金銀パラジウム合金のレーザ溶接に関する基礎的研究

第2報 機械的性質と熱処理

柿本 和俊

Basic Study on Laser Welding of Ag-Pd-Cu-Au Alloy

Part 2. Mechanical Properties and Heat Treatment

Kazutoshi Kakimoto

Abstract: Laser welded material must have enough mechanical strength withstanding the biting impact and stress. In case of Ag-Pd-Cu-Au alloy, the mechanical properties proved to be changed by heat treatment. The heat treatment before and after welding influences the mechanical properties of welded material. The purpose of this study was to evaluate the influence of heat treatment for the mechanical properties of laser welded material.

Specimens, rolled sheets of 1.2mm thickness, were welded by a pulsed Nd:YAG laser. Test pieces were made of specimens with different heat treatment before and after welding, then tensile test and Vickers hardness test were performed.

The hardness of the weld by laser irradiation was higher than that of solution treated base metal. The tensile strength of the laser welded specimen was nearly equal to the solution treated base metal. And the welded specimen after ageing had nearly equal to or higher tensile strength than the soldered specimen. In the fractured surface of laser welding specimen by tensile test, the dimple showing the ductile fracture was observed.

Key words: Lasers, Welding

緒 言

レーザ溶接した補綴物が口腔内装着後、長く機能を果たすためには、溶接部に十分な強度がなければならない。すなわち、レーザ溶接によって接合された補綴物が口腔内での使用に耐えるに十分な機械的な強度が得られるかどうかが最も重要な問題である。したがって、歯科におけるレーザ溶接の研究では溶接部の機械的性質についての研究が最も多い¹⁻⁵⁾。

レーザ溶接部の機械的強度は種々の溶接条件によって影響されるが、接合部が完全に溶け込むことが、まず必要である。接合部に未溶融の部分があり完全に接合されていなければ、機械的強度は低くなる。この点については、溶込み深さや溶融径などの溶込み形状が問題となる。そこで、レーザ照射条件および試料表面状態と溶込み形状の関係についての検討を第1報⁶⁾で行った。

機械的性質に影響を及ぼすのはレーザ照射条件や試料表面状態だけではない。接合部に完全な溶込みが得られても他の溶接条件によって機械的性質は変化する。特に、鑄造用金銀パラジウム合金は熱処理硬化性のある金属材料であるので、溶接前後の熱処理も非常に重要な因子となると考えられる。

このような観点から、金銀パラジウム合金のレーザ溶接についてつぎのような目的で実験を行った。第1点は、

大阪歯科大学大学院歯学研究科歯科補綴学専攻(指導:西浦 恂教授)

Graduate School of dentistry, The First Department of Prosthodontics, Osaka Dental University (Director: Prof. Makoto Nishiura)

昭和62年8月14日受付

レーザー溶接によって歯科補綴物として十分な強度が得られるか。そして、第2点は溶接部はどのような機械的性質をもつか。さらに、第3点は、溶接前後の熱処理が溶接部の機械的性質に影響を及ぼすか、などについての検討である。

実験は実際にレーザー溶接した試験材について行った。溶接に際しては溶込み形状を調べた実験結果を参考にし、レーザー照射条件を決定した。試料表面状態は、第1報⁶⁾からどの条件であっても、レーザー照射条件を調整することによって十分な溶込みが得られることがわかったので、#400のエメリーペーパー仕上げしたものとした。そして、レーザー溶接後、ビッカース硬さ試験および引張試験を行った。また、引張試験で破断した試験片の破断面を走査電子顕微鏡で観察した。

実験材料および方法

1. 実験材料と条件

使用したレーザー加工装置は第1報⁶⁾と同じく大阪大学

溶接工学研究所の CONTROL-LASER 社製 MODEL 428 である。また、実験材料も第1報と同じ市販の鋳造用金銀パラジウム合金の圧延板を用い、試験材の厚さは1.2 mm とした。実験に用意した試験材の大きさと数は Table 1 に示すとおりである。

試験片作製過程の処理条件を Table 2 に示す。また、試験片の種類と作製までの処理過程を Table 3 に示す。以下、Fig. では Table 3 に示すように、溶体化処理したことを S (Solution treatment)、時効硬化処理したことを A (Ageing treatment)、溶接したことを W (Welding) と略記する。そして、行った処理を順番に記して各処理条件を示すことにする。

Table 1 Sizes and numbers of test piece materials

Test piece	Size ($W \times L \times T$)	Number
For welding	$56 \times 27 \times 1.2$ (mm)	16
For soldering	$9 \times 27 \times 1.2$ (mm)	12
For base metal	$9 \times 54 \times 1.2$ (mm)	6

Table 2 Experimental conditions

Heat treatment	Solution treatment : Heat at 700°C for 20 min, then quenched with water	
	Age hardening treatment : Heat at 450°C for 30 min, then bench cooling	
Welding conditions	Beam Diameter (D_o)	: 8.0 mm, Pulse width (τ_p) : 3.1 ms
	Focal length (f)	: 120 mm, Laser energy (E_o) : 23.5 J/P
	Defocused distance (f_d)	: 16 mm, Atmosphere : Air
	Overlapping ratio	: 0.8, Pulse interval : 1.0 ms
	Specimen surface	: Polish with emery paper (#400)
	Joint form	: Butt joint
Soldering conditions	Soldering metal : Arau solder (G-C Co. Batch No. 120951)	
	Component (Wt %) Ag : 38%, Cu : 27, Pd : 12, Au : 18, Zn : 5	
	Investment : Investment for soldering work (G-C Co. Batch No. 111051)	Joint clearance : 350 μ m, Flame soldering

Table 3 Heat treatment conditions of test pieces

Test piece	Treatment process
S	Solution treatment
SW	Solution treatment $\rightarrow$ Welding
SWS	Solution treatment $\rightarrow$ Welding $\rightarrow$ Solution treatment
SWA	Solution treatment $\rightarrow$ Welding $\rightarrow$ Ageing
SWSA	Solution treatment $\rightarrow$ Welding $\rightarrow$ Solution treatment $\rightarrow$ Ageing
SA	Solution treatment $\rightarrow$ Ageing
SAW	Solution treatment $\rightarrow$ Ageing $\rightarrow$ Welding
SAWS	Solution treatment $\rightarrow$ Ageing $\rightarrow$ Welding $\rightarrow$ Solution treatment
SAWA	Solution treatment $\rightarrow$ Ageing $\rightarrow$ Welding $\rightarrow$ Ageing
SAWSA	Solution treatment $\rightarrow$ Ageing $\rightarrow$ Welding $\rightarrow$ Solution treatment $\rightarrow$ Ageing
Soldering	Soldering $\rightarrow$ Solution treatment $\rightarrow$ Ageing

Fig. 1 Schematic diagram of welded specimen and extraction of test pieces for tensile test and Vickers hardness test

2. レーザ溶接した試験材の作製

レーザ溶接を行う試験材はすべて 700°C , 20 分加熱後水中急冷して溶体化処理を行った。その後, 16 枚の試験材のうちの半分にあたる 8 枚を無作為に選択し, 450°C , 30 分加熱後空气中冷却して時効硬化処理を行った。なお, 熱処理を行った電気炉は NEY 社製 NEYMATIC 202 で, 試験材の近くの温度を直径 0.3 mm の白金ロジウム熱電対 (石福金属工業社製 PR 熱電対 Batch No. 5812) で計測し, タケダ理研工業社製デジタルマルチ温度計 TR 211 A で計測値を読み取った。以後特に熱処理条件の記述がない場合, 溶体化処理と時効硬化処理はすべて上記の条件である。

熱処理後, 表面の酸化物を #400 のエメリーペーパーで除去し, 同じ熱処理をした 8 枚の試験材を 2 枚ずつ突き合わせてレーザ溶接した。すなわち, 溶接する試験材はレーザ加工装置のワークテーブルにネジ止めし, 発振したレーザを焦点距離 120 mm のレンズで集光し, 焦点はずし距離を 16 mm として大気中で試料面に照射した。なお, パルス幅は 3.1 ms, 1 パルスの照射エネルギーは 23.5 J/P とした。パルスレーザ照射は 1 秒ごとに行い, ワークテーブルを等速で移動させることによって, スポット溶融部を 80% の割合でオーバーラップしてシーム溶接を行った。継手形状は突合せ継手で, 両側溶接すなわち 2 枚の試験材を突き合わせて片面から溶接した後, もう片面にも同じように溶接を行った。こうして溶体化処理した試験材を溶接したものとし時効硬化処理した試験材を溶接したものをそれぞれ 4 枚ずつ作製した。

各々 4 枚の溶接した試験材のうち 1 枚は硬さ試験用と

し, 残りの 3 枚の試験材から引張試験片を作製した。Fig. 1 は試験材を溶接した図であり, 引張試験片とビッカース硬さ試験片の採取を同じ図に簡単に描いた。ビッカース硬さ試験片と引張試験片は前述したように同一の溶接条件で溶接した異なる試験材から作製した。また, 1 枚の溶接した試験材からは 6 つの引張試験片を作製した。

3. ビッカース硬さ試験片の作製と硬さ試験

溶接の最初と最後にあたる各試験材の端から 2 mm の部分は溶接状態が不安定である可能性があり, まず試験片の作製にあたってこの部分を切断し除去した。そして, 溶接した熱処理条件の異なる各 1 枚の試験材を幅 8 mm に切断後, さらに熱処理を行った。試験材の切断には BUEHLER 社製 ISOMET LOW SPEED SAW を用い, 加工硬化や発熱のないよう十分注意した。また, 各熱処理条件は Table 2 に示したとおりである。熱処理後, 溶接部から 7 mm 以上離れた部分は切り取り, 試験片の表面を鏡面研磨してビッカース硬さ試験を行った。

使用した微小硬度計は松沢精機社製 DMH-2 型である。荷重量は 200 g, 荷重時間は 15 秒とし, 測定は溶接部から 1.5 mm 離れたところから 0.2 mm 間隔で行い, 溶接部を通り反対側の溶接部から 1.5 mm 離れたところまで測定した。

4. 引張試験片の作製と引張試験

ビッカース硬さ試験片の作製と同じく, まず溶接の最初と最後にあたる各試験材の端から 2 mm の部分を切断

Fig. 2 Shape of test piece for tensile test

し除去した。引張試験片は熱処理の異なる各3枚の溶接した試験材を切断し1枚の試験材を6つに分割した。切断にはビッカース硬さ試験片の作製と同じく、BUEHLER社製 ISOMET LOW SPEED SAWを用いた。切断後、この6本の試験材をそれぞれ3組に分け、1組は切断したまま、残り2組はそれぞれ異なる熱処理、すなわち時効硬化処理のみ、もしくは溶体化処理後時効硬化処理を行った。

したがって、溶体化処理した試験材を溶接したもの3枚から、3種類の異なる熱処理した試験材を1枚につき各2枚、計6枚作製した。時効硬化処理した試験材についても同様のことを行った。溶接前に時効硬化処理した試験材についても同じ処理を行ったので、溶接した試験片は合計6種類各6枚となった。

以上の方法で、6つの条件にそれぞれ6枚の試験材ができた。これらの試験材をフライス盤にて Fig. 2 に示すような形状に機械加工して引張試験片を作製した。試験片は平行部の長さは12 mm、厚さは原則的に0.7 mmとした。ただし、試験片によっては溶接部の起伏が大きく、規定の厚さにしても凹凸が残る場合は、平行部が平らになるまで研削盤にて厚みを減じた。

母材の試験片は溶体化処理したものと、溶体化処理後時効硬化処理したものを用意した。そして同じように機械加工して引張試験片を作製した。

また、ろう付した試験片も作製した。ろう付はろう付用に作製した試験材をろう付用埋没材（而至歯科工業社製鐵着用埋没材）で埋没し、ブローパイプにて行った。なお、接合面は #120 のエメリーパーにてろうの流れる方向に研磨し、ろう付間隙は埋没材硬化後に計測して、約 350 μm となるようにした。そして、ろうには金銀パラジウムろう（而至歯科工業社製 ARAU SOLDER）を用いた。ろう付後、溶体化処理後時効硬化処理を行い、その後引張試験片を作製した。本実験でのろう付条件の設定にあたっては、中野ら (1974)⁷⁾、柄ら (1977)⁸⁾、湯田

(1979)⁹⁾、藤多 (1981)¹⁰⁾ の報告を参考にした。

このようにして作製した試験片平行部の幅と厚みを万能工具顕微鏡（東京工学社製、トプコン-TUN 200 型）で測定し、デジタルリニアスケールカウンタ（三豊社製）で読み取った。測定は平行部中央と中央から5 mmの位置の3カ所について行い、厚みは平行部の両側について行ったので計測点は6カ所である。これらの値の平均から平行部の幅と厚みを求め、さらに断面積を計算した。また、万能工具顕微鏡で試験片を拡大した際に、平行部に明らかに引張試験の結果に影響を及ぼすと判断できるようなノッチなどの欠陥のある試験片は除外した。したがって、1つの条件に対して試験片は6本ずつ作製したが、引張試験を行った試験片数は必ずしも6本ではない。

引張試験は島津製作所製島津式オートグラフ DSS-200を用い、引張速度は1 mm/minで行った。さらに、破断面を走査電子顕微鏡（エリオニクス社製走査電子顕微鏡 ESM-302 型）で観察した。

実験結果

1. ビッカース硬さ試験結果

ビッカース硬さ試験結果を Fig. 3 に示す。上図は溶体化処理した試験材、下図は時効硬化処理した試験材について、それぞれ溶接した後各熱処理をした試験片の結果である。

溶体化処理した試験材を溶接した場合、溶融部は周囲の母材金属に比べ高い硬度を示した。時効硬化処理した試験材を溶接した場合は、溶融部は周囲の母材金属よりは硬度は低い、溶体化処理した母材よりは高い硬度を示した。つまり、レーザ照射による溶融部は、溶体化処理した母材金属より高い硬度を示した。

レーザ照射による溶融部は前述したように、時効硬化処理された母材金属より硬度は低かった。しかしながら、溶融部をそのまま時効硬化処理した場合、周囲の時効硬

化した母材金属より高い硬度を示した。

このように、レーザによる溶融部は周囲の母材金属とは異なった硬さを示したが、溶融部を溶体化処理した場合の溶融部の硬度は、周囲の母材金属とは変わらなかった。

Fig. 3 Hardness distribution in vicinity welded joints

た。その後時効硬化処理を行っても、周囲の母材金属と同程度に硬度が上昇し、やはり同じ硬度を示した。

2. 引張試験結果と破断面

引張試験結果を Fig. 4 に示す。グラフ棒中の数字は前の数字が試験片数、後の数字が溶接した試験片の母材部での破断のあった試験片数を示し、区間表示は 95% 信頼区間を表している。

母材金属試験片以外で最も引張強さが大きかったのは時効硬化処理した試験材を溶接し、その後溶体化処理したのち時効硬化処理した試験片であった。そして、その引張強さは、時効硬化処理した母材試験片の約 90% であった。また、溶体化処理した試験材を溶接し、そのまま、あるいは一度溶体化処理後時効硬化処理した試験片も、前述の試験片とほぼ同じ引張強さを示した。そして、これらの 3 つの条件の試験片はろう付した試験片より大きい引張強さを示した。

溶体化処理した試験材をレーザ溶接した場合は半数以上が母材部で破断した。また、引張強さは溶体化処理した母材試験片とほぼ同じであった。一方、時効硬化処理した試験材を溶接した試験片の引張強さは、溶体化処理した母材よりも大きい値を示した。以上のことから、レーザ溶接部の引張強さは溶体化処理した母材と同じか、もしくはそれ以上の強さがあることがわかった。

溶接後、そのまま時効硬化処理した試験片は、溶接しただけの試験片よりも引張強さは大きく、また、溶体化処理した母材よりも大きかった。しかし、時効硬化処理した母材よりは小さかった。つまり、レーザ溶接部は時効硬化処理を行うことによって引張強さが増したが、時効硬化処理された母材ほどには強化されなかった。時効

Fig. 4 Tensile test results (Numbers are "specimen number, fracture in base metal")

Fig. 5 SEM photos of fractured surface

硬化処理した試験材を溶接し、そのまま時効硬化処理した試験片では、母材部での破断を起こしたものがあり、引張強さは溶接後に時効硬化処理した試験片の中では最も小さかった。

溶接後一度溶体化処理を行ってから時効硬化処理した場合は、溶接前の処理にかかわらず大きな引張強さを示した。

引張試験片の破断面の走査電子顕微鏡像を Fig. 5 に示す。レーザ溶接部の破断面にも、母材試験片の破断面と同じく延性破壊を示すディンプルが認められた。また、破断面には気孔の観察できるものもあった。

実験結果の考察

本実験結果によると、レーザ溶接部は時効硬化処理を行うことによって、引張強さは母材金属よりもわずかに弱いとはいえ、ろう付と同じかそれ以上の大きさを示すことがわかった。ポーセレン焼付け合金のレーザ溶接部の曲げ試験による破断面について南里（1977）⁵⁾ が報告したように、引張試験片の破断面の走査電子顕微鏡写真でも強延性の結合が確認できた。したがって、レーザ溶接によって歯科補綴物として、十分な接合強度が得られたといえる。

ろう付の場合は母材金属の間にろう材すなわち異種金属を介在させるので、接合部の機械的性質はろう材の機械的性質に影響される。これに対し、レーザ溶接では共金溶接が可能であり、本実験でも共金溶接を行った。この場合、異種金属の介在がないので、接合部の機械的性質は母材金属の性質によるところが最も大きい。以上の

ように考えると、ろう付よりもレーザ溶接の方が強固に接合できることは理解できる。

しかしながら、溶接したままの試験片や時効硬化処理した試験材を溶接後、そのまま時効硬化処理した試験片などにみられるように、レーザ溶接した試験片すべてがろう付した試験片より機械的に優れていたとはいえず、レーザ溶接によって必ず強固な接合が得られるとは限らない。強固な接合を得るためには適切な溶接条件を選択しなければならない。そして、溶接条件の中で、溶接前後の熱処理条件が溶接部の機械的性質に大きな影響を与える因子の1つであることが今回の実験結果から判明した。

引張試験結果では、溶体化処理した試験材をレーザ溶接したままの状態では溶体化処理した母材とほぼ同じ強度であり、他の条件の溶接した試験片に比べ引張強さは小さいといえる。また、ろう付した試験片よりも小さい。しかし、時効硬化処理した試験材を溶接した場合の結果をみると、その引張強さは溶体化処理した母材金属よりも大きい。これはレーザ溶接部が溶体化処理した母材金属より強いことにつながる。ビッカース硬さ試験の結果においては、溶融部の硬さは溶体化処理した母材金属よりも明らかに大きい。

レーザ溶接を行いその後熱処理を行わない試験片についての引張試験や硬さ試験の報告はいくつかなされている。すなわち、Smith ら（1972）¹⁾ は種々の歯科用金合金の鑄造体を溶接し、引張試験と硬さ試験を行った。その結果、レーザ溶接した試験片の引張強さは、鑄造したままの母材よりわずかに小さい程度であり、ろう付した試験片より大きかったと述べた。また、硬さ試験の結果で

は、完全に溶体化処理された母材とほぼ同じであり、時効硬化性にも変化はなかったとした。これと同様な研究を Benthem ら (1983)²⁾ は金を 50% 以上含む貴金属合金と卑金属合金である Co-Cr 合金について行い、引張試験については Smith らの報告とほぼ同じような結果を得ている。硬さ試験では Co-Cr 合金ではレーザ溶接部は著しく硬化しており、また、貴金属合金においてもわずかに増加したと報告している。わが国においても南里 (1974)³⁾ は 18-8 ステンレス鋼と金合金のレーザ溶接を行い引張試験と硬さ試験を行い、レーザ溶接部の引張強さは 18-8 ステンレス鋼では母材と、そして金合金ではろう付後時効硬化処理したものとはほぼ同じであり、硬さについては溶接部と母材にいずれも差は認められないと報告している。

Smith ら (1972)¹⁾ や Benthem ら (1983)²⁾ の報告で、ろう付した試験片よりレーザ溶接した試験片の引張強さが大きいのは、使用した合金やろう材の相違のほか熱処理硬化性のある合金ではろう付後の熱処理の有無によるためではないかと考えられる。

溶融部はレーザ光のエネルギーによって熔融した後、急速に凝固し、さらに急冷したと考えられる。つまり、溶融部は溶体化処理された母材金属に近い状態にあるといえる。したがって、溶接したままの状態ではろう付後時効硬化処理を行った試験片より弱いことは十分考えられる。また、溶体化処理した試験材を溶接した場合の引張強さが溶体化処理した母材金属とほぼ同じであったことも妥当といえる。しかし、時効硬化処理した試験材を溶接した試験片では引張強さが溶体化処理した母材試験片より大きいことや、硬さの大きいことは説明できない。また、上記のこれまでの研究者の報告でも、溶接部の硬さの測定結果は一致していない。したがって、溶融部は溶体化処理された母材金属とは若干異なった機械的性質を示すなんらかの要因があると推察できる。

溶接後、最後に時効硬化処理した試験片では大きな引張強さが得られた。これに該当する試験片は本実験では 4 条件あったが、この中で、時効硬化処理した試験材を溶接し、そのまま時効硬化処理した試験片の場合は、他の 3 条件の場合に比べわずかに引張強さが小さい。それにもかかわらず、この条件でのみ母材部での破断のあった試験片があったのは、母材部は一度時効硬化処理された後そのまま再び時効硬化処理され過時効となったためと考えられる。ビッカース硬さも、母材部ではこの条件の試験片は他の時効硬化処理した試験片よりもわずかにあるが低いことからみて、このような溶接前後の熱処

理方法をとることは推奨できない。

溶接後時効硬化処理した試験片中、溶融部をそのまま時効硬化処理した場合は、いずれも周囲の時効硬化処理した母材金属よりビッカース硬さは大きかった。これは、溶融部がそのままの状態の時は溶体化処理した母材金属より硬かったことに似ており、やはり溶融部の機械的性質は母材金属とは全く等しいとはいえない。ただ、溶接部を一度溶体化処理した場合は、母材金属と類似した性質を示した。このような溶融部と母材金属の機械的性質の違いを起こす原因については今回の実験結果のみで考察するのは不可能であり、さらに新たに実験を行い考究を進めることが必要である。

歯科補綴物の接合に限らず、接合部は母材金属と同じ機械的性質を持つことが好ましい。今回の実験結果から判断すると、最も母材金属に近い状態になるのは、溶接後溶体化処理してから時効硬化処理することであり、その引張強さは母材金属の約 90% を示し、ビッカース硬さでは両者の間に差は認められなかった。

結 論

金銀パラジウム合金はレーザ溶接によって歯科補綴物として十分な機械的強度のある接合が得られるかどうか。そして、レーザ溶接部の機械的性質と、それに与える溶接前後の熱処理の影響を知る目的で実験を行った。その内容は、レーザ溶接した試験材のビッカース硬さ試験および引張試験、さらに引張試験で破断した試験片の破断面の走査電子顕微鏡での観察である。その結果、つぎのような結論を得た。

1) 引張試験の結果、レーザ溶接部は溶体化処理した母材金属とほとんど同じ強度を示した。また、ビッカース硬さ試験結果では母材金属よりも硬かった。

2) レーザ溶接部をそのまま時効硬化処理することによって引張強さは増加した。そして、ビッカース硬さは時効硬化処理した母材金属より大きくなった。

3) レーザ溶接部を一度溶体化処理し、その後時効硬化処理することによっても引張強さは増加し、ろう付した試験片より大きい引張強さを示した。また、ビッカース硬さは同処理の母材金属とほとんど変わらなかった。

4) レーザ溶接部の引張試験による破断面には延性破壊を示すディンプルがみられた。

5) 1)~4) から、レーザ溶接によって十分に強固な結合を得ることができ、その機械的性質は溶接前後の熱処理によって変化することがわかった。本実験結果では、

溶接後溶体化処理を行ってから時効硬化処理すれば、溶接部はかなり母材金属に近い性質が得られるといえる。しかし、母材と溶接部の機械的性質の違いを引き起こす原因については本実験結果からでは不明である。

稿を終えるにあたり、ご指導、ご校閲を賜った西浦 恂教授に深甚の謝意を表します。また、本研究に際し、終始ご助言とご鞭撻をいただいた大阪大学溶接工学研究所松縄朗教授に深く感謝の意を表します。さらにご助言いただきました権田悦通助教授、ならびに、種々ご指導くださいました大阪大学溶接工学研究所片山聖二助手に厚くお礼申し上げます。最後に、ご協力くださいました教室員各位、ならびに、大阪大学溶接工学研究所圧接機構部門の方々に感謝致します。

本論文の要旨は、第75回日本補綴歯科学会学術大会(1986年6月13日、大阪)ならびに第351回大阪歯科学会例会(1986年9月13日、大阪)において発表した。

文 献

- 1) Smith, D.L., Burnett, A.P. and Gordon, T.E.: Laser Welding of Gold Alloys, J Dent Res, 51 (1): 161~167, 1972.
- 2) Van Benthem, H. and Vahl, J.: The Importance of Laser Welding Technique in Prosthetic Dentistry, Proc. ICALEO' 83 (Int. Congr. on Appl. of Lasers and Elactor-Optics, Laser Inst. of America, Los Angels), 38: 141~148, 1983.
- 3) 南里獄仁: 加工用レーザ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) 南里獄仁: 加工用レーザ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) 南里獄仁: 加工用レーザ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) 中野義基, 平山道子, 伊藤充雄: 白金加金及び鋳造用金銀パラジウム合金のろう付に関する研究, 歯理工誌, 15: 86~95, 1974.
- 8) 柄 俊彦, 川越則昭, 勝島健太郎, 浜田泰三, 山田早苗: 歯科用金合金のろう付間隙が引張強さに及ぼす影響について, 広歯誌, 9: 265~269, 1977.
- 9) 湯田雅士: 歯科技工における継付について〈第11回〉, 歯科技工, 7: 375~384, 1979.
- 10) 藤多文雄: 歯科用合金のろう着間隙に関する基礎的研究—とくに曲げ強さ, せん断強さおよびせん断時間に及ぼす影響—, 歯科医学, 44: 169~194, 1981.