

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「耐熱鋳鋼複雑薄肉化のための減圧注湯法の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 北海道経済産業局

委託先 財団法人 北海道中小企業総合支援センター

目 次

	頁
第1章 研究開発の概要	2
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	4
1-1-1 研究開発の背景	4
1-1-2 研究開発の研究目的及び目標	6
1-2 研究体制	7
1-3 成果概要	10
1-3-1. 減圧注湯法による試作成果	10
1-3-2. 減圧注湯プロセスの開発成果	11
1-3-3. 製造設備仕様の策定成果	11
1-4 当該研究開発の連絡窓口	12
第2章 研究開発の内容	12
第3章 研究開発結果	14
3-1 減圧注湯プロセスの開発	14
3-1-1 減圧注湯予備実験結果	14
3-1-2 鋳造シミュレーション予備実験およびシミュレーション結果	18
3-2 減圧注湯法による試作結果	25
3-2-1 スタッキングトレイ実体試作結果	25
3-2-2 スタッキングトレイ内部調査	29
3-2-3 スタッキングトレイ形状計測結果	30
3-3 減圧注湯設備仕様の指針	30
第4章 結果のまとめ	32
第5章 全体総括	35

第1章 研究開発の概要

自動車部品製造には熱処理は不可欠であり、これに用いられる治具は加熱急冷のヒートサイクルを何度となく繰り返す。熱処理効率向上には製品増量の為の治具軽量化、省体積化が重要であり、具体的には治具薄肉省体積化がポイントになる。しかし、熱処理治具材料は鋳鉄ではなく高合金鋳鋼となるため、溶融金属の流れが悪く薄肉複雑化は困難であった。そこで、溶融金属の流れ改善の為の吸引（減圧）技術を用い、複雑薄肉形状の製造を可能とする研究を計画、実施した。

従来の砂型への溶融金属の注湯は、床面に直置きされた砂型への注湯であり、湯口から湯道を通り製品へと供給され、揚がり（空気抜き）によって製品中の内部残存空気を抜いていた。全てに揚がりがあるわけではなく、無い部分は内部残存空気が溶湯によって次第に加熱圧縮され、溶湯に背圧がかかる。その空気の圧力が砂型の通気度を越える圧力に達した時初めて砂型から空気が外部に排出される。従って、砂型の通気度を上げる（通気性を良くする）ことが有効であるが、通気度を上げることは、バインダー量の低減等砂型強度低下に関連し、砂型崩れ等の問題を発生させるため困難であった。

また、耐熱鋳鋼は一般に溶融温度が高く、凝固開始温度も高いため、砂型と直接接触する表面が多い薄肉複雑形状では、直ぐに凝固が始まりうまく細部にまで行き届かなかったり、鑄造欠陥（不良）が発生したりする。そのため、特に耐熱鋳鋼は、比表面積の大きい薄肉複雑形状品は通常砂型では製造できないと言われていた。

そこで、この内部残存空気を減圧によって極力排除し、残存空気の背圧を小さくして溶湯の流れを改善し、薄肉複雑形状でも細部にまで行き届く鑄造欠陥の無い製品を製造する減圧注湯法を開発することとした。下に示している熱処理治具2種類は、既存の熱処理治具で薄肉部の厚さが7～9mm程度である。熱処理治具の例2に示しているように熱処理炉の大きさで決まる体積の範囲内で、かつ重量制限もある。そのため、被熱処理物（ギヤ、プーリなど）を数多くセットするには複雑で、肉厚も薄くならざるを得ない構造になっている。

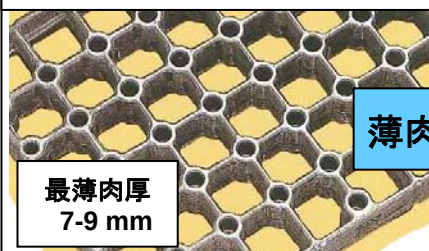


熱処理治具の例 1



熱処理治具の例 2

従来熱処理治具の例

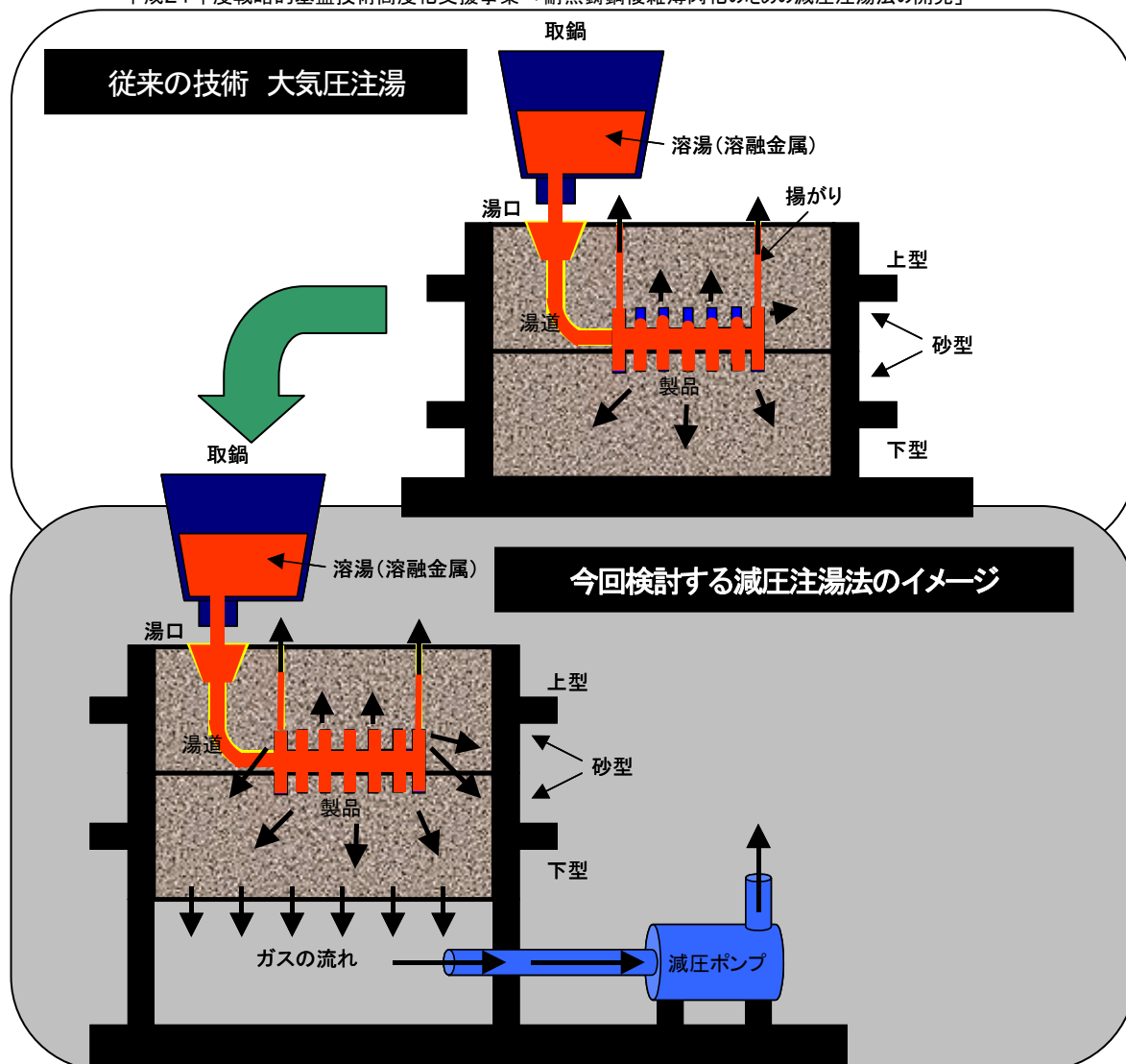
最薄肉厚
7-9 mm

薄肉熱処理治具の例

最薄肉厚
3 mm

薄肉化

下段左図の右側に示している熱処理治具（薄肉熱処理治具の例）は、現在精密鑄造法によって主に製造されているが、高価であるため実用上あまり利用されていない。ニーズと価格のアンマッチがあった。

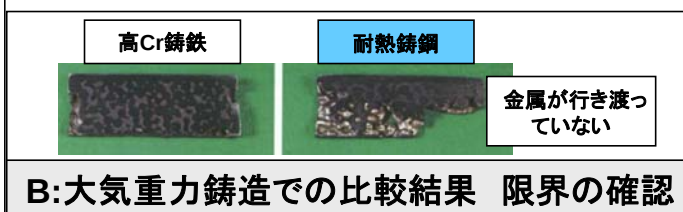
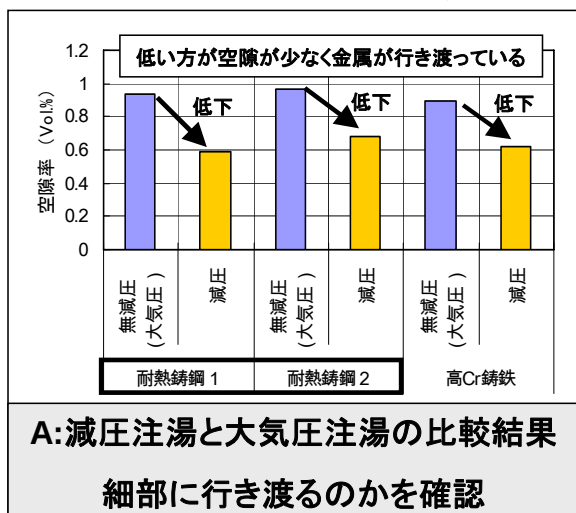


平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業 F/S支援事業の採択により

★減圧注湯のダウンサイジングした予備実験を実施することができ、減圧の有効性を本実験では確認した（試験片サイズ 30×50×22mm）

（A：減圧によって細部にまで行き渡らせる効果を確認済み）

（B：大気圧鋳造での耐熱鋳鋼材料の細部への侵入限界も確認済み）



上に示している実験Aは、減圧注湯と大気圧注湯による細部にまで金属溶湯（溶融した金属液体）が侵入するかどうかの実験結果である。空隙率で示しているが、空隙率が低い すなわち隙間のない方が減圧注湯であり、減圧による細部侵入の改善効果が確認された。

また、左下の実験Bは金属の種類の違いによって細部にまで金属溶湯が行き渡るかどうかを確認した大気圧注湯の実験結果である。この結果、耐熱鋳鋼は、他の金属種（この場合は高 Cr 鋳鉄）に比べ、同条件にて注湯しても細部にまで行き渡ることができないことを確認した。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

特定ものづくり基盤技術の高度化指針のうち、以下の項目に対応

・川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

（十）鋳造に係る技術に関する事項

1 鋳造に係る技術において達成すべき高度化目標

（1）自動車に関する事項

①川下製造業者等の抱える課題及びニーズ

ウ. 複雑形状化 オ. 軽量化 カ. 低コスト化 キ. 短納期化

・川下産業となる自動車製造においては部品の低コスト化のため、段取りの削減やチョコ停のない連続部品製造操業が求められている。多くの自動車部品製造時に必要となる連続熱処理炉は、高温保持と焼入れ時の急冷を繰り返す厳しい環境の中で使用されている。その熱処理用治具に変形、割れが生じると連続操業が出来ず、低コスト化、短納期化への妨げとなっており、治具の耐久性の向上が求められている。

さらに、治具の薄肉化（複雑形状化）、軽量化により被処理物の増量化、処理の効率化が強く求められるようになってきている。

高温及び焼入れ時の繰り返し急冷という熱履歴を受ける治具の耐久性能向上とその高合金における湯流れ改善によって複雑薄肉形状造型を可能とする技術の開発を目的としている。1000℃に近い高温及び焼入れ時の繰り返し急冷という熱履歴を受ける治具の耐久性能向上のためにはCr（クロム）やNi（ニッケル）を多く含む高合金材料を使用することが必要となる。しかし、この種の高合金は、溶融温度が高く溶湯の湯流れが悪い。そのため薄肉化や複雑形状化は困難と言われている。そこで、注湯時の湯流れ改善のため吸引（減圧）技術を用い、複雑薄肉形状の造型を可能としたい。

一方、この減圧注湯という造型方法は、一般にVプロセスと呼ばれている減圧を利用した砂型造型方法が有名である。これは、砂型を造型する時にバインダーを使用せずに減圧環境を利用した砂の硬化方法であり、環境にやさしい造型方法である。この方法は、木型に樹脂

フィルムを密着させ、その上に金枠を載せ砂充填した後、上部にもフィルムを載せて横から減圧吸引するもので、減圧によって砂型を硬化させる方法である。木型を抜型し上型と下型を合わせて鋳型とし、減圧を保持しながら注湯を行う。溶湯の凝固後に大気圧に戻す方法である。この方法では注湯時は減圧環境となるため技術としては同様であるが、本システムを導入するためには、装置一式の導入が必要であり、まだ広くは普及していないのが現状である。多くの鋳鋼鋳造メーカーは有機自硬性砂型やガス硬化型砂型であり、この砂型を用いた減圧注湯という技術はほとんど公開された報告がないのが現状である。

また、一方精密鋳造という製造方法があり、一般的にはロストワックス法と呼ばれているが、製品と同じ形をしたロウを金型で製造し、その周囲にバインダー混合砂を何層も吹き付け後高温で砂を硬化させながらロウを溶け流す方法で、そのロウが抜けた砂型に金属を鋳造する製造方法である。この方法であれば高温で砂を固めた後に鋳造するため砂型が高温のまま注湯することになるので、凝固し難く細部にまで溶湯が行き届くと言われており、この種の耐熱鋳鋼でも薄肉化は可能であると言われている。ただし、このような製造方法のため製造コストが高く、コストパフォーマンスが低いという問題があり、広く使用されてはいない。今回の熱処理治具においても治具のような消耗品にロストワックス製品は価格競争力が無く、現実的には検討対象にはなっていない。

以上の従来の肉薄鋳造製造方法との比較をまとめると以下の表になる。

肉薄鋳造 製造方法	精密鋳造法 (ロストワックス法)	Vプロセス法 (真空砂型パック法)	重力鋳造法 (一般的な鋳造方法)
製法の特徴	金型にワックス（ロウ）を流し固化したロウの外側に砂型となるスラリーへ何度かディッピングして高温乾燥し、砂型を固化すると共にロウを溶出させる。その抜けた空洞に溶融した金属を流し込み、固める鋳造方法。鋳型が高温のまま注湯するので湯回りが良く薄肉複雑鋳造品が製造可能	砂型の硬化方法がビニールシートをかぶせて上型下型別々に真空パックしたもの。注湯時の砂型崩落を防止するため注湯中には真空引きしている。金属が凝固後、真空を開放すると砂型が崩れ、ばらし作業が必要となる。また、砂型用バインダーが不要で環境やコスト低減に有効である。	一般的な鋳造法で、砂型を何らかのバインダー（水ガラス、樹脂など）を用いて硬化させその鋳型内へ注湯を行う鋳造方法。溶湯にかかる力は重力のみであり、溶湯の流れ易さと溶湯ヘッド（湯口の最高高さの位置）の高さによって圧力が決まり、高い方が圧力は高まり薄肉品には有効であるが、歩留まり低下となる。
中小企業における本製造方法導入の障害	基本的な製造方法が異なり、製造設備一式の導入が不可欠。また製造ノウハウの蓄積も必要。比較的小物製品に限られる。	基本的な製造方法が異なるため製造設備一式の導入が不可欠。また製造ノウハウの蓄積も必要。形状的な制限がある。	

以上のように、薄肉鋳造品を製造する手段は他にもあるが、その製造方法を採用することは機械設備一式の導入を意味し、大きな設備投資となる。中小企業においてこの決断は非常に大きな経済問題及び技術問題となる。そのため、既存の鋳造設備（重力鋳造法）を用いて、

+αの技術を加味することで、従来製品よりも高品質で薄肉複雑な製品を提供することが可能になる技術開発を目的としている。

本検討の主目的は、現状の砂型造型方法を用い、注湯時のみ減圧という技術を用いて、現在出来ない薄肉耐熱鋳物を製造するということであり、リーズナブルな製造技術を確立することにある。

1-1-2 研究目的及び目標

特定ものづくり基盤技術の高度化指針のうち、以下の項目に対応

(十) 鋳造に係る技術に関する事項

- ・鋳造技術における高度化目標達成に資する特定研究開発等の実施方法（高度化の方向性）
 - (1) 高付加価値化に対応した技術開発の方向性
 - (2) 軽量化に対応した技術開発の方向性
 - (3) コスト低減と短納期に対応した技術開発の方向性
- に対応し、
- ・鋳造に係る技術において達成すべき高度化目標(川下製造業者等の抱える課題及びニーズ)
 - (1) 自動車に関する事項 ②高度化目標
 - オ. 耐熱性の向上に資する鋳造技術の開発
 - ケ. 複雑形状を実現させるための鋳造技術の開発
 - サ. 薄肉化及び軽金属化を実現するための鋳造技術の開発
 - ス. コスト低減に資する鋳造技術の開発
 - シ. 品質の確保及び向上に資する鋳造技術の開発
 - セ. 短納期を実現するための鋳造技術の開発
 - ・高温及び焼入れ時の繰返し急冷という熱履歴を受ける治具の耐久性能維持向上と、その高合金鋳鋼における湯流れ改善によって複雑薄肉形状造型を低コスト高品質短納期で可能とする技術の開発。

1-1-2-1. 減圧注湯法による試作（試作設備での試行）

約800mm角金枠用吸引実験装置を試作し、肉薄部3mm製品を実際に製造することを目標とする。（自動車部品メーカー向けスタッキングトレイ）（札幌高級鋳物株式会社主体）さらに、次年度にてエンドユーザの協力を得て機能評価を行い実用上の機能を確認し、事業終了後の速やかな顧客への販売開始を目標とする。

1-1-2-2. 減圧注湯プロセスの開発（実験設備での開発）

実用形状では明確にできない肉厚限界や金属種と減圧の関係を研究し、既存砂型を用いた減圧プロセスを策定することを目標とする。F/S 支援事業ではできなかった薄肉鋳物注湯実験機を導入(近畿大学主体)し、その実験機によって減圧注湯工程の条件を検討する。また、

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業「耐熱鋳鋼複雑薄肉化のための減圧注湯法の開発」
鋳造シミュレーション等を利用して減圧注湯法の位置づけを明確（道立工業試験場と札幌高級鋳物株式会社の協同）にして、減圧プロセス最適値確立を目標とする。

1-1-2-3. 製造設備仕様の指針の策定

減圧注湯に適した真空ポンプ等の設備レイアウト計画案を作成することを目標とする。また、試作した試作品の形状を実務的かつ正確に計測するため、非接触計測（道立工業試験場）と接触計測（札幌高級鋳物株式会社）の整合性を確認しながら計測の方法を確立することも目標とする。

1-1-2-4. 総合的な目標値

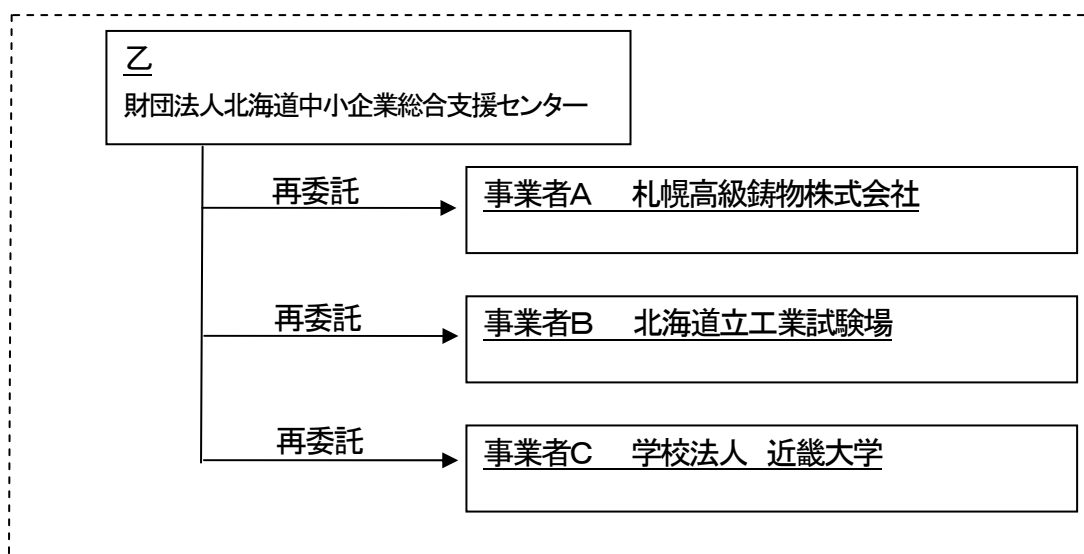
以上の技術的目標を元に、複雑かつ最肉薄部3mmの鋳造を目標とする。

（耐熱鋳鋼での通常鋳造における現行最肉薄部5mm程度，通常7～9mm程度）

1-2 研究体制

（1）研究組織及び管理体制

1）研究組織（全体）



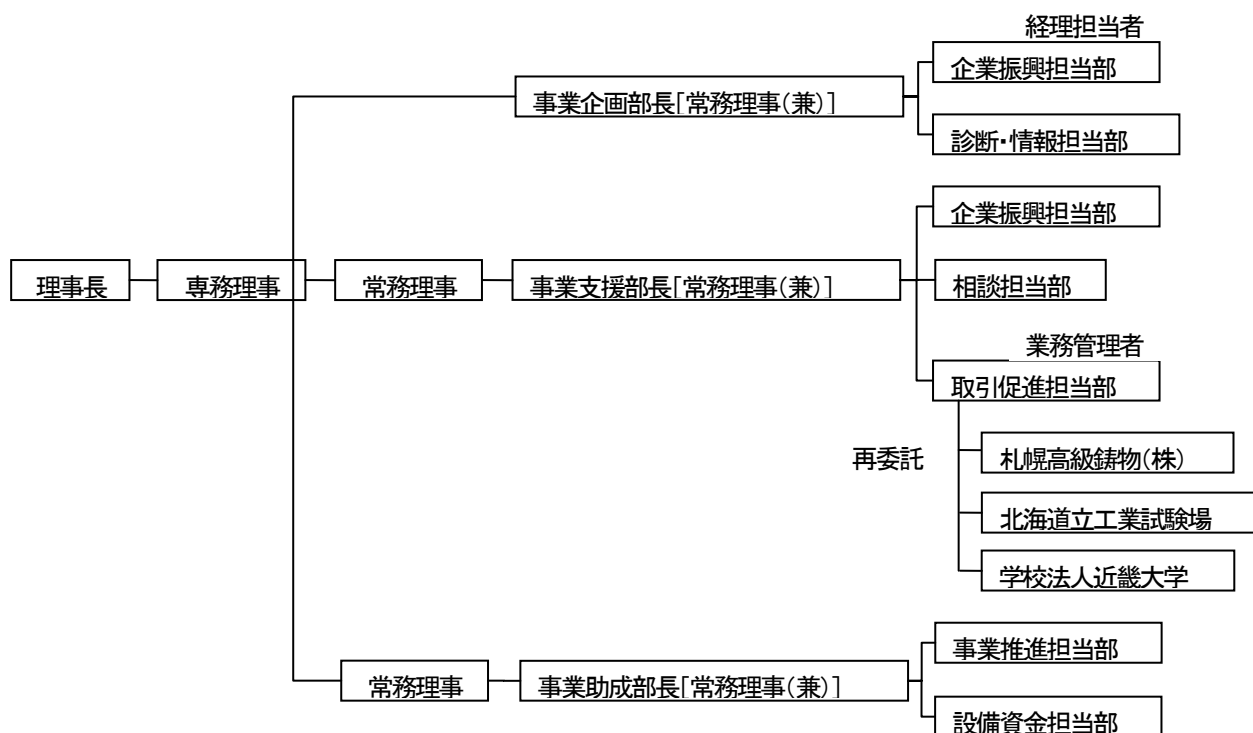
総括研究代表者（PL）
札幌高級鋳物株式会社
取締役技術開発部長
宮坂 元博

副総括研究代表者（SL）
学校法人近畿大学
理工学部 機械工学科
講師 浅野 和典

2) 管理体制

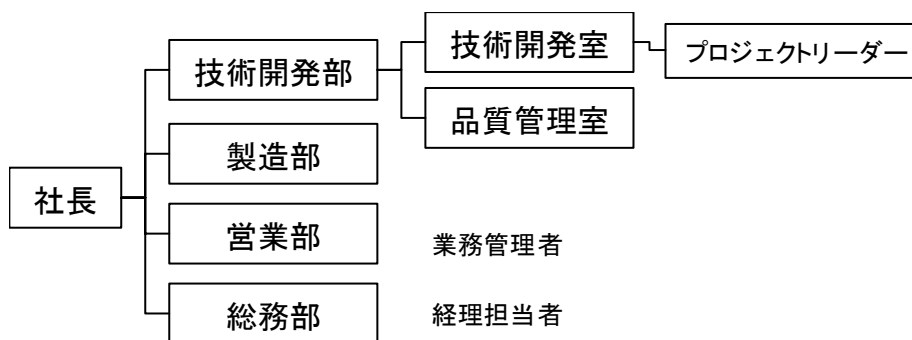
①事業管理者

[財団法人北海道中小企業総合支援センター]

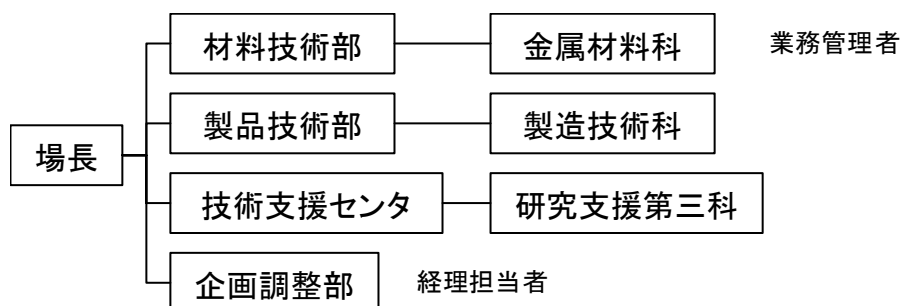


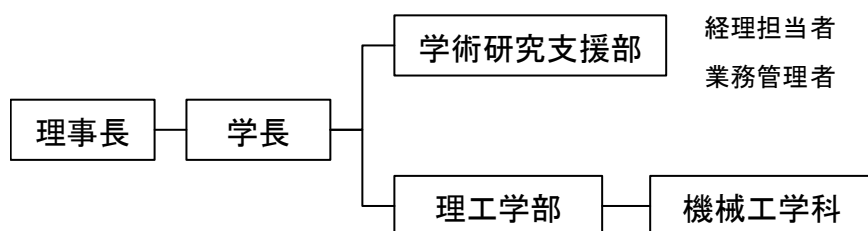
② (再委託先)

札幌高級鋳物株式会社



北海道立工業試験場





(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】財団法人北海道中小企業総合支援センター

①管理員

氏 名	所属・役職
高橋 昭彦	取引促進担当部長
澤村 光幸	取引促進担当部取引促進課長
橋本 真紀	取引促進担当部取引促進課主任
河上 剛	企画管理担当部企画管理課長
田巻 幸男	企画管理担当部企画管理課主任

②研究員

氏 名	所属・役職
な し	

【再委託先】※研究員のみ

札幌高級鋳物株式会社

氏 名	所属・役職
宮坂 元博 (PL)	技術開発部 取締役部長
藤原 政俊	製造部 部長
小椋 博樹	製造部 マネージャー
吉川 謙	製造部 部員
伊勢田 真輔	品質管理室 室員
田家 智彦	技術開発室 室員

堀 洋介	技術開発室 室員
------	----------

北海道立工業試験場

氏 名	所属・役職
宮腰 康樹	技術支援センター 研究支援第3科 科長
田中 大之	材料技術部 金属材料科 科長
戸羽 篤也	製品技術部 製品技術科 科長

学校法人近畿大学

氏 名	所属・役職
浅野 和典 (SL)	理工学部 機械工学科 講師
米田 博幸	理工学部 機械工学科 教授

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人北海道中小企業総合支援センター

(経理担当者) 企画管理担当部企画管理課長 河上 剛

(業務管理者) 取引促進担当部長 高橋 昭彦

(再委託先)

札幌高級鋳物株式会社

(経理担当者) 経理部 取締役部長 三田村 薫

(業務管理者) 営業部 取締役部長 児玉 直哉

北海道立工業試験場

(経理担当者) 企画調整部 企画調整課 研究企画係 係長 奥田 篤

(業務管理者) 材料技術部 部長 赤沼 正信

学校法人近畿大学

(経理担当者) 学術研究支援部 研究支援課 山田 英治

(業務管理者) 学術研究支援部 部長 祝原 豊

1-3 成果概要

1-3-1. 減圧注湯法による試作成果（札幌高級鋳物株式会社、北海道立工業試験場）

800mm角の金枠用吸引実験装置を試作し、最肉薄部3mm製品を実際に製造した（自動車部品メーカ向け耐熱治具）。今回ターゲットにしている耐熱治具（スタッキングトレ

イ：約400×500mm）は、砂型として800mm角の金枠を使用するため、その大きさにて実験を実施した。最肉薄部の3mm部分がある。この部分を精度良く形状を創りこむことができるかが今回の最大の目標となり、技術課題である減圧注湯と木型（金型）形状や方案（溶湯をどのように流し込むか）の最適化を目指した。今回の耐熱治具の試作は札幌高級鋳物が主になって行い、鋳造した試作品の評価は北海道立工業試験場が主に取り組んだ。

この結果、実際のスタッキングトレイ3種類は本減圧注湯設備を使用して試作し、3種類ともほぼ形状が形成できたスタッキングトレイを試作完成することが出来た。詳細は後述するが、減圧注湯の効果の確認と薄肉3mmの耐熱鋳鋼鋳造品が製造可能なことを示すことが出来た。

1-3-2. 減圧注湯プロセスの開発成果（近畿大学、札幌高級鋳物株式会社、北海道立工業試験場）

ダウンサイジングした実験装置にて大気圧鋳造に対する減圧鋳造の特性比較およびメカニズム解明を行った（近畿大学が主に展開）。実験仕様としては、トーナメント表のような形状の薄肉形状部を溶湯が通過して肉薄形状が成型できるかを実験にて確認した。最小肉厚として2mmを設定した。また、砂型の通気度を測定し、砂型からの空気の吸引のし易さを定量化した。さらに、鋳造シミュレーションを用いた大気圧注湯（通常方法）と今回検討する減圧注湯法の違いをシミュレーションとして比較検討し、湯流れの差異などを評価した。本検討結果によって実際の耐熱治具の試作や小型実験装置にも反映させるよう平行に進めた。本検討は、札幌高級鋳物株式会社、北海道立工業試験場の共同にて進めた。また、北海道立工業試験場においては、鋳造シミュレーションに必要な砂型の伝熱に関する基礎データを採取した。

この結果、通気度データにおいて実際にスタッキングトレイを試作したCO₂ガス型（VRH砂型）を用いて、通気度の傾向を把握することができ、薄肉鋳造品の試作において減圧鋳造の優位性の確認は達成できた。また、鋳造シミュレーション用の物性データを定めるための実験によって、各パラメータの傾向を把握することは出来た。また、鋳造シミュレーション湯流れ解析によって、減圧と大気圧鋳造の差異に関して排圧を考慮するかしないかによって模擬することができた。

1-3-3. 製造設備仕様の策定成果（近畿大学、札幌高級鋳物株式会社、北海道立工業試験場）

減圧注湯に適した真空ポンプ等の仕様確立を行い、最適減圧条件等を踏まえた設備レイアウト計画立案を行った。耐熱治具をお客様へ提供するための製造可能数量、効率、価格などを検討し、お客様にとって有効なコストパフォーマンスになるのかを判定した。また、試作品の形状測定に関して、非接触計測と接触計測の整合性を確認しながら実務的な計測を行い、お客様要求の製品仕様に合致するかも判定した。

この結果、札幌高級鋳物に導入した試作用設備の稼働状況を確認することにより、十分に金枠4台連結でも真空ポンプの減圧能力が達成できることを確認し、金枠のシールやシール用シートも実用に耐えることを確認した。堰ばち方式は、下注ぎ方式取鍋のノズルを用いて、

長さを短縮することで使用可能であり、何度かの使用に耐えることも確認できた。また、形状測定としては、非接触を用いるまでなく接触式3次元測定器を用いることで、簡便に各所の測定が出来ることを確認し、スタッキングトレイの出荷検査や品質確認に使用できることを確認した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理者

氏名：澤村 光幸

所属組織名：財団法人北海道中小企業総合支援センター

所属役職：取引促進担当部 取引促進課長

住所：〒060-0001 札幌市中央区北1条西2丁目経済センタービル9階

Tel: 011-232-2406 Fax: 011-232-2011

E-mail: sawamura@hsc.or.jp

(2) プロジェクトリーダー (PL)

氏名：宮坂 元博

所属組織名：札幌高級鋳物株式会社

所属役職：取締役 技術開発部長

Tel: 011-661-3333 Fax: 011-661-3292

E-mail: m-miyasaka@sapporo-kokyu.co.jp

(3) サブプロジェクトリーダー (SL)

氏名：浅野 和典

所属組織名：学校法人近畿大学

所属役職：理工学部機械工学科 講師

Tel: 06-6721-2332(5368) Fax: 06-6727-2024

E-mail: asano@mech.kindai.ac.jp

第2章 研究開発内容

1000℃に近い高温及び焼入れ時の繰返し急冷という熱履歴を受ける治具の耐久性能向上のためにはFe（鉄）をベースに20%以上のCrや10%以上のNiを含む高合金材料を使用することが必要となる。しかし、この種の高合金は、熔融温度が高く溶湯の湯流れが悪いため、現状の通常鋳造では肉厚7～8mm程度が薄肉の限界である。通常砂型を使用した薄肉鋳造を可能にする湯流れ改善には以下の考え方がある。

湯流れ改善	溶湯の高温化	振動注湯	吸引（減圧）注湯
改善内容	溶湯を高温にすると粘度が下がり、湯流れが改善される。最も一般的な方法。	溶湯と鋳型表面の表面張力（濡れ）を振動によって改善し、湯流れ改善させた方法。	注湯時に砂型等から大量発生するガス吸引し、注湯時の背圧をなくし湯流れを改善する方法

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業「耐熱鋳鋼複雑薄肉化のための減圧注湯法の開発」

他の改善方法との比較優位性	最も容易な改善方法 (現実的にはこの方法のみでは改善できていない)	比較的現実性に富む改善方法 (バッチ処理が弱点)	最も他効果(高作業効率, ガス欠陥低減, 作業環境改善)が期待できる改善方法
技術的課題	① 溶湯の高温化は砂型表面との反応等を誘発し焼き付き等の問題が起こり易い. ② 凝固時の熱収縮量が増えるので引け巣欠陥などが発生し易い.	① 加振による砂型同士の共振などによって砂型崩れなどが発生しやすい. ② 加振台の上での作業(バッチ処理)が前提となり, 作業性が低下する.	① 優先的にキャビティ部分から吸引するためには部分的なシールが必要であり, 減圧の最適化が不明. ② 吸引した空気の処理方法や管理方法が不明.

本研究開発においては, 他の効果(作業効率が良い, ガス欠陥の低減, 作業環境の改善)が期待できる吸引(減圧)注湯法により, 複雑形状かつ薄肉である耐熱鋳鋼の製造を行っていく.

(具体的対応方法)

2-1. 製造技術課題への対応

1) 減圧注湯法による試作(札幌高級鋳物株式会社主体)

実際に最肉薄部3mmの製品(スタッキングトレイ: 例538×434×155mm)を試作製造し, 現状での問題点の顕在化と減圧注湯時の細部侵入効果の確認を行う. また, 試作品のエンドユーザ(自動車部品メーカー)評価を依頼し, 機能上の問題点および製品使用の可能性を明確にする.

2) 減圧注湯プロセスの開発(実験機: 近畿大学主体)(シミュレーション: 道立工業試験場と札幌高級鋳物株式会社が主体)

ダウンサイジング(302×150×50mm: 最肉薄部2mm)した実験装置にて大気圧鋳造に対する減圧鋳造の特性比較およびメカニズム解明を行う. また, 鋳造(湯流れ, 凝固)シミュレーションによる減圧注湯法の大気注湯との差異を明確化する.

2-2. 製造管理技術課題への対応

1) 製造設備仕様の指針の策定(道立工業試験場と札幌高級鋳物株式会社が主体)

試作設備および実験装置における実験データに基づき, 設備面での仕様確立を行う. 最適減圧条件等を踏まえた設備レイアウト計画立案を行う. また, 試作品の形状測定装置に関して実務的な設備案を策定する.

(参考文献)

- 1) 新版工業炉ハンドブック: 日本工業炉協会編, 省エネルギーセンター, 平成9年11月発行
- 2) 工業炉技術者のための実用熱工学: 吉田正彦著, 平成21年1月増刷

第3章 研究開発結果

3-1 減圧注湯プロセスの開発

3-1-1 減圧注湯予備実験結果 (近畿大学)

本項では、まず減圧吸引下での種々の砂型における通気性を明らかにする。次に、実用製品を想定し、トーナメント状の鋳型に鋳鋼溶湯を注湯した場合について、薄肉部への溶湯充てんにおける減圧の効果を明らかにする。

(1) 実験条件

(1-1) 減圧吸引下での砂型の通気性 (実験1)

図1に実験方法の概略を示す。まず内径 48mm の円筒管に、砂を所定の厚さ L になるように詰め、水ガラスバインダを混合した後、炭酸ガスにて硬化させた。砂は①天然再生砂、②天然新砂 (7 号) の2種類を用いた。砂型厚さ (L) は 50~150mm と変化させた。砂型を装入したパイプを図1に示すように設置し、塗型は砂型の空気入口側に施した。真空ポンプにより砂型の出口側より減圧吸引を行う際、減圧度調整バルブで出口圧力を変化させた。砂型から 15mm の所に直径 8mm の穴を開け、そこから風速計を差し込み、円筒管内の空気の流れが定常状態になった後、空気の平均流速と差圧 (入口圧力 (大気圧) と出口圧力との差) を測定した。

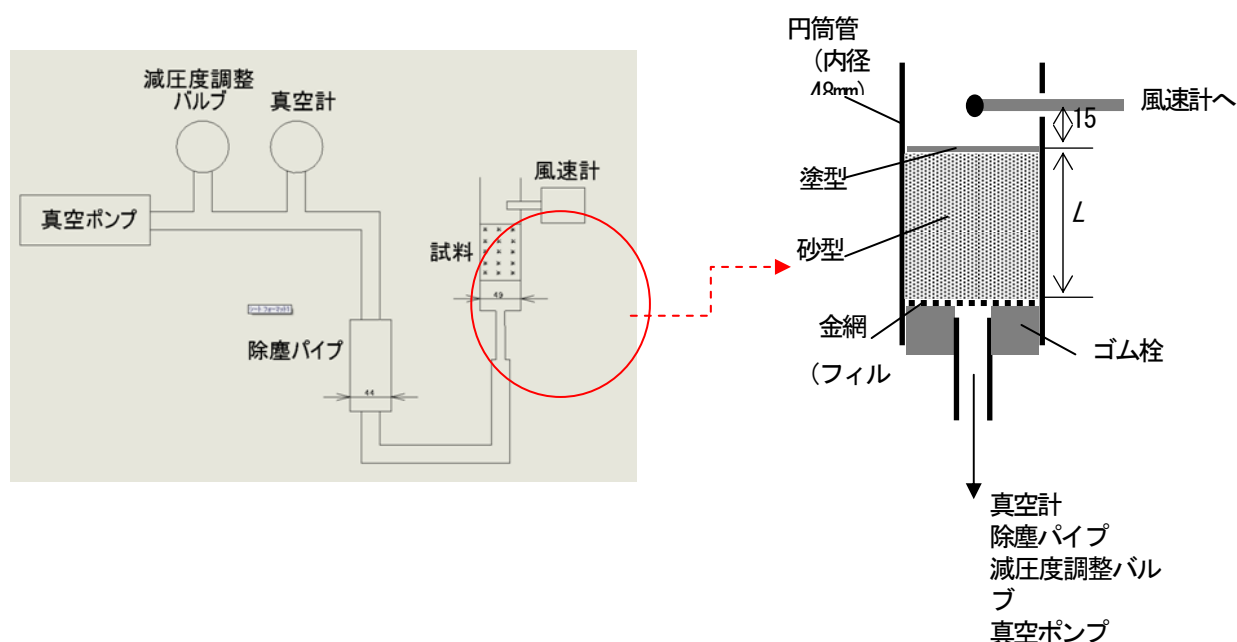


図1 砂型の通気性測定方法

(1-2) トーナメント状鋳型を用いて鋳鋼を減圧鋳造した場合の湯流れ性調査 (実験2)

図2に砂型作製に用いた木型 (キャビティ部のみアルミニウム合金製金型) の外観 (湯口、押湯部分を除く) を示す。砂型作製の際に、砂型からの抜けを容易にするため、金型部には塗型を施している。

図3に実験方法の概略を示す。砂型には炭酸ガス (CO_2) 型を用いた。7 号砂、粘結剤を混練機で混合し、上型と下型を木型と鋼枠を用いて造型し、それぞれ造型後 CO_2 ガスを通して

砂を硬化させた。なお、本砂型は、(1-1 (実験1)) で用いた②の砂型と砂・粘結剤の種類・粘結剤の配合量が同じものである。鋳鋼溶湯 (SCH13) の注湯に先立ち、図3に示すように、まずパンチ穴加工した鋼板を設置した鋼ボックスに、鋼枠に収まった上型、下型

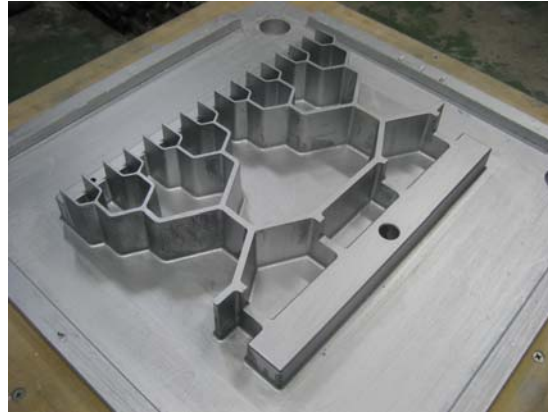


図2 砂型作製に用いた木型の外観 (湯口, 押湯部分を除く)

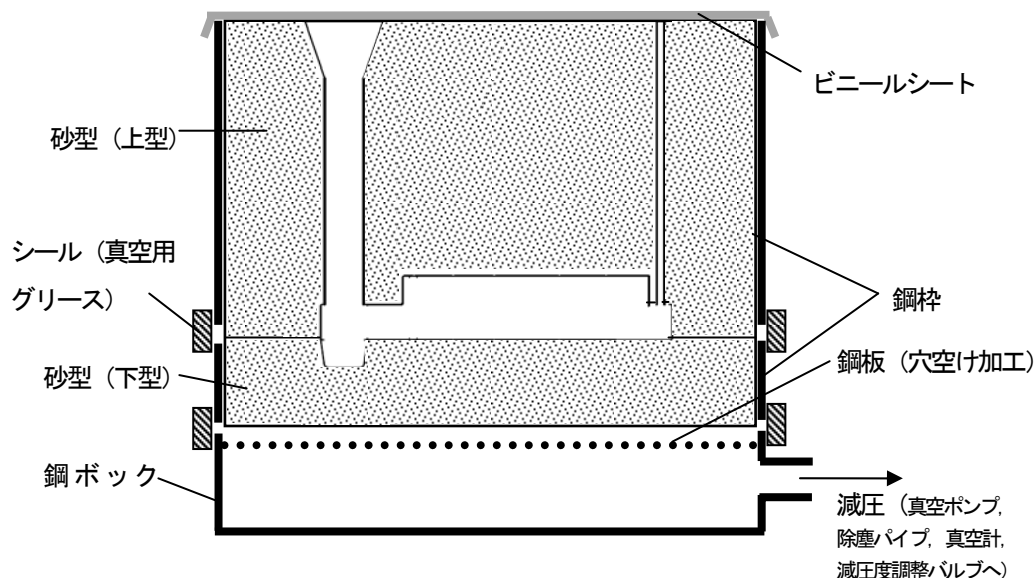


図3 実験方法の概略

を重ねた。次に鋼枠・ボックス間隙を埋めるために真空用グリースを塗布するとともに、上型上部にビニールシートをシリコン樹脂でとりつけ覆い鋳型内を密封した。鋼ボックスには吸入口が設けられており、この吸入口から、真空ポンプにより減圧ができる仕組みとなっている。減圧鋳造する場合は、外気を巻き込まずに鋳型に充填させるため、掛け堰 (堰ばち) を設けた。

鋳鋼インゴットをアルミナライニングした黒鉛るつぼ(#15)に入れ、高周波誘導炉で溶解し、スラグを若干量投入し除滓した後、1723K (1450℃) で鋳型へ注湯した。注湯の際には真空ポンプにて-60kPa まで減圧を行い、鋳型キャビティ内を減圧状態とした。

(2) 実験結果および考察

(2-1) 減圧吸引下での砂型の通気性 (実験1)

図4に天然再生砂を用いた場合の差圧と平均流速の関係を示す。同一差圧であれば、 L が小さいほど平均流速は大きくなる、すなわち L が小さいほど通気性は良好であることがわかる。また、いずれの L でも差圧と平均流速との関係は非線形であることから、砂型内を通過する空気は乱流状態であると推察される¹⁾。さらに(a)と(b)との比較から、塗型によって平均流速は低減することがわかる。

図5に7号天然新砂を用いた場合（塗型なし）の差圧と平均流速の関係を示す。平均流速の数値は全体的に天然再生砂に比べて小さい値である。これは粒径が新砂の方が小さいためと考える。また、塗型なしで差圧と平均流速はほぼ比例関係である。このような比例関係が見られる場合、空気は層流状態と推察される¹⁾。

これらの結果から、 L が大きく、微細な砂を用いた場合は砂型内を通過する空気は層流状態になりやすいと考えられる。

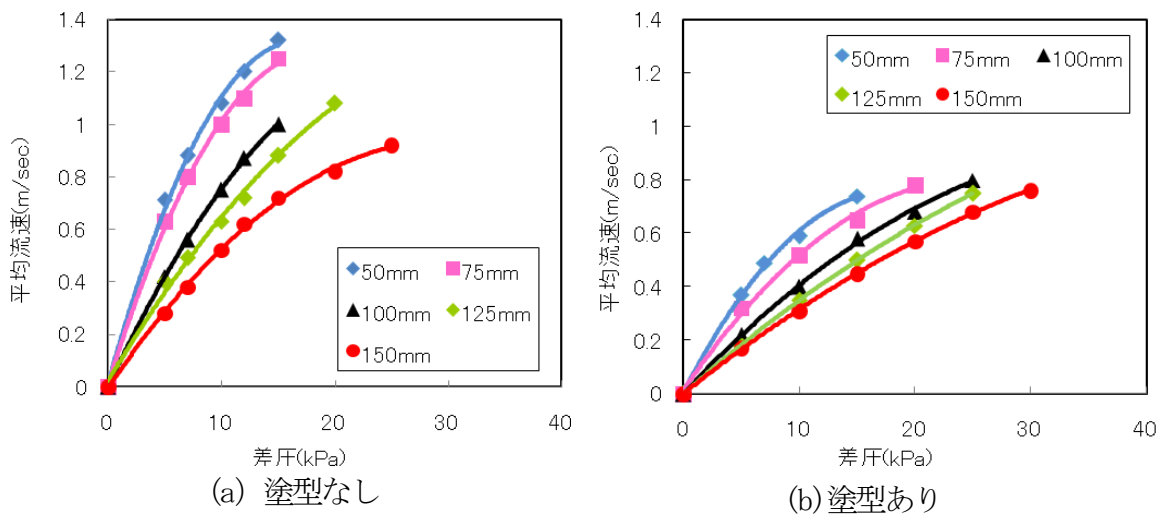


図4 天然砂再生を用いた場合の差圧と平均流速の関係（図中の凡例は L を示す）

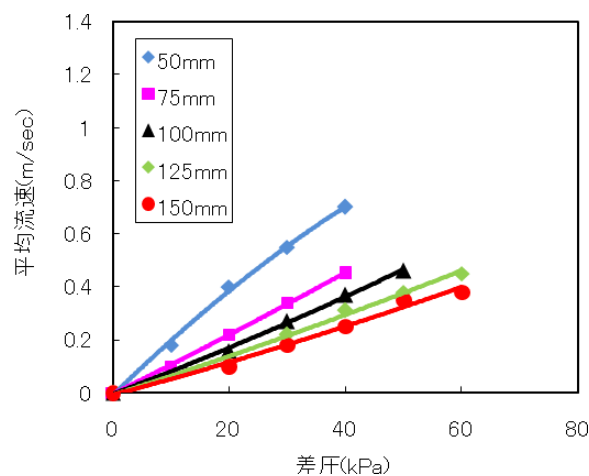


図5 7号天然新砂（塗型なし）を用いた場合の差圧と平均流速の関係（図中の凡例は L を示す）

(2-2) トーナメント状の鋳型を用いて鋳鋼を減圧鋳造した場合の湯流れ性 (実験2)

図6に鋳造後の試料の外観を示す。無減圧で鋳造した試料(図6(a))に比べ、減圧鋳造した試料(図6(b))はキャビティの先端側(肉厚の小さい側、トーナメント形状の先端側)への湯廻りが良好であることがわかる。しかし、試料の形状がやや崩れていること、バリが生じていた。減圧による溶湯の吸引力により、鋳型形状が崩れたためと考えられる。このことより、減圧により、薄肉部への湯廻り改善が得られると同時に、減圧による溶湯の吸引力に耐え得る鋳型(砂型)強度が必要なことと、適切な吸引力(減圧力)を設定することが必要であるといえる。

また試料の一部を切断し、研磨して断面を観察した結果、肉眼では減圧の有無による断面状態に大きな差は認められなかった。



(a) 無減圧で鋳造した試料



(b) 減圧鋳造した試料

図6 鋳造後の試料の外観(上から観察)

(3) まとめ

減圧吸引下での砂型の通気性実験の結果から、 L が小さく、砂の粒径が大きいほど通気性は良好になること、また塗型によって通気性は低減することがわかった。差圧と平均流速の関係から、砂の粒径が大きく L が小さいと、砂型内を通過する空気は乱流状態になりやすくなることが推察された。

トーナメント状の鋳型を用いた鋳鋼溶湯の減圧鋳造実験の結果から、薄肉部への溶湯充てんにおける減圧の効果が明らかになったが、適切な減圧力と重力鋳造以上の高い砂型強度が必要であることもわかった。

(4) 今後の検討内容

本実験では、減圧鋳造を行った場合に、砂型(砂)の変更により溶湯の充填挙動に違いが生じるかどうかの確認はできなかった。本実験で得られた砂型の通気性と鋳鋼溶湯の湯流れ性の関係解明が、今後の検討課題である。

(5) 参考文献

1) 久保公雄, 福迫達一, 大中逸雄: 減圧法による鋳型の通気度測定について, 鋳物 52 巻 7 号 (1983) pp. 25-31

3-1-2 鋳造シミュレーション予備実験およびシミュレーション結果

3-1-2-1 鋳造シミュレーション予備実験 (道工試)

(1) 試験の目的

鋳造解析において, 鋳物の熱伝導率・比熱, 鋳型の熱伝導率・比熱, および鋳物と鋳型の間の熱伝達率等の伝熱境界条件は数値計算結果に大きく影響を及ぼすため, より正確な鋳造シミュレーション解析を行うためには, これらの数値を正確に把握しなければならない。

これらのうち, 鋳物の熱伝導率・比熱等の熱物性は材料によって定まる物性値であり, これらを変更することは, 解析計算の手法としては望ましくない。一方, 鋳型の熱物性は, 鋳型に用いる骨材, 粘結材の種類, 充填密度等の条件によって異なると考えられるので, 実際の鋳造現象に計算結果を合わせるためには, これら鋳型の熱物性を適正に選んで解析条件として用いるのが合理的である。本試験は, 現行で使用する鋳型および鋳造材料の組合せにおいて, 鋳造試験における伝熱挙動を, 数値解析手法でなるべく正確に再現するための境界条件を得るため, 鋳造試験において鋳物, 鋳型の熱履歴を計測するとともに, 試験と同じモデルを用いて数値解析を行った結果と計測結果とを比較することにより, 鋳型の熱物性および鋳物と鋳型との熱伝達係数を得ることを目的とする。

(2) 実験の方法

鋳造解析に用いる境界条件として用いる数値を得るため, 試験片用鋳型に熱電対を設置し, これに金属溶湯を注湯して鋳型の温度変化を計測した。また, 試験と同じモデルで境界条件を変えて凝固解析を行い, 熱電対を設置した位置に相当する要素の温度変化と, 温度計測結果とを比較して両者が近づくような境界条件を見出した。

試験に用いた鋳型の寸法は, 外形 110mm×300mm の直方体で, その内部に幅 30mm×長さ 250mm×深さ 60mm の容積をもつ鋳型形状とした。鋳型の上部は開放とした。鋳型は CO₂ ガス型とし, 予備試験では鋳型骨材にオリビンサンドを用い, その後現行の鋳造工場で用いている珪砂を用いた。

温度計測は, 長手中央付近の鋳物の底から 20mm 高さの位置にφ3mm のストレートドリルで穴を6箇所あけ, それぞれ①鋳物内部5mm 深さとなる位置, ②鋳物表面, ③鋳型壁面, ④鋳型内部5mm 深さの位置, ⑤鋳型内部10mm 深さの位置, ⑥鋳型内部15mm 深さの位置に熱電対を設置した。

凝固解析は, 鋳造 CAE システム ADSTEFAN Ver. 11 (茨城日立情報サービス(株)製)を用い, 鋳造試験と同じ形状の鋳型と温度測定位置をモデル化して湯流れ解析, 凝固解析の際に与えるべき境界条件のうち, 鋳型の熱伝導率, 鋳型の比熱, 鋳物と鋳型の間の熱伝達率 (ADSTEFAN においては「熱抵抗」と称して, 熱伝達係数の逆数の値を設定する) の3つを

変化させ、計測結果と比較して最も近づく結果を得る条件を見出した。

また、減圧鋳造の影響を調べるための鋳造試験を想定し、湯流れ解析において減圧を考慮する場合としない場合の解析結果の差異を確認した。減圧鋳造実験に供する鋳型装置の構成および寸法を図1に示す。鋳型は、鋳型高さ 80mm の上型と鋳型高さ 150mm の下型で製作し、その下に鋳型を減圧するための箱状容器を設置する構成とした。鋳物は、幅 60mm×長さ 90mm×厚さ 3mm の薄板形状とし、その先端に溶湯を流し溜める幅 60mm×深さ 100mm の溝を設ける。温度計測は、板形状部分の中央付近に、①鋳物表面、②鋳型表面、③鋳型内部 5mm、④鋳型内部 10mm、⑤鋳型内部 15mm の位置とした。

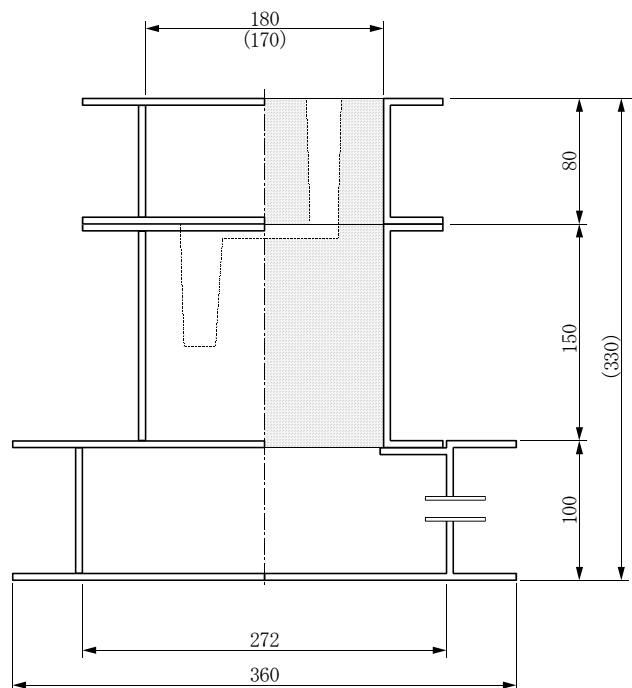


図1 減圧鋳造実験を想定した鋳型の寸法

(3) 実験の結果

(3-1) 実験による温度計測結果

前項で示した鋳型を用いて鋳造試験を行い、鋳物および鋳型の温度履歴を計測した結果を図2に示す。図2は耐熱鋳鋼を鋳込んだ試験結果を示す。

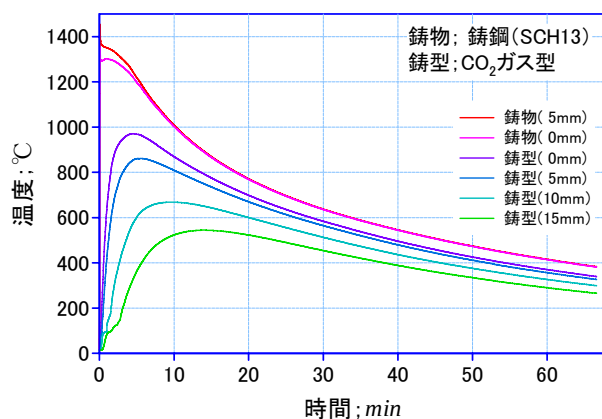


図2 温度計測試験結果（耐熱鋳鋼）

鋳物の内部5mmの位置での計測温度は、ほぼ鋳物の凝固過程における温度変化を示しており、鋳型が溶湯の熱で過熱されて昇温し、その後鋳物の冷却とともに鋳型温度が低下していく様子が捉えられている。

鋳型の温度変化について、鋳物と接する鋳型表面では鋳造後の溶湯熱によって温度が室温から急上昇し、ピークに達した後で徐々に冷却される過程が捉えられている。このときの温度のピークは、鋳型表面が最も高温で、鋳型の測温位置が深くなるにつれて低い温度となる。

鋳物の内部深さ5mmと鋳物表面の温度差が小さいのに比較して、鋳型深さが5mm異なると温度差が非常に大きい。これは、鋳物の熱伝導率より鋳型の熱伝導率が小さいためである。また、鋳型の昇温過程で、いずれの場合も鋳型温度が100℃に達したところで一度昇温が停滞し、その後再度昇温過程をたどる挙動が確認された。これは、CO₂ガス型のバインダに用いる水ガラスに含まれる水分が蒸発する際の気化潜熱に由来するものと考えられる。

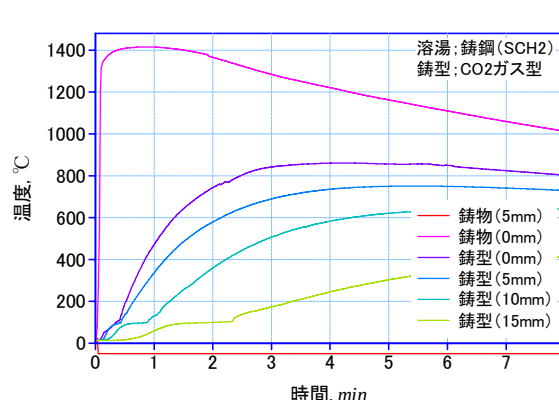
(3-2) 温度計測と解析との比較

各種パラメータの解析結果から、鋳型の比熱(C)、鋳型の熱伝導率(λ)、鋳物と鋳型の熱伝達率(h)の3つのパラメータが凝固解析結果に及ぼす影響を把握したところで、温度計測試験結果と凝固解析結果を比較し、両者がさらに近づくように絞込みを行った。

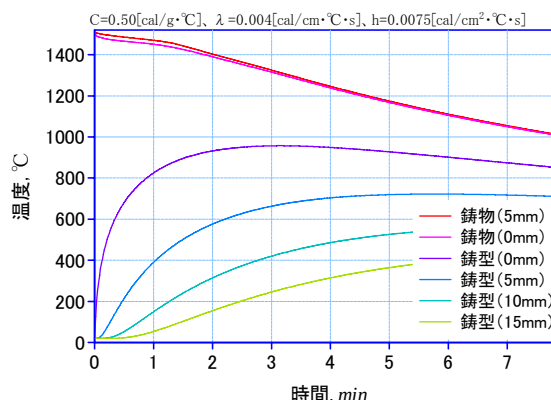
以上の結果を表にまとめると、表1のようになる。なお、オリビンサンドを用いたCO₂ガス型の場合の境界条件も参考値として付記する。

表1 鋳型材質と物性値の比較

物性値	珪砂CO ₂ 型	オリビン砂CO ₂ 型
鋳型の比熱 [cal/g・℃]	0.50	0.30
鋳型の熱伝導率 [cal/cm・sec・℃]	0.004	0.0015
鋳型壁の熱伝達率 [cal/cm ² ・sec・℃]	0.0075	0.01



温度計測結果



解析結果

(3-3) 減圧鋳造を想定した湯流れ解析

薄肉耐熱鋳鋼を鋳造する際の湯廻りを良くするため、鋳型を減圧することを検討しているが、減圧を想定した鋳造CAE（特に湯流れ解析）の定説的な手法はない。ADSTEFANでは、

様々な鋳造方法を想定した湯流れ解析条件の設定メニューが提供されているが、これらの中で減圧鋳造に関連する境界条件として、「背圧」と「溶湯流入条件」の設定が可能である。

背圧とは、鋳型内キャビティにもともと存在した空気が溶湯の注入で圧縮されたときに、鋳型の通気性が十分に確保できなければその圧縮された空気が溶湯を押し戻そうとする力として作用する圧力である。ADSTEFAN の一般の湯流れ解析では、背圧を想定せず、鋳型の通気度は十分に大きくとって流入した溶湯を押し戻すような力は発生しないことを前提に解析を行っている。しかし実際には鋳型には有限の通気性があるため、一般の砂型鋳造では若干の背圧が発生していることになる。

減圧鋳造は、見方によっては背圧を小さくする鋳造方法と考えることもできるので、一般の条件で行った湯流れ解析結果と、背圧を設定し現実に近い条件で湯流れ解析を行った結果を比べてみることにする。鋳物の形状は、減圧による湯流れ試験を想定した薄板状鋳物の吐かせ方案を用い、背圧に相当する鋳型の通気度として、ADSTEFAN の推奨値の範囲から、 $1.0 \times 10^{-8} [\text{cm}^2]$ （通気度の単位は cm^2 が用いられている）を設定し、それぞれの湯流れ解析を行った。今回の条件設定では、湯流れの解析結果に大きな差異は認められなかった。さらに、鋳物表面、鋳型表面、および鋳型内部の温度履歴を比較した。凝固解析の結果についても両者の明確な差異は認められなかった。しかしながら、実際の鋳造試験においては、減圧により注湯時間が短縮される現象が確認されているので、この現象を鋳造解析で再現するために、もう一つの「溶湯流入条件」を用いるテクニックを検討する。

ADSTEFAN の湯流れ解析において、湯口からの溶湯流入条件を設定する。一般的には、湯口と注湯口と高さの差から溶湯の落下速度を見積もって設定するが、簡易的には鋳込み容量 $V [\text{cc}]$ 、注湯時間 $t [\text{秒}]$ 、湯口の断面積 $A [\text{cm}^2]$ から

$$v = V / A t \quad [\text{cm/秒}]$$

として計算して与える。

ADSTEFAN では、溶湯流入条件の設定メニューとして湯口での流入圧力を設定することができる。条件の与え方としては、湯口に作用する圧力を大気圧の倍数で指定する。減圧鋳造は、見方によっては外から圧力を加えて鋳込む鋳造方法と考えることもできるので、一般の条件で行った湯流れ解析結果と、加圧鋳造法として設定した条件で湯流れ解析を行った結果を比べてみることにする。溶湯流入条件として与えた加圧圧力は大気圧の 1.1 倍（10%増）とした。通常の解析結果と加圧鋳造に設定した解析結果との湯流れ解析の結果、通常の鋳込みでは、約 1.2 秒で鋳込みが完了するのに対して、加圧鋳造では約 0.26 秒（4.6 倍）で鋳込みが完了し、湯口での加圧によって鋳込み時間がかなり短くなっているのと同時に、鋳型内に流入する形態も異なっていた。

鋳込み時間は、外観から計測することができるので、鋳込み圧力をパラメータとして合せ込みが可能である。したがって、減圧鋳造を想定した鋳造解析は、湯口での流入圧力設定によって再現できる可能性がある。

一方、注湯後の凝固過程における鋳物と鋳型の履歴を比較したところ、こちらはあまり大きな差異が認められなかった。

(4) まとめ

鋳造シミュレーションにおいて、鋳型の比熱、熱伝導率、鋳型壁における熱伝達率等のパラメータが冷却過程の温度変化に及ぼす影響を検証した。概論的に整理すると、鋳型の比熱が小さいほど、熱伝導率が大きいほど、熱伝達率が大きいほど、鋳型の昇温は早くなる傾向がある。ただし、熱伝導率と鋳型壁の熱伝達率の違いが鋳型の昇温状態に影響を及ぼす部位が異なり、熱伝導率は鋳型深部に、熱伝達率は鋳型表層部に大きく影響を及ぼす。

測温結果と比較すると、実測では鋳型温度の上昇速度が解析結果よりもかなり小さく、これに合わせるために、境界条件として設定すべき各物性値の値は、比熱を大きく、熱伝導率を小さく、熱伝達率を小さくするように選んでいかなければならない。

今回の実験と解析結果の比較から推測すると、珪砂を骨材とする CO_2 ガス型に耐熱鋳鋼溶湯を鋳込む場合の境界条件設定として、鋳型の比熱は 0.5 程度、鋳型の熱伝導率は 0.004、熱伝達率は 0.0075 に設定すると実際の鋳造現象に近い解析結果得られると推測される。

一方、減圧鋳造法を想定した鋳造解析において、設定できるパラメータとして鋳型の通気性を考慮した背圧や流入圧力の設定などが挙げられる。背圧の境界条件は、鋳型の通気度として与えるが、デフォルト設定では無限大の通気度が設定されており、鋳型内の空気は何の抵抗もなく鋳型の外に排出されることになる。しかしこれは、鋳型内を真空にしているに等しく、この条件だけで見ると最大限の減圧鋳造条件となる。普通に用いられる砂型の通気度から背圧を考慮した解析を行っても、デフォルト設定との明確な差異は見られなかったため、背圧で減圧鋳造条件を再現するのは困難である。溶湯流入条件（湯口圧力）は、減圧によって湯口からの溶湯が流入する際に差圧を発生させる効果を再現させるという考え方の上から適用したところ、減圧鋳造を特徴的に再現させることができそうであることがわかった。

(5) 今後の検討内容

凝固・伝熱解析の解析条件を得るため、鋳物および鋳型の実測試験結果と数値解析結果の比較を行い、これらの2つの結果が近づくような解析条件を求めたが、確度の高い近似解を得るためのパラメータ値を見出すことはかなり難しいことがわかった。

実用上、どの程度までの解析精度が要求されるかについては今後の検証を必要とするが、実際の測温と解析結果が合致しない理由として、計算モデルを単純化していることが挙げられると考える。例えば、今回の合せこみで注目した鋳型の比熱、熱伝導率、鋳物との熱伝達率の数値は、実際の鋳造では鋳型の各部位、経過時間に伴う変形、温度依存性による物性値の変動などにより、1つの値で代表させている段階で既に誤差要因を含んでいる。

しかし、これらを厳密に設定することが可能だとしてもそれに費やす労力や結果の保証という課題に見合うかどうかは甚だ疑問である。むしろ、今回の課題で解決しようとする薄肉部までの溶湯の流入状態の良否を見極めるという一点に的を絞った解析パラメータの設定方法ということを追求する方が、鋳造CAEの利用技術としては高度なテクニックとなりうるのではないかと考える。

今後は、実際に製品として製作する鋳物の形状に合わせて、鋳造解析パラメータの絞込み等の検討を進めていくべきであると考えます。

3-1-2-2 鋳造シミュレーション実験（札幌高級鋳物）

茨城日立情報サービス株式会社の鋳造シミュレーションソフトウェアADSTEFAN（アドステファン）Ver. 11を導入し、鋳造解析を実際に行った。解析対象として最も複雑であり、今回のメインの対象製品であるF用スタッキングトレイを用いて、湯流れ解析を主体に行った。

（1）解析条件

解析条件

テーマ名	表面張力 (dyn/cm)	背圧	速度 (cm/s)	時間 (sec)	メッシュサイズ (mm)	流動限界固相率
F用スタッキングトレイ(大気)	1800	タミーから	95	4.9	1.5	0.5
F用スタッキングトレイ(減圧)	1800	考慮せず	95	4.9	1.5	0.5
F用スタッキングトレイ リブ追加(減圧)	1800	考慮せず	95	4.9	1.5	0.5

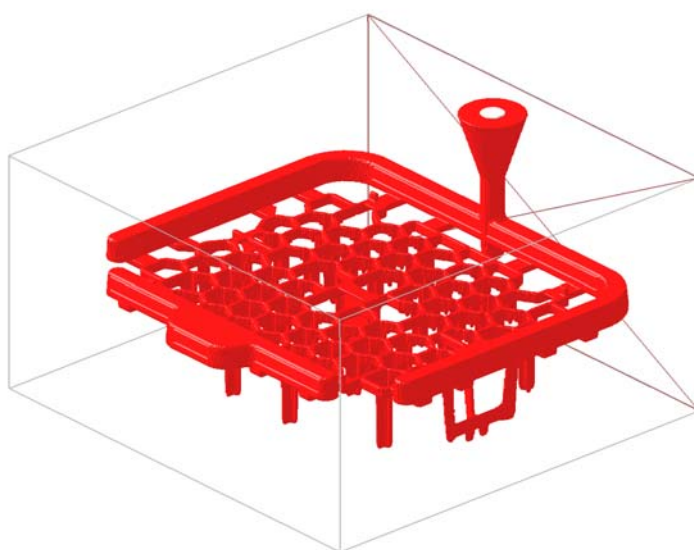
材料特性

材質	密度 (g/cm ³)	熱伝導率 (cal/cm・s・°C)	比熱 (cal/g・°C)	初期温度 (°C)	潜熱 (cal/g)	動粘性係数 (cm ² /s)	液相線温度 (°C)	固相線温度 (°C)
1.dummy(タミー):iso-air	1.0E+10	1.0E+10	1.0E+10	20	-	-	-	-
2.mold(鋳型):CO2-mold	1.6	0.001	0.25	20	-	-	-	-
3.casting(鋳物):SCH13	7.8	0.1	0.124	1530	57.5	0.008	1356	1252

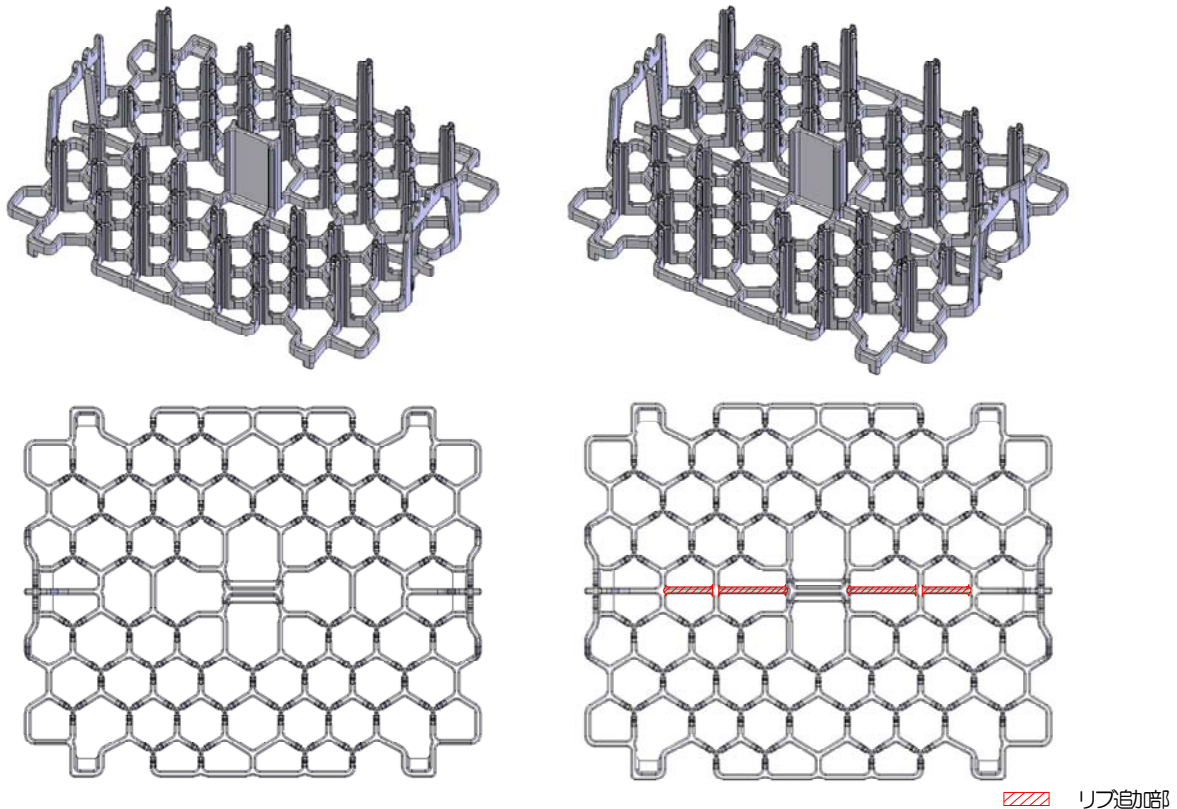
熱抵抗値 (cm²・s・°C/cal)

1.dummy/2.mold	2000
1.dummy/3.casting	4000
2.mold/3.casting	20
3.casting/gate	4000

（2）解析対象モデル（湯口系付き）



（3）解析対象製品モデル（通常品；下左図 および リブ追加品；下右図）



(4) 解析結果のまとめ

本解析結果により以下のことが判明した。

- ① 大気圧鋳造の方が、早く湯口が満ちる傾向があり、湯道が完全に満ちることが無く製品へ流れ始めるのに対し、減圧鋳造は湯道の先端から満たされながら湯口の近くが満ちていく傾向が認められた。その後の製品への湯流れは大きな差は認められなかった。これは、減圧注湯が比較的大きな径の部分には早く溶湯が満ちるのに対し、その後の肉薄細部には減圧による効果が出にくいことが分かった。
- ② 中央部の板状部分及び湯口から遠い足の長い部分に最後に溶湯が満たされることが判明した。この結果は、実際の製品試作でも同様の傾向であった。
- ③ 中央部の板状部分への湯回りを改善する目的で追加したリブ形状付きのものとの湯流れシミュレーションにおいて、その中央部の板状部分への湯回りの改善が、シミュレーション上でも確認され、比較的最早い段階で湯が回ることが確認された。また、リブ追加品は湯口が満ちるのも遅く、流体抵抗が少なくなって湯流れがよりスムーズになっているものと思われる。実際の製品試作でもリブ追加品は中央部の板状部分に湯が十分に回っていた。

3-2 減圧注湯法による試作結果

3-2-1 スタッキングトレイ実体試作結果 (札幌高級鋳物株式会社)

(1) 実験条件

(1-1) 試作製品

① F用スタッキングトレイ

(1-2) 木型, 金型

① F用スタッキングトレイ



(1-3) 減圧条件

減圧(圧力)値	湯口開放時	堰ばち方式時	堰ばち方式時 つなぎ追加
計測値	-4kPa (97kPa)	-71kPa (30kPa)	-78 kPa (23kPa)
大気圧	101. 325kPa (ポンプ能力-96kPa (5kPa))		

(1-4) 実験内容

項 目	注湯温度	真空度 (減圧度)	方 案
①	高 温	低真空 (-4kPa)	通常方案(開放)
	高 温	大気圧	通常方案
②	高 温	高真空 (-96kPa)	通常方案(蓋)
③	低 温	低真空 (-4kPa)	通常方案(開放)
	低 温	大気圧	通常方案
④	高 温	低真空 (-71kPa)	堰ばち方案
⑤	高 温	低真空 (-78kPa)	堰ばち方案(追加)

(2) 実験結果 (外観) (札幌高級鋳物)

減圧注湯の全体的な傾向として、深さ方向の深い部分(長い部分の先端部)が、湯回り不良となっている傾向がある。減圧度合いを大きくした条件では顕著であったが、鑄込み時間が短縮されている。すなわち、湯の流れが速くなっていることは確かである。この湯流れ速度の高速化による六角の骨格部分(水平方向)に優先的に溶湯が流れ、狭い隙間になっている足の長い奥部まで流れることが十分に出来なかったのではと考えている。また、湯口から減圧されながら溶湯が流れ込む際に、空気も一緒に吸い込まれながら入っていくことが考えられる。これは、溶湯と空気が混濁しながら流れ込むことが予想され、泡を抱きこみながら流れていくことも考えられる。実際、湯口に蓋をし、発泡スチロール製の蓋を溶融しながら

ら注湯した時には、空気の巻き込みと思われる欠陥も多数確認されている。減圧注湯の場合は、この溶湯の流れる速度が高いこと、空気の巻き込みがあることを考慮した注湯が必要である。

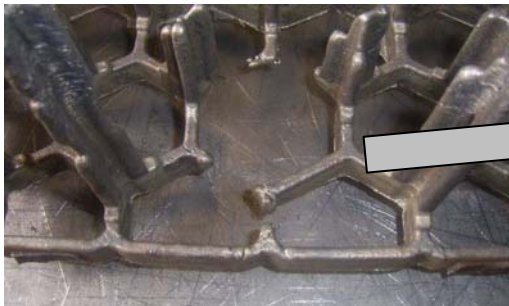
通常砂型(大気圧注湯)



減圧砂型(減圧注湯)



通常砂型(大気圧注湯)



減圧砂型(減圧注湯)



<掛け堰(堰ばち)方式>

① 実験条件

注湯実験時に湯口部に掛け堰（堰ばち）と呼ばれる溜りを設置し、ノズルにて栓をしておく。溶湯をその掛け堰（堰ばち）に必要量流し込み、その後そのノズルを開放し、一気に注湯を行う。この方法だと砂型内の減圧が開放させにくく、かつ注湯時の空気の巻き込みも少ないことが考えられる。





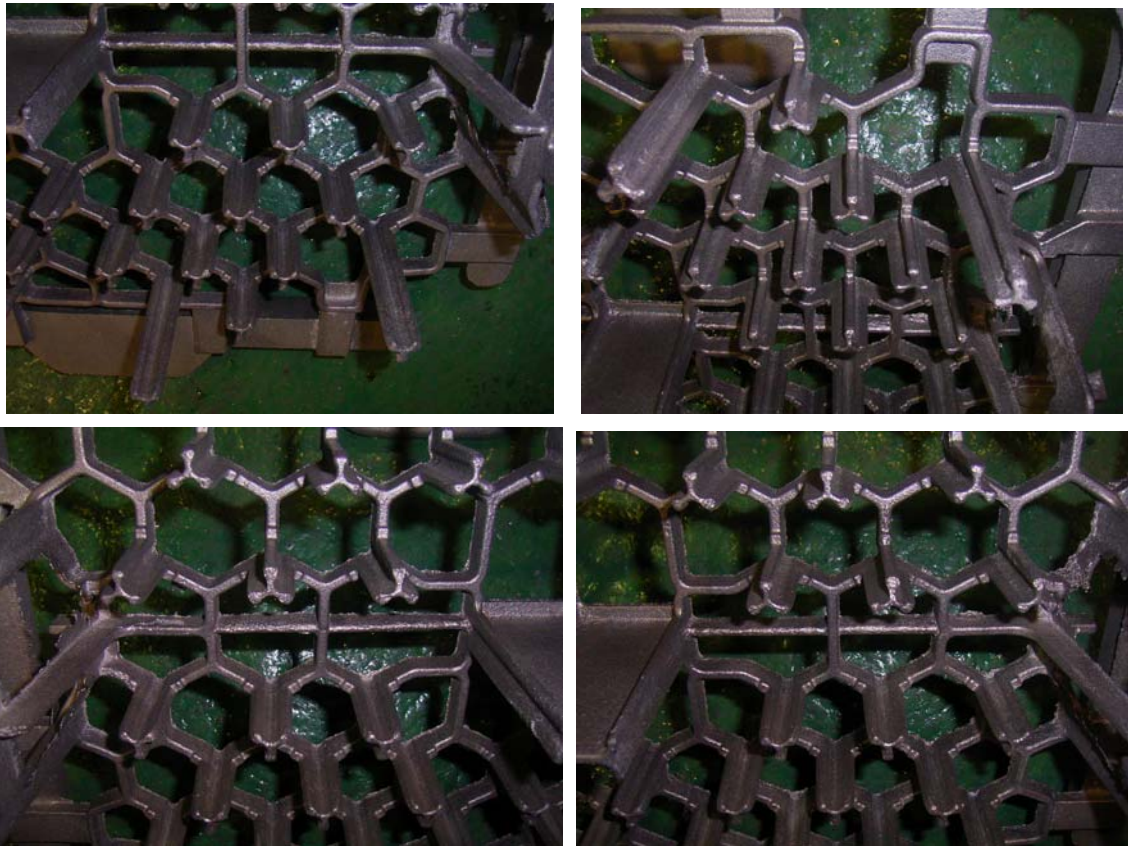
② 試作品外観



<中央つなぎ無し>



<中央つなぎ有り>



<つなぎ追加部>

③ 留意点

- 1) 鋳込みが非常にスムーズであった（約1秒程度）
- 2) 湯回り不良（中央部板状部分）がつなぎ追加により解消した
- 3) 鋳肌が非常にきれいだが、先端部の一部に砂付有（砂型付き固め不足か）
- 4) 表面引け巣が少ない

以上のように前回の掛け堰（堰ばち）方案の減圧注湯同様に、鋳肌自体が平滑できれいになり、鋳物としての完成度が向上し、中央部の板部にも湯が廻り形状としては完成した。今後、鋳肌の更なる改善や形状変更も考慮して実用化を模索する。

（3）結果のまとめ

実際のスタッキングトレイ（①F用スタッキングトレイ）を用いて、大気圧鋳造と減圧鋳造を比較しながら試作実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 高温注湯で行えば、大気圧鋳造でも、湯回りは比較的問題は少なかった。
- ② 減圧鋳造と大気圧鋳造の差としては、大気圧鋳造品に表面引け巣が多く認められ、減圧鋳造品には比較的少なかった。
- ③ 減圧鋳造と大気圧鋳造の差としては、大気圧鋳造品に比べ減圧鋳造品の方が重量は重い傾向があった。これは、減圧鋳造品の方が表面引け巣が少ない影響と考える。
- ④ 低温注湯の場合、減圧鋳造と大気圧鋳造ともに湯回りは不十分であったが、減圧鋳造

の方が湯回りは良くなっており、減圧が湯回り改善に効果があることを確認した。

- ⑤ 湯口からの空気の巻き込みをほとんどなくした堰ばち方式は、湯回り、鋳肌、表面引け巣を含めて改善することができ、ほぼ外観上は完成品に近い状態となった。
- ⑥ 中央部の板状部分は、掛け堰（堰ばち）方式でも湯回りを十分に達成できなかったため、その部分に溶湯が先に回るようバイパスのようなつなぎ部を追加することで、板状部分にも十分に湯が回り、ほぼ完成した形状の造型ができた。

3-2-2 スタッキングトレイ内部調査（北海道立工業試験場）

札幌高級鋳物㈱より提出された4つの試料(Nor①, Vac①, Vac②, Well①)について鋳物の内部欠陥、密度および組織を調査した。その結果、以下の所見が得られた。ここでNor①は通常の大気圧鋳造、Vac①は湯口開放状態で減圧鋳造、Vac②は発泡スチロールで湯口に蓋をして減圧鋳造、Well①は掛け堰（堰ばち）方式により減圧鋳造したもので最も減圧の状態で注湯されたものである。いずれも、F用スタッキングトレイ。

(1) 調査結果

大気圧鋳造 Nor①と減圧鋳造（3種類、湯口開放 Vac①、湯口閉塞 Vac②、堰ばち Well①）の比較調査として行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1-1) 外観において、大気圧鋳造品 (Nor①) は湯回りが満たされているが、表面引け巣が認められるのに対し、減圧鋳造品 (Vac①, Vac②) は湯回りが不良だが、表面引け巣は少ない。減圧鋳造堰ばち品 (Well①) は、湯回りも問題なく、表面引け巣も少ない。

(1-2) X線透過像においては、大気圧鋳造品 (Nor①) は、いわゆる交差部（三又部など）に鋭角な引け巣と思われる欠陥が確認された。一方、減圧鋳造品 (Vac①, Vac②) は交差部にも欠陥があるものの場所を限定しない比較的丸みを帯びた欠陥が多く、ガス系（ブローホール等）の欠陥と思われるものであった。さらに減圧鋳造堰ばち品 (Well①) は、やはり交差部に欠陥が確認されるが、比較的大気圧鋳造に似た位置や形状の欠陥となっていた。また、非常に細かい円形の欠陥がある部分に確認された。

(1-3) 密度、断面組織においては、ある一本の試料であり一断面であるため、詳しい考察は出来ないが、相対的に減圧鋳造品の方が内部欠陥は多くその欠陥が丸みを帯びている傾向が確認された。また、断面の金属組織において、注記しておきたいのは減圧鋳造の Vac①と Vac②の内部欠陥の表面（欠陥内部）が黒っぽいのに対し、Well①の内部欠陥の表面が金属色を呈していることが判明した。あくまで推定であるが、溶湯の酸化度合いが異なる（Vac①と Vac②は酸化が進行し、Well①は酸化があまり進行していない）ことが考えられる。これは、注湯した時の空気の巻き込みの差が要因しているのではないかと考える。

(2) 考察（今後の検討内容）

今回の結果により、減圧鋳造品の堰ばち方式が外観の品質的には優れたものとなったが、内部の調査においては、内部欠陥はむしろ大気圧鋳造よりは多い傾向を示していた。但し、製品試作の結果の一部にあったように大気圧鋳造品に比較し、減圧鋳造品は形状が保たれていれば、重量が重いことが確認されている。この傾向は大気圧鋳造品が表面引け巣は多かつ

たのに対し、減圧鋳造品は表面引け巣が少なかったことに起因すると考えている。これは、見掛けの体積が大気圧鋳造品の方が痩せて小さく、減圧鋳造品の方が本来の形状で大きいということであり、内部欠陥があったとしてもその全体の差が重量に現れたものと考えている。

今後は、この減圧鋳造品の内部欠陥の防止、と平行して内部欠陥と表面欠陥が実用上どのように影響するかということを実際に使用して確認していければと考えている。

3-2-3 スタッキングトレイ形状計測結果 (札幌高級鋳物株式会社)

(1) 測定条件

FARO社フージョンアーム6 f t (1.8m) 7軸システムを用いて、定盤上に製品をマグネットマウント等で固定し、測定した。その結果を以下の通り。

(2) 測定結果

3種類のスタッキングトレイの寸法測定において、定盤上で製品を受け面にて治具で支えて、3次元測定器にて測定した。その結果、F用スタッキングトレイ及びR用スタッキングトレイについては、オブザーバー（自動車部品メーカー殿）の意見により、直接被熱処理物のギヤが挿入される三又状棒部の仮想直径が重要とのことで、その主要部直径を測定し、また積み重ねられる次のトレイが載る台座部の高さを測定した。その結果、直径については、F及びR共に最大差が1 mm以下となり、特段の問題が無いことが判明した。また、台座の反りなどは最大3. 56 mmと 1. 06 mmとなり、若干の修正が必要であることを確認した。3 mm以下を目標とし、矯正も合わせて検討する。

一方、ギヤホルダスタッキングトレイについては、ギヤの載る台座の高さを重要とのことで、その高さを測定した。また、次のトレイが載る高さも測定した。素の結果、最大差2. 01 mmと2. 41 mmとなり、3 mm以下とする目標には達成していたことを確認した。

(3) 考察（今後の検討内容）

最も複雑な形状であるF用スタッキングトレイの次のトレイに載る高さが若干3 mm以上になっていたため、その対策として矯正調整も検討する。

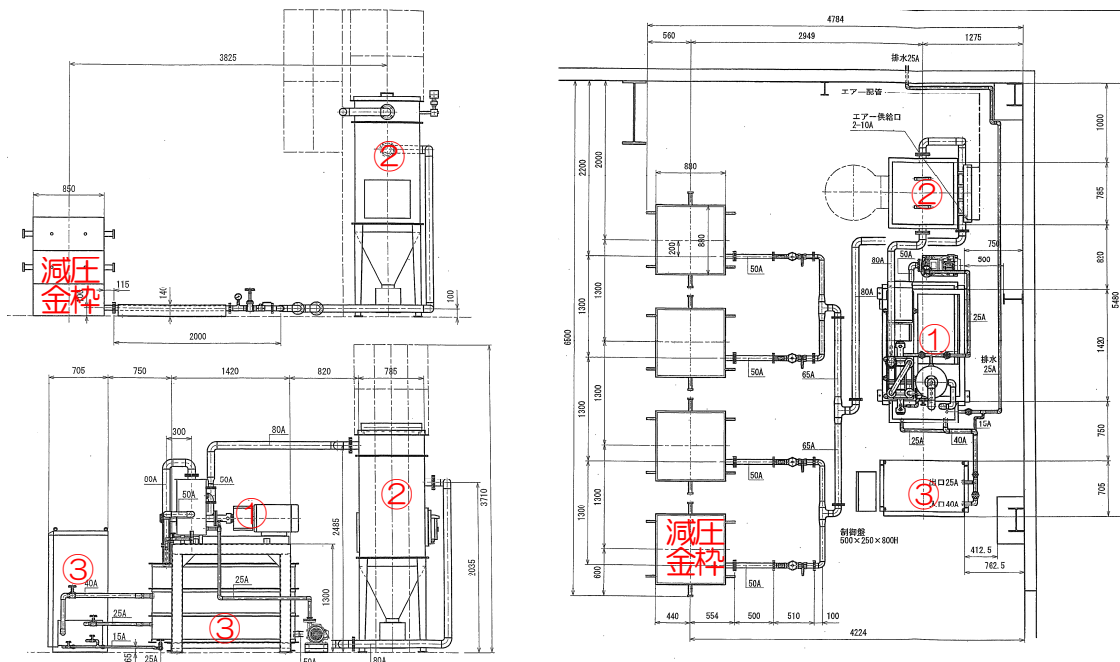
また、測定自体は定盤上で比較的迅速に測定が出来、本3次元測定器でなければ測定が難しい仮想直径や台座の高さなどが容易かつ正確に測定が出来ることが証明された。今後は、さらに数量を確認し、更なる迅速化のための測定治具（台座など）を検討したい。

3-3 減圧注湯設備仕様の指針 (札幌高級鋳物株式会社)

1) 試作で製作した設備仕様

- ① 水封式真空ポンプ (SB-300S)
- ② エアショックバグフィルター (AS-16-4-TR)
- ③ 大型空冷チラー (RKL-375D-D)

④ その他配管，制御装置1式



2) 設備仕様のまとめ

- ① 真空ポンプ設計としては，この水封式ポンプ 4600L/min 能力で 4 枠程度であれば十分と判断する.
- ② バグフィルター，空冷チラー，配管は，問題なく，設計的には本仕様で十分であることが確認できた.
- ③ シールはゴムホース使用，上部シールは V プロセス用ビニールシートで十分であることを確認し，上部に砂をかけることでリークを防止できた.
- ④ 風速の測定により，湯口付近は 10 m/s 程度の風速にて，注湯されていることが判明した.

第4章 結果のまとめ

1) 減圧注湯プロセスの開発

1-1) 減圧注湯予備実験 (近畿大学)

予備実験として通気度実験及び薄肉鋳物鋳造実験を行った結果、以下が明らかとなった。

- ① 減圧吸引下での砂型通気性実験結果から、砂型厚さ L が小さく、砂の粒径が大きいほど通気性は良好になること、また塗型によって通気性は低減することが分かった。
- ② 差圧と平均流速の関係から、砂の粒径が大きく砂型厚さ L が小さいと、砂型内を通過する空気は乱流状態になりやすくなることが推察された。
- ③ トーナメント状の鋳型を用いた鋳鋼溶湯の減圧鋳造実験の結果から、薄肉部への溶湯充てんにおける減圧の効果が明らかになったが、適切な減圧力と重力鋳造以上の高い砂型強度が必要であることもわかった。
- ④ 本実験では、減圧鋳造を行った場合に、砂型（砂）の変更により溶湯の充填挙動に違いが生じるかどうかの確認はできなかった。本実験で得られた砂型の通気性と鋳鋼溶湯の湯流れ性の関係解明が、今後の検討課題である。

1-2) 鋳造シミュレーション予備実験およびシミュレーション結果

1-2-1) 鋳造シミュレーションのための予備実験 (道工試)

鋳造シミュレーションのための予備実験として鋳込み実験およびその結果に基づいた解析を行った結果、以下が明らかになった。

- ① 予備実験において、鋳型の比熱、熱伝導率、鋳型壁における熱伝達率等のパラメータが冷却過程の温度変化に及ぼす影響を検証した。概論的に整理すると、鋳型の比熱が小さいほど、熱伝導率が大きいほど、熱伝達率が大きいほど、鋳型の昇温は早くなる傾向がある。ただし、熱伝導率と鋳型壁の熱伝達率の違いが鋳型の昇温状態に影響を及ぼす部位が異なり、熱伝導率は鋳型深部に、熱伝達率は鋳型表層部に大きく影響を及ぼす。
- ② 測温実験結果と比較すると、実測では鋳型温度の上昇速度が解析結果よりもかなり小さく、これに合わせるために境界条件として設定すべき各物性値の値は比熱が大、熱伝導率は小、熱伝達率は小というように選んでいかなければならない。
- ③ 今回の実験と解析結果の比較から推測すると、珪砂を骨材とする CO_2 ガス型に耐熱鋳鋼溶湯を鋳込む場合の境界条件設定として、鋳型の比熱は 0.5 程度、鋳型の熱伝導率は 0.004、熱伝達率は 0.0075 に設定すると実際の鋳造現象に近い解析結果得られると推測される。
- ④ 減圧鋳造法を想定した鋳造解析において、設定できるパラメータとして鋳型の通気性を考慮した背圧や流入圧力の設定などが挙げられる。背圧の境界条件は、鋳型の通気度として与えるが、デフォルト設定では無限大の通気度が設定されており、鋳型内の空気は何の抵抗もなく鋳型の外に排出されることになる。しかしこれは、鋳型内を真空にしているに等しく、この条件だけで見ると最大限の減圧鋳造条件となる。普通に用いられる砂型の通気度から背圧を考慮した解析を行っても、デフォル

ト設定との明確な差異は見られなかったため、背圧で減圧鋳造条件を再現するのは困難である。溶湯流入条件（湯口圧力）は、減圧によって湯口からの溶湯が流入する際に差圧を発生させる効果を再現させるという考え方の上から適用したところ、減圧鋳造を特徴的に再現させることができそうであることがわかった

1-2-2) 鋳造シミュレーション結果（札幌高級鋳物）

鋳造シミュレーション（ADSTEFAN）にて実際に解析を行い、次の事が判明した。

- ④ 大気圧鋳造の方が、早く湯口が満ちる傾向があり、湯道が完全に満ちることが無く製品へ流れ始めるのに対し、減圧鋳造は湯道の先端から満たされながら湯口の近くが満ちていく傾向が認められた。その後の製品への湯流れは大きな差は認められなかった。これは、減圧注湯が比較的大きな径の部分には早く溶湯が満ちるのに対し、その後の肉薄細部には減圧による効果が出にくいことが分かった。
- ⑤ 中央部の板状部分及び湯口から遠い足の長い部分に最後に溶湯が満たされることが判明した。この結果は、実際の製品試作でも同様の傾向であった。
- ⑥ 中央部の板状部分への湯回りを改善する目的で追加したリブ形状付きのものと湯流れシミュレーションにおいて、その中央部の板状部分への湯回りの改善が、シミュレーション上でも確認され、比較的早い段階で湯が回ることが確認された。また、リブ追加品は湯口が満ちるのも遅く、流体抵抗が少なくなつて湯流れがよりスムーズになっているものと思われる。実際の製品試作でもリブ追加品は中央部の板状部分に湯が十分に回っていた。

2) 減圧注湯法による試作結果

2-1) スタッキングトレイ実体試作結果（札幌高級鋳物）

実際のスタッキングトレイ（①F用スタッキングトレイ、②R用スタッキングトレイ、③ギヤホルダスタッキングトレイの3種類）を用いて、大気圧鋳造と減圧鋳造を比較しながら試作実験を行った結果、以下のことが明らかとなりました。

- ⑦ 高温注湯で行えば、大気圧鋳造でも②R用スタッキングトレイ及び③ギヤホルダスタッキングトレイの形状であれば、湯回りは比較的問題は無かった。
- ⑧ 減圧鋳造と大気圧鋳造の差としては、大気圧鋳造品に表面引け巣が多く認められ、減圧鋳造品には比較的少なかった。
- ⑨ 減圧鋳造と大気圧鋳造の差としては、大気圧鋳造品に比べ減圧鋳造品の方が重量は重い傾向があった。これは、減圧鋳造品の方が表面引け巣が少ない影響と考える。
- ⑩ 低温注湯の場合、減圧鋳造と大気圧鋳造ともに湯回りは不十分であったが、減圧鋳造の方が湯回りが良くなっており、減圧が湯回り改善に効果があることを確認した。
- ⑪ 湯口からの空気巻き込みをほとんどなくした掛け堰（堰ばち）方式は、湯回り、鋳肌、表面引け巣を含めて改善することができ、ほぼ外観上は完成品に近い状態となった。
- ⑫ 中央部の板状部分は、掛け堰（堰ばち）方式でも湯回りを十分に達成できなかったため、その部分に溶湯が先に回るようバイパスのようなつなぎ部を追加することで、板状部分にも十分に湯が回り、ほぼ完成した形状の造型ができた。

2-2) スタッキングトレイ内部調査 (道工試)

札幌高級鋳物にて試作したスタッキングトレイについて、金属材料として健全であるかどうかを判断するため、調査を行った結果、次のことが判明した。

- ① 外観において、大気圧鋳造品 (Nor①) は湯回りが満たされているが、表面引け巣が認められるのに対し、減圧鋳造品 (Vac①, Vac②) は湯回りが不良だが、表面引け巣は少ない。減圧鋳造掛け堰品 (Well①) は、湯回りも問題なく、表面引け巣も少ない。
- ② X線透過像においては、大気圧鋳造品 (Nor①) は、いわゆる交差部 (三又部など) に鋭角な引け巣と思われる欠陥が確認された。一方、減圧鋳造品 (Vac①, Vac②) は交差部にも欠陥があるものの場所を限定しない比較的丸みを帯びた欠陥が多く、ガス系 (ブローホール等) の欠陥と思われるものであった。さらに減圧鋳造堰ばち品 (Well①) は、やはり交差部に欠陥が確認されるが、比較的大気圧鋳造に似た位置や形状の欠陥となっていた。また、非常に細かい円形の欠陥がある部分に確認された。
- ③ 密度、断面組織においては、ある一本の試料であり一断面であるため、詳しい考察は出来ないが、相対的に減圧鋳造品の方が内部欠陥は多くその欠陥が丸みを帯びている傾向が確認された。また、断面の金属組織において、注記しておきたいのは減圧鋳造の Vac①と Vac②の内部欠陥の表面 (欠陥内部) が黒っぽいのに対し、Well①の内部欠陥の表面が金属色を呈していることが判明した。あくまで推定であるが、溶湯の酸化度合いが異なる (Vac①と Vac②が酸化が進行し、Well①が酸化があまり進行していない) ことが考えられる。これは、注湯した時の空気の巻き込みの差が要因しているのではないかと考える。

2-3) スタッキングトレイ形状計測 (札幌高級鋳物)

3種類のスタッキングトレイの寸法測定において、定盤上で製品を受け面にて治具で支えて、3次元測定器にて測定した結果、以下のことが判明した。

- ① F用スタッキングトレイ及びR用スタッキングトレイについて、直接被熱処理物のギヤが挿入される三又状棒部の仮想直径は、F r 及びR r 共に最大差が1 mm以下となり特段の問題が無く、また、積み重ねされる次のトレイが載る台座部の高さは最大3. 56 mmと1. 06 mmとなり、若干の修正が必要であることを確認した。3 mm以下を目標とし、矯正も合わせて検討する。
- ② ギヤホルダスタッキングトレイについては、ギヤの載る台座の高さは最大差2. 01 mmと2. 41 mmとなり、3 mm以下とする目標は達成していた。

3) 減圧注湯設備仕様の指針 (札幌高級鋳物)

- ⑤ 真空ポンプ設計としては、この水封式真空ポンプ 4600L/min 能力で4 枠程度であれば十分と判断する。
- ⑥ バグフィルター、空冷チラー、配管は、問題なく、設計的には本仕様で十分であることが確認できた。
- ⑦ シールはゴムホース使用、上部シールはV プロセス用ビニールシートで十分であることを確認し、上部に砂をかけることでリークを防止できた。

- ⑧ 風速の測定により、湯口付近は 10 m/s 程度の風速にて、注湯されていることが判明した。

第5章 全体総括

熱処理を施すために使用する熱処理用治具は、製品の体積を多くするため薄肉化が求められており、その薄肉熱処理治具（最薄部肉厚 3 mm）のスタッキングトレイを精密鋳造ではなく、普通（重力）鋳造＋減圧を用いて形状造型が可能であるかを種々検討した。

この結果、減圧鋳造の大気圧鋳造に対する湯回り改善効果と、湯口からの空気の巻き込みを低減する掛け堰（堰ばち）方式鋳造を行うことで、薄肉耐熱鋳物を耐熱鋳鋼でも造型できることを確認した。この掛け堰（堰ばち）方式鋳造品は、表面の鋳肌、湯回り、表面の引け巣という点でも優れており、外観上は完成品としても支障のないレベルであった。しかし、内部にはブローホールのような小さなガス系の丸みを帯びた鋳造欠陥が若干確認されており、この影響については実際の使用環境での影響を確認する必要がある。鋳造シミュレーションによって、減圧と大気圧の違いも確認でき、まだ改良の余地はあるが、減圧環境でも鋳造シミュレーションが使用可能であることを確認した。

また、本スタッキングトレイの形状測定として、接触式 3 次元測定器を定盤上で測定することで、必要な部分（仮想直径、基準面に対する台座の高さ）の測定が簡易的かつ迅速に計測可能であることを証明した。

減圧注湯装置としては、水封式真空ポンプの容量、バグフィルターを含めた装置の構成で減圧注湯を最大 4 台まで可能である見通しを得た。シールについても従来のものでも十分に使用可能であることを確認した。

今後、さらに数量を増した試作にて、ばらつきの確認を取ると共に、試作品を必要数製作し、エンドユーザーでありオブザーバーである自動車メーカー殿において、一定期間の使用検討をお願いする予定である。そこで合格できれば、晴れて実用化することになる。

また、本技術を応用し更なる薄肉化や複雑形状化をターゲットにトライしていきたい。