

技術フォーラム

鉄とアルミニウムのミグ溶接

古川 一敏

愛知産業株

1 はじめに

鉄とアルミニウムの接合は大型構造物から小型軽量部品まで様々な製品で行われている。船ではアルミニウム合金製コンパスブリッジデッキと鋼製船体との接合、LNG船体へのアルミニウム合金製球形タンクの取付け、低温工業におけるアルミニウム管と鋼管の接合、アルミニウム合金製車体の鋼製台車への搭載、さまざまな電気製品など枚挙にいとまが無い。

しかし、鉄とアルミニウムは本質的に合性が悪く、従来から「鉄とアルミニウムの溶接はできないもの」とされ、鉄とアルミニウムの間にステンレスや非金属材料を介してボルト締めなど機械的な接合を行うか、小型部品では軟ろうによる接合などが行われてきた。鋼とアルミニウムのクラッド鋼の開発は構造物の製作上大きな飛躍をもたらしたが、鋼とアルミニウムの溶接が不可能であるという事実にはいささかの変化もなかった。

オーストリアのフローニウス社が長年の研究の結果開発して、最近わが国に導入紹介された画期的なアーク溶接法CMTプロセスは、永年の壁を破って不可能とされてきた鉄とアルミニウムの溶接を可能にした。CMTプロセスは世界で初めてワイヤの動きをプロセス制御に組込んだもので、従来のアーク溶接の範疇に入らないまったく新しい技術である。本稿ではCMTプロセスを御紹介しつつ鉄とアルミのアーク溶接について報告する。

2 鉄とアルミニウムの溶接

鋼鉄とアルミニウムはともに多くの産業分野で広く使用されているもっとも汎用的な金属材料であるが、両材料の物理的特性は表に示すように大きく異なっている。この物理的特性の大きく異なる鉄とアルミニウムが溶融結合すると、非常に硬くて極端にもろい金属間化合物(Intermetallic Phase)を生じる。この金属間化合物の厚

表 鉄とアルミニウムの物理的特性

項目	単位	鉄	純アルミ	
比重		786	2.70	
融点	℃	1530	660	
比熱 (0~100℃)	Cal/g	0.11	0.22	
膨張係数	10 ⁻⁶	12	24	
熱伝導度	CGS単位	0.12	0.52~0.54	
弾性係数	kg/mm ²	21000	7000	
剛性率	kg/mm ²	8400	2500	
固有抵抗	Ω/mm ² /m	0.120	0.028	
導電率	%	16	62	
標準電位 (於25℃)	V	-0.44	-2.34	
		SS330	O材	H14材
引張強度	kg/mm ²	34~45	9.5	13.5
降伏点・耐力	kg/mm ²	≥21	3.5	9.0
伸率	%	>26	40	15

さは溶接シームへの入熱量によって異なるが、この化合物によって鉄とアルミニウムの溶接部は非常に低い静的/動的強度と変形性能となる。

図1(次ページ)に鉄とアルミニウムの二元状態図を示す。鉄はアルミニウムのわずかに数%しか溶解できないが、アルミニウムが重量比で12%を超えると結晶構造が急速に変化してFeAlやFe₃Alのような超格子(Superlattice)が形成される。この超格子は極端に硬くてもろいという特性がある。アルミニウムの含有量がさらに増えるとFe₂Al, Fe₂Al₅, FeAl₃のような金属間化合物が形成される。この金属間化合物は硬度600~1,100HVと超硬で、また極端にもろい特性を持っている。この金属間化合物はアルミニウム内における鉄の体積拡散(Volume Diffusion)および鉄内におけるアルミニウムの体積拡散によって発生する。拡散現象(Diffusion Motion)は、2つの異なる材料の間で化学的ポテンシャルあるいは機械的ポテンシャルが異なる場合に発生する。化学ポテンシャルの違いが大きければ大きいほど金属は拡散均衡(Diffusion Equalisation)の方法により濃度の違いを補正しようとする。もし2つの異種金属がいずれも溶融状態にあれば、異なる化学ポテンシャルを埋めようとして拡散均衡現象はますます激しくなる。

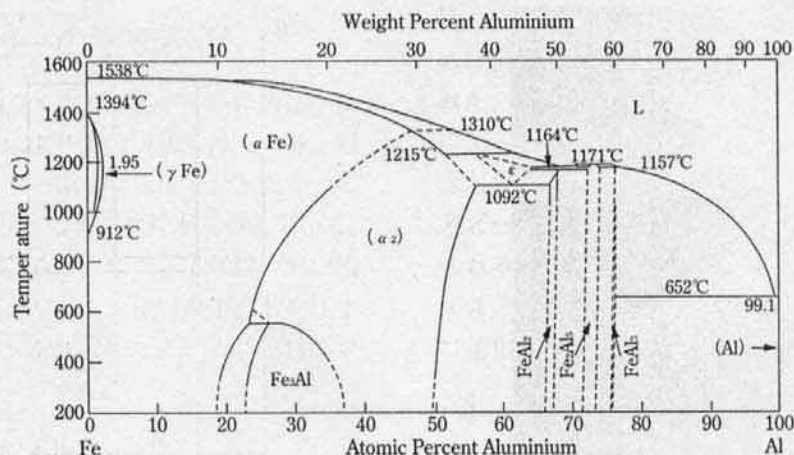


図1 鉄-アルミニウム2元状態図

しかし金属間化合物が非常に薄い場合 ($<10\mu\text{m}$) は、その脆弱性は母材が持つ延性によって吸収される。

今一つの大きな問題は2元素間の電気化学ポテンシャルが大幅に異なる点である。電気化学ポテンシャルが違うことによる影響として、電解質が存在すると電解槽 (Electrolytic cell) が形成されることである。実際面ではマイナスの標準電位を持つ元素 (アルミニウム) が電子の放出により溶け始める。

以上、鉄とアルミニウムの溶接の問題点、溶接が不可能な理由を説明してきたが、鉄とアルミニウムの溶接を可能にするためには2つの重要な条件が必要である。

- ①溶接エネルギーを最小限に押さえたプロセスであること。
- ②鋼板は亜鉛めっきされていること。

従来の溶接法では①の低入熱条件を満足するものではなく、鉄のアルミニウムの溶接は不可能とされてきたが、CMTプロセス開発によって始めて可能となった。②の亜鉛めっきについては、亜鉛めっき層の厚みが最低 $10\mu\text{m}$ 確保されていることが基本で、溶融亜鉛めっきが望ましく、めっき厚 $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ が必要である。亜鉛めっきの外、亜鉛-アルミニウム合金めっき ($<50\%\text{Al}$)、溶融アルミニウムめっきでも可能である。

3 CMTプロセス

鉄とアルミニウムの溶接を可能にしたCMT溶接法は、オーストリアのフローニウス社が長年の研究の結果開発した画期的なプロセスで、CMTとはCold Metal Transferの頭文字を取ったものである。CMTプロセスは一種のミグ/マグ溶接法でディップトランスファ (短絡移行) 型の原理に基づいた溶滴移行が行われているが、従来型ディップトランスファと異なり、機械的な溶滴切断法と

いう斬新な方法によっている。次にCMTプロセスの特徴を挙げる。

3.1 溶滴移行のプロセス

従来のミグ/マグの標準的なディップトランスファの場合は、アークが発生し電極ワイヤの先端が溶融プールに接触浸漬すると、高い短絡電流が流れて突然に溶融し始めホットプロセスで溶融金属の表面張力によって溶滴が移行する。溶滴移行が終了した途端、再点弧されてアークが発生しホットプロセスが連続する。

これに対してCMTプロセスでは、電極ワイヤの先端が溶融プールに接触すると、デジタルプロセス制御によってドライブ溶接トーチのサーボモータが逆転しワイヤを戻して溶滴切断を促進するとともに、溶接電流は限りなくゼロに近づいてコールドプロセスとなる。溶融金属移行時の電流はほぼゼロになりスパッタも発生しない。溶滴が切断され金属移行が終了すると、アークが再点弧されワイヤは再び前進送給され、設定電流が流れてホットプロセスとなる。

CMT溶接の状況を写真1 (以下、次ページ) に、アーク発生より短絡、溶滴移行、再アークに至る間の状況とワイヤの動きを写真2および図2に、電流、電圧の変化を図3に示す。

CMTの処理サイクルは、選ばれる溶接特性によっても異なるが、ワイヤ前進・後退動作は1秒間に平均約63回 (最大70回) と多く、短絡回数は通常のミグ/マグの2倍で、ホットプロセスとコールドプロセスが交互に繰り返され、溶接速度も非常に早くなる。

3.2 入熱量の低減

CMTプロセスでは溶滴の移行はワイヤの逆進・後退に

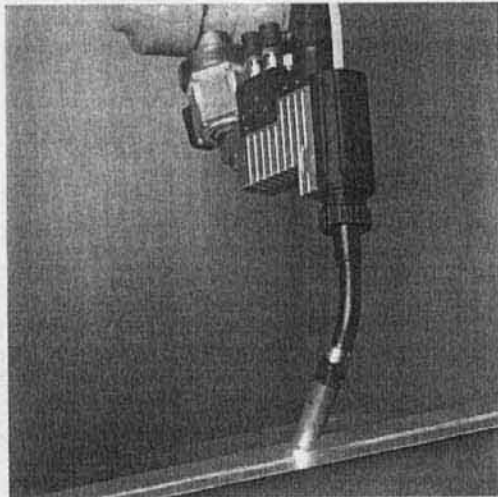


写真1 CMTアーク溶接

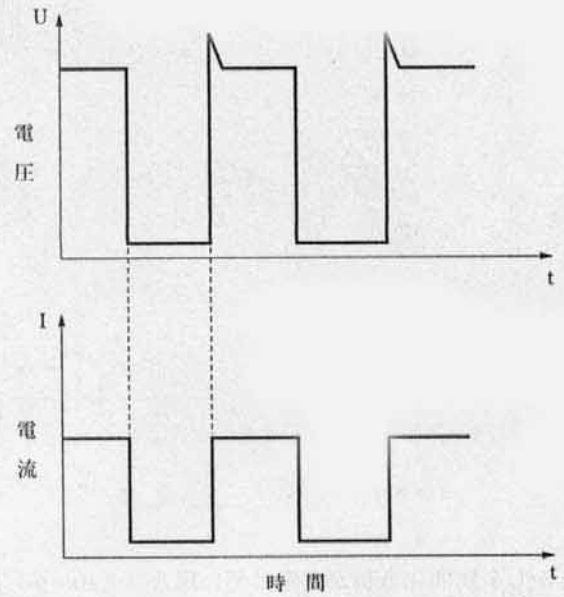
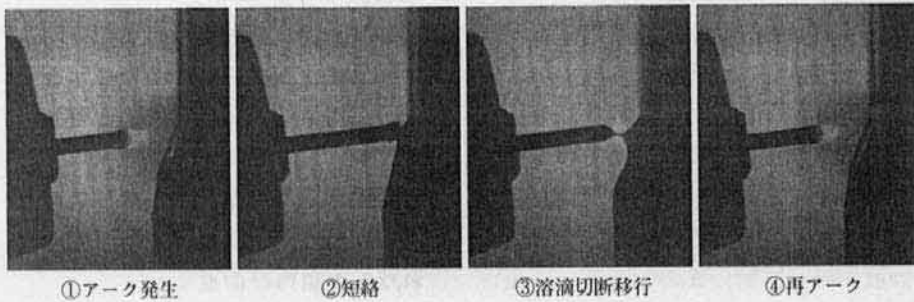


図3 電圧と電流の変化（金属移行時の電流はほぼゼロ）

よって行われ、実際上電流に左右されずに実行される。

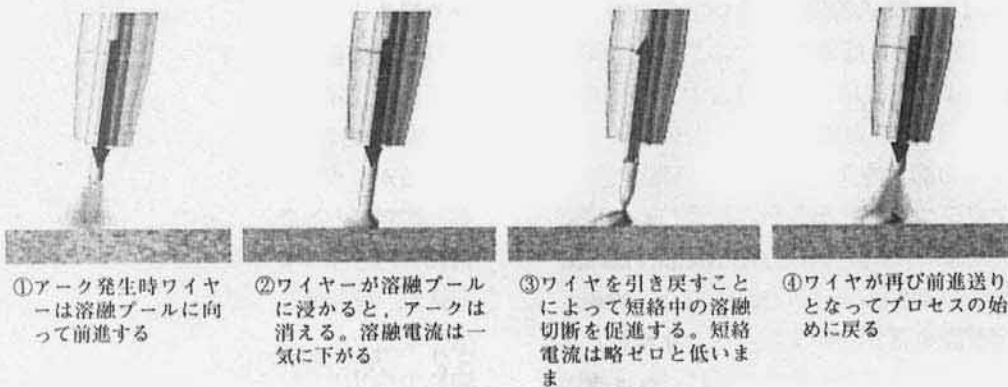
ワイヤが前進しアークが発生し溶融プールに短絡すると同時にワイヤは逆進・後退し、電流も限りなくゼロに近づく。アークが入熱を与えるのは一瞬ですぐに冷却の状態に戻り、ホットプロセスとコールドプロセスが繰り返される。アークプレッシャーはいちじるしく減圧され、溶接入熱量も大幅に減少し、その結果、溶接物なかでも溶接ゾーンが従来のミグ/マグに比べて低温処理ということが出来る。CMTプロセスは入熱量の大幅な低下によ

って、歪みの発生が少なくなり溶接の精度が向上した。また、従来は不可能であった0.3mmという極薄シートの突合せ溶接が裏当板無しでできるようになり、異種金属の接合も含めて超薄板の溶接、ろう接が可能となった。また、継手のギャップブリッジング能力も優れている。



①アーク発生 ②短絡 ③溶滴切断移行 ④再アーク

写真2 CMTプロセス



①アーク発生時ワイヤは溶融プールに向かって前進する
②ワイヤが溶融プールに浸かると、アークは消える。溶融電流は一気に下がる
③ワイヤを引き戻すことによって短絡中の溶融切断を促進する。短絡電流は略ゼロと低いま
④ワイヤが再び前進りとなってプロセスの始めに戻る

図2 CMTプロセスの基本原理

3.3 スパッタ・フリーの金属移行

CMTプロセスでは電極ワイヤが溶融プールに短絡中ワイヤを逆進して戻すことにより溶滴切断を行うので、短絡は機械的に制御され、短絡電流もほぼゼロと低く抑えられるので、スパッタフリーの金属移行が実現している。

スパッタフリーの溶接、ろう接によって欠陥の無い均一美しいビードを実現し、ビードや母材の手直しや仕上げ作業を不要にしてコストを削減したことは、CMTプロセスの大きなメリットの一つである。

3.4 アーク長のコントロール

従来のミグ/マグ溶接法のアーク長制御は電気的方法で行われているのに対して、CMTプロセスでは初めてワイヤ送給を直接プロセス制御に組み込み、アーク長の検出および制御を機械的な方法で行っているのが特徴である。

この制御方法の変更によって、CMTプロセスではワークピースの表面状況や溶接速度が変化したり、突出長が変化してもアーク長が電圧変動の影響を受けることなくアークはきわめて安定している。

3.5 CMTとパルスアーク

CMTプロセスの画期的な特徴として電極ワイヤの短絡現象が起きるたびにデジタルプロセス制御が電源を中絶し、ワイヤの引き込みをコントロールする。このワイヤの前進・後退動作は最大1秒間に70回行われており、このため再アークの点火処理は従来の約2倍となり、母材の溶融が短時間で実現する。溶接入熱量は大幅に低減し、低入熱の結果溶接ビードは幅が狭くビード厚が高い形状となる。

CMTアークの出力は図4に示すように他のアークに比べて一段と低く、出力の上限は中間ディップアークのスタートポイントにより決まり、また、出力の下限は溶接

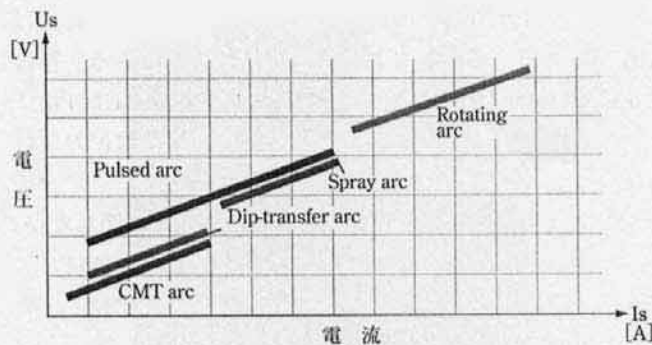


図4 CMTアークのパワーレンジ

物の状況によって決まる。これらの限界を多少広げるために、通称パルスミックスと呼ばれるプロセスが開発された。このプロセスはCMTをパルスアークと組合すことによって、アークの安定性やスパッタフリーの利点を損なわない範囲でメタルへの入熱を増やすもので、入熱量とビード形状を変化できる。パルスミックスモードが使われる場合は溶込みは深くなり、ビード幅は広がる。パルスミックスモードは板厚が1.5mm以上と厚くなる場合に適用される。

4 CMT溶接システム

CMT溶接システムはロボットを含む自動溶接用に設計されているが、基本的には従来のフローニクス社のフルデジタル制御方式ミグ/マグインバータ溶接機「トランスパルス・サイナジック (TPS) システム」¹⁾と同じである。この画期的なプロセスの実現のためには、いくつかの新機能と新システムコンポーネントが必要となった。そこで新コンポーネントの開発と新機能に加え、それ以外のコンポーネントについてもCMTプロセスの適用を前提に、すべてのシステムを見直し再構築が図られた。

CMTシステムの全貌を図5(次ページ)に示す。個々のコンポーネントは次の通りである。

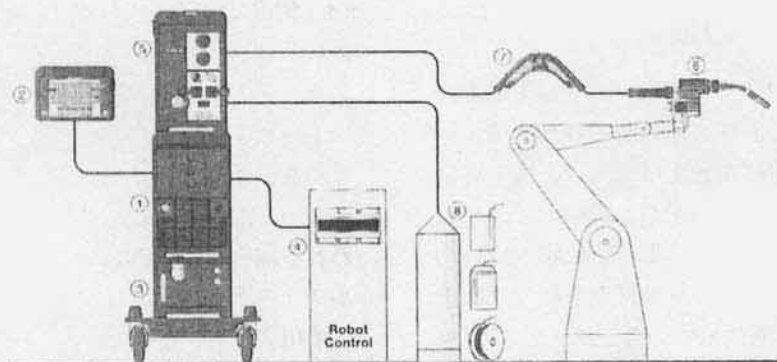
4.1 CMT溶接電源

溶接電源はフルデジタルマイクロプロセッサ制御のGMAインバータ電源TPS3200/4000/5000CMT MV (20~320/400/500/A)を使用。ハード、ソフト一体型のCMTプロセス専用のパッケージが有り、CMTプロセス用統合ソフトを搭載している。標準電源との違いはドライブユニットと電源間的高速データコミュニケーションを目的とした統合LHSB基盤。CMT起動ユニット。リモートコントロールユニット更新用USBポート付などである。

標準/パルス/CMTと3種類のモードを持っている。

4.2 リモートコントロールユニット

RCU5000iリモートコントローラを利用し、容易なオペレーションが可能である。RCU5000iはフルテキストディスプレイ付きリモートコントロールユニットで、Qマスター機能を利用して溶接データのモニタが可能。また、ユーザーフレンドリーな対話型操作が中心となりシステムマッチなメニュー構造が採用されている。標準/パルス/CMTと3種類の処理モードがあるが、CMTシステムの場合は必須部品である。



- ①CMT溶接電源。TPS3200/4000/5000溶接機
- ②RCU5000i リモートコントロール・ユニット
- ③FK4000R 冷却装置
- ④ROB5000 ロボット・インターフェース
- ⑤VR7000 ワイヤフィーダー
- ⑥ロバクタ・ドライブCMT溶接トーチ
- ⑦ワイヤ・バッファ
- ⑧ワイヤ・サプライ・ペールバック

図5 CMT溶接システム

4.3 冷却装置

FK4000-R冷却装置は丈夫で信頼性高く、ロボット溶接トーチに最適な水冷システムを提供する。水冷装置のみの使用が可能。

4.4 ロボットインターフェース

ロボットインターフェースROB5000はロボットの制御がデジタル方式、アナログ方式またフィールドバスシステム経由と、いずれの方式であってもほとんどすべてのロボットシステムに対応できる。CMTはデジタルマシン用フィールドバスシステムを採用。

4.5 ワイヤ送給装置

VR7000-CMT 4R/G/W/F++ワイヤフィーダは4ロールのワイヤ送給用ドライブローラでほとんどすべての汎用タイプのワイヤに対応したデジタル制御ワイヤフィーダである。コネクタ型で電源とトーチへの接続用LHSBコネクション付きエレクトロニクスで、当初CMTトーチ専用が開発された。VR7000-CMTには標準で1.2mmφアルミニウム用フィードロールが組み込まれている。

4.6 ドライブユニット

CMT用ドライブユニットとしてロバクタドライブCMTが使用される。デジタル制御、ギアレス、高ダイナミック特性のACサーボモータ付きコンパクトなロボット溶接ドライブユニットで、重量は1.6kgときわめて軽く、ロボットの負荷重量は6kgで十分である。再現可能なワ

イヤ接触圧力調整およびテンションレバーを開いて圧力読み取りが可能である。ワイヤはデジタル速度制御によって正確に送給される。

使用するトーチネックは標準として36°の角度を有する。「RA500」トーチを使用するが、すべての標準トーチネックをドライブユニットに接続できる。

4.7 ワイヤバッファ

ワイヤバッファは2台のワイヤドライブを切離し独立させることによって、スムーズなワイヤ送給を実現した。ワイヤバッファの搭載方法としては専用のバランスを使用することが望ましいが、ロボットの第3軸を利用することも可能である。

4.8 ワイヤサプライ

汎用ワイヤのほとんどすべてのペール缶・ペールバックが使用できる。

写真3（以下、次ページ）はCMT溶接電源トランスパルスサイナジック3200のフロントを示す。写真4はRCU5000Riリモートコントロールユニットである。写真5はVR7000-CMTワイヤ送給装置。写真6はCMT用ドライブ装置、ロバクタドライブCMT。写真7は吊り下げたワイヤバッファである。

以上、CMT溶接システムの基本形について説明したが、いくつかのバリエーションも可能である。またCMTシステムは前述のように同一のシステムでマルチプロセスが利用可能である。すなわち、

- ①ミグ/マグ 標準溶接



写真3 CMT溶接電源TPS3200の正面

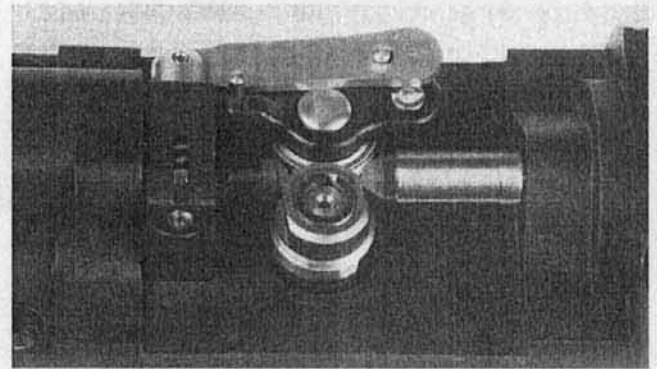


写真6 ロボクタドライブCMT



写真4 RCU5000iリモートコントローラー

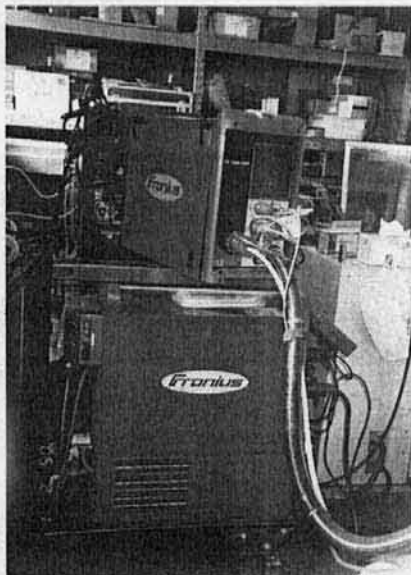


写真5 VR7000-CMTワイヤフィーダー

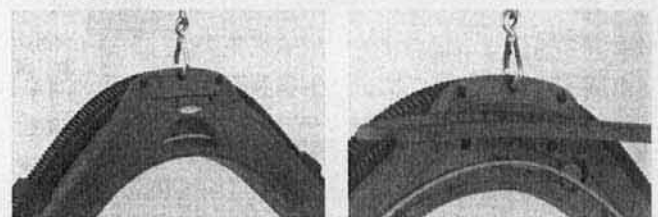
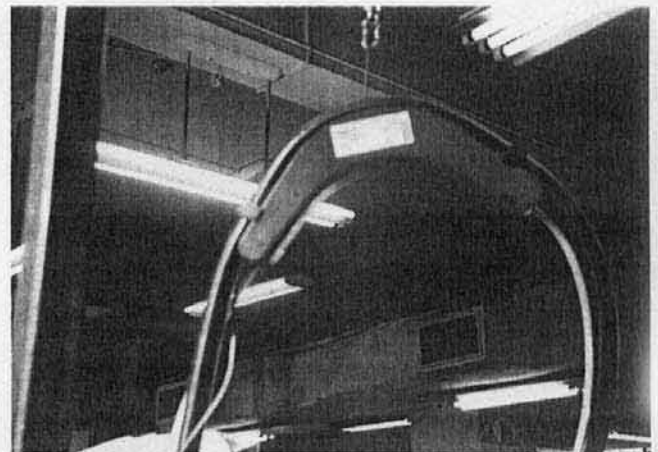


写真7 ワイヤバッファ

②ミグ/マグ パルスアーク溶接

③CMT アーク溶接

これらの特徴に加え、CMTシステムには各種のコスト削減につながる工夫がされている。

- ①トーチに供給するガスサプライのロスが少ない。
- ②冷却システムの自動停止機能
- ③短絡時の電力消費が少ない
- ④モジュラー型システム構造
- ⑤コンピュータを使ったシステムの更新

5 CMTプロセスによる鉄とアルミニウムの溶接

鉄とアルミニウムの溶接を可能にするためには2つの重要な条件が必要であることは前述の通りであるが、その第1条件を満足させる「溶接エネルギーを最小限に抑えたプロセス」としてCMT溶接プロセスが出現した。

写真8は鉄とアルミニウムをCMTアーク溶接した試験片の外観とマクロ断面を示す。1mm厚シートの突合せ溶接で溶接速度は70cm/分。溶接ワイヤはフローニクス社で開発したAISI系の特殊ワイヤ1.2mmφ径を使用している。マクロ断面を見るとアルミニウム側は溶接、スチール側はろう接となっている。写真9に鉄とアルミニウム溶接継手の引張試験片を示す。試験片はすべてアルミニウム母材側熱影響部で破断している。写真10および写真11は0.8mm厚の鉄とアルミニウムシートの重ね継手溶接（溶接速度60cm/分）と同継手の剪断引張試験片

である。

鉄とアルミニウムの溶接継手の引張試験結果を図6(次ページ)に示す。図6の上方の線は使用したアルミニウム合金材母材の引張強度、下方の線は母材熱影響部

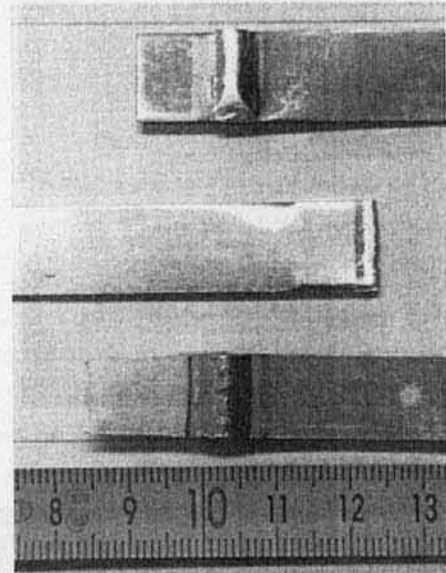
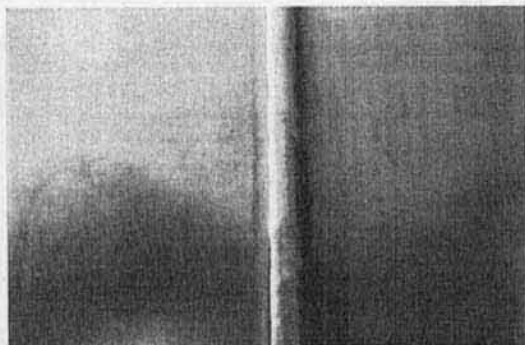
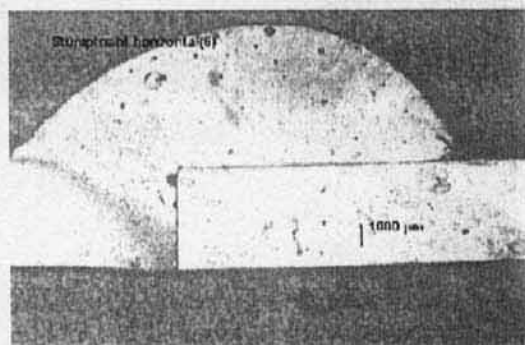


写真9 鉄とアルミニウム溶接継手の引張試験片



外観



マクロ断面

写真8 鉄とアルミニウムの溶接

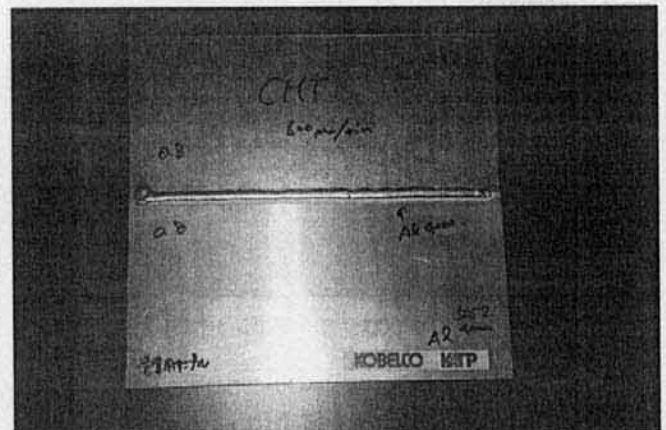


写真10 鉄とアルミニウムの重ね継手溶接

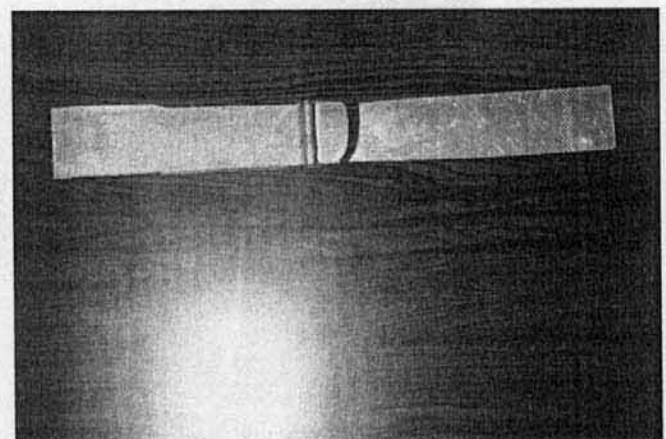


写真11 鉄とアルミニウムの重ね溶接せん断引張試験片

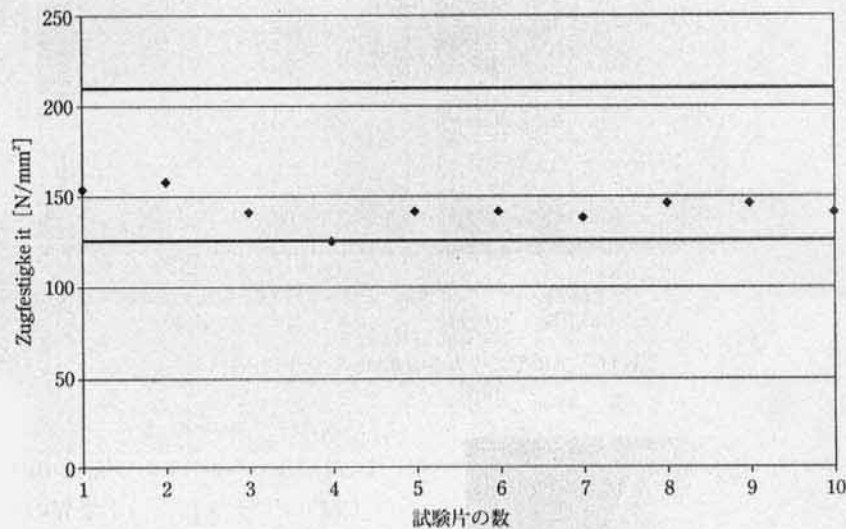


図6 鉄とアルミニウム溶接継手の引張強度

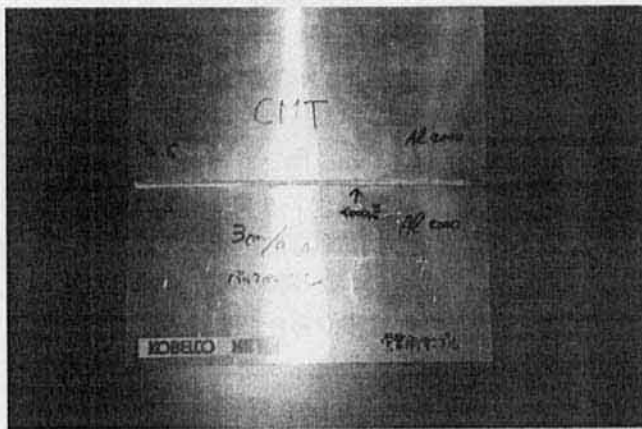


写真12 0.6mmアルミニウムシートの突合せ高速溶接 (溶接速度 3m/分)

の引張強度のレベルで、引張試験片はすべてアルミニウム母材の熱影響部で破断している。

6 CMTプロセスの適用

CMTプロセスはまったく新しい画期的な溶接技術で従来は不可能あるいは困難とされてきたような材種、板厚、異材継手の溶接、ろう接が可能となった。本プロセスはロボットアプリケーションにもそれ以外の自動アプリケーションにも使用することができる。またすべての汎用的母材、汎用的ワイヤが使用できる。また、突合せ継手、重ね継手、すみ肉継手、フランジ継手などの各種タイプの溶接継手や全溶接姿勢への適用が可能である。

CMTプロセスによって可能となった溶接の1例を次に示す。

6.1 超薄板の溶接

アルミニウム、スチール、ステンレスなどの板厚

0.3mmからの超薄板の突合せ溶接が裏当材無しでできる。アルミニウム材の場合は板厚3mmまで、ステンレスや鋼板の場合は板厚2mmまでの溶接においてCMTプロセスの特性が発揮される。

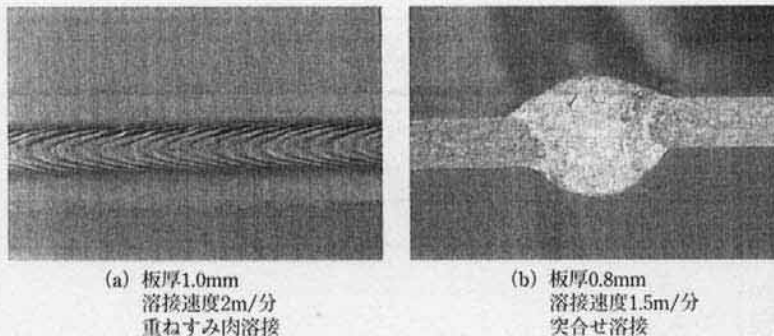
アルミニウム材は0.3~3.0mmのすべてのアルミニウム合金に対してCMTプロセスのメリットは顕著であるが、とくに深溶け込みを必要としない板厚1mm以下の場合に適している。0.6mmのアルミニウム合金板の裏当無しの突合せ溶接を3m/分の高速溶接を行った試験片を写真12に示す。

AlMg₃の1mm厚シートの重ねすみ肉継手を溶接速度2m/分でCMT溶接した試験片の外観を写真13(a) (次ページ)に、0.8mm厚シートの突合せ継手を溶接速度15m/分でCMT溶接した試験片の断面を写真13(b)に示す。シールドガスは純Ar、使用ワイヤAlSi₅ (1.2mmφ径)。

ステンレス材の場合、CMTは0.3~2.0mm厚シートに対して使用される。ギャップが大きい場合も有効であり、また高速溶接ができる。板厚が大きい場合やすみ肉溶接の場合はパルスミックスモードが適用される。シールドガス97.5%Ar/2.5%CO₂、ワイヤは4316 (1.0mmφ径)。

6.2 亜鉛めっきシートのろう接

亜鉛めっきシートにCMTプロセスを適用すると、スパッタが無く、大きなギャップのある場合も安定して良好なビードが得られ高速溶接が可能である。電気亜鉛めっき鋼板の場合は150cm/分という高速溶接でもスパッタの少ない溶接ができるが、溶融亜鉛めっき鋼板の場合はスパッタを減らすために溶接速度を70~80cm/分と低速にする必要がある。シールドガス99%Ar/1%O₂、ワイ



(a) 板厚1.0mm
溶接速度2m/分
重ねすみ肉溶接

(b) 板厚0.8mm
溶接速度1.5m/分
突合せ溶接

写真13 アルミニウム合金AlMg₃シートのMT溶接

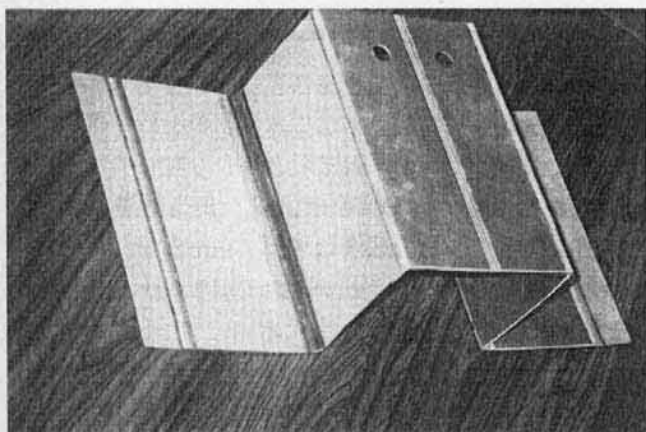


写真14 CMT溶接法の適用例

ヤCuSi₃ (1.0mm φ 径)。

6.3 その他

写真14はアルミニウム、ステンレス、スチールの混在した継手のCMT溶接物であるが、CMTプロセスを適用する可能性のあるものは多々考えられる。前述のCMT溶接の適用例を含めて、CMT溶接を行う場合はすべてフローニアス社の指示するプログラム番号のプロセスによって溶接されるものである。現在はCMTプロセスが開発され業界に紹介されてから未だ日が浅く、新しい条件に対

する新しいプログラムで開発中のものも多い。

CMTプロセスによって業界の一部にはすでにセンセーションを起こしている所もあるが、自動車メーカー、家電メーカー、建材メーカー、金属メーカー、ロボットメーカー、航空宇宙産業、マイクロ接合分野など今後この画期的な溶接法CMTプロセスの適用分野が拡大してゆくことが予測される。

7 おわりに

21世紀の革新的な溶接法CMTプロセスの概要とCMT溶接法による鉄とアルミニウムの溶接について説明御紹介した。最近の工業の進歩にともなう製品の精密化、高級化、軽量化、地球温暖化に伴う環境問題、エネルギー問題など溶接に対しても様々な新しいニーズが出ている。CMTプロセスは少エネルギー、低入熱、低歪、スパッタフリー等々、新しいニーズに対応できる画期的な溶接法として今後の活用が期待される。

参考文献

- 1) 古川一敏；欧州におけるイナートガス・アーク溶接機。軽金属溶接Vol.43 (2005) No.4