チタン製眼鏡フレームのレーザ微細溶接に関する基礎研究*

中村 浩**, 川人 洋介***, 強力 真一****, 多田 弘幸*****, 片山 聖二***

Fundamental research of laser micro welding for practical use of titanium eyeglass frames*

by NAKAMURA Hiroshi**, KAWAHITO Yousuke***, GORIKI Shin-ichi****,
TADA Hiroyuki***** and KATAYAMA Seiji***

Micro welding of titanium eyeglass frames requires sound strength, good exterior appearances and stable production which were solved narrow HAZ (heat-affected zone), contactless method and stable production, which suit micro laser welding. The objective of this work is to fundamentally investigate butt welding conditions with a pulsed YAG laser beam for exterior appearances and joint strength. Eleven factors of the welding conditions which influence joint strength were evaluated from the viewpoint quality engineering. It was found that two factors of defocused distance and processing of welding surface of the welding parts led to fluctuation on the joint strength. Therefore sub-millimeter scale control of the laser irradiated point along optical axis and removal of impurities lead to brittle metallic compound on the surface produced sound strength of the joints. Furthermore, the optimized laser condition is applied to fabrication of components with a real shape of titanium eyeglass frames. The qualities of the obtained joints were confirmed by stripping test, cyclic bending test, metallographic observation and hardness determination. It was revealed laser welding method is more reasonable than conventional resistance brazing method.

Key Words: Titanium, Micro laser welding, butt welding, eyeglass frame, quality engineering

1. 緒 言

チタンは鉄鋼より比強度（強度／比重）が高く、耐食性が優れているため、航空宇宙等で実用化されている材料であり、近年、精密化が進み医療等の精密部品分野でも製品化されている。チタンの精密加工部品のひとつであるチタン製眼鏡フレームの溶接には、従来抵抗加熱ろう付法¹⁾が用いられており、電極による部品表面の損傷、電極劣化による加熱のばらつき、ろう付部周辺での広い熱影響の形成等の解決すべき課題がある。これらの課題は、眼鏡フレームデザインに制約を与え、製品の付加価値の下落を招く。チタンのレーザ微細溶接は、高強度で、非接触かつ品質が安定し、溶接による熱影響範囲が狭いことが期待され、従来不可能であった微小部品で構成された眼鏡フレームの製造も可能になる。これまでにレーザ溶接による機械的性質の評価等については、いくつかの報告がある^{2,3)}が、数ミリサイズの小型部品における強度評価が行われておらず、実用化のためにはまだ不十分である。

眼鏡フレーム部品へのレーザ溶接適用において目標となる溶接品質基準は、人の目視により溶接部が目立つことのない良好な溶接外観（基準：溶接ビード幅 $800\mu\text{m}$ 以下、表面付着物の大きさが $200\mu\text{m}$ 以下）、深い溶込み（広い溶接面積）により得られる高い溶接強度（基準：眼鏡フレーム部品による溶接強度試験において部品破壊）である。

本研究では、工業用純チタン JIS2 種の板材およびチタン製眼鏡フレーム部品に対し、最大平均出力 50 W のパルス YAG (Yttrium Aluminum Garnet) レーザ発振器を用いて、シーム溶接し、眼鏡フレームの溶接外観品質基準に適合したレーザ溶接条件範囲の検討を行った。レーザ溶接の実用化に向け、溶接強度に影響すると考えられる因子11項目を選択し品質工学を用いて、各因子の影響度を評価し、溶接強度を向上させるための原因と対策を検討した。良好と判断されたレーザ溶接条件で眼鏡フレーム部品を溶接し、剥離試験による強度の評価および繰返し曲げ試験を行い、従来法との耐久性を比較した。さらに溶接部周辺の熱影響状態について比較評価を行った。

2. 供試材、実験装置および実験方法

供試材として、板材と眼鏡フレーム部品形状をした部材の二種類を使用した。材質は共に工業用純チタン JIS2 種を使用し、板材の寸法は厚み 2 mm、幅 3 mm、長さ 40 mm である。素材の典型的な化学組成を Table 1 に示す。眼鏡フレーム部品形状をした部材としては、Fig. 1 に示すような部品寸法が

*受付日 平成25年2月4日 受理日 平成25年6月4日

**正 員 株式会社シャルマン Member, Charmant Inc.

***正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

**** 福井県工業技術センター Industrial Technology Center of Fukui Prefecture

***** 株式会社シャルマン Charmant Inc.

Table 1 Chemical compositions of pure titanium

Chemical composition (Mass %)					
C	Fe	N	O	H	Ti
0.004	0.04	0.003	0.113	0.0025	Bal.

Fig. 1 Welded parts of eyeglass frame **Fig. 2** Schematic illustration of experimental set-up in pulsed YAG laser welding

高さ 3.7 mm, 幅 2.4 mm, 長さ 3 mm のチタン製丁番 (Hinge) と, 厚み 1.3 mm, 幅 3.4 mm, 長さ 135 mm のチタン製テンプル (Temple) を使用した。

本研究で使用したレーザ熱源は最大平均出力 50 W のパルス YAG レーザ発振器である。溶接状況の模式図を Fig. 2 に示す。レーザ光は、発振器からコア径 0.4 mm のファイバーによって伝送され、焦点距離 50 mm のレンズでスポット径を約 0.3 mm に集光し、供試材の表面に照射する方法を基本光学構成とした。シールドガスにはアルゴンを用い、斜方 45° から 12 mm 径サイドノズルで 25 L/min で供給した。チタンの板材の溶接では、Fig. 2 に示すように長手方向の端面同士を突合せ、板材の始端から終端までの距離 3 mm を板材の表面と裏面の両側にラップ距離 0.1 mm のパルス照射によりシーム溶接した。また、眼鏡フレーム部品の溶接では、Fig. 3 に示すように部品同士を突合せ、レーザ照射軸に対し眼鏡フレーム部品を 30 度傾け、端部から端部までチタン板材と同様な条件でシーム溶接を行い、溶接部が対向する 2 方向から 1 回ずつ溶接を実施した。

溶接強度の評価方法として、チタン板材では単軸引張試験を、クロスヘッド速度 0.017 mm/s で実施した。眼鏡フレーム

Fig. 3 Welding method for welded parts of eyeglass frame **Fig. 4** Test method for evaluation peeling strength **Fig. 5** Method of cyclic bending test

部品では、剥離試験と繰返し曲げ試験を行った。剥離試験方法は Fig. 4 に示すように、突合せ溶接した眼鏡フレーム部品の片側を治具とピンにより固定し、もう片方の溶接端部から 2 mm の位置で固定したワイヤーを掴み、引張試験機によりクロスヘッド速度 0.033 mm/s で引張り、剥離方向の強度を評価した。部品の耐久性を評価するために繰返し曲げ試験を行った。試験は Fig. 5 のように溶接した眼鏡フレーム部品の片側を固定し、溶接部端面から 10 mm の位置において、60 N の力で下方へ繰返し曲げ、5000 回まで続け評価を行った。チタン溶接部のミクロ組織は、水：硝酸：フッ化水素 (5:4:1) の腐食液でエッチングし、光学顕微鏡により観察した。溶接部の組成は、蛍光 X 線 (XRF: X-ray Fluorescence) 分析装置を用いて測定し、測定したコリメート径は 0.1 mm で、励起電圧 50 kV, 管電流 1 A で行った。眼鏡フレーム部品の硬度はマイクロビッカース硬度 (HV) 計により測定した。測定位置は部品表面から 0.1 mm の深さにおいて、溶接端部からテンプル部品の長手方向へ 0.2 mm 間隔で実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 チタン製眼鏡フレームに適したレーザ溶接条件

溶接ビード幅が狭く、深い溶込みの溶接を行うためには、

Peak Power [kW]	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Bead surface
Cross section
Bead width [μm]	590	680	730	810	890
Penetration [μm]	450	530	580	730	810

Fig. 6 Surfaces, cross sections, weld bead widths and penetration depths of laser welds made at several powers of 0.4 kW to 0.8 kW

Fig. 7 Influence of laser power on ratio of porosity area to weld area and subtraction melting area from porosity area

より高いパワー密度が有効である⁴⁾。最適な溶接条件を選定するため、チタンの板材同士を突き合せ、溶接速度 1 mm/s、パルス幅 2 ms、10 Hz のパルス照射で、レーザーピークパワーを 0.4 kW から 0.8 kW までの範囲で変化させてシーム溶接を行った。得られた溶接部の外観および縦断面の写真を Fig. 6 に示す。板材の表側のみレーザー溶接を行い、突き合せ部分を破断させ、そのままの状態破断面を観察した。レーザー溶接後の溶接ビード幅および溶込み深さの測定については、0.1 mm 間隔でレーザーが照射されることにより発生する溶込み量の変化を考慮して、各試験片 20 か所を 0.15 mm 間隔で測定して平均値を求めた。溶接ビード幅は、0.4 kW では 590 μm であり入射レーザー光のスポット径の 1.5 倍を超え、ピークパワーが増加するに伴い 0.8 kW で 890 μm にまで拡大し、スポット径の 3 倍程度に達した。また、0.5 kW 以上ではビード表面にスパッタの付着が確認されたが、いずれも直径が 200 μm 以下の大きさであり品質基準に影響を及ぼさないと判断した。一方、溶込み深さは、ピークパワーの増大に従って深くなり、0.4 kW では 450 μm 、0.8 kW では 810 μm となった。全ての条件で溶込み中央部から底部の範囲の位置にポロシティが観察された。次に、ピークパワーにおけるポロシティ面積比率およびポロシティ面積分を差し引いた溶接面積を各条件でそれぞれ 5 断面計測した。ポロシティ面積比率の計測方法は、複数あるポロシティの空隙面積の和と溶融部全体の面積の比から、溶接面積については、溶込み深さと溶接長さの積からポロシティの割合分の差をとり、それぞれ平均値を算出した。計測結果を Fig. 7 に示す。ピークパワーが 0.4 kW から 0.5 kW に上がると、ポロシティの割合が 3.6% から 5.3% と約

Fig. 8 Cause and effect diagram for ideal laser weld

Fig. 9 Relationship between tensile strength and combination of factors

Table 2 Combination of factors by L12 orthogonal arrays

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
No.	Angle of welding surface	Processing of welding surface	Chamfering of welding surface	Tilted jig (Vertically welding direction)	Tilted jig (Welding direction)	Bending load	Guard glass	Bending deformation of fiber	Pickling	Distance between welded part and gas shield nozzle	Acetone defatting
1	0°	WEDM	Square	0°	0°	Not	New	Not	Not	5mm	Practice
2	0°	WEDM	Square	0°	0°	Practice	Used	Practice	Practice	15mm	Not
3	0°	WEDM	C0.2	1°	1°	Not	New	Not	Practice	15mm	Not
4	0°	Machining	Square	1°	1°	Not	Used	Practice	Not	5mm	Not
5	0°	Machining	C0.2	0°	1°	Practice	New	Practice	Not	15mm	Practice
6	0°	Machining	C0.2	1°	0°	Practice	Used	Not	Practice	5mm	Practice
7	1°	WEDM	C0.2	1°	0°	Not	Used	Practice	Not	15mm	Practice
8	1°	WEDM	C0.2	0°	1°	Practice	Used	Not	Not	5mm	Not
9	1°	WEDM	Square	1°	1°	Practice	New	Practice	Practice	5mm	Practice
10	1°	Machining	C0.2	0°	0°	Not	New	Practice	Practice	5mm	Not
11	1°	Machining	Square	1°	0°	Practice	New	Not	Not	15mm	Not
12	1°	Machining	Square	0°	1°	Not	Used	Not	Practice	15mm	Practice

1.5 倍に上がり、0.5 kW から 0.7 kW においても揺やかに上昇を続け、0.7 kW から 0.8 kW になると 9.6% まで再び大きく増加していた。溶込み深さの増大に伴い、溶接金属部底部にポロシティが発生し、そのビード断面積に対する比率が高くなる傾向にあるが、ピークパワーと溶接面積の関係は、溶込み深さの傾向と同様であった。

以上の結果から、眼鏡フレームの溶接外観基準を満たし、溶接面積が広く溶接強度基準を達成し得るレーザピークパワー 0.6 kW の条件を選定し、本研究での基本条件とした。

3.2 実用化に向けた溶接品質に影響する因子

製造過程で重要な加工のばらつきについては、品質工学の観点から取り組んだ。チタン製眼鏡フレームのレーザ微細溶接の実用化に向け、溶接強度に影響すると考えられる因子について、新井氏が作成した図⁹⁾を元に特性要因図を作成した。その図を Fig. 8 に示す。その特性要因図から特に生産時に変化が生じやすいと考えられる 11 項目を選定した。各因子の水準数は 2 個として、実際の生産時の都合により想定される範

囲で値を設定し、Table 2 のように L12 直行表に割付けた。評価は溶接強度を定量的に比較するため、板材の単軸引張試験により実施し、最大荷重を評価の値とした。得られた結果を Fig. 9 にまとめた。Fig. 9 から、大きな溶接強度の変化が見られた因子は、溶接進行方向に対する治具の角度の因子および突合せ溶接面の加工方式の違いによる因子であった。それぞれの治具角度における溶込み深さを測定し、強度に及ぼす影響を検討した。治具角度が試料表面に対して垂直な場合（治具角度：0°）、溶込み深さは 580 μm であり、治具角度が試料表面に対して垂直から 1° 傾いたとき（治具角度：1°）、溶込み深さは 630 μm あった。この溶込み深さ変動の原因として、治具の傾斜によるレーザヘッドと共試材表面の距離変化（焦点はずし距離）が考えられる。治具を 0° から 1° へ傾斜させたときの焦点はずし距離を測定したところ、0.4 mm 程度であった。そこで、焦点はずし距離が溶込み深さに及ぼす影響を調査し、治具角度による溶込み深さの変動との整合性を評価することで、治具角度が強度に及ぼす影響の主要因が焦点はずし距離であることを確認した。その結果を Fig. 10 に示す。

Fig. 10 Relationship between laser weld penetration and defocused distance

Fig. 10 よりレーザ焦点はずし距離の変化量が大きいほど溶込み深さが減少していることがわかる。焦点はずし距離が 0.4mm 変化した場合、溶込み深さの変動は 10% 程度となり、この結果は、治具角度を 1° 傾斜させた溶込み深さの変化と高い整合性が得られた、したがって、治具角度の傾斜が溶込み深さに及ぼす影響の主要因としては、焦点はずし距離であると考えられる。また安定した溶接強度を得るためには、溶接する部品およびそれを保持する溶接治具に、精度が要求される。10% 以上の溶込み深さの減少はピークパワー 0.1kW の低下に相当する。溶込み深さの減少量を 5% 以下に抑えるためには、本条件では、溶接時のレーザ照射位置高さが $\pm 0.2\text{mm}$ 程度の精度が必要であることが判明した。

次に、突合せ溶接面の加工方式の違いにおける溶接強度の差を調べる。眼鏡部品では、切削加工を用いることが一般的であるが、生産ロット数量が少ない場合には、ワイヤーカット (WEDM) 加工が用いられる。各加工方式による溶接強度を確認するため、溶接したチタン板材の引張試験を実施した。引張試験の結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、ワイヤーカット加工は切削加工に比べ、破断までの伸び量が半分以下になっていることがわかる。そこで電子顕微鏡による引張試験後の破断面の観察を行い、その画像を Fig. 11 に示す。観察した結果、ワイヤーカット加工に比べ切削加工の方が、絞り量が多く延性的な破断面が見られた。

次に溶接部のミクロ組織観察を行った。観察結果を Fig. 12 に示す。ワイヤーカット加工面の溶接部は切削加工面と異なるミクロ組織を示した。そこで溶接部の成分を調べるため蛍光 X 線分析装置による定性分析を実施した。分析結果を Fig. 12 に示す。ワイヤーカット加工面ではチタン元素の他に銅および亜鉛元素が検出され、切削加工面ではチタン元素のみの検出となった。銅、亜鉛が検出された理由として、加工に使うワイヤーは真鍮 (銅と亜鉛からなる合金) 製を使用しており、ワイヤー成分がチタンに付着し、銅、亜鉛が検出されたと考えられる。ワイヤーカット加工は、被加工材の表面にワイヤー成分を含んだ放電痕の累積による変質層が形成さ

Fig. 11 Tensile test results and SEM images of fracture surface

Welding surface	WEDM	Machining
Microstructure of weld bead
Qualitative analysis at weld bead	Ti, Cu, Zn	Ti

Fig. 12 Cross sections and qualitative analysis results of each weld bead

	Laser micro welding	Conventional welding process
Component surface
Welding Surface

Fig. 13 Component surfaces and welded parts produced by laser micro welding and conventional welding process

れることが言及されており⁹⁾、またチタンと銅およびチタンと亜鉛の合金は、多くの金属間化合物が報告されている^{7, 8)}。よって、ワイヤーカットの溶接部は金属間化合物等の脆弱な化合物が形成され、伸びの低下につながった可能性が高いと推察される。

以上の結果から、レーザ焦点はずし距離の変化量を抑えられる高精度な部品およびそれを保持する治具に加え、突合せ溶接面の不純物を取り除いた切削加工による清浄化が、加工ばらつきを抑え、かつ良好な溶接強度に繋がること示唆された。

Fig. 14 Comparison of peeling strength between laser micro welding and conventional welding

Fig. 15 Surfaces of welded parts after peeling strength test, showing sound welds and fracture in hinge

Fig. 16 Surfaces of welded parts deformation after cyclic bending test

3.3 レーザ溶接した眼鏡フレーム部品による信頼性評価

レーザ焦点位置が管理され、溶接面を切削加工した眼鏡フレーム部品において、レーザピークパワー 0.6 kW でレーザ溶接した供試材の剥離試験を実施した。試験前における眼鏡フレーム部品の外観写真を Fig. 13 に示す。Fig. 13 よりレーザ溶接では部品表面の損傷が見られないが、従来溶接法（抵抗ろう付）では部品表面に傷が確認された。剥離試験で得られた荷重と変位量のグラフを Fig. 14 に示す。レーザ溶接した眼鏡フレーム部品の剥離方向の強度は、310 N であり、溶接部は破壊せず、眼鏡フレーム部品の丁番が破断された。試験後の眼鏡フレーム部品の写真を Fig. 15 に示す。従来溶接法で溶接した眼鏡フレーム部品では、剥離方向の強度 275 N であり、同様に丁番が破壊された。したがって、レーザ溶接部は従来溶接法と同等の強度が得られた。

眼鏡フレームは常用の際、テンプルの開閉および顔への脱着に対し、負荷に耐え得る強度が要求される。さらにこれら

Fig. 17 Microstructure of welded part on components of eyeglass frame

Fig. 18 Hardness profiles of laser welded part and conventional weld of eyeglass frame

の脱着を繰返しても製品形状が変わらない耐変形性が必要である。そこでこれらの耐久性の評価として、溶接した眼鏡フレーム部品の繰返し曲げ試験を実施した。試験の結果および試験後の眼鏡フレーム部品の写真を Fig. 16 に示す。レーザ溶接および従来溶接法ともに溶接部は破壊されておらず、十分な強度があるといえる。しかし試験後、供試材が曲げ方向側へ塑性変形しており、溶接端部から 5 mm の位置における変形量はレーザ溶接で 0.1 mm、従来溶接法で 0.25 mm であり、レーザ溶接の方が従来溶接法に比べ小さく、耐変形性に優れていることが確認された。変形量が小さい原因として溶接時に発生する熱影響範囲が狭く、眼鏡フレーム部品の強度が維持されていたためと考えられる。レーザ溶接と従来溶接法の熱影響範囲を比較評価するため、溶接後の眼鏡フレーム部品断面のミクロ組織を Fig. 17 に示す。従来溶接法では、結晶粒の粗大化が広範囲に確認された。一方、レーザ溶接は、溶接部分以外では結晶粒の粗大化は見られず、従来溶接法に比べ面積で約 12% に抑えられている。機械性質を確認するため、金属材料の HV 硬さを測定した。測定結果を Fig. 18 に示す。レーザ溶接では溶接端部の位置で HV170 程度である

が、溶接端部から0.2mmの位置ではHV230程度まで上昇し、それ以降3.0mmまでHV200からHV230までの範囲で推移しており、溶接前の部品硬度とほぼ同程度の硬さであった。それに対して従来溶接法では、溶接端部から1.8mmの位置まで、HV150からHV180までの範囲で推移し、溶接前の部品硬度より低下しており、2.0mm以降ではHV200からHV230までの範囲となり溶接前の部品硬度とほぼ同程度の値を示した。従来溶接法は、溶接時に眼鏡フレーム部品が受ける熱影響範囲がレーザー溶接法よりも大きいため、溶接端部から1.8mmの範囲で硬度が軟化したと考えられる。また従来溶接法のろう付部の硬度は、HV350であり、溶接後の部品に比べ高い硬度であることから、ろう付部ではなく部品が変形したと推察される。以上のことから、従来溶接法はレーザー溶接に比べて、溶接時の熱影響による硬度低下範囲が広く、その影響により部品の降伏強度が低下し、溶接部近傍で塑性変形しやすくなったと考えられる。

眼鏡フレーム部品にレーザー溶接を採用することで、溶接部近辺の部材強度の低下を考慮した部品設計が不要となり、眼鏡フレームのデザイン自由度を高めることが可能となる。

4. 結 言

本研究では、チタン製眼鏡フレームの溶接に適したレーザー溶接条件の検討を行い、実用化に向けた溶接品質に影響する因子を調査した。眼鏡フレーム部品に対してレーザー溶接を行い、剥離試験、繰返し曲げ試験および溶接部付近の硬度測定から実用製品としての評価を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 眼鏡フレームの実用製品としての溶接外観基準を満たすレーザーピークパワーは、0.6kW以下であり、0.7kW以上では溶接外観基準を満たすことができないことを確認した。溶接外観基準を満たす条件の中で、0.6kWが最も広い溶接面積が得られる。
- 2) 通常の製造工程におけるプロセス管理の下では、溶接強度に大きな影響を与える因子は、焦点はずし距離と溶接面の加工方式の違いであることが確認された。溶込み深さの減少量を5%以下に抑えるためには、集光レンズの焦点距離が50mmにおいて、 ± 0.2 mm程度の位置精度が必要であることがわかった。ワイヤーカット加工面よりも、溶接面の不純物を取り除いた切削加工面の方が良好

な溶接強度が得られることがわかった。

- 3) レーザ溶接した眼鏡フレーム部品の剥離試験において、溶接部が破壊することなく部品が破断し、従来溶接法と同等の強度が得られた。
- 4) レーザ溶接した眼鏡フレーム部品の溶接部は、繰返し曲げ試験において従来溶接法と同等の強度が得られた。
- 5) レーザ溶接法によって、結晶粒の粗大化範囲が従来溶接法の約12%まで低減させることができ、溶接部近傍における部品の軟化範囲を狭め、耐変形性が向上することを確認した。
- 6) 以上のことから、レーザー溶接は眼鏡フレームの製造品質を満たすことが確認された。また従来溶接法の課題である電極による部品表面損傷、加熱ばらつき、部材への広範囲な熱影響を防ぎ、従来デザイン制約があった微小部品で構成された眼鏡フレームの実用化が可能となることが判明した。

謝 辞

本研究は、微細溶接したチタン製眼鏡フレームの実用化に大きく貢献し、第4回ものづくり日本大賞特別賞の受賞に至った研究成果のひとつであり、本研究の遂行にあたりご助言等を頂きました東北大学ら関係各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Japan Welding Society: 溶接・接合便覧 第2版, Maruzen, (2003), 426-427. (in Japanese)
- 2) T. Asahina and Y. Itoh: Structures and mechanical properties of butt welded pure titanium sheet using pulsed YAG laser, Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol.55, No.8 (2005), 337-342. (in Japanese)
- 3) H. Hagino, S. Noguchi and K. Masui: CO₂ Laser Welding of Titanium, Japan Society of Electrical, Vol.34, No.77 (2000), 8-14. (in Japanese)
- 4) T. Miyazaki, H. Miyazawa, M. Murakawa and S. Yoshioka: レーザ加工技術, Sangyotosho Publishing, (1991), 100-102. (in Japanese)
- 5) T. Arai: レーザ加工の基礎工学, Maruzen, (2007), 153-154. (in Japanese)
- 6) Mitsubishi Electric: 図解 放電加工のしくみと100%活用法, Gijutsu-hyohron, (1979), 59-65. (in Japanese)
- 7) The Japan Institute of Metals: 改訂3版 金属データブック, Maruzen, (1993), 531. (in Japanese)
- 8) The Japan Institute of Metals: 改訂3版 金属データブック, Maruzen, (1993), 598. (in Japanese)