

平成21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22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

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
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究目的及び目標	2
1-1-3 実施計画上の実施内容	3
1-2 研究体制	4
1-2-1 研究組織及び管理体制	4
1-2-2 管理員及び研究員	7
1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	8
1-2-4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項	8
1-3 成果概要	9
1-3-1 非破壊試験による評価方法の確立	9
1-3-2 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立	9
1-3-3 マイクロチャンネル構造への設計指針の適用	9
1-3-4 マイクロチャンネル熱交換器の経時変化の測定	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 本論	10
2-1 非破壊試験による評価方法の確立	10
2-1-1 単一界面の観察	10
2-1-2 超音波の縦波、横波を利用した界面検査方法の検討	14
2-1-3 拡散接合による超音波試験片の試作	16
2-2 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立	17
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	17
2-3 マイクロチャンネル構造への設計指針の適用	19
2-3-1 微細管内凝縮流れの伝熱流動特性	19
2-3-2 単層における相変化を伴わない伝熱流動実験	23
2-4 マイクロチャンネル熱交換器の経時変化の測定	29
2-4-1 使用環境下における経時変化の測定	29
第3章 全体総括	32

# 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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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、①CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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。

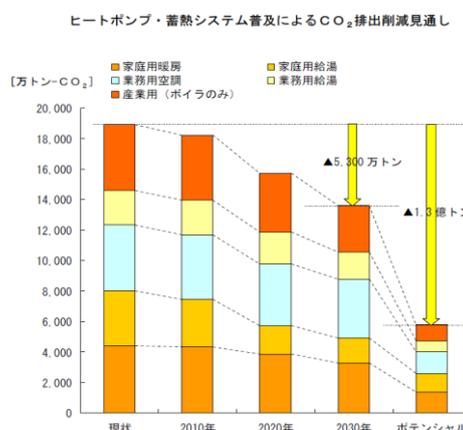


図1-1 ヒートポンプ・蓄熱システム普及による

CO<sub>2</sub>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。

特に CO<sub>2</sub> 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。

### 1-1-3 実施計画上の実施内容

#### 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 接合状態の測定、断面観察及び破壊試験の比較
- ①-2 超音波の縦波、横波を利用した界面検査方法の検討
- ①-3 拡散接合による超音波試験片の試作

#### 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
- ②-2 材料定数を考慮した設計指針の汎用化

#### 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
- ③-2 構造の最適化による小型化

#### ④ マイクロチャン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 測定装置の設計製作
- ④-2 圧力損失の測定
- ④-3 リークの測定
- ④-4 接合界面の観察

#### 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2回程度開催する。

## 1-2 研究体制

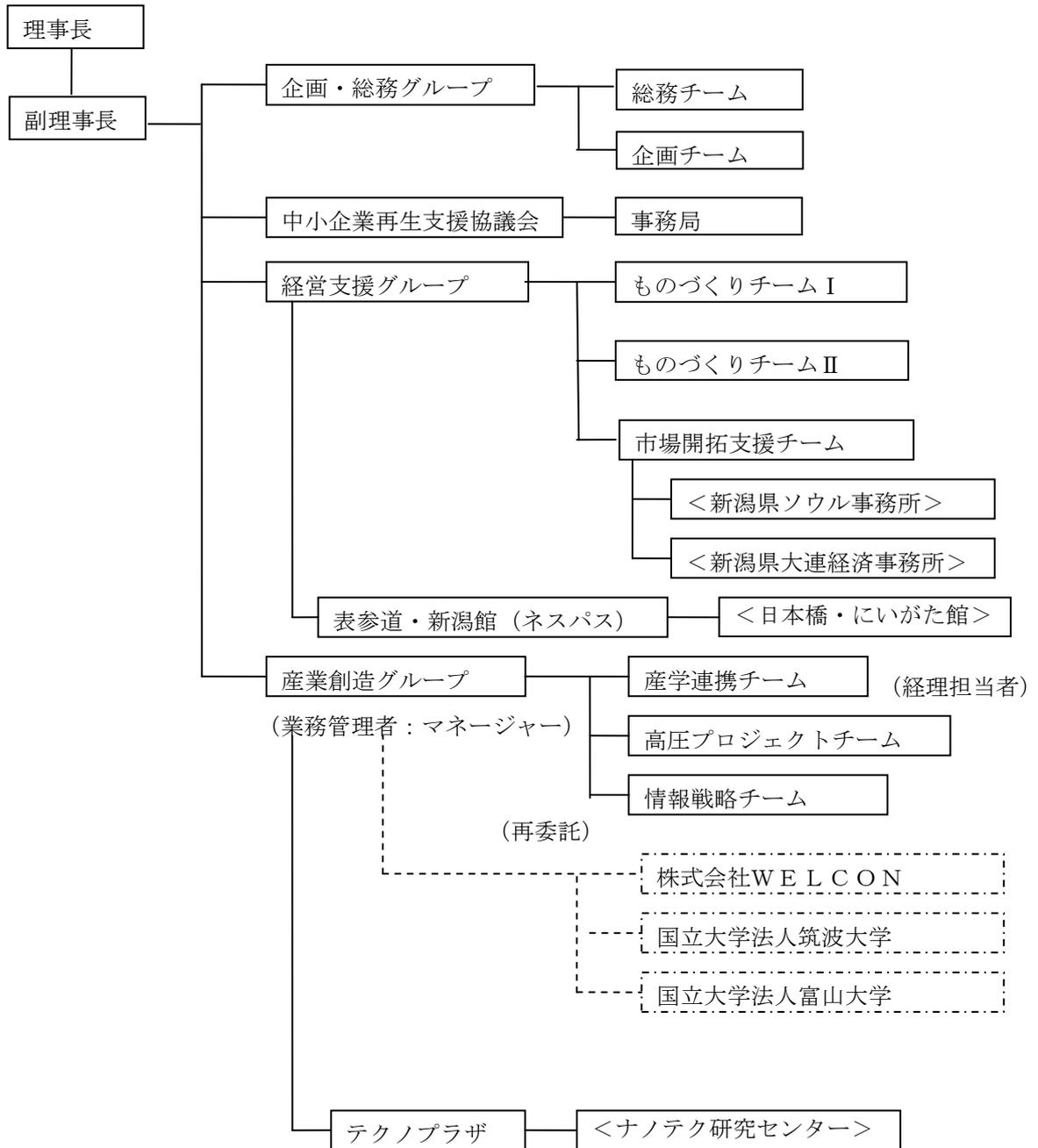
### 1-2-1 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織（全体）



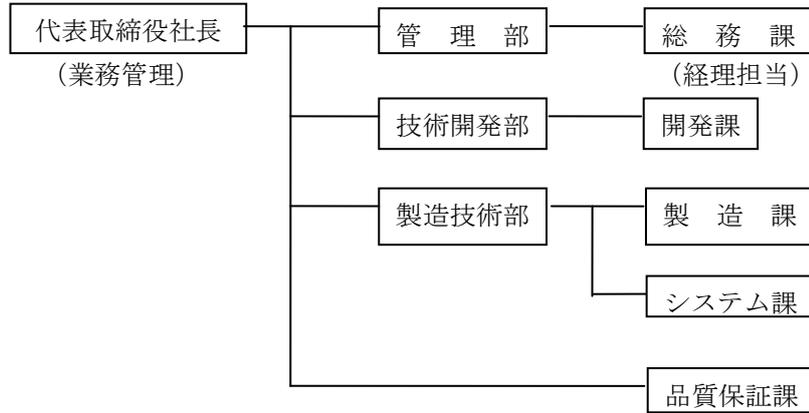
## 2) 管理体制

### ① 事業管理者[財団法人にいがた産業創造機構]

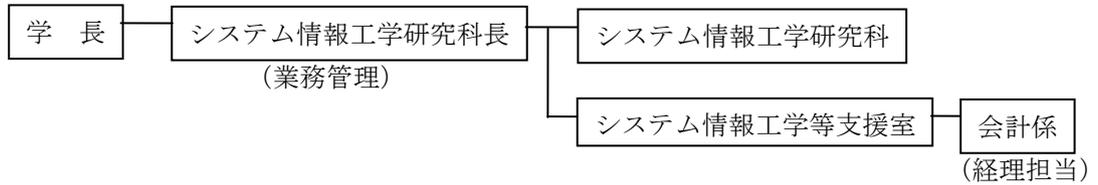


② 再委託先

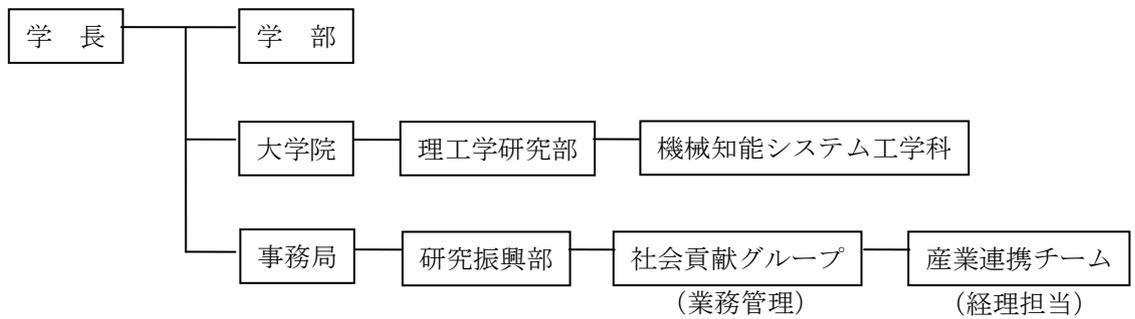
[株式会社 WELCON]



[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) 事業管理者

財団法人にいがた産業創造機構

管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
横田 優治	産業創造グループマネージャー	⑤
富田 正幸	産業創造グループサブマネージャー	⑤

### 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	①,③,④,SL
池田 大	製造技術部システム課 課長	②,③,④
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 スタッフ 千原 恵子  
 (業務管理者) 産業創造グループ シニアエキスパート 小林 和仁

(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 大町 雄介  
 (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	委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	
五十嵐 茂義	財団法人にいがた産業創造機構 ディレクター	
小林 和仁	財団法人にいがた産業創造機構 シニアエキスパート	
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
西尾 洋一	小林製薬株式会社 小林メディカルカンパニー本部 事業 戦略部 製品開発課	アドバイザー
藤井 哲雄	有限会社コロージュンテック 代表取締役	アドバイザー
嶽岡 悦雄	新潟県工業技術総合研究所 所長	アドバイザー
佐藤 猛行	新潟県産業労働観光部産業振興課 課長	アドバイザー

## 1-3 成果概要

### 1-3-1 非破壊試験による評価方法の確立

接合界面に関して界面状態の変化を破壊試験と非破壊試験で確認し、一定の相関関係を導くことができた。

超音波探傷による非破壊試験では、通常の縦波を使った場合に捉えられない欠陥を横波で捉えることができ、拡散接合の不良部への応用として適用できる可能性を示した。

また、標準試験片の試作では、実際の接合物におけるボイドが存在した場合の試験片を製作し、その結果がどのように超音波探傷機で測定されるか確認できた。

### 1-3-2 材料、形状による拡散接合の設計指針の確立

SUS316Lを使用した場合の部品形状の限界点を知ることができ、形状に対する耐圧性能とその変形率の関係についても知ることができた。それにより求められる耐圧や変形率に対する設計の指針が得られた。

### 1-3-3 マイクロチャンネル構造への設計指針の適用

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として、対向流型の熱交換器を製作し、実際に測定して、従来の直交流型熱交換器よりも性能が高いことが実証された。

また、構造の最適化による小型化として、単一微細管をモデルとした凝縮の流動現象を高速度カメラで明らかにすることができ、最適な流路径や流路長の決定のための基礎とすることができた。

### 1-3-4 マイクロチャンネル熱交換器の経時変化の測定

析出に対する圧力損失の測定のために必要な機器を選定し、長期間測定するための基本的な準備を行うことができた。また、実際のマイクロチャンネル構造において加速試験を行い、その析出の状態と圧力損失の関係を把握することができた。

## 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

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 単一界面の観察（株式会社 WELCON）

##### 1) 実験概要

単一界面における接合界面の破壊と非破壊の相関関係を把握するために、図 2-1 に示したテストピースを SUS316L で作成した。□100×t25 の SUS316L ブロックを 2 個重ねて接合し、その界面を評価した。

まず接合界面の状態を全ての条件で同一とするため、ブロックの接合面を平面研削した。研削方向は刻印を手前に置き、左右方向にした。

ブロックはそれぞれが混同しないように、端面にリユータにて刻印を施した。

拡散接合を行う前に、ブロックの厚さ、表面粗さを測定し、アルカリ洗浄と酸洗浄を行った。

洗浄を行ったブロックを拡散接合機（WELCON 自社製）にて拡散接合を行った。拡散接合は表 2-1 に示した条件で行った。

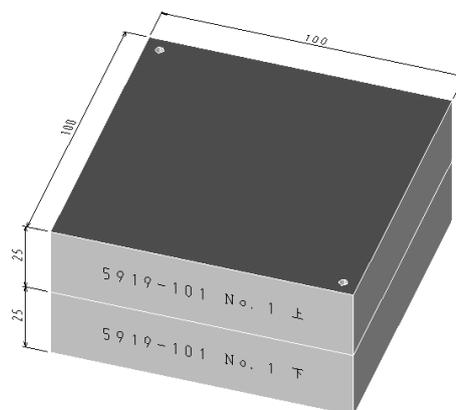


図 2-1 テストピース形状

表 2-1 単一界面接合条件表

時間	加圧力	温度				
		$T-2\Delta T^{\circ}\text{C}$	$T-\Delta T^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}\text{C}$	$T+\Delta T^{\circ}\text{C}$	$T+2\Delta T^{\circ}\text{C}$
t min	P MPa	○	○	○	○	○

拡散接合後にまずテストピースの厚さを測定し、接合前の厚さと比べて変形率を算出した。次に接合したテストピースから超音波試験用テストピース、引張試験用テストピース、断面観察用テストピースをそれぞれ放電加工にて切り出して評価を行った。

## 2) 破壊試験結果

破壊試験の結果を図 2-2 に示す。

$T-2\Delta T \sim T^{\circ}\text{C}$ において、一定の傾きで変形率が大きくなり、引張強度も同様に一定の傾きで大きくなっている。よって、この間は同一の現象で推移していると考えられる。

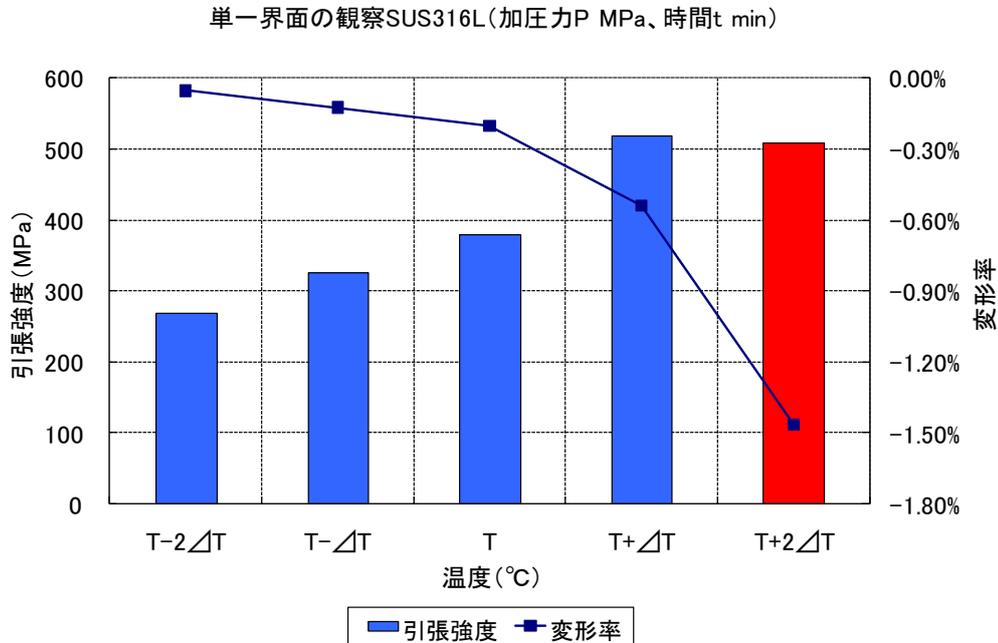


図 2-2 単一界面(SUS316L)の引張強度と変形率

しかし  $T+\Delta T^{\circ}\text{C}$ において、変形率、引張強度ともに急激に大きくなる。よって、ここが大きな変化点となっていると考えられる。 $T+2\Delta T^{\circ}\text{C}$ においては、変形が非常に大きくなり、また、引張強度は  $T+\Delta T^{\circ}\text{C}$ とそれほど変わらないが、母材破断を起こした。これは接合時の温度が高くなったことにより、材料の強度が低下したためと考えられる。

次に引張試験後の引張試験片の破断面を顕微鏡で観察した。その結果を図 2-3 に示す。

図 2-2 のグラフと同様に  $T-2\Delta T \sim T^{\circ}\text{C}$ においては接合前の状態から徐々に接触面積が増えていく様子が分かる。この間は平面研削の跡を徐々に押しつぶしながら接触面積を増やしていっていると考えられる。しかし  $T+\Delta T^{\circ}\text{C}$ になると、平面研削の跡がゆがみ、密着が急激に進んでいる様子が分かる。

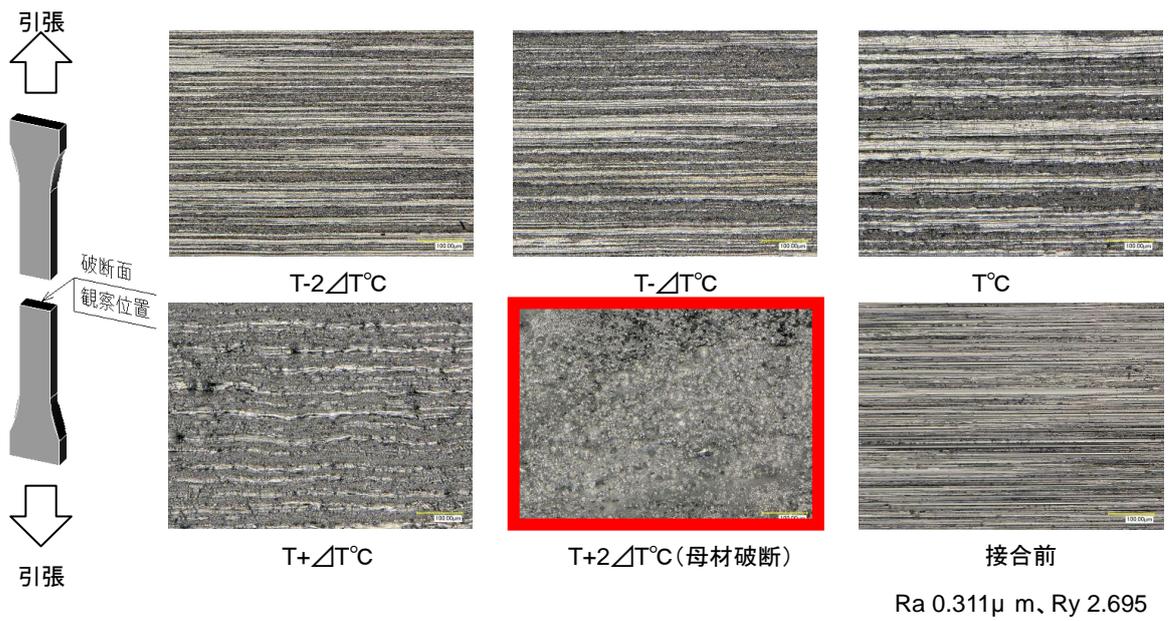


図2-3 単一界面(SUS316L)の破断面観察

次に界面の状態を断面から観察した結果を図 2-4 に示す。先ほどまでの結果のとおり、 $T^{\circ}\text{C}$ までの間ではまだ界面の密着が完全ではないが、 $T+\Delta T^{\circ}\text{C}$ においてはかなり界面の密着が進んでいる。

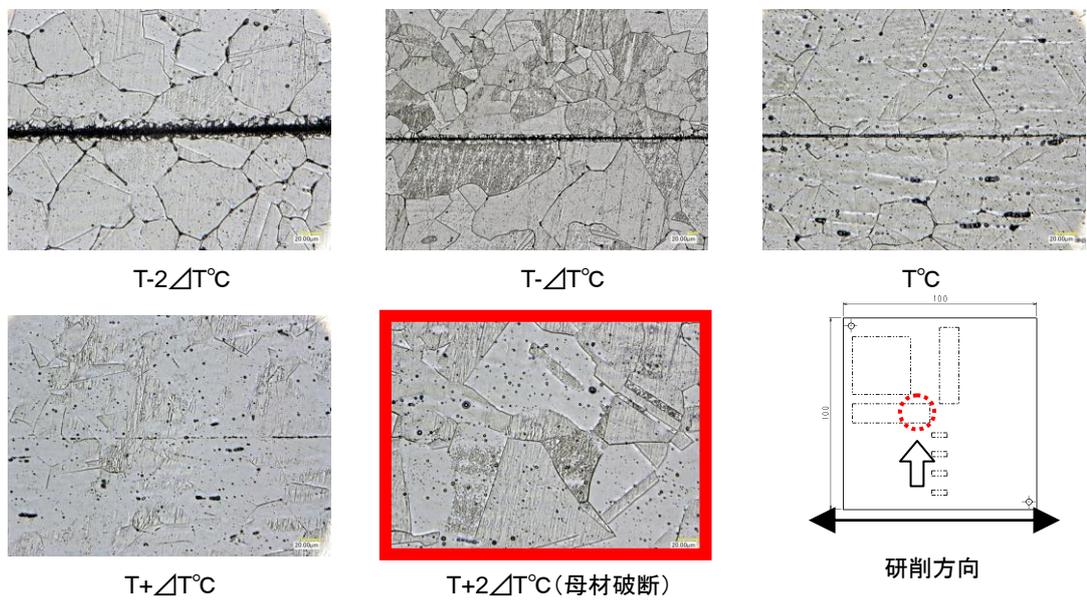


図2-4 単一界面(SUS316L)の接合断面観察

### 3) 非破壊試験の結果

非破壊試験に使用した超音波探傷装置の外観を図 2-5 に示す。一般に市販されている超音波探傷装置は、深さ方向に対してある深さのデータのみしか取得できず、異なる深さを評価する場合は再び走査する必要がある。また、装置側で必要ないと判断したデータは除去されてしまい、本当に必要なデータがあったとしても扱うことができない。

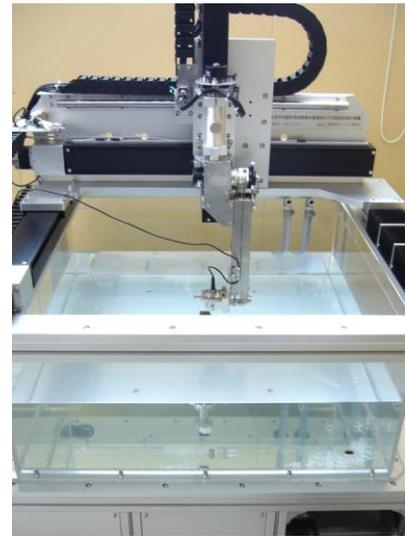


図 2-5 超音波探傷装置

そこで本研究では、内部構造が複雑であり、微小な欠陥をもつ界面や複数界面を持つマイクロチャンネル熱交換器を対象とするため、深さ方向の全てのデータを一度の走査で取り組むことが可能で、また、装置側でデータの除去を行わず、後で蓄積したデータを使用した解析が可能な装置を導入した。

超音波探傷機で測定した結果を図 2-6 に示す。画像上で黒い部分はピークが無い部分である。青い部分は微弱なピークがある部分である。一見するとテストピース内での散乱による反射を拾っているか、ノイズだと思われるが、条件の上昇につれて青い部分も消失していくため、界面の状態を僅かであるが表しているとも思われる。 $T+2\Delta T^{\circ}\text{C}$ は  $T+\Delta T^{\circ}\text{C}$  よりも青い部分が増えているが、これは結晶粒の粗大化による乱反射が  $T+\Delta T^{\circ}\text{C}$  よりも増していることを表しているのではないかと推測する。緑色の部分が反射のピークが存在すると思われる部分である。 $T^{\circ}\text{C}$ までは反射が散在しており、接合界面に空隙があることが分かる。 $T+\Delta T^{\circ}\text{C}$ 以上ではそういった部分が消失している。破壊試験の結果と比べると、それぞれ相関があるようであり、界面の評価に使用できると考えられる。

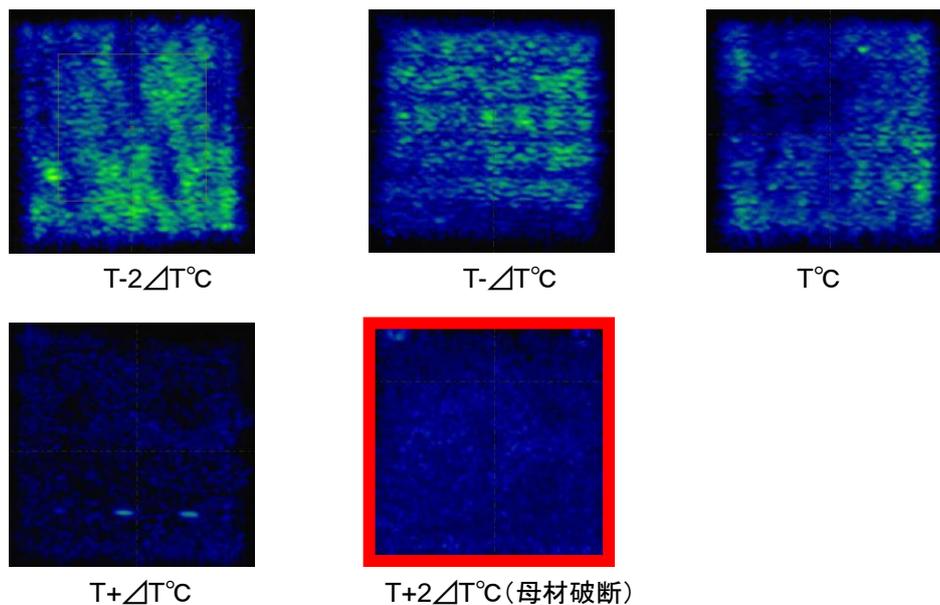


図2-6 単一界面(SUS316L)の超音波探傷結果

## 2-1-2 超音波の縦波、横波を利用した界面検査方法の検討（国立大学法人富山大学）

拡散接合構造の接合強度や健全性については、様々な接合条件で非破壊評価が不可欠であるが、本年度は拡散接合の接合強度の良否を非破壊的に評価する手法を確立するための第一段階として、最も標準的な接合条件を中心に、接合温度を変えた試験体についてまず、現在 IC や複合材料の剥離評価に実用されている、縦波集束探触子を用いて、音響計測を行った。

測定システムは、図 2-7 に示す富山大学で最近構成した汎用性の高いもので、従来の超音波剥離映像装置が断面像毎に再計測が必要であるのに対し、計測データを全て保存することで、一度測定すれば計算機上で任意の深さの断面音響画像が再構成できる。またこれまでの剥離映像装置は、高速計測を目的に、パルサーは専用の高周波用パルサーに固定され、幾つかのパルサーで測定を行う汎用性は無かった。新しいシステムでは、低周波用パルサーや、強力超音波発生用パルサー等、富山大で現有する他のパルサーを組み合わせた音響映像測定が可能のため、パルサーを変更するだけで、将来の高精度化に容易に対応できる。

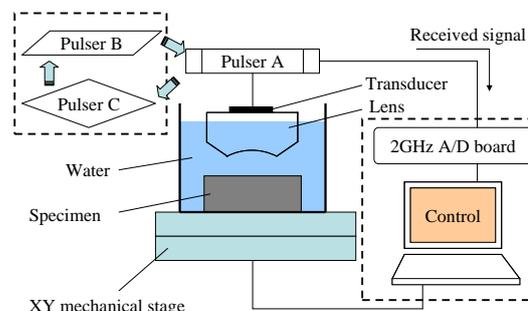


図 2-7 新しい超音波剥離映像装置

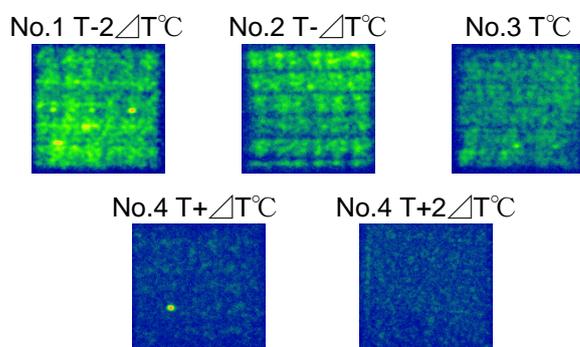


図 2-8 超音波接合界面反射エコー像

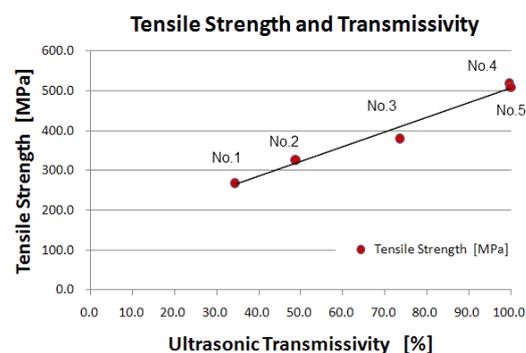


図 2-9 反射エコー画像面積と強度の関係

拡散接合試料は、前述した表 2-1 に示す接合温度を変えた 5 種類である。5MHz 縦波超音波を用いた映像法を用いて接合界面からの反射エコーの有無で映像化を行った。その結果、剥離エコー強度及び剥離画像面積は、図 2-8 に示すように接合強度に依存して変化し、接合強度が母材と同等の健全材では反射エコーは観察されなくなった。図 2-8 のノイズレベル以上のエコー画像面積率と、引張り強度の関係を調べ、図 2-9 に示した。接合強度と剥離面積率は比例関係を示した。以上より、本研究で作成した試料については、5MHz 程度の通常の縦波集束探触子に依る測定で、剥離健全性や強度が推定できることが確認できた。さらに強度測定で、強度は母材強度を示すが、接合界面で破断した試料について、周波数を 50MHz に上げて高周波数計測を行った。しかし、空間分解能の向上は見られたものの、健全材では 5MHz の計測同様、反射エコーは検出できなかった。以上、今年度本研究で準備した試験体

については、縦波集束探触子による従来の剥離映像計測法で十分、接合強度の評価が可能であることが確認できた。

以上、第一段階としての評価を終えたので、更に高精度な超音波映像計測を適用するための準備として、接触しているが接合していないことが明らかになっている、図 2-10 に示すスポット溶接におけるコロナボンド接合部を対象に、本研究で用いた計測システムを適用し、縦波測定に加えて、裏面反射モード変換横波の透過強度を映像化して、横波を用いた剥離検査測定の高感度化の可能性を検証した。

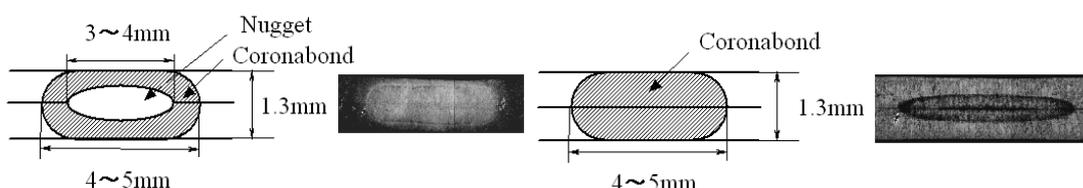
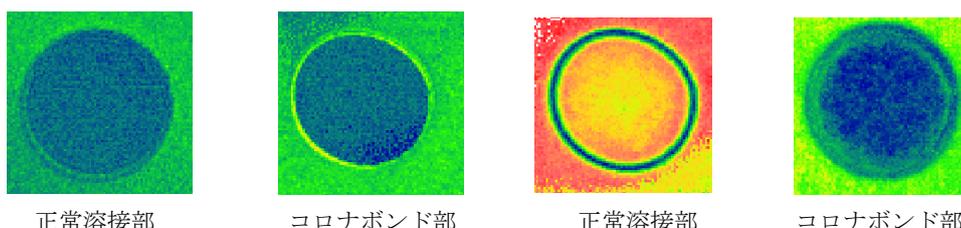


図 2-10 スポット溶接健全材(右)と不良コロナボンド(左)

その結果、縦波では図 2-11 に示すように、界面反射が起こらず正常と判断されたコロナボンド部で、図 2-12 のように横波は透過せず、予備実験で確認したと同様、正常組織と容易に判別できることが分かった。これより、横波を利用した剥離検査システムは、従来の縦波を用いる計測システムに比べ感度が著しく高いことが確認できた。得られた知見から、裏面モード変換横波の代わりに、開口角の大きい集束探触子を設計し、界面に直接横波を入射できる各種素子を試作した。適用した結果、予想と異なり、横波界面反射エコーは得られなかった。界面の良否で、剥離界面に横波を下方から通過させた場合に差異が得られ、上方から入射した場合差異が得られないことになり原因が不明である。そこで、固体内の超音波伝搬を可視化できる超音波伝搬光弾性法可視化法を適用し、試作した集束探触子の固体内への入射挙動と、裏面での反射挙動を調べた。その結果、上方からの入射横波は横波の剥離界面への入射方向が 45~60 度傾いているのに対し、下方からの裏面モード変換横波は、界面に垂直方向に入射していることを確認した。横波の縦波に比した剥離検出能の高さは、界面へ垂直にせん断波が入射することにあると考えられるため、この入射方向の差異が計測に大きな影響を与えるものと推定された。

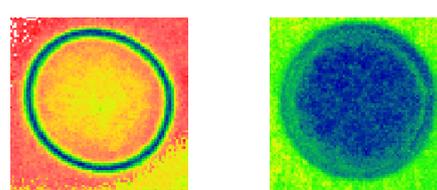
これらスポット溶接接合部で有効性が確認できた知見は、拡散接合試験体の評価においても同様に利用できると考えており、従来の縦波計測法に加えて横波計測法を適用することで新しい定量計測・評価法を確立できる可能性を示すものである。



正常溶接部

コロナボンド部

図 2-11 縦波界面反射の音響像



正常溶接部

コロナボンド部

図 2-12 裏面反射横波の界面透過音響像

### 2-1-3 拡散接合による超音波試験片の試作

現在一般的に使われている超音波試験片は、ほとんどが鋼材であるが、主に接合材料として使用するのにはステンレス材であり、ステンレス材を用いた超音波探傷の標準試験片を製作する。

超音波試験片の概要を図 2-13 に示す。形状は□30mm で厚さ 20mm の SUS316L 製ブロックに、Φ1mm の異なる深さ 3、6、9、12mm の穴を機械加工にて加工した。よって、各穴の超音波入射面からの距離は、浅いほうから 8、11、14、17mm となる。

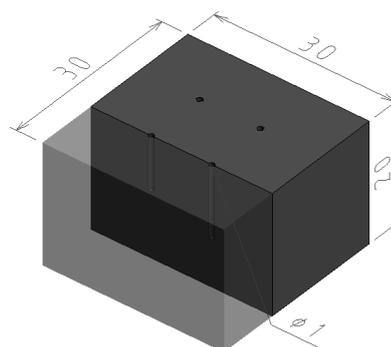


図 2-13 超音波試験体

また、このブロックは事前に拡散接合時と同じ条件で熱処理を行っている。

超音波試験片で測定する前の予備実験として、未処理の SUS316L ブロックに対して、接合を行った結果、どのように超音波が減衰するかを測定した。その結果を表 2-2 に示す。

実験は、□30mm、厚さ 15mm の SUS316L ブロックに、2-1-1 2)の各条件を付与し、その後表面反射エコーが装置表示で 100%となったときの、A スコープ画像の底面エコー強度の値で評価した。

表を見て分かるように、一定ではなく、温度条件が T°C のテストピースが高い値となった。このことから、内部の結晶粒の状態により、減衰、散乱が発生して異常な値となっていると思われる。しかしそれ以外は全て条件が高くなるにつれてエコー強度が低下しており、ブロック内での減衰と散乱が大きくなっていることが分かる。

表 2-2 超音波減衰量

	ゲイン	底面エコー強度
未処理品	18.7 dB	80%
T-2/△T°C、P MPa、t min	20.2 dB	50%
T-△T°C、P MPa、t min	21.2 dB	37%
T°C、P MPa、t min	20.2 dB	88%
T+/△T°C、P MPa、t min	19.2 dB	30%

次に、超音波試験片で測定した結果を図 2-14 に示す。探触子の周波数は 5MHz、焦点位置は入射面から 10mm の位置で測定した。図の左下が最も浅い 8mm、右下が 11mm、左上が 14mm、右上が 17mm である。

径が 1mm あるにも関わらず、深い位置にある箇所は識別が難しい状態である。これはステンレスの結晶粒が粗大化していることによって、超音波が減衰、散乱しているからである。より深い位置の欠陥を検出するためには、減衰の少ない探触子を新たに選定する必要がある。

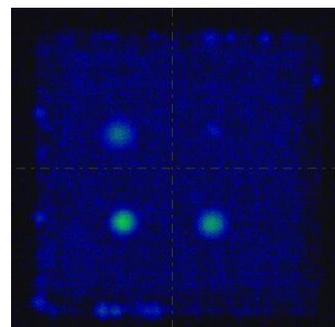


図 2-14 超音波試験片試験測定結果

## 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

#### 1) 実験概要

板厚と開口部寸法をパラメータとしたときの耐圧性能と変形の傾向を把握し、拡散接合で製作した場合の機械的構造の限界を探った。

実験のためのテストピース構造を図 2-15 に示す。図において、上面の板厚と内部開口寸法をパラメータとし、上面の変形と耐圧性能を探る。開口形状は円、四角形を用意する。接合条件は、 $T^{\circ}C$ 、 $P$  MPa、 $t_{min}$  にて行った。

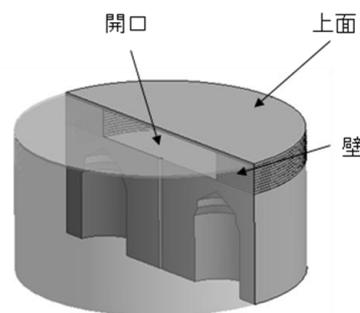


図 2-15 テストピース図

#### 2) 実験結果

実験結果の状態を図 2-15 に、実験の結果を図 2-16 と図 2-17 に示す。

上フタ 0.5t の場合をみると、 $\phi 20mm$  から  $\phi 30mm$  になった時に、変形が急激に大きくなっている。また、 $\phi 30mm$  と四角 30mm の場合、変形が非線形になっている。一方板厚を倍にすると変形は 1/6 程度に収まっている。

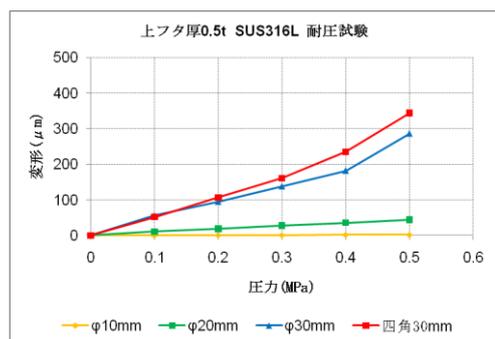


図 2-16 上フタ厚 0.5t 耐圧試験結果

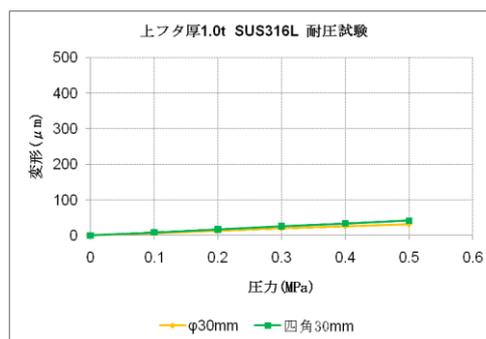


図 2-17 上フタ厚 1.0t 耐圧試験結果

実験結果とシミュレーションを比較した結果の例を図 2-18 から図 2-20 に示す。シミュレーションには ANSYS ED9.0 を使用した。

ANSYS で計算した場合には、圧力に応じて変形率が比例関係で上昇する。しかし、実際には 0.4MPa 程度から変形は上昇する。この原因について考えた。

図 2-20 は上フタの厚さが 0.5mm で、圧力を 0.4MPa 与えた場合の結果である。相当応力は 203MPa である。

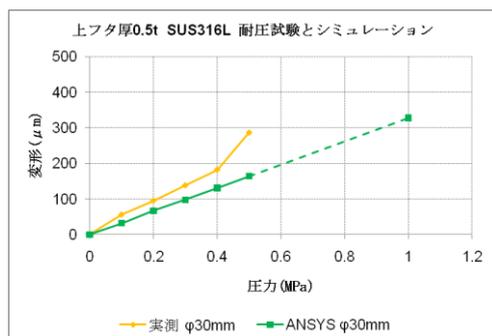


図 2-18 上フタ厚 0.5t 試験とシミュレーション

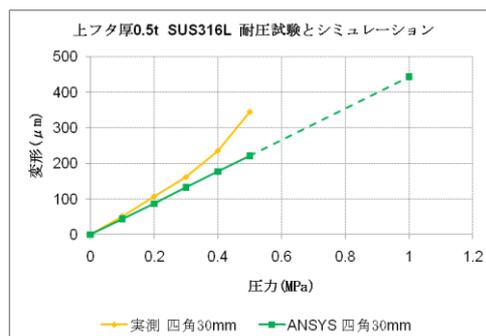


図 2-19 上フタ厚 0.5t 試験とシミュレーション

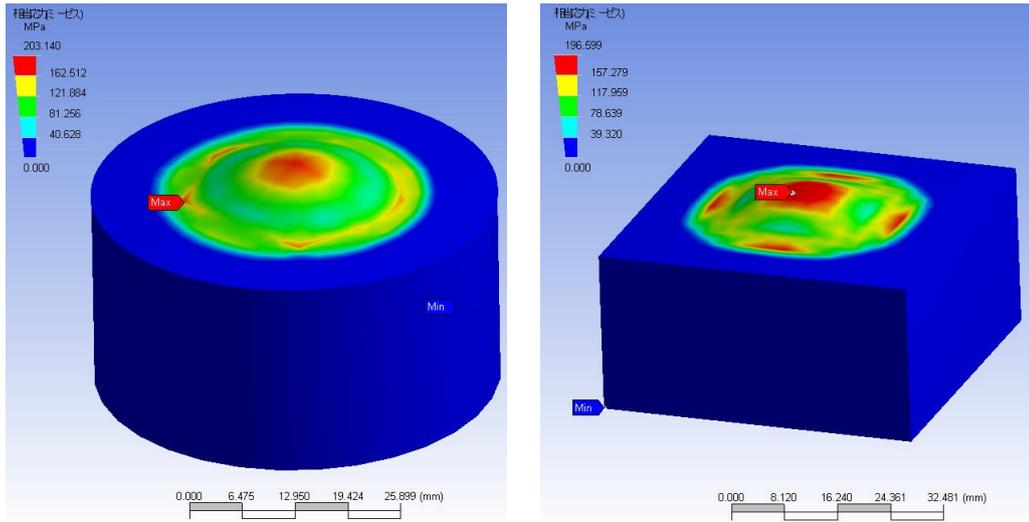


図 2-20 上フタ厚 0.5t 圧力 0.4MPa シミュレーション(左:φ 30mm、右四角 30mm)

図 2-21 に本研究で行った SUS316L 引張強度のグラフを示す。応力-ひずみ曲線における上位降伏点と言える箇所は見受けられないが、グラフの傾きからおそらく 210MPa 前後であると思われる。これは SUS316L の標準的な値と変わらない。

図 2-18 を見ると、0.4MPa より高い圧力で傾きが変わっている、これは ANSYS で検討した相当応力が発生する圧力とよく一致する。また、そのときの相当応力の値は、引張強度で求めた上位降伏点とも一致する。

ANSYS においては、変形の量は一定の傾きでしか出力されないが、材料定数を指定することにより、安全率として状態を判断できる。Φ30mm の場合も安全率が 1 付近を示しており、一般的なシミュレーションで形状に対しての予測が可能であることが分かった。

しかし、今述べたことは□30mm の場合だと、実測した変形の傾きが始まる圧力が、シミュレーション結果よりも早い。この理由として、本研究で使用したシミュレーションが下位モデルであり、要素数や接点の数に制限があるため、正確なシミュレーションができていないからであると考えられる。四角形状の方が円形よりも複雑な動きをするため、正確な結果を出すにはより上位のシミュレーションが必要となる。

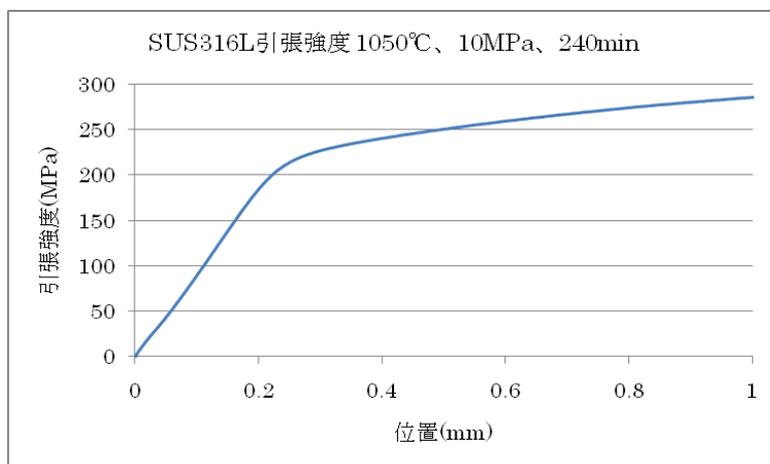


図 2-21 SUS316L 引張強度

## 2-3 マイクロチャンネル構造への設計指針の適用

### 2-3-1 微細管内凝縮流れの伝熱流動特性

熱交換器を最適化するためには、熱交換器内で生じている現象を把握する必要がある。しかし、熱交換器内は流路が多数積層されているため、構造が複雑となっており、熱交換器における伝熱流動特性を把握するのは困難である。そのため、熱交換器を最適化する初期段階として、単一流路の伝熱特性を把握する必要がある。そこで微細管内における蒸気の凝縮流れに関して流動構造と伝熱特性の関係を明らかにすることを目的とする。

#### 1) 凝縮挙動の可視化観測

##### ① 凝縮挙動の遷移課程

図 2-22 に内径 240  $\mu\text{m}$  で外径 400  $\mu\text{m}$  のガラス管における凝縮挙動の観測画像を示す。蒸気の入口圧力は 142 kPa で、水温は 28  $^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、不凝縮性ガス濃度は 33.8 ppm である。図 2-22(a)は微細管内の全体の流動を示している。蒸気は図中の左側から流れ、ガラス管壁面からの熱伝達によって凝縮している。また環状流から気泡流へと流動が遷移していることが確認できる。ここで凝縮現象を詳細に観測するために、図中の A、B、C、D 点における局所画像をそれぞれ図 2-22(b)~図 2-22(e)に示す。図 2-22(b)はガラス管入口部から約 3 mm の入口付近を観察したものである。写真左から流入した蒸気が滑らかな環状流を形成しているのが確認できる。図 2-22(c)は環状流先端部における分裂直前の挙動を観察したものである。撮影位置はガラス管入口部から約 18 mm の部分である。図 2-22(b)では確認できなかったが、環状流がくびれている箇所が存在することが確認できる。これは液膜と蒸气流の間で速度差が存在するため、界面が不安定となっていることが原因であると考えられる。図 2-22(d)は環状流が分裂している様子を観察したものである。撮影位置はガラス管入口部から約 20 mm の部分である。くびれた波が進行方向に進むにつれて大きくなり、最後には管の中央部で千切れるように気泡へと分裂する。図 2-22(e)はガラス管出口付近を観察したものである。撮影位置はガラス管入り口部から約 35 mm の部分である。図 2-22(e)では図 2-22(d)と同様に気泡流の流動形態を有していることが確認できる。また図 2-22(d)と比較すると気泡径はわずかに減少していることが確認できる。しかし気泡は完全に消失していないことより、ボイラーに投入する水に溶存していた不凝縮性ガスが析出しているためであると考えられる。

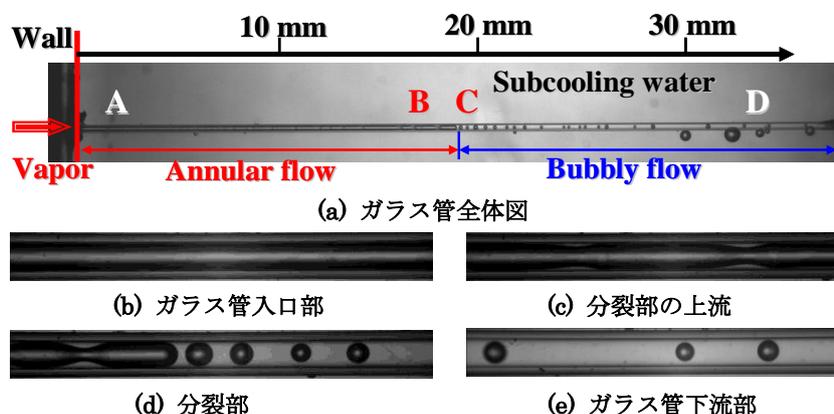


図 2-22 ガラス管における凝縮挙動(管内径 240 $\cdot\mu\text{m}$ , 外径 400 $\cdot\mu\text{m}$ )

## ② 不凝縮性ガスの影響

図 2-23 に外径 2 mm、内径 300  $\mu$  m のガラス管を用いた凝縮挙動の時系列観測画像を示す。撮影速度は 30000 fps で露光時間は 10  $\mu$  s である。図より環状流が分裂する際にも界面がくっきりと撮影できていることが確認できる。これにより、分裂時の詳細な挙動を把握することが可能となった。このことは蒸気の流動特性を明らかにする際に重要なことである。また 693  $\mu$  s の時に分裂した蒸気泡は、1089  $\mu$  s では凝縮し、気泡径が小さくなっていることが確認できる。この凝縮速度を計算することにより、凝縮のメカニズムを明らかにできる可能性が示唆される。

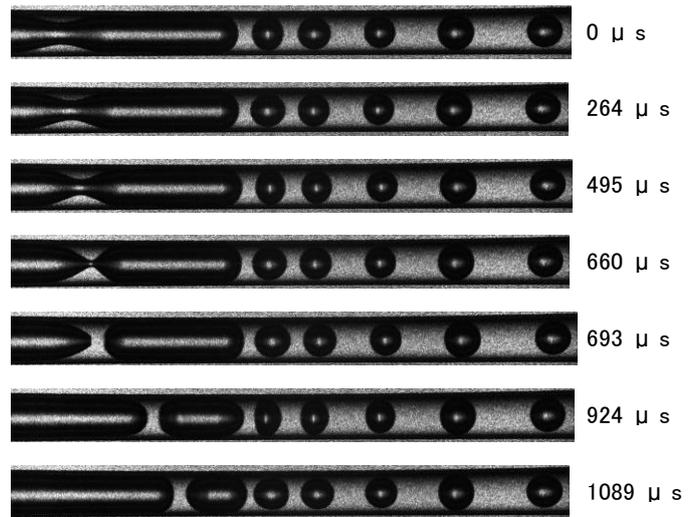


図 2-23 凝縮挙動(30000 fps, 10 $\mu$  s)

## 2) 伝熱流動特性の評価

本節では、微細管内の伝熱流動特性を定量的に評価した結果に関して報告する。2-3-1 1) では微細管の可視化観測を行い、凝縮挙動や流動様式に関して定性的に評価を行った結果を述べた。しかしマイクロチャンネル内の伝熱メカニズムに関しては未だ明らかにされていない。マイクロチャンネル熱交換器の伝熱性能を明らかにするために、単一マイクロチャンネル内の伝熱流動特性を理解する必要がある。よって本節では、単一微細管を用いた実験結果に関して、伝熱流動特性に関する面から考察する。

### ① 熱交換量

図 2-24 に内径 300  $\mu$  m で外径 1 mm のガラス管における蒸気入口圧力に対する凝縮熱量の水温依存性を示す。不凝縮性ガス濃度は 29.6 ppm で水温は 20  $^{\circ}$ C~74  $^{\circ}$ C としている。また、凝縮熱量は以下の式で定義した。

$$Q = H_{fg}W + c_{p,w}W(T_{sat} - T_{v,out}) \quad (2.1)$$

ここで、 $H_{fg}$  は凝縮潜熱、 $c_{p,w}$  は水の定圧比熱、 $T_{sat}$  は蒸気の飽和温度、 $T_{v,out}$  は蒸気の出口温度を表している。本来ならば水の温度上昇を利用して熱交換量を求める必要があるが、本実験ではバルク水量が蒸気流量に比べ大きいため、バルク水の温度上昇を計測することができない。そのため本報告では凝縮熱量を熱交換量として議論することとする。

入口圧力が上昇するに伴い凝縮熱量も増加していることが分かる。また、水温が上昇することで凝縮熱量はわずかに減少していることが分かる。入口圧力が増加することで、ガラス管内部に流入する蒸気流量は増加する。それにより、凝縮熱量も増加することが考えられる。また、水温の上昇により凝縮熱量が減少することに関しては以下のことが考えら

れる。水温が上昇することにより、同じ入口圧力でも流動様式が変化する。管内の流動様式に伴い圧力損失が異なると仮定すると、入口圧力が同じであっても管内を流れる流量が異なることが考えられる。それにより凝縮熱量が異なり、水温を上昇させると凝縮熱量が減少する傾向にあるということが考えられる。

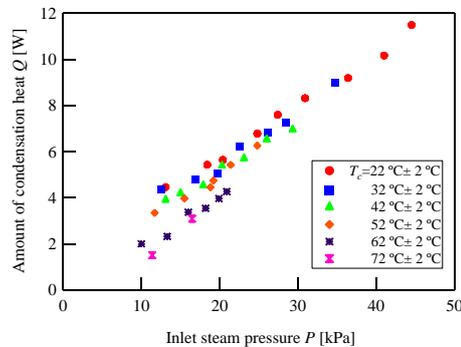


図 2-24 入口蒸気圧力に対する凝縮熱量

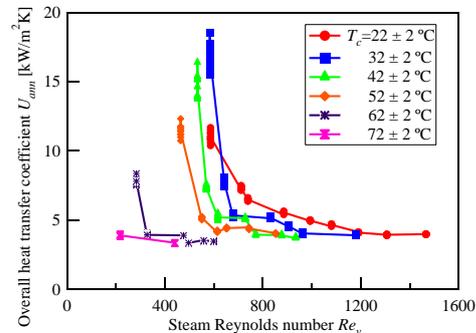


図 2-25 蒸気レイノルズ数に対する熱通過率

## ② 熱通過率

図 2-25 に内径 300  $\mu\text{m}$  で外径 1 mm のガラス管におけるレイノルズ数に対する熱通過率の温度依存性を示す。不凝縮性ガス濃度は 29.6 ppm で水温は 20  $^{\circ}\text{C}$  ~ 74  $^{\circ}\text{C}$  としている。レイノルズ数及び熱通過率は以下の式で定義した。

$$Re_v = \frac{u_v D_{in}}{(\mu_v / \rho_v)} \quad (2.2)$$

$$U_{ann} = \frac{H_{fg} W}{\pi D_{in} L_{ann} (T_{sat} - T_c)} \quad (2.3)$$

ここで、 $D_{in}$  はガラス管内径、 $\mu_v$  は蒸気の粘性係数、 $L_{ann}$  は環状流長さ、 $T_c$  はサブクール水温度である。本来ならば、本研究では流れ方向に対して蒸気が凝縮しているため、質量の移動を考慮してレイノルズ数を定義する必要がある。しかし本研究では簡単化のため、上式で定義することとする。また前節の凝縮挙動の可視観測結果より、蒸気が凝縮する部分は主に環状流長さの部分であることが示唆されたため、熱通過率を上式で定義した。

図よりレイノルズ数が高い場合には熱通過率はほぼ一定値となっているが、レイノルズ数が低い場合には熱通過率はレイノルズ数が高い場合と比べ高くなっていることが分かる。また水温が上昇するにしたがって熱通過率は減少する傾向にあることも分かる。熱通過率の定義式より、凝縮潜熱、ガラス管内径及び水温は定数である。つまりレイノルズ数を増加させることで変化するパラメータは凝縮水の質量流量、環状流長さおよび蒸気の飽和温度である。以上のことより、環状流長さの変化を調べることが重要であると考えられる。水温が上昇するとサブクール度が減少するので、熱通過率の定義式より熱通過率は上昇するはずである。しかし熱通過率が減少しているということは環状流長さが変化していることが考えられる。このことよりも、環状流長さの変化を知ることは重要であることが示唆される。

### ③ 環状流長さ

図 2-26 に内径 300  $\mu\text{m}$  で外径 1 mm のガラス管におけるレイノルズ数に対する無次元環状流長さ  $Z$  を示す。不凝縮性ガス濃度は 29.6 ppm で水温は 20  $^{\circ}\text{C}$  ~ 74  $^{\circ}\text{C}$  としている。 $Z$  は以下の式で定義した。

$$Z = \frac{L_{ann}}{L_{water}} \quad (2.4)$$

ここで  $L_{water}$  は凝縮部の長さである。 $Z$  の定義式より、 $Z$  が 1 以下であると管内で全量凝縮していることを表す。なお今回の実験では蒸気が全量凝縮した場合のみを取り扱うことにする。蒸気レイノルズ数が上昇するにつれて  $Z$  はほぼ線形に増加していることが分かる。また水温が上昇するにつれて  $Z$  が増加していることが分かる。蒸気流量が増加することで凝縮するまでに必要な時間が増加するため、レイノルズ数の上昇に伴い  $Z$  が増加することが考えられる。 $Z$  が増加することで伝熱面積が増加するため、図 2-25 のように熱通過率が低くても十分な熱量  $Q$  を得ることができる。また水温の上昇によりサブクール度が小さくなるため、伝熱量は小さくなる。これにより蒸気的全量凝縮に必要な時間が長くなり、環状流長さが増加することが考えられる。また、蒸気レイノルズ数の増加に伴い凝縮熱量と環状流長さがほぼ線形に増加するということは、熱通過率はほぼ一定になるはずである。しかし図より、熱通過率は一定になっていない。つまり蒸気レイノルズ数が低い領域で、環状流長さが短くなっていることが原因であると考えられる。この要因としては流動構造の変化が影響していると考えられる。蒸気レイノルズ数が小さい領域では、環状流長さが短く、蒸気の流動様式は急激に変化する。だからこの影響が生じている可能性が考えられる。その蒸気レイノルズ数が低い領域での特徴として観測された画像を図 2-27 に示す。図を見て分かるように、本研究においてガラス管入口部では膜状凝縮だけではなく、滴状凝縮が生じていることが観測できる。滴状凝縮は膜状凝縮に比べ伝熱性能が高いことより、ガラス管入口部ではこの流動の影響を強く受け、熱通過率が増加していることが考えられる。つまり、熱通過率はガラス管の外壁の温度だけではなく、蒸気の流動様式も重要であることが示唆される。

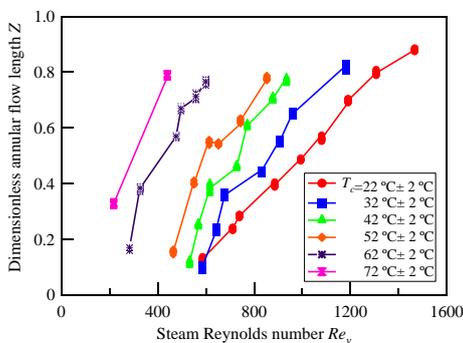


図 2-26 蒸気レイノルズ数に対する無次元環

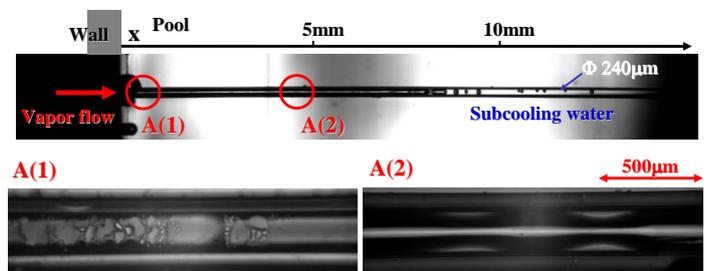


図 2-27 ガラス管位置による凝縮挙動の違い

## 2-3-2 単相における相変化を伴わない伝熱流動実験

### 1) 実験装置

図 2-28 に試験流体に水単相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、温度と圧力の計測が可能である。

本実験では、図 2-29 と図 2-30 に示す 2 種類のデバイスを用いた。図 2-29 が直交流型熱交換器であり、図 2-30 が対向流型熱交換器である。それぞれのデバイスの流路寸法を表 2-3 にまとめて示す。直交流型熱交換器は、流路径  $250 \times 250 \mu\text{m}$ 、流路長  $22 \text{ mm}$ 、1 層あたりチャンネル数 38 本、積層数は加熱側、冷却側ともに 20 層である。対向流型熱交換器は、流路径  $500 \times 500 \mu\text{m}$ 、流路長  $66 \text{ mm}$ 、1 層あたりチャンネル数 31 本、積層数は一方は 5 層、他方は 6 層となっている。なお今回の実験では、5 層を冷却側、6 層を加熱側とした。いずれも材質は SUS304 である。

対向流型デバイスでは流体の流れ方向を変えること可能であり、図 2-42(a)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、図 2-42(b)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と記すこととする。

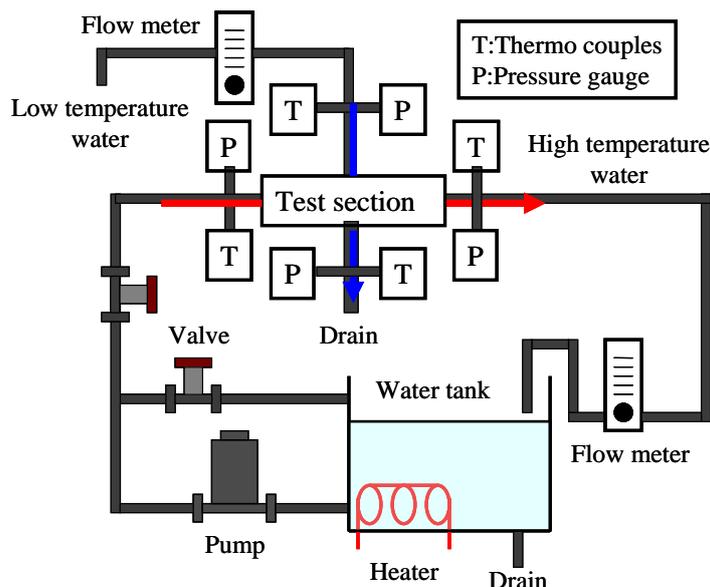


図 2-28 水単相における実験装置概要図

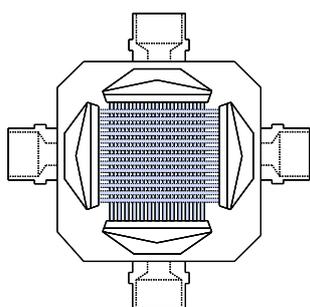
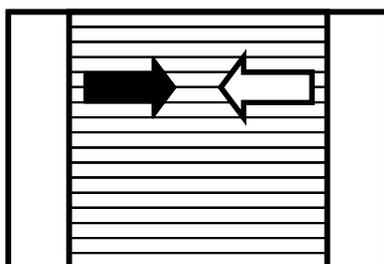
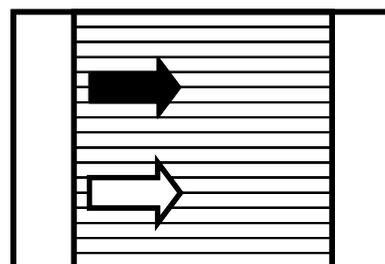


図 2-29 直交流型熱交換器



(a) 対向流



(b) 並行流

図 2-30 対向流型熱交換

表 2-3 熱交換器の主要寸法

		流路径 [mm]	積層数 [層]	全流路数 [本]	流路長 [mm]	伝熱面積 [m <sup>2</sup> ]
直交流型	高温側	0.25×0.25	20	760	22	0.0167
	低温側					
対向流型	高温側	0.5×0.5	6	186	66	0.0218
	低温側		5	155		0.0182

## 2) 実験方法及び実験条件

本研究では水単相における伝熱特性と流動特性を調べるために、圧力損失と熱交換量を計測した。まず圧力損失の計測は、水の流量を変化させて行う。このとき水を流した時に生じるデバイスの入口部と出口部の圧力差を圧力損失とする。計測は各々の熱交換器の片側流路を用いて行い、計測の際にもう一方の流路は空気開放とする。水は 5 μm のフィルターを通した水道水を用い、流量は 0.3 L/min から 3.0 L/min まで増加させる。

熱交換量の計測は、低温側流量を変化させ、高温側入口温度を一定とした場合で行う。高温側は、タンクに貯めた水をヒーターで加熱し、ポンプによって汲み上げ、バルブで流量を調節してテスト部に流す。低温側は、水道水を 5 μm のフィルターに通してテスト部に流している。水温は 12±3 °C となっている。低温側流量は 0.5 L/min から 3.0 L/min まで増加させ、高温側入口温度は 80±2 °C で一定にした。また、高温側流量を 1.0 L/min、1.5 L/min および 2.0 L/min としたそれぞれの場合で実験を行った。

## 3) 伝熱流動特性

図 2-31 に圧力損失と水の流量の関係を示す。水の流量が増加するに伴い、圧力損失も増加することが確認された。今回の流量条件では、圧力損失は最大 18 kPa 程度であることが示された。5 層側と 6 層側の圧力損失を比較すると、5 層側の方が、圧力損失が大きくなることが確認された。5 層側は 6 層側より流路の表面積が 20 % 減少する。一方で 5 層側は流路本数が少ないため、流速がおよそ 20 % 増加する。この流速増加の影響により、5 層側の方が、圧力損失が大きくなったと考えられる。また、対向流型デバイスの圧力損失は直交流型デバイスよりも大きい。これは、対向流型デバイスは流路数が少ないため、1 本の流路に流れる流量が多くなり、流速がおよそ 40 % 速くなるためと考えられる。

図 2-32 に直交流の熱交換量と低温側流量の関係、図 2-33 に対向流の熱交換量と低温側流量の関係および図 2-34 に並行流の熱交換量と低温側流量の関係を示す。低温側流量が増加するに伴い、熱交換量も増加することが確認された。また、高温側流量が増加するに伴い、熱交換量も増加することが確認された。今回の入口温度、流量条件では、直交流の熱交換量は 1500～3500 W、対向流の熱交換量は 1500～4000 W、並行流の熱交換量は 1500～3700 W であることが示された。直交流、対向流および並行流の場合で熱交換量を比較すると、対向流の場合で、低温側流量の増加に伴う熱交換量の増加量が最も大きく、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、マイクロなスケールにおいても対向流の熱交換の性能が優れていることが確認できた。しかし、いずれの流れ方向にお

いても、高温側入口温度を増加させた場合および低温側流量を増加させた場合で熱交換量の増加の傾向が大きく変わることはないことが示された。

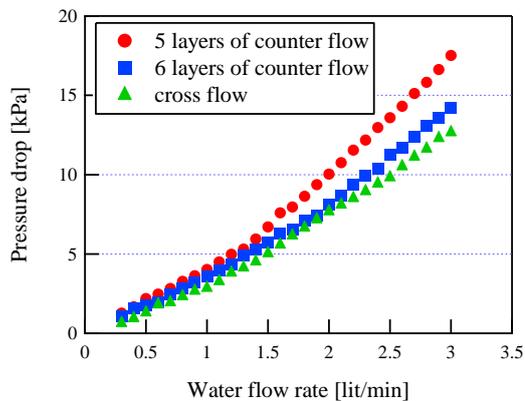


図 2-31 圧力損失と水の流量の関係

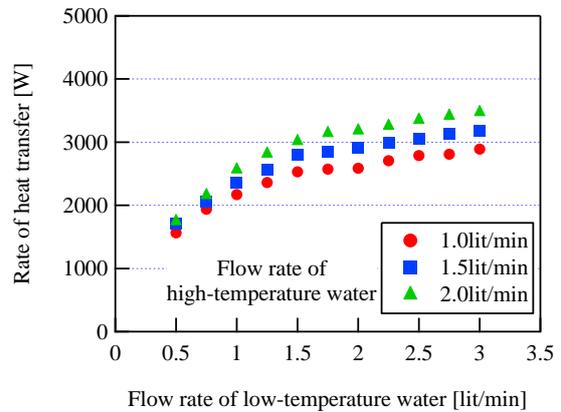


図 2-32 熱交換量と低温側水流量の関係(直交流)

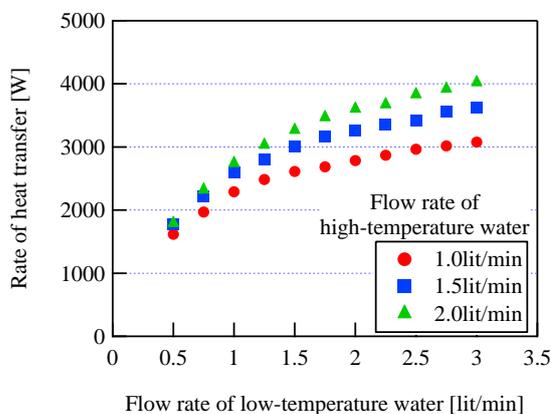


図 2-33 熱交換量と低温側水流量の関係(対向流)

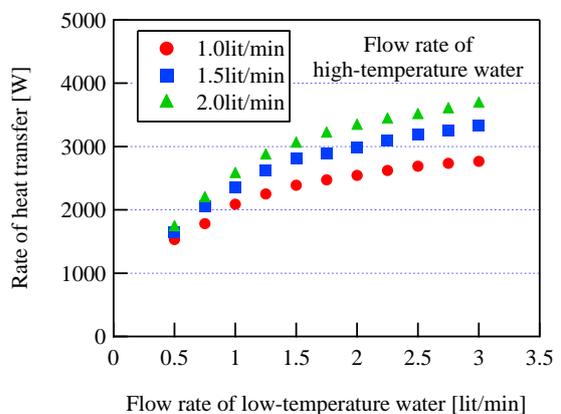


図 2-34 熱交換量と低温側水流量の関係(並行流)

#### 4) 既存の熱交換器との比較

これまで、本研究の関連研究で製作した高耐圧マイクロチャンネル積層型熱交換器の伝熱特性および流動特性を明らかにしてきた。本節では、本熱交換器の性能を、実際に使用されている他の熱交換器の性能と比較する。今回比較する熱交換器は、エコキュートの凝縮器とし、比較する 2 つの熱交換器を device A および device B とする。この 2 つの熱交換器は 2003 年度に発売された給湯器の熱交換器であり、定格加熱能力が 4500 W であるため、熱交換量に差はない。この 2 つの熱交換器と直交流型デバイス、対向流型デバイスの 4 つの熱交換器で性能を比較する。対向流型デバイスの流れ方向は、対向流とする。また、4 つの熱交換器のサイズを表 2-4 に示す。

今回比較する熱交換器は本実験で用いた熱交換器とサイズが全く異なるため、性能をデバイス単位質量あたりの熱交換量、デバイス単位体積あたりの熱交換量およびデバイス単位面積あたりの熱交換量で比較することにする。比較するにあたりデータは足利工業大学委託研究成果のものを用いる。この研究では、加熱側には、温度 80 °C の温水を、流量 1.5 L/min で流している。冷却側には、温度 20 °C の水を、流量を変化させて流している。2 つの熱交換器の熱交換量は、冷却側の流量が 1.0 L/min の時 4500 W、1.5 L/min の時 5500

W、2.0 L/min の時 6000 W になっている。

図 2-35 に単位質量あたりの熱交換量の比較を示す。既存の熱交換器がおよそ 103 W/kg であるのに対して、本熱交換器はおよそ 104 W/kg であった。図 2-36 に単位体積あたりの熱交換量の比較を示す。既存の熱交換器がおよそ 106 W/m<sup>3</sup> であるのに対して、本熱交換器はおよそ 108 W/m<sup>3</sup> であった。図 2-37 に単位面積あたりの熱交換量の比較を示す。既存の熱交換器がおよそ 105 W/m<sup>2</sup> より小さい値であるのに対して、本熱交換器はおよそ 105 W/m<sup>2</sup> より大きい値であった。

これらの結果から、本熱交換器は既存の熱交換器よりも単位体積あたりの熱交換量がおよそ 100 倍大きいことが確認された。これは既存の熱交換器と比較して、本熱交換器が小型であるにもかかわらず、高性能な熱交換器であることを示している。このことから、本熱交換器を用いることで、システムの大幅な小型化が可能であると考えられる。

しかしながら、図 2-38 に示すように単に熱交換量のみで比較すると、本熱交換器の性能は既存の熱交換器よりも劣っている。このことから、既存の熱交換器と同程度の性能を得るために、熱交換量を向上させる必要があると考える。

表 2-4 熱交換器の質量と体積

	device A	device B	直交流	対向流
質量(kg)	7.79	4.43	0.24	0.31
体積(m <sup>3</sup> )	0.0075	0.00291	0.00004	0.00006

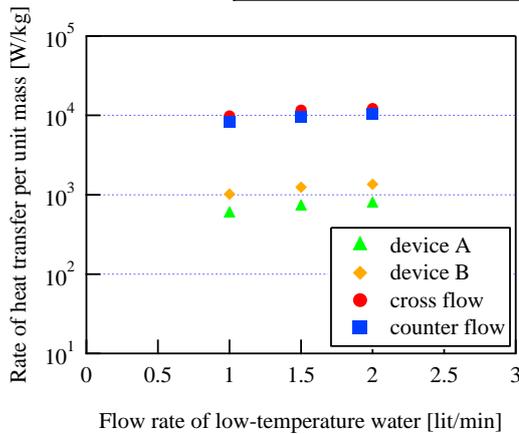


図 2-35 単位質量当りの熱交換量の比較

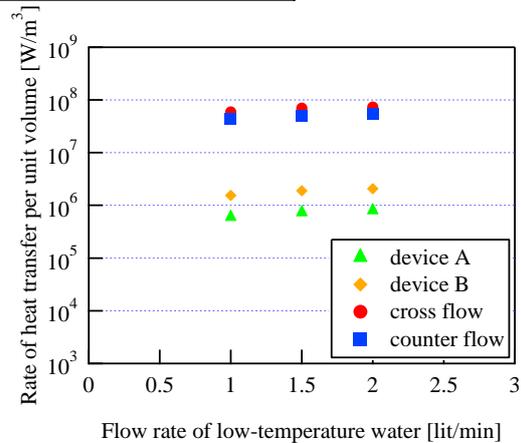


図 2-36 単位体積当りの熱交換量の比較

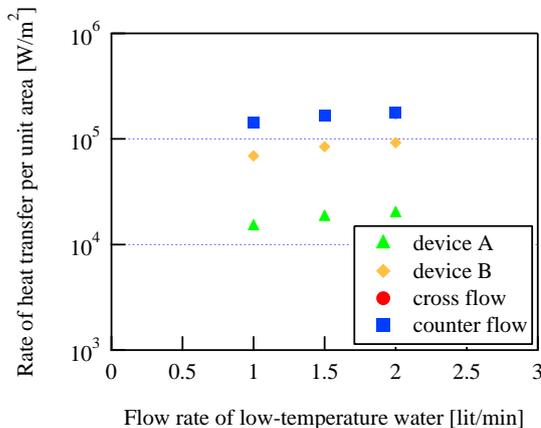


図 2-37 単位面積当りの熱交換量の比較

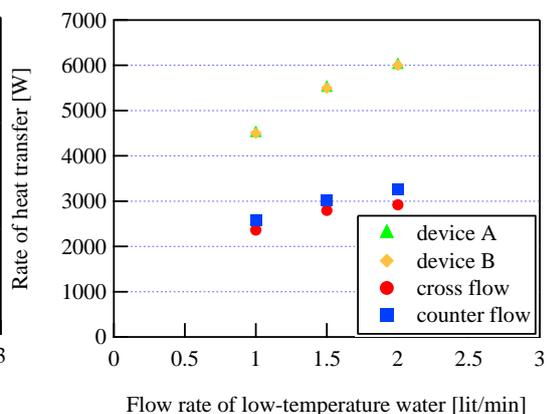


図 2-38 熱交換量の比較

## 5) 蒸気と水を用いた相変化を伴う凝縮実験

### ① 実験装置

図 2-39 に試験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、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、温度、圧力を測定できるようになっている。

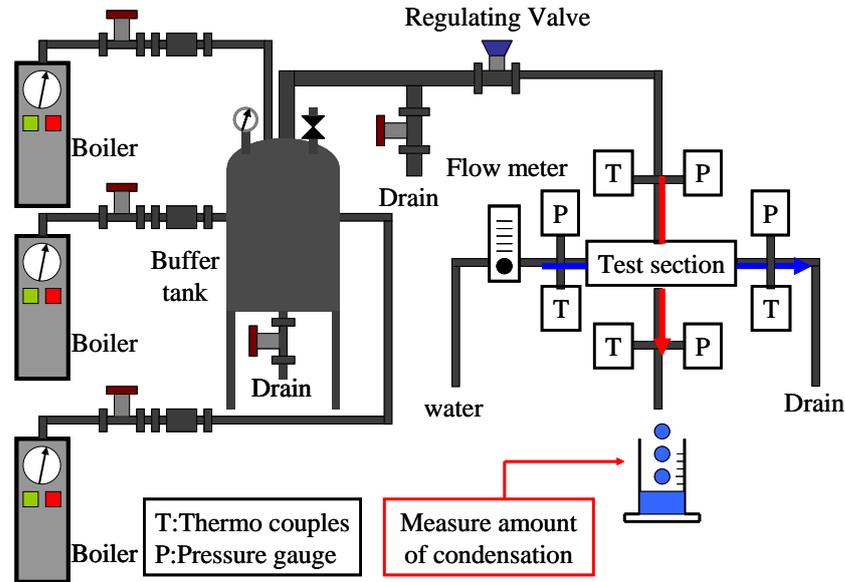


図 2-39 蒸気と水の二相流における実験装置概要図

### ② 実験方法及び実験条件

加熱側は、電気ボイラー3台から蒸気を流す。電気ボイラーから供給された蒸気は、ヒーターの ON/OFF により圧力変動が起こるので、バッファータンクに貯めることで圧力を一定とする。バッファータンクから供給された蒸気は、減圧弁により圧力を調整し、テスト部には必要な圧力の蒸気が流れるようにする。テスト部出口では、ビーカー、電子天秤およびストップウォッチを用いて凝縮水量を計測する。また、テスト部出口での温度が 100 °C に達する場合は水と蒸気の二相流突出、100 °C を下回る場合は蒸気が全量凝縮していると判断する。今回の実験では、全量凝縮時の凝縮水量を蒸気流量とする。冷却側は、水道水を 5 μm フィルターに通してテスト部に流す。水温は 9±1 °C となっている。水の流量は 0.5 L/min から 3.0 L/min まで増加させる。

### ③ 入口圧力に対する熱交換量の比較

図 2-40 に流れ方向を直交流とした場合の熱交換量の比較、図 2-41 に流れ方向を対向流とした場合の熱交換量の比較および図 2-42 に流れ方向を並行流とした場合の熱交換量の比較を示す。すべての入口蒸気圧力の場合において、水と蒸気の二相流突出の時は、冷却水流量の増加に伴い、熱交換量も増加し、全量凝縮してからは、熱交換量はほぼ一定の値になることが確認された。これは、蒸気が全量凝縮すると、流入する蒸気流量が変化しなくなるためと考えられる。また入口蒸気圧力を増加させることにより、蒸気流量が増加し、

それに伴い熱交換量も増加することが確認された。このことから、蒸気流量の増加に対して、冷却水流量を増加させることでさらに大幅な熱交換量の向上が可能であると考えられる。また、今回の流量条件では、直交流の場合、蒸気流量がおよそ 3.6 g/s の時に熱交換量は最大 7500 W 程度、対向流の場合、蒸気流量がおよそ 4.0 g/s の時に熱交換量は最大 9400 W 程度、並行流の場合、蒸気流量がおよそ 3.9 g/s の時に熱交換量は最大 7800 W 程度なることが確認された。

これらの結果から、直交流型デバイスは流路長が 22 mm と小さいにも関わらず、試験流体に蒸気と水を用いた場合、蒸気が全量凝縮し、凝縮水が定常的に排出されることが確認された。また、対向流型デバイスは直交流型デバイスよりも少ない流量の水で全量凝縮が可能であることが確認された。これは、対向流型デバイスの流路長は 66 mm と直交流型デバイスの流路長の 22mm よりも長く、伝熱面積が大きいためと考えられる。このことから、本熱交換器は凝縮器としても作動することが確認された。

しかしながら、今回の実験結果は、熱交換量に非常にばらつきが多い結果となった。これは、バッファータンクの容積が小さかったため、電気ボイラーの圧力変動がテスト部の入口条件に影響を与えているためと考える。そのため、減圧弁の下流にニードルバルブを設置するなどして、圧力変動を抑える工夫が必要であると考えられる。また、凝縮量を正確に計測するため、テスト部入口の上流に蒸気流量計を設置するなどして、凝縮水量をより正確に測定する必要があると考える。

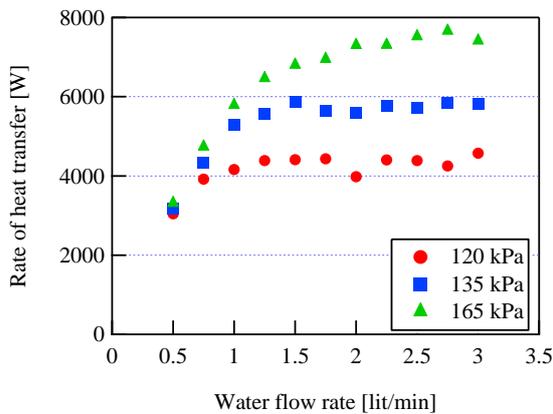


図 2-40 冷却水流量と熱交換量 (直交流)

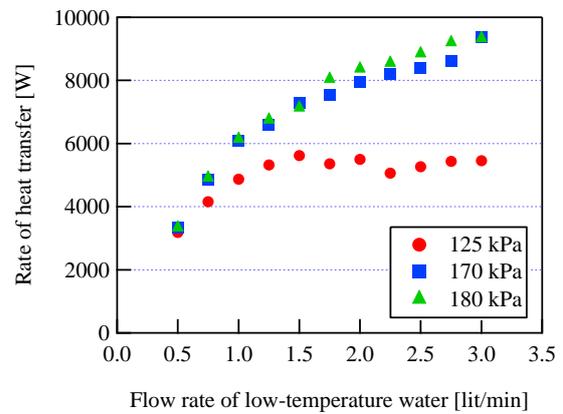


図 2-41 冷却水流量と熱交換量 (対向流)

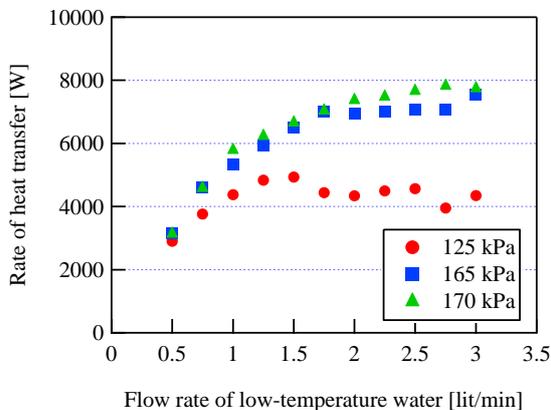


図 2-42 冷却水流量と熱交換量 (並行流)

## 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 使用環境下における経時変化を測定する

実際の使用環境と同じ環境での経時変化を測定し、問題となる点を捉え、現状の熱交換器における問題点を見つけ出す必要がある。ここでいう経時変化とは、主にスケール（析出物）が流路内に堆積し、流路を閉塞してしまう恐れを問題としている。しかしながら、環境によっては腐食による孔食や、異物の混入による流路の閉塞などに関しても、デバイスの信頼性を高める上で必要となる。

#### 1) 測定装置の設計製作

経時変化の測定を行うための測定機類を検討し、設計製作した。特に、経時変化の測定においては長期的に析出傾向であったり、腐食傾向の水を流したりすることが想定されるため、配管の交換、機器の交換が容易であり、また、様々な条件やデバイスの測定を考慮し、装置のように組み上げるよりも、机上実験に近い状態で部品を自由に組合せ、組みなおせることが望ましいと考え設計製作した。

図 2-43 に経時変化の測定機類の外観を示す。全体は 100V のコンセント 1 つで給電される。長期間同じ条件で運転するために、温度の調節機構と流量の調節機構が付いている。データはデータロガーに記録される。



図 2-43 経時変化測定機類

#### 2) 圧力損失の測定

ここでいう圧力損失とは、経時変化によってスケールが析出し、それが熱交換器の流路を閉塞してしまうことである。スケールは通常の国内の水質および一般的な水道温度では気にならないものである。しかし、全国にはスケール成分が特に多く含まれている地域がある。また、ヒートポンプは大気熱を利用して高温のお湯を作れるが、水道は温度が 60℃ 以上になるとスケールが析出しやすくなる。その際にマイクロチャンネルは流路の閉塞が懸念される。

そこで、まずはスケールの発生を加速試験によって確かめ、マイクロチャンネルに対してどのようにスケールが付着するかを把握することで、こういった形状がよいか検討した。

図 2-44 に測定機器の構成と、測定するデバイスの外観を示す。試験水は純水を元に析出が強化されるように調整した。測定するデバイスは流路幅 0.5mm、流路高 0.5mm が 12 本並んでいる流路構成の板 1 枚が挿入されたものを使用した。

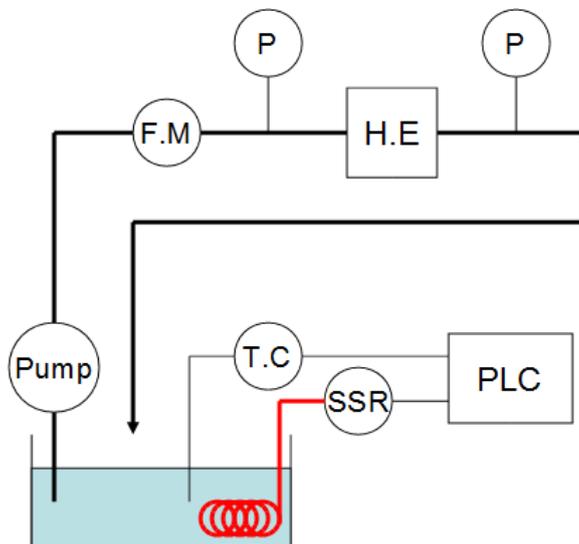


図 2-44 経時変化構成と測定外観

各試験前後の状態を図 2-45 から図 2-48 に示す。

僅かではあるが、入口側よりも出口側の方がスケールの付着量が多い。また、中央部をみると、スケールの付着量は入口や出口と比べて非常に少ない。このことから、スケールの付着は流れの変わる場所に特に付着しやすいことが分かる。当初懸念していた流路内のスケールの付着は思っていたよりも少ない。ただ、流路内に異物などが混入して流れが変わった場合、そこへ加速度的に付着が進む可能性がある。スケールを高倍率で観察した結果をみると、針状の物質が多数析出しており、絡み合うように堆積していることからその点が言える。

以上のことより、スケールに対して有効なのは、流れに急な変化を持たせぬように、なるべくなめらかにつなぐことが必要であると思われる。

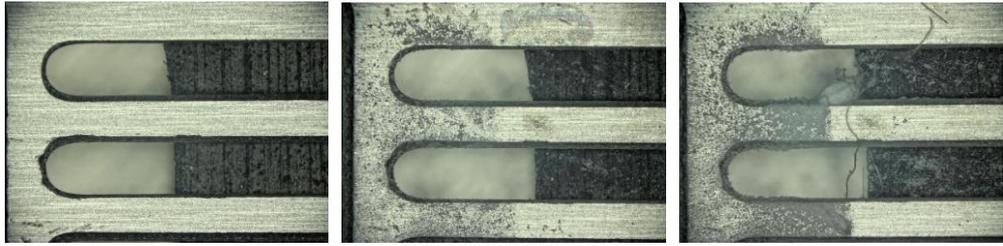


図 2-45 入口側写真

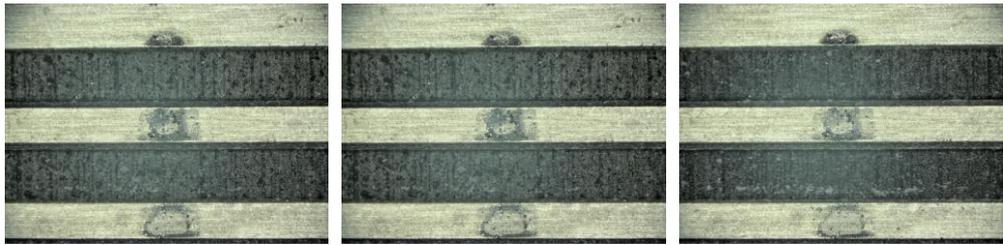


図 2-46 中央部写真

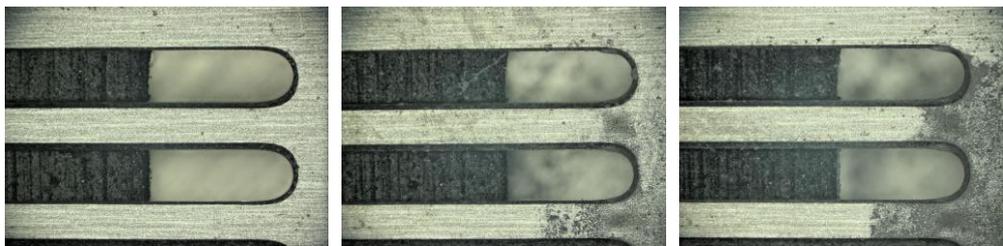


図 2-47 出口側写真

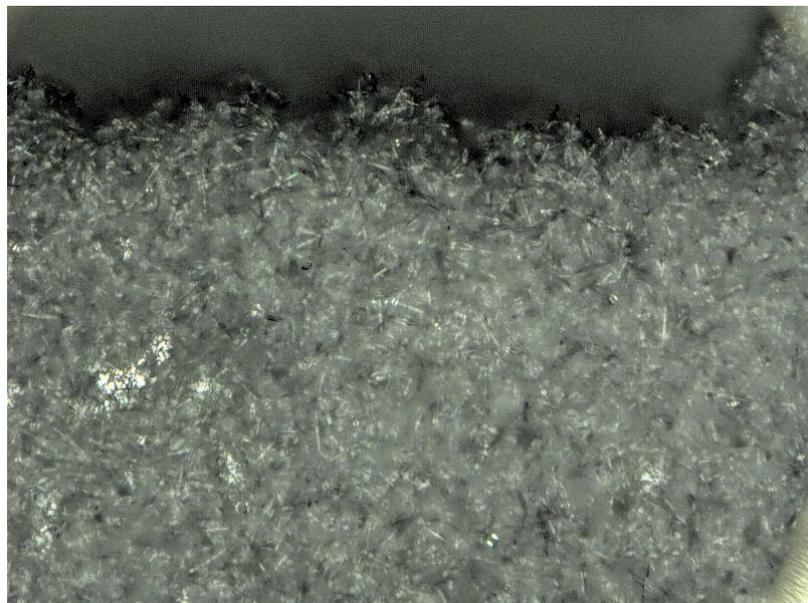


図 2-48 付着したスケール

### 第3章 全体統括

本研究では、拡散接合によるマイクロチャンネル熱交換器の実用化に必要な評価方法や設計等に関して基本的な知見を得ることができた。しかし、実際に拡散接合によるマイクロチャンネル熱交換器を実用化するにはさらに多くの研究を実施し、設計指針や評価手法のためのデータを収集する必要がある。

例えば、異種材料における熱交換器においては、最適な接合条件が何か、どの程度の強度を有するのか、寿命はどの程度得られるのか、設計の指針や性能特性はどのようになるのかなどは評価されておらず、異種材料における最適設計指針の確立に今後取り組んで行く。

また、ものづくりの観点から、拡散接合プロセスにおける評価手法はある程度得られたが、実際の使用においてどのような破壊モードが存在するか把握しなければ、特に民生品への実用化は困難である。実際に熱交換器を製作し、ヒートポンプシステムなどの実機に取り付けたり、実機と同等の負荷を与えたりしながら、経過を逐次観察しデータを収集などに取り組んでいく。

マイクロチャンネルの伝熱流動解析では、圧力損失や熱交換器の種類において、一般的なスケールの熱交換器と同様の理論が適用できることが示された。しかし、マイクロチャンネルとして本当に最適な流路径、流路長などを今後明らかにする必要がある。

超音波探傷と破壊試験との相関に関しては一定の知見が得られた。しかし、実際のデバイスに適用しようとした場合に、デバイスに付与された熱によって減衰が異なること、また当然組織の組成や結晶粒の向き、状態によっても探傷結果が異なる。実際に本研究でも内部における超音波の減衰は与えた温度と比例関係にありながら、そうでないものも存在した。さらに、結晶粒が粗大化した場合の傷の見えかたやその限界に関しては、まだ殆ど知見が得られていない。このことから、超音波探傷で信頼性を評価するためには、超音波の探触子と傷の形状、減衰の関係をさらに正確に捉え、また、界面の形状や挙動に関してさらに細かい現象まで捉えられなければならない。この部分に関してさらなる研究が必要であると思われる。

構造への設計指針に関しては、単純な円形モデルにおいては、シミュレーションの結果と良く一致した。これは拡散接合で製作するデバイスに関して、事前のシミュレーションにより、構造的な懸念が無いか確認できることを意味している。しかしながら、現在われわれが保有しているシミュレーションでは、ソフトとしての仕様の限界により、複雑なモデルの検証ができていない。実際のデバイスで適用できるかどうかに関しては、実際の形状をモデリングしてより上位のソフトでシミュレーションし、さらに実機を試作して比較し、一致するかどうかを確認する必要がある。

伝熱流動解析においては、マイクロチャンネルで製作したデバイスにおいて、圧力損失が通常スケール流路の理論式と良く一致し、設計においては一般の理論式において圧力損失を見積もることができることが示された。また、熱交換器の形状としては、通常スケールの場合と同様に対向流が直交流よりも優れていることが確認できた。蒸気と水の二相流

による伝熱流動特性では、対向流で最大 9400W の交換熱量を達成した。

微細管の流動現象の可視化においては、ハイスピードカメラ (Phantom) と高輝度レーザー (elite) を用いることで、分裂部の詳細可視化に成功した。また、蒸気レイノルズ数の増加に伴い、環状流から気泡流に遷移する際の気泡分裂周波数は増加することを確認した。今後この撮影画像から凝縮速度を計算することにより、局所における凝縮メカニズムを明らかにできる可能性が示唆された。また、微細管から見積もった等価熱交換量と熱交換器における熱交換量を比較した結果、両者は同オーダーであることを確認した。このことより、微細管を用いた実験結果は熱交換器における流動構造や伝熱特性を理解する手助けをしてくれる可能性が示唆された。

経時変化の析出に対して、流路導入導出部の形状が重要となる可能性が見えた。また、各流路内は層流のスムーズな流れであり、その中ではスケールの析出はあまり見られなかった。また、ゴミなどが付着した場所では急激に析出が進むことが確認できた。以上より、析出において重要なのは、滑らかな流れで全体をつなぎ、またフィルターなどを使用することにより、析出のきっかけとなるものを流路内部に入れないことが重要であることが示された。