

曲げ工程の自動設計に対する遺伝的アルゴリズムの適用*

森 敏彦^{*1}, 広田 健治^{*1}
宮 脇 舞^{*2}, 平 光 真 二^{*2}Application of Genetic Algorithm
to Automated Design of Bending ProcessToshihiko MORI^{*3}, Kenji HIROTA,
Mai MIYAWAKI and Shinji HIRAMITSU^{*3} Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

An automated design of bending process was carried out by using an artificial intelligence. This design which is to decide an optimum order of edges to be bent can be considered as a kind of traveling salesman problem. A genetic algorithm was applied for a solution, where a gene is an edge to be bent and chromosome is an order of gene. If an interference occurred due to an ill-considered order, a process cannot be carried out. The interference would be known at the beginning of a design, while it often occurs at the end of a process. In order to design efficiently a practice of an inverse process design, which means not to decide a beginning order from a raw material to a product but to do a development order from a product to a raw material. Automatic design of two product profiles were carried out in the condition that two crossovers were examined and a scaling changed and it done successfully in the case of combination of two point and permutation crossover and gradual change of weight of a scaling. A fitness function was composed of five process factors which include a interference.

Key Words: Production Systems, Design, Process Planning, Computer Aided Design, Genetic Algorithm, Bending Process, Inverse Manufacturing

1. 緒 論

IT化にともない工学分野においても精密化、開発期間短縮、効率化などの要求が高まっている。特に塑性加工の工程設計はその複雑さもあり、熟練者の思考判断に代わりうるシステムの開発が期待されている。こうした複雑な工程に対して自動設計を行うには、制御変数、評価関数の選択、数学モデルの構築に加え、多峰性関数からの最適解探索が不可欠であるが、局所解に陥りやすく正確な解を見つけることは難しい^①。遺伝的アルゴリズム(以後、GAと略す)は生物の遺伝を模倣した最適化アルゴリズムであり^②、複雑大問題から解を向上させる要因を次々と見いだしていくことには向いている。本研究では、曲げ加工の工程設計を巡回セールスマン問題(以後、TSPと略す)に帰着し、そこにGAを適用することにより最適工程を求

めるシステムを構築し、曲げ加工の自動設計に対する知能化技術の適応を検討する。

2. 板金曲げ加工の概要

2-1 板金曲げ工程 大型部品や、複雑な曲げの場合に、プレスブレーキで曲げ加工が行われるが、その製造工程の概略を図1(a)に示す。定寸材から箱型の展開形状のブランクを作り、曲げ線(AB)に沿って楔形のポンチを押し込み(図1(a))、曲げが達せられる。目標形状まで曲げが行われた後、辺同士が溶接されて、曲げ最終製品となる。

2-2 工程設計 工程が進むにつれ、被加工材各部分は曲げられ、したがって、次第に複雑となる空間部分同士を曲げることとなる。このため、プレスブレーキには十分な作業空間(図1(b))のH、W、Dを確保しておくことが必要であり、ポンチはグースネックとしておく必要がある。ここで、グースネックとは図1(c)に示すように箱物製品を曲げる場合に材料が当たらないように逃げを設けてあひるの首状にした形状をいう。

* 原稿受付 2001年8月20日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。^{*2} 名古屋大学大学院。

E-mail: mori@mech.nagoya-u.ac.jp

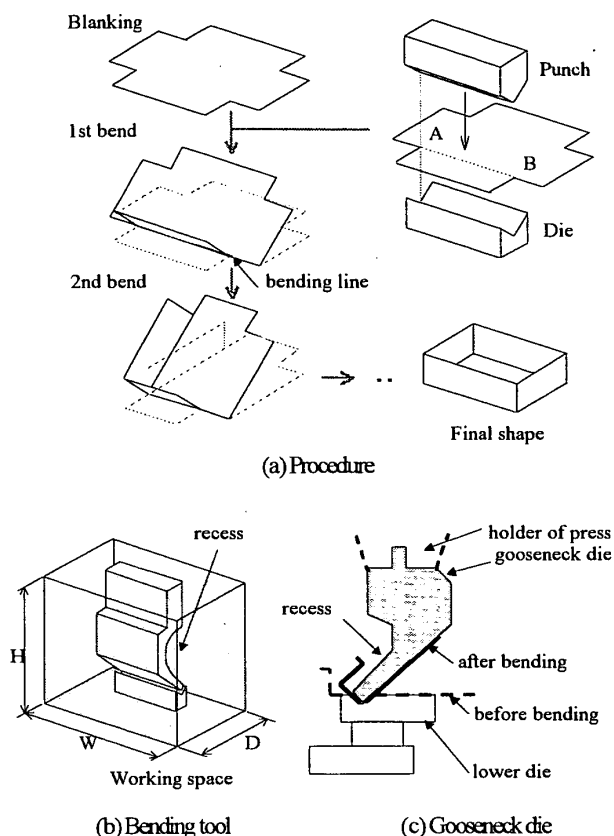


Fig.1 Sheet metal bending process

こうした制約内で干渉が生じないように展開図、曲げ順序ならびにポンチ形状を決定する必要がある。一方、製品精度に関して、曲げ半径や曲げ高さ、スプリングバック、キャンバ（曲げ線方向の反り）等の不良変形が生じる場合があり、底突きや逃しの検討がなされる。また、溶接の際には、熱ひずみの影響についても考慮する必要がある。

上記を考慮した工程設計は、熟練者の経験と試行錯誤による煩雑な作業であり、本研究ではその判断基準に AI を利用し、合理的かつ効果的な工程設計を行うことを目指す。

3. 自動曲げ工程設計に適用する解法の検討

3.1 組み合わせ最適化問題 最適化問題とは、与えられた制約条件を満たし、かつ目的関数を最大（最小）にする適応度 $f(x)$ を決定する問題であり、その中で、離散値を取り扱う問題を組み合わせ最適化問題と呼ぶ。スケジューリング問題や巡回セールスマン問題などがその例である。

3.2 巡回セールスマン問題 (TSP) これは、3.1 で述べたような複雑な組み合わせ最適化問題の 1 つであり、与えられた都市を一度ずつ訪問し、目的関数を最適とする順回路を求める問題である。その組み合わ

せは都市数を N 個とすると、 $(N-1)! / 2$ 個あり、NP 困難に属する問題となる。

3.3 曲げ工程設計の TSP への帰着に対する検討 本研究では、曲げ工程設計を組み合わせ最適化問題の一種であると考え、工程設計は曲げ線を必ず一度ずつ選ぶことによってなされる。その間、後述するように金型交換や高価なグースネックの使用等でコストが関係し、展開図形状などで評価される。

3.4 逆工程設計の提案 自動曲げ工程設計とは、要求される製品に対して最適な素板形状、最適な工程順を決定することであり、これに対して下記の理由により製品を出発として素板まで逆上る方法が適し逆工程設計を提案する。

- (i) 1 つの製品に対して、可能性のある素板形状、工程順は多種あり、曲げ工程設計は、いわば、製品からの分岐問題である。
- (ii) 金型とプレス機械の干渉や自己干渉は最終形状に近い工程で起こり、手順では干渉の有無が設計最終段階に至るまで分からず、逆工程では早期に判明する。

逆工程設計とは、完成形状から曲げ稜線を 1 つずつ指定して展開していき、干渉の有無を確認し、なければその稜線で展開し、順次繰り返すことにより展開図を作成することであり、得られた展開手順の逆が曲げ工程となる。このように、工程を逆に考える逆工程設計を行うことで、工程設計の初期の段階で干渉チェ

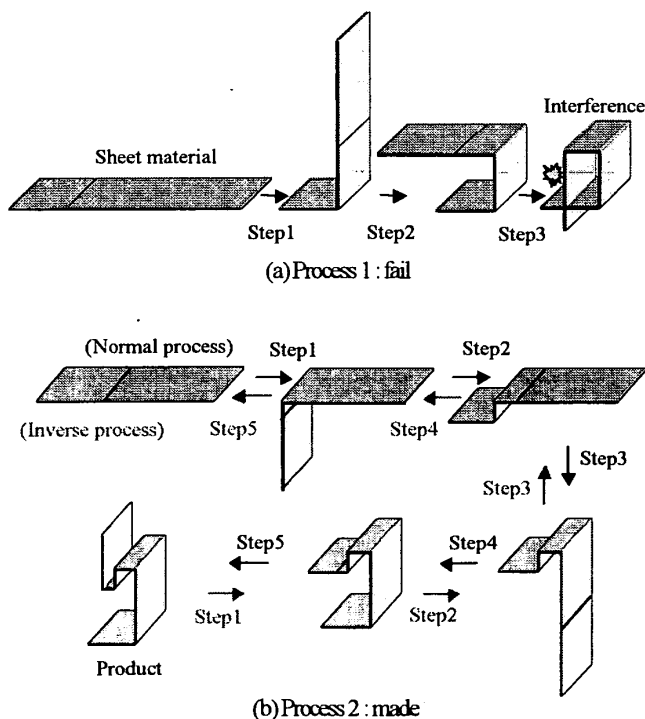


Fig.2 An example of self-interference

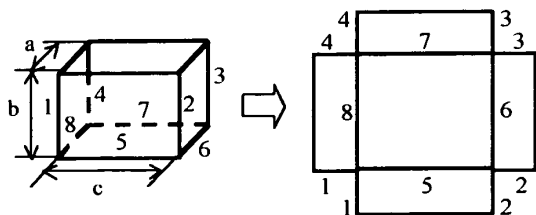
ックを行うことができ、無駄な探索を減らすことができる。図2に順工程、つまり素板より製品へと工程を進めた場合の工程設計を示す。工程1では、ステップ3で自己干渉が起きて加工が不可能とわかった例であり、工程2では、最終的に製品まで工程を進めることができた例である。なお、図2の例では、曲げ線が全て平行で展開図が1通りであるが、箱型で曲げ線が互いに交角を持つ場合には、展開図が幾通りもあり、割付をする必要があるが、この場合にも逆工程設計で容易に行える。以上、本研究では曲げの逆工程設計を、曲げ稜線を都市としたTSPで解くことにより工程の最適化を行う。

4 自動曲げ工程設計へのGAの適用に関する検討

GAとは人間の進化の過程を模倣した確率的探索であり、対象物を遺伝子に見立て、交叉、選択淘汰、突然変異を繰り返すことで、その問題の最適解を導き出し得る。言い換えればGAとは大問題の中から解を最適にする小問題を解くこと、または要因を見いだしていくことであり、特にNP困難に陥る問題に向く。

4.1 曲げ工程順のコード化 TSPで、起点とする都市から巡回する順番に都市名を列挙した文字列を染色体とするコード化をパス表現と言う。曲げ工程に対しても、展開可能な曲げ稜線に番号をつけ、それを遺伝子としてコード化する。例えば、図3の場合、[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]が染色体の1つである。ただし、このような箱型の一般的製品では、稜線が展開されるか切り離されるかは、設計当初は不明で、展開を進めるに従い評価値を基準として決めていく。逐次、展開稜線を遺伝子座の前半、切り離し稜線を後半にまとめる。

4.2 曲げ工程順最適化のために採用した遺伝子操作 最適解を得るための交叉には2通りの方法を試し、その際、TSPに起こり得る致死遺伝子の抑制および縮約も加味した。選択淘汰には、最適解向上の促進と局所解への埋没抑制を考慮し、エリート保存戦略とル



Chromosome code [⑤,⑥,⑦,⑧, 1,2,3,4]
Circle edge are to be unbent.

Fig.3 Encoding

ーレット選択戦略、スケール方策を検討した。なお、突然変異は、一般にサブツアーを壊し評価を悪くする恐れがあるため、使用しなかった。

4.2.1 交叉法に関する考察 2つの親の染色体を組替えて新たな染色体を作り、良好な形質を持つ染色体を生成する操作が交叉である。様々な交叉法が開発されているが、本研究では、2点交叉と組み合わせ交叉の有効性を検討する。

(a) 2点交叉 曲げの逆工程設計では、干渉チェックがなされて工程前半として有効な展開稜線に限られる。したがって、前半部分のむやみな交叉は無駄な探索を増すこととなる。また箱型の場合、工程の後半部分に切り離し稜線が配置される。そのため、染色体の始めの部分と終わりの部分を残す可能性の高い2点交叉を採用することで無駄な探索を減らす。なお、2点交叉で単純に交換したのでは致死遺伝子が発生するため、これを防ぐため、本研究では部分写像交叉を行う。図4(a)が致死遺伝子(子におけるその遺伝子を斜体で示す)が発生した例、(b)が部分写像交叉で致死遺伝子を抑制した例である。

(b) 組み合わせ交叉 世代交代が進行し、集団中に同じような形質を持つ個体が増加し、大局的な探索から局所的な探索に移行させる場合、交叉法も局所的な探索に向く手法をとるべきである。部分順列を壊さずに親の形質を継承させる交叉法の1つが、図5に示す組み合わせ交叉法である。このような場合、縮約を行う機会が増える。

Parent A : [1 2 | 3 4 5 | 6 7]
Parent B : [2 7 | 3 6 5 | 1 4]

↓ Crossover

Offspring A : [1 2 | 3 6 5 | 6 7]
Offspring B : [2 7 | 3 4 5 | 1 4]

(a) Ontogeny of fatal gene

Parent A : [1 2 | 3 4 5 | 6 7]
Parent B : [2 7 | 3 6 5 | 1 4]

Offspring A' : [1 2 | 3 ? ? | 6 7]
Offspring A'' : [1 2 | 3 5 ? | 6 7]
Offspring B' : [2 7 | 3 ? ? | 1 4]
Offspring B'' : [2 7 | 3 5 ? | 1 4]

↓ Crossover

Offspring A : [1 2 | 3 5 4 | 6 7]
Offspring B : [2 7 | 3 5 6 | 1 4]

(b) Partially mapped crossover

Fig.4 Partially mapped crossover

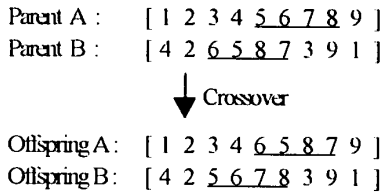


Fig.5 Permutation crossover

4.2.2 曲げ工程設計問題に対する選択淘汰 曲げ工程設計問題は、適応度に比例した確率によってのみ次世代を選択淘汰すると集団における適応度が失われる可能性があり、適応度の高いある順位までの個体はそのまま残すエリート保存戦略を適用する。ただし、エリート個体の遺伝子が集団中に急速に広がる可能性が高いため局所解に陥る危険性もあり、その他については、ルーレット選択戦略を適用する。染色体 I_i の適応度 $f(I_i)$ 、集団個体数 n とすると、選択確率 P_i は、次式で表される。

$$P_i = f(I_i) / \sum_{j=1}^n f(I_j) \quad \dots(1)$$

GA を適用する際、適応度のスケールリングが重要であり、本研究では線形スケールリングを採用する。スケールリング後の適応度 f' はスケールリング前の適応度 f により、次式で表される。進化の段階に応じて、定数の値 a を変化させることによってスケールリングの効果を調整する。

$$f'(I_i) = a \times f(I_i) + \frac{1-a}{n} \sum_{j=1}^n f(I_j) \quad \dots(2)$$

4.3 評価値 (適応度) 個体を選択淘汰させるための評価値 (適応度) を以下に示す。本研究では評価基準として以下の5パラメータをとった。

(1) 展開図のアスペクト比: a 材料取りを考えると素板はなるべく正方形に近く、また、切断長さはなるべく短くしたほうが望ましい。いずれにしてもアスペクト比 (=面積/輪郭線長さ) を大きくしたほうがよい。同一面積でアスペクト比最大は円であるので、この値で無次元化し、無次元化パラメータは次式で与えられる。

$$a = 2\sqrt{\pi \times A} / L_t \quad \dots(3)$$

ここで、 A : 面積, L_t : 輪郭線長さとした。例えば、図3に対しては、次式のようになる。

$$a = \sqrt{\pi[ac + 2b(a+c)]} / (a+c+4b) \quad \dots(4)$$

(2) 溶接部分長さ: L_w 溶接は、形状・材質を変化させるのでなるべく少なくしたほうが好ましい。評

価を悪くするパラメータとして溶接長さ L_w をとる。図3に対して $L_w=4a$ となる。

(3) 金型形状および同一金型の連続使用頻度: R 逃げなし金型の評価値を最大として、グースネックで大きな逃げを必要とする金型ほど評価を下げるパラメータとして R をとった。また、金型交換の頻度が増すほど、それだけ段取りを要することとなる。同一金型を使用するほど評価値を上げるように、連続使用回数を指数とするパラメータ I を採用した。

(4) 切離し稜線遺伝子の染色体中の座: $a^{N_p \cdot i}$ 展開 (逆曲げ) 工程設計にとって切離し稜線は無意味な稜線であるが、各個体ごとに設計当初は不明であり、工程を進めるに従い明確となる。一方、最初の個体を乱数で発生させるためには、全ての稜線を各染色体の座に収めておかねばならない。工程の初めのほうに切離し稜線が含まれるほど評価値 $a^{N_p \cdot i}$ (N_p : 全稜線数, i : 切離し稜線座) を下げることによって、その個体が淘汰されるようにした。

(5) 干渉の有無: I 工程に干渉があれば、それで加工は不可能になり、全評価値を零にするようにした。

評価値を前4者の重みつき線形結合とし、干渉の有無でその工程採否を判断することとし、次式に示す適応度をとった。

$$f = (C_1 \cdot a + C_2 \cdot L_w + C_3 \sum R^I + C_4 \sum a^{(N_p \cdot i)}) \times I \quad \dots(5)$$

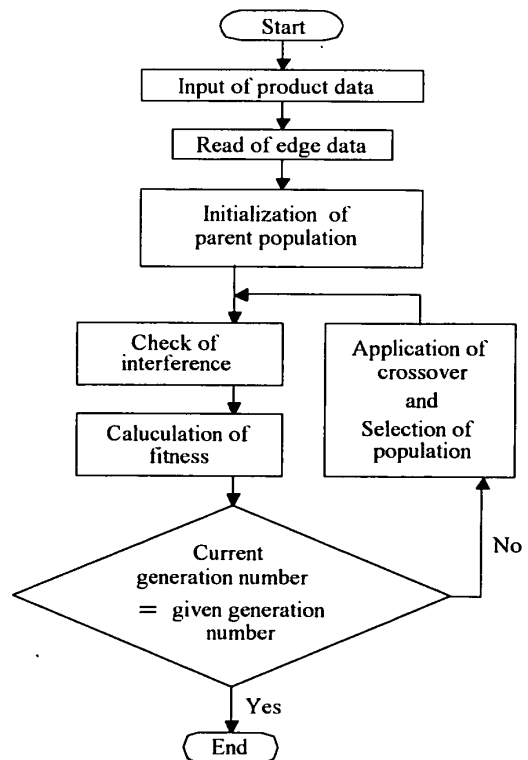


Fig.6 System flow

ただし, $C_1 \sim C_4$: 重み係数, $C_2 < 0$, $I=1$ (干渉無し), 0 (干渉有り) とする.

5. システムの概要

曲げ加工の自動工程設計を GA を使って逆工程のシステムの流れを図 6 に示す. なお, 本システムは Pentium II 相当のパソコンを使用し, C 言語を用いて開発した.

フローにおける各処理は以下のようになった.

- (1) 製品図面から頂点情報 (個数, 3次元座標), 面情報 (個数, 面を構成する点の番号, その面に連なる面の数, 面番号) をデータとして取り込む.
- (2) データから展開可能な稜線 (稜線が2つの面に共有) を取り出し, 番号付けする.
- (3) 稜線番号を遺伝子とした染色体の初期集団を, ランダムに発生させる.
- (4) 初期集団の各個体について展開を行い, 各評価値を算出し, 重みをつけ適応度を計算する.
- (5) 適応度にしたがって次世代に子孫を残す親を選び, 交叉を行う.
- (6) 新しく作られた各個体について展開を行い, 各評価値から適応度を計算する.
- (7) 適応度にしたがって次世代に残る個体を集団全体から選ぶ.
- (8) (5)~(7)を設定世代まで繰り返す.
- (9) 最適化の終了.

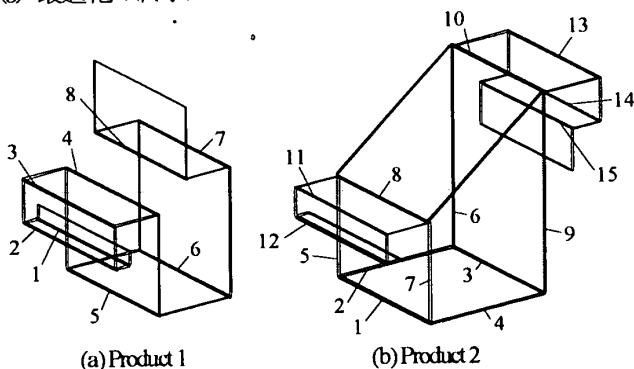


Fig.7 Geometries of products to be automated designed

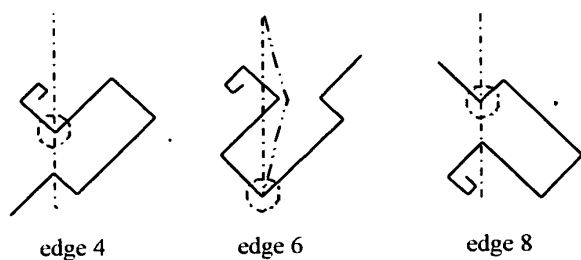


Fig.8 Check of interference between die and material

6. 適用製品形状

本探索戦略の妥当性を検証するため, 図 7 に示す 2つの製品形状に対して適用を試みた.

6.1 製品1の特徴 曲げ稜線はすべて平行で展開図は1つだけとなる. このため, 4.3 の評価値では(3)と(5)のみが評価対象となり, 以下の条件を満たすものが最適となる. 展開第1工程で加工不可能は, 曲げ稜線 1, 4, 8 であり, Fig.8 に示すように曲げ線 4, 8 ととも材料と下型が干渉する. 曲げ加工が容易なのは, 逃げの最も小さい曲げ線 6 (Fig.8) である. なお, 中間工程で並び [4, 3, 2, 1] のセットを入れると評価値は上がる.

6.2 製品2の特徴 切り離しを伴う製品形状であり, 4.3 の評価値すべてが評価対象となる. 本対象に対しては, 重み係数を $C_1=210$, $C_2=70,000$, $C_3=1$, $C_4=-10$ とした.

7. シミュレーション結果および考察

7.1 製品1

(1) 探索条件 稜線は 8 個であり, 組み合わせ総数 = $8! = 40,320$ 個となる. それに対して, GA をスケージングの有無, 交叉法の選択のより表 1 に示す 6 通り, さらに, 比較として総数 500 ~ 3000 のランダム探索も行う. 表 1 中で適用した操作に○印をつける. GA は, 初期個体数 40, 交叉数 20, 世代数 40 と初期個体数 80, 交叉数 20, 世代数 40 の 2 通りで行い, スケージングの重みは, 0.7 (1~11 世代), 1.0 (12~20 世代), 1.3 (21~40 世代) とした.

6.1 の製品の特徴で考察した最適工程 “曲げ線 6 を第 1 展開, 中間工程に並び [4, 3, 2, 1] を入れる工程” が個体数 40 の初期集団に含まれる確率は 0.0476 である.

(2) 探索結果 図 9 に初期個体 40 の場合の世代についての各集団における最大評価値の推移を示す. 最大評価値が本研究の最適値に到達したのは, 全てを考慮した実験 6 のみである. 探索法 3, 5 も比較的高い

Table 1 Search method

	Scaling	Partially mapped crossover	Permutation crossover
Test 1		○	—
Test 2	—	—	○
Test 3		○	○
Test 4		○	—
Test 5	○	—	○
Test 6		○	○

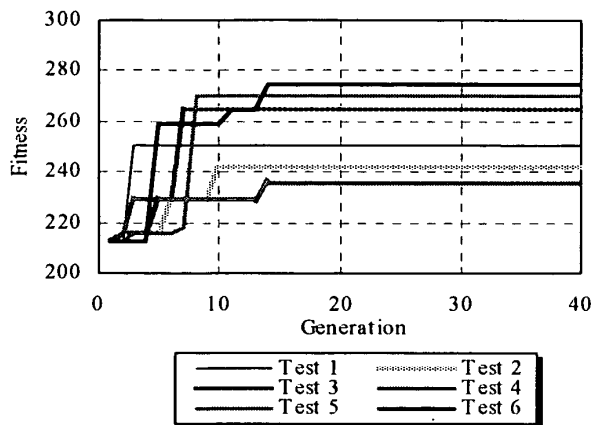


Fig.9 Proceed of maximum fitness

値である。なお、実験1で評価値が比較的高くなったのは、乱数発生で生成した初期集団の中に評価の高い個体が含まれ、エリート保存戦略で残ったからである。

交叉法については、2点交叉と組み合わせ交叉の併用が有効であった。2点交叉では細かい並びの入れ替えが難しく、組み合わせ交叉では個体間の共通部分順列に左右されやすい。両者を適宜組み合わせることで互いの短所を補償する効果が現れたと考えられる。結果としてスケーリングと複合交叉を行った実験6でのみ6・1で述べた条件を満たす最適解を得ることができた。

7.2 製品2

(1) 探索条件 稜線総数15、切離し稜線数4で組み合わせ総数 $= 11! = 39,916,800$ 個となる。探索法は、スケーリング適用、2点交叉と組み合わせ交叉の複合のみを行い探索条件も初期個体数100、交叉数50、世代数80のみとし、スケーリングの切り替えを表2の3通りとした。例えば、実験8では、第1~24世代で重み0.7、第25~48世代で重み1.0、49~80世代で重み1.3に設定する。

(2) 探索結果 図10に探索結果を示す。世代全体に段階的にスケーリングをかけた実験7で最も高い適応度を得た。大きな3段階のみで重みの小さいスケーリングをかけた実験8ではよい結果を得ない。

実験7では、解を浅く探索する時期と解の方向性を統一して深い探索をはじめめる時期においてスケーリングの切り替えがうまく行われた結果、世代後半に急激な解の改善を得たと考えられる。

なお、適応度については、溶接線を含み評価項目

Table 2 Applied generation of scaling weight

Weight	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.3	1.5
Test 7	1/8	9/16	17/24	25/32	33/40	41/48	49/80
Test 8		1/24			24/48	49/80	
Test 9	1/4	5/8	9/12	13/16	17/20	21/24	25/80

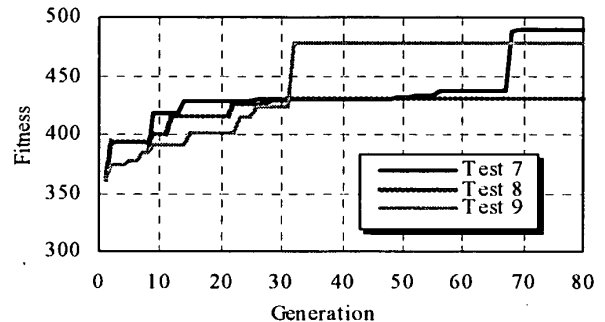


Fig.10 Proceed of maximum fitness

の関連が複雑になるため今後の検討を要する。例えば、金型の逃げで考えれば第1展開曲げ線は2, 3, 4となるが、溶接線長さで考えれば1を選ぶべきである。このような場合、各評価項目の優先度に応じて評価が高まるように(5)式における $C_7 \sim C_9$ を決める必要がある。

8. 結 言

提案したGAによる曲げ工程システムに対して、計算実験により性能評価を行った。

(1) 溶接線のない形状に対し、スケーリングを施し2点交叉と組み合わせ交叉を複合して行う探索法により最適解を得ることができた。

(2) (1)に加えてスケーリングの重みを段階的に変化させることで、溶接線を含む箱型に対しても探索性能が向上することを確認した。

(3) 実製品には一枚の素板だけから製作できないもの、穴加工等を曲げ工程途中に組み込まねばならぬもの等があり、今後の課題はまだ多い。

文 献

- (1) 森・広田・宮脇, 第51回塑性加工連合講演会論文集, (2000), 479-480.
- (2) 北野宏明 編, 遺伝的アルゴリズム, (産業図書)
- (3) 柳浦・茨木, 電学論 C1146, (1994), 713-720.