原著論文

歯科補綴物のレーザ溶接における変形の防止法

—埋没材による固定および熱処理の効果—

氷見 彰敏 柿本 和俊* 河畑 誠司* 小正 裕* 権田 悦通*

Prevention of Laser Welding Deformation for Dental Prosthesis

—Effects of Investment Fixation and Heat Treatment—

Akitoshi Himi, Kazutoshi Kakimoto*, Seiji Kawahata*, Yutaka Komasa* and Yoshimichi Gonda*

Abstract : Recently, the laser welding has gradually been applied as a joining method for dental alloys. Therefore, this study was conducted to develop a welding method for preventing laser welding deformation. In this study, the influence of the fixed strength on the prevention of welding deformation was examined by fixing Ag-Pd-Cu-Au alloy specimen with a soldering investment or silicone rubber. Moreover, the effectiveness of post-heat treatment after welding on the welding deformation prevention was examined. In addition, the deformation result of the laser welding was compared with that of soldering.

The conclusions were as follows :

1. It was effective to compensate for transverse shrinkage to expand joint gap considering the degree of the shrinkage by setting expansion of soldering investment on fixing specimens there with.
2. The strong fixation of specimens with soldering investment could reduce welding deformation.
3. Post-heat treatment of the specimen fixed by investment was effective in preventing the deformation.

Key words : laser, welding, deformation

I. 緒 言

歯科用金属の接合には、主としてろう付が用いられてきたが、最近になってレーザ溶接による接合も行われ始めてきた。これは、レーザ溶接の操作時間が非常に短いことと、装置の価格が低下してきたことによるところが大きい。

Gordon ら¹⁾の研究をはじめとするいくつかの研究で、レーザ溶接部の強度は、歯科補綴装置として十分であることが報告されている²⁻⁵⁾。われわれの講座においても、金銀パラジウム合金やチタンおよび Ti-6 Al-4 V 合金にお

けるレーザ溶接部の接合強度が十分であることを報告した⁶⁻⁹⁾。

一方、レーザ溶接によって製作した補綴装置の精度や溶接変形を詳細に検討した報告は非常に少ない¹⁰⁾。レーザ溶接法では、熱影響部が非常に狭いので、高精度の接合が可能であると考えられるが、柿本¹¹⁾の研究では溶接変形が生じることが判明している。

そこで、レーザ溶接の精度を高めるための溶接方法を開発することを目的として実験を行った。本報告では、接合する金属の固定の強弱や溶接後の応力除去のための熱処理が溶接変形に与える影響を調べ、変形防止の効果について検討した。さらに、ろう付による変形についても調べ、レーザ溶接と比較検討した。

大阪歯科大学大学院歯学研究科歯科補綴学専攻

*大阪歯科大学歯科補綴学第一講座

Graduate School of Dentistry (Prosthodontics), Osaka Dental University

*First Department of Prosthodontics, Osaka Dental University
平成 10 年 9 月 28 日受付

図 1 Specimens for welding
溶接を行う試料

図 2 Specimens fixed with soldering investment
ろう着用埋没材で固定した試料

II. 実験材料と方法

1. 実験材料と接合の前準備

実験には金銀パラジウム合金（キャストウェル MC 金 12%，ジーシー社）の鋳造体を $3.0 \times 25.0 \times 2.0$ mm の大きさに切断したものを用いた。図 1 に示すように、試料端から 1～5 mm の範囲には、埋没材の固定を強固にするための半円形のノッチを 4 カ所に形成した。また、試料表面には試料の接合部側の端から 5 mm および 18 mm の位置に、変形を計測するための計測点をビッカース硬度計 (MMT-3, MATSUZAWA 社) を利用して刻入した。

2 つの試料金属を緊密に突き合わせた状態のままパラフィンワックス（パラフィンワックス，ジーシー社）で仮着後，図 2 に示すように固定材としてろう着用埋没材（鐵着埋没材，ジーシー社）を用いて固定した。また，固定が弱い条件として，シリコンラバー（信越シリコン KE 113，信越化学工業社）を用いて固定した試料も準備した。ろう着用埋没材で固定すると，埋没材の硬化膨張によって継手間隙が大きくなることが予想されるのに対して，シリコンラバーの場合には硬化時にわずかに収縮し，継手間隙が小さくなることが予想される。そこで，シリコンラバーで固定する場合には，突き合わせた 2 本の試料の仮着時には緊密に突き合わせるのではなく，固定前

図 3 General view of pulsed YAG laser apparatus
パルス YAG レーザ加工装置の外観

図 4 Conditions of laser welding
レーザー照射条件

にあらかじめコンタクトゲージ（コンタクトゲージ，ジーシー社）を用いて約 $120 \mu\text{m}$ の間隙をあけた。これによって，ろう着用埋没材で固定した場合もシリコンラバーで固定した場合もほぼ同じ継手間隙ができる。なお，パラフィンワックスは固定後温水中に流そうした。

2. 接合条件

1) レーザ溶接

使用したパルス YAG レーザ加工装置はパルス波形制御型 Model MHL 250 A（ミヤチテクノス社）である。その外観を図 3 に示す。本装置はパルス幅（ τ_p ）を 1～20 ms の範囲で設定でき，ランプ電圧を 200～495 V の範囲内で変化させることによって 1 パルスの照射エネルギー（ E_0 ）を 0～90 J に設定できる。発振したレーザを光ファイバー（GI 型 $0.8 \text{ mm}\phi$ ，三菱電線社）によって伝送し，焦点距離（ f ）150 mm のレンズを用いて継手表面に集光させる。本実験におけるレーザ照射条件を図 4 に示す。な

表 1 Relation between working steps and measurements
作業ステップと計測時期の関係

step i	レーザー溶接試料		ろう付試料	
	ろう着用埋没材で固定した試料 (熱処理あり)(熱処理なし)	シリコンラバーで固定した試料		
step 0	仮着計測	仮着計測	仮着計測	仮着計測
step 1	埋没固定計測	埋没固定計測	埋没固定計測	埋没固定計測
step 2	レーザー溶接計測	レーザー溶接計測	レーザー溶接計測	ろう付計測
step 3	熱処理計測	固定材除去計測	固定材除去計測	固定材除去計測
step 4	固定材除去計測			

お、集光レンズの焦点位置と試料表面間の距離を焦点はずし距離と称し、集光レンズに対し焦点位置よりも試料が遠い場合を正の値として表示する。1パルスあたりの照射エネルギーを約 40 J とし、パルス幅は 10 ms、焦点ははずし距離 (f_d) を 5 mm とした。また、熔融部のオーバーラップ率は約 75% とした。なお、レーザー溶接した試料は、ろう着用埋没材で固定したものを 20 個、シリコンラバーで固定したものを 10 個製作した。

2) ろう付

ろう付は、電気炉 (オートファーマス QM 1, ジーシー社) 内にて 450°C で 30 分間予備加熱した後に、金銀パラジウム合金ろう (アローソルダー, ジーシー社) を用いて火災ろう付した。なお、ろう付した試料は 5 個製作した。

3. 溶接後熱処理

溶接時に生じる応力を除去する目的で、ろう着用埋没材で固定したレーザー溶接試料のうち、10 個に対して溶接後熱処理を行った。溶接後熱処理は、電気炉内で 700°C、30 分間の条件で行った。

4. 変形の計測方法

各作業ステップごとに、接合前および後の試料表面に刻入した計測点の二点間距離および 2 本の試料の表面および裏面がなす角を計測し、溶接変形を横収縮および角変形として求めた。作業ステップと計測時期の関係を表 1 に示す。計測は、固定材で固定する前のパラフィンワックス仮着状態、固定材で固定後、接合後、熱処理後および埋没材除去後に行った。計測には万能工具顕微鏡 (TOPCON TUN 200, 東京光学社) を用いた。

1) 横収縮

図 5 は横収縮とその測定方法を示す模式図である。2 本の試料における外側の計測点 (接合部から 18 mm の点) の二点間距離 d_{out} 、内側の計測点 (接合部から 5 mm の

図 5 Measurement of transverse shrinkage
横収縮 (横方向の変形) の計測方法

図 6 Measurement of angular distortion
角変形の計測方法

点) の二点間距離 d_{in} の平均値 d を試料金属の横収縮を測定するときの基準とした。各作業ステップ ($i=0\sim4$) における横収縮 S_i は試料の基準の長さ d_i から固定前の長さ d_0 を引いた値とした。また、ある作業ステップにおける基準の長さ d_i から、1つ前の作業ステップにおける基準の長さ d_{i-1} を引いた値をその作業による横収縮量 ΔS_i とした。S が負の値をとるとき収縮したことになり、正の値をとるとき膨張したことになる。なお、前記のようにレーザー溶接試料は各条件につき 10 個、ろう付試料は 5 個製作しているの、各条件における横収縮はレーザー溶接試料では 10 個、ろう付試料では 5 個の平均値とした。

2) 角変形

図 6 は角変形とその測定方法を示す模式図である。突き合わせた 2 本の試料の上面および下面がなす角 θ_0 、 θ_i を計測し、これらの平均を 2 本の試料のなす角度 θ とした。各作業ステップにおける θ_i から固定前の角度 θ_0 を引いた値を、各作業ステップ時における角変形 $2\Delta\theta$ とした。また、横収縮と同じく、1つ前の作業ステップとの θ の差を、その作業による角変形 $\Delta 2\theta$ とした。2 $\Delta\theta$ の値が正の時、下向きに凸の角変形を生じたことになる。なお、横収縮と同様に各条件における角変形量は、レーザー溶接試料では 10 個、ろう付試料では 5 個の平均値とした。

なお、変形のデータにおける有意性の検定はスチューデント式 t 検定によった。

III. 結 果

図 7 に各作業後の固定前に対する横収縮 S_i の変化をグ

図 7 Change in transverse shrinkage with each step
横方向の変形（横収縮）S の変化

ラフで示す。また、図 8 では各作業後の角変形量 2α の変化をグラフで示す。

1. 埋没固定による変形

固定前には継手部は緊密に接していたが、ろう着用埋没材での固定によって試料間の距離は、溶接後熱処理を行う試料は $92\mu\text{m}$ 、行わない試料は $100\mu\text{m}$ 、ろう付試料は $96\mu\text{m}$ と、3つの条件すべての試料を平均すると $96\mu\text{m}$ 大きくなった。すなわち、継手間に $96\mu\text{m}$ の間隙が生じた。角変形に関しては試料間にばらつきがみられた。溶接後熱処理を行う試料は 1mrad 、行わない試料は 3mrad 、ろう付試料は 10mrad 変形し、ろう着用埋没材での固定によって下向きに凸の角変形がわずかに生じた。一方、シリコンラバーによる固定では、固定前には継手部に約 $120\mu\text{m}$ の間隙を持たせていたが、試料間の距離が約 $20\mu\text{m}$ 短くなったために、継手間隙はろう着用埋没材で固定した場合と同じく約 $100\mu\text{m}$ となった。また、ろう着用埋没材の固定とは逆に 8mrad の上向きに凸の角変形が生じた。

2. 接合による変形

1) レーザ溶接による変形

ろう着用埋没材で固定した試料は、強固に固定されているにもかかわらず、レーザ溶接によって、溶接前と比較して、溶接後熱処理を行う試料で $85\mu\text{m}$ 、行わない試料で $91\mu\text{m}$ 、平均で $88\mu\text{m}$ の横収縮を生じた。前述のように、ろう着用埋没材の固定によって $96\mu\text{m}$ の膨張が生じているので、固定前と比較すると溶接直後の時点では $8\mu\text{m}$ の膨張となった。また、角変形は溶接によって、溶接後熱処理を行う試料で 13mrad 、行わない試料は 12mrad 、平均で 13mrad の下向きに凸の角変形を生じた。したがって、固定前の状態と比較すると、レーザ照射側に固定による角変形と合わせて約 15mrad の下向きに凸の角変形が生じ

図 8 Change in angular distortion with each step
角変形量 2α の変化

たことになる。

一方、シリコンラバーによる固定では、レーザ溶接によって $123\mu\text{m}$ の横収縮を生じ、 43mrad の角変形を生じた。シリコンラバーで固定した場合のレーザ溶接による角変形は、ろう着用埋没材で固定した場合の角変形よりも危険率 1% で有意に大きかったが、横収縮に関しては有意差を認めなかった。

2) ろう付による変形

ろう付によって約 $210\mu\text{m}$ の横収縮と 8mrad の下向きに凸の角変形を生じた。ろう付による横収縮は、ろう着用埋没材で固定したレーザ溶接試料の溶接による横収縮よりも危険率 1% で有意に大きかったが、角変形に関しては有意差が認められなかった。ろう付後には固定前の状態と比較すると $104\mu\text{m}$ の横収縮と 18mrad の下向きに凸の角変形を生じたことになる。

3. 熱処理時による変形

固定した状態での溶接後熱処理による変形は横収縮は $2\mu\text{m}$ 、角変形は上向きに凸の 2mrad であり、ごくわずかであった。

4. 固定材除去による変形

1) レーザ溶接試料

埋没材で固定したレーザ溶接試料のうち溶接後熱処理を行った試料の固定材除去による変形は、上向きに凸の角変形を 2mrad 生じたのみで、横収縮はほとんど生じなかった。したがって、固定前に比較した埋没材除去後の横収縮は $5\mu\text{m}$ 、角変形は 10mrad であった。

溶接後熱処理を行わなかった試料では、固定材除去によって $22\mu\text{m}$ の横収縮と 7mrad の角変形を生じ、横収縮、角変形ともに溶接後熱処理を行った試料に対して危険率 1% で有意に大きかった。したがって、固定前に比較し

た埋没材除去後の横収縮は $13\text{ }\mu\text{m}$ 、角変形は 22 mrad であった。

シリコンラバーで固定した試料は、固定材の除去によって $10\text{ }\mu\text{m}$ の横収縮と 2 mrad の角変形を生じた。

2) ろう付試料

ろう付試料では固定材の除去によってほとんど横収縮は生じなかったが、上面に凸の 10 mrad の角変形を生じた。したがって、固定前に比較した埋没材除去後の横収縮は約 $110\text{ }\mu\text{m}$ 、角変形は 8 mrad であった。

IV. 考 察

1. 固定時の変形について

固定材は、レーザー溶接の横収縮を補正するために必要である十分な硬化膨張率を持っていることと、熱処理に十分耐えうという理由からろう着用埋没材を選択した。結果としてろう着用埋没材による固定で間隙量が $96\text{ }\mu\text{m}$ 大きくなった。ろう着用埋没材の硬化膨張率は 0.21% で2つの試料に付けたノッチの間隔は約 45 mm であり、 45 mm に 0.0021 を積算した値が約 $95\text{ }\mu\text{m}$ となることから、試料に付けたノッチが埋没材を挟み込み、それによって埋没材の膨張時に試料が引っ張られて2つの試料の間に間隙ができたと考えられる。また、下向きに凸の角変形が生じたのは試料の埋没材部の形態によるものと思われる。すなわち試料底部の方が上部よりも埋没材の量が多く硬化膨張も大きいことに加えて、上部は、2つの部分に分かれているため膨張が内方に向かうために、上部よりも下部の方が外方への膨張が大きくなって、下向きに凸の角変形を起こしたと考えられる。逆に、シリコンラバーは硬化時に収縮するので上向きに凸の角変形を起こしたと考えられる。

2. レーザ溶接時に生じる変形について

レーザー溶接による変形には溶接物の面内の収縮変形と面外のたわみ変形に分けられるが¹²⁾、今回はそれらの面内の収縮変形の基礎となる横収縮と、面外のたわみ変形の基礎となる角変形について調べた。

1) 横収縮について

横収縮とは溶接線に直角方向の変形のこと¹²⁾、これは溶融した部分および熱影響部の金属の熱収縮に起因して生じる。柿本の報告¹¹⁾では、純チタンの継手のない平板にレーザー照射による溶融部を形成するだけでも横収縮が生じたとしている。したがって、2本の金属を完全に緊密に突き合わせたとしても、溶接時の横収縮を防ぐことは困難である。そこで、横収縮を防ぐために溶接する試料を強固に固定するとともに固定材の膨張によって溶接間隙を広げること考えた。本実験では、ろう着用埋没材で固定することによって約 $100\text{ }\mu\text{m}$ の溶接間隙が生じた。ろう着用埋没材にて固定した試料の溶接による横収縮は約 $90\text{ }\mu\text{m}$ で

図 9 Cross section of laser-welded specimen
溶接部の断面図

あったので、埋没固定時の横方向の膨張と差し引きすると、ほぼ横収縮は補正されたといえる。埋没材で固定しているにもかかわらずレーザー溶接によって $90\text{ }\mu\text{m}$ の横収縮が生じたのは、金属と接している部分の埋没材がレーザー溶接時にかかる応力に耐えられずに破壊されたからであろう。したがって、埋没材の固定では、溶接部の横収縮を防ぐことはできず、膨張による収縮の補正は必要である。しかしながら、シリコンラバーで固定した試料の横収縮は約 $120\text{ }\mu\text{m}$ と、埋没材による固定と比較して明らかに大きく、固定力の強い方が横収縮を小さくできることが明らかになった。

2) 角変形について

角変形とは、溶接線に垂直に折れ曲がるような横曲がり変形のことである¹²⁾。この変形には溶融部の断面形態が影響すると考えられる。すなわち溶融部の幅が裏面よりも表面のほうが大きければ溶融部に生じる熱収縮は当然裏面よりも表面のほうが大きくなり、裏面方向に凸の角変形が生じる。したがって、表面と裏面の溶融部の幅が等しくなるような溶け込みを得られれば、角変形を防ぐことができると考えられる。図9はレーザー溶接を行った試料の断面図である。溶融部の幅はレーザー照射を受けた面から下に向かって徐々に小さくなっているのがわかる。本実験に用いた試料金属の厚さは 2 mm あり、裏面も表面と同じだけの溶融部の幅を得るのは困難である。この実験での条件以上のパワー密度で溶接を行うと、内面に大きなブローホールが形成されるか表面が穴あきとなるからである。また、一方向だけでなくその反対方向からもレーザー照射する方法も考えられる。両面からレーザーを照射すれば表裏面の溶融部の幅を等しくすることが可能と考えられる。しかし、表面だけでなく裏面にもレーザーを照射すると、横収縮が増大してしまう。そこで、この実験ではろう着用埋没材で強固に固定することによって角変形を防ぐことを考えた。しかしながら、レーザー溶接によって約 13 mrad の角変形を生じ、角変形を完全には防げなかった。固定しているにもかかわらず

ず角変形が生じたのは、横収縮の場合と同じく、レーザ溶接時にかかる応力に耐えられずに試料金属周囲の埋没材が破壊されたと思われる。しかしながら、シリコンラバーで固定した試料はレーザ溶接によって 43 mrad の角変形を生じたので固定力が強いほど角変形を小さくできることは明らかである。

3. 熱処理の効果について

ろう着用埋没材による固定では、角変形、横収縮ともに完全には防ぐことはできなかったが、シリコンラバーによる固定と比較すると変形は小さく、固定による効果が認められる。したがって、ろう着用埋没材で固定してレーザ溶接を行った試料の溶接部は、埋没材すなわち外的拘束力¹²⁾によって収縮が抑制されていると考えられる。また、試料自体の局所的な熱履歴の相違によって内的拘束力¹²⁾も生じていると考えられる。このために、ろう着用埋没材で固定した試料には溶接部にかなりの応力が残留していると考えられる。溶接残留応力の緩和の手段の 1 つに溶接物をその金属の適当な温度に保持する方法（応力除去焼きなまし）がある。本実験ではこの熱処理法を用いて残留応力の除去を試みた。その結果、溶接後熱処理を行った試料は、行わなかった試料と比べて固定材除去時に生じる変形が小さかった。このことから、溶接後熱処理を行うことは溶接時に生じた応力の除去に効果があるといえる。

また、本実験においては応力除去のための熱処理を 700°C と設定した。その理由は金銀パラジウム合金の溶体化熱処理温度が 700°C であり、この温度では金属原子の移動が活発に行われ確実に応力を除去できると考えたからである。ただ、実験に用いた金属の時効硬化熱処理温度は 400°C であるので、この温度においても金属原子の移動は可能であると考えられる。したがって、400°C においても応力除去の可能性があると考えられる。今回の実験では形状が単純であったが、複雑な形態の試料では、固定材と試料の熱膨張率が異なると大きな加熱は変形につながる。したがって、ブリッジなどの複雑な形態の補綴物を熱処理するときは 400°C 程度に低い温度の方がよいと考えられ、今後、検討する必要がある。

4. ろう付との比較

本研究ではレーザ溶接と比較するためにろう付も行った。ろう付では、横収縮はレーザ溶接よりも約 2 倍大きく 210 μm となった。しかしながら、継手間隙は埋没材に埋没することによって、突き合わせた状態から約 100 μm 広がっているだけなので、210 μm の収縮は考えにくい。このような結果となった 1 つには埋没前に突き合わせた状態では多少の間隙があったということも考えられるが、ろう付作業中の試料と埋没材との温度差による試料全体の変形が考えられる。すなわち、火炎加熱しているときに、埋没

材は金属よりも熱伝導率が低いので金属ほど温度が上がらず、熱膨張が金属よりも小さくなるので、埋没材に覆われている部分の金属の膨張は抑制される。このために冷却時の収縮が大きくなり、試料全体が収縮したと考えられる。そこで、実際に今回の実験におけるろう付後の試料と同じ大きさの 3.0×50.0×2.0 mm の金銀パラジウム合金の棒を、今回の試料と同じ状態でろう着用埋没材に埋没し、電気炉で 450°C 30 分間加熱した後、ろう付時に必要としたのと同じ 3 分間火炎加熱したところ、3 試料の S の平均値で 63 μm 収縮した。また、ろう付による角変形はレーザ溶接よりも小さかった。これは加熱時間が長くまた多方向から加熱するため試料全体がほぼ均一に高温になり、レーザ溶接のような温度変化をとらないためと考えられる。また、試料表面と裏面のろうの溶着量にあまり差がないことも原因の 1 つであると考えられる。

今回は火炎ろう付法を用いたが、炉内ろう付法で行えば埋没材も金属も均一に加熱されるので変形を小さくできたかもしれない。しかし、いずれにしてもろう付では試料全体を加熱しなければならないので、ろう付部のみならず試料全体に変形が生じるのに対して、レーザ溶接では加熱領域が小さく溶接変形の起こる範囲が小さいことから、レーザ溶接がろう付よりも精度が高い接合法であるといえる。さらに、接合に要する手技に関してもレーザ溶接の方が簡便であり、個人の技術による差が出にくいといえる。

すべての接合作業終了後に残った固定前（仮着時）に対する変形は、横収縮については、ろう着用埋没材で固定し、レーザ溶接を行い、固定材除去前に熱処理を行った試料が最も小さかった。一方、角変形についてはろう付した試料が最も小さかったが、横収縮はレーザ溶接の 2 倍であった。これらのことから、本実験で行った条件のなかでは、歯科補綴装置の接合には、試料をろう着用埋没材で固定し、レーザ溶接法を行い、固定材除去前に熱処理する方法が最も望ましいと判断される。

V. 結 論

レーザ溶接時の変形を防ぐ目的で溶接する試料を固定しレーザ溶接を行い、以下の結論を得た。

1. レーザ溶接を行う試料をろう着用埋没材で固定し、埋没材の硬化膨張によって継手間隙を広げることは、溶接時に生じる横収縮を補正するのに効果があった。
2. レーザ溶接を行う試料をろう着用埋没材で強固に固定することによって、溶接時に生じる変形を小さくすることができた。
3. レーザ溶接後に埋没材で固定したまま行った熱処理は変形の防止に効果があった。

稿を終えるにあたり、本研究に種々ご教示いただいた大阪大学接合

科学研究所松縄 朗教授, 片山聖二助教授をはじめとする研究員各位に深謝いたします。

なお本研究は, 大阪大学接合科学研究所共同利用によって行った。

本論文の要旨は第 97 回日本補綴歯科学会学術大会 (1997 年 5 月 31 日, 長崎) において発表した。

文 献

- 1) Gordon TE, Smith DL. Laser welding prostheses—an initial report. J Prosth Dent 24 : 472-476, 1970.
- 2) Smith DL, Burnett AP, Gordon TE. Laser welding of gold alloys. J Dent Res 51 : 161-167, 1972.
- 3) 南里嶺仁. 加工用レーザーの歯科補綴への応用 第 1 報 レーザ溶接の基礎的研究. 補綴誌 17 : 524-529, 1974.
- 4) 南里嶺仁. 加工用レーザーの歯科補綴への応用 第 2 報 レーザ溶接の基礎的研究. 補綴誌 19 : 633-640, 1976.
- 5) 南里嶺仁. 加工用レーザーの歯科補綴への応用 第 3 報 レーザ溶接の基礎的研究—曲げ試験—. 補綴誌 21 : 276-281, 1977.
- 6) 柿本和俊. 金銀パラジウム合金のレーザー溶接に関する基礎的研究 第 1 報 溶込み深さと溶融径. 補綴誌 31 : 1143-1156, 1987.
- 7) 柿本和俊. 金銀パラジウム合金のレーザー溶接に関する基礎的研究 第 2 報 機械的性質と熱処理. 補綴誌 31 : 1566-1573, 1987.
- 8) 柿本和俊. 金銀パラジウム合金のレーザー溶接に関する基礎的研究 第 3 報 機械的性質に影響を与える因子. 補綴誌 32 : 62-73, 1988.
- 9) 柿本和俊, 小正 裕, 榎田悦通. チタン系補綴物のレーザー溶接 第 1 報 溶込み形状と金属組織. 補綴誌 38 : 560-570, 1994.
- 10) Huling JS, Clark RE. Comparative distortion in three-unit fixed prostheses joined by laser welding, conventional soldering, or casting in one piece. J Dent Res 56 : 128-134, 1977.
- 11) 柿本和俊, 榎田悦通. 歯科補綴物のレーザー溶接. 日本レーザー歯学会誌 6 : 62, 1995.
- 12) 溶接学会編. 溶接便覧, 東京 : 丸善, 1977.

著者連絡先 : 氷見 彰敏

〒 573-1121 大阪府枚方市楠葉花園町 8-1

TEL 0720-64-3074