

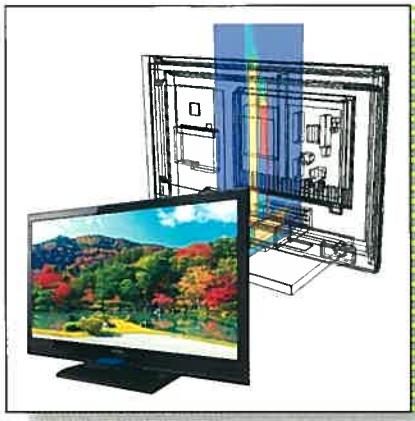
IMITSUBISHI

三菱電機技報

Vol.84 No.12

2010 12

特集「設計技術と生産技術の進化と拡大」



巻/頭/言

生産技術が生む競争力—持続的革新とヒューマンキャピタルが支える—

Competitiveness Brought From Manufacturing Technology
—Role of Continuing Innovation and Valuable Human Capitals—豊田政男
Masao Toyoda

“夢はみるもの、いや叶(かな)えるもの”をモットーに、多くの技術者が自負を持って“ものづくり”を推し進めてきた。“夢か現実か”となると、科学は“夢”ともいわれるが、夢のない人に現実を理解させることは難しい。ものづくりは現実であるが、それは“夢”でもあり、“夢”的実現でもあるのだ。

我が国では“ものづくり帝国主義”ともいるべき立場で、諸先輩が国力の向上に果たした役割は大きい。ものづくりが経済を支配するとの考えが、“Japan as No.1”をもたらしたのかも知れない。一方で、科学至上主義では、科学の持つ普遍性と有用性を、相反するものとの考え、有用性を捨てることが美学との思いが前面に出る。有用性が強調されて普遍的知識を忘ることの行き過ぎと、普遍性のみにこだわって有用性を忘ることの行き過ぎの2つとも、一方向のみのむなしさを感じさせる。

今や世界が大きく変わっている。“変わる”の議論となると、いつも“不易と流行”がいわれ、変わってはいけないものがある、特に技能などはその典型例としてあげられる場合が多いが、技術・技能が変わってはいけないことはない。変わってはいけないというのも、変わらなければ、恐らく持続的発展はないであろう。

政治、経済、文化などいろいろな面で“変わる”が見られ、特に、近年の我が国の国力の低下という変化は懸念されるところである。“薄れる日本企業の存在感”“世界シェアの著しい低下”などの文字が新聞紙上を賑(にぎ)わしているが、我が国の産業の強みはどこにいったのか。IT関連の苦戦、液晶パネルや白色LED(Light Emitting Diode)でさえシェアを落とす一方で、デジタルカメラ、NAND型フラッシュメモリのようにシェアを上げているものもある。この違いはどこにあるのか。シェアトップが変わる原因は、

機動性にあるという。その機動性を支えるのが、実は基盤技術力である。これまでの我が国の強みである戦略性と機動性を支える基盤技術に人が集まらないことは懸念材料である。材料技術、溶接技術、鋳造技術、塑性加工技術などのものづくり基盤技術分野の研究者も流行に流れている。流行に流れるのは悪いことではないが、我が国はすべてが同じ方向に流れる傾向にあり、基盤の魅力を示せないことが大きな問題なのである。我が国では、1960～1970年代、とにかく産業技術力の向上を目指そうとする“熱き想い”が、多くの基盤技術を大きく発展させてきたことを忘れてはいけない。この基盤技術と“思い入れ”的人材が我が国のものづくりNo.1を支えたのである。

必要なことは、まず、①技術革新・進歩とヒューマンキャピタル(人的資本)：基盤技術の重要性を認識し、技術の戦略的な維持・発展を多面的に考えることと、基盤技術の魅力化で人材が集い、それが人財とならなければならない。次に、②研究開発マネジメントの高度化：基盤の強い人財が育ち、有機的・融合的に思考させることで、プロダクト・イノベーションにつなげなければならない。さらに、③産学連携のような外部人財を活用し、目指すものが明確で相互刺激が得られる高度に組織された共創の場の創設である。

今こそ、政府、産業界、そして学界には、産業技術力の更なる発展について継続的な努力が求められている。我が国の人々の行動原理はワールドカップのときの監督評を見ても分かるが、開始前には監督をあれだけたたいたサポーターやマスコミも、快進撃が続くと手のひらを返したように評価する。この変わり身の早さは利点でもあるが、科学・技術では必ずしも利とならない。今や、ものづくりの基盤技術において、“続く”の意味を考え直すときであろう。

巻頭論文



設計プロセス革新による開発効率化

山下昭裕*

前川隆昭**

Promotion of Development Efficiency by Design Process Innovation

Akihiro Yamashita, Takaaki Maekawa

要旨

製造業では、グローバル市場での性能／価格両面での製品力強化のため、開発プロセス革新によるQCD (Quality Cost Delivery) 向上が喫緊の課題となっている。特に、製品企画から製造、販売にわたるものづくりプロセスで最上流にある設計工程の効率化、品質作り込みが重要である。

これまで三菱電機では、設計プロセス革新による開発効率化のための取組みとして、ソフトウェア開発、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 開発、ハードウェア開発で、開発上流段階での設計品質を作り込む“設計フロントローディング”を推進してきた。

本稿では、当社の“設計フロントローディング”推進活動で活用してきた次の手法と、その適用事例について述べる。

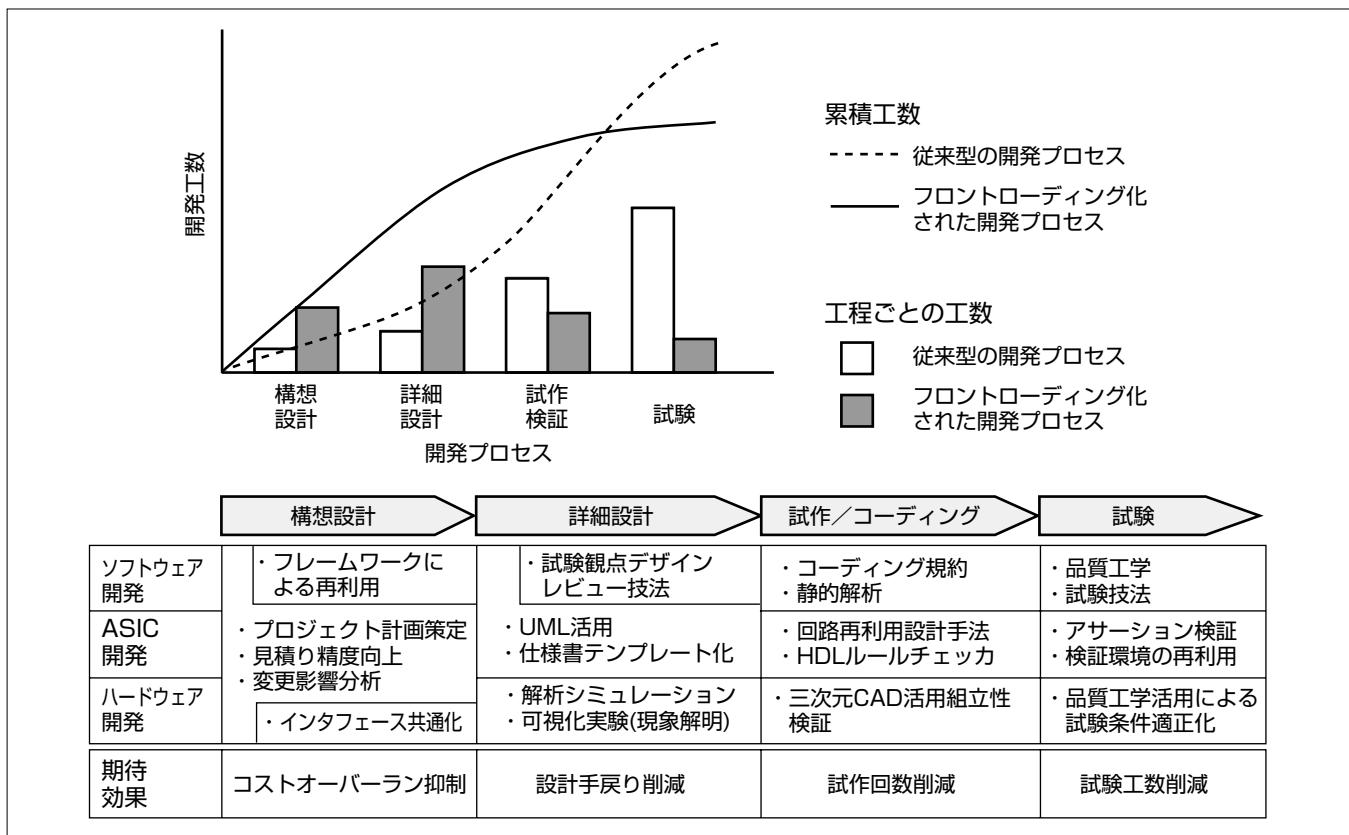
(1) ソフトウェア開発：ゾーン分析によるプロジェクト計

画改善手法、フレームワークによる再利用手法、仕様書テンプレート活用によるデザインレビュー強化手法

- (2) ASIC開発：UML^(注1)活用による仕様見える化手法、デジタル／アナログHDL^(注2)活用による機能検証手法、検証環境の再利用手法
- (3) ハードウェア開発：インタフェース共通化、変更影響度分析による課題抽出手法、可視化実験と解析シミュレーションを活用した熱設計検証手法、品質工学を活用した強度・振動試験条件の適正化手法、三次元モデルを活用した組立性検証手法

(注1) UML (Unified Modeling Language) は、Object Management Group Inc.の登録商標である。

(注2) HDL (Hardware Description Language) は、デジタル回路の振る舞いを記述するためのプログラム言語で、アナログHDLはアナログ・デジタル混在回路に拡張したものである。



設計プロセス革新のねらいと手法

設計フロントローディングによる開発プロセス革新のねらいと、各工程におけるプロセス改善手法と期待効果を示す。各工程でこれらの手法を適用することで、開発上流段階での工数は増加するが、後工程での試作検証工数と試験工数を大幅に削減できるため、開発プロセス全体での累積工数は減少する。

1. まえがき

製造業としてグローバル市場への事業拡大戦略に対応する性能、価格両面での製品力強化のため、設計プロセス革新によるQCD向上が喫緊の課題となっている。特に、製品企画から製造、販売にわたるものづくりプロセスで最上流にある設計工程は、開発プロセス全体の効率、品質、コストに多大な影響を与える。

当社では、開発プロセスの各工程における業務改善施策として、開発初期段階での設計品質の作り込みを実現する“設計フロントローディング”を推進してきた⁽¹⁾。さらに、これまで培ってきた設計フロントローディング手法を体系的に整備し、開発プロセス改善手法として深掘り、進化させることによって、多岐にわたる当社製品への適用加速、展開を図ってきた。その結果、多くの製品で開発手戻り削減、試作回数／試験工数削減、コストオーバーラン抑制などの効果を実現し、製品開発全体での累積開発工数削減によって、製品開発コスト削減と早期市場投入が可能となつた。

本稿では、当社における設計プロセス革新の取組みについて、ソフトウェア／ASIC／ハードウェア設計分野における開発プロセス改善のための手法とその実践例について述べる。

2. 設計フロントローディングによる開発プロセス改善

2.1 概要

図1に、設計フロントローディングによる開発プロセス改善の主要効果である開発工数削減効果を示す。工程ごとの工数は開発上流段階では増加するが、後工程での手戻りによる試作検証工数、試験工数が大幅に削減できるため、開発全体での累積工数は減少する。

図2は、設計フロントローディングを実現するため当社で活用している代表的手法と期待効果を、開発対象（ソフトウェア、ASIC、ハードウェア）と、適用する工程に分類して示したものである。

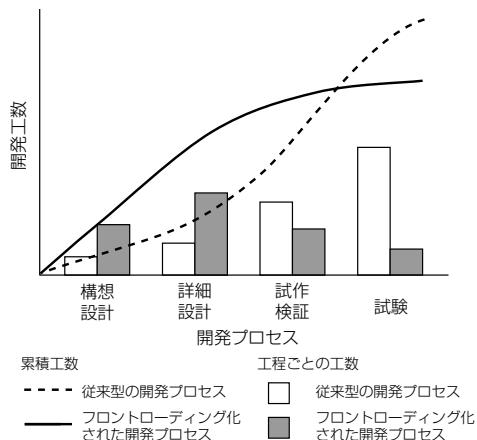


図1. 設計フロントローディングによる開発効率化

2.2 ソフトウェア開発プロセスの改善手法

図3は、ソフトウェア開発プロセスの各工程と試験工程の関係を表すV字モデルと、工程ごとの代表的な改善手法を示したものである。

特にソフトウェア開発では、開発各工程での不具合検出数によって、“設計フロントローディング率(設計FL率)”^(注3)を算出し、プロセス改善の度合いを評価する指標としている。当社の製品の特性に応じた設計FL率の目標値を設定し、ソフトウェア開発プロセス改善活動を展開中である。

次にソフトウェア設計分野でのプロセス改善の主な手法について述べる。

(1) ゾーン分析によるプロジェクト計画改善手法

過去の同種の開発プロジェクトを、開発コスト・開発規模などの観点で分類し、計画と実績の乖離(かいり)度を分析する(ゾーン分析)ことで、対象システムの特性に合ったプロジェクト管理を実施する。

(2) ソフトウェアフレームワーク化による再利用手法

シリーズ機種など類似製品に搭載するソフトウェア開発で、ソフトウェア構造を分析し、共通部と機種依存部に分類して部品化、機能単位で階層化するなど、全体構造を再構築(フレームワーク化)することによって、再利用を促進する。

(3) 仕様書テンプレート、チェックリスト活用によるデザインレビュー強化手法

(注3) 設計フロントローディング率=設計上流での不具合検出数÷開発全体での不具合検出数

	構想設計	詳細設計	試作／コーディング	試験
ソフトウェア開発	・フレームワークによる再利用	・試験観点デザインレビュー手法	・コーディング規約・静的解析	・品質工学・試験技法
ASIC開発	・プロジェクト計画策定・見積り精度向上・変更影響分析	・UML活用・仕様書テンプレート化	・回路再利用設計手法・HDLレールチェック	・アサーション検証・検証環境の再利用
ハードウェア開発	・インタフェース共通化	・解析シミュレーション・可視化実験(現象解明)	・三次元CAD活用・組立性検証	・品質工学活用による試験条件適正化
期待効果	コストオーバーラン抑制	設計手戻り削減	試作回数削減	試験工数削減

図2. 設計フロントローディング手法

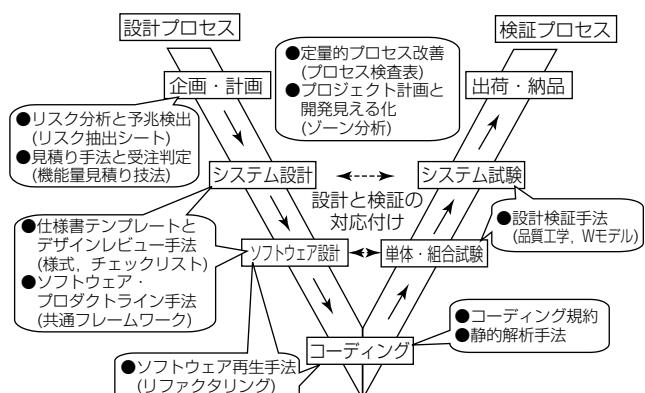


図3. ソフトウェア開発プロセスの改善手法

作成者に依存しがちな仕様書の記載内容をテンプレート化することで、仕様書の均質化、質的向上を図るとともに、仕様書記載内容にリンクしたチェックリストを作成、デザインレビューに活用することで、設計品質を向上させる。

2.3 ASIC開発プロセスの改善手法

図4にソフトウェアと同様のV字モデルで、代表的なASIC開発プロセス改善手法を示す。ソフトウェア設計分野での開発プロセス改善手法はデジタル回路設計にも適用され、大規模デジタルASIC開発で初回サンプルでの品質確保に効果を上げている。さらに当社では、電子機器製品差別化のキーパーツとなっているアナログASICの開発プロセス改善に取り組んでいる。

次にデジタル／アナログASIC設計分野でのプロセス改善の主な手法について述べる。

(1) UMLによる機能可視化とアサーション検証手法^(注4)

ソフトウェア開発で活用されているUMLを仕様設計に活用(ユースケース図による機能範囲の明確化、クラス図による機能実現手段の明確化など)することで検証すべき機能を抽出する。さらに、抽出された機能に対して、アサーション検証手法を適用して、機能検証漏れを防止する。

(2) アナログHDL活用による機能検証手法

アナログASIC開発で、アナログHDLを活用した機能ブロック単位での検証、アナログHDLとSPICE^(注5)シミュレータの併用による大規模全体回路の高速検証などを実施し、初期段階での機能検証を徹底する。

(3) 検証環境の再利用手法

大規模デジタルASICの検証環境構築において、検証機能を、テストプログラム(試験の手順を記述)、トランザクタ(手順が意図する機能動作を信号動作へ変換)、ドライバ(試験対象に信号値を出力)として部品化、再利用を容易にすることで、検証工数を削減するとともに検証の精度向上を図る。

(注4) 仕様を検証用言語で記述して、回路記述との等価性を論理的・数理的に検証する手法

(注5) 電子回路のアナログ動作をシミュレーションするソフトウェア

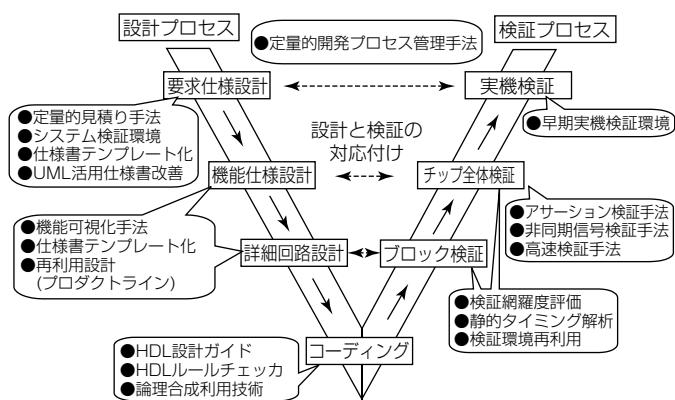


図4. ASIC開発プロセスの改善手法

2.4 ハードウェア開発プロセスの改善手法

図5は、ハードウェア設計における開発プロセス改善手法(品質工学を活用した耐震強度設計の例)を示したものである。対象製品の重要課題に対応したモデル実験手法とシミュレーション解析技術を構築・強化することで、設計試作前段階における設計品質の作り込みが可能となり、開発後工程での手戻り削減が図れる。

次にハードウェア設計分野でのプロセス改善の主な手法について述べる。

(1) インタフェース共通化による派生機種開発

図6はシリーズ開発型製品(能力、容量、サイズなどによる機種系列を持つ製品)の派生機種開発の考え方を示したものである。開発構想段階で、共通部と機種依存部とのインターフェースを共通化することで、ベース機種開発から派生機種展開を開発効率的に進めることができる。

(2) 変更影響度分析による課題抽出手法

開発初期段階で、過去機種からの仕様の変更点を明確化し、設計基準・試験規格・過去不具合情報などからその影響範囲を特定することで、開発全般にわたっての課題を抽出する。抽出された課題に対して評価計画を立案、開発各工程で未完了課題項目を一元管理することで早期課題解決を図る。

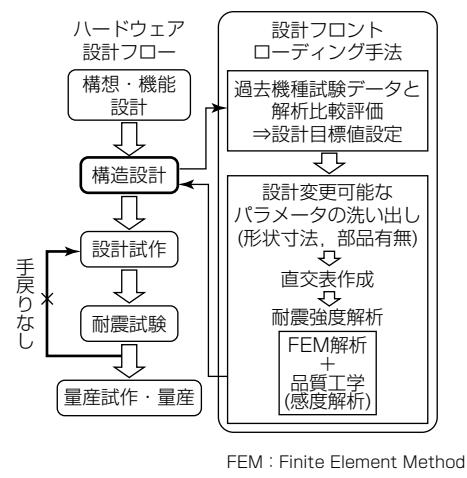


図5. ハードウェア開発プロセスの改善手法
(品質工学を活用した耐震強度設計の例)

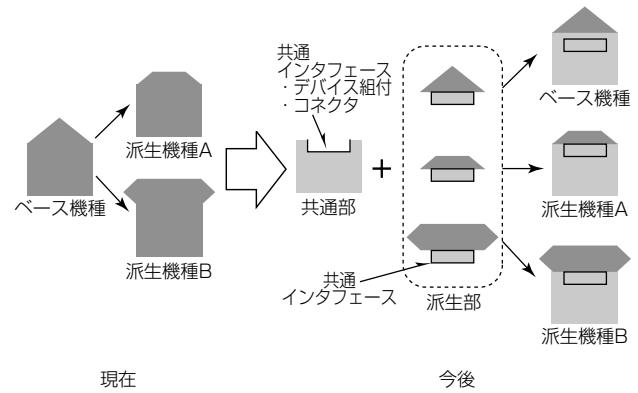


図6. ハードウェア開発における派生機種展開の効率化

(3) オーダーレベル計算／解析シミュレーションを活用した熱設計検証手法

製品の基本性能を決定する機能設計で、表計算ワークシートを活用したオーダーレベル検討(First Order Analysis: FOA)によって、適切な設計の見極めを実施する。さらに、部品配置、冷却風路などを決定する基本設計段階で、三次元形状による熱流体シミュレーションによって温度・流れを精度よく予測・検討することで、早期に熱対策を実施する。

(4) 品質工学を活用した強度・振動解析検証、試験条件適正化手法

構造設計で、構造強度解析に品質工学を組み合わせて、直交表による効率的な解析パターンの絞り込みと、感度解析による各設計パラメータの影響度を評価、適正な強度・振動試験条件を設定することで、設計手戻りや過剰設計によるコスト増を抑制する。

(5) 三次元モデルを活用した組立性検証手法

組立性の検証、デザインレビューに三次元CADデータを活用することで、構造設計段階で組立性課題の抽出、改善検討を実施し、製造準備段階での設計手戻り削減と組立性改善を図る。

3. 適用事例

前章で説明したソフトウェア、デジタル／アナログASIC、ハードウェア設計の各分野における開発プロセス改善手法の適用事例は次のとおりである。これらの事例の内、(1), (3), (4), (5), (6)については、この特集号の論文で詳細に述べる。

(1) 社会インフラシステムのソフトウェア開発プロセス改善⁽²⁾
社会インフラシステム(広域監視システム)開発プロジェクトに、ゾーン分析に基づくコスト計画／リスク管理手法を適用し、見積り精度向上と目標QCD達成を可能とした。(本号11ページ)

(2) 空調機器制御ソフトウェアの再利用開発⁽³⁾

空調機器制御ソフトウェアを対象とする、再利用型開発環境の構築に取組み、機能部品化による仕様記述の標準化、ソフトウェア試験資産の再利用を可能とし、生産性の向上、試験網羅度の向上を実現した。

(3) 自動車電子キー用アナログASICの開発効率化⁽⁴⁾

自動車電子キー用ASICの開発に、アナログHDL活用による機能ブロック検証手法、大規模回路検証手法を適用し、サンプル試作前の問題点洗い出しによって開発期間短縮を実現した。(本号15ページ)

(4) 映像情報機器、薄型液晶テレビの熱設計⁽⁵⁾

リアプロジェクタシステム、薄型液晶テレビの開発に、

FOA、三次元熱流体解析手法を適用し、製品の構想設計、詳細構造設計の各段階に対応した熱対策を検討することで、設計品質の早期作り込みによるQCD向上を実現した。(本号19ページ)

(5) 空調機器筐体(きょうたい)の輸送時落下衝撃強度設計⁽⁶⁾

設備用パッケージエアコンの開発で、輸送時の衝撃を想定した強度設計手法を構築し、部材削減による原価低減、落下衝撃試験後の設計手戻り削減を可能とした。(本号23ページ)

(6) 鉄道車両用制御機器の組立性改善⁽⁷⁾

鉄道車両用推進制御装置の開発で、三次元CADを活用した組立性検証手法を適用し、組立性品質の向上を可能とした。さらに、組立作業要領書／部品リスト作成の自動化、組立作業での三次元アニメーション利用による設計手戻り抑制と初品組立時間短縮を実現した。(本号27ページ)

4. むすび

当社における開発プロセス改善の取組みを、ソフトウェア設計、ASIC設計、ハードウェア設計の各分野の代表的手法とその適用事例によって述べた。あらゆる製品分野で、品質向上、コスト削減、開発期間短縮に対する市場要求はますます厳しくなっており、引き続き製品ライフサイクル全般にわたるものづくりプロセスの強化と、中長期的な製品戦略まで見据えた開発の効率化に取り組んでゆく。

参考文献

- (1) 竹垣盛一, ほか: フロントローディング型開発設計への取組み, 三菱電機技報, 80, No.10, 636~638 (2006)
- (2) 米澤寛泰, ほか: プロジェクトの特性に応じたソフトウェア・プロセス改善手法, 三菱電機技報, 84, No.12, 669~672 (2010)
- (3) 大河原 繁, ほか: 空調機器制御ソフトウェアの再利用開発, 三菱電機技報, 84, No.6, 311~314 (2010)
- (4) 武内良祐, ほか: アナログASIC設計フロントローディング手法, 三菱電機技報, 84, No.12, 673~676 (2010)
- (5) 児玉拓也, ほか: 電子機器におけるフロントローディング型熱設計, 三菱電機技報, 84, No.12, 677~680 (2010)
- (6) 谷 則行, ほか: 大型板金筐体の落下衝撃強度検証技術, 三菱電機技報, 84, No.12, 681~684 (2010)
- (7) 有田直喜, ほか: 三次元モデルを活用した組立性改善, 三菱電機技報, 84, No.12, 685~688 (2010)

巻頭論文

現場密着型生産技術による
モノづくり力の強化

岡村将光*

Productivity Improvement Based on Manufacturing Engineering with Close Coverage of Production Site
Masamitsu Okamura

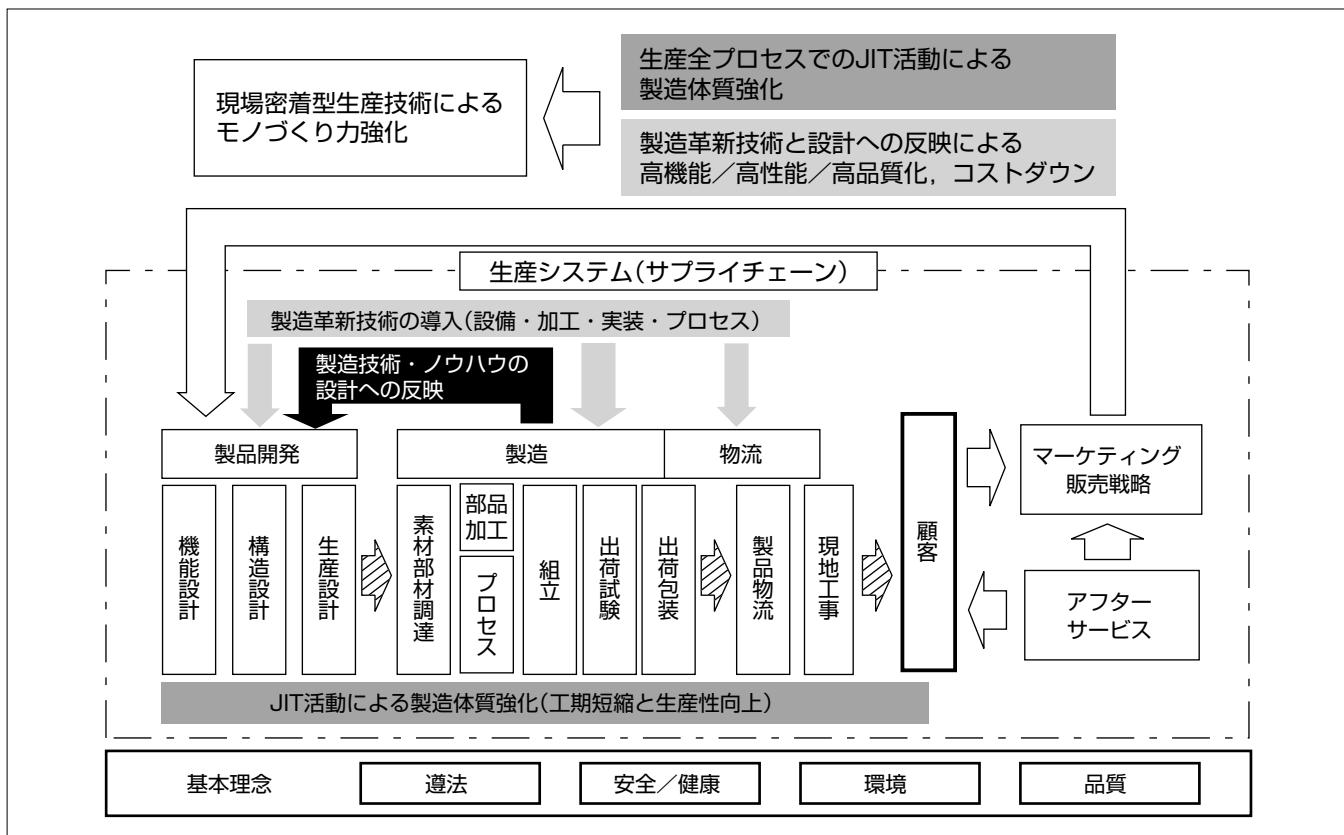
要 旨

世界の経済環境は、中国・インドに代表される新興国の台頭による市場バランスや競争環境の変化、素材高騰、為替、環境問題など、変動要因が大きい。また、これまで培ってきた“モノづくり大国”としての日本の地位はすでに絶対的ではなく、日本の製造業はグローバル競争に生き残るためにモノづくり力を再構築しなければならない。

そのために果たすべき生産技術の役割は、製造技術力の高度化、資材調達から客先納入まで生産の全プロセスにおけるムダの排除、市場環境の変化に即応できる生産管理・

情報システムの構築などによる“現場の製造体質強化”と、製品の機能に遡(さかのぼ)り作りやすさの観点から基本構造を見直す生産設計や、製造技術・ノウハウを製品に反映する構造設計による“製品力・市場競争力強化”であり、いずれも現場に密着した活動が重要である。

本稿では、三菱電機の生産技術・モノづくりを牽引(けんいん)する中心組織として1994年に発足した生産技術センターでの具体的な活動事例の紹介を通じて、当社のモノづくり力強化への取組みと生産技術の役割について述べる。



モノづくり力強化と生産技術の位置づけ

モノづくり力の強化のためには、①JIT(Just In Time)活動をベースとした現場の製造体質強化、②構造設計・生産設計による製品力・市場競争力強化が重要であり、生産技術者は製造と設計を結ぶ重要な役割を担う。

1. まえがき

2008年度下期からの経済危機はようやく底を打ち、世界の経済環境は緩やかに回復しつつあるが、中国・インドに代表される新興国の台頭による市場バランスや競争環境の変化、素材価格の高騰、国内経済の停滞、為替、環境問題など変動要因が大きく、その度合いには事業分野・地域ごとに大きな差異がでると予想される。

一方、“モノづくり大国”としての日本の地位はすでに絶対的ではなく、製造拠点のみならず開発拠点のグローバル展開も避けて通れない現実の中で、日本の製造業は外部環境に影響されない強固な経営体質を作り、発展していくかねばならない。そのためには、国内工場をマザーワークとしてその実力を確たるものとし、海外拠点・協力工場が一体となったグローバル生産体制を構築し、環境の変化に即応できるよう進化させていく必要がある。

その鍵(かぎ)は現場の製造体質の強化である。当社では、JIT活動を核とした資材調達から客先納入までの生産全プロセスにおける徹底したムダの排除、製造ラインでの生産性向上・不良低減、購入品の品質改善などを推進している。

またその一方、製品が性能・コスト・品質・サービスで常にトップランナであり続けるためには、生産技術から製品を革新していくことが重要である。そのため、製品の機能に遡って作りやすさの観点から基本構造を見直す生産設計、製造・設計現場を踏まえた製品構造設計、製品差別化のためのキーパーツ内製化などの活動を強化している。

本稿では、現場密着型で進めているこれらの活動について、生産技術センターでの取組み事例を中心に述べる。

2. 生産技術センター及び関連組織の活動

当社の生産技術は、1993年に発足した生産システム本部が統括している。生産システム本部は、全社の生産にかかわる施策の企画・推進をつかさどる4部(生産技術部、品質保証推進部、環境推進部、ロジスティクス部)と、生産システム技術の開発・実用化及び事業部への展開を担当する3センター(情報システム技術センター、設計システム技術センター、生産技術センター)から構成されている。

全社的施策としては、①JIT活動の生産全プロセスへの拡大、②品質・信頼性向上活動、③低炭素化社会に向けた環境負荷低減活動などの項目を展開している。

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、全社の生産技術・モノづくりを牽引する中心組織としての役割を果たしてきた。現在の活動は、現場に深く入り込むことを基本に、①JIT活動をベースとした現場の製造体質強化、②革新的な生産技術による生産設計とそれを実現する設備開発、③構造設計による製品力・市場競争力強化に

注力している。

3. 製造体質強化

3.1 JIT活動の深化と拡大

当社は、2003年度から棚残改善(生産体質強化)を目的とし、“5S(整理・整頓・清掃・清潔・躰(しつけ))3定(定位・定品・定量)”と“徹底したムダ取り活動”を基本とした全社JIT活動を開始した。

全社展開にあたっては、本社生産技術部と生産技術センターとが中心となって、意識改革、活動活性化のための推進責任者／推進キーマン教育、優良企業見学などの施策展開と、トップ診断、個別改善支援、自主研究会の立ち上げなどの活動支援により深化と拡大を図ってきた。

一方、各製作所では、JIT思想に基づいて製造部門からスタートし、現場発信型で順次、生産全プロセスに活動範囲を深化／拡大してきた。また、各部門が相互連携し、棚残回転率の向上、損益改善など、儲(もう)けにつなげるJIT活動を展開し、体質強化が図られつつある。

ここでは、JIT活動のさらなる深化、拡大に向けた現状と今後の取組みについて述べる。

(1) 活動の深化

①自発的・継続的に改善する風土の醸成と人材育成

はじめに、生産管理板などの活用による問題・課題の見える化、徹底したムダの排除によるモノ／人の視点で改善を行い、7ゼロ指標(Products Inventory Cost Quality Maintenance Delivery Safety : PICQMDS)による成果の見える化でPDCA(Plan Do Check Action)を回すことによって成功体験を積み重ね、自主的活動への定着を図っている。

次に、全社施策であるJIT改革推進制度、指導者認定制度、全社発表大会、3日間改善、自主研究会の活性化などにより改善活動を継続的に拡大している。

②5S3定から流れ化、平準化、標準作業化

生産技術センター各技術部門の連携により、製造技術と生産管理技術の融合した活動を強化している。具体的には、自動化／セル化、加工法／段取り改善、直行率向上、小日程同期化などにより、ライン改善からライン革新へステップアップする取組みを行っている。

(2) 活動の拡大

①受注から出荷・現地工事まで生産全プロセスへの拡大

総合工期中のウェートが高い外注品、購入品に焦点を当てた調達JITを強化推進し、マザーワーク(製作所)と連携したJIT活動を国内関係会社・協力工場に展開中であり、今後更に拡大する。

また、工期の長さがコストへ与える影響が大きい現地据付け工事にも着目し、工事部門、担当製作所と連携して、現地据付け工事の工期短縮と物流改善に注力している。

②海外関係会社への活動拡大

現地工場のレベル・環境に応じた活動を、マザー工場(製作所)と連携して中国、東南アジアを中心に展開している。

国内工場と同レベルを目指し、人材育成、総合工期短縮に向けた5S3定、ムダ取り活動などを強化・推進している。

3.2 工程内の不良低減活動

工程内で発生する不良の低減は、製作所の生産性を改善するだけではなく、製品の品質を高めて製品価値を向上させる上で重要である。生産技術センターでは、多くの製作所を対象に不良低減活動を展開している。

工程内不良低減活動の基本は、発生している不良に対し、課題、目標、体制を明確にした上で、“原因究明”“対策の立案”“対策の効果検証”“量産適用”“量産評価”的サイクルを効率よく回すことである。

不良解析には高度な技術を要する、原因が複数の工程・複数の部門にまたがり原因究明に時間がかかる、十分なリソースを確保できない等の理由によって、原因究明が未完のまま対症療法的な対策にとどまり、効果的な改善ができないケースが多い。

生産技術センターでは、対象製品・技術に適した技術者を生産現場に密着させ、先に述べた各サイクルを着実に実行することで、効果的に改善活動が進むよう支援している。具体的な事例として、太陽光発電セルの不良低減活動について述べる。

工程内不良には①特性不良、②外観不良及び③破損があった。特性不良については、セルの発熱解析と断面観察によって、原因が反射防止膜の異物であることを突き止め、①異物発生の抑制、②飛散の抑制、③次工程への持込みの抑制という3つの視点で対策を実施し、異物付着量を対策前の半分以下に抑えた。

外観不良については、不良セルの脱ガス分析によって、原因が有機汚染であることを明らかにし、対策として、工程内で使用する治具類の材質変更や付着した有機物を除去するためのプロセス改善を実施した。

破損については、割れの起点の調査、断面観察、セルのひずみ測定によって、破損が発生する工程と破損の原因になる工程を抽出し、治具類や搬送部品の材質・形状改善、搬送条件の見直しと管理強化などを行い、破損率を低減した。

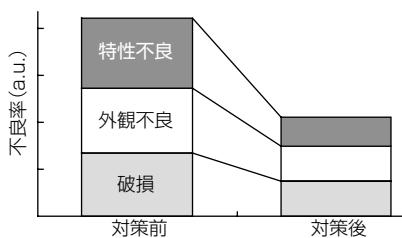


図1 不良低減活動の効果

これらの対策を実施することで、図1に示すように不良率の大幅な低減を実現した。

3.3 購入品の品質改善

当社製品は、社外から調達した部品を数多く搭載しており、購入品の品質が製品品質を大きく左右する。また、製品の高機能化、高性能化を実現するために、部品に要求される機能、性能も極めて高度なものになってきている。一方、それらの部品の生産現場は国内や欧米から中国、東南アジアにシフトしており、部品の品質を維持・向上させるための活動が、特に重要になってきている。

生産技術センターでは、当社製品の品質を確保するためには、購入品の品質改善活動を各製作所と一体となって実施している。具体的な活動内容としては、①部品の採用認定時の評価支援、②部品受け入れ時のスクリーニング技術開発、③製品製造工程における部品不具合の解析、④部品メーカーの生産現場における品質改善活動などを実施している。次に④の例としてセグメント系液晶パネルの品質改善活動について述べる。

当社製品に搭載しているセグメント系液晶パネルは、現在ほとんど中国で製造されている。エコキュート用リモコンの液晶パネル(図2)で、試作段階で表示不具合が発生したため原因究明活動を開始した。不具合品を解析した結果、液晶パネル内部の電極の腐食、すなわち部品不良が原因であることが判明した。

この結果を受けてメーカーに赴き、製造現場を調査した結果、洗浄工程に原因があることを突き止めた。そこで、メーカーに対して改善指導を行い、対策後は同様な不具合が発生しないことを確認した。さらに、将来品質不具合を起こす可能性のある工程に対して改善を実施し、ライン全体の品質レベルを上げた。このように、部品メーカーと一緒に改善活動を展開することで購入品の品質を向上させ、市場不良の未然防止に努めている。

4. 生産設計と製造設備の開発

製品の開発・設計段階から、次の3つのコンセプトで生産設計と製造設備(自動機)の開発を推進している。

- (1) 開発・設計者と生産技術者とが、相互の制約を共通理解し、るべき姿を追求する



図2 エコキュート用リモコンの液晶パネル



図3. ブラケット固定時のずれ抑制

(2) 製品の機能に遡り、作りやすさの観点から基本構造を見直す

(3) キーとなる製造設備は自前で開発する

最近の事例として、AC小型モータならびにレーザテレビ用光源モジュールの調芯(ちょうしん)組立技術について述べる。

4.1 AC小型モータ

換気扇などに使用されるAC小型モータ(コンデンサモータ)では、ステータコイルの集中巻化とエアギャップ長の短縮によって、コイルの電気抵抗と励磁電流を低減し、低銅損による低消費電力化を実現した。また、コイル軸長の短縮で得られた空間にコンデンサを内蔵し、配結線を自動化することによって小型・低コスト化も達成した。

製品特性上は磁気騒音の抑制が大きな課題となったが、ステータとロータを高精度に調整・固定する以下の組立設備を開発することで解決した。

(1) 集中巻化とエアギャップ短縮によって増加する磁気騒音を抑制するためには、高精度化する必要があった。しかし、部品の加工精度向上に頼る方法ではコスト増となるため、簡単な機構で短時間に精度を測定できる方法を追究し、組立設備を開発した。

(2) フランジの固定方法も位置ずれが大きい“かしめ”からレーザ溶接に変更した。さらに、モータの把持力と溶接条件を適正化して固定時のずれを極小化することで、従来比で1桁(けた)小さい誤差での高精度組立を実現した(図3)。

4.2 レーザテレビ用光源モジュール

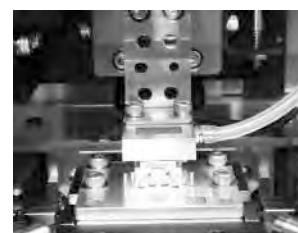
レーザテレビの映像表示に用いる緑色のレーザ光源は、小型・低コストへの要求と高出力要求とを両立させるため、固体レーザ素子・波長変換素子には、製造が容易なプレナ(平面)導波路型を用い、原理的に高効率化が可能な内部波長変換方式を採用した(図4)。

また各素子間の光軸を発光状態で高精度に調整・固定する調芯組立設備を開発することにより、結合レンズを廃したバットジョイント方式を実現した。

バットジョイント方式を成立させるためには、素子どうしを6自由度方向に高精度(1 μm以下)組立して各素子の光軸を合わせる必要がある。そのため、各素子を別々のヒ



図4. 緑色レーザモジュール



光軸調芯ステージ



光軸調芯装置の外観

図5. 光軸調芯装置

ートシンクに組み立ててサブモジュール化し、各々を最終組立工程で三次元固定する構造・工法を考案した。また熱変位やレーザの発振状態変動の影響を排除するため、励起光出力と各サブモジュールの温度状態を実動作状態と同等に保ちつつ調芯組立する設備を開発した(図5)。

5. 構造設計による製品力・市場競争力強化

1990年代のバブル期以降、社内に保有する加工要素技術が停滞すると同時に、金型や部品の加工外注の技術力が向上し、それへの依存度が増えた。また、製作図面の作成も外注に委託する割合が増えた。そのため、設計者に製造現場の声が届かなくなり、高コストで量産に不向きな部品や金型が増えてきた一方で、安価な海外製品との競争や製品の海外生産により、製品のコスト削減、信頼性向上が必要となった。

これらの問題を解決するため、生産技術センターでは、設計と製造との乖離(かいり)を防止し、生産上の課題を設計に持ち込むために、設計者自らが製造技術者とともに製造現場に入り込み、改善活動を展開した(図6)。具体的には、次に述べる活動を推進し、いくつかの成果を得た。

5.1 製造・設計現場を踏まえた生産・原低設計

通常の開発では、設計の人的リソースや金型費用を極力削減するため、高価格帯機種を最初に検討し、これをベースとして低価格帯機種が検討されるため、機能や性能にムダが存在する。そのため、機能設計が確立されている低価格帯機種に開発を限定すれば、能力帯に合わせた部品を使用でき、軽量化や部品点数の大幅な削減が期待できる。

例えば、ルームエアコンの場合、樹脂部品の成型条件最

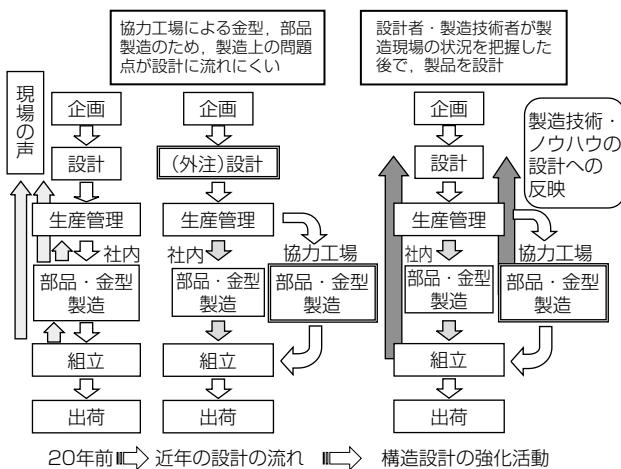


図 6. 構造設計力強化活動の概念図

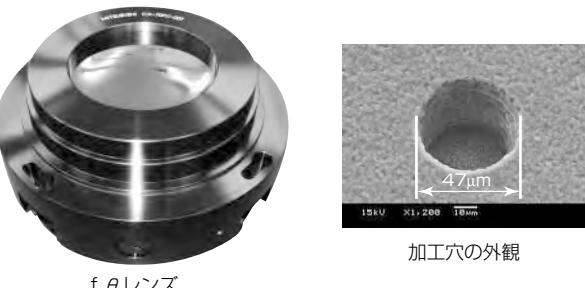


図 7. f θ レンズと加工穴の外観

れらによって切削加工・樹脂成形・ダイカスト成型技術、装置・工具設計製造技術などを飛躍的に成長させることができた。

図 7 は、赤外線レーザを用いた基板穴あけ加工に用いられる特殊な非球面レンズ(f θ レンズ)とエポキシ系基板への加工穴の外観である。従来、ほぼ1社独占であったこのレンズに対し、材料、光学設計、高精度組立方法などの内製化技術を確立し、2000年から量産してきた。開発当初は、穴径80 μmの加工が限界であったが、加工技術、材料などの研究により穴径50 μm以下を可能とし、紫外線レーザよりも安価な加工機として注目を浴びている⁽¹⁾。

6. む す び

これからますます厳しくなるグローバル競争に打ち勝つためには、モノづくり力の抜本的な強化が不可欠であり、①JIT活動をベースとした現場の製造体質強化、②革新的な生産技術による生産設計とそれを実現する設備開発、③構造設計による製品力・市場競争力強化が重要であることを述べた。

本稿では言及しなかったが、グローバル化の進展に伴い拡大する海外生産・調達への対応も重要な課題である。国や事業によって環境が異なるため、それぞれの地域性やインフラに適した生産方式や製造技術、部品サプライヤーを調査・研究し、海外工場の事業拡大と生産性向上を図っていく必要がある。

これらの課題を解決していくために、現場密着型生産技術によるモノづくり力の強化活動を今後も推進していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 竹野祥瑞, ほか: マルチビーム光学系によるプリント配線板穴あけ用レーザ加工機の高速化, 三菱電機技報, 84, No.12, 697~700 (2010)

プロジェクトの特性に応じたソフトウェア・プロセス改善手法 —広域監視システムへの適用—

米澤寛泰*
菅谷博文**
後藤裕香里**

Software Process Improvement Method Corresponding to Project Characteristic —An application to the wide area monitor system—
Hiroyasu Yonezawa, Hirofumi Sugaya, Yukari Goto

要 旨

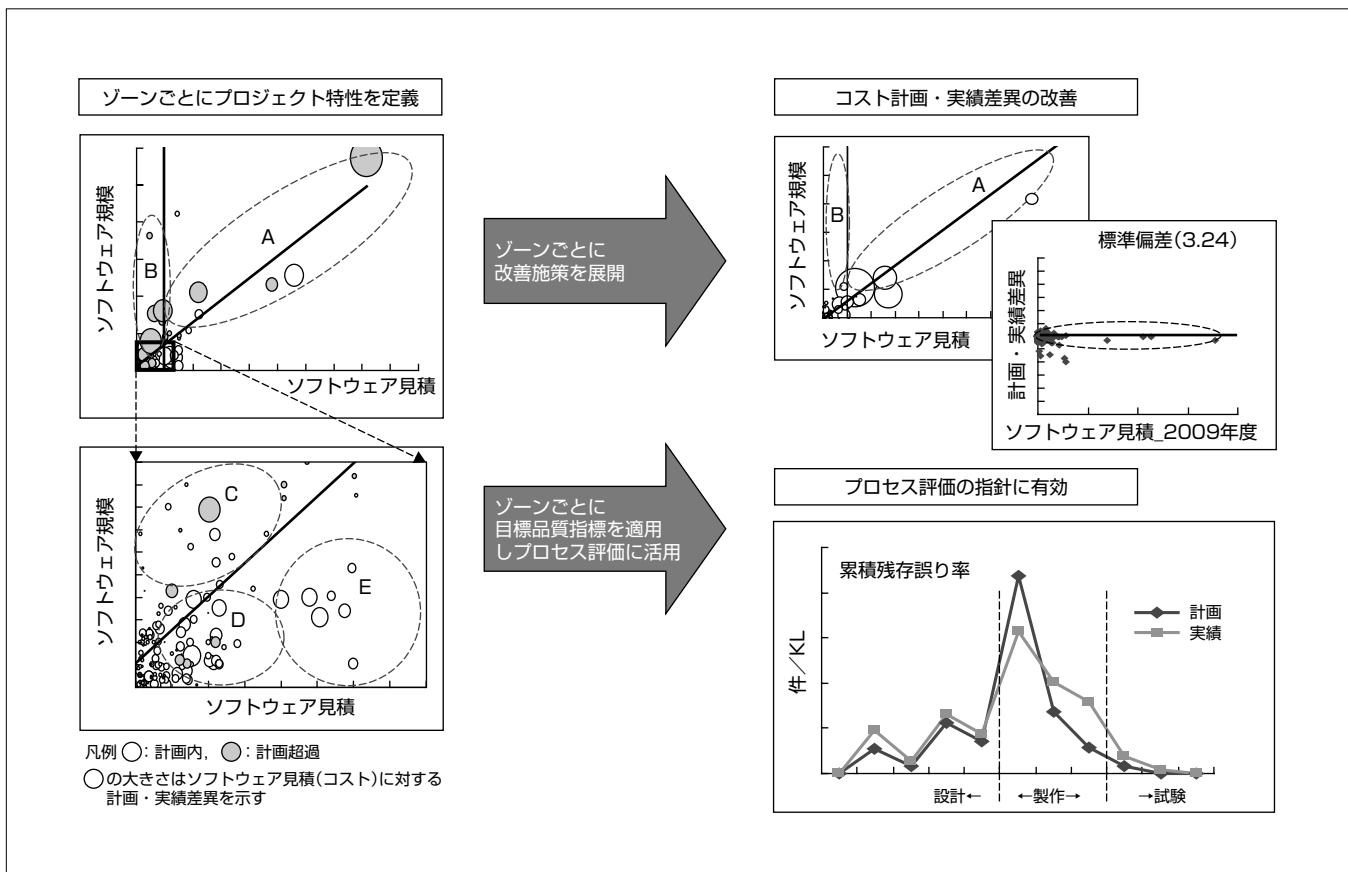
近年、社会システムが急速に多様化し、大規模化している中で、多岐にわたるビジネス分野のソフトウェア開発を行っている三菱電機の社会システム部門では、プロジェクトの目標QCD(Quality Cost Delivery)を達成することを目的として、プロジェクトの特性に応じたソフトウェア・プロセス改善活動に取り組んでいる。

はじめに、ソフトウェア見積(コスト)、ソフトウェア規模(KL(キロライン))の観点からプロジェクトを5つの領域(ゾーン)に分類し、各ゾーンでの計画コストと実績コストの差異によってゾーンごとのプロジェクト特性を明らかにした上で、ゾーンごとの改善施策の立案と目標品質指標の設定を行った。改善施策は、重要なプロジェクトとゾーンごとのいくつかのプロジェクトに対して適用し、複数

のゾーンに適用した施策の例として“見積精度向上施策”“コスト改善施策”“リスク管理施策”について述べる。また、ゾーンごとに設定した目標品質指標は、実プロジェクトに適用し分析結果を評価した。

成果として、ゾーン別活動では、ゾーンごとのコスト計画・実績差異が改善され、部門全体のプロジェクト計画・実績差異の標準偏差も $\sigma = 8.30$ (2007年度)から $\sigma = 3.24$ (2009年度)へとばらつきが大幅に改善した。また目標品質指標は、ソフトウェア開発時のプロセス評価の指針として有効であり、ゾーンごとに適切な対策を促すことができる効果を確認した。

本稿ではプロジェクト特性に応じたソフトウェア・プロセス改善手法について述べる。



ゾーン別ソフトウェア・プロセス改善

ソフトウェア見積(コスト)、ソフトウェア規模(KL)の観点からプロジェクトを5つのゾーンに分類しコスト計画・実績差異からプロジェクト特性を明らかにし、ゾーンごとに改善施策と目標品質指標を展開し、コスト計画・実績差異の改善とソフトウェア・プロセス評価の指針としての有効性を確認した。

1. まえがき

本稿では、当社の社会システム部門でのプロジェクト特性に応じたソフトウェア・プロセス改善手法について述べる。

この部門の事業領域は、“広域監視制御システム”を基盤としたものであり、河川、有料道路、ビル、交通、電力、設備管理など、11種類のビジネス分野に及び、年間数100件のソフトウェアプロジェクトがある。これまでには、11種類のビジネス分野で、画一的なプロセス改善活動を実施していたが、ソフトウェアが急速に多様化・大規模化し、目標品質(Q)・コスト(C)・納期(D)を達成できないケースも発生するようになった。そこで、画一的なプロセス改善活動ではなく、プロジェクトの特性に応じたプロセス改善活動によって、プロジェクトの目標QCDを達成することを目的としてソフトウェア・プロセス改善活動に取り組んだ。

2. プロジェクトの特性によるゾーン定義と改善施策

2.1 プロジェクトの特性に応じたゾーン定義

はじめに、プロジェクトが属する11種類のビジネス分野でグルーピングし、品質データとの相関を分析したが、ビジネス分野と品質データには明確な関連性は得られなかつ

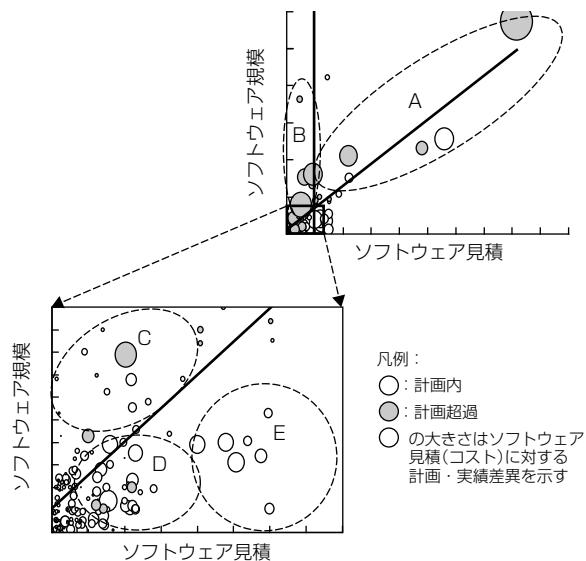


図1. ソフトウェア見積・規模によるプロジェクト分布

表1. ゾーンの定義

ゾーン	定義
A	ソフトウェア規模“大”，規模に見合った見積のプロジェクト
B	ソフトウェア規模“大”，規模に対し見積が小さいプロジェクト
C	ソフトウェア規模“中小”，規模に対し見積が小さいプロジェクト
D	ソフトウェア規模“中小”，規模に見合った見積のプロジェクト
E	ソフトウェア規模“中小”，規模に対し見積が大きいプロジェクト

た。そこで、様々なデータを分析した結果、X軸にソフトウェア見積(コスト)、Y軸にソフトウェア規模(KL)をとり、ソフトウェア見積を起点として、プロジェクトの計画コストに対する実績コストの差異をバブルで表現した散布図を作成した。この散布図で表現されるプロジェクトを5つの領域(ゾーン)で分類(図1)すると、各ゾーン(表1)での計画コストと実績コストの差異には次の特性があった。

(1) Aゾーン

プロジェクトの進展につれソフトウェア規模が増大し、実績コストが計画コストを超過したプロジェクトが多い。

(2) Bゾーン

大幅な見積誤りのプロジェクトでは、確実に実績コストが計画コストを超過している。

(3) Cゾーン

実績コストが計画コストより超過したプロジェクトと計画内であったプロジェクトが混在する。

(4) Dゾーン

実績コストが計画コスト内のプロジェクトが多い。

(5) Eゾーン

ソフトウェア規模はDゾーンと同規模であるがソフトウェア見積が大きいプロジェクト群であり、原価低減によって改善が見込まれるプロジェクト群である。

2.2 ゾーン別改善施策

2.2.1 ゾーン別改善施策の立案

2.1節で示したように、プロジェクトを5つのゾーンに分類することで、ゾーンごとの課題に応じた改善施策を計画することができる。次に各ゾーンの改善施策を示す。

(1) Aゾーン

ソフトウェア規模が大きいため、マネジメントの強化と上流工程からの品質作り込みを主とした対策を実施する。

- ・プロジェクトマネジメント力を強化する。
- ・ソフトウェア構成図などを適用し見積精度を向上させる。
- ・有識者参画によるデザインレビューを強化する。

(2) Bゾーン

ソフトウェア規模が大きくソフトウェア見積が小さいため、リスク管理を主体とした対策を実施する。

- ・受注前の見積レビューを強化し妥当性を確認する。
- ・有識者によるリスクの抽出とリスク管理を強化する。

(3) Cゾーン

ソフトウェア規模に対しソフトウェア見積が小さいため、リスク管理と手戻り削減対策を実施する。

- ・有識者によるリスクの抽出とリスク管理を強化する。
- ・システム設計工程でのデザインレビューを強化する。

(4) Dゾーン

計画コスト内のゾーンであり、更なる効率化をねらう。

- ・リソース投入時期の調整で工期短縮を図る。

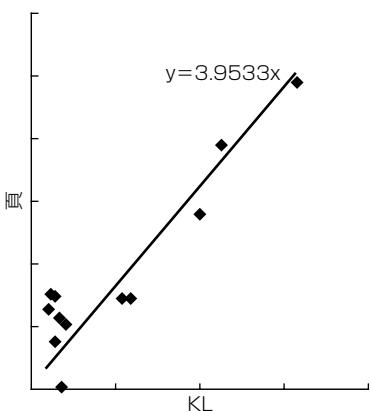


図2. 指標の散布図と近似曲線(サンプル)

表2. 品質指標の仮決値と決定表

プロセス	品質指標	単位	Aゾーン		ゾーン別目標品質指標				
			傾き	仮決値	A	B	C	D	E
システム 設計	ドキュメント量	頁	3.953	4.0	a1	b1	c1	d1	e1
	レビュー工数密度	HR/頁	0.000	0.1	a2	b2	c2	d2	e2
	レビュー指摘密度	件/頁	0.000	0.2	a3	b3	c3	d3	e3
ソフトウェア 設計	ドキュメント量	頁	5.000	5.2	a4	b4	c4	d4	e4
	レビュー工数密度	HR/頁	0.000	0.2	a5	b5	c5	d5	e5

(5) Eゾーン

ソフトウェア規模に対しソフトウェア見積が大きいため、経費面を監視する対策を実施する。

- ・プロジェクト計画書のテーラーリングを実施する。
- ・計画コストの精度向上と原価低減活動を強化する。

2.2.2 ゾーン別目標品質指標の設定

ゾーン定義と並行して、定量的品質管理を進展させるためにゾーンごとに目標品質指標の設定を行った。対象とする品質指標は、設計ドキュメントの頁数に対するレビュー指摘密度(件/頁)、プログラムの生産量に対する試験での欠陥密度(件/KL)などである。これら品質指標の目標値を算出するために、品質データの実績値と各指標間の相関分析を実施し、相関係数 $r = 0.70$ 以上を示す指標間の直線近似を求め、直線の傾きから指標値の仮決めを行った(図2)。目標品質指標は、この仮決値に目標とする係数を乗じて決定する(表2)。また係数の設定には、各ゾーンのプロジェクト特性、上流工程の品質強化の観点、及び過去の経験や実績値を踏まえ重みづけを行い、改善値も含めた適正な目標品質指標を決定した。

3. プロジェクトでの適用評価

3.1 改善施策事例

ゾーンごとのプロジェクト特性に応じた改善施策(2.2節)は、重要なプロジェクトとゾーンごとのいくつかのプロジェクトに対して適用した。次に、複数のゾーンに適用した施策の例として、見積精度向上施策とコスト改善施策及びリスク管理施策について述べる。

(1) 見積精度向上施策(全ゾーン)

受注生産型プロジェクトでのソフトウェア見積の精度は、プロジェクトのQCD達成に直結する重要な要素であり、受注前から納品までの工程全般にわたり、すべてのゾーンに対して改善を行った。具体的には、見積タイミングを受注前と受注後に分け、受注前は経営層を含めた見積審査会議で見積の妥当性と組織戦略判断を行い、受注後はプロジェクト計画で計画コストの見直し精査の実施、納品までの工程では変更管理による仕様変更分の対策を実施した。またこれらのデータは、実績データとして蓄積し、見積基準へフィードバックできるようにした。

(2) コスト改善施策(全ゾーン)

コスト改善施策は、ゾーン特性を踏まえた目標コストを設定しゾーン別施策を展開することに加え、経費についてもプロジェクト費目別分析を行い費目別改善も推進した。具体的には、システム設計のコスト改善のために有識者による設計審査を実施し、過去経験の少ない技術を抽出してリスクとして見える化を行う等によってコストの改善につなげた。

(3) リスク管理施策(ゾーンA, B, C)

リスクは、その抽出と適切な時期までの対策が重要である。特にA, B, Cゾーンのプロジェクトについては、有識者参画によるリスク管理会議を実施し対策案の有効性評価も実施した。またこれらのリスクは、発生確率、影響度、対策コスト、処置期限などで一覧表としてまとめ予防措置を講じた。これによって予期しないコストの発生が回避され、プロジェクトのコストは計画どおりに完了するよう改善した。

3.2 目標品質指標の適用と分析

3.2.1 誤り検出指標から予測される指針の導出

目標品質指標に対する分析の指針は、過去の実プロジェクトでの経験から、次の予測される指針を導出した。

- ①設計工程では、計画値より実績が大きい場合、レビュー指摘内容を分析する。
- ②製作工程では、計画値より実績が小さい場合、レビューの実施、誤り内容の実情を調査する。
- ③試験工程では、計画値より実績が大きい場合、誤り内容の実情を調査する。

3.2.2 実情調査と分析結果

3.2.1項で示した指針に基づき、あるプロジェクトの品質分析を実施し(図3, 図4)，次のような評価となった。

図3は、誤り検出密度の計画値を“1”としたときの実績値を開発工程ごとに示したものである。図4は工程ごとの誤り混入と除去の関係を示したものである。

- (1) 図3から、設計工程では、レビュー指摘内容は誤字などの形式誤りが多く、誤り検出指標が大きくなっていた。またレビュー工数密度は計画値よりも小さかった。

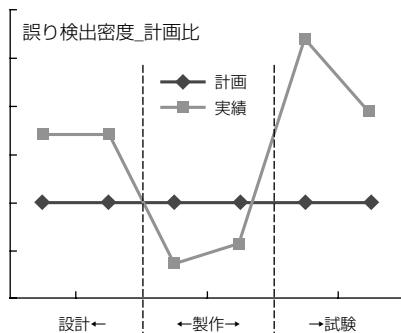


図3. 誤り検出密度計画比

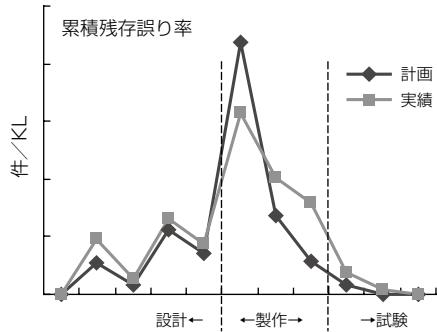


図4. 累積残存誤り率グラフ

(2) 図4から、設計工程は、計画よりも誤り混入が多く、誤り除去が少なく、先に述べた分析結果を裏付けている。同様に、製作工程、試験工程も指針に基づき実情を調査した結果、計画と実績の差異要因を特定することができ、目標値はプロセス評価の指針として有効であると判断できた。

4. 成 果

4.1 ゾーン別活動の成果

ゾーン別活動の成果は、図5のA、Bゾーンの散布図で示すとおりすべて計画コスト内で完了した。また図6のソフトウェア見積に対するコスト計画・実績差異で表現されるプロジェクト分布でも、改善前の標準偏差8.30が、改善後は3.24へとばらつきの大幅な減少が見られ、見積精度が向上し、プロジェクト制御が機能する仕組みに改善された。

4.2 目標品質指標の評価と課題

ゾーンごとに設定した目標品質指標は、プロセス評価に一定の指針を与え、実績との乖離(かいり)から要因分析を促すシグナルとして有効である。乖離がある場合は、実情を調査し必要な対策をゾーンごとに適切に実施することが

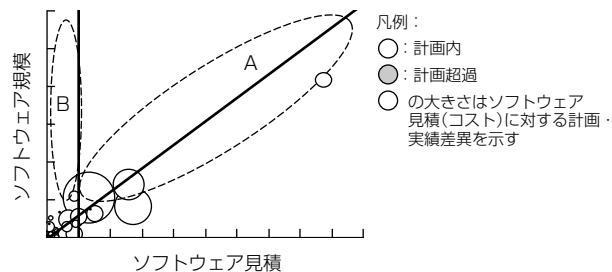


図5. A, Bゾーン・プロジェクトコスト計画差異

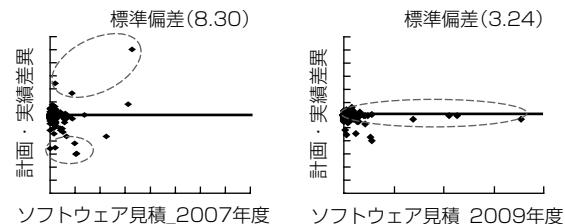


図6. ソフトウェア見積の計画・実績差異の散布図

でき、品質の早期確保に役立つ。また次の効果も期待できる。

- (1) 品質計画策定時の基準指標として活用することで品質計画の定量化が容易となる。
 - (2) 工程移行時のプロセス評価、プロダクト評価に活用することで品質対策を具体的に展開できる。
 - (3) 品質実績評価時の差異分析に活用することで改善へのアプローチが定量的に明確化される。
- 一方、目標品質指標の設定に際して、実績データの蓄積による品質指標の精度向上、及びこれらを用いた品質の予測を行うことが今後の課題である。

5. む す び

プロジェクトの特性に応じたソフトウェア・プロセス改善活動によって、プロジェクトの目標QCDの達成が図られるようになった。また、品質指標に関しても特性に応じた品質評価が行えるようになってきている。今後もこの手法で継続的に課題の抽出と特性に応じたプロセス改善を実施していくとともに、プロジェクトのデータを蓄積・分析し目標品質指標の精度向上を図っていく所存である。

参 考 文 献

- (1) (独)情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリングセンター編：定量的品質予測のススメ—ITシステムにおける品質予測の実践的アプローチ— (2008)

アナログASIC設計フロントローディング手法

武内良祐*
下沢充弘**
岡村茂一***

Promotion of Development Efficiency for Analog ASIC Design

Ryosuke Takeuchi, Mitsuhiro Shimozawa, Shigekazu Okamura

要 旨

製品仕様に特化して開発する半導体デバイスであるASIC(Application Specific IC)では近年、市場での差別化のため高性能な無線機能や高効率電源など要求される機能が増加し、仕様も複雑となっている。特に車載用ASICでは電子キーシステムやETC(Electronic Toll Collection)など無線応用の製品があり、その無線機能を実現するアナログASICを短期間で開発することが求められている。

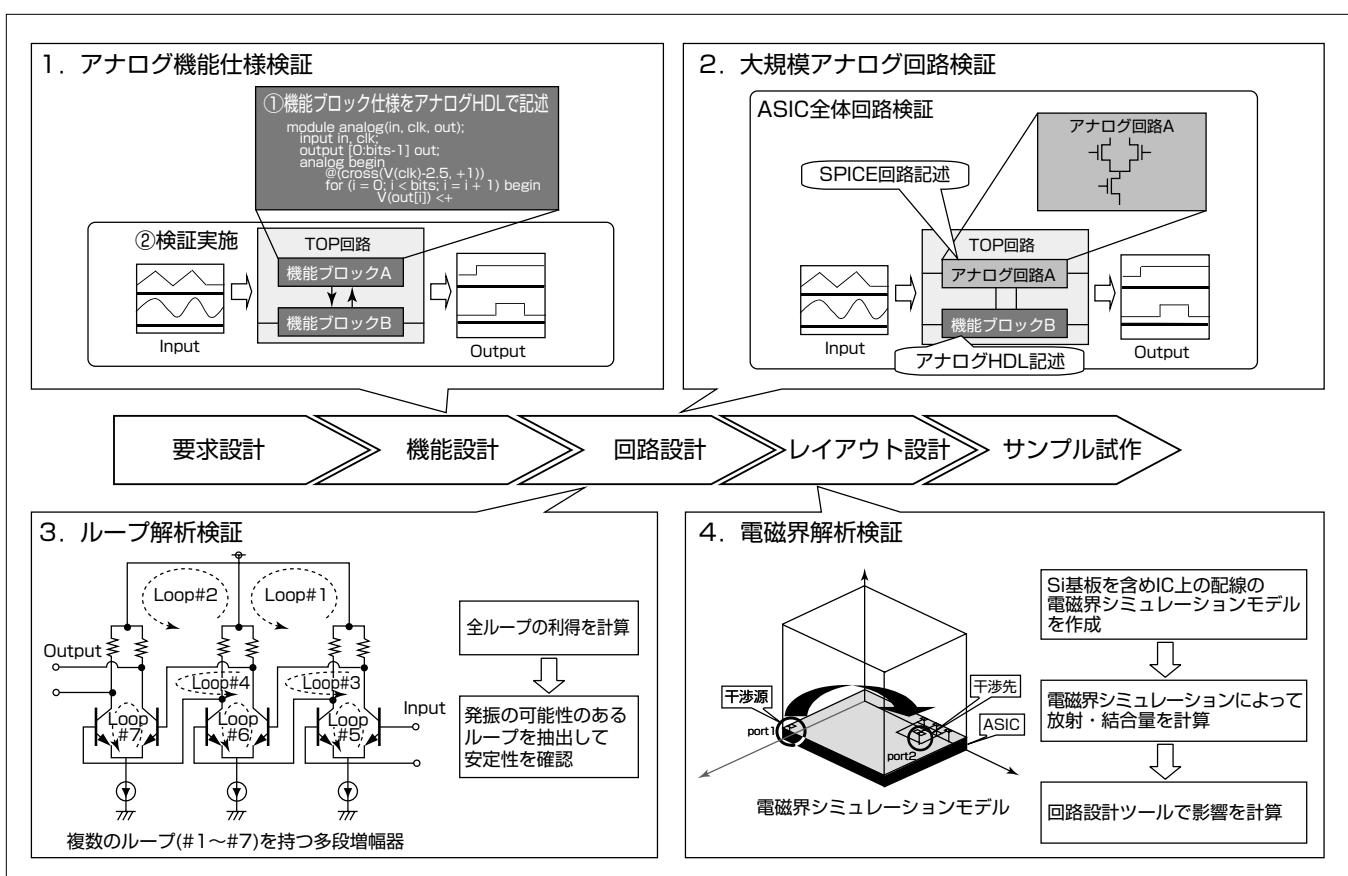
これまで半導体の設計検証技術は、デジタル回路設計分野で著しく発展してきた。アナログ回路設計分野では、ノイズや干渉などの物理現象が存在しデジタル回路のように検証モデルが抽象化できず、デジタルASIC開発では実施可能なASIC全体の検証が実施できないなどの問題がある。さらにアナログASICでは実デバイスとモデルの差異があ

るため、設計→試作サンプル製造→評価を繰り返して開発を進める手法が一般的である。

本稿では、この状況を改善し短期間かつ効率的にアナログASICを開発することを目的に、ASICのサンプル試作前に設計品質を向上させる取組みとして実施しているフロントローディング手法について述べる。

具体的な取組みとしては次のとおりである。

- (1) 機能記述言語を用いたアナログ機能仕様の検証
- (2) 機能記述言語と回路レベルの混在シミュレーションによる大規模アナログ回路の検証
- (3) ループ解析による発振防止手法
- (4) 電磁界解析による回路間干渉の防止手法



アナログASIC開発設計フロントローディングのねらいと手法

設計フロントローディングによるアナログASIC開発改善のねらいと、各工程の改善手法を示している。各工程でこれらの手法を適用することで、開発上段階での工数は増加するが、ASIC製造後の不具合判明を大幅に削減できるため、ASICの製造費用や試験工数を削減でき、開発プロセス全体での開発費用・期間は減少する。

1. まえがき

近年、無線技術を応用したETC／DSRC(Dedicated Short Range Communication)や電子キーシステムの車載用製品に関してアナログASICは市場での製品差別化の重要なキーデバイスになっており、その開発期間の短縮が求められている。

アナログASICは、ノイズや干渉、製造ばらつきなど、様々な要因があるため、サンプル試作を繰り返して機能や性能を実現する開発手法が中心で、設計フロントローディングの取組みはデジタルASICほど進んでいない。逆にアナログASICの要求仕様は、低消費電力化・多電源化・低ノイズ化・高耐圧化など複雑度を増しており、試作サンプル製造開始までにいかに問題点を検出して、試作回数を削減し開発期間を短縮するかが重要になっている。

本稿では、アナログASIC開発で当社が適用したフロントローディングの手法について述べる。

2. アナログ機能仕様検証

これまでの開発では、アナログ回路の機能仕様について自然言語で記述しており、その動作を正確にブロック設計者間で共有できず、解釈の齟齬(そご)が発生し機能不具合の原因になっていた。

アナログ仕様を厳密に定義でき、シミュレーション可能な言語で記述することで不具合の早期検出が可能である。現在、verilog-AMS^(注1)やVHDL-AMS^(注2)などのアナログHDL(Hardware Description Language)が提案されている。

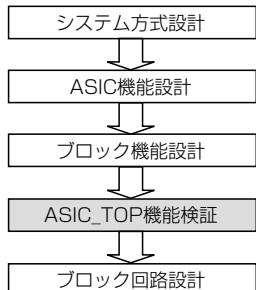
その記述形式は、出力を入力値から関数で定義する抽象度の高いレベルから、回路構成を記述した抽象度の低いレベルまで幅広い記述が可能であり、どのような効果をねらうかでその記述のレベルも選択する必要がある。図1に示す各ステップでの記述レベルと改善される効果について説明する。

(1) システム方式設計

ASIC化の範囲を規定せず、機能を伝達関数など数式、表のレベルで記載し、方式の妥当性を検証

(2) ASIC機能設計／ブロック機能設計

ASIC化の範囲を規定し、周辺回路とのインターフェース



を時間と電圧で規定。各制御信号を動作レベルで記述し、インターフェース機能仕様を明確化

(3) ASIC_TOP機能検証

(2)で設計したASICの各ブロックのアナログHDLを接続したASIC_TOP(ASICの最上階層)の回路図を用いて各ブロックの制御仕様(電源投入からのシーケンス、各動作モードの遷移など)をシミュレーションによって確認

(4) ブロック回路設計

基本的なアナログ回路(オペアンプなど)レベルの記述を行い、(3)の検証環境を活用してブロックの設計の周辺ブロックとの整合性を検証

図2にASIC_TOPアナログ機能検証を示す。このASIC_TOP機能検証で作成したASICの周辺やASICの各アナログHDL記述を、その後のブロック回路設計の検証のテストベンチとして利用することで検証が容易に実施できる効果がある。これによってブロック設計作業は、アナログHDLで定義されたインターフェース電圧範囲、動作タイミングなどを確認でき不具合の混入を抑止することができる。

(注1) アナログ機能を記述できる言語。IEEE1076.1として標準化されている。

(注2) 同じくアナログ機能を記述できる言語。IEEE1364として標準化されている。

3. 大規模アナログ回路検証手法

回路設計・検証フェーズでは、SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)^(注3)シミュレータが使用されてきたが、シミュレーションのアルゴリズムが回路方程式を解く方式であるため、チップレベルの大規模な検証は数週間程度の実行時間が必要で十分実施できていなかった。これによって機能レベルの不具合が評価工程で判明するケースが少なくなかった。

2章で述べたASIC_TOPレベルの接続図と各ブロックのアナログHDLの検証環境で、詳細設計を実施した回路をSPICEシミュレーションのモデルとして、その他のブロックをアナログHDLのままでSPICEシミュレーションとアナログHDLの混在シミュレーションを実施することで、アナログ回路全体をSPICEシミュレーションで検証する場

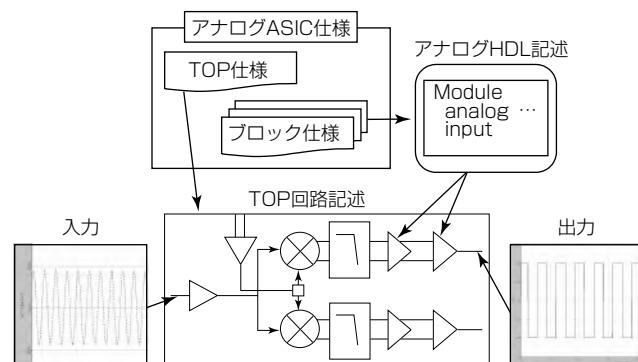


図2. ASIC_TOPアナログ機能検証

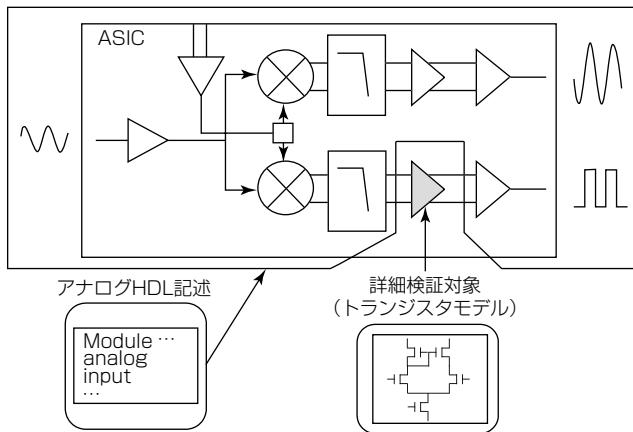


図3. 大規模アナログ回路の検証手法

合と比べて、50~1,000倍高速に検証が可能となった。シミュレーション速度の高速化は、SPICEネットとアナログHDLの割合に依存するため、検証項目に応じて必要な部分だけSPICEモデルにすることで大規模なアナログ回路の検証が高速に実施できる(図3)。

別の大規模検証手段としてSPICEシミュレータも高速化のアルゴリズムが開発されており、検証できる回路規模は増加しているが、SPICEシミュレーションの場合、すべての詳細設計が完了しないと全体の検証が開始できない。この手法では、設計完了部分があればTOPからの検証が開始できるため、フロントローディング手法として有効である。

無線用アナログASIC開発に適用した結果、従来400時間のSPICEシミュレーション時間を1時間に短縮することができ、機能的不具合をサンプル試作前に検出する成果を得ることができた。

(注3) アナログ回路検証に広く利用されている市販シミュレータである。

4. ループ解析発振防止検証手法

発振とは、回路に入力信号がないにもかかわらず、外部に不要信号が outputされる状態である。発振が生じる条件は、回路から出力された出力信号が入力端子に戻る帰還経路(ループ)が形成され、そのループの利得 G_L が1以上、かつ、通過位相 Φ_L が、360度の整数倍となることである。アナログASIC、特に高周波ASICでは高利得の増幅器が多段接続され、かつ、周波数が高いため、電源の配線などを介して容易にループが形成される。また高周波では、チップ上の接地端子と外部の地導体とを接続するワイヤが持つインピーダンスが無視できないため、接地端子の電位がゼロとならず、ループが形成される場合もある。一方、チップサイズの小形化には、各回路の電源端子や接地端子の共通化が不可欠であることから、端子共通化時の発振の有無、すなわち安定性を予測する必要がある。

ループ解析は、ループにおける G_L と Φ_L とを計算して発

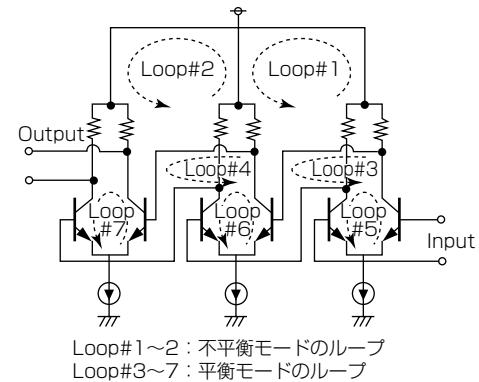


図4. 従属接続形差動増幅器の構成と考慮すべきループ

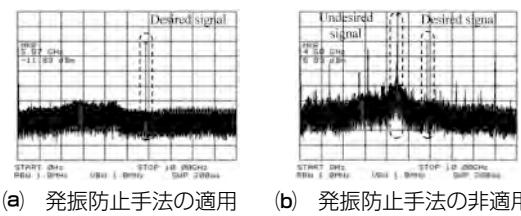


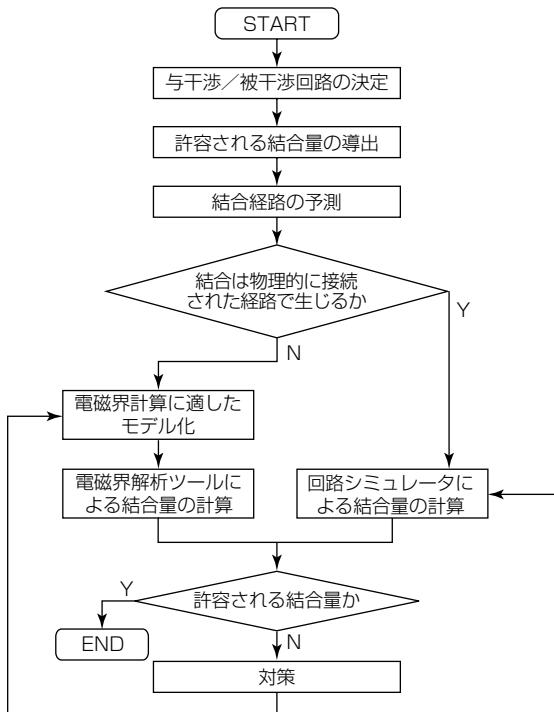
図5. 5 GHz帯多段増幅器ICの出力スペクトラムの測定結果

振の可能性を予測する手法であり、不平衡の入出力端子を持つ高周波増幅器についてはすでに確立している⁽¹⁾。さらにこれを差動増幅回路に拡張することで⁽²⁾、ASIC内の多段の差動高周波増幅器でも発振を抑制する設計が可能となる。ただし、高周波回路を含むアナログ回路では信号経路を構成する配線によって通過位相が変化する。したがって配線が確定する前の回路設計の段階では G_L のみに着目してループ解析を行い、レイアウト設計後に、 Φ_L も考慮したループ解析を行う。なお、回路設計の段階で $G_L \ll 1$ を満たせば、一般にレイアウト設計後もこの条件を満足するので、再度のループ解析は不要となる場合が多い。またレイアウト後のループ解析でも、まず G_L のみ計算し、 G_L が発振条件を満たす場合は Φ_L も計算すればよい。ただし、高周波回路では Φ_L の計算で十分な精度が得られない場合もあるので、 $G_L < 1$ となるようにするのが妥当である。

図4に、従属接続形差動増幅器の構成と考慮すべきループを示す。いずれのループについても安定化の手法としては、各増幅器の電源端子及び接地端子の分離や、安定化抵抗Rの追加があげられる。ただし、端子の分離はチップ面積の増加、Rの追加は利得の低下となるので、上記ループ解析結果をもとに適切な手法をとる。

図5はこの手法を適用して設計した5 GHz帯多段増幅器ASICの出力スペクトラムの測定結果(図5(a))であり、比較のために適用せずに設計したASICの出力スペクトラム(図5(b))を合わせて示す⁽²⁾。

この手法の適用によって発振が抑制され、有効性を確認できる。



- ・レイアウト変更
- ・地導体配置／分離の徹底
- ・回路変更による許容結合量の緩和
- ・配線変更
- ・バイパスコンデンサの追加
- ・回路変更による許容結合量の緩和

図6. 電磁界解析を含む回路間結合の検証フロー

5. 電磁解析レイアウト検証

アナログASIC、特に高周波アナログASICでは、回路間の十分なアイソレーションが得られず、信号がほかの回路に結合して、特性が劣化する場合がある。結合の経路として、電源配線など想定外の物理的な接続のほか、配線の有無に関係しない電磁界結合がある。これについては、レイアウトをもとに電磁界解析を行って、結合を抑制する必要がある。ただし、あらかじめ許容できる結合量を明確にしたうえで、計算量を削減するためにレイアウトを電磁界解析に適したモデルに置き換えることで、効率的なレイアウト検証が可能となる。

図6に、配線による想定外の結合を含めたレイアウト検証のフローを示す。また、図7、図8に5.8GHz帯のETC車載器用高周波アナログASICで、送信回路と局部発振回路間の結合に電磁界解析を適用した例を示す⁽³⁾。

図7はチップ上の回路間の結合を計算する電磁界シミュレーションモデル、図8(a)は結合を抑制しない場合の送信スペクトラム、図8(b)は抑制した場合の送信スペクトラムである。

図8(a)では結合によってスペクトラムのアンバランスが生じている。これに対し図8(b)では、電磁界解析で求めた結合量とスペクトラムのアンバランス量の関係を計算して、

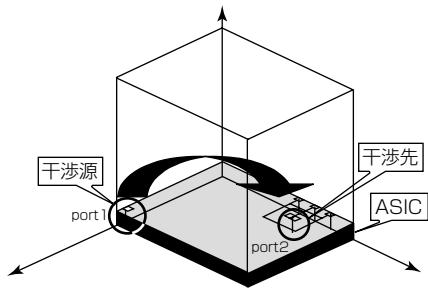


図7. 三次元電磁界シミュレーションモデル

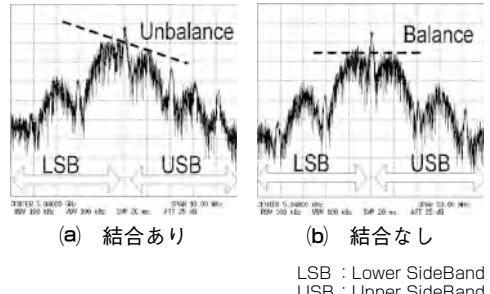


図8. 結合の有無による送信スペクトラムの違い

改善すべき結合量を導出したうえで、(1)送信回路と局部発振回路をIC上の対角位置に配置する、(2)回路間へ地導体を配置する、(3)チップ厚さを削減するなどの対策をとった結果、回路間の結合量を低減して、アンバランスのない良好なスペクトラムを得た。

6. むすび

近年製品の重要なキーデバイスになっているアナログASICの設計フロントローディングについて4種の手法について述べた。今後、さらにフロントローディング手法を加えてアナログASICの試作回数を削減し、製品の開発期間短縮を図る予定である。

参考文献

- (1) Takagi, T., et.al.: Analysis of high power amplifier instability due to $f_0/2$ loop oscillation, IEICE Trans. on Electron., E78-C, 936~943 (1995)
- (2) Shinjyo, S., et.al.: ASK and $\pi/4$ -QPSK Dual Mode SiGe-MMIC Transceiver for 5.8GHz DSRC Terminals Having Stabilized Amplifier Chain, IEEE MTT-S Symp., 1071~1074 (2008)
- (3) 堤 恒次, ほか: SiシステムチップにおけるPA-VCO間干渉の検討, 電子情報通信学会技術研究報告 MW2005-182 (2006)

電子機器におけるフロントローディング型熱設計 —映像情報機器、薄型液晶テレビへの適用—

児玉拓也*
菅野直樹**
横山雅哲**

Front-loading Thermal Design Method of Electronics Packaging—Application for Image Information device and LCD TV—
Takuya Kodama, Naoki Kanno, Masaharu Yokoyama

要 旨

顧客ニーズの多様化に伴い、電子機器の高性能化の要求はめざましい。また、他社との熾烈(しれつ)な競争では、いかにニーズにあった製品をタイムリーかつ低コストで市場投入できるかが重要となる。その中で製品競争力を維持するためには、各開発フェーズで適切な設計対策案を盛り込み、QCD(Quality/Cost/Delivery)の全体改善を目指した設計フローが必要である。特に熱問題については、いわゆる“火消し型”的試作による現物ベースの後手熱対策から、原理・原則に基づく検討とシミュレーション技術を活用することで、予想される熱問題を見極めた“フロントローディング型”熱設計への移行が不可欠となる。

三菱電機は全社的にデジタル設計技術を導入したフロントローディング型熱設計手法を構築し、多機種にわたる製品設計に適用してきた。この手法ではSTEP1とSTEP2を設け、開発フェーズで検討する項目と設計インプット、アウトプットを明確化することで段階的な熱設計を行い、

早期に問題の解決を見極めた開発を実現できる。

(1) STEP1

予想発熱、筐体(きょうたい)サイズ、及び、冷却方式の検討など製品の基本性能を決定する機能設計で手計算・表計算レベルのオーダー検討によって、適切な設計の見極めを行う。

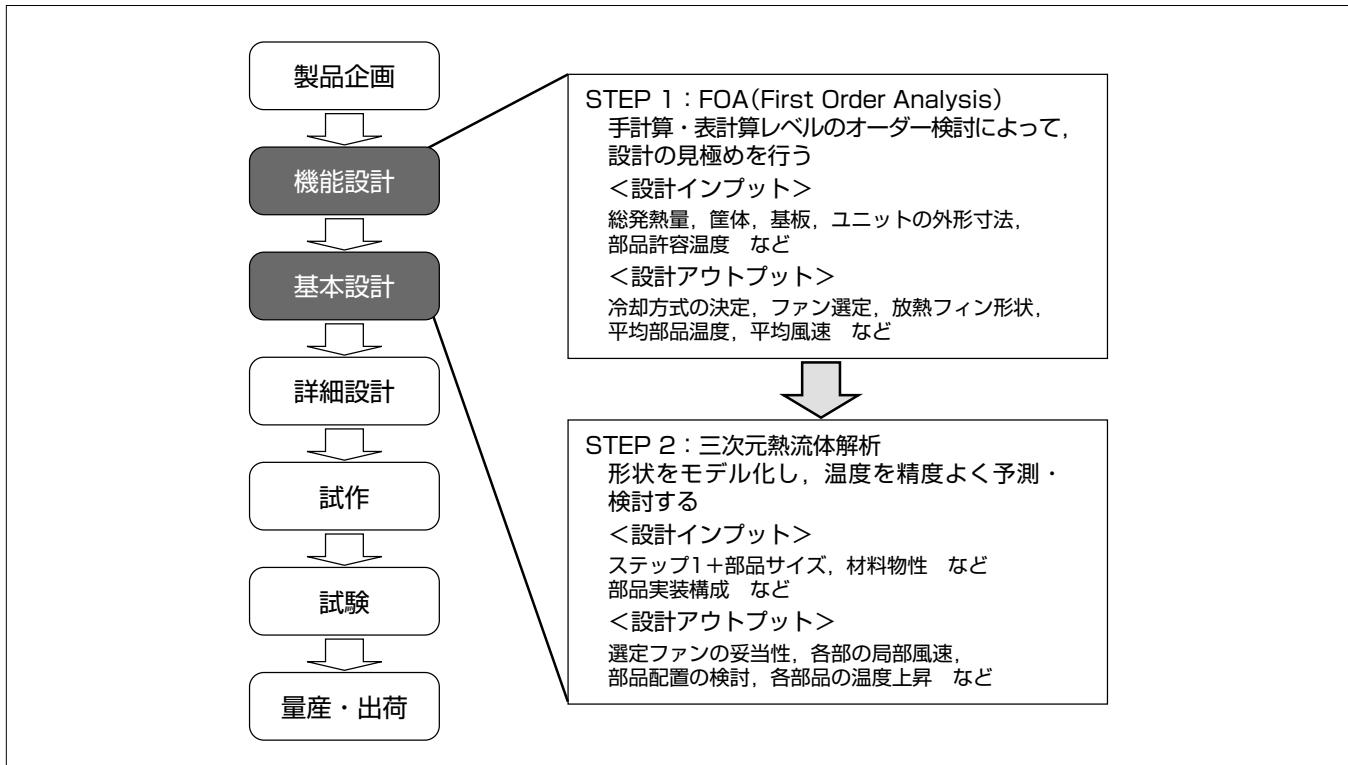
(2) STEP2

部品配置、冷却の風路など三次元形状による熱流体シミュレーションによって温度・流れを精度よく予測・検討する。

本稿では短期開発で製品化を実現したLED(Light Emitting Diode)-DLP^(注1)方式リアプロジェクタシステムと世界初^(注2)となるハードディスクとブルーレイドライブを内蔵した薄型液晶テレビに適用した熱設計事例について述べる。

(注1) DLP(Digital Light Processing)は、Texas Instruments, Inc.の登録商標である。

(注2) 2009年8月19日三菱電機株広報発表時(民生用液晶テレビにおいて)



1. まえがき

顧客ニーズの多様化に伴い、電子機器の高性能化の要求はめざましい。また、他社との熾烈な競争では、いかにニーズにあった製品をタイムリーかつ低コストで市場投入できるかが重要となる。その中で製品競争力を維持するためには、各開発フェーズで適切な設計対策案を盛り込み、QCDの全体改善を実現した設計フローが必要である。特に熱問題については、いわゆる“火消し型”の試作による現物ベースの後手の熱対策から、原理・原則に基づく検討とシミュレーション技術を活用することで、予想される熱問題を見極めた“フロントローディング型”熱設計への移行が不可欠となる。

当社は全社的にデジタル設計技術を導入したフロントローディング型熱設計手法を構築し、多機種にわたる製品設計で実践してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

フロントローディング型設計の概念を図1に示す。フロントローディング型設計とは、“設計自由度の高い構想段階や基本仕様を決定する設計上流で十分な検討を行い、適切な対策を盛り込むことで下流工程で生じる設計不具合を未然に防ぎ、結果として設計品質の向上(Quality)，開発費の抑制(Cost)，開発期間の短縮(Delivery)を達成する設計手法”である。三次元CAD(Computer Aided Design)や大規模の解析CAE(Computer Aided Engineering)が普及した現在の設計環境では、設計上流でデジタルベースの詳細かつ高精度な設計検証が可能となった。

フロントローディング型熱設計では、扉図に示すように検討ステップを2段階に分け、それぞれの開発レベルにあつた設計インプット／アウトプットを行うことで効率的に検討を進めていく。

(1) STEP1

予想発熱、筐体サイズ、及び、冷却方式の検討など製品の基本性能を決定する機能設計で手計算・表計算レベルのオーダー検討によって、適切な設計の見極めを行う。

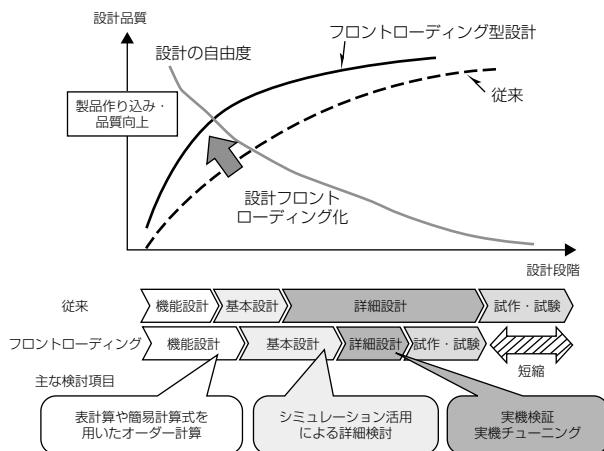


図1. フロントローディング型設計の概念

(2) STEP2

部品配置、冷却の風路など三次元形状による熱流体シミュレーションによって温度・流れを精度よく予測・検討する。

本稿では短期開発で製品化を実現したLED-DLP方式リアプロジェクタシステムと世界初となるハードディスクとブルーレイドライブを内蔵した薄型液晶テレビに適用した熱設計事例について述べる。

2. LED-DLP方式リアプロジェクタシステムへの適用

24時間、365日連続で5～10年の長期運用が一般的である監視用ディスプレイでは信頼性と保守性が強く求められる。従来、DLP方式リアプロジェクタでは光源として高圧水銀ランプを使用してきた⁽³⁾。高圧水銀ランプは点灯時のランプ内部が高圧のため、微細なクラックで破裂する可能性があり、ランプ切れ対応のためランプチェンジャーシステムを導入している。

一方、LED光源は高圧水銀ランプに比べ、約6倍の光源の長寿命化が可能となり、メンテナンスフリーを実現できる。さらに有害指定物質である水銀を使用せず、輝度(光出力)をコントロールすることで消費電力を抑制できる環境配慮型の次世代光源である。しかしながらLEDパッケージは表面積が小さく、可視光で消費されたエネルギー以外はすべて熱となるため、発熱密度が高くなる。また、輝度は温度依存性が強く、十分な信頼性と製品寿命を持たせるには温度制御が必要となる。さらに、図2に示すように通常では複数台で使用するため、單一画面のみならず、大規模表示システム全体で高い信頼性が必要となる。

2.1 STEP1における取組み

熱設計を行う上ではまず、複雑な筐体の放熱経路を熱回路でシンプルにあらわす。LED光源の放熱経路の簡略図を図3に示す。筐体内的温度上昇($T_{in} - T_a$)、ヒートシンクの温度上昇($T_{base} - T_{in}$)、ヒートシンクとLEDを熱的に接触させる放熱シートの温度上昇($T_{base} - T_{LED}$)の3つの熱抵抗によってLEDの温度上昇値が決まる。それぞれの熱抵抗を低減させるため、以下の方針で設計検討を行った。

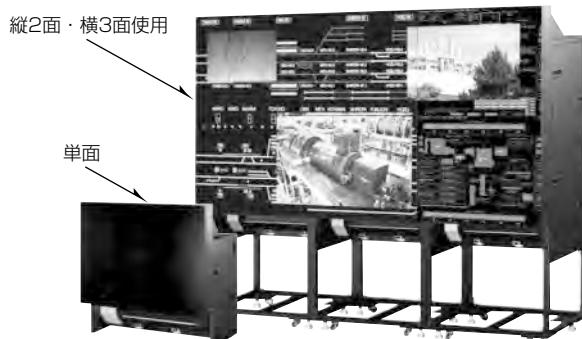


図2. LED-DLP方式リアプロジェクタシステム

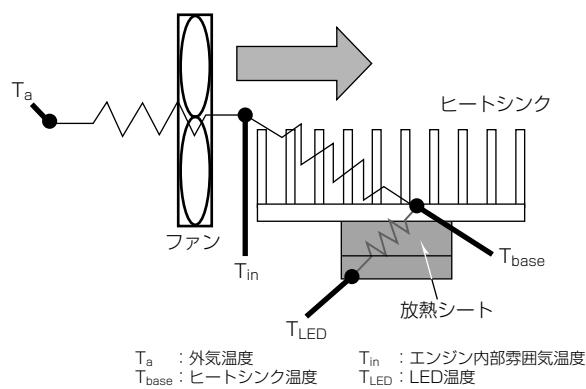


図3. 热回路によるLED光源の放熱経路

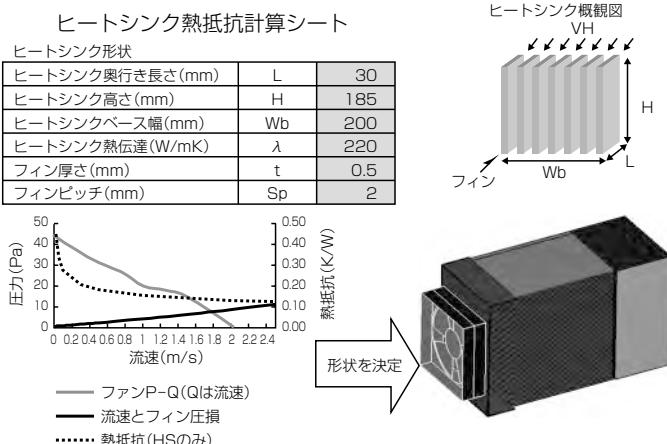


図4. 表計算ベースによるヒートシンクの概算検討

①筐体内風路の最適配置による換気効率の向上

②小型コンパクトヒートシンクの開発

③放熱シートの熱抵抗低減

ここではSTEP1で実施した一例として②について述べる。基本設計を行う段階では未確定な設計要素が多い。そのため、図4に示す表計算などを用いた簡易的に行える検討が重要である。この設計では表計算ベースによるヒートシンク設計を行った。設計インプットはヒートシンク形状(包らく形状、フィンピッチ、フィン厚さなど)とP-Q特性などのファンの情報であり、アウトプットとしてヒートシンクの熱抵抗を得ることができる。この計算法でパラメータスタディを繰り返し、高密度実装の限られた空間で最大限の性能を引き出すヒートシンク形状を開発した。

2.2 STEP2における取組み

STEP2では三次元熱流体解析による筐体内の部品レイアウト及び、風路設計を行う。設計インプットはSTEP1に加え、各部品の形状と発熱量、材料物性であり、アウトプットとして流速の分布と各部品の温度上昇が得られる。

部品の位置関係、風路の確保など三次元熱流体解析を駆使することで、最大限の性能を引き出すことのできる放熱構造を実現した。図5に筐体内部を換気する流速の分布を示す。さらに、リアプロジェクタは1面50~80インチの表

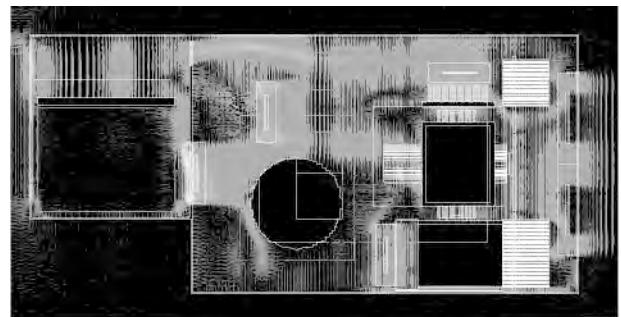


図5. 三次元詳細形状による熱流体解析(流速分布)

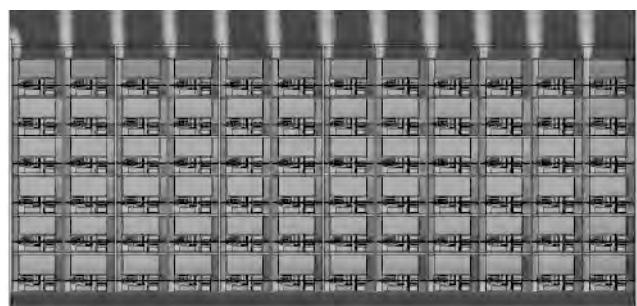


図6. 72面規模における大規模熱流体解析(温度分布)

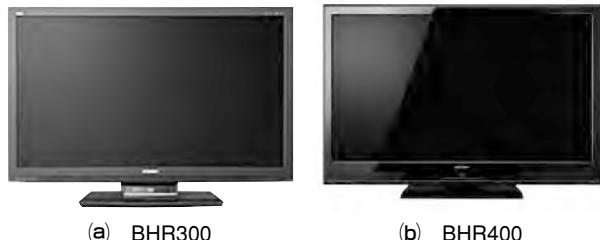


図7. "REAL" BHR300, BHR400シリーズ

示装置をタイル状に配置して映像を作り出すため、横12面縦6面の大規模監視システム(図6)での熱流体解析を実施した。実機評価前段階で多段積みの影響を予測し、実測でも追加対策なく開発を完了した。

3. 薄型液晶テレビへの適用

2011年の地上デジタル放送への移行を直前に控えて液晶テレビの普及は著しく、消費者ニーズにあったタイムリーな市場投入のために新規製品の開発短期化を目指すと同時に、品質とコストを考慮した設計が必要である。当社では2009年に液晶テレビ"REAL" BHR300シリーズを、2010年にはLEDバックライトを採用した"REAL" BHR400シリーズを市場投入した(図7)。

BHRシリーズはこれまでの液晶テレビにハードディスク(HDD)、ブルーレイドライブを搭載した世界初のオールインワンモデルであり、テレビの視聴だけでなくHDDやブルーレイへの録画・再生をリモコンによる簡単操作で行うことができ、他社との差別化を図っている。液晶テレビでは騒音問題・信頼性の点からファンレス(自然空冷)で薄型筐体の製品化を実現する必要がある。

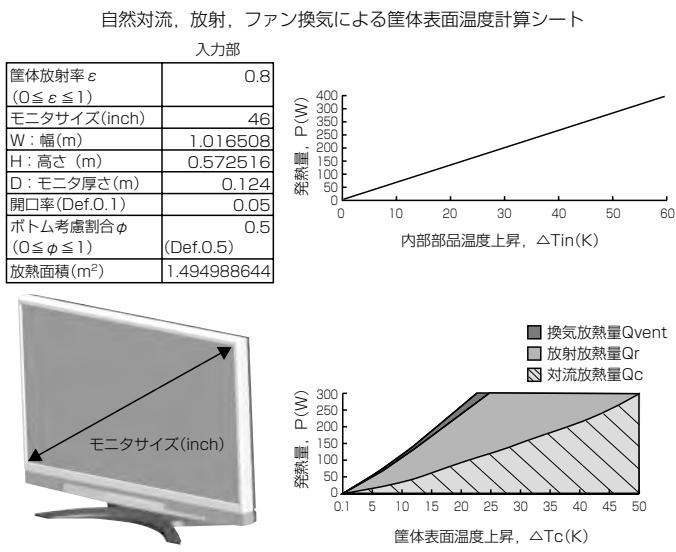


図8. 表計算ベースによる概算検討

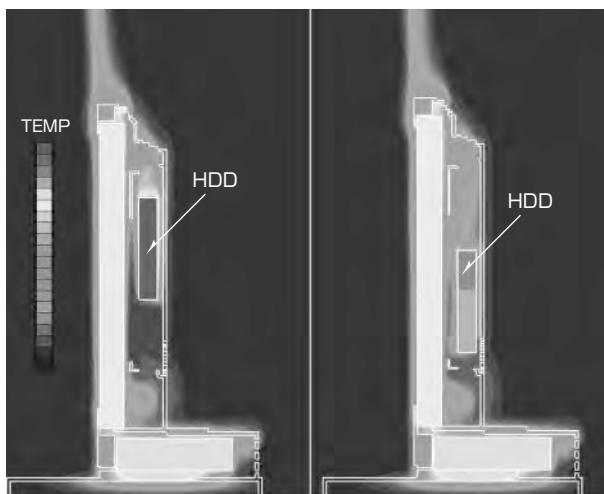


図9. 三次元熱流体解析によるHDD実装検討

3.1 STEP1における取組み

STEP1では自然空冷で許容温度に納まる見込みがあるかを図8に示す表計算ベースの簡易計算ツールによって検討した。筐体サイズ、見込まれる発熱量をインプットすることで、筐体表面と内部の自然対流によって換気される排熱量を計算し、筐体内の空気温度及び筐体表面の温度をアウトプットする。この検討の結果、予想発熱量では自然空冷で可能と判断し、部品配置など詳細に検討するSTEP2へ進んだ。

3.2 STEP2における取組み

STEP2では熱流体解析を用いた部品レイアウト検証を行う。ここではHDD、ブルーレイドライブ、電源系基板、信号系基板、モニタ、バックライトなど主要部品に発熱を与える、液晶テレビ内に実装される各部品の温度上昇を解析によって検証した。図9はHDDのレイアウト変更に伴う温度上昇の差異である。煙突効果によってHDDの温度上昇を抑制し、熱評価では対策レスで温度条件をクリアすることができた。

4. むすび

フロントローディング型熱設計として、各開発フェーズでSTEP1、STEP2と称し、段階的に検討する熱設計項目を明確にした設計手法について述べた。この手法を開発製品へ適用することで効率的に各設計フェーズに合致した熱検討が実施でき、ニーズにあった製品をタイムリーかつ低成本で市場投入ができる。さらに設計品質の向上(Quality)、開発費の抑制(Cost)、開発期間の短縮(Delivery)を達成することができる。

参考文献

- (1) 小林 孝, ほか: カーナビ開発におけるフロントローディング実装設計, 三菱電機技報, 80, No.10, 651~653 (2006)
- (2) 児玉拓也, ほか: 高密度電子情報機器への熱流体解析の適用, 第22回エレクトロニクス実装学会講演大会講演論文集, 87~88 (2008)
- (3) 渋江重教: データウォール用リアプロジェクト"PH70シリーズ", 三菱電機技報, 83, No.2, 139~143 (2009)

谷 則行*
吉沢二郎*
菊地宏満**

大型板金筐体の落下衝撃強度検証技術

Method of Drop-impact Analysis for Large Enclosure

Noriyuki Tani, Jiro Yoshizawa, Hiromitsu Kikuchi

要 旨

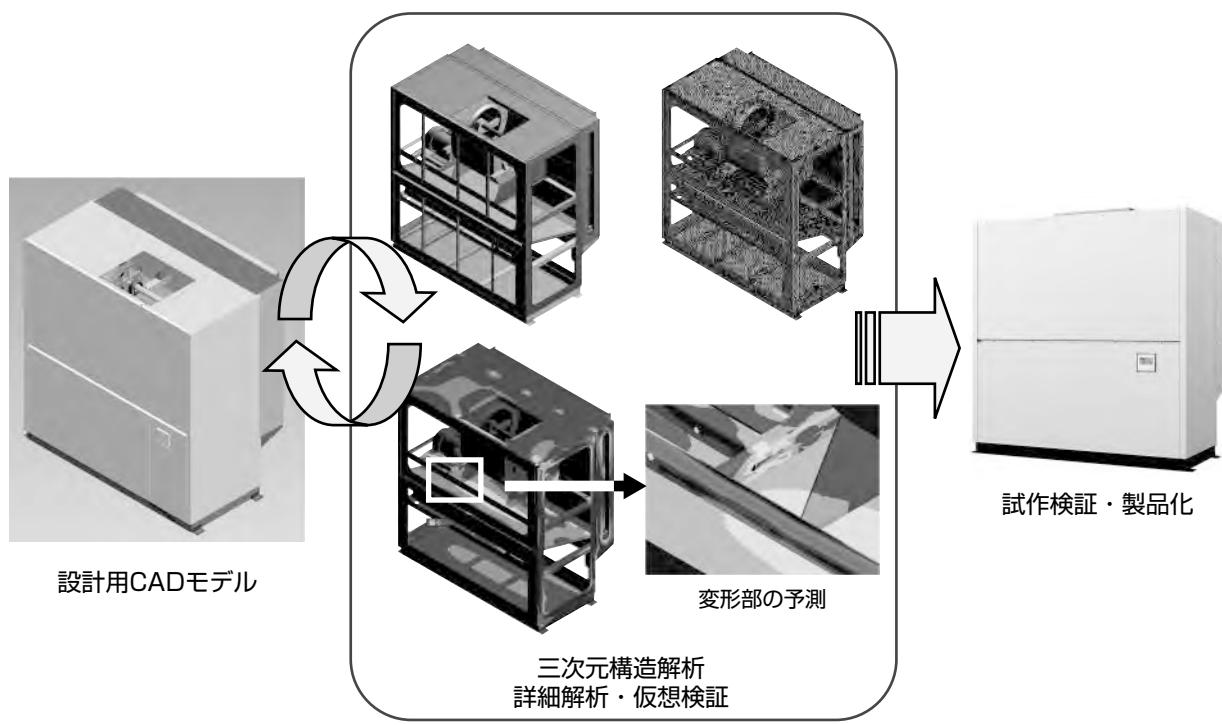
設備用パッケージエアコン(Package Air Conditioner: PAC)などの大型板金筐体(きょうたい)の構造設計では、出荷から据付けに至る輸送時の振動、衝撃に耐える強度確保が重要である。特に、落下衝撃に対する強度設計は、解析的な現象予測が困難であり、検証は実機評価試験(落下試験)に頼っていた。このため、試験による板金変形などの問題が起り、試作・試験後の筐体構造の見直し、改造などの設計手戻りが発生していた。

そこで、設計手戻りの抑制を実現するため、試作・試験前に強度検証を可能とする衝撃強度設計手法を構築した。

落下衝撃強度を予測するためには、衝撃の現象時間にわ

たる非定常な挙動を求める動解析を用いるのが一般的であるが、計算時間が長いため、設計期間内での適用が困難であった。そこで、短時間での検証を可能とするため、定常状態における力の釣合いから変形を求める静解析による検証方法を検討した。この結果、実機の落下試験結果から導出した衝撃荷重の予測式などの解析条件ルールと限界試験から求めた判定値を用いることで、静解析で落下試験の模擬が行えることを確認した。

この手法を用いることで、設計手戻りなく落下衝撃強度を確保することを可能とした。



大型板金筐体の落下衝撃強度検証技術

パッケージエアコン(PAC) 室内機などの大型板金筐体を持つ製品で、落下試験を行うものを対象に、試作前に落下強度の評価を行う技術開発を行った。静解析を使用し、落下を模擬した解析で発生応力を基準値と比較することによって試作前の検証を行い、設計手戻りの抑制や原価低減に貢献する。

1. まえがき

パッケージエアコン(PAC)室内機などの大型板金筐体は、輸送時の落下を想定した強度を確保する必要がある。従来、設計段階での検証手段は十分ではなく、実機評価試験(実機をロープでつるし、規定の高さより床に落とす試験(図1))によって、設計完成度を高めていた。このため、落下試験での板金変形などの問題によって設計手戻りが発生していた。また、試験には多くの費用がかかり、原価低減(原低)に向けた補強部品の削減やスリム化が促進できなかったという課題があった。

そこで、手戻りの抑制や原低推進のため、設計段階で検証可能な落下衝撃強度設計手法の開発が求められていた。

2. PACにおける落下衝撃強度設計の課題

PACの開発段階では、落下試験を実施したときに、筐体を構成する板金の変形や、板金同士をつなぐねじの変形などの問題がしばしば発生し、試作・試験後の筐体構造の見直しや補強などが設計手戻りの要因となっている。また、昨今の企業を取り巻く厳しい経営環境の中で、設計手戻りによる開発期間の増大や補強部材の追加によるコスト増大は、重要な開発課題となっている。

試作前に落下衝撃強度の検討ができるれば、試作・試験段階の不具合・手戻り発生を未然に抑制し、短期開発が可能となる。

また、補強の削減やスリム化が実現できれば、原低が可能となるが、実機試験での検証では限界がある。これらを実現するには、強度解析によって設計変更前後の剛性(変形)及び強度の定性的な傾向、又はその絶対値をいかに精度良く見積もれるかが重要となる。

そこで、大型板金筐体の落下衝撃強度を検証する技術を開発した。



図1. 実機評価試験(落下試験)

3. 落下衝撃強度検証技術

3.1 概 要

三次元構造解析は、三次元の計算格子(メッシュ)に対し、運動方程式を解くことによって、構造物の運動現象を解析する手法である。三次元構造解析には運動方程式の加速度項、速度項を考慮した動解析と、剛性項のみを考慮した静解析がある。落下は瞬間的(動的)な現象であるため、一般的には動解析で現象を再現するが、長時間の計算時間が必要(静解析の数十～数百倍以上)という課題がある。そこで、今回は限られた設計期間の中で検討を行うことを目的とするため、静解析を利用することとする。

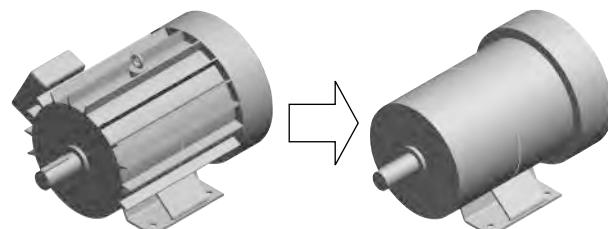
メッシュモデルの構築と解析条件によって、計算結果が大きく変わるために、これらの設定が非常に重要である。

3.2 メッシュモデルの構築

設計用CADモデルを使って、解析に使うための解析用CADモデルを作成する。解析用CADモデルは計算時間短縮のため、板金はシェル(薄板)化し、構成部品は細部形状を取り除いた概略モデルに変更する。例としてファンモータの簡略化を図2に示す。簡略化による質量の増減は、密度を調節することによって、現物と合わせる。

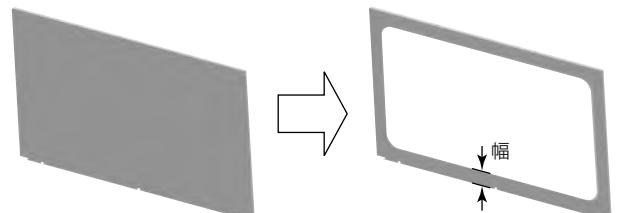
さらに、配管などの筐体の強度に影響のない部品は削除し、重さだけをモデル上に付加する。また、筐体の表面を覆う意匠パネルは静解析の性質上、実機よりも剛性が高く評価されることから、内部をくり抜くことで、剛性を下げた(図3)。このときのくり抜き量(図3(b)の幅)は、実機のひずみ測定を行い、剛性が等価となるように定めた(図4)。

次に、作成した解析用CADモデルからメッシュ生成を行う。メッシュのサイズについては解析時間と計算精度から総合的に判断し決定した。



(a) 設計用CADモデル(簡略化前) (b) 解析用CADモデル(簡略化後)

図2. 三次元モデルの簡略化(ファンモータの例)



(a) 設計用CADモデル(くり抜き前) (b) 解析用CADモデル(くり抜き後)

図3. 意匠パネルのくり抜き

解析用CADモデルとメッシュモデルを図5に示す。今回の例では要素数は約14万となった。

メッシュモデルの構築まで大体2日間程度の時間を要する。

3.3 解析条件の設定

解析条件は、落下を模擬するため、落下時の衝突面(底面)を固定し、加速度を付加することとした。このときの加速度は、次の理論式から算出する。筐体を質量とバネ定数からなる1質点系と考え、運動方程式(1)と、エネルギー保存則式(2)から加速度 α について解くと式(3)が導出される。ここでバネ定数 K は、筐体全体の剛性とし、静解析より求めることができる。

$$F = M\alpha \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Mgh = \frac{1}{2}KX_{\max}^2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{2ghK}{M}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

F : 荷重(N), M : 質量(kg), α : 加速度(m/s^2),

g : 重力加速度($9.8m/s^2$), h : 落下高さ(m),

K : 筐体剛性(N/m), X_{\max} : 最大変位(m)

理論式(3)から算出された結果と実機の測定結果(重量物の応答加速度)を図6に示す。落下高さを変化させて、試験を行ったところ、実測値と理論値がよく一致していることが分かる。また、実機の測定結果から、落下方向だけでなく幅方向と奥行き方向にも無視できない加速度が発生していることが分かった(図7)。これによって、3軸同時に加速度を入力することとした。幅と奥行き方向の加速度は、図7に示す測定結果の比率を使用した。

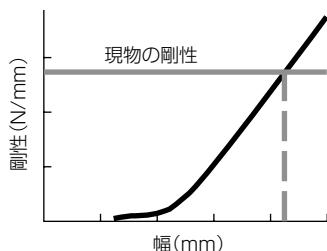
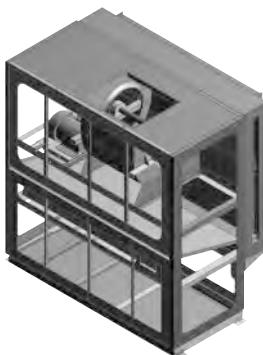
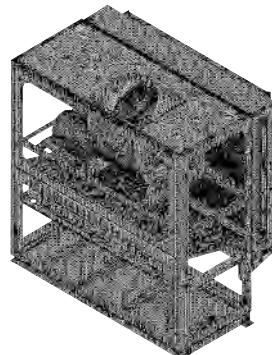


図4. 意匠パネルの幅と剛性の関係



(a) 解析用CADモデル



(b) メッシュモデル

図5. 解析用CADモデルとメッシュモデル

3.4 計算時間及び解析結果の評価

計算時間はメッシュ数や計算機のスペックにもよるが、平均的に1ケース約30分程度である。この程度の計算負荷であれば、1日に数ケースの設計案を比較・評価することが可能であるため、十分に実用的である。

解析結果を図8に示す。筐体の中央部の梁(はり)に高応力が集中していることが分かる(図8(b))。この応力集中部位が、実機の落下試験での変形部位(図9)と一致することを確認した。さらに動解析も実施し、応力集中部位の一致を確認した(図10)。この部位に発生している応力値を基

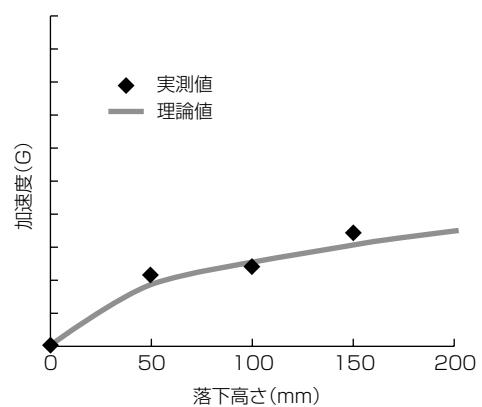


図6. 加速度の理論値と実測値

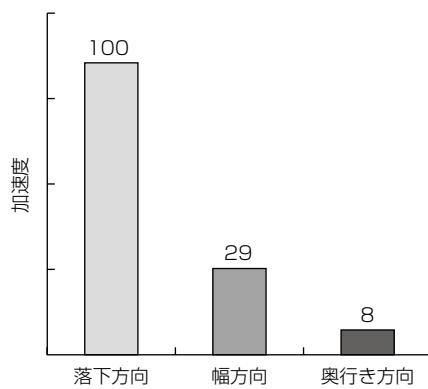
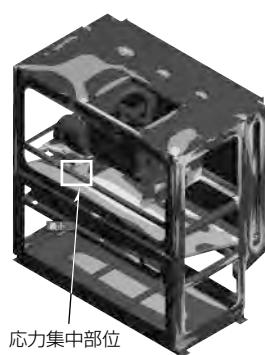


図7. 落下時にかかる加速度と比率



(a) 解析結果(応力分布図)



(b) 応力集中部位(拡大図)

図8. 解析結果

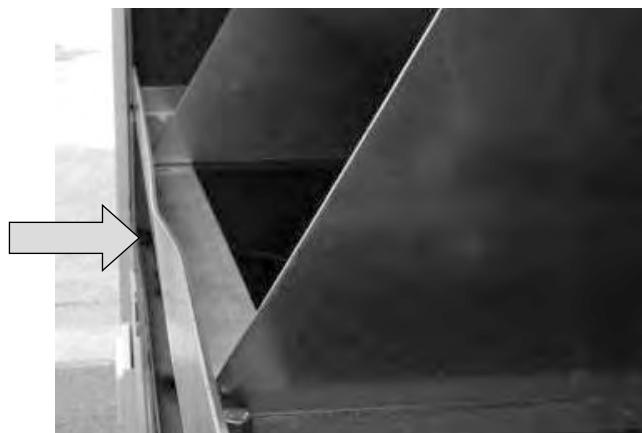


図9. 実機の変形部位

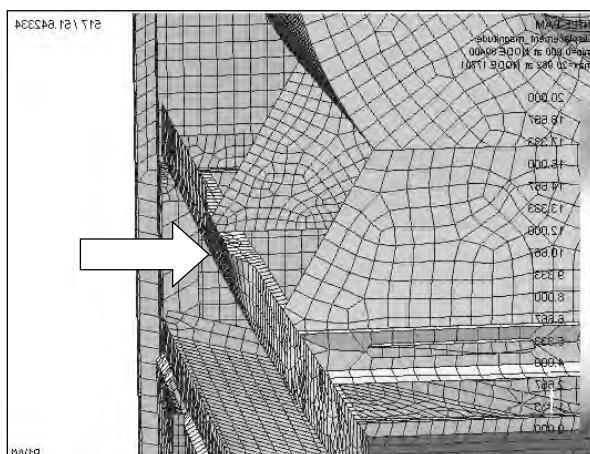


図10. 動解析の応力集中部位

準値とし、判定を行うこととした。この応力値については、今後複数の機種での応力測定を行い、精度向上を図っていく。

3.5 結論

落下衝撃強度検証技術の確立によって、試作機を用いた落下試験による検証作業の多くを解析に置き換えられるようになったため、設計段階で短時間に多くの設計検討が可能となった。

3.6 今後の展開

現在この技術をパッケージエアコンの開発に適用するだけでなく、他機種への展開も実施している。また、これらの試作・試験では、発生加速度やひずみなどの試験データを取得し、さらなる落下衝撃強度検証技術の精度向上を図っていく。

4. むすび

パッケージエアコンなどの大型板金筐体を持つ構造物の落下衝撃強度検証技術を確立した。この技術を開発に適用することによって、設計手戻りの削減と原低の推進に貢献できると考える。

三次元モデルを活用した組立性改善

有田直喜* 森田尚美**
佐藤正男* 西川岳人**
太田輝彦**

Improvement of Assembly by Using 3D Model

Naoki Arita, Masao Sato, Teruhiko Oota, Naomi Morita, Taketo Nishikawa

要 旨

組立性の良い製品を作るには、設計段階で設計部門と工作(組立)部門が連携したものづくりを行う必要がある。

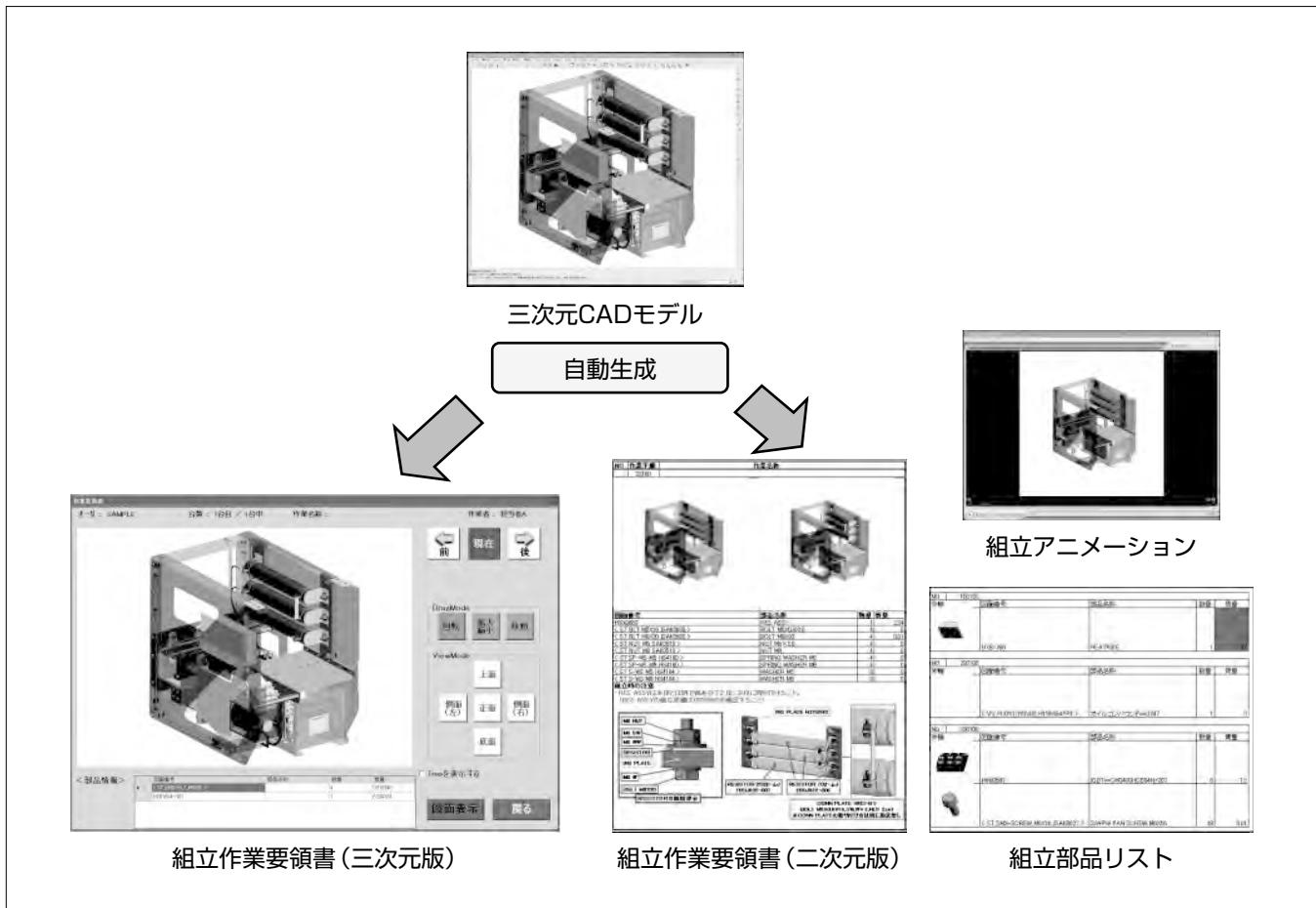
しかし、多品種少量生産製品は大量生産製品と比較して、設計／生産技術部門の担当者一人で担当する機種が多いいため、作業負荷が高く十分な連携が困難な状況であった。

この課題を解決するため、鉄道車両の推進制御装置を対象に、設計段階での工作部門参加による組立性検証プロセスを定義するとともに、三次元CAD(Computer Aided Design)モデルを活用し設計部門と工作部門が連携できる仕組みを構築した。

具体的な取組みは次のとおり。

- (1) 三次元CADモデルから組立作業要領書／組立部品リスト／組立アニメーションを自動生成するツールを開発
- (2) 自動生成された組立作業要領書を用いて、設計段階での工作部門参加による組立性検証を実施
- (3) 工作部門からの製造時の注意事項を附加した組立作業要領書を用いて組立作業を実施

これらの施策によって、製品の組立性品質を向上させるとともに、組立準備作業での組立作業要領書作成の効率化を実現した。



三次元モデルを活用した組立性改善

三次元CADモデルから組立作業要領書を自動生成し、設計段階での組立性検証時のレビュー資料と製造現場での組立作業要領書として活用することで製品の組立性改善を実現した。

1. まえがき

多品種少量生産製品は大量生産製品と比較し、設計／工作部門の担当者一人で担当する機種数が多い。

そのため、組立の準備作業で、主力製品以外では組立作業要領書が準備できず、現場作業者は組立図面を基に組立作業を行っており、組立作業の品質／工数（含む組立手順）は製造現場作業者に大きく依存していた。また、主力製品でも、組立作業要領書は1台目の初品組立状態を写真撮影し作業要領書を作成しており、初品組立時は組立図面で組立作業を行っていた。

設計段階の図面DR(Design Review)では、組立図面を用いてのレビューが主であり、組立作業の細部までは十分な検証ができず、1台目組立後の現品会議での指摘による設計手戻りが散見される状況であった。

このように組立の準備作業の改善、設計段階での組立性検証の改善が必要であった。この課題を解決するため三次元CADモデルを活用し、自動的に組立作業要領書を生成し、組立作業要領書を用いて設計段階における組立性品質を向上させるとともに、組立準備作業における組立作業要領書作成の効率化を実現した。

本稿では鉄道車両の推進制御装置の組立性改善の取組みについて述べる。

2. 組立性検証プロセスの構築

2.1 組立性検証プロセス

設計部門と工作(組立)部門が連携したものづくりを行うため、設計段階で工作部門が参加する組立性設計検証プロセスを構築した(図1)。

検証プロセスは、次を特徴とする。

- (1) 三次元CADデータから自動生成された組立作業要領書／組立部品リスト／組立アニメーションを活用
 - (2) 従来実施している図面DRの前(組立図面作成前)に、

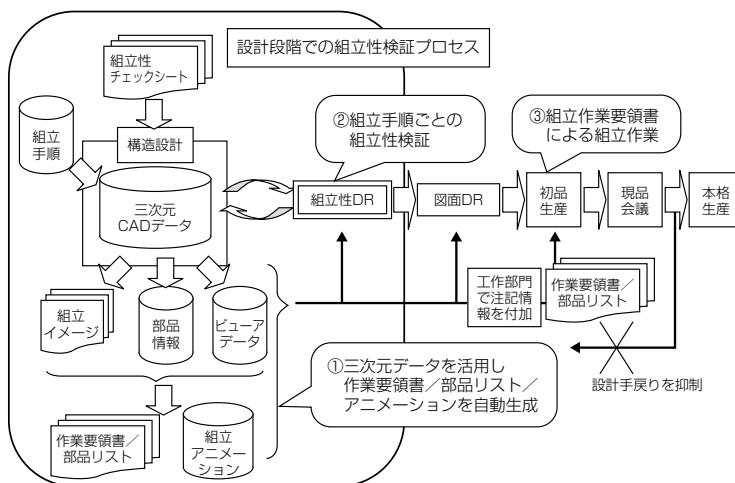


図1. 組立性設計検証プロセス

設計／工作部門参加による組立性DRを新たに設定し、組立手順ごとに組立性検証を行い、改善要求を設計に反映

- (3) 組立作業要領書の標準化と、標準化された作業要領書を使用した組立作業をルール化

2.2 組立性セルフチェックシート

組立性の向上を目的とし、過去の現品会議での指摘内容から、構造設計者による組立性セルフチェックシートと設計基準を明記した設計ノウハウ集を作成した(図2)。

組立性セルフチェックシートは作業項目ごとに分類するとともに、チェック項目に関する設計ノウハウ集を簡単に閲覧できるようにした。

3. 三次元モデルの活用

3.1 組立性DR

図面DRでは組立図面を基に製品の組立性が検証されるが、組立図面は組立完成時の状態を表した図面であり、組立途中の状態は図面DR出席者が組立図面から推測し課題／組立性改善の洗い出しを行う必要があった。そのため、複雑に部品を組み合わせる組立作業では課題／組立性改善内容を見つけることが難しく、現品会議の段階で指摘を受け、設計手戻りするケースが散見していた。

新たに設定した組立性DRでは、DR出席者が組立途中の状態を推測しなくとも組立性を検証できるように、組立作業順番ごとのDRを可能とした。

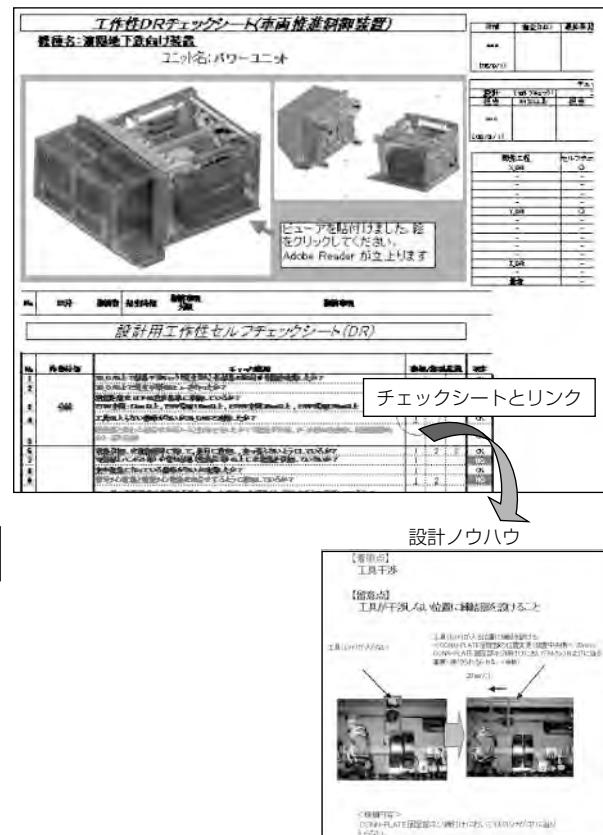


図2. 組立性セルフチェックシートと設計ノウハウ集

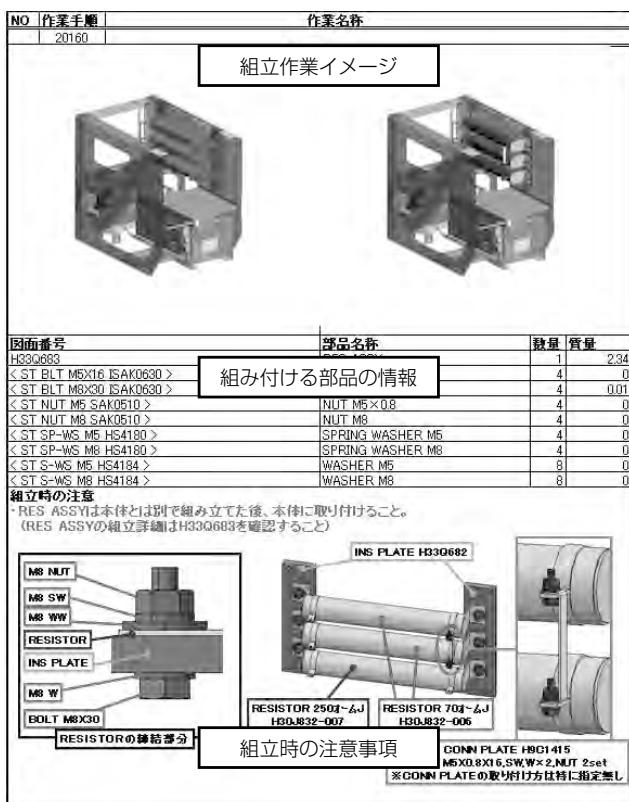


図3. 組立作業要領書(二次元版)

具体的には、①構造設計者が三次元CAD上で製品を構成する部品単位に組立順番を付加、②その順番ごとに部品が組み付くイメージファイルと部品名称などの情報を三次元CADから自動で取得し、Excel^(注1)ファイルの組立作業要領書(図3)を自動生成する仕組みを準備した。

組立作業要領書の内容は、組立順番ごとに組立作業イメージ、組み付ける部品の情報(部品型名/図面番号、部品名称、使用個数、質量)、及び、組立等の注意事項で構成されている。

組立作業イメージでは組み付ける部品を赤色で表示するとともに、質量が重い部品は質量欄を赤色で表示し、重量部品であることが見ただけで分かるように工夫した。

設計で自動生成された組立作業要領書は、組立性DRの前に工作部門に送られ、現場作業者を交えて組立性を検証し課題/組立性改善の洗い出しを行う。洗い出された内容は、設計/工作部門が出席する組立性DRで対応を取り決める。

(注1) Excelは、Microsoft Corp. の登録商標である。

3.2 組立作業要領書(二次元版)

組立性DR用に自動生成された組立作業要領書は、組立性DRで工作部門の意見が反映された上で、工作部門で組立作業時の注意内容を追記し、正式な組立作業要領書として発行される。

組立作業は組立作業要領書を紙に出力して行う。三次元CADデータから組立作業要領書の自動生成が可能となり、

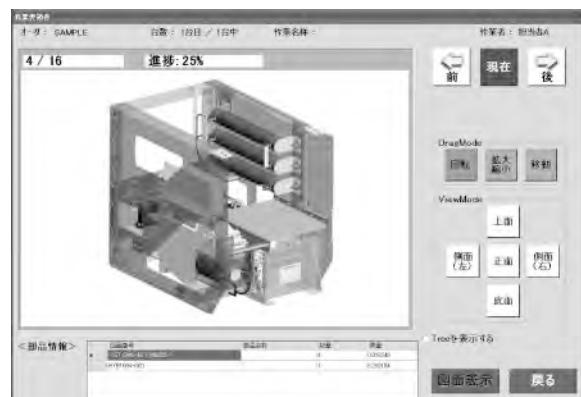


図4. 組立作業要領書(三次元版)



図5. 製造現場の三次元ビューアツール画面

製品の初品組立時から組立作業要領書を用いて作業を行っている。

3.3 組立作業要領書(三次元版)

二次元版の組立作業要領書は組立作業を表すイメージ部分が二次元の組立イメージのため、ケーブル配線のように三次元的な組立が必要な部品では、組立作業が分かり難いという課題がある。その課題を解決するため、組立状態を表すイメージ部分に三次元データのビューアツールを用いて、現場作業者の理解度向上を図った(図4)。

三次元ビューアツールを用いるため、製造現場に液晶ディスプレイを設置し、画面を見ながら組立作業ができる環境を整備した(図5)。

また製品組立の複雑度に応じて、二次元/三次元版の組立作業要領書を使い分けて組立作業を行う。

3.4 組立部品リスト、組立アニメーション

組立作業要領書の自動生成時に、組立作業で使用する部品を一覧化した部品リストと、組立の様子をアニメーション表示する組立アニメーションも自動生成される。

部品リストはExcelファイルで生成され、組立順番ごとに使用する部品の一覧と、製品全体で使用する部品の一覧に分けて出力される(図6)。部品リストの内容は、部品ごとに外観イメージ、部品型名/図面番号、部品名称、使用個数、質量で構成されている。組立性DR時での部品の標準化確認や組立作業時の部品準備に使用する。

NO	20110	機種番号	部品名稱	数量	質量
外觀		H7B5444	FRAME ASSY	1	1390
NO	20120	機種番号	部品名稱	数量	質量
外觀		H6C7228	OT=HO-MN600V4B15D	1	0.2
		H7B5445	INS PLATE ASSY	1	224
		ST-SMS-BLT-MBX5	SW+PW (H)BOLT M8X25	4	0.02
		ST-SMS-SREW-M4X12_ISAK0622	SW+PW PAN SCREW M4X0.7X12	2	0
NO	20130	機種番号	部品名稱	数量	質量
外觀		H0G1416	SUPPORT	1	0.08
		H0G1417	SUPPORT	2	0.2
		ST-SMS-BLT-MBX12	SW+PW (H)BOLT M6X0.8X12	6	0

図6. 組立部品リスト

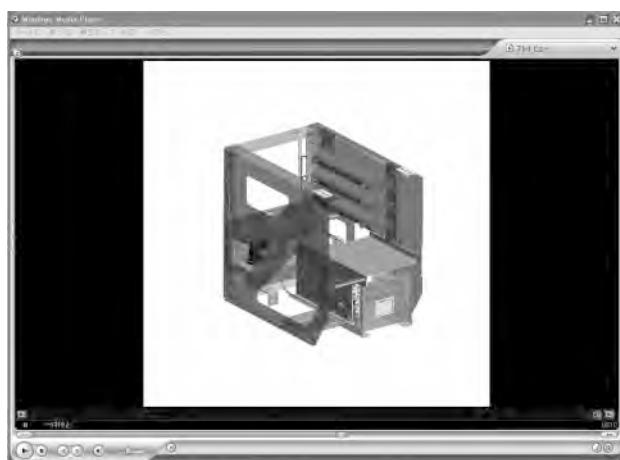


図7. 組立アニメーション

を実現している(図7)。組立性DR時や、組立作業開始前に組立作業手順を把握するために使用する。

4. む す び

これまでの取組みによって、設計部門と工作部門が連携し設計段階での組立性改善が行えるようになり、設計手戻り、組立準備時間の削減が実現できた。

今後も継続して組立作業者の意見を取り入れながら組立性検証プロセスを進化させ、更なる組立性の改善を進める。

参考文献

- (1) 組立設計フロントローディングによるQCD改善、三菱電機技報、84、No.1、49 (2010)

組立アニメーションは、AVI(Audio Video Interleaved)ファイルで作成され、二次元版作業要領書を作成する際に取得した組立イメージをつなぎ合わせてアニメーション化

板金製造のIT化による生産性向上

Improvement of Sheet Metal Processing by IT

Yasutaka Kanamori, Naohisa Mashimo, Keisuke Hatanaka

要 旨

情報システムの連携強化と、設計と生産管理の情報を有効活用することで、社内板金製造における生産準備作業を効率化し、現場作業の自動化と管理を強化する仕組みを導入して生産性を向上させた。

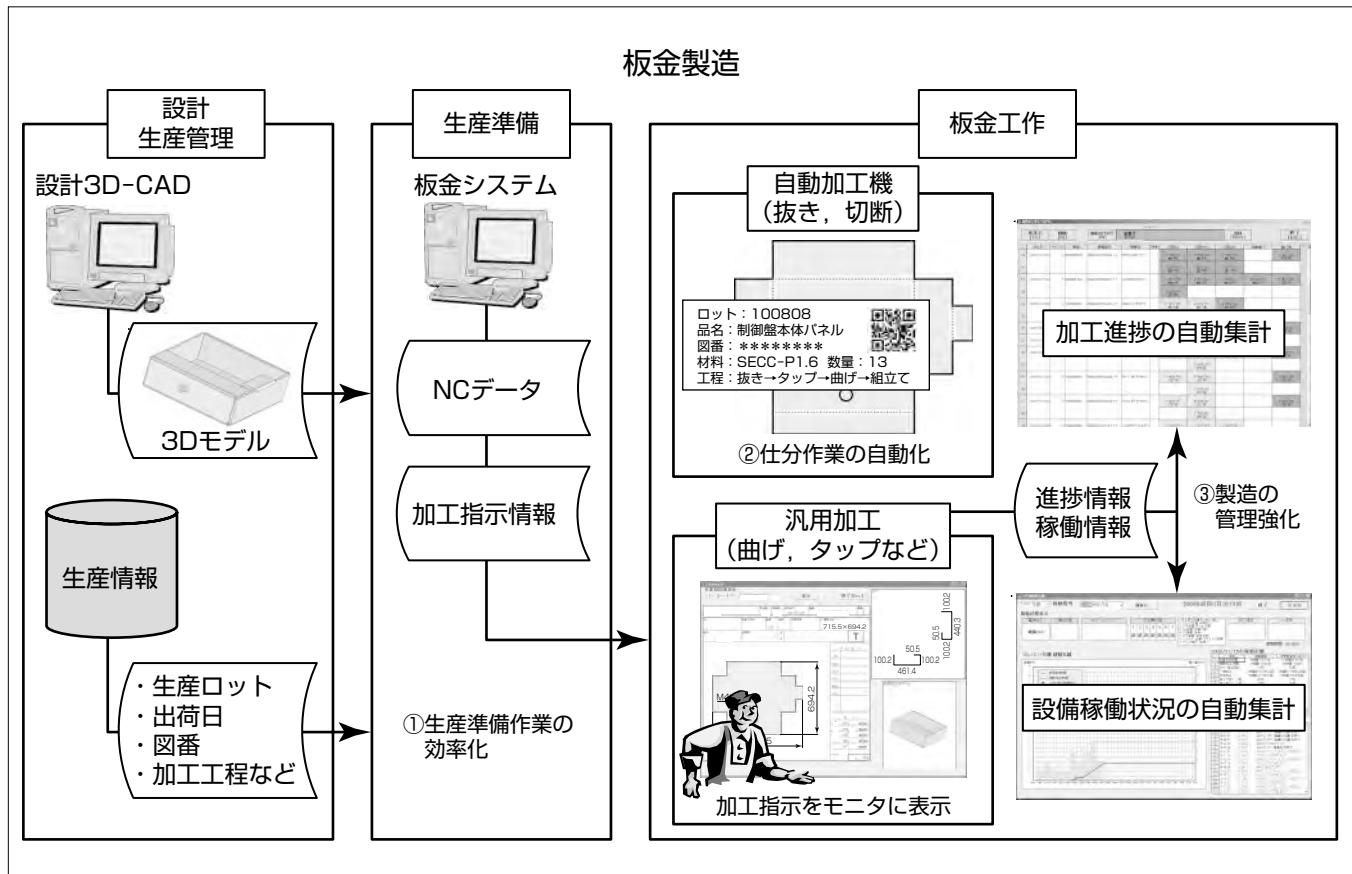
生産準備作業では、設計が作成した3Dモデルから板金形状を自動認識して解析することで、板金製造に必要な加工情報(NC(Numerical Control)データ、加工指示情報)の作成を一貫して処理する板金システムを構築した。実現にあたり、設計の3D-CADと板金システムの情報連携を図るため、設計が作成する3Dモデル上に、板金システムが認識可能なモデリング方法で板金形状を表現するルールの構築と、システム間で正確な情報伝達を可能とするインターフェース(I/F)を確立した。また、これまで熟練作業

に依存していた加工情報作成のノウハウを自動処理化した。

板金工作では、自動加工機のシステムと板金システムを連携し、設計と生産管理から取得した情報を基に現品票を板金部品に貼り付けて仕分する現場作業を自動化した。

さらに、管理強化を目的に、加工の際に加工情報を提示するに合わせて加工進捗(しんちょく)を自動集計することで、高精度の進捗情報をリアルタイムに提示する仕組みを導入した。

また、加工機の稼働状態を収集する能力が向上したシーケンサなどの制御機器から、大量の稼働情報を高速に収集するI/Fを開発し、稼働状況をリアルタイムに見える化することで加工機の稼働率の向上を実現した。



情報システムの連携と情報の有効活用によって生産性を向上

- ①板金システムが設計3Dモデルと生産情報を活用し、加工情報(NCデータ、加工指示情報)を一貫して作成することで、生産準備作業を効率化した。
- ②自動加工機のシステムと板金システムを連携し、3Dモデルと生産情報を活用して現品票の貼り付けと仕分作業を自動化した。
- ③加工進捗と設備稼働状況を自動収集して集計し、信頼性の高い情報をリアルタイムで提示する仕組みを構築した。

1. まえがき

売上げの海外依存が高まる中、国内市場に加えてグローバル市場での競争力を強化するため、より幅広い顧客ニーズにこたえるために多種多様化する製品を短納期・低コストで提供する体制作りが必要となってきている。

製造部門では、さらなる“多品種生産化”“短工期化”を“高品質”“低コスト”で実現する生産システムの再構築が課題となっている。

本稿では制御盤など客先仕様に応じた設計とモノづくりが必要な個産事業における板金製造を対象に、情報システムの連携と、設計と生産管理の情報を有効活用することで、生産準備作業の効率化と現場作業の自動化、製造の管理を強化する仕組みを導入し、生産性を向上させた事例について述べる。

2. 生産準備作業の効率化

社内JIT(Just In Time)活動でカイゼン(改善)が進んだ生産現場に対し、生産準備作業は標準化と能率の評価が難しくカイゼンが遅れており、個産事業では特に顕著である。この生産準備作業で最も人手と時間がかかるている加工情報作成作業を、設計情報を活用することで効率化した。

2.1 加工情報作成作業について

板金製造に必要な加工情報として、汎用(はんよう)加工の作業者に設計図面に代わって部品の加工方法を提示する加工指示書と、抜き／切断工程や曲げ工程で使用するNC加工機に必要なNCデータがある(図1)。

加工指示書は、作業者が作業中に設計図面を読図解析することによる加工の停滞や加工ミスを避けるため、加工に直接必要な情報(曲げ加工では曲げ展開図や断面図など)と注意事項を記載したもので、あらかじめ熟練作業者が設計図面を読図解析して作成していた。

抜き／切断NC加工機(タレットパンチプレスやレーザ加

工機)のNCデータはCAM(Computer Aided Manufacturing)システムを使って作成するが、曲げによる材料の伸び(材質や板厚、曲げ角度、曲げRによる)を考慮した曲げ加工前の図面(曲げ展開図)が必要で、従来は人手で作成していた。

曲げNC加工機(プレスブレーキ)は、作業者が生産現場で加工指示書を見てNCデータを作成して加工機に入力しており、この間は加工が停止することになる(内段取り)。

2.2 板金システムの構築

2D三面図と比較して、実物に忠実に表現された3Dモデルから、曲げや抜き穴などの板金形状を容易に自動認識することができる。板金設計の3D-CAD化に伴い、作業者による設計図面の読図解析に代わって設計で作成した3Dモデルの板金形状をシステムが認識して解析することで、人手に頼っていた加工情報の作成を一貫して処理する仕組み(板金システム)を構築した(図2)。

2.2.1 板金形状を付加した3D-CAD設計

板金システムが設計の3Dモデルから加工情報作成に必要な板金形状を取得するため、設計3D-CADで板金形状をモデリングするルールを構築した(図3)。

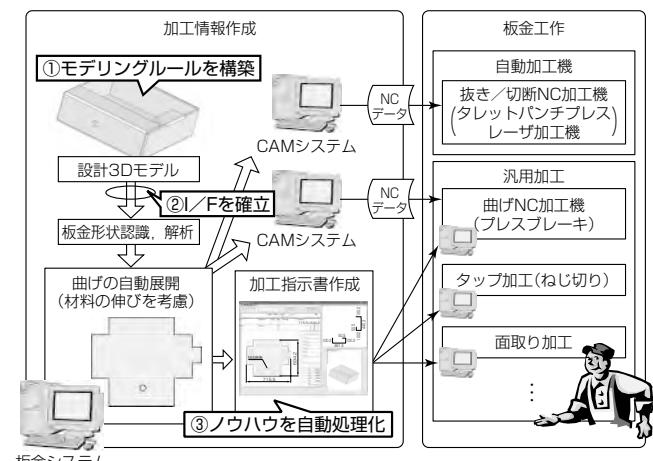


図2. 板金システム

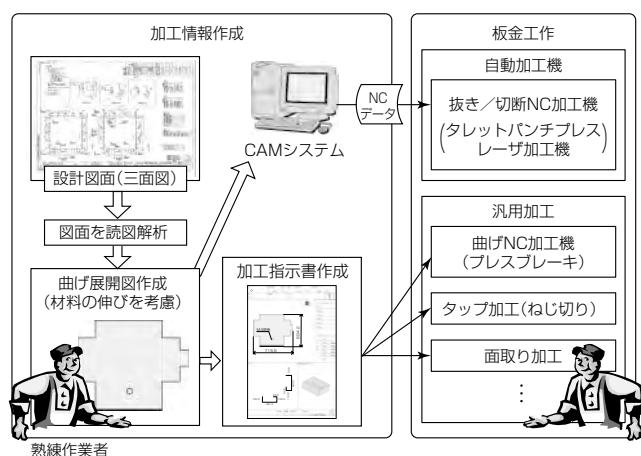


図1. 加工情報の作成方法

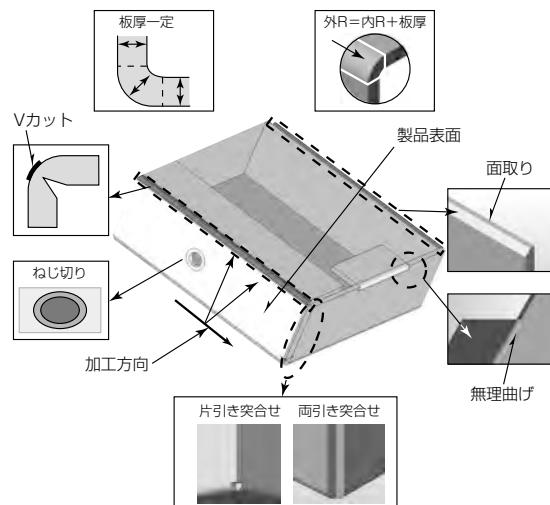


図3. モデリングルールの一例

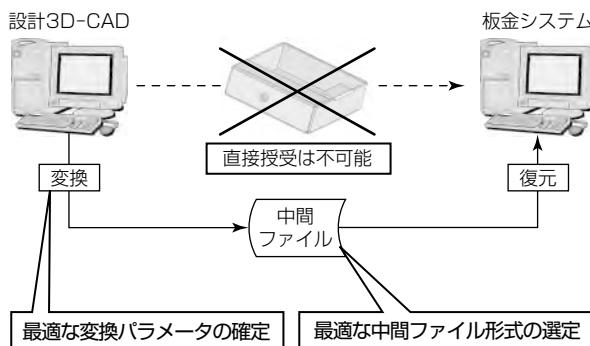


図4. 3D-CADデータの授受方法

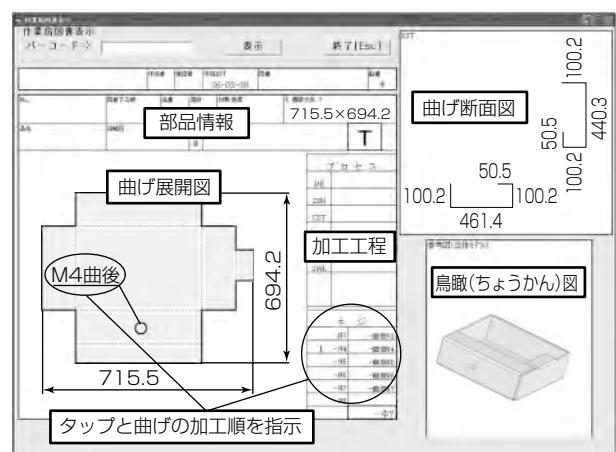


図5. 自動作成した加工指示書

抜き／切断NC加工機のNCデータ作成に必要な曲げ展開図は、板金システムが3Dモデルから曲げの板金形状を認識して解析することで曲げ情報(曲げ位置、角度、Rなど)を取得し、材料の伸び量を算出して自動作成する。

また、この曲げ情報を用いて曲げNC加工機のNCデータを作成するCAMシステムを導入し、板金システムと連携することで、作業者のNCデータ作成作業と加工機の停止時間を削減した(外段取り化)。

2.2.2 板金3D-CADと板金システムのI/F確立

一般的に、異なるCADシステム間でCADデータを授受する場合、互いのデータフォーマットが異なり、かつCAD間で親和性が低いため直接の授受は不可能である。そこで互いのシステムで認識可能なデータフォーマット(中間ファイル)を介してデータを授受する。しかし、モデリングの方法や、中間ファイルの形式とその変換方法によっては情報が欠落するなどの理由で、受け側のシステムで正確に3Dモデルを復元できない場合がある。そこで、今回ルール化した板金形状モデルを正確に伝達することが可能な中間ファイルの形式と、その変換パラメータを評価し、確定した(図4)。

2.2.3 加工指示書作成のノウハウをシステム化

加工指示書には、これまでに生産現場で蓄積された加工ノウハウに基づく指示も含まれ、熟練作業者が作成している。その加工ノウハウによる指示の作成方法をシステム化し、加工指示書の作成を自動化した(図5)。

例えば、曲げ加工の前にタップ加工(ねじ切り)をするのが作業性に優れる。しかし曲げ近傍は材料の伸び縮みが生じてねじ穴が変形するため、曲げ加工後にタップ加工をする必要があり、その加工順を加工指示書で指示している。熟練作業者が過去の経験を基に、曲げとねじ穴の離れ具合、ねじサイズや材質、板厚などの諸条件から加工順を決定している。そのノウハウをルール化してシステム化し、板金システムが設計3Dモデルから取得したねじ穴と曲げの情報から加工順を決定する機能を開発した。

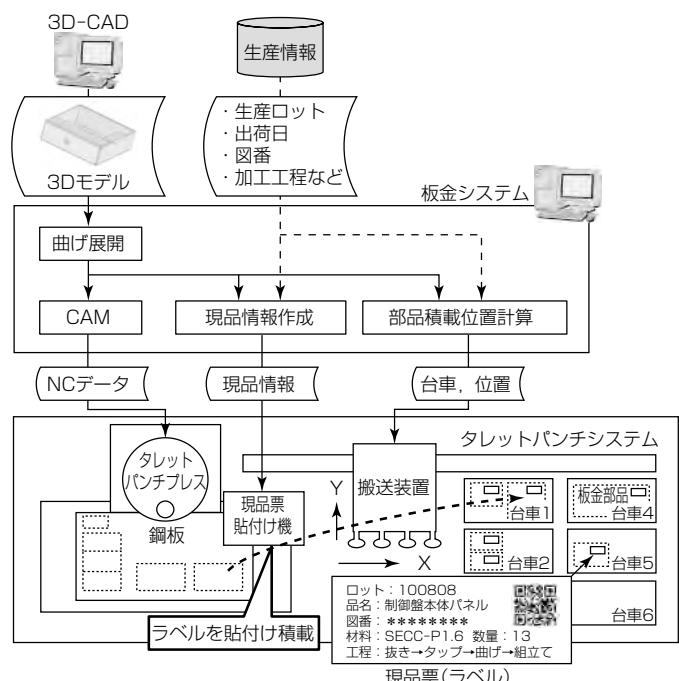


図6. 板金部品の仕分自動化

3. 板金部品の仕分自動化

抜き／切断工程では、主にタレットパンチプレスを使って規格サイズの鋼板を金型で抜き、板金部品を切り出す。複数生産ロットをまとめて加工するなど、1枚の鋼板にできるだけ多くの部品を配置することで材料歩留りの向上を図るが、1度に切り出される部品数が増えるため、現品確認(現品票の貼り付け)と後工程で加工する単位／生産ロットにまとめる仕分作業の工数が増大した。板金システムとタレットパンチシステムを連携し、3Dモデルと生産情報を活用してこの仕分作業を自動化する仕組みを開発した(図6)。

3.1 現品票貼付けの自動化

板金システムが生産情報と3Dモデルから取得した板金形状から現品情報を作成する。現品票貼付け機に転送した

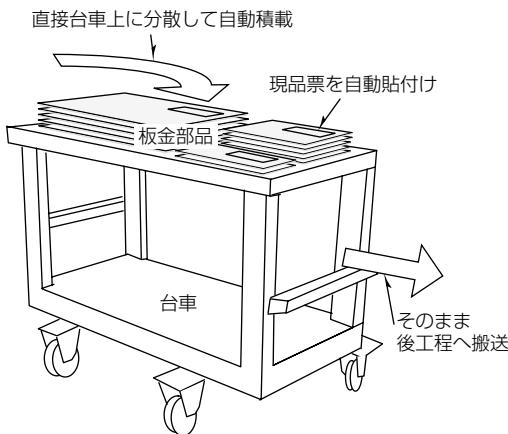


図7. 台車と部品積載のイメージ

現品情報をラベルに印字し、加工中のタレットパンチプレスに連動して該当する板金部品に貼り付ける。このラベルには生産ロットや図番、加工工程などの現品情報のほか、バーコードを印字した。後の汎用加工では作業者がこのバーコードを使って加工指示情報をモニタに呼び出すことで、従来の紙面による加工指示書の出票や配布作業を削減した。同時にNC加工機には該当する部品のNCデータを転送する。

3.2 板金部品の仕分積載の自動化

タレットパンチプレスには複数の部品搬送用台車を設置した。板金システムが部品ごとに生産情報と3Dモデルから取得した情報(曲げ展開寸法など)を使って積載する台車と、台車上の積載位置(座標)を決定し、搬送装置に指示して積載する。台車上には荷崩れ防止と後工程で部品を取り出しやすいよう、部品のサイズごとに分散して積載した(図7)。従来はパレット上に、材料上の配置と同様の配置で部品を積載していたが、直接後工程へ搬送する台車に仕分けて積載することで搬送効率の向上を実現した。

4. 製造の管理強化

4.1 加工進捗の自動集計

板金製造の加工進捗を自動集計し、後工程にモニタで表示して提示する仕組みを構築した(図8)。

自動加工機の加工進捗は自動加工機のシステムから自動集計する。汎用加工の加工進捗は、作業者が加工指示情報をモニタに呼び出すため、部品に張られた現品票のバーコードを読み込むのに合わせて集計する。

以上によって、作業者が進捗報告を意識することなく、精度の高い進捗情報を自動集計し、リアルタイムに提示することが可能となった。

4.2 設備稼働状況の自動集計

自動加工機に搭載されるNCやシーケンサなどの制御機器の進化によって、加工時間と段取り作業の内訳や詳しいトラブル発生履歴など、制御機器がより多くの設備稼働状態を分析し集積できるようになった。当社が開発した

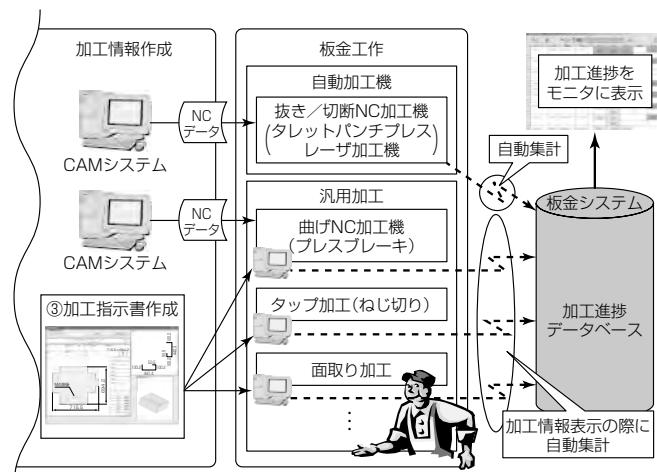


図8. 加工進捗管理の概要

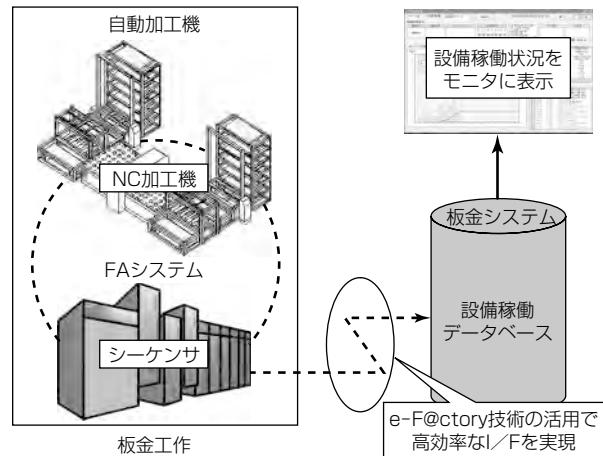


図9. 設備稼働管理の概要

“e-F@ctory”技術を活用することで、制御機器に集積された大量の設備稼働情報をリアルタイムにデータベースへ登録するI/Fを低コストで実現した(図9)。収集した多くの情報をリアルタイムに効率良く見える化することで、設備の稼働率の向上を実現した。

5. むすび

グローバル市場で、コスト面では中国など新興国のメーカーを相手に勝負の限界に来ており、高付加価値、高品質な製品を短サイクルで提供することで差別化を図る必要がある。

その実現のためには3D-CADやCAE化の推進とバーチャル設計などによる開発設計部門の強化と、組織の巨大化によって個別最適に陥った部門間の連携を強化する必要がある。

今後、強化される設計開発部門と連携し、設計開発部門で作られる情報を製造部門で活用する仕組みの強化と、品質検査や物流など活用範囲を拡大することで、全体最適な生産システムの再構築を目指す。

高出力太陽光発電モジュールの 量産化技術

瀧本晋輔* 石井僚二**
山下浩儀* 川杉直喜**
金塚憲彦*

Manufacturing Equipment for High Output Polycrystalline Photovoltaic Module

Shinsuke Takimoto, Hironori Yamashita, Norihiko Kanazuka, Ryoji Ishii, Naoki Kawasugi

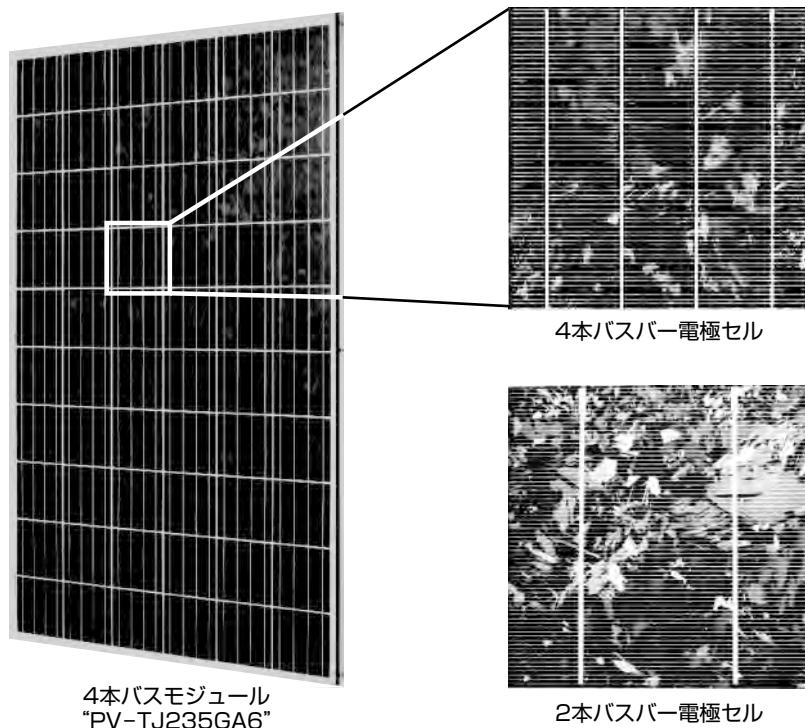
要 旨

地球環境に対する問題意識が高まる中で、太陽光発電は温室効果ガスの排出が少ないクリーンなエネルギー源の一つとして注目されている。さらに欧州でのFIT制度(Feed In Tariff: 電力固定価格買取り制度)の導入を背景に、太陽光発電の需要は世界的に拡大しており、住宅や工場からメガソーラー発電所にまで幅広く導入されている。

このような中、太陽光発電システムでは、限られたスペースに設置するため、高効率化及び大出力化が重要課題である。三菱電機では高効率化に向けた取組みの一つとして、バスバー電極を2本から4本構成とすることで、グリッド電極からバス電極への集電距離を縮めて電流の抵抗ロスを低減させ、従来の2本バスバー電極に比べセル1枚当たり出力を約3%向上させた。

4本バスバー電極セルは当社のみが採用しており、従来の2本バスバー電極セルと同等の受光面積を確保するために、バスバー電極及びタブ線の幅を従来の半分に細線化している。モジュール化する際にセルの効率を最大限に引き出すためには、タブ線をバスバー電極へ高精度に搭載し、はんだ付けをしなければならない。このように4本バスバー電極セルのモジュール化では、細線化による技術的課題が多くなるが、それら課題を解決し2010年1月から量産を開始した。

本稿では、4本バスバー電極セルを用いた太陽電池モジュールの量産化を実現するための課題と、それに向けた取組みについて述べる。



4本バスバー電極セルとモジュール

バスバー電極を従来の2本から4本構成とすることでグリッド電極からバス電極への集電距離を短縮し、電流の抵抗ロスを低減させセル1枚当たりの出力を約3%向上させたセル、及びそのセルを用いて製造されたモジュールである。4本バスバー電極セルでは、従来の2本バスバー電極セルと同等の受光面積を確保するために、バスバー電極の幅が従来の半分となるとともに、タブ線の幅も半分となっている。

1. まえがき

地球環境に対する問題意識が高まる中で、太陽光発電システムは、温室効果ガスの排出が少ないクリーンなエネルギー源の一つとして注目されている。太陽光発電システムでは限られたスペースに設置するため、高効率化及び大出力化が重要課題である。

当社では高効率化に向けた取組みの一つとして、バスバー電極を従来の2本から4本構成とすることで、グリッド電極からバス電極への集電距離を短縮し、電流の抵抗ロスを低減させた。4本バスバー電極セルでは、従来の2本バスバー電極セルと同等の受光面積を確保するために、バスバー電極及びタブ線の幅を従来の半分にしている。モジュール化する際にセルの効率を最大限に引き出すためには、タブ線をバスバー電極へ高精度に搭載し、はんだ付けすることが重要である。

2. 4本バスモジュールの製造課題

2.1 4本バスセル及びモジュール

4本バスセルは2本バスセルに比べ、グリッド電極の集電距離を短縮し(図1(a))、抵抗ロスを低減することによって約3%の効率向上を実現した⁽¹⁾。

一方、太陽光発電モジュールは、セルにタブ線をはんだ付けすることでセルを直列に接続し(図1(b))、さらに屋外環境の使用に耐えるために、直列に接続した太陽電池セルをガラスとバックフィルムで挟み込み、樹脂で封止した構造となっている(図1(c))。

2.2 4本バスモジュール量産化への課題

モジュールを量産する上で重要なことは、セルの特性を最大限に生かすことである。4本バスモジュールは、2本

バスモジュールと同じ受光面積を確保するため、タブ線幅とバスバーの電極幅を半分の1mmにしている。そのため従来の機械的な位置決めによる搭載精度だけでは、バスバー電極幅に対するタブ線のずれ量の割合が大きくなり、発電効率を低下させる要因となる。よって従来よりも高精度なタブ線搭載精度が必要不可欠であり、それを実現するためには次に示す3つの課題を解決しなければならなかった。

- (1) タブ線の高精度搭載技術の確立
- (2) 検査技術の確立
- (3) タブ線はんだ付けの安定化

(1)はタブ線のバスバー電極に対するずれを最小限にすることでセルの受光面積を確保し、発電効率の低下を抑制するに重要である。また(2)はタブ線のバスバー電極への搭載精度の確からしさを検知し、不良を市場に流出させないに重要である。さらに(3)はタブ線とバスバー電極の良好なはんだ接合を確保し、バスバー電極から効率よく電力を取り出すとともに、信頼性を確保するために重要である。

3. 課題に向けた取組み

3.1 タブ線の高精度搭載技術

4本バスモジュールは、1mm幅のバスバー電極上に1mm幅のタブ線を搭載するため、従来の2本バスモジュールに比べ、バスバー電極に対するタブ線の位置ずれ許容量も半分にしなければならない。タブ線の搭載精度は、セルやタブ線の移載精度や位置決め精度などを含み、4本バスモジュールの製造工程で、従来と同様の方式でセルとタブ線を移載した場合、ずれ許容量を超えることが判明した。バスバー電極に対するタブ線の位置ずれの原因としては次の項目が考えられ、各項目の影響をいかに抑制するかが、4本バスモジュールの製造課題となった。

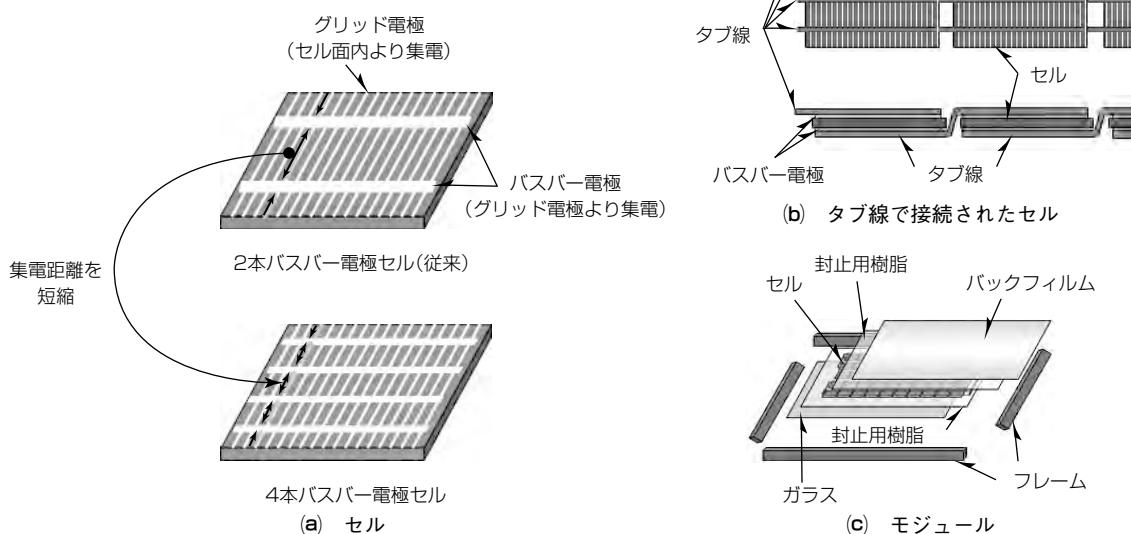


図1. 4本バスセルとモジュール

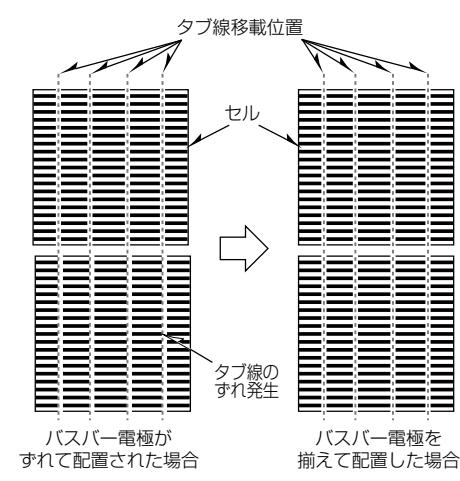


図 2. タブ線搭載精度向上

- (1) 移載前のセルの位置決め精度
- (2) セルの移載精度
- (3) セル上に印刷されたバスバー電極の印刷精度
- (4) タブ線の移載精度

これらの項目の影響を抑制するためには、セル上に形成されたバスバー電極を高精度に整列させ、かつタブ線をバスバー電極上に高精度に移載する必要がある。

3.1.1 バスバーアライメントの導入

そこで、セル移載時にバスバー電極を整列させる方法として、バスバー電極の位置を画像によって認識し、バスバー電極基準でセルを搭載する方式(バスバーアライメント方式)を採用した。

セル移載前にバスバー電極の位置をCCD(Charge Coupled Device)カメラによって認識し(図2(a))、角度・位置補正をかけた後、セルを移載する。このようにバス電極基準でセルを移載することで、移載前のセルの位置決め精度とバスバー電極の印刷精度が要因で発生するタブ線ずれを抑制できる(図2(b))。

3.1.2 タブ線移載精度の向上

次にタブ線移載精度の向上について検討した。タブ線はバスバー電極上に移載された後に固定しているが、特に固

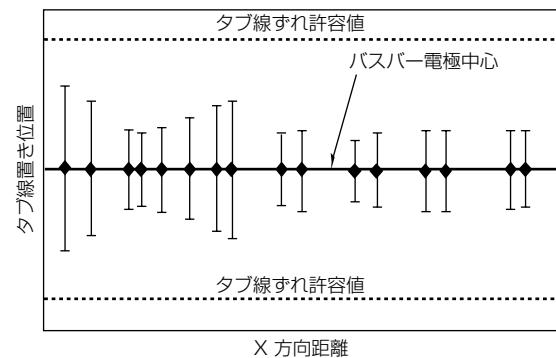


図 3. バスバー電極に対するタブ線移載精度検証

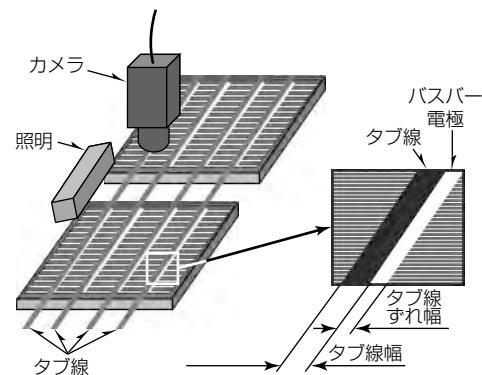


図 4. タブ線ずれの検査

定時にタブ線が位置ずれを起こしやすい。図3はバスバー電極上でタブ線移載ずれ量が最も大きくなる位置での測定結果を示しており、タブ線の位置によってずれ量が異なることが分かる。このずれ量のばらつきをタブ線全長にわたって押さえ込むことが重要である。そこで、バスバー電極上でタブ線を固定する際のプロセスパラメータを適正化しバスバー電極に対するタブ線のずれを抑制することで、図3に示すように、ずれ量のばらつきを許容値内に収めた。

3.2 検査技術の確立

幅1mmのバスバー電極上に幅1mmのタブ線が正確に搭載されているかを確認する手段として、当社では画像検査技術を導入し(図4)、セルの全数検査を実施している。画像検査では、バスバー電極とタブ線の検知に加えて、撮像画像にセル表面に見えるシリコンの多結晶模様の映り込みをどのように抑制するかが重要となる。もし結晶模様をタブ線やバスバー電極と誤検知した場合、不良流出のおそれがあると同時に、生産の流れを止めることにつながる。そのために、照明の色や角度などを適正化し、タブ線及びバスバー電極と結晶模様の明度差を十分に確保し、誤検知の少ない検査技術を導入した。また検査データを製造側にフィードバックし、品質管理の強化を図っている。

3.3 タブ線はんだ付けの安定化

セルで発電した電力を効率よく取り出すためには、タブ線とバスバー電極との接合面積を確保することが重要であり、そのためには安定なはんだ付けプロセスを確立する必

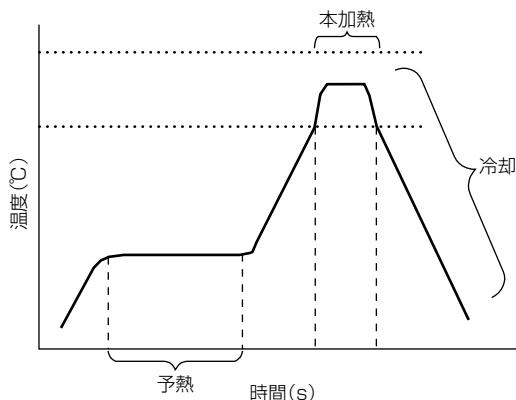


図5. 温度プロファイルの概念

要がある。さらに信頼性の観点からも、はんだ付け性の安定化は必要不可欠である。

当社では2003年より鉛フリー化を実現しているが⁽²⁾、鉛フリーはんだは鉛入りはんだに比べ融点が高く、それに伴いセルに与える熱量が大きくなる。特に熱応力によるセルの破損には注意する必要があり、温度プロファイルの管理が重要となる。さらにはんだの濡(ぬ)れ性にも注意する必要があり、フラックス種の選定及び、フラックスの活性度を維持するための加熱条件を適正化することも重要である。

図5に温度プロファイルの概念を示す。予熱時はバスバー電極上に塗布されたフラックスを活性化し、その活性度を維持するために温度や時間管理が重要となる。また本加熱では、はんだが十分に溶融するための温度と時間管理が

重要である。さらに冷却では、温度勾配(こうぱい)が大きい場合、セルとタブ線の線膨張差から生じるひずみの影響で、セルの破損につながるおそれがあるため、温度勾配を小さくする必要がある。

そこで当社では、はんだ付け性を安定化させるために、加熱温度や冷却速度に加えて、タブ線とバスバー電極の良好な接触状態を維持するためにタブ線の把持方法も最適化している。さらにセルの破損を抑制するために、適正な加熱方法によってセル面内の温度分布を均一化している。

4. む す び

高出力太陽光発電モジュールの量産化技術について述べた。受光面積を減らすことなく、バスバー電極を従来の2本から4本構成とすることで、約3%の出力向上を実現した。量産化する上で抽出した①タ線の高精度搭載技術の確立、②検査技術の確立、③タブ線のはんだ付け性の安定化という課題に対し、適正なプロセス・装置技術を確立し、2010年1月から4本バスモジュールの量産を開始した。

参 考 文 献

- (1) 中村真之, ほか: 太陽光発電モジュールの高効率化及び大出力化, 三菱電機技報, 84, No.6, 347~350 (2010)
- (2) 森川浩昭, ほか: 太陽電池セル・モジュール鉛フリー化, 三菱電機技報, 77, No.5, 309~312 (2003)

マルチビーム光学系によるプリント配線板 穴あけ用レーザ加工機の高速化

竹野祥瑞* 成瀬正史**
石塚智彦* 滝川靖弘**
小林信高*

Productivity Improvement of Laser Processing Machine for PWB by Multi-beam Optics

Shozui Takeno, Tomohiko Ishizuka, Nobutaka Kobayashi, Masashi Naruse, Yasuhiro Takigawa

要 旨

近年、スマートフォンなどに代表される電子機器のさらなる高機能化によって、これらに搭載されるプリント配線板も高密度化が進展している。そのため、CO₂レーザで加工されるマイクロビアと呼ばれる層間接続用の小径とまり穴も穴数の増加、小径化が急速に進んでおり、レーザ加工のさらなる高速化、小径化の要求が高まっている。

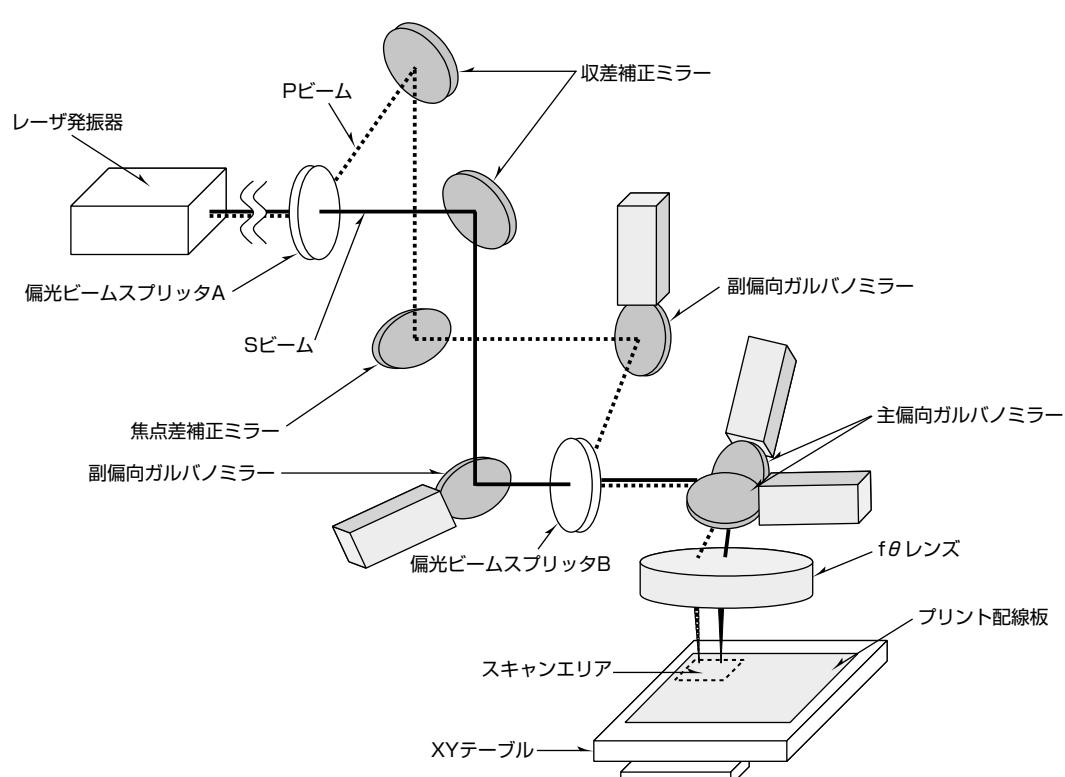
レーザ加工の高速化をねらいとして、“1つの集光レンズに2つのビームを入射して、それぞれを高速・高精度位置決めするマルチビーム光学系”を開発した。

マルチビーム光学系はレーザビームの偏光特性によってビームを分光、合成する偏光ビームスプリッタを応用了した副偏向光学系、ビームの収差を補正する収差補正ミラー、

2ビーム間の焦点差を補正する焦点差補正ミラーで構成し、通常の1ビームと同様の安定性で2ビームでの高速加工を可能とする。

このマルチビーム光学系を2台搭載して4ビーム同時加工を実現した4ビーム加工機“ML605GTF-5150U”を製品化し、従来の2ビーム機と比較して1.6倍の4,915穴/秒の加工速度を達成した。

また、高収束光学系を新規に開発し、収差補正／焦点差補正ミラーと組み合わせることによって、集光性向上と焦点裕度拡大を実現し、これまでCO₂レーザでは加工困難となっていたφ40μm級穴の加工を可能とした。



マルチビーム光学系の構成

1つの集光レンズに2つのビームを入射して、それを高速・高精密位置決めするマルチビーム光学系はレーザビームの偏光特性によってビームを分光、合成する偏光ビームスプリッタを応用了した副偏向光学系、ビームの収差を補正する収差補正ミラー、2ビーム間の焦点差を補正する焦点差補正ミラーで構成している。これらの機構によって、通常の1ビームと同様の安定性で2ビームでの高速加工を実現した。

1. まえがき

携帯端末をはじめとする電子機器の小型・高性能化によって、これらに搭載されるプリント配線板も配線パターンの高精細化、多層化などの高密度化が進展している。高密度プリント配線板ではマイクロビアと呼ばれる層間接続用の小径となり穴加工が必要とされるが、生産性と品質の面からCO₂レーザによるマイクロビア加工が標準的な加工方法として適用されている。近年、スマートフォンなどに代表される電子機器のさらなる高機能化によって、マイクロビア数の増加、小径化が急速に進んでおり、レーザ加工の更なる高速化、小径化の要求が高まっている。本稿では、レーザ加工の高速化をねらいとして開発した“1つの集光レンズに2つのビームを入射して、それぞれを高速・高精度位置決めするマルチビーム光学系”の構成、動作原理について述べ、マルチビーム光学系を搭載したプリント配線板穴あけ用4ビーム加工機ML605GTF-5150Uでの高速加工や小径加工などについて述べる。

2. 高密度プリント配線板穴加工／加工機の動向

高密度プリント配線板の主たる用途は携帯端末であるが、近年、携帯端末に占めるスマートフォンの比率が増加傾向にある。図1は携帯端末の第2世代、第3世代、スマートフォンそれぞれについて、搭載されるプリント配線板の層数、端末1台あたりのレーザ加工穴数を比較したものである。

第2世代に対して第3世代では2.5倍、スマートフォン

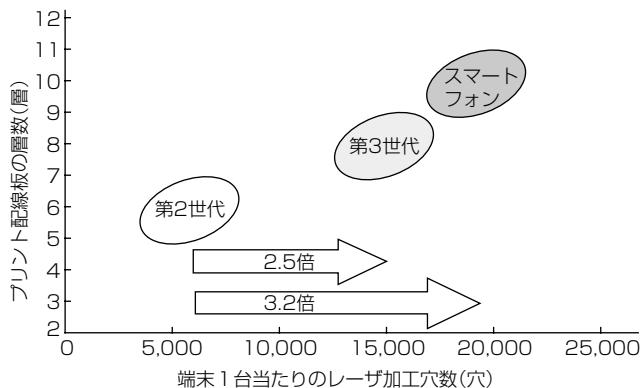


図1. 携帯端末1台あたりのプリント配線板の層数と加工穴数

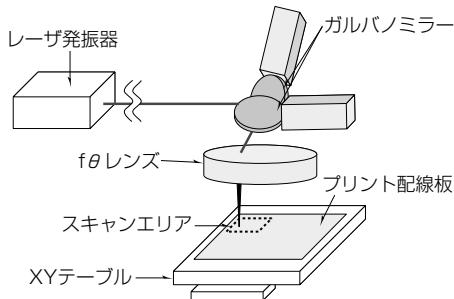


図2. プリント配線板穴あけ用レーザ加工機の構成

では3.2倍と穴数が著しく増加している。このような穴数の増加に伴い、プリント配線板穴あけ用レーザ加工機の加工速度向上の要求も高まっている。

プリント配線板穴あけ用レーザ加工機の構成は図2に示すとおりで、レーザビームを高速に回転するガルバノミラーとfθレンズでプリント配線板上の最大70×70(mm)のスキャンエリアに高速位置決めし、穴あけ加工を行う。スキャンエリア内の加工が終了すると、XYテーブルで次のスキャンエリアにプリント配線板を移動しレーザビームを照射する繰り返し動作によってプリント配線板全体を加工する。加工速度向上のため、これまでガルバノミラーの位置決め高速化と加工ヘッド多軸化が進んできた。加工ヘッドの多軸化はガルバノミラーとfθレンズからなる加工ヘッドを複数並べて、複数のレーザビームで同時加工するシステムであるが、加工ヘッドの増加に対応して装置の設置面積が大きくなるため、単位面積あたりの生産性が低下するという問題があった。この解決策として、“1つの集光レンズに2つのビームを入射し、それぞれを高速・高精度位置決めするマルチビーム光学系”を開発し、2ヘッド機と同じ設置面積で4ビーム加工機を実現した。

3. マルチビーム光学系

マルチビーム光学系は、①レーザビームの偏光特性によってビームを分光、合成する偏光ビームスプリッタを応用した副偏向光学系、②ビームの収差を補正する収差補正ミラー、③2ビーム間の焦点差を補正する焦点差補正ミラーから構成される。この構成によって、通常の1ビームと同様の安定性で2ビームでの高速加工を実現できる。

3.1 副偏向光学系構成

図3にマルチビーム光学系に用いられる偏光ビームスプリッタによるビーム分光の模式図を示す。

偏光ビームスプリッタは入射ビームと反射ビームを含む平面に対して垂直方向と水平方向に振動する電界ベクトル

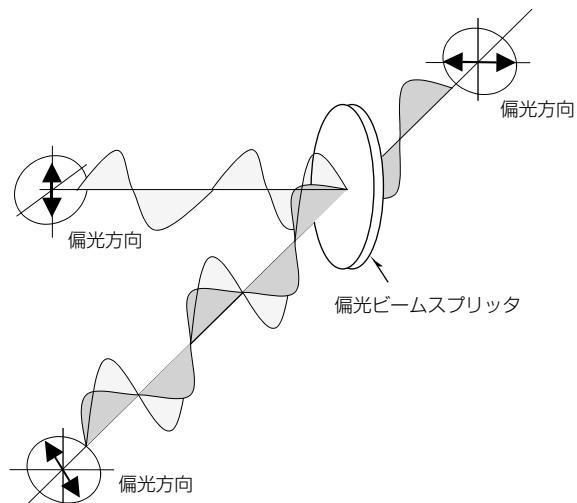


図3. 偏光ビームスプリッタによるビーム分光

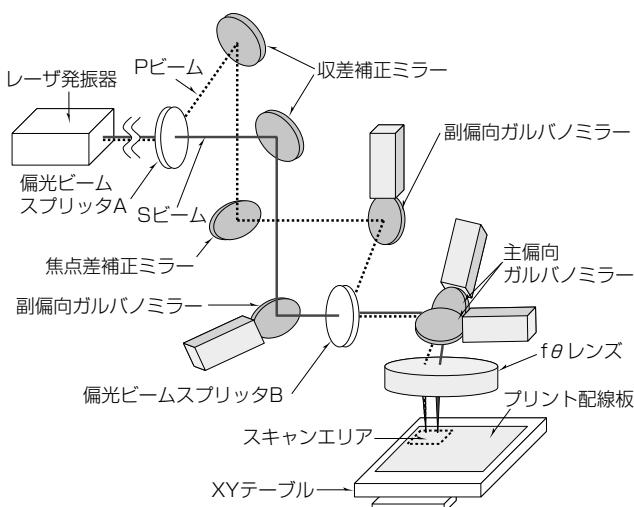


図4. マルチビーム光学系の構成

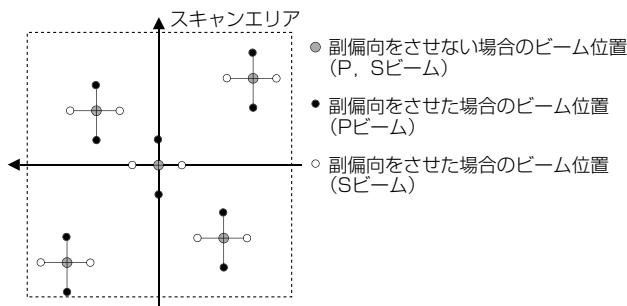


図5. マルチビーム光学系による2ビーム加工の模式図

を持つレーザビームが入射した際、垂直方向に振動する電界ベクトル成分を反射し、水平方向に振動する電界ベクトル成分を透過する特性を持った光学部品である。図4にマルチビーム光学系の構成を示す。垂直方向と水平方向に振動する電界ベクトルを持つ一本の直線偏光のビームを偏光ビームスプリッタAで垂直方向に振動する電界ベクトル成分のPビームと水平方向に振動する電界ベクトル成分のSビームの2本に分光し、それぞれ1枚の副偏向ガルバノミラーを経由して、偏光ビームスプリッタBで同じ光路に戻す。この2つのビームを1対の主偏向ガルバノミラーで位置決めする。プリント配線板上では、図5に示すように主偏向ガルバノミラーによって2ビームを一括で位置決めし、それぞれの副偏向ガルバノミラーで、互いに直交する方向に2つのビームの相対位置を位置決めすることによって、2ビームをスキャンエリア内の任意の場所にそれぞれ独立に位置決めできる。

3.2 収差補正ミラー

マルチビーム光学系の場合、2ビームの分光、合成などを行うため、通常の光学系と比較して多数のミラーやビームスプリッタを使用する必要がある。これらの光学部品の幾何光学的な歪(ひずみ)などによって、伝送されるレーザビームの非点収差が増大し、焦点裕度が低下する場合がある。このため、反射面の形状を図6のように変化させるこ

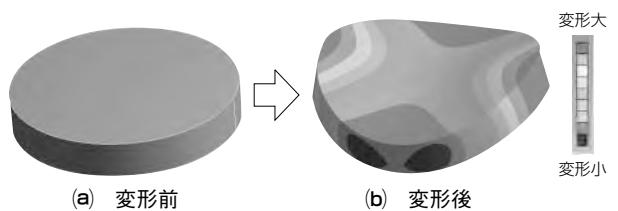


図6. 収差補正ミラーの反射面形状

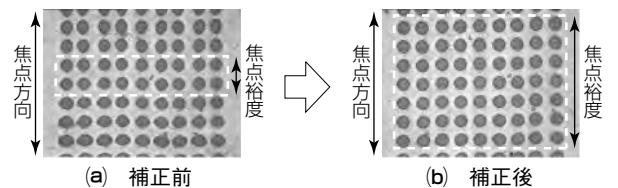


図7. 収差補正による焦点裕度拡大

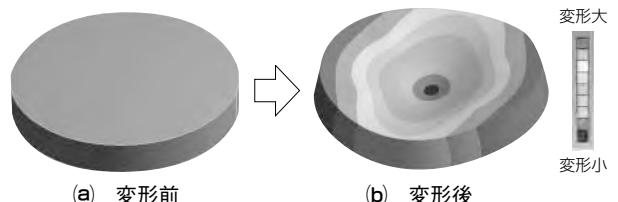


図8. 焦点差補正ミラーの反射面形状

とで非点収差を補正できる収差補正ミラーを開発し、2ビームそれぞれの光路に設置した(図4)。収差補正ミラーによる収差補正の例を図7に示す。それぞれの写真は、横方向にはスキャンエリア内の異なる位置での加工穴を並べ、縦方向にはそれぞれの位置でビームの焦点位置を変化させた時の加工穴を並べている。収差補正ミラーによって収差を補正することで、非点収差によって狭くなっていた焦点裕度(スキャンエリアのどの位置でも真円度の高い穴加工ができる焦点位置の範囲)が拡大されることがわかる。

3.3 焦点差補正ミラー

2つのビームが1つの集光レンズに入射する場合、光路中の光学部品の影響でレーザビームの広がり角が微妙に変化し、2ビーム間での焦点位置のずれが生じる。このため、マルチビーム光学系では、反射面の曲率を図8のように変化させることで焦点位置を調整できる焦点差補正ミラーを開発し、焦点差を解消させている(図4)。焦点差補正ミラーによる焦点位置補正の例を図9に示す。Pビーム、Sビーム間の焦点差をなくすことによって焦点裕度を拡大できる。

4. プリント配線板用2ヘッド4ビーム穴あけ加工機

2ヘッド2ビーム加工機に2台のマルチビーム光学系を搭載し、従来の2ヘッド2ビーム加工機と同じ設置面積で4ビーム同時加工を実現した2ヘッド4ビーム加工機ML605GTF-5150U(以下“GTF”と言う。)を開発した⁽¹⁾。

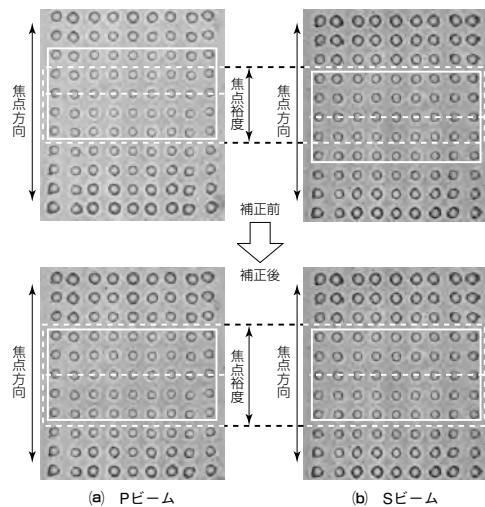


図9. 焦点差補正による焦点裕度拡大



図10. GTFの外観

表1. GTFの基本仕様

項目		仕様
システム	外径寸(mm)	加工機 + 発振器 + 制御装置 + L / UL ※シグナルタワー含む
	機器質量(kg)	8,900
加工機	XYテーブル	加工ワーク寸法(mm) 620 × 560
		同時加工ワーク数(数) 2
		最大送り速度(m / mm) 50
発振器	レーザの種類	CO ₂ レーザ
	出力(W)	150
	設定パルス周波数(Hz)	10 ~ 10,000

L : Loader UL : UnLoader

4.1 加工性能

図10にGTFの外観を、表1に仕様を示す。GTFでは、2枚のワークの4ビーム同時加工によって、図11に示すように従来の2ビーム機と比較して1.6倍の4,915穴/秒の加工速度を実現した。穴位置精度についても図12に示すように従来の2ビーム機と同等の位置精度を確保している。

4.2 加工例

図13に小径穴の加工例を示す。高収束光学系を開発し、収差補正／焦点差補正ミラーと組み合わせることによって、集光性向上と焦点裕度拡大を実現し、これまでCO₂レーザでは加工困難とされていたφ40μm級穴の加工を可能とした。

5. むすび

レーザ加工の高速化をねらいとして開発した“1つの集

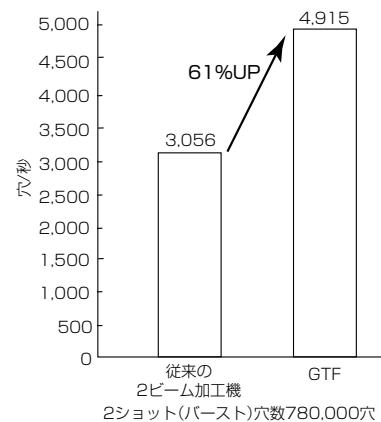


図11. 穴あけ加工速度の比較

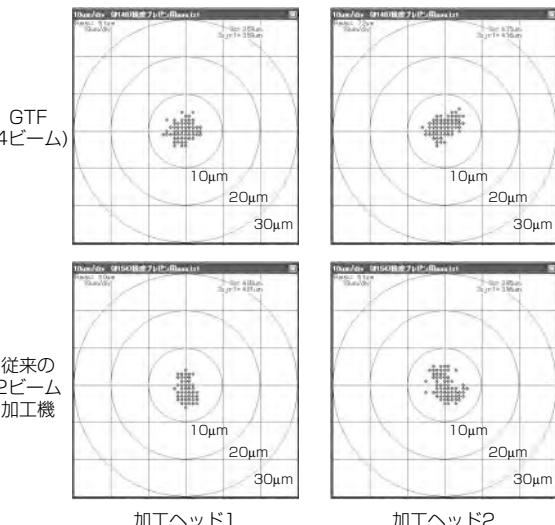


図12. 穴位置精度の比較

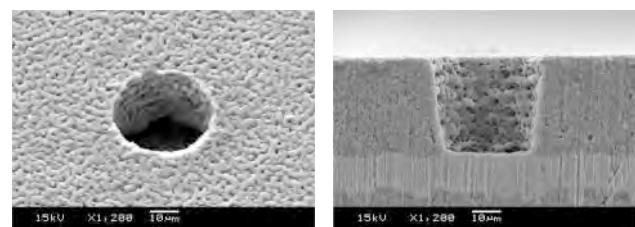


図13. φ40μm級穴のSEM画像

光レンズに2つのビームを入射して、それぞれを高速・高精度位置決めするマルチビーム光学系の構成、動作原理について述べ、マルチビーム光学系を搭載したプリント配線板用4ビーム加工機ML605GTF-5150Uでの高速加工や小径加工について述べた。今後も携帯端末の小型・高機能化が進みプリント配線板の穴数増加がますます進行するものと考えられ、更なるレーザ穴あけ加工の生産性向上を図っていく必要がある。

参考文献

- (1) 岩下美隆：新型プリント基板穴あけ用レーザ加工機“ML605GTF-5150U”，三菱電機技報，83，No.4，287～290（2009）

トレンチIGBTの異物管理技術

小野山 歩* 山田 勝*
中田和成*
樋崎敦司**

Defect Management Technology of Trench IGBT

Ayumu Onoyama, Kazunari Nakata, Atsushi Narazaki, Masaru Yamada

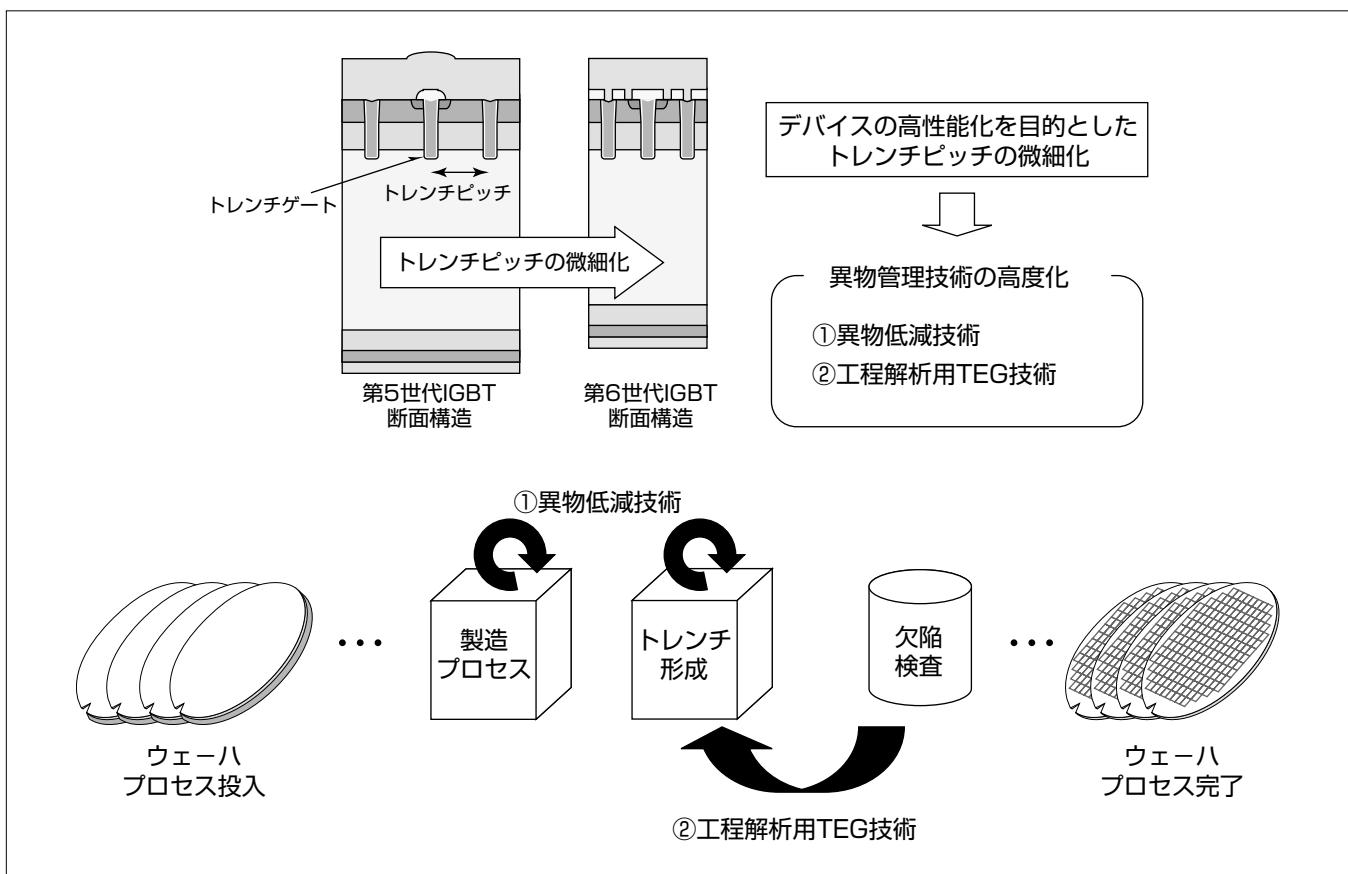
要 旨

近年の環境意識の高まりを受け、電力エネルギーを効率的に利用できるパワーエレクトロニクス機器の普及が著しい。その中で、パワーエレクトロニクス機器のコアデバイスであるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の高性能化と生産性の向上が必要となっている。

IGBTは、その中に組み込まれるトランジスタセル数によって、電流の流れやすさが決まるため、トレンチIGBTではトレンチピッチの微細化技術が非常に重要となる。三菱電機では、第5世代IGBTから第6世代IGBTに進化する際に、LSI(Large Scale Integration)に用いられる微細加工技術をベースに、パワーデバイスに対応した微細化技術を開発することによって、トレンチピッチの微細化を実現し、IGBTの性能向上を図った。

また、スイッチングデバイスであるトレンチIGBTでは、電流のON/OFFを制御するトレンチゲートの形成が重要である。トレンチゲートは、シリコン基板に深いトレンチ形状を加工するドライエッチングプロセスによって形成される。このトレンチ形成工程で異物が発生すると、トレンチ形状が崩れ、電気的不良となる。つまり、異物を管理する技術は、トレンチIGBTの生産性向上に不可欠の技術である。

本稿では、トレンチIGBTの開発及び量産に必要な異物管理技術として、“トレンチピッチの微細化によって新たに管理が必要となった異物の低減技術”と“異物発生工程の特定を短時間化できる工程解析用TEG(Test Element Group)技術”について述べる。



トレンチIGBTの異物管理技術

パワーエレクトロニクス機器のコアデバイスであるIGBTの高性能化には、トレンチピッチの微細化技術が必要であり、この微細化に対応した異物管理の高度化が必要不可欠である。微細化によって新たに管理が必要となった異物を低減する装置・プロセス技術や、トレンチIGBTのキー工程であるトレンチ形成工程での異物解析をショートサイクルで行える工程解析用TEG技術の開発を進めている。

1. まえがき

近年の地球温暖化に代表される環境問題に対する意識の高まりを受け、低炭素社会に向けた省エネルギー化が年々重要になってきている。それに伴い、電力エネルギーを効率的に利用できるインバータを搭載した家電製品、ハイブリッド自動車や電鉄、産業用機器、さらには太陽光発電用パワーコンディショナなどが注目されている。このインバータやコンバータのコアデバイスがパワーデバイスであり、パワーデバイスに対する高性能化と生産性向上の要求も高くなっている⁽¹⁾。

これらのパワーデバイスには、主としてシリコン基板を用いたIGBTやダイオードなどの半導体デバイスが用いられる。IGBTチップは、その中に組み込まれるトランジスタセル数によって通電能力が決まるため、現在主流となっているのは高集積化が可能なトレンチIGBTである。このトレンチIGBTの高集積化には、トレンチピッチの微細化が必要である。

トレンチIGBTのトレンチゲートを作り込むには、ドライエッチングプロセスによって高アスペクト比のトレンチをシリコン基板に形成しなければならない。このトレンチ形成工程で異物が発生すると、トレンチ形状が崩れ、電気的不良となる。この異物を管理する技術は、トレンチIGBTの生産性を向上するために必要な技術である。

このように、トレンチIGBTの開発及び量産には、トレンチ形成工程で発生する異物を管理する生産技術が必要である。その生産技術力のレベルによってデバイスの特性や製造不良率は大きく左右される。

本稿では、“トレンチピッチの微細化によって新たに管理が必要となった異物の低減技術”と“異物発生工程の特定を短時間化できる工程解析用TEG技術”について述べる。

2. トレンチピッチの微細化によるトレンチIGBTのデバイス性能向上

IGBTチップは、多数のトランジスタセルからなる通電部と高電圧に耐える接合終端部で構成される。IGBTの通電能力を向上させるためには、トランジスタセルを微細化し、トランジスタセル数を増やすことが必要である。

図1にIGBTの性能指数であるFOM(Figure of Merit)の値と、第一世代を基準とした各世代の改善状況とキーテクノロジーとの関係を示す。FOMはパワーデバイスに流れる定格電流密度を通電時の電圧(オン電圧)とスイッチング時の電力損失で割ったものである。第1世代から第3世代はプレーナーゲート構造である。第4世代でセル構造を、シリコン基板にトレンチを形成するトレンチ構造とすることによって、飛躍的にトランジスタセル数を向上させてきた。第5世代では、濃度プロファイルをCSTBT(Carrier

Stored Trench Bipolar Transistor)構造とし、オン電圧を低減した⁽²⁾⁽³⁾。さらに、第6世代では、薄ウェーハ化及びトレンチピッチの微細化が行われた。

図2に、第5世代IGBTと第6世代IGBTのセル構造を示すが、IGBTは、デバイスの縦方向(厚さ方向)に電流を流すため、薄ウェーハ化によって通電時のオン電圧を低減できる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

図3に、トレンチピッチの微細化によって、トランジスタセルを高集積化した場合のオン電圧をシミュレーション

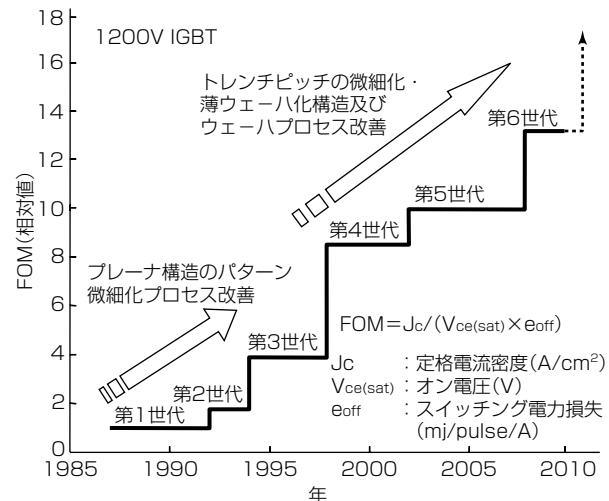


図1. デバイス構造の進化によるIGBTの性能向上

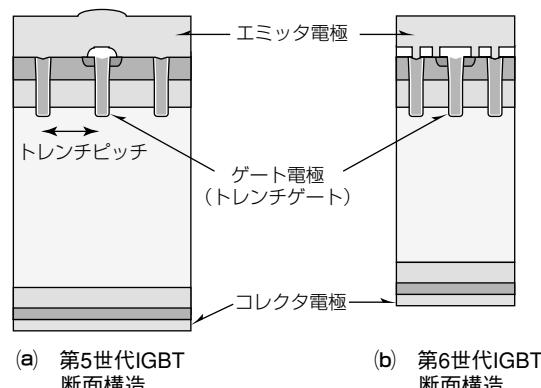


図2. 第5世代と第6世代IGBTの断面構造比較

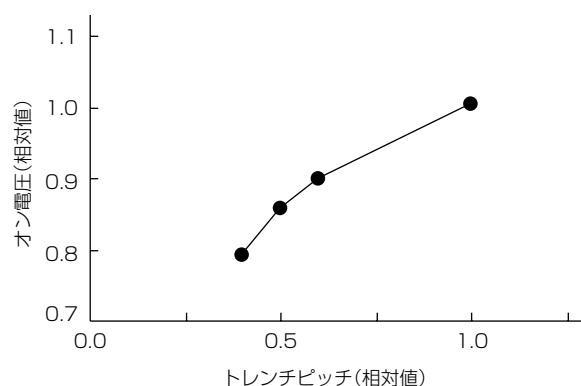


図3. トレンチピッチの微細化によるオン電圧の低減
(シミュレーション値)

した結果を示す。トレンチピッチの微細化によって、オン電圧の低減が可能となり、さらなる省エネルギー化が見込まれる。

このように、プレーナーゲート構造からトレンチゲート構造への進化があった第4世代と、トレンチピッチの微細化を行った第6世代では、トランジスタセルの高集積化によって大幅にFOMが改善した。

3. 微細化によって新たに管理が必要な異物低減技術

先に述べたようにトレンチピッチの微細化を進めてきたが、パターンの微細化が進むと、異物がより問題となる。すなわち、従来のパターンピッチでは、短絡(ショート)や開放(オープン)などの電気的不良にならなかったサイズの異物が、パターンの微細化によって配線間距離が短くなったため、短絡不良の原因となる。さらに、パターンの微細化によって、配線にかかる応力が大きくなり、不良が発生しやすくなる。これらの不良を低減するため、管理する異物サイズを小さくする、配線にかかる応力を低減するといった対策が必要となる。

トレンチIGBTの心臓部であるトレンチゲートは、次のような工程でシリコン基板上に形成される。写真製版処理によってゲートパターンを形成し、ドライエッティングプロセスによって高アスペクト比のトレンチを形成する。次に、エッティング時に発生した分解・反応生成物を除去し、清浄なシリコン面を露出させる洗浄処理を行った後、ゲート酸化膜とポリシリコン電極を形成する。

図4に、トレンチピッチの微細化を検討した際に発生した異物のウェーハ面内分布とSEM(Scanning Electron Microscope)像の一例を示す。この異物は、トレンチ形成後にトレンチに加わる応力によって発生した異物である。この異物を低減するため、洗浄工程及びゲート酸化膜形成の工程でトレンチに加わる応力の低減を目的としたウェーハ保持治具形状の改善と、洗浄工程の適正化を実施した。

また、このトレンチに加わる応力とトレンチ深さの面内均一性はトレードオフの関係にあることが分かっている。そこで、更なる対策として、デバイス構造として要求されるトレンチ深さをウェーハ面内で十分に確保しつつ応力を低減するため、トレンチパターン形成領域の適正化を実施した。

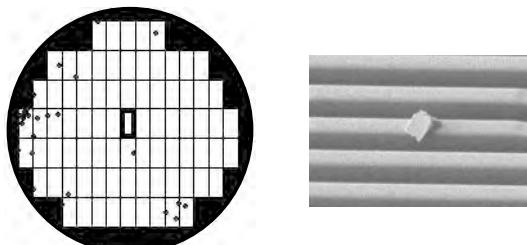


図4. 異物のウェーハマップとSEM像

これらの対策によって、トレンチ深さの面内均一性を確保した上で、微細化によって発生した異物を大幅に低減することができた。

4. TEGを用いた工程解析技術

4.1 トレンチ形成工程の異物管理

半導体製造装置では、様々な原因で発生した異物がウェーハに付着し、電気的不良を引き起こす原因となる。例えば、エッティング装置では、エッティングガスが滞留する部分で、分解・反応生成物が堆積しやすい。その堆積物がはがれ、ウェーハに付着することがある。

IGBTでは、シリコン基板をドライエッティングプロセスで加工するトレンチ形成が最も重要な加工工程である。このトレンチ部に電流のON/OFFを制御するためのスイッチであるゲート酸化膜とゲート電極が成膜される。このゲート電極とエミッタ電極間、コレクタ電極間はシリコン酸化膜で絶縁している。その絶縁性を検査するため、定格以上の十分な電圧を様々な条件で印加する検査工程がある。トレンチ形成工程で発生した異物はトレンチ形状異常を引き起こし、電気的不良の原因となるため、生産性を著しく低下させる。これらの理由から、トレンチ形成工程の異物管理が、IGBTの生産性を向上させるために非常に重要である。

従来、トレンチ形成工程では、装置異物の発生状況を確認するため、装置内に入れたペアウェーハをレーザ散乱式検査装置で検査している。また、製品のインライン検査としては、明視野光学式パターン検査装置を用いた欠陥検査などを行っている。これらの検査で規定数以上の異物や欠陥が検出された場合、パーツの洗浄や交換を定期的に行う。また、エッティングチャンバに堆積する分解・反応生成物を除去するセルフクリーニングなども頻繁に実施し、異物を大幅に抑制している。

4.2 トレンチ工程解析用TEG

製品の製造工程と検査を図5に示す。まず、トレンチ形成工程後のインライン検査で検出された欠陥に対して異物の発生が疑われる工程は、製造プロセスA, B, C, D, トレンチ形成1, 2, 3と多工程にわたる。そのため、複数回の異物発生工程絞込み実験が必要となり、異物発生工程の特定までの期間が長くなるという課題がある。また、製造プロセスA, B, Cでウェーハ上に形成されたシリコン酸化膜や不純物注入領域のパターン形状や欠陥が、トレンチ形状の明視野光学式パターン検査のノイズ成分となるため、トレンチ形成工程で発生する欠陥をインライン検査で検出する感度が低くなるという課題もある。

これらの課題に対して、図6(a)のような構造のトレンチ工程解析用TEG技術を適用した。

工程解析用TEGは、ショートサイクルで異物が発生す

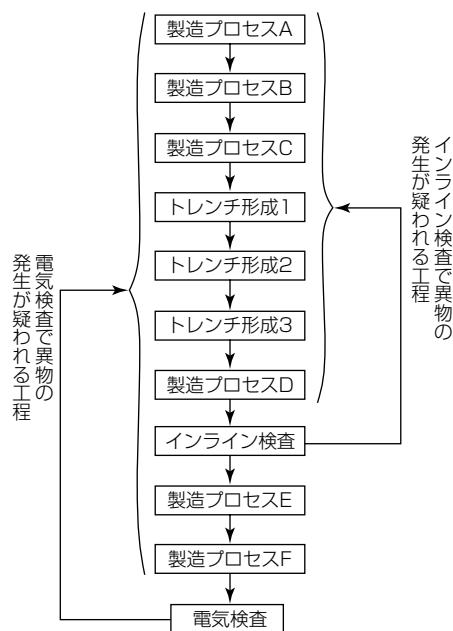


図5. 製品の製造工程と検査

る装置の特定及び対策を目的としたTEGである。トレンチ工程解析用TEGの作成フローは図6(b)に示したようにトレンチ形成工程のみからなる。

このトレンチ工程解析用TEGの特長は次のとおりである。

- ①製造工期が短い。
- ②検査工程で検出された欠陥に対し異物の発生が疑われる対象工程が少ない。
- ③作り込まれている形状は、トレンチ形状のみであり、インライン検査での欠陥検出感度が高い。

この解析用TEGを活用することによって、トレンチ形成工程での異物発生から製造装置での対策開始までの期間を大幅に短縮できた。

また、トレンチ工程以外に、ポリシリコンパターン形成工程やエミッタ電極形成工程のみを抽出した工程解析用TEGを、それぞれの工程の異物管理に利用している。

5. む す び

パワーエレクトロニクス機器のコアデバイスであるトレンチIGBTの高性能化及び生産性の向上には、トレンチ形

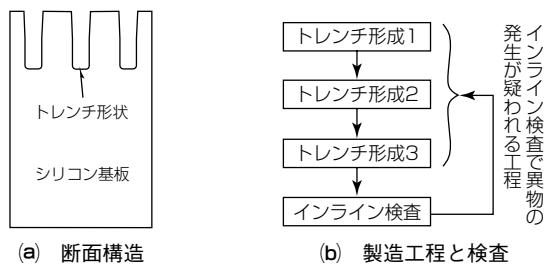


図6. トレンチ工程解析用TEGの断面構造と製造工程及び検査

成工程で発生する異物を管理する生産技術が必要であることを述べてきた。

トレンチIGBTで、トレンチピッチは更に微細化が進むとともに、高アスペクト比が必要となる。また、薄ウェーハ化など、LSIとは異なるパワーデバイス特有の縦方向の構造作り込みが、今後ますます必要になると考えられる。

このような高性能パワーデバイスを安定的に製造するため、異物管理技術を中心としたパワーデバイスの生産技術開発に、今後も引き続き取り組んでいく。

参 考 文 献

- (1) マジュムダールゴーラブ, ほか:環境対策に不可欠なパワーデバイスの技術動向, 三菱電機技報, 84, No.4, 210~214 (2010)
- (2) Takahashi, H., et al.: Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor(CSTBT) - A Novel Power Device for High Voltage Application -, Proceedings of the 8th ISPSD (1996)
- (3) Tomomatsu, Y., et al.: Characteristics of a 1200V CSTBT Optimized for Industrial Applications, Industry Applications Conference, 36th IAS Annual Meeting (2001)
- (4) Takahashi, T., et al.: CSTBTTM(III) as the next generation IGBT, Proceedings of the 20th ISPSD (2008)
- (5) 高橋徹雄, ほか:新型パワーモジュール用第6世代IGBTと薄ウェーハダイオード, 三菱電機技報, 84, No.4, 224~227 (2010)

圧入組立型分割鉄心による 圧縮機モータ

山本一之* 吉野勇人***
増本浩二**
庄野一弘**

Compressor Motor Using Partial Fitting Assembly Cores

Kazuyuki Yamamoto, Koji Masumoto, Kazuhiro Shono, Hayato Yoshino

要 旨

近年、世界規模での環境規制が拡大される中、産業用、家電用、車載用などの多くの機器に搭載されるモータに対して、さらなる高効率化が要求されている。空調機器の分野では、各国の省エネルギー規制が強化されて目標値のレベルアップが求められており、エアコンの圧縮機やファンモータに高効率のブラシレスDC(Direct Current)モータを搭載するケースがますます増えている。三菱電機でも、家庭用ルームエアコン向けにポキポキモータと呼ぶ分割鉄心を採用したブラシレスDCモータを開発し、製品化している⁽¹⁾。

今回の開発は、業務用やビル用のパッケージエアコンに搭載される中大型の圧縮機モータを高効率化することを目的とする。年間の生産台数は家庭用に比べて少なく、かつ多品種の製品であるため、生産規模に応じて設備投資や工数を十分に最適化し、コスト競争力を強化する必要がある。

対象となる圧縮機モータの固定子には分布巻き方式が採用されてきた。そこで、巻線密度を高めて高効率化できる集中巻き方式のブラシレスDCモータの適用を目指し、“カチッコア”と呼ぶ新しい圧入組立型の分割鉄心を提案した。この分割鉄心は、磁極単位の鉄心から簡単に中大型モータの固定子が組み立てられるため、鉄心金型やプレス装置などの設備投資を抑え、組立工数を低減することができる。

提案した鉄心構造を用いてモータを設計するとともに、整列巻きによる高密度巻線を実現する巻線機などを開発して、量産工法を確立した。新規に開発したブラシレスDCモータは、従来の分布巻き方式のモータに比べて、総合効率を1~4%向上し、質量比で約20%の小型化を実現した。当社の業務用パッケージエアコン“HNB、ENBシリーズ”的圧縮機に採用され、順次適用機種を拡大中である。



圧入組立型分割鉄心
(カチッコア)



集中巻き方式モータ固定子



集中巻き方式モータ搭載
圧縮機“HNB78F型”

エアコン用圧縮機モータ

溶接された密封型の圧縮容器(シェル)に圧縮室とモータが一体に配置されている。モータの固定子はシェルに焼きばめて固定されており、回転子は圧縮機の回転部に接続され、モータは常に冷媒中に浸(した)された状態で作動する。近年、圧縮機の高効率化のために、従来の誘導モータからブラシレスDCモータが主流となっている。圧縮機モータは幅広い運転域で、高効率化以外に、静音化・低振動化などの性能を満たす必要がある。

1. まえがき

空調機器の分野では、環境問題を背景に、省エネルギー規制の強化や省エネルギー優遇措置の施行が世界各国で実施されている。エアコンのインバータ化が進み、圧縮機に高効率なブラシレスDCモータを搭載するケースが増えている。当社でも家庭用ルームエアコン向けに、ボキボキモータと呼ぶ分割鉄心を採用した高効率モータを開発し、製品化している⁽¹⁾。

今回の開発は業務用パッケージエアコンに搭載される中大型の圧縮機モータを対象とする。年間の生産台数は家庭用に比べて少なく、かつ多品種の製品であるため、生産規模に応じて設備投資や工数を最適化し、コスト競争力を強化する必要がある。

本稿では、高効率化、小型化、静音化・低振動化などのモータ性能の向上とともに、金型やプレス装置などの投資や組立工数の低減も実現した新しい分割鉄心を用いたモータ開発について述べる。

2. 中大型モータへの分割鉄心の適用

2.1 圧縮機モータの巻線構造

図1に圧縮機モータに用いられるブラシレスDCモータの固定子構造を示す。(a)が分布巻き方式、(b)が集中巻き方式である。分布巻き方式は、治具に外巻きしたコイルをインサートツールによって固定子鉄心に挿入する巻線が行われる⁽²⁾。集中巻き方式は、コイル線を巻線ノズルによって磁極ごとに巻回する巻線が行われる⁽¹⁾。

集中巻き方式は、鉄心を分割化して巻線スペースを十分に確保し、コイル線を整列させて巻線密度を高められるため、高効率モータへの採用が増加している。この開発でも、集中巻き方式を中大型の圧縮機モータに採用してモータの高効率化を図ることを試みた。

2.2 分割鉄心を適用する場合の課題

多品種少量の中大型モータに対して、従来提案されてきた分割鉄心を適用する場合、次の課題がある。

図2の(a)に示すように、ボキボキ式分割鉄心は磁極を連

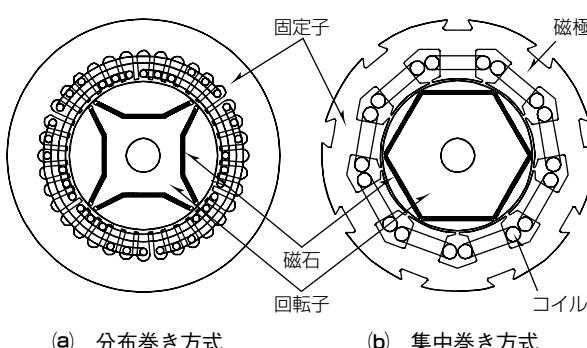


図1. 圧縮機モータの固定子構造

結してコイル線を切らずに連続巻線できる利点がある。しかし、中大型の固定子鉄心に採用した場合、連結した鉄心形状を製造する金型や大型のプレス装置への投資が大きく、また巻線やモータ組立に要する工数や設備費も増大する課題がある。

図2の(b)に示すように、磁極単位の鉄心を金型で抜き、溶接によって組み立てる方式は、小型の金型と、加圧能力の低い安価なプレス装置で鉄心を製造できる反面、組立時の溶接歪(ひずみ)で十分な鉄心精度が得られない課題がある。

図2の(c)に示すように、分割面にアリ溝形状の凹凸部位を設けて圧入によって組み立てる方式も、積層厚が厚い中大型の鉄心に対しては圧入力が増大し、鉄心がかじりをして十分な鉄心精度を確保できない課題がある⁽²⁾。

3. 圧入組立型分割鉄心の提案

3.1 提案する分割鉄心構造

図3にこの開発で提案する圧入組立分割鉄心“カチッコア”を示す。磁極ごとに分割された鉄心はその分割面に凹凸部位を設けてあり、この凹凸部位は勘合形状と挿入形状の2種類の鋼板を積層して構成されている。各々の分割面を合わせたとき、勘合形状の凸部位は挿入形状の凹部位に挿入でき、また挿入形状の凸部位は勘合形状の凹部位に挿入できるように設計されている。そして勘合形状の凸部位と凹部位は積層方向(モータ軸方向)からの押圧によって圧入組立できるアリ溝形状に設計されている。

3.2 “カチッコア”的特徴

図4に提案した割鉄心の組立の様子を示す。積層方向に少しづらせば分割面が合わせられるように勘合形状と挿入

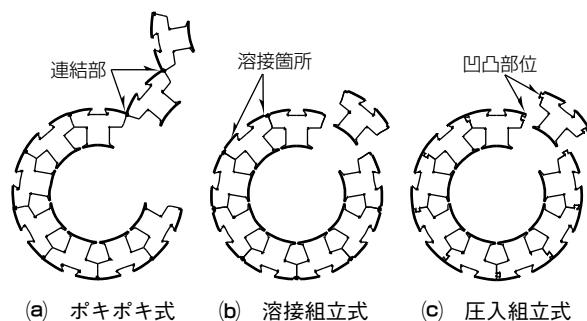


図2. 鉄心分割方式の比較

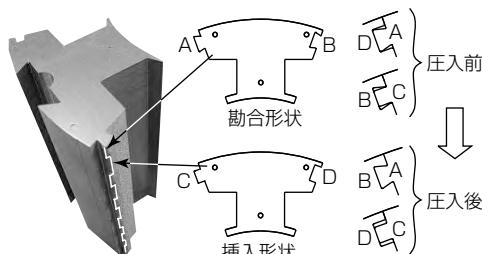


図3. 圧入組立分割鉄心“カチッコア”

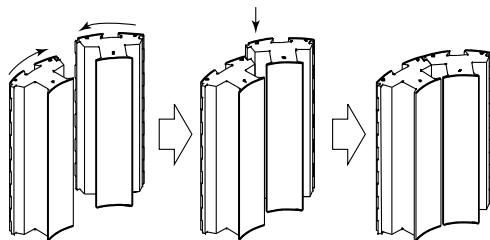


図4. 分割鉄心の組立

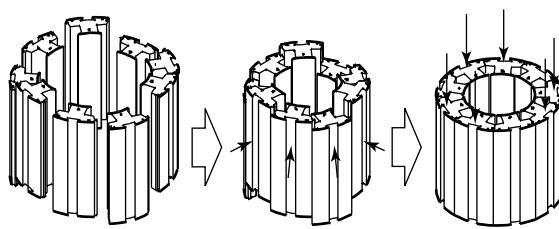


図7. 鉄心一括組立工法(コイルは未表示)

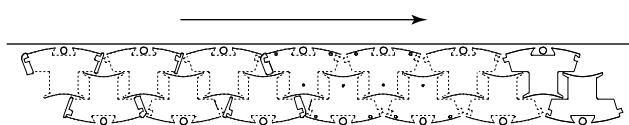


図5. 鉄心金型のレイアウト

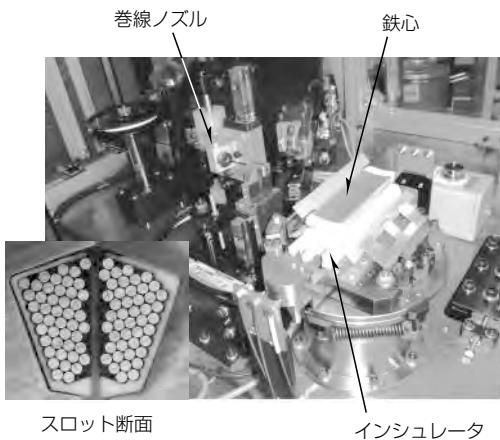


図6. スピンドル式巻線機

形状が交互に配置してあり、分割面を一旦(いったん)合わせた状態に組み立てた後、短い距離を積層方向に押圧するだけで勘合形状の凹凸部位を圧入組立できる。構成する勘合形状と挿入形状の比率を変えて圧入力を低減できるため、圧入部がかじることがなく優れた鉄心精度が得られる。

図5にこの分割鉄心の金型レイアウトを示す。パンチコレーラによってトリムパンチを切り替えて分割面の凹凸部位を形成する。磁極単位の抜きであるため、小型の金型が採用でき、また加圧能力の低いプレス装置の採用が可能となり投資を抑えられる。また分割化によってネスティングを工夫できるため、一体化鉄心よりも高い鉄心歩留まりを得ることができる。図のように2つの磁極を対向させて千鳥配置とした場合、鉄心歩留まりは約80%である。

4. 圧縮機モータへの適用

4.1 スピンドル式巻線機の開発

開発した圧縮機モータは集中巻き方式の固定子とネオジム磁石を内部に配置した回転子からなる9スロット6極の

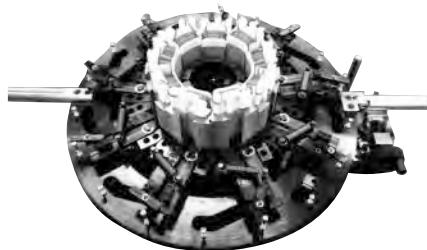


図8. 鉄心一括組立治具

構造である。部材コストを低減するためにモータ回路はコイル端末を結線して構成した。

図6に開発した巻線機を示す。インシュレータを装着した鉄心を回転させ、巻線ノズルの1方向の動作でコイル線を配置させるスピンドル巻線方式を採用した。整列巻線を行う上でコイル積層時に制御する必要がある巻層間の重なり位置(クロスポイント)は、すべてコイルエンドに集中させてスロット内部を完全な俵積み状態に配置し、設計したスロット面積に対して最大限の占積率を達成した。

またこの巻線機には、各端末の長さを指定長に調整して切断できる機能や、CO₂レーザ光を巻線途中で照射して端末先端の表面皮膜を剥離(はくり)する機能などを付加して、後のコイル端末処理の組立工数を低減させた。

4.2 鉄心一括組立工法の開発

分割鉄心の組立工数を低減するために、カチッとコアの構造を活用して、図7に示す一括組立工法を考案した。組立は、次の3工程で行う。

①巻線されたすべての磁極を同心円上に、かつ隣り合う凹凸部位が挿入できる高さに配置する。

②各鉄心を同時に中心に向かって移動させ、各凹凸部位を挿入して分割面を合わせる。

③積層方向に押圧し、勘合凹凸部位を圧入組立する。

図8に開発した半自動式の組立治具を示す。カムやギヤなどを用いて一連の動作を実現でき、作業者は負担なく短い時間で作業を遂行できる。

この組立工法は、すべての磁極の分割面を密着させた状態で圧入組立ができるため、組立後の真円度は約30μmと、一体型鉄心と同等の鉄心精度が得られた。その結果、所望の静音・低振動のモータ性能を実現することができた。



図9. 開発した圧縮機モータ固定子

4.3 開発した圧縮機モータの性能

図9に開発した圧縮機モータの固定子を示す。同出力の分布巻き方式の固定子に比べ、質量比で約20%を削減することができた。また、固定子のコイルエンドの高さが低減でき、30%以上の軸方向の小型化が実現できた。

図10と図11に、同出力の分布巻き方式のモータと開発した集中巻き方式のモータを比較した場合の、総合効率と各損失の測定例を示す⁽³⁾。総合効率とは、モータ効率とインバータ効率の積である。特に低回転域で効率が大きいものの、すべての回転数で分布巻き方式に比べて効率が優れていることがわかった。そして、コイル抵抗の低減によって銅損が半減できていることが確認でき、集中巻き方式の優位性を検証できた。

開発した圧縮機モータは当社の業務用パッケージエアコンのHNB(18HP), ENB(10HP)シリーズに採用されており、順次、適用機種を拡大中である。

5. む す び

“カチッとコア”は、簡易な組立てで十分な鉄心精度が得られるため、試作も容易であり、モータ開発を加速することにも貢献している。またポキポキモータとも組み合わせ、生産規模に応じたモータラインを構築することによって、空調機器だけでなく、産業用、車載用など、多くの製品に高効率モータを提供できると考えている。

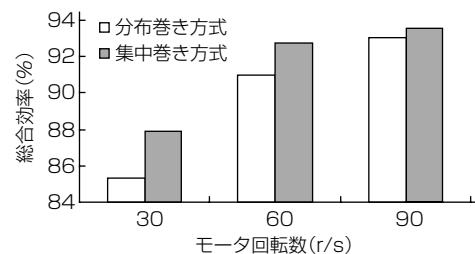


図10. 総合効率の比較

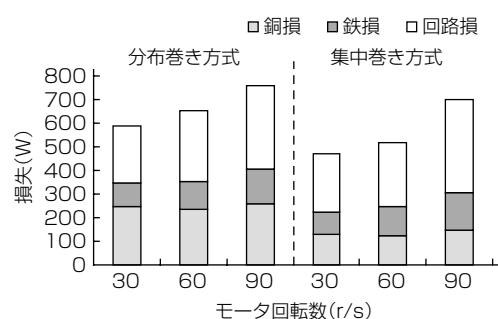


図11. 各損失の比較

当社では、モータがキーパーツとなっている製品が多数ある。モータの生産技術開発を通じて、多くの製品の競争力を強化するとともに、高性能化、高効率化を更に追求して、省エネルギー化に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 秋田裕之, ほか: エアコン用圧縮機モータの省エネルギー・高効率化, 三菱電機技報, 75, No.10, 655~658 (2001)
- (2) 木下治雄, ほか: 換気扇用小型モータの量産ライン構築, 三菱電機技報, 81, No.12, 791~794 (2007)
- (3) 吉野勇人, ほか: 集中巻ブラシレスDCモータの高効率化検討, 電気学会 回転機研究会資料, RM-09-51 (2009)