

特集：溶接電源 ～電源の最新技術情報～

## 溶接電源の新しい展開～積層造形（WAAM方式）について

愛知産業株式会社  
先進機能部 プロジェクト推進室  
木寺 正晃

### 1. はじめに

溶接で思い浮かべるのは、鋼板同士を被覆アーク溶接及び MIG/MAG 並びに TIG などにより接合する工法として広く知られていた。その為、立体形状を作る積層造形のために溶接用ビードを積み上げる事に展開されることはほとんどなかった。一方で、これら従来の溶接技術を積層造形に展開しようという動きは1920年代から始まっていた。図1は米国の Baker Ralph 氏が、Welding for other purposes than joining, e.g. built-up welding というタイトルで1925年に特許を申請した際のものである。

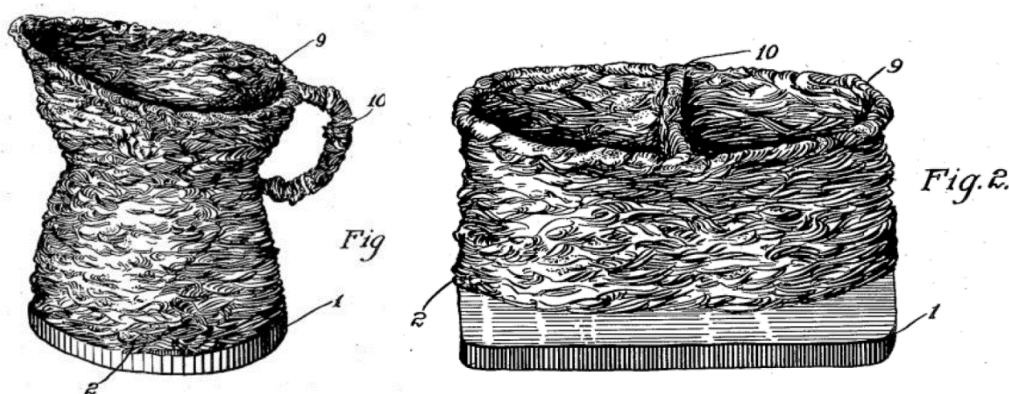


図1 Baker Ralph 氏が構想していたアーク溶接による造形イメージ [Ralph, 1925]

この時点では、構想段階での特許取得がされていたものの、技術として確立するまでには長い時間を要した。これは従来の溶接機と溶接技術では細かく入熱量を制御して、溶融量を調整し、所定の形状を作ることが難しかったためである。低入熱でも安定した溶接を行う事は積層造形を実現するうえで大きな課題の一つであった。

一方、CNC 制御されたロボットアームと溶接電源を組み合わせた技術が1993年に特許化された。1994年以降、イギリスの Cranfield (クランフィールド) 大学で Wire Arc Additive Manufacturing (アークとワイヤによる積層造形の意味、以降 WAAM 方式と表記)に関する研究が盛んに行われるようになった。

ある意味では WAAM 方式が本当に可能になった瞬間であるといっても良いかもしれない。

そして、2005年には溶接機の電源メーカーであるオーストリアの Fronius 社が、世界で初めて Cold Metal Transfer (以降 CMT と表記) と呼ばれる技術を開発した。これにより低入熱・低スパッタでの溶接が可能になったことから、WAAM 方式による積層造形が大きく発展したと言える。

今回はこの CMT という技術の説明、また CMT による積層造形 WAAM 方式の特徴や実例を紹介する。

## 2. CMT (Cold Metal Transfer)とは

CMTとは、短絡アーク溶接に分類される特殊なプロセスである。これまでの一般的な短絡アーク溶接では短絡した瞬間に短絡電流による電磁的ピンチ力でワイヤ先端の溶滴を離脱させており、この瞬間が入熱の増加とスパッタ発生の原因となっていた。一方CMTプロセスでは、母材とワイヤとの間のアークでワイヤ先端に溶滴が生じるが、溶滴の接近を溶接電源が感知、短絡の直前にアークを維持する程度の弱い電流を維持することで溶滴が母材に移行する。溶滴が母材に移行した瞬間にワイヤをACサーボモータによって物理的に引き上げることで溶滴移行が完了する。ワイヤを引き上げながら電流を上げ再びアークが発生することでワイヤ先端に溶滴を生成させる。

このような、ワイヤの正逆送給及び電流制御により低入熱・低スパッタ化が可能となった。このプロセスを最大で1秒間150回繰り返しており、低入熱で安定した溶接が可能となっている。通常のショートアーク溶接では、溶滴の離脱に短絡電流を流しているのに比べて、CMTではワイヤを逆転することで溶滴を離脱しており、入熱量が格段に抑えられることがわかる。入熱量が低減できることにより前層の再溶融が最低限に抑えられ、揃ったビード幅と積層高さで安定した積層が行える。また、溶接変形が少ないことから位置ずれがない積層が可能となる。

図2にCMTの仕組み、図3にプロセスの違いによる炭素鋼とニッケル基合金の肉盛溶接での希釈率の一例を示す。また、スパッタ発生量比較を図4に示す。更に以下リンクにて、MAG溶接とCMTでの施工状況を動画で比較したものを参照されたい。<https://www.youtube.com/watch?v=yuvo30oNfv0>

CMTプロセスはもともと自動車マーケット向けに薄板の溶接がターゲットになっていたが、溶接が困難なアルミ合金と亜鉛メッキ鋼板の接合等にも適用されていた。高度なデジタル制御により従来よりもはるかに高度な溶接電流・溶接電圧・波形制御が可能になったことで、近年になり積層造形への展開が考えられるようになった。

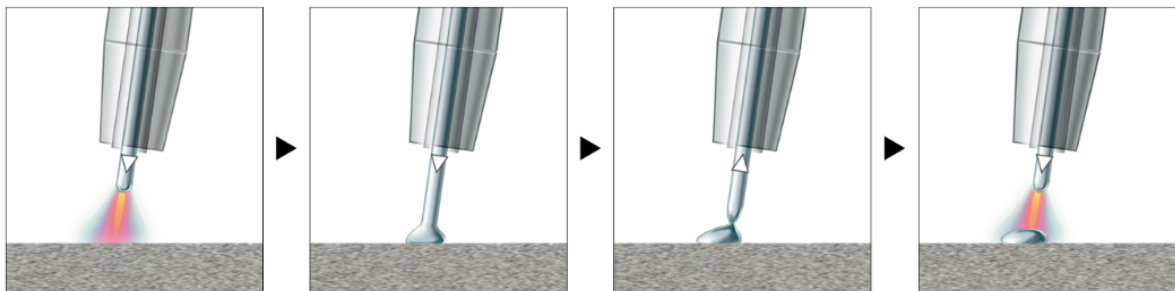


図2 CMTの仕組み - 短絡を制御する溶滴移行


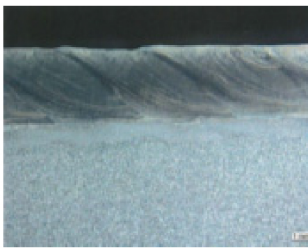
溶接方法	パルスMIG	CMT
鉄の含有率%	～14.5	～6
断面マクロ		

図3 パルスMIG溶接とCMTとの希釈率の比較



図4 スパッタ発生量比較 (左からショートアーク: 0.376g、パルス: 0.264g、CMT: 0.002g)

### 3. WAAM 方式による積層造形

WAAM 方式は CMT 及びプラズマ溶接プロセスとロボットアームや、ソフトウェアの組み合わせで造形が可能で、設備費用が数千万円といわれる金属 3D プリンタの中では比較的安価かつ持ち運び対応な技術として注目を集めている。また、市販の溶接ワイヤが使用出来ることから、大型の立体形状が安価に作り上げることが可能である。WAAM 方式での溶接方法は、プラズマ溶接が主流であったが、高い溶着量により造形時間が短縮できる CMT が盛んに検討されている。

WAAM 方式における溶接は一般的に大気中で行われるため理論上ではそのサイズに制限はない。但し、チタンなど酸化し強度低下する材料を溶接する場合は、目的のワーク形状に応じてチャンバーを用意したほうが良い場合がある。

イギリスのクランフィールド大学 (図 5 参照) における研究例では、チタンを使った大型造形を 2 台のロボットを協調制御することでより速い造形を行うことが可能となっている。溶接ロボットが WAAM Shield という独自のトレーラノズルを搭載し、このトレーラノズルによりチャンバーを必要としない積層を可能にしている。ピーニングロボットは溶接直後に疲労強度向上等を目的に空気圧によるピーニングを行っている。 <https://www.youtube.com/watch?v=4UoV7MCWYZ8>

### 4. WAAM 方式による造形例

以下に、クランフィールド大学で行われている造形例を紹介する。

#### ① サポート無しの鋭角造形

積層造形で鋭角(45° 以下)の造形を行う場合は、サポートと呼ばれる格子状の支えを必要とするのが常識だったが、サポート無しで水平方向及びアーチ状に造形した例を図 5 に示す。このようにサポートの無い造形が可能になったことで、造形できる形状の種類が広がったほか、使用材料の削減にもつながっている。

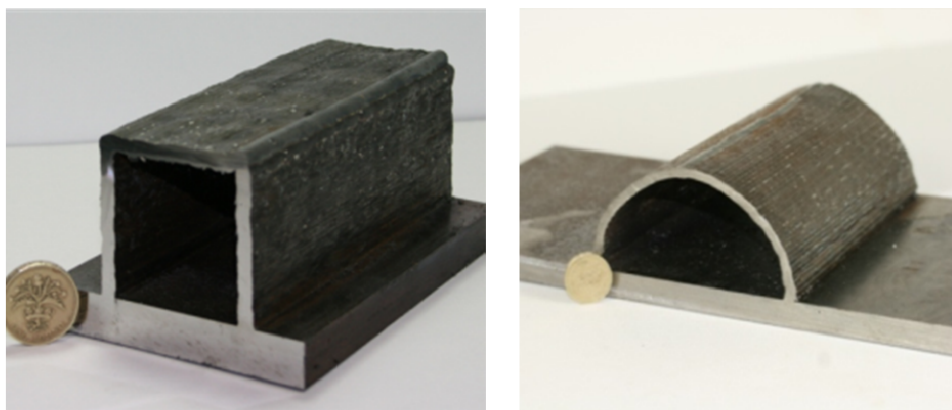


図5 サポートなしの鋭角造形

## ② AI 製飛行機羽根の造形

図 6 に示すように、金属積層造形では最大の造形物である全長 6m 越え、質量 300kg の AI 製飛行機羽根の造形にも成功している。10m 越えの専用チャンバーと、2 台のロボットアームを使用して製造したもので、従来の製法と比較すると最大 70%のコストカット、製造時間も優に 1 年以上かかっていたものが数か月に短縮されている。



図 6 世界最大級(全長 6m)の積層造形物

基材/ワイヤ： AL 4043

<https://www.youtube.com/watch?v=QWrswjk5sEo>

## ③ チタン製圧力容器の造形

チタン製圧力容器(高さ 1m 程度、重量 8.5kg)は従来鍛造と切削で製造されていたが、WAAM 方式に切り替える事で部品点数、製造時間並びに材料費の削減が可能となった。部品点数は 2 つから 1 つに減り、製造時間も 65%削減、特に材料の使用料は従来の 1/30 で、200kg の削減となった。

造形した圧力容器を図 7 に、造形時の状態を図 8 に示す。



図 7 チタン製圧力容器



図 8 チタン製圧力容器の造形時の状態

④ 航空機部品の造形

図 9 は、イギリスの ARA 向けの高張力鋼製(Aircraft Research Association)航空機部品(高さ 1m 程度)の造形が行われている造形例を示す。



図 9 WAAM 方式による造形例

[https://www.youtube.com/watch?v=nCa\\_3bfNX6Y&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=nCa_3bfNX6Y&t=2s)

⑤ 車両用サスペンションパッドの造形

軍事用車両の製造メーカーであるトルコの FNSS 社向けデモとして、高張力鋼製(材質 : Er120 steel)の車両用サスペンションパッドの造形例がある。



図 10 WAAM 方式による造形例

<https://www.youtube.com/watch?v=FBx3UEHiXGA>

## ⑥ アルミニウム製の翼小骨の造形

航空機製造メーカーであるカナダのボンバルディア社向けに、2.5×1.2mのアルミニウム製の翼小骨を WAAM 方式にて造形した結果、従来の工法と比較し 500kg の材料削減に成功している。



図 11 WAAM 方式による造形例 (基材 : Al 2219, ワイヤ : Al 2319)

[https://www.youtube.com/watch?v=Ku-sv3D\\_p8](https://www.youtube.com/watch?v=Ku-sv3D_p8)

## 5. おわりに

これまで、アーク溶接といえば鋼板同士の接合などのイメージが強く、それ以外の用途への展開はあまりされてこなかった。しかし、溶接機と溶接技術の進歩により、アーク溶接のビードを重ねる事で立体形状の造形が可能になり、比較的安価な金属 3D プリンタとして注目され始めた。

そもそも金属 3D プリンタという言葉自体は 1990 年代から使用されはじめ現在に至るが、その技術の基礎は金属の溶融と凝固によって形状を作るという溶接技術を応用したものである。それにも関わらず、アーク溶接自体を主とした金属 3D プリンタの発展は停滞気味であった。しかし、フルデジタル電源の開発と CMT プロセスが応用可能であると認識されてからはその研究開発が進み、ついには全長 6m 越えの造形に成功ようになった。このような実績によって、現在では 3D 金属プリンタの一種として認識されるようになってきた。

これまで紹介してきたように、WAAM 方式での造形に切り替える事で、従来の製造方法-例えば鋳造や切削等-に比べて材料や時間の削減を期待できるため、今後も発展が期待される技術であると同時に、研究開発もまだまだ必要な技術であると考え。

## 参考文献

1) MARTINAFILOMENO. (2016 年 12 月 15 日). WAAMMat.

参照先: HAVE WE 3D PRINTED THE BIGGEST METAL PART EVER?:

<https://waammat.com/blog/have-we-3d-printed-the-biggest-metal-part-ever>

2) MARTINAFILOMENO. (2018 年 2 月 12 日). FIRST MULTI-PROCESS TRIALS ON OUR TWIN-ROBOT FACILITY.

参照先: WAAMMat: <https://waammat.com/blog/first-multi-process-trials-on-our-twin-robot-facility-1>

3) RalphBaker. (1925 年 4 月 14 日).

参照先: <https://patentimages.storage.googleapis.com/83/25/a2/c6e506fcb62cf6/US1533300.pdf>

<略歴>

**木寺 正晃 (きでら まさあき)**

---

2004年 専修大学 商学部 商業学科 卒業  
2006年 愛知産業株式会社 入社 営業部 配属  
2009年 レーザプロジェクトチーム 配属  
2013年 3Dプロジェクトチーム 配属 係長  
2016年 レーザ事業推進統括課 配属 主査  
2020年 先進機能部 プロジェクト推進室 室長

現在に至る