ろう付部間げきが0.30~0.35 mm の ろう付部の X 線応力測定†

出 井 裕* 末 澤 芳 文*
関 口 晴 男** 若 林 忠 男***

Stress Measurement of Brazed Joints with Joint Clearance in the Range of 0.30 to 0.35 mm

by

Hiroshi IZUI*, Yosifumi SUEZAWA*, Haruo SEKIGUCHI**
and Tadao WAKABAYASHI***

This paper summarized a study of X-ray stress measurement of stainless steel SUS410 brazed joints with two types of palladium containing filler metals, BPd-7 (5Pd-95Ag) and BPd-8 (18Pd-82Cu). The brazing was performed in a resistance heated vacuum furnace. The joint clearance of brazed joints ranged from 0.30 to 0.35 mm. The brazing surfaces were polished by four types of emery papers, #80, #240, #400, and #1500, to clarify the effect of brazing surface roughness on the residual stress after brazing. The stress measurement of brazed joints was made in the longitudinal and transversal directions of the specimen by using the X-ray stress measurement technique (sin-square-psi technique).

The residual stresses σ_{xr} and σ_{yr} were compressive at the brazed joints with BPd-7 and BPd-8, and the residual stresses of the brazed joint with BPd-8 were greater than those of the brazed joint with BPd-7. In the case of brazed joint with BPd-8, the rough brazing surface produced greater residual stresses than the smooth brazing surface.

Key words : Brazed joint, Palladium containing filler metal, Joint strength, Brazing surface roughness, X-ray stress measurement, Residual stress

1 緒 言

ろう付部の継手強度に影響する要因として、母材とろう材の引張強さ、ろう付間げき、ろう付面あらさ、ろう付温度およびろう付時間などがあり、これに関する研究がこれまで数多く報告されている。例えば、Colbus¹⁾らは引張強さおよび引張せん断強さに及ぼすろう付間げき、ろう付面積および母材強さの影響について報告している。その研究の中で、母材の引張強さが高く、またろう付間げきが狭くなるほど、ろう付部の引張強さは上昇するとしている。^{2)~7)}末澤は軟鋼のろう付強度の及ぼす表面状態の影響に関する研究で、ろう付面あらさが粗いほど、引張強さ、疲労強度および衝撃強さは上昇するが、ねじり強さは低下すると報告している。また江国⁸⁾らはろう材と母材強さがろう付部の変形に影響を及ぼし、引張試験によるろう付部の破断様相が異なると述べている。⁹⁾¹⁰⁾雀部らはせん断荷重下での接合部のろうの変形挙動に関する研究で、実験的お

よび転位論的な考察をしている。

ろう付の場合、ろう材と母材の物理的、機械的性質（たとえば膨張係数、ヤング率など）が異なるため、ろう付部に残留応力が発生し、この残留応力がろう付部の継手強度に影響することが考えられる。しかし、これまでの研究では、ろう付強度や荷重下でのろう付部の応力変化に及ぼす残留応力の影響に関する報告はほとんど見当たらない。したがって、ろう付部の応力測定が必要と思われるが、微小間げきのろう付部の応力測定例はほとんどない。

そこで本研究は、応力を非破壊的に測定する X 線応力測定により、ろう付面あらさの異なるろう付部の残留応力を測定し、ろう付面および残留応力がろう付強度やろう付部の応力状態に及ぼす影響を詳細に検討し、ろう付強度向上の要因を明らかにするものである。今回の報告ではステンレス鋼 SUS410 をろう材 BPd-7 および BPd-8 で真空ろう付し、ろう付間げ

† 本報を「ろう付部の X 線応力測定 (第 1 報)」(X-Ray Stress Measurement of Brazed Joint, I) とする。

原稿受理 昭和62年9月5日 Received Sep. 5, 1987

* 正 会 員 日本大学理工学部 船橋市習志野台, College of Science and Technology, Nihon University, Narashinodai, Funabashi

** (株) 島津製作所 調布市柴崎, Simadzu Corporation, Shibazaki, Chofu

*** (株) 島津製作所 京都市左京区, Simadzu Corporation, Sakyo-ku, Kyoto

き $t=0.30 \sim 0.35 \text{ mm}$ のろう付部について応力測定を行った。ろう付部の X 線応力測定上の問題点として、(1) ろう材と母材の回折線が重なる、(2) ろう付間げきが狭いため、X 線照射面積が小さく、回折線強度が低い、(3) ろう付部の結晶粒が大きいなどが考えられ、まずこれらについて検討した。つぎにインストロン試験機(引張速度 0.5 mm/min)でろう付試験片の引張試験を行い、ろう付面あらさとろう付強さの関係を明らかにした。さらにろう付面あらさがろう付部残留応力に及ぼす影響を調べ、つぎに引張荷重下におけるろう付部の応力を測定し、ろう付面あらさがろう付部の変形挙動に及ぼす影響について検討した。

2 実験方法

2・1 ろう付方法

2・1・1 供試材料 本研究で使用した母材はマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS410 で、その化学成分を Table I に示す。またろう材は Ag-Pd 系の BPd-7 および Cu-Pd 系の BPd-8 で、その化学成分、固相線および液相線温度を Table II に示す。これらのろう材は全率固溶体を形成する合金である。ろう材は真空溶解したのち、 0.3 mm の板厚に圧延し、使用に際しては約 $6 \times 11 \text{ mm}$ の大きさに切断して使用した。Table III は母材とろう材の機械的性質および線膨張係数で、このうちろう材の線膨張係数は微小定荷重熱膨張計で測定した。

2・1・2 ろう付試験片の作製 Fig. 1(a) に示すごとく、ろう付試験片の寸法は厚さ 5 mm 、幅 10 mm 、

Table I. Chemical compositions (wt%) of base metal SUS410.

	Fe	Cr	C	Si	Mn	P	S
SUS410	Bal.	13.06	0.05	0.32	0.39	0.024	0.002

Table II. Chemical compositions (wt%) of filler metals and their solidus and liquidus temperatures.

	Pd	Ag	Cu	Solidus	Liquidus
BPd-7	4.96	Bal.	—	1243K	1323K
BPd-8	18.1	—	Bal.	1348K	1358K

Table III. Mechanical properties and expansion coefficients of SUS410 and filler metals.

Filler metal	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Coefficient of thermal expansion ϵ ($1/K^{-1}$)
BPd-7	59.8	217.5	20.3×10^{-6}
BPd-8	138.5	289.1	17.3×10^{-6}
SUS410	215.3	>540	10.1×10^{-6} (100°C) 12.2 (600°C) 11.7 (1000°C)

Fig. 1. Dimensions of brazed specimen and stress measuring directions.

長さ 30 mm で、試料のろう付面は # 80, # 240, # 400, # 1500 のエメリーペーパーで z 方向に研磨した。ろう付面の表面あらさを触針式表面あらさ計で測定し、それらのあらさを最大高さ R_{max} で表すと Table IV のごとくとなる。Fig. 2 は BPd-8 でろう付した各母材あらさの接合界面の状態を示したものである。

ろう付試験片の作製はまず前記の母材およびろう材をアセトン中で超音波洗浄した後、Fig. 1(a) に示すごとく、同じ表面あらさの母材を長手方向に突き合せ、接合間げきにろう材を挟み、母材と同じ材質のろう付治具にセットした状態で、容量 7 kW の真空抵抗加熱炉内で Table V に示すろう付条件でろう付した。またろう付間げきはろう材の厚みによって調節し、 $0.30 \sim 0.35 \text{ mm}$ に設定した。Fig. 1(b) はろう付試験片の外観である。

2・2 X 線応力測定法

ろう付部応力の測定には応力測定用アタッチメントを取り付けた X 線回折装置(島津製作所製 XD-3A)を使用した。応力測定条件は Table VI に示すごとく、

Table IV. Roughness of brazing surface.

Emery No.	R_{max} (μm)
80	11.2
240	3.9
400	1.1
1500	0.4

Table V. Brazing conditions.

Brazing alloy	BPd-7	BPd-8
Brazing temp. (K)	1273	1373
Brazing time (min)	10	10
Pressure (Pa)	6.3×10^{-3}	

Filler metal Base metal (a) $R_{\max}=11.2 \mu\text{m}$ (b) $R_{\max}=3.9 \mu\text{m}$ (c) $R_{\max}=1.1 \mu\text{m}$ (d) $R_{\max}=0.4 \mu\text{m}$

Fig. 2. Surface conditions at brazing interface.

Co-K α 線を使用して, BPd-7 の回折面は Ag の (331) 面, BPd-8 の回折面は Cu の (311) 面について測定した. また応力の測定方向は Fig. 1 (a) に示すごとく, ろう付部表面の長手方向 (x 方向) およびそれに直角の横方向 (y 方向) の 2 方向について, 側傾法による $\sin^2\psi$ 法で応力測定を行った. 応力測定の

Table VI. X-ray diffraction conditions.

Characteristic X-ray	Co-K α
Diffraction plane	BPd-7: Ag (331) BPd-8: Cu(311)
Intensity	40kV, 15mA
Filter	Fe
Detector	Scintillation counter
Goniometer scanning speed	1/2 (deg/min)
Time constant	10 (sec)
Full scale	500 or 1000(cps)
Method	Half-value breadth method $\sin^2\psi$ method

要領は, ろう付部の X 線照射領域が幅 1 mm, 長さ 5 mm となるように厚さ 0.2 mm のビニールテープでマスクし, X 線の平行ビームをろう付部に照射し, 各 ψ (ψ は試料面法線と格子面法線とのなす角) に対する回折線から, $2\theta-\sin^2\psi$ 線図を求めた. またろう材部の結晶粒が少なく, 粗大化しているため, 測定部を揺動した. なお, 応力値は次式¹³⁾より求めた.

$$\sigma = K \cdot M \quad (1)$$

ここで, K は X 線応力定数, M は $2\theta-\sin^2\psi$ 線図の直線の傾きである.

3 実験結果および考察

3・1 ろう付部のミクロ組織

Fig. 3 (a) は BPd-7, (b) は BPd-8 でろう付した各試験片のろう付部のミクロ組織である. これらから分かるごとく, ろう付部にはボイド, 割れなどの欠陥が存在しない良好なろう付組織を呈している.

(a) BPd-7

(b) BPd-8

Fig. 3. Microstructures of brazed joints.

3・2 ろう付部の引張強さ

Table VII はろう付部の引張試験結果である. この

Table VII. Tensile strength of brazed joints.

Filler metal	Roughness ($R_{\max}$)	Tensile strength (MPa)
BPd-7	11.2	287.3
	0.4	252.8
BPd-8	11.2	462.4
	0.4	456.9

結果から分かるごとく、両ろう材ともろう付面あらさが粗いほど、高い引張応力を示し、また試験片はすべてろう材部から破断した。

3・3 ろう材の X 線応力定数

ろう材の X 線応力定数は次のように決定した。Fig. 4 に示す 4 点曲げ荷重装置に厚さ 3.5 mm、幅 8 mm、長さ 60 mm のろう材を取り付け、ろう材の裏面にひずみゲージを貼付し、各負荷ひずみ ϵ_a に対する $2\theta - \sin^2\psi$ 線図の傾き M を求め、 $M - \epsilon_a$ 線図の傾きを式 (2) に代入して、ろう材の X 線応力定数 K を求めた。

$$K = E_M / (\partial M / \partial \epsilon_a) \quad (2)$$

ここで、 E_M はろう材のヤング率で、式 (2) より X 線応力定数 K を求めると次の値となる。

$$\text{BPd-7: } K = -105.5 (\text{MPa/deg})$$

$$\text{BPd-8: } K = -425.8 (\text{MPa/deg})$$

Fig. 4. Loading device for measuring X-ray elastic constants and applying tensile load.

3・4 ろう付部の応力測定結果

Fig. 5 は BPd-7 および母材の回折線である。BPd-7 における Ag の (331) 面の回折角 2θ は約 146.4 (deg) となり、Fig. 5 (b) から分かるごとく、ろう材の回折角付近には母材の回折ピークが存在していない。また BPd-8 における Cu の (311) 面の回折角 2θ は約 108.5 (deg) であり、この回折角付近で母材の回折ピークは存在しない。したがって、ろう付部からの回折線は母材の回折線の影響を受けておらず、ろう材のみの回折線と見なすことができる。

Fig. 6 は両ろう材の長手方向について測定した回折線の一例である。この図から分かるごとく、0.30 ~ 0.35 mm の狭いろう付間げきからでも十分な回折線が得られた。Fig. 7 と Fig. 8 に $2\theta - \sin^2\psi$ 線図の一例を示す。図中の直線は最小二乗法による回帰直線である。

(a) BPd-7 (Diffraction plane: Ag (331))

(b) SUS410

Fig. 5. Diffraction line profiles of BPd-7 and SUS410.

測定値に多少ばらつきがみられるが、ほぼ直線で近似でき、0.30 ~ 0.35 mm のろう付間げきを有するろう付部の応力測定が可能であることが明らかとなった。

各ろう付面あらさにおけるろう付部の残留応力測定結果を Fig. 9 に示す。縦軸は長手方向の残留応力 σ_{xr} および横方向の残留応力 σ_{yr} で、また横軸はろう付面あらさ $R_{\max}$ である。ろう付部に生じた残留応力 σ_{xr} 、 σ_{yr} は BPd-7 および BPd-8 ともに圧縮応力となった。BPd-7 の場合、 σ_{xr} はほぼ一定値となったが、ろう付面あらさが粗くなると、 σ_{yr} はわずかに増加した。BPd-8 の場合、測定値にばらつきがあるが、 σ_{xr} および σ_{yr} ともろう付面あらさが粗くなると圧縮応力は増加する傾向を示した。したがって、ろう付面あらさとろう材によって、ろう付部に発生する残留応力は異なることが分かる。

ここで BPd-7 と BPd-8 における測定値を比較すると、BPd-8 のろう付部の圧縮残留応力は BPd-7 のろう付部の圧縮残留応力より大きな値を示した。熱膨張係数 α の他にヤング率 E も残留応力に影響を及ぼし、 $\alpha \times E$ の値が増加すると接合体の残留応力も増加するという報告がある。したがって、本研究で使

(a) BPD-7 (σ_{xT}), $R_{\max}=11.2\mu\text{m}$ (b) BPD-8 (σ_{xT}), $R_{\max}=0.4\mu\text{m}$

Fig. 6. Diffraction line profiles from brazed joints.

(a) σ_{xT} , $R_{\max}=0.4\mu\text{m}$ (b) σ_{yT} , $R_{\max}=0.4\mu\text{m}$ Fig. 7. 2θ - $\sin^2\psi$ diagrams of brazed joint with BPD-7. (a) σ_{xT} , $R_{\max}=11.2\mu\text{m}$ (b) σ_{yT} , $R_{\max}=11.2\mu\text{m}$ Fig. 8. 2θ - $\sin^2\psi$ diagrams of brazed joint with BPD-8.

($\text{MPa} \cdot \text{K}^{-1}$) となるため、BPD-8 のろう付部に BPD-7 のろう付部より大きな残留応力が生じるものと思われる。

つぎに引張荷重を負荷した場合の応力変化に関する

結果を示す。Fig. 4 に示した 4 点曲げ荷重装置を使用して、ろう付部に引張荷重を作用させた状態でろう付部の応力を測定した。負荷したひずみをろう付部に貼付したひずみゲージで測定した。各負荷ひずみに対す

(a) BPd-7

(b) BPd-8

Fig. 9. Relation between residual stress and brazing surface roughness.

(a) BPd-7, $R_{\max}=11.2\mu\text{m}$ (b) BPd-7, $R_{\max}=0.4\mu\text{m}$

Fig. 10. Relation between stress of filler metal and applied strain.

ろう付部の長手方向 (x 方向) の応力 σ_{xf} および横方向 (y 方向) の応力 σ_{yf} を測定し, Fig. 10 と Fig. 11 はろう付面粗さ $R_{\max}=11.2, 0.4(\mu\text{m})$ におけるろう付部の応力測定結果である。縦軸は長手方向および横方向の応力を, また横軸は負荷ひずみ ε を表している。 $\varepsilon=0$ の値は無負荷時にろう付部に生じた残留応力である。Fig. 10 から分かるごとく, BPd-7 の場合, 両ろう付面あらさともに負荷ひずみが増加すると, 応力 σ_{xf} は直線的に増加し, 圧縮応力から引張応力に

(a) BPd-8, $R_{\max}=11.2\mu\text{m}$ (b) BPd-8, $R_{\max}=0.4\mu\text{m}$

Fig. 11. Relation between stress of filler metal and applied strain.

Fig. 12. Stress condition at brazed joint.

変化した。つぎに応力 σ_{yf} では負荷ひずみに対し, 圧縮応力がわずかに減少し, まるろう付面あらさが粗いほど, ろう付部に大きな引張応力が発生した。

BPd-8 の場合には, 負荷ひずみが増加すると, 両ろう付面あらさとも, σ_{xf} では $\varepsilon=1000 \times 10^{-6}$ 以下では圧縮応力がほぼ直線的に減少した。また σ_{yf} では $R_{\max}=11.2(\mu\text{m})$ の場合, 圧縮応力がわずかに減少するが, $R_{\max}=0.4(\mu\text{m})$ の場合には, 圧縮応力が増加する傾向を示した。

ここでろう付面あらさがろう付強さとろう付部の変形挙動に及ぼす影響について考察する。ろう付部に引張荷重を負荷した場合, Fig. 12 に示す応力状態となることが考えられる。Table III に示すごとく, ろう材は母材に比べ, ヤング率, 引張強さが小さく, 延性材料であるため, まずろう材部が長手方向に伸びて引

張応力が発生し、また横方向に収縮して圧縮応力が発生する。しかし母材の変形抵抗が大きいため、横方向の収縮は母材の拘束により阻止され、ろう材に引張りが作用する。さらに荷重を増加させると、ろう材は母材より降伏点が低いため、ろう材が降伏し、長手方向の伸びおよび横方向の収縮がさらに進み、最終的にはろう材部でせん断破断することが考えられる。

BPd-7の場合、Fig. 10から分かるごとく、両ろう付面あらしとも、負荷ひずみと長手方向の応力は直線関係にあるため、弾性変形が生じているものと思われる。またこの直線の傾きはろう材のヤング率にほぼ等しいので、長手方向の変形にはろう付面あらしの影響をほとんど受けないことが考えられる。また横方向の変形ではろう付面が粗いほど、大きな引張応力が生じ、これは母材から大きな拘束力がろう材に作用して、収縮が阻止されていると考えられる。

BPd-8の場合、Fig. 11から分かるごとく、 $\epsilon = 1000 \times 10^{-6}$ 以下では負荷ひずみと長手方向の応力は直線関係にあり、この範囲内では弾性変形し、さらに負荷ひずみが増加すると、ろう材が降伏して塑性変形していることが分かる。また両ろう付面あらしの応力-ひずみ線図はほぼ等しく、長手方向の変形にはろう付面あらしの影響はほとんどないものと思われる。また横方向の変形ではBPd-7と同様にろう付面あらしが粗いほど、引張応力が生じているが、これも母材の拘束力により、収縮が阻止されたものと考えられる。つぎにろう付面あらしと残留応力がろう付部の引張強さに及ぼす影響について検討する。Table VIIに示したごとく、ろう付面あらしが粗くなると、高い引張強さを示した。Fig. 12の変形挙動から分かるごとく、長手方向に圧縮残留応力を発生させ、横方向の収縮を阻止することにより、引張強さが増加すると考えられる。したがってろう付面あらしが粗くなると、長手方向に大きな圧縮残留応力が発生し、また母材の拘束により横方向の収縮が少なくなるため、より高い引張荷重に耐え、引張強さが上昇したものと思われる。

4 結 論

ステンレス鋼 SUS410 を BPd-7 および BPd-8 で真空ろう付し、そのろう付部の応力をX線応力測定法で測定し、本研究で得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) X線応力測定法により、ろう付間げきが0.30

mm ~ 0.35 mm のろう付部に生じる応力が精度良く測定できることが明らかとなった。

(2) BPd-7でろう付した場合、長手方向にはほぼ一定の圧縮残留応力が発生し、また横方向も圧縮残留応力となり、ろう付面あらしが粗くなると、わずかに増加する傾向を示した。

(3) BPd-8でろう付した場合、長手方向および横方向とも圧縮残留応力となり、ろう付面あらしが粗くなると、残留応力は増加した。

(4) ろう付部に引張荷重を負荷した場合、長手方向の変形はろう付面あらしの影響をほとんど受けないが、横方向の変形はろう付面あらしの影響を受け、ろう付面が粗いほど、母材ろう付面のより大きな拘束力がろう材に作用して、ろう材の横方向の収縮が妨げられる。

(5) ろう付面あらしが粗いほど、ろう付部の引張強さは上昇する。これはろう付面あらしの増加に伴い、長手方向の圧縮残留応力の増加と横方向の収縮量の減少の影響によることが明らかとなった。

(昭和62年7月23日 第24回X線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) J. Colbus, C. K. Keel and G. M. Blanc, *Welding Journal*, **41**, No. 9, 413s (1962).
- 2) 川勝一郎, 末澤芳文, 溶接学会誌, **40**, 55 (1971).
- 3) 川勝一郎, 末澤芳文, 溶接学会誌, **41**, 181 (1972).
- 4) 末澤芳文, 溶接学会誌, **41**, 1109 (1972).
- 5) 末澤芳文, 溶接学会誌, **42**, 315 (1973).
- 6) 末澤芳文, 溶接学会誌, **42**, 469 (1973).
- 7) 末澤芳文, 溶接学会誌, **45**, 289 (1976).
- 8) 江国定明, 平井淳一, 溶接学会誌, **33**, 431 (1964).
- 9) 雀部 謙, 岡根 功, 溶接学会誌, **45**, 876 (1976).
- 10) 雀部 謙, 岡根 功, 溶接学会誌, **47**, 115 (1976).
- 11) カリティ, "X線回折要論", p. 345 (1979) アグネ.
- 12) E. A. Brandes, "Smithells Metals Reference Book", Sixth Edition, 14-29, 15-3 (1983) Butterworths.
- 13) 日本材料学会編, "X線応力測定法", p. 77 (1981) 養賢堂.
- 14) 田中啓介, 松井英治, 秋庭義明, 材料, **35**, 749 (1986).
- 15) 奈賀正明, 岡本郁男, 日本金属学会講演概要, p. 182 (1985).
- 16) E. Orowan, *Rept. Progr. Phys.*, London, p. 185 (1948).