Ni 基合金を用いた異種材溶接ペローズの特性*

平田 養^{*1}, 中島 晃^{*2}, 岡田 健^{*3}
藤井 晶衛^{*4}, 佐藤 雅弘^{*5}

Characteristics of Dissimilar-Metal-Welded Bellows Made of Ni Base Alloy

Osamu HIRATA, Akira NAKAJIMA, Ken OKADA,
Masae FUJII and Masahiro SATOH

Double-ply-welded bellows of nesting type are used as sealing devices of valves for high-temperature and high-pressure applications, and so far, the same-metal-welded bellows have been used exclusively. In the present investigation, the authors manufactured dissimilar-metal-welded bellows aiming at high corrosion resistance as well as mechanical strength. Namely, highly corrosion-resistant Ni base alloy B is placed on the fluid-contact side and higher-strength Ni base alloy A is placed on the no-fluid-contact side for the purpose of mechanical back-up of Ni base alloy B. As a result of study on its characteristics, it has been found that the welded part of this dissimilar-metal-welded bellows has mechanical strength near that of the Ni base alloy A and the chemical composition is intermediate between Ni base alloys A and B. Furthermore, it was confirmed that this bellows has higher resistance to corrosion than the bellows made of only Ni base alloy A, and has a longer total life than the same-metal-welded bellows made of only Ni base alloy A or B.

Key Words: Welding, Machine Element, Seal, Welded Bellows, Ni Base Alloy, Mechanical Strength, Corrosion Resistance, Stress Corrosion Cracking, Life Test

1. 結 言

ペローズは、石油化学プラント、火力原子力プラントの配管装置において伸縮管継手として使用されるほか、配管系やバルブのステム貫通部の軸封、空気圧シリンダ運動部分のシールや大形コンピュータに用いられる超 LSI 冷却用冷媒の密封などにその機能を提供している。また、伝動用の軸継手や圧力検出用のセンサとして使われるなど、用途は多岐にわたっているが、いずれのペローズも作動条件や使用環境が近年ますます厳しくなる中、高い信頼性が要求されている。

高温高圧用バルブの弁棒軸封装置として金属ペローズがよく用いられているが、金属ペローズを使用するような配管系では、腐食性の強い流体や有毒ガスを含む各種の流体を扱うことが多く、特に高温高圧下で内部流体が系外に漏れると大変危険であり、環境にも悪影響を及ぼす。このような条件下で使われるペローズ

の耐久性や信頼性の向上を図るには、要求機能を満足する構造・形状の設計および材料の選定が重要であり、特に、機械的強度のみならず、耐食性、耐 SCC(応力腐食割れ)特性との複合的な特性評価が不可欠と思われる。しかしながら、ペローズに関する従来の研究において、機械要素としての機能に重点を置いた力学的解析や実験例などはよく見受けられるが⁽¹⁾⁽²⁾、材料学的な検討を積極的に実施した例は極めて少ない。

本研究では、高温高圧環境下において用いられる玉

図 1 溶接ペローズの構造

* 原稿受付 平成 5 年 7 月 26 日。

^{*1} 正員、イーグル工業(株)技術本部 (〒716 高梁市落合町阿部 1212)。^{*2} 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町 1)。^{*3} イーグル工業(株)技術本部 (〒350-02 坂戸市片柳 1500)。^{*4} イーグル工業(株)技術本部 (〒716 高梁市落合町阿部 1212)。^{*5} イーグル工業(株)岡山事業部 (〒716 高梁市落合町阿部 1212)。

形弁の軸封装置である溶接ベローズを対象とし、機械的強度とともに耐食性の向上をねらい、新たに製作した異種材溶接ベローズの特性・耐久性を、従来形の同種材溶接ベローズと比較しながら総合的に検討する。

2. ベローズの構造

金属ベローズを製法により分類すると、成形ベローズ、溶接ベローズ、電着ベローズの三つに大別できる。また、ベロー部分の断面形態は機能を左右する重要な因子であり、U、S、 Ω 形などが一般的である。図1に代表的溶接ベローズの断面形状を示した。製法はいずれも大同小異であり、円環状薄板を成形後内径部、外径部を交互に溶接してベローズ化する。そのため、成形ベローズに比べて高価となるが、成形ベローズでは実現が困難であるネスティングタイプ(密着形)のものが得られる。この密着形ベローズは、全面密着ができるので単位長さ当たりの伸縮量が他のタイプのものより格段に大きく、密着状態における耐圧力も高いなどの利点をもつ。したがって、限られた空間内に設置する必要がある高圧力用のバルブの軸封装置として、この種のベローズは欠かせないものであり、広く普及している。中でも、プレートを2枚ずつ重ねて溶接した二重構造のダブルプライ形ベローズが最近よく使用されているが、特に根拠も示されないまま、内外同種材を用いたものが一般的であった。

3. 実験方法

3.1 ベローズ材の選定 ステム軸封部にベローズを用いるいわゆるベローズバルブは、配管内が高圧高温流体や強腐食性の流体が多く材料的に厳しい環境下にある。それ故、これらの流体に接する溶接ベローズの材料としては、①溶接性、②薄板の成形性などの加工性のほか、③機械的強度、④高温強度特性、⑤耐食性が特に重視される。

このような条件を一応満足する材料として高Ni合金を挙げることができるが、今回は、中でも引張強度の大きいNi合金Aおよび耐食性に優れるNi合金Bを選定した。Ni合金AとBそれぞれの機械的性質と耐食性は表1に、化学組成は表2に示すとおりである。

3.2 供試ベローズの仕様

バルブ用ベローズは高圧力に耐え、かつバルブの開閉に伴う伸縮作動に対し耐久性がなければならない。高圧力に耐えるにはベローズプレートの板厚が必要であり、ベローズの伸縮作動に対しては板が薄いほうが長寿命になることがすでに明らかにされている⁽³⁾。したがって、今回の溶接ベローズとしては、両者のバランスを考慮し、1枚のプレートの板厚を0.254 mmと決定した。

本研究の対象とするベローズは、ダブルプライ形溶接ベローズであり、供試ベローズは、重ねる2枚の板をNi合金A同士またはNi合金B同士とした同種材溶接ベローズ、およびNi合金AとNi合金Bの板を重ね合わせた異種材溶接ベローズである。しかも、異種材溶接ベローズにおいては、高耐食性材であるNi合金Bを流体と接する側に、引張強度の大きいNi合金AをNi合金Bの補強材として流体と接しない側に配置した。表3に供試ベローズの仕様一覧を、図2にベローズの断面写真を示している。

3.3 溶接および熱処理条件

試験に供する3種類の溶接ベローズはいずれも表4に示す条件で溶接された。Ni合金Aの溶体化処理温度について、Gordineは、温度が1339 K以上になると溶接部の衝撃強さや延性が改善されることを報告している⁽⁴⁾。また、溶体化処理温度を1363 Kと1227 Kとし行った著者らの寿命試験において、1363 Kのほうが長寿命となることも確認されている。これらのことより、本研究では溶体化処理温度を1363 Kに設定した。また、Ni合金Aは溶体化処理後2段の時効熱処理が必要とされるが、Ni合金Bは溶体化処理のみで通常時効熱処理は行われない⁽⁵⁾。Ni合金A+Bのダブルプライベローズにおける熱処理条件は、これらを勘案の上Ni合金Aに合せた。

表1 供試ベローズ材の機械的性質と耐食性

Items	Ni base alloy A	Ni base alloy B
Yield strength (MPa)	1187	485
Tensile strength (MPa)	1442	1006
Elongation (%)	17	36.4
Heat treatment (K)	ST:1366 Aging:993 & 893	ST:1323 No aging
Corrosion resistance	Good	Excellent

表2 供試ベローズ材の化学成分

	(mass %)												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	Al	Ti	Ni	Fe	Nb+Ta
Ni base alloy A	0.035	0.02	0.01	0.002	0.001	18.55	0.01	3.14	0.51	1.03	Bal	19.2	5.00
Ni base alloy B	0.09	0.33	0.34	0.002	0.001	21.63	0.01	9.35	0.31	0.35	Bal	2.49	3.64

4. 試験方法および試験結果

4・1 溶接部の硬さ 一般に、材料の引張強さや降伏点(耐力)と硬さとの間には、一定の対応関係が成り立つことが知られており⁽⁶⁾、今回、溶接部の機械的強度を推定するために硬さを測定した。マイクロビッカース硬さ計(試験荷重 2.9 N)を用いてペローズの内径側母材部から溶接ビード部に至る硬さを 100 μm 間隔で測定した結果を図 3 に示す。サンプル番号 1 と 3 では、母材と溶接ビード部の硬さはほぼ同程度であり、

表 3 供試ペローズの仕様

Sample No.	1	2	3
Type of Material	Ni base alloy A	Ni base alloy A + B	Ni base alloy B
Structure	double ply	double ply	double ply
Inside dia.	φ 33.3 mm	φ 33.3 mm	φ 33.3 mm
Outside dia.	φ 60 mm	φ 60 mm	φ 60 mm
Thickness	0.254 mm/ply	0.254 mm/ply	0.254 mm/ply
Heat treatment (K)	ST: 1366 Aging: 993 & 893	ST: 1366 Aging: 993 & 893	ST: 1323 No aging

表 4 溶接条件

Welding method	Edge weld (TIG)
Voltage	14 V
Current	18 A
Ar gas flow	25 l/min
Welding speed	4.3 mm/sec

図 2 ダブルプライ形溶接ペローズの断面写真 (サンプル番号 2)

それぞれ供試体母材の硬さを保っている。一方、サンプル番号 2 では、溶接ビード部の硬さは Ni 基合金 A と B の間にあり、Hv=430 と両者の平均よりむしろ Ni 基合金 A に近い値を示している。図 4 は Ni 基合金 A, B (Ni 基合金 B は熱処理条件が違うデータも含む)それぞれの材料の硬さと引張強さ、降伏点(耐力)の関係をプロットしたもので、硬さと強度の関係を最小二乗法で直線近似すれば次式のようなになる。

$$\text{硬さ } H_v = 0.5 \times \text{引張強さ} - 257$$

$$\text{硬さ } H_v = 0.3 \times \text{耐力} + 106$$

この関係式にサンプル番号 2 の溶接ビード部の硬さ Hv=430 を代入し、その強度を推定すれば、引張強さ

(a) サンプル番号 1 と 3 の硬さ

(b) サンプル番号 2 の硬さ

図 3 溶接部のマイクロビッカース硬さ(荷重=2.9 N)

図 4 Ni 基合金 A と B の材料強度と硬さの関係

=1 374 MPa, 耐力=1 080 MPa となり, 溶接部合金層の機械的性質としては Ni 基合金 A に近い値が示された。なお, 熱処理条件はサンプル番号 1 と 2 は同じであるが, サンプル番号 3 は異なる。しかし, Ni 基合金 B に対する熱処理条件の違いを硬さの測定結果で比較すると, サンプル番号 3 とサンプル番号 2 の Ni 基合金 B 母材部の硬さはほぼ同じであり, 今回の熱処理条件の差異(溶体化処理温度の違いと時効熱処理の有無)が Ni 基合金 B の強度に与える影響は少ないと判断される。

4・2 溶接部の引張試験 内径側の溶接ビード部の強度を直接的に求めるために溶接ビード部の引張試験により引き裂き強度を測定した。試験片の形状および試験方法を図 5 (a) に示す。溶接ペロウズと同一条件で溶接したサンプルから内径側のビード部を幅 5 mm 切出し試験片の幅 (L) およびビード幅 (H_L, H_R) の大きさを実測した後試験を実施した。引き裂き強度 T は次式で定義される。

$$T = F / (L \times H / 2) \text{ MPa}$$

F : 破断時の荷重 N

L : 試験片の幅(実測値) mm

H : 平均ビード幅 = $\{(H_L + H_R) / 2\}$ mm

H_L, H_R : ビード幅(実測値) mm

この試験は, 溶接部で屈曲している試験片を強制的に引き裂く形の引張試験であるため応力集中があり, 通常の試験片による引張強さに比べかなり低い値が計測された。図 5 (b) は得られた引き裂き強度をそれぞれの材料の引張強さに対してプロットしたものである。サンプル番号 2 については, 硬さ測定から推定さ

れた引張強さ 1 374 MPa に対しプロットした結果, 引き裂き強度が引張強さに比例して増加するよい直線関係にあることがわかった。すなわち, サンプル番号 2 は, 硬さの測定結果からも推測されたように有効な合金層が形成され, 引き裂き強度もサンプル番号 1 の Ni 基合金 A により近い値であることが確認された。

4・3 応力腐食割れ試験 本研究に用いた Ni 基合金 A は, 従来耐 SCC (応力腐食割れ) 性に優れた材料であるといわれてきた。しかし, 最近の研究による高温純水中で SCC が発生する事例が報告されている⁽⁷⁾。そこで, サンプル番号 1 と 2 について 5 山のペロウズを製作し, SCC 試験を実施した。試験方法の概略を図 6 に, 試験条件および試験結果を表 5 に示す。

サンプル番号 1 では, SCC 試験終了後の気密試験で漏れが発生した。一方, サンプル番号 2 については気密試験において漏れがなく, 切断検査でもまったく割れは認められないことから, Ni 基合金 B の使用によりペロウズの耐 SCC 性向上の効果が確認できた。応力腐食割れの発生状況例を図 7 に示す。サンプル番号 1 においては, 板厚の薄い母材部ではなく, 肉厚のあるビード部の接液側から非接液側へ貫通する大きな割れが見られるが, サンプル番号 2 において割れはまったく発生していない。

4・4 寿命試験 ペロウズパルプは使用中, ①パ

表 5 応力腐食割れ試験条件と結果

Temperature	360℃	Test results
Exposure time	1500 Hr	Sample No. 1
Pressure	19.6 MPa	leak & cracks
Dissolved oxygen	less than 10 ppb	2 pieces/2 pieces
Dissolved hydrogen	30 cc NTP/kg H ₂ O	Sample No. 2
PH	7 ± 0.2	no leak & no crack
H ₃ BO ₃ content (as B)	500 ppm	2 pieces/2 pieces
LiOH content (as Li)	1 ppm

(a) 試験片の形状と試験方法

(b) 試験結果

図 5 引張試験方法と試験結果

図 6 応力腐食割れ試験方法

(a) サンプル番号1の破損部の断面写真 (b) クラック部の拡大写真(サンプル番号1)
(c) サンプル番号1の破面写真 (d) 応力腐食割れ試験後のサンプル番号2の断面写真(クラックなし)

図7 応力腐食割れ試験によるクラックの発生状況(内径溶接ビード部)

(a) 伸縮作動試験装置と試験条件

(b) 圧力変動試験装置と試験条件

図8 寿命試験装置と試験条件

ルプの開閉に伴い繰返しペローズが伸縮し、②ペローズには、バルブ開時には配管圧力が負荷され、バルブ閉時には配管内の2次圧力が低くなることにより圧力が繰返し負荷され、さらに、配管内の圧力変動も負荷される。

ペローズの耐久性を評価するため、以上二つの作動条件をそれぞれ模擬した寿命試験⁽⁹⁾を実施した。

(1) 一定圧力下でのバルブの全閉から全開に至る伸縮作動試験

(2) バルブ閉取付長での圧力変動試験

図8に試験装置の概略図と試験要領を示すが、伸縮作動試験における圧力は8.6 MPa一定、圧力変動試験

図9 圧力変動試験結果と伸縮作動試験結果

験においては0~8.6 MPaの変動圧力を繰返し負荷した。

試験結果を図9にまとめて示している。伸縮作動寿命を示す図の縦軸は供試体の伸縮量をペローズの山数で除した1山当たりの変位量である。伸縮作動試験の結果からは、まず1山当たりの変位量が小さくなれば寿命が延びること、1山当たりの変位量大きい範囲ではサンプル番号1>2>3の順に寿命が長い、小さくなれば、その差が縮まり、1山当たりの変位量0.2 mmではほとんど差がないことがわかる。なお、ペロ

ーズの最小全長は変位量/1山に関係なく一定であり、変位量/1山が大きくなれば最大全長が大きくなるように設計されている。つまり伸縮量が小さいということは、ベローズの作動範囲の中で山と山のピッチが小さいということであり、密着しやすい構造になる。次に、圧力変動試験結果はかなり重なる部分があるものの、全体としてはサンプル番号3>2>1の順であり、機械的強度が低く延性に富む材料のほうがむしろ寿命が長い。これら二つの試験結果を総合評価するために、Minerの法則⁽⁶⁾に従ってバルブ用ベローズのトータル寿命 Nt を次のように定義した。

$$1/Nt = 1/Ns + 1/Np$$

Ns : 伸縮作動寿命

Np : 圧力変動寿命

図10には、実使用条件である圧力8.6MPa、伸縮量0.4mm/山に対する各ベローズの圧力変動寿命と伸縮作動寿命を示すとともに、上式により求めたトータル寿命をプロットしている。その結果、トータル寿命はサンプル番号2>1>3の順であり、異種材溶接ベローズが総合的に長寿命であると評価される。なお、ベローズの破断箇所は図11に示すように引張試験の場合と同様の内径側溶接ビード部であった。

図10 寿命試験結果

図11 サンプル番号2の圧力変動試験での破損部の断面写真(サンプル番号2の内径ビード)

5. 考 察

以上、機械的強度、耐食性、寿命を総合的に判断してサンプル番号2の異種材溶接ベローズが優れていることが確認できた。ここでは、溶接部の化学成分分析結果や応力解析結果等とも合せこの溶接ベローズの特性について検討を加える。

5.1 溶接部の拡散について

異種材溶接ベローズの溶接ビード部は、硬さにばらつきがほとんどないことから均一な合金層を形成していることが推測された。さらに、溶接部の拡散状況を確認するためにEPMAによる線分析を行った。その結果を図12に示すが主たる分析成分はNi, Cr, Feであり、溶接ビード部はNi基合金AとBのちょうど中間的な化学成分の分布状態を示しているのがわかる。また、EDS分析による母材部、ビード界面およびビード部の化学成分定量分析結果を表6に、その分析面全体のSEM写真およびFeによる面分析結果を図13に示す。面分析では、拡散状況を確認するために、Ni基合金AとBとで含有量に顕著な差があるFeを選定した。その結果、溶接ビード部においてはFeの偏析等はなく、均一な分布状態であることが確認できた。なお、表6の定量分析結果からはMo, Alの含有量が表2に示した化学成分より多く検出されているが、これは、EDS分析ではMoとNbの特性X線のエネルギーが近く完全に分離できていないため、また、Alは表面に析出しやすい元素であるためと推定される。次に、表6でFeの成分を見ると、Ni基合金Aの母材部は、21.44%、Ni基合金Bの母材部は4.61%であるのに対し、ビード界面ではそれぞれ17.75%、7.2%であり、さらにビ

図12 サンプル番号2のEPMAによる線分析結果
(A): Ni基合金A
(B): Ni基合金B

表 6 EDS によるサンプル番号 2 の成分分析結果

Analysis position		Chemical composition (mass %)							
		Mn	Cr	Mo	Al	Ti	Ni	Fe	Ta
Ni base alloy A	Plate	0.05	18.47	6.8	2.55	1.03	48.83	21.44	0.51
	Weld bond	0.16	18.88	8.19	2.67	0.89	50.26	17.75	1.02
	Weld bead	0.28	19.61	10.11	2.84	0.75	52.37	12.77	1.15
Ni base alloy B	Plate	0.23	21.23	13.61	2.44	0.51	56.07	4.61	0.99
	Weld bond	0.25	20.69	12.06	2.62	0.45	55.41	7.2	1.32
	Weld bead	0.17	19.75	10.03	2.84	0.72	52.61	12.57	1.05

図 13 SEM 写真と Fe による面分析結果(サンプル番号 2)

図 14 内径溶接ビードのマイクロクラックの代表例

ード部ではそれぞれ 12.77%と 12.57%になっており、ビード部で均一な拡散が行われたことが裏付けられる。また、Ni 基合金 A, B の主成分である Ni, Cr, Mo についても Fe と同様に、ビード部の成分は Ni 基合金 A と B の中間的な成分となっており、サンプル番号 2 の溶接部は均一な合金層が形成されていることが確認できた。

5・2 溶接部の欠陥について ペローズの強度に影響を与える溶接部の欠陥の発生状況について調査し

表 7 EDS によるマイクロクラック部の成分分析結果 (mass%)

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al
No crack part	48.62	18.4	18.7	7.95	4.00	1.25	1.00
Micro crack part	37.93	15.3	15.6	10.29	6.38	0.17	14.2

図 15 一観察断面当たりが発生するマイクロクラックの長さ

た、発見されたマイクロクラックの代表例を図 14 に示す。Ni 基合金の溶接において発生したマイクロクラックについて、その組成が $\text{CbC}^{(9)}$ 、Laves 相⁽¹⁰⁾ や Al_2O_3 ⁽¹¹⁾ であるとの報告がある。そこで、クラックの部分と健全部の成分分析を行った。その結果、表 7 に示すように、マイクロクラックの部分では、極端に Al が多く検出されており、高い融点をもつ Al_2O_3 が先に凝固したことがこのクラック発生の主原因と考えられる。図 15 は、溶接ビード内のマイクロクラックの発生状況の比較である。横軸は、溶接ビードを 16 断面に切断し、観察されるすべてのマイクロクラックの長さを加算した全長さを検査断面数で除した平均のクラック長さであり、各サンプルごとにその値を示している。図より、1 断面当たりが発生するマイクロクラックの長さは Ni 基合金 B を使用したサンプル番号 3 が最も小さく、溶接性の点からは Ni 基合金 B が優れていることがわかる。

5・3 溶接部の弾塑性解析 溶接ビード部付近の応力・ひずみ状態を検討するために弾塑性 FEM 解析を行った。解析にあたっては溶接ビード部は溶接欠陥がない理想的な形状とし、用いた物性値(縦弾性係数、

図 16 FEM 解析による応力と塑性ひずみ量の分布図
(圧力=8.6 MPa)

ポアソン比、応力・ひずみ線図)は、Ni 基合金 A、B とともに温度 1366 K で溶体化熱処理後、993 K と 893 K の 2 段階効熱処理を行った引張試験のデータを用いた。ただし、溶接ビードの物性値としては、化学成分や物性値が Ni 基合金 A、B のほぼ中間的な値であることより、Ni 基合金 A、B の平均値を用いた。8.6 MPa の圧力が負荷されたときのペロースの内径ビード部付近のミーゼス応力と塑性ひずみ量の分布図を図 16 に示す。この図より破断は、接液側ビード界面寄りの母材部、大気側はビード界面付近から、いずれも板厚方向に起こることが予測され、図 11 に示した圧力変動試験による破断状況とよく一致している。一方、SCC 試験における割れは、この場合と異なり、図 7 (a) に示したように溶接ビードを貫通する方向に進展している。このことから、応力腐食割れは、溶接時に発生するマイクロクラックを起点として発生しやすく、図 14 のようなマイクロクラックがあれば引張応力の存在する母材先端部(接液側)からビード部を横切り非接液側に抜ける貫通形割れが起こるものと推察される。

なお、この種のペロースの評価方法として、SCC 試験や寿命試験など個別に行われることが多いが、単一な条件下の試験だけでは不十分であり、実際の使用条件を考慮しつつ総合的検討が必要である。しかも溶接ペロースは、溶接ビード部、母材部材との接合部、およびそれらの会合点などそれぞれ母材とは組成・性質

が異なり、材料学的アプローチも不可欠である。

6. 結 言

引張強度が大きい Ni 基合金 A を非接液側に、機械的強度は劣るけれども高耐食性材料である Ni 基合金 B を接液側に配置したネスティングダブルプライ形の異種材溶接ペロースを新たに製作し、それぞれの材料単独で製作された従来形溶接ペロースとの特性比較を行った。結果は次のようにまとめられる。

(1) この異種材溶接ペロースの溶接部は、化学成分が Ni 基合金 A と B のほぼ中間的な値を示す均一な合金層であることが確認されるとともに、機械的強度はむしろ Ni 基合金 A のほうに近いことがわかった。

(2) 応力腐食割れ試験の結果、Ni 基合金 A だけの同種材ペロースより優れていることが示され、Ni 基合金 B の耐食性の効果が確認された。

(3) 伸縮作動寿命試験および圧力変動寿命試験の結果を Miner 則に従って整理したトータル寿命は、Ni 基合金 A と B の異種材溶接ペロース > Ni 基合金 A の溶接ペロース > Ni 基合金 B の溶接ペロースの順であり、玉形弁の軸封用ペロースとして今回製作した異種材溶接ペロースが総合的に最も優れていることを明らかにした。

(4) 有限要素法による弾塑性解析結果から予測される溶接ペロースの破損位置が圧力変動試験の結果とよく一致することがわかった。

文 献

- (1) 石山・ほか 4 名, 精密工学会誌, 57-10 (1991), 1832.
- (2) 浜田・ほか 3 名, 機論, 32-243 (1966), 1640.
- (3) Aoki, A., ほか 3 名, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, C373/028 (1989), 57.
- (4) Gordine, J., *Welding J.*, 49-11 (1970), 531-s.
- (5) SAE, *Aerospace Material Spec.*, 5599 & 5596, (1984).
- (6) Tabor, D., *The Hardness of Metals*, (1954), 104, Oxford.
- (7) Yonezawa, T., ほか 5 名, *Proc. Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, (1983), 345, Myrtle Beach, USA.
- (8) 機械学会編, 金属材料疲労強度の設計資料 I, (1982), 5, 日本機械学会.
- (9) Lucas, M. J. and Jackson, C. E., *Welding J.*, 49-2 (1970), 46-s.
- (10) Thompson, E. G., *Welding J.*, 48-2 (1969), 70-s.
- (11) Coffey, D. L., ほか 2 名, *Welding J.*, 51-1 (1972), 29-s.