

平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「欠陥を事前予測し実用性を高めたシミュレーションによる
複雑一体部品の一気通貫鋳造法の開発」

研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社ひたちなかテクノセンター

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的および目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 物性値の測定

- 2-1 物性値測定法の開発
- 2-2 材質ごとの物性値
- 2-3 人工砂配合量による熱物性値
- 2-4 鋳型硬度による物性値の差

第3章 職人技ノウハウを最適方案へ展開する「使い易い鋳造シミュレーションシステム」の開発

- 3-1 冷し金使用による物性値の変化
- 3-2 発熱材の燃焼による保温効果への影響
- 3-3 押湯保温効果に対するふりかけ材の影響
- 3-4 種々の鋳造方案におけるCAE結果と鋳造品内部欠陥の比較
- 3-5 CAE解析条件の検討

第4章 鋳造方案・工法を盛り込んだ作業標準書の開発

- 4-1 小物製品Aの最適方案
- 4-2 小物製品Bの最適方案
- 4-3 小物製品Bの更なる最適方案
- 4-4 薄肉製品Cの最適方案
- 4-5 大物製品Dの最適方案
- 4-6 大物製品Eの最適方案
- 4-7 大物品のCAE条件の検討
- 4-8 作業基準の作成

第5章 全体総括

註：専門用語の説明は各章の終わりに示す

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的および目標

1) 研究の目的

建設、産業機械向け鋳物は、複雑形状の多品種少量生産の世界であり、国内の鋳造産業にはグローバル化のもとで、高品質で低価格、短納期に対応できる高度なものづくり技術が求められている。このため、鋳造産業はIT技術、特にCAEとしての鋳造シミュレーション¹⁾活用が進みつつあるが、中小企業のものづくり現場におけるシミュレーション適用の成果は少ないのが実状である。

上記課題を解決するため、今後大きな需要が見込まれる鋳鉄材、特に球状黒鉛鋳鉄材の複雑一体鋳鉄鋳物に的を絞り、本研究実施者のもつ鋳造ノウハウを取込み、試作プロセスにおいて鋳造方案²⁾改良や欠陥を事前予測し、一回で試作品の完成品を得ることができる高精度鋳造シミュレーション技術を開発することにより、複雑一体部品の一気通貫鋳造法を確立することを目的として研究開発を行う。

目標として、中小企業でも簡単に利用できる使いやすい鋳造シミュレーションを開発し、試作一回で量産に入れるようにコストの低減、納期の半減化を掲げる。

2) 研究の概要

最終技術目標を達成するために、以下の研究開発を実施する。

- ① CAEシミュレーション時に設定する物性値として、鋳造条件である溶湯材質、人工砂配合率、鋳型硬度の違い、これらをどのような物性値にするかの測定。
- ② 冷し金^{***}、発熱スリーブ^{****}、ふりかけ材^{*****}が鋳造にどのような影響を与えるかの調査。
- ③ CAEシミュレーションをするときに、押し湯の発熱量、大気圧、湯流れ等の設定条件の調査及び引け欠陥の最適評価法の調査
- ④ 代表的な製品に関する鋳造方案設計基準、製造基準、品質保証基準の設定

専門用語

*鋳造シミュレーション：

溶けた金属を鋳型の中に流し込んだ時にどのように流れ、どのように凝固していくかをシミュレートとすること。

**鋳造方案：

溶けた金属をどのように鋳型の口から入れ、どのような道を通って、鋳型へ流し込むかの方案。

***冷し金

溶けた金属を早く凝固させるための金属片。

******発熱スリーブ**

溶けた金属が凝固するときに発生する収縮を補うための押湯の凝固を遅らせる発熱材を含んだスリーブ。

*******ふりかけ材**

開放された押湯の凝固を遅らせる発熱材を含んだふりかけ材

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織

本件の研究開発における組織の全体構成を図1-2-1に、管理体制を図1-2-2から図1-2-6に示す。

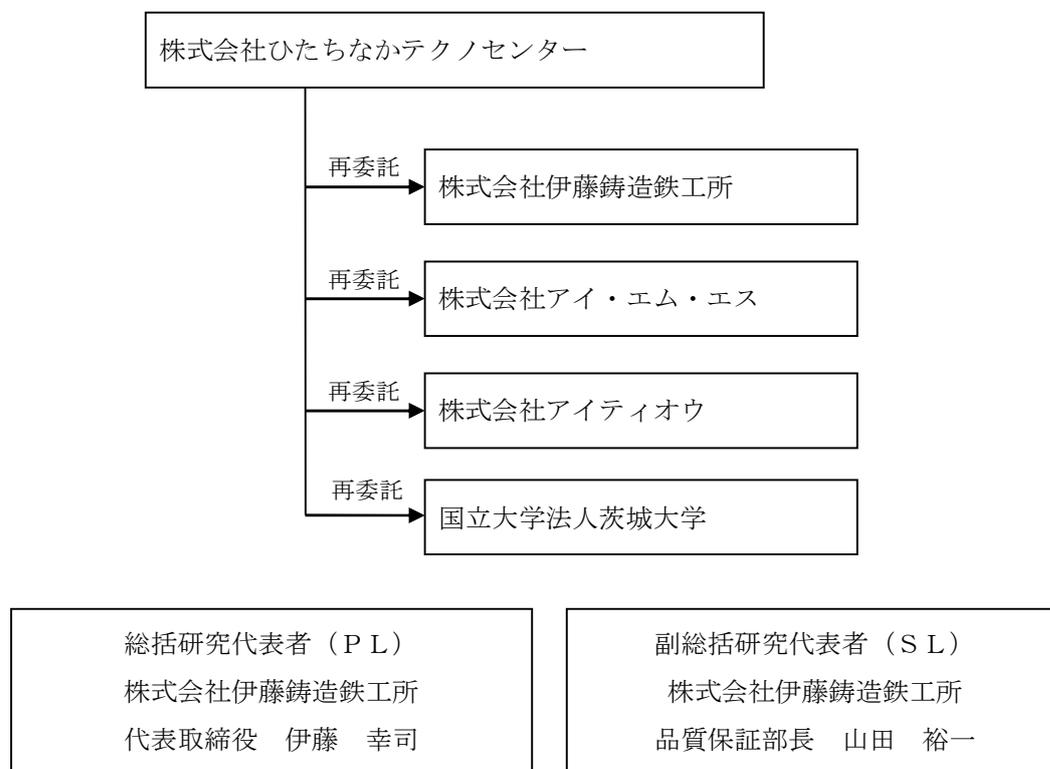


図1-2-1 研究開発組織の全体構成

1-2-2 管理体制

(1) 体制

1) 事業管理機関

[株式会社ひたちなかテクノセンター]

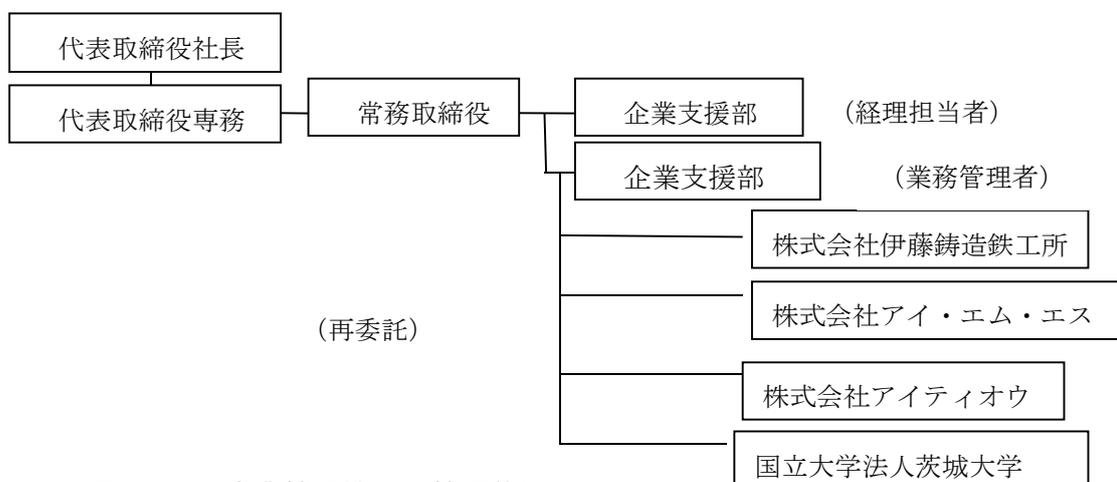


図1-2-2 事業管理機関の管理体制

2) 再委託先

[株式会社伊藤鑄造鉄工所]

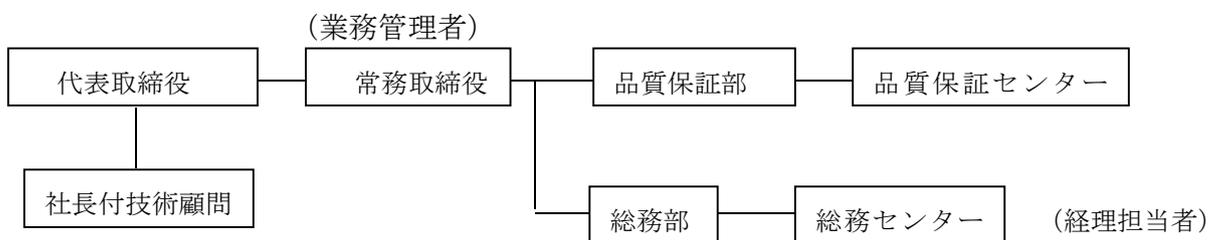


図1-2-3 株式会社伊藤鑄造鉄工所の管理体制

[株式会社アイ・エム・エス]



図1-2-4 株式会社アイ・エム・エスの管理体制

[株式会社アイティオウ]

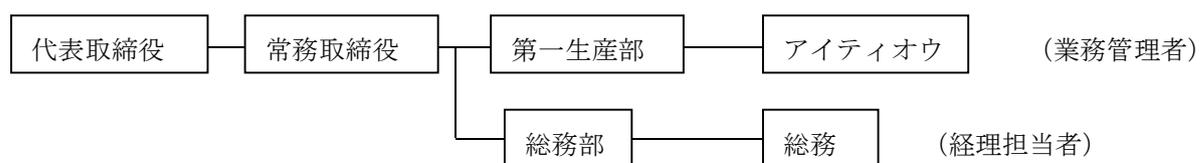


図1-2-5 株式会社アイティオウの管理体制

[国立大学法人茨城大学]

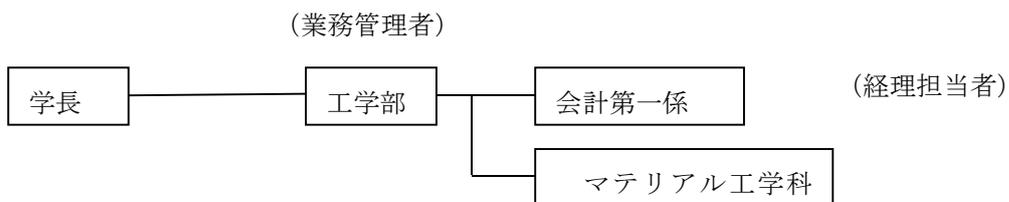


図1-2-6 国立大学法人茨城大学の管理体制

(2) 管理員及び研究員

1) 事業管理機関 株式会社ひたちなかテクノセンター
管理員

氏名	所属・役職
江尻 一彦	常務取締役（企業支援部部長兼務）
浅野 俊之	企業支援部次長
藺部 英明	企業支援部課長代理
佐藤 雅之	企業支援部嘱託職員
鴨 正治	企業支援部嘱託職員

2) 再委託先

研究員

株式会社伊藤鑄造鉄工所

氏名	所属・役職
伊藤 幸司	代表取締役
石原 安興	社長付技術顧問
新山 英輔	社長付技術顧問
山田 裕一	品質保証部長
藤田 大輝	品質保証部 品質保証センター グループ長
根本 孝行	品質保証部 品質指導員

株式会社アイ・エム・エス

氏名	所属・役職
中島 淳	鑄造技術部 鑄造サービスセンター センター員
ゴォ ニュ ホアン	鑄造技術部 鑄造サービスセンター CAEグループ長
大和田 浩司	鑄造技術部 鑄造サービスセンター グループ長

株式会社アイティオウ

氏名	所属・役職
飛田 広史	製造センター センター長
大川 賢一	製造センター グループ長

国立大学法人茨城大学

氏名	所属・役職
太田 弘道	工学部 マテリアル工学科 教授
西 剛史	工学部 マテリアル工学科 准教授

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社ひたちなかテクノセンター

(経理担当者) 企業支援部 課長 沢畠 正成

(業務管理者) 企業支援部 常務 江尻 一彦

(再委託先)

株式会社伊藤鑄造鉄工所

(経理担当者) 総務部 総務センター 経理グループ長 長安 正昭

(業務管理者) 常務取締役 伊藤 秀幸

株式会社アイ・エム・エス

(経理担当者) 総務部 総務 荒井 彩奈

(業務管理者) 常務取締役 伊藤 秀幸

鑄造技術部 鑄造サービスセンター員 中島 淳

株式会社アイティオウ

(経理担当者) 総務部 総務 門田 恵理子

(業務管理者) 常務取締役 伊藤 秀幸

製造センター センター長 飛田 広史

国立大学法人茨城大学

(経理担当者) 工学部 会計第一係長 軽部 昇

(業務管理者) 工学部 工学部長 米倉 達広

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
伊藤 幸司	株式会社伊藤鑄造鉄工所 代表取締役	P L
石原 安興	株式会社伊藤鑄造鉄工所 社長付技術顧問	委
新山 英輔	株式会社伊藤鑄造鉄工所 社長付技術顧問	委
山田 裕一	株式会社伊藤鑄造鉄工所 品質保証部長	S L 委
藤田 大輝	株式会社伊藤鑄造鉄工所 品質保証部 品質保証センター グループ長	委
根本 孝行	株式会社伊藤鑄造鉄工所 品質保証部 品質指導員	委

中島 淳	株式会社アイ・エム・エス 鑄造技術部 鑄造サービスセンター員	委
ゴォ ニュ ホアン	株式会社アイ・エム・エス 鑄造技術部 鑄造サービスセンター CAEグループ長	委
大和田 浩司	株式会社アイ・エム・エス 鑄造技術部 鑄造サービスセンター 開発グループ長	委
飛田 広史	株式会社アイティオウ 第一生産部 アイティオウセンター センター長	委
大川 賢一	株式会社アイティオウ 第一生産部 アイティオウセンター グループ長	委
太田 弘道	国立大学法人茨城大学 工学部 マテリアル工学科 教授	委
西 剛史	国立大学法人茨城大学 工学部 マテリアル工学科 准教授	委
中江 秀雄	学校法人早稲田大学 名誉教授	アドバイザー (謝金、旅費)
内田 敏夫	株式会社サイバーテックシステム開発部	アドバイザー (謝金、旅費)
松本 誠	伊藤鉄工株式会社 技術部長	アドバイザー (謝金、旅費)
安西 雄一郎	株式会社真岡製作所 鑄造ラボ	アドバイザー (謝金、旅費)
助名 和浩	永井機械鑄造株式会社 工場次長	アドバイザー (謝金、旅費)
栗田 洋二	株式会社栗田合金鑄造所 常務取締役	アドバイザー (謝金、旅費)
佐々木 正	株式会社佐々木鑄工所 代表取締役	アドバイザー (謝金、旅費)
安藤 正	株式会社アイメタルテクノロジー 研究開発部 研究第二グループ	アドバイザー (謝金、旅費)
駒木 博	株式会社田島軽金属 製造技術本部 本部長 (兼) 製造部 部長	アドバイザー (謝金、旅費)
小沼 祐之	株式会社常陽銀行 地域協創部 産学官連携チー フコーディネーター 参事役	アドバイザー (謝金、旅費)

1-3 成果概要

1) 3年間の計画と成果項目

本研究開発は株式会社ひたちなかテクノセンターが事業管理機関となり、再委託先として株式会社伊藤鑄造鉄工所、株式会社アイ・エム・エス、株式会社アイティオウ、及び国立大学法人茨城大学が再委託先となって進めてきた。

25、26、27年度3年間の計画と成果項目を表1-3-1に示す。

表1-3-1 計画と成果概要

	計画時目標	成果項目
I. 物性値の測定	1. 物性値測定法の開発 2. 球状黒鉛鑄鉄の材質ごとの熱伝導率等の物性値の測定 3. 鑄型砂への人工砂配合による物性値測定 4. 鑄型強度の変化に対する物性値の確認	1. 熱伝導率等の物性値の測定設備を作り、また測定法を開発した。 2. F Cでの2材質、F C Dでの3材質について物性値を測定したが材質による物性値の差はなかった。 3. 人工砂20%、100%配合での比較では100%配合では熱伝導率が20%配合より低かった。 4. 砂詰めが十分でない低密度鑄型は熱伝導率が低くなる。
II. 職人技術ノウハウを最適方案へ展開する「使い易い鑄造シミュレーションシステム」の開発	1. 鑄造に使う冷し金、発熱スリーブ、ふりかけ材の鑄造への影響調査 2. C A Eシミュレーション時の設定条件および引け欠陥評価法の検討	1. ①黒鉛冷し金は鑄鉄製より熱伝導率は低い。また新しい冷し金、古い冷し金、S S材冷し金を使用した時の物性値には大きな差はなかった。 ②発熱スリーブは鑄型の中にあるので酸素が少なく保温力はあるが発熱力は小さい。 ③ふりかけ材は保温効果はあるが、押し湯の加熱力は小さい。 2. C A Eで引け欠陥を精度よくシミュレーションするには下記の条件が良い。 ①大気圧は考慮に入れない ②湯流れによる熱影響を考慮する ③発熱スリーブの発熱量は250kcal/kg とする ④大物鑄物では収縮率を1.0から0、-0.5% とする必要がある。 ⑤引け欠陥評価は「健全度95%以上」で行

	<p>3. 種々の鋳造方案におけるC A E 結果と鋳造品内部欠陥の比較</p> <p>4. 最適鋳造方案自動選択ツールの開発と最適鋳造方案の模索</p>	<p>う。</p> <p>3. 小物鋳物、肉薄鋳物においては上記の条件でC A Eシミュレーションを行うと引け欠陥を精度よく予測することが可能となった。</p> <p>4. いくつかの方案の案を作りそれらを「最適鋳造方案自動選択ツール」にかけると一度にシミュレーション結果を得ることができ、最適方案を選択するのが早くなった。</p>
Ⅲ. 鋳造方案・工法を盛り込んだ作業標準書の開発	1. 代表アイテムの方案設計標準・製造標準、品質保証標準を作る。	<p>1. 代表的な小物、大物、薄物アイテムの方案設計基準を作り上げた。</p> <p>2. 内部欠陥を評価するツールとして超音波探傷C Tの使い方を開発した。</p>
プロジェクトの管理・運営	研究開発推進委員会開催：6月、11月、2月	研究開発推進委員会：6月23日、11月24日、2月26日に行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

当該研究開発の事業管理者

名称：株式会社 ひたちなかテクノセンター

住所：茨城県ひたちなか市新光町38

代表役職・氏名：常務取締役 江尻 一彦

連絡担当者所属役職・氏名：浅野 俊之 企業支援部 次長

T E L : 0 2 9 - 2 6 4 - 2 2 0 0

F A X : 0 2 9 - 2 6 4 - 2 2 0 3

E - m a i l : asano@htc.co.jp

第2章 物性値の測定

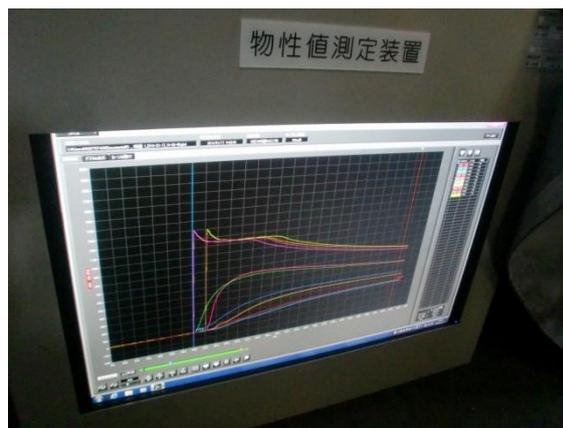
2-1 物性値測定法の開発

2-1-1 測定装置と測定法

図2-1-1に示す装置を組み立て、図2-1-2に示す模型で鋳型を作りそこに熱電対をセットし、溶湯を注ぎ、冷却曲線を得る。それを開発した図2-1-3に示す熱物性値同定ソフトを用い、その冷却曲線に合った種々の物性値を使った想定冷却曲線と比較し標



測定装置

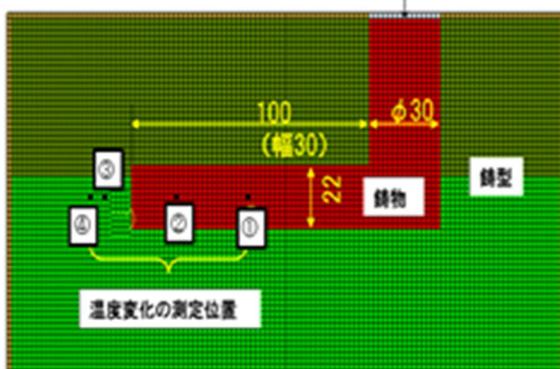


測定中の様子

図 2-1-1 物性値測定装置



注湯口 測定鋳型用模型



熱電対測定位置①～④



測定準備状況

図 2-1-2 熱物性値測定模型および熱電対セット状況

標準偏差値が最小となる冷却曲線を選び出す。その時の熱物性値を、被測定物の熱物性値とするという方法を確立した。

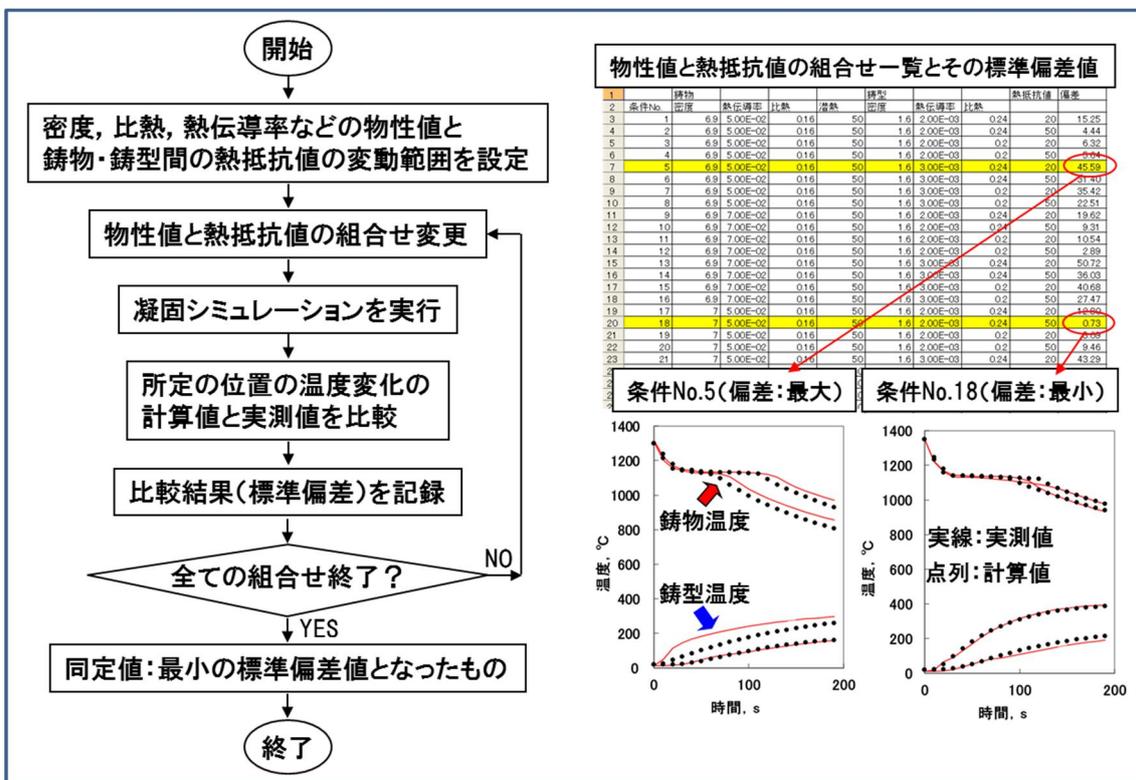


図 2-1-3 熱物性値同定ソフト

因みに、今回同定した熱物性値と従来からある市販のソフトの値との差を表2-1-1に示す。

2-2 材質ごとの熱物性値

2-2-1 実験目的

鋳鉄の材質には主としてねずみ鋳鉄（以降FCと称する）と球状黒鉛鋳鉄（以降FCDと称す）があり、各々にはいくつかの種類に、また分けられている。これらの材質の間で熱物性値はどうなっているかを調べる。

また同一材質でもCE値*が異なることがあるのでCE値の熱物性値への影響を調べる。

2-2-2 実験結果と考察

材質ごとの熱物性値測定結果を表2-2-1に示す。

この測定結果より次の事が言える。

1) FC200（FCの後の数字はJISの表記で引張強さをあらわす。200N/mm²）、FC300の間、およびFCD450～FCD700（FCDの後の数字は

J I Sの表記で引張強さをあらわす)の間、また、F C D 4 5 0におけるC E値の高低においては密度、比熱、熱伝導率、潜熱の差は少ない。

2) F CグループとF C Dグループの固相線温度に大きな差はない。

表 2-1-1 従来の熱物性値と今回同定した熱物性値の差

■従来値

材料	密度 g/cm ³	熱伝導率 cal/cm・s・°C	比熱 cal/g・°C	潜熱 cal/g	液相線温度 °C	固相線温度 °C
鋳物(FCD450)	7.1	0.0700	0.16	50	1180	1140
鋳型(砂型)	1.5	0.0020	0.20	-		

境界	熱抵抗値 cm ² ・s・°C/cal
鋳物・鋳型間	100

■同定値

材料	密度 g/cm ³	熱伝導率 cal/cm・s・°C	比熱 cal/g・°C	潜熱 cal/g	液相線温度 °C	固相線温度 °C
鋳物(FCD450)	7.2	0.0700	0.17	50	1140	1135
鋳型(砂型)	1.6	0.0020	0.20	-		

境界	熱抵抗値 cm ² ・s・°C/cal
鋳物・鋳型間	20

実測値を使用

* 朱書き部が従来との相違値

表 2-2-1 材質ごとの熱物性値

材質	C %	S i %	C E %	密度 g/cm ³	比熱 cal/g・°C	熱伝導率 cal/cm. s. °C	潜熱 cal/g	液相線 温度 °C	固相線 温度 °C
FC200	3.40	2.07	4.09	7.10	0.17	0.07	48	1200	1150
FC300	3.17	2.04	3.85	7.10	0.12	0.10	49	1228	1134
FCD450	3.65	2.27	4.41	7.10	0.17	0.11	49	1146	1120
FCD500	3.62	2.32	4.39	7.08	0.17	0.09	44	1154	1130
FCD700	3.61	2.32	4.38	7.11	0.17	0.10	50	1160	1130
FCD450	3.42	2.15	4.14	7.10	0.15	0.13	49	1159	1117
FCD450	3.58	2.17	4.30	7.10	0.24	0.15	49	1152	1114
FCD450	3.85	2.26	4.60	7.10	0.19	0.15	49	1146	1118

専門用語

*CE値：炭素当量 $CE\% = C\% + Si/3$

2-3 人工砂配合量による熱物性値

2-3-1 実験目的

造型ラインによって人工砂100%のラインと珪砂80%・人工砂20%のラインがある。そこでこれらにおいて鋳造品の熱物性値が変わるかを確認することとした。

2-3-2 実験結果と考察

測定結果を表2-3-1に示す。参考のために化学成分も併記した。

表 2-3-1 人工砂配合量による熱物性値

砂条件	C %	Si %	CE %	密度 g/cm ³	比熱 cal/g.°C	熱伝導率 cal/cm.s.°C	界面熱抵抗 cm ² .s.°C/cal
人工砂 100%	3.63	2.31	4.39	1.79	0.20	0.0016	27
人工砂 20% 珪砂 80%	3.61	2.25	4.36	1.64	0.22	0.0019	22

- 1) 人工砂100%のものは密度は高いが熱伝達率は低い
- 2) 砂型と鋳物の間の界面熱抵抗値測定例は見当たらないが今回測定でき20から30 cm²・s・°C/Calであることが分かった。

2-4 鋳型硬度による熱物性値の差

2-4-1 実験目的

造型時に鋳枠の中の砂を充分につき固めた時とそうでないときでは鋳型硬度は変わり、当然熱物性値は変わってくるものと思われる。そこでスタンプで十分につき固めた時と、砂を入れて簡単に抑えただけとその中間で測定用鋳型を造型しその差を見ることにした。

2-4-2 実験結果と考察

表2-4-1に熱物性値測定結果を示す。

結果をまとめると

- 1) 砂の充填度を増すと、当然ながら鋳型密度は上昇し、熱伝達率も高くなる。
- 2) 鋳型密度が高くなると当然鋳型硬度も高くなる。

3) 鑄型密度が高くなっても界面熱抵抗値は変わらなかった。

表 2-4-1 鑄型充填度による熱物性値

砂条件	C %	Si %	CE %	密度 g/cm ³	鑄型表面硬度 kgf	比熱 cal/g.°C	熱伝導率 cal/cm.s.°C	界面熱抵抗 cm ² .s.°C/cal
低密度充填	3.71	2.35	4.49	1.46	2.493	0.20	0.0018	29
中密度充填				1.55	3.445	0.22	0.0021	29
高密度充填				1.65	3.536	0.19	0.0021	29

第3章 職人技ノウハウを最適方案へ展開する「使い易い鑄造シミュレーションシステム」の開発

3-1 冷し金による熱物性値の変化

3-1-1 実験目的

凝固を速めるために外部に金属片を当てる冷し金や黒鉛片を使う冷し黒鉛がある。また、古い冷し金は新しい物に比べ冷却能が低いのではないかと言われてきた。また、最近では鋼材（以降、SS材と称す）の冷し金も使われている。これらに冷却能に差があるとCAEシミュレーション（以降CAEと略す）の精度が変わってくるのが考えられるので、これ等の冷し材の冷却能の差を調べることにした。

3-1-2 実験結果と考察

測定法を図3-1-1に示す。

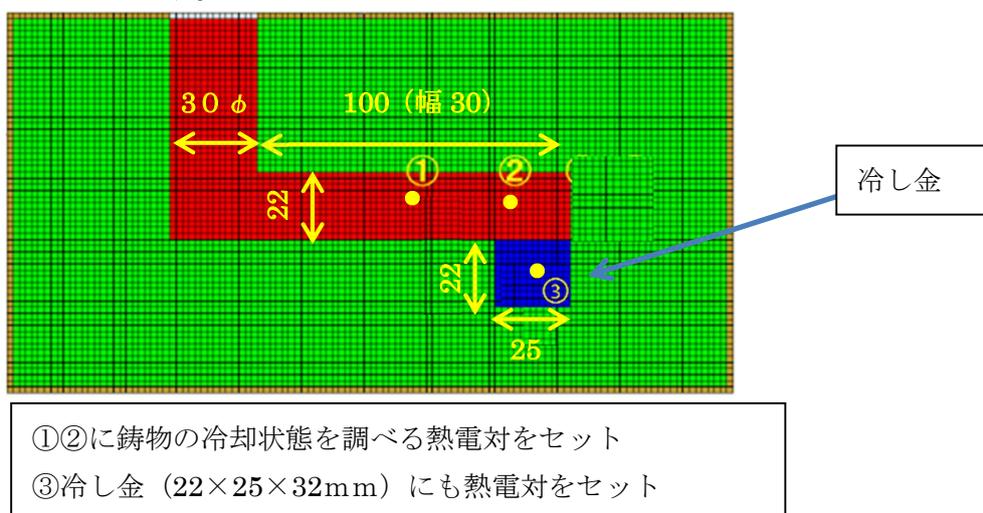


図 3-1-1 冷し金等の冷却能を調べる実験法

3-1-3 実験結果と考察

新しい冷し金を使った時の冷却曲線を図3-1-2に示す。

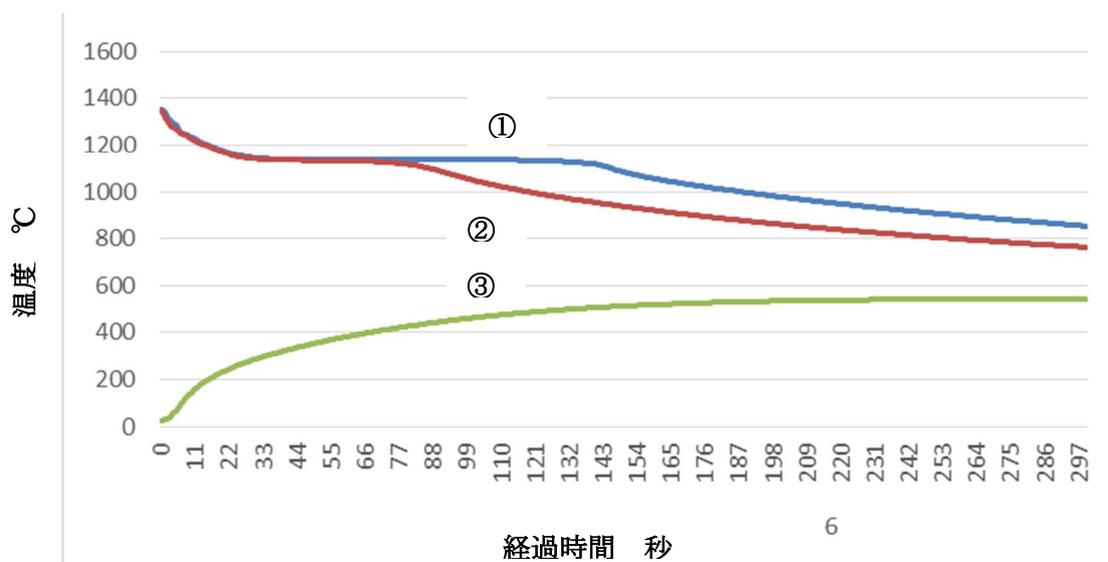


図3-1-2 冷し金を使った時の測定結果

このように測定した結果、次のような結果を得た

- 1) 新しい冷し金と古い物との冷却能に差は認められなかった。
- 2) 鋳鉄製の冷し金と、S S材冷し金では冷却能には大きな差は認められなかった。
- 3) 黒鉛冷しは鋳鉄製の冷しに比べて冷却能が低かった。これは密度と熱伝導率が低いことによると考えられる。
- 4) 冷し金と鋳物との間の界面熱抵抗は、冷却曲線から初期は小さく時間と共に増加しそれによる熱流の変化が大きいと考えられる。

3-2 発熱材の燃焼による保温効果への影響

3-2-1 実験目的

押し湯の冷却を遅くし、いつまでも溶湯補給ができるようにと押し湯の部分に発熱材を含ませた発熱スリーブが多く使われている。発熱スリーブを使うと、どの程度押し湯が機能しているか調べることにした。なお、溶湯を注湯した後のスリーブを見ると黒いまままで、燃焼発熱していないと思われる。そこで、一方のスリーブに空気が入るよう繊維密度が低いセラミックウールでスリーブを囲い、また空気取り入れ口をつけてみた。その効果も確認してみた。

3-2-2 実験結果と考察

図3-2-1に実験方法を示す。また、測定結果を図3-2-2に示す。

その結果次のようなことが分かった。

- 1) この押し湯では中心温度は1150°Cで16分は凝固しないで液状態である。
- 2) ウールを巻いた押し湯の凝固時間は、巻かないものの2倍。

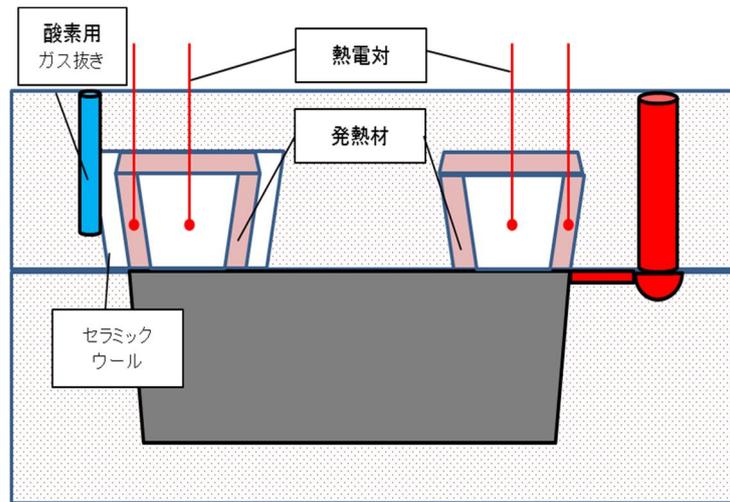


図 3-2-1 発熱スリーブの効果の確認実験法

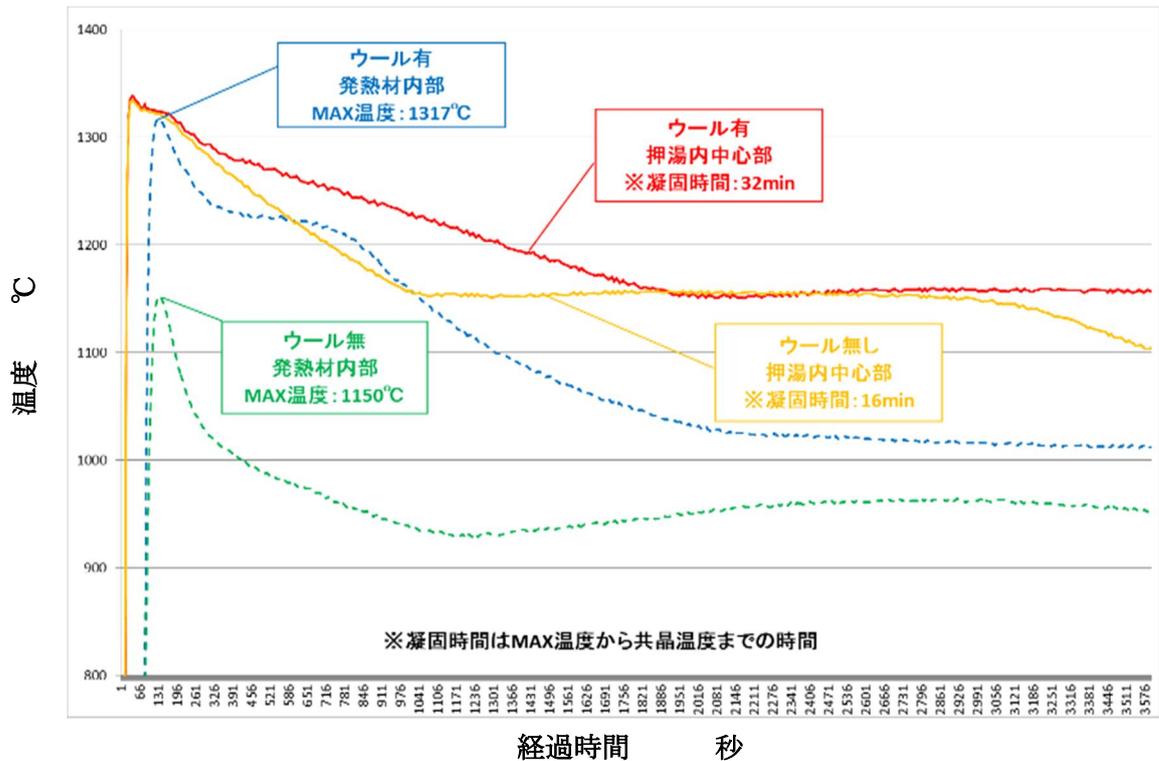


図 3-2-2 温度測定結果

- 3) 発熱材の中心部温度はウールを巻いたものは、巻かないものより 150°C 高い
- 4) 押し湯中心部の温度には大きな差はなかった。
- 5) 以上からウールを巻いて空気が入ったものは燃焼し、ウールを巻かないものは充分に燃焼していないと推定される

3-3 押湯保温効果に対するふりかけ材の影響

3-3-1 実験目的

押湯には鋳型の中に設置される「ブラインド押湯」と、鋳型の中には設置されるが上
が解放されている「開放押湯」が有る。この「開放押湯」において少しでも凝固を遅ら
せて製品内の収縮部に溶湯を補給し続けようと押湯内に溶湯が上がってきたところで、
発熱ふりかけ材をふりかけるということをやることもある。

鋳造方案を立てるのに、このふりかけ材がどの程度、押し湯の凝固を遅らせるかを測
定しておく必要がある。

そこで、ブラインド押湯、開放押し湯にふりかけ材350g、および500gの3種類
の比較を行ってみた。

3-3-2 実験結果と考察

図3-3-1に実験法を示す。

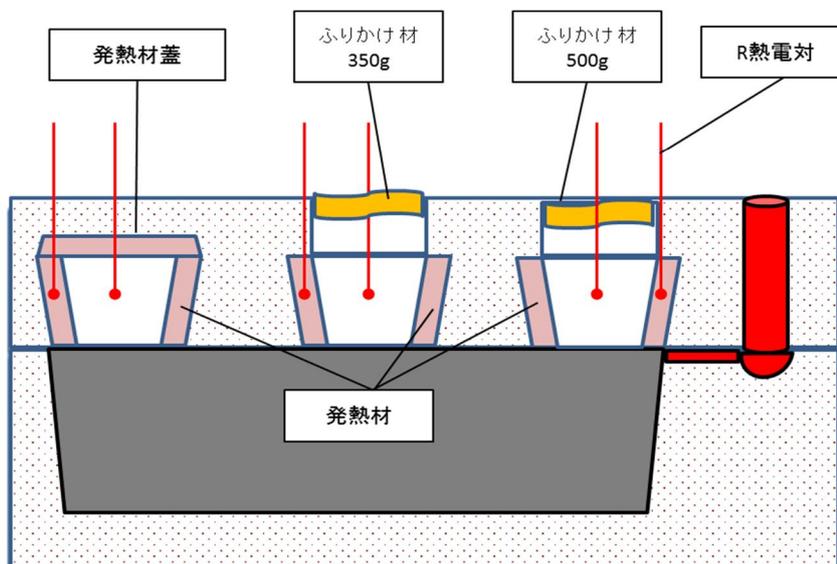


図 3-3-1 ふりかけ材の効果確認実験法

また、実験結果（温度測定結果）を図3-3-2に示す。

その結果、下記のようなことが分かった。

- 1) 押湯内の最高温度はブラインド押し湯が 1359℃と高く、ふりかけ材を多くした方が低い結果となった。
- 2) 発熱スリーブ内部の温度では、ふりかけ 350 g が 1292℃と一番高く、500gのものより高かった。
- 3) 上記より、ふりかけ材の効果は確認できなかった。

3-4 種々の鋳造方案におけるCAE結果と鋳造品内部欠陥の比較

3-4-1 実験目的

第2章で物性値を測定し、第3章の初めの方では冷し金や発熱スリーブ、ふりかけ材等周辺技術の確認も行ってきた。

これらの情報を入れて実際の鋳造品で最適鋳造方案を探す実験を色々行ってきた。実験での鋳造品のCAE結果（以降CAEと略す）と実際に鋳造した鋳造品を超音波CTでの内部欠陥確認、また切断し浸透探傷試験（カラーチェック）で欠陥を確認し

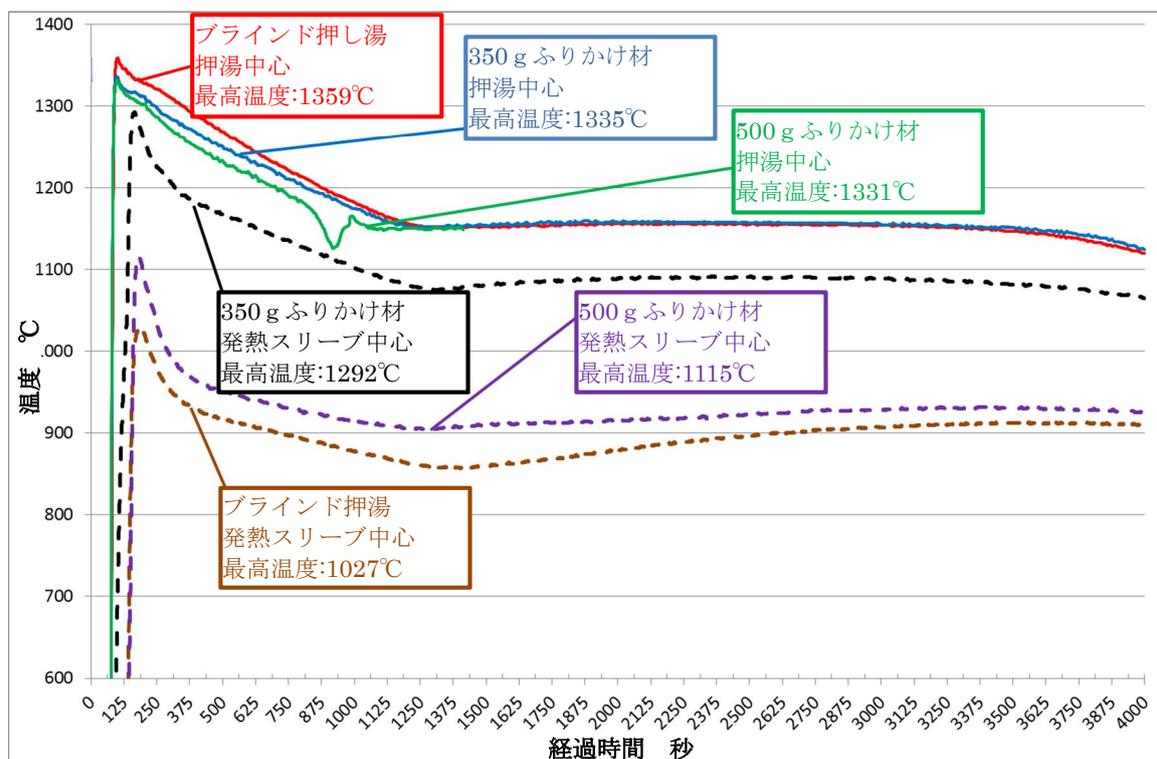


図 3-3-2 ふりかけ材使用時の押湯内温度・発熱スリーブ中心温度測定結果

欠陥の照らせ合いを行い、CAEの精度がどうなっているかを確認して行った。

3-4-2 実験結果と考察

3-4-2-1 製品の一部を模した部分モデルでの検証（その1）

製品の一部を模した部分モデルで押湯無し、冷し金無しという条件で、CAEと実際の鋳造をし、比較した結果を図3-4-1に示す。その結果をまとめると以下となる。

- 1) CAEでの欠陥評価を「健全度95%以上」という評価方法で行うと欠陥が示され、超音波CTや切断でも欠陥が確認された。
- 2) 但し、CAEと実際の鋳物欠陥位置は多少ずれていた。

3-4-2-2 製品の一部を模した部分モデルでの検証（その2）

前項で使った部分モデルで、80φ押し湯をつけ欠陥をなくそうと実験した。その時のCAEと実際の鋳造品の欠陥との比較を行った結果を図3-4-2に示す。

この結果では以下のようなことが分かった。

- 1) CAEでは健全度95%以上でも、 G/\sqrt{R} でも欠陥が見られなかった。
- 2) 実際の鋳物では、超音波CT、切断結果ともに小さな欠陥が検出され、CAEとは合わなかった。

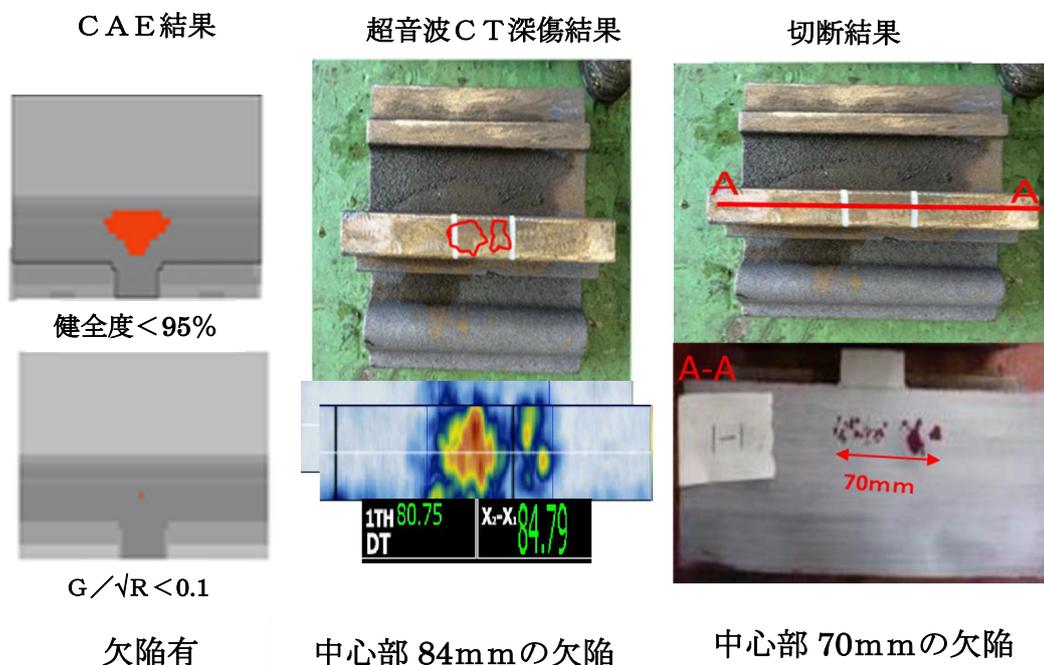


図3-4-1 部分モデルでのCAEと実際の鋳造品の欠陥比較 (その1)

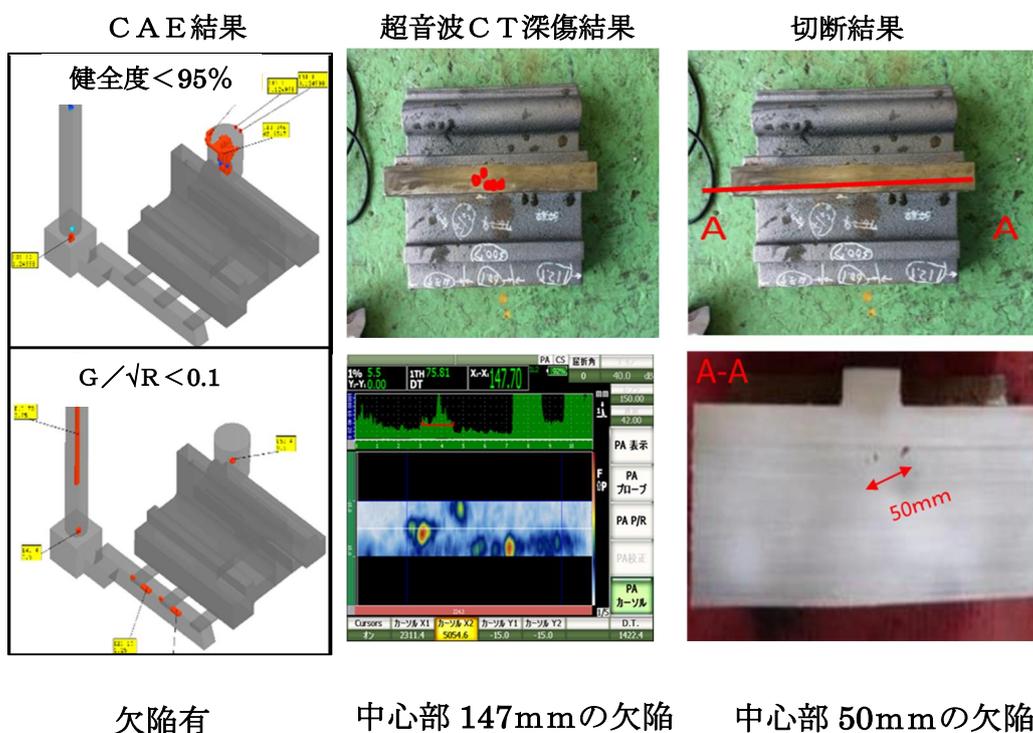


図3-4-2 部分モデルでのCAEと実際の鋳造品の欠陥比較 (その2)

3-4-2-3 CAE条件の検討

部分モデルで押湯を使ったり、冷し金を使ったりでCAEと実際に铸造した铸造品の欠陥との比較を行った結果を表3-4-1に示す通りCAEでの欠陥の予測は困難という結果となった。

そこで、CAEを行うときの条件を色々検討し、CAEと実際の铸造品欠陥との比較を行った。その検討実験を次章から示す。

表 3-4-1 部分モデルでのCAEと実際の铸造品の欠陥比較 (その3)

	押湯	冷し金	CAE結果	超音波CT結果	切断結果
1	無し	下部に使用	× 中心部に欠陥	○ 欠陥無し	○ 欠陥無し
2	無し	下部2ヶ所に使用	× 中心部に欠陥	○ 欠陥無し	△ 中心部に小欠陥
3	Φ100	無し	○ 欠陥無し	× 中心部に欠陥	× 中心部に欠陥
4	Φ70	無し	× 中心部に小欠陥	× 中心部に欠陥	× 中心部に欠陥

3-5 CAE解析条件の検討

シミュレーションする際、種々の解析条件がある。これまでにを行ったシミュレーションは下記の条件で行ってきた。

- ①押し湯の発熱スリーブの発熱量：1800kcal/kg
- ②大気圧：考慮する
- ③湯流れによる熱影響：考慮しない
- ④評価：健全度95%以上、または G/\sqrt{R}

各々どのような条件を用いれば、どのような铸造でもCAEの精度を確保されるのかを検討する。

3-5-1 押し湯の発熱スリーブの発熱量の検討

3-5-1-1 実験目的

発熱スリーブの発熱量は一般的に1800kcal/kgと言われているので、この値を使ってCAEを行ってきたが、これではCAEは合わないなのでこの発熱量を少しずつ下げて検討した。

3-5-1-2 実験結果とまとめ

250kcal/kgでCAE行った結果を示す図3-5-1に検討結果。

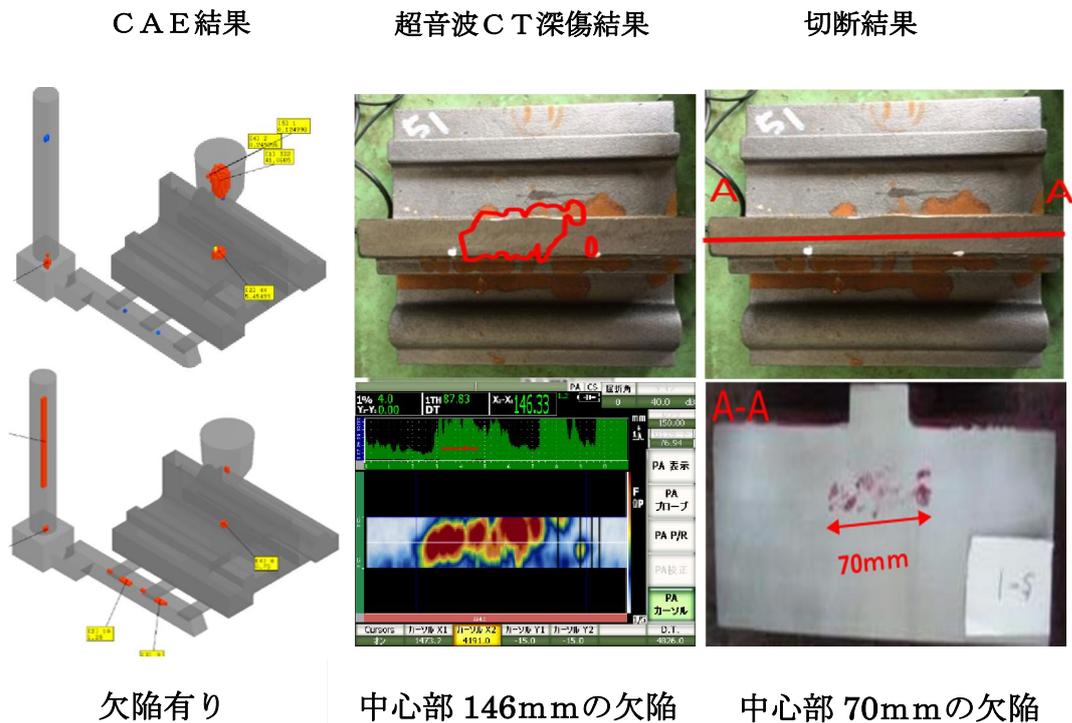


図 3-5-1 100φ 押湯発熱量 250kcal/kg でのシミュレーション結果と鑄造品内部欠陥比較結果

- 1) この条件であると健全度95%以上の評価法で評価すると鑄造品実体の欠陥と合致する。
- 2) 発熱スリーブの発熱量が250kcal/kgという値が正しいかの検証が別途必要であろう。

3-5-2 大気圧の検討

3-5-2-1 実験目的

前のCAEシミュレーションでは大気圧を考慮しての解析であったが、小物の場合は大気圧はあまり関係ないかと大気圧を無視した場合と比較してみた。

3-5-2-2 実験結果とまとめ

大気圧有り無しのCAEを図3-5-2に示す。

- 1) その結果では、大気圧を考慮するとCAEでT字部の上の方に引け有りと示されていて実際の鑄造品の欠陥とずれている。
- 2) 大気圧を考慮しないとCAEの欠陥と鑄造品の欠陥と同じような位置に欠陥を認めることができた。

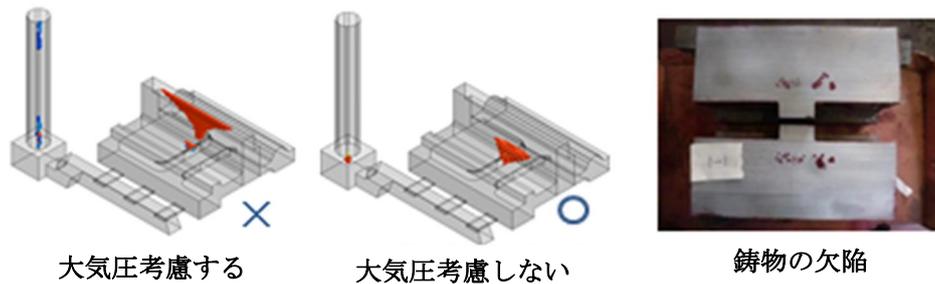


図 3-5-2 大気圧を考慮しない時と考慮した時の比較結果

3-5-3 湯流れの検討

3-5-3-1 実験目的

前のCAEでは湯流れを考慮しないでの解析、すなわち、一定温度の湯がキャビティ内に有ったとしての解析であったが、温度の高い湯が次第に入っていくという条件との比較を単純形状のモデルでなく、複雑な部分のある製品で検討した

3-5-3-2 実験結果とまとめ

結果を図3-5-3に示す。

- 1) 湯流れを考慮しないと限られた部分しか欠陥が見られない。
- 2) 湯流れを考慮すると実際の鋳物の欠陥とほぼ合致する。

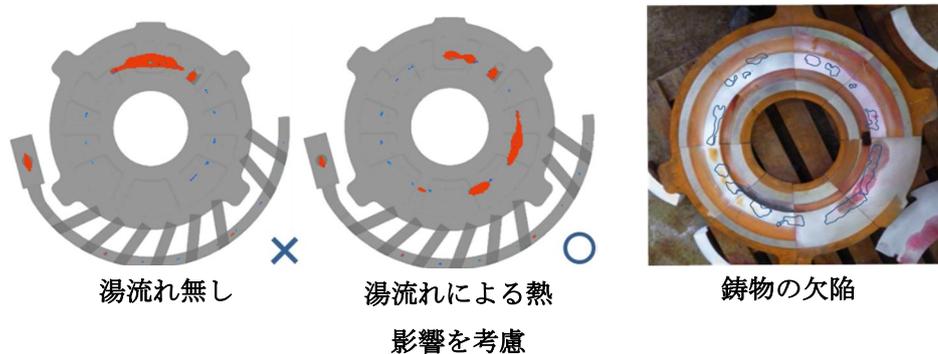


図 3-5-3 湯流れを考慮しない時と考慮した時の比較結果

3-5-4 欠陥評価方法の比較

3-5-4-1 実験目的

CAEでシミュレーションして引け巣欠陥を評価するのに、鋳物の健全度での表示、修正温度勾配法である G/\sqrt{R} での表示、最終凝固部での表示等がある。このうちのどの評価法が適切かの検討を行う。

3-5-4-2 実験結果とまとめ

図3-2-4に健全度95%以上と G/\sqrt{R} との比較を示す。

- 1) 鋳造品には欠陥が見当たらないが、 G/\sqrt{R} で評価すると大きな欠陥が表示される。
- 2) これに反して健全度95%以上での評価では欠陥が出ていないで実体と合う。

3) 健全度で評価するとこのその欠陥体積を求めることができる。

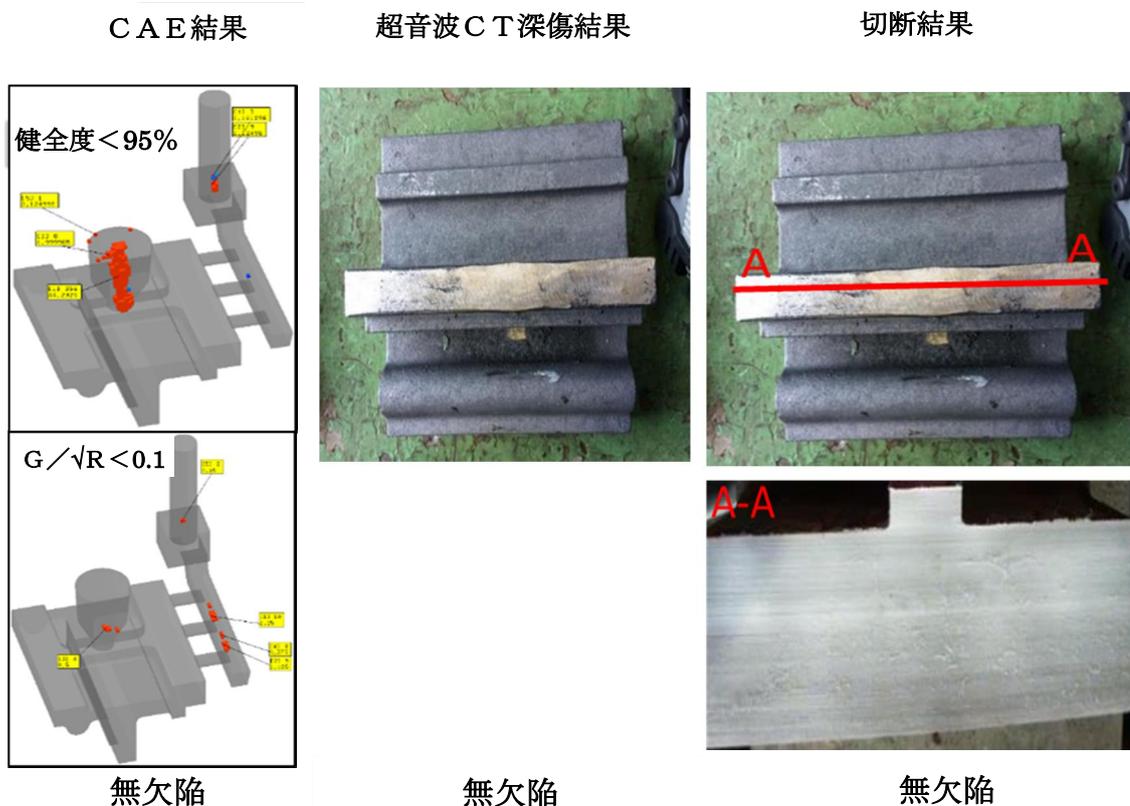


図 3-5-4 CAE欠陥評価法の比較

以上纏めるとCAEを使う条件として表3-5-1が良いと考えられる。

表3-5-1 CAEの精度を上げる条件

- | |
|---|
| <p>①押し湯の発熱量：250kcal/kg</p> <p>②大気圧：考慮しない</p> <p>③湯流れによる熱影響：考慮する</p> <p>④評価：健全度95%以上</p> |
|---|

専門用語

***レーザーフラッシュ法：**

試料の表面にレーザーフラッシュ光を照射すると、時間の経過とともに試料温度の勾配が見られ、表面の熱が裏面へと拡散していき、熱伝導率を測定できる。

****G/√R：**

温度勾配 **G** (°C/cm) と冷却速度 **R** (°C/s) を用いて、温度勾配法で引巣発生位置を評価できる。

第4章 鑄造方案・工法を盛り込んだ作業標準書の開発

前章において CAE で引け欠陥の発生の有無、また、引けの発生位置が分かるようになったので、作業基準を作るために、代表的アイテムについて、職人技ノウハウを利用していくつかの鑄造方案を考え、最適鑄造方案自動選定ツール (SolidWorks-Adstefan-Optimus) を用いて最適方案を探すこととした。

4-1 小物製品Aの最適方案

4-1-1 実験目的

職人技ノウハウを発揮して5種類の方案を考え、これを最適鑄造方案自動選定ツールにかけ一時にこのCAE結果を求めることができるかを試し、またCAEと実際の鑄物の欠陥が合うかを確認する。

4-1-2 実験結果とまとめ

方案として表4-1-1の案を作った。

表4-1-1 小物製品Aの方案の案

	押湯	冷し金	備考
案1	6カ所	3カ所	湯道寸法、湯口比は現在量産中と同一とする
案2	4カ所	2カ所	
案3	5カ所	1カ所	
案4	1カ所	下型全面	
案5	4カ所	なし	

これを最適鑄造方案自動選定ツールにかけCAE結果を一度に得た。得られた引け体積予測を表4-1-2に示す。

表4-1-2 CAE結果

	引け巣総体積 cm ³	重要部引け巣総体積 cm ³
案1	0.641	0.000
案2	1.093	1.003
案3	0.482	0.000
案4	3.428	0.008
案5	0.669	0.728

案3および1は重要部に欠陥が出ないとともに製品部も引け巣体積が最も小さい(0.482、0.641C m³)。

結論として案1と案3が最適な方案である。

なお、製品実体の引けをX線CTで撮影し、CAE結果と比較した結果を図4-1-1に示すが欠陥位置は良く合っていた。

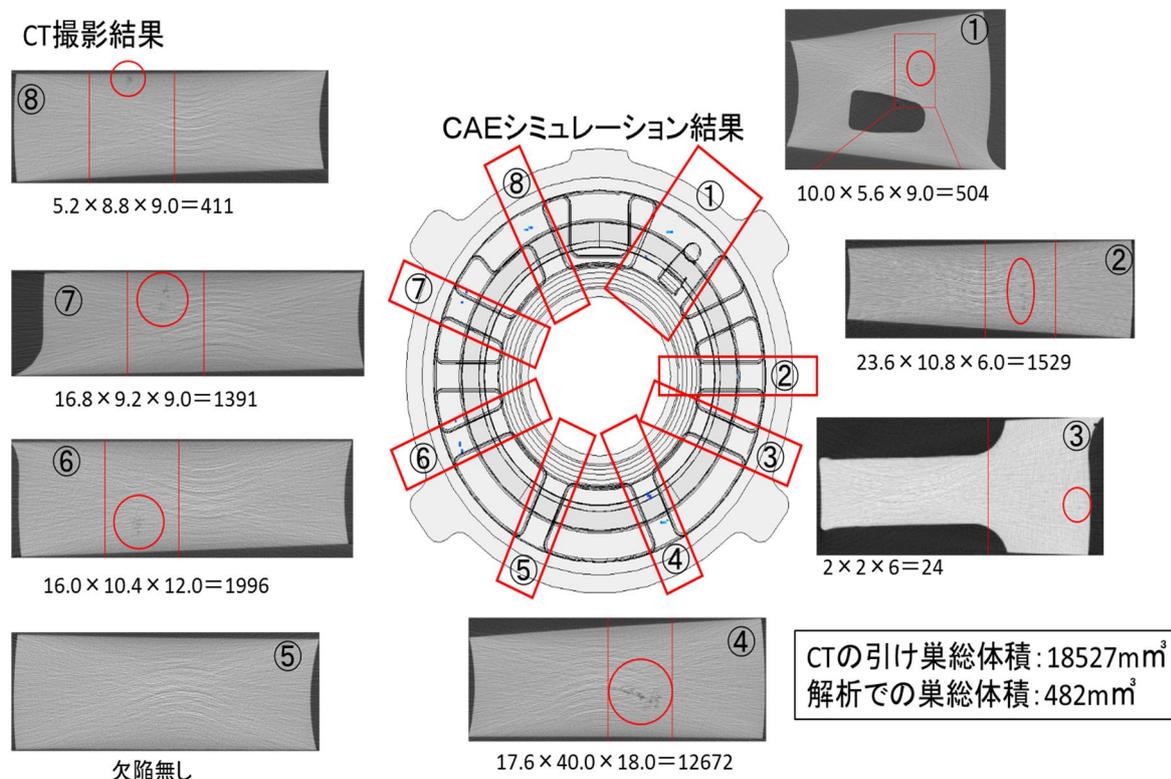


図 4-1-1 案 3 の方で鋳造した実製品の X 線 II での欠陥確認

註：図中の寸法は欠陥に外接する四角形の寸法を示す

4-2 小物製品Bの最適方案

4-2-1 実験目的

次に同様の手法で小物製品Bの最適方案を見つける。

4-2-2 実験結果とまとめ

表4-2-1に5つの方案の案を示し、表4-2-2にCAE結果を示す

CAE結果によると案5は欠陥体積が一番小さく、重要部以外の部分（製品部）は案1が欠陥が小さい。但し、まだ欠陥が重要部にあり最適方案とは言えない。

4-3 小物製品Bの更なる最適方案

4-3-1 実験目的

4-2で検討した結果ではまだ欠陥が重要部に残っており最適方案とは言えないので更なる方案検討を行うこととした。

前項で一番欠陥が小さかった案5に表4-3-1に示すように冷し金を追加してみた。

4-3-2 実験結果とまとめ

図4-3-1に铸造した物の切断結果を示す。

表4-2-1 小物製品Bの方案の案

	押湯	冷し金	備考
案1	6カ所(湯道上にサイド押湯)	なし	
案2	なし	フランジ部上下 全面	反転方案
案3	なし	重要部位2カ所	反転方案
案4	なし	重要部位2カ所	
案5	6カ所(湯道と製品 の間にサイド押湯)	なし	

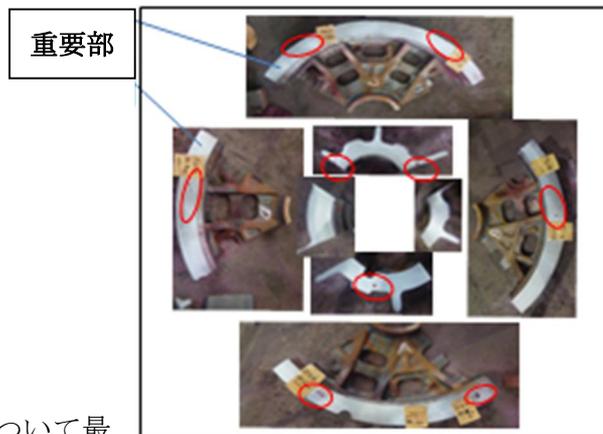
表4-2-2 CAE結果

	引け単総体積 cm ³	重要部引け単総体積 cm ³
案1	3.217	16.481
案2	10.744	58.794
案3	9.231	60.319
案4	10.921	35.918
案5	8.710	10.427

表4-3-1 小物製品Bの方案の案

	冷し金	備考
案1	なし	湯道、湯口比等は案5と 同一
案2	重要部2カ所	

この改善案でも完全には欠陥は
なくならなかったが、重要部の
引けは小さくなった。またC
AEと切断結果で引けの位置
は良く合っている。



4-4 薄肉製品Cの最適方案

4-4-1 実験目的

比較的薄物の代表として製品Cについて最

図4-3-1 切断結果

適方案を求める。

表4-4-1に方案の案を示す。

表4-4-1 薄物製品Cの方案の案

	押湯	湯道
案1	4カ所	片側湯道
案2	6カ所	同じ
案3	8カ所	同じ
案4	4カ所	両湯道

4-4-2 実験結果とまとめ

図4-4-1に最適方案のCAE結果と実際の鋳造品の切断結果を示す。

薄肉製品Cにおいては第4案が最適方案で、CAEでも欠陥が無く、切断も欠陥はなくこの方案が最適と考えられる。

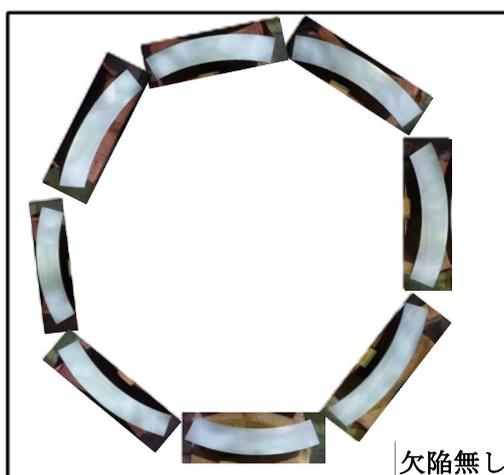


図4-4-1 切断結果測

4-5 大物製品Dの最適方案

4-5-1 実験目的

重量がある大物の例として大物製品D（重量600～900kg）の最適方案を求める。

4-5-2 実験結果

先ず現在生産されている方案でのCAE結果と、実際の欠陥を調べてみた。CAEの結果を図4-5-1に、製品各部位のX線検査結果を図4-5-2に示す。

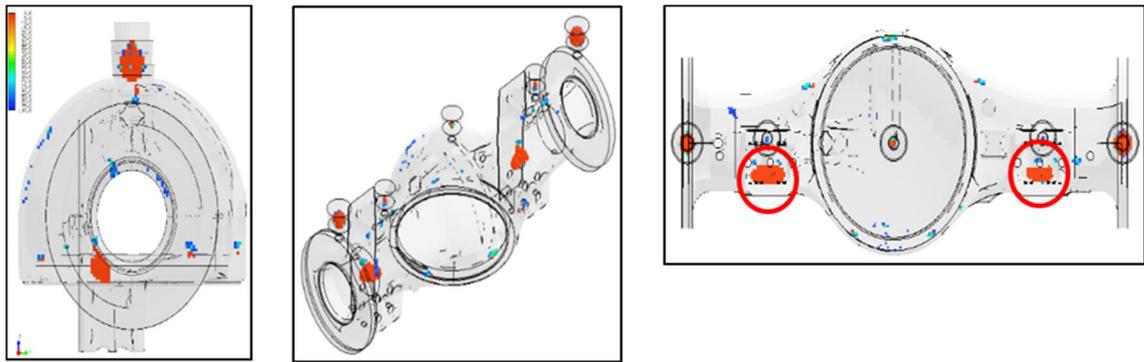


図 4-5-1 CAE による欠陥予測

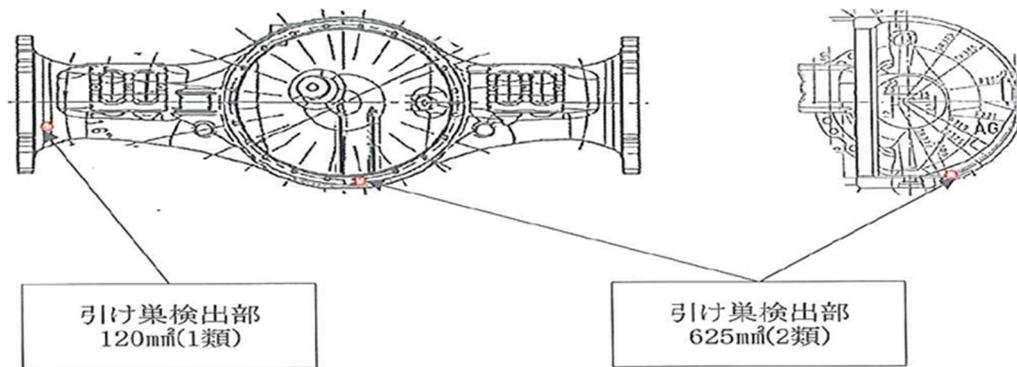


図 4-5-2 X線検査結果

小物、薄物ではCAEで欠陥を予測できたが、この大物製品DではCAEでは引け欠陥が多く場所に出るという結果になっているが、鋳造品では欠陥が出そうところのX線検査結果ではわずかな欠陥しかが見当たらず、今までのCAEシミュレーション条件では欠陥を予測することができない。

この製品DではX線の結果では問題になる欠陥が見つからないので、現行の方案を最適方案とした。

4-6 大物製品E最適方案

4-6-1 実験目的

これも重量がある大物の例として大物製品E（重量900～1200kg）の最適方案を求める。

4-6-2 実験結果

図4-6-1に現在使われている方案でのCAE結果を示す。また、切断結果を図4-6-2に示す。

この場合もCAEでは欠陥ありとなっているが実際の製品を切断して調べた結果で

は欠陥が無い。そこで結論としては、現行方案を最適方案とした。

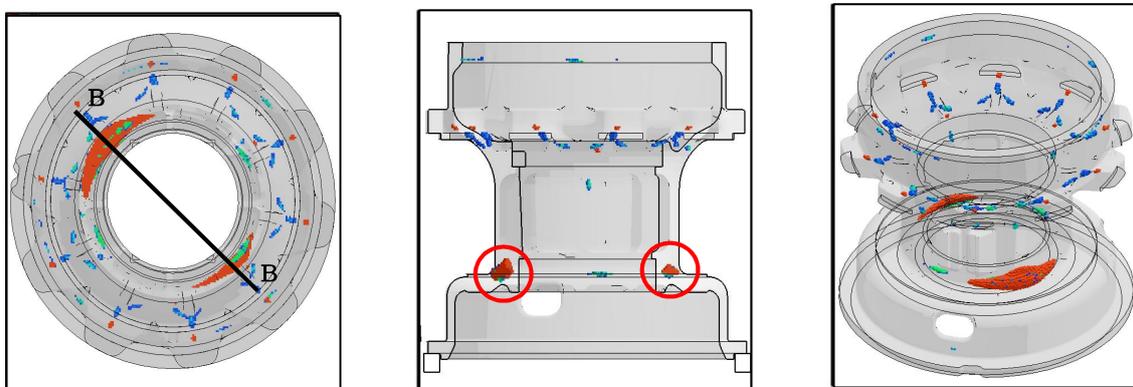


図 4-6-1 CAE による欠陥予測

4-7 大物品のCAE条件の検討

製品D, Eは今までのCAE条件では欠陥予測が難しいことが分かった。

色々検討した結果、大物は鋳込み後の冷却が遅く黒鉛の膨張が十分に行われ、小物、薄物では収縮率を図4-7-1のAのように1%で設定しているが、 1.1×10^5 立方センチメートル以上の大物品は収縮率はBの様に収縮率が1.0~0~-0.5%と変化すると仮定してこれを条件にCAEを行うと引け無しとなり実際の鋳造品と合うと想定された。今後さらなる検討を要する。

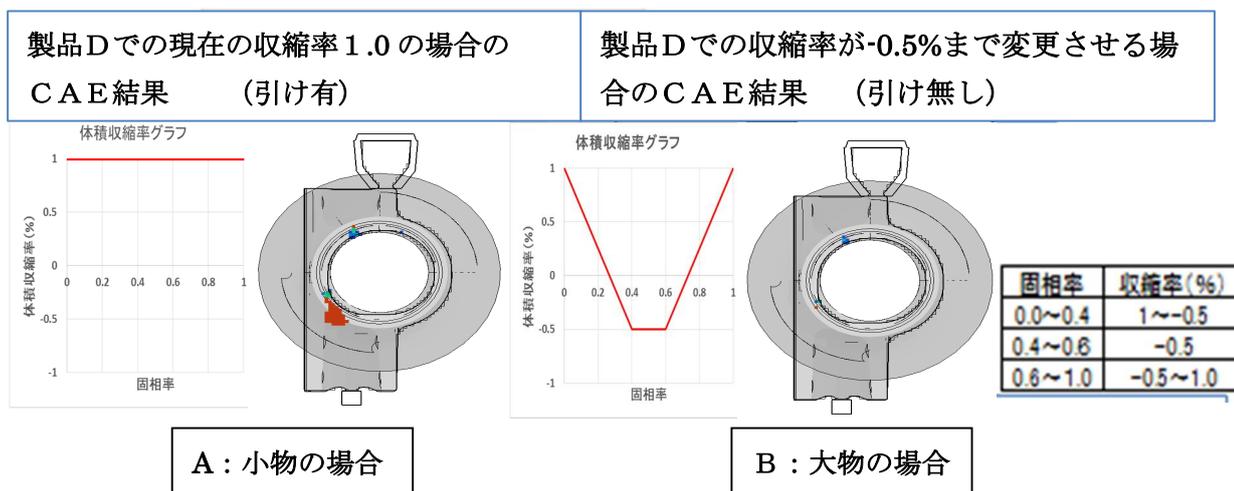


図 4-7-1 大物品の収縮率による差

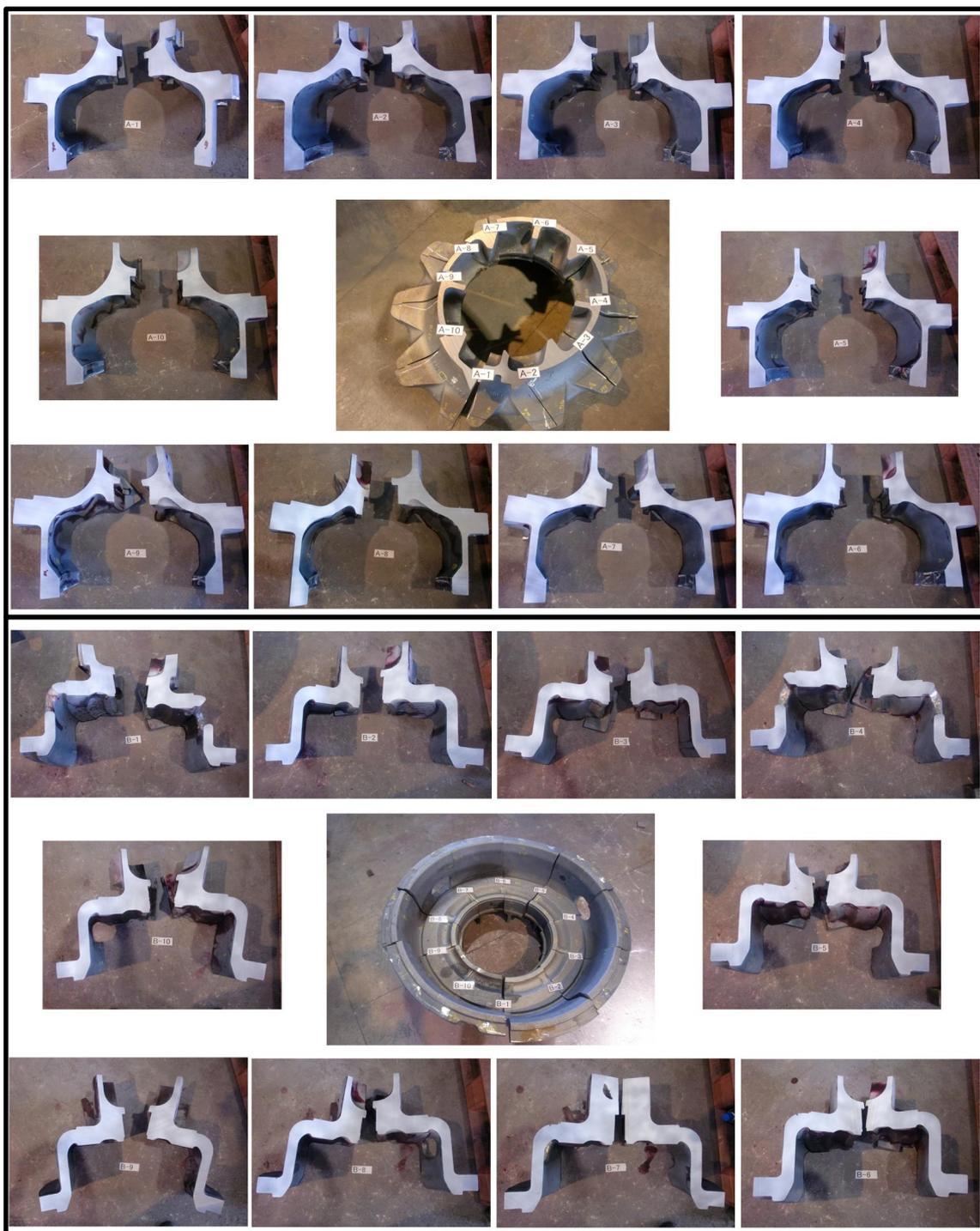


圖 4-6-2 切斷檢查結果

4-8 作業基準の作成

前の項まで方案設計の作業標準、製造の作業標準、品質保証の作業基準を作るための種々の実験、調査を行ってきて、これらをもとに各工程での作業基準の作成を行った。

4-8-1 方案設計の作業基準

表4-8-1に現在多量に生産されているアイテムの方案設計の作業基準を示す。

表 4-8-1 方案の設計基準

製品名	標準項目
小物 製品A	<ul style="list-style-type: none"> ・ 押湯冷し金無しにて解析し、最終凝固部付近に押湯を設ける ・ 重要部が下側に来るように落とし込みにする ・ 冷し金は指向性凝固になるように設置する 冷し金は鋳物形状に合わせ、厚さは肉厚と同じとする ・ 湯口比に関しては (1 : 1.08 : 1.01)
薄肉 製品B	<ul style="list-style-type: none"> ・ 肉厚のある重要部には冷し金を設置し凝固を促進させる 冷し金は鋳物形状に合わせ、厚さは肉厚と同じとする ・ 製品は全て下側にレイアウト ・ 薄肉物はサイド押湯を設置し ・ 湯口→湯道→サイド押湯→堰→製品となる様にする ・ 湯口比に関しては (1 : 1.2 : 2.6)
小物 製品C	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製品はすべて下型にレイアウトする ・ 冷し金は指向性凝固になるように下型端面に設置、製品高さの1/3の厚さで指向性凝固促進させる ・ 押し湯は上型に設定し、冷し金との指向性凝固になるように設置する ・ 湯口に関しては (1 : 1.4 : 0.9)
大物 製品D	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製品は中心割りで上下にレイアウトし、ハバキを下にし中子を安定させる ・ 冷し金はタップ穴部、ボス、フランジに肉厚と同じ厚さで設置 ・ 押湯はフランジ、四角パット面、中心部の上型に設置 ・ 湯口比に関しては (1 : 1.6 : 0.8)
大物 製品E	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製品は中子セットを考慮し、フランジ（花びら）で上下にレイアウトする ・ 冷し金は下型にフランジ部、内径ベアリング部の重要部に設置し、厚さは製品と同じ厚さとする ・ 押湯はトップに設置し開放とする ・ 湯口はむくり上げ方案とする ・ 湯口比に関しては (1 : 1.3 : 0.8)

4-8-2 製造の作業基準

これまでの铸造実験は、従来からの製造基準として決められている溶湯の化学成分、注入温度、铸物砂組成、铸型強度で行ってきたので、製造時基準は従来からの製造基準とする。

4-8-3 品質保証の作業基準

これも、従来の品質保証基準にのっとりて品質検査を行ってきたので、従来からの基準を品質保証基準とする。

但し、内部欠陥に関する品質保証基準として、従来の切断、超音波探傷、X線を用いることに加え、今回導入し開発した超音波探傷CTを用いることを追加する。

具体的使用法を図4-8-1に示す。

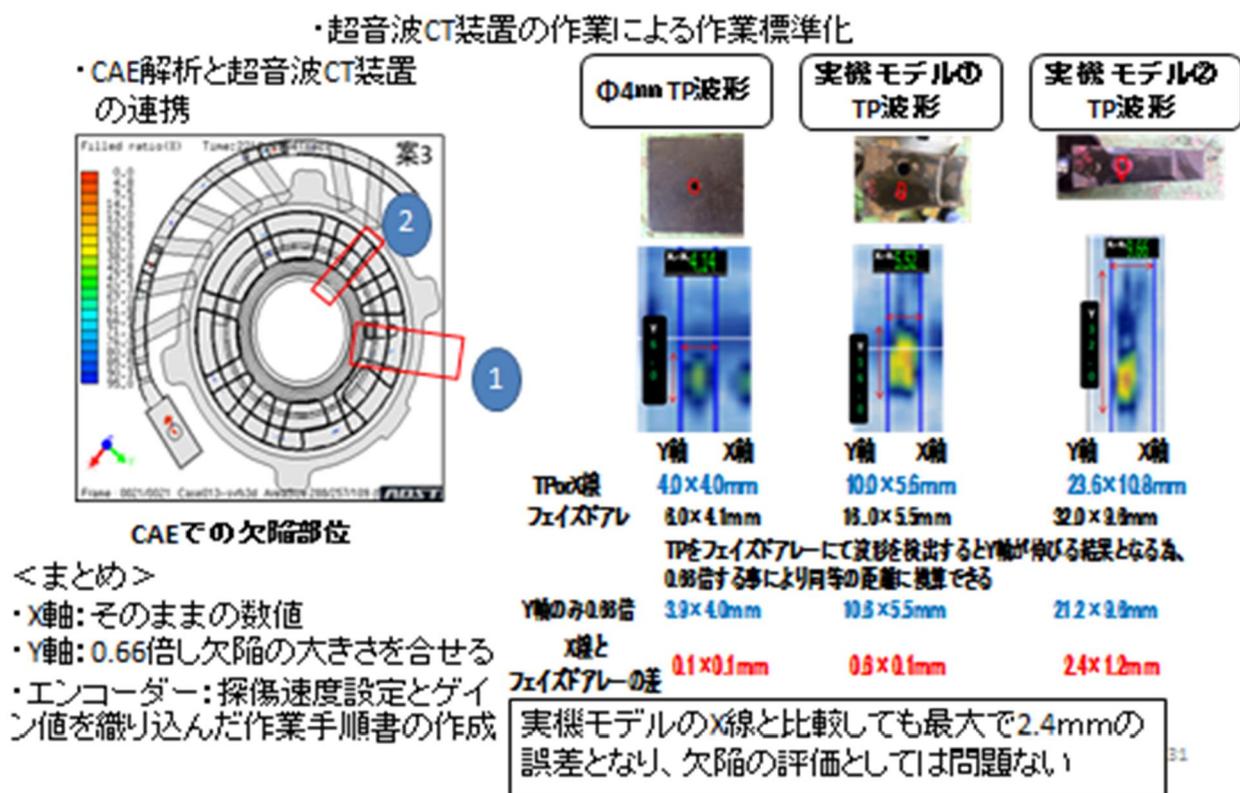


図 4-8-1 超音波探傷CTの使用基準

第5章 全体総括

3年間の開発のまとめを以下に示す。

1. 鑄造材の多様化に対する解析設計値検証システムの開発

今回採用したCAEソフトにおいて引けの検出については

- ・解析の押湯の発熱量は250kcal/kgで実施する。
- ・解析は大気圧を考慮に入れず評価する。
- ・湯流れは考慮する。
- ・解析での評価は健全度95%で行う。

以上を行うことで、解析結果と鑄造品における超音波CT及び切断での欠陥位置は合うようになった。

2. 職人技ノウハウを最適方案へ展開する「使い易い鑄造シミュレーションシステム」の開発

- ・いくつかの小物鑄物、薄肉鑄物、大型鑄物の最適方案を探すことができた
- ・大物製品は解析上の収縮率を1.0~0~-0.5%と冷却に従って変化させることでCAEの欠陥的中率を向上させることができる。

3. 鑄造方案・工法を盛り込んだ作業標準書の開発

1) 設計作業標準

- ・代表的な小物・薄肉・大物鑄物の方案設計基準をCAEで探し出した方案で作り上げた。

2) 製造作業標準

- ・現状の化学成分、砂性質、鑄型硬度を管理値とする。

3) 品質保証作業標準

超音波CT探傷について

- ・X軸はそのままの数値が良いがY軸では0.66倍し欠陥の大きさを合せる必要がある
- ・エンコーダーの探傷速度の設定とゲイン値を織り込んだ作業手順書の作成中

以上