

超硬合金と鋼とのレーザー溶接

苫小牧工業高等専門学校 機械工学科

准教授 高澤幸治

(平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012208)

キーワード：超硬合金，レーザー溶接，抗折力

1. 研究の背景と目的

超硬合金と鋼との接合法としては、締結法やろう付け法が大部分を占め、既に完成された技術となっている。また、著者らは、焼結接合法や TIG 溶接の適用を試みている¹⁻²⁾。しかし、薄板の突合せのように接触面積が小さい場合（例 カッターブレード）や、部材がそもそも小さい場合（例 内視鏡手術機器）は、これら既存の手法では接合が困難である。

そこで著者らは、この問題を解決するために、レーザー溶接の適用を試みてきた³⁾。一般に、セラミックスと金属との溶接はほぼ不可能である。主な理由は、熱膨張係数の著しい差異やセラミックスの靱性の低さ等である。しかし、申請者は、板厚 3mm の超硬合金／鋼の突き合せレーザー溶接において、再現性に難があるものの、曲げ試験で鋼部が降伏・塑性変形するような接合を実現したことがある³⁾。接合強度に影響を及ぼす要因を明確にし、安定した溶接が可能になれば、様々な分野での付加価値の高い製品づくりにつながる。

また、将来、超硬合金の原料である希少元素 (W, Co 等) の供給リスクや価格が低減するとは考えにくい。そこで、全体が超硬合金からなる部材を、超硬合金／鋼ハイブリッド部材に置き換えることができれば、超硬合金への依存度を低減することができる。既存接合法では困難な部材形状でも、レーザー溶接ならば実用化できる可能性がある。

溶接欠陥（主に割れ）の発生や継手の強度に及ぼす要因として、影響が大きいと思われるのが、第一に、超硬合金／鋼突き合せ境界とレーザー照射位置とのずれである。レーザー照射が直接超硬合金になされると割れの抑制は困難であろうし、突き合せ境界から離れすぎると両母材の接合が困難になる。そこで本研究では、このずれの距離を再現性良く制御できる治具および実験方法を用いて、溶接欠陥の発生状況や継手強度への影響をより明確にすることを目的とした。また、第二に、鋼の化学成分、特に炭素量の影響が考えられる。すなわち、炭素量が多いほど硬さが増加するため、熱応力の緩和が困難になるであろう。また、レーザー照射後の相変態による膨張・収縮や硬さの変化が熱応力の緩和に影響を及ぼすと推測される。そこで、第一の要因を精度良く制御したうえで、鋼中炭素量の影響を調べることにした。

2. 実験方法

2. 1 供試材料

供試試料は、超硬合金板として住友電工ハードメタル製 KH05 (100×60×t3.2mm)、鋼板として市販の SS400, S50C, SKS93 および SKD11 (4 種とも 100×30×t3mm) を用いた。この超硬合金は、Co 量が 13mass%、硬さが 90.4HRA であり、金型等の素材として市販されている一般的なものである。また、鋼板は炭素量の範囲を広く取る為、比較的入手しやすい 4 種を選んだ。

KH05 板は、購入時の半分の大きさ (100×30×t3.2mm) となるように、まずは、長手方向にダイヤモンドカッターで湿式切断した。次に、板の両面 (100×30mm の面) を平面研削盤でダイヤモンド研削 (FSK 製ダイヤモンド砥石、MDC120N75B3, #800 相当) して、厚さを t3mm とした。その後、切断した面 (100×3mm の面) を同じく平面研削盤でダイヤモンド研削し、鋼板との突合せ端面として仕上げた。さらに、この板をダイヤモンドカッターで 5 分割し、溶接試料 (30×20×t3mm) とした。

SS400, S50C, SKS93 および SKD11 板は、長手方向端面 (100×3mm の面) を同じく平面研削盤でダイヤモンド研削し、超硬合金板との突合せ端面として仕上げた。さらに、この板を精密カッターで 5 分割し、溶接試料 (30×20×t3mm) とした。

2. 2 溶接治具

レーザー溶接方向（レーザーヘッド進行方向）と突き合せ界面との平行出しや供試材料の固定が容易で、溶接部を不活性ガス雰囲気につ保つことができ、また、溶接角変形による応力・ひずみを逃がし易い溶接治具を作成した。Fig. 1 に作成した治具の概要と、超硬合金板および鋼板の固定手順を示す。

まず、治具とともに製作したガイド板を用いて、超硬合金板の突合せ端面がレーザーヘッド進行方向と可能な限り並行になるように設置し (①)、ヒータ内蔵の押え板で固定する (②)。その超硬合金に、巻きバネで押し付けるように鋼板を取り付ける (③)。このような固定方法とすることで、溶接後に微小ながら生じる溶接角変形による応力を逃がすことが可能である。また、治具台座中央のスリットは、溶接始端より外側でレーザーを逃がすためのものであるが、あわせてアルゴンガスの噴出口となっている (④)。

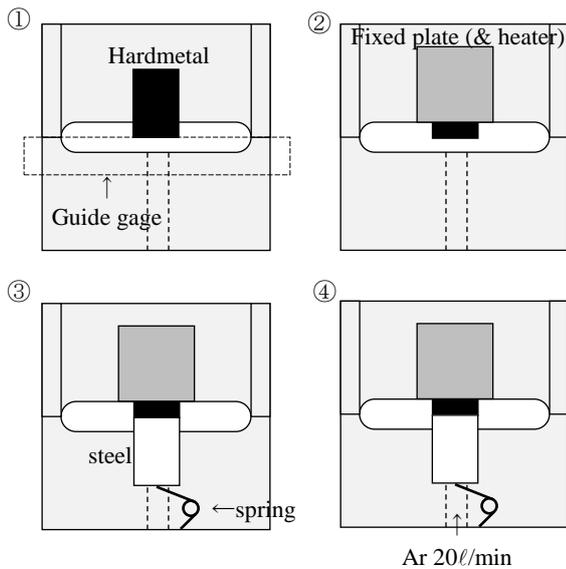


Fig. 1 Schematic illustration of hardmetal and steel plate mounting.

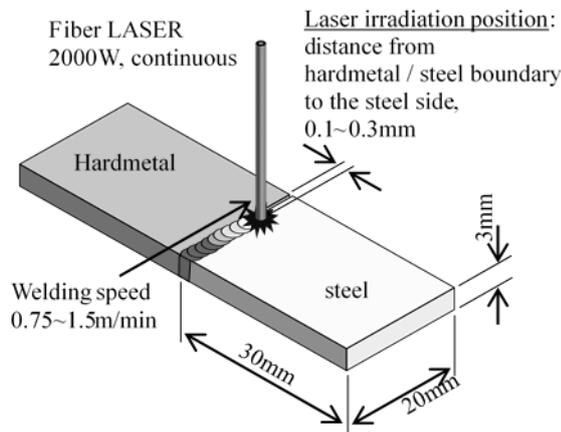


Fig. 2 Schematic illustration of Laser welding.

レーザヘッドから噴出するアシストガス（アルゴン）とあわせて溶接部の酸化を防ぐことが可能である。

なお、超硬合金の押え板および治具台座の超硬合金直下にはヒータユニットが内蔵されており、それらに挟まれた板材を 180℃程度まで加熱することが可能である。

2. 3 レーザ溶接

レーザ溶接には、北海道総合研究機構が所有するイッテルビウムファイバーレーザ加工機（レーザ発振器：IPG Photonics YLS-2000，ロボット：川崎重工業 FA20N 6 軸多関節）を使用した。Fig. 2 に、供試材料および溶接条件の概要を示す。主な溶接条件は、出力 2000W，連続発振，溶接速度 0.75～1.5m/min，焦点は材料表面にジャストフォーカス，アシストガスは溶接用純アルゴン 20ℓ/min とした。なお、前述したとおり，溶接試料の下側（溶接治具台座のスリット）からも同様に溶接用純アルゴン 20ℓ/min を供給した。溶接試料を設置後，レーザ溶接機と同軸 CCD

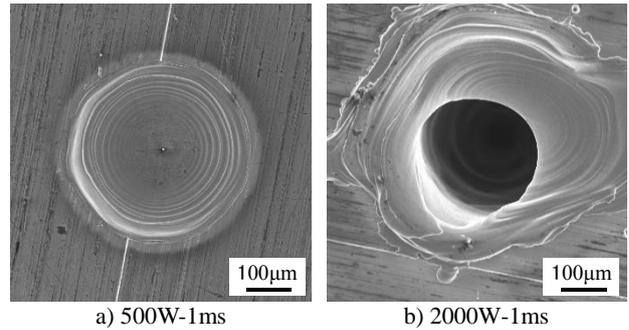
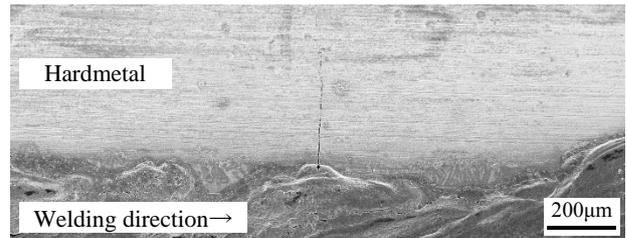
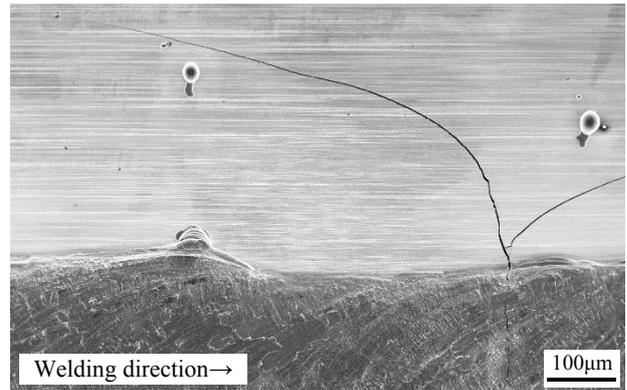


Fig. 3 SEM image of Laser irradiation marks on steel.



a) SS400-v1.50-d0.20



b) SKS93-v1.50-d0.20

Fig. 4 SEM images of major welding defect.

カメラを用いて、超硬合金と鋼との突合せ境界とレーザ照射位置とを一致させ、そこを照射位置 0mm とした。そこから鋼側へ 0.1～0.3mm の範囲で照射位置を変化させ、ロボットの自動制御で溶接を行った。

以下、鋼種，溶接速度 v ，照射位置 d を組み合わせて溶接試料名を示す（例：SS400-v0.75-d0.15 など）。

3. 実験結果および考察

3. 1 レーザスポット径

溶接実験に先立ち，レーザヘッドを動かさずに，本レーザ加工機の最小照射時間で，SS400 板の表面にレーザを照射した。Fig. 3 に，出力 500W および 2000W で 1ms 照射した場合の照射痕の SEM 像を示す。500W の場合，熔融深さはわずかであり，レーザスポット径と同等の照射痕となっていると推測される。レーザ加工機の仕様によるとスポット径は 0.3mm となっており，実験結果はそれと良く一致

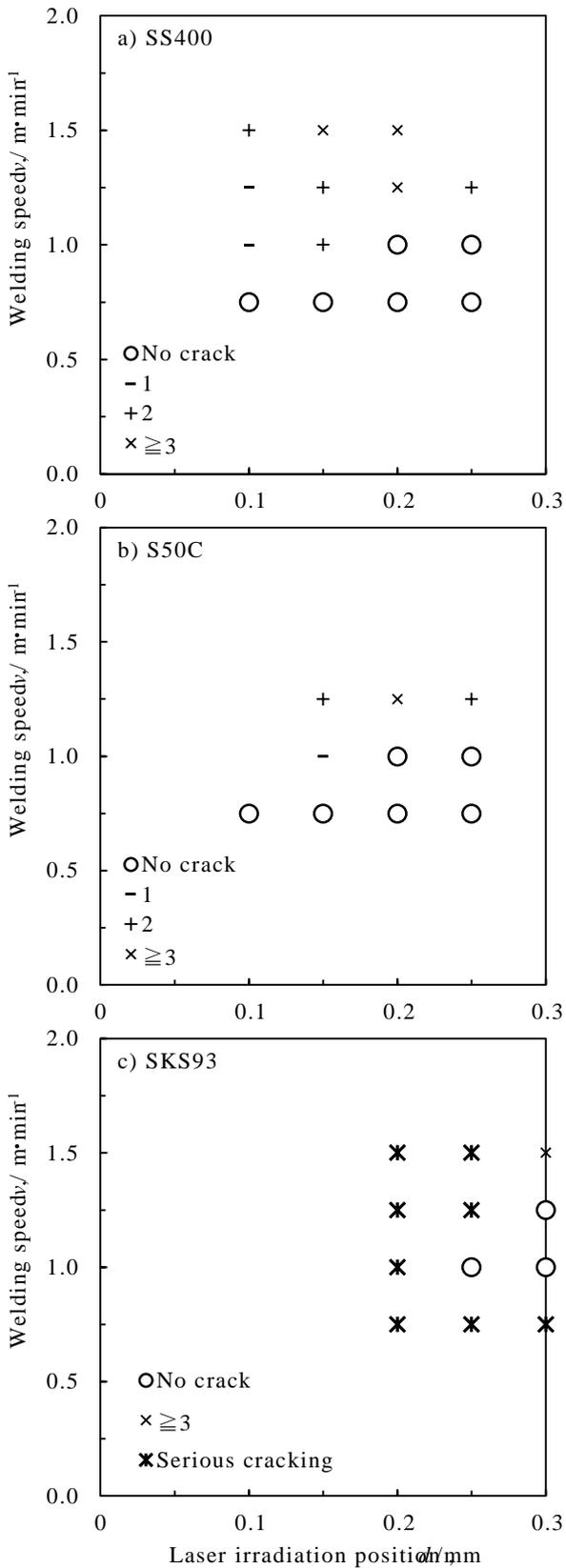


Fig. 5 The effects of welding speed and laser irradiation position on the formation of welding cracks.

している。また、2000W の場合は、直径 0.2mm 程度のキーホールが形成されていることがわかる。これらのことから、

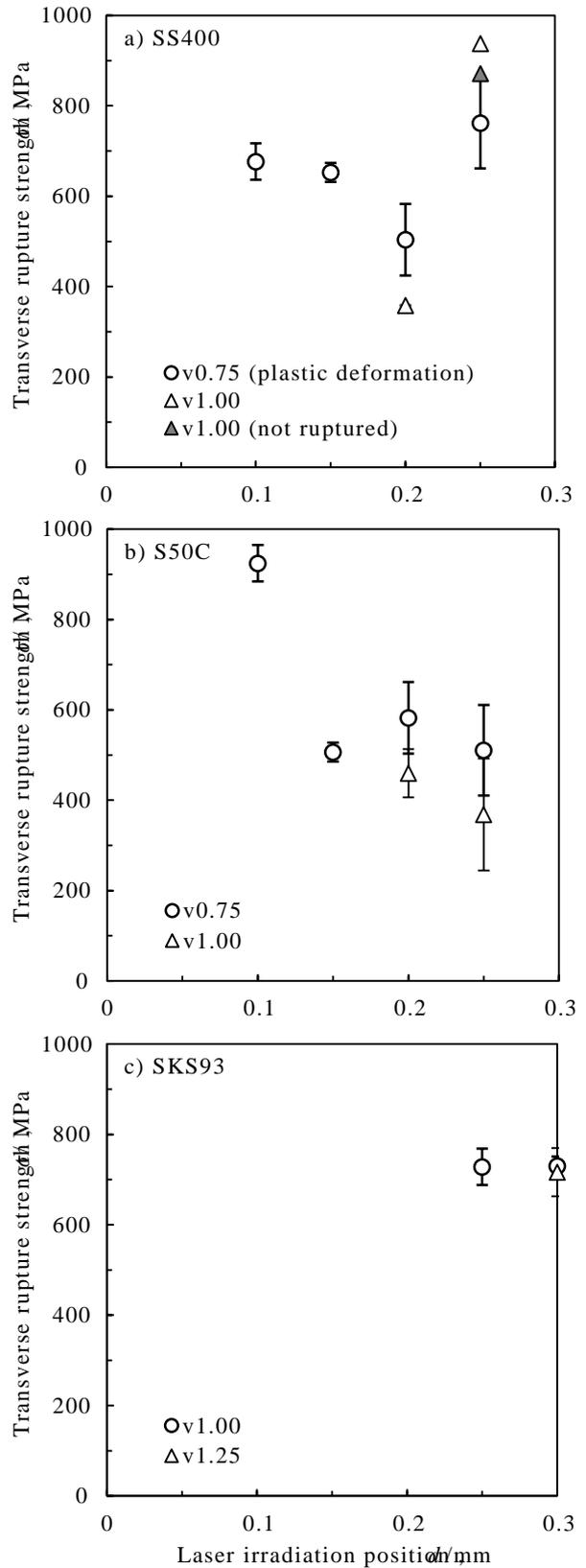


Fig. 6 Transverse rupture strength of the joint welding defects were not observed (4-point bending test).

レーザ照射位置を(超硬合金と鋼との突合せ境界から)超硬合金側へ、スポット径あるいはキーホール径の半分

(0.10~0.15mm) よりもずらしてしまうと、超硬合金部に直接レーザが照射されるといえる。実際にそのような条件で溶接を行った結果、超硬合金部が起点と推測される大きな割れが観察された。

3. 2 割れの生成に及ぼす溶接速度と照射位置の影響

3. 1 およびその他幾つかの予備実験の結果をふまえ、レーザ照射位置を突合せ境界から鋼側へ0.1~0.3mmとした。溶接速度については、予備実験の結果、2.0m/min以上で溶け込み不良(裏面の開先が残存)が認められたため、1.5m/min以下とした。

Fig. 4に、代表的な溶接割れの例を示す。a)はSS400、溶接速度1.5m/min、照射位置0.20mmの場合に形成された微小な割れのSEM像である。写真の上側の明るい部分が超硬合金で、下側の暗い部分が溶接ビードである。超硬合金とビードとの境界から超硬合金側へ、直線状の割れが進展している。b)は鋼がSKS93で、溶接条件はa)と同一である。a)と異なり、割れが大きく弓状に形成されている。このような割れの生成状況を、溶接した全試料(の超硬合金/ビード境界全長)をそのままSEMで観察して確認した。

Fig. 5にその結果を示す。グラフ中には、「割れ無し」の他に、微小な割れが1つ、2つ、3つ以上、さらに「大きな重篤な割れ」と区別して示してある。なお、SKD11についても他の鋼種と同様に広範囲の条件で溶接実験を行ったが、予熱・後熱処理を併用した場合でも、全て、溶接後の冷却過程で破断した。そのため、図には示していない。

SS400およびS50Cの場合、溶接速度0.75m/minで割れない溶接が照射位置によらず可能である。また、溶接速度1.00m/minでも、照射位置を鋼側へ離すことにより割れの生成が抑制された。これは、溶接速度を遅くすることにより、溶接進行方向前方は予熱、後方は後熱されるのと同様の影響があったためであると考えられる。また、溶接速度が遅いほど溶融量が増加して溶接ビード幅も大きくなるため、超硬合金部に微細な割れが生成されたとしても、それを覆い隠していることも推測される。SKS93においても同様の傾向が認められるが、生成される割れが微小なものではなく、Fig. 4のb)に示したような、比較的大きく、弓状に進展したものが多かった。これは、SKS93母材および溶融凝固した領域の硬さが他の鋼種よりも高く、応力の緩和が困難であったためと考えられる。このことは、上述したSKD11の結果とも矛盾しない。また、SKS93やSKD11のような高炭素鋼は、溶接後の冷却過程でビード部がマルテンサイト変態し(特にSKD11は空冷でも焼入れが可能な鋼種である)、さらに硬さが増加するため、より割れの抑制を困難にしていると思われる。

Fig. 6に、Fig. 5で割れが無いと判断された試料について、4点曲げ試験を行った結果を示す。なお、曲げ試験片は、溶接試料の中央部分から幅5mm弱の短冊状の試料を2

本切り出したものである。試験片形状や試験条件はJIS R1601のファインセラミックスの曲げ強さ試験方法に準じたが、溶接部を平面研削等で処理することせず、あえて試験には不利な溶接ままの状態での試験に供した。

SS400では、照射位置0.20mmを除けば、照射位置が鋼側になるほど、抗折力が増加しているといえる。一方、S50Cでは、照射位置が鋼側になるほど、抗折力が減少している。SKS93は、割れのない溶接が可能な条件が狭いため、抗折力に与える影響は認められない。

SS400-v0.75-d0.20試料とSS400-v1.00-d0.20試料は研究初期の頃の溶接であったため、何らかの不慣れな要因があったと思われる。実際、溶接部の“のど厚”が比較的小さいため、抗折力が小さく現れていることも影響している。また、本研究では、溶接部の凹凸が残存しているため、それが破壊の起点として作用し、抗折力を減少させていることは容易に想像できる。

しかし、溶接ままの状態では、SS400およびS50Cでは900MPa程度、SKS93では700Ma程度の抗折力が得られた。溶接後に溶接部の凹凸を平面研削等で処理すれば、安定した高い抗折力が得られると考えられる。

また、SS400では、溶接速度0.75m/minの全試料とv1.00-d0.25試料では、曲げ過程で降伏、塑性変形が確認されている。なお、Fig. 6で示したこれらの試料の抗折力は、降伏後の最大荷重から算出している。Fig. 7にこれらの荷重-変位線図を示す。SS400の降伏応力が比較的小さいこともあり、破断に至る前に比較的大きな塑性変形量が見られた。

Fig. 8に、曲げ試験において最大の塑性変形量となったSS400-v1.00-d0.25試料の曲げ試験の様子と、破断する前

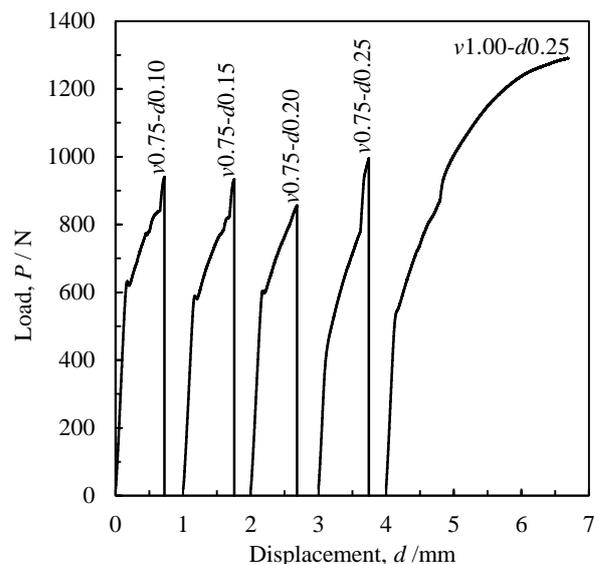
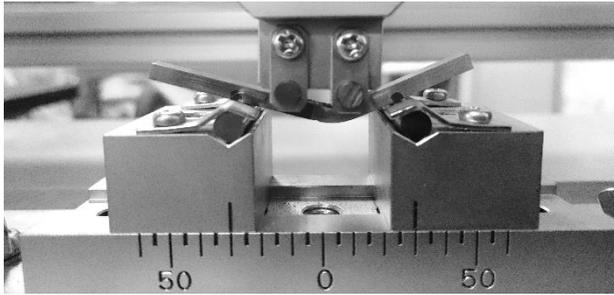
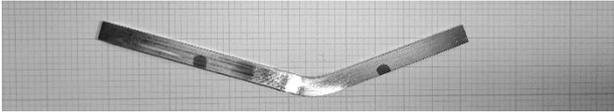


Fig. 7 Load-displacement diagram in 4-point bending test of welded joints used SS400 that were caused plastic deformation before rupture.



a) 4-point bending test of SS400-v1.00-d0.25 joints



b) The plastic deformation due to bending test a)

Fig. 8 The 4-point bending test that was interrupted before rupture.

に試験を中断した試験片の外観を示す。3mm厚の超硬合金と鋼とを直接レーザー溶接した継手としては、十分な強さを有しているといえる。

4. まとめ

本研究では、超硬合金と鋼とを、インサート材等を用いずに、直接レーザー溶接し、以下の知見を得た。

- (1) レーザ照射位置を、超硬合金／鋼突合せ境界から鋼側へ、レーザースポット半径あるいはキーホール半径よりも離すことで、溶接割れの発生を抑制できた。言い換えると、超硬合金部にレーザーが照射されると、急熱・

急冷により、ほぼ確実に割れが発生する。

- (2) 溶接速度が遅いほど溶接割れの発生を抑制できた。これは、溶接方向前方には予熱、後方には後熱と同様の影響を与えるためであると考えられる。
- (3) 鋼中炭素量が少ないほど溶接割れの発生を抑制できた。これは、鋼母材および溶接部の硬さが低いほど、溶接に伴う応力を緩和する効果が高いためであると考えられる。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団平成24年度一般研究開発助成(AF-2012208)を受けたものであり、その遂行にあたって、地方独立行政法人北海道立総合研究機構産業技術研究本部の櫻庭洋平氏、ならびに苫小牧市テクノセンターの柴田義光氏、高橋保行氏に多大なご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 宮腰康樹, 高澤幸治, 田頭孝介, 鴨田秀一, 高橋英徳, 丸山正男, 金山達也: 粉体および粉末冶金, vol. 44(1997), No. 10, pp. 958-962.
- 2) 趙秀娟, 楊徳新, 高澤幸治, 鴨田秀一, 宮腰康樹, 山森英明, 田頭孝介: 日本金属学会誌, vol. 68(2004), No. 2, pp. 98-101.
- 3) 高澤幸治, 柴田義光, 高橋保行: 2005年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 57~58.