

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「極細管加工技術を用いたマイクロチャンネル熱交換器の
小型化・軽量化の研究」

研究開発成果等報告書

平成23年 9月

委託者 近畿経済産業局

委託先 学校法人 立命館

成果報告書目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 背景・研究目的及び目標
 - 1-1-1 研究開発の背景
 - 1-1-2 研究開発の目的
 - 1-1-3 高度化目標
 - 1-1-4 技術的目標
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
 - 1-2-1 研究組織
 - 1-2-2 管理体制
 - 1-2-3 管理員及び研究者氏名
- 1-3 成果概要
 - 1-3-1 切削加工に関する研究開発
 - 1-3-2 金属プレス加工に関する研究開発
 - 1-3-3 数値シミュレーションに関する研究開発
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 切削加工に関する研究内容
- 2-2 金属プレス加工に関する研究内容
- 2-3 数値シミュレーションに関する研究内容

第3章 全体総括

- 3-1 研究開発の成果
- 3-2 事業化展開

第1章 研究開発の概要

1-1 背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

自動車産業においては、燃費の向上と車内スペースの広さが付加価値を左右する重要な要素であり、車体に搭載する部品の小型化、軽量化が求められている。車体に搭載する部品の中で熱交換器は大きさ、重さ共に大きなウェイトを占めており、今後の電気自動車へのシフトに対してもこの熱交換器は必要となってくるので、この熱交換器の小型化、軽量化のニーズが高まっている。また、同時に国際競争力確保の観点から、小型化、軽量化を図りながらコストの低減も必要であり、低コストで高品質でバラツキの少ない部品製造を可能とする製造技術開発のニーズが高まっている。

しかしながら、熱交換器にはその使用条件にもよるが高耐圧を求められることが多く、高耐圧に耐えうる熱交換器を設計する場合は、熱交換する伝熱壁の肉厚を分厚くする必要があり、肉厚を厚くした分、熱交換効率も悪くなり、必要とする熱交換量を確保するには余計に伝熱面積を必要とし、小型化できないことは言うまでもなく、重量は厚み分と面積分の掛け算で重くなってしまい、車体に搭載する部品としては致命的となる。

現在、広く採用されているプレート型の熱交換器は波板にプレス加工された金属板を積層してロウ付けし、その板と板の隙間を熱交換させたい作動流体を交互に流し、金属板を伝熱壁として熱交換させている。この熱交換器を高耐圧で小型化・軽量化するには前述したような問題が起こり、現在様々な技術開発が行われている。

一方、従来からある熱交換器で高耐圧下でも非常に信頼性の高い熱交換器としてシェルアンドチューブ型熱交換器がある。プレート型と違い、耐圧に一番強い形であるパイプを伝熱壁とすることで、伝熱壁の肉厚を極限まで薄く設計することが可能となり、大幅な効率の改善による小型化・軽量化が可能となる。

1-1-2 研究開発の目的

本研究開発は、従来からあるシェルアンドチューブ型の熱交換器の伝熱管（パイプ）を設計耐圧に耐えうるまで肉薄化させる為に、パイプの肉厚を均等にそぎ落とし、かつ高速で生産性の高い製造方法を確立する。同時にその伝熱管を保持するヘッダーの作製を従来からのドリルなどの切削加工ではなく、生産性の高いプレス加工で行えるようにする。高耐圧に耐えうる設計にするにはヘッダー部にもある程度の肉厚は必要となるので、プレスの穴あけ加工と肉厚との限界を超える新たな加工方法の確立が必要となる。

1-1-3 高度化目標

特定ものづくり基盤技術高度化指針にある「切削加工に係わる技術」に関する事項において、本研究に対応した自動車に関する川下製造業者等の抱える課題及びニーズは、

(1) 自動車に関する事項

- イ. ハイブリッド化、燃料電池化
- ウ. 軽量化

(2) 電機機器に関する事項は

- イ. 機能の確保・高度化
- ウ. 性能・寸法の再現性向上
- カ. 小型化

であり、そのニーズを踏まえた切削加工に係る技術の高度化目標は

- a. 高精度・超精密加工に対応した熱交換器の熱効率の向上、小型化、軽量化

- b. 高速・高効率化に対応した加工コストの低減化

また、金属プレス加工に係る技術の高度化目標は

- a. 精密・微細加工技術の向上
- b. 複合加工、部品組立て及び工程短縮などを可能とする技術の向上である。

1-1-4 技術的目標

上記高度化目標に対応した技術的目標は以下のとおりである。

(1) 切削加工に関する技術的目標

伝熱管であるパイプを細径化させると伝熱管を多く配列することができ、単位体積あたりの伝熱面積を増やし、熱交換効率も飛躍的に上げることが可能となる。しかしながら、パイプを細径化させることで外径に対して相対的にパイプの肉厚が分厚くなってしまい、熱交換器の設計耐圧以上の肉厚は上述のように伝熱効率を落とし、製品の重量・体積を大きくしてしまう。現状ではパイプ径が3mmではパイプの肉厚は0.1~0.2mmが限界であり、それ以下でのパイプ製造は困難である。本研究では切削加工を高度化させ3mm以下のパイプの肉厚を0.05mm(50 μ m)以下までに落とし込み、かつ低コストで加工できるように自動化の研究開発を図る。

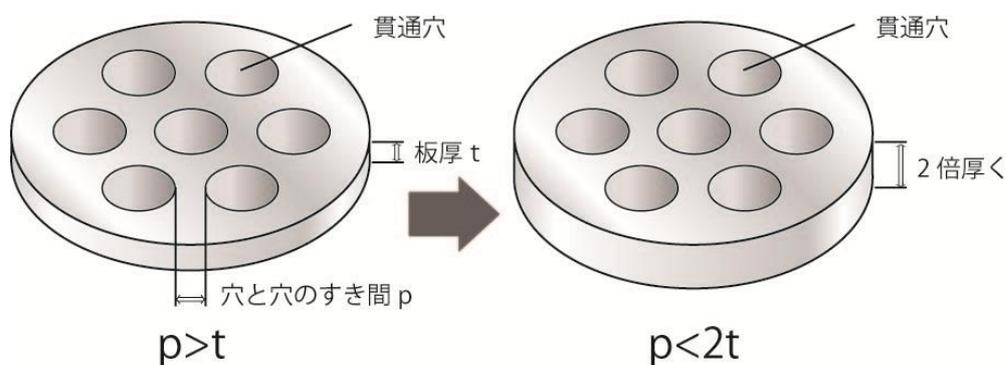
(2) プレス加工に関する技術的目標

シェルアンドチューブ型の熱交換器を小型化・軽量化するには、伝熱部分であるパイプを保持するヘッダー（右図



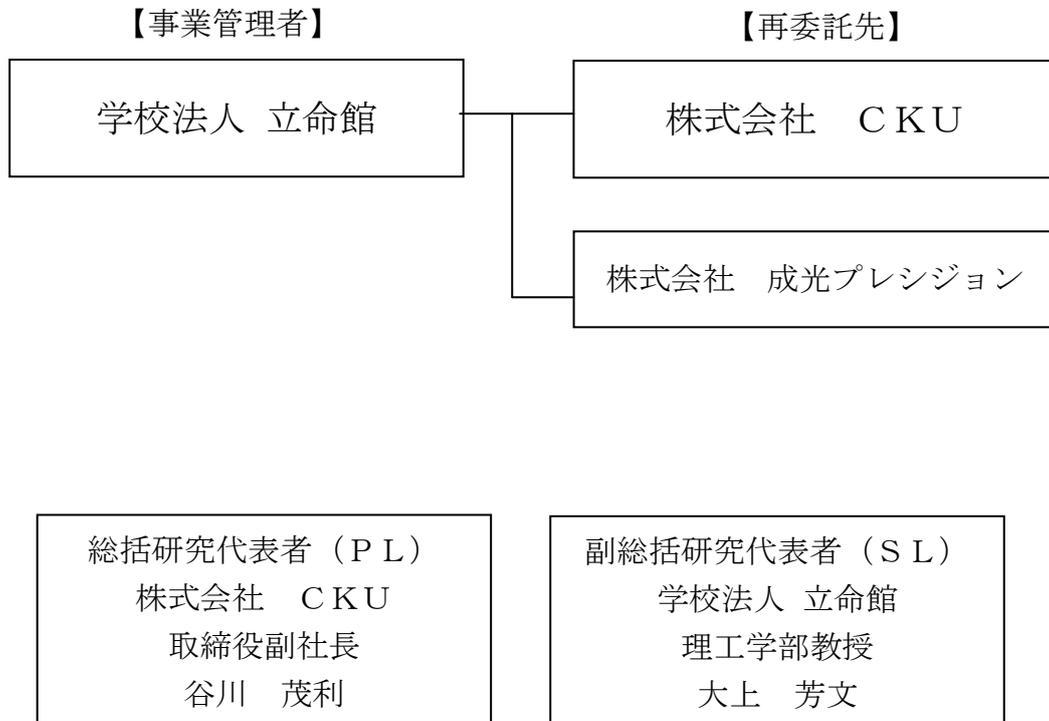
図1. ヘッダー

参照) に多数の穴を狭ピッチであける必要があるが、ドリル加工やレーザー加工では1つの穴に対して最低でも数十円かかり、パイプを数十本挿入する必要があることを考えるとコスト的に合わない。プレス加工にて打ち抜くことが最も有利であるが、高耐圧に耐える為にヘッダーの厚みを厚くしたいが、プレス加工の性質からヘッダーの厚みとあけようとする穴と隣の穴とのピッチが同等以上でない設計ができない。つまり、ヘッダーの厚みを 2mm 必要とすると穴と隣の穴とのピッチが 2mm 以上 (2.5mm 程度) 必要とする。本研究ではヘッダーの厚みに対して穴と隣の穴とのピッチを半分以下にすることを目標とし、具体的にはヘッダーの厚みを 2mm のものであれば穴と隣の穴とのピッチを 1mm 以下で製造できるようにする。(下図参照)



1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1-2-1 研究組織



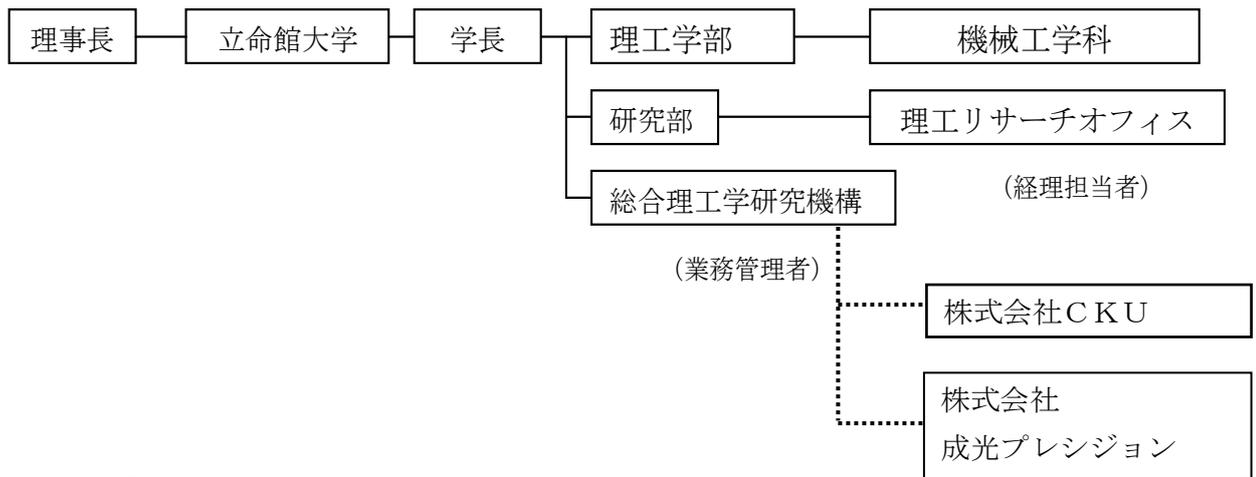
研究開発分担・・・（主たる研究実施場所については、下線表記）

- 学校法人 立命館
〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1
- 株式会社 CKU
立命館大学BKCインキュベータ
〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1
- 株式会社 成光プレシジョン
〒210-0854 神奈川県川崎市川崎区浅野町 6-7

1-2-2 管理体制

【事業管理者】

- 学校法人立命館

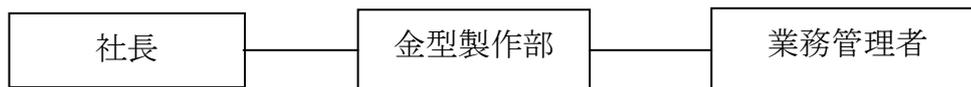


【再委託先】

- 株式会社 CKU



- 株式会社 成光プレシジョン



1-2-3 管理員及び研究者氏名

【事業管理機関】

○ 学校法人立命館

①管理員

氏名	所属・役職	
馬渡 明	研究部 理工リサーチオフィス 課長	
藤澤 知宏	研究部 理工リサーチオフィス 課長補佐	
服部 華代	研究部 理工リサーチオフィス 課員	
加藤 早恵子	研究部 理工リサーチオフィス 課員	

研究員

氏名	所属・役職	
大上 芳文	理工学部 機械工学科 教授	副総括研究代表者

【再委託先】

○ 株式会社 CKU

氏名	所属・役職	
谷川 章太	代表取締役	総括研究代表者
谷川 茂利	取締役副社長	
櫛引 啓三	技術部 小型熱交換器推進チーム	

○ 株式会社 成光プレシジョン

氏名	所属・役職	
大原 正一	金型製作部係長	
細谷 静男	金型製作部	

1-3 成果概要

1-3-1 切削加工に関する研究開発

1-3-1-1 パイプ加工技術の開発と量産技術の確立

熱交換器として、必要耐圧に耐えうる限界までパイプ肉厚をそぎ落とし、熱交換効率を高め、小型化、軽量化を促進させることを目的とする。この加工工程がコスト的にボトルネックとならない為にも、安定的に加工精度がだせ、歩留まりを良く、さらにできる限り短時間で加工が完了するように、パイプの送り速度を速めても安定する諸条件の最適化を図った。

結果としては、現在製作できるパイプの肉厚を3分の1にすることができ、加工スピードも従来よりも10倍近いスピードで製造できるようになった。それにより、従来の方法でシェルアンドチューブ式の熱交換器を製作した時と比べると約半分の大きさ、重量で製造することが可能となった。

1-3-1-2 パイプ内径の工夫について

しかしながら、パイプを細径化すると熱交換量だけを見ると高性能化され、大幅な小型化・軽量化が可能となるが、細径化によってパイプ内に流す為に必要な圧力が必要となる。つまり、熱交換器としての圧力損失が増大する。熱交換をさせたい2つの作動流体は通常ポンプなどで圧力を上げて熱交換器に流しこむのであるが、熱交換器の圧力損失が大きいと作動流体を流すのに大きな圧力が必要とする為、ポンプにより高い負荷がかかり、より大きい動力を必要とする。近年の省エネ・環境意識の高まりから小型化・軽量化と同様に省エネ率（COP）という指標が非常に大きい付加価値としてある為、細径化による小型化・軽量化が成功したとしても省エネ率とのトレードオフの関係であれば大きな付加価値を得ることはできない。本研究開発で確立できたパイプの薄肉加工に加えて、パイプ内部に溝を整形することでパイプ内に流れる流体を乱流化させ、パイプ径を大きくしても従来よりも飛躍的に高い熱交換効率を得ることができた。それにより、圧力損失を抑えつつも、小型化、軽量化を推進できる目処がついた。今後、パイプ内部に溝を整形することでのパイプの耐圧性能や溝の形状などの最適化などを進める必要がある。

1-3-2 金属プレス加工に関する研究開発

プレス加工による穴あけで、穴と穴との隙間（ピッチ）と加工対象物（ワーク）の厚みとの比率を1以下、つまり、穴と穴とのピッチが1mmの場合ではワークの厚みが1mm以下でなければ穴があけられなかったものを、比率を1

以上の2以上を目標とした。すなわち、穴と穴とのピッチが1mmの時でワークの厚みが2mm以上でも穴あけ加工できる加工方法の確立を目指した。

1-3-2-1 通常の順送金型で打ち抜き

1. 板厚と同一の穴ピッチは形状を保持したままきれいに打ち抜くことが出来た。
2. 板厚の80%の穴ピッチで打ち抜くと、2回目の打ち抜きステージで隣の穴との隙間が引っ張られ、1回目の穴が楕円形状になってしまった。
3. クリアランスを追い込んで破断面を少なくしたが、カジリが発生した。

1-3-2-2 すべての穴を同時に加工し、穴を三段階で打ち抜く

1. 板厚の80%の穴ピッチは問題なく打ち抜くことが出来た。
2. 板厚の70%の穴ピッチでトライをすると、隙間が引っ張られ穴形状が歪んでしまった。
3. クリアランスを追い込んでみたが、カジリが発生して打ち抜けなかった。

1-3-2-3 ファインブランキング方式で打ち抜く

金型を変更してサーボプレスにてファインブランキング方式を用いて打ち抜くようにした。プレスの回転数を落として加工すると当初の目標である板厚の50%の穴ピッチを加工することができた。ただ、プレスの回転数を上げると順送金型の時のような問題が生じた。また、刃に摩耗が生じてくると加工する穴形状に異常が生じることも分かった。

最終的には独自の工程にて、板厚を穴ピッチの3倍までのヘッダーの量産技術は確立できた。

1-3-3 数値シミュレーションによる研究

1-3-3-1 バッフルプレートと除去熱量との関係

バッフルプレートの枚数が、シェル内の流れや圧力降下、除去熱量に与える影響を明らかにし、効率の良い熱交換器の設計に資することを目的とした。一連の解析により以下のことが明らかとなった。

- (1) バッフルプレートの数が増えれば除去熱量も増える。しかし、その後、減少し除去熱量を最大とする枚数が存在する。
- (2) バッフルプレートの背後には渦流れが発生し、流体の停留時間を増大させ、その結果、より多くの熱を奪う作用をする。

1-3-3-2 マイクロチャンネル内のシミュレーション

マイクロチャンネル内ではフロンガス R410A が気体から液体に凝縮する際に管壁から熱を奪う。今回、新たに提案されたコイルスプリングがマイクロチャンネル内に挿入されており、流れの乱流化と熱の除去を促進させると考えられる。この効果を明らかにするためのシミュレーションを行い、以下の結果が得られた。

- (1) コイルスプリングのピッチが大きくなると、より均一な流れとなる。
- (2) ピッチが小さいほど、流体抵抗が大きくなり、温度は小さくなる。
- (3) 奪われる熱量を最大にする条件が存在する。

1-3-3-3 マイクロチャンネルのギャップやバッフルプレートの枚数の影響

本節ではマイクロチャンネルのギャップや直径、バッフルプレートの枚数を変化させ、圧力抵抗や除去熱量に与える影響を明らかにした。その結果、以下が明らかとなった。

- (1) 除去熱量はバッフルプレートが5枚の時に最大となるが、3枚、7枚との差はそれほど大きくない。
- (2) ギャップが 0.4mm の場合が最も効率が良い

1-3-3-4 マイクロチャンネルの熱応力解析

マイクロチャンネルに作用する熱によって生じる熱応力を解析した。その結果、以下が明らかとなった。

- (1) 生じる応力は Pa のオーダーであり、金属の圧縮強さ (MPa~GPa のオーダー) に比べて、全く問題がない。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

学校法人 立命館

研究部理工リサーチオフィス課員 加藤 早恵子

TELL: 077-561-2802 FAX: 077-561-2811

E-mail: kato-s-a@st.ritsumei.ac.jp

第2章 本論

2-1 切削加工に関する研究開発

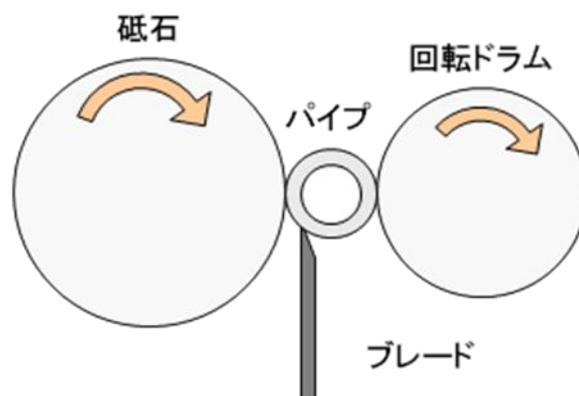
本研究では、パイプの肉厚を設計耐圧に耐えうるぎりぎりの薄さにすることで熱交換効率を高め小型化・軽量化を図り、同時に生産性の高い方法での切削加工方法の確立を目指した。具体的には

- a. パイプ加工技術の開発：安定的な肉薄管の加工条件の割出
- b. 量産技術の確立①：自動パイプ供給の開発
- c. 量産技術の確立②：加工品の自動評価装置

を行い、各工程のパラメーターを前後の工程との影響を考慮し最適化を図ることで歩留まりの良く加工時間の短縮による生産性の向上などを目指した。また、同時に熱交換器としての効率を最大化する為に、パイプ内に溝を形成し、パイプ内に流れる作動流体の流れを乱流化させ、熱伝達率の向上を目指した。

2-1-1 パイプ加工技術の開発と量産技術の確立

パイプの外径を砥石により切削研磨を行い、パイプの肉厚を薄くするのであるが、パイプを下図のように一方から回転させる為のドラムをあて、もう一方では同じようにドラム状になった砥石を当てることで研磨を行う。

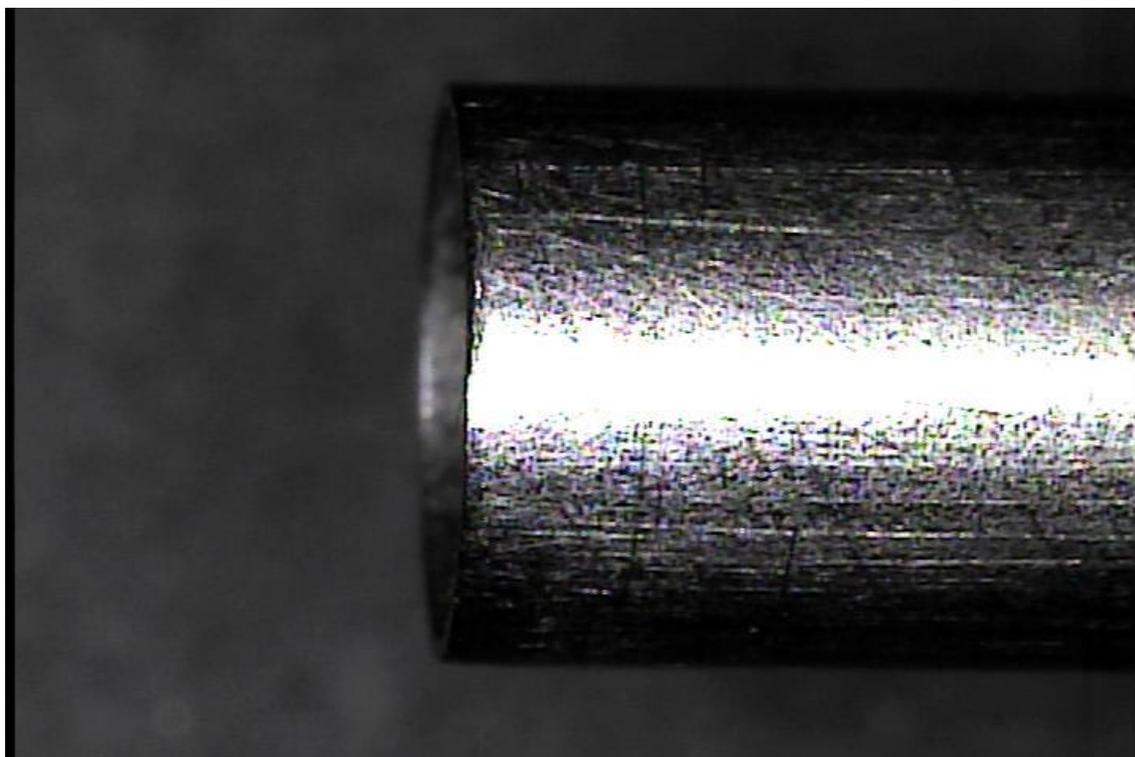


しかしながら、パイプが薄肉になるに従って、局部的に薄くなった部分が破けてしまう。局部的に薄くなる理由としては

- ①加工する前のパイプの真円度や偏肉の状況など加工前のワークの問題
- ②加工時にパイプを回転させるドラムや砥石の状況の問題

が挙げられる。①に関しては、パイプメーカーとの調整により、メーカーの品質保証のレベルを上げてもらうことで解決できた。②に関しては、回転させるドラムの問題はパイプ同様メーカー側で解決できたが、砥石に関しては加工時に出る粉末や、砥石の形状変化が問題である。その問題を解決する為に、研磨

時に使用する砥粒を変化させたり、加工時への砥石の当て方などを工夫したりすることで、砥石の形状変化を抑えることに成功した。さらに、量産性を上げる為に、パイプを送る速度を上げて安定的にパイプが加工できるようにパイプの送り速度と砥石の回転数の最適値を出す為にパイプの径を含めて考えられるすべてのパラメーターを割り振り最適な組み合わせを見つけることに成功した。その際に研磨後のパイプの表面を拡大して、表面の切削傷の具合と、パイプの断面を確認して加工によるパイプ肉厚の偏肉があるかどうかなどを調べた。下図にパイプ表面を拡大した写真を添付する。砥石による切削傷が荒く出ていることが分かる。通常の研磨ではこのような大きな傷がないが、今回は量産性を出す為に、パイプの送り速度を通常の10倍程度早くしており、その送り速度に対応してパイプ肉厚を切削できるように砥石の切削能力が高い荒い目の砥石を使用し、さらには砥石の回転数も通常の数倍早くしている。



結果としては、パイプ径が $\phi 3\text{ mm}$ 程度のものでは肉厚を 0.8 mm 程度まで安定的に、かつ、量産性の高い状態で加工することに成功した。下図にそのパイプの写真を添付する。



外径φ2.26mm 内径2.1mm パイプ肉厚0.08mm (80 ミクロン)

上図のパイプであれば、通常のパイプを作る工程であれば、肉厚が0.2～0.3mm程度は必要となる。実際に今回の研究開発で切削加工を行う前のパイプは肉厚0.25mmのもので、そこから精密切削加工を行い、肉厚を0.08mmまで安定的にそぎ落とすことに成功した。切削前のパイプの重量は1本当たり60gであったのが、加工後は18gと3分の1以下にすることに成功した。(パイプ全長は500mm) シェルアンドチューブ型の熱交換器はこのパイプを伝熱管として数十本使用し、重量の大半はこの部分が占める為に、その貢献度は非常に高いものと言える。実際に現行のプレート型の熱交換器と比較しても、同等の熱交換量の機種で重量は3分の1以下にすることができる見通しが立つ。

しかしながら、パイプを細径化させることで熱交換の効率は上がったものの、熱交換をさせたい作動流体を流す為の動力が従来と比べ上がってしまうという欠点もあるということが分かった。作動流体を流すのに必要な圧力(熱交換器の圧力損失)は作動流体を流すポンプの動力に直結しており、ポンプに余計な負荷がかかることなる。家電製品に代表されるエアコンやエコキュートなどはCOPと呼ばれる成績係数を表示しており、消費電力当たりの能力(冷房・暖房能力)を表しており、近年の消費者の省エネ・環境への意識の高まりから、その製品の売上を左右する指標となっている。作動流体を流す為のポンプに余計な負荷をかけてしまうと、このCOPが悪くなってしまい、製品が小型化・軽量化ができて付加価値に結び付かないものになる。ただ、自動車部品とし

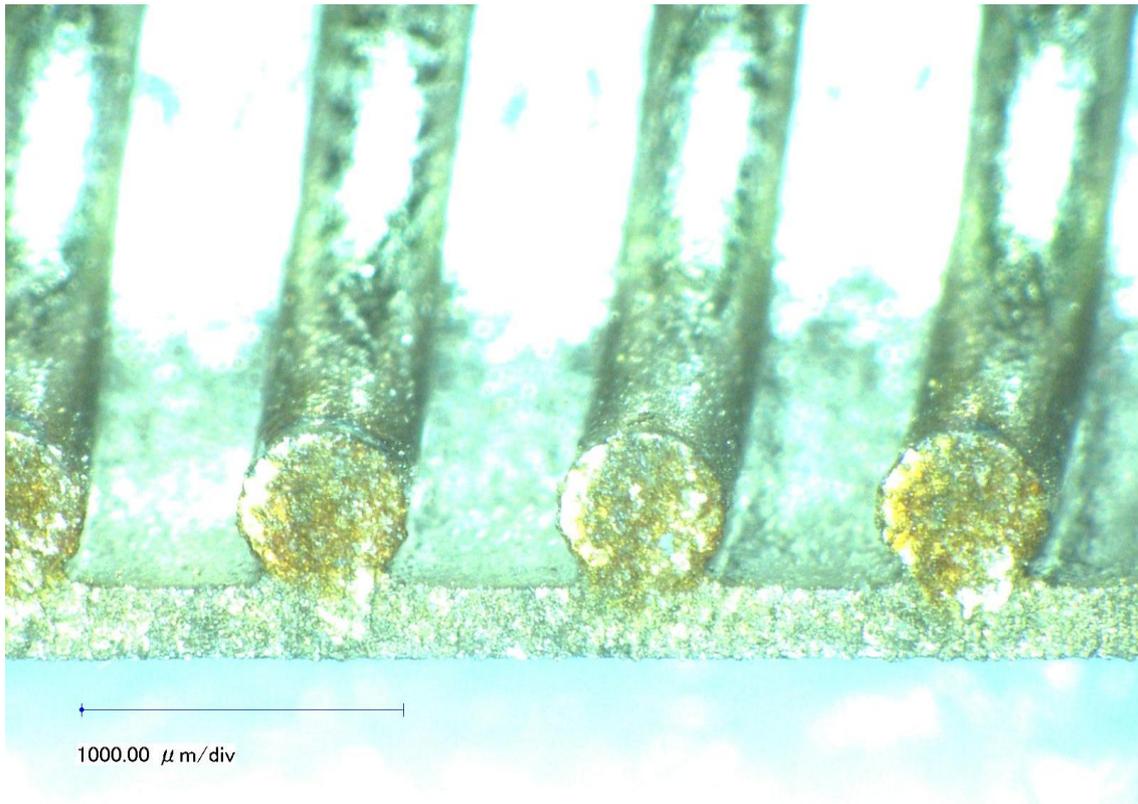
ては小型化・軽量化が多少の動力との引き換えに得られるのであれば全体的として付加価値が上がる可能性はある。しかしながら、単純なパイプの細径化だけでは熱交換器としては最適なものではなく、エアコンなどで使用されている銅管のようにパイプ内部にフィンが整形し、パイプ内に流れる作動流体を乱流化させることで壁面の熱伝達率を高めることも重要だと分かった。ステンレスパイプで内部にフィン形状を整形して、同時にパイプ肉厚をギリギリまで薄くし、圧力損失との兼ね合い考慮しパイプ径を調整できれば、従来よりも小型化、軽量化が図れ、圧力損失も従来通りの最適な熱交換器ができることが分かった。

2-1-2 パイプ内径の工夫について

本研究開発で行ったパイプの肉薄化と量産化技術をベースにし、熱交換器としてさらに付加価値を上げる為に、パイプの内径に溝を整形し、パイプ径をそれほど微細化させなくても、熱交換効率を上げることができるよう工夫をした。具体的にはパイプ内部にスプリングを挿入し、パイプ内壁ときちんと接してスプリングコイルの表面積を伝熱面積として利用できるように、パイプの内壁とスプリングコイルを接合した。その接合方法はパイプにスプリングコイルを挿入した後に、銅のロウ材を入れ、真空炉で高温にすることで銅を溶かしパイプ内壁とスプリングコイルとの隙間を溶けた銅が入り込ませ接合をさせた。下図にその結果出来上がったパイプの断面を確認する為に、ワイヤー放電加工にてパイプを縦に切った断面の写真を下記に添付する。上の写真がパイプを縦に切断した時に全体図であり、下の写真がその断面を拡大したものである。下の写真を見ると分かるように、溶けだしたロウ材がスプリングコイルとパイプ内壁の間に入り込みきちんと接合されていることが分かる。これにより、スプリングコイルの表面積自体を伝熱面積として活用することが可能となり、その伝熱面積の増加に比例し熱交換量が増えることになる。また、スプリングコイルを入れることでパイプ内部を流れる作動流体が乱流化し、壁面の熱伝達率を大幅に向上させることが可能となった。スプリングコイルを入れることでの熱伝達率の向上については後述の流体の数値シミュレーションで詳しく述べる。結果としては、熱交換器として圧力損失を上げないようパイプの外径を3mm程度まで大きくしても、パイプ外径が1mmの中に溝がないストレートのものと2倍以上の性能があることが分かった。これにより、同じ体積内に配列させるパイプ本数は径が大きくなった分、本数が3分の1になり、それに伴い伝熱面積が3分の1になってしまうのだが、パイプ内にスプリングコイルを入れることで熱交換器としては単位体積当たりの熱交換量を倍以上にすることに成功した。当然パイプ径を大きくしたことで圧力損失は径を ϕ 1mmと細くしたものと比較して5分の1程度に軽減されている。

パイプの中にスプリングコイルを入れロウ付けにて接合することで、パイプの耐圧性能の向上も期待できる。その耐圧性能の向上についてはコンピューターによる構造解析にてどれくらい向上しているかを分析する予定である。





2-2 金属プレス加工に関する研究開発

本研究で行ったプレス加工は、従来から限界とされているプレス加工での穴あけで、穴と穴との隙間（ピッチ）と加工対象物（ワーク）の厚みとの比率を1以下、つまり、穴と穴とのピッチが1 mmの場合ではワークの厚みが1 mm以下でなければ穴があけられなかったものを、比率を1以上の2以上を目標とした。すなわち、穴と穴とのピッチが1 mmの時でワークの厚みが2 mm以上でも穴あけ加工できる加工方法の確立を目指した。

2-2-1 順送金型でヘッダーの穴を2回に分けて打ち抜ぬく

1. 板厚と同一の穴ピッチで打ち抜くと、材料の押さえをしっかりとすれば形状を保持したままきれいに打ち抜くことが出来た。
2. 板厚の80%の穴ピッチで打ち抜くと、2回目の打ち抜きステージで隣の穴との隙間が引っ張られ、1回目の穴が楕円形状になってしまった。
3. クリアランスを追い込んで破断面を少なくしたが、カジリが発生した。結果写真を下図に示す。穴と穴との隙間が引っ張られ穴が綺麗な円形状を保っていないことが分かる。



2-2-2 金型の設計変更をして全ての穴を同時に、3段階で打ち抜く

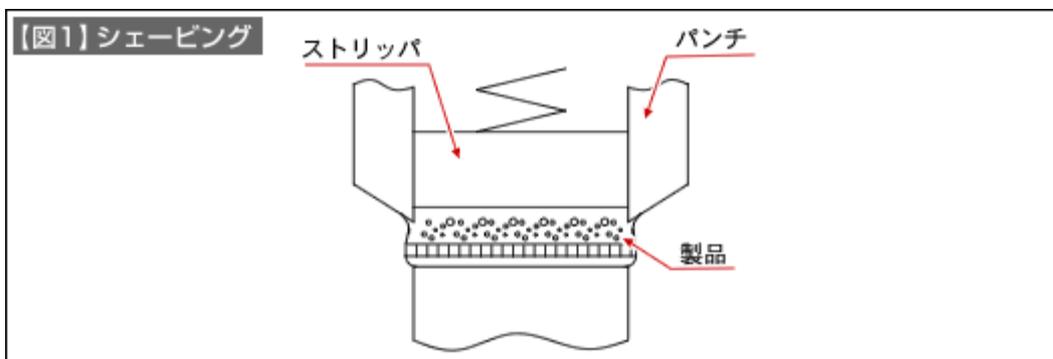
1. 板厚の80%の穴ピッチは問題なく打ち抜くことが出来た。
2. 板厚の70%の穴ピッチでトライをすると、隙間が引っ張られ穴形状が歪んでしまった。
3. クリアランスを追い込んでみたが、カジリが発生して打ち抜けなかった。

2-2-4 ファインブランキング方式で打ち抜く

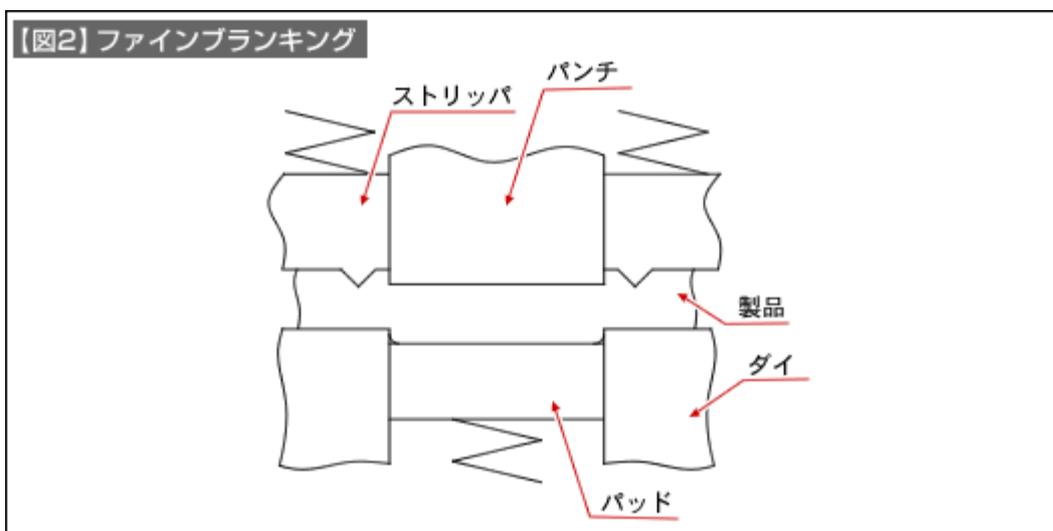
金型を設計変更してシェービング方式かファインブランキング方式を検討しファインブランキング方式を採用した

シェービングとは、普通抜きされた外形抜きや穴抜きの切り口面を改善する加工方法。改善の内容としては、切り口面から破断面をなくしてせん断面としたり、板厚面と切り口面の直角度を向上する方式。寸法精度の向上も含む。シェービングをするには、普通抜き形状をわずかに大きくする。これをシェービング代という。シェービングはわずかに大きくしたシェービング代を削り取る加工（【図1】参照）削り取る量はそれほど大きくすることはできない。板厚の10%ぐらいが限度。板厚が厚くなると1回のシェービングでは取り切れずに、複数回のシェービングが必要になることもある。スクラップ

の処理もおこないにくい。金型は比較的容易に作ることはできますが、効率的な加工といえない部分がある。



ファインブランキングとは【図2】に示すように、材料にストリップのV突起を押し込み、ダイ内に逆押しえ用のパッドを組み込んで、材料を強く拘束した状態で抜き、クリアランスを極小にしておこなう抜き加工。金型は複雑なものとなるが、1工程で破断面の無い切り口面を作り出すことができる。



更に加工はサーボプレスで行い、打ち抜き付近のモーションを遅くして打ち抜き時にかかる負担を極力抑えるよう工夫した。刃の摩耗が発生すると、カジリ・歪みの原因になるので上下ともに材質は超硬を使用した。加工自体には成功したが、回転数が上げられないことや、僅かな刃の摩耗で穴形状に異常が発生するなど、量産に向けては課題を残している。ただ、独自の工夫にてヘッダーの肉厚を穴と穴との隙間の3倍までのヘッダーを歩留まり良く生産できる方法を確立できた。これにより、シェルアンドチューブ型の熱交換器において伝熱パ

イプ以外で耐圧が一番弱い所であるヘッダー部を高耐圧にすることができた。
下図に完成したヘッダーの写真を添付する。



2-3 数値シミュレーションに関する研究開発

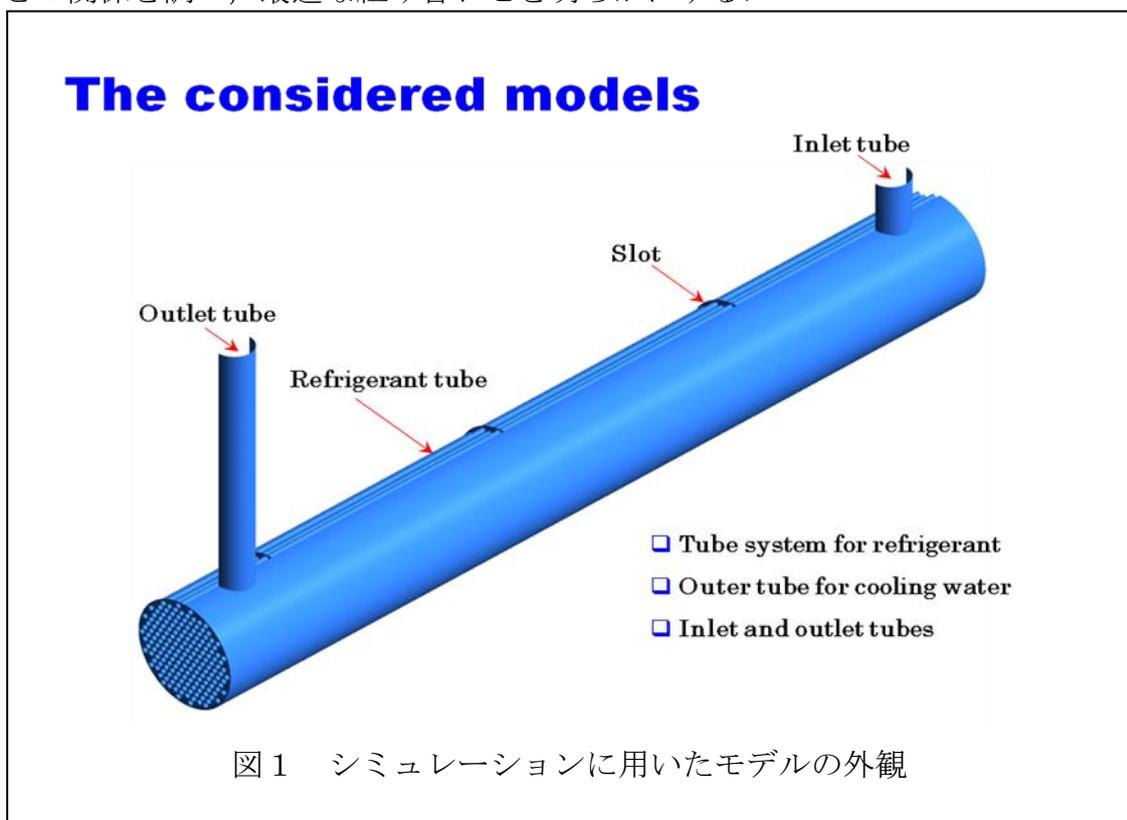
2-3-1 バッフルプレートと除去熱量との関係

本節ではバッフルプレートの枚数が，シェル内の流れや圧力降下，除去熱量に与える影響を明らかにし，効率の良い熱交換器の設計に資する。

2-3-1-1 シミュレーションモデルと境界条件

図1にシミュレーションに用いたモデルの外観を示す。太いパイプ(シェルと呼ぶ)の両側上部に入口(Inlet)と出口(Outlet)のパイプが設置されている。シェルの中には181本の細いパイプ(マイクロチャンネルと呼ぶ)が挿入されている。入口から冷却用の水が入り，シェルの中(マイクロチャンネルの外)を流れ，その際，マイクロチャンネルから熱を奪う。その後，出口から出て行く。マイクロチャンネルの中にはフロンガスなどの冷媒が流れている。図中の Refrigerant tube はマイクロチャンネルを指し，Slot はバッフルプレートを指す。

図2に示すように，入口と出口で各圧力を測定する(P_{in} ， P_{out})。その差($\Delta P = P_{in} - P_{out}$)が圧力降下，すなわちパイプ内の流体抵抗を示す。シェルの中にバッフルプレートを何枚か設置し，その数と圧力降下，さらには除去された熱量 Q との関係調べ，最適な組み合わせを明らかにする。



Purpose

Effect of slot number to **heat transfer Q** from the tubes to water between for the same **pressure loss ΔP**

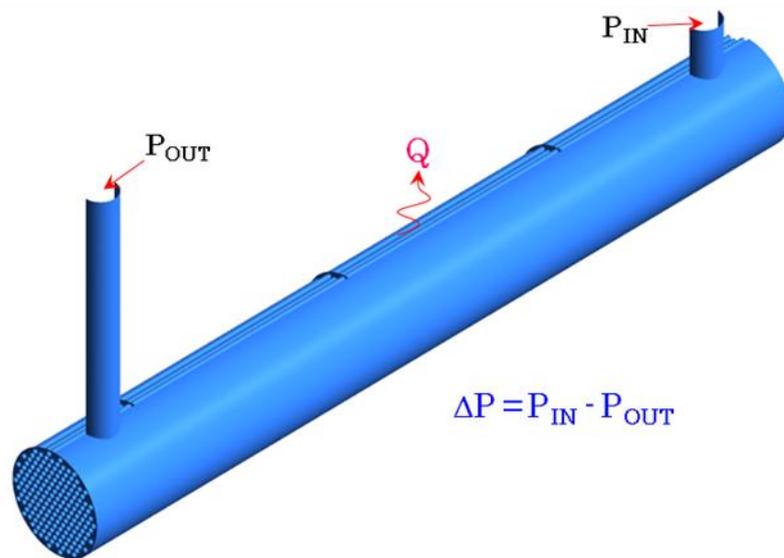


図2 圧力降下の測定と除去熱量

図3には本モデルの立断面の計算格子を示す。一つの格子は8面体を基本としている。各マイクロチャンネルの隙間に6層の格子を作製しており、本研究では流れは層流であるために、十分に境界層をとらえることができる。さらに、マイクロチャンネルの管壁には熱が移動する条件を設けている。

図4は横断面の計算格子を示す。入口のパイプ(Inlet tube)とシェル本体は別々の物体をして計算格子を作製するが、その接合面(Interface)では、流体力学上の様々な物理量、変数の交換を行っており、その結果、一体化された物体として機能する。また、バッフルプレート(Slot)が上下に設置されており、白抜きで表現されている。

Mesh by GAMBIT (ANSYS Inc.)

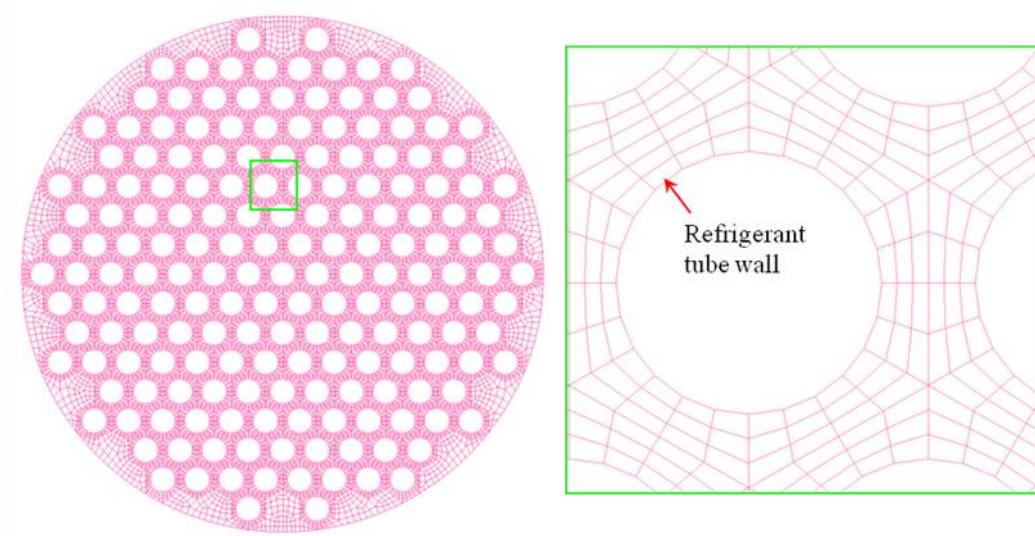


図3 立断面での計算格子の様子

Mesh by GAMBIT (ANSYS Inc.)

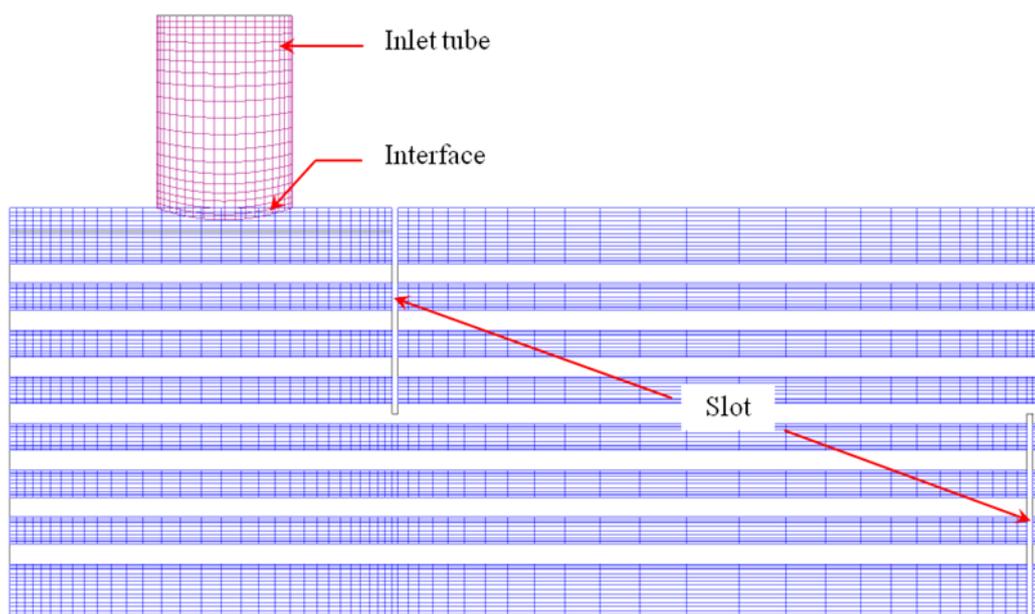


図4 横断面での計算格子の様子

図5には本シミュレーションに用いた境界条件を示す。まず、入口から入る流体の温度は 303K とする。シェルの壁面温度は 340K である。出口の温度勾配は 0 とする ($\partial T/\partial n = 0$)。管壁から流体への熱の移動量(熱伝導率)は $h = 1.5\text{w/m}^2\text{K}$ とした。

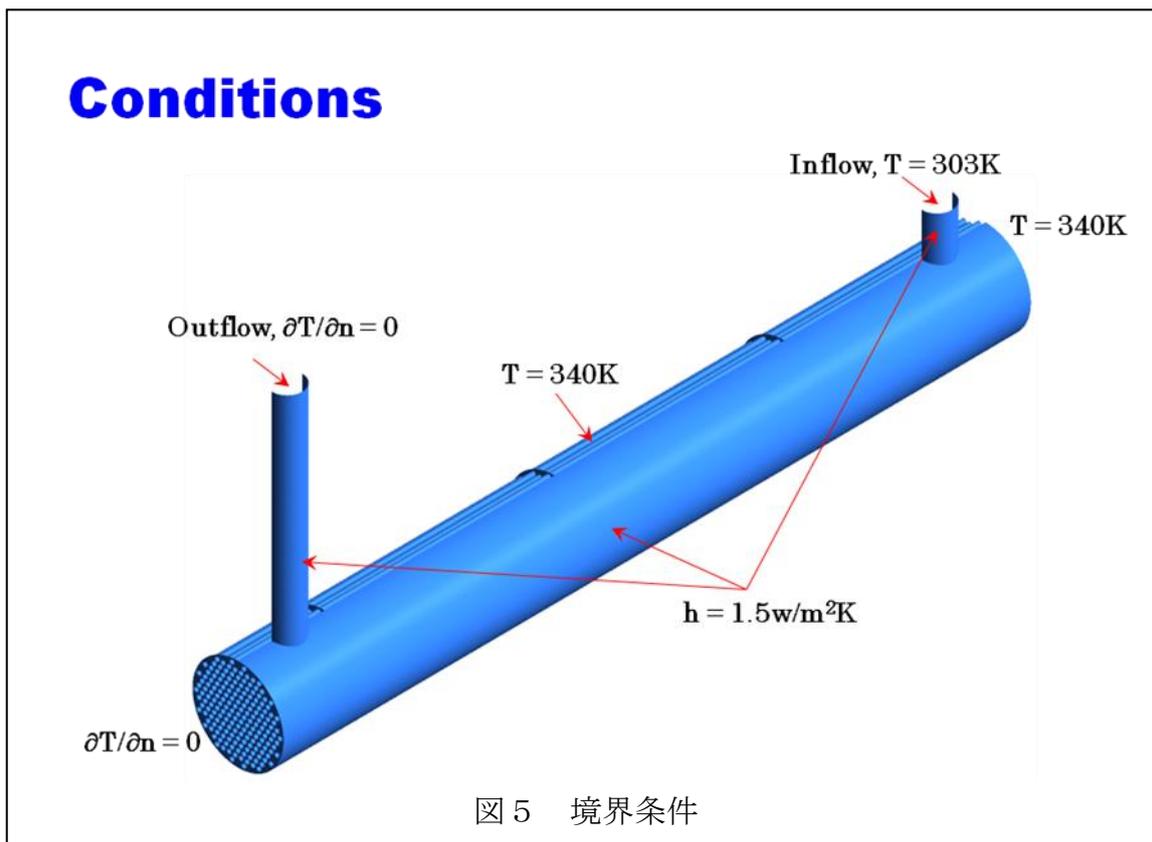


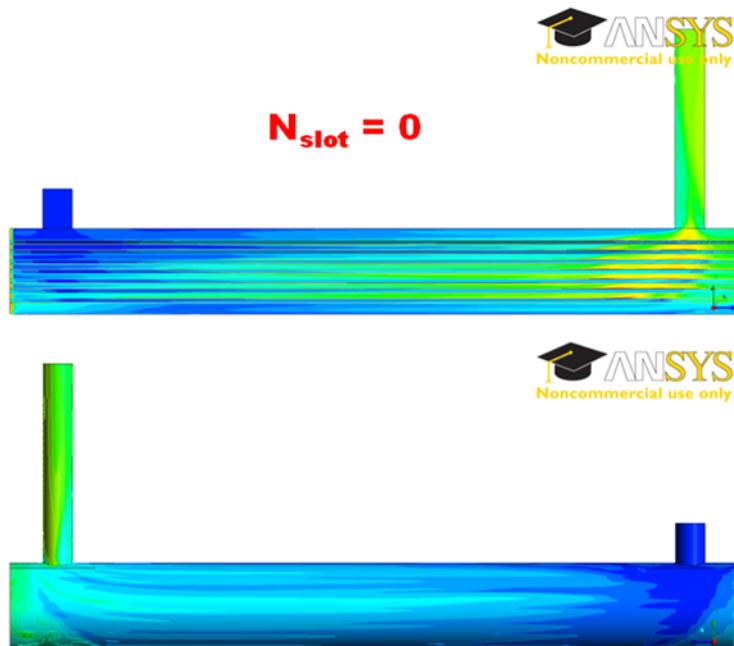
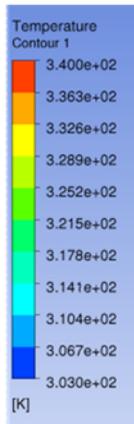
図5 境界条件

2-3-1-2 計算結果

図6(a)~(f)にはバッフルプレートの数を 0 から 7 まで変えた場合の温度分布を示す。いずれの場合も圧力損失が 12.4kPa となるように流量を調節している。

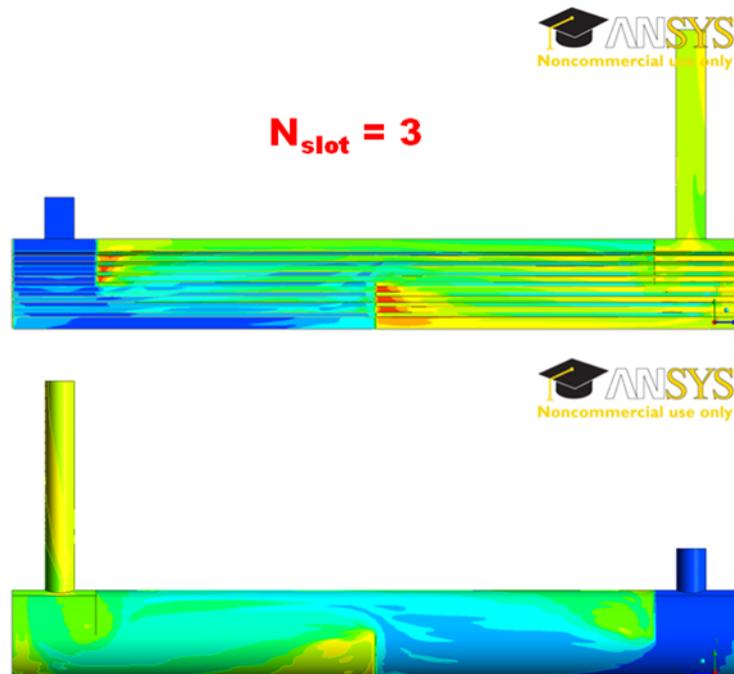
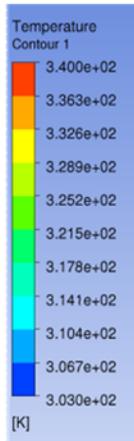
これを見ると、いずれの場合も入口の温度は 303K で一定であるが、出口の温度がバッフルプレートの数と共に上昇することが分かる。特にバッフルプレートの背後の温度が高くなっている。これは、バッフルプレートの背後に渦流れが発生し、その結果、流体の滞留時間が長くなり、より多くの熱をマイクロチャンネルから奪うためである。

Results: $\Delta P = 12.4$ kPa



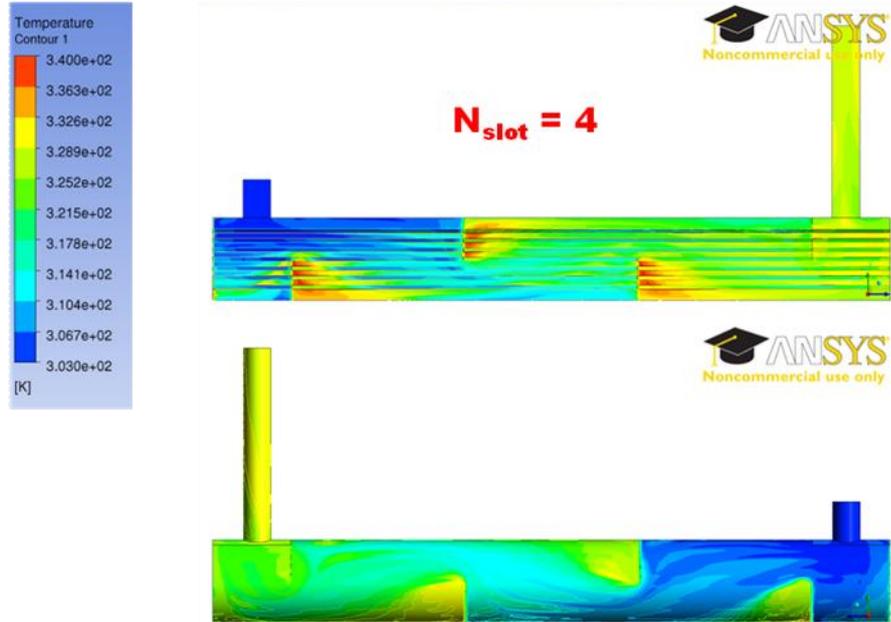
(a) $N=0$

Results: $\Delta P = 12.4$ kPa



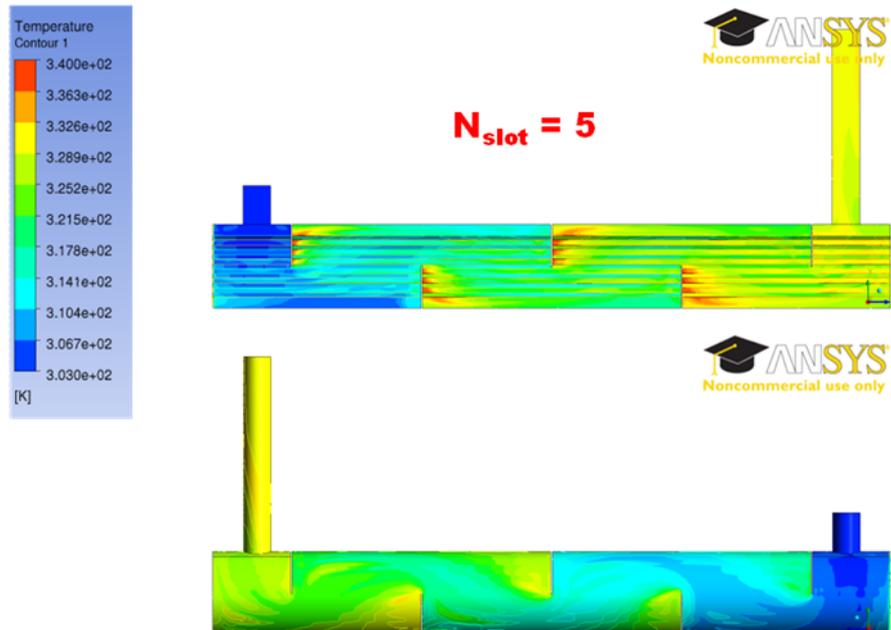
(b) $N=3$

Results: $\Delta P = 12.4$ kPa



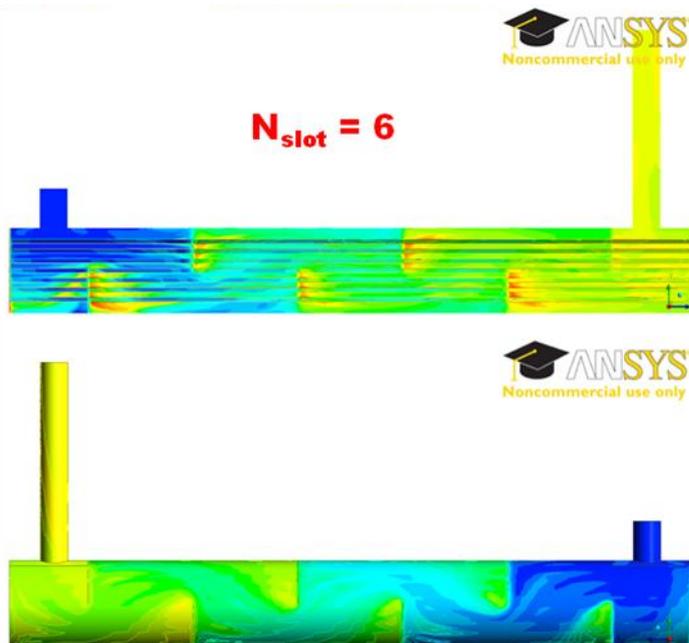
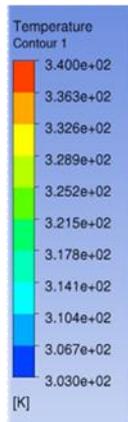
(c) $N=4$

Results: $\Delta P = 12.4$ kPa



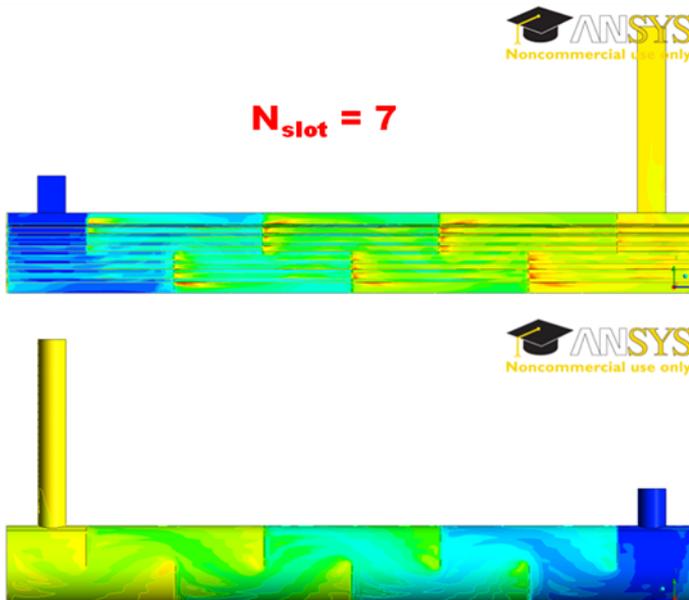
(d) $N=5$

Results: $\Delta P = 12.4$ kPa



(e) N=6

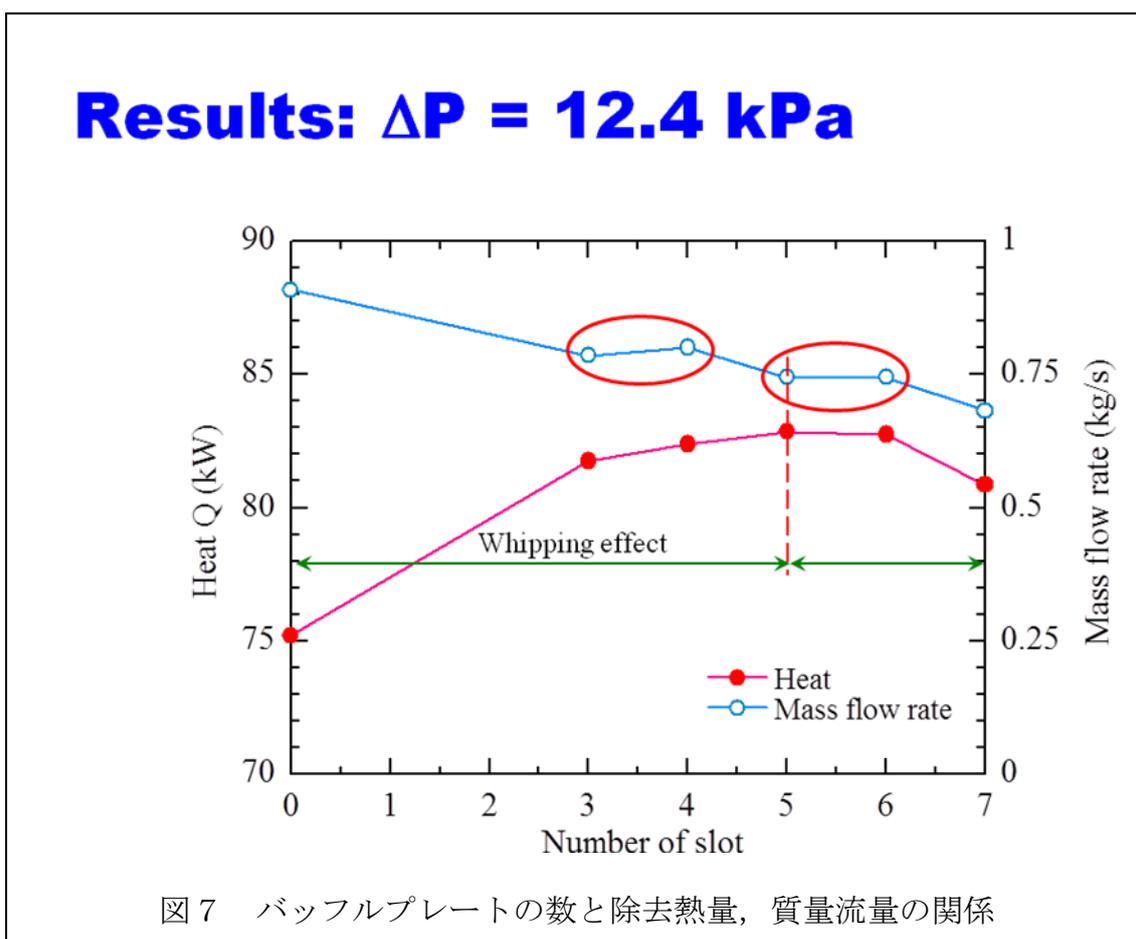
Results: $\Delta P = 12.4$ kPa



(f) N=7

図6 バッフルプレートの数を変えた場合

図7にはバッフルプレートの数（横軸）とマイクロチャンネルから除去された熱量（赤），および，シェル内の質量流量（青）との関係を示す．圧力降下は一定となるように質量流量を設定している．まず，質量流量はプレートの数と共に減少していることが分かる．これは，プレートの存在が流体抵抗を生み出し，その結果，同じ圧力降下に対して流量が減少するためである．除去される熱量はプレートの数と共に大きくなるが，N=6, 7では減少していることが分かる．したがって，最高率の熱交換器を設計するための条件がここに明らかにされていることになる．



2-3-1-3 まとめ

- (3) バッフルプレートの数が増えれば除去熱量も増えるが，その最大値が存在する．すなわち，最適な設計条件が存在する．
- (4) バッフルプレートの背後には渦流れが発生し，流体の停留時間を増大させ，その結果，より多くの熱を奪う作用をする．

2-3-2 マイクロチャンネル内のシミュレーション

マイクロチャンネル内では、入口から入ったフロンガス R410A が気体から液体に凝縮する際に管壁から熱を奪う。また、マイクロチャンネル内にはコイルスプリングが挿入されており、流れの乱流化と熱の除去を促進させると考えられる。本節では凝縮モデルについて説明し、シミュレーション結果を報告する。

2-3-2-1 凝縮モデル

本研究で用いるフロンガス R410A は R32 と R125 の混合気である。その質量比は 0.6976 : 0.3024 である。

これらの気体の状態方程式は

$$\frac{p}{\rho RT} = 1 + \delta \frac{\partial \Phi^r(\tau, \delta, x)}{\partial \delta}$$

である。ここで p は圧力、 T は温度、 ρ は密度、 R は気体定数、 $\delta = \rho / \rho_c$ 、 $\tau = T_c / T$ 、 Φ^r はヘルムホルツのエネルギー式の剰余項である。添え字の c は標準状態を示す。

R32 と R125 の混合気の Φ^r は下式で計算される。

$$\frac{\partial \Phi^r}{\partial \delta} = x \frac{\partial \Phi_{R32}^r}{\partial \delta} + (1-x) \frac{\partial \Phi_{R125}^r}{\partial \delta} + x(1-x) \frac{\partial \Phi_m}{\partial \delta}$$

x は R32 の質量分率である。これらの式は c 言語で記述し、熱流体解析ソフト **fluent** に組みこむ。

図 1 には R410A の飽和蒸気圧曲線を示す。実験によるとマイクロチャンネルの入口の温度は 67°C、出口は 35°C である。したがって、この図から凝縮温度は約 40°C であることが分かる。このグラフのデータをプログラムに組みこんで、凝縮の起こる時刻や場所の計算を行う。

2-3-2-2 計算格子と境界条件

図 2 には本シミュレーションに用いた計算格子を示す。一本のマイクロチャンネルの中に、コイルスプリングが挿入されている様子がわかる。構造が複雑にあるために、計算格子の総数は 2 百万個以上となり、8cpu を用いた並列計算でも 6 日ほどかかる。したがって、前節で示した多数のマイクロチャンネルの中に、このようにコイルスプリングを挿入して、計算を行うことは現実的ではない。本節では一本のマイクロチャンネルについての解析を行うが、それから得られる結果は有用である。

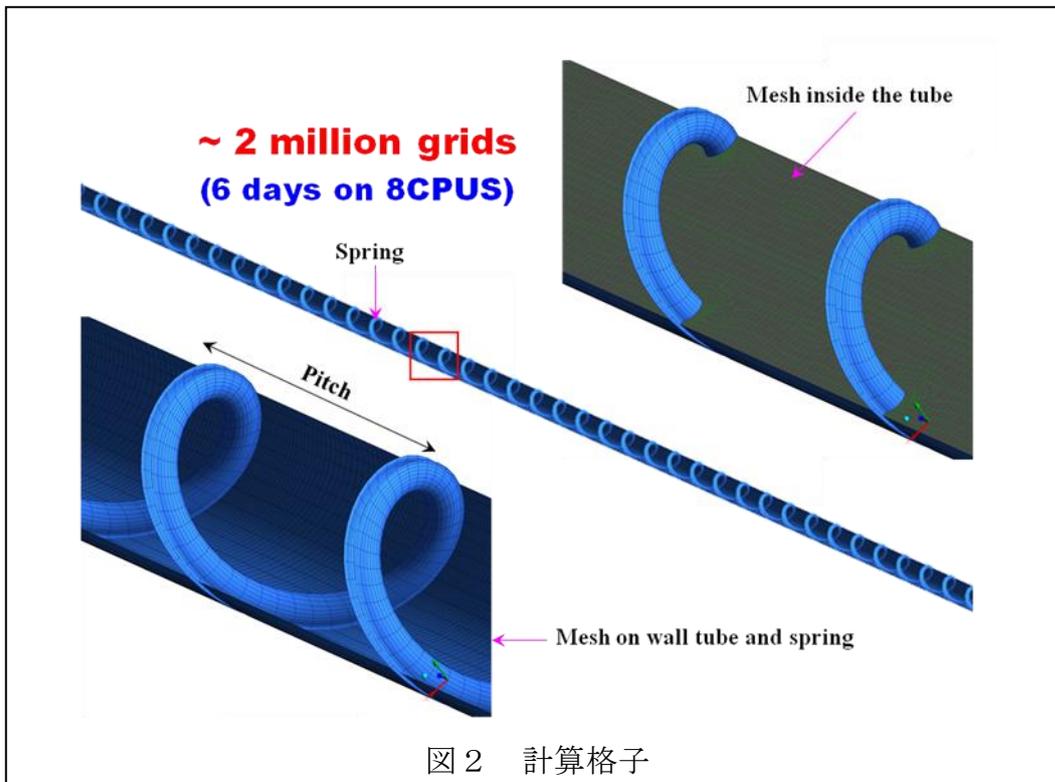
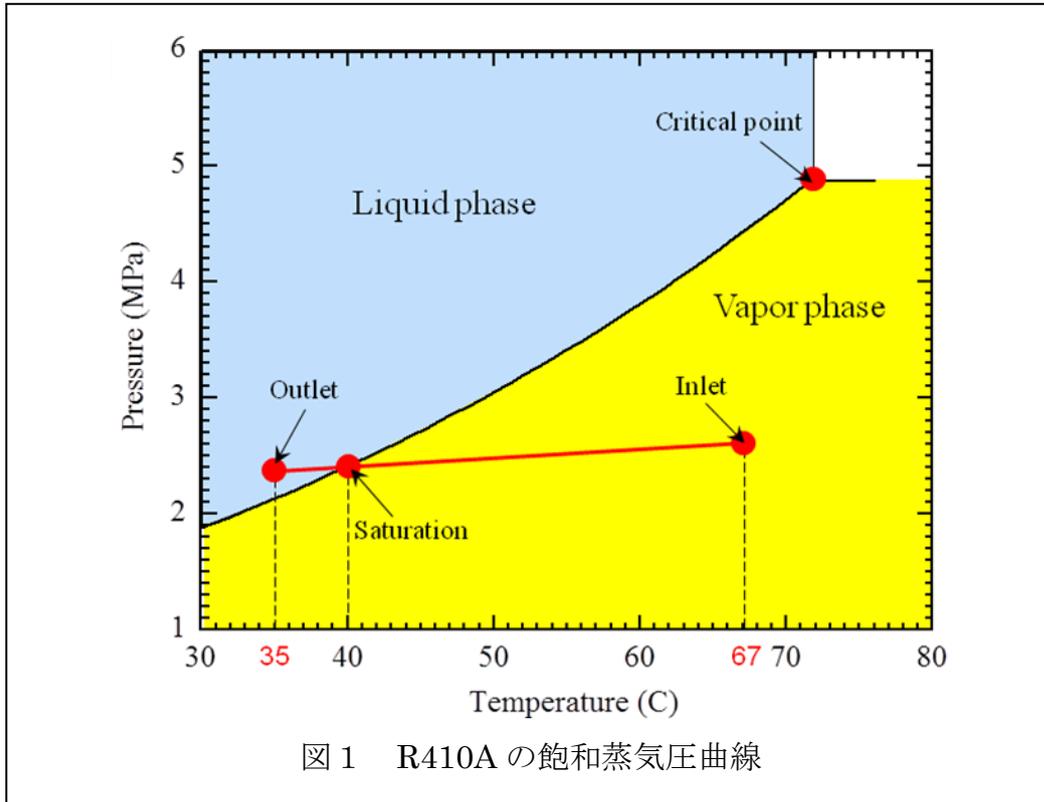
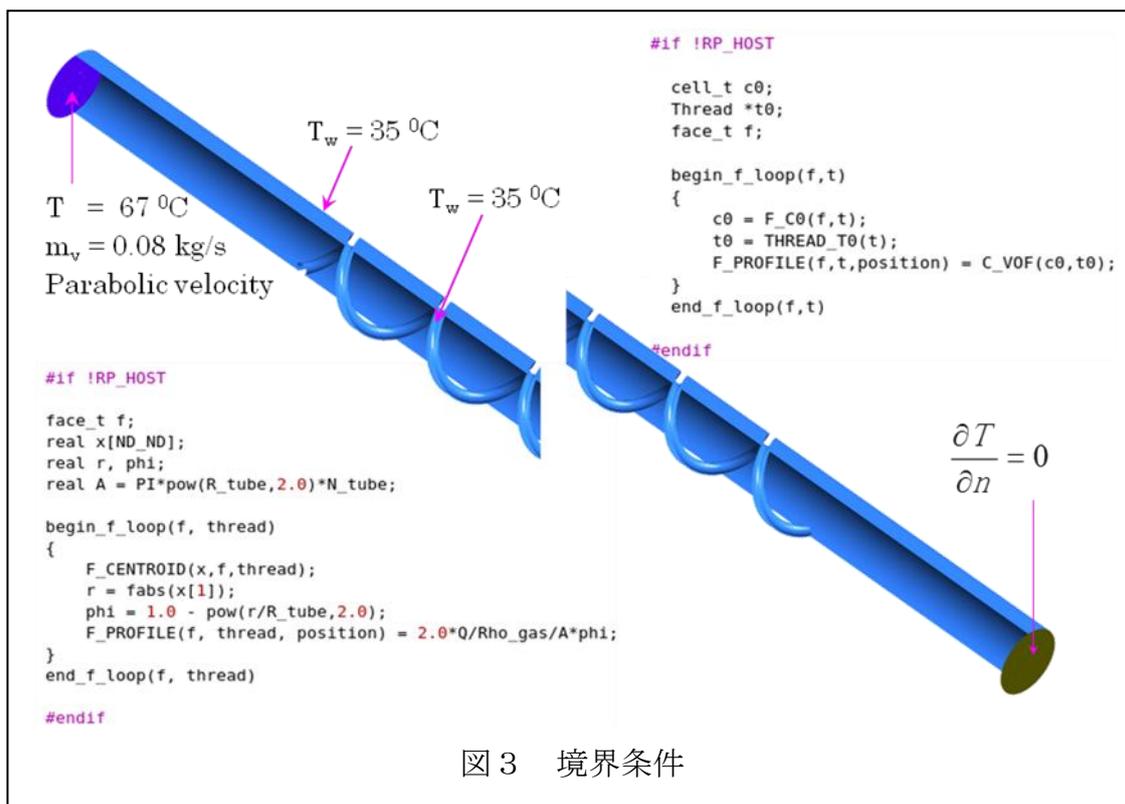


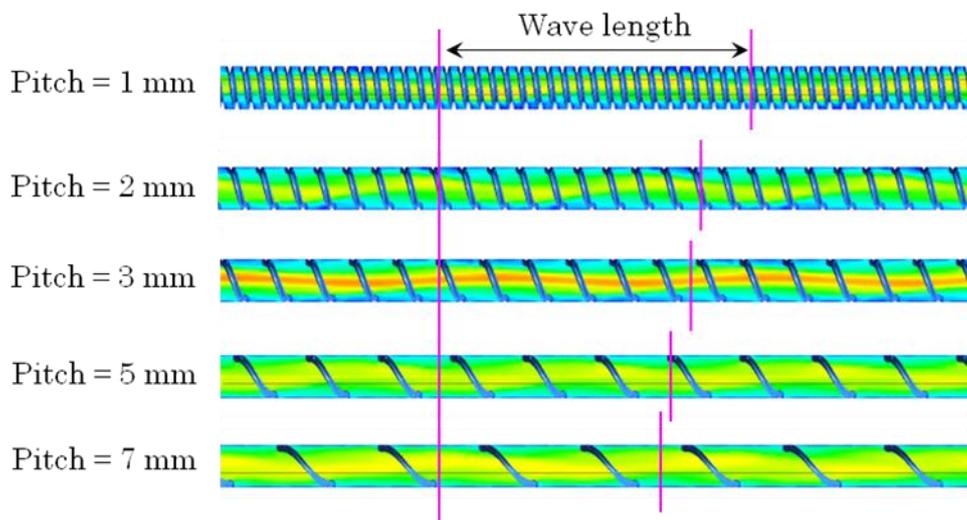
図3には境界条件を示す。マイクロチャンネルとスプリングコイルの表面温度は35°Cとする。マイクロチャンネルの入口温度は67°C，出口では温度勾配が0とする。また，入口では質量流量を0.08kg/sとし，放物線状の流速分布を与える。



2-3-2-3 計算結果

図4はスプリングコイルのピッチを1mm~7mmと変化させた場合の，流れの様子を示す。コイルの影響によって，内部流にうねりが生じ，その波長（Wave length）はピッチが大きくなるほど小さくなることが分かる。

図5はマイクロチャンネルの断面での流れ方向（紙面に垂直な方向）の速度分布を示す。赤いところほど速度が大きく，青いところほど小さい。これを見るとピッチが大きくなるほど，赤い領域が広がること，すなわちより均一な流れになることが分かる。なお，どの断面でもほぼ同様の速度分布が得られる。



- Larger pitch creates a shorter wave length
- Larger pitch leads to more homogeneous velocity in cross section

図4 スプリングコイルのピッチが内部流に与える影響

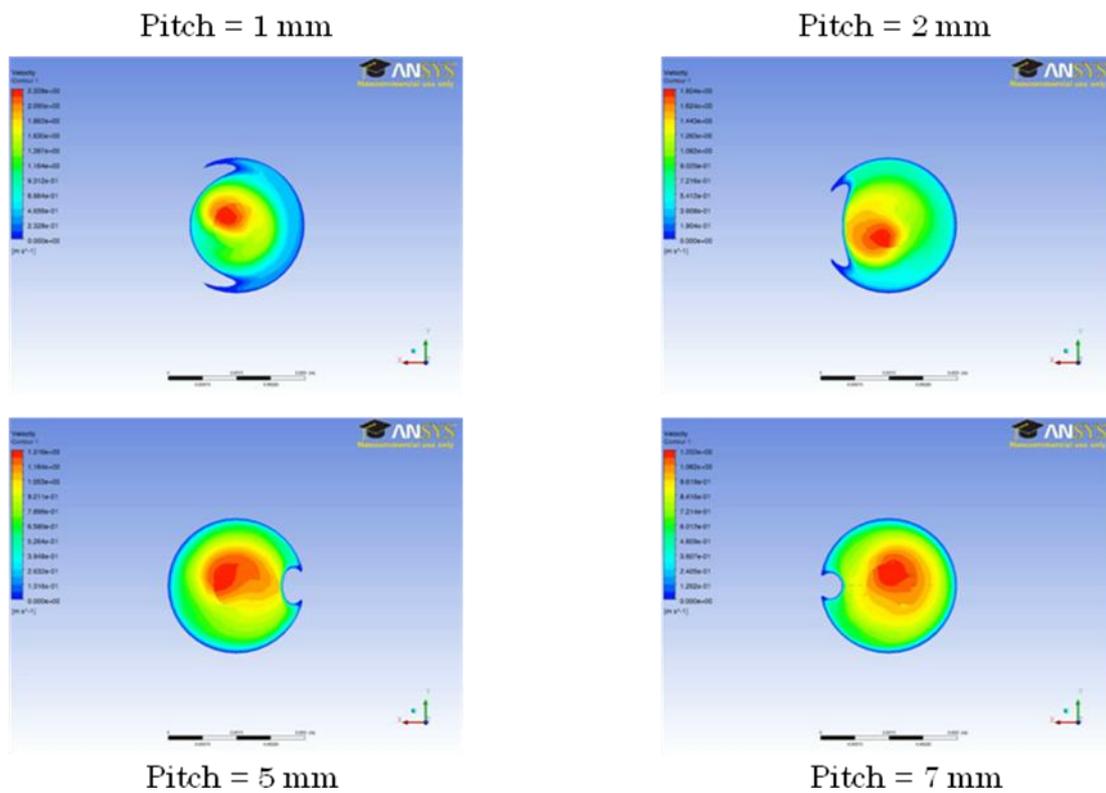


図5 マイクロチャンネルの断面での流速分布（流れ方向）

図6はマイクロチャンネルの断面での半径方向（紙面に平行な方向）の速度分布を示す。これを見るとピッチが大きくなるほど、赤い領域が小さくなること、すなわち、前述のようにより流れ方向に均一な流れになることが分かる。

図7はマイクロチャンネル内の圧力分布(a)と温度分布(b)を示す。横軸は流れ方向の座標を示している。(a)の圧力分布は出口（右端）の圧力を0としている。これを見るとスプリングコイルのピッチを小さくするほど、圧力降下が大きくなっている。これは、コイルの生み出す流体抵抗が大きくなるからである。(b)の温度分布では、ピッチが小さくなるほど温度が下がることが分かる。すなわち、より多くの熱が奪われる。図中の紫の横線は凝縮温度(313K)を示す。ピッチが小さいほど凝縮温度に早く到達することが分かる。すなわち、左から入って来た気体の一部は、ここで凝縮し液体になる。その際、潜熱を吸収し、より多くの熱を奪うために、温度が下がる。

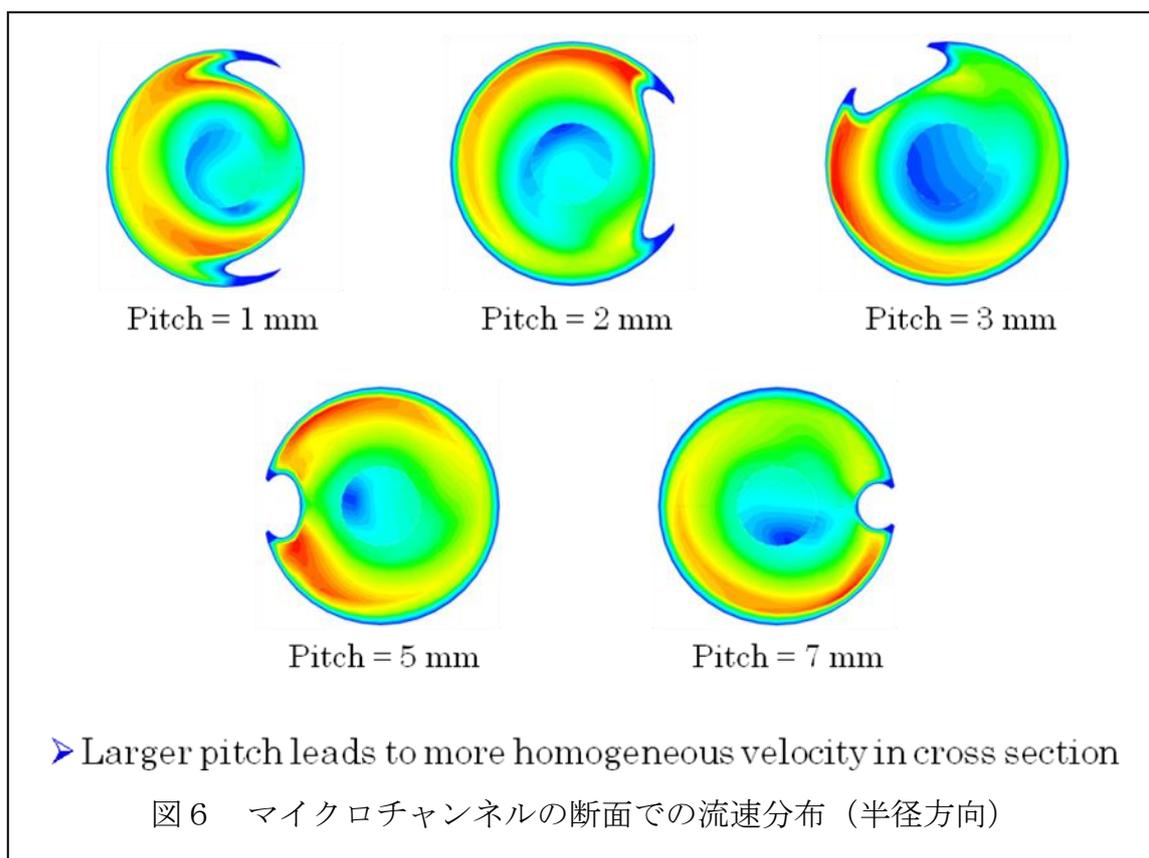
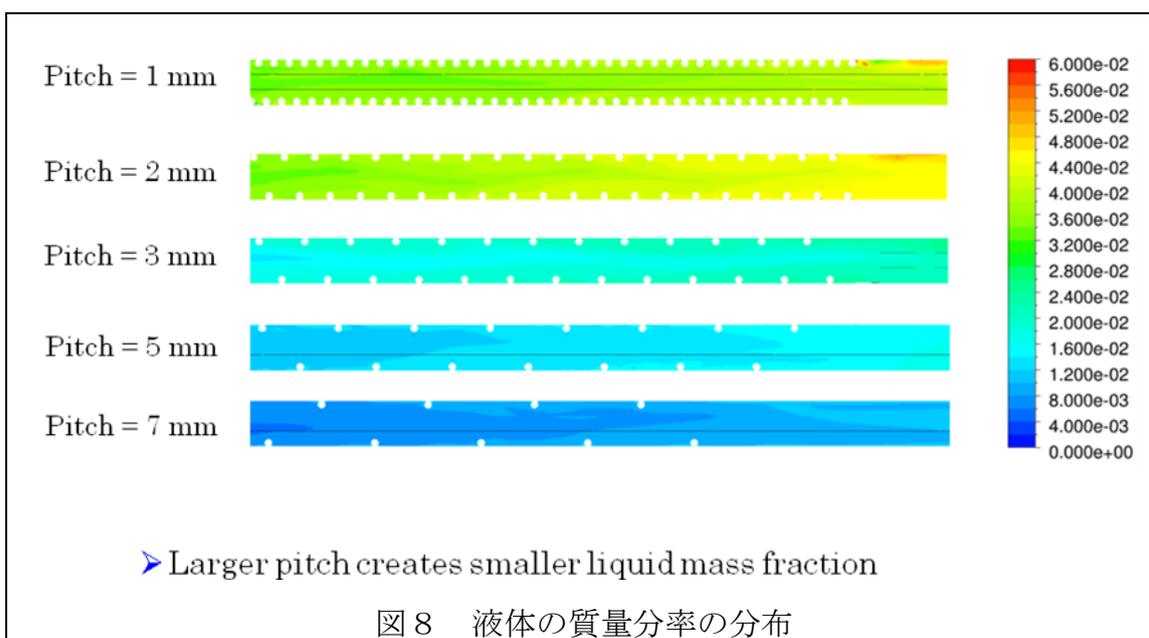
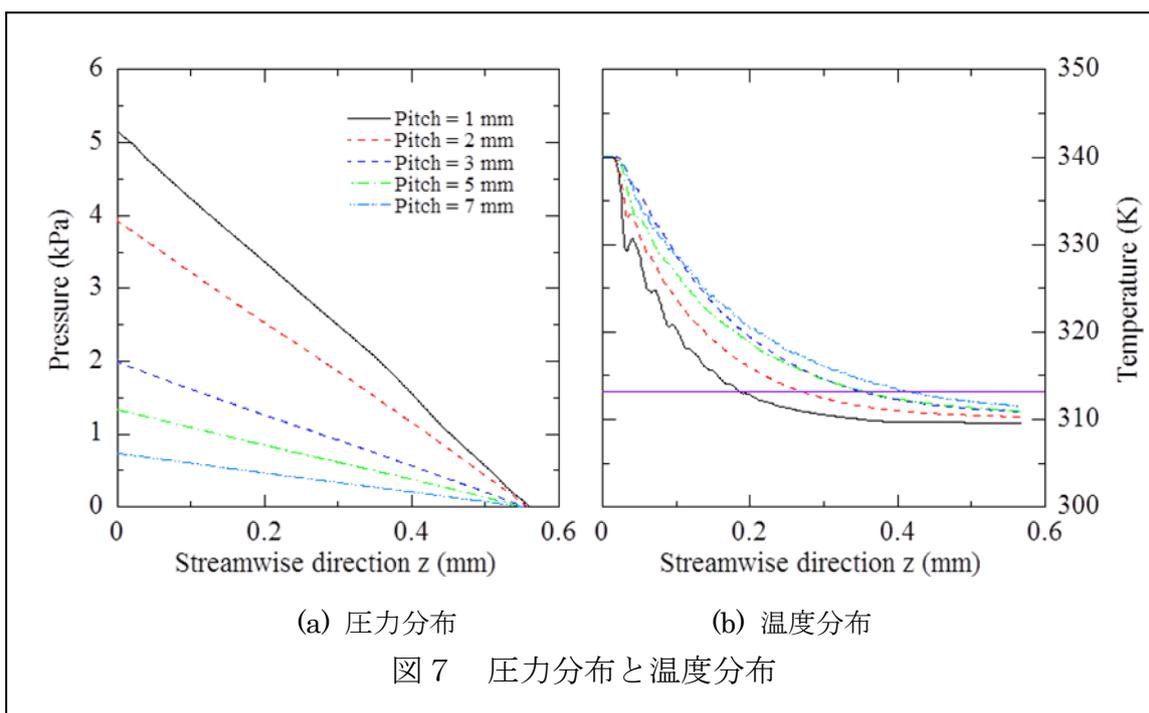


図8は凝縮した液体の質量分率の分布を示す。これを見るとピッチが小さいほど、質量分率が大きくなっていることが分かる。すなわち、より多くの気体が液体になり、熱を奪っていることになる。

図9は本マイクロチャンネルによって奪われる熱の総量の計算モデルである。マイクロチャンネルの壁面とスプリングコイルの表面を通過する全熱量を積算することを示す。



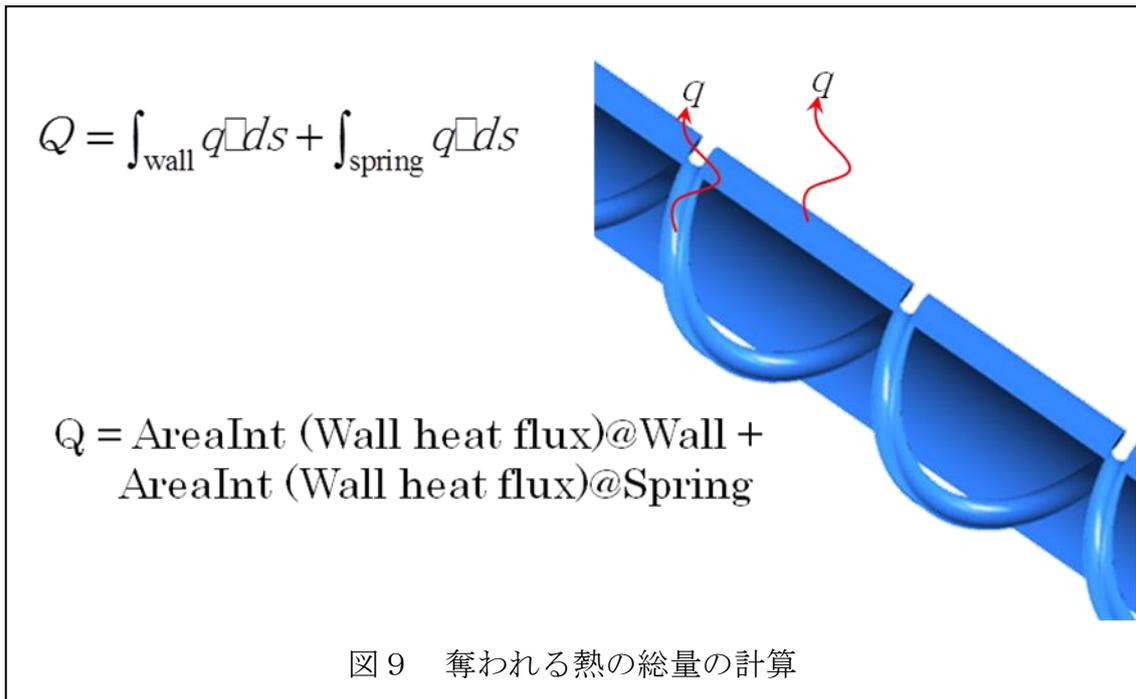
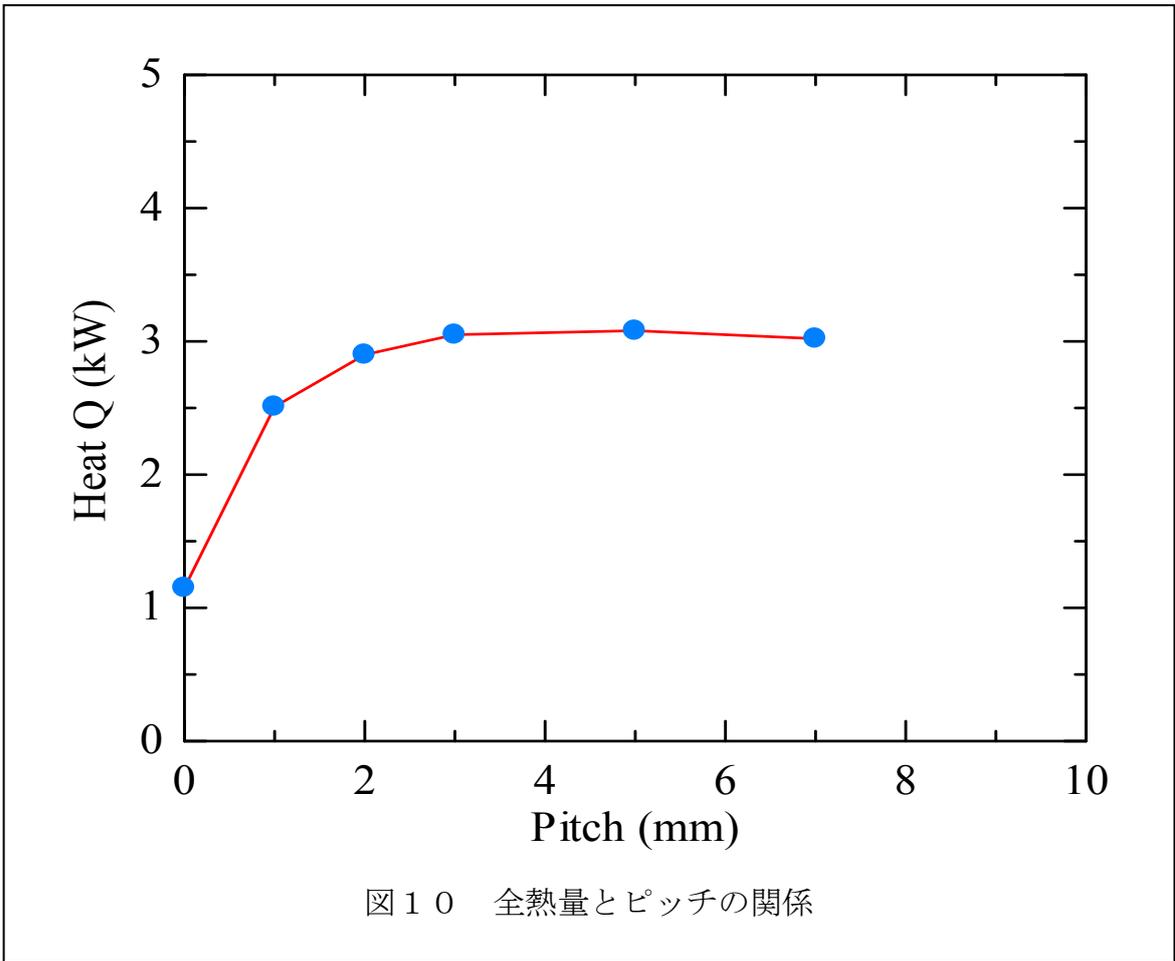


図10はマイクロチャンネルが除去することが出来る全熱量とピッチの関係を示す。これを見るとピッチが大きくなるほど、熱量が増えることが分かる。さらにその最大値が存在することを示しており、最適な条件が存在することが分かる。また、第4次試作品の実験では、ピッチが4.5mmで除去熱量が最大となり、第5次試作品では5mmで最大となり、本計算と良い一致を見せる。さらに、ピッチ4mm以下では実験されていないので、本計算結果は有用である。

2-3-2-4 まとめ

本節のシミュレーション結果より以下の事柄が明らかとなった。

- (4) ピッチが大きくなると、より均一な流れとなる。
- (5) ピッチが小さいほど、流体抵抗が大きくなり、温度は小さくなる。
- (6) ピッチが大きくなるほど奪われる熱量も大きくなるが、それを最大にする条件が存在する。



2-3-3 マイクロチャンネルのギャップやバッフルプレートの枚数の影響

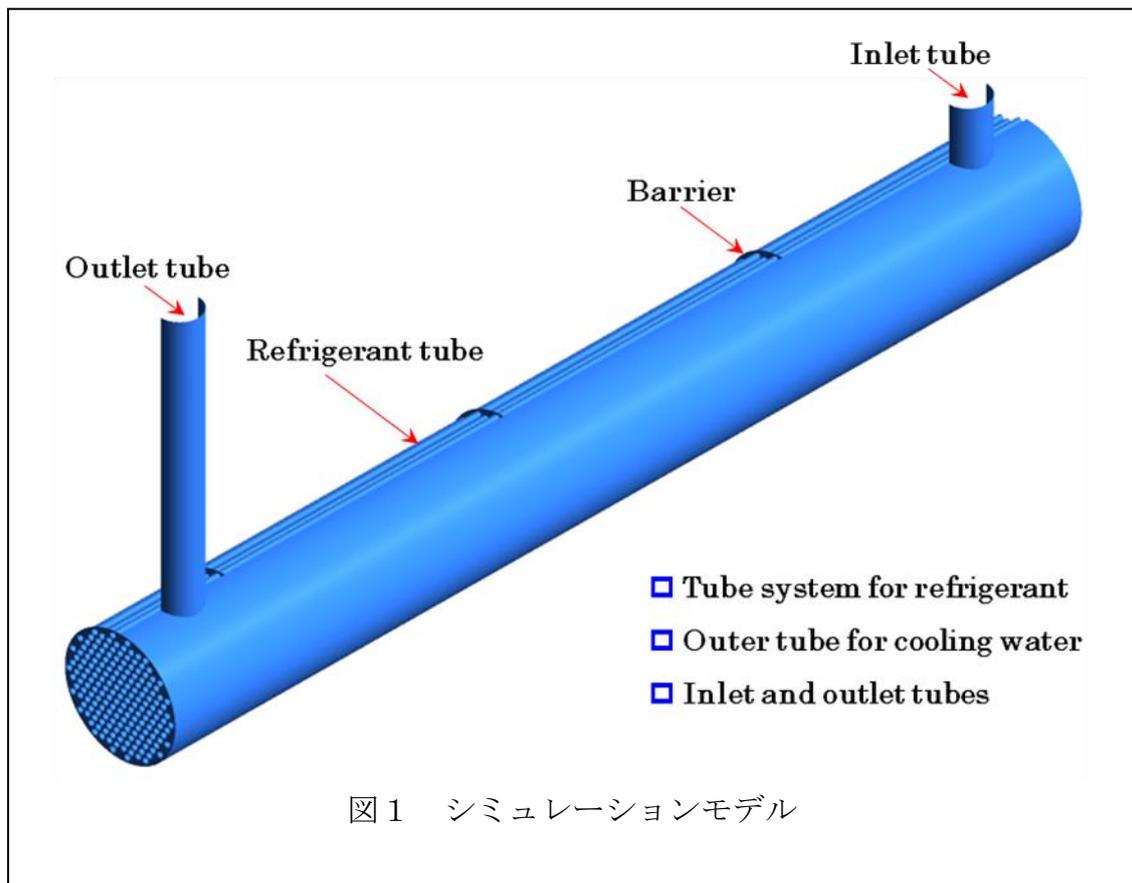
本節ではマイクロチャンネルのギャップや直径，バッフルプレートの枚数を変化させ，圧力抵抗や除去熱量に与える影響を明らかにする。

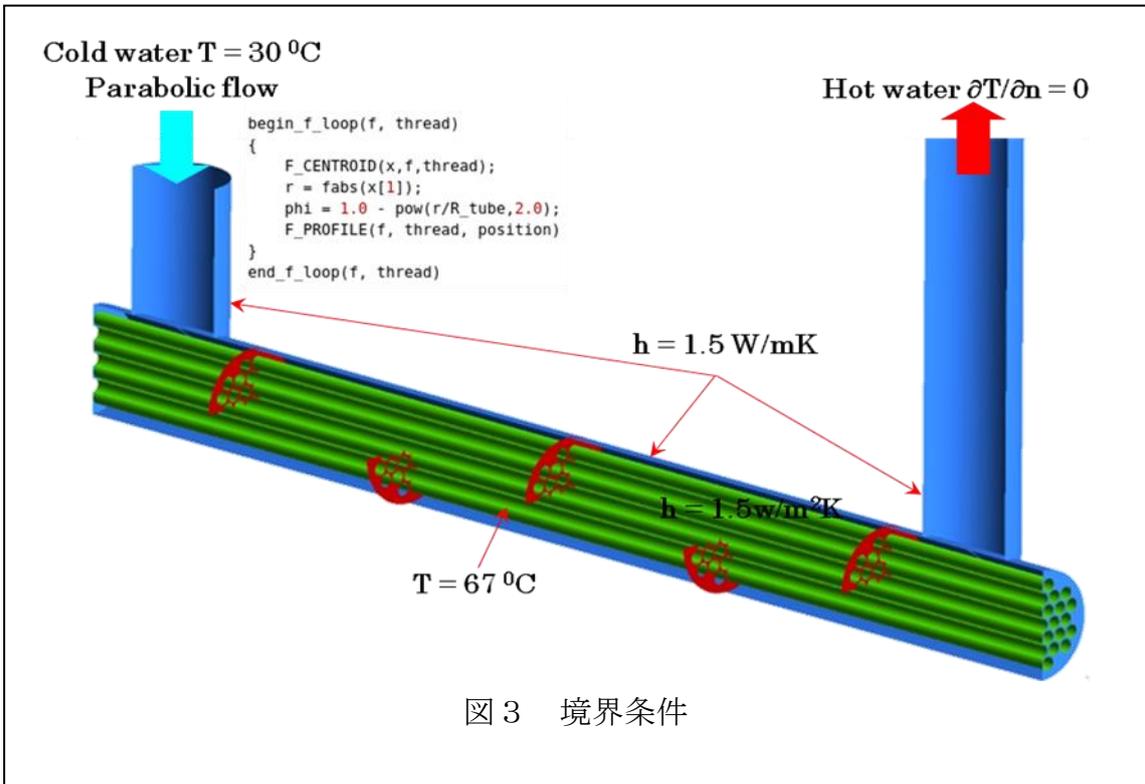
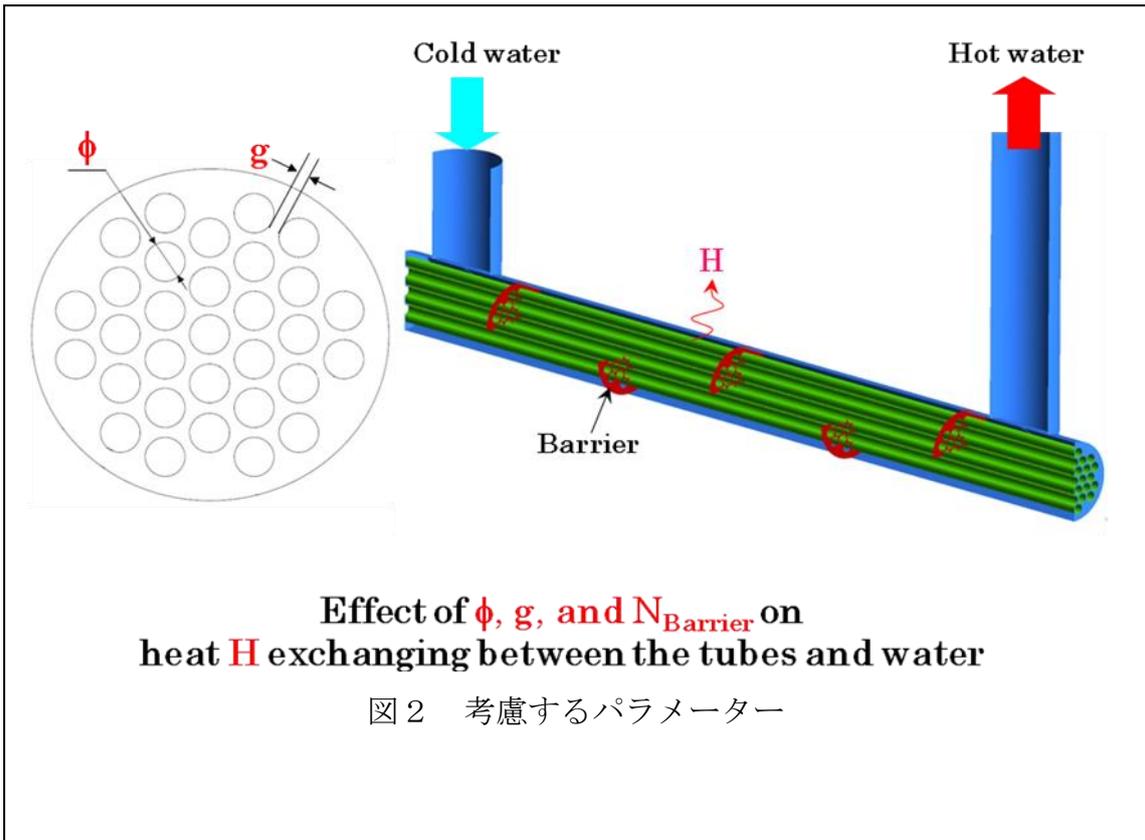
2-3-3-1 計算条件

本節で扱うシミュレーションモデルを図1に示すが，第1節のものと同様である。

図2には本節で考慮するパラメーターを示す。 ϕ はマイクロチャンネルの直径， g はマイクロチャンネル間のギャップ， N_{Barrier} はバッフルプレートの枚数を示す。これらが，除去熱量に与える影響を調べる。

図3は本シミュレーションで設定する境界条件を示す。入口から流入する水の温度は 30°C とし，放物線状の速度分布を与える。出口では温度勾配を0とする。マイクロチャンネルの外側の温度は 67°C とし，熱の移動量（熱伝導率）は 1.5W/mK とする。

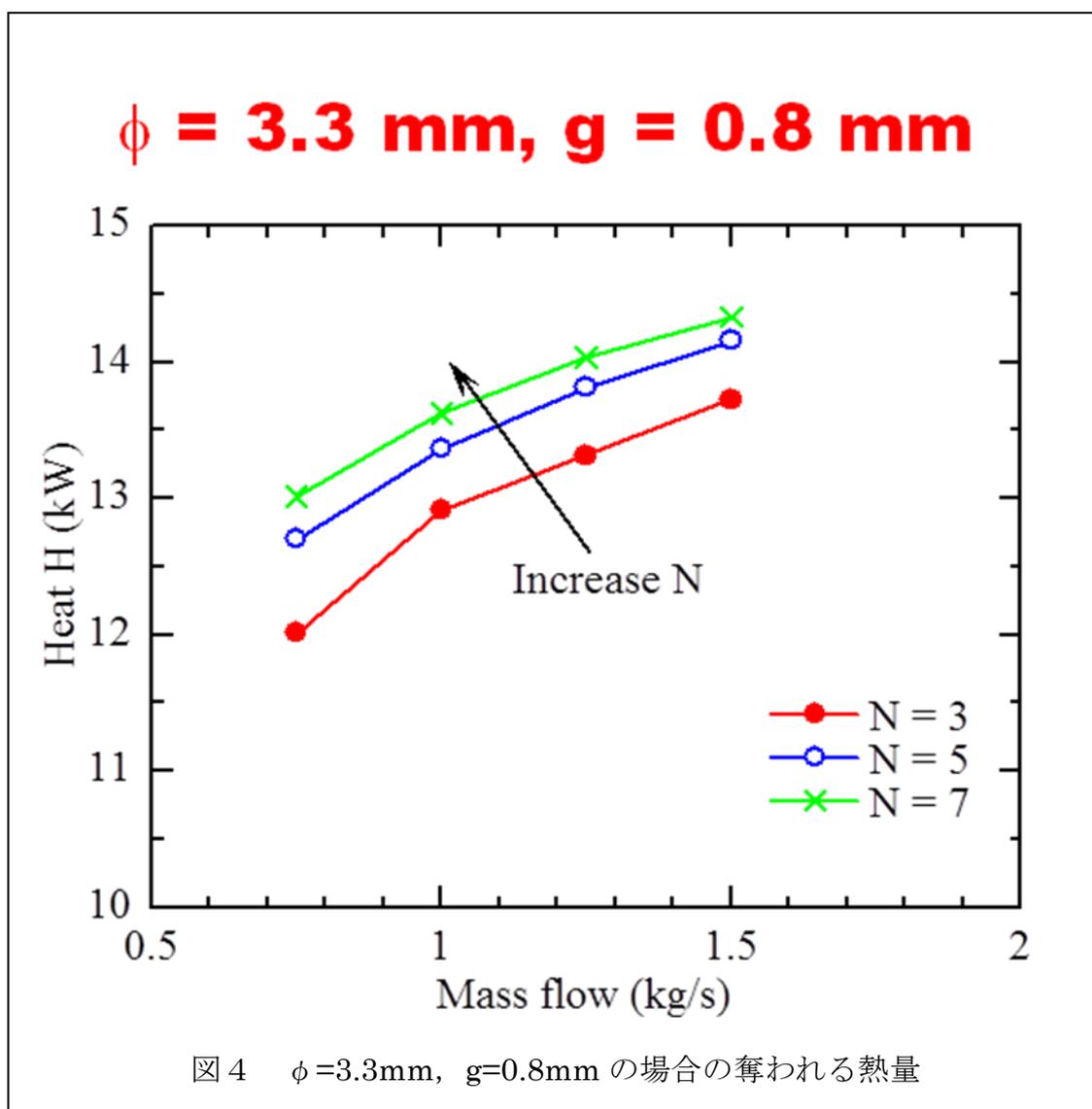




2-3-3-2 計算結果

図4は $\phi=3.3\text{mm}$, $g=0.8\text{mm}$ の結果を示す。横軸は質量流量であり、これが大きくなるほど、奪われる熱量も大きくなる。さらに、バッフルプレートが増えるほど、奪われる熱量も大きくなるが分かる。

図5は同条件での圧力降下を示す。横軸は水頭（動圧 $=1/2 \rho Q^2$ ）であり、圧力降下と線形の関係があることが分かる。圧力降下は水頭、およびバッフルプレートの数と共に上昇することが分かる。



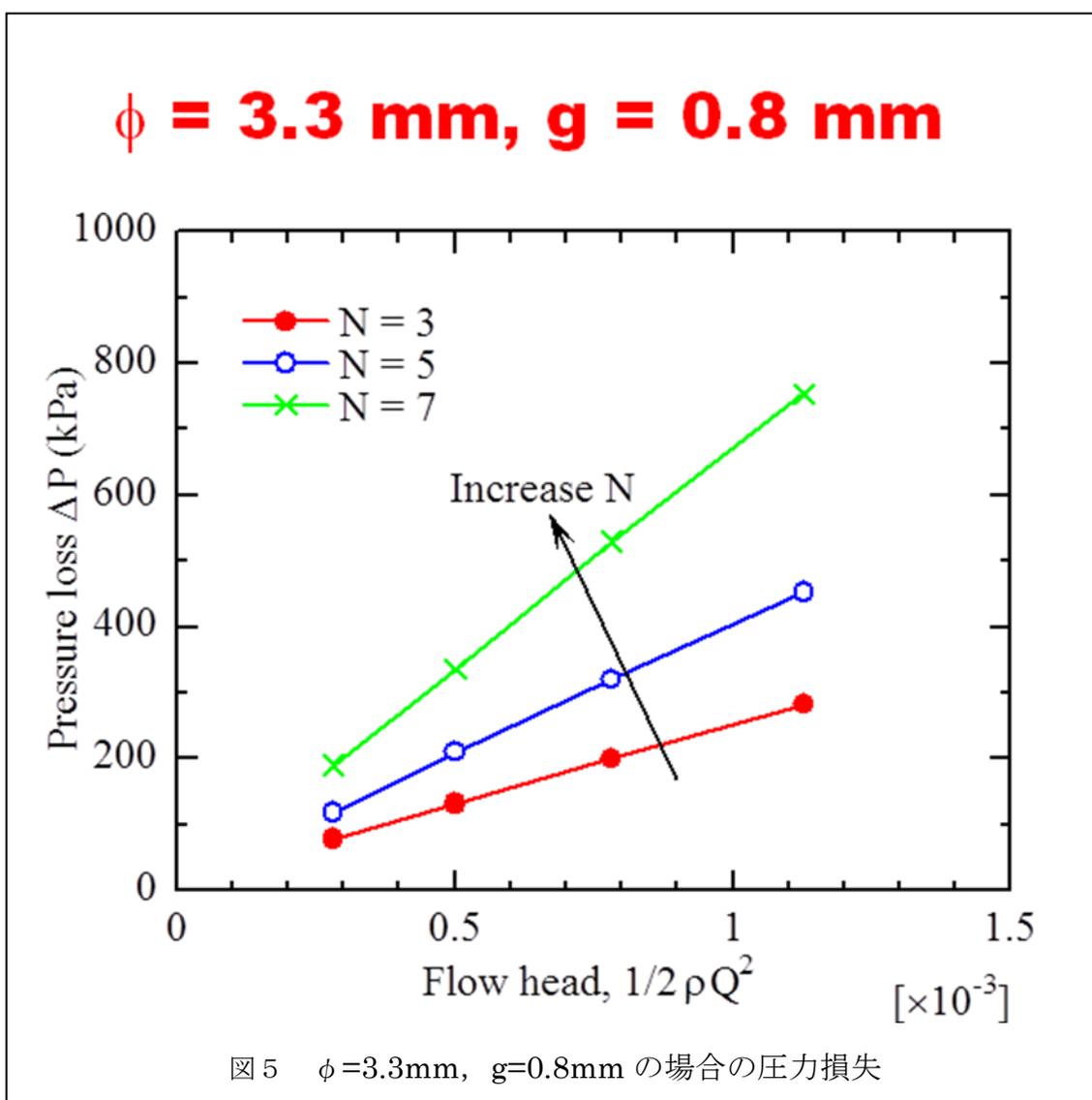


図6は $\phi=2.7\text{mm}$, 質量流量 1.5kg/s の場合を示す。横軸のギャップが大きくなるほど、奪われる熱量が減少するが、バッフルプレートが増えると共に熱量は増加することが分かる。

図7は同条件での圧力降下を示す。ギャップが大きくなるほど圧力降下は小さくなるが、バッフルプレートが増えれば大きくなることが分かる。

$\phi = 2.7 \text{ mm}, \text{MF} = 1.5 \text{ kg/s}$

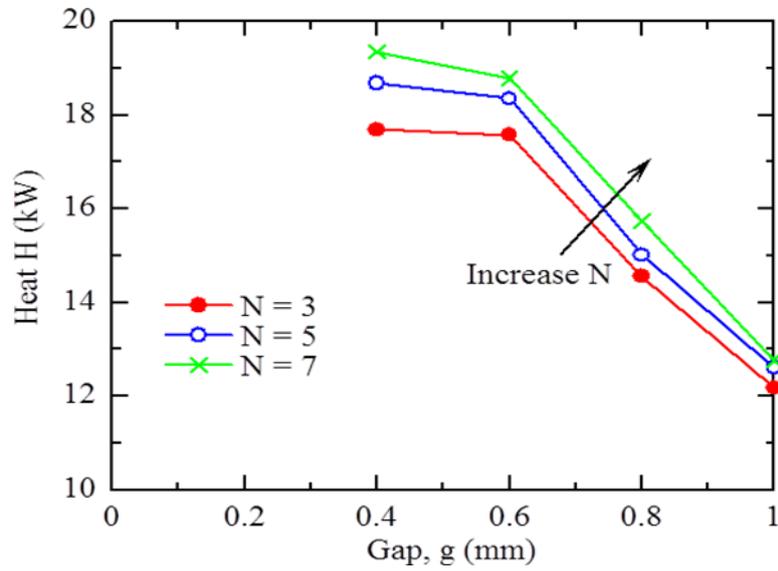


図6 $\phi=2.7\text{mm}$, 質量流量 1.5kg/s での除去熱量

$\phi = 2.7 \text{ mm}, \text{MF} = 1.5 \text{ kg/s}$

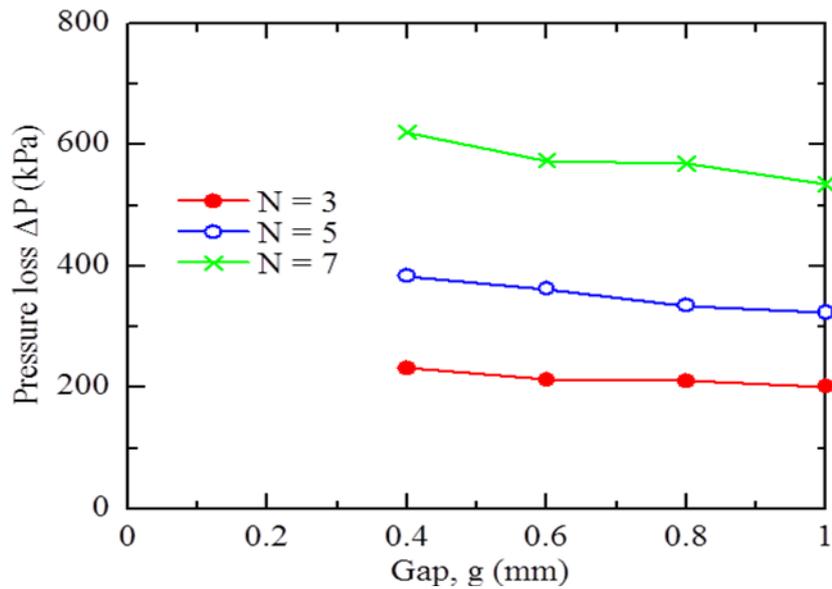


図7 $\phi=2.7\text{mm}$, 質量流量 1.5kg/s での圧力降下

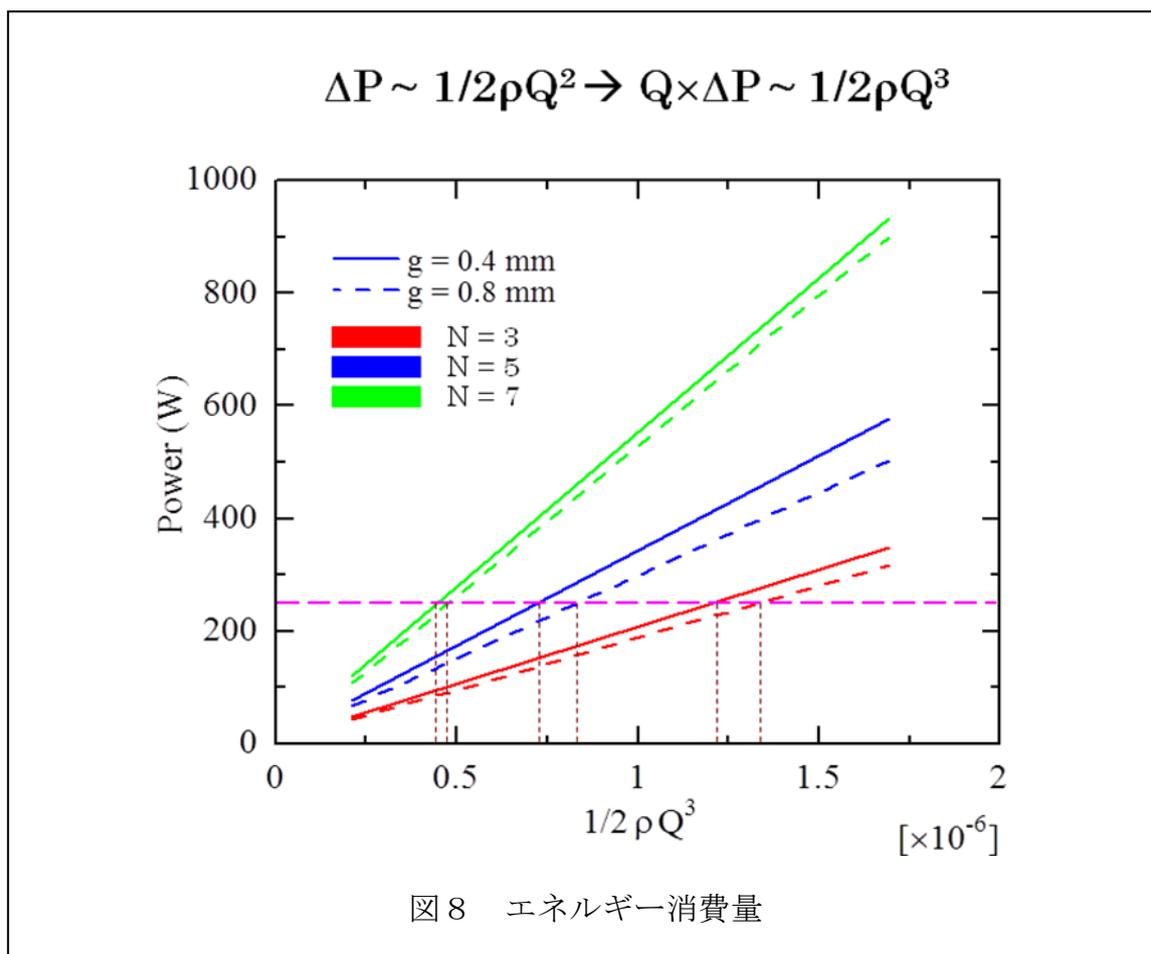
図8はエネルギー消費量と流量 Q の関係を示す。流量が増えれば、当然エネルギー消費量も増えるが、さらにバッフルプレートの数と共に増える。これは、流体抵抗が大きくなるためである。また、ギャップが小さいほど、エネルギー消費量は増える。これも、小さいギャップほど粘性による流体抵抗が増えるためである。

図9はエネルギー消費量を 250W, $\phi=2.7\text{mm}$ とした場合の除去熱量を示す。ギャップが大きくなるほど、除去熱用は減少するが、バッフルプレートの数にはあまり依存しないことが分かる。ギャップが 0.4mm の場合の効率が最も良いと言える。

図10はエネルギー消費量が 300W, $\phi=3.3\text{mm}$ の場合を示すが、図9と同様の傾向である。

2-3-3-3 まとめ

- (3) 除去熱量はバッフルプレートが5枚の時に最大となるが、3枚, 7枚との差はそれほど大きくない。
- (4) ギャップが 0.4mm の場合が最も効率が良い。



$\phi = 2.7\text{mm}$, Power = 250 W

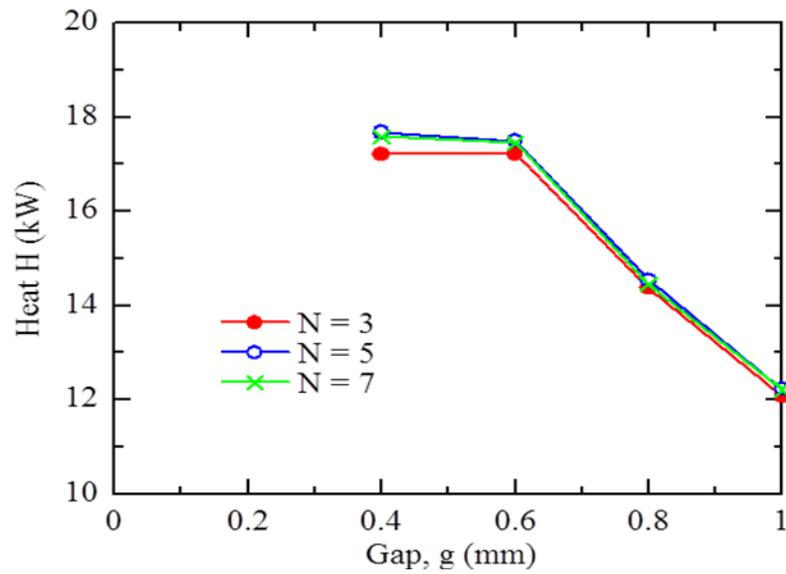


図9 エネルギー消費量が一定 (250W) の場合

$\phi = 3.3\text{mm}$, Power = 300 W

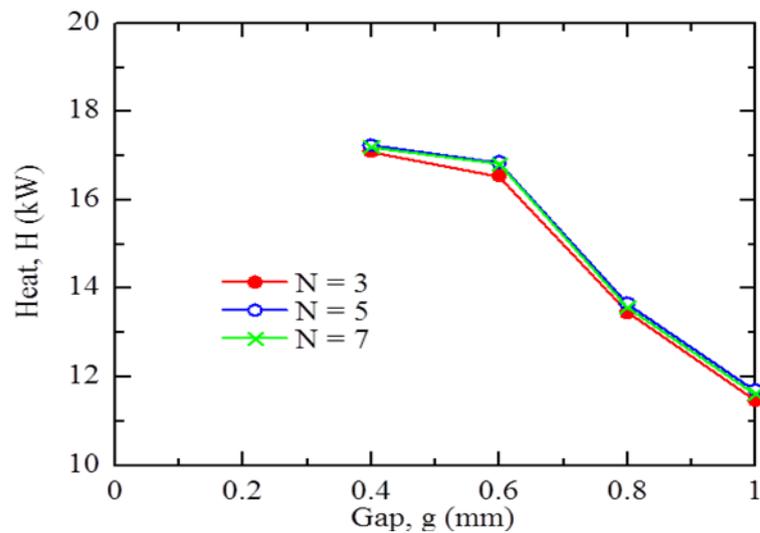


図10 エネルギー消費量が一定 (300W) の場合

2-3-4 熱による応力の解析

マイクロチャンネルは高温の流体にさらされ、その結果、熱膨張が生じ、圧縮応力が発生する。この応力が大きい場合は材料を劣化させることが考えられる。ここでは、どのくらいの熱応力が発生するのかを検討する。

2-3-4-1 シミュレーションモデル

長さ 500mm、直径 3.3mm のマイクロチャンネルを考える。計算は軸対称とし、外壁に 67°C の熱が作用するものとする。格子数は約 5000 である。

2-3-4-2 計算結果

図 1 に上記条件下で生じた熱応力の分布（等高線）と図 2 にそのグラフを示す。応力の最大値 5.73Pa が入口で生じ、出口方向に向かって急激に減少し、一定値 5.27Pa を示すようになる。一般に金属の圧縮強さは MPa~GPa のオーダーであるために、本装置での熱による応力は、全く問題がないと言える。

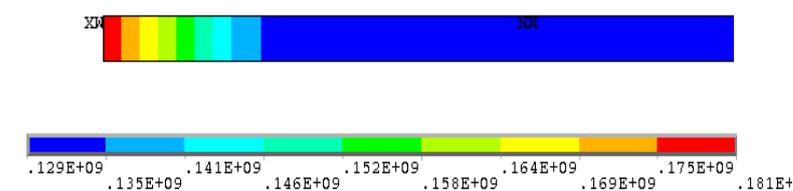


図 1 熱応力分布（等高線）

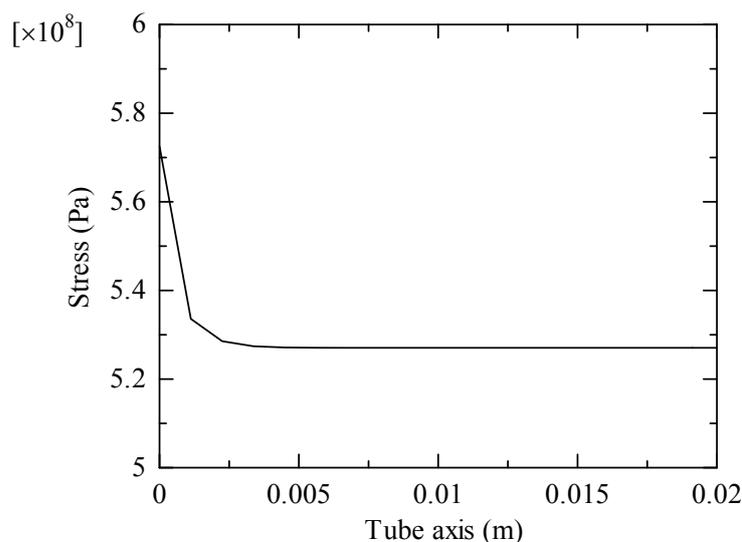


図 2 熱応力分布（グラフ）

第3章 全体総括

3-1 研究開発の成果

3-1-1 切削加工に関する研究開発の成果

切削研磨加工をパイプの径に合わせて回転させるドラム、砥石の回転数や角度、研削油、送り速度など様々なパラメーターを最適化することにより、 $\phi 3$ mm程度のパイプの肉厚を0.25 mmから0.08 mm程度まで薄肉化させる熱交換器の伝熱管を70%程度軽量化削減することに成功した。さらに、パイプ加工速度も通常の切削研磨加工と比べ10倍以上のスピードを実現することが出来た。しかし、パイプの細径化することにより、熱交換器自体の圧力損失が増大する為に、ある程度の流路徑（パイプ径）が必要となる。パイプ径が大きくなると、配列できるパイプ本数が減る為に単位体積当たりの伝熱面積が減り、熱交換量が減ってしまう。その問題を解決する為にパイプ内部にスプリングコイルを挿入し、ロウ付けにて接合することで、スプリングコイルの表面積を伝熱面積とすることができ、同時にパイプ内部に流れる作動流体を乱流化させ、単位面積当たりの熱伝達率を上げることに成功した。パイプ内壁にスプリングコイルを接合することで薄肉化したパイプの耐圧強度が上げられることも期待でき、構造計算により、パイプの設計耐圧を算定し直す必要がある。また、パイプ内に入れるスプリングコイルの形状、ピッチなどのパラメーターが熱交換効率、圧力損失にどのように影響するかなどを継続して基礎データを取る必要がある。

3-1-2 金属プレス加工に関する研究開発の成果

通常の順送金型での加工では、板厚と同一の穴ピッチで打ち抜くと、材料の押さえをしっかりとしていれば形状を保持したままきれいに打ち抜くことが出来た。板厚の80%の穴ピッチで打ち抜くと、2回目の打ち抜きステージで隣の穴との隙間が引っ張られ、1回目の穴が楕円形状になってしまった。クリアランスを追い込んで破断面を少なくしたが、カジリが発生した

金型の設計変更をして全ての穴を同時に、3段階で打ち抜ぬくと、板厚の80%の穴ピッチは問題なく打ち抜くことが出来た。板厚の70%の穴ピッチでトライをすると、隙間が引っ張られ穴形状が歪んでしまった。クリアランスを追い込んでみたが、カジリが発生して打ち抜けなかった。

さらに金型を変更しファインブランキング方式にて加工を行ったところ、目標である、板厚の50%の穴ピッチの加工に成功したが、プレス機の回転数を早くできず、また、僅かな刃の摩耗で穴形状に異常が発生するなど、量産性に問題がでた。最終的には独自の工程を加えることでヘッダー板厚を穴ピッチの3倍まで安定的に生産する方法を確立した。

3-1-3 数値シミュレーションに関する研究開発の成果

計算機を用いた熱流体数値シミュレーション、および構造解析シミュレーションを行うことで、マイクロチャンネル内の流体の速度分布、圧力分布、温度分布、応力分布など、実験的に把握することが困難な物理量を可視化することができた。その結果、熱効率を向上させるための流体力学的条件や幾何学的条件を明らかにすることが出来た。

また、構造解析に関しては、実験的に十分な強度が得られていることが明らかにされたため、当初の目的とは外れるが、より重要と考えられ、かつ実験的には把握が困難な「熱による応力の解析」を行った。

研究期間が6ヶ月程度と短かったため、当初の目的がすべて完了した訳ではないが、効率の良い熱交換器の設計に資するデータが得られたと考える。

3-2 事業化展開

本研究開発で確立した加工技術を元に出来上がった熱交換器を給湯器や燃料電池などに搭載するにあたり、現行とプレート式の熱交換器とは違い配管の位置など大幅な設計の変更が必要となる。また、それと同時にパイプを薄肉化したことによる耐久性の評価も必要となってくる。一般的には給湯用などは10年間のメンテナンスフリーを要求されており、10年間による腐食の問題や水道水に含まれる不純物の堆積などの問題を解決する必要がある。腐食に関してはより厳しい条件化で加速試験を行い、1~2年程度継続してその経過を見てデータを取っていくのであるが、熱交換器内に流す作動流体の状況により、その試験自体が全く違う方法となる。すなわち、ガス給湯のような場合は中にはガスが流れるのであるが、ガスが凝縮して液化する場合はその液の腐食性の高い液である為に、その条件もより厳しいものとなる。最終的には、熱交換器が搭載される製品を製造しているメーカーとの協議により使用条件に合わせた評価方法での試験もする必要がある。また、高圧化で使用する場合は、設計圧力は当然のことながら、数十万回にも及ぶ繰り返し応力にも耐える必要がある。つまり、高圧力、低圧力を繰り返すことによる金属疲労を検証し、特にヘッダ

ーとパイプのロウ付け部（接合部）などの変化のデータを出す必要がある。

本研究により、熱交換器として、熱交換量、圧力損失を満たし小型化・軽量化が図れることが分かったので、次のステップとして製品としての信頼性を正確なデータの裏付けから保証する必要がある。幸いなことに、本研究でアドバイザーとして参加していただいた関西電力株式会社様と継続して研究開発を見ていただけることとなり、より早い事業化を目指して信頼性の基礎データやより付加価値の高い製品の開発を進めていきたいと考えている。