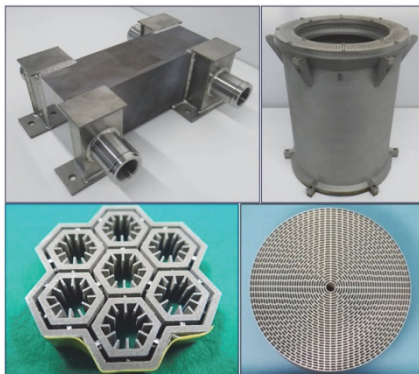


金属 Additive Manufacturing 技術を活用した コンパクト・高性能熱交換器の開発

Development of Compact and High-Performance Heat Exchangers Using Metal Additive Manufacturing



中 拂 博之*¹
Hiroyuki Nakaharai

谷 本 浩一*²
Koichi Tanimoto

上 藤 陽一*³
Yoichi Uefuji

高 橋 雄太*⁴
Yuta Takahashi

畑 中 雅哉*⁵
Masaya Hatanaka

貫 野 敏史*⁶
Toshifumi Kanno

近年、金属 Additive Manufacturing (以下 AM) 技術の向上によって、非常に精緻な造形が可能になっており、この技術を熱交換器に活用することで、従来にない高性能な熱交換器が実現できる。熱交換器は様々な製品に搭載されているが、例えば車両や船舶などの移動を伴う製品では、搭載機器の小型軽量化を通じて、燃費改善や運動性能向上に貢献できる。本報で紹介する AM 技術を活用した熱交換器 (以下、AM 熱交換器) では、移動体を例に、試作・性能試験、及び品質保証に関する検討を行い、従来使用していた熱交換器に対して、重量・体積を半減できることを確認した。

1. はじめに

近年、AM 技術の向上によって、これまでの機械加工技術では製作できなかった、非常に精緻且つ複雑な構造体が製作可能になっている。この技術を熱交換器に適用することで、内部流路に精緻な伝熱促進体を配置することや、流路自体を複雑な曲面で設計することが可能になり、従来の機械加工による熱交換器と比べ、圧力損失あたりの交換熱量を増加させることができる。さらに、AM 技術の活用によって熱交換器自体の形状自由度も向上し、設置空間に応じた熱交換器の形状を設計することで、他の機器と併せてコンパクトなパッケージングが可能となる。このように、熱交換器単体の小型・軽量化に留まらず、その他の機器も含めてパッケージング空間の最小化が可能であることは、熱交換器だけではなく、システム全体を設計・製作する三菱重工業株式会社 (以下、当社) の強みのひとつである。

加えて、このような優れた特徴を有する AM 熱交換器を実際の製品に搭載するためには、品質保証に対する取組みも必要不可欠である。本報で述べる AM 熱交換器は、精緻な造形が可能なパウダーベッド方式で造形しているが、一般的にレーザの出力や走査速度、粉末性状など、様々な要因が造形品質に影響を及ぼすことが解っている。これらを適切に管理しなければ、造形金属内部に欠陥や融合不良が生じ、それに起因して強度が低下することになる。

当社は、AM 熱交換器の性能向上と品質保証を両輪として開発に取り組んでおり、本報では、その開発事例や今後の展望について紹介を行う。

*1 総合研究所 伝熱研究部 主席 T 統括 工博

*2 総合研究所 伝熱研究部 FS 工博

*3 総合研究所 伝熱研究部 主席 T 統括

*4 総合研究所 伝熱研究部 技術士 (機械部門)

*5 総合研究所 製造研究部 主席 T 統括 技術士 (金属部門)

*6 総合研究所 強度・構造研究部

2. AM 熱交換器の構造と特徴

前述のとおり、当社は様々なコンセプトの AM 熱交換器の開発を進めており、その中の一部を本章で紹介する。

2.1 微細流路対向流 AM 熱交換器

図1に微細流路で形成された対向流型の AM 熱交換器を示す。この熱交換器は流路を微細化して単位体積当たりの伝熱面積を増加させるとともに、流路の内部に精緻な伝熱促進体を設置することで、平滑流路に対して、同一ポンプ動力あたりの熱交換量を増加させている。ヘッダ構造は、各流路への流量分配が均等になるように設計しており、主な使用環境で流量偏差による性能低下が約1%程度になるよう設計している。

図2は、流路性能を評価するための要素試験用供試体である。流路の本数は高温側、低温側共に5本ずつとし、最小要素で流路の熱伝達率と圧力損失特性を把握した。媒体は水・油・空気をを用いて試験を実施し、図3に示す通り、伝熱・圧損特性を評価し、設計式を整備した⁽¹⁾。ここで、レイノルズ数は粘性と慣性の比率を表す無次元数であるが、同一流体においては流量の大小を表している。ヌセルト数は流体と隔壁の間での熱輸送の大きさ(熱伝達率)を表す無次元数であり、レイノルズ数によって変化する。また、ヌセルト数は、流体の粘性や比熱、熱伝導率などによっても変化するため、伝熱特性を定式化するには、レイノルズ数に加えて、動粘性係数と温度拡散率の比率であるプラントル数と呼ばれる無次元数が一般的に用いられる。本試験で用いた水・油・空気はそれぞれ、プラントル数が大きく異なる流体であり、本研究では広範なプラントル数に対応できる設計式を整備している。

このように、当社は要素試験に基づいて整備された AM 熱交換器の性能評価式を用いることで、適切な仕様の熱交換器を設計することが可能である。そのうえで、移動体向けの AM 熱交換器を設計・製作した結果、図4に示す通り、従来用いているプレート式熱交換器に対して、重量及び体積が半減する結果が得られた。

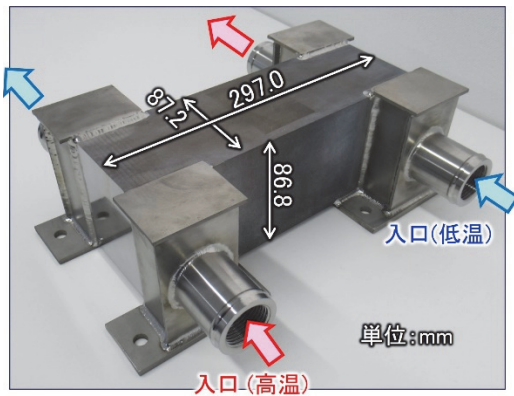


図1 微細流路対向流 AM 熱交換器

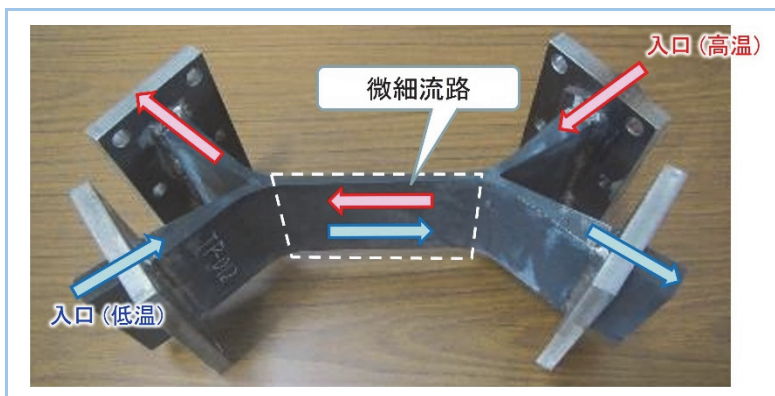


図2 要素試験用供試体

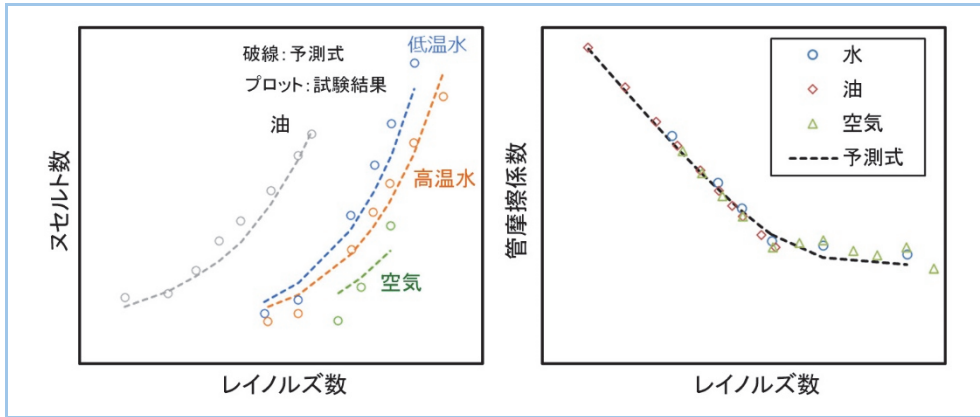


図3 試験によって取得した伝熱・圧損特性

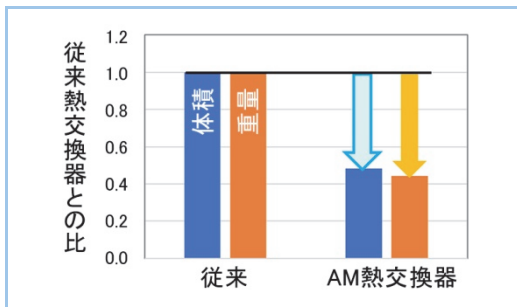


図4 従来型熱交換器とAM熱交換器の比較

2.2 触媒一体型 AM 熱交換器

本報の冒頭で述べたとおり，AM 技術を熱交換器に活用することで，熱交換器自体の形状自由度が向上し，設置空間に応じた熱交換器形状を設計することができる。それによって，他の機器と併せてコンパクトなパッケージングが可能となる。その一例として，触媒と熱交換器を一体化させたものを紹介する。

当社は触媒を用いた様々な製品を設計・製造しているが，その多くは，触媒の反応に適した温度域に制御するため，熱交換器が用いられている。そのため，熱交換器と触媒を接続する配管が必要となり，当然，配管を取り回す空間が必要になっている。そこで，当社は配管を含めたパッケージ空間を大幅に削減する触媒一体型 AM 熱交換器を開発した。図5はその構造及び外観の写真である。この例では，流入したガスを熱交換器と電気ヒータで昇温し，触媒に送り込む。その後，流入した低温ガスで冷却し，流入温度に近づけたうえで排出する構造となっている。

この AM 熱交換器についても，試作及び性能試験が完了しており，想定した性能が得られることが確認できている。図6は，この触媒一体型 AM 熱交換器について，事前の設計値と性能試験の結果を比較したものである。媒体は高温側・低温側いずれも空気とし，低温側は 20～25℃の間で変化させ，高温側は 170～230℃の間で変化させている。これより，設計値は試験による実測値と良好に一致しており，その差は交換熱量が±5%，圧力損失が±10%程度であった。この性能試験の結果を踏まえ，触媒一体型 AM 熱交換器を設計することで，従来のパッケージ空間(配管取り回しを含む)を半減できる見込みである。

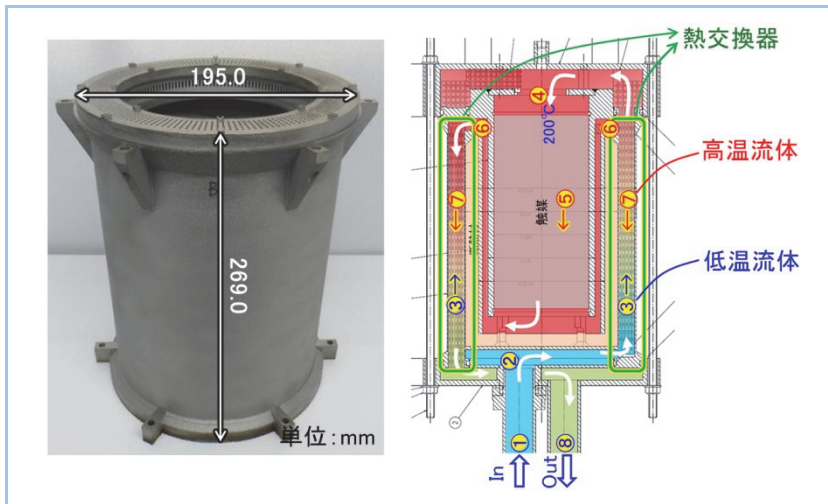


図5 触媒一体型 AM 熱交換器

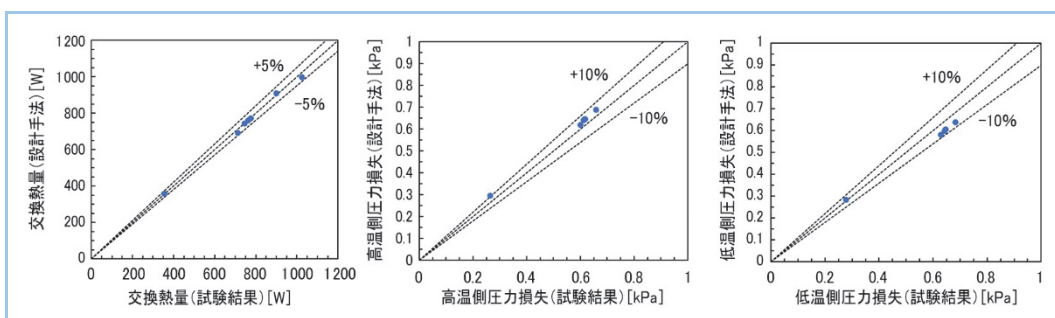


図6 設計値と試験結果の比較

2.3 配管埋込型 AM 熱交換器

図7は配管内部に埋め込むことを想定した AM 熱交換器である。廃熱を回収し、再利用することは製品の性能・効率向上の観点から非常に重要であるが、多くの機器をコンパクトにパッケージングした製品では、熱交換器を追設する空間が十分に確保できない場合もある。そのような場合に、配管内部に設置できる熱交換器は非常に有用と考えられる。

図8(a)(b)は配管埋込型 AM 熱交換器の試作品の写真である。図8(a)は配管埋込型 AM 熱交換器のコア部の写真であり、図7の“熱交換器コア”と表記した部分に相当する。コア内部の流路は高温流体と低温流体が対向する流れになっており、第一流体は配管内を直進するようにコアを通過し、第二流体は側面に設けたスリットから流入しコア内を流れる構造となっている。図8(b)は、六角形の内部に第一流体、その周囲のギャップに第二流体が流れる。一般的に、第一流体と第二流体の体積流量が大きく異なる場合、体積流量が大きい方の流路断面積を大きくする必要がある。この熱交換器もハニカム内部とギャップ部で流路断面積の差が大きく、体積流量が大きく異なる流体（例えば液とガスなど）の場合に適した熱交換器といえる。現在、トポロジー最適化で創出した伝熱促進構造をギャップ内に配置した、高性能なハニカム熱交換器の開発も進めており、解析による試算では、一般的な二重管タイプの熱交換器に比べて、体積が半減する結果を得ている。

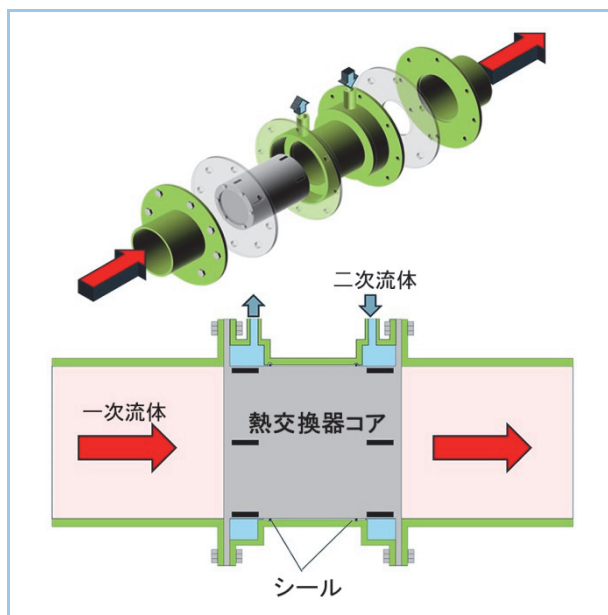


図7 配管埋込型 AM 熱交換器

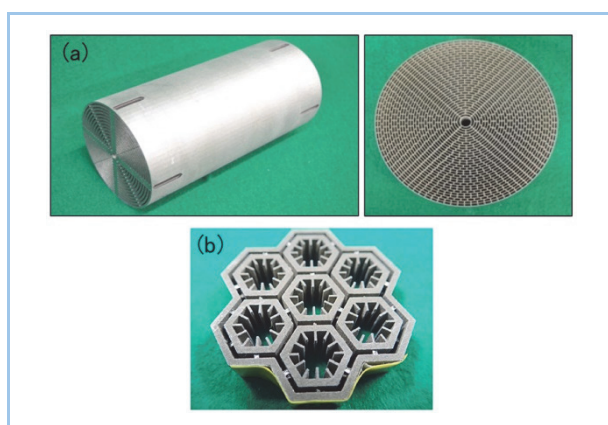


図8 配管埋込型 AM 熱交換器試作品

3. 品質保証に関する取組み

AM 熱交換器を製品に実装するにあたり、製品に応じた品質保証が必要となる。例えば、現在 AM 熱交換器の造形に使用しているパウダーベッド方式では、レーザ出力や走査速度、粉末の粒径や管理方法、造形姿勢など、様々な条件で造形品質が変化する。図9は、実際にレーザ出力を変化させ、意図的に入熱を過剰にした場合と、適切な入熱で造形した場合の造形品の比較であり、過剰入熱の場合には、粉末の熔融時に発生する金属蒸気の巻き込み等により、図のような無数の空隙が生じてしまう。逆にレーザ出力が過少な場合にも、出力不足による融合不良で空隙が生じることが解っている。このような空隙が存在すると、製品が搭載される環境によっては、熱応力や振動等によって、空隙を起点として亀裂が進展する可能性があり、各因子が品質に与える影響を正確に把握し、造形条件を適切に管理していくことが重要となる。そのため、当社は、事前に様々な条件で造形を行い、これら因子の影響を把握すると共に、造形材の強度評価試験等を行い、設計に必要なデータを蓄積している。

図10に示すミーゼス相当応力のコンタ図は前記の図1の熱交換器における温度分布及び4隅固定部の熱変形拘束により生じる熱応力を内部構造までモデル化した FEM 解析により計算したものである。また、図10の写真は AM 熱交換器の流路を模擬した疲労要素試験片の外観であり、熱交換器と同じ造形条件で製作されたものである。写真の試験片は試験で破断させた後のものであり、このような試験を実施することで、AM 熱交換器の強度評価の基礎データを蓄積している。

このように、AM 熱交換器の設計に際しては、振動条件・起動停止回数・熱応力など、製品固有の要求条件を把握したうえで、詳細なFEM解析や試験データに基づいた寿命評価を行うことで、信頼性を確保している。

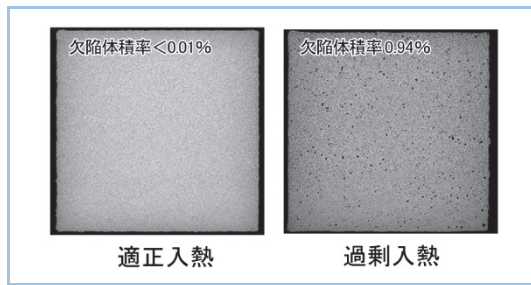


図9 造形物断面

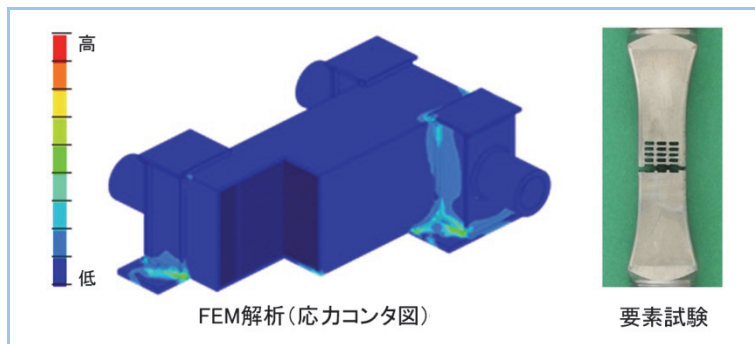


図10 要素試験及びFEM解析による強度信頼性評価

4. まとめ

本報では、近年急速に発展しているAM技術を活用した熱交換器の高性能化・小型化の取組みについて紹介した。また、熱交換器を含む各機器のパッケージング空間の削減を狙い、他の機器と熱交換器を一体化した事例についても紹介した。

当社は、コンセプトの創出から、試作、性能評価、振動・強度評価、品質保証など一連の検討を進めており、既に一部の製品向けでは、従来の熱交換器に対して、重量・体積半減の目処を得ている。また、トポロジー最適化手法なども活用し、更なる性能向上・小型化にも引き続き取り組んでおり、今後、高性能で小型軽量の熱交換器を通じて、様々な当社製品のエネルギーマネジメントの高度化(効率向上、消費エネルギー削減等)に貢献していく。

参考文献

- (1) 江口駿作ほか、リブ付き流路の伝熱特性、第58回日本伝熱シンポジウム講演論文集(2021-5)