

曲げ工程の自動設計に対する遺伝的アルゴリズム適用 における交叉法に関する研究*

森 敏彦^{*1}, 広田 健治^{*1}
宮 脇 舞^{*2}, 平 光 真二^{*2}

Consideration of Optimum Crossover in Automated Design of Bending Process by GA

Toshihiko 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 had been carried out by using a genetic algorithm, where a gene in an edge to be bent and a chromosome in an order of gene. It was considered as a kind of TSP and solved inversely in order to detect a interference easily. GA have been used successfully to solve continuous functional optimization problems, in which crossover operation typically involves only exchanging randomly selected gene of chromosome between two parents to create two children genotypes. However, these genetic operators are not suitable for routing type problems, because an optimal ordering of a list of objects must be found in order to solve the problem. Furthermore, often the selection of operations requires a deep insight into the nature of the specific problem and operations are not portable to real-problems in themselves. In this reports, seven kinds of crossovers were discussed and tested in automated designs of bending process.

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

1. 緒 言

曲げ加工工程決定は、複雑な加工技術の知識ベース化を必要とするため自動化が遅れている⁽¹⁾。その問題解決のため、前年度から曲げ加工を巡回セールスマン問題(TSP)、逆工程問題に帰着し、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用して、自動工程設計システムの構築を行ってきた⁽²⁾。GAにおける生物進化過程を模倣した確率的探索方法の中に、交叉の操作があるが、多数ある交叉法の中で最適なものはシステムごとに異なってくる^{(3),(4)}。本論文では、本システムに対する最適な交叉法を検討した。

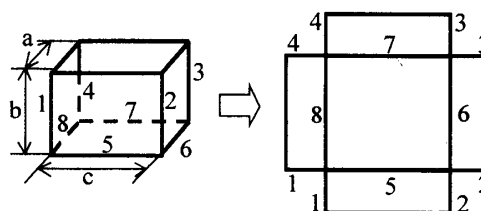
2. 自動曲げ工程設計への遺伝的アルゴリズムの適用に関する検討

本研究では、曲げ工程設計は曲げ線を必ず一度づつ

選ぶことによってなされる組み合わせ最適化問題の一種であると考え、TSPに帰着し、さらに干渉の早期解決のため逆工程設計問題とし、GAの適用を可能とした。金型交換、高価なグースネックの使用等にコストが関係し、さらに展開図形状の難易があり、それらを評価関数とした。

2-1 曲げ工程順のコード化

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して、曲げ工程をパス表現した。例えば、



Chromosome code [⑤⑥⑦⑧, 1, 2, 3, 4]

Circle edges are to be unbent.

Fig.1 Encoding

* 原稿受付 2002年8月27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

図1の場合, [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]が染色体の一つである。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。

2.2 本研究で採用した遺伝子操作

本研究では, 現行のシステムに対しての最適な交叉法の検討が目的であるため, 7種類, 10手法の交叉法を用いた。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ーレット選択戦略, スケーリング方を併用した。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。

2.2.1 本実験に用いた交叉法 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。ほとんどの組み合わせ問題においては, 解空間に制約がついており, 交叉の際にそれらの制約を満たすような実行可能解を生成する必要がある。本研究で利用したTSPにおいては, その解は n 個の要素の順列でなければならない。現在では, その条件を満たすような交叉法(順序づけ交叉法)が数多く提案されている。以下に, 本実験で用いた順序づけ交叉法を紹介する。ここで紹介する交叉法の多くはTSPに対して提案されたものであるが, 一部は本研究に適するように修正した。交叉の基となる親の数と, 交叉によって生成される子の数の組み合わせはいろいろ考えられるが, ここでは2つの親A, Bから2つの子C, Dが生成されるものとして説明する。

(1) PMX (partially mapped crossover) PMXは, 2つの親の遺伝子を部分的に交換する交叉法の一つで, マスクを利用して子への遺伝操作を行う。1つの染色体内に同一遺伝子が2個存在して致死遺伝子になることがある。この致死遺伝子の発生の抑制は, 致死遺伝子群の中からランダムに選び出し交換することで行う。以下にPMXの過程を示す。

過程1: 遺伝子数 n 個の親A, Bに対して, [0,1]をランダムに n 個発生させてマスクを作成し, マスク要素 [0] の遺伝子座の遺伝子を子に継承させ, マスク要素 [1] の遺伝子座には一方の親の遺伝子を継承させる。

過程2: マスクの要素が [1] の遺伝子座の中に, 致死遺伝子が発生した場合には, 残りの遺伝子をランダムに選び出し交換する。

図2は実施例で, (a)は致死遺伝子が発生した場合,

(b)は, PMXで致死遺伝子をなくした場合である。

(2) OX (order crossover) OXは, 2つの親の遺伝子を部分的に交換する交叉法の一つで, PMXと似るが, 致死遺伝子をなくす操作を親の形質を継承するように改良したものである。OXでは, PMXにおける過程2で致死遺伝子座に当てはめる遺伝子を親に存在したときの順序で割り当てる。OXの過程2を図3に示した。

(3) FLX (free list crossover) FLXとは, 染色体を作成する方法を符号化し, その符号を交叉させ, その後, 復号化して子を生成する交叉法である。子の染色体も符号に従って遺伝子を1つずつ選ぶため致死遺伝子は発生しない。

親 [1372546] の符号化手順を図4に示す。最初の要素1はリスト中1番目であるので符号の最初に1, 次の要素3は1を除いたリスト中2番目であるから符合は2, 次の要素7は1, 3を除いたリスト中5番目であり符号は5, このように順に選んでいき, 符号は [1251211] となる。図5に実施例を示す。

(4) CX (cycle crossover) CXは両親に共通する遺伝子の順列を見つけ出し継承する方法である。図6に示すように, 親Aの1番目の遺伝子を1番目の要素, 親Bの同じ遺伝子座の遺伝子を2番目の要素, 親Aにおける2番目の要素が存在する遺伝子座に位置する親Bの遺伝子を3番目の要素として, 1番目の遺伝子に戻るまで続け, サイクルを見つけ出す。継承されてい

Parent A : [1 2 3 4 5 6 7]	
Parent B : [3 2 5 6 7 1 4]	
Mask : [0 0 1 1 1 0 0]	
↓ operation(1)	↓ operation(1)
Child C : [1 2 5 6 7 6 7]	Child C' : [1 2 5 ? ? 6 7]
Child D : [3 2 3 4 5 1 4]	Child D' : [3 2 ? ? 5 1 4]
	↓ operation(2)
	Child C : [1 2 5 4 3 6 7]
	Child D : [3 2 6 7 5 1 4]

(a) Ontogeny of fatal gene (b) PMX

Fig.2 An example of PMX

Parent A : [1 2 3 4 5 6 7]
↓ operation(2)
Child C : [1 2 5 3 4 6 7]
Child D : [3 2 6 7 5 1 4]

Fig.3 An example of OX

```
List  [1234567]   [*234567]   [*2*4567]
Order (1234567)   (*123456)  (*1*2345)
Parent [1372546] → [*372546] → [**72546]
Code  [1*****]  [12*****] [125****]
      ,,,→ [1251211]
```

Fig.4 Encoding of chromosome

```
Parent A : [1372546] →Encoding→Code A : [1251211]
Parent B : [3261754] →Encoding→Code B : [3241321]
                          Mask : [0001111]
Child C : [1372654] ←Decoding←Code C : [1251321]
Child D : [3261547] ←Decoding←Code D : [3241211]
```

Fig.5 An example of FLX

```
Parent A : [1 2 3 4 5 6 7]
           ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
Parent B : [3 2 5 6 7 4 1]
           ↓
Child C : [1 2 3 6 5 4 7]
Child D : [3 2 5 4 7 6 1]
```

Fig.6 An example of CX

ない遺伝子は、他の親から継承する。太字がサイクルとして継承した遺伝子、細字が他の親から継承した遺伝子である。子Cについては、サイクル [1→3→5→7] を見つけ、親Aからこのサイクルの要素を継承し、決まらない遺伝子座は、親Bの要素を継承する。

(5) POPX (partial order preserving crossover) POPXは、両親に共通する2要素間の半順序 (partial order) を保存する子を生成する交叉法である。以下に、POPXの過程を示す。

過程1: 遺伝子要素 i に対して、2つの親の染色体中で共通してその遺伝子の後ろに存在する遺伝子の数を数え、 $X(i)$ とする。

過程2: $X(i)$ の多い順に遺伝子を並べ替えたものを子とする。 $X(i)$ が等しい場合、子Cで親Aの、子Dで親Bの順序を保存する。図7に実施例を示した。

(6) AEX (alternating edge crossover) AEXは、染色体内における隣り合う2つの遺伝子の並びを両親から交互に継承する解を生成する方法である。図8に実施例を示す。子Cについて、1番目の遺伝子座には親Aの1番目の [1] を、2番目には親Bの並び [1→4]

より [4] を、3番目には親Aの並び [4→5] より [5] を、4番目には親Bの並び [5→6] より [6] を、というように順次生成していく。

(7) PX (permutation crossover) PXでは、互いの親の染色体内で、ある区域で同じ遺伝子群が違う順序で存在するとき、その区域において親Aの順序と親Bの順序とを交換して、それぞれを子C、子Dとする。部分順序を壊さずに親の形質を継承するため、局所探索に有用であると考えられる。図9に実施例を示す。

<Element>

$X(1)=0, (2)=4\{4\ 5\ 6\ 7\}, X(3)=4\{4\ 5\ 6\ 7\},$
 $X(4)=0, X(5)=2\{6\ 7\}, X(6)=1\{7\}, X(7)=0$

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

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

↓ operation(1)(2)

Child C : [2 3 5 6 1 4 7]

Child D : [3 2 5 6 7 4 1]

Fig.7 An example of POPX

```
Parent A : [1234567] Adjoining A : [1→2] [2→3]
                                           [3→4] [4→5]
                                           [5→6] [6→7]
Parent B : [3256714] Adjoining B : [3→2] [2→5]
                                           [5→6] [6→7]
                                           [7→1] [1→4]
```

Child C : [1 4 5 6 7 3 2]

Child D : [3 4 1 2 5 6 7]

Fig.8 An example of AEX

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

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

↓

Child C : [1 2 3 5 6 7 4]

Child D : [3 2 4 5 6 7 1]

Fig.9 An example of PX

(8) 交叉点数 点交叉が可能なのは、巡回位置を重視するOX,PMX,FLXの3交叉法である。これらの交叉法では、一般に交叉点数を増やせば探索空間が広がる。例えば、遺伝子長を L_{gene} とし、交叉点を等分割点に選んだ場合、1点交叉の場合には、交叉しても $1/2 L_{gene}$ 長の遺伝子が1単位として保存されるのに対して、2

長の遺伝子が 1 単位として保存されるのに対して、2 点交叉の場合には、前者よりも短い $1/3 L_{gene}$ 長の遺伝子が 1 単位として保存される。1 点交叉では、長い遺伝子が優性巡回と劣性巡回の組合せであっても、交叉によって劣性巡回を変更することができない。TSP 問題では、保存される遺伝子長を短くすることにより多くの可能性を検討することとなる。

2.2.2 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、エリート保存戦略とルーレット選択戦略を併用する。また、進化の段階に応じ、スケューリングを行った。

2.3 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) を次式で求めた。

$$f = (C_1 \cdot \alpha + C_2 \cdot L_w + C_3 \sum R^l + C_4 \sum a^{(N_p - l)}) \times I \quad (1)$$

ここで、 α : 展開図のアスペクト比, L_w : 溶接部分長さ, R^l : 金型形状および同一金型の連続使用頻度, $a^{(N_p - l)}$: 切り離し稜線遺伝子の染色体中の座, I : 干渉の有無とした。但し、 $C_1 \sim C_4$: 重み係数, $C_2 < 0$, $I = 1$ (干渉無し), 0 (干渉有り) とする。

3. システムの概要

曲げ加工の自動工程設計を GA を使って逆工程で行う本システムは、Pentium II 相当のパソコンを使用し、C 言語を用いて開発した。なお、システムのフローは前報で示した⁽²⁾。

4. 各交叉法に対する検討

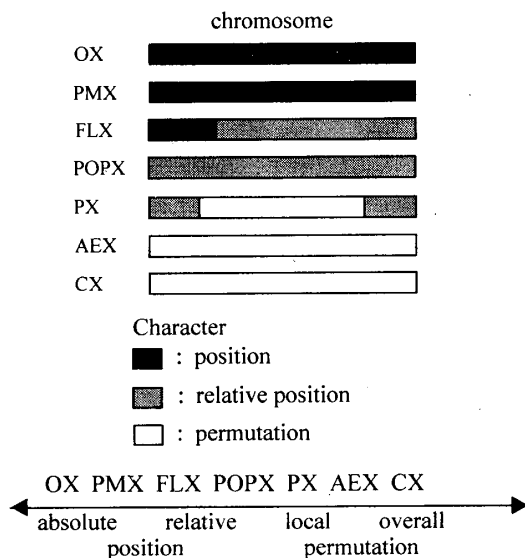


Fig.10 Inherited character of each crossover

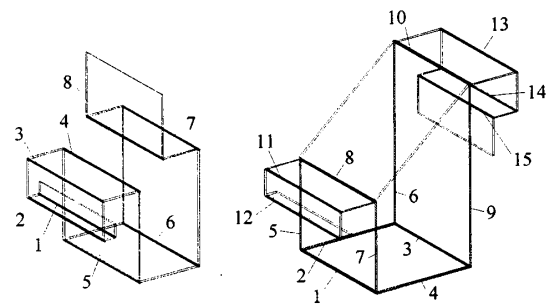
スケジューリング問題における最適解が、全体工程順における各工程の位置が順列かは、対象とする問題ごとに異なる。図 10 に本論文で扱う各交叉法が染色体中で遺伝させる形質を示した。黒は遺伝子座重視、ハッチングは相対順重視、白は順列重視である。

5. シミュレーション結果および考察

5.1 製品形状 自動曲げ工程設計の代表として、図 11 に示す製品形状を最適工程シミュレーションする。

(a) の製品 1 は、带状素板から曲げるものであるが、複雑さの程度は高く、山曲げ、谷曲げの連続及び山曲げの 4 回連続があり、組合せ総数は $8!$ (=40,320) ある。製品 2 は箱状の両側に把手がついた形状で直交する方向の曲げを含み、組合せ総数は $11!$ (=39,916,800) ある。現実の曲げ製品形状は製品 1, 2 より単純な形状であり、本シミュレーションで自動曲げ工程設計全般を包含しうると考える。なお、今回は素板が 1 枚よりなる形状としているが 2 枚以上に分かれる場合にも、個々で TSP を解き、それぞれで最適巡回を選ぶことであり、本質的には、本シミュレーションの検討で十分と考える。

5.2 シミュレーション 1



(a) Product 1 (b) Product 2

Fig.11 Geometry of products to be Automated-designed

5.2.1 探索条件 製品 1 (図 11 (a)) に対して、個体数 40, 交叉数 30, 世代交代数 40 の条件で、各交叉法によって最適工程探索を行った。OX, PMX, FLX については、1 点、2 点交叉を行うため、すべてで 10 通りの交叉法を試み、それを区別するための各交叉法名の後に交叉点数をつけた。なお、比較し易くするために、乱数発生で生成した初期個体はすべて同一のものを用いた。

5.2.2 探索結果及び考察

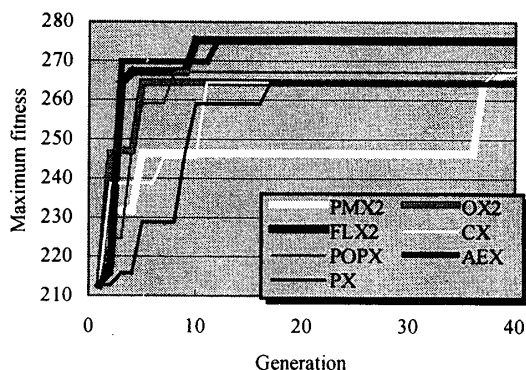


Fig.12 Proceed of maximum fitness with generation in simulation1 (Comparison of different crossover)

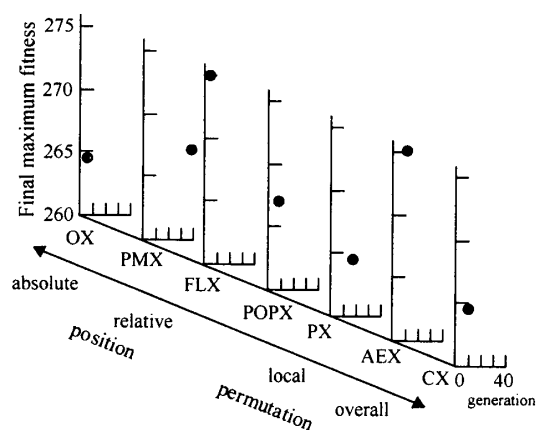


Fig.13 Measures of each crossover's performance (Comparison of different crossover)

(1) 各交叉法の比較 図 12 に各交叉法によって得られた最大評価値の推移を示す。この図により各交叉法の性能を表す指標として、世代交代数 40 までに到達した最大評価値及びその評価値に達した世代数を取り、遺伝形質を座標軸として各交叉法を配置させた各指標面にプロットしたものを図 13 に示す。図 13 の各指標面で左上ほど、交叉法の性能が良いことを表し、FLX と AEX がほぼ同程度の高性能を示した。前報で考察したように、製品 1 に対して最適工程を与える条件は、稜線 [6] を最初に、中間工程で並び [4→3→2→1] を与えることである。2.2.1(3)の説明及び図 10 から分かるように、FLX は適する最適工程を選択すればそのまま固定し易く、さらに、交叉する前に符号化を行うために、多くの並び順を探索する。AEX は優秀な親の染色体の中の隣りあった工程の前後関係を細かに結び付けていく方法であり、結局、工程全般を探索する。この 2 つの探索方法以外は、自動曲げ工程設計

において遺伝子が入れ替わり難く、何らかの欠点を持つ。OX, PMX は位置重視の交叉で、交叉点前後において遺伝子が入れ替わり難く、各部分 (例えば前半部分のみ) で固定された遺伝子列の入れ替えが続くのみで局所探索に陥る。ただし、PMX では致死遺伝子除去でランダム操作が入り、突然に解が改善されることもあり、図 12 の 37 世代で急増し、さらに 113 世代まで続けると最良解に到達している。PX, POPX は比較的長い遺伝子列を固定することになり、解の重複、すなわち、探索速度が遅く、最良解に近づいた後、探索速度を速める有効な手段がない。

(2) 交叉点数の影響 OX, PMX, FLX について、交叉点数を変えた場合の最大評価値の経過を図 14 に、性能指標を図 15 に示す。1 点交叉の方が世代初期の立ち上がり早い、その後の上昇、到達最大評価値は 2 点交叉の方が大きい。OX の 1 点交叉では最大評価値は 221.0352 までにしかならない。

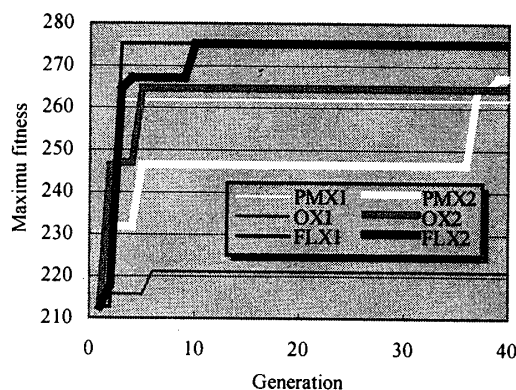


Fig 14 Proceed of maximum fitness with generation in simulation1 (Comparison of one and two-points crossover)

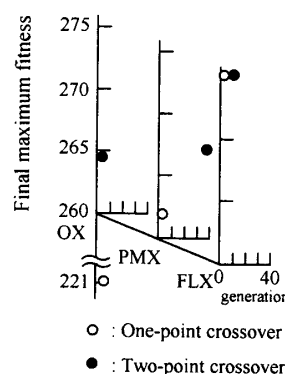


Fig.15 Measures of each crossover's performance (Comparison of one and two-point crossover)

5.3 シミュレーション 2

5.3.1 製品形状 製品 2 (Fig.11 (b)) に対して、個体数 100, 交叉数 50, 世代交代数 50 の条件で、各交叉法によって最適工程探索を行った。

5.3.2 探索結果及び考察 図 16 に各交叉法による最大評価値の推移, 図 17 に性能指標値を示す。この製品形状においても適切な交叉法は FLX および AEX であった。但し、最終最大評価値に到達する世代数は、製品 1 に対し大半において 10 世代程度であったが、製品 2 に対しては約 30 世代を要する。急増は少なく、漸増傾向である。製品形状ごとに解改善傾向が異なり、適切個体数も異なるためと思われる。

図 18, 19 に交叉点数を変えた場合の最大評価値の

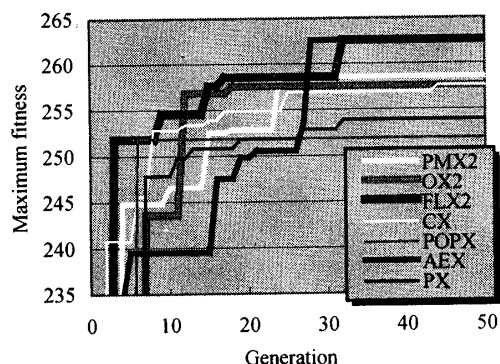


Fig.16 Proceed of maximum fitness with generation in simulation2 (Comparison of different crossover)

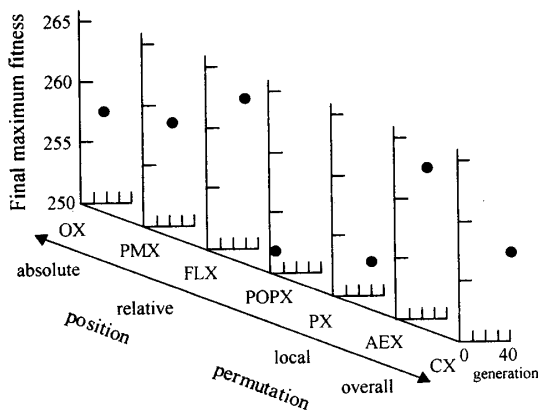


Fig.17 Measures of each crossover's performance (Comparison of different crossover)

推移, 性能評価値を比較する。製品 2 に対しても 2 点交叉の方が優れている。但し、製品 1 に対して OX1 の最終最大評価値は、他の交叉法に比べ極めて低かったが、製品 2 に対しては全ての値が近くなっている。なお、製品 2 には、解改善時の OX の急増が目立ち、この方法の解改善が偶然性に支配されていることを表し、曲げ工程設計に採用するのは好ましくない。

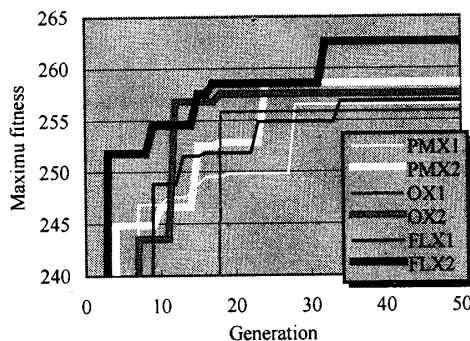


Fig 18 Proceed of maximum fitness with generation in simulation2 (Comparison of one and two-points crossover)

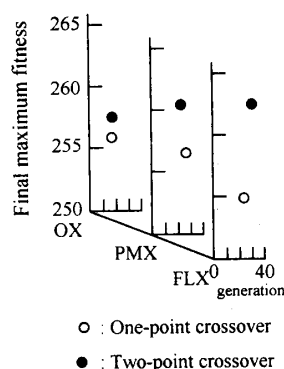


Fig.19 Measures of each crossover's performance (Comparison of one and two-point crossover)

6. 結 言

自動曲げ工程設計に対する GA の適用に際して、重要な操作の一つである交叉法に関して検討し、以下の結論を得た。

- (1) シミュレーションを行った 2 つの製品形状のどちらに対しても、FLX と AEX が有効である。
- (2) 1 点交叉よりも 2 点交叉の方が、探索空間が広く良質な解が得られる。

文 献

- (1) 日本塑性加工学会編, 曲げ加工, (1995), 231-236, コロナ社。
- (2) 森敏彦・広田健治・宮脇舞・平光真二, 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, 機論, 68-671, C(2002), 2163-2168.
- (3) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, (1993), 13-15, 産業図書。
- (4) 柳浦睦憲・茨木俊秀, 順序問題における遺伝的交叉法に対する一考察, 電学論, 114, C(1994), 713-720.