

遺伝的アルゴリズムによる線状加熱の加熱法案の最適化

大阪府立大学大学院 ○橋詰 光 , 前川 真奈海
生島 一樹, 柴原 正和

Optimization of Line Heating Plan Using Genetic Algorithm

by Hikaru HASHIZUME, Manami MAEKAWA, Kazuki IKUSHIMA and Masakazu SHIBAHARA

1. 緒 言

線状加熱とは、Fig. 1 に示すように、鋼板の表面をガスバーナーで加熱した際に発生する熱変形を利用し、船体曲面を成形する技術であり、現在、国内外の多くの造船所で採用されている。線状加熱においては、鋼板が局部的に加熱されることにより、加熱部に塑性変形が発生する。この変形量は、加熱するガスバーナーの移動速度、燃焼ガスと酸素の流入と混合比、バーナーと鋼板の距離などを変化させることにより、変化する。線状加熱では、加熱位置を様々に変えて鋼板に入熱することで、鋼板を Fig. 2 に示すような目的の曲面形状に曲げることができる。しかし線状加熱によって生じる変形は、縦収縮・横収縮、縦曲り・横曲りが混在する複雑なものであり、さらに、入熱量や速度、加熱位置等の多様な因子にも依存するため、線状加熱の自動化は困難と考えられている^{1,2)}。

線状加熱工程の自動化、簡素化に関する研究としては、鋼板表面を冷却することで角変形を増加させることを狙う冷間加工を使用したもの¹⁾や、数値計算を応用し熱曲げ加工の自動化を行ったもの³⁾、また加熱部の曲げモーメントから変形予測を行い、大まかな加熱箇所を指示するもの⁴⁾など、多くの検討がなされているものの、実用化には至っていないのが現状である。加えて、線状加熱の習得には 10 年から 20 年を要すると言われており、技能者の経験に依存しているのにも関わらず、近年の熟練技能者の減少に伴いその技能伝承が問題となっている。以上より、線状加熱に関する熟練技能者支援および、線状加熱の加熱法案作成の自動化が急務となっている。

線状加熱における加熱法案作成の自動化において、複雑な変形を短時間に予測する手法および、入熱量や速度、加熱位置、加熱順序などの複数のパラメータを考慮できる加熱法案の作成手法の確立が必要である。そこで本研究では、固有ひずみを用いた弾性解析^{5,6)}による変形シミュレーションと、広義の AI の一つである遺伝的アルゴリズム^{7,8)}を組み合わせることで、線状加熱における加熱条件を選定、最適化するシステムを提案する。固有ひずみを用いた弾性解析は、溶接変形や残留応力の予測に用いられる数値シミュレーションであり、計算時間が短いことから、最適化の計算に要求される膨大な数のシミュレーションに対応可能である。また、遺伝的アルゴリズムは生物進化から着想を得たアルゴリズムであり、自由度が高く複雑な問題にも適用することができるため、入熱量や加熱位置、加熱順序など様々な条件が複雑に関係する線状加熱の最適化に対応することが可能であると考えられる。本研究では、提案したシステムを用いて目的形状作成時の加熱法案の最適化を行うことで、提案システムの有用性について検証する。



Fig. 1 Photo of bending by line.



Fig. 2 Photo of Shape of ship hull.

2. 線状加熱の最適化手法

2. 1 線状加熱の任意形状成形に用いた基礎理論

2. 1. 1 固有ひずみ法による変形予測

線状加熱のような温度の変化に伴う弾塑性現象の数値シミュレーション手法として、FEM 熱弾塑性解析が挙げられる。FEM 熱弾塑性解析では温度履歴に応じた変形・応力を逐次解析をするため、過渡の変形・応力状況を解析できる一方、解析時間が膨大となるため大型構造物や大量の溶接線や加熱線が必要となるような解析には不向きであるといえる。

これに対して、固有ひずみを用いた弾性解析⁶⁾では、加熱線に発生する変形量は加熱線固有のものであり、対象の構造物の形状や拘束条件によってはあまり影響されないと考える。線状加熱による鋼板の変形は、この固有変形によって発生する。この固有変形が既知であれば、鋼板の変形が、弾性解析において加熱線に沿って固有変形を初期ひずみとして与える事で加熱後の変形を予測することができる⁶⁾。固有ひずみを用いた弾性解析は、計算時間が熱弾塑性解析に比べて極めて短時間であることが特徴として挙げられる。

以下に加熱線に付与する固有ひずみの算出方法と弾性解析による変形の導出の過程を示す。材料に熱サイクルが与えられ、永久変形、すなわち、塑性変形が発生した場合のひずみは式(1)のように表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は全ひずみ、すなわち溶接変形であり、 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ は残留応力に対応する弾性ひずみ、 $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ は塑性ひずみである。固有ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ とは、全ひずみと弾性ひずみの差として定義され、変態ひずみやクリープひずみを無視できるものとする⁶⁾と塑性ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ と等しくなる。

固有変形の概要図を Fig. 3 に示す。実験や熱弾塑性解析などから、入熱量ごとに固有変形、すなわち、縦収縮 S_x^* 、横収縮 S_y^* 、角変形 θ_x^* 、縦曲り θ_y^* の4成分を算出する。さらに固有変形より、加熱線方向、加熱線と垂直方向それぞれのひずみ ε_x^* 、 ε_y^* と曲率2成分 κ_x^* 、 κ_y^* を導出する。

(a) 加熱線方向の固有ひずみ: ε_x^*

縦収縮は加熱線方向の固有ひずみ ε_x^* を用いて次式のように導出される⁶⁾。

$$S_x^* = \frac{1}{h} \iint \varepsilon_x^*(y, z) dy dz \quad (5)$$

ただし、 h は板厚である。ここで、加熱線上の固有ひずみは面内方向に一様であると仮定し、固有ひずみによる弾性解析をシェル要素で行う場合、固有ひずみ ε_x^* は縦収縮 S_x^* を用いて式(7)のように決定できる。

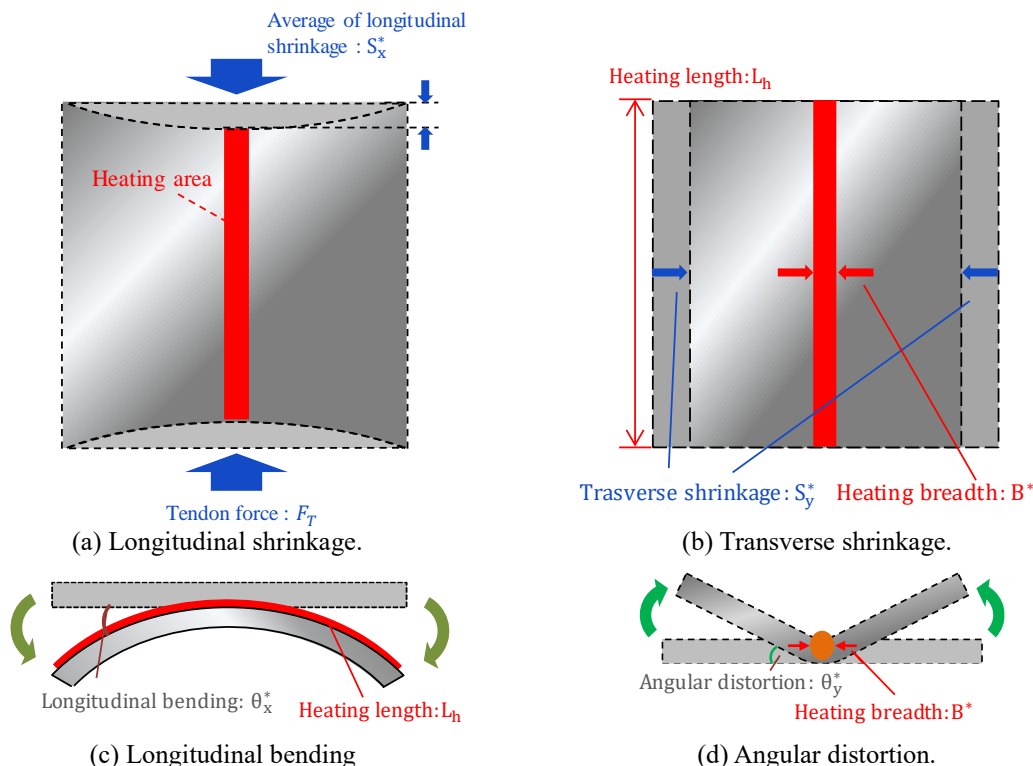


Fig.3 Schematic illustration of inherent deformation

$$S_x^* = \frac{1}{h} \cdot \varepsilon_x^* \cdot B^* \cdot h \quad (6)$$

$$\varepsilon_x^* = \frac{S_x^*}{B^*} \quad (7)$$

ただし、 B^* は固有ひずみによる弾性解析において、加熱線として固有ひずみを付与する領域の加熱幅である。

(b) 加熱線方向の曲率: κ_x^*

縦曲り θ_x^* においても同様に、加熱線方向の固有ひずみ ε_x^* を用いて次式のように導出される⁽⁶⁾。

$$\theta_x^* = \frac{12}{h^3} \iint \varepsilon_x^*(y, z) \left(z - \frac{h}{2}\right) dy dz \quad (8)$$

固有ひずみによる弾性解析においては、縦曲り時の曲率 κ_x^* に比例する断面内の固有ひずみ分布を $\varepsilon_x^* = \kappa_x^* z$ とし、式(8)から曲率 κ_x^* を決定できる。

$$\theta_x^* = \frac{12}{h^3} \cdot \kappa_x^* \cdot B^* \cdot \frac{h^3}{12} \quad (9)$$

$$\kappa_x^* = \frac{\theta_x^*}{B^*} \quad (10)$$

(c) 加熱線と垂直方向の固有ひずみ: ε_y^* と加熱線と垂直方向の曲率: κ_y^*

(a), (b)と同様に、横収縮 S_y^* と角変形 θ_y^* それぞれについての固有変形と固有ひずみの関係式⁽⁶⁾から、式(5)-(10)と同様の計算を行うことで、固有ひずみ ε_y^* と曲率 κ_y^* はそれぞれ次式のように表すことができる。

$$\varepsilon_y^* = \frac{S_y^*}{B^*} \quad (11)$$

$$\kappa_y^* = \frac{\theta_y^*}{B^*} \quad (12)$$

これらの導出された固有ひずみを加熱線として指定した領域に与える。

次に、算出された固有ひずみから、有限要素法の弾性解析により、鋼板の変形や応力を求める。有限要素法では解析対象を有限個の要素に分割し、仮想仕事の原理から各要素における変形や節点力を求める。この関係式を以下に示す。

$$\{F\} = [K]\{u\} + \{F\}_{\varepsilon^*} \quad (13)$$

ここで $\{F\}$ は等価節点力、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{F\}_{\varepsilon^*}$ は固有ひずみによる等価節点力である。 $\{F\}_{\varepsilon^*}$ を全要素について求め、全体の連立方程式を境界条件、および荷重条件を用いて解くことで、変形と応力を求める。

2. 1. 2 遺伝的アルゴリズム

AIの学習方法として遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)がある。GAは、生物進化から着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索手法の一手法と考えることができる^{7,8)}。GAでは最適化や規則学習などの、解空間上の探索を行うことができる。Fig. 4にGAの最適化手順の概要を示す。まず「初期集団の生成」を行い、その後、「適応度の評価」「選抜」「交叉」「突然変異」というプロセスを繰り返すことによって最適化を行う。以下で、各プロセスの詳細を述べる。

まず初めに初期集団の生成を行う。各個体には染色体と定義されるデータ配列を有しておりその配列の要素を遺伝子という。染色体は遺伝情報を伝える実体である。この染色体をランダムに生成する。

次に各個体に対して適応度の評価を行う。適応度はその個体がどれだけ優れているかを示すもので、優れた個体ほど大きな値となる。

各個体の適応度を評価すると、交叉を行う個体の選抜や次世代の決定を行う。これまでに様々な方法が提案されており、以下では今回採用したGAのモデルの中のSteady State(SS)⁹⁾について述べる。このモデルは比較的速くアルゴリズムが収束するという特徴がある。このモデルでは適応度が上位の個体を交叉する個体として選抜する。

交叉する個体対を決定した後、染色体の交叉を実行する。交叉とは選抜された双方の個体に対して、染色体の一部を取り出し、子孫の遺伝子を決定するプロセスである。例として、Fig. 5に一点交叉の概略図を示す。これは、交叉点を1点ランダムに選択し、その前後の遺伝子を入れ替える方法である。交叉で作成された子個体群は、親個体群の適応度が低い最悪個体群と入れ替える。

最後に、ある確率で染色体の一部の値を変更する突然変異を行う。交叉だけでは個体の親に依存するよう

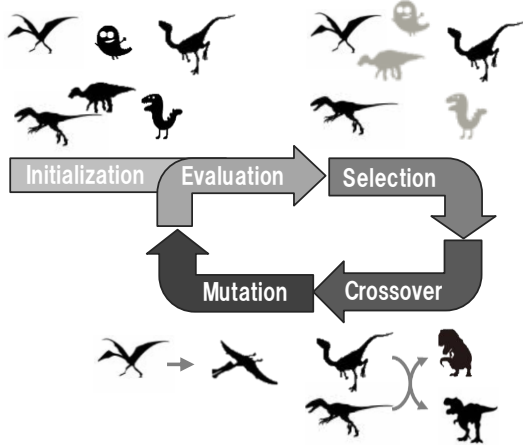


Fig. 4 Conceptual chart of GA.

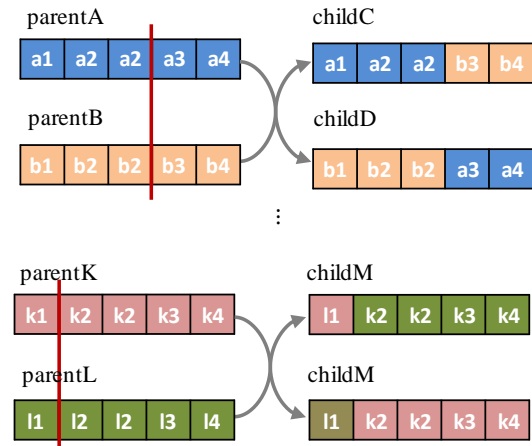


Fig. 5 Conceptual chart of crossover.

な限られた子しか生成することができない。そのため突然変異によりアルゴリズムが局所解に停滞することを防ぎ、個体群の多様性を保つ狙いがある。これらのプロセスの後に作成された次世代の個体群に対しても適応度の評価、選抜、交叉、突然変異の操作を同様に行い、解が収束するまで世代交代を繰り返し実行する。

GA の利点としては以下のことが考えられる。GA では、各個体の評価を独立に行えることから、線状加熱の最適化に GA を適用することで、同時に複数の加熱方案を並列して変形シミュレーションを実施し、実用時間内に優れた解を求めることが出来ると考えられる。さらに GA は染色体の仮定の自由度が高く、その配列データ次第で様々な問題に対応することができるため、線状加熱の入熱パラメータ、入熱位置、順序などを最適化の対象にすることができる。

2. 2 GA を用いた加熱方案最適化システム

2. 2. 1 システム概要

本解析システムでは、固有ひずみを用いた弾性解析による変形シミュレーションと GA を組み合わせることにより、線状加熱の最適化を行う。本解析システムの概要を Fig. 6 に示す。初めに加熱線の本数を設定し、その本数分の加熱線を組合せた加熱方案を生成する。さらに現代の世代に対して選抜、交叉、突然変異の操作を実行し、十分誤差が小さくなるまでこれを繰り返す。今回のシステムの特徴として、従来の GA に比べ突然変異の頻度が高くなるように設計されていることが挙げられる。これは、線状加熱では加熱線は面内に無数に配置できるため、加熱方案の最適化において突然変異による加熱位置や入熱パラメータ変更の頻度を

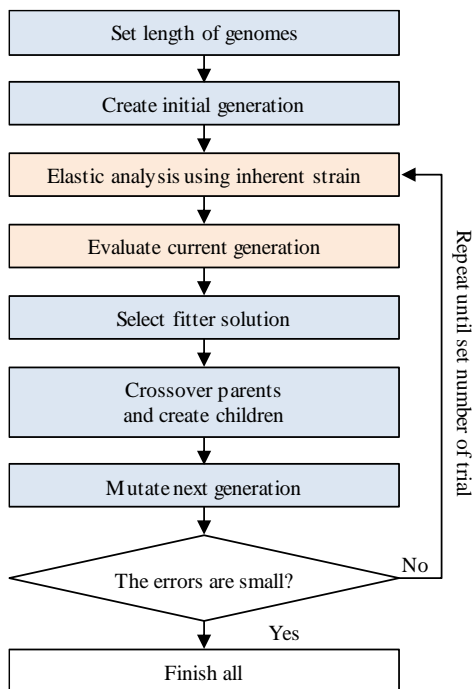


Fig. 6 Flow of proposed system.

を増加させ、ある程度の自由度を確保する必要があると考えたからである。以下に各プロセスの詳細を記述する。

2. 2. 2 加熱方案の初期化

まず初めに遺伝子情報として加熱条件の入熱パラメータ、入熱位置、入熱順序を遺伝子(加熱線)として有する染色体をランダムに複数生成し、初期集団を生成する。Fig. 7 に加熱線が 3 本のときの染色体の例を示す。染色体には加熱線の本数分の遺伝子が格納されており、その順番が加熱順序になっている。さらに遺伝子には一本の加熱線の入熱パラメータ、入熱始端位置の要素、終端位置の要素が格納されており、加熱線の条件を表現している。このように染色体や遺伝子を定義することで、加熱順序、入熱量、加熱位置を同時に最適化する。

2. 2. 3 固有ひずみを用いた弾性解析と適応度の評価方法

現代の個体集団に対して固有ひずみを用いた弾性解析を実施する。解析結果から、式(11)に従い、目的形状との差 e を計算する。

ここで、 z_p は目的形状における各節点の Z 座標、 w_p は固有ひ

$$e = \sum_{p=1}^n (z_p - w_p)^2 \quad (13)$$

ずみ解析結果における各節点の Z 方向変位とした。

さらに目的形状に適合しているかを、初期形状の誤差 e_1 と固有 ひずみ解析後の誤差 e を正規化することにより式(12)で評価する。この評価値が GA における適応度 f に相当し。初期形状では適応度は $f=0$ となり、解析モデルが目的形状と一致した時は $f=1$ となる。

なお、本解析では、各世代の解析ケースが膨大になるため、サーバーから複数のクライアントに解析ケースを分配することで、並列して計算を行う。これによりクライアント数に反比例して解析時間を減少させることができる。

2. 2. 4 次世代の加熱方案決定

FEM 解析の実施後、現世代の中で交叉を行うために適応度が高い、すなわち、より目的形状に近づく加熱方案である個体集団を選抜する。選抜された集団から親個体を抽出し、Fig. 8 に示すように、加熱線の交換を

$$f = \frac{e_i - e}{e_1} \quad (13)$$

行う。交叉後に現世代で適応値が低い個体を、交叉により新たに生成した子個体集団と入れ替え、次世代集団を生成する。最後に選抜、交叉により新たに生成された次世代集団の個体に対して突然変異を施す。突然変異では、次世代集団における個体の加熱線の入熱パラメータ、入熱位置をランダムに別の値に置き換える操作を行う。従来の突然変異では、選抜、交叉を実行し、現世代と同じ個体数の集団を生成する。その集団からランダムに幾つかの個体を抽出し、突然変異を施し、次世代とする。一方今回の提案手法では、交叉の実行後、個体が現世代の半分となる二つの同じ集団を生成する。一方には突然変異を施さず、もう一つの集団の全個体に対して突然変異を施す。これにより、選抜や交叉で生成された個体の染色体を崩すことなく、次世代の半分の個体に突然変異を施すことが可能となる。

3. 線状加熱に関する基礎的検討

本章では、まだ自動化できていない大変形解析かつ薄板鋼板を対象とした線状加熱において、GA の世代交代を経ることでどのように加熱線が改善されるのかについて検討した。また、本システムを用いて基本形状を成形し、本システムによってどのような加熱線が採用されるのかについて検討した。

3. 1 解析モデル

固有ひずみを用いた弾性解析で用いた要素分割図を Fig. 9 に示す。幅 500mm、奥行 500mm のシェル要素を用いた。要素分割は、幅方向および奥行方向にそれぞれ 40 分割とし、解析対象材料は SM490、板厚は 2.5mm と仮定した。SM490 の材料定数を Table. 1 に示す。この解析モデルを採用したのは、固有ひずみを用いた弾性解析では幾何学的に相似則が成立するため、実施工で多く用いられている板長さ 2500mm、板幅 2500mm、板厚 12.5mm の鋼板における線状加熱について実験室レベルで実施することを想定したためである。また、固有ひずみ解析で要素に付与する固有ひずみの横収縮 ϵ_x^* 、縦収縮 ϵ_y^* 、横曲り曲率 κ_x^* 、縦曲り曲率成分 κ_y^* を Table 2 に示す。本システムで成形する目的形状は Fig. 10 に示すような鞍型とする。

3. 2 GA による鞍型成形

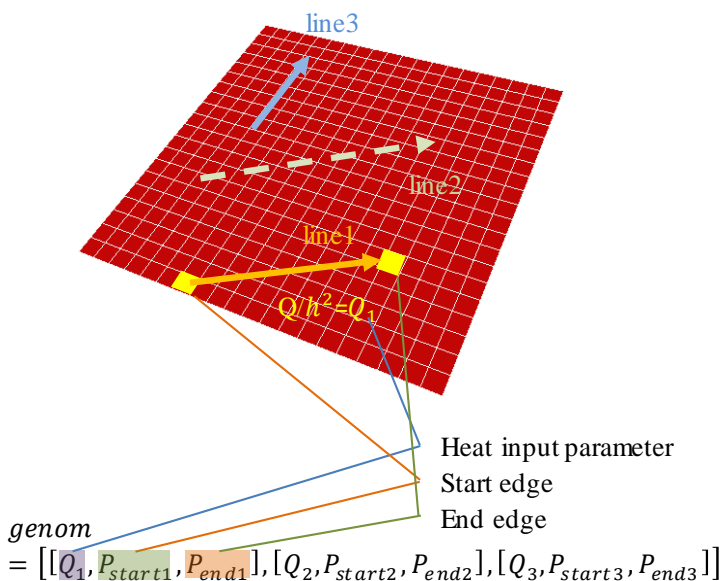


Fig. 7 Relation between heart input sequence and genome.

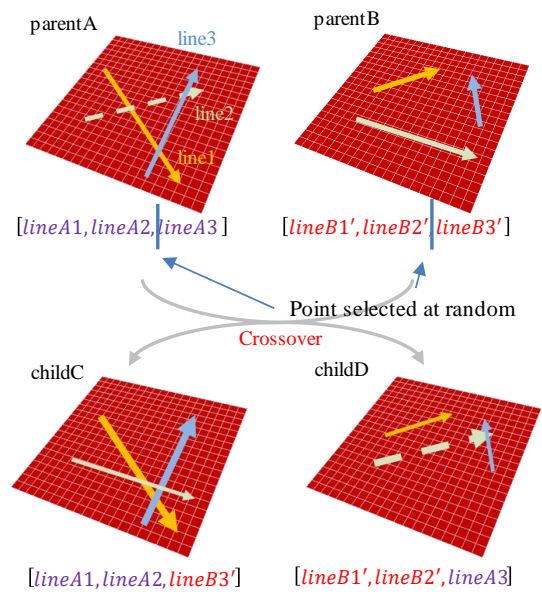


Fig. 8 Crossing of heart input sequence.

各世代は前世代から選抜された適応値が高い集団，交叉または突然変異で生成された集団で構成されている。Fig. 11 に各世代における，各集団の適応値の推移を示す。適応値は，初期（未加熱時）の平面の場合は 0，目的形状と一致した場合に 1 となる。Fig. 11(a)より，全世代から選抜されたエリート集団は最高値，平均値ともに高い値で推移しており，安定していることが確認できる。また Fig. 11(b)から交叉で生成された集団

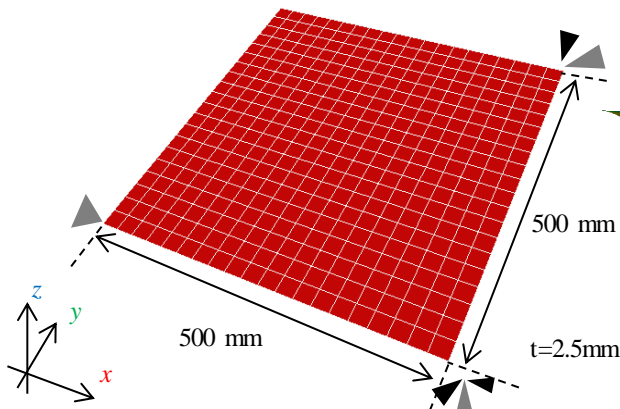


Fig 9 Mesh division.

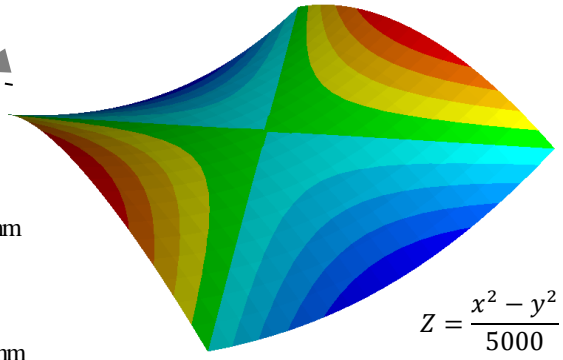


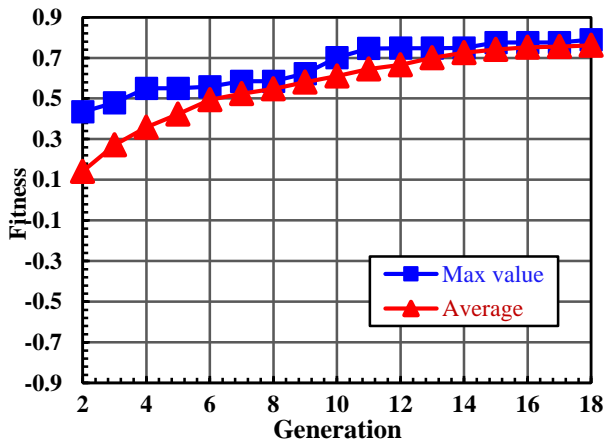
Fig. 10 Saddle shape.

Table 1 Material constants of SM490.

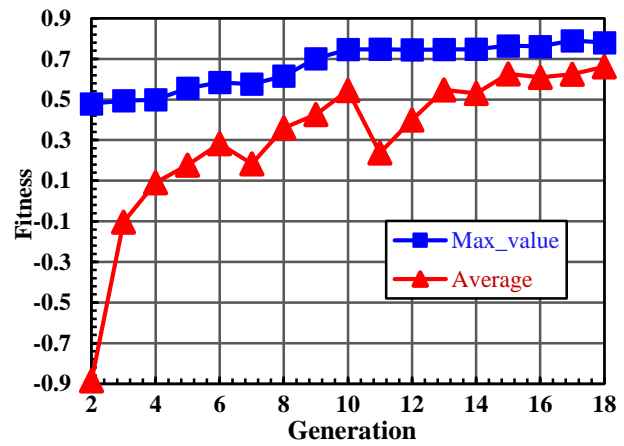
Young` module(MPA)	212,000
Poisson`s tration	0.3
Density(g/cm ³)	7.81 × 10 ⁻³

Table2 Inherent strain for elastic analysis.

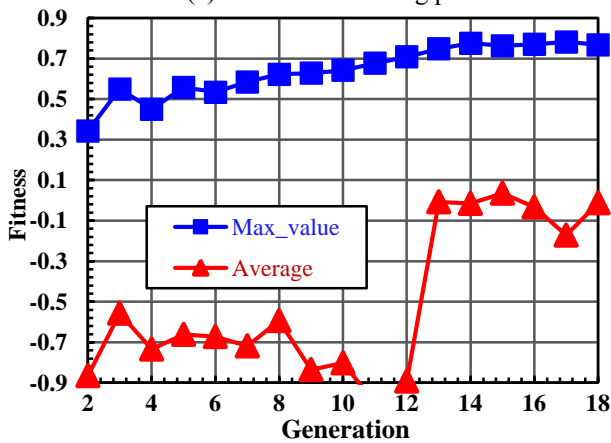
Q/h ²	ϵ_x^*	ϵ_y^*	κ_x^*	κ_y^*
9.77	-2.59 × 10 ⁻⁴	-3.56 × 10 ⁻³	3.95 × 10 ⁻⁶	6.14 × 10 ⁻⁴
13.2	-3.03 × 10 ⁻⁴	-6.11 × 10 ⁻³	3.63 × 10 ⁻⁶	6.78 × 10 ⁻⁶
16.7	-3.48 × 10 ⁻⁴	-9.35 × 10 ⁻³	-2.04 × 10 ⁻⁶	5.67 × 10 ⁻⁶
23.4	-4.10 × 10 ⁻⁴	-14.1 × 10 ⁻³	-1.79 × 10 ⁻⁶	2.32 × 10 ⁻⁶



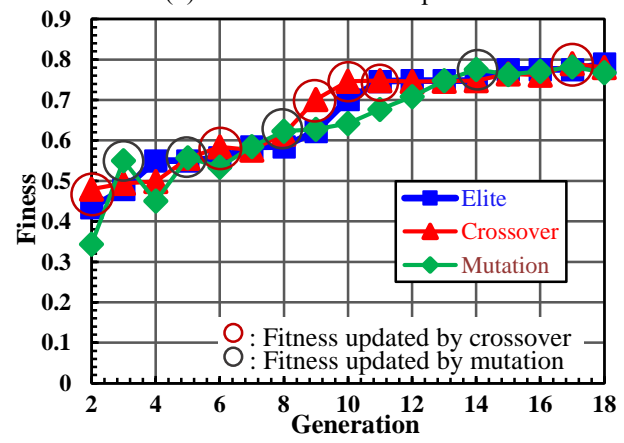
(a) Fitness of selecting process.



(b) Fitness of crossover process.



(c) Fitness of mutation process.



(d) Comparison of max value of fitness in each process.

Fig. 11 Fitness in each generation.

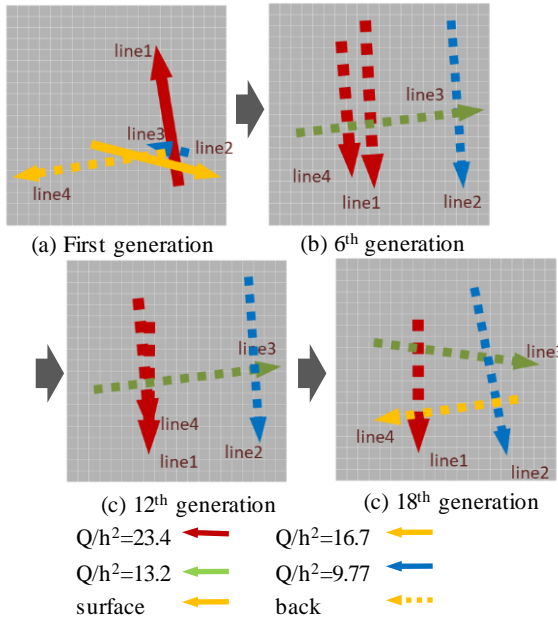


Fig. 12 Comparison of heart input sequence between each generation.

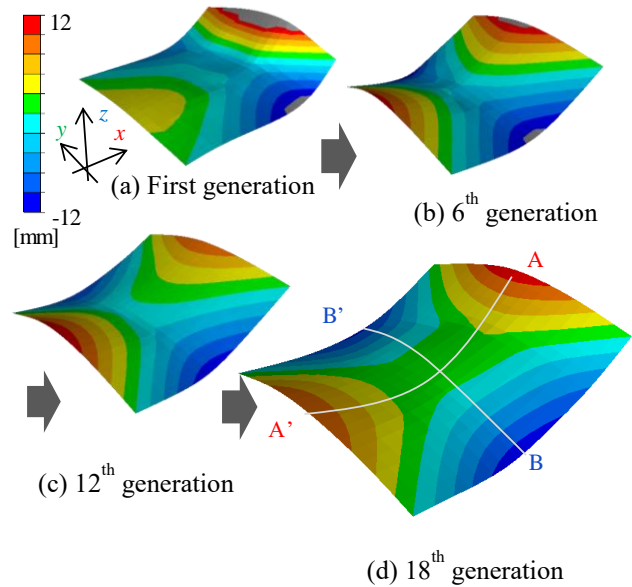


Fig. 13 Comparison of displacement in z between each Generation.

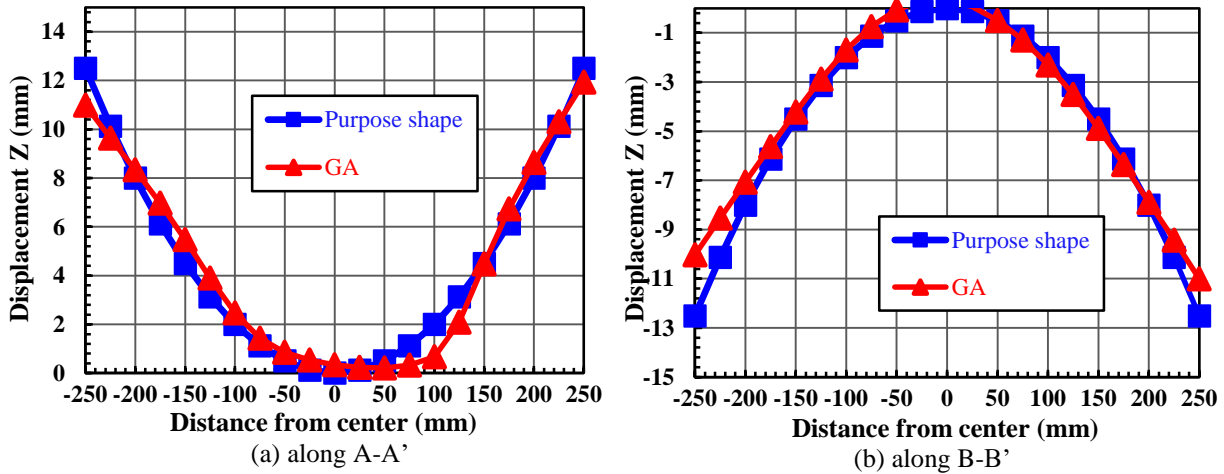


Fig. 14 Distribution of out of plane deformation.

では初めの数世代では平均値が低いですが、世代更新することで平均値も高い値を示しており、交叉のプロセスで安定して適応値が高い個体を生成していることが確認できる。一方、突然変異で生成された集団は適応値の最高値は高いが、平均値は後半の世代でも上昇しない。これは、突然変異では交叉と違い、ある個体の一部をランダムに変更することで新たな個体を生成しているためと考えられる。Fig. 11(d)に示される各集団の適応値の最大値について、初期では0.5未満であったが、交叉や突然変異により徐々に改善し、18世代程度で0.8程度に収束していることが確認できる。

次に各世代の加熱方案の変遷について検討した。Fig. 12に各世代で適応値が最高となった個体の加熱方案を示す。第一世代の加熱線の配置では初期個体のランダム性が表れているが、表裏中央部を上下または左右に入熱する加熱線が残り、後半の世代では加熱線がモデルの中央に集中した。これよりモデルの中央に面内収縮を発生させることで鞍型形状を成形する様な加熱方案となることが分かった。なお、今回の鞍型成形では8ケースを並列して解析を実施した。

さらに、各世代で適応値が最大となった個体の解析の結果をFig. 13に示す。同図からも世代交代により、徐々に目的形状に近づいていることが分かる。Fig. 14に18世代目における解析結果と目的形状との比較を示す。これより、GAにより目的形状と良好に一致する形状を成形可能であることを示した。

なお、今回の鞍型成形では8ケースを並列して解析を実施した。その際、最適化の計算に要した時間は約14時間要であった。これらの検討から、線状加熱における入熱位置、入熱順序の最適化においてGAは有効な手段となり得ると考えられる。

4. 結言

本研究では線状加熱の自動化，加熱方案の最適化を目指し，加熱位置、入熱量、入熱順序を最適化のパラメータとして扱い，また複数の加熱方案を並列して解析可能にし，最適化に要する解析時間を削減させるために，GA を用いた線状加熱最適化システムを開発した．そのシステムを基本形状である鞍型成形時の加熱位置、入熱量、入熱順序の選定問題に適用した．それによって以下の知見が得られた．

- 1) 線状加熱の加熱方案の最適化に GA を適用した．提案したシステムでは，GA の選抜，交叉や突然変異のそれぞれのプロセスを，優秀な加熱方案の選抜，加熱方案どうしの加熱線の交換，加熱線の入熱量や入熱位置の変更に置き換えた，その結果，限られた加熱線で鞍型を成形することが可能な加熱方案を作成できることを示した．
- 2) 鞍型の成形において，第一世代では加熱位置の配置に初期個体のランダム性が表れたが，世代を更新することで，鋼板の中央部を上下または左右に入熱する加熱線が残ることが確認できた．GA を用いた提案システムにより，このような加熱線の最適化が行われたため，GA の交叉や突然変異などの操作が加熱方案の最適化に有効であることが分かった．
- 3) 線状加熱における鞍型成形では，モデルの表裏中央部を上下または左右に入熱する加熱線が採用された．これより，鞍型を成形するには，角変形を利用するよりも，モデルの中央部に面内変形を集中させ絞る方が有効であることを示した．

5. 参考文献

- 1) F. Nishioka, T. Tanaka, W. Yasukawa, T. Yamauchi, K. Nishimaki, M. Matsuishi, and O. Tohogoh: On Automatic Bending of Plates by the Universal Press with Multiple Piston Heads (2nd Report : Application Study): Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.133, pp.291-305, 1973
- 2) H. Murakawa: Welding Residual Stress and Distortion –Theoretical Prediction and its Application-: Journal of the JWS, Vol. 67, No. 3, pp.26-42, 1998
- 3) I. TSUJI, Y. OKUMURA: A Study on Line Heating Process for Plate Bending of Ship Steels: Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects: No. 76, pp.149-160, 1988
- 4) T. Nomoto, M. Ohtsuki, T. Yokoyama: Fundamental studies on the bending work using multiple-piston-pressing method for outside plate of ship: Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.170, pp.587-598, 1991
- 5) Hidekazu Murakawa, Yu Luo, Yukio Ueda: Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain: Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.180, pp.739-751, 1996
- 6) W. Liang, Shinji Sone, Hisashi Serizawa and H. Muarakawa: A Simple Mesuaring Method of Welding Inherent Deformation Using Inverse Analysis: Journal of the JWS, No. 182, pp.783-793, 1997
- 7) H. Kitano: Genetic Algorithms: Journal of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Vol.7(1992), No.1
- 8) A New Generation Alternation Model of Genetic Algorithm and Its Assessment: Journal of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Vol.12(1996), No.7