

橋梁へのレーザ・アークハイブリッド溶接 およびレーザホットワイヤ溶接技術の適用

株式会社 IHI 技術開発本部
猪瀬幸太郎、杉野友洋、松本直幸

レーザ溶接の利点である高速溶接、小さな溶接変形と、従来の溶接方法の利点である良好な施工性を両立するハイブリッド溶接はレーザ光の他に補助熱源を併用する施工法であり、とくに大型鋼構造物への適用が期待されている。本報では、アーク溶接を補助熱源とするレーザ・アークハイブリッド溶接とホットワイヤを補助熱源とするレーザホットワイヤ溶接について、それぞれの特性について述べる。また実用化のための継手（部材）の性能確認試験と実際の橋梁への適用事例を紹介する。

1. 概要

溶接鋼構造物の製作技術は製鋼技術と接合技術の進歩とともに発展した。なかでもリベット接合からアーク溶接接合への転換は大きな転機であり、設計の自由度、軽量化、高水密性など多くの利点を得た。一方、溶接接合は材質および部材性能への影響も大きく、設計や施工管理においては溶接変形、残留応力、脆性破壊、疲労破壊などへの配慮が不可欠となる。このような技術課題に対する研究開発は鋼構造物の製作技術の基盤であり、様々な検討が進められてきた。レーザ溶接技術開発はその代表であるが、本報では鋼橋における取組みを紹介する。

図1に従来アーク溶接法およびレーザ溶接技術を用いたT継手（すみ肉溶接継手）の断面マクロ組織を示す。もともと橋梁製作においては、継手は突合せよりもすみ肉溶接継手が圧倒的に多く、特に近年の橋梁構造はその傾向が顕著である。そのためレーザ溶接技術の橋梁への適用は、すみ肉溶接が突合せ溶接に先行した。

図中アーク溶接（GMAW）と比較するとレーザ光のみを熱源とするレーザ溶接（LBW）は溶接金属が少なく、入熱による影響を低減できる。ただし大型鋼構造物の施工ではレーザ溶接（LBW）よりも施工性が良好な、レーザ・アークハイブリッド溶接（LA-Hybrid）やレーザホットワイヤ溶接（LBW&Hotwire）など補助熱源を併用することが多い。

これら溶接方法の特性の一例として図2に溶接入熱パラメータで整理した溶接角変形量を示す。アーク溶接で生じた角変形と比較するとレーザ溶接のそれは小さいことが分かる。とくにリブの片側から1パスで貫通溶接したレーザ・アークハイブリッド溶接とレーザホットワイヤ溶接については、補助熱源を併用していてもレーザ光のみで溶接したときと同程度に角変形が小さい。

最初の実橋への適用はレーザ・アークハイブリッド溶接を用いた²⁾。溶接変形は小さく、拘束および溶接ひずみ矯正作業が不要な施工が可能となった。またパス数削減や溶接速度の向上も実現した。しかし、後述するように、ルート部の不溶着長管理のための超音波探傷試験など、従来のアーク溶接よりも精緻な品質管理が求められた³⁾。将来的には適用実績の増加や信頼性向上によって検査は合理化され、負担も低減されると予測される。しかし当面はレーザ・アークハイブリッド溶接の適用は付

加価値の高い用途に限定し、継手の性能向上を図るための研究に注力している⁴⁾。そのため、一般的なすみ肉溶接継手に対しては従来のアーク溶接と同じレベルの施工管理で対応できるレーザーホットワイヤ溶接 (LBW&Hotwire) を開発して実用化を進めている⁵⁾。

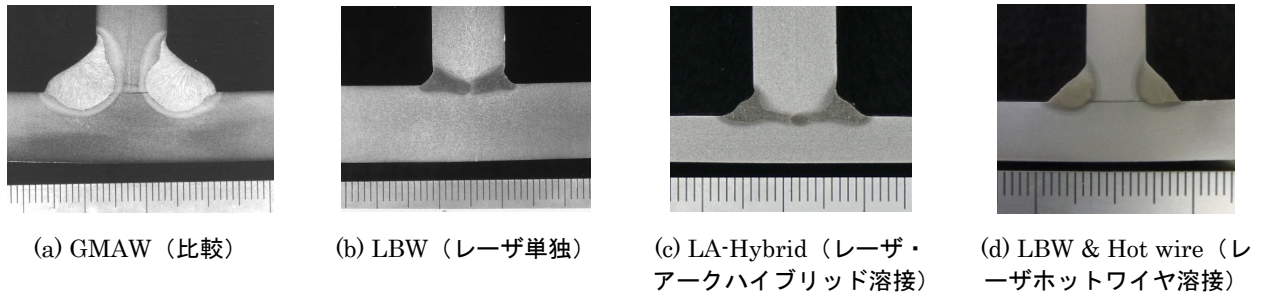


図1 レーザを用いた溶接継手のマクロ写真

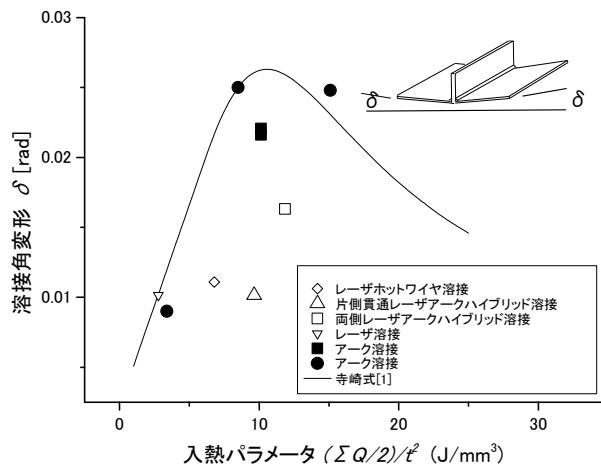


図2 各種溶接継手の溶接角変形量

2. レーザ・アークハイブリッド溶接の開発

図3にレーザー・アークハイブリッド溶接トーチを示す。レーザー光源にはファイバーレーザーを用いており、レーザー光の直径が0.2~0.8mm程度になるように集光して主溶接熱源とする。さらに補助熱源であるアーク溶接トーチをレーザー溶接トーチと一体化することで現場の作業性を高めている。レーザー、アークそれぞれの狙い位置、相対位置、入熱のバランス、は施工上の重要なノウハウである。図4にレーザー溶接装置の一例を示す。全長5m程度までの部材であれば、このような大型のハンドリング設備を用いると制御が容易となる。一方、自走式の溶接機は施工する部材の寸法や製作現場のレイアウト変更などに柔軟に対応できるなどの利点がある。

新たに開発した溶接施工方法を実機に適用するには、それを用いて製作した継手性能を確認することが求められる。そこで、橋梁へのレーザー・アークハイブリッド溶接適用を目的とした性能確認試験を実施した。ここでは、すみ肉溶接継手の継手強度について紹介する。

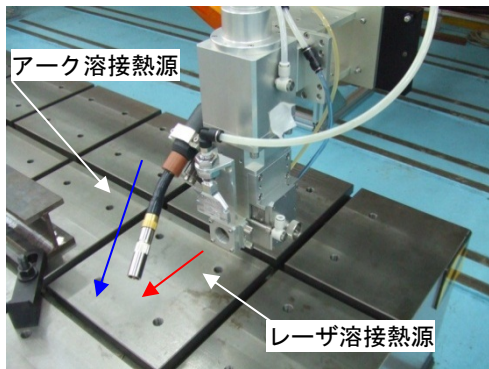


図3 レーザ・アークハイブリッド溶接トーチ



図4 レーザ・アークハイブリッド溶接装置

図5に荷重伝達型すみ肉溶接継手の引張試験結果を示す。ここでは未溶着率 (Δ/t) を指標とし、継手強度へ及ぼす影響を整理した。継手強度は一般性を持たせるため、母材の引張強度で無次元化して示している。レーザー・アークハイブリッド溶接継手は未溶着が生じにくいことから小脚長 (2mm) であっても母材部で破断する。一般的に未溶着が大きくなると継手効率は低下する。従って深い溶込みを得ることができるレーザー・アークハイブリッド溶接は強度的に有利である。未溶着率が4分の1 (板厚8mmの場合、未溶着長2mm) 以下であれば、その継手強度は母材引張強さ以上であることを確認した。

リブの片側からの貫通溶接であれば、施工側の脚長と裏波の形成状況を目視することにより未溶着の有無を推定することができる。しかしリブの両面から溶接した場合、未溶着の有無やそれが許容値以下であることの判定には超音波探傷試験が必要となる。脚長を計測することで施工管理ができるアーク溶接と比較すると品質管理は煩雑と言える。

図6に荷重非伝達型すみ肉溶接継手の疲労試験結果を示す。溶接止端部からのき裂発生を想定した評価であり、き裂発生位置の近傍に貼付したひずみゲージの応力範囲が15%変動した繰り返し数を疲労寿命とした。従って試験片が完全に破断するまでを疲労寿命とするよりは厳しい評価となる。リブの片側から貫通溶接したレーザー・アークハイブリッド溶接継手は、少なくともアーク溶接継手と同等の疲労強度 (JSSC、E等級) と判断できる⁶⁾。また、リブの両側から溶接した継手の疲労強度は極めて高いことも分かる。

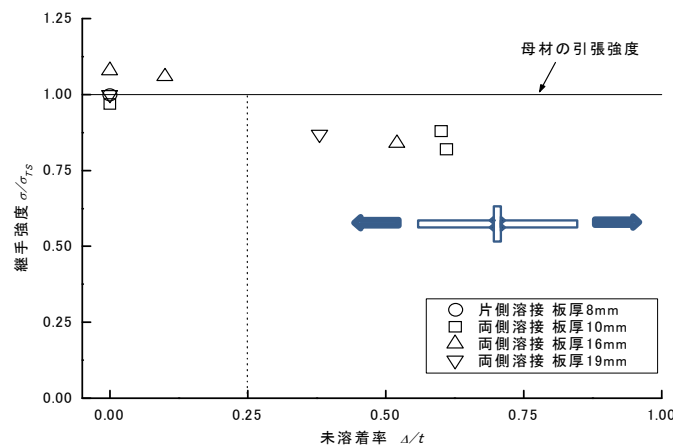


図5 レーザ・アークハイブリッド荷重伝達型すみ肉溶接継手強度

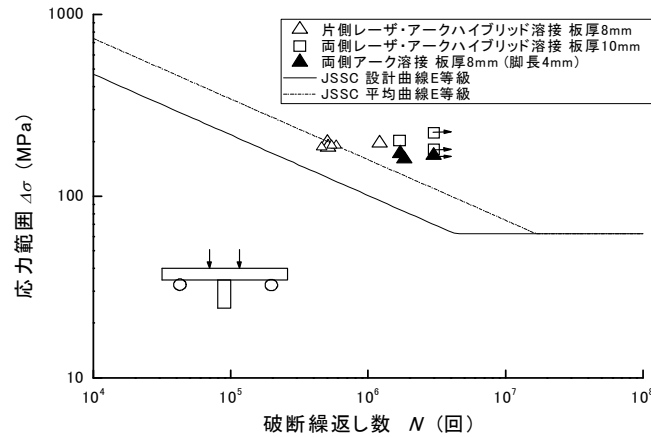


図6 レーザ・アークハイブリッド荷重非伝達型すみ肉溶接継手疲労強度

3. レーザホットワイヤ溶接の開発

レーザホットワイヤ溶接のプロセス概念図を図7に示す。溶接機は溶接トーチ、ワイヤ送給装置、レーザ発振器（冷却装置含む）、ワイヤ加熱電源から構成される。高速、小変形というレーザ溶接の特徴を活かし、かつ施工性の向上と品質管理の効率化を実現するため、レーザ光の集光は通常よりも大きなサイズを採用する（ $\phi 5\text{mm} \sim \phi 7\text{mm}$ ）。これによるエネルギー密度の低下は溶接ワイヤに通電して得るジュール熱によって補っている（ホットワイヤ技術）。

溶接現象はキーホール型溶接ではなく熱伝導型溶接であり、ワイヤから移行した溶接金属がアーク溶接継手と同じように形成されてのど厚（脚長）が得られる。そのため荷重伝達機構はアーク溶接継手と同じであり、施工管理も主に目視と脚長管理によって行う。高速（ $0.8\text{m/min} \sim 1.5\text{m/min}$ ）で拘束や矯正作業の少ない溶接施工が可能となり、さらにアーク溶接と同様の施工管理手法を適用できる。

一般にアーク溶接によるすみ肉溶接継手では施工上、必要以上に大きな脚長となっていることが多く、溶接変形も大きくなりがちである。レーザホットワイヤ溶接は $3 \sim 4\text{mm}$ といった極めて小さい脚長の隅肉溶接も安定して施工できることから、この点においても有利である。

レーザホットワイヤ溶接継手においてもレーザ・アークハイブリッド溶接継手と同様に継手性能を確認した。図8に継手の硬さ分布を示す。溶接金属部が硬化するのは通常のレーザ溶接などのキーホール型溶接と同じである。そこで硬さの管理目標値を CO_2 レーザ溶接継手の場合を参考に 380HV 以下と定めた。レーザホットワイヤすみ肉溶接継手を対象とした基準ではないことから、検討の余地はあるが、本継手はこれを満たしていた。図9に溶接金属のマイクロ組織の観察結果を示す。金属組織はマルテンサイトとベイナイトを主体とした中間段階組織である。シールドガスにはアルゴンガスを用い、溶接金属中の酸素量、窒素量が管理目標値である $\text{O} \leq 100\text{ppm}$ 、 $\text{N} \leq 50\text{ppm}$ を満たすように流量を調節した。

図10にレーザホットワイヤすみ肉溶接継手の引張試験結果を示す。試験片は JIS Z 3131 をもとに設計し、破断強度は設計強度に対する安全率で示している。すべての継手において十分な強度（安全率 ≥ 2.2 ）を有することが分かる。図11に疲労試験の一例として後述する橋梁の車道部材を模擬した継手の疲労強度をしめす⁵⁾。本継手は要求値である疲労強度 JSSC E 等級を満たしている。

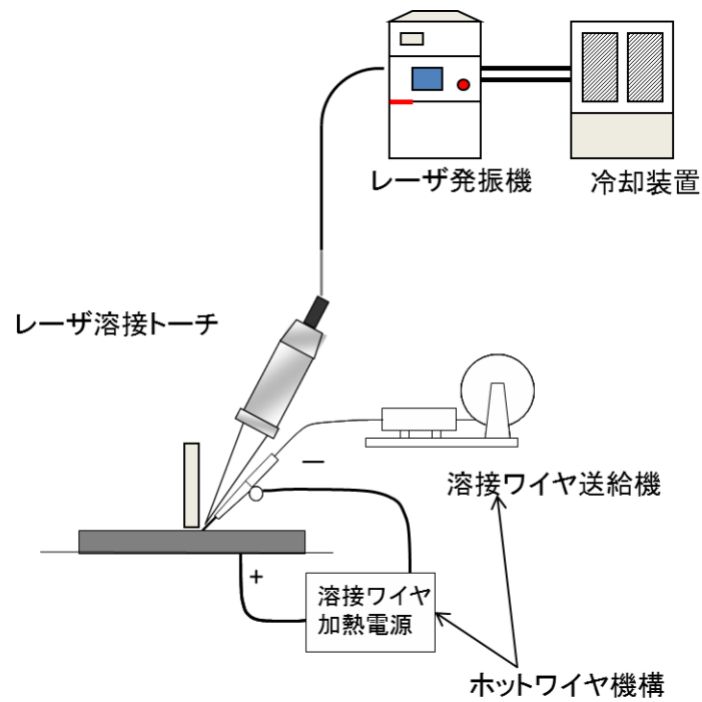


図7 レーザホットワイヤ溶接プロセス概念図

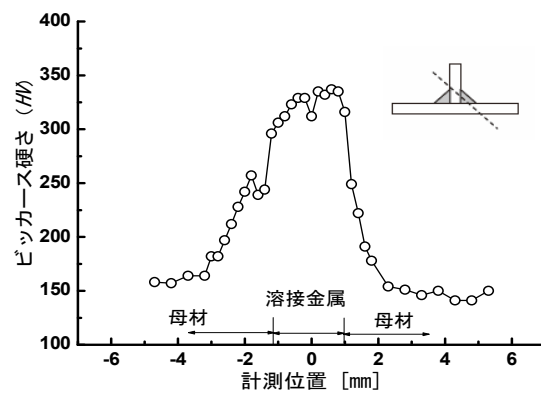


図8 レーザホットワイヤ溶接硬さ分布

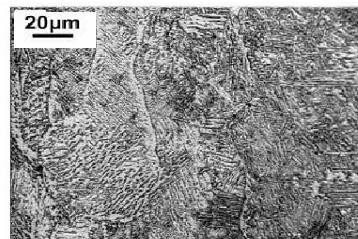


図9 レーザホットワイヤ溶接金属のマイクロ組織

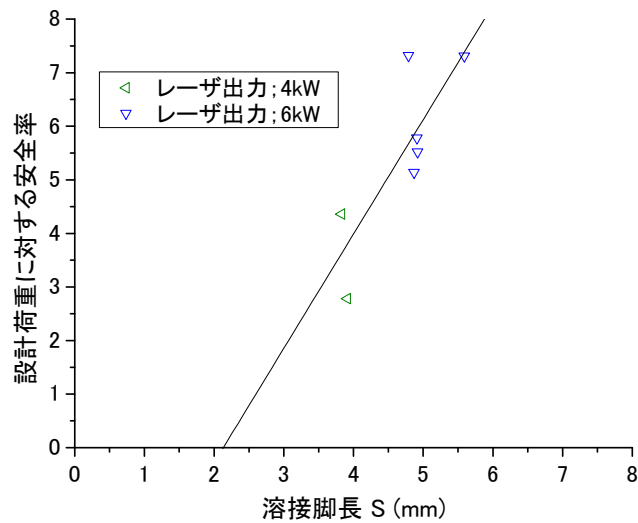


図 10 レーザホットワイヤすみ肉溶接継手強度

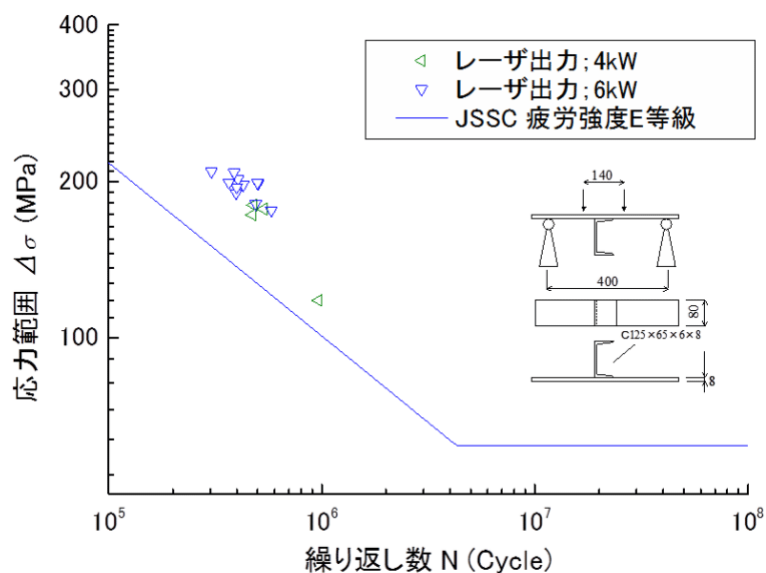


図 11 レーザホットワイヤ溶接継手疲労試験結果

4. 実橋への適用

レーザー・アークハイブリッド溶接は歩道部材の一部に適用した。これは最初の適用対象として橋梁主構造の安全性に直結する重要部材を避けたためである。ただし引張試験より定めた許容未溶着長と、超音波探傷要領を規定し承認を得るなど重要部材と同等の施工管理を行った。さらに溶接施工試験も改めて行っている。今回施工した継手はT継手（すみ肉溶接継手）であるため最大2mmまでの未溶着を許容している。しかし超音波探傷試験の結果、溶接施工試験の継手、実部材の継手とも未溶着は検出されず十分な溶込みを得ていることを確認した。

アーク溶接と比較すると溶接速度が速いだけでなく、リブ片側からの貫通溶接によって施工した部材では溶接パス数が半減した。また溶接変形は少なく溶接施工後のひずみとり作業も省略することが

出来た。図 12 にレーザ・アークハイブリッド溶接を適用した橋梁の全景を、図 13 に部材の架設状況を示す（2007 年部材製作）⁷⁾。

レーザホットワイヤ溶接は車道を支える床版部材に適用した⁸⁾。これは車両による繰り返し荷重を直接受ける極めて重要な部材である。耐久性が特に重視されるため継手レベルだけでなく、部材レベルの性能確認も行った。図 14 に耐久試験（輪荷重載荷試験）要領を示す。この試験は車両荷重を模擬した荷重を段階的に増加しつつ 52 万回載荷する。試験後は鋼部材とその継手の変状の有無を入念に検査し、損傷が生じていないことを確認した。製作した床版部材（鋼製の補剛パネル）を図 15 に、架設した都市高速の高架橋を図 16 に示す⁹⁾（2010 年部材製作）。



図 12 レーザ・アークハイブリッド適用橋梁⁷⁾



図 13 レーザ・アークハイブリッド適用部材架設状況

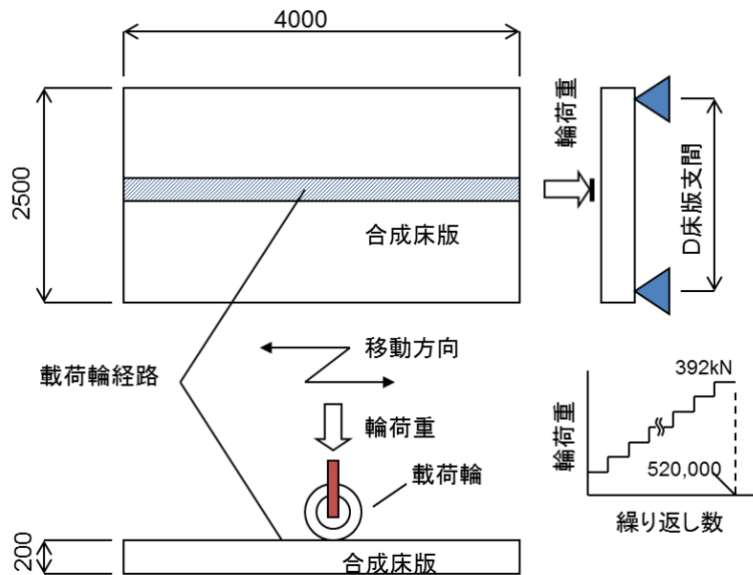


図 14 耐久試験（輪荷重載荷試験）要領



図 15 レーザホットワイヤ溶接適用部材



図 16 レーザホットワイヤ溶接適用橋梁⁹⁾

5. まとめ

橋梁へのレーザー溶接技術適用の取り組みについて初期の実橋適用を中心に述べた。現在、本格的な実用化を推進している。またレーザー溶接技術の有効利用の可能性として高強度鋼への適用も検討している。文献¹⁰⁾ではレーザー溶接技術の適用による高強度鋼の有効活用が報告されており、鋼構造建設（建造）事業の国際競争力向上に資すると期待している。

参考文献

- 1) TERASAKI Toshio, Domination Factors and Quantification of Welding Deformation, Journal of the Japan welding society Vol.72, No.4, (2003)
- 2) 猪瀬幸太郎、大脇桂、中西保正、宮地崇、藪野真史、小川勝治：レーザー・アークハイブリッド溶接の歩道部鋼床版部材への適用、土木学会第 63 回年次講演会、pp815-816 (2008)
- 3) 猪瀬幸太郎：大型構造物における新接合法の導入と設計・製作の革新、第 21 回セミナー資料、溶接・接合技術力を生かす製品開発・設計力、溶接接合光学振興会、pp43-56、(2010)
- 4) 例えば：猪瀬幸太郎、神林順子、阿部大輔、松本直幸、杉野友洋、金裕哲、レーザー・アークハイブリッド溶接を用いた HT780 すみ肉溶接継手の疲労強度改善、溶接学会全国大会講演概要、第 89 集、(2011)
- 5) 猪瀬幸太郎、阿部大輔、大脇桂、大畑和夫、岡田誠司、倉田幸宏、金裕哲、半導体レーザーを用いた隅肉溶接継手の性能確認、土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集、(2010)
- 6) 日本鋼構造協会：構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版 (1993)
- 7) 中西保正、猪瀬幸太郎：やさしい橋の溶接技術、橋梁と基礎、pp40-45、(2010)
- 8) 猪瀬幸太郎、大脇桂、倉田幸宏：レーザー溶接の実機への適用、LMP シンポジウム 2011、溶接協会、(2011)
- 9) 西廣浩二、猪瀬幸太郎、岡田誠司、大畑和夫：レーザー溶接の実橋梁への適用研究、第 504 工区（橋本）高架橋上部工（鋼桁）新設工事（その 9）、IHI インフラ技報、第 1 巻、(2012)
- 10) 中西保正、山岡弘人、猪瀬幸太郎：NEDO プロジェクト「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発、溶接技術、Vol.60、No.11 (2012)

<略歴>

| | | |
|-------|-------|----------------------------------|
| 猪瀬幸太郎 | 1993年 | 金沢大学大学院機械システム工学修士課程修了 |
| | 2008年 | 大阪大学大学院工学研究科より博士（工学）取得 |
| | 1993年 | 石川島播磨重工業(株)（現、(株)IHI）入社 橋梁事業部配属 |
| | 2001年 | (株)IHI 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 主任研究員 |

| | | |
|------|-------|---|
| 杉野友洋 | 1992年 | 都立科学技術大学（現 首都大学東京）大学院・電子情報システム工学専攻 |
| | 1992年 | 石川島播磨重工業株式会社入社（現、(株)IHI）、技術本部・技術研究所・機械システム開発部配属 |
| | 2003年 | 九州工業大学大学院工学研究科設計生産工学専攻 博士（工学）取得 |
| | 2009年 | 技術開発本部・生産技術センター・溶接技術部 主任研究員 現在に至る |

| | | |
|------|-------|---|
| 松本直幸 | 2009年 | 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 卒業 |
| | 2009年 | (株)IHI 入社 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部配属 技術開発本部 生産技術センター 溶接技術部 応用グループ スタッフ 現在に至る |