

ろう付によるオールチタン製熱交換器の製作

松 康太郎(東京ブレイズ株式会社)

宮澤 靖幸(東海大学)

恩澤 忠男(東京工業大学)

有賀 正(東海大学)

1. 緒言

熱交換器はあらゆる産業分野で使用されており、その種類や形状は多岐にわたっている。中でもろう付タイプのプレート型熱交換器は軽量かつコンパクト、また高性能であるなどの理由から幅広く使用されている。特に自動車のオイルクーラーやラヂエーター等はその最たる物であろう。

このような中、様々な環境下で熱交換器が使用されているが、腐食環境下では耐食性の良い材料が必然的に用いられてきた。ステンレス鋼は最もポピュラーな耐食材料であるが、そのステンレス鋼でさえ腐食されてしまうような環境では、それ以外の材料が用いられている。さまざまな材料がある中、近年耐食性のよい構造材料の最たるものとしてはチタンをあげることが出来る。

チタン製の熱交換器は世の中に存在するが、そのほとんどは溶接構造でできているために、形状に制限がある。従って、軽量、コンパクトで高性能なプレートタイプの熱交換は、溶接構造では作製出来ないのがガスケットタイプのみが存在している。チタンのろう付タイプ熱交換器が作られなかった理由は、十分に耐食性があるろう材がこれまでに存在しなかった為である。チタンのろう付自体は以前から数多く研究され、実際に工業分野でも行われてきたが、そのほとんどは銀系ろうやその他のろう材でろう付を行ったものであった。しかし近年、構造材料のろう材として十分な耐食性を持ち、かつ低融点のチタン系ろう材が東京工業大学の恩澤らにより開発された。

そこで本研究では、恩澤らによって開発された数種類のチタン系ろう材を用いろう付し、接合部組織観察、接合強度測定、ろう材耐食性評価を行い、ろう材の性質を系統的に再調査した。そしてろう付タイプの熱交換器に最も適するろう材を選び、実際に製品を作製することを目的とした。さらにその熱交換器と現存する熱交換器の性能を比較した。

2. 実験方法

接合母材には工業用純チタン(2種)を用いた。試験片の形状は図1に示す形状に加工した。この形状の試験片を用いたせん断試験方法は宮澤ら¹⁾により推奨された方法で、図2に示したせん断治具で定量的な強度測定を行うことができ、従来に比べ試験片の作製が容易である。ろう材には恩澤らが開発したチタン系ろうから4元系の2種類を使用した²⁾。それらのろう材組成を表1に示した。これらのろう材は粉末形状で、バインダーと混合してペースト状にしろう付部に塗布した。ろう付は真空炉を用い真空中(7×10^{-6} torr)で行った。ろう付時間は10minと60minとした。ろう付温度は実際の作業を想定して880℃で一定とした。ろう付後、断面組織観察をSEI(Secondary Electron Image)により観察した。また、EDXを用いて元素分析を行った。機械的

性質を圧縮せん断試験により評価した。せん断試験はAUTOGRAPHを用い、クロスヘッドスピードは 1mm/minとした。また、これらのろう材の耐食性試験を行った。熱交換器の実際の使用状況を想定し、浸漬試験にて経過時間後の腐食減量を測定することで耐食性の評価を行った。腐食液として塩酸(5%)、次亜塩素酸ソーダ(2%)、人工海水(3.5%)、アンモニア水(10%)を使用した。

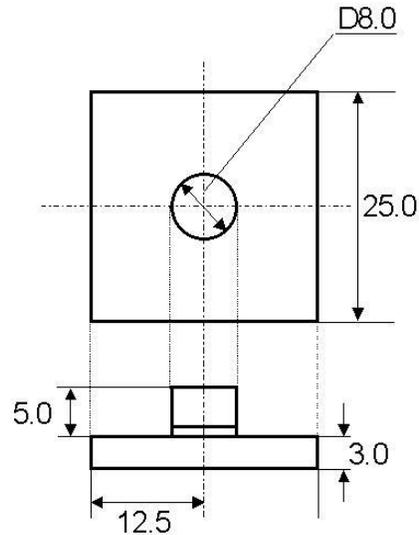


図1 せん断試験片の形状

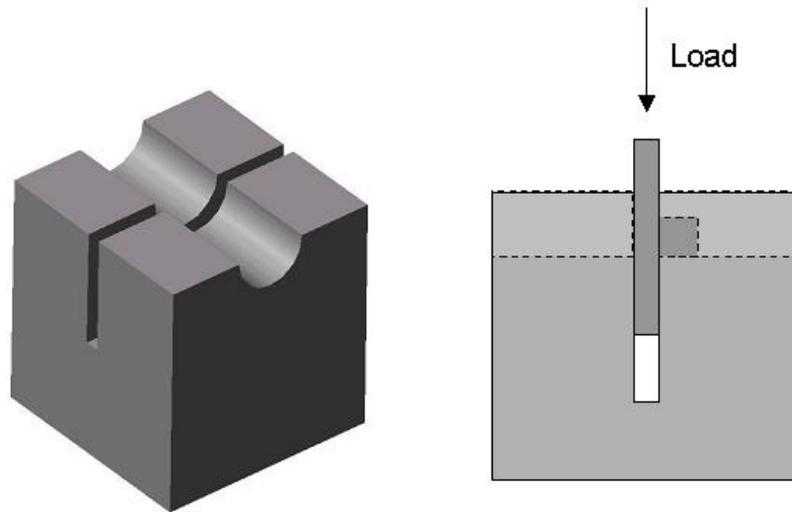


図2 せん断試験用治具の外観図

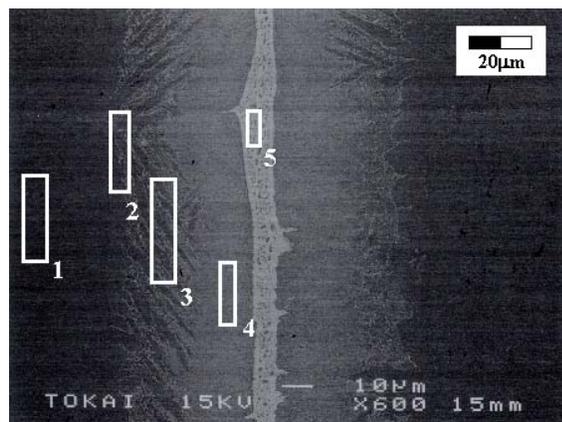
表1 使用したチタン系ろうの化学組成(wt%)

Filler Metal	Chemical Composition (wt%)				Melting Range (°C)
	Ti	Zr	Cu	Ni	
TB-1510	37.5	37.5	15	10	842(eutectic)
TB-2020	40	20	20	20	810-867

3. 実験結果及び考察

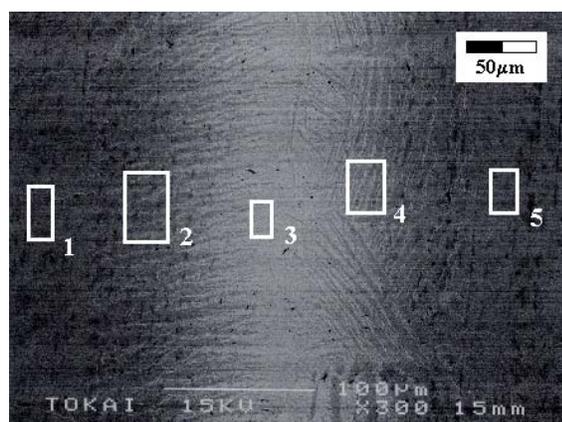
本研究ではすべての試験片においてポイドやクラックの無い良好な接合体を得ることができた。図3にTB-1510を用い10min保持した接合部組織と元素分析結果を示した。接合部中央にはろう材の組成とほぼ同じ組織が確認され、ろう材層が残っていることがわかった。接合界面にはTi-Zr固溶体の初晶が形成された。接合界面の母材側には黒い線状の相の間にラメラ組織が混在する針状組織が確認された。図4に60min保持した接合部組織を示した。10min保持では存在したろう材層は消失し、初晶と針状組織のみが接合界面で確認された。これはろう材中のZr、Cu、Niの融点降下元素が母材中に拡散し、接合部が等温凝固した組織である³⁾。基本的に同じ成分のTB-2020でも同様の組織が観察された。

針状組織中の微細組織を詳しく調べると、黒い線状の組織は初析の(α -Ti、 α -Zr)固溶体であった。一方、ラメラ組織は共析反応により析出した(α -Ti、 α -Zr)固溶体と、Ti₂NiとTi₂CuにZrが固溶している組織であることが状態図により推測された。



Position	Chemical Composition (mass%)			
	Ti	Zr	Cu	Ni
1	100	0	0	0
2	85	7	5	3
3	78	13	6	3
4	68	21	8	3
5	35	33	22	10

図3 ろう付部界面の2次電子像とEDX分析結果(TB-1510、880°C、10min)



Position	Chemical Composition (mass%)			
	Ti	Zr	Cu	Ni
1	97	0	1	2
2	80	12	5	3
3	70	20	8	2
4	83	10	4	3
5	98	0	1	1

図4 ろう付部界面の2次電子像とEDX分析結果(TB-1510、880°C、60min)

図5にTB-1510とTB-2020の880°C、10minと60minでろう付した試験片のせん断試験による強度測定結果を示した。各ろう材ともに60minでは良好なせん断強度を示した。破断形態は

いずれも母材を引きずる形で起きていたので、母材強度と同等の強度が得られていると考えられる。

一方 10min では強度が著しく低下した。せん断試験後の断面組織を観察したところ、破断位置は全てろう材層中で発生していた。

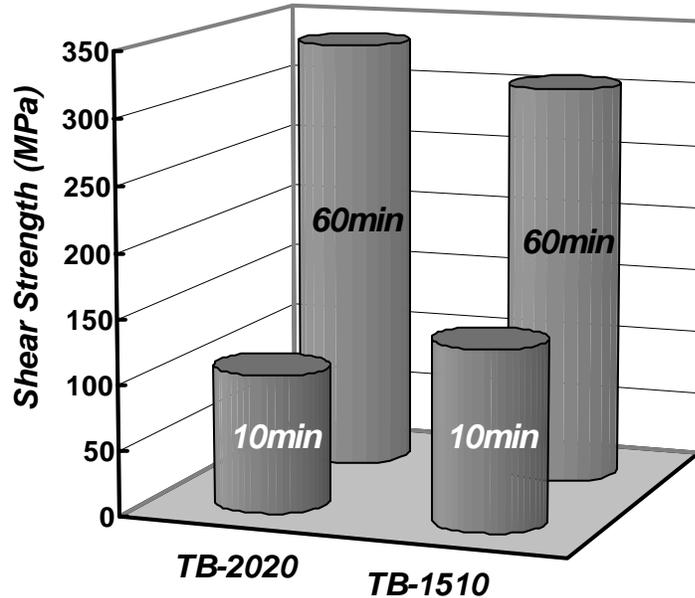


図5 せん断試験結果

図6と図7に TB-1510 の 880℃、10min と 60min でろう付した試験片接合部の硬度分布測定結果を示した。図中横軸の 0 を接合界面の中心として測定した。

図6はろう付時間 10min の試験片の硬度測定結果で、中心部ろう材層の硬度が Hv = 約 600 と非常に硬い組織が残っていることが確認された。ろう付時間 10min ではこの硬い組織が界面に残留していることにより、接合強度が低下していることが判明した。

一方図7に示したろう付時間 60min の試験片の硬度測定結果では、接合界面には母材と比較して著しく硬度の高い組織は存在ないので、せん断試験後での破断は母材を引きずる形で発生した。この結果より接合体は母材同等の強度を得られていたことが判明した。

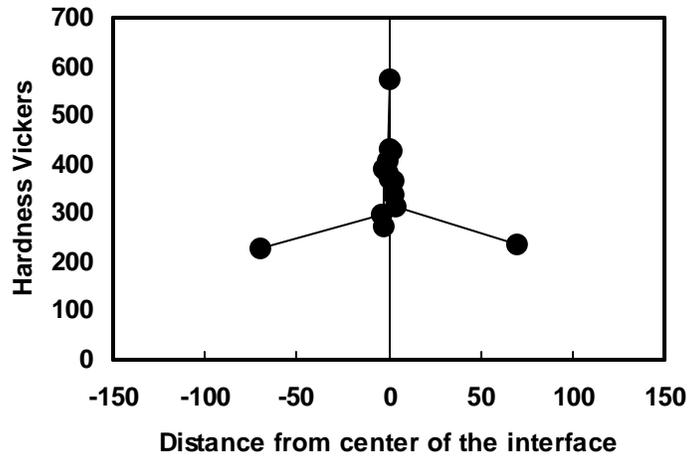


図6 ろう付部界面の硬度分布 (TB-1510、880°C、10min)

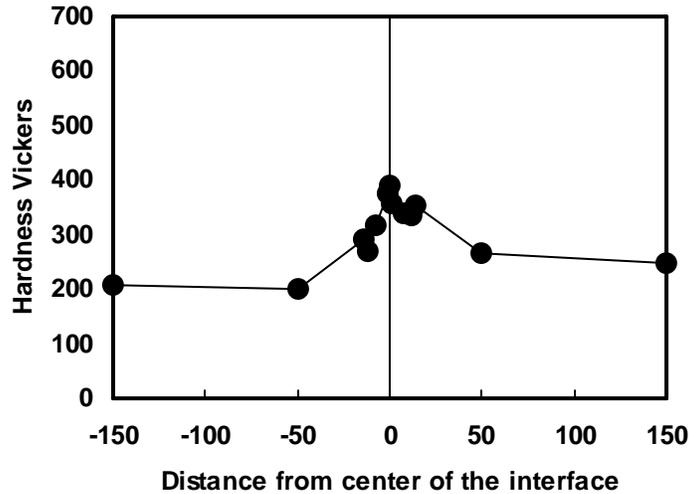


図7 ろう付部界面の硬度分布 (TB-1510、880°C、60min)

表2に浸漬 720 時間後の各試料の耐食性試験結果を示した。○は外観で全く腐食が確認されず腐食減量の全く無かった状態で、△は外観で微量の腐食もしくは微量の腐食減量が確認された状態を指す。×は著しく腐食された状態を指す。TB-1510 はどの腐食液に対しても全く腐食されず良好な耐食性を示した。TB-2020 は次亜塩素酸ソーダに対して微量の腐食減量が確認された。比較試料として試験を行った工業用純チタンはどの腐食液に対しても全く腐食されなかったが、SUS304 は塩酸と次亜塩素酸ソーダで著しい腐食が確認された。また、アンモニアに対しても微量の腐食が確認された。

表2 浸漬試験による耐食性試験結果(720 時間後)

	TB-1510	TB-2020	CP-Ti	SUS304
塩酸 HCl (5%)	○	○	○	×
次亜塩素酸ソーダ NaClO (2%)	○	△	○	×
人工海水 NaCl (3.5%)	○	○	○	○
アンモニア水 NH ₃ (10%)	○	○	○	△

4. まとめ

- (1) 本研究で使用した 2 種類のろう材ともに、短いろう付時間では接合部中央ろう材層が残った。ろう付時間の増加とともに Ti-Zr 固溶体の初晶が成長し、接合部では等温凝固によりろう材層が消失し初晶と針状組織のみの組織になった。
- (2) 各ろう材ともに、880℃、60min でろう付を行った場合には、母材強度と同等の接合強度がせん断試験により確認できた。
- (3) ろう付時間 10min では、接合界面中心部に Hv=約 600 と非常に硬いろう材層が残留し、接合強度を著しく低下させていた。
- (4) 腐食試験の結果、TB-1510 は全く腐食されず良好な耐食性を示した。TB-2020 は次亜塩素酸ソーダに対して微量の腐食減量が確認された。
- (5) 熱交換器の作製には、ろう材の融点、強度、耐食性を考慮して TB-1510 が最も適していると判明した。

5. 熱交換器の作製

試験結果より、TB-1510 を用いてプレート型熱交換器を作製した。プレート型熱交換器にはプレートフィンタイプとインナーフィンタイプとがあるが、今回作製した熱交換器には接合面積が多く製品の強度を確保でき、また流水抵抗の少ないインナーフィンタイプを採用した。インナーフィンには特別形状のスタックドフィンを採用し、熱交換率の向上を図った。図8に内部構造と流体通路の模式図を示した。

ろう材はペーストろうを使用し、ろう付は真空炉を用いて真空と Ar キャリアガスを併用した雰囲気中で行った。ろう付製品の外観写真を図9に示した。表3には熱交換器の仕様と実際に測定した性能を示した。

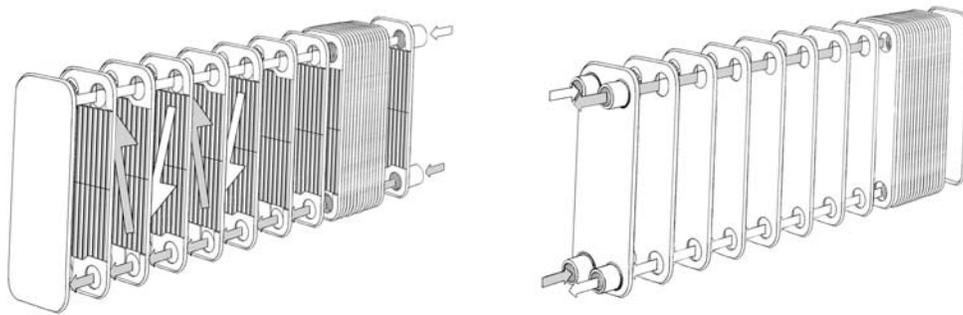


図8 熱交換器の内部構造と流体通路の模式図



図9 ろう付製品の外観写真

表3 熱交換器の仕様と性能

品番	TB-HE-Ti-5	TB-HE-Ti-10
形式	インナーフィンタイプ(スタックドタイプ Vフィン)	
寸法	311 x 90 x 72mm	311 x 90 x 113mm
回路数	高温側 5 / 低温側 6	高温側 10 / 低温側 11
熱交換面積	0.260m ²	0.521m ²
最大流量	20L/min	40L/min
熱交換量	20,000Kcal/hr	40,000Kcal/hr
使用圧力(常用/最大)	10 kg/cm ² / 30 kg/cm ²	10 kg/cm ² / 30 kg/cm ²
本体重量	2.16 kg	3.82 kg

6. 熱交換器の性能比較

(1) シェル・アンド・チューブタイプの熱交換器との比較

- 直径 100mm x 長さ 500mmの熱交換器では、伝熱面積は約 0.05m²で熱交換性能は 3,000Kcal/hr
- 外観上がほぼ同じプレート型熱交換器(TB-HE-Ti-5 型)は、伝熱面積が約 0.3m²で 6 倍となり、性能は 6~7 倍となる
- 直径 170mm x 長さ 1,000mm のシェル・アンド・チューブタイプ熱交換器と該当する

(2) 自動車用ラジエーター熱交換器との比較

- ・乗用車用は 1,500～2,000cc クラスで 15,000～20,000Kcal/hr (TB-HE-Ti-5 型と同等)
- ・トラック 4 トン車クラスで 40,000Kcal/hr (TB-HE-Ti-10 型と同等)
- ・トラック 10 トン車クラスで 100,000Kcal/hr

7. 総括

恩澤らが開発したチタン系ろう材を再調査し、ろう付タイプのプレート型熱交換器に最も適するのは TB-1510 であることが判明した。また、最適なろう付条件を導き出した。このろう材で 2 種類のろう付タイプのプレート型熱交換器を作製し、その性能は非常に高いことがわかった。今後耐食性の要求される環境下で、コンパクトかつ高性能の熱交換器としてこのオールチタン製プレート型熱交換器が使用できることがわかった。

参考文献

-
- ¹⁾ Y. MIYAZAWA, T. ARIGA, and K. MATSU, Strength of Stainless Steel Joint Brazed by Various Nickel-Based Brazing Filler Metals, 128th The Japan Institute of Metals Spring Meeting Proceedings, Narashino, (2001), p337
 - ²⁾ T. ONZAWA, A. SUZUMURA, M. KO, Structure and Mechanical Properties of CP Ti and Ti-6Al-4V Alloy Brazed Joints with Ti-Base Amorphous Filler Metals, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 5 (1987), p205
 - ³⁾ T. ONZAWA, A. SUZUMURA, M. KO, Microstructure of Titanium Joint Made with Ti-Zr Base Brazing Fillers, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol. 7 (1989), p455