他の電気回路については PSpice で記述し、電圧、電流および PWM 信号の受け渡しにより連成させている。図 4 にフィルタ効果の評価結果の一例を示す。上側がフィルタ前段の電圧、下側がフィルタ後段の電圧である。また、この他に、フィルタの影響で発生する負荷変動時の電圧変動やパワーエレクトロニクス機器の制御動作に伴う影響についても配電系全体を考慮した評価を行い、効率よく要求仕様を満たすシステムの設計を行っている。

2.2.2 新回路方式動作解析への適用

省エネルギーの観点から、固定電圧・固定周波数の電源電力を可変電圧・可変周波数の電力に直接変換する AC-AC 直接変換方式が注目されている。この方式は、従来方式とは異なり、電力変換部での電力損失が少なく、また保守部品であるコンデンサが不要となる長所を有している。

図 4 電圧波形および高調波成分シミュレーション例



注 1 Simulink : MathWorks 社の登録商標

注 2 PSpice : Cadence Design System 社の登録商標

図 2 電圧高調波解析回路の概略

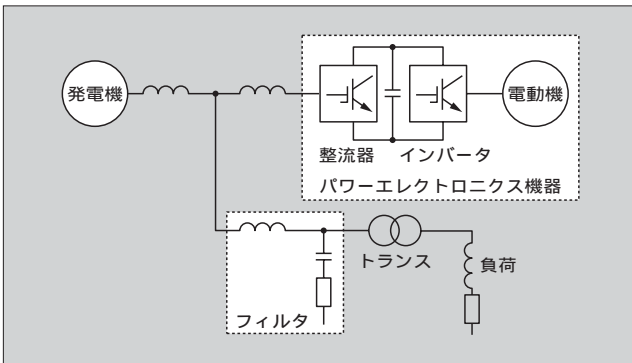


図 5 AC-AC 直接変換方式の回路構成

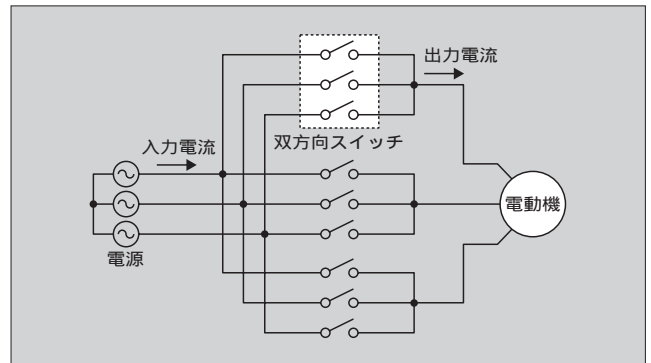


図 3 電圧高調波解析プログラム

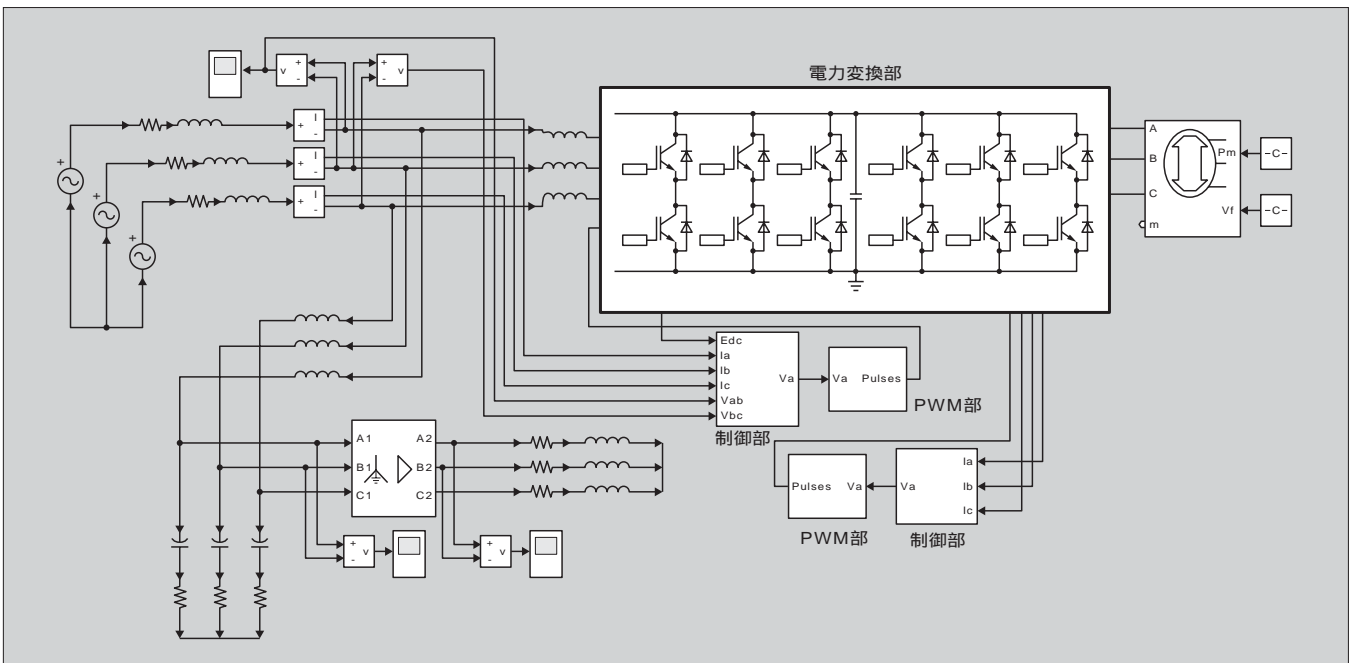




図6 AC-AC 直接変換方式の動作解析例

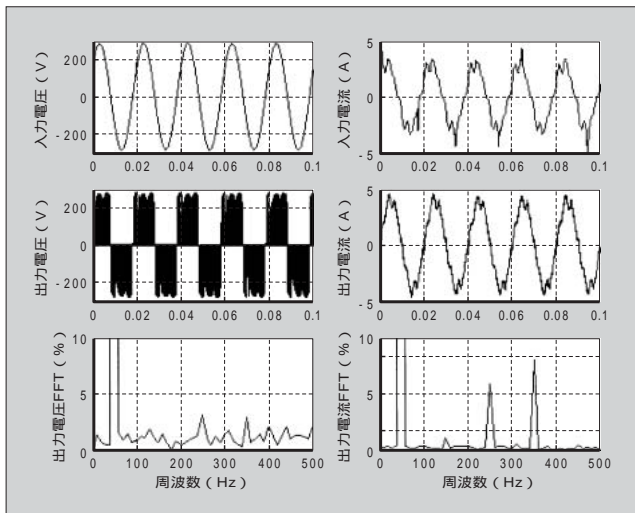


図5にAC-AC直接変換方式の回路構成を示す。図6は、図5の回路構成において電動機を駆動した際の入出力双方の電圧と電流のシミュレーション演算結果の一例である。このように、連成シミュレーションを用いることで、回路構成とその制御方式とを組み合わせた状態での動作解析を簡単に行うことができる。

### ③ 機械系の動作解析技術

#### 3.1 解析・評価手法と特徴

一般産業や交通輸送などインバータで電動機を駆動して機械系を動作させる分野では、機械系の挙動に応じた電動機制御を必要とする用途が少なくない。中でも、慣性モーメントの大きい機械系、シャフトが長く共振しやすい機械系、鉄道車両のように摩擦を介して動力を伝える機械系を駆動する際には、精確かつ応答の速い電動機制御が求められる。これらの用途向け電動機制御方式の研究・開発では、対象となる機械系を負荷装置として設ける必要がある。以前では、負荷装置にフライホイールや弾性シャフト、クラッチなどの動力伝達機構を用いていたが、評価する機械系に応じてフライホイールや弾性シャフトをそのつど交換しなければならず、効率よく実施することが難しかった。また、動力伝達機構では、伝達する動力の再現性の確保が難しく、きめ細かい評価を行ううえで障害となっていた。

このような問題を解決するため、富士電機では、電動機に直結した発電機に負荷となる機械系の動作をリアルタイムで実現させる機械系シミュレータを開発し、この機械系シミュレータを駆使して電動機制御性能の評価・解析を行っている。実物の制御装置とインバータを用いて電動機を運転するので、マイクロプロセッサによるデジタル制御に伴う量子化誤差や演算むだ時間、センサの検出誤差、インバータの出力電圧誤差など電気系・制御系の影響をも含めた定量的な性能評価を行うことができる。

図7 機械系シミュレータの構成

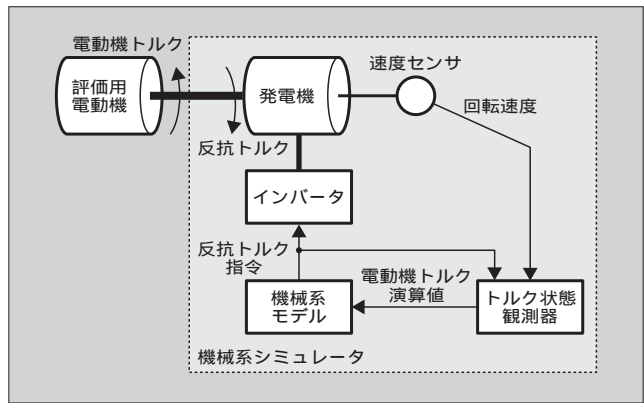


図8 電動機・機械系シミュレータ用発電機セットの外観

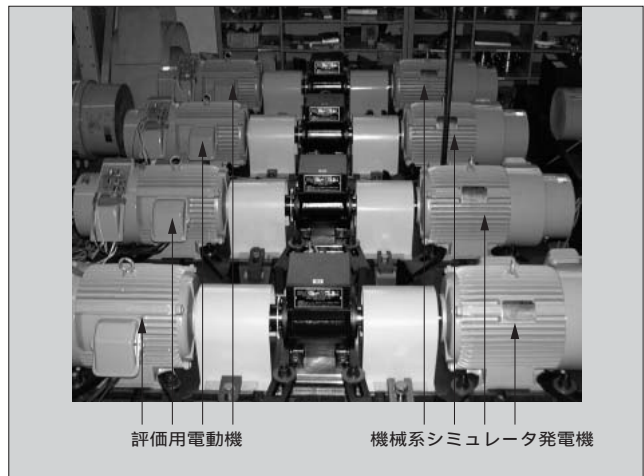
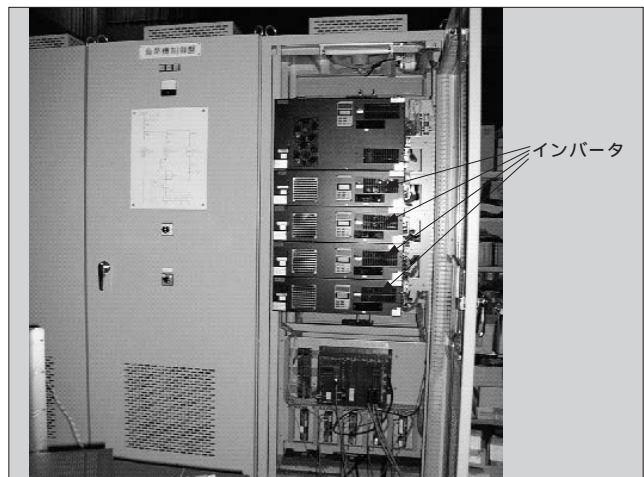


図9 発電機駆動用インバータ装置の外観



#### 3.2 機械系シミュレータの原理と構成

機械系シミュレータの原理は、電動機に発電機を直結し、電動機から機械系負荷側にトルクがかかった際の負荷側から電動機への反抗トルクを発電機に発生させることにある。図7に示すように、電動機トルクを推定する状態観測器とあらかじめ設定した機械系モデルとから算出した反抗トルクを演算し、高性能インバータで発電機トルクを制御する

ことで実現している。電動機・機械系シミュレータ用発電機セットの外観を図8に、発電機を駆動するインバータ装置の外観を図9にそれぞれ示す。プラント用や鉄道車両用で多く適用されている1台のインバータで複数台の誘導機を駆動するシステムの検証にも対応できるように、電動機・発電機を4セット設け、発電機側は個々にインバータ装置を備えている。

3.3 解析・評価事例

3.3.1 大慣性・共振系駆動への適用

低コスト化、省配線化の観点から、速度センサを用いずに電動機の高性能トルク制御を実現する速度センサレスベ

クトル制御方式は、大慣性・共振系駆動へも適用が求められている。従来、速度センサレスベクトル制御方式は、図10に示すような大慣性で共振が起きやすい用途では、性

図10 速度センサレスベクトル制御での大慣性駆動装置

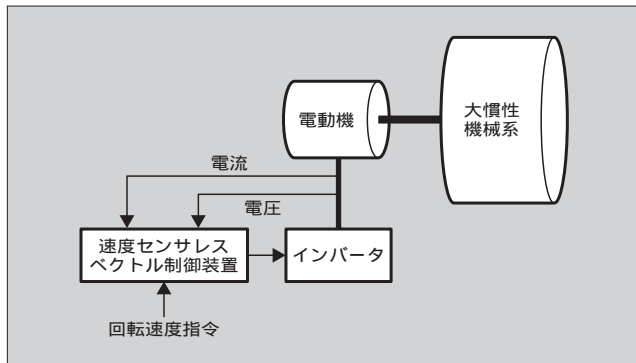


図11 大慣性機械系駆動性能評価結果例（慣性50倍）

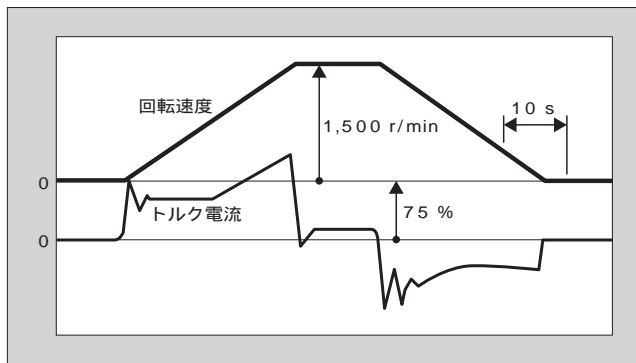


図12 大慣性機械系駆動性能評価結果例（慣性100倍）

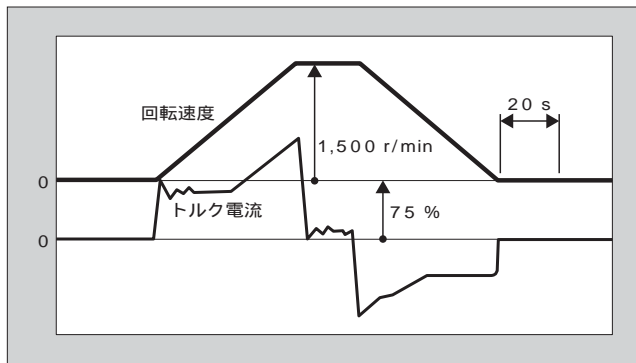


図13 鉄道車両駆動装置構成

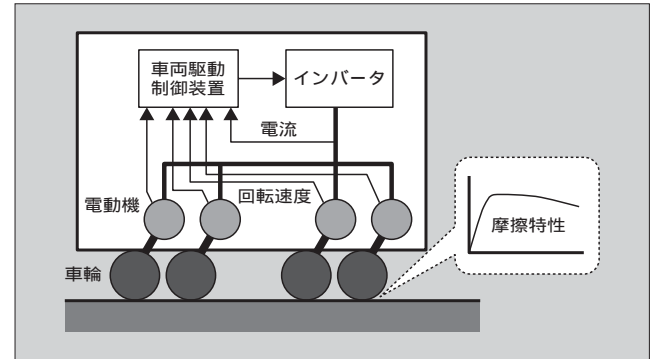


図14 空転抑制制御評価結果例（従来制御方式）

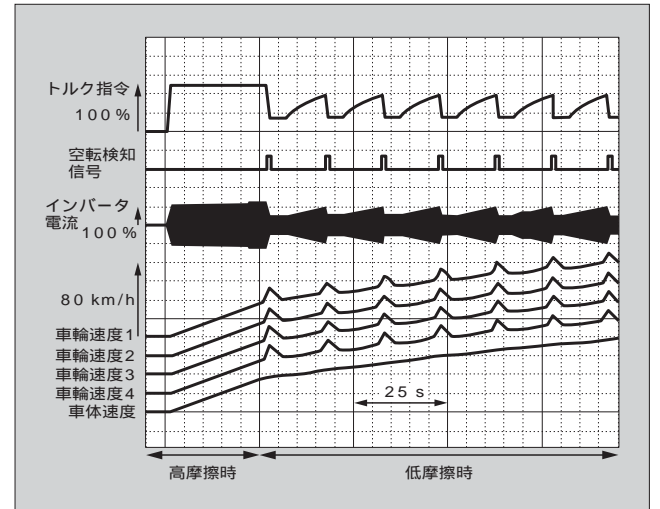
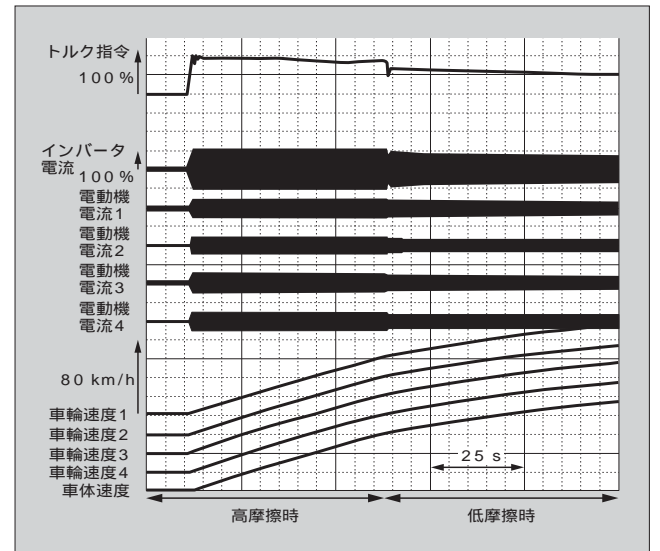


図15 空転抑制制御評価結果例（新制御方式）



能を十分に発揮することが難しいとされていた。図11および図12は、機械系シミュレータで作り出す負荷の慣性モーメントを電動機の慣性モーメントの50倍および100倍とし、大慣性・共振系への適用時の制御性能を評価した際の測定例である。このように、機械系シミュレータを用いることで、さまざまな大慣性・共振系を駆動した際の性能評価を容易に行うことができ、効率よく課題解決を図ることが可能となる。

### 3.3.2 鉄道車両空転抑制への適用

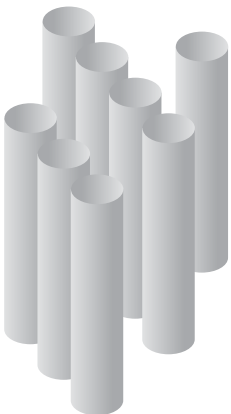
鉄道車両駆動の分野では、乗客に乗り心地の良さを提供するとともに雨天時の運行ダイヤを確保するために、車輪の空転を抑制することが必要とされている。ここでは、図13に示す新幹線で最も普及している1台のインバータで4台の電動機を駆動する車両を例に紹介する。図14は空転を検知してから電動機トルクを絞る従来制御方式、図15は線路・車輪間の摩擦特性をオンラインで探索して未然に空転を抑制する新しい制御方式の性能評価時の測定例である。このように、以前では困難であった空転に関する性能の評価を簡単に行うことができる。また、再現性も確保されており、各種制御の性能比較も容易に行うことができる。

## 4 あとがき

パワーエレクトロニクス機器における電気回路動作を対象とした電気系動作解析技術、電動機駆動を対象とした機械系動作解析技術およびその適用事例について紹介した。今後とも、解析精度と評価技術の向上を図り、さまざまなパワーエレクトロニクス機器の開発に活用していく所存である。

### 参考文献

- (1) 松本康ほか．多慣性機械系を模擬する負荷装置．電気学会半導体電力変換研究会．SPC-92-36，1992．
- (2) 田島宏一ほか．速度センサレスベクトル制御の遠心脱水装置への適用例．電気学会平成11年産業応用部門大会．171，1999．
- (3) 松本康ほか．1インバータ・複数台誘導機駆動システム用高粘着化制御方式．電気学会平成13年産業部門大会．255，2001．



# 交流電磁接触器の動的挙動の解析

和田 正義(わだ まさよし)

吉本 博(よしもと ひろし)

北出 雄二郎(きたいで ゆうじろう)

## 1 まえがき

電磁接触器は、モータの駆動回路などの始動・停止の切換を行う開閉装置で、負荷回路のスイッチングを行うための可動・固定接点や電磁石などから構成される。電磁石の駆動電源としては、交流または直流を用いるタイプがあるが、交流駆動のものは、安価であることや商用電源が直接使用できることから、市場での流通量は9割程度を占める。

交流電磁接触器は、一般的に電磁石の動作が速く、負荷回路を閉じる際(接点閉動作時)に、接点自身もしくは電磁石同士との衝突による衝撃力が接点部に伝搬することで、接点の衝突が短時間に繰り返し生じるバウンス(チャタリング)と呼ばれる現象が発生する。以上のような一連の動作を解析的に把握するためには、接点と電磁石の衝突や振動などの現象を含んだ電磁接触器の過渡的な挙動を明らかにする必要がある。交流駆動の電磁石は、電気-磁気回路系、機械系が相互に作用して動作するため、総合的な挙動を解析するためにはそれぞれの系を連成させ、解析ステップを細かくする必要がある。

これまで電磁石を含むシステムの解析手法として有限要素法が広く用いられてきた。この方法では、ある時刻における電磁石の磁束分布や磁界強度は精度よく求められる。しかし、1回あたりの解析時間に長時間を要することから、一連の動作に対し解析ステップを細かく分割して計算することが困難であり、したがって機械系の動的挙動が正確に把握できない恐れがあった。さらに、さまざまな状況における挙動を解析することにも時間的限界があった。また、電磁石同士の衝突や接点の動作も含めた総合的な連成解析を行った例はこれまでほとんどない。

今回、上記のような衝突現象や接点部も含めて電気-磁気回路系、および機械系それぞれを定式化し連成させることで、電磁接触器の過渡的な挙動を解析するシミュレータを開発した。本シミュレータは、動作時の各時刻に対する解析精度は有限要素法ほど高くないが、ステップごとの解析時間が短いために、一連の動作を細かく分割して解析できることが特徴である。また、微分方程式により、電磁接

触器をモデル化することにより、高速な解析を可能にした。これにより、設計段階においてパラメータ変化の影響を考慮するような場合に多くの解析ができるようになった。

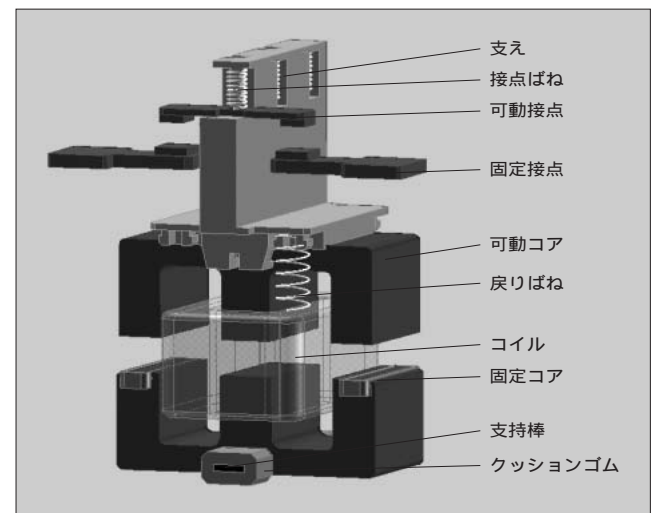
本稿では、さまざまな条件において電磁接触器の総合的な動的挙動を短時間で計算する動的連成シミュレータについて報告する。

## 2 電磁接触器の構造と動作

### 2.1 電磁接触器の構造

電磁接触器のモデルを図1に示す。アクチュエータである電磁石は、可動・固定コアおよびコイルにより構成され、可動コアには、支えと呼ばれる可動接点を格納する部品が連結されている。可動接点には、接点閉時に固定接点に対し接触圧力が付加されるように、接点ばねが取り付けられている。また、固定コアは、コア衝突時の衝撃を吸収するためのクッションによって、支持棒を介して筐体(きょうたい)により支持されている。

図1 電磁接触器モデル



和田 正義

電磁接触器、配線用遮断器の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所副主任研究員。博士(工学)、日本ロボット学会会員。IEEE 会員。



吉本 博

電磁接触器の開発を経て、自動販売機の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所。電気学会会員。



北出 雄二郎

電磁気応用機器、超音波応用機器の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所長。日本機械学会会員。

2.2 電磁接触器の動作

図2および図3を用いて、回路の開動作について説明する。同図上段は、接点の接触状態を示しており、電圧が0Vおよび10Vは、接点の開状態および閉状態をそれぞれ示している。また、同図中段および下段は、可動接点および可動コアの速度をそれぞれ示している。電磁石に電圧が印加されると、可動コアが固定コアに向かって吸引されるとともに、可動コアと接続している可動接点も固定接点に向かって移動する。接点間の距離よりもコア間の距離の方が長いため、最初に接点同士が衝突し(図2, A部)バウンスが生じる。その後も可動コアは移動し、数ms経過後、固定コアに衝突する(図2, B部)。衝突後、コア同士は吸着して一体となって振動し、一定の時間が経過後、静止する。

図2 電磁接触器の動作

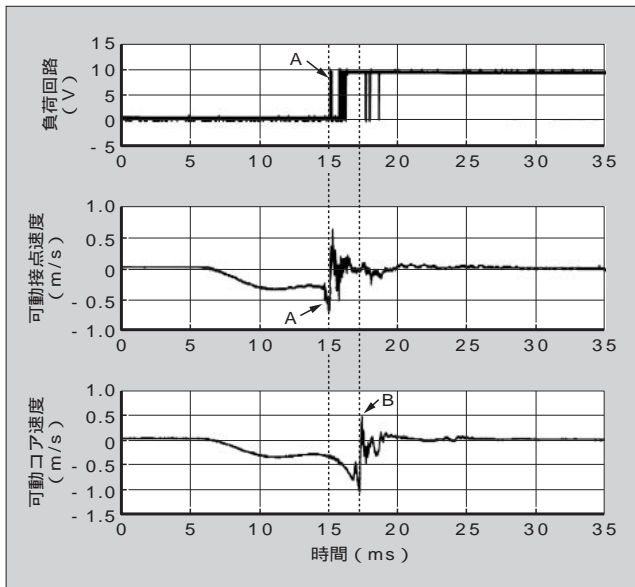
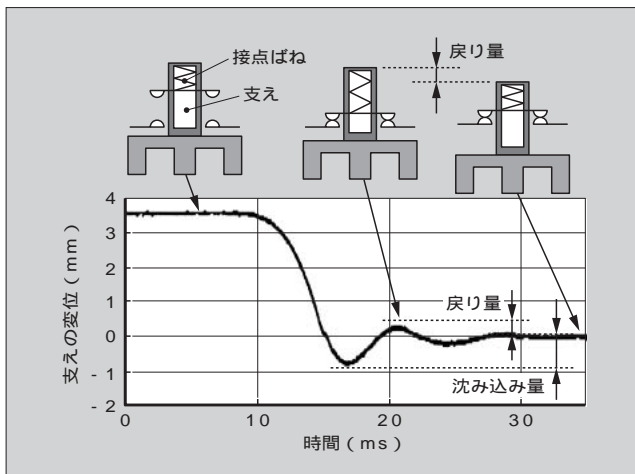


図3 支えの変位



③ 連成解析シミュレータ

3.1 シミュレータの概要

今回開発したシミュレータは、電磁接触器の吸引動作における動的挙動が解析できる。

解析モデルは、大きく分けて機械系、電気回路系、磁気回路系の三つの部分から構成される。図4に機械系-電気系モデル、図5に磁気回路モデルを示す。

上述の系で考慮している項目を以下に記す。

3.1.1 機械系

- (1) 接点の並進、回転動作と衝突現象
- (2) 固定、可動、両コアの並進動作と衝突現象
- (3) 支えの並進動作と可動コアとの衝突現象
- (4) 各部位を支えるばね、クッション構造のばね定数、粘性係数

3.1.2 電気回路系

- (1) コイルに印加させる電圧、コイルに流れる電流
- (2) コアの動作に伴うコイルのインピーダンス
- (3) くま取コイル(Sコイル)の電圧、電流

3.1.3 磁気回路系

- (1) コアの各部に流れる磁束
- (2) 空げき、コアのインピーダンス
- (3) Sコイルにより発生する磁束

図4 機械系-電気系モデル

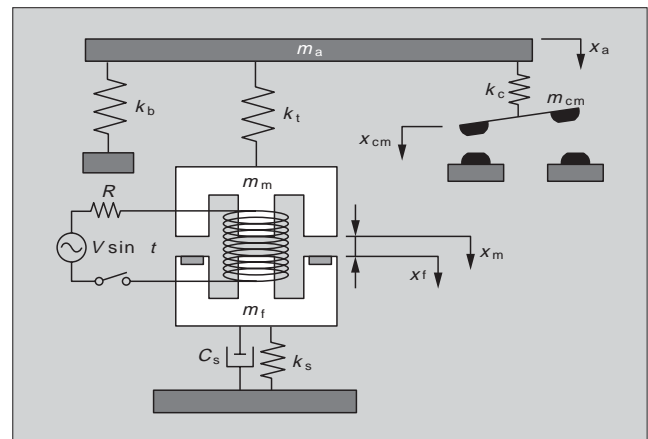
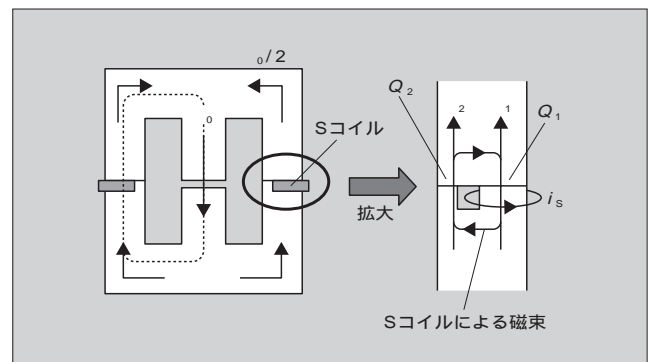


図5 磁気回路モデル



3.2 基礎方程式

基礎方程式を機械系，電気回路系，磁気回路系に分けて記す。

3.2.1 機械系の運動方程式

$$m_a \ddot{x}_a = -k_b x_a - k_t (x_a - x_m) - k_c (x_a - x_{cm}) \dots\dots\dots(1)$$

$$m_m \ddot{x}_m = -k_t (x_m - x_a) + F_m - f_q(\dot{u}, u) \dots\dots\dots(2)$$

$$m_t \ddot{x}_t = -k_m x_t - C_m \dot{x}_t - F_m + f_q(\dot{u}, u) \dots\dots\dots(3)$$

$$m_{cm} \ddot{x}_{cm} = -k_c (x_{cm} - x_a) + f_w(\dot{u}, u) \dots\dots\dots(4)$$

$m$  : 質量  $x$  : 変位  $k$  : ばね定数

$C$  : 粘性係数  $F_m$  : 電磁吸引力

○添え字

a : 支え b : 復帰ばね c : 接点ばね

t : 連結ばね cm : 可動接点中心

f : 固定コア m : 可動コア

q : コア w : 接点

衝突力 :

$$f(\dot{u}, u) = \begin{cases} (1 + p\dot{u})H \cdot u^{1.5} & u \geq 0 \text{ and } \dot{u} \geq -1/p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

$\dot{u}$  : 相対速度  $u$  : 相対変位

$H$  : ヘルツの力の定数  $p$  : エネルギー損失係数

3.2.2 電気回路の基礎方程式

$$L \frac{di_0}{dt} + Ri_0 = V \sin t \dots\dots\dots(6)$$

$L$  : コイルのインダクタンス

$R$  : コイル抵抗  $V \sin t$  : 印加電圧

$i_0$  : コイル電流 : 電源周波数

3.2.3 磁気回路の基礎方程式

吸引力 :

$$F_m = -\frac{1}{2\mu_0} \left\{ \frac{0^2}{S_0} + 2 \times \left( \frac{1^2}{S_1} + \frac{2^2}{S_2} \right) \right\} \dots\dots\dots(7)$$

磁束 :

$$\phi_0 = \frac{Ni_0}{R_m} \dots\dots\dots(8)$$

インダクタンス :

$$L = \frac{N^2 \phi_0}{i_0} \dots\dots\dots(9)$$

S コイル部の磁束 :

$$\phi_0/2 = \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2 + 2\phi_1\phi_2 \cos \theta} \dots\dots\dots(10)$$

$$= \tan^{-1} \left( \frac{2\phi_1\phi_2}{R_s Q_2} \right) \dots\dots\dots(11)$$

$$\phi_1 Q_1 + \phi_2 Q_2 = i_s \dots\dots\dots(12)$$

$S_i$  : 接極面積 ( $i = 0, 1, 2$ )

$\phi_i$  : 磁束 ( $i = 0, 1, 2$ )

$\mu_0$  : 空気の透磁率  $N$  : コイル巻き数

$Q_i$  : S コイル部の磁気抵抗 ( $i = 1, 2$ )

$R_s$  : S コイルの抵抗

$\theta$  :  $R_{m1}$  部の漏れ係数

○添え字

0 : 中央脚部 1 : S コイルがある部位

2 : S コイルがない部位

4 シミュレーションによる解析と実験結果

開発したシミュレータを用いて，さまざまな状況における電磁接触器の挙動を解析した。また，同条件における実際の電磁接触器における各部位の挙動も測定し，解析結果と比較することで，シミュレータの解析結果の妥当性を検証した。電磁石励磁時の交流電源の投入位相を変えて各種挙動を評価した。

4.1 投入位相に対する接点間およびコア間の衝突速度

図6に交流電源の投入位相を変化させた場合の，接点間およびコア間の衝突速度の変化を実測値と解析値とについて比較した結果を示す。本結果から，投入位相の変化に対する点間およびコア間の衝突速度の変化の様子は，ほぼ一致していることが分かった。興味深い点として，投入位相を変化させると，接点の衝突速度とコアの衝突速度の大小が入れ替わる位相条件があることである(図6，A部)。この速度の関係についても，シミュレーション結果と，実測がよく一致していることが確認できる。

4.2 詳細動作の比較

シミュレーション解析と実験結果の比較として，上述の接点とコアの衝突速度の大きさが逆転する投入位相60度の結果を図7に示す。同図(a)はシミュレーション結果であり，動的な電磁吸引力(上段)，機械動作(中段)，回路電流および電圧(下段)をそれぞれ示す。電圧印加後，電流の上昇に伴って電磁吸引力が負荷を上回り，可動コアが吸引され始めるが，動作の途中から，電磁吸引力がばね負荷を下回る現象が見られる。これは交流電源が零点を交差することに起因する。このとき，ばね負荷により可動コアは減速されるものの，慣性力によって固定コアまで到達し，吸引動作は完了する(図7，A部)。接点の衝突後から可動コアが減速することから，接点の衝突速度よりも，可動コアの衝突速度が遅くなる。

以上により，本シミュレータの妥当性が確認できた。

図6 衝突速度比較結果

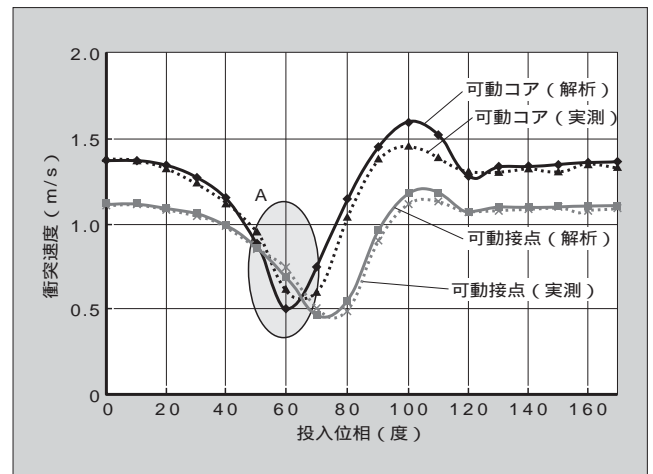
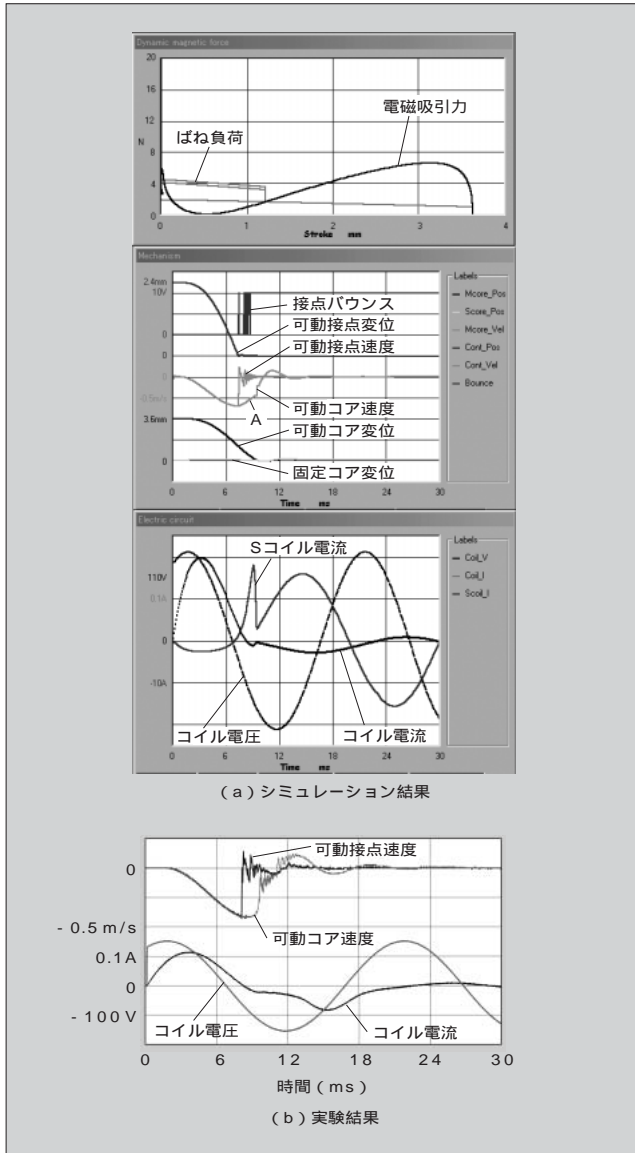


図7 シミュレーション結果の例 (投入位相 60度)

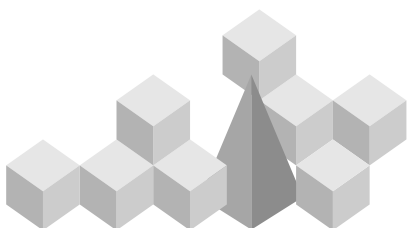


5 あとがき

機械的な挙動が高速で、吸引力などのパラメータ変化率が大きい交流電磁接触器に対し、機械運動系および電気-磁気系を微分方程式により定式化し、それぞれの相互作用を考慮した連成シミュレータを開発することで、各部の動的な挙動を解析可能とした。本シミュレータを用いて、交流電源の投入位相を変化させ、接点およびコアの衝突速度の変化を解析し、実機と同様の動作特性を示すことを確認した。これにより、交流駆動の電磁接触器に対する基本解析モデルの妥当性が検証できた。

参考文献

- (1) 茂木晃．電磁装置とその設計．電気書院．1962．
- (2) 石黒敏郎ほか．交直マグネットの設計と応用．オーム社．1965．
- (3) 中田高義ほか．交流電磁石の設計と応用．森北出版．1991．
- (4) Muramatsu, N. et al. Measure to Reduce the Bounce of a Movable Part in an Electromagnetic Contactor. AS ME. vol.123.
- (5) Braumann, P. et al. Analysis of the interrelation between mechanical and electrical phenomena during making operations of contacts. The 17th International Conference on Electric Contact Phenomena. 1994, p.29-38.
- (6) Wada, M. et al. Dynamic Analysis and Simulation of Electromagnetic Contactors with AC Solenoids. The IEEE International Conference on IECON. 2002.



# 有接点機器の長寿命化とその寿命予測

潮崎 克郎(しおさき かつろう)

河原木 豊(かわらぎ ゆたか)

宮沢 秀和(みやざわ ひでかず)

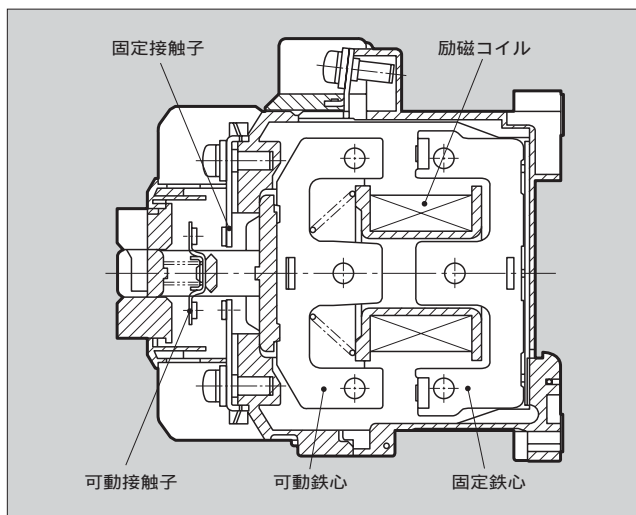
## 1 まえがき

近年のグローバル化の中にあつて、有接点機器、とりわけ低圧開閉機器を取り巻く情勢は地球環境保護や安全規格の国際化などの動きを受け、大きく変化しつつある。富士電機ではこれらの変化にいち早く呼応し、必要な要素技術の確立を図りながら電磁接触器、配線用遮断器など低圧設備を支える各種コンポーネントの開発を行ってきた。これらの開発の中で有接点機器の長寿命化の取り組みは、国際性および環境性を追求した新商品を実現させるうえで重要な意味を持っている。

この長寿命化に関する研究は従来から行われてきているが、その観点は電流遮断時の現象解析を中心としたものが主流である。富士電機では開閉機器の開路と遮断の両面から現象をとらえて解析・評価に取り組んできた。

本稿では有接点機器の代表格である電磁接触器の電気的寿命(新JIS用語:電気的耐久性)を取り上げ、長寿命化を支える要素技術、寿命予測技術、最近の寿命評価設備の概要などについて紹介する。図1に小型電磁接触器の構造の一例を示す。

図1 小型電磁接触器の構造例



## 2 電磁接触器の接点消耗メカニズム

### 2.1 電磁接触器の適用負荷

交流電磁接触器における適用負荷の種別は、JIS C 8201-4-1の表1において次のように分類されている。

- (1) AC-1: 無誘導又は低誘導負荷, 抵抗炉
- (2) AC-2: 巻線形モータの始動, 停止
- (3) AC-3: かご形モータの始動, 運転中の停止
- (4) AC-4: かご形モータの始動, ブラッキング, インチング

これらの適用負荷の中で、実使用上最も適用の多いものはAC-3であり、要求される寿命回数も多い。

### 2.2 AC-3条件における接点消耗メカニズム

図2に示すオシログラムは、電磁接触器にて三相かご形モータを始動、停止(AC-3条件)した場合の電圧と電流の観測波形例である。始動時には一般に定格電流の6倍程度の電流を投入し、停止時は定格電流を遮断する。電流遮断後の極間電圧(接点間の電圧)は、モータの回転の減速に伴って緩やかに上昇し、完全停止の時点で商用周波回復

図2 かご形モータを始動、停止した場合のオシログラムの例



潮崎 克郎

受配電機器、制御機器の開発試験を経て、材料および機器の要素技術開発に従事。現在、機器・制御カンパニー電源・機器事業部技術開発・生産センター開発部担当部長。電気学会会員。



河原木 豊

電磁開閉器の開発試験に従事。現在、機器・制御カンパニー電源・機器事業部技術開発・生産センター品質保証部担当課長。電気学会会員。



宮沢 秀和

電磁開閉器の開発試験に従事。現在、機器・制御カンパニー電源・機器事業部技術開発・生産センター品質保証部。電気学会会員。



電圧値に至る。

このような条件で閉路される電磁接触器の接点は、閉路時と開極時に発生するそれぞれのアーク熱によって消耗する。そのメカニズムの概要を図3に示す。

まず、閉路時には接触子同士および鉄心同士の衝突による接点バウンスが発生する。この現象は微小ギャップでの始動電流開閉であり、接点は酸化されにくい状況下で間欠アークにさらされ、押しつぶされるような形で消耗する。次いで接点は安定した接触状態を保って通電を維持し、この状況下での接点消耗は生じない。開極時には遮断アークが発生し、一時的なこう着（アークが接点面近傍に停滞）時間を経て伸長・冷却され、接点上から駆動されて消滅に至る。この過程において接点は溶融・蒸発を伴って消耗する。

小型、中型の電磁接触器における電氣的寿命は、接点バウンスの大きさにより閉路時の消耗が大きく関与する。この現象は遮断時には極間電圧が低く、アークエネルギー的に楽な状態になっていることが影響している。

### ③ 有接点機器の長寿命化

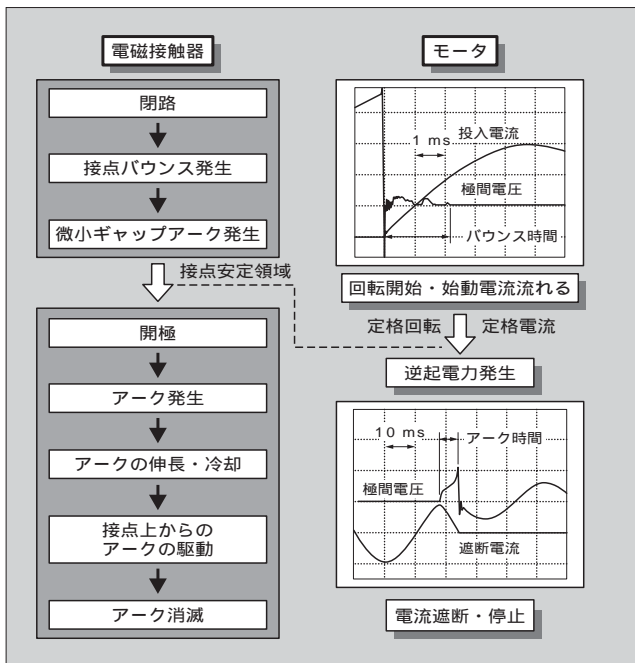
#### 3.1 長寿命化を支える要素技術

電磁接触器の電氣的寿命は、絶縁劣化や開閉機構部の損耗・変形などの影響を受ける場合があるが、主として主接点の消耗によって決定される。電氣的寿命を効率的に狙いどおりの性能にもっていくには、技術データに基づく高度な解析・評価技術が要求される。

富士電機では、接点消耗を抑制した長寿命化の達成手段として以下に記す要素技術の確立に取り組んできた。

- (1) 接点バウンス低減技術（振動解析）
- (2) 接点材料の高性能化

図3 接点消耗メカニズム



- (3) アーク駆動技術（接点面のアークを速やかに移動）
- (4) アークエネルギーの抑制技術
- (5) アークエネルギーが接点消耗に及ぼす影響度の解析技術
- (6) 三相均等化消耗技術（接点を有効に使いきる）
- (7) 電氣的寿命予測技術

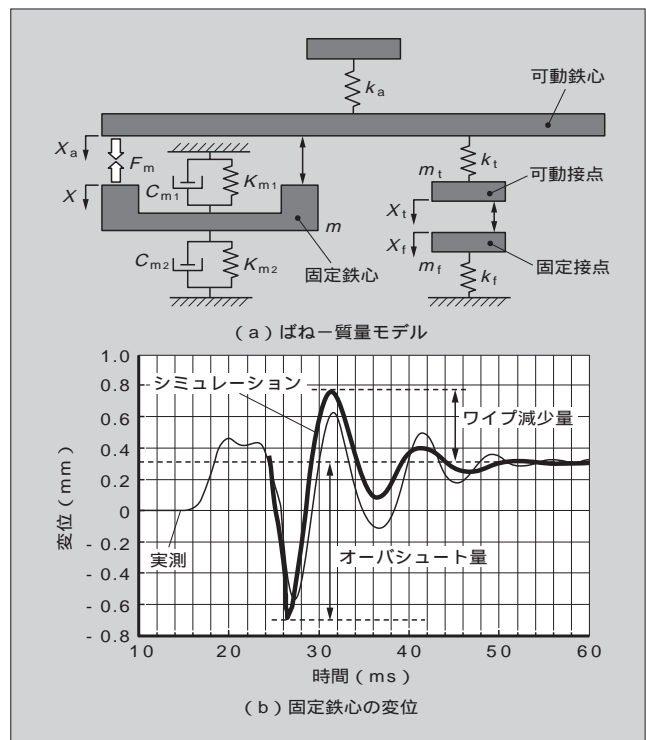
これらの要素技術の中から、本稿では小型電磁接触器における代表事例として1),(2)および7項について述べる。

#### 3.2 接点バウンス低減技術

先に述べたように、AC-3条件での開閉動作の中では閉路時の接点消耗がかなり電氣的寿命に関与している。したがって、閉路時の接点バウンス低減が長寿命化を図るうえで効果的であることから、電磁接触器の全体構造を考慮した「バウンスシミュレーション技術」を開発した。

図4は電磁石部における固定鉄心の挙動解析のための簡易なばね-質量モデルとその解析結果の事例である。この解析結果と、図5に示すばね定数とクッション性能の関係から、接点バウンスは接点部だけではなく電磁石部を含むクッション系全体の最適化によって達成できることを確認した。固定鉄心のオーバーシュート量と接点バウンス時間の関係は、ばね定数の変化に対してトレードオフになっていることから、解析結果に基づいて最適値にコントロールしている。この事例のようにバウンスシミュレーションの解析結果は、部品ばらつきなどに影響を受けにくいロバスト設計へ活用されている。効果として接点バウンス時間を約30%低減することができた（寿命20%延長）。

図4 ばね-質量モデルと解析結果の例



3.3 接点材料の高性能化

前節で接点バウンス低減による長寿命化について述べたが、接点材料の高性能化も寿命延長の大きな達成手段である。図6は2種類の接点の断面写真の例である。この写真は代表的な内部酸化法によって製作された接点を示す。右図は改良品であり、結晶組織が細かく、それぞれの結晶粒の中に針状結晶が見られ、組織の緻密(ちみつ)さや均一分散を示している。これらには原材料の配合割合、溶解条件、圧延焼鈍条件および酸化雰囲気など種々の製造条件が関与してくる。富士電機では、これらを適切に制御することによって接点のミクロ構造にまで立ち入った材料開発を行い、接点の電気的性能向上を実現した。

接点の性能は通常「接触抵抗」「消耗性」「耐溶着性」で表されるが、上記の最適化によって接点性能を10~20%向上させ商品の高性能化に寄与した。

3.4 電気的寿命予測技術

これまで接点長寿命化のための二つの事例について紹介した。本節では電気的寿命の予測技術について述べる。この技術は長期の評価期間を要する寿命試験において、初期データを活用して短期間に寿命推定を行うものである。開発段階において寿命決定にかかわる各種仕様変更フレキシブルに対応でき、開発期間の短縮や製品コストの削減に

図5 ばね定数とクッション性能の関係

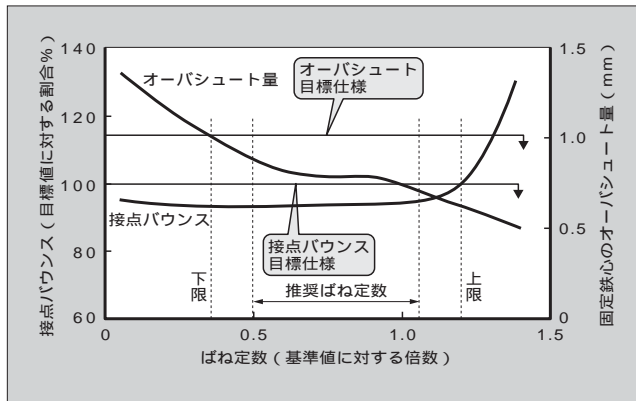
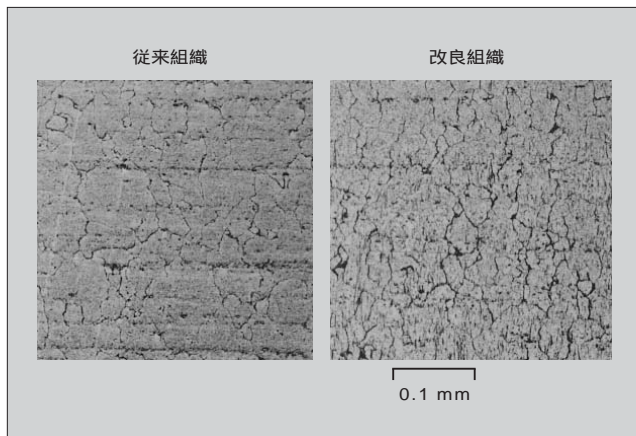


図6 接点の断面写真の例



貢献できる。

3.4.1 AC-3 条件における寿命予測方法

この方法は蓄積データを基に作成されたマスターカーブを利用するものであり、開閉条件の異なる試験においても予測が可能である。小型電磁接触器における予測手段の概要を以下に述べる。

(1) アークエネルギーと接点消耗の関係をマスターカーブ(図7)として作成する。

なお、実負荷接点バウンス時間とアークエネルギーの関係を実例として図8に示す。

(2) マスターカーブのX、Y軸に対象となる供試器の1回あたりの平均アークエネルギーと限界消費量をプロットする。

(3) 上記2点を延長した交点から寿命回数を予測する。ただし、この寿命予測を行うにあたっては蓄積データに基づいて次の仮定を行っている。

- 三相中の最大消耗相で判断する。
- 接点寿命となる限界消費量は、事前に初期ボリュームに対する割合として決定しておく。
- 1回あたりの平均アークエネルギー(閉路時+遮断)は開閉の進行に伴う変動を考慮し、初期データにある係数を乗じたものを用いている。

3.4.2 過酷度の概念を盛り込んだ予測技術の信頼性向上

電磁接触器のAC-3条件での三相開閉は、コイル励磁位相がランダムの場合においても特定相に接点消耗の偏りを生じることがある。これは主回路投入位相がある特定相範囲内に集中するためであり、電磁接触器の動作時間特

図7 寿命推定用マスターカーブ

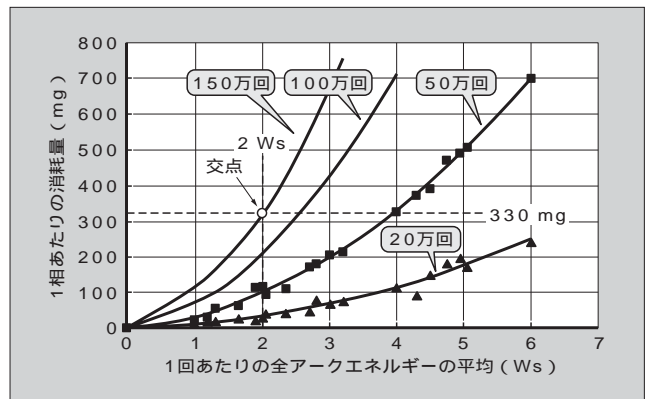
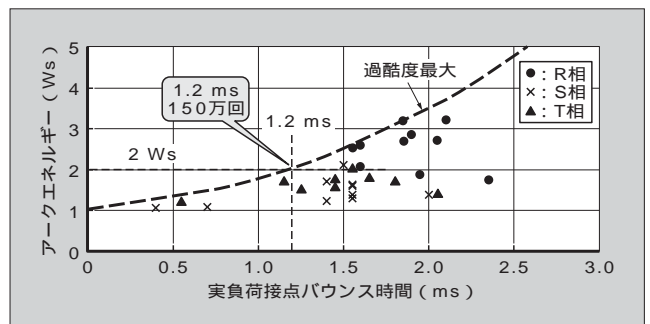


図8 実負荷接点バウンスに対するアークエネルギー



性に起因する現象である。

この各相間の消耗ばらつきは、以下に記す過酷度の概念によって予測することができ、前項の方法と併用することで予測技術の信頼性を高めることができる。

「過酷度」とは、接点消耗に対する厳しさを表す度合であり、次式により求めることができる。

過酷度を  $\sigma$  とすると、

$$\sigma = S \cdot \omega^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$S = I_m \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\theta - \phi)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $S$ ：投入電流突進率  $di/dt$

$I_m$ ：投入電流波高値 (A)

$\theta$ ：投入位相角 (rad)

$\phi$ ：力率角  $\tan^{-1} L/R$  (rad)

$\omega$ ： $\tan^{-1} \omega / \dots$  (rad)

$\omega$ ：可動接触子の衝突速度 (m/s)

この式は、閉路時の接点消耗量は励磁位相によって決まる投入電流の  $di/dt$  と可動接触子の衝突速度の二乗の積に比例して増加することを表している。

各相の過酷度  $\sigma$  は  $\omega$  の実測と  $S$  の計算によって求めることができ、事前に各相間の寿命比較を予測できる。この技術は三相間のアンバランス消耗の抑制に役立っている。

上述した寿命予測方法の活用によって短期間に試作品の性能評価を行い、タイムリーな商品開発を実践している。

4 電気的寿命評価設備

富士電機は、有接点機器の長寿命化に取り組み、安全性や環境保護などを考慮した技術開発を推進してきた。これらの評価・解析に使用される設備や計測器類については、時流にマッチした最新の技術を取り入れ、常に信頼性の高

いデータを取得、供給できる体制を築いている。ここでは前章で述べた電磁接触器の寿命予測などに用いた電気的寿命試験装置の概要について述べる。

この試験装置は、IEC60947-4-1 および新 JIS (JIS C 8201-4-1) に準拠した試験を実施できるほか、各種個別要求の試験に対応できる。図9にその外観と解析データ処理画面の一例を示す。主な特徴は次のとおりである。

(1) アーク現象自動計測装置の導入

試験装置は供試器を開閉する試験盤とアーク現象解析装置から構成されており、開閉回数と累積アークエネルギー (543 ページの「解説」参照) の関係を三相同時に自動で計測できる。取込みデータは目的に応じて、閉路のみ、遮断のみ、閉路+遮断の三つのモードで解析ができる。その他のデータ処理アイテムとしてアークタイム、アークパワー、電流二乗積、実負荷接点バウンス時間などの計測が

図9 電気的寿命試験装置の外観とデータ処理画面

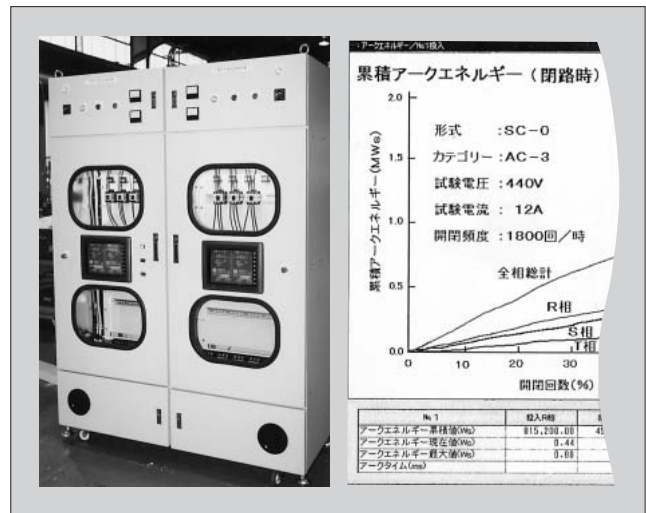
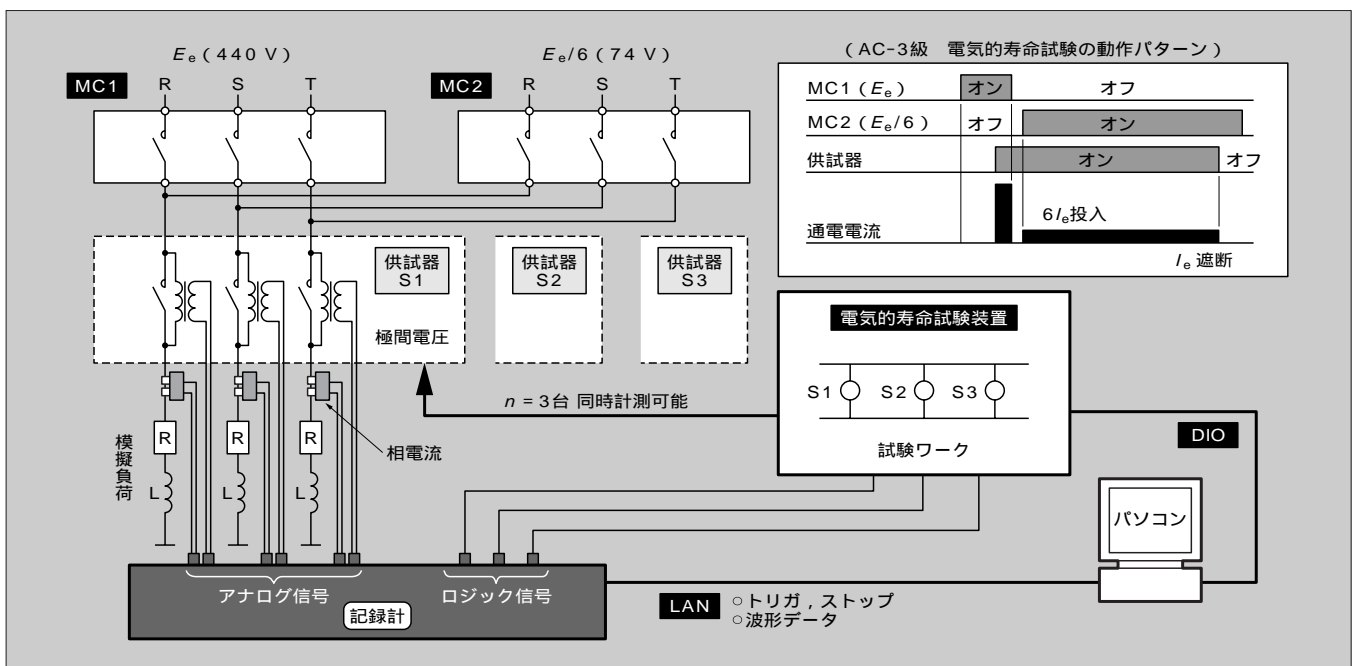


図10 アーク現象自動計測装置の回路構成



可能である。システムとしての試験回路構成を図10に示す。

(2) 試験電圧範囲の拡大

IEC 規格の内容に一致した新 JIS 規格への対応として試験電圧範囲の拡大を行っており、最高で主回路 690 V までの試験が可能である。

(3) 制御条件のフレキシブルな対応

電氣的寿命試験は適用される負荷や開閉頻度によって制御条件が規格で定められているが、評価の内容によっては特殊な制御条件が必要となる場合がある。本装置ではこのような場合に備えて、POD (操作表示器) 画面からの簡単な入力操作で任意の条件に設定変更ができるようになっており、フレキシブルな対応ができる。

以上で述べた寿命試験装置は、有接点機器の開閉性能の解析・評価に重要な役割を果たすものであり、今後とも商品開発の基盤評価設備として効果的な活用が期待される。

5 あとがき

有接点機器の代表機種として電磁接触器を取り上げ、長寿命化のための取組み、その予測技術、最近の寿命評価設備の概要について述べた。

有接点機器の長寿命化は、必要とする寿命を最小限の部材およびボリュームで実現させる技術開発でもあり、エコロジカルな商品開発の一端である。今後とも多様化する市

場のニーズに合致した信頼性の高い商品の供給に向けて、鋭意取り組んでいく所存である。

本稿が低圧開閉機器を実際に使用されている需要家各位のご参考になれば幸いである。最後にご指導・ご協力を賜った関係各位に深謝する次第である。

参考文献

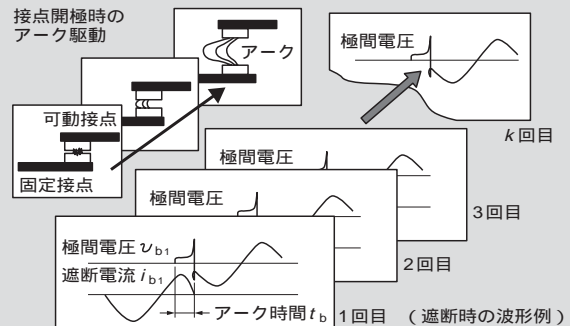
- (1) 伊藤昭吉ほか．電磁接触器のアーカ磁気駆動力の三次元有限要素解析．平成 8 年電気学会全国大会講演論文集．1996．
- (2) 森貞次郎ほか．アーカ電流が気中銅電極の消耗に及ぼす影響．電気学会論文誌 B．vol.119, no.5, 1999, p.596-604．
- (3) 青山淳憲ほか．冷却を行った円筒円環電極間を走行するアーカによる電極損耗量特性．平成 14 年電気学会全国大会講演論文集．2002．
- (4) 三ツ口邦夫ほか．柱上用 6 kV ガス開閉器の負荷開閉可能回数の推定．電気学会論文誌 B．vol.122, no.2, 2002, p.238-242．
- (5) 小嶋明比古．低圧開閉機器の技術動向と富士電機の対応．富士時報．vol.74, no.11, 2001, p.596-603．
- (6) 広田耕人ほか．NEO SC シリーズ新中形電磁接触器，富士時報．vol.72, no.7, 1999, p.363-369．
- (7) JIS C 8201-4-1．低圧開閉装置及び制御装置．第 4 部：接触器及びモータスタータ．第 1 節：電気機械式接触器及びモータスタータ．

解説 累積アーカエネルギー

有接点機器において負荷電流を開閉すると、接点の開離と同時に接点間にアーカが発生し、アーカ電圧が現れる。このときに発生するエネルギーはアーカ電圧とアーカ電流の積を時間で積分した値となり、アーカエネルギーと呼ばれる。

有接点機器の接点消耗は、このエネルギーによって影響を受ける。アーカエネルギーはその一部が接点を溶融・蒸発させるとい形で消費される。他に接点部周辺の側壁や空気を暖めたり、端子台の温度を上昇させたりする。有接点機器の長寿命化は、発生したアーカエネルギーをできるだけ接点消耗に関与しない部分で消費させることが大きなポイントである。

累積アーカエネルギーとは、目標とする回数までの毎回のアーカエネルギーの総計であり、接点寿命の解析において基礎となる重要なデータである。



$$\text{累積アーカエネルギー} = \sum_{n=1}^k \left( \int_0^{t_c} c_n i_{c_n} dt + \int_0^{t_b} b_n i_{b_n} dt \right)$$

$t_c$  : 閉路時の接点バウンス時間,  $t_b$  : 遮断時のアーカ時間,  
 $k$  : 累積数 (設定した開閉回数),  
 $c_n$  :  $n$  回目における閉路時の極間電圧,  $i_{c_n}$  :  $n$  回目における閉路時の電流,  
 $b_n$  :  $n$  回目における遮断時の極間電圧,  $i_{b_n}$  :  $n$  回目における遮断時の電流

# 大容量空気冷却タービン発電機における解析・評価技術

木村 誠(きむら まこと)

星 昌博(ほし まさひろ)

## 1 まえがき

126 MVA 試作実験機による研究開発を機に、富士電機の2極空気冷却タービン発電機の電磁界、通風冷却および構造強度を中心とした解析・評価技術は飛躍的に前進した。これまで、これらの解析・評価技術を適用し、300 MVA までの空気冷却タービン発電機の系列化を行ってきた。これはガスタービンの発達、コンバインドサイクル発電の進展による空気冷却タービン発電機に対する大容量化のニーズに合わせた系列化である。

大容量の空気冷却タービン発電機では、効率向上や温度低減面からの通風冷却の改善、機動性を生かした運用や回転子長大化の面からの強度確保が重要な課題となる。300 MVA 級の発電機では全損失に占める通風損の割合はほぼ半分になる。また、大容量化に伴い電圧が高くなることで、固定子巻線の主絶縁が厚くなり冷却特性が低下することから、効率向上、温度低減の双方に対し通風冷却の改善が必要である。一方、強度面でも長年改良が行われてきた回転子軸などの主要部材の強度特性はほぼ限界にきており、DSS (Daily Start and Stop) 運用や回転子長大化に伴う遠心力などの増大に対しては形状・構造の改善による信頼性確保が必要である。

本稿では、通風冷却および構造強度に関する課題について設計段階で実施した検討内容を示し、大容量空気冷却タービン発電機における解析・評価技術を紹介する。

## 2 大容量空気冷却タービン発電機の熱流体解析

富士電機では、空気冷却タービン発電機の固定子巻線は全含浸方式の絶縁を採用している。全含浸方式は、通常の巻線単一含浸方式の絶縁に比べ冷却特性においても優れており、固定子巻線の温度低減が可能であるが、冷却媒体である空気の冷却特性、発電機の体格や寸法の面から、大容量化とともに次のような通風冷却上の課題が生じる。

- (1) 空気冷却発電機の場合、全損失に占める通風損失の割合が大きい。大容量機ではその傾向が顕著で、高効率化

を制限する要因となる。

- (2) 細長い構造のタービン発電機が一層長くなり、固定子巻線の軸方向の温度分布を均一にし、効果的に冷却することが困難となる。
- (3) 高電圧に対応するために固定子巻線の絶縁が厚くなることから、熱抵抗が大きくなり巻線の温度が上昇する。以上の課題に対し、下記仕様の発電機において熱流体解析を実施し評価を行い、通風冷却特性を確認した。

- 出力 : 300 MVA
- 電圧 : 18 kV
- 力率 : 0.85
- 回転速度 : 3,600 r/min

### 2.1 通風回路

解析対象の空気冷却タービン発電機の通風回路を図1に示す。この通風方式では、発電機の固定子軸方向の3か所に固定子外径側から冷却風を送り込み、他の部分では固定子内径側から冷却風を送り込み固定子鉄心および巻線を冷却している。富士電機では、このように発電機固定子の内外両側から冷却風を送り込む冷却経路を持つ通風方式を、複流通風と呼んでいる。

タービン発電機はその形状の特徴から、水車発電機などの他の回転電機機械と比較し、発電機中央部の温度が高くなる傾向にある。発電機中央部の冷却を改善するため、鉄心が長い発電機に対しては複流方式の通風回路を採用している。この方式により、固定子巻線は効果的に冷却され、温度分布の均一化が実現される。

### 2.2 解析モデル

固定子巻線を効果的に冷却するために、軸方向温度分布の均一化を目的に行った熱流体解析モデルの固定子鉄心歯部の詳細を図2に示す。解析の全体モデルは、発電機固定子鉄心の長さ方向に1/2、周方向は半スロットピッチ分とした。発電機中央部は対称性から熱の出入りがない断熱条件とし、周方向は周期対称条件を用いた。また、発電機端部側の境界面は、実績を基に算出した温度を与え、温度



木村 誠

大型回転機の開発、設計に従事。  
現在、エネルギー製作所発電機部。  
電気学会会員。



星 昌博

大型回転機の構造設計、開発に従事。  
現在、エネルギー製作所発電機部。

図1 空気冷却タービン発電機の通風回路

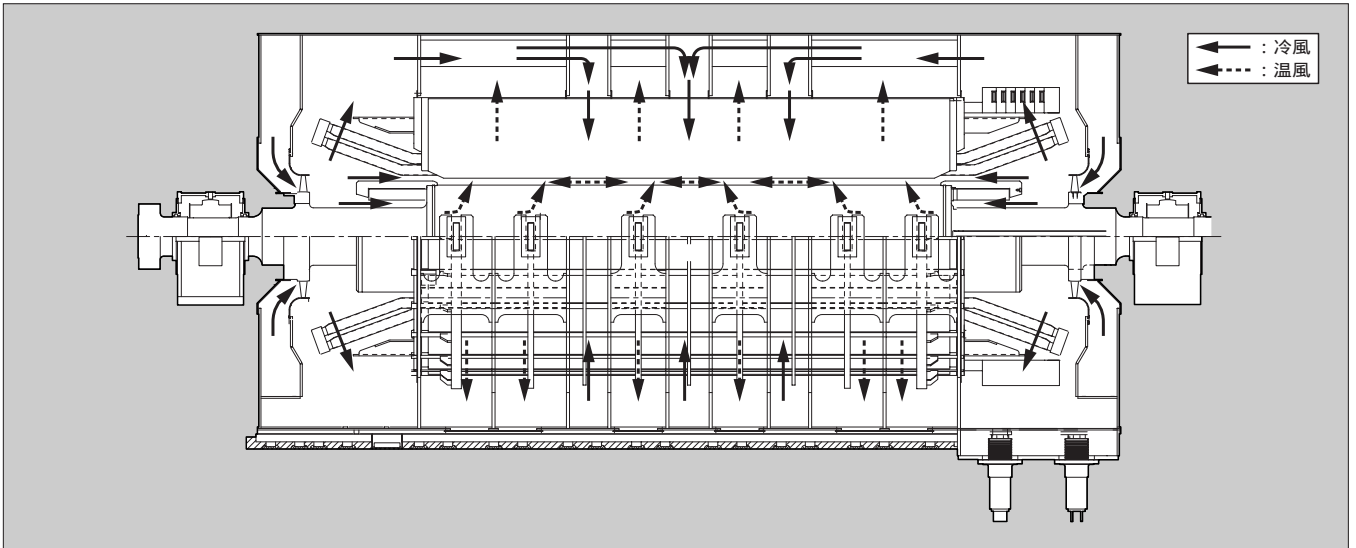


図2 熱流体解析モデル（固定子鉄心歯部）

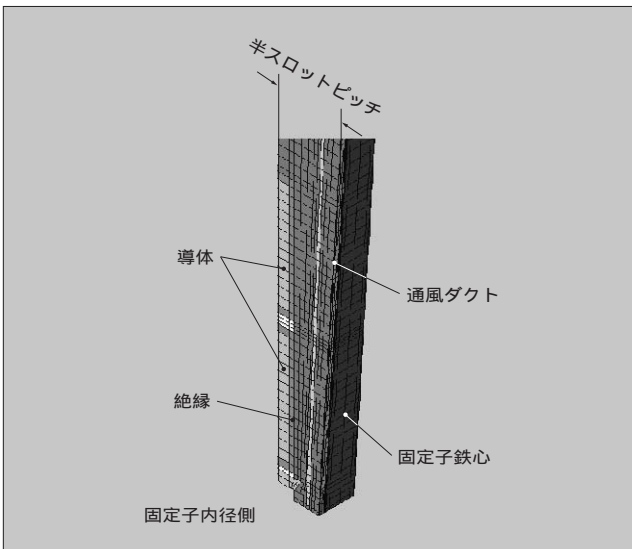
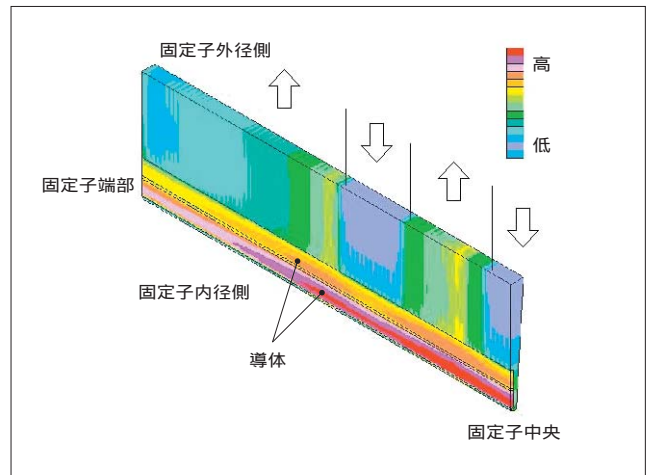


図3 固定子の温度分布



固定面とした。

2.3 熱流体解析条件

熱流体解析条件は以下のとおりである。

- 定常解析
- 非圧縮性解析
- 乱流モデル : 標準 k-
- アルゴリズム : SIMPLE 法
- 差分スキーム : 一次風上差分

解析時の固定子鉄心、巻線および絶縁の熱伝導率に関しては以下の点を考慮した。

- (1) 固定子鉄心の径方向および周方向はけい素鋼鉄の熱伝導率とし、積層方向はその 1/10 とした。
- (2) 固定子巻線の導体部は、軸方向に銅の熱伝導率、それ以外の方向は軸方向の 1/200 の値を用いた。

これらの熱伝導率の異方性については、バッフルと呼ぶ要素を使用し、熱伝導率の小さい方向に熱抵抗を持たせて

模擬した。一方、冷却風と鉄心および導体間の熱伝達率は熱流体解析にて計算される。

巻線の導体部、鉄心歯部および継鉄部の損失は、単位体積あたりの発熱量として各要素に与えた。また、固定子鉄心の各ダクトに流れる冷却風の風量は、等価回路網で求めた値を使用した。

2.4 解析結果と評価

図3に固定子の温度分布の解析結果を示す。固定子鉄心の温度は、外径側から冷風が押し込まれる領域で低くなっている。また、固定子巻線部の温度も同様に軸方向に分布しているが、固定子鉄心ほど温度差が大きいことが分かる。これは、固定子巻線の導体部の軸方向の熱伝導率が高く、熱が軸方向によく伝わるためである。

図4に固定子巻線の軸方向に沿った温度分布を示す。この図から外径側からの冷風の効果がよく分かり、冷風を押し込むべき軸方向位置と量が判断できる。

図5に固定子内径部から外径部に向かって冷却風が押し込まれる代表的な通風ダクト部の冷却風温度分布と速度分

図4 固定子巻線の温度分布

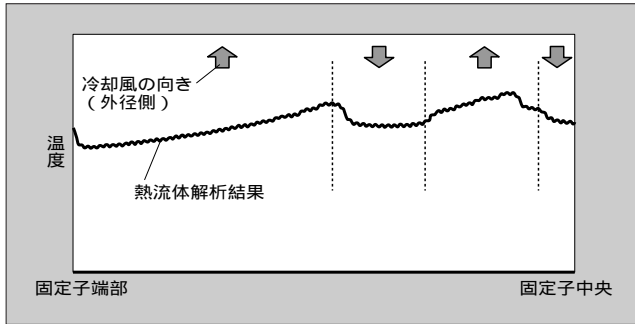
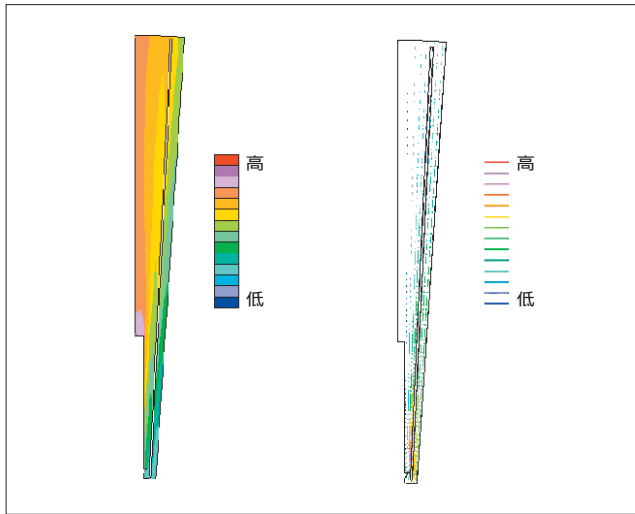


図5 ダクト内の冷却風温度および冷却風速度



布を示す。固定子鉄心内径部で温度が低く、外径側に向かうほど温度が高くなる。また、固定子巻線を冷却した後の冷却風の速度が小さいことや温度が高くなるのが分かり、巻線の冷却状態が検討できる。

以上のように、熱流体解析により固定子に押し込む冷却風の風量と速度を求め評価し、適切に配分することで軸方向の温度分布の均一化が図れ、設計段階で効果的な通風冷却を確認することが可能である。

これらの解析手法の精度は、126 MVA 試作実験機の固定子巻線温度や冷却風量の測定結果と熱流体解析結果の比較により確認している。

③ 回転子の強度解析

ガスタービンあるいはコンバインドサイクル発電システムは、ピーク負荷やミドル負荷用として使用されることから起動頻度が多く、これに適用される空気冷却タービン発電機は大容量化と相まって構造強度に関する検討が必要である。特に回転子の保持リング焼ばめ座部は、構造が複雑で遠心力や熱膨張などの荷重が複合して作用することから、構造検討および評価においては注意が必要である。

保持リングは回転子軸胴端部に焼ばめられ、回転時に回転子コイルエンド部の遠心力を保持する。保持リングと回転子軸の焼ばめ座部は、定格運転時に焼ばめ部が分離し異

図6 強度解析モデル (全体)

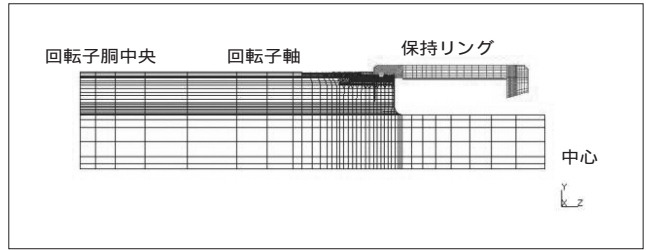
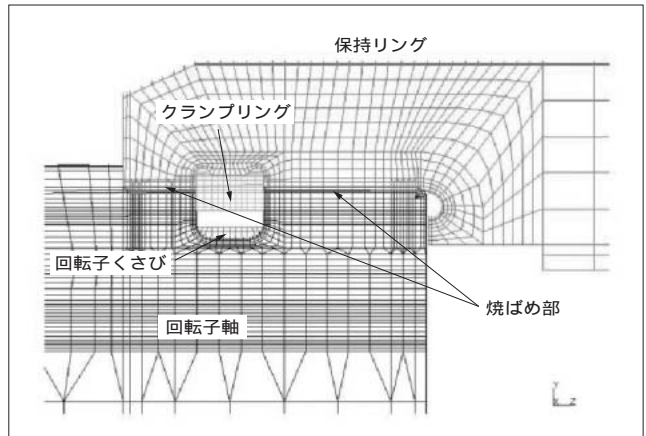


図7 強度解析モデル (焼ばめ座部付近詳細)



常が発生しないように、さらに突発短絡時などの異常トルクに対抗できるように締め代が決められる。

3.1 強度検討

回転子軸の保持リング焼ばめ座部の強度検討は、静止時、定格運転時および最大回転時の応力を求めて行われる。主要な評価断面で公称応力が材料の降伏応力に対し規定の安全率を確保するように、また起動停止による応力集中部の局所的な応力が材料の疲労強度に対し安全率を確保するように、形状が検討され設計に反映される。

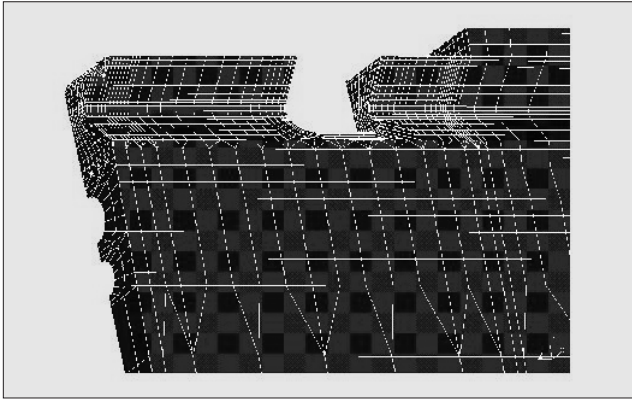
一般的に、タービン発電機の構造設計は弾性設計が基本であり、任意評価断面の公称応力は材料の降伏応力を超えないように設計されることから、強度解析は弾性応力解析で行われる。弾性域を超えるような局所的な応力集中部の疲労強度を検討する場合、弾性応力解析により得られた応力集中部の応力から、繰返し応力ひずみ線図とノイバー則を用いてひずみに変換し、静止時と定格回転時のひずみ範囲を用いて評価している。

保持リング焼ばめ座部の強度解析は、前述したように構造が複雑なため三次元モデルで模擬する必要がある。また、焼ばめ部の状態により回転子胴端部の応力が著しく影響を受けることから、状態を正しく模擬するために境界条件の非線形性を模擬できる接触要素が使用される。このような理由から、強度解析は大規模な非線形解析となる。

3.2 解析モデル

保持リング焼ばめ座部まわりの回転子軸の強度解析のモデルと焼ばめ座部付近の詳細をそれぞれ図6、図7に示す。

図8 強度解析モデル（回転子軸胴端部詳細）



また、回転子軸胴端部の詳細モデルを図8に示す。運転時の回転子コイルの熱膨張による影響を模擬するため、軸方向は回転子胴中央からモデル化している。周方向は回転子のスロットピッチの半分とした。構造要素として、回転子軸、保持リング、回転子くさびおよびクランプリングをモデル化した。

保持リングと回転子軸の焼ばめ部は接触要素を定義し、境界条件の非線形性を考慮した。同様に、保持リングと回転子くさび、クランプリングと軸および保持リングなどの構造物の接触部はいずれも接触要素でモデル化した。回転子巻線は要素を生成せずに、回転時の遠心力は外力として与えた。

また、運転状態を模擬するため各構造要素には適正な温度を与えるとともに、熱膨張による伸び差を生じる部分には摩擦係数を与え熱荷重を模擬できるようにした。ただし、回転子巻線の熱膨張により保持リングに作用する軸方向の力は外力として与えた。

### 3.3 解析結果と評価

図9に疲労強度評価のための回転子軸の保持リング焼ばめ座部の応力解析結果を示す。静止状態では、保持リング焼ばめによる圧縮応力が支配的になることから最小主応力を計算し、定格回転速度では遠心力による引張応力が支配的になることから最大主応力を計算して、その応力差を評価応力として表した。この図から回転子くさびが挿入される溝部の評価応力が大きいことが分かる。

また同様に、クランプリング溝底部付近の評価応力計算結果を図10に示す。クランプリング溝底部に局部的に応力が集中している。設計当初の計画形状では、保持リング焼ばめ座部の面積が小さく圧縮応力が大きいことや、クランプリング溝底部と回転子くさびを挿入する溝の先端部が同じ位置となり、応力集中部が干渉し局部応力が過大であった。このような局部応力の干渉を避け、応力を低減するためにクランプリング溝を深く加工し、疲労強度に対する信

図9 強度解析結果（回転子軸胴端部）

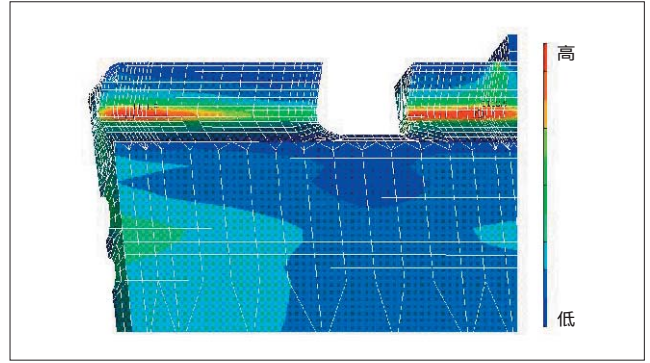
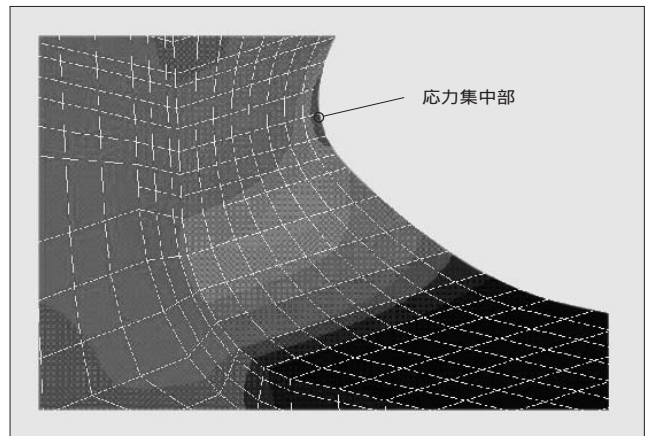


図10 強度解析結果（クランプリング溝底部）



頼性を向上する改善を行っている。

以上のように、回転子の部位で最も構造的に複雑で、作用する荷重や境界条件が煩雑な保持リング焼ばめ座部の強度解析と評価が設計段階で比較的簡単に実施できるようになり、構造改善とそれのための強度確認が可能となり、信頼性の高い構造を実現できるようになった。

### 4 あとがき

大容量空気冷却タービン発電機の解析・評価技術について熱流体解析と強度解析を例に述べた。

市場のニーズの変化に対応するためには、スピードのある技術改善とその改善に対する信頼性確認が不可欠である。従来の設計計算方法に加え、紹介したような解析・評価技術が設計段階で容易に使えるようになったことで、信頼性が高く速い技術改善が可能になった。今後とも解析・評価技術の開発に注力し、市場のニーズに応えた製品を提供していきたいと考える。

### 参考文献

- (1) 三村一郎ほか．新系列2極空気冷却タービン発電機の完成．富士時報．vol.72，no.5，1999，p.263-266．



## カンパニー別営業品目

### 電機システムカンパニー

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

### 機器・制御カンパニー

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，汎用モールド変圧器，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，UPS，ミニUPS

### 電子カンパニー

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，感光体およびその周辺装置

### 流通機器システムカンパニー

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，ホテルペンダシステム，カードシステム

---

富士時報	第 75 卷	第 9 号	平成 14 年 8 月 30 日 印刷 平成 14 年 9 月 10 日 発行
			定価 525 円（本体 500 円・送料別）

---

編集兼発行人	原 嶋 孝 一
--------	---------

---

発行所	富士電機株式会社 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
-----	----------	---

---

# 富士時報論文抄録

## 富士電機の解析・評価技術への取り組み

長野 恵 松山 秀昭 坂田 昌良  
富士時報 Vol.75 No.9 p.495-496 (2002)

半導体デバイス、磁気記録媒体などの微小領域化・薄膜化に対応できる、透過電子顕微鏡法、高輝度放射光法 (SPring-8)、電界放射型走査オージェ電子分光法、二次イオン質量分析法、走査プローブ顕微鏡法などの分析技術について述べる。また、パワー半導体デバイスの接合界面の評価技術とデバイス内部の温度分布や温度分布に対する熱応力、熱変形を定量的に予測し、熱・応力・ひずみなどを同時に連成させた解析・シミュレーション技術についても述べる。さらに、よりミクロな分析と、材料物性、接合界面などのミクロな現象の解析を展望する。

## シリコントレンチ構造微視変形の解析

栗林 均 蛭田 玲子  
富士時報 Vol.75 No.9 p.497-500 (2002)

近年、シリコン基板への三次元的な素子形成が注目されている。トレンチ側壁にゲートを形成するトレンチゲート素子は、その代表で、オン抵抗が小さいという特徴を持つ。トレンチゲート素子の特性・信頼性改善のため、高温水素アニールによる、トレンチ構造改善の検討を行った。トレンチのマクロな変形および側壁のミクロな凹凸の解析・評価を行い、表面拡散によって変形が起こること、また、拡散定数の値が明らかになった。さらに、側壁が原子レベルで平坦になることが分かった。

## 放射光 (SPring-8) 利用による磁気記録媒体などの解析

大沢 通夫 田沼 良平  
富士時報 Vol.75 No.9 p.501-504 (2002)

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、磁気記録媒体の解析などに取り組んでいる。高輝度放射光を利用したX線面内回折法により、Ru中間層を持ち、非加熱で成膜できる新たなHDD用磁気記録媒体について、各層の結晶性および結晶配向性を解析し、Ru中間層が、磁性層の結晶配向性を制御するうえで重要な役割を果たしていることを明らかにした。その他、燃料電池の触媒解析、強誘電体膜の添加元素の状態解析、Siのひずみ解析法の検討などにも取り組んでいる。

## 二次イオン質量分析技術の向上

植木 裕子 前田 賢彦  
富士時報 Vol.75 No.9 p.505-508 (2002)

二次イオン質量分析法は、ppmからppbまでの高い検出感度と深さ方向分析が可能であることから、半導体デバイス中の微量不純物分析をはじめ金属、有機物などの広い分野で活用されている。しかし近年、半導体デバイスの微細化、高集積化に伴い、さらなる分析技術の向上が求められている。本稿では、サンプルホルダの改善による測定精度の向上、試料を研磨して裏面から測定することによる深さ分解能の向上、産学共同で行った基礎データ取得を目的としたラウンドロビン分析について紹介する。

## 半導体製品の樹脂技術と解析

市村 裕司 伊藤 秀昭 石渡 統  
富士時報 Vol.75 No.9 p.509-512 (2002)

半導体パッケージ製品は、エポキシ樹脂を中心に樹脂封止が主流になっている。この樹脂封止では、構成材料の物性の違いから、残留ひずみや、反り変形が発生する。このことが、クラック、はく離などを誘引させる要因になっている。エポキシ樹脂のガラス転移温度は、硬化条件の最適化に適用されている。また、放熱基板の反り変形をコントロールするうえで、重要な物性値になっている。本稿では、ガラス転移温度の高精度な解析手法の開発と、封止樹脂組成のフィラー、触媒に着目したアルミ放熱基板の反り低減技術の事例を紹介する。

## マイクロ加工・直接接合における無機材料の表面界面評価

後藤 友彰 片倉 英明 塩川 国夫  
富士時報 Vol.75 No.9 p.513-515 (2002)

マイクロ加工や直接接合の技術開発に不可欠な無機材料の評価技術の適用事例を紹介する。シリコンの薄板化技術に関しては、研削加工表面の結晶状態の評価を行い、加工力が加工ひずみに影響するなどの発生メカニズムを解明し、砥石および研削条件を最適化することで低応力加工を実現した。シリコンとセラミックスの陽極接合に関しては、接合界面の評価と元素分析により、Naイオンの移動制御が重要であるなどの接合メカニズムを解明し、接合条件を最適化することで異種材料の陽極接合を実現した。

## はんだ付けのメカニズムと解析技術

渡邊 裕彦 下田 将義 金子 公寿  
富士時報 Vol.75 No.9 p.516-519 (2002)

電子機器の実装はんだ付けは、フラックスとすず鉛合金を加熱する安価で単純な接合方法である。この非常に単純な方法であるはんだ付けの不良がまだ製品信頼性を低下させる大きな要因となっている。本稿では、はんだ付け不良撲滅へ向けた取組みの一例として、従来から行っている統計手法に加え、はんだの物性取得や、はんだ付けの現象に立ち入った、はんだ付けメカニズム解明への取組みとその解析事例について紹介する。

## 自動販売機における臭気・味覚の分析評価技術

内田 勝啓 永田 睦美 西脇 正剛  
富士時報 Vol.75 No.9 p.520-523 (2002)

飲料用自動販売機は、飲料が持つ本来の香りや味をそのまま利用者に提供することが求められており、利用者の嗜好(しこう)を妨げる臭いや味を付与してはならない。嗜好を妨げる要因としては、自動販売機の構成材料から揮発または溶出する微量成分が考えられる。衛生的で、おいしい飲料を販売する自動販売機を供給していくためには、高感度で高信頼性の臭気・味覚の分析評価技術が重要である。本稿では、官能評価と機器分析を用いた、臭気・味覚に関する分析評価技術を紹介する。

# Abstracts (Fuji Electric Journal)

## Characterization of Silicon Trench Transformation

Hitoshi Kuribayashi Reiko Hiruta  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.497-500 (2002)

In recent years, there has been considerable interest in the fabrication of three-dimensional devices on a silicon substrate. The trench gate device, formed with a gate in the sidewall of a trench, is a typical such device and has a special characteristic of low on-resistance. To enhance the characteristics and reliability of trench gate devices, we studied the effect of using high-temperature hydrogen annealing to improve the trench structure. Macro-transformation of the trench and micro-irregularities of the sidewall were analyzed and evaluated, and the occurrence of deformation due to surface diffusion and the value of the diffusion constant were identified. Additionally, it was confirmed that the sidewall is flat, even on the atomic level.

## Fuji Electric's Efforts in Analysis and Evaluation Technology

Megumi Nagano Hideaki Matsuyama Masayoshi Sakata  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.495-496 (2002)

This paper describes analysis techniques such as transmission electron microscopy, high brilliance synchrotron radiation (SPring-8), field emission-scanning Auger electron microscopy, secondary ion mass spectrometry and scanning probe microscopy, which are capable of supporting smaller area and thinner film semiconductor devices, magnetic recording media, and such. Also described are a technique for evaluating the junction interface of power semiconductor devices, and techniques for quantitatively predicting the temperature distribution within a device, the corresponding thermal stress, and thermal deformation, and for simultaneously analyzing and simulating the coupled heat, stress and deformation. Additionally, the prospects for micro-analysis and the analysis of material property and junction interface micro-phenomena are discussed.

## Improvement of analysis technology for Secondary Ion Mass Spectrometry

Yuko Ueki Takahiko Maeda  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.505-508 (2002)

The large dynamic range and excellent depth resolution of secondary ion mass spectrometry has enabled this technique to be used in a wide range of fields for the analysis of metal, organic materials, including the analysis of small amounts of impurities in semiconductor devices. However, more sophisticated analysis technology has come to be required as semiconductor devices have become more densely integrated and smaller in size. This paper discusses the increased measuring accuracy enabled by an improved sample holder, enhanced depth resolution capability enabled by measurement from the underside of a polished sample, and the round-robin study conducted as a collaborative effort by Japanese industrial and academic users.

## Analyses of Materials such as Magnetic Recording Media using the Synchrotron Radiation of SPing-8

Michio Ohsawa Ryohei Tanuma  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.501-504 (2002)

Fuji Electric has been analyzing materials using the industrial consortium beamlines of SPing-8, the largest synchrotron radiation facility in the world. Crystallographic structures of HDD-use magnetic recording media fabricated with a non-heating process and having an Ru intermediate layer were studied by in-plane X-ray diffraction that utilizes high brilliance synchrotron radiation. It was verified that the Ru intermediate layer plays an important role in controlling the crystalline orientation of the magnetic layer. In addition, there are ongoing efforts to study the analysis of fuel cell catalysts, analysis of impurities doped in ferroelectric films, and strain analysis of Si.

## Surface and Interface Analysis for Micro-machining and Anodic Bonding of Inorganic Materials

Tomoaki Goto Hideaki Katakura Kunio Shiokawa  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.513-515 (2002)

This paper outlines surface and interface analysis techniques for the micro-machining and anodic bonding of inorganic materials. The crystalline structure of the ground face of a silicon wafer was evaluated and the mechanism by which processing force causes deformation was identified. Low stress grinding technology has been developed in order to optimize this process. The mechanism by which silicon forms an anodic bond with ceramic sputtered glass film is also identified through analysis of the ceramic-glass film interface, and the importance of controlling the migration of Na ions was verified. Additionally, anodic bonding between different materials was achieved by optimizing the bonding conditions.

## Technology and Analysis of Plastic Packaging Material for Semiconductor Devices

Yuji Ichimura Hideaki Ito Osamu Ishiwata  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.509-512 (2002)

Semiconductor devices are commonly encapsulated in epoxy resin. Residual deformation and warpage occur in this resin encapsulation due to differences in the physical properties of structural materials, and consequently the encapsulation becomes susceptible to cracks, peeling, etc. The glass transition temperature of epoxy resin is an important factor to consider for optimal curing conditions. Additionally, warpage of the heat dissipating substrate is an important physical property for purposes of control. This paper discusses the development of a high precision technique for analyzing glass transition temperature and presents a technique for reducing warpage in an aluminum heat dissipating substrate, which has been targeted for use with the fillers and promoters that form the encapsulating resin.

## Smell and Taste Analysis and Evaluation Technology for Vending Machines

Katsuhiro Uchida Mutsumi Nagata Seigo Nishiwaki  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.520-523 (2002)

Beverage vending machines that are capable of supplying beverages to users while preserving the original aroma and flavor of the beverages are in demand. A beverage vending machine must not impart any flavor or aroma that may be disagreeable to the user. Such disagreeable flavors or aromas are thought to be caused by trace constituents that volatilize or elute from the component materials of the vending machine. In order to provide a hygienic vending machine that sells good-tasting beverages, sensitive and highly reliable smell and taste analysis and evaluation technology is essential. This paper introduces smell and taste analysis and evaluation technology that incorporates sensory evaluation and instrumental analysis.

## Soldering Mechanism and Analysis Technique

Hirohiko Watanabe Masayoshi Shimoda Kimihisa Kaneko  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.516-519 (2002)

The soldering of electronic equipment by heating flux and a tin alloy is an inexpensive and simple method of bonding. However, with this extremely simple method of soldering, solder defects are still a major cause of degraded product reliability. As an example of Fuji Electric's efforts to eradicate solder defects, and in addition to the statistical methods that have been used so far, this paper presents Fuji's efforts to identify the physical properties of solder and to understand the soldering mechanism. An example analysis is presented.

### 固体高分子形燃料電池における面内分布の解析

榎並 義晶  
富士時報 Vol.75 No.9 p.524-526 (2002)

固体高分子形燃料電池のセル内部における電流密度や湿度などの面内分布を、実測データをもとに計算する技術を開発した。複雑な溝形状を持ったセルの内部状態を高い精度で推定することができる面内分布解析の概念と計算例、さらに最近のトピックスである拡散層の透過を考慮したガス流速分布計算について紹介する。

### 非接触 IC カードリーダライタのシミュレーション技術

四蔵 達之 村上 益雄 近藤 史郎  
富士時報 Vol.75 No.9 p.527-529 (2002)

非接触 IC カードは、金属端子などの電氣的接続を伴わずにデータのやり取りを行うことができるカードであり、富士電機では、ソニー(株)製の FeliCa のカードを利用した各種リーダライタ (RW) を開発してきた。昨今の IC カード応用の広がりに伴うメディアの多様化や RW 組込み環境の広がりに迅速に対応していくため、現在、RW 特性解析ツール高度化研究を推進している。本稿では任意形状アンテナの解析技術と回路解析シミュレータとの組合せによる RW 主要部全体を解析する技術について紹介する。

### パワーエレクトロニクス機器の電気系・機械系動作解析技術

松本 康 真下 明秀 佐藤 以久也  
富士時報 Vol.75 No.9 p.530-534 (2002)

パワーエレクトロニクス機器は、電源分野や電動機駆動分野など多方面で用いられている。用途・容量ともに多岐にわたる機種の開発を進めるうえで、シミュレーション技術を駆使することが、小型・低コスト・高性能化の観点から不可欠となっている。本稿では、システム開発の段階で用いている電気回路を主眼としたコンピュータシミュレーションによる電気系の動作解析技術、電動機駆動を主眼とした機械系リアルタイムシミュレータによる機械系の動作解析技術について紹介する。

### 交流電磁接触器の動的挙動の解析

和田 正義 吉本 博 北出 雄二郎  
富士時報 Vol.75 No.9 p.535-538 (2002)

交流電磁接触器の動作を解析するシミュレータについて報告する。これは従来の有限要素法を用いたシミュレータなどと比較して、高速に解析ができるものである。高速計算のために、電気・磁気回路および衝突を伴う機構運動を含む電磁接触器全体を微分方程式によりモデル化し、ルンゲ・クッタ法により高速に解く。このシミュレータを用いた高速な解析により、電磁石の大きさ、電源電圧、周波数、機構部品の質量や慣性などのさまざまなパラメータ変化の電磁接触器の動作、性能への影響を調べることが可能となった。

### 有接点機器の長寿命化とその寿命予測

潮崎 克郎 河原木 豊 宮沢 秀和  
富士時報 Vol.75 No.9 p.539-543 (2002)

有接点機器の長寿命化は、国際性および環境性を追求した新商品を実現させるうえで重要な意味を持っている。この長寿命化に関する研究は、電流遮断時の現象解析を中心としたものが主流であった。今回、小型電磁接触器を中心に閉路と遮断の両現象面から評価・解析を行って実績を上げることができた。本稿では、長寿命化を支える要素技術確立の取組み事例として、接点バウンス低減技術、接点材料の高性能化、電氣的寿命予測技術について説明するとともに、最近の電氣的寿命評価設備の概要について紹介する。

### 大容量空気冷却タービン発電機における解析・評価技術

木村 誠 星 昌博  
富士時報 Vol.75 No.9 p.544-547 (2002)

126 MVA 試作実験機による研究開発を機に、富士電機の電磁界、通風冷却および構造強度の解析・評価技術は飛躍的に前進した。これらの解析・評価技術を適用し、300 MVA までの空気冷却タービン発電機の系列化を行ってきた。大容量空気冷却タービン発電機では、通風冷却の改善や長大回転子の構造強度の確保が課題となる。本稿では、大容量空気冷却タービン発電機的设计段階における通風冷却および構造強度に関する解析・評価技術を紹介する。

---

### **Simulation Technology for Reader/Writer of Contactless IC Cards**

Tatsuyuki Shikura Masuo Murakami Shiro Kondo  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.527-529 (2002)

---

Contactless IC cards are able to exchange data without establishing an electrical connection by means of metal pins or the like. Previously, Fuji Electric has developed several types of Reader/Writer (R/W) devices for Sony's "FeliCa" contactless IC cards. To accommodate new types of IC cards and the expanded range of applications in which R/W devices are embedded, Fuji Electric has developed simulation technology for analyzing R/W characteristics. This paper describes example results of the simulation of a R/W device consisting of a three-dimensional antenna and a radio-frequency unit.

---

### **Distribution Analysis of Polymer Electrolyte Fuel Cell**

Yoshiaki Enami  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.524-526 (2002)

---

A steady state, two-dimensional model of a polymer electrolyte fuel cell is described. The model is based on empirical data of current-voltage characteristics and water transport measured with a 5 cm<sup>2</sup> cell. It is found that the model can provide accurate results since the calculated distributions were in close agreement with the experimental results over a wide range of gas utilization. The effect of gas permeation through a gas-diffusion layer is also investigated. By employing the gas-diffusion layer with highest permeability, the flow rate imbalance can be increased by 20 % or more.

---

### **Dynamic Simulation of Magnetic Contactors with AC Solenoids**

Masayoshi Wada Hiroshi Yoshimoto Yujiro Kitaide  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.535-538 (2002)

---

This paper presents a dynamic simulator for analyzing various behaviors of electromagnetic contactors with AC solenoids. This simulator is capable of analyzing the dynamic motion of a contactor much more quickly than conventional modeling that use the finite element method (FEM) or other techniques. So that the contactor model may be computed quickly, the entire contactor, including electromagnetic circuitry and mechanical motion in response to shocks and collisions, is described by differential equations. These equations are solved simultaneously by the Runge-Kutta method. This quick analysis allows designers to investigate the effect on the electromagnetic contactor when various parameters such as solenoid dimensions, power voltage and frequency, mass and inertia of mechanical parts, etc., are changed.

---

### **Analysis Technology for Electrical and Mechanical Dynamics of Power Electronics Equipment**

Yasushi Matsumoto Akihide Mashimo Ikuya Sato  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.530-534 (2002)

---

Power electronics equipment is utilized in various fields such as in power supplies and motor-driven applications. In order to develop a diversity of models for various applications, each having different capacities, it is essential to fully utilize simulation technology to achieve miniaturization, lower cost, and enhanced performance. This paper describes design-stage analysis technology for computer simulation of the electrical dynamics of electrical circuits and for real-time simulation of the mechanical dynamics of motor-driven applications.

---

### **Analysis and Evaluation Technology for Large-capacity Air-cooled Turbine Generators**

Makoto Kimura Masahiro Hoshi  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.544-547 (2002)

---

While conducting research and development for a 126 MVA prototype turbine generator, Fuji Electric realized dramatic advances in techniques for the analysis and evaluation of electromagnetic fields, air-cooling and structural strength. Through applying these techniques, a line-up of air-cooled turbines ranging up to 300 MVA have been developed. The development of large-capacity air-cooled turbine generators is confronted with the challenges of improving the air-cooling performance and achieving the necessary structural strength of a long rotor. This paper describes design-stage analysis and evaluation techniques for the air-cooling and structural strength of a large-capacity air-cooled turbine generator.

---

### **Prolongation and Estimation of Longevity of Successful On-load Cycle Operation of Low-voltage Switchgears**

Katsuro Shiozaki Yutaka Kwaragi Hidekazu Miyazawa  
Fuji Electric Journal Vol.75 No.9 p.539-543 (2002)

---

The prolongation of successful on-load cycle operation of low-voltage switchgear is important for the development of new products that meet global standards and are environmentally safe. Research related to longevity prolongation has focused mainly on analysis of circuit-breaking phenomena. Fuji Electric has achieved good results by evaluating and analyzing the phenomena associated with both circuit-making and circuit-breaking operations. This paper describes technology for reducing contact bounce time, material for achieving high-performance contacts, and a method for electrically estimating the longevity of successful on-load cycle operation as examples of efforts to establish essential technology. An overview of recent equipment for electrically evaluating longevity is also presented.

# 富士電機株式会社

本社	事務所	☎03)5435-7111	〒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)
北海道	支社	☎011)261-7231	〒060-0042	札幌市中央区大通西四丁目1番地(道銀ビル)
東北	支社	☎022)225-5351	〒980-0811	仙台市青葉区一番町一丁目2番25号(仙台NSビル)
北陸	支社	☎076)441-1231	〒930-0004	富山市桜橋通り3番1号(富山電気ビル)
中部	支社	☎052)204-0290	〒460-0003	名古屋市中区錦一丁目19番24号(名古屋第一ビル)
関西	支社	☎06)6455-3800	〒553-0002	大阪市福島区鷺洲一丁目11番19号(富士電機大阪ビル)
中国	支社	☎082)247-4231	〒730-0022	広島市中区銀山町14番18号
四国	支社	☎087)851-9101	〒760-0017	高松市番町一丁目6番8号(高松興銀ビル)
九州	支社	☎092)731-7111	〒810-0001	福岡市中央区天神二丁目12番1号(天神ビル)
北関東	支店	☎048)526-2200	〒360-0037	熊谷市筑波一丁目195番地(能見ビル)
首都圏北部	支店	☎048)657-1231	〒330-0802	さいたま市宮町一丁目38番1号(野村不動産大宮共同ビル)
首都圏東部	支店	☎043)223-0702	〒260-0015	千葉市中央区富士見二丁目15番11号(日本生命千葉富士見ビル)
神奈川	支店	☎045)325-5611	〒220-0004	横浜市西区北幸二丁目8番4号(横浜西口KNビル)
新潟	支店	☎025)284-5314	〒950-0965	新潟市新光町16番地4(荏原新潟ビル)
長野	支店	☎026)228-6731	〒380-0836	長野市南県町1002番地(陽光エースビル)
東愛知	支店	☎0566)24-4031	〒448-0857	刈谷市大手町二丁目15番地(センタービルOTE21)
兵庫	支店	☎078)325-8185	〒650-0033	神戸市中央区江戸町95番地(井門神戸ビル)
岡山	支店	☎086)227-7500	〒700-0024	岡山市駅元町1番6号(岡山フコク生命駅前ビル)
山口	支店	☎0836)21-3177	〒755-8577	宇部市相生町8番1号(宇部興産ビル)
山松	支店	☎089)933-9100	〒790-0878	松山市勝山町一丁目19番地3(青木第一ビル)
沖縄	支店	☎098)862-8625	〒900-0004	那覇市銘苅二丁目4番51号(ジェイ・ツービル)
道北	営業所	☎0166)68-2166	〒078-8801	旭川市緑が丘東一条四丁目1番19号(旭川リサーチパーク内)
道北見	営業所	☎0157)22-5225	〒090-0831	北見市西富町163番地30
道釧路	営業所	☎0154)22-4295	〒085-0032	釧路市新栄町8番13号
道東	営業所	☎0155)24-2416	〒080-0803	帯広市東三条南十丁目15番地
道南	営業所	☎0138)26-2366	〒040-0061	函館市海岸町5番18号
青森	営業所	☎017)777-7802	〒030-0861	青森市長島二丁目25番3号(ニッセイ青森センタービル)
盛岡	営業所	☎019)654-1741	〒020-0021	盛岡市中央通一丁目7番25号(朝日生命盛岡中央通ビル)
秋田	営業所	☎018)824-3401	〒010-0962	秋田市八橋大畑一丁目5番16号
山形	営業所	☎023)641-2371	〒990-0057	山形市宮町一丁目10番12号
山新庄	営業所	☎0233)23-1710	〒996-0001	新庄市五日町1324番地の6
福島	営業所	☎024)932-0879	〒963-8033	郡山市亀田一丁目2番5号
いわき	営業所	☎0246)27-9595	〒973-8402	いわき市内郷御殿町二丁目29番地
水戸	営業所	☎029)231-3571	〒310-0805	水戸市中央二丁目8番8号(櫻井第2ビル)
茨城	営業所	☎029)266-2945	〒311-1307	茨城県東茨城郡大洗町桜道304番地(茨交大洗駅前ビル)
栃木	営業所	☎028)639-1151	〒321-0953	宇都宮市東宿郷三丁目1番9号(USK東宿郷ビル)
金沢	営業所	☎076)221-9228	〒920-0031	金沢市広岡一丁目1番18号(伊藤忠金沢ビル)
福井	営業所	☎0776)21-0605	〒910-0005	福井市大手二丁目7番15号(安田生命福井ビル)
山梨	営業所	☎055)222-4421	〒400-0858	甲府市相生一丁目1番21号(清田ビル)
長野	営業所	☎026)228-0475	〒380-0836	長野市南県町1002番地(陽光エースビル)
山松本	営業所	☎0263)40-3001	〒390-0852	松本市島立943番地(ハーモネートビル)
甲信	営業所	☎026)336-6740	〒390-0811	松本市中央四丁目5番35号(長野県鑄物会館)
岐阜	営業所	☎058)251-7110	〒500-8868	岐阜市光明町三丁目1番地(太陽ビル)
静岡	営業所	☎054)251-9532	〒420-0053	静岡市弥勒二丁目5番28号(静岡荏原ビル)
京滋	営業所	☎075)253-6081	〒604-8162	京都市中京区烏丸通蛸薬師上ル七観音町637(朝日生命京都ビル)
和歌山	営業所	☎073)432-5433	〒640-8052	和歌山市鷲ノ森堂前丁17番地
鳥取	営業所	☎0857)23-4219	〒680-0862	鳥取市雲山153番地36〔鳥電商事(株)内〕
倉吉	営業所	☎0858)23-5300	〒682-0802	倉吉市東巖城町181番地(平成ビル)
山陰	営業所	☎0852)21-9666	〒690-0007	松江市御手船場町549番地1号(安田火災松江ビル)
徳島	営業所	☎088)655-3533	〒770-0832	徳島市寺島本町東二丁目5番地1(元木ビル)
高知	営業所	☎088)824-8122	〒780-0870	高知市本町四丁目1番16号(高知電気ビル別館)
小倉	営業所	☎093)521-8084	〒802-0014	北九州市小倉北区砂津二丁目1番40号(富士電機小倉ビル)
長崎	営業所	☎095)827-4657	〒850-0037	長崎市金屋町7番12号
熊本	営業所	☎096)387-7351	〒862-0950	熊本市水前寺六丁目27番20号(神水恵比須ビル)
大分	営業所	☎097)537-3434	〒870-0036	大分市寿町5番20号
宮崎	営業所	☎0985)20-8178	〒880-0805	宮崎市橘通東三丁目1番47号(宮崎プレジデントビル)
南九州	営業所	☎099)812-6522	〒890-0046	鹿児島市西田一丁目5番1号(GEエジソンビル鹿児島)
エネルギー製作所		☎044)333-7111	〒210-9530	川崎市川崎区田辺新田1番1号
変電システム製作所		☎0436)42-8111	〒290-8511	市原市八幡海岸通7番地
千葉製作所		☎0436)42-8111	〒290-8511	市原市八幡海岸通7番地
東京システム製作所		☎042)583-6111	〒191-8502	日野市富士町1番地
神戸工場		☎078)991-2111	〒651-2271	神戸市西区高塚台四丁目1番地の1
鈴鹿工場		☎0593)83-8100	〒513-8633	鈴鹿市南玉垣町5520番地
山松本工場		☎0263)25-7111	〒390-0821	松本市筑摩四丁目18番1号
山梨工場		☎055)285-6111	〒400-0222	山梨県中巨摩郡白根町飯野221番地の1
吹上工場		☎048)548-1111	〒369-0192	埼玉県北足立郡吹上町南一丁目5番45号
大田原工場		☎0287)22-7111	〒324-8510	大田原市中田原1043番地
三重工場		☎0593)30-1511	〒510-8631	四日市市富士町1番27号
(株)富士電機総合研究所		☎0468)56-1191	〒240-0194	横須賀市長坂二丁目2番1号
(株)F F C		☎03)5351-0200	〒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)

