

令和4年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「鋳鉄製品の不良低減と被削性を向上させる
IoT/AI キュポラ溶解制御システムの開発」

研究開発成果等報告書

令和5年3月

担当局 経済産業省 中部経済産業局
補助事業者 一般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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	3
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	
2 - 1	データベース構築への対応	7
2 - 2	キュポラ操業エキスパートシステムの開発	13
2 - 3	鑄鉄溶湯熱分析装置の開発	14
2 - 4	被削性アドバイスシステムの開発	17
第 3 章	全体総括	
3 - 1	研究開発の成果概要	24
3 - 2	研究開発後の課題・事業化展開	25

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) 研究開発の背景

自動車関連等川下産業ではグローバルな競争に勝つため、鑄鉄鑄物製品に対しコストダウンを強く望んでいる。また、鑄鉄鑄物の切削工程まで含めたコストダウンには、不良の低減及び被削性の向上は不可欠である。

鑄鉄溶解に関しその生産性・溶解コストなどキュポラによる溶解は、電気炉に比べはるかに優れている。すなわち、キュポラ工場におけるエネルギー消費量 (0.232kl/溶解 t) は、電気炉工場 (0.2919kl/溶解) に比べて 25%ほどエネルギー消費量は少ない。また、CO₂ 排出量に関してもキュポラ工場 (0.6293t/溶解 t) と電気炉工場 (0.6514t/溶解 t) と同程度の排出量を示している。さらに、キュポラ溶解において、溶解された溶滴は強い還元作用を持つ高温のコークス表面を滴り落ち、脱酸素・脱マンガンを精錬効果を受け不純物の少ない清浄な溶湯が得られる。ただし、キュポラから出湯される溶湯の性状は、材料であるスクラップ・リターン材や熱源であるコークス等のバラツキだけではなく、季節変動さらには天候等にも大きく左右される。またキュポラに投入された材料は約 1 時間後に溶湯となって出湯されるため、注湯工程において必要とされる溶湯の性状を 1 時間前には予測し投入する材料の配合・コークスの量と配合を調整しなければならない。この調整は従来技術としては職人の経験と勘に頼らざるを得ない。ただし、職人でも読みが外れることが多々あり溶湯品質の低下につながる。このため被削性の悪い製品を川下産業であるメーカーに届けることとなり、加工工程でのコストアップにつながっている。

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">○川下産業のニーズ：自動車関連等川下産業ではグローバルな競争に勝つため、鑄造品のコストダウンに期待 ⇒ 鑄造品の不良低減及び被削性の向上が不可欠○鑄造産業のニーズ：不良低減及び被削性の向上のためには、溶湯品質の向上が急務○社会的ニーズ：環境への配慮として、鑄造品生産時の CO₂ 排出量低下が求められている。 |
|---|

(2) 研究目的及び目標

本事業では、キュポラを計装化し職人の経験をデータ (IoT) に勘を AI に置き換える図 1 に示すような「キュポラ溶解エキスパートシステム」を開発し日本製品の品質向上とトータルコストダウンに役立てる。収集されたデータは、製品品質 (引張強さ、硬さ、材質、組織写真、不良内容等) とともにデータベース化する。蓄積したデータを AI に学習させる。学習した AI は、現在のデータから 1 時間後の溶湯性状を予測しオペレータに伝える。またオペレータは 1 時間後に必要とされている出湯量、溶湯品質を AI に伝え、AI は操業条件の変更等をアドバイスする。また、冷却曲線による溶湯性状分析装置と溶解工程のセンシングデータ/被削性データを紐づけして、被削性向上のためのアドバイスシステムを開発する。

なお、事業を実施するにあたり、掲げたサブテーマとその目標を表 1 に示す。

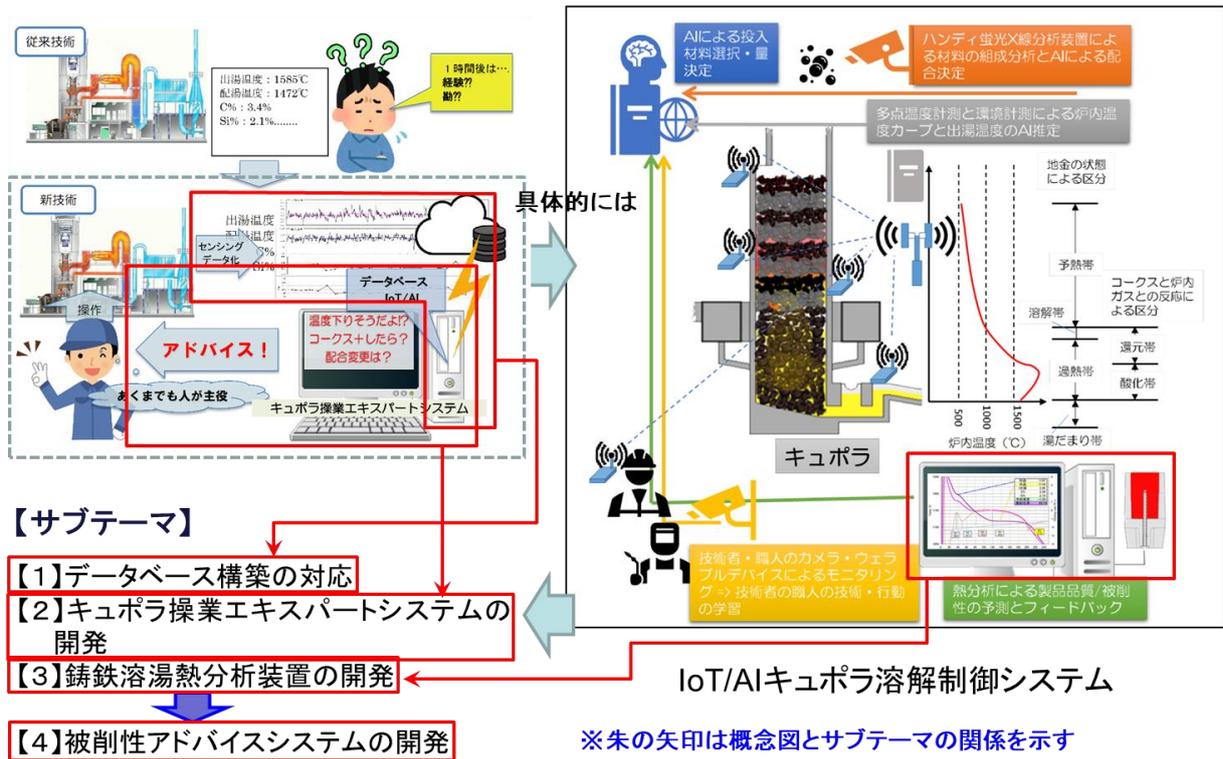


図1 キュポラ溶解エキスパートシステムの概念図

表1 各サブテーマとその目標

最終目標	
1. データベース構築への対応	キュポラ操業に係る出湯温度等の収集したデータを時間その他で紐づけしデータベースを構築
2. キュポラ操業エキスパートシステムの開発	1項で構築されたデータベースを使いAIで処理し、現状の操業状態から1時間後の溶湯性状を予測するキュポラ操業エキスパートシステムを開発
3. 鋳鉄溶湯熱分析装置の開発	凝固過程における各ポイントでの凝固潜熱放出量が測定でき鋳鉄組織の良し悪しが推定できる鋳鉄溶湯熱分析装置を開発
4. 被削性アドバイスシステムの開発	被削性アドバイスシステムの完成、またIoT/AIキュポラ溶解制御システムとの相互リンク

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

本事業は、図2に示すような体制で研究開発を実施した。なお、事業管理法人である（一財）素形材センター内に、研究実施機関、及び研究内容に関する識者、及びユーザーで構成する推進委員会を設置し、本事業の推進を行った。

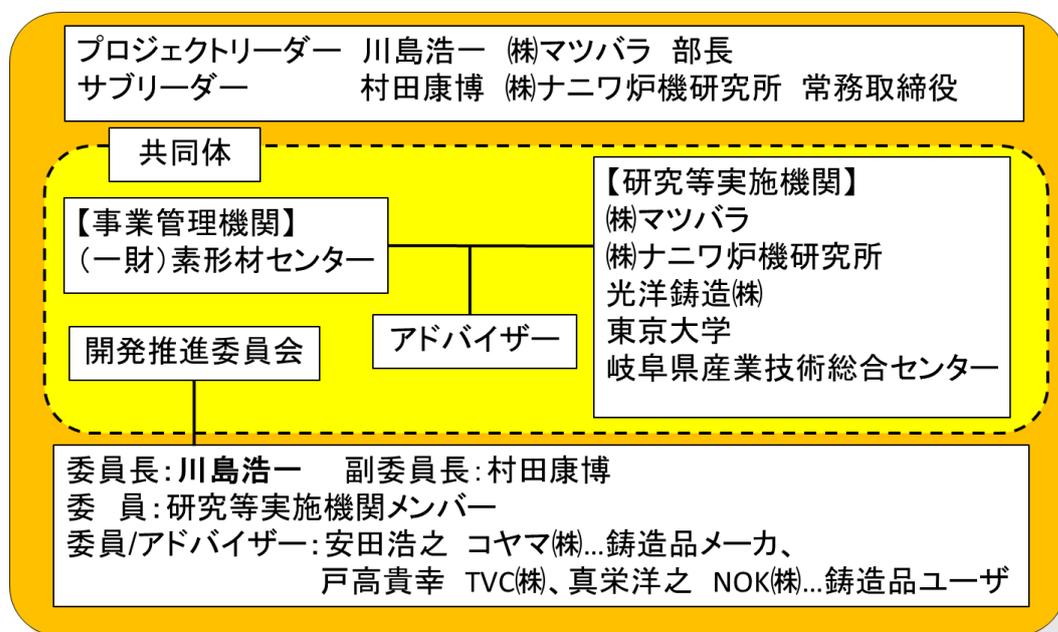


図2 本事業の実施体制

①事業管理機関

名称	一般財団法人素形材センター
代表者及び役職名	青木宏道 会長（～令和4年6月） 小脇一朗 会長（令和4年6月～）
本社所在地	（〒105-0011）東京都港区芝公園三丁目5番8号
主な事業所所在地	所在地：（〒105-0011）東京都港区芝公園三丁目5番8号 事業所名：一般財団法人素形材センター
電話番号	03-3434-3907
担当者名及び役職名	田邊秀一 技術部長

②研究等実施機関

名称	株式会社マツバラ
代表者及び役職名	松原史尚 代表取締役社長
本社所在地	（〒504-0034）岐阜県各務原市那加浜2丁目22番地
主な事業所所在地	所在地：（〒501-3924）岐阜県関市迫間字大下1-1 事業所名：株式会社マツバラ 関工場
電話番号	0575-24-5657

担当者名及び役職名	川島浩一 技術員室担当部長
-----------	---------------

名称	株式会社ナニワ炉機研究所
代表者及び役職名	代表取締役社長 村田 博敏
本社所在地	(〒581-0851) 大阪府八尾市上尾町5丁目1番地8
主な事業所所在地	所在地：(579-8037) 大阪府東大阪市新町12番34号 事業所名：株式会社ナニワ炉機研究所
電話番号	072-986-2578
担当者名及び役職名	村田康博 代表取締役常務

名称	光洋鑄造株式会社
代表者及び役職名	白江 一 代表取締役社長
本社所在地	(〒518-1152) 三重県伊賀市予野西出2624
主な事業所所在地	所在地：(〒518-1152) 三重県伊賀市予野西出2624 事業所名：光洋鑄造株式会社
電話番号	0595-39-0080
担当者名及び役職名	白江 一 代表取締役社長

名称	国立大学法人東京大学
代表者及び役職名	藤井輝夫 総長
本社所在地	(〒113-8654) 東京都文京区本郷7丁目3番1号
主な事業所所在地	所在地：(〒113-8654) 東京都文京区本郷7丁目3番1号 事業所名：国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科
電話番号	03-5841-6491
担当者名及び役職名	伊藤寿浩 大学院工学系研究科精密工学専攻 教授

名称	岐阜県産業技術総合センター
代表者及び役職名	梅村澄夫 所長
本社所在地	(〒501-3265) 岐阜県関市小瀬1288
主な事業所所在地	所在地：(〒501-3265) 岐阜県関市小瀬1288 事業所名：岐阜県産業技術総合センター
電話番号	0575-22-0147
担当者名及び役職名	平湯秀和 情報報技術部長

③ 研究開発推進委員会

委員長 (PL)	川島浩一	株式会社マツバラ 技術員室担当部長
副委員長 (SL)	村田康博	株式会社ナニワ炉機研究所 代表取締役常務
委員	伊藤寿浩	国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 教授
	白江 一	光洋鑄造株式会社 取締役社長
	平湯秀和	岐阜県産業技術総合センター 情報技術部 部長

	久富茂樹	岐阜県産業技術総合センター 情報技術部 主任専門研究員
アドバイザー	安田浩之	株式会社コヤマ 第一製造部 部長
(委員)	戸高貴幸	TVC株式会社 鋳造部 主幹
	真栄洋之	NOK株式会社 製造第2副課長
事務局		一般財団法人素形材センター

1-3 成果概要

令和2年度から令和4年度の3年間で取り組んできた本事業の成果概要を下表に示す。

サブテーマ/年度目標	研究開発の成果
<p>【1】 データベース構築への対応</p> <p>【1-1】 キュボラ溶解の計装化</p> <p>【1-2】 収集したデータのネットワーク対応</p> <p>【1-3】 データベースの構築</p>	<p>【1-1】 現在測定している温度・圧力・電流等のデータを導入した PLC に入力、データとして蓄積できるシステムを創り上げた。CO₂/CO ガス濃度測定装置を導入、PLC にデータを送信・蓄積できるようになった。</p> <p>【1-2】 導入した PLC を社内ネットワーク上に置いた。</p> <p>【1-3】 PLC からのデータを、ネットワークを通しデータベースに蓄積できるシステムを完成させた。</p>
<p>【2】 キュボラ操業エキスパートシステムの開発</p>	<p>構築されたデータベース・出湯温度データ及び1分毎に細分化された投入材料/燃料を時間で紐づけした EXCEL シートを作成した。このデータを AI ソフトである Predict に学習させ操業状況を予測したところ、45 分後のデータと相関が高いことがわかった。このことから、投入する材料/燃料が 1 時間以内溶湯となることが明確となった。また、予測値も実測との相関が高く実用性があることも明確にした。</p>
<p>【3】 鋳鉄溶湯熱分析装置の開発</p>	<p>溶湯の凝固曲線の正確な収集、及びその曲線よりリアルタイムで凝固潜熱放出量を計算できる装置を完成させた。</p> <p>本内容が鋳造工学 第 93 巻(2021)第 5 号に掲載されるとともに特許も出願した。</p>

<p>【4】被削性アドバイスシステムの開発</p> <p>【4-1】被削性試験テストピース用鋳造型の設計とテストピース鋳造</p> <p>【4-2】切削加工と刃先の摩耗状態観察、切削加工時刃先温度測定</p> <p>【4-3】鋳造品の残留応力測定</p> <p>【4-4】被削性アドバイスシステムの完成</p>	<p>【4-1】被削性試験テストピース用鋳造型の設計、製作および鋳造をおこなった。</p> <p>【4-2】鋳造されたテストピース鋳物について、キュボラ性鋳物と電気炉製鋳物の被削性の比較試験を行った。</p> <p>【4-3】X線による残留応力測定を行ったプーリー形状の鋳物(キュボラ製鋳物と電気炉製鋳物)について、歪みゲージを用いた切断法による残留応力測定を行った。いずれも応力値としてはせいぜい 10MPa 程度と小さく、それほど大きな変形をもたらすものではなかった。</p> <p>【4-4】切削時切削抵抗及び温度測定、また鋳造品組織・硬度等比較結果より被削性の良い鋳物は硬度が高いがそのバラつきは少ないという結果を得た。また、切削抵抗においても同様の結果が出ており鋳物内の組織のバラつきが被削性に大きな影響を及ぼすことが明確になった。旧来鋳物内の硬度のバラつきは黒鉛核数(共晶セル数)に影響しているといわれており、熱分析装置で黒鉛化度等の測定及びその改善で切削性は推定できることがわかった。</p>
---	---

1-4 当該研究開発の連絡窓口

一般財団法人素形材センター 技術部

東京都港区芝公園3丁目5番8号 機械振興会館3階301号室 (〒105-0011)

TEL:03-3434-3907 FAX:03-3434-3698 E-mail:kinzoku@sokeizai.or.jp

URL: <https://www.sokeizai.or.jp/>

第2章 本論

2-1 データベース構築への対応

2-1-1 キュボラ溶解の計装化

(1) 研究開発の具体的内容

中・小型のキュボラは、炉頂で CO ガスが燃焼し雰囲気温度は 1000°C を超え計測環境は劣悪となっている。また CO 濃度を測るためには、燃焼反応が起こる前、キュボラの内部よりガスを吸引する必要があるが現在は計測されていないのが実情である。IoT/AI 溶解制御システムを構築する上で必要となる炉頂 CO 濃度を、中・小型キュボラ専用 CO 計測システム開発・設置することにより連続測定する。

また、温度の連続測定では非接触の放射温度計にて測定することが一般的である。ただし、キュボラの出湯温度を放射温度計にて測定しようとした場合、ヒュームやフラッシュによるノイズが多い環境のため精度の高い計測は現状困難となっている。今回の研究開発実施機関である鑄造企業では同様の環境である注湯温度に対し、放射温度計から出力されたデータを PLC にノイズフィルタープログラムを組み込み精度よく測定できている。この放射温度計のシステムをキュボラ出湯温度計測用に開発し、連続測定を実現させる。

(2) 研究開発の成果

本事業では鑄造品の要求特性や不良低減等を達成するためには“キュボラ溶解から良い溶湯性状を得る”こととしている。そこで鑄造組織や凝固・湯流れを決定づける重要な因子である出湯温度を指標として定め、最適な出湯温度の±10°C以内を目指すこととしている。

このキュボラ溶解の計装化では、CO 濃度測定等のためのキュボラ用 CO センサ設置し、放射温度計、出湯温度記録システム、データロガー及び計測制御用 PLC との連携を含め、図 1.1.1 に示すようなデータ収集システムを完成した。

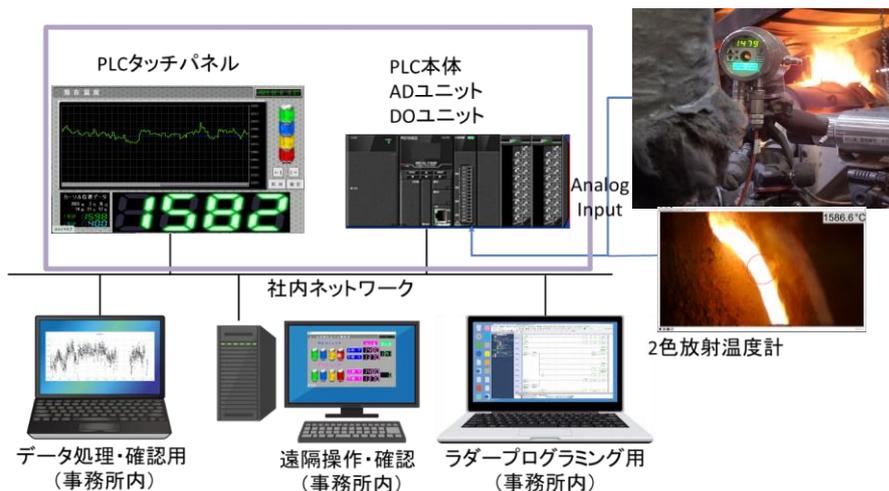


図 1.1.1 放射温度計による出湯温度計測システム

これらより、導入したキュポラ計測制御用 PLC からの図 1.1.2 に示すような実データを確認することが可能となった。図 1.1.3 にマツバラに設置した同社のキュポラ操業のデータ収集システム画面を示すと共に、図 1.1.4 及び図 1.1.5 に本システムで得られたキュポラ操業時に収集したデータの事例を示す。

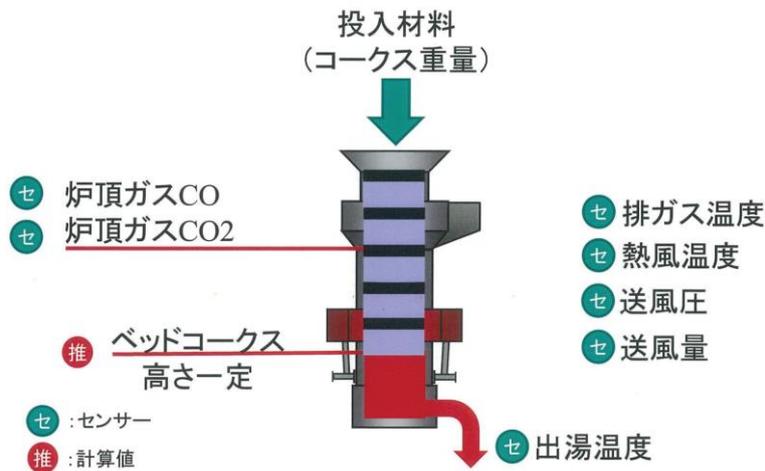


図 1.1.2 キュポラ操業時の測定項目



図 1.1.3 キュポラ操業のデータ収集システム画面

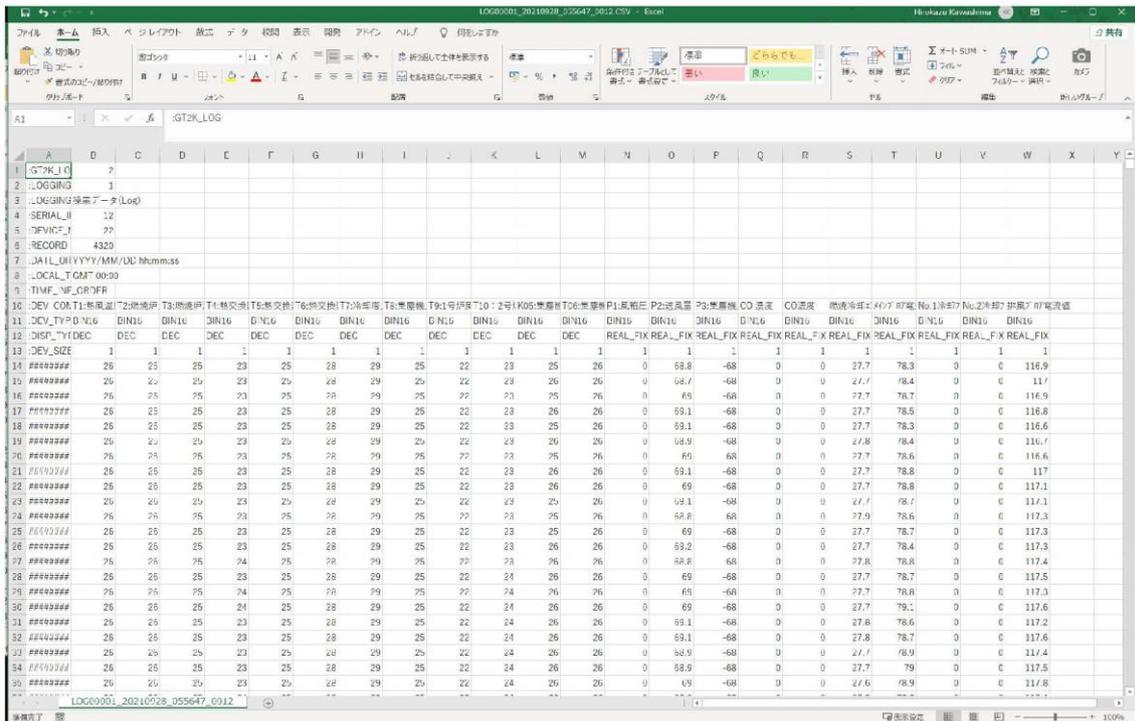


図 1.1.4 キュボラ計測制御用 PLC からの実データ

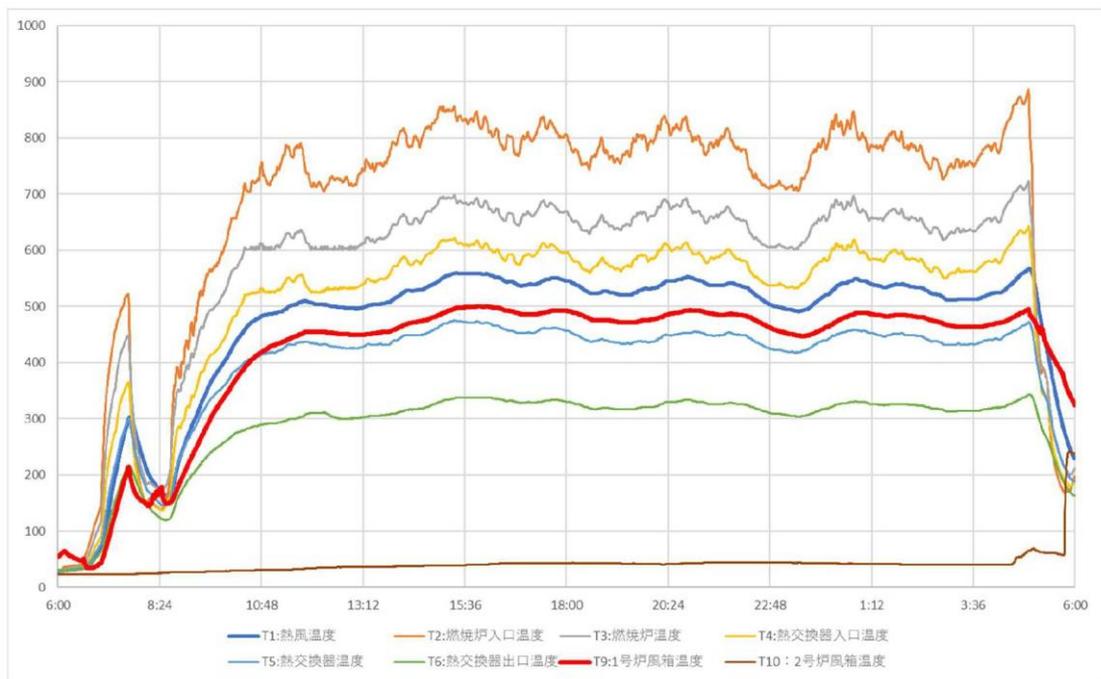


図 1.1.5 実データ (図 1.1.4) から作成したキュボラ操業時の時系列グラフ

また、キュボラ操業の IoT/AI を進めていく一方で、やはり人的な要素に頼る工程も残ってくる。そのデジタル化の推進として、昨年度に検討した機械設備の振動状態をモニタリングするデバイスをアン

テナと組み合わせることにより、無電源で振動検出が可能となるデバイスを試作した。また、職人の健康状態や対応を記録するシステムとして応用可能な、マイクを搭載したウェアラブルデバイスを試作した。さらに腕時計型熱中症リスク判定デバイスを試作し、キュポラ溶解設備の職人への装着実験を実施するとともに、職人への適用を模した実験によりキュポラ溶解設備の職人に適用する鼓膜温度推定ニューラルネットワークを開発した。

2-1-2 収集したデータのネットワーク対応

(1) 研究開発の具体的内容

現在キュポラ関連で収集されているデータは、紙ベース（プロッタ）で残されていて、データベース化されていない。現在データを収集しているデータロガーをネットワーク対応のデータロガーに置き換え、サーバーで一元管理する。

またクラウドサーバーも活用し、キュポラの状態を遠隔で監視できるシステムとする。

(2) 研究開発の成果

キュポラ関連で収集されているデータのデータベース化として、これまでデータを収集しているデータロガーをネットワーク対応のデータロガーに置き換え、サーバーで一元管理することとした。具体的には、次のサブテーマ図 1.3.1 に示すように、PLC から FTP サーバーを介して NAS（ネットワーク対応 HDD）へのデータ受け渡し用システムを確立した。

2-1-3 データベースの構築

(1) 研究開発の具体的内容

職人の今後（30～1 時間後）キュポラから出湯される溶湯の材質、温度などを予測し配合の変更を指示している。その指示の結果は、投入材料別の重量として記録されている。この投入記録もデータベース化し、キュポラがどんな状態のときは、職人はどう手を打つかをこの後開発する AI システムに学習させる。その他、収集したデータも時間その他で紐づけしデータベースを構築する。

また、現在あるデータベース（砂特性、材質関連）や検査実績（不良項目・不良率等）とも紐づけし生産関連のデータが一括管理できるようにする。

(2) 研究開発の成果

キュポラ溶解の計装化によって得られた計測データを、ネットワークを介してオンラインで、データベースに自動書込みを行う仕組みを構築した。以下にその詳細を記載する。

図 1.3.1 に、データベースへのデータ書込み処理手順のイメージを示す。併せて、図中に記載の①～④の内容（処理手順）を以下に示す。

- ① PLC から計測データ (CSV ファイル) を、PC の FTP サーバ (FileZilla) に送る。
- ② FTP サーバは CSV ファイルを受信すると、NAS の CSV フォルダに保存する。
- ③ バッチファイルに従い、NAS の CSV フォルダにある CSV ファイルを、データベース (MySQL) に書込む。
- ④ バッチファイルに従い、1 週間分のデータを自動的に CSV ファイルで出力する。

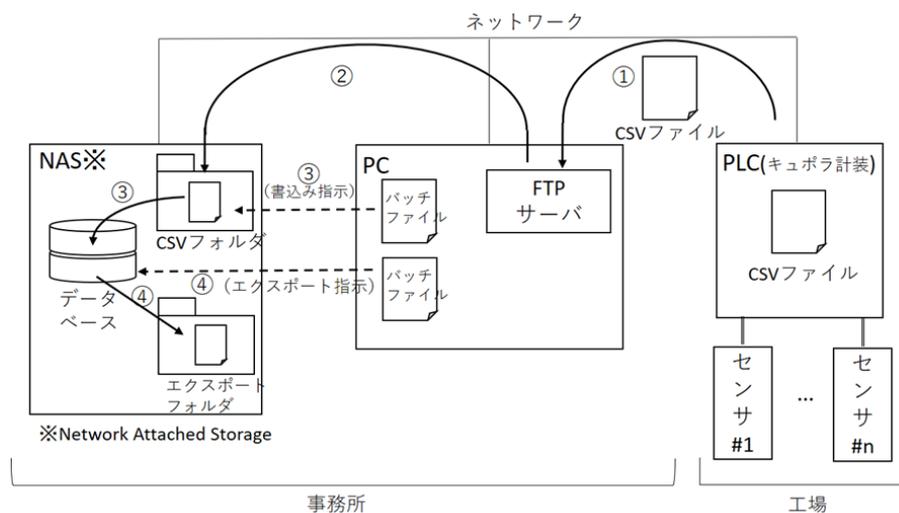


図 1.3.1 データベースへの書込み処理手順 (イメージ)

特に、処理手順③において、バッチファイルを PC (Windows) のタスクスケジュールに登録することで、定期的な自動実行が可能となる。また PLC が定期的に CSV ファイルを自動送信できることから、PLC からデータベースまで一気通貫の自動書込みが可能となる。また、処理手順④では、バッチファイルを PC (Windows) のタスクスケジュールに登録することで、定期的な自動実行が可能となる。

CSV ファイルに記載されている情報は、計測日時と表 1.3.1 に記す計測データである。データベースでは日時を主キーとするテーブルを設け、CSV ファイルに記載の計測データを保存することになる。データベースのテーブル内容を図 1.3.2 に示すと共に、データベースのデータを、可視化するソフトウェアで表示した画面を図 1.3.3 に示す。

表 1.3.1 計測データの内訳

計測データ	個数
温度	17
圧力、送付量	4
ガス濃度	2
湿度	3
溶解装置の消費電流	5
ブロー周波数	2

日時						①
T1:熱風温度	T2:燃焼炉入口温度	T3:燃焼炉温度	T4:熱交換器入口温度	T5:熱交換器温度	T6:熱交換器出口温度	②
T8:集塵機入口温度	T9:1号炉風箱温度	T10:2号炉風箱温度	Ta1:No.1'ホ-7'出口熱風温度	Ta2:除湿再生空気温度	Ta3:除湿処理空気温度	③
Ta4:No.3熱交出口排気温度	Ta5:No.2熱交出口排気温度	Ta6:No.1熱交入口熱風温度	Ta7:No.2熱交入口熱風温度	Ta8:No.3熱交入口熱風温度		④
P1:風箱圧力	P2:減風量	P3:集塵機入口圧力	P4:燃焼室圧力			⑤
CO2:CO2濃度	CO:CO濃度					⑥
H1:入口湿度	H2:出口湿度	H3:除湿量				⑦
I1:燃焼冷却F7ファン電流値	I2:メインF7電流値	I3:No.1冷却ファン電流値	I4:No.2冷却ファン電流値	I5:排風F7電流値		⑧
F1:排風F7回転数	F1:No.1GC冷却ファン回転数					⑨

図 1.3.2 改良後のデータベースのテーブル



図 1.3.3 計測データの表示 (可視化ソフトのスクリーンショット)

2-2 キュポラ操業エキスパートシステムの開発

(1) 研究開発の具体的内容

職人の対応その他構築されたデータベースを使い AI で処理/学習させることにより、現状の操業状態から1時間後を予測するIoT/AI キュポラ溶解制御システムを開発する。

(2) 研究開発の成果

2-1-3 項で構築されたデータベース・出湯温度データ及び1分毎に細分化された投入材料/燃料を、時間で紐づけた EXCEL シートを作成した。このデータを AI ソフトである Predict により学習させ、先のデータ (30~90 分) を予測させた。45 分後のデータと相関が高いことから、投入された材料/燃料は 45 分後に出湯されることを明確にした。

AI ソフト Predict の学習データをもとに、別日のデータによる予測値と実測結果を比較した。図 2.2.1 のように実用上問題ないレベルで予測できることが確認された。また、コークス投入量と出湯温度に明確な相関がみられなかったことより、コークス投入量を減少させ Predict で出湯温度を予測させた。結果グラフ (図 2.2.2) のように出湯温度は下がることなく、ばらつきを抑えることができるという結果が得られた。このような結果を導くことで、CO₂排出量低減に大きく役立つものと考えている。

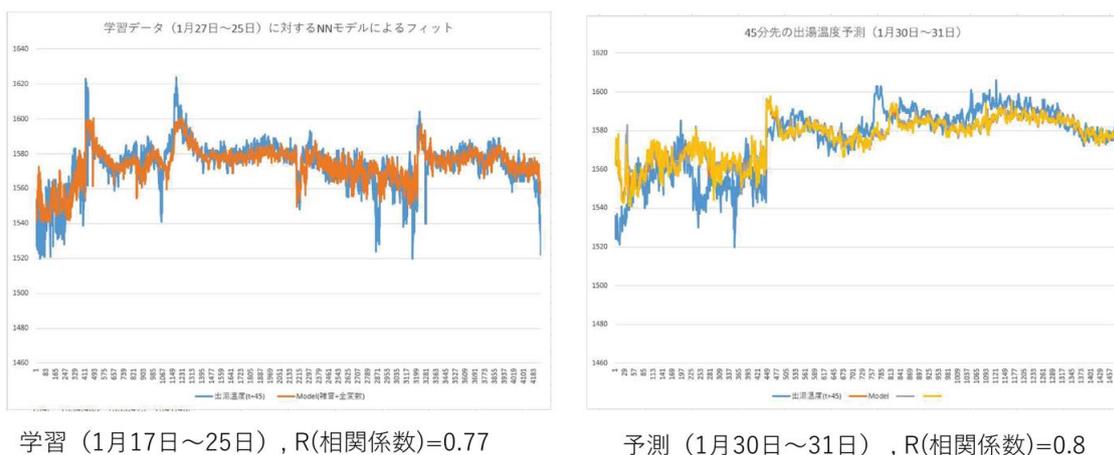


図2.2.1 AI ソフト Predict による学習と予測値

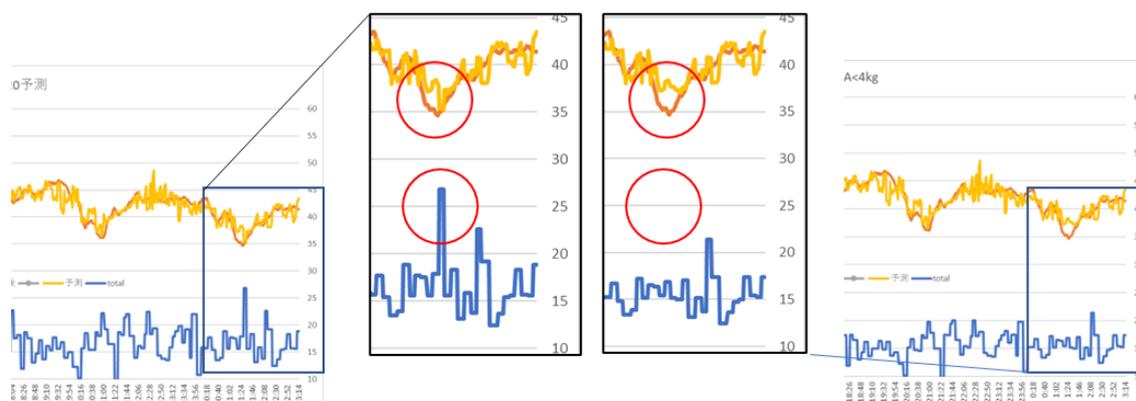


図2.2.2 燃料 (コークス) 減量時の出湯温度予測

2-3 鋳鉄溶湯熱分析装置の開発

(1) 研究開発の具体的内容

現状溶湯の冷却曲線と黒鉛核の生成/成長と密接な関係があることがわかってきた。特に凝固潜熱の放出過程が鋳鉄生地組織に影響を及ぼし、不良の発生率、硬さ、強度、さらには切削性など製品品質に密接に関連している。高精度なデータロガーを使い PC または PLC と組み合わせ溶湯熱分析装置を開発する。

(2) 研究開発の成果

キュボラ溶湯の冷却曲線から、硬さ、強度、さらには切削性など鋳造品品質の推定を可能とすることを目標に、現場（高温・粉塵）での使用に耐える鋳鉄溶湯の熱分析装置を開発した。

図 3.1 に示す本装置では、データロガーで収集したデータを PC 上の EXCEL で計算処理できる。これにより、初晶温度/共晶温度/C%/Si%/黒鉛化度/各 phase における凝固潜熱放出量を計算できるシステムである。また、同図に示すように 8CH 同時計測が可能で、共析温度域（約 15 分）までの連続計測など今までの熱分析装置には無い機能を組み込んでおり、鋳造品品質を確認する上でより精緻な分析が可能となっている。

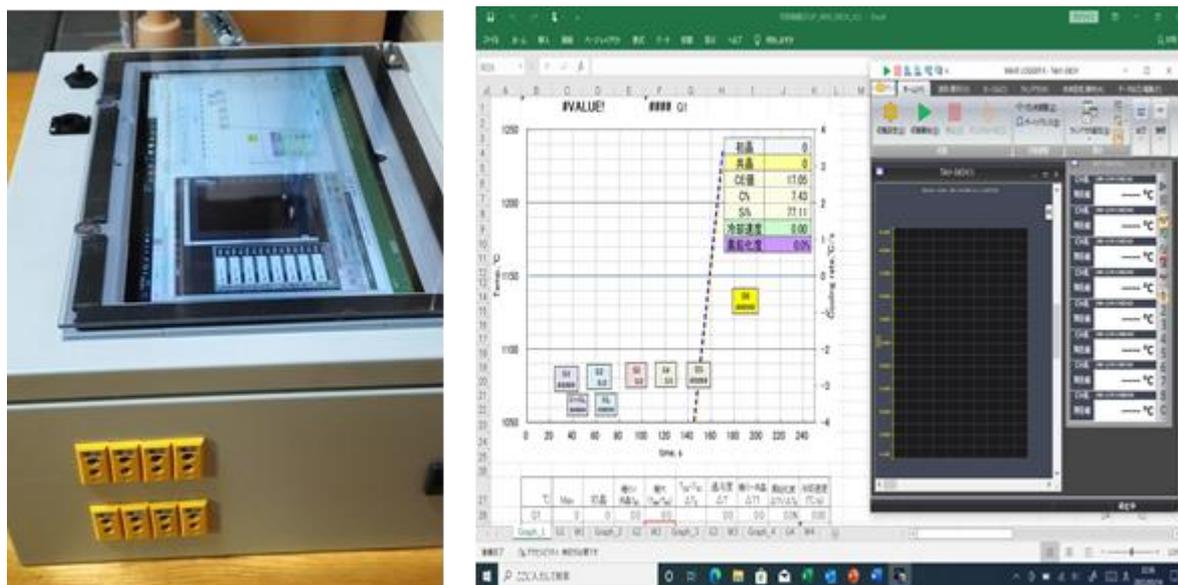


図 3.1 鋳鉄溶湯熱分析装置（左：外観、右：測定用画面）

また、鋳造品品質の推定で鋳鉄溶湯熱分析を運用する上で、重要となる鋳鉄組織観察結果について、組織観察による接種と肉厚感受性の評価を以下に示す。

鋳鉄では、凝固組織を改良するために接種剤を添加するが、鋳物の肉厚変化により冷却速度の変化が異なるため、接種剤添加の効果にも影響がある。そこで、2種の接種剤（USi：ウルトラシリコン、Fe-Si：Fe-75%Si）について、段階的に肉厚を変化させた階段形状の鋳型に鋳造した試験片（図 3.2：階段状試験片）を作製し、それぞれの肉厚部の凝固組織観察を行った。比較として、接種剤なしの試験片も

作製した。試験片番号と接種剤の添加量は昨年と同じく、No.2 が USi 接種剤を 0.3% 添加したもの、No.3 が接種剤 Fe-Si を 0.3% 添加したもの、No.4 が未処理（接種なし）、となっている。階段状試験片は、図 3.2 (a) の様に、先端側が肉厚 3mm と最も薄く、次に 5mm、10mm、15mm と順次厚くなり、それぞれ幅 25mm の段差となっている。この試験片を中心部分で切断し、図 3.2 (b) のような位置で格段の組織観察用試験片を採取した。

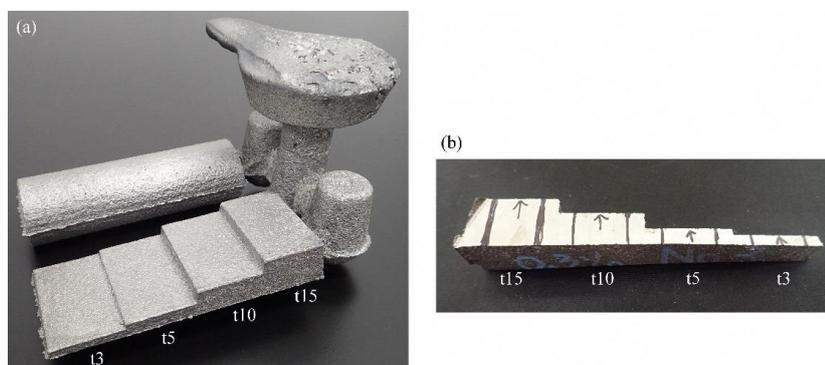


図 3.2 階段状試験片の (a) 外観と (b) 観察用試験片の採取位置

図 3.3 に黒鉛形状を見るためエッチングなしで観察した階段状試験片のマイクロ組織を示し、図 3.4 に 5% ナイタル（アルコール+5%硝酸）でエッチングして組織観察を行ったものを示す。図 3.3 の黒鉛形状を見ると、No.4 の未処理の試料では、全ての板厚で表面側から内部まで全体的に D 型黒鉛（共晶黒鉛）が存在していた。USi を接種した No.2 では、肉厚 t3 の試料では D 型黒鉛が多かったが、t5 では D 型黒鉛が大幅に減少し、B 型が増えていた。さらに肉厚が増えた t10,15 では、ほとんど A 型となっていた。Fe-Si を接種した No.3 も No.2 と同様に、肉厚 t3 の試料では D 型黒鉛が多かったが、t5 では B 型が増えていた。さらに肉厚が増えるとほとんど A 型となるのも No.2 と同じだが、黒鉛がより太くなっていた。

図 3.4 のエッチングをしたものを見ると、No.4 の肉厚 t3 の試験片には、白いチル層が表面側（上・下面）に存在している箇所も確認された。肉厚 t5 以上ではこのようなチル層は見られなかったが、表面側に晶出した B 型黒鉛の周りには白いフェライト相が観察された。USi を接種した No.2 および Fe-Si を接種した No.3 ではいずれもチル層は見られなかったが、表面側に晶出した B 型黒鉛の周りには白いフェライト相は観察された。

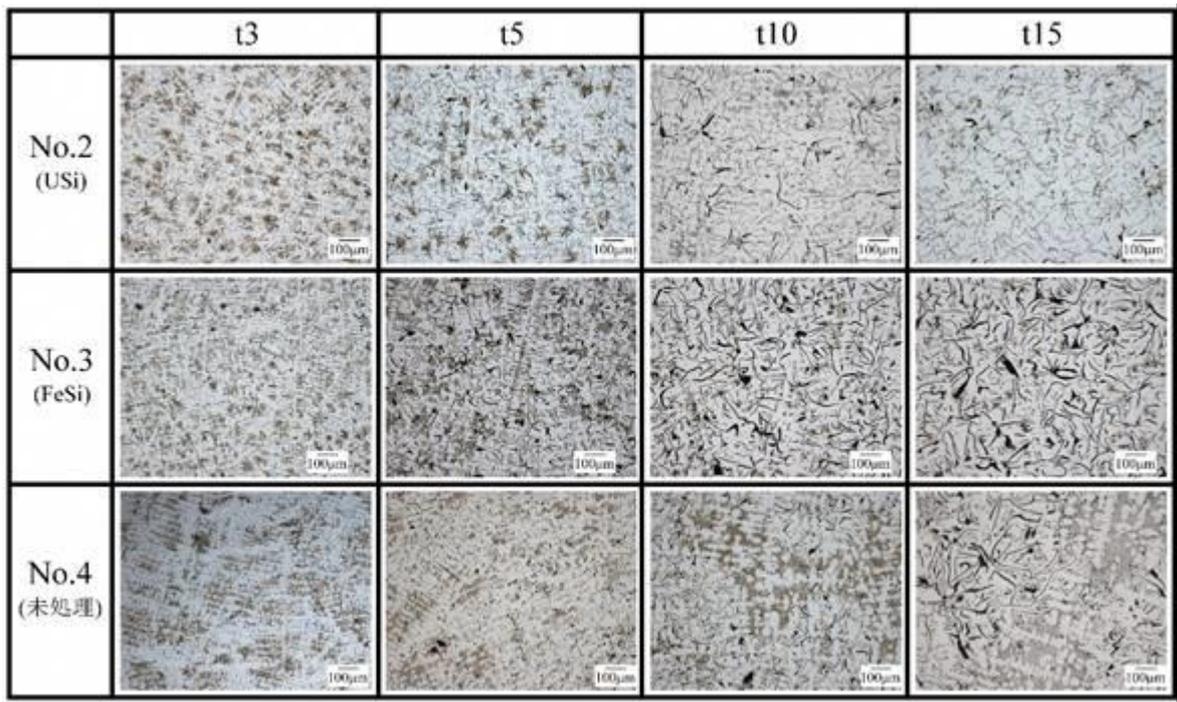


図 3.3 階段状試験片のマイクロ組織（ノーエッチ）

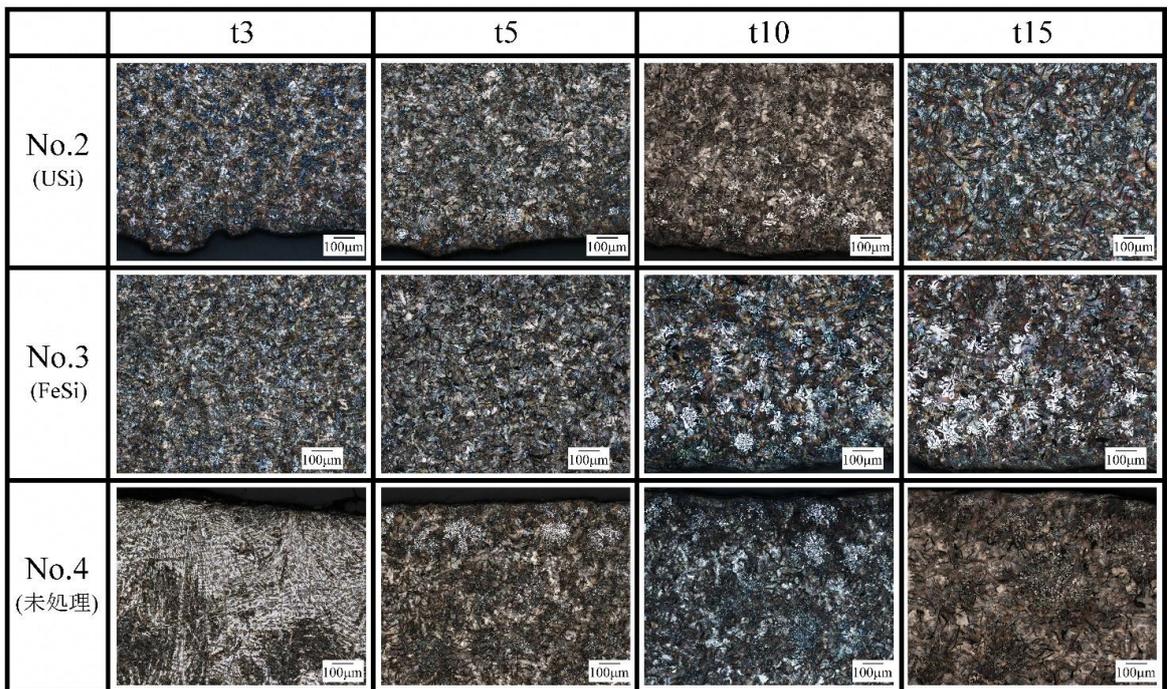


図 3.4 階段状試験片のマイクロ組織（エッチング）

2-4 被削性アドバイスシステムの開発

2-4-1 被削性試験テストピース用鋳造型の設計とテストピース鋳造

(1) 研究開発の具体的内容

溶湯の性状による被削性の変化を検証するため鋳造型を設計/製造し、その型で被削性テストピースを鋳造する。溶湯性状を可能な限り変化させる。

(2) 研究開発の成果

ここでは切削加工を行い切削距離と刃先摩耗量の測定により、鋳鉄の被削性と残留応力・結晶格子の乱れ（熱収縮・膨張に伴う歪み）との相関を調査することにより、鋳造品の切削加工に際してアドバイスを行うシステムを構築することにある。

まず A 社（キュポラ）及び B 社（電気炉）において、同じ製品形状の型により鋳造された鋳物を各 500 個×2 パターン切削加工し、刃具の摩耗状態を調べた。図 4.1.1 に 2 社で使用した鋳造型を示す。

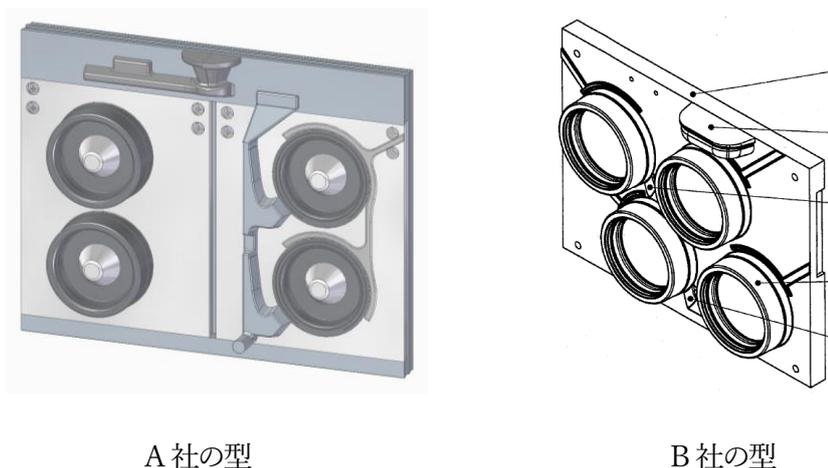


図 4.1.1 被削性試験テストピース用鋳造型

2-4-2 切削加工と刃先の摩耗状態観察、切削加工時刃先温度測定

(1) 研究開発の具体的内容

切削加工を行い切削距離と刃先摩耗量（VB 摩耗）の測定を行う。また加工時の刃先温度を刃先に取り付けた熱電対で測定・記録し切削距離と刃先温度を正確に記録する。

(2) 研究開発の成果

図 4.2.1 に示すような加工手順により、A 社（キュポラ）及び B 社（電気炉）の鋳造品の切削加工を行い、刃先の摩耗状態を比較、切削性を評価し、それらの情報をデータロガーに集積した。

加工性改善

段取り 2月12日

加工実施 2/15-19

スケジュール

日程	2月15日	2月16日	2月17日	2月18日	2月19日
内容	100	200	300	400	500
条件1	○	○	○		
条件2	○	○	○		

テスト内容

対象品目 RD02330AR

個数 500(深さ1.5:500個)

n=2 合計1000個

評価項目 ①チップ摩耗

加工条件 ①周速・送りの条件を変更

S300 F0.35

②面取りあり

③クーラント: サンライトMC100

備考

①条件1と条件2 詳細は1/27打合せ内容

準備内容

チャック: RD02269ALA20 イコライズ爪

バイト: 左勝手 ①面取りT5 ②端面T9 ③外径T7 ④端面仕T2 ⑤端面仕T3 端面仕T4

プログラム: 条件1 RD2330R1

条件2 RD2330R2

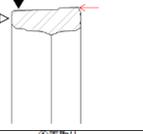
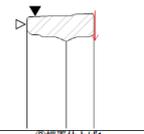
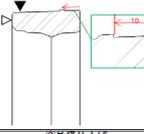
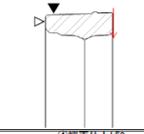
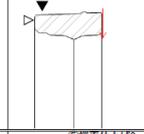
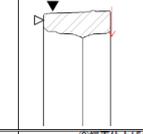
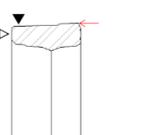
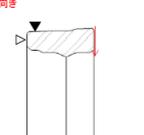
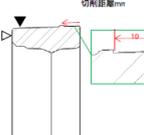
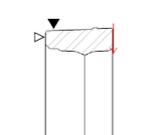
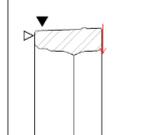
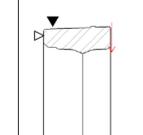
工程表	①面取り	②端面仕上げ1	③外径仕上げ	④端面仕上げ2	⑤端面仕上げ3	⑥端面仕上げ4
条件1	チップ: DNMG150408 ホルダ: DDNNN2525 ヘッド: ターニング 	チップ: WNMG080408 切込みmm 1.5 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.35 ※逆向き 	チップ: WNMG080408 切込みmm 1.5 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ニーサル 送りmm/rev 0.35 切削距離mm 10 	チップ: WNMG080408 切込みmm 0.25 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.33 	チップ: WNMG080408 切込みmm 0.25 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.33 	チップ: WNMG080408 切込みmm 0.25 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.33 
条件2	チップ: DNMG150408 ホルダ: DDNNN2525 ヘッド: ターニング 	チップ: WNMG080408 切込みmm 1.5 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 500 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.35 ※逆向き 	チップ: WNMG080408 切込みmm 1.5 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ニーサル 送りmm/rev 0.35 切削距離mm 10 	チップ: WNMG080408 切込みmm 0.2 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.33 	チップ: WNMG080408 切込みmm 0.15 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.33 	チップ: WNMG080408 切込みmm 0.1 ホルダ: DWLNL2525M0 周速m/min 300 ヘッド: ターニング 送りmm/rev 0.33 

図 4.2.1 切削加工手順

2-4-3 鋳造品の残留応力測定

(1) 研究開発の具体的内容

鋳鉄の被削性に影響を与えているのは、鋳型に拘束された状態で凝固したときの熱収縮・膨張に伴う歪みではないかと言われているが、これまでにそれを実証するデータは得られていない。また、キュポラで製造した鋳鉄は、電気炉で製造した鋳鉄よりも被削性が良い、と言われているが、この理由についても実証データがない。鋳物内部の歪みは残留応力となって蓄積され、結晶格子の乱れも引き起こす。近年、このようなデータを測定することが可能な機器が整備されたことから、鋳鉄の被削性と残留応力・結晶格子の乱れとの相関を調査する。

(2) 研究開発の成果

A 社のキュポラで製造された鋳物と B 社の電気炉で製造された同じ形状の鋳物について、切削加工

後の残留応力測定を行った。測定したのは、鋳物の幅広側の円周上 90° ずつの 4 点で、図 4.3.1 に示すように円周方向と半径方向の 2 方向について測定した。測定は微小部 X 線応力測定装置((株)リガク製、Auto MATE II)を用い、解析は $\sin^2\psi$ 法によるものである。測定条件は表 4.3.1 に示したとおりで、測定方向によって測定方法を変えている。この測定では図 4.3.2 に示したように、 ψ 角を変えるとピーク位置 (2θ 角) が変化している様が測定でき、 2θ - $\sin^2\psi$ 線図にプロットした傾きから鋳物の残留応力を導いた。



図 4.3.1 残留応力の測定点と測定方向

表 4.3.1 残留応力測定条件

X 線種と出力	Cr K α 線、40kV・40mA
コリメータ径	1mm
ピーク角度	156.40°
走査範囲	146.140° ~166.540°
ψ 角範囲と測定点数	0~45°、11 点
計数時間	30s
測定法	並傾法(円周方向)、側傾法(半径方向)
揺動幅	5°

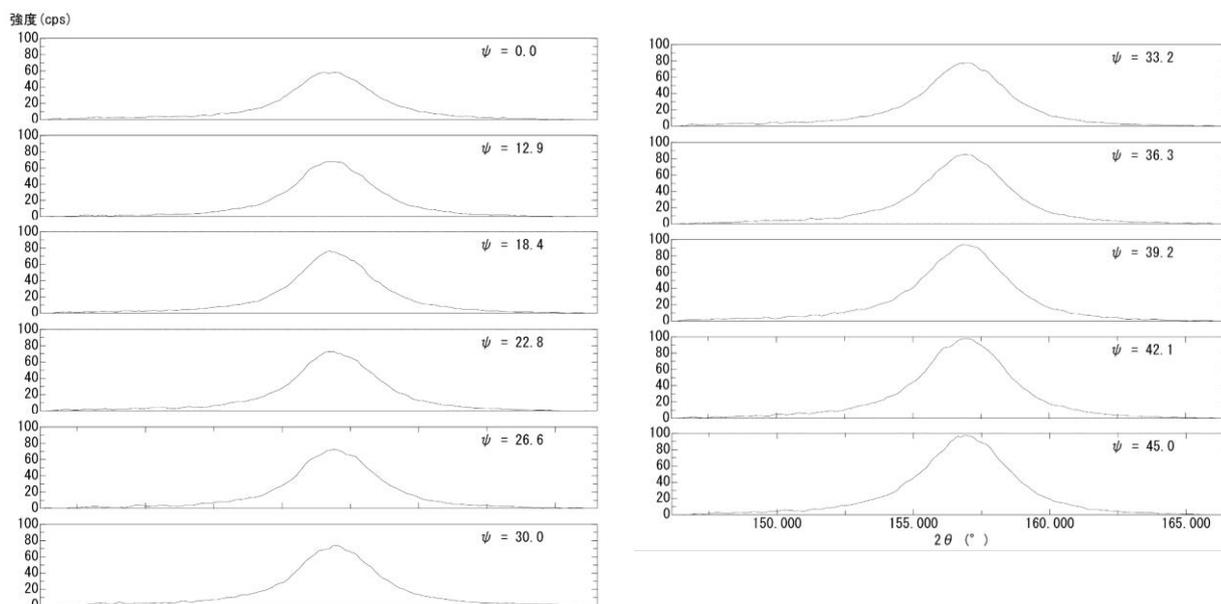


図 4.3.2 各 ψ 角において測定されたピークの例(A 社の鋳物 Point2 の円周方向)

続いて、X線による残留応力測定を行ったプリー形状の鋳物について、歪みゲージを用いた切断法による残留応力測定を行った。測定には、(株)共和電業製応力解析用3軸歪みゲージ(KFGS-1-120-D17-11 L3M3S)を用い、図4.3.3のように切断砥石でプリーの1箇所を切断した。歪みゲージは、プリーの外径側と内径側の両方について切断箇所の左右(L側、R側)に1つずつ、計4個を貼り付け、切断後の変形量を計測することで変形に要した応力(残留応力)を算出した。この時、FC鋳物の物性値として、ヤング率100GPa、ポアソン比0.27を用いた。A社のキュボラで製造された鋳物と、B社の電気炉で製造された鋳物(TVC(株)製)について測定した結果をそれぞれ表3.3.2及び表3.3.3に示す。この表で、プラスの数値は引張の残留応力を、マイナスは圧縮を示す。いずれも応力値としてはせいぜい10MPa程度と小さく、それほど大きな変形をもたらすものではなかった。実際に、切断後の切り口の開口部は使用した切断砥石の肉厚とほぼ同等であり、残留応力は小さかったことが分かる。一方、X線による残留応力測定では60~80MPa程度の引張の応力が検出されたが、この測定方法では表層数 μm 程度の極微小な領域のみ測定しており、機械加工による加工歪みによる影響が強かったのではないかと考えられる。



図4.3.3 切断法による残留応力測定の様子(左)と3軸歪みゲージの配置方法(右)

表4.3.2 A社のキュボラ製鋳物の残留応力 (MPa)

	L側	R側
外側	0.03	-0.01
内側	7.01	10.17

表4.3.3 B社の電気炉製鋳物の残留応力 (MPa)

	L側	R側
外側	-5.13	-0.85
内側	9.44	13.32

次に、この切断した断面について、EBSD(電子線後方散乱回折法)による結晶方位差の測定を行った。これは、材料に塑性変形等が加えられ、内部に歪み(応力)が発生すると結晶方位差が大きくなることから、これをKAM値として内部歪み(残留応力)の大きさを評価できるものである。図4.3.4及び図4.3.5にA社のキュボラ製鋳物とB社の電気炉製鋳物について測定した結果を示す。測定は $\alpha\text{-Fe}$ で指数付けしており、こ

の指数付けの確からしさ(結晶性の善し悪し)を示す IQ(Image Quality)マップ、紙面垂直方向の結晶方位を示す逆極点図方位(IPF : Inverse Pole Figure)マップ、周囲の結晶との方位差の大きさを示す KAM(Kernel Average Misorientation)マップをそれぞれ示す。図 4.3.4 及び図 4.3.5 の IQ マップでは、片状黒鉛は指数付けがほとんどできなかったことを示す黒色となっているが、鉄素地部分は良好な指数付けが可能であったことを示す白に近い灰色となっており、試料作りを含めた測定が適切に行われたことを示している。次に、結晶方位を測定した IPF マップを見ると、色調がランダムであることから結晶方位に方向性はないことが分かる。また、同じ系等の色(青系、赤系、緑系等)の結晶内でもグラデーションがかかっており、同じ結晶内でも方位が少しずつ変化しているのが分かった。周囲の結晶との方位のズレを評価する KAM 値マップでは、ややズレが生じている黄緑色の分布がどちらの試料でも多くなっているが、この 2 つの試料でそれほど大きな違いは見られなかった。どちらの試料でも切断法による残留応力の値がそれほど大きくなく、違いは小さかったことと一致する。それにも関わらず、キュポラで製造された A 社の鋳物の方が、被削性が良い結果となっている。この被削性の調査実験では鋳肌面をそのまま加工していることから、鋳肌最表面の性状調査が重要であると思われる。

さらに、これらの鋳物を約 1 年工場内に放置し、枯らしを行ったサンプルについて同様の残留応力測定を行った。鋳物は、鋳造時の相変態や熱収縮・膨張等により内部に歪み(残留応力)が発生する。これが経年や機械加工により寸法変化等の不具合を引き起こす原因となるため、残留応力を除去する熱処理(歪み取り焼鈍)や枯らしが行われる。今回のプーリー形状の鋳物が、枯らしによって残留応力が変化するかどうかを調査した。

当初の試験と同様に、微小部 X 線応力測定装置(株)リガク製、Auto MATE II)を用いた残留応力の測定結果を表 4.3.4 に示す。測定点および測定条件も同様である。この結果、A 社のキュポラ製鋳物では半径方向が、B 社の電気炉製鋳物では円周方向の残留応力が大きい傾向は枯らし前の時と同じであったが、どちらの鋳物も残留応力が減ることなく、逆に増加してしまっていた。この枯らしによる残留応力の変化を同じ個体で比較調査したのではなく、前と後で違う個体で調査したことから、初期状態の個体差の影響も考えられる。次に、上記と同様に歪みゲージを用いた切断法による残留応力の測定結果を表 4.3.5 及び表 4.3.6 に示す。鋳造後の結果である表 4.3.2 及び表 4.3.3 でもそれほど大きな残留応力ではなかったことから、これを約 1 年枯らしたものでもそれほど大きな値ではなく、減ったかどうかの判断が難しかった。

また、図 4.3.4 及び図 4.3.5 と同様に約 1 年枯らした鋳物の断面について、EBSD による結晶方位差の測定を行った結果を図 4.3.6 及び図 4.3.7 に示す。しかしこれらの図でも、約 1 年枯らしたことによる変化はほとんど見られず、図 4.3.4 及び図 4.3.5 と同様の KAM 値マップ図となっていた。これらの鋳物では、経年変形等が問題となるような残留応力(歪み)がもともと大きくなかった可能性がある。枯らしの効果を調査するには、鋳造後の残留応力がより大きい鋳物形状で比較するのが良いと思われる。

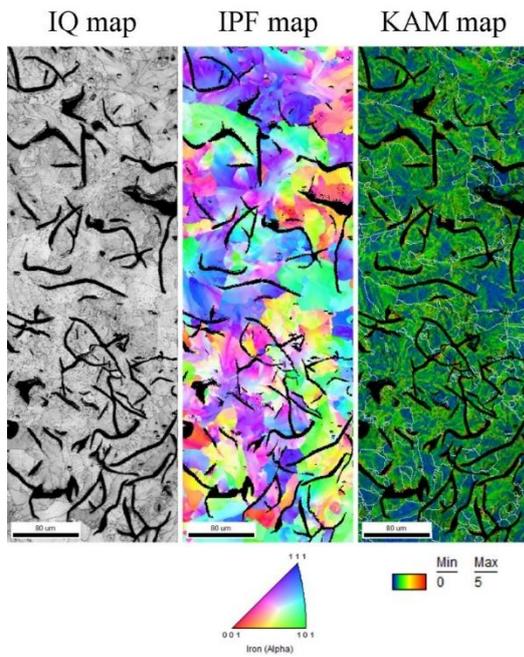


図 4.3.4 A 社のキュポラ製鋳物の IQ map、IPF map、KAM map

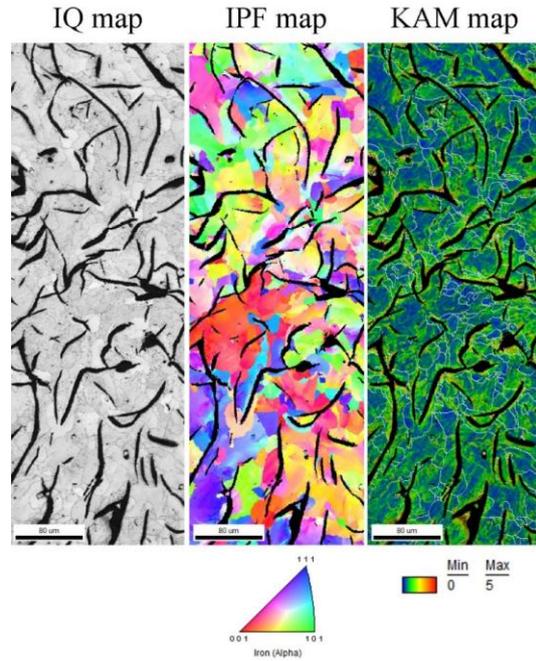


図 4.3.5 B 社の電気炉製鋳物の IQ map、IPF map、KAM map

表 4.3.4 約 1 年枯らした鋳物の X 線による残留応力測定結果 (MPa)

試料	方向	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
A 社のキュポラ製鋳物	円周	36	26	-13	-59
	半径	121	101	89	41
B 社の電気炉製鋳物	円周	133	137	174	151
	半径	57	31	57	56

表 4.3.5 約 1 年枯らした A 社のキュポラ製鋳物の残留応力 (MPa)

	L 側	R 側
外側	1.56	2.15
内側	5.39	8.22

表 4.3.6 約 1 年枯らした B 社の電気炉製鋳物の残留応力 (MPa)

	L 側	R 側
外側	-8.27	1.24
内側	7.6	9.18

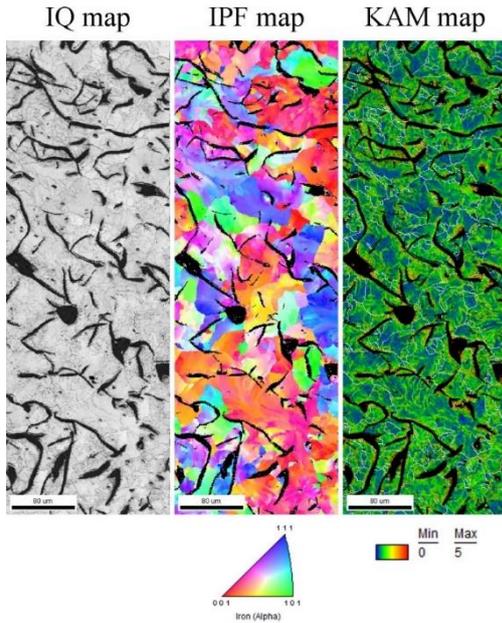


図4.3.6 約1年枯らしたA社のキュポラ製
 鋳物の IQ map、IPF map、KAM map

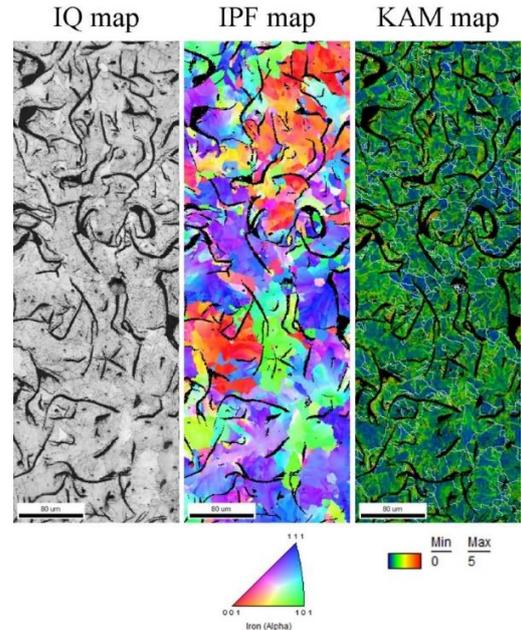


図4.3.7 約1年枯らしたB社の電気炉製
 鋳物の IQ map、IPF map、KAM map

2-4-4 被削性アドバンスシステムの完成

(1) 研究開発の具体的内容

被削性アドバンスシステムの完成また IoT/AI キュポラ溶解制御システムとの相互リンクにより、刃具摩耗量減少 (1/5 以下)、または/かつ切削速度向上 (1.5 倍以上) により切削加工の生産性を 50% 以上向上させ、材料製造プロセスに係る技術の高度化目標を実現する。

(2) 研究開発の成果

アドバイザー企業における切削時切削抵抗及び温度測定、また鋳造品組織・硬度等比較結果より被削性の良い鋳物は硬度が高いがそのバラつきは少ないという結果を得た。また、切削抵抗においても同様の結果が出ており鋳物内の組織のバラつきが被削性に大きな影響を及ぼすことが明確になった。旧来鋳物内の硬度のバラつきは黒鉛核数 (共晶セル数) に影響しているといわれており、熱分析装置で黒鉛化度等の測定及びその改善で切削性は推定できる。

(図 4.4.1 参照)

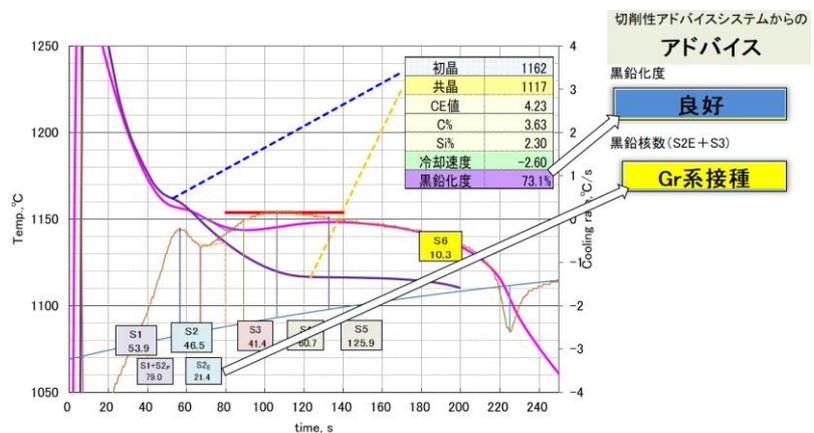


図 4.4.1 被削性アドバンスシステムからの
 アドバイスの事例

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果概要

令和2年度から令和4年度の3年間で取り組んできた本事業の成果概要を下表に示す。(1-3節の成果概要の再掲)

サブテーマ/年度目標	研究開発の成果
<p>【1】 データベース構築への対応</p> <p>【1-1】 キュボラ溶解の計装化</p> <p>【1-2】 収集したデータのネットワーク対応</p> <p>【1-3】 データベースの構築</p>	<p>【1-1】 現在測定している温度・圧力・電流等のデータを導入した PLC に入力、データとして蓄積できるシステムを創り上げた。CO₂/CO ガス濃度測定装置を導入、PLC にデータを送信・蓄積できるようになった。</p> <p>【1-2】 導入した PLC を社内ネットワーク上に置いた。</p> <p>【1-3】 PLC からのデータを、ネットワークを通しデータベースに蓄積できるシステムを完成させた。</p>
<p>【2】 キュボラ操業エキスパートシステムの開発</p>	<p>構築されたデータベース・出湯温度データ及び1分毎に細分化された投入材料/燃料を時間で紐づけした EXCEL シートを作成した。このデータを AI ソフトである Predict に学習させ操業状況を予測したところ、45 分後のデータと相関が高いことがわかった。このことから、投入する材料/燃料が 1 時間以内に予測できることを明確にした。また、予測値も実測との相関が高く実用性があることも明確にした。</p>
<p>【3】 鋳鉄溶湯熱分析装置の開発</p>	<p>溶湯の凝固曲線の正確な収集、及びその曲線よりリアルタイムで凝固潜熱放出量を計算できる装置を完成させた。本内容が鋳造工学 第 93 巻(2021)第 5 号に掲載されるとともに特許も出願した。</p>
<p>【4】 被削性アドバイスシステムの開発</p> <p>【4-1】 被削性試験テストピース用鋳造型の設計とテストピース鋳造</p> <p>【4-2】 切削加工と刃先の摩耗状態観察、切削加工時刃先温度測定</p> <p>【4-3】 鋳造品の残留応力測定</p> <p>【4-4】 被削性アドバイスシステムの完成</p>	<p>【4-1】 被削性試験テストピース用鋳造型の設計、製作および鋳造をおこなった。</p> <p>【4-2】 鋳造されたテストピース鋳物について、キュボラ性鋳物と電気炉製鋳物の被削性の比較試験を行った。</p> <p>【4-3】 X 線による残留応力測定を行ったプリー形状の鋳物(キュボラ製鋳物と電気炉製鋳物)について、歪みゲージを用いた切断法による残留応力測定を行った。いずれも応力値としてはせいぜい 10MPa 程度と小さく、それほど大きな変形をもたらすものではなかった。</p> <p>【4-4】 切削時切削抵抗及び温度測定、また鋳造品組</p>

	<p>織・硬度等比較結果より被削性の良い鋳物は硬度が高いがそのバラつきは少ないという結果を得た。また、切削抵抗においても同様の結果が出ており鋳物内の組織のバラつきが被削性に大きな影響を及ぼすことが明確になった。旧来鋳物内の硬度のバラつきは黒鉛核数（共晶セル数）に影響しているといわれており、熱分析装置で黒鉛化度等の測定及びその改善で切削性は推定できることがわかった。</p>
--	---

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

3-2-1 研究開発後の課題

研究開発を計画した 2019 年度、開発を始めた 2020 年度以降、地球環境に対する企業の責任はますます重要なものとなり、特にカーボンニュートラルに関し最優先で取り組むべき課題となっている。エネルギー多消費産業である鋳造業、特に化石燃料を多用するキュポラ溶解においてその責任は重大なものとなっている。ただし、電気炉溶解に比べ熱効率が高く、更にはバイオマス等の非化石燃料が使用できるキュポラ溶解の重要性は高まっている。バイオ燃料の使用/溶解効率の向上においてキュポラ AI システムは最良なアイテムとなる。変化点への対応、予測精度向上また予測結果のパラメータ化を進め多くのキュポラで簡単に取り入れることができるシステムとしたい。

3-2-2 事業化展開

① 研究開発成果に係る製品等

(i) IoT/AI キュポラ溶解制御システム

構築されたデータベースを使い AI で処理することにより、現状の操業状態から 1 時間後の成分を含めた溶湯性状が予測でき、投入材料の変更等事前に対応。必要とされる成分の溶湯を必要量出湯することができる。これにより、ムリ（⇔必要な溶湯量の供給）・ムラ（⇔溶湯性状の安定化）・ムダ（⇔鋳造歩留まりの向上）が排除され資源生産性を 10%以上向上させる。喫緊の課題であるカーボンニュートラルにおいてもエネルギー効率でキュポラ溶解は優位である。今後非化石燃料（バイオマス等）の使用において経験のない操業状態に短時間で対応するためにも、AI による学習及び結果の予測は不可欠なものになると思われる。

(ii) 鋳鉄溶湯熱分析装置

凝固過程における各ポイントでの凝固潜熱放出量が測定でき鋳鉄組織の良し悪しが推定できる鋳鉄溶湯熱分析装置を開発する。製品に注湯する前に溶湯性状が把握でき、不具合がある場合は製品への注湯を中止、或いは接種等で対応する。鋳造品の硬度不良や引け不良を撲滅させ不良率を低下させる。

(iii) 被削性アドバイスシステム

材料/燃料の配合変更や接種量を増減など被削性に関するアドバイスをを行うシステムにより、川下産業の切削工程における刃具摩耗量減少、切削速度向上により切削加工の生産性を 50%以上向上させ、材料製造プロセスに係る技術の高度化目標を実現する。切削加工の生産性はそのまま CO₂ 排出量削減に直結し地球環境問題に明確に対応可能と考える。

② 想定する国内、海外市場（現状、今後の動向）

国内の鋳物生産事業所のうちキュボラ設備を保有している生産事業所・・・約100社

キュボラ溶解は、鋳鉄の溶解炉として数々の利点を有しており、また昨今の電気料金の高騰及び電力不足から、これを所有する企業は今後も続くものと思われる。しかし一方で前述のように、操炉経験者の高齢化と補修難のため、溶解法自体の問題でなく、社会情勢等からの制約で、この優れた溶解法の存続が危ぶまれてきた。

本開発装置は、鋳物製造企業にとって人件費の節約や生産の合理化等の直接的な経済効果を生むほか、上述の問題を解決する一助にもなり、今後の鋳物製造業が向かうべき一つの方向を与えるものと言える。

③ 川下企業（顧客） ニーズ

鋳物製造業界は、FA 化が他の業界に比べて立ち遅れ気味であり、これが鋳物業界さらに鋳物製品自体のイメージを損ねている一因であることは否めない。これらの要因から鋳鉄鋳物の品質や被削性は大きくバラツキ川下産業である加工メーカーの生産性悪化の一因となっている。現在、熱・凝固解析、流動解析、組織予測等の鋳物製造過程でのシミュレーションも確立しつつあり、これらと溶解・注湯・造型工程の FA 化が結び付き、よりインテリジェント化された生産プロセスが構築されれば、従来の労働集約型から脱皮して、都市型立地の可能な近代的工業へと発展していくことが可能となる。

鋳物製造業界における「IoT/AI キュボラ溶解制御システム」・「鋳鉄溶湯熱分析システム」さらには「被削性アドバイスシステム」は、雇用問題を解決するのみでなく、鋳物製品に対する信頼性も高め、中小鋳造メーカーにおいての生産性向上や加工メーカーへの需要増への寄与も充分考えられる。

また、LCA による環境負荷低減も求められており、資源生産性を高め非化石燃料を容易に使いこなすことができるキュボラ IoT/AI システムと、切削加工の CO₂ 排出量低減が可能な被削性アドバイスシステムで作られた鋳物製品の需要は高まると思われる。

④ その他波及効果

鋳鉄製品の被削性向上はキュボラ溶解のみではなく、電気炉溶解を行っているすべての鋳鉄鋳物製造業者に適応可能となり、鋳鉄素材での国際競争力が大きく向上する。

また、自動車・産業機械等多くのものづくり産業が川下産業となる鋳鉄鋳物で、切削加工の向上は生産性を大きく向上させ川下産業の国際競争力も大きく向上する。

⑤ 新たな事業展開の可能性

装置産業でありながら中小企業の多い鋳造業は慢性的に利益率の低い経営状態となっている企業が多い。開発した「IoT/AI キュボラ溶解制御システム」・「鋳鉄溶湯熱分析システム」さらには「被削性アドバイスシステム」を販売・設置を行う。これにより中小鋳造メーカーにおいて生産性の向上を図り企業体質を強化し、オールジャパンでモノづくり立国日本の再興を目指す。