遺伝的アルゴリズムによる複合材料積層板剛性最適化*

轟 章^{*1}, 渡 辺 究^{*2}
小 林 英 男^{*1}, 中 村 春 夫^{*1}

Optimization of Composite Plate by Genetic Algorithms

Akira TODOROKI, Kyu WATANABE,
Hideo KOBAYASHI and Haruo NAKAMURA

Composite laminated plates have been widely applied to aircraft primary structures. However, composites have remarkable mechanical anisotropy, and material design on stacking sequences is needed. In recent years genetic algorithms have been worthy of notice as solutions for combinatorial optimum problems. Some reserachers have applied the genetic algorithm for optimization of stacking sequence, but not for stacking number. Therefore, three new approaches were proposed and examined in detail in this study. A 'two species GA model' uses two species which differ in their stacking numbers. The choromosomes of meta populations have one less genes by one than the chromosomes of actual populations in this model. However, these populations are independent of each other. A 'mixed two species model' is similar to the two species GA except for crossover, and the two species exchange their genes with each other. A 'mutant model' uses only mutation. Using these three models, a bending stiffness optimization problem was examined. As a result, both the 'mixed two species model' and the 'mutant model' are applicable in the special case that there is little difference between local minimum points, such as in this problem.

Key Words: Genetic Algorithm, Composite, Optimum Design, Stacking Sequence

1. 緒言

一方向プリプレグを積層して作成する複合材料積層板は優れた力学的特性を有するため、航空宇宙機器などの構造材料として適用が拡大されている。しかし材料異方性が著しいため、積層構成の最適化が必要である。これに対して積層パラメータを用いた優れた最適化手法が既に報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。

しかし、ハンドレイアップなどを用いるの製作現場では繊維方位が限定されることを考慮し、あらかじめ決められた繊維配向角の中から最適な組み合わせを求めることを目的とし、著者らの一部はオブジェクト指向に基づく複合材料積層構成の最適設計エキスパートシステムを作成した⁽³⁾。

さらに円孔を有する複合材料積層板への補強板貼り付け最適化を目的としてオブジェクト指向に基づく手法を適用し、その有効性を示した⁽⁴⁾。積層構成組合せの最適化においてはスーパープライを用いた分岐限定法による最適解の探索が可能であるが、探索時間が非現実的に長くなることが明らかにされた⁽⁵⁾。

近年組み合わせ最適化問題において生物進化をモデル化した遺伝的アルゴリズムが注目されている^{(6)~(9)}。遺伝的アルゴリズムは確率的探索法の一種であるが、

さまざまな分野においてその有効性が示されている。この確率的探索法では組合せ最適化問題に対し、真の最適解が得られる保障はないが、優秀な適合解を比較的短時間に見いだせる特色を有している。

複合材料積層版の積層構成最適化に対して、R. Rich⁽⁶⁾及び福永⁽⁹⁾はGAを用いてその有効性を示しているが、積層数の最適化(重量の減少)に関しては言及していない。

著者らは円孔を有する複合材料積層版応力集中構造部の剛性最適化に遺伝的アルゴリズムを適用し、突然変異を重視したアプローチが有効であることをすでに示した⁽¹⁰⁾。

そこで、本研究では積層板構造物の変位を拘束条件、積層板の積層構成を染色体とした遺伝的アルゴリズムを用いて積層数および積層構成の最適化(重量軽減と変形の減少の最適化)の新しい手法を検討し、さらに突然変異のアプローチの有効性も検討した。

2. 最適化問題

本研究では一方向プリプレグを多方向に積層するCFRP積層板を解析対象とした。この積層板に荷重が負荷されるときの変位の上限値を設計要求とし、これを満足する最小積層数の積層構成、また積層数が同じ場合は最も最大変位が小さい積層構成を最適解とした。なお積層数の減少は重量軽減に対応している。

* 原稿受付 1994年11月16日。

^{*1} 東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。^{*2} 東京工業大学大学院。

図1 ハニカムサンドイッチ

ただし以下の条件を有する。

- (1)積層板はCFRPプリプレグを 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° の4種類の中から選択し、積層する。また材料はT300/5208 ($E_L=181\text{GPa}$ 、 $E_T=10.3\text{GPa}$ 、 $G_{LT}=7.2\text{GPa}$ 、 $\nu_{LT}=0.28$)を用いた。
- (2)積層板は中央にハニカムコアをはさんだサンドイッチ積層板とする(図1参照)。ただしコア部は荷重を全く負担しないと仮定した⁽¹⁾。
- (3)複合材料積層板特有のカップリング効果をなくすために、積層構成はコアをはさんで上下対称積層とする。
- (4)積層板の変形はオブジェクト指向有限要素法で解析する。

変形解析手法は有限要素法であるため、本最適化手法は基本的に形状、境界条件に依存しない。有限要素モデルを構築し、設計対象の位置と変位を指定すれば、どのような形状、境界条件にも対応可能である。

3. オブジェクト指向有限要素法

本研究では先に開発したオブジェクト指向有限要素法に板曲げ要素を追加し、変位解析に用いた⁽⁴⁾。クラス階層構造を図2に示す。なお、オブジェクト指向有限要素は柔軟性が高いために用いたものであり、GAに

図2 クラス階層構造

必要不可欠なシステムではない。

FemBendingStructure、FemBendingElement、FemBendingNodeを新たにサブクラスとして作成した。またCompositePlateに面外剛性の計算のメソッドを加え、CompositePlateのサブクラスにハニカムコアをはさんだ積層板を扱うCompositePlateWithCoreを作成した。

板曲げ要素には非適合要素であるが簡便な4節点薄板曲げ要素を用いた⁽¹²⁾。オブジェクトの所有関係は既報⁽⁴⁾と同じなのでここでは省略する。ソルバーには従来手法のコレスキー法を用いた。要素には4節点薄板曲げ要素を用いたため、各節点の変位は板厚方向(z方向)とたわみ角だけとなり、面内応力の解析はできない。面内応力の解析を同時に行う場合には、要素オブジェクトを改善するだけである。なお、解析にはコア部は曲げ荷重を負担しない空間として古典積層理論で求めた曲げ剛性を用いた。

4. 解析方法

4. 1. 遺伝的アルゴリズムへのインプリメント

本研究では構造全体を同一積層構成の積層板とする積層構成を取り扱う。このため、各要素の積層構成が等しくなり、構造全体の積層構成を繊維配向角の配列を用いて表すことができる。本研究においても、既報⁽⁴⁾と同様にハンドレイアップによる積層板の製作を想定しているため、繊維配向角は 0° 、 45° 、 -45° 、 90° だけに限定した。この 0° 、 45° 、 -45° 、 90° の配向角をそれぞれ0, 1, 2, 3の4進数で対応させる。また配列のサイズは上下面の積層構成が対称なので全積層数の半分である。

求められた積層構成を表す配列を遺伝的アルゴリズムでは染色体とし、またそれぞれの配向角を遺伝子と考える。図3にこの模式図を示す。

図3 GAへのインプリメント

4. 2. 最適化アルゴリズム

まず初めに設計要求を満たす疑似等方性板での最小積層数を求める。 $[0/45/-45/90]$ の4層からなる疑似等方性板をコア上面下面に対称になるように積層し、最

図4 疑似等方性板による積層数上限値の見積り

大変位を解析する。最大変位が設計要求を満たさない場合はさらに4層ずつ上下面に積層し、その最大変位を解析する。従って積層数は8層ずつ増加する。これを設計要求を満たすまで繰り返し、疑似等方性板を用いた場合の最小積層数を求める（図4参照）。求められた最小積層数を N_g とする。

次に遺伝子数 $N_g/2$ の染色体と $N_g/2-1$ の染色体を乱数を用いて設定個数だけ発生させる。ここで遺伝子数 $N_g/2$ の染色体を実個体、 $N_g/2-1$ のものをメタ個体と呼ぶ。

後述する最適化アルゴリズムを用いることによって世代が進むと実個体、メタ個体ともに適応度が上昇する。解析が進展し、メタ個体集団の中に設計要求を満たす個体が発生した場合、実個体の遺伝子の最後の2つ（最内積層板）を削除し、それを新しいメタ個体とする。そして今までメタ個体集団と呼ばれていたものを新しい実個体集団とする。個体が3つの場合を例として図5示す。図中集団Aが実個体集団、集団Bがメタ個体集団である。実個体集団Aの各染色体の右2つの遺伝子が削除され、新しいメタ個体集団B'となる。なお、最外積層板は曲げに対する剛性への影響が大きいので、最内積層板を削除している。これは優秀

図5 2種族遺伝的アルゴリズム

な積層構成をメタ個体に残すためである。

これを繰り返すことによって設計要求を満たす積層数は減少し、同時に最大変位も減少する。

ただし、疑似等方性板による積層数上限値の見積りはかなり安全側であるため、解析の初期段階では最適化が進展しなくても積層数は減少する。

最適化手法としては以下の3つの手法を検討した。なお、全てのパラメータは参考文献(10)の方法でパラメータサーベイを実施して検討した。

(1) 2種族遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムの詳細は文献(6)(7)に示されているのでここでは省略する。

本解析では個体数を実個体、メタ個体とも20とした。設計要求で規格化した値を f_i とすると、適応度 f_i は以下の式で求められる。

$$f'_i = \left(\frac{1}{f_i} \right)^3 \quad (1)$$

選択にはルーレットモデルを用いる。式(1)で求められた適応度に比例した確率で乱数を用いて次世代に残す個体を選択する。

交叉は中央単一交叉とし、2つの染色体を乱数を用いて選択し、遺伝子の前半部を入れ換える。交叉は全染色体の20%に発生させる。

突然変異は1つの染色体の全遺伝子のうち2つの遺伝子を乱数を用いて書き換える。突然変異を発生させる染色体も乱数を用いて決定する。突然変異は全染色体の20%に発生するものとする。

またエリート保存戦略を用いた。したがって一度発生した優れた染色体はそれより優れた染色体が見つかるまで必ず次世代に残ることになる。

最適化は実個体、メタ個体それぞれ別に上記の遺伝的アルゴリズムを用いて解析する。

(2) 異種族混合モデル

上記の遺伝的アルゴリズムは実個体、メタ個体の集

図6 異種混合モデル

団を全く別な個体集団としてそれぞれ最適化を行っている。そのため、片方の集団内で発生した優れた染色体の部分（スキーマ）はその集団内で広がるだけで他集団に広がることはなく、2つの最適化システムがそれぞれ最適解を探索している。

そこで実個体とメタ個体を同じ集団とする異種混合モデルも検討した（図6参照）。実個体、メタ個体間の交叉が行われるため、優れた遺伝子の情報が全ての個体に広がる可能性がある。交叉は中央単一交叉であり、他種族間でも交叉される遺伝子数は同じである。実個体の遺伝子数が10の場合は5つを、遺伝子数が9の場合は4つの遺伝子を交叉するように設定した。また、選択において実個体の積層数がメタ個体よりも多く適応度が高いので、メタ個体が次世代に残らない危険がある。そこで選択のみ実個体、メタ個体を分けて行い、ともに設定個数だけ必ず次世代に残るものとした。

(3) ミュータントアルゴリズム

遺伝的アルゴリズムはローカルミニマムに陥らないようにするために解の多様性を保ちながら解空間を探索する。そのため逆に解の探索効率が悪い。

そこで前報で個体数を1としたミュータントアルゴリズムを考えた。個体数が1であるので、選択および交叉は行われず、突然変異だけを発生させる。突然変異は遺伝的アルゴリズムと同じように全遺伝子のうち2つにだけ発生させる。エリート保存戦略を用いているた

め優れた個体が見つかるまで同じ個体に対して突然変異を発生させ続けることになる。

しかしながらミュータントアルゴリズムは一度ローカルミニマムに陥るとそこから脱出することが非常に困難である。そこで複数のシステムで並列に解の探索を行った。図7に3つのシステムが並列している場合の例を示す。A, B, Cの3つのシステムの実個体、メタ個体が独立して解析を行うため、積層数が減少する時期、最終的に求められる積層構成はシステムによって異なる。

遺伝的アルゴリズムや異種混合モデルとの違いとしては、遺伝的アルゴリズムが個体が交叉によってお互いに情報を交換しながら解を探索するのにに対してミュータントアルゴリズムでは複数の個体が単独で解を探索する。

本研究では5つのシステムで並列に解析した。

5. 解析モデル

解析対象には航空機の尾翼をモデル化したものを用いた（図8参照）。長さ2m、幅1m。サンドイッチ積層板を用い、コア部の厚さを40mmとした。積層板にはx軸方向に均一な分布力（総荷重14.4kN）でありy方向には $y=0$, $y=0.5$, $y=1$ (m)の各点で1:4:35の割合で分布していると仮定し、節点力を与えた。設計要求は最大変位が0.05m以下とした。

図8 解析モデル

図7 ミュータントアルゴリズム

図9 2種族遺伝的アルゴリズムの結果

図10 2種族遺伝的アルゴリズムの拡大図

また解析にはSUN SPARK STATION IPXを用い、解析時間を450分とした。なお、一度のFEM計算は約3分である。

6. 解析結果

まず2種族遺伝的アルゴリズムの結果を図9に示す。横軸は時間、縦軸は（積層数+最大変位／設計要求変位×2）である。規格化した最大変位の2倍を加えたのは、グラフ上で最大変位の減少量が拡大され、なおかつ規格化した最大変位が1以下であり、2倍しても一度に減少する積層数2を超えないためである。したがって例えば縦軸の値が44～46の場合、積層数は44層である。

図11 異種族混合モデルの結果

図12 異種族混合モデルの拡大図

図9から時間の経過と共に積層数は減少し、約190分後に積層数44層の解を見つけ出している。設計要求を満たす疑似等方性板の最小積層数は72層であり、積層数は約39%の減少した。図9の縦軸の45～47の部分拡大した結果を図10に示す。その後44層より少ない積層数の解は探索されていないが、積層構成の改善により最大変位が減少していることがわかる。しかし減少はわずか4%にとどまっている。

次に異種混合族モデルの結果を図11に示す。約110分後に44層の解を見つけ出している。解析時間は遺伝的アルゴリズムの約半分である。これは優れたスキーマが実個体、メタ個体の区別なく広がったためと考える。図11の縦軸の45～47の部分拡大した結果を図12に示す。44層発見後最大変位は6%程度減少した。

遺伝的アルゴリズムも異種混合族モデルも確率的探索方法であるため、必ず異種混合族モデルの方が早く44層を見つけ出すとは明言できないが、複数（5回）の計算でもほぼ同様の傾向が現れた。

どちらのアルゴリズムでも44層の解を得た後に最大変位がほとんど減少していない。これは、44層に達するまでに積層構成の最適化が進展しているためである。

本研究のアルゴリズムでは積層数の減少において実個体集団がメタ個体集団になる際に最内積層板にあたる最後の2つの遺伝子を削除する。積層板の面外変形では外側の積層板の方が材料特性に及ぼす影響が大きく、内側の積層板を削除しても最適化には大きな影響がない。このため積層数が減少しても積層構成の最適化が進展する。

ミュータントアルゴリズムの結果を図13に、図13の縦軸の45～47の部分拡大した結果を図14に示す。44層の解を探索するのに早い場合約280分、遅い場合では約420分費やしている。これは遺伝的アルゴリズム、異種混合モデルと比較するとかなり遅い。しか

図13 ミュータントアルゴリズムの結果

- (3) 笹田, ほか 2 名, 機論, 58A-551(1992), 1175
 - (4) 轟, ほか 3 名, 機論, 60A-571(1994), 270
 - (5) 轟, 笹田, 機論 投稿中
 - (6) R. L. Riche, R. T. Haftka, AIAA J., 31-5(1993), 951
 - (7) W. M. Jenkins, The Structural Engineer, 69-24 (1991), 418
 - (8) 坂本, 尾田, 機論, 59A-562(1993), 1568
 - (9) 福永, 関根, 日本航空宇宙学会, 42-485(1994), 146
 - (10) 轟, ほか 2 名, 機論, 60A-573(1994), 146
 - (11) 新沢, 藤原, 川島, 「航空機の構造力学」, 産業図書, (1989), 138
 - (12) C. C. Zienkiewicz, 「マトリックス有限要素法」, 倍風館, (1977), 220
-