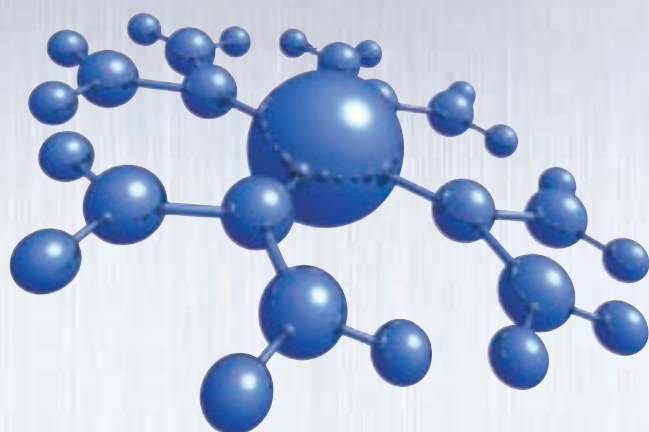


鉄と鉄をつなぐ(下)

あらゆる溶接法を適用できる唯一の金属、鉄。強度やリサイクル性などの優れた特性に加え、切断と接合が容易という、モノづくりに際し大切な条件を備えた材料だ。11月号では「溶接のメカニズム」に焦点をあてた。今号では、「溶接」から生まれた新日鉄の優れた「オキサイドメタラジー」と、それをベースに発展してきた鋼材開発、溶接技術を紹介する。



溶接を安定させる「酸化物」の働き

フラックス（鉱物酸化物の溶剤）を用いる「サブマージアーク溶接」「被覆アーク溶接」には、「ルチール（ TiO_2 ）」というチタン酸化物の添加が不可欠だ。また、フラックスを用いないガスシールドアーク溶接用ワイヤにも、日本の溶接材料メーカーはチタンを添加している。では、なぜチタンを添加するのだろうか。

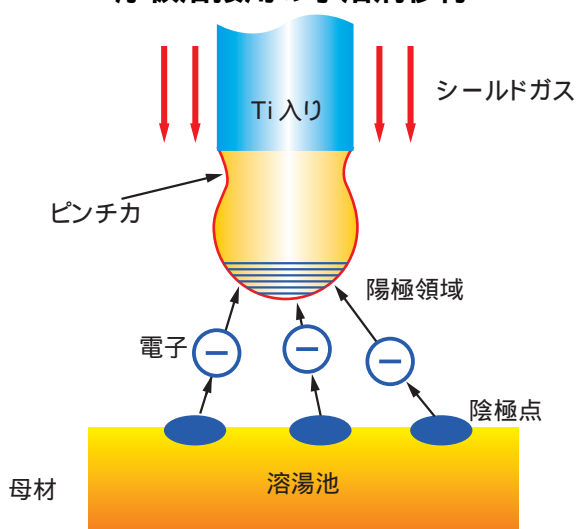
図1はガスシールドアーク溶接のアーク発生部を拡大したものだ。ワイヤを陽極にすると陰極の母材（溶湯池）から「電子」が飛び出し、それがワイヤ先端に高速で衝突して熱を発生し、溶融速度が上がるとい原理だ。溶接の安定化にはこの「電子」が十分に飛び出すことが重要で、電子は溶湯池に浮遊する「酸化物」からのみ発生する。これを陰極点という。

鉄鋼を「アーク溶接」する場合、純アルゴンガスによる溶接だけでは、電子の飛び出しが不十分（＝陰極点不足）で、アークが安定しない。鉄は緻密な酸化層に覆われていないからだ。そのため、

ガスシールドアーク溶接における溶滴移行

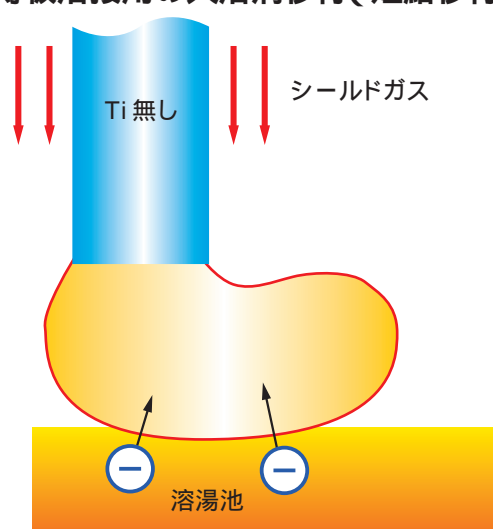
図1

厚板溶接用の小溶滴移行



ワイヤ先端がアーク熱で加熱・溶融し球状になったとき、ワイヤ先端を絞り込むようなピンチ力が働き、「溶滴」となって溶けた溶接金属（＝溶湯池）に飛んでゆく。この溶滴は小さいほどアーク状態が安定し、溶滴の飛び込みによる溶湯池の乱れも抑えられる。

薄板溶接用の大溶滴移行(短絡移行)



チタンを添加しないワイヤで溶接した場合は、溶滴は上のように巨大になる。自動車鋼板などの薄板を溶接するケースでは、アークが薄板を突き抜けてしまわないよう、ワイヤと母材を溶滴で直接くっつける（短絡させる）。その際、溶滴を大きくするために、チタンを添加しない。

シールドガスに「炭酸ガス」を用いたり（「炭酸ガスアーク溶接」）、アルゴンガスに酸素ガスを少量加え（「マグ溶接」）、酸化物を形成しやすくする必要があるのである。これが鉄鋼のアーク溶接の特徴だ。一方で、緻密な酸化層が表面を覆うアルミやチタンの溶接の際は、無添加の純アルゴンガスだけでアークは安定する。

普通のアーク溶接（図1/左）では、ワイヤ先端がアーク熱で加熱・溶融し球状になったとき、ワイヤ先端を絞り込むようなピンチ力が働く。この力は電離ガス（プラズマ）の気流の乱れによって生ずる電磁力だ。あたかも針金をペンチ（pincher）で切り取ったときに先端が吹き飛んでいくように、「溶滴」となって溶けた溶接金属（＝溶湯池）に飛んでゆく。この溶滴は小さいほどアーク状態が安定し、溶滴の飛び込みによる溶湯池の乱れも抑えられる。

溶滴を小さくするには溶滴の表面張力を下げればよいが、そのためには、溶滴の表面を溶融酸化物（スラグ）で薄く覆うことが必要となる。しかしここで一つの問題が生じる。覆うスラグが「電気を通す性質（通電性）」を持たなければ、溶湯池から飛来した電子を遮断して、電気が流れずアークが切れてしまうのだ。

不思議で有用な物質「チタン」

スラグにはアルミ系、シリコン系、マンガン系など多くの種類はあるが、そのうち電気を良く通す「良導体」なのは「チタン系」だけだ。従って、アーク溶接ではワイヤに「チタン」を添加し、フラックスにチタン酸化物「ルチール」を加えることで、溶接を安定させている。最近、光触媒などで脚光を浴びているチタン酸化物は、アーク溶接が発明された20世紀初めから溶接分野で利用されてきた。なお、溶滴を小さくするために表面をチタン系スラグで覆う際、ワイヤ表面にさらに酸化物を塗布すると溶接が安定する（旧日鉄溶接工業特許）。チタンを添加しないワイヤで溶接した場合は、溶滴は図1/右のように巨大になる。

このようにアーク溶接の安定化のためには、フラックス（酸化物）を用いたりシールドガスやワイヤに酸素・酸化物を加える。そのため溶接金属には鉄鋼母材の10倍以上の「酸化物」が含まれている。この酸化物は高温（10,000℃）のアーク下で1ミクロン以下の球状になり、鋼材の表面に均一に分散する。その中でも、チタン系酸化物は有用に作用し、溶接金属の靱性が非常に高くなる。

そのメカニズムを説明しよう。鋼も溶接金属も、溶接時の高温加熱状態から冷却していくと、700℃前後で結晶構造が変化（冷却変態）し、チタン系酸化物から新しい結晶が生まれ成長していく。写真1はその瞬間をとらえたものだ。チタン系の酸化物だけが、核となり新しい結晶粒を生み出すことができる。1ミクロン以下のチタン系酸化物から生成する結晶粒は数ミクロンと微細になり、靱性も優れたものになる。（注1）

溶接には長年チタン酸化物「ルチール」が用いられてきたが、上述したチタン酸化物核生成メカニズムが分かったのはつい最近（1980年）のことだ。チタン系酸化物だけが、溶滴を覆うスラグの中で電気を通す良導体であり、加えて、微細な結晶を生成させる核となる。溶接を安定させるために重要な働きをするチタンは、まことに不思議な物質だ。

注1：チタン系酸化物は冷却変態後の新しい組織と特になじみが良く、酸化物から新結晶が滑らかに成長するのだとする説が有力である。

チタン酸化物から発生し成長する新しい結晶

写真1



10ミクロン

溶接金属が冷却変態する際、酸化物から新しい結晶が生まれ成長していく瞬間をとらえた写真

溶接技術が常識を覆した オキサイドメタラジー

ここで画期的なことは、新日鉄の鉄鋼研究所主幹 研究員大北茂らの溶接研究者がこの原理に着目し、鋼材への適用を思いついた点だ。「鋼材にチタン酸化物を分散させると、鋼材を溶接する時の熱影響部の結晶粒も微細になり、溶接でもろくならない溶接構造用鋼が開発できるのではないかと考えたのだ。

当時は、鋼材中の酸化物はじゃまな物として嫌われ、できる限り酸化物の少ない清浄な鋼を製造するのが常識だった時代だ。その後、新日鉄は酸化物冶金（オキサイドメタラジー）を研究部門の横断テーマとして取り組み、製鋼技術部門と協力し「チタン酸化物鋼」を完成させ（1983年特許取得）、1986年、北海の大型海洋構造物に適用された。

1970年代の大入熱溶接用鋼にはTiN（窒化チタン）を利用していましたが、溶接部分の熱影響部の融合線近傍（図2）では非常に高温になるため、TiNは溶解し、機能しなくなる。一方、酸化物は熱的に安定で、超大入熱溶接でもその機能を消失しないため、酸化物利用鋼は優れている。新日鉄のオキサイドメタラジー研究はその後も発展を続け、新しいタイプの酸化物利用鋼を次々に開発し、大入熱溶接用構造鋼やラインパイプ鋼の開発では世界のトップランナーとなっている。

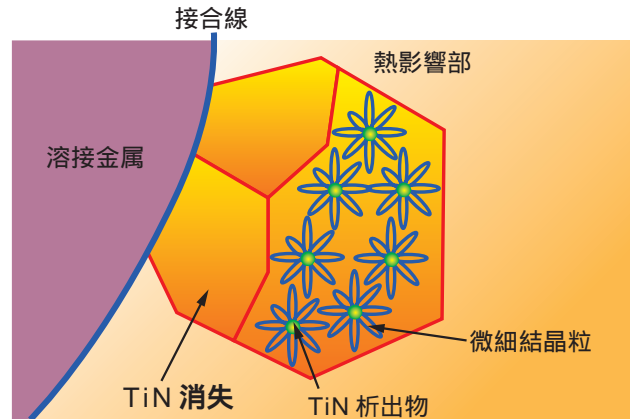
高機能鋼材の開発で 高まる溶接の難しさ

溶接性向上を目的に開発した鋼材を除けば、強度、耐腐食、耐摩耗、耐高温劣化などに優れた新開発鋼のほとんどは、溶接が難しくなる。そのため、高機能鋼材が開発されると、それに適応する溶接技術開発が必要となる。鋼材の顧客である造船会社をはじめとする製造業では、鋼材を切断し溶接で製品に組み立てる。従って、鋼材を開発したときには、溶接方法について顧客と一緒に考えて考えなければならないケースが多い。

自動車産業で用いる溶接法は、特に種類が多い（P13 図4）。自動車は多くの部品のアッセンブリーであり、部品の溶接にはそれぞれの部品に最適な溶接法が選ばれるからだ。例えば、外板パネルの接合に

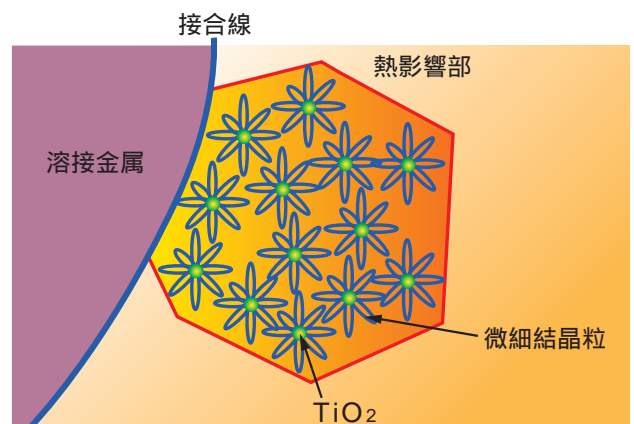
大入熱溶接用鋼の溶接熱影響部の組織 図2

TiN(窒化チタン)鋼



1970年代の大入熱溶接用鋼にはTiN（窒化チタン）を利用していましたが、溶接部分の熱影響部の融合線近傍（図2）では非常に高温になるため、TiNは溶解し、機能しなくなる。

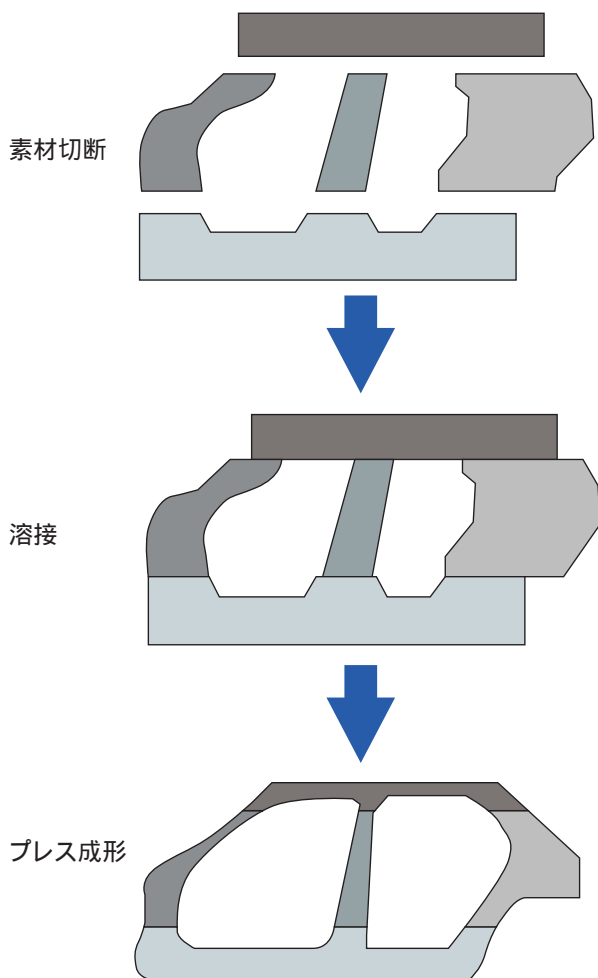
TiO₂(チタン酸化物)鋼



酸化物利用鋼は酸化物が熱的に安定で、超大入熱溶接でもその機能を消失しないため、優れている。

は数秒で接合できる「抵抗スポット溶接」や薄板の溶接に適する高速「レーザー溶接」、足周りなど強度部材には溶接が強固な「ガスシールドアーク溶接」、ルーフとピラーの接合には主に小物部品の組立製造に適用される「ろう付け」、駆動軸には円形断面接合専門の「摩擦圧接」、燃料タンクには水密性に優れた「電気抵抗シーム溶接」が使われる。最近では、板厚、強度、あるいはめっきの種類異なる材料を適切な場所に配置して溶接してプレス成形する「テイラードブランク溶接」（注2）が採用されつつある。（図3）テイラードブランク溶接には「レーザー溶接」「プラズマ溶接」あるいは高速の「マッシュシーム電気抵抗溶接」（専ら飲料缶溶接に適用）が用いられる。

テイラードブランク溶接による自動車外パネルの工作過程 図3



板厚、強度、めっきの異なる材料を適材適所に配置して溶接し、その後プレス成形する方法。強度が必要な部位には高強度鋼板で薄肉化し軽量化する。

レーザーは高エネルギー密度の熱源のため高速の小入熱溶接が可能で、熱影響部で懸念される強度低下がない。そのため、レーザー溶接はハイテンの強度メリットを十分活かすことができる。こうした自動車用薄板の溶接は難しく課題も多いため、新日鉄は次のような積極的な溶接技術開発を進めている。

防錆亜鉛めっき鋼板を「電気抵抗スポット溶接」で車体に組み立てるとき、めっきの亜鉛とスポット溶接電極の銅が反応して、電極端に硬い青銅（亜鉛と銅の合金）を形成し、溶接が乱れ流れ作業を中断させてしまう。そうすると溶接が非効率になり電極

注2：洋服の縫製に似ているため、テイラード（仕立て）ブランク（原板）溶接と呼ばれる。

寿命（電極が損耗するまでに健全なスポット溶接ができる回数、連続打点数で示される）も短くなる。そのため新日鉄はめっき層の組織改良とそれに適した溶接技術開発に取り組んでいる。

また、最近自動車の組み立てに適用が拡大している「レーザー溶接」の際、亜鉛がレーザー熱で蒸発して溶接金属に閉じ込められ、気孔を生じて継手強度が不足するため、めっき層の組織改良に取り組んでいる。

また、従来、耐ガソリン腐食とシーム溶接性に優れた「鉛めっき鋼板」が使用されてきた自動車燃料タンクは、現在環境対策から鉛フリー化が進められている。新日鉄が開発した「鉛フリー表面処理鋼板」の適用が進んでおり、当社は、電気抵抗シーム溶接技術開発に鋭意取り組んでいる。

さらに、自動車軽量化に貢献する高張力鋼（ハイテン）の適用が拡大する中、高強度な母材を溶接する際の熱影響部が軟化しないための、鋼材開発・溶接技術開発に、積極的に取り組んでいる。

ソリューションを提供する新日鉄の溶接技術

自動車以外の各産業においても溶接の難度は高まっており、新日鉄はこうした課題の解決に向け、鋼材開発と溶接技術開発の両面から取り組んでいる。課題解決にあたっては、溶接プロセスの専門家、アークプラズマ物理、溶接力学、溶接冶金、エレクトロニクス制御などの各基盤技術の専門家、溶接材料開発グループ、溶接技量指導者の助言、協力が必要だ。新日鉄グループでは、プロセスと基盤技術の研究集団である接合研究センターと溶接材料開発集団である日鉄溶接工業(株)研究所、溶接技能訓練のウエルテックセンターが千葉県富津の新日鉄総合技術センターに集まり、専門家グループとして新日鉄の顧客の溶接課題にソリューションを提供している（P13 図5）。

製鉄所では製造ラインの連続化のためにビレットやコイルを継ぐ高速度接合技術が要請される。鋼管事業において電縫鋼管（電気抵抗溶接）、UO鋼管・スパイラル鋼管（サブマージアーク溶接 P13 写真2）は溶接製品そのものだ。新日鉄グループの日鉄ドラム(株)で製造しているドラム缶も溶接製品だ。エンジニアリング事業部では大手重工会社同様、パイプラ

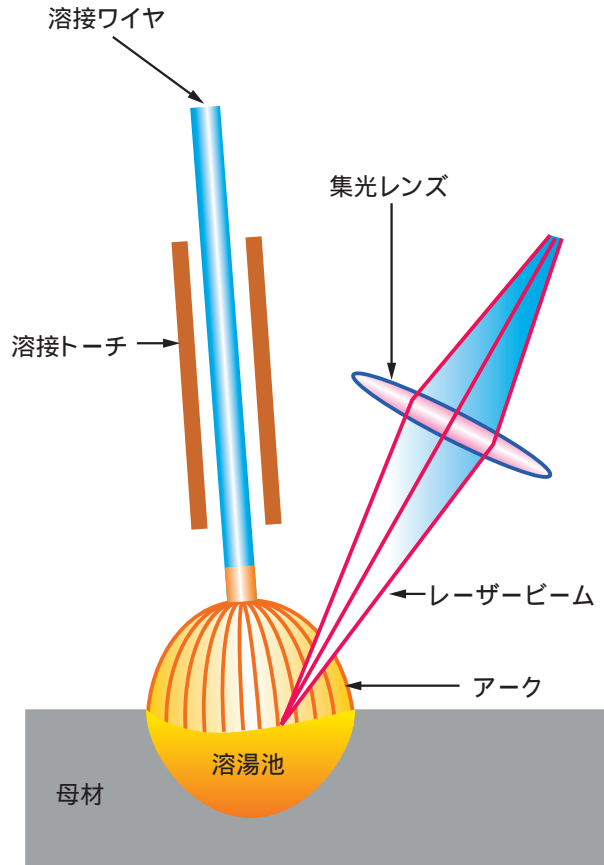
スパイラル鋼管

写真2



アーク・レーザーハイブリッド溶接

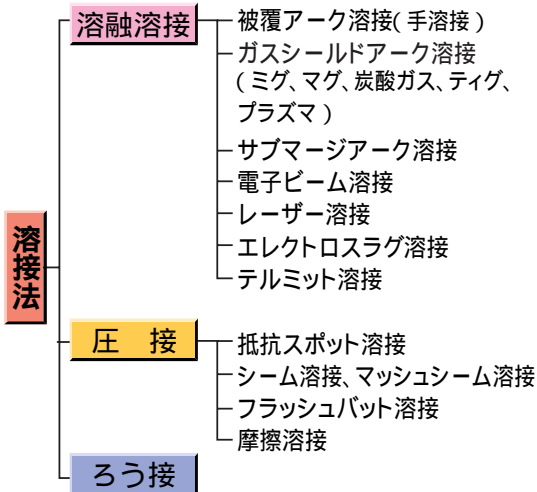
図6



アーク溶接、レーザー溶接のそれぞれの特徴を活かしたハイブリッド溶接技術。

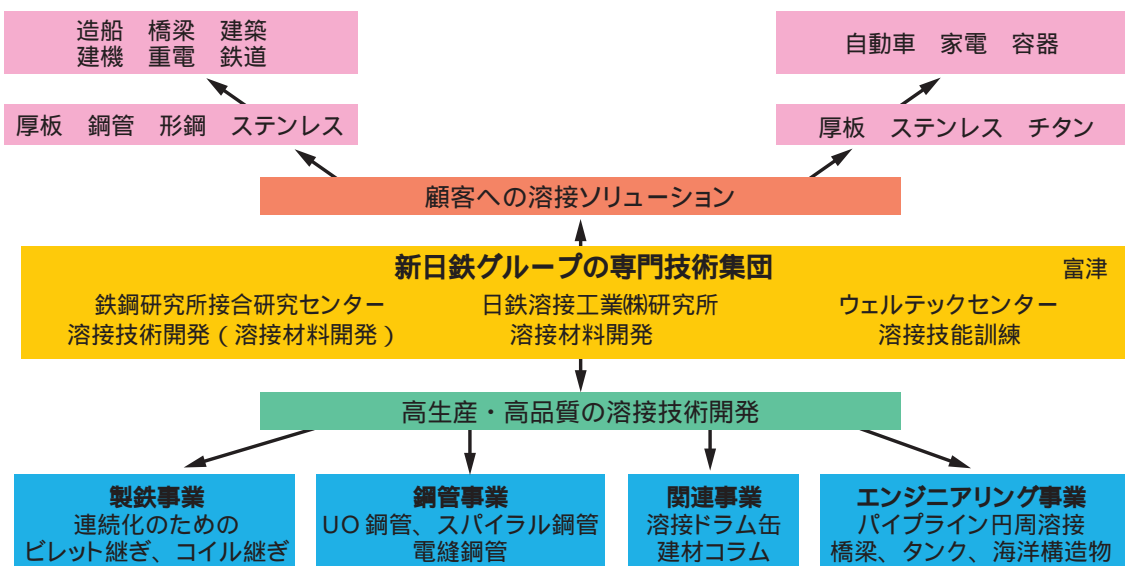
溶接方法の種類

図4



新日鉄グループの顧客への溶接ソリューション

図5



最適な溶接プロセス技術および溶接材料を開発し、顧客にタイミング良く溶接ソリューションを提供していく

イン敷設で現場円周溶接の溶接工事を実施し、橋梁、タンク、海洋構造物を製作している。これら事業のすべてにおいて高能率（高速度）で高品質な溶接技術の開発が要請されており、技術開発本部接合研究センターを中心とする新日鉄グループの溶接・接合技術部門が、各事業の溶接技術開発を支援している。

日本の発展を支える 溶接・接合技術

エレクトロニクス技術の向上によるアーク溶接技術の進歩は著しい。電流電圧をパルス制御し、溶滴（P9 図1）が絞れようとするときに瞬間的に電流値を変えてピンチ力を高めるなど、溶滴移行の一滴一滴を制御することで、溶接作業性は大きく改善されている。また、パイプの円周を溶接する場合、下向き、横向き、上向きと溶接姿勢が変わるため、溶接条件

の制御が不可欠だ。10,000 の高温アーク下で溶湯池の形状を監視し、その変化を溶接条件にフィードバックすることで溶接欠陥発生を抑える完全自動溶接技術が進歩している。

レーザー溶接技術の進歩も、その熱源パワーの年々の向上と共に著しい。レーザー溶接は熱源集中度が極めて高いため、高速溶接が可能だが、溶接前に溶接体をぴったり合わせておかなければならない。また、アーク溶接より高温のため、金属プラズマ（金属蒸発電離ガス）が発生し、溶接部に気孔が生じ欠陥となることもある。これらの問題を解決するために、アーク溶接、レーザー溶接それぞれの特徴を活かしたハイブリッド溶接技術（図6）が開発されつつあり、今後の実用溶接技術の本命となると思われる。

このように溶接技術は発展してきたが、今後も着実に進歩していく。これからも新日鉄および新日鉄グループ各社は、お客様と共に新技術開発を進めていく。

溶接・接合は製造業のキーテクノロジー

新日本製鉄㈱顧問 百合岡 信孝（ゆりおか のぶたか）

21世紀になっても理髪店と溶接はロボット化されないとされるほどに、溶接は大きく人の技量に依存しています。確かに、溶接ロボットも大いに進化してきました。しかし、溶接ロボットを導入しても熟練溶接工がいないので使いこなせないという話をよく耳にします。溶接ロボットを満足に操作するには、溶接施工をよく理解した経験豊富な技術者が必要なのです。

アジア各国の製造業の追い上げは厳しく、造船量では韓国が日本を追い抜いています。しかしLPG船などの付加価値が高く、難しい溶接を必要とする造船は日本がリードしています。

溶接技術は多くの学問分野にまたがる総合技術です。長年の研究と開発の積み重ねが現在の高い技術水準をもたらしていると言えます。日本の各企業には、組織立った技能訓練と技術教育を経て公的認証を受けた有能な溶接士と優れた溶接技術者がいます。優れた技術・技能がないところに新しい設備を導入しても、最高の溶接ができるわけではありません。溶接・接合のキーテクノロジーとなっている製造業はこれからも「モノづくり立国」日本を支えていくに違いありません。

鉄鋼材料メーカーである新日鉄は、鋼材ユーザーの溶接プロセスを十分理解しています。当社技術開発本

部接合研究センターを中心とする新日鉄グループの使命は、鋼材を誰よりも深く理解し、最適な溶接プロセス技術および溶接材料を開発し、顧客にタイミング良く溶接ソリューションを提供することです。今後とも溶接基盤（溶接冶金、溶接力学、プラズマ物理）溶接材料、溶接プロセスの三位一体の技術開発を継続し、世界一流の技術力を堅持してまいります。新日鉄鋼材の顧客信頼度を高めるため、新日鉄溶接グループは鋼材溶接技術に関して、世界をリードする集団であり続けたいと考えています。



プロフィール

1940年生まれ、大阪府出身。
1965年入社。1995年フェローを経て、2001年より顧問。
1998年：(社)日本鉄鋼協会 浅田賞
1999年：(社)溶接学会 佐々木賞
2003年：文部科学大臣賞 科学技術功労者賞