Pd-Ni 系パラジウムろうによるステンレス鋼 SUS316L の耐熱ろう付*

—新開発パラジウムろうによるステンレス鋼 SUS316L の耐熱ろう付 (第 2 報)—

出井 裕**, 末澤 芳文**

Heat-resisting Brazing of Stainless Steel SUS316L with

Palladium-Nickel Based Filler Metals*

—Heat-resisting Brazing of Stainless Steel SUS316L with Newly Developed Palladium
Containing Filler Metals (Report 2)—

by Hiroshi Izui** and Yoshifumi Suezawa**

This paper summarized metallurgical and mechanical properties of stainless steel SUS316L joints brazed with two types of newly developed palladium-nickel based filler metals, 40Pd-50Ni-10Co, 30Pd-50Ni-10Cu-10Co, commercial palladium containing filler metal, 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10), and nickel-based filler metal, Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B.

The main results obtained were as follows:

- (1) The maximum joint strengths at room temperature were the joints brazed with the palladium-nickel based filler metal 40Pd-50Ni-10Co and 30Pd-50Ni-10Cu-10Co, then the mean values were 516 MPa.
- (2) The 30Pd-50Ni-10Cu-10Co filler metal showed the highest joint strength at 873 K or below, and the 33Pd-64Ag-3Mn filler metal showed the highest joint strength at 1073 K.
- (3) Joints brazed with 40Pd-50Ni-10Co and 30Pd-50Ni-10Cu-10Co have superior creep rupture resistance at 673 K and 873 K, and the brazed joints with Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B offered longer rupture time at 1073 K than those with palladium-nickel base filler metals.
- (4) The 30Pd-50Ni-10Cu-10Co filler metal is the best filler metal for heat-resisting brazing.

Key Words: Palladium-nickel based brazing filler metals, stainless steel, SUS316L, Joint strength, Creep rupture resistance, High temperature strength

1. 緒 言

本研究は従来からの耐熱ろう材であるニッケルろうや金ろうより高温強度が高く、さらに金ろうより経済性に優れたパラジウムろうを開発するものである。前報¹⁾では 3 種類の Pd-Cu 系パラジウムろう 30Pd-60Cu-10Co, 30Pd-60Cu-10Ni および 30Pd-50Cu-10Ni-10Co を試作し、これらのろう材で SUS316L を真空ろう付し、各ろう付部のミクロ組織、常温と高温における継手強度さらにろう付部のクリープ破断強度について比較検討し、高温強度に優れた継手が得られるろう材とそのろう付条件を調べた。その結果、試作ろう 30Pd-50Cu-10Ni-10Co のろう付継手が常温および高温強度に優れていることを明らかにした。

今回の報告では前報の Pd-Cu 系ろうより融点の高い Pd-Ni 系パラジウムろう 40Pd-50Ni-10Co および 30Pd-50Ni-10Cu-10Co を試作した。これらのろう材と比較するために市販されている JIS 規格のパラジウムろう 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10) とニッケル基アモルファスろう Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B を用いた。これらのろう材で SUS316L を真空ろう付し、各ろう付部のミクロ組織観察、EPMA による成分分析、常温および高温引張試験等を行い、各ろう材のろう付性および常温と高温における

継手強度について検討を行った。さらにろう付部のクリープ破断試験を実施し、各ろう付部のクリープ破断強度を調べた。

2. 実験方法

2.1 供試材料

本研究で使用した母材は前報と同じくオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L で、その化学組成を Table 1 に示す。この母材は Fe-Cr-Ni 系で、高強度かつクリープ強度が高く、耐酸化性と耐食性に優れた材料である。

本研究で新たに試作したパラジウムろうは Pd-Ni 系ろう 40Pd-50Ni-10Co および 30Pd-50Ni-10Cu-10Co である。これらのろう材は次のごとく作製した。Pd-Ni 系に Co および Cu 元素を添加し、Pd-Ni-Co の 3 元態

Table 1 Chemical compositions (mass%) of base metal SUS316L.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.017	0.49	1.37	0.032	0.002	16.85	12.26	2.03	Bal.

Table 2 Chemical compositions (mass%) of brazing filler metals.

	Pd	Ag	Mn	Ni	Co	Cu	Cr	Mo	Fe	B
40Pd-50Ni-10Co	40.0	---	---	50.1	9.9	---	---	---	---	---
30Pd-50Ni-10Cu-10Co	30.0	---	---	50.0	10.0	10.0	---	---	---	---
33Pd-64Ag-3Mn	33.3	63.6	3.1	---	---	---	---	---	---	---
Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B	---	---	---	Bal.	23.0	---	10.0	7.0	5.5	3.5

*原稿受付 平成 4 年 5 月 20 日 平成 3 年度秋季全国大会で発表、
平成 3 年 11 月 界面接合研究委員会発表

**正 員 日本大学 Member, Nihon University

Table 3 Solidus and liquidus temperatures of brazing filler metals.

Filler metal	Solidus	Liquidus
40Pd-50Ni-10Co	1543 (K)	1553 (K)
30Pd-50Ni-10Cu-10Co	1523	1548
33Pd-64Ag-3Mn	1403	1503
Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B	1330	1438

Fig. 1 Dimensions of brazed specimen.**Table 4** Brazing conditions.

Filler metal	Brazing temp.	Brazing time	Pressure
40Pd-50Ni-10Co	1563 (K)	5 (min)	2.6×10^{-5} 6.7×10^{-5} (Pa)
30Pd-50Ni-10Cu-10Co	1573		
33Pd-64Ag-3Mn	1503		
Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B	1473		

図²⁾より合金の融点が約1573 K以下となる組成を選んだ。さらにろう材の加工性も考慮し、これらのパラジウムろうは延性に富み、容易に圧延加工で箔となるろう材である。また今回使用した市販のろう材は JIS 規格のパラジウムろう 33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)で、JIS 規格のパラジウムろうではろう付温度の高いろう材に属する。またもう一方のろう材は Ni 基アモルファスろうは Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B で、ステンレス鋼の接合に適し、高温引張およびラプチャー試験で高い強度を示すろう材である。各ろう材の化学組成、固相線温度と液相線温度をそれぞれ Table 2, Table 3 に示す。なおパラジウムろうは真空溶解した後、厚さ 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm に圧延したものを使用した。

2.2 ろう付方法

ろう付試験片は次のごとく作製した。Fig. 1 に示すごとく、まず厚さ 5 mm の母材を幅 10 mm, 長さ 30 mm に切断し、次にろう付面を #400 のエメリー紙で Z 方向に研磨した。またろう材は幅 6 mm, 長さ 11 mm に切断した。これらの母材とろう材をアセトン中で超音波洗浄を行った後、母材を長手方向に突き合わせ、母材間に所定の厚さのろう材を挟み、母材と同一材質 (SUS316L 製) のろう付治具にセットし、真空抵抗加熱炉内でろう付を行った。また、ろう付間隙は挟んだろう材の厚さによって調節した。各ろう材のろう付条件を Table 4 に示す。

まず各ろう材について拡がり試験を行った。一辺が 25 mm の正方形板 (板厚 0.15 mm) 上に重量 0.1 ± 0.001 g の粒状のろう材を置き、Table 4 に示した各ろう付温度で、保持時間を 5 分, 10 分, 20 分としたときのろうの拡

がり面積を測定した。

光学顕微鏡によるろう付部のマイクロ組織観察を行い、次に X 線マイクロアナライザ (EPMA) によるろう付部の成分分析 (線分析) を行った。またマイクロビッカース硬度計 (荷重 50 g) を用いて、ろう付部のヌープ硬度を測定した。さらにろう付部の継手強度を調べるために、インストロン材料試験機 (引張速度 0.5 mm/min) を用いて、まず常温引張試験を行い、次にこの試験機に電気炉を取り付け、473 K, 673 K, 873 K, 1073 K の試験温度で大気中における高温引張試験を行った。さらに 673 K, 873 K, 1073 K におけるクリープ破断試験を行い、負荷応力に対する破断時間を調べた。

試験片形状は前報と同じで、常温引張試験片は前述の Fig. 1 に示したろう付した状態のものを使用し、高温引張試験とクリープ破断試験の試験片はろう付部を直径 4.5 mm, 長さ 10 mm の丸棒に機械加工したものを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 各ろうの拡がり性

Fig. 2 は各ろう材の保持時間に対するろうの拡がり面積を示したものである。この図から分かるごとく、いずれのろう材も拡がり面積は保持時間とともにわずかに拡がり面積は増加した。最も良好な拡がり性を示すろう材は 33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)で、30Pd-50Ni-10Cu-10Co とニッケルろう Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B の拡がり面積にはあまり差は認められない。またパラジウムろう 40Pd-50Ni-10Co は他のろう材に比べて拡がり性が劣った。

3.2 ろう付部のマイクロ組織、硬度分布および EPMA による成分分析

3.2.1 40Pd-50Ni-10Co のろう付部

Fig. 3 は 40Pd-50Ni-10Co のろう付組織、ろう付部の EPMA による線分析と硬度分布を示したものである。Fig. 3 (a) に示したマイクロ組織より、ろう付部では特に偏析は認められない。またろう付界面でわずかに凹凸がみられ、界面に沿ってろう材中に暗色の層が存在した。さらに界面近傍の母材で黒色の層が観察できる。Fig. 3 (b) の EPMA 分析より、母材成分の Fe はろう材部全体に拡散しているが、ろう付界面近傍で濃度が高く、この暗色の相は母材からろう材中に拡散した Fe の濃度が高いため生じたものと思われる。また母材の界面近傍の黒色の層は母材に拡散したろう材成分によって生じた拡散層と

Fig. 2 Relation between spreading area and keeping time of each brazing filler metal.

(a) Microstructure

(b) EPMA analysis

(c) Hardness distribution

Fig. 3 Microstructure, EPMA analysis, and hardness distribution of brazed joint with 40Pd-50Ni-10Co.

思われる。母材/ろう材界面の凹凸は母材がろう材部に溶出したために生じたことが考えられる。ろう材部ではPd, Ni, Coともほぼ一定の濃度を示した。Fig. 3(c)に示したろう付部の硬度分布では母材の硬度が約175 H_Kを示すが、ろう材部ではほぼ約240 H_Kの一定の硬度を示し、ろう付界面での硬度上昇はみられない。

3.2.2 30Pd-50Ni-10Cu-10Coのろう付部

Fig. 4は30Pd-50Ni-10Cu-10Coのろう付組織、EPMAの線分析および硬度分布である。Fig. 4(a)に示すごとく、このろう付部も特に偏析は認められず、40Pd-50Ni-10Coと同様にろう付界面に暗色の相がみられた。Fig. 4(b)のEPMA分析より、母材成分のFeがろう材中に拡散し、界面からろう材中央部に近づくにつれFe濃度が徐々に減少し、中央部でFe濃度が低く、逆にNi, Pd, Cu濃度がわずかに高い。またFig. 4(c)のろう付部の硬度分布より、ろう材部で硬度にばらつきがみられ、中央部の白色の相で約300 H_Kの硬度を示し、ろう付界面のFe濃度が高い相では硬度が180~270 H_Kとなり、ろう材部では母材より高い硬度を示した。

3.2.3 33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)のろう付部

Fig. 5は33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)のろう付組織、ろ

(a) Microstructure

(b) EPMA analysis

(c) Hardness distribution

Fig. 4 Microstructure, EPMA analysis, and hardness distribution of brazed joint with 30Pd-50Ni-10Cu-10Co.

う付部のEPMA分析および硬度分布である。Fig. 5(a)に示したこのろう付組織はろう付界面とろう材部のマトリックス中に白色の相が観察でき、界面で柱状組織またろう材部で粒状組織を形成した。Fig. 5(b)の線分析より、この白色の相ではPd濃度が高く、わずかにAgとMnが固溶し、さらに母材のFeが拡散してPdと合金層を形成した。またろう材部のマトリックスはAg濃度が高く、わずかにPdが固溶している。ろう材部にはMnが濃化した微細な球状組織が点在した。Fig. 5(c)の硬度分布より、ろう材部のAg濃度が高いマトリックスで硬度が100~150 H_Kと低く、界面のPd濃度が高い相で硬度が約240 H_Kに上昇した。

3.2.4 Ni-Co-Cr-Mo-Fe-Bろう付部

Fig. 6はニッケルろうNi-Co-Cr-Mo-Fe-Bのろう付組織、EPMA分析および硬度分布である。Fig. 6(a)から分かるごとく、このろう付部では母材と母材粒界でニッケルろうによくみられるろうの著しい拡散が生じた。またろう材部では複雑な形状をした不均一な組織が観察できる。Fig. 6(b)に示したEPMA分析より、ろう材部では各元素の濃度変化が大きい。ろう材部に生成した複雑な

(a) Microstructure

(b) EPMA analysis

(c) Hardness distribution

Fig. 5 Microstructure, EPMA analysis, and hardness distribution of brazed joint with 33Pd-64Pd-3Mn (BPd-10).

(a) Microstructure

(b) EPMA analysis

(c) Hardness distribution

Fig. 6 Microstructure, EPMA analysis, and hardness distribution of brazed joint with Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B.

形状の相では Mo と Cr の濃度が高く、その分 Ni と Fe 濃度が低くなっている。また界面とこの相以外の部分では Ni, Co, Fe 濃度が高くなっている。さらに母材中で Cr 濃度が高い部分があるが、これは主に Cr が母材粒界に拡散したために生じたものと思われる。Fig. 6 (c) のろう付部の硬度分布より、ろう材部の硬度は全般的に母材より高く、特に複雑な形状の相すなわち Mo と Cr 濃度が高い相で硬度が高くなった。この高硬度の相はろう材中に B を含むことからホウ化物を生成していることが考えられる。

3.3 常温における継手強度

Fig. 7 は各ろう付部の常温引張試験結果で、ろう付間隙と継手強度との関係を示したものである。また図中にはろう材 (铸造材) の引張強さも示した。40Pd-50Ni-10Co ろう付部ではろう付間隙約 0.30 mm まではほぼ一定の継手強度を示し、さらにろう付間隙が増加すると緩やかに継手強度が減少した。この継手強度はろう材の引張強さより低い。ろう付間隙 0.07~0.15 mm の平均継手強度は 516 MPa の高い強度を示した。いずれのろう付間隙でも主としてろう付界面から破断した。Fig. 8 にろう付間隙 0.16 mm における試験片 (継手強度 541 MPa) の破断

Fig. 7 Relation between tensile strength and joint clearance.

部と破断面の SEM 像を示す。この写真から分かるごとく、主としてろう付界面から破断し、一部ろう材部から破断した。その破断面は微細なディンプルを形成する延性破断となった。

Fig. 8 Cross section and scanning electron micrograph of tensile test specimen brazed with 40Pd-50Ni-10Co.

Fig. 9 Cross section and scanning electron micrograph of tensile test specimen brazed with 33Pd-64Pd-3Mn (BPd-10).

Fig. 10 Cross section and scanning electron micrograph of tensile test specimen brazed with Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B.

30Pd-50Ni-10Cu-10Co ろう付部でも 40Pd-50Ni-10Co のろう付部と同様にろう付間隙の増加にともなう継手強度の低下は少なく、広いろう付間隙でも高い継手強度が得られた。40Pd-50Ni-10Co と同様にこの継手強度もろう材の引張強さより低い値を示した。またいずれのろう付間隙の試験片とも主にろう付界面から破断し、それらの破断面は微細なディンプルを形成した延性破断の様相を呈した。ろう付間隙 0.05~0.13 mm における平均継手強度は 516 MPa を示した。

一般的なろう付部すなわちろう材より母材の強度が高い場合、ろう付間隙と継手強度の関係では継手強度の極大値が存在する。しかし Fig. 7 から分かっていくと、40Pd-50Ni-10Co と 30Pd-50Ni-10Cu-10Co のろう付部ではろう付間隙と継手強度の関係において継手強度の極大値は存在せずに、ろう付間隙 0.30 mm までほぼ一定の継手強度を示し、さらにろう付間隙が増加すると継手強度は緩やかに低下し、継手強度の極大値は存在しない。したがってこれらのろう材により、ろう付間隙の影響の少ない継手が得られることが明らかとなった。

33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10) ろう付部では、ろう付間隙の増加とともに継手強度が増加し、ろう付間隙 0.12 mm で最大継手強度を示し、さらにろう付間隙が広がると、継手強度はわずかに減少して約 200 MPa となった。ろう付間隙 0.08~0.12 mm の平均継手強度は 285 MPa で前

Fig. 11 Tensile strength of brazed joints at each temperature.

述のパラジウムろうに比べて著しく強度が低い。Fig. 9 にろう付間隙 0.12 mm のろう付部 (継手強度 295 MPa) の破断部と破断面の SEM 像を示す。ほぼろう材中央部のマトリックスから破断し、その破断面は微細なディンプルを形成した延性破断を示した。その他のろう付間隙ともろう材中央部から破断した。このろう付部の継手強度はいずれのろう付間隙でもろう材の強度を下回った。これは Fig. 5 のろう付組織と EPMA 分析から分かっていくと、このろう付部では界面に Pd が凝集するため、ろう材中央部では Ag 濃度が高く Pd 濃度が低くなった。したがってこの中央部ではろう材本来の均一な組織と異なり、ろう材の強度に比べてろう材中央部では Ag 濃度が高くなり継手強度が低めとなったものと推測できる。

ニッケルろう Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B ろう付部では、ろう付間隙の増加とともに継手強度は増加し、ろう付間隙 0.06 mm で最大継手強度を示し、さらにろう付間隙が増加すると継手強度は徐々に低下した。ろう付間隙 0.05~0.07 mm の平均強度は 295 MPa で 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10) と同程度の強度を示した。Fig. 10 にろう付間隙 0.05 mm のろう付部 (継手強度 286 MPa) の破断部と破断面を示す。この写真から分かっていくと、ろう材中央部から破断し、その破断面は延性破面を呈した。その他のろう付間隙においても破断はすべてろう材部から生じた。これは前述の EPMA 分析から脆弱なホウ化物を形成していることが考えられるため、ろう材部から破断したものである。

3.4 ろう付部の高温引張試験結果

Fig. 11 は各ろう付部の高温引張試験結果で、試験温度と継手強度の関係を示したものである。また図中に示した点線はパラジウムろうの引張強さを表している。40Pd-50Ni-10Co ろう付部では 637 K までは緩やかに継手強度が低下し、常温で 516 MPa となるが、473 K で 480 MPa、673 K で 418 MPa を示した。さらに 873 K で継手強度の低下が大きく、この温度で 268 MPa、また 1073 K で 155 MPa となり、すべての試験片が主にろう付界面から破断した。また 30Pd-50Ni-10Cu-10Co ろう付部も 873 K までは緩やかに継手強度が低下し、常温での継手強度が 516 MPa に対して、473 K で 496 MPa、673 K では 428 MPa を示し、873 K で 381 MPa となり、さらに 1073 K では 146 MPa となった。このろう付部も破断は主にろう付界面から生じた。

次に 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10) ろう付部は、873 K 以下の温度では強度低下がほとんどなく、常温での継手強度に匹敵する強度が得られ、常温で 485 MPa に対して、

473 K で 282 MPa, 673 K で 276 MPa, 873 K で 275 MPa を示した。さらに 1073 K においても 181 MPa の高い継手強度を示した。このろう付部では前述のパラジウムろうと異なりろう材部から破断した。このろう付部の継手強度は温度依存性が低い。これは Fig. 5 に示したろう付部の組織より、ろう付界面では Pd と Fe の合金層を形成しているため、界面で高温強度の上昇が考えられる。したがって、ろう材中央部では低強度の Ag リッチ相であるが、高温においても界面の Pd と Fe の合金層が Ag リッチ相の変形を拘束するため、高温でも強度の低下が少ないものと思われる。

ニッケルろう Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B のろう付部は常温で低強度であるが、試験温度に対する強度の変化が少なく、常温で 295 MPa に対して、473 K で 295 MPa, 673 K で 260 MPa, 873 K で 188 MPa, また 1073 K で 127 MPa を示した。すべての試験片はろう材部から破断した。

次に各ろう付部の高温強度を比較する。473 K と 673 K では試作ろう 30Pd-50Ni-10Cu-10Co が最も継手強度が高く、次に 40Pd-50Ni-10Co がわずかに強度が低く、33Pd-64Pd-3Mn (BPd-10) と Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B は同程度の継手強度を示した。また 873 K でも 30Pd-50Ni-10Cu-10Co が最も強度が高く、次に 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10) と 40Pd-50Ni-10Co がほぼ等しい強度を示し、Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B の継手強度が最も低い。さらに 1073 K では 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10)、次に 40Pd-50Ni-10Co と 30Pd-50Ni-10Cu-10Co がほぼ等しい強度を示し、Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B の強度が最も低い。

Fig. 12 は前報^{1,3)}で報告した優れた高温強度を示す市販のパラジウムろう 20Pd-55Cu-15Ni-10Mn (BPd-12) と試作ろう 30Pd-50Cu-10Ni-10Co、さらに今回使用したろう材の中で高い高温強度を示したろう材について高温強度を比較したものである。473 K では試作ろう 30Pd-50Ni-10Cu-10Co が最も高い継手強度を示し、他のパラジウムろうでは 30Pd-50Cu-10Ni-10Co と 40Pd-50Ni-10Co はこのパラジウムろうよりわずかに強度が低いが、高強度も継手が得られた。また 673 K では試作ろう 30Pd-50Cu-10Ni-10Co の継手強度が最も高く、次に 30Pd-50Ni-10Cu-10Co、さらに 40Pd-50Ni-10Co の順で強度が高い。この 473 K と 673 K ではこれらの試作パラジウムろうは市販されているパラジウムろうおよびニッケルろうより高い継手強度を示した。また 873 K では 30Pd-50Ni-10Cu-10Co が最も高い継手強度を示し、さらに強度の高い順に 30Pd-50Cu-10Ni-10Co, 33Pd-64Pd-3Mn (BPd-10) である。また 1073 K では 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10) が最も高い継手強度を示し、試作ろう材 30Pd

Fig. 12 Joint strength comparisons for palladium containing filler metals.

-50Ni-10Cu-10Co, 40Pd-50Ni-10Co および 30Pd-50Cu-10Ni-10Co の強度差はほとんどなく、これらパラジウムろうの継手強度は 33Pd-64Ag-3Mn (BPd-10) よりわずかに低い。

3.5 ろう付部のクリープ破断試験

Fig. 13 は各ろう付部のクリープ破断試験結果で、負荷応力と破断時間との関係を示したものである。試験時間は最高 1000 時間とし、図中に示した矢印は試験開始 1000 時間後でも破断しなかったことを表している。

673 K において優れたクリープ破断強度を示したろう材は 40Pd-50Ni-10Co と 30Pd-50Ni-10Cu-10Co で、負荷応力がいずれも 425 MPa で 1000 時間以上の破断時間

(a) 40Pd-50Ni-10Co (Clearance: 0.08-0.12 mm)

(b) 30Pd-50Ni-10Cu-10Co (Clearance: 0.08-0.13 mm)

(c) 33Pd-64Pd-3Mn (BPd-10) (Clearance: 0.09-0.11 mm)

(d) Ni-Co-Cr-Mo-Fe-B (Clearance: 0.05-0.10 mm)

Fig. 13 Relation between applied stress and rupture time.

を示した。これらのクリープ破断強度はこれまで最も高いクリープ破断強度を示した30Pd-60Cu-10Ni(負荷応力400 MPa, 破断時間1000時間以上)より優れている。またその他のろう材では33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)が負荷応力150 MPaで1000時間以上の破断時間を示した。

また873 Kで優れたクリープ破断強度を示したろう材は673 Kと同じく40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coで、負荷応力125 MPaが1000時間以上の破断時間を示した。これらのクリープ破断強度はこれまでに最も高いクリープ破断強度を示したNi-Cr-W-Fe-B-Siと等しい。またその他のろう材でNi-Co-Cr-Mo-Fe-Bが負荷応力100 MPa, 33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)が負荷応力50 MPaで1000時間以上の破断時間を示した。

1073 KではニッケルろうNi-Co-Cr-Mo-Fe-Bが優れたクリープ破断強度を示し、負荷応力75 MPaで1000時間以上の破断時間を示した。またパラジウムろうでは33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)が負荷応力50 MPaで、40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coで負荷応力25 MPaが1000時間以上の破断時間を示し、ニッケルろうより破断時間は短い。

いずれの温度においても40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coはろう付界面から破断し、また33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)とNi-Co-Cr-Mo-Fe-Bはろう材部から破断した。

673 Kと873 Kでは40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coがこれまでのパラジウムろうより高いクリープ破断強度を示した。すなわち30Pd-50Ni-10Cu-10Coと30Pd-50Cu-10Ni-10Coの高温強度はほぼ等しく、873 Kでは40Pd-50Ni-10Coの高温強度は30Pd-50Cu-10Ni-10Coより劣るが、その他の温度では40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Cu-10Ni-10Coの高温強度はほぼ等しい。クリープ破断強度は40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coが30Pd-50Cu-10Ni-10Coより高い。これらのろう付組織は特に偏析がみられず、ほぼ類似の組織を示した。したがって40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coでは30Pd-50Cu-10Ni-10Coより多くのNiが固溶しているためにクリープ強度が上昇したものと推測できる。

以上の結果より前報^{1,3)}と本研究で使したろう材では新開発のパラジウムろう30Pd-50Ni-10Cu-10Coが市販のパラジウムろうおよびニッケルろうより常温および高温強度に優れかつその強度はろう付間隙の影響をほとんど受けない継手を形成した。また673 Kと873 Kにおけるクリープ破断強度も他のろう材に比べて高い値を示した。したがって30Pd-50Ni-10Cu-10Coでは常温と高温で高強度の継手が得られることから、SUS316Lの耐

熱ろう材として十分使用可能であることが明らかとなった。

4. 結 論

ステンレス鋼316Lを新開発のPd-Ni系パラジウムろう40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Co、さらに市販のパラジウムろう33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)およびニッケルろうNi-Co-Cr-Mo-Fe-Bで真空ろう付し、各ろう付性について検討した結果は次のように要約できる。

1) 40Pd-50Ni-10Coのろう付組織では偏析はみられず、ろう材成分はろう材部でほぼ均一に分布し、母材成分Feがろう材中に拡散した。30Pd-50Ni-10Cu-10Coでも偏析は認められず、ろう材中央部でNi, Pd, Cu濃度が高く、また母材がろう材部に溶出した。33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)ではろう付界面でPd濃度が高く、母材のFeがPdと合金層を形成し、ろう材中央部ではAg濃度が高い。ニッケルろうNi-Co-Cr-Mo-Fe-Bのろう付組織ではろう材部にMoとCr濃度が高い高硬度の相がみられた。

2) 常温における継手強度は試作ろう40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coが最も高く、ろう付間隙の増加にともなう強度の低下は少ない。

3) 各温度で最も高い継手強度を示したろう材は873 K以下では試作ろう30Pd-50Ni-10Cu-10Co, 1073 Kでは市販の33Pd-64Ag-3Mn(BPd-10)であった。

4) 各温度で最も高いクリープ破断強度を示したろう材は673 Kと873 Kでは40Pd-50Ni-10Coと30Pd-50Ni-10Cu-10Coで、1073 KではNi-Co-Cr-Mo-Fe-Bであった。

5) 前報と本研究で使したろう材では試作ろう30Pd-50Ni-10Cu-10Coのろう付部が常温および高温強度に優れ、さらに高いクリープ破断強度を有する継手が得られ、このろう材は耐熱ろう材として十分使用できることが明らかとなった。

本研究の遂行に当たり、ろう材の作製にご協力いただきました田中貴金属工業株式会社、竹内健氏並びに塩田重雄氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 出井, 末澤: 本会論文集, 11-1 (1993), 13.
- 2) He Cheunxiao, Ma Guangchen, Wang Wenna, Wang Yongli, and Zhao Huaizhi: "Phase diagrams of Precious Metal Alloys", The Metallurgical Industry Press (1983).
- 3) 出井, 末澤: 高温学会誌, 19-1 (1993), 24.