

レーザホットワイヤすみ肉溶接の開発と都市高速橋梁への適用

Development of Laser Hot Wire Welding and Applying for Viaduct of High Way Bridge

猪瀬 幸太郎 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 主査 博士(工学)
杉野 友洋 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 主査 博士(工学)
松本 直幸 技術開発本部生産技術センター溶接技術部
大脇 桂 株式会社 IHI 検査計測 研究開発事業部生産技術部 課長
大畑 和夫 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部開発部 部長 技術士(建設部門)

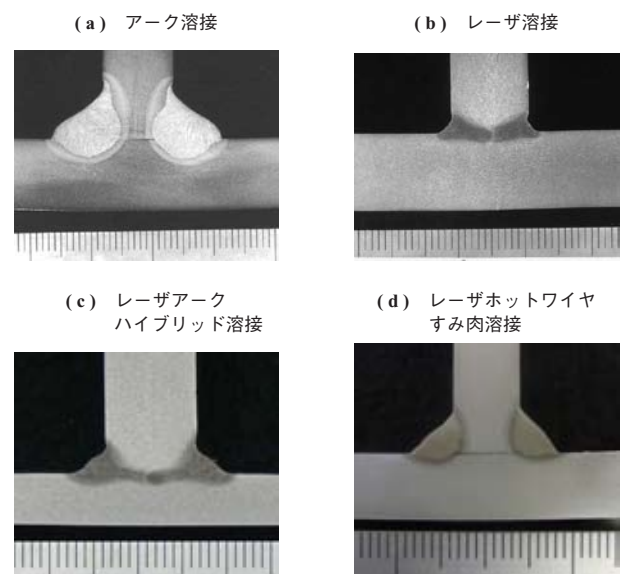
レーザホットワイヤすみ肉溶接は薄板補剛鋼構造に供する接合技術である。従来のアーク溶接よりも小変形、高速溶接であるというレーザ溶接の利点を保持しつつ、高い施工性や施工管理の簡易化を実現した。その実用化のため、継手レベル、部材レベルの各種性能試験を行い、製品の性能と安全性を確認した。さらに、都市高速道路橋の車道を支える鋼コンクリート合成床版製作に適用した事例を紹介する。

Laser hot wire welding has been developed with the intention of applying it for structures stiffened with thin steel plates. This newly developed welding process enables welding with only less distortion and at higher speed than conventional arc welding without complicated work being required, while maintaining strict quality control. In order to put the new welding method into practical use, the performance of welded joints and members has been identified in order to verify product quality. In addition, a case study is introduced in which laser hot wire welding is employed for composite slab and steel panels, which are non-redundant parts of high way viaducts.

1. 緒 言

鋼橋は、製鋼技術と接合技術の進歩とともに、橋梁としての性能を高めてきた。なかでもリベット接合からアーク溶接接合への転換は鋼橋にとっても大きな転機であり、設計の自由度、軽量化、高い水密性、など多くの利点を享受した。しかしその一方、アーク溶接は局部的な急熱急冷を伴うことから、材質および部材に与える影響も大きく、設計や施工管理においては、①溶接変形②残留応力③ぜい性破壊④疲労破壊、などへの配慮が不可欠となった。これらの技術課題に対する研究開発は今日に至るまで鋼橋発展の基盤となっている。そして現在でも、さらなる性能向上を目指した次世代技術の研究が進められている。なかにはアークに代わる新たな溶接熱源の利用もあり、レーザ溶接技術はその代表格である。

第1図にレーザ溶接技術を用いたすみ肉溶接継手のマクロ組織を示す。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、さらに近年の橋梁構造はその傾向が顕著である。そこで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て行われた。



第1図 レーザ溶接技術を用いたすみ肉溶接継手のマクロ組織
Fig.1 Macrograph of laser welded joint

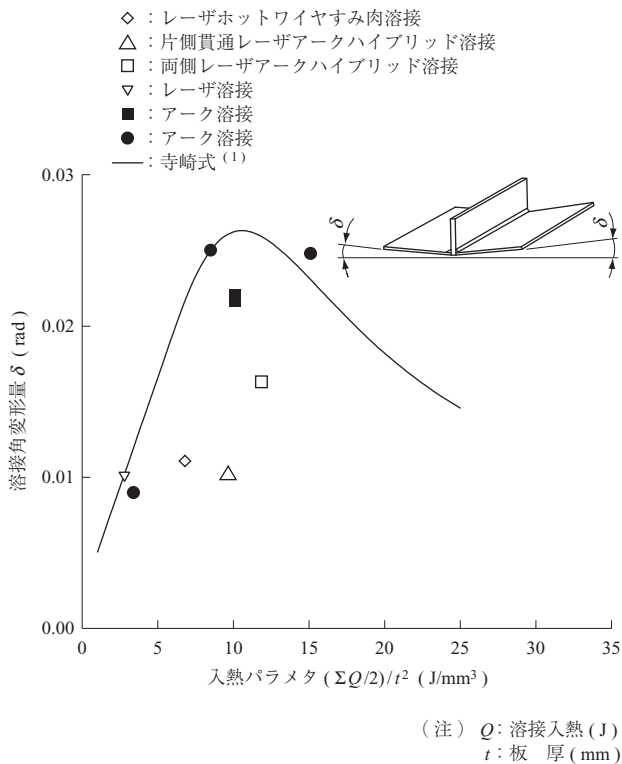
図中アーク溶接(第1図-(a))と比較するとレーザ光のみを熱源とするレーザ溶接(- (b))は溶接金属が少なく、入熱による影響を低減できる。ただし実際の施工ではレーザ溶接(第1図-(b))よりも施工性が良好な、レーザアークハイブリッド溶接(- (c))や後述するレー

ザホットワイヤすみ肉溶接 (- (d)) が用いられることが多い。

これら溶接方法の特性の一例として第2図に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ハイブリッドも含めたレーザー溶接のそれは小さいことが分かる。特に、1パス溶接（片側貫通）で接合したレーザーアークハイブリッド溶接、レーザーホットワイヤすみ肉溶接については、レーザー溶接で生じる角変形と同程度であり、注目に値する。

最初の実橋への適用はレーザーアークハイブリッド溶接を用いた⁽²⁾。前述したように溶接変形は小さく、拘束レス、歪矯正レス施工が可能になった。またパス数削減や溶接速度の向上も実現した。しかし、レーザーアークハイブリッド溶接はこれまで橋梁本体に適用された実績がない。また、アーク溶接がのど厚で強度を確保するのにに対し、レーザーアークハイブリッド継手は深い溶込みで得た継手内部の接合面によって強度を確保する。これらの理由によって精妙な検査や管理が求められた⁽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する。しかし、当面はレーザー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、そのための性能向上を図ることにした⁽⁴⁾。



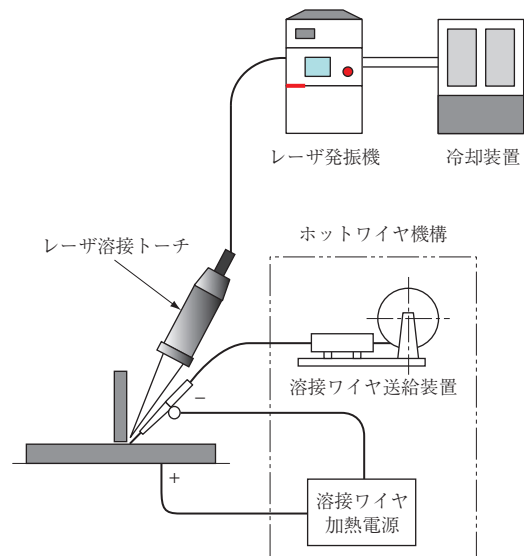
第2図 溶接角変形量
 Fig. 2 Angular welding distortion

一方、一般的なすみ肉溶接継手については、従来のアーク溶接と同じ施工管理で対応できるレーザーホットワイヤすみ肉溶接 (第1図 - (d)) を新たに開発した⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾。本稿ではこれを詳述する。

2. レーザホットワイヤすみ肉溶接の開発と継手の基本特性

新たに開発したレーザーホットワイヤすみ肉溶接プロセスの概念を第3図に示す。溶接機は、① レーザ溶接トーチ ② 溶接ワイヤ送給装置 ③ レーザ発振機（冷却装置含む）④ 溶接ワイヤ加熱電源、から構成される。高速、小変形というレーザー溶接の特長を生かし、かつ、施工性の向上と品質管理の効率化を実現するため、スポット径（焦点におけるレーザー光の直径）を通常レーザー溶接（φ0.2～φ0.8 mm）よりも大きなサイズを採用した（φ5～φ7 mm）。したがって、レーザー発振機には大きなスポット径に適した半導体レーザーを用いている。スポット径拡大に伴う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う（ホットワイヤ技術）。

溶接現象はキーホール形溶接ではなく、熱伝導形溶接であり、溶接金属はアーク溶接継手と同じようにのど厚が形成される。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ことができる。さらに実施工のための溶接機も開発した。高速（0.8～1.5 m/min）、拘束ジグレス、矯正作業レス溶接施工を実現した。

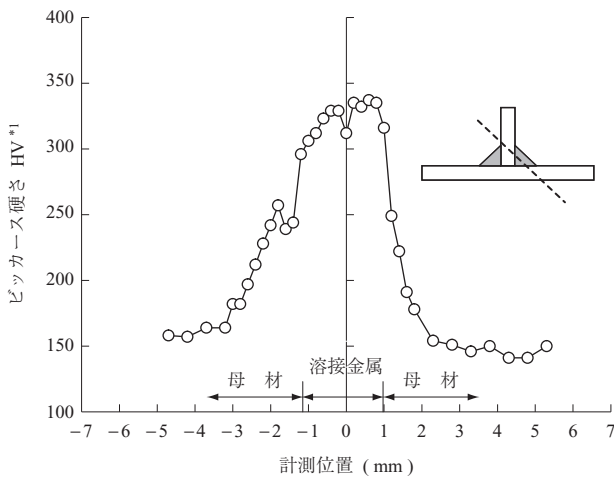


第3図 レーザホットワイヤすみ肉溶接プロセスの概念
 Fig. 3 Schematic of laser hot wire welding

レーザホットワイヤ技術を用いたすみ肉溶接（以下、レーザホットワイヤすみ肉溶接）の主な適用対象が薄肉補剛構造であることから、ねらい脚長は4 mmと比較的小さい場合もある。このような施工においても本溶接方法は一様かつ良好なビードを容易に得ることができる。

第4図に溶接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（キーホール形溶接）と同じである。ここでは硬さの管理目標値をCO₂レーザ溶接継手の場合を参考に380 HV以下と定めた。もともとレーザホットワイヤすみ肉溶接継手を対象とした数値ではないため、単純な援用には検討の余地があるが、本継手はこれを満たしていた。

第5図に溶接金属のミクロ組織の観察結果の例を示す。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。すみ肉継手性能を損なう金属組織ではな



(注) *1: 荷重 1.96 N

第4図 溶接継手の硬さ分布
Fig. 4 Hardness distribution of the joint



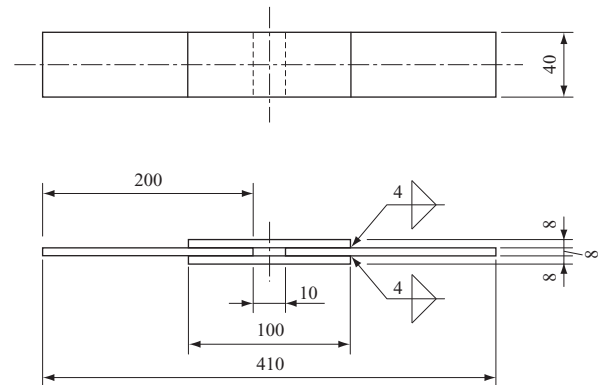
第5図 溶接金属ミクロ組織
Fig. 5 Welded metal microstructure

いと判断できる。シールドガスにはアルゴンガスを用いている。流量は溶接金属中のO₂、N₂が管理目標値であるO₂ ≤ 100 ppm、N₂ ≤ 50 ppmを満たすのに必要な5 l/minとした。

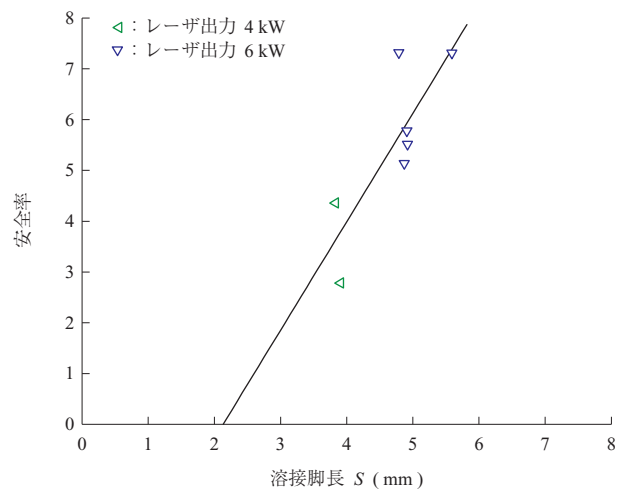
こうして製作した継手がすみ肉溶接継手として機能することの確認も行っている。第6図に引張試験片寸法を示す。試験片寸法はJIS Z 3131を援用した。第7図に試験で得た破断荷重を設計耐力で無次元化して示す。溶接熱量が増加するに従い脚長は大きく、強度も向上する。

3. レーザホットワイヤすみ肉溶接の橋梁車道部材への適用

構造物は想定される荷重に対し安全が確保されていること、供用期間中に有害な振動や変形を起こさないことが必須となる。そのためには耐荷力（圧縮、引張り）、剛性、疲労強度といった継手や部材の性能要素が構造物の使用目的に整合していることが不可欠となる⁽⁷⁾。レーザホット



第6図 引張試験片寸法 (単位: mm)
Fig. 6 Geometric size of tensile test piece (unit: mm)



第7図 引張試験結果
Fig. 7 Result of tensile testing of welded joint

ワイヤすみ肉溶接の実橋適用においてもこれに留意した。

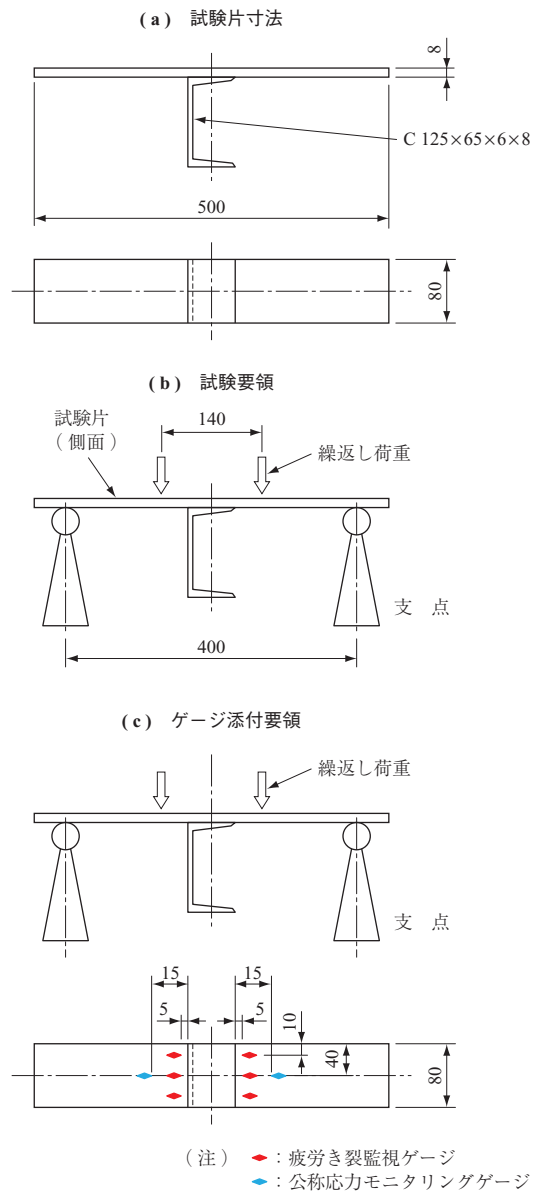
レーザホットワイヤすみ肉溶接の適用対象として第8図に示す合成床版および鋼パネル部材のすみ肉溶接（荷重非伝達形）を検討した⁽⁸⁾。

床版とは、橋梁の路面を直接支える部材であり、その形式として鋼とコンクリートの複合構造である合成床版がある。繰返し荷重である車両を直接支える部材であることから、耐久性が特に重視される。よって本部材では、継手レベルおよび部材レベルの疲労試験を特に重視した。

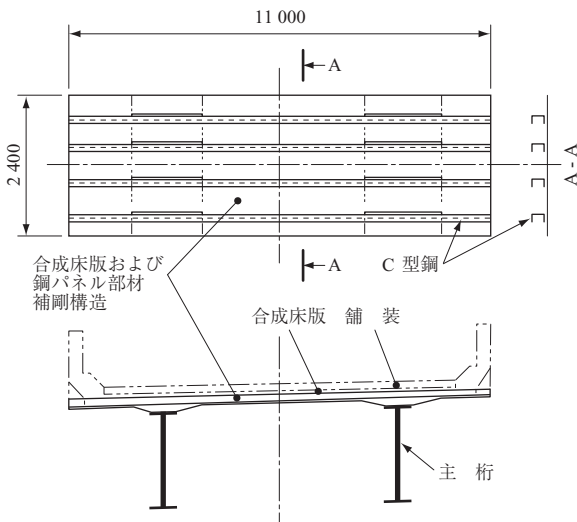
第9図に疲労試験片寸法と試験要領を示す。試験片（第9図-(a)）は適用部位であるスキンプレートと型鋼との接合を模擬した構造とし、止端割れを評価した。荷重方法は4点曲げであり、溶接ビード止端から5mmの位置に貼り付けたひずみゲージによって疲労き裂の発生を監視した。

疲労試験結果を第10図に示す。今回実施した継手試験すべてにおいてJSSC（社団法人日本鋼構造協会）疲労強度E等級を満たしていた⁽⁹⁾。

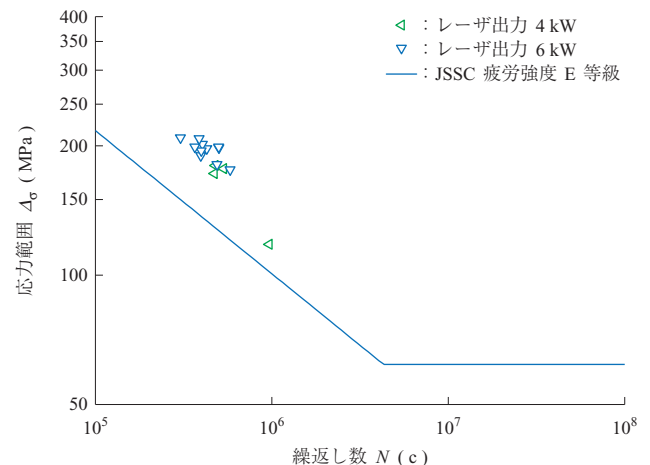
部材レベルの疲労試験としては、第11図に示す耐久試験（輪荷重載荷試験）を実施した。これは車両荷重を模擬した試験であり、段階的に荷重を増加しつつ52万回の移動荷重を載荷する。耐久試験（輪荷重載荷試験）状況を第12図に示す。試験後は鋼部材とその継手の変状の有無を入念に検査し、損傷が生じていないことを確認した。製作した鋼製パネルは福岡高速5号線の高架橋に供しており、すでに供用が始まっている⁽⁸⁾。



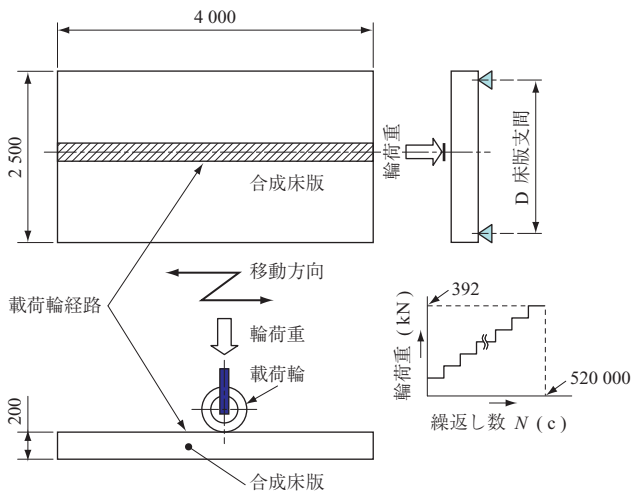
第9図 疲労試験片寸法と試験要領（単位：mm）
Fig. 9 Geometric size of fatigue test piece and test method (unit : mm)



第8図 合成床版および鋼パネル部材（単位：mm）
Fig. 8 Composite slab and steel panel (unit : mm)



第10図 疲労試験結果
Fig. 10 Result of fatigue testing of welded joint



第 11 図 耐久試験（輪荷重載荷試験）要領（単位：mm）
Fig. 11 Concept and procedure of endurance test (unit: mm)

4. 結 言

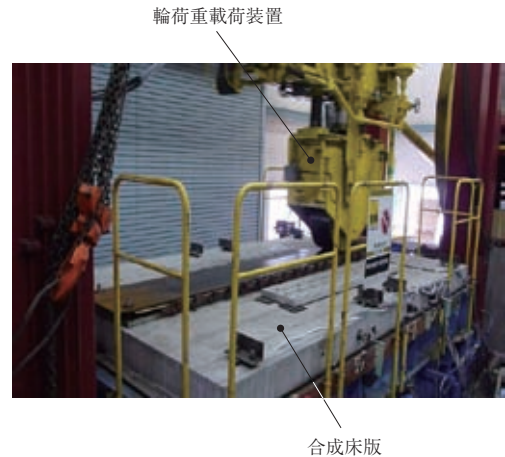
本稿ではレーザーホットワイヤすみ肉溶接の開発、性能確認、実機適用について報告した。ただし、レーザー溶接には用いるビームの性状、併用する熱源の有無や種類によって幾つかの種類が存在し、それらの継手性状や特性にも違いがある。レーザー溶接継手への期待効果は、構造物の目的や継手の役割によってさまざまである。このため、適用する継手にとって最適なレーザー溶接技術を適材適所に採用する必要がある。引き続き性能改善を図り、本レーザーホットワイヤすみ肉溶接の普及に取り組んでいく。

— 謝 辞 —

レーザーホットワイヤすみ肉溶接の実機適用に当たり、福岡北九州高速道路公社の関係各位から、多くのご指導とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 寺崎俊夫：溶接変形の支配因子と定量化 溶接学会誌 第 72 巻第 4 号 2003 年 pp. 234 - 237
- (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 回年次講演会講演概要集 2008 年 9 月 pp. 815 - 816



第 12 図 耐久試験（輪荷重載荷試験）状況
Fig. 12 Overview of endurance test

- (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・接合技術力を活かす製品開発・設計力 溶接接合工学会 2010 年 pp. 43 - 56
- (4) たとえば、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 年 8 月 pp. 214 - 215
- (5) 大脇 桂, 猪瀬幸太郎, 杉野友洋, 松本直幸, 山本元道, 篠崎賢二：半導体レーザーを用いたホットワイヤ隅肉溶接プロセスの開発 溶接学会全国大会講演概要 第 86 集 2010 年 3 月 pp. 182 - 183
- (6) 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ホットワイヤ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 年
- (7) K. Inose, Y. Nakanishi and I. Imoto : Study on Design for Extra High Strength Steels Structure Welding in the World Vol. 47 No. 3/4 (2003)
- (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 日本溶接協会 2011 年
- (9) 社団法人日本鋼構造協会：構造物の疲労設計指針・同解説 技報堂出版 1993 年