プロセスルールを用いた溶接部品の形状生成*

尹 泰聖** 三好和人*** 鈴木宏正† 木村文彦†

Generation of Welded-part Geometry with Manufacturing Process Rules

TaeSung YOON, Kazuto MIYOSHI, Hiromasa SUZUKI and Fumihiko KIMURA

Welding process is one of key processes in industry, but weld-joint geometry, such as grooves and fillets, is not easily generated from given parameters. To support the generation of welded-part geometry, a rule based system is proposed and implemented. First of all, geometry of raw material is refined by shifting or cutting suitable for welding. An IF-condition of the rule consists of geometric parameters and user defined parameters. A THEN-clause of a rule is a procedure of generating a weld-joint geometry, which sweeps a cross section of groove or fillet weld along the surround loop of contact faces between raw materials. Welded-part geometry can be generated by set operation between weld-joint geometry and raw material.

Key words: welding process, welded-part geometry, rule based system, form feature, geometry generation, geometry refinement for welding

1. 研究の背景と目的

実生産の前に生産性を検討するためには製品モデルと工程モデルの統合が必要であり、設計生産時に考慮できるすべての生産工程をモデル化して、計算機で支援することが要求される¹⁾。従って、溶接部品の設計を支援するためにも様々な方法が提案されている。例えば、福田²⁾は、溶接設計の初期段階における溶接方法や継手の種類などの決定問題を支援するためのシステムを提案した。また、Goel³⁾も、溶接作業時間とコストなどを事前評価するルールの枠組みを提案した。一方、梅田⁴⁾は、溶接製品モデルと知識ベースを連携させて、設計作業における図面作成などを含む支援機能を提案した。しかし、これらの提案は溶接部品の形状生成には触れていない。

形状生成問題に対して、Wang⁵⁾は、部品のソリッドモデルから必要な幾何条件をすべて検出して、溶接部品の形状を生成する方法を提案した。しかし、幾何条件を直接管理する方法は、部品の寸法が変わると、その変化に伴ってすべてを再計算するので、製品の寸法決定が完全に決められてないと適用できない。

溶接部品を設計する時、溶接される部分の形状や溶接方法等は溶接記号を使って表示するのが一般的である。この記号の図示方法は日本工業規格 (JIS) や米国溶接協会 (AWS) の規格などに定められている。しかし、この記号 (図 1 の左) からなる 3 次元形状 (図 1 の右) を生成することは非熟練者にとっては難しい。また、溶接方法と溶接継手や、ある部分の寸法が変わると、その変化に対応する形状は設計者

が関連仕様をすべて見ながら形状を直す方法しかない。しかし、設計段階では粗くても早く生産性を検討することが重要であるので、要求される溶接条件からなる部品形状を生成し、条件が変わる場合の部品形状と比較検討することが望まれる。

従って、本研究では、溶接による製作形状を検討する段階における、溶接部品の 3 次元形状を溶接プロセスのルールによって生成することを目的とする。しかし、溶接工程における熱変形は考慮しない。

Fig.1 2-dimensional welding symbol and its 3-dimensional geometry

本研究で開発中のシステムの全体像を図 2 に示す。図 2 のハッチングされたボックスが本論文の記述範囲である。最初設計された設計形状から、溶接工程を適用するための分割形状を生成して、溶接を行った後の溶接形状を生成する。本研究では、後者の分割形状から溶接形状の生成を扱う。溶接形状には、溶接部の収縮まで考慮した形状 (図 4 の左) と理想的な形状 (図 4 の右) が考えられるが、本研究の対象とする形状は理想的な溶接形状である。

2. 溶接部品の形状生成に関する諸要因

2.1 溶接方法と溶接継手

機械分野でよく使用される溶接方法としては、アーク溶接法、高エネルギービーム溶接法、抵抗溶接法、エレクトロスラグ溶接法などがある。また、溶接される部分を溶接継手と呼ぶ。溶接継手は溶接方法、素材の板厚、構造物の種類と形状、材質などを考慮して種々の形式が採用されている。

* 原稿受付 平成 8 年 6 月 19 日

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

*** 正 会 員 東京大学大学院工学系研究科 (現、日本電気(株): 東京都港区芝 5-7-1)

† 正 会 員 東京大学大学院工学系研究科

Fig.2 Flow of data and work

代表的なものには開先溶接継手 (Groove Weld-joint), 隅肉溶接継手 (Fillet Weld-joint), せん溶接継手, スロット溶接継手の形式がある⁶⁾。本研究では, 溶接方法としてアーク溶接法を対象とし, 溶接継手としては, 開先溶接継手と隅肉溶接継手を対象とする。溶接素材としては平面と円筒面からなる形状を対象とする。

2.2 溶接継手形状

開先溶接継手では, 素材の接触面に適当な形の溝を設けて溶接する。この溝を開先形状またはグループ形状という。一方, 隅肉溶接継手では母材形状をそのままにして, 母材の間を直接溶接する。開先形状は, その断面形状から分類され, 素材板厚の増大に従って, それぞれ I 形 → V 形 (L 形) → U 形 (J 形) → X 形 (K 形) → H 形 (両面 J 形) が適用される (図 3)。開先形状を変えることによって作業性を改善し, 溶着量を減少させることができる。溶着量の減少によって溶接棒使用量と溶接工数の減少および溶接変形, 残留応力, 母材への熱影響などの悪影響を減少することができる⁶⁾。

Fig.3 Kinds of grooves

2.3 溶接継手の応力

溶接継手の応力 σ は, $\sigma = P/(a \cdot l)$ で計算する。ここで, σ : 応力 (N/mm^2), P : 荷重 (N), a : 理論のど厚 (mm), l : 有効溶接長 (mm) である (図 4)。のど厚 (throat depth) は余盛を無視した理論のど厚で考える。従って, 計算機で生

成される溶接部品の形状として, 余盛を無視した理想的な形状を生成対象とする。

Fig.4 Throat depth a and weld length l

2.4 溶接継手の寸法

開先溶接継手と隅肉溶接継手を適用する時, 溶接記号上の各項目の記述位置と内容を図 5 で示す。括弧内はユーザが定義できる範囲である。各項目はユーザが定義する要求条件として, ルールの条件部を構成する (図 7 の 2)。

- (f1) Weld-process:: {SMAW, TIG, GMAW, FCAW, SAW}
- (f2) Groove-root-radius:: {number (for U, J, H, double J)}
- (f3) Groove-weld-length:: {number}
- (f3) Fillet-weld-length:: {number}
- (f4) Fillet-weld-pitch:: {number}
- (f5) Weld-joint-type:: {groove-weld, fillet-weld}
- (f5) Groove-type:: {I, V, L, U, J, X, K, H, double J}
- (f6) Root-gap:: {number}
- (f7) Groove-angle:: {number}
- (f8) Finishing:: {machining, as-is}
- (f9) Groove-depth:: {number}
- (f9) Throat-depth:: {number}

Fig.5 User defined parameters related with welding symbols

2.5 分割形状の接触面と接触特徴

分割形状とは, 設計形状をいくつかの断面で切断し, 互いに接触する素材形状に分割したものであり, この断面部を溶接することによって設計形状を得る。接触特徴とは, この断面における接触のパターンを表すものである。

二つの素材 S_1 と S_2 との接触面 (Contact-face) を θ とする。素材 S_1 と S_2 の面 f_1 と f_2 に対して, θ を f_1 と f_2 に投影した面を $\theta(f_1)$ と $\theta(f_2)$ とする。 θ は f_1 と f_2 の積として計算され, 頂点と稜線からなる境界を持つ面分の連結した領域となる。この領域の外周ループ (Surround-loop) の数を $g(\theta)$ で表す。面接触特徴は, 接触面と素材の基準面から定義され, F^{same} , $F^{contain}$, $F^{through}$, F^{across} の 4 種類で定義する (図 6)。図 6 の黒点は頂点を, 白点は面上の点を表す。

F^{same} 特徴は, $\theta(f_1) = f_1$ かつ $\theta(f_2) = f_2$ であり, $g(\theta) = 1$ である。 $f_1 \subseteq f_2$ の場合, f_2 が f_1 を contain すると定義して, $F^{contain}$ 特徴とする。この場合, θ のすべての頂点が, f_1 の頂点とは 1 対 1 対応するが, f_2 に対しては $\theta(f_2) \subseteq f_2$ である。 F^{across} 特徴の場合は $\theta(f_1) \subseteq f_1$ かつ $\theta(f_2) \subseteq f_2$ で, $g(\theta) = 1$ である。 $F^{through}$ 特徴は $\theta(f_1) \subseteq f_1$ かつ $\theta(f_2) \subseteq f_2$ で, $g(\theta) = 2$ である。

Fig.6 Classification of face-contact Features

3. ルールベースを用いた溶接形状生成

3.1 ルールの枠組と形状の分類

溶接形状を生成するルールの枠組を図7に示す。ルールの条件部は、分割形状から認識する幾何条件とユーザが定義する要求条件から構成される。実行部は、条件部を満足する形状生成の手続きからなる。

```

RULE "Rule name"
<Premise>
1.Geometry parameter
-.Face contact feature
-.Number of Surround-loop
-.Area of Contact-face
-.Angle between connect faces
-.Others
2.User defined parameter
-.Weld process
-.Groove root radius
-.Others
<Action>
Procedure
-.decomposed-geometry-refinement
-.weld-joint-geometry-generation
    
```

Fig.7 Frame of rule

溶接形状生成のために、ルールを接触面を基準とするルールと外周ループを基準とするルールに分けて管理する。ルールを区分して、管理する目的は次のようである。

● 接触面を基準とするルール：

分割形状の修正の必要性を決定する。このルールは、分割形状に対する形状変更や干渉回避などを実行する。溶接形状生成の対象になるのは、この修正した後の分割形状である。修正が要らない場合は、元の分割形状をそのまま対象とする。

● 外周ループを基準とするルール：

溶接工程は接触面の外周ループを基準とする生産工程であるため、接触面の外周ループは実際に溶接形状を生成する時の基準になる。このルールによって、溶接継手形状が生成される。

現在、分割形状の修正のための3個のルールと溶接形状生成のための12個のルールが試作されている。

3.2 分割形状の修正

分割形状に対して溶接形状生成の可能性を検討するためには、接触面を基準として、面間の接触特徴、荷重、溶接継手

などの条件を検討する。検討結果、元の分割形状から溶接形状を生成できない場合は、それを修正する。分割形状の修正は、応力集中回避のための接触位置の変更、干渉回避のための接触面の除去がある。

3.2.1 接触位置の移動

これは、例えば、応力集中を回避するために、溶接位置を持ち上げたり持って下げたりすることによって元の分割形状を変える場合で、高压配管部品などによくある例である。

図8に鉄板と円形フランジが接触している分割形状を示す。図8の左上が元の分割形状で、ハッチングされた面が分割形状間の接触面である。この分割形状に対して、応力集中を回避できる開先溶接継手が要求されるとする。これらの条件を満足する溶接形状を生成するために図8の右上のように溶接位置を持って下げたものが、溶接形状生成のための分割形状になる。

Fig.8 Decomposed geometry refinement: shift (Upper/Left:before refined, Upper/Right:after refined, Middle:make-shift procedure, Bottom:rule used)

図8の下は、適用するルールの記述例である。引数として、設計形状、元の分割形状、接触面を利用する。このルールでは、もし接触特徴が $F_{contain}$ で、圧力が高压、溶接継手が開先溶接継手、そして接触面のすべての稜線が円であることが条件部を構成する。実行部は、分割形状の接触面を大きさ (depth) で、持って下げることを表現する。以下、移動手続き (make-shift) について説明する。

step 1 入力として与えられた分割形状から接触面とその外周ループを検索する。図8の場合は、外周ループは edge-in と edge-out の二つである。

step 2 外周ループの稜線 (edge-out) の頂点 b をとる。

step 3 接触特徴は $F_{contain}$ であるため、接触面は part1 の接触面 (f_2) と一致する。従って、接触面を part1 に対して、ユーザが定義した長さ (depth) だけ下げる。頂点 b を depth ほど下げたのが b' である。

step 4 頂点 b を $part2$ に属する面 f_1 に対して、 b から b_1 まで offset する。 $part2$ に対しては b を b_2 へ移動する。この断面 bb_1b_2 を sweep して補強形状を生成する。

step 5 接触面が持って下げられて、新しい補強形状が生成された後の形状が、溶接形状生成の対象になる。

3.2.2 溶接線との干渉回避

図 9 の左上は分割形状で、ハッチングされた面が分割形状間の接触面である。ここで、稜線 ab が別に溶接される部分(溶接線)とする。もし、接触面の一稜線 xy が他の溶接線 ab と一致する場合は、分割形状間の接触を回避できるように元の形状を切断して(図 9 の右上)、溶接線との干渉を回避する。干渉回避には溶接線移動も考慮できるが、図 9 のようにリブやサポートに対しては形状除去による回避方法が一般的である。以下、形状除去の手続きについて説明する。

Fig.9 Decomposed geometry refinement:cut (Upper/Left:before refine, Upper/Right:after refine, Bottom:make-cut procedure)

step 1 分割形状間の接触面から、溶接線 ab と一致する分割形状の稜線を検索して、 xy とする。

step 2 稜線 xy を回転中心とした、半径 r の円筒を生成する。その後、稜線 xy が属する分割形状 ($part1$) から、この円筒を引き去る。

step 3 元の分割形状に対して、干渉回避のために形状除去された後の形状が溶接形状生成の対象になる。

3.3 溶接形状の生成

3.3.1 開先溶接継手の場合

溶接形状は、溶接継手形状と溶着(金属)の形状で区別される。溶接継手形状は溶接前の形状を、溶着形状は溶接後の溶着された金属の形状を示す。

[継手形状の生成]

開先溶接継手形状(以後、開先形状)を生成する手続きは外周ループの稜線単位で適用され、属性を付加する部分と開先形状を生成する部分に分けて構成される。以下、図 10 を用い開先形状の生成手続きを説明する。

step 1 分割形状の接触面の外周ループを計算して、開先形状生成の基準とする。

Fig.10 Geometry generation for groove weld-joint

step 2 形状生成の基準とする外周ループの全稜線に ADD-GROOVEの属性を付加する。

step 3 開先形状の断面を生成する。例えば、L 形開先形状の場合は、頂点 p_1, p_2, p_3 からなる三角形で表現される。 p_2 と p_3 の方向は外周ループと垂直である。 p_1 から p_2, p_1 から p_3 までの距離は、ユーザ定義パラメータで、Groove-depth (図 5 の(f9)) である。このように、頂点間の距離をユーザが定義することによって、すべての開先形状の断面を生成することができる。

step 4 属性を付加した全稜線に対して断面をsweepする。

step 5 分割形状から断面形状を差演算する。この結果が開先形状である。

[溶着形状の生成]

溶接を行った後の形状は、この断面形状をまた加えた形状で、元の分割形状と同じである。この断面形状が溶着形状(図 10 のweld-metal)である。

3.3.2 隅肉溶接継手の場合

Fig.11 Geometry generation for fillet weld-joint

[継手形状の生成]

分割形状がそのまま隅肉溶接継手形状になる。

[溶着形状の生成]

溶着形状生成は開先形状生成の手続きと同じであるが、sweep する断面を生成する時、頂点の p_1 と p_2 の位置は同じで、 p_3 の方向が変わって、外周ループから分割形状の外側に向かう三角形を断面とする(図 11)。頂点間の距離は Throat-depth (図 5 の(f9)) である。

4. 溶接部品の形状生成例

以上の手法に基づいて、溶接部品の形状生成システムを試作した。ソリッドモデラには、Spatial Technology 社の ACIS 3D Toolkit を用い、プログラムはLisp 言語の方言である Scheme を用いて作成した。

図 12 から図 16 までを実行例として説明する。図 12 は例題として与えられた設計形状である。この設計形状からの分割形状は分割方向によって様々であるが、ここでは、その中の四つを例とする。この分割形状に対して、開先形状を生成して、その形状を説明のために半分切斷したのが図 13 から図 15 までの図である。各々の分割形状に対する接触特徴、溶接継手、圧力などが異なると、各々異なる開先形状を生成する。特に図 15 の場合は、元の分割形状に対して下部フランジの接触面が持ち下げられて、新しい補強形状が生成されてから、開先形状を生成した例である。図 16 は、隅肉溶接を適用する溶接部品の形状を表す。

これらの溶接形状は開先溶接継手か隅肉溶接継手を適用する時の形状を示している。したがって、平面と円筒面からなる形状を持つ設計形状から、プロセスルールを用いて溶接形状を生成できることを表している。

5. ま と め

分割形状から溶接形状を生成するための方法について述べた。まず、分割形状に対して、溶接形状生成の可能性を検討して、溶接形状を生成できない場合は、分割形状に対する接触位置や接触形状などを変更する。溶接形状生成のためのルールの条件部は、分割形状の幾何条件とユーザからの要求条件から構成され、実行部は形状生成の手続きを表現する。形状生成のためには、接触断面の外周ループの全稜線に対して溶接継手の属性を与えて、継手断面を sweep する。sweep された形状を元の分割形状と集合演算して、溶接形状を生成する。この方法によって、分割形状を変更する時に対応する溶接形状を実時間で確認できるので、溶接部品設計時の設計生産性が向上できると思われる。今後は、生成された溶接形状に対して生産性を評価して、様々な溶接形状の内、最適案を選ぶシステムの開発が必要である。

参 考 文 献

- 1) F.Kimura: Product and Process Modelling as a Kernel for Virtual Manufacturing Environment, Ann. CIRP,42,1,(1993) 147.
- 2) A. Fukuda: Development of WELDA: An Advisor Expert System for Welding, Knowledge based Expert Systems for Engineering, Computational Mechanics Publications, (1987) 285.
- 3) V. Goel, T. Liao, K. Lee: A Shielded Metal Arc Welding Expert System, Computers in Industry, 21, (1993) 121.
- 4) 梅田政信, 長澤勲: 溶接製缶のための設計システム—公的知識ベースの運用を含めて, 第 8 回設計シンポジウム論文集, (1990) 61.
- 5) Z.Wang, S.Bedi, D.Weckman: The Design and Fabrication of Welded Tubular Joints Using Solid Modelling Techniques, Proc. 2nd ACM Solid Modeling, (1993) 429.
- 6) 溶接学会編: 溶接・接合工学の基礎, 丸善, (1993) 16.

Fig.12 A design geometry for example

Fig.13 Condition: weld-joint (groove-weld), Contact-feature (contain), pressure (normal)

Fig.14 Condition: weld-joint (groove-weld), Contact-feature (through), pressure (normal)

Fig.15 Condition: weld-joint (groove-weld), Contact-feature (contain / through), pressure (high), Decomposed geometry (refined)

Fig.16 Condition: weld-joint (fillet-weld), Contact-feature (contain), pressure (normal)