



家庭から宇宙まで、エコチェンジ

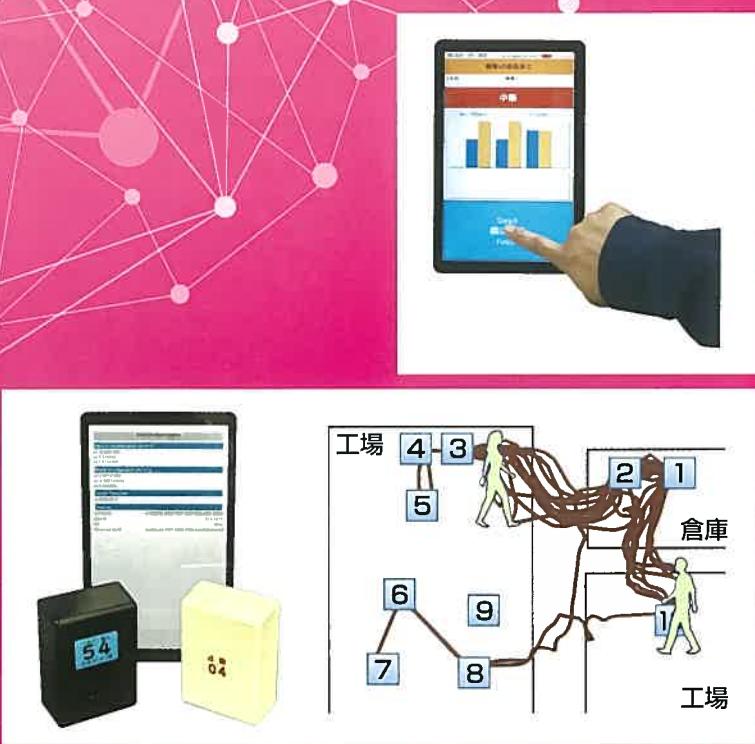
# 三菱電機技報

12

2019

Vol.93 No.12

## 生産技術



### 目 次

#### 特集「生産技術」

デジタルトランスフォーメーションでの生産技術の役割	卷頭言	1
西岡靖之		
成長戦略に向けたモノづくり力の強化	卷頭論文	2
高山智生		
ESD試験・管理技術		7
安藤慎一郎・金谷雅夫・中西浩平		
JIT改善活動の深化と拡大		11
玉置哲也・三上勝次・福田義勝・杉尾吉彦・兼森洋志		
グローバル変更管理業務の合理化		15
長原耕平・仲神俊明・吉村 崇・山田賢治		
グローバルサプライチェーンでの部門間連携強化		19
中田智仁・長田実那子・齊藤陽介・石川拓朗・坪川貴和		
板金加工ノウハウの形式知化による製造工期短縮		23
渡邊秀徳・太田祐貴・岡田 龍		
塗装技術強化への取組み		27
竹本洋平・柴田洋平・澤田準平・藤原淳史・満田理佐		
光モジュールの計測調整組立技術		32
小寺秀和・下野真也・池田一貴		
高速主軸モータ用低次陥純アルミ導体ロータ		37
石川 寛・山根慎次郎・玉腰知玄・古谷紀宗		
欧州鉄道の溶接規格認証制度と対応事例		41
山田景太・山口 博・久保圭祐・中野裕人・芳村晃一		
海外のモノづくり支援を意識した技能強化への取組み		45
野田秀夫		
かしめ工法によるヒートシンク一体型		
高放熱パワーモジュール		49
中島 泰・三田泰之・芳原弘之・木村 亨・北井清文		
小形誘導モータの低騒音化技術		53
宮本佳典・水谷敏彦・吉桑義雄・米谷晴之・出口 学		
関連拠点紹介		57
特許と新案		
「形状可変鏡及び形状可変鏡を用いるレーザ加工装置」		59
「薄板部材の溶接方法、 およびその溶接方法を用いた缶体の製造方法」		60
三菱電機技報93巻総目次		61

#### Manufacturing Technologies

Role of Manufacturing Technologies for Digital Transformation	
Yasuyuki Nishioka	
Strengthening Production Engineering for Growth Strategy	
Tomoo Takayama	
ESD Test and Control Technology	
Shinichiro Ando, Masaaki Kanatani, Kohei Nakanishi	
Deepening and Expansion of Just-in-time Improvement Activities	
Tetsuya Tamaki, Katsuji Taguchi, Yoshikatsu Fukuda, Yoshihiko Sugio, Hiroshi Kanemori	
Rationalization of Change Management Operations at All Manufacturing Sites	
Kohei Nagahara, Toshiaki Nakagami, Takashi Yoshimura, Kenji Yamada	
Strengthening Inter-department Collaboration in Global Supply Chain of Group Companies	
Tomohito Nakata, Minako Nagata, Yosuke Saito, Takuro Ishikawa, Takakazu Tsubakawa	
Reduction of Manufacturing Lead Time by Formalizing Know-hows in Sheet Metal Processing	
Hiidenori Watanabe, Yuki Ota, Ryu Okada	
Initiatives to Strengthen of Painting Technology	
Yohei Takemoto, Yohei Shibata, Jumpei Sawada, Atsushi Fujiwara, Risa Mitsuda	
Measurement Adjustment Assembly Technique of Optical Module	
Hidekazu Kodera, Masaya Shimono, Kazutaka Ikeda	
Low Defected Pure Aluminum Conductor Rotor for High Speed Spindle Motor	
Hiroshi Ishikawa, Shinjiro Yamane, Tomoharu Tamakoshi, Norihiro Furutani	
European Railway Welding Standard Certification System and Case Examples	
Keita Yamada, Hiroshi Yamaguchi, Keisuke Kubo, Yudai Nakano, Koichi Yoshimura	
Effort to Strengthen Skill Conscious of Overseas Manufacturing Support	
Hideo Noda	
Heat Sink Integrated High Heat Dissipation Power Module by Crimping Method	
Dai Nakajima, Yasuyuki Sanda, Hiroyuki Yoshihara, Toru Kimura, Kiyofumi Kitai	
Method of Reducing Noise for Small Induction Motors	
Yoshinori Miyamoto, Toshihiko Mizutani, Yoshio Yoshioka, Haruyuki Kometani, Manabu Deguchi	

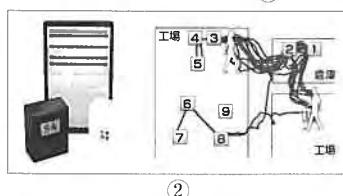


表紙：JIT 改善活動のための IT ツール

三菱電機では2002年からJIT(Just In Time)改善活動を進めてきた。当社を取り巻く環境の変化とグローバル展開に対応するためには、更なる深化と拡大が必要である。活動の深化に向けての課題は、PDCA(Plan Do Check Action)サイクルの高速化であり、製造現場データの取得と整理に関して、人手に代わる効率的な手法が求められていた。

表紙の写真は、この要求に応えるため開発したITツールのうち2種類を掲載している。  
①は作業の着手、完了の時間データを取得可能なタブレットツールであり、作業実績時間の把握、作業中断理由の明確化、時間意識の向上が可能である。

②はビーコンとタブレットを組み合わせて、作業者やフォークリフトの動線、エリア別滞在率を見える化するツールであり、工場レイアウトの改善やフォークリフト最適配置が可能である。



## 巻/頭/言

## デジタルトランスフォーメーションでの生産技術の役割

Role of Manufacturing Technologies for Digital Transformation

西岡 靖之  
Yasuyuki Nishioka

第四次産業革命というキーワードに続き、デジタルトランスフォーメーションという言葉が、製造業の革命的といふべき大きな変化を示唆している。製品中心のビジネスモデルから、サービス中心のビジネスモデルへ。情報のプラットフォームが整備されることで、データが国や地域を越えて一瞬にして移動することが可能になった。勝者総取りのIT産業が得意とするゲームの論理が、ややもすれば職人や技能者が腕を競っていた古き良き製造業の景色を一変させようとしている。

望むと望まざるとに係わらず、中小企業を含めて、製造業はグローバル化を意識しなければ存続すらできない状況にある。ただし、デジタル化が進む中で、グローバルに通用する共通のゲームのルール、勝利の方程式があらかじめ用意されているわけではない。そうであるならば、新たな時代のルールを自ら作ることができないだろうか。そこでのキーワードは生産技術である。

企業のあり様が根こそぎ変わってしまうデジタルトランスフォーメーションが進む中で、製造業が新たに飛躍する方法として、広い意味での“サービス化”が重要であるのは間違いない。よく言われるサービス化の例として、例えば、製品の販売形式をサブスクリプション型に変え、顧客とダイレクトにつながり、そこから継続的に収益を得るといったビジネスモデルが挙げられる。ただし、これは、プラットフォームを自前で持たない企業にとっては、思ったほど収益が上がらない場合が多い。また、製造業として、これまで培ってきたコアコンピタンスが生かせない。

日本の製造業が、デジタルトランスフォーメーションで飛躍するために注力すべきなのは、生産技術のサービス化であると筆者は考えている。簡単に言えば、生産技術そのものをお金に換えるということだ。生産技術は、“モノづくり”での“つくり”に関する技術である。又は、モノを作る“しくみ”に関する技術とも言える。試作品ができても、そ

れを安定的に量産でき、その原価を市場の求めるレベルにまで下げなければ、決してその製品は消費者の手に届かない。

装置や生産ラインを設計し、実装し、運転を通して品質と稼働率を高めていく一連のプロセスは、極めて専門的な知識と技術と経験を必要とする。製品のアイデアはあるのだが生産設備がない、又はコストに見合った生産方法が分からぬというニーズは、社内だけでなく世界中のあらゆる場所で存在する。個別化、多様化の時代では、こうしたニーズは更に拡大していくだろう。

デジタルトランスフォーメーションによる製造業のサービス化では、こうした製造業のど真ん中に位置付けられる製造や組立てを担う工場が持つ知識創造の機能に投資を増やすべきである。言うまでもなく、生産技術者は、そこでの勝敗を分ける最も重要なプレイヤーになるだろう。要するに、生産技術を、これまでのように製品の裏方に控えた立ち位置ではなく、舞台の中心で演じる主役にしてはどうかという提案である。

そのためには、これまで以上に、生産ラインの設計、実装、そして管理プロセスの標準化・共通化が必要になる。さらに、この取組みは、企業を越えて、業種を越えて行う必要がある。いわゆる協調領域を通り抜けた外側に、新たな競争領域が広がっているのだ。競争力を失わずに、いかに自前主義から脱却し、個々に知的財産の生産性を高めるかが多く日本の製造業の課題になる。

同時に、生産技術という日本が誇るコアコンピタンスの価値を、製造業の経営者を含めて多くの関係者が正しく評価することも重要だろう。そうすることで、そこがデジタルとアナログが融合する新たな未踏のフロンティアとして、更に魅力的に見える世界になり、新たな異分野のクリエイターたちが集まり、これまで以上に強い製造業が、これからも日本の根幹を支えてくれるのではないかと期待している。

# 巻頭論文



## 成長戦略に向けたモノづくり力の強化

Strengthening Production Engineering for Growth Strategy

Tomoo Takayama

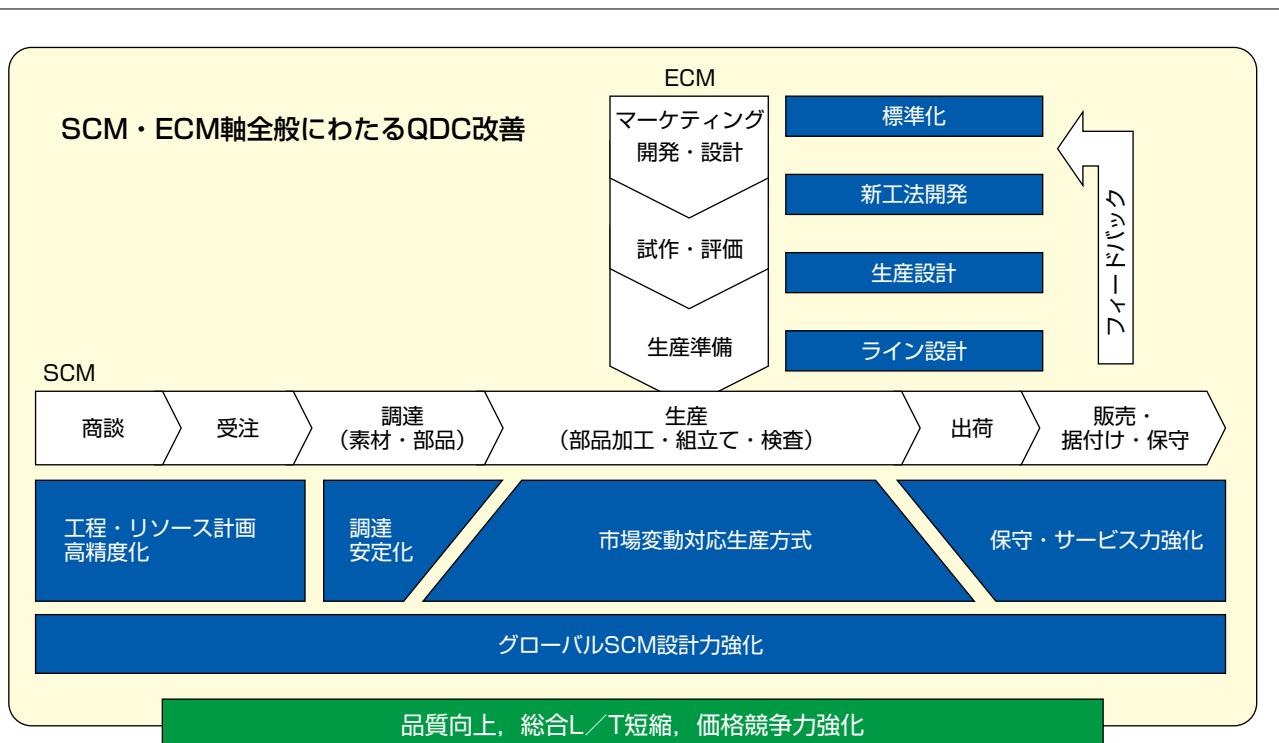
### 要 旨

三菱電機は、経営戦略として多様化する社会課題の解決に向け、経営基盤の強化に加えて事業モデルの変革によって、もう一段高いレベルの成長を目指している。当社生産技術センターは、当社グループ内のモノづくりと生産技術をけん引する中心的役割を担ってきた。

生産技術の継続的な底上げとして、JIT(Just In Time)改善活動については、経営に結び付く指標改善を製造部門から当社全プロセスに拡大し、社内教育によって活性化してきた。更なる活動の深化と拡大に向け、IT活用によるPDCA(Plan Do Check Action)サイクル高速化と自発的・継続的改善風土の醸成をグローバルで推進中である。要素技術については、溶接、鋳造、塗装等の基盤技術、IT・AIを担う技術者の育成を継続的に行ってい。

当社事業の海外展開の進展に伴い、グローバルで通用するモノづくり力の強化が望まれ、SCM・ECM軸全般にわたって活動領域を拡大している。現地生産・調達に関わるサプライチェーンの課題の複雑化に対し、拠点間を跨(また)がる業務設計全体の見直しを含め、更なる市場変動対応生産方式の推進をしている。設備開発では、製品企画や構造設計の上流段階にさかのぼり、造りやすさと高付加価値化の両立を狙う生産設計・構造設計や、現地調達材前提の設備設計を推進している。国内及び海外生産・調達品質に関しては、開発初期段階からの設計・製造・調達品質の作り込み力強化を推進している。

今後、当社の一段高いレベルの成長に向け、事業・拠点と連携しながら、更なるモノづくり力の強化を図っていく。



SCM : Supply Chain Management, ECM : Engineering Chain Management, QDC : Quality Delivery Cost, L/T : Lead Time

### 成長戦略に向けたモノづくり力の強化

成長戦略で要求される、品質向上、総合L/T短縮、価格競争力強化を実現するためには、工程・リソース計画の高精度化、調達安定化、市場変動対応生産方式、保守・サービス力強化、及び、これらを統合したグローバルSCM設計力強化等のSCM軸の活動を基軸に、標準化、新工法開発、生産設計、ライン設計等のECM軸の活動を融合させて推進することが重要になる。

## 1. まえがき

日本の製造業を取り巻く環境や、社会・顧客に受け入れられる製品・システムは変化し続けており、製造業各社は事業継続・発展のため、日々、変化への対応に尽力している。その中で特に近年は変化というより、変革の時代となってきており、2011年にドイツで発表された“Industry 4.0”に始まり、中国での“中国製造2025”，米国での“Smart America Challenge”，また日本での“Society 5.0”といった国レベルでの産業革命に相当する新たなステージへの移行が叫ばれている。各国が提唱しているコンセプト、対象範囲、ロードマップは少しずつ異なるが、製造領域では、ICT(Information and Communication Technology)、IoT(Internet of Things)、AIなどの活用によって、工場を始めとして、サプライチェーン、エンジニアリングチェーンのスマート化、コネクティッド化を推進していく必要がある。

当社は、経営戦略として“多様化する社会課題の解決に向け、100年培った経営基盤の強化に加えて事業モデルの変革によって、ライフ、インダストリー、インフラ、モビリティの四つの領域で、グループ内外の力を結集した統合ソリューションを提供する”を新たに掲げ、もう一段高いレベルでの成長を目指している。成長に向けては、社会・顧客にとって性能、機能、信頼性などで魅力があり、価格も適正な製品・システムを他社に先んじて創出できる開発設計力、生産技術力と、製品・システム及びこれらに関連したサービスを顧客へ効率的に届ける仕組みの構築力・維持管理力を更に強化するとともに、これらの力を生み出し、発揮させる人材・組織の育成を日本国内はもとより、グローバルで推進していくことが重要である。また、当社グループの強みの一つである“生産、品質管理、販売、サービス等の全ての現場に定着した改善文化”を更に発展させていく必要がある。

本稿では、成長戦略に向けたグローバルで通用す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当社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、当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、設計・生産システム技術の開発・実用化及び事業への展開を担う3センター(設計システム技術センター、生産技術センター、コンポーネント製造技術センター)で構成されている。当社施策としては、①JIT改善活動のモノづくり全プロセスへの展開、②当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などの項目を展開している<sup>(1)</sup>。

その中で生産技術センターは、1994年に当社の生産技術研究所と生産システム技術センターを統合して組織化され<sup>(2)</sup>、2014年には情報システム技術センターの一部組織を取り込み、当社及び当社グループ内のモノづくり、生産技術をけん引する中心組織としての役割を果たしてきた。方針としては、“現場主義の徹底・深化による支援する事業の強化”“生産技術基盤の強化”“海外事業・拠点支援の拡大”“自立する生産技術者の育成”を掲げ、近年は、①素材・部品レベルから製造に至る最高の品質作り込みを推進、②JIT改善活動をベースにした生産革新、③事業拡大・全体最適を狙ったスタートアップ・ビジネスプロセスエンジニアリング、④グローバル拠点間・部門間の情報共有・連携強化によるSCM業務改善、⑤材料・加工プロセス技術と自動化設備技術、生産システム技術の統合による製造システム革新、⑥生産設計・省力化技術で“良いものを安く早く”の実現、⑦加工技術と材料技術をベースにした製品構造の革新、⑧モノづくり力をベースにした開発試作と製造改善支援をグローバルで推進するとともに、東南アジア、中国、欧州に開設された海外生産技術室と連携した活動を展開している。

## 3. 生産技術力の継続的な底上げ

### 3.1 JIT改善活動の深化と拡大

当社はモノづくり力の強化策として、JIT改善活動を推進してきた。活動は深化と拡大を続けながらも、そのDNAとも言える基本的な考え方は不变である(図1)。ムダのない筋肉質の会社にするための活動で、製造現場だけでなく、設計、営業、保守も含め、経営に結び付く指標を改善することである。その基本は、①問題点の見える化、②ムダ取りの実行(見える化した問題点の解決)、③自

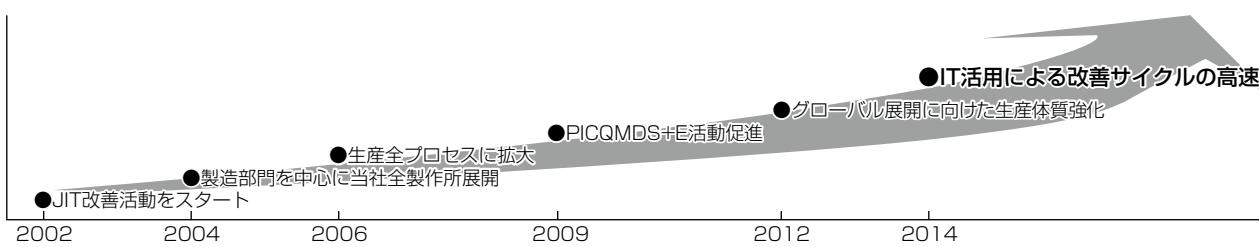


図1. JIT改善活動の深化と領域の拡大

発的・継続的改善風土の醸成である。

このJIT思想に基づいて製造現場からスタートしたJIT改善活動は、部門間相互連携を重視して活動領域を生産全プロセスに拡大してきた。SCM軸(商談-受注-調達-生産-出荷-販売・据付け・保守)では、総合L/T短縮、棚残削減を目的とした5S(整理・整頓・清掃・清潔・躰(しつけ))3定(定位・定品・定量)によるムダ取り、7ゼロ+E指標(Products・Inventory・Cost・Quality・Maintenance・Delivery・Safety・Environment: PICQMDS+E)等の導入によって活動を活性化してきた。ECM軸でも業務プロセス改善によるコスト削減、開発L/T短縮を進めてきた。そしてこれらの活動を国内製作所にとどまらず、関係会社や協力工場にも展開している。さらに海外製造拠点への展開も順次拡大し、連結視点でJIT改善活動を推進している。

活動の活性化と自発的・継続的改善風土の醸成に向けて本社生産技術部と生産技術センターが中心となって様々な施策を展開してきた。経営者層も含めた階層別研修、JIT改革推進制度、工場集中改善、更には全従業員対象のeラーニング等によって継続的な深化に向けて活動している。こうした国内で実績のある取組みを海外製造拠点にも展開してナショナルスタッフの育成に取り組んでいる。

ここでは、JIT改善活動の更なる深化と拡大に向けた現在の取組みの一例を述べる。

### 3.1.1 活動の深化

JIT改善活動の深化のためにはその基本的な考え方は踏襲しつつ、一段高いレベルのJIT改善活動を進める必要がある。具体的にはPDCAサイクルを高速化させ、改善効果の早期刈取りを実現するITツールの開発である。開発に当たり、改善の対象となる人・モノ・設備に着眼し、①簡単な操作でデータ入力できること、②ツールの維持・管理が容易であること、③安価な汎用機器を用いることをコンセプトにした。これらのITツールではデータ取得はタブレットにタッチするだけによく(図2)、集計も自動でできるため、調査及び評価業務の大幅な時間短縮が可能に



図2. タブレットを利用したITツール

なった。この結果、改善業務の多サイクル化が可能になり、新たな課題の抽出と合わせて改善効果の拡大に結び付いている。

### 3.1.2 活動の拡大

生産のグローバル化に伴って海外拠点でのJIT改善活動の重要性が増してきている。活動の活性化に向けて海外生産技術室及び国内マザー工場と連携して、自発的・継続的改善風土の醸成を進めている。JIT改善活動の定着化に向けて、改善のけん引層であるナショナルスタッフの早期育成が必要であり、国内に準じた施策の展開に加え、生産技術センター員が現地に赴いてJIT・IE(Industrial Engineering)セミナを開催している。これらのセミナは講義と現場での実習がセットであり、身をもって改善が体験できる実践型のセミナとしてけん引者層の実力向上に貢献している。

これらの活動は現在、東南アジアと中国を中心であるが、今後は欧州にも拡大していく計画である。

### 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・アウトソーシングの活用・IT化によるPDCAサイクルの高速化が進む中で、技術の伝承はより必要不可欠な取組みとなっている。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力の維持に加え、モノづくりを容易にするIT・AI活用技術の強化が重要である。生産技術センターでは、これらの技術の維持及び強化を狙い、センター内の独自教育制度や社内人材ローテーションを通じて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務で、社内外との現場力ベンチマークングを実施し、技能者の育成も進めている。

## 4. グローバルで通用するモノづくり力の強化

### 4.1 海外拠点支援の強化

グローバル競争に勝ち抜くためには、海外でのモノづくり力に加え、販売力の強化も不可欠であり、製造だけにとどまらず、国内と同様にSCM・ECM業務領域全プロセスの改善を推進していく必要がある。海外製造拠点に対しては、グローバル市場で負けない革新的な製造技術を開発し、それを海外に速やかに移管して事業貢献することが求められている。そのために、それぞれの地域性、インフラ、現地サプライヤーに適した生産方式や製造技術を開発し、技術移管の迅速化を図っている。また、海外販売拠点に対しては、生産技術センターが持っている情報システム技術等を活用し、販売コスト削減を目的とした業務プロセスの改善や、機会損失削減、在庫適正化等を目的とした製販連携強化を推進している。各事業の海外展開が進む中、生産技術

センターの支援拠点は年々増加しており、現在では46拠点に及ぶ(図3)。先に述べた支援業務を円滑に行うため、各地域の海外生産技術室と連携して現地に密着した支援活動を展開している。

#### 4.2 市場変動対応生産方式

従来当社は、家電等の一部の量産製品に対して、部材の共通度、段取り替え制約等を考慮した形名グループ単位で生産・手配量を設定し、市場要求の確定度合いに応じて詳細仕様を段階的に決定していく“順次確定生産方式”を採用し、市場変動に対応してきた。近年ではさらに、AIを用いた需要分析や顧客動態に基づく在庫基準の設定、PSI(Production, Sales, Inventory)計画の洗練化によって市場変動への対応力強化を図っている(図4)。

一方、事業のグローバル展開が進み、サプライチェーンの複雑化・大規模化が加速していくと、販売-設計-調達-製造-保守サービスでの各プロセス間、グローバル拠点間の連携強化がより一層重要となっている。特に、市場に対する現地生産・現地調達化や国際機能分業化が進展すると、グローバルサプライチェーン全体の効率を高めるための課題も複雑になっている。具体的には、各事業では海外展開

の時期や経緯の違いもあり、各々の事業形態に合わせた業務システムが構築されている場合がある。このような場合では、拠点間を跨ぐる業務全体の整流化を行った上で拠点間連携の業務システムを構築する。また、海外拠点の役割変化に伴う業務の見直しも発生する。地城市場の規模が大きくなるにつれ、より市場に近い拠点での機能強化と、それに伴った業務設計が必要となる。これらの活動は、拠点内で閉じることなく、拠点間で連携した活動によって実現できるものである。生産技術センターは、グローバル拠点間の情報共有・連携強化に向けた企画と業務設計・改善活動を展開し、更なる市場変動対応型生産方式の推進をしている。

#### 4.3 生産設計・構造設計と設備開発

生産技術センターでは、従来自動化設備開発を行ってきたが、1990年代以降、人件費の安い海外に生産をシフトしてきた関係上、単なる省人化や既存の製品設計前提では投資効果が出にくくなつた。そこで、工場の製品企画や構想設計の上流段階にさかのぼることによって、設計部門と共同で造りやすい構造と高付加価値化の両立を狙う生産設計を推進した。モータの事例では、家電、FA、車載機器の製品に生産設計とそれに基づく製造設備開発を水平展開した。

金型や部品の加工外注の技術力と依存度が高まるに伴う設計の外注依存度も増えた。これに対し、設計者が製造技術者とともに製造現場に入り込むことによって、設計と製造の乖離(かいり)を抑制し、早期に製造課題の反映を狙う構造設計を推進した。2000年代以降、冷熱機器用熱交換器、配管用各種弁、光学機器用レンズ、家電用意匠部品等の量産キーパーツの高付加価値化・内製化を進めるとともに、大型チラーや鉄道関連製品等、個別製品の設計改善を図った。

2010年代以降、空冷、車載機器、昇降機等の事業では地産地消を目指し、海外生産比率を高めているが、現地生産特有の課題がスムーズな量産移行の妨げになるケースが散見された。そこで、事業側及び海外生産技術室と連携し、SCM・ECM両軸にわたって対策を立案、設計への反映を推進している。例えば、家電製品の意匠パネルの樹脂成形金型立ち上げで、現地成形機に適した成形法、現地調達の樹脂材に適した金型改造、現地素材サプライヤーの技術指導を行うことによって、高品質な意匠成形を実現した。また、昇降機や空調機の関連部品生産で、鋼板・電線・鋳物等の現地調達材を使いこなす技術を確立するとともに、現地作業者の離職率を考慮し、人の入れ替わりを前提として、容易なメンテナンス性とシンプルな操作性を兼ね備えた製造設備・システムを導入した(図5)。



図3. 支援対象の海外拠点

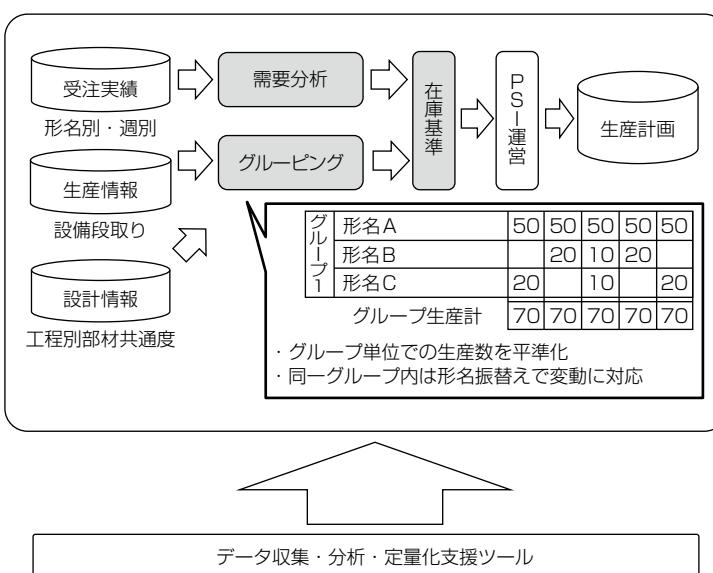


図4. 市場変動に対応する生産方式

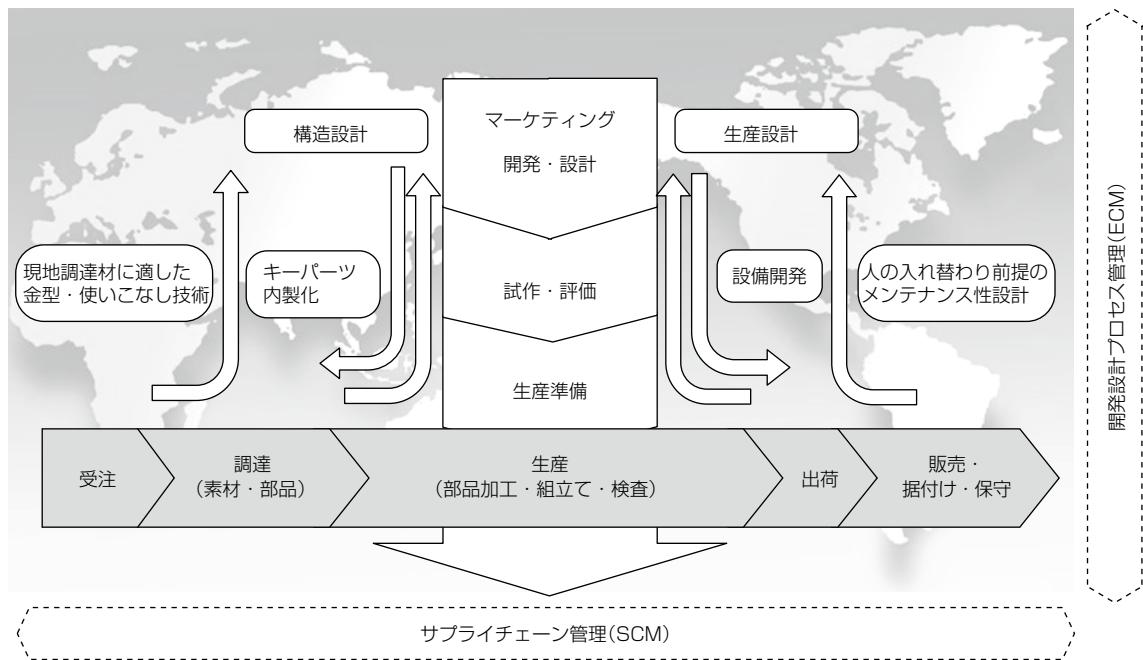


図5. 生産設計・構造設計と設備開発

#### 4.4 品質作り込み力の強化

生産技術センターでは、社は“品質奉仕の三菱電機”に従い、調達品・製造・設計での品質作り込み活動を強化している。特に、グローバル化が進むサプライチェーンを安定化させるため、調達品品質作り込みや、海外工場を含む当社グループの製造拠点で、IoT活用や工程内不良低減による製造品質作り込みに取り組んでおり、その取組み事例について述べる。

##### 4.4.1 調達品品質作り込み

当社製品は、社外から調達した部品を多数搭載している。その中で、小型・高性能化が求められる製品に搭載する電子部品では、国内サプライヤーのラインアップ再編や、海外サプライヤーのEOL(End Of Life)による生産中止がここ数年で急増している。さらに、RoHS(the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment)指令等の環境規制を受けての材料変更もあり、部品認定や受入れ検査、サプライヤー監査の重要性が高まっている。部品認定では、初期性能評価だけではなく、長期信頼性を短期間で評価する加速技術開発や、性能が劣化した部品の劣化原因を特定する分析技術開発に注力している。サプライヤー監査では、多様化する調達先の監査効率化とともに、監査レベルの標準化を目的とした、監査チェックシートの整備に注力している。また、本社品質保証部と連携し、監査ノウハウの伝承を目的とした人材育成と、全社での監査情報の共有を進めている。

##### 4.4.2 製造品質作り込み

製造・検査工程の自動化による製造品質作り込みを進めているが、少量多品種の製品を中心にマニュアル作業の多い製品がある。このようなマニュアル作業でのヒューマン

エラー防止やトレーサビリティ向上を目的とし、IoTを活用した国内外の工場での品質改善を、JIT改善活動と連動させて進めている。

また、工程内の不良低減活動を端緒とした、ESD(Electro Static Discharge)試験・管理技術開発にも注力し、生産性の改善に取り組んでいる。

#### 5. むすび

当社は、多様化する社会課題の解決に向け、一段高いレベルの成長を目指しており、生産技術センターは、当社グループ内のモノづくりをけん引する中心的役割として、生産技術の継続的な底上げとして、JIT改善活動の拡大、及び基盤技術の伝承を図ってきた。

当社事業の海外展開の進展に伴い、グローバルで通用するモノづくり力の強化が望まれており、現地生産に伴うサプライチェーン課題に対しては、更なる市場変動対応生産方式の推進を、現地での設備導入では、設計の上流段階にさかのぼる生産設計・構造設計に加え、現地調達材前提の設備設計を、国内及び海外生産の品質に関しては、調達品・製造・設計品質の作り込み力の強化を推進している。

今後、当社の一段高いレベルの成長に向け、事業・拠点と連携しながら、SCM・ECM全般にわたる領域を俯瞰(ふかん)しつつ、更なるモノづくり力強化を推進していく。

#### 参考文献

- (1) 大西 寛：成長戦略を支える生産技術、三菱電機技報、87, No.12, 662~665 (2013)
- (2) 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)

安藤慎一郎\*  
金谷雅夫\*  
中西浩平\*

# ESD試験・管理技術

ESD Test and Control Technology

Shinichiro Ando, Masao Kanatani, Kohei Nakanishi

## 要旨

半導体デバイスの耐電圧(耐圧)は、構造微細化が進むにつれて低下傾向にある。そのため、製品製造工程で発生する静電気放電(Electro Static Discharge: ESD)によってデバイスが損傷し、工程歩留りが低下することが懸念されている。

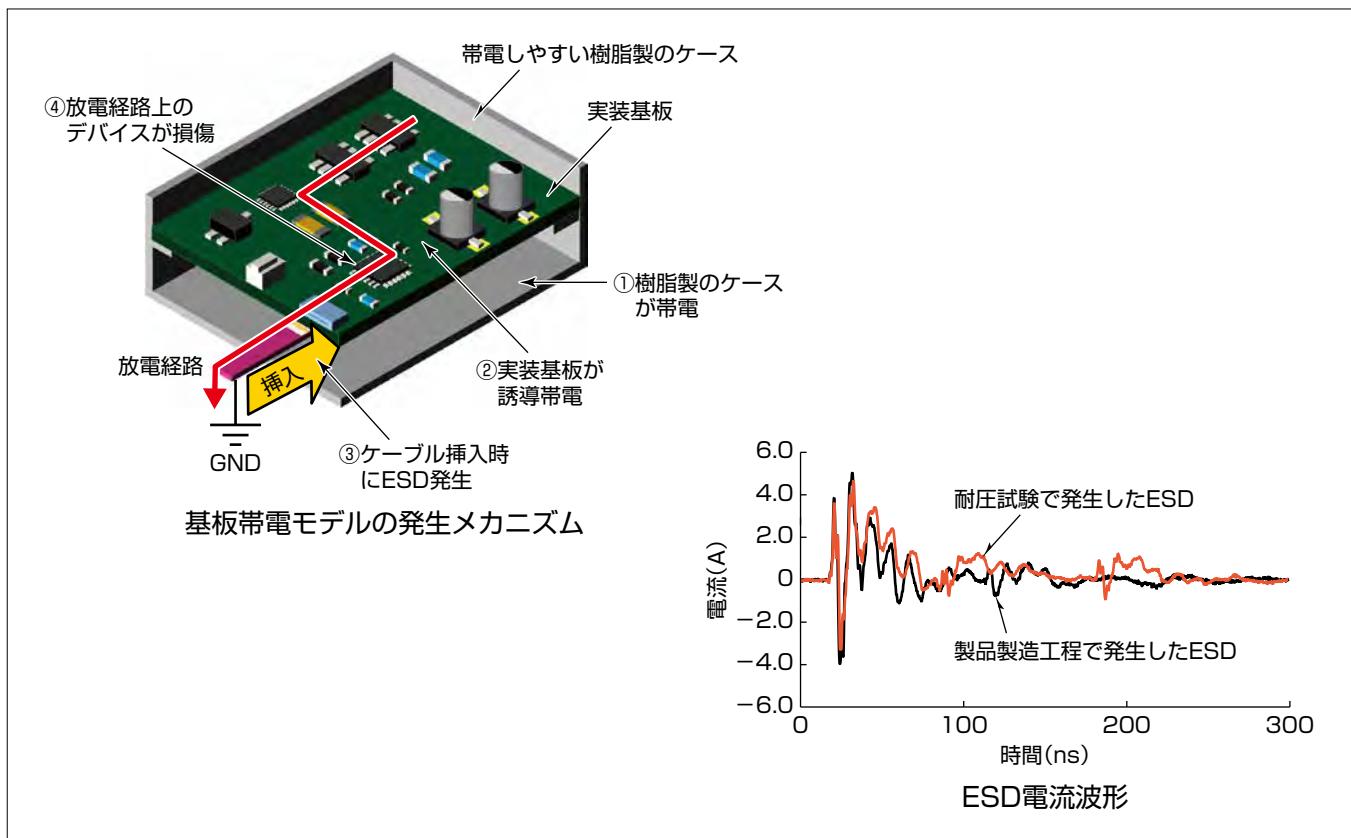
ESDから、デバイスを保護するためには、製品試作時に、実際に発生する可能性のあるESDを模擬した耐圧試験を実施し、その結果を基に、製品設計の変更や、製品製造工程の適切なESD管理を実施する必要がある。

ESD耐圧試験の中でも、帯電した人体からデバイスに放電する“人体帯電モデル”や、帯電したデバイスからGND(GrouND)に接続された設備に放電する“デバイス帯

電モデル”などの、デバイス単体状態で発生するESDの耐圧試験方法は、デバイスメーカーが実施する試験として、その方法が確立されてきた。

しかし、実装基板状態で発生する“基板帯電モデル”“ケーブル帯電モデル”“剥離帯電モデル”などのESDモデルの耐圧試験は、デバイスユーザーが設計する基板に依存してESD発生時にデバイスに加えられるエネルギーが変化するため、その方法が確立されてこなかった。

そこで、三菱電機では、これらの耐圧試験方法が未確立のESDモデルに対して、その発生メカニズムに基づいた耐圧試験方法を開発した。



## 基板帯電モデルの発生メカニズムとESD電流波形

①樹脂製のケースが人体や設備などと接触し、静電気に帯電すると、その中に配置された②実装基板も誘導帯電する。この実装基板に③GNDに接続されたケーブルを挿入すると、ケーブルと実装基板の電位差によってESDが発生し、④放電経路上のデバイスが損傷する。この基板帯電モデルについて、製品製造工程で発生したESDと同等のESD電流波形を出力できる耐圧試験方法を開発した。

## 1. まえがき

半導体デバイスの耐電圧(耐圧)は、構造微細化が進むにつれて低下傾向にある。そのため、製品製造工程で発生するESDによってデバイスが損傷し、工程歩留りが低下することが懸念されている。

製品製造工程で発生するESDとして、帯電した人体からデバイスに放電する“人体帯電モデル”や、帯電したデバイスからGNDに接続された設備に放電する“デバイス帯電モデル”，帯電した実装基板からGNDに接続された設備に放電する“基板帯電モデル”などが知られている<sup>(1)(2)</sup>。

図1は、それぞれのESDモデルの2kVの放電電流波形であるが、ESDモデルによって電流波形の形状が異なることが分かる。これは、帯電物の静電容量や、放電経路の抵抗値やインダクタンス成分の違いが原因であるが、“基板帯電モデル”的電流波形は他のモデルに比べて数A程度の大きなピークが複数回発生している。電荷量が多いと、同じ電圧のESDであってもエネルギー(電圧×電流)が大きくなるため、“基板帯電モデル”は、この中で最もデバイスを損傷させるリスクが高いということになる。

このようなESDからデバイスを保護するためには、製品試作時に、実際に発生する可能性のあるESDを模擬した耐圧試験を実施し、その結果を基に、製品設計の変更や、製品製造工程の適切なESD管理を実施する必要がある。

図2に示すように、ESD耐圧試験の中でも、“人体帯電モデル”や、“デバイス帯電モデル”などの、デバイス単体状態で発生するESDの耐圧試験方法は、デバイスマーカーが実施する試験として、その方法が確立されてきた。しか

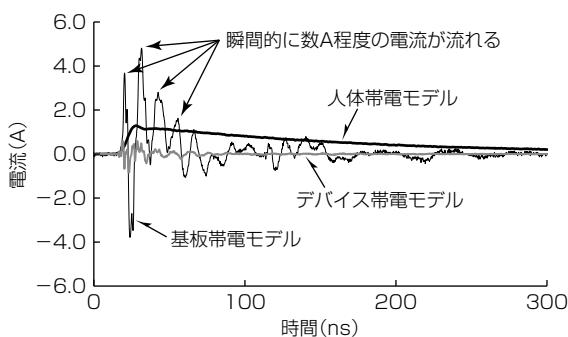


図1. ESDモデルの2kV放電電流波形

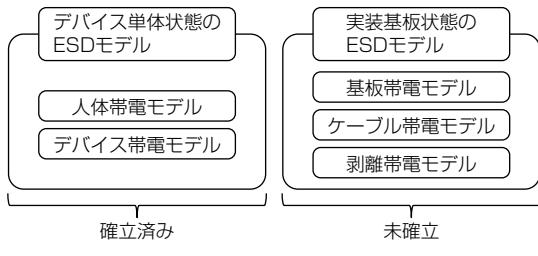


図2. ESDモデルの耐圧試験方法確立状況

し、実装基板状態で発生する基板帯電モデルなどのESDモデルの耐圧試験は、デバイスユーザーが設計する基板に依存してESD発生時にデバイスに加えられるエネルギーが変化するため、その方法が確立されてこなかった。

本稿では、これらの耐圧試験方法が確立されていない実装基板状態で発生するESDモデルに対して、その発生メカニズムに基づいて開発した耐圧試験方法について述べる。

## 2. 実装基板のESD耐圧試験方法の開発

耐圧試験方法が確立されていない実装基板状態で発生するESDモデルとして“基板帯電モデル”“ケーブル帯電モデル”“剥離帯電モデル”がある。これらESDモデルに対して、耐圧試験方法の開発を行った。

また、今回開発した耐圧試験の結果を基に、製品製造工程で発生するESDによる工程歩留り低下を抑制するためには、耐圧試験で発生させるESDのエネルギー量を、製品製造工程で発生するESDと同等にする必要がある。そこで、今回開発した耐圧試験方法では、製品製造工程と同じメカニズムで実装基板を帯電させ、ESDを発生させることができる試験構成にした。

### 2.1 基板帯電モデルの耐圧試験方法

#### 2.1.1 基板帯電モデルの発生メカニズム

基板帯電モデルの発生メカニズムを図3に示す。①帯電しやすい樹脂製のケースが、人体や設備などと接触することで帯電する。②帯電したケースによって、ケース内の実装基板が誘導帯電される。③誘導帯電した実装基板へのGNDに接続されたケーブル挿入時に、ケーブルを近づけると、ケーブルと実装基板の電位差によってESDが発生する。④発生したESDの放電経路上のデバイスが損傷する。

#### 2.1.2 試験方法

基板帯電モデルを鑑みた耐圧試験とするため、“導電性マットと絶縁シート”を用いて、“樹脂製のケースの帯電”を模擬する。図4に、試験の構成と手順を示す。①スイッチを切り換える(0→1)，高圧電源に接続された電極(導電性マット)を任意の電圧に帯電させる。②電極が帯電することで、絶縁シート上に置かれた実装基板が誘導帯電する。③誘導帯電した実装基板にGNDに接続されたケーブルを近づけると、ケーブルと実装基板の電位差によってESDが発生する。④実装基板に対して電気特性の評価を行い、デバイスの損傷有無を確認する。損傷していないければ、電圧を上げ、デバイスが損傷するまで試験を繰り返し行う。デバイスが損傷した場合は、そのときの高圧電源の設定電圧を、実装基板の耐電圧(耐圧)とする。

電極に導電性マットを利用した理由の一つ目は、電極形状を実装基板形状に合わせて加工することが容易なためである。二つ目は、導電性マットが持っている抵抗は、電極を充電するための充電抵抗としても利用できるためである。

### 2.1.3 製品製造工程で発生した電流波形との比較

図5に、耐圧試験と、製品製造工程で発生したESD電流波形を示す。両者を比較すると、耐圧試験の電流波形は、実際の電流波形の、複雑なピーク群の形状を再現できていることが分かる。このピーク群の大きさや、ピーク同士の間隔(周波数)は、帶電物の静電容量や、放電経路の抵抗値やインダクタンス成分によって変化し、デバイスに加わるエネルギー量を決定する。

この試験方法は、製品製造工程で発生したESDと同等のエネルギーをデバイスに対して与えることができておらず、ESD耐圧試験として有効であると言える。

### 2.2 ケーブル帶電モデルの耐圧試験方法

#### 2.2.1 ケーブル帶電モデルのメカニズム

実装基板へのケーブル挿入時、基板帶電モデルのように実装基板が帶電していない場合でも、ケーブルが帶電している場合はESDが発生する。本稿では、このESDモデルを“ケーブル帶電モデル”と呼ぶ。このモデルの発生メカニズムについて図3を用いて述べる。

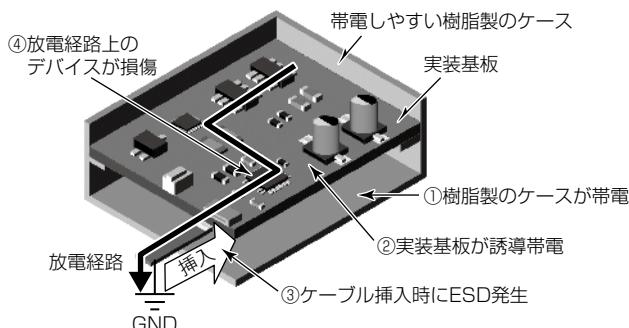


図3. 基板帶電モデルの発生メカニズム

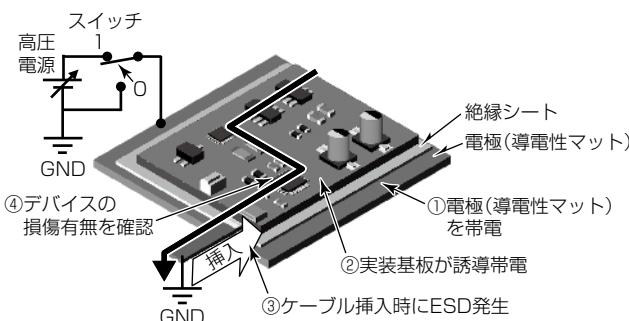


図4. 基板帶電モデル耐圧試験の構成と手順

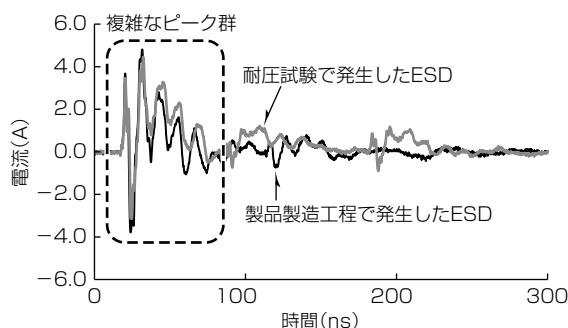


図5. 耐圧試験と製品製造工程で発生した電流波形の比較

ズムについて図6を用いて述べる。

①ケーブルの樹脂被覆が設備と接触して帶電する。②ケーブルの樹脂被覆の帶電によって、ケーブル芯線が誘導帶電する。③芯線が誘導帶電したケーブルをGNDに接続された実装基板に挿入すると、ケーブルと実装基板の電位差によってESDが発生する。④発生したESDの放電経路上のデバイスが損傷する。

このケーブル帶電モデルは、ケーブルの長さや太さなどによって発生時のエネルギー量が変化する。そのため、ケーブルの帶電電圧が低い場合でもESDによるエネルギーが大きくなることがあり、デバイスを損傷させる可能性が高いモデルである。

#### 2.2.2 試験方法

ケーブル帶電モデルを鑑みた耐圧試験とするため、“導電性マットと絶縁シート”を用いて“ケーブル樹脂被覆の帶電”を模擬する。図7に、試験の構成と手順を示す。①スイッチ1を切り換える(0→1)、高圧電源に接続された電極(導電性マット)を任意の電圧に帶電させる。②電極が帶電することで、絶縁シート上に置かれたケーブル芯線が誘導帶電する。③スイッチ2を切り換える(0→1)、芯線が誘導帶電したケーブルと実装基板を接続すると、ケーブル芯線と実装基板の電位差によってESDが発生する。④実装基板に対して電気特性を測定し、デバイスの損傷有無を確認する。損傷していない場合は、電圧を上げて、デバイスが損傷するまで試験を繰り返し行う。デバイスが損傷した場合は、そのときの高圧電源の設定電圧を、実装基板の耐電圧(耐圧)とする。

#### 2.2.3 製品製造工程で発生した電流波形との比較

図8に、耐圧試験と製品製造工程で発生したケーブル帶電モデルの電流波形を示す。両者を比較すると、耐圧試験の電流波形は、実際のケーブル帶電モデルの波形を再現できている。

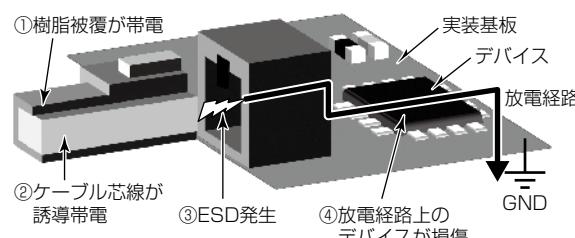


図6. ケーブル帶電モデルの発生メカニズム

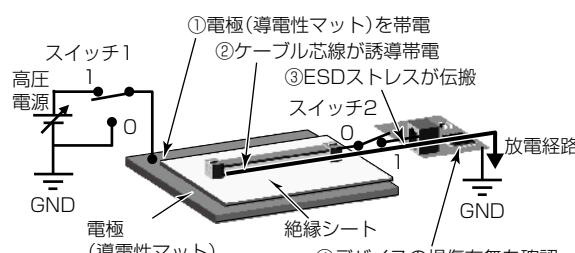


図7. ケーブル帶電モデル耐圧試験の構成と手順

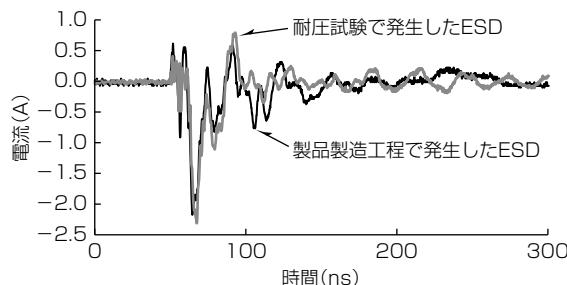


図8. 耐圧試験と製品製造工程で発生した電流波形との比較

きていることが分かる。

この試験方法は、実際のケーブル帶電モデルと同等のESDエネルギーをデバイスに対して与えることができておらず、ESD耐圧試験として有効であると言える。

### 2.3 剥離帶電モデルの耐圧試験方法

#### 2.3.1 剥離帶電モデルのメカニズム

「基板に接続された樹脂部品」を傷や汚れなどから保護するために貼られた保護シートを剥離すると静電気が発生し、デバイスを損傷させることがある。このESDモデルを本稿では、「剥離帶電モデル」と呼ぶ。

剥離帶電モデルの発生メカニズムについて図9を用いて述べる。①樹脂部品に貼られた保護シートを剥離することで樹脂部品表面が急激に静電気帶電する。②樹脂部品と接続された実装基板上のデバイスに誘導電流が流れ、デバイスが急速に高電圧に帶電する。③急速に帶電することでデバイスが損傷する。

このように、剥離帶電モデルは、基板帶電モデルや、ケーブル帶電モデルのように、静電気による放電現象が原因でデバイスが損傷するモデルとは異なり、デバイスが急速に高電圧に帶電することが原因で損傷するモデルである。

#### 2.3.2 試験方法

剥離帶電モデルを鑑みた耐圧試験とするため、「導電性マットと絶縁シート」を用いて「樹脂部品の保護シート剥離による帶電」を模擬する。図10に、試験の構成と手順を示す。①スイッチを切り替える(0→1)ことで電極(導電マット)を帶電させる。②電極が帶電したことにより誘導電流が実装基板に流れ、搭載されたデバイスが急速に帶電する。このとき、デバイスが帶電したことを確認するために非接触式の電圧計(表面電位計)を用いてデバイスの帶電電圧を確認する。③実装基板に対して電気特性を測定し、デバイスの損傷有無を確認する。損傷していない場合は、電圧を上げて、デバイスが損傷するまで試験を繰り返し行う。デバイスが損傷した場合は、そのときの設定電圧を、実装基板の耐電圧(耐圧)とする。

#### 2.3.3 製品製造工程で発生したESDとの帶電速度比較

このモデルは、デバイスが急速に帶電することで損傷するモデルであるため、耐圧試験と、製品製造工程で発生した帶電の速度を比較する。図11に、その比較結果を示す。

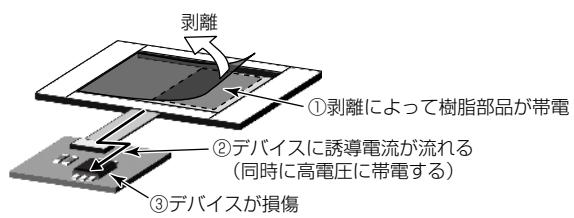


図9. 剥離帶電モデルの発生メカニズム

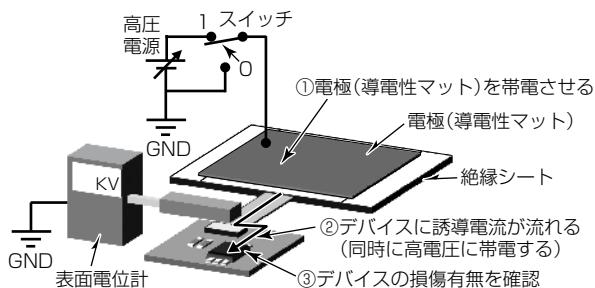


図10. 剥離帶電モデル耐圧試験の構成と手順

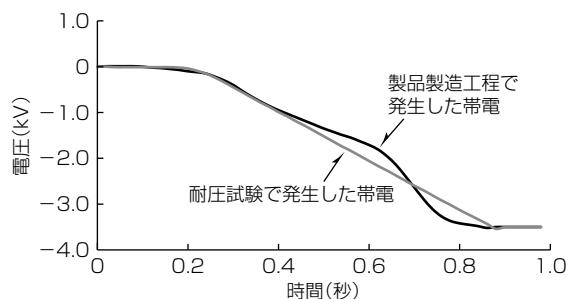


図11. 耐圧試験と製品製造工程で発生した帶電の速度比較

両者を比較すると、耐圧試験は実際の保護シート剥離による帶電と同等の速度で、デバイスを帶電させていることが分かる。今回開発した試験は、剥離帶電モデルの試験方法として有効であると言える。

### 3. むすび

半導体デバイスの構造微細化が進むにつれて耐圧が低下することが懸念されている。そのため、デバイス単体や実装基板状態のESD耐圧を測定し、その結果を製品設計や、製品製造工程のESD管理にフィードバックすることは、当社製品の品質強化で非常に重要な役割を持つ。

今回、開発したESD耐圧試験法は、当社の国内・海外工場で製造している多くの製品に適用することで、当社製品の品質向上に貢献していく。

### 参考文献

- 静電気学会編：静電気ハンドブック、(株)オーム社(2006)
- 一般財団法人 日本電子部品信頼性センター：静電気現象からの電子デバイスの保護 一般要求事項 RCJS-5-1(第3版) (2016)

# JIT改善活動の深化と拡大

Deepening and Expansion of Just-in-time Improvement Activities

Tetsuya Tamaki, Katsuji Taguchi, Yoshikatsu Fukuda, Yoshihiko Sugio, Hiroshi Kanemori

玉置哲也\* 杉尾吉彦\*  
田口勝次\* 兼森洋志\*\*  
福田義勝\*

## 要旨

三菱電機は2002年から生産体質強化を目的に、5S(整理・整頓・清掃・清潔・躰(しつけ))3定(定位・定品・定量)、徹底したムダ取り、自発的継続的改善を基本としたJIT(Just In Time)改善活動を開始している。その後、生産全プロセスへの拡大、事業のグローバル展開に伴う海外製造拠点への拡大と年々その領域を広げながら深化を遂げてきた<sup>(1)</sup>。しかし、当社を取り巻く環境の変化及び事業のグローバル展開に対応するためにはJIT改善活動の更なる深化と拡大が求められている。

JIT改善活動の深化と拡大に向けての当面の課題は、それぞれ改善活動のPDCA(Plan Do Check Action)サイクル高速化とグローバル拡大である。

改善活動のPDCAサイクル高速化という課題に対して

当社では改善活動を全社で推進していくためのプラットフォームコンセプトと標準ツール整備を進め、製造現場の現状分析を容易にするITツールを開発した。改善活動の中にITツールを組み込むことで短時間で多くのデータの取得と処理が可能になった結果、活動のPDCAサイクル高速化を促し、大きな成果へと結び付いている。

また、改善活動のグローバル拡大という課題に対しては、東南アジアと中国に開設した海外生産技術室と連携し、人材育成と改善風土の醸成を推進した。また、海外製造拠点でのJIT改善活動の定着度を評価する指標の導入によって早期定着化に向けた活動を推進した。

当社を取り巻く環境が著しく変化する中、今後もJIT改善活動の深化と拡大に向けて、絶え間ない活動を続けていく。

## 資産回転率改善を目的としてJIT改善活動をスタート

製造部門を中心に当社の全製作所に展開

生産全プロセスに対してJIT改善活動を開始  
深化・拡大のための仕掛け作りを実施

物流部門のJIT改善活動を開始

活動の深化・拡大の一層強化

生産全プロセスJIT改善活動を強化、成果刈取りを徹底

平均資産回転率を向上させる活動を開始

事業のグローバル展開に向けた生産体質強化と  
連結の資産回転率改善を目的としたJIT改善活動

6軸プラットフォームを活用したJIT改善活動

e-F@ctory<sup>(注1)</sup>コンセプトに基づく  
JIT改善活動

ITツール活用による  
改善サイクル高速化

改善活動の  
グローバル拡大

SCM/ECM業務領域  
全プロセスの改善

連結資産回転率管理の  
強化活動開始

2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019

(注1) 三菱電機のFA-IT統合ソリューションである。

SCM: Supply Chain Management, ECM: Engineering Chain Management

## JIT改善活動の深化と拡大

製造現場からスタートした当社のJIT改善活動は、生産全プロセスへとその活動領域拡大と深化を遂げてきた。今後も事業のグローバル展開への対応と連結視点での施策によってその領域拡大と深化に向けて活動を活性化する。

## 1. まえがき

当社のJIT改善活動のDNAとも言える基本的な考え方は、ムダのない筋肉質の会社にするための活動で、製造現場だけでなく、設計、営業、保守も含め、経営に結び付く指標を改善することである。それは、①問題点の見える化、②ムダ取りの実行(見える化した問題点の解決)、③自発的・継続的改善風土の醸成である(図1)。このJIT思想に基づいて製造現場からスタートしたJIT改善活動は、部門間連携を重視して活動領域を生産全プロセスに拡大してきた。SCM軸では、総合L/T(Lead Time)短縮、棚残削減を目的としてムダ取り活動やムダを評価する指標等の導入によって活性化、ECM軸でも業務プロセス改善によってコスト削減、開発L/T短縮を進めてきた。これらの活動は、海外を含めた関係会社及び協力工場にも拡大して国内製作所と連携して進めている。しかし昨今の当社を取り巻く環境の変化及び事業のグローバル展開に対応するためにはJIT改善活動の更なる深化と拡大が必要であり、ここ数年はこれらの課題に重点的に取り組んできた。

## 2. JIT改善活動の深化と拡大に向けた課題

JIT改善活動の深化と拡大に向けた課題は、次に述べるように改善活動のPDCAサイクル高速化とグローバル拡大である。

### 2.1 改善活動のPDCAサイクル高速化

改善活動のPDCAサイクルは、製造現場での調査(データ取得)、データ整理、問題点の抽出、改善案の検討及び実施が一般的な流れである。このうち、調査(データ取得)及びデータ整理は時間を要する作業であり、改善活動のPDCAサイクル高速化のためにはできる限り効率化を図ることが望ましい。しかし、現在の人に頼った方法では効率化に限界があり、人手に変わる新たな方法が求められていた。また改善効果の最大化のためには人・モノ・設備のあらゆるデータ取得が必要であり、これらの膨大なデータ取得及び処理の高速化が可能となるツールの開発が求められていた。

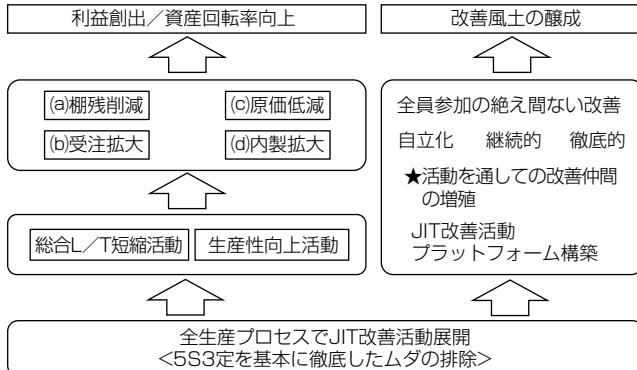


図1. JIT改善活動の目指す姿

## 2.2 改善活動のグローバル拡大

従来の海外製造拠点での当社生産技術センターの関わり方は国内製造拠点と同様に、個別のテーマを改善する改善支援、及び生産現場を巡回しながら問題点を指摘、指導する診断型支援が中心であった。しかしこうした関わり方は距離的・時間的制約が強く、生産技術センターの限られたリソースでは、海外製造拠点の拡大に追従できない問題と、せっかく改善しても後戻りが発生したり、問題点を指摘してもその後の改善が思うように進まなかったり、といった海外製造拠点固有の問題が発生していた。

これらの問題に対応するため、海外製造拠点でのJIT改善活動を生産技術センターに頼った活動から、海外製造拠点自身が自立した活動に現地化し、活動の早期定着化を促進することが求められていた。

## 3. ITツールを活用したJIT改善活動

### 3.1 ITツール開発の経緯

製造現場でのデータ取得と処理の高速化、海外製造拠点でのJIT改善活動の現地化要求に応えるため、製造現場の現状分析を容易にするITツールを開発した(図2)。

ITツールの開発に当たり、ドイツでの“インダストリー4.0”，中国での“中国製造2025”に準ずる形で、JIT改善活動の主体となる現場レベルで導入・保守が簡単に実行できるようにするため、①簡単な操作でデータ入力できること、②安価な汎用機器を用いること、③ツールの維持・管理が容易であることをコンセプトにした。

### 3.2 JIT改善活動へのITツール適用

JIT改善活動に活用するため開発したITツールのうち、作業の着手・完了記録ツール、運搬データ取得ツール、設備稼働データ取得ツール、人作業のムリ・ムダ抽出ツールの4種類について述べる。

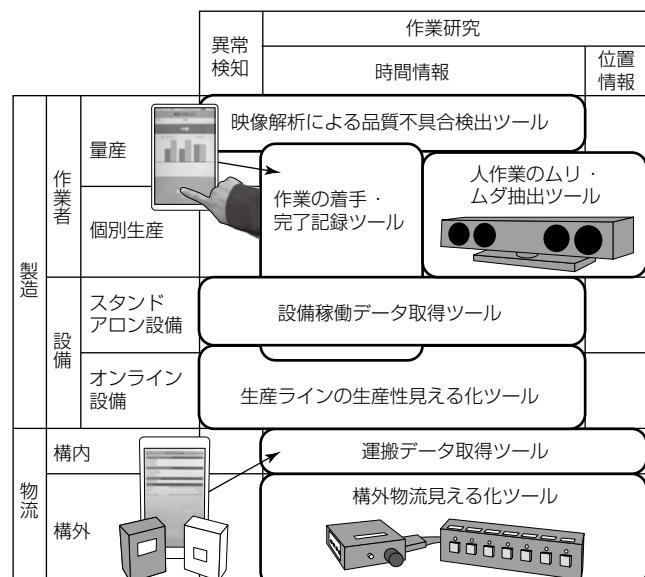


図2. JIT改善活動のためのITツール一覧

### (1) 作業の着手・完了記録ツール

作業の着手・完了の時間データを取得し、標準時間と比較可能なタブレットツールを開発した(図3)。このツールは、汎用タブレットで動作するソフトウェアであり、タッチ入力インターフェースを持っている。このツールを使用することで作業実績時間の把握、作業中断理由の明確化、時間意識の向上などが可能である。これらによって、改善活動を効率的に進めることができ、早期の生産性向上が可能である。

### (2) 運搬データ取得ツール

工場や倉庫などの空間にビーコンを設置し、作業者やフォークリフトなどにタブレットを携行させることで、それらの動線やエリア別滞在率といった運搬データを見える化するツール(図4)を開発した。運搬動線やエリア別滞在率を見える化することで(図5)、工場レイアウトや運搬経路の見直しなどの改善を加速できる。また、フォークリフトの稼働率も定量化できるため、フォークリフトの最適配置が可能である。

### (3) 設備稼働データ取得ツール

設備シグナルタワーの情報から設備稼働状況を把握可能なツール(図6)を開発した。このツールは、送信機、受信機、ディスプレイで構成されており、ネットワークに接続されていない設備の稼働率把握が可能である。このツール

を用いることで、設備オペレータへの設備停止状態の通知による、早期復旧の促進や、設備の稼働状態を時系列で集計することによる、設備停止の未然防止が可能になった。



図4. 運搬データ取得ツール

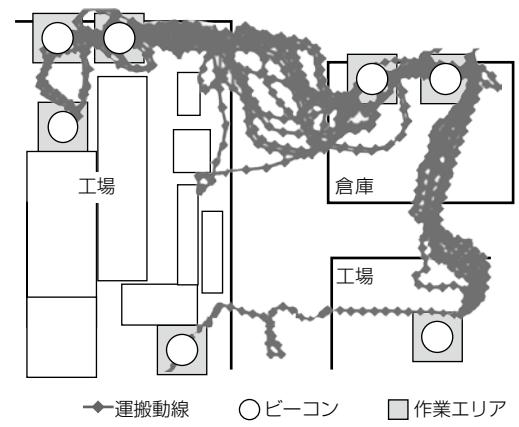


図5. 運搬動線



図3. 作業の着手・完了記録ツール

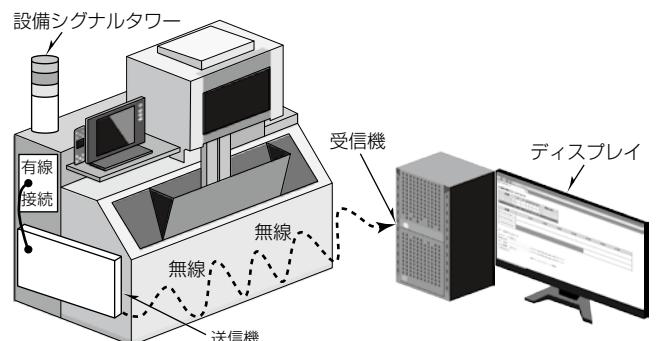
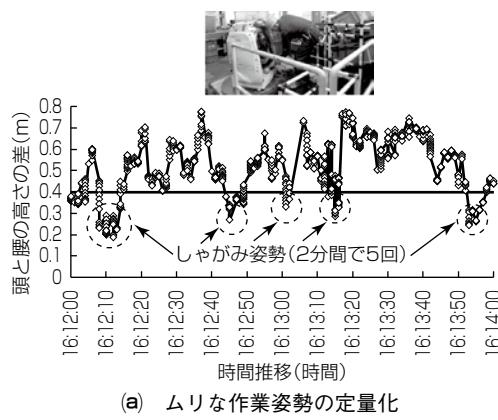


図6. 設備稼働データ取得ツール



(a) ムリな作業姿勢の定量化

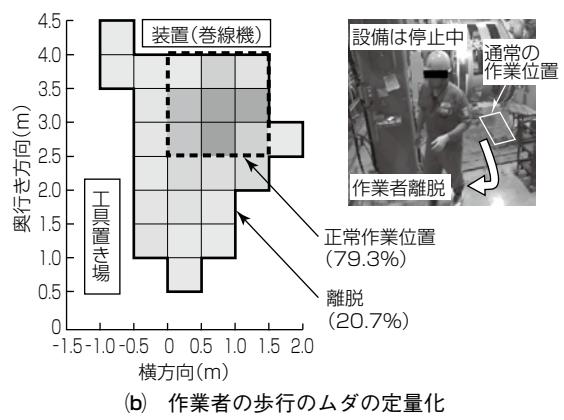


図7. 人作業のムリ・ムダ抽出ツール“MAAL”

## (4) 人作業のムリ・ムダ抽出ツール

モーションキャプチャ等で検出した人の手足等の三次元位置情報から、ムリな動きやムダな動きを計算するロジックを内蔵したソフトウェアツールを開発した。このツールをすることで、ムリな作業姿勢を定量化することで作業環境改善に結び付けること(図7(a))、及び作業者の歩行のムダを定量化し、生産現場のレイアウト改善に結び付けること(図7(b))が可能になった。

## 3.3 今後の展開

これまで製造現場の現状分析を容易にするITツールを開発してきた。これらのツールは、国内外の当社グループで幅広く活用されている。展開先の拡大に向け、現場視点での使い勝手向上を突き止めつつ、今後、一般化しつつある映像解析技術、AI技術等を活用する技術開発とツール化を進め、JIT改善活動の更なる加速を図る。

## 4. JIT改善活動のグローバル拡大

## 4.1 改善風土醸成に向けた取組み

改善活動のグローバル拡大という課題に対しては、現地の文化や風習に配慮しつつ、国内マザー工場及び海外生産技術室と連携を取りながら、工場診断や、現地スタッフの人材育成も兼ねた改善活動を通してJIT改善活動の定着化を進めてきた。

国内で実施しているJIT改善活動の推進者育成体系に基づき、経営者から作業者まで全従業員に対して各階層に合わせた育成施策を実施してきた(図8)。特にJITけん引者層を強化するため、拠点数の多い東南アジア・中国地区で、国内で実績のあるJIT・IE(Industrial Engineering)セミナを展開してきた。それぞれの文化に応じた体系的・実践的教育によって、成功体験を得るカリキュラムとすることで、改善の楽しさを実感するとともに、改善する仲間を増加させた。これによって海外で自発的な改善風土を醸成した。

## 4.2 自立化に向けた取組み

JIT改善活動を現地で定着させるためには、自発的・継続的な改善風土をつくることが重要である。そのためには、木(活動推進の仕組み)、肥沃な土壌(活動活性化する仕組み)、太陽(脚光を浴びる仕組み)を整備することが重要である。

これらの考え方を踏まえてJIT改善活動の自立化を評価するツールとして6軸のプラットフォームを構築した(図9)。活動推進の仕組みの評価軸として①方針展開と②活動計画の策定の2軸を設定した。また、活動を活性化する仕組みとして③推進体制の確立と④活動展開の仕組み及び⑤人材育成の仕組みの3軸を設定した。最後に脚光を浴びる仕組みとして⑥モチベーションの仕組みを設定し、6軸に分類した点検項目で評価することで、改善風土の醸成を促進してきた。これによってJIT改善活動に必要な項目がバランス

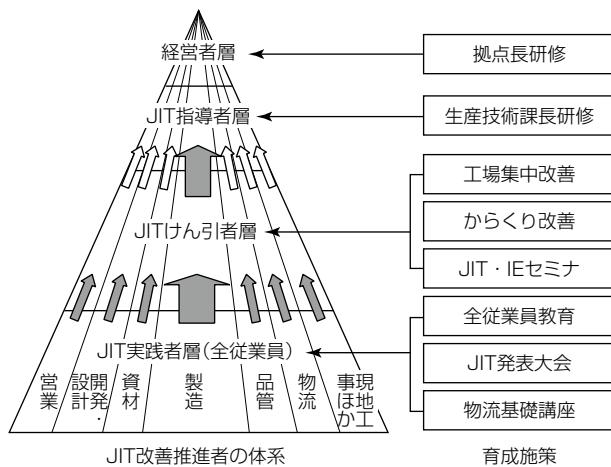


図8. JIT改善活動の推進者育成体系

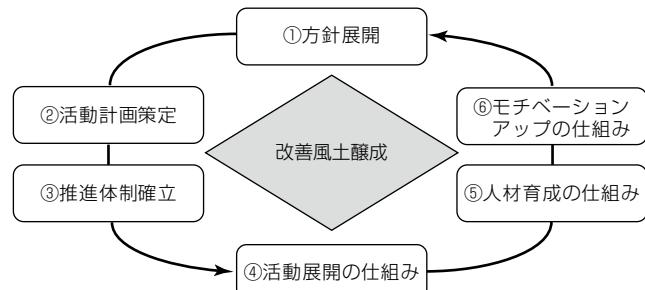


図9. 6軸プラットフォームの構成

ス良好に強化され、海外で自立化に向けた取組みを展開している。

## 4.3 今後の展開

JIT改善活動の支援対象となる当社の海外製造・販売拠点は、東南・南アジア17拠点、中国13拠点、欧州9拠点、北米7拠点の計46拠点である。

これまで、東南アジア・中国地区で実施してきた取組みを欧州・北米地区へ展開し、JIT改善活動の更なるグローバル拡大を図る。そのためには、国内と海外で得た活動のノウハウを現地文化に適応させ、信頼関係を構築しつつ協調して活動を展開していく。

## 5. むすび

当社のJIT改善活動は活動開始以来、着実に深化と拡大を遂げてきた。しかし、今後ますます競争が激しくなっていく中で、当社が生き残っていくためには、変化に対応し続けていく必要がある。そのためには、JIT改善活動のDNAであるムダの見える化、ムダ取りの実行、そして改善風土の醸成という地に足のついた活動の再徹底と更に一段高いレベルのJIT改善活動の姿を追い求めていく。

## 参考文献

- (1) 横野本宣秀、ほか：生産革新活動の深化とグローバル拡大、三菱電機技報、87、No.12、706～710 (2013)

# グローバル変更管理業務の合理化

長原耕平\* 山田賢治\*\*  
仲神俊明\* 吉村 崇\*\*

Rationalization of Change Management Operations at All Manufacturing Sites

Kohei Nagahara, Toshiaki Nakagami, Takashi Yoshimura, Kenji Yamada

## 要旨

従来、三菱電機の自動車機器事業の海外拠点では、国内マザー工場での設計変更(図面、検査仕様の変更など)に伴い、図面の読図や変更内容の転記といった変更管理業務を行っていた。近年、海外拠点での生産機種数の拡大に伴って変更管理業務が増加し、製品の高機能化によって検査項目数も増加した。このような状況下、国内マザー工場での検査プログラム<sup>(注1)</sup>作成業務では、検査要領書が自由書式、作成が手作業、検査項目の目視確認が必要という課題があり、海外拠点での変更管理業務では、変更内容の転記漏れ、変更適用の管理負荷大という課題があり、業務品質低下が懸念された。

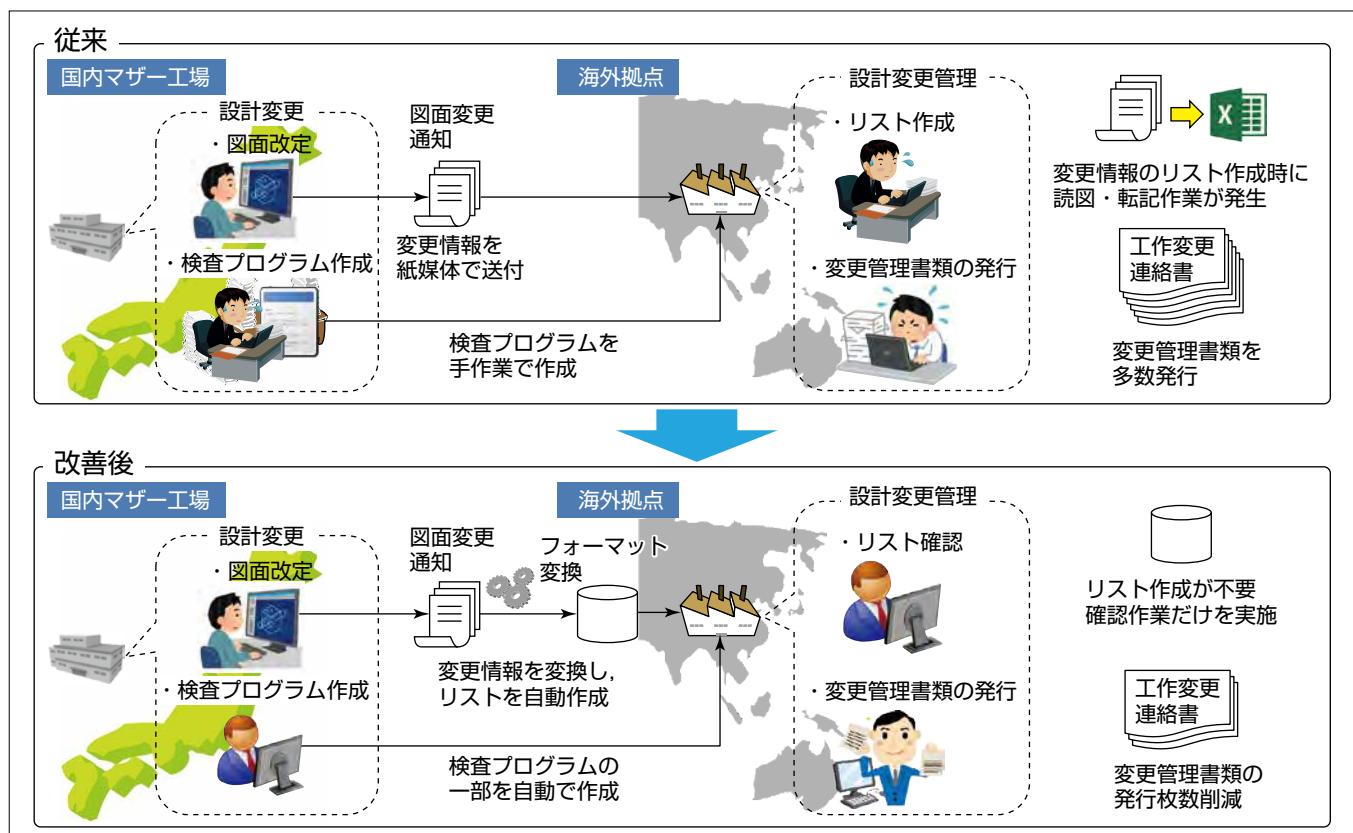
そこで、変更管理業務の合理化による業務品質の担保が急務となり、これらの課題を解決するため、次の二つの改

善施策を実施した。

- (1) 国内マザー工場での検査プログラム作成業務改善
  - ・検査要領書の標準化、検査プログラム作成の半自動化によって検査項目の漏れ、検査規格値の誤りを防止
- (2) 海外拠点向け変更管理システムの構築
  - ・複数のマザー工場からの変更情報を一元化し、リスト作成を自動化することによって読図・転記を排除
  - ・変更管理書類を同一変更適用日でまとめて発行枚数を削減

今後、多様化する顧客ニーズに対応するため、引き続き変更管理技術の深耕と業務運用の改善を推進する。

(注1) 検査機に検査項目、検査規格値を指示するプログラムのこと。検査項目が漏れたり、検査規格値を誤ると正しく検査を行うことができない。



## グローバル変更管理業務の合理化の取組み

従来は、国内マザー工場での設計変更通知を紙媒体で海外拠点に送付し、検査プログラムを手作業で作成していた。海外拠点ではこれらのデータの受領後、図面の読図、変更内容のリスト作成、変更管理書類の発行などを行っていた。改善後は、リスト作成の自動化や検査プログラム作成の半自動化によって、変更管理の業務品質を担保するとともに、変更管理工数を削減した。

## 1. まえがき

従来、当社の自動車機器事業の海外拠点では、国内マザー工場での設計変更(図面、検査仕様の変更など)に伴い、図面の読図や変更内容の転記といった変更管理業務を行っていた。近年、海外拠点での生産機種数の拡大に伴って設計変更が増加し、製品の高機能化によって検査項目数も増加した。

このような状況下、従来の仕組みでは変更管理業務の品質低下や管理負荷増加が懸念されるようになったため、変更管理業務の合理化によって業務品質を担保する仕組みの構築が急務となった。

海外拠点での変更管理業務の流れを図1に示す。当社の自動車機器事業では、この変更管理業務の改善のため次の二つの施策を設定し、対策を講じてきた。本稿ではこれら取組みについて述べる。

- (1) 国内マザー工場での検査プログラム作成業務改善
- (2) 海外拠点向け変更管理システムの構築

## 2. 国内マザー工場での検査プログラム作成業務改善

### 2.1 従来業務の課題

自動車機器事業製品の一部は機能の統合化、高機能化が進む一方で製品ライフサイクルは短期化する傾向にあり、複雑化する製品を短期間で設計・製造することが課題となっている。当社製品では、このような環境下でも高い品質レベルを担保するために、製品の全回路と主要な性能を工程内で全数検査し、新機種の増加にも迅速に対応できるように検査設備及び検査プログラムを内製化している。近年、高機能化、車種別の仕様の複雑化及び顧客のグローバ

ル化に伴う機種数の増加によって、検査プログラムを作成する業務負荷も増加する傾向にあり、検査項目の漏れや検査規格値の誤りの発生を防止するための確認に時間を要していた。従来業務での課題は次のとおりである。

- (1) 設計部門が作成する検査要領書の様式は自由書式であり、機種シリーズごとに様式が異なっていたため、生産技術部門は様式ごとの特徴を理解する必要があった。
- (2) 生産技術部門は検査要領書を読図し、機種別の検査項目・検査規格値の一覧を作成し、この一覧を基に検査プログラムを手作業で作成していた。しかし、人手による作業のため、検査項目の漏れや検査規格値の転記ミスが生じるリスクがあった。
- (3) 生産技術部門は検査プログラムの作成後、検査要領書と一致しているかを目視で確認していたが、検査項目数が多いため確認に時間を要していた。

### 2.2 課題の解決策

2.1節で述べた課題の解決策として、設計部門では検査要領書をシステムに入力し標準化することで、生産技術部門への情報の流れを整理した。また、生産技術部門では、入力されたデータを基に検査項目と検査条件を自動生成し、検査プログラムに反映する運用にした。さらに、反映後の検査プログラムと検査要領書を自動照合する仕組みを構築した(表1、図2)。

#### 2.2.1 検査要領書の統一化と作成のシステム化

検査要領書に記載する、検査項目・検査規格値・検査対象機種の情報を入力するシステムを整備した。入力内容を基に、検査要領書を自動的に作成するため、機種シリーズに依存しない検査要領書の作成を可能にした。また入力内容をデータベースに登録することによって、検査要領書の

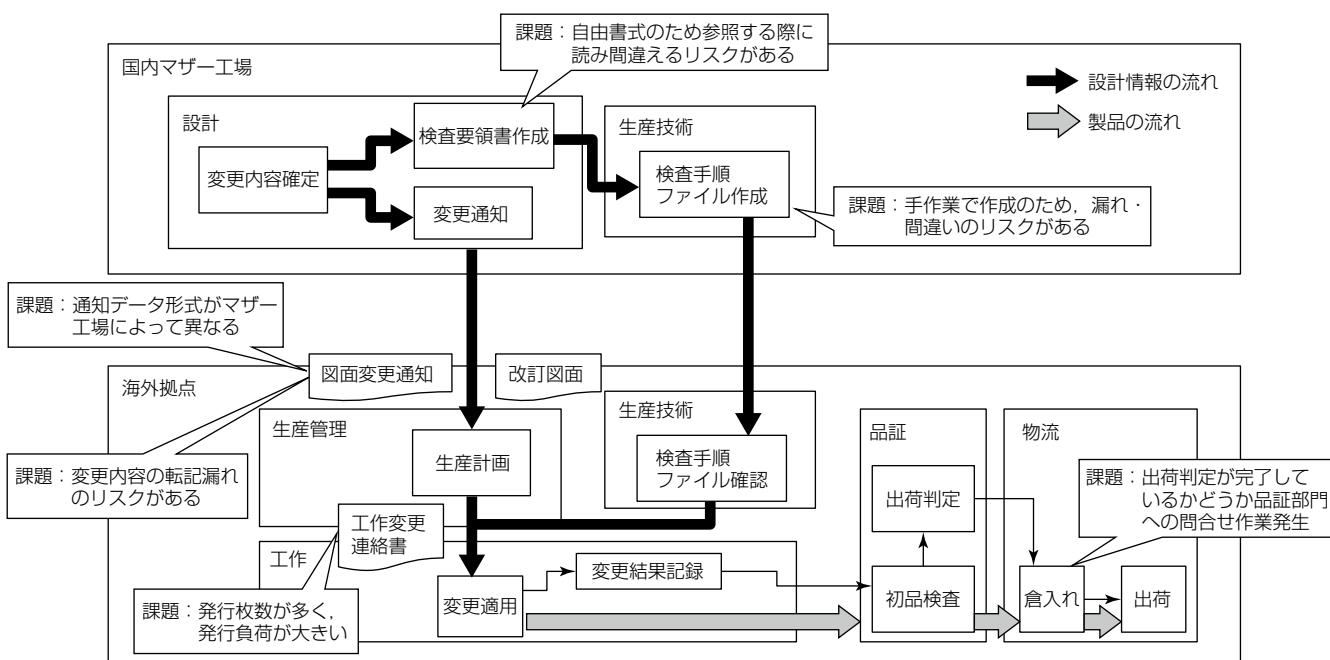


図1. 海外拠点での変更管理業務の流れ

表1. 検査プログラム作成業務での課題と解決策

課題	解決策
検査要領書の書式が自由書式	システム化による検査要領書の標準化
検査プログラムを手作業で作成	検査プログラムの自動作成
検査項目が多いため、目視確認に時間を使う	検査要領書と検査プログラムの自動照合

表2. 変更管理業務での課題と解決策

課題	解決策
転記漏れ防止や変更予定日の確認に時間を要する	図面変更通知リストの自動作成
工作変更連絡書の発行負荷が高い	工作変更連絡書の発行枚数削減
出荷判定の検認完了まで倉入れしないため、倉入れ待ちの製品が滞留し、管理工数が増加する	初品検査・出荷判定電子化及びハンディターミナルによる出荷判定確認

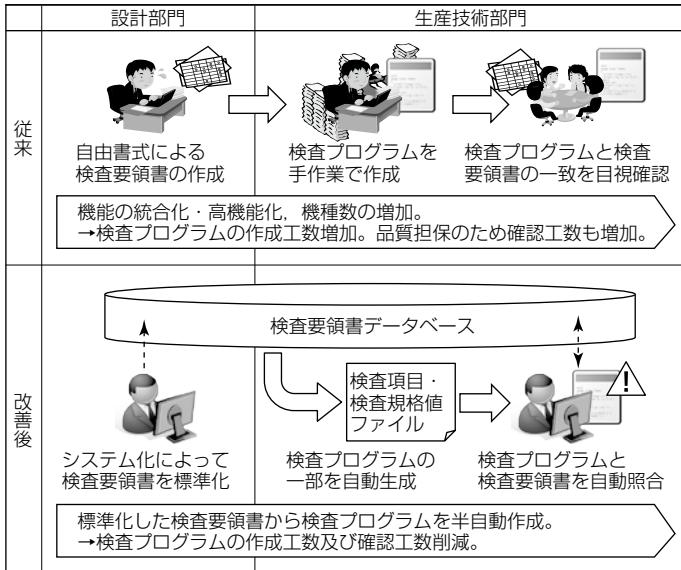


図2. 検査プログラム作成業務の流れ

流用作成も可能になった。

### 2.2.2 検査プログラムの一部自動生成

検査プログラムを作成するシステムを構築し、設計部門が作成した検査要領書のデータを自動で抽出できる機能を設けた。これによって検査対象機種ごとに、検査項目・検査条件を自動的に生成し、生産技術部門での一覧の作成業務の削減、検査項目の漏れや検査規格値の誤りをなくすことができた。

### 2.2.3 検査要領書と検査プログラムの自動照合

検査要領書と検査プログラムを機械的に照合し、差異がある場合、差異の発生箇所を表示するシステムを整備した。これによって目視での確認作業を廃止し、検査項目の漏れや検査規格値の誤りの確認に要する工数を削減した。

## 3. 海外拠点向け変更管理システムの構築

### 3.1 従来業務の課題

従来の海外拠点での変更管理業務では、マザー工場での設計変更に伴う図面変更通知を受領してから、変更を適用した製品の生産・検査・出荷までの間に次のような業務がなされており、それぞれに課題があった。

#### (1) 図面変更通知の管理と工作変更計画

複数のマザー工場から図面変更通知を受領した後、変更の予定日を管理するために、変更対象機種と変更内容のリストを作成していた。リストの作成には時間を要するだけでなく、読図・転記作業が発生するため、転記漏れによる

変更漏れのリスクがあった。

#### (2) 工作変更連絡書の発行

工作部門に対して、変更内容・変更対象機種を通知するため、工作変更連絡書と称する紙媒体の指示書を変更対象機種の枚数分発行しており、枚数が多く発行作業の負荷が大きかった。また工作変更連絡書は指示書の役割だけでなく、変更の実績(変更の適用日、生産数、シリアル番号等)を管理する役割を果たしている。複数の変更内容を同一タイミングで適用する場合でも、同一の変更の実績を複数の工作変更連絡書に記載しなければならないため、負荷が大きかった。

#### (3) 初品検査・出荷判定・倉入れ・出荷

変更を適用した初品のロットに関して、工程内検査だけでなく、品証部門による詳細な検査(初品検査)を行う。その後、品証部門の管理者は初品検査結果を確認し、出荷を承認する(出荷判定)。また、出荷判定前の製品を誤って出荷しないため、出荷判定までは初品ロットを倉庫に入庫(倉入れ)してはいけない運用としていた。具体的には初品検査後に出荷判定待ちと記載された紙を製品に貼り付け、出荷判定完了後に剥がして倉入れしていた。しかし、出荷判定が完了しているにもかかわらず紙を剥がし忘れる場合があり、品証部門へ状況を問合せする作業が発生していた。

### 3.2 課題の解決策

3.1節で述べた課題の解決策として、図面変更通知リストの自動作成、工作変更連絡書の発行枚数削減、変更実績、初品検査の記録・検認と出荷判定の電子化及びハンディターミナルによる出荷判定確認を実施した(表2)。

#### 3.2.1 図面変更通知リストの自動作成

マザー工場で図面変更通知を発行した後、変更内容と変更対象機種のリストを自動生成し、海外拠点へ伝送する仕組みを構築した。図面変更通知に記載されている内容はマザー工場ごとに異なり、あるマザー工場では意図したリストを生成するのに図面変更通知のデータだけでは不十分であった。そこで、不足分のデータを図面変更前後の部品構成情報の差異で補い、図面変更通知と合わせて共通のインターフェースデータを生成する処理をマザー工場側に構築した。海外拠点側ではリストを元に変更対象機種・変更内容を確認するだけではなく、図面変更通知からの読図・転記作業を廃止した(図3)。

#### 3.2.2 工作変更連絡書の発行枚数削減

工作変更連絡書の発行枚数削減に向けて、異なる変更内

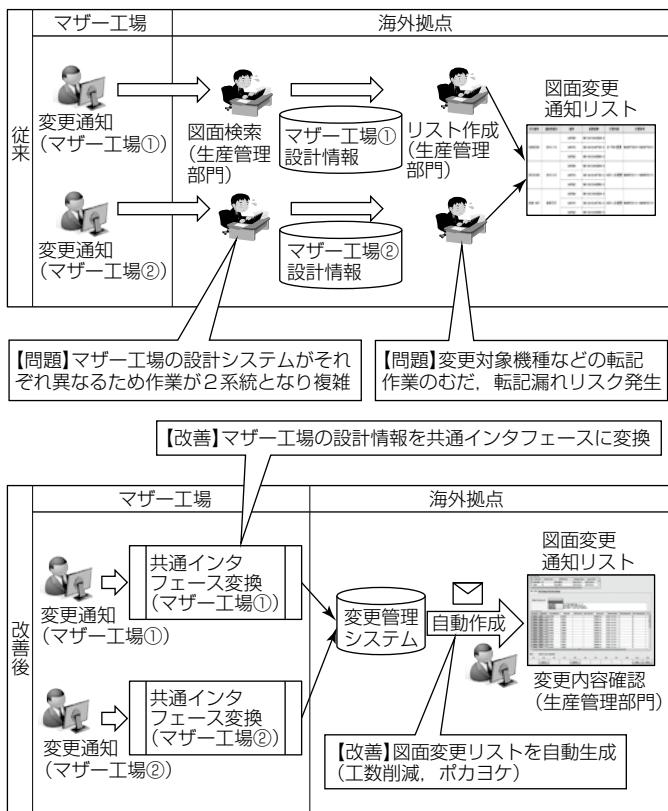


図3. 図面変更通知リストの自動作成

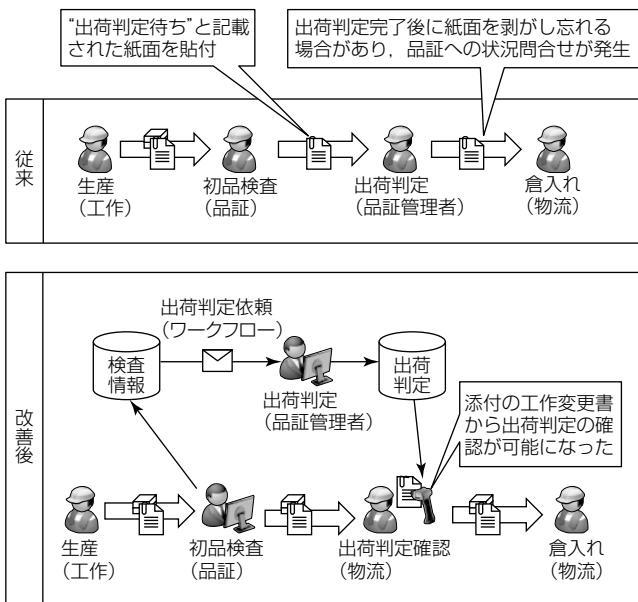


図5. 変更実績記録・検認と出荷判定電子化及びハンディターミナルによる出荷判定

この施策によって工作変更連絡書の発行枚数を削減した(図4)。

### 3.2.3 変更実績記録・検認と出荷判定の電子化及びハンディターミナルによる出荷判定確認

#### (1) 変更実績記録・検認と出荷判定の電子化

工作変更連絡書へ手書きで記載していた、変更の実績・検認、出荷判定をシステムに登録する運用に切り替えた。また検認に関しては、担当者が実績を登録すると、管理者へ検認を依頼するワークフローの仕組みを適用した。これによって工作変更連絡書の回覧を廃止し、製品と工作変更連絡書と一緒に回すことが可能になった。

#### (2) ハンディターミナルによる出荷判定の確認

従来は、倉入れ前の製品の出荷判定が完了しているかどうかを確認する際に、物流部門から品証部門への問合せ作業が発生しており、時間を要していた。そこで、工作変更連絡書の番号をハンディターミナルで読み取ることによって、出荷判定を確認できる仕組みを構築した(図5)。

## 4. むすび

海外拠点の生産拡大に当たって課題となった変更管理業務の合理化と業務品質の向上を実現するための当社自動車機器事業での取組みについて述べた。

今後も顧客のニーズは多様化し、製品の高機能化も進んでいくと見込まれるが、今後はマザー工場による設計変更への対応だけでなく、海外拠点独自の改善に伴う変更管理が増加し、管理が複雑化すると考える。

変更管理業務を更に合理化しつつ業務品質の向上を図るために、引き続き変更管理技術の深耕と業務運用の改善を推進する。

容の工作変更連絡書を1枚に集約することにした。

3.2.1項で述べた機能によって作成された変更対象機種と変更内容のリストに変更の適用予定日を登録する運用にした。従来、図面変更通知を受領した後すぐに工作変更連絡書を発行していたが、変更の適用予定日が近づいた段階で工作変更連絡書を発行する運用に変更した。これによって異なる変更内容であっても、変更適用予定日が同一であれば、1枚の工作変更連絡書に集約することを可能にした。

# グローバルサプライチェーンでの部門間連携強化

中田智仁\* 石川拓朗\*  
長田実那子\* 坪川貴和\*  
斎藤陽介\*

Strengthening Inter-department Collaboration in Global Supply Chain of Group Companies

Tomohito Nakata, Minako Nagata, Yosuke Saito, Takuro Ishikawa, Takakazu Tsubokawa

## 要旨

事業のグローバル展開が進み、サプライチェーンの複雑化・大規模化が加速していく中、販売・設計・調達・製造・保守サービスでの各プロセス間、グローバル拠点間の連携強化が重要となっている。しかし、市場に対する現地生産・現地調達化や国際機能分業化が進展すると、グローバルサプライチェーン全体の効率を高めるための課題も複雑になる。

グローバルサプライチェーンでの部門間連携の主な三つの課題とその代表的な対応事例は次のとおりである。

### (1) 異なる企業間の情報システムの連携

急速に拡大する中国市場で産業機器の保守・アフターサービス事業の販売会社及び修理会社双方の業務自体を整

流化して業務システムを構築した業務効率化事例。

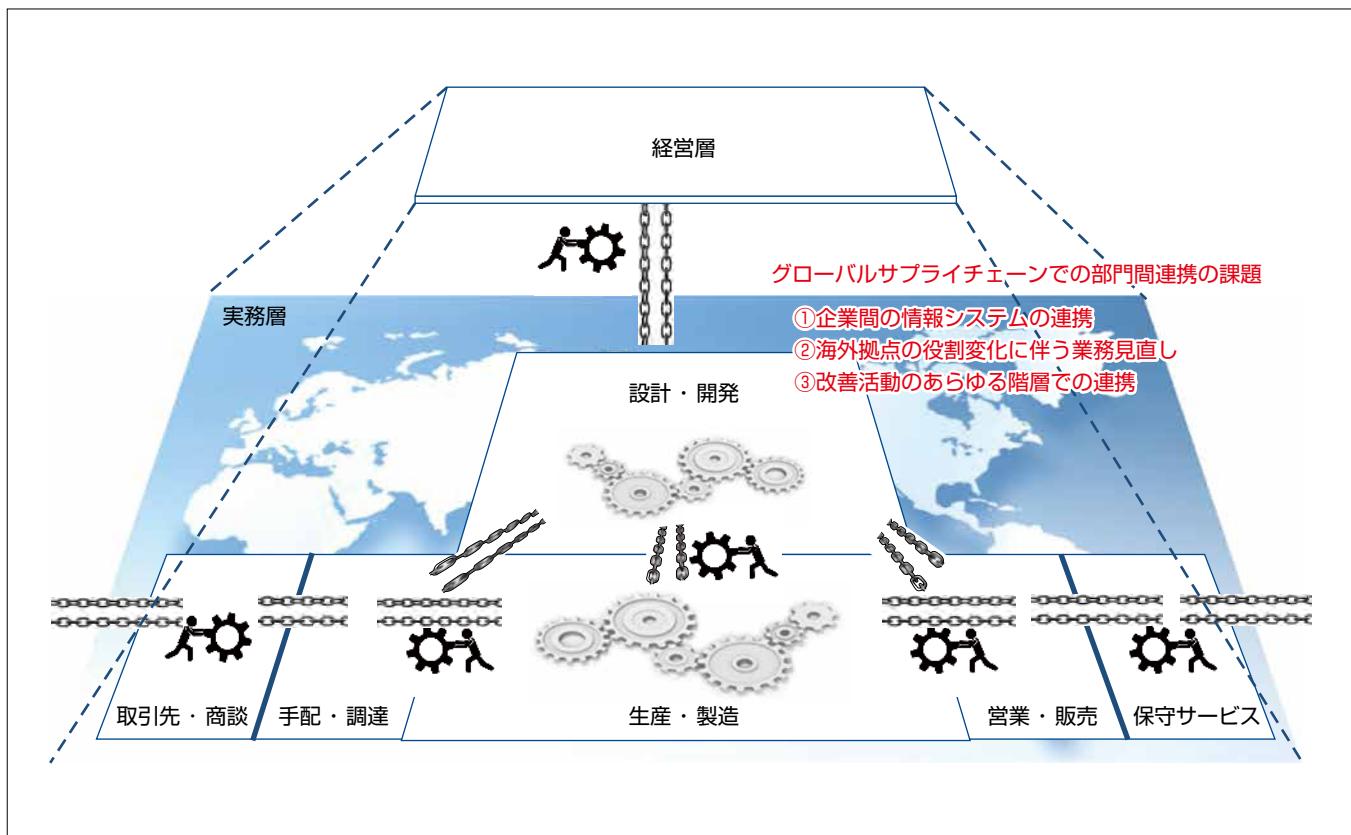
### (2) 海外拠点の役割変化に伴う業務見直し

顧客からの要求に速やかに対応するために、販売部門と設計部門、製造部門と調達部門との連携によって、より顧客に近い拠点・部門の機能増強をした昇降機事業の事例。

### (3) 改善活動のあらゆる階層での連携

拠点ごとで行われる様々な改善活動を拠点内で閉じたものにせずに拠点間で連携した活動を展開する事例。

これらグローバルサプライチェーンでの部門間連携を強化することで、より効果的な経営革新活動の推進が期待できる。



## グローバルサプライチェーンでの部門間連携の課題

グローバルサプライチェーンでの部門間連携の主な課題として、①企業間の情報システムの連携、②海外拠点の役割変化に伴う業務見直し、③改善活動のあらゆる階層での連携があり、これらの連携強化によってより効果的な業務効率向上と連結経営改善を実現することが期待できる。

## 1. まえがき

事業のグローバル展開が進み、サプライチェーンの複雑化・大規模化が加速していく中、販売・設計・調達・製造・保守サービスでの各プロセス間、グローバル拠点間の連携強化が重要となっている<sup>(1)(2)</sup>。しかし、市場に対する現地生産・現地調達化や国際機能分業化が進展すると、グローバルサプライチェーン全体の効率を高めるための課題も複雑になる<sup>(3)</sup>。

本稿では、グローバルサプライチェーンでの部門間連携の課題を述べ、業務効率向上と連結経営改善を実現する取組み事例について述べる。

## 2. グローバル部門間連携での課題

### 2.1 異なる企業間の情報システムの連携

三菱電機はグローバル市場に対して、FA機器、昇降機、空調冷熱機器等の様々な製品を販売している。各事業部ではグローバル展開の開始時期や設立経緯の違いもあり、各々の事業形態に合わせた業務システムが構築されている。例えば生産領域では、意思決定の周期に応じて計画粒度の異なる複数の業務で構成されている(図1)。経営層に近い管理系システムは、ERP(Enterprise Resource Planning)を代表とする業務パッケージソフトウェアで共通化されることが多く、MES(Manufacturing Execution System)等の製造現場に近い支援系システムでは、各事業固有の仕組みが構築されることが多い。このように同一企業内であっても、複数の事業を持つ場合では、複数の情報システムが併存することがある。さらに、海外販売会社も含めたサプライチェーン間では、自拠点内の情報システム間の連携だけでなく企業間を跨(また)がった連携が必要になる(図2)。そのためには、企業間の業務自体を整流化してシステムを構築する必要がある。

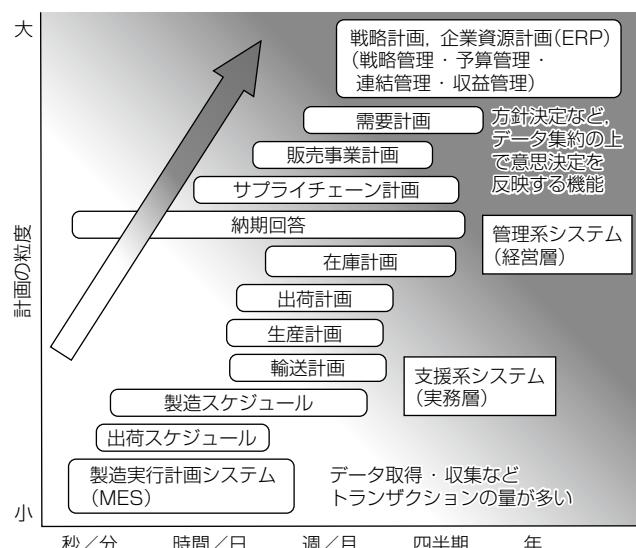


図1. 生産領域での意思決定サイクルと計画粒度

### 2.2 海外拠点の役割変化に伴う業務見直し

海外地域市場の規模が大きくなるにつれ、その地域での現地生産・現地調達化が進展する。この進展に伴い、より市場に近い拠点での機能強化が必要になる。例えば、国内マザー工場からノックダウン(KD)部品の供給を受けて組み立てていた海外拠点は、市場の拡大に伴って、営業機能の増強が図られる。さらに、マザー工場側でコントロールしていたKD部品の供給は、海外拠点側でコントロールする形態に変化する(図3)。この過程で、マザー工場と海外拠点との役割も変化し、それに伴った業務フローの再設計が必要になる。

### 2.3 改善活動のあらゆる階層での連携

グループ企業としての業績最大化を図るため、連結経営視点での部門連携が重要である。例えば、販売部門からの要求に対して製造部門では何日後までに出荷するか(引受け納期の設定)や、完成品の在庫をどこで持つか(在庫配置の問題)など、局所最適化に陥らずに連結経営視点での連携が必要になる。一方で、各拠点で行われる様々な改善活動を拠点内で閉じたものにせずに、拠点間で連携して活動することも重要である。例えば、販売側の情報を製造側の業務改善に利用したり、製造側の情報を販売側で活用するといった、改善活動のあらゆる階層での連携が重要である(図4)。

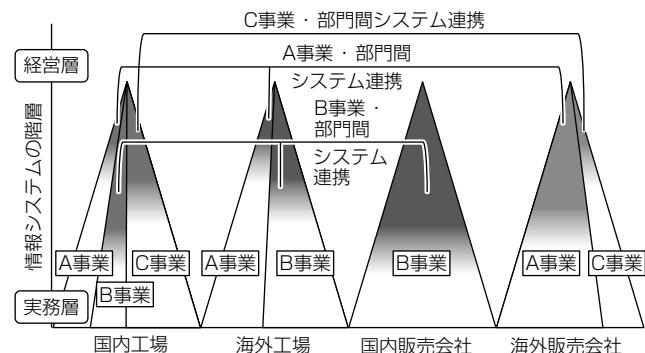


図2. 企業間を跨がった情報システムの連携

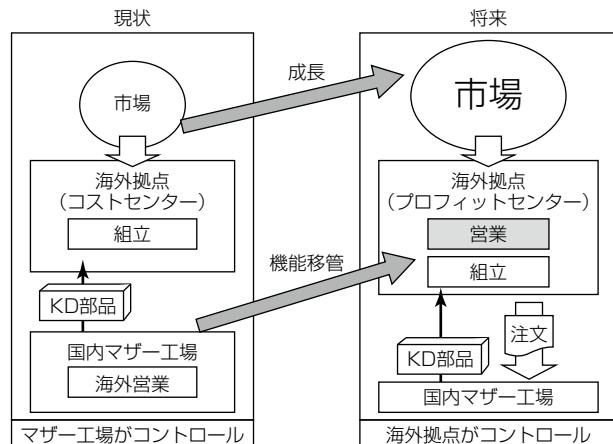


図3. マザー工場と海外拠点の役割の変化

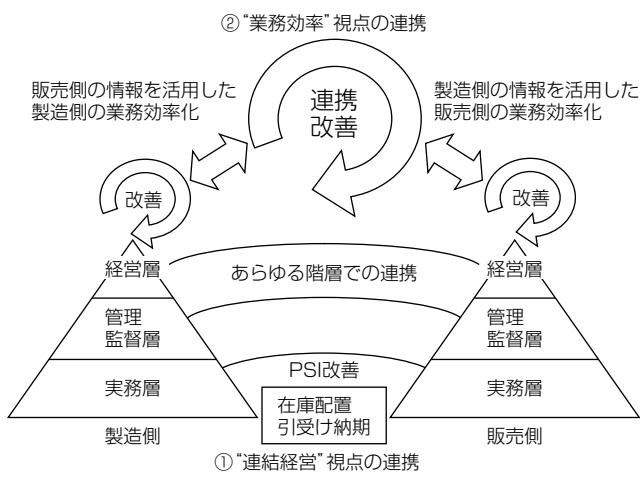


図4. 製販間の連携改善

### 3. 部門間連携強化の事例

#### 3.1 保守部門と販売部門の連携(FA機器事業)

中国でのFA機器の保守・アフターサービス事業は、急速に拡大する市場ニーズに対応するために、販売会社と修理会社双方の業務効率化が課題であった。従来は、地域ごとに設置していた支社で個別に保守サービスの問合せを受け付け、拠点ごとで交換部品在庫を持っている非効率な運営となっていた。さらに、一連の業務フローのあちこちに属人性が残存し、情報の共有化も不十分であったことから、在庫の偏在化や業務の非効率化が存在していた。そこで、修理受付、在庫調整、修理作業の分離と集約を図るため、コールセンター(受付)、サービスセンター(保守作業)、リペアセンター(部品修理)、パーツセンター(部品在庫管理)の4センター化に体制を整備するとともに、各センターの情報の一元管理を図るべく業務システムを構築した(図5)。システム構築に際しては、販売会社と修理会社双方の業務全体を“基本機能”と“オプション機能”に整理し(図6)、業務を標準化した。これによって、業務の属人性を排し、在庫調整機能の強化による在庫の偏在化を抑制した。

この事例は、企業間を跨ぐる情報システム構築に際し、業務全体設計と整流化を行った事例である。

#### 3.2 販売部門と設計部門の連携(昇降機事業)

顧客からの要求や仕様問合せに速やかに対応するため、販売(営業)部門と設計(技術)部門間の連携は重要である。昇降機事業でも、従来から、国内外の顧客からの標準仕様か否かといった限定的な問合せは営業部門で対応していたが、より特殊な技術確認は、設計部門へ問い合わせて対応していた。そのため、問合せ件数の増加に伴う設計部門の繁忙や、情報共有化が不十分なことに伴う確認の手戻りが生じていた。そこで、より顧客に近い営業部門の技術検討機能の強化に取り組んだ。設計部門が利用している“技術検討ツール”を営業部門にも展開し、顧客の問合せに対

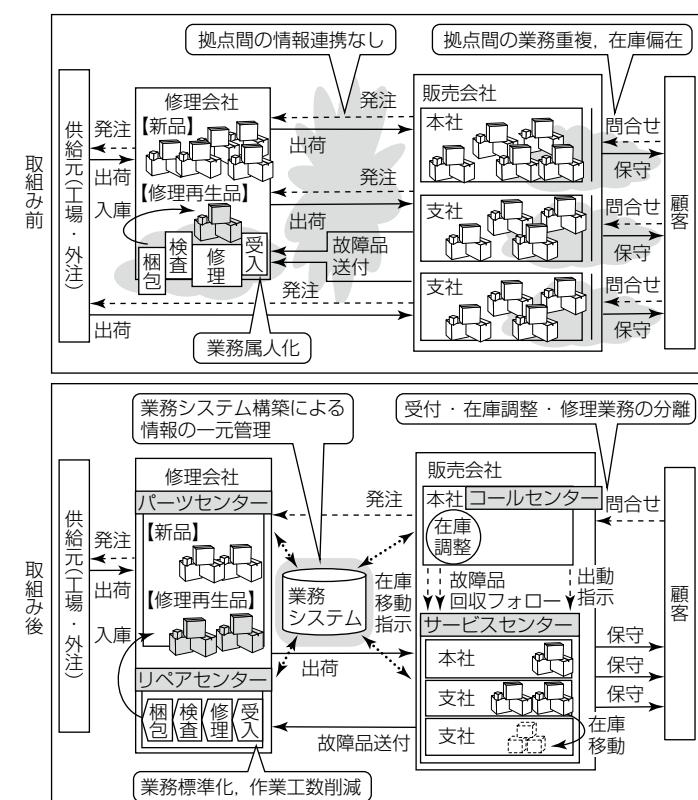


図5. 中国FA機器の保守サービス体制再編と業務システム構築

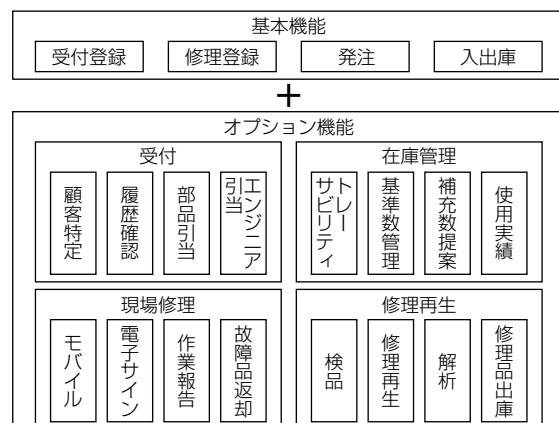


図6. 複数企業間を跨ぐる業務機能の整理

しては標準仕様以外の一部特殊仕様までの確認ができるようになり、顧客への対応スピードを高めた。設計部門にとっては、営業部門からの検討依頼が抑制され、より顧客要求に則した設計業務が可能になる(図7)。

この事例は、顧客への対応力強化に向けた営業部門の機能強化事例である。

#### 3.3 製造部門と調達部門の連携(昇降機事業)

海外工場での生産体制が成熟してくると、部材調達の機能も高度化し、手配方法が洗練化される。特に、昇降機の場合、顧客現場の据付け工事のタイミングに合わせて、部品が製造されることから、現地(海外)工場の生産計画に合わせた部品調達が重要になる。特に、国内マザー工場からKD部品を調達する場合には、輸送期間を考慮した手配が

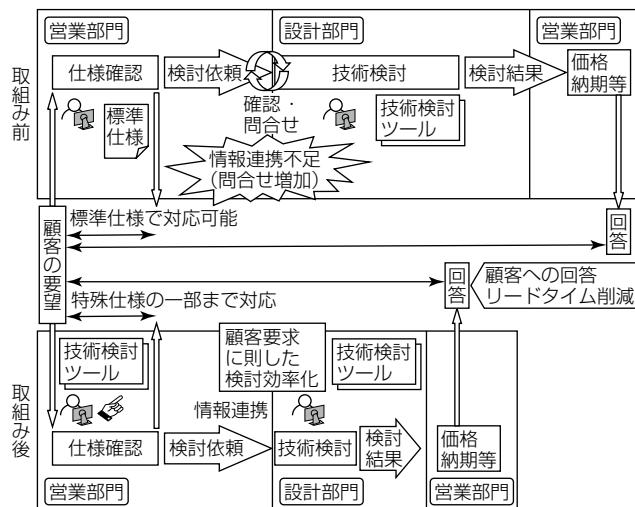


図7. 昇降機事業での技術検討の営業・設計連携

表1. 部品在庫の保有場所(状態)の設計例

	(少)	← 生産規模 →	(多)
専用部品	海外工場(完成状態)		
共通部品	マザー工場(材料状態)	マザー工場(完成状態)	

必要になる。そこで、生産に必要な部品在庫を現地工場で持つか、マザー工場側で輸送前の状態で持つか、又は完成前の材料の状態で持つかを製造部門と調達部門とが連携して設計した(表1)。

この事例は、海外工場の部材調達をマザー工場と連携することで、海外市場の生産計画への追従を容易にする部品在庫の保有方法の事例である。

### 3.4 製造部門と販売部門の連携

当社グループの海外販売会社では、複数の異なる事業部門を持つ場合があり、さらに地域特性や設立経緯が異なることから、各社が異なるバージョンの基幹業務システムを構築していることがある。そのため、製造拠点と販売拠点間の受発注・出荷情報等のデータ授受は、拠点同士が独自に業務ルールを定め運営する場合がある。そのような場合、新拠点立ち上げごとに互いの拠点間のルール調整やシステム導入等に多くの作業を要するために非効率になる。例えば、複数の製造拠点からの出荷伝票類をメールで受領している状況下では、その後の人手作業での読み替えや転記、販売会社側システム登録が生じ、顧客への納期回答に数日を要することになる。そこで、工場側から発信するデータ様式を統一し、整備した業務連携のグローバルインターフェース基盤システムに接続することで、販売会社側システムへ自動反映する仕組みを構築すること等が有効な施策となる。これによって、販売会社側での非効率な作業を廃止でき、顧客との納期調整に要する期間を短縮できる(図8)。

一方、工場側でも同様の状況があり、海外販売会社側からの発注データの様式が一致しておらず、納期・価格照会の際の内容確認や工場側データベースに登録する際に人手を要する場合がある。このような場合ではこれら販売会社

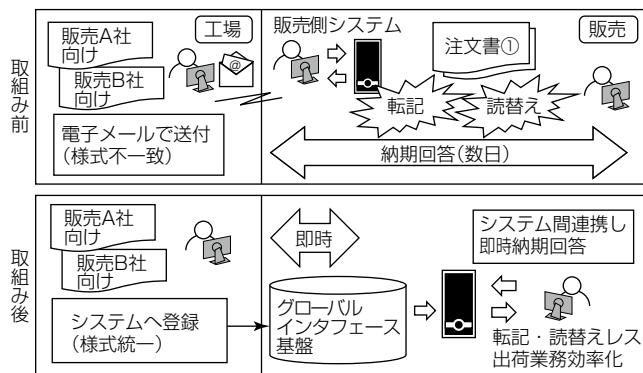


図8. 製造部門と販売部門の連携による出荷業務効率化改善

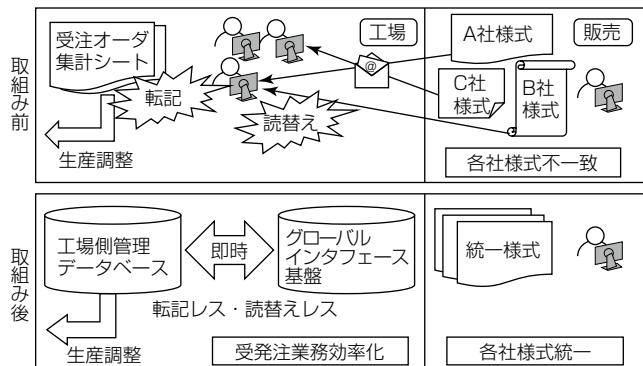


図9. 製造部門と販売部門の連携による受発注業務効率化改善

の様式を統一することで、工場側システムと自動的に連携するとともに内容チェックを自動化し、工場側の業務効率を改善することができる(図9)。

この事例では、販売部門側の業務効率を改善するために、製造部門側の業務を変更し、逆に製造部門の業務効率化を販売部門の業務を変更することで実現する。これは、互いの業務効率化を部門間で協力し合うことで、より効果的な改善活動が推進できる事例である。

## 4. むすび

グローバルサプライチェーン上の部門間連携強化について、異なる企業間の情報システムの連携、海外拠点の役割変化に伴う業務見直し及び改善活動のあらゆる階層での連携について、代表的な事例を挙げて述べた。今回の事例のように、グローバルサプライチェーンでの部門間連携を強化することで、より効果的な経営革新活動の推進が期待できる。

## 参考文献

- (1) 大西 寛:成長戦略を支える生産技術, 三菱電機技報, 87, No.12, 662~665 (2013)
- (2) 横野本宣秀, ほか:生産革新活動の深化とグローバル拡大, 三菱電機技報, 87, No.12, 706~710 (2013)
- (3) 経済産業省: 2019年版ものづくり白書, 9~11 (2019)

# 板金加工ノウハウの形式知化による 製造工期短縮

渡邊秀徳\*  
太田祐貴\*  
岡田 龍\*

Reduction of Manufacturing Lead Time by Formalizing Know-hows in Sheet Metal Processing  
Hidenori Watanabe, Yuki Ota, Ryu Okada

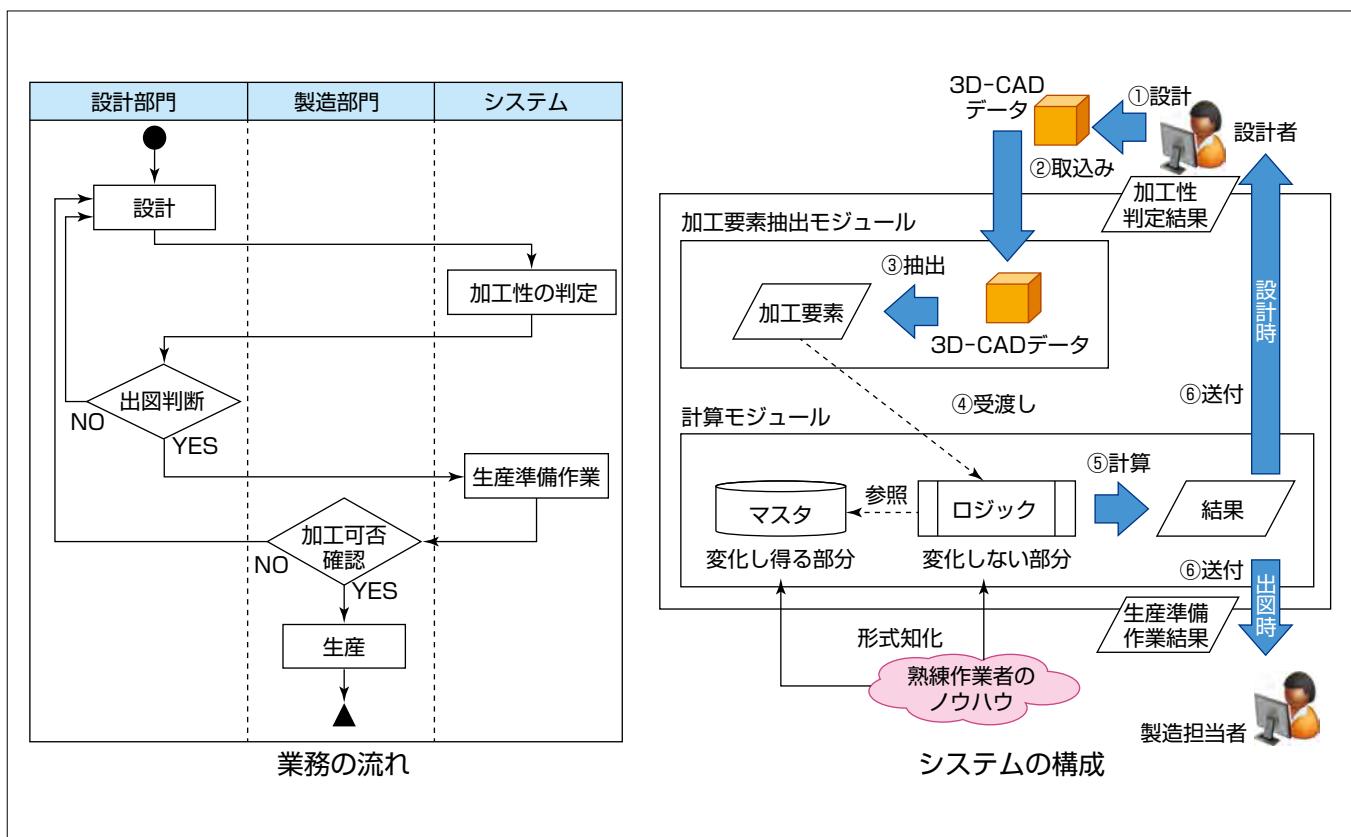
## 要旨

近年、グローバル市場での多様なニーズ、及び、適時納入への対応力強化が求められている。そのため、現地生産・現地供給の体制を整えるとともに、各拠点で高品質・短納期を実現するために熟練作業者のノウハウを形式知化する取組みが必要となっている。

製品の設計段階で、製造部門での作りやすさ(以下“加工性”という。)を検討する“生産設計”を実施するが、製造部門の保有設備や作業方法の考慮が必要であり、熟練作業者のノウハウ活用が有効である。製造段階で実施されている生産準備作業でも同様である。この課題は、特に個別受注生産の場合に顕著であり、製造工期を長期化させる要因となっている。

今回、個別受注生産体制が多くとられる薄板板金加工を必要とする製品を対象に、技能によらず短納期で製品を提供するため、熟練作業者のノウハウを形式知化し、加工性の自動判定と生産準備作業の効率化を支援する板金製造支援システムを開発した。

加工性の自動判定は、加工可否判定の自動化による手戻り削減と品質や作業性等の観点から優先構造を評価し、モノづくりの視点を反映した生産設計を可能にする仕組みである。生産準備作業の効率化は、従来、熟練作業者だけが実施可能であった高精度な標準時間設定と、加工の際に難易度が高い構造に対する作業上の注意点を自動出力する仕組みである。



## 板金加工の業務の流れと板金製造支援システムの構成

左側に業務の流れを、右側に板金製造支援システムの構成を示す。従来、熟練作業者のノウハウに依存していた加工性の判定と生産準備作業をシステムで自動処理することで作業工数と設計部門への手戻りを削減した。板金製造支援システムは、設計3D-CADデータから加工要素を抽出するモジュールと形式知化したノウハウを保持する計算モジュールで構成した。

## 1. まえがき

近年、グローバル市場での多様なニーズ、及び、適時納入への対応力強化が求められている。そのため、現地生産・現地供給の体制を整えるとともに、各拠点で高品質・短納期を実現するために熟練作業者のノウハウを形式知化する取組みが必要となっている。

熟練作業者のノウハウは、製品の設計段階と製造段階で必要となる。製品の設計段階では、顧客の要求に応える“機能設計”と製造部門での加工性を検討する“生産設計”を実施する。機能設計は設計者単独で実施するのに対し、生産設計は製造部門での保有設備や作業方法を考慮する必要があり、熟練作業者のノウハウを活用する必要がある。さらに、製造段階でも、作業指示書の作成や計画立案等に使用する標準時間(Time Standard: TS)の算出といった生産準備作業で熟練作業者のノウハウが必要になる。

設計段階で、加工性は、設計部門と製造部門の両者ですり合わせて検討することが主流である。しかし、検討結果が製造部門の担当者のノウハウに左右される、検討に時間を要するといった問題があり、特に個別設計を要する個産製品で製造工期に影響が生じる。製造段階で実施される生産準備作業でも同様である。

本稿では、個別受注生産体制が多くとられる薄板板金加工を必要とする製品を対象に、技能によらず短納期で製品を提供するため、熟練作業者のノウハウを形式知化し、加工性の自動判定と生産準備作業の効率化を支援する板金製造支援システムについて述べる。

## 2. 板金製造支援システムの構成と業務の流れ

図1に開発した板金製造支援システムの構成を示す。加工要素抽出モジュールでは、3D-CADデータの形状をシステムが認識して解析することで加工要素を抽出する。計算モジュールは、熟練作業者のノウハウを関数化して定義したマスタ部とロジック部で構成され、計算処理を行う。設備更新時や作業改善などによって、関数内で変化し得る係数部分(保有金型情報など)をマスタ部とし、関数内で変化しない部分(金型によるパンチ数の算出式など)をロジック部としている。

図2にシステム導入前と導入後の業務の流れを示す。システム導入前は、設計段階での加工性の判定や製造段階での生産準備作業が人手で行われており、作業工数の増加や設計部門への手戻りが発生していた。システム導入後は、加工性の判定と生産準備作業をシステムが行うことによって、作業工数と手戻り頻度を削減し、製造工期の短縮を達成した。

## 3. 設計段階での加工性の自動判定

熟練作業者のノウハウを形式知化し、設計段階で加工可

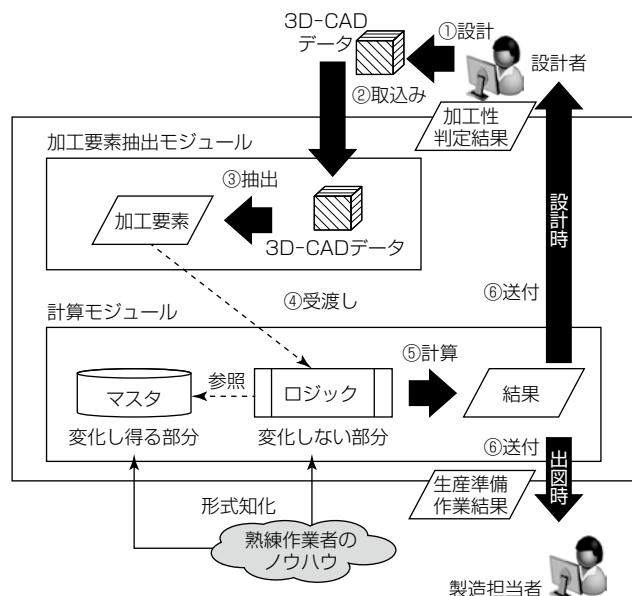


図1. システムの構成

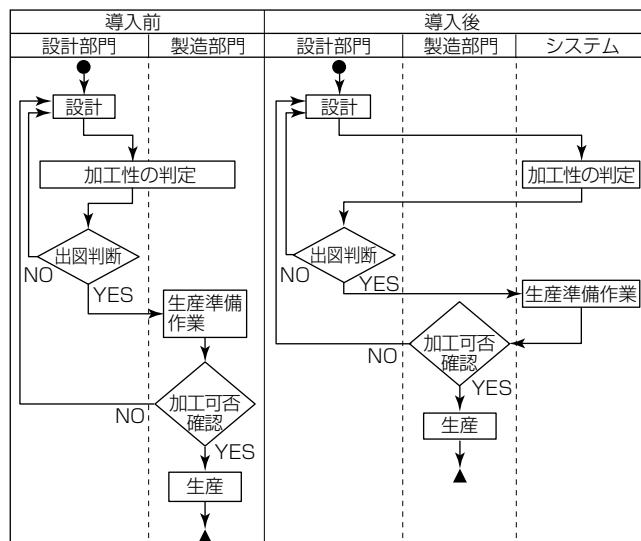


図2. システム導入前と導入後の業務の流れ

否と可能な限り回避すべき構造を自動判定する仕組みを開発した。

### 3.1 加工可否の判定

板金加工工程の加工制約が設計・製造部門で共有されていない場合、設計者が加工可否を判定できず、手戻りが発生する。二次元三面図を用いた設計DR(Design Review)を実施し、必要に応じて現場で試作を行うことで対処できるが、検討期間が長期化する原因となる。そこで、加工制約を形式知化し、加工可否を自動判定する仕組みを構築した。

板金加工は、設備や金型によって加工制約が異なるため、計算モジュールのマスタ部に設備情報や金型情報、ロジック部に制約情報を登録する必要がある。

例えば、曲げ加工での加工可否の一例にフランジの実加工寸法と金型の許容寸法による可否判断が存在する。曲げ加工は上型(パンチ)と下型(ダイ)で板金を加圧して塑性変形させることで曲げ形状を形成する。図3に立ち上がるフ

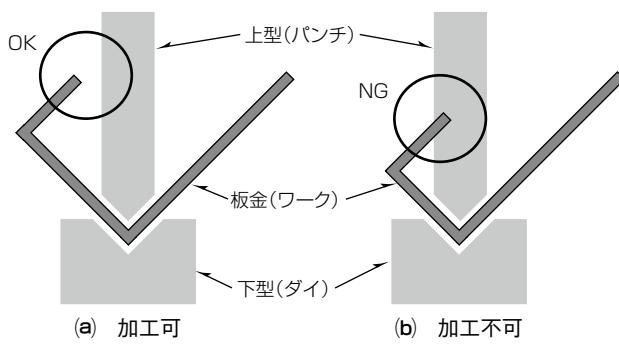
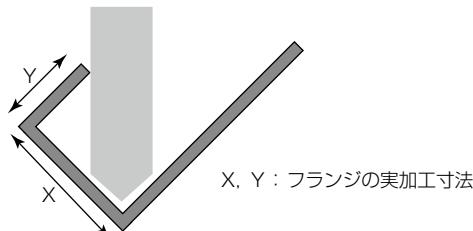


図3. 曲げ加工でのフランジの加工可否



ロジック部：許容寸法の計算式の定義  
 $a_iX + b_i$   
 マスク部：金型の形状を洗い出して近似することで算出した係数 $a_i, b_i$ の一覧表  
 曲げ加工可否判定： $Y < a_iX + b_i$ なら、加工可  
 $Y > a_iX + b_i$ なら、加工不可

図4. 曲げ加工でのフランジの加工可否判定方法

フランジが金型に干渉しない場合と干渉する場合を示す。フランジが金型に干渉する場合は、加工不可となる。

図4に示すように、フランジの長さX(実加工寸法)とマスク部に設定されている該当する金型の係数 $a_i, b_i$ からロジック部に定義されている計算式( $a_iX + b_i$ )で許容寸法を計算して、フランジの長さY(実加工寸法)と比較することで曲げ加工可否の判定結果を得る。この判定結果を設計段階で確認することによって、設計手戻りが削減できる。

### 3.2 回避すべき構造の判定

3.1節の仕組みで加工可能と判定された形状には、コスト(材料歩留り等)や品質(寸法精度等)の悪化を招く構造など、加工可能だが可能な限り回避すべき構造が含まれる。この構造の判定は、製造担当者に属人化されたノウハウに依存しており、設計にフィードバックされることとは少なく、品質悪化や製造工期の長期化を招くことがある。そこで板金構造を洗い出し、加工要素をコスト・品質・安全・作業性の観点で重み付けして優先構造を定義することで、構造判定のノウハウを形式知化し、判定する仕組みを構築した。

例えば、種々の曲げ形状の中からどの曲げ形状を選択するべきかという問題がある。図5に曲げ構造の例を示す。構造①(90度曲げ)や構造②(鈍角曲げ)は標準金型で加工できるため段取りが不要で作業性が良い。構造③(鋭角曲げ)や構造④(金型ありのR曲げ)は特殊金型で作業を行う必要があるため、金型段取りが発生する。構造⑤(金型なしのR曲げ)は、ストロークと曲げ線のピッチを調整して送り曲げを行うことでR形状を形成するため、作業性が悪

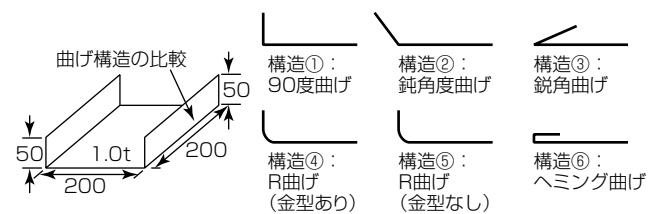


図5. 曲げ加工構造の例

表1. 曲げ加工構造ごとの優先構造の定義例

構造	加工費	重み付け係数				合計 <sup>(注1)</sup>	優先構造
		コスト	品質	安全	作業性		
①	250	1.0	1	1	1.0	1.0	◎
②	250	1.0	1	1	1.5	1.5	○
③	300	1.2	1	1	2.0	2.4	×
④	300	1.2	1	1	2.0	2.4	×
⑤	375	1.5	2	1	3.0	9.0	×
⑥	350	1.4	2	1	3.0	8.4	×

寸法精度が悪い R精度が悪い 金型段取りが増加

(注1) 合計 = コスト係数 × 品質係数 × 安全係数 × 作業性係数

くR精度が出にくい。構造⑥(ヘミング曲げ)は特殊な金型を複数使用して形状を成型するために通常より加圧する必要があり、品質悪化や設備消耗を招く。

表1に曲げ加工構造ごとにコストや品質の良し悪しを決める要素を洗い出して重み付けをし、優先構造を定義した例を示す。これによって、コストや品質の評価結果を設計段階で把握できるようになり、代替構造への変更を検討することで、モノづくり視点を反映した設計を実現した。

### 4. 製造段階での生産準備作業の効率化

熟練作業者のノウハウを形式知化し、生産準備作業を自動化する仕組みを開発した。この章では、生産準備作業のうち、TSの設定と曲げ作業指示の作成について述べる。

#### 4.1 TSの設定

TSは、部品の抜き穴個数や曲げ回数といった加工要素に係数をかけることによって算出する方法があるが、精度の高いTS値を得るために、計算された値に熟練作業者のノウハウを加味する必要があった。そこで今回、TS値を得るために、熟練作業者のTS見積り方法を形式知化し、加工要素から抜き工程と曲げ工程のTS値を高い精度で自動計算する仕組みを構築した。

例えば、曲げ工程では抜き工程で切断した板金を上型と下型で加圧し、複数個の曲げ形状を得る。曲げ工程のTS値は、従来曲げ線の本数に係数をかけることで算出されていたが、実際の加工では、曲げ作業と次の曲げ作業の間にワークの上下を入れ替える反転作業や、前後を入れ替える回転作業が発生する(図6)。改善後のTS値は、反転作業や回転作業の発生を考慮して算出する。部品の反転・回転作業の発生有無は、曲げ順序と曲げ線の方向(山・谷)、曲げ線の配置領域を用いて判定する。図7にその判定条件を示す。反転作業は、曲げの前後工程の曲げ方向が同一の場

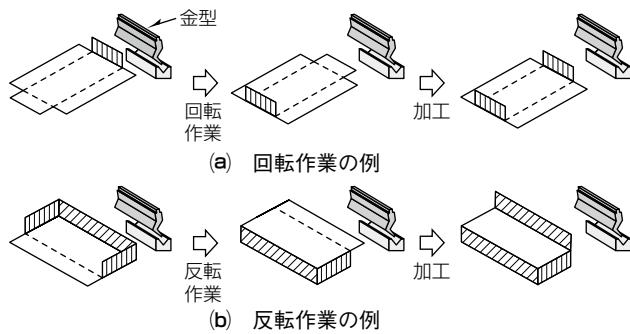


図6. 曲げ作業での反転・回転作業の例

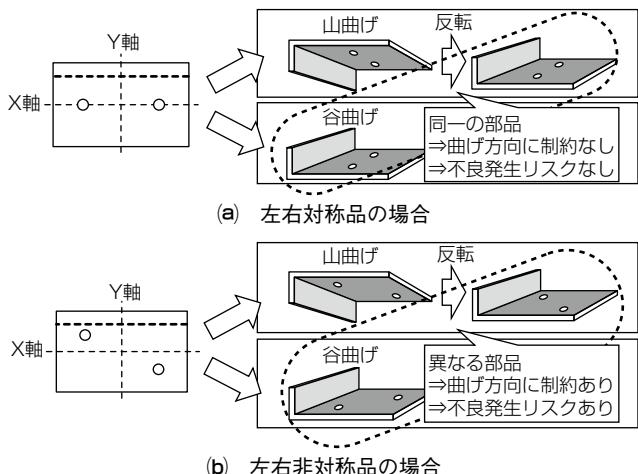


図8. 曲げ方向間違い不良の発生理由

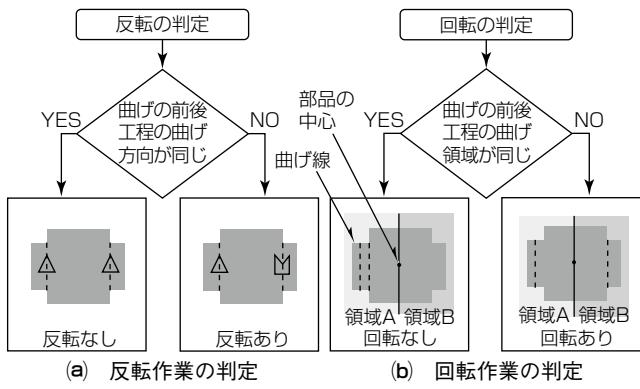


図7. 曲げ作業での反転・回転作業の判定条件

合は反転なしとし、異なる場合は反転ありとする(図7(a))。一方、回転作業は、曲げの前後工程の曲げ線の配置領域が同じ場合は回転なしとし、異なる場合は回転ありとする(図7(b))。

反転作業や回転作業の有無を考慮することによって、高精度なTSを自動計算し、TS設定の所要時間を9割短縮させた。

#### 4.2 曲げ作業指示の作成

曲げ加工の作業指示は、3D-CADデータを解析することで自動作成可能である<sup>(1)</sup>。しかし、実際には、3.2節述べたとおり、可能な限り回避すべき構造が存在するが、設計制約上、そのような構造に限定される場合がある。その場合、出図後に製造部門の担当者が図面を読図し、作業上の注意点を作業指示書に記入する。今回、製造担当者が記入している作業上の注意点を形式知化し、自動出力する仕組みを構築した。

例えば、曲げ方向(山・谷)間違い不良の発生リスクがある部品か否かの判定がある。図8に曲げ方向間違い不良の発生理由を示す。展開図の形状が左右対称の場合は、曲げ方向に制約が発生せず不良発生リスクはないが、左右非対称の場合は、曲げ方向に制約が発生して不良発生のリスクがある。

今回作成したロジックでは、曲げ方向間違い不良発生リスクの有無を自動判定する。図9にその判定ロジックを示す。部品の中心を原点とした座標系を定義し、展開図の各

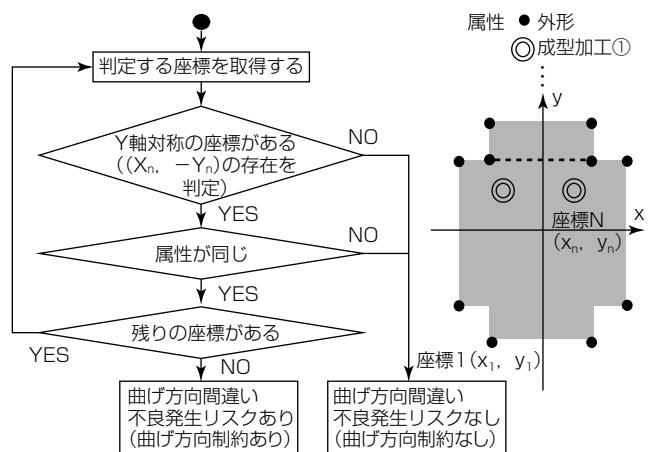


図9. 曲げ方向間違い不良発生リスク有無の判定ロジック

座標に対して、Y軸対称の反対領域に同じ属性の座標があるか判定する。全ての座標に対して、同じ属性の座標が存在する場合は曲げ方向間違い不良の発生リスクあり(左右対称)，存在しない場合は曲げ方向間違い不良の発生リスクなし(左右非対称)とする。

このロジックによる判定結果を作業指示書に自動出力することで、曲げ方向間違い不良を撲滅した。

#### 5. むすび

個別受注生産体制がとられる薄板板金加工を必要とする製品を対象に、熟練作業者のノウハウの形式知化による加工性の自動判定と生産準備作業の効率化を支援する板金加工支援システムについて述べた。

今後は、営業活動や部材調達、物流などのSCM(Supply Chain Management)軸を対象に熟練技術者のノウハウの形式知化を進めることで、更なる短納期化を目指す。

#### 参考文献

- (1) 真下尚久, ほか:板金製造のIT化による生産性向上, 三菱電機技報, 84, No.12, 689~692 (2010)

# 塗装技術強化への取組み

竹本洋平\* 藤原淳史\*  
柴田洋平\* 満田理佐\*  
澤田準平\*

Initiatives to Strengthen of Painting Technology

Yohei Takemoto, Yohei Shibata, Jumpei Sawada, Atsushi Fujiwara, Risa Mitsuda

## 要旨

三菱電機では、製品に付加価値を付与する目的で、タービン発電機等の大型構造物から板金筐体(きょうたい)等の金属部品、空調機用の意匠パネルの樹脂部品等、多岐にわたる国内及び海外生産品を対象に塗装技術を適用している。各生産拠点で適正な塗装品質を安定して確保することは製品の寿命・デザイン性を確保する上で重要である。

当社は塗装技術を製造基盤技術と位置付け、2009年度から塗装品質の向上・安定化と技術者育成を目的とした技術の深掘りと形式知共有化を進め、技術の蓄積と海外も含めた製造現場への展開を継続的に行っている。塗装技術の強化活動と成果の製品適用による品質向上・生産安定化の活動事例を次に挙げる。

### (1) 塗装技術力の強化

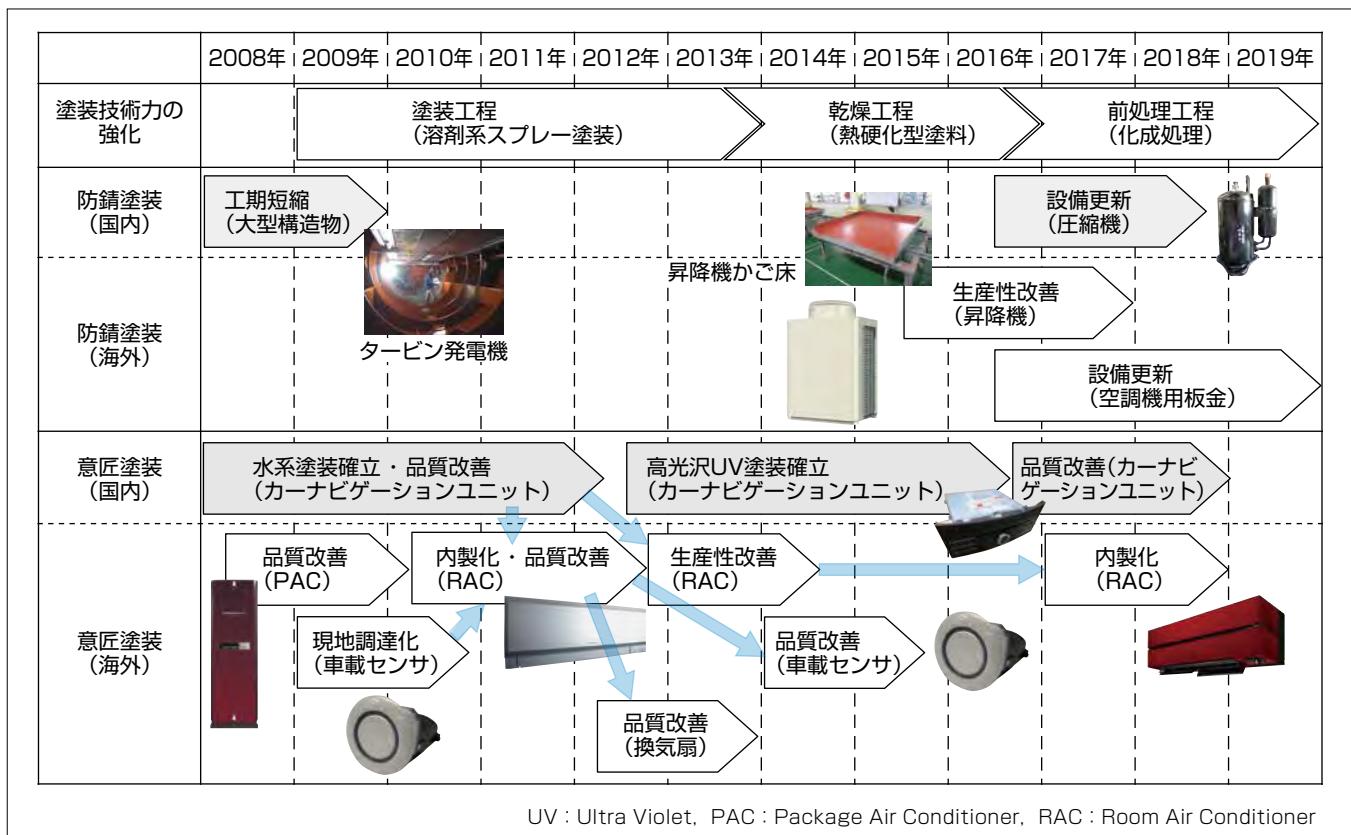
塗装の各工程を物理／化学現象として把握、技術に落とし込み、塗装技術の蓄積と製造現場への展開をしている。

### (2) 防錆塗装技術の強化と品質安定化

被塗装物の材質や表面状態・寸法に応じた塗装工法と求められる性能を原理検証・現物評価の両面から把握し、その安定化を推進している。

### (3) 意匠塗装技術の強化と品質安定化

海外工場での生産品質を確保するため、形式知化した技術を用いた製造条件の確立や塗装品質の安定化を推進し、また、環境に優しい水系塗装技術を確立し、製品へ適用している。



## 当社の塗装技術強化への取組み状況

当社では、塗装技術力の強化活動として、塗装の各工程を物理／化学現象として把握・分析し、技術として蓄積し、国内・海外の製造現場へ展開して塗装品質を向上させる活動を進めている。また、タービン発電機や昇降機等の大型構造物から空調機用の圧縮機、板金筐体等の金属部品、空調機用の意匠パネル、カーナビゲーションユニット、車載センサ等の樹脂部品を対象に塗装技術を適用しており、製品の付加価値の向上に寄与している。

## 1. まえがき

当社では、製品に耐食性、意匠性等の付加価値を付与する目的で、タービン発電機、昇降機等の大型構造物から空調機用の圧縮機、板金筐体等の金属部品、空調機用の意匠パネル、カーナビゲーションユニット、車載センサの樹脂部品等、多岐にわたる国内及び海外生産品を対象に、塗装技術を適用している。国内・海外の各生産拠点で適正な品質の塗装を施すことは、製品の寿命・デザイン性を確保する上で重要である。

当社は塗装技術を製造基盤技術と位置付け、2009年度から塗装品質の向上・安定化と技術者育成を目的とした技術の深掘りと技術の形式知共有化を進め、技術の蓄積と海外も含めた製造現場への展開を継続的に行っている。

本稿では、当社の塗装技術力の強化と品質安定化に向けた活動に関して、この10年間の活動事例について述べる。

## 2. 塗装技術力の強化

当社では、製品の品質向上や技術者育成のため、塗装要素技術の深掘りと技術の形式知共有化を目的とした活動を2009年度から行っている。塗装は官能作業と捉えられることも多く、作業品質が技能に依存する部分があり、品質の安定化が難しい技術であると一般に言われている。また、品質の確認には大掛かりな装置や破壊検査が必要な場合も多く、製造現場での物理／化学分析が困難であるため、製造品質の安定化が重要なポイントとなる。

そこで、塗装の各工程(前処理工程、塗装工程、乾燥工程)を物理／化学現象として把握・分析し、技術に落とし込むことで塗装技術として蓄積し、製造現場へ展開する活動を進めている。次にこれまでの活動事例を述べる。

### 2.1 前処理工程(リン酸亜鉛化成処理)

前処理工程は塗膜の付着強度や耐食性に関係し、塗膜剥離や腐食等の品質不具合の原因になりやすい。しかし、工程内で不具合を検出することが難しく、不具合を発生させないプロセス管理が重要である。塗装の前処理として広く採用される化成処理であるリン酸亜鉛化成処理を中心に技術の深化を進めている。化成処理を化学反応として理解し、原理検証を行った結果を図1に示す。同一の処理液で処理条件を変化させ、形成したリン酸亜鉛皮膜をSEM(Scanning Electron Microscope)観察した結果である。プロセ

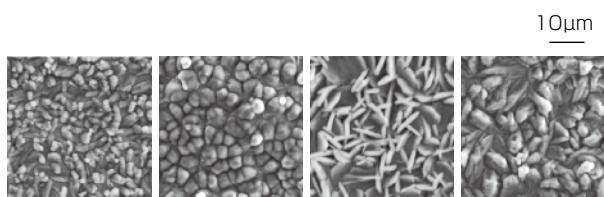


図1. リン酸亜鉛皮膜のSEM観察像(2,000倍)

スと処理条件が皮膜の結晶成長に与える影響を定量的に把握することで結晶性状の制御が可能になった。また、腐食促進試験によって皮膜の性状が塗装後の耐食性に与える影響を体系化している。

### 2.2 塗装工程(溶剤系塗料のスプレー塗装)

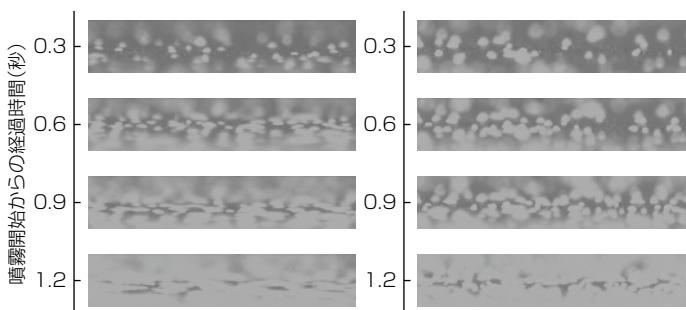
溶剤系塗料のスプレー塗装は広く用いられる塗装方法であるが、スプレー塗装での圧縮空気や塗料の流れ、塗料微粒化等の塗装現象は、塗着効率、塗膜の平滑性に影響を与えるにもかかわらず理論的な解明は乏しく、技能者の感覚に依存する部分が大きい工法である。技能を技術として確立するため、スプレー塗装プロセスである塗料の調整、塗装ガンの選定、微粒子化、塗着、平滑化に対して、塗料粘度やエア圧の変化、スプレーミスト径、塗着効率等を実測し、現象把握による技術の確立を試みた<sup>(1)</sup>。

塗膜表面の平滑化を検討するため、希釈率の異なる塗料を噴霧し、ミストの塗着～ぬれ拡がりの様子を高速度カメラで撮影した結果を図2に示す。塗膜表面を平滑化する状態変化の時間依存性や影響因子等を定量的に把握した。

### 2.3 乾燥工程(溶剤系熱硬化型塗料)

塗膜が母材に付着していることは機能発現の前提条件である。そのため、製品の品質管理で、塗膜の付着強度の特性を把握することは極めて重要であるが、定量的に測定する評価手法があまりなく、付着強度の評価手法は基盤目試験など定性的な手法が一般的である<sup>(2)</sup>。

塗膜の付着強度は経験上、硬化条件で変動することが知られている。塗装の乾燥工程は熱風乾燥方式が一般的であり、板厚によって硬化条件がばらつくことが予想される。そこで、硬化時の温度の影響度を把握するために、塗膜の付着強度の測定手法としてSAICAS(Surface And Interfacial Cutting Analysis System)法を用いることで硬化温度と付着強度の関係を明らかにした(図3)。さらには、その影響因子として内部応力に着目し、遊離塗膜の物性値を測定することで硬化した塗膜に残留する内部応力を導出した(図4)。これによって、硬化温度が高い場合には、内部応力が増大することで付着強度が低下する傾向を確認し、塗装乾燥工程の温度管理の重要性を明らかにした<sup>(3)</sup>。



(a) 塗料粘度低(43mPa·s) (b) 塗料粘度高(159mPa·s)

図2. 塗料塗着と流動の高速度カメラ画像

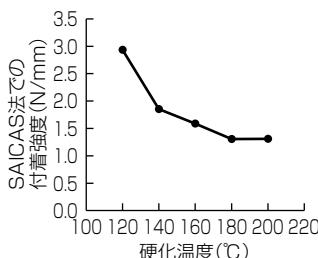


図3. 硬化温度と付着強度

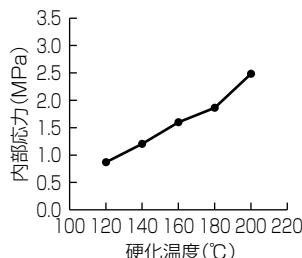


図4. 硬化温度と内部応力

### 3. 防錆塗装

当社では、タービン発電機等の大型構造物から板金筐体等の金属部品を対象として防錆塗装を採用している。製品の材質や寸法によって求められる塗装品質や工法が異なり、個々の製品に応じて必要な機能を把握し、その品質を確保できる塗装条件・プロセスを決定し、品質の安定化を進めている。

#### 3.1 大型構造物防錆塗装

大型構造物の大きいものは10mを超えるので乾燥炉による強制乾燥ではなく、1液乾燥塗料を使用した常温自然乾燥で塗装品質を確保する場合がある。防錆塗装では厚膜が要求されることが多く、場合によって100μm以上の塗装膜厚が必要となるため、重ね塗りが必要であり、硬化時間が長くて作業が長期化するという課題がある。

##### 3.1.1 温度上昇時の腐食反応性

腐食反応には水と酸素が不可欠である。大気環境では水の供給が律速になり、相対湿度80%以上で進行しやすい。ISO9223では“ぬれ時間：0°C以上かつ相対湿度80%以上の時間”と定義し、腐食速度に影響を及ぼす因子として挙げている。ぬれ時間(Time of Wetness: TOW)は式(1)で得られる。

$$TOW = 8766 \times P(RH) \times P(T) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、P(RH)は相対湿度(RH)による確率係数、P(T)は温度(T)による確率係数を各々示す。これを用い、内外部両面の塗装を必要とする密閉型構造物の外部と内部の腐食反応性を比較した結果を表1に示す。内部は運転時に50°C程度まで温度上昇するため相対湿度とぬれ時間が低下する。反応性を論じる上で重要な速度定数は、概算結果が近い値を取ったため10°C 2倍則で考えた。その結果、構造物外部の反応性を1とすると、内部は0.06と反応性が非常に低く、塗装仕様を見直す余地があることを確認した。複合サイクルと塩水噴霧試験の結果を基に、耐食性の確保に必要な塗装膜厚に調整し、噴霧塗装作業工数を22%削減した。

##### 3.1.2 腐食電位測定

内部に雨水等が浸入し、塗装膜が吸水して素地に水が到達した場合、腐食反応の進行に加え、水の浸透による塗装膜の剥離が懸念される。管理方法の指標とするため、素地

表1. 腐食反応性の比較

	温度(°C)	相対湿度(%)	P(T)	P(RH)	TOW	速度定数	反応性
外部	30	90	0.999	0.859	7522	1	1.00
内部	50	31	0.999	0.012	105	4	0.06

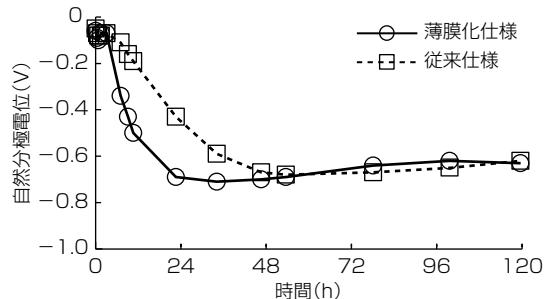


図5. 腐食電位の測定結果

に水が到達する時間を測定した。参照電極に銀／塩化銀電極を用いた4電極式の腐食電位測定で評価した。

図5に測定結果を示す。薄膜化仕様では従来仕様の約半分の時間で塗膜が吸水した。これに基づき、24時間以上水と接触することがないよう、管理方法の参考にした。

#### 3.2 空調機用圧縮機の防錆塗装

空調機用圧縮機は、腐食の影響因子である水との接触の機会は限定的であり、それに応じた耐力設計がなされてきた。しかし、近年の使用環境及び用途の拡大から、次世代圧縮機の塗装仕様を確立する必要があった。圧縮機は溶接部や局所的な薄肉部を持つ複雑形状の塗装品であるため、均一な塗膜を各部位に形成し、要求される耐食性を圧縮機全体に付与することが課題である。また、熱容量が大きい組立品を塗装する工程となるため、塗装工程の省エネルギー化が課題である。

##### 3.2.1 耐食性の強化

当社は、2018年に一部の機種を対象とした圧縮機用の塗装ラインを立ち上げた。ここで、圧縮機の製造工程を図6に示す。まず、耐食性の強化を目的として化成処理剤の選定と新塗料の開発を実施した。化成処理剤にはジルコニア化成処理剤を採用することで、塗装品の耐食性と塗装設備の省スペース性・メンテナンス性の両立を実現した。塗装工程では、複雑形状である圧縮機を均一に塗装することが必要であり、特に、薄肉である足部のエッジ部での膜厚の確保が必要であった。そのため、均一塗装性に優れる電着塗装を採用し、さらに、塗料中の樹脂の配合を調整し、塗料の硬化初期での粘度の低下を抑制することでエッジ部の膜厚を確保した(図7)。

##### 3.2.2 塗装・乾燥工程の省エネルギー化

新規に塗装ラインを立ち上げるに当たり、工程の省エネルギー化にも配慮した。圧縮機は、厚肉のシェルの内部に電着塗装品を持っており、熱容量が大きいために塗装・乾燥時に多量のエネルギーを消費する。また、電着塗料は、顔料



図6. 圧縮機の塗装工程

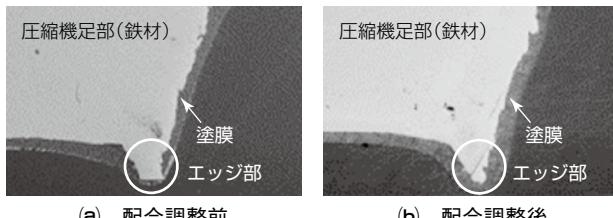


図7. 圧縮機足部の断面観察像

や樹脂の沈降を抑制するため、大型の塗料槽を常時攪拌(かくはん)することが要求される。耐食性を維持したまま、塗料に低温硬化・低攪拌の機能を付与することで、乾燥炉及び電着槽の省エネルギー化を実現した。

これらによって、圧縮機全体への耐食性の付与と塗装工程の省エネルギー化を同時に実現した。

#### 4. 意匠塗装

当社では、空調機用意匠パネル等の多くの樹脂部品を対象に製品付加価値の向上を目的とした意匠塗装を行っている。意匠塗装では、溶剤塗装のほかに、環境負荷の低減が可能な水系塗装の導入も積極的に行っている。また、近年のグローバル化に伴い、当社の意匠塗装品は海外工場での生産も多く、海外現地を考慮した製造条件の確立や塗装品質の安定化を進めている。

##### 4.1 空調機用樹脂部品の溶剤塗装

当社の海外向け空調機の生産拠点である、タイのMCP社では、RAC室内機の意匠性を高めるため、樹脂部品の意匠塗装をキーとなる生産技術と位置付け、2010年から意匠塗装を内製化している。内製化に際し、タイ現地を考慮した製造ライン・プロセス設計と品質の維持・管理が課題であった。

###### 4.1.1 海外に対応したライン設計と生産立ち上げ

現地作業者の身長・体格を考慮した作業高さ(作業性)、現地のエネルギー事情に基づいた塗装ブース・ライン・乾燥炉の設計、塗料の顔料であるアルミフレークの分散性と配向性から色むらが生じにくい塗料の選定、また、現地調達が可能な治具・備品を基にしたプロセス設計と品質の作り込みを行った。生産開始後は、現状分析→課題抽出と評価→改善案の立案と実行→効果の把握の一連の改善サイクルを現地メンバーと共同で実践し、生産性・品質改善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の独り立ちを促進した。

###### 4.1.2 大型樹脂部品に対応した新工法の開発

海外工場では作業者の離職が問題となる。特に手吹き塗

装の場合、作業者の育成に時間を要し、また、塗装作業者間で品質のばらつきが生じる。最終的には人に左右されない生産効率・生産品質の向上が課題となり、この課題に対応するため、自動塗装システムとして、大型部品への適用が困難とされるスピンドル塗装を採用した。特有の課題である塗装むらと膜厚のばらつきに対し、手吹き塗装と比較して、塗料を低粘度化して吐出量・霧化圧を増加させ、広範囲に噴霧することで極薄膜を多層成膜し、1層当たりのばらつきを平均化して解決した。また、同時に求められていた生産性の向上と部分塗装品への対応として、塗装の上下動とスピンドルの回転動作を別機構で分担し、部分塗装も同一システムで処理できる方式にすることで、塗装動作の高速化と安定化を可能にし、塗装時間を12%短縮した(図8)。

##### 4.2 車載センサ用の高精度溶剤塗装

当社の海外工場であるタイのMETA社では車載センサを製造している。この製品は車体バンパーに取り付けられる部品であり、塗装色をバンパーの色に合わせなければならない。このため、塗装色に要求される管理範囲は狭く、塗装工程で塗装色を高精度に制御できる品質の作り込みが課題である。

次に述べる三つの対策によって、ばらつきが小さく、規格中央値で成膜可能な塗装工程を確立し、品質の安定化を実現している。

###### 4.2.1 塗装膜厚の均一化

車載センサの塗装に使用される塗料は、クリア塗料にアルミフレーク顔料を含んだ光透過性の塗料であり、膜厚に依存して塗装色が変動するため、塗装色を高精度に制御するには膜厚の均一化が必要である。そこで、塗装ステージ上の膜厚分布を実測、その結果をフィードバックし、塗装ロボットの動作プログラムを適正化することで膜厚分布を均一化し、塗装色のばらつきを低減した(図9)。

###### 4.2.2 塗料粘度・膜厚の適正化

塗装色は膜厚のほか、塗膜内部でのアルミフレーク顔料の配向性に依存して変動する。塗装色のばらつきを低減するには、顔料配向性のばらつきを抑制する必要がある。そこで、理論計算によって、塗料中の顔料が沈降する速度を見積もり、顔料の配向性がばらつく要因を塗料粘度、膜厚と推定し、塗料粘度の増加と塗装膜厚の薄膜化によって、アルミフレーク顔料の配向性を均一化し、更なる塗装色のばらつき抑制を実現している(図9)。

###### 4.2.3 塗料の調整

塗装色の平均値を規格中央値に合わせ込むため、塗料メーカーと協同して塗料を調色した。

##### 4.3 水系塗料の量産品への適用

近年の環境意識の高まりから、製造業に対しても、環境負荷の小さい塗装工程の構築が望まれており、当社で

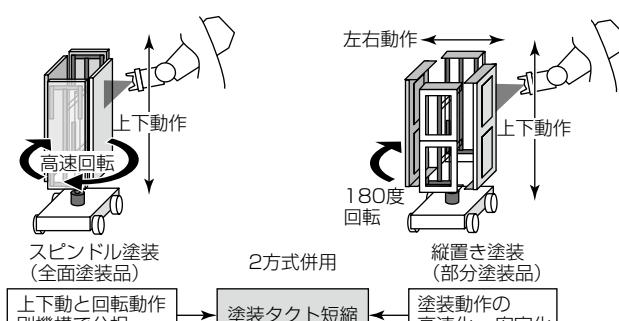


図8. 大型樹脂部品のスピンドル塗装

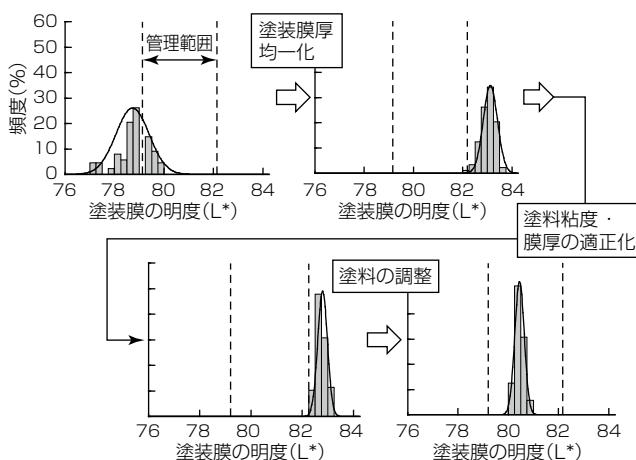


図9. 塗装色のばらつき低減効果

は、2009年から揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds: VOC)の排出が低減可能な水系塗料を量産品に適用している。水系塗料では、従来、粘度調整に用いていたシンナーの大半を水で代替しており、VOC発生量を約80%削減可能である。一方で、水系塗料では、粘度調整に水を用いることから塗料の表面張力が大きいため、被塗装物に対するぬれ性が低下し(図10)、塗装剥離が発生しやすいという課題がある。また、樹脂に対する相溶性がないことに起因して手直し塗装が不可能であるため、不良発生時の廃棄ロスが大きいという課題がある。

#### 4.3.1 塗膜の付着強度の向上

塗装剥離防止の観点から、被塗装物である樹脂成形品に対して汚染物の除去によってぬれ性を改善する脱脂工程と、樹脂成形品の表面を改質して表面を活性化するコロナ処理工程を持つ製造工程を構築した。塗料側の高い表面張力に起因するぬれ性の低下を、被塗装物側の表面を清浄化・活性化することで、被塗装物表面での塗料のぬれ性低下を改善し、塗膜の付着強度を向上させた。

#### 4.3.2 廃棄ロスの抑制

水系塗装では手直し塗装が不可能であることから、高い直行率が必要とされる。当社では、水系塗装を量産品に適用する上で、塗装での頻出不良であるゴミが塗膜面に付着

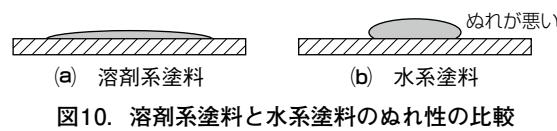


図10. 溶剤系塗料と水系塗料のぬれ性の比較

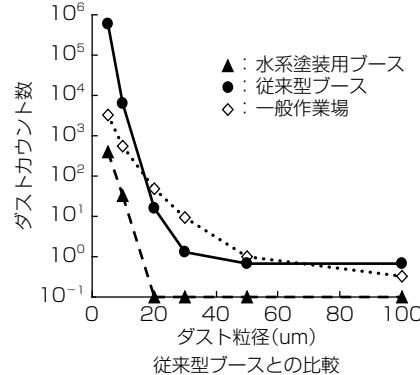


図11. ダストカウント数

して発生する外観不良に着目し、この不良を極力発生させない設備仕様を検討した。代表的な仕様として、ライン全体(脱脂→塗装ブース→焼付け乾燥炉)のクリーンルーム化と塗装ブース内の気流制御が挙げられる。これらの対策によって、ラインへのゴミの侵入を抑制し、また、ゴミの原因となる、塗装ブース内での塗装ミストを効率的に除去した。その結果、従来型ブースと比較して高い清浄度を確保し(図11)、溶剤塗装と同等の不良率を達成。水系塗装に特有の材料ロスを抑制している。

## 5. むすび

塗装工程は多量のマンパワー、エネルギー、スペースを使用する工程であり、その基本的な構成は数十年前から大きく変わっていない。今後の社会情勢を考慮すると、自動化、省エネルギー化、省スペース化の要求がますます厳しくなることが予想され、本稿で述べたようなプロセス技術の開発に加えて、AI(Artificial Intelligence)・IoT(Internet of Things)技術の活用、前後工程との連結といった設備・システム技術の開発と塗装工程への適用が不可欠と考える。今後は、現状の改善だけでなく、塗装工程の革新にも取り組み、持続可能な社会の実現に貢献していく。

## 参考文献

- (1) 澤田準平, ほか: 二流体スプレー塗装 噴霧塗料ミスト径の予測, 第28回塗料・塗装研究発表会講演予稿集, 46~50 (2013)
- (2) 日本工業規格JIS K 5600-5-6: 付着性(クロスカット法) (2008)
- (3) 藤原淳史, ほか: 塗装膜の硬化温度と付着力との相関性の評価, 第34回塗料・塗装研究発表会講演予稿集, 20~24 (2019)

小寺秀和\*  
下野真也\*  
池田一貴\*

# 光モジュールの計測調整組立技術

Measurement Adjustment Assembly Technique of Optical Module

Hidekazu Koder, Masaya Shimono, Kazutaka Ikeda

## 要 旨

近年のスマートフォンやタブレットなどの携帯端末の普及に伴い、データ通信量が急速に増大、急増するトラフィックに対応するため、光ファイバ通信機器局内の光伝送装置内の光トランシーバとそれに搭載される光送信モジュールの小型化が求められている。そこで三菱電機では、25Gbps(Gigabits per second)で変調される波長の異なる四つのLD(Laser Diode)を一つのパッケージに内蔵した100Gbps集積光送信モジュールを開発し、市場に提供している。

光モジュールの組立は、規定性能を得る上で、高精度調整が必要になるため、光強度・形状等の物理量を計測しながら、計測結果を基に光学部品の位置を精密調整し、組立固定しているが、100Gbps集積光送信モジュールでは、

四つのLDからの発光光を最終的に一つのファイバに集光する必要があり、パッケージ内に一つのLDだけを搭載する場合より光軸調整回数が増加し、また、より高い調芯精度が要求される。

そこで、高精度調整を短時間で行うための技術開発に取り組み、100Gbps集積光送信モジュール組立のキー工程である第2レンズ・レセプタクルの調整組立工程の工程フローと光軸調整技術の課題を明らかにし、①高速光軸調整技術(ステージ連続動作とデータ一括読出による高速化、調整アルゴリズムの高度化)の開発、②光軸補正の自動化、③組立工程の統合化によって、この工程の組立時間を従来比1/4に短縮した。



第2レンズ・レセプタクル調整組立装置

## 100Gbps集積光送信モジュールと第2レンズ・レセプタクル調整組立装置

光モジュールの組立では、規定性能を得るため、光強度・形状等の物理量を計測しながら、計測結果を基に光学部品の位置をサブミクロンレベルで精密調整し、組立固定することが特徴である。今回、100Gbps集積光送信モジュールの高速・高精度組立の上でキー工程となる、第2レンズ・レセプタクルの高速光軸調整技術を開発・装置化し、組立精度向上と生産性向上を実現した。

## 1. まえがき

近年のスマートフォンやタブレットなどの携帯端末の普及に伴い、音楽・動画配信などのデータ通信量が急速に増大し、光ファイバ通信機器局内の光伝送装置の増設が求められている。しかしながら、通信基地局内の設置スペースは限られたことから、急増するトラフィックに対応するため、伝送装置内のラインカード当たりの実装密度を高めていく必要があり、必然的に光トランシーバとそれに搭載される光送信モジュールの小型化が求められている。そこで当社では、2014年から、25Gbpsで変調される波長の異なる四つのLDと各LDからの光を平行光化するレンズ及びその光を合波する合波器を一つのパッケージ内に内蔵した100Gbps集積光送信モジュール(以下“集積光モジュール”という。)を開発し、市場に提供している<sup>(1)(2)</sup>。

光モジュールの組立では、規定性能を得るために光強度・形状等の物理量を計測しながら、計測結果を基に、ファイバ等の光学部品の位置を精密調整し、組立固定しているが、集積化によって、光軸調整回数が集積光モジュール内に実装されているLDの数だけ増大し、かつ調芯要求精度が厳しくなるため、生産性向上を目指し、高精度調整を短時間で行うための製造技術開発に取り組んだ。また、自動機による調整組立で、品質安定化も実現させた。

本稿では、特に、集積光モジュール組立のキー工程である、第2レンズ・レセプタクル(ファイバ)の計測調整組立技術開発について述べる。

## 2. 集積光モジュールの構成

図1に、集積光モジュール内部での光学系の概念図を示す。パッケージ内には四つのLD(レーン0～3)、レンズ、及び空間光学系合波器が集積されている。合波器は、ガラスブロックに対して、3枚のBPF(Band-Pass Filter)と1枚のミラーが対面に貼り付けられた構成になっている。この製品は2段レンズの光学系を採用しており、LDから出射して第1レンズを通過後、平行光化されたビームは、合波器に入射され、BPFとミラー間を多重反射することによって、レーン0～3の4波長が合波される。合波器によって束ねられた平行光は、第2レンズを通過することで集光され、レセプタクルからファイバへと入射する。

図2に、パッケージの外部構造を示す。パッケージは、第2レンズと隅肉溶接によって固定され、第2レンズとレセプタクルホルダは突き合わせ溶接によって、レセプタクルとレセプタクルホルダは貫通溶接によって組立固定される。なお、これらの溶接はYAG(Yttrium Aluminum Garnet)レーザ溶接によって行われる。

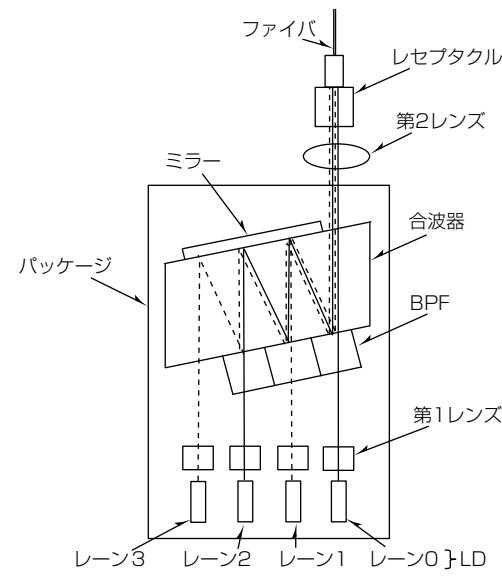


図1. 集積光モジュール内部での光学系

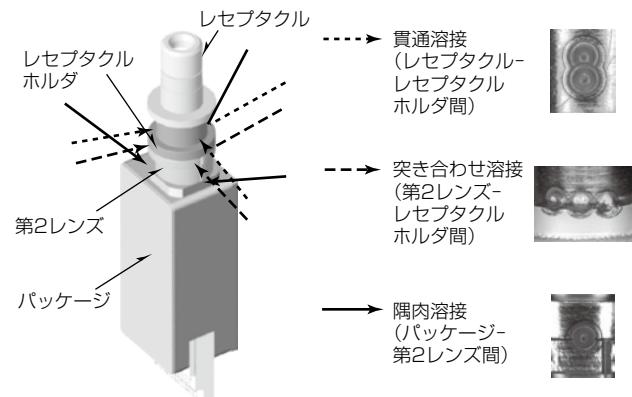


図2. パッケージの外部構造

## 3. 従来の工程フローと光軸調整技術の課題

### 3.1 従来の工程フロー

図3及び図4に、従来の第2レンズ・レセプタクル調整組立工程の組立手順及び工程フローを示す。この工程は大別して①第2レンズの光軸調整固定、②レセプタクルの光軸調整固定、③追加レーザ照射・微小歪(ひずみ)形成による光軸補正の三つに分けられる。

従来、①～③は、各々完結した異なる工程として、順次、完成品取り出し→部材供給→完成品取り出し作業を繰り返し行っていた。また、従来、一連の工程の中で、③追加レーザ照射による光軸補正の際の光軸補正方向検出作業を自動化できていなかった。

### 3.2 従来の光軸調整技術

光モジュールの組立では、サブミクロンレベルの組立精度が必要であるため、各種物理量(光強度、形状等)を測定器で計測し、計測結果を基に部品を最適位置に調整し、組立固定している。例えば、ファイバ光軸調整の場合、一般

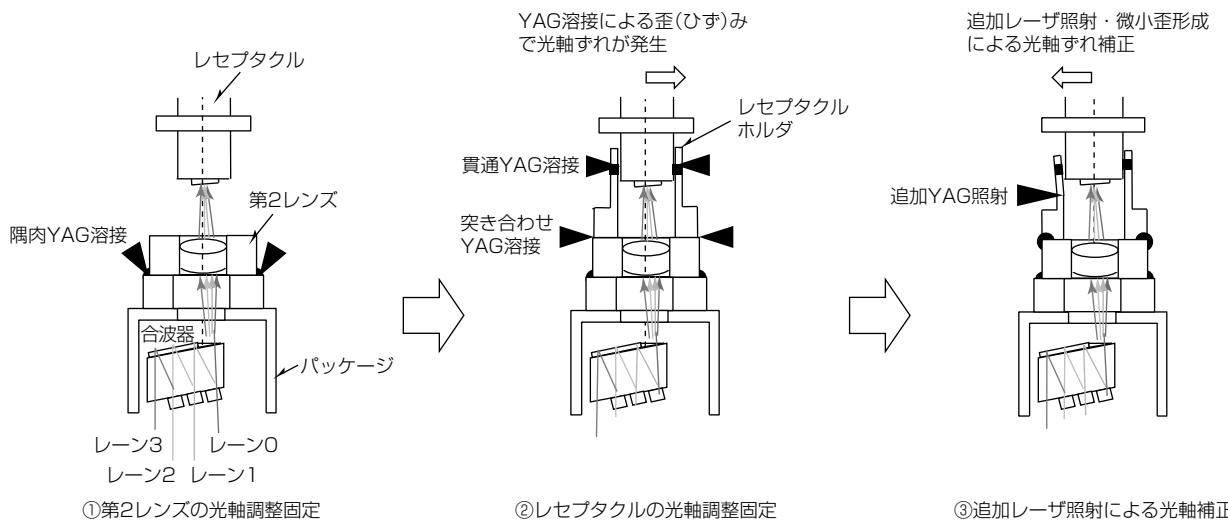


図3. 第2レンズ・レセプタクル調整組立手順

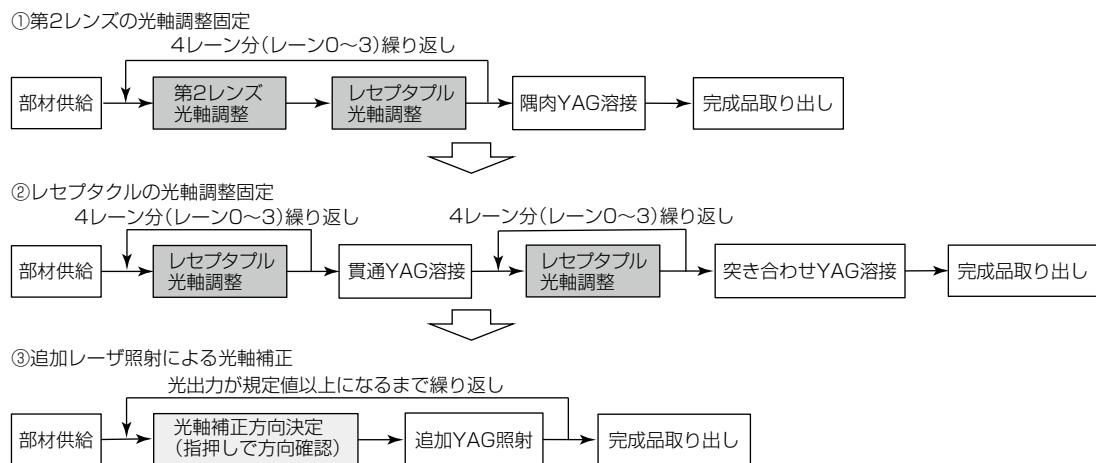


図4. 従来の第2レンズ・レセプタクル調整組立工程フロー

的には光強度測定にはパワーメータ、ファイバの位置調整にはステッピングモータステージが用いられる。ステッピングモータでは、移動中に位置情報を取得できないため、ファイバ位置とその位置で測定される光強度との整合をとるため、ステージを一度停止させてから光強度を測定し、光強度と位置情報を逐次取得する必要があった。すなわち、XY平面上(ファイバの光軸に対して垂直な平面)で光強度測定→計算処理→ステージ移動(ステップ動作)を繰り返し、同平面上で最も光強度が高くなるXY座標にファイバを位置決めする。これをファイバのZ座標を変えながら繰り返し実行し、最終的にファイバを最適位置に位置決めする。

この手法は、高精度に調整できるが、ステップ数の分だけ調整に時間を要する。ステップ数を少なくするため、XY平面上の調整動作で、最初に10μm程度の移動量とし、ある程度光強度が得られるように光軸調整し(粗調整)、最終的に調整範囲を絞った上で、0.2μmの刻み幅で光軸調整(精調整)するという手段を採用しても調整時間短縮には限界があり<sup>(3)</sup>、高精度光軸調整の高速化手法開発が課題であった。

#### 4. 高速光軸調整技術の開発

##### 4.1 ステージ連続動作・データ一括読み出しによる高速化<sup>(3)</sup>

図5に、今回開発した集積光モジュール対応光軸調整制御系の構成を示す。従来の課題に対し、調整用駆動ステージとしてステージ内に位置センサを内蔵して位置データを電圧としてアナログ出力可能なピエゾステージを採用し、移動中のステージ位置をアナログ電圧として取得してステージを停止させずにファイバ位置と光強度データの整合性をとることができる。そのため、ステージを連続動作させて光軸調整を高速化することが可能になる。さらに、パソコン内のA/Dボードでステージの位置データ(ステージ位置に比例して出力させるアナログ電圧)とパワーメータからの光強度データ(測定した光強度に比例して出力させるアナログ電圧)の両方を取得、A/D変換器内のバッファメモリで一時的にデータを蓄積し、ステージ動作完了後、ステージ位置データと光強度データを一括して読み出すことで、逐次処理をやめて処理を高速化した。

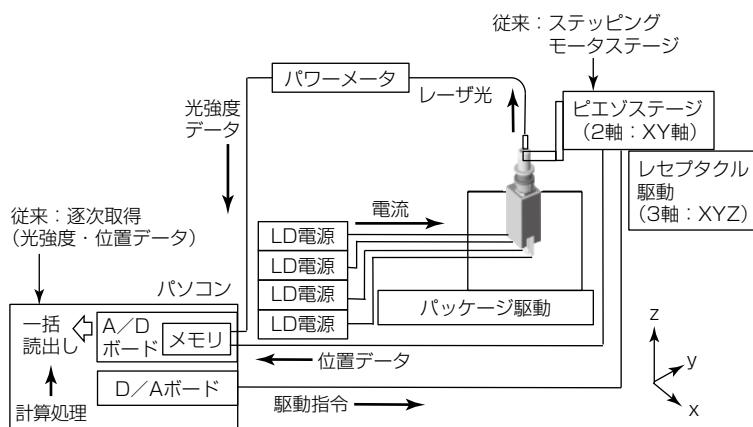
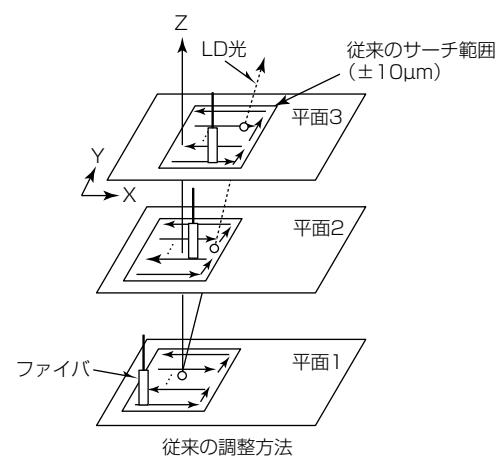
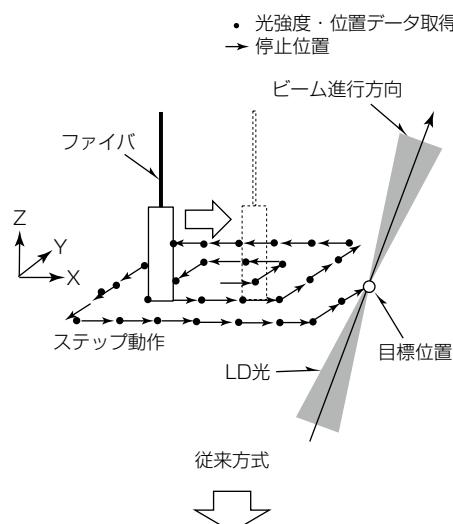


図5. 集積光モジュール対応光軸調整制御系の構成



従来の調整方法



- 光強度・位置データ取得
- 停止位置

ビーム進行方向

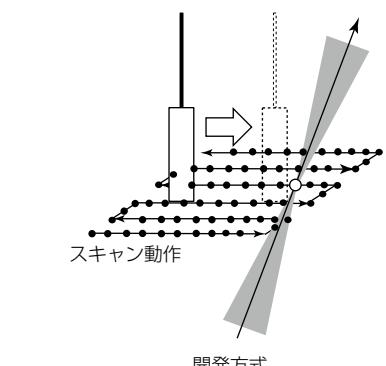


図6. XY平面内スキャン動作の高速化

#### 4.2 調整アルゴリズムの高度化

調整動作の高速化に加えて、調整アルゴリズムの高度化を行った。具体的には、図6及び図7に示すように、XY平面上でのスキャン動作を連続動作化の上、Z座標の調整で、ビーム位置予測を取り入れた。すなわち、最初の2平面での調芯完了位置を基準に、ビームの傾きを予測し、以降のサーチ範囲を面積比1/16に絞るようにした。これらの取組みによって、光軸調整1回当たりの所要時間を従来比1/7(67.8→9.9秒)に短縮した(表1)。

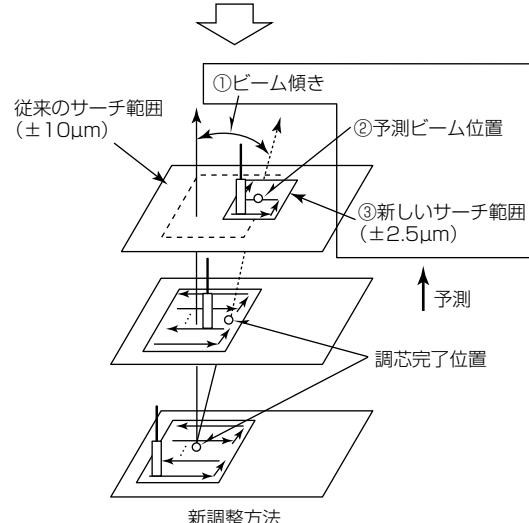


図7. 調整アルゴリズムの高度化

表1. 光軸調整時間の比較

	従来方法	新方法
光軸粗調整(秒)	13.4	2.0
光軸微調整(秒)	54.4	7.9
合計(秒)	67.8	9.9

⇒従来比：約1/7

## 5. 工程の自動化・統合化

### 5.1 光軸補正工程の自動化

従来、光軸補正方向検出を自動化できていなかった課題に対し、図8に示すように、YAG溶接前後でレセプタクル位置でのレーン0～3での光出力変化量を取得し、光軸ずれベクトルを算出することで光軸補正方向を決定する方法を考案、アルゴリズムに反映し光軸補正作業を自動化した。これによって、第2レンズ・レセプタクル組立に関わる一連作業を全自動化した。

### 5.2 工程の統合化

従来、図4に示すように、①～③の工程をそれぞれ完結した工程として行っていたのに対し、これらを連続的に統合した。図9に工程統合化後の工程フローを、図10に第2レンズ・レセプタクル調整組立装置の機構部構成を示

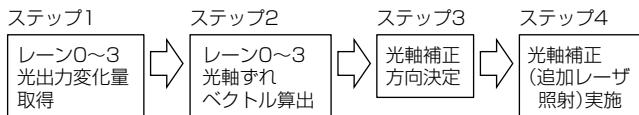
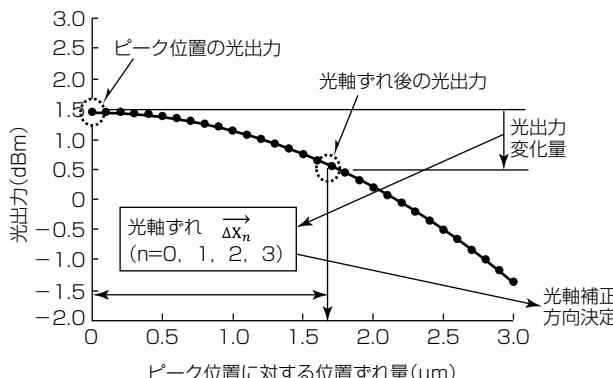


図8. 光軸補正方向決定の自動化

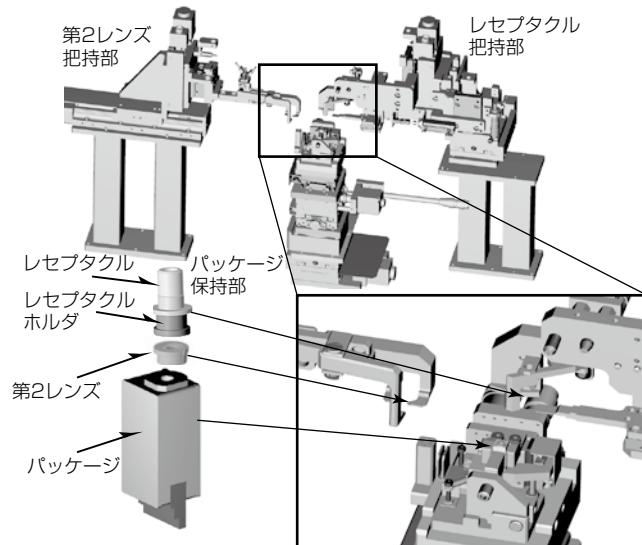


図10. 第2レンズ・レセプタクル調整組立装置の機構部構成

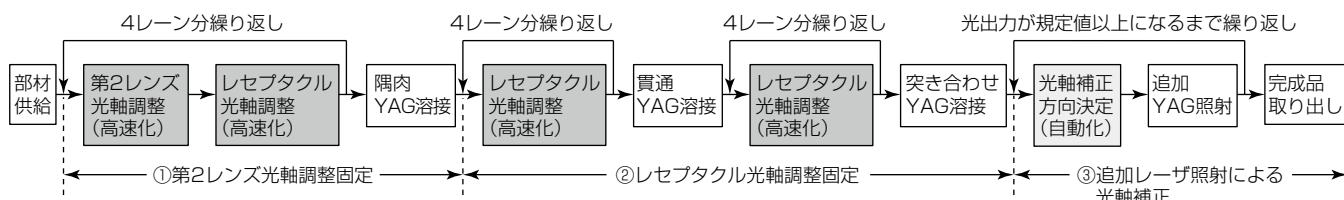


図9. 新しい第2レンズ・レセプタクル調整組立工程フロー

す。工程を統合化し、1台の装置で行うため、機構部として、パッケージ、レセプタクル、レセプタクルホルダ、第2レンズの4部品を供給できる構成にした。さらに、3種類のYAG溶接に対応するためにYAGレーザヘッドに4軸駆動機構を備えるとともに、パッケージと第2レンズ間及び第2レンズとレセプタクルホルダ間の2か所での溶接部材の面合わせを可能にした。

## 6. 開発結果

図11に、第2レンズ・レセプタクル調整組立工程の組立時間を示す。4章と5章で述べた、光軸調整の高速化・自動化及び調整組立工程の統合化によって、組立時間を従来比1/4に短縮した。

## 7. むすび

高精度調整を短時間で行うために開発した高速光軸調整技術と100Gbps集積光送信モジュールの第2レンズ・レセプタクル調整組立工程への展開を中心に述べた。光モジュールでは、製品の集積化やマルチエミッタ化によって、加工費・製造時間が増大する傾向にあり、今後も、計測調整組立技術の高度化、調整アルゴリズムの進化を図り、品質の安定化、生産性向上、製品競争力強化に貢献するとと

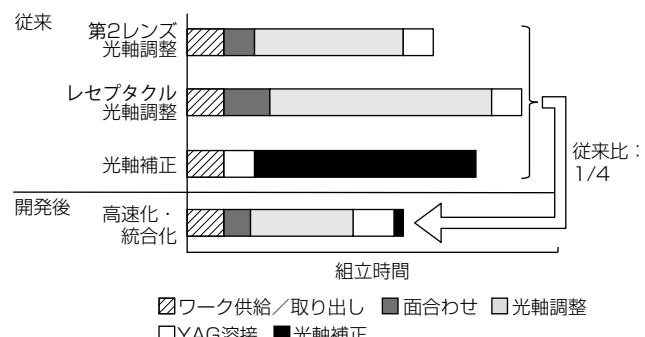


図11. 第2レンズ・レセプタクル調整組立工程の組立時間

もに、人依存・熟練作業の形式化・自動化を推進し、生産拠点のグローバル化にも対応していく。

## 参考文献

- 佐藤 膳, ほか: 100Gbps小型集積EML-TOSA, 三菱電機技報, 91, No.5, 273~276 (2017)
- 安井伸之, ほか: 100Gbps光集積送信モジュール, 三菱電機技報, 87, No.2, 137~140 (2013)
- 下野真也, ほか: 光軸調整装置および光軸調整方法, 特許第6355993号

# 高速主軸モータ用 低欠陥純アルミ導体ロータ

石川 寛\* 古谷紀宗\*\*  
山根慎次郎\*\*  
玉腰知玄\*\*

Low Defected Pure Aluminum Conductor Rotor for High Speed Spindle Motor

Hiroshi Ishikawa, Shinjiro Yamane, Tomoharu Tamakoshi, Norihiro Furutani

## 要旨

工作機械にチャックされたドリルやフライスカッター等を回転させるためにコラムに内蔵されているモータ(以下“主軸モータ”という。)の籠形回転子(以下“ロータ”という。)は導体が純アルミで、ダイカスト鋳造法によって製造される。一般的にダイカスト鋳造部品は肉厚3mm以内が適正とされるが、ロータ両側端部のアルミ製短絡環(以下“エンドリング”という。)は10mm以上の厚肉であるために引け巣欠陥等の鋳造欠陥が発生しやすい。一方でモータが回転と停止を繰り返すと、ロータには遠心力による応力振幅によって、特にエンドリング内部の鋳造欠陥を起点として金属疲労による損傷が進展しやすい。近年、加工時間を短縮することが原価低減に有効であり、それに伴い高速回転仕様の工作機械の需要が世界的に高まってきているが、

高速回転仕様の主軸モータに適用するロータについては先に述べた理由からエンドリング内部の欠陥の大きさについて厳しく規定されている。

周速120m/s(2万rpm相当)の高速主軸モータに適用するロータの製造に当たり、上下方向に型締めを行って下方から上方にアルミ溶湯を射出する方式のスクイズキャストマシンと呼ばれるダイカストマシンを使用し、0.2m/s以下の低速(一般的に1.5m/s~4.0m/sの高速で充填する)で金型内にアルミ溶湯を充填させるとともに、凝固後にエンドリング端面部分を加圧することで、鋳造したロータ全数の欠陥寸法について規定値以下を達成し、低欠陥ロータを安定して連続鋳造することに成功した。



## 高速主軸モータ用ロータとその構造

工作機械の主軸スピンドルモータに使用されるロータは、所定の高さだけ積層された円形電磁鋼板の両端部を純アルミ製エンドリングが挟み込み、両側のエンドリングをスロットバーで締結した構造になっている。三菱電機ではロータをダイカスト鋳造法で製造している。一般にダイカスト鋳造法では適正肉厚は3mm以下とされ、厚肉では引け巣欠陥が発生しやすいとされるが、特殊な鋳造法で高速回転用の低欠陥ロータを実現した。

## 1. まえがき

当社グループでは、工作機械にチャックされた、ドリルやフライスカッター等のツールを回転させるための主軸モータを工作機械メーカーに納品している。近年、加工時間を見短縮することが原価低減に有効であることから高速回転仕様の主軸モータの需要が世界的に高まっている。

本稿では、周速120m/s(2万rpm相当)の高速回転仕様の主軸モータの構成部品であるロータの製造技術開発について述べる。

## 2. 主軸モータ用ロータの製造方法と課題

### 2.1 主軸モータ用ロータの構成

図1にロータの構造を示す。ロータは軸方向に所定の厚みだけ積層された、円形に打ち抜いた電磁鋼板(以下“鉄心コア”という。)を軸方向両端部からアルミ製のエンドリングが挟み込んだ構造となっている。エンドリングは、鉄心コアの外周に円周方向に等間隔で打ち抜かれた穴を貫通するアルミ製のバー(以下“スロットバー”という。)によってつながっている。また、鉄心コア中央にも穴があいていて、穴にはツールを脱着する治具(ドローバー)等を内蔵する軸が焼き嵌(ば)めによって装着される。

### 2.2 主軸モータ用ロータの製造方法

当社では主軸モータ用のロータをダイカスト鋳造法によって製造している。一般には水平方向に型締めを行い、固定ダイプレート後方から水平方向に溶湯を射出する方式のダイカストマシンが広く普及しているが、ロータ鋳造では上下方向に型締めを行って下側の固定ダイプレート下方から上方に射出する方式のダイカストマシンを使用する。

図2にロータの鋳造工程を模式的に示す。固定ダイプレート上に金型を設置する。溶湯の通り道であるランナとゲート及びエンドリング形状がかたどられた下型の中心とスリーブ中心が一致するよう設置する。また、下型中央の

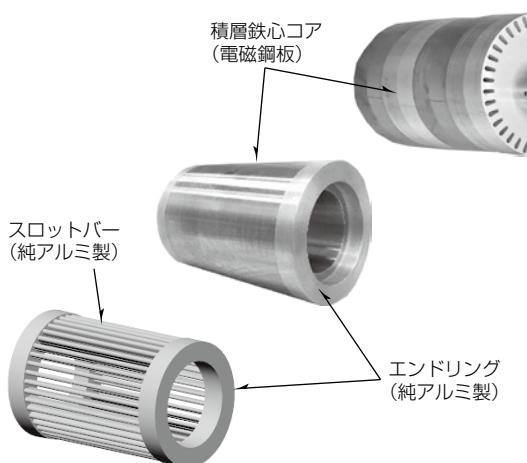


図1. 主軸モータ用ロータの構造

穴に仮軸と呼ばれる軸心棒を立てる。鉄心コアの中央の穴を仮軸に通すようにして下型の上方に所定の高さまで積層する。

このとき、各鉄心コアのスロットバー穴の位相が揃うようにする。コアバンドと呼ばれる円筒形状の金型を、鉄心コア外周部を覆うように設置する。そしてエンドリング形状とガス抜き溝がかたどられた上型をコアバンド上方に設置する。

金型設置後、可動ダイプレートが下方に下がって型締めされる。一方、マシン給湯装置でアルミ溶湯を射出部に注いだ後、固定ダイプレートとドッキングして溶湯を射出する。

アルミ溶湯は下型のランナからゲートを経てエンドリング部を充填し、次に鉄心コアのスロットバー穴を充填し、上型のエンドリング部を充填する。金型内の空気や気化した離型剤はガス抜き溝から排出される。金型内のアルミが凝固、冷却後にダイカストマシンから金型を取り出して、ゲートから下部を切断し、金型を分解してロータを取り出す。

### 2.3 高速主軸モータ用ロータ鋳造の課題

工作機械稼働時、ロータが回転すると、遠心力によって応力が発生する。このためモータが回転と停止を繰り返すと、ロータには金属疲労による損傷が発生する。金属疲労はロータの応力振幅が大きい部位や材料自体の強度が低い部位で顕著に発生し、応力集中係数の高い形状、例えば亀裂や不規則な形状の空洞等の鋳造欠陥を起点として損傷が進展しやすい。

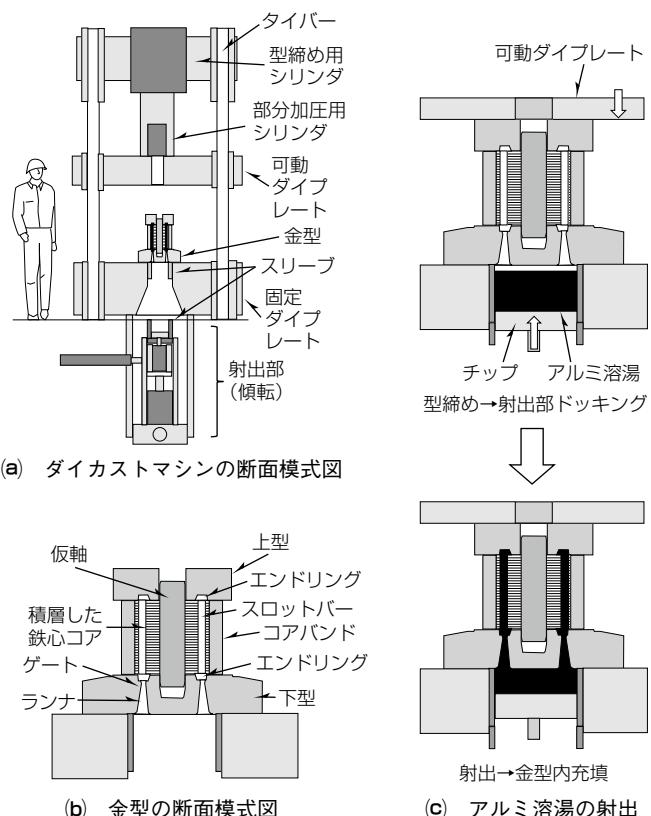


図2. ロータの鋳造工程概要

ロータの場合、導体が純アルミであり、一般的に使用されるアルミ合金材に比較して著しく引っ張り強さや疲労限度が低い。そして周囲を電磁鋼板に囲まれ、拘束されているスロットバー部に比較して、エンドリング部はスロットバーとつながっているところ以外は拘束されていないために応力振幅が大きい。したがってエンドリング部の気泡欠陥や引き巣欠陥はロータ疲労破壊の起点となりやすい。

ロータ铸造では溶湯がゲート→エンドリング→スロットバー→エンドリングと広い場所と狭い場所を交互に通るために乱流による空気の巻き込みが多くなることが懸念される。加えて一般的にダイカスト部品の肉厚は3mm以下とされるが、ロータのエンドリング部の肉厚は10mm以上あり、軸方向での中央付近はアルミ材の凝固収縮による不規則な形状の引き巣欠陥が発生しやすく、厚肉ゆえに引き巣欠陥サイズも大きくなる。铸造欠陥が大きいほど、また応力振幅が大きいほど、金属疲労寿命は短くなる。したがって周速120m/s以上の高速回転仕様のモータに適用するロータの铸造ではエンドリングの欠陥のサイズについて他機種のロータより厳しく規定されており、欠陥発生を抑制する製造技術を開発する必要があった。

### 3. 高速主軸モータ用ロータの铸造

#### 3.1 鑄造欠陥抑制方法

一般的に铸造欠陥を抑制する方法は次のとおりである。気泡欠陥については溶融アルミの金型への充填速度を低く抑えて乱流を抑制し、空気の巻き込み量を低減させる。引き巣欠陥は凝固収縮によって未凝固の液相の圧力が飽和蒸気圧以下まで低下して発生する。したがって抑制方法として未凝固の液相部位に持続的に溶湯を供給し、最終凝固部位を製品形状外に持っていく方法と未凝固の液相部位を加圧し圧力低下を防ぐ方法がある。前者は铸物铸造での押し湯やダイカスト铸造でのオーバーフローが相当する。後者はダイカスト铸造での部分加圧が相当する。部分加圧については、凝固後も発生した引き巣欠陥に荷重を付加して塑性変形で潰すという効果も期待される。

当社でのロータ铸造の場合、先に述べたように上方に射出する方式のダイカストマシンを使用している。このダイカストマシンはスクイズキャストマシンとも呼ばれ、気泡欠陥抑制の点で水平方向に射出する方式より有利である。これは容器に入った液体を定速で上方に持ち上げても波立たないように、射出時、スリーブ内の溶湯はゲートに到達するまで波立たないためである。また水平方向に射出する方式のマシンと比較して径の大きなスリーブを使用できる。その効果として単位時間あたりの充填流量が多いため、低速でも短時間で充填が完了して巻き込む空気も少ない。またエンドリング下部に均等にゲートを配置でき、各スロットバーを均等な速度で充填できるといった特長もある。

しかしながら、充填速度が低いと充填途中で凝固して止まったり、局所的に未充填のまま凝固し、しわや亀裂のような外観形状となる湯廻り不良といった不具合が発生したりする。また充填速度が高いと、エンドリング内充填中に溶湯内への空気の巻き込みが多くなるだけでなく、各スロットバーが均等な速度で充填せず、充填の早いスロットバーからの溶湯流れでゲートと反対側のエンドリングが充填される。その結果充填が遅いスロットバー内の空気が閉じ込められて気泡欠陥となる可能性があるため、適正な充填速度についてCAE流動解析を用いて推測した。

さらに、ゲートと反対側のエンドリングの引き巣欠陥発生の抑制策として、ダイカストマシンの可動ダイプレート中央に搭載されている部分加圧用の大径シリンダを用いてエンドリング端面を加圧した。部分加圧についてはCAE凝固解析を用いて適正な開始時間を推測した。一方、ゲート側のエンドリングには金型及びマシンの構造上、部分加圧はできないが、保圧機構によってスリーブ内の溶湯からゲートを通じてエンドリング内の溶湯に圧力を伝達することで圧力低下を防ぎ、発生を抑制できる。ゲートが凝固する時点でのゲート側エンドリング内の未凝固部位をCAE凝固解析で推測するとともに、エンドリング凝固後にゲートが凝固するような適正なゲート方案を検討した。

#### 3.2 CAE铸造解析による適正铸造条件推測

ロータのアルミの部分(ゲート、ランナ、スリーブの一部含む)の3Dモデルを作成した。鉄心コア部は省略して金型と同じ材質と定義した。溶湯の温度は670°Cで、金型の温度は一律で150°Cとした。溶湯の流速は①1.00m/s、②0.20m/s、③0.10m/s、④0.05m/sの4通りとし、モデル下面から流動させる。溶湯の流動が停止する固相率を50%に設定した。

図3は充填完了時(全体の98%まで充填した状態)の溶湯温度分布を示したコンター図である。黒い部分は未充填

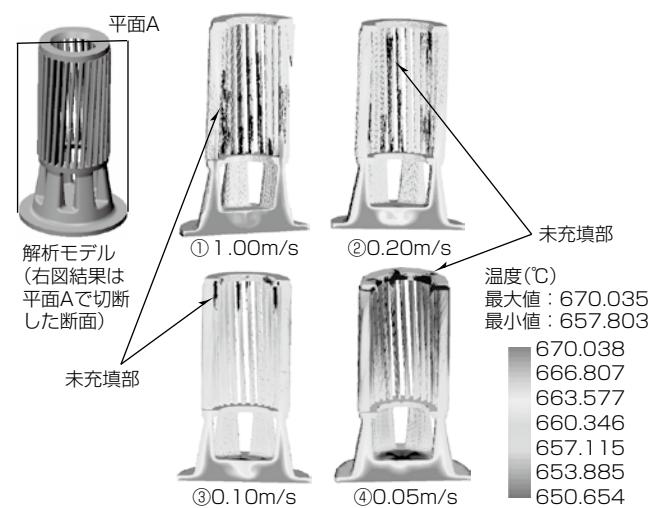


図3. 各充填速度での流動解析結果

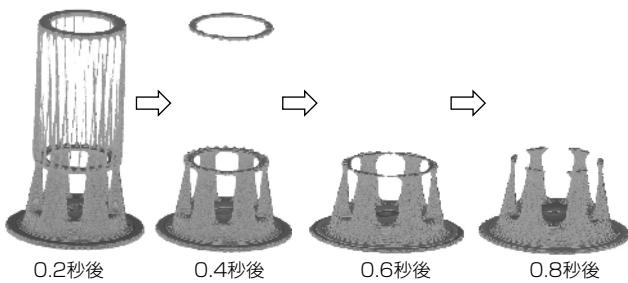


図4. 充填完了後からの固相率50%以下領域の推移

部位を示している。①1.00m/sと②0.20m/sとではエンドリング上部は充填されるが、各スロットバーが均等に充填されず、スロットバーに未充填部位が残り、この部位に空気が閉じ込められ気泡欠陥になると推測される。③0.10m/sでは各スロットバーが均等に充填されているが、スロットバー上部からエンドリングにかけて未充填部位が見られ、④0.05m/sでは未充填部位が広がる。以上から適正な充填速度は0.10~0.20m/sの間と推測されることから試作鋳造では0.10m/sと0.20m/sの2通りで充填して比較した。

次に凝固解析結果から、図4に固相率50%以下の領域の推移を示す。なお固相率50%以上の領域は空白で示されるように設定している。まず充填完了後0.2~0.4秒の間にスロットバーが凝固する。それ以降、ゲートと反対側のエンドリング内部に液相が残存して孤立することから、充填完了後0.2~0.4秒後が部分加圧開始タイミングと推測される。ゲート側については、エンドリング→ゲート→ランナの順に凝固し、ゲート凝固後の時点でゲート側のエンドリング内に液相は残存しないので、このランナゲート形状は適正であると推測される。試作鋳造では部分加圧開始を充填完了後0.3秒後と凝固が完了する1.0秒後に設定した。1.0秒後の部分加圧は3.1節で述べた、荷重を付加して塑性変形で引け巣欠陥を潰す効果を狙っている。

### 3.3 試作鋳造

試作鋳造では、まず各条件でN=3鋳造を行い、鋳造したロータのゲート側とゲートと反対側のエンドリングの軸方向の中心付近を端面に平行な方向に輪切りし、目視で欠陥の有無を確認した。欠陥のない良好な条件について連続で鋳造を行い、全数をX線で検査した。

輪切りしたエンドリングの切断面を鋳造条件ごとに表1に示す。どれもゲート側のエンドリング切断面に気泡欠陥や引け巣欠陥は見られなかった。ゲートと反対側のエンドリングは、部分加圧開始時間を充填完了後1.0秒後としたものについて引け巣欠陥が存在し、凝固後に塑性変形によって潰す引け巣欠陥の大きさに限界があることが判明した。部分加圧時はエンドリングの上面から荷重が負荷され

表1. 試作鋳造ロータのエンドリング切断面

充填速度	0.10m/s	0.20m/s	0.20m/s
部分加圧開始時間 (充填完了後)	0.3秒後	0.3秒後	1.0秒後
ゲート側			
ゲート反対側			

○ 鋳造欠陥

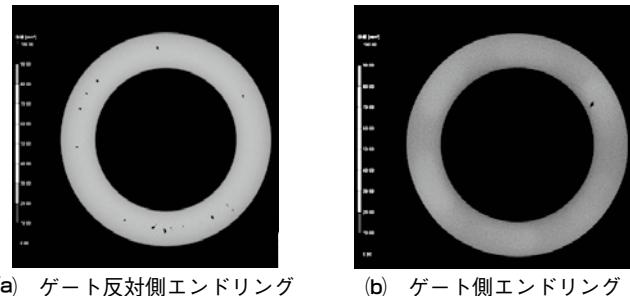


図5. 連続試作鋳造ロータのX線CT画像例

るが、側面は金型、底面は鉄心コアによって拘束されているために、塑性流動が起きにくかったと推測される。充填速度の違いによる鋳造品質の差は見られなかった。連続鋳造は充填速度を0.20m/sに、部分加圧開始時間を充填完了0.3秒後に固定して実施した。なお充填速度についてはN=3の試作鋳造品質に違いが見られなかったことから、比較的安定した速度で射出できる0.20m/sに設定した。N=15連続試作鋳造ロータのX線CT画像例を図5に示す。エンドリングの内部に見える黒い斑点が欠陥である。どのロータでも欠陥サイズについては目標とした高速主軸モータ適用規格内であった。なおスロットバー内部は無欠陥であることを確認している。

### 4. むすび

高速主軸モータ用としてエンドリング内の欠陥サイズが厳しく規定されているロータの製造に当たり、上下方向に型締めし、下方から上方に射出するスクイズキャストマシンを使用し、低速で溶湯を金型内に充填し、ゲートと反対側のエンドリングを部分加圧する方法で鋳造した。ゲート方案設計及び充填速度と部分加圧開始時間はCAE鋳造解析を用いて適正な案を推測した。その結果、低欠陥ロータを安定して連続で鋳造することを可能にした。

# 欧洲鉄道の溶接規格認証制度と対応事例

山田景太\* 中野裕大\*\*  
山口 博\* 芳村晃一\*\*\*  
久保圭祐\*\*

European Railway Welding Standard Certification System and Case Examples

Keita Yamada, Hiroshi Yamaguchi, Keisuke Kubo, Yudai Nakano, Koichi Yoshimura

## 要旨

溶接はISO 9000では“特殊工程”と定義されている。特殊工程とは、施工後の検査で容易に良否の判断ができない工程であり、ほかにも塗装、めっき、接着、ろう付け、はんだ付け、熱処理、鋳造・鍛造などがある。これら特殊工程では品質保証のために、顧客の要求品質に対して、プロセスの妥当性を確認して、製造条件が正しいことを証明する必要がある。特に溶接は、内部欠陥や金属組織や成分が長期信頼性に影響を及ぼすことから、施工管理技術として品質保証のための種々の国際規格が発行されており、どの規格で保証していくかを事前に顧客と取り決めて、受注・生産することがある。しかし、それらの規格には、工場認証、溶接作業員の認証、溶接部の形状ごとの作業手順

書と溶接サンプルの整備と認証、加えて、国際溶接技術者 (International Welding Engineer : IWE) 等の有資格者の対応が必須であるなど、エンジニアリングチェーンとサプライチェーンを含めた事業全体の課題としての取組みが要求されている。

今回、三菱電機の鉄道車両用空調事業で、欧洲鉄道の溶接品質管理規格EN 15085の認証を取得する一連の活動が結実した。この事例を基に、溶接規格認証について体系的に述べることで、生産技術者だけでなく、営業、設計、品質管理、工作、経営層の人々にも、溶接規格認証の重要性を広く周知することを目指す。

ISO 9000の初版では溶接は熱処理とともに  
代表的な“特殊工程”と位置付けられた

- 特殊工程での要求事項(ISO 9001の7.5.2項)
- ①プロセスのレビュー及び承認のための明確な基準
  - ②設備の承認及び要員の適格性確認
  - ③所定の方法及び手順の適用
  - ④記録に関する要求事項
  - ⑤妥当性の再確認



## 特殊工程での溶接の品質要求事項

### 欧洲規格EN 15085の構成

EN 15085	内容
Part1 General 総則	規格の適用範囲 用語と定義
Part2 Quality requirements and certification of welding 溶接品質要求事項と製造事業者認証	溶接士及び溶接オペレータの認定(EN 287-1, ISO 9606-2, EN 1418) 溶接管理技術者の業務と責任(ISO 14731) 非破壊検査要員の資格と認定(EN 1418) 溶接施工法の確認試験(ISO 15613, ISO 15614), 製造事業者認証(ISO 3834)
Part3 Design requirements 設計要求事項	鉄道車両軸体の構造上の要求事項(EN 12663) 溶接欠陥の品質レベル(ISO 5817, ISO 10042) 母材と溶接材料の選定(ISO 15608), 溶接継手設計(ISO 9692)
Part4 Production requirements 生産要求事項	溶接前の準備(ISO 15609-5, ISO 14555, ISO 15620) 溶接に対する要求事項 溶接に対する特別要求事項
Part5 Inspection, testing and documentation 試験、検査及び文書化	溶接前、溶接中、溶接後の試験と検査(EN 437) 文書化、トレーサビリティ(ISO 3834, EN 10204) 不適合及び是正処置

WPS : Welding Procedure Specification

### 特殊工程としての溶接の品質要求事項

溶接は、その品質管理の困難さと構造物に必要不可欠な技術としての重要性から、ISOで体系的に規格化されている。また、欧洲規格では、鉄道車両とその構成物の溶接品質管理について、EN 15085に要求事項が規格化されている。

## 1. まえがき

三菱電機は交通システム事業をグローバルに展開するため、鉄道用の空調装置や主変圧器で国際鉄道産業標準規格 (International Railway Industry Standard : IRIS) の認証を取得している。IRISはISO 9001に基づいた、鉄道特有の要求事項を追加したマネジメントシステム規格であり、鉄道業界でのサプライヤーの承認要件として広く認識され、交通システム事業として欧州市場へ参入するためには、取得が推奨される規格である。

一方、鉄道関連の溶接構造物の品質管理について、欧州顧客からはEN 15085(Railway applications—Welding of railway vehicles and components)への準拠を要求される商談が近年増加していることから、三菱電機でも、鉄道車両用空調装置の溶接筐体(きょうたい)について取り組み、規格認証が完了した。EN 15085の認証は、IWE等の人材確保、作業者の育成、調達先の管理・監査に始まり、場合によって設計上の制約や設備投資が発生するなど、事業全体の課題として取り組むべき内容となっている。

本稿では鉄道車両及びその部品の溶接に係わるEN 15085規格の概要と、三菱電機の鉄道車両用空調装置での対応事例について述べ、生産技術者だけでなく、営業、設計、品質管理、工作、経営層の人々にも、溶接規格認証の重要性について広く周知することを目指す。

## 2. 溶接関連規格

### 2.1 ISO 3834

溶接は、ISO 9000の初版(1987年版)で熱処理とともに代表的な“特殊工程”と定義されたが、その施工結果が、後工程の検査や試験で、製品として要求された品質基準を満たすかどうかを、十分に検証することが難しい。よって、品質保証を確かなものにするため、ISO 9001“品質マネジメントシステム-要求事項”では、そのプロセスの妥当性確認を要求している。ISOでは溶接プロセスに対し、この妥当性確認に対応させたISO 3834“溶接の品質要求事項”が規格化されており、製造事業者が溶接に関して守るべき要求事項が記載されて

いる。この規格に基づいた特殊工程での溶接の品質要求事項を図1に示す<sup>(1)</sup>。近年、ISO 3834に基づく製造事業者認証を取得する動きが世界的に広がり、欧州市場でも溶接構造物の製造又はその製造物を流通させようとする際には、ISO 3834に基づく品質マネジメントが強く求められている<sup>(2)</sup>。

### 2.2 欧州規格EN 15085

EN 15085は、鉄道車両及び関連機器や部品の製造、修理を行う溶接に対して設計、製造、検査などの包括的 requirement をまとめた規格である。欧州では鉄道システムに関わる溶接構造物を製造する上で順守すべき規格となっている。この規格はPart 1～5の5部構成となっており、関連する規格と合わせて表1に示す。

#### Part 1 総則

規格の適用範囲、用語の定義、一般要求事項について定められている。

#### Part 2 溶接品質要求事項と製造事業者認証

製造事業者として溶接の品質を確保するために必要な人員、溶接作業環境、IWE等を含めた組織体制、溶接施工要領などの要求事項や製造事業者認証での要件と、認証取得後の当該規格の有効期限について定められている。また、製造事業者認証では溶接工程の一般要求事項としてISO 3834の品質要求も満足する必要がある。

#### Part 3 設計要求事項

継手強度設計、応力係数によって決められる応力区分、継手損傷による人的、環境への影響を考慮した安全区分、応力区分と安全区分に応じて決まる溶接パフォーマンスクラスと溶接検査クラスについて定められている。

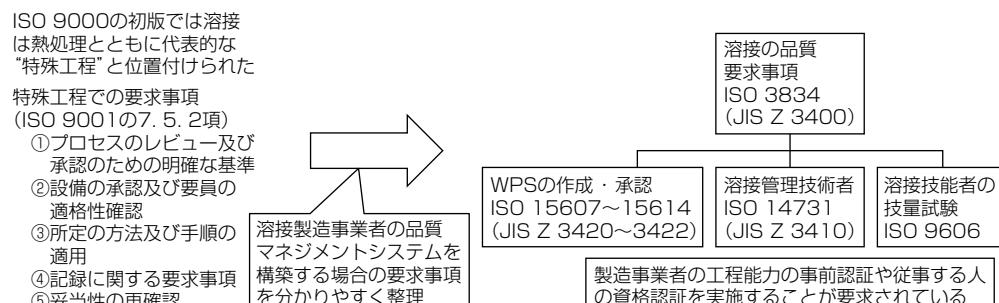


図1. 特殊工程での溶接の品質要求事項

表1. 欧州規格EN 15085の構成と関連規格

EN 15085	内容
Part 1 General 総則	規格の適用範囲 用語と定義
Part 2 Quality requirements and certification of welding 溶接品質要求事項と製造事業者認証	溶接士及び溶接オペレータの認定(EN 287-1, ISO 9606-2, EN 1418) 溶接管理技術者の業務と責任(ISO 14731) 非破壊検査要員の資格と認定(EN 1418) 溶接施工法の確認試験(ISO 15613, ISO 15614), 製造事業者認証(ISO 3834)
Part 3 Design requirements 設計要求事項	鉄道車両軸体の構造上の要求事項(EN 12663) 溶接欠陥の品質レベル(ISO 5817, ISO 10042) 母材と溶接材料の選定(ISO 15608), 溶接継手設計(ISO 9692)
Part 4 Production requirements 生産要求事項	溶接前の準備(ISO 15609-5, ISO 14555, ISO 15620) 溶接に対する要求事項 溶接溶接に対する特別要求事項
Part 5 Inspection, testing and documentation 試験、検査及び文書化	溶接前、溶接中、溶接後の試験と検査(EN 437) 文書化、トレーサビリティ(ISO 3834, EN 10204) 不適合及び是正処置

#### Part 4 生産要求事項

溶接製造に関わる計画文書、溶接施工要領、製造前試験、溶接時の要求事項や製品メンテナンスでの溶接の要求事項について定められている。

#### Part 5 試験、検査及び文書化

溶接前、溶接中、溶接後に実施すべき検査試験と検査基準や不適合品の管理、顧客の仕様要件を証明する適合宣言の作成、生産履歴管理について定められている。

### 3. 鉄道車両用空調装置での対応事例

三菱電機ではEN 15085が要求される欧州大手鉄道車両メーカーへ空調装置を納めてきた(図2)。ここでは関連するISO規格とともに溶接施工管理の主な項目について実例について述べる。

#### 3.1 製造事業者と溶接管理技術者の認証レベル

EN 15085-2で製造事業者にはレベル1から4まで四つの認証レベル(Certification Level : CL)が定められている。認証レベルによって溶接できる継手や製造できる部品が割り当てられており、CL1が最も高いクラスとなる。また、認証レベルに応じて、ISO 14731に従って関連する専門知識を持つ溶接管理技術者を在籍させなければならない<sup>(3)</sup>。溶接管理技術者にもLevel A, B, Cの3種類があり職務内容とその権限が区別されている。Level C, B, Aの順で要求される専門知識が高度となり、Level Aは包括的な専門知識を持つ。Level Aに認定される一つの条件として、国際溶接学会IIWが認定する国際溶接技術者(IWE)が溶接管理技術者(図3)となるよう定められている。三菱電機鉄道車両用空調装置の事例では、三菱電機で設計し、関係会社へ生産を委託して溶接作業を実施している。そのため、三菱電機と関係会社共に、IWEを複数名所属させており、設計だけの三菱電機はCL4、生産する関係会社はCL1の認証レベルを取得している。

#### 3.2 溶接士／オペレータの認証

空調装置筐体はアーク溶接、抵抗溶接で組み立てており、ISO 9606-1(Qualification testing of welders—Fusion welding—Part1 : Steels), ISO 14732(Welding personnel—Qualification testing of welding operators and

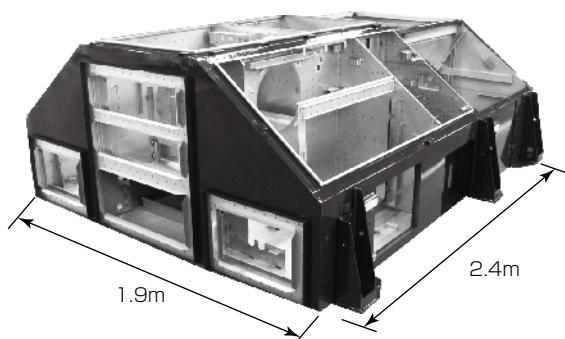


図2. 欧州向け空調装置筐体の事例

weld setters for mechanized and automatic welding of metallic materials)に準拠して認証機関から資格を取得している。溶接士認証では溶接作業姿勢も資格項目として挙げられており製品によっては同じ継手形状でも溶接姿勢が異なる場合、姿勢に応じた認定試験で資格を取得する必要がある。例えば、図4に示すようなT字継手で矢印の方向から溶接する場合には下向きや横向きなどの溶接姿勢での資格が必要となる。規格では溶接士／オペレータの有効期間が定められており、更新忘れを防止するためリストを作成して一元管理している。

#### 3.3 溶接施工要領書

筐体の各溶接部については、溶接法、材種、継手、板厚、溶接姿勢の違いに応じて溶接サンプルを作製し、外観検査と溶接断面の観察によって設定した溶接条件の妥当性を確認する必要がある。つまり、各溶接継手別に溶接施工要領書(Welding Procedure Specification : WPS)を作成し、ISO 15614(Specification and qualification of welding procedures for metallic materials—Welding procedure test)の溶接施工法認定試験を行い、認証機関による承認を受ける必要がある。また、ISO 15609(Specification and qualification of welding procedures for metallic materials—Welding procedure specification)に従い、必要な溶接条件を記載し、製造現場での運用を徹底しなければならない。溶接サンプルを顧客監査で提示することもあり、図5のようにラベル識別によって保管・管理している。

#### 3.4 溶接欠陥の品質レベルと検査

EN 15085-3で定められる溶接パフォーマンスクラスによって検査方法及び欠陥品質レベルが定められている。例えば、図2に示す筐体は目視検査だけであり、検査基準はISO 5817(Welding—Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)—Quality levels for imperfections)に従いClass Cを適用している。

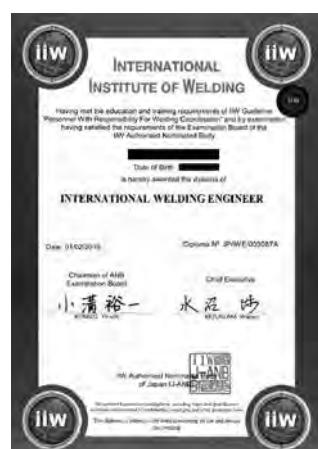


図3. IWEの認定証

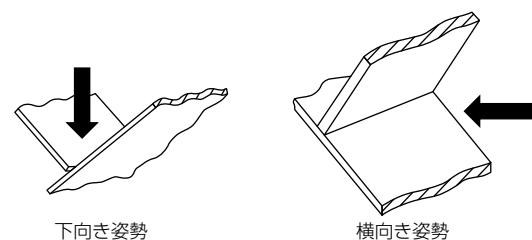


図4. T字継手の溶接姿勢



図5. 溶接サンプルの保管状態

表2. 継手の製造前溶接試験のサンプル例

継手種類	重ね継手	角継手
形状		
溶接姿勢	立向き上進	水平隅肉
裏当て	裏当て使用	裏当て使用
溶接断面のマクロ写真		

### 3.5 製造前溶接試験

ISO 15614溶接施工法認証試験に従って証明することができない特殊な継手やISO 9606溶接士の資格認証で決められていない継手に関しては、製造前溶接試験によって溶接品質を確認する必要がある。例えば、板厚が3mm以下の重ね継手や角継手などが挙げられ、ISO規格と同様に外観検査や溶接断面の観察によって溶接性を確認する必要がある(表2)。これら特殊な溶接継手の良否判定は、基本的に最も厳しい基準であるClass Bを適用することになっている。

### 3.6 溶接材料の選定

溶接施工法確認試験で選定した各種溶接材料が、各々の溶接継手の設計要求に適合しているかを確認する必要がある。製造現場では溶接図面に指定された溶接材料の使用を徹底させ、トレーサビリティの観点から溶接後には自主検査シートに溶接材料の製造番号を控える必要がある。三菱電機では顧客の要求もあり、DB certificationに準拠した溶接材料を使用している。図6は、TIG(タンゲステン不活性ガス)溶接材料のDB certificationの一例である。

### 3.7 溶接継手リスト

筐体組立てに関わる全溶接継手に対して、溶接後の検査方法、溶接パフォーマンスクラス、検査クラス、対応するWPSを整理した継手リストを作成すると便利である。溶接管理技術者は製造に関わる部門とのデザインレビューで、

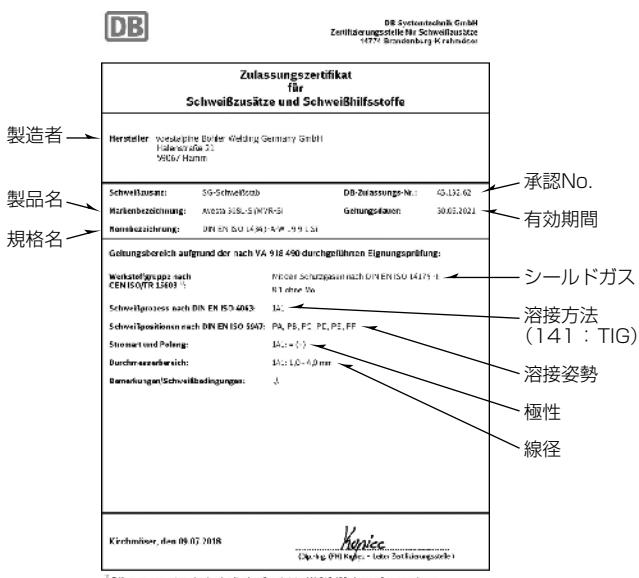


図6. DB Certification (TIG溶接材料の一例) (4)

現状で持っている認定資格(溶接士、検査員)、設備、溶接施工要領などを考慮して製品を作り上げができるかを十分に検討する必要があるため、認定不足分を見える化するために継手リストは非常に有効である。

## 4. むすび

鉄道車両及び関連部品の溶接に関する欧州規格EN 15085の構成と内容について、溶接施工管理の観点から対応事例を交えて述べた。溶接は特殊工程であるがゆえ、品質を確保するためには、人員や設備、製造プロセスの管理が非常に重要になってくる。EN 15085に従って設計、製造、検査することで製品の溶接部に要求される品質基準を満たすことができるが、溶接士認定や施工法承認には時間と費用を要する。溶接管理技術者は可能な限り、溶接個所、継手種類を少なくするよう設計部門と検討し、溶接要員、設備などの維持・管理を最小限にとどめ、必要な品質を確保しつつ、常に生産性の向上を図るように努めるべきであると考える。

## 参考文献

- 1) 社団法人溶接学会：新版 溶接・接合技術特論、産報出版(株) (2010)
- 2) 細井宏一：第1回 国際標準としてのQMS「ISO 3834」、産報出版(株)、溶接技術、62, No.7, 118~122 (2014)
- 3) BS EN 15085-2: 2007: Railway applications—Welding of railway vehicles and components—Part 2: Quality requirements and certification of welding manufacturer (2007)
- 4) ONLINE-REGISTER EN 15085  
<https://www.en15085.net/zws/files/43.132.62.pdf>

# 海外のモノづくり支援を意識した技能強化への取組み

野田秀夫\*

Effort to Strengthen Skill Conscious of Overseas Manufacturing Support

Hideo Noda

## 要旨

事業競争力の強化及び事業規模の拡大に向けて、生産拠点のグローバル化が進む一方、海外生産拠点への技能の伝承と維持が課題となってきた。三菱電機では、国内外生産拠点の技能者を一段高い技能レベルへと誘導し、生産作業現場を主体とした製造改善風土のグローバル規模での構築を狙っている。これを受け、モノづくり・生産技術をけん引する組織である当社生産技術センターが中心となり、海外でのモノづくり支援を意識した技能強化に取り組んでいる。

生産技術センターでは、海外のモノづくり支援を意識して次の二つの技能強化活動を実施している。

## (1) 外部技能交流“黒帯対決”

難易度の高い加工テーマに対し、若手技能者が加工方法

を自ら考えて加工し、プロセスと結果を組織の壁を越えて比較することによって、お互いの技能を高め合う活動である。

## (2) 技能教育プログラム“からくりチャレンジ道場”

日本古来のからくり人形などに利用されている原理を理解し、LEGO<sup>(注1)</sup>モデル等で再現する手法を学び、作業現場改善に展開できる“からくりキーマン”を育成する活動である。

これらの技能強化活動によって、生産技術センターと国内生産拠点の若手技能者の育成と技能の底上げを図るとともに、モノづくり力強化の仕組みを構築した。今後、この仕組みを海外生産拠点に展開し、グローバルに強いモノづくりを実現していく。

(注1) LEGOは、LEGO JURIS A/Sの登録商標である。



	挑戦者A(製作所技能者)	挑戦者B(生産技術センター技能者)
加工コンセプト	夜間無人運転を活用するためにワンチャッキングで加工	加工時間と工具費用の削減
加工機	5軸制御立型マシニングセンタ ほか	3軸制御立型マシニングセンタ
加工工具	各種エンドミル(超硬)	各種エンドミル(ハイス鋼、超硬)
寸法公差	規格内	規格内
結果	工具振動むら	なし
加工時間	10時間33分	6時間25分
メリット	ほとんどの加工を連続でできる (生産効率が良い)	①加工時間が短い ②工具費を1/2に削減できる
デメリット	加工時間が長い	チャッキング回数が多い
工夫した点	①5軸制御マシニングセンタの採用によってワンチャッキング化を実現 ②側面を両面均等に上向き削りで加工することによって加工歪を抑制	①粗加工量を増やして加工時間を短縮 ②不等ピッチエンドミルを使用して仕上げ加工時のびりを抑制
失敗例	加工時の振みしろを少なく設定したため、切削負荷が制限されて加工時間が長くなつた	SUS材の加工条件不適切による工具破損(経験不足)

## 外部技能交流(黒帯対決)の事例



## 技能教育プログラム(からくりチャレンジ道場)の狙い

SUS : Steel Use Stainless

## 外部技能交流“黒帯対決”と技能教育プログラム“からくりチャレンジ道場”

上図に示す外部技能交流(黒帯対決)の事例では、薄肉加工部品の側壁の機械加工をいかに精度良く短時間で加工できるかを競う。ただし、勝敗にこだわるのではなく、加工レシピ、工夫した点、失敗例をお互いに考察することで、新たな知見を得ることができる。技能教育プログラム(からくりチャレンジ道場)は、下図に示すように、からくり機構を応用したLEGOモデルの試作で学んだことを実用モデルに展開できるからくりキーマンの育成を狙いとしている。

## 1. まえがき

事業競争力の強化及び事業規模の拡大に向け、生産拠点のグローバル化が進む一方、海外生産拠点の製造力強化に向けた技能の伝承と維持が課題となってきた。そのためには、モノづくり力を徹底的に強化する仕組みを確立した上で、海外生産拠点に改善活動を展開し、底上げと自立化させることが重要になってくる。

当社では、生産技術センターに、モノづくり力をベースとした開発試作と製造改善支援をミッションとした製造支援部を設置し、自らの技能力を高めるとともに、生産拠点の技能者を対象として、独自の人材育成を実施している。こうした活動を通じて、技能を一段高いレベルに誘導するとともに、現場での改善風土を定着させ、海外生産拠点への改善風土展開を促進している。

本稿では、技能対決を通してお互いの技能を高め合う組織の壁を越えた外部技能交流(黒帯対決)と、からくり機構の理解と、実用モデル検討を通して現状の問題点を自ら解決する手法を学ぶ技能教育プログラム(からくりチャレンジ道場)について述べる。

## 2. 外部技能交流(黒帯対決)

2015年から、製造リードタイム短縮を妨げる要因となっている難易度の高い加工部品と工程をテーマとして取り上げ、製作所の若手技能者と生産技術センターの若手技能者が、それぞれ自ら加工レシピを考え、作業時間短縮と品質改善を競い合う技能交流を社内では黒帯対決と名付けて実施している。この対決の狙いは、勝敗にこだわるのではなく、加工レシピを比較し合い、そこから得られた考察で、お互いの知見と技能を高めることにある。加えて、失敗事例も共有することで知見を更に深めることもできる。

### 2.1 新たな技能強化スキームの具体化

活動の取り掛かりとして、生産技術センターでは生産拠点である国内の当社製作所で生産中の図1に示すフープ状薄肉アルミ部品の加工時間の短縮にトライした。この部品はブロック材から加工する。現状は、板厚が0.24mmと薄い上、段差と変形があってはならないため、外力を使わずに加工部品を分離できるワイヤ放電加工で製作されている

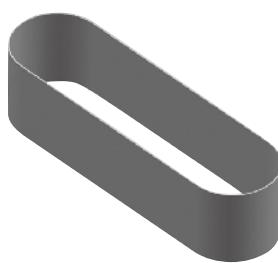


図1. フープ状薄肉アルミ部品

材質：アルミ  
外寸：60×20×20mm  
板厚：0.24mm  
寸法公差±0.06mm  
要求品質：加工面に段差がないこと

が、段取りを含めた加工時間が約4時間と長く、生産性を著しく低下させている。

これに対し、生産技術センターではマシニング加工だけによる加工時間短縮にトライした。加工手順を次に述べる。まず、素材をバイスにチャッキング後、図2に示すように外側粗加工と内側仕上げ加工を実施する。次に、図3に示す中子(別途製作)を内側に挿入し、図4に示すように外側仕上げ加工を実施する。次に、図5に示すようにTスロットカッターで切断加工する。最後に中子を取り外して完成する(図6)。

この加工で工夫した点は、①内側仕上げ加工寸法に合わせた中子外側寸法とすることで、外側仕上げ加工時の歪(ゆが)みを抑制、②図7に示すように中子を製品高さより高くし、Tスロットカッターで製品と中子の表層部を同時に切断することで切断加工時の歪みを抑制、③ワンチャックで加工できる手順として寸法精度を確保の3点である。

この加工方法で、段取りを含めた加工時間が約1時間となり、現状の1/4に短縮することが可能になった。

この取組みで、製作所の現状の加工作業に対する、生産技術センターの技能者からの作業改善提案を通じた全社技能強化への取組みスキームを具体化し、製作所から理解・賛同を得ることができ、以後の活動拡大につなげた。なお、この考案の加工法は2016年兵庫県職域での創意工夫賞を受賞し、社外から高い評価を受けている。



図2. 外面粗加工と内面仕上げ加工



図3. 中子形状



図4. 外面仕上げ加工



図5. 切断加工



図6. 完成品

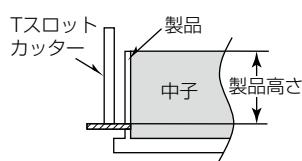


図7. 切断方法

## 2.2 黒帯対決の事例

製作所の技能者と生産技術センターの技能者とで、図8に示す課題を取り決めて、加工時間と品質を競う黒帯対決を行った。課題は、ブロック材からの加工であるが、この課題で難しい点は、難削材のSUSを薄肉・深彫り加工するところである。加工時の工具振動むら発生、工具の破損、チャック方法等、考慮すべき点が多くて対決課題として適している。

表1に両者の対決結果を示す。製作所技能者は、夜間無人運転を前提にして、ワンチャッキングで加工可能な5軸制御のマシニングセンタを選定している。工具振動むらが発生しやすい側壁の加工については、外面と内面の削り量を均等にし、下から上向きに加工することで工具の振動を抑制している。これに対し、生産技術センター技能者は粗加工量を増やし、トータル加工時間を削減し、粗加工用のエンドミルの材質をハイス鋼にすることによって工具費用の削減を狙った。仕上げ加工時に発生するびびりについては、不等ピッチエンドミル(四つの刃の取付けピッチを不均一にすることで固有振動の発生を抑制するもの)を使用することによって抑制した。

このように同じ製品形状でも異なった加工コンセプトが提案され、これらをお互いに考察してディスカッションすることによって、新たな知見を得ることができた。

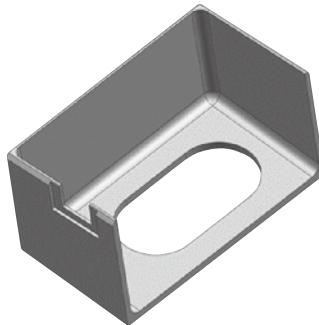


図8. 黒帯対決の課題

表1. 対決結果

	挑戦者A(製作所技能者)	挑戦者B(生産技術センター技能者)
加工コンセプト	夜間無人運転を活用するためにワンチャッキングで加工	加工時間と工具費用の削減
加工機	5軸制御立型マシニングセンタほか	3軸制御立型マシニングセンタ
加工工具	各種エンドミル(超硬)	各種エンドミル(ハイス鋼、超硬)
結果	寸法公差 規格内	規格内
工具振動むら	なし	なし
加工時間	10時間33分	6時間25分
メリット	ほとんどの加工を連続でできる (生産効率が良い)	①加工時間が短い ②工具費を1/2に削減できる
デメリット	加工時間が長い	チャッキング回数が多い
工夫した点	①5軸制御マシニングセンタの採用によってワンチャッキング化を実現 ②側面を両面均等に上向き削りで加工することによって加工歪を抑制	①粗加工量を増やして加工時間を短縮 ②不等ピッチエンドミルを使用して仕上げ加工時のびびりを抑制
失敗例	加工時の掘みしろを少なく設定したため、切削負荷が制限されて加工時間が長くなった	SUS材の加工条件不適切による工具破損(経験不足)

## 2.3 外部技能交流の展開

外部技能交流は毎年2件の頻度で継続しており、生産技術センターと対決相手のWin-Winの関係を重視した技能の底上げを今後も継続する。また、生産技術センターの技能者では、海外生産拠点でのモノづくり支援を視野に、こうした取組みを活用しつつ若手技能者の育成と増強を図る。

## 3. 技能教育プログラム(からくりチャレンジ道場)

### 3.1 からくり改善活動

生産技術センターは、製造現場の改善活動の新たな切り口として全生産拠点の技能者によるからくり改善<sup>(注2)</sup>活動を推進している。からくり改善活動とは、自らの作業場に潜むやりにくい作業や困っている作業を日本古来のからくり人形に利用されているメカニズム(てこ、カム、クラシク、ギヤ、リンク等)を用い、自らのアイデアで解決する改善活動である。改善によって得られる効果として、作業現場では、ワークが重い、出し入れが面倒、うまく組めない等の悩みが改善される。また、モチベーションが向上して活性化するとともに改善意識が高まることが挙げられ、工場全体としては、作業安全性の確保、品質向上、生産性向上、省エネルギー化、設備投資の抑制などの効果が挙げられる。

からくり改善活動はまず課題を選定するところから始まるが、①簡単に改善できそうな課題を選定する、②本当に困っている課題を選定する、③改善効果が大きそうな課題を選定するの3点がポイントとなる。次に構想から具体案を決め、設計～組立て調整に取り掛かるが、単純なメカニズム、低コストそして省エネルギーであることを意識しながら進める。

(注2) からくり改善は、公益社団法人 日本プラントメンテナンス協会の登録商標である。

### 3.2 からくりチャレンジ道場

からくり改善活動を全社規模で活性化させるために、生産技術センターが主導して、2016年から各生産拠点の技能者を対象に、からくりチャレンジ道場と名付けた技能教育プログラムを定期的に開催している。2018年度までに20回を超えるからくりチャレンジ道場を開催し、当社グループ全体で約400名のからくりキーマンを育成している。からくりチャレンジ道場は、①からくり事例研究、②からくり基本機構の学習、③LEGOを使用したモデル試作の三つのカリキュラムで構成されている。これらを1.5日で実施し、からくりの基礎を習得した後に、からくりキーマンとして各生産拠点での作業改善の中心

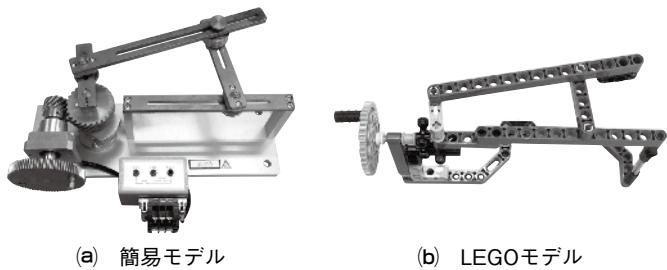


図9. リンク機構の再現

的役割を担う。次に各カリキュラムについて述べる。

### 3.2.1 からくり事例研究

初心者への取り掛かりとして、まず社内で先行しているからくり事例をビデオで紹介し、次に紹介事例に用いられている機構をアニメーションで解説する。ビデオだけでは理解しにくいからくりをアニメーションで解説することによって、機構をイメージしやすくなる。そして最後に、実物のからくりモジュールに触れ、体験を通じて機構を理解する。機構をイメージした後に、実物の動作を確認する一連の流れで理解を更に深めることができる。

### 3.2.2 からくり基本機構の学習

からくりに興味を持った後は、座学で①てこの基本原理、②リンク機構の基本、③斜面の力、④滑車・輪軸の基本原理、⑤カムの基本原理、⑥歯車の基本原理、⑦ゼネバストップの基本原理、⑧ベルトロープ・チェーンの基本原理の八つのからくり基本原理を理解し、簡易モデルで動作を再現させる学習を実施する。

次に、簡易モデル(図9(a))に実際に触れ、動作を確認した後に、LEGOモデル(図9(b))を使用して動作を再現させる。

### 3.2.3 LEGOを使用したモデル試作

最後のカリキュラムは集大成として、与えられた製作課題に対し受講者がグループを編成し、これまでに学習したことをベースに、独自のアイデアでからくり基本機構を駆使してモデルを製作する。モデル製作にはLEGOを使用し、機能の追加は自由とする。

図10は受講者グループによって製作された、一定の高さに昇降する機能を持った台車モデルの例を示す。四つのグループによって、それぞれ異なる機構を使用した台車モデルが製作された。製作したモデルのコンセプトと機構については各グループから紹介され、講師のコメントを交えグループ間でディスカッションを行う。一つの課題に対し、方策は複数存在することがこのカリキュラムの特長であり、それぞれの設計コンセプトを評価し合うことで、新たな知見が得られるとともにモチベーションを高めることができる。

最終的には、全受講者が図11に示すようにLEGOモ

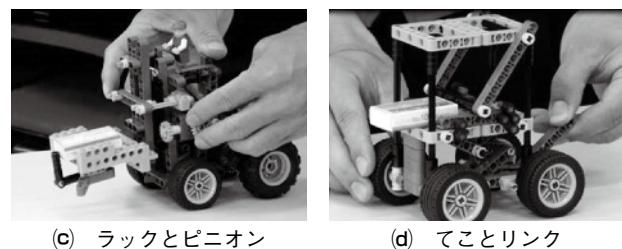
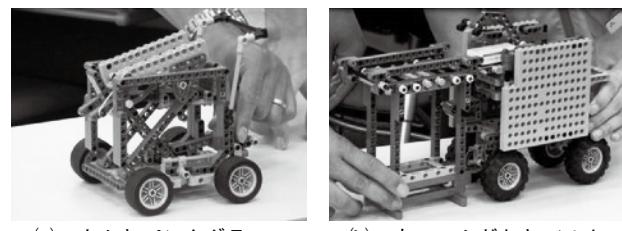


図10. 受講者グループによる昇降機能付き台車モデルの製作例

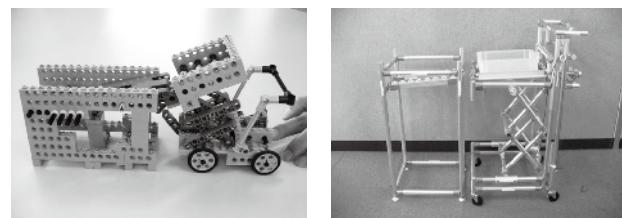


図11. LEGOモデルから実用モデルへの展開

ルで学習したことを実用モデルに展開できるようになり、各生産拠点の作業現場改善のキーマンとして活躍している。

### 3.3 技能教育プログラムの展開

先に述べたからくりチャレンジ道場以外に、並行して講師が拠点に出張する形態の、からくり出張講座も開催している。まずは国内の生産拠点を中心に開催しているが、グローバル対応として海外生産拠点への展開も開始しており、2019年度中に中国の生産拠点を対象に、からくり出張講座を開催する計画である。

## 4. むすび

今後、更に激化するグローバル競争の中で、海外生産拠点でのモノづくり力が優れているということは大きなアドバンテージとなる。そのためにはまず、国内生産拠点を対象として、モノづくりに関わる若手技能者を確実に育て上げていくことが重要である。ベテランからの技能を伝承しつつ、新たに技能者間の交流を促進することによって技能の底上げを図る。国内で築き上げたモノづくり力強化の仕組みは、それぞれの地域性や工場インフラへの適合を重視しつつ海外生産拠点への展開を推進し、グローバルに強いモノづくりを実現していく。

# かしめ工法によるヒートシンク一体型 高放熱パワーモジュール

中島 泰\* 木村 亨\*\*  
三田泰之\* 北井清文\*\*  
芳原弘之\*

Heat Sink Integrated High Heat Dissipation Power Module by Crimping Method

Dai Nakajima, Yasuyuki Sanda, Hiroyuki Yoshihara, Toru Kimura, Kiyofumi Kitai

## 要 旨

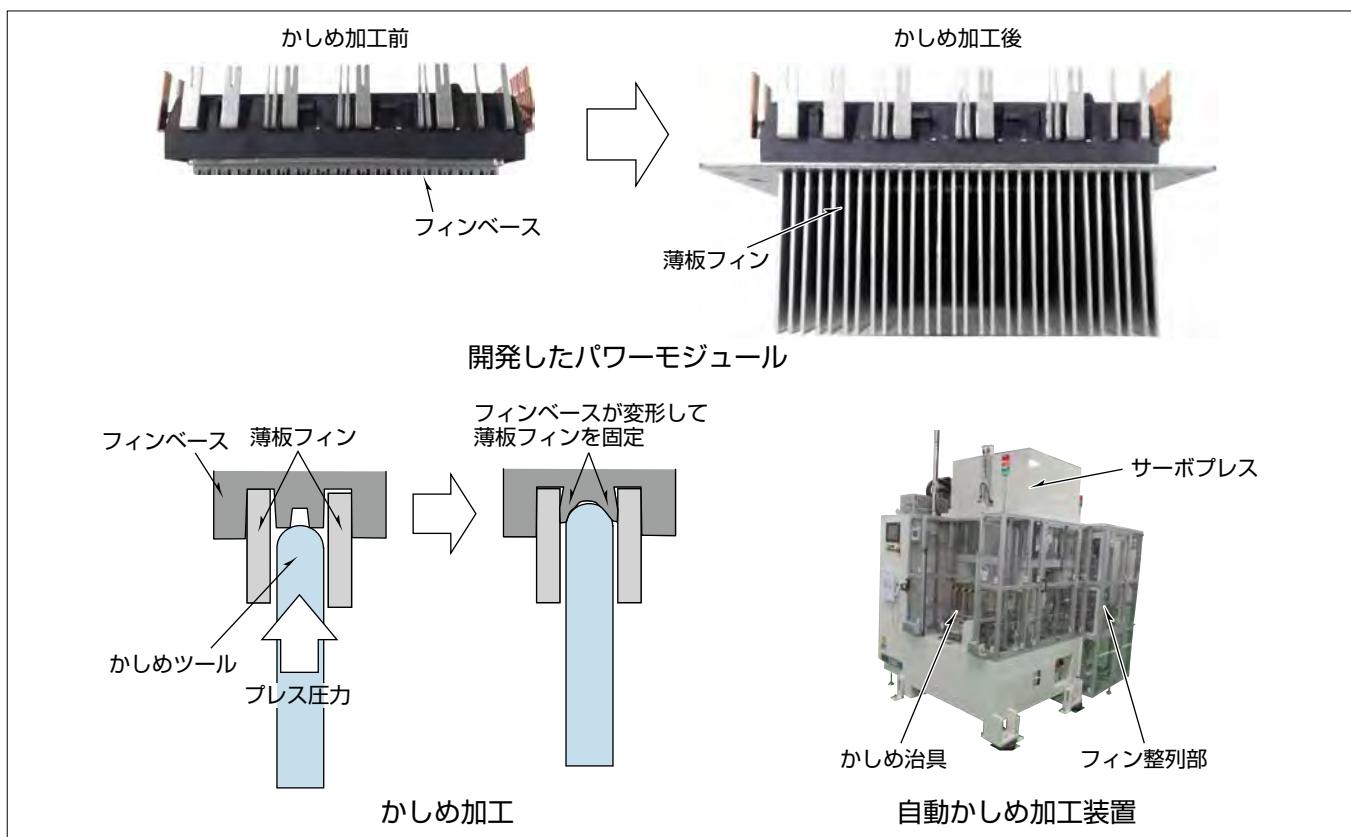
パワーモジュールは、家電製品、産業用機器、輸送機関などの幅広い分野で用いられている電力変換を行う半導体製品である。省エネルギーや再生可能エネルギー利用の増大、車両の電動化などの流れによって需要が拡大している。

一般的にパワーモジュールは動作時に発熱するため、ヒートシンクと組み合わせて使用されている。パワーモジュールの底面とヒートシンクの受熱面間には熱伝導グリスが用いられるが、熱伝導グリスの熱伝導率は  $1 \sim 5 \text{ W/mK}$  のものが主流であり、パワーモジュールやヒートシンクの構成材料であるCu(銅)やAl(アルミニウム)の $200 \sim 400 \text{ W/mK}$  の熱伝導率に比べて熱伝導率が非常に小さいため、放熱性能を向上させる上での阻害要因の一つとなっている。

今回、産業用機器向けパワーモジュールの放熱性向上と

小型化を目的に、パワーモジュール底面に設けたフィンベースの凹凸部に薄板フィンをかしめ加工によって一体化してヒートシンク部を構成した新たな放熱技術、複数の薄板フィンを一括でかしめ加工する自動機、かしめ加工時の応力低減効果が得られるトランスファモールド封止構造を開発した。

開発したヒートシンク一体型のパワーモジュールは、熱伝導グリスを用いた構造に対して、熱抵抗 $0.16 \text{ K/W}$ と高い放熱性が得られ、容積が0.56倍と高出力密度化を達成した。このパワーモジュールは三菱電機汎用インバータ“A800シリーズ”の $1.5 \sim 7.5 \text{ kW}$ 機種に適用されている。今後更なる適用の拡大を図る。



## 開発したパワーモジュールとかしめ加工及び自動かしめ加工装置

放熱性向上させることを目的として、モジュール底面のフィンベース部に薄板フィンをかしめ加工によって一体化するモジュール構造を開発した。複数枚の薄板フィンを一枚ずつ整列した後に一括で所定の位置にセットし、加圧してかしめ加工する専用の自動かしめ加工装置を開発して量産に適用した。

## 1. まえがき

パワーモジュールは家電製品、産業用機器、輸送機関などの幅広い分野で用いられている電力変換を行う半導体製品であり、複数のパワー半導体素子を通電・放熱・絶縁などの機能を持たせて一体化したものである。省エネルギーや再生可能エネルギー利用の増大、車両の電動化などの流れによって需要が拡大している。産業用機器では、工場で用いられるACサーボモータやロボットを始め、ファンやポンプなど多くの機器に適用されている。

従来のパワーモジュールでは放熱面とヒートシンクの受熱面の接触面間の隙間が放熱の妨げとなることを抑制するために、熱伝導グリスを介在させていた。ここで熱伝導グリスの熱伝導率は1～5 W/mK程度であり、パワーモジュールやヒートシンクの主要な放熱用の構成材料であるCu(約400W/mK)やAl(約200W/mK)に比べて熱伝導率が小さいため、放熱性能を向上させるまでの阻害要因の一つとなっている。また温度変化が繰り返されるとポンピングアウトと呼ばれる熱伝導グリスの排斥現象が起きて放熱性が低下するという課題がある<sup>(1)</sup>。

自動車用パワーモジュールでは、これらの課題を解決して高出力密度化を実現するために、熱伝導グリスを介さず水冷型ヒートシンクとパワーモジュールを一体化した製品が実用化されている<sup>(2)(3)</sup>。産業用機器では、一般的に冷却には自然空冷方式又は強制空冷方式が用いられていることから、技術の横展開ができていなかった。今回、産業機器向けのパワーモジュールで、強制風冷型ヒートシンクを熱伝導グリスを用いずに一体化した製品を開発・量産化した。

## 2. ヒートシンク一体型パワーモジュールの構造

パワーモジュールの底面にヒートシンクを一体化した構造を開発するに当たり、ヒートシンクの構造を選定した。ダイカスト工法や押し出し工法で製造されたヒートシンクなどが通常用いられているが、より高放熱のヒートシンク構造としてかしめ工法によるヒートシンクがある。多数の薄板フィンを狭いピッチで配置できることが特長である。しかし、パワーモジュール製造工程でヒートシンクを一体化して搬送したり加工することは、生産設備が大型化し生産性を阻害する懸念があった。そこで、パワーモジュール底面に配置したフィンベース部を小型化し、パワーモジュールよりも前後の長さが大きい薄板フィンを用い、薄板フィンを囲うパネルとダクトを一体化することで、冷却風が流れる領域を制限して放熱性を向上させる構造にした。また、フィンベースに設けた凹凸部に薄板フィンをかしめ加工によって一体化することにした。開発したパワーモジュールの構造(以下“開発構造”という。)を図1に示す。

開発構造では薄板フィンとフィンベース間を接触によっ

て熱的に接続しているため、放熱上の妨げとなる接触熱抵抗が介在する。開発構造でこの影響を確認するため、削り出しで一体化したヒートシンクと、かしめ加工で薄板フィンを取り付けたヒートシンクを試作し、接触熱抵抗の影響を調査した。かしめ部の詳細な構造については3章で触れる。図2に試作したヒートシンクの熱抵抗の測定結果を示す。この例では8枚の40×40×1 (mm)の薄板フィンを一体化したヒートシンクを用いた。図のように削り出し一体型の熱抵抗1.00K/Wに対して、かしめ加工によって得られたヒートシンクの熱抵抗は1.02K/Wと微増することを確認した。放熱設計の観点ではこの2%の熱抵抗増大は十

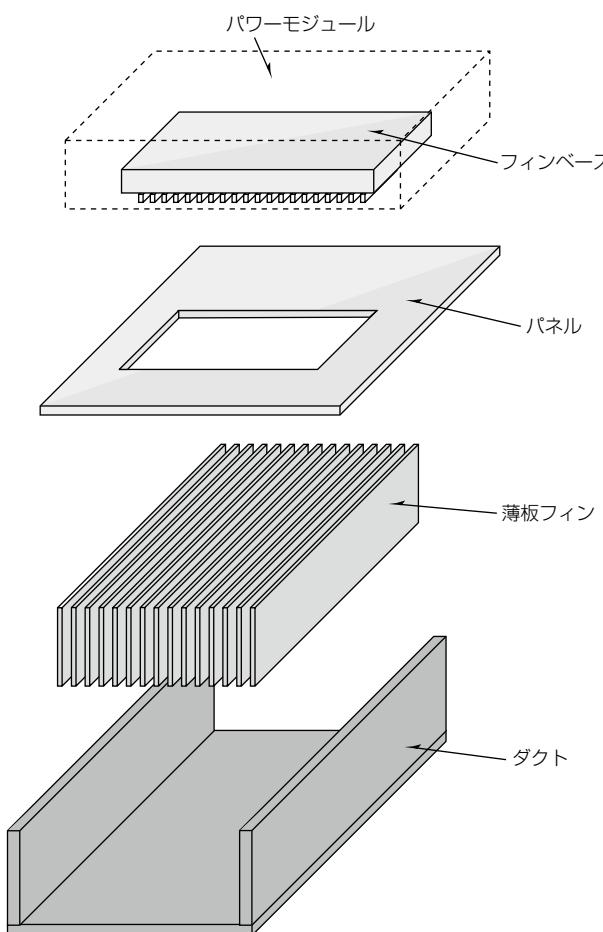


図1. パワーモジュールの構造

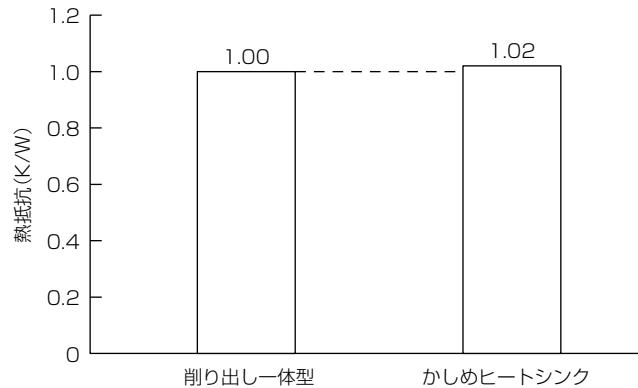


図2. 試作したヒートシンクの熱抵抗測定結果

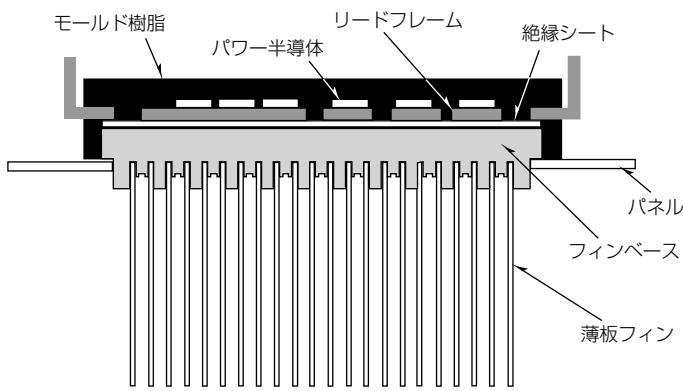


図3. パワーモジュールの断面構造

分許容可能であり、グリスを用いる構造よりも低熱抵抗化が可能であるため、この構造で開発を進めることにした。

かしめ工法をパワーモジュールに適用する場合、フィンベースを加圧したときの加圧力をパワーモジュールの上面が支える必要がある。今回の開発品ではパワーモジュールの構造として図3に示すようなトランスファモールド封止構造を適用した。当社の多くのパワーモジュールに用いられており、熱硬化性のモールド樹脂内にパワーモジュールの構造物を封入していることに特徴がある<sup>(4)</sup>。従来のパワーモジュール構造にはゲルが封入されている中空部分があったが、トランスファモールド構造の場合、中空部分がないため、かしめ加工の加圧力を上面全体で受け止めることができ、今回のかしめ工法に適している。

### 3. フィンかしめプロセス及び装置の開発

薄板フィンのかしめ加工には自動機を開発した。今回の開発品では厚み1mm、縦横41×97(mm)の薄板フィン30枚を所定の3.4mmピッチに整列した上で、モジュールの底面のフィンベースに設けられた凹凸部にかしめ加工する。装置の外観を図4に示す。薄板フィンをまとめてセットした状態から一枚ずつ取り出して整列台上に配置するフィン整列部、薄板フィンを一時的に保持する可動位置決め機構を持つかしめ治具、治具を加圧して、薄板フィンをモジュール底面のフィンベースの凹凸部に挿入し、次いでかしめ治具がモジュールの底面に押しあてて塑性変形させて加圧力を与えるサーボプレス機構から構成されている。

図5にかしめ加工前と加工後の断面図を示す。図5(a)に示すようにフィンベースにはかしめ部と垂直壁という2種類の凹凸部がある。薄板フィンを垂直壁とかしめ部の間の溝に挿入し、図5(b)のようにかしめ治具で加圧する。すなわち2枚の薄板フィンに対して1枚のかしめ治具でかしめ加工する。その結果、図5(c)のようにかしめ部が変形し、薄板フィンを垂直壁と変形したかしめ部で挟み込んだ状態で保持する。このような一連のプロセスによってかしめ加工が完了する。



図4. 自動かしめ加工装置

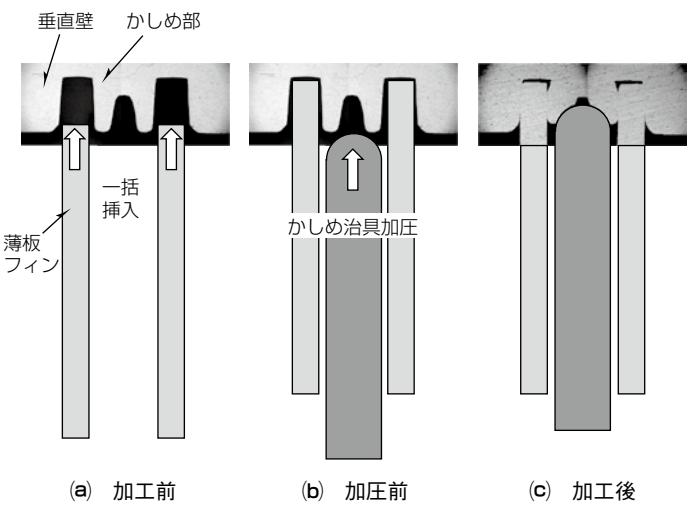


図5. かしめ加工前と加工後の断面図

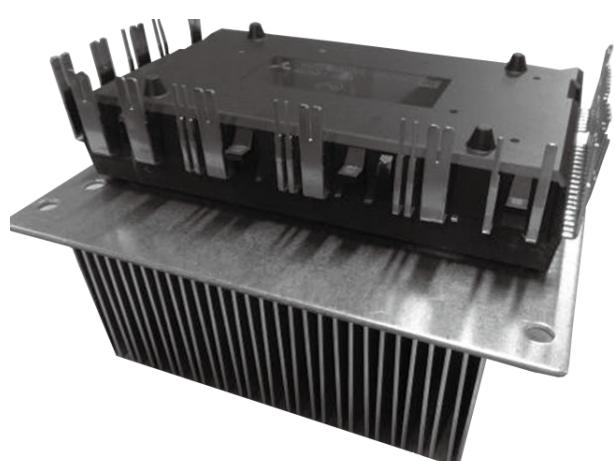


図6. 7.5kW用パワーモジュール



図7. ダクトと一体化したヒートシンク一体型パワーモジュール

#### 4. フィンかしめ工法によるモジュールの評価結果

図6に開発品のうち定格出力7.5kWの汎用インバータ向けパワーモジュールのかしめ加工後の外観を示す。また図7にパワーモジュールをダクトと一体化した状態の外観を示す。所定のDCファンをダクトの全面に配置して強制風冷状態で熱抵抗0.16K/Wと高い放熱性が得られた。前世代の熱伝導グリスを用いた構造に対して容積は0.56倍と高出力密度化を達成した。

#### 5. む す び

放熱性向上を目的として、熱伝導グリスを介さずに強制風冷型ヒートシンクを一体化した新たなパワーモジュール構造を開発・量産化した。開発の成果は次のとおりである。

(1) パワーモジュールの生産性を確保して高い放熱性を得るため、パワーモジュールよりも長さの大きい薄板フィンをかしめ加工によって一体化し、パネルとダクトを用

いて風路を構成するパワーモジュール構造を考案した。

- (2) 2枚の薄板フィンに対して1枚のかしめ加工ツールで、フィンベースのかしめ部を加圧して固着するかしめ加工プロセスを開発した。
- (3) かしめ加工工程には、薄板フィンを自動的に配列し、一括でフィンをかしめ加工する自動機を開発し、量産適用した。
- (4) 30枚の縦横41×97(mm)の薄板フィンを用いて熱伝導グリスなしにヒートシンクを一体化することで熱抵抗は0.16K/Wの高い放熱性が得られ、容積は0.56倍の高出力密度化を達成した。

これらの結果から、2015年からA800シリーズインバータの一部機種に適用し、量産中である。また他のシリーズにも適用して低熱抵抗化を進めていく計画である。

#### 参 考 文 献

- (1) 小西祐一郎, ほか: 熱サイクルにともなう熱伝導グリースのポンプアウト現象に関する可視化実験, 日本機械学会論文集, 83, No.845, DOI: 10.1299/transjsme.16-00243 (2017)
- (2) 八木英介, ほか: 小型乗用車用パワーコントロールユニットの開発, 半導体電力変換研究会, 電気学会研究会資料, 49~51 (2010)
- (3) 難波明博, ほか: 次世代高出力密度電動コンポーネント技術, エレクトロニクス実装学会誌, 19, No.5, 321~324 (2016)
- (4) 白石卓也, ほか: 1,200V大型DIPIPM“Ver.4シリーズ”, 三菱電機技報, 84, No.4, 251~254 (2010)

# 小形誘導モータの低騒音化技術

宮本佳典\* 米谷晴之\*\*\*  
水谷敏彦\* 出口 学†  
吉桑義雄\*

Method of Reducing Noise for Small Induction Motors

Yoshinori Miyamoto, Toshihiko Mizutani, Yoshio Yoshikawa, Haruyuki Kometani, Manabu Deguchi

## 要旨

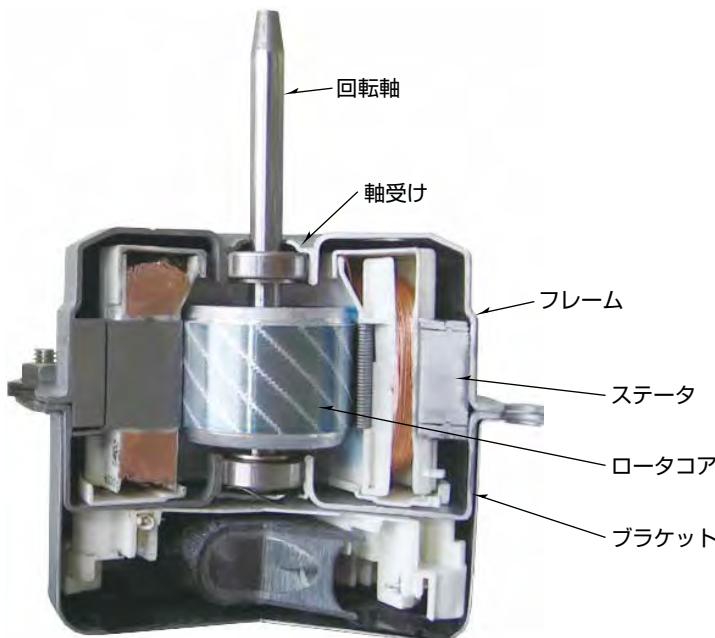
換気扇や送風機などに小形誘導モータが多く用いられている。1台当たりの消費電力が小さいが、国内での普及台数の多さと運転時間の長さから総消費電力が大きいため、消費電力低減に向けた取組みが継続されている。一般に、コイルを分布巻から集中巻に変えて電気抵抗を小さくする方法や、ステータとロータの間の空隙長を小さくして磁路抵抗を下げる方法を採用することが多い。どちらの方法もモータの電磁騒音が増加するという副作用があるため、住宅等で用いられて低騒音が要求されるモータに採用することが困難であった。

そこで、モータの電磁騒音がロータの偏心によっても増加することを逆に利用し、偏心を従来のモータより小さく

することで、集中巻と空隙長の短縮による電磁騒音の増加を打ち消すことにした。

直列に接続された二つのコイルの電圧差がロータの偏心量に比例することを見い出し、その関係を利用して偏心量を高精度に測定する技術を開発した。2相のコイルに異なる周波数の交流電圧を印加することで2方向の偏心量を同時に測定できるようになった。また、ステータコアとブラケットの間に隙間を設けてロータ位置を調整し、レーザ溶接で固定する工法を開発し、偏心量を従来の1/8以下に低減できた。

その結果、低消費電力化と低騒音化を同時に実現できた。



## 低騒音化技術を適用して製造したモータ

コイルを分布巻から集中巻に変えたことでモータの軸方向長さが短くなったため、出力軸と反対側の空間に従来外付けしていた進相コンデンサを内蔵している。モータの断面を顕微鏡で観察した結果、ステータとロータの間に0.15mmの空隙が周方向に均一に形成されており、偏心量測定技術と調心組立技術の有効性が確認できた。

## 1. まえがき

安価で取扱いが容易な小形誘導モータが換気扇や送風機に多く用いられている。消費電力が50W以下と小さいが、国内での普及台数が多く、24時間換気で常時運転する使用形態も多いため、消費電力を低減できれば大きな省エネルギー効果が得られる<sup>(1)</sup>。誘導モータの主な損失である銅損を低減するためには、コイルを分布巻から集中巻に変えて電気抵抗を小さくしたり、ステータとロータの間の空隙長を短縮して励磁電流を小さくしたりする方法がとられる。どちらの方法もモータの電磁振動や電磁騒音が増加するという問題があり、技術的な限界があった。

本稿ではロータの中心軸の位置を1μmの精度で調整し、偏心量を低減することでモータの低騒音化を実現でき、高効率化の阻害要因を取り除くことができる技術について述べる。

## 2. 偏心がモータの振動に及ぼす影響

ステータの中心軸に対してロータの中心軸が偏心している場合、ステータとロータ間の空隙長が不均一になって不平衡磁気吸引力が生じることによって、モータの振動が大きくなることが知られている<sup>(2)(3)(4)</sup>。開発対象としたモータで不平衡磁気吸引力を計算した結果を図1に示す。縦軸に不平衡磁気吸引力を、横軸にロータの偏心率(偏心量の空隙長に対する比)をとり、集中巻と分布巻を比較した。偏心率40%までの範囲で不平衡磁気吸引力が偏心率に比例して増加していること、同じ偏心率で比較すると集中巻の方が分布巻に比べて不平衡磁気吸引力が約4倍大きいことが分かる。

従来の分布巻モータでは、空隙長0.3mmで偏心率30%以下、従って偏心量が90μm以下になるように設計していた。集中巻モータで分布巻モータと同等の不平衡磁気吸引力にするためには、図1から、偏心率を8%以下にする必要があることが分かる。効率向上を図り空隙長を0.15mmに短縮した場合、偏心量の許容範囲が12μm以下になる。

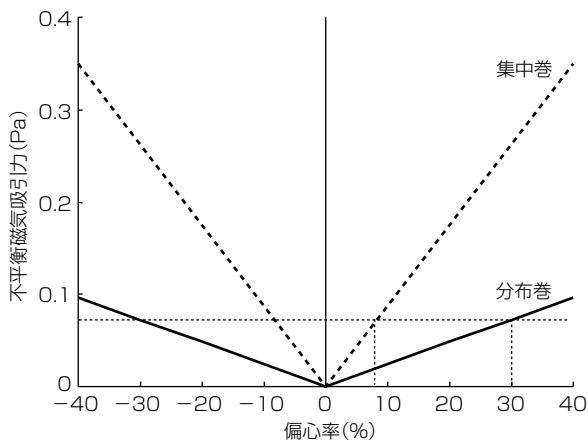


図1. 不平衡磁気吸引力の計算結果

ロータの偏心量を1μm以下の精度で測定できる既存の方がなかったため、新たな測定技術の開発が必要になった。

## 3. 偏心量測定技術

### 3.1 基本原理

図2に2相2極4スロットの集中巻モータの模式図を示す。図の横方向と縦方向に配置されているそれぞれ2個のコイルが直列に接続されている。縦方向の2個のコイルに交流電圧を印加すると、図2(a)に示すようにロータが縦方向に偏心していない場合、上側のコイルの電圧V1と下側のコイルの電圧V2が等しくなる。図2(b)に示すようにロータが下側に偏心すると、上側の空隙長が大きくなり磁路抵抗が大きくなるため、上側のコイルに鎖交する磁束が減少し、上側のコイルの電圧V1が下側のコイルの電圧V2に対して小さくなる。この現象を利用すればモータのコイルを位置検出センサとして活用でき、ロータの偏心量を電気的に測定できることが分かった<sup>(5)(6)</sup>。

図3に実際のモータで電圧の変化量を測定した結果を示す。縦軸に電圧偏差(2個のコイルの電圧の平均値と1個のコイルの電圧との差)、横軸に偏心率をとっている。偏心率50%以下の範囲で電圧偏差が偏心率に比例することが分かる。また、偏心率を8%以下にするためには、電圧偏差を1V以下にすれば良いことも分かった。

### 3.2 測定回路

実際のロータには振れと呼ばれる動的偏心があるため、ロータを回転させながらその動的中心を測定することにし

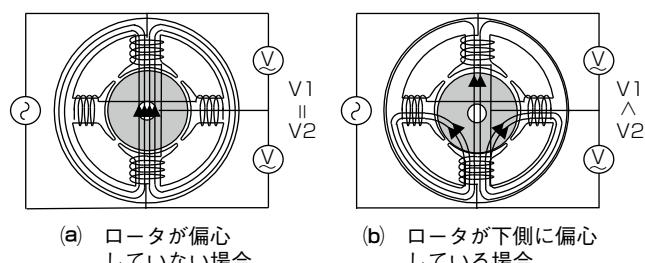


図2. ロータの偏心と電圧差の関係

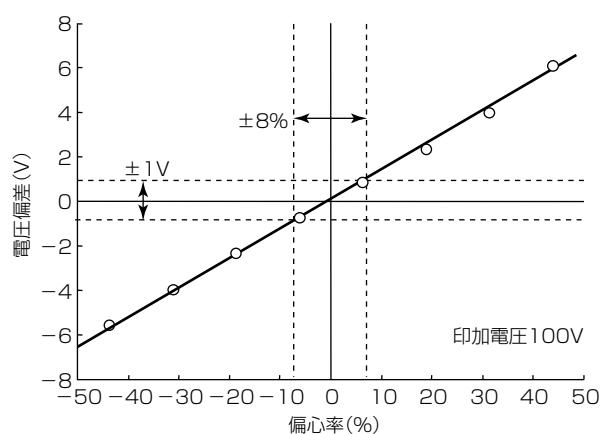


図3. 電圧偏差と偏心率との関係

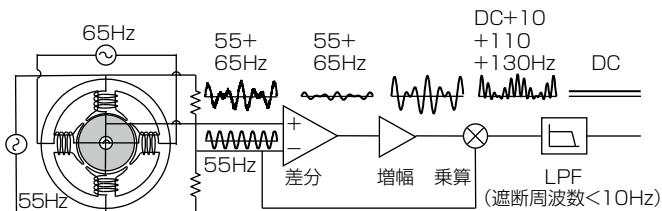


図4. 偏心量測定回路の構成と動作

た。測定時間を短縮するため、ロータの回転を止めず、縦方向、横方向の偏心量を同時に測定する必要があった。しかし、前記の方法では、縦方向、横方向の直列コイルが発生する磁束が互いに干渉するため、正確に測定できないという問題が生じた。そこで、2組の直列コイルに異なる周波数の交流電圧を印加し、測定回路で周波数分離する方法を考案した。

図4に回路の構成を示す。2組の直列コイルに55Hz、65Hzの交流電圧を印加し、それぞれの直列コイルの中間点から電圧波形を取り出す。この波形には55Hzと65Hzの周波数成分が含まれている。また、印加電圧の1/2となるように抵抗分圧された基準点の電圧波形を取り出す。この波形には55Hz、65Hzどちらかの周波数成分だけが含まれている。中間点の電圧と基準点の電圧の差を増幅し、得られた波形に基準点の電圧波形を乗算する。さらに、ローパスフィルタ(LPF)を通すと、基準点の電圧波形と同じ周波数の成分だけが直流電圧として得られる。この回路を用いることで、縦方向、横方向の偏心量を同時に測定できるようになった。また、インバータなどのノイズが多い製造ラインでも、十分なS/N比(Signal to Noise ratio)で偏心量を測定できるようになった<sup>(7)(8)</sup>。

#### 4. 調心組立技術の実用化

3章で述べた偏心量測定技術を基に、年産100万台規模の量産ラインで、ロータの中心軸を1μm以下の精度で調心して組み立てる技術を実用化した。

##### 4.1 モータの基本構造

図5にモータの断面図を示す。フレームと呼ぶ外郭に巻線されたステータが端部の一部を残して圧入されている。回転軸にロータコアとそれを挟むように2個の軸受けが圧入されている。軸受けの一方がフレームに設けられたハウジングに納められ、もう一方がプラケットと呼ぶ外郭に設けられたハウジングに納められている。ロータを調心するために、ステータコアの外周とプラケットの内周の間に、従来のモータにはなかった隙間を意図的に設けている。この隙間を利用してプラケットとロータの位置を移動して調整する<sup>(9)</sup>。

この方法ではロータの中心軸がステータの中心軸と平行にならない場合がある。そこで、ロータの傾き角度とロータの軸方向中心の偏心率を変えてモータの振動加速度を測

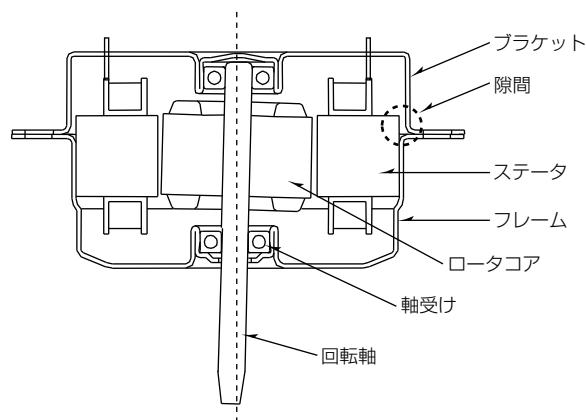


図5. 開発したモータの断面図

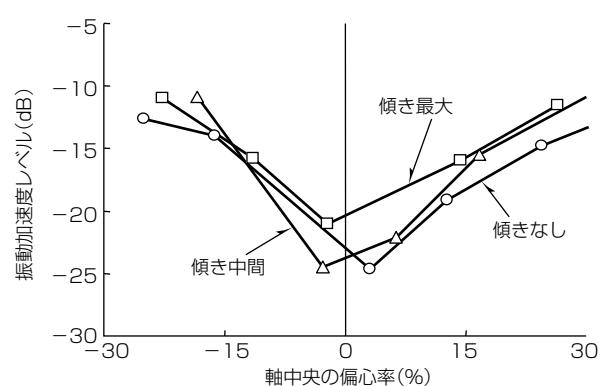


図6. ロータの傾きの影響

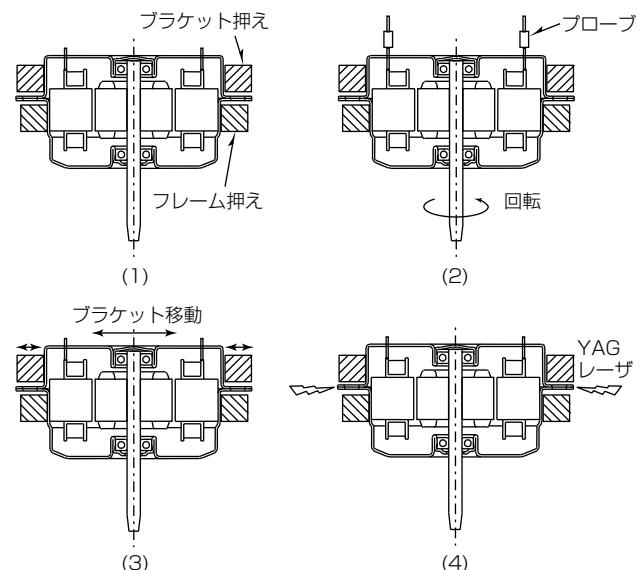


図7. 調心組立工程

定した。結果を図6に示す。傾き角が変わってもロータの軸方向中心の偏心率を最小にすれば、振動加速度が最小になることが分かった。

##### 4.2 組立工程

調心組立工程は次のとおりである(図7)。

- (1) ステータが圧入されたフレームにロータを挿入し、上にプラケットを載せる。

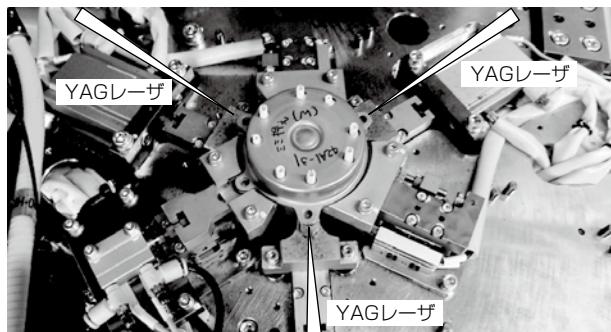


図8. YAGレーザによる3か所同時溶接

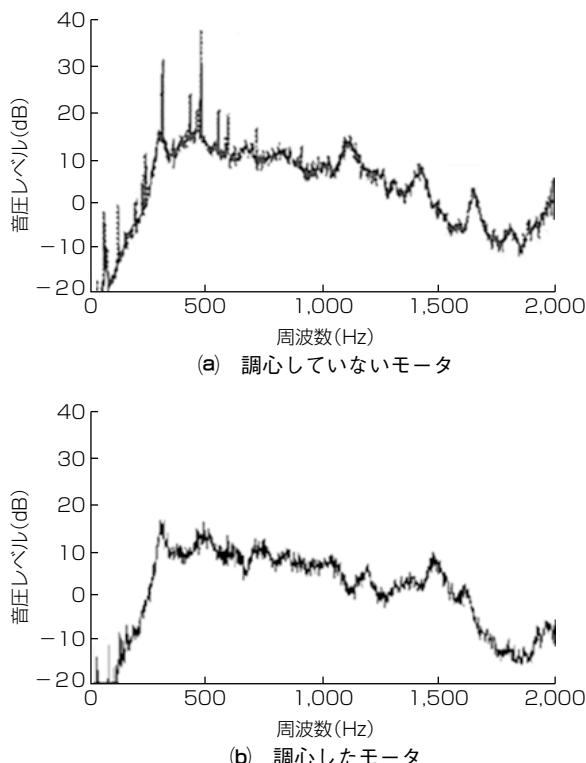


図9. 負荷時の騒音測定結果

- (2) ロータを1周させて動的偏心量を測定する。
- (3) (2)で測定した動的偏心量が最小になるようにブラケットを移動させる。
- (4) ブラケットとフレームのフランジをYAG(Yttrium Aluminum Garnet)レーザで溶接して固定する。

従来のモータではフレームの外縁部に設けた爪を折り曲げ、ブラケットの外縁部を挟んで固定していた。この方法では調心したブラケットが応力によってずれてしまうため、新しいモータでは溶接歪(ひずみ)の小さいYAGレーザで固定する方法を採用した。さらに、レーザを分岐して外縁部3か所を同時に溶接することで、1か所ずつ溶接した場合に溶接された方向にずれる現象を抑制するとともに、溶接工程の時間短縮も実現した(図8)。

#### 4.3 騒音低減効果

調心組立技術の適用による騒音低減効果の測定例を図9

に示す。負荷運転時にモータが発生する騒音の周波数分析結果を表している。調心していないモータでは480Hzに顕著なピークが見られるが、調心したモータではその音を20dB低減できていることが分かる<sup>(10)</sup>。

## 5. むすび

小形誘導モータを対象にロータの中心軸を1μm精度で調心して偏心率を最小化することで低騒音化を実現する技術について述べた。2010年にこの技術を適用した最初のモータを量産化した後、適用機種を順次拡大し、2019年に容量の大きいモータの量産を開始した。その間に周辺技術が進歩し、測定回路を専用設計のアナログ回路から当社製C言語コントローラによるデジタル処理に代替した。この技術の適用範囲が小形モータに限られないで、今後も適用の拡大を図り、モータの低騒音化に貢献していく。

## 参考文献

- (1) 三菱総合研究所：機械器具等の省エネルギー対策の検討に係る調査報告書、平成23年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業 (2012)
- (2) Ellison, A.J., et al.: Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, **118**, No.1, 174~184 (1971)
- (3) Yang, S.J.: Low-Noise Electrical Motors, Oxford University Press, 15~77 (1981)
- (4) 吉桑義雄, ほか: 小形誘導電動機の電磁加振力発生要因および低減方法の検討、日本AEM学会誌, **14**, No.1, 102~107 (2006)
- (5) 吉桑義雄, ほか: モータの振動騒音低減方法、一般社団法人 日本機械学会、2009年度年次大会講演論文集, No.09-1, 75~76 (2009)
- (6) 米谷晴之, ほか: 対向コイルの電圧差による回転子の偏心検出、電気学会回転機研究会資料, RM-10-141, 43~47 (2010)
- (7) 吉桑義雄, ほか: 特許第5592688号「回転電機の偏心推定方法、偏心修正方法、および回転電機の偏心推定システム」(2014)
- (8) 宮本佳典, ほか: 特許第5511281号「回転電機の回転子軸心位置測定方法及び回転電機の回転子軸心位置測定装置」(2014)
- (9) 宮本佳典, ほか: 特許第5283566号「回転電機及びその製造方法」(2013)
- (10) 吉桑義雄, ほか: 卷線を偏心推定センサとして活用した超低騒音モータの開発(偏心量1μm以下の実現によるモータ低騒音化)、一般社団法人 日本機械学会論文集, **84**, No.861 (2018)