

## パルス YAG レーザによる溶接部の熱処理\*

—パルス YAG レーザによるマイクロ補修溶接の研究 (第2報)—

渡辺 健彦\*\*, 山田 善治\*\*\*, 田村 武夫\*\*\*\*

### Heat Treatment of Welds Using Pulsed YAG Laser\*

—Study on the Micro Repair Welding by Pulsed YAG Laser (Report 2)—

by WATANABE Takehiko\*\*, YAMADA Zenji\*\*\* and TAMURA Takeo\*\*\*\*

This study describes laser heat treatment of alloy tool steels SKD11 using pulsed YAG laser. When filler metal SUJ2 is welded to base metal SKD11 which metal is material of rotary cutter, the hardness of weld metal become lower than that of the base metal.

In order to improve the hardness of weld metal which become lower than that of the base metal after laser welding, heat treatments using an electric furnace and pulsed YAG laser were carried out after laser welding, then examined the variation of hardness of weld metal after heat treatments. The obtained results are as follows.

In the heat treatment using an electric furnace, the hardness of weld metal which become low against the base metal after laser welding become higher than that of the base metal under the conditions of heat treatment holding temperature at 180°C and holding time from 30 s to 120 s, then take out the weld metal from the electric furnace and cooling from furnace temperature to room temperature.

In the heat treatment using pulsed YAG laser, after laser welding in succession laser beam radiate at the surface of weld metal, the hardness of weld metal which become low against the base metal after laser welding become the same hardness as the base metal under the conditions of holding temperature at 180°C and holding time from 30 s to 120 s, then cooling to room temperature.

**Key Words:** Pulsed YAG laser, Repair welding, Laser heat treatment, Rotary cutter blade, Vickers Hardness, Alloy tool steels, Electric furnace

## 1. 緒 言

前報<sup>1)</sup>において、高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)をフィラーメタルとしてパルス YAG レーザによる合金工具鋼(SKD11)のロータリカッターのマイクロ補修溶接に関する基礎的技術の確立を目的としてパルスショット数が溶接金属の硬さ、溶接部の曲げ強さに及ぼす影響などを明らかにしてきた。その過程で、フィラーメタル SUJ2 を用いてレーザ補修溶接すると溶接金属の硬さがロータリカッターの母材 SKD11 の硬さより低くなり、パルス YAG レーザで補修溶接した部分がロータリカッターとしての機能を発揮しないことがわかった。そこで、本報ではレーザ補修溶接により硬さが低下した溶接金属の硬さをカッター母材 SKD11 の硬さ HV680 程度に向上させるための基礎的な

熱処理条件、およびパルス YAG レーザによる熱処理方法を検討した。

## 2. 実 験 方 法

### 2.1 供試材および試験片形状

供試材は前報<sup>1)</sup>と同様、被補修材として合金工具鋼 SKD11、フィラーメタルとして高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 を用いた。合金工具鋼 SKD11 は 1030°C で焼入れ強制空冷後、510°C で高温焼戻し熱処理を 2 回行いその後、ワイヤカット放電加工機にて補修溶接用試験片 (13<sup>mm</sup>×30<sup>mm</sup>×60<sup>mm</sup>) を作製した。高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 は直径 1.5 mm の玉軸受鋼球をそのままフィラーメタルとして使用した。Fig. 1 に補修溶接用試験片の形状、寸法および熱処理用試験片の形状、寸法を示す。Fig. 1 (A) は補修溶接用試験片で上面に刃丈 1.5 mm、刃幅 0.6 mm のロータリカッターの切り刃を 10 mm 間隔で 6 列作製した。Fig. 1 (B) はレーザ溶接後、マイクロカッターにて厚み 5 mm に切断した電気炉による熱処理用試験片を、Fig. 1 (C) は Fig. 1 (A) に示す補修溶接用試験片の切り刃の上面にフィラーメタルとして直径

\*原稿受付 平成12年7月25日 平成11年度秋季全国大会で発表

\*\*正 員 新潟大学工学部 Member, Niigata University, Faculty of Engineering

\*\*\*学 生 員 新潟大学大学院 Student Member, Niigata University, Graduate School

\*\*\*\* 新潟大学工学部 Niigata University, Faculty of Engineering

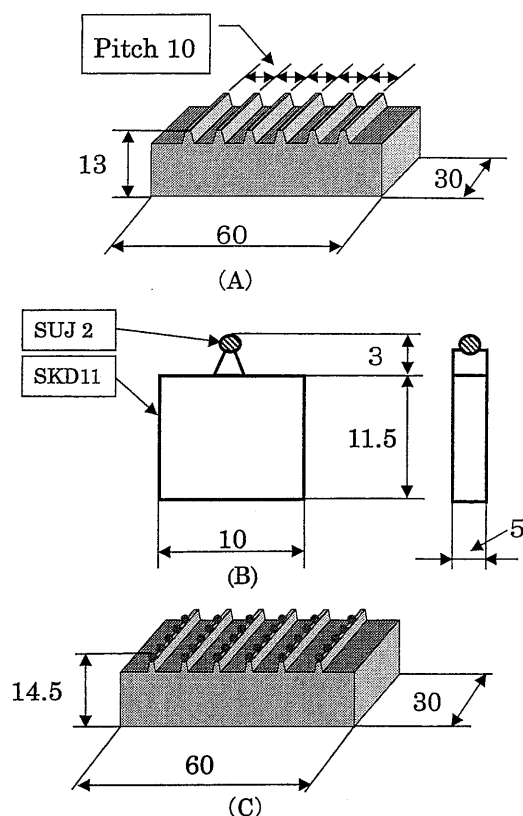


Fig. 1 The shape and size of the specimen.  
(A) : Specimen of repair welding  
(B) : Specimen of heat treatment using an electric furnace  
(C) : Specimen of heat treatment using pulsed YAG laser

1.5 mm の玉軸受鋼球を 5 mm 間隔でレーザ溶接したレーザ熱処理用試験片を示す。

レーザ補修溶接は Fig. 1 (A) に示す補修溶接用試験片 SKD11 の刃の上側表面に直径 1.5 mm の玉軸受鋼球 SUJ2 をパーカッション溶接機で仮付けし、フィラー金属の鋼球表面に焦点を合せ、パルス YAG レーザをフィラー金属の上方から照射して溶接した。なお、電気炉による熱処理前のパルス YAG レーザによる溶接条件は前報<sup>1)</sup>で行った溶接条件の中からパルス波高 235 V、パルス幅 18 ms、パルス繰返し数 2 PPS、パルスエネルギー 30 J/P、パルスショット数 30 を選定した。

## 2.2 電気炉による熱処理

まず、レーザ熱処理を行う前に電気炉を用いて熱処理を行い、パルス YAG レーザ溶接した溶接金属の硬さの変化を調べた。電気炉による熱処理は Fig. 1 (B) に示す熱処理用試験片を電気炉内に入れ、Table 1 に示す条件で熱処理をした。

電気炉による熱処理方法は炉内の保持温度を 180℃ 及び 530℃ とし、そのときの保持時間は 30 s、60 s 及び 120 s の三種類とし、加熱後試験片を電気炉から取出して室温まで自

Table 1 Heat treatment conditions for using an electric furnace.

Holding temperature	180℃	530℃
Holding time 1	30s	30s
Holding time 2	60s	60s
Holding time 3	120s	120s

然放冷した。熱処理後、溶接金属の硬さをマイクロビッカース硬度計で測定し、熱処理前の硬さと比較検討した。

## 2.3 パルス YAG レーザによる熱処理

電気炉による熱処理と同様な熱処理をパルス YAG レーザで行うには電気炉における炉内保持温度を得るためのレーザ照射条件の設定が必要である。予備実験によりパルス波高、パルス幅およびパルス繰返し数とレーザ照射部の温度について調べた。レーザ照射部の温度測定結果から、パルス繰返し数が少ないと照射パルス間隔が長くなるので、レーザ照射部は加熱、冷却の繰返し間隔が長くなり温度の変動が大きくなるため、レーザ熱処理における保持温度を一定に保つことができなくなる。そこで、本実験では照射パルス間隔を短くして温度の変動を小さくするために、レーザ熱処理におけるパルス繰返し数を 10 PPS とし、レーザ溶接におけるパルス繰返し数 2 PPS に比べて増加させた。また、レーザ熱処理はレーザ溶接後、引続き溶接金属の上方からパルス YAG レーザを照射して保持温度を 180℃ 及び 530℃ に、そのときの保持時間を 30 s、60 s 及び 120 s の三種類とし、加熱後室温まで自然放冷した。レーザ熱処理後、溶接金属の硬さをマイクロビッカース硬度計で測定し、熱処理前の硬さと比較検討した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 電気炉による熱処理条件と溶接金属の硬さ

電気炉による各熱処理後、溶接金属の硬さを測定した結果を Fig. 2 にまとめて示す。Fig. 2 (A) は電気炉内の保持温度 180℃、Fig. 2 (B) は電気炉内の保持温度 530℃ で熱処理したときの溶接金属の硬さと熱処理前の硬さを示す。溶接金属の硬さの測定は Fig. 1 (B) 及び (C) に示す各熱処理用試験片の球形状をした溶接金属のほぼ中央部分を垂直方向にマイクロカッターで切断し、切断された溶接金属の断面中央部分を Fig. 8 に示す断面写真の様に溶接金属の上側の表面から下側の母材 SKD11 方向に向かって 0.05 mm 間隔で測定した。なお、レーザ溶接により硬さが低下した溶接金属の硬さを向上させるための熱処理温度はフィラー金属 SUJ2 及びカッターの母材 SKD11 が通常行われている焼戻し温度<sup>2)3)</sup> から 180℃ と 530℃ を選定した。また、その中間の温度である 280～350℃ ではロータリカッターに要求され

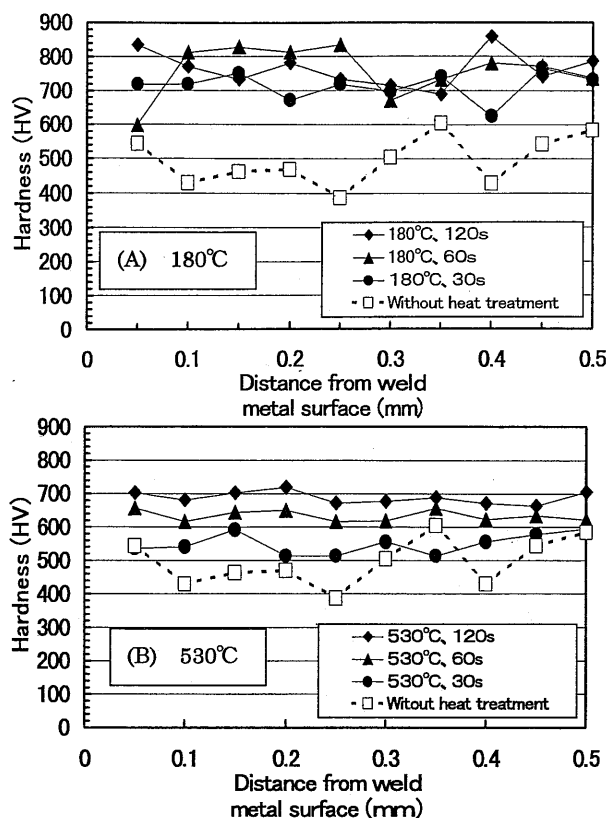
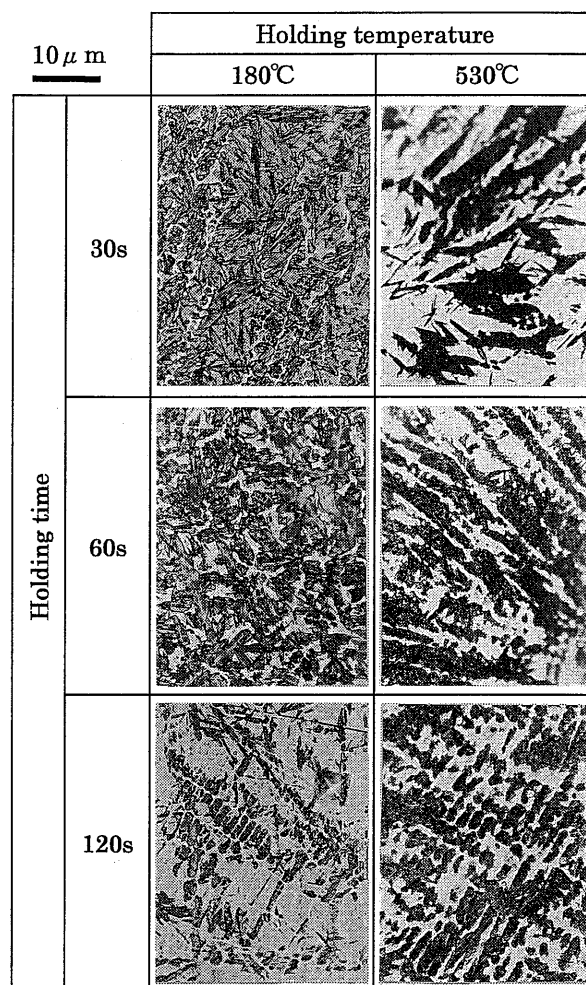


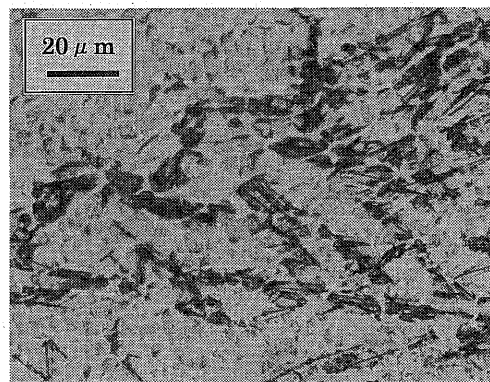
Fig. 2 Vickers hardness at the weld metal for various conditions of heat treatment using an electric furnace.

ている耐衝撃性が低下することが予想される<sup>4)</sup>ため熱処理温度から除外した。一方、フィラーメタル SUJ2 の Ms 点は約 220°C<sup>5)</sup>、カッター母材 SKD11 の Ms 点は約 180°C<sup>6)</sup>であることから、熱処理温度 180°C の方が Ms 点に近いため熱処理後の溶接金属の硬さが高くなることが期待される。また、熱処理後の溶接金属の硬さはカッター母材 SKD11 と同程度の HV680 前後を目標とした。

Fig. 2 (A) から電気炉内の保持温度 180°C における熱処理では、溶接金属の硬さはすべての保持時間において熱処理前の硬さに比べて硬くなり、保持時間 30 s における硬さは HV626 から HV766 の範囲でその平均は HV715、保持時間 60 s における硬さは HV598 から HV835 の範囲でその平均は HV758、保持時間 120 s における硬さは HV689 から HV858 でその平均は HV764 となり、カッターの母材 SKD11 鋼の硬さ HV680 以上の硬さになるが、溶接金属はバラツキが大きいことがわかった。また、Fig. 2 (B) から電気炉内の保持温度 530°C における熱処理では溶接金属の硬さは保持時間 30 s を除いては熱処理前の硬さに比べて硬くなるが、保持温度 180°C に比べて全体的に溶接金属の硬さは低くなり、保持時間 30 s における硬さは HV513 から HV595 でその平均は HV550、保持時間 60 s における硬さは HV616 から HV657 でその平均は HV634、保持時間 120 s における硬さは HV664 から HV719 でその平均は HV688



(A)



(B)

Fig. 3 Microphotographs of weld metal.  
(A) : Micro structure of weld metal after heat treatment using an electric furnace  
(B) : Micro structure of weld metal before heat treatment

となり、保持時間 120 s 以外の熱処理ではカッター母材 SKD11 の硬さ HV680 より低くなった。しかし、保持温度 180°C の熱処理に比べて硬さのバラツキは小さくなった。そこで、電気炉による熱処理前後における溶接金属の組織の

関係を調べるため、熱処理を行った後の溶接金属の組織写真と熱処理前のレーザ溶接したままの溶接金属の組織写真をまとめて Fig. 3 に示す。Fig. 3 (A) は電気炉による熱処理後の溶接金属の組織写真、Fig. 3 (B) は熱処理前の溶接金属の組織写真を示す。熱処理前の溶接金属の組織は残留オーステナイトに微量の針状マルテンサイトが混在しているが、熱処理を行った溶接金属の組織は特に保持温度 180℃ における保持時間 30 s および 60 s において、レーザ溶接直後の組織に比較して明らかに針状およびレンズ状の混合マルテンサイトの量が増えている。これは高 C、高 Cr 鋼に属する SKD11、SUJ2 の Ms 点が約 180℃ 及び約 220℃ であることから熱処理保持温度 180℃ 加熱の方が 530℃ 加熱よりもマルテンサイトが多く発生したためと推定される。その結果、熱処理前の硬さに比べて硬さが増大したものと考えられる。

## 3.2 パルス YAG レーザによる熱処理

### 3.2.1 熱処理保持温度とレーザ照射条件

まず、電気炉による炉内保持温度と同じ 180℃、530℃ を

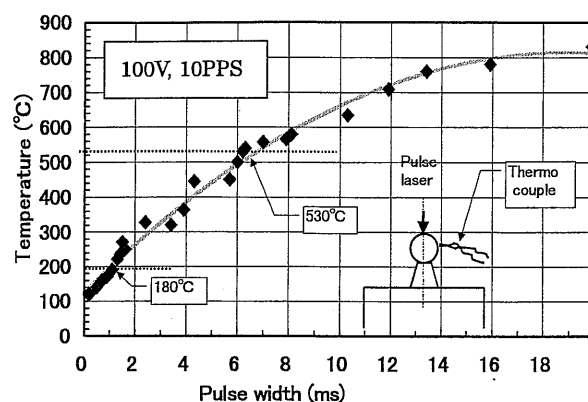


Fig. 4 Relationship between pulse width and temperature at the weld metal using pulsed YAG laser.

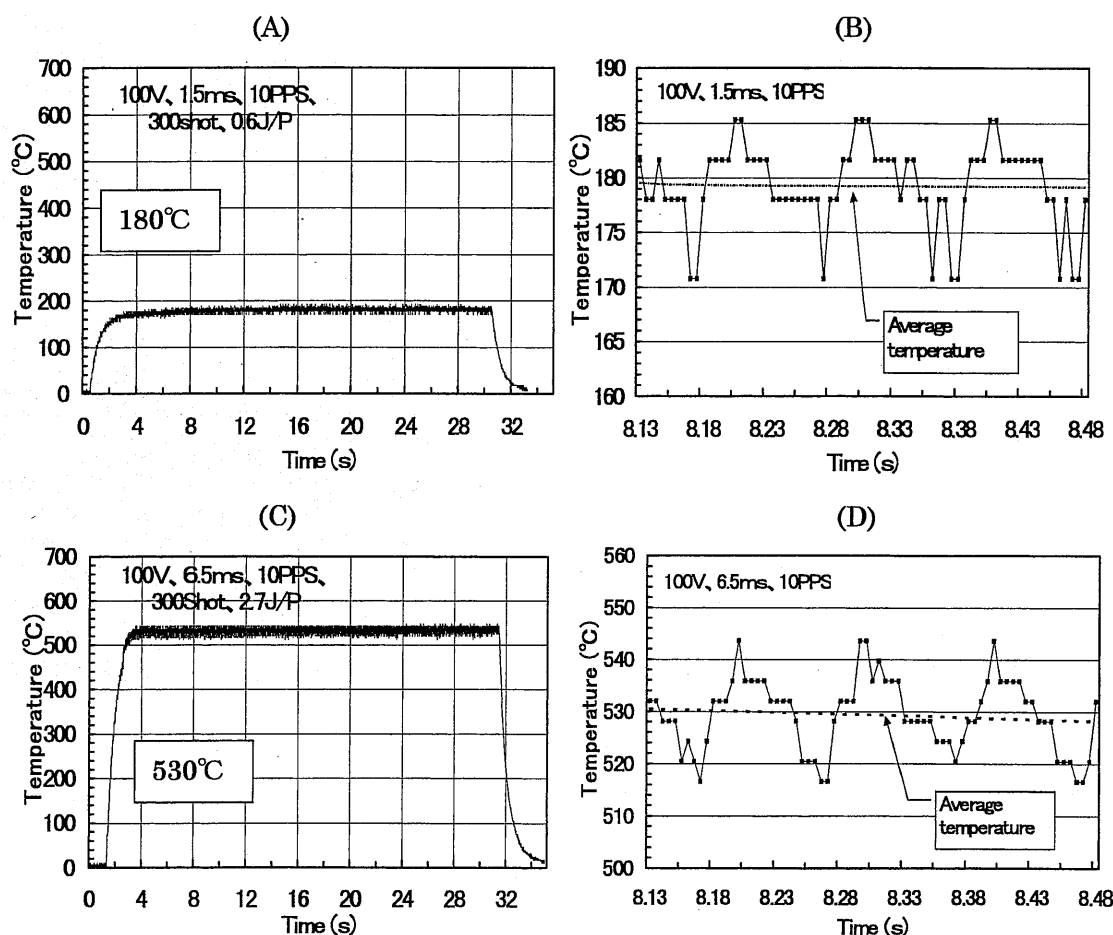


Fig. 5 Temperature curves at the weld metal during pulse laser beam radiation.  
 (A): Full temperature curve of heat treatment for holding temperature 180℃  
 (B): Detail temperature curve of heat treatment for holding temperature 180℃  
 (C): Full temperature curve of heat treatment for holding temperature 530℃  
 (D): Detail temperature curve of heat treatment for holding temperature 530℃

パルス YAG レーザで設定するため、パルスレーザ照射条件のなかでパルス繰返し数を 10 PPS (10 Hz)、パルス波高さを 100 V に固定してパルス幅を変化させてレーザ溶接した溶接金属にパルスレーザ光を照射した場合の溶接金属の温度を測定した結果を Fig. 4 に示す。

溶接金属におけるレーザ熱処理用温度の測定位置は Fig. 4 に示すようにレーザ溶接後、溶接金属のほぼ中央部に K 型熱電対を溶着し、測定データサンプリング周波数 200 Hz で温度を測定した。Fig. 4 から電気炉内の保持温度 180℃ と同じ保持温度に設定するためのレーザ照射条件はパルス波高さ 100 V、パルス幅 1.5 ms、パルス繰返し数 10 PPS、電気炉内の保持温度 530℃ と同じ保持温度に設定するためのレーザ照射条件はパルス波高さ 100 V、パルス幅 6.5 ms、パルス繰返し数 10 PPS であることがわかった。そこで、保持時間を 30 s、保持温度を 180℃ と 530℃ の場合におけるパルス YAG レーザによる熱処理温度曲線の測定結果を Fig. 5 にまとめて示す。Fig. 5 (A) は保持温度 180℃ における全体の熱処理温度曲線を示し、Fig. 5 (B) は保持温度 180℃ における温度の詳細を示す。また、Fig. 5 (C) は保持温度 530℃ における全体の熱処理温度曲線を示し、Fig. 5 (D) は保持温度 530℃ における温度の詳細を示す。Fig. 5 (B) からレーザ熱処理の保持温度 180℃ における温度の変化は 171℃ から 186℃ で、そのときの温度変化の周期は 0.1 s であるが平均温度は 179℃ であることがわかった。一方、Fig. 5 (D) からレーザ熱処理の保持温度 530℃ における温度の変化は 516℃ から 544℃ で、そのときの温度変化の周期は 0.1 s であるが平均温度は 530℃ であり、いずれの場合も電気炉による熱処理における炉内保持温度とほぼ同じ保持温度になることがわかった。しかし、レーザ熱処理の場合、レーザ照射部 (球の頂上部) と温度測定点 (球の側面部) では温度に差があり、保持温度 180℃ の場合約 80℃、保持温度 530℃ の場合約 230℃、レーザ照射部の温度が温度測定点の温度に比べて高くなることがわかった。

### 3.2.2 レーザによる熱処理と溶接金属の硬さ

前項の電気炉による熱処理の結果から、レーザ溶接後引き続き熱処理をすれば、レーザ溶接により硬さが低下した溶接金属は母材 SKD11 と同程度の硬さになることがわかった。そこで Table 2 に示すレーザ照射条件でレーザ熱処理をした。

レーザ熱処理後、溶接金属の硬さを測定した結果を Fig. 6 にまとめて示す。Fig. 6 (A) は保持温度 180℃、Fig. 6 (B) は保持温度 530℃ で熱処理したときの硬さ示す。Fig. 6 (A) から保持温度 180℃ で熱処理したときの溶接金属の硬さは電気炉による熱処理の結果と同様に熱処理前の硬さに比べて硬くなり、保持時間 30 s における硬さは HV593 から HV752 でその平均は HV675、保持時間 60 s における硬さは HV634 から HV742 でその平均は HV695、保持時間 120 s における硬さは HV582 から HV719 でその平均は HV658 とな

Table 2 Heat treatment and laser radiation conditions in the case of pulsed YAG laser.

Holding time		30s	60s	120s
Holding temperature 180℃	Pulse height	100V	100V	100V
	Pulse width	1.5ms	1.5ms	1.5ms
	Pulse frequency	10PPS	10PPS	10PPS
	Pulse number	300	600	1200
Holding temperature 530℃	Pulse height	100V	100V	100V
	Pulse width	6.5ms	6.5ms	6.5ms
	Pulse frequency	10PPS	10PPS	10PPS
	Pulse number	300	600	1200

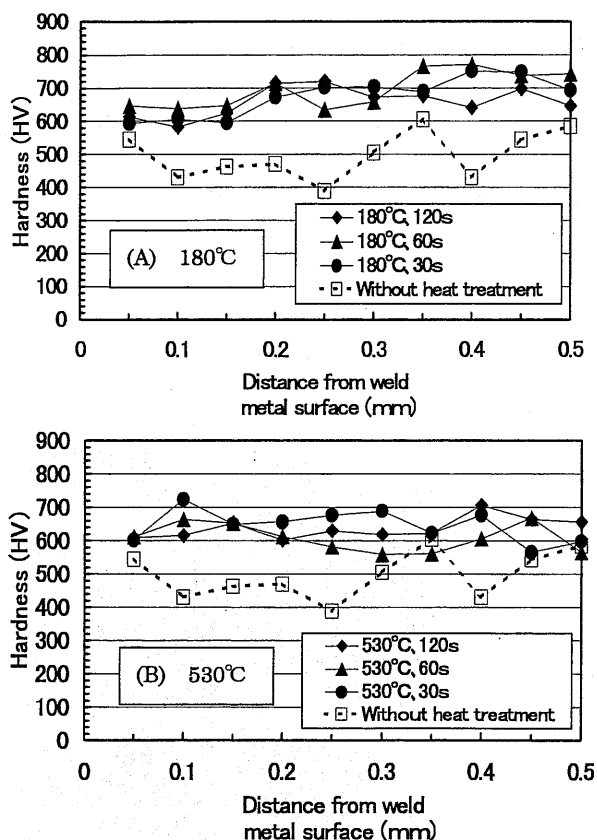


Fig. 6 Vickers hardness at the weld metal for various conditions of heat treatment using pulsed YAG laser.

り、カッターの母材 SKD11 の硬さ近くまで硬くなった。しかし、炉内熱処理に比べてレーザ熱処理による硬さは約 HV40~80 程度低くなった。これはレーザ熱処理における保持温度が平均温度としては炉内保持温度とほぼ同じ温度であるが、加熱時の最高到達温度が炉内保持温度よりも高くなるためと推定される。また、レーザ熱処理では球状をした溶接金属のレーザ照射部 (球の頂上部) 近傍の硬さが中央部の硬さに比べて低くなった。これはレーザ照射部 (球の頂上部) の温度が温度測定点 (球の側面部) に比べて温度が高くなるためと推定される。

また、Fig. 6 (B)からパルス YAG レーザによる保持温度 530℃で熱処理したときの溶接金属の硬さは Fig. 6 (A)に示す保持温度180℃の熱処理よりも全体的に硬さは低くなったが、熱処理前の硬さに比べると硬くなることがわかった。保持時間30 sにおける硬さは HV566 から HV724 でその平均は HV646、保持時間60 sにおける硬さは HV561 から 668 で平均は HV608、保持時間120 sにおける硬さは HV602 から HV706 でその平均は HV638 となり、熱処理なしの平均の硬さ HV490 に比較するといずれの場合も硬くなった。そこで、レーザ熱処理前後における硬さの変化と溶接金属の組織の関係を調べるため、熱処理後の溶接金属の組織写真を各熱処理毎にまとめて Fig. 7 に示す。Fig. 3 および Fig. 7 からレーザ熱処理を行った後の溶接金属の組織は前項の電気炉による熱処理で得られた組織と同様な傾向を示し、特に保持温度180℃における保持時間30 s および60 sにおいて、熱処理前の組織に比べて針状およびレンズ状の混合マルテンサイトの量が増えている。その結果、溶接金属の硬さは熱処理前の硬さに比べて増大したものと考えられる。

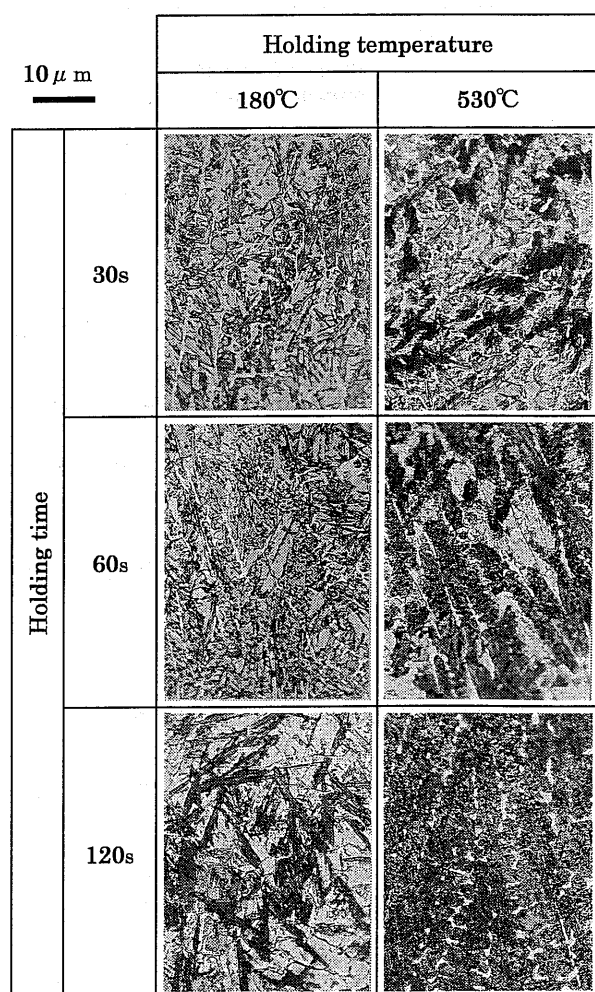


Fig. 7 Microphotographs of weld metal after heat treatment using pulsed YAG laser.

つぎに、電気炉による熱処理とレーザ熱処理の相違を調べるため、Fig. 8 に電気炉による熱処理とレーザ熱処理をしたときの球状をした溶接金属の上部側の断面写真を示す。Fig. 8 (A)は電気炉による熱処理、Fig. 8 (B)はレーザ熱処理をしたときの溶接金属の断面写真である。Fig. 8 (A)から、電気炉による熱処理では炉内の温度が熱処理対象材である球状の溶接金属の周囲からほぼ均等に伝わることから球状の溶接金属の外周表面は写真に示すようにほぼ均一になっている。一方、Fig. 8 (B)からレーザ熱処理では溶接金属の外周表面の上方からパルス YAG レーザを照射するため、レーザ照射部が局所的に加熱されて溶接金属内部に熱が伝わることから球状の溶接金属の外周表面は写真に示すように一様にならず、レーザが当たった外周表面はレーザの照射により集中的に熱の影響を受けることがわかった。レーザ熱処理による溶接金属の局所的な熱影響の範囲はレーザ照射部で深さ方向に約0.2 mm、直径方向に約0.6 mm であることがわかった。補修溶接後、ロータリカッターの微小破損部を修正する場合、レーザ熱処理で溶接金属の上部側の外周部に発生した熱影響領域はカッターの切り刃を最終的に修正する段階で周りの正常な切り刃の高さに合わせるた

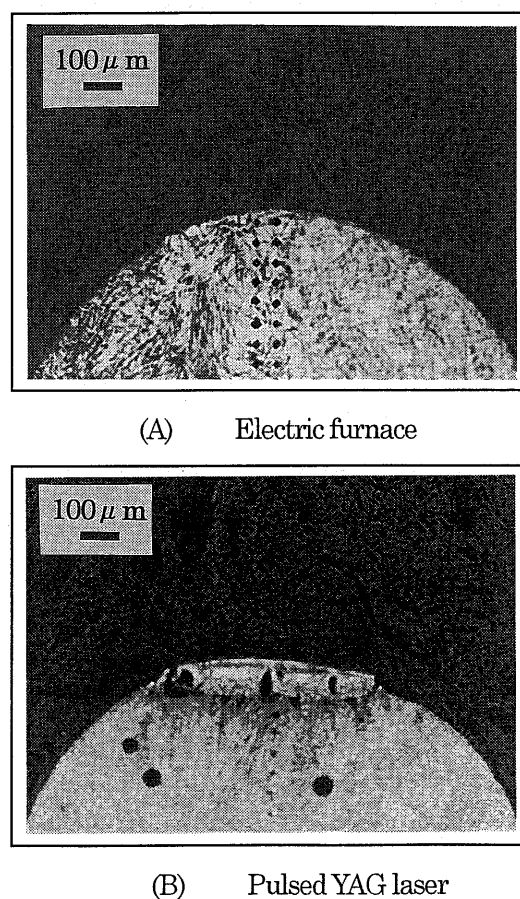


Fig. 8 Microphotographs of the weld metal at the upper part after heat treatment.  
(A) : Using an electric furnace  
(B) : Using pulsed YAG laser

め、熱影響部を含んだ余分な溶接金属を削除するのでロータリカッターの切り刃への影響はない。

#### 4. 結 言

フィラーメタル SUJ2 を用いてパルス YAG レーザ補修溶接すると溶接金属の硬さが母材 SKD11 より低下するため、レーザ補修溶接後溶接金属を電気炉およびパルス YAG レーザを用いて熱処理し、硬さ及び組織の変化について検討した。大要つぎのような結果が得られた。

1) レーザ補修溶接により硬さが約 HV490 に低下した溶接金属は電気炉で保持温度180℃に30 s から120 s 保持し、その後室温まで空中放冷する熱処理をすると、溶接金属の硬さは HV715 から HV764 になる。また、電気炉で保持温度530℃に120 s 保し、その後室温まで空中放冷する熱処理をすると、溶接金属の硬さは HV664 から HV719 になる。

2) レーザ溶接後、引続きパルス YAG レーザを溶接金

属の表面に照射して、保持温度180℃に30 s から120 s 保持し、その後室温まで空中放冷する熱処理をすると、溶接金属の硬さは HV658 から HV695 になる。また、保持温度530℃に120 s 保持し、その後室温まで空中放冷する熱処理をすると、溶接金属の硬さは HV602 から HV706 となり、電気炉による熱処理とレーザ熱処理の溶接金属に対する硬さに及ぼす影響がほぼ同じであることがわかった。

#### 参 考 文 献

- 1) 山田善治他：溶接学会論文集，投稿中。
- 2) 佐藤知雄：鉄鋼の顕微鏡写真と解説，丸善㈱，(1995)，144。
- 3) JIS G4404：合金工具鋼鋼材，6．焼入焼戻し硬さ，表 7 試験片の焼入焼戻し硬さ。
- 4) 田中，栗原，大和久：入門 金属材料と組織，大河出版，(1992)，87。
- 5) ㈱日本熱処理技術協会，日本金属熱処理工業会：新版 熱処理技術入門，大河出版，(1986)，136。
- 6) 大同特殊鋼㈱：高硬度・高靱性 DC53 新・汎用ダイス鋼，技術資料 SD8707，(1987)，11。