

技術資料

熱交換器用銅管とフェライト系ステンレス鋼管の新規接合技術の開発

西島進之助* 三浦教昌**

Development of new joining technology for copper pipes and ferritic stainless steel pipes for heat exchangers

Shinnosuke Nishijima, Norimasa Miura

Synopsis:

We have developed a new mechanical joining technology for ferritic stainless steel tubing (NSS445M2) and copper tubing (C1220) representing tubing of dissimilar materials. The results obtained are as follows.

- (1) Our novel method for fabricating a groove to join tubing of dissimilar materials was a suitable means for placing the hard ferritic stainless steel tubing on the exterior to ensure joint performance.
- (2) Provision of an appropriate groove depth resulted in a joint with sufficient pressure resistance, fatigue characteristics, corrosion resistance, and practicable joint strength.

1. 緒言

省エネルギーや地球温暖化対策としてのCO₂排出量削減の観点から、エネルギー効率に優れるヒートポンプタイプの熱交換器の需要拡大が期待されている¹⁾。例えば、ヒートポンプタイプのエアコンやエコキュートの出荷台数推移は、図1に示すように高い水準で横ばい基調

であることが分かる²⁾。従来、電機メーカーでは、熱交換器用配管材料として、伝熱性、加工性および素材の調達性に優れた銅管を広く採用してきた。しかし近年、図2に示すように銅の価格が大きく変動し、調達性に問題が生じるようになってきている³⁾。

そこで、ヒートポンプタイプの熱交換器への当社の材

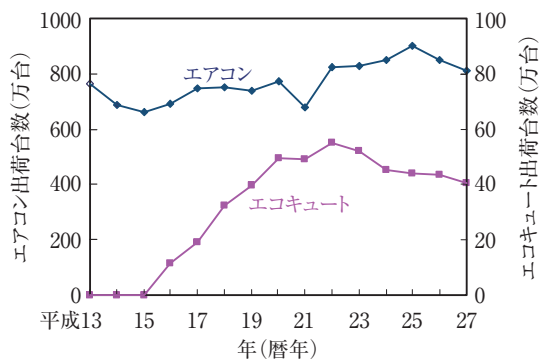


図1 ヒートポンプ関連機器の出荷台数推移²⁾

Fig. 1 Trends in shipments of heat pump equipment.

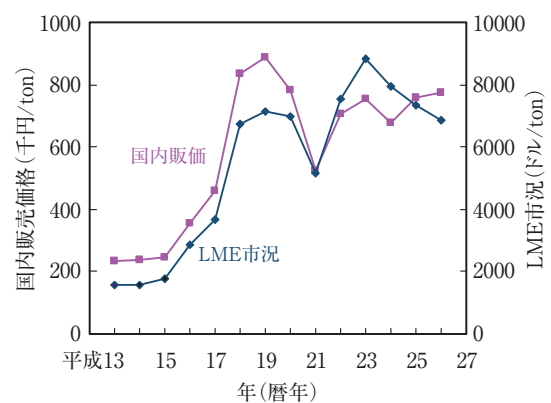


図2 銅の販売価格推移³⁾

Fig. 2 Transition in copper sales prices.

*加工技術研究所 加工第二研究チーム サブリーダー

**加工技術研究所 加工第二研究チーム チームリーダー

料と加工技術の新規適用を目的として、エアコンやエコキュート向け熱交換器用配管材料である銅管に着目し、その市場規模を調査した。その結果、エアコンやエコキュートに使用される銅管は一台当たり約10kg(後述の分解調査結果参照)、出荷台数がエアコンとエコキュート合計で約840万台/年(図1)であることから、熱交換器用の銅管使用量は概算で約7,000ton/月と推定された。

当社では、化学プラント、医療、食品、建設などの様々な分野向けに、設備機器のライフサイクル性(長寿命、メンテナンス頻度削減)、環境配慮性(薄板、省資源、高耐食性)、衛生機能に加え、優れた機械的性質など、さまざまな特性を持たせた高い機能を有するステンレス鋼板を製造・販売している。とりわけ、フェライト系ステンレス鋼(以後、 α 系ステンレス鋼)は、高価なNiを含有していないことから、機能とコストのバランスに優れ、多くの需要家に使用いただいている⁴⁾。

現在当社では、ヒートポンプタイプの熱交換器を製造している電機メーカーに対し、熱交換器用の配管材料に多く用いられている銅管に替わる材料として、素材の調達性(価格安定性)、製造性、環境性能(製品ライフサイクル性)に優れた α 系ステンレス鋼管を提案している。 α 系ステンレス鋼の一種である当社独自鋼NSS445M2(22Cr-1.2Mo-Ti-Nb-Al)は、塩化物を含む温水用途に適した材料として開発された鋼種であり、耐食性向上のため表面皮膜が強化され、さらに熱膨張係数がオーステナイト系ステンレス鋼に比べて小さいことから、熱交換器用途に適した材料である⁵⁾。

本稿では、ヒートポンプタイプの熱交換器用配管材料への α 系ステンレス鋼管の材料変更に伴う技術的課題およびその解決策(具体的には新規接合技術)について報告する。

2. α 系ステンレス鋼管への材料変更に伴う技術的課題

銅管から α 系ステンレス鋼管への材料変更に伴う技術的課題とその解決策を検討するため、市販のエアコンやエコキュートの分解調査を行った。図3に分解調査例を示す。分解調査の結果、熱交換器配管には機種により異なるが、外径 $\phi 3 \sim \phi 20\text{mm}$ 、厚み0.3~1.0mmの銅管(純銅:りん脱酸銅(C1220))が1台当たり3~18kg使用されていた。接合部はロウ付けであり、一方の管を拡管しそこにもう一方の管を挿入する構造で、隙間にロウ材を浸透させて接合されていた。接合部の外側に配置した管と内側に配置した管のクリアランスは片側0.1mm程度であり、拡管された平行部の長さは3~30mm程度であった。

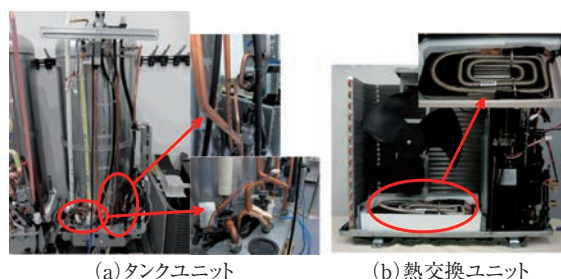


図3 エコキュートの分解調査例
Fig. 3 Disassembly example of EcoCute.

表1に、 α 系ステンレス鋼管への材料変更に伴う技術的課題を示す。技術的課題は材料の物理的性質と製造技術に大別される。

材料面の課題は熱伝導性である。 α 系ステンレス鋼(NSS445M2)の熱伝導率は純銅(C1220)に比べ約1/15と低いが、材料固有の物性値であることから改善は期待できない^{5,6)}。そこで工学的な伝熱量に着目し、数値解析(解析ソフト:Marc)により、伝熱量が肉厚0.8mmの銅管と同等となる α 系ステンレス鋼管の肉厚を算出した結果、約0.4mmと見積もられた。しかし、配管の薄肉化に

Table 1 Issues accompanying material change to ferritic stainless steel pipe

表1 α 系ステンレス鋼管への材料変更に伴う課題

分類	項目	課題	予備検討結果
材料面	熱伝導性	・熱伝導率 ^{5,6)} (W/m \cdot °C):銅> α 系ステンレス鋼 ⇒材料固有値であり改善は期待できない 参考)銅(C1220):339, α 系ステンレス鋼(NSS445M2):22.5	薄肉化で同等以上の伝熱量と耐圧性を確保できることを確認
製造技術面	造管コスト	・小径管の造管コスト:銅管 \leq α 系ステンレス鋼管 ⇒日新製鋼ステンレス鋼管(株)での営業生産 $\phi 10\text{mm}$ 以上	全ての銅管を α 系ステンレス鋼管化するのは困難
	加工性	・加工性:銅管 \geq α 系ステンレス鋼管 ⇒加工条件の検討を要する	
	異種材料接合技術	・従来技術では健全な接合が困難 ⇒接合部に溝加工を施す新たな加工方法を検討	

よる耐圧性の低下が懸念されるため、上述の数値解析ソフトを用いて、管の内圧変化による管径の最大変位量を算出した。その結果、肉厚0.4mmの α 系ステンレス鋼管の耐圧性は、肉厚0.8mmの銅管以上であることが判明した。これらの予備検討から、銅管を薄肉の α 系ステンレス鋼管に置き換えることで、熱伝導性と耐圧性のいずれも満足できることが明らかとなった。

製造技術面の課題として造管コスト、加工性、異種材料接合技術が挙げられる。造管コストは、押出により製造される銅管の場合、管径に大きな影響を受けないが、ロールフォーミングで製造される α 系ステンレス鋼管の場合、 ϕ 10mm未満の小径管で大幅に増加する傾向である。そのため、日新製鋼ステンレス鋼管(株)では ϕ 10mm未満は量産しておらず、日新製鋼グループでは、分解調査より明らかとなったサイズ範囲の一部を供給することができない。

加工性の面では、軟質な銅管は加工しやすく、熱交換効率の向上を目的に管の表面に微細な凹凸を付与したもののや、簡易なバンダーでも容易に曲げ加工ができる特徴がある。しかし、 α 系ステンレス鋼管は硬質であるため、銅管と同様の断面形状や曲げ加工形状を得ることが困難な場合も考えられる。

以上のように、複雑な形状の構成部品が多い熱交換器の全ての部材を α 系ステンレス鋼で製造することは必ずしも得策ではないことから、まずは代替可能な一部の銅管について検討することになる。熱交換器配管の一部が α 系ステンレス鋼管に材料変更される場合、銅管と α 系ステンレス鋼管の異種材料接合箇所が発生する。

異種材料の管を接合する技術は、溶接、接着、ロウ付け、メカニカル接合など多種多様⁷⁾であるが、接合部健全性および作業性の観点から、メカニカル接合技術が有望と判断した。従来のメカニカル接合技術には、溶接によって取付けたフランジ部をボルト・ナットにより締結する方法や、管自体にネジ切り加工を施す方法があるが、本研究の対象部材である薄肉小径の管には適用が困難である。

そこで、従来のメカニカル接合技術が抱える問題点を解決するため、 α 系ステンレス鋼管と銅管の異種材料接合方法を検討した。溝加工を施すことで省工程かつ低コストの接合ができる新たなメカニカル接合を考案し、接合部の溝加工性および接合性能を確認することにした。以下にその詳細を述べる。

3. 実験方法

3.1 供試材

表2に供試材を、表3にその機械的性質を示す。 α 系

ステンレス鋼管には22Cr-1.2Moを基本成分とし、Ti, Nb, Alを複合添加した高耐食性を有する当社独自鋼NSS445M2の銅管(ϕ 12.7mm \times t0.4mm, レーザ溶接, 未焼鈍)を、銅管には市販純銅管(りん脱酸銅)のC1220-O材(ϕ 12.7mm \times t0.6mm, 焼鈍材)を用いた。

Table 2 Test pieces

表2 供試材

素材	造管方法	焼鈍	外径(mm)	厚さ(mm)
α 系ステンレス鋼(NSS445M2)	ロールフォーミング(レーザ溶接)	なし	ϕ 12.7	0.4
銅(C1220)	押出	あり	ϕ 12.7	0.6

Table 3 Mechanical properties of test pieces

表3 供試材の機械的性質

素材	YS* (MPa)	TS* (MPa)	EI* (%)
α 系ステンレス鋼(NSS445M2)	518	563	30
銅(C1220)		239	55

※：管状態での引張試験値

3.2 評価サンプルの製造方法

図4に検討に用いたメカニカル接合の断面構造を、表4に接合条件を示す。

α 系ステンレス鋼管と銅管のそれぞれを外側に配置した

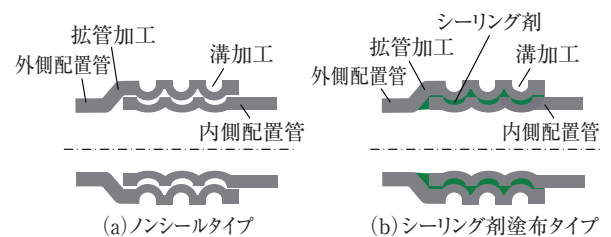


図4 検討に用いたメカニカル接合の断面構造

Fig. 4 Cross-sectional structure of mechanical joint examined.

Table 4 Joining condition

表4 接合条件

項目	内容
外側に配置する管	・ α 系ステンレス鋼管(鋼種:NSS445M2) ・銅管(C1220-O)
シーリング剤の有無	・ノンシールタイプ: 無 ・シーリング剤塗布タイプ: 有 (酢酸ビニル樹脂系防食シーリング剤)
接合部の構造	外側配置管の拡管内径: ϕ 12.9mm 拡管部の長さ: 30mm(平行部) 溝ピッチ: 7mm 個数: 3 溝深さ: 0.3~1.8mm

場合の接合性の違いについて、加工後の寸法測定および断面観察により確認した。またシーリングは、シーリング剤を使用しないノンシルタイプと、シーリング剤を外側と内側の管の隙間に塗布したシーリング剤塗布タイプの2条件とした。シーリング剤塗布タイプについては、シーリング剤が完全に硬化(24時間以上)した後に評価した。

接合部の溝加工条件は、熱交換器の分解調査より明らかとなったロウ付け部の寸法を考慮して、拡管内径を片側クリアランスが0.1mmとなるφ12.9mmとした。また、拡管部の長さはロウ付け部の最大長さとなる30mmを採用した。

溝加工は市販のパイプカッターの切断ロール刃をR付ロール(先端R = 1.0mm, 幅2.0mm)に改造した工具(図5)を用い、R付ロールを押し込みながら外側に配置した管の周囲に工具を回転させ、所定の溝深さのサンプルを作製した。

図6にシーリング剤塗布タイプの加工手順および各部名称を示す。工具の構造上、溝の中心から両側に最低7mmの平行部が必要であるため、外側配置管の管端より7mm離れた場所から、拡管した平行部に加工できる

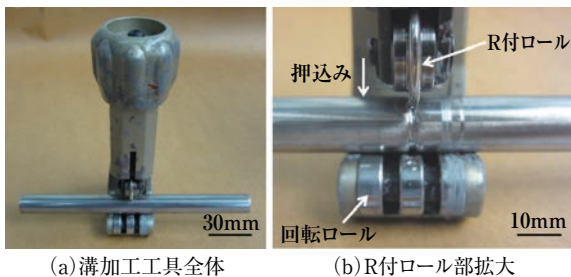


図5 溝加工方法
Fig. 5 Groove processing method.

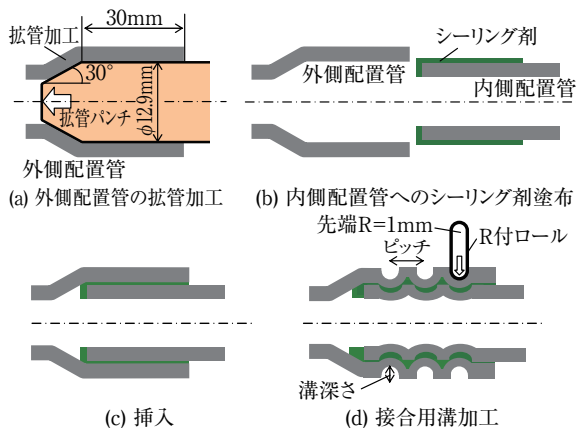


図6 シーリング剤塗布タイプの加工手順および各部名称
Fig. 6 Processing procedure of sealant application type and name of each part.

最大個数となる3箇所にも溝加工を施した。また溝深さは0.3~1.8mmの間で変化させた。なお、ノンシルタイプは、上記加工手順からシーリング剤の塗布を省いた加工方法である。

3.3 メカニカル接合部の性能評価方法

表5に接合部の性能評価方法と目標性能を示す。耐圧試験、疲労試験、耐食性試験の3項目は特定の需要家からヒアリングした評価方法および目標性能であるが、これらに加え、内圧により発生する管軸方向の引張力で継手が抜けることを懸念して、接合強度試験を実施した。

各評価項目の試験方法と試験条件は次のとおりである。

なお、各性能評価試験では、接合性に及ぼす材料配置の検討結果(後述)から適切と判断された材料配置(外側にα系ステンレス鋼管、内側に銅管)の試験サンプルを使用した。

Table 5 Performance evaluation method of mechanical joint and target performance

表5 メカニカル接合部の性能評価方法と目標性能

評価項目	試験条件	目標性能	参考
耐圧試験	一定水圧×1分間保持	5MPa以上	図7
疲労試験	内圧:0.1~1.1MPa 速度:正弦波10Hz 回数:100万回	漏水,破断 なきこと	図8
耐食性試験	試験水:2,000ppmCl ⁻ +2ppmCu ²⁺ 温度:80℃ 期間:30日間		図9
接合強度試験	引張速度10mm/min (JIS Z 2241 に準拠)	内圧で抜け ないこと	—

(1) 耐圧試験

図7に耐圧試験方法を示す。接合部から45mm離れた

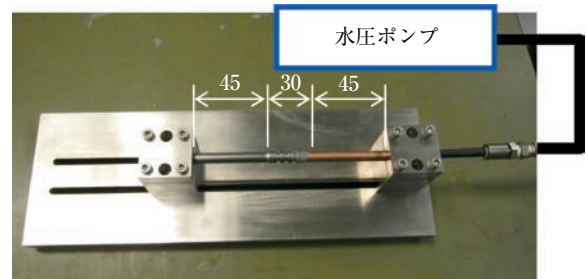


図7 耐圧試験方法
Fig. 7 Pressure resistance test method.

場所を治具で拘束し、内部に水を充満させた状態で一方の管端を封止し、もう一方の管端から水圧ポンプで加圧した。一定の水圧を負荷した後1分間保持し、破断や漏水の発生が無い場合、1MPaずつ圧力を上昇させて破断や漏水が発生するまで繰り返した。目標性能は内圧5MPa以上とした。

(2) 疲労試験

図8に疲労試験方法を示す。増圧器を疲労試験装置にセットし、増圧器のシリンダーを上下に動かすことで、内圧を増減させた。一方の管端を封止したサンプルのもう一方の管端から圧力を加え、内部に0.1~1.1MPaの圧力を負荷し、正弦波10Hzの周波数で100万回繰り返した。試験体は複数と同時に評価できるよう配管し、負荷経路の一箇所ですべての試験体による内圧を測定した。目標性能は、試験完了時に漏水や破断がないこととした。

性能評価には、耐圧試験で適切と判断したシーリング剤塗布タイプで、最大の耐圧を示した溝深さ1.2mmのサンプルを用いた。

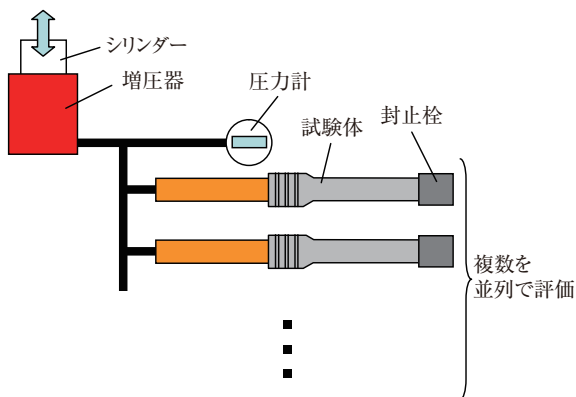


図8 疲労試験方法
Fig. 8 Fatigue test method.

(3) 耐食性試験

図9に耐食性試験方法を示す。ループ試験装置にサンプルをセットし、2,000ppmの塩素イオンと2ppmの銅イオンを含んだ80℃の試験水を管内部に30日間循環させた。目標性能は試験完了時に漏水や破断がないこととした。

性能評価には、耐圧試験で適切と判断したシーリング剤塗布タイプで、最大の耐圧を示した溝深さ1.2mmのサンプルを用いた。

(4) 接合強度試験

接合強度試験では、接合した管の端部をチャッキングし、10mm/minの速度で管軸方向に引張り、最大荷重を

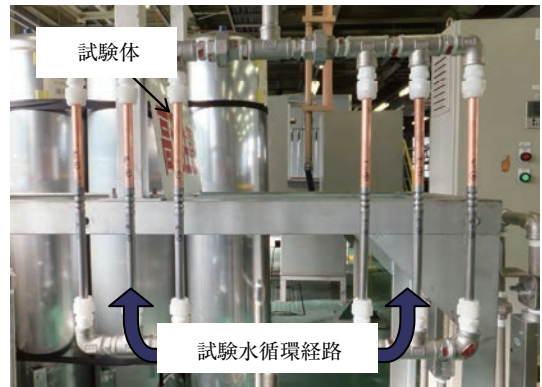


図9 耐食性試験方法
Fig. 9 Corrosion resistance test method.

測定した。試験条件はJIS Z 2241に準拠したものであり、内圧で発生する管軸方向の引張力で抜けるおそれがないことを確認する目的で実施した。

4. 実験結果

4.1 接合性に及ぼす材料配置の影響

ノンシールタイプのサンプルを用いて、メカニカル接合の接合性に及ぼす材料配置の影響について検討した。図10に溝深さと内外径変化量の関係を示す。外側に α 系ステンレス鋼管を、内側に銅管を配置した場合、 α 系ステンレス鋼管の外径変化量に対する銅管の内径変化量は同等であった。一方、外側に銅管を、内側に α 系ステンレス鋼管を配置した場合、銅管の外径変化量に対する α 系ステンレス鋼管の内径変化量は約3/5であった。このように、銅管を外側に配置すると、溝加工による接合性が低下する。

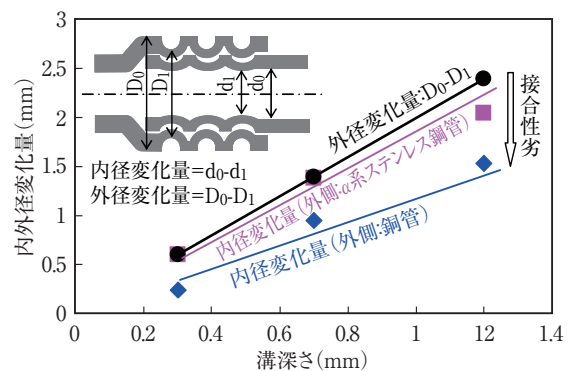


図10 溝深さと内外径変化量の関係
Fig. 10 Relation between groove depth and change internal and external diameter.

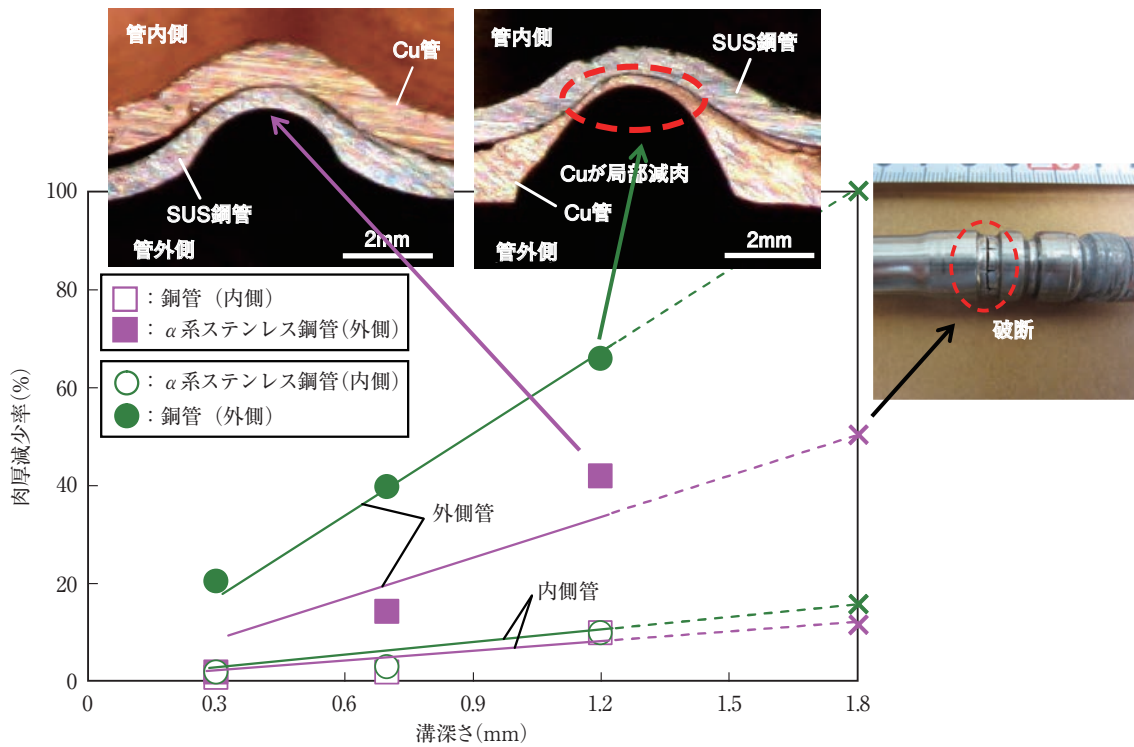


図11 溝深さと肉厚減少率の関係
Fig.11 Relationship between groove depth and thickness reduction rate.

図11に溝深さと肉厚減少率の関係を示す。材料の配置によらず、溝深さが増加することで肉厚減少率は増加した。肉厚減少率は外側に配置した管で大きく、とくに軟質な銅管の肉厚減少率は硬質なα系ステンレス鋼管のそれに比べ2倍程度大きかった。一方、内側に配置した管の肉厚減少率は材料によらず同程度であった。溝深さ1.8mmで溝底部に破断が生じた。

上記の結果から、継手性能を確保する上で、外側に硬質なα系ステンレス鋼管を配置することが適切と判断し、以後の性能評価試験では、外側に配置する管にα系ステンレス鋼管を、内側に配置する管に銅管を用いた。

4.2 メカニカル接合部の性能評価結果

(1) 耐圧試験

図12に耐圧試験結果を示す。溝深さを深くすることでシーリング剤の有無によらず、目標性能である5MPa以上を満足することができる。

また、ノンシールタイプおよびシーリング剤塗布タイプ共に溝深さが1.2mmの条件で、銅管の母材が破断(20MPa)する高い耐圧性を示した。適正な溝深さを選定すればシーリング剤の有無によらず目標性能を満足することが確認できた。

しかし、図12に示したようにノンシールタイプはシー

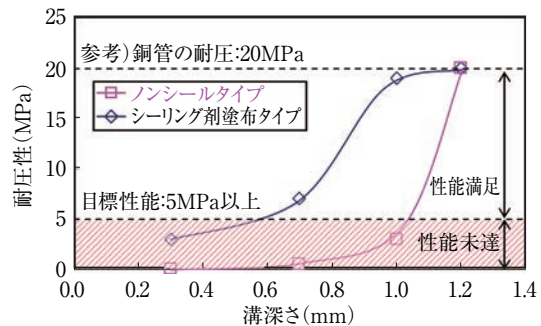


図12 耐圧性におよぼす溝深さの影響
Fig.12 Influence of groove depth on pressure resistance.

リング剤塗布タイプに比べ、目標性能を満足する溝深さが深くかつ適正範囲が狭いため、溝底部での材料破断の可能性が高くなり、量産加工における品質の安定性が低いことが予想される。

そのため、以後の疲労試験および耐食性試験では、シーリング剤塗布タイプで最大の耐圧を示した溝深さ1.2mmについてのみ性能評価した。

(2) 疲労試験

図13に疲労試験における圧力推移を示す。100万回の試験完了まで、最大・最小の圧力の変化は認められず、漏水などの異常も認められなかった。疲労試験完了後に

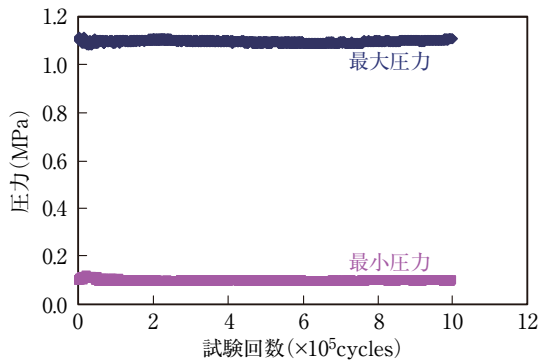


図13 疲労試験における圧力推移 (0 ~ 100万回)
Fig.13 Transition of pressure in fatigue test (0 to 1 million times).

サンプルの外観観察も行ったが、破損等の不具合は認められなかった。

上記結果から、接合部は目標の疲労特性を満足した。

(3) 耐食性試験

表6に耐食性試験30日後のサンプル状況を示す。半割したサンプルの内側を観察した結果、銅管に腐食(緑青)が認められた。一方、 α 系ステンレス鋼管は、変色はあるものの腐食の発生は認められなかった。また、接合部を分解した後、錆およびシーリング剤を除去し、管同士の接触面側を観察したが、どちらの管にも異種材料接触面での局所的な隙間腐食や著しい全面腐食は認められなかった。

以上のように、接合部では実用上問題となる腐食は認められず、目標の耐食性を満足した。

(4) 接合強度試験

図14に溝深さと接合強度の関係に及ぼすシーリング剤塗布の影響を示す。各溝深さにおいてノンシールタイプはシーリング剤塗布タイプよりも接合強度が高かった。ノンシールタイプの接合強度は最大で銅管母材の引張強さの8割程度、シーリング剤塗布タイプで7割程度

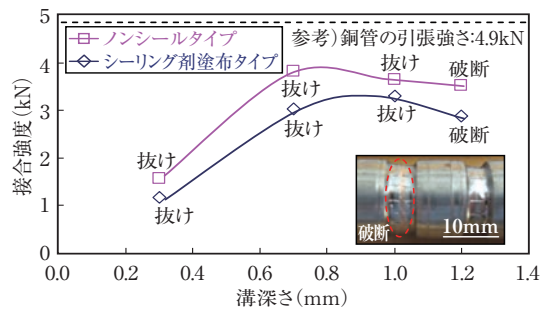


図14 溝深さと接合強度の関係に及ぼすシーリング剤塗布の影響
Fig.14 Influence of sealing on the relation between groove depth and joint strength.

であった。耐圧試験では、溝深さ1.2mmで最大の耐圧性を示したが、接合強度では溝深さ0.7~1.0mmで最大の接合強度を示した。接合部の強度は、母材破断には至らないものの、耐圧試験の目標性能であった5MPaが管内部に負荷された際に、管軸方向に作用する可能性がある最大引張荷重(内側の周方向断面積×内圧=引張荷重)の6~7倍の値を有している。

上記の結果から、接合部は目標の接合強度を満足した。

4.3 接合部の性能評価まとめ

表7に、 α 系ステンレス鋼管を外側に配置した場合の性能評価の総括を示す。

耐圧試験ではシーリング剤の有無にかかわらず、適正な溝深さを付与することによって十分な耐圧性を確保できるが、ノンシールタイプは目標性能を満足する溝深さが深くかつ適正範囲が狭いため量産時の品質の安定性に課題が残る。一方、シーリング剤塗布タイプは目標性能を満足する適正範囲が広く、量産安定性に有利と判断される。

シーリング剤塗布タイプは、その他の評価項目である

Table 6 Sample status after 30 days of corrosion resistance test
表6 耐食性試験30日後のサンプル状況

内側	管同士の接触面側	
	取外しまま	錆・シーリング剤除去
半割		

Table 7 Summary of performance evaluation when ferrite stainless steel pipe is arranged on the outside
表7 α 系ステンレス鋼管を外側に配置した場合の性能評価の総括

接合の種類	評価項目					総合評価
	耐圧試験		疲労試験	耐食試験	接合強度試験 (kN)	
	◎	×				
ノンシールタイプ	◎	×	—	—	最大3.8	×
シーリング剤塗布タイプ	◎	○	○	○	最大3.3	○

疲労試験や耐食性試験においても接合部からの漏水や破断はなく、接合強度も高い性能を示したことから、実用可能な接合方法であるといえる。

5. 結 言

α 系ステンレス鋼管 (NSS445M2) と銅管 (C1220) の異種材料管の新たなメカニカル接合技術を開発した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 新たに考案した溝加工を施すことで異種材料管同士を接合する方法では、継手性能を確保する上で、硬質な α 系ステンレス鋼管を外側に配置することが適切である。
- (2) 適正な溝深さを付与することで、十分な耐圧性、疲労特性、耐食性および実用可能な接合強度を有する接合部が得られる。

参考文献

- 1) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターホームページ, ニュースリリース「ヒートポンプ普及拡大による一次エネルギー及び温室効果ガスの削減効果について」(2017), <http://www.hptc.or.jp/index/newsrelease/tabid/1351/Default.aspx>, (閲覧日: 2017年10月13日).
- 2) 一般社団法人日本冷凍空調工業会ホームページ, 自主統計「エアコンとヒートポンプ給湯器の国内出荷実績」, <http://jraia.or.jp/statistic/index.html>, (閲覧日: 2016年3月15日).
- 3) 一般社団法人日本伸銅協会ホームページ, 伸銅品のデータベース「地金生産と価格」, <http://copper-brass.gr.jp/databases/statistics>, (閲覧日: 2016年3月15日).
- 4) 日新製鋼株式会社ホームページ, 製品一覧・カタログ, <http://products.nisshin-steel.co.jp/list/#anc2-2>, (閲覧日: 2017年10月13日).
- 5) 日新製鋼製品技術資料, NSS445M2高耐食性フェライト系ステンレス鋼, CF00194bJ (1995), 1-2.
- 6) 三菱伸銅株式会社ホームページ, 製品情報, 無酸素銅・タフピッチ銅・りん脱酸銅, 物理的性質, <http://www.mitsubishi-shindoh.com/ja/products/material/cu.html>, (閲覧日: 2017年10月13日).
- 7) 川下研介, 若林鐵生: 配管工学ハンドブック I, 第1版 (1977), 7-17.