

ロールフォーミング汎用シミュレーターの開発に関する研究 (4) ——ロールフラワーの自動設計 (応用) ——

Study of Computational Simulation Method of Cold Roll Forming Process*4 th Report

木 内 学*・高田橋 俊 夫*
Manabu KIUCHI, Toshio KOUHABASHI

1. ま え が き

筆者らは、任意の製品断面のロール設計を合理的に行うことのできる汎用シミュレーターを開発すべく、一連の研究を行っている。第1報¹⁾、第2報²⁾では、素材の変形曲面形状、応力-歪履歴を求めるための解析手法を示し、第3報³⁾では、これを発展させたロールフラワーの自動設計法を説明し、C形鋼についての設計例を報告した。

本報では、第3報に引き続き、電縫管・溝形鋼・ハット形鋼についてのロールフラワーの自動設計を試みたので以下にその結果を報告する。

2. 使用記号

$\Delta\theta^{*i}$: *i-1~*i スタンド間における曲げ角度増分

W^{*i} : *i-1~*i スタンド間における変形仕事率

$(\epsilon_{x0})_{MAX}^{*i}$: *i-1~*i スタンド間での素材縁部の長手方向膜歪みの最大値

$((\epsilon_{x0})_{MAX})_{MAX}$: 全スタンドを通しての $(\epsilon_{x0})_{MAX}^{*i}$ の最大値

n : スタンド間での素材の変形曲面形状を近似する形状関数 $S(X)$ のエネルギー法により最適化されるパラメータ。図1のように、 n が大きいほどスタンド直前で急激な変位が起こり、 n が小さいと変位はゆるやかになる。

n_{op} : パラメータ n の最適値

3. 設計の手法および方針

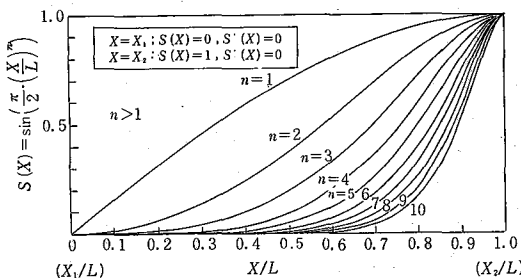


図1 形状関数 $S(X)$ の計算例

設計の手法については前報を参照されたい。設計の方針としては、前報と同様に次の2つを考える。スタンド段数は前もって与えるものとする。

- 1) 各スタンドの $(\epsilon_{x0})_{MAX}^{*i}$ を均一化して、 $((\epsilon_{x0})_{MAX})_{MAX}$ を最小にする $\Delta\theta^{*i}$ 配分を求める。
- 2) 各スタンドに要する変形仕事率 W^{*i} を均一化する $\Delta\theta^{*i}$ を配分を求める。

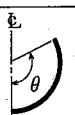
4. 電縫管についての設計例

以下に電縫管についての設計例を示し、その結果について検討する。ここで使用した計算条件を表1に示す。

4.1 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の均一化設計

図2は、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ を均一化したときの最終的な $\Delta\theta^{*i}$ 配分を各サイズについて示したものである。 t/D が4~7%程度のサイズにおいては、 $\Delta\theta^{*i}$ 配分の違いはあまり見られず、*2~*5 間の中間スタンドで $\Delta\theta^{*i}$ は小さく、*1, *6 スタンドで $\Delta\theta^{*i}$ は大きくなる配分となっている。一方、 t/D が最小の $2.3 \times \phi 101.6$ と t/D が最大の $4.5 \times$

表1 電縫管の計算条件

製品断面寸法	$2.3 \times \phi 101.6 (t/D=2.3\%)$ $4.5 \times \phi 101.6 (4.4\%)$ $7.5 \times \phi 101.6 (7.4\%)$ $4.5 \times \phi 76.3 (5.9\%)$ $4.5 \times \phi 48.6 (9.3\%)$
最終スタンド断面寸法	 ブレクダウン成形を想定し、 $\theta=150^\circ$ 曲げを最終スタンド断面形状とする。
曲げ方式	曲げ弧長一定方式
スタンド段数	6 段
スタンド間距離	600mm
パスライン	ボトムラインコンスタント、ダウンヒル
成形速度	40m/min
素材の応力-歪特性 (SS41相当)	ヤング率 $E=21000\text{kg/mm}^2$ 加工硬化係数 $H=80\text{kg/mm}^2$ ポアソン比 $\nu=0.3$ 初期降伏応力 $\sigma_0=31.5\text{kg/mm}^2$

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

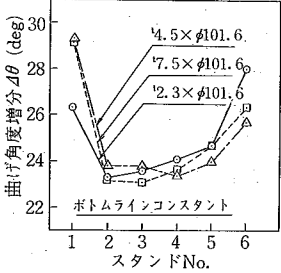
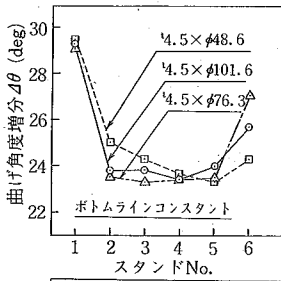


図2 $\Delta\theta^i$ の $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ 均一配分

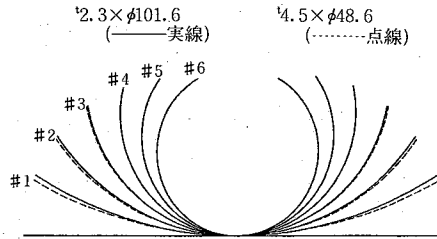
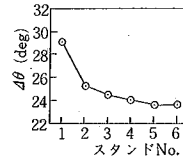
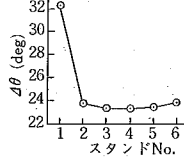
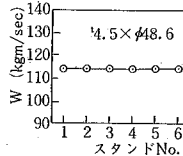
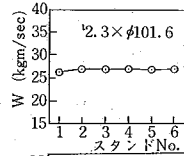


図3 2.3xφ101.6, 4.5xφ48.6 ロールフラワーおよび $\Delta\theta^i$, $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の値 ($(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の均一化設計)

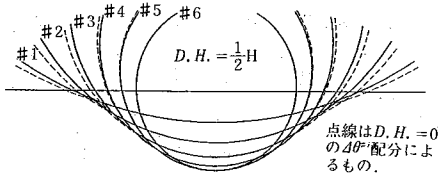
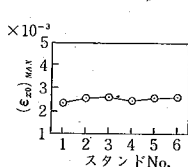
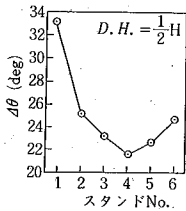


図6 ダウンヒル成形での最適ロールフラワーおよび $\Delta\theta^i$, $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の値 (4.5xφ101.6, D.H. = 1/2 H)

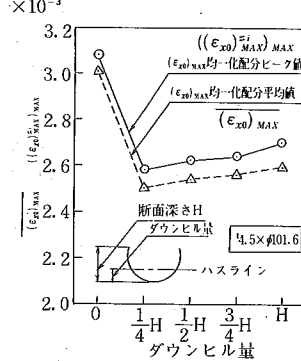


図7 ダウンヒル量の $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ に与える影響

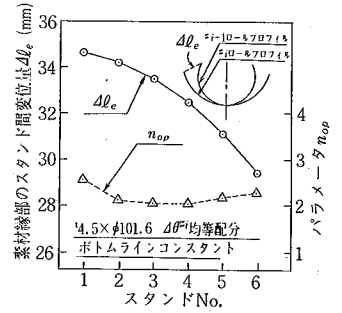


図4 $\Delta\theta^i$ 均等配分のときの $\Delta l_e, n_{op}$ の値

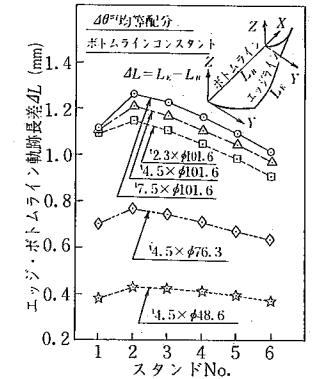


図5 t/D の ΔL に与える影響

φ48.6では、図のように多少異なった $\Delta\theta^i$ 配分となっている。この2サイズについての最適ロールフラワーおよび $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の均一化状態を図3に示す。

図4は、 $\Delta\theta^i$ を均等配分したときの素材縁部のスタンド間変位量 Δl_e とパラメータ n_{op} の値を各スタンドについてプロットしたものである。ここで、形状関数 $S(X)$ は Y 座標(素材幅方向)に適用していることに注意されたい。図5は、 $\Delta\theta^i$ を均等配分したときの、スタンド間での素材のエッジラインとボトムラインの軌跡長差 ΔL を各サイズについて見たものである。図4の Δl_e と n_{op} の値だけから判断すると、軌跡長差 ΔL は上流側のスタンドほど大きくなると考えられるが、実際には、図5の

ように #2, #3 の中間スタンドで ΔL は大きくなっている。これは、上流側(特に #1 スタンド)では主にエッジの立ち上がり変位が起こり、下流側では主にエッジの幅寄せ変位が起こるため、幅寄せの度合を表す n_{op} をスタンド間で比較することは必ずしも妥当ではないことを意味している。#1 スタンドで Δl_e が大きいにもかかわらず ΔL が小さくなっているのは、弾性変形の割合が大きいためにより他のスタンド間に較べて変位がゆるやかになっているためであると考えられる。 ΔL が大きいほど $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ が大きくなると考えると、図5は図2の各サイズの $\Delta\theta^i$ 配分を比較的良く説明していると思われる。

図6は、ダウンヒル成形での $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ を均一化したと

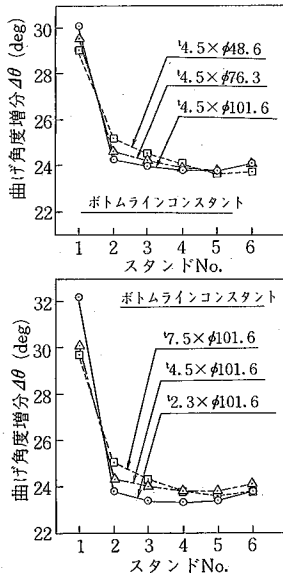


図8 $\Delta\theta^i$ の W^i 均一化配分

きの最適ロールフラワー、 $\Delta\theta^i$ 配分、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の均一化状態の一例を表したものである。ダウンヒル成形においても、 $\Delta\theta^i$ 配分は中間スタンドで小さくなる配分となっている。

図7は、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ を均一化した後の平均値 $\overline{(\epsilon_{x0})_{MAX}}$ と最大値 $((\epsilon_{x0})_{MAX})_{MAX}$ にダウンヒル量が与える影響を見たものである。(完全には均一化されていないため $\overline{(\epsilon_{x0})_{MAX}}$ と $((\epsilon_{x0})_{MAX})_{MAX}$ は多少異なる)。 $\overline{(\epsilon_{x0})_{MAX}}$ と $((\epsilon_{x0})_{MAX})_{MAX}$ は共に、ダウンヒル量零で最大となり、 $1/4 H$ 、 $1/2 H$ で比較的小さく、エッジライン水平になると増加する傾向にある。したがって、過大なダウンヒルも縁波に対し不利に働くことになる。

4.2 W^i の均一化設計

図8は、 W^i を均一化したときの最終的な $\Delta\theta^i$ 配分を示したものである。全体的な $\Delta\theta^i$ 配分の特徴としては、#1 スタンドで $\Delta\theta^i$ は特に大きく、#2~#5 スタンド間でゆるやかな漸減形となり、#6 スタンドでは#5 スタンドよりも若干大きくなっている。#1 スタンドで $\Delta\theta^i$ が大きいのは、弾性変形の占める割合が他のスタンドに較べて特に大きいためである。したがって、 t/D が小さいほどこの傾向は大きくなる。#2~#5 スタンド間でのゆるやかな漸減形の配分は、主に加工硬化によるものと考えられる。したがって、 t/D が大きいほどこの漸減形の傾きは大きくなる。#6 スタンドで $\Delta\theta^i$ が若干大きくなるのは、前に述べたように、同一の曲げ角度増分では、#5 スタンドより#6 スタンドの方が $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ が小さくなり、これが加工硬化の影響を上回るためである。したがって、

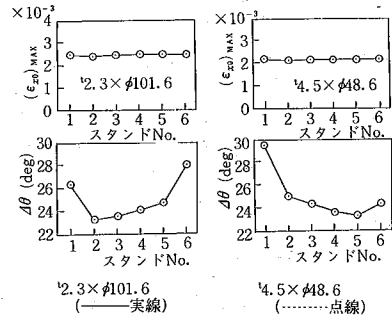


図9 $2.3 \times \phi 101.6$ 、 $4.5 \times \phi 48.6$ ロールフラワーおよび $\Delta\theta^i$ 、 W^i の値 (W^i の均一化設計)

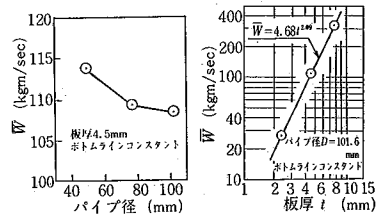


図10 W^i を均一化したときの製品サイズと \overline{W} の関係

t/D が小さいほどこの傾向は大きくなる。

図9に、 t/D 最小のサイズと最大のサイズについて、 W^i を均一化する最適ロールフラワーおよび W^i の均一化状態を示す。

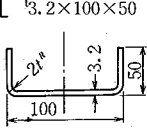
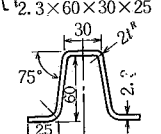
図10は、 $\Delta\theta^i$ を W^i 均一化配分にしたときの製品サイズと平均値 \overline{W} の関係を見たものである。同一板厚では、パイプ径が小さいほど \overline{W} は大きくなっている。このことは、パイプ径が小さくなると、幅方向曲げ歪の増大とそれに伴う加工硬化の進行による \overline{W} の増大効果が、変形を受ける素材の体積減少による \overline{W} の減少効果を上回ることを意味している。同一のパイプ径 ($\phi 101.6$) では、 \overline{W} は板厚の2.1乗に比例して発生している。

5. 溝形鋼、ハット形鋼の設計例

ここで使用した計算条件をまとめて表2に示す。図11は、溝形鋼の $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ を均一化する最適ロールフラワー、 $\Delta\theta^i$ 配分、および $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の均一化状態を表したものである。電線管の90°曲げ(ほぼ#4スタンド)までの $\Delta\theta^i$ 配分とほぼ同様の傾向を示している。#1 スタンド

研究速報

表2 溝形鋼, ハット形鋼の計算条件

製品断面寸法	$[3.2 \times 100 \times 50$	$\cap 2.3 \times 60 \times 30 \times 25$
		
	スリット幅=219mm	スリット幅=193mm
曲げ方式	曲げ弧長一定方式	曲げ弧長一定方式
スタンド段数	6段	6段
スタンド間距離	400mm	400mm
パスライン	ボトムラインコンスタント	ウェブラインコンスタント ニュートラルラインコンスタント
成形速度	40m/min	40m/min
素材の応力・歪特性	電縫管と同じ (SS41相当)	

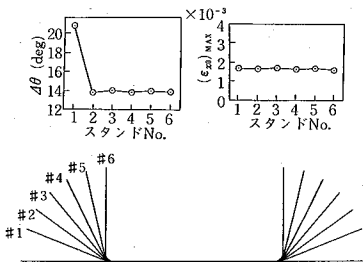


図11 溝形鋼の設計例 (W^{*i} の均一化)

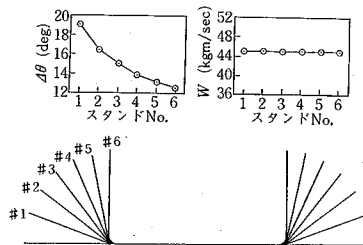


図12 溝形鋼の設計例 ($(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の均一化)

で $\Delta\theta^{*i}$ が大きいのは、電縫管のところで述べたように、弾性変形の影響で他のスタンド間に較べて変形がゆるやかに起こることにより、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$ が小さくなり易いためである。

図12は、溝形鋼の W^{*i} を均一化する最適ロールフロー、 $\Delta\theta^{*i}$ 配分、および W^{*i} の均一化状態を表したものである。一般に溝形鋼、ハット形鋼のような角曲げでは、コーナーアル部の曲げ変形に要するエネルギーが全変形エネルギーの大部分を占め、かつ、そこでの曲げ歪が大きいという理由から、図12のような直線的な漸減形の配分は、コーナーアル部の加工硬化によるもの

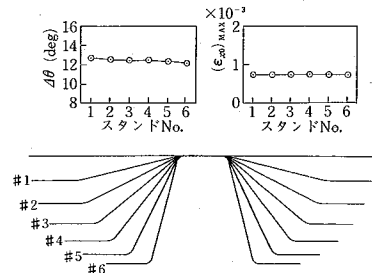


図13 ハット形鋼の設計例 ($(\epsilon_{x0})_{MAX}$ の均一化) (ウェブラインコンスタント)

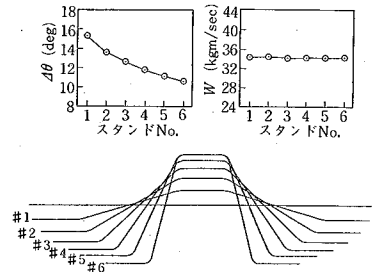


図14 ハット形鋼の設計例 (W^{*i} の均一化) (ニュートラルラインコンスタント)

であると考えられる。

図13, 図14にハット形鋼についての設計例を示す。ハット形鋼については、第2報で述べたように、現状の形状関数 $S(X)$ では実際の変形曲面をうまく表すことができないため、ここではパラメータ n は各スタンド2.0に固定し、第3報の設計手法のハット形鋼への有効性をのみを検討した。その結果、図13, 図14に示すように、 $(\epsilon_{x0})_{MAX}$, W^{*i} を均一化する $\Delta\theta^{*i}$ 配分が得られ、本設計手法がハット形鋼にも適用可能であることが判明した。

6. ま と め

第3報のC形鋼に引き続き、電縫管・溝形鋼についてのロールフローの自動設計が可能となった。今後は、ハット形鋼についての形状関数 $S(X)$ を検討し、広幅断面のロールフローの設計を可能にしたい。

(1983年4月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・高田橋・江藤：昭和57春季鋳加講演論，1982-5, 638
- 2) 木内・高田橋：第33回鋳加連講演論，1982-11, 517
- 3) 木内・高田橋：昭和58春季鋳加講演論，1983-5