

深溶込みレーザー溶接の実用化に新しい道

- 溶接欠陥の発生を大幅に抑制

平成13年11月15日

独立行政法人 物質・材料研究機構

1. 概要

独立行政法人 物質・材料研究機構の構造体化研究グループ：塚本進サブグループリーダーらは、深溶込みレーザー溶接部で発生する溶接欠陥の大幅な抑制に成功した。この技術は、厚板溶接への高出力レーザーの実用化に新しい道を開くものであり、今後の産業界における動向が注目される。ここ数年来、レーザー発振器の高出力化がめざましい進展を遂げており、これを厚板の溶接に適用することが、鉄鋼、重工、機械工業等を中心とした産業界で待望されてきた。しかし、溶込み深さ^{*1}が増加するにしたがって、溶接部ではポロシティ^{*2}などの溶接欠陥が顕著に発生するようになり、これが実用化の大きな障害となっていた。同グループでは、超鉄鋼プロジェクトの一環として、20 kW CO₂ レーザ溶接装置（図1）を導入し、超鉄鋼厚板の高品質接合技術の開発を行ってきた。このたび、レーザー出力を外部から適切な波形及び周波数で制御することにより、溶込み深さ20mmの低炭素鋼溶接部において、溶接欠陥の大幅な抑制に成功した。この技術は、今後高出力レーザー溶接の実用化に拍車をかけると期待される。

本研究成果については、第7回国際溶接シンポジウム（5年に一度行われる溶接学会主催の国際会議、11月20-22日、神戸国際会議場）で発表の予定である。

2. 研究の背景

高出力レーザーによる厚板の溶接

レーザー溶接は、熱源のエネルギー密度が通常のアークと比べて桁違いに高い。このため、幅が狭く深い溶込み形状が得られ、これに伴って熱影響部が狭くかつ溶接変形の小さい高品質な精密溶接が可能となる（図2）。このような深溶込み溶接は、従来同等なエネルギー密度を持った電子ビーム溶接においてのみ可能であった。しかし、電子ビーム溶接は真空中で行う必要があり、真空チャンバーのサイズによって溶接すべき構造物の大きさが制限されたり、真空引きの時間により生産性の低下が指摘されてきた。レーザー溶接の優れた点は大気中でも溶接が可能なことであり、その特性を生かし、現在自動車部品を中心に薄板の高速精密溶接に多くの分野で適用されてきている。一方、ここ数年来レーザー発振器の高出力化が飛躍的に進み、造船、橋梁、原子力、鉄鋼、建設機械等の産業界で、これを厚板の高エネルギー溶接に適用することが望まれている。また、ヨーロッパでは、造船分野を中心に12mmの厚さまでレーザー溶接が実用化されているが、これが25mm程度にまで拡大されると重工業分野における大部分の溶接がカバーできることに

なり、継手特性や生産性の大幅な向上が見込まれる。

超鉄鋼材料の溶接

当機構では、平成9年度にスタートした新世紀構造材料プロジェクト（超鉄鋼プロジェクト）の中で、「強度2倍、寿命2倍、環境負担度低減、トータルライフコスト低減」を基本コンセプトとして、4種類の超鉄鋼材料とその溶接・接合技術の開発を行っている。これらの材料は、いずれも高度な組織制御を行うことにより優れた特性を引き出している。たとえば、従来鋼の高強度化は高価な合金元素を添加することにより達成されてきたが、ここで開発されている800Mpa^{*3}級高強度鋼は、結晶粒を1ミクロン（1mの100万分の1）以下にまで微細化することにより行われている。これにより、素材のコストが低減できるだけでなく、リサイクル性が良くなり、環境に優しい高強度鋼を作ることができる。また、従来の高強度鋼では、溶接時に発生する割れを防止するため、あらかじめ材料を高温まで加熱した上で溶接を行う必要があったが、合金元素を多く含まないこの材料ではこの工程を省くことができる。

このように組織制御された材料を用いて構造物を組み立てるには溶接が不可欠となるが、生産性を高めるため大量の熱を投入して溶込みの深い溶接を行うと、せっかく作りこまれた優れた組織が破壊されてしまう。このため、できるだけ小さな入熱で熱影響が少なく、かつ生産性の高い高効率な溶接技術の開発が望まれる。当機構ではこれらを達成する目的で高出力レーザーによる高品質深溶込み溶接技術の開発を行っている。

3．深溶込み溶接の問題点

しかし、厚板のレーザー溶接は容易ではない。高エネルギー密度のレーザーを材料に照射すると、瞬時に材料の溶融と蒸発が起こる。蒸発の際に発生する蒸発反力^{*4}は溶融金属を排除し、(図3)に示すように、レーザー照射部にキーホールと呼ばれる細長い空洞が形成される。このキーホールは、溶込み深さが大きくなるにしたがって安定に維持することが次第に困難になり、これに伴ってポロシティ、ブローホール^{*5}、割れ等の溶接欠陥が発生しやすくなる。特に溶込み深さが15mm以上に達すると、このような欠陥の発生を避けることは不可能とされてきた。(図4)は、出力20kW、溶接速度1m/minのもとで溶接したときの横断面及び縦断面の一例を示す。高速溶接にも関わらず20mm程度の深溶込みが得られているが、縦断面をみると多くのポロシティが観察される。このような溶接欠陥の発生を防止することが、厚板溶接への道を開く重要な課題であった。

4．レーザー出力のパルス変調による溶接欠陥の抑制

当機構では、平成11年に、レーザー出力を高速で自在に制御できる20kWCO₂レーザー溶接装置を導入し、欠陥形成機構の解明とその防止法の開発を行ってきた。溶接中のキーホールの動きをX線透視法により高速度撮影してみると、キーホールの深さは溶接中にランダムに変動しており、キーホールが急激に浅くなる時に不安定現象により先端がちぎれてバブルを発生することがわかった(図5)。ポロシティは、このとき発生したバブルが残留することにより形成される。同グループでは、このような自然発生的に

起こるキーホール深さのランダムな変動を積極的に制御することを考え、このたび、レーザー出力に適切な周波数及び波形で脈動を与えることにより、溶接欠陥を大幅に抑制することに成功した。(図6)に示すように、レーザー出力をパルス状に変動させると、レーザー出力がベース出力(W_B)からピーク出力(W_P)に急激に高くなる時点で熔融金属に周期的な振動が発生する。このとき、レーザー出力の変動周波数を熔融金属の固有振動周波数と一致させると、キーホールの動きを適切に制御することができ、その結果ポロシティの発生を効果的に防止することができた。ポロシティの抑制効果は、出力変動の波形を適切に制御することによりさらに大きくなる。(図7)は、通常的一定出力で行った連続溶接及び出力変動を付与した溶接部の縦断面を示す。20mm程度の深溶込み溶接を行っているため、通常の連続溶接では多くのポロシティが発生している(図7(a))のに対し、適切な波形並びに周波数でレーザー出力に脈動を与えることにより、欠陥の発生が極端に減少している(図7(b))ことがわかる。

本技術は、今後鉄鋼、重工、機械工業等で期待されている厚板のレーザー溶接技術の発展に大きく貢献すると予想される。

現在、当機構で開発している超微細粒高強度鋼の溶接にこの技術を適用させ、溶接性の検討を行っている。通常のアーク溶接では、熱影響部において結晶粒の粗大化により軟化部が形成されるため(図8)継手強度が低下するが、小入熱で溶接が可能な本溶接法ではほとんど軟化が起こらない。また、超微細粒高強度鋼は合金元素の添加を極力減らし細粒化で高強度を達成しているため、炭素当量^{*6}を少なくすることが可能で、通常の高強度鋼溶接継手と比較して高靱性が得られることもわかってきている。今後さらに詳細な継手特性評価を行うと共に、他の超鉄鋼材料の溶接にも本溶接法の適用を検討する予定である。

(問い合わせ先)

独立行政法人 物質・材料研究機構

総務部総務課広報係

TEL 0298-59-2026 FAX 0298-59-2017

(研究内容に関することについて)

独立行政法人 物質・材料研究機構

材料研究所構造材料研究センター

構造体化研究グループ

塚本 進

TEL 0298(59)2151 FAX 0298(59)2101

入江宏定

TEL 0298(59)2502 FAX 0298(59)2501

語句の説明

* 1 溶込み深さ

溶接により溶融した深さを溶込み深さという。通常のアーク溶接では溶込み深さが溶融幅と比べて小さいが、高エネルギービームのレーザーや電子ビームを用いた溶接では、図 2 (b) にみられるように、幅が狭くて大きな溶込み深さが得られる。

* 2 ポロシティ

溶接欠陥の一種。図 4 (b) に示すように、溶接金属内に生じた大きな空洞をいう。

* 3 M P a

圧力や強度を示す単位

1 M P a は約 0.1kgf/mm² に相当する。800Mpa は 1 平方ミリメートルに約 80 kg の荷重に耐える強度。

* 4 蒸発反力

ロケットは燃料を後方へ噴射し、その反作用で前方に進む。これと同様に、レーザー照射により材料が溶融蒸発すると、噴出する蒸発粒子の反作用により溶融金属液面に圧力がかかり、くぼみを生じる。このときの圧力を蒸発反力という。

* 5 ブローホール

溶融金属中のガスにより生じる球状の溶接欠陥。サイズはポロシティよりも小さい。

* 6 炭素当量

溶接は材料を急激に加熱・冷却するプロセスであるため、炭素が多く含有されている鋼では、冷却時に焼き入れにより溶接金属や熱影響部が硬化し、これが著しい場合には割れを発生する。材料がいかに硬化するかは、主に炭素含有量と冷却速度により決定されるが、炭素だけでなく、Mn,Ni,Cr 等の元素も材料の焼き入れ性を高め、硬化させる元素である。そこでこれらの元素の焼き入れ性が炭素に対してどの程度になるかの計数を決め、それぞれの元素の含有量に計数をかけてたしあわせたものを炭素当量とし、材料の焼き入れ硬化性の指標としている。炭素当量が大きくなるほど溶接時に硬化しやすくなることを意味する。いくつかの炭素当量式が提案されているが、その代表的なものを以下に示す。CEは炭素当量。

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

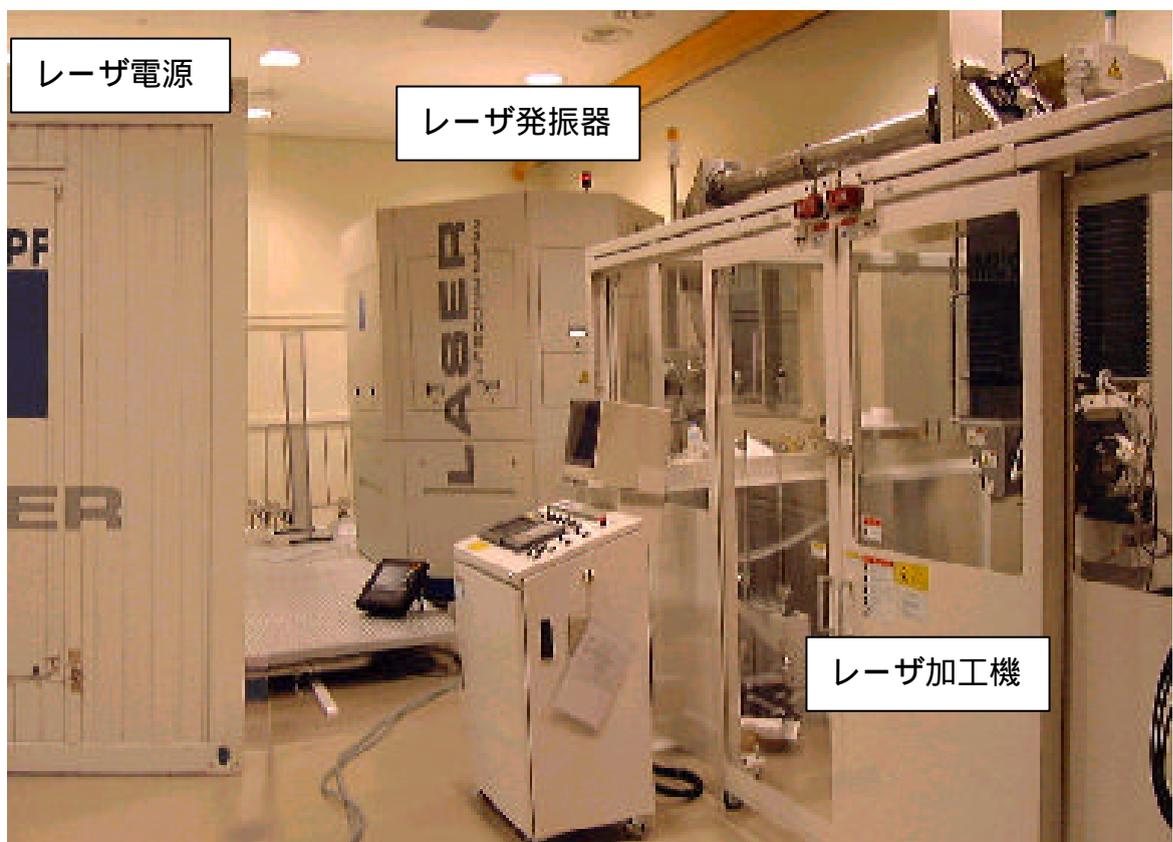
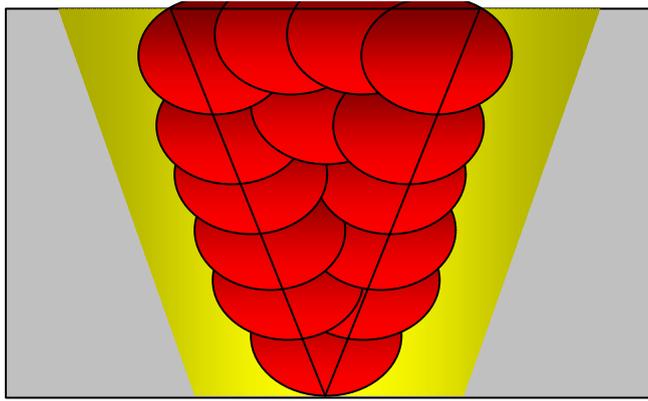


図1 20 kW CO₂レーザー溶接装置

母材 溶接金属 熱影響部

(a) アーク溶接



(b) レーザ溶接

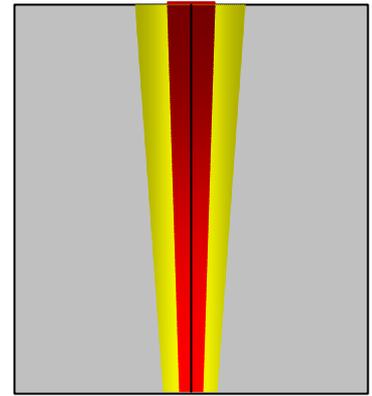


図2 アーク溶接とレーザー溶接の比較

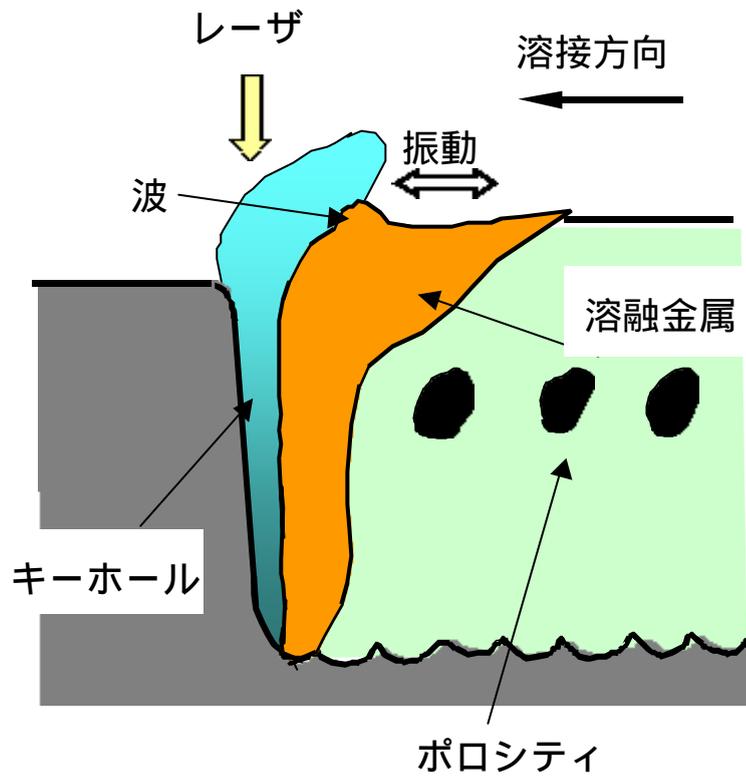
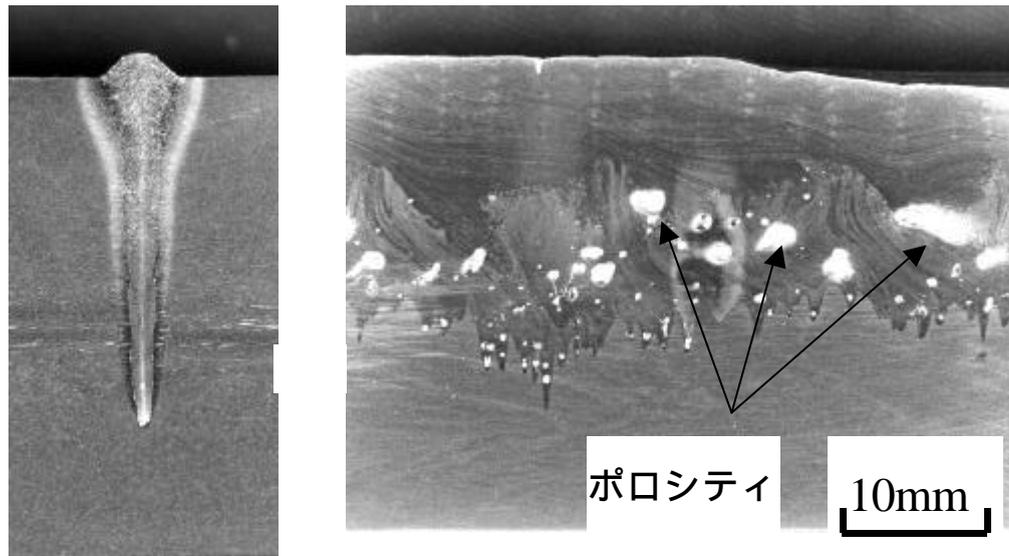


図3 レーザ溶接現象

レーザー出力:20kW、溶接速度：1 m/min



(a) 溶接部横断面 (b) 溶接部縦断面(ポロシティの発生)

図4 溶接部断面形状とポロシティの発生

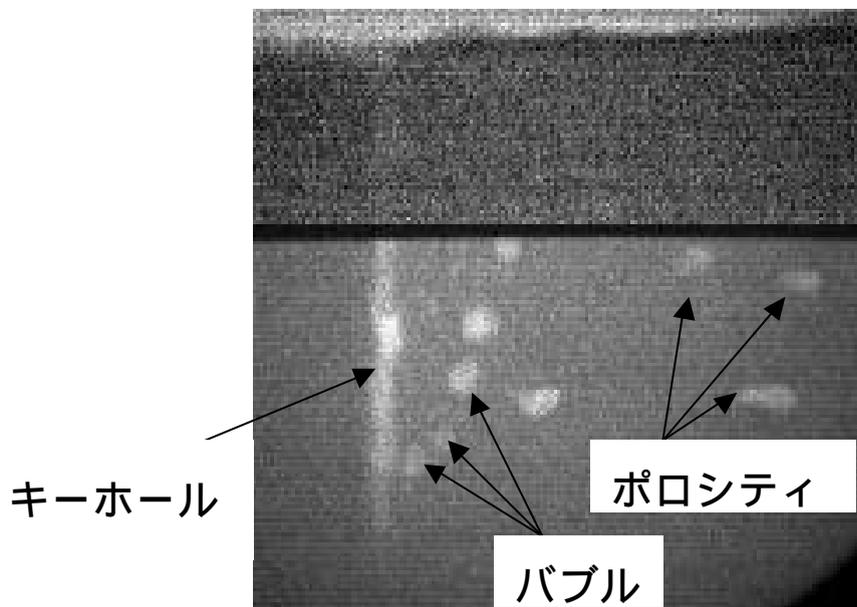


図5 キーホールのX線透視画像(レーザー溶接中に撮影)

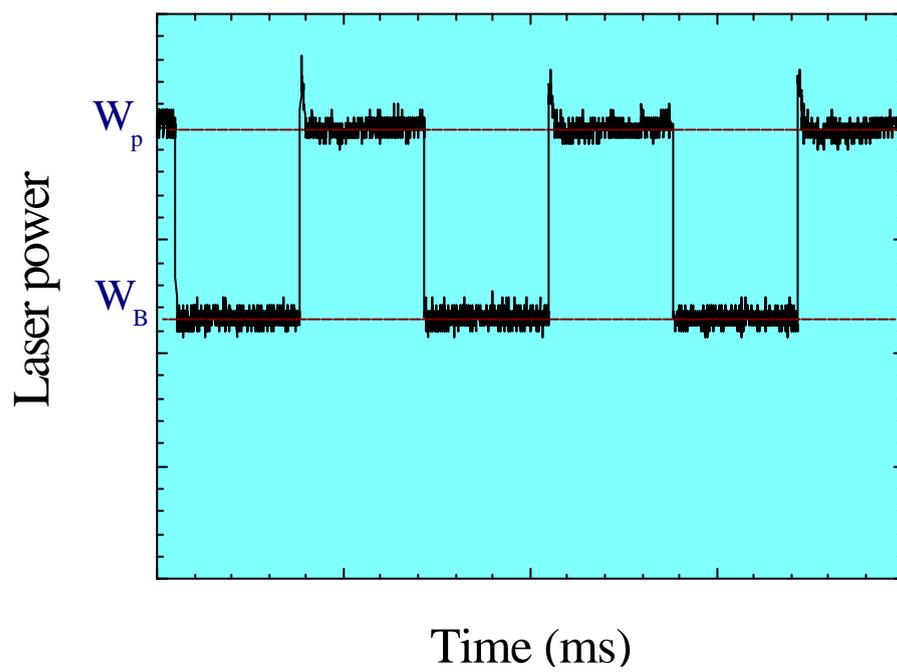


図6 レーザ出力のパルス変調

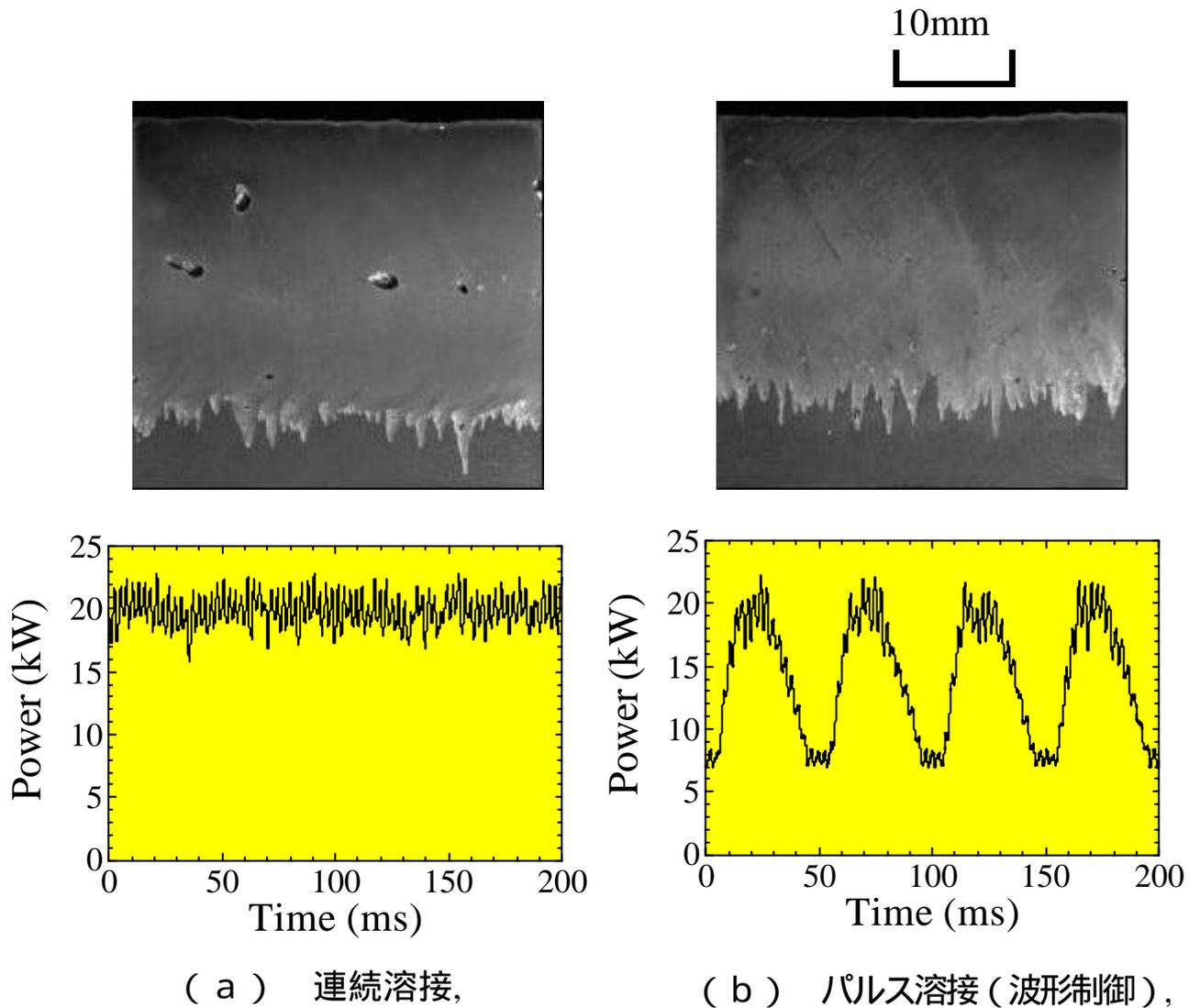


図7 レーザの出力制御によるポロシティ（溶接欠陥）の抑制

レーザの出力を適切な周波数及び波形で脈動させることにより、溶接欠陥（ポロシティ）の発生が効果的に抑制されている。

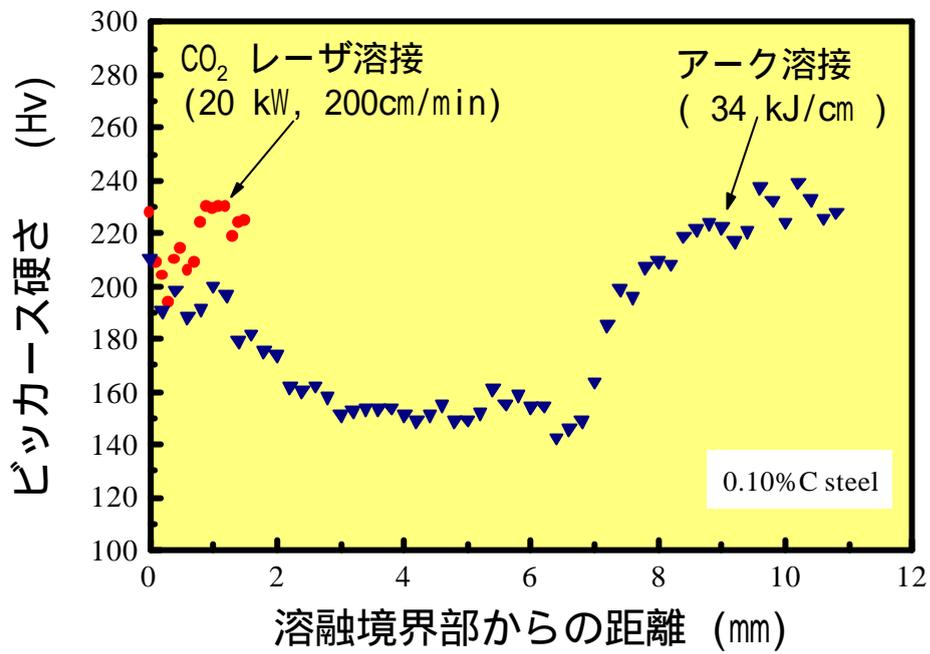


図 8 超微細粒高強度鋼溶接熱影響部の硬さ分布

通常のアーク溶接では幅広い領域が軟化するのに対し、
 レーザ溶接では軟化の程度が小さく、幅も極端に狭い。