

平成29年度採択
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

「表面テクスチャリングによる
環境負荷低減型熱交換器用プレートの開発」

研究開発成果等報告書

令和2年5月

担当局 四国経済産業局
補助事業者 公益財団法人とくしま産業振興機構

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・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）・・・・・・・・ 8
- 1-3 成果概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11

第2章 本論

- 2-1 プレートそのものの伝熱性能の向上に効果的な処理条件の選定課題への対応・ 12
- 2-2 洗浄性向上に効果的な F 研磨処理条件の選定課題への対応・・・・・・・・ 16
- 2-3 自動処理装置の試作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
- 2-4 実証実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28

最終章 全体総括・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37

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

○研究開発の背景

改正省エネ法が2010年4月に施行されたこともあり、高度に工業化された現代ではエネルギー問題が懸念事項の一つとなっている。そのため、産業界では省エネルギー化に対して様々なアプローチが検討されている。その一つに産業界で幅広く利用されている熱交換器の性能の向上がある。特に高効率、省スペース、メンテナンスが容易などの点でプレート式熱交換器が注目されている。プレート式熱交換器は、積層した複数のプレート間に流路を形成し、プレート一枚おきに高温流体と低温流体が交互に流れ、流体間で熱交換が行われる。生産現場では冷却や廃熱などの熱源を有効利用するために現在多くのプレート式熱交換器が運転されている。

このプレート式熱交換器の性能向上に際して、二つの解決すべき課題がある。一つ目の課題は伝熱性能の向上である。現在のプレートでは伝熱面積を増加させるため、プレス加工によって伝熱面を凹凸や波形形状としている。しかし、プレス加工などによる伝熱面積増加手法は技術的な限界に達しており、今後は大幅な改善が難しい。そのため、プレス加工等に頼らない新しい手法による伝熱性能の向上が望まれている。

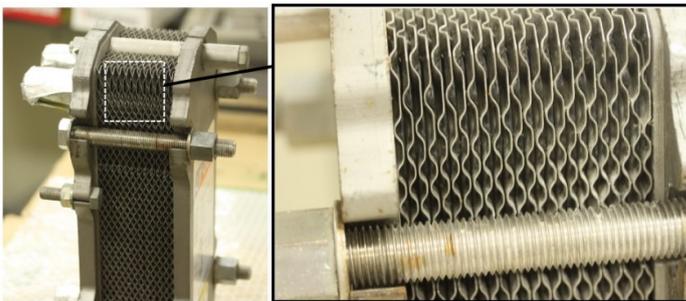


図1 プレート式熱交換器

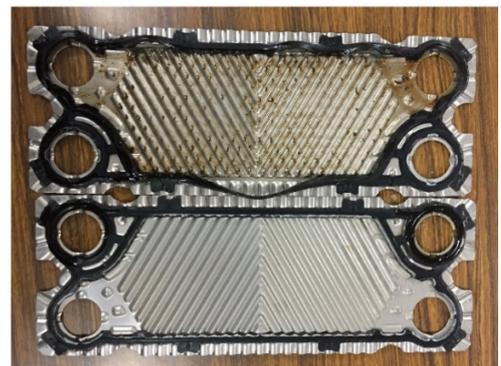


図2 熱交換器のプレート

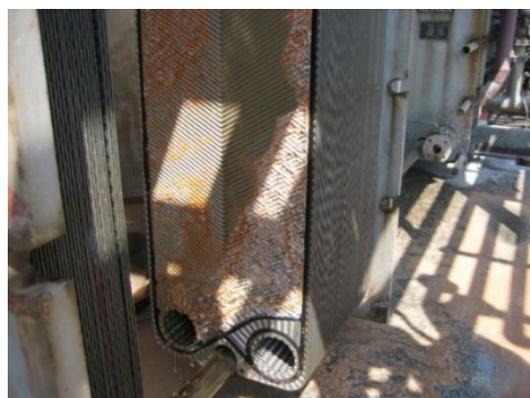


図3 プレートに付着した汚れ層の例

二つ目の課題は洗浄性の問題である。プレート表面に形成された汚れの層は強固に付着している場合が多く、デッキブラシや高圧水を用いた機械的洗浄や薬液槽に浸すことで洗浄する化学洗浄などが用いられる。機械的洗浄では多大な労力を要することに加え、プレートの变形や損傷を引き起こす可能性がある。また、化学洗浄ではプレートが腐食する可能性に加えて仕上げ洗浄を丁寧に行う必要もある。これら洗浄には多くの人手を要し、さらには多数のプレートの分解・組立てが必要となるため多大な時間を要する問題がある。そのため、産業界からは汚れの層を容易にはく離させる対策が望まれている。

○研究目的及び目標

本研究開発では表面研磨加工技術「F研磨処理」を応用することでプレート式熱交換器等の伝熱性能の向上とともに汚れ層のはく離性の向上を可能とし、既存の製品と比較して、伝熱性能30%向上及び洗浄作業性を50%向上できる新たな表面処理技術を開発する。

プレート式熱交換器の伝熱性向上及び洗浄性向上に対して、本研究開発では**ダイカテック株式会社及び徳島大学が共同で開発してきた表面テクスチャリング手法“F 研磨処理”**によって解決を図るものである。F 研磨処理とは金属表面への粉体の付着を抑制する表面研磨加工技術である。(粉体取扱装置用鋼製部材及び粉体取扱装置, 特願 2007-073841、特開 2008-230665、特許第 4064438 号、2008 年 1 月 11 日、加藤 雅裕、米倉 大介、大西 賢治)。F 研磨処理は凹凸のピッチが $1\ \mu\text{m}$ 以下の範囲で凹凸の高さとピッチの比が0.005以上であり、かつ、当該比のばらつきが各波長における比の値の平均値から3割以内であることを特徴とする表面テクスチャリング手法である。本技術は、コーティング材や機械部品の摩耗による異物混入の可能性を極めて低くできる上に閉そく問題を解消できる技術として各種産業からの反響は大きく、特許取得後から川下企業である食品産業を初め、医薬品業界、素材産業などの様々な業界から毎年100件程度の粉体付着防止技術の引き合いがある。なお、本特許は国内外他社における類似特許は見当たらず、抵触等の恐れは無い基本特許である。

F 研磨処理はサブミクロンの起伏を有する表面を形成するため、表面積の増大に伴い伝熱性を向上できる。(熱交換器、特願 2014-266900、特開 2016-125762、加藤 雅裕、米倉 大介、大西 賢治) 製作した実験システムを用いた予備実験の結果、実際に水の**気化条件下でバフ研磨による鏡面仕上材に比べて F 研磨処理材は伝熱性が 6 倍向上すること**、また、同装置を用いて温水によるプレートの温度上昇の測定から液相状態下での伝熱性能評価を行ったところ、F 研磨処理プレートでは温度が上がりやすい、すなわち伝熱特性が良いことが確認できている。これらの特性を利用すれば、第 1 の課題解決に寄与できると考えている。尚、サンドブラスト等のブラスト研磨による凹凸形成については騒音の問題及び使用中の投射材の破損による再現性の低下の問題があるため、本研究から除外した。

洗浄性の問題については、片栗粉スラリーを用いた汚れ層のはく離性に関する予備実験を行っている。その結果、鏡面仕上材では打撃を加えても片栗粉層が残留したのに対し、F 研磨処理材では片栗粉層が容易にはく離すること、さらに残存量も少ないことを確認している。したがって、第 2 の課題を解決できる可能性を示唆している。

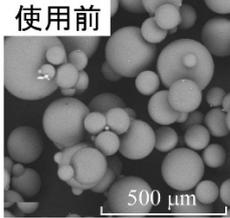
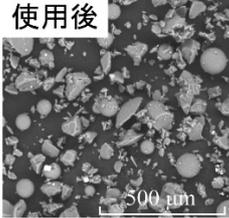
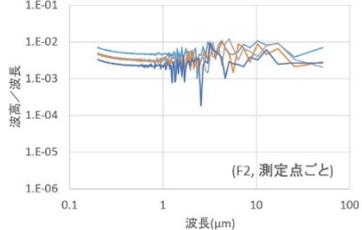
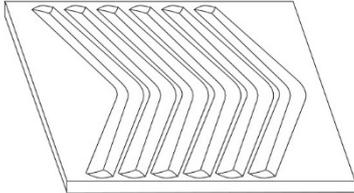
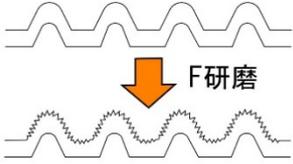
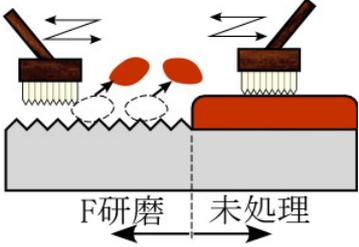
	従来技術	新技術
表面処理方法	<p>ショットブラストでは処理中に投射材が破損するため、表面形状の再現性に乏しい。</p> <p>使用前  使用後 </p> <p>500 μm 500 μm</p>	<p>F 研磨では砥粒の摩耗や破損が生じる前に交換するため、表面形状の再現性がある。</p>  <p>1.E-01 1.E-02 1.E-03 1.E-04 1.E-05 1.E-06</p> <p>0.1 1 10 100</p> <p>波長(μm)</p> <p>(F2, 測定点ごと)</p>
伝熱性能の向上手法	<p>V 型波型形状（ヘリンボーン）にプレス加工し、表面積を増大。</p> 	<p>ヘリンボーン状にプレス加工したプレートに F 研磨処理による表面テクスチャリングを適用することで、さらなる表面積の増大。</p>  <p>↓ F 研磨</p>
洗浄性	<p>悪い。</p> <p>運転を停止して汚れの層をデッキブラシや高圧水による機械的洗浄を行う。場合によっては薬液槽に浸す化学的な洗浄が行われるが、プレートの損傷や腐食の原因ともなる。</p> 	<p>良い。</p> <p>F 研磨により、汚れ層を容易にはく離可能。洗浄作業の省力化が可能。</p>  <p>F 研磨 未処理</p>
従来技術の課題及び新技術による課題解決方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ショットブラストでは表面形状の再現性に乏しい。 ・プレス加工による表面積増大だけでは伝熱性能の向上に限界がある。 ・汚れ層がプレート表面に強固に付着しているため、洗浄作業に時間を要する。また、洗浄作業によりプレートが変形や損傷することもある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・F 研磨処理では、砥粒の摩耗や破損が生じる前に交換するため、表面形状の再現性がある。 ・プレス加工と F 研磨処理との複合処理をすることで、プレートそのものの伝熱性を向上できる。 ・F 研磨処理により、汚れ層を容易にはく離できるため、洗浄作業を短時間化できる。また、強い力を加えなくてもはく離できるため、プレートの損傷を防ぐことができる。

図4 従来技術と新技術の比較図

一方で、プレート式熱交換器の伝熱性向上及び洗浄性向上の実現に際して、解決すべき課題として以下の課題がある。

①プレートそのものの伝熱性能の向上に効果的な処理条件の選定課題

F 研磨処理によりプレート自体の伝熱性能の向上を図るためには、伝熱性能と表面状態の関係性を明らかにする必要がある。現状、F 研磨をプレート式熱交換器のステンレス製プレート面へ応用することで、水蒸気の沸騰条件下で鏡面に比べ伝熱性が6倍向上することを見出しているが、この向上メカニズムは未解明であり、処理条件によってその性能が異なることがわかっている。そのため、F 研磨による伝熱性向上メカニズムの解明を行い、第1の課題の解決と同時に伝熱性を改善できる表面形状を明らかにする必要がある。

②洗浄性向上に効果的な F 研磨処理条件の選定課題

F 研磨処理プレートは、洗浄時における汚れ層のはく離性に効果的な加工条件を明らかにする必要がある。現状、F 研磨処理の効果について、応募者らはこれまでに片栗粉スラリーを用いた大気環境中における予備試験から検討を行ってきており、片栗粉層のはく離に対してF 研磨処理の効果が現れる加工条件が異なることがわかっている。そこで、汚れの種類ごとに適切な表面形状を特定し、洗浄性に効果的な加工条件の特定およびそのデータベース化する必要がある。

本研究開発では、以上の課題を解決することで、伝熱性能と洗浄性を向上させた新しい熱交換器プレートの技術開発とその実用化を実現する。

【当初の目的及び目標に対しての実施結果について】

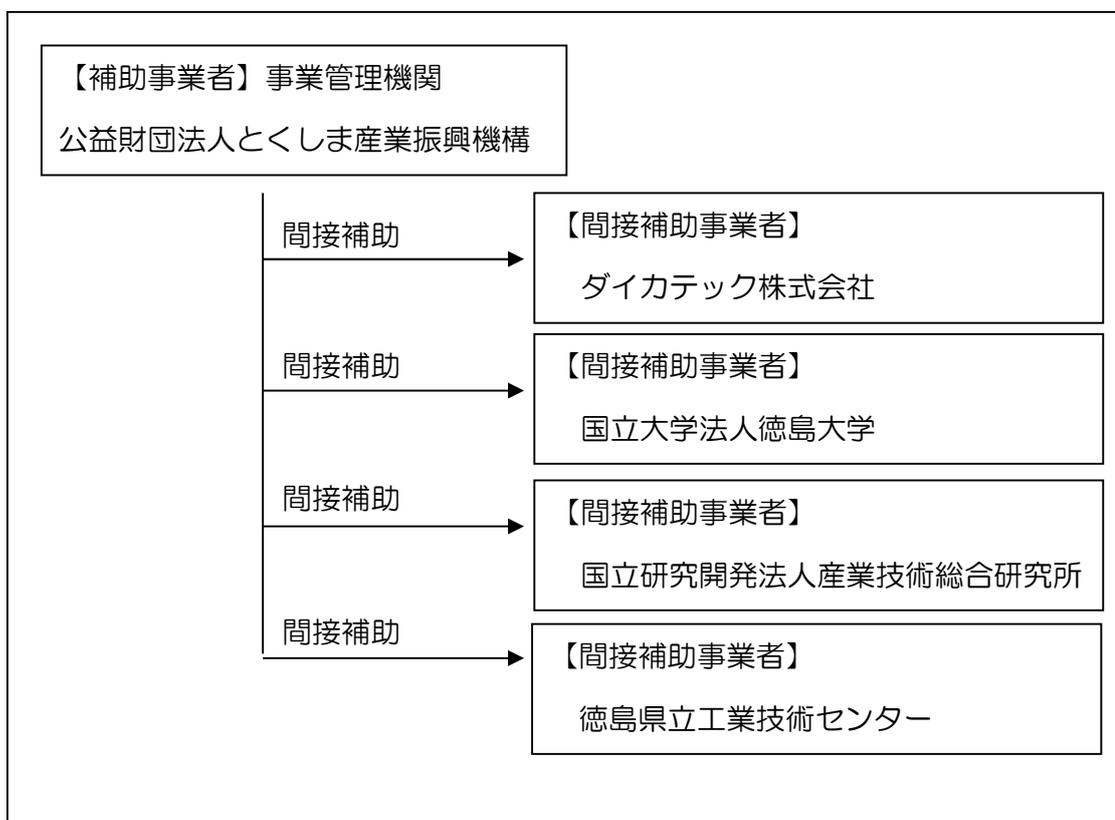
各研究開発課題に対する実施結果は次のとおり。

研究開発実施内容	実施結果
【1. プレートそのものの伝熱性能の向上に効果的な処理条件の選定課題への対応】	(1) 気化条件下における伝熱特性の評価実験において、F 研磨処理プレートは鏡面仕上げプレートに比べ、局所熱伝達係数で3~6倍の効果を確認した。表面粗さで表わすとRq=71~206nm程度を有するF 研磨処理となる。 (2) 液相状態における伝熱特性の評価は、プレート式熱交換器を使ったプレート表面のF 研磨処理有無で比較を行った。冷水をある温度まで上昇させるために必要とする温水流量を30%削減できることを確認した。その時の鋼板表面凹凸分布は、波長20~30 μ mで波高2~8 μ mを有しており、伝熱面積が実質増大している。 (3) F 研磨処理鋼板凹凸面の断面曲線長は、鏡面仕上げ鋼板よりも1.4~1.7倍の伝熱面積を有することがレーザー顕微鏡による表面形状の測定によって判明した。
【2. 洗浄性向上に効果的な F 研磨処理条件の選定課題への対応】	(1) 人工的な粉末状の汚れ、フィルム状の汚れ、析出物の汚れを鋼板面に作成し、その洗浄後の残存面積について F 研磨処理の効果を確認した。析出物の汚れについてはその効

	果を見出せなかったが、粉末状及びフィルム状の汚れについては F 研磨処理の優位性を確認できた。
【3. 自動処理装置の試作】	ロール状研磨紙テープを鋼板面に押し当て鋼板の移動によって F 研磨加工を行う自動処理装置を完成させた。装置の性能評価は、自動処理装置と従来の手加工で作成した鋼板面の表面粗さについて比較を行い略近似した状態に調整を行うことができた。ここで、出来上がった鋼板の表面粗さに関するデータベースの作成において、従来の触針式表面粗さ計に加え、より精度の高いレーザー顕微鏡で F 研磨処理の番手 F-3～F7 について調査を行った。しかし、細部の凹凸データを拾い過ぎて番手の違いが見辛くなり、各凹凸形状の差を表すことが難しいことが判明した。このため、従来通り触針式表面粗さ計による測定データで F 研磨処理番手を定義することにした。
【4. 実証実験】	<p>(1) 洗浄性の向上に関し、(株)MEPCOM 四日市の協力を得て、樹脂冷却水の汚れが付着した熱交換器プレートについて F 研磨処理の実証実験を実施できた。この汚れ洗浄に未処理のプレートは高圧洗浄を必要としたが、F 研磨処理プレートでは上水道圧でも同じ洗浄結果が得られた。また、徳山積水工業(株)のシリコン廃液のラインにおけるプレート式熱交換器のプレート表面の汚れの付着状況において F 研磨処理の汚れ付着の抑制効果が確認できた。</p> <p>(2) F 研磨処理鋼板の伝熱特性について、プレート式熱交換器 2 台 (F 研磨の有無) を使って温水→冷水への温度上昇を測定し、その評価を実施した。伝熱特性向上の目標値 30%、すなわち、伝熱性能向上による省エネということから冷水を目標とする温度まで上昇させるために必要とする温水流量の 30% 低減を確認できた。また、プレートを渦巻状に巻いたスパイラル熱交換器についても伝熱性向上の実証実験を実施した。しかし、製作時の酸洗い液が F 研磨処理加工面に影響を与えてしまう製作上の課題があり、この影響を加味しても明らかな伝熱特性向上の効果を見出すことは出来なかった。</p>

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制



(1) 研究者および協力者氏名

【事業管理機関】公益財団法人とくしま産業振興機構

氏名	所属・役職
長谷川 尚洋	成長戦略推進部・部長
大上 真莉子	成長戦略推進部・主事

【間接補助事業者】

ダイカテック株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
大西 賢治	代表取締役社長	【1-1】 【1-2】 【2-1】 【2-2】 【3-1】 【3-2】 【4-1】

国立大学法人徳島大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
米倉 大介 加藤 雅裕	大学院社会産業理工学研究部 教授 大学院社会産業理工学研究部 准教授	【1-1】【1-2】 【3-2】 【4-1】

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
廣瀬 伸吾 板垣 宏知	製造技術研究部門・研究グループ長 製造技術研究部門・研究員	【1-1】【1-2】

徳島県立工業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
日開野 輔	機械技術担当・主任	【2-1】【3-1】 【4-1】

【アドバイザー】

氏名	所属・役職	協力内容
吉川 卓志	三和澱粉工業株式会社	一般産業部品における熱交換器の伝熱性能および洗浄性における技術課題について助言を行う
野々村 俊夫	独立行政法人中小企業基盤整備機構四国本部・ものづくり支援チームアドバイザー	研磨処理に関する高い知見と熱交換器の市場に関して助言を行う

1-3 成果概要

研究開発の内容および技術的目標値	達成状況
【1. プレートそのものの伝熱性能の向上に効果的な処理条件の選定課題への対応】	
【1-1】気化条件下における伝熱特性に及ぼす処理条件の影響	局所熱伝達係数で3~6倍の効果を確認できたが、そのメカニズムまで解明することは出来なかった。
【1-2】液相状態における伝熱特性に及ぼす処理条件の影響	冷水をある温度まで上昇させるという実験のF研磨処理が伝熱特性を向上させるその背景について、鋼板表面の凹凸分布を解析した。F研磨処理は、波長20~30 μm で波高2~8 μm を有しており、凹凸面の断面曲線長の評価において、鏡面仕上げ鋼板よりも1.4~1.7倍の伝熱面積を有することがレーザー顕微鏡によって明確になり、伝熱面積の实质増大が効果の要因であると推察された。しかし、流体の粘度や流速の影響、特に凹凸による渦の発生などメカニズム部分については未解明のままである。
【2. 洗浄性向上に効果的なF研磨処理条件の選定課題への対応】	
【2-1】洗浄時における汚れのはく離に効果的な処理条件の選定	粉末状の汚れ、フィルム状の汚れについてはF研磨処理の優位性を確認できた。しかし、析出物の汚れについてはその効果を見出せなかった。
【2-2】洗浄性に効果的な加工条件のデータベース化	F研磨の研磨面仕上げに対して、「(触針式の)表面粗さ」、「表面観察像」、「(光学的)反射率」の各種評価データを事例化し、加工事例のデータを蓄積、閲覧可能とするウェブベースのソフトウェアを開発した。
【3. 自動処理装置の試作】	
【3-1】自動処理装置の試作	従来の手加工に代わるロール状研磨紙テープを鋼板面に押し当て鋼板の移動によってF研磨加工を行う自動処理装置を完成させた。しかし、研磨紙の番手の粗いF-3については、研磨中に砥粒子が研磨紙から剥がれてしまい、加工ができなかった。このため、砥粒の紙面との接着強度が高い、自動処理装置専用の研磨紙開発が必要であることがわかった。
【3-2】処理条件と表面形状のデータベース化	鋼板の表面粗さに関するデータベースの作成において、従来の触針式表面粗さ計に加え、より精度の高いレーザー顕微鏡で細部の凹凸データを収集した。そのデータ(F-2~F7)を離散フーリエ変換で波高/波長対波長に着目したデータベース化を実施した。しか

	し、一部の卓越した凹凸データが番手の違いを見辛くし、各凹凸形状のデータベースとして採用することが出来なかった。このため、従来通り触針式表面粗さ計による測定データで処理条件と表面形状を定義することとした。
【4. 実証実験】	
【4-1】実証実験	<p>実証実験は、①F 研磨処理による熱交換器プレート面の汚れ付着抑制と洗浄性向上への効果②熱交換器プレート面の F 研磨処理有無による伝熱特性の向上、この二つの実証実験を実施した。</p> <p>① 汚れの付着抑制と洗浄性の向上についてF 研磨処理の効果を確認できた。しかし、そのメカニズムを明確にできなかったことやその費用対効果が川下ユーザーで異なり、削減できる労力との比較という点で明確な評価を得ることができなかった。</p> <p>② 熱交換器は、プレート式熱交換器の他、プレートを渦巻状（スパイラルプレート）に巻いた長方形の流路を有するスパイラル式熱交換器の 2 機種についてF 研磨処理有無による温水→冷水への伝熱特性を比較した。プレート式熱交換器は、冷水流量 40L/min において目標である省エネ 30%を確認できた。しかし、スパイラル式熱交換器については、明らかな効果を見出せなかった。</p>

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人とくしま産業振興機構 成長戦略推進部 大上 真莉子

TEL : (088) 654-0102 (代) FAX : (088) 653-7910

e-mail : m-oooue@our-think.or.jp

【法認定機関】

ダイカテック株式会社 代表取締役社長 大西 賢治

TEL : 088-666-0011 FAX : 088-666-0220

e-mail : k_onishi@e-daika.co.jp

第2章 本論

2-1 プレートそのものの伝熱性能の向上に効果的な処理条件の選定課題への対応

【1-1】 気化条件下における伝熱特性に及ぼす処理条件の影響

【1-1】においては、F 研磨（F0 処理）による伝熱性能の向上が認められる気化条件下において、その表面形状を検討した。複数条件で研磨処理した試料を用い、これまでに得られた結果を踏まえて、研磨条件（研磨紙粒度、処理荷重）について評価検証を行った。また、伝熱特性評価と組み合わせた検討を通じて、F 研磨による伝熱性向上メカニズムの解明を行い、伝熱性を改善できる表面形状への知見を得ることとした。

プレートの伝熱性能向上に及ぼす F 研磨処理の影響を明らかにするため、異なる条件で処理した試験プレート（ステンレス板）に対して、気化条件下における伝熱特性を検討した。また、最適な処理条件を選定するにあたり、処理条件の伝熱性向上に与える影響をより明確にするため、既存の評価装置（図 1-1-1）に直接観察用の覗き窓を追加加工し、沸騰伝熱挙動と表面状態の関係を詳細に観察した。

種々の処理条件で処理した伝熱テストプレートを用意し、気化条件下における伝熱特性を検討した。具体的には、表 1-1-1 に示すような、種々の表面粗さをもつプレートを用意し、図 1-1-1 の実験装置を用いて、乾き度を変えながら局所熱伝達係数を測定した。その結果（図 1-1-2）、鏡面プレートと比較して、中程度の表面粗さをもつ F2、F0 研磨プレートでは、乾き度 0.35 において、局所熱伝達係数が約 6 倍、比較的大きな粗さをもつ F-1、F-2 研磨プレートでは約 3 倍の局所熱伝達係数を示し、処理条件が伝熱性に大きな影響を及ぼすことを見出した。具体的には、伝熱性が最も高い処理条件は、表面粗さ R_q が 71 nm ~ 206 nm 程度であることがわかった。

表 1-1-1 各研磨方式によるステンレス板表面粗さ(R_q)

研磨	鏡面プレート	F2 研磨	F0 研磨	F-1 研磨	F-2 研磨
表面粗さ R_q [nm]	6	71	206	552	655

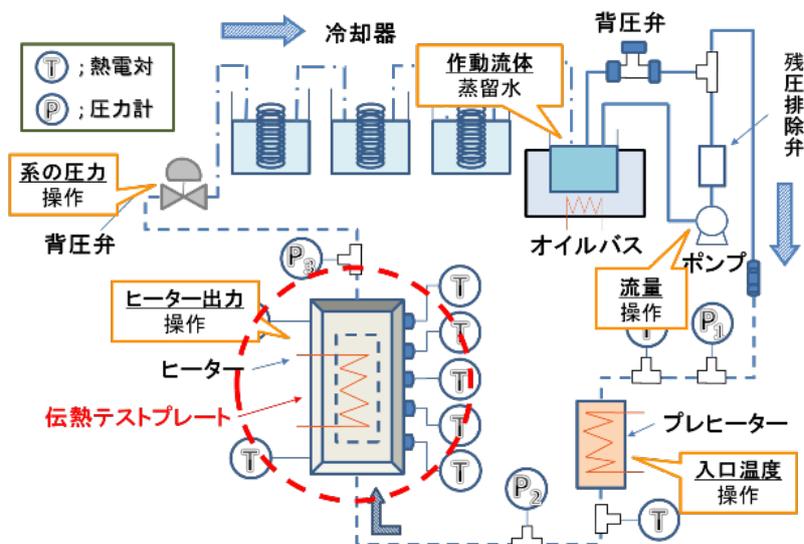


図 1-1-1 実験装置の概略図

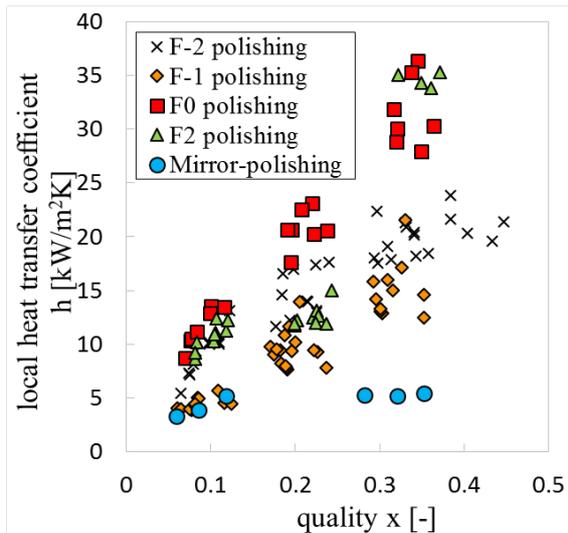


図 1-1-2 各研磨表面における局所熱伝達係数と乾き度の関係（操作条件（流量；40 mL/min, ヒーター出力；1000W, 系の圧力；0.3MPa）

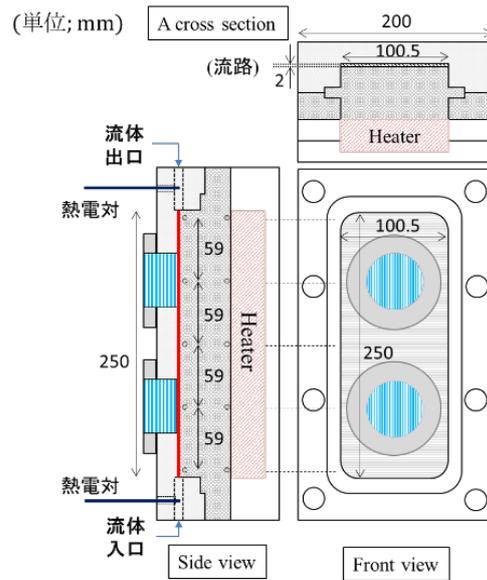


図 1-1-3 可視化装置の概略図

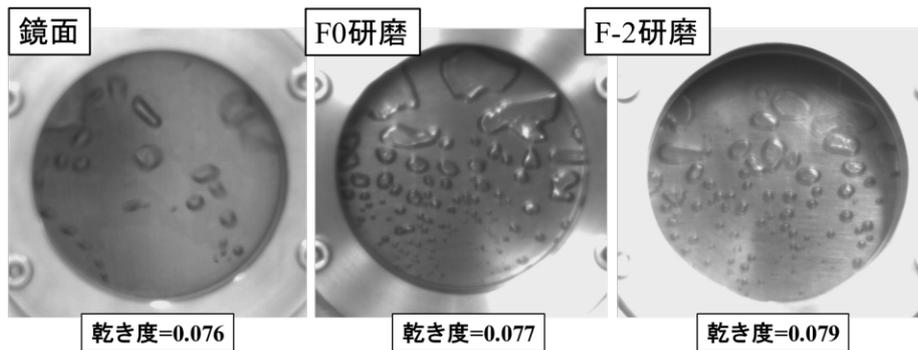


図 1-1-4 (左)鏡面プレート, (中)F0 研磨プレート, (右)F-2 研磨プレート
操作条件(系の圧力；0.3MPa, 流量；40 mL/min, ヒーター出力；1000W)

次に、気化条件下におけるF 研磨を施したプレート面での沸騰伝熱挙動を可視化した。ここでは、代表的な処理条件としてFO 研磨とF-2 研磨を採用し鏡面プレートと比較した。具体的には、フレームの流路側に図 1-1-3 に示すような覗き窓を設け、高速度カメラで撮影することで流動層内を可視化した。その結果（図 1-1-4）、F 研磨プレートでは、鏡面プレートに比べ、核沸騰がより活発に起こり、より広範に多数の小さな気泡が存在することがわかった。これは、F 研磨により多数の傷や凹凸が形成され、これらが気泡形成に優位に働き、局所で熱伝達性向上に寄与する気泡サイクルを促進していることを示した。さらに、FO とF-2 を比較すると、FO においてより小さな気泡の形成が観測されたことから、小さな表面粗さがより小さい気泡の形成に寄与していた。このことから、処理条件が伝熱性促進挙動を制御可能であることが明確になった。

【1-2】 液相状態における伝熱特性に及ぼす処理条件の影響

【1-2】においては、【1-1】の気化条件下での知見をもとにして、液相状態の温度域における伝熱特性と表面形状の関係を検討した。その際、F研磨によって得られた表面特性と伝熱特性との関係を明らかにし、得られた知見をもとにして、さらなる伝熱性能の向上が期待できる処理条件を提案し、その評価を行った。

一方で、熱交換器での温水流量による冷水の温度上昇試験において、ノーマルプレートと比較してF-3プレートで30%の温水流量削減を達成している。これらの結果から、F研磨の処理条件の違いにより伝熱性促進挙動を制御することが可能であると考えて、F研磨を施したプレートの表面凹凸状態の分布を評価し、表面凹凸状態とF研磨条件の相関を調べた。

図1-2-1及び図1-2-2に気化条件で気泡の発生に違いの見られたFO研磨プレート及びF-2研磨プレートの光学顕微写真を示す。FO研磨においては、その凹凸差は大凡 $1\mu\text{m}$ の範囲にあることがわかった。また、F-2研磨プレートは、FO研磨プレートと比較して細かい凹凸が多く見られ、その凹凸差は $2\sim 4\mu\text{m}$ であった。

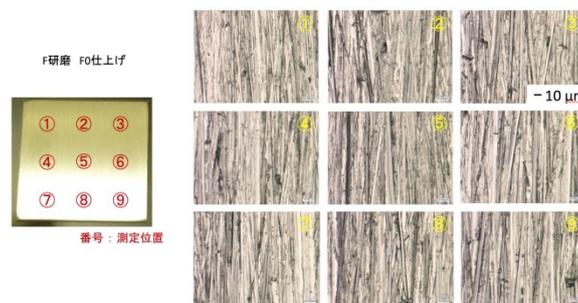


図 1-2-1 FO 研磨プレート凹凸分布

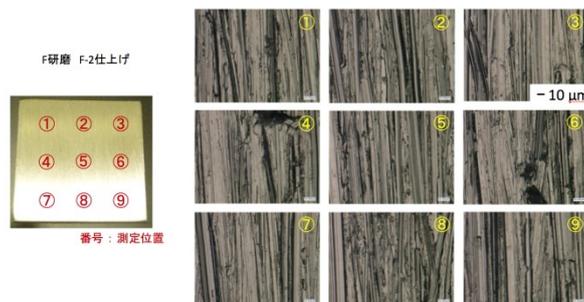


図 1-2-2 F-2 研磨プレート凹凸分布



図 1-2-3 F-3 研磨プレート凹凸分布

また、冷水温度上昇試験で効率化効果のあった F-3 研磨プレートも同様に表面の凹凸分布を評価した (図 1-2-3)。F-3 研磨においては、大凡 20~30 μm 幅の凹凸が深さ 2~8 μm で生じていることがわかる。このことから、F 研磨により熱交換器プレートの表面積が実質的に増大し、その結果、冷水の温度上昇効率が改善されたものと考えられる。

表1-2-1 は、6回測定した数値の平均値からプレート面凹凸の状態を表す指標 (表面粗さ) をまとめたもので、F 研磨処理および鏡面プレートの伝熱面積として測定した断面曲線長さを適用してそれらの比較を行った。結果として、F 研磨処理によって鏡面の1.4~1.7倍の伝熱面積を得られることが判明した。

表1-2-1 表面形状の測定結果 粗さ

6回測定の平均値 (JIS B 0601-1994)

	鏡面	F4	F0	F-3
Ra (算術平均粗さ)	0.05	0.15	0.40	0.56
Ry (最大高さ)	0.33	2.02	4.48	6.77
Rz (十点平均粗さ)	0.26	1.32	2.66	3.32
Sm (凹凸の平均間隔)	1.02	1.36	3.62	3.63
S (局山頂の平均間隔)	0.31	0.34	0.35	0.35
RMS (Rq二乗平均平方根粗さ)	0.06	0.20	0.53	0.73
カットオフ	0.25	0.8	0.8	0.8
断面曲線長/測定長	1.083	1.415	1.632	1.739
鏡面に対する断面曲線長の増加率(%)	-	30.6 %	50.7 %	60.5 %

測定装置: レーザ顕微鏡 VK-9500 (キーエンス社製)

対物レンズ倍率: 150倍

測定ピッチ: 0.01 μm / 0.092 μm (高さ / 測定方向)

算出方法: 研磨方向に直角な断面曲線の測定長さ当たりの曲線長さを比較

2-2 洗浄性向上に効果的なF研磨処理条件の選定課題への対応

【2-1】 洗浄時における汚れのはく離に効果的な処理条件の選定

プレート洗浄時における汚れのはく離に効果的な処理条件の選定を行うため、異なる条件で処理した試験プレート（ステンレス板）上に擬似的な汚れの層を形成させ、流水によるはく離のしやすさについて検討した。また、最適な処理条件は、汚れの種類によってF研磨の効果が変わることが予想される。そこで、スラリーから形成した汚れ、糊状の汚れ及び析出物由来の疑似的な汚れを用いて最適処理条件の絞り込みを行った。

F研磨処理条件として粗い方からF-2、F0、F2、F4の4つと比較材としてバフ研磨（鏡面研磨）したものもあわせて用いた。スラリーから形成した汚れ層には、シリカ粉末（公称粒径：2 μ m）と市販の片栗粉を用いた。シリカ粉末は、水道水を用いて0.1wt%シリカ粉末スラリーを作製し、超音波洗浄器を用いて攪拌後、研磨面を上面向けて試験片を4日間浸漬した。同様に片栗粉は、水道水を用いて20wt%の片栗粉スラリーを作製し、研磨面を上面向けて試験片を2時間漬けた。所定の時間浸漬後、液中から静かに引き上げ、室温大気中で乾燥させた。

洗浄性の評価については、2通りの方法を試みた。一つ目の方法は、堆積させた試験片を水中にサーボモーター用いて10~20mm/sで垂直に浸漬・引き上げを最大10往復繰り返しの洗浄性の差異を重量変化及び目視観察から評価した。2つ目の方法は、流水を用いた方法である。今回は予備試験としてシリカ粉末を用い、45°に傾けた試験片に開栓量一定、10秒間の条件で水道水を流し、洗浄性の差異を評価した。片栗粉についてはポンプを用いて、水道水を250ml/minで30秒間、45°に傾けた試験片の洗浄を行い、目視による評価を行った。なお、この条件で汚れの層の除去を行えなかった場合は、水道を用い、開栓量一定で10秒間の洗浄を行った。

(1) スラリーから形成した汚れの洗浄性について

まずシリカ粉末を用いた試験片を1つ目の評価方法である浸漬・引き上げ試験を行った。その結果、重量、目視による変化は非常に少なく評価困難であることがわかった。そこで次に流水による洗浄で評価を行った。図2-1-1にシリカ粉末の場合の流水による洗浄後の表

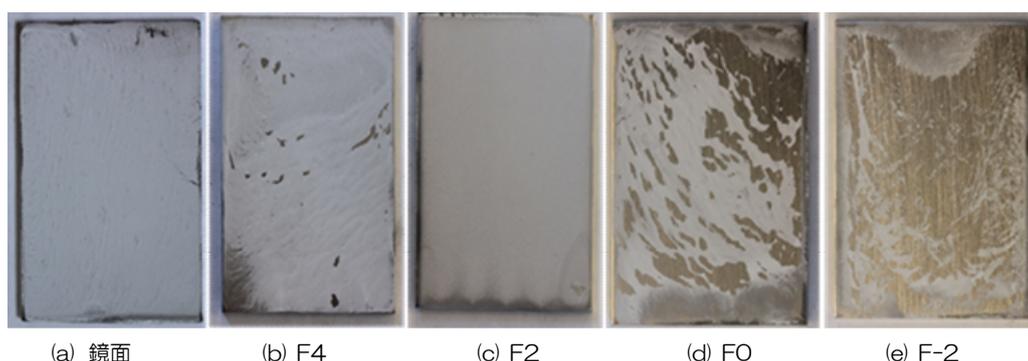


図2-1-1 流水洗浄後の試験片表面の様相（シリカ粉末を用いた汚れ）

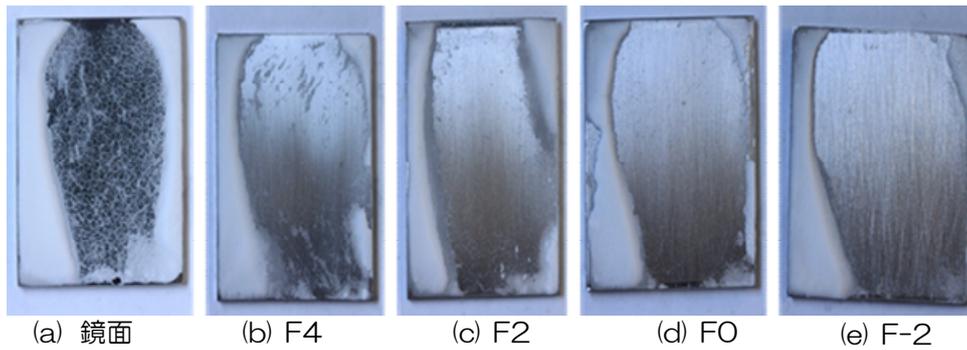


図 2-1-2 流水洗浄後の試験片表面の様相（片栗粉スラリーを用いた汚れ）

面観察結果を示す。なお重量変化は非常に小さかったため省略する。鏡面研磨、F4 研磨、F2 研磨では堆積層がほとんど取り除かれず、目視による変化は非常に小さく洗浄性が悪いといえる。一方、粗い表面である FO 材と F-2 材では堆積層が明確に除去され、とりわけ F-2 材では広範囲にわたって鋼板が露出していることが分かる。したがって、シリカ粉体からなる堆積層には表面が粗いほど効果が出るのが分かった。

次に片栗粉を用いた評価、図 2-1-2 に流水による洗浄後の表面観察結果を示す。なお、シリカと同様に重量変化は非常に小さかったため省略する。周囲から片栗粉については、同図から、鏡面研磨材では堆積層の上部は取り除かれるものの、片栗粉が薄く残存していることが分かる。一方、全ての研磨処理材では、堆積層の状態が変わっていることが分かる。特に、F-2 材では最も洗浄性が向上しているのが分かる。したがって片栗粉にも研磨が粗い方が効果的である。

以上よりシリカの粉体、片栗粉どちらも研磨の粗さが大きい条件で洗浄性が向上する可能性が高いことが分かった。

（2）糊状の汚れの洗浄性について

膜状の汚れとして熱湯で糊化させた片栗粉を鋼板上に形成して前述（1）と同様の評価を行った。糊化片栗粉については、水：片栗粉粉末の重量比が 40：1 となるように水溶き片栗粉を沸騰水で攪拌し片栗粉を糊化させ、汚れ層の判別ために赤色の絵の具で着色した。研磨面を上面に向けて試験片を 1 日間漬け、試験片に汚れ層を形成させた後、室温大気中で 1 日間自然乾燥後、洗浄性の評価を行った。水道の開栓量一定にして 45° に傾けた試験片を 30 秒間流水洗浄し、鏡面研磨材と F-2 材、FO 材、F2 材、F4 材の洗浄性の差異を比較した。また、室温大気中で 3 日間自然乾燥後の剥離度合いを 1 日おきに観察した。

図 2-1-3 に糊化させた片栗粉を用いた場合の洗浄後の表面観察結果を示す。同図から片栗粉の落ち方に違いはなかったが、鏡面よりも F-2 材では空気層が多くできており空気層がある場所も鏡面では試験片の端だけであるのに対し F-2 材では全体的に広がっているの

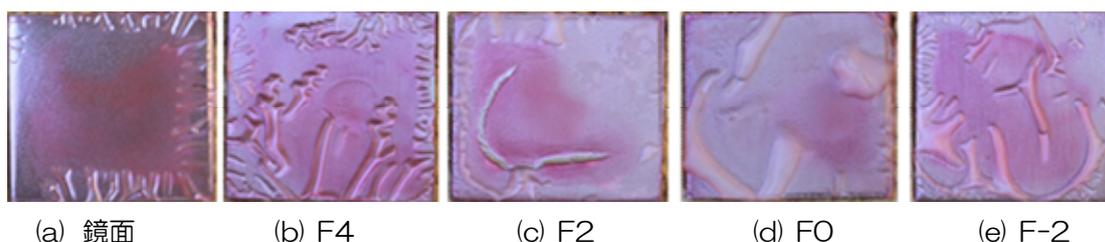


図 2-1-3 流水洗浄後の試験片表面の様相（糊化させた片栗粉を用いた汚れ）

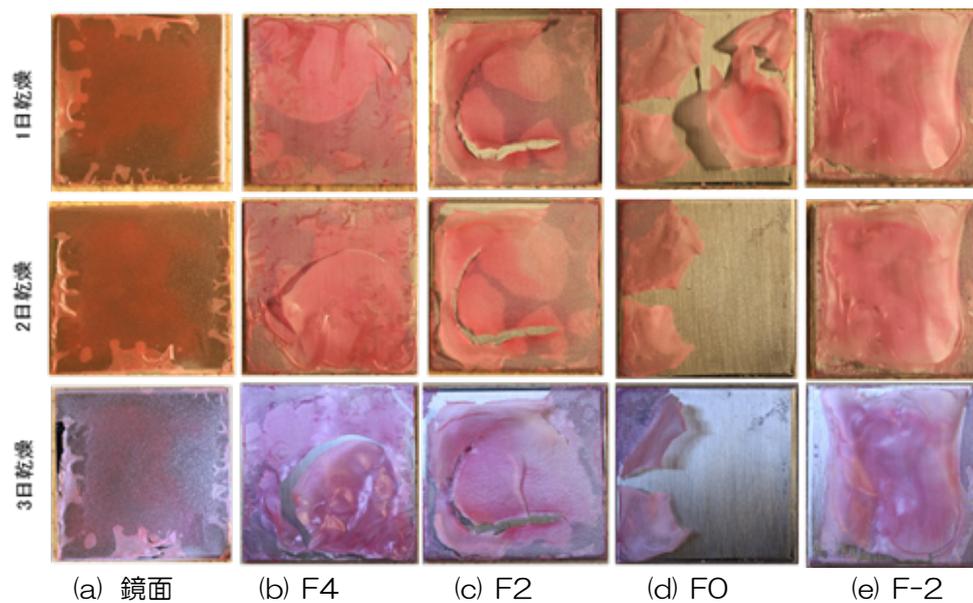


図 2-1-4 流水洗浄後の試験片表面の経時変化の様相（糊化させた片栗粉を用いた汚れ）

がわかる。また、F4 材では細かい空気層が多く形成されており、F2 材では洗浄前に剥がれている部分があるものの空気層はあまり形成されない。FO 材では大きな空気層が形成されている。このように F 研磨を施しても流水のみで汚れ層全体のはく離は生じないが、鋼板と汚れ層の間に部分のはく離を生じやすくなることがわかった。この原因として F 研磨によって形成された微細な溝部に水が浸入し、そこから膜が剥がれ始めていることが予想される。

洗浄試験後にそれぞれの試験片を 3 日間自然乾燥させた。その結果を図 2-1-4 に示す。FO、F-2、F2 材では板から糊化した片栗粉がはく離していることがわかる。特に FO 材では 1 日目の時点でほとんどの部分が剥離していることがわかる。これに対して、F4 材と鏡

【ドライヤーによる短時間乾燥後】



【流水洗浄後】



(a) 鏡面 (b) F4 (c) F2 (d) FO (e) F-2

図 2-1-5 短時間乾燥させた後、流水洗浄した試験片表面の様相（糊化させた片栗粉を用いた汚れ）

面研磨材ではわずかにはく離が生じるものの糊化した片栗粉の多くは板面に残存した。特に鏡面研磨材では部分的なはく離も生じず、板面に密着したままであることがわかった。

しかし、実機では通常、長時間の乾燥工程は行わない。そこで、糊化片栗粉を鋼板上に堆積させた後、ドライヤーで短時間乾燥後、ポンプを用いて水道水を 250ml/min で 30 秒間洗浄した。その結果を図 2-1-5 に示す。FO、F4 材では流水洗浄によってほぼ片栗粉が剥離していることがわかる。また、F-2 材ではわずかに片栗粉が残っていることがわかる。これに対し、F2 材及び鏡面材では大部分の片栗粉が表面上に残存していることがわかる。

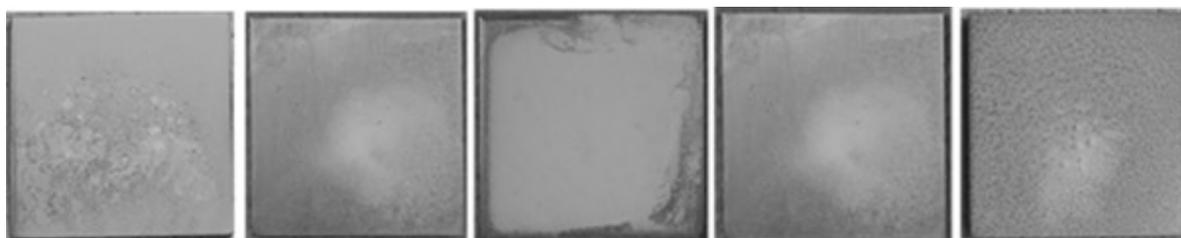
以上のように糊化させて糊状とした汚れについても F 研磨の優位性が確認できた。しかし、スラリーから形成した汚れの場合とは若干異なり、処理条件と洗浄性に間に一定の傾向を認めることはできなかった。

(3) 析出物による汚れの洗浄性について

析出物由来の汚れを鋼板上に形成して上述の(1)及び(2)と同様の評価を行った。なお、析出物由来の汚れとして炭酸カルシウムを鋼板上に析出させたものを用いた。なお、炭酸カルシウムは、鋼板を浸漬した炭酸ナトリウム溶液を 60°C 程度に予熱した後に塩化カルシウム、塩化ナトリウムを数秒間で投入することで得た。その後、溶液中から引き上げ、室温大気中で自然乾燥させて洗浄性の試験に用いた。洗浄性の評価は、45° 傾けた試験片にポンプを用いて水道水の流量 250ml/min、30 秒間流すことで行った。

図 2-1-6 に炭酸カルシウムの析出物を用いた場合の洗浄前後の表面観察結果を示す。同図から、鏡面材を含めた全ての試験片において、汚れ層の上部は洗い流されるものの、鋼板表面に接する汚れはほぼ全面に残存している様子がわかる。また、洗浄性について処理条件

【洗浄前】



(a) 鏡面

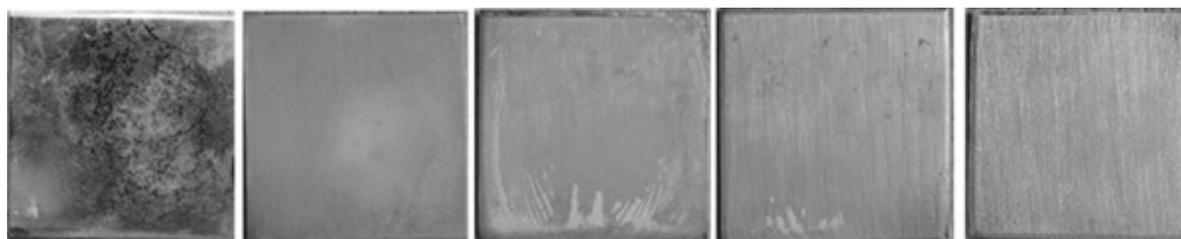
(b) F4

(c) F2

(d) FO

(e) F-2

【洗浄後】



(a) 鏡面

(b) F4

(c) F2

(d) FO

(e) F-2

図 2-1-6 流水洗浄後の試験片表面の様相（炭酸カルシウムによる汚れ）

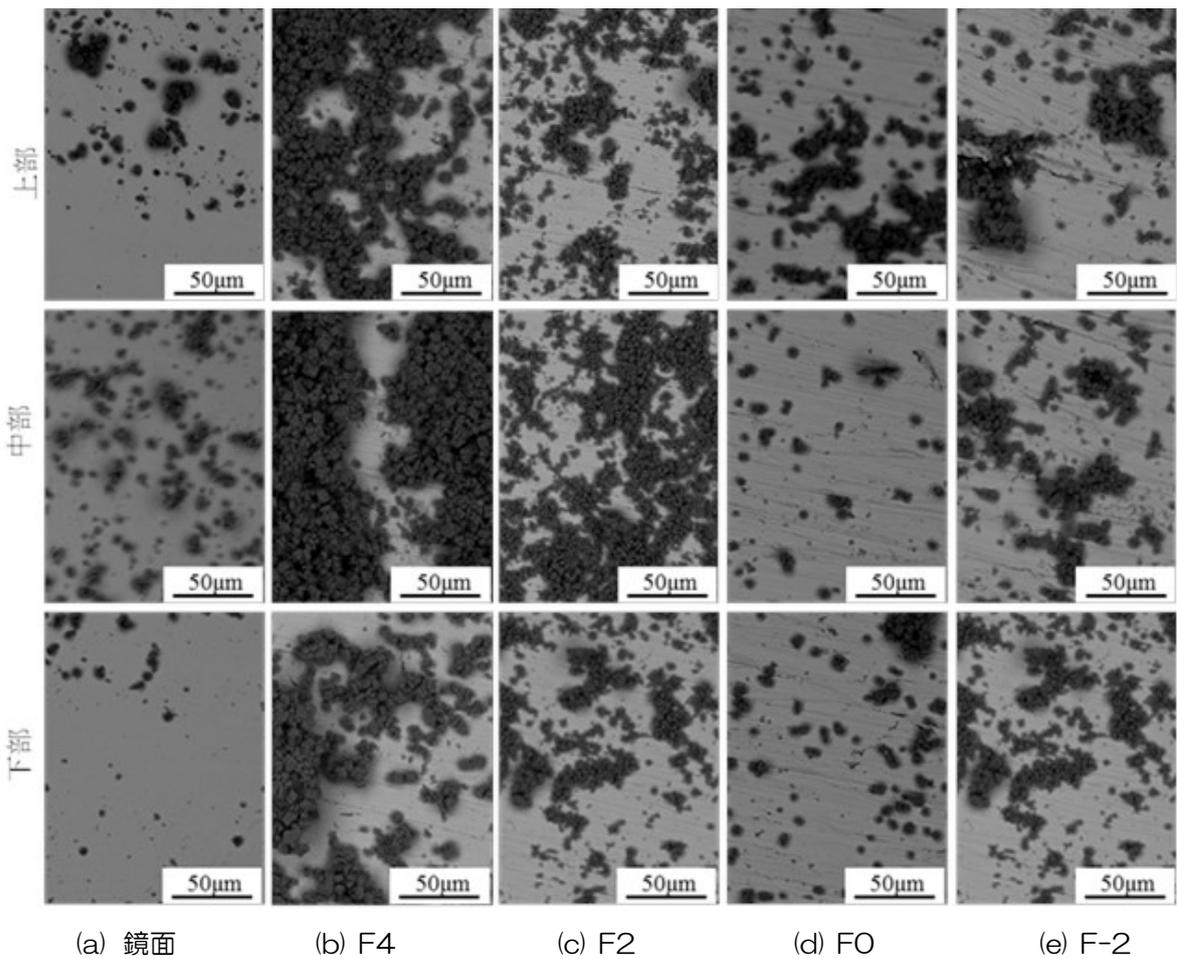


図 2-1-7 流水洗浄後の試験片表面のSEM 観察結果（炭酸カルシウムによる汚れ）

ごとに優位さは認められない。そこでより詳細な観察を行うため、洗浄後の表面を走査型電子顕微鏡（SEM）によって観察した。観察は流水試験時の上流、中流及び下流の3点で行った。その結果を図 2-1-7 に示す。図中、流水方向は左から右に対応している。同図から、F 研磨を施しても炭酸カルシウムの析出物を効果的に除去できていないことがわかる。とりわけ F4 材と F2 材では多量の析出物が強固に付着したまま鋼板表面上に残存しており、鏡面研磨材よりも洗浄性に劣ることがわかる。これは F 研磨による加工痕が炭酸カルシウムの結晶の核の形成を助長したためと考えられる。

以上のように、スラリーから形成した汚れと糊状の汚れの場合、F 研磨は洗浄性を向上に効果的であることが明らかになった。しかし析出物由来の汚れについては、F 研磨の優位性は表れず、処理条件によってはむしろ洗浄性が悪化することが明らかとなった。洗浄時の剥離に対する効果をまとめたのが、図 2-1-8 である。このように洗浄性に効果の出る処理条件について、汚れの種類ごとにおおまかな絞り込みを行う事ができた。

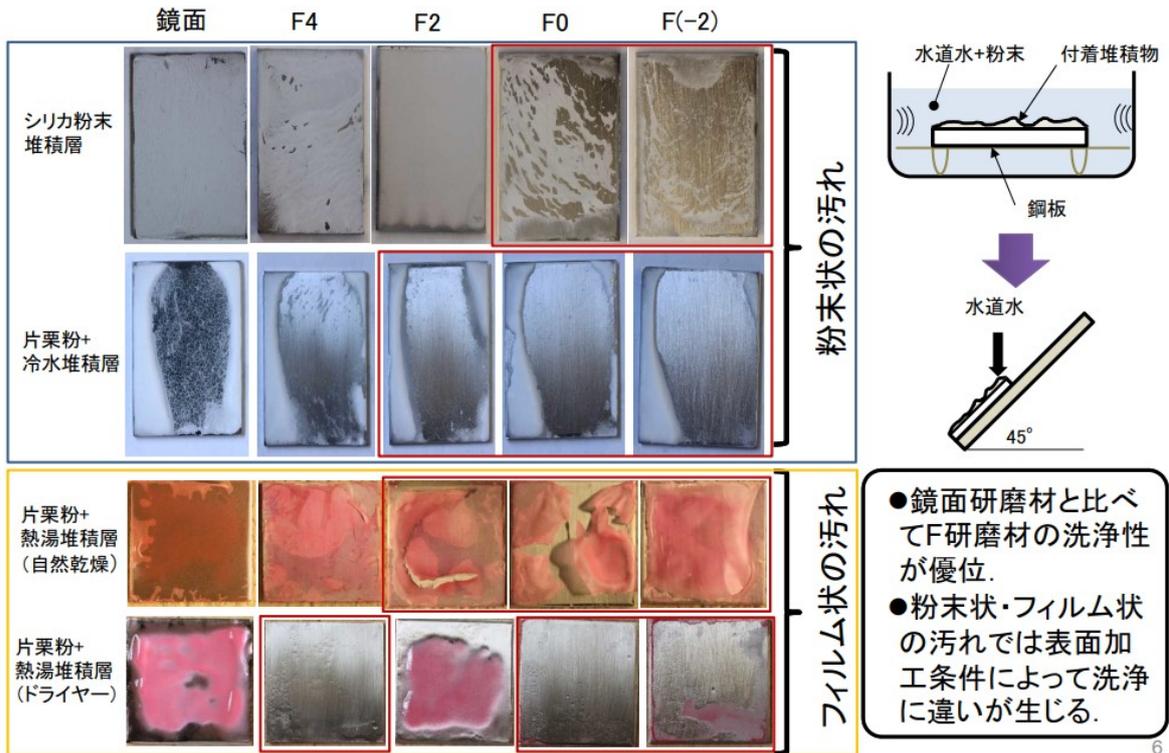


図 2-1-8 洗浄時の剥離効果のまとめ

【2-2】洗浄性に効果的な加工条件のデータベース化

これまでの研究開発において、F 研磨を施したステンレス鋼プレートの表面凹凸状態の分布を評価し、表面凹凸状態と伝熱特性との相関を調べた。F 研磨の表面粗さのグレードを F(数値)として表現し、伝熱特性で効果があった FO 研磨においては、その凹凸差は $1 \mu\text{m}$ の範囲にあり、F-2 の F 研磨プレートは、FO 研磨プレートと比較して細かい凹凸が多く見られ、その凹凸差は $2\sim 4 \mu\text{m}$ であることを明らかにしてきた。

図 2-2-1 には、触針式表面粗さ計による各種 F 研磨仕上げ面の表面粗さの測定結果を示しており、算術平均粗さ(Ra)、最大高さ粗さ(Rz)、突出山部高さ(Rpk)ともに、表面粗さが増加するにつれて大きくなっていることが確認できた。

プロジェクト開始当初では、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて微小高さ領域での表面粗さを計測することを念頭に、伝熱特性や研磨条件と相関を行う予定であった。これまでの研究開発2年間において、気化条件下や液相状態下での伝熱性能を向上させた表面状態は、数ミクロンレベルの荒い表面であることがわかってきており、AFMが測定できるナノレベルの凹

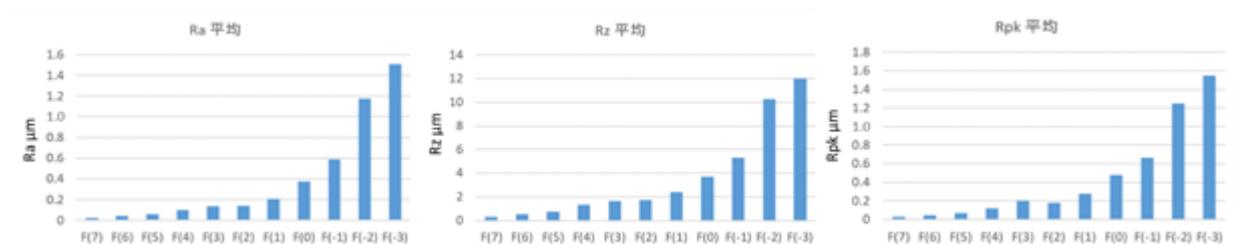


図 2-2-1 触針式表面粗さ計による各種 F 研磨仕上げ面の表面粗さ

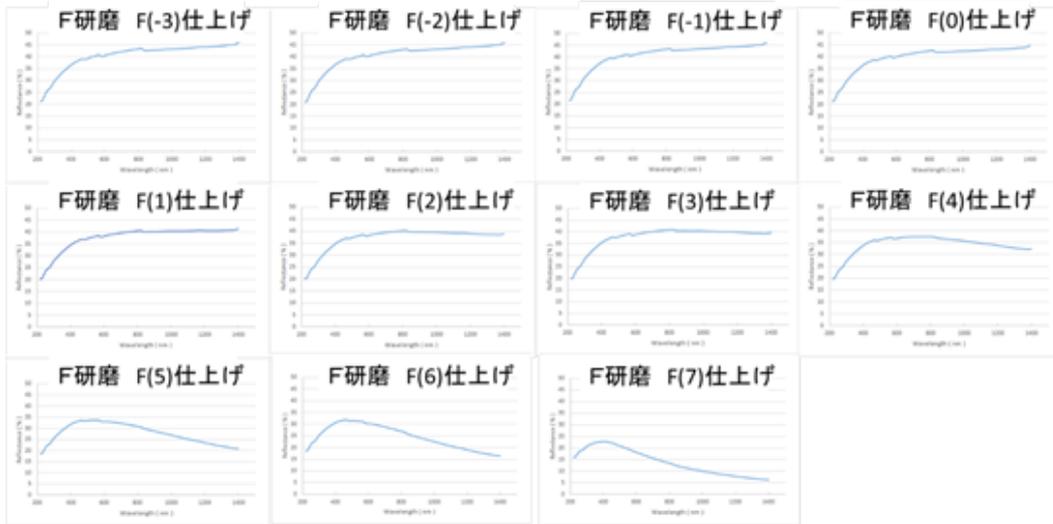


図 2-2-2 分光光度計による各種 F 研磨仕上げ面の反射率測定結果

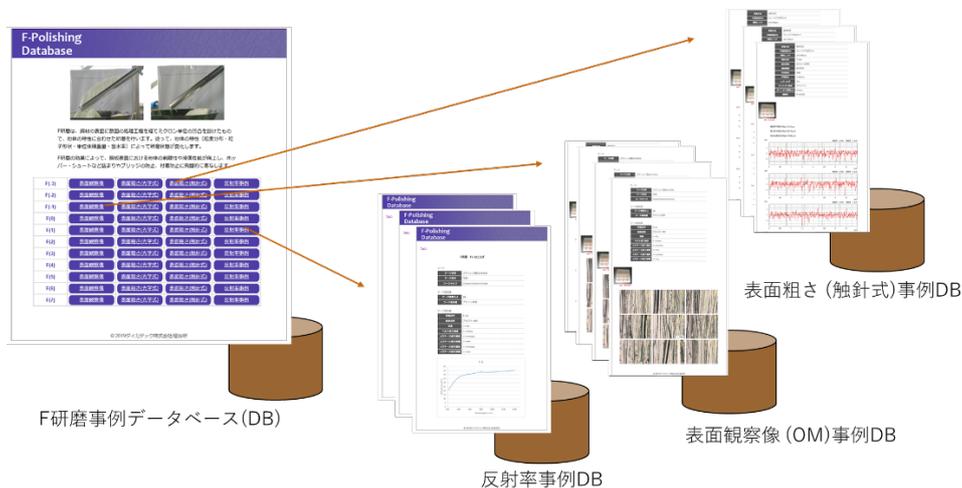


図 2-2-3 F 研磨データベース

凸を測定することができないことがわかった。そこで、数ミクロンでの評価法として、分光光度計を用いて反射率としてミクロンレベルで測定することを選択し、表面状態に関するより深い解釈と知見を得ることとした。

図 2-2-2 に、各種 F 研磨仕上げ面に対して、分光光度計による反射率測定結果を示す。紫外・可視光領域の波長を固体試料に照射し、その反射スペクトルを測定することで、表面の凹凸に関する情報が取得可能である。F-3 から F3 については、反射率が紫外線領域から可視光領域に上昇時、45%程度で可視光から赤外領域までほぼ一定であったのに対して、F4 から F7 につれて、近赤外領域の 800 nm から反射率ピークが落ち始め、表面粗さが増加するにつれて反射率のスペクトルのピークが低波長側に移動し、可視光領域において反射率の低下傾向があることがわかった。これは、基材表面が平坦になるにつれて、光の散乱が減り、反射率としては特に可視光領域が低くなっていると考えられる。反射率測定では、平坦な面の領域では凹凸のレベルを光の散乱を利用して F 研磨の仕上げグレードを評価することができるが、伝熱特性の効果があった凹凸表面では F 研磨面の仕上げグレード評価は困難であることが確認できた。これにより、伝熱特性についての研磨面の仕

上げグレードは、触針式の表面粗さ計を用いて保証することが重要であると決定できたといえる。

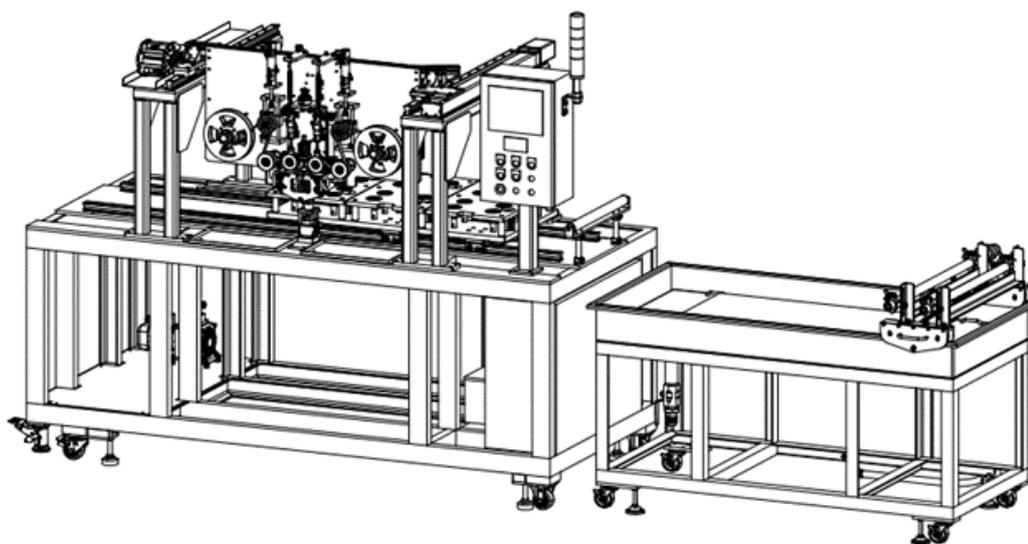
F 研磨データベースは、F 研磨の研磨面仕上げに対して、「(触針式の) 表面粗さ」、「表面観察像」、「(光学的) 反射率」の各種評価データを事例化し、加工事例のデータを蓄積、閲覧可能とするウェブベースのソフトウェア開発を行った (図 2-2-3)。

2-3 自動処理装置の試作

【3-1】自動処理装置の試作

手作業による加工法では、加工時間・品質のばらつきに関して課題があるため、手作業の動作を機械化した F 研磨処理の自動処理装置を製作した。この装置によって試験鋼板を作成し、この鋼板面の凹凸形状に評価を加えながら装置の改良を実施した。また、自動処理した F 研磨処理鋼板プレートの表面を洗浄するための機構を追加し、自動処理～洗浄作業～処理鋼板面の評価までの一連の作業の時間短縮を試みた。

自動処理装置とその処理鋼板面を洗浄するための装置、その全体図を図 3-1-1 に示す。研磨プレートをセット～研磨方向に移動させるための架台 (三分割ステージ) と研磨テープのセット～自動送りを行う研磨装置ユニット (ローラーヘッドユニット) から構成される。洗浄装置は、研磨された鋼板面の削りカスや汚れの水洗いと空気圧による乾燥を行う。



＜自動研磨装置＞

＜洗浄装置＞

図 3-1-1 自動処理装置全体図

(1) 自動処理装置の検証

自動処理装置を駆動させることで下記のような問題が発生した。

- ① コンプレッサーの振動によって研磨加工用ローラーヘッドの接地圧、その荷重計の値にバラツキが発生。 → 防振対策と制振装置付きコンプレッサーと交換。
- ② 研磨テープのテンションで上記と同じく、接地圧が変化する。 → テープ送り機構とその固定方法の改良。
- ③ 鋼板をセットするための三分割されたステージ面に高低差があり、これによってセットした鋼板 (SUS 材) に微小な変形が発生する。(図 3-1-2、図 3-1-4、図 3-1-5) → ローラーヘッドの押しえ圧による鋼板面の変形はない。但し、図 3-

1-3 に示すとおり鋼板自身の板厚誤差とうねりがあるため、総合的にこの影響を吸収（追従）できる構造の検討が必要。

- ④ ヘッド接地圧（荷重計）のバラつきは、セットした時のZ軸（上下方向）のバラつきが原因である(図 3-1-6)。 → ローラーヘッド部の上下昇降ガイドの摩擦、昇降用エアシリンダーの空気圧を0（フリー）にした際のシリンダーロッドの摩擦抵抗、これらの影響を無くすこと。
- ⑤ Z軸位置と接地圧の荷重計との関係は線形である(図 3-1-6)。このため、上記セットしたローラーヘッド先端（Z軸位置）の誤差を吸収できるローラー材質またはローラーヘッドユニット全体の自重を制御できる構造を検討すべきである。 → ローラーヘッド材質を柔らかい剛性の低いものにした場合、研磨テープのローラーからのズレが発生し易くなり、長時間運転ではそのズレの蓄積でテープの外れが発生した。
- ⑥ 板をセットするステージ面の中央部が0.25 mm下がっていること（加工精度）。
- ⑦ 購入した板厚3mmの鋼板には、2.855~2.871mmの板厚差（JIS G4305±0.22 mm）があり、且つ微妙ではあるがうねり面も有していること。
- ⑧ ローラーヘッドの繰り返しセット位置の再現性をピックテストで測定（10回）した結果、0~0.06 mmのバラつきが発生した(図 3-1-6)。この値は、ローラーユニットの自重による接地圧を0~320 g 変化させる致命的なものであった。このバラつきは、上下運動時に発生するスライドガイド部分の摩擦抵抗にあることが判った。
- ⑨ 長時間の運転で、ロール研磨紙の位置がローラーヘッドから徐々にズレ、最終的には外れて破断する問題が発生した。この原因は、上下移動時のガイドのガタツキが要因でガイド位置とローラーユニットの重心ズレが影響していた。また、ローラー材質は剛性の低いウレタン系の方がこの影響を受け易いことが判明した。

これらの課題を解決するために、下記の改造を実施した。

- ① 鋼板面の上下変化を吸収できる構造、ローラーヘッドの先端が上下自由になるようにユニット全体をバネで吊り下げる構造に改造。
- ② ガイド部分を抵抗の少ないガイドローラーに変え、且つ、ユニット重心とガイドローラーの位置ズレによる偏心モーメントが小さくなる配慮を行った。

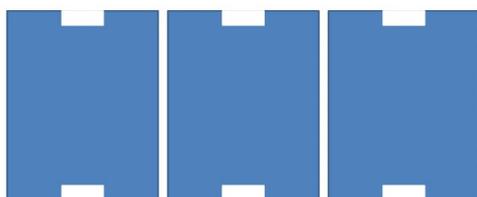
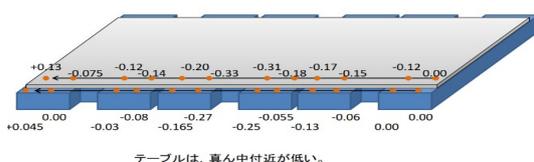


図 3-1-2 三分割ステージ



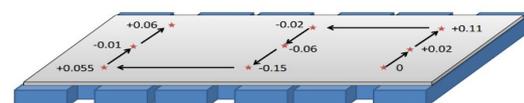
シャーリングによる切断部のダレ等も気になる

図 3-1-3 鋼板の板厚



テーブルは、真ん中付近が低い。

図 3-1-4 ステージと鋼板面



シムによる高さ調整
or
テーブルを一枚板に。
(機械加工仕上げ)

図 3-1-5 鋼板面



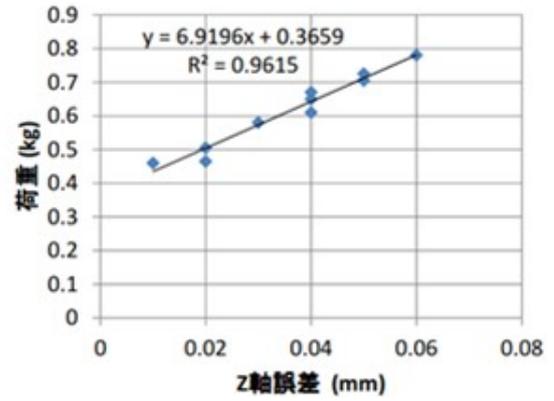


図 3-1-6 ピックテストによる Z 軸誤差測定の様子(左)とその結果(右)

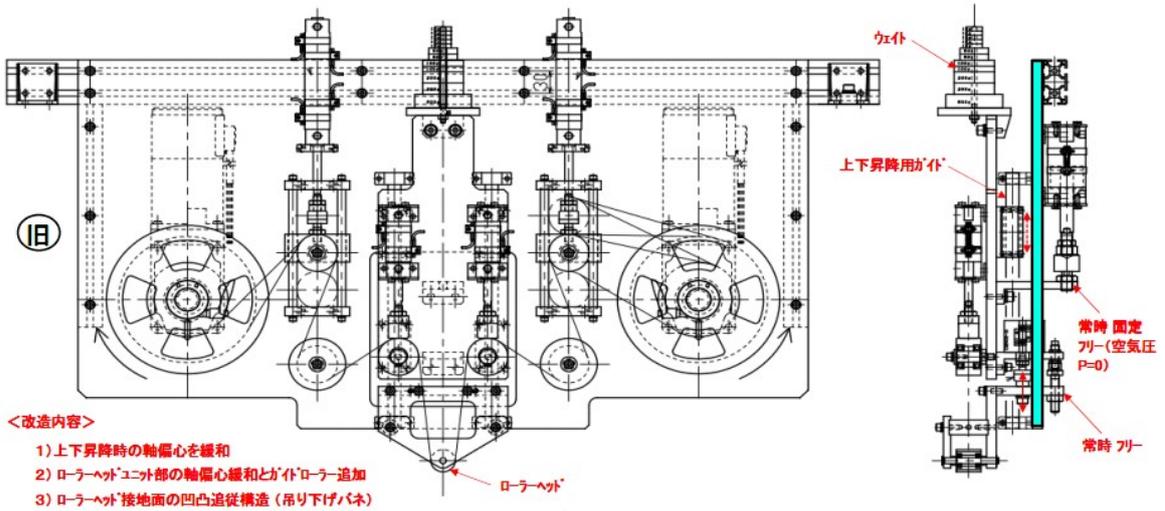


図 3-1-7 初期の自動処理装置

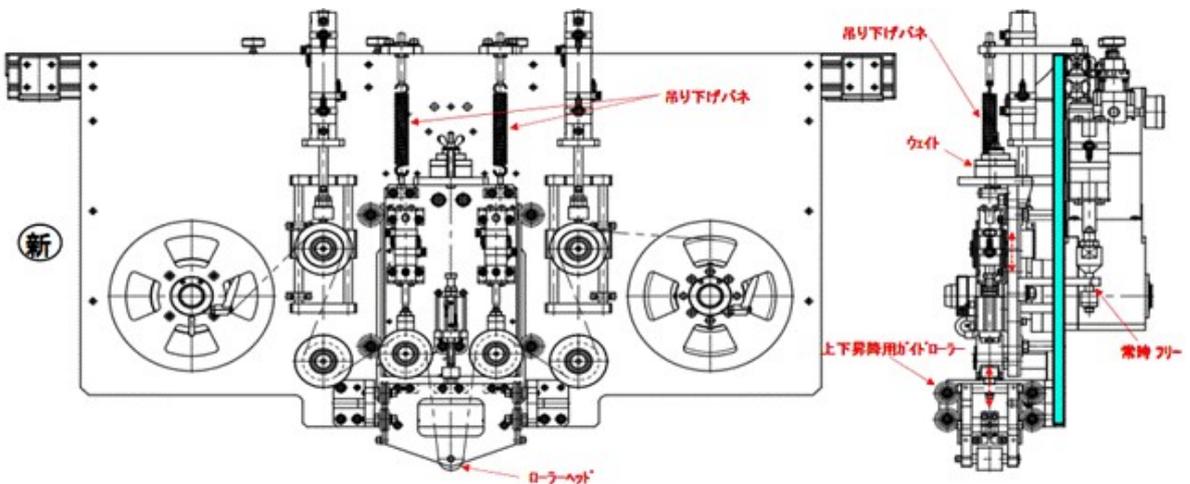


図 3-1-8 改良後の自動処理装置

【3-2】 処理条件と表面形状のデータベース化

自動処理装置で作成した鋼板の表面形状（凹凸形状）を触針式表面粗さ計で測定し、手作業による従来の鋼板との算術平均粗さRaについてデータを比較し、今回処理鋼板の手加工と自動処理装置による鋼板に関して、レーザー顕微鏡による波長VS波高/波長比についてデータベース化を実施した。

触針式による測定値は、その先端径の関係から凹幅 $1\ \mu\text{m}$ 以下については正確な凹み深さを表しているとは言い難い（図3-2-1）。一方、レーザー顕微鏡による測定値は、レーザーの波長が408nmであることから精度は高いといえる。しかしながら、得られたデータは、深さ方向の変動が激しくF研磨近傍の番手と重なり、その番手違いを判断するには見辛いことが判明した。一方、触針式は、実際よりも滑らかな凹凸形状（図3-2-1 赤破線）を表すことになるが、極端な凹み部分がカットされて表面粗さ形状がシンプルに表され、F研磨処理番手の違いが大局的に判断できた。レーザー顕微鏡と触針式表面粗さ計の結果を比較すると、当然ではあるが波高/波長比においてレーザー顕微鏡測定値の方が大きくなる。すなわち、一定の処理条件で製作するF研磨加工では、表面形状の再現性を確認することが主目的であり、このため従来通り触針式による測定データで統一することにした。

また、手加工と自動処理の表面粗さ比較（図3-2-2）では、F-1～F7では略近い加工精度が得られていると判断され、F-2では、凹みが大きいことから自動処理装置の押え荷重を軽減すべきと判断された。

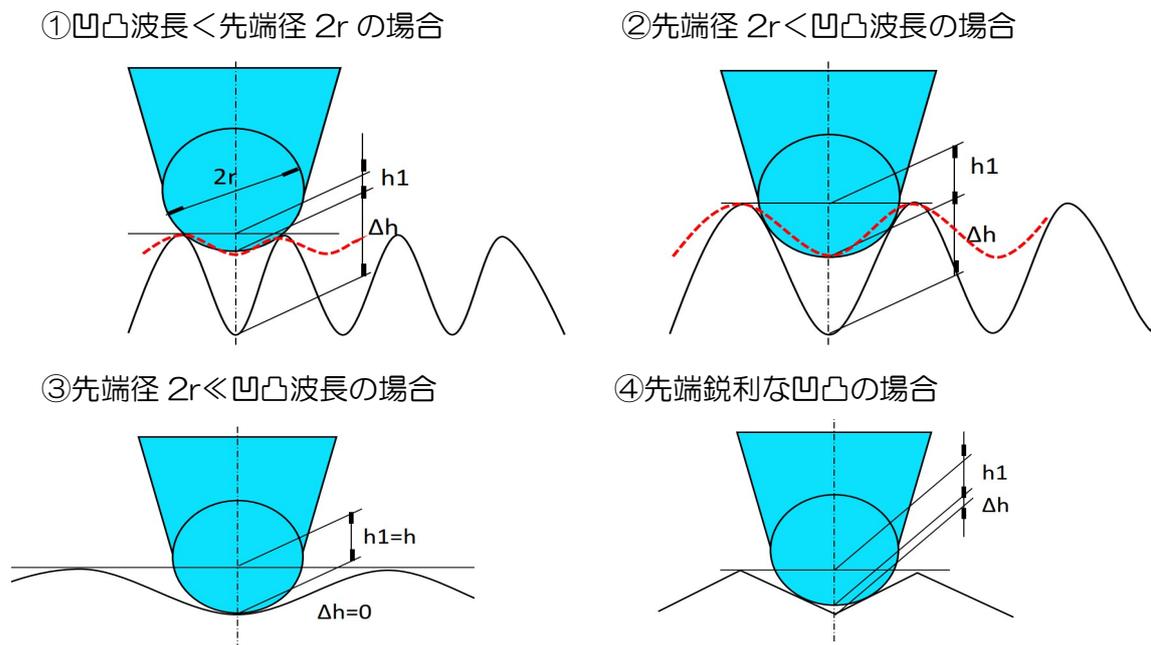


図3-2-1 触針式表面粗さ計の精度

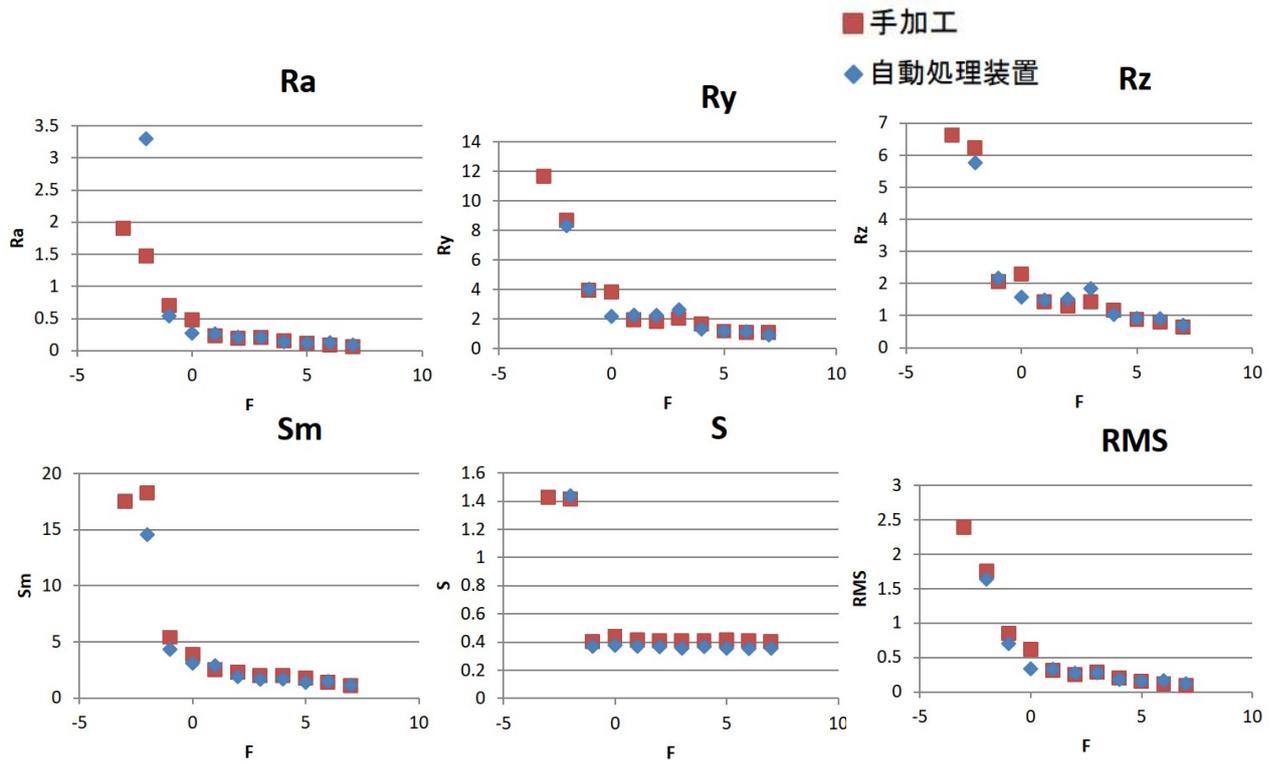


図3-2-2 【手加工】と【自動処理装置】の表面粗さ比較

2-4 実証実験

【4-1】 実証実験

実証実験の実験内容は、①F 研磨処理による熱交換器プレート面の汚れ付着抑制と洗浄性向上への効果についての実証実験と②熱交換器プレート面のF 研磨処理有無による伝熱特性の向上に関する実証実験の二つを実施した。

【4-1-1】 F 研磨処理によるプレート面の汚れ付着抑制と洗浄性向上への効果

温水・冷水は、図 4-1-1 のようにプレートを挟んで対向する構造で、重ねたプレートは両端を締め付けることでパッキンが潰れ、波型形状の凸部は接触するようになる。

- ① 波型凹部を移動する流体は、先端が行止りのために対面プレート側に方向を変え、波型形状に沿って流れる。しかし、対面プレート側も行止りとなっているため、再度反対側の流路に戻る経路をたどり、全体の流れは、図 4-1-1 右図のようなシグザク状の形態となる。2 流体の流れは、完全向流で流速を大きくすることで高い乱流を発生させる構造であるが、逆に圧力損失からプレートの両端にデッドゾーンが発生し易くなる。

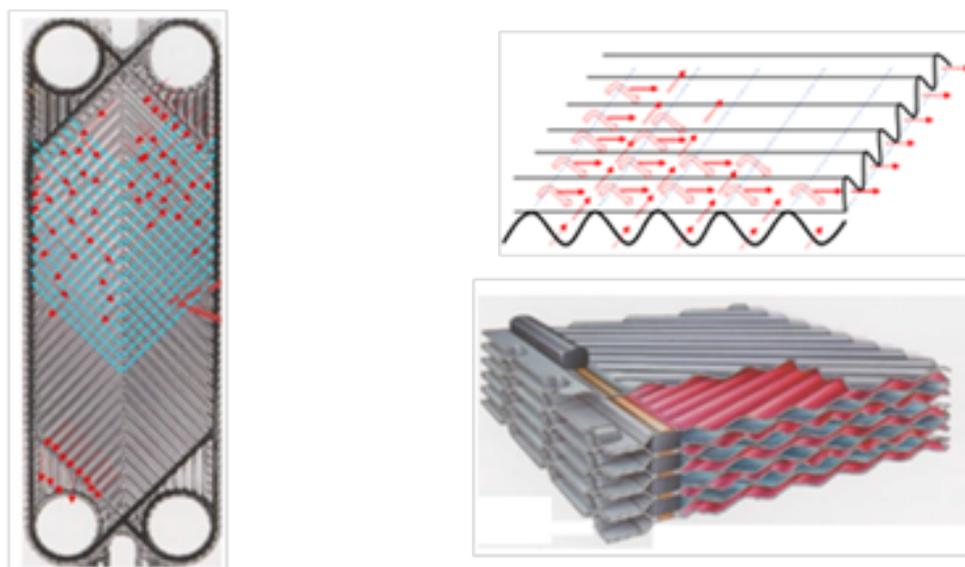


図 4-1-1 プレート組合せ構造

- ② 実際に設置されている熱交換器プレートについて 3 ケースの実証実験を実施した。洗浄した「既存のプレート」、「新品」、「新品+F 研磨処理」の 3 ケースで図 4-1-2 プレート面の汚れ付着状況（徳山積水工業（株）シリコン廃液）が示すように、プレート中央部を流体が流れることが判る。したがって、新品プレートとこれと対面する F 研磨処理プレートとの比較から、流体の流路であるプレート面には F 研磨処理による汚れの付着抑制の効果が伺え、当然ではあるが流路のデッドゾーンとなる部分については汚れ付着が発生する。



プレート面の汚れ付着状況①

blank

新品

新品+F研磨



プレート面の汚れ付着状況②

図 4-1-2 付着抑制効果実証試験結果

- ③ (株)MEPCOM 四日市の協力で樹脂ペレット製造ラインの冷却水(純水)に使用される熱交換器プレートで洗浄性比較を実施した。その結果を図 4-1-3 に示す。従来、高圧洗浄機でしか剥離しなかった汚れが F 研磨処理プレートでは、生活用上水道圧で剥がれ落ちる効果を確認できた。

ノーマル



FO 研磨



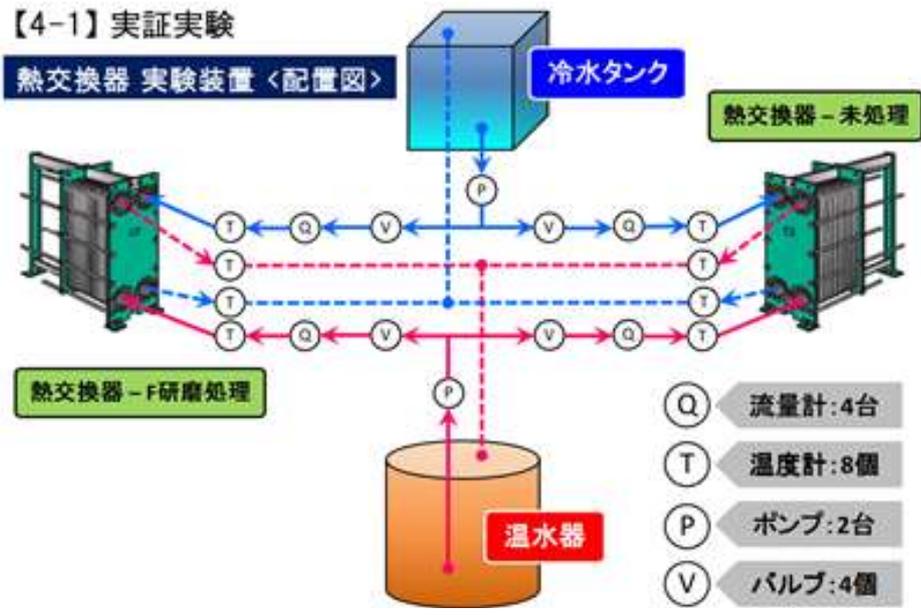
図 4-1-3 付着抑制効果実証試験結果

【4-1-2】熱交換器プレート面のF研磨処理有無による伝熱特性の向上

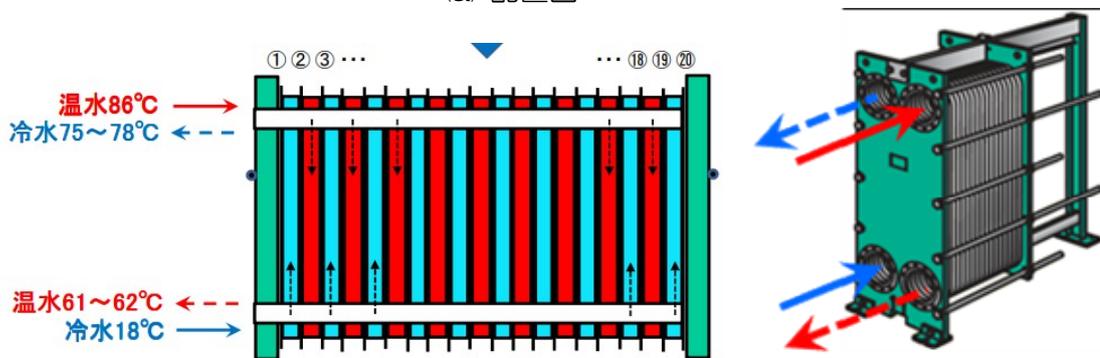
熱交換機2台、温水器、冷水タンク、圧送ポンプ等による実験装置（図 4-1-4）について、それぞれの機器性能に関して検証を行い、熱交換器2台の性能に関する互換性や測定器（流量計・温度センサー）の校正を実施した後、温水→冷水への熱伝達性能、即ち温水によるプレートを介した冷水出口温度を測定することで性能を検証した。熱交換器は2機種、プレート式熱交換器の他、プレートを渦巻状（スパイラルプレート）に巻いた長方形の流路を有するスパイラル式熱交換器についてF研磨処理の効果を確認した。

(1) プレート式熱交換器

温水器で作った82~85℃の熱水と冷水タンク約20℃の水道水をポンプで同時に熱交換器へ送り込み、熱交換器出口の冷水温度変化に着目して評価を行った。測定の時間差による周囲環境の影響を無くすため、配管をT字管で分岐させ2台の熱交換器（F研磨処理 有・無）のデータを同時に採集している。また、冷水流量を一定にし、温水流量を変化させた時の冷水出口温度を測定し、冷水流量については、 $Q=40\text{L}/\text{min}$ と $100\text{L}/\text{min}$ の2ケースとした。



(a) 配置図



(b) 熱交換器の構造

図 4-1-4 実験装置図

冷水流量 Q=40L/min における TNO.5 を代表例として測定結果を図 4-1-5 に示す。また、結果一覧を表 4-1-1 および表 4-1-2 に示す。温水タンクの容量から実験の測定時間は5分程度となったが、冷水出口温度が略安定するまでのデータを得ることが出来た。温水入口流量を横軸、鉛直方向を冷水出口温度としたグラフに冷水 Q=40L/min および 100 L/min における TNO.1~5, 6 をプロットしたものが、図 4-1-7 である。

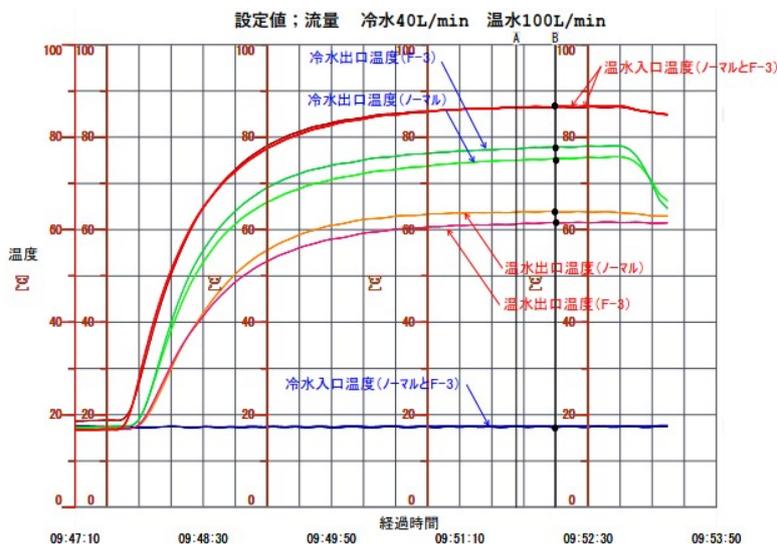


図 4-1-5 TNO.5 の測定結果

表4-1-1 【プレート式】冷水流量40L/min試験結果一覧

研磨状態	TNO.	日付	冷水流量	温水流量	温水入口温度 °C	冷水出口温度		効果 Δt °C	外気温度 °C	備考
			L/min	L/min		°C (バ 7)	°C (F-3)			
	1	10月30日	40	30	82	61	63	2.0	24	耐熱ホース配管
	2	11月13日	40	40	84	65	68	3.0	21	耐熱ホース配管
F-3	3	11月15日	40	60	83	69	73	4.0	24	耐熱ホース配管
	4	11月5日	40	75	84	72	77	5.0	26	耐熱ホース配管
	5	11月21日	40	100	87	75	78	3.0	23	耐熱ホース配管

表 4-1-2 【プレート式】冷水流量 100L/min 試験結果一覧

研磨状態	TNO.	日付	冷水流量	温水流量	温水入口温度 °C	冷水出口温度		効果 Δt °C	外気温度 °C	備考
			L/min	L/min		°C (バ 7)	°C (F-3)			
F-3	1	7月25日	100	40	83	49.5	50.5	1.0	26	SUS配管、熱電対変更
	2	7月23日	100	50	84	53	55.4	2.4	28	SUS配管、熱電対変更
	3	7月23日	100	60	81.6	55.76	57.58	1.8	28	SUS配管、熱電対変更
	4	7月23日	100	80	83.5	61.2	63.5	2.3	27	SUS配管、熱電対変更
	5	7月25日	100	100	84	66	67.5	1.5	29	SUS配管、熱電対変更
	6	7月29日	100	120	85.5	70	71	1.0	24	SUS配管、熱電対変更

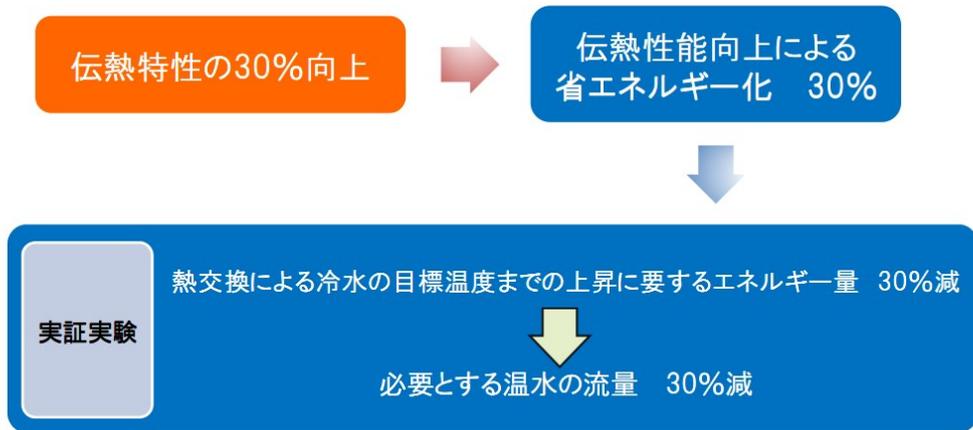


図 4-1-6 伝熱特性の向上と省エネルギー化

ところで、実証実験の目標は伝熱特性の30%向上、一方、川下ユーザーの受取り方は、伝熱特性の向上＝経済効果として理解されるため、今回の実証実験結果を川下ユーザーが理解し易いように“冷水温度を目標の温度に上昇（熱交換）させるために必要とする温水の流量、これを30%低減させることが伝熱特性の30%向上”と考えた（図 4-1-6）。

図 4-1-7 は、温水流量変化に対する冷水温度の上昇を表したもので、冷水温度を 74℃ まで上昇させるための温水流量は、（ノーマルプレート Q = 91 L/min）、（F 研磨処理プレート Q = 64 L/min）を読み取ることができる。その結果、温水流量はノーマルプレートに比べ $(91 - 64) / 91 \div 30\%$ 減の省エネ効果を達成している。

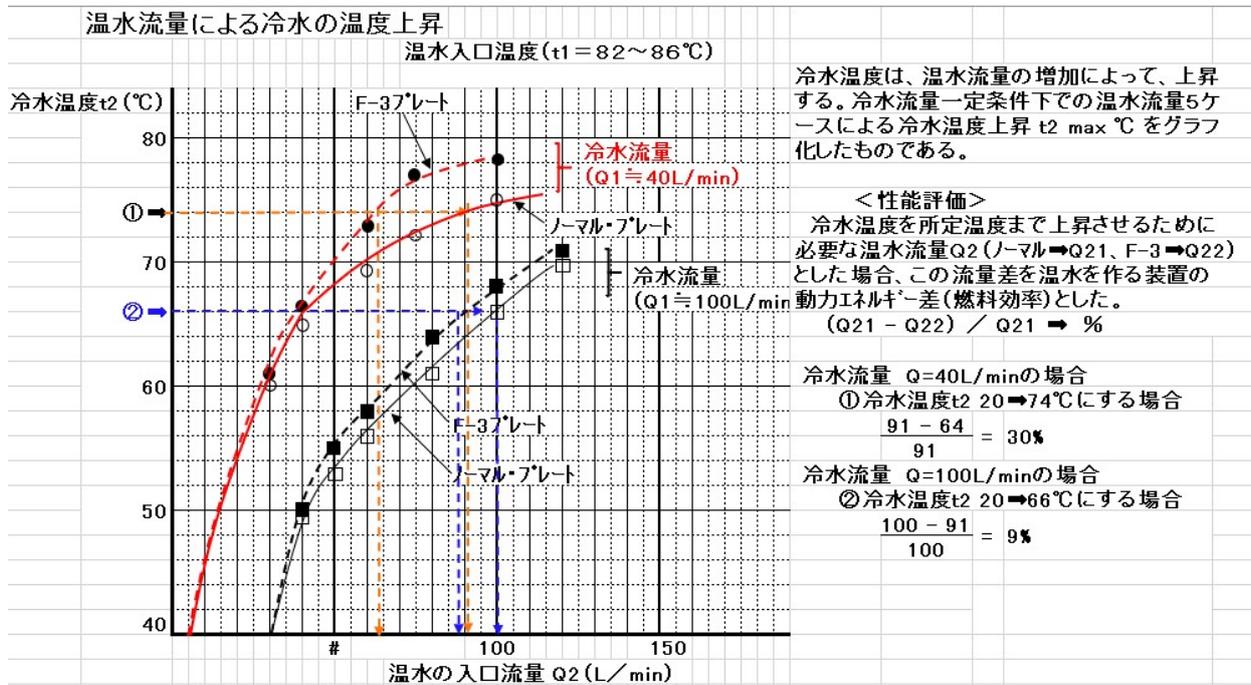


図4-1-7【プレート式】冷水の上昇温度と温水流量

また、熱交換器全体の伝熱特性は、その複雑な流路形態から流量（流速）によって変化し、当然ながら流速を増大しても伝熱特性が飽和することを図 4-1-7 から、温水流量の増加に伴う冷水の温度上昇から推察することが出来る。

一方、冷水流量（ $Q=100\text{L}/\text{min}$ ）の大きい範囲では、F 研磨の効果は小さい。この背景には流量が大きくなることで流速が増し、プレート表面のヘリボーン凹凸による影響が卓越してくるためと推察される。

（2）スパイラル式熱交換器

プレートを渦巻状（スパイラルプレート）に巻いた長方形断面の流路を有する熱交換器があり、プレート構造の熱交換器ではあるが、スパイラル式熱交換器として区分されている。このスパイラル式熱交換器のプレート表面はヘリボーン形状のような波型の障害物がなく平面であるため、繊維質などの夾雑物を多く含む工場排水（汚泥）では繊維の絡みつきによる詰まりが発生し難いという特長を持っている。したがって、流路が単一流路で流下形態がスムーズである点でF研磨処理の効果が出やすいのではないかと考え、その効果確認のために実験を実施した。

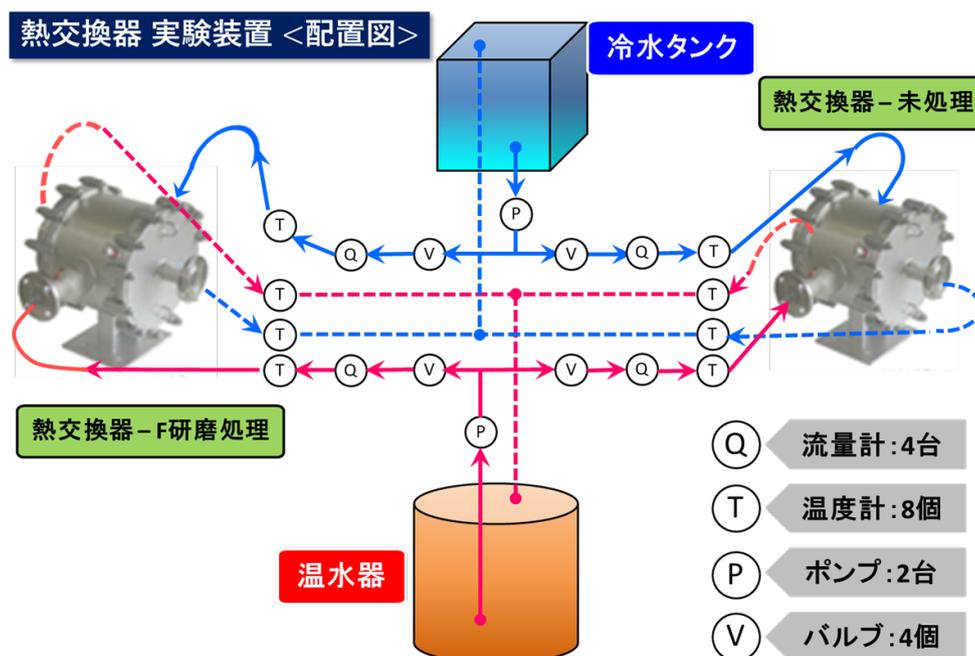


図4-1-8 【スパイラル式】実証実験装置の配置図



図4-1-9 【スパイラル式】実証実験装置



図4-1-10 【スパイラル式】熱交換器

スパイラルプレート2枚の両端を溶接接合した後の焼け取り用酸洗液がF研磨処理面に流れ込まないように注意を喚起したが、洗浄時に希薄された洗浄液がプレート面に流入し、F研磨処理凸部の鋭利な先端部分を溶解させてしまうことが判明した。しかし、これを修正加工するためにはプレート間にその隙間がなく、今後の製作においても回避できない構造であるため、そのまま実験を続行した。結果（図4-1-11～13）は、前述の影響があったとしてもF研磨処理の明らかな効果を見出すことが出来なかった。

最後に、スパイラル式熱交換器は、流路が単一流路でスケールが付着した際には流路断面積が小さくなることで流速が増大し、スケールを剥離する自浄作用が働くと言われている。しかしながら、現実はその構造上プレートの隙間に器具を挿入することは困難で、且つ全溶接構造のために分解も出来ないという洗浄不可の構造である。したがって、メーカーサイドの興味は、F研磨処理による汚れの抑制や洗浄性の改善にあったようである。

100ms/S 20s/Div (1)TH-CH06:冷水流量 = 10.00L/min/Div
2019/07/29 10:05:20.000000 2019/07/29 10:12:00.000000

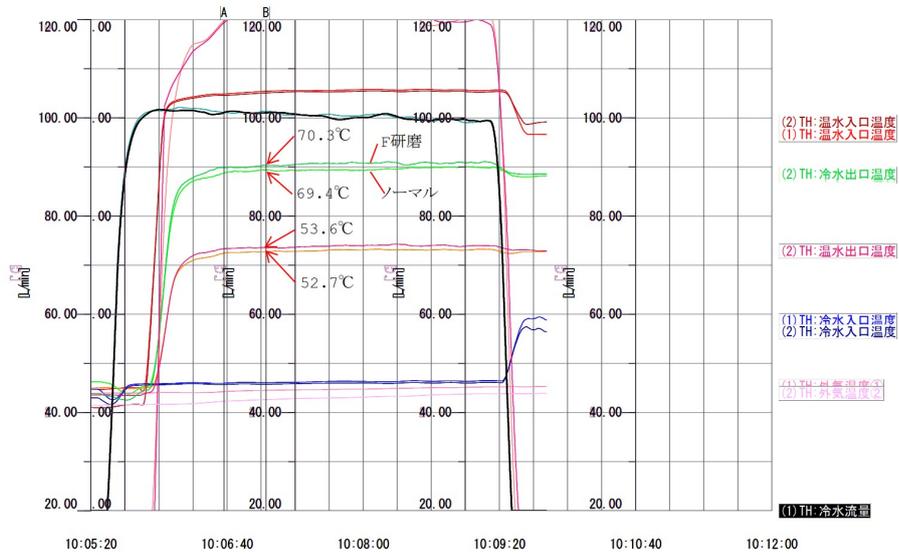


図4-1-11 流量 冷水100L/min 温水120L/min

100ms/S 20s/Div (1)TH-CH06:冷水流量 = 10.00L/min/Div
2019/07/23 14:07:22.000000 2019/07/23 14:14:02.000000

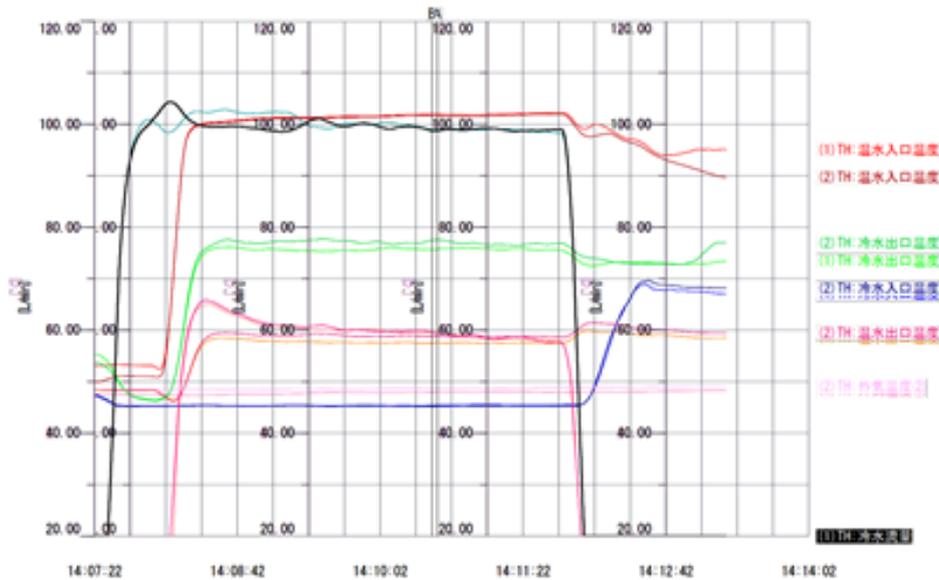


図4-1-12 流量 冷水100L/min 温水60L/min

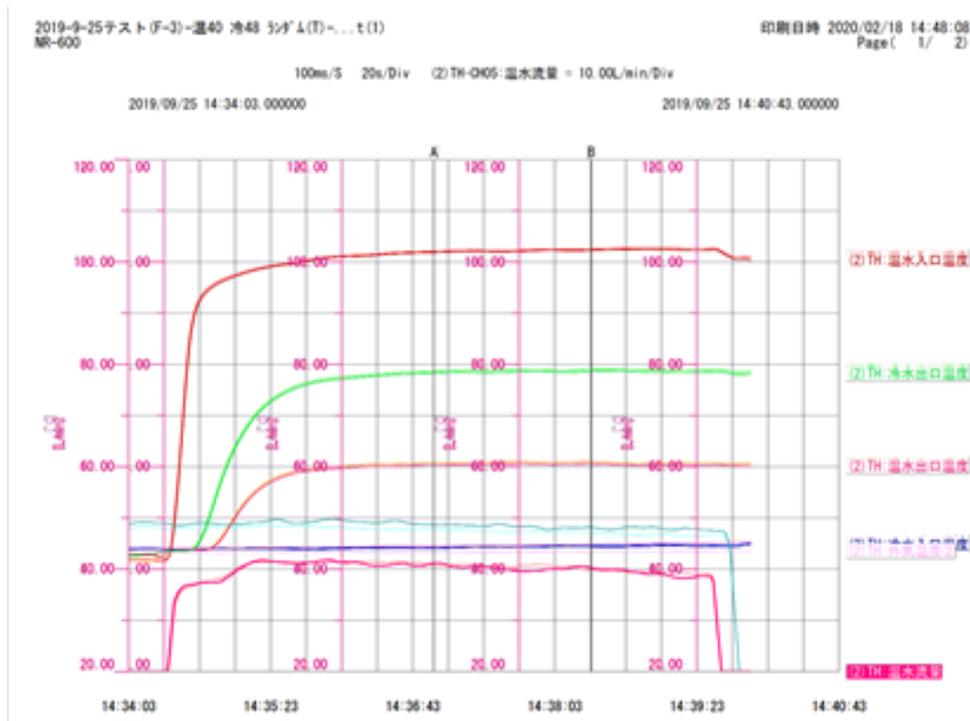


図4-1-13 流量 冷水50L/min 温水40L/min

最終章 全体総括

(1) 汚れに対する付着抑制と洗浄性の向上について

プレート式熱交換器における客先（徳山積水工業（株）および（株）MEPCOM四日市）での実証実験によって、鋼板面へのF研磨処理が、汚れの付着抑制と付着した汚れの洗浄性向上に寄与することが確認できた。また、汚れの種類によってF研磨の効果が変わることも人工的な汚れ付着の室内試験で確認できた。しかし、大きな課題が二つあり、一つ目はその効果を裏付けるメカニズムが明らかにされていないこと。そのために、汚れの種類に対するその効果を確約できず、その都度効果実証のための実験を伴うことである。また、二つ目は、F研磨処理による費用対効果が川下ユーザーによって異なり、現状より削減できる労力を経済効果の数値で表すことが非常に難しいことである。すなわち、F研磨処理効果の確約とその経済効果を前以て提示で来ないことにある。ただ、間違いなく客先ニーズが高いことから、有償による試験鋼板の提供によって実証実験の実績を積重ね、客先の評判を高めることで事業化への流れを構築するつもりである。

(2) 伝熱性能の向上について

F研磨処理した伝熱テストプレートによる気化条件下における伝熱特性の比較で、乾き度0.35における局所熱伝達係数が鏡面プレートよりも約6倍という高い伝熱性を確認し、その処理条件も絞り込むことができた。これは、F研磨により形成された多数の傷や凹凸が、核沸騰を活発にして気泡形成に優位に働き、局所で熱伝達性向上に寄与する気泡サイクルを促進していることが判明した。しかし、蒸気を使った実証のための実験装置は、安全性の面で制約を受けることから、その実施は難しい。

また、液相状態における伝熱特性は、温水→冷水への熱伝達性能向上30%を目標値に対し、F研磨処理有無によるプレート式熱交換器2台を使い、必要とする温水の流量で30%の

省エネを確認できた。しかし、その効果は冷水流量の増大によって減少し、このメカニズムは、プレート式熱交換器が有するヘリボーンという大きなプレートの凹凸やその枚数増による機器効率の低下などの流体に係る構造的な不確定要素が影響することから、今回の室内実験結果だけでは説得力に欠けるようである。特に、前述で述べた汚れの付着も伝熱性能に大きく影響することもその要因と言える。

上記の二つの成果から、F研磨処理による伝熱特性の向上を目的としたプレート式熱交換器の性能向上として事業化を図りたいが、そのためには二つの課題がある。一つ目は、プレート式メーカーの興味が低いこと、すなわち、伝熱性能がアップによる装置の小型化でコストメリットがでないことや現状装置設計に関する不確定な部分（プレート面のデッドゾーンや枚数増大による効率低下）から、経験工学的な要素が強いこと。二つ目は、プレート面への汚れ付着による影響が伝熱性能に大きく影響することである。したがって、汚れの付着抑制効果によって伝熱性が向上するという話の流れの方が事業化し易いと考えられる。

（3）F研磨処理の自動処理装置

熱交換器のプレート面を自動処理加工することでF研磨処理の品質向上や加工のスピード化を目的として開発した装置である。F研磨処理加工は、本研究の以前から粉体の付着抑制や撥水効果を有することから、ホッパーシュートや輸送配管の表面処理として多くのニーズがあり、現在も表面処理加工事業として継続している。このため、この事業内容に定型のF研磨処理鋼板販売を加え、新しく市販鋼板サイズ（1×2m）の加工が行える大型自動処理装置の開発に今回の研究成果を生かす予定である。