

局所レーザ加熱による金属構造材の高効率補修技術の開発

A High Efficiency Method of Repairing Metal Structure using Local Laser Heating

株式会社 東芝	上野 聡一	Souichi Ueno	Member
株式会社 東芝	椎原 克典	Katsunori Shiihara	Non-Member
株式会社 東芝	福田 健	Takeshi Fukuda	Non-Member
株式会社 東芝	只野 智	Satoshi Tadano	Non-Member

Importance of repairing structures in nuclear power plants as countermeasures for Stress Corrosion Cracking is increasing because many plants are aging. We have developed the underwater laser beam welding (ULBW) for the repair technique. In order to achieve faster and widespread repairing, we focused on a top-hat type laser beam and hot-wire system. The top-hat type laser beam has oblong energy distribution and contributes to expand heating area. The hot-wire system heats the welding wire before insertion and improves extent of melted welding wire. First we conducted heat conduction analysis and validated efficiency of the top-hat type laser beam. Next we conducted welding tests and optimized parameters concerned with welding condition; laser scanning velocity, wire feeding velocity, and heating current. Consequently we demonstrated the possibility of high speed welding as twice as our traditional underwater laser welding by combination of top-hat type laser beam and hot-wire system.

Keywords: Laser welding, Top-hat type laser, Hot-wire system

1. はじめに

原子炉内構造物に発生したき裂の補修技術として、これまでレーザを用いた溶接技術を開発してきた^[1]。本技術は炉内構造物に発生したき裂を除去した後に肉盛溶接を行うものであり、原子炉内で部分的に不活性ガスの気中環境を作ることによって炉水を抜くことなく遠隔で補修溶接を行う。また、TIGと比較して低入熱の溶接が可能であり、原子炉内の材料に対しても適用性が高い。さらに広範囲を短時間で補修することができれば工期短縮に寄与できる。そこで、本研究では単位時間当たりの溶接面積（以下、溶接面積）の拡大を目的とする。溶接面積を拡大するには、レーザの加熱面積と溶接ワイヤ供給量の増加が必要である。このため、矩形のエネルギー分布を持つレーザ光とワイヤを挿入前に加熱するホットワイヤの組み合わせに着目した。本稿はその第一段階として溶接条件の基礎的検討結果について報告する。

2. 提案手法

レーザ溶接に加熱源として用いられるレーザ光は、加工点で中心を最大としたガウシアン状に広がるエネルギー分布を有していた。従って、補修対象側への入熱はレーザ加工点の中心が高くなる。仮にレーザ光のスポット径を広げることで加熱範囲の拡大を試みると、レーザ光の照射範囲内で入熱に差が出てしまう。結果として、補修対象側で温度勾配が発生してしまうため、溶接ワイヤを挿入した際に十分に広がらないことが予想される。

そこで、本研究では加熱源として、加工点が Fig. 1 に例として示すような矩形のエネルギー分布を有するトップハット型レーザ光に着目した。トップハット型レーザ光を用いることで、補修対象側への入熱は一定の幅で均一になると考えられる。さらに、加工点へワイヤが供給された際に加工点の温度降下を改善するために、事前にワイヤを加熱するホットワイヤとの組み合わせを試みた。これによって、ワイヤ供給時の加工点の温度低下を最小限に抑えられる。本研究では補修後に最大 40 年間の運転を満足するための肉盛厚さとして、1mm 以上を制約条件とした。従来補修技術の溶接面積の 2 倍以上である 50cm²/min 以上で行うことを目標とした。

連絡先: 上野聡一、〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町
8 (株) 東芝、電話: 045-770-2307、
E-mail: souichi.ueno@toshiba.co.jp

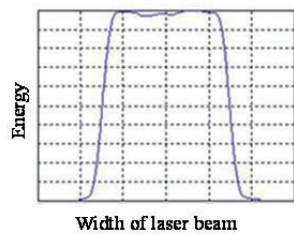


Fig. 1 The energy distribution of laser beam

3. 熱伝導解析による検証

Fig. 2 に熱伝導解析モデルを示す。被加熱体には一般的な金属構造材であるステンレス鋼とし、形状は 200mm×200mm×50mm である。加熱源であるレーザー光は、Fig. 3 に示す様に出力 1kW のガウシアン分布のレーザー光を BB 断面と平行な方向に並列して 4 つ重ね合わせることで、Fig. 3 に示す矩形型のエネルギー分布を持つレーザー光を加熱源とした。比較用として、加熱源領域の中心に出力 4kW のガウシアン分布のレーザー光を照射した場合も解析を行った。また、加熱源は Fig. 2 の点線で示す 20mm×10mm の領域に与え、速度 40cm/min で走査をさせた。解析開始の初期温度は 20℃とし、ステンレス鋼の比熱、熱伝達率は Table.1 に示すように温度依存性を考慮した^[2]。Fig. 2 に示す加熱源の領域の中心を通り走査方向に平行な AA 断面と、走査方向に垂直な BB 断面の温度分布を求めた。結果を Fig. 4 に示す。AA 断面の温度分布は矩形分布、ガウシアン分布ともに加熱領域に差は見られない。一方、BB 断面はガウシアン分布と比較して、矩形分布がより広い領域に高温域が分布していることが確認できる。従って、レーザー光のエネルギー分布を矩形分布とすることで、加熱領域拡大の効果が期待できることを確認した。

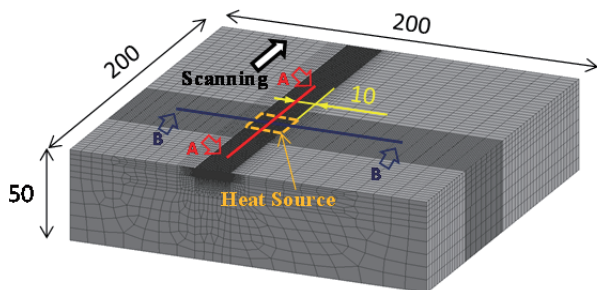


Fig. 2 Analytical model

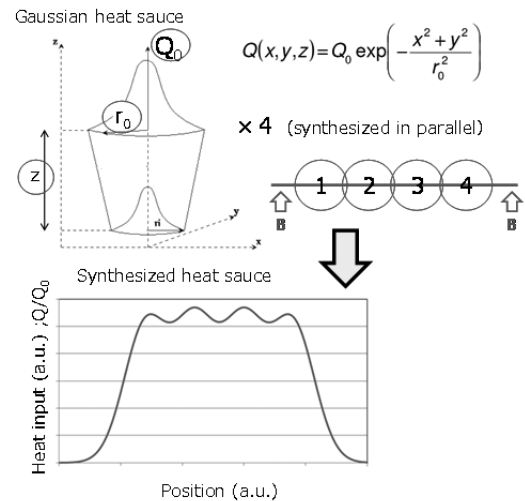


Fig. 3 Concept of oblong heat source

Table.1 Analytical conditions

Temperature ℃	Specific heat J/(g·K)	Heat conductivity W/(mm·K)
20	0.452	0.0146
100	0.494	0.0156
300	0.523	0.017
500	0.553	0.0197
700	0.578	0.0224
1400	0.620	0.0276

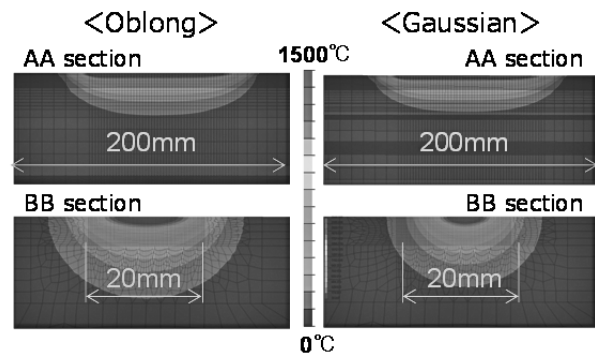


Fig. 4 The results of heat conduction analysis

4. 溶接試験方法

水中レーザー溶接ではガウシアン分布のレーザー光で被加熱体の表面を加熱し熔融させ、熔融池にワイヤを挿入する。ワイヤを雰囲気温度で挿入すると、ワイヤの熔融によって熔融池側から熱量が奪われる。安定した溶接を行うためには、この熱損失も考慮して加熱源となるレーザー光の条件を決める必要がある。前章で述べた矩形エネルギー分布による加熱領域拡大効果を最大限にいかすために、本研究では挿入前に事前にワイヤを加熱するホットワイヤとの組み合わせを検討した。これによって、ワイヤの熔融による熱損失を最小限にすることを試みた。

Fig.5 に試験体系を示す。レーザヘッドは COHERENT 社製の 4kW ダレクトダイオードレーザ (DDL) を使用した。DDL で成形される加工点の形状はバーンパターンから、走査方向と垂直方向に 15mm、平行方向に 3mm であった。ワイヤ供給後の表面の酸化を防ぐために Ar ガスをノズルで吹き付けた。試験体は材質 SUS304、サイズは 200mm×200mm×50mm である。本試験片の化学成分表を Table.2 に示す。ワイヤ材質は 52M、ワイヤ径は φ1.2mm である。本試験で使用したホットワイヤは通電方式である。試験体にアースを取りワイヤ供給装置側を高電位にすることで、ワイヤが試験片表面に接触した瞬間に電流が流れる。この電流によるジュール熱でワイヤを加熱する。本試験のパラメータはレーザ走査速度 (cm/min)、ワイヤ予熱電流 (A)、ワイヤ供給速度 (cm/min) である。レーザ出力はワイヤ供給時に表面温度をより高温にするため、最大出力の 4kW とした。また、ワイヤ溶融後の肉盛部の形状を Fig.6 に示すように半楕円と近似すると、厚さ 1mm 以上の肉盛部断面積 $S(\text{cm}^2)$ が 1 分間当たり 50cm^2 以上であるために、肉盛部の高さ $h(\text{cm})$ とレーザの走査速度 $v(\text{cm/min})$ は、以下の関係式

$$S = 1.5v \sqrt{1 - \frac{0.01}{h^2}} \geq 50, \quad h \geq 0.1$$

を満たす必要がある。さらに、変形して得られる

$$0 \leq \left(\frac{5000}{15v} \right)^2 < 1$$

の関係式からレーザ走査速度が約 30cm/min 以上必要と算出した。そこで、レーザ走査速度を 30cm/min、40cm/min の 2 種類とした。また、このときの 1 分間当たりに形成される肉盛部の体積から、最低限必要なワイヤ供給速度を 700cm/min と算出し、両レーザ走査速度において肉盛可能なワイヤ予熱電流値を、試験を複数回行うことで求めた。その後、ワイヤ供給速度とワイヤ予熱電流をともに増加させて、肉盛厚さ 1mm 以上の溶接面積が最大になる条件を求めた。各試験パラメータの変動範囲を Table.3 に示す。面積の評価方法は以下に記載する通りである。Fig.7 に示す様に肉盛部の型を取り、一定間隔で 6 つの領域に区切る。各断面において厚さ 1mm 以上の幅を求め、分割した 6 つの領域を台形と近似してそれぞれの面積を算出し、その総和を求めた。最後にレーザ走査速度から肉盛に要した時間を求め、溶接面積を求めた。

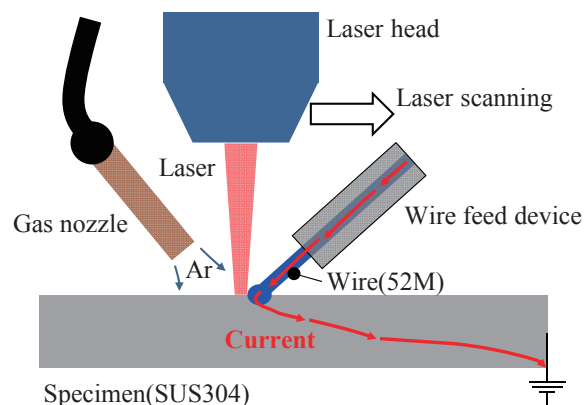


Fig.5 Experimental setup

Table.2 Chemical composition

Chemical Composition (%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
× 100	× 100	× 100	× 1000	× 1000	× 100	× 100	—
5	43	110	32	2	807	1814	—

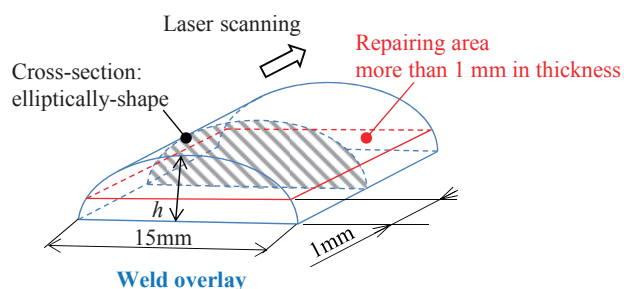


Fig.6 Shape of weld overlay

Table.3 Variation range of test parameters

Parameter	Unit	Variation range
Scan velocity	cm/min	30 or 40
Feeding velocity	cm/min	700 ~ 1300
HeatCurrent	A	140 ~ 330

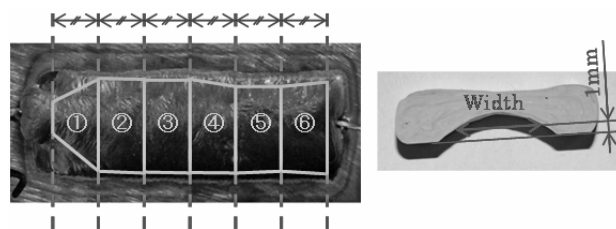


Fig.7 The way of evaluating area more than 1mm in thickness

5. 溶接試験結果

Fig.8 から Fig.10 に前章で検討したパラメータ範囲で行った試験のうち、特徴的な現象を示した 3 条件の試験後の試験片外観、肉盛溶接中の高速度カメラの画像及び厚さ 1mm 以上の 1 分間当たりの溶接面積の評価結果を示す。Fig.8 ではワイヤが溶融せずに残っている。高速度カメラの画像からもワイヤが試験片に接触後に溶融していないことが確認された。ワイヤ供給速度 700cm/min に対して予熱電流 170A は予熱が不十分な条件であることが分かった。一方、Fig.9 では外観上は肉盛溶接ができているように見えるが、溶接面積の評価結果は $38.8\text{cm}^2/\text{min}$ であり目標を下回った。Fig.9 に示す高速度カメラの画像から本条件ではワイヤが試験片に接触した瞬間に短絡し、飛散していることが確認された。従って肉盛を形成するワイヤの量が少なくなり、厚さ 1mm 以上の面積が減少したと考えられる。Fig.10 は本試験で溶接面積が最大の $60.1\text{cm}^2/\text{min}$ となった条件（レーザ走査速度 40cm/min、ワイヤ供給速度 1300cm/min、ワイヤ予熱電流 300A）である。本条件ではワイヤの未溶融や短絡は観測されず、高速度カメラの画像に示す様にレーザで加熱された領域を溶融したワイヤが流れることが確認された。Fig.11 に横軸にワイヤ予熱電流、縦軸にワイヤ供給速度を取り、試験パラメータの組み合わせにより肉盛溶接成功（溶接面積 $50\text{cm}^2/\text{min}$ 以上）、ワイヤ未溶融、短絡のどの現象が生じたかを表したグラフを示す。Fig.11 から肉盛溶接が成功した場合のワイヤ予熱電流とワイヤ供給速度は線形に近い関係を保っている。また、ワイヤ予熱電流が過小で未溶融、過大で短絡が発生していることが分かる。従って前章で述べた事前のパラメータ検討に加え、Fig.11 に示すワイヤ予熱電流とワイヤ供給速度の関係から安定した肉盛溶接施工が可能であると考えられる。

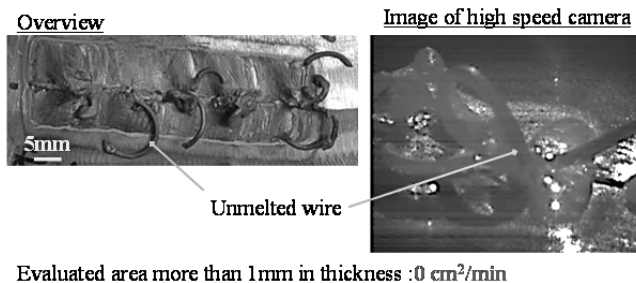


Fig.8 The experimental result (Heating current 170A, Feeding velocity 700cm/min, Laser scan velocity 30cm/min)

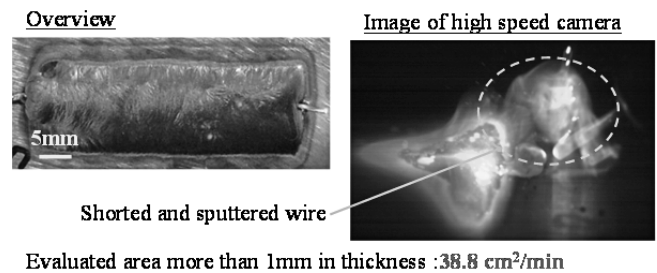


Fig.9 The experimental result (Heating current 330A, Feeding velocity 1100cm/min, Laser scan velocity 40cm/min)

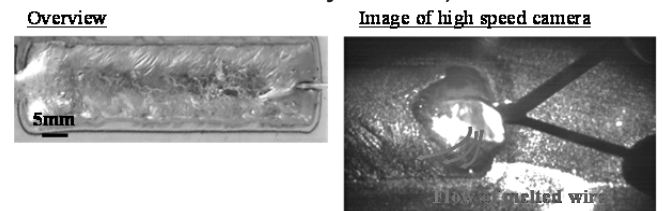


Fig.10 The experimental result (Heating current 300A, Feeding velocity 1300cm/min, Laser scan velocity 40cm/min)

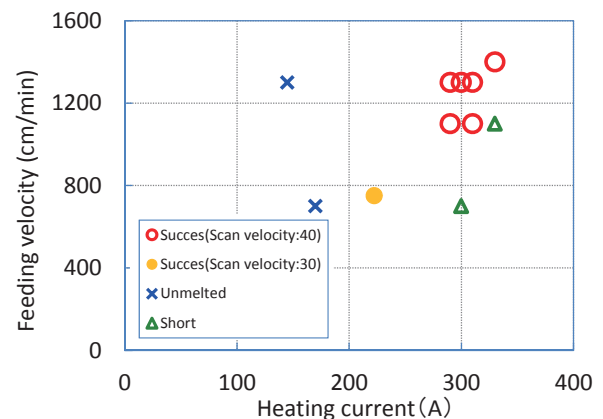


Fig.11 The relationship between phenomena and test parameters

6. まとめ

溶接面積拡大を目的として、加工点が矩形のエネルギー分布を持つレーザと通電により予熱するホットワイヤを組み合わせる方法を提案した。レーザ走査速度 40cm/min、ワイヤ供給速度 1300cm/min、ワイヤ予熱電流 300A とすることで、最大 $60.1\text{cm}^2/\text{min}$ の溶接面積を達成した。

参考文献

- [1] M. Tamura, et al., Proc. ICONE13, ICONE13-40141 (2005).
- [2] 望月正人ら 溶接学会論文集 第12巻 第4号 561-567 (1994)