

製造業を支える溶接・接合技術の最近の進歩

百合岡 信孝
Nobutaka Yurioka

新日本製鐵(株) 技術開発本部 フェロー

The Latest Progress in Welding and Joining Technology Supporting the Manufacturing Industry

1 はじめに

溶接・接合技術は、自動車、車両、航空機、船舶、橋梁、建築、土木構造物、圧力容器、貯槽タンク、産業機械、レール、パイプライン、家電、半導体などほとんどあらゆる工業製品の製造組立に関わっている。メガコンペティション時代となって、今後とも我が国の製造業が世界競争力を維持できるかどうかは、我が国を追いつつある諸国が追随出来ない高付加価値製品の製造にかかっている。高付加価値製品は応力、温度(低温、高温)、腐食、疲労などに関し使用条件が過酷となり、構造物の一部を形成するに過ぎない溶接部の性能が相対的に重要となる。本稿では、これら工業製品の生産技術のキテクノロジーとなりつつある溶接・接合技術の最近の進歩を簡単に解説する。

2 溶融溶接

2.1 アーク溶接

アーク溶接材料と粗鋼生産量の推移を図1に示すように、溶接材料と粗鋼生産量は完全に連動している。従って、溶接材料の生産量は鉄鋼生産量とともにその拡大は期待できない。しかし、溶接材料種別の生産比率の変化は著しい。特に、1970年代には75%を占めていた被覆アーク溶接棒は年々減少し、最近では20%を切り、それに替って伸長著しいのはマグ(MAG) および炭酸ガス溶接に用いるソリッドワイヤとフラックス入りワイヤである。炭酸ガス溶接はArガスを用いないので低コストだが、小電流域では短絡移行で大電流域はグロービュール(大流滴)移行となり、いずれもスパッタが多発する。ArとCO₂の混合ガスを用いるマグ溶接は臨界電流量以上ではスプレー(細流滴)移行し、スムーズな溶接となりスパッタは激減する。しかし、欠陥防止や薄板溶接時の溶け落ち防止から小電流域溶接が必要な場合もある。

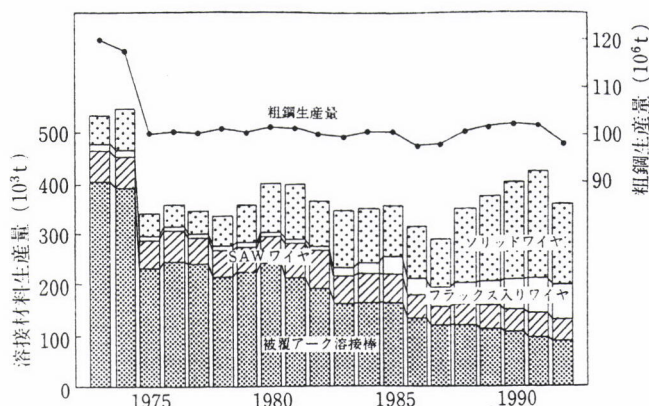


図1 溶接材料と粗鋼生産量の推移

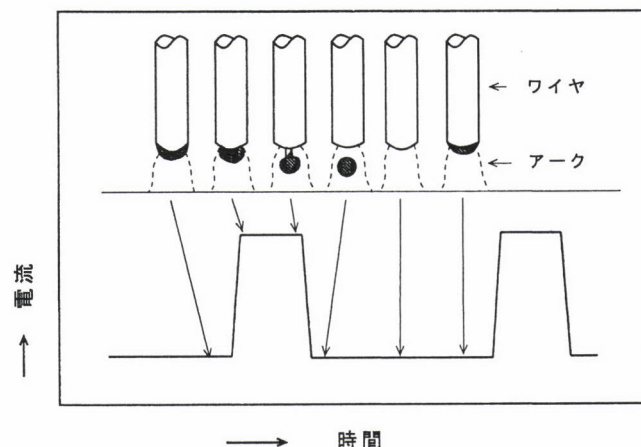


図2 インバータ制御パルスマグ溶接におけるワイヤから溶融池への溶滴移行

近年、トランジスタ・インバータ制御による高速で緻密な溶接電流波形制御技術が開発された。図2のインバータ制御パルスマグ溶接における溶滴移行現象に示されるように、臨界電流以上に設定された一つのパルスで一つの溶滴

をスプレー移行させ、アークを直接制御することが可能になった¹⁾。このパルスマグ溶接ではパルスの大電流と小電流の時間割合を変えることにより平均電流値が制御でき、小電流から大電流の全域でスプレー移行溶接を達成できる。

炭酸ガス溶接ではフラックス入りワイヤを用いアークをソフトにしスパッタ発生を抑え、ソリッドワイヤより外観が美しいビードを得ている。また、高性能インバータ制御では、溶接中の手ふれなどアーク長さが変動した場合も設定されたアーク電圧（アーク長さ）に瞬時に戻るよう制御可能なので、熟練工でなくとも相当の水準の溶接ができるようになった。そのため、造船、橋梁などの溶接ではフラックス入りワイヤの使用比率が高まっている。

造船、橋梁などのすみ肉溶接では、突合せ溶接のように開先を取らずそのまま溶接するので、鋼板のプライマを除去せずに溶接したい要望があった。しかし、その場合、溶接金属にブローホールやピットが発生するが、それらの発生を低減できるフラックス入りワイヤが開発された³⁾。又、自動車、住宅、家電などには亜鉛めっき鋼板が用いられるが、アーク溶接において亜鉛蒸気起因のブローホールとピット発生が問題となる。これに対しても、溶融池の粘性を高め亜鉛蒸気によるブローホールの成長を抑制できる新しい亜鉛めっき鋼板用ワイヤ（炭酸ガス・ソリッド）が開発された³⁾。

溶接において以上述べた作業性ばかりでなく溶接生産性が重要である。図3に各種溶接法の能率（溶接速度と溶着速度）の比較を示す⁴⁾。最近開発された生産性向上を矢印で示すが、ティグ（TIG）では2重シールドによるアークの集中、サブマージアーク溶接（SAW）やエレクトロスラグ溶接（ES）では電極数の増加、マグ溶接ではフラックス入りワイヤによる大電流下でのアークのソフト化によって達成され

ている。なお、図3で電子ビーム、レーザ、マッシュシーム溶接は溶接材料（溶加材）を用いないので、母材を溶融する速度（溶融速度）で表示されている。

アーク溶接は現在のところ溶接技術の主流の座を占めているが、溶接材料とアーク制御技術のたゆみない向上により今後とも主流であり続けるに違いない。

2.2 ロボット溶接

今後の熟練溶接士不足の状況を考えると、溶接ロボットの開発は必須である。溶接ロボットにおいてはワーク毎に異なる溶接部形状が認識されねばならない。オンラインティーチング・プレイバック方式はタッチセンサーなどを用いワーク形状をロボットに教示させるが教示者に多大の負担がかかるため、コンピュータグラフィックスを用い計算機上でオフラインで教示させる方法が開発された⁵⁾。ティーチング方式は溶接時にワークの変形が無い場合に適用されるが、薄板溶接や溶接長の長い時のように溶接変形を伴う場合は、溶接線のずれを認識する必要がある。溶接ワイヤ先端を開先内で揺動させ左右位置での溶接電流値の偏差から溶接適正位置を認識するアークセンシング法が、インライン制御に実用されている。より完全なロボット化を実現するには視覚センシングが望ましいが、アーク光は強烈で直接監視は困難である。そのためレーザスリット光を溶接部より少し前方に照射し開先情報を得る方法も開発されている。完全自動溶接を目指すとなるとアーク直下の溶融池の形状やワイヤ先端位置情報をオンラインで知り、直ちに適正溶接条件にフィードバックする必要がある。アーク光をフィルターで、ある程度遮断してレーザストロボを用い溶接を直接観察する試みがなされ⁶⁾、オンライン制御完全自動化溶接技術への道が拓かれつつある。

ロボット溶接は造船をはじめ各分野でその適用は着実に

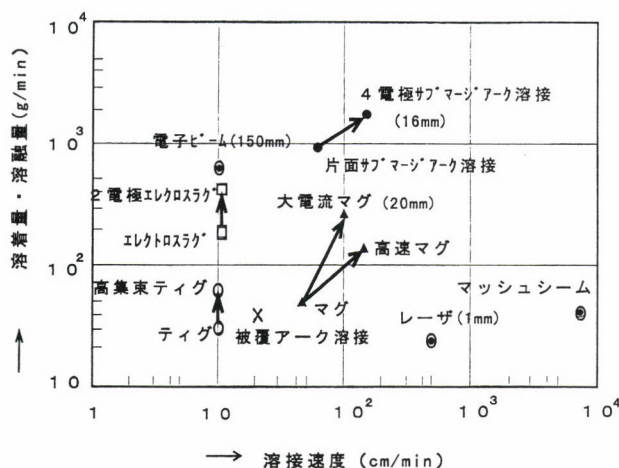


図3 各種溶接法の生産性の比較と最近の進歩

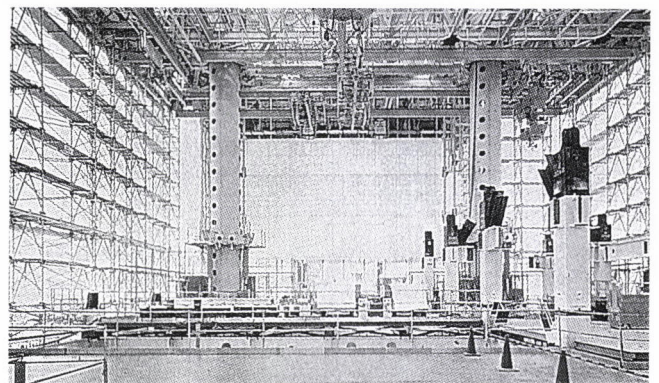


図4 高層ビル全天候型溶接施工システム

拡大しているが、ペンストック(水圧鉄管)、パイプライン、レール、建築においては悪環境での現地溶接が不可欠であり、溶接自動化への切実な要望がある。最近開発された高層ビル自動施工プラントでの自動溶接の例を図4に示すが、この場合、各階の施工が完了すると施工プラントはせり上げられて最上階まで工場溶接のように全天候型で溶接される⁷⁾。このような現場溶接自動化はパイプライン、ペンストックやレールにおいても顕著な進捗を見せている。

2.3 溶接冶金

微量のチタンはアークを安定させ、溶接金属組織微細化にも寄与することは従来より知られていた。この組織微細化は溶接金属中のチタン酸化物を核とする溶接冷却変態時の細粒アシキュラーフェライトの生成(図5)に起因することが1980年に判明した⁸⁾。これがオキサイドメタラジの始まりであり、酸化物分散型の大入熱溶接用鋼の開発へと結びついた。溶接金属の酸素量は鋼材に比べて高く、酸化物は0.5μm以下の球状で均一に分散しているので粒内変態核としては望ましい状態にある。しかし酸化物が過剰になると延性は低下する。そのため、酸素低減技術とともに、どのような結晶構造と組成を有する酸化物が靱性に優れるのか、種々の酸化物の生成機構と変態挙動が熱力学データベースの計算熱力学を活用して研究されている^{9,10)}。

9%Ni鋼の溶接では溶接金属にインコネル系の高Ni合金が使用される例に見られるように、溶接金属は母材に比べて冶金的オーバーマッチングが許容される。特にステンレス鋼の溶接の場合、溶接金属の成分設計の組み合わせの範囲が広がり、同時に溶接凝固割れ防止のため適量のデルタフェライトを高温時に存在させるように成分を選択する



図5 溶接金属中の酸化物からのアシキュラーフェライトの生成
(オーステナイトフェライト変態途中から焼入れ)

時など、計算熱力学による平衡相の予測が重要な手段となっている¹¹⁾。

3 抵抗溶接

3.1 スポット溶接

表面処理鋼板をスポット溶接する場合、裸鋼板に比べてその溶接性が問題となる。防錆用としての亜鉛めっき鋼板には電気めっき系と溶融めっき系があり、それぞれに純亜鉛めっき系と合金亜鉛めっき系がある。これら亜鉛めっき鋼板は鋼板表面の接触抵抗および硬度の差、さらにめっき層最表面の融点の差が微妙に適正溶接条件範囲に影響することが判明した¹²⁾。1秒以内の短時間に終了する抵抗スポット溶接現象が、最近、熱伝導と熱応力計算によるシュミレーションによって解析されるようになり、表面接触抵抗の相違による溶接金属(抵抗溶接ではナゲットと称する)の形成の過程を把握できるようになった¹³⁾。

スポット溶接では溶接条件範囲の他に電極寿命(連続打点数)が重要であり、めっき鋼板の電極寿命は裸鋼板に比べて著しく短く、めっき目付量が増すとさらに減少する。これは、めっき鋼板ではめっき層のZnと電極のCuが合金化し、電極先端に硬い真ちゅう層が形成され、それが割れたり剥離して連続打点性を損なうからである。この真ちゅう層の形成は純亜鉛めっきに比べ、合金化溶融亜鉛めっきでは軽微で、Zn-Ni電気めっき鋼板では全く形成しない。そのため、合金化溶融亜鉛めっき鋼板にZn-Ni系のフラッシュめっきなどを施すなど、鋼材側から電極長寿命化への努力が払われている¹⁴⁾。

3.2 マッシュシーム溶接

ぶりき溶接缶材料は高周波を用い80m/minに及ぶ高速のマッシュシーム溶接で接合される。この溶接は板端をわずかに重ね円板電極によって押しつぶし(マッシュダウン)ながら通電し、溶融寸前のナゲットを形成するものである。図6に示すように¹⁵⁾、望ましいナゲットの形成のためには、電極と鋼板表面の接触抵抗や融点の関係から錫めっき(ぶりき)が望ましい。しかし、錫資源が稀少であるがゆえの供給不安定と高コストのために、薄錫めっき鋼板が開発された。これは塗料密着性の良好なクロメート層も表面に露出させつつ、錫を島状に分布させマッシュシーム溶接性を確保したものである¹⁶⁾。

自動車車体組立において、特性の異なる材料を適材適所に配置しそれを溶接してからプレス成形するテイラードブランク方式が従来の一体化プレス方式に一部替わりつつある。後述するように、テイラードブランクに最近レーザー

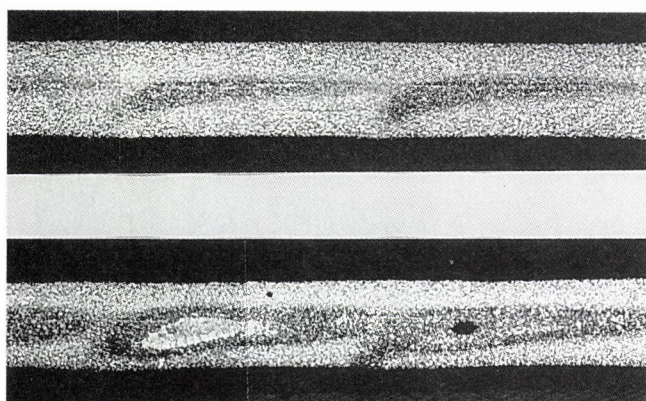


図6 錫めっき鋼板(上)と錫フリーめっき鋼板(下)のマッシュシーム溶接部のナゲット(溶接部縦断面、0.3mm厚)

溶接が採用され始めたが、欧州では10年以上前からマッシュシーム溶接が用いられている¹⁷⁾。

4 ビーム溶接

4.1 電子ビーム溶接

1950年代後半に開発された電子ビーム溶接は、現在では300kW級の溶接装置が実用されている。大型構造物の電子ビーム溶接では大型真空室を必要とするが、深溶込みを

特徴とし100mm超の厚肉材でも1パスで溶接でき圧力容器や反応容器の製造に適用されている。電子ビーム溶接では一般に溶接材料を用いないので溶接部(溶接金属)は母材成分のままであり、溶接部の低温靱性の確保が問題となる。例えば、590MPa級鋼(HT60)では焼入れ性の高い成分系なので溶接金属は下部ペーナイト組織となって、満足すべき靱性が得られるはずであるが、凝固偏析(マイクロ偏析)が破壊の起点となって靱性を下げることが判明し、極低P、低N、低Cの590MPa級電子ビーム用鋼が開発された¹⁸⁾。一方、490MPa級鋼(HT50)では溶接金属は酸素不足のためアシキュラーフェライトは得られず上部ペーナイト主体の組織となり著しく靱性が劣化する。しかし、Ti脱酸鋼のようにAlレス($Al < 0.002\%$)となると、低酸素でも粒内変態によるアシキュラーフェライトが得られることが見いだされ、490MPa級電子ビーム用鋼も開発された¹⁸⁾。このように厚板への電子ビーム溶接の適用の拡大は、鋼材組成の制御が鍵を握っている。

4.2 レーザ溶接

1960年に人工ルビーを媒質として発振に成功したレーザーは、現在では45kW CO₂レーザー、2kW YAGレーザー、そして5kW COレーザーが開発されている。しかし、レーザー発振出力は未だ電子ビームの約1/10であり、またレーザー照射時に発生するプルームの妨害などにより、溶込みはかなり浅い。

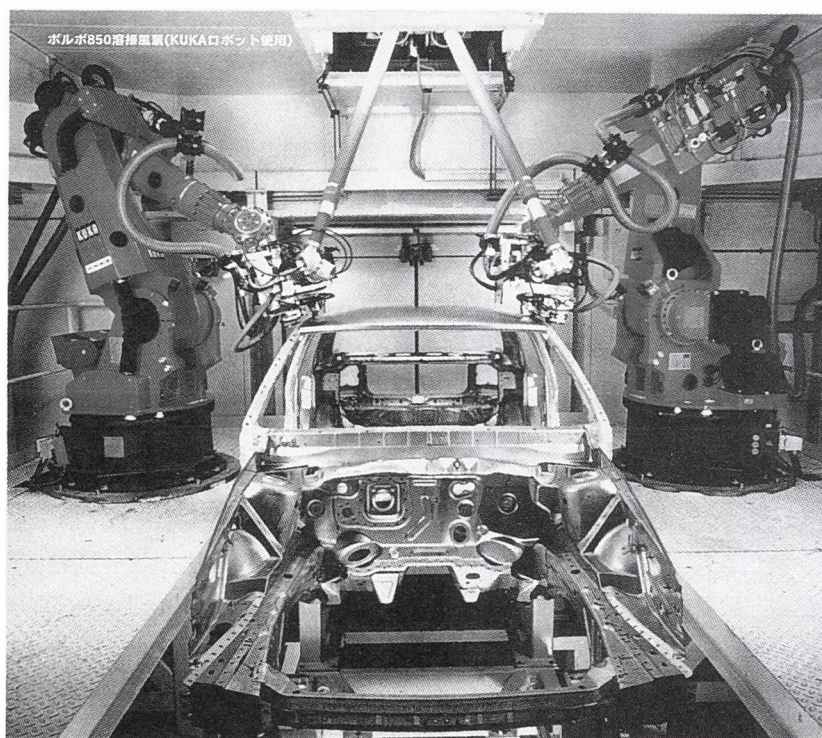


図7 レーザ溶接ロボットによる自動車車体の溶接

しかしながら、レーザビームは大気中で搬送できること、およびエネルギーが集中し熱影響が僅少で溶接歪みも小さいと云う利点から、その実用化の範囲は急速な拡大をみせている。

溶込みが浅いことからレーザ溶接は主に薄板の溶接に適用され、例えば前述のテイラードブランク接合や図7に示すような車体接合に適用されている。しかし、高エネルギー密度溶接と溶接材料を用いないことゆえに、突合わせ溶接のギャップ裕度やビーム狙い裕度がアーク溶接に比べて低く、ビーム制御などの特別な対策が必要となる。CO₂レーザは厚板の高速精密切断が可能で、25mm厚までの厚板切断用に5kW級の設備が広く普及している。一方、厚板の溶接に対しては、深溶込みの確保とブローホールおよび靱性対策が今後の課題であるが、オンライン後熱処理などによってこれらの問題を解決し、ERW(電気抵抗溶接)に替わるCO₂レーザ鋼管シーム溶接技術が開発されつつある¹⁹⁾。YAGレーザは光ファイバーで搬送できるので溶接ロボットに適用される。実際、原子力プラントの炉内構造物の狭隘部での溶接あるいは補修溶接に威力を発揮している。COレーザも将来の原子炉解体のための放射線危険域での切断用として期待されている。CO₂、YAG、COレーザの何れも、ハードウェアが現時点でも進歩しており、発振出力の増大とともに今後着実に溶接・切断の適用域を拡大させるに違いない。

5 圧接、ろう付け

5.1 圧接

圧接による接合法として、フラッシュバット溶接、DCバット溶接(電気接触抵抗溶接)、摩擦圧接およびガス圧接がある。円形機械部品接合に摩擦圧接が、鉄筋接合にガス圧接が、自動車ホイールにフラッシュバットまたはDCバット溶接が、レールにフラッシュバット溶接とガス圧接が用いられる。これらの接合法では、突合わせ(バット)両面を加熱溶融させた直後にアップセットし溶融物を排出するので、結果的に固相界面接合となる。したがって、理想的な接合状態が実現できるが、一方、アップセット時の排出が不完全であると接合界面に酸化物がフィルム状に残存することとなり、継手性能を著しく劣化させる。この時、曲げ試験をすると低応力で破断し破面は平滑で、すなわちフラット破面を呈する。そのため、圧接法では加熱温度・時間、アップセットのタイミング・圧縮量を高度に制御した自動化機の使用が前提となる。

圧接法は他の溶接法に比べ短時間で全断面を一挙に接合するので、ワンショット溶接に近い。パイプラインやレー



図8 フラッシュバット溶接による大径鋼管の現地円周溶接

ルの敷設では厳しい環境下での現地溶接となるので、機械化されたワンショット溶接は特に魅力的である。実際、図8に示すようなシベリヤでの大径鋼管の溶接に、米国でのレールの現地溶接に、20万アンペアと云う大電流を瞬時に付加する巨大なフラッシュバット溶接機が実用されている。

5.2 ろう付

ろう付はろう材だけを溶かし、被溶接体を溶融しない接合法である。たまたま、融点が400℃前後のろう材が無く、そのため融点が450℃以上のろう材を用いるのを硬ろう付け(ブレイジング)と称し、350℃以下を軟ろう付け(ソルダーリング)又は、はんだ付けと称する。ブレイジングは母材の溶融溶接が困難な場合や箔に近い薄物や小物部品の組立製造に用いられる。前者の用途は航空エンジンなどの組立であり、後者は冷凍機など熱交換機、ハニカム、配管の接合など適用範囲は多岐にわたる。

はんだを含めたろう付技術の開発は半導体の分野で目覚ましい進歩を見せている。半導体チップと基板の電極の接合には、はんだをこぶ状に100μm間隔に分布させ炉内で一括接合する技術、LSIパッケージ実装ではセラミックス基板表面をまずメタライジングしそれから半導体チップ電極とAg-Cu系ろう材で接合する技術、さらにTi、Zrを用いた活性ろう材でセラミックス-金属の直接接合する技術など²⁰⁾、ろう付けを主体とする超微細接合技術の発展は日進月歩である。そして、半導体の製造にはろう付の超微細接合技術がキエテクノロジーとなっている。

6 おわりに

溶接性に優れた鋼材の開発例に触れつつ溶接・接合技術

の進歩について解説した。現時点では溶接・接合技術は溶接用鋼材開発技術とともにわが国は世界をリードしていると思う。今後ともこれを維持するには、溶接冶金やアーク物理など基礎基盤研究の充実を欠くことはできないことは云うまでもない。

本稿では紙面の都合でレール溶接に用いられるテルミット化学反応溶接や、異種材料接合の用いられる爆発接合などを紹介できなかった。鉄鋼材料は、このテルミット溶接や爆着を含めて本稿に記述したすべての溶接・接合方法が適用できるが、ステンレス鋼、アルミ、チタンはその順に適用可能な溶接・接合法が限定される。また、溶接・接合と常に対をなす切断においても、鉄鋼はその酸化物の融点が母材より低く酸素溶断が可能な希有の金属で、ガスやレーザ（少量の酸素を添加）で容易にかつ能率良く切断できる。このように、溶接、接合、切断の観点からも鉄鋼材料は素晴らしい素材と云える。

参考文献

- 1) 長谷薫：第159・160回西山記念技術講座，(1997)，p.167
- 2) 原田章三，安田哲夫：溶接技術，vol.62(1993)No.2，p.81
- 3) 小山汎司：溶接技術，vol.62(1993)No.2，p.72
- 4) 若林正邦：新日鐵社内資料
- 5) 木邑信夫，藤平雅信：溶接学会誌，vol.64(1995)，p.442
- 6) 藤田憲，松本長：溶接学会誌，vol.63(1994)，p.511
- 7) 前田純一郎：溶接技術，vol.62(1993)No.12，p.68
- 8) 森直道，本間弘之，大北茂，若林正邦：溶接学会誌，vol.50(1981)，p.48
- 9) 堀井行彦，市川和利，大北茂，百合岡信孝：溶接学会論文集，vol.13(1995)，p.500
- 10) T.Koseki and N.Yurioka：Science and Technology of Welding and Joining，TIM 投稿中
- 11) T. Koseki, T. Matsumiya, T. Yamada and T. Ogawa：Metall. Trans. A, 25A(1994)，p.1309
- 12) 斎藤亨：溶接学会誌，vol.60(1991)，p.484
- 13) 西口公之，松山欽一，内田主亮：溶接学会全国大会講演概要集，vol.51(1992)，p.310
- 14) 小池利明，板東誠治，池田 聡：材料とプロセス，vol.3(1990)，p.1528
- 15) 崎山達也：新日鐵社内資料
- 16) 市田敏郎：ふえらむ，vol.1(1996)，p.868
- 17) 中村孝：溶接技術，vol.64(1995)No.3，p.66
- 18) 井上尚志，田辺康児，小原昌弘，小山邦夫：新日鐵技報，vol.348(1993)，p.32
- 19) 岩崎謙一，関根幸夫，森平明宏：材料とプロセス，vol.9(1996)，p.548
- 20) 小林紘二郎：溶接学会誌，vol.63(1994)，p.115

(1997年2月27日受付)