

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「IH加熱金型技術を用いた次世代アルミ鑄造法の開発」

研究開発成果等報告書

平成23年9月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人 素形材センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論	7
2-1 IH式金型温度制御によるハイサイクル化と高品質化の確立	7
2-2 IT化による量産品質安定化の確立	21
第3章 全体総括	29
3-1 研究開発成果のまとめ	29
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	29
専門用語解説	31

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究の背景・目的

国際競争が激化している自動車業界では、より一層のコスト低減・軽量化・環境対応が課題となっている。本研究開発では、アルミ合金重力鋳造において、業界初の中周波 IH を用いた金型温度制御を開発技術の核として、CAE、データ分析による鋳造の最適化も行い、生産性を革新的に向上させると共に、不良率低減を図る次世代鋳造法を開発する。

これにより、低コスト軽量で高品質な自動車エンジン及び一般汎用部品の供給を目指す。

(2) 研究の概要および目標

近年、自動車業界では、より一層の品質確保とコスト低減、軽量化、環境対応が課題となっている。軽量化対応でアルミ鋳造部品が多く採用されており、特に重要部品であるシリンダヘッド等の複雑中空形状部品は重力鋳造法並びに低圧鋳造法が主力工法になっている。しかし、中子や押湯部分の凝固時間が長い等の理由でダイカスト法に比べて生産性が劣っており、コスト高になっている。これらの鋳造法について、加圧や吸引・冷却によるハイサイクル化・軽量化を狙った研究が一部で進んでいるが、業界へ波及する大きな効果が出ていないのが現状である。

また、鋳造品の品質管理は、主に熟練工によるカン・コツ・経験で不良を主観的に判別する対策が行われてきたが、重要部品については従来の延長上の強化だけでなく、新しい手法(CAE・非破壊検査等)を取入れた安定した高品質鋳物が要求されている。

そこで、本研究開発では、アルミ合金重力鋳造(以下、グラビティ)において、業界初の中周波 IH を用いた金型温度制御を開発技術の核として、CAE、データ分析による鋳造の最適化も行い、生産性を格段に向上させると共に、薄肉軽量化、不良率低減、低コスト化を実現させる。また、IH にすることにより付帯効果として CO₂ 削減を見込む。なお研究開発対象品は、これからの次世代エンジンに必要な部品で、更に薄肉化による軽量化効果の大きい、エアーパープ(図 1-1)とする。

なお、本研究の研究開発項目、及びその技術目標値は以下のとおりである。

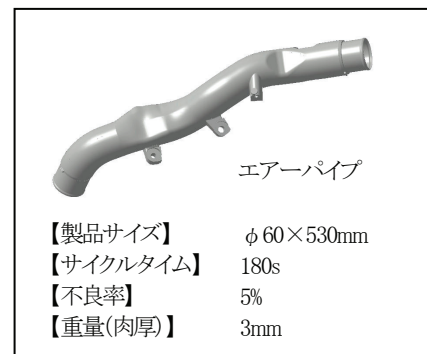


図 1-1 研究開発対象品

①IH 式金型温度制御によるハイサイクル化と高品質化の確立

- ⇒ 鋳造サイクルタイム 50%減(180s→90s)
- ⇒ 薄肉化 40%減(3.5mm→2mm)
- ⇒ 不良率 50%減(5%→2.5%)

①-1 IH 加熱とオイル冷却による金型温度制御の研究

- ・・・ 急加熱・急冷却の制御→最適な温度制御の確立

①-2 ハイサイクル製品の品質評価・・・ 不良原因の特定→品質保証

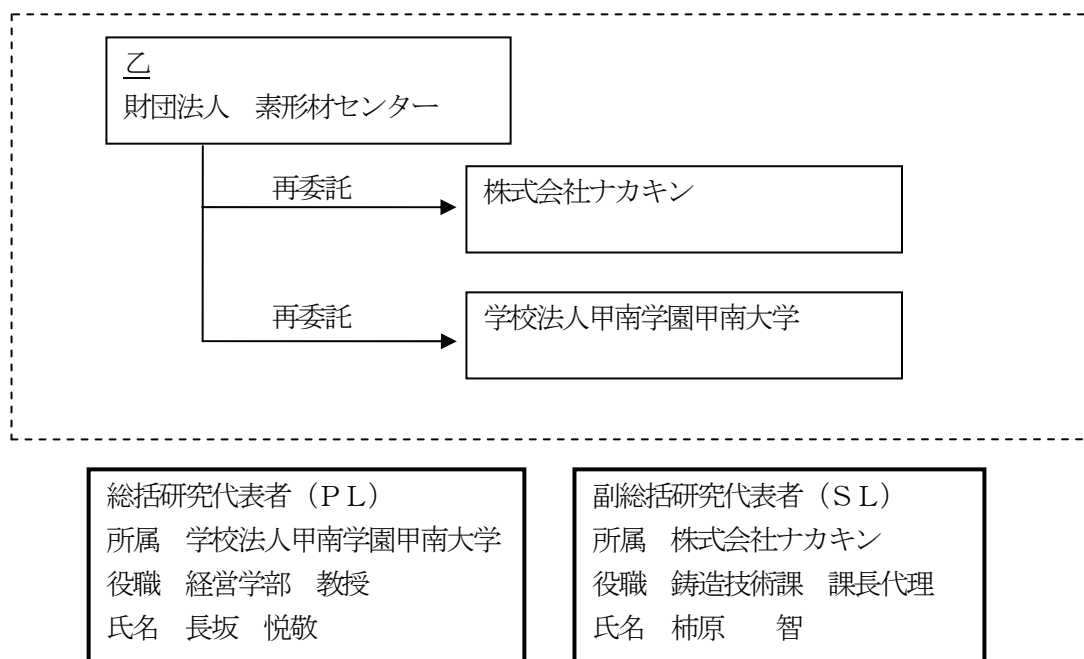
②IT 化による量産品質安定化の確立 ⇒ 品質安定化

②-1 自己組織化マップの研究・・・ SOM の研究→データ・マネジメント方法を確立

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

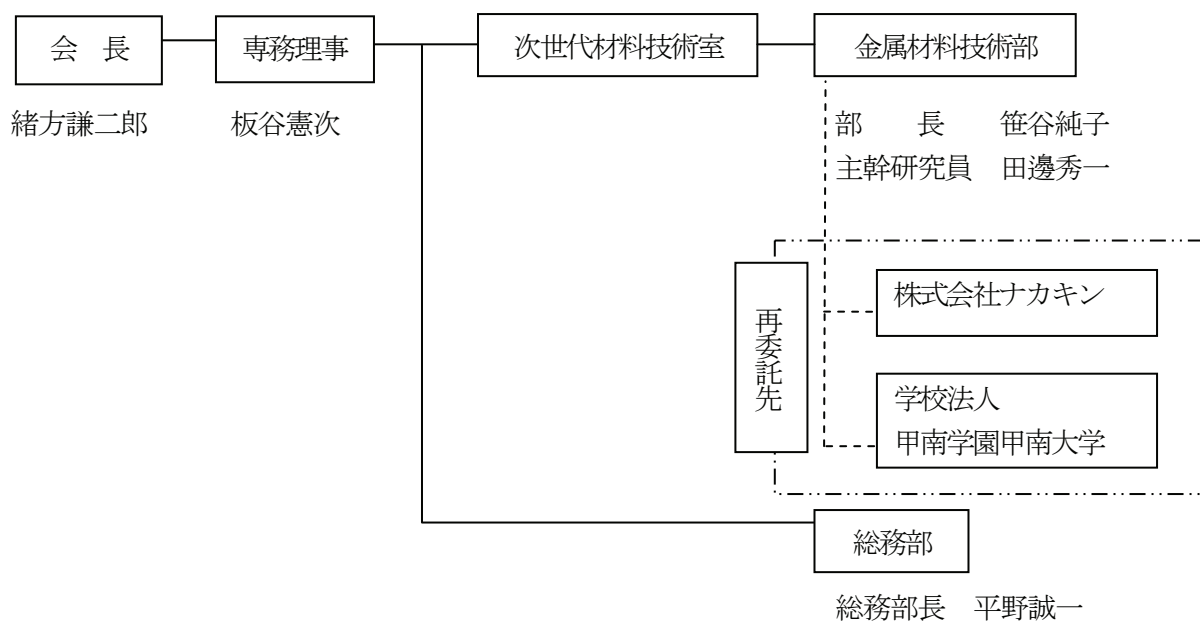
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

① 事業管理機関

[財団法人素形材センター]



② 再委託先

[株式会社ナカキン]

取締役社長
榎本卓嗣

取締役副社長
中村好孝

取締役 枚方・春日工場長

上田康彦

技術部

次長 植杉 浩

鑄造技術課

課長代理 柿原 智
藤原靖大(平成23年3月31日まで
は研究開発課所属)

大竹寿仁

研究開発課

主 任 寺内健太郎(平成23年3月31日
までは鑄造技術課所属)

設備技術課

土田利明

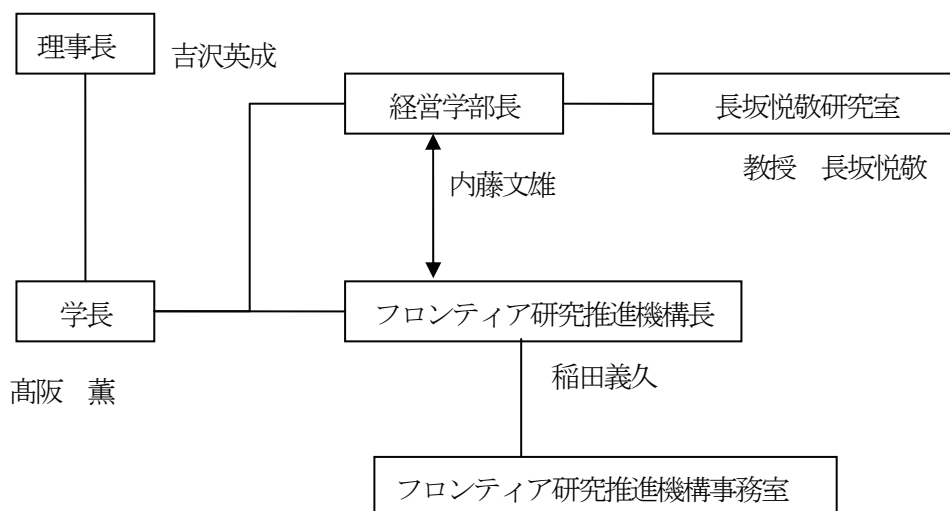
品質管理課

主任 鹿島和彦

総務課

課長 弥永英作

[学校法人甲南学園甲南大学]



課 長 藤本佳和
 契約・経理担当 青木久子(～平成23年5月31日)
 心山 潤(平成23年6月1日～)

(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 財団法人素形材センター

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
板谷 憲次	専務理事	③
笹谷 純子	金属材料技術部 部長	③
田邊 秀一	金属材料技術部 主幹研究員	③

【再委託先】 ※研究員のみ

株式会社ナカキン

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
柿原 智	技術部 鑄造技術課 課長代理	①
植杉 浩	技術部 次長	①
寺内 健太郎	技術部 研究開発課 主任	①
大竹 寿仁	技術部 鑄造技術課	①
藤原 靖大	技術部 鑄造技術課	①
土田 利明	技術部 設備技術課	①
鹿島 和彦	品質管理課 主任	①

学校法人甲南学園甲南大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
長坂 悦敬	経営学部経営学科 教授	②

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

財団法人素形材センター

(経理担当者)	総務部長	平野 誠一
(業務管理者)	金属材料技術部 部長	笹谷 純子

(再委託先)

株式会社ナカキン

(経理担当者)	総務課課長	弥永 英作
(業務管理者)	取締役枚方・春日工場長	上田 康彦

学校法人甲南学園甲南大学

(経理担当者)	フロンティア研究推進機構事務室	青木 久子
	同	心山 潤
(業務管理者)	フロンティア研究推進機構事務室 課長	藤本 佳和

1-3 成果概要

① IH 式金型温度制御によるハイサイクル化と高品質化の確立

①-1 IH 加熱とオイル冷却による金型温度制御の研究

本研究開発では、金型の予熱及び生産中の金型温度保持に IH を用い、生産開始時のロス無くし、生産中の金型温度制御をコントロールし、さらに押湯部の凝固時間短縮にオイル冷却を使用することによって、ハイサイクル化した高品質なグラビティ鋳造を実現した。

また、本研究開発のもう一つの目的として、低コスト化がある。生産性の向上によるコスト低減に加え、製品の軽量化による材料コストの低減にも取り組み、現行量産品であるエアーパープの製品肉厚を、図面スペックの下限値で製造することで、設計品質要求を満たし、軽量かつ低コストで川下ユーザーに提供できるような製品作りを実現した。

達成状況としては、以下のとおりである。

- ・オイル冷却の使用による凝固時間の短縮及び機械動作の見直しにより、鋳造サイクルタイム従来比 50%減を達成した。
- ・IH 加熱による金型温度制御を行い、エアーパープ鋳造品の薄肉化 40%減を達成した。
- ・付帯効果として、ガス加熱に比べ大幅に CO₂削減できる事が分かった。

①-2 ハイサイクル製品の品質評価

本研究開発では、長年培ったアルミ鋳造技術をベースに、IT を駆使した最新技術である CT スキャナと走査型電子顕微鏡を用い、より正確な不良箇所の特特定とより精度の高い発生原因の追究を行い、対策に展開することで、不良率の低減を実現した。

達成状況としては、以下のとおりである。

- ・CT スキャナ画像の肉厚解析により、断面を計測することなく肉厚を網羅的に確認できた。
- ・CT スキャナ画像の欠陥解析により、3 次元的に欠陥の位置と大きさを確認できた。
- ・走査型電子顕微鏡によるボイド分析で、欠陥部の原因特定ができた。

② IT化による量産品質安定化の確立

②-1 自己組織化マップの研究

自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Map) を鋳造品の品質分類に応用することを初めて試みた。製造プロセスの各中間特性を属性テーブルとして用意し、SOM 分類を行うことで、最終品質を知らなくてもその製品の生まれの過程の類似性を分析するができた。これにより、結果として不良になった製品群の属性との類似性を定量的に分析することが可能になり、どのような生まれ (製造プロセスでの中間特性の連鎖) の製品群に不良になる潜在要因があったかを分析できる。複雑な複数プロセスで製造される鋳造品の品質保証ツールのひとつとして有効であることがわかった。

SOM の特徴を活かすことにより、

- (1) どの条件下で不良になるのか、その複雑な製造要因の組み合わせを見つけるために製造要因 (IH ヒーター金型の注湯前、注湯後、取出後温度、傾斜時間、角度、注湯時間など) と品質の属性値から分類を行い、複雑な組み合わせの中から不良確率が少なくなる製造要因の組み合わせを発見することが可能になる。
- (2) これにより従来の鋳造不良要因が特定できる決定打がないもぐら叩きの繰り返し事象をできるかぎり「見える化」することが可能になる。

1-4 当該研究開発の窓口

財団法人素形材センター 金属材料技術部

(担当 ; 部長 笹谷純子、主幹研究員 田邊秀一)

Tel : 03-3434-3907 Fax : 03-3434-3698 E-mail : mail@sokeizai.jp

第2章 本論

2-1 IH 式金型温度制御によるハイサイクル化と高品質化の確立

2-1-1 IH 加熱とオイル冷却による金型温度制御の研究

(1) 研究内容

鋳造のハイサイクル化と高品質化を実現するためには、金型の温度制御が重要となる。すなわち、所定温度に達するまでの加熱時間を短くするとともに、鋳造時は加熱・冷却で適切な湯回りと凝固を確保しなければならない。

従来、アルミ重力鋳造では金型を加熱する手段としてガスバーナを使用している。しかし、加熱時間がかかる・温度制御が困難・外部放熱が多い等の問題点がある。また、鋳込まれる金属(溶湯)に対し、金型温度が適正温度よりも低い場合は、溶湯が十分に型に充填しない(湯廻り不良を発生)、高すぎる場合は、製品の凝固に時間がかかってしまう。

このため、これらの問題を全てクリアするためには、新たな金型加熱方式が必要と考える。本研究開発では電磁誘導加熱(IH)を用いて金型を加熱する全く新しい技術開発を行う。IH は高周波が一般的であるが、この高周波に比べ安価で、人体影響も少なく、金型内部まで加熱できる「中周波電磁誘導加熱(導入費用は高周波に比べて 1/5 以下)」を採用する。中周波電磁誘導加熱は鍛造用金型や樹脂用金型の一部の初期加熱に使用されている。しかし、初期加熱だけではなく、鋳造中の温度管理にも、この誘導加熱方式を用いることは鋳造業界では本研究開発が初めての試みである。図 2-1-1 に金型への IH 取付詳細図を示す。金型を製品の形状に合わせ裏側を削り、そこに断熱材で包んだ IH を設置し磁力を発生させ、うず電流を作り金型を発熱させ、金型の加熱を行う。この加熱方法により、金型温度を安定化して十分な湯回りを確保することにより、製品の薄肉化(従来の製品肉厚 3.5mm→2mm)を行う。これにより、低コスト化に寄与する軽量化が実現可能である。

一方、アルミ重力鋳造におけるサイクルタイムに大きく影響する凝固過程においては、押湯(湯道)部分の凝固が遅い。そこでオイル冷却を使用し、製品の急冷却を行うと押湯部分の凝固時間が大幅に短縮される。

しかし、次のサイクルではオイル冷却により金型温度が低下しているので湯流れが悪く連続して鋳造できない。このため IH による急速加熱で金型温度を適正に戻す必要がある。

本研究開発では、最も高効率な加熱・冷却ができるように、急加熱では金型温度、急冷却では製品温度を設定して、加熱・冷却箇所、コイルの形状・設置場所などを検討する。また、加熱冷却の最適なタイミングで金型温度制御を行えるように検討し IH 加熱 ON・OFF のタイミング、オイル冷却 ON・OFF のタイミングを最適化する。

以上のように、注湯時には IH による加熱、凝固時にはオイル冷却を繰り返し、最適なタイミングで金型温度をコントロールしサイクルタイムを 50%削減(180s→90s)し、従来にない生産性の向上を図る。

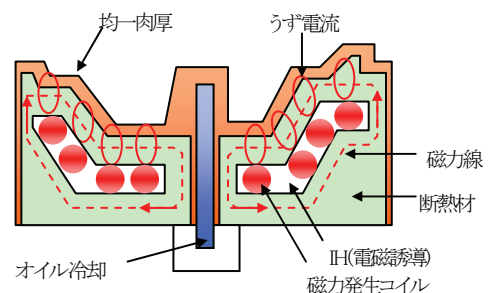


図 2-1-1 金型への IH 取付詳細図

コイル容量：30kW 以上
制御方式：サイリスタによる PID 定電流制御

(2) 研究成果

①金型のガス加熱と IH 加熱の湯流れシミュレーション解析による確認

本研究開発を行うに当たって、従来のガス加熱と新技術の IH 加熱による薄肉鋳物(肉厚 2mm を目標)の製造が可能であるかを湯流れシミュレーション解析にて検証した。解析条件は、ガス加熱・IH 加熱共に金型初期温度を 400℃と設定し、湯流れ解析を繰り返し計算し、図 2-1-2、2-1-3 に示すような、実際の鋳造状態に見合う金型温度分布になる状態の計算結果を得た。

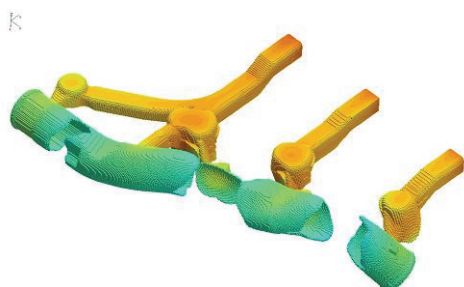


図 2-1-2 ガス加熱による鋳造品の湯流れ解析結果(鋳造品の肉厚 2mm)

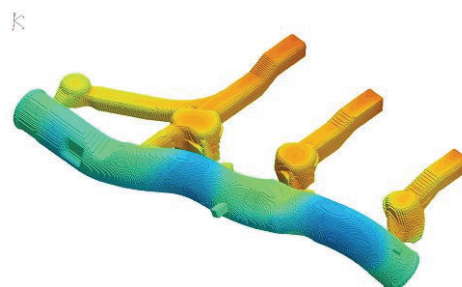


図 2-1-3 IH 加熱による鋳造品の湯流れ解析結果(鋳造品の肉厚 2mm)

ガス加熱では金型温度を維持することができない為に、金型温度が低下し、湯廻り不良が出る結果となった。一方、IH 加熱では、金型に保温条件を設定しており、金型温度が高い状態で維持できているので、湯廻り不良が出ない結果となった。

②薄肉鋳物のガス加熱での鋳造試験

現行の製品肉厚 3.5mm から 2mm に変更した試験金型を、従来技術のガス加熱で昇温させて鋳造を行い、①項で得られた解析結果の検証を行った。鋳造条件は現行量産品と同じ表 2-1-1 で行った。

ガス加熱では製品肉厚が 2mm となっているので湯廻り不良が多発した(良品率 0% : 0/15 台、図 2-1-4 参照)。これは湯流れ解析結果とも一致していることが確認できた(図 2-1-2 参照)。

また、製品肉厚を 3.5mm から 2mm に変更したことにより、凝固時間は 120s から 110s になりサイクルタイムが 10s 短縮されることがわかった。

表 2-1-1 ガス加熱の鋳造条件

溶湯温度 : 705℃±10℃
金型温度 : ※240℃~300℃
金型反転時間 : 10s±1s
凝固時間 : 120s
サイクルタイム : 180s

※金型温度 : ここで示している金型温度は、金型側面 1 点での熱電対による測定値であり、以降に記載している金型温度とは意味が異なる。



図 2-1-4 ガス加熱による鋳造品

図 2-1-5 はガス加熱で鋳造した時の金型の熱画像である。この画像からわかる様に、生産開始時 (a)は加熱直後であるため金型温度は全体的に高く分布しているが、鋳造ショット数が増えるにつれて金型温度は低下し、鋳造品端面(ホース口の両端)においては、その傾向が顕著に現れている(b)。また、製品肉厚が 2mm のため、製品が持っている熱量が小さく、溶湯から金型へ伝播する熱量が 3.5mm の従来品と比べて少なくなる。そのため、製品肉厚 2mm 部分の金型温度が従来品より低下し易くなる。これらの原因により、湯流れが悪化し、湯廻り不良が発生し易くなっていると考えられる。

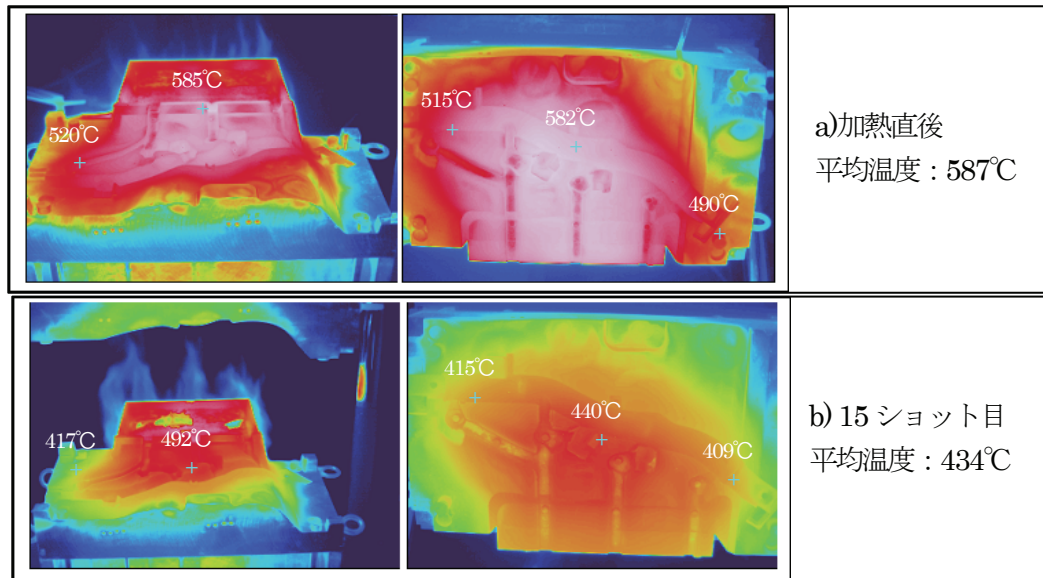


図 2-1-5 ガス加熱による熱画像

③IH 式金型温度制御の研究

i) IH 設置箇所の研究

従来技術であるガス加熱による金型の熱画像(図 2-1-5 参照)では、金型の中心が高温となっており外側に向かうにつれ低温になっていることが分かる。また、湯流れシミュレーション解析結果によると、IH 加熱のように金型温度バランスを均一にする事で湯廻り不良が出ないことが確認できている(図 2-1-3 参照)。

以上のことをふまえて、低温となってしまう部位にも IH を用いて高温にし、温度バランスが均一になるように、金型の背面を掘り込み、IH コイルを設置するためのスペースを確保した。

IH コイルに流す電流の周波数は、表 2-1-2 に示す通り、金型の内部まで電流が浸透し易く、かつ人体への影響が無い電源周波数である 60Hz(近畿圏)を採用し、IH コイルをその設置面積により容量(コイルの巻き数)を決定し、金型の背面より設置した。また、湯口カップも IH にて温度制御することで溶湯温度の低下を防ぐ事とした。

表 2-1-2 電流の浸透深さ

条件	周波数	δ						
		50	5 00	1 000	3 000	1 0000	2 00000	
炭素鋼	磁性域	21°C	0.64	0.14	0.084	0.042	0.019	0.0025
		300°C	0.86	0.18	0.122	0.058	0.026	0.0035
		600°C	1.30	0.29	0.180	0.090	0.040	0.0054
	非磁性域	800°C	7.46	2.37	1.67	0.96	0.53	0.12
		1250°C	7.98	2.53	1.879	1.03	0.56	0.13
		溶解時 (1550°C)	9.00	2.85	2.01	1.16	0.64	0.14
銅	850°C	1.95	0.62	0.44	0.25	0.14	0.03	
	溶解時 (1550°C)	3.30	1.04	0.74	0.43	0.23	0.05	
真鍮鋼 (65%)	850°C	2.52	0.79	0.56	0.33	0.18	0.04	
	溶解時 (1000°C)	4.57	1.44	1.02	0.59	0.32	0.07	
アルミニウム	850°C	2.01	0.64	0.45	0.26	0.14	0.03	
	溶解時 (750°C)	3.70	1.17	0.83	0.48	0.26	0.06	

© (社) 日本溶接協会. 2004

ii) IH 式金型温度制御システムの構築

今回の試験研究において、鋳造機、IH 金型、IH 制御盤、及びオイル冷却装置をタッチパネルで網羅的にコントロールできる LAN 通信システムを構築した。(図 2-1-6、図 2-1-7)

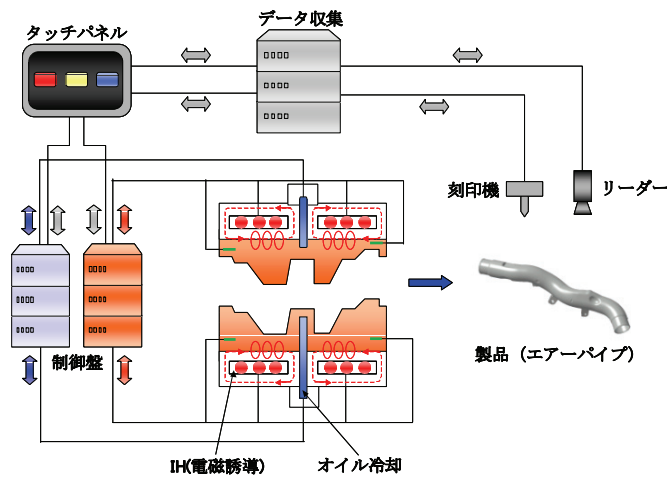


図 2-1-6 IH コントロール金型制御システムの概要

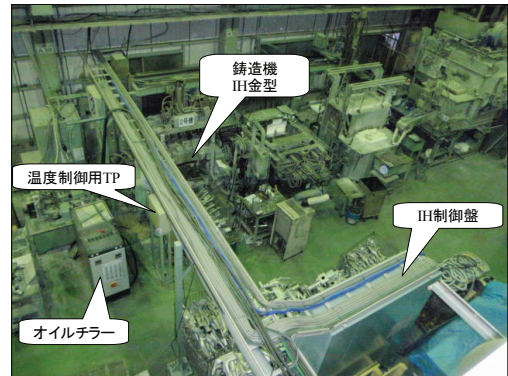


図 2-1-7 鋳造現場のレイアウト

システム構築のポイントとしては、金型温度とオイル冷却装置の温度データを鋳造機の PLC(Power Line Communications)を介してトレースし、タッチパネルでそれぞれの設定温度の変更と確認ができるシステムとした。また、過去に実施したサポイン事業「鋳造トレーサビリティ・ソリューションによる品質保証システムの開発」で取り組んだ製品への QR コード(図 2-1-8)のリーダーマーカによる刻印とリーダーによる読取りによって、後からでも製品各個の鋳造条件を確認できるシステムとした。

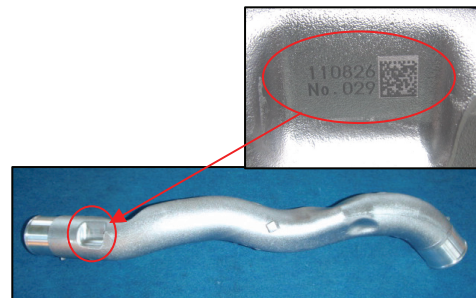


図 2-1-8 製品の QR コード

iii) IH 金型の昇温試験

IH 金型が設定温度に達するまでの時間を測定した。測定方法としては、金型温度設定を①塗型の塗布温度(200°C)、②鋳造開始温度(400°C)の 2 段階に設定し、どの程度時間が掛かるかを検証した(図 2-1-9 参照)。

図 2-1-9 に示すように、IH 制御盤の電源を ON にしてから約 30 分で金型温度 200°C まで達している。200°C で塗型塗布を完了し、設定を 400°C に変更し、塗型時間を省くと鋳造開始温度 400°C に金型が昇温するまでの時間は 90

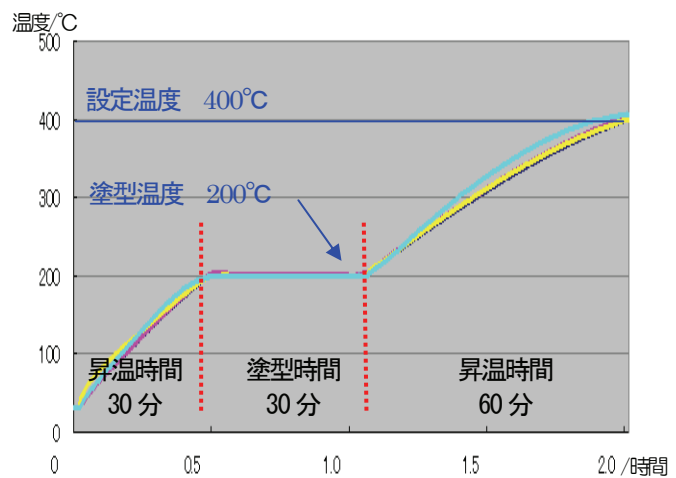


図 2-1-9 IH による初期金型加熱の温度推移

分であった。IH 加熱はガス加熱と比較して、外部放熱が少ないため(熱効率：ガスが約 40%、IH が約 83%)、また、温度制御盤を確認してもコイルの温度バラツキが小さいため、安定した温度制御ができることも伺えた。

iv) 電磁波測定

作業者の安全性の面から、IH 金型からどのくらいの電磁波が発生しているのかを測定した。測定方法としては、テスラメータを用いて金型より 5cm 離れた周辺を測定した。その結果、鑄造機の起動スイッチ付近で 40 μ テスラあったが、その他の箇所は 0 μ テスラであった。電磁波による人の健康を保護するための国際的なガイドライン国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)の新ガイドライン(2010 年発表)によれば 83 μ テスラ以下を推奨している。測定値は推奨値を下回っていることから、本研究で使用している IH 金型から発せられる電磁波が作業者に及ぼす影響は、全く問題無いと判断できる。

v) 騒音測定

IH 金型は、通電することで誘導電流によるコイルの振動で、騒音が発生する。その騒音レベルがどの程度であるかを確認した。確認方法としては、騒音測定器を用いて金型温度 200 $^{\circ}$ C時点及び 450 $^{\circ}$ C時点の金型周辺 2cm、100cm を測定した。

その結果を表 2-1-3 に示す。

表 2-1-3 鑄造機周辺の騒音測定レベル

金型温度	金型からの距離(cm)	騒音レベル(db)
200 $^{\circ}$ C	2	85
200 $^{\circ}$ C	100	79
450 $^{\circ}$ C	2	91
450 $^{\circ}$ C	100	80

参考までに、(株)ナカキン社内で使用しているエアーツール(90~100db)と比較しても IH 金型から発生している騒音レベル(79~91db)の方が小さく問題ないものと考えられる。

④IH 金型による鑄造試験

i) 薄肉鑄物の IH 加熱での鑄造試験

前述したように、ガス加熱では薄肉パイプ(肉厚 2mm)の鑄造ができなかったため、IH 加熱での試験確認を行った。その試験実施状況を表 2-1-4 に示す。

なお金型温度は、上下型それぞれ各 4 箇所(表中の①~④)で制御している。

表 2-1-4 IH の最適温度設定

TRY.No	#1 7/1	#2 7/8	#3 7/25	#4 7/28	#5 7/29	
上型	①	400	400	430	460	470
	②	400	400	430	470	480
	③	400	400	430	380	390
	④	400	400	430	470	480
下型	①	400	400	430	430	440
	②	400	400	430	390	400
	③	400	400	430	430	440
	④	400	400	430	440	440
反転	9s	9s	9s	9s	9s	
凝固時間	110s	110s	110s	110s	110s	
サイクル タイム	170s	170s	170s	170s	170s	
湯廻り	×	×	×	△	○	
巣				△	◎	

TRY#1 では、IH 金型の温度設定を全箇所 400 $^{\circ}$ Cに設定し、その他の鑄造条件は現行生産品(肉厚 3mm のもの)と同等で試験を行った。ガス加熱と比較すると湯廻り不良箇所は減少しているが、不良は多発している結果となった(図 2-1-10)。

TRY#2 でも TRY#1 の再現試験及びデータ収集を目的として、IH 金型の温度を全箇所 400 $^{\circ}$ Cに設定し、それ以外は現行生産品と同等の鑄造条件で試験を行った。TRY#1 と同様に、不良は多発している結果となった。

TRY#3 を実施するに当たって、TRY#2 までのデータを検証したところ、湯廻り不良の原因として金型温度が低

最適

いことが考えられた。よって TRY#3 では、金型設定温度を 400℃→430℃に上げて試験を行った。しかし、結果は前回までと同様に湯廻り不良が多発する結果となった。湯廻り部位を調査した結果を図 2-1-11 に示す。湯廻り不良は上型側に発生していることが分かった。



図 2-1-10 TRY#1 鑄造試験品

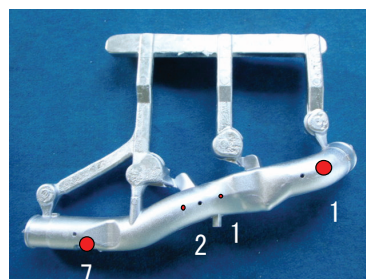


図 2-1-11 TRY#3 での湯廻り不良部位

TRY#4 では TRY#3 の結果をもとに、上型一部の温度設定を更に高くして鑄造試験を行った。その結果、湯廻り不良は大幅に減少した(図 2-1-12)。湯廻り不良が発生しやすい部位の設定温度は高く、湯廻りと関係の無い部位の設定温度は低くすることで、指向性凝固も考慮された最適な金型温度に近づいたことが湯廻り不良減少の大きな要因だと考えた。なお TRY#1～TRY#3 で製品に偏肉が確認されたため、TRY#4 以降ではケレン(詳細は 2-1-2(2)④項に記載)を設置し製品の偏肉を抑制している。

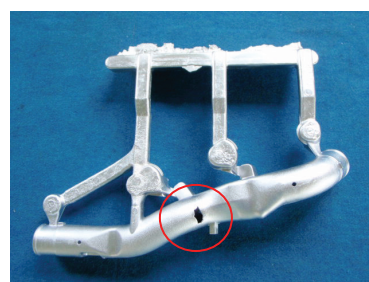


図 2-1-12 TRY#4

TRY#5 では更なる湯廻り不良の改善を図るため、TRY#4 の結果を踏まえ湯廻り不良の発生した部位の温度をさらに 10℃程度上昇させ鑄造試験を行った。結果は一次不良の湯廻り、二次不良の巣ともに大幅に減少された(図 2-1-13)。このことより、TRY#5 が最適な IH 金型温度設定と考えることができる。

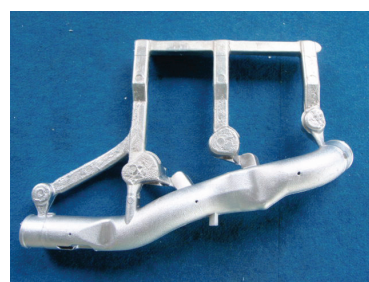


図 2-1-13 TRY#5

TRY#5 の最適な温度設定で試験した IH 加熱の熱画像と従来のガス加熱した熱画像を比較した(図 2-1-14 参照)。IH 金型で鑄造した方がガス加熱に比べて、ホース口付近において高い温度を維持していることが分かる。また、製品部分も全体的に加熱されていることが分かった。

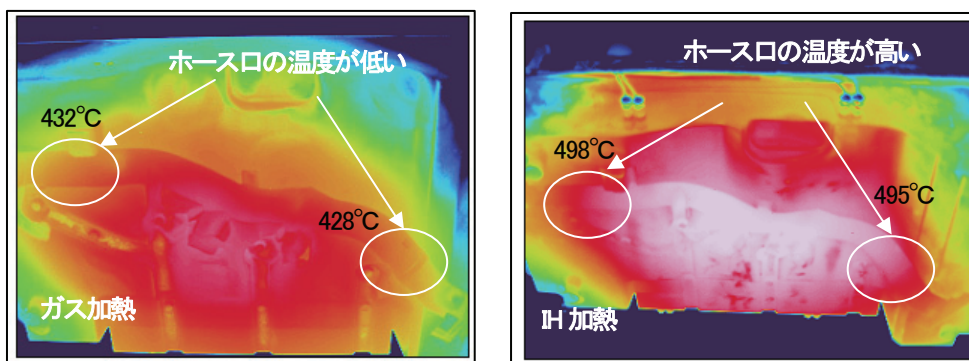


図 2-1-14 IH による最適温度の熱画像

以上のことより、表 2-1-4 に示す最適金型温度で鋳造すると、肉厚 2mm にした鋳造品が安定的に製作出来るようになり、製品重量も従来 840 g から 580 g と 30%の軽量化に成功した。従来のガス加熱では不可能であった薄肉で軽量なアルミパイプの鋳造が IH 加熱による金型温度制御で実現可能となった。

⑤ハイサイクルの研究

i) オイル冷却設置箇所の検討

ガス加熱の熱画像及び解析結果によると、押湯部分の凝固が遅くサイクルタイムに大きく影響している。そこで押湯部を効率よく冷却できるように、金型側面より穴を空け、オイルが通る経路を設定した。冷却経路は上下型ともに穴径φ13mm でそれぞれ 4 箇所のオイル出入り口を設けた。この出入り口を組み合わせ、どの経路を使用すれば効果的に金型を冷却でき、かつ鋳造が可能であるか検証を行った。その鋳造条件は、以下の通りである。

・鋳造条件

(溶湯の保持温度：710℃・鋳造機の反転時間：9s・凝固時間：40s・サイクルタイム：100s)

a) 経路パターン 1

オイル経路パターン 1 は、金型の中央部をループ状に通る経路で、金型温度の高くなる部分だけを冷却することを目的としている。同パターンによる試験の結果、湯道から押湯部にかけて未凝固であったため、取り出すことが出来なかった。図 2-1-15 の熱画像からもわかるように、オイル冷却を使用している周辺では金型の温度低下が確認できるが、押湯部が取り出し可能な温度までには至っていなかった。ハイサイクル化のために必要な温度までは低下していないことが分かった。

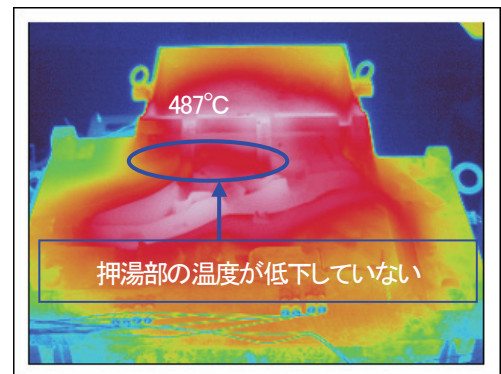


図 2-1-15 オイル通路の経路 1 の熱画像

b) 経路パターン 2

オイル経路パターン 2 は、金型の中央から左側を通る経路で、パターン 1 よりも広範囲を冷却することを目的としている。同パターンによる試験の結果、製品の押湯部の凝固進行が進み折れることなく取り出すことができた。図 2-1-16 の熱画像からもわかるように、オイル冷却を使用している周辺では温度低下が見られるが、次の鋳造サイクルまでに IH 加熱により金型温度を上昇させることができ、適度な冷却であることが確認できた。

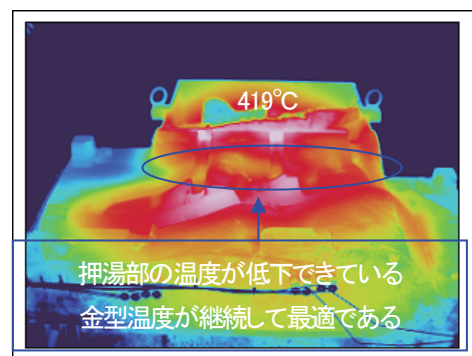


図 2-1-16 オイル通路の経路 2 の熱画像

c) 経路パターン 3

オイル経路パターン 3 は、湯道から押湯部全体を通る経路で、パターン 2 よりも更に広範囲を冷却することを目的としている。同パターンによる試験の結果、製品の押湯部が折れることなく取り出しを行えた。しかし、図 2-1-17 の熱画像からもわかるように、オイル冷却を使用している周辺では温度低下が大きく、次の鑄造サイクルまでに IH 加熱により金型温度を上昇させることが出来なかった。冷却範囲が広すぎて、不要な部位まで冷却してしまい湯廻り不良が多発した。

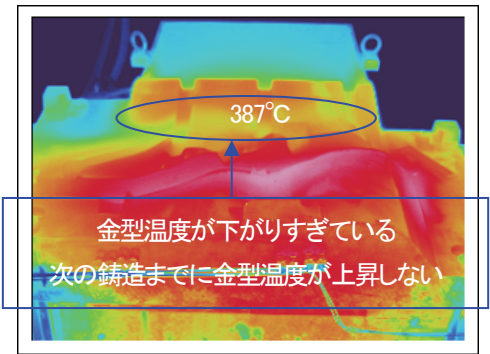


図 2-1-17 オイル通路の経路 3 の熱画像

ii) オイル冷却能力の研究

IH 金型によるハイサイクル鑄造試験時において、オイル冷却を使用する時間によって金型温度がどのくらい低下するのか試験を行った。試験方法は前項 i) の「オイル経路パターン 2」を使用し、金型温度 400°C の時点よりオイル冷却時間を 0s、10s、15s、20s、25s、30s と増加させていった。その金型温度を熱電対で測定した結果を図 2-1-18 に示す。図 2-1-18 よりオイル冷却を使用している間の冷却曲線はグラフの傾きより 2°C/秒であることが分かった。これは鑄造シミュレーション解析により導いた冷却能力の結果と同等のものであった。

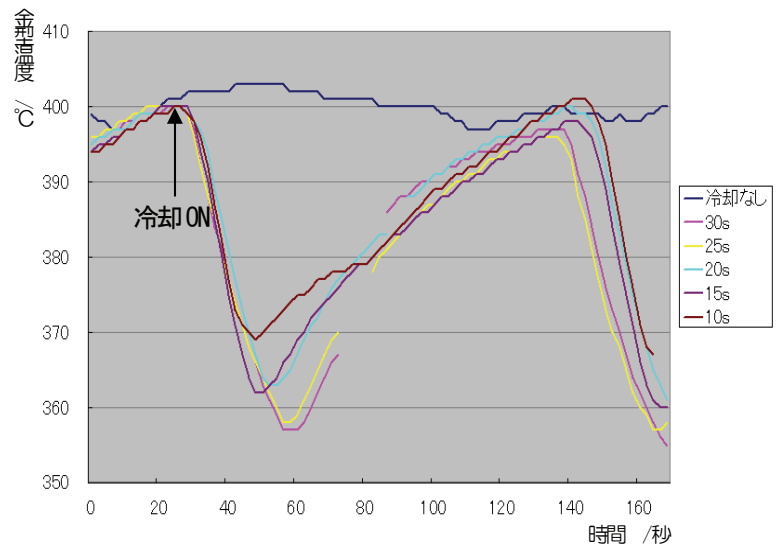


図 2-1-18 金型温度-時間推移

iii) ハイサイクルでの最適温度の検討

最適金型温度の確立により、肉厚 2mm の製品が安定して鑄造できるようになったため、もう一つの目標である、サイクルタイムの短縮に取り組んだ。

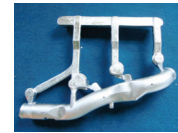
最適金型温度として金型を高温に設定する必要があるが、それに伴い、押湯部の凝固が遅くなり、これが凝固時間の長引く原因となっている。そこで、前項で検証したオイル冷却の経路で鑄造試験を実施し、強制的に押湯を凝固させられるか検討した。

TRY#7 では、オイル冷却による温度低下の少ない経路パターン 1 で試験した。120s であった凝固時間を 85s、60s、50s、40s、35s、30s と段階的に短くし、押湯部の凝固状況を確認しながら試験を実施した。その結果を表 2-1-5 に示す。

表 2-1-5 に示すように、凝固時間 120s→85s に短縮し押湯部が完全に凝固していたのが確認されたので、更に凝固時間を 60s まで短縮した。それから押湯の凝固を確認しながら凝固時間 40s までにすることができた。しかし、凝固時間を 35s にすると押湯部及びランナー部が未凝固のために、試験品を取り出す際に折れてしまった。また、その試験品を試加工したところ、ホース口にガス欠陥が発生していた(図 2-1-19 参照)。(詳細は 2-1-2(2)②項に記載)

表 2-1-5 凝固時間による取出し結果

	サイクルタイム						
	120s	85s	60s	50s	40s	35s	30s
取出し	○	○	○	○	○	×	×



これらの結果より、従来のガス加熱では 120s あった凝固時間が IH 加熱とオイル冷却を用いることで、凝固時間 40s(約 67%減)と飛躍的な時間短縮に成功した。しかし、二次不良の巣が発生してしまった。本試験研究の目標値は凝固時間 30s であることから、あと 10s 短縮するため TRY#8 を実施した。

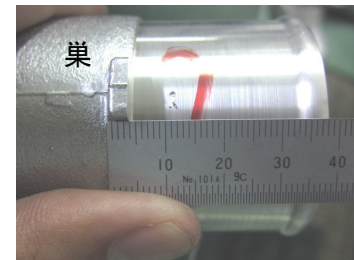


図 2-1-19 ホース口の巣

TRY#8 では冷却能力を上げるため、オイル通路を経路パターン 2 に変更して試験した。これにより、金型冷却能力も上がり冷却範囲も広がった。試験条件は TRY#7 と同様に凝固時間を 120s、85s、60s、50s、40s、35s、30s と段階的に短くし押湯部の凝固状況を確認しながら試験を実施した。凝固時間 35s でも押湯部が凝固して、取出し可能であることが分かった。しかし、金型冷却能力が上がったことにより金型温度が低下してきたために、凝固時間 35s 以下では湯廻り不良が多発した(図 2-1-20)。その後の TRY#9 や TRY#10 でも同様の結果となった。

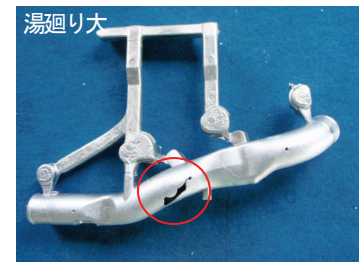


図 2-1-20 TRY#8 での湯廻り不良

TRY#11 ではオイル冷却時間を、湯廻り不良が多発していた上型とそうでない下型の冷却時間に差(冷却時間：上型>下型)をつけて試験を行った。その結果、湯廻り不良は少なくなったものの铸造品 41 台中 5 台で発生した(図 2-1-21)。凝固時間も 35s まで短縮できたが 30s には至らなかった。そこで铸造機の反転時間を 9s→5s に変更し更なるサイクルタイムの短縮を行った。

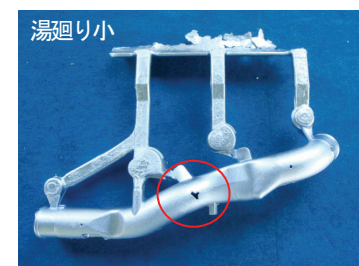


図 2-1-21 TRY#11 での湯廻り不良

TRY#12 では TRY#11 に引き続き、铸造機の反転時間を 5s にし、また、オイル冷却時間を上、下型でさらに差をつけることにした。結果、湯廻り不良は 40 台中 3 台で発生したが、いずれも微細な湯境であった。冷却時間の変更に伴い、凝固時間は 35s→40s まで 5 秒延びる結果となったが、更なる铸造機の動作見直しにより、サイクルタイムの短縮に取り組んだ。その結果、当初目標であった铸造サイクルタイム 90s が可能となった。しかし、TRY#12 铸造品について、試加工を行うとボス部に巣が現れた。これは铸造機の反転時間を 9s→5s に変更した事が要因と思われ、次項 2-2 にて検証を行う。

以上の結果を表 2-1-6 にまとめた。

表 2-1-6 ハイサイクル鑄造の結果

TRY.No	#7 8/5	#8 8/10	#9 8/25	#10 8/26	#11 9/1	#12 9/2	
上型	①	470	470	450	460	440	460
	②	470	440	450	450	450	450
	③	380	380	390	390	360	370
	④	470	480	470	480	480	480
下型	①	430	430	430	430	430	430
	②	410	400	390	450	440	430
	③	440	430	430	440	440	440
	④	410	440	400	400	400	390
反転	9s	9s	9s	9s	9s→ 5s	5s	
凝固時間	40s	35s	35s	35s	35s	40	
サイクル タイム	100s	95s	95s	95s	90s	90s	
冷却時間	上: 40s 下: 40s	上: 30s 下: 30s	上: 20s 下: 20s	上: 10s 下: 10s	上: 10s 下: 5s	上: 20s 下: 5s	
配管経路	経路 1	経路 2	経路 2	経路 2	経路 2	経路 2	
湯廻り	○	×	×	×	△	○	
巢	△					△	

図 2-1-22 は最適な鑄造条件の TRY#12 で試験した 1 サイクルの温度と時間の関係を示したものである。金型にアルミ溶湯が入り、製品部が凝固するとオイル冷却が行われ(冷却ゾーン)、押湯部が凝固するまで冷却を行ったあと冷却を停止する。鑄造機の反転戻より IH による金型加熱に移り、製品取出→中子セット→注湯→反転倒の順で動作を行う。この間は IH による金型加熱を継続し、金型温度を上昇させる。鑄造機の反転倒までに湯廻り不良が発生しないように金型温度を上昇させることが最低条件である。これらオイル冷却による冷却ゾーン、IH 加熱による加熱ゾーンを制御することで本試験研究品であるエアーパープの鑄造サイクルタイムを従来の 180s から 90s に短縮可能となった。

iv) まとめ

- ・鑄造品の凝固時間は、従来 120s であったのに対し、本研究後には 40s となり、80s の時間短縮が図れた。
- ・IH 加熱及びオイル冷却を用いての金型温度管理をはかることにより、機械動作の見直しが可能となり、従来の鑄造機の反転時間が 9s→5s、鑄造機機の反転戻時間が 8s→5s、製品の取出時間が 10s→7s にそれぞれ短縮した。

以上のことから、サイクルタイムの目標値 180s→90s を達成することができた。

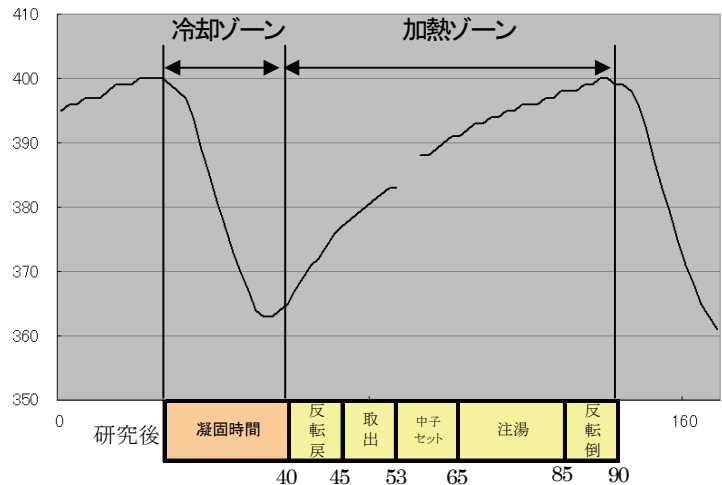


図 2-1-22 サイクルタイムの比較

⑥その他付帯効果

IH 金型の消費電力と CO₂削減効果を確認した。IH 金型の本試験期間中の 1 時間当りの消費電力は平均 14kW であった。この電力量は、同等金型サイズの中子型ヒーターの消費電力の半分程度に相当し、大きなものではないといえる。

現在、(株)ナカキンでは鑄造機 1 台当り年間 8,400m³ のガスを使用している。本試験研究において使用した IH 金型の消費電力データを元に、CO₂排出量の比較を表 2-1-7 に示した。これにより、本研究の IH 加熱法は、従来のガス加熱法に比べて約 63%の CO₂削減効果が見込まれる。

表 2-1-7 CO₂排出量比較

	現状				本研究		
	機材	使用量	CO ₂ 排出量 (換算)		機材	使用量	CO ₂ 排出量 (換算)
生産準備時	ガスバーナー	8400m ³ /年	17640kg/年	生産準備時	電磁誘導加熱 (IH)	16800kWh/年	6552kg/年
生産時				生産時			

※CO₂排出係数：電気 (0.39kgCO₂/kWh) 都市ガス (2.1kgCO₂/m³)
 ※生産数2,000台/月 消費電力14kw/hで試算

2-1-2 ハイサイクル・高品質試作品の品質評価

(1) 研究内容

現行の量産しているエアーパープ(図 1-1)においては不良率 5%前後で推移している。不良の主な原因としては湯廻り不良、内部ボイドである。湯廻り不良については 2-1-1 項の研究により解決し、内部ボイドについては、CT スキャナで製品内部を確認し、走査型電子顕微鏡(SEM)によるボイド分析により、引け巣、ガス、介在物等の原因を特定し、後述するサブテーマ「2-2 IT 化による量産品質安定化の確立」の成果と合わせ、即座に対策を講じる。これにより、不良率を半減(5%→2.5%)する。

(2) 研究成果

①不良原因の特定

現行の量産しているエアーパープの不良率は約 5%(一次不良率：2.2%、二次不良率：2.8%)である。

一次不良の内訳を調査すると図 2-1-23 のとおりであり、湯廻り不良が全体の 38%、パープ内の巣(外引け巣)が 15%を占めていることがわかった。湯廻り不良および外引け巣については、本研究の IH による最適金型温度制御の確立により、改善が可能である。

次に、二次不良の内訳を図 2-1-24 に示す。巣が全体の半数以上(53%)を占めている。これまで、製品に発生した巣の対策は目視、マイクロスコープによる拡大画像及び熟練工による経験により、M6 ネジ・取付穴座面に発生した巣はガス、その他に発生した巣は引け巣として判断し、対策を行っていた。しかし、本研究で導入した SEM により確認すると、これまで、引け巣と判断し、対策していたホース口の巣には、介在物の巻き込みによるものもあることが新たに判明した。このように、SEM を用いて確認することにより、巣に対する的確な対策ができるようになった。また、肉厚不良については、本研究では肉厚 2mm で実施するため、現行品より影響の大きいことが推測されるが、肉厚不良が発生した場合はケレンを設置することで改善ができる見込みである(詳細 2-1-2(2)-④参照)。

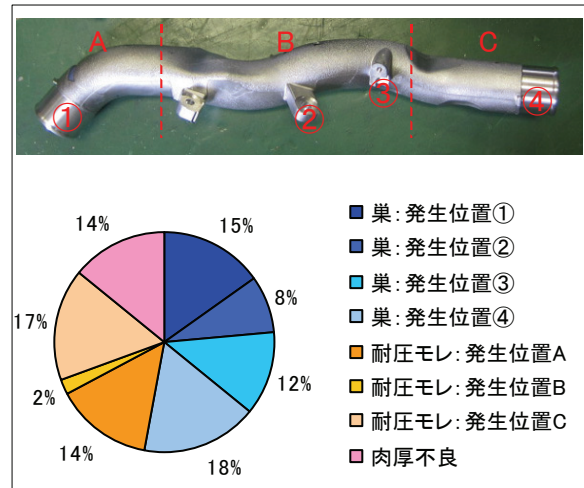


図 2-1-23 一次不良内訳(発生位置)

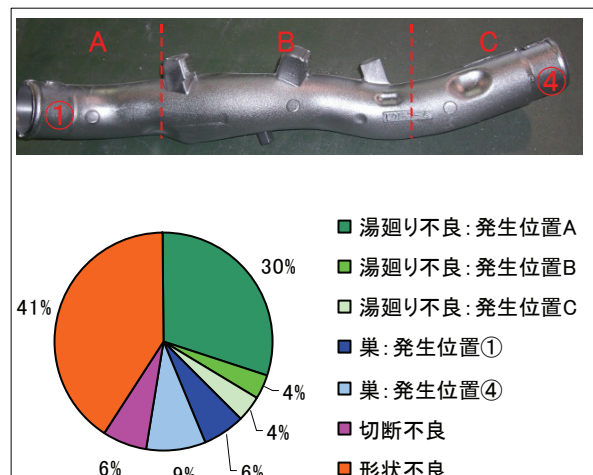


図 2-1-24 二次不良内訳(発生位置)

以上のことから、一次・二次の各不良原因を特定し、IH による最適金型温度制御を確立することで不良対策が施される。この不良対策がはかられることによって、目標値として掲げる不良率を現行の5%から2.5%へ半減することができるものと考えた。以降では、品質評価として不良原因とその対策について記載する。

②最適金型温度の確立による品質評価

金型温度制御の研究による薄肉鋳物の IH 加熱での鋳造試験(詳細 2-1-1④ ii)参照)により、肉厚 2mm の製品が安定して鋳造できるようになった(TRY#5)ため、試作した鋳造品 20 台の中から 10 台を抜き取り、CT スキャンで鋳造品の内部観察を実施した。これまで内部欠陥の確認は CT 断面図を 1 枚ずつ確認し、内部欠陥の『ある・なし』だけの定性的な判定であったが、本研究で導入した欠陥解析ソフトを用いることにより、内部欠陥の発生位置を立体的に確認することができ、また、内部欠陥の大きさ(体積)も確認することができるようになった(図 2-1-25)。

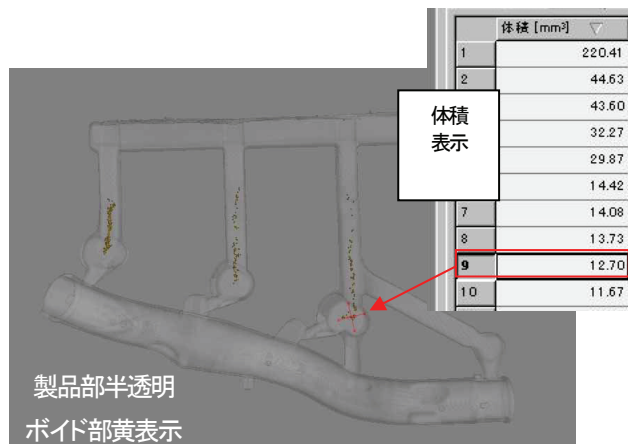


図 2-1-25 欠陥解析結果

この解析ソフトを用いて確認した結果、抜き取った 10 台には内部ポイドが見られなかったため、この素材 20 台の試加工を実施した。試加工の結果、20 台中 1 台に欠陥が発生したが、SEM で確認した結果、この欠陥は今回対策を実施していないガス欠陥であることが判った(図 2-1-26)。

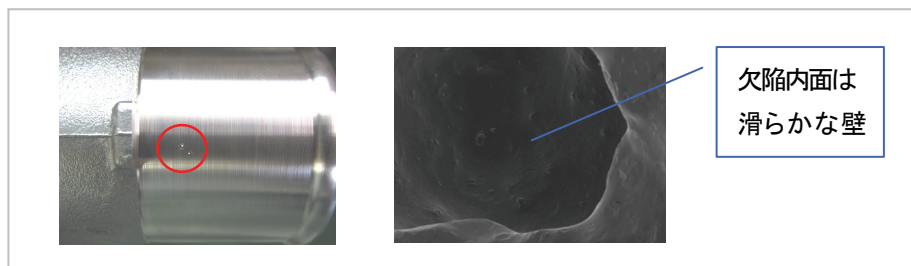


図 2-1-26 SEMによる欠陥の確認

以上のことから、IH による最適金型温度の確立により、湯廻り不良、引け巣、耐圧漏れは無くなっていることが確認された。

③ハイサイクル製品の品質評価

ハイサイクルでの最適金型温度の研究(詳細 2-1-1⑤ iii)参照)により、サイクルタイムを短縮しても安定して製品が鋳造できるようになった(TRY#7)ため、素材 20 台の中から 10 台を抜き取り、CT スキャンでの内部観察を実施し、欠陥解析による内部ポイドの確認を行った。確認した結果、抜き取った 10 台中 1 台に内部ポイドが見られた(図 2-1-27)。1 台であったため、素材 20

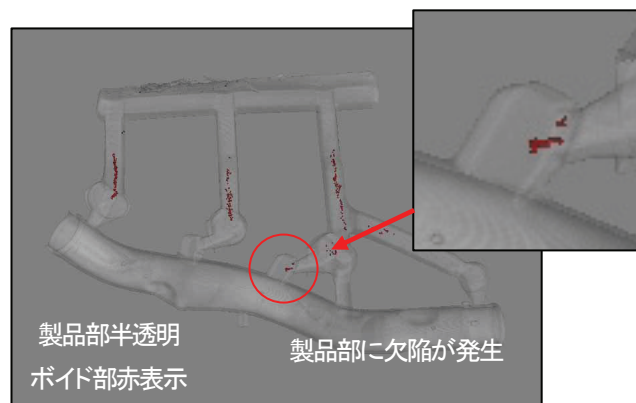


図 2-1-27 欠陥解析結果

台の試加工を実施した。試加工の結果、20 台中 5 台に欠陥が発生した。SEM により発生原因の特定を実施した結果、発生したこれらの欠陥は全て引け巣であることが判った(図 2-1-28)。サイクルタイム短縮前に引け巣は発生していなかったことから、この欠陥は取付穴直下の過剰なオイル冷却が原因であると考えられる。

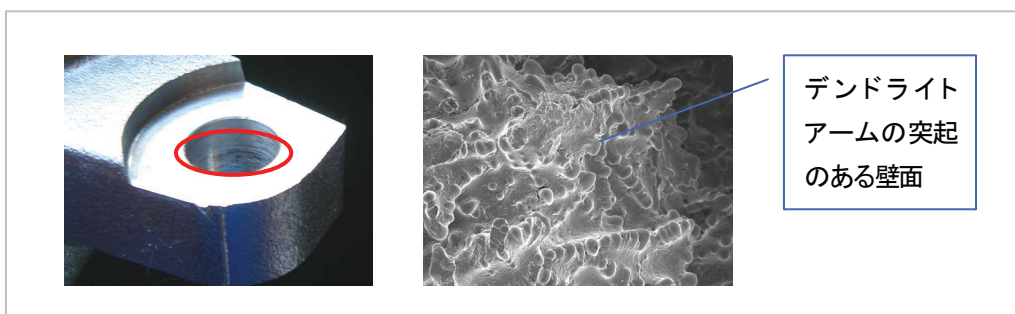


図 2-1-28 SEM による欠陥の確認

そこで、引け巣対策としてオイル冷却を改善して鋳造した製品について、先に引け巣が発生した取付穴部分を CT スキャンで確認したところ、内部に欠陥の発生は見られなかった(図 2-1-29)。この結果から、オイル冷却の改善により内部欠陥は改善されたと考えられ、更にサイクルタイムを短縮するため、鋳造機の反転速度を高速化して、鋳造を実施した(TRY#12)。反転速度を高速化しても安定して製造が鋳造できたため、素材 40 台の試加工を実施した。試加工の結果、40 台中 1 台に欠陥が発生した。SEM により発生原因の特定を実施した結果、この欠陥は介在物の巻き込みであることが判った(図 2-1-30)。反転速度の高速化以前は介在物の巻き込みは発生しておらず、反転速度の高速化が原因と考えられるが、注湯前に更に溶湯の清浄化を行えば、この問題も解決できるものと想定される。

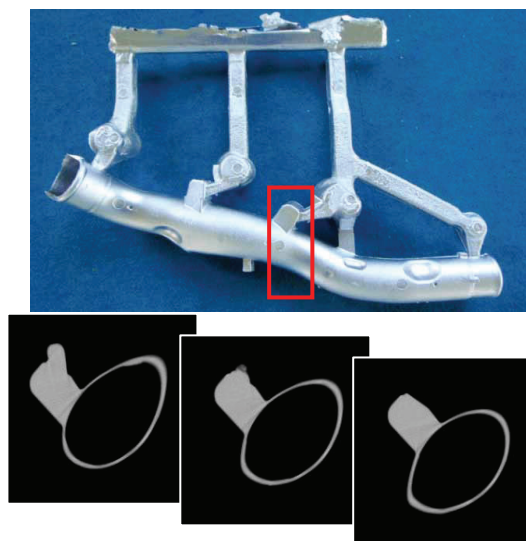


図 2-1-29 CT 断面確認

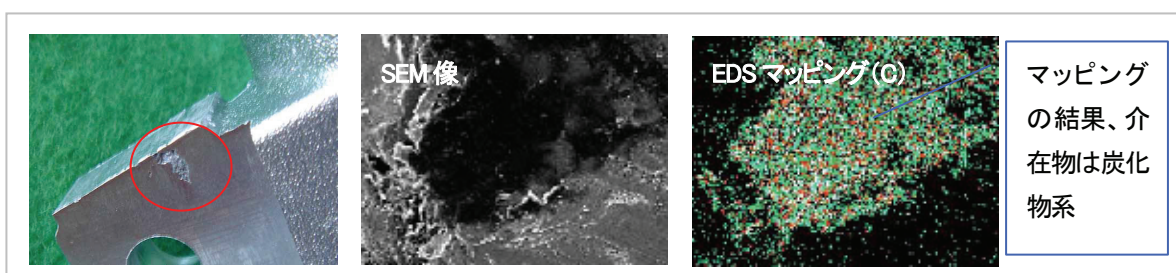


図 2-1-30 SEM による欠陥の確認

④肉厚確認

TRY#1～3 の IH 加熱による鋳造試験では湯廻り不良が多発している。これは現行品の二次不良調査から肉厚不良が 14%発生していることから、現行品より肉厚を薄く(2mm)したことによる影響が大きいことが考えられる。そこで、IH 加熱での鋳造不良品を CT スキャンし、本研究で導入した肉

厚解析ソフトを用いて肉厚の確認を行った。このソフトは CAD データがなくても肉厚の測定が可能である。また、これまでは 1 箇所ずつしか測定できなかったが、このソフトでは全体の肉厚を色表示(赤: 3mm 厚 ⇔ 青: 1mm 厚)できるため肉厚の違いが一目でわかる。その結果を図 2-1-31 に示す。同図に示すように一般肉厚部でのバラツキが大きいことが確認された。そこで、金型の上下 3 箇所ケレンを設置し、鋳造品の偏肉の改善を試みた(TRY#4)。

金型へのケレン設置により、湯廻り不良は改善され、大体の一般肉厚部は 2mm 前後になったが、まだ、一部 2mm から外れていることが確認された(図 2-1-32)。これは、金型へ中子設置時の問題だけではなく、中子自体の問題も考えられ、中子重量の差による影響を検討し、中子の CT スキャンを実施し、中子重量による形状のバラツキを確認した。その結果を図 2-1-33 に示す。この調査結果より中子重量が 900g を越えると中子寸法にバラツキが生じることが確認された。これは中子に使用する砂の密度と熱膨張の影響によるものと考えられる。

以上の結果から、本研究では 900g 未満の中子を使用し、鋳造したところ、一般肉厚部のバラツキが解消された(図 2-1-34)。

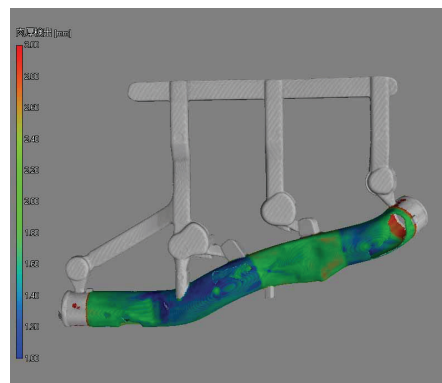


図 2-1-31 肉厚解析結果

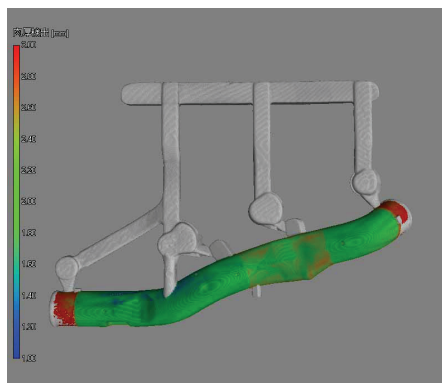


図 2-1-32 肉厚解析結果

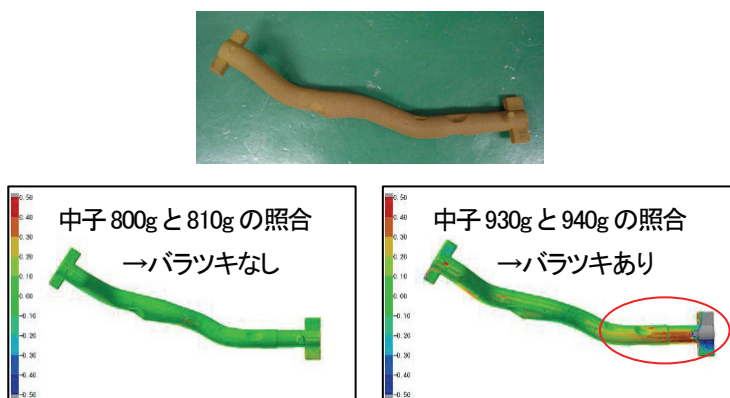


図 2-1-33 中子の形状確認

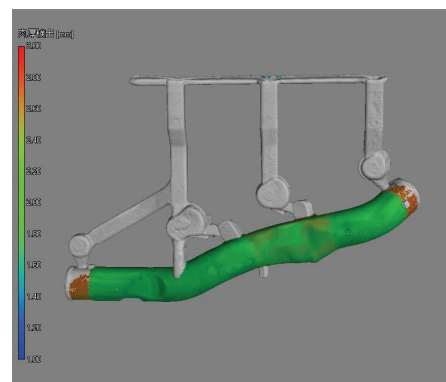


図 2-1-34 肉厚解析結果

⑤製品の歪確認

本試験研究で、CT スキャンによる画像照合をしたところ、製品が歪んでいることが分かった(図 2-1-35)。しかし、加工取代の範囲で歪の吸収は可能(製品スペックより)であり、完成品自体に問題はない。素材での歪問題については金型の熱影響によるところが大きいと考えられ、過去に実施したものづくり支援事業「熱変形を見込んだ金型の設計開発」を利用し、今後改善を実施していく。

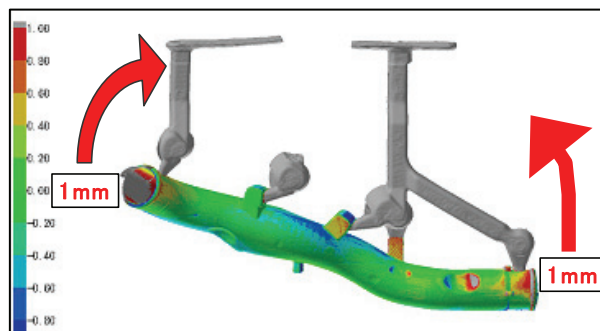


図 2-1-35 IH 品の歪確認(CAD データとの比較)

⑥組織確認

IH 鋳造品および現行品(ガス加熱)の取付ボス(図 2-1-36)を切断し、研磨した後、金属顕微鏡により組織の観察、DAS(デンドライトアームスペーシング)値の測定を行った。各顕微鏡組織を図 2-1-37 に示す。DAS 値は IH 加熱による鋳造品およびガス加熱による現行の鋳造品とも $30\mu\text{m}$ で差はなく、取付ボス部の冷却速度(機械的性質)に差はないと考えられる。

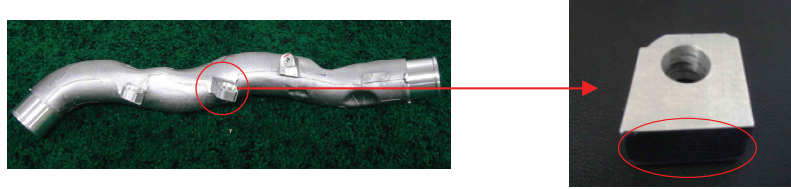


図 2-1-36 組織確認箇所

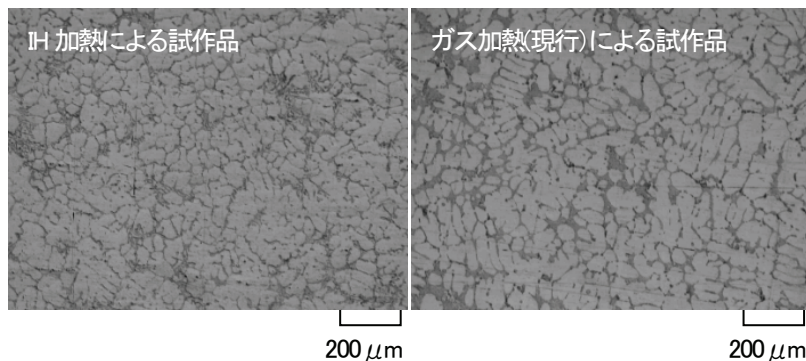


図 2-1-37 顕微鏡組織写真

2-2 Π 化による量産品質安定化の確立

2-2-1 自己組織化マップの研究

(1) 研究内容

IH 加熱金型技術を用いた次世代アルミ鋳造法において、製造条件や各工程における製品の品質などの推移(傾向)を監視、製造工程を安定な状態に維持管理するために、鋳造プロセスの品質管理では初めてとなる自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Map) を用いてデータ・マネジメント方法を検討する。

鋳造は多様な製造工程を経て生産されるため、複数の製造要因が連鎖し、不良品につながる場合が多い。SOM は様々な高次元データを予備知識なしにクラスタリングでき、ニューラルネットワークの一種で与えられた入力情報の類似度をマップ上での距離で表現するモデルである。また主にデータマイニングの1手法として応用され、データの分類、視覚化、要約などを得意としている。このような SOM の特徴を活かすことにより、どの条件下で不良になるのか、その複雑な製造要因の組み合わせを見つけるために製造要因 (IH ヒーター金型の注湯前、注湯後、取出後温度、傾斜時間、角度、注湯時間など) と品質の属性値から分類を行い、複雑な組み合わせの中から不良確率が少なくなる製造要因の組み合わせを発見することが可能になる。これにより従来の鋳造不良要因が特定できる決定打がないもぐら叩きの繰り返し事象をできるかぎり「見える化」すること、そして、適切な分析手法が不良対策につながる。

(2) 研究成果

従来のクラスタ分析よりも強力なクラスタリング手法を用いて、重要な意味のあるセグメントを発見するという目標のもと、SOM を鋳造製造プロセスの要因と品質の分析に適用した。SOM はニューラルネットワークの一種で与えられた入力情報の類似度をマップ上での距離で表現するモデルであり、様々な高次元データを予備知識なし(教師なし)にクラスタリングできるといわれている。

SOM のネットワークはデータを入力する入力層と、入力したデータを元にマップが形成される競合層の2層からなっている。図 2-2-1 は SOM の基本的な構造を示したものである。入力層および競合層の各層にはニューロンがあり、入力層のニューロンは競合層のすべてのニューロンと結合している。そして、入力層と競合層の結合重みを介してデータが記憶される。同じ層のニューロン間には結合はない。競合層の次元数には理論上特に制限があるわけではないが、一般的には視覚的に表現しやすい1~2次元が多く用いられている。SOM の最大の特徴は多次元空間における現象を1~2次元空間に投影し、パターン間の関係構造を明らかにできることにあるといわれる(伊藤則夫、2007)。

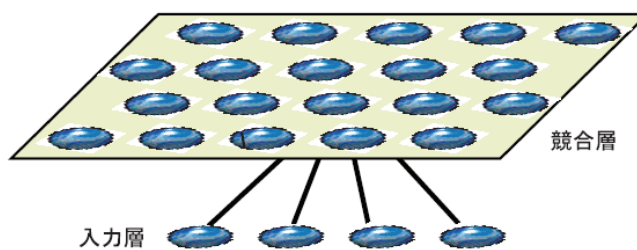


図 2-2-1 SOM の基本構造

SOM は教師付き学習と異なり、学習時に正解値を与えていないので、純粋に入力データパターンの分布状況をそのまま反映したマップが形成される。このため、SOM はパターン分類やパターン認識の分野で特に優れていると考えられている。

SOM の学習は、次に示すような手順で行われる。

- (1) 学習データを正規化し、同時に入力層と競合層を結ぶ結合重みを乱数または意図的な値で初期化する。
- (2) 入力層に入力ベクトル E を提示し、競合層のニューロン i への重みベクトル U_i との類似度を求める。
- (3) 入力ベクトル E と重みベクトル U_i が最もよく一致するニューロンを勝者ニューロンとする。
- (4) 勝者ニューロンの回りに近傍領域と呼ばれる領域を設定し、近傍領域に含まれニューロンに対して重みベクトルの更新を行なう。
- (5) 各入力ベクトルに対して(2)~(4)を繰り返す。

この学習手順の(2)、(3)が競合学習であり、(4)が近傍学習と呼ばれるものである。すなわち、SOM の学習アルゴリズムの特徴は、競合に勝ち残ったニューロンだけではなく、その近傍に位置するニューロンをも含めて集団で学習が行なわれることにある。

図 2-2-2 は階段関数を用いた格子配列の SOM 学習過程を示している。この例では学習ベクトルの要素は x 座標および y 座標の 2 つで、図 2-2-2 には学習ベクトル $E=(x,y)$ (○印)および重みベクトル $U_i=(U_{ix}, U_{iy})$ (●印)をプロットしている。そして、隣接したニューロンは線で結ばれている。学習ベクトルは図 2-2-2(a)のように同心円状に分布している。そして、重みベクトルは場全体を覆うように図 2 (b) のように初期化する。1 つの学習ベクトルがネットワークに示されると図 2-2-2(c)に示すように 1 つの勝者ニューロンが選ばれる。そして、図中に破線で示した近傍領域内にある全てのニューロンの重みベクトルを学習ベクトルに近づけるように更新する。また、別の学習ベクトルが提示されると図 2-2-2(d)のように、その学習ベクトルに最も近いものがまた勝者ニューロンに選ばれ、

近傍領域内にある全てのニューロンの重みベクトルを更新する。学習の初期の段階においては入力データの重心に引き寄せられるような状態になるが (図 2-2-2(e))、最終的には図 2-2-2(f)のように入力データの分布を反映したマップが出来上がる。

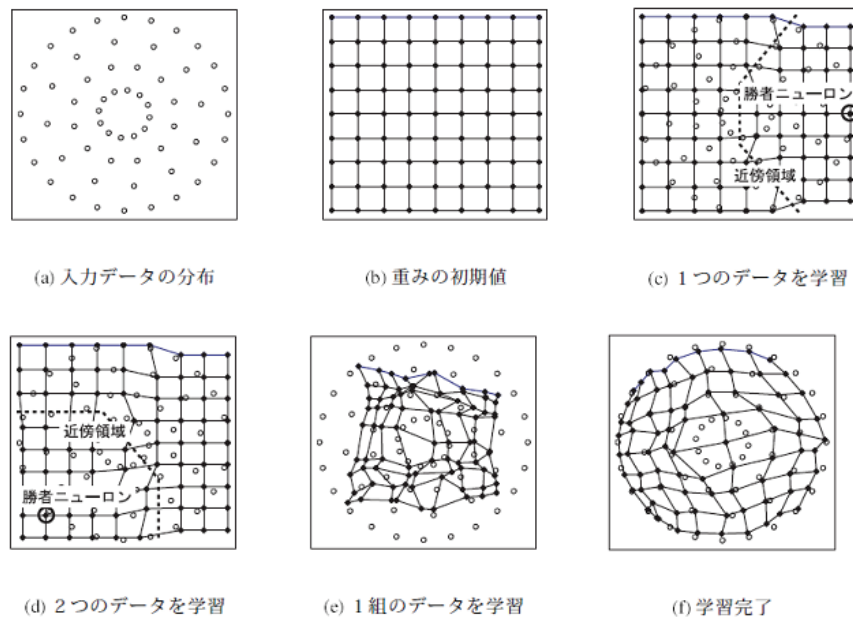


図 2-2-2 SOM の学習過程 (模式図)

SOM は、データの視覚化(visualization)機能が強力である。図 2-2-2 のアルゴリズムを用いて、カラーパレットの学習分類を実施した例を図 2-2-3 に示す。各パレットは RGB の 3 色の色量を数値の属性データとしてもつ。図 2-2-3 のようにランダムに配置された多変量(3 色の数値データ)からなるデータの統計的性質を学習し、類似したデータ (同じような色) が近接するように配列する(図 2-2-2 での学習完了(f))。似ているデータが近くに、似ていないデータは遠くに表示する。SOM の分類が妥当であることを視覚で確認できる。

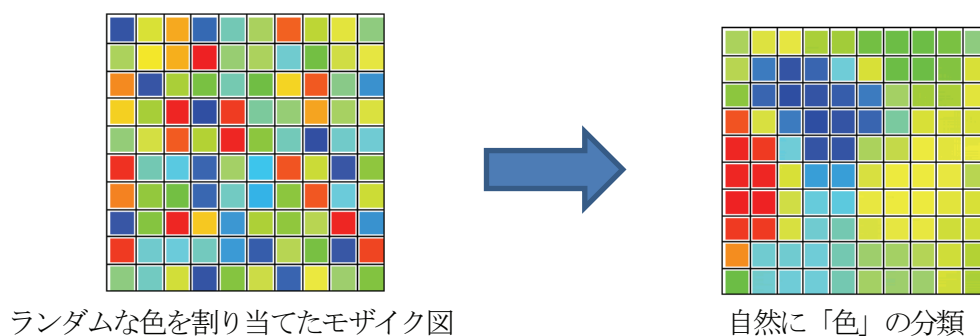


図 2-2-3 色パネルの分類

SOM 分類のテストデータとしてよく使われる動物分類の属性テーブルと SOM による分類結果を図 2-2-4 に示す(SOM を提唱したコホーネンの著書で紹介されている例題)。この例題では、様々な動物について大きさや、体表の様子、行動などの特徴を列挙しており、該当する特長には 1 を、そして該当しないものには 0 を付している。この属性テーブルを SOM で分類したものが右図である。

左下隅のニューロンに対する最一致データは、アヒルおよびガチョウの2つである。マップ上に記された動物の名前と色分けを見ると、マップの下側には鳥類が集まっていることがわかる。SOMでは、似たものは近くに表示されることになっている。アヒルとガチョウ、フクロウとタカ、そしてウマとシマウマはそれぞれ同じ位置に名前が記入されているが、入力属性データを確認するとこれらのデータパターンがまったく同じであることがわかる。

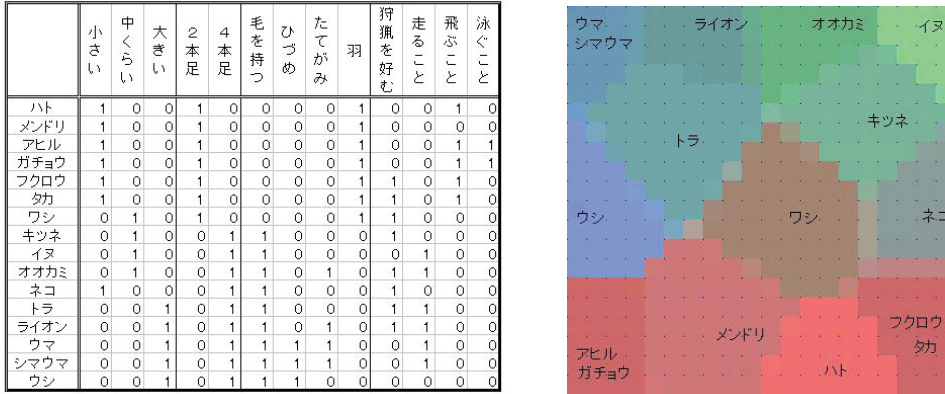


図2-2-4 テストデータ(動物の属性)による SOM 分類

本研究開発では、SOM の鋳造プロセスへの製品分類に応用することを初めて試みた。鋳造品の製造プロセスの各中間特性を属性テーブルとして用意し、SOM 分類を行うことで、最終品質を知らなくてもその製品の生まれの過程の類似性を知ることができる。結果として不良になった製品群との突き合わせから、どのような生まれの製品群に不良になる潜在要因があったかを分析できる可能性がある。図 2-2-5 にその適用イメージをまとめた。従来の方法では、結果として不良になったか良品になったかを知った後に判別分析によって、その要因を1次元的に分類する試みを行ってある程度の有効性を確認している。SOM では、2次元のマッピングで類似性を判断できる。

本研究では、SOMAnalyser(Ver.3)を用いて分類を行った。

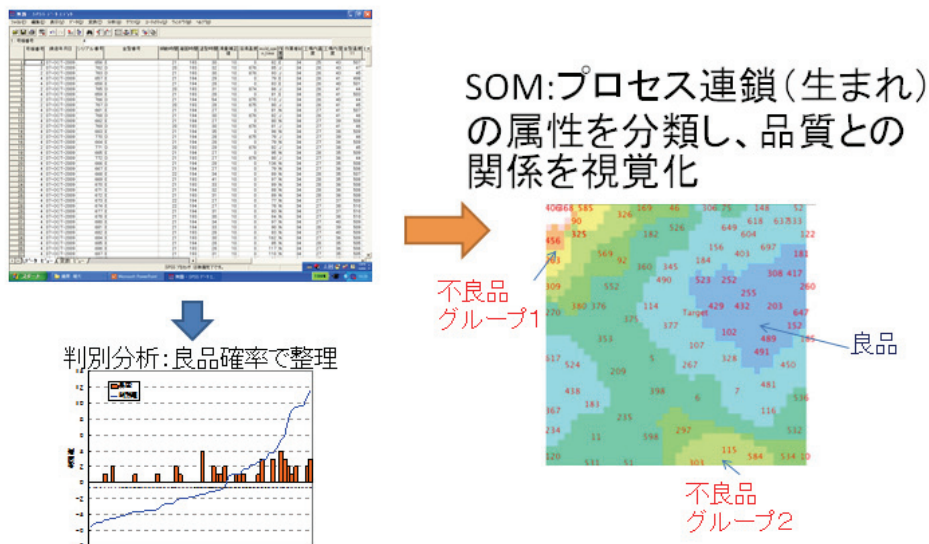


図2-2-5 SOM の鋳造プロセスへの適用イメージ(本研究)

アルミ・エアパイプを IH ヒーターによる金型で、重力鋳造で試作したときのデータに SOM を適用した。

金型温度測定位置および AsCast の湯道付きの製品写真を図 2-2-6 に示す。TRY#4(表 2-1-4 参照)の時点では相当数不良が発生した。

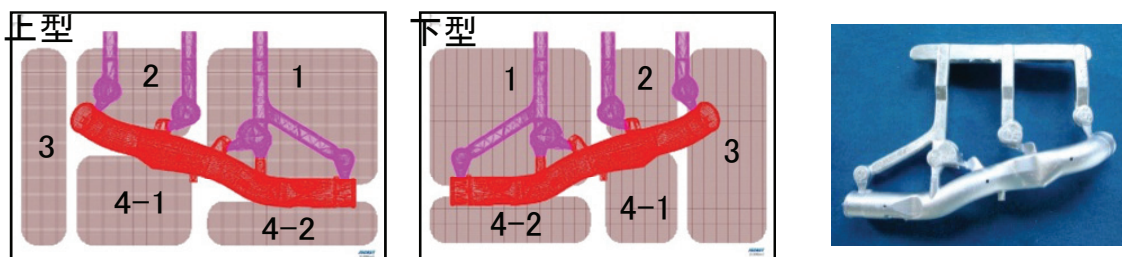


図 2-2-6 金型温度測定位置および製品外観写真

図 2-2-7 には、SOM による分類を示す。図 2-2-8 の番号の横に F がついている製品は不良品である。この場合は 4 つの不良の島ができていて、不良要因は大きく 4 種類あることがわかる。

図 2-2-8 の因子分析では、2 つの因子で累積寄与率は 82.39%あり、やはり 4 つの島に分かれて不良をみることができる。

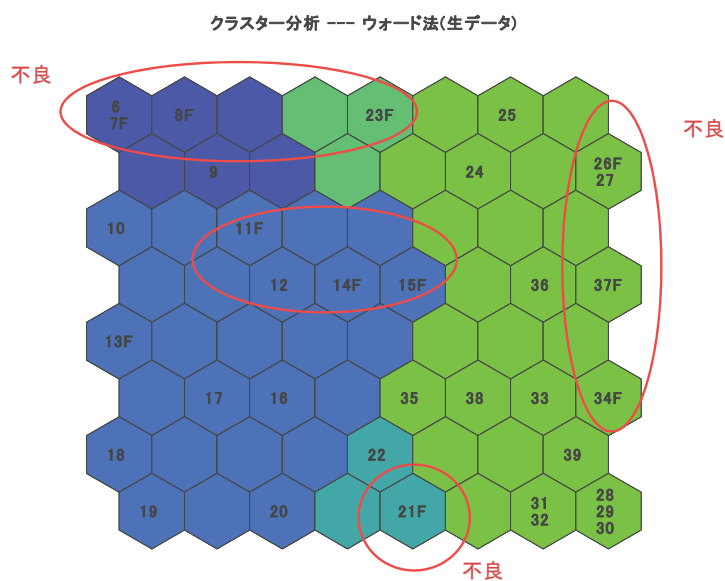


図 2-2-7 TRY#4 の SOM(要因のうちオイル冷却を除く)

因子軸回転前	第1因子	第2因子
固有値	7.706	2.1806
寄与率	0.6422	0.1817
累積寄与率	0.6422	0.8239
上型1	0.8151	0.5627
上型2	0.9741	0.1883
上型3	0.9863	0.0171
上型4	0.8541	0.401
下型1	-0.4939	0.778
下型2	-0.8664	0.4587
下型3	0.8915	0.4413
下型4	0.9196	0.3581
ワッパ	0.6513	-0.4065
溶湯	0.1143	-0.1808
凝固	0.8331	-0.3758
中子	0.7898	-0.4354

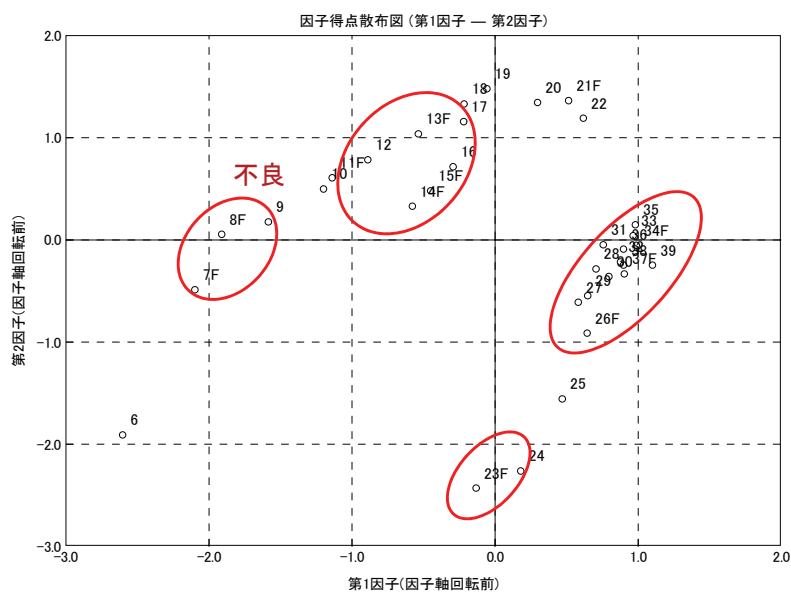


図 2-2-8 TRY#4 のデータの因子分析

これに対して、比較的良品率の高かった TRY#7(表 2-1-6 参照)の SOM 分類は図 2-2-9 のようになり、不良製品群は一つであることがわかった。図 2-2-10 は要因のうちオイル冷却温度を除いて(金型温度だけ)で分類したものであるが、ほとんど同じ結果になった。一次要因と二次要因が混ざっている図 2-2-9 で分類し分析するか、二次要因だけで分類するか、違いがある場合は注意が必要である。図 2-2-11 の因子分析でも不良要因は一つのグループに絞られることがわかる。

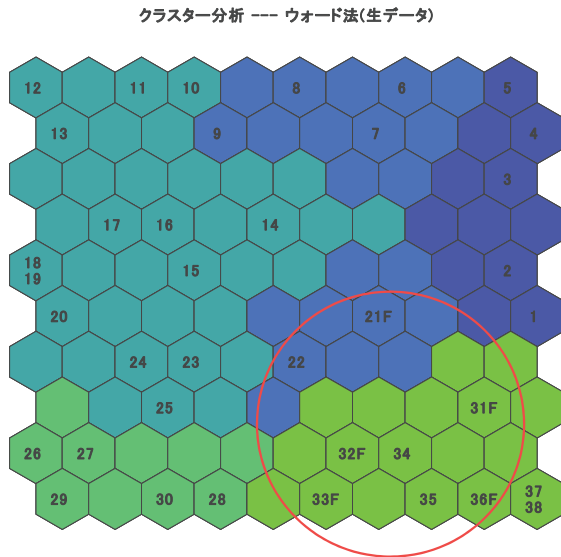


図 2-2-9 TRY#7 のデータの SOM 分類 (すべての要因)



図 2-2-10 TRY#7 の SOM 分類 (要因のうちオイル冷却温度を除く)

因子軸回転前	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
固有値	5.6612	3.7526	1.2679	0.544
寄与率	0.4718	0.3127	0.1057	0.0453
累積寄与率	0.4718	0.7845	0.8901	0.9355
上型1	0.5594	0.8003	0.0096	0.1023
上型2	0.629	0.7339	-0.1811	-0.0827
上型3	-0.7697	0.3794	0.3947	-0.0423
上型4	0.5994	0.7682	-0.173	-0.0982
下型1	0.832	-0.4249	-0.1416	0.1958
下型2	0.8449	-0.044	0.5037	0.0778
下型3	0.1923	0.6833	0.641	-0.0258
下型4	0.8634	-0.2008	0.3911	0.1218
ワッパ	-0.7082	0.5299	0.0358	0.2888
溶湯	0.1045	-0.836	0.3904	-0.2857
凝固時間(s)	0.8593	-0.3702	-0.1437	0.303
中子重量(g)	-0.7495	-0.1811	0.1929	0.4455

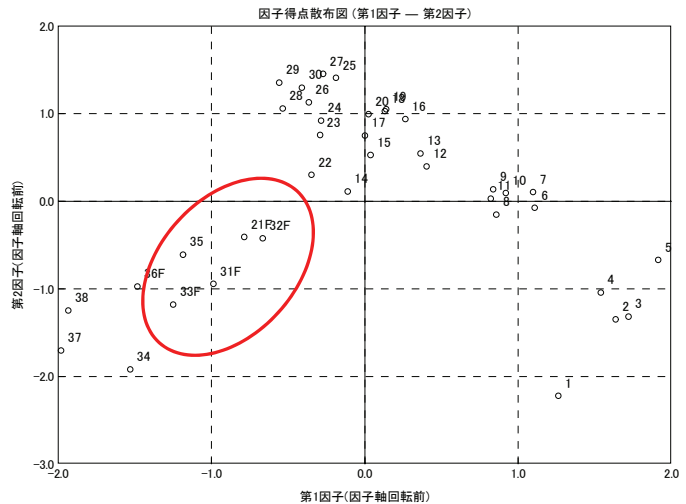


図 2-2-11 TRY#7 のデータの因子分析(要因のうちオイル冷却温度を除く)

TRY#7 のデータについて、不良か良品かという判別を行う関数を導けるかどうか、判別分析を行った(図 2-2-12)。判別値が 0 以下は不良、0 以上は良品と判別され、決定木分析により不良になる要因の組み合わせがわかった。SOM と判別分析、決定木分析を組み合わせることで、不良要因の抽出、対策を適切にとることができる可能性が大きい(図 2-2-13)。

試作、分析を繰り返し、最適であると思われる金型温度制御で試作を行った結果(TRY#12、表 2-1-

6 参照)では、ほとんど良品が得られた。TRY#7 および TRY#12 のデータを合わせて、SOM 分類した結果が図 2-2-14 である。TRY#7 と TRY#12 では、明らかに別グループに分類されていることがわかる。

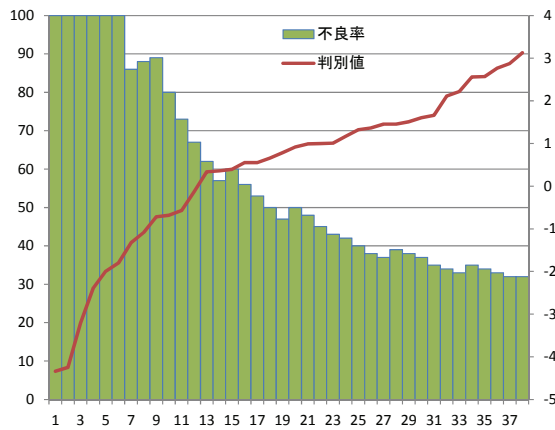


図 2-2-12 判別分析(TRY#7)

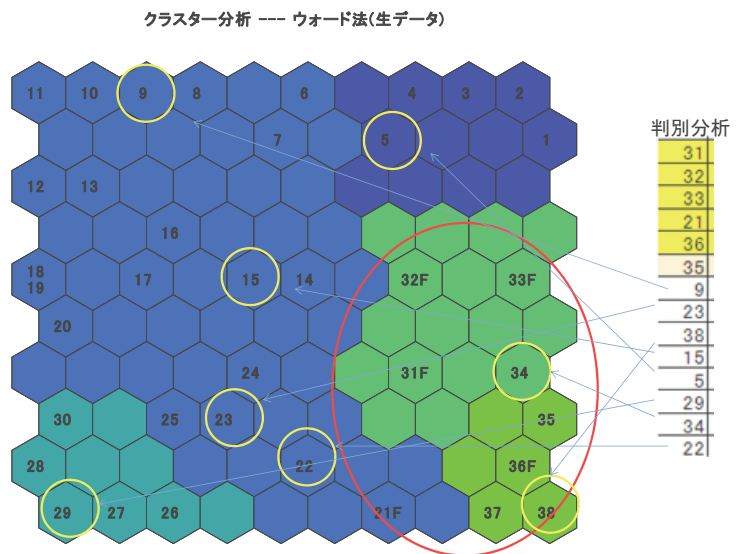


図 2-2-13 判別分析によって不良確率が高いと予想された製品の SOM での位置

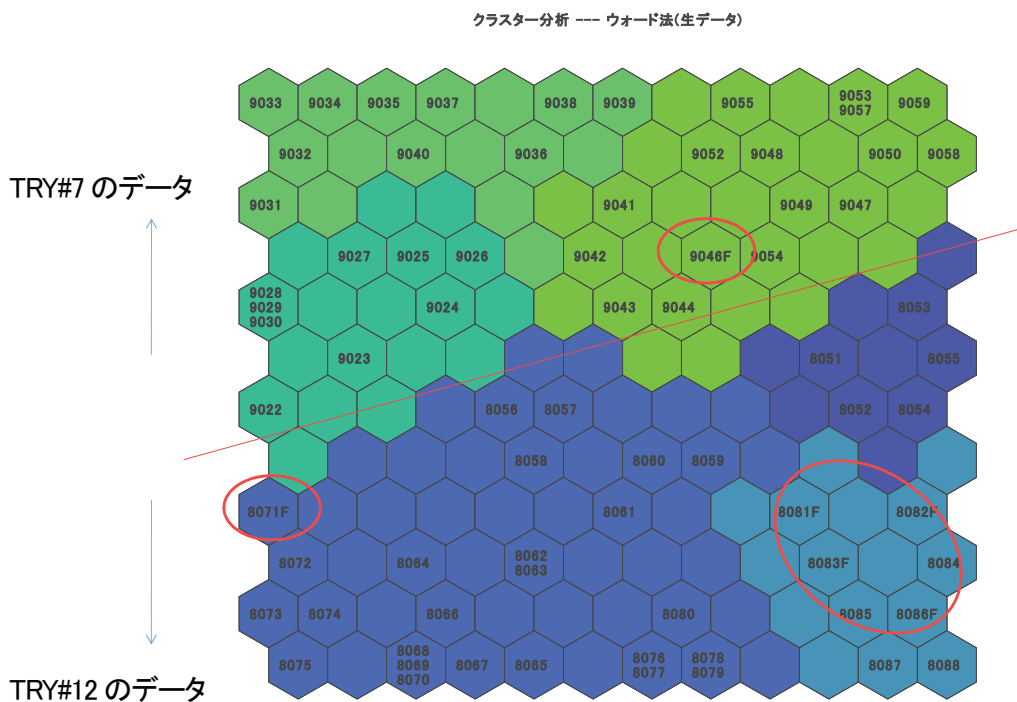


図 2-2-14 TRY#7 および TRY#12 のデータ(要因のみ)を合わせた SOM 分類

以上のことから、SOM の特徴を活かすことにより、

- (1) どの条件下で不良になるのか、その複雑な製造要因の組み合わせを見つけるために製造要因(IIヒーター金型の注湯前、注湯後、取出後温度、傾斜時間、角度、注湯時間など)と品質の属性値から分類を行い、複雑な組み合わせの中から不良確率が少なくなる製造要因の組み合わせを発見することが可能になる。
- (2) これにより、従来の鑄造不良要因が特定できる決定打がないもぐら叩きの繰り返す事象をできるかぎり「見える化」することが可能になる。

参考文献

- (1) コホーネン著 徳高他訳 1996 自己組織化マップ シュプリンガー・フェアラーク
(ヘルシンキ大学工学部 Neural Network Research Center
<http://www.cis.hut.fi/research/som-research/>
SOM, LVQ の研究・学習用パッケージ(SOM-PAK, LVQ-PAK)が公開されている)
- (2) 徳高平蔵・岸田悟・藤村喜久郎 1999 自己組織化マップの応用—多次元情報の 2 次元可視化
海文堂
- (3) SOMAnalyser Ver.3 操作マニュアル

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果のまとめ

各サブテーマとも所定の成果を上げることができ、表 3-1 のように提案書で記載した技術目標値を達成した。

表 3-1 技術目標値達成状況

サブテーマ名、技術目標	実績	判定・摘要
①IH 式金型温度制御によるハイサイクル化と高品質化の確立 ・ 鋳造サイクルタイム 50%減(180s→90s) ・ 薄肉化 40%減(3.5mm→2mm) ・ 不良率 50%減(5%→2.5%)	・ 凝固時間短縮と機械動作見直しにより、鋳造サイクルタイム 50%短縮達成 ・ エアーパイプ鋳造品の肉厚を 2mm にする事で 40%減達成	○ 達成
①-1 IH 加熱とオイル冷却による金型温度制御の研究 ・ 急加熱・急冷却の制御→最適な温度制御の確立 ①-2 ハイサイクル製品の品質評価 ・ 不良原因の特定 → 品質保証	・ IH 式金型温度制御により、不良率 50%減を達成 ・ CT スキャナ、SEM 等を用いて不良原因を特定し、その対策を講じることにより品質保証を可能とした。	
②IT 化による量産品質安定化の確立 ・ 品質安定化 ②-1 自己組織化マップの研究 ・ SOM の研究→データ・マネジメント方法を確立	・ SOM による鋳造プロセス品質の分類方法を確立 ・ 不良/良品それぞれの製品群の属性類似性の定量分析を実現	○ 達成

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

(1) 今後の課題

① IH 式金型温度制御によるハイサイクル化と高品質化の確立

①-1 IH 加熱とオイル冷却による金型温度制御の研究

- ・ IH 加熱とオイル冷却による金型温度制御技術を向上させ、より安定的に生産が出来る製造条件の確立を目指す。
- ・ IH コイルの耐久性を向上させると共に、汎用性のあるコイル製造をメーカーと検討する。
- ・ ユーザーである自動車メーカーに試作品を評価してもらい、商品化を進める。
- ・ 熱変形を見込んだ IH 金型による製品開発を目指す。

①-2 ハイサイクル製品の品質評価

- ・ CT スキャナによる鋳造品の内部ボイドの確認と、走査型電子顕微鏡(SEM)によるボイド分析の作業を標準化し、不良対策の効率化を図る。

② IT 化による量産品質安定化の確立

②-1 自己組織化マップの研究

- ・ SOM 分類のための属性データの選択、SOM による分類から不良を出さない製造条件を抽出する方法、そのノウハウの蓄積が必要である。

(2) 今後の事業化展開

今後の事業展開のイメージを下図に示すが、(株)ナカキンが中心となり、下記3項目について事業化展開を検討していく。

①低コストで軽量・高品質な鋳造品（エアーパープ等）

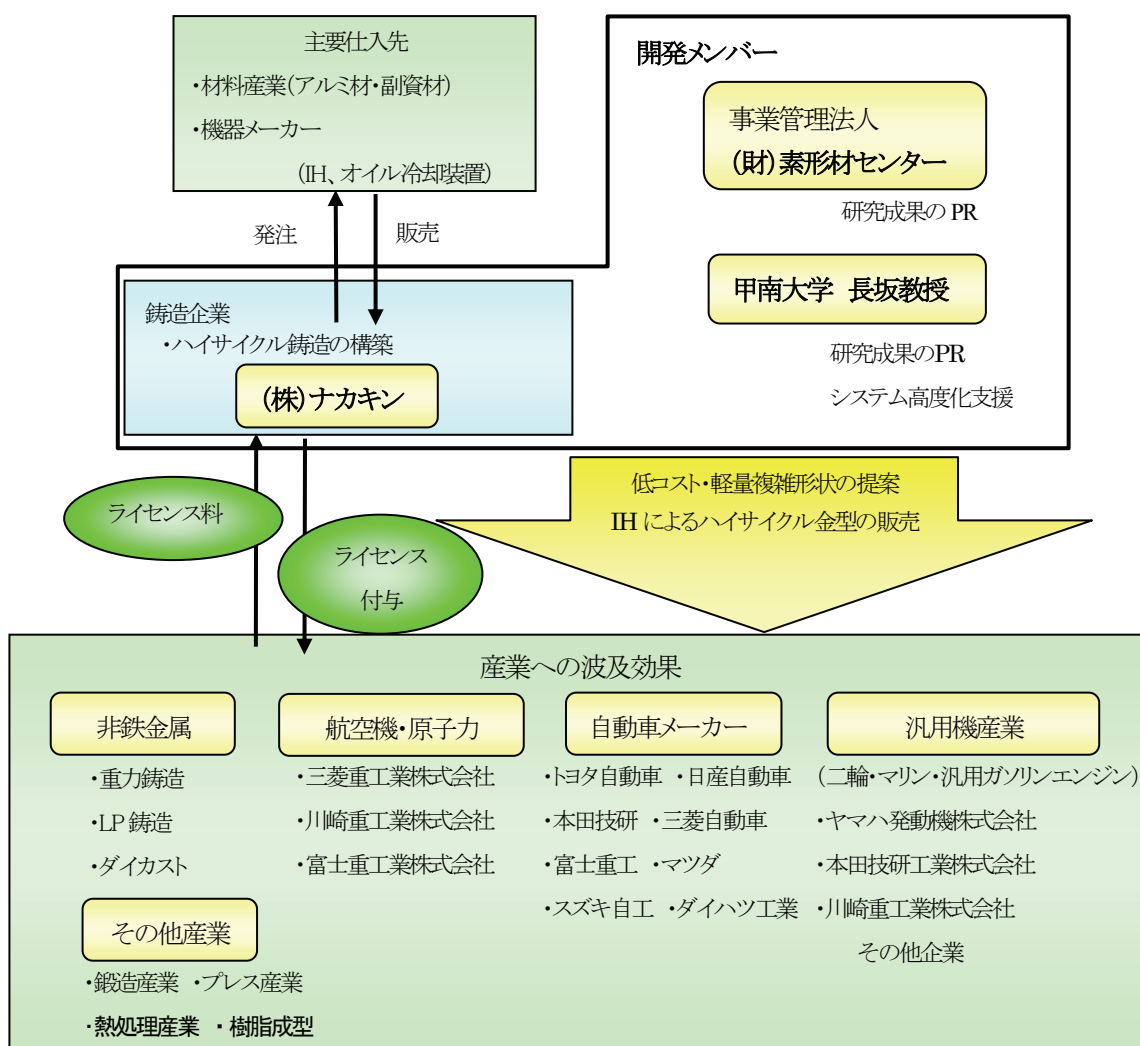
開発製品は、(株)ナカキンと川下産業である自動車メーカーの研究開発部門と共同で評価試験を実施しており、本研究開発終了後すぐにエアーパープをサンプル提供し、採用を目指す。また、今後多くの需要が見込まれる小型過給機エンジンには必要不可欠な複雑形状エアーパープを、国内自動車メーカーに売り込み、新規部品獲得を目指す。

②低コストで軽量・高品質な鋳造品（インテーク・マニホールド等）

(株)ナカキンの主力製品であるインテーク・マニホールドでも低コストで軽量・高品質な鋳造品の研究開発を行い、現在生産している製品の薄肉サンプルを製作し、主要取引先である三菱自動車へ提出する。評価試験終了後、量産切替えの目処が立てば、他部品にも順次展開する。

③温度制御と環境対応に優れた次世代金型の製造・販売

(株)ナカキンは、金型事業部を有しており、今回の試験研究で開発した IH 金型のノウハウを利用し、グラビティ鋳造金型及び低圧鋳造金型の製造・販売を目指す。



専門用語の解説

1. IH (Induction Heating)

誘導加熱を英語で「インダクション(誘導)・ヒーティング(加熱)」と言う。電磁誘導の原理を利用して加熱させる。

2. 誘導加熱

誘導加熱は新しい加熱方式として家庭の中でも普及しつつある。現在、誘導加熱は高周波を使う高周波加熱が一般的に普及している。

3. 中周波加熱

周波数のうち数 Hz 前後を低周波、数百～数千 Hz 前後を中周波、数万 Hz 前後を高周波と呼ぶ中周波は高周波に比べ、表面だけでなく内部まで浸透し、また人体影響がなく安心。

4. SOM(Self-Organizing Map;自己組織化マップ)

入力パターン群をその類似度に応じて分類する能力を自律的に獲得していくニューラルネットワークである。与えられた入力情報の類似度をマップ上での距離で表現するモデル。

5. 非破壊検査 (NDI: Non destructive Inspection)

材料内部の欠陥や表面の微小な割れやボイドを、被検査物を物理的に破壊することなく検出する検査方法である。

6. ケレン

中子を支えたり定位置に保持するために、鋳型の空けき部に置かれる金具である。