

円弧状材料を平板化する圧延加工の逆問題的アプローチ
(平板化理論に基づく実験解析とシミュレーション手順)山中 昇¹Inverse Problem Approach of Rolling Process for Flattening Arc-shape Material
(Experimental Analysis and Simulation Procedure Based on Flattening Theory)

Noboru YAMANAKA

(平成30年9月25日受理)

あらまし 円弧状 FGMs を圧延により平板化する手法の開発を目指し、圧延における平板化シミュレーションに資する因子を検討した。また、均質材料を用いた平板化圧延の実験結果を圧延による成形法を逆問題的に解析し、円弧状材料を平板化するための手順について検討した結果、以下のことが分かった。(1)曲率半径と円弧内側ロールと外側ロールの投影接触弧長さ比の関係は双曲線となり、平板化圧延におけるシミュレーション因子として有効である。(2)曲率半径と投影接触弧長さ比の関係を表す双曲線の漸近線の値は、投影接触弧長さ比を修正する値で、上ロール半径 19.5 mm、下ロール半径 37 mm のロール比 0.53 で 1.38、同様にロール半径 23 mm と 31.5 mm のロール比 0.73 で 1.17 となる。また、漸近線の値は、平板化時の条件となる。(3)ロール比 0.53 及び 0.73 の条件下における曲率半径の絶対値($abri$)と修正投影接触弧長さ比($abcoldr$)の関係式は、 $abri = 27.1 \cdot abcoldr^{-1.07}$ となる。(4)シミュレーション因子を利用して平板化圧延を逆問題的に解析できる。(5)試験片の初期形状と実験結果から求めた式と平板化後の厚さから、この厚さまで数回に分けて圧延を行うことで平板化が可能である。(6)曲率半径の絶対値と修正投影接触弧長さ比の関係式を利用することで、実験と同様の結果をシミュレーションできる。

キーワード [FGMs、平板化圧延、投影接触弧長さ比、逆問題、シミュレーション]

1 まえがき

複合材料は2種類以上の材料を組み合わせて成形した明瞭な界面を有する材料で、古くは紀元前より住居などに使用されてきた¹⁾。ガラス繊維の開発と量産化が進むと構造材料への応用のため1960年代より複合材料の力学解析が進んだ²⁾。このような地道な複合材料素材の開発と力学的な研究の進展に伴って、現在では航空機の主翼のように構造材料として利用されるようになってきている³⁾。以上の例では複合材料の種類は一般的に母材に分散材料を均一に分

散させた均質材料である。一方、例えば厚さ方向に組成(分散粒子の体積分率など)を傾斜配分した複合材料を傾斜機能材料(FGMs)といい、材料内部の熱応力の段差を解消して破壊特性を向上できるなどの特徴を有し、均質材料と異なった性質を持つことが期待されている。FGMsの作製方法には、PVD、CVD、焼結法など種々提案されている⁴⁾。著者らはこれまで、大きな素材を得るのに適した熔融金属に遠心力を付加する遠心鑄造法により金属基 FGMs を作製している^{5,6)}。

さて、遠心鑄造法により作製した FGMs は円筒形

1 都城工業高等専門学校機械工学科

Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Miyakonojo College

状ではあるが、他の方法に比較して容易にしかも大きな寸法の FGMs を作製できる。さらに、こうして作製した FGMs は平板にすることで構造部品にも応用することができると考えられる。そこで、著者は円筒材料から切り出した円弧状 FGMs を平板に加工する金属加工技術として、押出しや圧延により作製する方法を提案している^{7~11)}。

圧延法については、これまで円弧状材料の平板化圧延における原理と平板化の条件や平板化のシミュレーション因子を明らかにした。シミュレーション因子を見いだすために行った実験で用いた材料は均質材料であり、それ故、傾斜機能材料における解析はその材質が複雑で数式化がより困難になると考えられる。このような複雑な材料の成形現象を直接解析することは困難であろう。一つの手法として中間層が2層以上あるニューラルネットワークに対しより性能の良い結果を獲得させるための学習方式であるディープラーニング¹²⁾を応用して平板化の要因と平板化の法則を見いだす方法が考えられる。また、著者らの行ってきた実験から平板化の現象を説明する過程は演繹的方法であり、それに対して、複数の具体的な事実から平板化を説明する手法を見出す方法は帰納的方法である¹³⁾。帰納的方法の延長線上にディープラーニングが存在する¹⁴⁾と考えられるが、現時点でこの方法による解析は困難である。一方、本研究のように新しい現象を把握しようとするとき、最初に与えられるものが現象の観察により得られた結果の場合、これを理解する方法は逆問題として捉えることができる^{15,16)}ことからこの手法は帰納的方法と同義であると考えられる。そこで、ディープラーニングの方法の次善の方法として、平板化の手順を逆問題的に捉え、その手法の妥当性を検討する。

以上のことを踏まえ、本報では、まず円弧状材料を圧延により平板化する際の要素や変数に関する基礎式の概略を述べる。さらに、均質材料を用いた平板化圧延の実験結果から実際の圧延における平板化シミュレーションに資する因子を検討し、圧延による成形法を逆問題的に捉えた、円弧状材料を平板化するための手順を明らかにする。

2 基礎式

詳しい理論については、既報⁸⁾に記載しているので、本報では圧延による成形法を逆問題的に捉えるために必要となる理論式について再掲する。

圧延においてロールと圧延材料が接触している部分を接触弧と言う。接触弧は、上下の直径が同じロールで平板を圧延する一般的な圧延の場合は上下の

接触弧は同じ弧の形状となる。しかし、上下のロール径が異なる場合や圧延材料が円弧の場合は円弧の上ロール側（円弧の内周側）と下ロール側（円弧の外周側）で異なり、円弧内側と外側に接する応力に差が生じ、変形量すなわち材料の伸びが異なり円弧の形状が変化する。変形に寄与する面積に関する変数は、圧延により幅広がりがないものとするロールと材料が接触している長さとなる。そこで、図1に示すような円弧状材料を内側ロール半径(R_i)、外側ロール半径(R_o)で圧延する場合を考えると、内周側投影接触弧長さ(ld_i)及び外周側投影接触弧長さ(ld_o)は、

$$ld_i = \sqrt{\frac{2r_i t_i R_i}{r_i - R_i}}, \quad ld_o = \sqrt{\frac{2r_o t_o R_o}{r_o + R_o}} \quad (1)$$

となる。ここで、 r_i 、 r_o 、 t_i 及び t_o は、それぞれ円弧状材料の内半径、外半径、内周側圧下量及び外周側圧下量である。 t_i 及び t_o は組成傾斜などの材料特性に依存して変化するので、材料特性を考慮に入れた数値計算により求めた。また、均質材料の数値計算結果より t_i 及び t_o の値は近似的に $t_i = t_o$ と置いても解析誤差は小さく、本報では $t_i = t_o$ と置いて解析を進める。

3 実験方法及びデータ解析方法

3.1 実験条件及び実験方法

圧延実験で使用した試験片の材質はスズと純アルミニウム板 A1050 である。スズは遠心铸造して円弧状に成形した板厚 3mm、板幅 20mm、長さ約 200mm

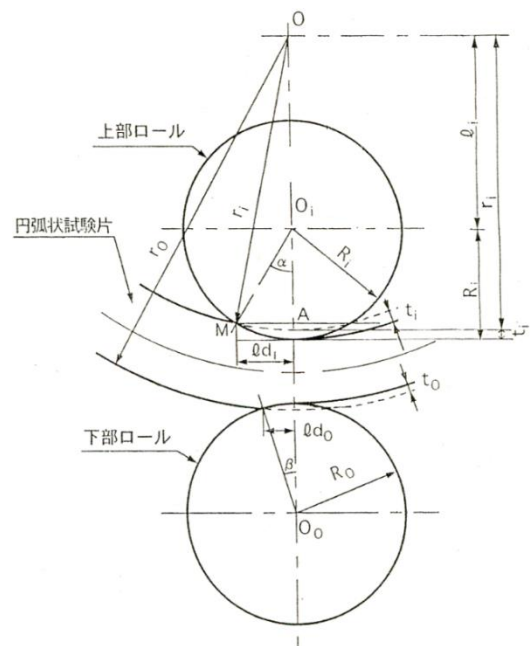


図1 投影接触弧長さの定義

の素材である。A1050 は板厚 6mm 及び 10mm で板幅 20mm、長さ 200mm の矩形素材である。これらの素材を金型、木型及び万能試験機を用いて初期曲率半径(r_0)の円弧形状に成形した。圧延機のロール半径比 R_i/R_o を Rr で表す。圧延は R_i が R_o より小さい異径同周速圧延で、 Rr は 0.53 ($R_i=19.5$ mm、 $R_o=37$ mm) 及び 0.73 ($R_i=23$ mm、 $R_o=31.5$ mm) の2つの条件で常温にて行った。試験片には番号を付けた。各試験片の条件は以下である。No.1~9 はロール比 $Rr=0.53$ で、No.10~18 はロール比 $Rr=0.73$ で圧延した。また、No.1~3 及び No.10~12 の材質はスズで、その他の試験片の材質は A1050 である。

3.2 圧延機及び圧延方法

図2に実験に用いた圧延機の写真を示す。圧延機は自製であり、ロール及び変速歯車を交換することによりロール径やロール周速比を変化させた圧延が可能である¹⁷⁾。インバータで回転制御された圧延機本体下部の筐体内に納めたモータの回転は、大型減速機による減速を経て、Vベルトにて圧延装置台上のウォーム歯車式減速歯車に伝達される。図2に示すように減速歯車箱の出力軸は下部(円弧外周側)ロールの歯車とかみ合っており、同時に中間歯車を介して上部(円弧内周側)ロールの歯車とかみ合っている。円弧内周側と外周側のロール回転は中間歯車により反対方向に回転する。圧下は内周側ロール軸受け箱上部に取り付けた圧下ねじで行う。圧延に用いる素材の形状が円弧状であり、圧延機に挿入する角度がその変形に影響するため円弧状試験片の入口側の接線が水平になるように試験片を挿入し圧延する。試験片形状の計測は、圧延前に試験片の側面形状を用紙に転写し、厚さ、幅を測定したのち圧延を行い、これを繰り返して形状変化を調べる。圧延実験の手順を図3に示す。

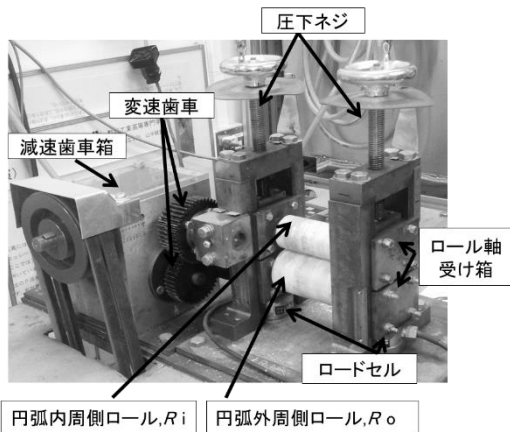


図2 平板化圧延装置

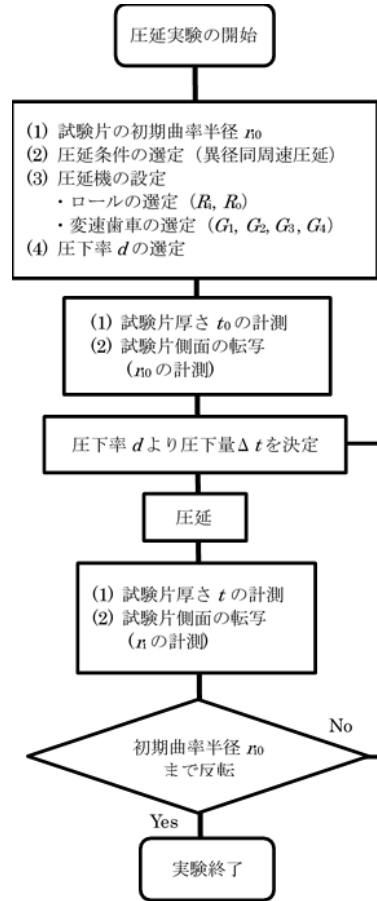


図3 平板化圧延実験のフローチャート図

3.3 実験データ解析の手順

実験により得られたデータから図4に示す手順で実験データを解析する。ここで、 r_i 、 t 、 Δt 、 R_i 、 R_o 、 ld_i 、 ld_o 及び ldr はそれぞれ、曲率半径、試験片厚さ、圧下量、上下ロールの半径、内周及び外周側投影接触長さ及び投影接触長さ比(ld_i/ld_o)である。また、 d_i は累積圧下比で

$$d_i = (t_0 - t) / t_0 = \Delta t / t_0 \quad (2)$$

である。手順を以下に示す。

(1) r_i と ldr の関係図より材料の曲率が反転する時の漸近線の値(ldr_{cri})を求める。

(2) 曲率半径(r_i)の値の絶対値($|r_i|$)を $abri$ とし、 ldr を ldr_{cri} で修正した値($ldr - ldr_{cri}$ 、修正 ldr)を $coldr$ 、その値の絶対値($|coldr|$)を $abcoldr$ とする。

(3) $abri$ と $abcoldr$ の関係式

$$abri = a \cdot abcoldr^b \quad (3)$$

を求める。

(4) 試験片厚さ毎に $coldr$ と d_i の関係図を描き、 $coldr$ と d_i の関係式

$$coldr = cd_i + d \quad (4)$$

を求める。

(5) c と t_0 の関係図を描き、 c と t_0 の関係式

$$c=et+f \tag{5}$$

より e, f を決定する。

(6)d と r_{10} の関係図を描き、d と r_{10} の関係式

$$d=g r_{10} +h \tag{6}$$

より g, h を決定する。

(7)式(5)、(6)と定数より式(4)が決定できる。

(8)以上で求めた a, b, coldr を式(3)に代入して r_1 の式が決定される。

4 実験結果及び考察

4.1 圧延試験片の形状変化

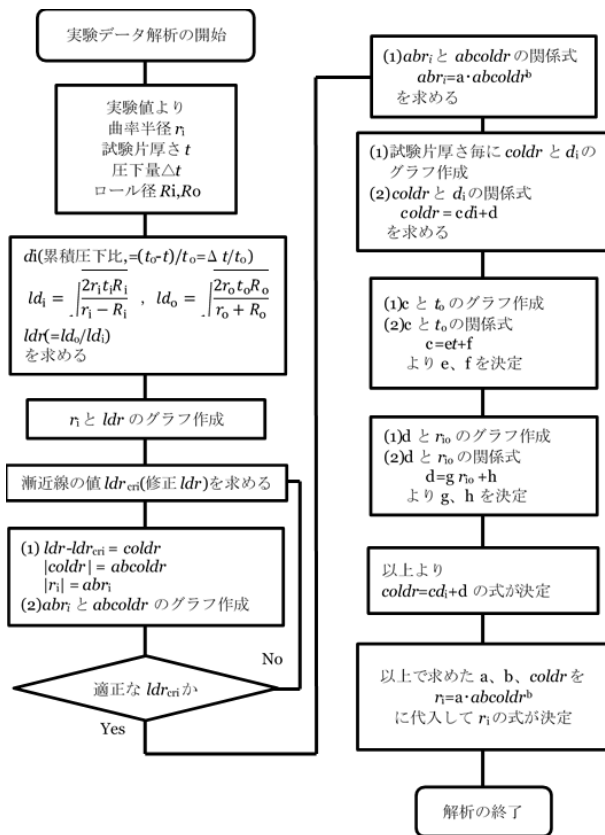


図4 平板化圧延実験データ解析のフローチャート図

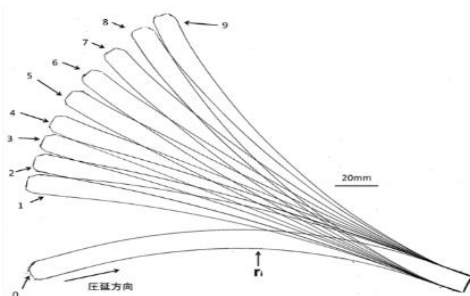


図5 A1050 試験片の形状変化の例 (No.7, $Rr=0.53$, $r_{10}=201$, $t_0=10.16$)

圧延実験の結果の例として図5に No.7 試験片の側面形状変化を示す。No.7 の条件は $Rr=0.53$ で、初期形状 $t_0=10\text{mm}$ 、 $r_{10}=200\text{mm}$ の A1050 である。図5に示すように圧延回数が増えると曲率半径が大きくなる。No.7 では1パスで原形から大きく変形し、2パス目以降はその変形の程度が小さくなっている。これは、1パス目の圧下量が大きかったため、それ以降の圧下率の設定を1パス目より小さくしたためである。また、図には示さないが、圧延機入口と出口に相当する試験片部分の変形が試験片中央付近より曲率が小さくなる例があったが、これは圧延機入口でのかみ込み状態の不安定さのためであると考えられる。

4.2 曲率半径と投影接触弧長さ比の関係

No.7 試験片の曲率半径(r_1)と投影接触弧長さ比(ldr)の実験結果の例を図6に示す。図6より圧延回数が増すと r_1 が正方向へ大きくなった後、7パス目以降で変形が逆転し、 r_1 は負方向の大きい値となり、圧延を続けると曲率半径はさらに小さくなる傾向となる。これは図5に示すように曲率半径が7パス目で反転したことを表す。これらの傾向は、平板化可能な条件の下では他の試験片でも同様であり、反転時が漸近線となる。

また、スズ及びA1050の全条件の r_1 と ldr の結果についてまとめた図を $Rr=0.53$ について図7(a)に、 $Rr=0.73$ について図7(b)にそれぞれ示す。図7(a)、(b)より r_1 と ldr の関係は双曲線となるようである。また、 $Rr=0.53$ における平板化の条件は図7(a)の漸近線の値として $ldr_{cri}=1.38$ 、図7(b)より $Rr=0.73$ における値は $ldr_{cri}=1.17$ となった。

4.3 曲率半径と修正投影接触弧長さ比の関係

図7(a)、(b)より曲率半径の絶対値 ($|r_1|$, $abri$) と

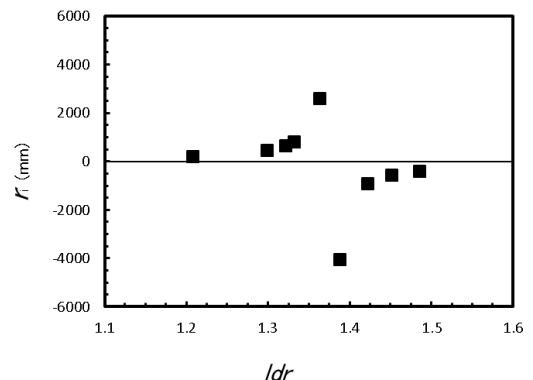


図6 曲率半径(r_1)と投影接触弧長さ比(ldr)の解析結果の例 (No.7, $Rr=0.53$, $r_{10}=201$, $t_0=10.16$)

修正 ldr ($coldr$) の絶対値($abcoldr$)の関係を両対数で表記して図8が得られる。図8で(a)及び(b)は、それぞれ $ldr_{crit}=1.38$ 及び 1.17 で修正した $Rr=0.53$ 及び 0.73 の解析結果である。図8より $abri$ と $abcoldr$ の関係は双曲線形状となるので、累乗の関係にあると考えられる。そこで、図8よりそれぞれ近似曲線を求めると

$$Rr=0.53 \text{ について図8(a)より} \quad abri=31.8abcoldr^{-1.06} \quad (7)$$

$$Rr=0.73 \text{ について図8(b)より} \quad abri=26.6abcoldr^{-1.05} \quad (8)$$

となる。

得られた式(7)と(8)は双曲線の式を表し、それぞれの定数は比較的近い値となった。そこで、図8(a)、(b)における $Rr=0.53$ 及び 0.73 の全ての実験値をまとめて両対数グラフに図示すると図9が得られる。図9より $abri$ と $abcoldr$ の関係式は、

$$abri=27.1abcoldr^{-1.07} \quad (9)$$

となる。この式から、 $abcoldr$ を求めることができれば、曲率半径 $abri$ が求まる。すなわち、 $abcoldr$ の元となる円弧内側ロールと外側ロールの投影接触弧長

さ比 ldr は平板化圧延におけるシミュレーション因子として有効であると考えられる。

5 シミュレーションを利用した平板化圧延の逆問題的アプローチ

順問題解析方法である3.3節で示した実験データ解析の手順の逆の手順で平板化圧延を逆問題的に解析する。平板化圧延をシミュレーションするには、圧延加工における設定条件を決定する必要がある。

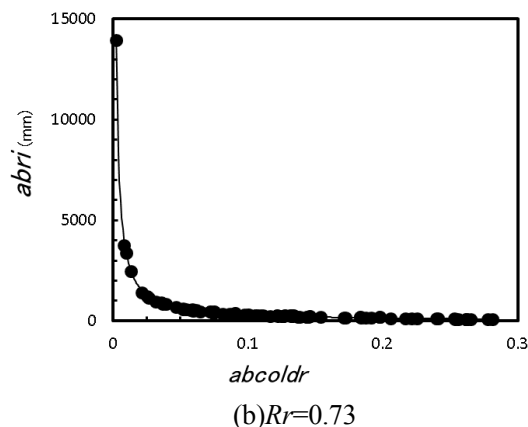
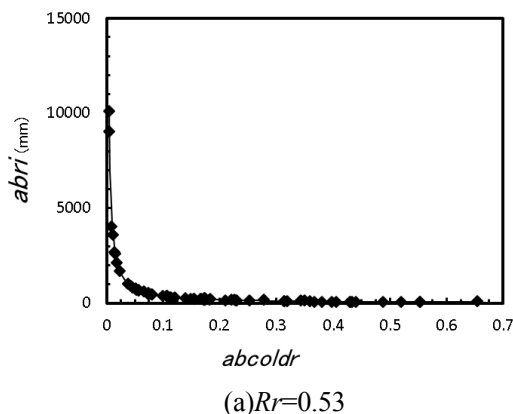


図8 $abri$ と $abcoldr$ の関係

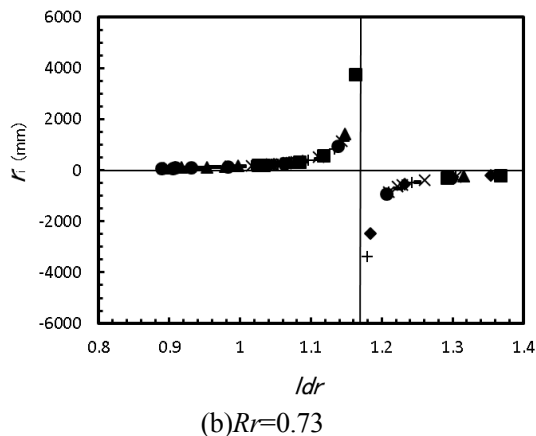
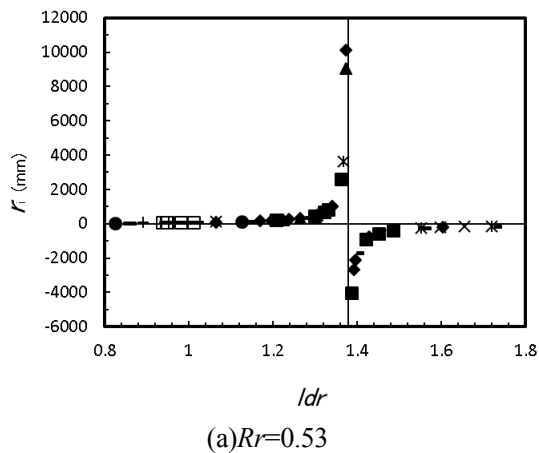


図7 曲率半径(r_i)と投影接触長さ比(ldr)の実験結果

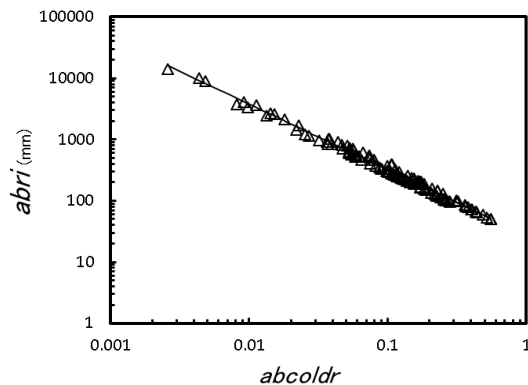


図9 図8(a)、(b)の全データの両対数表示

そこで、本節では、まず、シミュレーションのための要素について検討したのち、シミュレーション手順とその結果について記す。

5.1 平板化圧延シミュレーションのための要素

圧延加工では、圧下量を設定して最終的な板厚の製品を製造する。また、一般的には板材の圧延前後の板厚から計算される圧下率を一つの指標としており、熱間圧延では20-40%にも及ぶ大きな値で圧延される。本研究で取り扱う平板化圧延は円弧状材料を平板に成形することを目的としているため数%に設定している。

さて、シミュレーションを利用して円弧状材料を平板化圧延する際の手順を逆問題的に示したフローチャートを図10に示す。以下、このアプローチについて考察する。

平板化圧延では、圧延される試験片素材の形状として、初期厚さ t_0 及び初期曲率半径 r_{i0} を計測する。次に圧延を施し目標である平板化された場合の最終の厚さ t_{fin} を求め、この厚さまで数回に分けて圧延を行う。

(1) 関連する式を以下に記す。

目標平板状態での厚さに相当する最終厚さを t_{fin} 、

累積圧下比 d_i の最終圧下比を d_{ifin} と置くと以下の式が関連する式となる。

$$coldr = cd_i + d \tag{10}$$

$$c = et + f \tag{11}$$

$$d = g r_{i0} + h \tag{12}$$

$$d_{ifin} = (t_0 - t_{fin}) / t_0 \tag{13}$$

(2) 平板の条件($coldr=0$)より t_{fin} を求める。

式(10)~(13)に実験条件や定数を代入して、最終厚さ t_{fin} を求める。まず、平板の条件($coldr=0$)より式(10)は、式(11)、(12)を代入し、

$$coldr = cd_i + d = (et + f)d_i + (g r_{i0} + h) = 0 \tag{14}$$

となる。ここで、 $t = t_{fin}$ と置き、 t_{fin} について解く。式(14)に式(13)を代入し、

$$(et_{fin} + f) \times (t_0 - t_{fin}) / t_0 + (g r_{i0} + h) = 0 \tag{15}$$

式(15)は、二次方程式として、

$$et_{fin}^2 + (f - et_0)t_{fin} + (-f - g r_{i0} - h)t_0 = 0 \tag{16}$$

が得られる。そこで、根の公式より

$$t_{fin} = \frac{-(-f - et_0) \pm \sqrt{(f - et_0)^2 - 4e(-f - g r_{i0} - h)t_0}}{2e} \tag{17}$$

として、目標最終厚さ t_{fin} の解が求められるので、この厚さまで数回に分けて圧延すれば、平板を得ることができる。

5.2 実験結果を用いたシミュレーション手順

5.1 節で示した方法を実験した条件に当てはめて検討する。条件としては、No.7 試験片と No.15 について検討した。また、No.15 については、ここに手順は示さないが、No.7 と同様にしてシミュレーションを行った。以下に No.7 の結果を詳述する。

5.2.1 目標最終厚さの決定

No.7 試験片の条件は、 $Rr = 0.53$ 、 $r_{i0} = 201\text{mm}$ 、 $t_0 = 10.16\text{mm}$ である。これまでの実験で得られた式(7)~(9)の定数は、 $a = 27.1$ 、 $b = -1.07$ である。また、 $Rr = 0.53$ に関する式(11)、(12)の定数は、 $e = -0.629$ 、 $f = 12.459$ 、 $g = 0.0018$ 、 $h = -0.5981$ である。これらの値を式(17)に代入し、得られた最終厚さ t_{fin} の計算結果は、9.780 と 20.19 であった。これらの値の中で、 $t_{fin} = 20.19\text{mm}$ はあり得ない値であるので、 $t_{fin} = 9.780$ が最終厚さとなる。

5.2.2 圧延条件の決定と諸条件の計算手順

(1) 圧下量と圧延回数の計算

試験片の初期厚さ $t_0 = 10.160\text{mm}$ 、最終厚さ $t_{fin} = 9.780$ 、累積圧下量は、0.380mm となる。例えば、圧延は圧下量 0.1mm を 3 回、0.080 を 1 回の合計 4 回で圧延が完了し、平板が得られるはずである。ただし、本報では、実験値との比較のために圧下量を実験値でシミュレーションする。

(2) 理論曲率半径(r_{ith})と修正投影接触長さ比($coldr$)の関係

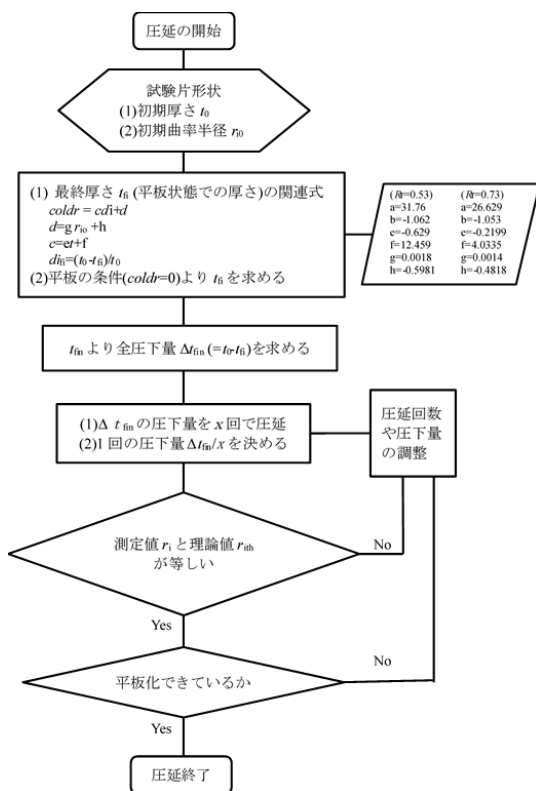


図 10 シミュレーションを利用した平板化圧延の逆問題的アプローチのフローチャート

まず、修正投影接触長さ比($coldr$)を求める。 $coldr$ は、式(10)~(13)より

$$coldr = (e+f) d_i + (gr_{i0} + h) \quad (18)$$

である。 d_i は累積圧下比であり、式(2)と同様に

$$d_i = (t_0 - t) / t_0 = \Delta t / t_0 \quad (19)$$

で表される。

また、理論曲率半径 (r_{th}) は、式(9)より

$$r_{th} = 27.1 coldr^{-1.07} \quad (20)$$

となる。

5.3 シミュレーション結果

No.7 試験片の実験結果のシミュレーションに用いた値及び得られた解析結果を解析例として表1に示す。また、曲率半径と修正投影接触長さ比の実験結果と解析結果を図11に示す。図11(a)、(b)は、それぞれ No.7 と No.15 の解析結果を実験結果と併せて示す。 $coldr$ について考察する。図11(a)より1パス目の $coldr$ の理論値が実験値より約 0.06 大きくなっているが、それ以降はそれらの差は小さくなった。

また、同様に曲率半径について考察する。理論値 (r_{th}) と実験値 (r_i) の差は、曲率が反転した時点の値(負

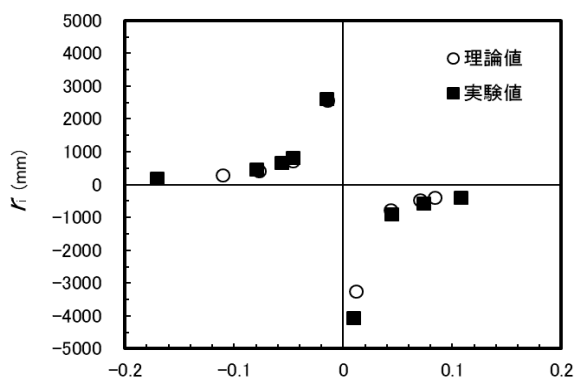
の曲率半径となる値) では、約 500mm の差があるが、その他の値ではそれほど大きな値とはならなかった。図11(b)より $coldr$ の理論値と実験値に誤差が生じているものの両者はなだらかな曲線を描いている。また、図11(a)、(b)の図において曲率が反転した時点の値に大きな差が生じているのは、曲率半径が無限大となる平板状態の条件が式(20)に示す式であるため計算結果のわずかな差が反映されていると考えられる。本研究で行った条件での平板化圧延では、図11の第2象限での圧延となるためこの範囲でのシミュレーションの適合性が重要である。以上のことから本手法による平板化のシミュレーションが可能であることが分かる。

6 まとめ

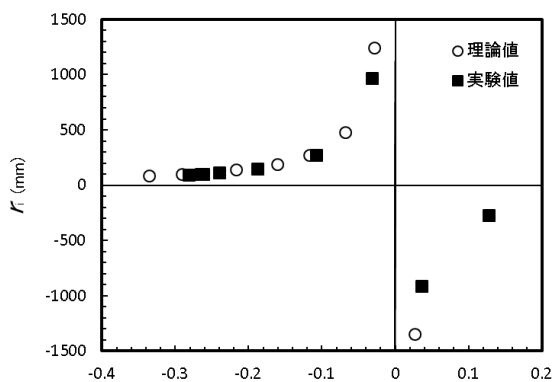
本報では、円弧状材料を圧延により平板化手法の開発を目指し、圧延における平板化シミュレーションに資する因子を検討した。また、均質材料を用いた平板化圧延の実験結果を圧延による成形法を逆問題的に解析し、円弧状材料を平板化するための手順について検討した結果以下のことが分かった。

- (1) 曲率半径(r_i)と円弧内側ロールと外側ロールの投影接触弧長さ比(ldr)は双曲線となり、平板化圧延におけるシミュレーション因子として有効である。
- (2) 曲率半径(r_i)と投影接触弧長さ比(ldr)の関係を表す双曲線の漸近線の値は、 ldr を修正する値(ldr_{cri})は、ロール径 $R_i=19.5$ mm、 $R_o=37$ mm ($Rr=0.53$) で 1.38、同様に $R_i=23$ mm、 $R_o=31.5$ mm ($Rr=0.73$) で 1.17 となる。また、 ldr_{cri} は、平板化時の条件である。
- (3) $Rr=0.53$ 及び 0.73 のロール比の条件下における曲率半径の絶対値($abri$)と修正投影接触弧長さ比($abcoldr$)の関係式は、 $abri = 27.1 abcoldr^{-1.07}$ となる。
- (4) シミュレーション因子を利用して平板化圧延を逆問題的に解析できる。
- (5) 試験片の初期形状と実験結果から求めたいいくつかの式と平板化後の厚さから、この厚さまで数回に分けて圧延を行くことで平板化が可能である。
- (6) まとめ(3)の曲率半径の絶対値と修正投影接触弧長さ比の関係式を利用することで、実験と同様の結果をシミュレーションできる。

以上のことから、円弧状材料の平板化圧延による成形法を逆問題的に捉えることで、円弧状材料の平板化をシミュレーションする因子とシミュレーション手順を明らかにできたと考える。今後は、この手



(a)No.7 ($Rr=0.53$)



(b)No.15 ($Rr=0.73$)

図11 曲率半径と修正投影接触長さ比の実験結果と解析結果

法を用いて平板化圧延実験で確認する予定である。

表 1 No.7 試験片の実験結果をシミュレーションした結果

圧延回数	1	2	3	4	5	6	7	8
試験片厚さ t_1 (mm)	10.160	9.950	9.900	9.850	9.800	9.76	9.71	9.67
圧下量(mm)	0.210	0.050	0.050	0.050	0.040	0.050	0.040	0.020
仕上げ厚さ t (mm)	9.950	9.900	9.850	9.800	9.760	9.710	9.670	9.650
累積圧下量(mm)	0.210	0.260	0.310	0.360	0.400	0.450	0.490	0.510
$coldr$	-0.11	-0.08	-0.05	-0.01	0.01	0.04	0.07	0.08
理論曲率半径 r_{th} (mm)	286.0	419.1	731.8	2556.3	-3237.9	-777.4	-468.1	-386.2

謝辞

本研究の遂行には以下に示す多くの卒業生、在校生や教職員各位にお世話になった。圧延装置製作は、平成 8 年度卒業生の中村正志君、西賢一郎君、川田正昭君、中村龍太君、平成 9 年度卒業生の植村聡君、岡本茂幸君、高野真一君、徳留義一君、徳丸福一君、堀之内一弥君、力丸貴之君が行った。また、試験片作製や圧延実験は、平成 8 年度卒業生の中村正志君、西賢一郎君、平成 11 年度卒業生の崔春烈君、杉原廣美君、平成 12 年度卒業生の下村達也君、園田剛巳君、平成 27 年度卒業生の大山洗市君、東剛亮君、平成 28 年度卒業生の大西春樹君、亀田秀亮君、平成 29 年度卒業生の岩元純平君、清武大晃君が行った。本年度は著者の退職年度で平板化圧延の集大成である本研究を遂行できたのは、本年度卒業研究生の坂元晃基君、塚脇広清君の尽力によるものである。ご尽力いただいた多くの卒業生、在校生や教職員各位に心中より謝意を表す。有難うございました。

参考文献

- 1)常深信彦:複合材料が一番わかる, 技術評論社, p.8, 2013
- 2)岡部朋永・矢代茂樹訳:複合材料の力学, 共立出版, まえがき, 2015
- 3)文献 1 の p11
- 4)未踏科学技術協会・傾斜機能材料研究会編: 傾斜機能材料, 工業調査会, pp.11-83, 1993
- 5)山中昇・渡辺義見・福井泰好・布村成具:シラス/アルミニウム合金傾斜機能材料の作製とその熱伝導特性, 軽金属, 44-6, pp.330-335, 1994
- 6)福井泰好・山中昇・渡辺義見・清宮義博:遠心力法による Al-Al₃Ni 傾斜機能材料の作製, 軽金属, 44-11, pp.622-627, 1994
- 7)山中昇・福井泰好:金属基傾斜機能材料の塑性変形挙動(第 1 報 Al-Al₃Ni 傾斜機能材料の押し加工), 日本機械学会第 74 期全国大会講演論文集,

- pp.307-308, 1996
- 8)山中昇:遠心鋳造法により製作した FGM 材の平板化に関する研究, 都城工業高等専門学校研究報告, 32, pp.27-35, 1998
- 9)山中昇:遠心鋳造により製作した円弧状傾斜機能材料の平板化圧延における変形過程のシミュレーション, 平成 28 年度塑性加工春季講演会講演論文集, pp.287-288, 2016
- 10)山中昇・渡辺義見・瀬川裕二:遠心鋳造法により製造したパイプ形状傾斜機能材料の平板化, 第 27 回新構造・機能制御と傾斜機能材料シンポジウム講演要旨集, p2, 2016
- 11)山中昇・岩元純平・清武大晃・渡辺義見・瀬川裕二:円弧状材料の平板化圧延における投影接触長さ比の影響, 第 28 回新構造・機能制御と傾斜機能材料シンポジウム<FGMs2017>講演要旨集, p13, 2017
- 12)金丸隆志:カラー図解 Raspberry Pi ではじめる機械学習(基礎からディープラーニングまで), 講談社, p305, 2018
- 13)小高知宏:機械学習(マシンラーニング)と深層学習(ディープラーニング):C 言語によるシミュレーション, オーム社, p36, 2016
- 14)文献 12 の p160
- 15)上村豊:逆問題の考え方(結果から原因を探る数学), 講談社, pp.20-23, 2014
- 16)日本機械学会編:逆問題のコンピュータアナリシス, コロナ社, p5, 1991
- 17)山中昇・永田静光・立山義浩・津浦洋一・富山光照・海田英生:総合実習と卒業研究を連携した FGM 平板化圧延機の製作, 論文集「高専教育」, 22, pp.155-160, 2000