
鉄を支える溶接材料と溶接技術

Welding Materials and Technologies Expanding the Application of Steels

安田 功一(Koichi Yasuda) 山口 忠政(Tadamasa Yamaguchi)

要旨：

溶接加工に関わる各産業分野の主なニーズを整理し、これらに対応する川崎製鉄の最近の溶接材料、溶接技術を紹介する。溶接材料の分野では高能率、高品質を目的に、溶接継手の疲労特性を格段に向上させる溶接材料や溶接スパッタの発生量が著しく少ない CO₂ アーク溶接用ソリッドワイヤ、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などを開発した。

Synopsis：

The recent welding materials and welding technologies corresponding to the requirements of the welding engineering industries are outlined. In the field of welding materials for securing high efficiency and high quality welding, there have been developed welding materials having excellent fatigue characteristics, solid wire for the low spattering CO₂ arc welding, high efficiency one pass submerged arc welding process and flux with super-high heat input for heavy section plates. From the viewpoint of the weldability of steel materials, new welding technologies were established for the 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。

Welding Materials and Technologies
Expanding the Application of Steels

安田 功一
Koichi Yasuda
技術研究所 厚板・条鋼・接合研究部門 主任研究員(部長補)



山口 忠政
Tadamasa Yamaguchi
棒線営業部 主査(部長)

要旨

溶接加工に関わる各産業分野の主なニーズを整理し、これらに対応する川崎製鉄の最近の溶接材料、溶接技術を紹介する。溶接材料の分野では高能率、高品質を目的に、溶接継手の疲労特性を格段に向上させる溶接材料や溶接スパッタの発生量が著しく少ない CO₂ アーク溶接用ソリッドワイヤ、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などを開発した。

Synopsis:

The recent welding materials and welding technologies corresponding to the requirements of the welding engineering industries are outlined. In the field of welding materials for securing high efficiency and high quality welding, there have been developed welding materials having excellent fatigue characteristics, solid wire for the low spattering CO₂ arc welding, high efficiency one pass submerged arc welding process and flux with super-high heat input for heavy section plates. From the viewpoint of the weldability of steel materials, new welding technologies were established for the surface coated steel sheets and high tensile strength steel plates.

1 はじめに

鉄鋼材料は社会環境や市場ニーズの変化に応じて進化してきた。その中で溶接材料と溶接技術はその鉄鋼材料の利用、応用分野において「鉄を支える」重要な役割を果たしてきた。

特に溶接構造用鋼においては、高能率大入熱溶接施工に耐えうる溶接継手を提供するために、靱性に優れた溶接材料が開発されてきた。またその一方、鋼材の開発においても溶接熱影響部の材質劣化を抑制するための開発が進められてきた経緯があり、高能率大入熱溶接施工に対応した鋼材開発の歴史がある。このように、溶接材料、溶接技術の開発と鋼材開発は表裏一体であり、お互いに支え合い、これらのシナジー効果によって新しい鋼材や溶接材料、および溶接技術が開発されてきた。

今後この開発形態は変わることはないと考えられるが、当社創立 50 周年を節目に、最近の溶接に関わる各産業分野の主なニーズを整理し、これらに対応する溶接材料と溶接技術をまとめた。

2 各ニーズに対応する溶接材料および溶接技術

2.1 ガスメタルアーク溶接における低スパッタ化への対応

ガスメタルアーク溶接による自動化および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 +

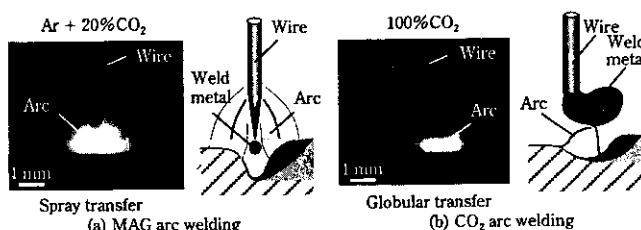


Photo 1 Comparison between MAG (Ar + CO₂) and CO₂ arc weldings in the metal droplet transfer phenomena

* 平成12年5月19日原稿受付

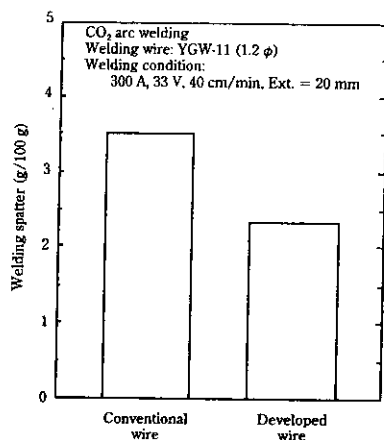


Fig. 1 Comparison between amount of the welding spatter in CO₂ arc welding with newly developed wire and that with conventional wire

CO₂とCO₂アーク溶接におけるアーク発生状況を示す。MAG溶接の場合にはアークはワイヤ端溶融部の上方から発生するため溶滴を含む溶融部には下向きの電磁力が作用し、ワイヤ端は鋭角を保って溶融し、また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に局部集中して発生する。そのため、溶滴は上向きの電磁力によって持ち上げられ、大粒の溶滴となって溶融池に移行する(globular移行)。その際に大粒の溶滴はこのアークによる電磁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やすく、再アーク時の急激な温度上昇による爆発によって溶滴が飛散するため、CO₂アーク溶接時のスパッタ発生量はMAG溶接の場合に比べて著しく多くなる。

したがって、CO₂アーク溶接における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り、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、アークの局部集中を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. 1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、溶接スパッタ発生量が比較的小さい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溶接ワイヤ(KM-50S)が開発された。

2.2 高疲労強度への対応

一般に溶接ままの溶接継手には、溶接冷却過程で溶接金属が熱収縮して母材の降伏強度程度の引張応力が残留し、これによって溶接継手の疲労強度が著しく低下する。そのため母材に高強度鋼を使用しても溶接継手の疲労強度は上昇せず、高強度鋼の特長が発揮できないという不具合が生じている。そこで、引張の溶接残留応力を軽減、あるいは圧縮応力を残留させることを目的に溶接材料の開発が進められた。Fig. 2¹⁾にオーステナイト相からの冷却過程で生じる熱収縮を示す。通常の溶接材料は図中の破線で示すように500℃程度で変態が開始して変態膨張するが、変態終了後は再び熱収縮し

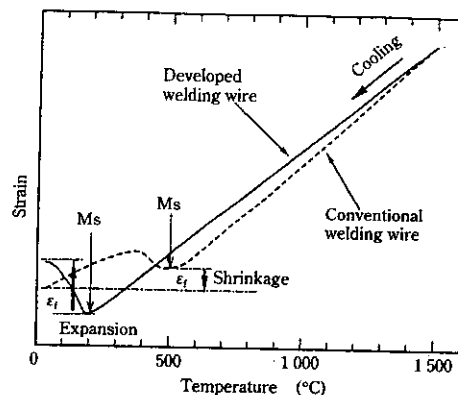


Fig. 2 Change in the residual strain of the welding materials after cooling due to the transformation temperature

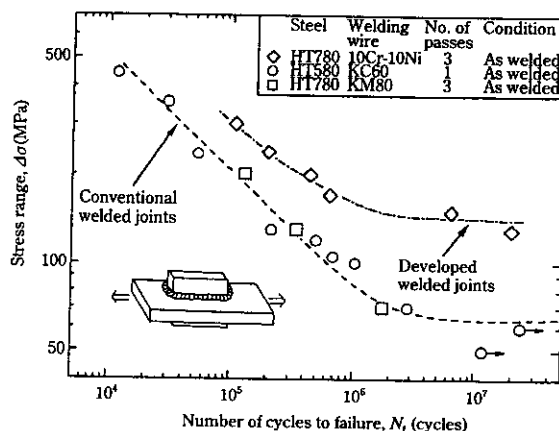


Fig. 3 Fatigue characteristics of the welded joint with the shielded metal arc welding material showing low transforming temperature

て拘束の大きい溶接継手では室温で引張の残留応力が生じる。これに対して、図中の実線で示すように変態開始温度が低く、室温付近で変態が終了する溶接金属を適用した場合には、溶接金属が変態膨張した状態で冷却が完了するため、圧縮の残留応力を導入することができる。このような考えをもとに、金属材料技術研究所殿とともに低変態温度溶接ワイヤの創製に取り組み、ワイヤの変態挙動やそのワイヤによる溶接継手の疲労特性が調査され、実溶接継手の疲労特性向上に有効な低変態温度溶接材料が開発された。Fig. 3²⁾に従来の溶接材料と低変態温度溶接材料(10Ni-10Cr系)を適用した角回し溶接継手の疲労特性を示す。開発材料の適用により疲労強度は従来溶接継手に比べて溶接ままで約2倍に向上させることができる。

2.3 耐高温割れ(耐凝固割れ)への対応

通常の溶接材料は、固定された開先内で溶接することを前提として耐高温割れ設計されている。したがって、やむなく振動あるいは揺動している開先を溶接する場合には従来の溶接材料をそのまま適用することができない。その象徴的な事例として、既設の一般橋梁や道路高架橋などを混雑緩和のため交通規制することなく供用下で補修、補強溶接する場合などがあげられる。Fig. 4³⁾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。溶接中には、通過する車輛によって溶接の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

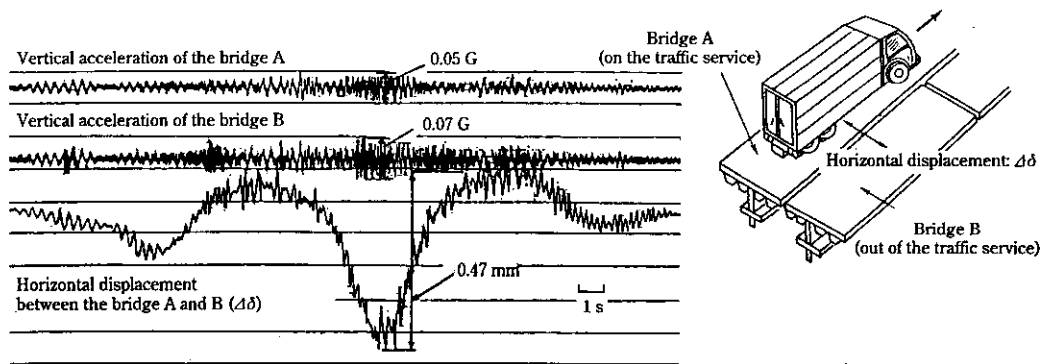


Fig. 4 Example of displacement between bridges on the traffic service

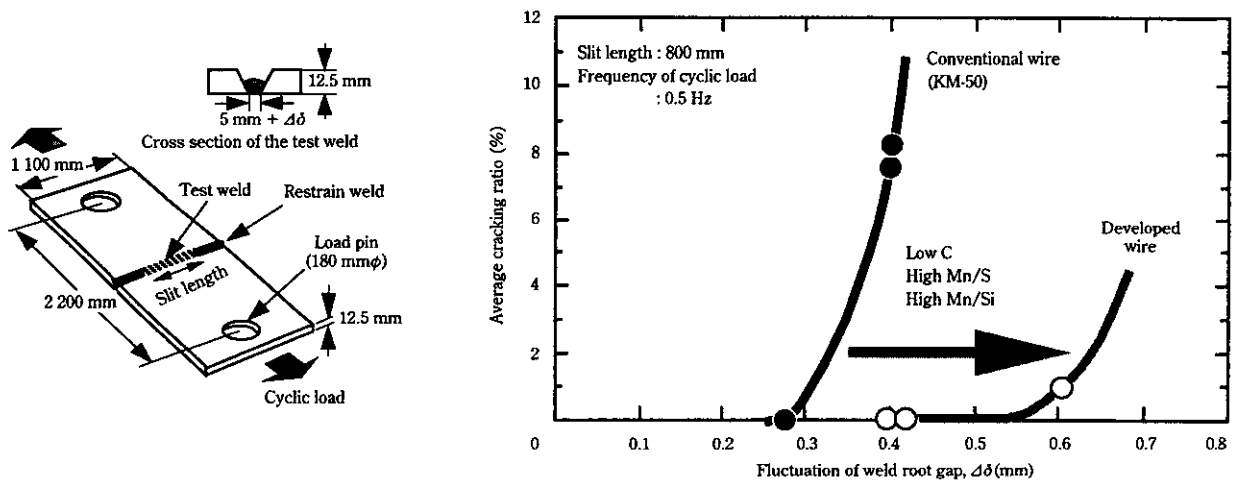


Fig. 5 Relation between the fluctuation of the root gap and the solidification cracking ratio of the weld metal under the cyclic load

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。またこの溶接材料は、海洋の波動によって揺動する超大型浮体構造物 (メガフロート) の洋上接合分野にも応用可能であり³⁾、溶接作業効率の良好なガスシールドアーク溶接用ソリッドワイヤも開発された⁴⁾。Fig. 5 に従来ワイヤと開発ワイヤを用いた MAG 溶接金属の変動変位に対する凝固割れ発生率を示す。開発ワイヤは従来材に比べて 2 倍以上の変位でも割れが発生しない。

2.4 耐低温割れ (耐水素割れ) への対応

溶接継手における低温割れは、溶接時に溶接金属に侵入した拡散性水素が溶接後常温で引張のひずみ集中部に拡散集積して材料を水素脆化させ、溶接による引張の残留応力と相まって発生する割れであり、溶接部の硬さ上昇によって割れ感受性は著しく大きくなる。したがって、低温割れは Fig. 6 に示すように (1) 溶接部の拡散性水素量 (H_D)、(2) 溶接部に作用する引張応力 (σ)、(3) 溶接部の硬さ (H_V) の 3 大要因によって引き起こされる割れであるため、大きな引張残留応力が発生し、溶接部が著しく硬化する高強度材の溶接では深刻な問題となる。高張力鋼の溶接では、溶接部に侵入する水素を低減するために低水素系の溶接材料を十分に乾燥して使用したり、大気水蒸気の混入を避けることはもちろん、侵入した拡散性水素を溶接部から拡散逸出させるために溶接部を予熱、後熱するなどの努力が払われている。しかしながら、高温の予熱、後熱は施工工程が増大する上に溶接作業環境を著しく阻害するなどの問題が新たに発生するため、できるだけ低い予熱によって低温割れ発生を阻止できる技術が要求される。

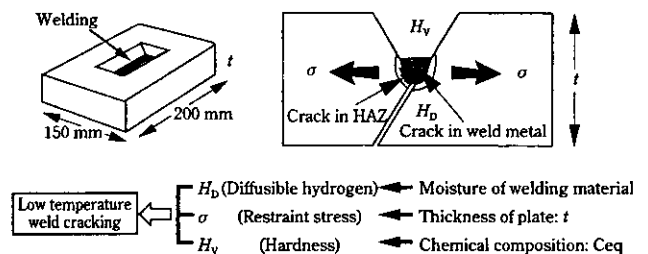


Fig. 6 Factors of the low temperature weld cracking

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り、特に拡散性水素量が最も多い被覆アーク溶接における低温割れが懸念された。これに対応して、継手溶接金属の強度、靱性は Fig. 7 に示すように炭素当量 (Ceq) を調整して溶接金属の硬さを適正化することによって確保した。また低温割れに関しては、低 C 化によって硬さ上昇を抑制した溶接材料を開発することによって、上記の難題を解決した。すなわち、冷却速度が大きいために硬化して低温割れ感受性が增大する初層溶接金属においては、硬さが C 量に依存するマルテンサイト主体の組織になっていることに着目して、Fig. 8 に示すように炭素等量を変化させずに低 C 化を図った。この開発被覆アーク溶接棒を HT980 鋼の溶接に適用することによって、板厚 75 mm、30°C、80%RH の厳しい溶接作業雰囲気においても、75°C の予熱で低温割れの発生を阻止することが可能となった⁵⁾。

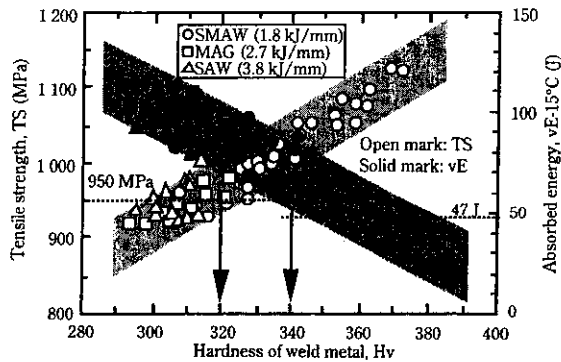


Fig. 7 Relation among the hardness, tensile strength and Charpy absorbed energy of the weld metals in the multi-pass welded joints

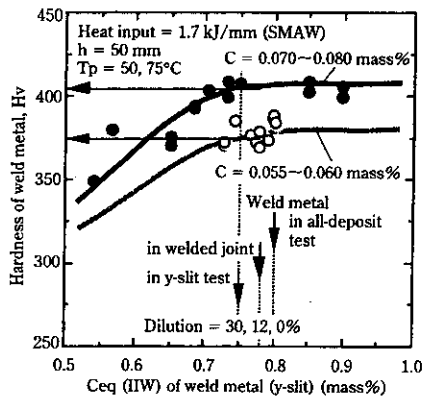


Fig. 8 Effects of the carbon equivalent and carbon content on hardness of the weld metal employed in the y-groove weld cracking test

2.5 高能率溶接への対応

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溶接において高能率化の要求が高まり、大入熱深溶込みサブマージアーク溶接(SAW)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。大入熱SAWにおける溶融池の挙動をX線を用いて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金属量を抑制することが重要であることが明確となった。この知見をもとに、2電極SAW法による板厚60mmのボックス柱角継手の高能率1パス溶接方法が確立された⁶⁾。また従来6.4mm径であった先行極に5.1mm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、2000A未満の低出力溶接電源でも上述60mm厚の高能率1パス溶接が可能な溶接施工法も開発された⁷⁾。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 2⁸⁾に示す3電極SAWによる板厚80mmの1パス溶接方法が開発された。同様の考え方が溶接ビルトH形鋼の隅肉溶接にも適用され、無開先T継手溶接において板厚25mm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80mm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⁹⁾。

また、このような極厚鋼板のSAWやエレクトロスラグ溶接など

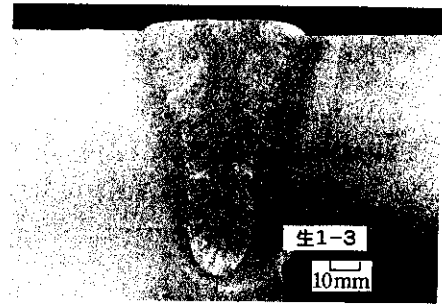


Photo 2 Cross sectional macrostructure of the 3-electrodes, 1 pass submerged arc welding for heavy section plate of 80 mm in thickness

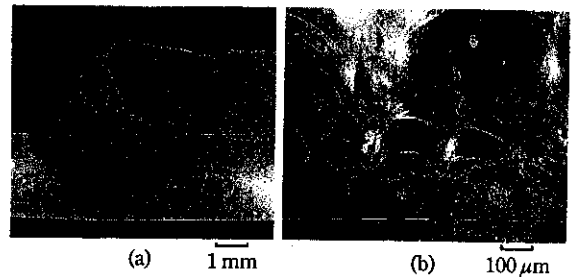


Photo 3 Cross sectional view (a) and inner surface (b) of typical blowhole generated in the lapped MAG welding of zinc coated sheets (45/45 g/m²)

の超大入熱高能率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も精力的に実施された^{10~12)}。

2.6 表面処理鋼板の溶接作業性の改善

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。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FeP₂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が開発された¹³⁾。

また亜鉛めっき鋼板の抵抗スポット溶接における溶接性の劣化には次の二つの現象が挙げられる。一つは溶接時に板表面のZnめっき層が溶融し、特に板/板間においては溶融しためっき金属によっ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くなる現象である。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、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-

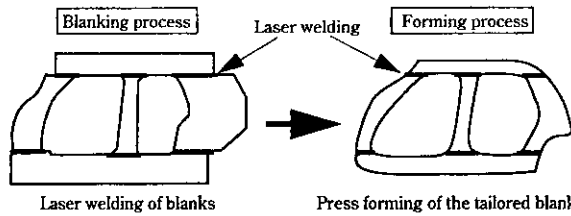


Fig. 9 Example of the press forming process with tailored blanking technology

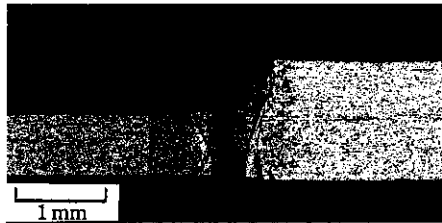


Photo 4 Example of laser welded joint of the sheets of different thickness, i.e., 0.7 and 1.4 mm in thickness, welding condition; 4.6 kW, 4 m/min

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、遂には溶接ナゲットが形成されなくなる。このような電極寿命の劣化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詳細に解析¹⁴⁾して電極先端形状とナゲット形成能の関係¹⁵⁾を明らかにした。その結果、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¹⁶⁾。

2.7 レーザ溶接の新たな活用

1980 年代から 1990 年代にかけて、車体の軽量化あるいは素材の適切な選択と適用などを目的に、Fig. 9 に示すようにブランク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クするテイ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、板厚や表面処理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^{17,18)}、その適用素材や適用箇所が拡大している。

また、CO₂ レーザ溶接機の出力はこの 10 年間で飛躍的に向上し、Fig. 10 に示すように機能的には厚鋼板にも十分適用可能な 45 kW 級の実用機も出現した。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

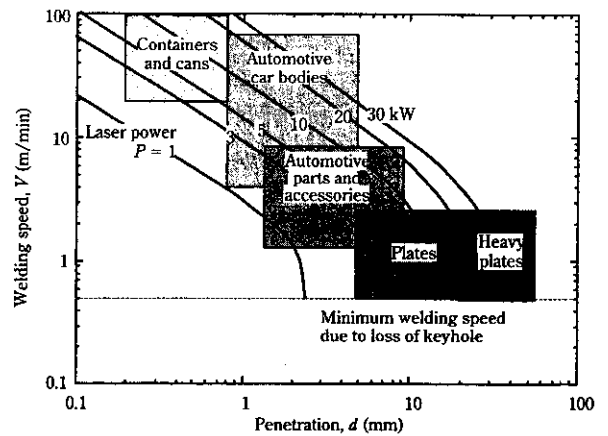


Fig. 10 Relation between the laser power and the penetration depth of the laser welded beads

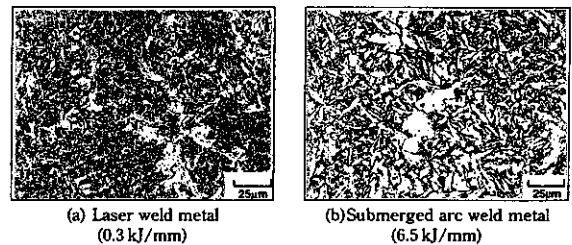


Photo 5 Microstructures of the laser and submerged arc weld metals

どの冶金学的性状について基礎的な研究がなされた^{19,20)}。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強度、高靱性組織になることが見いだされている (Photo 5)。

3 おわりに

当社における最近の「鉄を支える」主な溶接材料と溶接技術を紹介したが、溶接技術の進化には常に社会環境や市場ニーズが深く関わっており、また溶接技術が新しい鉄鋼材料の実用化を決定するキーテクノロジーとしての役割を果たしてきた。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ものと考えられる。

参考文献

- 1) 太田昭彦, 渡辺 修, 松岡一祥, 志賀千晃, 西島 敏, 前田芳夫, 鈴木直之, 久保高宏:「低変態温度溶接材料を用いた角回し溶接継手の疲労強度向上」, 溶接学会論文集, 18(2000)1, 141
- 2) 中西保正, 中村義隆, 酒井啓一, 河野武光, 上条 建, 佐藤功輝, 川井 豊, 山口忠政, 西山 昇:「供用中補修溶接施工に関する研究 (第 2 報 変動応力下の補修溶接棒の開発)」, 石川島播磨技報, 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) 池田倫正, 安田功一, 中西保正, 木治 昇:「大型浮体構造物の洋上接合における溶接割れ防止技術 (第 2 報)」, 溶接学会全国大会講演概要, 65(1999), 367
- 5) 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
- 6) 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」, 溶接学会論文集, 13(1995)3, 384
- 7) 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

- による高能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
- 8) 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
- 9) 山口忠政, 林 三郎, 中島松重:「厚鋼板のT型すみ肉鋼能率サブマージアーク溶接技術」, 川崎製鉄技報, 26(1994)4, 198
- 10) 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
- 11) 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. Ins. of Welding, IIW Doc. No. IX-1839-96, (1996)
- 12) 西森正徳, 林 透, 川端文丸, 天野慶一:「超大入熱溶接熱影響部の粒内組織制御」, 材料とプロセス, 10(1997)3, 592
- 13) K. Yasuda, S. Nakano, T. Yamaguchi, T. Komatsu, and T. Nakajima: "Avoidance of Blowhole in Arc Welding of Galvanized Steel Sheets", The 5th Int. Symp. of The Jan. Welding Soc., (1990), 5JWS-IV-36, 785-790
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 加藤千昭, 安田功一, 増田正純, 安田 顕, 森戸延行:「合金化溶融亜鉛めっき極低炭素鋼板のスポット溶接性に及ぼす鋼中Bの影響」, 材料とプロセス, 5(1992)2, 665
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 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回高エネルギービーム加工研究委員会資料, HEB-307-98, (1998)
- 20) 三澤俊平, 高佐成樹, 中野善文, 安田功一:「微小衝撃試験片法による鉄鋼レーザ溶接金属の延性脆性遷移の評価」, 鉄と鋼, 82(1996)8, 707