

## 論文・報告

# エレクトロスラグ溶接部の性能改善を目的 とした新工法の提案

## ～ノズル回転法エレクトロスラグ溶接の検討～

The suggestion of the New Electroslag Welding method that makes performance improvement of weld joint (An experiment of a rotary nozzle electroslag weld method)

藤田 敏明 \*<sup>1</sup>  
Toshiaki FUJITA

湯田 誠 \*<sup>2</sup>  
Makoto YUDA

鉄骨ボックス柱の製作などで採用されているエレクトロスラグ溶接法（ESW）は、大入熱を用いる点を特徴とし高エネルギー溶接法として定評があるが大入熱溶接部での脆性的破壊を防止する観点から、溶接金属部に対し近年、高い性能が要求されている。より安定的に性能を確保するために、1つには組み合わせ鋼材の高靱化や高性能溶接材料の開発、採用が進められてきた。これらの方策は、性能確保の上で1つのメニューにはなり得たが、改善工法など溶接法としての新たな取り組みは積極的には行われてこなかった。本報告では、ノズル回転法エレクトロスラグ溶接を提案し検討した結果を紹介する。従来法より劇的に低入熱化を可能とする本法は、過去に類のない発想であり施工法の観点から性能向上策を提案できる新工法として期待される。

キーワード：エレクトロスラグ溶接 大入熱溶接 性能確保 低入熱化 ノズル回転法

## はじめに

阪神淡路大震災以降、建築鉄骨に必要な性能の考え方が議論され、地震時の脆性的破壊に対する溶接継ぎ手のあり方が問われてきた。エレクトロスラグ溶接法（ESW）の溶接金属部も例外ではなく、近年、保有耐力をとらえた各種実験が行われている<sup>1) 2)</sup>。これらの報告によれば、ESW部の破壊性状は、近年のコンクリート充填柱（CFT柱）にみる仕口部のディテール、柱を構成するスキンプレート（スキン）とダイアフラム（ダイア）の組み合わせ板厚、溶け込み形状等さまざまなパラメータが複雑に影響し、柱に大きな引張力が作用した場合には、破断耐力確保のために高いシャルピー吸収エネルギー（例えば $\geq 40\text{J}$ ）が必要であるとされている。

一方、ESWは、ボックス柱のライン化生産に導入された当初より高エネルギー溶接法として認識が高く、国内外にて多くの実績を持つ溶接工法であるが、特有の大入熱施工であり溶接金属部の性能低下が常に懸念されている。

破断耐力確保のため、より安定的に性能を確保可能な方策として、組み合わせ材料（鋼材、溶接材料）の高靱

性化とともに、新しい施工法の開発が望まれている。

## 1. ESW部特有の問題点と課題

写真1にESW部の脆性的な破壊例を示す<sup>2)</sup>。この破壊は、裏当て金スリット先端部を起点に溶着金属部もしくはスキン側の熱影響部に進展した事象であるが、ESW継ぎ手部の破壊性状として認識されている。このためESW継ぎ手部の性能評価（シャルピー試験片採取位置）は、スキン側の熱影響部を中心とした確認が多くのプロジェクトにて実施されている。

このような中、CFT柱のようにスキン、ダイアの板厚比（ $S/D$ ）が1.0未満の場合、組み合わせ板厚と入熱量によって、おのずとスキン側中央偏析に近い範囲にまで溶け込みが広がり、重ねて蓄熱の程度も大きくなる結果、継ぎ手評価位置での性能低下が特に懸念されている。また、組み合わせ板厚によって蓄熱や希釈の程度に違いを生じることから、機械的性能は、入熱に応じ整理できないケースが散見されている<sup>3)</sup>。

\*1 川田工業株式会社 生産技術研究室 係長

\*2 川田工業株式会社 生産技術研究室 室長

以上のことから、溶接金属部の性能を安定的に確保し、継ぎ手の破壊性能を向上させるためには、常識化されてきた既存の大入熱施工に替わる方法、すなわち入熱のコントロールを可能とする方法の新たな模索、提案が必要となっている。

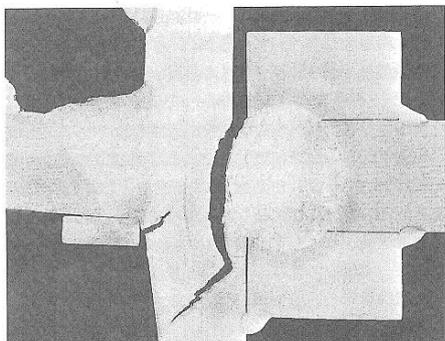


写真1 ESW部の破壊例<sup>2)</sup>

## 2. 性能改善のための新工法の提案

### (1) 開発目標

新たな ESW 工法の検討にあたり、開発の目標を次のように掲げた (図1)。

- ① これまでになく低入熱化を図り、溶け込みは必要最小限とすること
- ② 左右裏当て金への溶け込みを維持すること
- ③ 組み合わせ板厚にかかわらずスキン側の過大な溶け込みを避けること
- ④ 上記①～③を可能とし、高温割れなど著しい欠陥を誘発しないこと

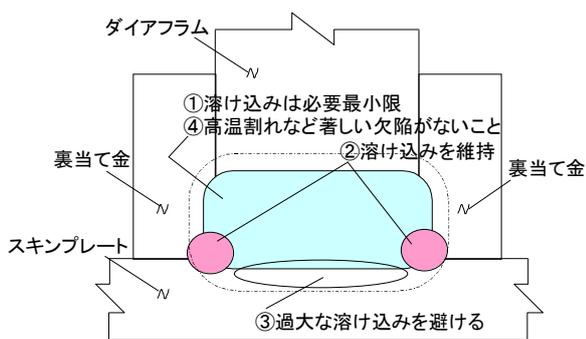


図1 開発目標とした溶け込み形状

### (2) 低入熱化を可能とするパラメータ

低入熱化に寄与するパラメータとしては、低電流値の採用、低電圧値の採用、溶接の高速化などが考えられるが、ここでは、ESW の特徴を捉え、電流値と電圧値は現行 ESW とほぼ同値とし、溶接速度のみを向上させることに着目した。

溶接速度のみを向上させる場合には、開先断面積の低減、ワイヤ送給速度の高速化が有効である。開先断面積は、施工可能な範囲でルートギャップを低減させ、元々の開先断面積を小さくするものとした。また、ワイヤ送

給速度は、施工性の確保を前提に高速化を試みるものとした。これらについては、事前検討を行い、施工性および溶接速度の向上効果を確認している。

### (3) 溶け込み形状の制御方法

ダイアとスキンならびに裏当て金で構成される I 形開先の中央部は、ダイア厚に応じたノズル揺動軌跡の中央に一致し、軌跡線の両側からの投入熱が重複すること、また、スキン板厚方向における熱の近距離反射により蓄熱しやすい部位といえる。一方、開先両端部は、スキンや裏当て金、ダイア部への熱伝達により熱拡散、放散が生じやすく、加えて、投入熱の重複がないため中央部に比べ蓄熱しにくい部位となる。このため、従来法の ESW の母材溶融は、開先中央部が最も大きく、両端部の溶け込みが得られにくく、熱的な特性として溶け込み形状は楕円形または円形となりやすい。

目標とする ESW とは、スキン側への過度な溶け込みを避け、かつ左右裏当て金への溶け込みを確実に確保する低入熱工法である。ESW の熱的特性を踏まえ、部位ごとに、求める溶け込み形状を得るための入熱投入方法を考える必要がある。すなわち、単調な左右揺動のみが行われる従来法に加え、

- ① 溶け込みが必要な部位にのみ入熱投入を可能とするようノズル揺動の軌跡に変化を持たせる
- ② ワイヤ先端のスラグ浴への挿入方向に応じスラグの対流効果が得られる点を利用する

等を効果的な方法として具体化できるかがキーポイントとなる。

### (4) 新工法の提案

前項までに述べた開発の要点をふまえ新たに考案した ESW 工法の概念を図2に示す。この工法とは、ノズル先端部を屈曲させノズル芯よりワイヤ先端位置を偏心させ、左右の揺動と同時にノズルを回転させる方法であり、入熱投入を行うワイヤ先端部に円弧状の軌跡をもたせるものである。この円弧状の軌跡は、従来法に比べて開先両端部へワイヤ先端部を近接でき、かつ、スキン側に対しては遠ざけることができるため、必要な部位に必要な入熱投入を行う上で有効と考えられる。このことで理想とする溶け込み形状を安定的に確保する工法として、簡便で、現実性の高い提案の1つと考えられる。

この概念をもとに試作した溶接装置を写真2に示す。装置は、現行 SESNET 溶接機 (日鐵住金溶接工業製) を利用して自作した。ノズル昇降部上に旋回部を新たに設け、従来のノズル左右揺動、自動上昇機能はそのままに、旋回部のハンドル操作にてノズルを回転させる機構となっている。

この新工法を用い、いくつかの適用性の検討を実施した結果を次に報告する。

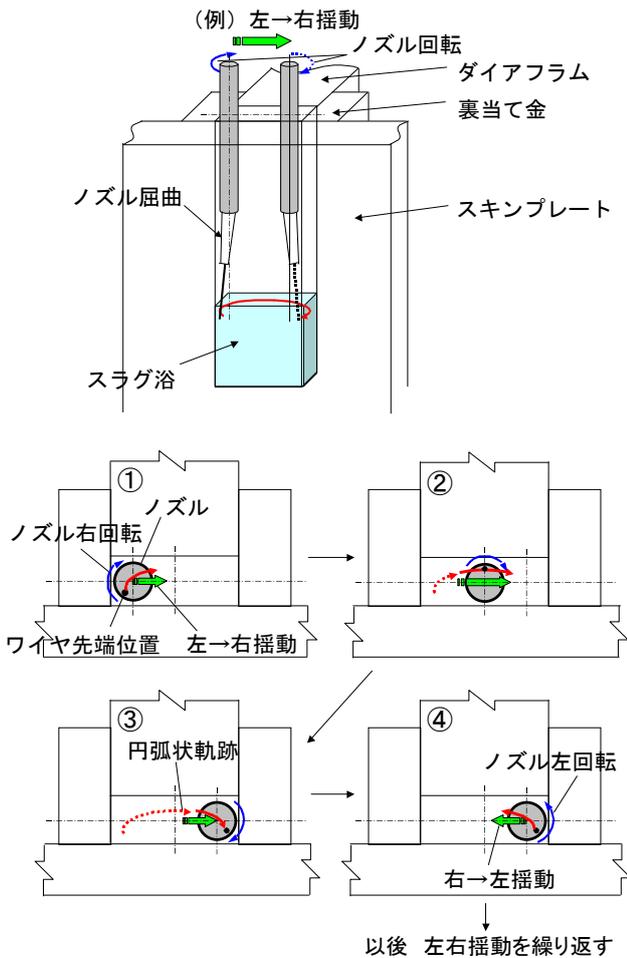


図2 新工法の概念

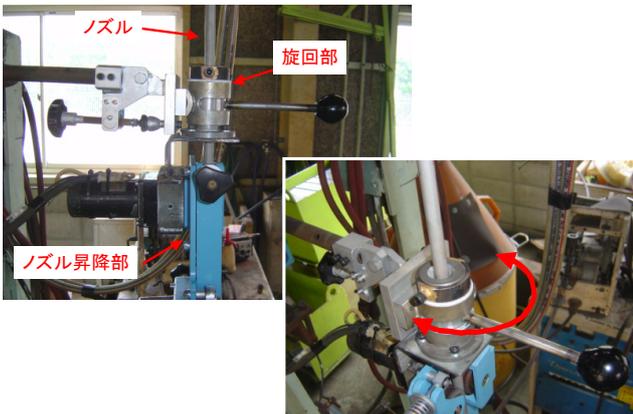


写真2 試作溶接装置

### 3. 適用性試験

試験は、前述の自作機を用い新工法の効果を確認するために、従来法、さらには従来法を低入熱施工した3種類の工法について試験体を製作し、マクロ試験による溶け込み形状の比較、スキン側熱影響部を中心としたミクロ組織の比較を行った。試験体の形状を図3に、組み合わせ板厚と各工法の施工条件を表1に示す。試験体は、懸案のダイア厚に対し薄いスキン厚の組み合わせ (S/D

≦1.0) とした。なお新工法および従来法の低入熱施工は、2項(2)に示す取り組みの結果として従来法の約40%ダウンの入熱条件を採用した。ノズル回転操作については、ノズルの左右揺動に同期させるようにノズルを回転させ、両端停止時にワイヤ先端部が左右の裏当て金とスキンの接触面を狙うようノズルを旋回させるものとした。

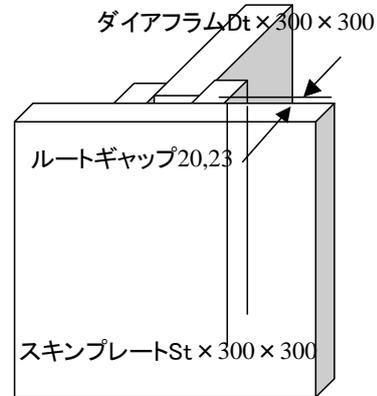


図3 試験体形状

表1 組み合わせ板厚および施工条件

施工法	組み合わせ板厚			施工条件			入熱量 kJ/cm
	スキン 板厚 (St)mm	ダイア 板厚 (Dt)mm	S/D比	ルート ギャップ mm	ワイヤ 送給量 M/min	揺動 方法	
従来法	25	40	0.63	23	8.5	左右	560
	32	50	0.64				750
	50	60	0.83				950
低入熱 施工	25	40	0.63	20	12	左右	350
	32	50	0.64				420
	40	60	0.67				510
新工法	25	40	0.63	20	12	左右 + 回転	340
	32	50	0.64				430
	40	60	0.67				530

板厚40mm以下: SN490C

板厚40mm超え: BH-HT325C

### 4. 試験結果

#### (1) マクロ断面による溶け込み形状の比較

マクロ試験結果を写真3に示す。

新工法または低入熱施工のマクロ断面は従来法と大きく異なり、低入熱化条件の効果によって溶着断面積は小さく、母材部の溶融が抑制されていることが確認できた。一方、溶け込み形状は、従来法あるいは低入熱施工ともに楕円形または円形であったのに対し、新工法は、これ

まで認識のない「勾玉（まがたま）」にも似た形状となっていた。特に、ダイア板厚が厚くなるほどこの傾向が顕著となっていた。ボックス柱の製作において要求されるスキンと裏当て金との接触面の溶け込みについては、低入熱施工は溶け込み幅が確保されにくい傾向であったのに対し、新工法は、低入熱条件を採用しているにもかかわらず従来法と同等の溶け込み幅が得られていた。また、今回の組み合わせ板厚に対し ESW 特有の溶け込みの広がりやすさが懸念されるスキン側は、従来法ならびに低入熱施工ともに大きく広がる点では同傾向となったが、新工法では溶け込みが抑制され、あわせて熱影響部の広がりもかなり小さくなっていることが確認できた。

これらの点から新工法は、入熱投入位置と入熱投入量のコントロールを可能とし、目標とした溶け込み形状に再現可能な工法であると期待される。

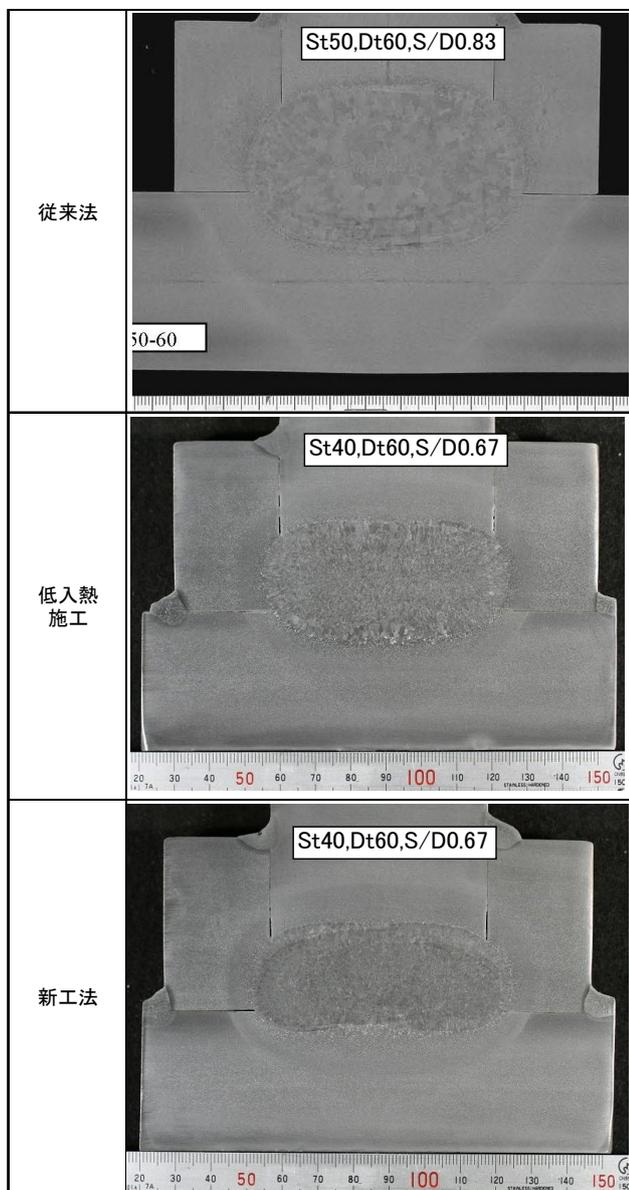


写真3 断面マクロ

## (2) ミクロ組織の比較

従来法と新工法についてのミクロ組織 ( $St=32, Dt=50$ ) を写真4に示す。観察位置は、ダイア板厚中心線上におけるスキン側の融合部 (FL部) を挟む溶着金属部と母材熱影響部とした。また、写真5には、溶着金属部からスキン側熱影響部に渡る詳細なミクロ組織写真(50倍)を示す。溶着金属部の組織については、結晶粒の粗大化、組織に占める粒界フェライト量の増加がシャルピー吸収エネルギーを低下させるなど、継ぎ手性能に影響を与えることが知られており、高性能化、性能安定化は、これらを抑制した組織とすることが必要となる<sup>4)</sup>。

従来法と新工法のミクロ組織の比較から、新工法は、FL部近傍の結晶粒の粗大化が抑制されているのが観察される。また、溶着金属部、FL部、熱影響部ともに粒界フェライト量は新工法の方が少なく、良好な組織であることが観察される。

新工法は、必要な溶け込みを維持しながら低入熱化を可能とする工法で、従来法よりも良好な組織に改善する効果があり、継ぎ手性能の向上が期待される。

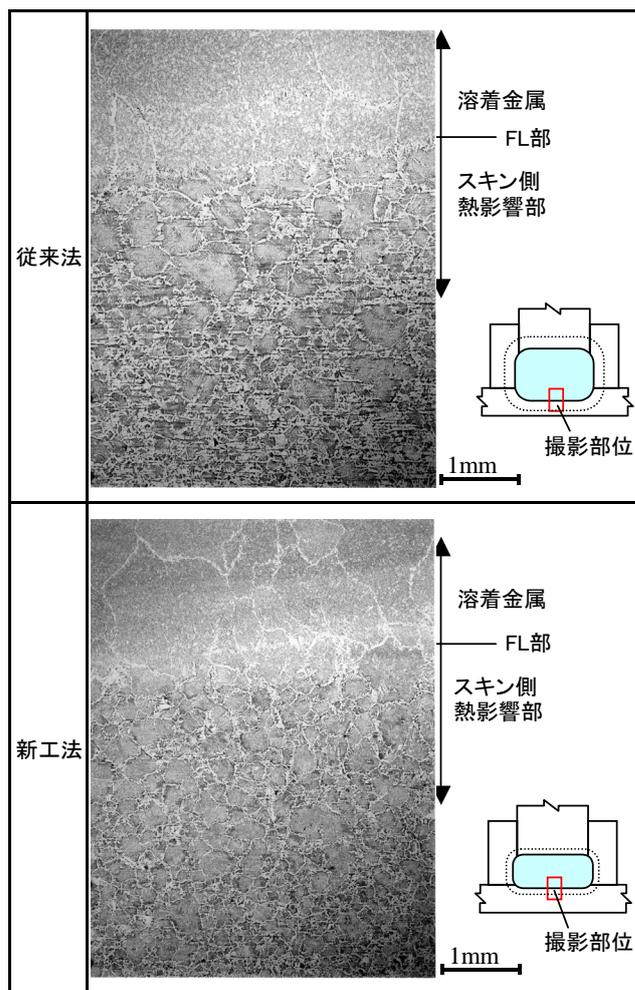


写真4 ミクロ組織 (FL部)

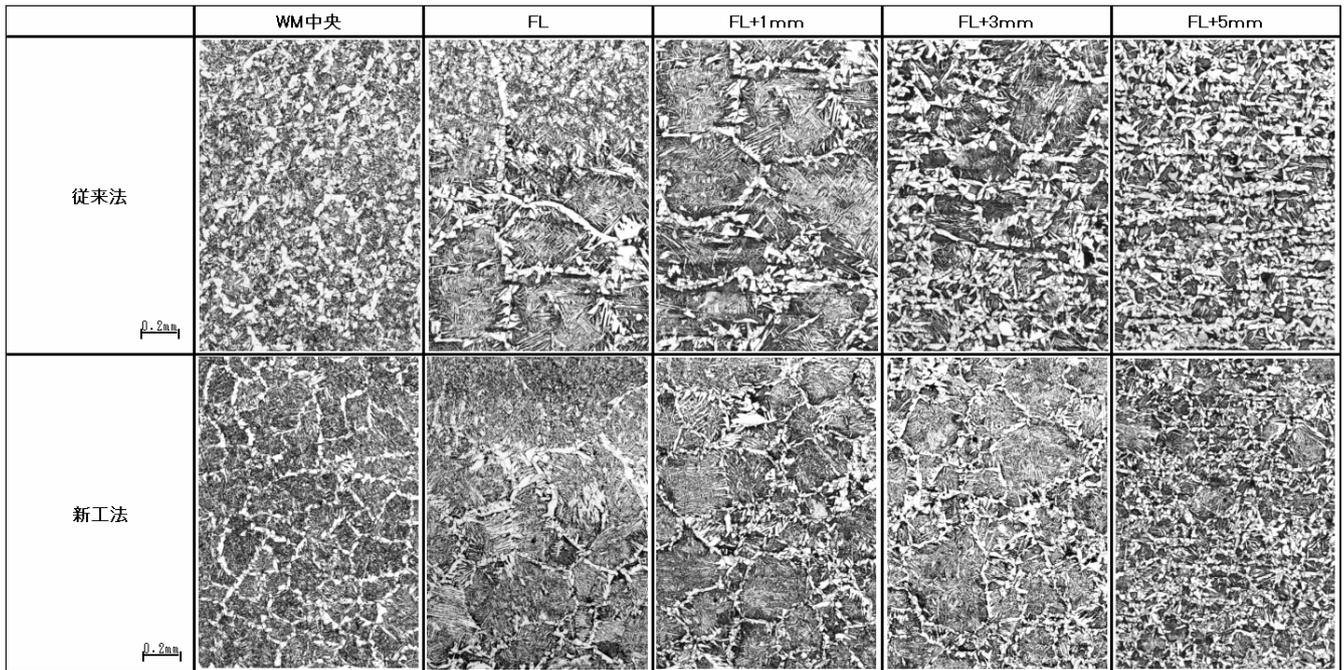


写真5 ミクロ組織（溶接金属部）

## 5. ノズル回転法エレクトロスラグ溶接

提案した新工法は、過去に類のない低入熱化条件を選択可能とし、より安定的に性能を得るための新しいESW工法と言える。

この新工法については、現在、特許出願中であり、ノズル回転法エレクトロスラグ溶接として試作機が完了している。この溶接装置を写真6に示す。本装置には従来のSESNET溶接機にはない機構として、ノズル旋回装置が搭載され、回転速度、回転角度など新たなパラメータが調整可能となっている。

実用化に向けた更なる調査、検討によって、新たな知見、成果が得られることを期待している。



写真6 ノズル回転法エレクトロスラグ溶接機

## 6. あとがき

新たなESW工法としてノズル回転法エレクトロスラグ溶接を提案した。ノズル回転法は、目標とした溶け込み形状を再現でき、低入熱化によって組織改善にも効果があることを確認した。

今後は、提案工法の実用化に向け、有識者あるいは関係者のご意見等を参考に完成度を高めたい。

### 参考文献

- 1) 秋山, 山田, 松本, 竹内, 杉本: 鋼構造柱梁改良接合部の終局耐震性に関する実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, No.551, pp.141-148, 2002.2.
- 2) 下川, 松下, 石井, 鈴木, 田淵, 中込, 森田, 岡本: エレクトロスラグ溶接部の破壊性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.565-566, 2006.9.
- 3) 市川, 大北, 池辺: エレクトロスラグ溶接部の靱性におよぼすスキンプレートおよびダイアフラム板厚の影響, 溶接学会全国大会講演概要, 第71集, pp.220-221, 2002.10.
- 4) 例えば 百合岡, 大北: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版, pp.110-128, 1998.11.