

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高品質高効率な多品種少量生産に向けた砂型低圧鑄造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月31日

委託者 関東経済産業局

委託先 北陸軽金属工業株式会社

目 次 (例)

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

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

1-3 成果概要

① シミュレーション鋳造製造プロセスへの適用検討

② 鋳造シミュレータ群の整備

2-1 熱流体シミュレータへの2相流解析機能追加

2-2 凝固収縮シミュレータのインターフェース開発

2-3 構造解析シミュレータの導入

2-4 方案検討支援プリプロセッサの開発

③ 解析結果の検証と物性データベースの構築

3-1 溶湯物性値のデータベース構築

3-2 シミュレーション結果の検証と適用ガイドラインの策定

1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2-1 シミュレーション鋳造製造プロセスへの適用検討

2-2 鋳造シミュレータ群の整備

2-2-1 熱流体シミュレータの2相流解析機能追加

2-2-2 凝固収縮シミュレータのインターフェース開発

2-2-3 構造解析シミュレータの導入

2-2-4 方案検討支援プリプロセッサの開発

2-3 解析結果の検証と物性データベースの構築

2-3-1 溶湯物性値のデータベース構築

2-3-2 シミュレーション結果の検証と適用ガイドラインの策定

最終章 全体総括

参考文献

第一章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

研究開発の背景

我が国の製造業を牽引している自動車産業において、鑄造技術は様々な部品を製造する最も基本的かつ重要な製造技術のひとつとして位置づけられる。製品としての自動車を設計開発する場合には、安全対応・環境対応・魅力的な製品の開発など求められる性能や機能の点から、高い比強度をもつ合金での鑄造、必要強度を維持した軽量化、複雑な形状の鑄造品の作成などが要求されている。加えて、鑄造品の品質確保や一体成形による低コスト化、また部材だけにとどまらず製造過程における環境配慮から再利用可能な資材による鑄造技法の開発など、多岐にわたるニーズが顕在化している。本研究開発の目的は、砂型アルミ鑄物部品による鑄造技術で求められる多品種少量アルミ鑄物部品の鑄造を、低圧鑄造手法及び鑄造シミュレーション技術を用いて新たに鑄造プロセスに活用することで、高品質高効率な砂型低圧鑄造技術を確立することである。この方法の確立により、今後の電気自動車、燃料電池自動車等の研究開発に求められる軽量化・薄肉化・複雑形状化・一体成形化等の砂型アルミ鑄物部品の安定供給が可能となる。図1-1に本技術開発の目指す姿を示す。

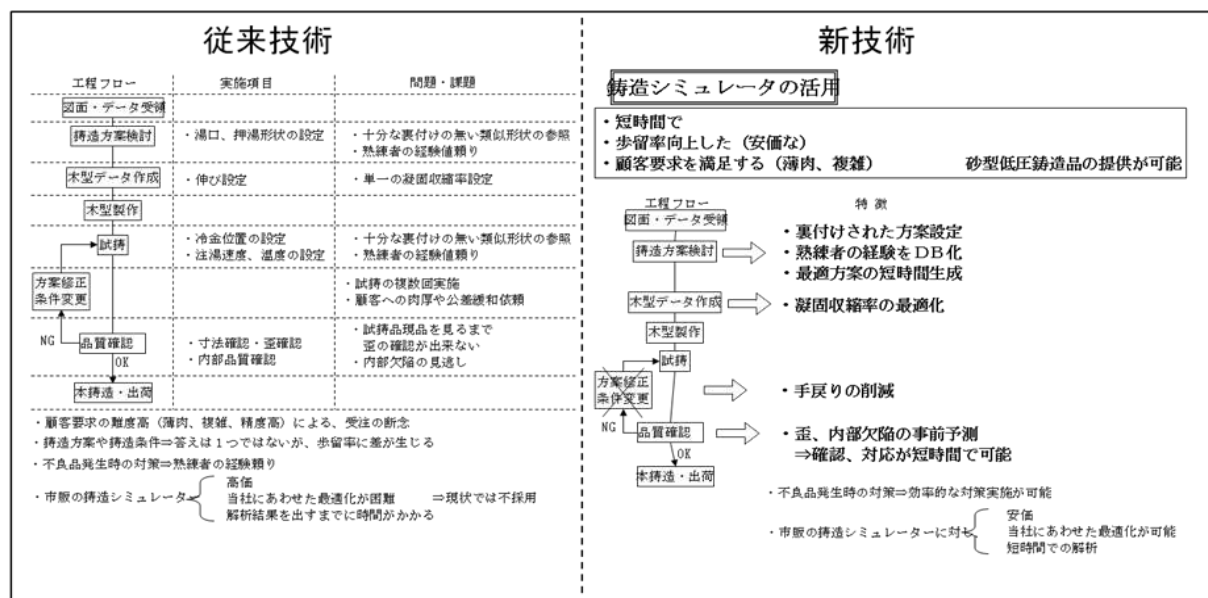


図1-1 従来鑄造プロセス（従来技術と新技術）

研究開発目的と目標

本研究開発では、川下製造業者の抱える課題とニーズのうち、以下の高度化目標を掲げる。

1. 薄肉化および軽金属化を実現するための鑄造技術の開発
2. 品質の確保及び向上に資する鑄造技術の開発
3. コスト低減に資する鑄造技術の開発
4. 短納期を実現するための鑄造技術の開発

上記の目標を達成するため以下のサブテーマを設け、技術研究開発を推進した。

1. シミュレーションの鑄造製造プロセスへの適用検討

現状の鑄造部品の製造プロセスは、熟練者のスキルに依存した工程となっている。特に、試鑄から本鑄までの方案形状検討と鑄造条件の取得過程では経験と試行錯誤に頼ったものであり、

製造サイクルの短縮の上でボトルネックとなっている。流動シミュレータの利用により、鑄込み時に発生する内部欠陥の原因となる鑄巣や湯境、湯周り不良を予測することが可能となる。流動シミュレータによる検討プロセスを導入することで、前述のような欠陥を抑えた方案形状の最適化が可能となり、試作回数の低減が期待できる。このために、既存の製造プロセスを分析し、シミュレータを導入する場合の工程フローの検討、各鑄造プロセスの所用工数や時間のデータ採取を行い、工程の最適化を図る。また、シミュレータの導入により達成される短時間化や品質向上の効果を測る方針の検討を行う。更に、より品質が良く生産性の高い鑄造方案を試鑄なしで検討することができ、経験と勘に頼ったノウハウを皆で共有できる知識へ変える役割も果たす。

<目標>

1. 解析による品質向上
 - (ア) 流動解析結果と検証実験にて得られたフローパターンの傾向が一致する。
 - (イ) 凝固収縮解析結果と検証実験にて得られた内部欠陥とそり量の傾向が一致する。
2. 軽量化
 - (ア) 薄肉製品の肉厚が平均 2mm 以下のものが作れる。
3. 砂型鑄造型設計の短時間化
 - (ア) 砂型の方案検討時間を現状の 1/2 にする。
4. 品質向上
 - (ア) 歩留まり率を 95%以上にする。

2 鑄造シミュレータ群の整備

短納期化、薄肉化、高品質化の実現を支援し、鑄造技術の高度化を達成するため、理化学研究所で開発してきたシミュレーションソフトウェア群を基にカスタマイズすることにより、短期間に目的のシミュレータを開発する。

2-1 熱流体シミュレータへの 2 相流解析機能追加

理研で開発した三次元非定常熱流体解析システムをベースとして、これに大密度差の計算が可能な 2 相流解析機能を追加する。これにより、鑄造時の溶湯の挙動や温度分布の様子を予測できるようになる。また、並列化を行い、並列計算機にて実用的な期間内で解析ができるようにする。

<目標>

1. 流動解析において、鑄巣や湯境、湯周り不良の発生位置を精度良く予測できる。
2. 形状データを入手後に 10 日以内に 3 ケースの計算を実施できる。

2-2 凝固収縮シミュレータのインターフェイス開発

理研にて開発した凝固収縮シミュレータによって、凝固時に発生する内部欠陥、鑄造製品の熱収縮に起因するそりや歪みを予測する。凝固収縮シミュレータによる検討を行うことで、所望の品質を保つ製品の製造が可能となり、歩留まり率を向上する。

<目標>

1. 凝固解析において、内部欠陥位置を精度良く予測できる。
2. そり解析において、熱変形量を精度良く予測できる。
3. 解析時間は、試鑄から本鑄までの間に3ケースの計算が行えること。

2-3 構造解析シミュレータの導入

理研で開発した構造解析シミュレータを用い、薄肉軽量となる鑄造製品の強度を予測し、軽量化に伴う強度低下のリスクを低減する。

<目標>

1. 薄肉製品の構造解析によって、所与の荷重に対する強度を精度良く予測できる。

2-4 方案検討支援プリプロセッサの開発

短期間に鑄造の湯流れ解析を実施するためには、解析モデル作成の迅速化が鍵となる。本提案事業で採用するボクセルベースの熱流動解析システムは、与えられた形状から短時間で解析モデルを作成できる特徴がある。しかしながら、このシステムを業務に利用する場合には、様々な方案形状への対応、型形状に対するモデル修正など、実務に合致した機能追加を実施する。

<目標>

1. 方案形状データベースを備え、鑄造部品形状に対して自由にレイアウト、迅速に鑄造モデルを作成する前処理を理研で開発したプリプロセッサをベースに機能追加する。
2. 形状が与えられた後、1時間以内で方案形状のレイアウトが可能なこと。

3 解析結果の検証と物性データベースの構築

3-1 溶湯物性値のデータベース構築

流動解析では、熔融金属の動粘性係数や凝固温度などの物性値が予測結果に大きく影響するパラメータとなる。業務で扱う範囲の組成をもった熔融金属に対して、推定値を含んだ物性値のデータベースを構築し、解析結果と実験結果の比較を行う。

<目標>

1. アルミ溶湯に関する物性値データベースを構築する。
2. フローパターンとの比較により校正値を取得する。

3-2 シミュレーション結果の検証と適用ガイドラインの策定

流動、凝固・収縮、構造解析の各シミュレータの予測精度を保証するために、検証実験を行う。各解析について、簡単な形状、中程度に複雑な形状、実際の複雑形状、の3段階の試験形状を準備し、溶湯充填速度や温度、フローパターン、そり量、欠陥部位などの測定データを用いて、シミュレーション結果を検証する。さらに、これらの比較結果をデータベース化し、シミュレーション適用のガイドラインを策定する。

<目標>

1. 複雑度の異なる3種類の形状について、鑄造条件の異なる鑄造データを取得する。
2. 対応する計算を実施し、結果の比較と分析を実施する。

3. シミュレーション適用のガイドラインを策定する。

研究開発の総合的な目標として、砂型アルミ鋳物部品の軽量化レベルの目標値を、平均肉厚 2 mm以下とし、これに対する製品肉厚寸法公差は平均 ± 0.35 mm とする。また鋳造歩留率は 95 %以上とし、これに伴う要件として複雑形状化、一体成形化も含み鋳造技術の開発を行う。また鋳造シミュレーションの開発におけるレベルの目標値は、流動解析・凝固収縮解析・そり解析・構造解析を試験鋳造より得られるデータと検証し、これを含む砂型鋳造方案の検討時間を従来の 1/2 とし、砂型鋳造型設計の短時間化を計る。

1-2 研究体制

研究組織（全体）

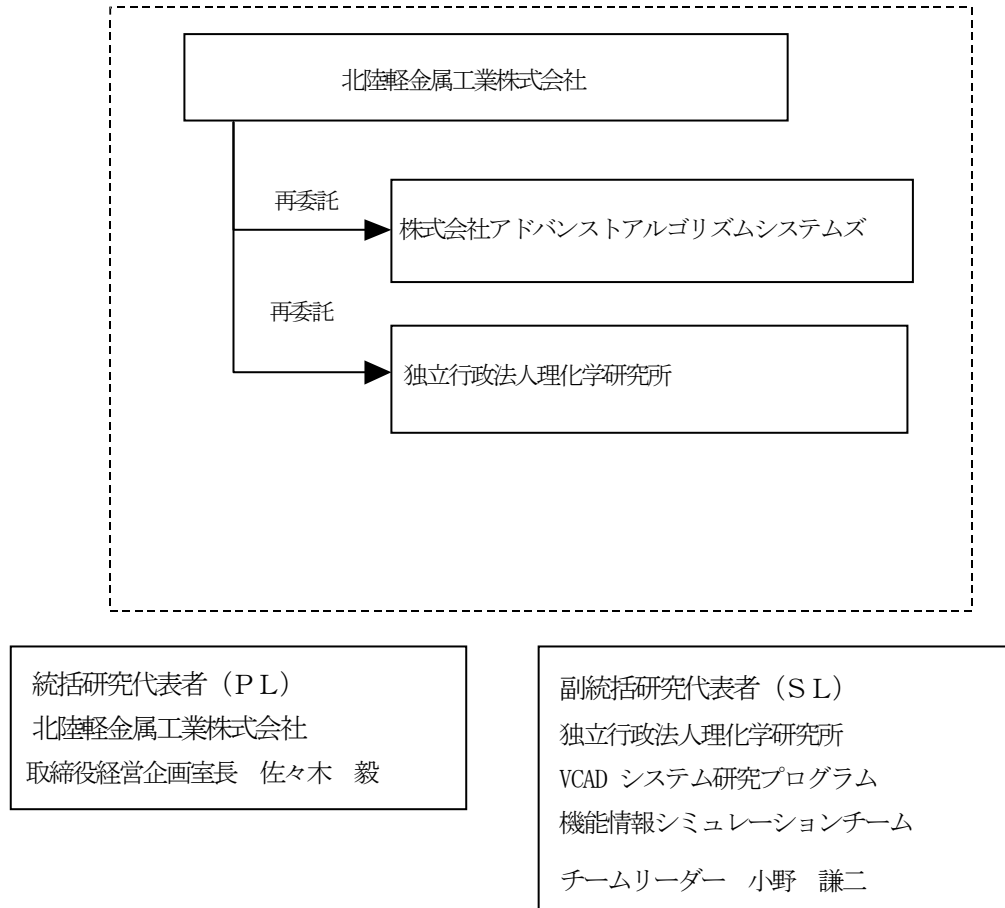


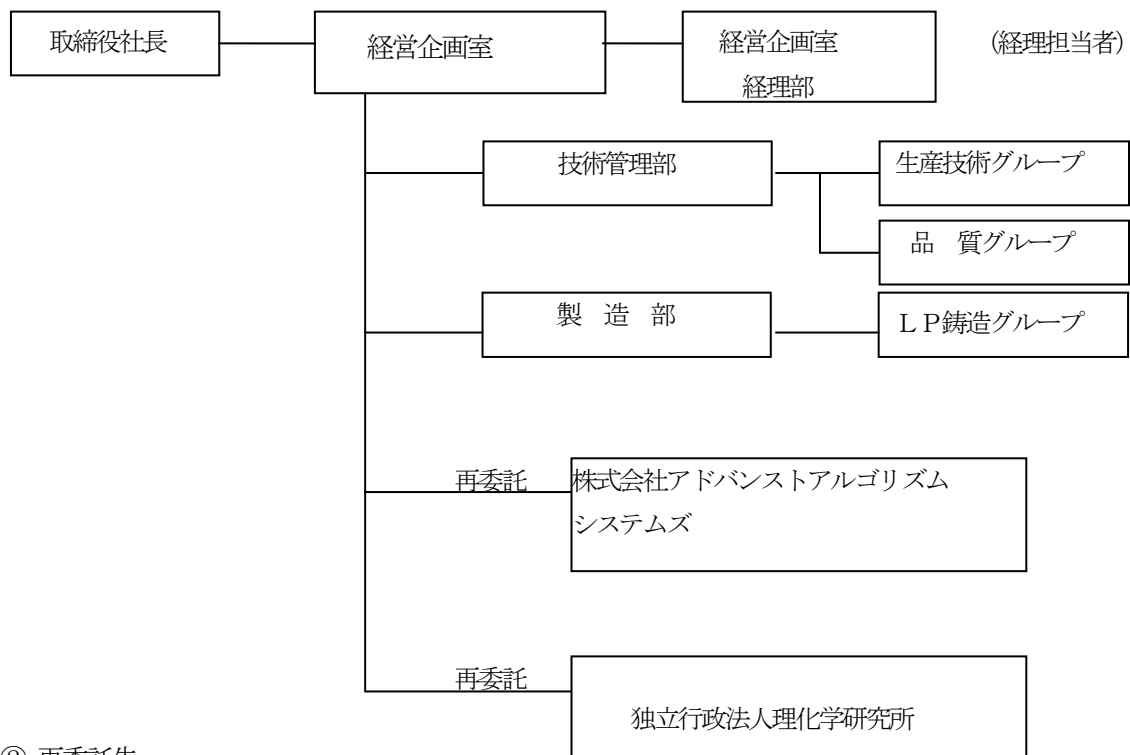
図1- 2 研究組織及び管理体制

2) 管理体制

①事業管理者

[北陸軽金属工業株式会社]

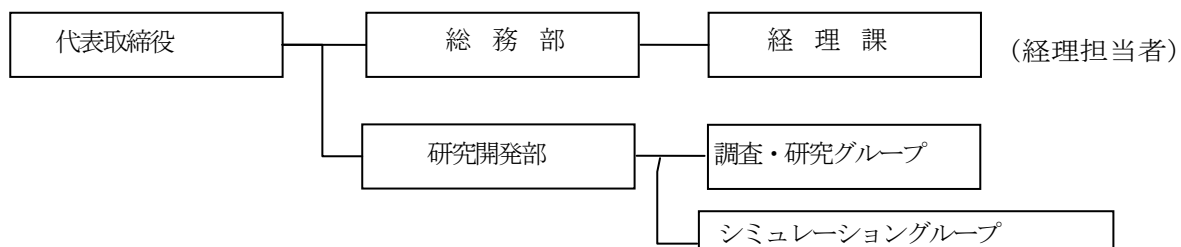
(業務管理者：経営企画室長)



② 再委託先

[株式会社アドバンストアルゴリズムシステムズ]

(業務管理者：代表取締役)



[独立行政法人理化学研究所]

(業務管理者：小野 謙二)

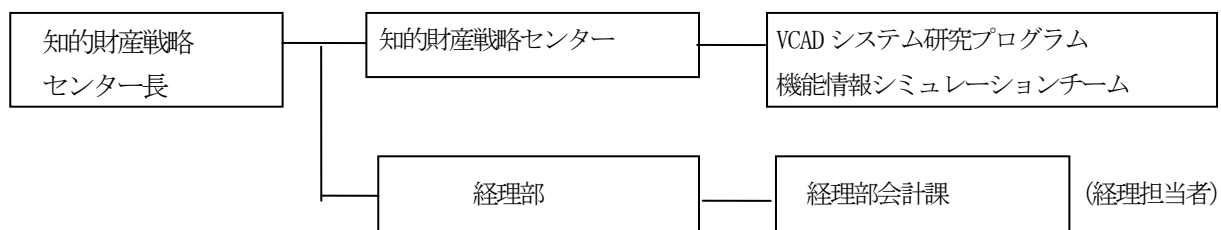


図1-3 管理体制

1-3 成果概要

① シミュレーションの鋳造製造プロセスへの適用検討

最初に、現状の木型製作から本鋳造までのプロセスの現状把握と分析を行い、各作業の課題および問題点を抽出した。次に、現在の鋳造生産プロセスに対してシミュレーション技術の適用フローを考え、図1-4に示すように鋳造プロセスへの鋳造シミュレーション技術適用の有効性を検討した。

現在の鋳造生産プロセスでは、鋳造品毎製作毎に、先ず鋳造方案の検討と決定による木型の製作から着手する。鋳造部品を成形するにあたり、鋳造方案は湯廻り性、内部品質、寸法精度等の鋳造品質に対して大きな影響を与える。従来、鋳造方案の決定には、経験値や類似形状の参照、過去の鋳造部生産における諸条件を参考としていた。木型製作開始から本鋳造までの鋳造プロセスにおいて、鋳造方案の形状は後の本鋳造で生産する鋳造部品の品質に与える影響が大きい。木型製作完了後の試鋳工程における湯廻り状況、寸法精度、内部品質の確認を行うことが重要である。この観点から、鋳造シミュレーションを方案の検討段階、および試鋳工程に対して適用することにより、型製作技術者、鋳造技術者、品質担当者のこれまでの経験・ノウハウ・諸データを、鋳造シミュレーションによる解析データと比較整合することにより、最適な鋳造方案形状の決定が可能になると判断した。

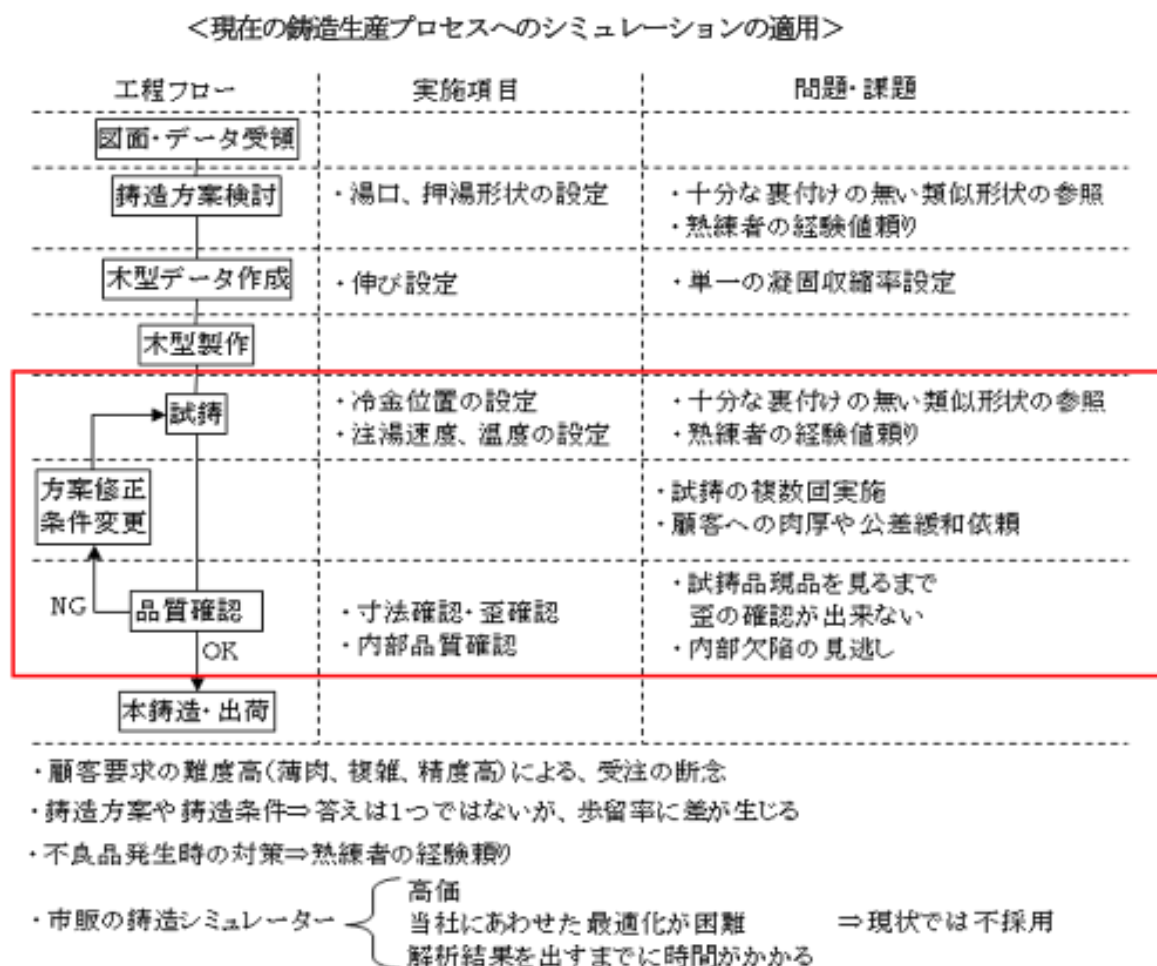


図1-4 工程フロー図

② 鋳造シミュレータ群の整備

2-1 熱流体シミュレータの2相流解析機能追加

理化学研究所 VCAD プロジェクトで開発した三次元熱流体シミュレータを基に、気液2相流の解析機能を開発・追加した。基本的な流れの検証を行い、妥当な結果を得た。また、鋳造方案の検討に利用し、方案形状の違いによる流動の相違を確認し、方案設計検討に利用できることを確認した。また、計算時間は1ケースあたり3日以内であり、当初の目標を達成した。

2-2 凝固収縮シミュレータのインターフェース開発

理化学研究所 VCAD プロジェクトで開発した凝固シミュレータは、有限要素法に基づいている。したがって、流動解析とは異なるデータ構造の解析モデルとなる。このため、流動解析の結果を凝固解析の初期値として用いるためには、データ変換が必要となる。本年度は、データ変換の方法について検討を行った。

2-3 構造解析シミュレータの導入

本年度は鋳造湯流れ解析シミュレータの開発に注力し、本サブテーマは次年度の活動で実施する。

2-4 方案検討支援プリプロセッサの開発

湯流れシミュレーションを実施するためには、検討対象となる方案の形状データを基に、流動解析に必要な解析モデルを作成する必要がある。このためのアプリケーションを、理化学研究所で開発した解析モデル作成ソフトウェア V-Xgen を基に、方案検討のためのポリゴン編集機能を追加し、短時間で解析モデル作成処理ができることを確認した。

③ 解析結果の検証と物性データベースの構築

3-1 溶湯物性値のデータベース構築

鋳造流動解析にあたり、熔融金属の動粘性係数や凝固温度などの物性値のデータベースを構築し、解析に利用する。研究開発手段としては、北陸軽金属工業と理研で物性値の調査を行い、XML 形式にてデータベースを構築した。

3-2 シミュレーション結果の検証と適用ガイドラインの策定

砂型アルミ鋳造部品による流動、凝固、収縮、構造解析の各シミュレーションソフトウェアの開発に対し、簡易形状、中程度複雑形状、複雑形状の3段階の試験モデルを準備し、これによる鋳造テストを行う事により得られる砂型鋳型内への溶湯充填速度や充填時の温度測定、その他試験鋳造に際する各種のデータ計測を行った。各種の計測により得られたデータは、鋳造シミュレーションソフトウェア開発の重要なデータとしてフィードバックし、各段階毎に試験鋳造条件を変更し実施した。

各段階で行われた試験鋳造では、薄肉、複雑形状化、一体成形化等の鋳造技術を確立する事も目的としており、**図1-5**に示す第3段階の試験モデルに於いては、製品平均肉厚2mmの鋳造品の鋳造方案技術を開発し、この鋳造品に対する湯廻り性は95%と判断する。第3段階試験モデルにおける鋳造歩留り率は約90%となっており、目標95%は未達成となった。また、目標とする製品肉厚寸法公差では、第3段階試験モデルに於いて平均 ± 0.4 mmと目標 ± 3.5 mmに対して未達成の結果である。また、局所的な複雑形状化が求められる電気自動車等の鋳造部品に対応を可能とするため、局所的な複雑形状化鋳造品の試験鋳造も実施した。この結果、現時点では約95%以上の湯廻り性が確認されたと共に、鋳造歩留り率も95%以上の結果となっている。

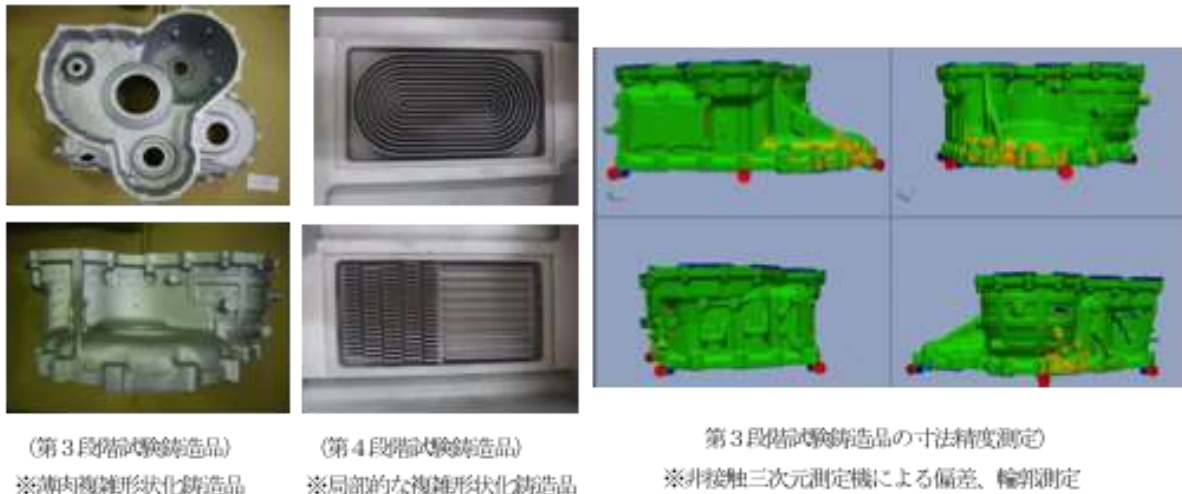


図1-5 複雑形状鋳造品への適用

1-4 当該研究開発の連絡窓口

北陸軽金属工業株式会社 経営企画室

〒369-1211

埼玉県大里郡寄居町大字赤浜字後古沢138-2

電話番号 048-582-2880

ファクス番号 048-582-1077

E-mail : t-sasaki@hokurikukeikinzoku.co.jp

: j-furukawa@hokurikukeikinzoku.co.jp

第2章 本論

2-1 シミュレーションの鋳造製造プロセスへの適用検討

(北陸軽金属工業、理化学研究所、アドバンストアルゴリズムシステムズ)

砂型アルミ鋳造部品の鋳造製造プロセスにおいて、木型製作工程、試鋳工程、本鋳造工ミュレーション技術を導入することにより、鋳造品質、鋳造日程、鋳造コスト等に対して導入効果を反映できうる最適な鋳造製造プロセスの選定を目指した。

鋳造製造プロセスにおける鋳造シミュレーション適用検討については、現在の鋳造プロセスについて再認識する必要がある。このプロセス分析に際して、各部門の研究員による現状把握、問題点や課題等のヒヤリング、過去に発生した工程毎の不良発生要因等を含め、細部に渡る検討を実施した。

鋳造製造プロセスの現状分析

現在の鋳造製造プロセスにおいて、技術、製造、品質の各研究員により現在の鋳造製造プロセスについての詳細把握と現状分析を行った。

現在の鋳造製造プロセスの検証

鋳造製造プロセスにおける品質不良要因についての調査を実施した。品質不良要因の検証では、過去3期に生産した鋳物部品についての不良発生数、不良要因を細部確認集計し、このデータを基に鋳造製造プロセスで発生した品質不良要因を特定した。

シミュレーション鋳造製造プロセスへの適用検討において、現在の鋳造製造プロセスの再認識、及び、過去3期の鋳造製造プロセスにおける不良要因特定についての検証を行った結果、下記内容が明確となった。

- (イ) 現在の鋳造製造プロセスに於いては、試鋳工程での寸法検査、内部品質検査等の洗出しと対処が本鋳造生産される鋳物部品の品質安定化を大きく左右する。
- (ロ) 現在の鋳造製造プロセスに於いては、予め定められた製作日程が短期間であることから、品質確認等についての対応が非常に難しい。
- (ハ) 過去3期に渡る品質不良発生要因の分析結果では、内部品質不良が50%以上を占めており、内部品質不良発生の原因は基本となる鋳造方案に起因する事が再認識された。
- (二) 内部品質に関する品質不良発生要因として、湯廻り不良、巣の2要因が最も多く、この不良要因は鋳造方案に起因する事が再認識された。

以上の分析結果から、鋳造製造プロセスに対するシミュレーションの適用は、寸法精度、内部品質確認が行われる試鋳工程に対して適用する事が最適である事が確認された。

2-2 鑄造シミュレータ群の整備

2-2-1 熱流体シミュレータの2相流解析機能追加

(アドバンストアルゴリズムシステムズ、理化学研究所)

理化学研究所で開発した三次元非定常熱流体シミュレータ C3D¹をベースに、大密度差の計算が可能な気液2相流解析機能を開発、追加した。二つの異なる物性を持つ物質が接している界面を持つ流体（本事業で考慮しているのは、空気と溶湯）の非定常流れを解析する。 δ 関数を用いて連続的に2相の物性が変化すると仮定して非圧縮流体を解く。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

それぞれの時刻と位置での気相と液相両方を表す密度を ρ ($=\rho(r, t)$) 体積を V としている。ここで、気相と液相の密度を ρ_g 、 ρ_l とし、それぞれ定数であるとする。 ρ は次の式で表される²。

$$\rho = \rho_g H(\phi) + \rho_l (1 - H(\phi)) \quad (2)$$

ここで、 $H(\phi)$ は以下で定義されるヘビサイド関数である。

$$H(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi < -\varepsilon \\ \frac{1}{2} + \frac{\phi}{2\varepsilon} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi\phi}{\varepsilon}\right) & -\varepsilon \leq \phi \leq \varepsilon \\ 1 & \varepsilon < \phi \end{cases} \quad (3)$$

ここで $H(\phi)=0$ が液相、 $H(\phi)=1$ が気相にあたる。また Φ は符号付距離関数 (Signed Distance Function、以下 SDF) である。この $\Phi(r, t)$ によって、気体と液体の界面を定義していることになる。ここで、 2ε は仮想的な気液境界面の厚さを持っており、実際の界面に厚さは無いが、この界面の幅によって計算を安定化することができる。

解くべき式は、以下の(4)～(8)式である。

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \left[\nabla \cdot (\mu \nabla \otimes \vec{V} + \mu \nabla \otimes \vec{V}^T) \right] + \vec{g} \quad (4)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (6)$$

$$\rho = \rho_g H(\phi) + \rho_l (1 - H(\phi)) \quad (7)$$

$$\mu = \mu_g H(\phi) + \mu_l (1 - H(\phi)) \quad (8)$$

¹ <http://vcad-hpsv.riken.jp/jp/>

² Kang [4]

これらの式は、 $\phi < -\varepsilon$ で、完全に気相の物性を持った非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式に一致し、 $-\varepsilon < \phi < \varepsilon$ で、完全に液相の物性を持った非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式に一致し、全体として質量の保存が満たされている。

界面の SDF は式(6)に従って、時間発展する。

初期状態において

$$|\vec{\nabla}\phi| = 1 \quad (9)$$

であるが、移流により、時々刻々上の式は成り立たなくなっていくため、(9) 式が常に成立するように再初期化を行う必要性が生じる。そこで、次の式で再初期化を行う³。

$$\frac{\partial\phi}{\partial\tau} = S(\phi)(1 - |\nabla\phi|) \quad (10)$$

ここで、

$$S(\phi) = \frac{\phi}{\sqrt{\phi^2 + \delta^2}} \quad (11)$$

これにより、 $\phi = 0$ の界面は変わらず、(9) 式を満たす再初期化が可能である。界面捕捉を行う Fast marching method⁴を実装した。

液体金属の表面張力を考慮する必要があるため、式(12)の表面張力項を導入した。連続表面力 (CSF) モデルを用いて表面張力を実装した。CSF モデルは以下の式を (4) 式の右辺に加えることでその効果を表すことが出来る。

$$\frac{\sigma\kappa}{\rho}\delta(\phi)\vec{N} \quad (12)$$

ここで σ は表面張力係数であり、 κ は曲率である。 $\vec{N}$ は $\phi(\vec{r}, t)$ に対する法線ベクトルで、

$$\vec{N} = \frac{\vec{\nabla}\phi}{|\vec{\nabla}\phi|} \quad (13)$$

$$\kappa = -\vec{\nabla} \cdot \vec{N} \quad (14)$$

式中の $\delta(\phi)$ は以下で定義される関数である。

$$\delta(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi < -\varepsilon \\ \frac{1}{2\varepsilon} + \frac{1}{2\varepsilon} \cos\left(\frac{\pi\phi}{\varepsilon}\right) & -\varepsilon \leq \phi \leq \varepsilon \\ 1 & \varepsilon < \phi \end{cases} \quad (16)$$

上記の方程式は、Fractional step 法により解析する⁵。

³ Setian [6]

⁴ Osher [2, 3]

⁵ Harlow, Riken [5, 7]

形状表現として、従来の Voxel による内部境界に加えて、Signed distance function による、内部境界を実装した。Signed distance function (以下、SDF と略記) により内部境界を実装することにより、圧力の定義点 (セル中心)、速度の定義点 (セル面中央) における SDF に対する法線ベクトルを容易に取得でき、それをを用いて、内部境界 (SDF=0 の曲面) における境界条件を満たすように、最近接外部点の物性値を設定した。その際、流れ内部の物性値は、その点を含む直方体を構成する 8 点から Trilinear interpolation により求めた。図 2-5 に上記の方法による形状表現の様子を示す。また、図 2-6 には重力場での気液界面のスロッシングの様子を示す。これらの結果から、プログラムの妥当性が判断できる。

鑄造方案 A、D の 2 ケースについて方案部分の検討を行うため、理化学研究所にて開発した三次元非圧縮熱流体シミュレータを用いて流動解析を実施した。タイプ A は従来実務で用いてきた方案のパターンである。タイプ D はストーク部からの流れ易さを考慮した形状とした。これらの形状データ (STL フォーマット) から、ボクセルモデルを作成した。作成した格子は、2mm のボクセルサイズで約 3500 万セル (257x322x425) である。計算条件として、ストーク部分の速度を 3cm/sec で与えている。

鑄込み開始後 15 秒の時の方案部分の流速の大きさの分布をみると、タイプ A では方案部分で溶湯が活れており、青色の低速部分が多いが、タイプ D では意図どおり、スムーズな流れとなっていた。

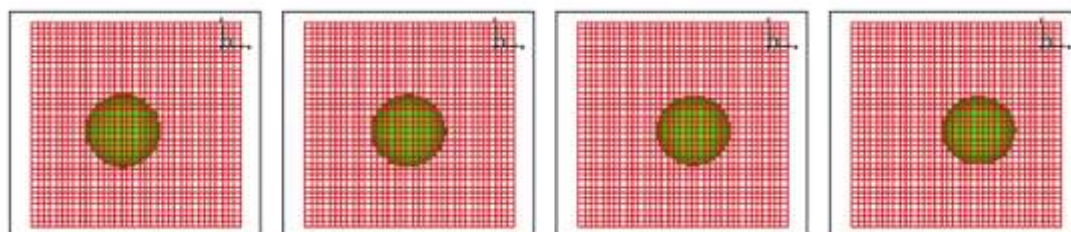


図 2-5 界面補足のテスト結果。左から右に形状が移動していく様子を表現している。

図 2-7 の断面の速度分布の様子からは、タイプ A の方はストーク部分から方案部分の流速が比較的高く、渦ができていくことがわかる。一方、タイプ D ではストークから方案部分の流速は比較的小さく、乱れが少ない。図 2-8 には、鑄造開始後 15 秒後のときの溶湯の温度分布の様子を示す。タイプ A は流速が小さいため、まだ湯がまわっていないことがわかる。これより、タイプ D の方が湯まわり性の点で好ましいと思われ、シミュレーションにより傾向の違いを見ることができる。

図 2-9 は、溶湯の鑄込み開始後からの非定常な挙動を示す。湯の移動を温度分布で可視化している。この湯の回り込みの時間的な変化を観察することにより、どの部分から充填され、どの部位で最後まで充填されないかといった内部品質に支配的な要因を把握することができる。実際には、図 2-9 に示す画像はムービー化され、時間軸方向の変化が分かり易く提示されている。

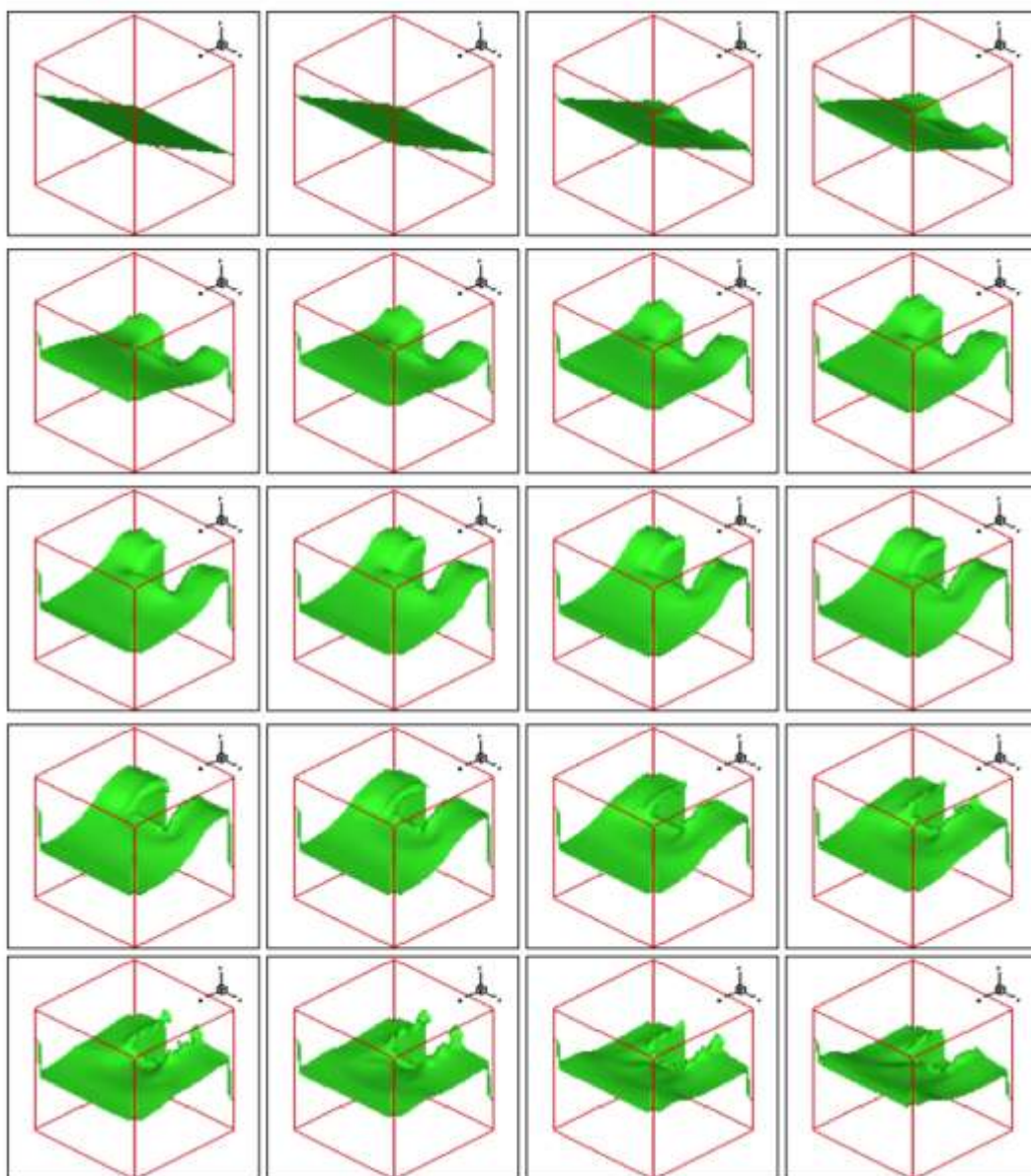
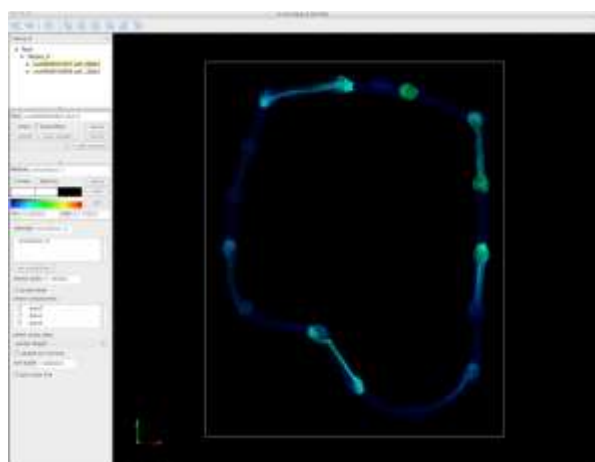
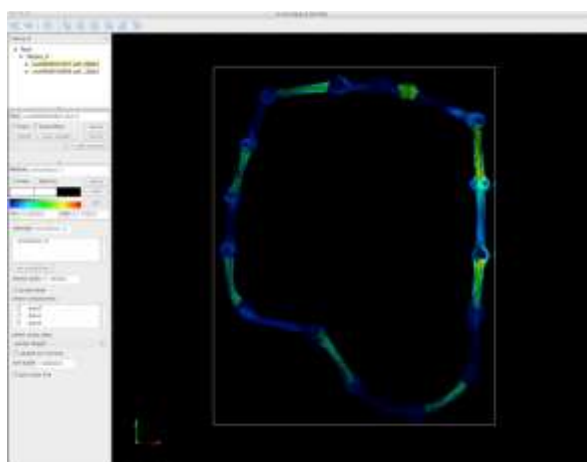


図2-6 重力場における障害物を伴う気液界面の挙動のシミュレーション

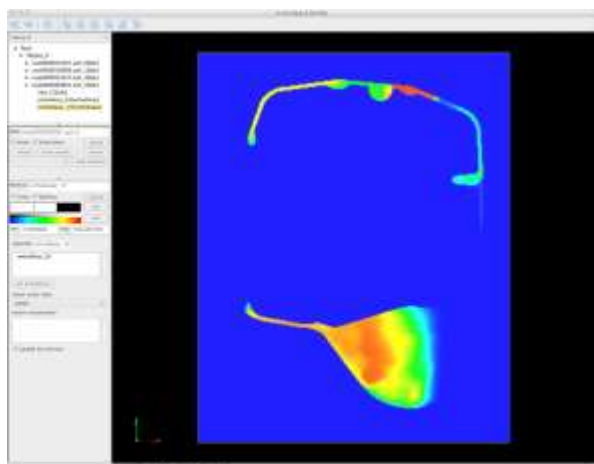


(a) タイプA

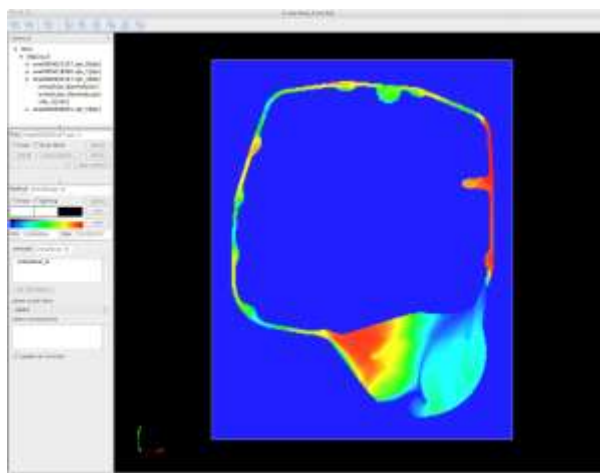


(b) タイプD

図2-7 断面流速分布の比較



(a) タイプA



(b) タイプD

図2-8 温度分布の様子

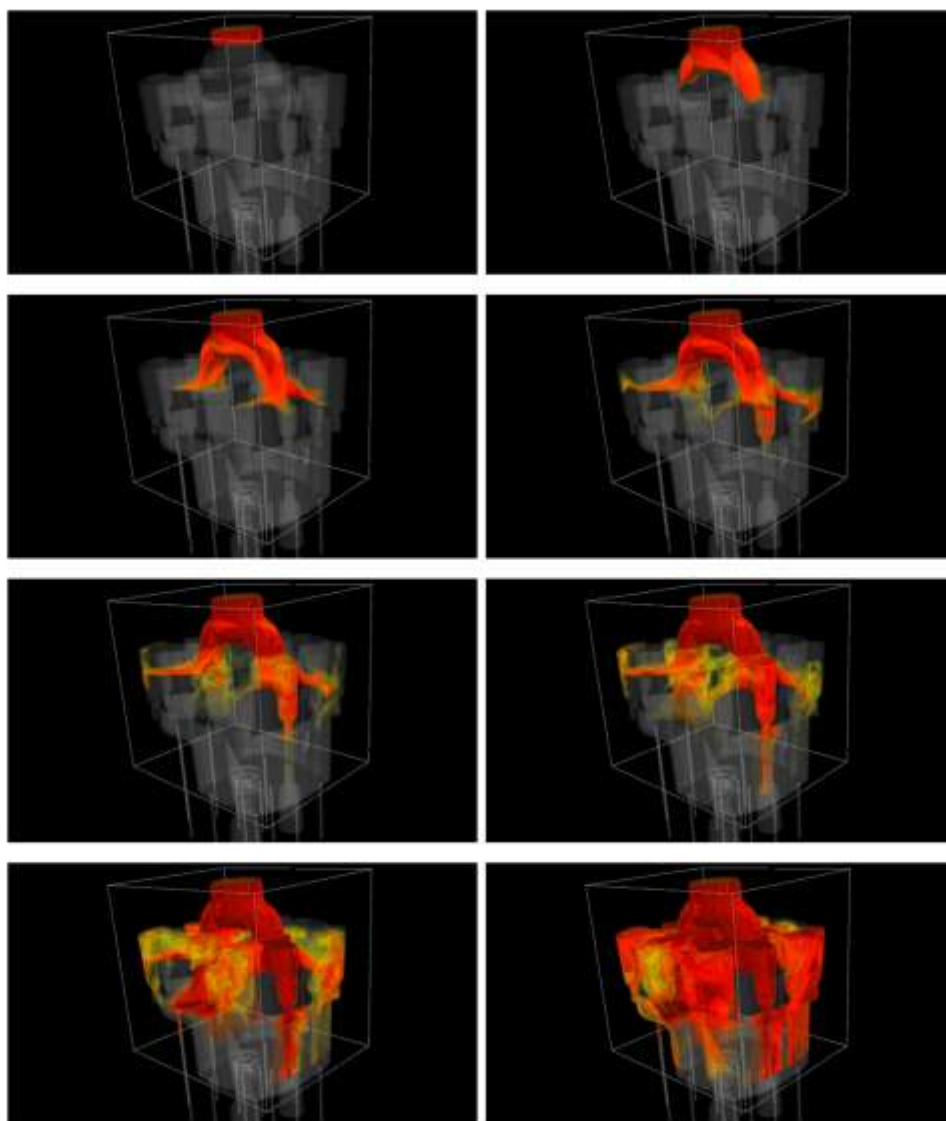


図2-9 溶湯の非定常な挙動の可視化

2-2-2 凝固収縮シミュレータのインターフェース開発 (理化学研究所)

理化学研究所 VCAD プロジェクトで開発した凝固シミュレータは、有限要素法に基づいている。したがって、流動解析とは異なるデータ構造の解析モデルとなる。このため、流動解析の結果を凝固解析の初期値として用いるためには、データ変換が必要となる。本年度は、データ変換の方法について検討を行った。データ変換方法は、2 つの格子系間で相互の格子点の位置関係を基に、三重線形内挿による補間によりデータを受け渡す方式とする。探索・補間アルゴリズムを以下に示す。

1. 全ての FEM 格子点に対して、以下の処理を行う。
2. FEM 格子点の座標から、その点がボクセル格子のどのセルに含まれるかを判定。
3. 内挿係数を求め、物理量を補間し、FEM 格子上の値として保存する。

2-2-3 構造解析シミュレータの導入 (北陸軽金属工業、理化学研究所)

本年度は鋳造湯流れ解析シミュレータの開発に注力し、本サブテーマは検討段階とし、次年度の活動で実施する。

2-2-4 方案検討支援プリプロセッサの開発 (北陸軽金属工業、理化学研究所)

鋳造湯流れ解析に必要なボクセルモデルを作成するプリプロセッサを開発する。理化学研究所にて開発したボクセルモデル作成ソフトウェア V-Xgen をベースに鋳造解析の境界条件指定などに必要なポリゴンの操作機能を追加開発した。図 2-10 にアプリケーションの画面を示す。図にはサンプルの鋳造方案形状が表示されている。アプリケーションの左側には読み込まれた幾何形状ファイル (STL フォーマット) のファイルリストが示されている。

解析モデル作成処理としては、形状データを選択し、形状を構成するポリゴン要素の中から境界条件を与えるポリゴン要素のみを抜き出し、別グループとして境界条件 ID を設定する。作業性を向上させるため、ポリゴンのグループ管理機能やポリゴン操作機能を開発した。この処理の後、ボクセルモデルを生成する。

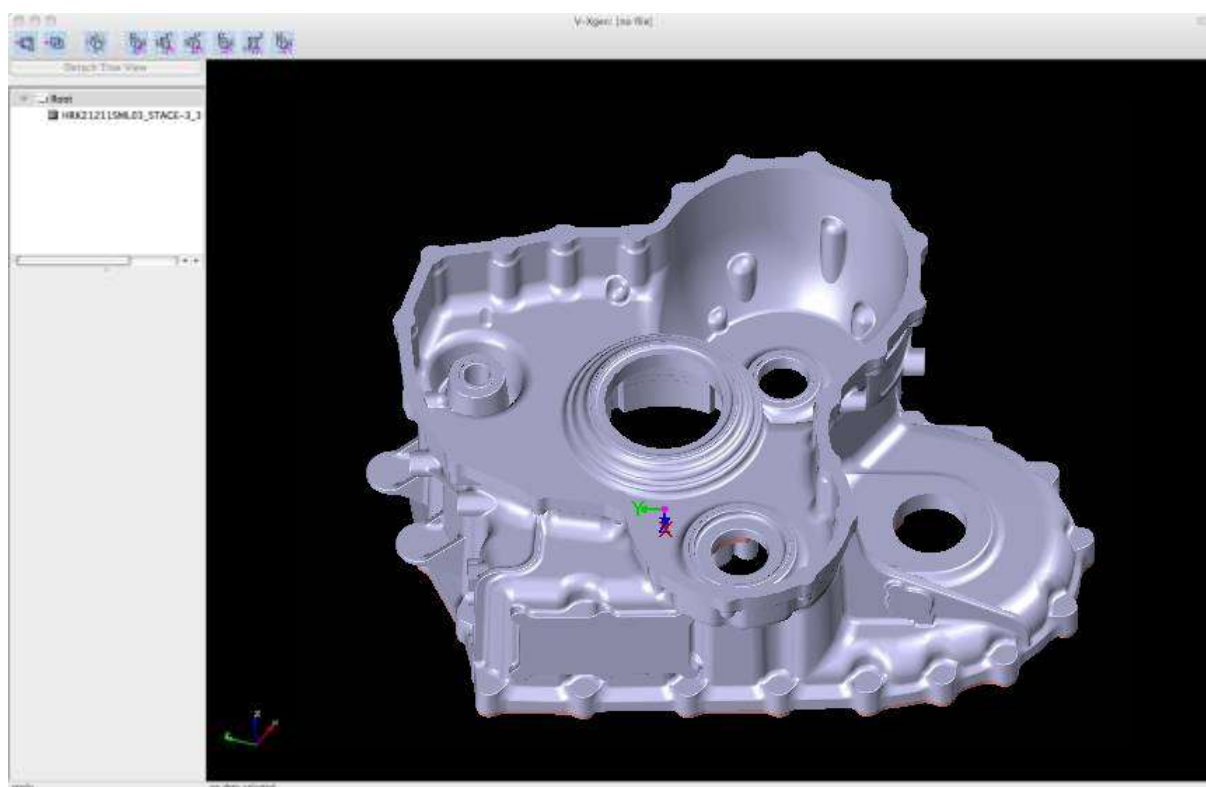


図 2-10 V-Xgen の操作画面

2-3 解析結果の検証と物性データベースの構築

2-3-1 溶湯物性値のデータベース構築

(北陸軽金属工業、理化学研究所、アドバンストアルゴリズムシステムズ)

鑄造流動解析にあたり、溶融金属の動粘性係数や凝固温度などの物性値のデータベースを構築し、解析に利用する。研究開発手段としては、北陸軽金属工業と理研で物性値の調査を行い、データベースを構築した。これらのデータは、シミュレータで用いる XML 形式のパラメータに変換され、入力データとして利用する。データベース構築にあたり、まず国内外の文献調査を行った。複数の文献にて重複する場合は、併記した上で状況によって精度の良いものを選ぶようにしている。

湯流れシミュレーションに必要な物性値、すなわち動粘性係数や密度などは、理科年表や新編熱物性ハンドブック（日本熱物性学会編、養賢堂）などで容易に参照できるが、昨今のインターネットを介したデータベース化の進展により、利便性はもとより大規模・多種データへのアクセシビリティ等も増している。とくに、液体金属の物性値については主として低温融体のアルカリ金属に限定されるが、通常は高温下で困難な測定を伴う金属の液体物性については新編熱物性ハンドブックでも単純物質の部分的な掲載に留まり、系統的な収集にはデータベース利用が有利である。熱物性⁶⁾に掲載されている「熱物性データベース特集」の記事では、次のような国内外の流体熱物性に関するデータベースサイトを紹介している。

- 1) 産業技術総合研究所は、分散型熱物性データベースから約 3,600 物質、約 10,000 件の熱物性データを提供している⁷⁾。
- 2) 九州大学が提供する PROPATH は関数型の汎用熱物性値プログラムパッケージで、物質名を指定すれば各種流体の熱物性値を簡便に求めることができる⁸⁾。
- 3) 米国 Purdue 大学 CINDAS は国外データベースで広く使用されており、Aerospace 構造材料、Microelectronics 材料とともに、5,000 種類の材料データを提供している。例えば登録されているアルミとその合金は 120 種類に及ぶ⁹⁾。
- 4) 宇宙航空研究開発機構 JAXA は、微小重力環境利用において顕在化するマランゴニ対流（液体表面の表面張力で駆動される）の調査目的に作成した「高温融体物性文献リスト」を公開している¹⁰⁾。

これらデータベースにより、鑄造用アルミ合金の液体物性データ（粘性係数、熱伝導率、密度、熱容量、エントロピー、エンタルピー等）を温度と共に取得した。

また、砂型中の流動から凝固に至る過程では状態図も考慮した凝固組織計算を視野にいれ、この分野で広く利用される熱力学データベース「CALPHAD」「Thermo-Calc」等を利用する。他の合金は PROPATH や 2 元・3 元状態図データから推定、作成する。

⁶⁾ 熱物性 Vol. 47, 48 [8, 9]

⁷⁾ <http://riodb.ibase.aist.go.jp/TPDB/DBGVsupport/> [10]

⁸⁾ <http://www.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/system/library/PROPATH/PROPATH.html> [11]

⁹⁾ <https://cindasdata.com/> [12]

¹⁰⁾ <http://idb.exst.jaxa.jp/jdata/00009/199601J00009010.htm#> [13]

2-3-2 シミュレーション結果の検証と適用ガイドラインの策定

(北陸軽金属工業、理化学研究所、アドバンストアルゴリズムシステムズ)

鋳造シミュレーションソフトウェアの鋳造プロセス適用を行うに際して、流動・凝固・収縮・構造解析の各シミュレータ開発を行うためのアウトプットデータ採取を目的として試験鋳造を実施した。試験鋳造に用いる形状は、簡易形状、中程度に複雑な形状、複雑形状の3段階の試験形状を準備し、特に薄肉、複雑形状の鋳造物に対する試験鋳造を行う。薄肉、複雑形状の鋳造物の試験鋳造に対しては、鋳造物に対する湯廻り性向上、品質向上を目的とした鋳造方案設計の検証と、各シミュレータ開発に対するデータ採取を目的とした温度測定、鋳型温度、その他試験鋳造に際する鋳造データも含みアウトプットする。これらの結果をデータベース化する事により、シミュレータ適用のガイドライン策定を行う。

第1段階試験鋳造では、シミュレーションソフト開発の基本データ採取を主目的として、試験鋳造を実施する。第2段階試験鋳造では、薄肉鋳造を目指した鋳造方案検討のためのテストトライと、シミュレーションソフトウェア開発に対するデータ採取の両面を目的として実施した。

第1段階試験鋳造

[試験方法]

第1段階の試験鋳造では、鋳造シミュレーションソフト開発の基本となるデータ採取が基本目的となるため、試験形状に付される鋳造方案については、

(A 方案) 試験形状に対して湯廻り性が良好で、内部品質に関する欠陥が発生しにくい鋳造方案設計

(B 方案) 試験形状に対して湯廻り性に乏しく、内部品質に関して欠陥が発生しやすい鋳造方案設計の2通りとなる。

この試験鋳造による鋳造手法は、機械制御により砂型鋳型内に溶湯を充填する低圧鋳造設備を用いて行う。また、試験鋳造に際しては、予め決定した採取データ項目について測定を行った。

[試験鋳造条件]

第1段階に於ける試験鋳造は、シミュレーションソフト開発に対するデータ採取を基本目的とするため、溶湯充填時の流動、凝固等について極端な差異が発生する事を想定した鋳造条件とした。

[試験結果]

試験鋳造形状は平均肉厚が4 mmに設定されて、この試験鋳造では(A 方案)、(B 方案)の湯廻り性、内部品質について両極端な現象が発生する条件とした。第1段階の試験鋳造では16通りの鋳造条件により累計48台の試験鋳造を行い、都度データを採取した。採取したデータ並びに試験鋳造品はソフトウェア開発チームに供給を行った。試験結果として、各16通りの試験鋳造品の注湯時温測定が完了し、また、鋳造条件による極端なデータ採取を行う事が出来た。図2-11に試験鋳造品の外観を示す。



図2-11 第1段階試験鋳造品事例

第2段階試験鑄造

[試験方法]

第2段階試験に用いる試験鑄造形状は第1段階鑄造形状と同様であるが、平均肉厚2mmとする薄肉形状とした。試験鑄造に用いる鑄造方案は第1段階同様、

(A 方案) 試験形状に対して湯廻り性が良好で、内部品質に関する欠陥が発生しにくい鑄造方案設計

(B 方案) 試験形状に対して湯廻り性に乏しく、内部品質に関して欠陥が発生し易い鑄造方案設計の2通りとした。試験鑄造に際しては予め決定した採取データ項目について測定を行った。また、平均肉厚2mmであることを考慮し、試験鑄造毎の湯廻り状況を確認しながら鑄造条件、鑄造方案を変更し行った。

[試験結果]

第2段階の試験形状に対する湯廻り性向上については当初困難な状況であったが、鑄造方案設計、鑄造条件の見直しによる試験鑄造を都度行い、また同時に、シミュレーションソフト開発に対するデータ採取も計画通りに行う事ができ、最適な鑄造方案設計並びに鑄造条件の構築が可能となった。

第3段階試験鑄造

第3段階に於いては薄肉複雑形状化に対応可能な砂型低圧鑄造技術の開発を主たる目的として、同時にシミュレーションソフトウエア開発のデータ採取も含み行った。これにより第1段階、第2段階で行ってきた試験鑄造データを踏まえながら最適な鑄造方案、鑄造条件を構築する。

[試験方法]

試験鑄造形状は第1、2段階とは全く異なり、平均肉厚2mmとする薄肉、且つ複雑形状となる。鑄造方案は基本案1種類に絞り込み、鑄造条件について2通りの条件を策定し試験鑄造を行った。また、試験鑄造に際しては予め決定した採取データ項目について測定を行った。

[試験結果]

[1. 試験鑄造品の湯廻り性の評価]

第3段階試験鑄造における主たる目的は、平均肉厚2mmの薄肉及び複雑形状な試験鑄造形状に対する湯廻り性向上を目指しており、最適な鑄造方案設計並びに鑄造条件について都度試験鑄造毎に、試験鑄造品現品に対する品質確認を行ってきた結果、**図2-12**に示す第3段階試験形状が完成となった。



図 2-12 第3段階試験鑄造品（完成品）

[2. 試験鑄造品の肉厚評価]

第3段階試験鑄造では、目標とする肉厚 $2\text{ mm} \pm 0.35\text{ mm}$ 以内の肉厚公差についての評価検証を行った。評価方法としては、第2段階より平均肉厚について平均 2 mm に変更したことから、第3段階試験鑄造における試験鑄造品の肉厚評価と関連付け、各試験鑄造ロット毎に抜き取り評価を行った。肉厚測定箇所は予め基準位置を定め肉厚測定器により測定を行った。図2-13に肉厚測定箇所を示す。

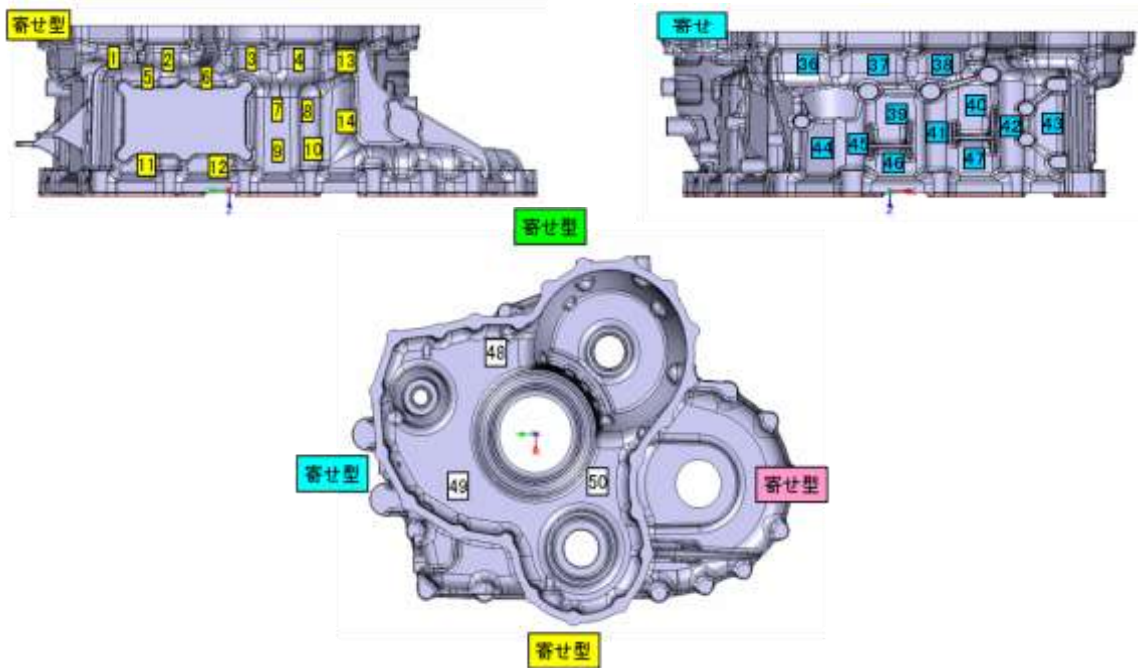


圖 2-13 第3段階試驗鑄造品肉厚測定箇所例

第3段階試験形状は複雑形状となっており、砂型鋳型の組立構造も複雑となっている。また、組立後の砂型鋳型の変形、砂型鋳型の乾燥工程における変形等、組立構造が複雑化する事により部分的な変形等が発生し易い可能性が大きいと推測される。砂型鋳型に溶解された溶湯を充填する際に発生する鑄造歪についても肉厚変異の要因となっており、砂型鋳型の構造が複雑化するに従い、溶解された溶湯の凝固収縮による影響も大きくなる事も推測される。

第3段階試験形状についての最終的な試験評価結果としては下記内容となっている。

※第3段階試験形状の肉厚公差目標値 平均肉厚2mm ±0.35mm

○実績値 : 平均肉厚2mm ± 0.4mm
○肉厚測定変位率 : 47箇所肉厚測定に対して88%

最終的に平均肉厚に対する47箇所における肉厚変位率は88%の結果となり、最終的な肉厚目標には達成する事が出来なかった。

[3. 試験鋳造品の内部品質評価]

第3段階試験形状については、湯廻り性、肉厚変位量の試験評価を行ったが、砂型鋳造品の重要な品質要求として、鋳巣等の内部品質における評価も重要となる。試験鋳造品の評価に於いては内部品質について都度 X 線観察装置を活用し、内部欠陥の発生し易い箇所について重点的に評価を行った。図 2-14 に示す X 線観察装置により内部欠陥の発生し易い、また、類似する鋳造品について顧客より求められる内部品質要求の高い箇所を X 線観察装置による非破壊検査を行った。図 2-15 に実際の透視像を示す。

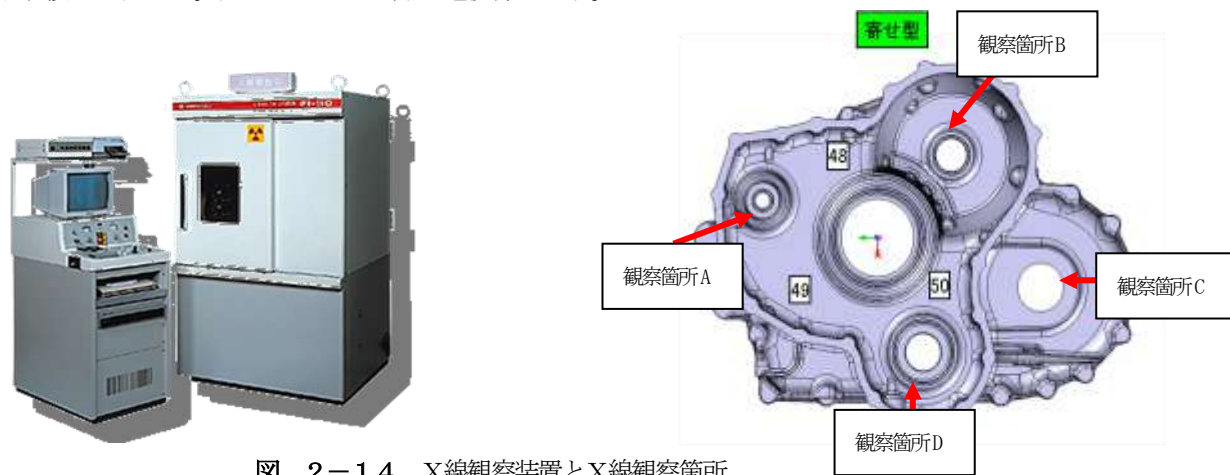


図 2-14 X線観察装置とX線観察箇所

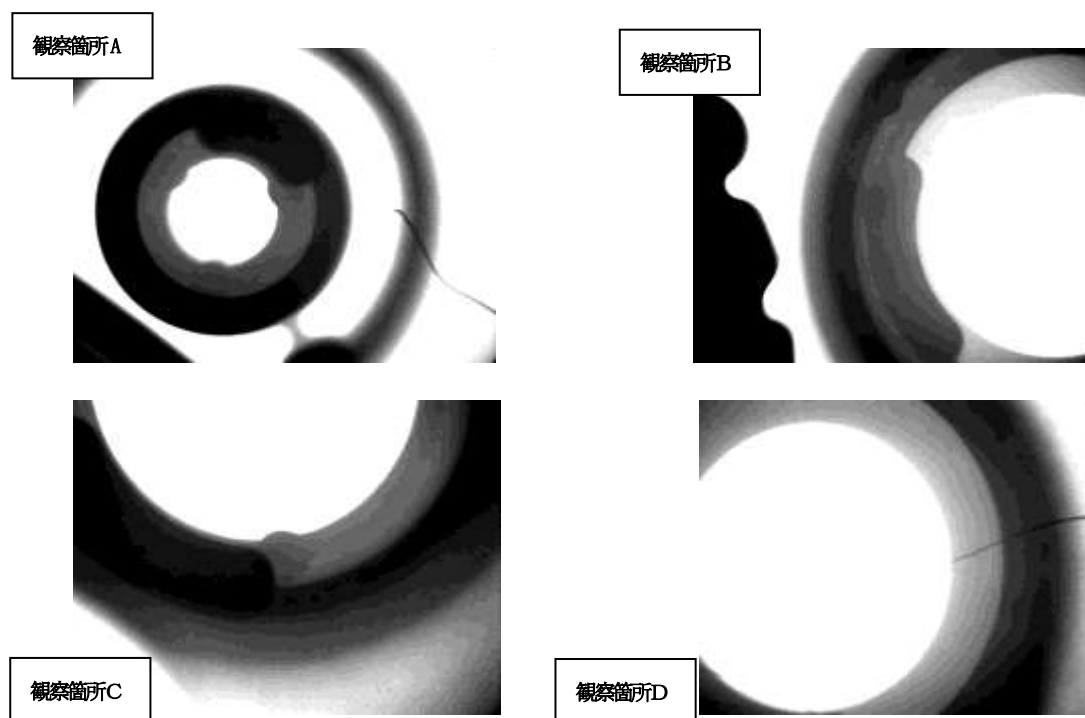


図 2-15 X線観察装置による実透視像

また、内部品質の非破壊検査評価方法として浸透探傷検査があり、試験鋳造品について図 2-16 に示す浸透探傷検査を行い、全体的な内部品質に関する欠陥発生は確認されなかった。

最終的な第3段階試験鋳造品における内部品質評価では、鋳巣等の内部欠陥の発生は確認出来ず、健全な状態と判断された。



＜試験鑄造品への浸透探傷液塗布＞



＜浸透探傷液洗浄乾燥後の現像液塗布状態＞

図 2-16 試験鑄造品浸透探傷検査

[4. 試験鑄造品の輪郭度の評価]

本研究では、砂型低圧鑄造技術の開発として、最終的に実用を目的とした薄肉で複雑形状な試験鑄造品の湯廻り性並びに肉厚寸法精度の向上に関する研究開発を行って来た。薄肉並びに複雑形状な鑄造品では、目的とする形状に対する輪郭変位についても重要な課題と認識している。輪郭度については鑄造品の歪や変形についての重要な案件でもあり、今後の研究開発を継続する上での課題として認識し評価を行った。

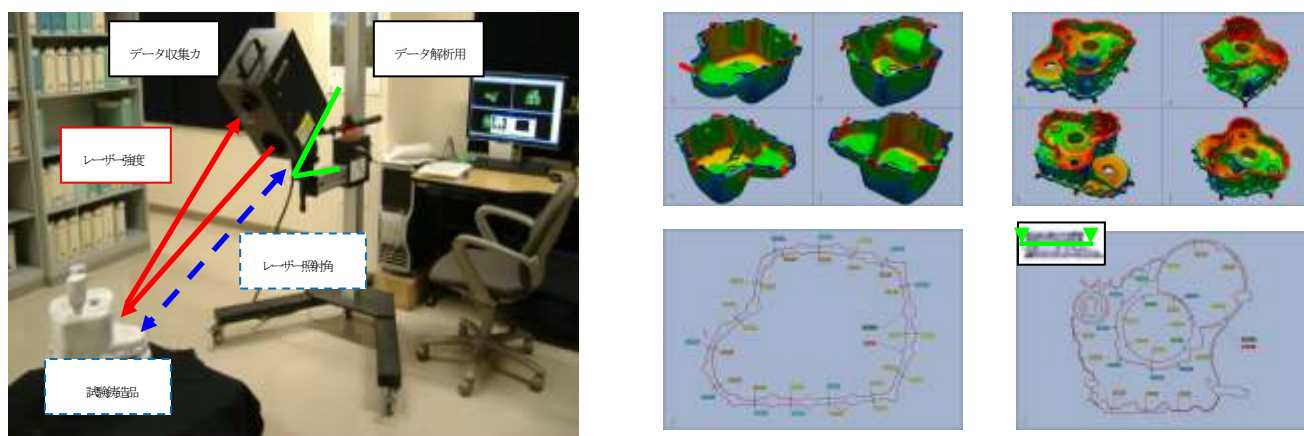


図 2-17 非接触三次元測定機による試験鑄造品の輪郭度評価事例

試験鑄造品における輪郭度評価では、図2-17で示すレーザースキャン方式の非接触三次元測定機を使用し、試験鑄造品に対する全体偏差並びに輪郭度についての評価も行った。今回実施した輪郭度測定では非接触測定を実施した数量が少ない事から明言は出来ないが、変形や歪発生の要因として次の事が推測される。

- ・砂型鑄型の複雑な組立構造と複雑形状による累積する組立寸法精度。
- ・砂型鑄型内に溶解された溶湯を充填する際に発生する凝固伸縮による要因。
- ・砂型鑄型に溶解された溶湯充填凝固後に行う砂型鑄型崩壊作業時の外的応力。

今回行った非接触測定機による輪郭度評価では、試験鑄造品の測定数不足や試験鑄造品の砂強度、また、砂型鑄型の崩壊作業等、その他多くの要因から発生すると推測し、今後の研究課題としていきたい。

ガイドラインの策定

適用ガイドラインの策定

砂型アルミ鑄造部品による流動、凝固、収縮、構造解析の各シミュレーションソフトウェアの開発に対して、簡易形状、中程度の複雑形状、複雑形状の3段階の試験モデルの試験鑄造により必要データを採取する事が出来た。また、試験鑄造は各段階毎に鑄造条件を変更し、これに対する解析計算との結果比較を実施する事が出来た。この採取データの検証により、シミュレーション適用のガイドラインが策定可能となった

最終章 全体総括

本研究開発では、鑄造湯流れシミュレータの開発、シミュレーションの鑄造プロセス適用検討、シミュレーションの精度検証のためのデータ採取、薄肉部品鑄造のための鑄造データ取得などを推進した。構造解析と凝固解析については鑄造湯流れシミュレータの開発に注力したため検討段階に留まり、次年度の研究に引き継ぎ、研究開発を進める。また、シミュレーション精度検証のためのデータ採取と薄肉部品鑄造の為の鑄造データ取得を目的とした段階的な試験鑄造では、薄肉複雑形状な試験形状に対する各鑄造データ並びに鑄造条件についての研究ができ、且つ、試験形状品についても当初予想を上回る湯回り性を確認する事ができ、一層の砂型低圧鑄造技術と局所的な複雑形状化に対する技術向上が可能となった。総合的に当初目標の8割程度を達成した。

尚、今後の事業化展開として、薄肉・複雑形状砂型鑄造品製造技術については、北陸軽金属工業が主体となり、理化学研究所と共同で確立された技術の開発を継続していくが、既にサンプル品による川下ユーザへのPR活動を開始しており、多くの反響、引き合いを獲得している。研究開発期間終了後は設備投資等により、供給体制を整備し、事業を推進していく。

鑄造シミュレーションソフトウェアにおける事業化については、研究開発期間終了後、理化学研究所が主体となりベンダの選定、資金やサポート体制の確保等、検討を行う必要があると認識している。また、ユーザとなる鑄造業界に対しては、北陸軽金属工業が、解析結果の提供による競合品に対する優位性のPR等を展開していく。

参考文献

- (1) <http://vcad-hpsv.riken.jp/jp/>
- (2) Osher, S. and Setian, J., 1988. “Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on hamilton-jacobi formulations”, J. Comp. Phys., 79(1), pp. 12-49.
- (3) Osher, S. and Fedkiw, R., 2002. The Level Set Method and Dynamic Implicit Surfaces, Springer-Verlag, New York.
- (4) Kang, M., Fedkiw, R., Liu, X.-D., 2000. “A Boundary Condition Capturing Method for Multiphase Incompressible Flow”, J. Sci. Comput., 15(3), pp. 323-360.
- (5) Harlow, F. and Welch, J., 1965. “Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface”, Phys. Fluids, 8(1), pp. 2182-2189.
- (6) Sethian, J., 1996. “A Fast Marching Level Set Method for Monotonically Advancing Fronts”, Proc. Nat. Acad. Sci. 93, pp. 1591-1595.
- (7) user guide of C3D solver class ver. 1.2.3 Functionality Simulation and Information Team VCAD system research program RIKEN
- (8) 熱物性、通巻47号 (Vol.14, No.2, April 2000)
- (9) 熱物性、通巻48号 (Vol.14, No.3, July 2000)
- (10) <http://riodb.ibase.aist.go.jp/TPDB/DBGVsupport/>
- (11) <http://www.cc.kyushu-u.ac.jp/scp/system/library/PROPATH/PROPATH.html>
- (12) <https://cindasdata.com/>
- (13) <http://idb.exst.jaxa.jp/jdata/00009/199601J00009010.htm#>
- (14) JIS B 0403 付属書3 アルミニウム合金鋳物の普通寸法