加工用レーザーの歯科補綴への応用

第4報 レーザ溶接の基礎的研究

—溶接時の雰囲気と溶接部の問題点—

南 里 嶽 仁

The Use of Laser Welding in Prosthodontics

The fourth report; Basic Study on Laser Welding of Dental Materials

—an atmosphere and problems of laser welding—

Takehito Minamizato

1. はじめに

著者は第1報、第2報、第3報においてレーザー溶接法とろう付法の(1)引張強さ(2)曲げ強さ(3)強酸による耐食性(4)接合時の寸法変化(5)操作性および作業時間等を対比して調べ、レーザー溶接法はろう付法よりも優れていることを報告した¹⁻⁴⁾。

レーザー溶接の特長の1つは大気中で溶接加工ができることである。しかし大気中で溶接すると金属表面が酸化されたり、金属の飛散等の問題が生じる。さらに飛散金属やレンズ系近傍の温度上昇などに対するレンズ系の防禦の意味からガスを吹きつけることが考えられる。この場合酸化防止から当然不活性ガスを吹きつけることになる。

本報では溶接時にアルゴンガス、ヘリウムガスなどの不活性ガスを吹きつけ、溶接組織に対するこれらの雰囲気の影響を検討した^{5,6)}。さらに溶接部の凹みや割れ、気孔などのレーザー溶接に伴う問題点とその解決策についても検討を加えた。

2. 実験方法

1) 試料金属は18-8ステンレス鋼(SUS 27), ADA

九州大学歯学部歯科補綴学第2講座(指導:末次恒夫教授)
Dept. of Prosthodontics, Kyushu Univ. School of
Dentistry (Director: Prof. Tsuneo Suetsugu)

昭和52年4月8日受付

規格 Type III, Type IV の金合金(G.C. 社製, 以後 Type III, Type IV と呼ぶ), ポーセレン焼付合金(松風社製)の4種類の圧延加工板(厚み1mm)を用いた。これらの板から幅2mm, 長さ10mmの試料を切り出し, Butt 溶接した。

また Co-Cr, Ni-Cr 合金の試料はタイコン, ワクローム, リーガロイ, ダンクローム, サンコリウム, ノビリアムの各種を用いた。これらの試料を厚さ1.8mm, 幅5.0mm, 長さ10.0mmに松風社製アルゴンキャスターで鑄造し, 中央部をカッターで切断した。その切断面を Butt 接合してレーザー溶接を行った(ただしワクロームは1.0×10.0×10.0の試料2枚を Butt 接合したものをを用いた)。また18-8ステンレス鋼および金合金の腐食液は第1報と同じ腐食液を用いた。Co-Cr や Ni-Cr 合金の腐食液は王水を用いた。

2) レーザ加工機は東芝製 LAY-508B 型で, 入力700V, 出力13J/pulse, 集光レンズの焦点距離f:50mm, 焦点の位置ディフォーカス+8mm, 溶接レンジ4, パルス幅0.3mm/pulseの条件で両面照射を行った。レーザー溶接時の雰囲気として(1)大気中(2)アルゴンガス吹きつけ(3)ヘリウムガス吹きつけの各条件下で溶接を行った。アルゴンガスについては30l/min, ヘリウムガスについては50l/minで吹きつけた。ただし Co-Cr, Ni-Cr 合金については片面照射でアルゴンガス, ヘリウムガスともに30l/minで吹きつけた。

3) 溶接部における各構成元素の分布をX線マイクロアナライザー(E.P.M.A.)によつて調べた。E.P.M.A.は島津社製 ARL 型 EMX-SM で, 取り出し角(52.5°),

検出X線 ($\text{FeK}\alpha$, $\text{AuL}\alpha$, $\text{CuL}\alpha$, $\text{OK}\alpha$), 加速電圧 (15 kV), 吸収電流 ($2\sim 0.5\ \mu\text{A}$) の条件で線分析, 面分析を行った。

4) 次にX線回折によつて溶接部および両母材の格子定数を測定し, E.P.M.A. による結果と比較検討した。X線回折は理学電機社製 RU-3 型で $\text{CoK}\alpha$ 線を用い, 加速電圧 50 kV, 管電流 60 mA, 走査速度 $2^\circ/\text{min}$ の条件で行った。

3. 結果および考察

1) 肉眼的観察

大気中でレーザー溶接した場合, 溶接後溶接表面はレーザースポットの境界にそつて酸化によると思われる変色が見られ, また所々に溶接によつて起こつたと思われる金属の飛散物があつた。しかし不活性ガス (アルゴン, ヘ

リウム) を吹きつけた場合は酸化によると思われる変色はほとんど観察されず, 飛散物も少なかった。図1に Co-Cr 合金ノビリウムの大気中, アルゴンガス吹きつけ, ヘリウムガス吹きつけの各レーザー溶接部の表面状態を示す。また大気中, 不活性ガス中のいずれの場合も金属の溶け込みや一部金属の飛散により, レーザ溶接部は元の接合部の断面積よりも小さくなつてゐる。

2) 金属組織の観察

(1) 組成が類似している場合

図2は Type IV 金合金とポーセレン焼付合金をレーザー溶接した場合の組織である。両者とも金合金であるが融点は約 200°C 異なる。

図2の左は大気中で溶接した場合で, 右はアルゴンガスを吹きつけながら溶接した場合である。アルゴンガスを吹きつけた場合の溶接組織は非常に不均一な組織を示す。また溶接幅も不均一である。一方大気中の場合はスポットの境界のはつきり現われ, 組織全体としては鮮明で均一である。

図3に E.P.M.A. による線分析の結果を示す。アルゴンガスを吹きつけるよりも大気中で溶接した方が各元素ともより均一な分布を示している。酸素Oの線分析では大気中の縦方向の分析においてわずかに上昇しているが, 横方向の分析はほとんど差がなかつた。したがつて溶接時に酸化物が形成され, それが溶接部に巻き込まれるということは少ないと思われる。

図4に面分析による元素の分布を示す。B.E.I. および Au, Cu の分布は大気中の方がアルゴンガスを吹きつけた場合よりも多少均一であつた。またアルゴンガスを吹きつけた場合に気孔が多いようにも思われる。

図1 レーザ溶接表面 (ノビリウム)

図2 Type IV 金合金とポーセレン焼付合金のレーザー溶接部と線分析の位置

(左) 大気中 (右) アルゴンガス吹きつけ

h: 横方向 v: 縦方向

図 3 Type IV 金合金とポーセレン焼付合金の線分析

(左上) 大気中—横方向   (右上) 大気中—縦方向
(左下) アルゴンガス—横方向   (右下) アルゴンガス—縦方向

図 4 Type IV 金合金とポーセレン焼付合金の面分析

(左) 大気中 (右) アルゴンガス吹きつけ

(2) 組成が極端に異なる場合

融点、組成が極端に異なる金合金と 18-8 ステンレス鋼を組み合わせてレーザ溶接を行った。その金属組織を図 5 に示す。溶接部の黒い組織はステンレス鋼の成分、

白い組織は金合金の成分がそれぞれの主成分の相と思われる。これらの組織像から判断すれば大気中とアルゴンガス雰囲気とでは図 2 の金合金同士の場合ほどの差はみられなかった。ただしアルゴンガスを吹きつけた場合に

図 5 Type III 合金と 18-8 ステンレス鋼のレーザ溶接
 (左上) 大気中
 (右上) アルゴンガス吹きつけ
 (左下) ヘリウムガス吹きつけ

Type III 側に気孔が認められる。またヘリウムガスを吹きつけた場合の組織は、前 2 者と比較するとかなり組織は均一である。しかし 1 発目のレーザスポットに金属の飛散によると思われるかなり大きな欠損が認められ、さらに溶接部の中央に割れが生じた。

図 6 に E.P.M.A. による線分析の結果を示す。Au, Fe はどの場所においても零レベルに落ちていない。その分布は Au が少ない所では Fe は増加している。アルゴンガス吹きつけと大気中とを比較すると、大気中の方が Au, Fe の元素分布は均一である。また大気中の線分析とヘリウムガスを吹きつけた場合の線分析とを比較するために、各元素の平均濃度に対する変動幅を調べた結果、ヘリウムガスを吹きつけた場合はさらに均一であった。

図 7 に面分析の結果を示す。アルゴンガスを吹きつけた場合では B.E.I., Au, Fe では濃淡の差が大きい。これは溶接時偏析を起こしたものである。しかし大気中ではかなり均一に分布し、またヘリウムガスを吹きつけた場合もさらにきれいな B.E.I., Au, Fe の分布を示している。

以上の結果からレーザ溶接時の雰囲気としてヘリウムガスをを用いた場合に最も均一な溶接組織が得られ、これ

に次いで大気中、アルゴンガスの順となつた。操作性などから判断すると大気中でレーザ溶接を行うのが最も良いが、肉眼的観察で述べたように大気中ではかなり酸化される。したがって特に酸化されやすい金属のレーザ溶接時にはヘリウムガスを吹きつけた方が良いと思われる。

ヘリウムガス吹きつけは (1) 空気を遮断する効果いわゆるシールド性が他よりも非常に優れている。(2) 表 1 に示すように熱伝導、比熱が他の 2 つに比べ、はるかに良く冷却効果がある。(2) の溶接時の冷却効果は結晶粒を小さくし、組織を均一化する効果である^{7,8)}。しかしヘリウムガスを吹きつける時に起こった割れは当然問題となる。これはたぶん冷却効果が大きすぎたためと思われる。そこで適当な冷却効果を得るようにガス流量を調節する必要がある。

3) X線回折による格子定数の測定

X線マイクロアナライザーによるマクロ的な元素の分布を調べたが、次に両母材と溶接部の格子定数を調べ、格子定数の変化を見ることにより溶接部の組成の変化を検討した。

Type III と 18-8 ステンレス鋼との組み合わせにおける両母材および溶接部をダイヤモンドディスクにて粉末と

図 6 Type III 金合金と 18-8 ステンレス鋼の線分析

(左上) 大気中—横方向 (右上) 大気中—縦方向
(左中) アルゴンガス—横方向 (右中) アルゴンガス—縦方向
(左下) ヘリウムガス—横方向 (右下) ヘリウムガス—縦方向

した。ただし歪み取り焼鈍を行えば拡散により溶接部の各相の組成に変化を生ずるおそれがあるために研削された粉末をそのまま測定に供した。したがって各ピークに広がりを生じたので測定可能であつた 4 本のピークから a を求め、その平均値をもつて格子定数とした。

図 8 に回折図形の一部を示す。溶接部では金属組織からも明らかなように 2 相が共存しているが、各相の格子定数は図 8 の表に示すように各母材のそれとは一致しない。すなわち Au-rich 相および Fe-rich 相ともに溶接部では相手側構成元素を取り込んでいることがわかる。

図 7 Type III 金合金と 18-8 ステンレス鋼の面分析

(左上) アルゴンガス吹きつけ
(左下) 大気中
(右) ヘリウムガス吹きつけ

表 1 アルゴン、空気、ヘリウムの各気体の熱伝導度と比熱

	熱 伝 導 度 Cal/cm·sec·deg	比 熱 (100°C) Cal/deg·mol
Ar	0.052	12.5
air	0.074	24
He	0.408	125

Lattice Constant (X Ray Diffraction) (単位 Å)

	Type III	18-8
Base Metal	3.947	3.592
Welded Zone	3.904	3.597
Δa	-0.043	+0.005

図 8 格子定数と X 線回折図形

したがって溶接部は両母材の機械的混合領域ではなく、合金層を形成していることが確認された。このことが強力な接合強さをもたらすものである。

4) レーザ溶接部の問題点とその解決策

肉眼的観察や金属組織で述べたように接合部の金属の

溶け込みや飛散による凹みや割れ (crack)、気孔 (void) を生ずることがわかった。これらの溶接欠陥の解決策として次のような方法が考えられる。

(1) 凹みについて

接合する金属母材と同種金属を 100~150 μ の厚みに圧延し、幅 2 mm、長さ 5 cm の溶接棒を作製する。こ

の溶接棒の作製には casting 時のスプルーが利用できる。この溶接棒を用い二重照射を行う。すなわち最初は接合部の溶接幅を狭くし溶接深度を増すように溶接条件³⁾をセットする。次に溶接棒を用い溶接幅を少し広くして接合部の周囲を肉盛りしながらレーザー溶接する。また金属組織に見られた溶接部の両端での欠損はレーザースポットの径(約 900 μ)の中央部が接合部の端面にきていたため、端面のエネルギー量が増大し、大きな凹みとなつたものと思われる。そこでレーザースポット径の円弧がちょうど端面に来るようにすれば凹みが少なくなる。さらに使用する金属の最適条件を見つけるためには casting 時のスプルーを用い必ずためし打ちを行うと良い。

(2) 割れ

溶接部の割れの原因の1つに溶接時に急冷しすぎることが考えられる^{7,8)}。一般に合金や 18-8 ステンレス鋼のような伸びのある金属では割れの発生は少ないが、Co-Cr や Ni-Cr 合金などのように伸びの少ない金属には割れが発生しやすい。図9はタイコンをアルゴンガスを吹きつけながらレーザー溶接したものである。溶接部に

平行な縦割れ、直角な横割れが発生し、その一部は熱影響部や母材部にも達している。

図9 タイコンのレーザー溶接(アルゴンガス吹きつけ)

図10 各種 Co-Cr や Ni-Cr 合金における割れ(大気中)

(左上) ワクローム (右上) リーガロイ
(左下) ダンクローム (右下) サンコリウム

図 11 雰囲気の影響による溶接割れ（ノビリウム）

(左上) 大気中
(右上) アルゴンガス吹きつけ
(左下) ヘリウムガス吹きつけ

さらに図 10, 11 に示す市販の Co-Cr 合金（ワクローム、リーガロイ、サンコリウム、ノビリウム）と Ni-Cr 合金（ダंकローム）の 5 種類をレーザ溶接し観察した結果、大気中で溶接した場合にノビリウムは全く割れを作らなかつた。ワクロームは比較的良好であつたが他の合金はすべて全面に割れを生じた。次にノビリウムについて雰囲気を変えてレーザ溶接すると Type III と 18-8 ステンレス鋼の場合と同様にヘリウムガス、大気中、アルゴンガスの順に均一な組織が得られた。また割れの防止には割れの発生しやすい金属すなわち延性の少ない金属同士の組み合わせはできるだけさけ、延性の少ないものと延性のあるものとを接合する。たとえば金属床の場合には plate は Co-Cr 合金を使用し、clasp は金合金を使用するなどの工夫が必要である。なお Co-Cr や Ni-Cr 合金に見られた割れの原因はただ単に伸びが少ないことによるだけでなく、他の要因も関係すると思われるが、いずれにしても各金属に対する種々の溶接条件を明記したデータバンクの作製が必要と思われる。

(3) 気孔の発生

一般に溶接部における気孔は大部分が CO ガスの発生によるものと考えられている。その他水素ガスや窒素ガ

スの発生等が原因とされている^{7,8)}。本実験においてはアルゴンガスを吹きつけた場合に気孔が多く見られたが原因については不明である。しかし溶接部表面を清浄にし、油脂や水分を除去しておくことは気孔の発生を少なくすると考えられる。そこで溶接する前に試料は必ず超音波洗浄器でクリーニングを行う必要がある。

以上のようにレーザ溶接時に生ずる種々の欠陥は溶接部の気密性および機械的性質の低下につながる。したがって完全なレーザ溶接を行うためには各種金属に対する種々の溶接条件を明記したデータバンクが必要と思われる⁹⁾。

著者は上に指摘した注意項目や方法を忠実に守り、レーザ溶接法を臨床に応用し非常な好成績をおさめている⁹⁾。

4. 結 論

レーザ溶接の歯科補綴への導入を試み、今回第 4 報として溶接時の雰囲気と溶接部の問題点を指摘し、次の結果を得た。

1) レーザ溶接に対する雰囲気の影響を調べるため、

(1) 大気中 (2) アルゴンガス吹きつけ (3) ヘリウムガス吹きつけの場合について比較した。その結果操作性や不活性ガスを吹きつける必要の少ない金属では大気中でレーザ溶接を行うのが最も良いが、しかし一般的に金属の酸化や飛散およびレンズ系の防曇、シールド性などの意味から不活性ガスを吹きつける方が良いことが判った。また不活性ガスを吹きつける場合はアルゴンガスよりもヘリウムガスの方が良いことが判った。

2) レーザ溶接にあたっては極端に融点、組成の差が少ない方がより均一な溶接組織を示した。

3) X線回折による格子定数の変化から、Type III と 18-8 ステンレス鋼のレーザ溶接部を判断すると、その溶接部は両母材金属が混合したのではなく合金層を形成していることが判った。

4) レーザ溶接部における金属の酸化や飛散および溶け込みによる凹みや割れ、気孔が認められた。このような欠陥の発生を防ぐため著者は種々検討し好成績をおさめているが、完全な溶接を容易に行えるようにするには各種金属合金に対するレーザ溶接条件を印記したデータバンクが必要である。

本論文の一部は第 63 回日本補綴歯科学会総会 (1976. 9. 25) において発表し、その講演集に抄録を掲載した。

稿の終りに臨み、本研究のご指導とご校閲の労を賜った末次恒夫教授および理工学教室山根正次教授ならびに九州歯科大学第 1 補綴学教室豊田静夫教授に厚く謝意を表します。

また終始一貫してご指導ご鞭撻をいただいた、理工学教室太田道雄助教授に深く感謝の意を表します。さらに工学部冶金学教室佐野毅先生およびアグネ技術センター長崎誠三先生や東芝電気 K.K. 長野幸隆氏、島津製作所の方々にもお礼申し上げます。

文 献

- 1) 南里嶺仁：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。
- 2) 末次恒夫，南里嶺仁：歯科補綴分野におけるレーザ加工の現状と将来の展望，歯界展望，44：26～34，1974。
- 3) 南里嶺仁：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。
- 4) 南里嶺仁：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。
- 5) 南里嶺仁：加工用レーザの歯科補綴への応用，第 29 回レーザ加工研究会例会，研究発表要旨，1976。
- 6) 南里嶺仁：加工用レーザの歯科補綴への応用（第 3 報），第 63 回日本補綴歯科学会総会講演内容抄録，32～33，1976。
- 7) 鈴木春義：最新溶接ハンドブック増補版，山海堂，1976。
- 8) 鈴木春義：最新溶接工学，コロナ社，1975。
- 9) 南里嶺仁：加工用レーザの歯科補綴への応用，第 5 報レーザ溶接の臨床的検討，補綴誌，21：291～307，1977。