

# 電縫鋼管製造における数値解析技術とその適用例

## Finite Element Analysis of ERW Pipe Forming Process and its Application

松本 昌士 MATSUMOTO Atsushi JFE スチール スチール研究所 鋼管・鋳物研究部 主任研究員（課長）  
勝村 龍郎 KATSUMURA Tatsuro JFE スチール スチール研究所 鋼管・鋳物研究部 主任研究員（副部長）

### 要旨

電縫鋼管は複数段の成形スタンドで連続的に変形させるロール成形により、素板から目標の断面形状を得る。この変形を解析するためには 3 次元的な変形挙動に加えて、弾塑性域の変形も考慮する必要があるため、3 次元弾塑性有限要素解析の活用が有効である。本稿では、素板の変形挙動や応力・ひずみ状態の解析精度を検証した。また、近似化により計算コストを小さくしたフルケージロール成形方式の解析モデルを構築した。本解析モデルを活用してロール成形における変形挙動やひずみを制御した最適な成形条件を見出し、実機試作を行うことで、目標の断面形状および機械的特性を満たした電縫鋼管が得られた。

### Abstract:

Electric resistance welded pipe (ERW) are formed continuously by roll forming from the steel sheet to the target cross-section. Three-dimensional elasto-plastic finite element analysis is effective method to study the complex sheet deformation considering the three-dimensional deformation and elasto-plastic behavior in roll forming. In this report, the analysis accuracy on deformation behavior and stress and strain state of the formed steel sheet was verified with result of experiment and analysis. Next, three-dimensional elasto-plastic finite element analysis model of cage roll forming was investigated to reduce the simulation cost with some approximations, and then the optimal forming condition controlling the deformation behavior and strain of steel sheet were obtained by using this model. With this optimal forming condition, the target shape and mechanical properties of electric resistance welded pipe were achieved in actual mill trial.

## 1. はじめに

電縫鋼管は寸法精度が良好で表面の肌が美麗であるなど、さまざまな優れた特性を有することから、エネルギー分野や機械構造用などの幅広い用途に使用されている。その製造プロセスは複数段の成形スタンドで構成された孔型ロール群に素板を送り込み連続的に円筒形状へ変形させるロール成形であり、生産効率が高い利点がある。このロール成形の手法は図 1 に示すようにコンベンショナル方式とフレキシブルミル方式に大別され、基本的なミルの構成は、素板を曲げ変形により所定の曲面へ粗成形を行うブレイクダウンスタンド、粗成形された素管の形状を整えつつ後段の電縫溶接の安定性を確保するフィンパススタンド、高周波電気抵抗加熱によって端面を加熱し、溶接を行うスクイズスタンド、および管を所定の寸法へ仕上げるサイジングスタンドと矯正機などからなる。フレキシブルミル方式に分類されるケージフォーミング方式は、コンベンショナル方式のブレイクダウンスタンドに多数の小径ロール群を配列させたケージ

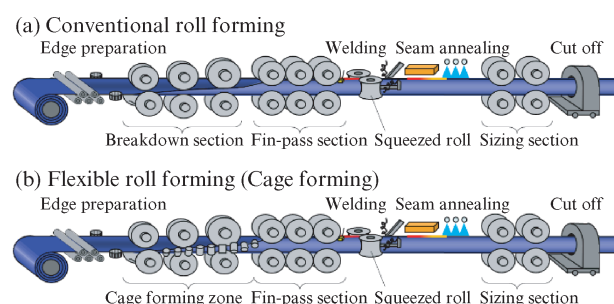


図 1 (a) コンベンショナル方式と (b) フレキシブルミル方式の概要図

Fig. 1 Schematic diagram of (a) conventional roll forming and (b) flexible roll forming

フォーミングゾーンを採用し、製品外径サイズに応じて成形ロールの兼用範囲を拡大させたことが特徴である。一般的に小径サイズの電縫鋼管はコンベンショナル方式、中径サイズ以上の電縫鋼管はフレキシブルミル方式で製造される。

電縫鋼管の寸法精度や所望の機械的特性を確保するためには、素板から目標の円筒形状へ成形するときの変形挙動や応力・ひずみ分布を定量的に把握することが重要である

2024 年 3 月 27 日受付

ため、これまで電縫鋼管のロール成形に関する数値解析の活用が進められてきた<sup>15)</sup>。電縫鋼管のロール成形の数値解析では、成形途中における素板の幅方向の曲げや長手方向の伸びなどの変形挙動のみならず、弾性回復（以降、スプリングバック）等の影響を考慮して途中材の断面寸法や、応力・ひずみ分布を高精度に予測することが重要である。弾塑性有限要素法（以降、弾塑性 FEM）は、このような弾塑性域の成形挙動に対する有効な解析手段である。

これまでに、電縫溶接が行われるまでの素板の途中形状（以降、オープン管）の変形過程について弾塑性 FEM を活用して予測する手法が報告されている<sup>6,8)</sup>。弾塑性 FEM では非線形的な変形を力のつり合い式から解く静的陰解法と、運動方程式から解く動的陽解法の解析コードを用いられることが多い。静的陰解法は解析精度が高い反面、収束計算を行って解くため計算コストが大きい。これに対し、動的陽解法は計算コストが小さいが、解析上の時間増分を適切に設定しなければ十分な解析精度が得られない。そのため、各解析コードの弾塑性 FEM を活用するにあたって、解析精度と計算コストを両立させたモデルの構築が必要である。

電縫管ロール成形におけるフィンパス成形はオープン管の周方向の曲げと絞りを伴う大変形であり、かつ次のロールスタンドないしガイドロールまでは除荷されるため、スプリングバックが顕在化しやすい工程である。このようなオープン管の複雑な変形挙動については解析誤差が大きくなりやすいため、弾塑性 FEM の変形解析結果と実験結果を比較することにより解析精度を系統的に評価できるが、実際のミルを対象にした解析精度を評価した事例は少ない。

また、知多製造所の中径電縫管工場はケージフォーミング方式の一種で、ケージフォーミングゾーンがブレイクダウンスタンドからフィンパススタンドまで連続し、その中に数十個の小径ロール群が連なっているフルケージフォーミング成形方式のミルである。本ミルで、解析精度が高い静的陰解法の弾塑性 FEM を用いて、素板から電縫溶接を行うスクイゾロールまでの素板の変形挙動や応力・ひずみ状態を評価する場合、たび重なる素材と小径ロールの間の非線形な接触解析によって計算コストが増大する課題がある。そのため、解析モデルの構築には、解析精度を確保しつつ計算コストを小さくできるモデルの構築手法の確立が必要である。

そこで本稿では、はじめに静的陰解法および動的陽解法による汎用解析コードを用いたフィンパス成形に関する 2 種類の 3 次元弾塑性有限要素解析（以降、3 次元弾塑性 FEA）モデルを構築し、それぞれの変形挙動を解析した。次に、解析と同じ条件で成形実験を行い、解析精度を評価した。さらに、静的陰解法による汎用解析コードを用いて、計算コストを小さくしたフルケージロール成形方式を対象にした 3 次元弾塑性 FEA モデルを構築した。また、ロール成形での変形挙動、成形ひずみなどについて定量的に評価した。そして、本手法により構築した静的陰解法による 3 次元弾

性 FEA モデルを活用し成形制御を行った事例を報告する。

## 2. 数値解析モデルの構築

### 2.1 フィンパス成形解析モデルの概要

図 2 にフィンパス成形プロセスの模式図を示す。本稿では 2 段スタンドのフィンパス成形を対象としている。フィンパススタンド（FP）入側における素材の初期形状は、実際に素板をロール成形により成形し、得られたフィンパススタンド入側におけるオープン管の寸法を測定し、その形状の周方向 1/2 モデルとして解析モデルに反映させた。

静的陰解法では、汎用ソフト COPRA RF 2011（dataM 社製）を使用し、解析コードとして Marc2005.r2（旧 MSC Software 社製）を用いた。オープン管の要素は 8 節点 6 面体要素を使用し、鋼管厚さ（以下、管厚）方向に 4 分割、周方向に 25 分割し、全要素数は約 36 000 とした。このとき、フィンパスロールは無駆動とし、オープン管の境界条件として、管後端部の管底に上下方向拘束、長手方向に強制変位を設定して成形解析を行った。一方、動的陽解法では、解析コードとして LS-DYNA Ver. 971（旧 LSTC 社製）を用いた。オープン管の要素は 8 節点 6 面体要素を使用し、管厚方向に 3 分割、周方向に 97 分割し、全要素数は約 260 000 とした。動的陽解法ではロールは駆動状態とし、スタンド間距離の 3 倍以上の長さを有するオープン管モデルを準備し、準定常状態になるまで計算した。このとき、解析の時間増分は約  $1 \times 10^{-6}$  sec に設定した。また、いずれの解法においても、オープン管とロール間の摩擦係数を 0.1 と仮定して計算した。今回用いた材料は板厚 16 mm×幅 1 900 mm の低炭素低合金鋼板とした。材料の機械的特性について、ヤング率を 210 GPa、ポアソン比を 0.3 とし、塑性域の応力-ひずみ式は式(1)に示す Swift の式で近似した。

$$\sigma = 720 (\epsilon - 0.0005)^{0.06} \dots\dots\dots (1)$$

解析精度の検証方法として、成形ミルで解析モデルと同じ条件で鋼管を成形し、フィンパススタンド間および最終フィンパススタンド出側の成形形状を測定した。実測定と成

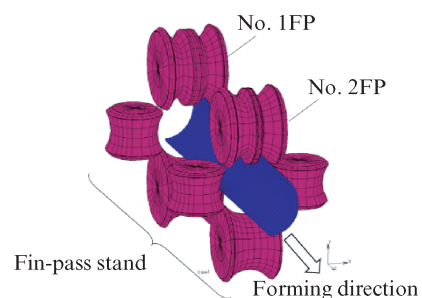


図 2 フィンパススタンドの概要図

Fig. 2 Schematic diagram of fin-pass stand

形中の同じ位置における解析結果の形状とを比較することにより、本解析モデルの解析精度を検証した。

## 2.2 フルケージロール成形方式の解析モデル構築

図3に本モデルの概要を示す。今回、フルケージロール成形方式の3次元弾塑性FEAモデルを以下のように構築した。ケージフォーミングゾーンの小径ロール（ケージロール）群は密に配列されて素板端部を拘束しており、この領域でオープン管のスプリングバックはほぼ発生しないと考えられるため、本モデルでは小径ロール群を一体型の剛体壁と仮定し、素板と小径ロール群との非線形な接触解析の計算コストを低減させた。また、素板の設計において、あらかじめ各スタンドのロール直下で上下一対のロール孔型（以降、ロールフラワー）に沿ったオープン管の断面形状を作成し、ロールフラワーを管の長手方向へ連続的に連結させて初期の素板形状とすることにより、通板の安定性を確保した定常状態の成形解析になるように設定した。ここで素板は幅1/2断面とし、素板の形状とメッシュ分割の状態は図4に示すとおりであり、要素は8節点6面体要素を使用している。また、1BDよりも上流側にある未変形部の一部分において、素板の変形挙動や応力・ひずみを詳細評価するために長さ1000 mmの細メッシュ域（基準域）を設定し、この基準域は管厚方向に6分割、幅方向に25分割、長手方向に100分割した。素板の全メッシュ数は約50000である。

境界条件は以下のように設定した。素板の後端部では素

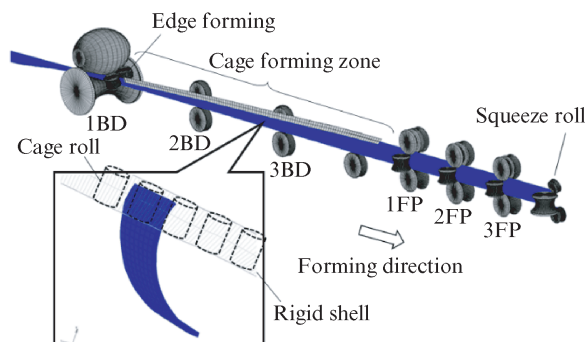


図3 フルケージロール成形方式 FEA モデルの概要図

Fig. 3 Schematic diagram of FEA model for full cage forming mill

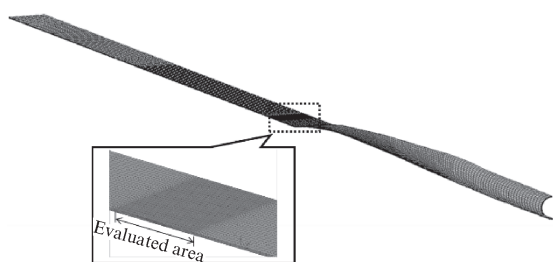


図4 素板の初期形状

Fig. 4 Schematic diagram of initial shape of steel sheet

板幅全長に鉛直方向の変位の拘束をあたえ、素板の先端部では長手方向の強制変位を与えた。成形ロールはすべて無駆動とし、ロールと素板間の摩擦係数を0として成形解析を行った。素板は板厚25 mm、幅1700 mmの低合金鋼板とし、材料の機械的特性について、ヤング率を210 GPa、ポアソン比を0.3とし、塑性域の応力-ひずみ式は式(2)に示すSwiftの式で近似した。

$$\sigma = 1000 (\varepsilon - 0.002)^{0.13} \dots\dots\dots (2)$$

汎用解析コードはMarc2010 (MSC. Software 社製) を使用し、プリポストプロセッサには汎用のMentat2010 (MSC. Software 社製) を用いた。計算機のCPUはIntel社製のXeon X5677 3.5 GHzであり、4コアで解析を行った。基準域がスクイズロールスタンドを通過するまでに要した解析時間は約170時間であった。

## 3. 数値解析結果

### 3.1 フィンパス成形解析の解析精度評価

図5に本解析モデルにおけるフィンパス成形中のオープン管の成形解析結果を示す。オープン管はNo. 1 FPで成形された後、スプリングバックによりオープン管の幅両端間距離である開口幅が広がっていることを確認した。図6に

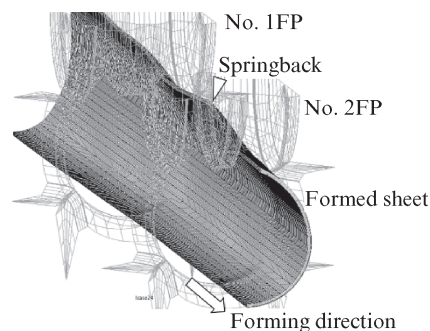


図5 フィンパス成形途中の素板の変形解析結果

Fig. 5 FEA result of sheet forming at fin-pass stand

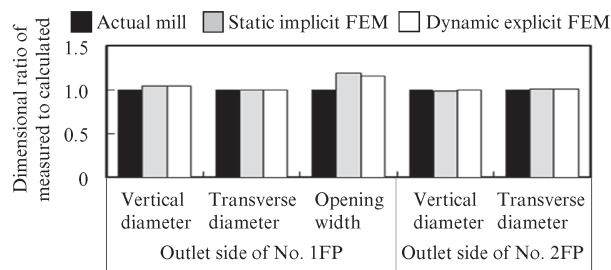


図6 各フィンパススタンド出側におけるオープン管寸法に対する解析結果と実測値の比

Fig. 6 Ratio of measured to calculated dimension of formed steel sheet at outlet side of No.1 FP and No.2 FP



No. 1 FP 出側および、No. 2 FP 出側におけるオープン管寸法の縦径および横径、No. 1 FP 出側におけるオープン管の開口幅について、本解析モデルによる数値解析結果と実測値を比較した結果を示す。縦径・横径について、いずれの解析コードによる結果も実測値との誤差が5%以下であった。開口幅については解析結果の方が実測値よりも大きかった。また、静的陰解法と動的陽解法の解析コードの違いによる縦径・横径、開口幅の差は、いずれも小さかった。以上の結果より、本稿で検討した解析モデルでは静的陰解法と動的陽解法ともに十分な解析精度を有していることが明らかになった。

### 3.2 フルケージロール成形解析によるひずみ評価

図7に基準域がスクイズロールを通過したときの解析結果の全体図を示す。素板の幅端部がケージフォーミングゾーンの小径ロール群に拘束を受け、滑らかに素板を曲面状に成形していることが確認できた。図8に素板の端部および周方向対称面、すなわち管底部に該当する幅中央部における成形管の内表面に該当する部位長手方向ひずみ履歴を示す。図8から、ケージフォーミングゾーンでは、端部に管底部でみられたような大きなひずみの増減がみられず、端部近傍は滑らかに成形が進行していることが分かった。また、素板の各部位が各成形ロールに接触し、通過するときにひずみの大きな増減がみられ、このひずみ増減は素板がロールになじむときに発生する素板の曲げ・曲げ戻し変形に起因したものであると考えられる。このようなフルケージロール成形解析により算出されたひずみ履歴は、同じく素板の端部および管底該当部でひずみゲージを使用して内表面を実測したひずみ履歴<sup>9)</sup>と同様の傾向を示していることが確認できた。

前述した素板がロールになじむときに発生する素板の曲げ・曲げ戻し変形に関し、ひずみ変動が最も大きかった成形初期に素板幅端部に曲げ変形を行うエッジフォーミング(EF)工程に着目した。エッジフォーミングを通過前後の素板端部の内表面および外表面の長手方向ひずみ履歴を図9に示す。ひずみ変動の増減量が外表面よりも内表面の方が大きいことが明らかになった。この挙動について、同じく図9に示している端部の内外表面の長手方向ひずみから算出した膜ひずみ履歴から以下のように考察した。エッジフォーミングによる膜ひずみの変動は、周方向の曲げ変形によって端部が立ち上がり、エッジフォーミング前よりも端部と管底部の間における幾何学的軌道差が大きくなるため、端部に引張方向のひずみが作用したと推察される。エッジフォーミング成形中における膜ひずみと内表面ひずみとの差の最大値は0.031程度であり、これは端部と接触している位置のエッジフォーミングロールの半径 $R$ と素板の板厚から幾何学的に算出される曲げひずみ0.037とほぼ同程度であることが分かった。以上のことから、素板がロールになじむと

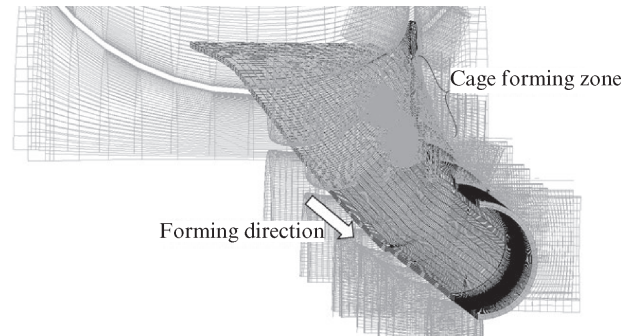


図7 フルケージロール成形解析における素板の変形解析結果  
Fig. 7 FEA result of sheet forming during full cage forming

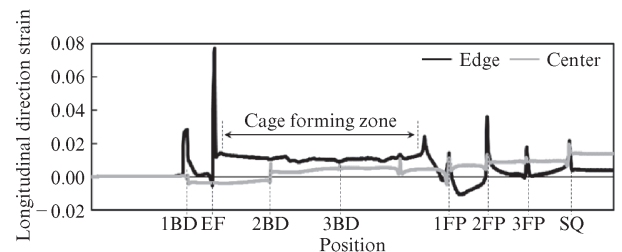


図8 フルケージロール成形における素板の端部および幅中央部における長手方向ひずみ履歴

Fig. 8 Longitudinal strain at edge and center of steel sheet in cage forming

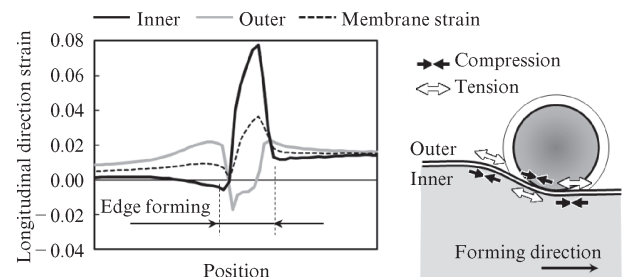


図9 エッジフォーミングにおける素板端部の内表面および外表面の長手方向ひずみ履歴

Fig. 9 Longitudinal strain of inner side and outer side edges during edge forming

きに発生する素板の曲げ・曲げ戻し変形におけるひずみ変動は、ロールの半径と素板の板厚などの幾何学的関係と膜ひずみの影響を受けていると推察された。

## 4. 製品開発への応用

これまでのフルケージロール成形方式ミルの弾塑性 FEA モデルの開発により、解析精度と計算コストの両立が可能になったため、素板からスクイズロールにわたるひずみ履歴が製品の機械特性に及ぼす影響を定量的に評価し、操業条件の最適化に反映できるようになった。ここでは国内最大厚である管厚 28 mm の建築構造用冷間ロール成形角形鋼管 JBCR<sup>®</sup>295 を対象に、フルケージロール成形方式ミルの弾塑

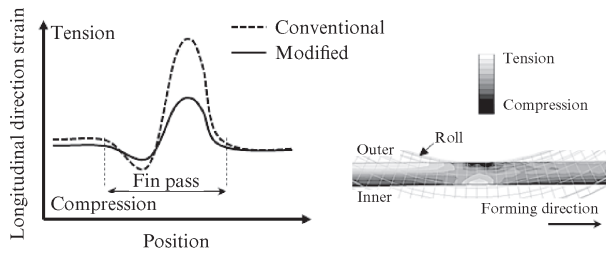


図 10 セットアップ最適化後のフィンパス成形における長手方向ひずみ履歴の概要図

Fig. 10 Schematic diagram of longitudinal strain under optimal forming condition at fin-pass stand

性 FEA モデルを活用して成形条件を最適化させたことにより、目標の機械的特性を確保した事例を示す。

電縫鋼管の管厚  $t$  と外径  $D$  の比率  $t/D$  が増加すると、成形性が悪化し、かつ、成形完了までに累積されるひずみが増加しやすいため、管厚  $t$  の増加により目標の断面寸法精度と機械的特性を確保できない課題があった。さらに、ロール成形においては目標断面形へ成形させる幅方向の曲げ変形のほかに、成形にともなって必然的に発生する複数の要因からなる付加的変形が発生する<sup>10)</sup>。これら付加的変形によるひずみは数%以内と小さいが、弾塑性域の変形で得られる製品の品質に及ぼす影響は無視できない。前述した、素板がロールになじむときに発生する曲げ・曲げ戻し変形はその付加的変形の一つである。弾塑性 FEA モデルを用いて現行条件で角形鋼管の平板部に該当する位置（電縫溶接部から  $\pm 90^\circ$  位置）における長手方向ひずみ履歴を算出した結果、ミル全体のうちフィンパス成形において、ひずみの変動、すなわち素板がロールになじむときに発生する長手方向の曲げ・曲げ戻し変形が顕著であることが明らかになった。

そこで、フィンパス成形の機能を確保しつつ、図 10 に示すようなロールになじむときに発生するひずみの変動を小さくできるロールポジションの最適セットアップ条件を、3次元弾塑性 FEA モデルから見出し、実機ミルで成形を行った。得られた製品の断面寸法、機械的特性、および角形鋼管の平板部の引張特性がいずれも目標値を達成していることを確認できた。

## 5. おわりに

電縫鋼管のロール成形について 3 次元弾塑性 FEA モデル

を構築し、解析精度を定量評価した。また、フルケージロール成形方式の解析モデルを構築し、本モデルを活用して、電縫鋼管成形のひずみ履歴の定量的に評価し、以下の知見を得た。

- (1) ロール成形の数値解析では、静的陰解法と動的陽解法のいずれも、十分な解析精度を有していた。
- (2) フルケージロール成形方式の 3 次元弾塑性 FEA モデルの構築にあたり、ケージロール群を剛体壁へ仮定すること、ロールフラワーに沿った素板初期形状を導入することなどの近似化によって計算コストを下げた。
- (3) ケージフォーミングゾーンにおいて、端部近傍は滑らかに素板からオープン管への成形が進行しており、素板幅中央部を含め、これらのひずみ履歴は実測したひずみ履歴と同様の傾向を示していることが確認できた。
- (4) 本稿で示した 3 次元弾塑性 FEA モデルを活用することにより、ロール成形におけるひずみを定量的に評価できるようになり、国内で最大厚である管厚 28 mm の建築構造用冷間ロール成形角形鋼管 JBCR<sup>®</sup>295 の開発に貢献できた。

## 参考文献

- 1) 木内学. 各種変形形態に対応する応力分布. 塑性と加工. 1969, vol. 10, no. 104, p. 635-645.
- 2) 小野田義富. 電縫管のフィンパス成形における増肉挙動の有限要素シミュレーション. 塑性と加工. 1989, vol. 30, no. 346, p. 1554-1559.
- 3) Toyooka, T. Computer simulation for tube-making by the cold roll-forming process. Aston Univ. PhD thesis. 1999.
- 4) 伊丹美昭, 阿高松男, 柴田充蔵. 塑性と加工. 電縫鋼管の残留応力に及ぼすサイザの影響. 塑性と加工. 1995, vol. 36, no. 419, p. 1373-1377.
- 5) 井口敬之助, 栗山幸久, 師井直紀, 浜孝之, 宅田裕彦. 高張力鋼板のロール成形におけるスプリングバックの検討. 塑性と加工. 2013, vol. 53, no. 622, p. 1003-1007.
- 6) Jiang, J.; Li, D.; Peng, Y.; Li, J. Research on strip deformation in the cage roll-forming process of ERW round pipes. Journal of Materials Processing Technology. 2009, vol. 209, p. 4850-4856.
- 7) Kasaei, M.M.; Moslemi, Naeini, H.; Azizi, Tafti, R.; Salmani, Tehrani, M. Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion. Journal of Materials Processing Technology. 2014, vol. 214, p. 190-199.
- 8) Chen, W.; Jiang J.; Li, D.; Zou, T.; Peng, Y. Flower pattern and roll positioning design for the cage roll forming process of ERW pipes. Journal of Materials Processing Technology. 2019, vol. 264, p. 295-312.
- 9) 横山栄一, 豊岡高明, 江島彬夫, 吉本勇三, 川手崇男, 桑田一義. 26 インチケージ成形電縫鋼管ミルにおける材料の変形挙動と荷重特性. 川崎製鉄技報. 1981, vol. 13, no. 1, p. 80-92.
- 10) 新版・先進ロール成形. ロールフォーミング分科会編. 日本塑性加工学会.