

# 近未来の 鉄鋼材料を知る

アーク溶接・レーザー溶接

## この小冊子発行の狙い

### 最新の研究成果を迅速に伝えたい!

平成13年度(2001年度)に発足した、独立行政法人の物質・材料研究機構(NIMS)は、我が国を代表する材料研究開発拠点の一つであり、世界の中核的な研究機関として材料研究を先導しています。

NIMSの1組織である超鉄鋼研究センターは、大規模な研究開発プロジェクトとして、「超鉄鋼材料」研究開発プロジェクトなどに取り組んでいます。超鉄鋼材料研究開発プロジェクトは、平成9年度(1997年度)から始まり、平成13年度(2001年度)までの5年間、第1期の研究開発プロジェクトを推進してきました。

そして、引き続き平成14年度(2002年度)から第2期の研究開発プロジェクトを開始しています。第1期と第2期の研究開発の中から、従来の鉄鋼材料の教科書を書き直すような、鉄鋼材料の根幹を解明する成果をいくつも上げていきます。

本小冊子は、大学や大学院などで材料を学ばれている学生の方々に、鉄鋼材料の最新の研究成果をいち早くお届けする狙いで編集されています。現代文明を支える鉄鋼材料の根幹となるメカニズムを、未来の研究者・技術者である学生の方々と一緒に考え、解き明かしていきたいと願っているからです。

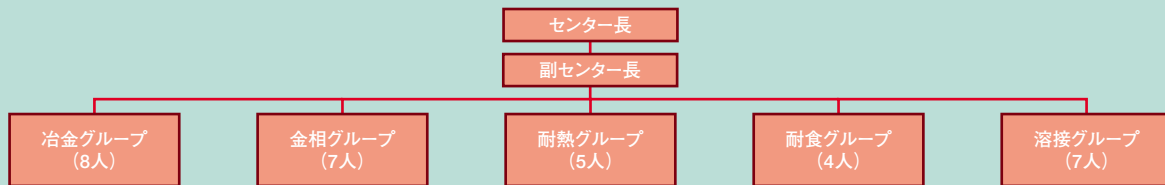
### 21世紀のニーズにこたえる超鉄鋼材料プロジェクト

超鉄鋼研究センターは、「新世紀構造材料」の基盤技術を研究開発しています。現在、構造材料の主役は鉄鋼材料です。21世紀も引き続き、構造材料の主役は鉄鋼材料であるとの視点から、「超鉄鋼材料」研究開発プロジェクトは立案・計画され、21世紀のニーズにこたえる鉄鋼材料を開発する目標の下に、研究開発を精力的に進めています。

超鉄鋼材料プロジェクトは、安心で安全な社会・都市基盤や発電効率が高い火力発電プラントの実現などを目指しています。リサイクルしやすいように希少合金元素を使わずに炭素やケイ素、マンガンなどの普通の合金元素の組成だけで、強さが2倍かつ寿命が2倍という卓越した性能を持つ超鉄鋼材料を開発するという挑戦的な目標を掲げています。強さ2倍は超微細粒化によって、寿命2倍は耐熱鋼の場合は、フェライト相鋼の組織を制御することによって、耐食鋼の場合は、オーステナイト相鋼に窒素を大量添加するなどの独創的・革新的な解決策をもってそれぞれ第1期の目標を達成しました。

平成14年度(2002年度)から始まった第2期の研究開発プロジェクトでは、材料開発から構造化につなげる研究開発を進めています。溶接法の開発もその一環です。物質・材料研究機構(NIMS)の理念である「使われてこそ材料」を実践するためです。

### 超鉄鋼研究センターの組織



(2004年6月20日現在)



# 超狭開先アーク溶接法の実用化にメド 小入熱で溶接欠陥発生を防ぎながら生産性向上

物質・材料研究機構の超鉄鋼研究センターの溶接グループは、新しいアーク溶接法として超狭開先アーク溶接法の実用化にメドをつけた。この新しい溶接法は溶接欠陥がほとんど発生しない高品質な継ぎ手を作製でき、溶接回数が少なくて済み生産性に優れている。超鉄鋼研究センターが開発中の強さが従来より2倍高いなどの特徴を持つ「超鉄鋼」をアーク溶接するための開発成果である。鋼を超微細粒化手法によって強さを2倍高めた鋼材を溶接して構造体をつくるには、鋼材の超微細粒組織をできる限り保ちながら変形が実質的にほとんどない精密溶接法が不可欠になる。アーク溶接法を高品質化・高生産性化する、超狭開先アーク溶接法について解説する。

鋼製の構造物は現在、鋼板やH型鋼などの鋼材を溶接によって接合して構造体をつくり上げるのが一般的になっている。以前、船舶はリベット接合によって組み立てられていたが、1950年代ごろから溶接による接合に次第に切り替わり、現在は溶接で組み立てられている。

自動車のボディー(車体)も、鋼板をドアやフェンダーなどの形状にプレス成形した部品同士を溶接して車体構造をつくる。車両の構造を支えるフロアーなどと呼ばれる車体構造部では、年々厳しくなる各国の衝突安全性規制への対応を先取りし、車体の溶接箇所・長さを増やすなどの工夫を凝らして車体剛性を高めている。

アルミニウム合金製や銅合金製の部品などでも、溶接によって構造体を作製するケースが増えている。

溶接が接合法の主役になった理由は、リベット接合に比べて複雑形状な部分同士でも接合でき、かつ気密性に優れた接合部(継ぎ手部)をつくりやすいなどの利点を持つからである。

現在、利用されているさまざまな溶接法の中で、一番汎用的でかつ基本と

なる溶接法はアーク溶接法である。アーク溶接法は、橋梁(きょうりょう)やビルの骨格、船舶などの大型構造物から、工作機械の支持構造などの中型構造物向けなどまで幅広く利用され、現代文明を支える溶接法になっている。

## 溶融・凝固させる溶接法の課題

鋼部品同士を接合する溶接法は、接合部の一部の鋼を局部加熱して溶融し、溶接部を溶融した鋼で満たした後に冷却し凝固させて一体に接合する加工法である(pp.45の別掲記事を参照)。

溶接法では施工条件を決めることが重要になる。溶接法に特有の課題の一つは、残留応力への対応である。溶接部の鋼を一度加熱して溶融させ、今度は冷却して凝固させる過程を経るだけに、加熱時に鋼は膨張する一方、冷却時には収縮する。この膨張と収縮によって残留応力ができる。

もう一つの課題は、溶融し凝固する過程で接合部に小さな穴である気孔などの溶接欠陥が生じる場合があることである。

さらに別の課題は溶融した鋼との濡(ぬ)れ性が悪いことから溶融した鋼で

十分に埋めきれない空隙の溶接欠陥が生じることもある。また、十分に溶かきれない溶融不足の“溶け残り”という空隙の溶接欠陥が生じることもある。

## 溶接部で起こる複合的な現象

溶接時の膨張と収縮によって接合部に残留応力が生じたり、溶接された鋼製部品同士や構造体全体にある程度の変形が生じたりすることもある。引張り応力の残留応力があると、接合部に割れ(「低温割れ」と呼ばれる)が生じてしまうなどの最悪の事態が起こる場合もある。

この割れが生じる機構は、引張り残留応力の存在に加えて、溶接部が相変態現象によって元の鋼板と機械的性質が不均一になるなどの複合的な要因が重なる場合が多い。

溶接部は急速加熱・急速冷却されるために、鋼組織はマルテンサイト組織やベイナイト組織などになったりする。溶接部の周辺の「熱影響部」(HAZ)も、急速加熱・急速冷却の影響を受けて加熱・冷却という熱処理を受け、元の組織とは異なる組織に変わる。例えば、マルテンサイト組織やベイナイト組織などになる。マルテンサイト組織やベイナイト組織は機械的性質が相対的に硬くて脆(もろ)い。

構造体の中では、溶接による接合部は応力が集中する形状や構造に元々なっている。この応力集中部となる接合部に、引張り残留応力があると、その分だけ疲労強さが低下する。

また、接合部に割れや気孔、空隙などの溶接欠陥がある場合も、疲労強さ

\* MAG溶接：MAG溶接法はアーク溶接の一つで、MIG溶接に似た溶接法。溶接ノズルから溶接ワイヤーが供給され、アークによって加熱される点まではMIG溶接法と同様。異なる点は、MIG溶接法が不活性ガスを吹き付けるのに対して、MAG溶接法はAr

(アルゴンガス)とCO<sub>2</sub>(炭酸ガス)の混合ガス、あるいはCO<sub>2</sub>を吹き付ける。このガスをActive Gas(活性ガス)と呼ぶためにMAG溶接法と呼ぶ。この解説では超狭開先アーク溶接の原理をMIG溶接法で解説しているが、実際はMAG溶接法を適用している。

## 超鉄鋼を生かす アーク溶接

が低下する。

割れや気孔、空隙などの溶接欠陥と残留応力は、接合部の接合強さ(継ぎ手強さ)を左右する。この結果、構造体の良否を左右する大きな要因になる。

### 溶接時の入熱を小さくする試み

溶接部に残留応力や割れなどの溶接欠陥が生じる原因は、鋼をいったん溶かすための加熱にある。このため、溶接欠陥の対策としては、溶接時の入熱を小さくすることが考えられる。

入熱を単純に小さくすると、溶融できる鋼の量が少なくなるので、溶接の生産性が落ちる。また、溶け残りなどの溶接欠陥ができやすくなるなどの問題も生じる。このため、生産性を落とさず、溶接欠陥をつくらないなどの対策を取りながら、小入熱化を図った。

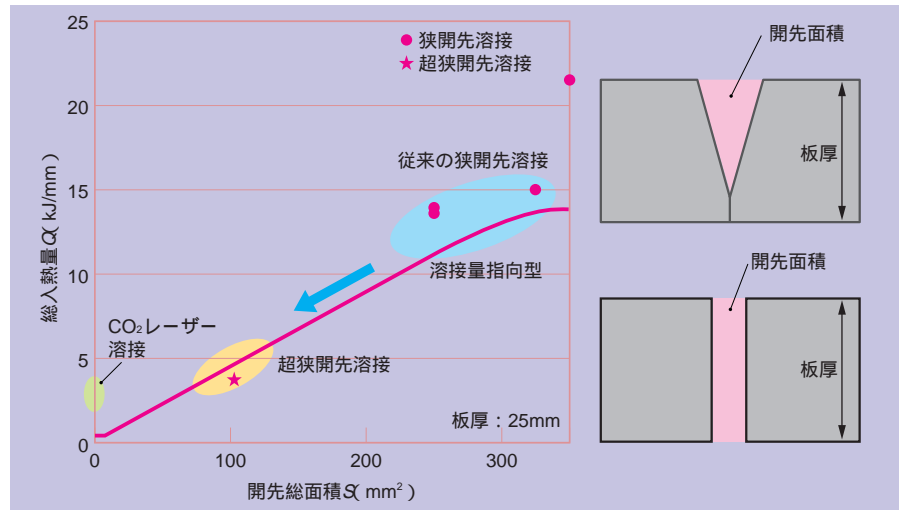


図1 アーク溶接部の開先面積と溶接入熱量の相関関係

厚板同士を溶接するには、接合対象部(「開先部」と呼ぶ)に対して溶接を何回か繰り返して溶接部を形成する。例えば、従来の大入熱では2回の溶接で接合できたものが、小入熱では10回溶接を繰り返す必要があるなど、生産効

率が大幅に落ちることが想定される。

船舶などの大型の構造体の溶接では、作業効率を高める視点から、入熱を大きくする大入熱化をむしろ進めてきた。その一方で最近では、入熱をできるだけ小さくして加熱による接合部の変形や

## 溶接は接合対象部の一部を溶融・凝固させて一体化する接合法

鋼部品同士の溶接は、接合する対象部分の一部を一度溶融させた後に凝固させて一体化する接合法である。代表的な溶接法であるアーク溶接の中で、最も基本的なMIG(Metal Inert Gas、「ミグ」と呼ばれる)溶接法を例に「溶接法とは」を説明する(図A-1)。

2枚の鋼板同士をMIG溶接するには、溶接される鋼板同士の接合対象部(「開先部」と呼ぶ)を急速に高温に加熱し溶融させることが必要になる。溶接ノズルの中心部から出た鋼製の溶接ワイヤーと溶接される鋼板の間に高電圧をかけ、一度接触させてアークを発生させる。アークに伴う発熱によって鋼板の接合対象部を加熱する。接合対象部は数秒間で室温から鋼の融点の1500以上まで急速に加熱される。溶接ワイヤーも融点以上まで加熱される。

溶接ノズルは、突き合わされた鋼板同士の接合対象部に対してある速度以上で移動し、連続して次々と急速加熱し溶融させて行く。急速加熱され溶融した鋼が溜(た)まっている溶接部(正確には「溶融池」)は、溶接ノズルが移動し加熱されなくなると、今

度は急速に冷却され、溶融した鋼が凝固する。融点から500付近までの冷却時間が10数秒程度と速いのが一般的な溶接条件である。突き合わされた鋼板同士と溶接ワイヤーが一度溶融して凝固するため、強固な溶接部ができあがる。

MIGの「M」はMetalの頭文字で、溶接ノズルの中央部から供給される金属製の溶接ワイヤーを意味する。実際には鋼製の溶接ワイヤーがアーク加熱によって溶融して溶接部を満ち、凝固して溶接部をつくる。鋼製ワイヤーを多少多目に溶かし、溶接部の表面を凸形状にする。「IG」は、ヘリウムガスやアルゴンガスなどの不活性ガス(イナータガス)を意味する。不活性ガスをアーク加熱部の周囲にシールドするように吹き出させて、溶融している鋼に空気中の窒素ガスが原子状になって溶け込むのを防ぐ。溶融した鋼中に窒素が溶け込むと、凝固時に気孔という溶接欠陥が多数できて溶接部の機械的性質を劣化させてしまうからである。実際には、MIG溶接に似たMAG(Metal Active Gas、「マグ」と呼ばれる)溶接\*を主に適用している。

溶接部は一度、鋼の融点以上に加熱され急速冷却された凝固組織となる。この結果、マルテンサイト組織やベイナイト組織、フ

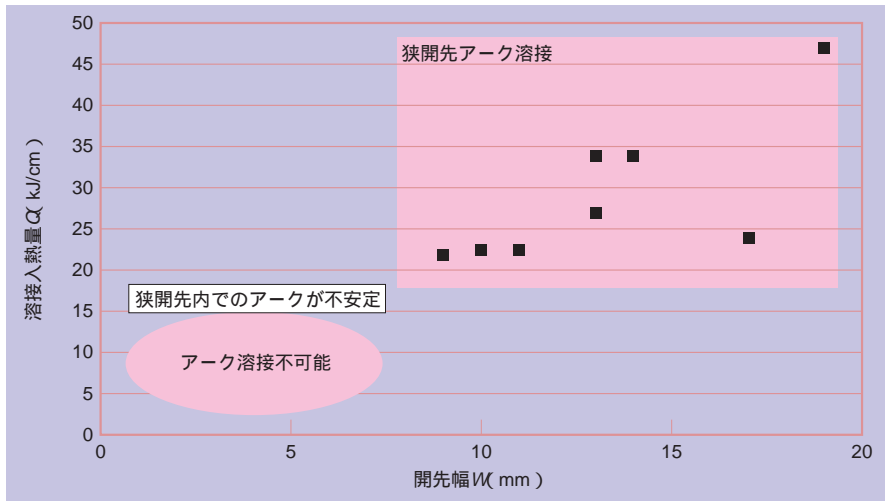


図2 アーク溶接部の開先幅と溶接入熱量の相関関係。従来のアーク溶接法では開先幅 8mm が下限に

残留応力の防止あるいは低減を目指す「精密溶接」の必要性も高まってきた。

こうしたニーズに対して、超鉄鋼研究センターの溶接グループは、アーク溶接時の入熱をできるだけ小入熱化しながら、生産性を落とさず溶接欠陥を

生じさせない精密溶接法を実用化した。

アーク溶接は、溶接ノズル中心部から供給した鋼製ワイヤー先端と、開先部壁面や底部の鋼との間にアーク放電を起こさせる。アーク放電による発熱によって鋼製ワイヤーと壁面と底部の

鋼を溶融させ、溶接部に溶融した鋼がたまり凝固して接合する。

接合対象部で溶融した鋼が埋める空隙部の断面積を「開先面積」と呼ぶ(図1)。開先面積が大きいと、溶融させる鋼が多く必要となり、入熱量もその分だけ多くなる。開先面積をできるだけ小さくして必要な入熱量を小さくするには、開先面積が小さくなるように開先幅を狭くすることが必要になる。

### 溶接部の開先幅を狭める試み

開先幅をどこまで狭くできるかを調べてみた。開先幅を小さくした狭開先溶接は幅8mmまで可能だった(図2)。実際の溶接施工では、最小の開先幅は平均10mmとなっている。開先幅が5mm以下と狭くなると、開先部内でのアーク放電が不安定となる。

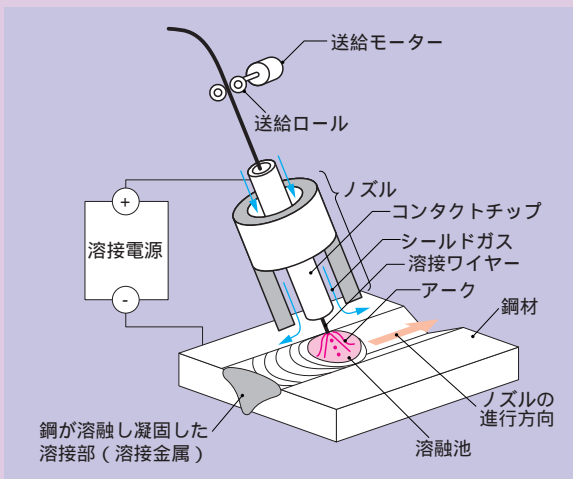


図 A-1 MIG 溶接法の溶接ノズル部の構造

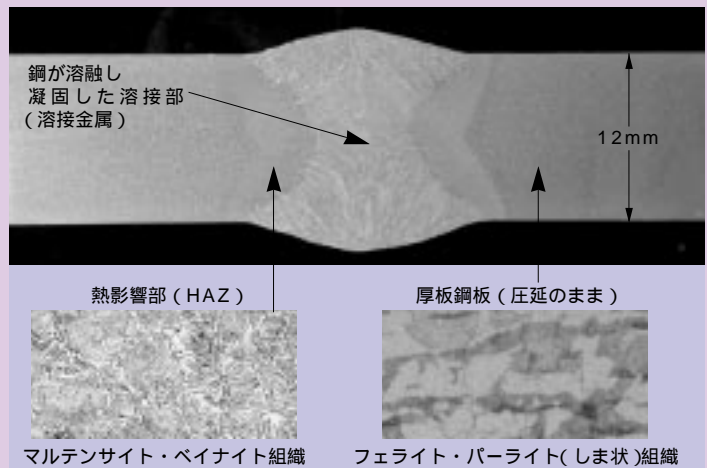


図 A-2 溶接された接合部の熱影響部 (HAZ) で相変態が起こる

フェライト相などが混在する相変態を起こす。一方、構造体に利用する一般的な厚板鋼板は一般に圧延でつくられる。圧延された鋼はフェライト相とパーライト相が混合したフェライト・パーライト混合組織になっている(図A-2)。鋼板の溶接部に近い部分も加熱・冷却による影響を受けて相変態する場合がある。

この部分を「熱影響部」(Heat Affected Zone、HAZ)と呼ぶ。例えば、マルテンサイト組織やベイナイト組織などに相変態する。

溶接部と熱影響部、元の鋼板の各組織の機械的性質などをどのように調整していくかが、優れたアーク溶接部(MIG溶接/MAG溶接)をつくる条件になっている。



アーク放電による加熱によって溶ける鋼製ワイヤー先端は、溶接対象部に対して下向きにどんどん送り込まれる。開先幅が5mmまで小さくなると、鋼製ワイヤー先端と開先底部の鋼との間にアーク放電が起こる前に、開先部の上側表面との間でアーク放電を起こしてしまい、開先部の底側でアーク放電が起こらなくなり、アーク溶接ができ

なくなる。

開先幅が10mm以上ある従来の狭開先溶接法では、入熱量を小さくすると、開先部の一番下側まで十分加熱されない場合もあり、アーク溶接時に開先壁面の底部両隅に未溶融部（溶け残り部）が生じ、融合不良部ができる可能性が大きくなる問題があった。

この対策として、溶接ワイヤーを開

先部の両壁面に対して左右に振って動かすウイーピングを加える効果が検討されたこともあった。しかし、溶接速度が遅くなり生産性が落ちるため適用できないと判断された。

### アークの熱分布を制御する発想

狭開先溶接を可能にする新しいアーク溶接法のコンセプトを検討した。小入熱でありながら溶接欠陥が無い高品質アーク溶接を目指すには、

- (1) アーク放電のアーク加熱によってできる熱分布を制御する新しい溶接法
- (2) アーク放電の挙動を制御し、安定したアーク放電による入熱を実現し、溶接欠陥の発生を無くす新しい溶接法の二つの課題を同時に解決する道を模索し検討を続けた。

従来の厚板の溶接では、ワイヤー先端と開先部の間に流す電流値は400A以上の大電流が一般的だった。狭開先溶接法での改良では最初、入熱の絶対値を小さくすることを目指した。

これに対して、アーク放電による加熱時の熱分布を制御する方法として、入熱をうまく分散させて熱密度を小さくする方法を追究するように発想を変えてみた。入熱による熱分布を巧みに制御すると、電流を逆に400～500Aと大きくしても、開先部の壁面に対しての入熱を相対的に小さくできることを見いだしたのである。

狭開先溶接を目指したこれまでの研究開発は、鋼製ワイヤー先端で起こるアーク放電を安定して起こさせることで対応しようとしていた。目指していた制御対象を単純化して説明すると、鋼製ワイヤーの先端の位置が一定にな

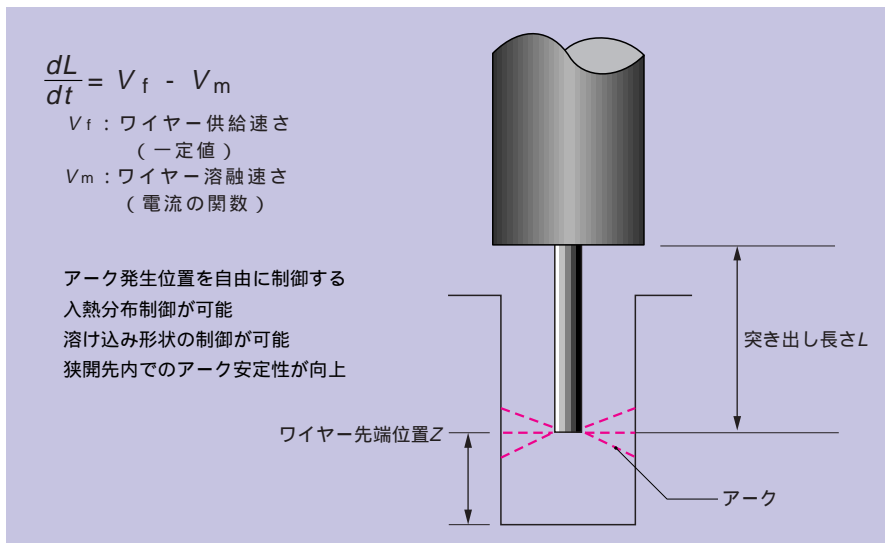


図3 アーク溶接ノズルの鋼製ワイヤーの突き出し量。アーク放電を起こす場所を決める

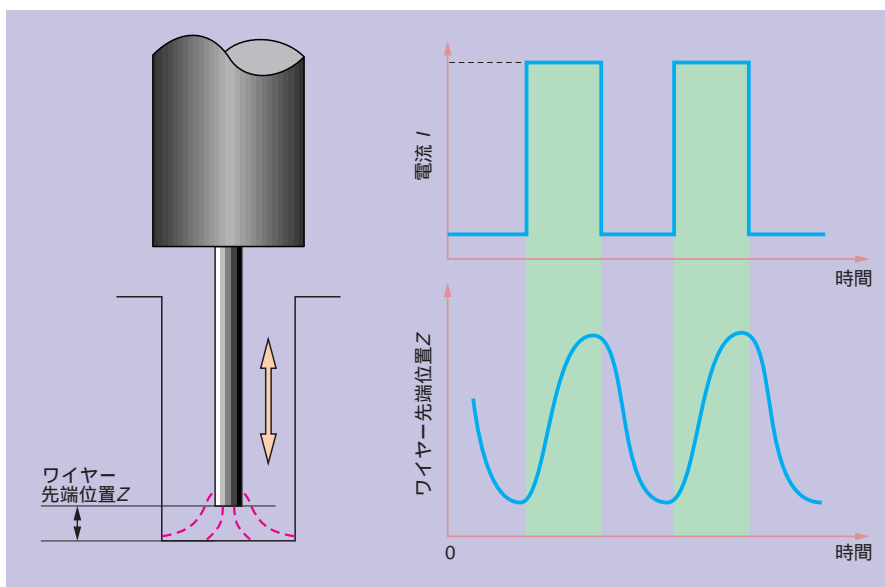


図4 鋼製ワイヤーに加える電流をパルスにして、アーク放電を起こす位置などを制御可能に

るように、鋼製ワイヤーに加える電流を制御しようとしていた。すなわち、鋼製ワイヤーの「突き出し長さ」が一定になるように、鋼製ワイヤーの溶融量（溶融速さ）を電流で制御しようとした（図3）。鋼製ワイヤーの突き出し長さ $L$ は、ワイヤーの送り込み速さ $V_f$ とワイヤーが溶融する速さ $V_m$ の差が、突き出し長さを決める。

$$dL/dt = V_f - V_m$$

従来から $V_f$ は一定値とし、鋼製ワイヤーを一定速度で送り込んでいる。 $V_m$ は、加えられる電流値に比例する。

### パルス電流でアークを制御

これに対して新しい発想では、溶接対象部（開先部）の中に送り込まれる鋼製ワイヤー先端の位置を時々刻々に最適に制御し、先端で生じるアーク放電の位置を適所に制御することを目指した。すなわち、開先部内で鋼製ワイヤー先端を上下方向に動かすことで加熱による熱分布の範囲を広くし、かつ加熱が必要な部分に対して適量の入熱を与えるようにした。

鋼製ワイヤー先端の位置を自由に制御し、突き出し長さを制御するには、加える電流を大電流と小電流を交互にパルスとして加える電流制御が有効なことを見いだした（図4）。これは、電流制御によって、鋼製ワイヤーの溶融速さの $V_m$ を制御するやり方である。

開先部の内部に入った鋼製ワイヤーの先端に電流が流れてアーク放電が起こると、パルスの電流値が大きい時間帯の場合は加熱の入熱量がその分だけ多く、鋼製ワイヤーは多く溶ける。鋼製ワイヤーを送り出す速さは一定なの

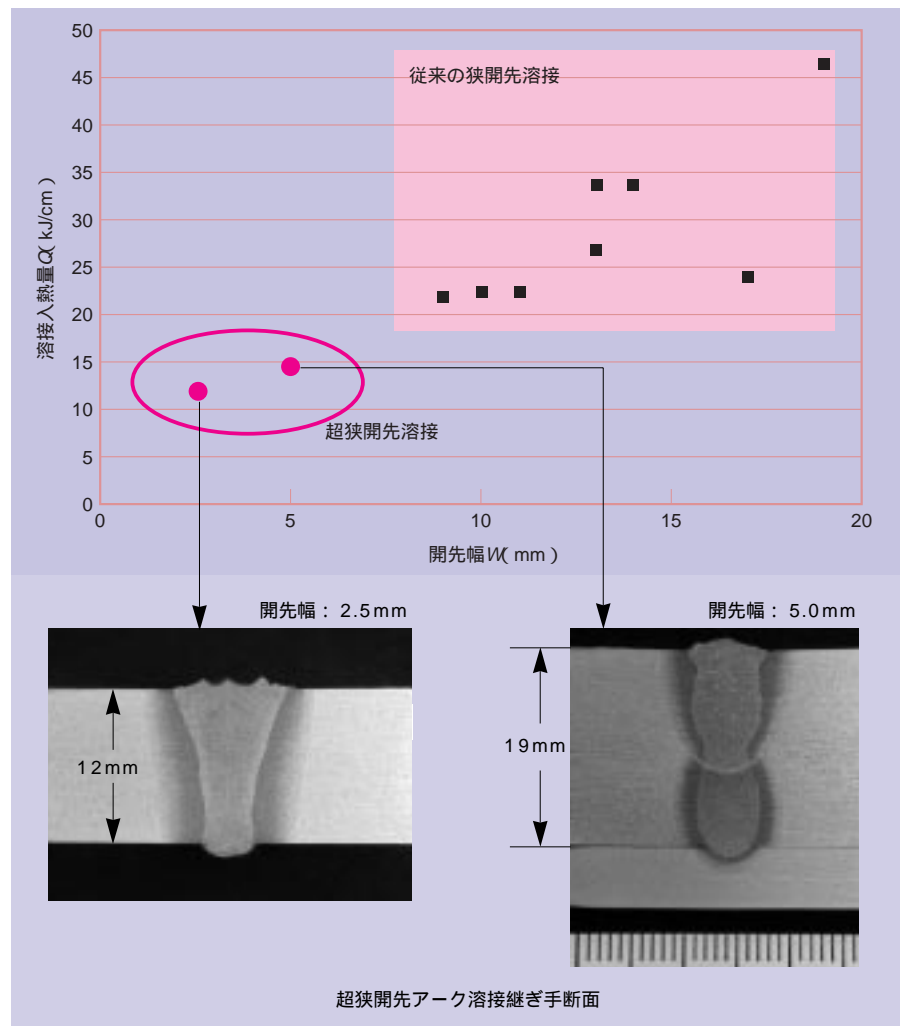


図5 超狭開先アーク溶接法による溶接可能範囲。開先幅 2.5mm まで溶接可能なことを実証

で、開先部内で鋼製ワイヤーが多く溶けると、突き出し長さがその分だけ短くなり、ワイヤー先端は上昇する。すなわち、突き出し長さが変化する。

次にパルスの電流値が小さい時間帯に入ると、鋼製ワイヤーを溶かす量が小さくなり、突き出し長さが大きくなってワイヤー先端が下側に降りて、開先部の底部に向けて下側でアーク放電を起こすように変化する。すなわち、鋼製ワイヤー先端の位置は、図4に示すようにサイン曲線に似た動きになる。

鋼製ワイヤーにパルス電流を流すこ

とで、アーク放電を発生させる位置を開先部の内部で上下させる。パルスの電流値が小さい時間帯は、開先部下側でアーク放電を起こし、その近くを十分に加熱して溶け込み不足を起こさなくする。次に、パルスの電流値が大きい時間帯に入り、鋼製ワイヤーを大量に溶かし、溶融した鋼を十分に供給する仕組みである。

鋼製ワイヤー先端の位置を最適に制御することで、従来の狭開先溶接で単純に開先幅を狭くした時に見られたアーク放電の不安定さを解消できるメド

をつけた。同時に溶け込み不足によって未溶融部が生じて融合不良部ができる問題も大量に溶融することで解消し、高品質な継ぎ手をつくるアーク溶接を実現するメドをつけた。

### 2.5mmの超狭開先幅を実現

パルス電流を用いることで、アーク溶接法が狭開先溶接法を進化させる可能性を持つことを示した。このため、開先幅をどこまで小さくできるかを実証することにした。この結果、開先幅が2.5～5mmと狭い“超”狭開先溶接ができることを確認した(図5)。

従来は開先幅10mmで3～4回(パス)溶接を加える溶接部に対して、今回は開先幅を5mmという超狭開先溶接としてパルス電流を用いるアーク溶接を施した結果、2回(パス)で溶接できた。つまり、溶接の生産効率が向上した。

従来のアーク溶接法と比較するために、溶接する鋼板として板厚12～25mmを選んで実験した。板厚12mmの鋼板をアーク溶接する場合に、従来は一般にV字型の溶接部を鋼板の裏表から2回溶接していた(図6(a))。まず、表側の開先部のV字(深さ7mm、角度60°)を溶接し、次に鋼板を裏返し、裏側の小さなV字(深さ5mm、角度60°)を切削で形成し、このV字を溶接する。

一方、超狭開先アーク溶接では、開先幅2.5mmに1回溶接するだけで作業は完了した(図6(b))。溶接時に溶融した鋼が抜け落ちないように裏あて材を用いている。

板厚12mmの鋼板に対する従来の溶接法と超狭開先溶接を比較すると、溶接回数は従来法が2回に対して超狭開先

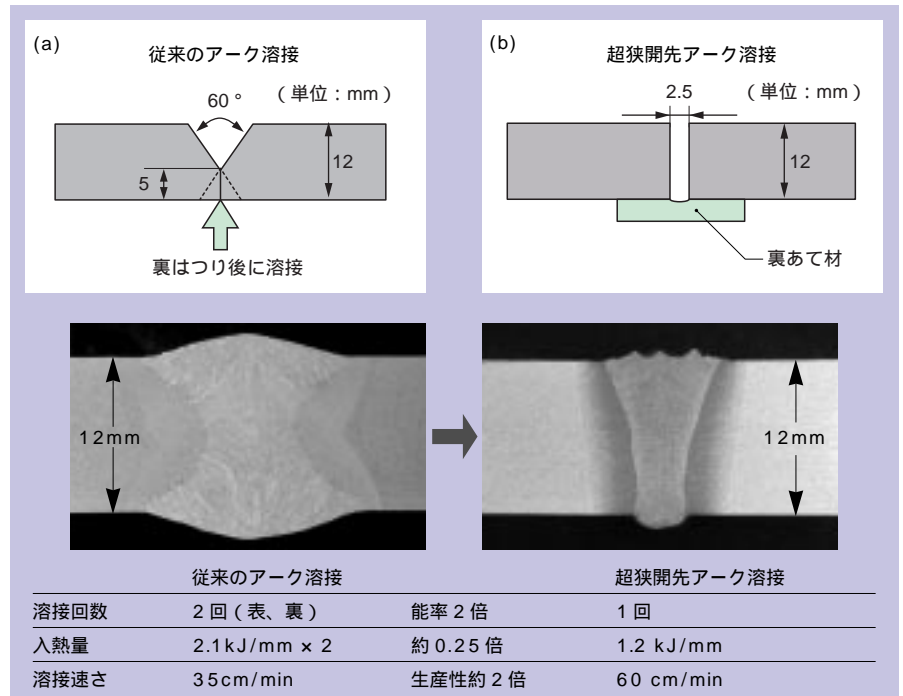


図6 板厚12mmの鋼板を超狭開先アーク溶接法で接合。溶接部は小入熱による高品質化と溶接回数(パス)の低減によって高生産性を実証

法が1回で済み、入熱量は同4.2kJ/mm(2.1kJ/mm × 2回)に対して同1.2kJ/mm、溶接速さは同35cm/minであるのに対して60cm/minと速い。入熱量は、溶接ノズルが移動した距離(その速さが溶接速さ)に対する値で今回は約1/4に削減でき、溶接速さが約2倍近く向上し生産性が高まることを明らかにした。

超狭開先アーク溶接は、入熱量が小さくて高品質な溶接部をつくることができる上に、溶接の回数(パス)が少なくて済むため高生産性(高効率性)も兼ね備える優れたアーク溶接法であることを実証できた。

### 科学に基づく開発アプローチ

今回の超狭開先アーク溶接の開発では、溶接現象をシミュレーションできるソフトウェア「アーク溶接プロセス開発数値シミュレーションツール」を

開発した。開発の期間と費用をともに最小にするツールとして開発したもの。

同時に、アーク溶接装置の電源として「フルデジタル溶接電源システム」も開発し、シミュレーション・ソフトウェアと組み合わせて利用した。

シミュレーション・ソフトウェアを駆使し、超狭開先アーク溶接のワイヤ先端の上下運動の有効性検証に成果を上げた。また、フルデジタル溶接電源システムでは、精密溶接法としての有効性と適切な溶接条件を見いだすのに、大きな成果を上げた。

今回開発に成功した理由は、シミュレーション・ソフトウェアやデジタル電源などを用いて、溶接法を科学に基づいて解明する姿勢を打ち出したからである。従来は経験と勘を重視する雰囲気はややもすればあったが、これを打破できたのが一番の成果である。



\*レーザー溶接：レーザー溶接に適用されているレーザーは現在、CO<sub>2</sub>（炭酸ガス）レーザーや、YAG（ヤグ=ネオジウムを含むイットリウム・アルミニウム・ガーネット）レーザー、半導体レーザーなどである。この中で、CO<sub>2</sub>レーザーは出力が大きい製品

が比較的安くできることが特徴で、最大50kW、数kW程度が主力製品になっている。レーザー溶接が本格的に普及し始めた現在、YAGレーザーなどの固体レーザーでさまざまな改良や工夫が進み、いろいろな用途に適用する動きが急速に進行中。

## 超鉄鋼を生かす レーザー溶接

# レーザー溶接法の溶接欠陥の克服にメド 出力を周期的に振動させて気孔発生を防止

物質・材料研究機構の超鉄鋼研究センターの溶接グループは、高精度溶接法の代表格であるCO<sub>2</sub>レーザー溶接の欠点克服にメドをつけた。溶接部の熱変形がほとんどないなどの優れた特徴を持つレーザー溶接は、厚板を溶接すると気孔などの溶接欠陥がしやすい欠点があり、その克服法が強く求められていた。同グループはレーザー光の出力を一定値ではなく、ある周波数で変動させる手法を採用することで、レーザー溶接の欠点だった気孔発生を防ぐ対策を見いだした。これによって、普及し始めたレーザー溶接法は、現在の薄板中心の用途だけではなく厚板へも適用できるメドをつけた。この結果、超鉄鋼研究センターが開発を進めている超微細粒鋼の厚板をレーザー溶接によって構造体に組み立てる道を切り開いた。

レーザー溶接\*は最近、自動車ボディ（車体）の一部の溶接に適用されるなど、溶接対象を急速に拡大し、本格的に普及し始めた（図1）。一般的なアーク溶接に比べて、レーザー溶接は溶接部の熱変形が小さいので、狙った通りの接合形状が実現できるなどの高精度溶接ができる。高精度溶接という特徴から、最近では航空機の機体の溶接にも採用されるなど、適用用途をますます増やしている。

溶接の熱源に波長と位相がそろっているレーザー光を用いているため、溶接対象部にレーザー光を集光させるこ

とができ、小さな直径に集中的に照射できる。これによって入熱密度（パワー密度）をかなり大きくできる点が最大の特徴である。

例えば、一般的な溶接条件で比較すると、レーザー溶接の主役の一つであるCO<sub>2</sub>（炭酸ガス）レーザー\*溶接（出力20kW）の加熱部の直径は0.5mmと小さい。これに対して、アーク溶接の加熱部の直径は約10mmで、レーザー溶接の入熱密度は400倍も高い。

単位面積当たりの入熱密度でも、アルゴンアーク溶接が最大15kW/cm<sup>2</sup>程度が主流であるのに対して、CO<sub>2</sub>レ

ーザー溶接は最大1000 kW/cm<sup>2</sup>である。この結果、溶接幅が非常に狭く、溶け込み深さがかなり深く、熱影響部が非常に狭い溶接ができる（図2）。これらの特徴から、溶接部の変形がほとんどない高精度溶接ができる。

出力20kWのCO<sub>2</sub>レーザーは速さ16.7 mm/sで溶接箇所を移動させても、溶け込み深さが20mm以上と非常に深い溶接を実現できる。

### 現在普及した用途は薄板の溶接

本格的に普及し始めたレーザー溶接だが、現在その用途は自動車ボディなどの薄板の溶接が主流になっている。これは、溶接部の熱変形が小さいという特徴を生かした適用である。

レーザー溶接のもう一方の特徴である溶け込み深さが深いという利点を生かす用途は、厚板の溶接である。

実は厚板をレーザー溶接すると、小さな穴である気孔や凝固割れという溶接欠陥ができる問題があり、厚板の溶接に適用されていないのが実情である。

この問題に対して、超鉄鋼研究センターの溶接グループは、厚板をレーザ



図1 自動車ボディ（車体）の屋根部にYAGレーザー溶接を適用（写真は、Volvo Cars Corporation提供）

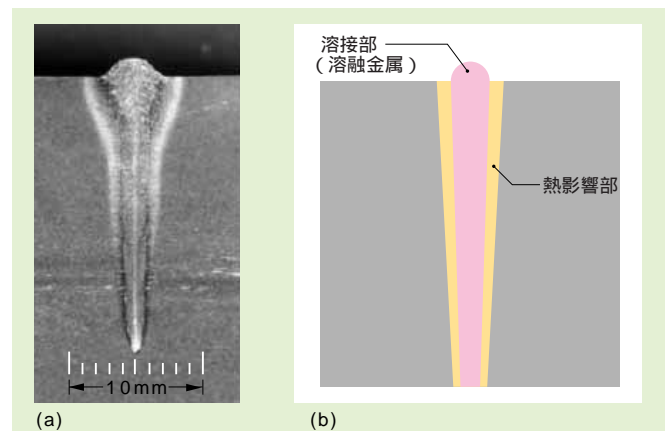


図2 (a)CO<sub>2</sub>レーザー溶接部の断面部、(b)溶接幅が非常に狭く、溶け込みが深く、熱影響部が非常に狭いことを示す模式図

\* CO<sub>2</sub>レーザー：レーザー溶接の主役の一つであるCO<sub>2</sub>（炭酸ガス）レーザーは、高出力が比較的容易なため、高出力な製品が販売されており、初期の設備投資などのインシヤルコストが安いなどの利点を持つ。欠点は、レーザー光を導く経路に光ファイ

バー（SiO<sub>2</sub>系）が適用できず、光路の設計に工夫が必要なことである。最近では、高速に動くミラー（ポリゴンミラー）に反射させたレーザー光を、長焦点レンズによって照射個所を動かすリモート溶接も実用化されている。

## 超鉄鋼を生かす レーザー溶接

一溶接した際にできる溶接欠陥である気孔や凝固割れの防止策を見だし、レーザー溶接を厚板に適用する道を切り開いた。

### 金属蒸気が溶融金属に中空部形成

厚板同士をレーザー溶接すると、溶接部内部に気孔ができる仕組みを考えてみよう。

小さな直径に集光させたCO<sub>2</sub>レーザー光を溶接対象部に照射すると、入熱密度が高いことから、鋼などの金属が急速加熱によって急速に溶けて「溶融

池」（溶融金属の部分）をつくる。

レーザー光の入熱密度はかなり大きいために、鋼の一部が気化し金属蒸気が激しく発生する。金属蒸気がキーホールから飛び出す時の反作用〔反跳力（はんちょうりょく）と呼ぶ〕が溶融池に働き、レーザーが照射している部分の先端部を下に押し下げる。この結果、「キーホール」と呼ばれる細長い円柱状の中空部が溶融金属内に形成される（図3(a)）。

レーザー溶接にとって、キーホールの存在は重要である。キーホールの内

面にレーザーが照射されることで奥深くまで入熱でき、溶け込み深さが深くなるからだ。

CO<sub>2</sub>レーザー溶接は、ある程度の速さで溶接個所を変えて移動することで連続溶接する。レーザー光の照射位置を変えるために、進行方向に対して、溶融池や熱影響部の温度分布は尾を引くような非対称な分布となる。

### キーホールが深くなると不安定に

レーザー光の照射が続くことで入熱密度の高い入熱が連続的に加えられ、金属蒸気が発生し続ける。金属蒸気の高い圧力がキーホールの側面を押し続けることでキーホールの円柱状形状が維持される（図3(b)）。

キーホールの深さが $2r$ （ $r$ ：キーホールの半径）以上の長さになると、キーホールは円柱形状を維持するのが不安定になり、キーホールの側面で円柱がくびれてしまう現象が起こる（図3(c)）。

くびれができると、レーザー光による入熱は、くびれの出っ張っている部分に照射し、この部分を加熱するのに入熱のエネルギーの多くを消費してしまう。すると、この下側のキーホールの奥まで届くエネルギー量（入熱）が小さくなる。キーホールの深部では金属蒸気の発生量が少なくなった分だけ、側面を押し圧力が弱まる。

### ×線透視像によるキーホール観察

気孔発生防止策を検討するために、レーザー溶接時にキーホールがどのようにでき、気泡と気孔がどのように発生するかを解明することが重要と考え

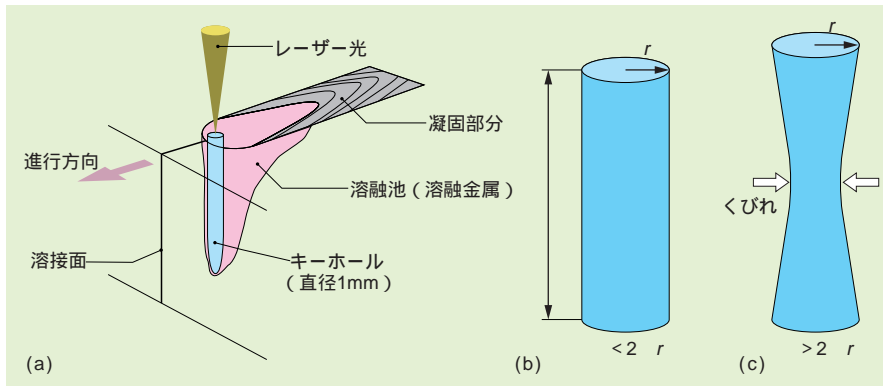


図3 (a)レーザー溶接途中の溶接部の溶融池にできるキーホール、(b)入熱密度が大きいために、直径が小さく深い円柱状の中空部のキーホールが形成される、(c)キーホールの深さが円周以上になると不安定になり、くびれが生じる。もし、くびれが閉じると、気泡が発生する

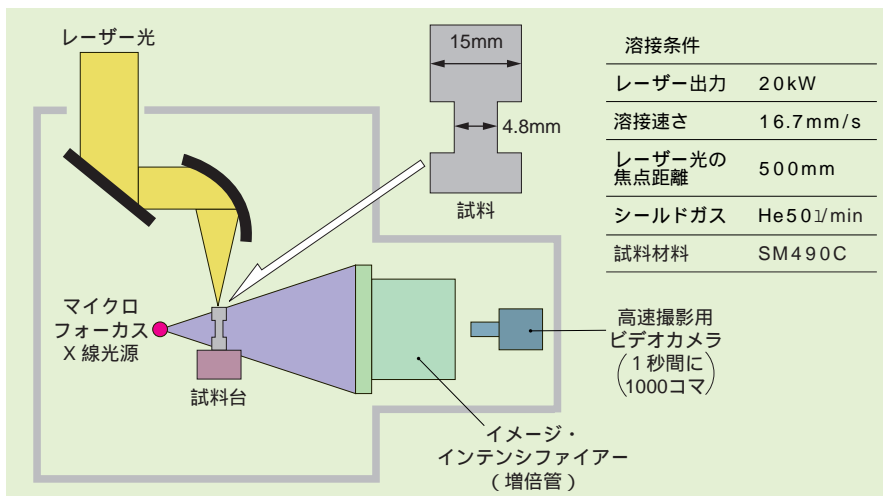


図4 レーザー溶接途中のキーホールの挙動を観察する計測装置。毎秒1000コマ（フレーム）の高速撮影ビデオカメラによってキーホールのX線透視画像を記録

た。このため、焦点を微小に絞れるマイクロフォーカスX線光源の前に、レーザー溶接する鋼製試料を配置し、溶接過程を示すX線透視像を観察する計測装置を組み上げた(図4)。X線透視像は微弱な信号であるため、イメージ・インテンシファイアー(増倍管)で可視化した。高速で変化するキーホルの挙動は、毎秒1000コマ(フレーム)の高速撮影ができるビデオカメラでX線透視像の画像を記録した。

キーホルの挙動を観察した結果、キーホルの途中で直径が小さくなるくびれが生じ、その部分より深いキーホル先端部から気泡ができることを観察した(図5)。

金属蒸気がキーホルの側面を押す圧力が弱まると、キーホルの先端部の深部ではくびれが閉じ、先端部に残った中空部が気泡になってしまう。

気泡は、溶融池内をゆっくりと浮上していく。レーザーの照射する位置が移動して、入熱がなくなり温度が低くなると気泡を含む溶融金属が凝固する。気泡は気孔として溶接部内に残る。

気孔ができる原因は、レーザー溶接の特徴である溶接幅がかなり小さく、

溶け込み深さが深いキーホルができるからである。レーザー溶接の根源にかかわることが原因であるだけに、気孔形成の防止策には抜本的な解決策が求められていた。

キーホルは直径方向にも、深さ方向にもそれぞれ振動する不安定現象が生じていることが観察できた。

### レーザー光出力を周期的に変動

CO<sub>2</sub>レーザー溶接時にキーホルの形状を安定化させる対策として、レーザー光の出力を制御する方法を検討した。

レーザー光の出力に強弱をつけるパルス状にする溶接実験を実施した。レーザー出力が高い部分を20kWに、低い部分を12kWとし、パルス間隔を同じ(高出力と低出力の時間比のデューティ=50%)にしてレーザー溶接した結果、レーザーのパ

ルス出力の周波数(変調周波数)が16Hzの場合に、キーホルが安定し気孔がほとんど発生しなくなった(図6)。

レーザー出力の変調周波数16Hzでキーホルが安定する機構を次のように考えた。レーザー出力をパルス状にした結果、出力が高出力に急増する際に(図6中の印)、キーホル内部から溶融金属が噴出し、溶融池表面に波をつくる。この進行波は溶融池と凝固部分

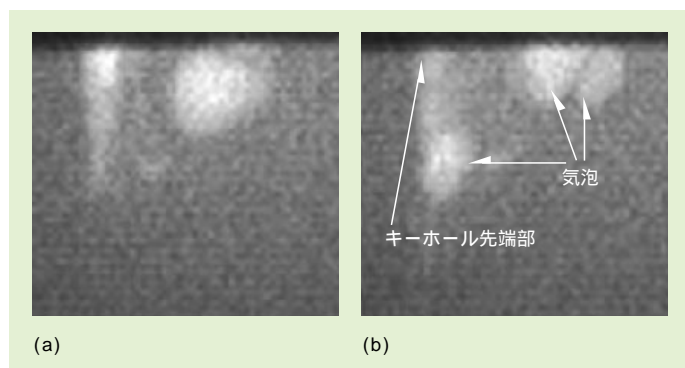


図5 (a)キーホルの先端部のX線透視像、(b)キーホル先端部のくびれた部分の下側で、くびれが閉じて気泡が発生する様子を高速撮影用ビデオカメラで撮影。毎秒1000コマ撮影しているため、1コマの画像データ量は小さい

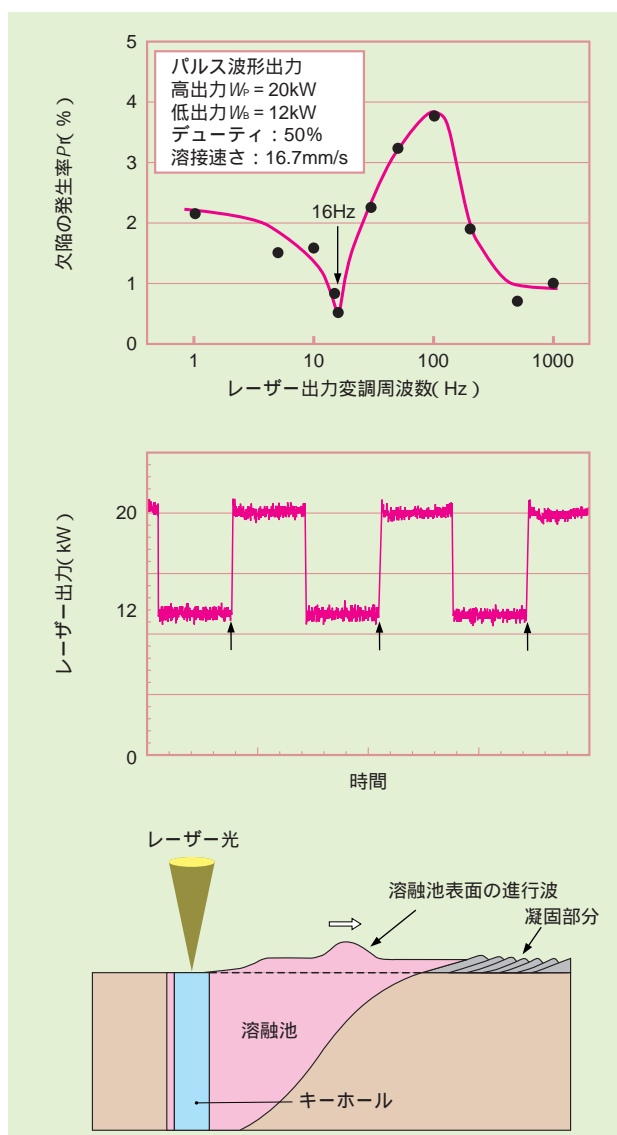


図6 レーザーのパルス出力が変調周波数16Hzの時に、キーホルが安定。気孔の発生確率が大幅に小さくなった



の端で反射して跳ね返ってくる。この反射波がキーホールまで到達すると、キーホールを埋めるように流れ込んでしまう。

流れ込んだ溶融金属はレーザー光に急速加熱されて、金属蒸気を急に発生させるために、キーホールの円柱形状が乱れる。

この現象が起こらないように、反射波がキーホールに入る直前に、強いレーザー光を照射すると急速加熱によって金属蒸気の発生量が増え、あふれ出る溶融金属の進行波が反射波を押し戻しキーホールを維持する。溶融池の表面にできる進行波と反射波の合成波の固有振動周波数が16Hzの場合に、レーザー出力の変調周波数16Hzと同期する結果、キーホールが安定した。

### レーザー光の波形を最適化

レーザー溶接時のキーホールを安定化させる対策として、レーザー光の出力に強弱をつけるパルス状にすると安定化させる効果が高いことを見いだした。次に、レーザー光の出力波形の最

適化を図った。

波形がパルス状の場合は、出力が急に強くなったり、弱くなったりし、入熱の度合いが急激に変わる際の反応が問題になると予想できた。出力が急に弱くなると、キーホール全体に与える熱入力が急に小さくなり、金属蒸気の発生量が急に小さくなって不安定になるとの懸念が推測されたからだ。

このため、レーザー光出力の波形をオンオフ的なパルス状から、なだらかに変化するように変更した。例えば、レーザー光の出力波形を三角波とし、特に最大出力以降の変化を緩やかな傾斜とする非対称な三角波を出力として与えてみた。

この結果、レーザー光出力が急に弱まることが無くなり、キーホールの安定性を向上させた(図7)。三角波の前

半の出力が高くなっていく部分でも、レーザー光出力が急に強まらないようになったため、キーホールの安定性が高まり、気孔の発生がなくなった。

レーザー光出力の波形では、出力が急に変化することを避けることが重要になると分析している。

### レーザー溶接を厚板に適用

出力20kWのCO<sub>2</sub>レーザー光を速さ16.7 mm/sで移動させる溶接実験では、溶け込み深さ20mmを確保できたことから、レーザー溶接は厚板を効率良く溶接できる潜在力を既に十分に持っている判断できた。

厚板を貫通する溶け込み深さが深いレーザー溶接を施工するには、溶融池の溶融金属が重力によって厚板から落ちないことがまず必要条件になる。溶融金属には表面張力が働く。この表面張力と溶融金属に働く重力の兼ね合いによって溶融金属が落下しない条件内で、厚板を貫通するレーザー溶接が可能になる。

厚板を貫通するレーザー溶接には、独特の課題があった。厚板を貫通するレーザー溶接では、キーホールを通過したCO<sub>2</sub>レーザー光が空気を電離し、厚板の裏面でプラズマをつくる。

プラズマができると、空気中のN<sub>2</sub>ガス(窒素分子)がN(原子状窒素)に変化し、溶融池に供給され、過飽和固溶してしまう。

この結果、過飽和固溶したNは、溶融池内でN<sub>2</sub>ガスとなって多数の気泡をつくってしまい、結果としては溶接欠陥である気孔をつくるという問題が生じた(図8)。

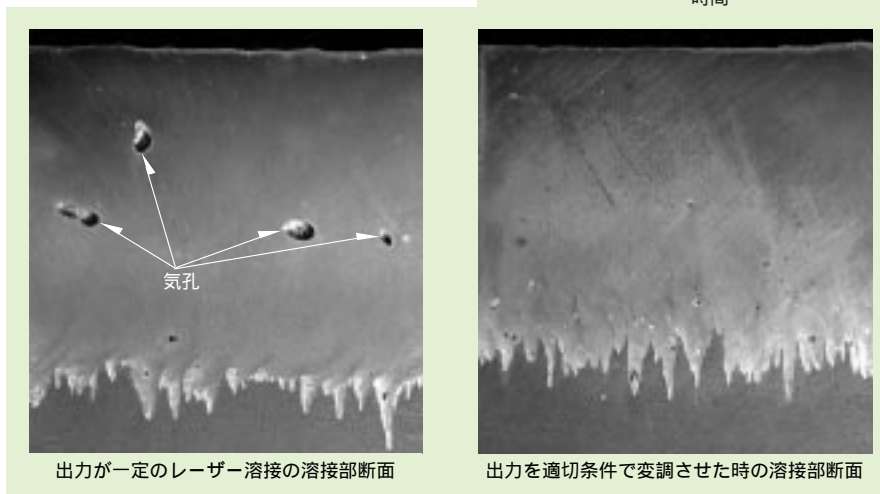
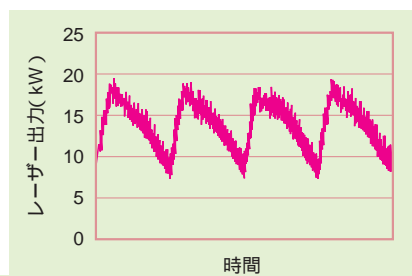


図7 溶接部断面。レーザー光の出力波形を最大出力以降の変化が緩やかな非対称な三角波にした場合

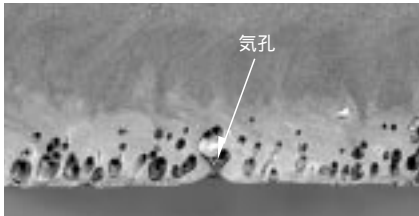


図8 厚板裏面を不活性ガスでシールドしないで、レーザー溶接した断面図。気孔が多数発生

### 不活性ガスによるシールド対策

気孔の発生防止策として、厚板の両側から不活性ガスであるHe（ヘリウム）ガスやAr（アルゴン）ガスなどの気流を溶接対象個所に当てて空気を遮断するシールド法が有効と、従来は考えられてきた（図9）。

不活性ガスを溶接部に当てて空気（窒素）をシールドする方法には、予想もしなかった問題があることが明らかになり、断念せざるを得なかった。

厚板の溶接個所に不活性ガス流を当てるシールド法では、厚板の下側に当てた不活性ガスがキーホール内に流れ込んで、キーホールの安定性を乱すことが分かってきた。

シールドガスがキーホール内部に厚板裏面から侵入すると、キーホールの円柱形状の一部に局部的に膨らんだ乱れが生じる。この乱れは、不活性ガスが急速過熱されて局部的に膨らむ現象である（図10）。

溶接幅が局部的に膨らむと、結果として溶融した鋼が凝固する際の最終凝固部に歪（ひず）みが集中しやすくなり、凝固割れが発生しやすくなる問題が生じる（図11）。凝固割れも溶接欠陥の一つであり、溶接部の強さを低下させ、信頼性を下げる。

このことから、過飽和固溶したNに

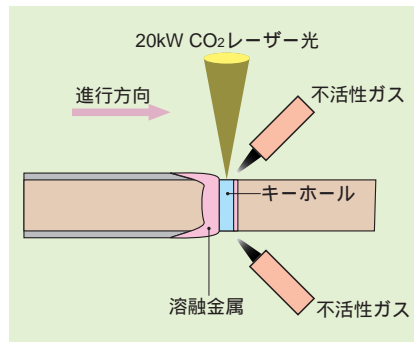


図9 厚板のレーザー溶接。溶け込み深さが深いのでレーザー光が厚板を貫通する

よる気孔発生を防止する対策には、不活性ガスによるシールド法を適用できないことが明らかになった。

### Al添加で窒化物を作製する対策

Nによって気孔が発生する問題の対策として、鋼中にNと親和力の高い元素をあらかじめ添加しておき、レーザー溶接時に生じる過飽和固溶Nとの窒化物をつくらせることで、窒素の気孔形成を防止する対策が考案された。

具体的には、Nと親和力が強いAl（アルミニウム）を用いる対策が有効だった。超鉄鋼研究センターが開発した超微細粒鋼の中に、耐食性（耐候性）を高める目的でAlを添加した鋼があったので、これを試料とした。

0.8質量%のAlを添加した鋼材を厚板に用いた。厚板裏面に不活性ガスなどでシールドしないでレーザー溶接を施した場合、Nによる気孔発生を抑制できた。キーホールでも乱れは生じなかった。

厚板にAlを添加した鋼種を適用できない場合には、厚板の裏側に、Al層をコーティングする手法が有効であることも実験で確認した。

厚板の裏側にAl層を約200 μmと薄

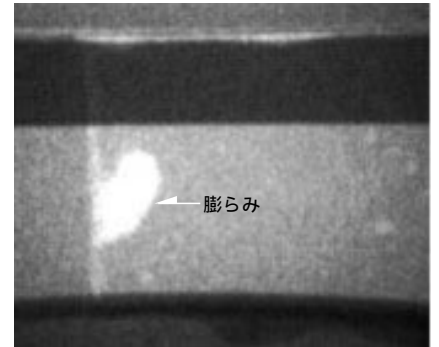


図10 シールドガスの不活性ガスがキーホールの内部に流れ込み、膨らんでいる様子

くコーティングした厚板をレーザー溶接しても、Alが過飽和固溶したNを窒化物として固定するために、気孔の発生は起こらなかった。

鋼にAlを添加したり、コーティングしたりする気孔発生対策の確立によって、レーザー溶接による鋼板の厚板の貫通溶接に実用化のメドをつけた。

この結果、厚板鋼板で大型構造物を組み立てる施工では、厚板鋼板同士をレーザー溶接によって貫通溶接する接合が次第に増えると予想している。

あらかじめ厚板鋼板同士をレーザー溶接によって設計図通りに接合する溶接処理し、現地で組み付けることを想定している。

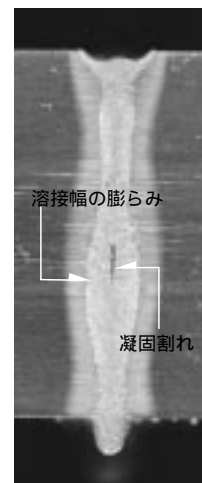


図11 厚板裏面をHeガスでシールドして溶接した横断面。キーホールが乱れた位置で溶接幅が広がり凝固割れが発生しやすくなる

\* MAG溶接：MAG (Metal Active Gas) 溶接はアーク溶接の一つで、MIG溶接に似た溶接法。溶接ノズルから溶接ワイヤーが溶接部に供給され、アークによって過熱され、鋼が溶融するまでは、MIG溶接と同様である。異なる点は、MIG溶接が不活性ガスを

吹き付けるのに対して、MAG溶接はAr (アルゴンガス) とCO<sub>2</sub> (炭酸ガス) の混合ガス、あるいはCO<sub>2</sub>を吹き付ける。このガスをActive Gas (活性ガス) と呼ぶためにMAG溶接と名付けられた。超狭開先アーク溶接は多くがMAG溶接を適用している。

## 超鉄鋼を生かす レーザー溶接

### 強さ2倍の超微細粒鋼の厚板を構造体に組み上げる精密な溶接法を開発

超鉄鋼研究センターは、強さ2倍・寿命2倍という従来にない高性能な“超鉄鋼”を開発するという、挑戦的な超鉄鋼研究開発プロジェクトに取り組んでいる。その研究開発成果の一つが、普通の軟鋼組成の鋼材に大歪(ひず)み加工を加えて引っ張り強さ800MPaという高強度鋼の開発にメドをつけたことである。現在、この高強度鋼の厚板製造技術の実用化に取り組んでいる。

現在、構造用の厚板の引っ張り強さは400MPaが主流であることから、引っ張り強さは約2倍も高い。800MPaという引っ張り強さは、大歪み加工によって鋼の結晶粒を1μmと微細粒にする手法で達成した(以下、開発した高強度鋼を「超微細粒鋼」と呼ぶ)。

超微細粒鋼製厚板を構造体に組み上げるには、溶接による接合が不可欠になる。しかし単純に溶接すると、溶接時の入熱によって、超微細粒鋼の接合部の熱影響部(HAZ)を構成する結晶粒が部分的にいくらか大きくなり、その部分だけ強さが弱くなる“軟化”が起こる。軟化すると、溶接の接合部(継ぎ手部)の強さなどの機械的性質が劣化し、品質保証ができなくなる。

超微細粒鋼製の厚板を実用化する開発技術の一つとして、超微細粒組織をできるだけ維持し、軟化が起こらない精密溶接法の開発も含めて研究開発を進めてきた。最も汎用的なアーク溶接(MIG/MAG溶接\*)と、普及が著しいレーザー溶接の両方で、超微細粒鋼製厚板を精密に溶接する手法をそれぞれ追求した。

#### 両溶接ともに入熱を精密に制御

超鉄鋼研究センターの溶接グループは、アーク溶接では小入熱化と溶接個所での入熱分布を精密に制御する手法を適用し、接合部の熱影響部(HAZ)などの一部の組織の結晶粒があまり大きくないように、すなわちできるだけ軟化しないように工夫した(pp.3-8の解説参照)。

軟化域を最小化したうえで、アーク溶接に用いる溶接ワイヤーに溶接後の冷却時に体積膨張する組成の鋼材を用いることで、残留応力を大幅に低減し、実質的に接合部の溶接品質を劣化させないメドをつけた。

レーザー溶接では、入熱を局所的に集中させるレーザーの特徴を生かし、入熱を精密に制御しながら溶け込み深さが大きく、かつ溶接欠陥を発生させないことにメドをつけた。熱影響部が非常

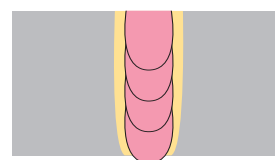
に狭く、溶接品質を劣化させない。1回のレーザー溶接で厚板同士を溶接できるので、生産性はかなり高い(pp.9-13解説参照)。

今回開発にメドをつけた精密溶接法のアーク溶接とレーザー溶接を適材適所に使い分ける目安は、以下のように考えている。精密溶接法のアーク溶接は溶接を複数回施工して溶接部を溶融した鋼で埋めていく接合加工であるため、厚板の厚さに原則上限がない。厚さ100mmの“超厚板”でも溶接できる。さらに、溶融させる溶接ワイヤーにいろいろな性質を与えることができる組成の鋼材を適用できるため、課題に柔軟に対応できる。

一方、精密溶接法のレーザー溶接は厚板同士を1回の溶接で接合するため、生産効率が高い反面、厚板を貫通させるレーザー入熱のエネルギー量の限界から、溶接できる厚板の厚さに上限がある。今回実験で用いた20kWのCO<sub>2</sub>レーザーでは、レーザー光の移動速さから厚さ20mmが上限と判断している。また、レーザー溶接はレーザー発振器などの一連の装置がアーク溶接に比べて、100倍以上高いと見積もっている。初期投資が高つくことが検討すべき項目に挙がっている。

超微細粒鋼は、リサイクル性を考慮して普通の軟鋼組成の鋼材を用いているため、鋼の構成元素を炭素量に換算した炭素当量と呼ばれる指標が小さい。このため、溶接時に接合部の一部が硬くてもろい組織に変化するなどの現象が起こりにくく、低温割れなどと呼ばれる溶接割れの問題は起こらない。

超鉄鋼として開発中の超微細粒鋼製の厚板を溶接によって構造体に組み上げるには、今回開発にメドをつけたアーク溶接(MIG/MAG溶接)かレーザー溶接の精密溶接法によって、工場などであらかじめ溶接してできるだけ接合加工を済ませておく。現地での最終組み立て時は、残った限定的な接合個所をボルト接合によって組み立てる工程を想定している。



基本は鋼材と溶接ワイヤーを溶融して複数回の溶接で開先部を埋めて一体化する

図A アーク溶接の一種であるMIGの接合部



基本は鋼材のみを溶融して1回の溶接で一体化する

図B レーザー溶接の接合部



## 独立行政法人の物質・材料研究機構とは

「超鉄鋼材料」研究開発プロジェクトを推進している独立行政法人の物質・材料研究機構(NIMS)は、平成13年度(2001年度)に独立行政法人として発足しました。当時、文部科学省の所管の金属材料技術研究所と無機材質研究所を統合した研究機関として誕生し、21世紀の物質・材料の科学技術に対する研究開発を先導する、世界の中核的研究拠点として研究開発を進めています。

NIMSは、文部科学省が策定した研究開発目標に対して、自らが策定した中期計画に沿って、効率的かつ自立的な研究開発を進めています。世界の中核的研究拠点として、オープンな体制で研究開発を推進し、産学官(官=独立行政法人)連携のために共同研究や研究者同士の交流を積極的に進めています。また、技術移転を進め、ベンチャー企業の創設、物質・材料分野の情報収集・発信を積極的に実行しています。



## 超鉄鋼研究センター

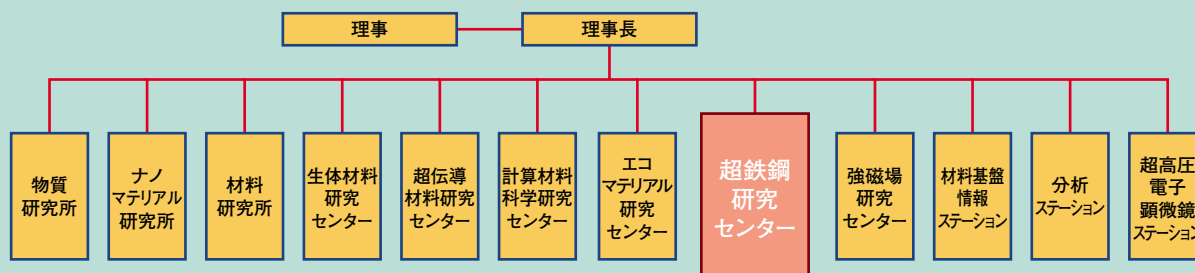
独立行政法人の物質・材料研究機構(NIMS)の1組織である超鉄鋼研究センターは、グローバルな視点からは地球環境問題を解決する鉄鋼材料を、東アジアの視点からは高耐震性と高耐食性を根本的に解決する基盤研究開発をそれぞれ目標としています。基盤研究開発は、材料設計・開発から構造体の開発、商品化までの一連の技術開発を戦略的に推進しています。

超鉄鋼研究センターは、センター長・副センター長の下に、冶金グループ、金相グループ、耐熱グループ、耐食グループ、溶接グループの5つのグループで構成され、挑戦的な研究開発テーマに対してグループ間を有機的につないで戦略的に進めています。さらに、材料基盤情報ステーションなどとも連携し、多くの成果を上げています。

研究開発の指針は、国際的な視野に立った研究戦略と連携戦略を基本に、「使われてこそ材料」の視点から、鉄鋼材料のエンドユーザーである製品設計者と連携を強化し、新しいモノづくりに挑戦しています。人材育成に対しても、国際的な視野の下に、鉄鋼材料の研究開発を担う次世代の人材を育てる戦略を立て、実践しています。

研究開発成果の速やかな実用化を図るために、超鉄鋼研究センターは企業などへのリエゾン機能として「商品化研究室」を設置し、NIMSの技術展開室との密接な連携の下に、企業との共同研究や技術移転を積極的に進めています。

## 物質・材料研究機構 組織図



### 小冊子「近未来の鉄鋼材料を知る」no.5

2004年6月20日発行

企画・編集：物質・材料研究機構 超鉄鋼研究センター

日経BPクリエイティブ編集開発本部(丸山正明)

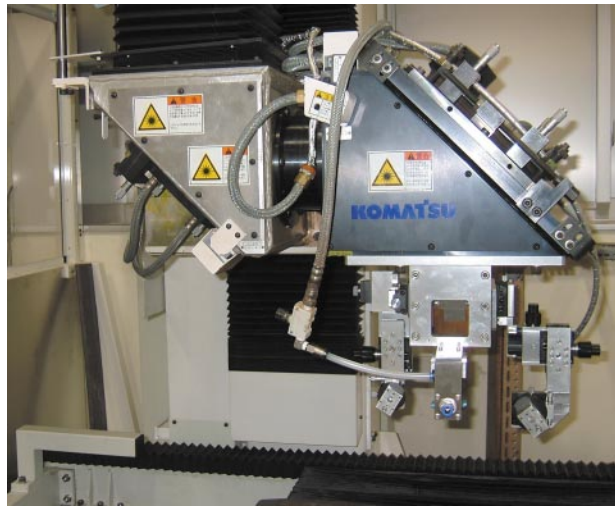
デザイン・制作：日経BPクリエイティブ

制作管理本部(水谷靖男)

梓測 勉

印刷：大日本印刷

発行：独立行政法人 物質・材料研究機構



 独立行政法人 物質・材料研究機構

〒305-0047茨城県つくば市千現1-2-1  
URL: [www.nims.go.jp](http://www.nims.go.jp)

新世紀構造材料(超鉄鋼)  
URL: [www.nims.go.jp/stx-21/jp/index.html](http://www.nims.go.jp/stx-21/jp/index.html)