平成２３年度戦略的基盤技術高度化支援事業（第３次補正予算）

「薄肉・高強度・高靱性アルミニウム合金鋳物製造のための多機能グラビティ一複合金型鋳造システムの研究開発」

研究開発成果等報告書

平成２５年　３月

委託者　北海道経済産業局
委託先　株式会社北海道二十一世紀総合研究所

目　　次

第１章　研究開発の概要
１－１　研究開発の背景・研究目的及び目標 1
１－２　研究体制 3
１－３　成果概要 6
１－４　当該研究開発の連絡窓口 7

第２章　注湯条件の研究
２－１　自動注湯装置の研究開発 8
２－１－１　研究目的及び目標 8
２－１－２　実施内容 8
２－１－３　研究成果 9

第３章　薄肉化を実現するための研究
３－１　湯流れ性向上の研究開発 10
３－１－１　研究目的 10
３－１－２　実験方法 10
３－１－３　実験結果 16
３－１－４　まとめ 22

第４章　高強度・高靭性の向上に資する鋳造技術の開発
４－１　微細化剤の研究開発 23
４－１－１　研究目的 23
４－１－２　実験方法 23
４－１－３　実験結果と考察 23
４－１－４　まとめ 27
４－２　超音波振動の研究開発 28
４－２－１　研究目的 28
４－２－２　実験方法 28
４－２－３　実験結果と考察 29
４－２－４　まとめ 37

第５章　複合金型鋳造システムの設計と製作
５－１　目的 39
５－２　複合金型鋳造システムの設計仕様 39
５－３　製作した複合金型鋳造システムによる鋳造試験 40
５－４　まとめ 41

第６章　全体総括
６－１　研究開発成果 42
６－２　研究開発後の課題・事業化展開 43

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

１－１－１　研究開発の背景

本研究開発は、「中小企業の特定ものづくり基盤技術の高度化に関する指針」のうち、以下の項目に対応した研究開発である。

（十）鋳造に係る技術に関する事項

（５）その他産業に関する事項

①　川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

ア．高強度化・高靭性化

アルミ合金のグラビティー金型鋳造品はダイキャスト品に比べ、高強度・高靭性の優れた機械的特性が得られ、金型鋳造の強みとされている。最近、現行のグラビティー金型鋳造品に対し、客先よりさらなる薄肉化の要求があり、必然的に一層の高強度化が必要となる。しかし、高強度化に伴い靭性低下を来たすことより、これら両特性を満足させるミクロ組織制御が必須課題となっている。

オ．軽量化

稼働部品の重量減、低炭素化、省資源、省エネルギー、搬送し易さなどの観点から、これまで以上に軽量化が求められている。したがって、薄肉・軽量化、小型化に対応できる鋳造技術の開発が差別化を図る重要課題となっている。

カ．低コスト化

アルミ合金の金型鋳造法は大別してダイキャスト（高圧）法、低圧鋳造法とグラビティー鋳造法（重力）の３種類である。多品種・少中量生産においては、金型及び鋳造マシンで圧倒的にグラビティー金型鋳造法がコスト的に有利である。低コスト化は顧客からの大きな要望であるが、一方では、自社体質の強化につながるものである。このためには鋳造欠陥を無くし、歩留まりを向上させることや作業の効率化が更に必要となる。また、多様な金型鋳物にも対応できる体質に変革する上でも、低コスト化の取り組みは必須である。

キ．短納期化

製造のグローバル化が進み、短納期化が益々要求されてきている。このためには、方案設計、試作等に係わる時間、金型段替え時間やリードタイムの短縮、高効率化が最重要である。

１－１－２　研究目的及び目標

注湯作業は、作業者によって鋳物の品質、欠陥の有無などに差が生じ、コスト増につながっている。低コスト化の要求に応えるため、熟練者の注湯動作を踏襲した自動注湯システムを考案し、さらに種々の鋳込み方案にも対応できる多機能鋳造システムを開発する。

また、注湯時の湯回り不良、空気等の介入をなくすことが必須であり、凝固組織の微細化を図るとともに、減圧吸引により狭空間に強制的に溶湯が回る鋳造システムを開発する。

さらに、鋳造品の重量減、搬送し易さなどの観点から、これまで以上に薄肉・軽量化が求められており、それらに対応できる鋳造技術の開発が重要課題となっている。薄肉化を図るた

めには高強度化が必要となるが、それに伴い靭性低下を来たす。そこで、凝固組織の粗大化を抑制するため、溶湯に結晶粒微細化処理を行う最適な微細化剤の添加とともに、注湯時に最適温度下の溶湯に超音波振動等を与える鋳造システムを開発する。

また、顧客からの短納期化の要望に応えるため、方案設計、試作、金型段替え時間やリードタイムの短縮を図るため、鋳造システムを複合化するとともに、離型性の向上や分割金型の設置を可能とするなど自由度の高いシステムを開発する。

１－１－３　研究の概要

多品種・少中量品のアルミ合金鋳物の製造に適するグラビティー金型鋳造法は、ダイキャスト法に比べ優れた機械的性質が得られるが、客先からはこれまで以上に高品質、低コスト化と更なる薄肉・軽量化が要望されている。これらを充たすために、注湯時の金型内部を減圧状態にするとともに、微細化剤の添加と超音波振動によるデンドライトの微細化、注湯の制御等により、高強度・高靭性の薄肉鋳造品が得られる複合金型鋳造システムを開発する。

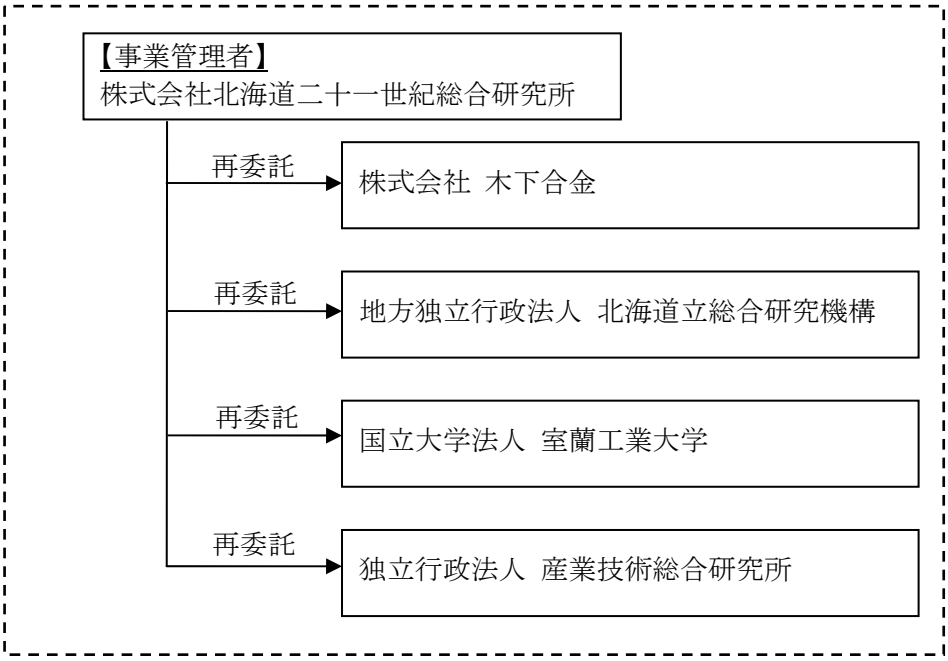
具体的には、下記の研究開発テーマ①～④を実施した。

①　注湯条件の研究
　①－１　自動注湯装置の研究開発
②　薄肉化を実現するための研究
　②－１　湯流れ性向上の研究開発
③　高強度・高靭性の向上に資する鋳造技術の開発
　③－１　微細化剤の研究開発
　③－２　超音波振動の研究開発
④　複合金型鋳造システムの設計と製作

また、本研究開発の円滑な推進を図るため、⑤事業管理者を中心にプロジェクトの進捗状況を定期的にチェック・フォローする体制で推進した。

１－２　研究体制

１－２－１　研究組織



総括研究代表者（ＰＬ）
所属：株式会社 木下合金
役職：代表取締役
氏名：木下　修

副総括研究代表者（ＳＬ）
所属：地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術研究本部工業試験場 製品技術部
役職：生産システム･製造技術グループ 主査
氏名：戸羽 篤也

１－２－２　研究開発分担

	㈱木下合金	北海道立総合研究機構	室蘭工業大学	産業技術総合研究所
①－１　自動注湯装置の研究開発	○	○		◎
②－１　湯流れ性向上の研究開発	○	◎	○	○
③－１　微細化剤の研究開発	○	○	◎	
③－２　超音波振動の研究開発	○	○	◎	
④複合金型鋳造システムの設計と製作	◎	○		

◎：主担当　○：副担当

１－２－３　管理員及び研究員

【事業管理者】

株式会社 北海道二十一世紀総合研究所

氏　名	所属・役職	備考
原田　　実	取締役事業総括担当部長	
有我　　功	調査研究部　主席研究員	
富田　　学	調査研究部　主任研究員	

【再委託先】

株式会社 木下合金

氏　名	所属・役職	備考
木下　　修	代表取締役	総括研究代表者
小熊　克則	工場長	
鈴木　智博	製造部長	
佐々木　国敏	製造課長	
松下 文芳	研究補助員	

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構

氏　名	所属・役職	備考
戸羽　篤也	産業技術研究本部工業試験場 製品技術部生産システム･製造技術グループ　主査	副総括研究代表者

国立大学法人 室蘭工業大学

氏　名	所属・役職	備考
桃野　　正	もの創造系領域 材料工学ユニット　教授	
田湯　善章	もの創造系領域 材料工学ユニット　助教	

独立行政法人 産業技術総合研究所

氏　名	所属・役職	備考
岡根　利光	先進製造プロセス研究部門 基盤的加工研究グループ　グループ長	

１－２－４　研究支援体制

■多機能グラビティー複合金型鋳造システム研究開発委員会参加者名簿

委員長	学識経験者	加賀　　壽
委　員	（国）室蘭工業大学 地域共同研究開発センター長　特任教授	鴨田　秀一
〃	（地独）東京都立産業技術研究センター 開発本部 開発第１部 機械技術グループ 上席研究員	佐藤　健二
〃	（独）産業技術総合研究所 産学官連推進部 産学・地域連携室 産業技術指導員	澤井　信重
研究員	株式会社木下合金　代表取締役（研究総括代表者）	木下　　修
〃	〃　工場長	小熊　克則
〃	〃　製造部長	鈴木　智博
〃	〃　製造課長	佐々木国敏
〃	〃　研究補助員	松下　文芳
〃	（地独）北海道立総合研究機構 産業技術研究本部 工業試験場 製品技術部 生産システム･製造技術グループ 主査（副総括研究代表者）	戸羽　篤也
〃	（国）室蘭工業大学 もの創造系領域 材料工学ユニット 教授	桃野　　正
〃	〃　もの創造系領域 材料工学ユニット 助教	田湯　善章
〃	（独）産業技術総合研究所　先進製造プロセス研究部門 基盤的加工研究グループ　グループ長	岡根　利光
事務局	株式会社北海道二十一世紀総合研究所 取締役事業総括担当部長	原田　　実
〃	〃　調査研究部 主席研究員	有我　　功
〃	〃　〃　主任研究員	富田　　学

１－３　成果概要

１－３－１　注湯条件の研究

本研究開発で得た自動注湯パラメータをベースに、以下の項目の傾斜式自動注湯装置の設計仕様を決定した。

① 製品注湯姿勢
② 傾斜角度
③ 操作方法
④ 傾斜角度検知
⑤ 傾斜速度制御
⑥ 傾斜用アクチュエータ
⑦ エンコーダ分解能

１－３－２　薄肉化を実現するための研究

① 金型内を減圧することで溶湯の湯流れ性に影響があることを確認した。
② 減圧による鋳型内への吸引力が働くことで、鋳造時の溶湯の流れを変化させ、そのときの溶湯攪拌効果により金属組織にも影響を及ぼすことが分かった。
③ 減圧鋳造において過度に減圧度を大きくすると返って溶湯流を乱して、得られる鋳物の形状に悪影響が生じる懸念があることが分かった。
④ そこで、適切な減圧力を確かめるため減圧力を変化させて鋳造実験を行ったところ、肉厚 2mm 付近では 75kPa（大気圧－25kPa）程度の減圧度で良好な湯流れ性及び充填性が得られるとの知見を得た。
⑤ この圧力を得ると同時に金型から空気などを排出する際の気流を静かに整えるのに効果があると考えられるベント･フィルターの使用を検討し、実験によりその効果を確認した。
⑥ ただし、実験において再現性の確保が難しく、本実験で得られたのは主に定性的な知見を得る結果となった。
⑦ 開発装置の実用化を図るためには、さらに実験条件を厳選して実験を重ね、定量的な知見を得ることも含めて有用なデータを獲得していかなければならない。

１－３－３　高強度・高靭性の向上に資する鋳造技術の開発

（１）微細化剤の研究開発

初晶 α デンドライト（Al-rich 相）の微細化と、共晶 Si の微細化について以下のことが判明した。

① 初晶 α 相の微細化は、合金元素 Cu, Si, Zn など平衡分配係数 ko<1 の合金元素を添加しても顕著な微細化は期待できない。しかし ko>1 である Ti や Zr は微細化作用が顕著であり、結晶微細化剤としての有効性が実証された。
② 共晶 Si 相の微細化には Sr が効果的であり、Na のようなフェーディングが少ないが、時間の経過と共に Sr の損耗が認められた。
③ 以上の結果から、微細化剤のみに依存する Al-Si 系合金では、Ti または Zr と、Sr の同時添加が結晶微細化に有効である。

（２）超音波振動の研究開発

超音波発生装置を用いて溶湯表面を加振することによって、以下の事項が確認できた。

① 初晶 α（Al-rich 相）に対する加振による微細化効果（ko<1 の場合）は、純 Al に対してはその効果は小さいが、僅かな溶質元素の添加により顕著となる。

② 初晶 α（Al-rich 相）に対する微細化効果（ko＞1 の場合）は、Ti, Zr では単独添加でも十分に結晶微細化作用があり、加振によってさらに微細化が促進される。

③ 用いる溶湯量と形状、材質に適した加振出力の選定が重要である。またホーンの浸漬深さも鋳塊性状に影響を与え、液相表面 5～10mm の浸漬量が適していることが判明した。

④ Al-8mass%Si-0.08mass%Sr 合金を超音波加振して凝固させると、共晶 Si は Sr による改良効果に加え、加振によりさらに微細な共晶 Si となることを実証した。

⑤ 得られた Al-8mass%Si-0.08mass%Sr 合金鋳塊の引張特性を調査した結果、著しい伸びの改善が認められ目標値を超えたが、引張強さは目標値を下回った。この対策としては速い凝固速度、脱ガス処理法の確立が肝要である。

１－３－４　複合金型鋳造システムの設計と製作

現行納期の 30%短縮を目標として、１－３－１～１－３－３の研究開発をもとに、それらの成果の集大成として、自動注湯システム、減圧強制吸引システム、凝固組織の微細化処理などを複合した前述の鋳造システムの設計仕様を決定し、それに基づき複合金型鋳造システムを製作した。

製作した複合金型鋳造システムにより鋳造試験を重ねた結果、従来品の厚み 5.5mm に対して、3mm の製品化のめどが立ってきたが、目標である 2mm までは至っていない。

１－４　当該研究開発の連絡窓口

①事業管理者

所属	株式会社二十一世紀総合研究所
役職／氏名	取締役事業総括担当部長／原田　実
電話	011-231-3053
FAX	011-231-3143
E-mail	harada@htri.co.jp

②総括研究代表者

所属	株式会社木下合金
役職／氏名	代表取締役／木下　修
電話	0134-34-2666
FAX	0134-25-3398
E-mail	kst@seagreen.ocn.ne.jp

③副総括研究代表者

所属	(地独)北海道立総合研究機構　産業技術研究本部 工業試験場
役職／氏名	製品技術部生産システム･製造技術グループ 主査／戸羽篤也
電話	011-747-2972
FAX	011-726-4057
E-mail	toba-atsuya@hro.or.jp

第２章　注湯条件の研究

２－１　自動注湯装置の研究開発

２－１－１　研究目的及び目標

本研究開発は、現行コストの 30～50%削減を目標とし、人手での注湯作業による品質のバラツキ、不良品の解消を図るため、注湯における流量、時間などを変え、得られた鋳造品の性状を調べることで最適な注湯条件を見出し、その結果をもとに最適条件で注湯ができる自動注湯装置を開発する。

具体的には、(独)産業技術総合研究所が有する開発実績を参考に、株式会社木下合金の現行注湯作業における注湯速度変化を計測記録し、これを自動化して再現する自動注湯装置を試作・開発する。この際、アルミニウム合金の金型鋳造に対応させるために、計測及び自動注湯制御の精度を向上させ、取鍋容量 50kg 以下で鋳込み重量 2～20kg の注湯作業に対応する制御技術を開発する。

また、(地独)北海道立総合研究機構が実施する金型内の減圧、(国)室蘭工業大学が実施する溶湯加振の機能を付加するための機構を設計し、これらの効果に関する検証実験を行う。

２－１－２　実施内容

（１）「ヒューマンスキルアシスト型自動注湯装置」概要

(独)産業技術総合研究所等において開発された自動注湯装置「ヒューマンスキルアシスト型自動注湯装置」について、これまで、熟練者の注湯作業を記録し、それを再現して安定した注湯を可能にするヒューマンスキルアシスト型注湯制御技術及び自動注湯装置の研究開発を行い、熟練者の手作業に負っていた注湯作業の最適化、作業の安定化、鉛フリー銅合金鋳物への対応を進めてきた。

ソフトウエア、ハードウエアを統合して運用することにより、目標の仕様を満たす自動注湯装置として実現させている（図２－１）。

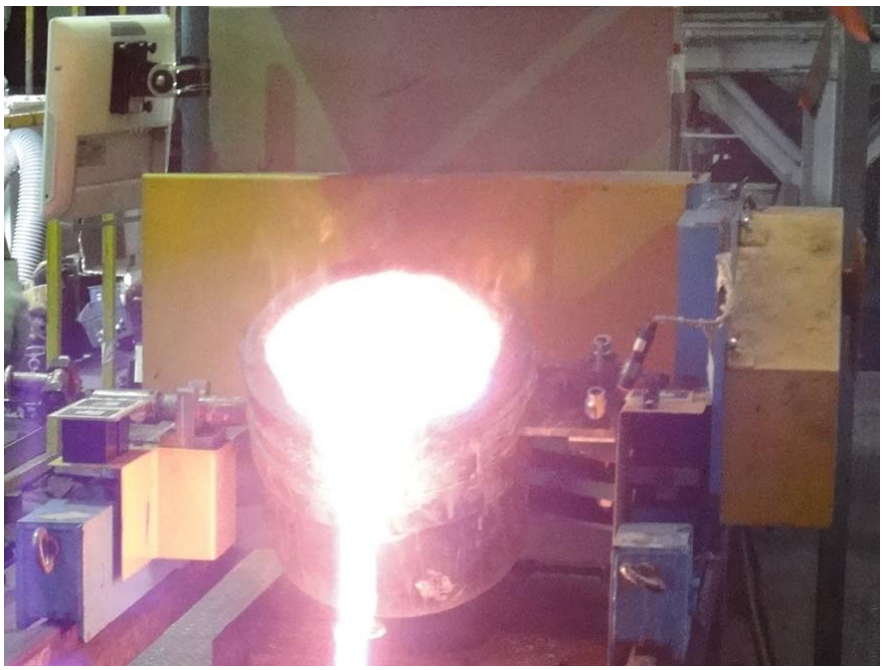


図 2–1　開発した自動注湯装置

（２）「ヒューマンスキルアシスト型自動注湯装置」のアルミニウム合金への適用

本事業において対象とするアルミニウム合金の金型鋳造に対応させるために、計測及び自動注湯制御の精度を向上させ、取鍋容量 50kg 以下で鋳込み重量 2～20kg の注湯作業に対応する制御技術を検討した。

対象とする製品と同等形状に対して熟練者の注湯パターンの計測を試み、本装置のソフトウエアの機能を用いて、自動注湯パラメータを自動生成させた。

２－１－３　研究成果

本研究開発で得た自動注湯パラメータをベースに、以下の項目の傾斜式自動注湯装置の設計仕様を決定した。

① 製品注湯姿勢
② 傾斜角度
③ 操作方法
④ 傾斜角度検知
⑤ 傾斜速度制御
⑥ 傾斜用アクチュエータ
⑦ エンコーダ分解能

第３章　薄肉化を実現するための研究

３－１　湯流れ性向上の研究開発

３－１－１　研究目的

本研究開発は、アルミ鋳物の金型自動重力鋳造装置の開発において、冷却速度が速い薄肉部に溶湯を供給する方法として、金型内キャビティを減圧することによる溶湯の湯流れ性改善とその効果を検証することを目的とする。さらに、減圧鋳造による鋳造時の溶湯流速度及び冷却速度の高速化による溶湯攪拌効果が及ぼす金属組織の微細化への影響を調べた。

３－１－２　実験方法

実験は、アルミ溶湯（AC4CH）を溶解し、種々の条件下でこれを金型に鋳込んだときの湯流れ性を評価した。溶湯の湯流れ性改善を目標にした減圧鋳造実験を行うため、金型減圧装置と試験用金型を製作した。以下、実験に供した製作した減圧装置と試験用金型の詳細を説明した後、鋳造実験の手順を説明する。

（１）金型減圧装置

金型減圧装置は、溶湯を金型に鋳込む際に金型内キャビティの圧力を下げる減圧鋳造を行うために用いる。実験に用いる金型減圧装置は、図３－１に示すシステム構成とした。

今回の湯流れ性実験は、細くかつ薄い鋳型内流路に溶湯を鋳造する試験となるので、金型内キャビティは極めて小容量となる。この際、金型内キャビティと減圧ポンプとを直接接続すると圧力の変動が大きく、実験条件を再現しにくくなる恐れがあったので、実験に用いる減圧装置は減圧ポンプと試験用金型の間に圧力容器を設けることとした。

また、重力鋳造においては一般に金型を 300℃以上に余熱して用いられるので、本実験においても金型温度を予め高温に昇温して鋳造する試験が想定される。金型で暖められた大気を減圧ポンプ系に流し込むとその熱影響による不具合が懸念されたので、金型から減圧装置（減圧タンク）に大気を引き込む入り口に水冷器を配置することとした。また、アルミ合金溶湯が金型内で凝固せず減圧流路系に流入して凝固することも危惧されたので、金型にベントホールを設けてフィルターを介して金型内キャビティを減圧し型内空気を吸引する構造とした。なお、後述で詳細を説明するが、ベント･フィルターの製作はフィルターの通気特性を変化させられるよう、金属粉末積層成形法によって製作して用いることとした。

減圧弁の開閉は、将来の自動化に配慮して電磁式弁を用いた。ただし、本実験においては特別なセンサを設けずに、開閉操作するためのフットスイッチを設け、目視でタイミングを量ってこのスイッチにより減圧の開閉を行った。

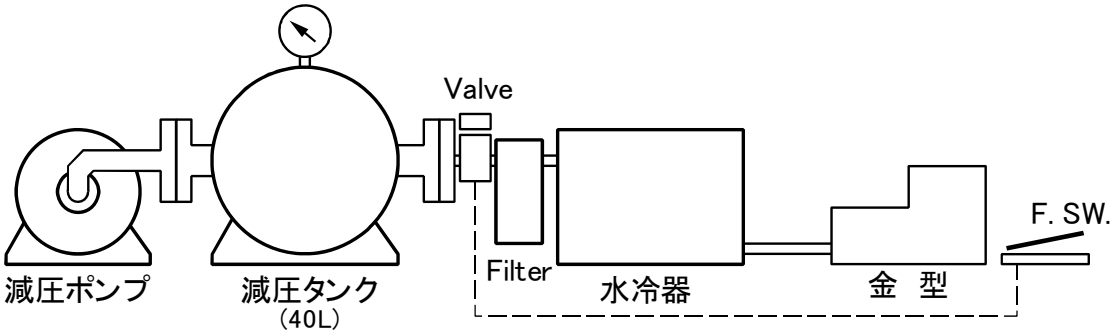


図 3-1 金型重力鋳造の減圧鋳造試験装置の構成（模式図）

（２）湯流れ試験用金型

湯流れ性の評価は、金型内に設けた小断面流路に注湯したときにどの程度の長さまで溶湯が供給されるかを計測して比較する方法で行った。

重力鋳造における一般的なアルミ合金薄肉鋳物の肉厚は 4mm 程度とされるが、本研究の課題設定において製作する薄肉鋳物の肉厚を 2mm としたことから、試験用金型の寸法は 2～3mm の鋳物肉厚を意識して製作した。実験の利便性を考慮して金型は小断面流路を持つ板金型と主金型本体とを別々の構成とし、板金型を交換することで実験条件を変化させた。

図３－２に主金型の大まかな形状と寸法を示す。主金型は 3 つの金型で構成する。その内訳は、湯口となる金型 1 個（図の左側）と、主型 2 個（図の右側）である。小断面流路をもつ板金型は、図３－３に示すように幅 100mm×長さ 300mm×板厚 t = 4.5mm の鋼板に３本の小断面流路を加工したものである。小断面流路の寸法は鋳物の肉厚を考慮し、表３－１に示す深さ 1.8mm、2.4mm、3.2mm の 3 水準とし、小断面流路の断面積がほぼ等しくなるように流路の幅を設定し、流路となる溝をフライス加工によって製作した。

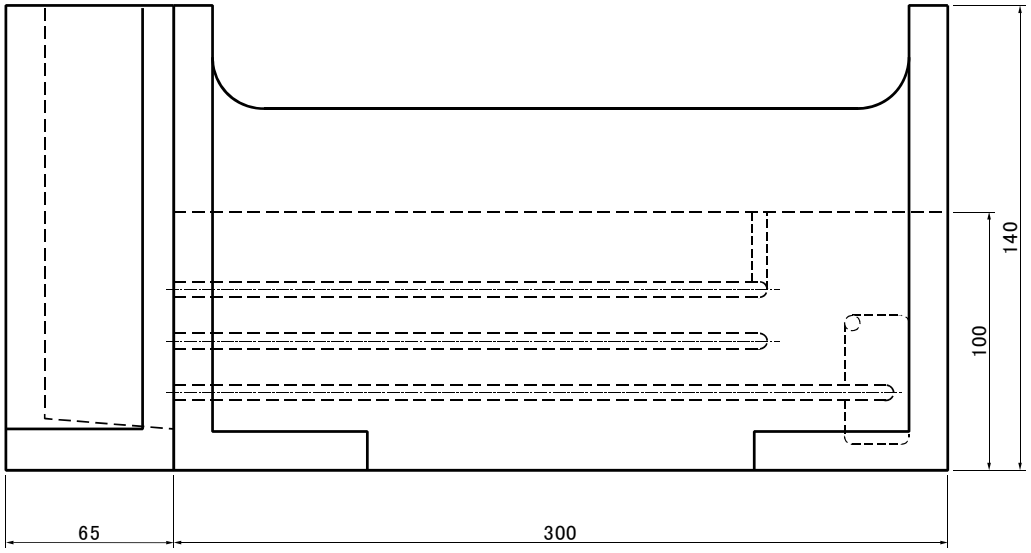


図 3-2 鋳造実験用金型の外観と寸法

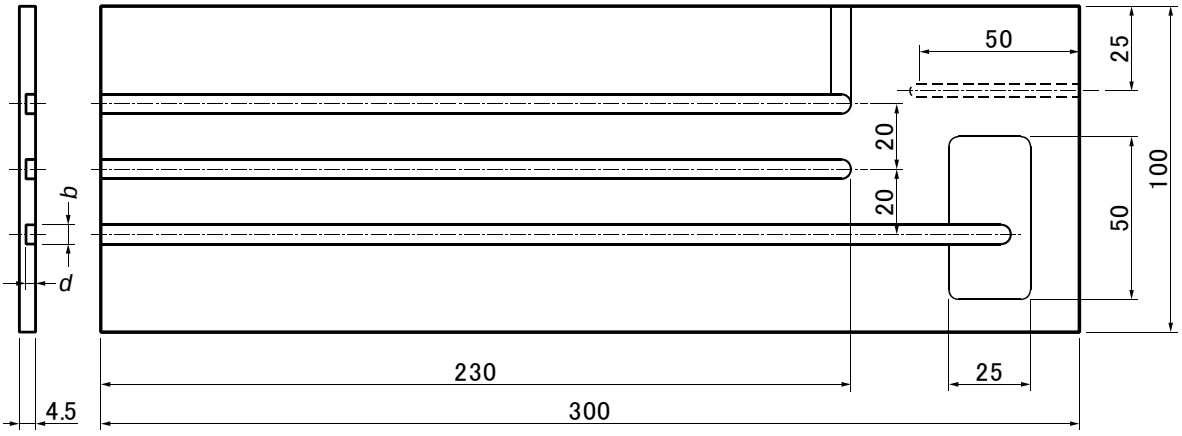


図 3-3 鋳造実験用板金型（小断面流路金型）

表 3-1 鋳造実験用板金型の小断面流路寸法

呼び記号	深さ　*d*,　mm	幅　*b*,　mm	断面積　*s*,　mm^2
D20	1.8	10.6	19.08
D25	2.4	8.4	20.16
D30	3.2	6.3	20.16

3 本の流路は下から順に①減圧流路、②閉込流路、③開放流路とした。減圧流路は図３－３右側に示す深さ 0.5mm の減圧孔接続部につながっており、主金型に設けたベントホール、減圧系配管を介して減圧鋳造が可能となるように設計した。閉込流路は主金型に設置された際に先端が密閉された状況となり、鋳造の際に元のキャビティ内の空気が閉じ込められて背圧を受けながらの鋳込みとなる。さらに、開放流路は流路先端に外へとつながる 0.5mm 深さの溝が切ってあり、鋳造の際に元のキャビティ内の空気が排出されるように設計されている。

この板金型を用いることにより、金型と溶湯の温度が同じ条件で減圧、密閉、開放の 3 条件の鋳込みを同時に行うことが出来る。

また、この板金型の裏面には金型温度計測用の溝が切ってあり、ここに熱電対を設置しておくことで鋳造時の金型温度を確認することができる。

図 3-4 減圧ポンプ

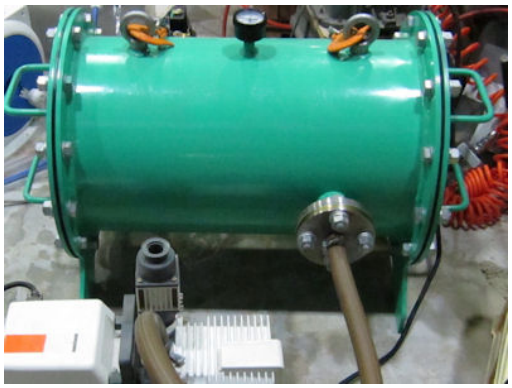


図 3-5 減圧タンク

図 3-6 減圧容器内圧力計

（３）実験用装置･金型の製作

１）金型減圧装置の製作

（１）項で説明した設計仕様に従って減圧装置を試作した。

減圧ポンプは、図３－４に示すアルカテル社製の減圧ポンプ（450W）を使用した。この減圧ポンプの能力を補うとともに、圧力変動を平滑化させるために、40 リットル容量（内径φ300mm×長さ 600mm）の減圧容器を用意した。図３－５に減圧容器の外観を示す。容器内の圧力は上部に取り付けた圧力ゲージで確認することが可能である（図３－６参照）。ただし、減圧弁を開放した際の金型内圧力は計測していない。

減圧ポンプと減圧容器とは、減圧容器の両側面に用意したフランジ継ぎ手の一方を用いて専用のゴム製ホースで接続した。他方のフランジ継ぎ手には、減圧の開閉を行う電磁弁とエアー･フィルターを取り付けた。エアー･フィルターは金型等からの粉塵などを取り除き、減圧容器や減圧ポンプへダメージを与えるのを防ぐために配置した。図３－７に、圧力容器に取り付けた電磁弁とエアー･フィルターの外観を示す。

図３－８に示す配管冷却器は、金型を高温に予熱した実験において減圧制御系に高温の空気が直接届かないよう、配管内の空気を冷却するために配置した。使用する

際にはこの容器内部に水道水を循環させ、その中に内径φ3mm 程度の銅製管を配管して、金型からの空気をこの管に通過させる際に冷却する設計である。

図３－９は、金型減圧装置の全景である。この写真で水冷容器の手前に見えるのが足踏式スイッチであり、注湯時にこのスイッチを足で踏むことにより圧力容器に取り付けた電磁弁が開放し、減圧ポンプ及び減圧容器の負圧により金型内の空気を吸い出す仕組みとなる。また、写真に写っているホースは冷却容器に水道水を供給するためのビニールホースである。水道水は、このホースを介して上水道から供給され、オーバーフローした水は別のホースで室外に放出される。

冷却容器と実験用金型とは、金属製のフレキシブルホースで連結する。

図 3-7 電磁バルブ＋エアーフィルター

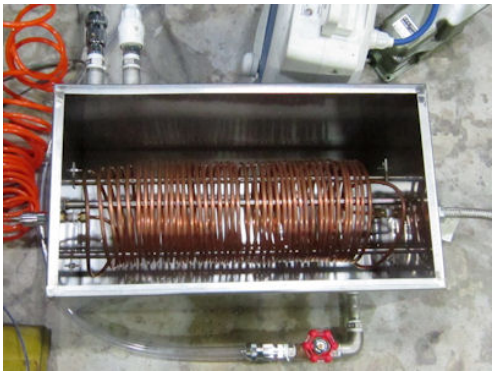


図 3-8 配管冷却器

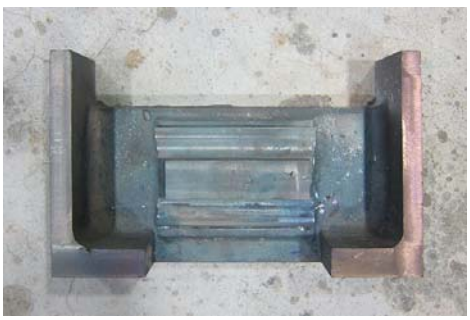
図 3-9 試験装置外観

２）金型減圧装置の製作

（２）項で示した設計仕様にもとづいて湯流れ試験用金型を製作した。

試験用金型の主型は、伝熱性が良好な鋳鉄製金型を用いることとし、模型･鋳型を製作して鋳造した後、機械加工して製作した。図３－１０に金型製作に用いた鋳型製作用模型及び製作した主金型と湯口金型の外観を示す。

a）鋳型製作に用いた木型



b）鋳造･機械加工した主金型

c）製作した湯口金型

図 3-10 実験用金型の外観

一方、板金型は板厚 t = 4.5mm の SPCC 鋼板を 100mm×300mm の寸法で裁断した後、フライス盤で所定寸法の溝を加工して用いた。製作した板金型の外観を図３－１１に示す。流路面には図３－１２に示すように 20mm 間隔で 3 本の流路を切ってあり、右側から減圧流路、閉込流路、開放流路として機能する。

a）流路面

b）測温面

図 3-11 鋳造実験用板金型の外観(D30)

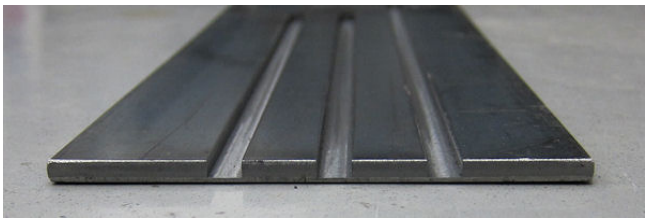


図 3-12 鋳造実験用板金型の湯流れ性評価のための小断面流路の外観(D30)

（４）鋳造試験

製作した減圧装置と金型を用いて、鋳造試験を行った。鋳造試験の手順を以下に示す。

１）塗型

製作した金型の表面に塗型を施した。塗型は、予め金型を 200℃程度に加熱し、塗型材を水で所定の濃度に希釈した塗型液をエアースプレーで金型表面に塗布する。（図３－１３参照）

図 3-13 金型表面の塗型作業

２）溶解

鋳造試験に用いるアルミ合金材料は Al-Si 系鋳造用合金（AC4CH）とし、溶解用の炉体内に黒鉛坩堝（#20）を配置し、これにインゴットを 5～7kg 投入して LPG バーナーで過熱して溶解した。（図３－１４参照）

ガスバーナーは坩堝の底部から炉内に燃焼ガスを吹き込む方式の炉を用いるが、この方式では上部からの熱放出により昇温しにくいので、加熱の当初段階では炉の上部からもガスバーナーで加熱して溶解時間を短縮した。

坩堝内のアルミ材料が溶融したら、図３－１５に示すように溶解坩堝の上から汲み出し用の黒鉛坩堝を蓋をするように静置し、汲み出し用坩堝を予熱するとともに溶融材料の酸化を防止した。また、溶解坩堝内に石英管で保護した熱電対（R 型）を挿入し、データ･ロガーで溶解後の溶湯温度を所定温度に保つようにガスバーナーの火力を調整した。

図 3-14 アルミ合金材料の溶解

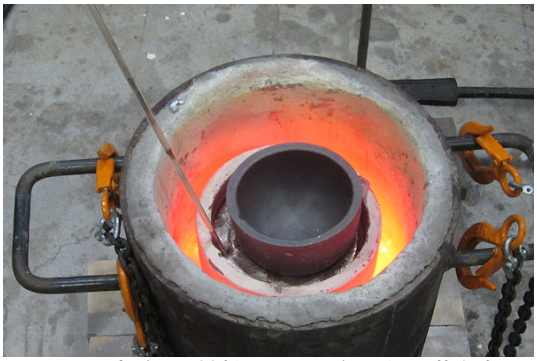


図 3-15 溶融した材料の上に黒鉛坩堝で蓋をする

３）金型の組み立て･予熱

金型は、図３－１６に示すように主金型、湯口金型、板金型を配置し、シャコ万力で固定して組み立てた。その後、金型を所定の温度まで加熱した。当初の計画では、電熱線と温度調整器を用いて金型の予熱をすることにしていたが、予備試験段階で金型の熱容量が予想以上に大きく加熱に時間を要したため、ガスバーナーによる加熱方式に変更した。

金型の温度は、板金型に設置した熱電対（K 型）で計測し、データ･ロガーで所定の金型温度に保つようにガスバーナーの火力を調整した。（図３－１７参照）

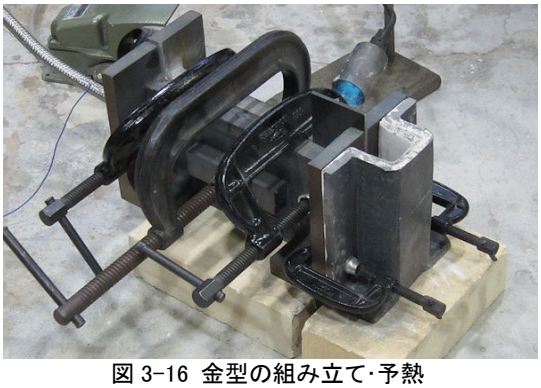


図 3-16 金型の組み立て･予熱

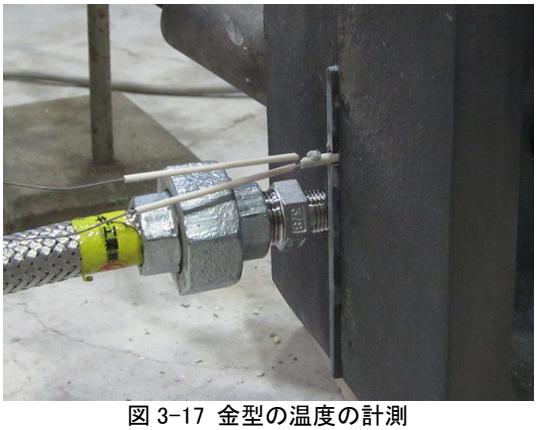


図 3-17 金型の温度の計測

４）鋳造･型ばらし

鋳造は、溶湯で予熱した汲み出し坩堝にアルミ合金溶湯を採取し、素早く金型に鋳込んだ。（図３－１８参照）

金型内を減圧する実験では、注湯して最下層の流路断面が塞がれたタイミングを見計らって足踏式スイッチを踏み込み、電磁弁を開放して金型の減圧操作を行った。

鋳造後、約 1 分間経過したところで金型を固定したシャコ万力を取り外し、火箸で金型を移動して板金型への湯流れの状態を確認する。（図３－１９参照）

本実験における溶湯温度及び金型温度の設定値は、溶湯温度を 700℃、金型温度を 200℃とした。現行の生産における鋳造作業では、溶湯温度を 760℃、金型温度を 350℃に設定しているので、鋳造実験ではいずれもこれらより低い温度設定である。

これは、実験作業の安全性確保の視点とともに、鋳造条件の限界値を見極める意味でもより厳しい温度条件設定下での鋳造可能性を確認する必要があると考えたからである。

当初、この温度設定で鋳造ができないようであれば、それぞれの温度設定を上げて実験する計画もあったが、結果として後述のとおり鋳造実験結果の評価が可能であったので、これらの条件のみで実験を行った。

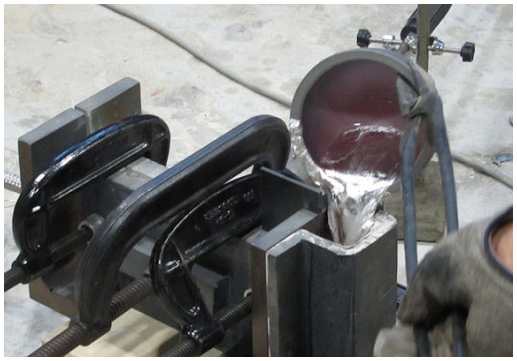


図 3-18 金型への鋳造

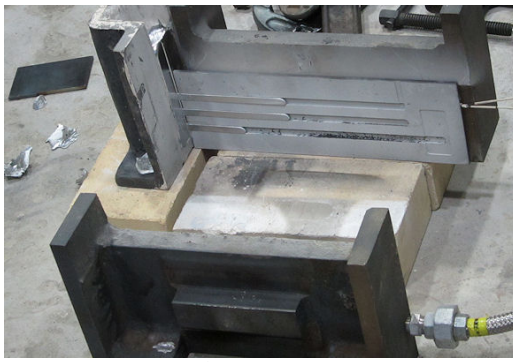


図 3-19 型ばらし･鋳造結果の評価

また、当初用意した減圧配管系の配管冷却器は、銅管の内径が細く、経路が長くなると、圧力損失が大きく、鋳型内の空気を効率的に吸引できないことが分かり、結果としてこれを省いて実験した。

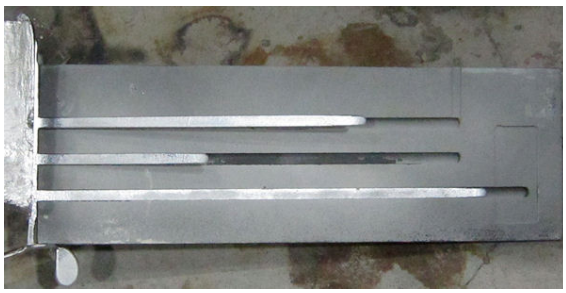
３－１－３　実験結果

（１）減圧効果

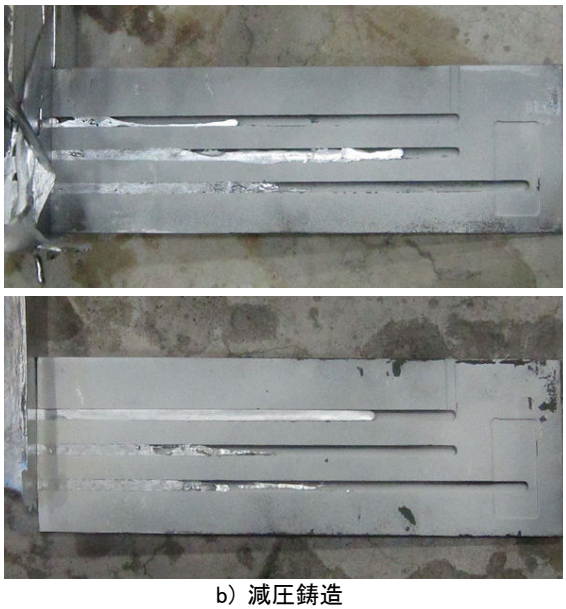
板金型を用いて金型重力鋳造における金型内減圧の効果を確かめるため、肉厚 t = 3.2mm の D30 試験片と肉厚 t = 2.4mm の D25 試験片を、減圧しない通常鋳造法と減圧鋳造法で鋳込み試験を行った。なお、減圧鋳造時の圧力は、減圧容器内の圧力を減圧ポンプの能力の最大限となる 2kPa 程度まで下げた。

D30 試験片の実験結果例を図３－２０に示す。図３－２０ a）は、減圧をせずに鋳込んだときの鋳造結果である。減圧をしなくても最下段の流路が最も遠くまで給湯されており、次に最上段の開放流路、閉込流路の順に給湯距離が長くなった。

開放流路の方が閉込流路より給湯距離が長くなったのは注湯の際に金型キャビティ内の空気の排出の可否による背圧の影響を受けたことが考えられる。最下段の流路で最も長い給湯距離が得られたのは、減圧をしなくても減圧系の配管に接続されていることによって背圧の影響を受けにくかったことに加えて、湯の供給口が最も下にあったことで圧力ヘッドが最も大きく



a）通常鋳込み



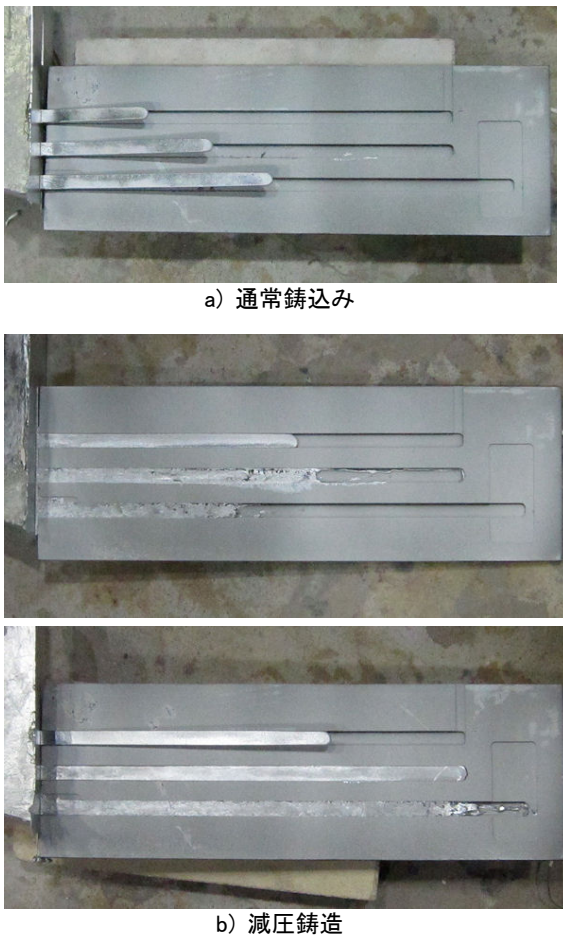
b）減圧鋳造

図 3-20 金型鋳造実験の結果例（D30）

なったことなどが考えられる。

これに対して、図３－２０ b）はいずれも注湯時に減圧を作用させた場合の鋳造結果を示す。減圧によって流路先端部分の溶湯に引張力が作用するので、最下段の減圧流路の給湯距離が最も長くなることを期待したが、いずれの結果も期待したような効果が得られず、むしろ減圧吸引により、溶湯先端が大きく乱れた形状で凝固することが分かった。この原因としては、溶湯の流速が早くなると大きな粘性抵抗を受けることになることや、鋳型の流入口付近での熱伝達量が大きくなることなどが考えられる。

肉厚の異なる D25 試験片の鋳造結果を図３－２１に示す。減圧なしの通常鋳造では、D30 試験片のときと同様に最下段の流路で最も長い給湯距離が得られた。開放流路と閉込流路の比較では D30 試験片とは逆に閉込流路の方が開放流路より給湯距離が長くなった。これは、金型キャビティ内空気の排出による背厚の影響よりも薄肉による冷却能の効果の方が大きく影響したのではないかと思われる。



a）通常鋳込み

b）減圧鋳造

図 3-21 金型鋳造実験の結果例(D25)

これに対して、減圧を行った場合は図３－２１ b）に示すように、いずれも減圧流路の給湯距離が最長となる結果は得られなかった。実験条件のばらつきからか給湯距離に大きなばらつきがあったが、D30 試験片の試料と同様に他の閉込流路や開放流路より減圧流路の給湯距離が短い結果となるものがしばしばであった。また、減圧流路の溶湯先端は減圧で強く引っ張られたためと思われる乱れた凝固形状となった。

これらの実験結果において、減圧吸引による湯流れ性の改善に期待した効果が得られなかったのは、減圧時の大気圧との圧力差が過大であったためと考える。たとえば、図３－２１ b）の下の写真で示す結果において、減圧流路の溶湯先端部分が乱れた形で凝固しているのに対して、その上段の閉込流路では溶湯が比較的綺麗に満たされている。これは、金型を組み立てるときに板金型を 2 枚の主金型で挟み込んで、シャコ万力で締め付けて固定するが、この際に板金型の流路面と主金型の面とは塗型材を介して接しているので、必ずしも密着せずに減圧による圧力はわずかながら閉込流路にも影響を及ぼしていると考えられる。閉込流路での流入状態が最良となったことの原因としてこの減圧効果の波及があるとするならば、減圧時の圧力は強すぎると返って悪影響として作用し、減圧の効果を得るには適切な減圧力の大きさがあると推定される。

（２）金属組織への影響

金型の減圧により溶湯流に吸引力が加わると溶湯の流速が変化し、その際の攪拌効果により金属組織の結晶粒の大きさにも影響を及ぼすと考えられる。そこで、図３－２０及び図３－２１の試験で製作した試料の各流路について、湯口付近と溶湯先端部の金属組織を観察した。

図３－２０で示した D30 試験片の各流路の湯口付近及び溶湯先端部の組織写真を図３－２２に

示す。いずれも湯口付近と溶湯先端部で結晶粒径に大きな差は見られないが、減圧鋳造の方が通常重力鋳造の場合よりも幾分だけ結晶粒径が小さくなっている傾向が認められる。特に、最下段の減圧流路で通常と減圧の差がはっきりしており、減圧することによる溶湯の攪拌効果が認められる。

同様に、図３－２１で示した D25 試験片の各流路の湯口付近及び溶湯先端部の組織写真を図３－２３に示す。D30 試験片と同様な傾向が見られるが、肉薄で冷却速度が大きくなった分だけ結晶粒径もわずかに小さくなっている。さらに、通常重力鋳造では、いずれの流路でも溶湯先端部に比べて湯口付近の結晶粒径が小さくなっているが、これは鋳造時の溶湯の流れによる攪拌効果が影響していると考えられる。これに対して減圧鋳造では、湯口付近と溶湯先端部で結晶粒径に大きな差は見られないことから、減圧鋳造の方が溶湯全体に一様の攪拌効果を及ぼし均一な組織が得られやすいことが分かった。

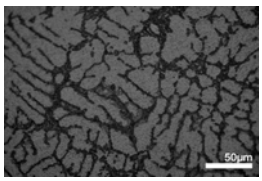
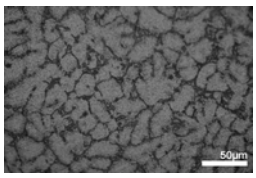
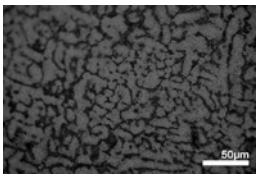
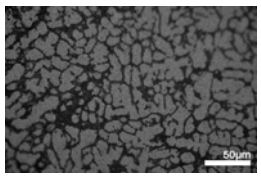
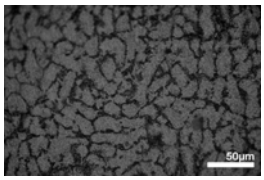
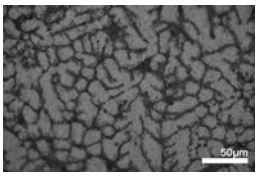
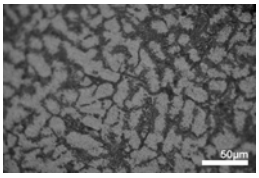
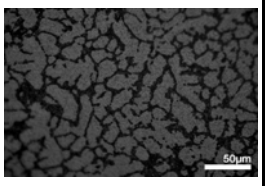
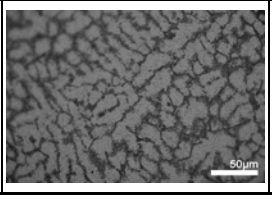
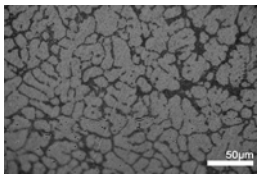
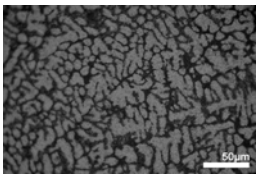
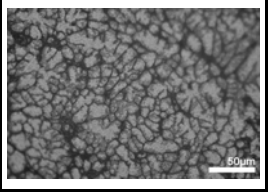
	通常鋳造（減圧なし）		減圧鋳造	
	湯口付近	先端部	湯口付近	先端部
開放流路				
閉込流路				
減圧流路				

図 3-22 減圧鋳造による金属組織への影響（D30 試料）

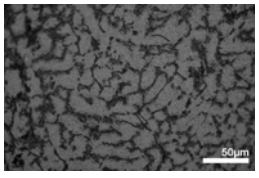
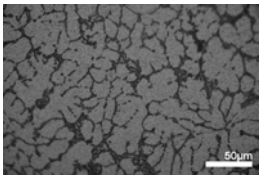
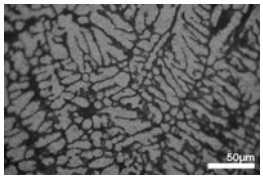
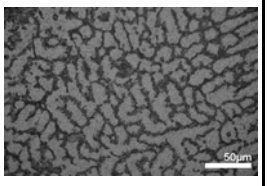
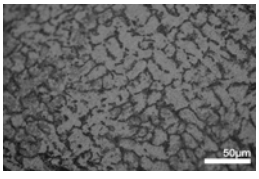
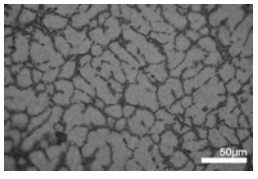
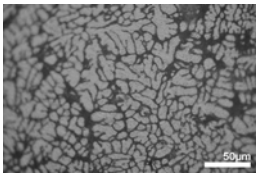
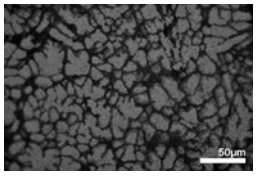
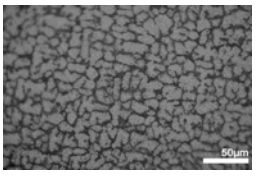
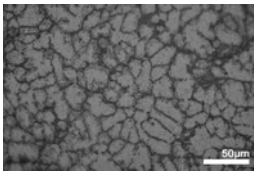
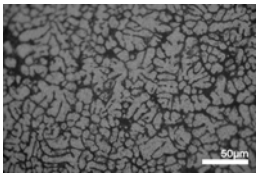
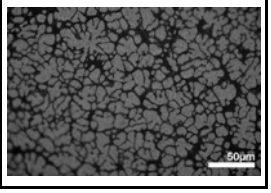
	通常鋳造（減圧なし）		減圧鋳造	
	湯口付近	先端部	湯口付近	先端部
開放流路				
閉込流路				
減圧流路				

図 3-23 減圧鋳造による金属組織への影響（D25 試料）

（３）減圧力の影響

高い真空度の減圧鋳造では、鋳込み時の圧力差が過大となり、返って湯流れに悪影響を及ぼすとの知見を得たことから、湯流れの改善に効果のある適切な減圧力を得るために、減圧容器内の圧力を調整して減圧鋳造試験を行った。

板金型には、薄肉の D25 試験片（溝深さ d = 2.4mm）と D20（溝深さ d = 1.8mm）の 2 種類を使用し、減圧をせずに鋳込んだ通常の重力鋳造試験試料と、減圧容器内を大気圧（100kPa）に対して 75kPa とした低減圧鋳造試験試料及び 50kPa の中減圧鋳造試験試料を比較検討した。

実験の結果を図３－２４に示す。減圧せずに鋳込んだ通常重力鋳造では、減圧流路、開放流路、閉込流路の順に長い給湯距離が得られる結果となった。これは、前々の図３－２０の通常重力鋳造で得られた結果と同じであり、同項で考察した原因によるものと考えることができる。D25 試験片と D20 試験片の間で給湯距離が異なるのは、肉厚による冷却条件の違いによるものと考える。

一方、減圧鋳造では、減圧力の違いによりそれぞれの流路での給湯距離の変化が認められる。実験の結果において最も良好な湯流れ性を示したのは D25 試験片において P = 75kPa で鋳込んだ試料であった。肉厚が 1.8mm の D20 試験片の減圧流路では、急冷されるせいかいずれも不完全な溶湯充填状態となったが、適切な減圧力は、D25 試験片より少し大きめの圧力差を与えたときに良好な減圧の効果が得られると推定されるような結果が得られた。

この実験結果から、減圧による良好な溶湯流動性改善効果を得るには、あまり大きな減圧度を必要とせず、低めの圧力差で静かに吸引するような状態の減圧方法が有効であるという知見が得られた。

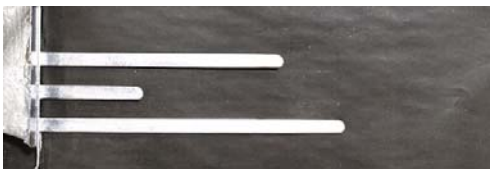
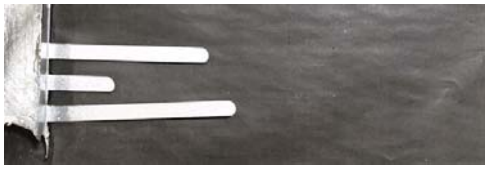
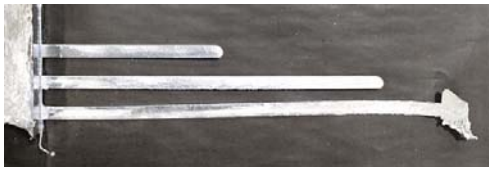
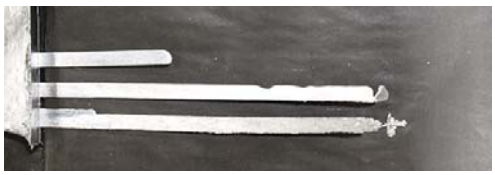
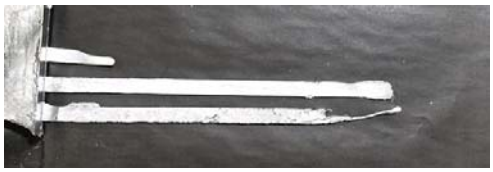
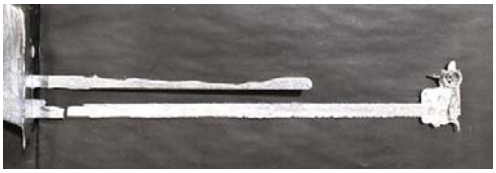
	D25（ d = 2.4mm ）	D20（ d = 1.8mm ）
Normal （減圧なし）		
Vacumed Low （ P = 75kPa ）		
Vacumed High （ P = 50kPa ）		

図 3-24 減圧度を変化させたときの鋳造試験試料

（４）ベント･フィルターによる減圧力調整の効果

前項で得られた実験結果から、減圧容器の圧力に対して幾分の圧力損失を生じさせると同時に、減圧して金型キャビティ内の空気を吸引する際の気流を静かに整えるような機能をベント･フィルターに持たせるのが有効であると推定した。

そこで、この機能を有するベント･フィルターを製作し、その使用効果を検証する試験を行った。ベント･フィルターは金型内に設置することが想定されるので、金属製のフィルターが必要になる。

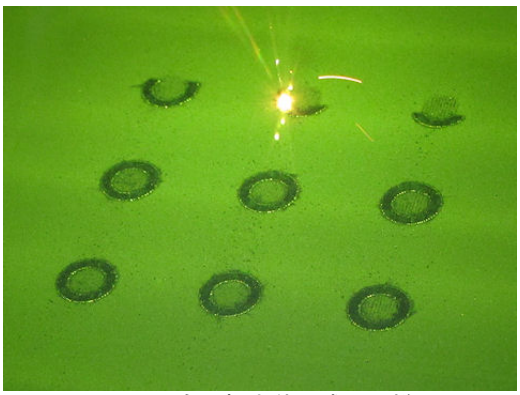


図 3-25　金属粉末積層成形の様子

図 3-26　製作したベントフィルター外観

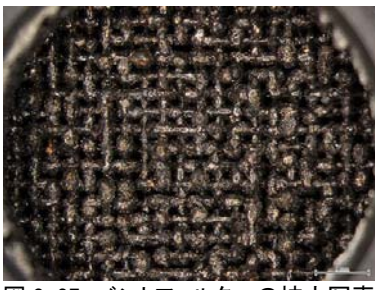


図 3-27　ベントフィルターの拡大写真

図 3-28　フィルター部断面の組織

図 3-29　金型に設置したフィルター

また、通気特性を変化させるため、フィルター部の開口率や厚さなどを任意寸法で製作する必要がある。そこで、ベント･フィルターの試作には多孔質の金属部材を製作することのできる金属粉末積層成形法によって製作した。

金属粉末積層成形法とは、微細流径の金属粉末を用いてこれを水平に敷き詰め、その面にレーザー光を照射して溶融積層して成形物を得る技法をいう。成形の際のレーザー光照射条件を適切に設定すると、完全溶融による成形体とは異なった多孔質の金属成形体を得ることができる。ベントフィルターの試作において、通気性と圧力損失を変化させるため、レーザー光の集光径を 0.06mm に絞り込んだ上で走査間隔を 0.5mm、0.6mm、0.7mm と変化させるとともに、フィルター部の厚さを 3mm、4mm、5mm と変化させて成形加工を行った。金属粉末積層成形装置（㈱松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25）によるベント･フィルター製作の様子を図３－２５に、製作したベント･フィルターの外観を図３－２６に示す。また、製作したベント･フィルターの表面及び断面組織の拡大写真を図３－２７、図３－２８に示す。成形加工の際のレーザー光の走査を所定間隔の格子状に制御したことにより、その表面組織も格子状に成形されている様子が確認できる。図３－２９には製作したベント･フィルターを主金型の減圧孔部に設置した状態を示す。

ベント･フィルターの通気性能は、フィルターに作用する圧力勾配（フィルター両端面に作用する圧力差をフィルター厚さで割った値）と見かけの通気流速（通気流量を有効開口断面積で割った値）との比率であらわされる。製作したベント･フィルターの通気性を調べた結果を図３－３０に示す。圧力勾配に対する流速の大きさにより通気度が定義されるが、製作した

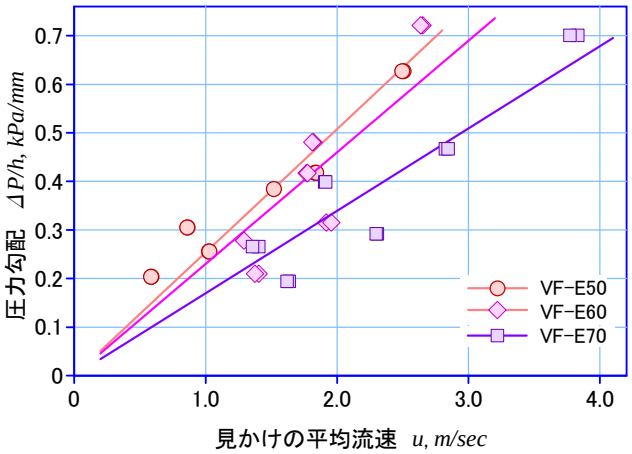


図 3-30　ベントフィルターの通気性評価

ベントフィルターの通気試験の結果、成形時のレーザー光走査間隔が大きいほど大きな通気度が得られた。減圧鋳造において減圧系における圧力損失を得るには、通気度の小さなベント･フィルターを選択することになる。

製作したベント･フィルターを使用して鋳造試験を行い、フィルターを使用したときの減圧鋳造の湯流れ性改善効果を確かめる実験を行った。実験は、3 種類の板金型（D30、D25、D20）を用い、減圧なしの通常重力鋳造試験と、減圧容器の圧力を減圧ポンプの最大能力となる 2kPa 程度まで下げて金型を減圧した鋳造試験を行い、各流路の給湯距離及び溶湯充填の様子を比較した。

実験の結果を図３－３１に示す。いずれの条件においても減圧なしの通常重力鋳造に比べて、減圧による湯流れ性改善効果が認められた。また、いずれの板金型においても減圧をすることで減圧流路の給湯距離が長くなると同時に開放流路の給湯距離が短くなる傾向が見られた。

これは、鋳造時に減圧すると減圧流路の方に溶湯が引っ張られる力が発生することで、その上方の閉込流路や開放流路の入り口付近の溶湯圧力が減少するようなメカニズムによるものではないかと推定される。

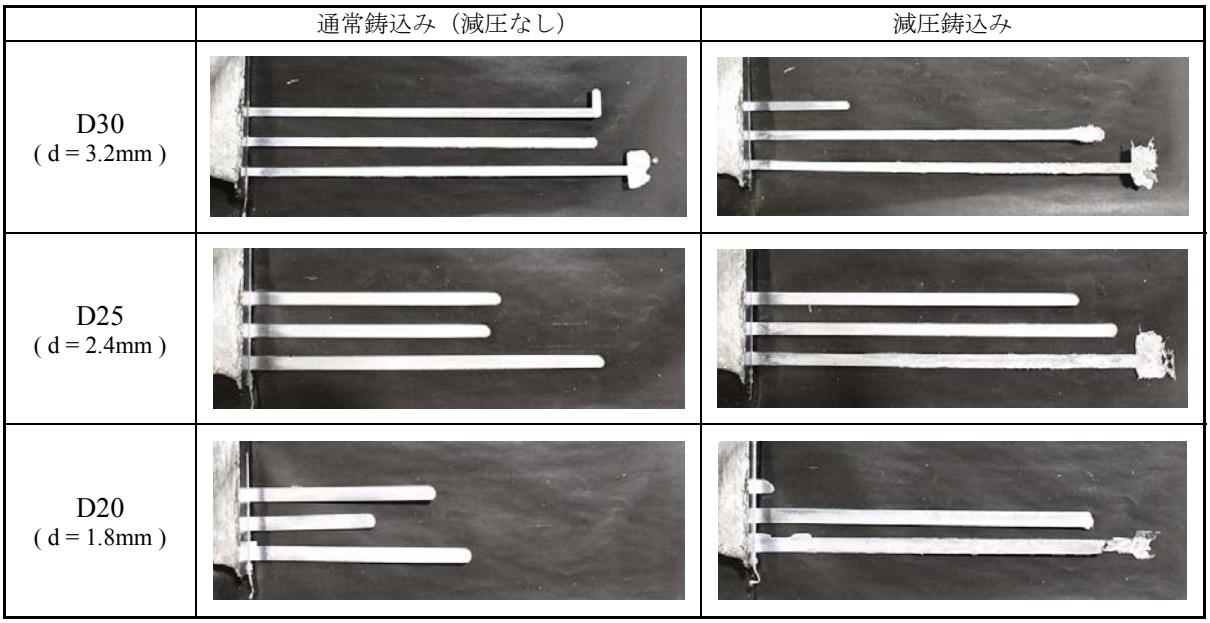


図 3-31　ベントフィルターを使用した時の減圧鋳造の効果

（５）実機搭載用ベント･フィルターの製作

前項で得られた知見を元に、自動鋳造装置の金型に減圧機構を設ける際に搭載すべきベント･フィルターを設計･製作した。

開発する自動鋳造機の金型にベント･フィルターを設置する際の位置や寸法を検討し、図３－３２に示す寸法のベント設備インターフェースを決定し、これに取り付けるフィルターを、本実験で用いたのと同様に金属粉末積層成形法によって製作した。

試作において、実機では実験で用いた金型より溶湯容量が大きく、排気量も大きくなる

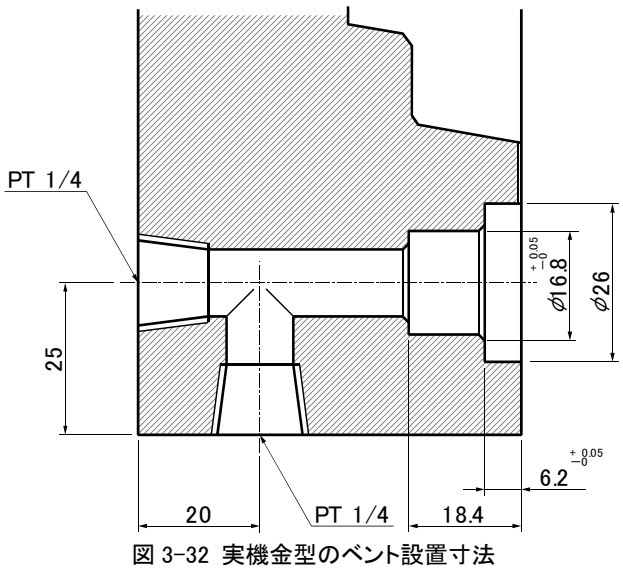


図 3-32 実機金型のベント設置寸法

ことから、通気度を大きく取るために多孔質の成形条件で製作したベント･フィルターのほか、図３－３３に示すような円形微小チャンネルを有するベント･フィルターも併せて製作し、実機での試験に供した。

他の項目で詳細の説明が記述されるが、開発した自動注湯装置（実機）による実験の結果、製品の湯流れ及び金属組織の改善効果に関して減圧による湯流れ性の改善効果については明確な有意差が認められなかった。その原因としては、金型の構造が試験鋳造法とは異なり、湯口の他に揚がりを設けているため、減圧鋳造においてはこの部位を閉じておく必要がある。実験ではこの部位を鋼板で塞いだが、そのときの密閉が十分でなかった可能性がある。

a）実機用フィルターの外観　　b）微小孔チャンネルを配したフィルターの例

図 3-33　試作した実機用ベントフィルターの外観

３－１－４　まとめ

アルミ鋳物の金型自動鋳造装置の開発に際し、鋳物の薄肉化に対応する湯流れ性改善方法の一つとして、金型内キャビティを減圧する減圧鋳造法の効果を検証する実験を行った。実験では、減圧装置及び試験用金型を製作し、本研究の目標である肉厚 2mm を視野に入れて減圧の有無による湯流れ性への影響を調べた。

実験の結果、金型内を減圧することで溶湯の湯流れ性に影響があることを確認した。また、減圧による鋳型内への吸引力が働くことで、鋳造時の溶湯の流れを変化させ、そのときの溶湯攪拌効果により金属組織にも影響を及ぼすことが分かった。さらに、減圧鋳造において過度に減圧度を大きくすると返って溶湯流を乱して、得られる鋳物の形状に悪影響が生じる懸念があることが分かった。

そこで、適切な減圧力を確かめるため減圧力を変化させて鋳造実験を行ったところ、肉厚 2mm 付近では 75kPa（大気圧－25kPa）程度の減圧度で良好な湯流れ性及び充填性が得られるとの知見を得た。また、この圧力を得ると同時に金型から空気などを排出する際の気流を静かに整えるのに効果があると考えられるベント･フィルターの使用を検討し、実験によりその効果を確認した。

ただし、実験において再現性の確保が難しく、本実験で得られたのは主に定性的な知見を得る結果となった。開発装置の実用化を図るためには、さらに実験条件を厳選して実験を重ね、定量的な知見を得ることも含めて有用なデータを獲得していかなければならないと考える。

第４章　高強度・高靭性の向上に資する鋳造技術の開発

４－１　微細化剤の研究開発

４－１－１　研究目的

Al-8mass%Si 鋳造合金の引張強さ 280～310N/mm^2、伸び 7.0～12.0%を目標とし、そのために凝固組織の粗大化を抑制する手法の 1 つとして、微細化剤の添加による鋳造品の結晶組織の微細化技術に関する研究開発を行うことを主な目的とした。

アルミニウム合金の微細化剤は、一般に初晶アルミニウムの微細化には Ti、B、または TiB_2 などが用いられ、Al-Si 共晶組織における Si 晶の微細化には Na または Sr が添加される。本研究においてはこれらの添加量を変化させた鋳物試料を溶製し、マクロ及びミクロ組織観察を行い、微細化効果について検討した。また、微細化剤添加後の時間経過とともに起こるフェーデイング挙動について調査し、最適な微細化剤添加処理法を実証することをねらいとした。

４－１－２　実験方法

純度 99.7mass%の Al 地金、及び Al-24.8mass%Si 母合金を、アルミナ溶解ルツボを用い、電気炉内で溶解した。溶解雰囲気は大気とし、鋳造直前に脱ガス処理した。鋳型には上部内形φ65mm、下部内径φ35mm、高さ 90mm の黒鉛るつぼを用い、常に K 熱電対で注湯・凝固－冷却過程をモニタリングした。

得られた鋳塊試料を中心より２分割し、一方をマクロ組織観察に、他方をミクロ組織観察に供した。マクロ組織観察は#120～#600 までエメリー紙研磨の後、10%NaOH 溶液、または Fick 氏液（HCl:15g, HF:10g, H2O:90g）でマクロエッチングした。

４－１－３　実験結果と考察

（１）初晶デンドライトの結晶微細化

一般に平衡分配係数 ko<1 の合金系について、その合金組成の増大にともなって鋳塊結晶組織が微細化するといわれている。これらの現象を確認するために、溶湯の過熱度 90℃で一定として、黒鉛鋳型に鋳造した。

図４－１は Al-Cu 系合金、Al-Si 系合金、及び Al-Zn 系合金において合金含有量を増大させた場合の、マクロ組織変化を示す。いずれの合金系においても、溶質の増大にともなって僅かな結晶微細化が認められるが、顕著な効果は観察されなかった。

これらの観察結果より、ko<1 の合金系に比較して結晶微細化能の高いとされている ko>1 の合金系について検討した。図４－２は合金元素として Ti、Zr について検討した結果である。いずれの元素も顕著な結晶微細化効果が認められ、これら元素の単独添加でも初晶 α（Al-rich）デンドライトの微細化が十分期待されることが判明した。なお、ミクロ組織の特徴としては、Al-Ti 系においては微細な花びら状デンドライトが観察される。

図 4−1　平衡分配係数 ko<1 の合金系における溶質含有量とマクロ組織変化

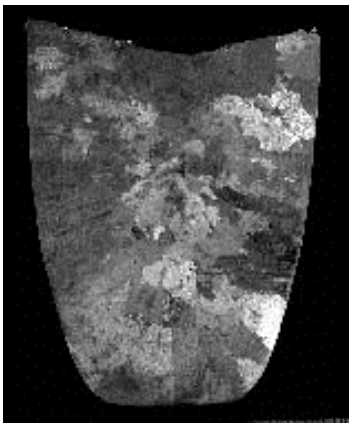
← 純アルミニウム鋳塊のマクロ組織

20mm

Al-1mass%Cu

Al-4.5mass%Cu

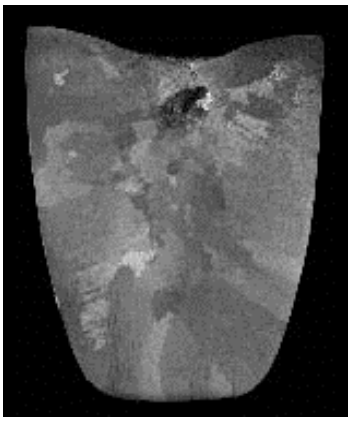
Al-5.7mass%Cu



Al-1mass%Si

Al-1.5mass%Si

Al-1.65mass%Si

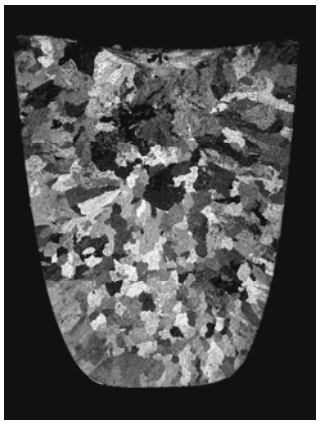


Al-3mass%Zn

Al-4mass%Zn

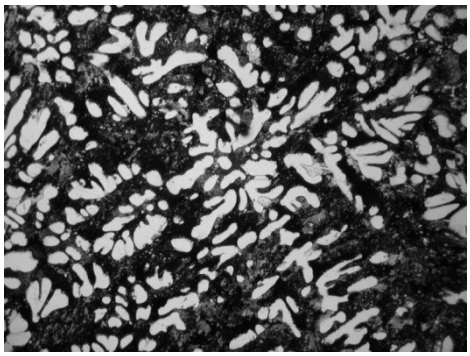
Al-5mass%Zn

(a) 純 Al 鋳塊



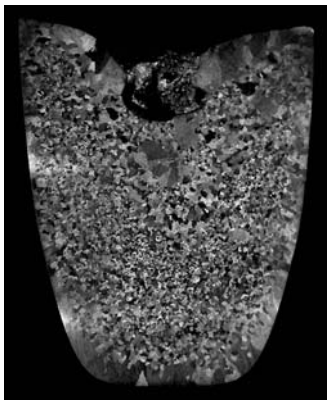
(b)Al-0.15mass%Ti

20μm

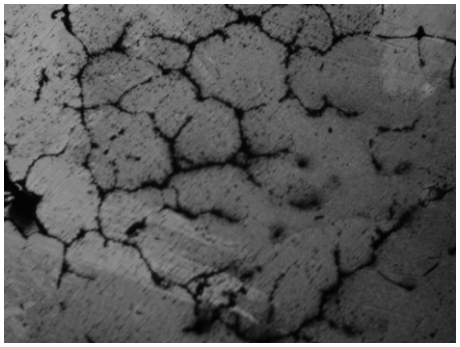


(c) Al-0.15mass%Ti ミクロ組織

20mm



(d)Al-0.3mass%Zr



(e) Al-0.3mass%Zr ミクロ組織

図 4-2
平衡分配係数 ko>1 の合金系における溶質含有量とマクロ組織変化

（２）共晶 Si の結晶微細化

Al-Si 系合金における共晶組織の微細化は、改良処理として良く知られている。この処理法は、Na を添加することにより処理効果があることが報告され、多くの実績例が報告されている。

図４－３は砂型鋳造における Al-Si 系合金の機械的性質と Si 量の関係 [1] である。改良処理によって引張強さ及び伸びの顕著な向上が認められる。またその効果は亜共晶領域（11mass%Si 以下）、共晶組成、及び過共晶組成（11mass%Si 以上）の広い範囲において認められる。

一般に改良元素としては Na、Sr、Sb が使われるが、一般に Na のフェーディング（持続性の減少）が大きいことが欠点として挙げられる。

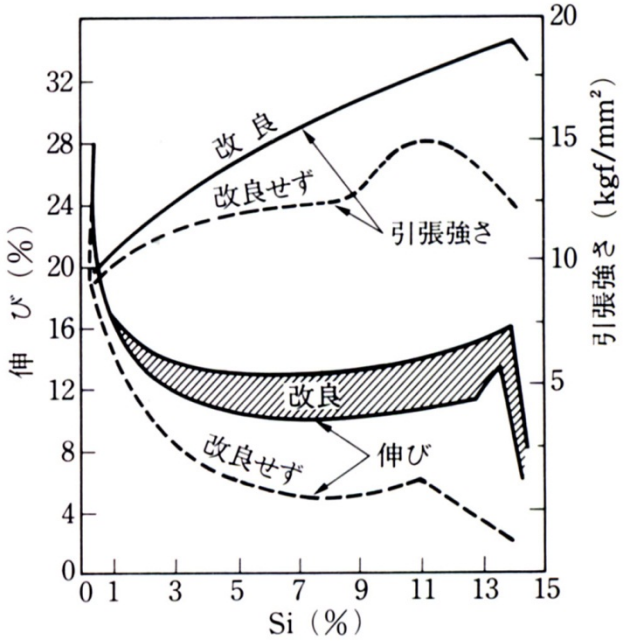


図 4-3 Al-Si 系合金の機械的性質と Si 量の関係（砂型鋳造）

図４－４は各種改良元素含有量に及ぼす溶湯保持時間の影響を示す[2)]。Na は最もフェーディング（持続性の減少）が大きく、Na の酸化損耗が認められる。一方、Sr は Na よりもフェーディングは少なく、Sb はフェーディングしないと報告されている。

本研究ではこれらのデータより、改良効果が Sb よりも大きく、フェーディング現象が Na よりも小さな Sr 添加について検討した。

図４－５は日本鋳物協会研究報告より引用した Sr のフェーディングに対するデータ上に、今回の実験結果を重ね合わせて表示した。80ppm 添加された Sr は、30min 後には 70ppm まで低下することが判明した。

以上の結果から、Sr の添加後の経過と共に、改良効果が低下することが示唆された。これを防止するためには、保持炉内の Sr 含有量の管理が重要であり、また、保持温度の Sr の損耗を促進することから、保持炉の温度管理も肝要である。

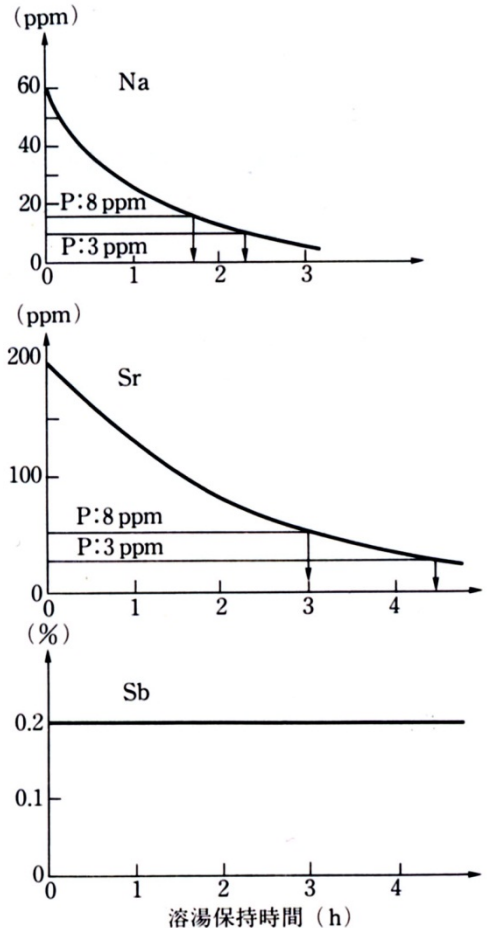


図 4-4　改良元素含有量に及ぼす溶湯保持時間の影響
（溶湯量：100kg）

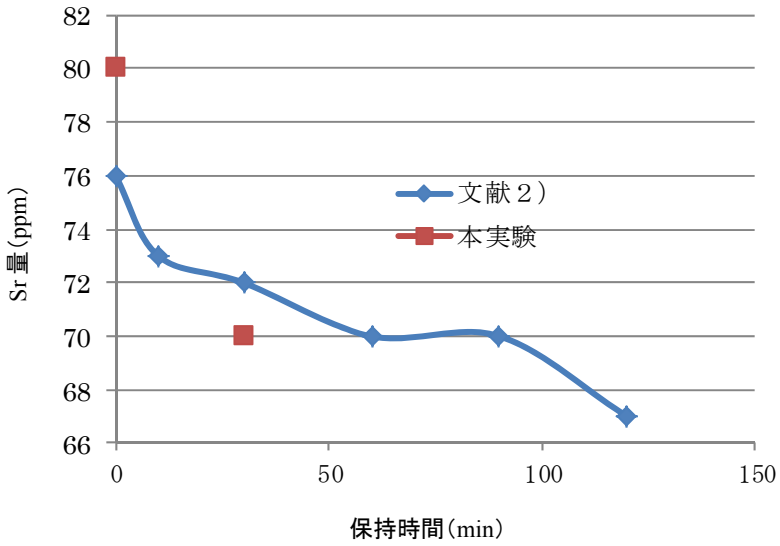
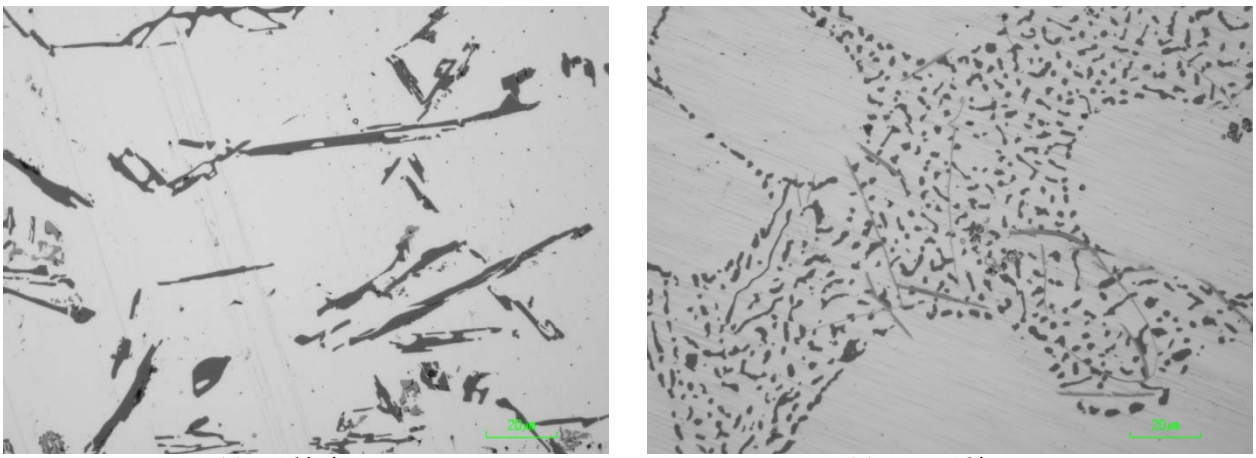


図 4-5　改良元素 Sr 含有量に及ぼす溶湯保持時間の影響



(a) Sr 添加なし　　(b) 0.08Sr 添加

図 4-6　Al-8mass%Si 合金のミクロ組織に及ぼす Sr の影響

図４－６は Al-8mass%Si 合金のミクロ組織に及ぼす Sr の影響を示す。Sr が添加されない(a)では Si 晶が粗大に成長しているが、0.08mass%Sr 添加によって Si は粒状に微細化され、このような効果が引張強さや伸びの改善につながるものと推察される。

４－１－４　まとめ

初晶 α デンドライト（Al-rich 相）の微細化と、共晶 Si の微細化について以下のことが判明した。

① 初晶 α 相の微細化は、合金元素 Cu, Si, Zn など平衡分配係数 ko<1 の合金元素を添加しても顕著な微細化は期待できない。しかし ko>1 である Ti や Zr は微細化作用が顕著であり、結晶微細化剤としての有効性が実証された。

② 共晶 Si 相の微細化には Sr が効果的であり、Na のようなフェーディングが少ないが、時間の経過と共に Sr の損耗が認められた。

③ 以上の結果から、微細化剤のみに依存する Al-Si 系合金では、Ti または Zr と Sr の同時添加が結晶微細化に有効である。

参考文献

１）　神尾彰彦編：「アルミニウムの組織と性質」（1991 年）、軽金属学会、p.239

２）　神尾彰彦編：「アルミニウムの組織と性質」（1991 年）、軽金属学会、p.241

３）　（社）日本鋳物協会 Al-Si 系合金の Sr による改良処理」、研究報告 68、（1994 年）、p.21

４－２　超音波振動の研究開発

４－２－１　研究目的

４－１と同様に、鋳造品の引張強さ 280～310N/mm^2、伸び 7.0～12.0%を目標とし、そのために凝固組織の粗大化を抑制する手段の一つとして、溶湯に超音波振動を加えることによって得られる鋳造品の性状を調べることを主な目的とした。

本研究において加振周波数、加振強度を変化させた場合の、鋳物材質への影響に関する実験を行い、最も効果のある加振条件を見出すことをねらいとした。またこれらの実験結果を踏まえ、試作自動鋳造装置で検証実験を行う。併せて、金型の減圧との相乗効果を検証するため、加振による溶湯の流動性への影響に関して検討する。

４－２－２　実験方法

本実験に供した超音波発振装置及び加振装置図を図４－７に示す。

本装置は公称周波数 19kHz、公称出力 1200W、振幅 20μp-p であり、ホーン材質はφ20mm のサイアロンである。

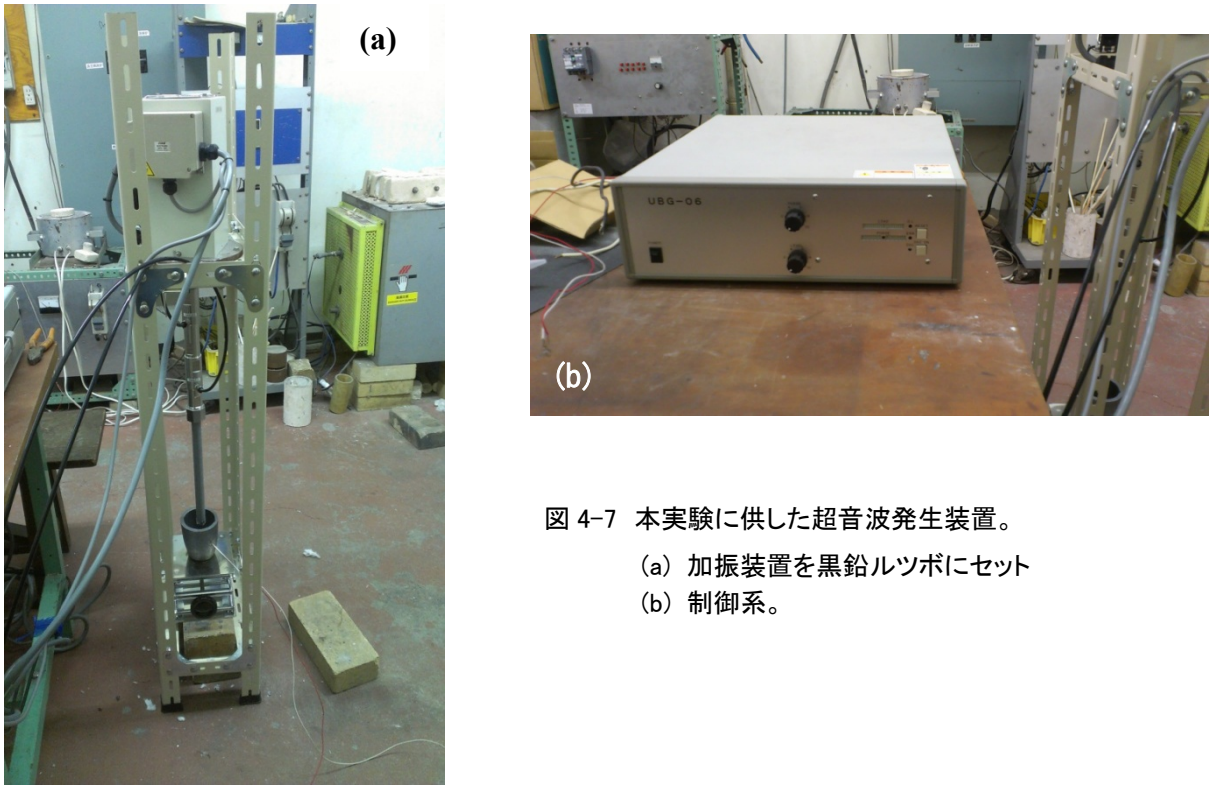


図 4-7　本実験に供した超音波発生装置。
（a）加振装置を黒鉛ルツボにセット
（b）制御系。

なお、図４－８に示す当研究室現有の超音波発生装置は、公称周波数 27.5kHz、公称出力 30～150W であり、図４－７に示した装置のおよそ 1/10 の出力であるが、小型実験には最適であり、適宜装置を使い分けた。鋳型余熱温度は 500℃とし、ホーンの浸漬は Al 合金溶湯表面から 10mm で一定とした。また、加振開始は液相線温度＋40℃とし、加振時間は 120s 一定とした。

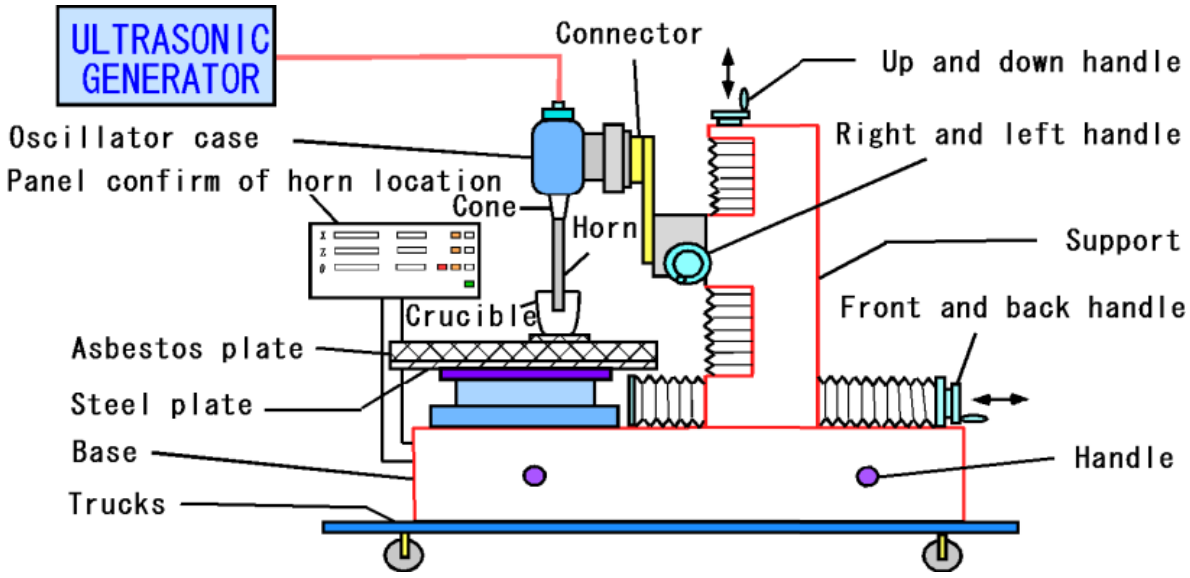


図 4-8　実験に供した小型超音波発生装置

４－２－３　実験結果と考察

（１）初晶 α（Al-rich 相）に対する微細化効果（ko<1 の場合）

Al-Cu 系合金の鋳塊マクロ組織に及ぼす超音波加振の影響を図４－９に示す。合金元素を含まない純 Al 鋳塊に対する超音波加振の影響は少ないが、1.0～5.7mass%添加では、超音波加振によって顕著な微細化効果が認められる。このことは図４－１０において認められるように、振動によってデンドライトアームの溶断遊離と増殖が促進されたことに起因する。

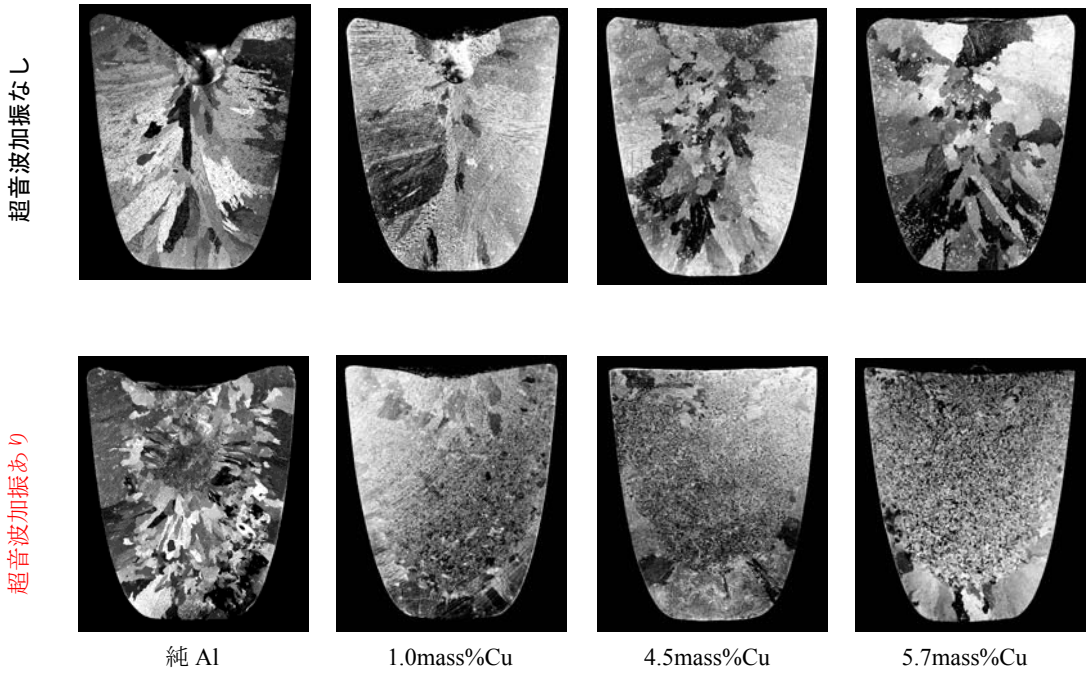
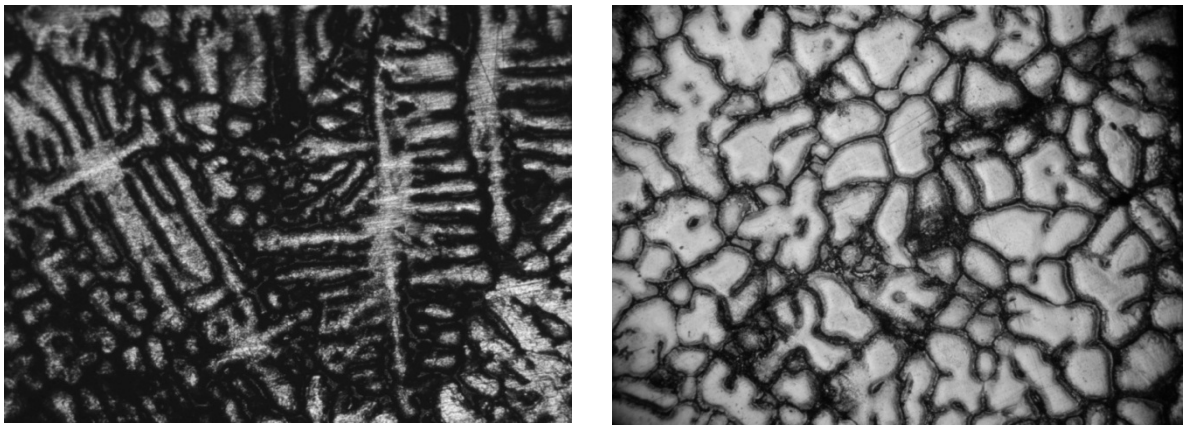


図 4-9　Al-Cu 系合金の鋳塊マクロ組織に及ぼす超音波加振の影響



超音波振動なし　　超音波振動あり

図 4−10　Al-5.7mass%Cu 系合金のミクロ組織

前述と同様に、Al-Si 系合金の鋳塊マクロ組織に及ぼす超音波加振の影響を図４－１１に示す。1.0～1.65mass%Si 添加では、超音波加振によって顕著な微細化効果が認められる。なお、いずれの場合も鋳型壁付近では柱状晶が観察される。この原因として、急冷凝固部は温度勾配が大きく、成長速度が速いことから、柱状成長を抑制できないためと考えられる。

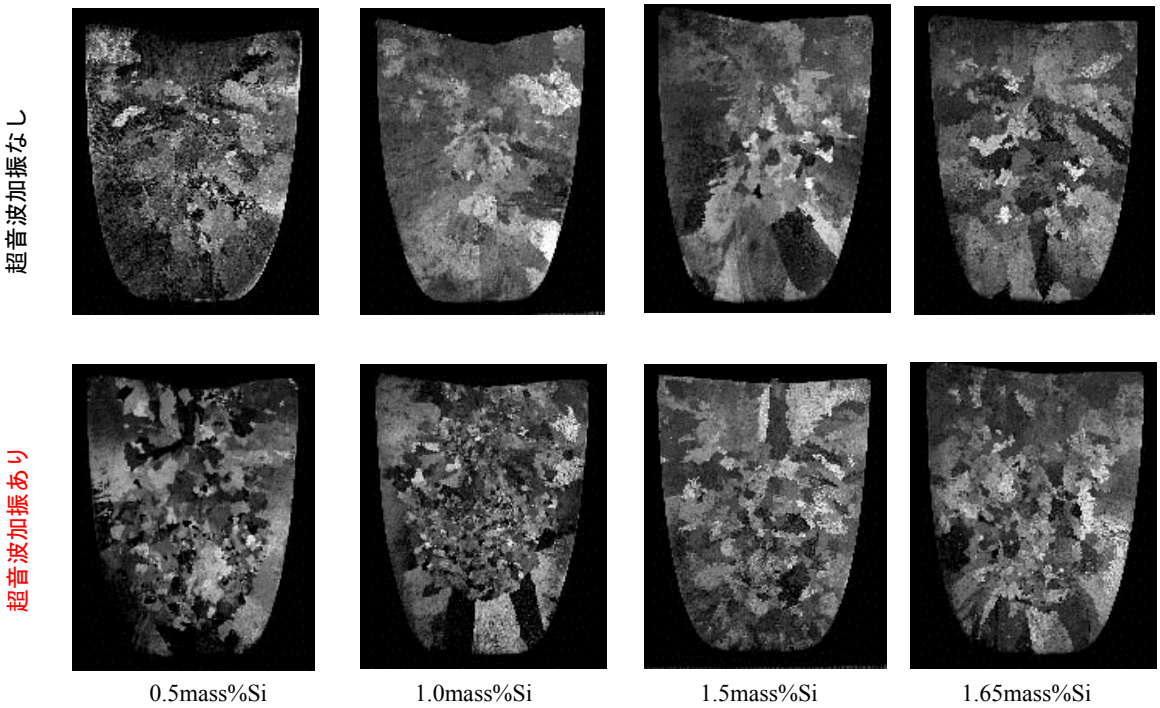


図 4−11　Al-Si 系合金の鋳塊マクロ組織に及ぼす超音波加振の影響

図４－１２は Al-Si 系合金のミクロ組織に及ぼす超音波加振の影響を示す。超音波加振によってαデンドライトが粒状に変化していることが明らかである。

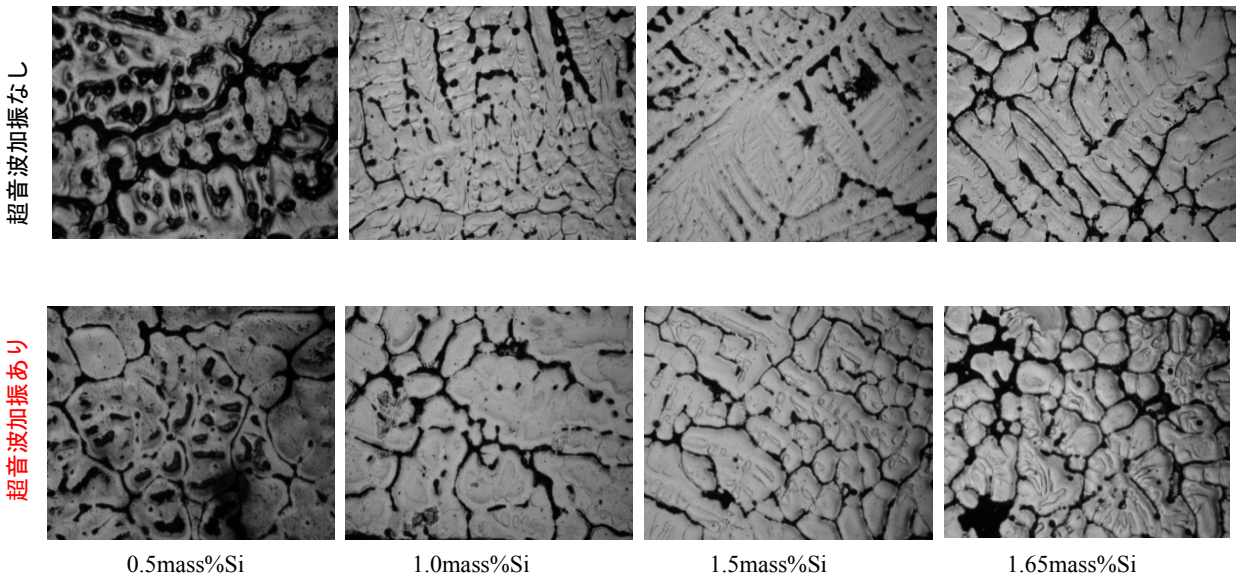


図 4-12　Al-Si 系合金のミクロ組織に及ぼす超音波加振の影響

Al-Zn 系合金についても検討した結果、Al-Cu 系合金及び Al-Si 系合金と同様の傾向が認められた。以上の結果を、分配係数 ko<1 の 3 種の合金について、超音波加振による結晶微細化効果をまとめた結果を図４－１３に示す。ここで縦軸の結晶微細化率Ｎは、以下のとおり定義した。

$$\text{結晶微細化率（N）} = \frac{\text{静置の結晶粒径} - \text{超音波加振の結晶粒径}}{\text{静置合金の結晶粒径}} \times 100\ (\%)$$

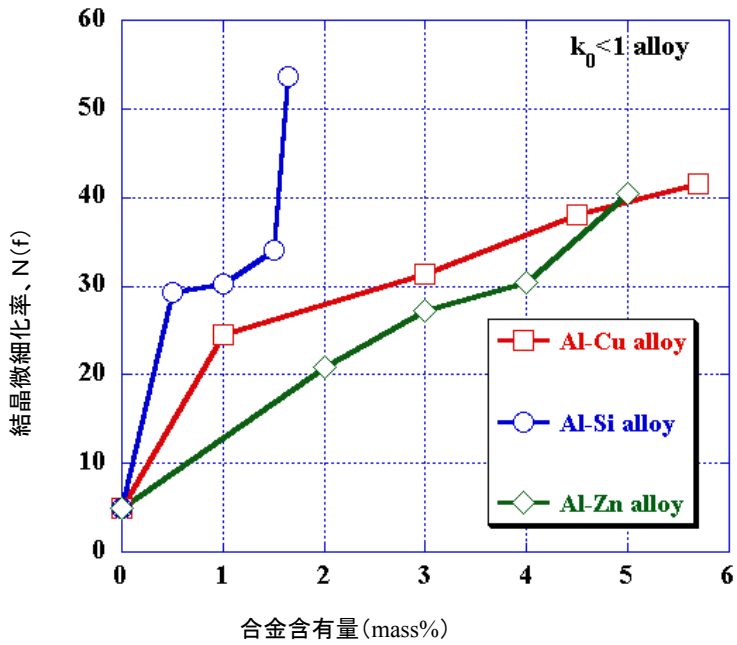


図 4-13
分配係数 ko<1 合金の超音波による結晶微細化率変化

3 種の合金系で最も超音波加振によって微細化される系は Al-Si 系合金であり、次に Al-Cu 系合金、Al-Zn 系合金は加振に対する微細化効果は最も低い。

この傾向は平衡分配係数の大小関係で説明できる。すなわち平衡分配係数 ko<1 の場合、ko 値が小さいほど組成的過冷しやすく、デンドライトアームの根元がくびれ、振動や温度のゆらぎによって容易に溶断遊離が生じ、微細等軸晶帯の拡大をもたらしたと考えられる。

表 4-1　3 種の合金系の平衡分配係数

合金系	平衡分配係数, ko
Al－Si 合金	0.14
Al－Cu 合金	0.17
Al－Zn 合金	0.39

（２）初晶 α（Al-rich 相）に対する微細化効果（ko＞1 の場合）

前章で述べたように Ti、Zr は Al に対して ko＞1 であり、超音波加振を付与しなくても初晶 α は十分に結晶微細化される。本節では基本的な微細化剤添加効果に加え、さらに超音波による微細化効果が相加的に影響するか否かを検討した。

図４－１４は Al-0.15mass%Ti 合金鋳塊のマクロ組織とミクロ組織に及ぼす超音波加振の影響を調べた結果である。超音波加振によって結晶の微細化、及び等軸晶帯の拡大が認められる。またミクロ組織においては、加振なしではデンドライトアームの発達が認められるのに対し、超音波加振した場合は微細粒状結晶が観察され、デンドライト表面に微細な側枝（アーム）が観察される。

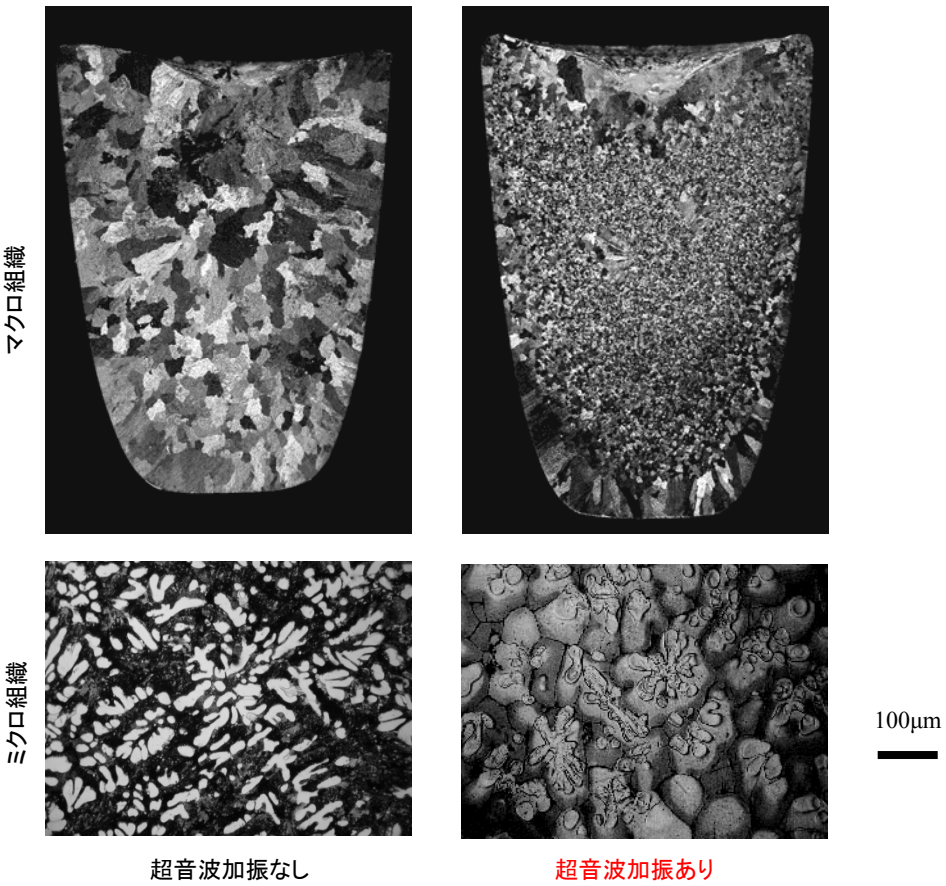


図 4-14　Al-0.15mass%Ti 合金鋳塊のマクロ組織とミクロ組織に及ぼす超音波加振の影響

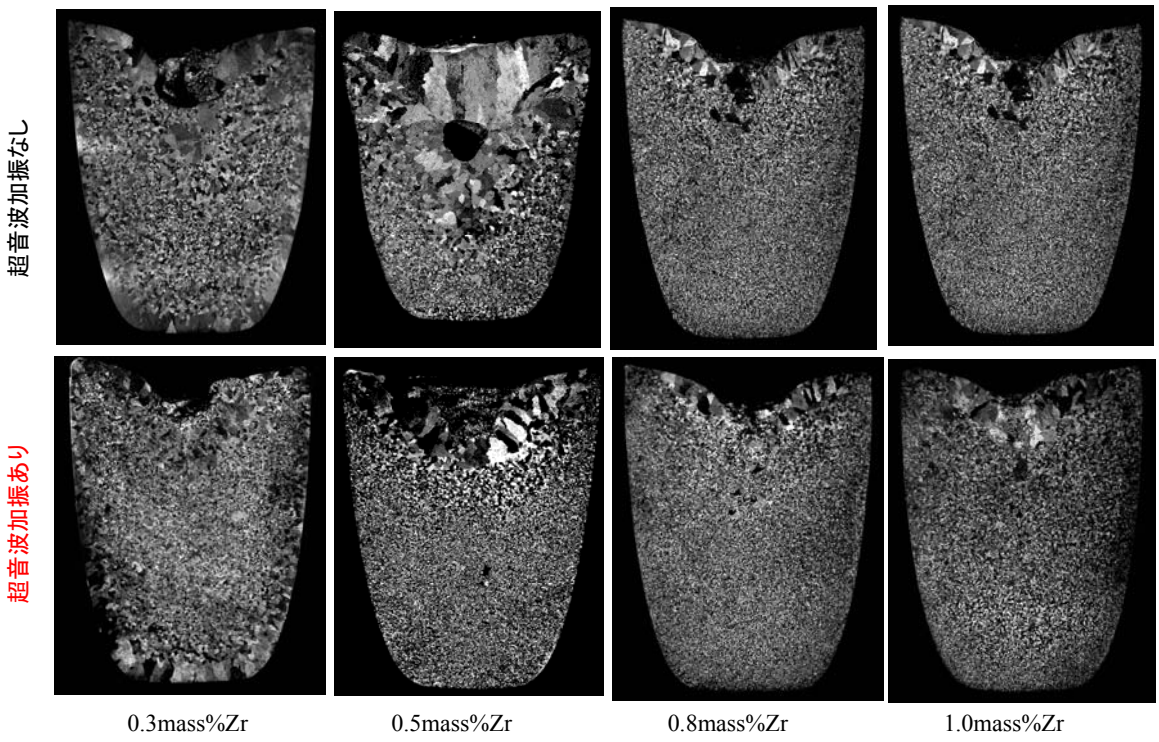


図 4-15　Al-Zr 系合金のマクロ組織に及ぼす超音波加振の影響

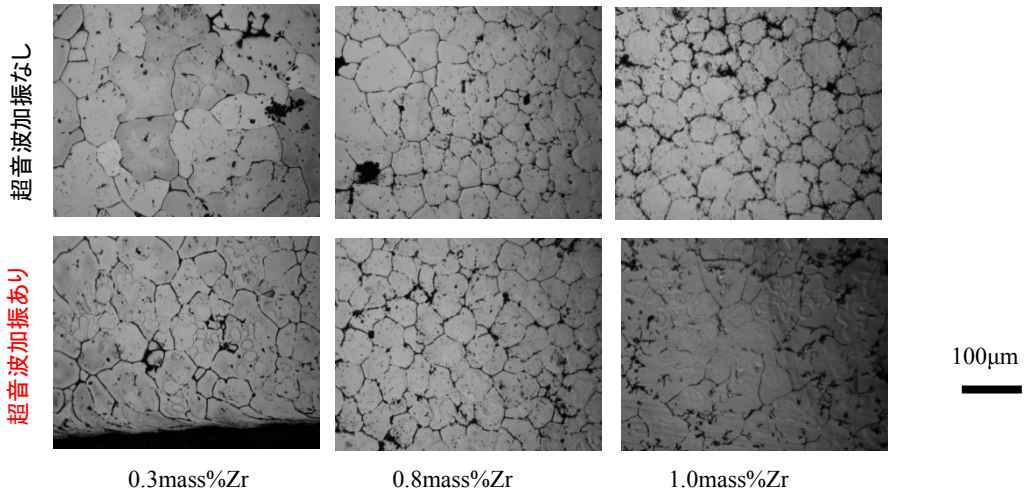


図 4-16　Al-Zr 系合金のミクロ組織に及ぼす超音波加振の影響

Ti と同様に、Al 結晶の微細化に有効とされている Zr について調査した。図４－１５はマクロ組織、図４－１６はミクロ組織に及ぼす超音波加振の影響を示す。Zr の場合は Ti よりも結晶微細化能が高いため、超音波加振の効果が明確ではなく、ミクロ組織においても加振効果は僅かといえる。Cr の添加についても調査した結果、最も微細化効果及び加振の効果が低かった。このような微細化傾向をまとめると、図４－１７のように示される。すなわち、Ti が最も顕著な微細化効果を示し、次に Zr、最も微細化効果が低い添加元素として Cr が挙げられる。

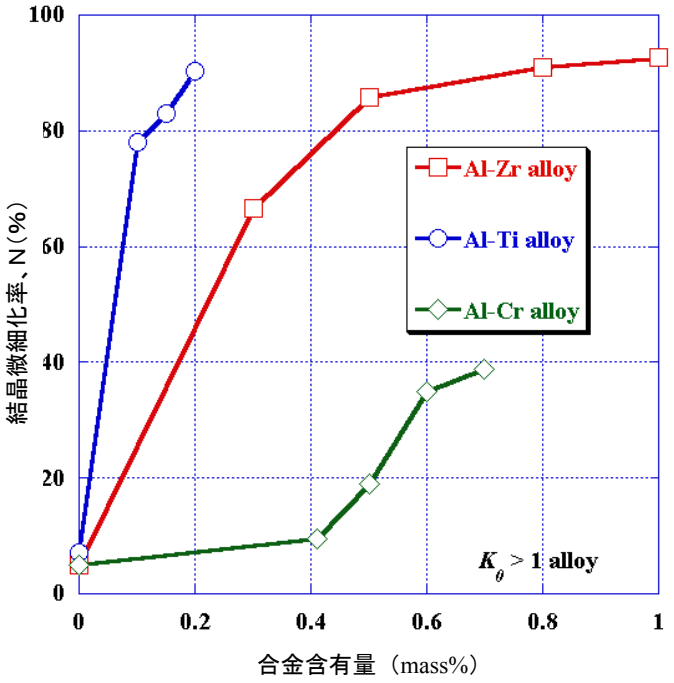


図 4-17
分配係数 ko>1 合金の超音波による結晶微細化率変化

以上の結果をまとめると、平衡分配係数 ko>1 の合金系において、ko が大きな値を示す Ti では最も微細化効果が大きく、また加振による微細化も顕著であった。しかし ko が 1 に近い値を示すほど微細化効果と加振効果が低かった。よって ko>1 の場合、ko が大きな値を示す合金系では、組成的過冷が促進され、デンドライトアームのくびれが大きくなり、溶断遊離と結晶の増殖により結晶微細化と等軸晶帯の拡大がもたらされたと考えられる。

表 4-2 3 種の合金系の平衡分配係数

合金系	平衡分配係数, ko
Al-Ti 合金	8.8
Al-Zr 合金	2.6
Al-Cr 合金	1.9

（３）超音波加振による結晶微細化効果と加振出力の関係

一般に鋳型寸法、鋳型形状によって加振による微細化効果が変化する。また、加振エネルギーによって、微細化能が変化することが予測される。そこで本実験では Al-Cu、Al-Si、Al-Mn 系合金の 3 種について、超音波発生装置の公称出力を 0～150W まで変化させて検討した。図４－１８は Al-1.0mass%Mn 合金のマクロ組織に及ぼす超音波加振出力の影響を示す。超音波出力の増大にともなって結晶微細化が図られていることが明らかである。Al-Cu、Al-Si 系合金についても、ほぼ同様の傾向を示した。

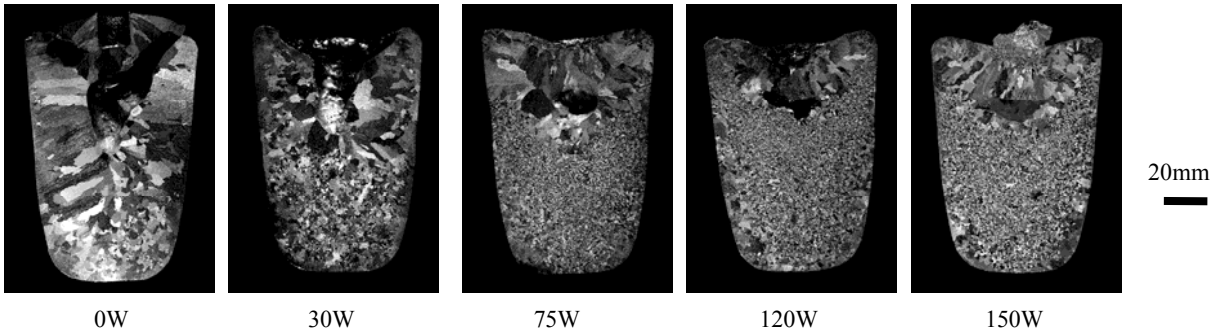


図 4-18 Al-1.0mass%Mn 合金のマクロ組織に及ぼす超音波加振出力の影響

以上の結果を、鋳塊の微細化率と超音波出力との関係でまとめると、図４－１９のとおりとなった。結晶微細化率は、ある一定の出力を超えると、その効果は飽和する傾向が認められる。すなわち、過剰な振動付与は微細化を促進せず、むしろ加振にともなう気泡の生成をもたらすリスクが増大すると考えられる。

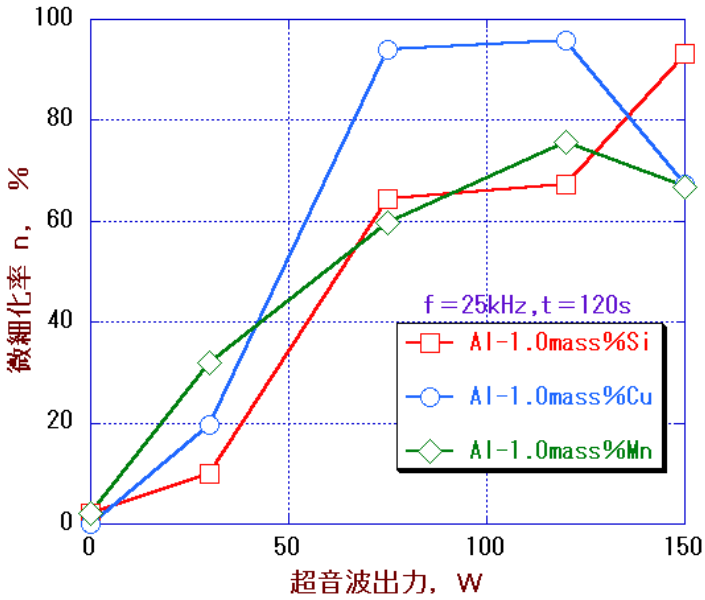


図 4-19　Al 合金の決勝微細化率と超音波出力の関係

（４）超音波加振におけるホーン浸漬深さと微細化効果

図４－２０は Al-2mass%Si 合金を超音波加振する場合の、ホーンの浸漬深さとマクロ組織との関係である。上部液面からの浸漬深さ 5～10mm では、底部の柱状晶を除いて、ほぼ全面が微細等軸晶領域で占められる。しかし浸漬深さを 20mm 以上に浸漬すると、鋳塊中央部は粗い等軸晶に変化している。またホーン挿入部は発熱により結晶の粗大化が認められる。以上の結果から、ホーンの浸漬深さには最適量があり、本実験の範囲内では 5～10mm が最も微細化効果が認められた。

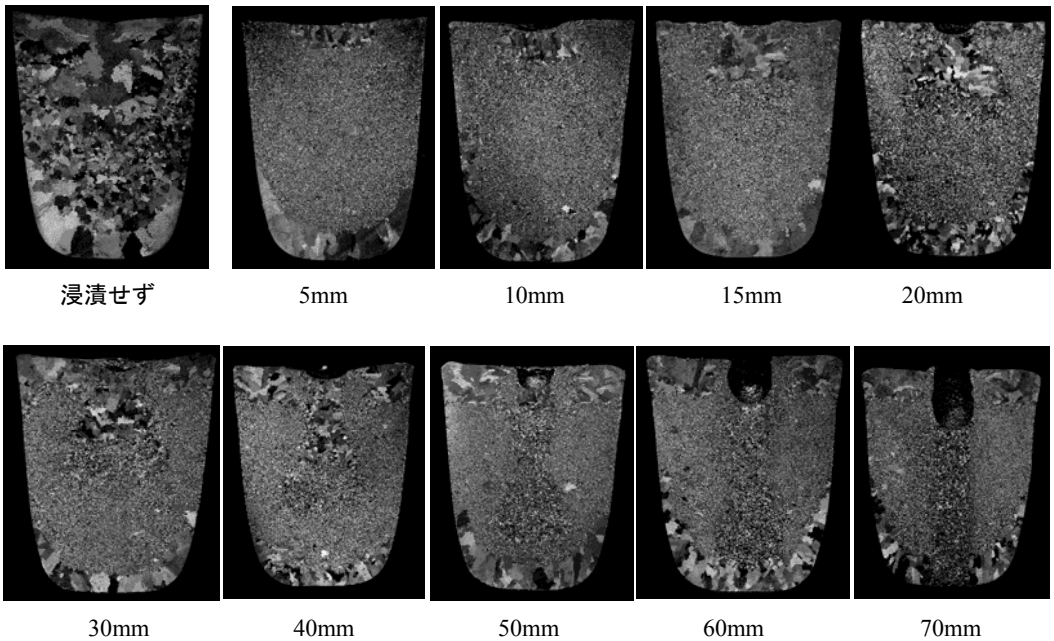


図 4-20　Al-2.0mass%Si 合金のマクロ組織に及ぼすホーン浸漬深さの影響

（５）超音波加振による微細化と Sr 添加の相互効果

図４－２１は、Al-8.0mass%Si-0.08mass%Sr 合金のミクロ組織と加振の効果を調べた結果である。図より明らかなように、Sr の添加なしでは、いずれの場合も共晶 Si は粗大な針状である。しかし Sr の添加によって共晶 Si 相は粒状化し、超音波加振によって一層微細な粒状 Si へと変化している。

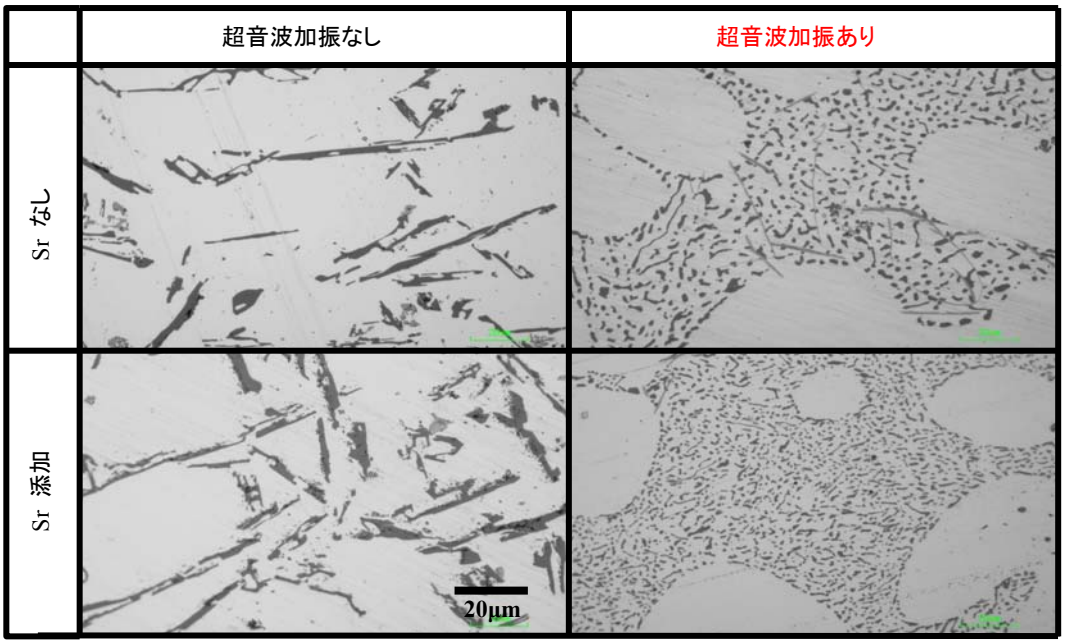


図 4-21　Al-8.0mass%Si-0.08mass%Sr 合金のミクロ組織に及ぼす加振の効果

（６）加振による溶湯の流動性への影響

溶湯の流動性を評価する方法にはいくつかあるが、一般的には流動長を比較することによって評価している。渦巻状の型に鋳造したり、一定圧に減じた流路内を流してその長さを測定する減圧法などが用いられている。

一般に結晶微細化すると溶湯の流動性が改善されることが指摘されている。この一因として、流れを妨げる柱状デンドライトが生成せず、粒状の初晶と融液が混在して流れることが指摘されている。

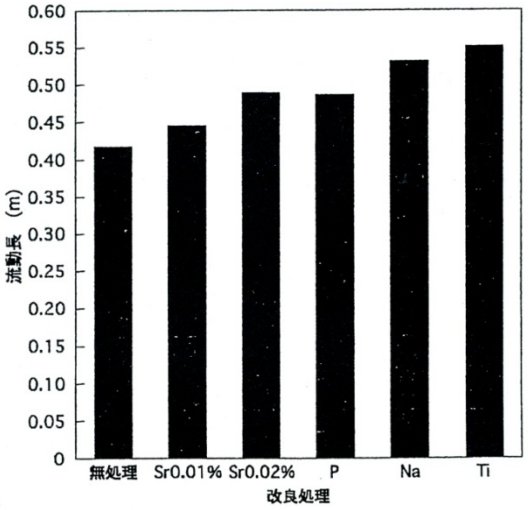


図 4-22　各種改良処理と流動長の関係

図４－２２は日本鋳物協会・研究報告からの引用[1)]であり、Sr の添加は無処理よりも流動長が改善され、Sr 添加量の増大にともなって流動長が大となることが示されている。しかし Na 添加よりは流動長が小さいことから、製造の際は湯廻り不良に留意すべきことを示唆している。

本研究では加振による溶湯の流動性評価は直接的にはできなかったが、超音波加振による顕著な結晶微細化が図られたことから、流れを妨げる要因が排除されたと推察される。また金型内を減圧することにより、著しい流動性の改善が期待される。

（７）超音波加振及び Sr 添加により溶製された鋳塊の引張特性

本研究のねらいの一つとして、鋳造品の引張強さ 280～310N/mm^2、伸び 7.0～12.0%を目標として鋳造組織の改善に取り組んだ。文献[2)]によれば、図４－２３に示されるように、Al-7mass%Si-0.35mass%Mg 合金の機械的性質に及ぼす改良処理の影響は、とくに伸びに対して顕著である。

本研究で得られた鋳塊から、平行部φ8mm×30mm の丸棒引張試験を作製し、クロスヘッド速度 1/60mm/s で試験した結果を図４－２４に示す。Sr 添加及び Sr 添加と加振の条件では、伸びは目標値 7.0～12.0%を超え十分な特性を有しているが、引張強さは目標には達しなかった。しかし AC4C 程度の引張強さを有していることから、脱ガス処理をより完全に行うことと、より速い冷却速度の条件について検討を重ねたい。

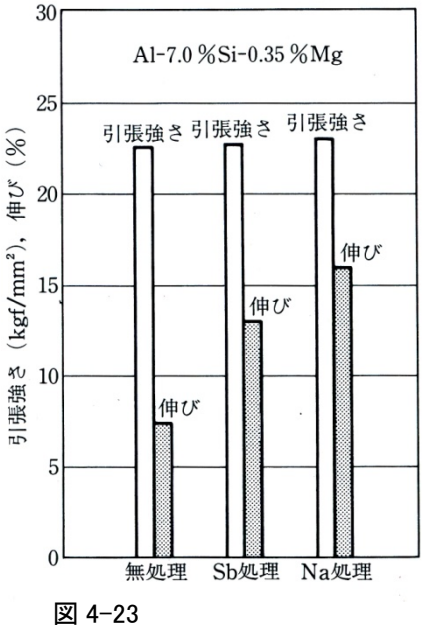


図 4-23
鋳放し AC4C 材の機械的性質に及ぼす改良処理の影響[2)]

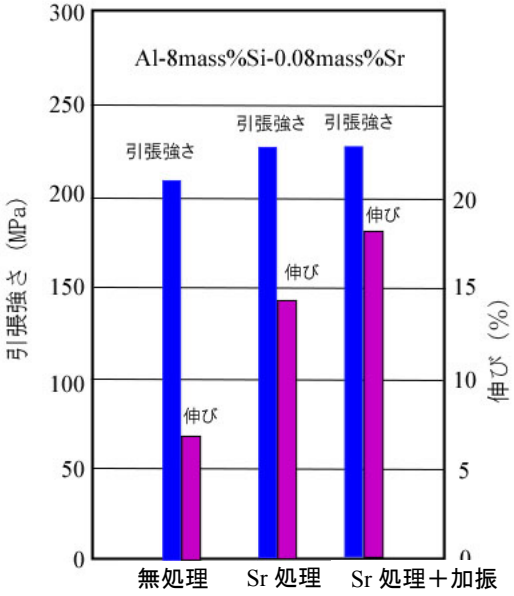


図 4-24
鋳放し Al-8mass%Si-0.08mass%Sr 合金の機械的性質に及ぼす改良処理の影響

４－２－４　まとめ

超音波発生装置を用いて、溶湯表面を加振することによって、以下の事項が確認できた。

① 初晶 α（Al-rich 相）に対する加振による微細化効果（ko<1 の場合）は、純 Al に対してはその効果は小さいが、僅かな溶質元素の添加により顕著となる。

② 初晶 α（Al-rich 相）に対する微細化効果（ko＞1 の場合）は、Ti, Zr では単独添加でも十分に結晶微細化作用があり、加振によってさらに微細化が促進される。

③ 超音波加振条件にはいくつかあるが、用いる溶湯量と形状、材質に適した加振出力の選定が重要である。またホーンの浸漬深さも鋳塊性状に影響を与え、液相表面 5～10mm の浸漬量が適していることが判明した。

④　Al-8mass%Si-0.08mass%Sr 合金を超音波加振して凝固させると、共晶 Si は Sr による改良効果に加え、加振によりさらに微細な共晶 Si となることを実証した。

⑤　このようにして得られた Al-8mass%Si-0.08mass%Sr 合金鋳塊の引張特性を調査した結果、著しい伸びの改善が認められ目標値を超えたが、引張強さは目標値を下回った。この対策としては速い凝固速度、脱ガス処理法の確立が肝要である。

なお、超音波付与の位置、及びタイミングは種々考えられるが、溶湯温度の低下を防ぎ、溶断分離されたデンドライトアーム片の再溶解を防止することで、きわめて有効な加振効果が得られる。金型への振動付与、あるいは注湯口の振動またはチル効果との併用も今後の課題として取り組む必要がある。

文献

1）日本鋳物協会研究報告 68「Al-Si 系合金の Sr による改良処理」（1996 年）、p.88
2）神尾彰彦編「アルミニウムの組織と性質」軽金属学会、（1991 年）、p.241

第５章　複合金型鋳造システムの設計と製作

５－１　目的

現行納期の 30%短縮を目標とし、１－１－３に示した研究開発テーマ①～③の研究結果をもとに、自動注湯システム、減圧強制吸引システム、凝固組織の微細化処理等を複合した鋳造システムの設計･製作を行う。

本研究において開発した要素技術を踏まえ、株式会社木下合金と（地独）北海道立総合研究機構が複合金型鋳造システムの基本設計を行い、製作を経て試作開発した自動鋳造装置に組み入れ、その稼動試験による動作確認を行う。

５－２　複合金型鋳造システムの設計仕様

第２章～第４章に示した研究開発の結果をもとに、自動注湯システム、減圧強制吸引システム、凝固組織の微細化処理等を複合した鋳造システムについて、以下の項目からなる設計仕様を決定した。

①　基本構造	⑦　真空引き装置
②　湯だまり部	⑧　油圧装置
③　傾斜式自動注湯装置	⑨　超音波発振装置
④　金型	⑩　電気制御盤内機器
⑤　金型昇温装置	⑪　操作盤
⑥　塗型昇温装置	⑫　塗型簡易制御盤

製作した複合金型鋳造システム

５－３　製作した複合金型鋳造システムによる鋳造試験

本研究開発において製作した複合金型鋳造システムにより、様々な注湯条件下での鋳造試験を行った。

以下は、その試作品の一例と注湯条件の違いによるマクロ組織の変化である。

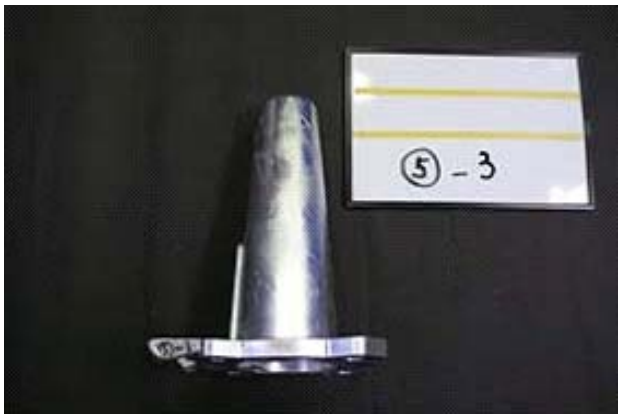


図 A

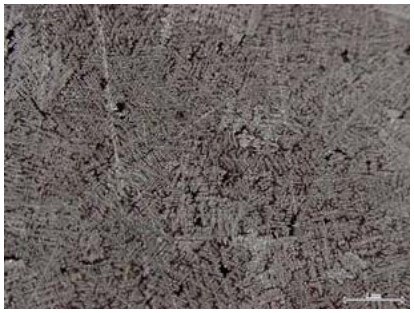


図 B

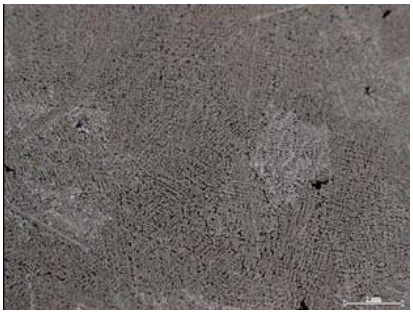


図 C

図 D

図 E

試料	引張強度（N/mm2）	伸び（%）	硬さ（HB）
図 A	201.9	12.0	55.3
図 B	173.3	9.0	49.3
図 C	177.1	6.8	48.5
図 D	186.2	4.4	52.3
図 E	168.5	4.7	51.3
規格値	160 以上	3 以上	55

５－４　まとめ

５－４－１　薄肉及び軽量化を実現するための鋳造技術の開発

欠陥の無い試作品については、所期目的の 2mm ではなく 3mm であるが、軽量化の削減率は満たされた。

	肉厚	製品重量	鋳込重量
従来品	5.5mm	2.0 kg	3.0 kg
開発品	3.0mm	1.3 kg	1.75 kg
削減率	45%	35%	45%

５－４－２　コスト削減に資するための鋳造技術の開発

上記より、重量比で 35%以上の削減が可能になった、これによりエネルギーコストも削減でき、総体的なコストは、40～50%削減が現実的となった。また、注湯者による製品のムラがなくなり、ここでのコスト削減も可能となった。

５－４－３　納期短縮

短納期を実現するための鋳造技術の開発においては、金型の加熱時間短縮がヒーターを用いることで可能になった。

また、段取り替えの金型補修作業においても、ヒーターを用いることで塗型時間を短縮することで可能となった。

主型の分割した金型を一体金型にすることにより、後処理の手間が省け、トータルで納期短縮 30% 削減は現実的となった。

第６章　全体総括

６－１　研究開発成果

本研究開発は、平成２４年３月１日に委託契約を締結したもので、１１か月と短い期間ではあったが、次のような成果を得ることができた。

６－１－１　注湯条件の研究

（１）自動注湯の研究開発

本研究ではダービル法での自動注湯を採用し、作業者による品質のバラツキを無くすことができ、それにより、不良率の低下によるコスト 30～50%減の現実化が見えてきた。

注湯速度をコントロールでき、最適速度を記録し再現可能な装置になった。また、金型内の減圧を行い、溶湯が狭い空間に流れやすくする装置も組み込み検証実験を行った。

超音波振動装置による溶湯加振を行った。溶湯を湯だまりに入れそこでの加振を当初考えたが、溶湯の温度低下による湯回り不良に繋がるため、注湯後のフランジ部（金型）での加振に替え実験を行った結果、デンドライトの微細化が認められ加振効果を得ることが実証された。

６－１－２　薄肉化を実現するための研究

（１）湯流れ性向上の研究開発

鋳造品の肉厚を薄さ 2mm まで対応できるようにすることを目標にしたが、当初 3mm で金型を作り、実証後 2mm と考え進めた結果、3mm でも条件を見つけることの難しさのため、3mm で終わってしまった。

減圧吸引のための金型の吸引箇所を、湯流れシミュレーションにより最終湯回り箇所に決定した。

超音波加振でのデンドライトの微細化は認められたが、湯流れ性との直接の効果は認められなかった。

６－１－３　高強度・高靭性の向上に資する鋳造技術の開発

（１）微細化剤の研究開発

実験結果でのマクロ組織を見ると、微細化剤及び超音波加振は微細化に有効であり、更に機械的強度の向上に寄与することが分かった。このなかで、強度が一番大きく貢献しているのは Na 系の微細化剤添加で、JIS 規格の機械的性質は十分満たしており、T6 処理を行うことにより所期の機械的性質（280 N/mm²、伸び 7.0～12.0%）を充たすものと推察される。

（２）超音波振動の研究開発

超音波振動装置による溶湯加振は、鋳造作業及び湯流れ性向上を目指す観点から湯だまりの溶湯中ではなく、金型フランジ部外部からの加振に切り替えシステムに組み込んだ。実験でのマクロ組織の結果をみると、デンドライは破壊されており、有効であるとの結果を得た。ただ　鋳造実験結果を見るに、湯流れ性との因果関係はあまり認められなかった。

６－１－４　複合金型鋳造システムの設計と製作

現行納期の 30%短縮を目標として、６－１－１～６－１－３の研究開発をもとに、それらの成

果の集大成として、自動注湯システム、減圧強制吸引システム、凝固組織の微細化処理などを複合した前述の鋳造システムの設計仕様を決定し、それに基づき複合金型鋳造システムを製作した。

６－２　研究開発後の課題・事業化展開

本研究開発において製作した複合金型鋳造システムにより鋳造試験を重ねた結果、従来品の厚み 5.5mm に対して、3mm の製品化のめどが立ってきた。しかしながら、目標である 2mm までは至っていない。

薄肉鋳造工程においては、溶湯温度や金型温度、塗型剤の種類、微細化添加剤の種類・添加割合、注湯スピード、減圧のタイミングなど多くの変化条件が存在する。安定的に、穴の空かない良品を作るため、これらの多くの条件を絞り込んで見つけてゆくことが次の課題となる。

この課題を克服し、3mm の肉厚を 2mm、1mm と、より薄肉化の製品を安定的に生産できるようにし、現在生産している製品のコストを削減し競争力を上げる生産を上げること、また、薄肉・高強度・高靭性アルミニウム合金金型鋳造を広く全国に PR して販路の拡大を行うことなどを目指す。

さらに、それらの成果を活かし、より高機能なアルミ合金鋳物を作ることで、「川下製造事業者」との協力体制を強化して、新たな事業領域を広げていくことを目指していく。