
溶接研究 10 年の歩み

Recent Activities in Research of Welding

安田 功一(Koichi Yasuda)

要旨：

溶接における最近 10 年間の技術動向と研究活動の概要を，社会環境や市場ニーズの変化を含めて紹介した。溶接材料の分野では高能率，高品質を目的に，低スパッタ CO₂ アーク溶接用ソリッドワイヤや極厚鋼板の高能率大入熱 1 パスサブマージアーク溶接方法，耐ピット性に優れたプライマー鋼板用フラックスコアードワイヤなどを開発した。鉄鋼材料の溶接性に関する技術分野では，薄鋼板の表面処理化，厚鋼板の高強度化に対応した溶接技術を開発した。

Synopsis：

The trends of the welding technologies and research developments in recent 10 years are outlined by including changes in social conditions and requirements of the market. Welding materials and a process were developed for high efficiency and high quality welding, e.g., a low spattering solid wire for CO₂ arc welding, a high efficiency one pass submerged arc welding process using super-high heat input for heavy section steel plates, and a flux cored wire with excellent pitting resistance for primer coated steel plates. In viewpoint of the weldability of steel materials, new welding technologies were established for surface coated steel sheets and high tensile strength steel plates.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Recent Activities in Research of Welding



安田 功一
Koichi Yasuda
技術研究所 溶接・鉄
粉研究部門 主任研究
員(課長)

要旨

溶接における最近 10 年間の技術動向と研究活動の概要を、社会環境や市場ニーズの変化を含めて紹介した。溶接材料の分野では高能率、高品質を目的に、低スパッタ CO₂ アーク溶接用ソリッドワイヤや極厚鋼板の高能率大入熱 1 パスサブマージアーク溶接方法、耐ピット性に優れたプライマー鋼板用フラックスコアードワイヤなどを開発した。鉄鋼材料の溶接性に関する技術分野では、薄鋼板の表面処理化、厚鋼板の高強度化に対応した溶接技術を開発した。

Synopsis:

The trends of the welding technologies and research developments in recent 10 years are outlined by including changes in social conditions and requirements of the market. Welding materials and a process were developed for high efficiency and high quality welding, e.g., a low spattering solid wire for CO₂ arc welding, a high efficiency one pass submerged arc welding process using super-high heat input for heavy section steel plates, and a flux cored wire with excellent pitting resistance for primer coated steel plates. In viewpoint of the weldability of steel materials, new welding technologies were established for surface coated steel sheets and high tensile strength steel plates.

1 はじめに

溶接、接合技術は鉄鋼材料を利用したあらゆる産業において重要な役割を果たし、社会環境や市場ニーズの変化に応じ進化してきた。

日本経済にとってこの 10 年は激動期であり、地価の高騰に支えられた平成いざなぎ景気とそのバブル経済崩壊による長期にわたる不景気時代の両局面を経験した。このことは日本の基盤産業である鉄鋼産業やその加工技術分野である溶接技術分野にとっても大きな環境の変化であった。21 世紀に向けて、この激動期を振り返り、今後の溶接研究の進むべき方向を考えてみることも必要であろう。本稿では溶接に関わる主な技術分野における最近 10 年間の当社の研究の歩みをまとめた。

2 各技術分野における研究活動

2.1 溶接材料

我が国の溶接材料の出荷量推移¹⁾を Fig. 1 に示す。1987 の円高不況時に 30 万 t/y を割り込んだ総出荷量もその後の平成景気に支えられ、1991 年には約 42 万 t/y の出荷量を記録した。しかし、バブル経済の崩壊後は一変して減産に転じ、1995 年以降は 35 万 t/y 程

度の出荷量を維持しているものの、今後はさらに厳しい状況が予想されている。品種別にこの推移を分析すると、ソリッドワイヤ (GMAW) はこの 10 年の前半で急速に大きな市場を形成した品種であることが分かる。その背景にはソリッドワイヤを用いたガスシールドアーク溶接が省人化、脱技能化を目的とした自動化、ロボット化に最も適した溶接方法であったことが挙げられる。最近ではソリッドワイヤは溶材総出荷量の 40% を占めて安定した推移を示して

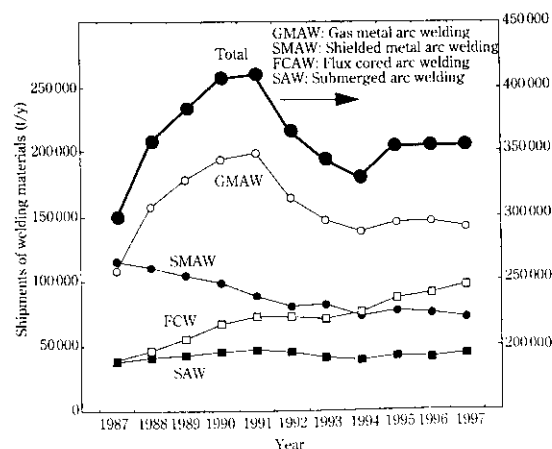


Fig. 1 Shipping trends of welding materials in Japan, including export

* 平成10年10月7日原稿受付

Fig. 2 Example of displacement between bridges on the traffic service

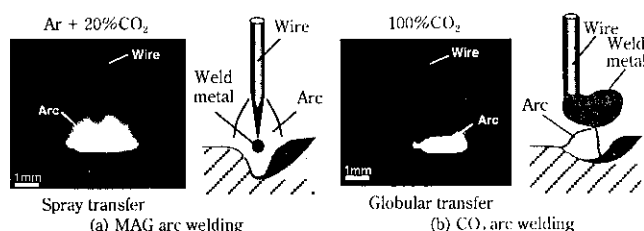
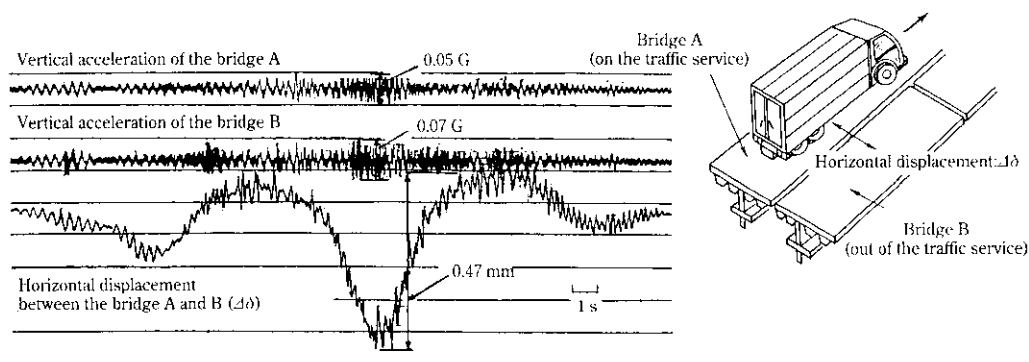


Photo 1 Comparison in the metal droplet transfers between MAG (Ar + CO₂) and CO₂ arc weldings

いる。一方、被覆アーク溶接棒 (SMAW) は減少の一途を辿っており、これに替わってフラックス入りワイヤ (FCW) の伸びが著しく、今後もこの傾向は続くものと予想される。サブマージアーク溶接用ワイヤおよびフラックスの出荷量は最も少ないが、この 15 年間ほぼ一定の量で安定して推移している。

このような状況下で、溶接材料も社会的ニーズに応えるため『高能率、高品質』をキーワードとした研究開発が積極的に進められた。その象徴的な事例として、変動応力下での耐高温割れ性に優れた被覆アーク溶接棒の開発が挙げられる。これは既設の一般橋梁や道路高架橋などを交通規制することなく供用下で補修、補強溶接するための被覆アーク溶接棒である。Fig. 2⁹⁾に道路高架橋の供用中補修過程における床板間の相対変位と変位速度の測定例を示すが、これを溶接する場合には、通過する車両によって溶接による溶融池にも同様の変動歪が作用して高温割れが発生する。このような高温割れを抑制するために、溶接金属の C、Si および P や S などの不純物元素を低減し、耐高温割れ性に優れた被覆アーク溶接棒 (KS-1000) が開発された。また、本被覆アーク溶接棒は波動によって同様の変動歪が作用する超大型浮体構造物の洋上接合分野にも応用可能であり、その適用性についても積極的な調査が行われた⁹⁾。

ガスメタルアーク溶接による自動化、ロボット化においては、溶接スパッタの発生量が多い場合、ガスシールドノズルに付着したスパッタによってガスシールドが阻害され、溶接品質が損なわれる。このような自動化における不具合に対応するため、ワイヤの安定した送給性も含めて溶接時の低スパッタ化技術の開発が積極的に進められた。Photo 1 は従来ワイヤを用いた MAG 溶接 (Ar + CO₂) と CO₂ アーク溶接における溶接スパッタの発生状況を示したものである。MAG 溶接の場合にはアークはワイヤから発生し、下向きのアーク力とプラズマ気流によってワイヤ端の溶滴はほぼ連続して小粒で移行する (spray 移行)。しかしながら CO₂ アーク溶接の場合には、CO₂ ガスが吸熱解離してアークを冷却緊縮させるためアークの電位傾度が大きくなり、アークはワイヤに懸架した溶滴の下部の局部に集中して発生する。そのため、溶滴は上向きのアーク力によ

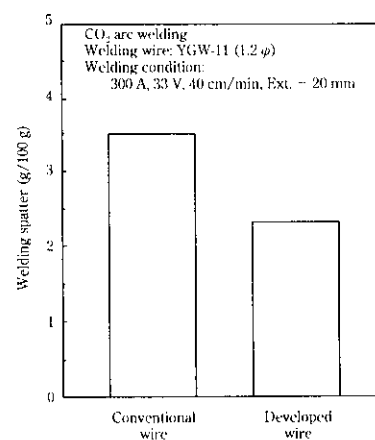


Fig. 3 Comparison in the amount of the welding spatter in CO₂ arc welding between the conventional and newly developed wires

て持ち上げられ、大粒溶滴となって溶融池に移行する (globular 移行)。その際に大粒溶滴はアーク力によってそのままスパッタとして飛散したり、またアーク長が短縮しているため溶滴が溶融池に短絡接触し、再アーク時の急激な温度上昇による爆発によって溶滴などが飛散するため、CO₂ アーク溶接時の溶接スパッタ発生量は MAG 溶接の場合に比べて著しく多い。

したがって、CO₂ アーク溶接における溶接スパッタ発生量を低減するには、アーク緊縮による電位傾度の増大を抑制することが開発のポイントとなる。したがって、ワイヤに電離エネルギーの低い元素を添加することによって CO₂ の熱解離による電位傾度の上昇を緩和し、アークの局部集中も軽減することができる。このような考えに基づいて、低スパッタ化を実現した CO₂ アーク溶接用ソリッドワイヤ (KC-50-DH) が開発された。Fig. 3 に開発ワイヤの溶接スパッタ発生量を従来ワイヤと比較して示す。

また、MAG 溶接においてもさらなる高品質化を目的とした低スパッタ化のニーズに対応して、パルス MAG 溶接時の低スパッタワイヤが開発された。すなわち、溶滴の粘性を調整してパルス印加時に溶滴がワイヤから安定的に離脱する最適形状となる溶接ワイヤ (KM-50S) が開発された。

フラックスコアードワイヤ (FCW) を大きく分類すると最も一般的で全姿勢が可能なスラグ系 FCW、耐ヒット性に優れたプライマー鋼板用 FCW、低ヒュームで高溶着性に優れたメタル系 FCW に分類でき、またフラックスを包含する鋼製の外皮の形状によってシームレスタイプ、巻締めラップドタイプ、巻締めアパッチングタイプに分類されるが、当社では巻締めアパッチングタイプによる

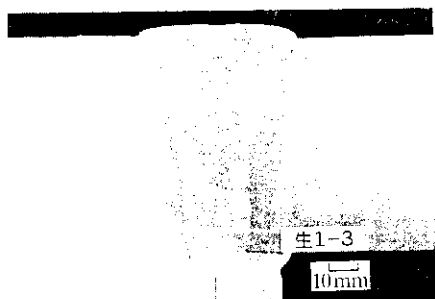


Photo 2 Cross sectional macrostructure of the 3-electrodes, 1 pass submerged arc welding for heavy section plate of 80 mm in thickness

FCW の開発を進めた。FCW の開発ではソリッドワイヤと同様に安定なワイヤの送給性が重要なポイントとなるため、伸線潤滑剤の最適化、伸線潤滑剤の洗浄、防錆潤滑油量の最適化などワイヤの表面性状や潤滑性に関わる研究が積極的に行われ、良好な溶接作業性はもちろん、ワイヤ送給性に優れた FCW が開発された。最近では溶接環境問題を重視し、さらなる低ヒューム FCW の開発が進められている。また、造船、橋梁分野で多用されるプライマー鋼板用 FCW の開発においては、溶接熱によるプライマーガスや亜鉛蒸気ガスの生成によるピットやガス溝の発生を抑制するために、溶接スラグ凝固時の固液比率を調整することによって溶接部に気泡が残留しないプライマー鋼板用 FCW (FG-50P) が開発された。

サブマージアーク溶接 (SAW) 材料の開発においては、特に 1980 年代後半から 1990 年代前半に到来した高層建築ブームをきっかけに、極厚ボックス柱や溶接ビルト H 形鋼に代表される建築材料の高能率化を目的とした大入熱深溶込み SAW 溶接技術と鉄粉添加焼成型フラックスの開発が積極的に行われた。X 線を用いて大入熱 SAW 溶接における溶融池の挙動を直接透視観察することによって、深溶込みを達成するためには後行極の溶接電流をむしろ低く抑えて先行極のアーク直下に流入する溶融メタル量を抑制することが重要であることが明確となり、2 電極 SAW 溶接法による板厚 60 mm のボックス柱角継手の 1 パス溶接方法が確立された⁹⁾。また先行極に 5.1 mm の細径ワイヤを適用して高電流密度化による深溶込みを利用することによって、2000 A 未満の低出力溶接電源でも上記 60 mm 厚 1 パス溶接が可能な溶接施工法も開発された¹⁰⁾。さらに、開先形状、極間距離などを最適化することにより Photo 2¹⁰⁾ に示す 3 電極による板厚 80 mm の 1 パス SAW 溶接方法が開発された。同様の考え方が溶接ビルト H 形鋼の溶接にも適用され、無開先 T 継手溶接において板厚 25 mm まで完全溶込み溶接が可能な焼成型フラックス (KB-U、鉄粉添加なし) と有開先 T 継手溶接において 80 mm もの極厚鋼板の完全溶込み溶接が可能な焼成型フラックス (KB-US、鉄粉添加) が開発され、溶接能率が大幅に改善された⁷⁾。

2.2 薄鋼板の溶接技術

1980 年代後半から車体防錆のため自動車用薄鋼板の表面処理化が急速に進められ、これにともなって溶接分野にも新たな課題が発生した。すなわち、亜鉛めっきを主体とする表面処理鋼板のアーク溶接金属にブローホールやピットなどの欠陥が発生したり、また抵抗スポット溶接時にナゲットの形成が不安定になるなど、溶接部の品質に関わる重要な課題である。

亜鉛めっき鋼板を重ねてアーク溶接すると、Photo 3 に示すように重ね隙間内の Zn が溶接熱によって気化して溶接金属内に吹き出し、凝固しつつある溶接金属にトラップされてブローホールとなる。

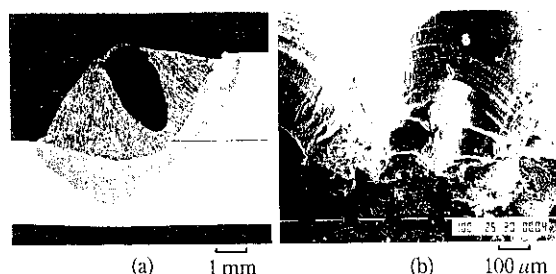


Photo 3 Cross sectional view (a) and inner surface (b) of typical blowhole generated in the lapped MAG welding of zinc coated sheets (45/45 g/m²)

したがって、これを防止するためには、ガスの発生を抑制することが効果的であり、溶接前にあらかじめ重ね隙間内の溶接部近傍に FeP_3 を塗布しておくことによって、溶接熱により Zn と反応して Zn の気化を防止する方法を開発した⁸⁾。

亜鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接性の劣化には、二つの現象が挙げられる。一つは溶接時に表面の Zn が溶融するため特に板/板間において溶接電流の通電径が拡大して電流密度が低下し、溶接ナゲットが形成されにくいことが挙げられる。亜鉛めっき鋼板に適した高電流で溶接すれば溶接ナゲットは形成されるが、これに対応するためには溶接トランスの大容量化が必要であり、また従来の溶接ロボットではこれにともなう溶接トランス重量の増大に耐えられないという課題が新たに発生した。これに対して、溶接電源メーカーでは軽量大容量に対応できる直流インバーター電源を開発し、一部実用化された。もう一つの劣化現象は、連続して繰り返して抵抗スポット溶接を実施すると、鋼板表面の亜鉛が溶接電極に拡散侵入して硬くて脆い Cu-Zn 合金層を形成して、電極の損耗が著しくなる現象である。これによって溶接電流密度も低下し、溶接ナゲットが形成されなくなる。これらの課題に対して素材面からの対応に取り組み、連続打点による電極損耗現象を解析¹¹⁾するとともに電極先端形状とナゲット形成能の関係¹²⁾を明らかにすることによって、電極先端に安定した突起を形成することのできる連続打点性に優れた合金化亜鉛めっき鋼板が開発された¹³⁾。

1980 年代から 1990 年代にかけて、車体の軽量化を目的に自動車用素材として Al 合金の適用が積極的に検討された。Al 合金は熱伝導率が高いため、抵抗スポット溶接時には亜鉛めっき鋼板よりもさらに大電流が必要となり、電極への熱的負担と Al や Mg などの電極への拡散による合金化層の形成によってさらに著しい電極損耗が生じた。このような溶接性劣化に対して、Al 合金成分の電極への拡散を抑制すると同時に適切な導電性を与え安定なナゲットが形成される表面処理アルミニウム合金が開発された¹⁴⁾。

車体の軽量化、あるいは素材の適材適所化などを目的に、ブランピング前に機能や板厚の異なる複数の素材をレーザ溶接などによって一枚のシートに接合してブランピングするティラードブランク技術が自動車会社によって開発、実用化された。これにともない強度、板厚などの異なる薄鋼板のレーザ溶接技術 (Photo 4) やレーザ溶接継手部の成形性などに関する研究が進められた^{15,16)}。

2.3 厚鋼板および鋼管の溶接技術

厚鋼板の溶接技術分野におけるこの 10 年は超高層建築、長大橋などに代表される重厚長大分野への揺れ戻しの時代でもあった。極厚鋼板の SAW 溶接やエレクトロスラグ溶接などの超大入熱溶接の適用に対応して、溶接金属および熱影響部の材質改善に関する研究

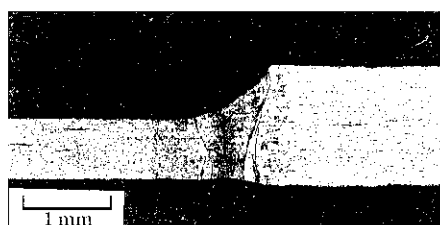
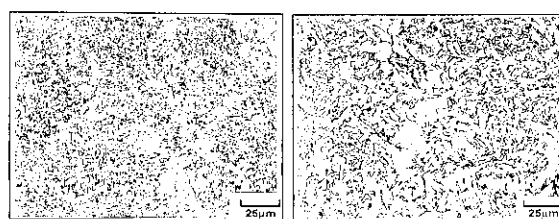


Photo 4 Example of the laser welded joint of the sheets of different thickness, i.e., 0.7 and 1.4 mm in thickness, welding condition; 4.6 kW, 4 m/min



(a) Laser weld metal (0.3 kJ/mm) (b) Submerged arc weld metal (6.5 kJ/mm)

Photo 5 Microstructures of the laser and submerged arc weld metals

が精力的に実施された¹⁵⁻¹⁷⁾。また、鋼材の一層の高張力化ニーズや高耐食性を目的とした高合金化ニーズが具体化され、SAW 溶接による API X80 および 100 級 UOE 鋼管、二相ステンレス鋼 UOE 鋼管の製造技術や HT980 鋼の揚水発電用ペンストックへの適用化技術に関する研究が進められた。二相ステンレス鋼においては溶接部の材質、耐食性に関する研究が行われ¹⁸⁾、溶接条件および溶接金属の化学組成から耐食性を支配するオーステナイト/フェライトの相比率の予測が可能となった¹⁹⁾。HT980 鋼の溶接では溶接金属の高強度と良好な靱性を維持しながら、低温予熱においても水素割れが発生しない溶接技術および溶接材料の開発が焦点となった。拡散性水素量が最も多く低温割れ感受性が高い被覆アーク溶接においても溶接金属の C 量と炭素当量を最適化することにより上記の課題を解決し、HT980 鋼において低温割れ阻止予熱温度 75°C を達成した²⁰⁾。

1980 年代から 1990 年代にかけて CO₂ レーザ溶接機の出力が飛躍的に向上し、機能的には厚鋼板にも十分適用可能な 45 kW 級の実用機が出現したことも厚鋼板の溶接技術分野では注目すべき点であ

る。このような大出力レーザ溶接継手の構造物への適用に向けて、溶接金属の冷却特性、組成と組織および靱性などの冶金学的性状について基礎的な研究がなされた^{21, 22)}。レーザ溶接金属においても Ti を主体とする介在物によって acicular ferrite 組織にすることが可能であり、アーク溶接金属よりもさらに微細で緻密な高靱性組織になることが見出された (Photo 5)。

3 おわりに

当社における最近 10 年の主な溶接研究の歩みを振り返ったが、溶接技術の進歩には常に社会環境や市場ニーズが深く関わっており、また溶接技術が鉄鋼材料の実用化を決定するキーテクノロジーであった。この傾向は新世紀においても変わることはないと思われるが、今後はますます多様化、高度化する材料に対応するためさらに幅広い溶接・接合技術が重要になると考えられる。

参考文献

- 1) 日本溶接棒工業会統計委員会編：「平成 9 年度の溶接材料出荷量分析」、1998 年 6 月
- 2) 中西保正ら：「川崎製鉄技報」、**27**(1987)4, 207
- 3) 川口 薫, 中西保正, 安田功一：「大型浮体構造物の洋上接合における溶接割れ防止 (その 1)」, 溶接学会全国大会講演概要, **58**(1994), 192
- 4) 阪口修一, 山口忠政, 中野善文：「鉄粉添加フラックスを用いた大入熱サブマージアーク溶接の溶融池現象と適正溶接条件」, 溶接学会論文誌, **13**(1995)3, 384
- 5) 阪口修一, 早川直哉, 安田功一：「ボックス柱角継手のワイヤ細径化による高効率サブマージアーク溶接方法の開発」, 溶接学会全国大会講演概要, **63**(1998), 172
- 6) 早川直哉, 阪口修一, 安田功一, 片岡義弘：「極厚継手の 3 電極 SAW における溶込み深さに及ぼす溶接条件の影響」, 溶接学会全国大会講演概要, **57**(1995), 118
- 7) 山口忠政, 林 三郎, 中島松重：「川崎製鉄技報」、**26**(1994)4, 198
- 8) K. Yasuda, S. Nakano, T. Yamaguchi, et. al.: "Avoidance of Blowhole in Arc Welding of Galvanized Steel Sheets", The 5th Int. Sym. of The Jpn. Welding Soc., (1990), 5JWS-IV-36, 785-790
- 9) 池田倫正, 安田功一, 山口忠政, 志賀千晃：「合金化亜鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接 (第 2 報)」, 溶接学会全国大会講演概要, **47**(1990), 154
- 10) 池田倫正, 安田功一, 山口忠政, 志賀千晃：「合金化亜鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接 (第 1 報)」, 溶接学会全国大会講演概要, **47**(1990), 152
- 11) 加藤千昭, 安田功一, 増田正純, 安田 顕, 森戸延行：「材料とプロセス」, **5**(1992)2, 665
- 12) 池田倫正, 安田功一, 片岡義弘, 橋口耕一：「アルミニウム合金板の抵抗スポット溶接特性に及ぼす表面皮膜の影響」, 溶接学会全国大会講演概要, **56**(1995), 172
- 13) 木谷 靖, 大井健次, 安田功一, 中野善文：「薄鋼板レーザ溶接継手の成形性に及ぼす溶接ビード性状の影響」, 溶接学会全国大会講演概要, **56**(1995), 42
- 14) 木谷 靖, 安田功一, 片岡義弘：「フィラーワイヤ添加レーザ溶接継手の成形性」, 溶接学会全国大会講演概要, **57**(1995), 456
- 15) 早川直哉, 阪口修一, 安田功一, 中野善文：「極厚鋼板の大入熱 1 パスサブマージアーク溶接金属の靱性に及ぼす冷却速度と化学組成の影響」, 溶接学会全国大会講演概要, **61**(1997), 194
- 16) N. Hayakawa, S. Sakaguchi, K. Yasuda, and Y. Kataoka: "Parameters Controlling Toughness of Weld Metal Made by Three-Electrode, One Pass Submerged Arc Welding for Heavy Section Box Columns", Int. Inst. of Welding, IIW Doc. No. IX-1839-96, (1996)
- 17) 西森正徳, 林 透, 川端文丸, 天野慶一：「材料とプロセス」, **10**(1997)3, 592
- 18) K. Yasuda, K. Tamaki, S. Nakano, et. al.: "Metallurgical Characteristics of Weld Metals and Corrosion Performance of Girth Weld Joints of Duplex Stainless Steel Pipes", 2nd Int. Conf. of "Duplex Stainless Steel '86", (1986), 202
- 19) K. Yasuda, R. N. Gunn, and T. G. Gooch: "Prediction of Austenite Phase Fraction in Duplex Stainless Steel Weld Metals", 4th Int. Conf. of "Duplex Stainless Steel '94" (1994)
- 20) 池田倫正, 大井健次, 安田功一, 中野善文：「ペンストック用予熱低減 HT980 鋼の溶接継手設計」, 溶接学会溶接構造シンポジウム '97, (1997), 29
- 21) 安田功一, 木谷 靖, 三澤俊平：「厚板の CO₂ レーザ溶接部の冶金学的性状」, 溶接学会第 29 回高エネルギー加工研究委員会資料, HEB-307-98, (1998)
- 22) 三澤俊平, 高佐成樹, 中野善文, 安田功一：「鉄と鋼」, **82**(1996) 8, 707