

MITSUBISHI
Changes for the Better

家庭から宇宙まで、エコチェンジ



三菱電機技報

12

2013

Vol.87 No.12

生産技術



目次

特集「生産技術」

“加工現象を極める” —生きた人材の育成と技術の伝承を目指して—	1
横井秀俊	
成長戦略を支える生産技術	2
大西 寛	
冷却速度制御による精密射出成形法	6
今泉 賢・小川瑞樹・北山二郎・佐久間利幸	
レーザ・アークハイブリッド溶接法	10
山田景太・松山昌之・西原順二	
太陽電池セル・モジュールの量産品質を支える製造技術	14
野々垣光裕・草壁嘉彦・瀧本晋輔・藪垣良美・告野 元	
リフロー温度プロファイルシミュレータ	18
岩田 彩・小山雅弘・朝山真次・田邊 剛・出田吾朗	
トルクリプルを低減するステータ鉄心製造技術	22
司城大輔・須藤広一・鈴木啓文・上屋文昭・田中敏則	
大口径薄形巻上機のステータ製造合理化	26
山添一利・橋本 昭・鶴飼義一・朴 和彦・大木克倫	
マニュアルモータスタータの製造技術	30
村井正俊・江藤基比古・八木博之	
IHクッキングヒーターのパワーエレクトロニクス実装技術	34
中島浩二・熊谷 隆・原田圭司・竹下みゆき・木下広一	
ロバスト設計手法による高周波回路の直行率改善	38
中川隆文・桐越 祐	
購入半導体デバイスの故障解析技術	42
石井宏之・金谷雅夫・中野一機	
生産革新活動の深化とグローバル拡大	46
樋野本宣秀・有川真明・三木 武・勝田繁雄	

Manufacturing Technologies

Master the Ultimate in Processing Phenomena —Toward Developing Living Human Resources for Handing Technology on to the Next Generation—	
Hidetoshi Yokoi	
Production Engineering for Supporting Growth Strategy	
Hiroshi Onishi	
Precision Injection Molding by Cooling Rate Control	
Masaru Imaizumi, Mizuki Ogawa, Jiro Kitayama, Toshiyuki Sakuma	
Laser/Arc Hybrid Welding	
Keita Yamada, Masayuki Hiyama, Junji Nishihara	
Manufacturing Technologies for Stable Mass Production Quality of Crystalline Silicon Photovoltaic Cells and Modules	
Mitsuhiro Nonogaki, Yoshihiko Kusakabe, Shinsuke Takimoto, Yoshimi Yabugaki, Hajime Tsugeno	
Temperature Profile Simulator for Reflow Soldering	
Aya Iwata, Masahiro Koyama, Sinji Asayama, Tsuyoshi Tanabe, Goro Izuta	
Manufacturing Technology of Stator Core to Reduce Torque Ripple	
Daisuke Shijo, Hirokazu Sudo, Akifumi Suzuki, Fumiaki Tsuchiya, Toshinori Tanaka	
Production Process Rationalization of Stator for Large Diameter and Thin Traction Machine	
Kazutoshi Yamazoe, Akira Hashimoto, Yoshikazu Ugai, Kazuhiko Boku, Katsunori Ohki	
Manufacturing Technologies of Motor Circuit Breaker	
Masatoshi Murai, Motohiko Eto, Hiroyuki Yagi	
Power Electronic Packaging Technology for IH-Cooker	
Koji Nakajima, Takashi Kumagai, Keiji Harada, Miyuki Takeshita, Hirokazu Kinoshita	
Improvement of First Run Rate in Microwave Circuits by Novel Robust Design Methodology	
Takafumi Nakagawa, Tasuku Kirikoshi	
Failure Analysis Technologies of Purchased Semiconductor Devices	
Hiroyuki Ishii, Masao Kanatani, Kazuki Nakano	
Productivity Innovation and Growth in the Global Competition	
Nobuhide Hinomoto, Masaaki Arikawa, Takeshi Miki, Shigeo Katsuta	

三菱電機技報87巻総目次	51
--------------	----

特許と新案

「混合弁装置及びその混合弁装置を用いた給湯機」	57
「金型装置および成形品の製造方法」	58



表紙：セル生産ライン対応の自動組立装置

モノづくり企業としての継続的発展のためには、革新的な製造技術の継続的導入とともに、地道な現場における生産性の改善活動やモノづくりの根幹をなす基盤技術の伝承などの取組みが重要となる。

表紙の写真は小型ロボットを部品供給や組立工程などに使った安定性の高い組立装置である。製造技術者が製品の構造設計や生産設計に入り込んだ上で、製造現場でのムダを排除しつつ人と設備を共生させることによって、品質を作り込んだ生産性の高いラインが実現できる。本号では、これらのモノづくりを支える生産技術の製品適用事例や取組み事例について特集した。

巻/頭/言

“加工現象を極める”―生きた人材の育成と技術の伝承を目指して―

Master the Ultimate in Processing Phenomena
—Toward Developing Living Human Resources for Handling
Technology on to the Next Generation—

横井秀俊
Hidetoshi Yokoi



モノづくりや生産技術は、マネジメントも含めた広義の概念であるが、ここではその基盤をなす加工技術に特に注目をしてみよう。加工技術を担う者は、“加工現象を極める”ことの大切さを最初に理解すべきであろう。 casting, 塑性加工, 切削・研削加工, プラスチック成形加工等のコア製造技術から, 超精密加工, ナノテクに至るまで, 素材に操作を加えて所望の機能を付与する加工プロセスは, 機械的, 熱的, 化学的, 電気的な多様な物理現象 (= 加工現象) に支配されている。未経験や新規の加工技術に向き合うとき, 実験データの積み上げによって加工現象をまず理解しようとする。次に, データ蓄積から解析モデルを構築し, 計算機上で加工現象を再現し, CAEによる予測技術を確認しようとする。生産現場では良品条件の加工現象を安定して再現し良品の量産を行う。また, 加工現象の本質を理解することが, 不良現象の逆利用など, 新たな加工技術開発への道筋を導く。加工現象はこうしたサイクルのど真ん中に常に位置している。

ひとたび“加工現象を極める”ことに開眼すると, 個々の加工技術の枠組みを越えて, 加工の本質を捉えた柔軟な思考と応用ができるようになる。生きた生産技術者・研究者への脱皮である。また緻密な実験データや可視化画像に基づき, 加工現象から立ち上がった生きた知識体系が構築されると, 工学にとどまらず個別企業に秘匿される普遍的な財産となり, 人材育成の上でも, 技術伝承の上でも, 時空を超えた極めて有効な宝となろう。

こうした加工現象の本質を理解する人材がいればこそ, 創造性, 応用力を発揮して次の時代を創り出すことができる。高価な機械を並べたとして, 生産技術が勝手に発展するものではないのである。国も企業も, 活力の源は人, 生産技術も人である。ところが, 超円高から端を発した生産

拠点の海外移転と空洞化の波が, 日本におけるモノづくりの社会的地位の低下, 世界一のモノづくりを牽引(けんいん)してきた人材の世代交代と相まって, 技術伝承の空白地帯を生み出し, 実体験も乏しく分野も細分化されたマニュアル化人間を生み出しつつある。グローバル化推進の環境の中で, 加工現象を極める人材を育て続けることがいかに難しいか。今まさに, この点が問われている。

今年の10月, 伊勢神宮式年遷宮の遷御の儀が執り行われた。8年をかけて社殿から神宝, 装束にいたるまで全てを新しいものに造り替える。20年に一度, 職人や技術者が全く同じものを完璧に再現して造り上げることで, 書物だけで残せない生きた技術を親子の世代を越えて1,300年にわたり伝承し続けてきた。常に新しい技術を生み出すことが求められる企業活動とは, およそ使命が異なるかに見えるが, 人材育成と技術伝承の大事業とのサイクルを重ねあわせ, モノづくりの現場を通して, 生きた形で人を育て技術を伝承する, まさにサステナビリティを実現するための古代人の驚くべき知恵である。

生きた技術の伝承は, 生きた技術の現場があり, 絶えず変革する技術を担う生きた技術者がそこにいて, 次世代の若い技術者と新たな変革を共有できる実地体験を通してこそ, 初めて可能になる。生きた技術の現場がなくなったとき, 技術の伝承はおぼつかなくなる。その当たり前のことを, 伊勢神宮式年遷宮の知恵が我々に語りかけてくれる。日本の生産技術は, かつて多くの分野で世界をリードし, 今もリードし続けている。その誇りと自信を胸に秘め, グローバル化の波を乗り越え, 今後も永続的に世界をリードし続けることを目指してほしい。加工現象を極める人材, 優れた人材の育成と, 技術の伝承の永続的で独創的なシステムが構築されることを期待したい。



大西 寛*

成長戦略を支える生産技術

Production Engineering for Supporting Growth Strategy

Hiroshi Onishi

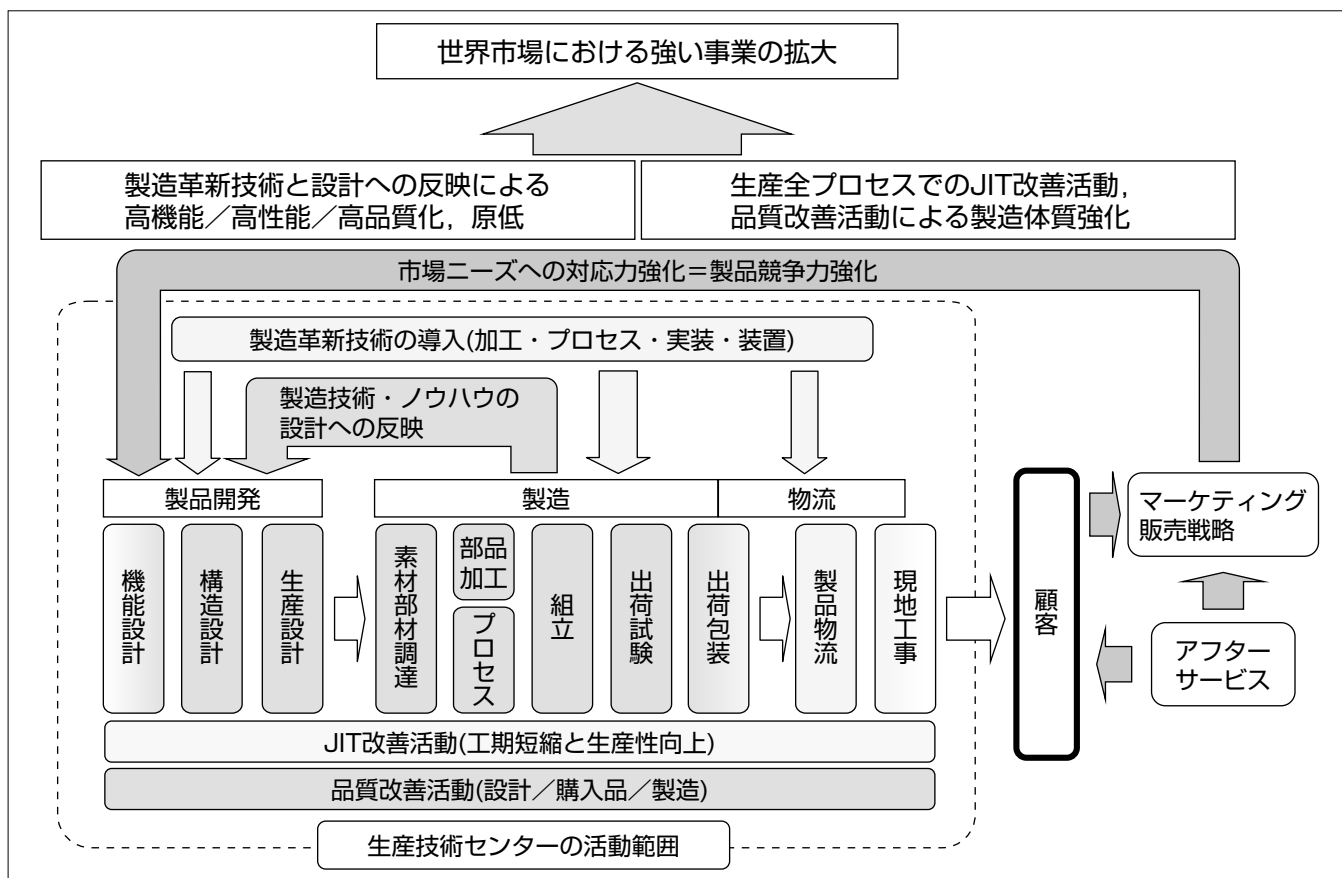
要 旨

国内の景気は漸(ようや)く低迷期を脱したと言える状況であるが、欧州の経済危機や世界各地で勃発する紛争など、経済環境は不安定な状態が継続している。また電機業界では、2011年のアナログテレビ放送停波後のAV(Audio Visual)機器需要低迷や新興国メーカーとの価格競争など、従来にはない厳しい環境が続いている。このような環境の中で、三菱電機は、世界市場における強い事業の拡大を成長戦略の基本とし、モノづくり企業としての発展を目指している。

このために果たすべきモノづくり企業の役割は、資材調達から出荷までの生産の全プロセスにおけるムダの削減や、構造設計・生産設計を駆使したコスト競争力の強化、消費

地生産・消費地調達と表されるグローバル生産の推進に加え、設計や部品選定から製造までの一貫した品質を意識した取組みである。また、これまでのモノづくりを支えてきた人材の世代交代に加え、生産拠点の海外展開が進む中で、技術の伝承が困難になってきている。すなわち、溶接技術や鋳造技術などの基盤技術の再構築と強化を狙った全社的な製造技術者の育成の取組みである。

本稿では、当社のモノづくりを牽引(けんいん)する中心組織である生産技術センターでの具体的な活動事例を述べるとともに、当社のモノづくり力強化の取組みについて述べる。



成長戦略を支える生産技術

成長戦略を実現するためには、①全ての生産プロセスでのムダを排除するJIT(Just In Time)改善活動、②消費地生産や生産拠点での部材調達を実現する品質改善活動、③製品構造や材料の最適化を狙った構造設計、作りやすさを追求する生産設計の推進が重要であり、製造技術者は成長戦略を推進する上で重要な役割を担う。

1. ま え が き

2008年後半から続いた景気の低迷は、今年に入り漸く回復傾向にあると言える状況になったが、欧州の経済危機や世界各地で発生する紛争など、不安定な経済環境であることに変わりがない。電機業界では、2011年のアナログテレビ放送停波後のAV機器需要低迷や、スマートフォン普及に伴う商品構成の変革、アジアメーカーとの価格競争等、従来にはない厳しい環境となっている。

このような環境の下、当社は経営戦略として“強い事業をより強く”を目指したVI(Victory)戦略と、“強い事業を核としたソリューション事業を強化”するAD(Advance)戦略、“世界市場における事業の拡大”を狙うグローバル戦略を成長戦略の基本とし、モノづくり企業としての発展を目指している。このために、魅力ある商品を他社に先んじて創出することのほか、モノづくりでの徹底したロスの削減やモノづくり力強化による生産コストの低減等、コスト競争力の強化と、客先需要にきめ細かく対応するための消費地生産や、生産拠点での部材調達等、生産活動のグローバル化の推進を進めている。

一方、海外生産の増加に伴い、技術者の育成などにも取り組むとともに、製品品質に関する市場要求の高まりに対応して、生産工程だけでなく、設計や部品選定から品質を意識した取組みを推進している。

当社製品が他社を凌駕(りょうが)して勝ち残るために、製品構造や材料の最適化を意識し、機能に対するコストを常に追求する構造設計や、作りやすさの観点から製品の機能にさかのぼって製品構造を見直す生産設計の活動を強化している。

本稿では、成長戦略を支えるモノづくり力の強化について、主に生産技術センターを中心とした三菱電機の具体的な取組み事例について述べる。

2. 生産技術センター及び関連組織の活動

当社の生産システム本部は、当社グループの生産技術を統括し、全社の生産に関わる施策の企画・推進をつかさどる4部(生産技術部、品質保証推進部、環境推進本部、ロジスティクス部)と、生産システム技術の開発・実用化及び事業部への展開を担う3センター(情報システム技術センター、設計システム技術センター、生産技術センター)で構成されている。全社的施策として、①JIT改善活動のモノづくり全プロセスへの展開、②全社生産技術戦略の推進、③品質・信頼性向上活動、④低炭素化社会の実現に向けた環境負荷低減活動等の取組みを行っている。

生産技術センターは、2014年で設立20周年を迎える組織であり、生産システム本部の中で、①JIT改善活動をベースにしたモノづくり体質強化の活動、②生産基盤技術の強

化と技術者の育成、③構造設計による商品力・競争力の強化、④革新的製造技術に基づく生産設計とそれを実現する設備開発を推進している。また、最近では特に、⑤製造工程での品質維持活動だけでなく、設計品質の向上や購入部材の品質確保まで含めた、設計・調達から製造までの品質作り込み活動や、⑥海外生産拠点の生産技術力向上にも注力している。

3. 生産技術力の底上げ

3.1 JIT改善活動の深化と拡大

当社では、生産体質強化を目的として、“5S(整理・整頓・清掃・清潔・躰(しつけ))3定(定位・定品・定量)”と“ムダ取り”を基本としたJIT改善活動を継続的に実施している。JIT改善活動は、工作部門だけでなく、上流となる設計や資材調達、営業から、梱包(こんぼう)、出荷、物流に至るまで、すべての工程に拡大し、徹底した効率化の追求と総合工期短縮に寄与している。

JIT改善活動の全社展開は、本社生産技術部と生産技術センターが中心となって、活動の浸透・活性化、活動推進者の育成、推進責任者の認定、自主研究会の設置等の活動支援を進めるとともに、製作所個別の改善支援を実施している。全製作所のほか、グループ企業、海外生産拠点にも展開し、棚残回転率の向上に寄与した。次に、JIT改善活動の具体例を述べる。

(1) 活動の深化

生産技術センター各技術部門の連携によって、生産管理技術と製造技術を融合させた活動を推進し、次の成果を得ている。①データマイニングを活用して工程を分析、複数工程の同期生産を実現し工程内仕掛の削減と工期短縮を実現し、②工程分析によって抽出された製造ネック要因に対応する製造技術を開発し、JIT思想を反映した生産設備の開発によってリードタイムの短縮や稼働率を向上させた。具体的には、バッチ式洗浄工程の1個流し化設備開発、半導体試験工程の設備間搬送の自動化開発、専用金型を用いないロール成形設備開発等である。

(2) 活動の拡大

協力工場まで活動を拡大、納期遵守率や生産性の改善を支援することによって、マザー工場の調達リードタイム短縮を推進している。また、協力会社など小規模な組織で効率的にJIT改善活動を推進する体制の確立を推進し、グループ会社・協力工場まで含めたJIT改善活動も推進し、現地据付工事の工期短縮や工場出荷後の品質向上、輸送費削減、倉庫費用削減等トータル物流改善にも注力している。

ほかに、国内生産拠点と連携して、海外生産拠点にもJIT改善活動の展開を推進している。現在16拠点で推進中であり、国内拠点と同じレベルを目指した人材育成、総合工期短縮に向けた5S3定・ムダ取りを強化・推進中である。

3.2 基盤技術力の強化

これまでのモノづくりを支えてきた人材の世代交代に加え、生産拠点の海外展開が進む中で、技術の伝承が困難になってきている。すなわち、溶接技術・鋳造技術・塗装技術・絶縁技術・機械加工技術・接着／接合技術・成形技術・めっき技術・装置設計技術等のモノづくりの根幹をなす基盤技術は、海外生産やアウトソーシングの進展に伴い、物理現象の理解による技術力の維持が重要である。生産技術センターでは、これらの技術の再構築と強化を狙い、人的ローテーションを通じた全社的な製造技術者の育成に取り組んでいる。併せて先進キーパーツの開発試作業で、社内外との現場力ベンチマーキングを実施し、技能・技術の育成を進めている。

4. 構造設計と生産設計

4.1 構造設計による製品力強化

金型や部品の加工外注の技術力の向上と業務の効率化を必要以上に推進することは、社内で実施すべき設計の外部委託を増加させ、外部への依存を高める結果となる。生産技術センターでは、設計と製造の乖離(かいり)を防止し、モノづくりの課題を早期に設計にフィードバックすることを狙い、設計者と製造技術者がともに製造現場に入り込み情報を共有化し、構造設計に反映する活動を推進している。次にその事例について述べる。

(1) LED照明器具

光学部材の光路解析や実装状態での熱解析、電源回路設計を組み合わせ、LED(Light Emitting Diode)照明器具(図1)の高品位化とコスト低減を推進した。具体的には、微細ブリズム構造を組み込んだ導光板開発によって高輝度化と面内均一性を実現した。また、LED配光を加味した反射板の設計によって光学系効率と照度分布を改善、成形性を考慮した樹脂レンズの設計によってレンズの高効率生産を実現した。さらに、大型照明器具で熱解析によるLEDの実装レイアウト設計と放熱構造設計による動作温度の安定化と光学特性の改善等を実施した。

(2) 海外向け大型冷蔵庫

省エネルギー性能を改善する海外向け大型冷蔵庫(図2)の高機能機種で、積層構造体の強度解析手法を用いることによって、断熱材の厚みを増加させるとともに板金部材を薄型軽量化した筐体(きょうたい)を実現した。

(3) 車載用パワーモジュール

生産性の改善とより高い信頼性の実現を狙い、車載用パワーモジュール(図3)の構造設計を行った。具体的には、モジュール内部の配線方法としてインナーリードをデバイス表面にはんだ付けする技術を開発するとともに、モールド樹脂で封止する構造を適用した。

4.2 生産設計と製造設備開発

製造設備の開発では、製品の開発・設計段階で作りやすさの観点での基本構造を検討する生産設計を推進している。次に事例を述べる。

(1) 中大型モータ

中大型モータに用いるステータコイル(図4)の製造で、熟練が必要であった結束・剥離工程に、多軸のモータ同期制御技術を適用、巻線と同時に押圧成形を実施する設備を



誘導灯



ダウンライト



スポットライト



ベース照明

図1. LED照明器具



図2. 海外向け大型冷蔵庫

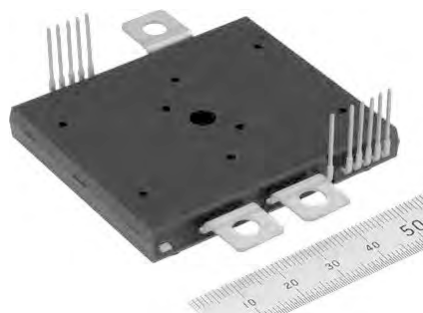


図3. 車載用パワーモジュール

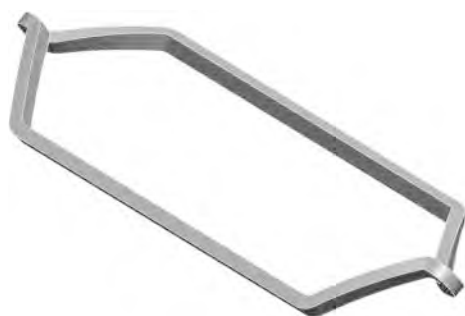


図4. ステータコイルの外観



図5. 電磁接触器の自動組立装置

開発し自動化を実現した。併せて製造ライン内工程間搬送の自動化も実現し、コイル製造工程の全自動化を達成した。また、電動・油圧サーボ機構を用いたワーク把持機構の開発によってワーク把持治具を廃止し、任意の設計形状に対応できる自動段取りを実現した。

(2) 電磁接触器

電磁接触器は機種数が多いため、小ロット・変量・多サイクル生産を狙ってセル式生産ライン対応の自動組立装置(図5)を開発した。従来ラインでの部品供給部でのチョコ停を回避するため、小型ロボットを活用した部品供給を実現し、部品供給部の安定動作を達成した。また、複数の対向する接触子を同時に組み付ける機構を開発し、機構部の簡素化とタクトタイムの短縮を実現した。

5. 品質作り込み力の強化

生産技術センターでは、品質は当社事業継続の生命線と捉え、設計・製造・調達部品における品質作り込み活動を強化している。従来、多くの製作所を対象に生産工程内での高品質化活動に取り組んできた。一方、不良に対するロバスト性は、製品設計に因るところも大きく、生産工程内で対策できないものが多い。また、製品の高機能化・高性能化を実現するために部品に要求される機能・性能も極めて高度で複雑になってきている。さらに、それら部品は中

国・東南アジア製にシフトしており、部品の品質を維持・向上させるための活動が特に重要となってきた。このような環境の変化を含めた取組み事例を次に述べる。

5.1 設計品質作り込み

開発・設計では、試作を通じて検証を行うが、特に機能の安定性を評価するためにHALT(Highly Accelerated Life Test)試験などを活用し、開発段階から製品の弱点を知ること、開発を手戻りさせない取組みを推進している。また、機能の安定性を確保するロバスト設計や多変量解析技術を駆使し、設計段階での品質の作り込みを推進している。また、品質キーマンを育成するため、本社品質保証推進部と連携して社内講座を開講し、人材育成にも注力している。

5.2 製造品質作り込み

従来の不良低減・直行率改善活動に加え、不良とは判定されていない製品の特性や製造ばらつきの検証から設計中心への誘導や、不良品の解析による製造プロセスの改善を推進し、半導体デバイスやモジュールへの適用を進めている。

5.3 購入品品質作り込み

製品の高度化に伴い部品の機能・性能も複雑になり、製品品質は部品の品質に因るところも大きくなっている。購入部品の認定、監査力の強化を推進し、購入部品品質の高度化に注力している。特に海外生産拠点が現地調達する部品については、課題の一つと捉え、注力している。

6. む す び

これからますます厳しくなる経済環境の中で、製造業としてグローバル競争に勝ち抜くためには、JIT改善活動を核としたモノづくり力の抜本的な強化が不可欠であり、加工・組立工程だけにとどまらず、全ての生産工程における生産技術力を強化し、商品競争力を持った製品を創出することが重要である。

さらに、コスト低減を徹底的に追求するため、開発した革新的な製造技術やノウハウを設計に生かし、キーパーツや応用製品の構造設計として具現化する取組みを拡大することが重要である。製造技術者が構造設計を生産技術の一部と捉え、設計者と連携し、生産設計に生かす取組みを着実かつ強力に推進し、確実に実績を上げていく。

また、グローバル化でも、徹底的に国内製造を改善強化することで、国内生産でも負けないモノづくりにこだわり、拠点工場としての機能を強化しつつ、それぞれの地域性やインフラに適した生産方式や製造技術、サプライヤーを調査研究し、グローバル海外生産の強化を図り、当社の成長戦略をモノづくりの立場から推進する。

冷却速度制御による精密射出成形法

今泉 賢* 佐久間利幸***
小川瑞樹*
北山二郎**

Precision Injection Molding by Cooling Rate Control

Masaru Imaizumi, Mizuki Ogawa, Jiro Kitayama, Toshiyuki Sakuma

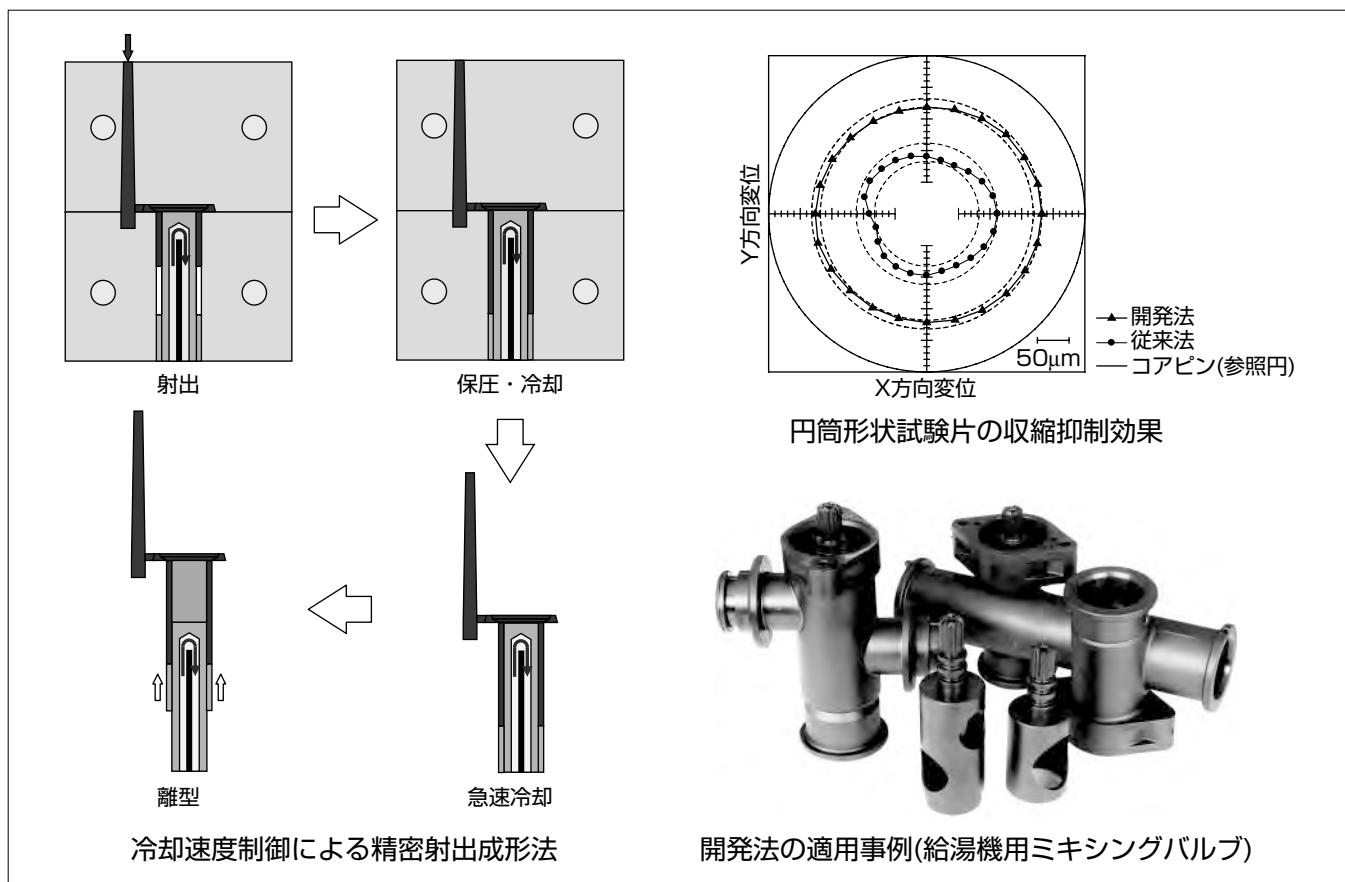
要 旨

近年、製品の軽量化や低コスト化が求められる中、機械的強度や耐熱性などの理由で、従来、金属を使用していた部品を、エンジニアリングプラスチックなどの高剛性、高耐熱性を持つ樹脂への代替が進められている。樹脂は複雑な三次元形状部品でも効率良く安価に成形できる反面、成形に伴う収縮が避けられないために高い寸法精度を実現するのが難しく、樹脂化の大きな支障になっていた。そこで三菱電機では樹脂の収縮を抑制することで精度の向上を図る“冷却速度制御による精密射出成形法”を開発した。

この成形法は、まず金型を樹脂に応じた適正な温度に加熱しておき、樹脂を射出した後、所定の時間この温度に保持させて樹脂の結晶化を促進させる。その後、精度が求められる特定の成形品面を金型に保持させた状態で急速冷却

し離型する。このように、開発した方法(以下“開発法”という。)は、冷却速度を積極的に制御することで、結晶成長と応力緩和を促進させ、同時に離型後の熱収縮を抑制して成形精度を向上させる手法である。

本稿では、開発法と従来法で成形した各種樹脂の収縮特性と結晶化度を調査し、収縮抑制効果が得られる条件を明らかにする。また、高精度化のメカニズムを解明するために、成形過程における応力の発生と緩和を考慮した粘弾性モデルによって成形品の収縮量を数値解析し、解析と実験の結果が良好に一致することを確認する。さらに、この成形法の適用事例としてPPS(ポリフェニレンサルファイド)製の給湯機用ミキシングバルブについて述べる。



金属から樹脂への代替を可能にした冷却速度制御による精密射出成形法とその適用事例

冷却速度制御による精密射出成形法の開発によって、機械加工法並みの成形精度を実現した。この成形法は、冷却速度を適正に制御することで、結晶化度と成形精度を両立させることができる手法である。また成形過程に発生する応力を積極的に緩和させることができるため、寸法安定性に優れた部品を成形することが可能であり、流体制御弁や機構部品などの当社製品で広く適用している。

1. ま え が き

近年、製品の軽量化や低コスト化が求められる中、機械的強度や耐熱性などの理由で、金属を使用していた部品に対してエンジニアリングプラスチックなどの高剛性、高耐熱性を持つ樹脂への代替が進められている。部品の精度は製品の機能や品質を左右する重要な要素となるため、これまで金属部品の多くは機械加工法で仕上げられ、精度が保証されてきた。一方、樹脂部品の多くは射出成形法によって成形される。複雑な三次元形状でも効率良く安価に成形できる反面、樹脂の収縮が伴うために機械加工法並みの精度を実現するのは難しく、結果的に成形後の仕上げ加工が必要となり樹脂化の大きな支障になっていた。

そこで、樹脂の収縮現象に着目し、収縮原因を排除することで精度の向上を図る“冷却速度制御による精密射出成形法”を開発した。これによって、射出成形品であっても仕上げ加工することなく金属部品と同等の寸法精度を可能にした。

本稿では、開発法で成形した各種樹脂の収縮特性と高精度化メカニズムについて述べる。また、この成形法の適用事例として、給湯機の流体制御弁について述べる。

2. 冷却速度制御による精密射出成形法の開発

金型を常温に設定し、成形品をできる限り冷却すれば、離型後の熱収縮を最小限に抑制できる。しかし結晶性樹脂を急速に冷却すると結晶化が十分に進行しないため、本来の特性が得られず、また不安定な状態で残留した非晶部分がその後再結晶化することで精度の悪化を招く。そこで、“冷却速度制御による精密射出成形法”を開発した⁽¹⁾。

この成形法の特徴は、精度を求める特定の成形品面だけを金型で拘束しながら局所的に急速冷却するところにある。図1に工程を示す。ここで例示するのは後述する実験で用いた円筒形状試験片であり、試験片の内周面に高い精度を求めることを前提としている。まず、温調機を使って所定温度に加熱した金型に樹脂を射出する。この時の金型温度は樹脂に応じて適正な温度(初期金型温度： T_M)に設定する。金型を T_M に保持させたまま次の保圧・冷却工程に移行し、この間に樹脂の結晶化を促進させる。そして所定の

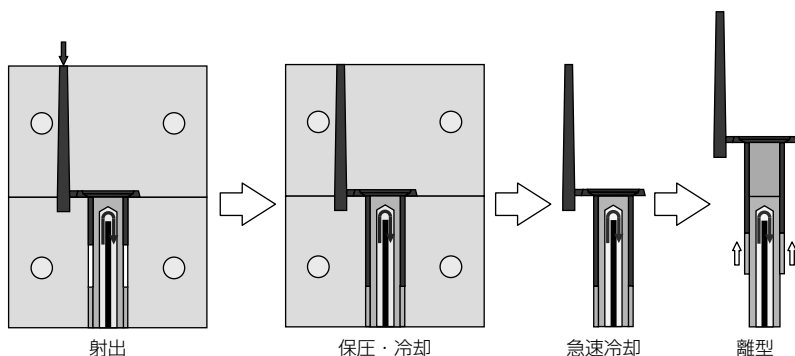


図1. 冷却速度制御による精密射出成形法の工程

時間(本稿の実験では冷却工程を開始してから10秒間)経過した後、成形品を金型に保持させた状態で円筒内周面を形成するコアピンを10℃の冷却水で急速冷却する。これによって成形品を局所的に冷却し、離型する。これらの一連の工程によって、金型で保持する部位の離型後の収縮を抑制して精度を向上させる手法である。

3. 各種樹脂の収縮特性と高精度化メカニズム

3.1 開発法の収縮抑制効果

図2にPPSで成形した単純円筒形状試験片(内径20mm, 外径26mm, 高さ60mm)の収縮抑制効果を示す。開発法と従来法で成形した試験片について、深さ40mmの円筒内周面を三次元測定した結果である。なお T_M は140℃, 冷却時間は30秒とした。この図は金型のコアピンからの収縮量を図中のスケールに拡大して表示している。開発法の方は明らかに収縮が抑制され、平均内径で算出した収縮率は従来法の1.53%から0.75%に半減した。また、真円度を比較すると、従来法は円の形が歪(ひず)んでおり、29.0 μ mとなっている。一方開発法は収縮が抑えられているため周方向の収縮ばらつきが小さく、真円度は13.8 μ mに向上している。このように開発法は、収縮の抑制と同時に形状精度(ここでは真円度)の向上に有効である。

3.2 円筒形状試験片の収縮特性

開発法で T_M は冷却速度を決定する重要なパラメータとなり、特に結晶性樹脂の場合は結晶成長と収縮特性に大きな影響を与えると考えられるため、この円筒形状試験片を用いて内径の平均収縮率に及ぼす T_M の影響を調査した。ここでは結晶性樹脂の中から代表的なPPS, PBT(ポリブチレンテレフタレート), POM(ポリアセタール)を選び、開発法と従来法の収縮率を比較した。なお冷却時間は60秒とした。まず図3(a)にPPSの結果を示す。開発法は T_M によらず一定の収縮率を示すが、従来法は T_M が高いほど離型後の収縮が大きくなるため、収縮率が高くなる傾向を示す。この差が開発法の収縮抑制効果である。しかし、 T_M が90℃を下回ると開発法と従来法の収縮率差がなくなった。この境となる温度はPPSのガラス転移温度($T_g=92^\circ\text{C}$)に一致し、 T_g が収縮特性に影響を及ぼしていると考えられる。

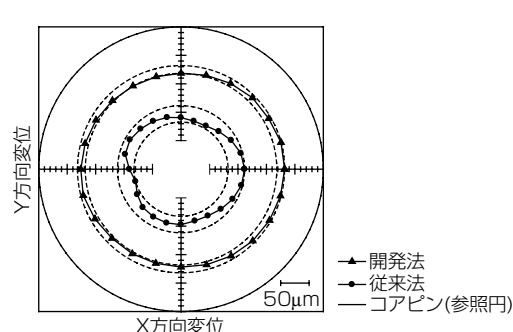


図2. PPS円筒形状試験片における円筒内周面の三次元測定結果

また、図3(b)にPBTの結果を示す。PPSと同じようにPBTの $T_g (=22^\circ\text{C})$ を境にして収縮率に差が現れた。しかし、 T_g が常温未満のPOM($T_g = -50^\circ\text{C}$)については、図3(c)に示すように収縮特性の境となる温度は必ずしも T_g に一致せず、収縮率の差は常温付近から T_M の上昇に伴って徐々に現れた。

この収縮特性は他の樹脂でも確認されている⁽²⁾。したがって、開発法によって収縮抑制効果が得られる条件は、① T_g が常温以上の樹脂は“ T_M が T_g 以上”であり、② T_g が常温未満の樹脂は“ T_M が常温以上”であることが明らかになった。

3.3 結晶化度に及ぼす初期金型温度の影響

2章で述べたように、結晶性樹脂を急速に冷却すると結晶化の進展が阻害される。したがって、成形途中で急速冷却する開発法は、結晶化度に対して悪影響を及ぼすことが懸念されるため、PPSの円筒形状試験片を用いて肉厚方向の相対結晶化度分布を確認した。この結果を図4に示す。 T_M を 140°C 、 120°C 、 90°C 、 40°C に設定し、開発法と従来法を比較すると、 T_M が同じ条件であれば両者に相対結晶化度の差はほとんど確認されなかった。しかし、 T_M が

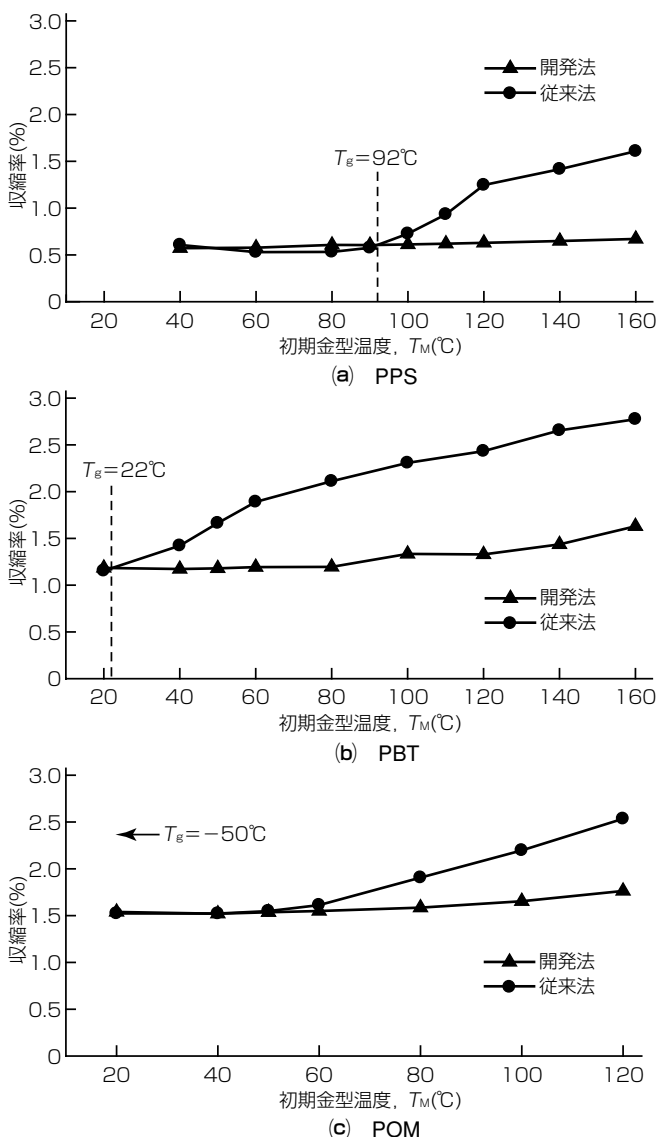


図3. 各種樹脂の収縮特性

90°C 以下になると、どちらの方法も金型に近い表層部では十分に結晶化されていないことが分かった。したがって、結晶化を十分に促進させるには T_M を 120°C 以上に設定する必要があるが、3.2節で示したように従来法では収縮が大きくなるため、成形精度が悪化する。しかし、開発法を適用することで成形精度と結晶化度を両立させることができる。

3.4 粘弾性モデルに基づく収縮メカニズムの解明

この実験で明らかになった特徴的な収縮特性は、樹脂の粘弾性を考慮した単純Maxwellモデルを用いて説明できる。これは樹脂の収縮を表現する要素に、弾性率 E のばねと粘度 η のダッシュポットを直列に接続したモデルである。

まず、図5(a)に離型時の樹脂温度(T_e)が樹脂の T_g より高い従来成形法の場合の収縮挙動を示す。射出後、冷却の進行に伴って樹脂要素が収縮すると、これに追従してばねが伸び、モデルに応力が作用する。そしてこの応力の一部はダッシュポットで緩和される。このように樹脂要素の収縮

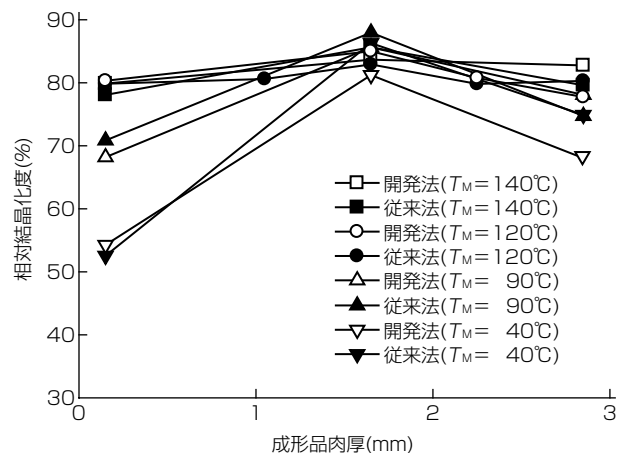


図4. PPS円筒形状試験片における肉厚方向の相対結晶化度分布

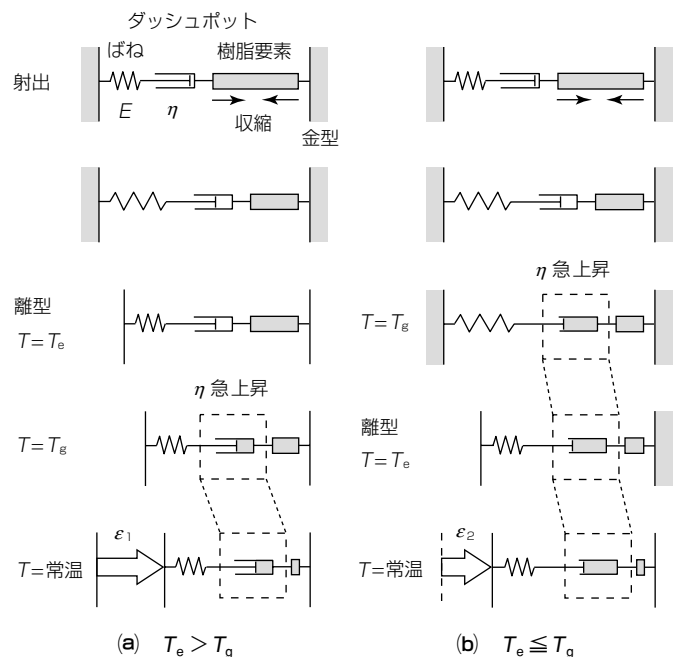


図5. 粘弾性モデルによる収縮メカニズム

に伴って応力の発生と緩和が同時に進行する。そして離型によって金型の拘束が解除されると、引き伸ばされていたばねは自然長まで復元する。その後は常温まで冷却される過程で、樹脂要素だけが線膨張係数に依存して熱収縮する。したがって、両者の和が成形品の収縮量 ε_1 となる。

次に、図5(b)に T_c が T_g 以下の場合を示す。これは開発法又は T_M が T_g 以下の従来法の場合に該当する。図5(a)と同様に樹脂が冷却されながら、応力の発生と緩和が同時に進行する。しかし、 T_g まで冷却されるとダッシュポットの粘度が急上昇する。そのため、以後は応力緩和しにくくなり、樹脂要素の収縮はばねの伸びに置き換わる。そして離型に伴ってばねが復元し、さらに、常温まで冷却される過程で樹脂要素が熱収縮する。この和が成形品の収縮量 ε_2 となる。つまり T_g 以下で発生する樹脂要素の収縮量は、一時的にばねに保存されるものの離型時にばねが復元するために、 ε_2 は T_c に依存せず一定となる。また、図5(a)の ε_1 と比較すると、熱応力がダッシュポットでより緩和され、さらに、離型後の熱収縮量が抑制される分だけ ε_2 は小さくなる。

この収縮メカニズムを実証するために、粘弾性モデルに基づいて円筒形状試験片の収縮量を数値解析し、実験結果と比較した。なお、モデルを構成するばねの弾性率 E とダッシュポットの粘度 η は、動的粘弾性測定で得られた値を用いた。図6にPPSの結果を示す。数値解析と実験の結果はほぼ一致している。また、PBTやPOM等でも良好に再現されていることも確認した⁽³⁾。このように開発法は、冷却速度を積極的に制御することで応力緩和を促進させて、離型後の熱収縮を抑制する手法であることを明らかにした。

4. 開発法の適用事例

開発法の適用事例として、ここでは給湯機用の流体制御弁について述べる。図7はミキシングバルブと呼ばれる部品であり、給湯機で沸き上げた湯と水をリモコンの設定温度に応じて混合するためのものである。従来のバルブは青銅製で、精度の高い複数の部品で構成されていた。しかし、一般的に給湯機のような水回りの部品に金属を用いると、腐食の問題が避けられない。そこで、樹脂を射出成形できるように構造を簡素化してPPS製のバルブを開発した。PPSは先に述べたとおり T_g が 92°C の結晶性樹脂なので、熱水中でも耐熱性や耐腐食性がある樹脂である。このバルブは、湯と水の導入口を設けたボディに円筒形状の弁体を挿入し、モータで回転させる構造である。弁体には穴が設けられ、湯と水の開口比を回転位置によって制御することで、設定温度の湯を供給できる仕組みになっている。しかし、高い温度制御性を実現するためには、ボディと弁体の円筒部分に数十 μm レベルの真円度を必要とする。構造を簡素化したとは言え部品は非対称形状であるため、従来の成形法では数百 μm 程度が限界であったが、開発法を適用すること

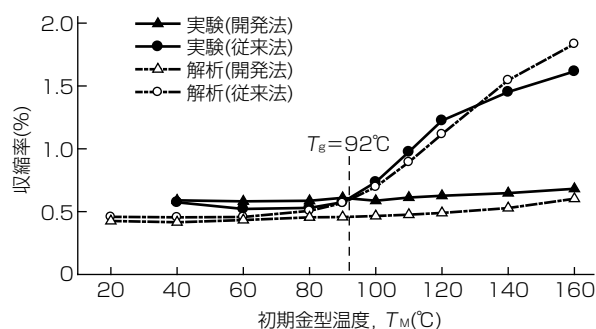


図6. 粘弾性モデルに基づくPPS円筒形状試験片の収縮解析結果と実験結果の比較



図7. 開発法の適用事例

でこれをクリアした。さらに、成形過程で発生する応力を積極的に緩和させることができるため、バルブに熱水を通水させても経時変形することなく、寸法安定性に優れている。

5. む す び

冷却速度制御による精密射出成形法とその適用事例について円筒形状部品を中心に述べたが、これに限定されるものではない。例えばコの字型成形品の側壁の倒れや箱型成形品の内反りなどに対しても効果があることは示されており、開発法は既に様々な部品に適用されている。また、この開発で明らかにした金型内の収縮メカニズムによって、流動解析シミュレーションにおける反り変形解析の高精度化が期待できる。今後も樹脂の収縮変形現象を解明し、更なる高精度成形技術の開発に取り組んでいく。

参考文献

- (1) 今泉 賢，ほか：冷却速度制御による精密射出成形法の開発(第1報) PPS円筒形状部品における収縮特性の制御，成形加工，**22**，No.10，590～597 (2010)
- (2) 今泉 賢，ほか：冷却速度制御による精密射出成形法の開発(第2報) 各種樹脂で成形した円筒形状部品の収縮特性，成形加工，**25**，No.1，37～45 (2013)
- (3) 今泉 賢，ほか：冷却速度制御による精密射出成形法の開発(第3報) 粘弾性モデルによる円筒形状部品の収縮メカニズムの解明，成形加工，**25**，No.10，493～503 (2013)

レーザ・アークハイブリッド溶接法

山田景太*
 桧山昌之**
 西原順二***

Laser/Arc Hybrid Welding

Keita Yamada, Masayuki Hiyama, Junji Nishihara

要 旨

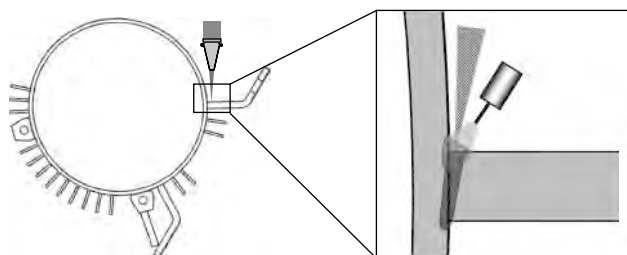
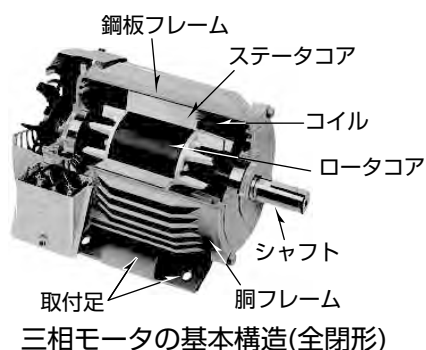
近年、レーザ装置の高出力化、小型化、ビーム高品質化に伴い、レーザ加工は切断や溶接など、適用範囲を多岐に広げている。レーザ溶接は深溶け込み・低歪(ひず)みなどの特長があるが、溶け込み幅が狭いため狙い位置精度が厳しいという課題がある。この課題に対し、レーザ溶接とアーク溶接とを組み合わせ溶け込み幅を拡大させて狙い位置精度を拡大できるレーザ・アークハイブリッド溶接技術の研究が盛んに行われ、自動車、造船、橋梁(きょうりょう)分野へ実用化されつつある。

本稿では、三相モータ用鋼板フレームのレーザ溶接工程で、胴フレームと取付足のT字継ぎ手に対してレーザ・ア

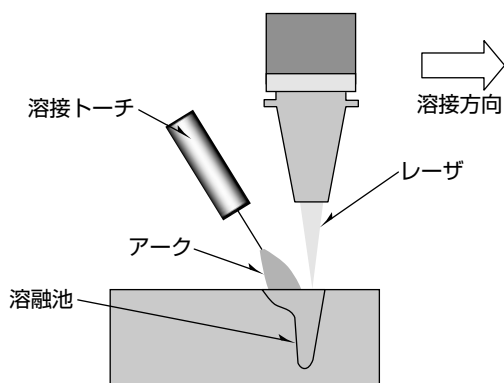
ークハイブリッド溶接の適用を検討する。その結果、従来の10kWCO₂レーザでの溶接と同等の溶接を6kWCO₂レーザとデジタルインバータ制御MAG溶接^(注1)を組み合わせたレーザ・アークハイブリッド溶接で実現した。

溶接部の溶け込み不足については、高速ビデオカメラの現象観察によって、レーザエネルギーを吸収するレーザ誘起プラズマがレーザ溶接単独時よりも大きく発生し溶け込みが浅くなることを解明した。対策としてアーク及びレーザ溶接用のシールドガス雰囲気を制御することで貫通完全溶接を実現した。

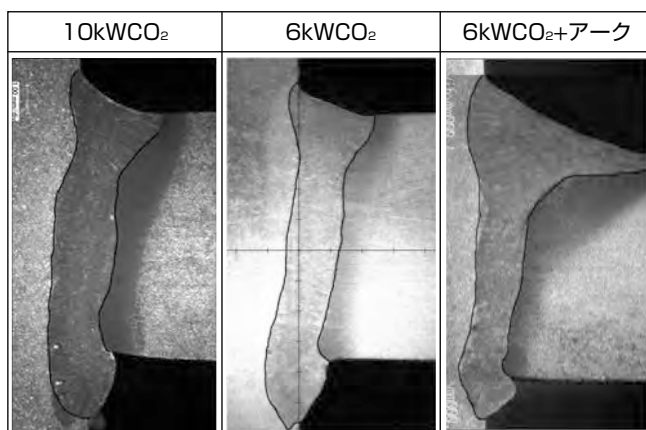
(注1) Metal Active Gas溶接(活性ガスを用いた溶接方法)



胴フレームと取付足の溶接



レーザ・アークハイブリッド溶接の構成



各種溶接法での溶け込み断面写真

レーザ・アークハイブリッド溶接の特長

レーザ後方にアーク電極を配置してレーザで形成される溶融池内にアークを発生させることで、レーザ溶接単独の溶け込み深さ、アーク溶接単独よりも大きな溶け込み幅を得ることができる。

1. ま え が き

レーザ溶接は、低入熱・高精度・高速溶接や深溶け込み溶接という優れた特長があり、各種産業で実用化されているが、レーザが細く絞られているため開先形状に高い寸法精度が要求される。一方、アーク溶接はもっとも広範囲に利用されており、技術的蓄積、信頼性が高い溶接方法であるものの、レーザ溶接と比較して入熱が高いことから溶接変形が大きく、高速溶接時には不整ビードが形成されやすい問題点がある⁽¹⁾。このような両者の欠点を補うため、各熱源を組み合わせることによって、より高効率・高品質な溶接を目指した技術がハイブリッド溶接技術であり、近年、研究開発が行われ、鉄鋼や船舶、重工業の分野で板厚6 mm以上の中厚板の溶接に適用されつつある⁽²⁾。

本稿では、レーザ・アークハイブリッド溶接(以下“ハイブリッド溶接”という。)の構成、溶け込み特性等の特長とともに、三相モータ用鋼板フレームの溶接工程への適用事例について述べる。

2. 三相モータ用鋼板フレームの構造と溶接方法

図1に三相モータの基本構造と鋼板フレームの外観を示す。胴の縦継ぎ、取付足をフィラーワイヤ供給ありのレーザ溶接、放熱フィン、吊りボルト座、Br座等はアーク溶接で接合しており、溶接姿勢は品質面から下向き溶接とするため図2に示すように鋼板フレームを回転させながら、奥行き方向にレーザを走査し溶接している。

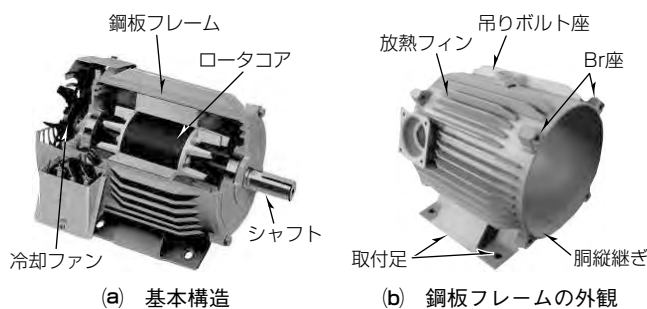


図1. 三相モータ基本構造(全閉形)

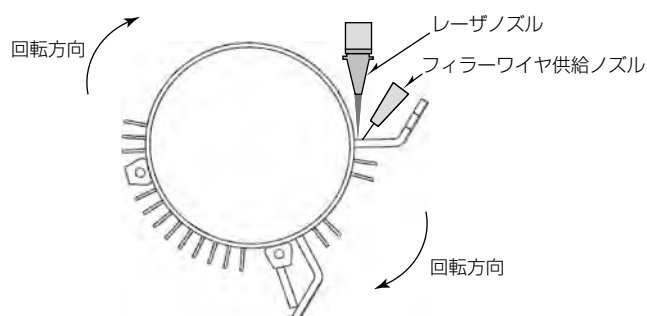


図2. 取付足レーザ溶接時の模式図

図3に胴フレームと取付足(板厚9 mm)のレーザ出力による溶接溶け込み写真を示す。溶接速度0.8m/minで設定出力8 kW(10kWCO₂発振器)を5.5kW(6 kWCO₂発振器)に低下することで溶け込み幅が狭くなり、胴フレームと取付足の未接合部が生じる。出力5.5kWで同等の溶け込みを得るためには溶接速度を0.5m/minまで低下させる必要があった。課題は図4に示すように、5.5kWのパワーでは対象板厚の貫通溶接は容易であるが、溶け込み幅が小さい点にある(図4(a))。又は、レーザ溶接の狙いを胴フレーム側に寄せることで溶け込みを確保できるが、今度は貫通溶接が困難になる(図4(b))。対策として、図5に示すように、アーク溶接を組み合わせ、貫通溶接をレーザに、胴フレームと取付足の溶け込み確保をアークに分担させるハイブリッド溶接を適用することで溶接速度を低下させずに溶接が可能となる。

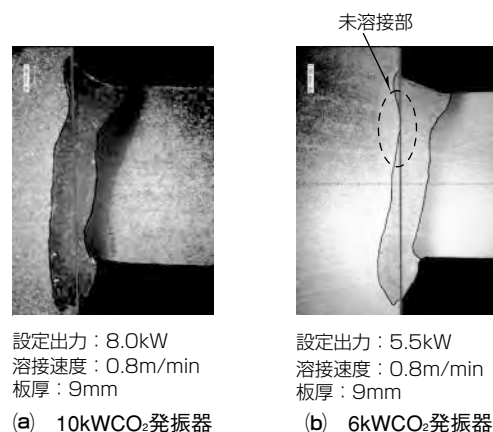


図3. レーザ出力による溶け込み比較

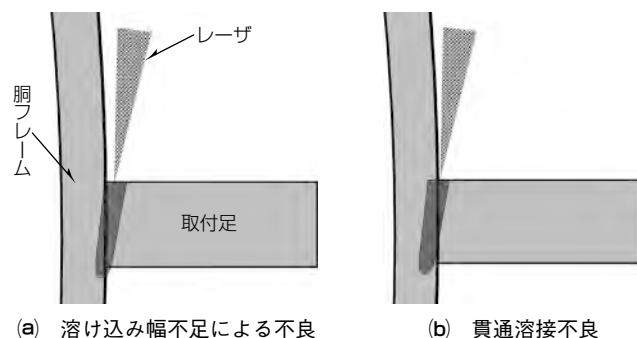


図4. レーザ溶接単独における溶け込み

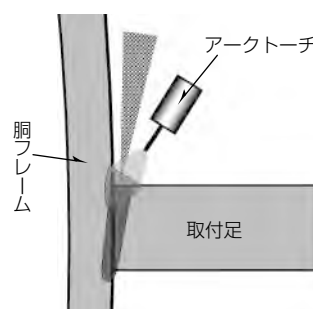


図5. ハイブリッド溶接の溶け込み

3. レーザ・アークハイブリッド溶接法

3.1 レーザ・アークハイブリッド溶接の構成

図6にハイブリッド溶接の構成を示す。レーザは三菱電機製の6kWCO₂発振器(ML60CF-R)から伝送され、レンズによって母材表面に集光させる。アーク電源は㈱ダイヘン製のデジタルインバータ制御式パルスMAG溶接機(DP350)を使用し、溶接ワイヤの狙い位置はレーザ照射点の後方1～4mm程度とした。ハイブリッド溶接ではレーザ溶接で形成される溶融池にアークを発生させることで、

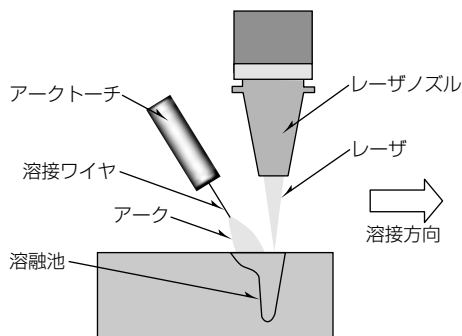


図6. レーザ・アークハイブリッド溶接の構成

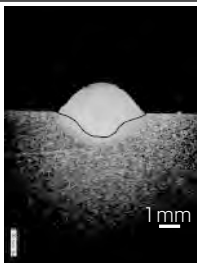
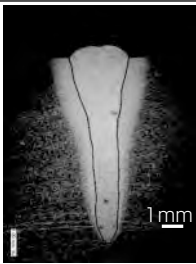
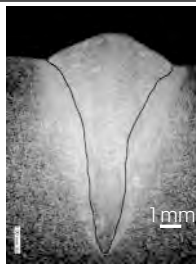
アーク溶接	レーザ溶接	ハイブリッド溶接
		
溶接速度：0.7m/min 溶接電流：150A 溶接電圧：20V 溶接ワイヤ：φ1.2mm	溶接速度：0.7m/min 設定出力：5.5kW Heシールド：25L/min	溶接速度：0.7m/min 溶接電流：150A 溶接電圧：20V 溶接ワイヤ：φ1.2mm 設定出力：5.5kW Heシールド：25L/min

図7. 各種溶接法の溶け込み写真

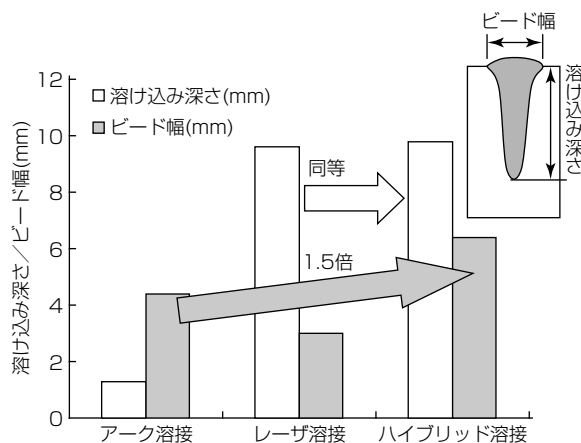


図8. 各種溶接法の溶け込み深さとビード幅の比較

レーザ溶接単独よりも溶け込み幅を増加させ、高速度化が可能となる。

3.2 レーザ・アークハイブリッド溶接の溶け込み特性

図7に各種溶接法における溶け込み写真を示す。アーク溶接は幅広で浅く、レーザ溶接は幅狭で深く、ハイブリッド溶接はアークとレーザの足し合わせ以上に幅広で深い溶け込みとなった。図8に各種溶接法における溶け込み深さ及びビード幅の測定結果を示す。ハイブリッド溶接のビード幅がアーク溶接と比べ1.5倍、溶け込み深さはレーザ溶接と同等を確保することができた。

4. 三相モータ用鋼板フレームへの適用

4.1 溶接狙い位置裕度の拡大による溶接高速化

取付足を溶接する際の溶接トーチの構成及びビーム狙い位置を図9に示す。ビーム狙い位置が大きすぎると胴フレームと取付足に未溶着部が生じてしまうため、十分な溶け込み幅が確保できる条件が望まれる。

図10に6kWCO₂発振器を用いたレーザ溶接単独とハイブリッド溶接のビーム狙い位置裕度を示す。ハッチング内部は胴フレームと取付足に十分な溶け込みが得られている

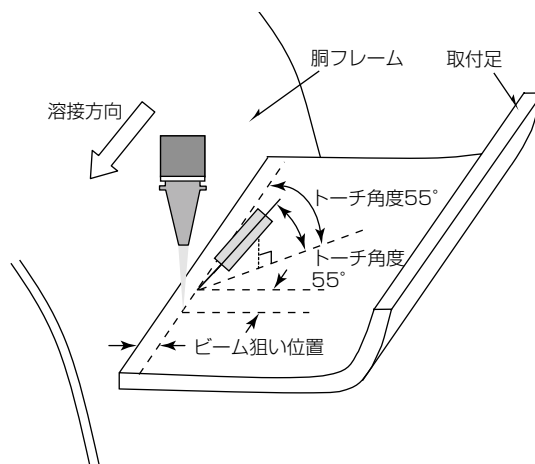


図9. 溶接トーチの構成とビーム狙い位置

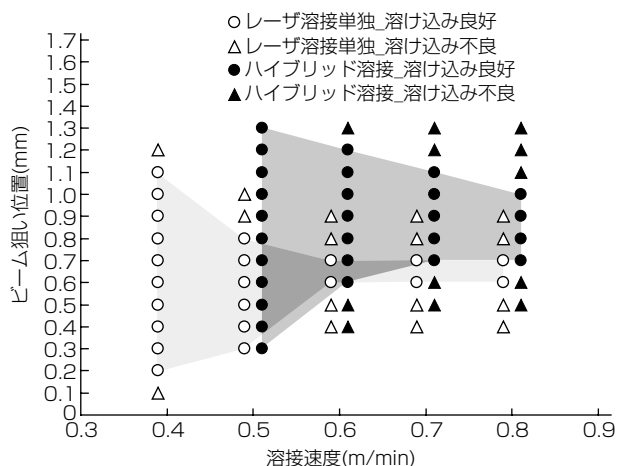


図10. 取付足(板厚9mm)におけるビーム狙い位置裕度の比較

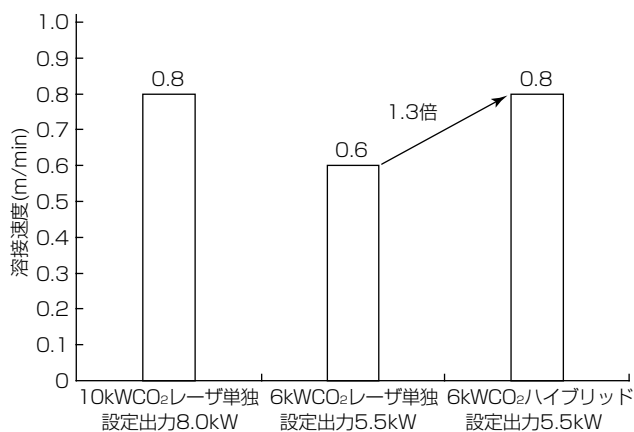


図11. 取付足(板厚 8 mm)での溶接速度の比較

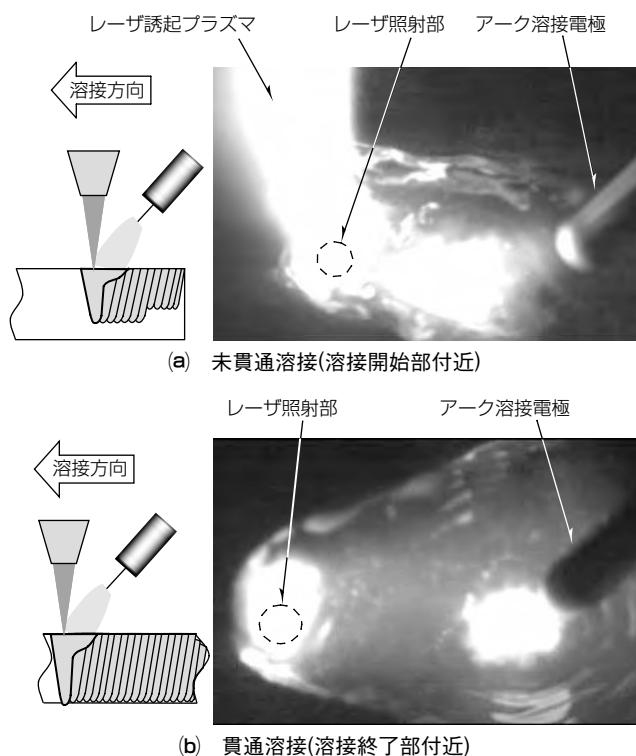


図12. ハイブリッド溶接時の溶け込み写真と高速度カメラ画像

ことを示す。溶接速度0.6m/minにおけるビーム狙い裕度は、レーザ溶接単独で0.1mmであるがハイブリッド溶接では、アーク溶接による溶け込み幅増大でおよそ6倍の0.6mmを確保することができる。図11に取付足(板厚 8 mm)での溶接速度を示す。一方、ハイブリッド溶接を適用させることで、6kWCO₂レーザ溶接単独よりも1.3倍の0.8m/minまで高速化でき10kWCO₂レーザと同等の速度を確保できた。

4.2 レーザ・アークハイブリッド溶接適用の課題

ハイブリッド溶接では溶接開始部で貫通溶接ができないという課題があった。図12にハイブリッド溶接時の溶け込み写真及び高速度カメラ画像を示す。未貫通溶接時(同図(a))にはレーザ照射部で高輝度の発光体が観察できた。これは図13に示すように高温の金属蒸気が電離し大きく成

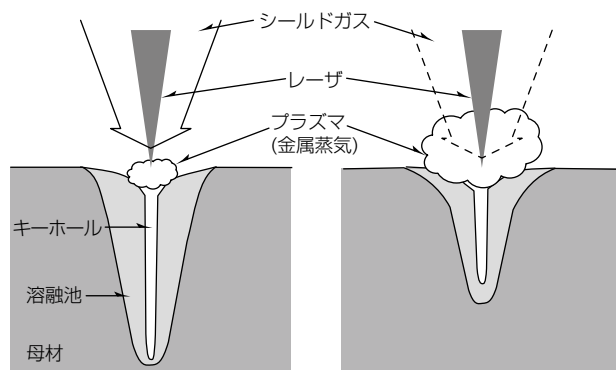


図13. プラズマ発生に溶け込み深さの違い

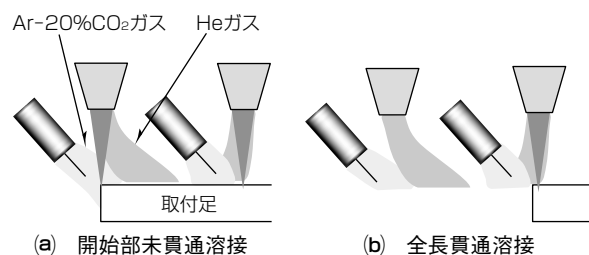


図14. 溶接開始部のHeシールド領域の比較

長したレーザ誘起プラズマであり、レーザエネルギーを吸収したものである。したがって、溶け込み深さはこのプラズマの影響によって浅くなる。プラズマを抑制するためシールドガスにHeを使用しているが、ハイブリッド溶接におけるアーク側のシールドガス(Ar-20%CO₂)の吹き付けによってHeのシールド性が弱まったと考える。溶接開始部以外で貫通溶接が可能であるのは図14(a)に示すようにレーザ加工機ヘッドが移動していく中でレーザ照射部のHeシールド性が高まったことにある。これを踏まえ加工機ヘッド稼働位置を手前にずらし溶接開始位置でHeシールド性を高めることで全長貫通溶接を実現した(図14(b))。

5. む す び

ハイブリッド溶接の三相モータ用銅板フレームへの適用を目指し、溶け込み特性やレーザ狙い位置裕度拡大に伴う溶接高速化について述べた。

ハイブリッド溶接はそれぞれの溶接法を単に組み合わせただけの効果を得ることができ、薄板ではギャップ裕度の向上、中厚板では低歪み、溶接高速化を実現できる溶接法とし他の製品にも広く適用できるものとする。

参 考 文 献

- (1) 川口 勲：レーザ・アークハイブリッド溶接技術の現状と今後の課題，IIC REVIEW No.42, 49～54 (2009)
- (2) 加野潤二，ほか：溶接・接合をめぐる最近の動向，溶接学会誌，81, No.5, 66～67 (2012)

太陽電池セル・モジュールの 量産品質を支える製造技術

野々垣光裕* 藪垣良美**
草壁嘉彦** 告野 元**
瀧本晋輔**

Manufacturing Technologies for Stable Mass Production Quality of Crystalline Silicon Photovoltaic Cells and Modules

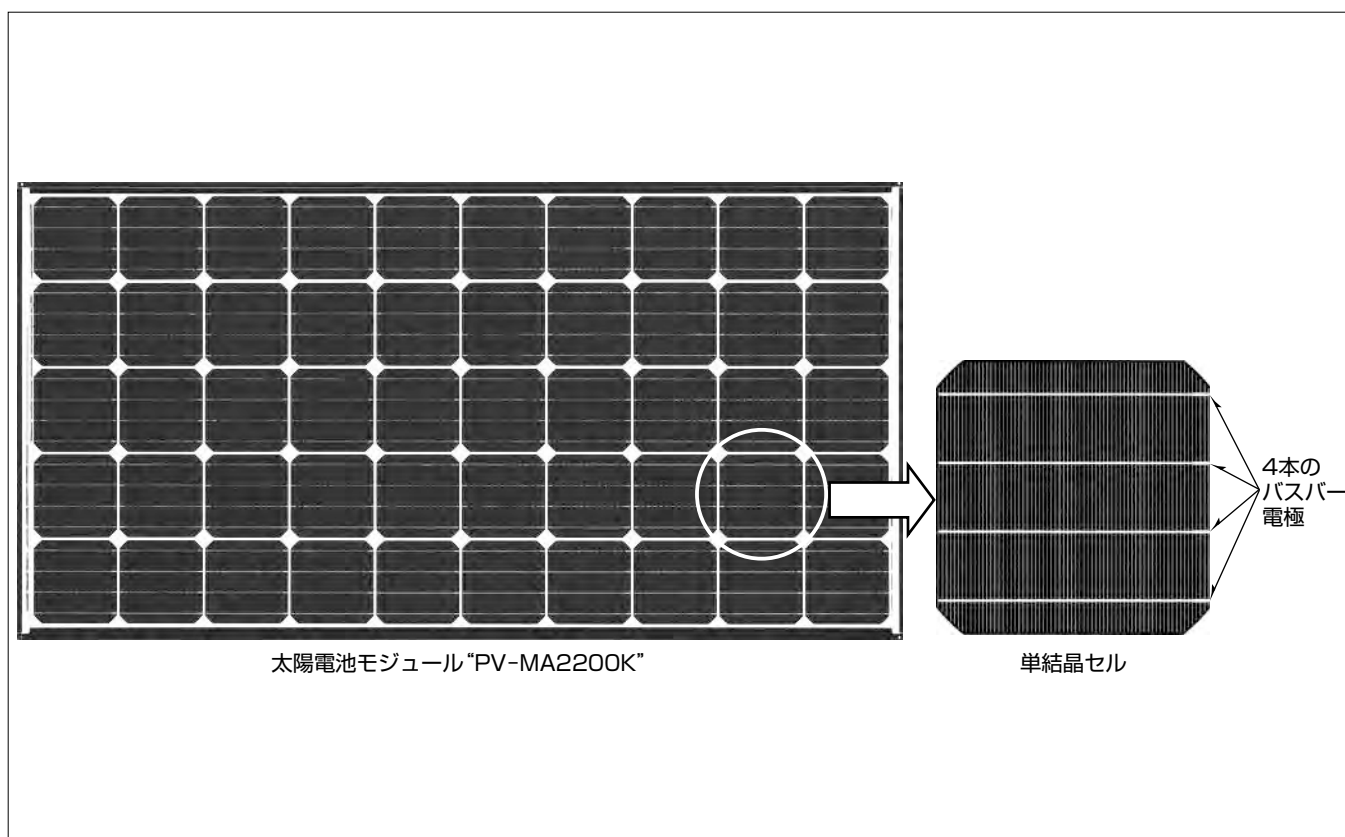
Mitsuhiro Nonogaki, Yoshihiko Kusakabe, Shinsuke Takimoto, Yoshimi Yabugaki, Hajime Tsugeno

要 旨

地球温暖化に対する問題意識が高まる中、太陽光発電の生産規模は、FIT (Feed-in Tariff) 制度導入後の1990年代後半から、ドイツを始めとする欧州の需要増によって順調に拡大してきた。しかしながら、2008年のリーマンショックや電力の買取制度変更に伴い、欧州市場での需要が冷え込み、世界的に太陽電池モジュールの生産量が過剰の状態となり、価格下落が急速に進んでいる。一方で、国内では2012年7月から電力の固定価格買取制度がスタートし、直近の太陽光発電の市場は急速に拡大している。激しく需給が浮き沈みしつつ市場が変動する中、今後も更なる高出力

化と長期信頼性の向上が求められると同時に、価格下落は続くものと推定される。このような市場に対し、三菱電機では、環境に配慮した鉛フリーはんだを用い、冗長性の高い4本のバスバー電極で構成する高信頼性のモジュールを開発し、市場に投入している⁽¹⁾⁽²⁾。

本稿では、鉛フリーを踏襲しつつ、高出力で品質の高いモジュールを生産性良く得るための製造技術として、セルについてはテクスチャ形成技術、モジュールについては鉛フリー低融点はんだ接合技術などのセル間を接続するためのはんだ接合技術の最近の開発状況について述べる。



4本バスバー電極の単結晶セルを用いた鉛フリーの高出力太陽電池モジュール

環境に配慮した高効率で高品質のセル・モジュールの製造技術の採用によって、モジュールの出力保証20年の安定した高出力を約束する住宅用単結晶10×5タイプで最大出力220Wの太陽電池モジュール。

1. ま え が き

地球温暖化に対する問題意識が高まる中、太陽光発電の市場は、需給の大きな変動を伴いつつ拡大している。今後も、出力向上と、長期信頼性の向上が最重要課題であることは変わりはないが、普及とともに、価格下落も更に続くものと推定される。このような状況下、高出力で信頼性の高いモジュールを生産性良く製造する技術が重要となる。当社では単結晶シリコンウェーハを購入し、太陽電池セルからモジュールまで一貫して製造している。

本稿では、セル、モジュールとも重要な製造工程が多々ある中、セルについてはテクスチャ形成技術、モジュールについてはセル間を接続するためのはんだ接合技術の最近の開発状況について述べる。

2. テクスチャ形成安定化技術

太陽電池セルの断面構造を図1に示す。セル表面には、反射を抑制し、入射光をできるだけ取り込むためにテクスチャ(ピラミッド構造)を形成する。当社の単結晶太陽電池セルの製造工程を図2に示す。購入したp型シリコンウェーハに対し、最初にテクスチャ形成を行った後、セル構造を形成する。そのため、下地となるテクスチャ形状の良し悪しが、テクスチャ形成以降の後工程のでき映え(pn接合、反射防止膜、電極)に大きな影響を及ぼす。このことから、太陽電池製造上、テクスチャ形成技術は重要である。

入射光を取り込むという本来の機能に加え、下地として重要な役割を果たすテクスチャは、シリコンの面方位によるエッチング速度の違いを制御するための添加剤を含むア

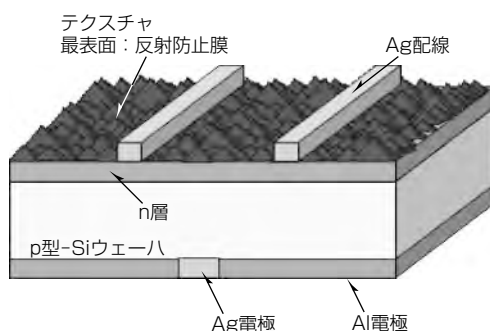


図1. 太陽電池セルの断面構造

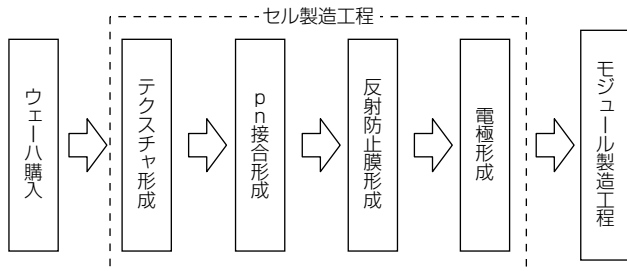


図2. 太陽電池セルの製造工程

ルカリ系薬液で形成している⁽³⁾。

正常なテクスチャ形状を図3(a)に示す。10μm前後のピラミッド構造が一面密に形成されている。これに対し、当社では量産導入検討の際、図3(b)に示すようにテクスチャ未形成領域が生じ、それに伴い反射率が悪化するセルが発生した。

ここでは、テクスチャ形状の可否の判定基準となる反射率を1として、その比を示している。このテクスチャ形成の阻害要因を究明すると同時にその対策を講じておくことが重要となる。

テクスチャの阻害要因として、汚染分析を行うとともに、検出された不純物による影響を調査した。その結果、特定の数種の金属が阻害要因となることを見出した。したがって、図4に示すように、阻害物質(特定の数種の金属(Mⁿ⁺)とシリコンの溶出成分(SiO₃²⁻)との化合物)の動きを抑制するエッチング制御物質を添加剤として含んだアルカリ系薬液を用いることが必要と考えた。

次に、阻害物質に対して、低反射率を安定して実現できるかどうかの観点で薬液の確認を行った。アルカリ薬液1

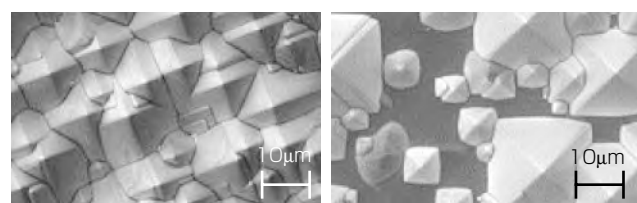


図3. テクスチャ形状とその反射率(arb.unit)

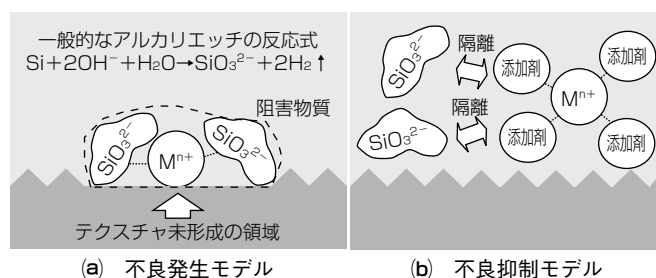


図4. 阻害要因となる特定金属(Mⁿ⁺)による不良発生モデルと添加剤による不良抑制モデル

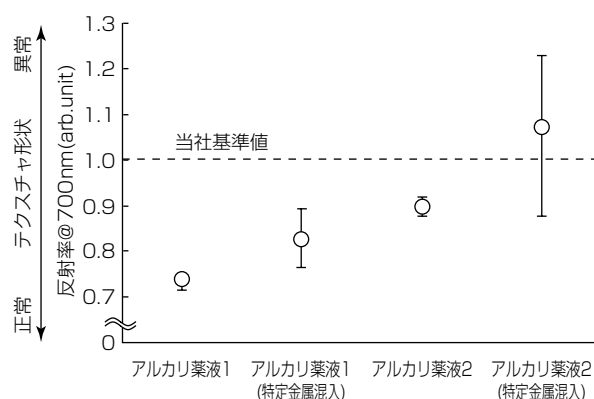


図5. 特定金属の反射率に及ぼす影響

とアルカリ薬液2の2種類のアルカリ薬液に対して阻害物質の影響を調べるため、高濃度の特定金属を混入させてテクスチャのでき映え(反射率)を評価した結果を図5に示す。アルカリ薬液1を用いると、特定金属を混入させた場合でも反射率は基準値を満たしており、テクスチャ形成への影響が小さいことが分かった。このことから、アルカリ薬液1を量産導入し、金属汚染改善のための過剰な設備投資をすることなく、低反射率の正常なテクスチャを安定して実現することができる。

3. 高信頼はんだ接合技術

モジュール製造で、発電したセルの電力を長期間にわたって効率よく取り出すためには、図6に示すストリングス(直列に接続したセルの集合体)を形成するためのバスバー電極とタブ線と称する配線材(はんだで被覆した平角銅線)とのはんだ接合部、及び図7に示すストリングス同士を接続するために使用する横タブ線とストリングス端のタブ線とのはんだ接合部の長期信頼性確保が重要である。そのため、長期信頼性に優れた高品質のはんだ接合技術を開発した。

3.1 鉛フリー低融点のはんだ接合技術

当社のモジュールでは、タブ線の表面のはんだ材には、環境を考慮し、Sn-Ag-Cu系の鉛フリーはんだを採用している。鉛フリーはんだは融点が高く熱応力が大きくなる傾向にあるため、製造工程内でのセルの破損やマイクロクラックによる特性不良の増加が懸念されるが、種々の工夫で一般的なSn-Pb系共晶はんだと同等以上の品質を確保している⁽⁴⁾。

一方、モジュールの低コスト化を図るためには、薄肉化されたウェーハを購入する傾向にあるため、製造されるセルは薄くなる。そのため、タブ線とのはんだ接合後にそり

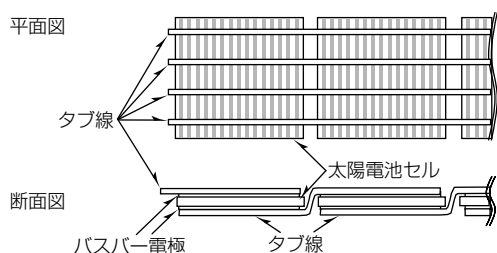


図6. バスバー電極とタブ線間のはんだ接合によるストリングス形成



図7. タブ線と横タブ線間のはんだ接合箇所

が大きくなって、セルが破損しやすくなるという問題がある。そりを低減するには低温ではんだ接合することが有効であるが、Sn-Bi系の低融点のはんだは脆(もろ)い性質があるため、温度サイクル試験でクラックが発生して接合信頼性が低下する懸念がある。そこで、クラックの発生を抑制するために、はんだ接合部の側面をエポキシ樹脂で覆う接合構造を開発した⁽⁵⁾。はんだ接合部の側面をエポキシ樹脂で覆うことによって、エポキシ樹脂に応力を分散させることでひずみを低減でき、接合信頼性を向上させることができる。

図8に接合部の応力シミュレーションに用いた二次元解析モデルとエポキシ樹脂の物性値、及び応力解析図を示す。エポキシ樹脂ありの場合、はんだ接合部に発生するひずみは、エポキシ樹脂なしに比べ、最大相当ひずみが1/3以下(0.035→0.011)に低減することが分かる。

また、実際にはんだ接合部の側面をエポキシ樹脂で覆う構造を実現するために、エポキシ樹脂として、硬化前の成分が、はんだの濡(ぬ)れ性に良好なフラックス作用を持つ材料を用いた。このエポキシ樹脂をディスペンサでバスバー電極上に塗布後、タブ線を搭載して加熱することによって、タブ線とバスバー電極間がはんだ接合されて、エポキシ樹脂は、はんだの側面に排出される。次に、側面に排出されたエポキシ樹脂をはんだが再溶融する温度以下でアフターキュアする。接合完了後の断面構造を図9に示す。タブ線とのはんだ接合部の側面が硬化したエポキシ樹脂で覆われていることが分かる。

次に、この低融点鉛フリーはんだを被覆したタブ線を用い、このエポキシ樹脂をバスバー電極に塗布してはんだ接

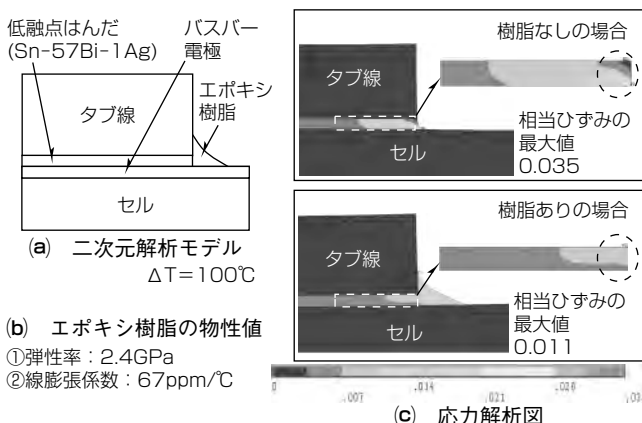


図8. 接合部の応力シミュレーション

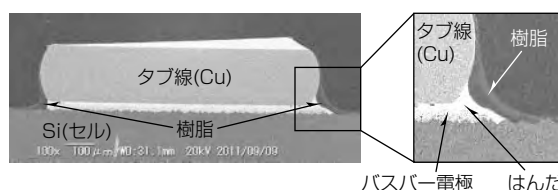


図9. エポキシ樹脂で補強したはんだ接合部の断面

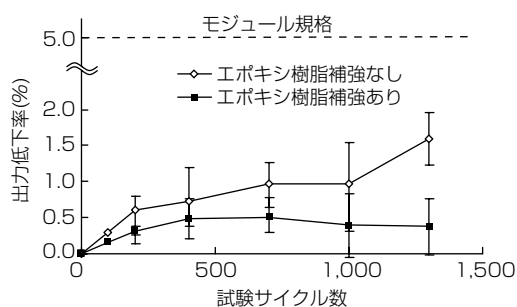


図10. モジュールの出力変化

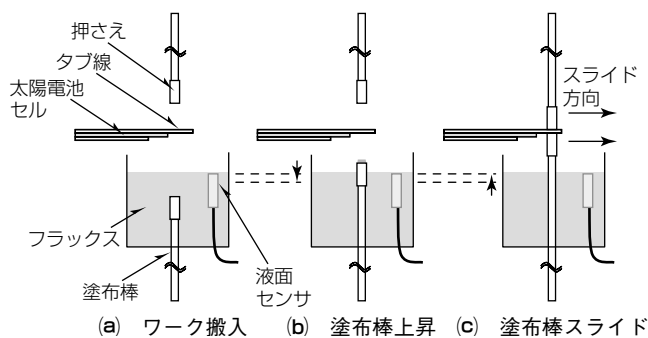


図11. フラックス塗布方式の概念図(側面)

合したセルと、エポキシ樹脂のない場合として、通常のフラックスを塗布してはんだ接合したセルを用いて、セル1枚構成のモジュールを各3枚ずつ作製し、温度サイクル試験(−40℃⇔90℃)を行った。図10に、試験サイクル数に対する出力の低下率の推移を示す。通常のフラックスを用いたモジュールはサイクル数が増えると、出力低下率が増加傾向にあるのに対し、フラックス作用を持つエポキシ樹脂を用いたモジュールでは出力低下率は増加していないという結果が得られた。

これらのことから、はんだ接合部の側面をエポキシ樹脂で覆う構造によって、接合部の信頼性を向上できることを確認し、将来のウェーハ薄肉化に対応することができる。

3.2 高品質タブ線間はんだ接合技術

ストリングス間の接続は、横タブ線とストリングス端のタブ線を表面に被覆されたはんだで接合する。確実にはんだ接合するためには、接合箇所にはんだ供給する必要があるが、タブ線自体の蛇行やストリングス自体の搬送時の回転等によって、フラックス供給が必要となるはんだ接合位置にはばらつきが発生する。このため当社は、ストリングス端のタブ線を横タブ線上のはんだ接合位置に搭載する直前に、タブ線にフラックスを塗布する方式を採用し、搭載位置のばらつきが発生しても確実にはんだ接合できる工法を実現している。

当社の塗布方式の概念図を図11に示す。フラックス液面以下で待機させていた塗布棒先端部でフラックスをすくい上げる。次に、塗布棒が上昇するにあわせて押さえが下降し、タブ線を挟み込むことによって、フラックスをタ

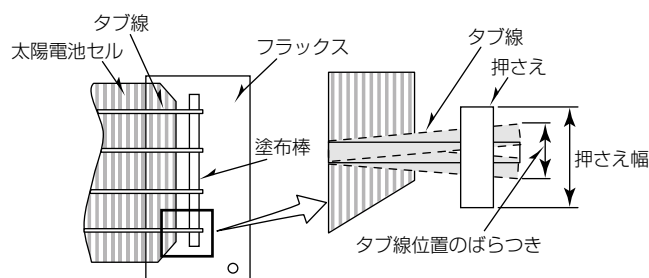


図12. フラックス塗布方式の概念図(上面)

ブ線に塗布する。この時、図12に示すように、押さえの幅は、タブ線先端部の位置ばらつきを考慮した尤度(ゆうど)のある設計としている。また塗布棒の先端部の材質と形状を工夫することで、適量のフラックスを掬い上げて塗布することを実現している。塗布棒と押さえはタブ線部を挟み込んだ後、タブ線先端部方向にスライドさせている。この動作によって、タブ線先端部まで確実にフラックスを塗布すると同時に、タブ線先端に塗布した余分なフラックスを取り除き、フラックスの過剰供給を抑制している。この後、フラックスを塗布したタブ線先端部を横タブ線上の所定位置に搬送し、タブ線同士を固定した状態で接触部を加熱することによって表面に被覆したはんだが熔融し、接合される。

さらに、はんだ接合後のでき映え検査を全数実施することで、市場へのはんだ付け不良流出を防止できる仕組みを構築している。

4. む す び

高出力で品質の高いモジュールを生産性良く得るために重要となる太陽電池セル・モジュールの製造技術について述べた。今後、更に生産性向上を図りながら高出力化と長期信頼性の向上を目指し、太陽光発電の更なる普及に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 中村真之, ほか: 太陽電池モジュールの高効率化及び大出力化, 三菱電機技報, **84**, No.6, 347~350 (2010)
- (2) 瀧本晋輔, ほか: 高出力太陽光発電モジュールの量産化技術, 三菱電機技報, **84**, No.12, 693~696 (2010)
- (3) Vazsonyi, E., et al.: Improved Anisotropic Etching Process for Industrial Texturing of Silicon Solar Cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, **57**, 179~188 (1999)
- (4) 森川浩昭, ほか: 太陽電池セル・モジュール鉛フリー化, 三菱電機技報, **77**, No.5, 309~312 (2003)
- (5) 藪垣良美, ほか: 熱硬化性樹脂を用いた太陽光発電モジュールの低温はんだ接合, 第19回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集, **19**, 253~256 (2013)

リフロー温度プロファイルシミュレータ

岩田 彩* 田邊 剛***
 小山雅弘** 出田吾朗†
 朝山真次***

Temperature Profile Simulator for Reflow Soldering

Aya Iwata, Masahiro Koyama, Sinji Asayama, Tsuyoshi Tanabe, Goro Izuta

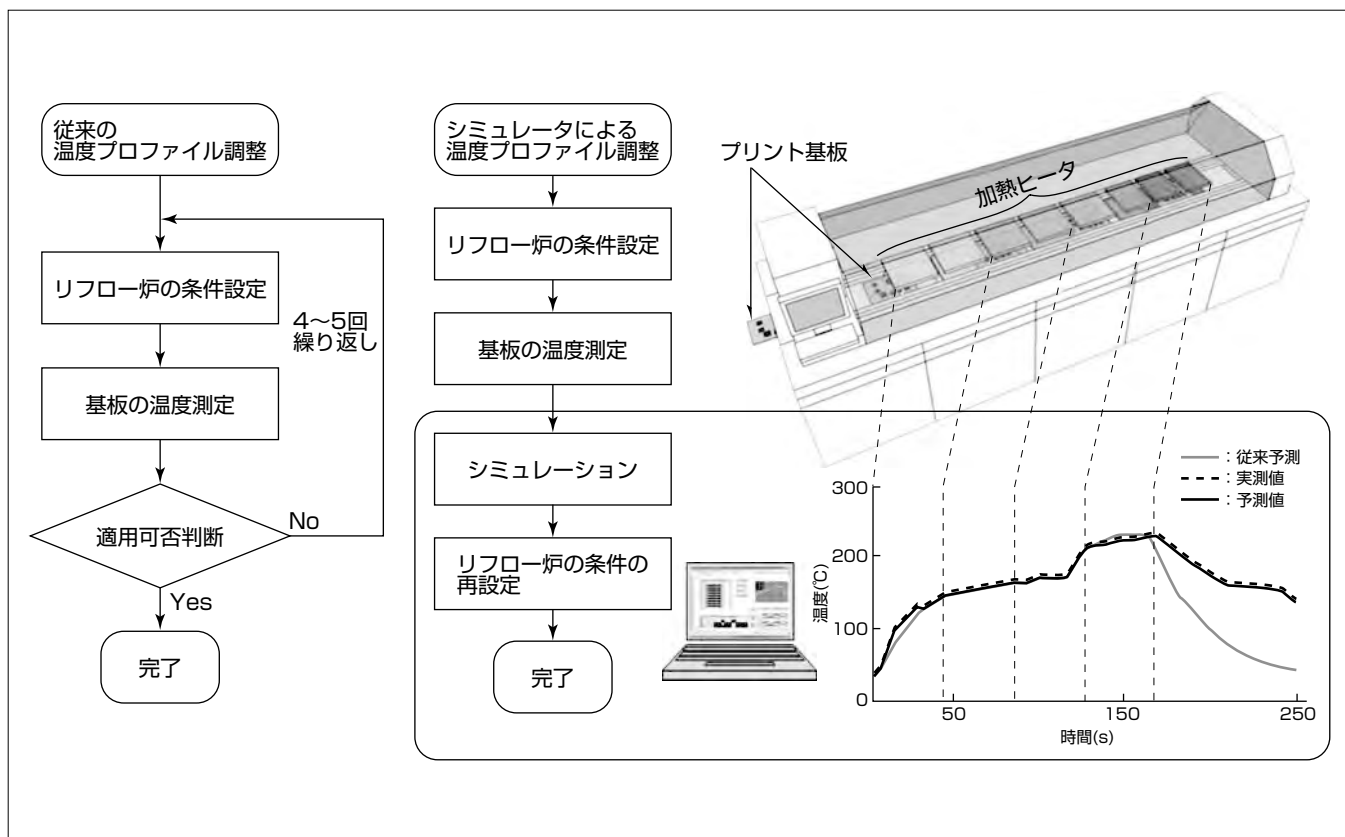
要 旨

地球環境、生態系への配慮から、三菱電機では鉛フリー化を推進してきた。一部の特殊需要製品を除くあらゆる当社製品に搭載されるプリント基板の鉛フリー化を完了して既に数年が経過している。しかし、鉛フリーはんだ材は、従来の鉛入りはんだ材に比べ、融点が30℃以上高いため、はんだ付け時の加熱温度を高める必要がある。一方、電子部品の耐熱温度は従来ほとんど変わっていないため、リフローはんだ付けで、高い実装品質を維持するためには、従来に比較して緻密な温度制御が要求される。形状、熱容量、放射率等、加熱特性の異なる数百種の電子部品を搭載するプリント基板のリフロー実装で、適切な温度プロファイルを得るためには、リフロー炉の熱風温度、風量、加熱時間等、条件設定を変更しながら温度測定を繰り返す煩雑な調

整作業が必要である。

この調整作業時間の削減を目的として、一度の温度測定データから、最適な温度プロファイルを得るための設定条件を決定できるリフロー温度プロファイルシミュレータを開発し、実用展開した。

このシミュレータは、実測したプリント基板の温度変化から、リフロー炉の加熱能力とプリント基板の熱物性値によって決定される加熱特性を算出し、任意のリフロー炉設定条件を入力することで、プリント基板の温度プロファイルを瞬時に計算するものである。新規プリント基板の量産適用時におけるリフロー炉の設定条件出し、量産ラインでのリフロー炉の変更可否判断、複数のプリント基板に対するリフロー炉設定条件の統合化等に活用できる。



適正なリフロー温度プロファイルを得るためのリフロー炉の設定条件調整

従来は、リフロー炉の設定条件を変更しながら温度プロファイル測定を何度も繰り返すことで、適正な設定条件を求めた。リフロー温度プロファイルシミュレータを使用する場合は、温度プロファイルをただ一度実測したデータを入力することで、任意のリフロー炉の設定条件での温度プロファイルを瞬時に算出可能となる。

1. ま え が き

RoHS(Restriction of the use of certain Hazardous Substances)指令以降、電気・電子機器分野で鉛フリー化が定着し、電子部品のプリント基板への実装でも、鉛入りはんだから鉛フリーはんだへの置き換えがおおむね完了している。しかし、従来のSn-Pb共晶はんだの融点183℃と比較して、鉛フリーはんだの融点は217℃前後と高く、はんだ付け工程で従来よりもはんだ付け部を高温に加熱する必要がある。一方、電子部品の耐熱温度も従来に比較して高められてはいるものの、改善幅は10℃程度と大差がない。そのため、はんだ付けの際に、はんだの溶融温度、電子部品の耐熱温度の両方を満足するよう細かな温度制御が要求される。また、はんだが凝固する瞬間の冷却速度ではんだの結晶組織が決定され⁽¹⁾⁽²⁾、信頼性に影響を与えるため、厳密に管理を行わなければならない。このように、プリント基板のはんだ付け工程で加熱から冷却までの温度設計に対し、今まで以上に緻密さが要求されている。

近年、一般にはんだ付け工程に用いられるリフロー炉は、複数の加熱／冷却ゾーンから構成されており、各ゾーンの温度設定及びコンベヤ搬送速度を調整することで、所望のはんだ付け温度プロファイルが得られる。基板ごとに適正な温度プロファイルを得るためには複数回の設定の調整／実測作業を繰り返す必要があり、この作業の工数削減が望まれている。この課題を解決するため、リフロー炉の空気温度／コンベヤ搬送速度からプリント基板の温度プロファイルを予測するリフロー温度プロファイルシミュレータを開発した。

本稿では、2章で温度プロファイルシミュレータを構築するのに用いた熱伝達理論を基にした計算方法、及びその計算を基に構築したシミュレータ4種について述べた後、3章でシミュレータの精度検討を行った結果について述べる。

2. 温度プロファイルシミュレータ

2.1 温度シミュレート方法

初めに、温度プロファイルシミュレータ構築の基礎とした熱伝達理論⁽³⁾⁽⁴⁾について述べる。

ある熱媒体内の空間に微小体積要素が存在するとし、この熱媒体は物性値が等方的で、かつ要素内の密度が一定、時間 t における要素の温度 $T(t)$ が一様であるとみなせるとする。ここで、微小体積要素の熱量の時間変化率 $\partial Q / \partial t$ は式(1)のように立式できる。

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \rho CV \frac{\partial T(t)}{\partial t} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、

ρ : 微小体積要素の密度(kg/m³)

C : 微小体積要素の比熱(J/(kg・K))

V : 微小体積要素の体積(m³)

また、微小体積要素の熱量の時間変化率 $\partial Q / \partial t$ は、時間 t での微小体積要素への流入熱量 δQ_{net} と要素内で発生した熱量 δQ_{gen} の和で表され、式(2)のように表わされる。

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \delta Q_{\text{net}} + \delta Q_{\text{gen}} \quad \cdots \cdots (2)$$

時間 t での流入熱量 δQ_{net} は、Newtonの冷却法則から、周囲の流体の温度 T_{∞} を用いて、式(3)のように表せる。

$$\delta Q_{\text{net}} = -h(T(t) - T_{\infty})A \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、

A : 熱と接触部の表面積(m²)

h : 熱伝達率(W/(m²・K))

これらから、式(2)は、式(1)、式(3)を用いて次のように表わされる。

$$\rho CV \frac{\partial T(t)}{\partial t} = -h(T(t) - T_{\infty})A + \delta Q_{\text{gen}} \quad \cdots \cdots (4)$$

$t=0$ のとき $T=T_0$ 、要素内での発熱量 δQ_{gen} が十分に小さく無視できるとすると、次式となる。

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho CV}t\right) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$T(t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})\exp\left(-\frac{hA}{\rho CV}t\right) \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで $t + \Delta t$ での T の値を、テイラー展開によって近似する。 $\Delta t \ll t$ である場合、 Δt が2次以上の項は0とみなせるので、式(7)となる。

$$T(t + \Delta t) \approx T(t) + (T_{\infty} - T_0)\frac{hA}{\rho CV}\exp\left(-\frac{hA}{\rho CV}t\right)\Delta t \quad \cdots \cdots (7)$$

$t=0$ から Δt 時間後の温度は、

$$T(\Delta t) \approx T_0 + (T_{\infty} - T_0)\frac{hA}{\rho CV}\Delta t \quad \cdots \cdots (8)$$

となる。解析ツールのアルゴリズムとして、 Δt 時間ごとの温度変化量を算出するため、 Δt 時間ごとに時間 t を0に初期化して、温度予測計算をする。

以降、予測で次を定義する。

$$\frac{hA}{\rho CV} = \alpha \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\frac{A}{\rho CV} = \beta \quad \cdots \cdots (10)$$

β は温度測定部の電子部品やプリント基板に依存した定数となり、便宜上ここではリフロー熱定数と定義する。

温度プロファイルの実測値から先に述べた計算を基に温度プロファイルの予測を行うことで、高精度の予測方法の確立を目指した。予測の高精度化のために、式(9)の α の算出を4通りの方法で実施し、その精度比較を行い、最も有効なシミュレート方法を検証した。2.2節でそれぞれのシミュレート方法を述べる。

2.2 シミュレータの特徴

精度検証評価に使用したシミュレータの詳細を述べる。

シミュレータは2.1節の理論を基に作成しており、既存のものも含めて4種について検討し、それぞれシミュレータ1, 2, 3, 4と名づけた。シミュレータ1と3は、以前に当社で開発したシミュレータであり、この検証評価における比較対象とした。全てのシミュレータで、設定条件を入力することで、温度プロファイルを表示するようにした。同時に、温度プロファイルの予備加熱時間、本加熱時間、ピーク温度、加熱・冷却時の温度変化の傾きを表示するようにし、それらの値が要求仕様に合致しているかについて合否判定を自動算出するように、シミュレーションツールを構築した(図1)。

次に、各シミュレータの特徴について述べる。

シミュレータ1は、リフロー炉内の熱伝達率 h を一定と仮定し、実測温度プロファイルから a を決定し、その a を利用してシミュレータを構築する。シミュレータ1では、実測値と同一リフロー炉、同一基板測定箇所温度プロファイルを予測可能である。

シミュレータ2では、より精密に温度を算出するため、リフロー炉内での位置によって熱伝達率 h が異なる値をと

るものと考え、 a をリフロー炉中での位置ごとに細かく定め、リフロー炉内での風速の変化などの影響を加味した予測を可能にした。このシミュレータ2では、シミュレータ1と同様に、実測温度プロファイルから式(8)を基に a を隣り合う測定点ごとに逐次算出し、それを利用して温度を予測する。このシミュレータ2はシミュレータ1と同様、同一リフロー炉、同一基板測定箇所温度プロファイルを予測可能である。

シミュレータ1, 2では、予測を所望する部品の実測温度プロファイルからシミュレータを構築し、温度予測を行った。シミュレータ3は、リフロー炉依存の熱伝達率 h を当社が開発した専用の温度センサ⁽³⁾を利用して実測し、温度測定部の部品やプリント基板に依存したリフロー熱定数 β を部品の物性値である密度 ρ 、体積 V 、表面積 A 、比熱 C から計算し、それらの値を乗算して a を算出し、その a を利用して温度シミュレーションを行う手法である。

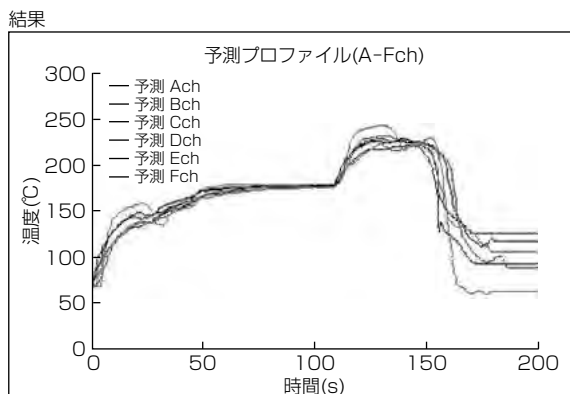
シミュレータ4は、シミュレータ2とシミュレータ3を組み合わせた手法である。シミュレータ3ではリフロー熱定数 β を電子部品の物性値から算出したが、シミュレータ4ではリフロー熱定数 β を、実測値を利用して算出し、温度予測を行う。そのリフロー熱定数 β は、シミュレータ2の方法で算出した a と先に述べた専用温度センサから算出した熱伝達率 h で求める。

シミュレータ3, 4は、シミュレータ1, 2とは異なり、 a を熱伝達率 h とリフロー熱定数 β に分離する。そのため対象プリント基板のリフロー熱定数 β を事前に算出しておくことで、加熱能力を測定済みのリフロー炉に対して、温度プロファイル予測が可能である。

例えば、台数 N のリフロー炉に対して品種数 m のプリント基板のリフロー条件を決定する時、シミュレータ1やシミュレータ2では最低1回は対象のリフロー炉とプリント基板を組み合わせた条件で測定しなければならない。そのため $N \times m$ 回の測定が必要であるのに対し、シミュレータ3, 4では、リフロー炉の能力とリフロー熱定数を別々に取り扱うので、 $N + m$ 回測定すれば、温度プロファイルの予測が可能になる。したがってリフロー温度条件出しの作業時間を大幅に削減可能である。

3. シミュレータの精度検証

2章で述べたシミュレータ4種全てを実際に使用し、その精度を評価した結果に関して述べる。この検証ではプリント基板はCEM3(Composite Epoxy Material-3)を、電子部品は部品a(Quad Flat Package: 14×14×1.6(mm))、部品b(セラミックコンデンサ: 1.0×0.5×0.5(mm))、部品c(電解コンデンサ: ϕ : 6, h : 8 mm)を、リフロー炉はリフロー炉A(仕様: 表1)を使用した。シミュレータ3、及びシミュレータ4では各電子部品のリフロー熱定数 β を



A-F	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
判定合格数	3	6	2	4	0

A	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		96.4		38.6	
傾き C/s	7.8		6.3		-14.7
最高温度 C				244.4	
判定	x	○	x	x	x

B	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		77.3		34.1	
傾き C/s	2.3		4.6		-4.4
最高温度 C				233.2	
判定	○	○	x	○	x

C	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		78.2		26.8	
傾き C/s	2.1		3.8		-5.5
最高温度 C				227.7	
判定	○	○	○	○	x

D	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		75.0		15.5	
傾き C/s	1.9		1.6		-6.8
最高温度 C				223.0	
判定	x	○	x	x	x

E	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		80.5		35.0	
傾き C/s	2.4		4.4		-6.3
最高温度 C				230.4	
判定	○	○	x	○	x

F	予熱前昇温	予熱	本加熱前昇温	本加熱	冷却
開始一終了時間 s		72.7		23.2	
傾き C/s	1.8		2.4		-6.8
最高温度 C				224.4	
判定	x	○	○	○	x

図1. シミュレーションツールの操作画面例

表 1. リフロー炉Aの仕様

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
長さ(mm)	350	350	350	350	350	250	250	250	350	350
ゾーン間(mm)	50									
搬送速度(m/分)	1.1									

表 2. 熱定数・算出リフロー炉Bの仕様と設定温度条件

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9
長さ(mm)	350	350	350	350	350	350	350	370	370
上部温度(℃)	190	170	170	170	170	275	235	60	40
下部温度(℃)	190	170	170	170	170	275	235	60	40
ゾーン間(mm)	50								
搬送速度(m/分)	1.1								

表 3. リフロー炉Aの設定条件

ゾーン	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
条件 1 : 温度(℃)	190	170	170	170	180	260	250	235	60	40
条件 2 : 温度(℃)	190	170	180	190	190	250	245	235	60	40
条件 3 : 温度(℃)	190	170	180	190	190	260	245	235	60	40
搬送速度(m/分)	条件 1 は 1.1, 条件 2 と条件 3 は 1.0									

表 4. 予測値と実測値との誤差(%)

電子部品	部品a			部品b			部品c			平均誤差
温度条件	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
シミュレータ 1	17	13	14	20	15	14	17	14	14	15
シミュレータ 2	3.0	1.7	0.0	3.0	1.0	1.0	2.0	1.2	1.4	1.6
シミュレータ 3	8.5	9.0	9.0	9.8	9.0	9.0	5.4	6.0	6.0	8.0
シミュレータ 4	6.2	6.0	7.0	8.0	9.0	8.0	9.0	9.0	9.0	7.9

求める必要があるため、リフロー炉B(仕様:表2)を用いてリフロー熱定数 β を求めた。評価は温度条件4条件(表3)でのシミュレータ予測値と実測値の誤差(表4)を電子部品3種に対して比較した(図2)。評価結果を可視化するため、 $\sqrt{\{(\text{予測}-\text{実測})/\text{実測}\}^2}$ を誤差として各予測値に対して算出し、それらの比較によって各シミュレータの精度を評価した(表4)。なお、はんだの融点と電子部品の耐熱温度を考慮すると、リフロー温度のピーク値が220~235℃で制御されるべきなので、この誤差式から3%の誤差を目標精度とした。

その結果、シミュレータ2が他のシミュレータと比較して5%程度予測誤差が小さく、平均誤差も1.6%と3.0%の目標精度を満足しており、高精度な温度シミュレーションが可能であることを確認した。また、シミュレータ3、4を比較すると、全平均誤差は同等であるが、誤差分布に関してはシミュレータ4の方がシミュレータ3よりも小さく、実測値を利用することで、シミュレータの精度向上が可能であることを確認した。

これらのことから、シミュレータ2が全シミュレータの中で最も精度良く予測可能である。またシミュレータ4は、

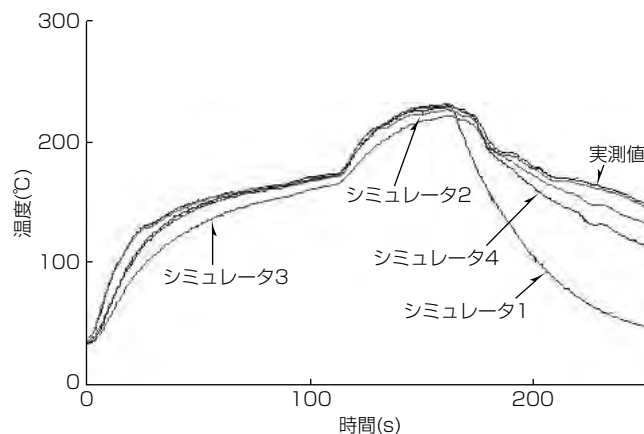


図 2. 温度プロファイルの比較

シミュレータ2よりも精度は劣るが、加熱能力を測定済みのリフロー炉で、対象基板の温度プロファイルデータを一度取得すれば、熱伝達率 h が既知の任意のリフロー炉での温度プロファイル予測が可能である。例えば、遠隔地に設置されたリフロー炉の適用可否判断などにも活用できる。シミュレータ2、4両方を状況に応じて使い分けることで、条件出しにかかるコストを削減可能である。

4. む す び

熱伝達の理論に基づいてリフロー実装における温度プロファイルシミュレータを構築し、容易に温度プロファイルシミュレーションを可能にした。計算手法を変化させてシミュレータを4種類作成し、それらのシミュレータの精度を比較し、高精度なシミュレート方法を見いだした。

これらのシミュレータは、新規プリント基板の量産適用時のリフロー炉の設定条件出し、量産ラインでのリフロー炉の変更可否判断、複数のプリント基板に対するリフロー炉設定条件の統合化の目的で、実際に量産現場で活用中であり、今後、更に適用拡大を図る予定である。

参 考 文 献

- (1) 喜來省吾, ほか: Sn-Ag-Cu合金の組織形成に及ぼす添加元素と冷却速度の影響, Mate 2010, **16**, 141~146 (2010)
- (2) 渡邊裕彦: 微量元素を添加した産業用鉛フリーはんだ, エレクトロニクス実装学会誌, **8**, No 3, 183~187 (2005)
- (3) 村上政明, ほか: リフローセンサおよびリフローシミュレータの開発, Mate 2003, **9**, 405~408 (2003)
- (4) 小川邦康: 見える伝熱工学, コロナ社, 18~26, 64~68 (2011)

トルクリプルを低減する ステータ鉄心製造技術

司城大輔* 土屋文昭**
須藤広一** 田中敏則***
鈴木啓文**

Manufacturing Technology of Stator Core to Reduce Torque Ripple

Daisuke Shijo, Hirokazu Sudo, Akifumi Suzuki, Fumiaki Tsuchiya, Toshinori Tanaka

要 旨

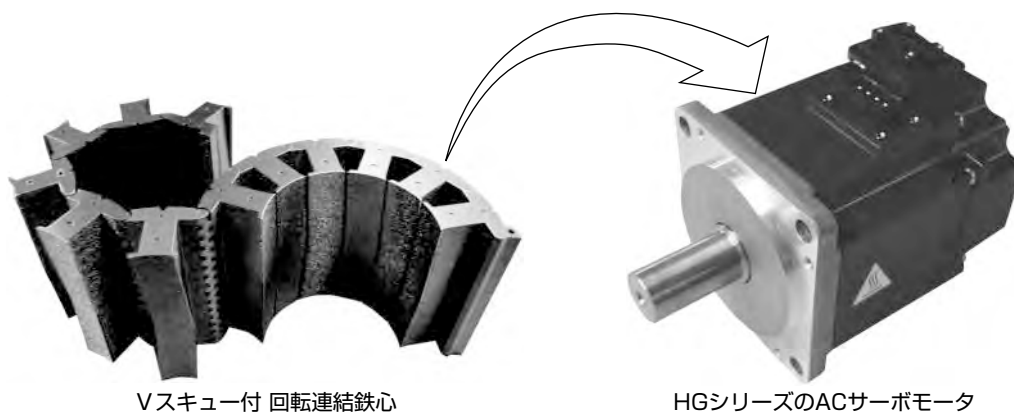
半導体製造装置や射出成形機、ロボット、工作機械等の各種産業機械に用いられているACサーボモータシステムでは、高速・高精度化のニーズに加えて、小型軽量、高機能、高信頼性、制御性向上、省エネルギー等、付加価値の要望が多様化してきている。そこで、三菱電機では2012年に次世代ACサーボモータ“HGシリーズ”とサーボアンプ“MR-J4シリーズ”を開発し、より多くの顧客要望に合致した製品の市場提供を行っている⁽¹⁾。

工作機械や組立て装置を駆動させるACサーボモータでは、滑らかな運転と高速・高精度な位置決めを実現するため、トルクリプルの低さが一つの訴求点となる。

今回、ロータとステータ間の磁束変化を滑らかにし、トルクリプルを低減するために、ステータ鉄心にVスキューを形成する製造技術を開発し、HGシリーズへ導入した。

従来、積層ごとに異なる形状の鉄心を順送金型で成形するのは困難であったが、金型加工に柔軟性を持たせる可動金型技術の開発と、ACサーボモータシステムによる高速・高精度な駆動制御によって、高い生産性と寸法精度を確保したVスキュー鉄心の製造が可能となった。

この技術は、コイル占積率と組立て性を向上させる当社独特のステータ構造である“回転連結鉄心”と相乗的に利用できるため、当社モータの更なる高品位化が実現できる。



ACサーボモータ“HGシリーズ”に導入したVスキュー鉄心

モータの制御性を阻害するトルクリプルは、ロータの永久磁石とステータの磁極ティース間の磁気回路が急峻（きゅうしゅん）に切り替わることで発生し、磁極ティース先端部の形状や磁石の着磁パターンなどに起因する。今回開発したVスキュー鉄心で、ロータの回転に伴う磁極ティース先端部と磁石の対向面積の変化を連続的にすることができるため、磁束の変化が滑らかになりトルクリプルの低減が可能である。

1. ま え が き

半導体製造装置や射出成形機、ロボット、工作機械等の各種産業機械に用いられているACサーボモータシステムでは、高速・高精度化のニーズに加えて、小型軽量、高機能、高信頼性、制御性向上、省エネルギー等、付加価値の要望が多様化してきている。そこで、当社では2012年に次世代ACサーボモータ“HGシリーズ”とサーボアンプ“MR-J4シリーズ”を開発し、より多くの顧客要望に合致した製品の市場提供を行っている。

工作機械や組立て装置を駆動させるACサーボモータでは、滑らかな運転と高速・高精度な位置決めを実現するため、トルクリプルの低さが一つの訴求点となる。トルクリプルの発生はロータとステータ間の磁束変化に起因する。具体的には、ステータの内径形状のひずみによって磁気抵抗が不均一となることや、ロータの磁極とステータの磁極ティース間の磁気回路が急峻に切り替わることなどが挙げられる。

本稿では、HGシリーズに搭載したトルクリプル低減技術の一つとして、磁気回路の切り替わりを滑らかにするステータ鉄心の構造とその製造方法について述べる。

2. トルクリプルを低減するモータ構造

2.1 ステータ・ロータの構造

図1と図2に従来のステータとロータの構造を示す。当社ではステータ鉄心に集中巻き用の回転連結鉄心を採用している。これは、各磁極ティースの外径付近にヒンジ構造を設けることで、磁極ティースを相互に回動可能とした鉄心である。マグネットワイヤをこの鉄心に巻線する際、対象となる磁極ティースだけを突出させるように姿勢変形ができるため、隣接する磁極ティースや既に巻線されたコイ

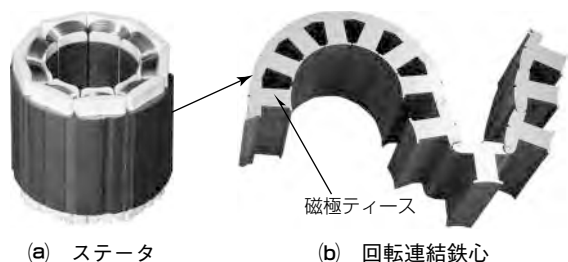


図1. ステータの構造

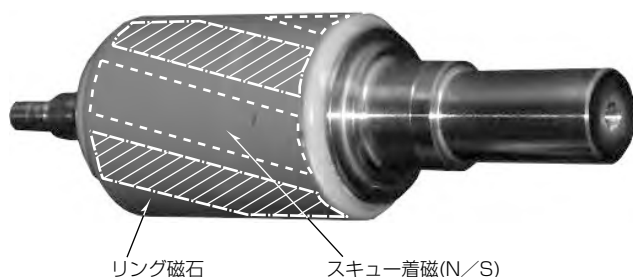


図2. ロータの構造

ルなどが巻線作業を阻害することなく、高い占積率で巻線することができる。これによってモータの高トルク化に寄与できる。また、各磁極ティースを連結していることから、一体的にステータを取り扱うことができるため、部品の搬送や組立てが容易であり、生産性も向上できる⁽²⁾。

一方、ロータには軸方向に対して傾斜させた着磁パターン(スキュー着磁)のリング磁石を用いて、ロータとステータ間の磁気回路の切り替わりを滑らかにし、トルクリプルを低減している。

2.2 スキュー鉄心と構造の比較

トルクリプルを低減する技術として、スキュー着磁のほかに、ステータ鉄心をスキューさせる方法がある(スキュー鉄心)。スキュー鉄心は、ステータ鉄心の磁極ティース先端部にあたるポール部の位置を周方向にずらすことで、相対的にスキュー着磁と同様の効果を得るものである。したがって、スキュー鉄心は軸方向の各断面で異なる形状とすることが必要である。

一般に、ステータ鉄心は電磁鋼板からプレス金型で所定の形状の鉄心シートを打ち抜いた後、それらを積層して製造される。プレス加工は、一定形状を精度良く高速に大量生産できる一方で、類似する形状であっても、金型の段取りが必要な堅固な加工方法である。これに対し、金型に柔軟性を持たせてスキュー鉄心を形成する技術として可動金型技術がある。

図3は2種類の金型の刃物を自動的に切り替えて、ポール部の長さが異なる鉄心シートを積層した段スキュー鉄心を示す。図4は1枚の鉄心シートを積層するごとに、既に

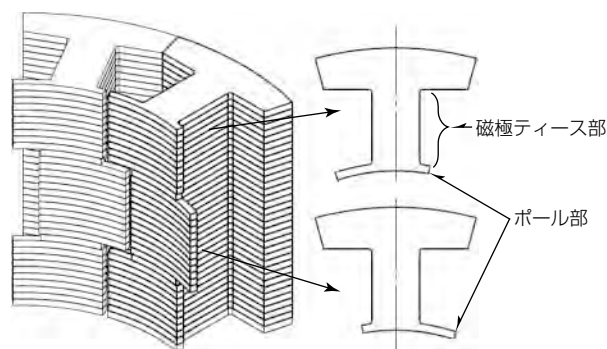


図3. 段スキュー鉄心

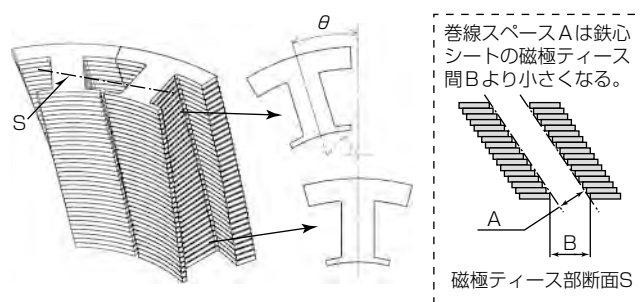


図4. 回転積層スキュー鉄心

積層済みの鉄心が格納されている金型部品を一定角度ずつ回転させて積層した回転積層スキュー鉄心を示す。

段スキュー鉄心は、トルクリプルの低減に関して一定の効果が得られるが、その形状からロータ回転時の磁束の変化は断続的であり、トルクの小さい小容量のモータでは、無視できないトルクリプルとして現れる。

一方、回転積層スキュー鉄心は、連続的なスキューが得られるが、磁極ティース部もスキューしていることから、図4右のように傾斜した領域にコイルが配置されるため、巻線スペースが減少しモータのトルク低下を招く。

そこで、今回は鉄心の軸方向における各断面(各鉄心シート)で磁極ティース部の形状は一定で、ポール部だけが連続的にスキューする鉄心の製造技術開発に取り組んだ。

3. スキュー鉄心製造技術

3.1 金型の構造と製造工程

金型の設計にあたっては、各鉄心シートで形状が共通な部分とそうでない部分に分別した。このスキュー鉄心は、磁極ティース先端のポール部の周方向長さだけが段階的に変化し、他の形状は共通である。したがって、ポール部を形成する刃物を鉄心シートごとに角度位相を変えながら加工することで、Vスキュー鉄心の形成が可能となる⁽³⁾。図5にスキュー鉄心を製造する順送金型の構造を示す。各鉄心シートにおける共通形状部分を形成する刃物を備えたメイン金型の内部に、ポール部の周方向長さを可変させて形成する回転可動金型を設置した。この回転可動金型は、メ

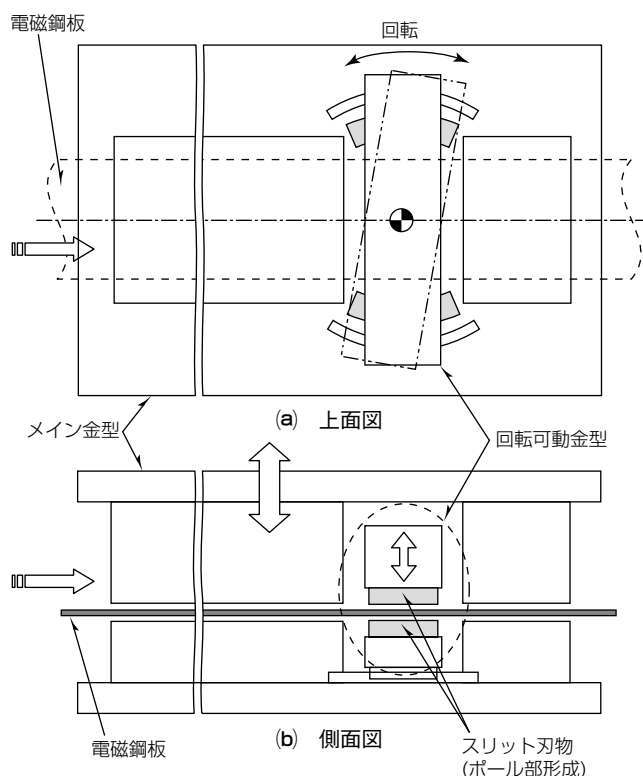


図5. 回転可動金型の構造

イン金型に設置したACサーボモータによって高速・高精度に回転位置を制御する。この駆動システムをプレス装置の動作と同期させることで、従来鉄心の場合と同等の打ち抜き速度での運転を可能とし、高い生産性を確保した。

次に、この金型を用いたスキュー技術を回転連結鉄心に適用した場合の製造工程を具体的に示す(図6)。電磁鋼板の加工位置決め基準となるパイロット穴を開けた後、工程①～⑩の順に加工を行う。

- ①内径トリム
- ②磁極ティース間とヒンジ部外径側のトリム
- ③ヨーク部の分断(左凸形状)
- ④ヨーク部の分断(右凸形状)
- ⑤ヒンジ部及びびかしめダボ部のピアス
- ⑥ヒンジ部ダボ及びびかしめダボの成形
- ⑦アイドリング工程
- ⑧隣接ポール部間のトリム
- ⑨アイドリング工程
- ⑩鉄心シート全体の打ち抜きと積層

工程⑧では、メイン金型が開いて電磁鋼板を次工程に送る間に、回転可動金型が所定の角度回転し、その後に両方の金型が同時に閉じることで加工される。ここで、回転可動金型は対向する各ポール間のスリットを打ち抜く刃物を周方向に複数配置した構造とし、各刃物が相対的な角度位相を確保したまま、回転して打ち抜きを行うため、各鉄心シートにおけるポール部の周方向長さがばらつかず、高精度に加工することができる。最終的に工程⑩で、成形された鉄心シートを下側のメイン金型の内部に抜き落として格納し、工程⑥で成形したダボによって鉄心シート間を結合して積層する。図7は、これらの技術によって開発した金型全体の外観であり、点線で示した箇所が回転可動金型である。

3.2 Vスキュー鉄心と巻線性

3.1節に述べた手法を用いて、製造した鉄心を図8に示す。今回、ロータの軸方向に加わる磁気吸引力をバランスさせるため、軸方向の中央面で対称となるV字状のスキューを形成した。ポール部を形成する回転可動金型はサーボ

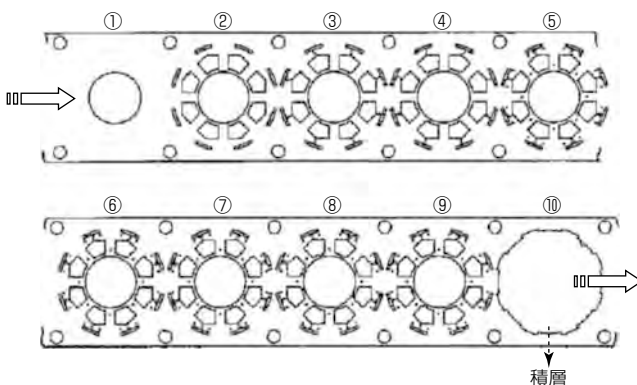


図6. 鉄心の製造工程

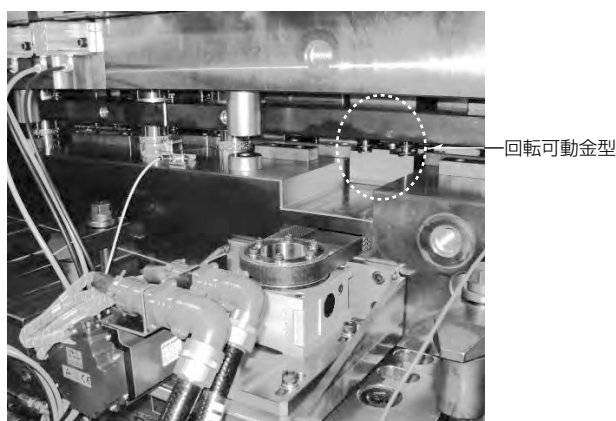


図7. Vスキュー金型の外観



図8. Vスキュー鉄心

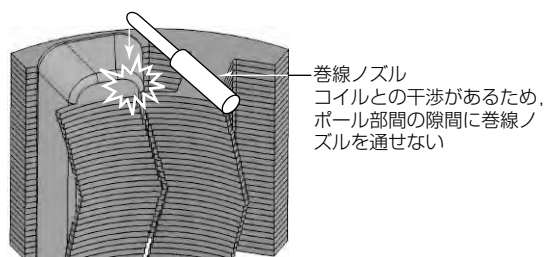


図9. 一体型鉄心への巻線

システムで制御しているため、任意のスキュー形状が設定できることもこの技術の特長であり、製品仕様に最適なスキューを金型の段取りなしで成形可能となる。

次に、Vスキュー鉄心への巻線性について述べる。一般的な一体型鉄心にVスキューを適用した場合、図9に示すように巻線ノズルと既に巻線済みのコイルとの干渉を回避する必要があることから、スキュー角度が大きすぎて、トルクリプルの低減効果が制限されてしまう。当社では、独特の鉄心構造である回転連結鉄心を用いており、図10のように巻線対象となる磁極ティースを突出させて巻線可能であるため、所定のスキュー角度を持つ鉄心であっても、高速・高占積率に巻線することが可能となる。

3.3 Vスキュー鉄心の効果

図11にVスキュー鉄心を適用したHGシリーズのACサーボモータを示す。このモータの特性を評価したところ、スキューなしの鉄心のものに比べ、無通電時トルクリプルを約25%低減できた。また、この鉄心はロータの磁石にスキューを形成する方法と同様の効果が得られる上、磁石と磁極ティースの対向面積を大きくとれることから、誘起電

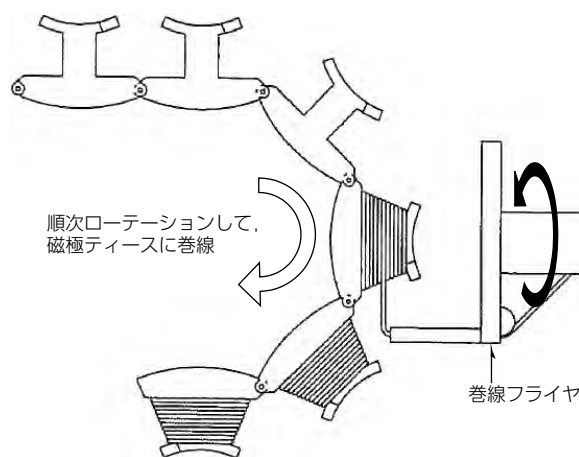


図10. 回転連結鉄心への巻線



図11. HGシリーズのACサーボモータ

圧が向上し、モータ単位体積当たりのトルクを向上させることができた。さらに、スキュー着磁では困難であったスキューのV字化によって、ロータに加わる軸方向の磁気吸引力を解消でき、モータの機械的信頼性を一層向上させることができた。

4. む す び

“製品性能と生産性を両立する”という生産コンセプトのもと、モータの高品位化を追求したVスキュー鉄心を考案し、それを量産可能とする可動金型技術を開発した。その結果、ACサーボモータの基本機能の一つである低トルクリプル化と同時に高速プレス加工と高速巻線を実現した。このような要素技術はACサーボモータ以外のモータ製品にも適用可能な共通基盤技術であり、車載機器や家電機器向けに展開を図り、より多くの製品の高機能化を推進する。

参 考 文 献

- (1) 川尻清成，ほか：次世代ACサーボアンプ“MR-J4シリーズ”・サーボモータ“HGシリーズ”，三菱電機技報，**86**，No.4，211～214（2012）
- (2) 秋田裕之，ほか：エアコン用圧縮機モータの省エネルギー・高効率化，三菱電機技報，**75**，No.10，655～658（2001）
- (3) 山村明弘，ほか：ステータおよびその製造方法，ならびにステータのコア部材の製造装置，特許第4121008号

大口径薄形巻上機のステータ製造合理化

山添一利* 朴 和彦**
橋本 昭* 大木克倫**
鵜飼義一*

Production Process Rationalization of Stator for Large Diameter and Thin Traction Machine

Kazutoshi Yamazoe, Akira Hashimoto, Yoshikazu Ugai, Kazuhiko Boku, Katsunori Ohki

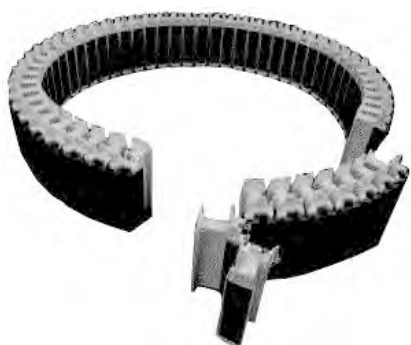
要 旨

ビル、マンションに設置される標準形エレベーターでは、建築スペースを有効活用できる機械室レスタイプ、小型機械室タイプの普及が進んでいる。三菱電機では2001年から薄形巻上機を昇降路内に設置した機械室レスエレベーターを販売し、小型化と低価格化のニーズに応えてきた。

薄形巻上機の技術としては、モータの多スロット集中巻構造による大口径設計、及び当社独自の回転連結鉄心を用いた高密度巻線技術を開発することによって、当社従来比1/5の薄形巻上機を実現している。機械室レスタイプ、小型機械室タイプのエレベーターは国内だけでなくグローバル市場でも選ばれる機会が増えている。これらエレベーターの構造を革新する鍵である薄形巻上機の生産規模が拡大しており、持続的な製造合理化が求められている。

本稿では、回転連結鉄心の特徴を生かしてステータの鉄心プレス工程と絶縁組立工程の合理化を実施した事例について述べる。鉄心プレス工程では、回転連結鉄心を直線千鳥状に2列対向させて打ち抜く直線2列抜き技術を開発し、鉄心の材料歩留りを約40%改善した。絶縁組立工程では、回転連結鉄心を逆反り姿勢で1ティースごとに樹脂一体成形し、絶縁構造を形成する工法と設備を開発した。

小さな単位で樹脂一体成形する工法によって設備を小型化し投資を抑制することで、大型製品の樹脂一体成形に自動化技術を適用することを可能にした。この自動化技術の適用によって生産条件を安定化させ、製品の高品位化を進めた。



薄形巻上機用ステータ



鉄心逆反り順送成形設備

回転連結鉄心の鉄心逆反り順送成形設備

工程ごとに適した姿勢を取れる回転連結鉄心の特徴を生かし、逆反りした姿勢で1つのティースずつ順次入れ替えながら樹脂一体成形する専用設備を開発した。加工する単位を小さくすることで成形金型と成形設備を小型化した。ティースの姿勢を変えて入れ替える鉄心姿勢変形装置は自社開発であり、成形プロセスに自動化技術を組み合わせることで自動生産を可能とした。

1. ま え が き

近年、グローバル規模でビルやマンションなどの建築着工数が増加しており、エレベーターに関しては、ビルの高層化に対応する高速大容量機種の拡張と、マンション向けなど標準機種の小型化と低価格化が求められている。当社では、永久磁石モータを搭載した大容量巻上機や薄形巻上機によって機械室を小型化できるエレベーターをラインアップし、顧客ニーズに应运きた。

標準機種としては、当社従来比1/5の薄形巻上機⁽¹⁾を開発し、巻上機と制御盤を昇降路内に設置することで機械室を不要とする機械室レスエレベーターを2001年4月に製品化した。機械室がなくなることで建物レイアウトの自由度が向上し、設置スペースが限られる駅舎などにも普及が進んでいる。また、薄形巻上機を活用した小型機械室エレベーターを製品化し、多様な建物仕様に対応している。

その結果、グローバル市場で顧客ニーズに合致した機械室レスタイプ、小型機械室タイプが選ばれる機会が増えている。これらエレベーターの構造を革新する鍵である薄形巻上機の生産規模は大幅に拡大しており、持続的な技術進化による生産性改善が求められている。

本稿では、ステータの製造合理化に取り組んだ事例について述べる。

2. 薄形巻上機における従来の製造技術

2.1 大口径集中巻きステータ

薄形巻上機のステータには従来、大口径集中巻構造を採用している。大口径化によって必要トルクを維持しつつステータの軸長を短縮し、巻線構造としてコイルエンドの短い集中巻を採用することでステータを薄形化した。集中巻モータの課題であるトルクリプルに対しては、ステータのスロット数とティース形状を最適化することで対策し、業界最薄^(注1)の巻上機を実現している。

製造工程では、図1に示すように、大口径のステータを円弧形状の鉄心ブロックに分割した状態で鉄心プレス加工し、鉄心ブロックごとに絶縁組立、巻線加工を実施し、複数の鉄心ブロックを溶接することで一円のステータを製造している。大型製品の製造では一般的に大型の設備を必要とするが、分割して加工単位を小さくすることでプレス設備や組立て設備を小型化できた。また、部品を小型化する

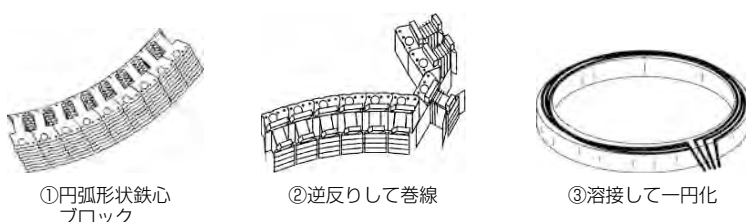


図1. ステータの製造工程

ことで工程間の搬送負荷が軽減し、効率よく大型ステータを製造している。

(注1) 2009年10月、当社調べ

2.2 回転連結鉄心

ステータを薄形化する技術として、“回転連結鉄心(図2)”を用いた高密度巻線技術が挙げられる。回転連結鉄心は、図3のように隣り合うティースの間で積層鋼板が重なり合い、その中央に形成された円柱状の突起が回転中心となることで自在に屈曲する特徴を持つ。

巻線工程では図4に示すように、鉄心ブロックを逆反り姿勢に展開して隣接するティースとの空間を広げることで真直性の良い電線を供給でき、フライヤノズルによる電線位置の制御によって整列化された高密度な巻線(図5)が実



図2. 回転連結鉄心

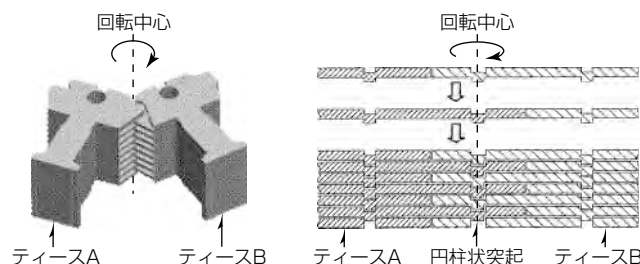


図3. 回転連結鉄心の挙動と断面

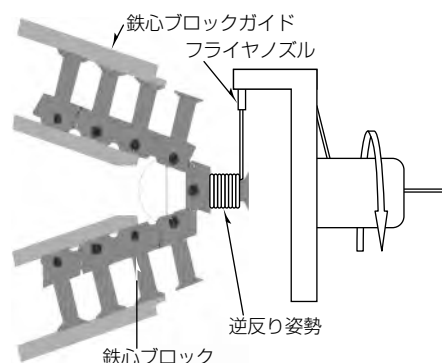


図4. 逆反り姿勢での集中巻

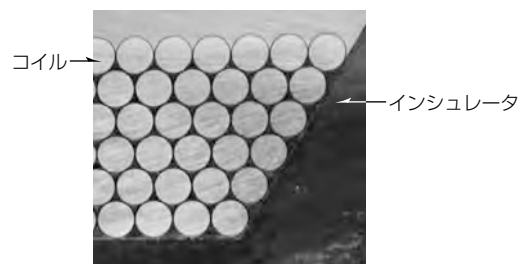


図5. 高密度整列巻線の断面

現できる⁽²⁾。限られたスペースに高密度に巻線を配置することで巻上機の薄形化を実現している。

また、回転連結鉄心は連結された構造のため隣接するティースのコイルを連続して巻線することができる。そのため後工程の接続作業が不要で、生産性が向上している。

このように、大口径集中巻きステータの構造設計と、回転連結鉄心による高密度巻線によって薄形巻上機を実現しているが、さらに、生産性向上の課題として、鉄心プレス工程、絶縁組立工程の合理化に取り組んだ。

3. 鉄心省材料化技術

外径が $\phi 600\text{mm}$ 以上の大口径のステータに用いる鉄心を一円で打ち抜くと、捨て材が多くなり材料歩留りが悪化する。そこで従来は、ステータを複数の鉄心ブロックに分割した構成とし、図6に示すようにプレス金型内で円弧形状に打ち抜くことで、高い材料歩留りを確保していた。今回、回転連結鉄心が持つ自在に屈曲できる特徴を生かし、図7に示すように直線形状に展開し、さらに、2列の鉄心ブロックのティース部を千鳥状に対向させて打ち抜くことで、従来の円弧形状では捨て材になっていたスロット内の材料を有効利用した。

プレス金型内で直線形状に打ち抜かれた鉄心ブロックが、ステータとして一円を形成するためには、図8のように円弧形状に屈曲する必要がある。同図(a)のように回転部で隣接するティース同士が密着した状態から同図(b)のように直

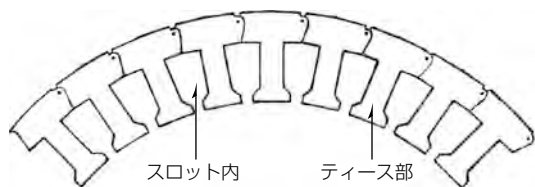


図6. 円弧形状

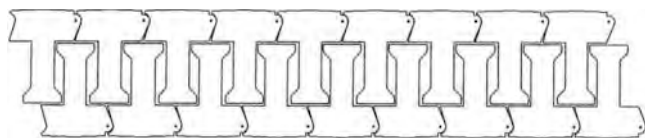


図7. 直線2列形状

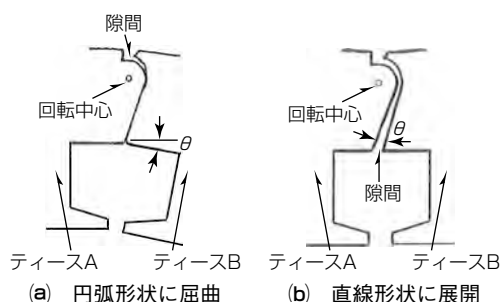


図8. 回転連結部の状態

線形状に展開したときに、隣接するティース間には θ 分の隙間が生じる。また、鉄心ブロックを自在に屈曲させるために、隣接するティース間が全て隙間で切り離されている。直線形状のプレス加工には、これら隙間を刃物で打ち抜く必要があり、量産に耐え得る刃物強度を確保した隙間形状とした。

このように、回転連結部の形状を工夫することで直線2列抜きを可能にし、鉄心の材料歩留りを約40%向上させた。

4. 絶縁組立工程の樹脂一体成形自動化技術

4.1 樹脂一体成形によるステータ絶縁構造

従来の絶縁部品組立構造を図9に示す。複数の絶縁部品を組み立てることで、鉄心ブロックとコイルの絶縁構造を形成する。鉄心ブロックとコイルを絶縁し巻枠の役割を果たすインシュレータ、インシュレータ間の隙間に貼り付けて絶縁を確保する絶縁シート、絶縁シートの外側を覆う絶縁フィルムの計6点を組み付ける構造である。

この開発では、成形金型内に鉄心ブロックを固定し成形樹脂を充填する樹脂一体成形構造(図10)を導入した。従来の絶縁機能を一体成形した成形樹脂で代替することで絶縁部品と組立作業を削減できた。

インシュレータの薄肉化は巻線するスペースの拡大につ

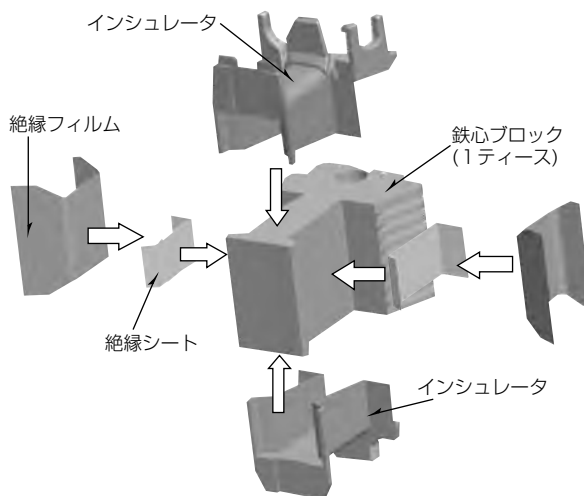


図9. 絶縁部品組立構造

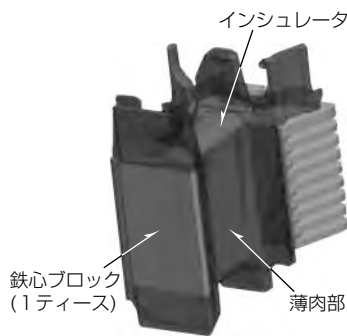


図10. 樹脂一体成形構造



図11. 成形樹脂の到達時間の差異

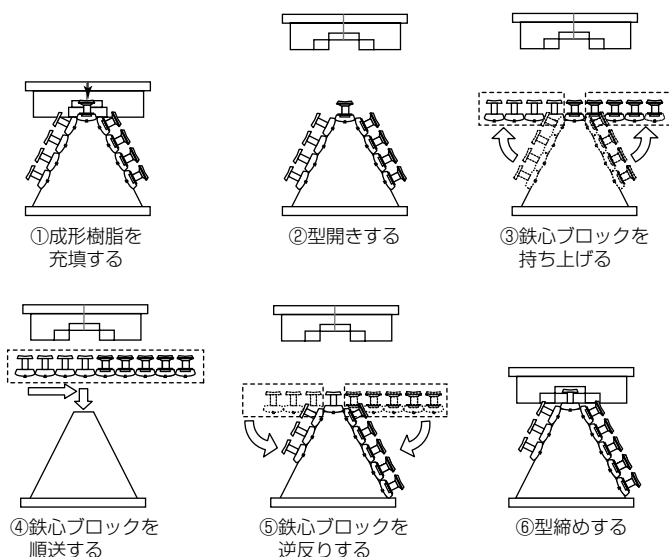


図12. 鉄心逆反り順送成形のフロー

ながるが、薄肉部への成形樹脂の充填性を確保する必要がある。そこで、流動経路をホットランナーにすることで成形樹脂の充填性を向上させ、さらに、樹脂流動解析(図11)を行いゲート配置と製品形状を最適化した。これによって成形樹脂の到達時間が遅い薄肉部への充填性を確保し、必要な成形品質を得ることができた。

4.2 回転連結鉄心の逆反り順送成形

モータ鉄心の樹脂一体成形工程では、1回の成形で全てのティースに成形樹脂を充填するのが一般的であるが、大型鉄心の場合、成形設備が大型化するという問題がある。そこで今回は、回転連結鉄心を逆反りさせて1ティースずつ樹脂一体成形し、順送を繰り返す“鉄心逆反り順送成形工法”を開発した。図12に鉄心逆反り順送成形のフローを示す。

次の①から⑥を繰り返すことで、樹脂一体成形によって絶縁構造を形成する。

- ① 1つのティースに成形樹脂を充填する。
- ② 成形金型を型開きする。
- ③ 鉄心ブロックを水平に姿勢変形させ、鉄心ブロックを持ち上げる。
- ④ 鉄心ブロックを水平方向に順送し次のティースを成形金型に固定する。
- ⑤ 鉄心ブロックを逆反り姿勢に屈曲する。
- ⑥ 成形金型を型締めする。

工程⑤では、鉄心ブロックを逆反り姿勢にすることで、図13に示すように樹脂一体成形するティースの側面に空間ができ、ティースの側面から金型スライドパーツで囲む構造にした。ティース間の狭い隙間に金型スライドパーツを挿入する必要がなくシンプルな構造になるため、金型の強度を確保できる。また、成形金型の開閉時間を短縮できた。

成形設備は、ロータリーテーブル式の縦(たて)型射出成形機、成形金型、及び鉄心ブロックの姿勢を変形し成形金

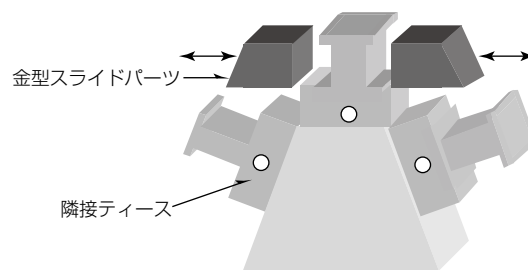


図13. 成形金型の構造

型に供給する鉄心姿勢変形装置で構成している。鉄心姿勢変形装置は鉄心ブロックの関節を屈曲させる姿勢変形ユニットと、鉄心ブロックを成形金型から持ち上げて順送する搬送ユニットで構成し、縦型射出成形機と一体化して連動することで、①から⑥の一連の工程を自動化した。これらの設備を自社開発することで、各工程の条件の最適化とサイクルタイムの最小化を図った。

この工法によって、鉄心ブロックを屈曲させて逆反り姿勢で1ティースずつ成形することで成形金型と縦型射出成形機を小型化することができ、投資を抑制する効果が得られた。また、小さい単位で成形することで、成形樹脂の充填状態を均一化しティースごとの成形品質を安定させることができた。

5. む す び

自在に姿勢を変えられる回転連結鉄心の特徴を活用し、“小さな単位で、適した形で加工する”というコンセプトの下、鉄心プレス工程、絶縁組立工程の合理化を進めた。鉄心プレス工程では鉄心ブロックを直線形状で2列に対向させる“形”で加工することで材料歩留りを約40%向上させた。絶縁組立工程では巻線工程と同様に逆反りの“形”として、1ティースずつという“小さな単位”の樹脂一体成形で絶縁構造を形成することで、部品点数を削減し組立作業を合理化した。

さらに、製品形状に適した形に変化させる自動化技術を成形技術に組み合わせることで、小さな単位で連続的に成形する工法を実現した。大型製品では、設備が大型化し設備投資が負担となるため自動化生産が進みにくいが、設備を小型化し投資を抑制することによって大型製品の樹脂一体成形に自動化技術を適用することができた。この絶縁組立工程の自動化によって、コスト低減と生産条件の安定化による製品の高品位化を更に進めた。

参 考 文 献

- (1) 井上健二，ほか：三菱新機械室レスエベーター用薄形巻上機，三菱電機技報，75，No.12，772～776（2001）
- (2) 秋田裕之，ほか：エアコン用圧縮機モータの省エネルギー・高効率化，三菱電機技報，75，No.10，655～658（2001）

マニュアルモータスタータの製造技術

村井正俊*
江藤基比古*
八木博之**

Manufacturing Technologies of Motor Circuit Breaker

Masatoshi Murai, Motohiko Eto, Hiroyuki Yagi

要 旨

マニュアルモータスタータは、配線用遮断器の短絡保護機能とサーマルリレーの過負荷・欠相検出機能を併せ持つスタータで、この一台でモータ回路の保護が可能であるとともに、手動でのモータの始動・停止が可能な機器である。

このマニュアルモータスタータには、モータ制御分野で高い安全性と省スペース・省配線及び規格のグローバル対応等が要求されており、高い遮断容量と優れた減流性能を実現することによって、モータ回路の短絡電流定格(SCCR)を配線用遮断器と電磁開閉器の組合せよりも大きく引き上げることが可能であり、機械セットメーカーでの需要が拡大している。

三菱電機はこれらの要求を満たすマニュアルモータスタータ“MMP-Tシリーズ”を開発・市場投入した⁽¹⁾。

MMP-Tシリーズの組立てでは、組立てに要求される精度が高いため、組立て精度向上及び品質安定化と生産性向上を目指し、自動機による製造技術開発に取り組んだ。

本稿では、次の3工程の製造技術開発の内容について述べる。

(1) バイメタルと固定端子の接合

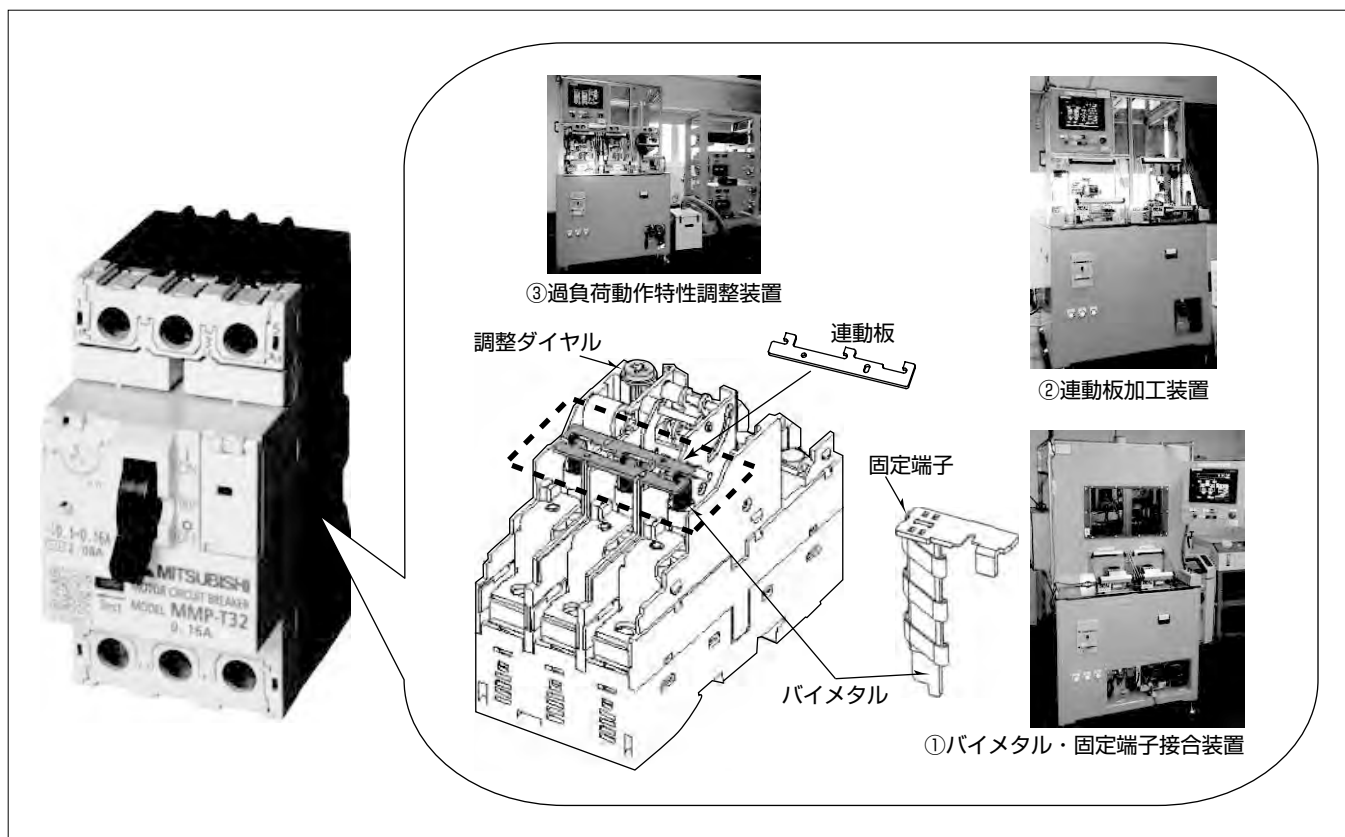
レーザ溶接適用による溶接信頼性の確保

(2) 連動板の加工・組立て

バイメタル位置計測結果に基づく連動板加工による連動板のバイメタルへの当接精度の確保

(3) 調整ダイヤルによる過負荷動作特性の調整

可変通電での調整による動作特性設定精度の確保



マニュアルモータスタータと導入した自動機

マニュアルモータスタータは、固定端子に接合されたバイメタルに過電流が流れ、バイメタルが発熱することで湾曲し、その湾曲に伴い連動板が作動し電路の開放が行われる。このような過負荷動作の特性は調整ダイヤルによって変更可能なことが特徴である。①バイメタル・固定端子接合装置、②連動板加工装置、③過負荷動作特性調整装置を導入し、組立て精度向上と品質安定化及び生産性向上を実現した。

1. ま え が き

マニュアルモータスタータは、①配線用遮断器の短絡保護機能、②サーマルリレーの過負荷・欠相検出機能、③手動スタータのモータの始動・停止機能を一つにまとめた機器であり、この一台でモータ回路を保護できる。

このマニュアルモータスタータには、モータ制御分野で高い安全性と省スペース・省配線及び規格のグローバル対応等が要求されており、高い遮断容量と優れた減流性能を実現することによって、モータ回路の短絡電流定格 (SCCR) を配線用遮断器と電磁開閉器の組合せよりも大きく引き上げることが可能であり、機械セットメーカーでの需要が拡大している。

当社はこれらの要求を満たすマニュアルモータスタータ MMP-Tシリーズを開発・市場投入した。

製品性能を満足するためには、組立てに要求される精度が高いため、人手による組立てでは要求精度を満足することが難しく生産性が低いことが懸念された。そこで、組立て精度向上と生産性向上を目指し、自動機による製造技術開発に取り組んだ。自動機による組立てを実現することによって併せて品質の安定化も実現した。

本稿では、次の3工程の製造技術開発の内容について述べる。

- (1) バイメタルと固定端子の接合
- (2) 連動板の加工・組立て
- (3) 調整ダイヤルによる過負荷動作特性の調整

2. マニュアルモータスタータの構造と特性

マニュアルモータスタータの構造を図1に示す。マニュアルモータスタータは、主に、①回路を開閉する接触子と電流を遮断する際に発生するアークを消滅させる消弧装置からなる遮断部、②通電電流の過電流や短絡電流を検知して機構部を動作させる過電流引き外し部、③遮断部の接触子の開閉動作を行う開閉機構部、④これらの構成要素を一体にして小形に組み込むベース (モールドケース) で構成している。過電流引き外し部は、各極の過電流を検知するためのバイメタルと、各極のバイメタルの動作を機構部に伝達するための連動板で構成している。また、過電流を検知した時の過負荷動作特性は、調整ダイヤルによって所定の範囲で変更可能なので、使用するモータの容量に合わせた調整での使用が可能である。例えば、呼び定格32Aのマニュアルモータスタータでは、24~32Aの範囲内で電流値を変更して使用できる。調整範囲を示す目盛りは、前面を覆うカバーに印字している。

このようなマニュアルモータスタータの過負荷動作特性を図2に示す。過負荷動作特性を示す曲線は、所定の範囲内では、おおむね電流の大きさに対して反比例する特性と

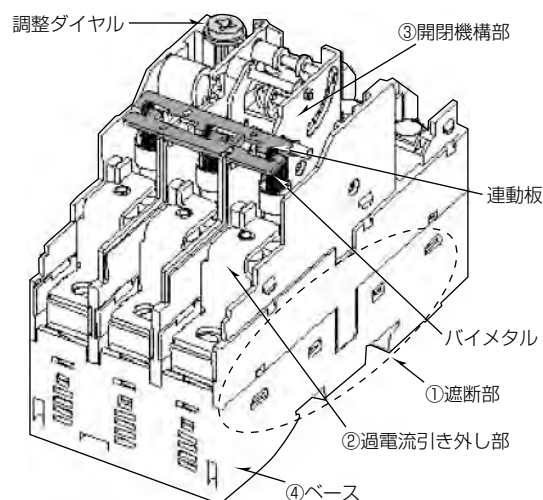


図1. マニュアルモータスタータの構造

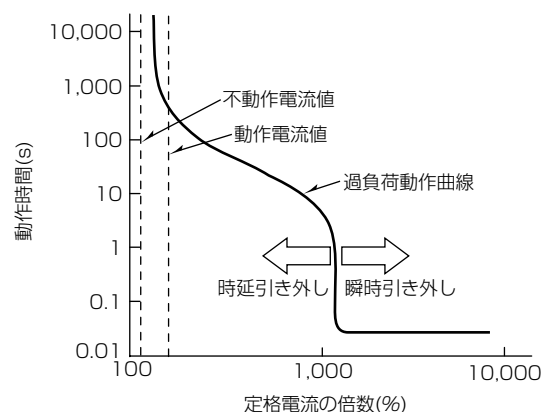


図2. マニュアルモータスタータの過負荷動作特性

なり、一般的に時延引き外し特性と呼ばれる。電流の大きさが一定値を超えるような短絡電流の通電時には、瞬時に電路を遮断する。このような特性を、瞬時引き外し特性と呼ぶ。

時延引き外し特性は、固定端子に接合したバイメタルに過電流が流れ、バイメタルが発熱することで湾曲し、その湾曲に伴い連動板が作動し機構部を動作させることによって電路を開放する。ここで、時延引き外し特性は、JISやIEC (International Electrotechnical Commission) の規格で、不動作電流値と動作電流値に対する動作時間が規定されており、その範囲内での動作が保証される必要がある。

3. マニュアルモータスタータの製造技術

3.1 バイメタルと固定端子の接合

バイメタルは、ベースに固定される固定端子に対し垂直に接合している (図3)。バイメタルと固定端子の接合には、電気的には、接合後の接触抵抗値が小さいこと、機械的には、接合後の固定端子に対するバイメタル直角度のばらつきが少なく十分な強度が保たれることが要求される。また、バイメタルは各極に使用されるので生産性確保のためには

高速な接合方法が求められる。このような要求を満足する接合方法としては、溶接による方法が考えられる。

バイメタルは、熱膨張率が異なる2種類の金属を張り合わせた部品である。そのため低膨張側の金属と高膨張側の金属の材料組成が異なり、各々の側で固定端子との溶接条件を変更する必要があった。また、製品の小型化のためには、省スペースで実現可能な構造に適した溶接方法を採用する必要があった。

そこで、バイメタルと固定端子の接合技術として、熱密度の高いレーザ溶接を用いた自動機によって、高膨張側と低膨張側の溶接パラメータを変更し、レーザ照射の狙い位置を補正しながら高速でバイメタルと固定端子の境界を溶接する方法を確立した(図4)。

溶接品質の安定化のためには、材料選定も重要である。固定端子には腐食防止のためにめっき処理を施しているが、バイメタルの融点に近いめっき材料を選定することによって溶接部の内部欠陥や表面の割れの発生を抑制した。

このような溶接方法を採用することで、十分な生産能力と固定端子へのバイメタルの溶接信頼性を確保した。

3.2 連動板の加工・組立て

連動板は、各極のバイメタルの湾曲量を機構部に伝達する機能を持つため、各極のバイメタルに当接した組立てが要求される。しかしながら、各極のバイメタルの位置は、

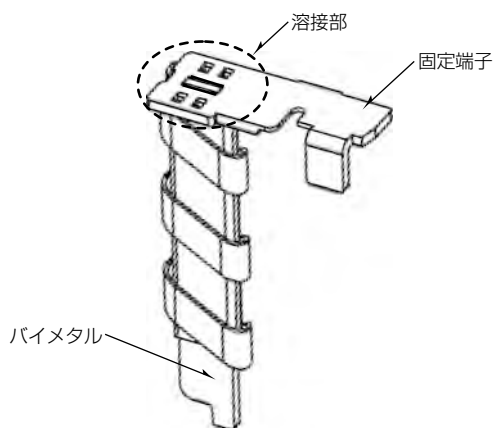


図3. バイメタルと固定端子

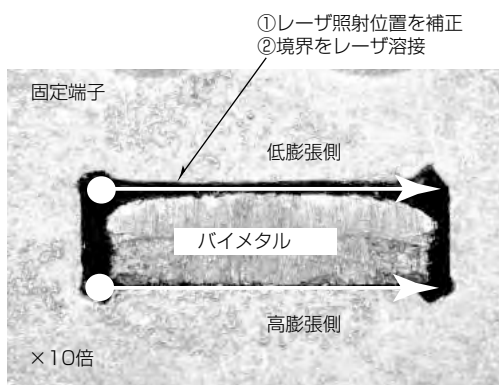


図4. 溶接部拡大

溶接による変形や組立て寸法のばらつきによって大きな誤差を生じる。そのため、組立て後の各極のバイメタルの位置に合わせた連動板の加工・組立てが必要である。また、生産性確保のためには、高速な加工・組立てが求められる。

そこで、連動板の加工・組立て技術として、バイメタル位置を高速で高精度に測定し、その位置情報に合わせて連動板の加工を実現する方法を確立した(図5)。

接触式の変位センサをバイメタルの測定箇所に対接させ、変位センサの当接時の振動と押し付け力によるバイメタルの変形を抑制してバイメタル位置を計測し間隔を計算し、その計算結果を基に連動板の加工寸法を決定し連動板を加工する制御プロセスを開発した。これによって、製品ごとに固有な連動板の間隔を高速で高精度に加工することが可能となり、バイメタルへの連動板の当接精度を確保できた。また、自動機による計測・加工によって生産性向上を実現した。

3.3 調整ダイヤルによる過負荷動作特性の調整

マニュアルモータスタータの過負荷動作特性は、不動作電流値と動作電流値の範囲内での動作が保証される必要がある。電流の通電時間とバイメタル湾曲量の関係から、この動作特性の調整とは、バイメタルの湾曲量が、不動作電流値に対するバイメタル湾曲量と動作電流値に対するバイメタル湾曲量のちょうど中間のバイメタル湾曲量の位置で機構部が動作するように、機構部動作点と連動板との間隔(ギャップ)を調整することである(図6)。

調整ダイヤルで特性の調整が可能な構造であることから、この調整も調整ダイヤルで実施できる。すなわち、バイメ

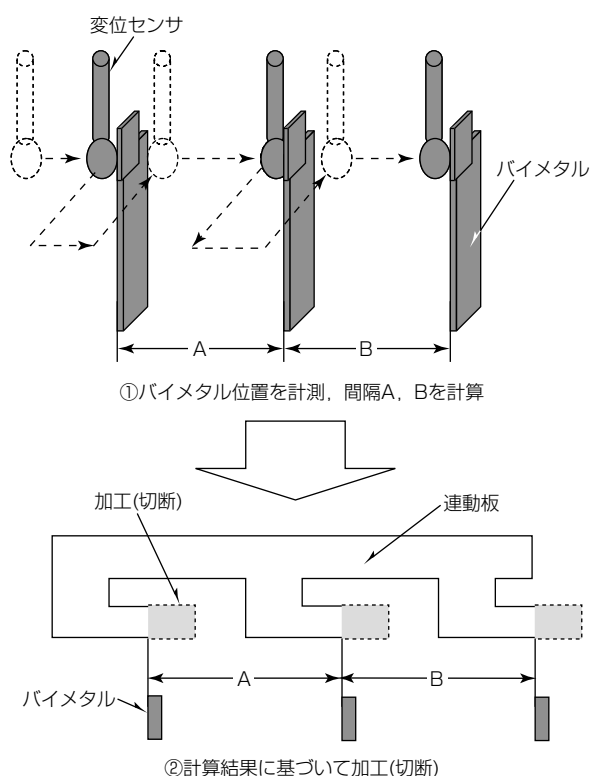


図5. バイメタル位置計測と連動板加工プロセス

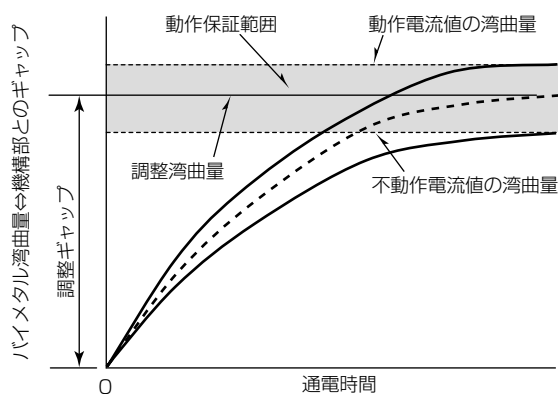


図6. 通电時間とバイメタル湾曲量の関係

タル湾曲量が不動作電流値と動作電流値のそれぞれの湾曲量の中間位置になるような通电電流値を、バイメタル湾曲量が安定するまで一定時間通电した後に調整ダイヤルを回転させることで、機構部が動作する調整ダイヤルの角度を検出し目盛りを印字することによって調整できる。

ここで、マニュアルモータスタータの動作特性は、変更可能な範囲の全ての電流値に対して満足する必要がある。最小電流値だけで調整を実施し、一定の目盛りを印字した場合、バイメタル湾曲量などのばらつきによって最大電流値で動作特性の精度が悪くなってしまう。

そこで、マニュアルモータスタータの調整では、まず、最小電流値で調整を実施した後に、最大電流値で同様の調整を実施する可変通电による調整で、個別の電流特性に合わせた目盛りを印字する方法を採用した。調整ダイヤルとカバーに最小電流値と最大電流値における目盛りを製品ごとに印字することによって、変更可能な範囲の全ての電流値で高精度に動作特性を確保することを可能とした(図7)。また、各電流値での調整と目盛りの印字を自動機で実施することによって生産性向上を実現した。

製品ごとに異なる目盛りを印字するために、最終調整位置である最大電流値の調整ダイヤル位置で、カバー側に最大目盛りを、調整ダイヤル側に基準マークを印字、また、当該位置を基準として調整結果に基づいた目盛り間隔分だけ反時計方向の位置に最小電流値の目盛りを印字する。その結果、製品固有に調整ダイヤルへの基準マークの印字位置とカバー側の目盛り印字の間隔が異なっていることが特徴である。

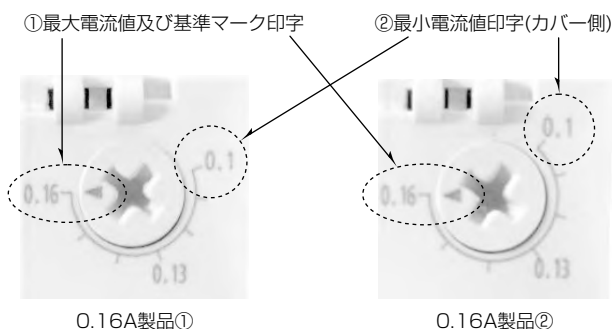
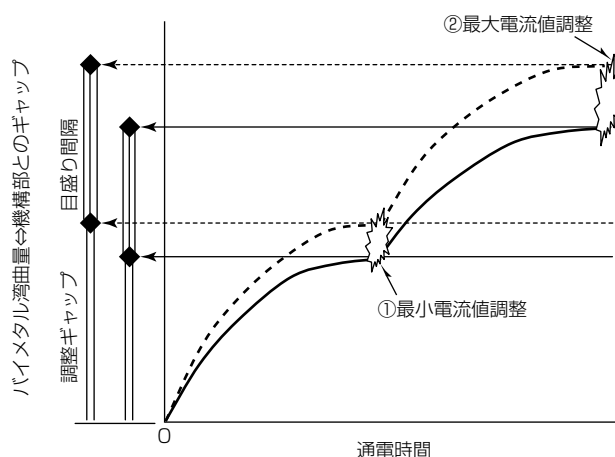


図7. 可変通电による調整プロセス

4. む す び

マニュアルモータスタータの製造技術開発として、組立て精度向上と品質安定化及び生産性向上を目指し、自動機による製造技術開発に取り組んだ。本稿では次の3工程の製造技術開発の内容について述べた。

- (1) バイメタルと固定端子の接合
- (2) 連動板の加工・組立て
- (3) 過負荷動作特性の調整

今後も、製造技術の革新と自動機の導入促進によって組立て精度向上と品質の安定化及び生産性向上に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 野崎洋之：マニュアルモータスタータ“MMP-Tシリーズ”，三菱電機技報，87，No.10，596～599（2013）

IHクッキングヒーターの パワーエレクトロニクス実装技術

中島浩二* 竹下みゆき**
熊谷 隆* 木下広一***
原田圭司*

Power Electronic Packaging Technology for IH-Cooker

Koji Nakajima, Takashi Kumagai, Keiji Harada, Miyuki Takeshita, Hirokazu Kinoshita

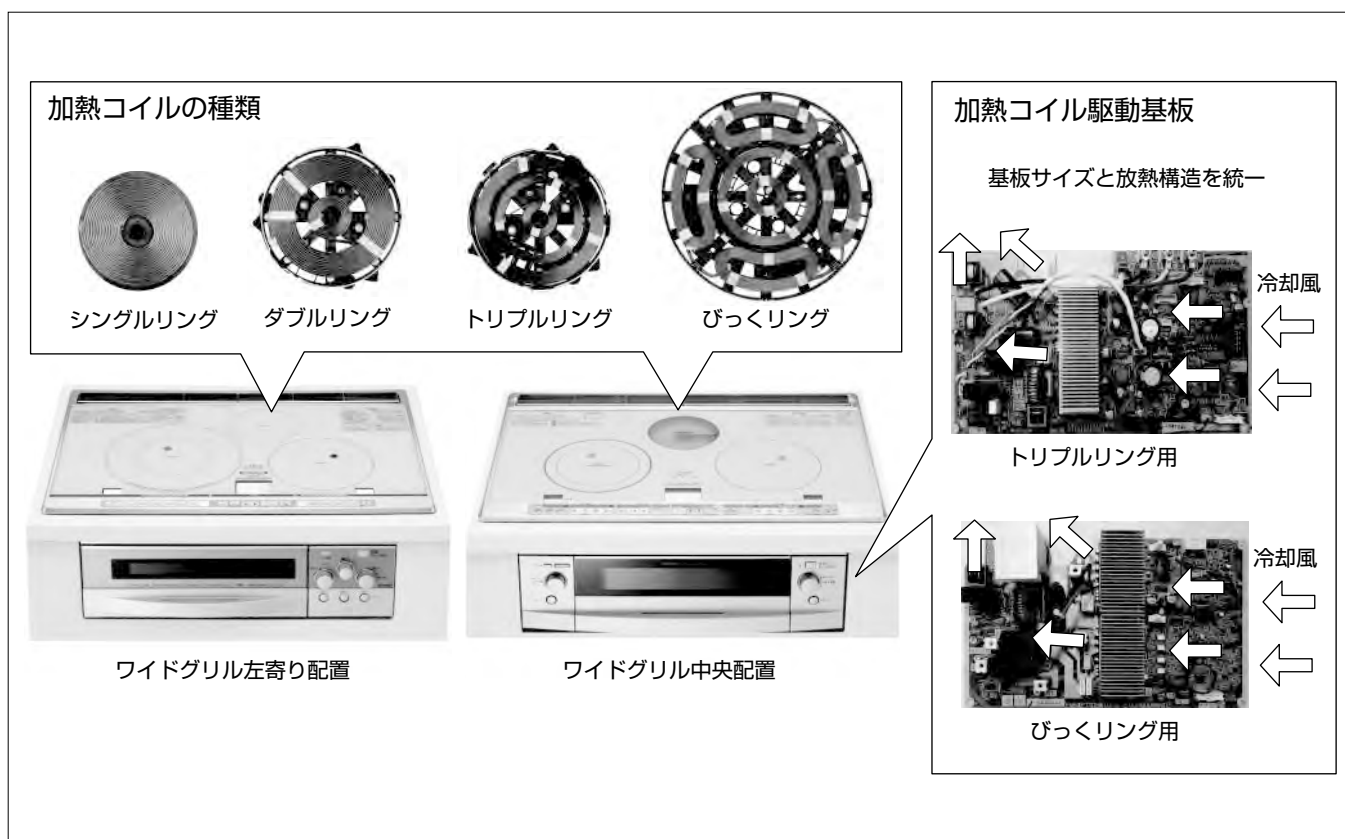
要 旨

IHクッキングヒーター市場は、ガスコンロからの置き換えに加え、新しい製品への買い換え需要も増加傾向にある。三菱電機は、ニーズの多様化に応えるため、調理機能が異なる4種類の加熱コイルと、幅360mm、奥行き296mmの横幅の広いワイドグリルの配置の組合せで、5機種の製品をラインアップした(2013年8月時点)。

“対流煮込み加熱”や“ゆでもの加熱”などの調理機能を持つ“トリプルリングコイル”と“びっくリングコイル”は、ほかの加熱コイルに比べて駆動回路が多く必要で、基板サイズが大きくなる。また、ワイドグリルの配置が異なると回路基板を収納できるスペースが大きく変動する。このような実装制約に合わせて個別に実装設計をすると開発期間が

長くなり、製品ごとに実装構造が異なると生産性も悪くなる。そこで、回路基板と放熱構造を標準化することで、開発期間を短縮し、生産性も向上させた。

加熱コイル駆動基板にパワー半導体を6素子内蔵した汎用のパワーモジュールが使用できる回路方式を考案し、これを適用してトリプルリングコイルとびっくリングコイルの基板を小型化し、他の加熱コイルの駆動基板と同等サイズにした。また、加熱コイルと駆動基板を冷却する放熱構造については、グリルの横に基板を縦置きに配置し、放熱フィンなどの基板上の大型部品の配置概念を全ての基板で同じにすることで、全機種で統一した。



ワイドグリル搭載IHクッキングヒーターの製品ラインアップ

三菱電機は、シングルリングコイル、ダブルリングコイル、トリプルリングコイル、びっくリングコイルの4種類の加熱コイルとラジエントヒータを選択する3つの加熱部と、横幅の広いワイドグリルの左寄り配置と中央配置の2種類の配置の組合せで5機種の製品をラインアップした。これら製品ラインアップで、汎用パワーモジュールの活用と部品の配置概念を同じにすることで、加熱コイルの駆動基板のサイズと放熱構造を統一した。

1. ま え が き

IHクッキングヒーターの国内需要は、2012年度で73万台(三菱電機調べ)であり、普及率も年々増加している。近年は、ガスコンロからの置き換えに加え、新しい製品への買い換え需要も増加傾向にある。

三菱電機は、1999年に加熱コイルにシングルリングコイルを搭載した製品を発売し、その後、2001年に均一加熱性に優れたダブルリングコイルを、2007年に対流煮込み加熱などの調理機能を加えたトリプルリングコイルを、2011年に様々な形状の鍋に対応できるびっくリングコイルを開発してきた。これら4種類の加熱コイルと、幅360mm、奥行き296mmの横幅の広いワイドグリルの配置の組合せで、5機種の製品をラインアップし、多様化するニーズに対応している。

本稿では、これら製品のラインアップで、回路基板や放熱構造の標準化を可能としたパワーエレクトロニクス実装技術について述べる。

2. 回路の種類と実装制約

表1に示すように、右加熱部はダブルリングコイルとして、左加熱部は3種類の加熱コイルから選択し、中央加熱部はシングルリングコイルか金属発熱で鍋底を加熱するラジエントヒーター(RH)から選択し、ワイドグリルの配置を左寄りか中央配置から選択することで5機種の製品をラインアップしている。

図1に4種類の加熱コイルを示す。シングルリングコイルとダブルリングコイルは、1つの直列コイルで構成している。トリプルリングコイルは、内コイルと外コイルの2つのコイルで構成している。びっくリングコイルは、内コイルと上下の外コイルと左右の外コイルの3つのコイルで構成している。トリプルリングコイルとびっくリングコイルは、複数あるコイルを個別に駆動することで対流煮込み加熱などの様々な調理機能を実現できるが、駆動回路がコイルごとに必要となるため、シングルリングコイルとダブルリングコイルよりも基板サイズが大きくなる。

図2にグリルを左寄りに配置した場合と中央に配置した場合の基板収納スペースを示す。回路基板は、3つの加熱部の間と、グリルの横に配置する。加熱コイルの直径は、ダブルリングコイルとトリプルリングコイルが200mmであるのに対し、びっくリングコイルは260mmと大きさが異なる。そのため、左加熱部に搭載する加熱コイルによって回路基板を配置できるスペースが異なる。また、グリルの横のスペースも、左寄り配置の場合、幅120mmであるのに対し、中央配置では60mm×2箇所と異なる。また、加熱コイルとその駆動基板は冷却が必要で、基板、及び基板上の部品配置が冷却性能に大きく影響する。

このような製品ごとに異なる回路や実装制約に合わせて

表1. 製品ラインアップ

型番	左加熱部	中央加熱部	右加熱部	グリル
PT31H	びっくリングコイル	シングルリングコイル	ダブルリングコイル	左寄り
PG21H	びっくリングコイル	—	ダブルリングコイル	左寄り
T32H	トリプルリングコイル	シングルリングコイル	ダブルリングコイル	中央
G32H	トリプルリングコイル	ラジエントヒーター	ダブルリングコイル	中央
G32V	ダブルリングコイル	ラジエントヒーター	ダブルリングコイル	中央

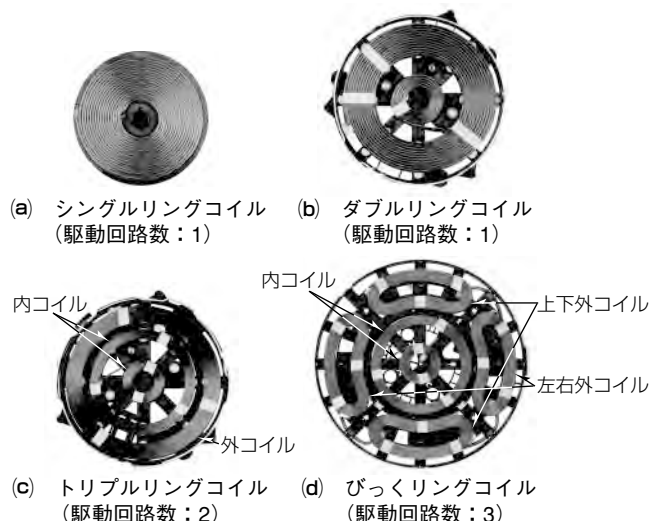


図1. 4種類の加熱コイル

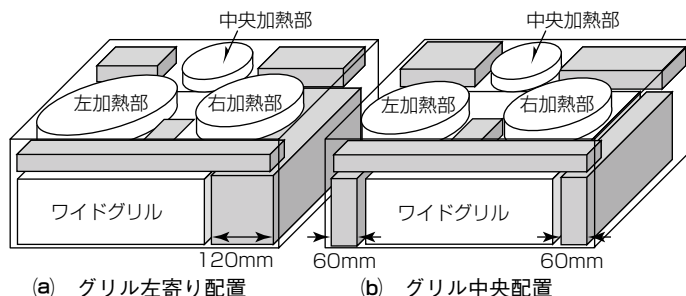


図2. 基板収納スペース

個別に実装設計すると、開発期間が長くなり、製品の生産性も悪くなる。そこで、回路基板、及び放熱構造を標準化することで、開発期間を短縮し、生産性を向上させた。

3. 回路基板と放熱構造の標準化

回路基板を標準化すると、電気性能と組立て性の設計評価の期間を短縮できる。基板の種類が異なっても、基板形状を同じにできれば、基板製造工程のプロセスや輸送の条件を統一でき、基板の生産性が向上する。また、基板収納スペースの制約で基板形状が異なっても、回路を共通にできれば、回路の設計評価の期間を短縮でき、電子部品の統一によって基板製造時の部品の切替え時間を削減できる。基板に加えて放熱構造も統一すると、風路を構成する部品や基板を固定する部品の設計期間と冷却性能の評価期間を

短縮できる。さらに、組立て工程を同じにできるため、生産性も向上できる。以下、5機種の製品での標準化について詳細を述べる。

3.1 制御電源とフィルタ回路の共通化

各回路を動作させるための直流電圧を生成する制御電源とノイズを除去するためのフィルタ回路は、製品ごとに必要な直流電圧やノイズ発生成分、ノイズ伝導経路が異なるため回路が異なる。そこで、設計の工夫によって、回路を共通化した。

各回路を動作させるために必要な直流電圧を、5機種で共通の電圧と製品仕様ごとに異なる電圧とに分け、生成する回路を2つに分割した。前者は、多出力絶縁型の制御電源回路で生成し、後者は、製品ごとに置き換える加熱コイル駆動基板と操作表示基板で生成するようにした。これによって、開発負荷の大きい多出力絶縁型の制御電源回路を共通にした。さらに、基板構成と配線を5機種の製品で同じにし、ノイズの伝導経路を統一したことで、フィルタ回路を共通にした。

3.2 基板配置

基板の配置は、グリル横の幅の狭いスペースをどう使うかがポイントとなった。図3に基板の横置き配置と縦置き配置の比較を示す。横置き配置とすると、基板の幅方向が狭く、基板一枚あたりの基板面積を広くとれない。製品の高さ方向には余裕があるため、二枚以上の基板を段積みすることになるが、基板間を接続する配線が必要で、配線の接続作業や組立て作業が増す。また、段積みされる各基板の発熱量に合わせて冷却風を分配する必要があるため、風路が複雑になる。一方、縦置き配置は、部品の高さに制約があるが、一枚あたりの基板面積を広くとれ、風路も単純にできる。さらに、グリルの左寄り配置と中央配置で基板面積を同等にでき、風路構造も類似にできるため、標準化に適している。そこで、グリルの横には回路規模の大きい加熱コイル駆動基板を縦置きで配置することとした。

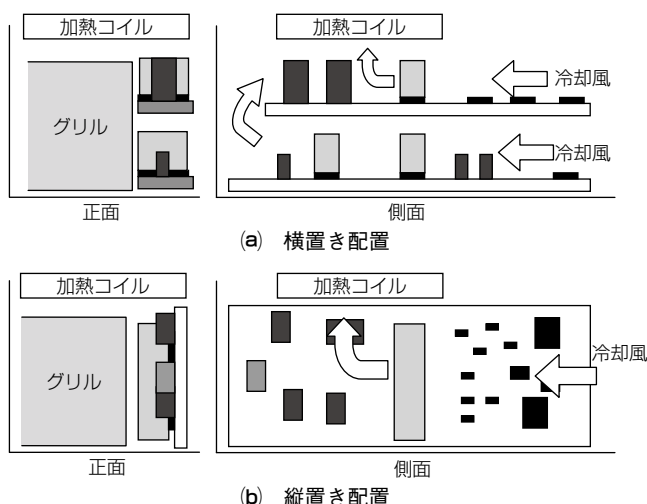


図3. 基板の横置き配置と縦置き配置の比較

図4にグリル左寄り配置の回路基板の配置を、図5にグリル中央配置の回路基板の配置を示す。大型部品の多いフィルタ、グリル駆動、RH駆動の3回路を、中央加熱部の右とその下に(図中点線)二枚の基板に分けて搭載した。大型部品の少ない制御電源回路を、グリル左寄り配置ではグリル横の二枚の加熱コイル駆動基板の間に、グリル中央配置では中央加熱部の左に搭載した。

3.3 加熱コイル駆動基板

3.3.1 駆動回路

図6に4種類の加熱コイルの駆動回路と使用した半導体素子を示す。

シングルリングコイル用とダブルリングコイル用の加熱コイル駆動回路には、半導体素子を放熱フィンへ取り付ける作業時間を短縮するため、半導体素子の数が少ないハーフブリッジ回路を採用した。

駆動回路の多いトリプルリングコイル用とびっくリングコイル用の加熱コイル駆動回路には、三相モータ駆動用パワーモジュールが使用できるように、2素子を共通として2組のフルブリッジ回路を6素子で構成する回路方式を考案し、適用した。これによって、ほかの加熱コイル駆動基板と同等サイズに小型化した。

3.3.2 部品配置

加熱コイル駆動基板と加熱コイルは、製品後方下部に配置するファンによって冷却する。製品後方の吸気口から流

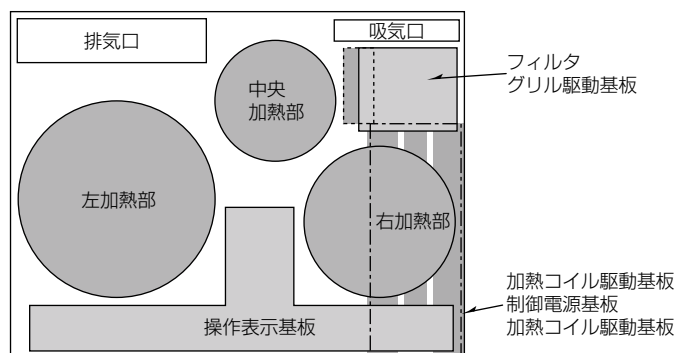


図4. グリル左寄り配置の回路基板の配置図

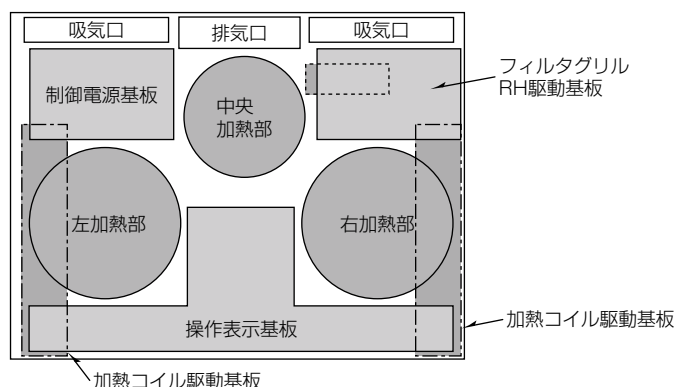


図5. グリル中央配置の回路基板の配置図

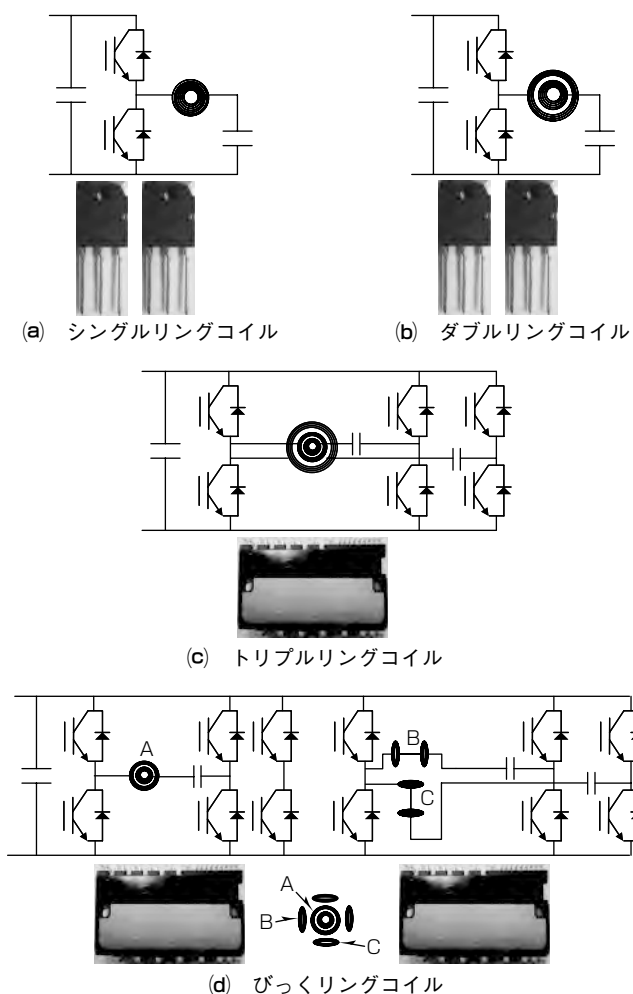


図 6. 加熱コイルの駆動回路と半導体素子

入する冷却風は、加熱コイル駆動基板を経由して加熱コイルに流れる。このような直列型の風路は、風路を形成する構造部品が少ないが、前方の加熱コイル駆動基板の部品配置が、風路の後方に配置する加熱コイルを冷却する能力に大きく影響する。図 7 に加熱コイル駆動基板の一例を示す。放熱フィンを基板の中央に配置し、大型部品を放熱フィンの風下側に上方に風を導くように配置した。風上側には、低背部品で構成する回路を配置するようにし、大型部品を配置する場合は、部品の長辺が風の流れと平行となるように配置した。このような部品の配置概念を全ての加熱コイル駆動基板で同じにすることで、どの加熱コイル駆動基板を搭載しても加熱コイルを冷却する能力が変わらないようにした。また、大型部品の長辺が風の流れと平行となるように配置することで、風上側では部品の冷却面を広くとれ、風下側では部品が風路の一部となり放熱フィン通過後の風速の高い冷却風を当てられるため、大型部品の冷却性能が向上し、熱に弱いコンデンサなどを小型化できた。

加熱コイル駆動基板の基板サイズと冷却風路の統一によって、回路基板の固定や放熱構造を標準化した。これによって、加熱コイル駆動基板と冷却ファン、固定部材を一体化したサブユニットをどの種類の加熱コイル駆動基板で

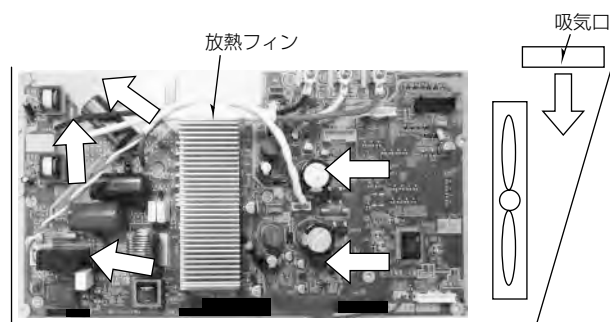


図 7. 加熱コイル駆動基板の一例

	回路の種類数	基板形状の種類数
フィルタ	5	2
グリル駆動	1	2
RH駆動	1	2
制御電源	5	2
操作表示	2	2
加熱コイル駆動	4	7



	回路の種類数	基板形状の種類数	標準化項目
フィルタ グリル駆動 RH駆動	1	2	回路の共通化
制御電源	1	2	回路の共通化
操作表示	2	2	—
加熱コイル駆動	3	1	基板サイズの統一 放熱構造の統一

図 8. 回路と基板形状の種類の削減

も同一形状とし、加熱コイルの種類が変わっても製品の組立て工程を同じにした。

3. 4 回路基板の標準化

3. 3項の発想で回路と基板形状を標準化した結果、図 8 に示すように、回路の種類を18種類から7種類に、基板形状を17種類から7種類に削減した。

4. む す び

4種類の加熱コイルと横幅の広いワイドグリルの配置を組み合わせた5機種の製品ラインアップで、回路基板、及び放熱構造を標準化した。IHクッキングヒーターの普及率は今後も増加すると見込まれる。多様化するニーズに応えるため、新しい調理機能の提案と製品ラインアップの充実化を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 私市広康, ほか: 汎用IPMのIHインバータへの適用, 三菱電機技報, **80**, No.6, 390~395 (2006)
- (2) 私市広康, ほか: 家庭用IHクッキングヒーター技術, 三菱電機技報, **84**, No.6, 339~342 (2010)
- (3) 菅 郁朗, ほか: 家庭用IHクッキングヒーター技術, 三菱電機技報, **86**, No.10, 568~571 (2012)

ロバスト設計手法による 高周波回路の直行率改善

中川隆文*
桐越 祐**

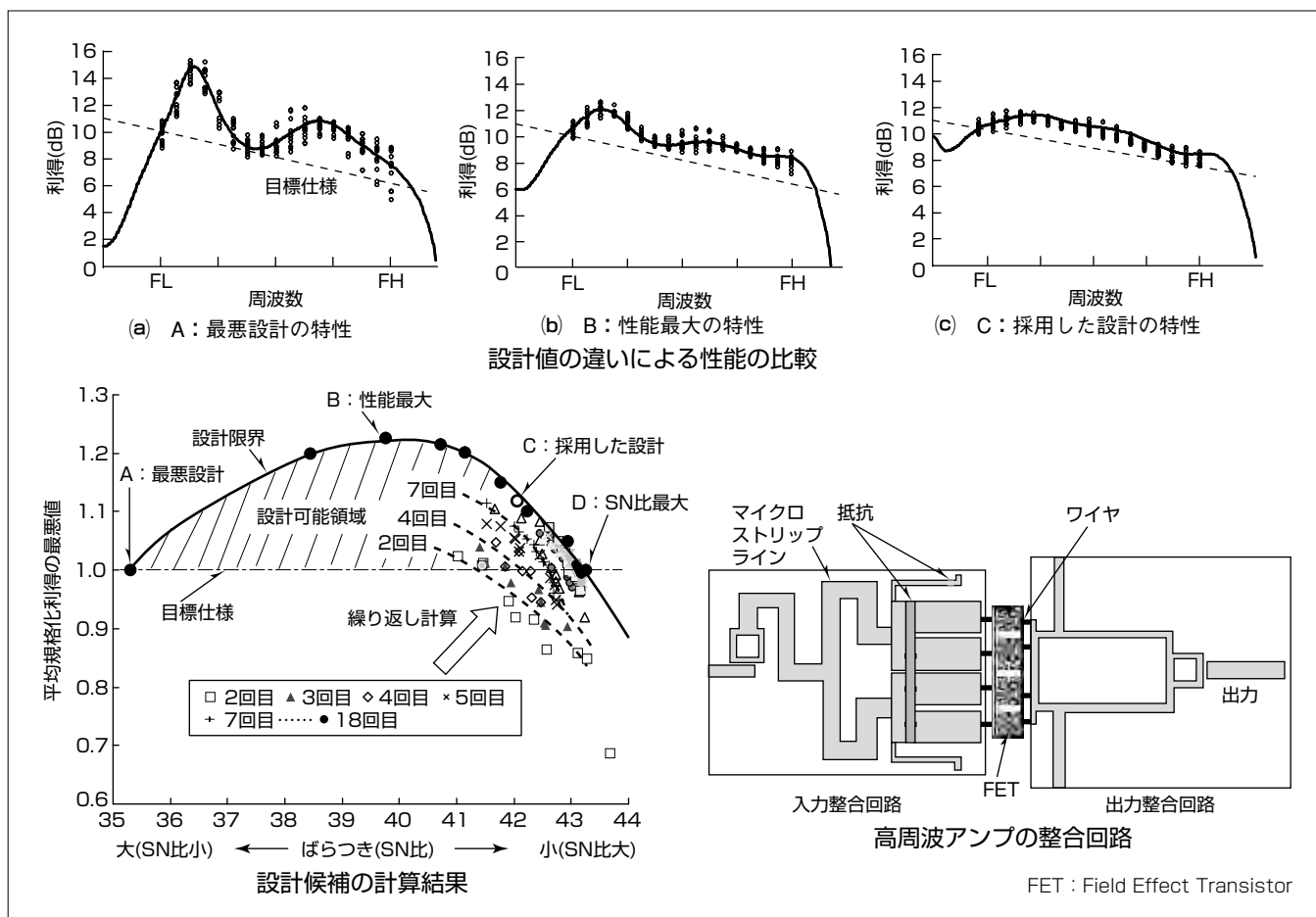
Improvement of First Run Rate in Microwave Circuits by Novel Robust Design Methodology

Takafumi Nakagawa, Tasuku Kirikoshi

要 旨

高周波回路の製造で、高い直行率を確保するためには、あらかじめ、製造ばらつきや部品特性のばらつきなどの制御できない因子(誤差因子)の影響を減衰させた設計(ロバスト設計)が必要である。従来の設計手法では仕様を満足するように設計値を決定した後、誤差因子による性能ばらつきを評価し、性能がばらついても仕様を満足するように設計値を修正する2段階の設計手法が一般的である。この場合、設計マージンを大きく取る設計になりやすい。しかし、目標仕様が厳しくなり設計マージンをとる余裕が小さくなると直行率が低くなるという課題がある。

本稿で述べる設計手法では、品質工学で用いるロバスト性の評価指標(SN(Signal-to-Noise)比)を導入することによって、性能とロバスト性を同時に考慮した設計を実現した。誤差因子を直交表で組み合わせて与え、性能とばらつきのトレードオフを考慮した最適設計を行う。この手法をシミュレーションによる高周波アンプの整合回路設計へ適用した結果、採用した設計は性能最大の設計に対して約20%、最悪設計に対して約50%に性能ばらつきを低減した。また、この設計手法を適用した製品の直行率が改善することを実機で確認した。



製造ばらつきを考慮したロバスト設計手法による高周波アンプ整合回路の計算結果

左下の図の設計可能領域の中で、Aはばらつき最大(SN比最小)、Bは性能最大、Cは採用した設計、Dはばらつき最小(SN比最大)の点である。C点は誤差因子による規格化利得の最悪値が仕様を満足する点である。規格化利得は $10^{(利得-目標仕様)/10}$ で計算する。SN比は製造ばらつきによる利得の変動を示す指標で、値が大きいほど性能変動が小さい。図中のプロットはモンテカルロ法で発生した一定数の設計候補の計算結果のうち、優劣をつけられない解(パレート解)を示す。点線は計算したパレート解の概包絡線である。計算値は繰り返し計算(図では18回)によって設計限界線に向かって収束する。

1. ま え が き

高周波回路の製造で、高い直行率を確保するためには、あらかじめ、製造ばらつきや部品特性のばらつきなどの制御できない因子(誤差因子)を考慮した設計が必要である。従来の設計手法では、高周波回路シミュレーションによって仕様を満足するように設計値を決定した後、誤差因子による性能のばらつきを評価し、性能がばらついても仕様を満足するように設計値を修正する2段階の設計手法が一般的である。この場合、設計マージンを大きく取る設計になりやすい。しかし、目標仕様が厳しくなり設計マージンをとる余裕が小さくなると、直行率が低くなるという課題がある。また、回路設計では目標仕様は複数項目あり、ある性能を良くするためにはほかの性能のどれかを悪くせざるをえないというトレードオフの関係がある。そのため、性能を上げるために設計者は互いに優劣をつけられない解(パレート解)を多目的最適解として計算する。しかし、実際の設計では、レイアウトの制限、電磁界解析による詳細設計やコストなど、設計の各段階でもトレードオフが生じるため、設計候補を決定しても修正が必要になる場合が多い。

これらの問題点を解決するため品質工学で用いるロバスト性の評価指標(SN比)を導入し、性能とロバスト性を同時に考慮した設計を実現した。また、この設計手法では、設計限界近傍解の設計候補をあらかじめ多数計算しておくことで、設計の各段階で生じるトレードオフに対しても他の設計候補を選択できる。

本稿では、この設計手法を高周波アンプの整合回路の設計に適用した結果について述べる。

2. ロバスト設計手法

この設計手法では、目標仕様は制約条件、多目的問題を制約条件付き単目的問題とし、SN比をできるだけ大きくする設計限界近傍の設計候補を多数計算する⁽¹⁾。図1にロバスト設計手法のイメージを示す。次の手順Step1～Step5をSN比が収束するまで繰り返す。ここで、制御因子

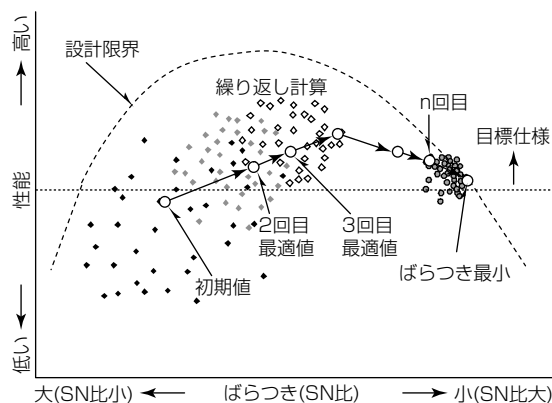


図1. ロバスト設計手法のイメージ

は設計パラメータのうちで、性能をコントロールする因子である。

Step1: 誤差因子と制御因子を選定する

Step2: 誤差因子の組合せを直交表で作る

Step3: モンテカルロ法で設計候補を一定数選ぶ

Step4: 特性値とSN比を計算する

Step5: もし、最悪値>目標仕様で、SN比>1つ前のSN比が成り立てば、最大の設計候補を次の計算の初期値に選ぶ。成り立たなければ、探索幅を1/2に狭め、Step2へ戻る。

計算量を減らすため誤差因子の組合せを直交表で作る(Step2)。設定した探索幅で制御因子の組合せをモンテカルロ法で一定数選ぶ(Step3)。SN比と利得の最悪値の関係を計算する(Step4)。最悪値が目標性能を満足し、性能のばらつきが最小(SN比は最大)になる設計値を次の計算の初期値として計算を繰り返す。1回目は設計領域を広く探索し、2回目以降ではよい結果が得られない場合に探索幅を1/2に狭めていく(Step5)。このような手順をSN比が収束するまで繰り返す。これによって、設計限界近傍にある複数の設計候補を計算することができる。

3. 高周波アンプのへの適用

3.1 計算モデル

ロバスト設計手法を図2に示す高周波アンプの整合回路の設計に適用する。このアンプは対称な2つの回路で構成している。入力信号は2分配され、さらに4分配され4つのFETで並列に増幅される。増幅された信号は出力整合回路で4合成され出力される。図3にCAEモデルを示す。図中の添字nは誤差因子、それ以外が制御因子である。

まず、誤差因子と制御因子を選定する(Step1)。表1に誤差因子の種類とその水準を示す。誤差因子は基板厚と導電率及びFETのゲート、接続ワイヤのインダクタンス、パスコンとDCカットの容量とインダクタンスのばらつきなどの10種類とした。制御因子は図2に示すようにマイクロストリップラインの線路幅Wと長さL及び抵抗値と抵抗長の9種類とした。誤差因子の水準は部品と製造ばらつきから決める。誤差因子の組合せは表2に示すL12直交表で

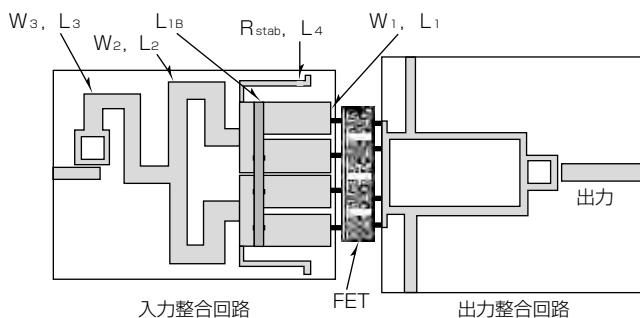


図2. 高周波アンプの整合回路と制御因子

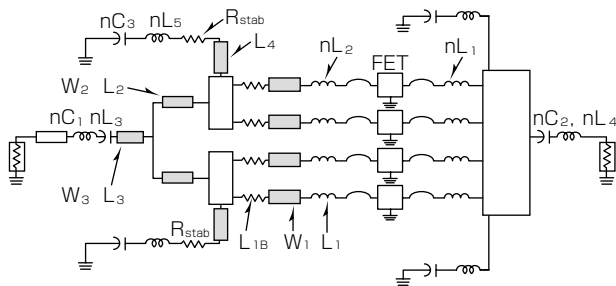


図 3. CAEモデル

表 1. 誤差因子とその水準

番号	誤差因子	単位	水準 1	水準 2
A	基板厚	%	-10	10
B	導電率	%	-10	10
C	nL1	%	-20	20
D	nL2	%	-20	20
E	nL3	nH	-0.06	0.06
F	nL4	nH	-0.06	0.06
G	nL5	nH	-0.06	0.06
H	nC1	%	-20	20
I	nC2	%	-20	20
J	nC3	%	-50	50

表 2. L12直交表

No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	割付なし
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

作る (Step2)。各制御因子の値をモンテカルロ法で選ぶ (Step3)。計算は線形回路モデルで行った。また、FETの特性は実測値を使った。アンプの基本性能に通過利得を選び、制約条件は目標利得と安定係数 k (アンプが発振しない条件で、 $k > 1$) とした。 k 値は常に仕様を満足したので以降では利得について述べる。

3.2 計算結果

図 4 は誤差因子を与えたときの利得の周波数特性の計算結果の一例である。規格化利得は式(1)で、SN比は式(2)で計算する。規格化利得が 1 以上で目標性能を満足する。また、 σ^2 は規格化利得の平均値からの二乗偏差である。SN比は平均利得に対する性能のばらつきに対応する。誤差因子の影響で性能がばらつく。

$$\text{規格化利得} = 10^{(\text{利得} - \text{目標仕様}) / 10} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{SN比 (db)} = 10 \log (1 / \sigma^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

また、図 5 は図 6 の点 A を初期値とした場合の 18 回の繰

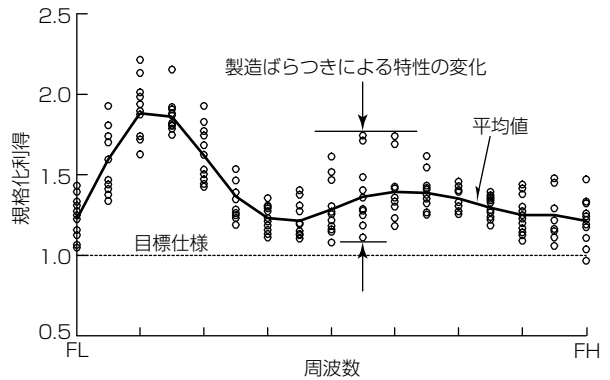


図 4. 誤差因子を与えたときの利得の計算結果の一例

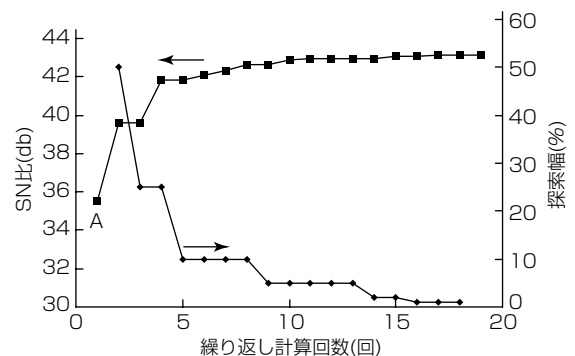


図 5. 繰返し計算回数に対する探索幅(%)とSN比の関係

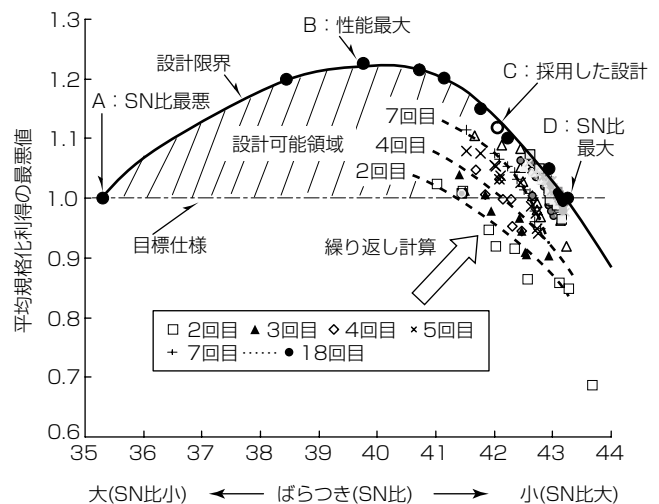


図 6. 100組の設計候補の計算結果

り返し計算ごとの探索幅(%)とSN比の関係を示している。平均規格化利得は1.0である。SN比の変化が小さくなるに伴い、探索幅を小さくしていく (Step5)。図から10回程度で43.1 (db) に収束した。

図 6 はモンテカルロ法で発生させた100組の設計候補の計算結果である。同図のプロットは、設計候補のSN比と平均規格化利得の最悪値との関係を示すパレート解である。ここで、平均規格化利得の最悪値は図 4 に示す平均値の最小値である。また、点線は計算したパレート解の概包絡線

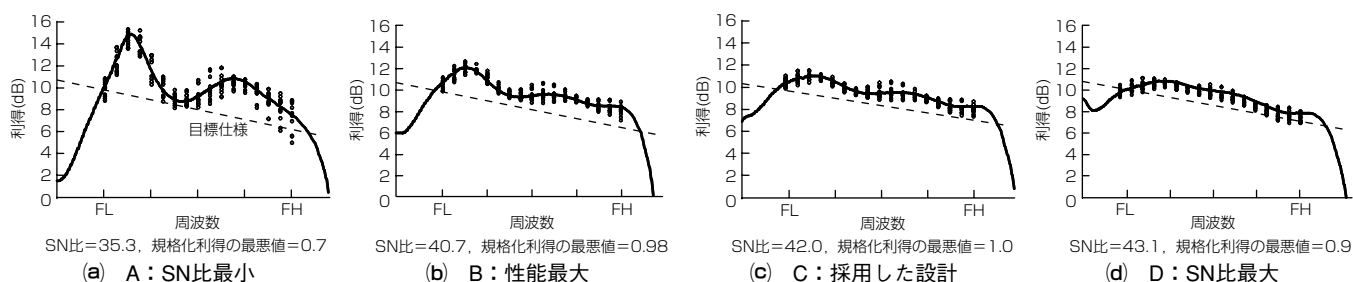


図7. 設計値の違いによる性能の比較

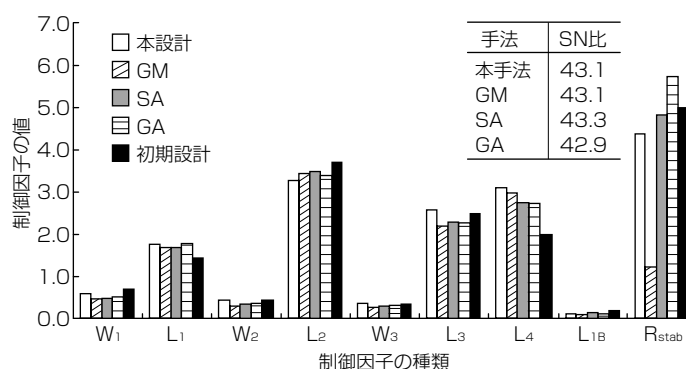


図8. 最適計算手法の違いによる制御因子の値の比較

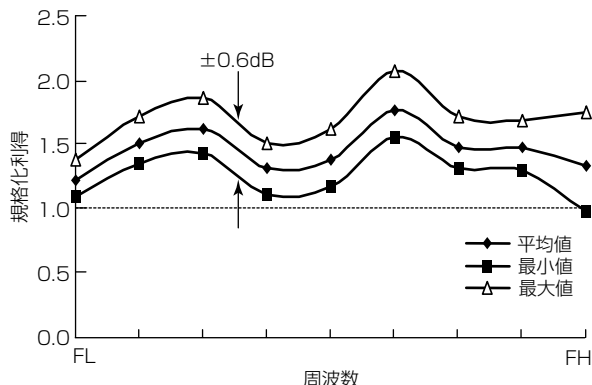


図9. 試作結果

である。図6の設計限界はSimulated Annealing(SA)法⁽²⁾で推定した結果である。図5に示すように、はじめは探索幅を広くし、次第に狭くしているので繰り返し計算によって設計限界へ向かってSN比が収束していく。図6から、この手法は設計限界の近傍解を計算できており、方法の妥当性を示している。また、従来の設計では、設計値が斜線の設計可能領域内ならどこでも良く、設計値の決定にSN比は考慮されていないため、直行率が低下する。図6のAはSN比が最悪の点、B点は性能最大、C点は採用した設計、DはSN比最大の点を示す。図4に示すように、誤差因子によって特性が平均利得の最悪値より小さくなる場合があるので、全ての計算値の最悪値が仕様を満足するC点を最終値として採用した。

図7は図6の各点における設計値の違いによる周波数特性の違いを示している。採用した設計は性能最大の設計(図6記号B)に対して約20%、最悪設計(図6記号A)に対して約50%ばらつきを低減した。

次に、最適計算手法の違いによる最適解の違いについて、従来よく使われている計算方法⁽²⁾と比較した。図8は図6のD点での制御因子の値の比較である。GMとGAはそれぞれ縮小勾配法と遺伝的アルゴリズムを使った計算結果である。SN比はほぼ同じ値であるが制御因子の値は違う。すなわち、設計限界を与える設計値は一意に決まらないことが分かる。したがって、各設計段階で生じるトレードオフに対応するためには設計限界付近でのパレート解を多数準備しておく必要がある。

4. 実測結果

この設計手法の妥当性を実機で確認した。設計結果を基に高周波アンプを250台試作し測定した結果を図9に示す。図は利得の最大・最小値と平均値で示している。全体の97%が目標値を満足した。また、各周波数帯での分散は0.2dBで利得のばらつきは $\pm 0.6\text{dB}$ 以内であった。

5. むすび

品質工学で用いるロバスト性の評価指標(SN比)を導入することによって、性能とロバスト性を同時に考慮した高周波回路の設計を実現した。この設計手法を高周波アンプの整合回路設計へ適用し、手法の妥当性を高周波回路シミュレーションによって確認した。また、この設計手法を適用した製品の直行率が改善することを実測で確認した。

今後、この設計手法を適用することで開発段階から高い直行率が得られ、開発期間の短縮と適用モジュールの歩留りの向上が期待できる。

参考文献

- (1) Nakagawa, T., et al.: Robust Parameter Design Methodology for Microwave Circuits Considering the Manufacturing Variations, IAENG International Journal of Computer Science, **39**, No.2, 214~219 (2012)
- (2) Agilent Technologies: Tuning, Optimization, and Statistical Design (2004)

購入半導体デバイスの故障解析技術

石井宏之*
金谷雅夫*
中野一機*

Failure Analysis Technologies of Purchased Semi-conductor Devices

Hiroyuki Ishii, Masao Kanatani, Kazuki Nakano

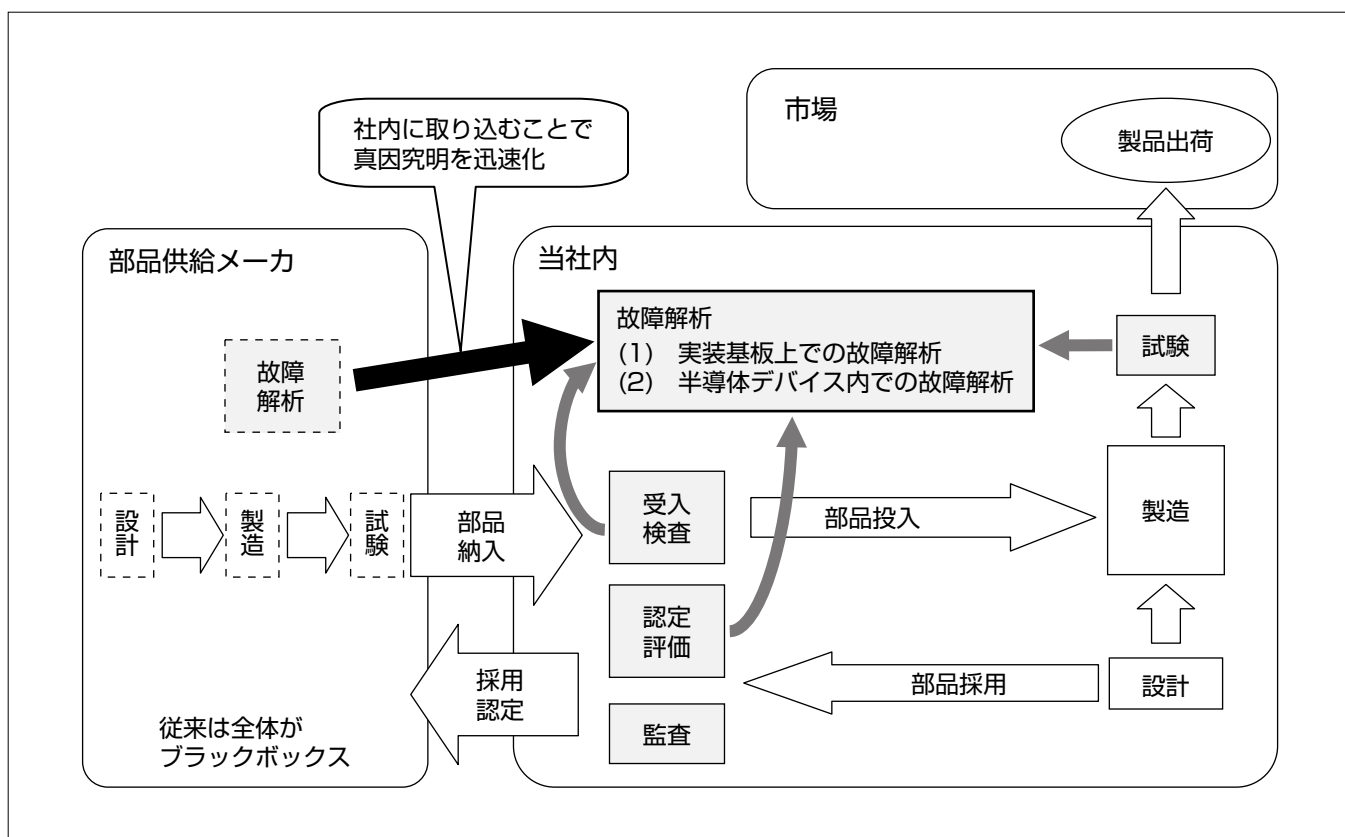
要 旨

近年、市場や生産拠点のグローバル化に伴い、製品に搭載する部品の海外調達も増加しており、その品質を見極めることが極めて重要になってきている。海外調達部品の品質見極め力を向上させるために、当該部品の採用認定時の評価技術や、受入れ検査時のスクリーニング技術、製品製造時のインライン検査技術等の高度化を推進している。しかし、不具合を顕在化できても、特に半導体デバイスを始めとする電子回路部品では、その内部構造や製造プロセスがユーザーにとってはブラックボックスであるため、真因究明や対策の実施を部品供給メーカーに頼らざるを得ず、長期間かかることが多くになっている。

このような問題を解決するためには、部品ユーザー側で故障解析技術を持ち、迅速な真因究明を実現することが必要である。三菱電機生産技術センターでは、高周波電気パルスやレーザを用いた、次の二つの故障解析技術の開発を進めており、不具合真因究明・対策実施までの時間を大幅に短縮することが可能となった。

- (1) 実装基板上での故障箇所特定技術
- (2) 半導体デバイス内での故障箇所特定技術

今後、更に拡大する海外調達部品に対応できるよう、引き続き解析技術の開発を進めるとともに、できるだけ上流の製品設計段階で不具合を顕在化できる手法の確立を目指す。



購入部品に対する品質確保の仕組み

製品に搭載する購入部品は、製品設計時の採用認定評価を起点として、量産時の受入れ検査、製品製造時、出荷時の試験工程等で品質の見極めを行う。その際、当社内で顕在化した不具合品の故障解析技術を開発することによって、真因究明の迅速化を図るとともに、最適な対策実施を実現できる仕組みを構築した。

1. ま え が き

拡大する海外市場、海外生産に対応して、海外調達部品の比率も高まっている。当社では海外調達部品の品質見極め力を向上させるために、当該部品の採用認定時の評価技術や、受け入れ検査時のスクリーニング技術、製品製造・出荷時の試験技術等の高度化を進めてきている。ところが、不具合を顕在化できても、特に半導体デバイスでは、その内部構造や製造プロセスがユーザーにとってはブラックボックスであるため、真因究明や対策の実施を部品供給メーカーに頼らざるを得ず、長期間かかることが多くなっている。さらに、ファブレス化や海外ローカル工場への分業化が進むなど、部品供給メーカー自身の技術力低下も危惧される。

この問題を解決するために、当社生産技術センターでは、高周波電気パルスやレーザー光を用いた、次の二つの故障解析技術の開発を進め、不具合真因究明・対策実施までの時間を大幅に短縮した。

- (1) 実装基板上での故障箇所特定技術
- (2) 半導体デバイス内での故障箇所特定技術

本稿ではこれらの技術と、これをもとに実際に検出した不具合事例について述べる。

2. 高周波を用いた実装基板上での故障箇所特定技術

2.1 TDRの測定原理と故障箇所特定システム⁽¹⁾⁽²⁾

製品に搭載した部品起因の不具合が発生した場合は、その部品が実装された基板上で、不具合現象をもとに当該部品を抽出することになるが、詳細な電気信号の変化点を見極め、部品や回路配線の断線や短絡等の故障箇所を断定するには、設計者並みの知識が必要となることが多い。しかし、現実の故障解析は設計知識の少ない品質担当者が実施する人が多い。そこで、簡便に故障部品を特定できる手法を開発した。測定手法は、高周波技術を応用したTDR (Time-Domain Reflectometry: 時間領域反射法) を用いており、立ち上がりパルスを基板上の回路に印加し、その反射波をピコ秒 (psec) オーダーの時間間隔でサンプリング測定するものである。この方法では、良品基板での測定波形と比較することによって、微小な短絡や断線等によるインピーダンス変化を検出することができる (図1)。測定波形の乖離 (かいり) 点 (インピーダンス変化箇所) までの時間

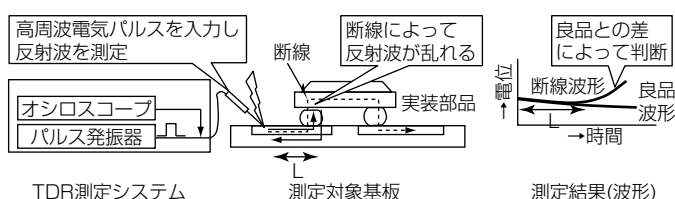


図1. TDRの原理

を読み取ることによって、基板上の故障箇所をミリメートル (mm) 単位で推定することができる。

このTDR法を用いた実装基板上の故障箇所特定システムを開発した (図2)。このシステムでは、ギガヘルツ (GHz) オーダーの高周波特性を損なうことなく基板の回路上にパルスを印加することが可能な高速切替えユニットや、100点を超える基板上の印加点に同時にプローブ可能な治具基板を開発して搭載している。また、良品基板で測定した波形と照合して故障の有無を自動判定するソフトを作成し、設計技術を持たない作業員でも簡便に短時間で特定できるようにした。また実装基板のプローブ測定時に問題になる接触不良を低減するためのプローブ先端部の自動清掃機構や、接触抵抗変動をキャンセルするための測定波形の微分比較アルゴリズムを搭載するなどの工夫も盛り込んだ。

2.2 TDRシステムで特定できた不具合事例

2.1節で述べた特定システムを用いて、実際の基板上で故障箇所が特定できた事例について述べる (図3)。

この事例は基板上に実装されたICのワイヤボン断線の検出事例である。図3のグラフが実際に測定したTDR波形である。

グラフ中の丸で示したところから波形の乖離が見られる

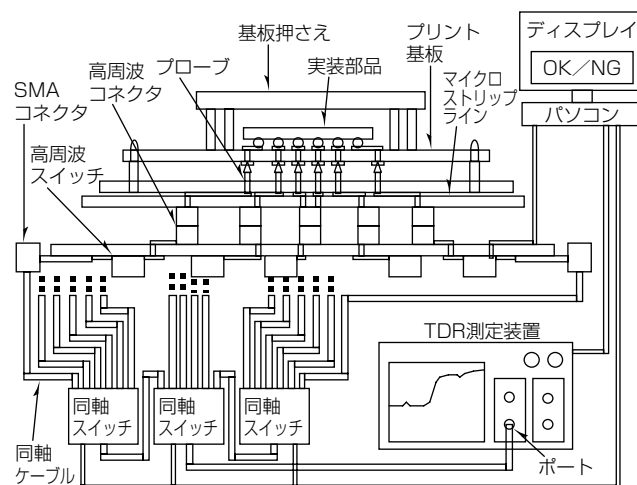


図2. 実機基板上の故障箇所特定システム

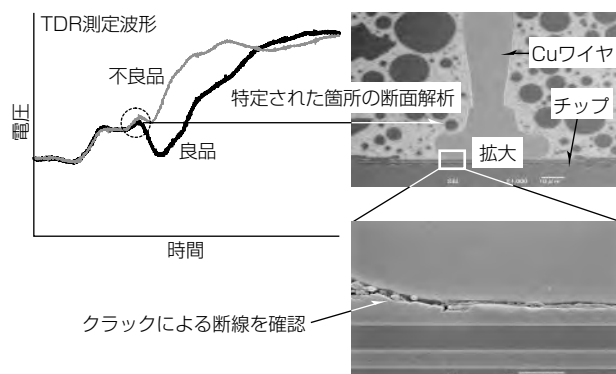


図3. TDRによる故障箇所特定事例 (IC内部のワイヤボン断線)

ので、この箇所が断線傾向の不具合が発生していると推測された。そこで、実際に当該箇所に当たるIC内部の断面を観察したところ、Cuワイヤのボンディング部におけるクラックによる断線が確認された。

この結果をICメーカーに提示することによって、部品自身の構造又はプロセス上の問題であることを認識してもらい、有効な対策を迅速に実施してもらうことができた。

この事例以外にも、BGA (Ball Grid Array) の断線不具合や、プリント基板のビアホール断線なども検出できており、この測定手法を用いた実装基板上の故障箇所特定技術として活用を拡大している。

3. レーザを用いた半導体デバイス故障箇所特定技術

3.1 OBIRCH解析の原理と故障箇所特定手法⁽³⁾⁽⁴⁾

2章で述べたように、基板上におけるmmオーダーの故障箇所特定技術としてはTDR法が有効であるが、半導体デバイス内部では、マイクロメートル(μm)オーダーの位置精度が必要となるため、TDR法では特定できない。そこで、半導体デバイス内部の故障箇所特定技術として、レーザを応用した解析技術であるOBIRCH (Optical Beam Induced Resistance Change: 光加熱抵抗変化) 解析技術の応用開発を進めている(図4)。

この解析手法は、半導体デバイスなどの被測定物をレーザ照射でスキャンしながら局部的に加熱したときの抵抗(電流)変動を検出することによって、リーク電流経路や接続部の抵抗異常箇所を可視化して特定する手法である。レーザ源としては、赤外線(IR)がシリコン(Si)を透過することからデバイス内部の配線を直接加熱することができるため、一般的によく用いられる。この手法は、測定そのものは比較的簡便であるが、故障箇所以外にも反応点が現れることが多く、結果の解釈にデバイス構造情報が必要となることから、通常は半導体デバイスメーカーが自身で設計したデバイスの不良解析に使用される手法である。

デバイス構造情報を持たないユーザーとして故障箇所を絞り込むために、単一的な解析手法ではなく、多面的な解析を実施できるように工夫している。具体的には、今回の技術開発に用いた解析装置(浜松ホトニクス社製エミッ

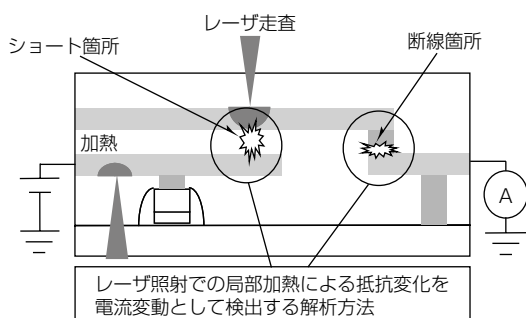


図4. OBIRCH解析の原理

ション顕微鏡：PHEMOS^(注1)-1000)には、基本仕様であるエミッション検出用カメラとして可視光用の高感度CCD (Charge Coupled Device) 検出器と近赤外線用InGaAs検出器を搭載しており、OBIRCH解析用の光源としてIRレーザ(波長 $\lambda = 1,300\text{nm}$)に加えて、グリーンレーザ($\lambda = 532\text{nm}$)も搭載している。このグリーンレーザは、SiCやGaNなどのバンドギャップがSiに比べて広いデバイスに対して、高分解能かつ高密度なエネルギーを照射できる最新の解析手法である。これら複数の解析手法を容易に切り替えて相補的に使用することによって、幅広い不具合モードに対して故障箇所の絞り込みを行うことを可能としている。

(注1) PHEMOSは、浜松ホトニクス(株)の登録商標である。

3.2 OBIRCH解析で特定できた不具合事例

3.1節で述べた特定手法を用いて、LED (Light Emitting Diode) チップ内での故障箇所を特定した事例について述べる。

LEDは最近その使用量が著しく増加しており、不具合件数も増加傾向にある。LEDモジュールとして購入することも多いが、モジュールメーカーがLEDチップ内の故障解析力を持たないことも少なくないため、近年はLEDチップ内の故障解析技術の開発に注力している。

LEDチップはその用途によって種々のパッケージ形態でモジュール化されているが、3.1節で述べた解析手法を適用するためには、まずLEDチップ表面をダイオード特性を劣化させずにダメージレスで露出させる必要がある。通常LEDはチップ上に蛍光体層が塗布されており、さらに、その上にシリコン樹脂製のレンズが形成されていることが多い。これら樹脂の成分に関してはユーザーに非開示であるため、良品サンプルを用いた試行錯誤を繰り返すことで開封条件を決めており、長時間かかることが問題であった。この問題を解決するために、硫酸と発煙硝酸を混ぜた混酸を樹脂表面に吹き付けることで、比較的容易に開封できる技術を開発した(図5)。

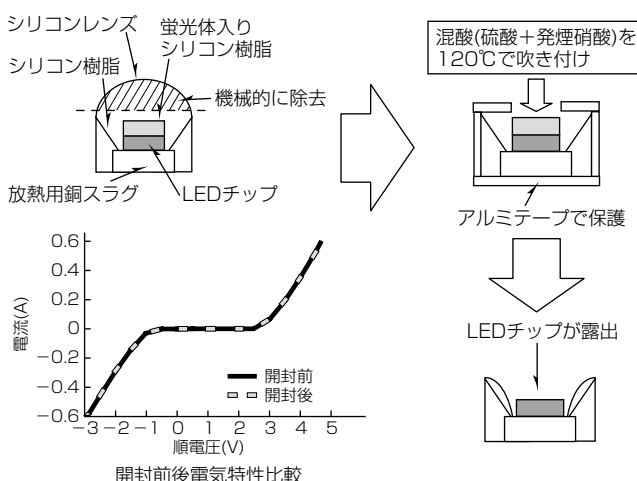


図5. LEDチップの露出手順

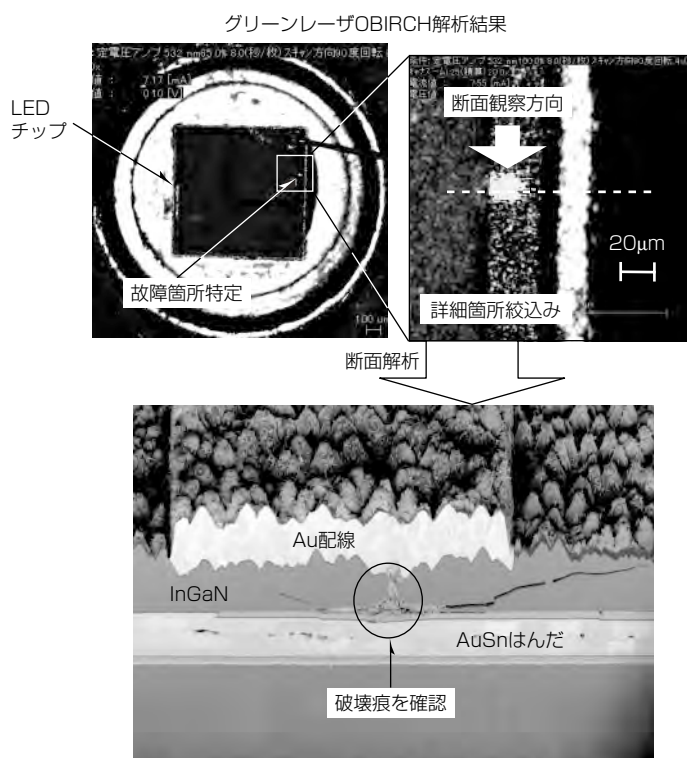


図6. LEDでの故障箇所特定結果

まずシリコンレンズ上部を機械的に除去し、混酸で腐食する土台部分をアルミテープで保護した後、混酸を吹き付けることでチップを露出させることができ、開封前後での電気特性に全く変化がないことを確認できた。混酸の混合割合や、温度、吹き付け時間等の条件は、パッケージ状態や樹脂の種類によって異なるが、条件変更を容易に実施することを可能とし、時間短縮を実現した。

ダメージレスでチップを露出させたLEDに対して、グリーンレーザによるOBIRCH解析を実施した(図6)。グリーンレーザでのOBIRCH解析以外に、先に述べたエミッション解析やIRレーザによるOBIRCH解析も実施した。グリーンレーザ以外ではどれも複数の反応ポイントが検出され、故障箇所の絞り込みができず、グリーンレーザだけで故障箇所の特定が可能であった。その理由としては、エミッション解析ではLED内に今回の故障とは関係のない複数の特異発光点が存在したこと及びIRレーザでは波長が長いこと熱ストレスで複数点が反応したものと考えられる。

グリーンレーザOBIRCH解析によって絞り込んだ箇所の断面解析を実施した結果、電気ストレスによると思われる

破壊痕を確認することができ、外部からの過電圧ストレスによる不具合であることが判明した。

この解析法によってLED以外にもICチップ内部の異物による配線間ショートや、セラミックコンデンサの内部短絡などの不具合解析を実施しており、不具合の迅速な真因究明を実現し、市場品質の向上につなげている。

4. む す び

グローバル化の拡大とともに進む海外調達部品の品質を見極める施策として、不具合発生時の迅速な真因究明を実現するために開発を進めている故障解析技術について述べた。一つは、高周波技術を応用したTDR法を用いた実装基板上での故障箇所特定技術であり、もう一つはレーザを応用したOBIRCH解析技術を用いた半導体デバイスでの故障箇所特定技術である。これらの技術を駆使することによって、購入品であるICやLED内部の不具合現象を解明でき、迅速に対応することで、製品の品質向上につなげることが可能となっている。

今後、更に微細化・複雑化が進む半導体デバイスの故障箇所解析技術の開発を進め、当社製品の品質向上につなげていく。

参 考 文 献

- (1) 新谷宣明, ほか: TDR法を用いたフリップチップのAuパンプ接続の非破壊解析, 第23回エレクトロニクス実装学会講演大会講演論文集, 11D-04, 83~84 (2009)
- (2) 中野 一機, ほか: TDR法による高密度実装基板の量産検査技術, Proc. of the 17th Symposium Microjoining Assembly Technology Electronics, 49~54 (2011)
- (3) Nikawa, K., et al.: Novel OBIC Observation Method for Detecting Defects in Al Stripes Under Current Stressing, Proc. of the 19th Int'l Symp. Testing and Failure Analysis, 303~310 (1993)
- (4) Kawamura, N., et al.: An Analysis and a Method of Enhancing the Intensity of OBIRCH Signal for Defects Observation in VLSI Metal Interconnections, IEICE Trans. on Electronics. E77-C, 579~584 (1994)

生産革新活動の深化とグローバル拡大

樋野本宣秀* 勝田繁雄**
 有川真明*
 三木 武*

Productivity Innovation and Growth in the Global Competition

Nobuhide Hinomoto, Masaaki Arikawa, Takeshi Miki, Shigeo Katsuta

要 旨

三菱電機は、2003年度から生産体質強化を目的に“5S3定”“徹底したムダ取り”“自発的・継続的な改善”を基本とした生産革新活動を展開している。全社展開に当たっては、まずは製造部門からスタートし、現場発信型で順次、生産全プロセスに活動範囲を深化、拡大してきた。また各部門が相互連携し、“ムダの徹底した排除”の思想に基づいた“JIT(Just In Time)”改善活動を展開し体質強化を図っている。本稿では、次に挙げる当社の生産革新活動について述べる。

(1) 自発的・継続的な改善風土の醸成と人材育成

自発的改善マインドへの意識改革と活動推進キーパーソンの育成を狙い、JIT改革推進制度、IE(Industrial

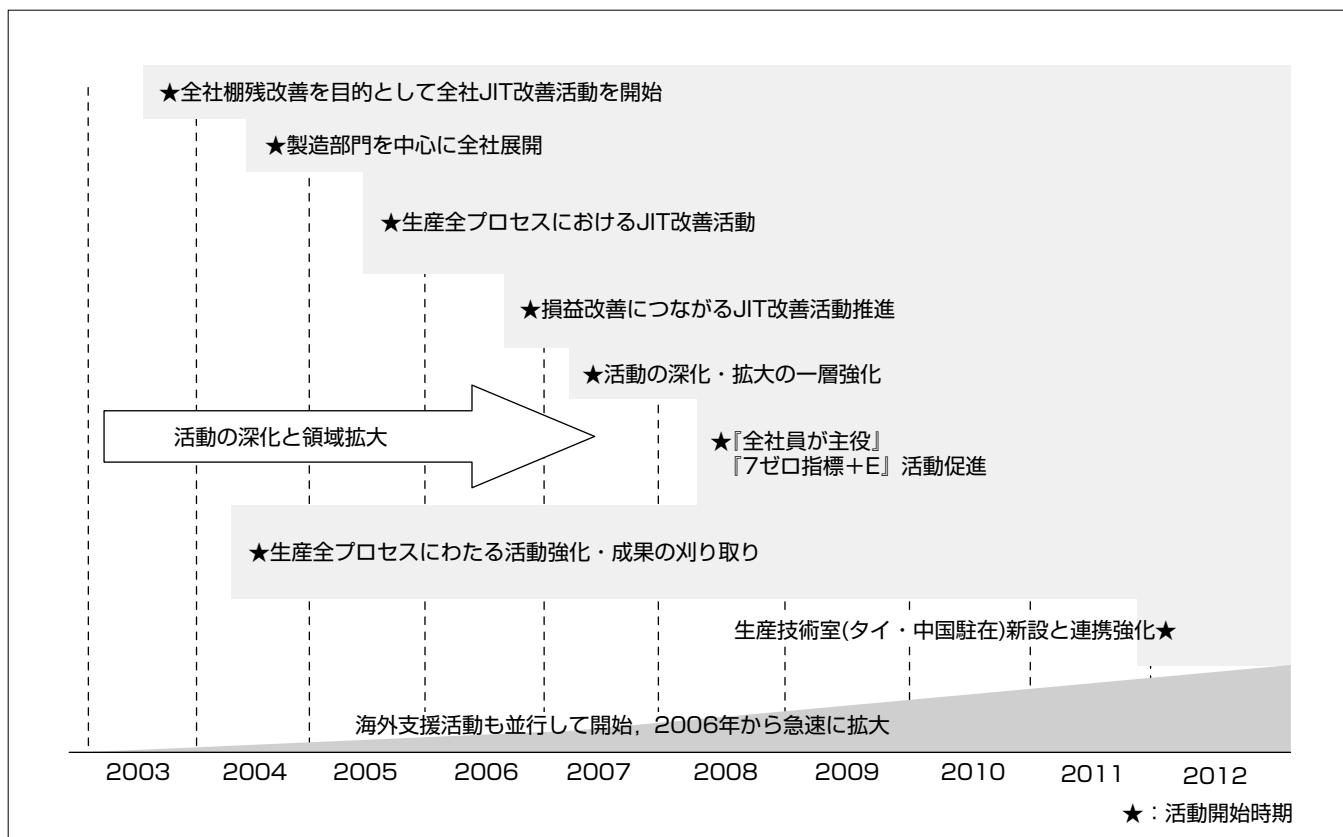
Engineering)研修制度などの継続的人材育成施策を展開している。

(2) 製造部門から生産全プロセスへの活動領域拡大

活動領域を製造部門に限定せず、あらゆる部門を対象として活動を推進している。調達部門、物流部門、現地工事部門等、多くの部門間の連携強化にも取り組んでいる。

(3) 海外生産拠点へのJIT改善活動拡大

グローバル化に伴い、海外工場での活動が重要となっており、マザー工場(国内工場)と連携して海外工場のレベル・環境に応じた活動を展開している。国内工場と同レベルを目指し、現地駐在部門と協働で5S3定、ムダ取り活動などを継続的に強化している。



当社生産革新活動の取組み状況

当社の生産革新活動は製造現場の意識改革から始まり、順次、生産全プロセスへと活動領域の深化と拡大を進めてきた。特に海外拠点を含めた活動推進のための人材育成は、当社の成長戦略の土台となる。

1. ま え が き

当社は、2003年度から生産体質強化を目的とした生産革新活動を展開している。全社展開に当たっては、工場内の改善にとどまらず、部材調達から工場出荷後の輸送、客先納入までの生産プロセス全体を対象に、設計効率化や調達方式の変更といった活動領域の拡大、グローバル化に伴った海外工場への展開、そして継続的な活動推進キーパーソンの人材育成等を進めてきた。

本稿では、これら当社の生産革新活動について述べる。

2. 生産革新活動の深化と領域拡大

当社の生産革新活動は、ムダのない筋肉体質の組織にするための、問題点の見える化、ムダ取りの実行、自発的・継続的な改善を基本として展開している。現在、全ての製品を対象とし、活動領域を製造部門に限定せず、物流、設計なども含めた生産全プロセスへ拡大し取り組んでいる。活動に際しては、“7ゼロ指標(PICQMDS)+E”(図1)を活動の進展を測る指標として設定し、特に“在庫”に問題点が顕在化すると考えて、“I(Inventory)”を重要指標と位置付けている。全社展開に当たっては、生産システム本部内の本社生産技術部と生産技術センターが中心となって、意識改革、活動推進キーパーソンの教育、現場診断等の活動サポートを担当している。そして各部門が相互連携し、損益改善につなげる活動を展開してきたことで、段階的ながら体質強化が図られつつある。これまでの10年間の活動を整理すると次のようになる。

2.1 活動の深化

(1) 自発的・継続的に改善できる風土醸成と人材育成

“7ゼロ指標(PICQMDS)+E”による成果の見える化によってPDCA(Plan, Do, Check, Action)サイクルをしつかりと回し、成功体験を積み重ねることで、自発的・継続的な改善風土の醸成を図っている。さらに、全社施策としてJIT改革推進制度、IE研修制度といった改善推進キーパーソンの育成施策や、自主研(自主研究活動)、3日間集中改善といった改善組織の活性化施策等を通じた人材育成にも注力している(3章で詳述)。

(2) “5S3定”から流れ化、平準化、標準作業化への深化
 5S3定を基本として、そこで見える化した課題に対しては、各事業本部・製作所と生産システム本部の各技術部門との連携によって解決を図っている。自動化、加工法／段取り改善、小日程同期化といった製造技術や生産管理技術を動員することで、工場全体の流れ化、平準化、標準作業化を推し進め、工場内のあらゆるムダの排除に努めている。

2.2 活動領域の拡大

(1) 受注から出荷・現地工事まで生産全プロセスへ拡大

外注品、購入品に焦点を当てた“調達JIT改善”や工場外のモノの流れに着目した“物流JIT改善”などの強化活動によって、生産全プロセスの生産革新へと活動を拡大している。例えば、電力事業者向け変圧器などの大型構造体などでは、工場出荷後の物流や現地据付け工事を含めた総合的なリードタイムの短縮を進めている。この活動では、製造部門だけでなく調達部門、物流部門、現地工事部門等、多くの部門間の連携が重要となっている(4章で詳述)。また、連結サプライチェーン改善にも取り組んでいる。

(2) 海外生産拠点のJIT改善活動拡大

グローバル化に伴い、海外工場でも生産革新活動が重要となってきた。マザー工場(国内工場)と連携し、現地工場のレベル・環境に応じた活動を中国、東南アジアを中心に展開している。国内工場と同等レベルを目指し、人材育成、総合リードタイム短縮に向けた諸施策を継続的に強化している(5章で詳述)。

3. 自発的・継続的な改善風土の醸成と人材育成

当社では、全員参加で弛(たゆ)まぬJIT改善活動を推進し“自発的・継続的な改善風土の醸成”を進めている。その土台を支える施策の1つが人材育成活動である(図2)。

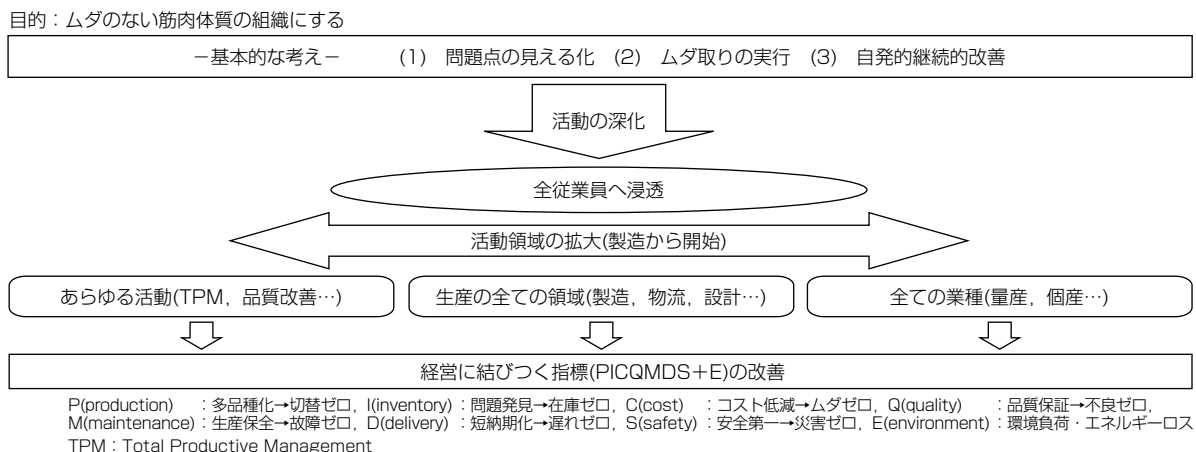


図1. 当社の生産革新活動

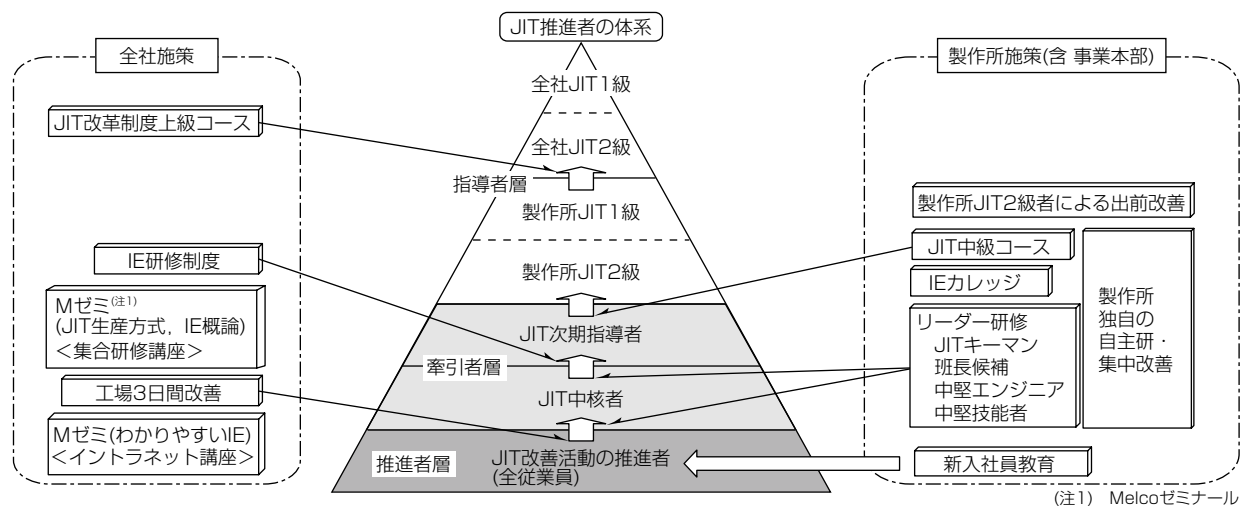


図2. 当社の人材育成体系

3.1 指導者層（上級者）育成

各事業本部・製作所で継続的に革新活動を牽引（けんいん）する指導者の育成を目的に、2004年度から“JIT改革制度上級コース”を運営している。このコースは三菱電機グループ全社から人材を選抜し、全社推進部門である生産技術センターに2年間籍を移し、改善スキルやコーチング技術を磨くものである。現在までに10期50名が選抜され、帰任後は所属する事業本部内の改善指導に活躍している。

3.2 牽引者層（中級者）育成

革新活動の実務リーダーの育成を目的に、年2回各6か月間の実践的研修を通じてIEスキルを習得させるプログラム“IE研修制度”を運営している。この研修は“JIT改革制度上級コース”と同様に生産技術センターに滞在し、2～3か月単位で2か所の生産工場の改善実習を集中的に行うものである。このほかにも、人事部門による自己啓発教育“Melcoゼミナール”や各事業本部・製作所が独自に主催する“〇〇道場”“〇〇塾”といった各種教育プログラムも提供している。

3.3 推進者層（初級者）育成

新入社員に対する集合教育や、イントラネットを活用した学習教材の提供などによって、全従業員に対するJIT改善、IE関連知識の基礎教育にも注力している。革新活動に対する理解を深めて職場内でのJIT改善活動の推進役となる人材の育成に力を入れている。

4. 現地据付け工事におけるJIT改善活動

変圧器などの大型構造体では、工場内での製作期間の後

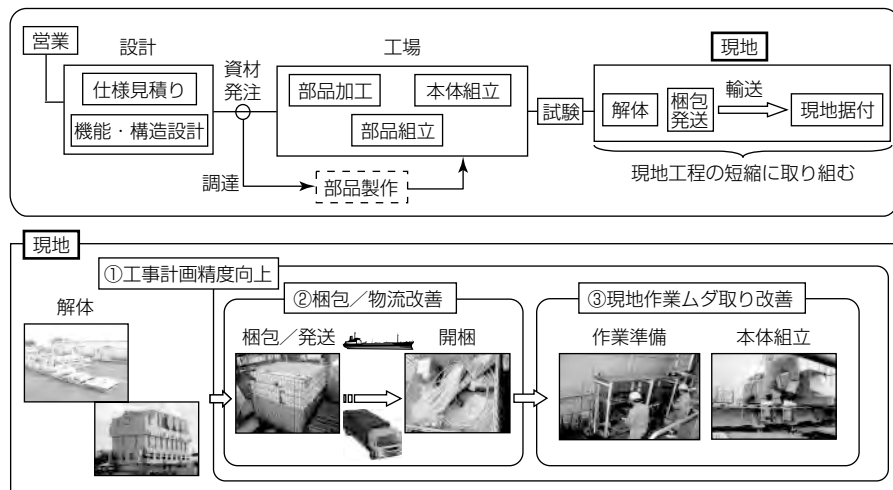


図3. 現地据付け工事におけるJIT改善活動

に現地据付け・調整工程が発生するため、総合リードタイムに占める現地据付け期間の割合は無視できなくなっている。そこで、このような大型構造体の総合リードタイム短縮活動に対してもJIT改善手法を取り入れた活動を推進している。この活動では工場内の取組みだけでなく、設計部門、物流部門、現地工事部門と連携して進める必要があり、①現地据付け工事の工事計画精度の向上、②工場から現地への梱包（こんぼう）・物流改善、③現地作業における徹底したムダ取り改善の3つの視点から活動を進めた（図3）。

4.1 工事計画の精度向上

大型構造体の現地据付け工事では、工程単位の必要作業日数と必要作業人員を記載した据付け工事計画が作成される。その際、計画に対する請負業者の作業実績などの現地の詳細な状況が把握されなければ余剰人員や、部品待ちによる作業中断が発生する。そこで、現地作業実績の収集ツールを導入し、日々の作業実績の管理をきめ細かに把握することで、工事に当たる作業員の確保、必要機材の手配、

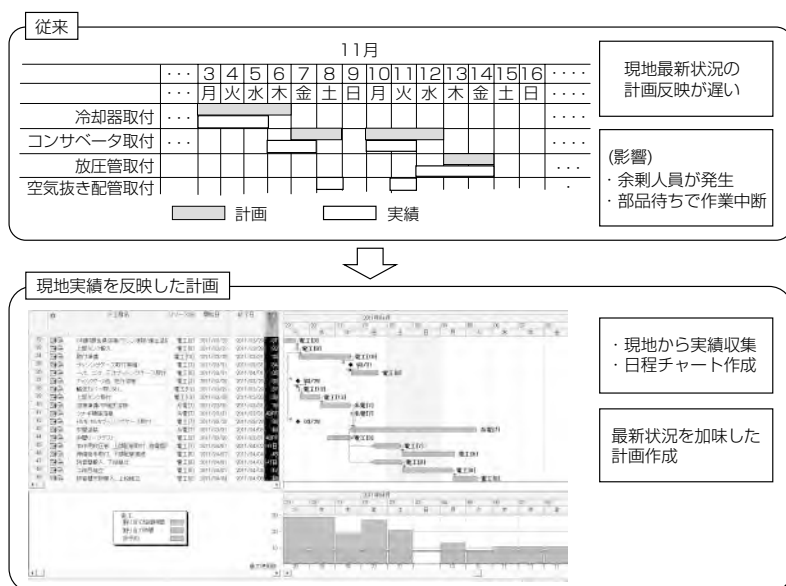


図4. 据付け工事計画の精度向上

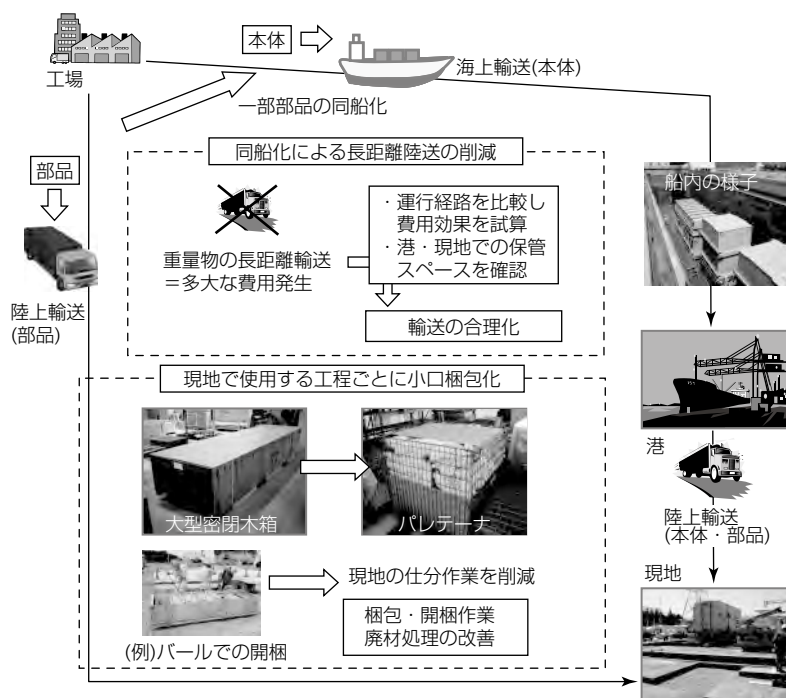


図5. 大型構造体の梱包・物流改善

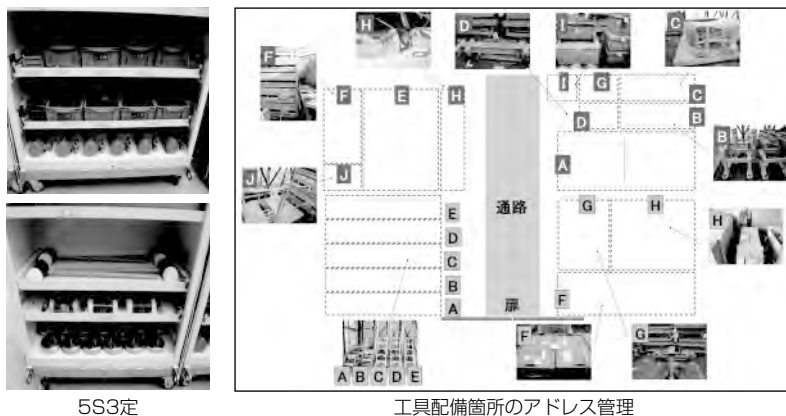


図6. 現地据付け工事におけるムダ取り改善

客先の立会い日程の決定等が精度よく行えるよう業務フローを整備した(図4)。

4.2 梱包・物流の改善

梱包・物流面では、適切な梱包手段による部品の送り込みが行われることが重要である。例えば、必要以上に過剰な梱包では、梱包材を解体し廃材処理する手間のムダが発生する。そこで、工場で解体された部品を現地で使用する工程ごとにパレターナなどのリターナブルな小口梱包などにすることで、現地での仕分作業を削減し、梱包・開梱作業や廃材処理を改善した。また海上／陸上の輸送手段の選択も抜本的に見直し、輸送の合理化も同時に進めている(図5)。

4.3 現地作業における徹底したムダ取り改善

製造部門で培ってきたJIT改善活動のノウハウを大型構造体の現地工事でも適用している。例えば、5S3定を基本とするムダ取り改善や、工事作業者の動線を考慮した工具配備箇所の見直しなどの作業効率化を図っている(図6)。

5. 海外生産拠点への活動展開

国内での活動開始から2年後の2005年から海外生産拠点でも本格的な活動を開始した。近年のグローバル成長戦略に従い、海外拠点における活動の重要性が増すとともに、活動拠点数も増加している(図7)。

海外での急速な活動拡大に当たっては、日本からの活動指導者の派遣や推進サポートも重要になる。その際、日本との社会情勢や文化の違いに留意する必要がある。具体的には、日本とは異なる離職率の高さや、言語の違いによるコミュニケーションの問題などへの対応である。

5.1 活動レベルに応じた推進サポート

日本国内マザー工場と同等レベルの活動を行っている拠点に対しては、定期的な現場診断を行い、個別の改善項目に沿った技術的助言を行っている。一方、活動推進力が弱く、現場診断だけでは効果的な活動を進めることが困難な拠点に対しては、現場診断に加え、現状分析→課題抽出と評価→改善案立案と実行→効果把握と歯止めまでの一連の改善サイクルを現地推進メンバーと共同で実践する“集中共同改善活動”と称するOJT教育(図8)を行っている。これによって、活動の必要性や進め方を個々のメンバーに浸透させ、自主的な組織活動として独り立ちできるよう促進し

今後も海外生産比率が高まる傾向にあり、これまで活動してきた拠点のレベルアップと、新たな活動拠点の拡大を図っていく必要がある。そのためには、海外現地の推進キーパーソンの人材育成を土台に、活動レベルに合わせた現場診断と個別技術指導を推進し、各拠点の意識改革と活動定着化に取り組んでいく(図9)。

6. む す び

これからますます厳しくなるグローバル競争に打ち勝つためには、モノづくり力の抜本的な強化が不可欠であり、本稿で述べたJIT改善活動を基本とした現場の製造体質強化を、今後、更に加速させていく必要がある。特に、生産全プロセスに関わる全従業員の意識改革は重要であり、今後も自発的・継続的な改善風土の醸成を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 岡村将光：現場密着型生産技術によるモノづくり力の強化，三菱電機技報，**84**，No.12，664～668（2010）

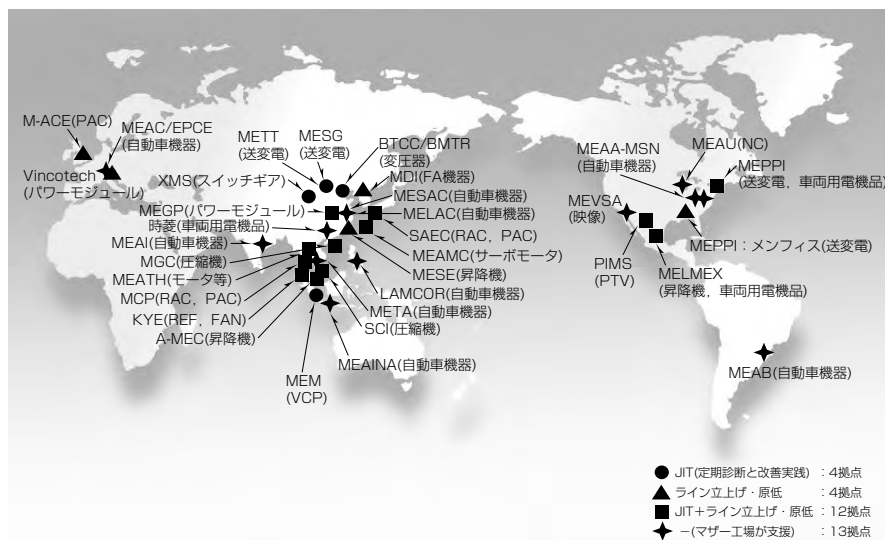


図7. 海外活動拠点

【メンバー】

現地人スタッフ、係長、班長、リーダー、(作業者)+本部からの出張指導者

【期間】

2日	1日	3日	1日
現状分析	改善案立案	改善実践	評価・歯止め

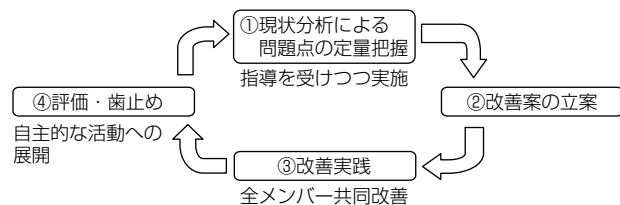


図 8. 集中共同改善活動



現場改善実施

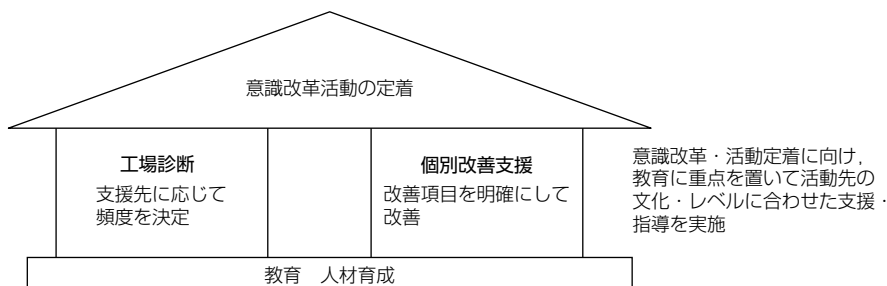


図9. 海外拠点における生産革新活動