

特集：新世代商品群の生産技術

34

走る喜びを実現するAPMC鑄造のモデルベース開発

Model-Based-Development of Advanced Precision Mazda Casting
to Realize Celebrate Driving

國松 大知*1	菅谷 智*2	橋本 修一*3
Daichi Kunimatsu	Satoshi Sugaya	Shuichi Hashimoto
村瀬 宏治*4	小杉 一浩*5	丸尾 幸治*6
Koji Murase	Kazuhiro Kosugi	Koji Maruo

要 約

ブランドエッセンスの「走る喜び」を実現するため、シリンダーヘッド素材領域でも「軽量化」を重要課題として取り組んでいる。しかし、軽量化として薄肉化を追求すると製品の機能限界に到達するため、各部位での限界を精度良く予測する技術が必要である。そのためには運転時に発生する応力に加え、製造時に製品内に残留する応力分布の考慮が不可欠であると考えた。そこで、残留応力予測技術を開発し、その結果を開発部門の機能評価に組み込む製品開発プロセスを構築した。

今回、この技術を用いて新型MAZDA3シリンダーヘッドをモデルベース開発し、製品機能を維持しつつ業界TOPレベルの薄肉軽量化を実現した。本稿ではその取り組みについて報告する。

Summary

In order to realize the brand essence “Celebrate Driving”, we are engaged in “Weight Reduction” as a critical theme in cylinder head casting area. However, if we easily pursue to reduce thickness for the weight reduction, the limit of the product function will be reached. Thus, the verification technology of function limit at each part with high accuracy is necessary. For that, we assumed that, in addition to several stresses which occur in driving, the residual stress distribution which remains in the product at manufacturing is the crucial factor. So, we developed the residual stress verification technology and structured the product development process that the residual stress distribution is coupled to the function verification at R&D Division.

This time, the cylinder head of All-New Mazda3 has been model-base-developed by this technology and we realized to reduce thickness and weight as the industry top level while keeping product functions. This article introduces the approach of the technology.

Key words : materials, and production・manufacture, aluminum alloy/magnesium alloy/titanium alloy, formed and fabricated materials, and quantity production prototyping, reliability/robust design, and design/prototyping, thickness reduction, weight reduction, residual stress, APMC=Advanced Precision Mazda Casting, casting, In-Process-Out, Coupled

1. はじめに

ブランドエッセンス「走る喜び」の追求に向けて、生産部門では「魂動デザイン」「人馬一体」「燃費」を実現&追求する方針を掲げている。これらを機能展開すると因子に「重量」が影響する。よって、素材領域では

製品の「軽量化」を重要課題に挙げている。本稿では、シリンダーヘッドの事例を紹介する。

Fig. 1に示すように、シリンダーヘッドは燃焼時の火炎伝播を制御する燃焼室や必要な空気の吸排気の流れを制御するポートと、燃焼熱の冷却に必要な水流を制御するウォーター・ジャケットを組み込んでおり、動力性

*1, 3~6 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

*2 MPS推進部
MPS Promotion Dept.

能や燃費を大きく左右する重要なエンジン部品である。製品機能向上のため燃焼や冷却をより緻密に制御する必要があるため、付帯部品の増加や冷却回路の多系統化が進み、シリンダーヘッドの形状は複雑化している。複雑になるほど形状間に余肉がつき重量が増加している。

2. 軽量化の追究

2.1 軽量化に向けた課題

一般的に、薄肉化や除肉により軽量化するには、アルミ溶湯の湯流れ性や鋳型の造型性といった生産性に加え、軽量化による製品機能への影響も考慮する必要がある。例えば、強度を維持しつつ軽量化しても、鋳造後の素材材に残存する応力（以下、残留応力）が局所的に大きくなると、耐久性が悪化する。これを防ぐために、生産性評価のみならず、生産技術と開発部門が一体となり、開発初期段階から残留応力を考慮し製品耐久性を評価することが重要な課題である。

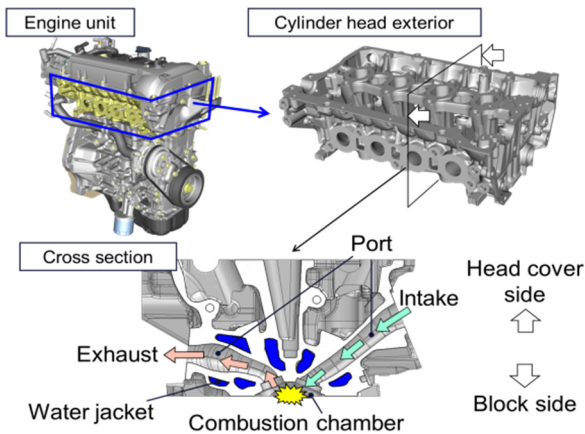


Fig. 1 Outline of Cylinder Head

2.2 開発部門での耐久性評価

Fig. 2の上段に耐久性評価基準を示す。製品設計段階で運転中にかかる応力を予測し材料の疲労限界に対する余裕度をCAEで評価している。

運転中にかかる応力は燃焼による熱応力と製造工程で発生する残留応力に分けられる。Fig. 2のグラフに示すが、部品が持つ残留応力を、従来では「過去の実測を基に設定した任意の均一値をシリンダーヘッド全体へ与える」との条件で行っていた。しかし、実際はそれより残留応力が低い部位が大部分であるため、軽量化できる領域を逃していた。一方で、残留応力が局所的に高くなる部位は、開発耐久評価時に手戻りが発生していた。つまり、CAEで軽量化を進めるには、より実態に近い耐久性検証が必要で、そのためには部品が持つ残留応力分布を考慮することが欠かせない。

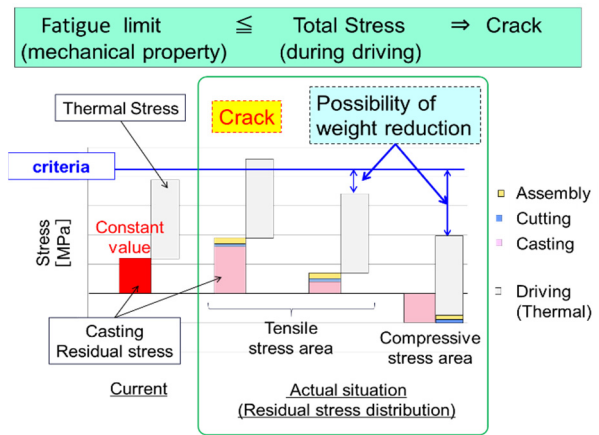


Fig. 2 Necessity of Residual Stress Coupled Analysis

3. 残留応力の発生メカニズム

3.1 シリンダーヘッド鋳造方法

一般的にシリンダーヘッドは低圧鋳造法（ロープレッシャーダイカスト（以下、LPD））と呼ばれる工法で製造されるが、マツダでは世界オンリーワンのアドバンスド・プレジジョン・マツダ・キャストィングプロセス（Advanced Precision Mazda Casting, 以下APMC）を採用している。

これは常温造型高精度砂型（以下、砂型）に低圧注湯する鋳造法をベースとし、砂型の一部に金型を取り入れることで鋳造組織の緻密化を図りつつ、シャワーを用いた急冷工程を取り入れた工法である。砂型と「冷却プレート」と呼ぶ金型を積み木のように組合せ鋳型を形成し、アルミ溶湯を注湯する。その後、狙いの材料素性になるように常温まで緻密に冷却制御し、砂型を除去することでシリンダーヘッド素材品を得る工程となる（Fig. 3）。

一般に広く採用されているLPDに比べ、必要な部位のみ機械的性質を大幅に向上しつつ、薄肉な形状が形成できる。また、冷却制御により急冷による焼き入れ効果と復熱による時効効果を得ることができ、熱処理レスによる低コスト生産を実現している（Fig. 4）。

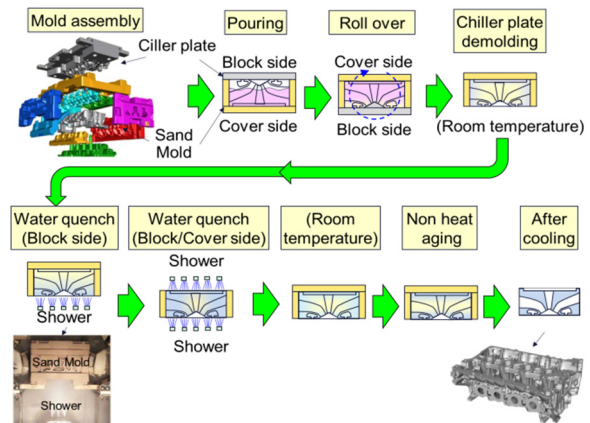


Fig. 3 APMC Process Flow

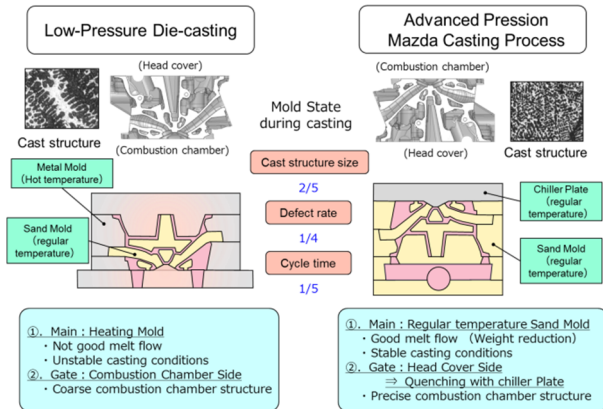


Fig. 4 Comparison between LPD and APMC

3.2 残留応力の発生メカニズム

先述のとおり、APMC工法の casting~冷却工程では、製品のさまざまな部位がダイナミックに温度変化することで、Fig. 5に示すように大きな温度ギャップが生じ（金型と中子によるアルミの冷却差及びシャワー照射部の急冷）、各部位で温度収縮差が発生するため、熱応力が発生する。そして、この熱応力（圧縮・引張応力）が冷却中に変化しながら最終的に釣り合った状態になり、素形材内部に残留する。以上がAPMC工法で残留応力が発生するメカニズムであり、残留応力の予測には各部位の温度変化を正しく計算することが最も重要である。

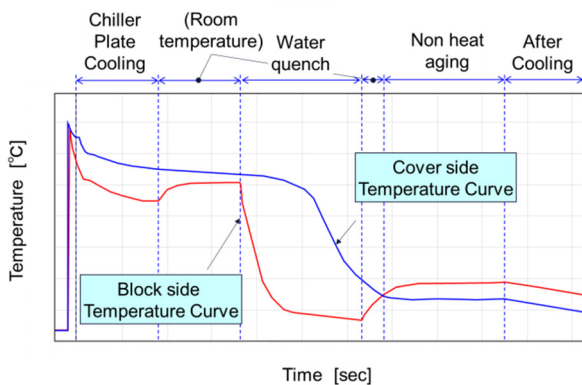


Fig. 5 Temperature Curve of APMC Process

4. 生産工程における定量化とモデル化

4.1 モデルベース技術の考え方

まず、現場・現物での実態測定により対象となる現象を徹底的に定量化し、現象のからくり（原理）を解明する。次に、このからくりを入力情報（Input）と出力情報（Output）の相関式（Process）で記述する（以下、IPO）。この式を構成する変数の内、コントロール可能な変数を制御因子、そうでないものを誤差因子とする。後は、相関式を解くために最も適したツールを使って

システム化を図るが、製品開発では部品形状が重要な変数となるため、FEMなどの3次元形状を計算可能なCAEソフトを使うことが多い。

本稿では、まず全 casting 工程の温度測定によりキーとなる各工程での温度変化のからくり（IPO）を解明した。次に、これらIPOを計算できるようにシステム開発するとともに、計算パラメータとして必要となる境界条件や物性値を詳細調査した（Fig. 6）。以下にその詳細を述べる。

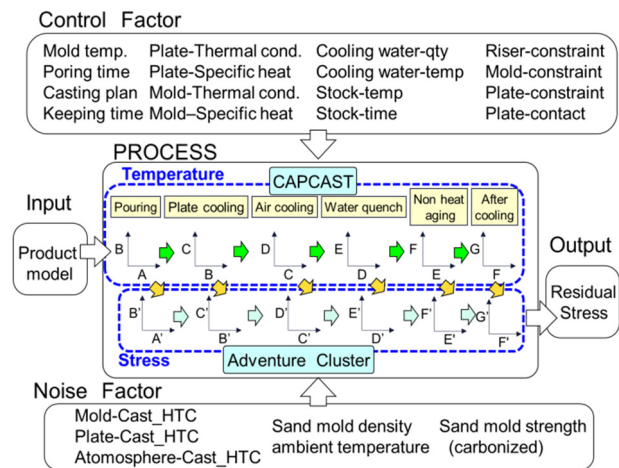


Fig. 6 Residual Stress In-Process-Out

4.2 全工程測温実現と測温精度向上

APMC工法では casting の各工程がシーケンシャルにつながっているため、工程ごとの温度変化を定量化する目的で全工程をまたいで連続測定する必要がある。

ところが、一般的な有線タイプの測温機器では配線が長くなるため取り回し性が悪く、断線トラブルなどにより連続測定は困難であった。そこで、Fig. 7-①に示すように測温機器を有線タイプから無線タイプに切り替えてこの問題をクリアすることで、配線が取り回せない工程（搬送中、シャワー冷却工程等）の温度プロファイルも取得可能となった。

測定精度向上のために、熱電対のセット方法にも改善を加えた。APMC工法の特徴である冷却プレートに溶湯が接触して急冷される部位では、計測ポイントが数mmずれるだけでも測定結果が大きく変わってしまう。溶湯の流れにより熱電対が倒れてセット位置がずれることを防ぐため、湯流れ解析結果から確認した溶湯の流れ方向に沿わせて熱電対を設置した。加えて、熱電対自体の剛性を上げられるように、飛び出し部へセラミックベースの接着剤で補強を行うなどの改善を加えることで測定ばらつきを抑制している（Fig. 7-②）。

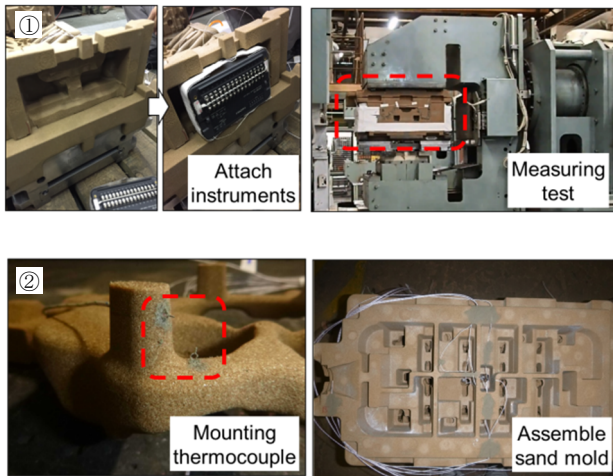


Fig. 7 Temperature Measuring Test

4.3 熱伝導特性の測定

冷却過程ではアルミと鋳型との熱の授受による温度変化が支配的である。よって鋳型の高温時の熱物性を正確に把握することは重要である。

砂型は砂が98%以上を占めていることから、従来は砂であるケイ素の熱伝導物性を入力していた。しかしながら、砂型は砂粒と微量の接着剤の集合体であるため、製造工程の上下限品の密度と接着剤の配合量をパラメーターとしてテストピース砂型を製作し、全組み合わせで熱伝導特性を実測した。結果、砂型は砂単体よりも伝熱性が低く、量産条件（温度・時間）では、溶湯接触面から約5mm程度しか砂型温度が上昇しないことが判明した。この結果から熱伝導率を算出し解析へフィードバックした。

4.4 熱間機械的性質値測定と分布考慮

凝固収縮過程では鋳型による拘束が残留応力に影響する。そこで、鋳型状態で常温から高温域500℃までの、線膨張係数、応力歪線図等を実測した。

一方、シリンダーヘッド鋳造材（AC4B相当材）の機械特性については、従来は現物から一つの応力-ひずみ曲線を測定して使用していたが、APMC工法の特徴に合致させるべく、急冷部と徐冷部での機械特性の差を考慮できるように改善した。具体的には、ブロック面は金型で冷却するため微細な結晶組織になり強度が高いが、ミドルデッキ・カバー面といった領域は相対的に強度が低い。この機械的性質の分布を考慮するために、冷却速度と機械的性質の相関式を作成し解析条件へ織り込んだ。

5. システム開発

5.1 ハード・ソフトウェアの改善

システム化にあたり、温度モデルを再現するソフト

ウェアはAPMC工法特有の制御因子を織り込むため、市販の鋳造解析ソフトを自部門でカスタマイズして利用している。APMC工法のダイナミックな温度変化が残留応力に大きく関わるが、ソフトウェア導入時は急激な温度変化を伴うシャワー工程を再現することが出来なかった。理由として、シャワーが当たる鋳物面は、冷却プレートや砂型、空気、水といった各工程で異なった材料と熱の授受を行っているが、材料設定変更をせず熱伝達係数のみで合わせ込みを行うと、内部の熱伝導計算が不確かなので、大きな誤差が生まれたためである。そこで、専用の解析プログラム（ロールオーバー～シャワーリング）を作成した。具体的には、材料設定を砂から水へ変更させるため、シャワーリング工程を独立して計算させ次工程のインプットとなるようなプログラムを開発した。また、シャワーノズルの水流量や噴霧範囲から冷却能分布を再現する仕様も開発した。具体的には、冷却時の壁面熱伝達率を計算する上で、沸騰現象を再現するのは膨大な計算時間がかかり現実的ではない為、各種冷却条件と熱伝達率との重回帰式を品質工学で効率的に構築し、ソフトウェアへ組み込んだ。

応力モデルを再現するソフトウェアは市販の弾塑性構造解析システムをそのまま使用するが、温度モデルとの連成はインターフェースを開発した。ハードウェアは、非常に重い計算になること想定してクラスター化対応を前提とすることで、段階的なCPU数増強により計算時間を短縮可能とした（Fig. 8）。

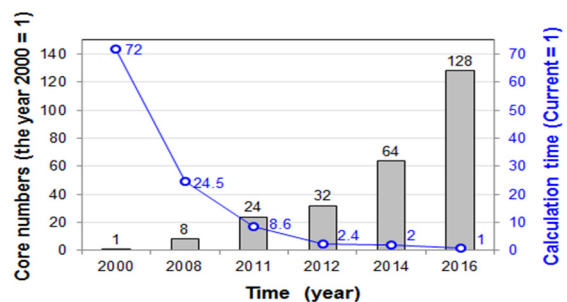


Fig. 8 Core Numbers and Calculation Time

5.2 残留応力予測精度確認

以上の取り組みにより、Fig. 9に示すように、注湯／凝固～シャワーリング～室温までの全域で温度曲線を±10℃以内に収めている。得られた温度曲線を残留応力解析の温度荷重にインプットすることで、鋳造工程で発生する残留応力を過渡的に確認できるようになった（Fig. 10）。

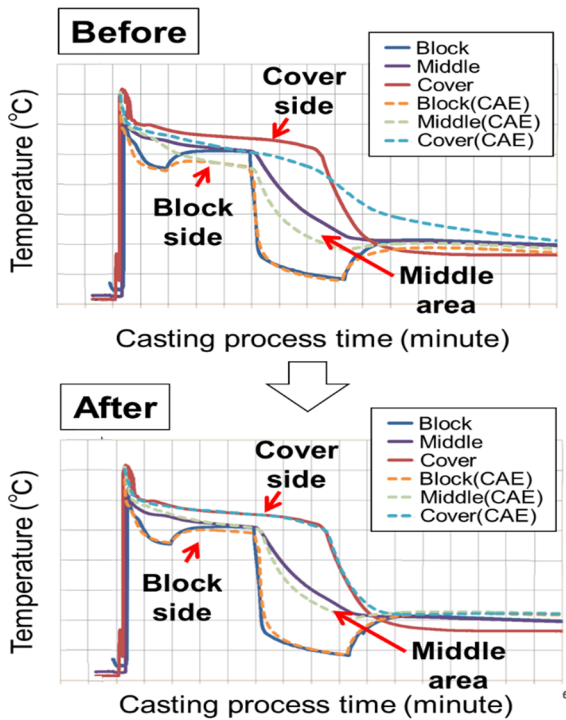


Fig. 9 CAE and Measured Temperature Curves (Before / After)

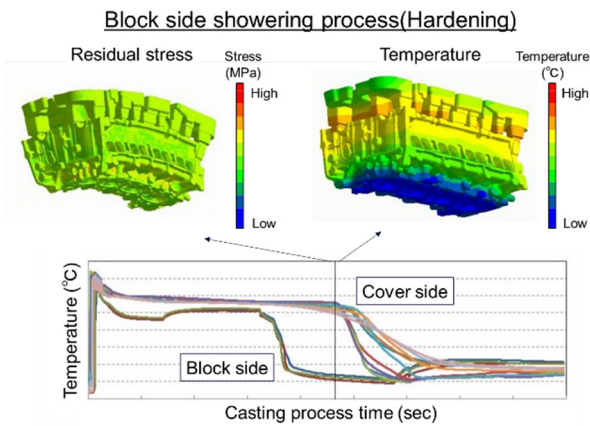


Fig. 10 Example of Stress and Temperature Change

SKYACTIVエンジンのシリンダーヘッドの残留応力計算結果を実測と比較した結果をFig. 11に示す。引張・圧縮方向及び応力値共に製品の各部位に渡って良い一致を示しており、モデルベース開発に適用可能と考え、鋳造プロセスや形状の最適化への活用を開始した。例えば、鋳造後の冷却過程で発生していたクラック等のメカニズム分析が可能となり、応力を低減させる鋳造条件変更や形状改善などを実施している。この残留応力予測結果を、開発部門で検証している耐久性評価システムの境界条件へ活用するため連成システムの構築を進めた。

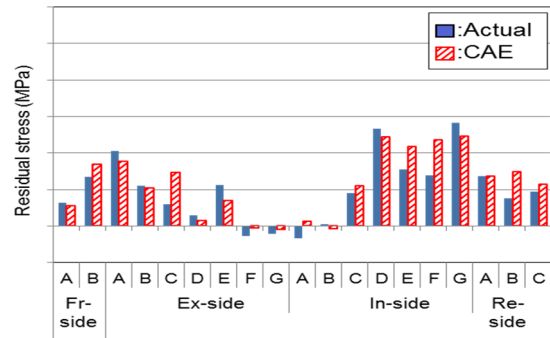


Fig. 11 Residual Stress Difference between CAE and Actual Measurement (SKYACTIV Engine)

6. 開発モデルとの連成

6.1 開発モデルとの連成システム構築

生産技術部門で残留応力予測を行う3Dモデルは鋳造時の形状であり、開発部門で耐久性評価を行う3Dモデルは機械加工を終えた最終製品形状であるため、形状が異なる。そのため解析を行うメッシュのノードが一致しておらず、当初は連成させることが困難であった。そこで、最も近いノード同士で残留応力を貼り付ける（マッピング）ことができるプログラムを開発した。また、耐久性評価の際、部品等の組み合わせを考慮して解析するため、設計ノミナル形状でやる必要がある。しかしながら、鋳造時に発生する残留応力や加工時に解放される残留応力を単純に耐久性評価用の製品形状へマッピングすると、釣り合いが取れず製品形状は変形してしまう。そこで、開発部門で残留応力による変形量の逆数を、製品形状の初期変位情報として与えるプログラムを開発した。

つまり、生産技術部門と開発部門でそれぞれ独立して耐久性向上に取り組むプロセス (Fig. 12上段) を、開発部門と共同で、各工程をつながることができるプロセス (Fig. 12下段) を構築した。これにより残留応力から耐久性までシームレスな解析プロセスを実現できた。

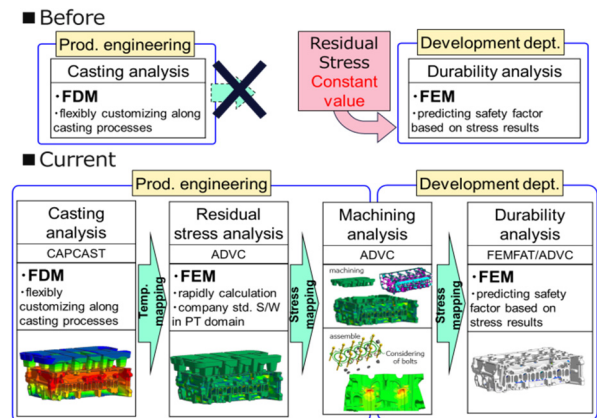


Fig. 12 Residual Stress Coupled Process Flow

6.2 達成有無の効果検討

Fig. 13に残留応力結果の達成あり・なしの、シリンダーヘッド耐久性評価結果を示す。ここで耐久性の評価指標は材料限度に対する応力の余裕度として、「安全率」と呼んでいる。開発モデルと連成したことで、分布や値が変化することがわかる。青で囲った部分は余裕があり、除肉による軽量化ポテンシャルがある部位と判断できる。一方、赤で囲った部分は耐久性のリスクがあり、残留応力と連成しない場合では予測ができていなかった部位を造り込めるようになった。次に、新型MAZDA3へ適用した内容を紹介する。

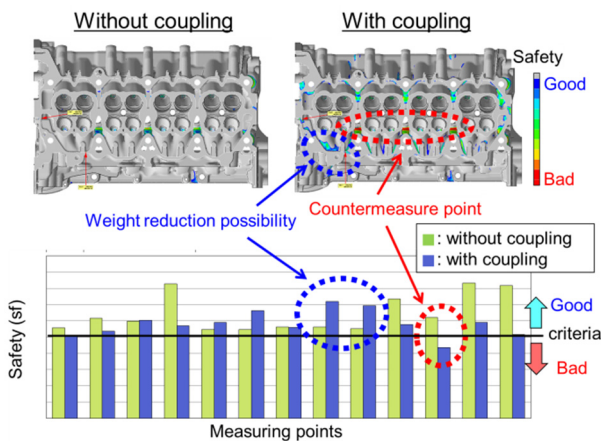


Fig. 13 Residual Stress Coupled Process Flow

7. 新型MAZDA3シリンダーヘッドへの適用

Fig. 14にSKYACTIV-Gでの適用例を示す。余裕がある部位 (Fig. 14-①) は、開発部門と連携し各部位の薄肉軽量化を検討し最小肉厚3mm達成した。一方で、余裕がない部位 (Fig. 14-②) はR拡大などの形状改善を加え製品剛性を向上し、耐久性を改善させた。

薄肉軽量化を検討する上で、製品機能とともに生産限界を見極めることも重要となるため、製品湯流れ温度予測技術との連携により鋳造方案の最適化を行い、生産性を確保しながら検討した。

この技術は新型MAZDA3やCX-8などに搭載されるエンジンに適用しており、成果として、SKYACTIV-Xシリンダーヘッドでは、インテークポート側・エキゾーストポート側の外壁肉厚は業界Topレベルである全域2.5mmを達成し、業界Best in Classの軽量シリンダーヘッドを実現した。その他のエンジンでも従来比で最大で950g (SKYACTIV-D) の軽量化を達成し、走る喜びを実現できるシリンダーヘッドを開発部門と一体となり開発できた (Fig. 15)。

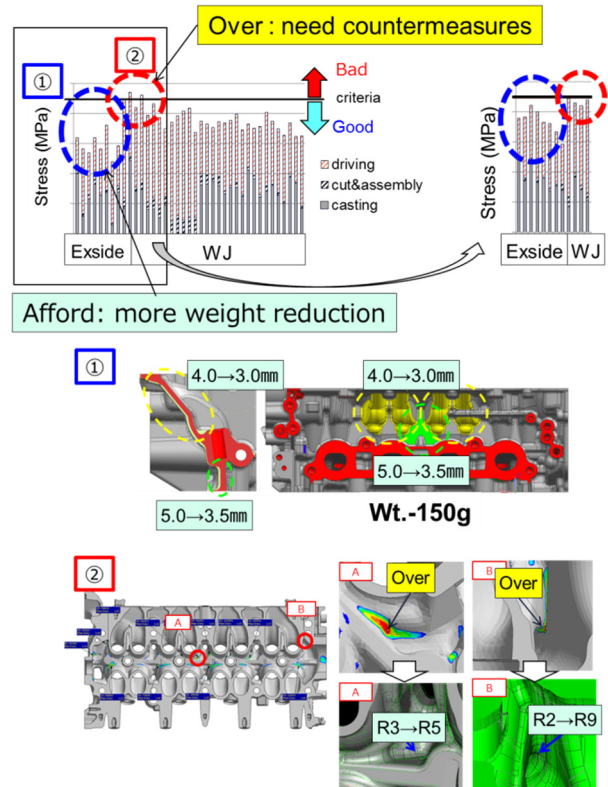


Fig. 14 Application Example of Development Process

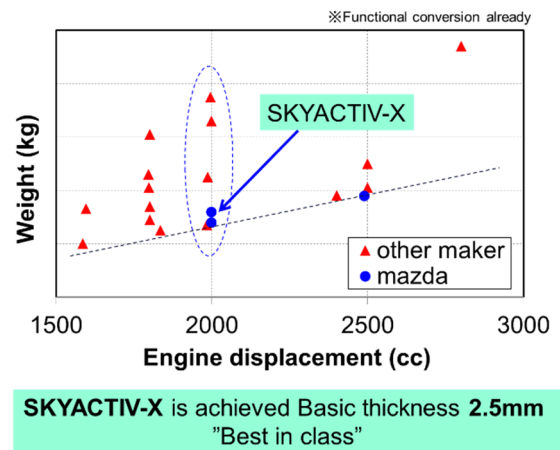


Fig. 15 Weight of Cylinder Heads (2010~)

8. まとめ

製品開発の初期段階から、開発部門と一貫通貫で形状育成可能な技術を構築し、その結果を製品形状に織り込むことで、より高い次元で商品性と生産性をブレークスルーできた。今後も、シリンダーヘッドの残留応力・耐久性の予測技術をレベルアップすることで、更なるお客様価値向上へつながっていくと考えている。

最後に、モデルベース開発を進めていく上でCAEをいかに活用し効率的に開発を進めるかが重要になる。そのためには『実現象を詳細に捉えIPOを整理しメカニズム

を考える』ことが必須となり、この考える部分を今後も強化していきたい。

■著者■



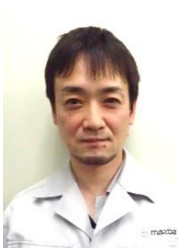
國松 大知



菅谷 智



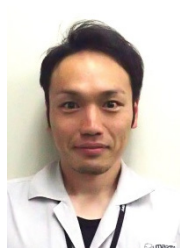
橋本 修一



村瀬 宏治



小杉 一浩



丸尾 幸治