

# 耐摩耗鋳物の生産技術開発と耐摩耗部品の溶接補修技術の確立

棚原靖、羽地龍志、山内章広、金城洋、照屋駿、新城祐功\*1、大濱博達\*2

沖縄県の地質は酸性からアルカリ性を示す土壌が広く分布し、土木建設や環境業界で稼働する装置や重機類の部品には耐摩耗性が求められている。

そこで本研究では、インモールド鋳造技術による耐摩耗性鋳物の生産技術の開発と硬化肉盛溶接による耐摩耗部品の安定的な補修技術を確立することを目的とした研究開発を行った。

なお、本テーマは株式会社沖縄 TLO が事務局として運営した平成26年度オキナワものづくりネットワーク構築事業において採択されたものであり、沖縄鋳鉄工業株式会社を中核企業に据え、協力企業に平安座総合開発株式会社、協力機関として工業技術センターが参画し実施したものである。

## 1 はじめに

亜熱帯島嶼県である沖縄は高腐食環境であると同時に、地質も酸性からアルカリ性を示す土壌が広く分布しているため、土木建設機械や産業廃棄物処理プラントなどの機器は激しく摩耗する。しかしながら県内では耐摩耗品は生産されておらず高価なメーカー品を使用せざるを得ない状況で、また補修については硬化肉盛溶接が殆どで品質のばらつきが課題となっている。

そこで本研究では、鋳型内に耐摩耗用微量硬化元素を添加し材料を改質するインモールド鋳造技術を活用した耐摩耗性鋳物の生産技術開発と硬化肉盛溶接による耐摩耗部品の安定的な補修技術を確立するため、下記に示す3つのサブテーマを設定し研究を行った。

また、研究開発実施にあたっては、図1に示す実施体制のもとで行った。

- ①インモールド鋳造による耐摩耗鋳物の開発
- ②硬化肉盛溶接の溶着現象の解析と適切な溶接方法の確立
- ③摩耗試験方法の検討と簡易摩耗試験機の製作

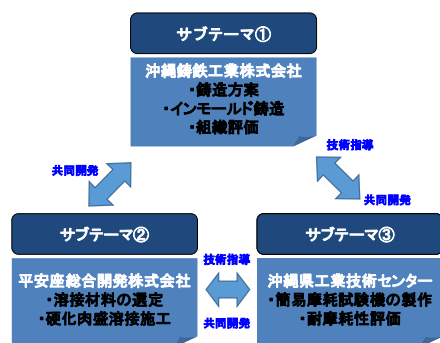


図1 実施体制

## 2 研究開発の成果（サブテーマ①）

### 2-1 目的と課題

マンホール鉄蓋の材料である片状黒鉛鋳鉄ならびに球状黒鉛鋳鉄に耐摩耗性を付加するためには、溶湯にクロム(Cr)やマンガン(Mn)、銅(Cu)、ボロン(B)のほかレアアース(RE)などの元素を添加し合金化する必要があるが、1チャージ2トンの溶湯全てを合金化するには、大量受注が必要であると同時に既存のマンホール鉄蓋の製造ラインもストップせざるを得なくなることから、1チャージの全溶湯に合金元素を添加することは困難である。

したがって、鋳型内に合金元素を配置することで個別製品単位もしくは製品表面に耐摩耗性を有するような合金を生成し、多品種小ロットに対応できるような鋳造法が必要となる。

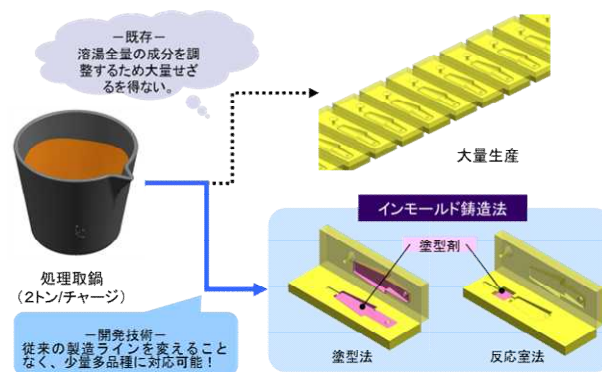


図2 インモールド鋳造法の概念図

### 2-2 実施内容

インモールド鋳造法とは、球状黒鉛鋳鉄製造時における球化処理として用いられている方法であり、球化剤(Mgなど)を処理取鍋に投入し溶湯全量を球状化する通常の製造方法とは違い、球化剤を鋳型内に配置し個々の製品ごとに球状黒鉛鋳鉄を得る方法である。本プロジェクトにおいては、インモールド鋳造法を応用して、球化剤の代わりにクロム(Cr)やマンガン(Mn)などの硬化元

\*1 沖縄鋳鉄工業(株) \*2 平安座総合開発(株)

素を用いて、個々の製品および製品表面に合金を形成し、耐摩耗性能を付加することを試みた。

### 2-2-1 塗型技術による合金組織の生成

目標とする鋼種は、表1に示す用途から、6種類の鋼種を設定した。この中でRESiは希土類であるセレンやランタンを主成分としたもので、靱性の改善を狙ったものである。また、テルリット50は市販の塗型材であり、硬化組織であるチルの生成を狙ったものである。表2に実験に用いた硬化元素の特性を示す。

基礎実験として図3に示すJIS G5502に記載されているYブロックB号を用いて、図4に示すような鑄造実験を行った。なお、硬化元素の添加量は、表面から深さ2mm程度の硬化層（表1の添加率）を得ることを目標に計量した。

表1 目標鋼種

	添加率	目標鋼種
FeCr	25%	ショットブラスト用インペラ
FeMn	13%	ハドフォーム鋼
RESi	0.1%	
金属Te	0.16%	チル化
FeP	1%	シソングライ付用
テルリット50	—	

表2 硬化元素の特徴

	含有量	融点	密度	サイズ
FeCr	55-60%Cr	1400-1600°C	$\rho \approx 7g/cc$	0-1mm
FeMn	73-78%Mn	1250-1350°C	$\rho \approx 7.3g/cc$	0-1mm
RESi	30%RE, 30%Si	1160-1200°C	$\rho \approx 6g/cc$	0-1mm
金属Te	100Te	449°C	$\rho \approx 6.2g/cc$	細粒
FeP	23-28%P	1166°C	$\rho \approx 7g/cc$	0-20mm
テルリット50	10%Te			市販のTe含有7ルコール系塗型材

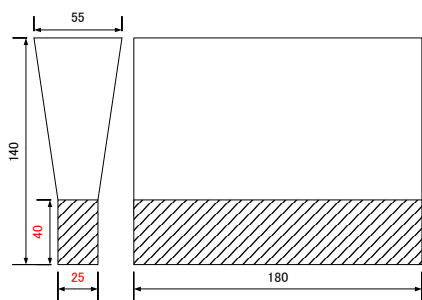


図3 Yブロック形状

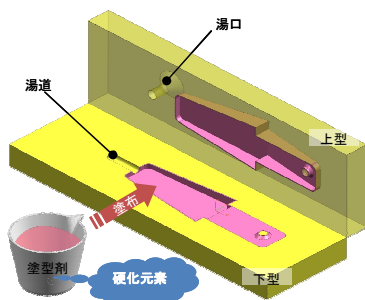


図4 鑄造方法（塗型法）

図5に組織観察結果を示す。観察した箇所は、図3の斜

線部断面である。いずれの硬化元素においてもチル層と見られる硬化層の生成は確認できたものの、層が薄く厚い所でも300 $\mu$ m程度しか生成されておらず、場所によっては、球状黒鉛鑄鉄素材そのもの箇所も観察された。

これらの原因として、塗型法では塗型剤表面に硬化元素が多く散布されている場合には、溶湯の流れによって元素が流されているためと考えられる。

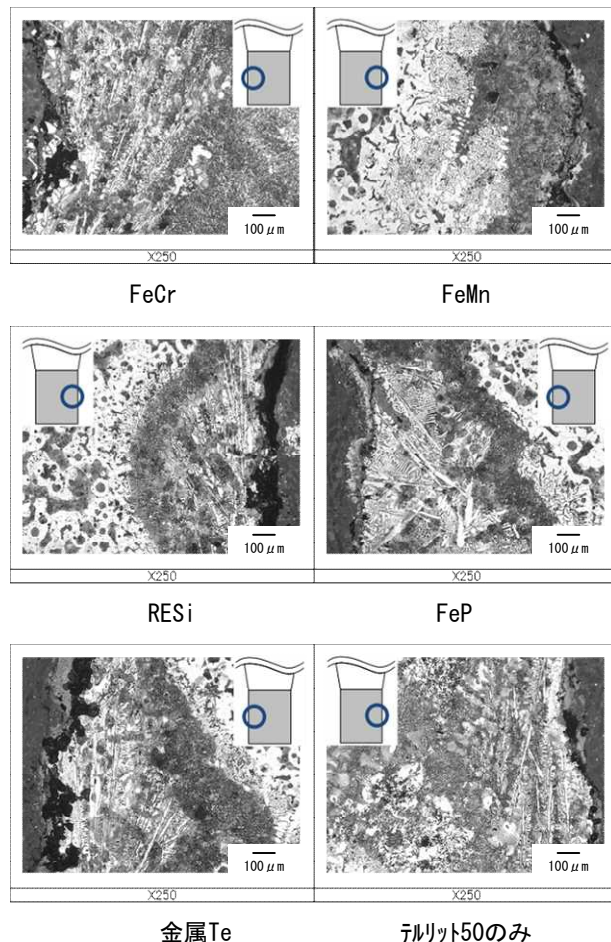


図5 塗型法による合金組織の生成  
（組織観察：塗型（テルリット50）へ直接散布）

### 2-2-2 反応室による合金組織の生成

2-2-1の結果より、塗型法による硬化層生成は困難であったことから、反応室法による実験を試みた。なお、実験に際してはFeCrとFeMnについては、融点が高いため、現在の注湯温度（約1,400°C）で十分溶融可能な硬化元素をRESi、金属Te、FeP、の3種に限定し、図4示すようなブラストマシン用インペラを試験片として、反応室法による鑄造実験を行った。

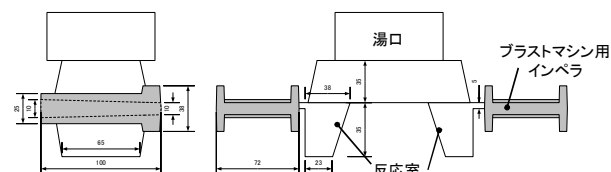


図6 ブラストマシン用インペラ（鑄型）

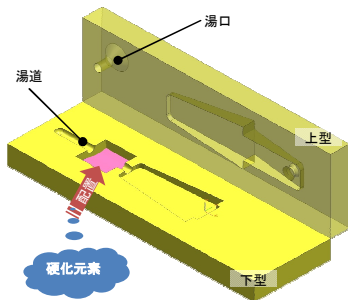


図7 鑄造方法（反応室法）

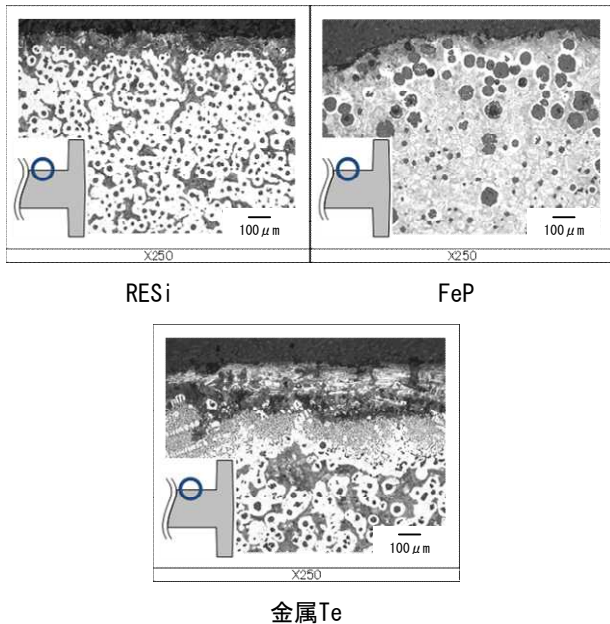


図8 反応室法による合金組織の生成  
（組織観察：溶湯FCD）

図8に結果を示すが、金属Teでわずかに硬化層が生成されているのみで、残りの2種は球状黒鉛鑄鉄のままであった。この理由は溶湯に含まれるSiの量が多いことが原因だと考えられることから、Siの量を減らした溶湯を使用して、図9に示すようなインペラ近似形状にて鑄造実験を行った。なお、硬化元素は、RESiを除きテルリット50を加えた3種とした。

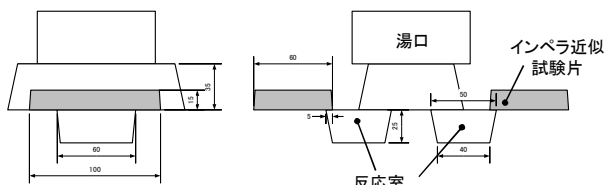


図9 インペラ近似試験片（鑄型）

図10に結果を示す。FePについては、合金層が生成されていなかった。FeTeについては、表面に金属Teとテルリット50の影響と思われる、厚い硬化層が確認されが、内部は片状黒鉛の組織となっていた。

金属Te単独とテルリット50を塗布した場合には、表面だけでなく組織全体にわたって硬化組織となっていた。しかしながら、この組織は靱性乏しいことが予想されることから、今後は熱処理も含めた検討が必要だと考えられる。

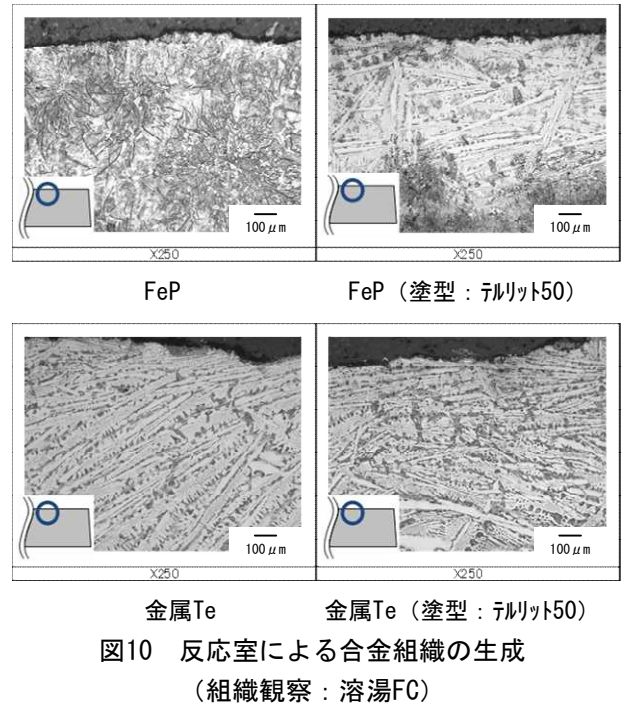


図10 反応室による合金組織の生成  
（組織観察：溶湯FC）

### 3 研究開発の成果（サブテーマ②）

#### 3-1 目的と課題

油圧ショベルのバケットや破砕機のハンマーなどの補修に用いられる硬化肉盛溶接は、手溶接または半自動溶接にて手軽に行えることから、広く用いられている補修方法である。しかしながら、補修を行う母材や肉盛溶接材料はその用途に合わせて多種多様な材料が使用されており、溶接条件によっては、目的の補修とならないばかりか、重大な事故に繋がる危険性もはらんでいる。したがって、補修部品母材の種類（化学成分含む）の把握と、肉盛溶接材料の化学成分の相関関係から、予熱温度や溶接電流ならびに速度など、詳細な溶接条件を把握する必要がある。

#### 3-2 実施内容

硬化肉盛溶接は基の材質と同等、若しくは基の材質より硬い性質を付与するために用いられる補修溶接であることから、母材の化学成分と溶接材料の化学成分とは、大きく異なる場合が多い。そこで、現在の施工実績から施工頻度の多い部品をピックアップし、様々な溶接条件のもとで溶接を行い、摩耗試験による評価を行うと同時にその結果から、溶接施工指針を策定した。



### 3-2-1 肉盛溶接材料の選定と溶接条件の検討

これまで施工実績のあるマルテンサイト系に加えて、これからの需要が見込まれる硬化肉盛溶接材料について検討を行い、最終的には表3に示す4種類の溶接材料を選定した。

表3 選定した硬化肉盛溶接材料

JIS Z3251	化学成分(%)							系統	主な用途
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	W		
1 DF3C	0.6	1.2	0.8	5.2	0.6	—	—	マルテンサイト系	一般摩耗性
2 DF4A	0.1	0.2	0.3	13	1.2	2.3	—	クロムフェリス系	耐食摩耗性
3 DFMA	0.7	0.2	16	—	—	—	—	高マンガン系	耐衝撃摩耗性
4 DFWA	3.2	0.2	2.1	—	—	—	41	タングステン炭化物系	耐重研削摩耗性

選定した溶接材料について、施工実績に基づき母材（SS400、S25C、S45C）に対して主に予熱の有無における溶接条件（表4）の検討を行った。図11に実験例を、表5には各条件における溶接時の割れの有無を示す。

表4 硬化肉盛溶接材料の溶接条件

JIS Z3251	溶接条件			母材
	溶接電流	予熱	後熱	
1 DF3C	120A-180A	150℃	—	SS400,S25C,S45C
2 DF4A	140A-180A	150-200℃	—	〃
3 DFMA	120A-180A	—	—	〃
4 DFWA	120A-220A	300℃	—	〃

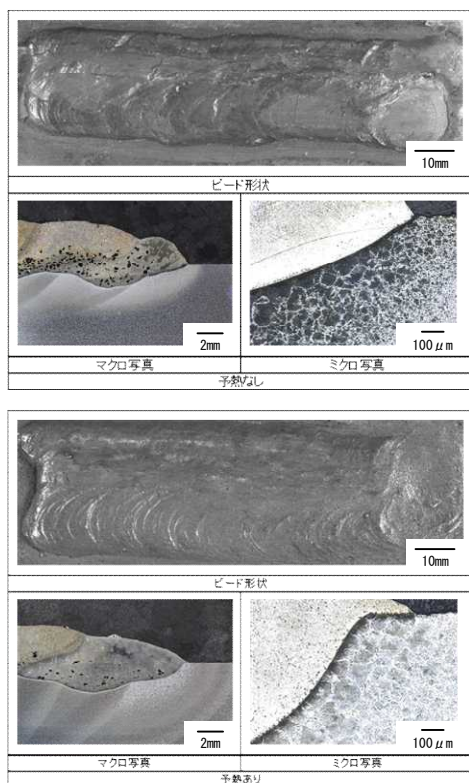


図11 硬化肉盛溶接の外観写真と組織写真の一例  
(溶接材料：DFWA 溶接電流：220[A] 母材：S25C)

表5 各条件下における割れの有無

溶接材料	予熱条件	母材		
		SS400	S25C	S45C
DF3C	予熱なし	あり	あり	あり
	予熱あり	なし	なし	なし
DF4A	予熱なし	なし	なし	なし
	予熱あり	なし	なし	なし
DFMA	予熱なし	なし	なし	なし
	予熱あり	なし	なし	なし
DFWA	予熱なし	あり	あり	あり
	予熱あり	なし	なし	なし

表5より、予熱なしの場合に亀裂が生じているが、予熱有りの場合には亀裂の発生は見られない。この現象は、比較的硬度の高いDF3Cについても同様であった。その他の溶接材料（DFMA、DW4A）については、予熱の有無による変化は見られなかった。また、いずれの溶接材料においても表面の亀裂の有無にかかわらずマクロ写真およびミクロ写真からは、熱影響部の広がりや硬化組織が観察された。

### 3-2-2 施工要領書の策定

3-2-1の結果をもとに、施工要領書の策定を行った。その一例を図12に示す。要領書は基本的な溶接条件およびその条件下における溶接ビードの外観写真やマクロおよびミクロ写真、さらには機械的強度の指針となる硬さ試験や摩耗試験の結果から構成されている。この施工要領書の整備により、新規の硬化肉盛溶接材料を使用した受注に対する溶接条件の予測が図れると同時に、社内の人材育成の教科書としても使用できる。

今後は本研究で選定した硬化肉盛材料以外の種類を増やすなど同施工要領書を拡充することで施工メニューとして施工主側に提示できるよう完成度を高めることで、より有益な資料になるものと考えられる。

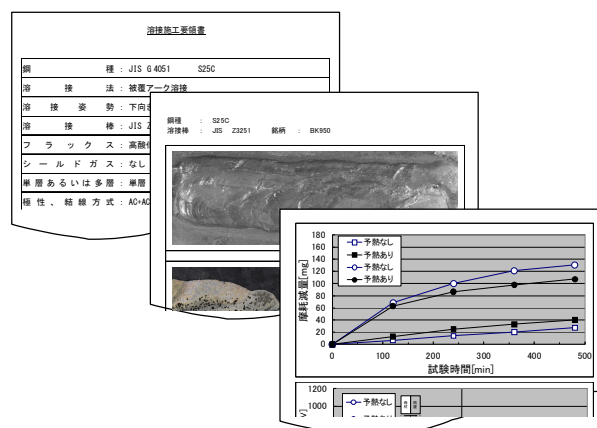


図12 施工要領書の一例  
(溶接材料：DFWA 溶接電流：220[A] 母材：S25C)

## 4 研究開発の成果（サブテーマ③）

### 4-1 目的と課題

油圧ショベルのバケット刃や破碎機のハンマーの選定は、基本的にメーカー推奨の部品を選択することになるが、実際の使用環境は必ずしもメーカーの想定した使用環境と一致するとは限らないことから、使用後にはじめてその部品の耐摩耗性などの性能が明らかになる事が多い。一方、耐摩耗性の評価は長期間を要するため、新しい材質や形状を開発しても、迅速な市場展開が困難であり、出来る限り早くかつ簡易的に部品の耐摩耗性を評価する方法が求められている。

### 4-2 実施内容

市販の摩耗試験機はすべり摩耗用が多く、本研究で想定している油圧ショベルによる掘削作業に代表される様なアブレッシブ摩耗を想定した試験機は少ない上、高価であることから、小型の簡易摩耗試験機を製作し、サブテーマ①において施策された耐摩耗鋳物およびサブテーマ②において施工された溶接試験片について耐摩耗性の評価を行った。

#### 4-2-1 摩耗特性の評価と摩耗試験方法の検討

図13に示す代表的なアブレッシブ摩耗試験<sup>1)</sup>について検討した結果、本研究では、試験距離が長く取れかつ粉体接触により試験片全体が摩耗にさらされる事を重視した。その結果、点線で囲まれた粉体内回転接触式と粉体内回転衝撃式の2種類の摩耗試験に決定し、試験機の製作と実験を行うこととした。

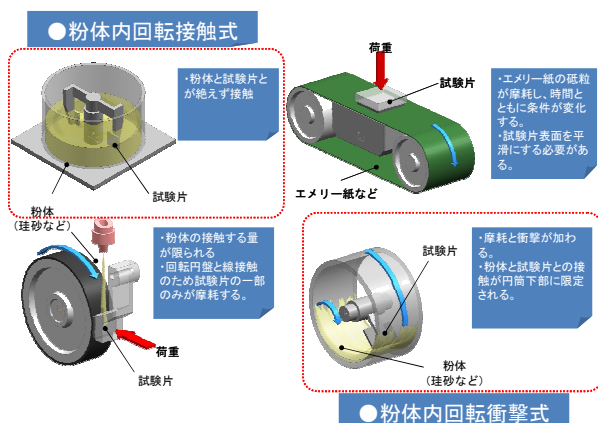


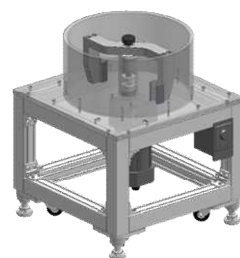
図13 代表的なアブレッシブ摩耗試験

#### 4-2-2 簡易摩耗試験機の製作と摩耗試験

4-2-1にて選定したアブレッシブ摩耗試験に使用する粉体は、硬度の高い炭化ケイ素を選定し、粒径は0.5mm～1.0mmとした。回転数は、株式会社神戸製鋼で行われた圧縮衝撃破碎摩耗試験<sup>2)</sup>の周速を参考に回転衝撃式を500min<sup>-1</sup>とした。回転衝撃式の試験片が粉体に接触する

のは最大で半円部分であるのに対し、回転接触式は全周に渡り接触することから、単位時間あたりの摩耗距離が同一となるよう、回転接触式の回転数は回転衝撃式の半分である250min<sup>-1</sup>とした。図14-15に摩耗試験機の概略図を示す。

摩耗試験は、2時間毎に試験片重量を計測し、試験前の重量との差を摩耗減量として評価した。また、2時間毎の計測の際には粉体を回収し、ふるいにて0.5mm～1.0mmに分粒した後、使用した。試験時間は、最長で8時間とした。



CAD図

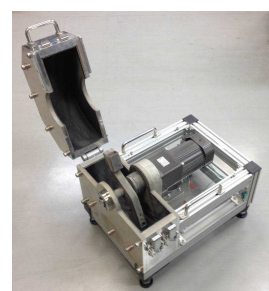


製作した装置写真

図14 粉体内回転接触式摩耗試験機の概要



CAD図

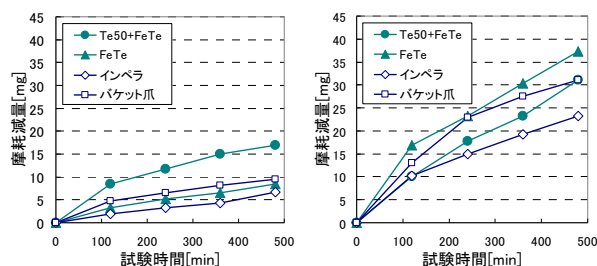


製作した装置写真

図15 粉体内回転衝撃式摩耗試験機の概要

サブテーマ①の実験において、良好な硬化組織が得られた試作耐摩耗鋳物の摩耗試験の結果を図16に示す。

結果より回転接触式と、回転衝撃式とでは摩耗の進行状況が異なるが、金属Te (FeTe) のみについてはバケット爪ならびにインペラと同等の耐摩耗性を示している。



回転接触式摩耗試験結果

回転衝撃式摩耗試験結果

図16 耐摩耗鋳物の摩耗試験結果

次に、硬化肉盛溶接に対して摩耗試験を行った結果を  
図17-20に示す。

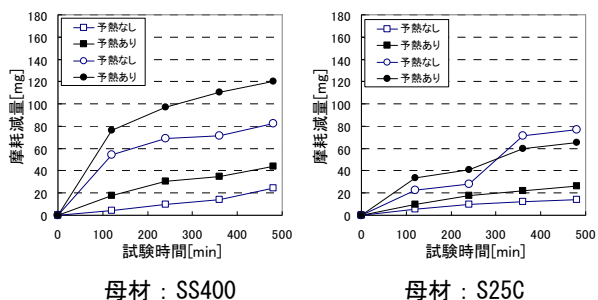


図17 硬化肉盛溶接の摩耗試験結果  
(DF3C □■：回転接触 ○●：回転衝撃)

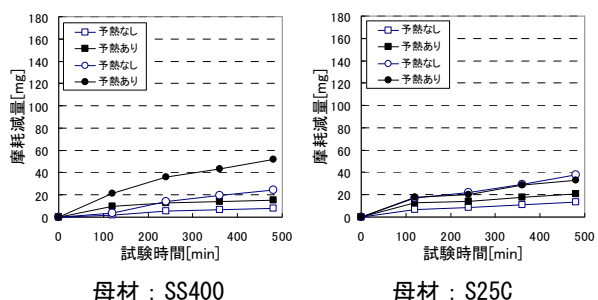


図18 硬化肉盛溶接の摩耗試験結果  
(DF4A □■：回転接触 ○●：回転衝撃)

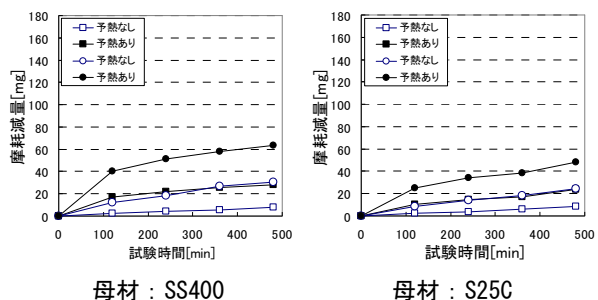


図19 硬化肉盛溶接の摩耗試験結果  
(DFMA □■：回転接触 ○●：回転衝撃)

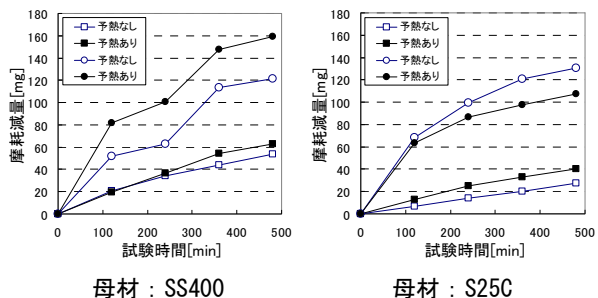


図20 硬化肉盛溶接の摩耗試験結果  
(DFWA □■：回転接触 ○●：回転衝撃)

結果より今回の摩耗試験ではDFMAならびにDFWAが  
もっとも良好な耐摩耗性を示した。また、DF3Cと  
DFWAについては、母材による違いが有り、両方とも  
SS400に施工した場合には、S25Cに施工した場合よりも

低い耐摩耗性となった。

また、摩耗試験結果と予熱の有無による影響と紙面  
では割愛した硬さ試験は、あまり相関性が見られなかつた  
ことから、追試または他の摩耗試験方法による検討を行  
う必要がある。

## 5 おわりに

県内において耐摩耗性品の製造ならびに補修技術を確  
立するためインモールド铸造法や硬化肉盛溶接技に關す  
る研究開発を行った結果は、下記のとおりである。

### サブテーマ①：

インモールド铸造による耐摩耗鑄物の開発

- ・ 塗型を用いた方法では、目標とした硬化層を得るこ  
とができなかった。
- ・ 反応室を用いたインモールド法では、硬化組織を得  
ることができ、同等の耐摩耗性を示したが、靱性の  
確保に課題を残した。

### サブテーマ②：

硬化肉盛溶接の溶着現象の解析と適切な溶接方法の確立

- ・ 従来扱っていた硬化肉盛溶接材料に加え、今後需要  
の想定される硬化肉盛溶接材料4種について選定を  
行うとともに、主に母材の違いや予熱変化による溶  
接施工実験を行い、耐摩耗性や硬さ試験など特性を  
確認した。
- ・ 溶接施工実験の結果を反映した、施工要領書を作成  
した。

### サブテーマ③：

摩耗試験方法の検討と簡易摩耗試験機の製作

- ・ 簡易摩耗試験機を製作し、耐摩耗鑄物ならびに硬化  
肉盛溶接の摩耗試験を行い、各々の耐摩耗性につい  
て評価を行った。
- ・ 摩耗試験方法については、圧力を付加した試験方法  
や粉体（砥粒）の種類の見直しを行う必要がある。

本研究は平成26年度工業研究費（受託）の「耐摩耗鑄  
物の生産技術開発と耐摩耗部品の溶接補修技術の確立  
(2014技004)」で行ったものである。

## 参考文献

- 1)橋本健次：粉体工学会誌，Vol.36(1999)，No.11，843-  
848.
- 2) (株)神戸製鋼所 溶接棒事業部：溶接学会誌，  
Vol.57(1988)，No.1，5.

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。