

平成26年度 戦略的基盤技術高度化支援事業（継続事業）

「新鑄造法による低コスト・高剛性MMC製造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成27年3月

委託者 東北経済産業局
委託先 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

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	3
1.1.1	研究背景と目的	3
1.1.2	研究概要および目標	4
1.1.2 (1)	研究概要	4
1.1.2 (2)	研究目標	4
①	高流動性MMC 溶湯の開発	4
②	新鑄造法に最適な鑄型の開発	4
③	溶湯の流動性を向上させる鑄造法の開発	4
④	製造プロセスの評価	4
1.2	研究体制	5
1.2.1	研究組織	5
1.2.2	管理体制	5
1.2.3	管理員及び管理員氏名	7
1.2.4	他からの指導・協力者及び指導・協力事項	7
1.3	成果概要	9
1.3.1	高流動性MMC 溶湯の開発	9
1.3.1 (1)	MMC インゴットの生成	9
1.3.1 (2)	MMC 溶湯の生成	9
1.3.1 (3)	溶湯組成と溶湯流動性の相関解析	9
1.3.1 (4)	MMC の微細組織と物性の相関解析	9
1.3.2	新鑄造法に最適な鑄型の開発	9
1.3.2 (1)	砂型の開発	9
1.3.2 (2)	耐火物型の開発	9
1.3.3	溶湯の流動性を向上させる鑄造法の開発	9
1.3.3 (1)	鑄造補助装置の確立	9
1.3.4	製造プロセスの評価	10
1.3.4 (1)	製造原価の評価	10
1.4	当該研究開発の連絡窓口	10
第 2 章	本 論	11
2.1	高流動性MMC 溶湯の開発	11
2.1.1	MMC インゴットの生成	11
(1)	研究内容	11
(2)	研究結果	11

2.1.2	MMC 溶湯の生成	13
	(1) 研究内容	13
	(2) 研究結果	13
2.1.3	溶湯組成と溶湯流動性の相関解析	14
	(1) MMC 溶湯の流動性の定量的評価方法	14
	(2) SiC 粒子の体積分率が異なる MMC 溶湯の流動性の測定	14
2.1.4	MMC の微細組織と物性の相関解析	18
	(1) MMC により銅管を鋳包んだ試料における銅管近傍の組織	18
2.2	新鋳造法に最適な鋳型の開発	22
2.2.1	砂型の開発	22
	(1) 研究内容	22
	(2) 研究結果	22
2.2.2	耐火物型の開発	24
	(1) 研究内容	24
	(2) 研究結果	24
2.3	溶湯の流動性を向上させる鋳造法の開発	26
2.3.1	鋳造補助装置の確立	26
	(1) 研究内容	26
	(2) 研究結果	26
2.4	製造プロセスの評価	27
2.4.1	製造原価の評価	27
	(1) MMC の加工	27
	① 研究結果	27
	② 研究課題	27
	(2) MMC の物性	28
	① 研究結果	28
	② 研究課題	28
	(3) 製造原価の試算	28
	① 研究結果	28
	② 研究課題	28
第3章	全体総括	29
3.1	研究開発成果まとめ	29
3.2	現状課題	29
3.3	事業化について	30

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

1.1.1 研究背景と目的

我が国が得意とする工作機械は、諸外国の技術迫り上げのため更なる高性能化が急務となっており、電子部品チップマウンタ等の製造装置は、製造タクトタイムを短縮して製造原価を低減するための加工の高速化が課題となっている。高速化はアクチュエータの高出力化と機械部品の高剛性化によって実現できるが、アクチュエータの高出力化は消費電力を増加させ、高剛性化は機械部品を重厚長大させ製造原価を増加させる。工作機械を作る川下産業は低コスト・省エネルギーで高速かつ高精度に位置決めする技術を求めており、これらの要求に応じるには従来材に代わる高剛性かつ軽量のMMC材料が要望されている。具体的には第 1.1.1-1 表の新鑄造法の欄に示す物性値を目標とする。

組成*の単位：v%

物性値		合金		MMC		
		鑄鉄	アルミ合金	鑄造法	新鑄造法	プリフォーム 浸透法
組成*	セラミックス	---	---	SiC 30%	SiC 50%	SiC 70%
	金属	Fe合金 100%	Al合金 100%	Al合金 70%	Al合金 50%	Al合金 30%
比重	---	7.30	2.70	2.80	2.92 以下	3.00
ヤング率	GPa	115	75	125	175 以上	260
熱膨張係数	$\times 10^{-6}/K$	10	21	14	10 以下	7
熱伝導率	W/m K	50	138	150	160 以上	180
振動減衰性	加速度半減期	---	A	A 以下	A 以下	A 以下

第 1.1.1-1 表 目標とする物性値

鑄造法によって製造されるMMC(金属基複合体)は、その製造方法からセラミックス含有率を高められない欠点があり高剛性、軽量等高機能で安価な材料を実現できていなかった。

そこで、従来不可能であったセラミックス高含有率MMCを安価に製造する新鑄造法を開発して、電子部品チップマウンタや高速プレス機等工作機械製造業者が求める高速化に必須な材料を提供し、我が国の工作機械産業の国際競争力強化に貢献する。

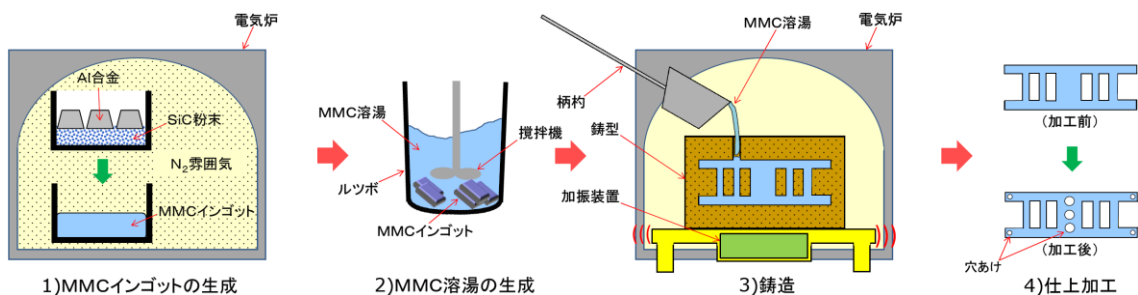
1.1.2 研究概要および目標

1.1.2 (1) 研究概要

従来の鋳造法では SiC 含有率 50v% の MMC は、SiC の含有率が高いため、鋳造する際の溶湯の粘度が高く流動性が悪化するため、鋳造欠陥が発生しやすいことから不可能とされていた。今回の研究開発では、原料組成、鋳型や鋳造補助装置等を開発して鋳造欠陥が発生しにくい SiC 含有率が 50v% の MMC を製品化する。

開発する新鋳造法は、湯周りが良く鋳造欠陥が発生しにくいので、川下企業が求める高剛性で複雑、軽量の機械部品を低コストで製造することができる。また、従来の鋳造技術、設備及び作業環境を流用できるので、多額の設備投資を必要とせず早期に事業化することができる。

新鋳造法の工程概略を第 1.1.1-1 図に示す。



第 1.1.1-1 図 新鋳造法の工程概略

本研究開発では、工作機械産業が求める高機能と低コストを両立する MMC の製品化を実現するため、1.1.2 (2) 項に示す課題を解決して鋳造技術の高度化を図る。

1.1.2 (2) 研究目標

① 高流動性 MMC 溶湯の開発

- ・ SiC50v% の MMC 溶湯の最適な製造条件を特定する。

② 新鋳造法に最適な鋳型の開発

- ・ 製品形状テスト型(3種以上)の最適な鋳造方案を特定する。

③ 溶湯の流動性を向上させる鋳造法の開発

- ・ 製品形状テスト型(3種以上)の最適な鋳造条件を特定する。

④ 製造プロセスの評価<製造原価の評価>

- ・ 最終目標値：SiC30v% の MMC と同程度の製造原価を達成する。

- 製品形状テスト型による鋳造製品の目標とする物性(第 1.1.1-1 表)を達成する。

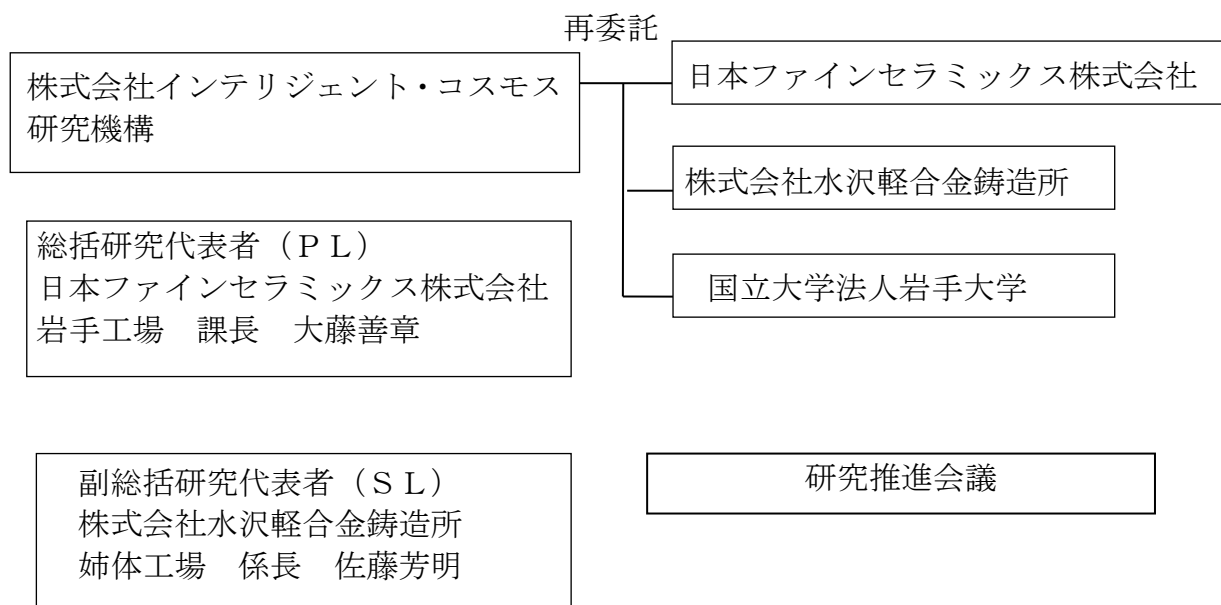
	SiC50v%MMC
SiC 含有率(v%)	50±2.5
比重(g/cm ³)	>2.87
ヤング率(GPa)	>170
熱膨張係数(10 ⁻⁶ /K)	<10
熱伝導率(W/mK)	>159
振動減衰性(-)	<Al 合金

第 1.1.1-1 表 目標とする物性

1.2 研究体制

1.2.1 研究組織

事業管理者は株式会社インテリジェント・コスモス研究機構、再委託先として日本ファインセラミックス株式会社、株式会社水沢軽合金鋳造所、国立大学法人岩手大学で組織構成される。

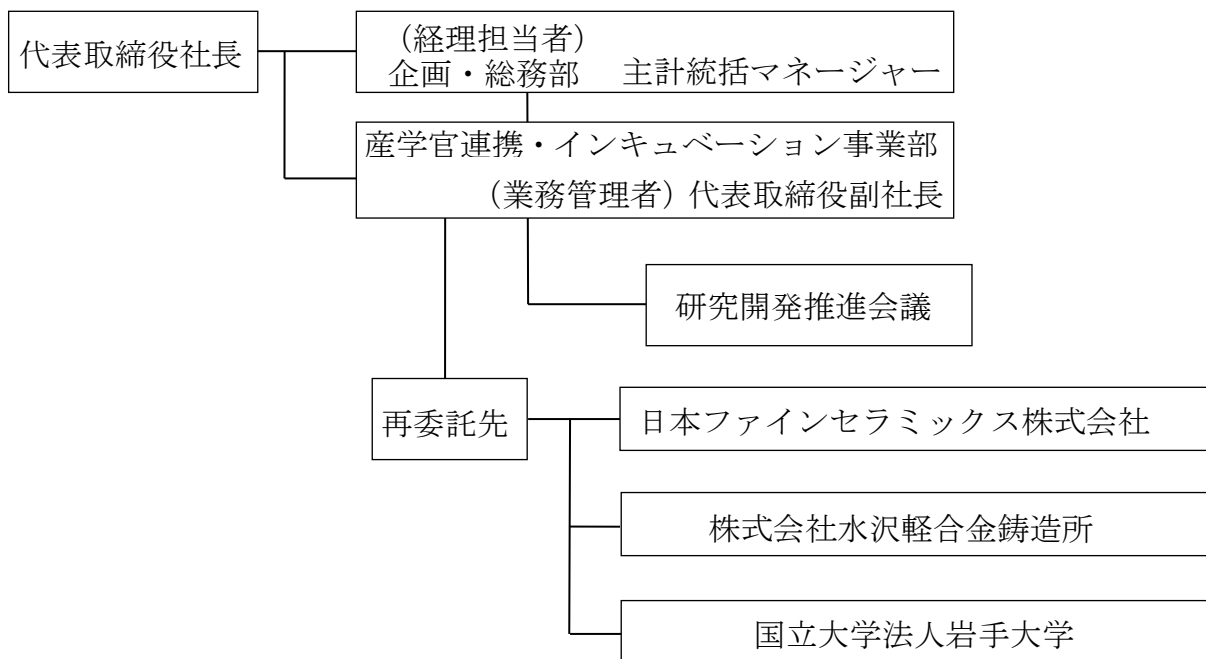


1.2.2 管理体制

管理体制は以下の通りである。

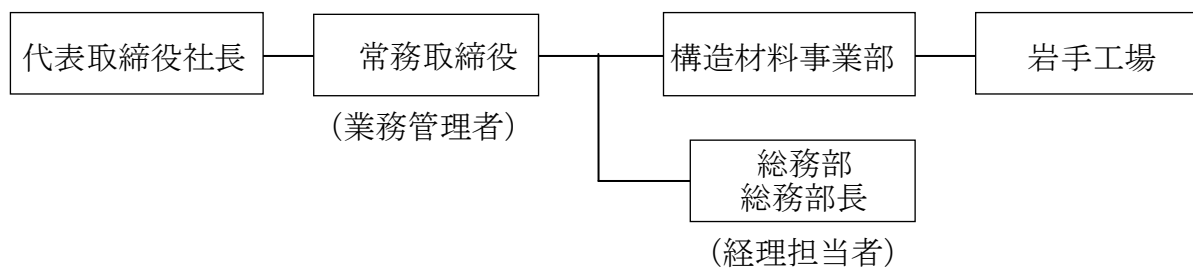
(1) 事業管理者

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

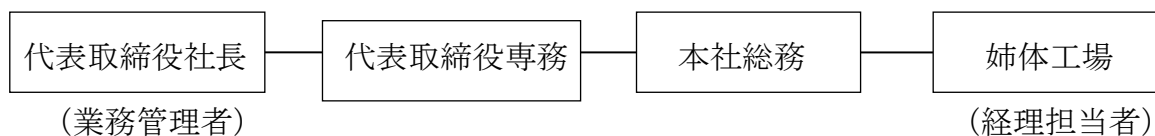


(2) 再委託先

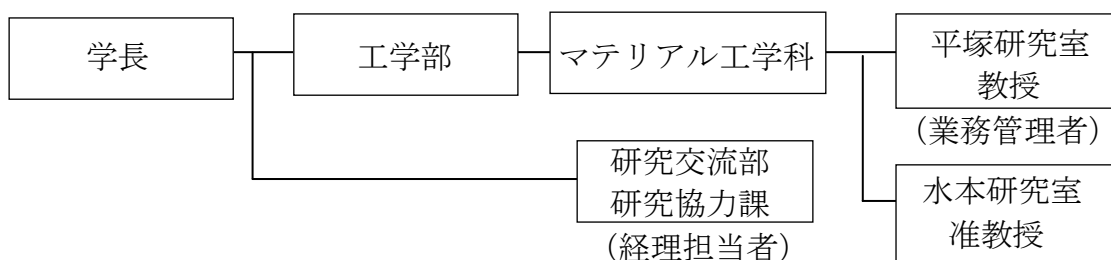
日本ファインセラミックス株式会社



株式会社水沢軽合金鋳造所



国立大学法人岩手大学



1.2.3 管理員及び研究員氏名

(1) 管理員(事業管理者)

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

氏名	所属・役職	備考
猪股 則夫	産学官連携・インキュベーション事業部 統括マネージャー	
鈴木 秀夫	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	
三浦 未紀枝	産学官連携・インキュベーション事業部 管理員	

(2) 研究員(再委託先)

日本ファインセラミックス株式会社

氏名	所属・役職	備考
大藤 善章	構造材料事業部 岩手工場 課長	PL
森 信一	構造材料事業部 岩手工場 課長代理	

株式会社水沢軽合金鋳造所

氏名	所属・役職	備考
金沢 史記	姉体工場 主任 H24.9～H26.3	SL
佐藤 芳明	姉体工場 係長 H26.4～H27.3	

国立大学法人岩手大学

氏名	所属・役職	備考
平塚 貞人	工学部 マテリアル工学科教授 兼 鋳造技術センター長	
水本 将之	工学部 マテリアル工学科准教授	

1.2.4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

共同体内での研究課題共有、研究計画の見直し決定を行うため、アドバイザーを含めた研究推進会議を設立し運営を行った。以下に研究推進会議の構成委員及びアドバイザーの協力事項を示す。

尚、事業期間中での全体研究推進会議を年3回計9回実施した。

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職
大藤 善章(PL)	日本ファインセラミックス株式会社 構造材料事業部 岩手工場 課長
佐藤 芳明(SL)	株式会社水沢軽合金鑄造所 姉体工場 係長
水本 将之	国立大学法人岩手大学工学部マテリアル工学科 准教授
足立 茂	日本ファインセラミックス株式会社 常務取締役
梁川 昌紀	日本ファインセラミックス株式会社 品質保証部長
森 信一	日本ファインセラミックス株式会社 構造材料事業部 岩手工場 課長代理
及川 勝比古	株式会社水沢軽合金鑄造所 代表取締役社長
堀江 皓 (※)	堀江鑄造技術研究所 所長
平塚 貞人	国立大学法人岩手大学工学部 マテリアル工学科 教授
川邊 慎二(※)	トヨタ自動車東日本株式会社 岩手工場 組立部主担当 員
林 睦夫(※)	株式会社フォーリスト 代表取締役社長
岩清水 康二(※)	地方独立行政法人岩手県工業技術センター ものづくり基盤技術第2部(鑄造)専門研究員
猪股 則夫	株式会社インテリジェント・コスモス研究機構 産学官連携インキュベーション事業部統括マネージャー
鈴木 秀夫	株式会社インテリジェント・コスモス研究機構 産学官連携インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー
三浦 未紀枝	株式会社インテリジェント・コスモス研究機構 産学官連携インキュベーション事業部 管理員

※印4名は本研究で協力頂いたアドバイザー

アドバイザー指導・協力事項

氏名	主な指導・協力事項
堀江 皓	開発全般の指導と助言
川邊 慎二	製品の技術的評価、用途開発の助言
林 睦夫	開発全般の指導と助言
岩清水 康二	開発全般の指導と助言

1.3 成果概要

1.3.1 高流動性MMC溶湯の開発

1.3.1 (1) MMCインゴットの生成

SiC45~50v%のMMCインゴットのSiC粒子配合を探索し、SiC45v%のMMCインゴットの原料組成を特定した。

1.3.1 (2) MMC溶湯の生成

SiC含有率を高くすると、溶湯流動性は低下する。SiC含有率が45v%を超えると溶湯が半固体となり溶湯流動性が極めて低下する。アルミ溶解炉と溶融・攪拌システムを用いてSiC45v%のMMC溶湯の生成条件を特定した。

1.3.1 (3) 溶湯組成と溶湯流動性の相関解析

MMC溶湯流動性測定システムを用いて、種々の組成から成るSiC粒子含有率が30~45v%のMMC溶湯の流動性を測定することにより、MMCの組成と流動性の関係を明らかにした。

1.3.1 (4) MMCの微細組織と物性の相関解析

MMCの組成および鋳包み条件がガンアームの諸物性に及ぼす影響を調べ、高剛性かつ高熱伝導率のMMC製ガンアームの作製条件を明らかにすることができた。

1.3.2 新鋳造法に最適な鋳型の開発

1.3.2 (1) 砂型の開発

MMCは溶湯流動性が低く、注湯時にガスを溶湯中に巻き込むと排出され難く、鋳物内部にガス欠陥が残留する。鋳造方案を探索して、SiC35v%のMMCに最適な鋳造方案および鋳造条件を特定した。

1.3.2 (2) 耐火物型の開発

耐火物型を用いて加振と加温を活用し、SiC45v%のMMCに最適な鋳造方案および鋳造条件を特定した。

1.3.3 溶湯の流動性を向上させる鋳造法の開発

1.3.3 (1) 鋳造補助装置の確立

MMCはアルミ合金に比べて溶湯流動性が極めて低下するため、注湯時に溶湯中に残留するガス欠陥を削減できる機器設備を必要とする。MMC鋳造における鋳造補助装置と鋳造条件を特定した。

1.3.4 製造プロセスの評価

1.3.4 (1) 製造原価の評価

SiC35v%と SiC45v%のMMCについて製造原価を試算したところ、申請当初に目標を共に達成していることを確認した。しかしながら、製造原価における加工費の割合が5割以上を占める場合が多々あるので、原価低減するためにより価格競争力のある製造技術を確立していく。

1.4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

産学官連携・インキュベーション事業部

統括マネージャー 猪股則夫

TEL 022-279-8811 (代)、FAX 022-279-8880

〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成六丁目6番地の3

第2章 本論

2.1 高流動性MMC溶湯の開発

2.1.1 MMCインゴットの生成

(実施担当：日本ファインセラミックス株式会社)

(1) 研究内容

大きい粒子を適用すると、単位重量あたりの被表面積が小さくなり溶湯流動性が高くなる。小さな粒子を適用すると、被表面積が大きくなり粒子の沈降が遅く SiC 粒子が均一に分散する。SiC 含有率が 45v%を超えると、溶湯が半固体となり溶湯流動性が極めて低下するので、溶湯流動性を高くすることに主眼を置き SiC 粒子配合を探索した。

(2) 研究結果

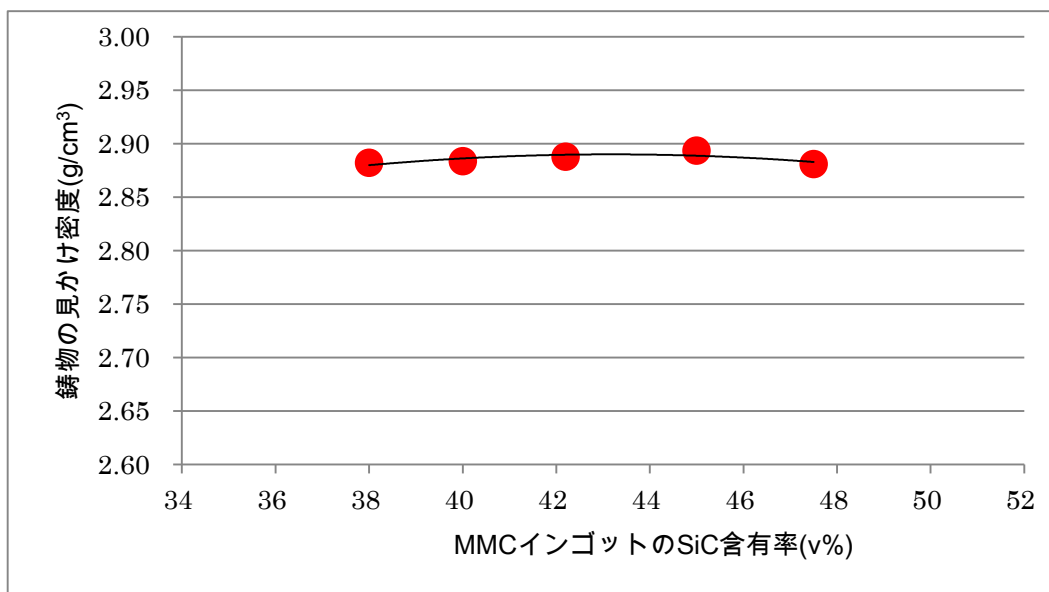
SiC 粒子配合において、より大径な粒子に置き換えてMMCインゴットを作製した。作製したMMCインゴットを第 2.1.1-1 図に示す。



第 2.1.1-1 図 MMCインゴット (SiC45v%)

MMCインゴットの SiC 含有率を変えて作製し鑄造を行い、鑄物の見かけ密度を測定した。MMCインゴットの SiC 含有率と鑄物の見かけ密度の関係を第 2.1.1-2 図に示す。MMCインゴットの SiC 含有率を上げると鑄物の見かけ密度が上昇するが、SiC45v%を超えると徐々に低下することが分かった。この現象は鑄物内部にガス欠陥が残留したことが主因と考えている。

SiC45v%のMMCインゴットの原料組成を大きい SiC 粒子と小さい SiC 粒子の混合配合に特定した。



第 2.1.1-2 図 MMCインゴットの SiC 含有率と鑄物の見かけ密度

2.1.2 MMC 溶湯の生成

(実施担当：株式会社水沢軽合金鋳造所、日本ファインセラミックス株式会社)

(1) 研究内容

SiC 含有率を高くすると、溶湯流動性は低下する。SiC 含有率が 45v% を超えると溶湯が半固体となり、溶湯流動性が極めて低下する。

第 2.1.1-1 図に示した SiC45v% の MMC インゴット約 40kg を第 2.1.2-1 図に示すアルミ溶解炉および溶融・攪拌システムを用いて SiC45v% の MMC 溶湯が生成できるか探査した。



第 2.1.2-1 図 アルミ溶解炉と溶融・攪拌システム

(2) 研究結果

溶融・攪拌システムによる機械的な攪拌と攪拌スプーンによる手動による攪拌との併用にて溶湯中の SiC 粒子を均一に分散させることが分かった。SiC 粒子の凝集らしきものがなく、SiC 粒子を均一に分散できた。SiC45v% の MMC 溶湯の生成条件を溶融・攪拌システムによる機械的な攪拌と攪拌スプーンによる手動に特定した。

2.1.3 溶湯組成と溶湯流動性の相関解析

(実施担当：国立大学法人岩手大学)

(1) MMC 溶湯の流動性の定量的評価方法

MMC 溶湯の流動性を定量的に評価するために、市販のトルクメータ、電気炉および振動器を組み合わせた MMC 溶湯流動性測定装置を製作し、MMC 溶湯の粘性を直接測定することにより、MMC 溶湯の流動性を評価した。

MMC 溶湯のような固液混相流体は非ニュートン流体であるが、解析を容易にするためにニュートン流体と仮定すると、みかけの粘性 η_c と回転トルク N_T の関係は次の式であらわされる。

$$\eta_c = N_T \frac{\alpha(1-\beta^2)}{4\pi r^2 L V}$$

ここで、 α は比例定数、 β は攪拌プロペラの径とるつぼ径の比、 r は攪拌プロペラの半径、 L は攪拌プロペラの浸漬深さ、 V は攪拌速度である。 β 、 r 、 L および V はすべて攪拌機に依存する定数であるため、みかけの粘性 η_c と回転トルク N_T は比例関係にあるといえる。すなわち、回転トルクを測定することにより粘性を評価することができる。

(2) SiC 粒子の体積分率が異なる MMC 溶湯の流動性の測定

SiC 粒子の体積分率が MMC 溶湯の流動性に及ぼす影響を調べるために、SiC 粒子の体積分率を変化させて作製した 35v%、40v% および 47.5v% SiC/Al 合金 MMC を用いて、700°C で回転トルクを測定した結果を第 2.1.3-1 図に示す。47.5v% SiC/Al 合金 MMC については、粘性が高すぎたために測定することができなかった。35v% および 40v% のいずれの MMC についても、SiC 粒子の体積分率が高いほど回転トルクは高くなった。また、40v% SiC/Al 合金 MMC では、回転トルクの時間変化は見られなかった。SiC 粒子の体積分率が高くなることにより回転トルクが増加した原因としては、体積分率が増加することで粒子の表面間距離が近くなるために、粒子間の相互作用の結果、粒子同士が接触および凝集したためと考えられる。

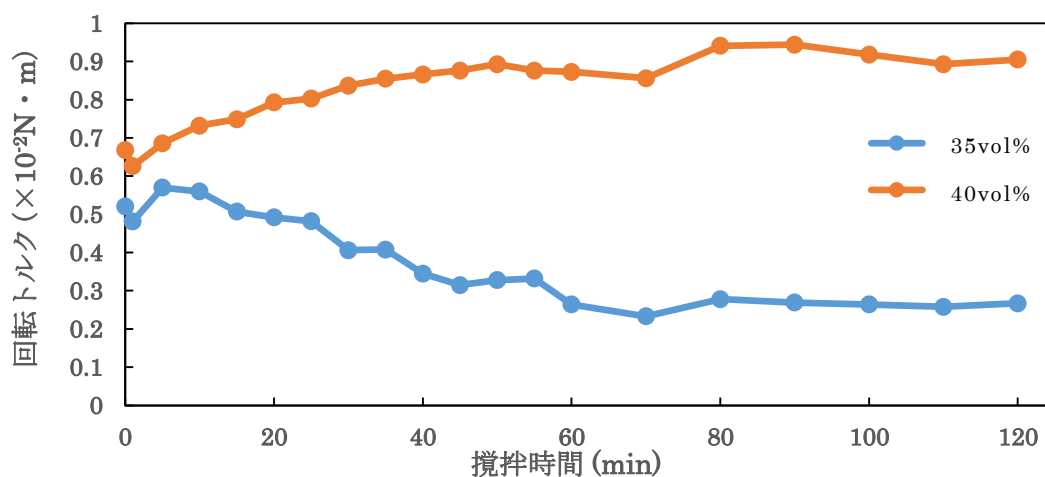
次に、強化材の粒径を均一して、体積分率を変化させて作製した 20v% SiC/Al-Si 合金 MMC (SiC 粒径 75 μ m、27 μ m、15 μ m)、10v% SiC/Al-Si 合金 MMC (SiC 粒径 75 μ m、27 μ m、15 μ m) を用いて、700°C で回転トルクを測定した結果を第 2.1.3-2-4 図に示す。粒径 75 μ m の場合には、30v% のときに回転トルクが顕著に高くなった。一方、粒径 15 μ m および

27 μm の場合には 75 μm の時とは異なり、時間経過とともに回転トルクはなだらかに減少する傾向を示した。これらの実験結果について、粒子表面間距離の観点から考察した。

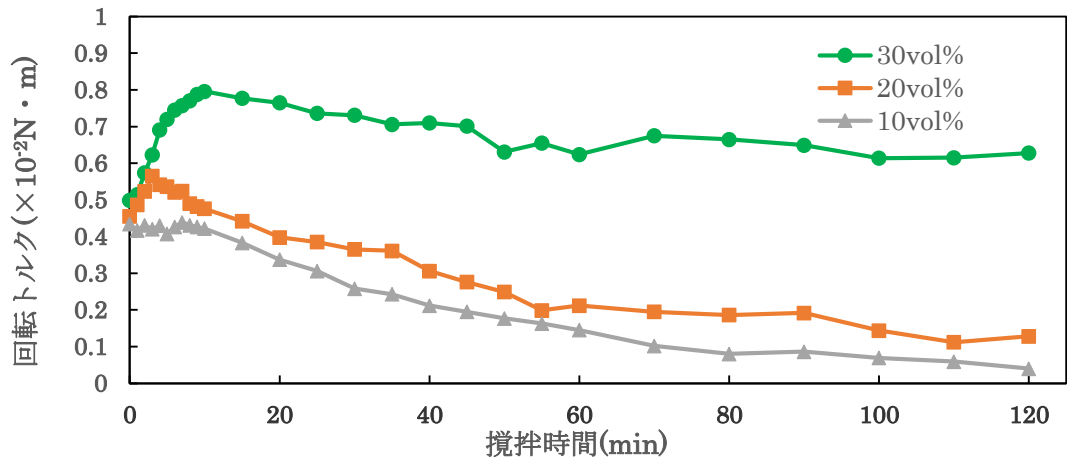
ナノ粒子の分散・凝集に関する研究において、平均粒子表面距離は、幾何学的に粒子径と粒子濃度の関数で求められたものが報告されている。Woodcock が提案した式を以下に示す。

$$h = d_p \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{3\pi F} + \frac{5}{6} \right)} - 1 \right\}$$

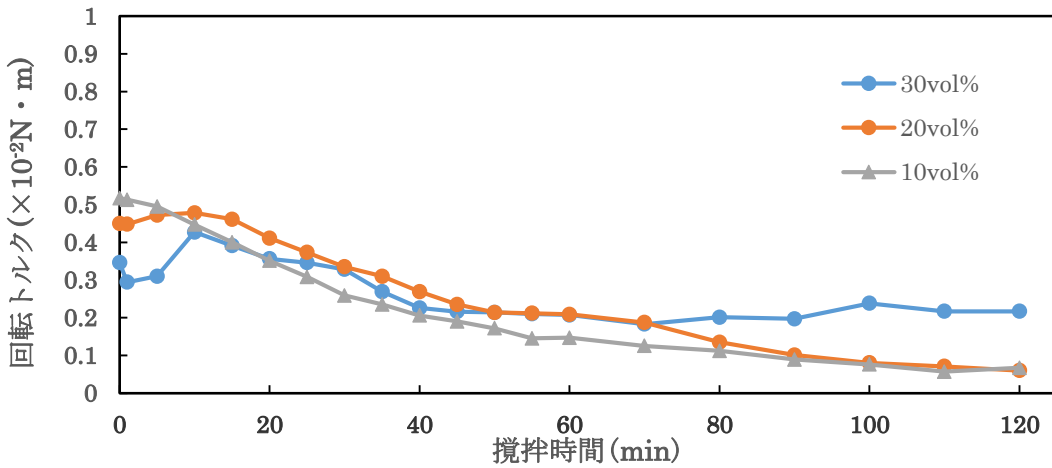
ここで、 h は平均粒子間距離、 d_p は粒径、 F は粒子体積分率である。Woodcock の式を用いて、MMC 中に SiC 粒子が均一に分散していると仮定して、SiC 粒子の体積分率が 10~50v% の時の、平均粒子表面距離を求めたものを表 2.1.3-1 に示す。表より、SiC 体積分率が高くなるに伴い平均粒子表面距離も近くなる。実験では、粒径 75 μm で 30v% の MMC で回転トルクが顕著に高くなったが、このときの平均粒子表面距離は SiC 粒径の 1/10 以下であることから、平均粒子表面距離が MMC 中の粒子径の 1/10 以下になると粒子間の相互作用が顕著に増加し、MMC 溶湯の粘性が増加すると考えられる。そのため、高い流動性を持つ MMC 溶湯を開発するためには、粒子間距離を考慮して、高 SiC 体積分率の MMC 溶湯であるほど、微細な粒子の割合を増加させる必要があることが示唆された。



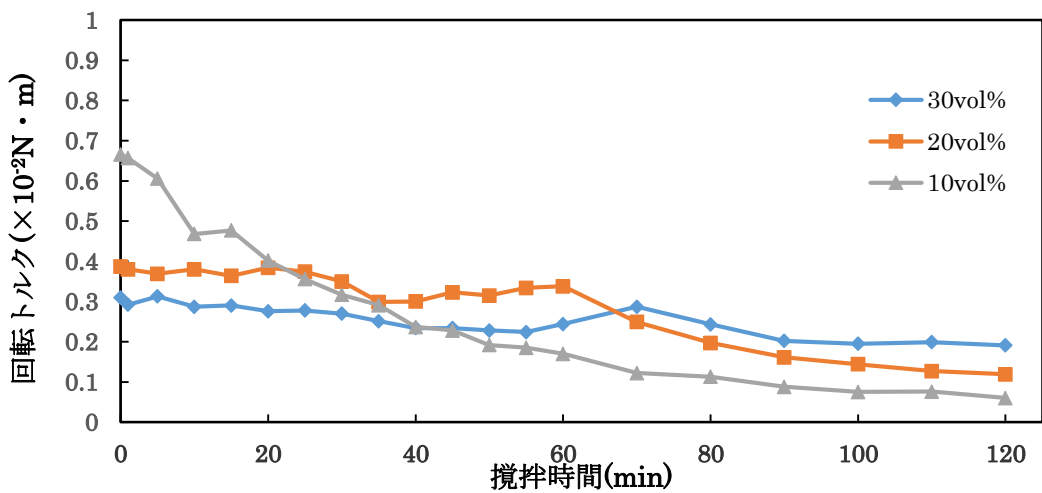
第 2.1.3-1 図 SiC/Al 合金 MMC 溶湯の粘性に及ぼす SiC 粒子の体積分率の影響



第 2.1.3-2 図 10~30v%SiC/Al 合金MMC 溶湯の粘性に及ぼす SiC 粒子の体積分率の影響 (SiC 粒子径 : 75 μ m)



第 2.1.3-3 図 10~30v%SiC/Al 合金MMC 溶湯の粘性に及ぼす SiC 粒子の体積分率の影響 (SiC 粒子径 : 27 μ m)



第 2.1.3-4 図 10~30v%SiC/Al 合金MMC 溶湯の粘性に及ぼす SiC 粒子の体積分率の影響 (SiC 粒子径 : 15 μ m)

SiC 粒子の粒径		10v%	20v%	30v%	40v%	50v%
90 μm		33.9 μm	15.1 μm	8.1 μm	4.3 μm	2.0 μm
75 μm		28.2 μm	12.6 μm	6.7 μm	3.6 μm	1.7 μm
63 μm				5.6 μm	3.0 μm	1.4 μm
27 μm				2.4 μm	1.3 μm	0.6 μm
15 μm		5.6 μm	2.5 μm	1.3 μm	0.7 μm	0.3 μm

表 2.1.3-1 Woodcock の式から求めた粒子表面間距離

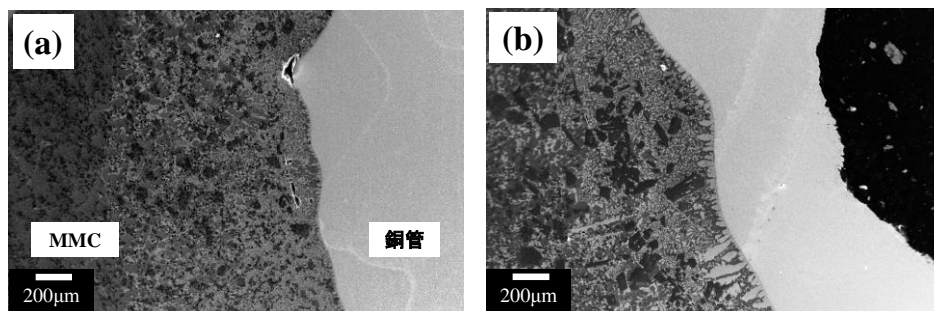
2.1.4 MMCの微細組織と物性の相関解析

(実施担当：国立大学法人岩手大学)

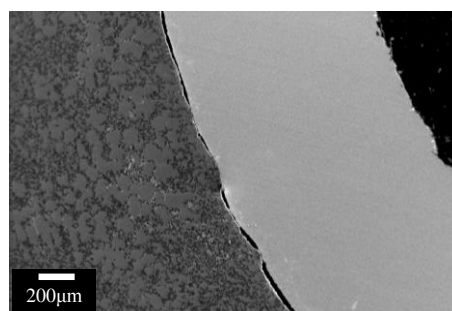
(1) MMCにより銅管を鋳包んだ試料における銅管近傍の組織

日本ファインセラミックス株式会社より、MMCにより銅管を鋳包んだ試料の組織解析依頼を受けた。本件について以下に説明する。

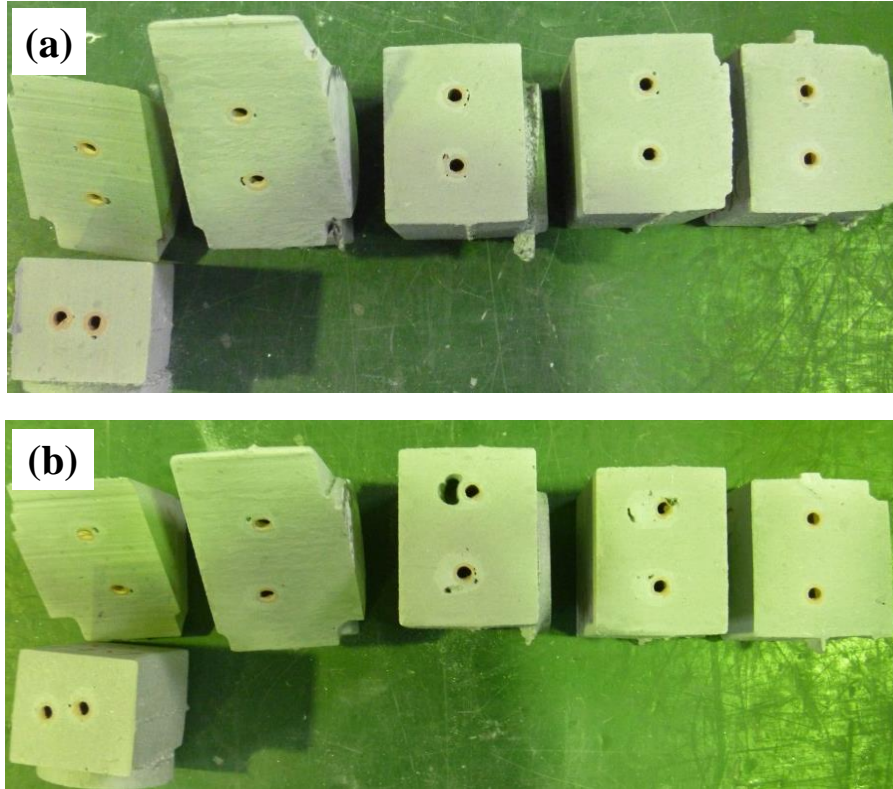
MMCの内部に銅管を鋳包んだ試料を作製した際に、銅管近傍に鋳造欠陥が観察され、さらに銅管近傍の組織はMMCの組織とは異なった組織が観察されたために、MMC組織解析システムを用いて組織観察を行った。第 2.1.4-1 図に、無処理の銅管を用いた試料とブラスト処理をした銅管を用いた試料の、銅管と 20v%MMCとの界面近傍の SEM 像を示す。(b)では界面は大きく波打っており、銅管が一部溶解したことがわかる。また、界面近傍ではMMCとは異なる組織が観察された。これは、銅管から拡散した Cu により、MMCのマトリックスである Al 系合金の組成が変化したためと考えられ、合金層が観察された箇所では、MMCと銅管の間には金属的な接合が達成されている。しかし、第 2.1.4-2 図に示すように、無処理の銅管を使用した試料の接合界面では合金層が観察されず、隙間がある界面も観察された。一方、銅管にブラスト処理をした試料の接合界面では隙間は存在せず、全面で合金層が観察された。これは、ブラスト処理により銅管表面の酸化膜が除去されたため、MMC溶湯との反応性が向上したためと考えられる。



第 2.1.4-1 図 (a)無処理および(b)ブラスト処理した銅管/MMC界面近傍の組織



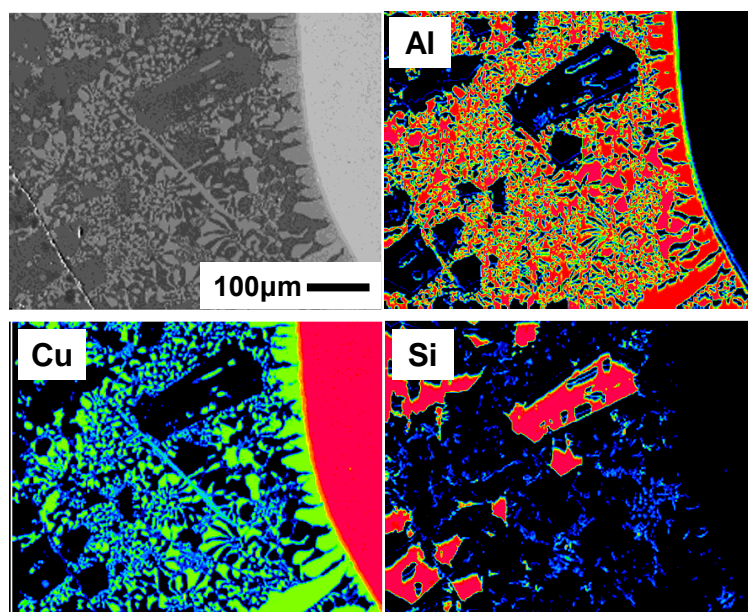
第 2.1.4-2 図 無処理の銅管/MMC界面近傍で観察された接合不良領域



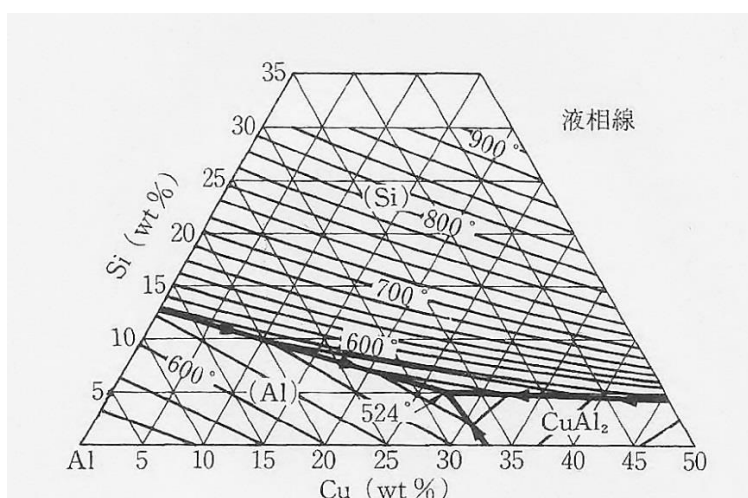
第 2.1.4-3 図 (a)無処理および(b)ブラスト処理した銅管近傍に発生した鑄造欠陥

第 2.1.4-3 図に、銅管を鑄包んだ試料の断面を示す。ブラスト処理の有無に関わらず、接合界面付近に鑄造欠陥が観察され、ブラスト処理した銅管を用いた試料の方が大きな鑄造欠陥が生じた。そこで、ブラスト処理した銅管近傍の組織を EPMA により元素分析を行った。その結果を第 2.1.4-4 図に示す。元素分析の結果、界面に生成した合金層は、Al-Si-Cu 系合金の組織であることがわかった。また、SEM 像に見られる塊状の組織は純 Si であることがわかった。この純 Si は、銅管近傍で多く観察された。しかし、界面で観察された合金層は、マトリックスである Al-11.4%Si 合金に Cu が拡散して形成された Al-Si-Cu 系合金と考えられるが、一般的な Al-Si 系では Si 含有量が 11.4%以下では、初晶 Si は晶出しない。しかし、第 2.1.4-5 図に示す Al-Si-Cu 系状態図によると、Cu の含有量が増加すると、Si が 11.4%以下でも、初晶 Si が晶出することがわかる。銅管付近では Cu の濃度が高くなると考えられるため、初晶 Si が晶出したと考えられる。また、初晶 Si 晶出後の Al-Si-Cu 系合金は、 α -Si 二元共晶反応を経て、 α -Si-Al₂Cu 三元共晶で凝固が終了する。 α -Si-Al₂Cu の固相線温度は 524°Cであり、AC3A 合金の固相線温度 577°Cよりも低い。このことから、銅管近傍で観察された鑄造欠陥は、固相線温度の低い α -Si-Al₂Cu が生成したことにより、界面近傍が最終

凝固部となって生じた引け巣であることがわかった。

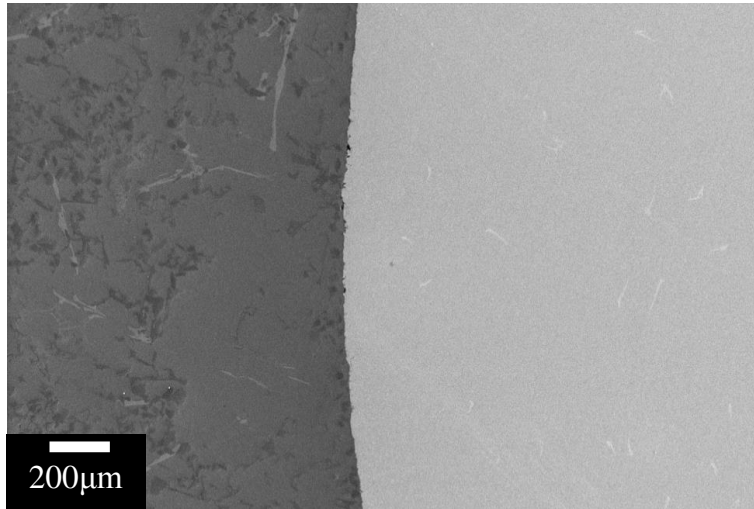


第 2.1.4-4 図 ブラスト処理した銅管近傍の元素分布

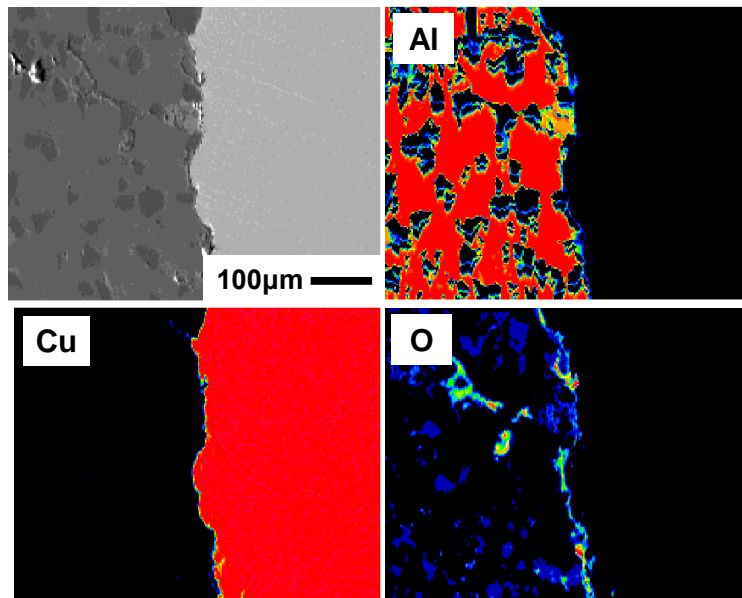


第 2.1.4-5 図 Al-Si-Cu 系状態図

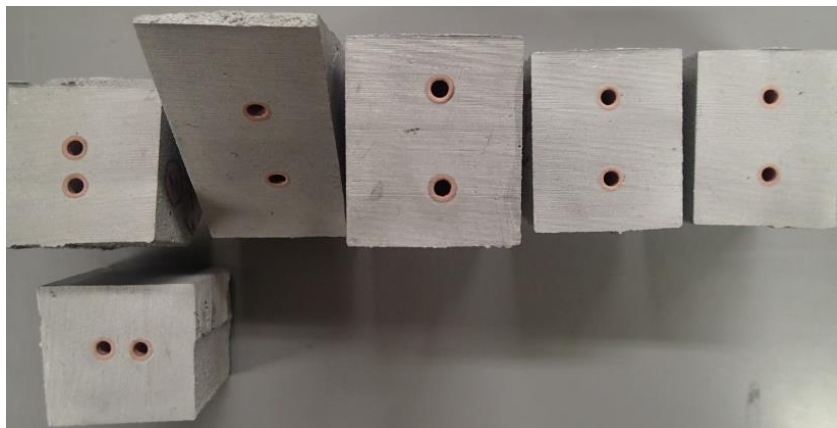
そこで、引け巣の発生を防止するために、銅管を熱処理することで酸化膜を形成させ、Cu と熔融 Al 合金を反応させないことを試みた。銅管の熱処理は大気中、220℃で 2 時間行った。熱処理した銅管を鋳包んだ試料における銅管と MMC との界面近傍の SEM 像を第 2.1.4-6 図に、界面近傍の元素分布を第 2.1.4-7 図に示す。界面には合金層は観察されず、Cu と熔融 Al 合金の拡散が起こらなかったことがわかる。また、第 2.1.4-8 図に示す試料の断面から、 α -Si-Al₂Cu の生成に由来する鋳造欠陥は観察されなかった。



第 2.1.4-6 図 熱処理した銅管/MMC界面近傍の組織



第 2.1.4-7 図 熱処理した銅管近傍の元素分布



第 2.1.4-8 図 熱処理した銅管を用いた試料の断面

2.2 新鑄造法に最適な鑄型の開発

2.2.1 砂型の開発

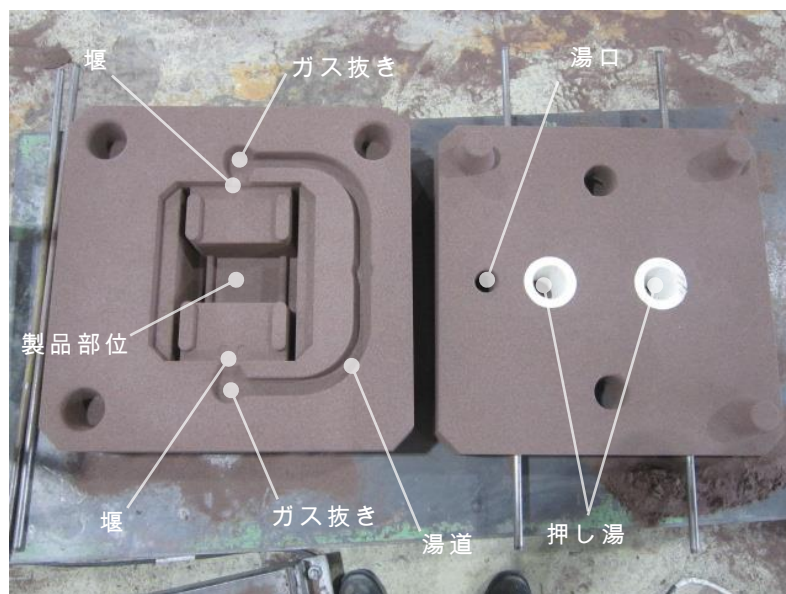
(実施担当：株式会社水沢軽合金鑄造所)

(1) 研究内容

MMCは溶湯流動性が低く、注湯時にガスを溶湯中に巻き込むと排出され難い。アルミ合金の鑄造方案を採用すると、鑄物内部にガス欠陥が残留して良好なMMCを得ることができない。注湯時に巻き込むガスの侵入抑制と排出促進を主眼に置き、SiC35v%のMMCに最適な鑄造方案と鑄造条件を探索した。なお、注湯時に高い溶湯流動性を得るため、振動器付き鑄込台(第 2.3.1-3 図)を用いて注湯時に鑄型を加振した。また、鑄物はブロック状の製品形状とした。

(2) 研究結果

作製した鑄型の一例を第 2.2.1-5 図に示す。湯道を長くして、その間に巻き込んだガスを浮上させ注湯時に製品部位(≒鑄物)へ侵入するガス量を削減している。また、製品部位に溶湯が入った時にガスの巻き込み量が少なくなるよう落差のない箇所に堰を配置している。なお、注湯時の鑄型の加振速度を 15mm/秒に、鑄型の傾斜を 10° とした。



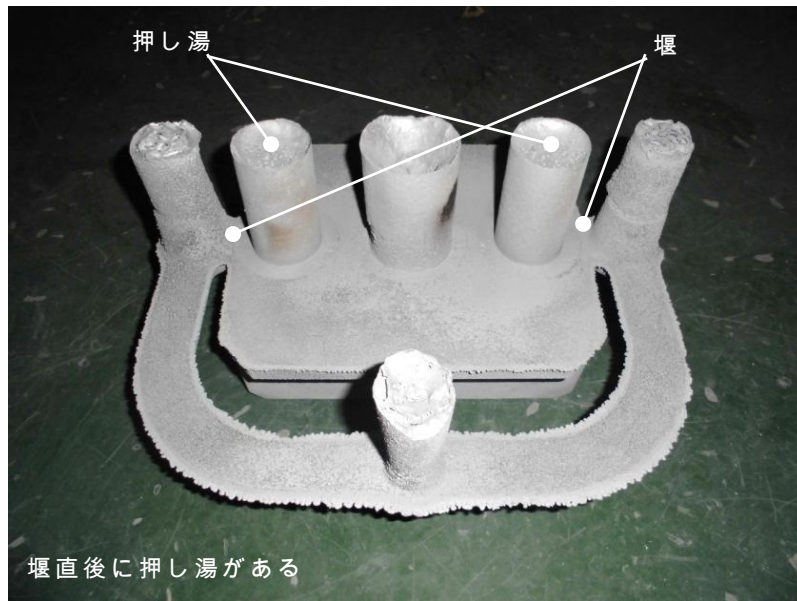
第 2.2.1-5 図 MMC (SiC35v%) の鑄造方案

第 2.2.1-7 図に示す鑄物は第 2.2.1-5 図に示す鑄造方案を元に押し湯(≒ガス抜き)の位置を堰直後に変更して作製した。鑄物の見かけ密度は 2.843g/cm³を示し 2.834g/cm³(SiC35v.0%相当)以上に達している。

次に、試作した鑄物について SiC 粒子が均一に分散しているか探索し

た。パルス法による弾性率測定器を用いると局部的にヤング率を測定できるので、異なる部位を複数箇所測定することにより鋳物内部の SiC 粒子分散性を間接的に測定することができる。測定の結果、ヤング率は平均 159GPa に達し、そのバラツキは±5GPa 程度であるため、SiC 粒子がほぼ均一に分散していると言える。

SiC35v%の鋳造方案を第 2.2.1-7 図に示す鋳造方案に、鋳型の加振速度を 15mm/秒に、鋳型の傾斜を 10° に特定した。ガス欠陥の発生対策に優れる鋳造方案と鋳造条件である。



第 2.2.1-7 図 鋳造方案 b

2.2.2 耐火物型の開発 (実施担当：日本ファインセラミックス株式会社)

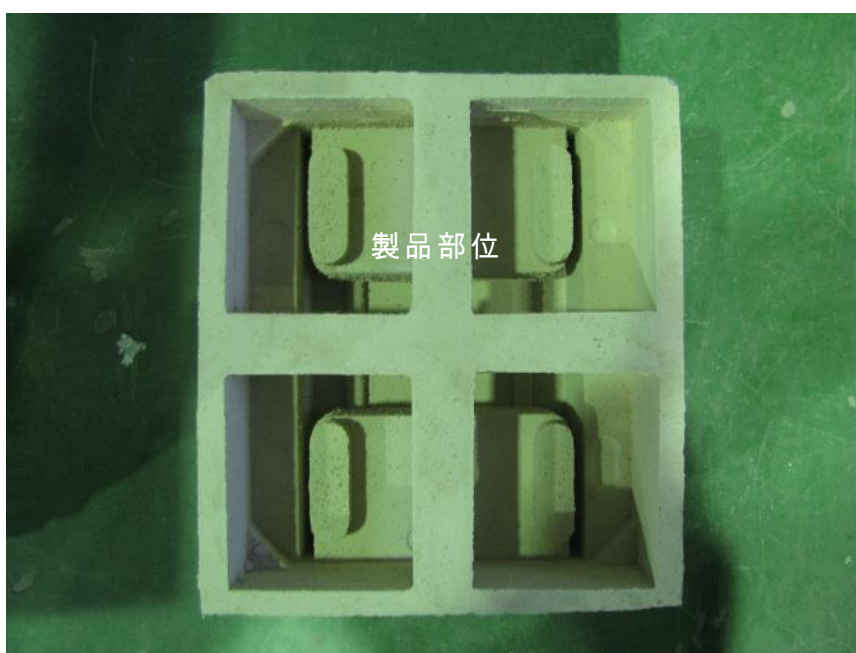
(1) 研究内容

SiC 含有率を高くすると、溶湯流動性は低下する。SiC 含有率が 45v% を超えると溶湯が半固体となり、溶湯流動性が極めて低下する。本研究開発では、第 1.1.1-1 図に示すように注湯時に鑄型を加振および加温して溶湯流動性を改善することにより、SiC45v%のMMCに最適な鑄造方案および鑄造条件を探索した。なお、鑄物は SiC35v%と同じブロック状の製品形状とした。

(2) 研究結果

SiC 含有率が 45v%を超えると溶湯が半固体となる。そのため、鑄造方案がアルミ合金のように複雑であると、鑄物全域を満たす十分な量の溶湯が堰を通過できず、製品形状の鑄物を得ることができない。したがって、最も簡素な直入れを鑄造方案として採用し、鑄造条件を探索した。

作製した鑄型の一例を第 2.2.2-4 図に示す。鑄造方案は直入れであるが、注湯時の鑄型の加振速度を 30mm/秒に、鑄型の加温を 650℃とした。鑄物の見かけ密度は 2.890g/cm³を示し 2.886g/cm³ (SiC45.0v%相当)以上に達している。



第 2.2.2-4 図 鑄造方案 b

次に、パルス法による弾性率測定器を用いてヤング率を測定し、試作した鑄物について SiC 粒子が均一に分散しているか探索した。測定の結果

果、ヤング率は平均 177GPa に達し、そのバラツキは±6GPa 程度であるため、SiC 粒子がほぼ均一に分散していると言える。

SiC45v%の鑄造方案を第 2.2.2-4 図に示す直入れに、注湯時の鑄型の加振速度を 30mm/秒に、鑄型の加温を 650℃に特定した。

2.3 溶湯の流動性を向上させる鑄造法の開発

2.3.1 鑄造補助装置の確立 (実施担当：株式会社水沢軽合金鑄造所)

(1) 研究内容

鑄造補助装置として導入した振動器付き鑄込台と電気工業用乾燥炉を第 2.3.1-3 図と第 2.3.1-4 図に示す。鑄造補助装置は鑄型を加振或いは加温するための装置であり、注湯時に溶湯流動性を高くして鑄物内部に残留するガス欠陥を削減することを目的としているが、鑄造補助装置の使用条件を探索した。



第 2.3.1-3 図 振動器付き鑄込台

第 2.3.1-4 図 電気工業用乾燥炉

(2) 研究結果

SiC35v%のMMCは第 2.3.1-3 図に示す振動器付き鑄込台を用いて、注湯時に鑄型の加振速度を 15mm/秒に、鑄型の傾斜を 10° にすることに特定した。また、SiC45v%のMMCは第 2.3.1-4 図に示す電気工業用乾燥炉を用いて、注湯時に鑄型の加振速度を 30mm/秒に、鑄型の加温を 650℃ にすることに特定した。

2.4 製造プロセスの評価

2.4.1 製造原価の評価 (実施担当：日本ファインセラミックス株式会社)

(1) MMCの加工

① 研究結果

MMCは強化材としてSiCを用いるので難削材である。MMCの加工は刃先にダイヤモンド砥粒や多結晶ダイヤモンドを取り付けた工具を用いる。選定した加工設備と代表的な工具を第2.4.1-1表に示す。

加工内容	加工設備	代表的な工具	
切断	 コンターマシン	 a.ブレード	---
研削	 GC	 b.四角チップ	 c.ホイール
穴あけ	同上	 d.コンパックス	 e.ドリル
ネジ切り	同上	 f.ネジ切りタップ	 g.ネジ切り砥石

第2.4.1-1表 MMCの加工設備とその工具

② 研究課題

工作機械の構造部品は高い寸法精度が要求される部位を多く持つので、その製造において機械加工を必ず伴う。そのため、原価を低減させるために加工の見直しは必要不可欠である。ニアネットシェイプ成形や加工の高速化を中心に探査を継続して、より価格競争力のある製造技術確立していく。

(2) MMC の物性

① 研究結果

SiC35v%と SiC45v%のMMCの物性について、その実測値平均値を第 2.4.1-2 図に示す。顧客への試作品提出等の事業化活動を始めると、SiC35v%、SiC45v%のMMCの需要があり、この2種を追加して研究開発を進めた。SiC50v%のMMCは上述したように、技術的に製品化が困難であることが分かり研究対象から除外した。

物性	単位	MMC (SiC35v%) *	MMC(SiC45v%)
		実測値平均	実測値平均
密度	g/cm ³	2.82	2.89
ヤング率	GPa	159	177
熱膨張係数	10 ⁻⁶ /K	13.3	10.4
熱伝導率	W/mK	172	171

第 2.4.1-2 表 MMC の物性

② 研究課題

MMCはSiCを強化材としてその優れた物性を活かすことにより市場に受け入れられている。第 2.4.1-2 表に示す「密度が低い」「ヤング率が高い」「熱膨張率が低い」「熱伝導率が高い」ことをよく説明し、顧客にその価値を理解していただく必要がある。

現状において、決して十分なデータ量とは言えないので、継続して物性データを取得し、販売促進に役立てていく。

(3) 製造原価の試算

① 研究結果

本研究開発による製造技術が市場にて価格競争力があるか製造原価を試算した。対象を 2.2 新鑄造法に最適な鑄型の開発にて試作したブロック状の製品形状として、平成 26 年度に開発した SiC35v%と 45v%のMMCについて試算した。試算の結果、申請当初に目標とした価格を満足していることが分かった。

② 研究課題

当該製品は精密機器に取り付けられる構造部品であるため、高い寸法精度が要求される部位が多い。そのため機械加工箇所が多く、素材加工費が製造原価全体の 5 割以上と高い。(2) MMCの加工にて述べたように、継続的な探査を行い、原価低減を図っていく。

第3章 全体総括

3.1 研究開発成果まとめ

平成26年度研究目標達成状況を下記にまとめる。

平成26年度は、SiC35v%とSiC45v%のMMCの溶湯生成、鑄造方案および鑄造条件等製造プロセスを確立した。また、事業化を見据えて、SiC含有率毎の物性データの取得と顧客への試作品提出を行い、販売促進活動を開始した。

国立大学法人岩手大学が持つ技術的知見と物性測定面での協力並びにアドバイザー各位の適切な助言により、これらの成果を得ることができたと考えている。

研究開発目標	成果	達成度
① 高流動性MMC溶湯の開発 SiC45~50v%のMMC溶湯の製造条件を特定 ①-1 MMCインゴットの生成 ①-2 MMC溶湯の生成 ①-3 溶湯組成と溶湯流動性の相関解析 ①-4 MMCの微細組織と物性の相関解析	SiC45v%のMMC溶湯の製造条件を特定 SiC45v%のMMCインゴットの生成条件を特定 SiC45v%のMMC溶湯の生成条件を特定 SiC30~45v%の溶湯流動性を定量的に測定 販売促進用試作品の微細組織を解析し、製造指針を提案	98% 95% 95% 100% 100%
② 新鑄造法に最適な鑄型の開発 SiC35v%,SiC45~50v%のMMCの鑄造方案を特定 ②-1 砂型の開発 ②-2 耐火物型の開発	SiC35,45v%のMMC製品の基礎方案を特定 砂型にて、SiC35v%の鑄造方案を特定 耐火物型にて、SiC45v%の鑄造方案を特定	98% 100% 95%
③ 溶湯の流動性を向上させる鑄造法の開発 SiC35v%,45~50v%の製造プロセスを確立	SiC35,45v%の製造プロセスを確立	98%
④ 製造プロセスの評価 目標とする製造原価を達成 製造原価を評価,解析 穴あけ,切断,研削,ネジ切りの各加工を評価	目標とする製造原価を達成 製造試算を評価し、原価低減の施策を立案 穴あけ,切断,研削,ネジ切りの各加工方法を特定	98% 100% 95%

3.2 研究後の課題

下表に研究終了後の主な課題を示す。これら課題等を解決して、事業化を成功に導く。

研究内容	研究後の課題	研究後の予定
① 高流動性MMC溶湯の開発	①-3 溶湯組成と溶湯流動性の相関解析	継続してデータを取得し、より多くの技術的知見を得る
② 新鑄造法に最適な鑄型の開発	②-1 砂型の開発 ②-2 耐火物型の開発	様々な製品形状を鑄造し、鑄造方案を確立する
③ 溶湯の流動性を向上させる鑄造法の開発		
④ 製造プロセスの評価	穴あけ,切断,研削,ネジ切りの各加工を評価	様々な製品形状を加工し、加工技術を確立する

3.3 事業化について

下表に事業化に向けた販売促進体制を示す。販売促進は総括会社、副総括会社双方で行う。PL を務めた大藤善章(日本ファインセラミックス株式会社 岩手工場 課長)は研究開発終了後に営業職務に従事する予定であり、特に販売促進に注力する。

