

Investigation of Bending and Welding Process Focusing on Unfolded Pattern of Sheet Metal Parts for Machine Tools and Improvement of their Quality with a Laser Welding Robot

Yohei YAMAGUCHI*, Toshiki HIROGAKI** and Eiichi AOYAMA***

(Received October 27, 2022)

As machine tools are required to have higher performance and more functionalities, the importance of sheet metal parts has been increasing. However, the design, functionality, and manufacturing technology of sheet metal parts of machine tools have never been systematically studied. Therefore, we investigate a new design and production system for sheet metal parts in the machine tools fields. First, we estimate features in unfolded pattern of sheet metal parts for machine tools, based on analyzing 3DCAD information. As a result, a novel welding technology is found to be required to construct the production system for three dimensional sheet metal parts. Second, we focus on fiber laser welding robot, which is installed to competitively manufacture sheet metal parts without relying on tacit knowledge of skilled operators. Finally, Hablanian plot is used to identify optimum welding conditions and it is demonstrated that laser welding robot system makes it feasible to improve the quality of sheet metal parts for machine tools.

Key words : machine tools, sheet metal parts, bending, welding, laser welding robot, manufacturing system

キーワード: 工作機械, 板金部品, 曲げ, 溶接, レーザ溶接ロボット, 生産システム

工作機械用の板金部品の展開図に着目した曲げと溶接の工程の考察と レーザー溶接ロボットを用いたその部品の品質向上

山口 陽平, 廣垣 俊樹, 青山 栄一

1. 緒言

世界的な市場において工作機械に求められる性能は多機能化・高性能化してきており, その達成のために主軸や送り軸案内などの要素技術や全体構造に対して様々な最適化設計やその製造法に関する

報告りがなされてきている. そのような中で必要な技術も変化してきており, 高圧クーラント下における加工の具現化, さらに安全性の確保のためカバーの具備など, 板金部品の重要性が増大してきている. しかしながら, 典型的な多品種少量生産である

* DMG MORI CO., LTD, Mie

Telephone: +81-0595-45-4271, E-mail: yo-yamaguchi@dmgmori.co.jp

** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

*** Department of Mechanical Engineering and Science, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6506, E-mail: eaoyama@mail.doshisha.ac.jp

工作機械用の板金部品の設計・機能性および製造技術に関する体系的な研究は極めて少なく、テレスコピックカバーの機能性に着目して摺動抵抗を評価²⁾した程度である。

そこで著者らは、世界市場に向けた次世代の工作機械の開発に向けた板金部品の新たな設計および製造方法について検討をはじめ、板金部品の2次元展開図の特徴の解明と板金部品のスマート化のための技術についての考察³⁾を進めてきた。しかしながら、板金部品の三次元的な特徴およびその製造方法に関する検討には至っていなかった。本報では、二次元展開図面から板金部品として3次的な形状への変化の特徴について考察し、さらにそれらを創成するために新たにレーザ溶接ロボットを導入する生産システムの可能性を検討した。その結果、工作機械用の板金部品の展開図の縦横比と曲げ回数との関係、溶接による機能化やコストの特徴、さらにレーザ溶接ロボットによる効果を確認できたので結果を報告する。

2. 工作機械の板金部品の特徴とその考察

2.1 対象とする工作機械と板金部品の形状

機械の質量(重量)が工作機械のサイズやその相似則を検討するための指標として有効であることが判明している⁴⁾。そこで本報では、一般的な全重量12000kg程度中型機を対象にして、その板金部品の重量と形状の関係について検討する。一般的に工作機械用の板金部品は、まず定尺寸法の長方形板からタレットパンチプレスやレーザ加工機により展開図形状に切り出される。次にプレスブレーキやパネルベンダにより曲げを加えることで複数の面を持つ立体形状となり、溶接工程によりさまざまな機能を付与され、塗装・表面処理工程を経て完成する場合が多い。

工作機械用の代表的な形状分類として、配線・配管の支持などに用いられる単純な切断と曲げのみで製作されるコの字、L+Z字型の板金(Fig. 1)、切削油、潤滑油や冷却油を受けたり溜めたりするために用いられるタンクとなる箱型の板金(Fig. 2)、機内の構造物を切り屑やクーラントから保護し、且つ

工具と刃物の寄付きを最小にするために移動物との干渉を最小限にした複雑形状であり、常に切り屑の飛散にさらされるため耐久性のある難加工材であるステンレス材で製作される機内板金(Fig. 3)、R形状、円錐形状や鈍角曲げなどを含み意匠性を持った複雑形状の外装板金(Fig. 4)、などが挙げられる。特に近年は、機内に高圧クーラントを用いる場合が多く、Fig. 2~Fig. 4は高い水密性が求められる。

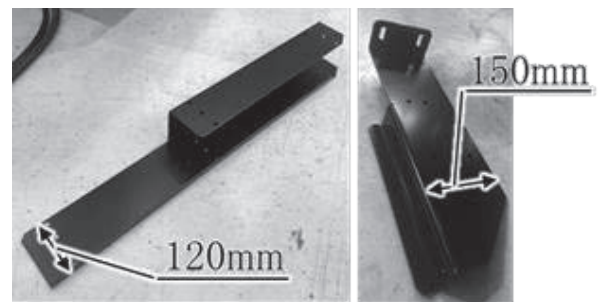


Fig. 1. U/(L+Z) shape sheet metal.

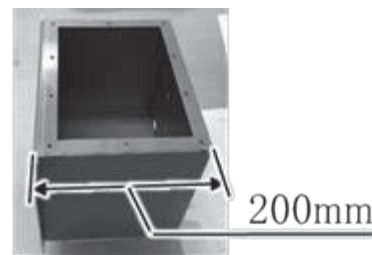


Fig. 2. Box shape sheet metal.

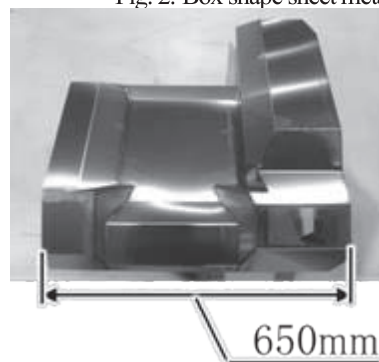


Fig. 3. Complex shaped interior sheet metal.



Fig. 4. Complex shaped exterior sheet metal.

さらに主軸回転数の高速化に対する安全性の確保や、高圧クーラントで生じるミストの集塵性、レーザー熱源を搭載しての機上での金属 AM(Additive Manufacturing)加工の統合により発生する金属粉塵やヒュームの集塵性、レーザー光の漏れ対策などの対応で Fig. 3~Fig. 4 に示すカバー類の部品が増大してきている。すなわち、これらは次世代の工作機械用の板金部品に求められる機能の典型例である。

2.2 3DCAD の設計図に基づく展開部品の面外曲げ回数と展開図の縦横比の検討

3DCAD の設計図の分析により、12000kg 程度の中型工作機械一台に使用される板金部品 (厚み $t=3.2\text{mm}$ 以下を対象にして 3.2mm , 2.3mm , 1.6mm の 3 種類) は約 2000kg で、重量比で約 17% を占め、板金点数 (完成部品単位) としては約 270 点である。それをさらに溶接前の子部品 (展開図単位) に分解すると 965 点に分けられる。この 965 点の展開図単位部品を Fig. 5 に示す定義 (最長辺に平行な方向およびその直交方向に座標系を設定して、その座標系に沿って展開図の長手を全長とする長辺 b と直交方向の全長とする短辺 a) に基づく二次元展開図の形状の長辺と短辺の比 (b/a : 縦横比と称する) と重量の関係の分布図を両対数で板厚の区別なく Fig. 6 に示す。また Fig. 6 の縦軸には典型的な形状の変化例も併記する。さらにこの図を展開図単位部品における曲げ回数ごとに分けて抽出した Fig. 7 を示す。

Fig. 6 では MTM (Methods Time Measurement) 法の基準の軽作業に対応する重量 1kg 以下の部品が大部分を

占めていることがわかる。またそのプロット点の分布は山型の形状になっているが、縦横比 1, 重量 0.005kg あたりから縦横比 100, 重量 0.5kg に向けて両対数で左下から中央頂点方向への実線の直線は、最も使用頻度の高い板厚 2.3mm の板金を用いて展開図の短辺 a を 20mm に固定し長辺 b を延長して縦横比を変化させた板金部品の境界線である。幅 20mm 以下の部品はハンドリング性が悪いので、この境界線から外れる板金部品は少ないと考えられる。境界線よりも外に存在する部品は板厚 1.6mm で製作された板金が多くを占める。

逆に縦横比 100, 重量 1kg あたりから縦横比 1, 重量

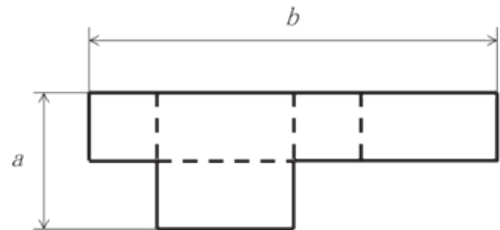


Fig. 5. Definition of dimensions for unfolded pattern of sheet metal parts.

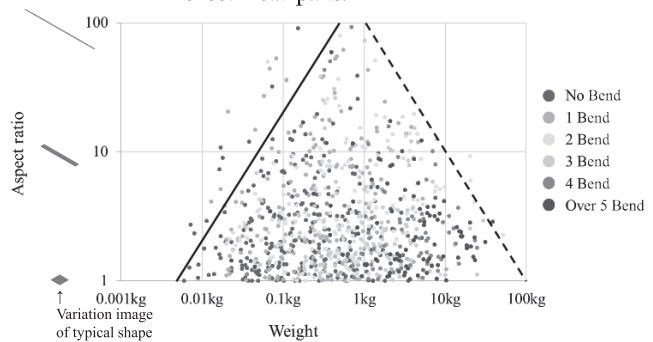


Fig. 6. Relationship between aspect ratio(b/a) and weight

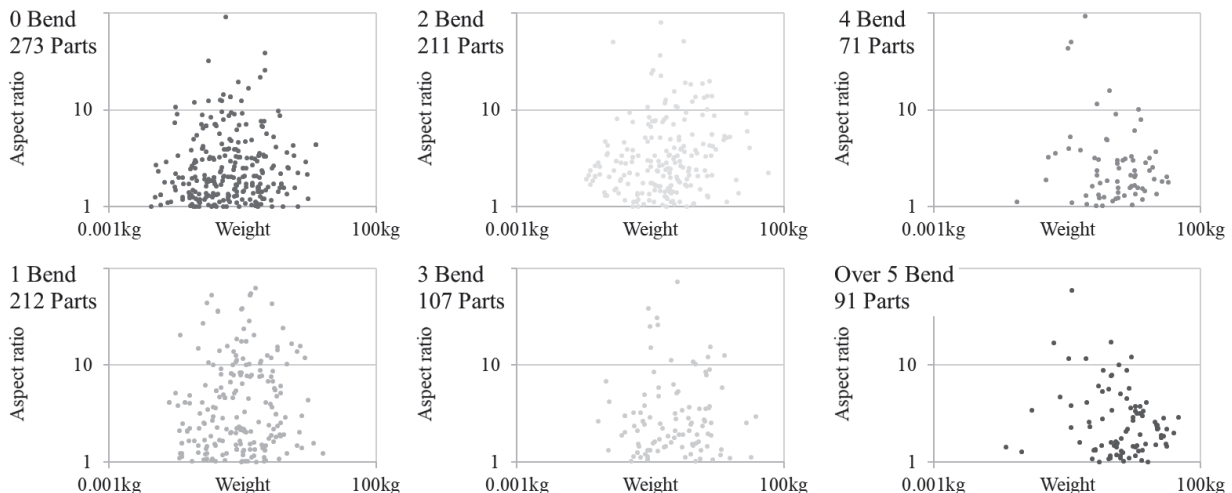


Fig.7. Differences among bending times.

100kg に向けての中央頂点から右下方向への破線の直線は、最も使用頻度の高い板厚 2.3mm の定尺寸法 1219mm × 2438mm の板金を用いて、レーザ加工機での掴み代を考慮した縁さん幅 30mm を除いた製作可能な最大幅である 2408mm を長辺 b として固定し、短辺 a を延長して縦横比を変化させた板金部品の境界線である。この境界線よりも外にある部品はさらに大きな定尺寸法鋼板規格である 1524mm × 3048mm の板金を用いて製作された板金であるが、特別に大きな部品を製作するのみに使用されており、購入コスト、管理コストを低減するため素材兼用の観点から多くの部品は定尺寸法鋼板規格 1219mm × 2438mm から製作可能であることがわかった。

次に Fig. 6 からプロットを曲げ回数ごとに分けて抽出した Fig. 7 に着目すると、面外曲げが 2 回までの部品は各曲げ回数ごとの部品点数が 200 点以上であるが、3 回以上では 100 点前後かそれ以下に減少していることがわかる。これは補強や締結のために大型板金に溶接される単純形状の子部品が 2 回曲げ以内で製作されているため、相対的に面外曲げが 2 回までの部品の点数が多くなっていると考えられる。また、大型の板金においても曲げ加工機（プレスブレーキ）やその金型と板金部品との干渉の制限により、箱形状の場合の側面を設ける 3 回目の曲げが実現できず、側面を別体として分けて溶接で構成する板金展開設計とすることがあるため、2 回曲げまでの部品が多く存在する。曲げ加工の工程は比較的単純な作業であり、熟練の技術が必要なく非熟練作業でも容易で低コストである。しかしながら、多くの板金部品において曲げ加工のみでは部品に複雑な形状や機能性等を与えていないことがわかった。

また曲げ回数毎のプロットの分布をみると、縦軸方向（縦横比）の分布の幅（最大値と最小値の差）には大きな差はみられないが、横軸方向（重量）においては、曲げ回数の増加に伴い分布が密となる重心位置が重量の増大かつ縦横比の減少となる方向に移動する傾向がみられる。さらに詳細には、曲げ回数 0~1 回では若干のその傾向、2~3 回ではそこから重量が増大しながら縦横比も増大し、4 回以上ではそこから重量の増大と縦横比の減少となるようにプロットの分布の重心位置の移動が生じている。すなわち曲げ回数が少ない部品は小型で正方形に近い形状が多く、数回（2~3 回）曲げの部品は少

し大型化するが Fig. 6 のたて軸に併記して図示したようにその形状が長細くなる傾向があり、多数回（4 回以上）曲げによって機能が付加される部品は大型（重量が大）で正方形に近い形状が多いことがわかる。したがって、小型部品は大型部品に溶接される子部品となる場合も多く、曲げだけでの機能性の付加はなされていない傾向があることがわかった。

2.3 板金部品の展開図と曲げ・溶接・作業コストの関係

工作機械板金における溶接工程の役割は、小型の部品に対する複雑形状の具現化、板厚の異なる部材の接合、ナットなどの子部品溶接による機能追加などが挙げられる。またボルト締結やリベット留めと異なり、曲げ加工と同様に水漏れを防ぐことができる、部品単体で剛性を確保できるなど、部品の高付加価値化の基幹と考えられる。

ここで開口直方体の箱型形状（辺が L , $2L$ ）について検討する。Fig. 8 にその展開図の例 2 種とそれぞれの折り曲げ（図中の破線）および張り合わせの辺（図中の太線）を示す。Fig. 8 の(a),(b)それぞれにおいて、曲げ回数は 4 回で同様であるが、折り曲げ辺長の合計は $6L$ と $5L$ 、

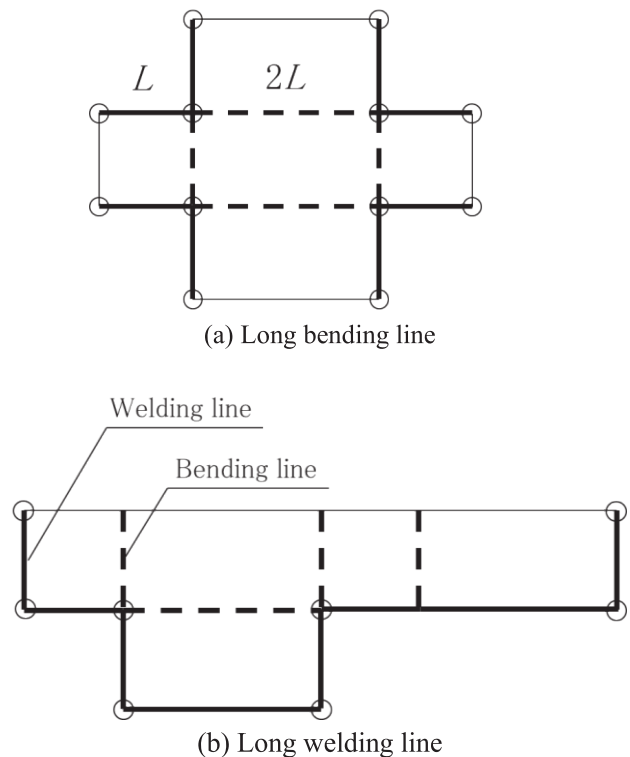


Fig. 8. Example of development drawing of open box shape and its bending line / welding line

張り合わせ辺長の合計は $8L$ と $10L$ となり、曲げおよび溶接工程となる辺の長さが異なることがわかる。また鋭角点 (図中の○印) の数も 12 点と 8 点となり差がある。このように同じ形状の部品であっても、展開形状によってこれらのパラメータが異なるため、最適な製造方法を考えるには、曲げと溶接両方の加工方法の特徴を理解・考察する必要がある。

近年、板金の曲げ加工に対しても、ペーパーで類似した作業対象となる折り紙工学の知見が有効であることが判明⁹⁾してきている。展開図から曲げと張り合わせ (接合) の作業を統合して分析した板金部品での例がないため、類似した作業となるペーパークラフトに着目する。その場合、工程は切り抜き、折り曲げ、張り合わせの作業に分類され、それぞれの辺長および辺数から工数および作業コスト C の解明が次式として進められている⁹⁾。

$$C=0.08(Lcs+Lb)+1.1Lcc+3.2Ns+4.7Nb+7.7Np \quad (1)$$

ここで Lcs は直線切断線の総延長、 Lb は折れ線の総延長、 Lcc は曲線切断線の総延長、 Ns は切断線上の鋭角点の数、 Nb は折れ線の数、 Np は張り合わせ箇所の数、である。

すなわち展開図形の複雑さに起因する作業コストは鋭角点の数で考慮がなされている。それらの中で張り合わせの作業はほかの作業コストに比べると大きいことが示されており、それらを考慮した展開図についての検討で、欲張りアルゴリズムにより最適な展開図の探索が提案されている。そこで板金部品についても同様な検討をすると、タレットパンチプレスやレーザ加工機による切断加工工程、プレスブレーキやパネルベンダによる曲げ加工工程、および溶接工程に該当するものと考えられる。そこでそれぞれの工程について検討する。

板金一辺単位の加工時間に着目すると、プレスブレーキを用いた一人作業で対応できる最大の曲げ幅の目安である幅 1000mm の面を、プレスブレーキで曲げる際の平均的な作業時間は約 48s、長さ 1000mm の二面の稜線を手作業によるアーク溶接で点溶接する場合の平均的な作業時間は約 240s、全溶接する場合の平均的な作業時間は約 720s であ

ることがわかっている。すなわちプレスブレーキによる曲げ作業時間と手作業による点溶接の作業時間の比は約 1 : 5 であり、式(1)に基づくペーパークラフトにおける作業コストの報告にある折り曲げコストと張り合わせコストの比 (Nb と Np の係数比) である 4.7 : 7.7 と比べると定性的な傾向は一致するが定量的な数値の比は板金部品で溶接 (張り合わせ) が大きい。ただし、式(1)に基づくペーパークラフトにおける折り曲げコスト 4.7 (Nb の係数) は、曲げ線の山側に対してペーパー板厚の半分を定規とカッターナイフを用いて事前にカットする作業コスト 3.2 と、その後 1 つの辺を折り曲げるのに要する作業コスト 1.5 の合算⁷⁾である。すなわちカット作業を省いた場合の単純な折り曲げと張り合わせコストの比は 1.5 : 7.7 となり、板金加工における比である 1 : 5 にほぼ一致する。したがって、一人作業が可能な中型サイズの板金においては単純な曲げ作業と点溶接の関係に限ると、ペーパークラフトと同様のコスト比の結果が得られることがわかった。

2.4 工作機械用の板金部品の曲げと溶接の工数とレーザ溶接ロボットの導入

ペーパークラフトにおける定規を用いた展開図の切り抜きにおいては、直線切り抜きコストは作業時間にほとんど影響を与えないとされている。板金製作における切断加工工程は、タレットパンチプレス、レーザ加工機の NC 制御による自動化が進んでおり、手作業の工数としてはペーパークラフトと同様にほとんど影響はないものと考えられる。したがって曲げ工程、溶接工程が板金製作における手作業の大部分を占めると考えられる。前節で検討したように、プレスブレーキによる板金の曲げ作業は単純で修正作業も含めてマニュアル化が容易であり、いわゆる熟練の技術はほとんど必要ない。その一方で、溶接工程は溶接中に熱応力や残留応力による変形などに応じての修正作業などもあり、マニュアル化が難しく特に熟練の技術が必要な作業である。そこで本報の対象である中型工作機械に用いられる部品の中で、完成部品単位として最も工数の多い Fig. 9 に示す機械前面一

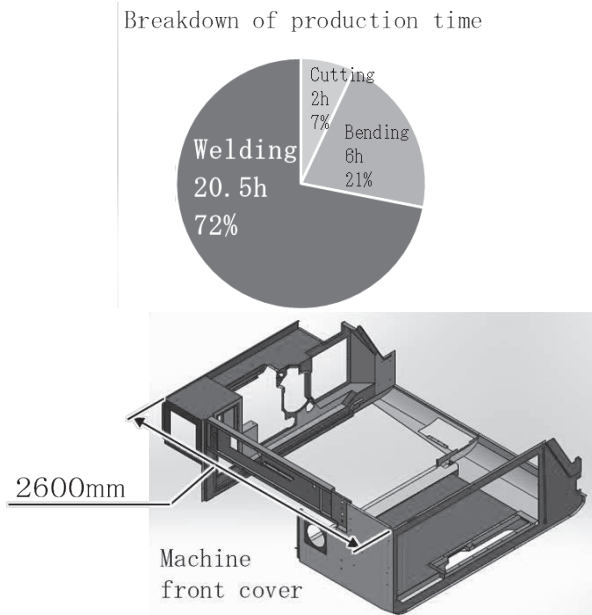


Fig. 9. Time ratio of sheet metal production process.

体カバーを対象として、切断、曲げ、溶接の加工工数を調べた結果、図中に示すように塗装工程を除く人手による加工時間 28.5h のうち 20.5h (72%) を溶接工程が占めていることが判明した。

ペーパークラフト作業では張り合わせ時に生じる変形は単純であるが、溶接作業では入熱に起因する各種応力が生じて変形が複雑化するため、より当該の工程の占める割合が増大しており、全溶接においてはさらに顕著になっているものと考えられる。展開図の鋭角点が少ない単純な部品 (Fig. 1, Fig. 2) は熟練の技能がほとんど必要ない労働集約型で製作可能であるが、鋭角点が多い高度な付加価値部品 (Fig. 3, Fig. 4) は熟練の技能と暗黙知が必要であり生産能力の増強が困難であるうえ、その変動への対応能力も確保できない。また手作業の溶接では溶接速度に上限が生じ、張り合わせ辺の合計が長い場合には入熱による変形が不可避となり、またビード幅などのムラによる外観品質の低下も生じている。そこでその問題を払拭し低入熱での溶接の自動化を具現化する手法としてレーザー溶接に着目した。さらに多品種少量で様々な形状にも対応するためには多関節ロボットが不可欠と考えられる。これらを考慮して、従来にないフレキシブルな新しい仕組みとしてレーザー溶接ロボットシステムの導入を遂

行した。生産台数のオーダが最大でも 1000 台/年程度である工作機械板金の製造において、レーザー溶接ロボットの導入の目的は単純部品の無人での大量自動生産ではなく、熟練技能の暗黙知を凌駕する技術を具現化し、多品種少量生産においての高付加価値な新たな板金部品の設計と生産システムの構築を目指すものである。

例として、Fig. 8 に示したとおり同一完成形状においても展開形状によって曲げ加工と溶接加工のバランスは変化する。従来の製作方法であれば曲げを可能な限り多くする展開としていたが、ロボット化により溶接の品質と加工速度が向上すれば、曲げよりも溶接を優先することで生産性をあげられるケースが新たに考えられるようになる。

3. ファイバーレーザー溶接ロボットシステムの構築と効果

3.1 ロボットシステムの概要

出力 4kW のディスク型レーザー発振器、可搬重量 30kg、最大リーチ長さ 2033mm の 6 軸制御型ロボット (繰返し位置決め精度 $\pm 0.05\text{mm}$)、回転軸付きのロータリーチェンジャ、ロボットとの同時制御可能な直交 2 軸回転ポジショナー (最大積載重量 400kg、最大搭載サイズ 2000 mm \times 1000 mm \times 700 mm) を備えた Trumpf 社製ファイバーレーザー溶接ロボットシステムである TruLaserWeld5000 を導入し検証をおこなった (Fig. 10)。積載重量から考えると Fig. 6 で示す全ての部品に対応可能な仕様である。すなわちロボットの 6 自由度と 2 軸回転の割り出しにより、対象部品の CAD データよりオフラインティーチングでプログラミングして、全ての部品においてロボットの特異姿勢を回避しながらワンチャッキングで全周のレーザー溶接が可能である。レーザー溶接は単純で 2 次元的な溶接部品の大量生産に用いられることが多いが、本システムではロボットと特異姿勢の回避が可能なオフラインティーチングを導入して複雑で 3 次元的な工作機械用の板金溶接部品の多品種少量生産にも適用を試みるものである。またレーザー光軸に同軸のモニタカメラも配置しており、レーザー溶接前の突合せ溶接の隙

間確認，レーザー溶接中の異常監視が可能であり，レーザー溶接による不良発生を未然に防ぐことができる．さらにこれらの画像，映像を記録することにより高い品質管理を実現できる．したがって，従来の人による目視観察だけでなくトレーサビリティの向上も可能としている．

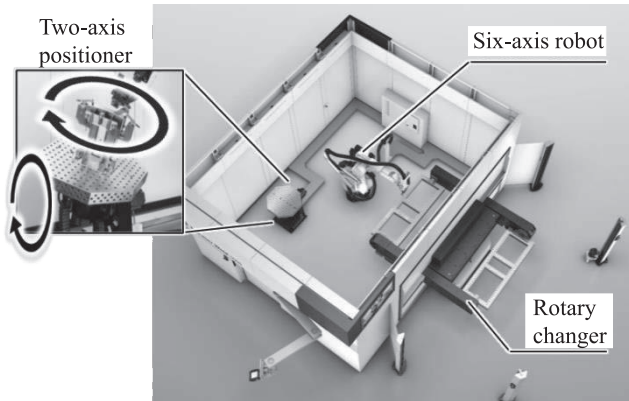


Fig. 10. Layout of constructed laser welding system with a robot.

3.2 レーザ溶接方法および条件設定方法の考察

レーザー溶接は熱伝導型溶接とキーホール型溶接に大別される．Fig. 11 に示すように，熱伝導型溶接は低いパワー密度 (10^4W/mm^2 程度未満) のレーザーで，金属表面で光が熱に変換され溶融池内の対流により内部が加熱され浅くて広いビードを形成する．加工効率は高くないが，溶接欠陥が生じにくく美観が求められる個所に活用できる．板金部品においては， 90° 突合せの角部に利用することで曲げ加工のような滑らかな R 形状の加工が実現できる．キーホール型溶接は高いパワー密度 (10^4W/mm^2 程度以上) のレーザーで，金属表面の溶融池内から蒸発がはじまり，その蒸発反力で深い窪み (キーホール) が発生⁸⁾してレーザーが内部まで届き深溶け込みとなる．キーホール内でレーザー光が多重反射して高効率な溶接が可能で，強度の求められる個所に活用される．板厚 3.2mm 以下の板金部品においては，溶け込みの深さでなく，加工効率の高さを活かし，溶接加工の高速化で効果を発揮できると考えられる．

Fig. 12 にステンレス鋼および熱間圧延鋼板を対象にして，移動熱源でレーザースポット径 d の幅および溶接深さ

t が溶融するとした場合にレーザー出力 P と溶接送り速度 V の関係を無次元化したメーカ推奨条件 (ただし溶接深さ t には板厚を代入) のハブリアンプロットを示す． K は溶接対象の熱拡散率， θ は融点， k は熱伝達率である．図中の点線は入熱効率 100%，一点鎖線は平板の突合せ溶接における参考文献⁹⁾の直線近似，実線はよりフィット度を向上した曲線近似を示す．さらに二点鎖線は本報で用いたシステムの推奨条件の直線近似である．熱伝導型溶接の推奨条件は一点鎖線や実線に近いが，キーホール型溶接はそれらの下側にプロットされ，送り速度 V が若干低く，出力 P は若干高めである．キーホールの形成はレーザービームプロファイル (モード) の影響を受けやすく，十分な溶け込みを保証するために安全側に推奨されているものと考えられる．

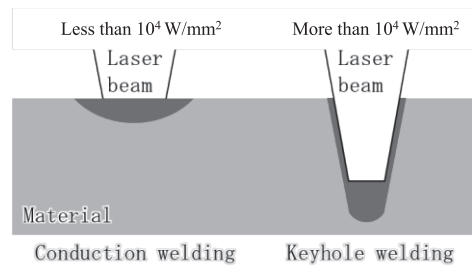


Fig. 11. Type of laser welding.

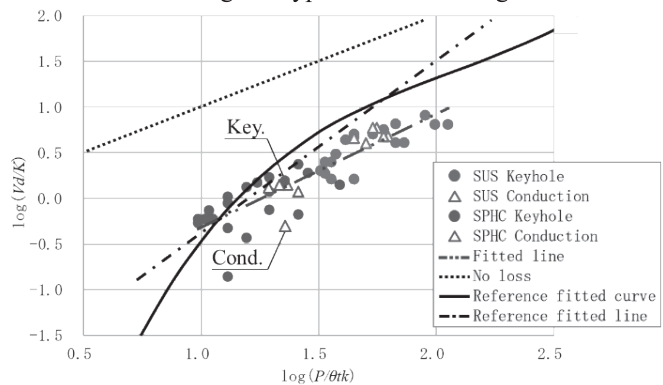


Fig. 12. Hablmanian plot to search for a suitable condition at laser welding of sheet metal parts for machine tools.

4. 90° 突合せ角部に対するケーススタディ

4.1 溶接の作業時間

工作機械用の板金部品の典型例として， 90° 突合せの角部 (例えば 2.3 節の Fig. 8 の太線で示される張り合わせ辺) で水漏れ防止機能 (水密性) と外観が同時に求められる幅 200mm × 奥行 200mm × 高さ 200mm の箱形状 (Fig. 2) の溶接 (溶接距離 1600mm) を熱伝導型溶接，



Fig. 13. Conduction welding.

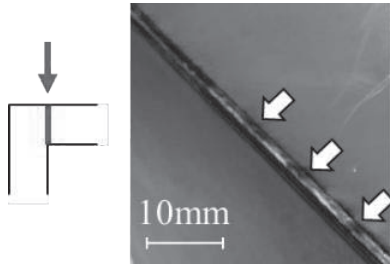


Fig. 14. Keyhole welding.

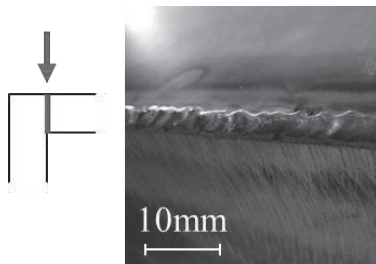


Fig. 15. Manual arc welding.

キーホール型溶接それぞれで製作した際の結果を比較する。Fig. 10 中のポジションナーテーブル上で、専用の治具を用いてコの字に曲げた板金2点をワンチャッキングでレーザ溶接した結果の外観（熱間圧延鋼板 SPHC、板厚 $t=2.3\text{mm}$ ）を Fig. 13 および Fig. 14 に示す。また比較として従来の熟練の技術者による手作業によるアーク溶接した結果の外観を Fig. 15 に示す。図中の矢印で水密性の確保も考慮した溶接（レーザ照射またはアーク溶接）方向と位置も示す。

まず溶接加工時間は熱伝導型溶接、キーホール型溶接それぞれ 1m18s, 2m33s であるがこれは溶接送り速度 V の違いに起因するもので、スポット直径 $d=0.4\text{mm}$ 、出力 $P=3500\text{W}$ （連続発振 CW）としてそれぞれ 900mm/min, 3000mm/min (Fig. 12 中の Key. および Cond.) である。パワー密度は $2.7 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ の両溶接の境界であり、送り速度に依存して熔融池の表面積と体積が変化して、蒸発の反力とのバランスでキーホールの有無が調整可能な条件

である。加工時間の比は 2 倍程度で送り速度の比は 3.3 倍である。この違いは、加工時間には直線 1 ライン毎にビームを抜いた後の再アプローチや回転割割り出しなどが含まれるために生じたものである。したがってキーホール型溶接は、熱伝導型溶接に比べてレーザ溶接の時間は短くなるが、送り速度の差ほどの溶接加工時間の差が生じないことがわかる。参考に Fig. 15 に示す従来の手作業によるアーク溶接の場合の溶接送り速度は作業者の技能と暗黙知に依存して最適な速度の探索に差がみられたが、平均的には 300mm/min 程度である。

事前段取りにおいては、熱伝導型溶接では Fig. 11 に示した通り溶接範囲が広いいため溶接時の板金同士の隙間管理の精度が低く（0.3mm 程度）でも溶接が可能であるが、キーホール型溶接は精度の高い隙間管理（0.1mm 程度）が求められる。製作前段取りとしての最適な治具設計に加えて、溶接加工前の治具取り付け段取り作業にも注意が必要となる。手作業による溶接の場合は技能者の暗黙知に基づき、常に板金同士の相対位置を手作業で調整しながらの隙間を管理するため、特別な治具取り付け段取り作業が不要で加工前段取り時間は省略される。一方で作業者の態勢移動、持替え作業などを要するため、総溶接加工時間はレーザ溶接に比べ約 5 倍の時間を要している。したがって専用治具の設計と製作に要するコストと時間を短縮することで、多品種少量生産の板金部品の溶接でも自動化による生産性改善の可能性があることがわかる。溶接作業の時間の観点においては、溶接距離に比例する加工時間と板金同士の隙間管理のために発生する時間を、熱伝導型溶接とキーホール型溶接の選択の目安にすれば良いことがわかる。

4.2 溶接の外観品質と部品の機能性の確保

次に外観の品質について、Fig. 13 に示すように熱伝導型溶接では溶接部の表面形状は滑らかであるが溶接焼けと称される酸化被膜（スケール）による変色が広い範囲にみられた。Fig. 14 に示すようにキーホール型溶接では溶接部の表面形状は蒸発金属や蒸発反力によるスパッタにより粗い状態や表面ビード幅と高さが周期的に変動したハンピングビ

ード¹⁰も見られる (Fig. 14 中の白抜き矢印) が、溶接焼けによる変色は狭い範囲であった。ここで表面の凹凸に着目すると、Fig. 15 の手作業では顕著に生じていることがわかるが、その場合に比べるとどちらのレーザ溶接 (Fig. 13, Fig. 14) も平坦であることもわかる。

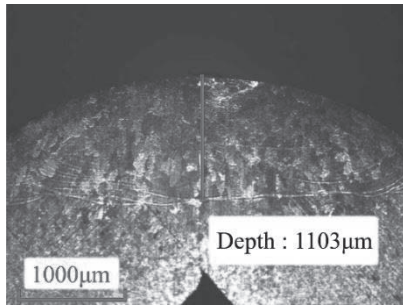


Fig. 16. Section photograph (V = 600mm/min).

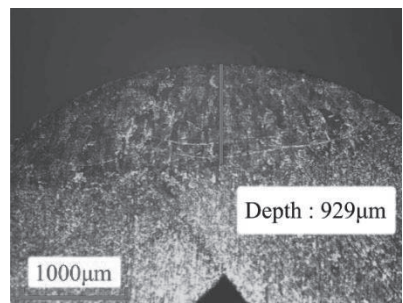


Fig. 17. Section photograph (V = 900mm/min).

一般に溶接時のエネルギー密度により膜厚とその組成が変化し、エネルギー密度の低いアーク溶接程度では薄膜 (1.5 μm 程度) のヘマタイト(Fe_2O_3)であり、レーザ溶接のようにエネルギー密度が高いと厚膜 (25 μm 程度) のマグネタイト(Fe_3O_4)が主成分に変化することが判明¹⁰している。ヘマタイトに比べマグネタイトは化学的安定性が高く、後工程の電解研磨におけるスケール除去剤での除去が困難になる。キーホール型溶接に比べて熱伝導型溶接はエネルギー密度が低く変色面積は広いが後工程でのスケール除去は容易である。さらにスパッタやハンピングビードなども生じていないため、多品種少量の工作機械用の板金部品の溶接においても安定した外観品質の確保が可能であることがわかった。すなわちカバーなど外観が重要な部品は熱伝導型溶接を用い、そうでない部品は処理速度と強度を優先してキーホール型溶接を選択すると良いことが

わかる。

ひずみについては、Fig. 15 に示す従来の手作業によるアーク溶接方法で最大 0.7mm 程度の熱ひずみが発生していたが、熱伝導型溶接では 0.5mm 程度の板金のひずみに抑えられ、キーホール型溶接においては狭い範囲にエネルギーが集中するため周囲への熱伝播が少なく、熱歪みは極めて小さな値 (0.1mm 以下) となった。

キーホール型溶接では溶け込み深さは十分であるが、熱伝導型溶接では不足する可能性が懸念される。そこで熱伝導型溶接後の断面写真を Fig. 16 および Fig. 17 に示す。キーホール型溶接同等までには至らないが、水漏れは生じない十分な深さの溶け込みが確認できる。したがって工作機械用の板金部品においても多用される 90° 突合せの角部に対しても、熱伝導型溶接の溶け込み深さでも十分な部品の機能性の確保ができることが確認できた。

以上より、従来は熟練技能者を頼り、その技能と暗黙知に基づき溶接作業を遂行して部品毎に最適な溶接速度を探索していたが、ロボットレーザ溶接システムを導入して、その溶接条件の設置にハブリアンプロットを用いながら適切に熱伝導型またはキーホール型溶接を組み合わせる手法を検討した。その結果、低ひずみかつ外観の美観も向上した高付加価値な工作機械用の板金部品の自動化製造の具現化の可能性を示すことができた。

5. 結 言

多品種少量生産が前提となる工作機械用の板金部品について、3DCAD の情報に基づき展開図から曲げおよび溶接による部品化に対する特徴を検討し、さらにレーザ溶接ロボットを導入した新たな生産システムによるその品質向上を試みた。結果を以下にまとめる。

1. 展開図の縦横比と部品サイズと曲げ回数の関係を調べた結果、大型部品は多くの曲げにより機能化する傾向にあり、小型部品の機能化には溶接による付加加工が必要であることが判明した。
2. 板金のカット・曲げ・溶接の作業コストも分析した結果、低熱変形かつ外観も良好な競争力ある高付加価値な板金部品には溶接工程の熟練者の暗黙知に頼らない

自動化技術が不可欠である。そのためのシステムとして特異姿勢回避が可能なオフラインティーチング機能を有するファイバーレーザー溶接ロボットシステムが有望であることがわかった。

3. 溶接条件の探索にはハブリアンプロットが有効であり、工作機械用の板金部品として水密性と外観が求められる箱型部品を対象としたケーススタディにより、その実用性と品質の向上の可能性を確認することができた。

ルのアーク溶接とレーザービーム加工により生じる変色部位の比較”, *Electrochemistry*, 83[7], 554-556 (2015).

参考文献

- 1) 山中将, “寸法効果を考慮したマイクロ工作機械の設計”, 精密工学会誌, 77[3], 259-262 (2011).
- 2) P. Kolar, J. Hudec and M. Sulitka, “Modeling of Passive Forces of Machine tool Covers”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 4[5], 892-901 (2007).
- 3) 山口陽平, 宮嶋健太郎, 廣垣俊樹, 青山栄一, “工作機械の板金部品の特徴と機能性に関する考察”, 砥粒加工学会誌, 65[7], 384-390 (2021).
- 4) 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 新山徹, 鈴木雅史, 岩間正俊, “デスクトップ型5軸制御工作機械のLCAを用いた環境負荷の考察”, 日本機械学会論文集, C75[752], 1135-1142 (2009).
- 5) 真鍋裕輝, 大西宏一, 廣垣俊樹, 青山栄一, “折り紙工学に向けたレーザー焼き入れフォーミングのための板バネ試作の考察”, 砥粒加工学会誌, 65[6], 323-329 (2021).
- 6) 三谷純, 鈴木宏正, “集約法による多面体の展開図生成手法”, 図学研究, 39[4], 3-9 (2005).
- 7) 三谷純, 鈴木宏正, “ポリゴンモデルの展開図組み立てに要するコスト評価法”, 図学研究, 37[2], 27-32 (2003).
- 8) 松廣克之, 稲葉洋次, 黄地尚義, 村上英次, “高エネルギー密度ビーム溶接におけるキーホール形成限界について・レーザー溶接現象のモデル化(第2報)”, 溶接学会論文集, 13[2], 218-222 (1995).
- 9) 部谷学, 坪井昭彦, 社本英泰, 田川正雄, “ステンレス鋼のレーザー溶接時の溶込み深さに対するハブリアンプロットによる予測”, レーザ加工学会誌, 21[3], 190-196(2014).
- 10) 大峯恩, 平本誠剛, 池田正幸, “高エネルギービームによる溶接特性 (第2報) 大出力炭酸ガスレーザーによる鉄鋼材料の溶込み形成”, 精密工学会誌, 64[2], 266-270 (1998).
- 11) 北折典之, 吉岡里紗, 大西則彦, “ステンレススチー