

超薄型扁平多孔管のプレス加工と伝熱向上

大阪産業技術研究所 加工成形研究部 四宮 徳章

1. はじめに

近年、空調用熱交換器の構成部材として、扁平多孔管が注目されている¹⁾。扁平多孔管は一边が1 mm程度の微細な流路が管内部に多数配列された構造を持ち、従来の熱交換器用チューブと比較して、単位体積当たりの伝熱面積が大きい。そのため、伝熱性能が高く熱交換器全体の形状を小型にできる部材として期待されている。

現在、この扁平多孔管は押し出し加工で製造されているため、素材は成形が容易なアルミニウム系材料、形状は左右対称の断面形状を持った直線部材に限定されている。

空調業界では、腐食環境下でも使用できるステンレス系あるいはチタン系材料での製造が求められている²⁾。また、伝熱性能のさらなる向上のために、扁平多孔管の縦横比の大きい超薄型形状や翼型形状に関する研究^{3), 4)}なども進められている。

しかし、押し出し加工では、ステンレス鋼などの高強度材料を扁平多孔管のような複雑形状に加工することは難しく、また超薄型や左右非対称の翼型形状は加工時の抵抗が大きくなることや、素材の流れがアンバランスになることから、加工が難しい。

2. 目的

本研究では、これらの課題を解決するため、

従来の押し出し加工ではなく、パイプ材を素材とした圧縮加工による扁平多孔管の新しい製法を提案する。本報では、良好な形状が得られた成形条件、および、その伝熱性能について報告する。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

アルミ製扁平多孔管は、すでにビル用マルチエアコンや自動車用コンデンサに使用されている⁵⁾。本技術は、これらの製品や今後採用が見込まれる家庭用エアコンについて、超薄型や翼型の扁平多孔管を提供できるもので、実用的な利用価値が高いと考える。また、成形できる材料の制限が小さいことから、ステンレスやチタンなど耐腐食性材料やインコネルなど耐熱性材料でも成形でき、腐食環境下や高温環境下で用いる熱交換器にも適用できる。

4. 研究内容の詳細

4-1 扁平多孔管の製作方法および実験方法

4-1-1 圧縮加工による扁平多孔管の製作方法

径の大きいパイプ材を外管として内部に細管(内管)を多数挿入し、外部から圧縮することで扁平多孔管を製作した。しかし、内管が折り重なる不具合が生じる場合があったため、図1のように、外管をある程度圧縮した後に内管を挿入し、さらに所定の厚みまで圧縮加工した。

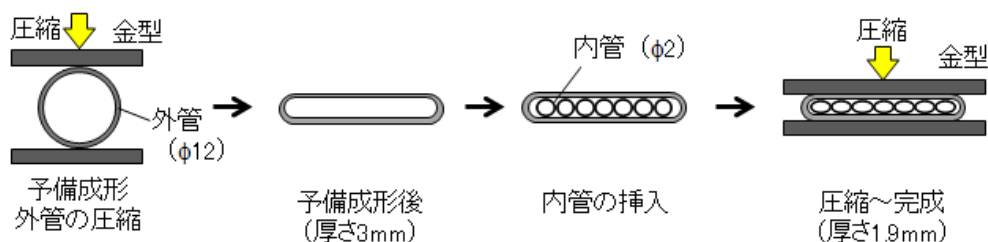


図1 圧縮加工による扁平多孔管の製作方法



図2 X線CTスキャナの外観



図3 サーボプレスの外観

4-1-2 扁平多孔管の内部観察

成形した扁平多孔管内部の断面形状を観察するために、東芝ITコントロールシステム製X線CTスキャナ(TOSCANER32300 μ FD)を用いた。図2に装置の外観を示す。撮影条件は、140 kV、100 μ A、画素解像度 19 μ mにした。

4-1-3 成形実験およびFEM解析

成形実験には、図3に示すコマツ産機製のサーボプレス(H1F200)を用いて、50 spmのスライド速度で圧縮加工を行った。素材は、大谷伸管製のアルミニウム管を用いた。内管は ϕ 2 mm(肉厚0.15 mm)、外管は ϕ 12 mm(肉厚0.3 mm)のものを用い、材種および調質は、内管にA3003-O、A3003-H18、外管はそれに加えてA1050-O、A1050-H18のそれぞれの組み合わせで計4種類とした。成形方法としては、前工程で外管のみ厚さ3 mm程度まで圧縮したものに、内管を8本挿入し、厚さ1.9 mm程度までさらに圧

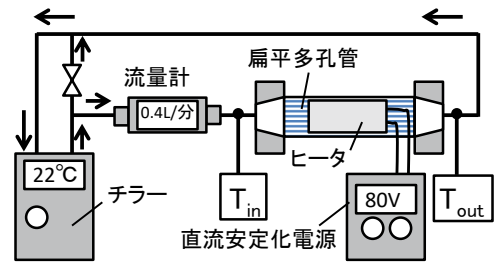


図4 伝熱実験装置

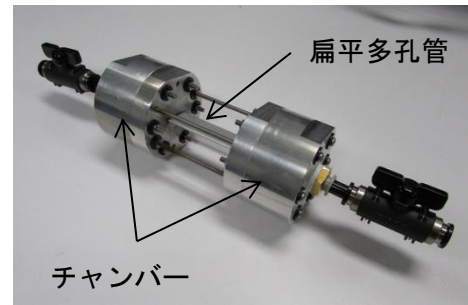


図5 扁平多孔管接続部の外観

縮した。また、内管に A3003-O、外管に A1050-O を用いて内管と外管の接触部をペーストろうで接合したものや、超薄型として内管に ϕ 1.03 mm(肉厚0.1 mm)を16本、外管に ϕ 12 mm(肉厚0.3 mm)を用いて、厚さ1.2 mm程度まで圧縮したものも成形した。

また、前工程の外管の圧縮加工で、材種および調質により成形後の形状が大きく異なったため、FEM解析を用いてその傾向を調べた。解析には、ダッソーシステム製のAbaqus2017を用い、パイプ材をシェル要素でモデル化した。材料はSwiftの式で表現したもので、塑性係数を164 MPa(工業用純アルミニウムを想定)とし、降伏応力や加工硬化指数に種々の値を用いて、それらが成形後の形状に及ぼす影響を調べた。

4-1-4 伝熱実験

圧縮加工により製作した扁平多孔管の伝熱性能を調べた。図4および図5に実験装置を示す。22 \pm 1 $^{\circ}$ C、0.4 L/minの冷水を、チャンバーを介して扁平多孔管の内部に循環させた。扁平多孔管の表裏両面には、セラミックヒータ(100 V-100 W)を各1枚貼付し、80 Vの直流電圧を

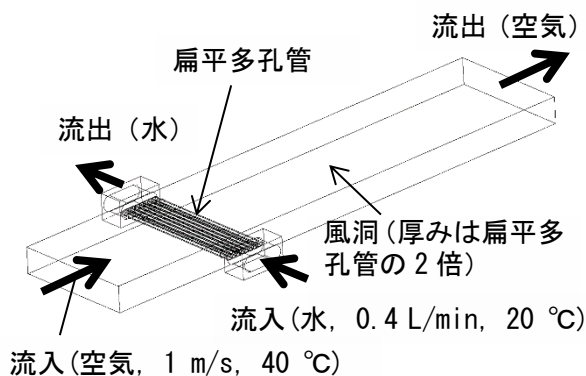


図 6 熱流体解析モデル

並列に印加した。扁平多孔管を流れる冷水の質量流量と、扁平多孔管の入口および出口の冷水温度差を用いて、セラミックヒータから冷水への伝熱量を求めた。

4-1-5 熱流体解析

現在、流通している扁平多孔管の入手が困難であったため、熱流体解析により一般的な扁平多孔管と圧縮加工により成形した扁平多孔管の伝熱性能を比較した。解析には、ソフトウェアクレイドル製の scFLOW V14 を用いた。解析モデルを図 6 に示す。

長さ 60 mm の扁平多孔管に 20 °C の冷却水、風洞に 40 °C の熱風を流す条件で解析を行った。要素およびその分割サイズは、風洞 2 mm 程度、扁平多孔管 0.1 mm 程度のポリヘドラル形状とし、壁面近傍は境界層と呼ばれる層状の要素を配置した。その結果、要素総数は約 400 万になった。乱流モデルには、SST k- ω モデルを用いた。また、風洞の上面と下面は対称境界条件とした。

解析を行った扁平管は三種類で、現在流通しているもの (Standard)、外管に A1050-O、内管に A3003-O を用いて圧縮加工したもの (Press-std)、圧縮加工で製作した超薄型 (Press-thin) である。

5. 実験結果および考察

5-1 成形実験

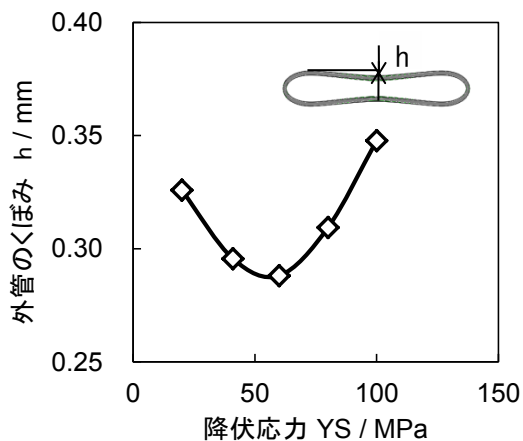
成形した扁平多孔管の長手方向中央付近の

断面写真を表 1 に示す。内管に A3003-O を用いた場合、外管に A3003-H18 や A1050-H18 といった H 材を用いると、内管の座屈や外管と内管に間隙が生じることがわかった。一方、外管に A3003-O や A1050-O といった O 材を用いると、内管の座屈は発生せず、外管と内管の間隙が小さかった。特に、外管に A1050-O を用いるとその間隙は極めて小さいことがわかった。また、内管に A3003-H18 を用いた場合は、外管の材種および調質に関わらず、すべてにおいて内管に座屈が生じた。

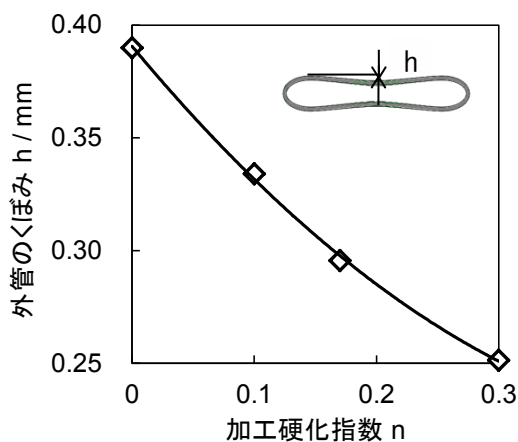
外管に H 材を用いた場合、前工程で外管のみに圧縮を加えると、管中央部が内側にくぼむことや、側端が鋭角に折れる現象が確認された。これらの現象が、内管の座屈に影響を及ぼすことも考えられるため、FEM 解析によりそのメカニズムを調べた。図 7 に結果を示す。降伏応力が成形結果に及ぼす影響として、管中央部の内側へのくぼみは極値が存在し、60 MPa 付近で最もくぼみが小さくなった。また、加工硬化指数の影響を調べると、加工硬化指数が大きいほど、内側へのくぼみは小さくなった。つまり、H 材のように、降伏応力が高く、加工硬化指数が小さい材料では、内側へのくぼみが大きくなることがわかった。図 8 に、A1050-O および A1050-H18 の成形結果と、降伏応力 43 MPa、加工硬化指数 0.17 および 0 の場合の計算結果を示す。実験と FEM 解析の結果は概ね一致した。

表 1 成形実験結果

外管\内管	A3003-O	A3003-H18
A3003-O		
A3003-H18		
A1050-O		
A1050-H18		



(a) 降伏応力

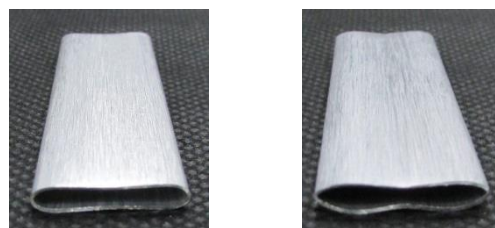


(b) 加工硬化指数

図 7 降伏応力および加工硬化指数が圧縮した管形状に及ぼす影響

5-2 伝熱実験

外管および内管の材種・調質が伝熱性能に及ぼす影響を調べた結果を図 9 に示す。A3003-H18 を両管に用いたものは、内管が座屈し、外管・内管の間隙が大きいため、最も伝熱性能が低かった。一方で、外管と内管の間隙が最も小さい A1050-O (外管) と A3003-O (内管) を組み合わせた扁平多孔管の伝熱性能は、最も高く、A3003-H18 を両管に用いた場合と比較して約 6 % 伝熱性能が向上した。しかし、A1050-O (外管) と A3003-O (内管) を組み合わせた扁平多孔管の外管と内管をろう付けしたものは伝熱性能が大きく向上した。つまり、外管と内管の間隙が小さくても、接触熱抵抗は大きいことが推察され



(a) A1050-O

(b) A1050-H18



(c) YS=43 MPa, n=0.17



(d) YS=43 MPa, n=0

図 8 (a)(b)成形結果と(c)(d)FEM 解析結果の比較

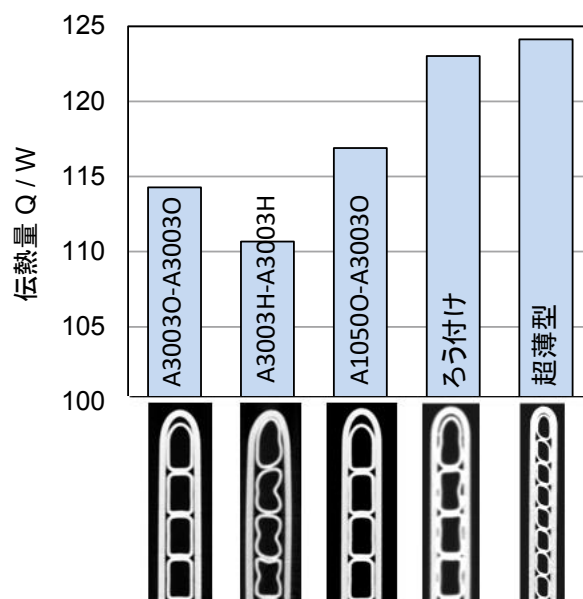


図 9 管の材種および調質が伝熱性能に及ぼす影響

る。一方、超薄型は、ろう付けしなくても他の扁平多孔管よりも伝熱性能が高いことがわかった。

5-3 熱流体解析

熱流体解析結果の一例を図 10 に示す。熱流体解析では、気流や冷却水の流れなどを詳細に計算できる。図 11 に、一般的な扁平多孔管 (Standard), 外管に A1050-O, 内管に A3003-O を用いて圧縮加工した扁平多孔管 (Press-std), および、超薄型の扁平多孔管 (Press-thin) での温度分布の解析結果を示す。また、それぞれの

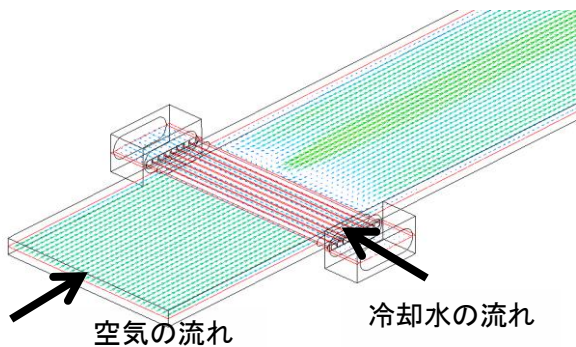


図 10 熱流体解析結果の一例（速度ベクトル）

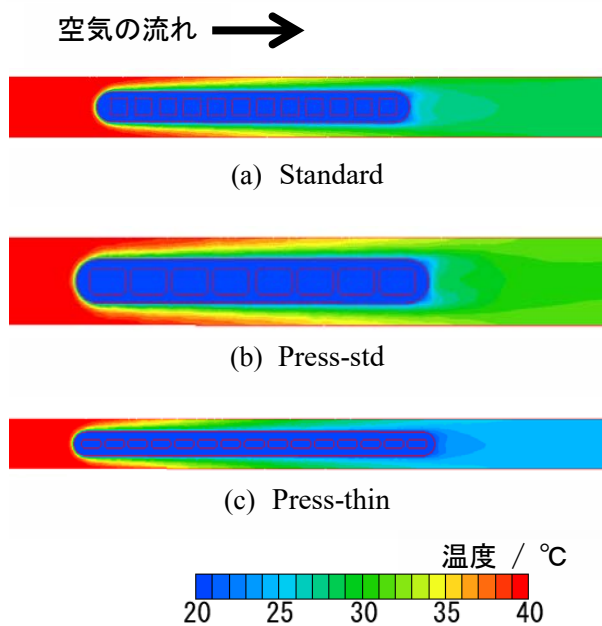


図 11 扁平多孔管周辺の温度分布

扁平多孔管の伝熱性能を図 12 に示す。

下流側の温度分布を見ると、Standard に比べて、Press-thin の温度が低くなっており、伝熱性能が高いことがわかる。図 12 において、各扁平多孔管の伝熱量を比較すると、Press-std が最も大きく、ついで Press-thin となり、Standard と比較して伝熱性能が高かった。伝熱量を扁平多孔管の厚みで除した単位厚さ当たりの伝熱量については、Press-std が最も小さく、Press-thin が最も大きくなった。同一の熱交換器寸法内で Press-thin は多列に配置することができるため、伝熱性能の高い熱交換器を設計できるものと考えられる。

6. 結言

圧縮加工により扁平多孔管を製作した結果、

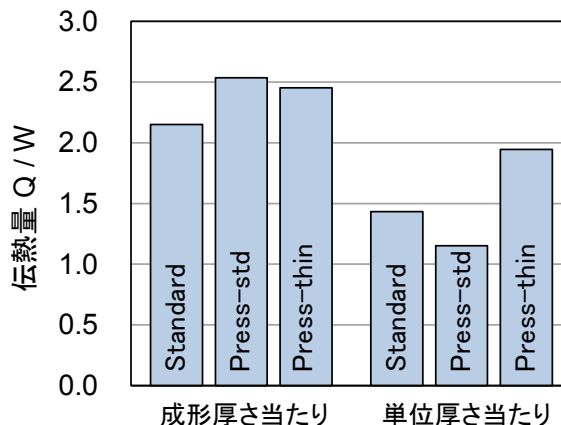


図 12 伝熱量に及ぼす扁平多孔管形状の影響

外管および内管に O 材を用いることで良好な形状で成形ができ、外管に A1050-O、内管に A3003-O と強度差のある材料を用いることで伝熱性能を向上できることがわかった。また、従来型の扁平多孔管よりも薄い管を成形でき、熱流体解析および実験から、高い伝熱性能を確認できた。

7. 謝辞

本研究は、公益財団法人金型技術振興財団平成 29 年度研究開発助成、および、一般社団法人日本塑性加工学会 塑性加工技術振興事業基金「研究助成基金」平成 29 年度若手研究者研究助成を受けて実施されたものであり、謝意を表します。

8. 参考文献

- 1) 宮良明男:日本機械学会誌, 118-1161(2015), 478.
- 2) 佐藤廣士:日本海水学会誌, 44-5(1990), 200.
- 3) 飛原英治:科研費研究成果報告書, (2017), 15K13880.
- 4) 大西元:第 48 回日本伝熱シンポジウム, (2011), G312.
- 5) 青山豊ら:日本冷凍空調学会誌, 91-1064(2016), 401.