

平成28年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「水素ステーションの低コスト化を実現するプレート式熱交換器の  
低圧拡散接合技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成29年3月

担当局 関東経済産業局  
補助事業者 株式会社信州TLO

## 目 次

第 1 章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	5
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第 2 章 本論	
2-1 熱交換器の設計	9
2-2 設計の評価	9
2-2-1 伝熱特性の評価	9
2-2-2 流れの評価：CFD を用いた熱交換器の均一性評価	13
2-2-3 流れの可視化実験	16
2-2-4 構造解析による接合圧力の評価	18
2-3 熱交換器の製作技術	20
2-3-1 プレート材料の機械的性質評価	20
(微小試験片による疲労試験)	
2-3-2 接合条件の最適化	21
2-3-3 表面改質による改良	22
2-4 熱交換器の評価	23
第 3 章 全体総括	
3-1 最終目標に対する達成度と課題	24
3-2 事業化の展開について	24

## 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) 研究の背景

【高度化指針における技術背景、当該分野における研究開発動向】

「(四) 接合・実装に係る技術に関する事項

1. 接合・実装に係る技術において達成すべき高度化目標」において、

「(3) 川下分野横断的な共通の事項 ①川下製造業者等共通の課題及びニーズ」として次が求められている。

#### ア. 高強度化

##### (1-1) 水素ステーションについて

水素ステーションの構成とプレクール必要性について説明する。現在、燃料電池自動車（FCV）の開発が進んでおり、2015年よりトヨタ自動車（株）が販売している。FCVの燃料となる水素は、水素ステーションにより供給される。

水素ステーションはLNG等から水素を製造する改質器、水素を高圧に圧縮する圧縮機、高圧水素を一次貯蔵する蓄ガスユニット、高圧水素を冷却するプレクール設備、プレクール設備からFCV車へ高圧水素を充填するディスペンサーから構成される（図1-1参照）。

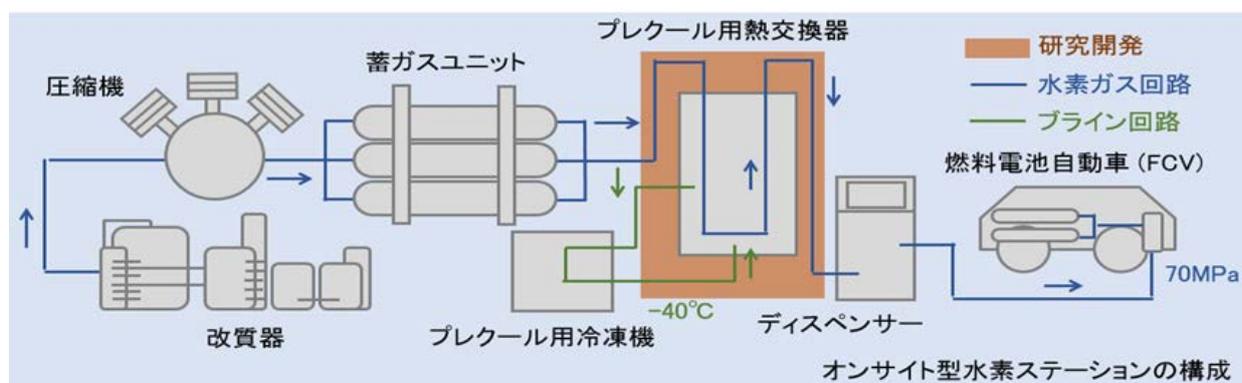


図1-1 オンサイト型水素ステーションの構成

水素は一般のガスとは異なり、圧力が減少すると発熱する性質（断熱膨張・逆転温度）があり、蓄ガスユニット（常用圧力： $70\text{MPa}$ ）から自動車のタンクへ常温で高圧水素を充填した場合、自動車の燃料タンク内の温度が耐熱温度（ $85^{\circ}\text{C}$ ）を超えてしてしまう。そのため、高圧水素の温度を $-33\sim-40^{\circ}\text{C}$ に冷却する必要がある、その冷却設備をプレクール設備という。

プレクール設備の構成は、冷凍機（ $-40^{\circ}\text{C}$ に不凍液を冷却）と熱交換器（冷却した不凍液で $70\text{MPa}$ の高圧水素を冷却）からなる。水素ステーション用の熱交換機は、冷却した不凍液タンク内にコイル状の伝熱パイプを通したシェル&コイル式が主流であるが、大型、大重量ならびに高コストであることから水素ステーション事業者から改良が望まれている。

### (1-2) 水素ステーションの現状と課題

水素ステーションの設置は計画通りに進んでおらず、燃料電池推進協議会（FCCJ）の計画では2015年に100箇所、2025年に1,000箇所となっているが、2017年1月時点においてわずか91箇所（計画中含む）に留まっている。

設置が遅れている原因は次の3点である。

- 設置イニシャルコスト：1箇所の設置費用は5億円  
(従来のガソリンステーションの20倍)。
- 設置スペースの制限：水素ステーションを構成する機械装置類が大きいため、建設地域が限定されてしまう。ステーションの設置が十分でない時期においては、移動式（パッケージ型）水素ステーションへの対応が必要。
- 性能向上への要求：FCVの走行距離延長と水素充填時間の短縮を目的とした常用圧力（現状70MPa→82MPa）の高圧化に伴う耐圧性能（現状115MPa→135MPa）の向上。また、24時間稼働の水素充填回数の増加による大気圧～82MPaの圧力変動時の疲労強度の向上（現状 $10^5$ 回→ $10^6$ 回）、低温（-40℃）における耐水素脆化性。

川下企業である「水素ステーション事業者」からは、これら課題を解決するため、熱交換器に対して次の要求がある。

- 1) 熱交換器の低コスト化
- 2) 熱交換器の軽量化
- 3) 水素充填圧力の高圧化への対応
- 4) 疲労強度の向上
- 5) 低温における耐水素脆化性

### (1-3) 水素ステーション用熱交換器の他社開発状況

上記の課題を解決するため、従来のシェル&コイル式熱交換器と比較して容積比で1/30～1/100、重量比で1/7となるプレート式熱交換器（マイクロチャネル熱交換器）が採用され始めている。

プレート式熱交換器は、薄板（0.5mm）にエッチングで水素および不凍液の微細な流路（0.3mm）を加工した伝熱プレートを数100枚積層したものである。伝熱プレートの接合には拡散接合技術を使用している。拡散接合は材料同士の接合面を重ね合わせ、高温環境中にて加圧力を加えることで表面の原子移動（拡散）により、接合を行う技術である。拡散接合では、加工された伝熱プレートを積層するため、内部に複雑な流路形状を描くことができる上、ろう付けや溶接の接合時に用いる溶接棒のような他の材料を用いることがないため、部分的な強度低下がないことが特徴となる。

国内他社では汎用のプレート式熱交換器を水素ステーション用に転用しているため、次のような課題がある。

- 1) 熱交換器は伝熱プレートを数100枚積層し、拡散接合によって接合して製作されるため、伝熱プレートをプレス加工により、製作すれば製造コストの低減が期待できる。しかしながら、拡散接合の強度は材料の密着性が重要であり、プ

レス加工では接合面の平坦度を確保することが難しいため、拡散接合による接合は困難とされている。そのため、工程が多岐に渡るエッチング加工にて製作された伝熱プレートを積層したプレート式熱交換器では、量産化に対応できず、低コスト化（現状：1,500～1,800万円）ならびに軽量化（現状：300kg）の障害となっている。

- 2) 現状の拡散接合では加圧力が高く、接合時に伝熱プレートの変形・部分的な流路の閉塞を伴うため、不凍液側の流路において異物析出・腐食生成物の付着により、流路の目詰まりを引き起こし、熱交換器性能を低下させる原因となる。そのため、拡散接合の低圧化が実現すれば、熱交換器のメンテナンス負荷を低減させることができ、製品の信頼性が向上する。
- 3) 伝熱プレートの積層に用いる拡散接合が 1,000℃以上であり、結晶粒成長等に伴い、接合強度が低下するため、現状の拡散接合技術では耐圧性能 115MPa ならびに大気圧～70MPa の疲労強度  $10^5$  回が限界であり、FCV の走行距離延長ならびに実車充填時間の短縮を目的とした水素充填圧力の高圧化に対応した耐圧性能 135MPa、および水素ステーションの 24 時間稼働に対応した大気圧～82MPa の疲労強度  $10^6$  回の向上が実現不可能である。
- 4) 水素は金属結晶内に入り込む際に、金属を脆くする性質があり、一般的には耐水素脆化性を持つオーステナイトステンレス鋼を採用することで対応している。しかしながら、拡散接合時の結晶粒の粗大化に伴う結晶内を通過する水素量の増加により、耐水素脆化性が低下してしまうため、拡散接合の温度や圧力を徹底して管理する必要がある。

## (2) 研究の目的

燃料電池車（FCV）の普及において水素ステーションの「低コスト化」ならびに「小型化」が課題となっている。水素ステーション設備には 70MPa の高圧対応機器にて構成されており、水素の発熱を除去するプレクール設備が必要となる。そこで、プレクール設備の熱交換器製造に用いる低圧拡散接合技術の高強度化を確立することにより、低コストで高強度を実現するプレート式熱交換器を開発し、水素ステーションの早急な整備と FCV 普及促進を図る。

## (3) 研究の目標

### 【高度化指針で定める高度化目標】

#### 「(四) 接合・実装に係る技術に関する事項

1. 接合・実装に係る技術において達成すべき高度化目標」において、
- 「(3) 川下分野横断的な共通の事項 ②高度化目標」のうち、次に寄与するものである。

#### ア. 高強度化・軽量化

#### イ. 部素材の接合技術の高度化

川下企業である水素ステーション事業者から、水素ステーションの設置を促進するため、熱交換器における低コスト化、小型化・軽量化ならびに耐圧性能、疲労強度、耐水素脆化性

の向上が求められている。そこで、本研究開発は水素ステーション用熱交換器の開発のための新たな低圧拡散接合技術の確立を目的とする。

- 1) 伝熱プレートの新規製造方法を確立することで低コスト化を実現する。
- 2) 伝熱プレートに表面加工処理を施すことで伝熱効率を向上させ、プレート枚数の低減による低コスト化、小型化・軽量化を実現する。
  - 低コスト化：750～900万円
  - 小型化：他社プレート式熱交換器と同等
  - 軽量化：200kg
- 3) 低圧拡散接合技術の開発により、次の仕様を満足させる。
  - 耐圧性能：135MPa
  - 疲労強度：10<sup>6</sup>回以上（大気圧～82MPaの圧力変動）
  - 低温（-40℃）における耐水素脆化性

本研究開発は、目詰まり防止と圧力損失の低減を実現する伝熱プレート形状の決定、プレート式熱交換器の耐圧性能、疲労強度ならびに耐水素脆化性を向上させる低圧拡散接合技術の開発、低圧拡散接合されたプレート式熱交換器の水素実負荷試験による高強度化評価からなる。

#### （4）実施結果

本研究開発を実施した結果は、以下のとおりである。

- 1) 伝熱プレートの新規製造方法を確立することで低コスト化を実現する。

いくつかの新規製造方法について検討を行い、その内の一部において十分な性能特性が出ることを確認した。これにより、製造コストを下げるのが可能である。ただし、熱交換器は高圧機器であるため、その安全性において十分な評価・検証が必要であり、実用についてはさらに研究開発が必要である。

- 2) 伝熱プレートに表面加工処理を施すことで伝熱効率を向上させ、プレート枚数の低減による低コスト化、小型化・軽量化を実現する。

いくつかの表面加工処理について検討を行ったが、いずれについても十分な性能には至らなかった。しかし、上の1) 及び 流路の設計を最適化することにより、コスト、小型化、軽量化について、目標値をクリアできることを確認した。

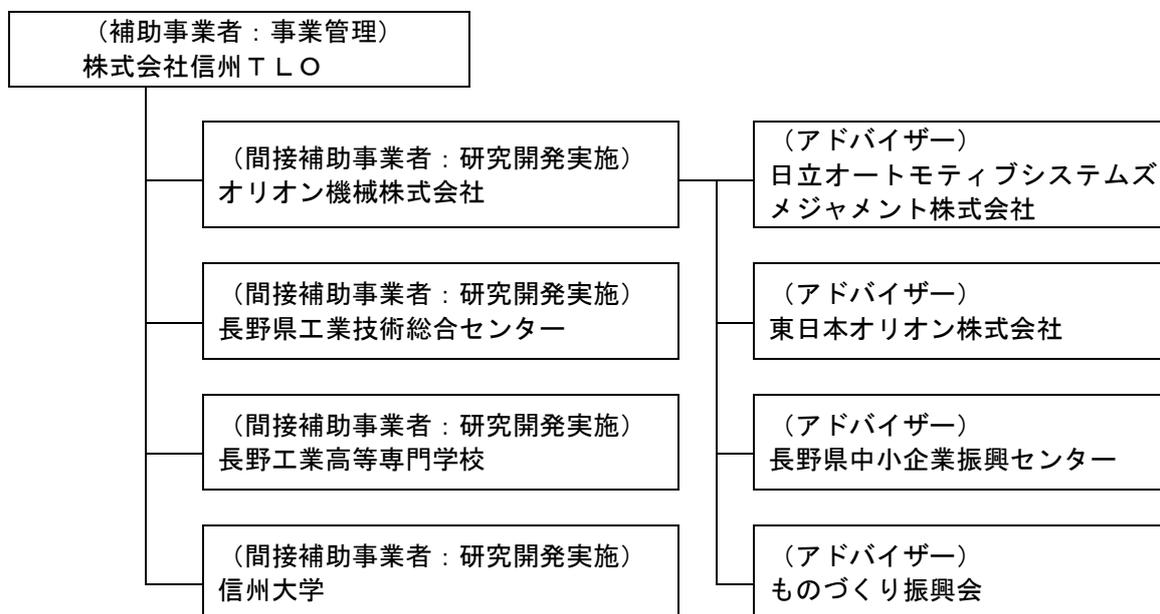
- 3) 低圧拡散接合技術の開発により、次の仕様を満足させる。

拡散接合における接合条件を最適化することにより、低圧での接合が可能となった。最終的な熱交換器の試作において、上記の目標値を満足することを確認した。加えて、熱交換器とその前後の装置との接続部分まで含めての評価を実施することで、製品化を加速することができた。

## 1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

### (1) 研究組織・管理体制



総括研究代表者 (PL)	オリオン機械株式会社 開発本部 開発部	副本部長、開発部長 太田 浩一
副総括研究代表者 (SL)	オリオン機械株式会社 開発本部 開発部	技師 中根 孝浩

### (2) 管理員

所属		氏名
株式会社信州TLO 技術移転グループ 総務部	代表取締役社長	大澤 住夫
	部長	勝野 進一
		横山 友美
		滝澤 智子

(3) 研究員

所属		氏名
オリオン機械株式会社 開発本部 開発部	副本部長、部長	太田 浩一 [PL]
	技師	中根 孝浩 [SL]
長野県工業技術総合センター 材料技術部門 金属材料部  製品科学部  設計支援部  材料化学部 環境・情報技術部門 環境技術部	部門長	北沢 俊二
	部長	石黒 周司
	研究員	豊川 良平
	研究員	小松 豊
	研究員	小杉 俊
	技師	村澤 智啓
	研究員	清水 洋
	研究員	佐藤 真
	研究員	畔上 達紀
長野工業高等専門学校 機械工学科  電子制御工学科	教授	長坂 明彦
	教授	戸谷 順信
	教授	堀口 勝三
信州大学 工学部 機械システム工学科	教授	吉野 正人
	助教	鈴木 康祐

(4) アドバイザー

所属		氏名
日立オートモティブシステムズメジャメント株式会社 新事業推進本部新エネルギー部	部長	小笠原恒治
東日本オリオン株式会社	技術部長	三ツ井寿和
長野県よろず支援拠点 (信州大学 特任教授、ものづくり振興会コーディネーター)	コーディネーター	白川 達男
長野県中小企業振興センター	プロジェクト支援コーディネーター	紅林 孝夫

## 1-3 成果概要

### (1) 熱交換器の設計

熱交換器は、伝熱プレートを複数枚積み上げ、拡散接合により接合することで製作する。伝熱プレートには不凍液用と水素用があり、それぞれに微細な流路が刻まれている。伝熱プレートはその加工における制限と流路内を通る高圧水素ならびに不凍液の物性値を考慮して目詰まり防止と圧力損失を低減でき、かつ十分な熱伝導性を持つ流路形状を決定しなくてはならない。加えて、拡散接合時に十分な加圧が加わるとともに、伝熱プレートの変形も抑制する必要がある。これらの条件を満足する設計を完了することができた。

### (2) 設計の評価

伝熱プレートの設計結果を試作で確認することは困難であり、シミュレーション解析を用いて評価を実施した。評価項目としては、伝熱特性、流路内の流れ、拡散接合時の加圧力の分布の3点である。

伝熱特性については、格子ボルツマン法というシミュレーション解析法を用いて、不凍液による水素の冷却の状況を確認した。流路の設計を適切にすることで、従来のものより高い熱伝達特性が得られることを確認した。

流路内の不凍液及び水素の流れの様子についても、シミュレーション解析を実施した。これにより伝熱プレートの流路内で、不凍液および水素が乱れなく均一に流れることを確認した。加えて伝熱プレートを積層した際のプレート間の流れについても確認し、問題ないことを明らかにした。さらに、シミュレーション解析に加えて、モデルを作成しての可視化実験を行い、シミュレーション解析の有効性を確認した。

拡散接合においては、伝熱プレート同士を加圧して接合するが、加圧力を高くすると接合をより強力にすることができる。しかし、加圧力が高すぎると伝熱プレートの変形を引き起こし、流路がつぶれてしまう等の問題が発生する。そこで、設定した加圧力が、伝熱プレート全体に均一に加わることをシミュレーション解析により確認した。

### (3) 熱交換器の製作技術

熱交換器を製作するための技術の確立を行った。まず、伝熱プレートの製作においては、従来はエッチングを用いていた。エッチングは製造の精度が高い利点があるが、非常に時間がかかりコストの高い加工方法である。コストダウンのためには、他の製造方法を新たに開発する必要があるが、精度の高い微細な流路を形成でき、かつ拡散接合に対応できるものでなくてはならない。いくつかの新規製造方法について検討を実施し、一部の加工方法において十分な性能特性が出ることを確認した。この加工方法を用いることにより、十分に熱交換器の製造コストを下げる事が可能である。

また、伝熱プレートへの表面加工を実施することで、伝熱特性の向上や、接合強度の向上、材料の硬度向上などを目指した。しかし、結果としては十分な性能を得ることはできなかった。拡散接合の難しさがあり、革新的な方法を生み出すことができなかった。

拡散接合技術については、接合時の温度、圧力、雰囲気の時間的制御を最適化することにより、低い加圧力でも十分な接合が可能となった。これにより、流路に影響を与えずに、強度を満足する熱交換器を製作することが可能となった。

加えて、金属の疲労評価方法についても検討を行い、従来よりも小さな試験片により十分な評価が可能であることを明らかにした。薄い伝熱プレートの積層したものから、十分なサイズの試験片を切り出すのは難しく、小さな試験片を使う評価法により、熱交換器の各所の強度を自由に評価することが可能になる。

#### (4) 熱交換器としての評価

試作したプレート式熱交換器の耐水素脆化性、耐圧性能および基本性能（圧力損失、伝熱性能）を評価するため、熱交換器からテストピース（JIS Z 2201「金属材料引張試験片」、4号定型試験片）を切り出した後、低歪速度引張強度試験（SSRT）ならびに疲労強度試験を行う。試験後、相対絞り比（RRA）を測定し、「JIS G4305 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」の値と比較することで耐水素脆化性を評価した。

本研究開発で開発するプレート式熱交換器は、高圧ガス保安協会の定める一般高圧ガス保安規則に準拠する必要があるため、水素ステーションに求められる気圧耐圧 121MPa（液圧 135MP 相当）にて評価する。さらには、大気圧～82MPa の圧力変動試験についても同時に実施する。以上により、当初の目標としていた性能を満足することを確認した。

熱交換器の仕様ならびに試験結果の評価はアドバイザーの日立オートモティブシステムズメジャメント(株)、東日本オリオン(株)の両社の協力を得て進め、迅速な研究開発とともに製品化を目指す。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

問合せ担当者 株式会社信州TLO 技術移転グループ 勝野進一  
住所： 〒386-8567  
長野県上田市常田3-15-1 信州大学繊維学部内 R棟 4階  
電話： 0268-25-5181  
FAX： 0268-25-5188  
E-mail： info@shinshu-tlo.co.jp

## 第2章 本論

### 2-1 熱交換器の設計

伝熱プレートはその加工における制限と、流路内を通る高圧水素ならびに不凍液の物性値を考慮して目詰まり防止と圧力損失を低減でき、かつ十分な熱伝導性を持つ流路形状を決定しなくてはならない。

熱交換器は、配管プレート、不凍液プレート、仕切板、水素プレート、ベースプレート、出入口ヘッダーにて構成される。水素プレートを仕切板で挟みこみ、耐圧性能を維持するとともに、熱交換効率を向上させるため、両側を不凍液プレートで支える構造とした。これらのプレートを1ユニットとし、これらユニットを積層したものに上下に配管プレート、ベースプレートを配置する。

### 2-2 設計の評価

伝熱プレートの流路は微細であり、これを試作して精度よく評価することは技術的に困難である。また、設計変更の都度試作を行うことは、コスト、時間の面からも現実的ではない。ここではシミュレーション解析及びモデル作成により設計の妥当性を評価した。

#### 2-2-1 伝熱特性の評価

冷熱機器の高性能化を目的として、これまで多くの研究で熱交換器における伝熱性能の向上が検討されてきた。その検討の一つとして、従来よりも小型化し、伝熱面積を確保するという観点から、近年、マイクロチャネル構造を有した熱交換器が注目されている。本事業におけるプレート式熱交換器もマイクロチャネル熱交換器の一種であり、より効率の良いマイクロチャネル熱交換器の開発には、その熱伝達特性の評価が必要不可欠である。しかしながら、マイクロチャネル熱交換器内の現象は微小なスケールであり、実験的観測が非常に困難である。そのため、数値計算によるアプローチを採用した。

熱流体解析のための数値計算手法として、格子ボルツマン法[1]が発展している。格子ボルツマン法の特徴として、複雑流れに関してもアルゴリズムが簡単、並列計算に適している、および質量・運動量の保存性に優れていることが挙げられ、これまでに多孔質流れなどの複雑な境界をもつ熱流動に適用され成功をおさめている。

そこで本研究は、格子ボルツマン法を用いた熱流動の数値計算により、様々な形状のプレートに対してプレート式熱交換器の熱伝達特性の評価を行うことで、熱伝達特性が高い効果的なプレート形状を決定することを目的とする。

[1] M. Yoshino and T. Inamuro :  
Int. J. Numer. Meth. Fluids 43 (2003), pp183-198.

### (1) 実施計画と内容

上記の目的のために、以下のような実施計画に沿って研究を行った。

- 1) マイクロチャネル熱交換器の簡易モデルの作成および妥当性検証
- 2) 設計流路ベースの単位ユニットモデルの作成と流路内温度分布の解析
- 3) 水素、ブラインプレート形状を変更した場合の流路内温度分布の解析と形状最適化

本事業におけるプレート式熱交換器のようなマイクロチャネル熱交換器の熱流動解析では、流体の熱流動だけではなく、流路を仕切る隔壁内部の熱伝導も重要な役割を果たす。そのため、異なる媒質間の熱のやりとりを正確に計算しなければならず、十分な妥当性検証が必要である。そこでマイクロチャネル熱交換器の簡易モデルを作成し、それを用いた基本的なベンチマーク問題を計算することで、プログラムの妥当性検証を行った。

### (2) 計算結果

本研究では、以下の二つのベンチマーク問題を通して、プログラムの妥当性を検証した。

- (a) ダクト内のポアズイユ流れにおける温度移流拡散問題
- (b) マイクロチャネルヒートシンク内の熱流動問題

問題(a)では、計算結果を熱流動方程式の厳密解と比較することで妥当性を検証した。また、問題(b)では、計算結果を Wei *et al.* の実験および数値計算結果[2]と比較することで妥当性を検証した。

#### (2-1) ダクト内のポアズイユ流れにおける温度移流拡散問題

まず、流体中の温度移流拡散計算の妥当性検証を行った。計算領域は図 2-1 のような  $L_x = L_y = L_z = 20\Delta x$  の立方体領域とした。ここで、 $\Delta x$  は格子間隔である。境界条件は、 $x$  方向に周期境界条件、 $y$  方向および  $z$  方向にはすべりなし境界条件を適用した。ただし、流入・流出面には圧力差  $\Delta p$  をつけ、 $z = L_z$  の面には温度  $T_H = 1.0$ 、その他の面には温度  $T_L = 0$  の等温条件を用いた。プラントル数は  $Pr = \nu / \alpha_T = 1.0$  とした。ここで、 $\nu$  は動粘性係数、 $\alpha_T$  は温度拡散係数である。また、レイノルズ数は  $Re = u_{\max} L_z / \nu = 2.0$  とした。ここで、 $u_{\max}$  は最大流速である。

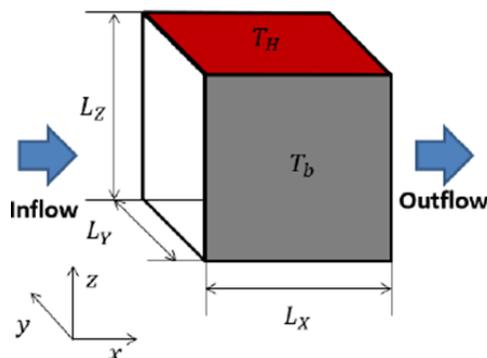


図 2-1 ダクト内のポアズイユ流れにおける温度移流拡散問題の計算領域

図 2-2 に、計算結果と厳密解の比較を示す。これらは、ダクト入口断面 ( $x = 0$ ) における、 $z = L_z/2$  あるいは  $y = L_y/2$  の直線上で比較したものである。この図より、本計算結果

は流速場、温度場ともに厳密解とよく一致していることが分かり、本計算が妥当であることが確認できる。

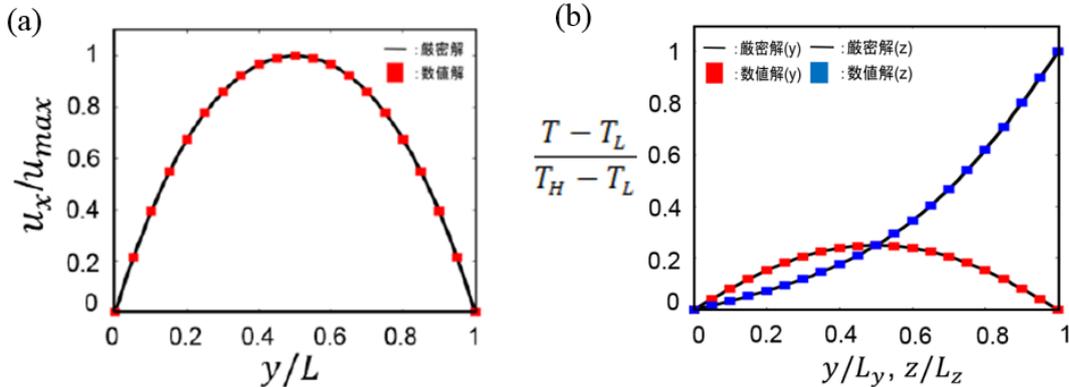


図 2-2 ダクト内のポアズユ流れの計算結果と厳密解の比較

(a) 流速場 (b) 温度場

### (2-2) マイクロチャネルヒートシンク内の熱流動問題

次に、隔壁と流体間の熱相互作用計算の妥当性検証を行った。検証に用いたマイクロチャネルの概略を図 2-3 に示す。このマイクロチャネルは、2 本の流路とそれを隔てる隔壁からなっており、流路中の流体には水、隔壁にはシリコンが用いられている。2 本の流路中の流れは対向流になっている。それぞれの流路の入口には等温条件が用いられており、上側流路の温度のほうが高い。また、領域の底からは一定の熱流束  $q$  が流入している。その他の面は全て断熱条件である。この問題は、Wei *et al.* により、実験および数値計算を用いて調べられている [2]。詳しい計算条件、領域寸法は参考文献 [2] を参照されたい。本研究では、解像度を  $(L_x \times L_y \times L_z) = (2000 \Delta x \times 20 \Delta x \times 288 \Delta x)$  として計算した。

図 2-4 に計算結果を示す。この図は、マイクロチャネルの底部における温度分布を表しており、本計算結果と Wei *et al.* による実験・数値計算結果を比較している。この図より、本計算結果と Wei *et al.* による実験・数値計算結果 [2] はよく一致しており、計算が妥当であることが確認できる。

[2] X. Wei, Y. Joshi and M. K. Patterson :  
*ASME J. Heat Transfer* **129** (2007), pp1432-1444.

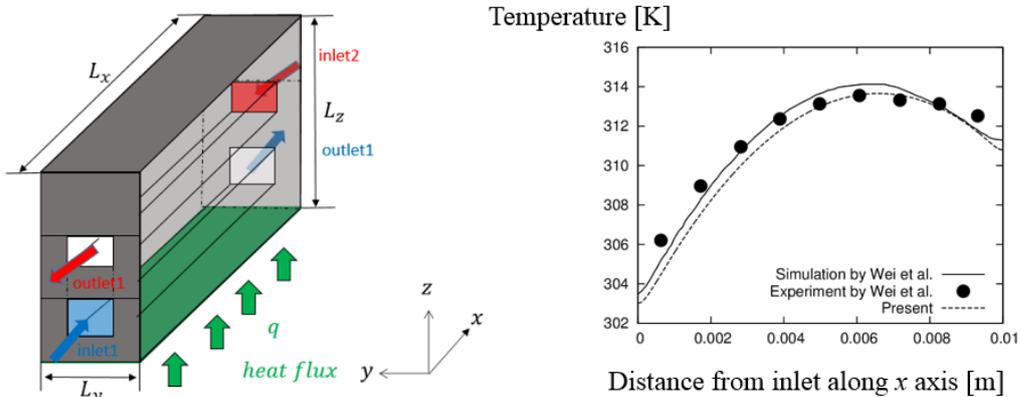


図 2-3 マイクロチャネルヒートシンク内の熱流動問題の概略 (左図)

図 2-4 マイクロチャンネルヒートシンクの底部における温度分布(右図)

(3) 熱交換器としての伝熱性能の評価

上記のように二つの基本的なベンチマーク問題を通してプログラムの妥当性を検証した。まず、ダクト内のポアズイユ流れにおける温度移流拡散問題により、流体中の温度移流拡散計算の妥当性検証を行った結果、厳密解と良好な一致を示し、妥当性が確認された。次に、マイクロチャンネルヒートシンク内の熱流動問題により、隔壁と流体間の熱相互作用計算の妥当性検証を行った結果、Wei et al. の実験および数値計算結果と良好な一致を示し、妥当性が確認された。

このシミュレーション解析を用いて、比較すべき他社製品と今回の設計品を検証する。その結果を表 2-1 に示す。

表 2-1 競合他社製品と研究開発品の比較  
断面平均温度での比較 (研究開発品については、全流路で平均したもの)

項目		$x = 0$ mm (水素側入口)	$x = 200$ mm (水素側出口)	出口 - 入口
不凍液	比較製品	247 [K] (-26 °C)	233 [K] (-40 °C)	-14 [K]
	研究開発品 (タイプ A)	237 [K] (-36 °C)	233 [K] (-40 °C)	-4 [K]
	研究開発品 (タイプ B)	237 [K] (-36 °C)	233 [K] (-40 °C)	-4 [K]
水素	比較製品	313 [K] (+40 °C)	245 [K] (-28 °C)	-68 [K]
	研究開発品 (タイプ A)	313 [K] (+40 °C)	242 [K] (-31 °C)	-71 [K]
	研究開発品 (タイプ B)	313 [K] (+40 °C)	238 [K] (-35 °C)	-75 [K]

研究開発品は、競合他社製品と比べ、水素を同程度以上冷却できる一方で、不凍液の温度上昇を抑えられることが予想される。

## 2-2-2 流れの評価：CFD を用いた熱交換器の均一性評価

### (1) 概要

本研究で研究開発を進める水素ステーション用熱交換器は、プレート毎に高圧水素流路、不凍液流路が形成され、100 セット規模の伝熱プレートが積層される構造となっており、面内方向及び積層方向における流れの均一性が熱交換性能に影響を及ぼすことが予想される。そこで、伝熱プレートの面内方向/積層方向の流れの均一性について CFD (Computational Fluid Dynamics：数値流体力学 (流体シミュレーション)) を用いて評価を行った。なお、面内方向については高圧水素と不凍液のそれぞれの流路について、積層方向については構造上流れが不均一になると予想される高圧水素流路を評価対象とした。

### (2) 実験の目的

本解析では熱交換器内流路を流れる流体 (高圧水素・不凍液) の流れの均一性について試作前に評価し、並行して実施する熱交換性能に関する解析や可視化実験の結果等と併せて、伝熱プレートの流路形状及び積層枚数といった設計値を決定するための知見を得ることを目的とする。

### (3) 実験方法

本評価で使用する伝熱プレートは、0.5mm×0.3mm の流路断面を持つ初期評価モデルを使用した。また、本節における数値解析の実施にあたっては、FVM (Finite Volume Method：有限体積法) を利用した市販の流体解析ソフトウェアを用いた。

面内方向の流れの均一性を評価するため、初期評価モデルでは高圧水素、不凍液ともに 2 系統の 38 パスを有した計 76 パスの流路とし、解析に用いた。高圧水素の流路解析モデルでは、流れの対称性を考慮した 19 パスの対称モデル (1 系統の半分のモデル) を不凍液の流路解析モデルについては、面内の流れに対称性はないため、76 パス全てを形成した三次元モデルを用いて評価することとした。

次に、初期評価モデルでは高圧水素流路、不凍液流路で 1 セットとした計 120 セットが積層されている。高圧水素流路の断面は前述のとおり非常に小さくパス数も多いため、三次元モデルによる解析は計算負荷が高く困難である。そこで、中心断面をカットした平面モデルによる二次元解析により評価を行った。

なお、本解析では評価対象は流れの均一性に限定し、伝熱特性は評価の対象外とし、各流体の物性には表 2-2 の値を使用した。

表 2-2 使用した流体の物性値

	粘度 [mPa・s]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	備考
水素	0.0109	48.1	-40°C (82MPa)
不凍液	27.6	1381	-40°C

### (4) 実験結果

図 2-5 に高圧水素流路における流速分布を、図 2-7 に不凍液流路における流速分布をコンター表示した結果を示す。高圧水素、不凍液共に流路幅が狭められる各パスに入ったところで流速が増していることが分かる。図 2-6、図 2-8 に示したのは各パス毎流れる流量をグラ

フ表示したものである。面内においては流路長がほぼ一致するように流路設計がなされているため、高圧水素・不凍液の流量に大きな違いは見られない。

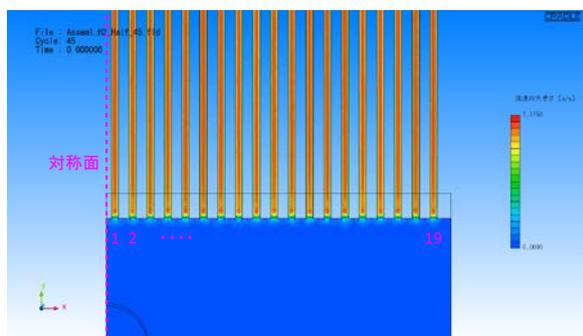


図 2-5 流入側の流速分布（高圧水素）

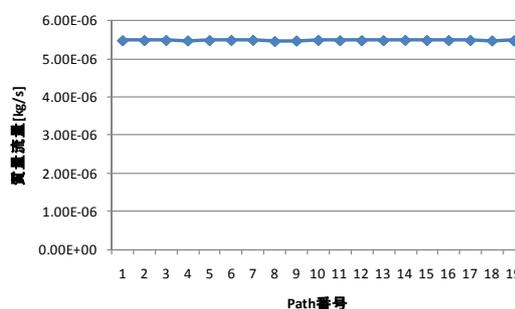


図 2-6 パス毎の質量流量（高圧水素）

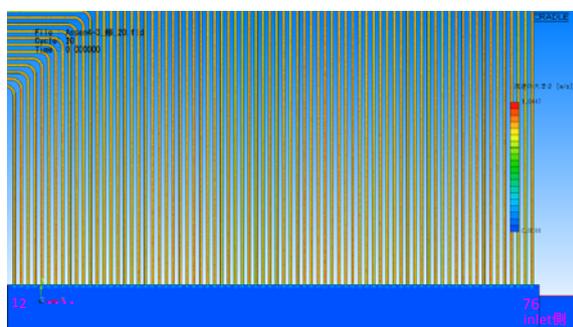


図 2-7 流入側の流速分布（不凍液）

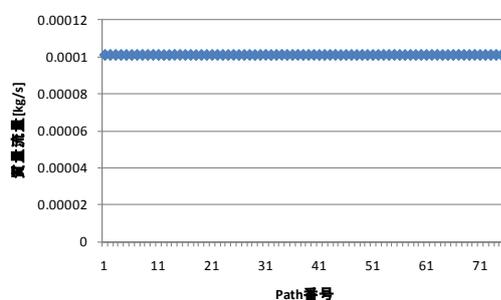


図 2-8 パス毎の質量流量（不凍液）

図 2-9 に積層方向流れについて二次元流体解析を実施し、速度分布のコンター表示をした結果を示す。高圧水素入口付近において流れが大きく乱れることにより、各層への流入量にバラツキが生じる結果が得られた。

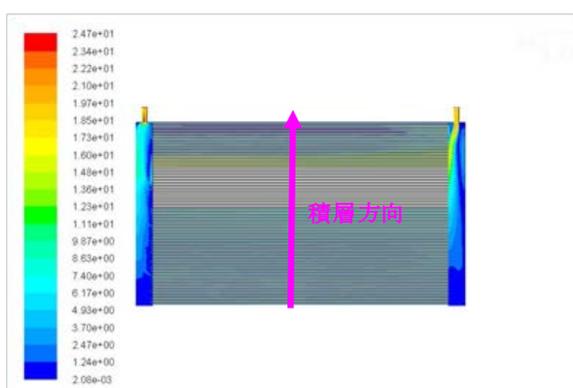


図 2-9 二次元断面流速分布（高圧水素）

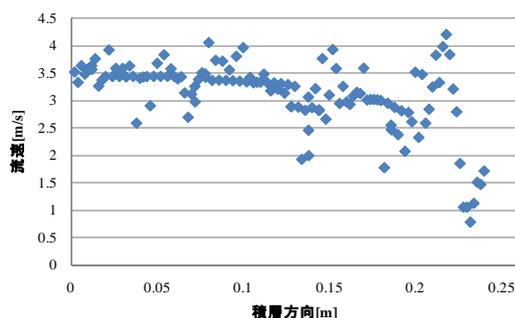


図 2-10 流路内速度分布（高圧水素）

### (5) 考察

面内方向の流体解析の結果から、高圧水素、不凍液流路のそれぞれについて、面内における流量の均一性は保たれるという結果となった。本解析において、パス間における流量バランスが保たれることが確認できたため、単一パスによる解析モデルで評価したところ、熱交

換器の外寸や熱交換性能の評価結果による積層枚数にもよるが、パスの入口と出口で生じる圧力損失はポンプ性能以下に抑えることができることを確認できた。

積層方向の流体解析の結果については、流入口から高圧水素が高速で熱交換器内に入り込むことによって激しい乱流が発生し、各層の伝熱プレートへ入り込む流量にばらつきが生じる結果となった。本解析は二次元モデルでの評価であり、奥行き方向の流れが制限されるため、過酷な境界条件下での評価となっているが、大まかな流れの傾向は確認できていると考えられる。本解析で得られた高圧水素のバラツキを目安として、流速にバラツキが生じた場合でも熱交換性能が保たれるような設計を行う必要がある。

#### (6) 流れの均一性、圧力損失の影響

不凍液と高圧水素のプレート内の流れの均一性評価については、上記のように実施しており、それぞれの流路形状や長さを同様とすることで流れが均一となることを確認済みである。

一方で、それらプレート内の圧力損失を流体シミュレーションによって算出し、不凍液の流れやすさを汎用品と比較した。シミュレーションに必要な流れ条件および物性値ならびに得られた結果を図 2-11 に示す。汎用品の不凍液側圧力損失は 1.39MPa であったのに対し、研究開発品は 0.028MPa と 1/50 程度まで改善されていることが明らかとなった。これは、流路断面形状が四角形から半円形に変更したことや流路断面積を広げたことによる効果である。圧力損失の改善によって熱交換器が接続されるプレクールチャーの循環ポンプ動力の低減にもつながり、省エネルギー効果にも寄与する。

同様に水素流路についても、圧力損失の算出を行い、充填圧力の 82MPa と比較して圧力損失は 0.028MPa (充填圧力の 0.0341% に相当) であり、水素充填遅延の防止が期待される。

#### ○高圧水素、不凍液の流量と圧力損失の算出条件

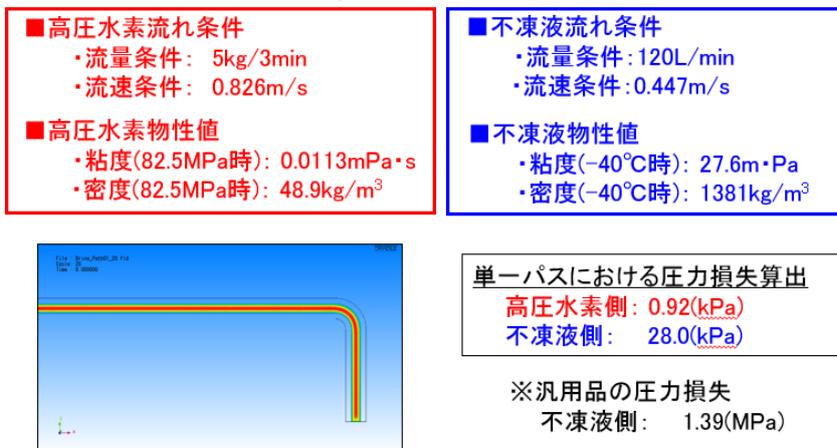


図 2-11 汎用品と研究開発品の圧力損失の比較

## 2-2-3 流れの可視化実験

### (1) 概要

前節では積層方向の流れに関する評価手法として平面モデルを用いた二次元流体解析を実施した内容について述べた。この解析では計算負荷を抑えるために解析モデルの簡略化を行っているため、結果に対する妥当性検証として類似した流路形状を有する熱交換器モデルを3Dプリンタにより製作し、トレーサ粒子を混合した水を作動流体とした可視化実験を試みた。

### (2) 実験の目的

類似した構造の熱交換器モデルの流れについて可視化し、流れの傾向を把握することで積層方向における解析結果の妥当性を検証することを目的とする。

### (3) 実験方法

本研究における熱交換器を模擬した可視化実験モデルを3Dプリンタで製作した後、可視化実験モデルに250~750 $\mu\text{m}$ のトレーサ粒子を混合した水を流し、長野県工業技術総合センター設置の高速カメラを用いて250fpsの速度で撮影を行った。なお、可視化実験を行うにあたっては、白色のトレーサ粒子を見えやすくするために、流路内に黒色スプレーを塗布した。流入口に接続したバルブを調整することで流量による流れの変化を確認するとともに、参考として、可視化実験モデルについての二次元流体解析を実施し、流れの傾向を比較する。

### (4) 実験結果

図2-12に可視化実験の様子と解析結果を示す。可視化実験の様子から流入口付近では流速が速く、流れの乱れが発生することが確認された。また、各層における流速のバラツキについては、流入速度が上がるほど大きくなることを目視で確認された。ヘッダーから各プレートへ流入する不凍液を想定し、流入量を2.3[l/min]と定義した時の解析結果（流速ベクトル図）を示す。同一条件で実施した可視化実験と比較すると、渦の発生箇所や流速のバラツキに傾向の一致が見られた。

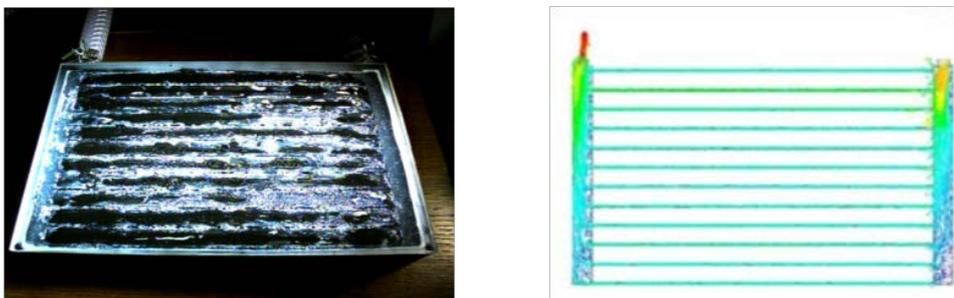


図 2-12 可視化実験モデルと解析結果

### (5) 考察

本実験では入口付近の乱流現象に起因する積層方向流れの均一性を視覚的に確認できた。可視化実験モデルに対するシミュレーションと傾向の一致が見られ数値解析手法の妥当性を検証できたと考えられる。実際の熱交換器とは形状及び作動流体に違いがあるものの、大ま

かな流れの傾向は一致すると考えられ、実機モデルにおける流体解析の結果について信頼性を裏付ける知見となったと考えられる。

#### (6) モデル製作・可視化実験

伝熱・流体シミュレーションにより、決定した流路を有するプレートについて 3D モデル(透明、ポリカーボネート)を製作し、可視化実験に供した。可視化実験には懸濁法を用い、トレーサーを混入させた水を高速度カメラで撮影した後、流体解析を行った。プレート内の流量の設定については、上の(4)でのヘッダーから各プレートへ流入する不凍液と同等とした。

図 2-13 に試験回路図と実験結果を示す。実験結果から流路間において大きな差異はなく、流れの均一性を確認することができた。さらには、解析した流路内の流れベクトル、流線、濃度分布からも、流れの抵抗となる渦流の発生は認められず、流路内において流れのパラツキはほとんどなかった。これにより、伝熱・流体シミュレーション結果の妥当性が確認することができた。

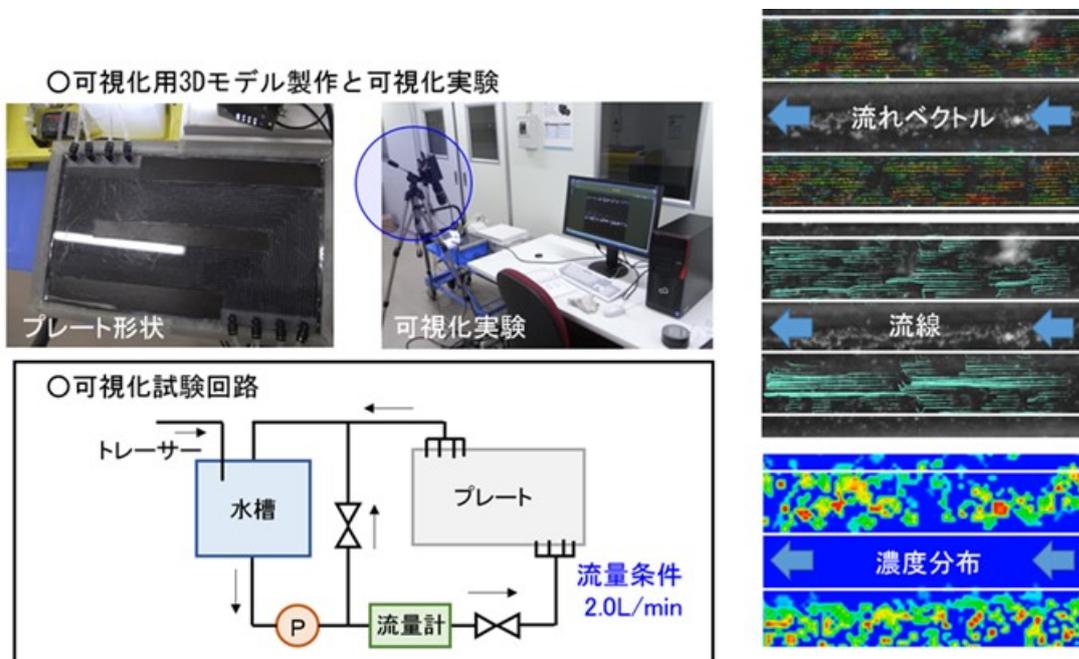


図 2-13 可視化実験の試験回路図と実験結果

## 2-2-4 構造解析による接合圧力の評価

### (1) 概要

拡散接合において、接合圧力（以下、圧力）は接合強度を決定する重要なファクターである。圧力不足や不均一は接合強度の低下や内部の局所的な応力集中を招くとともに熱交換機の性能を著しく低下させる要因となる。今回対象とする水素ステーション用熱交換機は面積の広いプレートが多重に積層されることから、加圧時において圧力が均一に付加できるか確認しておく必要がある。

本課題では応力解析ソフトウェアを用いて加圧時におけるプレート間の圧力を求め、これによって適正な接合強度が得られるかを予測することを目的としている。

### (2) 二次元解析の方法と結果

加圧時の圧力を求める際に市販の構造解析ソフトウェア (ANSYS Workbench 15.0) を用いた。解析には下記 2 種類のモデルを使用して圧力不足や均一性について検討することとした。

実際の製品では伝熱プレート-高圧水素プレート-伝熱プレート-不凍液プレートの 1 セットとし、60~100 セット程度積層することを想定しているが、これを実物大の三次元モデルで再現すると解析規模が非常に大きくなり、解析が困難である。そのため、1 セットを解析対象とし、ここでは 1 セットの三次元モデルにて面内方向の圧力分布と断面を数セット積層した二次元モデルにて積層方向の圧力分布を検討することにした。

ここでは二次元の解析について説明する。解析モデルは二次元の 1 セット積層モデルを用い平面ひずみモデルとして解析を行った。図 2-14 に境界条件を示す。底板下面の変位を水平方向はフリー、垂直方向は変位 0 に拘束し、上板上面には 40MPa の圧力を付加した。なお、この圧力については応力の差を顕著に表現するため、接合圧力以上に設定している。

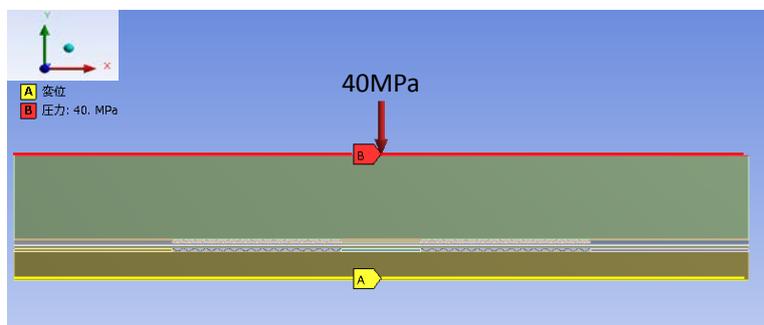


図 2-14 二次元境界条件

解析では要素分割を行い、接触条件として水平方向の分離がなく垂直方向の滑りを許容する条件に設定した。材料物性値については SUS316L に機械的物性値が比較的近い、表 2-3 に示す SUS304 の物性値 (20°C) を使用し、等方性弾性モデルとして解析を行った。

図 2-15 に今回の解析条件における圧力の結果を示す。圧力の高い部分は特に流路部のエッジ (赤矢印) に集中している。中央の平板部には十分な圧力がかかっているが、外側の平板部はプレート外周に近いほど圧力が小さくなる傾向があり不均一になっている。

表 2-3 SUS304 の材料物性値

温度(°C)	ヤング率[GPa]	ポアソン比
20	196	0.29

日本機械学会「金属材料の弾性係数」より抜粋

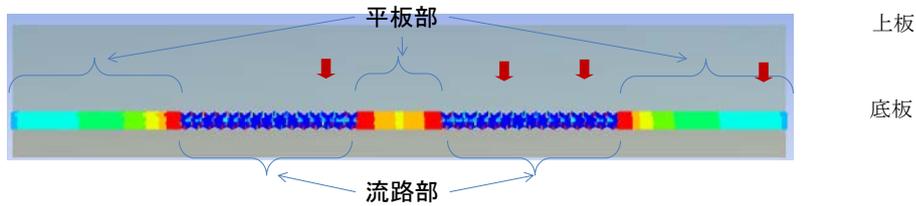


図 2-15 20°Cにおける圧力分布

流路のエッジに圧力が集中していることから、拡散接合時に流路部をしっかり封止できる可能性が示唆される。プレート外周部においては外周に近いほど圧力が低く不均一が生じているため、条件によっては外周部が接合されない可能性がある。ここには積層方向に高圧水素が流れる流路が配置されるため、接合不足が生じないか注意を払う必要がある。これについては三次元モデルを用いて検証を行う。

(3) 応力解析のための物性値の測定

応力解析の精度を高めるため、材料(SUS316L)の高温引張試験を行い高温物性値を取得する。得られた結果を図 2-16 に示す。

○応力解析に使用する物性値の取得

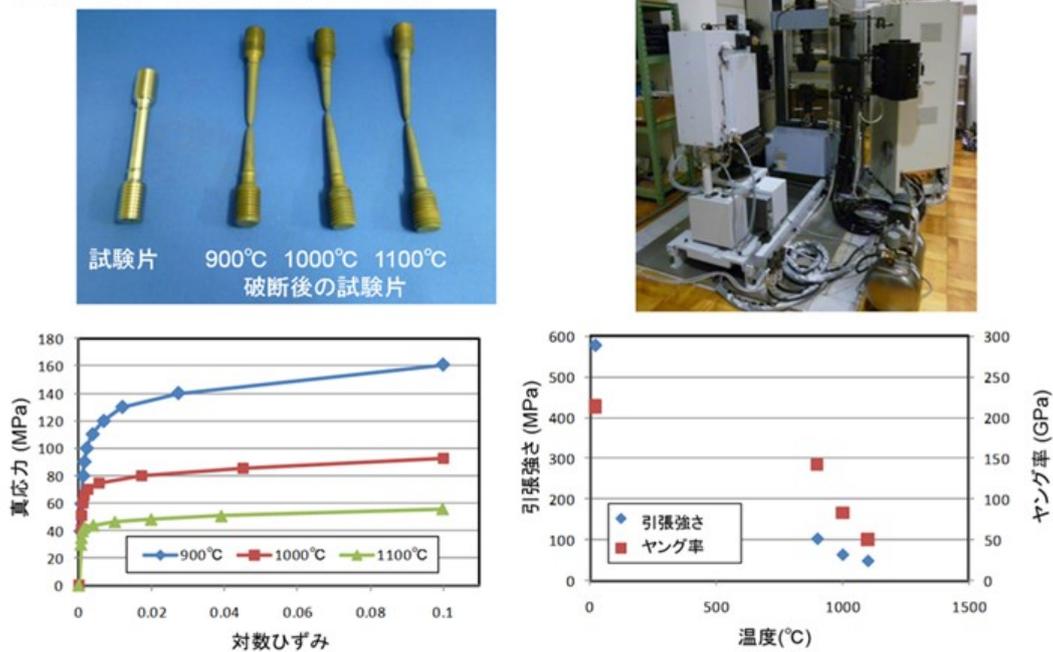


図 2-16 応力解析に必要な物性値の取得

## 2-3 熱交換器の製作技術

### 2-3-1 プレート材料の機械的性質評価（微小試験片による疲労試験）

ここでは、プレート式熱交換器に使われる高 Ni オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316LHNi 母材の疲労特性のデータ取得ならびに接合後の疲労特性との比較を行う。

疲労試験片は 80 mm× 22mm 板厚 0.5 mm の薄板で砂時計型の U ノッチ底幅 5 mm、ノッチ底半径 2.5 mm、板厚 0.5mm の U ノッチを中央に設ける。また、つかみ部の滑り防止のため、両端にアルミのタブ材 (A5052; 長さ 75mm×幅 22mm×厚さ 1mm) を接着し、試験片の強度を高め、チャックの精度を上げる。

加工方法はワイヤ放電加工を用いた。供試鋼には SUS316LHNi と比較鋼として、SUS316L を用いた。また、疲労試験片は圧延方向に採取し試験を行った。

#### 使用機器

油圧式疲労試験機サーボパルサ 4830 型(島津製作所)

周波数: 10 Hz

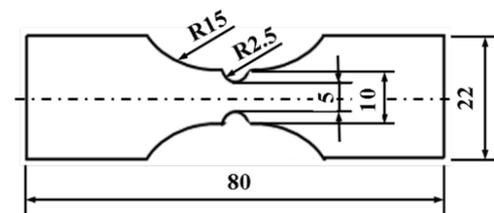
応力比:  $R = (\sigma_{\min} / \sigma_{\max}) = 0.1$

最大応力:  $\sigma_{\max} = 100 \sim 300$  MPa

最小応力:  $\sigma_{\min} = 10 \sim 30$  MPa

片振り(引張り-引張り)

繰返し数:  $N_f = 10^3 \sim 10^7$  回



疲労試験の応力変化(正弦波)について、試験片に与える応力は、応力の値が時間経過とともに、最大応力と最小応力の範囲内で正弦波を描くように変化させ続け、試験片が破断するまでの周期を測定する。さらに、その時の応力の最大値を  $\sigma_{\max}$ 、最小値を  $\sigma_{\min}$  とし、その差を応力振幅範囲  $\sigma_R (= \sigma_{\max} - \sigma_{\min})$  として算出した。

測定した疲労曲線(S-N 曲線)を図 2-17 に示す。SUS316LHNi において図 2-17 より最大応力幅 270MPa 付近で疲労限度に達する。オーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労曲線(JIS B8266(2003))に記載される疲労特性とほぼ同等であることが確認された。

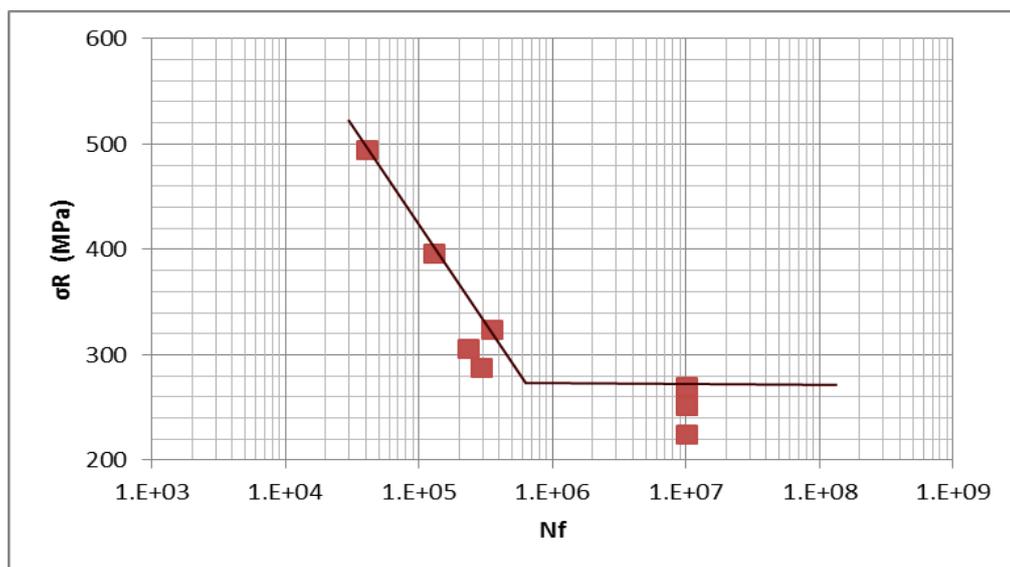


図 2-17 SUS316LHNi 材の疲労曲線 (S-N 曲線)

## 2-3-2 接合条件の最適化

### (1) テストピースの製作と拡散接合

拡散接合の基礎条件出しに用いるテストピースは SUS316L の  $\phi 20 \times L60$  (mm) 丸棒とした。接合面は、プレート材料表面と同様な No. 2B 程度に調整し、接合試験に使用した。接合後、強度を評価するため、JIS Z2241 (2011) に基づき、テストピースを加工した。図 2-18 にテストピース形状と接合部の引張強度試験結果を示す (母材データ元 JIS G4303 (1998))。

接合前後の変形度と引張強度を測定し、それらへの接合温度・時間の関係を明らかとし、接合基礎条件を設定した。変形度は温度の上昇と時間の経過に伴って増加する傾向となった。また、引張強度においては温度による強度の差異はほとんど見られなかったが、温度の上昇に伴って絞りが増加していることが確認された。一方で、温度の上昇は強度低下を招く可能性があるため、接合時には注意が必要である。また、接合強度は SUS316L 母材の機械的性質と同等以上でなければならないため、引張強度と絞りも含め、接合温度、接合圧力、接合時間を総合的に判断し、接合基礎条件とする。

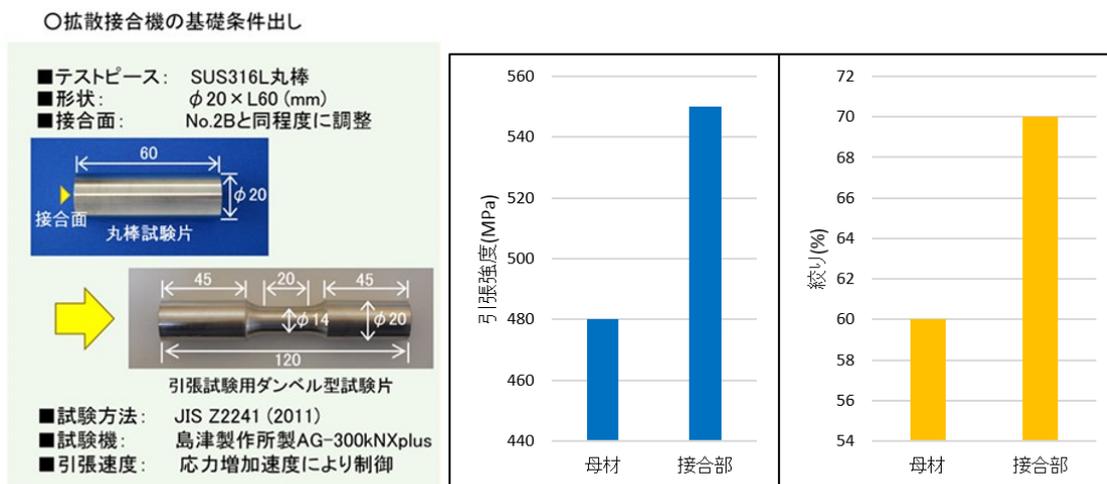


図 2-18 拡散接合機の試験片と接合結果

### (2) 接合後のテストピースの機械的性質評価

接合後の機械的性質評価は引張強度以外にも熱交換器の要求性能である疲労強度 (応力振幅 0~82MPa、サイクル数  $10^6$ 回) ならびに低温中の耐水素脆化性を評価する (低ひずみ速度引張強度試験、SSRT) 必要がある。

図 2-19 に SUS316LHiNi 拡散接合品、SUS316LHiNi、SUS316L の測定した疲労曲線 (S-N 曲線) を示す。テストピース形状ならびに試験条件は母材測定時と同様である。S-N 曲線から母材ならびに拡散接合品について疲労破壊しない領域に位置していることが確認された。

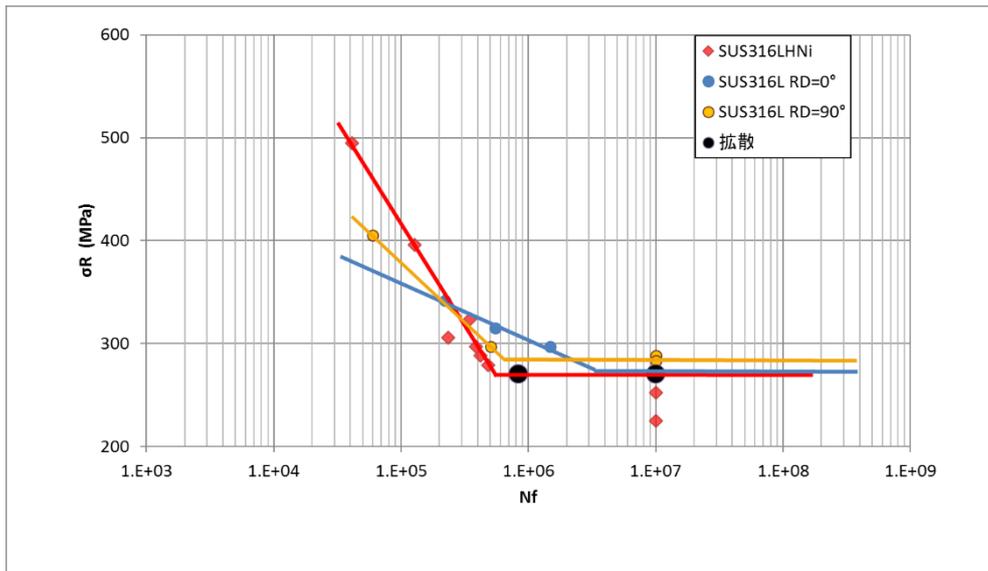


図 2-19 疲労曲線 (S-N 曲線)  
(SUS316LHNi 拡散接合品、SUS316LHNi、SUS316L)

### 2-3-3 表面改質による改良

熱プレートに表面改質(強度向上)を施すことで接合圧力による伝熱プレートの変形を最小限に抑える。また滑らかな数 $\mu\text{m}$ の凹凸を付与することで、単位面積当たりの伝熱効率を向上させ、伝熱プレートの枚数の低減による軽量化を図る。

凹凸の付与処理は伝熱面積の向上だけでなく、接合部表面近傍へ残留応力が付与されるため、拡散接合時の熱履歴を利用することで残留応力開放による原子拡散速度向上にもつながり、接合圧力を低減する効果が期待される。さらには、結晶粒の再配列と新しい結晶粒の生成(結晶粒の微細化)によって機械的性質(引張強度、疲労強度)や耐水素脆化性についても向上が期待される。

## 2-4 熱交換器の評価

高強度化の検証は、高圧水素による実負荷試験を実施し、耐圧性能、疲労強度ならびに耐水素脆化性に加えて基本性能（伝熱性能、圧力損失）を評価することで、本事業終了後の早急な市場投入を可能にする。

製作したプレート式熱交換器の試験評価を実施した。熱交換器の仕様ならびに試験結果の評価はアドバイザーの日立オートモティブシステムズメジャメント(株)、東日本オリオン(株)の両社の協力を得て進め、迅速な研究開発とともに製品化を目指す。

製作されたプレート式熱交換器の耐水素脆化性、耐圧性能および基本性能（圧力損失、伝熱性能）を評価するため、熱交換器からテストピース（JIS Z 2201「金属材料引張試験片」、4号定型試験片）を切り出した後、低歪速度引張強度試験（SSRT）ならびに疲労強度試験を行う。試験後、相対絞り比（RRA）を測定し、「JIS G4305 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」の値と比較することで耐水素脆化性を評価した。

本研究開発で開発するプレート式熱交換器は、高圧ガス保安協会の定める第一種特定設備に該当するため、特定設備検査規則ならびに特定設備技術基準の解釈に準拠する必要があるため、水素ステーションに求められる気圧耐圧 121MPa（液圧 135MP 相当）にて評価する。さらには、大気圧～82MPaの圧力変動試験についても同時に実施する。

上述の耐水素脆化性および耐圧性能を満足した熱交換器は、水素ステーション実証設備（HyTReC 水素エネルギー製品研究試験センター）の協力を得て水素実負荷試験（圧縮水素充填技術基準 JPEC-S0003(2016)）を行う。また、水素充填中の水素温度・圧力のデータを取得することで圧力損失ならびに伝熱性能の評価を行う。

以上により、当初の目標としていた性能を満足することを確認した。

## 第3章 全体総括

### 3-1 最終目標に対する達成度と課題

本事業で開発するプレート式熱交換器の最終目標としては、製造コストを 750~900 万円、重量を 200kg、高品質（高耐圧性 135MPa 以上、疲労強度  $10^6$ 以上、耐水素脆化性）であった。これに対して、製造コストならびに重量について達成した。また品質においても、基準値をクリアすることができた。試作した熱交換器においては冷却能力についても十分であることを確認した。

課題点としては、伝熱プレートの製造方法の実用化がある。本事業においていくつかの加工方法について検討を行い、性能が満足する方法も見つけることができた。しかし、プレート式熱交換器は高圧機器であり、その安全性を確保するためには、より長時間にわたる評価が必要である。このため、すぐに製品の製造に導入するのは困難であり、今後、その品質の確認を進めることで、新たな製造方法による伝熱プレートの製品化を進めていく。この制作方法を用いれば、伝熱プレートの製造コストを大幅に削減することができ、プレート式熱交換器の価格を下げるのが可能となる。

### 3-2 事業化の展開について

オリオン機械は、産業用の冷凍機器メーカーであり、クリーンルーム用の空調機から、産業用のチラーならびに除湿機等を生産している。そのシェアは、半導体向けのチラーにおいては 17%を占める。冷凍機器の設計開発・製造・販売においては、ASME 規格、第二種圧力容器（労働安全衛生法構造規格）、GB 中国圧力容器等に基づいて行っており、国内外の圧力容器の法規制への対応、品質管理の技術を有している。

また、水素ステーション設備についても、水素ステーション用プレクール設備（冷凍機＋シェル&コイル式熱交換器）については、現在までに JX 神の倉水素ステーションならびに JX 横浜旭水素ステーションへの導入実績あり、高圧水素を低温まで冷却する冷凍機と熱交換器のノウハウを有する。

水素ステーション建設において困難とされている高圧ガス保安規則への対応能力や高圧圧力容器の評価技術を有するため、迅速な事業化展開が可能である。プレクール設備全体を設計・製造・販売・サービスを行うことのできる国内唯一のメーカーである。既にプレクール設備の納入で取引のある川下企業との連携を深め、プレート式熱交換器を早々に納入する予定である。

本事業の研究開発のターゲットは、水素ステーション用のプレート式熱交換器であるが、今回の研究開発で得られた技術は、冷凍機器をはじめ家庭用給湯器に至るまで幅広い分野に応用することができる。