アルミニウム建材のパルス YAG レーザ溶接と 曲げ加工技術

沖 善成* 木下 茂** 梅田 真一***

1. はじめに

最近の建物は、ビル建築や住宅建築も、個性を重視したものが多く、また、町並みを美しくといった景観材料の需要も増えている。その結果、アルミ建材も直線的な形状だけではなく、立体的なものや曲線状のものが求められている。

立体的な形状を製作するには、金型による一体成形が一般的な方法であるが、個々に形状が異なる小ロット製品に適用することは金型コスト上不可能であった。そこで、溶接を用いることも考えられるが、アルミニウム建材で用いられる2~3 mmの薄板の場合、従来のアーク溶接では、溶接時の熱影響で、板が反ったりねじれたりするという問題があった。さらに、溶接部分のビード幅も5~6 mmと大きく、外観上使用箇所は限られていた。この問題に対し、最近実現した1 kW級のパルスYAG(Yttrium-Aluminum-Garnet)レーザを使って、溶接外観も金型成形部と遜色のない仕上がりを可能にした実例を紹介する。

また、曲線形状を成形するアルミ曲げ加工は、ビルのコーナ部や住宅用サッシの出窓、そしてエクステリア商品のバルコニーやカーポートなどで、従来から多く用いられている。最近では、意匠上さらに大きなアルミ材を、小さな曲げ半径で加工することが求められている。そこで、型材を分割し、一体で組合せて曲げ加工することにより、材料の破断、塑性屈服、しわの発生を防ぎ、あらゆる形状を製作可能にする方法や加工機を紹介する。

2. パルスYAGレーザ溶接

パルスYAGレーザ溶接は、高密度にエネルギーを集中できるため、熱影響部が溶接箇所の極近傍に限られる優れた方法である。しかし、アルミニウム建材に使用するための技術的製造条件は、明確に定義されていない。本技術は、このパルスYAGレーザ溶接の建材適用を実現するものである。これによって、従来法では、高価な金型が必要であった大型成形パネルが、一般的なプレスで曲げたものを溶接して安価に製作できる⁽¹⁾。さらに、パルスYAGレーザ溶接は、従来、塗装膜の焼け焦げにより美観上使用できなかったプレコート材の使用を可能にし、表面処理コストの低減を果たしている。

(1) 出力の制御

アルミニウム建材の溶接は、溶込み深さを得ることとスパッタを抑えることが重要である。一般的にレーザ溶接の条件は適切な使用範囲が明確に定義されておらず、図1に示す因子を見いだす必要がある。この中で、パワー密度とパルス幅がレーザ溶接に最も重要な因子となる⁽²⁾。

$$\text{パワー密度(W/m}^2\text{)} \quad D = \frac{P_k^2 \times 10^3}{d} \quad (1)$$

P_k : ピーク出力(kW)

d : 焦点面積(m²)

* 三協アルミニウム工業株式会社取締役生産技術部長(工学博士)

** 三協アルミニウム工業株式会社生産技術部生産技術課長

*** 三協アルミニウム工業株式会社生産技術部生産技術課(〒933 高岡市早川70)

Welding with Pulse YAG Laser and Bending for Aluminum Architectural Products; Yoshinari Oki, Shigeru Kinoshita, Shinichi Umeda (Sankyo Aluminum Industry Co., Ltd., Takaoka)

Keywords: aluminum, architectural products, pulse yttrium-aluminum-garnet laser, welding, bending, slide fitting

1996年3月1日受理

$$\text{ピーク出力(kW)} \quad P_k = \frac{E}{W} \quad (2)$$

E : 1 パルス当たりのエネルギー(J)

ω : パルス幅(ms)

パワー密度(D)は、パルスエネルギー(E)、パルス幅(ω)、焦点面積(d)から式(1)および(2)により定義される。なお、使用したレーザ装置は、パワー密度を直接設定できないため、ピーク出力を式(2)により算出し、パルスエネルギーとピーク出力を変化させ溶接条件を検討した。溶接条件と溶込み深さ、スパッタの関係は、図2に示すビードオンテストにより実験を行った。なお、使用したレーザ装置の概要を図3に示す。

各出力条件での溶込み深さとスパッタの関係を図4および5に示す。溶込み深さやスパッタの発生頻度は、ピーク出力とパルスエネルギーの影響が大きく、溶接速度の影響は小さい。さらに、ピーク出力とパルスエネルギーの大小により、レーザ溶接は、図6に示す熱伝導型とキーホール型に大別される。熱伝導型溶接では、溶接後の外観は問題ない。しかし、溶込み深さが不足している。溶込み深さが得られる完全なキーホール型溶接では、スパッタが顕著となり外観意匠に

図3 パルス YAG レーザ装置の概要。

図1 レーザ溶接に関する因子。

図2 ビードオンテストの概略。

＜スパッタ評価＞良○→△→□→■悪
 ○：スパッタは全く発生しない。
 △：火花程度を伴うが、スパッタの表面付着は無い。
 □：非連続的にスパッタが表面に付着する。
 ■：連続的にスパッタが表面に付着する。

図4 溶込み深さとスパッタの発生に関する実験（ビードオンテスト）結果。

問題がある。キーホール型溶接を行うことが、十分な溶込み深さを得るためには不可欠である。そこで、スパッタの発生が最小限となる条件を絞り込んだ。その条件は、図4中、同一ピーク出力で溶込み深さが急激に増加した直後である。これにより、図7に示す健全な溶接部位を得ることができる。

図5 溶接速度と溶込み深さ、スパッタの関係。

図6 レーザ溶接の溶込みモデル。

図7 A1100 合金，肉厚 3 mm のパルス YAG レーザを用いた溶接部。

パルス YAG レーザを用いたアルミニウム合金の溶接について実験した結果，溶込み深さやスパッタの発生は，ピーク出力とパルスエネルギーに起因し，溶接速度の影響は小さいことを明らかにした。

(2) 継ぎ手の性状と溶接性

YAG レーザによるアルミニウム合金溶接は，局所的な母材融解ゆえに，継ぎ手箇所の高い面精度が求められる。そこで，剪断や切削など種々の切断方法により突き合わせ継ぎ手を作成し，溶接後引張試験を行った。表 1 に試験片の性状を示す。小口面の表面粗さ(中心線平均粗さ R_a ，最大高さ R_{max} ，十点平均粗さ R_z)を測定した結果，ミーリングやソーカットによる加工面は，他に比べ平滑であり，安定している

表 1 試験片の性状。

項	目	性 状
材質	A1100	
肉厚	(mm)	3
溶接用試験片の寸法	(mm)	150×450
引張試験片の寸法	(mm)	40×300
溶接継ぎ手の切り出し方法(加工種類)		シャーリング パンチプレス ミーリング ソーカット

図8 引張試験後の破断面。

ことが分かる。また，図 8 に引張試験後の破断状況を示す。ミーリングやソーカットによる継ぎ手は，特定の伸びを示した後に破断し，シャーリングやパンチプレスは伸びずに割れたような破断を起こしている。

継ぎ手面精度の違いにより，継ぎ手の引張強さは異なる。切断面の表面粗さが小さいミーリングやソーカットによる継ぎ手の引張強さは，シャーリングやパンチプレスの継ぎ手に比べ約 2 倍の強度が得られる。この結果より，パルス YAG レーザを用いる溶接の継ぎ手面は，密着精度の高い加工が必要である。

パルス YAG レーザを用いたアルミニウム建材の溶接は，最適溶接条件を明らかにすることと，高い密着精度の継ぎ手を用いることが重要である。

(3) 実用化における問題点とその解決方法

試験片レベルの溶接長で，健全な溶接品質を得ることは比較的容易である。しかし，溶接長 3500 mm という長さを連続的にスパッタの発生を最小限に抑えながら，溶込みが十分得られる条件を見いだすことは容易ではない。問題としては，特に次の 2 点が挙げられる。

第 1 点は，小さなスパッタが次々と集光レンズを保護するカバーガラスに付着し，レーザ光を遮り加工を不安定にする。そこで，出射ノズルを改良し，レーザ光の経路にスパッタが付着するのを防止した。

第 2 点は，図 9 に示す溶接割れの発生である。対象製品

(a) 表面外観

(b) 断面

図9 溶接割れ。

が大きいために、材料の熱膨張による張力が、凝固時の収縮力を上回る部位に割れ⁽³⁾が発生する。そこで、材料の拘束状態を高めると同時に、溶接小口の仕上げ粗さの見直しを行った。従来のパネル切断は、おもにシヤーを用いて行っている。シヤーでは剪断面が粗く、突き合わせ時、材料間の隙間が大きくなる。この隙間が、溶接金属部を材料の厚さ方向に減少させ溶接部表面がくぼみ、割れや強度不足の原因となる。そこで、小口面をこのような剪断面から、鋸刃を使った切削面とした。中心線平均粗さで、 $5.2\mu\text{m}$ から $1.6\mu\text{m}$ に改善することができ、密着精度は向上し、図10に示すように溶接割れは防止できる。

(4) パルス YAG レーザ溶接の特長と建材への適用事例

アルミニウム建材のなかでも、ビル用受注生産品は、多品種少量生産の典型といってよい。特に、最近ではビル外観の個性化によって美的外観の高いものや、大型のものが増加している。凸型形状をした大型パネルなどは従来、プレスによる

図10 健全な溶接部断面。

絞り加工によって一体成形されていた。しかし、この方法は、高価な金型を必要とし、小ロット生産にはコストが高くなり適用できない。たとえば図11に示す大きさが、 $3.2\text{m} \times 1.7\text{m}$ のパネルは、必要量約40個に対して、金型を用いる場合、その費用は数千万円を要する。そこで、汎用のブレーキプレスで曲げたものを、パルス YAG レーザ溶接で接合し凸型成形パネルに仕上げた。これによって、曲げ部稜線と溶接部稜線の外観が、ほぼ同一なものを高価な金型を用いることなく得ることができた。また、従来は意匠外観の点から、溶接後表面処理を行っていた製品が、当社の場合でも年間生産量は数千トンにのぼっている。表面処理は、形状の単純な素材の段階で行うプレコート材の方が生産性も高く、コストや品質的にも有利である。そこで、図12に示すような形材を、パルス YAG レーザ溶接を用いてプレコート化することによってコストを低減し品質を向上させることが可能になった。

パルス YAG レーザを用いて、アルミニウム建材の溶接を実用化したことは、従来、高価で生産できなかった各種立体形状を実現可能とした。また、表面処理生産性の上からも低コスト高品質なものを得る有効な手段である。これらは価格破壊といわれている昨今、アルミニウム建材を広めていく上で特に有意義な手段を提供したといえる。

(a) 溶接長 3500 mm のダイヤモンドパネル。

(b) ダイヤモンドパネルの施工状況。
 施主：東洋大学，設計：(株)第一工房，施工：鹿島・戸田建設
 企業共同体，ヘリポートひさしパネル製作：三協アルミニウム工業(株)

図11 アルミニウム合金板材のパルス YAG レーザを用いた溶接製品例。

図12 パルス YAG レーザを用いたプレコートアルミニウム合金型材の溶接製品例。

3. 押出型材の曲げ加工

(1) 押出型材の曲げ加工における問題点

図13⁽⁴⁾に示す例のように押出型材の曲げ加工技術は，建築造形の要求に対して，自由に与えられる技術として位置付けられる。曲げ技術は，建物の外観を一新させるとともに，自然と調和させる景観材料として新たな需要を創っている。需要の増加につれて，型材は大型化や複雑化している。また，曲げ材料もプレコート化が進み，素材塗装面を傷つけないなど，難易度の高い要求が増加している。そのため，曲げ加工限界の向上に関する技術開発へ取り組む必要がある。

曲げ加工では，破断，塑性屈服，しわによる不安定現象の発生が一般的な限界である。しかし，それ以前に断面の倒れなどの変形で限界が規定される場合も多い。加工限界向上の対策として，設備を含めた各加工法の改良と，型材を曲げ易い断面に分割することの2点が挙げられる。

(a) 曲げ加工法の改良

アルミニウム建材の曲げに適用される加工法の種類を図14⁽⁵⁾に示す。曲げ半径の大小や難易度により様々な加工法が

施主：(株)トヨタ自動車，設計：(株)日建設計，施工：(株)竹中工務店，
 外装製作・施工：三協アルミニウム工業(株)

図13 ビル用建材の曲げ加工例⁽⁴⁾。

加工法	プレス曲げ	引き曲げ	押付け曲げ	引張曲げ	ロール曲げ
構造

図14 アルミニウム建材の曲げに適用される加工法の種類⁽⁵⁾。

図15 ピンチロール方式の押込み曲げ加工装置。

図16 鋼管の曲げ加工限界(引き曲げ)。

使い分けられ、それぞれ加工限界向上の努力を行っている。図15にその例を示す。

また、図16⁽⁶⁾ は、A6061-T1 のアルミ管を曲げる時の曲げ半径と加工条件を示す。多様な断面が特長である型材の曲げ加工は、経験やノウハウの蓄積によって行われており、これまで系統的な研究はほとんどない。

(b) 型材の分割曲げ

省エネルギーの点からプレコート材の曲げが検討されているが、小さい曲げ半径では塗装膜が割れる。このような加工限界を超える型材は、分割して曲げざるを得ない。しかし、スプリングバック率の違いにより、組合せた時の隙間が問題となる。

型材を分割して曲げ加工を行い、加工後の組合せ精度を向上させるためには、加工前のスプリングバック率の予測が重要である。そこで、スプリングバック率($\Delta\theta/\theta$)を加工比(曲げ径/半径方向高さ)から計算⁽⁷⁾⁽⁸⁾し、実測と対比した結果を図17に示す。図17中の実線、破線、一点鎖線は、それぞれの曲げ半径で曲げた場合の計算値である。

$$\text{スプリングバック率 } \Delta\theta/\theta = \frac{MR}{EI} \quad (3)$$

$$\Delta\theta/\theta = \frac{3}{2+n} \frac{F}{E} \left(\frac{2R}{h} \right)^{n-1} \quad (4)$$

$\Delta\theta/\theta$: スプリングバック率 R : 曲げ半径

M : 曲げモーメント E : 弾性係数

I : 断面2次モーメント F : 強度係数(301 MPa)

n : n 値(0.225) h : 曲げ断面の高さ

計算式は、式(3)に示すスプリングバック率を、 n 乗硬化則を使って求めた式(4)によって得たものである。スプリングバック率は加工比が大きくなるにつれ増加し、実測値と計算値は実用上ほぼ一致している。

(2) 新しい型材分割曲げ加工技術の開発

従来の分割法では、任意の位置で分割することや、組合せた際の型材間隙間を少なくすることが、困難であった。また、組合せ部を溶接する場合は、型材間の隙間が少ないこと

図17 平板断面におけるスプリングバック率と加工比.

図18 スライドフィッティング法の原理.

や、溶接の熱による歪みを小さくすることが重要な課題であった。分割方法の開発として、次の2点が挙げられる。

(a) スライドフィッティング法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

図18はスライドフィッティング法と称する分割方法の原理図である。一体の大型形材では曲げられない断面を図18に示すような引掛り部をもつ複数の断面に分割し、押出し後に各形材を組合せて曲げ加工するものである。スライドフィッティング法は、別々に曲げ加工する場合と比較し、次の利点がある。

- 分割曲げでそれぞれの部材を同一の曲げ径とするには、スプリングバック率を見込んだ曲げ径の型が、それぞれ必要

図19 インサート材による接合法.

図20 溶接外観比較(MIG溶接とパルスYAGレーザー溶接)。

となる。

- 単純に分割した場合は、断面の変形により真円度が悪化し隙間を生じる。スライドフィッティング法では、隙間は引掛り部の寸法以下に保たれる。

(b) インサート材による接合法⁽¹¹⁾

ビル用建材では、物件形材と称してその建物専用の形材も多い。物件形材は、押出金型当たりの生産量が少ないため、直線用と曲げ用部材を共通化することが多い。曲げの加工限界を越えた場合、形材は鋸刃を用いて切断・分割した後、曲げざるを得ない。そこで、図19に示すようにスライドフィッティング法を発展させたインサート材による接合法を開発した。また、図20に示すように溶接方法として、パルスYAGレーザーを用い溶接歪みを最小限に抑えている。従来のMIG溶接に比べて、パルスYAGレーザー溶接は熱による影響も少なく良好な結果が得られている。

(3) スライドフィッティング法の適用事例

スライドフィッティング法やパルスYAGレーザー溶接を用いたインサート材による接合法の実用化で、押出形材の曲げ加工限界がなくなった。どのような形状でも曲げ加工可能で溶接により強度も十分に確保できる。従来の一体曲げではしわが発生し製品化できなかったが、スライドフィッティング法により初めて製品化できたものも多い。

代表的な事例として、次の2点が挙げられる。

図21 プレコート材の曲げ事例(機能性門柱).

図22 外皮材と芯材の隙間に発生するしわの防止(サイクルポート).

(a) プレコート材の曲げ

図21に機能性門柱の事例を示す。プレコート材を曲げたものである。加工精度の向上と耐食性を確保するため、断面を4部材に分割している。

(b) 芯材挿入の隙間対策

図22はサイクルポートの事例とその柱断面を示す。柱の強度を増すために内部は鋼管を挿入して補強し、外皮材はアルミニウム押出型材を用いている。スライドフィッティング法を用いて型材と鋼管との隙間で発生するしわを防止してい

る。

曲げ加工において、スライドフィッティング法は、加工限界を意識せずに自由な製品設計を可能にする。また、プレコート材の曲げで省資源や省エネルギーが実現できる。今後、構造材としてアルミ型材の需要がより一層増加すると予想されることから、スライドフィッティング法の重要性は増すと考えられる。

4. おわりに

ここに紹介した新溶接法と新しい曲げ加工方法は、アルミの加工性の良さを、従来の加工限界を超えて最大限に活用する方向性を示した一例である。

アルミが建材に用いられるようになった理由は、押出し性の良い6063アルミニウム合金の出現によるといえる。しかし、その後の生産性向上策は、搬送系、段取り系を中心とした合理化が多い。加工法そのものを基礎的な段階から研究し、開発、そして、実用化に結びつける余地は依然と大きいものがあると考えられる。

最近では、プロセスイノベーションからプロダクトイノベーションへとと言われる。プロセスといっても、単なるマテリアルハンドリングの自動化やFA化が、イノベーションではないことは言うまでもない。プロセスそのものを基礎研究し、開発を行い、そして実用化することが、プロダクトイノベーションの種ともなることを、再度思い浮かべることが必要であろう。

アルミの加工は比較的小さな力で行われてきたこともあって、基礎的分野からの実用化というより、実際の製造現場においては、技術以前の「わざ」に依存していることがまだまだ多いと感じている。しかし、この「わざ」こそ貴重な財産である。この「わざ」を解析を伴った「技術」にすることが、21世紀をひらく鍵であると思う。

文 献

- (1) 梅田真一, 沖 善成, 津田 光, 木下 茂: 第2回機械材料・材料加工技術講演会論文集, (1994), 9-10.
- (2) “アルミニウム合金のレーザー溶接の現状(1)”, 軽金属溶接, **32**, No. 4(1994), 25.
- (3) アルミニウム合金構造物の溶接施工管理 I, (1992), (株)軽金属溶接構造協会.
- (4) 軽金属学会金属部会編: 自動車・建材アルミニウム型材の曲げ加工(第10回金属成形セミナー), (1992), 55.
- (5) 木下 茂: 最近の造管技術と管の加工技術(162回塑性加工シンポジウム), (1995), 69.
- (6) 軽金属協会標準化総合委員会: アルミニウムハンドブック, (1994), 98.
- (7) 木下 茂, 沖 善成, 梅田真一, 平田伸二: 平7春塑性加工講論, (1995), 281.
- (8) 木下 茂, 沖 善成, 宮村文夫: 84回春軽金属講概, (1993), 134.
- (9) 木下 茂: 塑性と加工, **35**-398, (1994), 198.
- (10) 特許第1108606号.
- (11) 特公平7-39791.