

平成 27 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「船舶用エンジンの高出力化とクリーン化の革新をもたらす
高疲労強度すべり軸受製造技術の確立」

研究開発成果等報告書

平成 2 8 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 一般財団法人大阪科学技術センター

目 次

第 1 章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
(研究組織及び管理体制, 管理員及び研究員)
- 1-3 成果の概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第 2 章 本論

- 2-1 Al-40%Sn 合金板鑄造技術の開発
- 2-2 クラッド条件の探索と生産用クラッド材製造装置の作製
- 2-3 軸受材成形機の作製と成形条件の探索
- 2-4 特性評価

第 3 章 全体総括

成果と今後の課題

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

船舶や産業用発電機のエンジンには、大型化と高速化が要求されるようになった。高出力により現状の軸受仕様のままではエンジンの回転部分を支える軸受の寿命は短くなる。現在と同等の寿命にするためには、現行の Sn-Sb-Cu 合金系ホワイトメタルの耐圧の 30%以上の向上と疲労強度の 50%以上の向上が必要である。しかし、従来の Sn-Sb-Cu 合金系のホワイトメタルの軸受ではこの要求を満たすことができず、Al-Sn 合金系のすべり軸受け用材料において Sn の濃度が 40%の場合に上記の要求をみたすことが見いだされている。しかし、従来の鑄造方法では凝固温度範囲が広い Al-40%Sn の鑄造では鑄巣が発生するという問題があり、解決が急がれている。鑄巣が発生せず、安価に Al-40% Sn 板を鑄造できるプロセスの開発を目指すとともに軸受性能を 2 倍以上に伸ばす。

機械的性質	ホワイトメタル(現状)	Al-40%Sn 合金(目標)	改善比率
耐久時間 (加速試験: 荷重 41.2MPa)	20 時間 (不足)	450 時間以上	22 倍以上
疲労強度 (繰返し数: 2×10^7)	23MPa (不足)	46MPa 以上	2 倍以上
衝撃値	88 kJ/m ² (不足)	300 kJ/m ² 以上	3 倍以上

また、Al-40%Sn 合金の材料コストはホワイトメタルの約 50%であり材料としてのコスト低減は大きい。ホワイトメタル製軸受を高出力エンジンに用いた場合、軸受の交換頻度が多くなり、交換時に船舶が運航できないことも含めると、材料の安さと性能向上の相乗効果で Al-40%Sn 合金の軸受の使用はコストパフォーマンスが大きい。Al-40%Sn 合金板の製造においては、省工程・省エネおよび多品種少量と大量生産の両用が可能な異径双ロール鑄造法や半連続鑄造法の採用によりコスト低減を目指す。下の表に鑄造コストの目標値を合金板の代表的な鑄造法である横型連続鑄造法と比較して示す。

異径双ロール鑄造による低コスト化目標値		
比較項目	横型連続鑄造	異径双ロール鑄造
設備費 (横型連続鑄造を 100 とする)	100	38
生産性 (横型連続鑄造を 100 とする)	100	180
歩留り	72%	92%
板コスト (横型連続鑄造を 100 とする)	100	60

本研究開発においては上記目標を達成するために、以下の開発項目について個別目標を設定した。

【1】Al-40%Sn 合金板用鑄造の開発

【1-1】異径双ロール鑄造における最適鑄造条件の探索

ロール幅 100mm の実験用異径双ロール鑄造機を使用して、板厚 6mm で鑄巣と表面割れの無い板を製造するための最適条件を確立する。

【1-2】板幅 400mm 異径双ロール鑄造機の作製と鑄造条件の最適化

実生産用のロール幅 400mm の異径双ロール鑄造機を作製し、【1-1】で明らかにした条件を基にして板厚 6mm で鑄巣と表面割れの無い板の鑄造技術を確立する。目標は幅方向での厚みの変動を 5%以内、鑄巣面密度及び鑄巣寸法を 0.1 パーセント以下及び 5 μ m 以下とする。

【1-3】厚板半連続鑄造の最適条件の探索

板幅 100mm 用の実験機を使用して、ロールおよび冷却板の速度、凝固距離、成形荷重をパラメータとして、20mm の厚さで巣・鑄造割れの無い板を製造するための最適条件を求める。

【1-4】板幅 400mm 厚板半連続鑄造機の作製と鑄造条件の最適化

板幅 400mm 厚板半連続鑄造機を作製し、【1-3】で明らかにした最適条件を基にして板厚 20mm で鑄巣と表面割れの無い板の鑄造技術を確立する。

【1-5】クラッド材用異径双ロール鑄造機の最適鑄造条件の探索

ロール幅 100mm の実験機のクラッド材用異径双ロール鑄造機を使用して、ロール周速、凝固距離、成形荷重、ロール面の状態、注湯方法をパラメータとして、純 Al 板と Al-40%Sn 板のクラッド厚比が 1:5 となり、接合界面に空隙が無いクラッド材を鑄造できる条件を求める。

【1-6】板幅 400mm クラッド材用異径双ロール鑄造機の作製と板の鑄造

ロール幅 400mm クラッド材用異径双ロール鑄造機を作製し、【1-5】で明らかにした最適条件を基にして板幅 400mm でクラッド比が 1:5 になり、接合界面に空隙が無いクラッド材を鑄造技術を確立する。幅方向での厚みの変動が 5%以内に抑制する。

【2】クラッド条件の探索と生産用クラッド材製造装置の作製

【2-1】クラッド条件の探索

狭幅の板を用いて Al-40%Sn 板、純 Al 板、鋼板のクラッド化条件を探索する。その接合強度は 60MPa 以上とする。また、狭幅の板を用いて探索した非対称圧延条件(異速率、圧下率)をスケールアップし実機での製造に適用可能であるか検討を加える。

【2-2】クラッド用圧延機、接合用焼鈍炉、および鉄鋼板表面清浄装置の作製

板幅 400mm のクラッド材の製造が可能なクラッド用圧延機、接合用焼鈍炉、および鉄鋼板表面清浄装置(廃液処理装置、排ガス処理装置)の作製を行う。

【2-3】板幅 400mm のクラッド条件の探索

上記圧延機を使用して 400mm 幅板のクラッド化が可能な条件を明らかにする。

【3】軸受材成形機の作製と成形条件の探索

【3-1】軸受材成形機の作製

幅 400 mm用の軸受材成形機の作製を行う。

【3-2】軸受材成形条件の探索

上記成形機を使用して 400mm 幅の成形に必要なロール荷重、ロール間隔などの成形条件の最適化を行う。

【4】特性評価

【4-1】鑄片の特性調査評価

各種鑄造条件に対して組織、偏析、鑄巣の発生、クラッド材の接合界面状態のなどを調査する。

【4-2】鑄片の機械的性質の評価

各種鑄造条件と成形条件に対して引張強さ、耐摩耗性などの機械的性質を評価する。

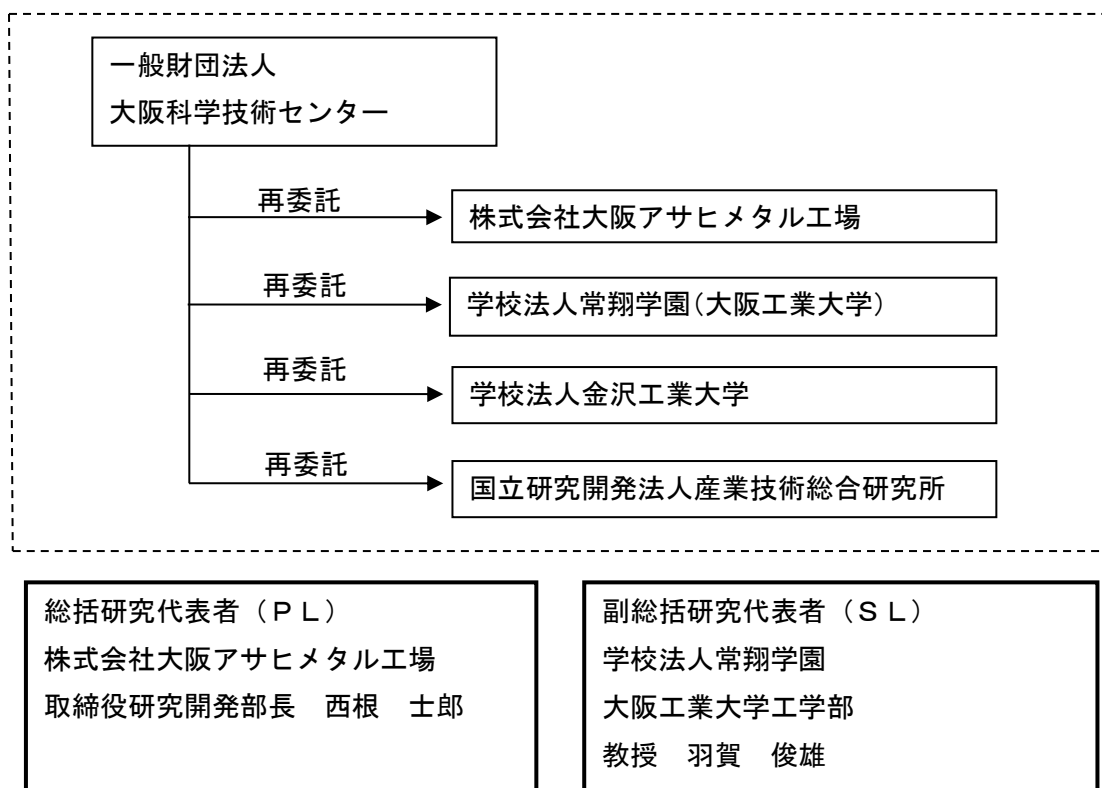
【4-3】表面検査装置の作製と軸受表面検査

軸受表面検査装置を作製し、軸受表面の鑄巣、偏析等の表面欠陥の有無の検査を行う。表面欠陥数は軸受あたり現状ホワイトメタル並みとする。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

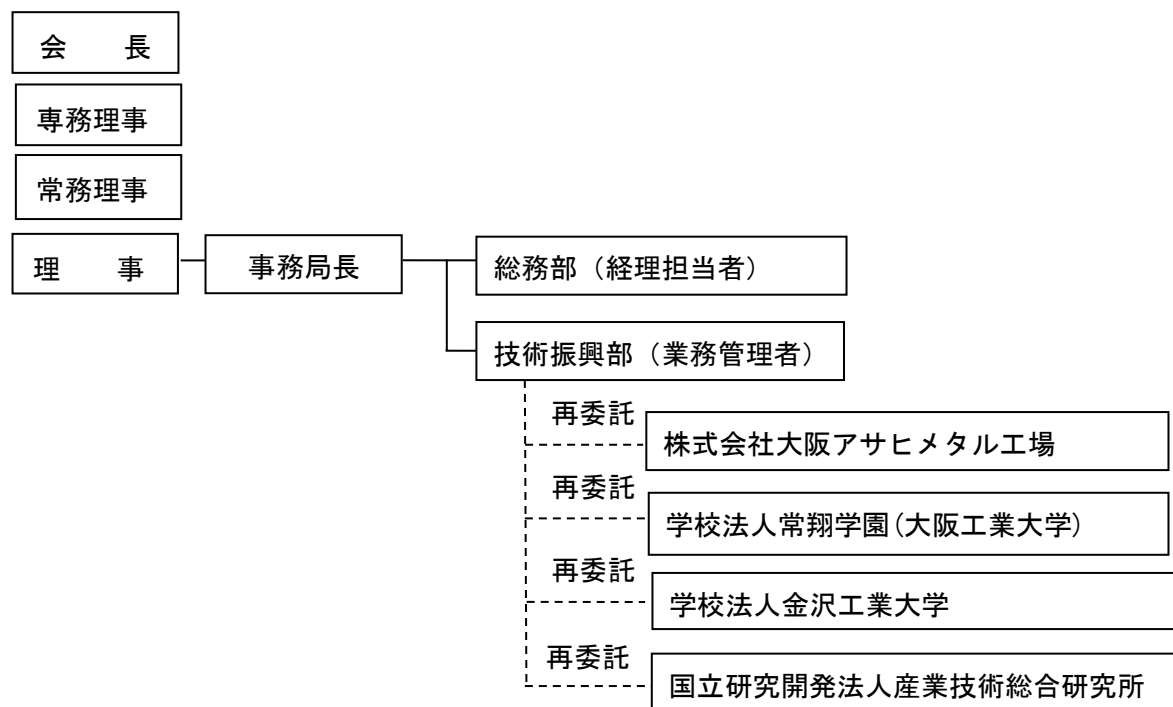
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

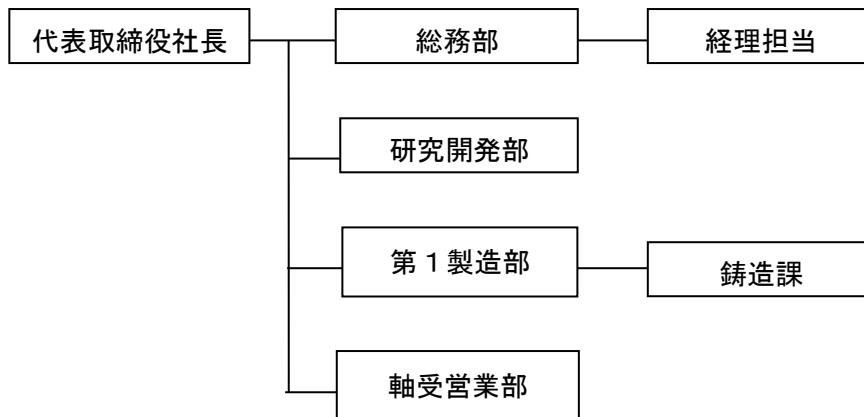
①事業管理機関

〔一般財団法人大阪科学技術センター〕

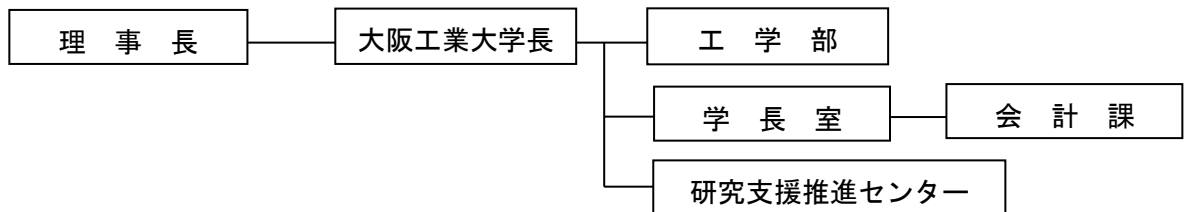


②(再委託先)

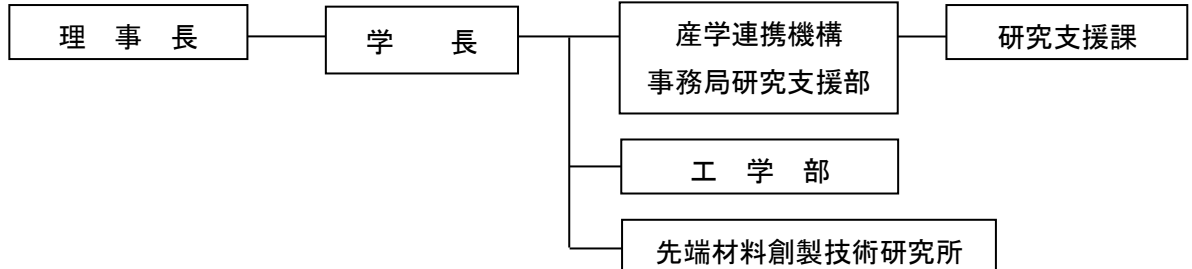
株式会社大阪アサヒメタル工場



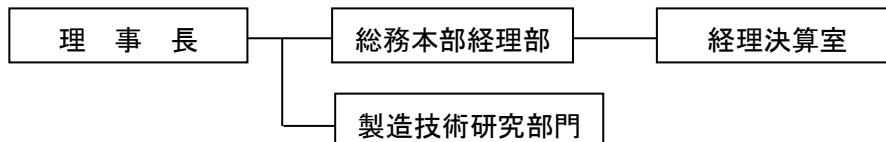
学校法人常翔学園



学校法人金沢工業大学



国立研究開発法人産業技術総合研究所



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】一般財団法人大阪科学技術センター

①管理員

氏 名	所属・役職	実施内容
小島 一哉	常務理事・技術振興部長	プロジェクトの管理・運営
川口 満	技術振興部 副部長	同上
森山 昌己	技術振興部 副部長	同上
中村 祐司	技術振興部 調査役	同上
本間 克己	技術振興部 調査役	同上
中山 幸子	技術振興部	同上

②研究員 なし

【再委託先】研究員のみ

株式会社大阪アサヒメタル工場

氏 名	所属・役職	実施内容
西根 士郎	取締役研究開発部長	【1-2】、【1-4】、【1-6】、【2-1】、【2-2】、 【2-3】、【3-1】、【3-2】、【4-2】、【4-3】
山崎 興志彦 南 勝宏	取締役第1製造部次長 研究開発部主任	【1-2】、【1-4】、【1-6】、 【2-1】、【2-2】、【2-3】、【3-1】、【3-2】、 【4-2】、【4-3】
下荒神 剛 小林 正明	第1製造部鑄造課長 軸受営業部課長	【1-2】、【1-4】、【1-6】、 【1-2】、【1-4】、【1-6】、

学校法人常翔学園

氏 名	所属・役職	実施内容
羽賀 俊雄	大阪工業大学工学部 教授	【1-1】、【1-3】、【1-4】、【1-5】、【1-6】

学校法人金沢工業大学

氏 名	所属・役職	実施内容
瀬川 明夫	工学部 准教授、 先端材料創製技術研究所研究員	【2-1】

国立研究開発法人産業技術総合研究所

氏 名	所属・役職	実施内容
松崎 邦男	製造技術研究部門 研究統括主幹	【4-1】

1-3 成果の概要

【1】Al-40%Sn 合金板用鑄造の開発

【1-1】異径双ロール鑄造における最適鑄造条件の探索

実生産に必要な基礎データである、ロール周速と板厚、凝固距離と板厚、ロール荷重と板厚、注湯温度と板厚等の関係を実験機より求め、生産機にフィードバックした。また表面欠陥の発生メカニズムを解明し、実証した。更に、鑄造板の表面割れの発生メカニズムを解明し、その対策として、ロール表面に溝を形成することで表面割れが防止できることを実証した。

【1-2】板幅 400mm 異径双ロール鑄造機の作製と鑄造条件の最適化

ロール幅 400mm の銅ロール製異径双ロール鑄造機を作製し、鑄造条件の最適化の実験を進めたが、実験回数の増加とともに銅製ロールが変形し、幅方向での厚みの分布を目標値以内にするのが困難となった。また、鑄造板の表面欠陥が後工程の圧延でクラックやキャンバーの発生要因となり、軸受用クラッド材の形成に用いることが困難であることが分かった。そのため、表面欠陥の解消を優先して実験を進めた。表面欠陥を波打ち、荷重割れ等 5 種類に分類し、その原因となるパラメータとしてロール荷重、ロール周速等 7 つの因子を取り上げ、鑄造の最適条件を追求した。その結果、一部凝固物の発生はあるものの、表面欠陥の少ない大面積鑄造板が得られた。但し、銅製ロールの変形によって、幅方向での厚みの変動は 10% 以上となり、鑄巣寸法も $5\mu\text{m}$ 以上と目標までに至らなかった。また、注湯の制御性と再現性を向上するために注湯装置を作製した。

【1-3】厚板半連続鑄造の最適条件の探索

板幅 100mm 厚さ 20mm 鑄造板用の厚板半連続鑄造実験機を作製し、それを用いて、鑄巣・鑄造割れない板を製造するための最適条件を求めた。この条件を【1-4】の板幅 400mm 厚板半連続鑄造開発に適用した。

【1-4】板幅 400mm 厚板半連続鑄造機の作製と鑄造条件の最適化

400mm 幅厚板半連続鑄造装置を大阪工業大学で作製し、その後、大阪アサヒメタル工場に移設して技術移管を行った。その結果、板厚 20mm、板幅 400mm、長さ 750mm の鑄造板を再現性よく作製することが可能となった。

【1-5】クラッド材用異径双ロール鑄造機の最適鑄造条件の探索

ロール幅 100mm の実験機のクラッド材用異径双ロール鑄造機を使用して、AlSn/Al クラッド厚比が 1:5 となり、且つ接合界面に空隙が無いクラッド材を鑄造できる条件を確立した。

【1-6】板幅 400mm クラッド材用異径双ロール鑄造機の作製と板の鑄造

大阪工業大学において板幅 400mm クラッド材用異径双ロール鑄造装置を作製し、それを用いて板幅 400mm の AlSn/Fe クラッド材を作製する鑄造技術を確立した。更に、 180° の曲げ試験により、クラッド界面の結合が強固であることを確認した。

【2】クラッド条件の探索と生産用クラッド材製造装置の作製

【2-1】クラッド条件の探索

クラッド材形成用鉄鋼板として、未焼鈍品と完全焼鈍品を用いたクラッド材形成条件の比較検討を行った。未焼鈍品を用いた場合、圧下率を大きくすることはできないが、形状の安定したクラッド材が再現性よくできることが分かった。完全焼鈍品を用いた場合には、圧下率を大きくとること

ができるが、現状では形状の安定したクラッド材が形成できにくく、製造条件の再検討が必要であることがわかった。完全焼鈍品を用いた Al/Fe クラッド材の接合強度は最大 60Mpa で目標値に到達したが、再現性に乏しく、接合界面の解析と、接合時の更なる圧下率の向上の検討が必要であることが分かった。

【2-2】クラッド用圧延機、接合用焼鈍炉、および鉄鋼板表面清浄装置の作製

クラッド用圧延機および接合用焼鈍炉の仕様決定が完了したので、今後その作製と設置場所の探索を進める。鉄鋼板表面清浄装置の構成装置である鉄鋼板エッチング装置、廃液処理装置、および排ガス処理装置を作製・設置した。この結果、鉄鋼板表面清浄化システムはほぼ完成した。今後、エッチング後の鉄鋼板表面乾燥方法として現在のエアガンによる乾燥から、温風乾燥方式による時間短縮、大型化を検討していく。

【2-3】板幅 400mm のクラッド条件の探索

圧延機と焼鈍炉の作製を進め、クラッド材の作製技術を開発していく。

【3】軸受材成形機の作製と成形条件の探索

【3-1】軸受材成形機の作製

計画通りに作製した、鉄鋼板の曲げ加工を行い、加工条件のデータを蓄積した。

【3-2】軸受材成形条件の探索

クラッド材の作製を進め、軸受材成形技術を開発していく。

【4】特性評価

【4-1】鋳片の特性調査評価

X線回折、走査電子顕微鏡等を用いて、AlSn 鋳片の圧延および焼鈍による組織の変化を観察し、組織の微細化を解析した。

【4-2】鋳片の機械的性質の評価

AlSn 合金板の圧延・焼鈍による組織の微細化と機械的性質について以下の知見が得られた。つまり、圧延によって組織の微細化が進み、引張強度と硬度が上昇すること、焼鈍によって引張強度と硬度が減少し、伸びが上昇することが分かった。今後、接合強度を満足する AlSn/Al/Fe クラッド材が作製し、軸受としての耐久試験、疲労試験等を実施していく。

【4-3】表面検査装置の作製と軸受表面検査

軸受表面検査装置を作製し、AlSn 合金内部の組織観察および解析に活用した。また、鋳造板内の鋳巣の寸法と面密度計測、および分布観察に活用した。今後、軸受表面検査に活用していく。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目8番4号

一般財団法人 大阪科学技術センター

技術振興部 TEL: 06-6443-5322 FAX: 06-6443-5319

森山 昌己 Email: moriyama@ostec.or.jp

本間 克己 Email: honma@ostec.or.jp

第2章 本論

2-1 Al-40%Sn 合金板用鑄造の開発

【1-1】異径双ロール鑄造における最適鑄造条件の探索

図1に模式図で示す異径双ロールキャストを用いて鑄造板の板厚と操作パラメータであるロール周速、凝固距離、ロール荷重、注湯温度との関係を調査した。その結果、板厚のロール周速、凝固距離、ロール荷重による依存性は表1のようになることが分かった。

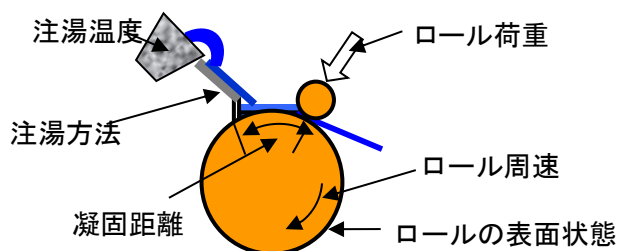


図1 異径双ロール鑄造機の鑄造板製造要因

表1 板厚の操作パラメータ依存性

パラメータ	条件	板厚
ロール周速	凝固距離一定	周速大で板厚小
凝固距離	ロール周速一定	凝固距離大で板厚大
ロール荷重	ロール周速一定 凝固距離一定	低荷重領域で 荷重大で板厚小 高荷重領域で 板厚一定、荷重に依存しない

また、表面欠陥の発生メカニズムを解明し、実証した。つまり、板の下面で発生する欠陥はロール周速を上げることで、上面で発生する欠陥はノズルを設置することで、表面欠陥の削減に効果があることを実証した。鑄造板の表面割れの発生メカニズムを解明し、その対策として、ロール表面に溝を形成することで表面割れが防止できることを実証した。さらに、ロールの材質を鋼から銅に変えることによって鑄造板内に介在する鑄巢の大きさおよび密度が減少することを確認した。

【1-2】板幅 400mm 異径双ロール鑄造機の作製と鑄造条件の最適化

図2に示すように銅製ロールを採用した板幅 400mm 異径双ロール鑄造機を作製し、鑄造条件を最適化することによって鑄巢の寸法とその面密度が減少することを確認した。鑄造の面密度は1%以下、鑄巢の寸法はほぼ $10\mu\text{m}$ 以下



図2 銅ロール製異径双ロール鑄造機

(上ロールのみ撮影されており、下ロールは鑄造板に隠れている。)

であったが、一方で $100\mu\text{m}$ 以上のものも散見された。また、鑄造実験の回数を重ねる毎に、銅製ロールが変形し、鑄造板の幅方向での厚みの分布が当初の6%から10%以上に拡大し、ロール材質の変更が必要となった。しかし、後工程の圧延および接合において、鑄造板の表面欠陥が破断、キャンバー等の不良の発生原因となるため、ロール改造の前に表面欠陥の解消を優先して実験を進めた。表面欠陥を波打ち、荷重割れ等5種類に分類し、その原因となるパラメータ

表2 異径双ロール鑄造の最適条件

ロール荷重	20kN 以下
ロール周速	25m/min 以上
凝固距離	220mm
注湯温度	625℃

としてロール荷重、ロール周速等を取り上げ、鑄造の最適条件を追求した。その結果を表 2 に示す。

さらに、注湯の制御性を向上させる目的で図 3 に示す注湯装置を作製した。その結果、図 4 に示すように一部凝固物が存在するが表面欠陥の少ない板厚 6mm の鑄造板が作製できることが分かった。

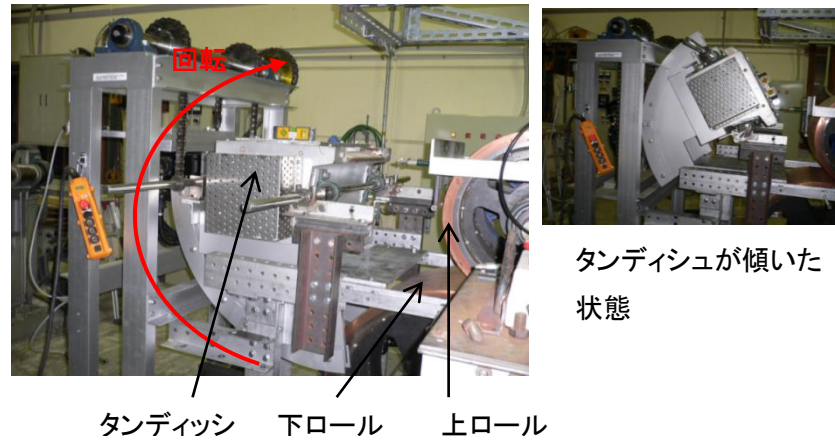


図 3 注湯装置

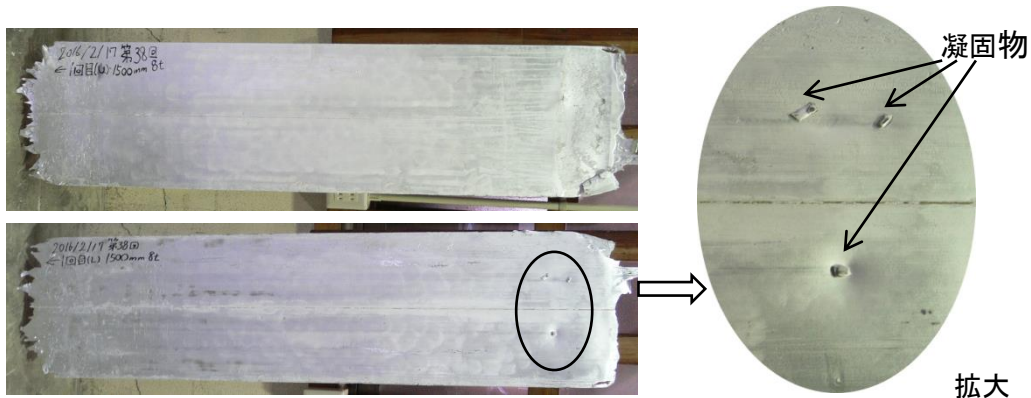


図 4 注湯装置を用いて作成した厚さ 8mm の AlSn 合金鑄造板(上:表面、下裏面)

【1-3】厚板半連続鑄造の最適条件の探索

厚さが 10～25mm 程度の板を鑄造するために、厚板半連続鑄造機を設計試作した。その模式図を図 5 に示す。幅 100 mm、長さ 1000 mm で厚さが 10～25mm の板を、1～2m/min で鑄造する仕様とした。Al-40% Sn 合金は、高圧鑄造や溶湯鍛造

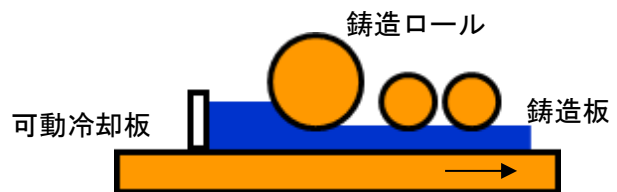


図 5 厚板版連続鑄造装置の模式図

では共晶部が押し出されて偏析が発生することが知られており、ロール荷重を大きくすることはできないと判断し、単位幅当たりの荷重を 0.5kN/mm に設定した。この条件において巣に対する鑄造速度の影響を調査した。鑄造速度は、1～3m/min の範囲では表面状態に顕著な差異がなかった。各速度で鑄造した板の断面組織を図 6 に示す。鑄巣が占める割合は、鑄造速度が 1m/min から 2m/min になると増加するが、3m/min になると急激に小さくなった。鑄造速度が速い場合、つまり、固相率が低く鑄巣が発生する前にロールによって圧下を受けて凝固が完了すると鑄巣が少なくなると考えられる。

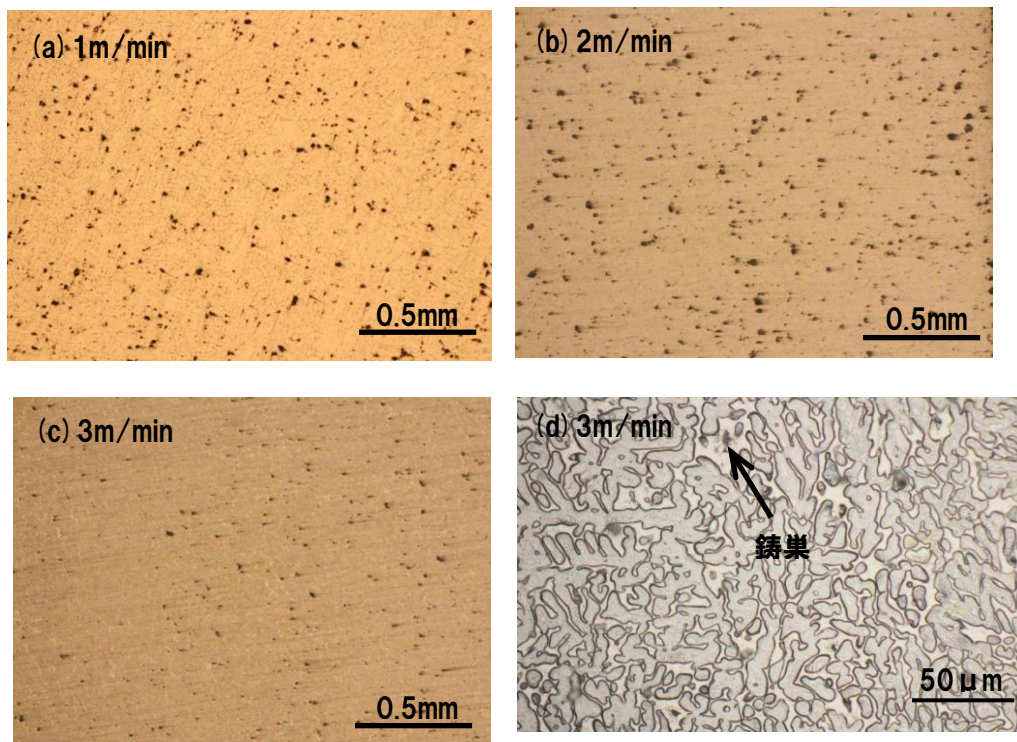


図 6 鑄造板の断面. 黒い点は鑄巣

【1-4】板幅 400mm 厚板半連続鑄造機の作製と鑄造条件の最適化

図 7 に幅 400mm 板の作製用の半連続鑄造機の写真、図 8 に模式図を示す。銅合金製のロールと移動鑄型から構成されている。移動鑄型が長いほど長い板を鑄造することができる。板厚は、ロールと移動鑄型の間隔と鑄型の移動速度によって調節する。



図 7 幅 400mm 板作製用半連続鑄造機の写真

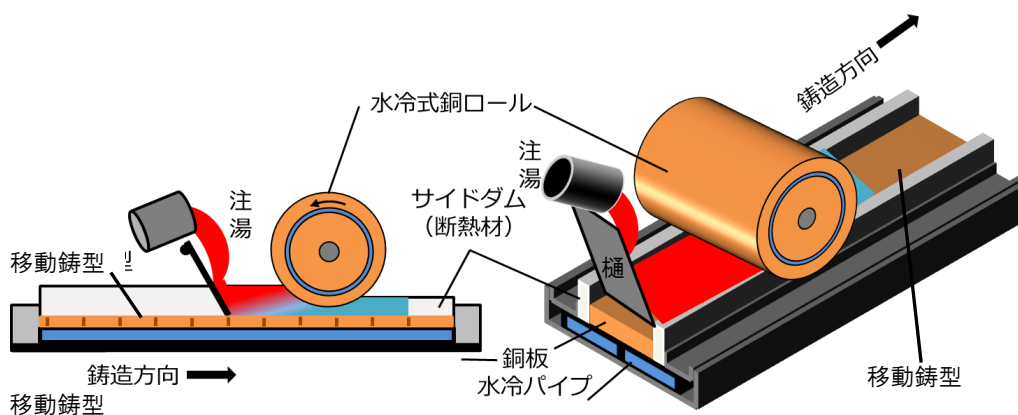


図 8 幅 400mm 板作製用半連続鑄造機の模式図

図 9 は、板の表面状態を改善するために取り付けけた浸漬プレートを示す。大気からの冷却により表面が温度低下して半凝固状態になったものは、板の表面の欠陥になる。板の下面には、ロールや移動金型を使用した時に発生する欠陥としてリップルマークがある。浸漬プレートは、リップルマークを改善するために新たに開発した。浸漬プレートは、アルミニウム合金用の断熱シートや断熱板で作製することができる。

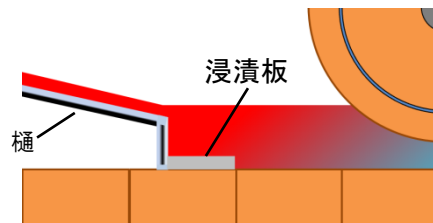


図 9 板の表面の改善のために
取り付けけた浸漬板

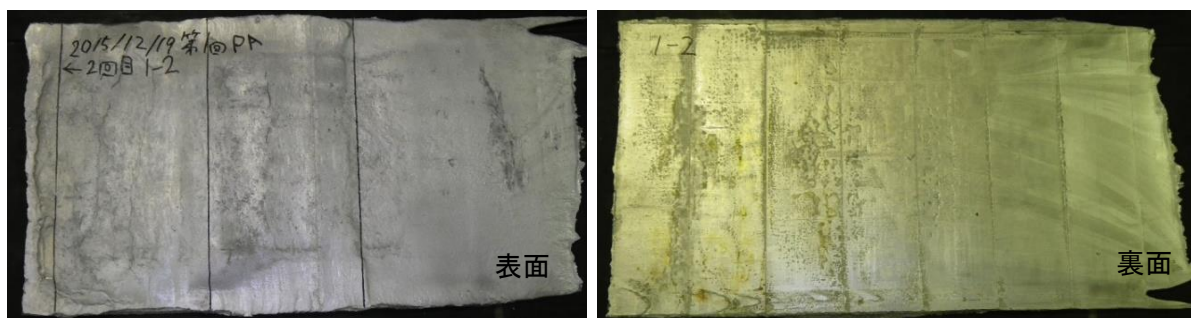


図 10 厚板半連続鋳造装置で作成した AlSn 合金鋳造板

条件:注湯量 15kg、注湯温度 658℃、ロール周速 2.0m/min、
ロールギャップ 20mm、ロール荷重 10kN、凝固距離 175mm

大阪工業大学所有の厚板半連続鋳造装置を大阪アサヒメタル工場に移設し、鋳造技術の移転を行った。技術移転中に作成した鋳造板の一例を図 10 に示す。厚さ 20mm、幅 400mm、長さ 750mm 程度の表面クラックが観察されない鋳造板が得られた。尚、本装置による鋳造、特に注湯は手作業で行っているため、注湯機の製作等省力化の検討を行っている。

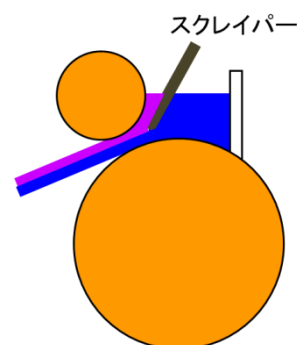


図 11 クラッド材作製用
異径双ロールキャストの模式図

【1-5】クラッド材用異径双ロール鋳造機の最適鋳造条件の探索

板幅 100mm クラッド材作製用の異径双ロールキャストの模式図を図 11 に示す。クラッド材の作製に対するロール周速とロール荷重の影響について調査した。

ロール周速が 10m/min の場合は連続的な板の鋳造には不適切であったが、ロール周速が 20m/min と 30m/min の場合は、連続的にクラッド材の作製が可能であった。クラッド材の接合は、ロール周速に依存せず、0.05~0.2kN/mm のロール荷重において可能であった。作製した Al-40%Sn の表面にはクラックは発生しておらず、単層の Al-40%Sn の板の表面状態と差異は無かった。図 12 に板の断面を示す。接合界面は明瞭であり、クラックも存在しない。よって提案した方法により Al-40%Sn 合金と Al (品種 A1050) のクラッド材の作製が可能であることが明らかになった。

Al-40%Sn

A1050

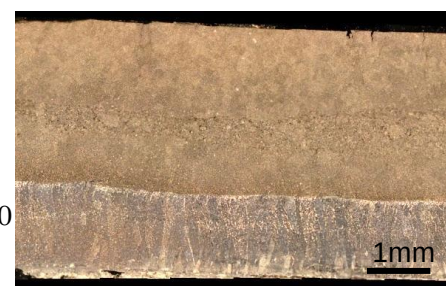


図 12 クラッド材の断面

ロール周速 30m/min、単位幅ロール荷重
0.1kN/mm、単位幅スクレイパー荷重 0.1N/mm。

【1-6】板幅 400mm クラッド材用異径双ロール鑄造機の作製と板の鑄造

図 13 には 400mm 幅の2層クラッド材作製の異径双ロールキャストの模式図を、図 14 にはその写真を示す。スクレイパーは、2種類の合金の混合を防ぐとともに、A1050 の接合面を接合が可能であり、他方の合金へ元素の拡散を防げる程度の半凝固状態の固相率にすることが可能である。スクレイパーが最も重要な部位である。スクレイパーは定荷重により圧下され、先端の位置は板厚により可動する。

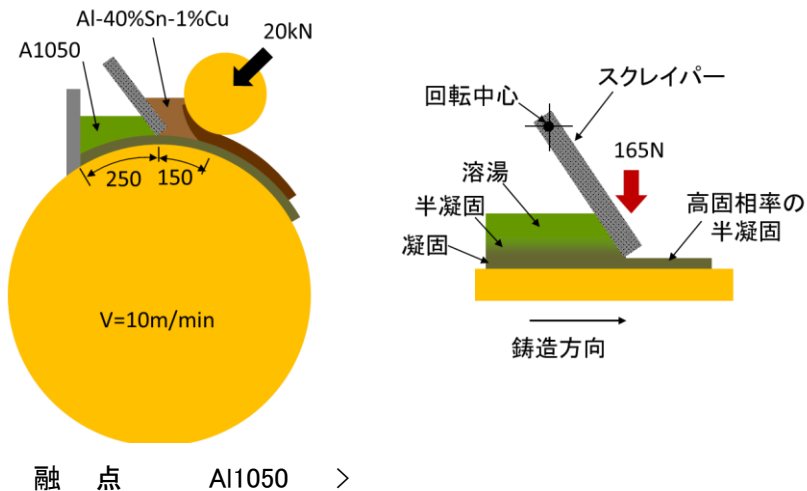


図 13 クラッド材作製用異径双ロールキャストの模式図



図 14 クラッド材作製用異径双ロールキャストの写真

図 15 には、鑄造したままのクラッド材の断面、線分析の結果、180° 曲げの断面を示す。断面より2層のクラッド材であること、X線分析より、Al-40%Sn-1%Cuに含まれているSnは、A1050に拡散していないことが明らかとなった。また、スクレイパーには、目標としている能力があることが判明した。180° 曲げを行っても、Al-40%Sn-1%CuとA1050は剥離せず、強固に接合していると考えられる。

さらに、冷間圧延を行っても Al-40%Sn-1%Cu と A1050 との剥離はなく、接合界面の乱れもなかった。冷間圧延後の表面状態、特に Al-40%Sn-1%Cu は表面の凹凸が平坦になっただけでなく、溶湯とロールの接触状態(ぬれ性)の不均一が原因で発生したと考えられる模様も改善されていることが分かった。また、エッジのクラックも微細であり、冷間圧延を行っても問題ないことが分かった。

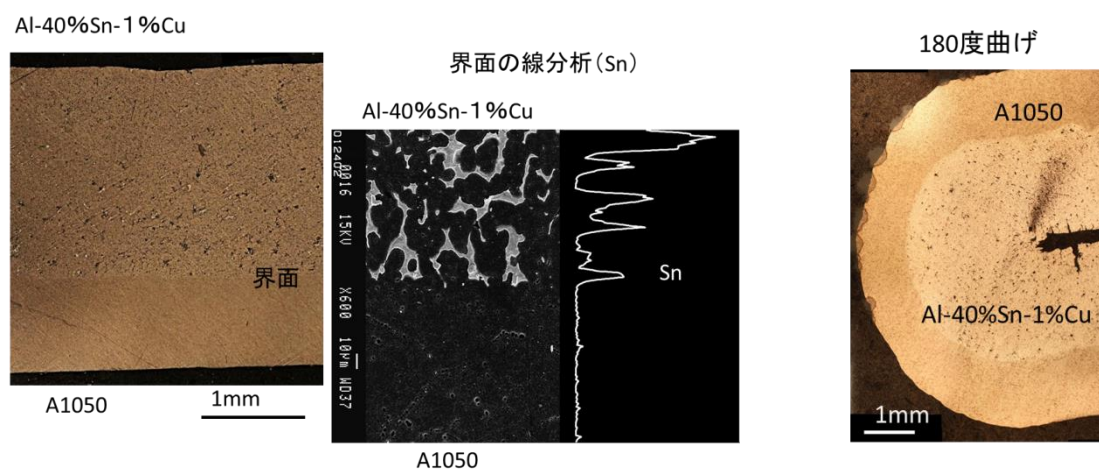


図 15 鑄造したままのクラッド材の断面、界面の線分析、180° 曲げ後の断面

2-2 クラッド条件の探索と生産用クラッド材製造装置の作製

【2-1】クラッド条件の探索

圧延接合によるクラッド材の形成においては、Al-40%Sn 板あるいは純 Al 板に後方張力をかけて鋼板を圧延接合することで、キャンバー(横ずれ)もなく再現性よく接合できることが判明した。この方法を用いて、圧延接合条件を種々変えて変形抵抗、摩擦係数等のデータを蓄積し、キャンバーと後方張力との関係を明確にした。また、クラッド材製造条件の探索は、A 案と B 案の 2 種類の製造工程について検討した。

A 案: Fe (品種 SS400) と Al (品種 A1050P) を圧延接合し、焼鈍、その後、Al-40%Sn 合金をその上に圧延接合させ、焼鈍する手法

B 案: 完全焼き鈍し処理を施した SS400 と焼き鈍し処理した Al-40%Sn 合金を圧延接合し、焼鈍する手法

図 16 に A 案と B 案のクラッド材製造の流れを模式的に示す。A 案の製造工程は Fe が 2 回の圧延工程を経るのが特徴で、界面での剪断応力による滑りを重視している。一方、B 案では完全焼鈍した Fe を採用し、圧延による供試材の新生面出現割合が増加することを重視している。



図 16 A 案と B 案の製造の流れ

A案とB案について一次圧延と二次圧延各々の最適条件を接合状態と形状より確立した。その結果を表3に示す。B案はA案と比較して、加熱温度が低く、圧下率が高いことが特徴である。

表3 A案とB案の圧延最適条件

		周速比	加熱温度(°C)	加熱時間(min)	圧下率(%)	後方張力(MPa)
A 案	一次圧延	1.3	420	45	20	13
	二次圧延	1.44	220	45	25	3.5～4.0
B 案	一次圧延	1.0	225	30	50	20
	二次圧延	1.3	225	30	30～35	2.1

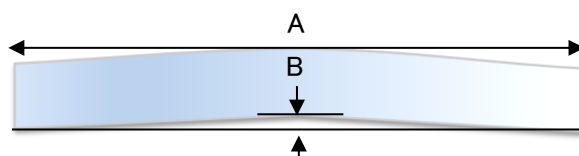


図17 キャンバー率の定義(クラッド材を上から見た図)
 キャンバー率=B/A、A:クラッド材の長さ、B:キャンバー量

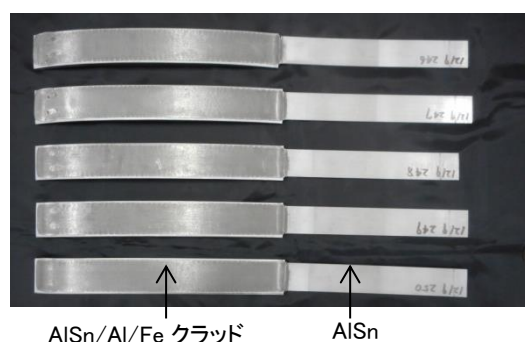


図18 A案で作製したAl-40%Sn合金
 /Al/Fe クラッド材



図19 B案で作製したAl/Fe クラッド材

図17にキャンバー率の定義を示す。キャンバー率はクラッド材の幅が小さくなるほどキャンバー率が大きくなることが分かった。各案で作製したクラッド材の写真を図18と図19に示す。各写真の左の部分はクラッド材で、右の部分はAlSn合金またはAlである。B案で作製したクラッド材はA案と比較してキャンバー率が大きく、形状が安定しないことが分かる。但し、B案におけるFeにAlクラッド接合する時の変形抵抗が、A案におけるFeにAlSn/Alを接合する時のそれと比較して約1/2であることが分かった。これは図19のクラッド材の長さが図18のそれと比較して1.5倍以上であることと対応している。

図19にB案によって作製したAlSn/Al/Fe 3層クラッドとAlSn/Fe 2層クラッドの断面写真を示す。AlとFe、AlSnとFeの界面には凹凸が見られるが、これはクラッドを形成する前にFeの表面を3%HNO₃でエッチングして形成されたものである。

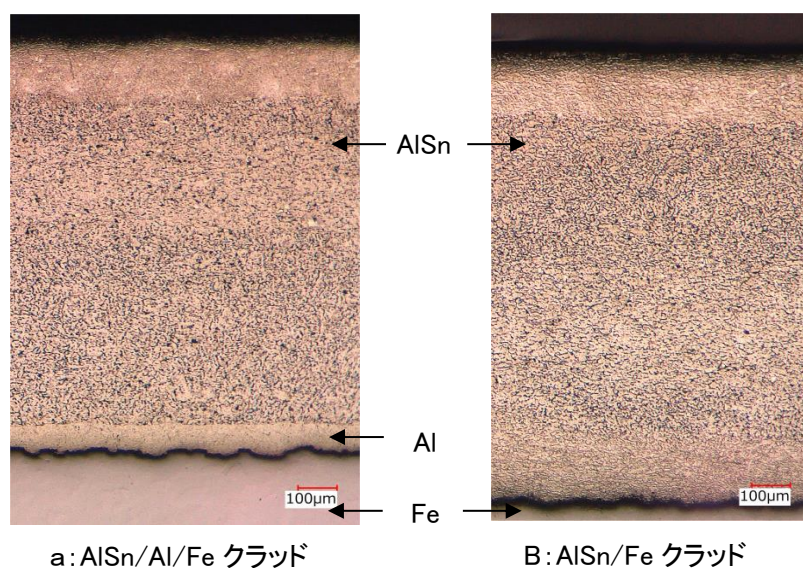


図 19 AlSn/Al/Fe 3 層および AlSn/Fe 2 層クラッド材の断面写真
(設定圧下率：30%、AlSn 合金の圧下率：52%、Fe の圧下率：12%)

表 4 に B 案で作製した各種クラッド材の接合強度を示す。圧延接合は 180℃、5 分加熱後、圧下率 35% で行った。但し、B-2 は加熱をせずに行った。圧接後の実質圧下率 35%での Al 層および Fe 層の実質圧下率はそれぞれ 54%、および 18%であった。接合強度は、圧接前に加熱すること、および、圧接後の熱処理温度を上げることで増加することが分かった。前者の加熱は、接合前の各素材の表面の水分除去と接合温度の上昇による結合の促進、または変形抵抗の減少による新生面の増加によるものと考えられる。後者の加熱は Fe 原子の Al 層への拡散の増加によるものと考えられる。拡散長を計算すると後者の加熱で 9 倍も大きくなっている。また、AlSn 層表面には Al 原子が約 80%露出しているため、少なくとも AlSn/Fe2層クラッドも接合強度は Al/Fe2層クラッドのその 80%程度あるものと考えられる。試料番号 98a と 126 とを比較するとその差はほとんど無く、クラッド界面の結合が十分でないためと考えられる。詳細な界面の検証が必要である。また、目標値の 60MPa に到達していないことは、各層の接合界面状態、酸化物層の厚み等の調査、および圧延接合時の圧下率の向上が必要と考えられる。

表 4 クラッド材の接合強度

クラッド 構造	試料 番号	熱処理条件 温度, 時間	接合強度 (MPa)	拡散長(注 1) (μ m)
Al/Fe	B-2	215℃, 72hrs	12～43	0.2
Al/Fe	98a	215℃, 72hrs	31～50	0.2
Al/Fe	98b	215℃, 72hrs + 350℃, 3.5hrs	43～60	1.8
AlSn/Fe	126	215℃, 72hrs	41～47	

注 1: Al 層への Fe の拡散を示す

【2-2】クラッド用圧延機、接合用焼鈍炉、および鉄鋼板表面清浄装置の作製
クラッド材の製造工程と設備を図 20 に示す。

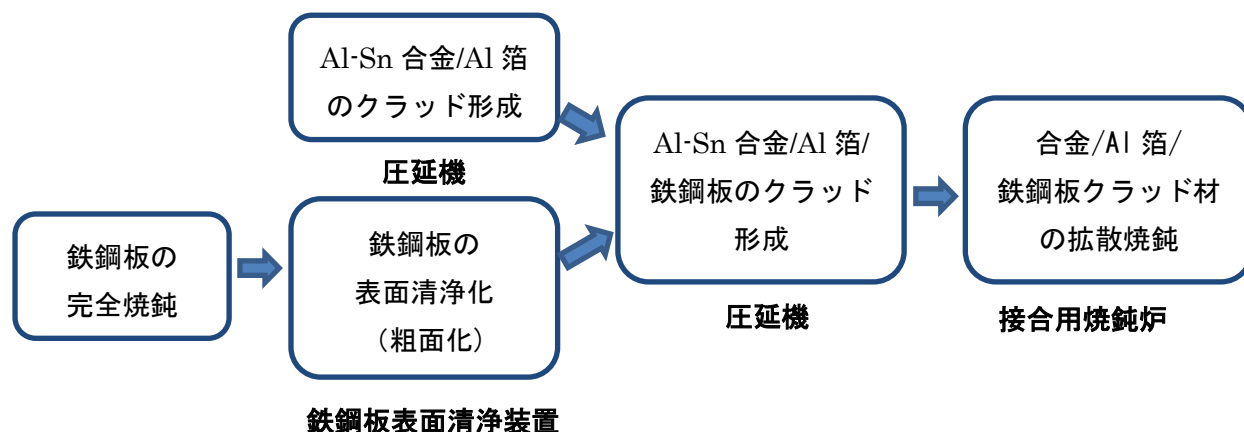


図 20 クラッド材の作製工程と設備

この中で、圧延機は設備価格が高く、かつ、重量も大きい耐荷重の大きい工場が必要である。図 21 に接合用圧延機の概略を、表 5 にその仕様を示す。B 案の仕様では荷重、モータ主力が A 案のそれらの約 1/2 であり、設備コストの削減となる。

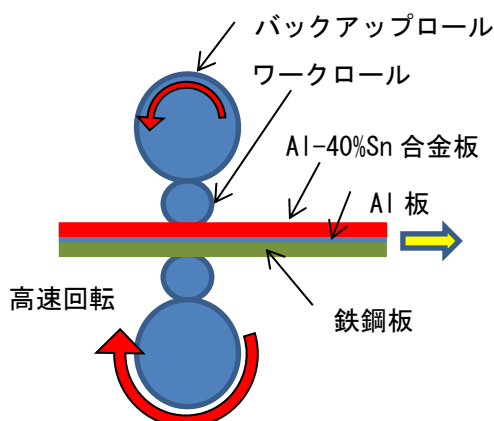


図 21 接合圧延機の概略

焼鈍炉については電気加熱方式の仕様を検討した。圧延機と焼鈍炉は同じ場所に設置した方が圧延接合後直ちに焼鈍ができるため、両者を隣接して設置する土地・工場が必要となる。本社工場近辺での空き工場の探索を行ったが、見つめることができなかった。さらに対象場所を広げて探索する予定である。

鉄鋼板表面清浄化装置の概念図を図 22 に示す。エッチング

表 5 圧延機の主な仕様

	A 案	B 案
ワークロール径	260mm	260mm
バックアップロール径	865mm	712mm
最大荷重	15,800kN	7,200kN
圧延可能鉄鋼板厚さ	20mm	27mm
圧延可能鉄鋼板幅	650mm	650mm
低速側モータ出力	250kW	140kW
高速側モータ出力	500kW	280kW

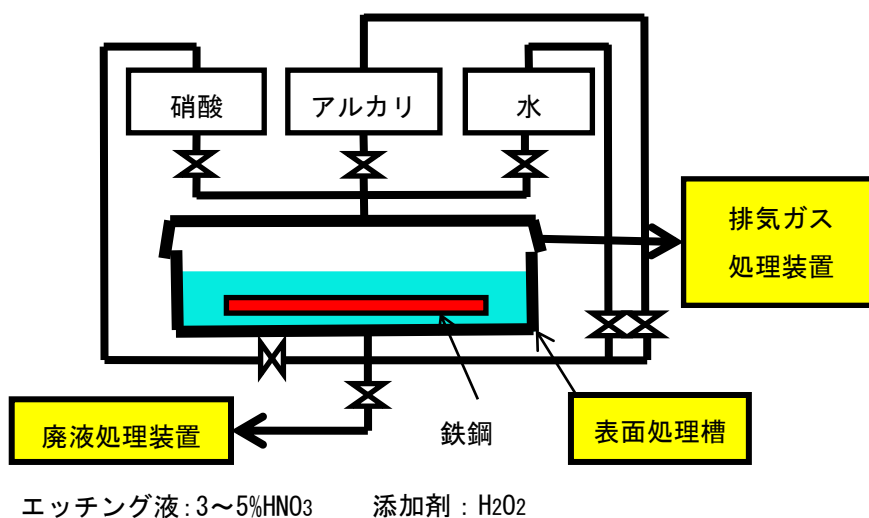


図 22 鉄鋼板表面清浄化装置の概念図

は H_2O_2 を添加した数%の HNO_3 水溶液であり、エッチング後は順に水洗、アルカリ洗浄、水洗を行って乾燥する。乾燥はエアガン方式で行っているが、量産時には温風乾燥方式を採用する計画である。

平成 26 年度と 27 年度に廃液処理装置、鉄鋼板エッチング装置、および排ガス処理装置を作製した。それらの装置の写真を図 23 と図 24 に示す。鉄鋼板表面清浄化装置の構成設備すべて揃ったので鉄鋼板表面清浄化の技術開発を開始した。今後、エッチング後の鉄鋼板表面乾燥方法として現在のエアガンによる乾燥から、温風乾燥方式による時間短縮、大型化を検討していく。



制御装置 エッチング槽

図 23 鉄鋼板エッチング装置



廃液処理装置 排ガス処理装置

図 24 廃液処理装置と排ガス処理装置

【2-3】板幅 400mm のクラッド条件の探索

平成 27 度中に圧延機と焼鈍炉の作製ができず、板幅 400mm のクラッド条件の探索には至っていない。今後、圧延機と焼鈍炉の作製を進め、クラッド材の作製技術を開発していく。

2-3 軸受材成形機の作製と成形条件の探索

【3-1】軸受材成形機の作製

平成 26 年度に軸受形成機を作製した。その外観写真とそれを用いて曲げ加工した鋼板を図 25 に示す。



図 25 軸受材成形機(左)と曲げ加工した鉄鋼板(右)

【3-2】軸受材成形条件の探索

軸受形成機を 25 年度に作製したが、船用軸受の素

材となる幅広のクラッド材が作製できないため、鉄鋼板のみで軸受形成条件の探索を実施した。今後、クラッド材の作製を進め、本条件を基礎にして軸受材成形技術を開発していく。

2-4 特性評価

【4-1】 鋳片の特性調査評価

種々の鋳造条件に対して組織、偏析、鑄巣の発生、クラッド材の接合界面状態などを調査するために、鋳片の熱処理、圧延にともなう組織等の観察を行った。また、密度の評価を行い、以下の結果が得られた。

①組織

図 26 は熱処理に伴う X 線回折図形の変化を示している。鋳造材は Al と Sn から構成され、Al は 111 のピークが最も大ききことがわかる。300℃まで熱処理を行った場合、構成相およびピーク強度に変化は見られないこと分かる。図 27 は各温度で熱処理した試料の SEM 組織を示している。白い部分が Sn であり、Al の粒の周りに存在している。熱処理により Al の大きさに変化はもられない。一方で、Sn は 180℃までは変化は見られないが、Sn の融点以上である 220℃では Sn が表面で微小な球状になっているのが見られた。

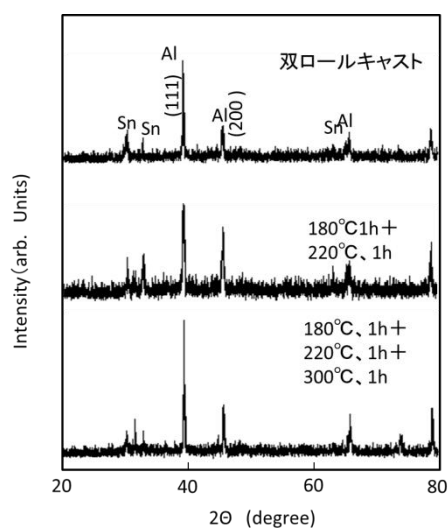


図 26 双ロール鋳造した試料の熱処理による X 線回折図形の変化

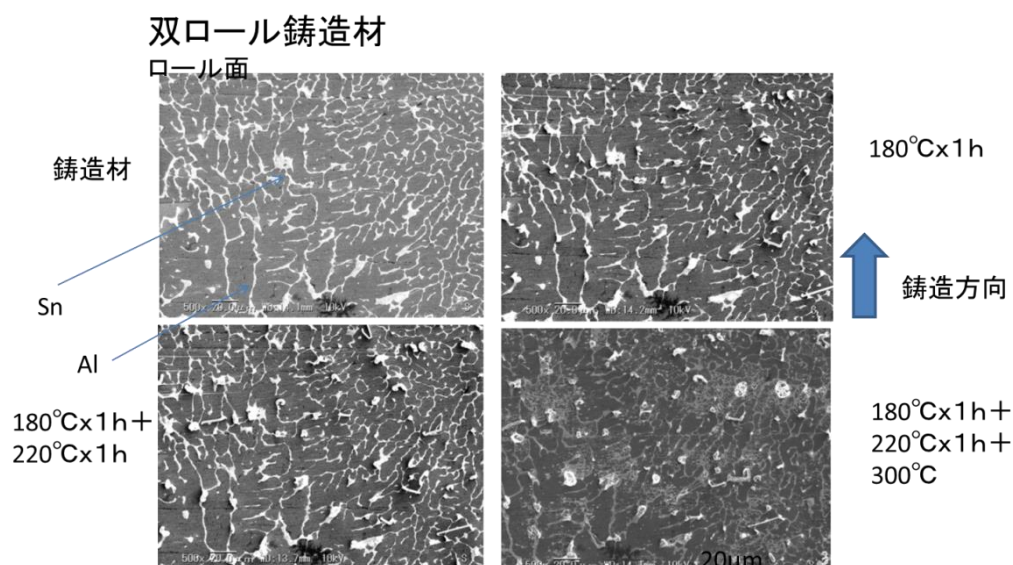


図 27 双ロール鋳造した試料の熱処理後のロール面の SEM 組織

圧延した場合には、X 回折図形からは、板厚の減少に伴い、Al の 200 面のピーク強度が増大し、わずかには配向化の傾向が見られる。一方で Sn にピーク強度に関しては圧延による変化はみられなかった。図 28 は各厚さまで圧延した試料の SEM 組織を示している。圧延前の試料のロール面近傍では、Sn が内部に向かって凝固しているのがみられる。また、表面近傍では、Sn は内部よりも微細な組織を示していた。3 mmまで圧延した試料でも圧延前とほぼ同じような組織を示しているが、1 mmまで圧延した試料では、ロール面近傍、内部とも Sn が圧延方向に延ばされた組織となっているのが分かった。

②密度

双ロール鑄造した試料の密度は、 3.56g/cm^3 であり、 220°C までに熱処理によって大きな変化は見られなかったが、 300°C で熱処理した場合には 3.45g/cm^3 に低下した。これは、Sn に溶融にともない、試料から溶け出したことに起因している。圧延した試料で、板厚の減少に伴い、密度は増加し、1 mm では 3.66g/cm^3 に増加しており、緻密化が生じていることが分かった。

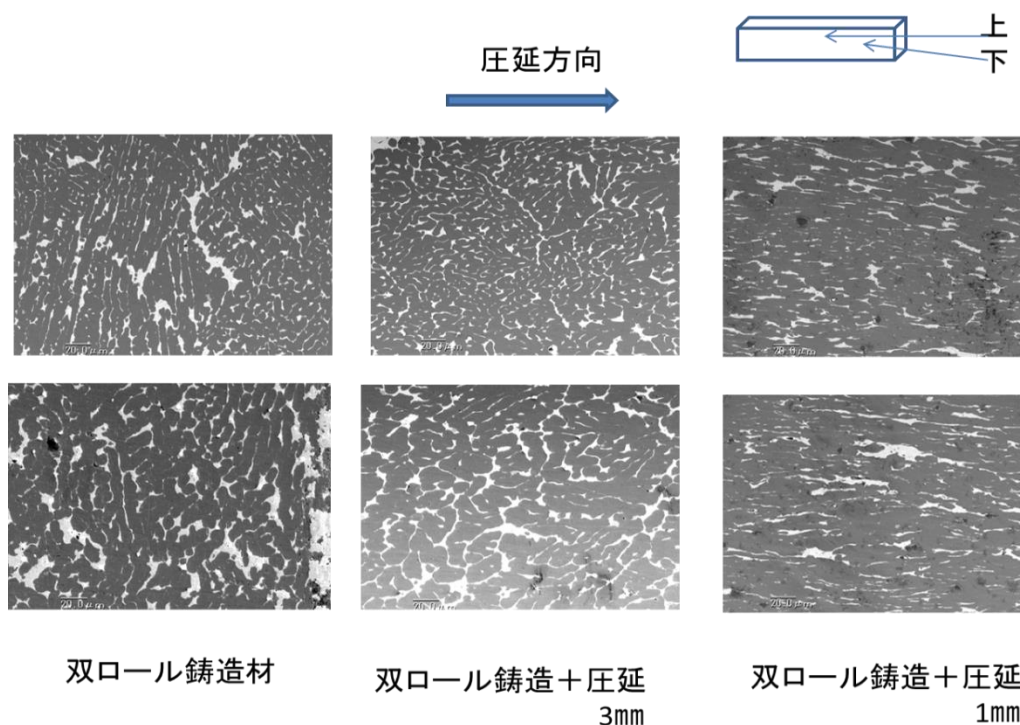


図 28 双ロール鑄造した試料の圧延に伴う組織の変化

③硬さ

双ロール鑄造した試料のビッカース硬度は 36 であり、熱処理を行っても大きな差異は見られなかった。圧延した場合には、板厚の減少に伴い、硬さは増加し、1 mm で HV51 が得られた。加工硬化により増加したと考えられる。さらに、圧延後、熱処理した場合には、 220°C までの熱処理では硬さはわずかに減少するが、 300°C では HV35 まで減少することが分かった。

④熱間圧延による組織

X 線回折図形より熱間圧延した試料でも Al の 200 面の強度が増加していることが分かった。また、Sn ではピーク強度の変化は見られなかった。各温度で圧延した試料の SEM 組織より、圧延方向に Sn が伸びた組織を示しており、熱間圧延により組織が大きく変化することはないことが分かった。

【4-2】鑄片の機械的性質の評価

表 6 に厚板半連続鑄造装置で作成した AlSn 合金板の圧延および焼鈍による機械的性質の変化を示す。試料は下記の工程の処理を行ったもので、各々 2 個について測定した。

PA1: 鑄造品を圧下率 52%で圧延した試料

PA2: PA1 を 200°C 、12 時間焼鈍した試料

PA3: PA2 を圧下率 50%で圧延した試料(全圧下率は 76%)

PA4: PA3 を 200°C 、12 時間焼鈍した試料

表 6 AlSn 合金の圧延・焼鈍による機械的性質の変化

試料 No.		引張強さ(MPa)	伸び(%)	硬度 Hv
PA1	-1	156	4	48
	-2	157	5	49
PA2	-1	135	9	44
	-2	137 (注 1)	3 (注 2)	45
PA3	-1	168	5	47
	-2	167	5	45
PA4	-1	146	7	44
	-2	150	8	45

注 1:破断位置が C のため、試験力を平行部の断面積で除して応力値を算出

注 2:破断位置が C のため、つば間の伸びを記載

表 6 より、圧延によって引張強さと硬度が増加し、伸びが減少すること、焼鈍によってこの現象が反転する、つまり、引張強度と硬度の減少、伸びの増加があることが分かった。

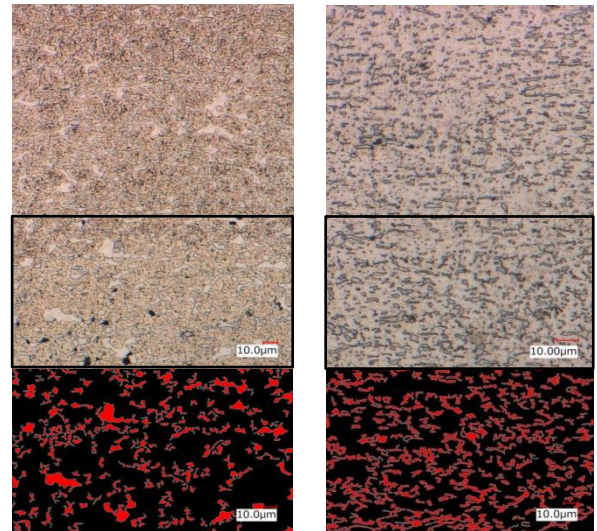
図 29 に、異径双ロール鋳造装置によって作成し、その後圧延した AlSn 合金の組織を示す。圧延の圧下率を高めると組織の微細化が進行することが分かった。

【4-3】表面検査装置の作製と軸受表面検査

平成 26 年度に作製した軸受表面検査装置(図 30 を用いて、鋳巣の寸法、面密度の測定、鉄鋼板エッチング表面の凹凸の観察と計測、AlSn 合金の組織観察と二値化による Sn の分布観察、クラッド材接合界面の凹凸の計測等に活用した。軸受作製後、本装置の更なる活用を図る。



図 30 表面検査装置



a: 圧下率 71%

b: 圧下率 80%

図 29 圧延による AlSn 合金組織の微細化
上部:顕微鏡写真、下部:顕微鏡写真の四角に囲んだ領域を二値化した写真(赤が Sn、黒が Alを示す)

第3章 全体総括

成果と今後の課題

第1章で記載した目標に対し、鑄造プロセスの開発では、未だ、生産性、歩留まり、コストを試算できる段階までには到達していない。また、軸受性能については、未だ、評価対象となる軸受を作製するまでには至っていない。さらに、軸受の製造には以下に示すように、圧延機と焼鈍炉の作製が必要なため、事業化の時期は少なくとも2年後以降、つまり平成30年以降となる。

以下分野毎に成果と、今後の課題および方針を列挙する。

1. Al-40%Sn 合金板用鑄造の開発

(1)異径双ロール鑄造技術

・成果

- ① 圧延および接合の後工程において、破断、キャンバー等の不良の発生原因となる表面欠陥の解消を優先して実験を進め、表面欠陥の少ない鑄造板が得られるようになった。
- ② 注湯の制御性と再現性を向上するために注湯装置を作製した。

・課題と方針

- ① 銅製ロールの変形によって、鑄造板の板厚の面内分布が10%以上と大きいため、材質を変更して耐荷重を上げたロールを作製する。
- ② 鑄巣の寸法と面密度を減少するために、鑄造条件の最適化を進める。
- ③ 表面欠陥と鑄巣の削減をさらに進め、表面研削を必要としない鑄造板の製造技術確立し、長尺の鑄造板を作製する。

(2)厚板半連続鑄造技術

・成果

- ① 板幅100mmの実験機の結果を基に、大阪工業大学で400mm幅厚板半連続鑄造装置を作製し、それを大阪アサヒメタル工場に移設し、技術移管を行った。
- ② 板厚20mm、板幅400mm、長さ750mmの鑄造板を再現性よく作製することが可能となった。

・課題と方針

- ① 注湯装置を作製し、注湯の高精度化と省力化を図る。
- ② 鑄巣の寸法と面密度を減少するために、鑄造条件の最適化を進める。

(3)クラッド材製造用異径双ロール鑄造技術

・成果

- ① ロール幅100mmの実験機の結果を基に、大阪工業大学にて400mm幅クラッド材用異径双ロール鑄造機を作製し、それを用いて板幅400mmのAlSn/Feクラッド材を作製する鑄造技術確立した。
- ② 曲げ試験により、クラッド界面の結合が強固であることを確認した。

・課題と方針

- ① 長尺クラッド鑄造板の作製技術の確立する
- ② 注湯装置を開発・作製する。

2. 軸受用クラッド材製造技術

・成果

- ① クラッド材形成用鉄鋼板として、未焼鈍品と完全焼鈍品を用いたクラッド形成条件の比較検討を行い、以下の結果が得られた。つまり、未焼鈍品を用いた場合、圧下率を大きくすることはできないが、形状の安定したクラッド材が再現性よくできる。完全焼鈍品を用いた場合には、圧下率を大きくとることができるが、現状では形状の安定したクラッド材が形成できにくく、製造条件の再検討が必要である。
- ② 完全焼鈍品を用いた Al/Fe クラッド材の接合強度は最大 60Mpa で目標値に到達したが、再現性に乏しく、接合界面の解析と、接合時の更なる圧下率の向上の検討が必要であることが分かった。
- ③ クラッド用圧延機および接合用焼鈍炉の仕様決定が完了した。
- ④ 鉄鋼板エッチング装置、廃液処理装置、および排ガス処理装置を作製・設置した。この結果、鉄鋼板表面清浄化システムはほぼ完成した。

・課題と方針

- ① 圧延接合条件を再検討し、接合強度の向上を図る。
- ② 船用軸受製造用圧延機および焼鈍炉を作製する。
- ③ 広幅クラッド材の製造技術の開発を進める。

3. 軸受材成形機の作製と作成条件の探索

・成果

- ① 成形機を用いて、鉄鋼板のみによる軸受形成条件の探索を実施した。

・課題と方針

- ① クラッド材の作製を進め、上記条件を基礎にして軸受材成形技術の開発を進める。

4. 特性評価

・成果

- ① AlSn 合金鑄造板の圧延・熱処理による配向変化、密度変化等の情報が得られた。
- ② AlSn 合金の圧延・熱処理による機械的性質の変化についての情報が得られた。

・課題と方針

- ① 軸受を作製し、軸受特性の評価を実施する。
- ② 軸受特性の評価により、AlSn 合金の最適組織構造を決定する。