

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「拡散接合技術による微細構造物の接合技術と信頼性の確立」

研究開発成果等報告書

平成24年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人にいがた産業創造機構

目次

	頁
第1章 研究開発の概要	1
1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.2 研究体制	5
1.3 成果概要	10
1.4 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2.1 非破壊試験による評価方法の確立	11
2.1.1 超音波の縦波、横波を利用した界面検査方法の検討	11
2.1.2 拡散接合による超音波試験片の試作	12
2.1.3 剥離検査装置による計測結果	15
2.1.4 考察とまとめ	21
2.2 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立	22
2.2.1 オーステナイト系ステンレス材の積層構造における設計指針の確立	22
2.2.2 材料定数を考慮した設計指針の汎用化	24
2.2.3 拡散接合におけるプレス加工部品の可能性評価	26
2.3 マイクロチャネル構造への設計指針の適用	27
2.3.1 設計指針を適用した低圧力損失マイクロチャネル熱交換器の試作	27
2.3.2 構造の最適化による小型化	33
2.3.3 考察とまとめ	38
2.4 マイクロチャネル熱交換器の経時変化の測定	39
2.4.1 経時変化の測定（圧力、リーク、超音波）	39
2.4.2 異物に対する評価実験	42
第3章 全体総括	44
3.1. 複数年を通じた研究成果	44
3.1.1 非破壊試験による評価方法の確立	44
3.1.2 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立	44
3.1.3 マイクロチャネル構造への設計指針の適用	45
3.1.4 マイクロチャネル熱交換器の経時変化の測定	45
3.1.5 システム化	45
3.2. 今後の課題・事業化展開	46
3.2.1 現在の技術開発動向とその影響	46
3.2.2 競合技術等に対する検討	46
3.2.3 現在の市場動向及びその対応	46
3.2.4 事業化について	46

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

近年環境破壊の影響に対する懸念から、脱フロン、脱炭素など環境にやさしい機器の必要が高まっており、生活の利便性と省エネルギーの両立を追求する必要がある。2040年には、エネルギー消費量は1.5倍(2000年基準)に達すると予想され、地球温暖化対策としてその40%を削減することが必要となっている。発電、産業、運輸の分野と比較し、民生分野での省エネルギー化は遅れている。国内の各部門におけるCO₂排出量は1990年と比較し、産業部門の-5.5%に対してビルや事業所の業務部門が44.6%、家庭部門が36.7%、運輸部門が18.1%増加している。民生部門のエネルギー消費の内訳は、冷暖房、給湯の需要が約50%を占めており、これらは化石燃料による熱エネルギーを利用している。

この問題に対処する一つの方法はエネルギー利用効率を向上させることであり、その解決策の一つに例えばヒートポンプシステムがある。

ヒートポンプは、気体を圧縮すると温度が上昇し、膨張すると下降する原理を利用して冷媒を冷却している。膨張したことによって温度の下がった冷媒は、周辺の空気から熱をもらうことができる。この技術を利用して1の投入電力に対して4程度の出力が得られる。身近なものではエアコンが同様の仕組みを使っている。

図1.1にヒートポンプによるCO₂排出削減の見通しを示す。民生部門の冷暖房・給湯、産業部門の乾燥・加温の熱需要のすべてをヒートポンプでまかなうと、約1.3億トンのCO₂の削減と、4500klの原油を削減する効果があると試算されている。

化石燃料を燃焼する機器からヒートポンプに置き換えることで、①CO₂排出を抑えられる、②夜間運転で電力ピークを抑制できる、③ランニングコストが燃焼式給湯器に比べて安いというメリットがある。これを受けてCO₂冷媒ヒートポンプ給湯機(エコキュート)は、2010年に累計520万台、単年度150万台の普及を目標としていたが、2008年10月現在でようやく累計出荷台数が150万台を超えたのが現状であり、520万台の達成は困難と考えられる。

エコキュートの普及を阻害している理由として、主に①イニシャルコストが高く、ランニングコストの回収に時間がかかる、②容積が大きく、狭小住宅、集合住宅への取り付けが困難である、ということがあげられる。よって、システムの小型化によって設置場所の制約がなくなり、小型化により安価にできれば、さらなる普及が望めると考える。

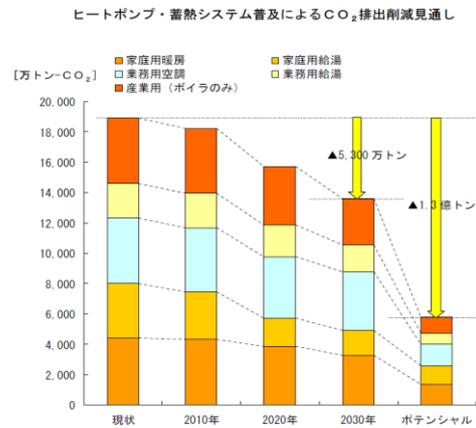


図 1.1 ヒートポンプ・蓄熱システム普及によるCO₂排出削減見通し
(財)ヒートポンプ・蓄熱センター資料より抜粋)

1.1.2 研究目的及び目標

以上のことから、より小型で高効率な熱交換器を開発することにより、設置場所と価格の両方を解決することが可能となる。そしてこの問題を解決できる方法として、拡散接合技術で製作する高耐圧マイクロ熱交換器がある。

拡散接合は金属の面と面を接触させ、加圧と加熱を行うことにより生じる、金属間の原子の拡散を利用して、金属を一体化させる技術である。パターンが形成された金属薄板を積層させて拡散接合を行うことにより、内部に複雑な形状を持ちながら、母材と同等の強度を有するデバイスを製作することができる。

マイクロ熱交換器の試作品は、従来の熱交換器と比較し 1/100 の大きさで同等の性能を得られた。これはシステムを 1/100 に小型化できる可能性を示している。図 1.2 には一般的なヒートポンプ用熱交換器とマイクロチャンネル熱交換器を比較した写真を示す。写真に示すように、非常に大きく重量もある熱交換器が手の平に載る大きさで実現可能である。

特に CO₂ 冷媒ヒートポンプでは、作動圧力が 100 気圧程度あるため、熱交換器には耐圧性能が求められるが、一般的なろう付けによるプレートフィン型熱交換機ではこの耐圧性能を得ることができない。また、高耐圧を求めれば大型な二重らせん管式熱交換器にせざるを得ない。

これらの特徴から、本熱交換器をヒートポンプシステムに組み込むことによって、省スペース、高効率化、低価格化を同時に達成することが可能となる。

しかし、複数層からなるマイクロ熱交換器の実用化には、部品の形状や制限、使用条件下における接合界面の非破壊検査による耐久性及び寿命の評価、またマイクロチャンネル内を流れる流体による汚れの付着、詰まり、錆といった表面状態の経時変化の評価を適切に行なう必要がある。これらの課題を解決し、マイクロ熱交換器の実用化を目指し、以下の研究項目に取り組む。



図 1.2 従来のヒートポンプ熱交換器と高耐圧マイクロ熱交換器(WELCON 製)

1.1.3 研究開発内容

① 非破壊試験による評価方法の確立（実施：株式会社 WELCON、国立大学法人富山大学）

①-1 超音波の縦波、横波を利用した界面検査方法の検討

未接合・接触拡散接合界面、いわゆる閉じたき裂を有するテストピースを作製し、非線形超音波による界面検査手法の検証を行う。また、パルサーや音響レンズを改良し、閉じたき裂の検出の高性能化を図る。また、当初接合されていた箇所が熱衝撃などのショックにより剥離しないか、サイクル試験により確認し、超音波での検査が可能か検証する。

①-2 拡散接合による超音波試験片の試作

数種類の金属材料において、界面検査用の超音波試験片を製作する。

② 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立（実施：株式会社 WELCON）

②-1 オーステナイト系ステンレス材の積層構造における設計指針の確立

20MPa の耐圧性能を有するテストピースの形状をシミュレーションし、実際の試験結果と比較する。また、その結果に基づいてデバイスを製作し、耐圧性能を実証する。

実使用環境における耐圧性能を検証する。

プレスにより製作した部品のバリやダレの耐圧性能への影響を検討・評価する。

②-2 材料定数を考慮した設計指針の汎用化

軟質材料（Cu・Al）のテストピースを製作し、変形や耐圧性能を評価する。また、接合時の変形率を SUS と同等に抑えられる設計方法を検討する。

③ マイクロチャンネル構造への設計指針の適用（実施：株式会社 WELCON、国立大学法人筑波大学）

③-1 設計指針を適用した低圧力損失マイクロチャンネル熱交換器の試作

熱交換器の流路に対応する微細管を用いて、微細管内における沸騰・凝縮時の可視観測と温度計測を行う。微細管内における沸騰・凝縮現象に関する系統的な実験データベースを構築して、微細管内における熱移動現象を明らかにする。さらに数値シミュレーションによりマイクロチャンネル構造内での流動や伝熱の評価手法を確立する。これらをもとにマイクロチャンネル熱交換器をシステムに適用する場合の定量的・定性的な性能評価手法を構築する。

③-2 構造の最適化による小型化

平成 22 年度に試作開発した対向流型熱交換器の測定結果及び微細管の凝縮現象可視観測の結果をもとに、構造や形状ならびに寸法を系統的に変化させた熱交換器を試作し、異なる流動条件において性能評価を行う。沸騰と凝縮が共存するヒートポンプシステムに本事業で試作したマイクロチャンネル熱交換器を実装し、システムへ適用するための実証試験を行う。

④ マイクロチャネル熱交換器の経時変化の測定（実施：株式会社 WELCON、国立大学法人富山大学）

④-1 圧力損失の測定

新潟市水を長期的に流し、圧力損失を監視する。一年間継続して流して詰まり等の発生を確認し、マイクロチャネルの長期保障のデータを得る。また、各種冷媒などのサイクルに適用し、マイクロチャネルデバイスを用いた場合の課題を抽出する。また、堆積した物質に関しては EDX により分析を行う。

④-2 リークの測定

新潟市水を長期的に流し、熱交換器内のリーク量を監視する。一年を通して継続して流してリークなどの発生を確認し、マイクロチャネルの長期保障のデータを得る。

④-3 接合界面の観察

上記④-1, 2 に関して定期的に接合界面の超音波検査を行い、接合条件の安定性と非破壊検査の信頼性評価を行う。

⑤ プロジェクトの管理・運営（実施：財団法人にいがた産業創造機構）

事業管理者財団法人にいがた産業創造機構において、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書を作成する。

本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けての課題等について研究実施者と連絡調整を行う。

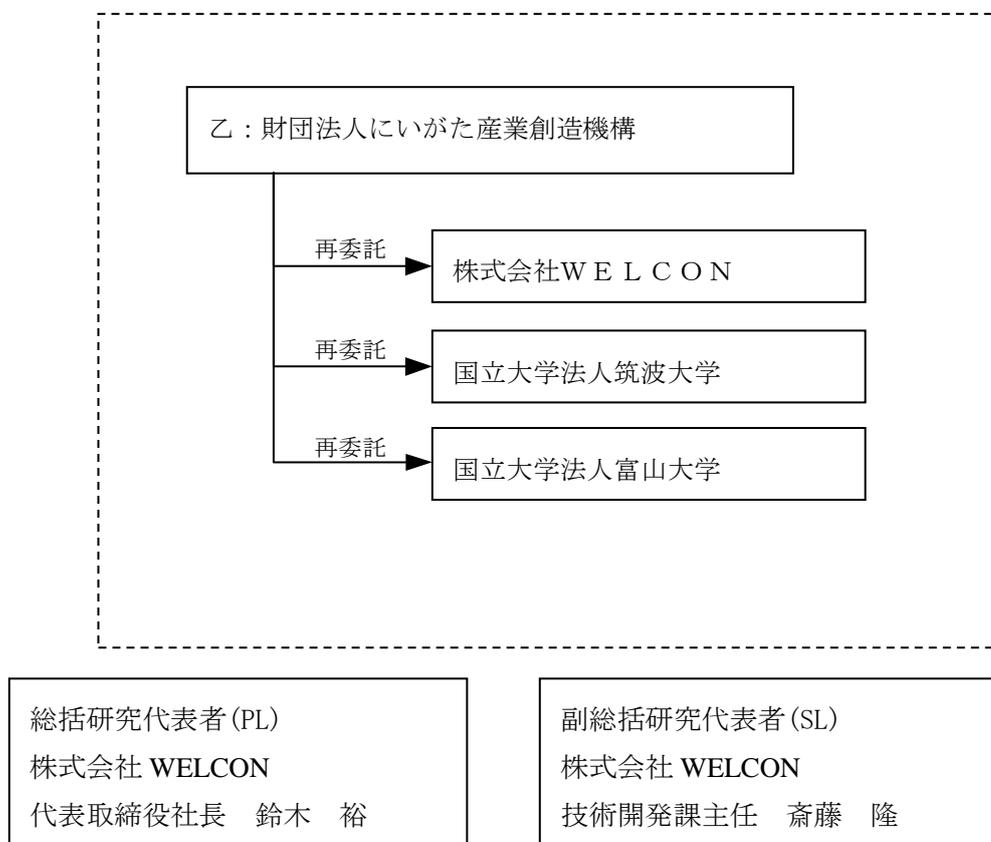
再委託先事業者が作成する証憑書類について、指導・確認を行う。

研究開発推進委員会を委託契約期間内に 3 回程度開催する。

1.2 研究体制

1.2.1 研究組織及び管理体制

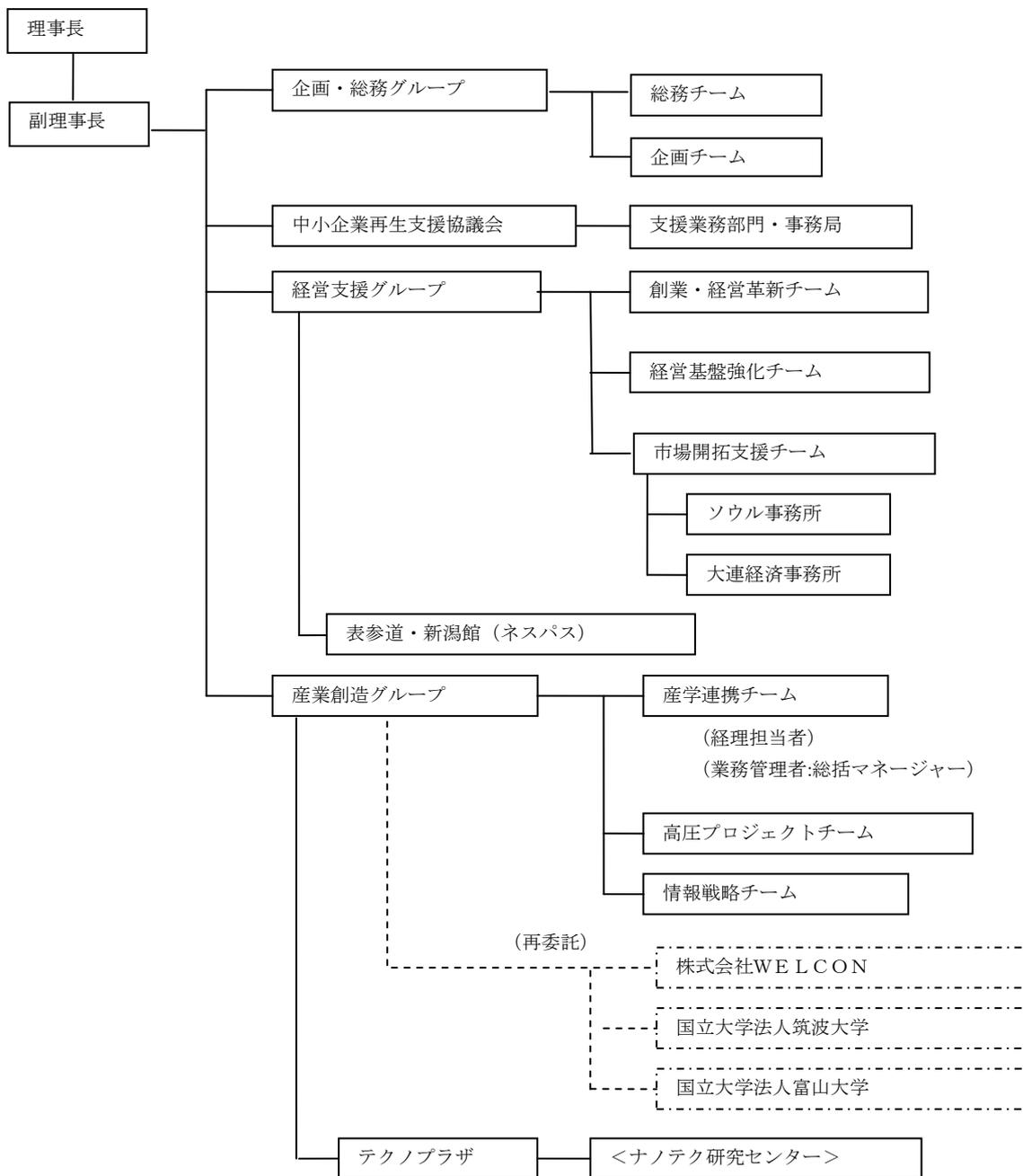
1.2.1.1 研究組織（全体）



1.2.1.2 管理体制

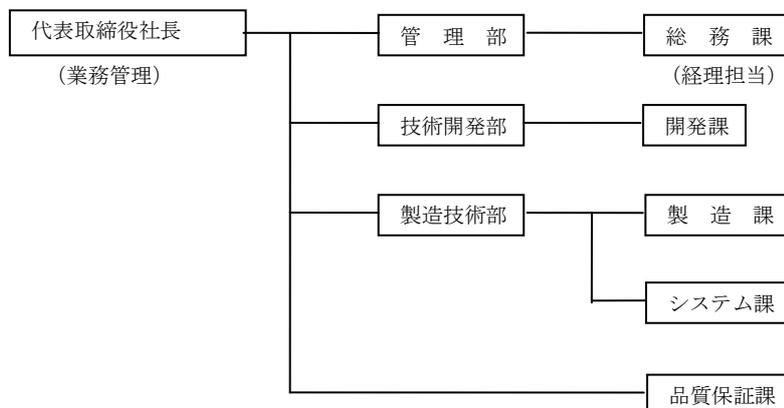
事業管理者

財団法人にいがた産業創造機構

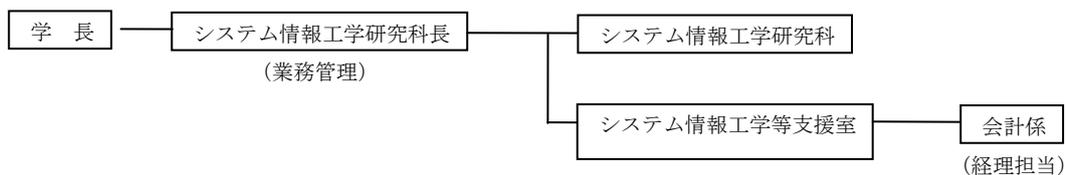


再委託先

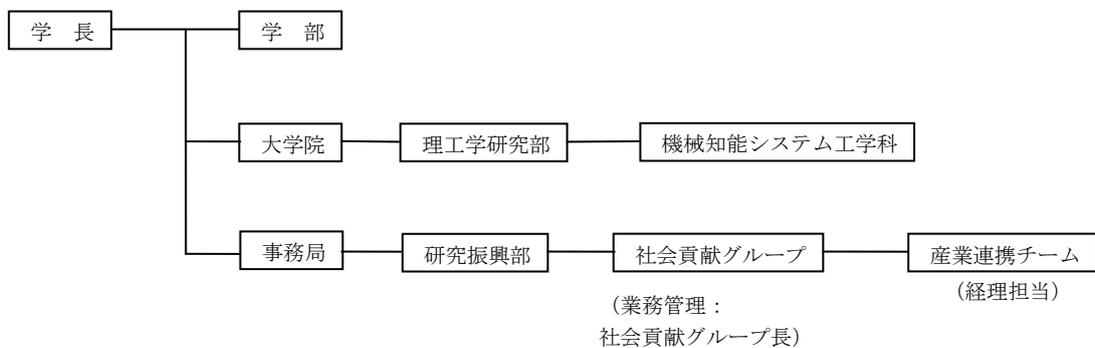
株式会社 WELCON



国立大学法人筑波大学



国立大学法人富山大学



1.2.2 管理員及び研究員

1.2.2.1 事業管理者

財団法人いがた産業創造機構

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
小林 和仁	産業創造グループ 産学連携チーム シニアエキスパート	⑤
平賀 恵一	産業創造グループ 産学連携チーム チーフ	⑤

1.2.2.2 再委託先 ※研究員のみ

株式会社 WELCON

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
鈴木 裕	代表取締役社長	①、②、③、④、PL
斎藤 隆	技術開発部開発課 主任	①、②、③、④、SL
田村 勝義	技術開発部開発課	①、②、③、④
池田 大	製造技術部システム課 課長	①、③、④
丸山 大輔	品質保証課 課長	①、②、④
古川 隆	製造技術部製造課 主任	①、②、③

国立大学法人筑波大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
阿部 豊	システム情報工学研究科 教授	③
金子 暁子	システム情報工学研究科 講師	③

国立大学法人富山大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
三原 毅	理工学研究部 機械知能システム工学科 教授	①、④

1.2.3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(管理法人)

財団法人にいがた産業創造機構

(経理担当者) 産業創造グループ 産学連携チーム マネージャー 小林 朝幸
 (業務管理者) 産業創造グループ 総括マネージャー 紫竹 耕司

(再委託先)

株式会社 WELCON

(経理担当者) 総務課 課長 帆苺 アイ子
 (業務管理者) 代表取締役社長 鈴木 裕

国立大学法人筑波大学

(経理担当者) システム情報工学等支援室 会計係長 石黒 隆之
 (業務管理者) システム情報工学研究科長 大田 友一

国立大学法人富山大学

(経理担当者) 研究振興部 社会貢献グループ 産業連携チーム 森本 直幸
 (業務管理者) 研究振興部 社会貢献グループ長 近藤 達也

1.2.4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

[開発推進委員会委員]

氏名	所属・役職	備考
鈴木 裕	株式会社 WELCON 代表取締役社長	PL
斎藤 隆	株式会社 WELCON 技術開発部開発課主任	SL
阿部 豊	国立大学法人筑波大学 システム情報工学研究科 教授	
金子 暁子	国立大学法人筑波大学 システム情報工学研究科 講師	
三原 毅	国立大学法人富山大学 理工学研究部 機械知能システム工学科 教授	
早川 新一	財団法人にいがた産業創造機構産業創造グループ ティレクター	
紫竹 耕司	財団法人にいがた産業創造機構産業創造グループ総括マネージャー	
王 凱健	株式会社富士通ゼネラル空調技術研究所 要素技術部長	アドバイザー
田岡 健	東京エレクトロン TS 株式会社 新事業開発室 企画戦略グループ&マーケティング	アドバイザー
藤井 哲雄	有限会社コロージョンテック 代表取締役	アドバイザー
大橋 修	株式会社 WELLBOND 代表取締役	アドバイザー
山崎 栄一	新潟県工業技術総合研究所 企画管理室長	
佐藤 猛行	新潟県産業労働観光部産業振興課 課長	

1.3 成果概要

1.3.1 非破壊試験による評価方法の確立

入力超音波振幅を 10nm 以上に増やした音響レンズを開発し、アルミ接合界面において $\omega/2$ 画像を観測し、サブハーモニック画像計測装置を構築できた。また、接合界面では完全な接合部と剥離が存在しており、基本的に線形計測で良不良の判断が可能であることが示された。

1.3.2 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立

従来エッチングにより流路を形成していたが、プレスによる流路形成とその接合性に関して検討を行った。マイクロチャンネル部におけるバリやダレが大きく、部分的に接触部は反応するもののリーク量が大きく、流体デバイスとしての使用は困難であることが示された。

1.3.3 マイクロチャンネル構造への設計指針の適用

マイクロチャンネル熱交換器は、積層数、流路長、流路径をパラメータとして評価を行った。熱交換表面積の増加および流路径の縮小に伴い性能が増加する傾向であり、一般の熱交換器と同様の理論が適用できることが示された。

マイクロチャンネル構造内の流動現象の可視化観測で、実際のデバイスより高い性能を得た。したがって形状や構造の最適化によって、さらに性能の向上が見込めることが示された。

1.3.4 マイクロチャンネル熱交換器の経時変化の測定

マイクロチャンネルに対する水質、温度変化、異物の影響を長期間評価した。水質と温度変化の影響では水道内の鉄が析出し流路内に付着した。それとともに圧力損失と熱通過率が僅かであるが減少した。しかし、熱交換器のリーク試験を実施したところ、圧力損失、熱通過率とも改善した。僅かなチャンネル内の変化で付着物が取り除かれたことから、流量の変化や洗浄の実施で容易に性能を維持できることが確認された。

1.4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社 WELCON (ウェルコン)

〒956-0113 新潟県新潟市秋葉区矢代田 15-1

技術開発部開発課 主任 斎藤 隆

E-Mail takashi_saito@welcon.co.jp

TEL 0250-38-1900

FAX 0250-38-1901

第2章 本論

2.1 非破壊試験による評価方法の確立

2.1.1 超音波の縦波、横波を利用した界面検査方法の検討

2.1.1.1 開発した高感度剥離検査装置

1) 計測システム

高感度剥離検査装置の概略を図 2.1.1 に示す。

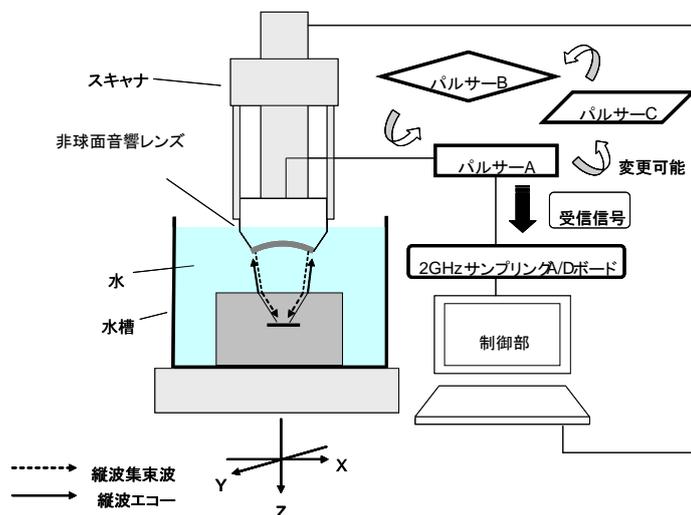


図 2.1.1 高感度剥離検査装置概略図

この装置の特徴は

- XY 走査で計測する全ての RF 波形をデジタル化することで、一度の計測で複数の深さ方向の音響画像が計測でき、多層接合構造部材の評価に適している。
- 従来の装置が専用パルサーによる音響画像計測しかできないのに対し、RF 波形出力を持つ全てのパルサーを自由に組み合わせた音響画像計測が可能である。
- 保存した全ての RF 波形にウェーブレット処理を行うことで、任意の周波数成分の音響画像を表示できる。例えば入力超音波（基本波）画像と、周波数の低いサブハーモニック画像を分離計測できる。

2) 集束探触子について

高感度剥離検査装置のために、2種類の集束探触子を開発した。一つは図 2.1.2 に示す圧電フィルムを探触子最前面に置き、非球面加工した探触子(中心周波数 20MHz、焦点深さ 5mm、開口幅約 $\phi 15\text{mm}$)、もう一つは非球面音響レンズ型の探触子(中心周波数 10MHz、焦点深さ 5mm、開口幅 $\phi 20\text{mm}$)である。

レーザー変位振動計による計測では、図 2.1.2 の 20MHz 探触子では peak to peak 振幅 2nm 程度の特徴を示した。また図 2.1.3 の 10MHz 探触子では peak to peak 振幅 20nm 程度の特徴を示した。

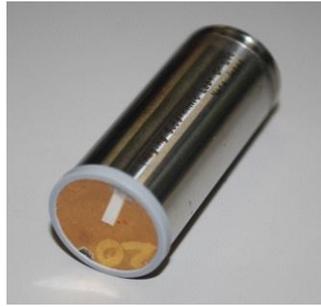


図 2.1.2 10MHz 集束探触子



図 2.1.3 20MHz 集束探触子

3) 使用するパルサー

本研究では超音波パルサーとして 2 種類のパルサーを使用した。一つはスパイクパルス
を印加するパルサーで、最大印加電圧 300V で、150MHz の高周波数まで励振でき、図 2.1.2
の 20MHz 集束探触子の励振に用いた。

もう一つは矩形バースト励振パルサーで、600V までの大電圧励振とき裂の非線形計測で
一般に用いられるバースト波を励起でき、図 2.1.3 に示す 10MHz 集束探触子と組み合わせ
て使用した。

4) 集束探触子(集束レンズ)の音場と空間分解能

試作した非球面集束探触子の空間分解能を検証するため、鋼試験片に正確に直径 3mm の
垂直穴をあけ、超音波画像化における空間分解能の計測を行った。それによると 20MHz 探
触子を励振したときの、反射エコーが完全に消失、出現した距離はそれぞれ 2.7mm、3.3mm
だった。よって、空間分解能は $\pm 0.15\text{mm}$ と考えた。

同様に 10MHz 探触子を大電圧バーストパルサーで励振したとき反射エコーが完全に消失、
出現した距離はそれぞれ 2.3mm、3.7mm であり、空間分解能は $\pm 0.35\text{mm}$ と考えた。

2.1.2 拡散接合による超音波試験片の試作

本研究では以下の 4 種類の拡散接合試料を作成した。

1) 試料①ステンレス鋼拡散接合試料 I

拡散接合で製作した試験片条件を表 2.1.1 に示す。ステンレス鋼を 900°C から 50°C 刻みで
温度条件を変えながら、5 条件の接合を行った。これらに関する超音波反射画像を図 2.1.4
に示す。

表 2.1.1 ステンレス鋼拡散接合試料 I の結合温度・圧力条件設定

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
temperature	900°C	950°C	1000°C	1050°C	1100°C
pressure	10MPa	10MPa	10MPa	10MPa	10MPa

温度によって反射面積が低減していく様子が確認できる。1050℃以上ではほぼ全域で透過となった。次に図 2.1.5 に反射エコー画像面積と強度の関係を示す。それぞれの試料の反射面積と強度の関係をプロットすると、反射面積と接合強度には相関があることが示された。

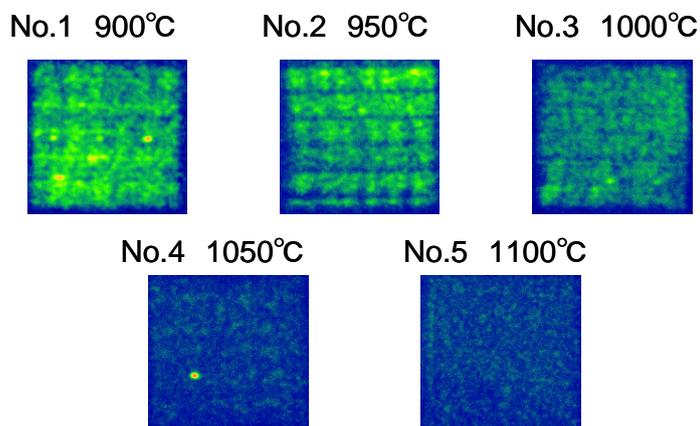


図 2.1.4 ステンレス超音波接合界面反射エコー像

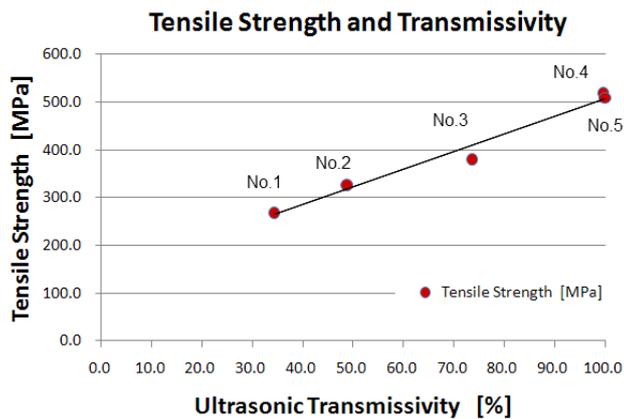


図 2.1.5 反射エコー画像面積と強度の関係

2) 試料②ステンレス鋼拡散接合試料Ⅱ

試料①の No.4 の接合良好条件を基に、接合時間を減らして接合強度を意図的に低下させた剥離模擬試験体として、表 2.1.2 の条件で新たに 2 種類の試料 A、B を作成した。なお、試料は 5mm 厚さの板材 2 枚を拡散接合により接合した。また図 2.1.6 にそれぞれの試料の引張試験結果を示す。

表 2.1.2 ステンレス鋼拡散接合試料Ⅱの結合温度・圧力条件設定

10mm in thickness test peace			
ID	A	B	C (No.4)
Temperature	1050°C		
Pressure	10MPa		
Time	60min	120min	240min

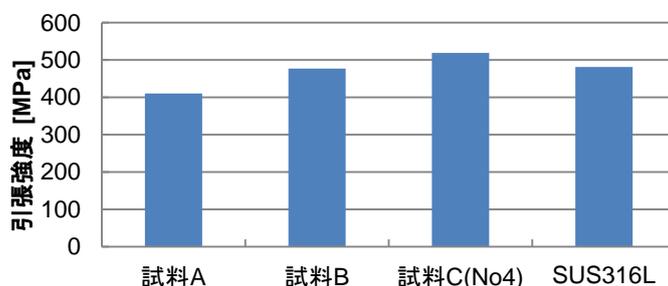


図 2.1.6 ステンレス鋼拡散接合試料の引張強度

3) 試料③アルミ拡散接合試料Ⅰ

接触しているが接合されていない界面状態（キッキングボンド）を高感度剥離検査装置で測定評価する目的で、ステンレス鋼に比べて接合条件の厳しいアルミ合金を使った接合不良模擬用試験片を作成した。

試験片はアルミ合金 A5052-O（試料 A）、A5083-O（試料 B）を使い、4mm 厚さの板材 2 枚を 6.3mm 厚さの板材を中心に上下から接合した形状となっている。それぞれ A、B で温度を変えた 2 種類（計 4 種類）を作成した。

拡散接合試料概観を図 2.1.7 に示す。またその引張試験の結果を図 2.1.8 に示す。引張試験により、母材の強度に比べ強度はそれぞれ落ち込みが見られた。

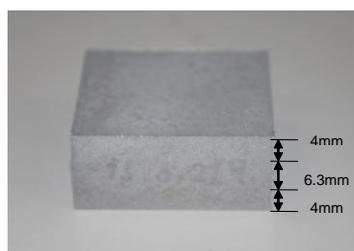


図 2.1.7 アルミ拡散接合試料 A の概観

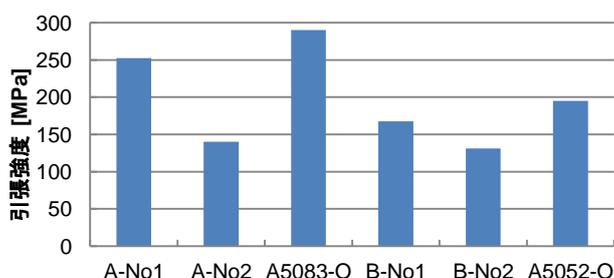


図 2.1.8 試料③における引張試験結果

4) 試料④アルミ拡散接合試料Ⅱ

試料③に比べより明確なキッシングボンド的な界面を模擬するため、試料③に比べて接合強度をさらに低下させた新たなアルミ拡散接合試料を A と B の 2 種類作成した。

使用した母材は A5052-O を使用し、5mm 厚さの板材 2 枚を接合した形状である。それぞれ A、B で温度を変えた 2 種類を作成した。拡散接合試料の概観を図 2.1.9 に、またその引張試験の結果を図 2.1.10 に示す。

引張試験の結果より、試料③に比べて強度がさらに落ち込んでいた。

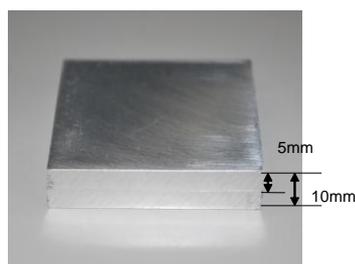


図 2.1.9 アルミ拡散接合試料Ⅱの A 概観

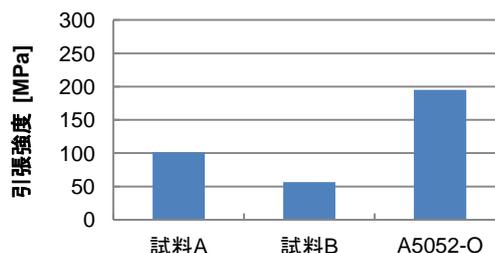


図 2.1.10 試料④における引張試験結果

2.1.3 剥離検査装置による計測結果

ここでは線形計測による評価に続く計測として、サブハーモニック波画像によるキッシングボンド界面の評価の可能性に特化して検討を行った。

1) 試料②ステンレス鋼拡散接合試料Ⅱを用いた計測

ここでは超音波スパイクパルサーと図 2.1.2 の非球面集束振動子(中心周波数 20MHz、集束深さ 5mm 開口幅 $\phi 15\text{mm}$)を組み合わせ得られた結果について述べる。

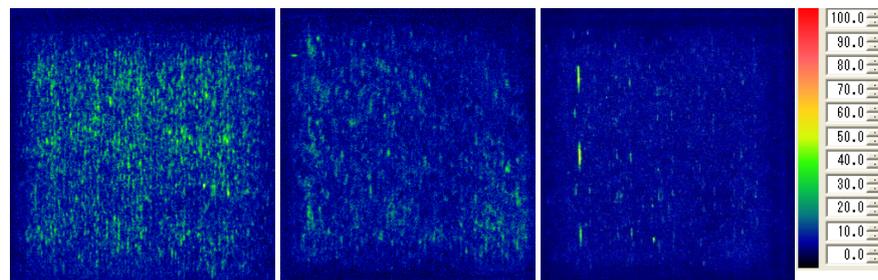
図 2.1.11 は接合界面の縦波の反射画像であり、A から C へ拡散時間の増加に伴って原子拡散が進み、剥離反射エコーが少なくなって接合強度が増加していく。次に取得した全ての界面の受信波形にウェーブレット処理を行うと、接合部では完全な透過が、剥離部では完全な反射が見られるがその中途の極めて小さい隙間部においては、超音波振幅が隙間に対し大きい場合に限って図 2.1.12 に見られるように、入射周波数 ω に対し、 $\omega/2$ のサブハーモニック波が出現する可能性がある。サブハーモニック波が出現する位置では、狭い隙間に対応して元となる界面反射エコー振幅は必ず小さいので、サブハーモニック波が出現していない部位でも、元々強い中心周波数 ω の漏れ成分が $\omega/2$ 画像の振幅に含まれてしまう。

そこで、サブハーモニック波発生の有無を明確にするため、中間の $3\omega/4$ 画像を作り、規格化を行い、さらに散乱ノイズとの差異を明確にするため、規格化の閾値を 3 とした。

規格化の閾値を 3 とした画像では白点が表れるが、それはサブハーモニック波発生位置と考えられる。白点箇所における受信波形を抜き出し、ウェーブレットとは異なる FFT 処理により、周波数特性を調べた結果を図 2.1.13 に示す。

FFT 結果より、白点では皆、低周波部 $\omega/2$ 付近に明確なピークが出現しており、本装置を

よる非線形計測で散接合試料を用いてサブハーモニック波発生をマッピング可能なことを確認できたと考えている。



試料A 試料B 試料C (No.4)

図 2.1.11 接合界面の縦波反射画像

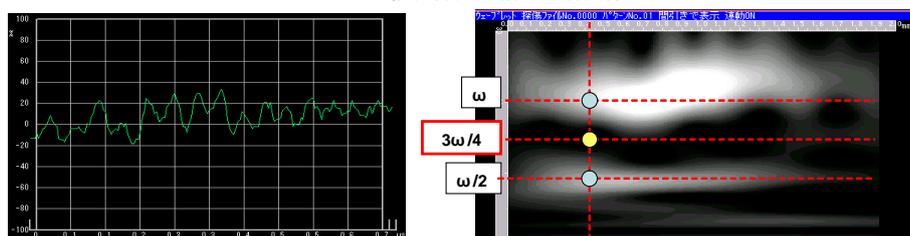


図 2.1.12 ウェーブレットと受信波形の例

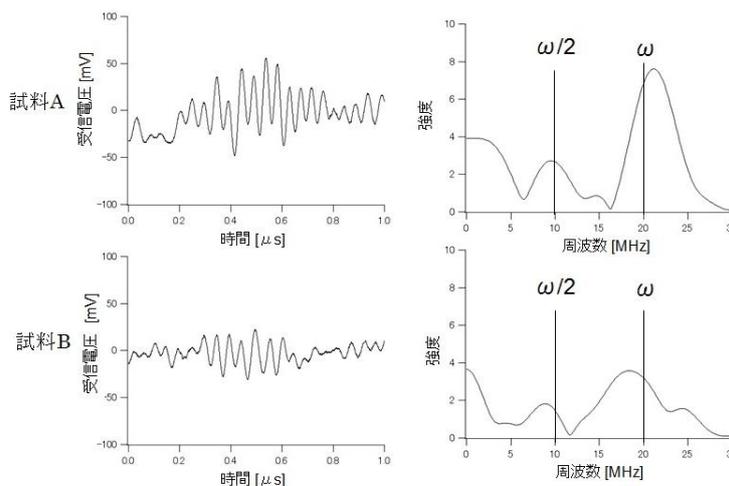


図 2.1.13 FFT 解析結果

2) 試料②ステンレス鋼拡散接合試料Ⅱの大変位入射と矩形波パルサーによる計測

試作した 10MHz 探触子を使用し、パルサーは最大 600V の負電圧矩形波を最大 10 波で送信できる大電圧バーストパルサーを組み合わせた画像計測を行った。実験条件は印加電圧 600V、波数は分解能を確保するため 5 波とした。

スキャンピッチ 0.1mm で縦波反射エコー画像を測定した結果を図 2.1.14 に示す。

次にウェーブレット処理により周波数画像を作成した結果と $3\omega/4$ 画像によって規格化を行った結果をそれぞれ、図 2.1.15、図 2.1.16 に示す。前項で見られたサブハーモニック波発生点が、大振幅超音波の計測システムでは逆に検出できなくなった。

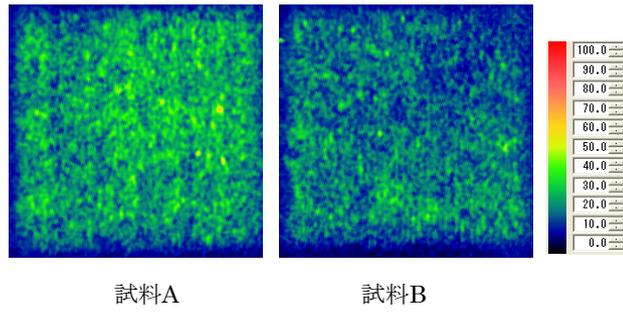


図 2.1.14 接合界面の縦波反射画像

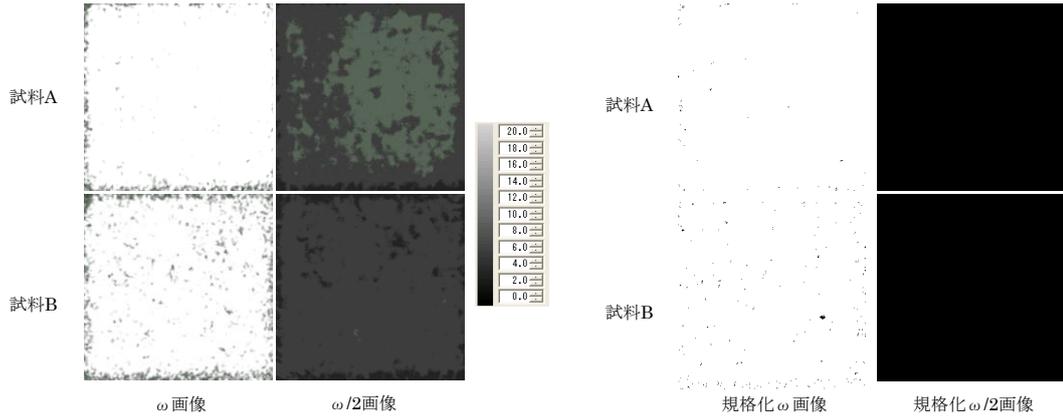


図 2.1.15 ウェーブレット処理による周波数画像作成結果

図 2.1.16 規格化画像作成結果

3) 試料③アルミ拡散接合試料 I の大変位入射と矩形波パルサーによる計測

試料③のアルミ拡散接合試料について、10MHz 探触子と、波数 5 波、600V の矩形波パルサーを組み合わせた計測を行った。

スキャンピッチ 0.1mm で測定した縦波反射画像を図 2.1.17 に示す。

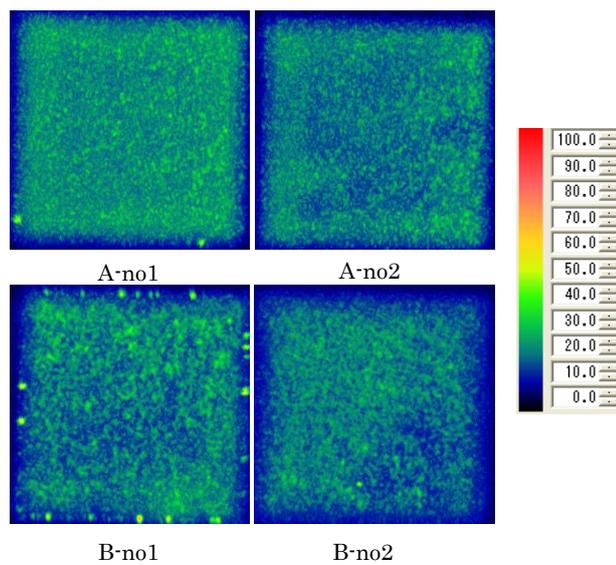


図 2.1.17 接合界面の縦波反射画像

次にウェーブレット処理により周波数画像を作成した結果と、 $3\omega/4$ 画像によって規格化を行い閾値 3 で画像化した結果をそれぞれ、図 2.1.18、図 2.1.19 に示す。

図 2.1.19 より、どの試料も規格化 $\omega/2$ 画像において白点画像は得られたが極めて限定的に点在したに留まった。

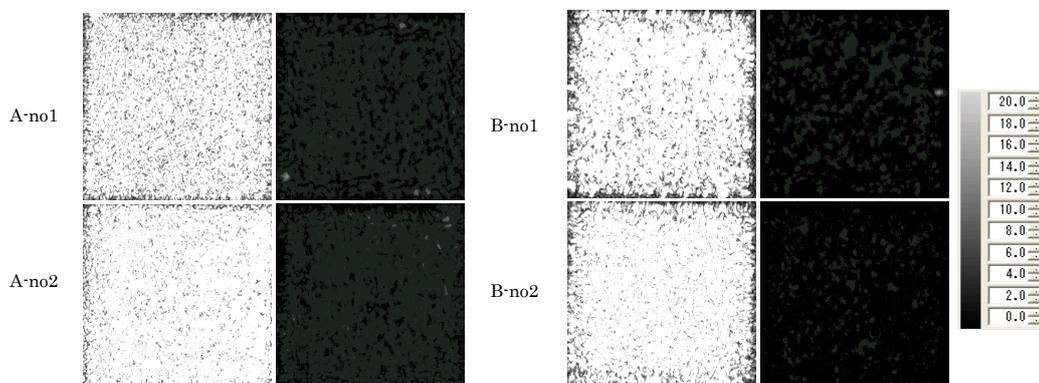


図 2.1.18 ウェーブレット処理による周波数画像作成結果(各図の左: ω 画像、右: $\omega/2$ 画像)

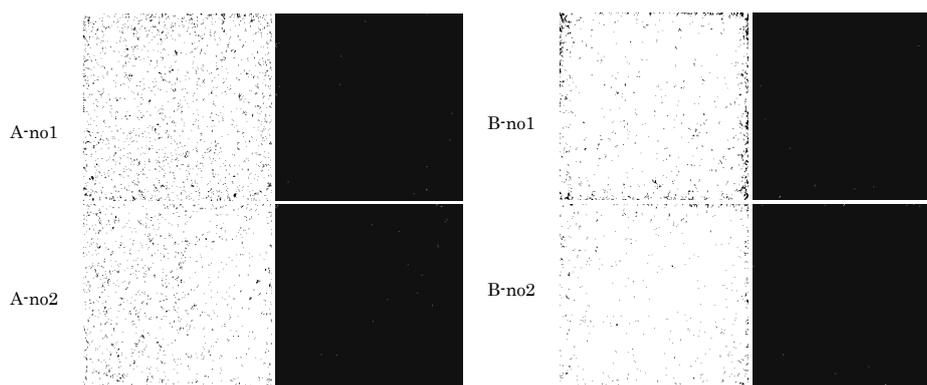


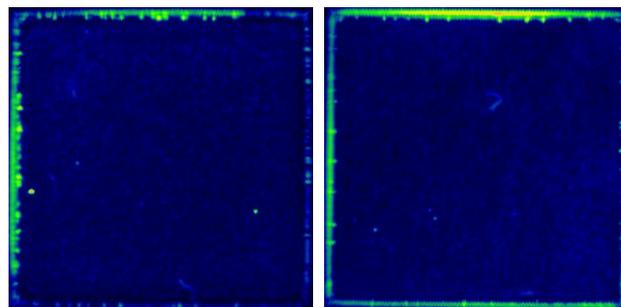
図 2.1.19 規格化画像作成結果 (閾値 3)(各図の左: 規格化 ω 画像、右: 規格化 $\omega/2$ 画像)

4) 試料④アルミ鋼拡散接合試料Ⅱの大変位入射と矩形波パルサーによる計測

試料③での計測でも、広範囲で明確なサブハーモニック成分は得られなかったので、ここでは試料④のアルミ拡散接合試料について、10MHz 探触子と、波数 5 波、600V の矩形波パルサーを組み合わせ計測を行った。

試料③と同様にスキャンピッチ 0.1mm で測定した縦波反射画像を図 2.1.20 に示す。試料③の図 2.1.17 に比べ、A、B の試料とも半分から 1/3 と引張り強度が低下しているのに対し、縦波反射エコーがほとんど得られておらず、従来用いてきた縦波反射法では引張り強度評価が困難である。試料周辺部には縁に沿って明確な剥離部も見られる。この結果本試料は、当初想定したキッシングボンド的な界面が作製できている可能性が高いと考える。

次にウェーブレット処理により周波数画像を作成した音響画像と、 $3\omega/4$ 画像によって規格化し閾値3とした画像を、それぞれ図 2.1.21、図 2.1.22 に示す。



試料A

試料B

図 2.1.20 接合界面の縦波反射画像

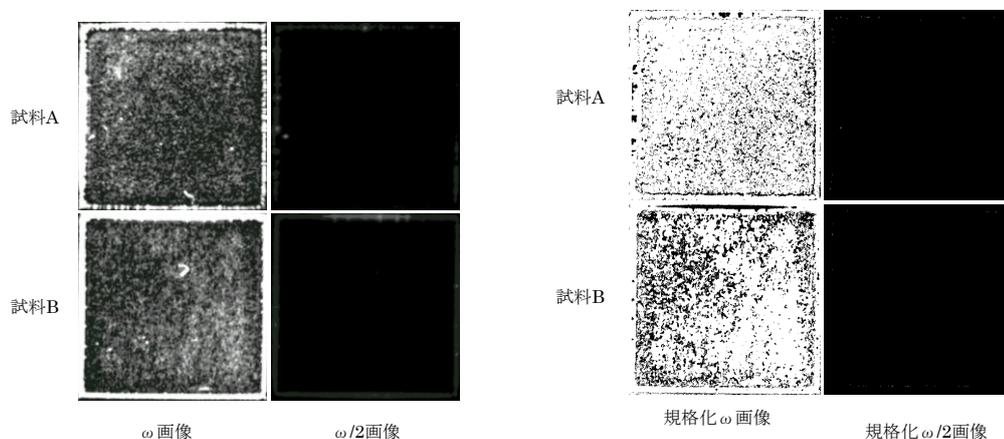


図 2.1.21 ウェーブレット処理による周波数画像作成結果

図 2.1.22 規格化画像作成結果 (閾値 3)

図 2.1.22 の結果より、まず試料 A、B ともに規格化 $\omega/2$ 画像で白点画像は極めて限定的にしか観察できず、図 2.1.20 の中央部で ω 成分の反射エコーが見られないことで、音響画像による評価が困難になる結果には対応できていない。今回のアルミ合金接合界面の作成条件はかなり特殊なものではあるが、これら従来キッシングボンドと考えられる界面の評価は大きな課題として残された。

また、同じ場所の線形画像と $\omega/2$ 画像を拡大してそれぞれ試料 A、B を並べた結果を図 2.1.23 に示す。

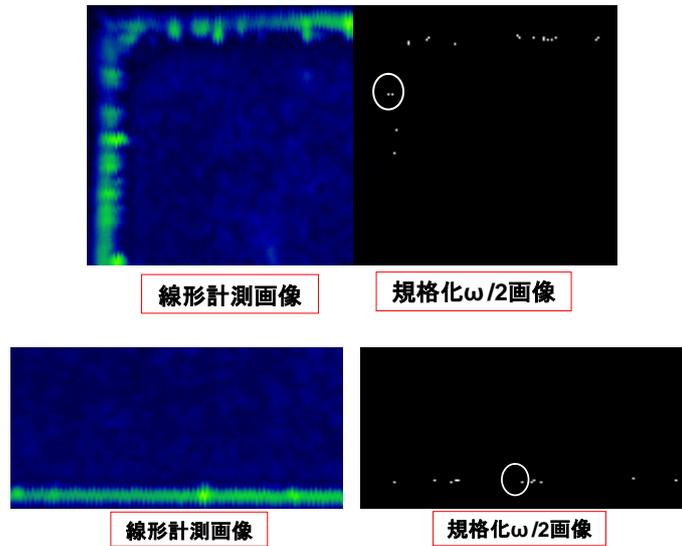


図 2.1.23 線形画像と $\omega/2$ 画像の比較(上図試料 A、下図試料 B)

規格化 $\omega/2$ 画像では白く輝度を持った箇所では、図 2.1.22 で剥離の見られた試料の縁を囲むように、白点が点在する結果となり、中央の音響的“接合部”と明確な剥離部の境目でサブハーモニック波が発生している傾向が見られた。この $\omega/2$ 白点箇所における受信波形と FFT 解析による周波数特性を調べた結果を図 2.1.24 に示す。

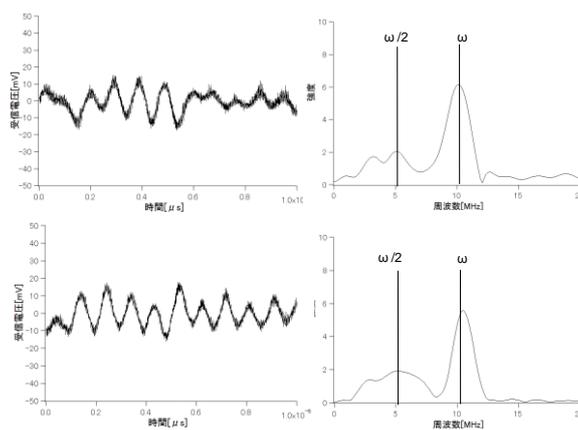


図 2.1.24 白点部における FFT 解析結果

2.1.4 考察とまとめ

以上本研究では、基本的にマイクロ熱交換器の作製時の拡散接合評価法の確立を目的として、計測システムの構築と有効性の検証を行ってきた。本プロジェクトの直接の目的は

- a) 市販の音響剥離検査装置を含め、本プロジェクトで問題となる接合界面製品の、拡散接合の接合部評価に適した音響計測装置の選択と開発を行う。基盤的となる手法は、剥離検査で広範な実績のある、水浸縦波反射法画像システムである。
- b) a)で選択したシステムにより、SUS316L ステンレス鋼拡散接合部の標準的な接合条件により音響画像評価を行い、引張り試験によって求めた引張り強度と対応を見て、音響計測で拡散接合強度の非破壊評価が可能かどうかを検証する。
- c) 標準を超える接合条件について、作製時に起こり得るものを中心に、あるいは起こり得ない条件を含めた検証を行い、a)のシステムでの強度評価との対応を検証する。
- d) c)の検証と同時に、もし従来法の a)で評価できない実用拡散接合界面が生じた場合の準備として、閉口き裂の実用評価手法として注目されているサブハーモニック画像計測装置を、a)のシステムに、開口の大きい集束探触子を組み合わせ大振幅超音波の入射機能とウェーブレット解析による任意の周波数画像表示機能の 2 つを付加することで開発する。
- e) サブハーモニック画像計測装置の有効性を、SUS316L ステンレス鋼拡散接合に加えて、より拡散接合が困難なアルミ合金拡散接合を加えて作製し、検証する。

とした。本プロジェクトで検討の結果、a)としてたくさんの接合界面を持つ製品の評価には、市販の音響映像装置は必ずしも適していないため、界面反射エコーを含む全 RF エコーを全て記録する新しい剥離検査装置を一部開発し用いることとした。また b)さらに c)では、SUS316L ステンレス鋼拡散接合について広範な条件を振って、音響映像測定と引張り強度の関係を調べた結果、剥離界面からの反射エコー画像面積（例えばノイズレベル以上）は、引張り強度と強い相関が見られ、音響画像から非破壊的に接合強度が評価できる可能性があることが分かった。d)については、ウェーブレット処理を組み合わせたサブハーモニック画像計測装置を使用し、入力超音波振幅 20nm の探触子で計測を行った結果、一部の部位で $\omega/2$ 画像が点在することから、サブハーモニック画像計測装置を構築できたと考えられる。さらに e)でアルミ合金拡散接合試験体を加えた検証の結果、アルミ拡散接合試料 II で母材強度 200MPa に対し 50~100 MPa 程度の引張り強度低下試験体で、所謂キッシングボンドと呼ばれる“接触しているが接合強度の無い”界面に近い挙動が見られ、接合部の殆どで超音波縦波反射エコーが得られない試験体を作製できた。

2.2. 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立

2.2.1 オーステナイト系ステンレス材の積層構造における設計指針の確立

2.2.1.1 概要

拡散接合の特徴として、接合界面で母材並みの強度を得られることが挙げられる。これによりろう付けで製作する熱交換器では実現できない耐圧性能が可能となる。その特徴を生かしながら、高耐圧の熱交換器を設計、シミュレーションし、必要な形状や板厚を検討する。

2.2.1.2 実験方法

耐圧性能が最も低くなるのは、板厚が薄く開口面積が広い場所になる。本項では現在当グループで製作可能な最大サイズの熱交換器を製作した場合の耐圧性能を検討する。

流路を形成したプレートを積層して拡散接合して熱交換器を製作する場合、耐圧性能が最も低いのは、流体導入後、各流路に分配するバッファ部である。流路部は流路径が小さく、接合面が多いため、強度的には強い。そこで図 2.2.1 のようなバッファ部のみを想定してシミュレーションを実施した。

材質は SUS304、許容応力は SUS304 焼鈍し材の降伏点応力を参考に 83.2MPa とした。内圧は 20MPa とした。解析は ANSYS Workbench13.0 を使用した。

2.2.1.3 結果と考察

二つの形状の解析結果を示す。図 2.2.1 のモデルは溶接性を考慮し、開先を本体側に加工している。図 2.2.2 に解析結果を示す。相当応力の最大値は 840.32MPa、全変形量の最大値は 0.46638mm となった。開先部に応力が集中する形となっており、破壊の起点となることが予測される。

図 2.2.3 に開先を除去したモデルを示す。内部空間を滑らかに接続し、応力集中が発生しないようなモデルとなっている。図 2.2.4 に結果を示す。図 2.2.2 と比較すると、開先部の応力は緩和された。相当応力の最大値は 341.86MPa、全変形量の最大値は 0.20786mm となった。応力は角部に集中している。CAE では角部の応力は値が発散し、正確な値とならない。そこで、一般的に応力集中部から板厚の 1/3 離れた位置の応力を参照する。それによるとドーム付け根の応力は 150MPa 程度、筒の付け根付近で 200MPa 以上となっており、ドームおよび筒の壁厚さが不足していることが示されている。しかし、ドーム部壁厚さは 50mm、筒部でも 23mm あり、開口部が大きくなると必要な壁厚さも増大する。これらの結果から、小さいデバイスを複数つくり、並列配置としたほうがコストと安全性の点から有利であると考えられる。

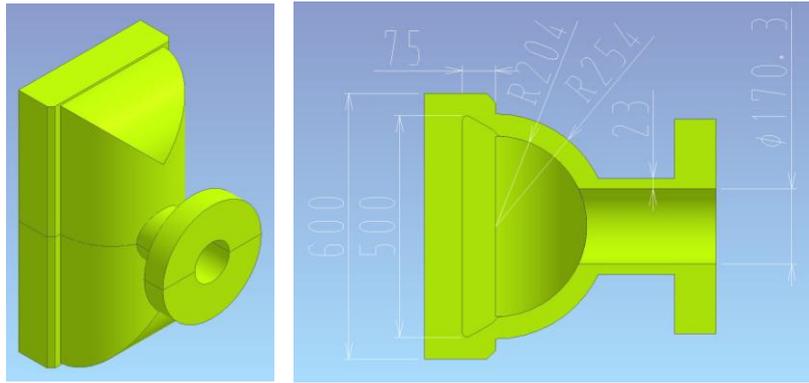


図 2.2.1 解析モデル 1 ドーム溶接型 A 全体図と断面図

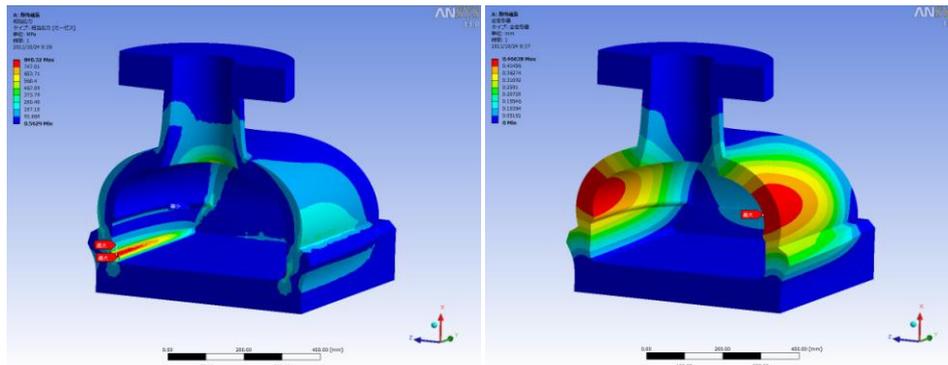


図 2.2.2 解析モデル 1 相当応力(左)と全変形量(右)

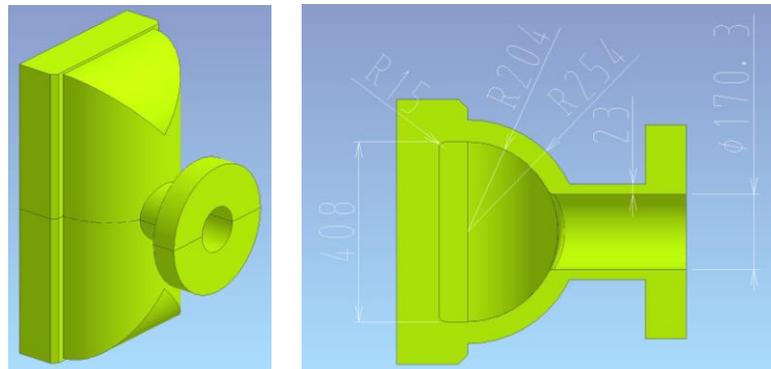


図 2.2.3 解析モデル 2 ドーム溶接型 B 全体図と断面図

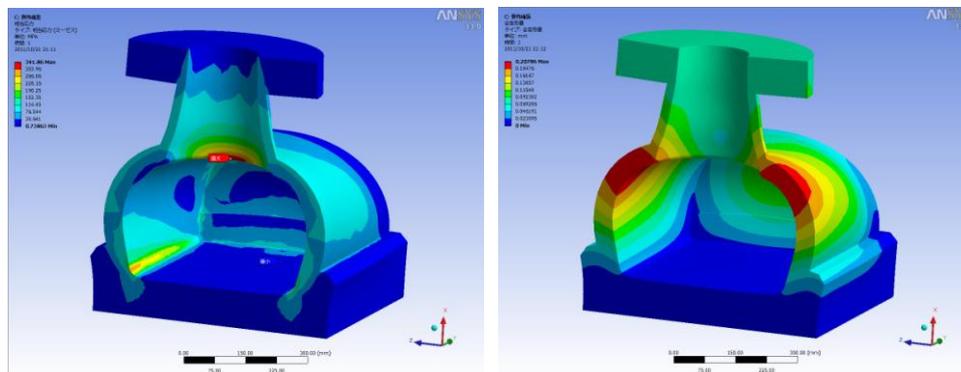


図 2.2.4 解析モデル 2 相当応力(左)と全変形量(右)

2.2.2 材料定数を考慮した設計指針の汎用化

2.2.2.1 概要

拡散接合は、一般的には絶対温度で融点の60%程度の温度で加熱加圧するプロセスのため、高温軟質材料（Cu・Al）の変形が問題となることがある。特にマイクロチャンネルデバイスでは流路の閉塞につながる恐れがある。本項では過大な変形を抑制する手法を検討する。

2.2.2.2 実験方法

図 2.2.5 に試験片形状を示す。試験片は A5052 アルミ材を用いた。試験片は□100mm×25mmt のブロックを 6 面フライス加工後、上下面(□100mm の面)を研削加工で仕上げた。接合前に厚さと図 2.2.6 に示す位置の外形を測定した。このブロックを 2 個積層し、拡散接合を実施した。拡散接合時、試験片上下には同じ材質で外形が 20mm 大きく、厚さ 20mm の板を配置して加圧した。

2.2.2.3 結果と考察

図 2.2.7～2.2.9 に拡散接合後の試験片を測定した結果を示す。

位置による変形率としては、辺中央部が最も大きく、角部に近づくにつれて小さくなる傾向を示した。加圧方向より試験片を見た場合、正方形が円形に近づくように変形していることになる。

X 方向と Y 方向を比べた場合、測定結果に大きな違いはない。また、上段と下段を比較した場合、下段の方がやや変形が大きい。

加圧方向の変形率は、中央部がくぼみ、外に向かって盛り上がり、外周部でまたくぼむ形状となる。断面はアルファベットの M のような形状となる。中実なステンレス鋼の拡散接合で、このような変形は起こらない。この変形はアルミニウムのような軟質材料特有のものであると言える。このとき試験片上下に配した治具の形状も、試験片形状が転写されていた。

変形率の温度依存性が大きく、およそ 20℃の違いで変形率は倍近い差となった。

変形は平面方向の変形と加圧中央部のくぼみが同時に進行し、中央部くぼみが押しつけられることによって、辺中央部(図 2.2.6 の C、H 位置)が外に向かって変形したと考えられる。

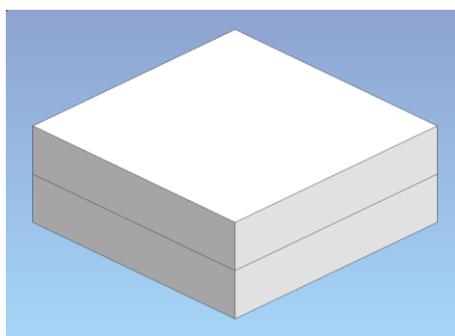


図 2.2.5 試験片形状

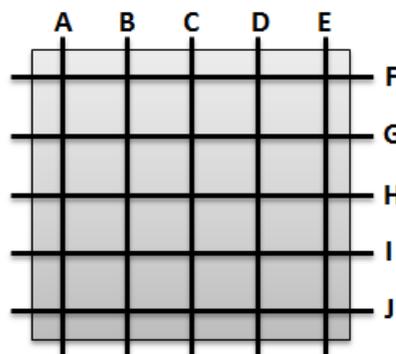


図 2.2.6 外形測定位置

X軸方向變形

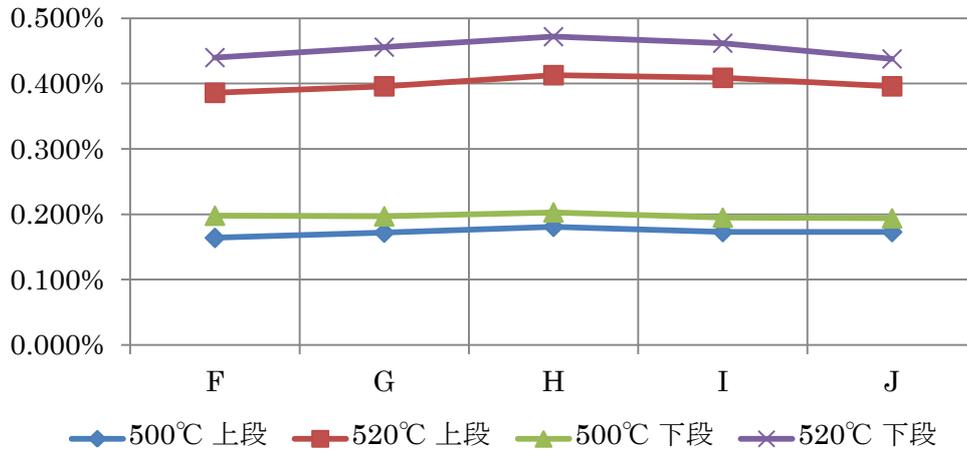


图 2.2.7 接合後平面方向变形率(X 轴方向)

Y軸方向變形

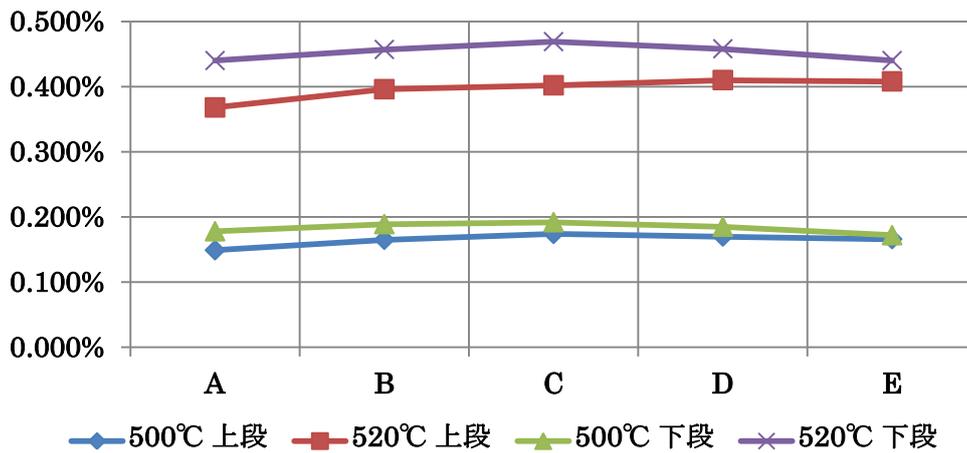


图 2.2.8 接合後平面方向变形率(Y 轴方向)

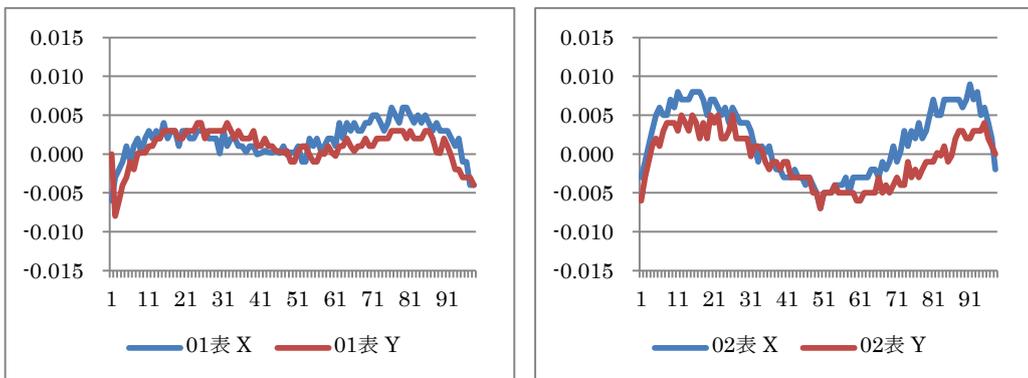


图 2.2.9 接合後加压方向变形率

2.2.3 拡散接合におけるプレス加工部品の可能性評価

2.2.3.1 概要

現在耐リーク性能を必要とする拡散接合品は、化学的な腐食によるエッチングによって部品加工を行っている。これは拡散接合には接合界面の密着が必要であり、バリやダレによる形状の影響を除くためである。製品の汎用化を目指し、コスト低減を目標として部品のプレス化の可能性を評価した。

2.2.3.2 実験方法

試験用部材として板厚 0.5mm を用意した。板厚 0.5mm は、板厚と開口寸法の比が 1 対 1 となること、流路ピッチの細かさから、プレス加工は非常に困難であった。そこで、板厚 0.3mm でも流路部品を製作した。スペーサ部品は 0.3mm とした。材質は SUS316L を用いた。これらを積層して接合し、リーク性能と界面の観察を行った。

2.2.3.3 結果と考察

図 2.2.10 に界面の観察結果を示す。エッチング部品で界面が消失する接合条件で接合を行ったが、スリット部品 0.5mm、0.3mm のどちらも界面がはっきりと観察され、十分な接合状態を得られなかった。各部品の平面状態が阻害要因となり面の密着が進まなかったことが原因と考えられる。

界面観察の前にヘリウムでリークテストを実施した。リークテストの結果はスリット部品 0.5mm は $1.2 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 、0.3mm は $5.0 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ となり、リークが発生した。エッチング部材における熱交換器のリーク基準は $5.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下、リーク量の変動無きこととしている。プレス部材を使用した流体部品の製作には、部品の加工精度の向上、または接合条件の探索が必要になる。接合条件はエネルギー消費が大きくなる方向になるため、部材加工技術のさらなる向上が求められることになる。

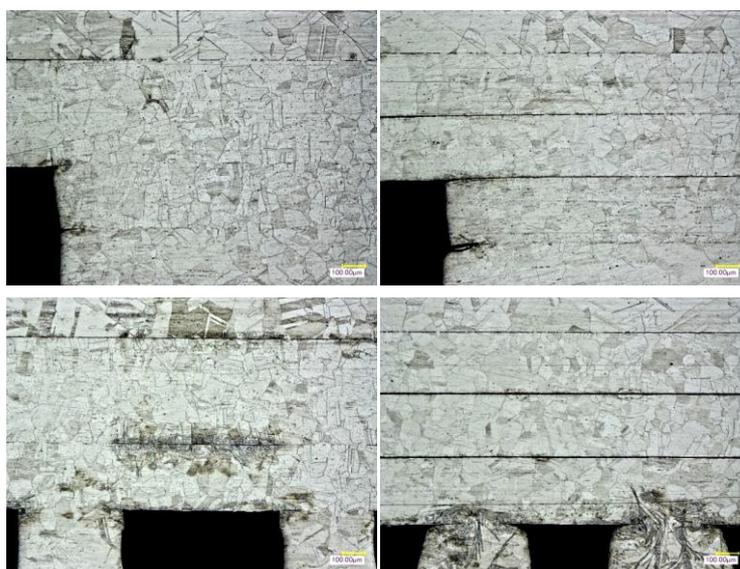


図 2.2.10 接合後界面観察(左:0.5t、右:0.3t×2)倍率 200 倍

2.3. マイクロチャネル構造への設計指針の適用

本研究の目的は、開発した高耐圧マイクロチャネル積層型熱交換器の伝熱流動メカニズムを解明することである。これまでは直交流型の高耐圧マイクロチャネル積層型熱交換器を開発してきた。しかしながら、直交流型の熱交換器は、CO₂冷媒ヒートポンプで使用されている既存の熱交換器と比較して、単位体積あたりの熱交換量は 100 倍の伝熱性能を有するものの、熱交換量は低い。そのため本項では、更なる熱交換量の向上を目指して、対向流型の高耐圧マイクロチャネル積層型熱交換器を開発した。

最初に新たに製作した対向流型の高耐圧マイクロチャネル積層型熱交換器の伝熱流動特性を明らかにする。また、本熱交換器をヒートポンプシステムに適応させ、実用化するために、本熱交換器と CO₂ 冷媒ヒートポンプで使用されている既存の熱交換器の伝熱流動特性を比較する。さらに、作動流体に蒸気と水を用いて、本熱交換器の凝縮器としての伝熱流動特性を明らかにする。しかしながら、上述のように、伝熱流動特性を明らかにしただけでは、高耐圧マイクロチャネル積層型熱交換器の構造を最適化することはできない。また、高い熱交換量を有する伝熱流動メカニズムが明らかにならなければ、設計指針を立てることもできない。

そこで、次に、マイクロチャネルを模擬した微細管の伝熱流動特性を明らかにする。熱交換器はステンレスで製作されており、熱交換器の流路内での流動様式は分からないため、熱交換器の 1 本の流路を模擬した微細管内における蒸気の凝縮挙動を可視化観測する。

2.3.1 設計指針を適用した低圧力損失マイクロチャネル熱交換器の試作

2.3.1.1 熱交換器

本研究では、対向流型の高耐圧マイクロチャネル積層型熱交換器を開発した。図 2.3.1 には、対向流型熱交換器と流体の流れ方向の概略図を示す。対向流型熱交換器は流体の流れ方向を変えることができ、図 2.3.1(左)のように高温流体と低温流体の流れ方向が同じ場合を並行流、図 2.3.1(右)のように高温流体と低温流体の流れ方向が反対の場合を対向流とする。また、表 2.3.1 には、本研究で使用した対向流型熱交換器の流路寸法をまとめたものを示す。本研究では、流路径、流路長及び積層数が異なる 7 種類のデバイスを使用した。全ての熱交換器の材質には SUS316 を用いている。

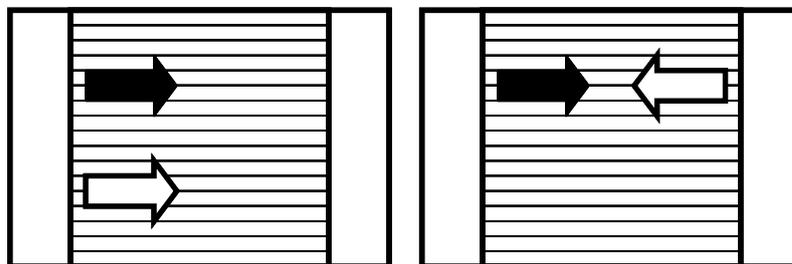


図 2.3.1 対向流型熱交換器と流体の流れ方向の概略図(左: 並行流、右: 対向流)

2.3.1.2 実験装置

1) 高温水 - 低温水における熱交換器の伝熱流動計測

図 2.3.2 に作動流体に高温水と低温水を用いた場合の実験装置の概要図を示す。実験装置は主にタンク、ポンプ、テスト部、計測機器からなる。流量は面積式流量計を用いて計測する。また、熱交換器の出入口には圧力変換器と熱電対が設置してあり、圧力と温度が計測できるようになっている。

表 2.3.1 対向流型熱交換器の流路寸法

		流路径 [μm]	積層数 [層]	流路数 [本/層]	全流路数 [本]	ストレート長 [mm]	伝熱面積 [m ²]
(1)	高温側	500×500	6	31	186	0	0.0120
	低温側		5		155		0.0100
(2)	高温側	500×500	6	31	186	20	0.0192
	低温側		5		155		0.0160
(3)	高温側	500×500	6	31	186	40	0.0266
	低温側		5		155		0.0221
(4)	高温側	500×500	16	31	496	20	0.0511
	低温側		15		465		0.0479
(5)	高温側	500×500	21	31	651	20	0.0670
	低温側		20		620		0.0638
(6)	高温側	250×250	6	61	366	20	0.0188
	低温側		5		305		0.0157
(7)	高温側	250×250	11	61	671	20	0.0345
	低温側		10		610		0.0314

2) 蒸気 - 水における熱交換器の伝熱流動計測

図 2.3.3 に作動流体に蒸気と水を用いた場合の実験装置の概要図を示す。実験装置は主に電気ボイラー3台、バッファータンク、減圧弁、テスト部、計測機器からなる。熱交換器の出口にはビーカーと電子天秤を設置して、蒸気が全量凝縮した際の凝縮水量を計測する。また、熱交換器の出入口には圧力変換器と熱電対が設置してあり、圧力と温度が計測できるようになっている。

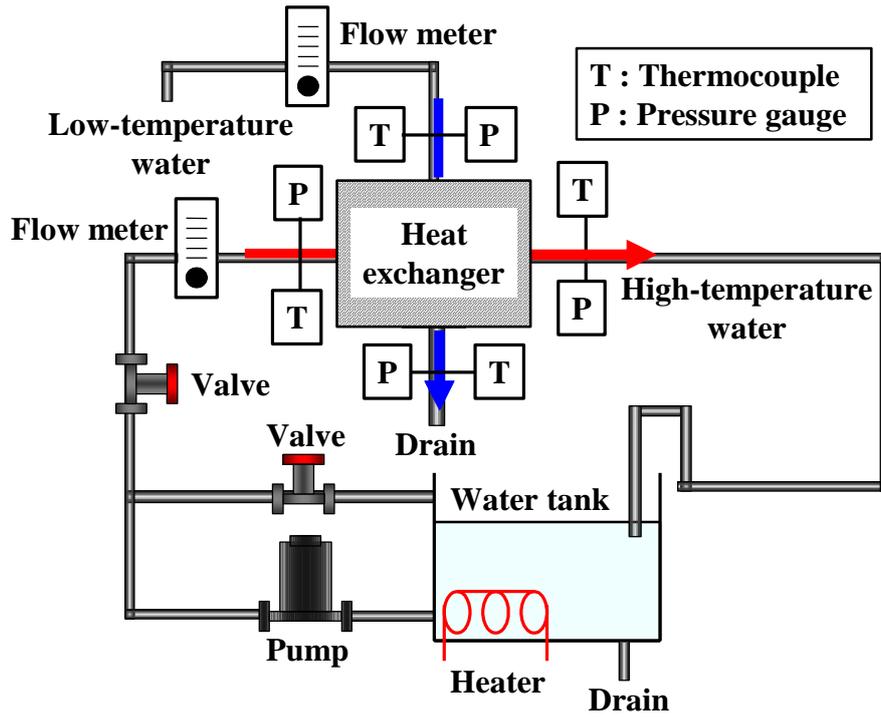


図 2.3.2 作動流体に高温水と低温水を用いた場合の実験装置

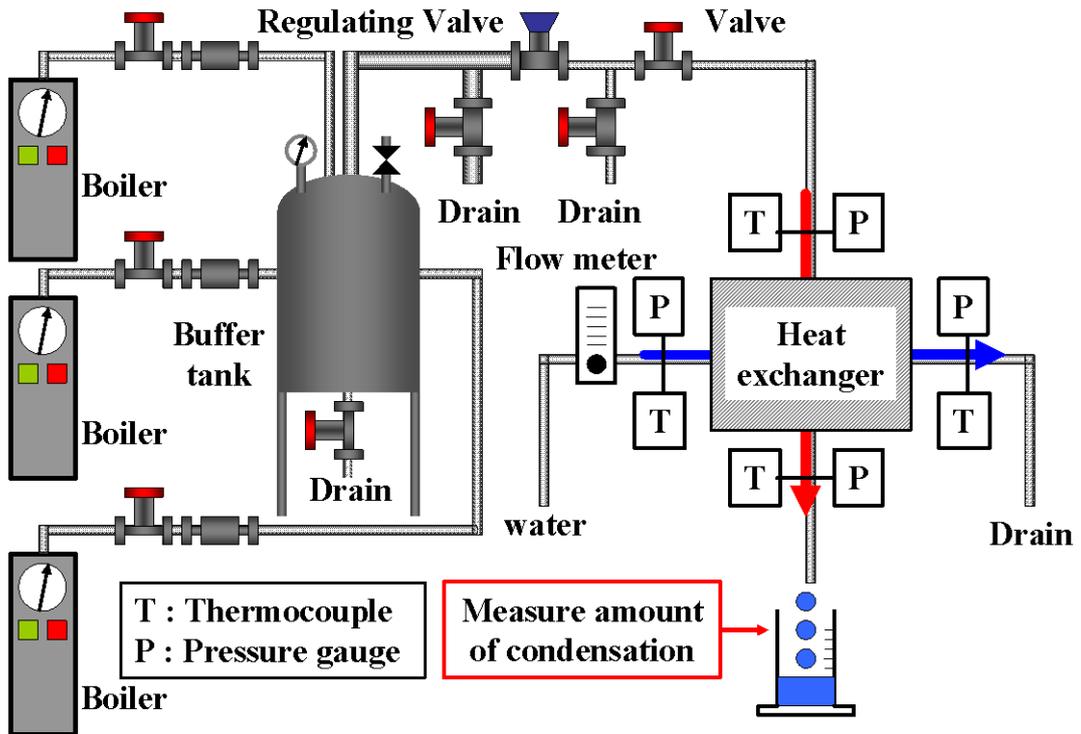


図 2.3.3 作動流体に蒸気と水を用いた場合の実験装置

2.3.1.3 実験結果

1) 伝熱流動特性に及ぼす流路長の影響

マイクロチャンネル積層型熱交換器の設計指針を明らかにするために、まず、伝熱特性に及ぼす流路長の影響を調べた。流路径 $500 \times 500 \mu\text{m}$ 、積層数 6/5 層、ストレート長 0 mm、20 mm、40 mm である熱交換器を用いて、ストレート長をパラメータにして、熱交換量、熱通過率及び温度効率を算出した。実験条件は、高温入口流量が 1.0~3.0 lit/min、高温入口温度が 80 °C、低温入口流量が 1.0~3.0 lit/min、低温入口温度が 10 °C である。

図 2.3.4(左)に低温水のレイノルズ数に対する熱交換量を示す。高温水のレイノルズ数は $Re_h = 982$ で一定にした。図より、すべてのマイクロチャンネル積層型熱交換器において、低温水のレイノルズ数が増加するに伴い、熱交換量は増加することが確認された。それぞれの熱交換器における熱交換量を比較すると、ストレート長が 20 mm 長くなることで、熱交換量はおよそ 500 W 増加し、ストレート長が 40 mm である熱交換器の熱交換量が最も高くなることが確認された。このことから、ストレート長が長くなることで、熱交換量が線形的に増加することが示唆された。また、ストレート長が 0 mm である熱交換器においても、約 2.5~4 kW の熱交換量を有することが確認された。このことから、マイクロチャンネル積層型熱交換器は、直交流の部分においても熱交換がされており、流路長が短いにも関わらず、高い熱交換量を有することが示唆された。

図 2.3.4(右)に低温水のレイノルズ数に対する熱通過率を示す。図より、すべてのマイクロチャンネル積層型熱交換器において、低温水のレイノルズ数が増加するに伴い、熱通過率は増加することが確認された。それぞれの熱交換器における熱通過率を比較すると、ストレート長が 0 mm である熱交換器の熱通過率が最も高くなり、ストレート長が増加するに伴い、熱通過率は減少することが確認された。これは、マイクロチャンネル積層型熱交換器は、直交流の部分のみにおいても高い熱交換量を有しており、流路の下流部においては交換する熱量が小さくなるためだと考えられる。

2) 伝熱特性に及ぼす積層数の影響

マイクロチャンネル積層型熱交換器の設計指針を明らかにするために、次に、伝熱特性に及ぼす積層数の影響を調べた。流路径 $500 \times 500 \mu\text{m}$ 、ストレート長 20 mm、積層数 6/5 層、16/15 層、21/20 層である熱交換器を用いて、積層数をパラメータにして、熱交換量、熱通過率及び温度効率を算出した。実験条件は、高温入口流量が 1.0~3.0 lit/min、高温入口温度が 85 °C、低温入口流量が 1.0~4.0 lit/min、低温入口温度が 25 °C である。

図 2.3.5(左)に低温水のレイノルズ数に対する熱交換量を示す。高温水のレイノルズ数は $Re_h = 491$ 、460、421 で一定にした。図より、すべてのマイクロチャンネル積層型熱交換器において、低温水のレイノルズ数が増加するに伴い、熱交換量は増加することが確認された。それぞれの熱交換器における熱交換量を比較すると、低温水のレイノルズ数が等しい条件において、積層数を 6/5 層から 16/15 層に増加させると、熱交換量は約 2 kW から約 6 kW になり、4 kW 増加することが確認された。これは、積層数を 6/5 層から 16/15 層に増加させることで、伝熱面積が約 3 倍になり、熱交換量も約 3 倍になったためだと考えられる。

また、積層数を 6/5 層から 21/20 層に増加させると、熱交換量は約 2 kW から約 7 kW になり、約 5 kW 増加することが確認された。積層数を 6/5 層から 21/20 層に増加させることで、伝熱面積は約 4 倍になり、熱交換量は約 4 倍にはならなかったものの、約 3.5 倍になっている。このことから、積層数を増加させることで、流路長を増加させるよりも効果的に伝熱面積を増加させることが可能であり、熱交換量の増加量も大きいことが確認された。

図 2.3.5(右)に低温水のレイノルズ数に対する熱通過率を示す。図より、すべてのマイクロチャンネル積層型熱交換器において、低温水のレイノルズ数が増加するに伴い、熱通過率は増加することが確認された。それぞれの熱交換器における熱通過率を比較すると、低温水のレイノルズ数が等しい条件において、熱通過率はほぼ等しくなることが確認された。これは、積層数が増加することで、熱交換器の 1 本の流路に流れる流体の流量が小さくなるが、レイノルズ数が等しい条件にしているために、流体の流量を大きくする必要があり、それに伴い、流体の流路分配も均一になり、すべての流路において交換する熱量が等しくなるためだと考えられる。

3) 伝熱特性に及ぼす流路径の影響

マイクロチャンネル積層型熱交換器の設計指針を明らかにするために、最後に、伝熱特性に及ぼす流路径の影響を調べた。ストレート長 20 mm、積層数 6/5 層、流路径 500×500 μm 、250×250 μm である熱交換器を用いて、流路径をパラメータにして、熱交換量、熱通過率及び温度効率を算出した。実験条件は、高温入口流量が 1.0～2.0 lit/min、高温入口温度が 85 $^{\circ}\text{C}$ 、低温入口流量が 1.0～4.0 lit/min、低温入口温度が 25 $^{\circ}\text{C}$ である。

図 2.3.6(左)に低温水のレイノルズ数に対する熱交換量を示す。高温水のレイノルズ数は $Re_h = 982, 998$ で一定にした。図より、どちらのマイクロチャンネル積層型熱交換器においても、低温水のレイノルズ数が増加するに伴い、熱交換量は増加することが確認された。また、流路径が 250×250 μm である熱交換器の方が、流路径が 500×500 μm である熱交換器よりも、熱交換量が高くなることが確認された。流路径が 250×250 μm である熱交換器と流路径が 500×500 μm である熱交換器の伝熱面積はほぼ等しいにも関わらず、流路径が小さい熱交換器の方が、熱交換量が高くなる原因は、流路径が小さくなることで、熱交換器の 1 本の流路に流れる流体の流量が小さくなり、熱量が交換されやすくなるためだと考えられる。

図 2.3.6(右)に低温水のレイノルズ数に対する熱通過率を示す。図より、どちらのマイクロチャンネル積層型熱交換器においても、低温水のレイノルズ数が増加するに伴い、熱通過率は増加することが確認された。また、流路径が 250×250 μm である熱交換器の方が、流路径が 500×500 μm である熱交換器よりも、熱通過率が約 4 kW/m²K 高くなり、低温水のレイノルズ数が低い条件においては、熱通過率は約 2 倍になることが確認された。このことから、流路径が半分になることで、熱通過率は 2 倍になり、熱伝達率は流路断面寸法の逆数に比例するという従来の考えと一致することが示唆された。これは、流路径が小さくなることで、流体における熱伝導の影響が小さくなり、熱伝達が支配的になるためだと考えられる。

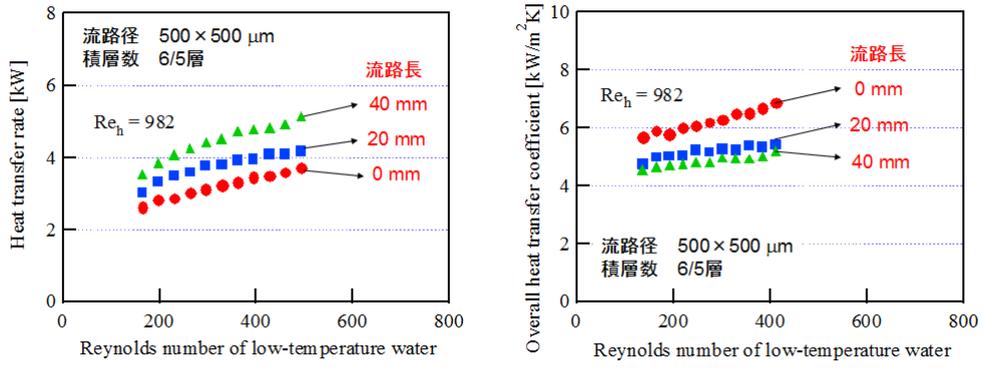


図 2.3.4 低温水のレイノルズ数に対する熱交換量(左)と熱通過率(右) (流路長の影響)

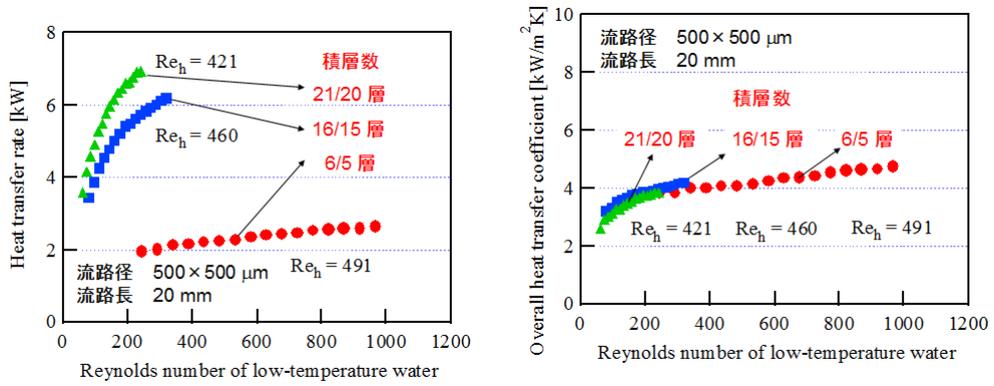


図 2.3.5 低温水のレイノルズ数に対する熱交換量(左)と熱通過率(右) (積層数の影響)

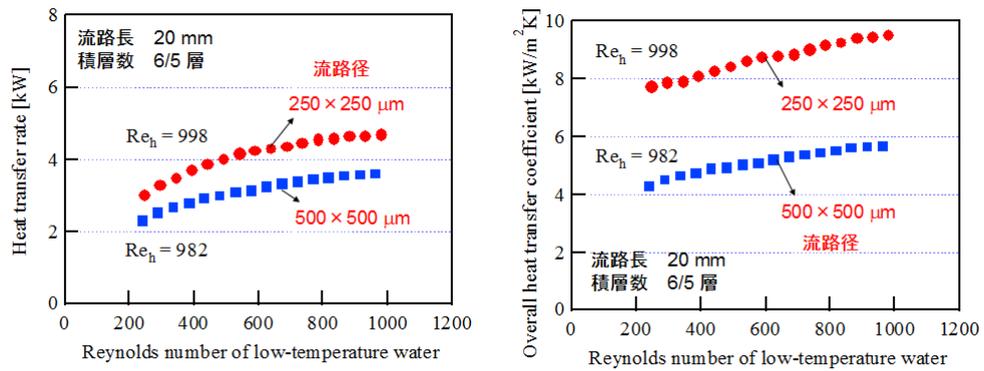


図 2.3.6 低温水のレイノルズ数に対する熱交換量(左)と熱通過率(右) (流路径の影響)

2.3.2 構造の最適化による小型化

2.3.2.1 実験概要

微細管の伝熱流動特性をマイクロチャンネル積層型熱交換器の伝熱流動特性に適応できるかを評価するために、微細管と熱交換器の熱交換量を比較することにした。単一微細管と積層型熱交換器の熱交換量を比較するには、伝熱面積を等しくする必要がある。そこで、微細管の伝熱面積と熱交換器の伝熱面積を等価にして熱交換量を比較するために、微細管の伝熱面積を熱交換器の伝熱面積に換算した換算熱量を算出する。

2.3.2.2 実験装置

1) 微細管内凝縮挙動の可視化計測

図 2.3.7 に微細管内凝縮挙動の可視化観測に用いた実験装置の概要図を示す。実験装置は主に電気ボイラー、ハイスピードカメラ、テスト部、計測機器からなる。テスト部の出口にはピーカーと電子天秤を設置して、蒸気が全量凝縮した際の凝縮水量を計測する。また、電気ボイラーに供給する水中に溶存している空気を抜くために、脱気装置を設置している。テスト部の入口には圧力変換器と熱電対が設置してあり、圧力と温度が計測できるようになっている。

図 2.3.8 にはテスト部の詳細を示す。テスト部は全長 100 mm のガラス管、50×50 mm のアクリル板及び 40×50 mm のステンレス板から構成されており、水槽内の凝縮部の長さは 40 mm とする。バックライトによりハイスピードカメラを用いて水平方向から蒸気の凝縮挙動を撮影できるように、前面と後面をアクリル板で製作した。微細管の撮影位置を調整するために、テスト部はトラバース装置に接続されている。微細管内に流入した蒸気が水槽に達する前に凝縮するのを防ぐために、フィッティング部分には断熱材を塗布している。また、本研究では、内径 240 μm 、外径 400 μm 、肉厚 80 μm 、あるいは内径 500 μm 、外径 800 μm 、肉厚 150 μm の 2 種類の微細管を使用した。どちらの微細管も、マイクロチャンネル積層型熱交換器の 1 本の流路を模擬するために、熱交換器の流路断面寸法と同等の寸法になっている。

2) 極細熱電対を用いた微細管外壁面温度計測

本研究では、マイクロチャンネルの管外壁面温度を計測するために、素線径 25 μm の K 型熱電対を使用した。また、銀ペーストを用いて熱電対を接着することにした。銀ペーストは常温で液体であるため、熱電対の先端部に確実に付着する。さらに、接着強度の増加、絶縁及び断熱をするために、銀ペーストの上からエポキシ系接着剤を塗布することにした。

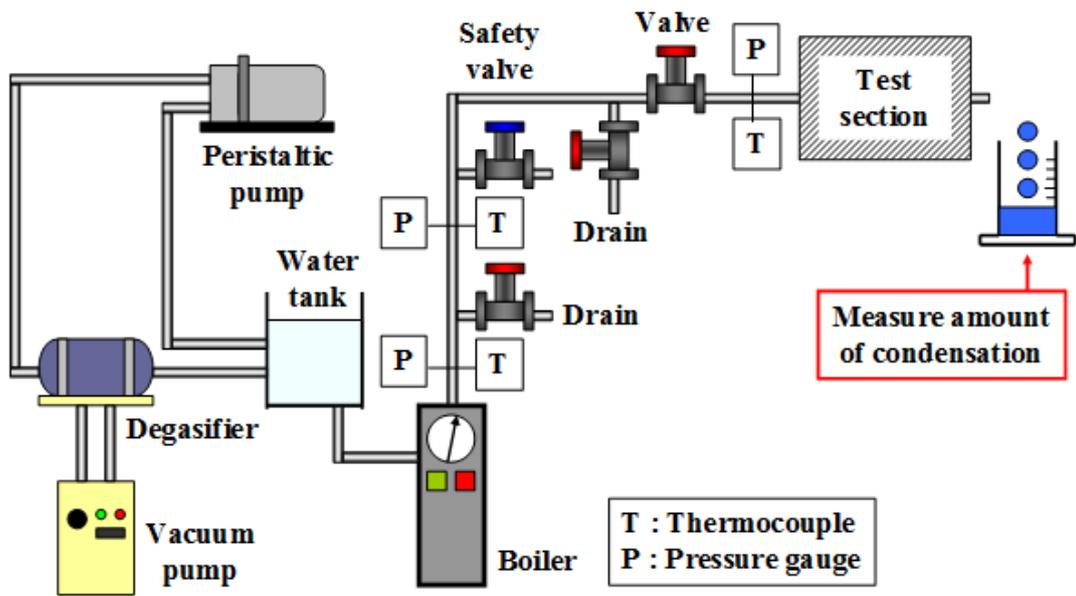


図 2.3.7 微細管内凝縮挙動の可視化観測の実験装置

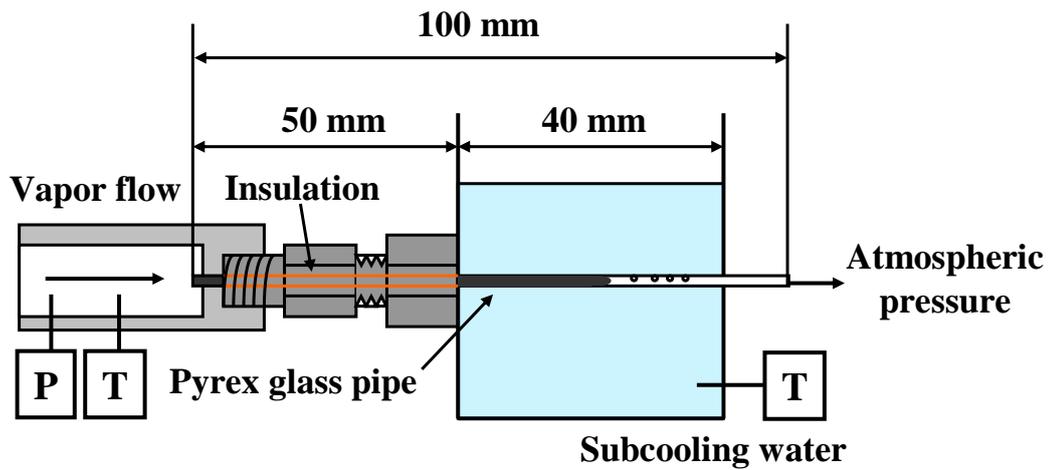


図 2.3.8 微細管内凝縮挙動の可視化観測におけるテスト部詳細

2.3.2.3 実験結果

1) 微細管と熱交換器の熱交換量の比較

図 2.3.9(左)に内径 240 μm 、外径 400 μm の微細管と、流路径 250 \times 250 μm 、流路長 66 mm、積層数 6/5 層の熱交換器の熱交換量を比較した結果を示す。図より、微細管の熱交換量は、蒸気レイノルズ数の増加に伴い線形に増加することが確認できる。熱交換器の熱交換量は、 $Re_w = 245$ の条件では、すべての蒸気レイノルズ数の条件において、熱交換器の出口での吐出状況が蒸気と水の二相流吐出であるため、熱交換量はほぼ一定になっていることが確認できる。しかしながら、 $Re_w = 490$ 及び $Re_w = 734$ の条件では、蒸気が全量凝縮しているため、蒸気レイノルズ数が増加するに伴い、水のレイノルズ数を増加させることで、熱交換量は増加することが確認できる。また、微細管と熱交換器の熱交換量を比較すると、蒸気レイノルズ数の範囲は異なるものの、微細管の熱交換量の方が熱交換器の熱交換量よりも高くなることが推定できる。これは、微細管を流れる蒸気は、その蒸気流量に対して十分な水量の水槽で全量凝縮させているため、蒸気の持つ熱量が水槽内の水にすべて伝熱したためだと考えられる。つまり、微細管の熱交換量は熱交換器の理想的な熱交換量であり、熱交換器を構造最適化することにより、熱交換量はさらに高くなることが示唆される。

図 2.3.9(右)に内径 500 μm 、外径 800 μm の微細管と、流路径 500 \times 500 μm 、流路長 66 mm、積層数 6/5 層の熱交換器の熱交換量を比較した結果を示す。図 2.3.9(左)の結果と同様に、微細管の熱交換量は、蒸気レイノルズ数の増加に伴い線形に増加することが確認できる。また、熱交換器の熱交換量は、蒸気レイノルズ数が増加するに伴い、水のレイノルズ数を増加させることで、増加することが確認できる。また、微細管と熱交換器の熱交換量を比較すると、微細管の熱交換量の方が熱交換器の熱交換量よりも高くなることが推定できる。ここで、微細管と熱交換器の熱交換量の差を図 2.3.9(左)の結果と比較すると、流路径 500 \times 500 μm の熱交換器の方が、流路径 250 \times 250 μm の熱交換器よりも伝熱性能が低いため、熱交換量の差は大きくなるものの、微量であることが確認できる。このことから、微細管と熱交換器の熱交換量の差は、実験体系にも依存していることが示唆される。そのため、微細管と熱交換器の違いを確認し、熱交換量の差がどの因子に影響を受けるのかを評価することが重要であると考えられる。しかしながら、実験体系は異なるものの、熱交換量はオーダーで一致していることから、マイクロチャンネルを模擬した微細管における伝熱流動特性が、熱交換器の伝熱流動特性を明らかにするための手助けになることが示唆される。

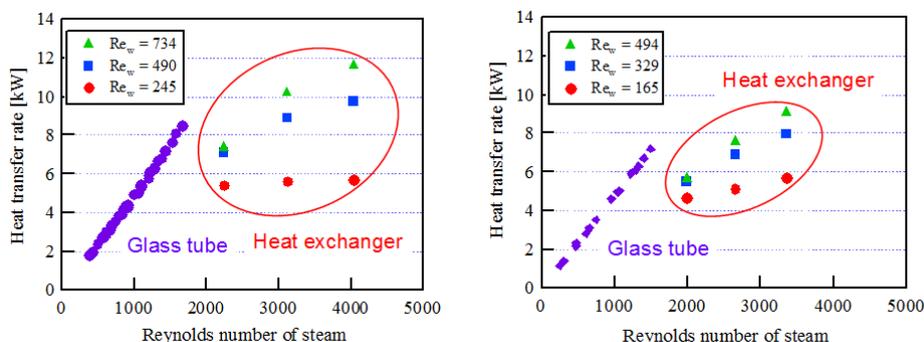


図 2.3.9 微細管と熱交換器の熱交換量の比較 ($D_{in} = 500 \mu\text{m}$)

2) 流れ方向管外壁面温度

図 2.3.10 に流れ方向管外壁面温度分布を示す。実験条件は、入口蒸気圧力が 112~162 kPa、入口蒸気温度が 102~113 °C、水槽内温度が 30±2 °C、溶存空気量が 4.2 mg/l である。また、微細管は内径 240 μm、外径 400 μm であるものを用い、微細管入口部から約 7 mm、15 mm、23 mm の地点で管外壁面の温度計測を行った。図の横軸はその計測位置を示しており、微細管の凝縮部の長さ 40 mm で除することで無次元化している。図より、 $Re = 409$ の条件では、環状流が 7 mm の計測地点に達しておらず、7 mm の計測地点での温度はわずかに高いものの、残り 2 つの計測地点での温度は水槽内温度とほぼ等しい温度になっていることが確認できる。7 mm の計測地点での温度がわずかに高い理由は、環状流は計測地点には達していないものの、環状流と計測地点の距離が近いため、微細管の熱伝導による影響を受けたためだと考えている。 $Re = 492$ の条件では、環状流が 7 mm の計測地点に達しており、7 mm の計測地点での温度が約 70 °C と高い温度になることが確認できる。しかしながら、環状流は 15 mm の計測地点には達していないため、残り 2 つの計測地点では、流れ方向下流に向かうにつれて、温度が低くなることが確認できる。 $Re = 869$ の条件では、環状流が 15 mm の計測地点にも達しており、7 mm と 15 mm の 2 つの計測地点での温度が約 70°C と高い温度になるが、23 mm の計測地点の温度は低くなることが確認できる。また、 $Re = 1380$ の条件では、環状流長さが約 32 mm となり、環状流が 7 mm、15 mm、23 mm のすべての計測地点に達しているため、3 つの計測地点での温度が約 70~80 °C でほぼ一定になることが確認できる。このことから、環状流における管外壁面温度は気泡流における管外壁面温度よりも高くなり、ほぼ一定になることが示唆される。また、環状流において、計測地点によらず管外壁面温度はほぼ一定になることから、微細管内の蒸気温度も位置によらず一定であることが示唆される。

図 2.3.11 に蒸気レイノルズ数に対する管外壁面温度を示す。図より、すべての計測地点において、蒸気レイノルズ数が増加するに伴い、管外壁面温度が増加することが確認できる。そして、計測地点が 7 mm では蒸気レイノルズ数が約 500、計測地点が 15 mm では蒸気レイノルズ数が約 600、計測地点が 23 mm では蒸気レイノルズ数が約 1000 を超えると管外壁面温度が約 70~80 °C でほぼ一定になることが確認できる。上述より、これは、蒸気レイノルズ数が約 500 を超えると、環状流が計測地点である 7 mm に達し、蒸気レイノルズ数が約 600 を超えると、環状流が計測地点である 15 mm に達し、蒸気レイノルズ数が約 1000 を超えると、環状流が計測地点である 23 mm に達していることを示唆している。このことから、管外壁面温度を計測することにより、環状流長さを予測することが可能であることが示唆される。

3) 管径の影響

図 2.3.12 に内径 500 μm、外径 800 μm の微細管における流れ方向管外壁面温度分布を示す。実験条件は、入口蒸気圧力が 103~108 kPa、入口蒸気温度が 100~102 °C、水槽内温度が 30±2 °C、溶存空気量が 4.2 mg/l である。また、微細管入口部から約 14 mm、22 mm、31 mm の地点で管外壁面の温度計測を行った。内径 240 μm、外径 400 μm の微細管における結

果と同様に、流れ方向下流に向かうにつれて、管外壁面温度が低くなることが確認できる。また、蒸気レイノルズ数が増加するに伴い、管外壁面温度は増加し、計測位置によらずほぼ一定の温度になることが確認できる。この温度を内径 240 μm 、外径 400 μm の微細管における図 2.3.10 の結果と比較すると、内径 500 μm 、外径 800 μm の微細管における管外壁面温度の方がわずかに高くなるものの、ほぼ等しくなることが確認できる。これは、熱通過率は管径の影響をほとんど受けないことが考えられているため、管壁面を通過する伝熱量が等しいためだと考えられる。

図 2.3.13 に内径 500 μm 、外径 800 μm の微細管における蒸気レイノルズ数に対する管外壁面温度を示す。内径 240 μm 、外径 400 μm の微細管における図 2.3.11 の結果と同様に、計測位置によらず、蒸気レイノルズ数が増加するに伴い、管外壁面温度は増加し、最終的にはほぼ一定の温度になることが確認できる。環状流において、管外壁面温度はほぼ一定になることから、横軸を蒸気レイノルズ数で整理することにより、温度計測位置における流動様式が明らかになることが確認できる。このことから、管の内径を変化させても、管外壁面温度を計測することにより、環状流長さを予測することが可能と示唆される。

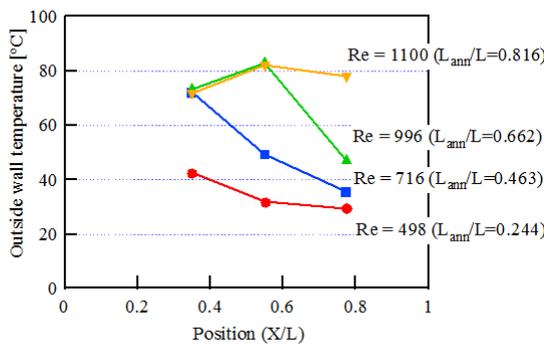


図 2.3.10 流れ方向管外壁面温度分布 (Din = 500 μm)

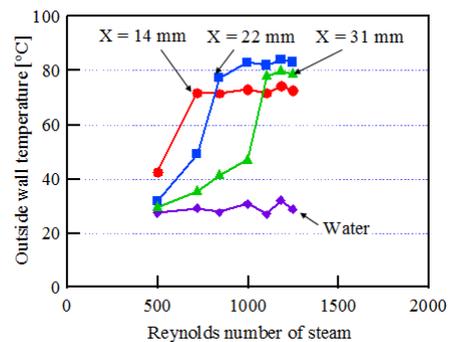


図 2.3.11 蒸気レイノルズ数に対する管外壁面温度 (Din = 500 μm)

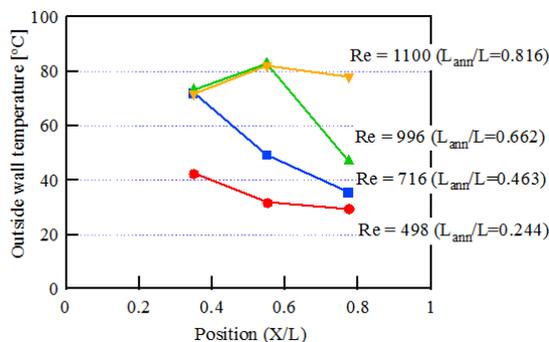


図 2.3.12 流れ方向管外壁面温度分布 (Din = 500 μm)

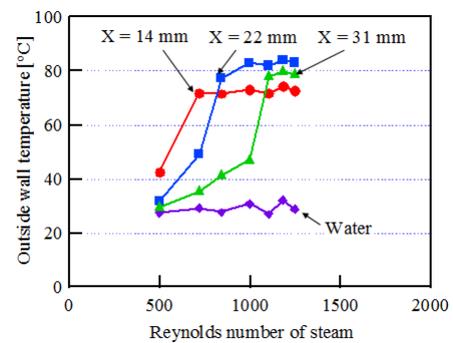


図 2.3.13 蒸気レイノルズ数に対する管外壁面温度 (Din = 500 μm)

2.3.3 考察とまとめ

拡散接合技術を用いて新たに開発した対向流型の高耐圧マイクロチャンネル積層型熱交換器の伝熱流動特性を明らかにし、熱交換器の1本の流路を模擬した微細管の伝熱流動特性と比較した結果、以下の知見を得た。

1) 高耐圧マイクロチャンネル積層型熱交換器の伝熱流動特性

- a) 作動流体に高温水と低温水を用いて伝熱流動特性を明らかにした結果、流路長や積層数を増加させて、伝熱面積を増加させることで、熱交換量及び温度効率の向上が可能であることが確認された。また、通常スケールの流路における摩擦損失係数の理論式を使用することで、圧力損失が見積もり可能であることが示唆された。
- b) 作動流体に蒸気と水を用いて伝熱流動特性を明らかにした結果、本熱交換器は大きな圧力差を必要とせずに凝縮器として作動し、熱交換量は12 kWにも達することが確認された。
- c) 本熱交換器と既存の熱交換器の熱交換量を比較した結果、高温水及び低温水流量を増加させることで、本熱交換器は既存の熱交換器よりも高い熱交換量を有することが確認された。さらに、本熱交換器は既存の熱交換器の100分の1程度の大きさであることから、システムの大幅な小型化が可能であることが示唆された。
- d) 本熱交換器と既存の熱交換器の圧力損失を比較した結果、本熱交換器は既存の熱交換器の約1/9の圧力損失になることが確認された。このことから、流量を増加させたとしても、圧縮機を含めたシステム全体として高性能になる可能性が示唆された。

2) マイクロチャンネルを模擬した微細管の伝熱流動特性

- a) マイクロチャンネルを模擬した微細管における蒸気の凝縮挙動を可視化観測した結果、環状流から噴出流へと遷移し、最終的に気泡流になる様子が確認された。また、伝熱に支配的な部分は、環状流部であることが示唆された。
- b) 環状流長さをを用いて、熱通過率を算出した結果、微細管の熱通過率は、熱交換器の熱通過率とオーダーで一致していることが確認された。このことから、微細管は熱交換器の1本の流路を模擬できていることが示唆された。
- c) 微細管と熱交換器の熱交換量を比較した結果、微細管の熱交換量は、熱交換器の熱交換量よりも高くなることが確認された。このことから、熱交換器を構造最適化することにより、熱交換器の熱交換量はさらに高くなることが示唆された。
- d) 微細管外壁面温度を計測した結果、環状流部においては、流れ方向によらず、管外壁面温度がほぼ一定になることが確認された。また、微細管内液膜厚さを計測した結果、流れ方向下流に向かうにつれて、液膜厚さが増加することが確認された。

2.4. マイクロチャンネル熱交換器の経時変化の測定

2.4.1 経時変化の測定（圧力、リーク、超音波）

2.4.1.1 概要

一般水道水を流体デバイスに用いる場合、水道水内に含まれる物理的なコンタミネーションと、カルシウムやマグネシウム成分などの析出物が問題となる。前者はフィルターによりデバイス内への流入を防ぐことは可能である。しかし後者は溶解度が温度とともに変化し、温度上昇とともに析出する。例えばカルシウムスケールの場合、80°Cで45mg/L程度であり、地域の水質によっては析出の可能性がある。ヒートポンプシステムの場合、コンプレッサで高温になった冷媒と熱交換することにより、熱交換器内で温度が上昇し析出する。そのため事前にフィルター等で除去することが難しい。また一般家庭において給湯目的で使用することを考慮すると、事前にカルシウム等を除去した水を使用することは現実的ではない。そこで、実際に水道水を加熱、通水し、マイクロチャンネル内への析出物の影響を捉え、その対策を検討した。

2.4.1.2 実験手法

図 2.4.1 に装置外観を示す。また、図 2.4.2 に装置概要を示す。

装置には 0.5L/min で市水を供給する。流量は流量計で測定しており、流量が一定になるように比例制御弁で制御を行っている。熱交換器内では以下のように流れている。

- 供給された市水は図 2.4.2 の左上より熱交換器に導入される。
- 右上から流れてくるヒーターで加熱された市水と熱交換を行って、加熱されながら左上から右下へ流れていき、一度排出される。
- 排出後ヒーターで 90°Cまで加熱し、右上より再度導入される。
- 左上から流れてくる新たな市水と熱交換を行い、冷却されながら右上から左下へ流れていき、排出される。

上記の一連の動作により、熱交換器内で市水が加熱されるため、使用環境に近い結果が得られることが期待される。上記サイクルを 24 時間連続稼働とし、圧力損失および熱交換性能を測定した。また、2833 時間経った時点で、腐食によるリークの発生がないか、ヘリウムリークテストで確認を行った。また、接合界面の以上が無い確認するため、超音波探傷を実施した。



図 2.4.1 装置外観

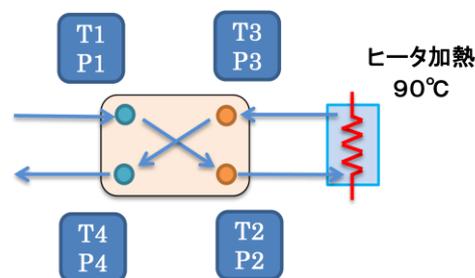


図 2.4.2 装置概略

2.4.1.3 実験結果と考察

1) 圧力損失と経時変化

図 2.4.3 に熱通過率と圧力損失の関係を示す。500 時間程度までは導入-加熱の（図 2.4.2 で左上から右下へと流れる）ラインは冷却-排出の（図 2.4.2 で右上から左下に流れる）ラインと同程度の傾きで推移している。その後は冷却-排出のラインは 1Pa/hour 程度の圧損増加で有るのに対し、導入-加熱のラインは 2~2.5 倍程度の傾きで増加している。その後 10kPa 程度をピークとして、少し減少し、2833 時間経過後のリークテストを行った段階で冷却-排出ラインと同程度となった。また、熱通過率も同様の傾向を示した

次に図 2.4.4 に入口水温と圧力損失の関係を示す。グラフには純水の動粘度傾向を示す線も示した。水温の低下とともに圧力損失が増加しており、その傾向は純水の動粘度の傾向と一致する。しかし導入-加熱側はこの傾向と乖離している。

2) 熱交換性能

次に図 2.4.5 に入口、出口温度と熱通過率の関係を示す。入口水温は季節が冬に差し掛かり、日毎に減少する傾向にあった。それに伴い熱通過率も減少していく様子が見られた。よって、当初は入口水温と性能に何らかの相関関係があると思われたが、2833 時間経過後にリークテストを実施した後、熱通過率が実験当初の値近くに戻った。

熱通過率は流量条件が一定であるならば、温度によらずほぼ一定の値を示すはずである（厳密には温度の変化による物性値の変化もあるため、必ずしも一定ではない）が、今回のように大きく変化していることから、経時による何らかの変化が考えられる。

3) 経時要因の分析

熱交換器導入口付近を観察したところ、導入口に付着物が観察された。この付着物を EDX で観察したところ、鉄と酸素が検出された。いわゆる赤さびであると考えられる。

測定装置前後における市水内の鉄の量を、共立理化学研究所製ラムダ-9000 を使用し、0.05 ~2mg/L の範囲を検出できる試薬を用いて行った。測定結果は測定装置前後とも検出限界以下であった。公表されている新潟市水の水質は 0.01mg/L 以下であった。

これらのことから、赤さびの問題は水分中の鉄の量が少なくても十分に起こると考えられる。熱通過率への影響は約 3000 時間で 15~20%程度低下することが示された。しかし、リークテスト実施時に内部エアブロー程度で熱通過率は改善する。つまりエアブローにより伝熱の障害層が除去されていると思われる。したがって性能への影響は認められるが、その除去は容易であり、本体構造への影響はほとんど無いと考えられる。

4) 構造への影響(リーク、超音波)

2833 時間通水後にヘリウムによるリークテストを実施した。リーク量は 5.0×10^{-10} Pa · m³/sec 以下であり、リークは無いと判断した。また、接合界面への影響を調査するため、超音波試験を実施したが、接合界面の異常は検出されなかった。

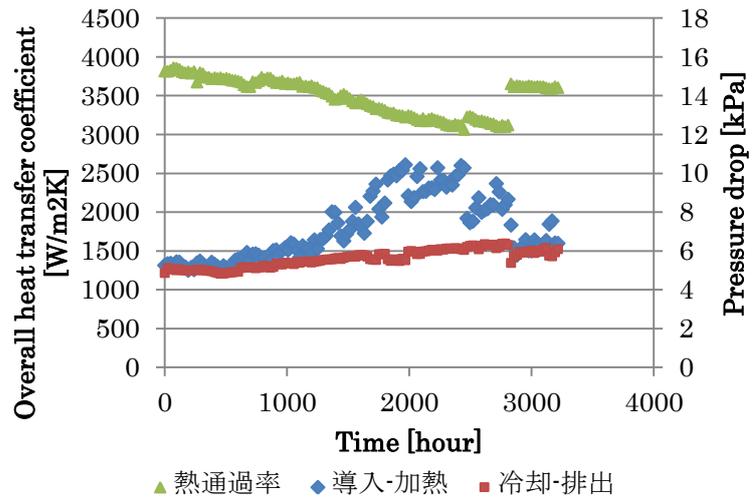


図 2.4.3 圧力損失と熱通過率

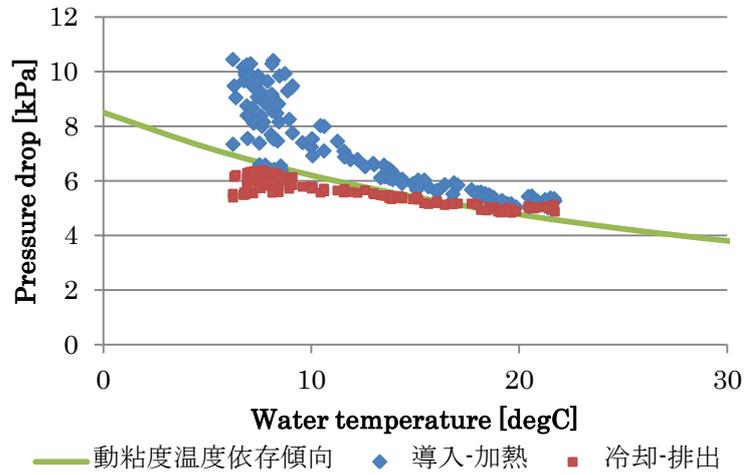


図 2.4.4 入口水温と圧力損失

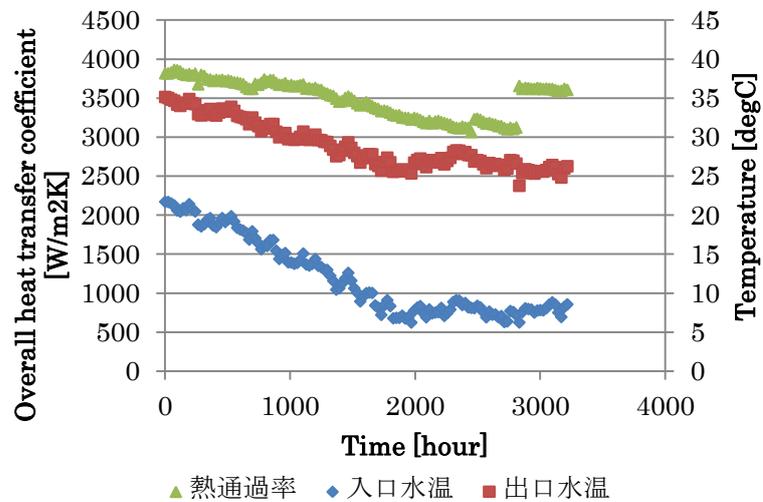


図 2.4.5 水温と熱通過率

2.4.2 異物に対する評価実験

2.4.2.1 概要

経時変化による熱交換器の劣化は、前述した水質由来の影響のほかに、コンタミネーションの影響が考えられる。異物が流路内に堆積することにより、管路の閉塞やその種類によっては腐食の起点となることが考えられる。

異物対策としてフィルターを用いる方法が考えられる。一般的な熱交換器であれば、内部流路の径が十分に大きいため、ストレーナの選定は易しい。しかし、マイクロチャンネル熱交換器の場合、管路の径が 0.5mm 以下と細いために、メッシュの開口径を細くし過ぎれば、動力負荷を増大させ、効率の高い熱交換器のメリットが損なわれる。

そこで、マイクロチャンネル熱交換器に適切なフィルターのメッシュ径を検討するために、メッシュ開口寸法をパラメータとして異物を流し、その妥当性を評価した。

2.4.2.2 実験手法

図 2.4.6 に異物試験装置概略を、図 2.4.7 に異物評価装置外観を示す。

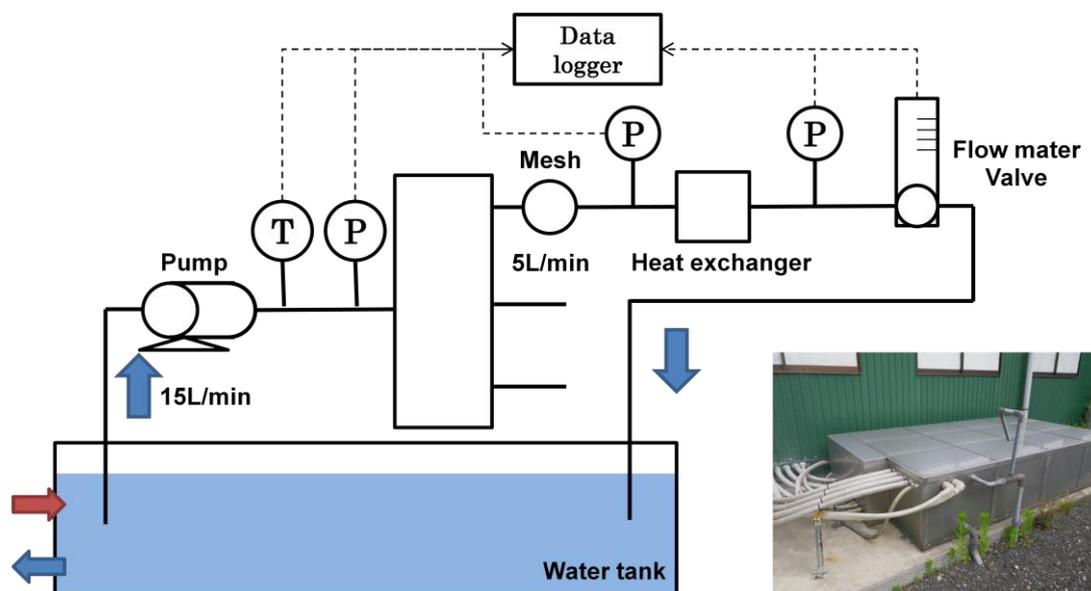


図 2.4.6 異物試験装置概略

工場用水槽からポンプで水を吸い上げ、マニホールで分岐し、各熱交換器へと供給する。熱交換器は三台同時に試験を行う。水はポンプで 15L/min 送水し、各熱交換器に 5L/min ずつ流れるように定流量弁を設けている。熱交換器の前後には圧力計を設けており、これによって圧力損失を記録する。定期的にリークテストおよびメッシュの確認を行い、経過を観察する。



図 2.4.7 異物評価装置外観

試験用水であるが、市水からは異物はほとんど検出されないため、(株)WELCON 内で装置冷却用に使用している工場循環水を用いることとした。この工場循環水をポンプで供給し、圧力変動およびメッシュの状態を評価する。

2.4.2.3 実験結果と考察

図 2.4.8 に圧力損失の測定結果を示す。単位流量当たりには換算しているが、変動は大きい。これは水槽内の温度が変わることにより水の粘度が変化することが考えられる。とくに 600 時間から 150 時間程度の間は長期休暇により徐々に水温が下がり、それに伴って圧力損失が増加していく様子が示されている。以上より、メッシュに対する異物の影響がほとんど無く、影響を与えたとしてもメッシュで適切に処理されると考えられる。

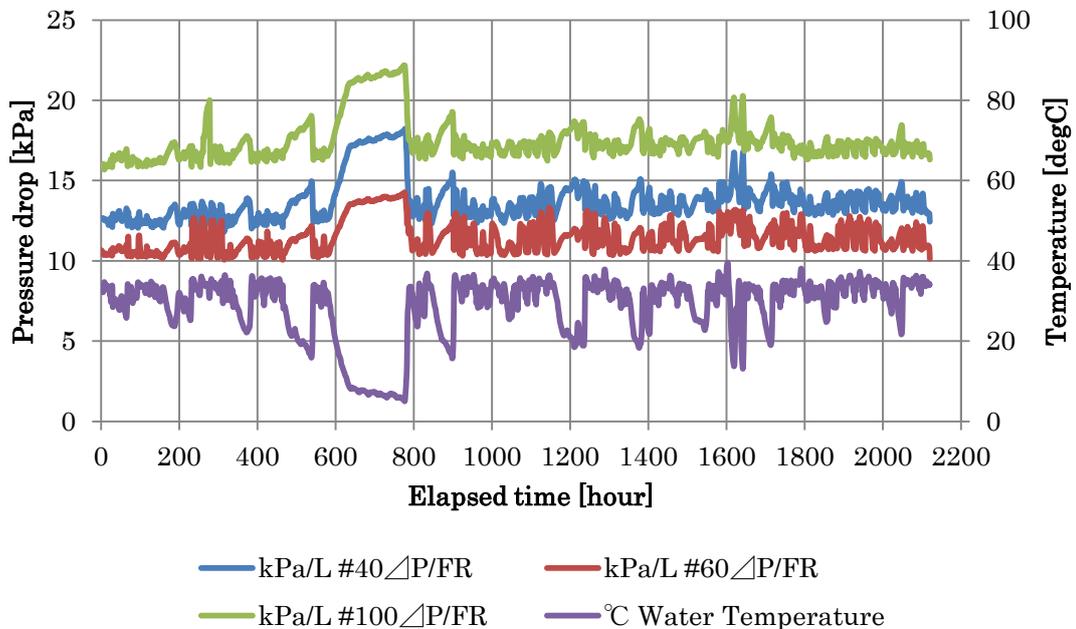


図 2.4.8 メッシュ圧力損失推移

第3章 全体総括

3.1. 複数年を通じた研究成果

3.1.1 非破壊試験による評価方法の確立

接合界面は従来、引張試験や断面組織観察などに代表される破壊試験と接合条件(温度、加圧、時間など)との相関から、接合条件が正しく実施されていれば良しとする相対評価を主として行ってきた。あるいは内部空間を保有する形状であれば、ヘリウムや水圧を用いた漏れ検査で製品を検査してきた。しかし、例えばリーク検査であれば、接合面に傷などが有り、内部と外部の空間が非常に薄い壁厚さしかなくなっていたとしても、検査中にリークが発生しなければ良品とされる。このとき、界面の状態を非破壊で見ることが可能であれば、これらの問題も見つけることが出来る。そこで、本研究では超音波を用いて界面を評価する手法を確立することを目的とした。

そこで、薄板を複数枚積層して製作する拡散接合の界面を捉えるため、超音波試験の全波形を収録し、測定後任意の深さの音響画像が得られるシステムを構築した。

非破壊検査に関しては、一般的なステンレス鋼に関して、破壊試験と非破壊試験の実験を行い、両者を比較した。それによると、界面からの超音波反射の面積は、接合強度と相関があることが示された。これにより、ステンレス鋼に関して非破壊で接合強度を推定することが可能となった。また、これらは一般的な縦波を用いた検査で十分であることが示された。

また、密着しているが接合強度がないキッシングボンドに関して、その検出のために横波を用いる手法と非線形を用いる手法を構築した。横波は測定物の形状や配置に制限が多く、適用が難しいが、スポット溶接で発生するコロナボンドと呼ばれるキッシングボンドの検出に成功した。

非線形を用いる手法では、大振幅のバースト波を発生させる超音波探傷子とパルサーを構築し、極めて狭い領域ではあるが、拡散接合で製作した超音波試験片でサブハーモニックの観測に成功した。これは拡散接合品の超音波探傷の幅が広がるのと同時に、再現が難しいとされるキッシングボンドのマスターを製作できる可能性も同時に示されたこととなる。

非破壊試験の成果として、拡散接合品の界面の信頼性を向上させるだけでなく、超音波試験片としての事業展開も考えられ、非常に大きな成果が得られた。

3.1.2 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立

拡散接合は面と面を接合する技術である。接合には圧力と熱が必要であり、拡散接合品は焼鈍しの状態となる。また、拡散接合で製作した圧力容器にかかるモードは2つ存在する。例えば円筒状の端面に蓋を拡散接合して内圧を付与した場合、蓋の厚さが十分に厚ければ接合界面の評価基準は引張強度となる。一方で蓋の厚さが薄ければ蓋が塑性変形し、接合界面にはモーメントがかかり、評価基準はピール強度となる。拡散接合界面において、特異な現象が起きず、一般的な材料力学、構造力学が適用できる現象が観察されれば、拡散接合の設計や評価手法は一般的な設計や評価が適用でき、拡散接合技術の汎用化が可能となる。

そこで、蓋の厚さ、および開口寸法をパラメータとした試験片を拡散接合で製作し、耐圧性能を評価した。その結果、接合界面に特異な破壊が見られず、一般的な応力ひずみ線図を得ら

れた。これにより、拡散接合で製作する中空デバイスを設計する場合、一般的な材料力学や構造力学に基づいて設計が可能であることが示された。

また、材料として軟質材であるアルミニウム材を用いた接合を行い、変形の評価を行った。アルミニウム材の場合、ステンレス鋼と比較し、変形率が增大するだけでなく、平面度の変形も発生することが示された。得られた変形率と傾向を元に、より複雑な形状に軟質材料を適用できる可能性が示された。

3.1.3 マイクロチャネル構造への設計指針の適用

マイクロチャネルは小型で高性能であることが知られていた。この流動現象を解き明かすことにより、最適化を図ることが可能となる。最適化はデバイス全体の最適化および微細管内の伝熱流動メカニズムの両方を図ることが必要となる。

微細管内の伝熱流動メカニズムに関して、蒸気レイノルズ数が低い領域で熱通過率が高くなる現象や、不凝縮性ガスが性能に与える影響は小さいこと、凝縮熱伝達率が高いために性能は微細管外壁の伝熱が支配的であることなどが確認された。さらに、液膜厚さが下流方向に進むにつれ厚くなることが確認された。また、マイクロチャネル内の凝縮による交換熱量を面積倍した値と、実際のデバイスの交換熱量に乖離が見られたが、これは微細管外壁面の熱伝達が支配的であることが分かり、実際のデバイスのさらなる性能向上が可能であることが示された。

デバイスの性能は、積層数、流路長さ、流路径などをパラメータとして評価を行い、伝熱面積の増加および、流路径の縮小によって性能の向上が確認された。これにより、一般的な熱交換器の設計手法が適用されることが示された。

3.1.4 マイクロチャネル熱交換器の経時変化の測定

マイクロチャネル流路を持つデバイスは、その流路の細さおよび流体間の壁厚さから、腐食やスケールの影響が大きい。特に使用者視点から見た場合、その性能よりも長期的に使用できるか否かが重要となる。そのため、経時変化の影響を解き明かすとともに、実際に長期間通水させて問題が無いことを確認する必要がある。

経時の信頼性という点では、長期試験において新潟市水ではカルシウムスケールの析出物は観察されなかったが、錆の析出が確認された。さらに、それによる僅かな圧力損失の増加と性能低下が確認された。しかし、析出物は容易に除去が可能であることが示され、デバイス自体への影響は無いことが確認された。これにより、長期的な運転においてもデバイスの信頼性が非常に高いことが示された。

3.1.5 システム化

事業化に向けてシステムの試作を行った。(株)WELCONの拡散接合技術を用いることにより、小型で高効率のデバイスが製作可能であることは既に示されているが、デバイスを小型化することによるシステムの小型化の検討を行った。それにより、冷媒サイクル部をA4サイズ程度に収めたコンパクトなヒートポンプサイクルを構築し、実際に駆動させることができた。

3.2. 今後の課題・事業化展開

3.2.1 現在の技術開発動向とその影響

マイクロチャンネルを利用した製品には、熱交換器の他にヒートシンクがある。ヒートシンクにはマイクロチャンネルの特徴を生かせる要望が多く、さらに熱密度が上昇しており、小型高効率なヒートシンクの需要は大きい。

3.2.2 競合技術等に対する検討

部品形状と製造手法の改善による価格の低減を図る。最適設計による部品のプレス加工化、プレス部品の接合性能の安定化を図ることにより、価格優位性を得ることを目標としてきたが、所望の微細構造に対してプレス技術の限界が生じてしまった。ただ一定板厚以下ではロール材のエッチングの自動ラインを利用することにより、プレスと同等以下のコストを実現できることが分かった。またヒートシンクにおいては、流路設計により従来では不可能な冷却能力を実現でき、製品化に近づいている。

3.2.3 現在の市場動向及びその対応

空調冷凍学会ではマイクロチャンネル構造に注目が集まっている。環境負荷の大きい冷媒の使用量を大幅に減少できること、自然災害時に冷媒の流出による窒息の危険性の減少など、効率、耐圧性能以外にも有効な点があり、将来的に有望視されている。

冷却向けなど二次側はユーザーが自由に選択できるようにする熱交換のユニット化の可能性も高まる。デバイスの高性能化に伴い冷却能力の向上が求められている。高性能ヒートシンクの検討にマイクロチャンネル構造が有力な候補として挙げられている。

3.2.4 事業化について

自社製品展開については、空調、冷凍分野における対象製品の所望の性能、価格について把握している。最近の動向としては熱交換器と比較しヒートシンク分野の需要が高い。これは熱交換器は容積を問題としなければ既存製品で対応できるが、排熱の場合は高い冷却能力が求められるため採用意欲が高い。

初期はハイスペックの置き換えを狙う。この段階では100億円以下の市場への展開を目標とする。次に量産化技術において一定の成果を得ることができれば、ボリュームゾーンを狙う。空調分野で熱交換器の市場は年間8000億円とされており、従来の熱交換器の20%が置き換わるだけでも、1600億円となる。ボリュームゾーンの製造の場合は製造を自社内にとどめるのではなく、製造会社にラインを供与し、ロイヤリティ収入で、次の事業への原資を得る形にする。

展示会、パブリシティの利用により興味本位の問合せから、引合い、受注につなげる。

学会発表は、国内だけでなく海外でも行っている。2010年5月に日本塑性加工学会からマイクロチャンネル熱交換器の開発について、三井精密技術賞を受賞した。

コンソメンバーを中心としたアライアンスの検討を進め、量産部品への採用を目指す。海外の展示会でエンジニアリングサンプルを紹介し、医療、インフラ等の高付加価値分野への展開も目指す。