遺伝的アルゴリズムを用いた板材逐次成形の加工条件の決定*

森 謙一郎^{*1}, 山本 政男^{*2}, 小坂田 宏造^{*1}

Determination of Hammering Sequence in Incremental Sheet Metal Forming Using Genetic Algorithm

Ken-ichiro MORI, Masao YAMAMOTO and Kozo OSAKADA

A method for determining hammering sequences in incremental forming of sheets is proposed on the basis of the genetic algorithm. The determination of the sequence for forming a sheet into a desired distribution of curvature in incremental forming is treated as a combinatorial optimization problem. The sheet is modeled to have many numbered points worked with a hammer, and is deformed under a constant load. In the genetic algorithm, a group of individuals having a combination of hammering points is set, and the combinations are optimized by selection, crossover and mutation operations in order to minimize the difference from the desired curvature distribution. The hammering sequences in incremental forming of aluminium square sheets with a hemispherical punch and a flat die are chosen as an example.

Key Words: Plastic Working, Computational Mechanics, Optimum Design, Genetic Algorithm, Incremental Forming, Sheet Metal Forming, Hammering Sequences, Combinatorial Optimization

1. 緒 言

板材をハンマで連続的に叩くことによって所定の形状に曲げる逐次成形が、フレキシブルな塑性加工法として期待されている。この成形法は局所的な変形を繰返すことによって板材をさまざまな形状に曲げるものであり、多品種少量生産に適した加工法である。逐次成形では、成形の自由度が大きいためハンマリングの順番を決定することは容易ではなく、成形条件は熟練者の経験によって決定されているのが現状である。有限要素法が塑性加工問題に応用されてその有効性が認識されるようになってきたが、逐次成形は局所的な変形を繰返すため有限要素法では計算時間が非常長くなる。さらに、叩く順番を決定するためには多くの試行錯誤を行う必要があり、有限要素法によって成形条件を決定することは現実的には困難である。このため、有限要素法の応用は局部の変形挙動を評価することに限られている⁽¹⁾。単純な曲面に対して成形経路を決定する試み⁽²⁾は行われているが、任意の形状を成形するための方法はまだ提案されていない。今後逐次成

形を実用化するためには、任意の製品形状に対して成形経路を推定する方法の開発が必要であり、計算力学的なアプローチが考えられる。

逐次成形では、成形経路、すなわち板材をハンマで叩く順番によって変形形状が変化するため、所定の形状に成形するためのハンマで叩く順番の決定は一種の組合せ最適化問題になる。組合せ最適化問題は連続値最適化問題と異って、目的関数を微分することによって最適化を得ることはできない。組合せ最適化問題の手法として、遺伝的アルゴリズム⁽³⁾が最近注目されている。遺伝的アルゴリズムでは、確率的な法則に基づいて組合せを変化させて最適化を行う方法であり、影響因子が陽な形で表されない複雑な目的関数も取り扱うことができる。

遺伝的アルゴリズムは、生産加工の分野においても応用されるようになってきた。Mizugaki ら⁽⁴⁾はフライス盤の工具の選択に遺伝的アルゴリズムを応用し、切削時間と削り残しの面積を最小にする工具径を決定している。工具径は規格で特定の値しかもつことができないため、工具径の選択は組合せ最適化問題となる。また、藤田ら⁽⁵⁾は板取りの問題に遺伝的アルゴリズムを応用している。一方塑性加工問題の応用として、Roy ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は引抜きおよび鍛造の加工条件の決定

* 原稿受付 1996年5月17日。

^{*1} 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-3)。^{*2} 大阪大学大学院。

に遺伝的アルゴリズムを応用している。この応用では、目的関数の値を計算するために有限要素法が用いられているが、遺伝的アルゴリズムでは目的関数の値を非常に多くの場合について計算しなければならないため、非常に限られた組合せの検討しか行うことができない。しかも、ダイスの角度および角部半径などの連続値を離散値に置換えており、最適な解を得ることは困難である。Roy らの試みは遺伝的アルゴリズムの利点を十分に活かしているとはいえない。

本研究では、板材を所定の曲率分布に逐次成形するためのハンマで叩く順番を決定する方法を、遺伝的アルゴリズムを基礎として提案する。所定の曲率分布との差を小さくするような遺伝子操作を行うことによって、最適な叩く順番を求める。

2. ハンマで叩く順番の決定方法

2.1 モデル化 板材を所定の曲率分布に逐次成形するためのハンマが叩く順番を、遺伝的アルゴリズムを用いて決定する。逐次成形では、ハンマによる局所的な変形を繰返すことによって板材を成形するが、それぞれの変形において板材が曲る量は、ハンマが叩いた周りの形状に大きく依存する。このため、ハンマが叩く順番によって成形される形状が変化することになり、叩く順番の決定は一般に容易ではない。単純な曲面に対しては、叩く順番を法則化することは可能であるが、一般的な形状に対しては容易ではない。遺伝的アルゴリズムでは、確率的な操作を基にして最適化を図るため、目標曲率分布に対してハンマで叩く順番が陽な形で表されなくても応用が可能である。

逐次成形を組合せ最適化問題として表現するために、板材はハンマで叩かれる多くの点を持ち、それらの点が一力の力で加工されるものとする。逐次成形では、叩く力を変化させると板材が曲る量は変わるが、

自動化の観点から考えると成形力を一定にしたほうが制御しやすいため成形力は一定とする。遺伝的アルゴリズムでは、図1に示すようにハンマが叩く点の組合せをもつ個体の集団を考え、その組合せを選択、交さ、突然変異の遺伝的操作を行うことによって最適化する。点には番号が付いており、叩く順番に点の番号を並べ、それぞれの点の番号は一定のビット長さの二進数で表現される。所定の形状に成形するためのハンマが叩く回数は前もってわからないため、個体をもつ組合せの数は実際のものよりも多くし、組合せの中に叩かないという情報ももたせている。点の最大番号よりも大きいもの(図1中にカッコを付けたものは叩かない場合を表している。

すべての叩く順番を遺伝的アルゴリズムで推定すると、組合せが多くなりすぎて計算時間および計算精度が問題になる。そこで、成形前半は板端から叩くものとして順番を求め、最終の形状に近い成形後半の順番を遺伝的アルゴリズムによって推定する。成形前半の順番は最終の形状にはあまり影響しないため、このような取扱いを行う。

2.2 適合度の定義 遺伝的アルゴリズムでは目標値に対して適合度を設定し、それを基にして確率的な処理を行って組合せを変化させ、組合せを目標値に近づける。板面内の曲率を x と y 方向に分解すると、個体 i における目標曲率分布との差 s_i は次のように表される。

$$s_i = \sum_{j=1}^n \{ |\kappa_{xj} - \bar{\kappa}_{xj}| + |\kappa_{yj} - \bar{\kappa}_{yj}| \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 n は点の数であり、 κ_{xj} , $\bar{\kappa}_{xj}$ は点 j における x 方向の得られた曲率と目標曲率である。目標曲率分布との差を基にして、個体 i の適合度 f_i を次式で定義する。

$$f_i = 1 / \{ 1 + (s_i - s_{\min}) \}^{\log 100 / \log (1 + \sigma)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m (s_i - s_{\min})^2$$

ここで、 $s_{\min}$ は式(1)の曲率分布との差 s_i の最小値、 m は個体数である。適合度は曲率差が小さいほど大きな値を持ち、曲率差が最小のとき最大値1になる。式(2)では、適合度が曲率差に対して指数的な関係をもつように設定されている。

2.3 曲率式 式(2)の適合度を計算するためには、順番に従って板材を叩いた後の曲率分布が必要になる。有限要素法によって曲率分布を計算することもできるが、ハンマが叩いた順番に従って計算を行うと時間は膨大になる。さらに、遺伝的アルゴリズムでは非常に多数の個体に対して各世代ごとに適合度が必要

Fig. 1 Group of individuals having combination of hammering points in genetic algorithm

になり、遺伝的アルゴリズムに有限要素法を直接応用することは現実的ではない。そこで、曲率の近似式を仮定し、それを用いて曲率分布を計算する。

板材のある点をハンマで叩いたときの曲率は周りの点の曲率に大きく影響される。周りの点がすでに曲がっているとハンマで叩くと大きく曲がるが、周りの点曲がっていないと曲がる量は小さい。同じ材料で同じ厚さの板材に対して一定の力で点1(図2)を叩いた後の曲率 κ_{x1} , κ_{y1} は、周りの点の曲率を考慮して次式で近似する。

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{x1} &= \kappa_{x1b} + \alpha_1 + \alpha_2(\kappa_{x3b} - \kappa_{x1b}) \\ &\quad + \alpha_2(\kappa_{x5b} - \kappa_{x1b}) \\ \kappa_{y1} &= \kappa_{y1b} + \alpha_1 + \alpha_2(\kappa_{y2b} - \kappa_{y1b}) \\ &\quad + \alpha_2(\kappa_{y4b} - \kappa_{y1b}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 κ_{x1b} は点1における x 方向の叩く前の曲率、 α_1 , α_2 は定数である。 α_1 は1回叩いたときの曲率の増加量に対応し、それに周りの点の曲率との差に比例した増加量を加えたものが式(3)である。点1を叩くと周りの点2, 3, 4, 5の曲率も変化すると考える。点2の曲率は次のように近似する。

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{x2} &= \kappa_{x2b} + \alpha_3 + \alpha_4(\kappa_{x2b} - \kappa_{x1b}) \\ \kappa_{y2} &= \kappa_{y2b} + \alpha_5 + \alpha_6(\kappa_{y2b} - \kappa_{y1b}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

点3, 4, 5の曲率も同様な式で表される。式(3)と式(4)の定数 α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 , α_6 は板厚、材質、ポンチで叩く力、ポンチ形状などが固定されているときのものであり、実験および有限要素シミュレーションの結果から求めることができる。板端を叩くような場合、変形の拘束が小さくなって大きく曲がるようになるが、

Fig. 2 Curvatures for one blow with hammer at point 1

```

Parent 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0
Parent 2 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 1

Template 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Yields

Child 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1
Child 2 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 0 0 1 0
  
```

Fig. 3 Exchange of 0 and 1 in each bit position for a pair of parents in uniform crossover

同様な式が成り立つものと仮定して定数の値だけを変化させる。それぞれの個体に対して、成形した順番に従って式(3)と式(4)から板材の曲率分布を計算する。

2.4 選択, 交さ, 突然変異 遺伝的アルゴリズムでは、個体をもつ組合せを世代ごとに変化させることによって最適な組合せを求める⁽³⁾。次の世代に対して、最大の適合度をもつ個体が同じ組合せで2個残される。これは現在の世代で最もよい組合せを次の世代に残すための処理であり、エリート保存戦略と呼ばれている。

残りの個体は選択, 交さ, 突然変異の遺伝的操作によって決定される。ルーレット方式親選択法を用いて適合度に比例させて個体を選択し、それらを親として一様交さとビット突然変異を行うことによって次の世代に異なった組合せをもつ個体集団を発生させる。一様交さでは、図3に示すように一組の親に対して二進数で表されたそれぞれのビットの値をランダムに入れ替える。すなわち、それぞれのビットにおいて0と1を乱数で発生させ、0の場合は親の値を入れ替えて、1の場合は値をそのままにすることによって新しい子を発生させる。適合度に比例した確率で選択された組合せに対して交さを行うことは、より最適な組合せを生成させる可能性が高いと考えられる。適合度は目標曲率分布との差に基づいて定義されているため、これらの処理は曲率差を小さくすることになる。

選択と交さの処理だけでは局所的な解しか得られないため、突然変異を行って異なった傾向の解を得る。この場合突然変異を頻繁に行うと解が収束しなくなるため、非常に低い確率で求められた個体のビットの値を変化させる。

2.5 二段階最適化 上述の方法では、叩く点とその順番を同時に最適化している。叩く点の数が増加すると、この方法だけでは最適解が求まらなくなる。この場合、得られた順番を入れ替えることより最適な組合せが求まることがわかった。そこで最適化を二段階にすることを考え、上述の方法を第一段最適化とし、求まった組合せの順番を入れ替える第二段最適化も遺伝的アルゴリズムを用いて行う。

第二段最適化では、組合せの順番だけを変更させるため、順序最適化遺伝的アルゴリズムを用いる。エリート保存戦略とルーレット方式親選択法を用いて個体を選択し、順序交さを行う。順序交さでは、組合せは二進数で表現されるのではなく、第一段最適化で求まった組合せに対して順番を付け、その順序を入れ替える。順番を付けた理由は、第一段最適化で求まった組

合せでは同じ叩く点の番号を含んでおり、順序交さできないためである。順序交さでは、図4に示すようにそれぞれの順序において0と1を乱数で発生させて、0の場合は親2の番号を子2に、1の場合は親1の番号を子1にそれぞれ残す。残りの番号はもう一方の親に現れる順に並べる。また、突然変異では組合せの中の2点の順番を入れ替える。

3. 曲率式の係数の決定

本計算法では、式(3)と式(4)を仮定して曲率を計算しているため、曲率式の係数の値を求める必要がある。図5に示すように、正方形板を球頭ポンチと平面ダイスによって逐次成形する場合を対象とし、数回叩いた場合の形状を測定することによって係数の値を決定した。板材は工業用純アルミニウムであり、一辺の長さが60 mm、厚さが1 mmである。球頭ポンチの直径は20 mmであり、板材を3.6 kNの一定の力で叩いた。

板材のある点をポンチで2回叩き、その後隣の点を

```
Parent 1 1 2 3 4 5 6 7 8
Parent 2 8 6 4 2 7 5 3 1

Template 0 1 1 0 1 1 0 0

Yields

Child 1 8 2 3 4 5 6 7 1
Child 2 8 4 5 2 6 7 3 1
```

Fig. 4 Exchange of numbers for a pair of parents in ordered crossover

Fig. 5 Incremental forming equipment of sheet metal with hemispherical punch and flat die

Fig. 6 Measured shapes of deformed sheet by laser beams for three blows; two blows at a point and then one blow at neighboring point

1回叩いた場合の板材の形状をレーザ変位計によって測定した結果を図6に示す。ポンチが叩いた付近で曲率が大きく変化しているため、式(3)と式(4)では叩いた周りの曲率だけを考慮した。それぞれの叩いた後の形状から3個の曲率分布のデータを求め、そのデータから係数を最小二乗法によって表1に示すように決定した。

4. 逐次成形における叩く順番の決定

4.1 計算条件 アルミニウム板の逐次成形(図5)におけるポンチが叩く順番を、遺伝的アルゴリズムを基礎として推定する。図7に示すように、板材は等間隔の100個の格子点をもち、ポンチがこれらの点を叩くことによって板材を成形する。板端を叩かないため、式(3)と式(4)から曲率を計算した。格子点は100個としたため、その番号を7ビット(128)で表現する。個体は叩く数を200個もつことができ、1400ビットで表現されており、個体数は300個である。対象とした目標曲率分布は、すべての点で曲率が 30 m^{-1} で均一なものと、表2に示す中心部の曲率が大きい不均一なもの2種類である。目標曲率に対して、曲率式(3)と式(4)を用いて板材を端から叩くものとして成形前半の順番を求め、成形後半の順番を遺伝的アルゴリズムによって決定する。

Table 1 Determined coefficients in equations (3) and (4) by least square method

α_1	16 m^{-1}
α_2	0.52
α_3	-6.7 m^{-1}
α_4	-0.20
α_5	7.7 m^{-1}
α_6	-0.12

Fig. 7 100 numbered points in sheet at equal spaces

Table 2 Desired curvatures [m^{-1}] in x - and y -directions at points in sheet for nonuniform distribution

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	25	25	25	25	25	25	0	0
3	0	0	25	50	50	50	50	25	0	0
4	0	0	25	50	50	50	50	25	0	0
5	0	0	25	50	50	50	50	25	0	0
6	0	0	25	50	50	50	50	25	0	0
7	0	0	25	25	25	25	25	25	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Uniform

(b) Nonuniform

Fig. 8 Variation of average minimum curvature difference between calculated and desired curvature distributions with generation number

4・2 推定結果 各世代における目標曲率分布との差の最小値 $s_{\min}$ を格子点の数 n で割った値の変化を図8に示す。第一段最適化では、曲率の差は世代数の増加とともにかなり減少している。第二段最適化では、第一段最適化で得られた解の精度が改良されている。

遺伝的アルゴリズムによって得られた各点の曲率を表3と表4に示す。叩く力が固定されているため、目標曲率とは完全には一致しないが、近い分布が得られ

Table 3 Obtained curvatures [m^{-1}] in x - and y -directions at points by genetic algorithm for uniform distribution

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	36	9	30	30	27	31	30	31	9	33
1	30	21	28	37	22	33	23	31	20	29
2	26	31	40	18	39	27	31	30	30	24
3	31	43	29	24	35	29	30	28	39	29
4	30	28	30	14	32	35	30	30	31	31
5	30	30	38	31	29	31	29	30	18	29
6	35	19	7	31	30	23	34	31	28	19
7	30	33	30	29	30	27	40	31	25	5
8	31	31	23	38	30	32	25	29	31	34
9	30	34	20	29	28	36	29	32	21	30
0	38	28	36	24	33	30	34	22	29	31
1	32	30	31	28	36	31	31	24	38	18
2	20	33	15	31	30	30	27	36	29	45
3	28	31	30	30	29	30	30	30	18	31
4	15	28	31	36	31	31	24	29	31	29
5	28	37	29	32	33	28	28	31	36	29
6	30	21	33	27	26	30	30	25	21	33
7	29	14	26	19	31	29	18	29	29	46
8	32	30	28	36	17	39	28	32	30	30
9	31	27	29	42	29	29	35	29	30	28

Table 4 Obtained curvatures [m^{-1}] in x - and y -directions at points by genetic algorithm for nonuniform distribution

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	8	0	0	10	7	0	0	0
3	0	0	-8	0	0	-12	-8	0	0	0
4	0	-8	30	21	18	31	30	18	0	0
5	0	8	25	17	25	32	34	12	0	0
6	0	0	25	44	50	50	20	31	-11	0
7	0	0	25	53	56	46	54	44	19	0
8	0	0	20	60	58	51	54	26	0	0
9	0	0	25	52	49	50	50	23	0	0
0	0	-5	29	49	50	54	57	24	0	0
1	0	5	41	39	50	53	48	25	0	0
2	0	-12	24	51	50	48	49	25	-11	0
3	0	15	31	50	35	50	47	26	7	0
4	0	0	23	25	30	30	25	17	-6	0
5	0	0	17	28	36	30	23	27	9	0
6	0	0	0	5	7	8	-7	7	0	0
7	0	0	0	-8	0	-9	8	-9	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fig. 9 Central cross-sectional shapes of bent sheets obtained by experiment

ている。本研究では叩く力を 3.6 kN としたが、叩く力を小さくすると 1 回の曲がる量が減少してより目標形状に近づく。この場合叩く総回数は増加するが、成形前半は板端から叩くものとして順番を求めているため、遺伝的アルゴリズムで推定する回数はあまり増加しない。

得られた順番に従って板材を成形する実験を行い、得られた中央断面の形状を図 9 に示す。均一曲率分布では実験で得られた断面形状は目標値にかなり近いが、中心部が大きい不均一曲率分布の場合ではあまり曲がっていない実験結果が得られている。これは曲率式(3)と式(4)の精度によるものと思われる。今後曲率式の精度を向上させる必要があり、仮定された曲率式(3)、(4)の形を検討しなければならない。同時に、曲率は形状の変化から求まるため測定誤差が大きくなりやすく、曲率の測定精度を向上させることと、曲率

式の係数を決定するためのデータを増加させることが必要になる。

5. 結 言

逐次成形はフレキシブルな方法として注目されているが、成形の自由度が大きいため、任意の目標形状に対してハンマが叩く順番を決定するのは困難である。本研究では、従来経験によって決定されていた逐次成形の成形経路に対して、計算力学的なアプローチを行った。遺伝的アルゴリズムを基礎とした方法を提案し、成形経路の決定に関するモデル化を行った。板材が多くの叩く点をもつものとして個体にそれらの点の組合せをもたせ、曲率式を仮定して適合度を求めて個体を選択し、交差と突然変異を行うことによって最適な組合せを発生させた。また、最適化を二段階にしてより最適な組合せを求めた。曲率式の精度が高くないため得られた解は十分ではないが、任意形状の逐次成形における成形経路を決定するための可能性を示した。

生産加工の分野では、組合せ最適化に関する問題がまだ多数残されている。組合せ最適化問題に、すでに確立されている連続値最適化手法を適用することができない。遺伝的アルゴリズムは確率的な手法に基づいて最適化を図るため、複雑な問題にも適用が可能であり、適用範囲は今後広がるものと思われる。

文 献

- (1) 長谷部忠司・島進, 塑性と加工, **35**-406(1994), 1323-1329.
- (2) 松原正基・田中繁一・中村保, 塑性と加工, **35**-406(1994), 1330-1335.
- (3) 例えば, 北野宏明編, 遺伝的アルゴリズム, (1993), 1-41, 産業図書.
- (4) Mizugaki, Y., Hao, M., Sakamoto, M. and Makino, H., *Ann. CIRP*, **43**-1(1994), 433-436.
- (5) 藤田喜久雄・赤木新介・廣川敬康, 機論, **59**-564, C (1993), 2576-2583.
- (6) Duggirala, R., Shivpuri, R., Kini, S., Ghosh, S. and Roy, S., *J. Mater. Processing Tech.*, **46**-1(1994), 185-198.
- (7) Roy, S., Ghosh, S. and Shivpuri, R. (Shen, S.-F., ほか 1 名編), *Simulation of Material Processing: Theory, Methods and Applications NUMIFORM 95*, (1995), 611-617, Balkema.