

複合材料積層円筒殻の積層構成最適化への イントロンを用いたGAの適用

Stacking Sequence Optimization for Buckling of Composite Cylinder
by Using Genetic Algorithm with Intron

正 轟 章 (東工大工) 笹井 正史 (東工大院)

Akira TODOROKI, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayam, Meguro-ku, Tokyo
Masafumi SASAI, Graduate Student of Tokyo Institute of Technology

Genetic algorithms are applied to obtain the optimum stacking sequences for maximizations of buckling load of composite cylinders. The buckling load is a function of total number of stacks and stacking sequence. To represent different number of stacks, intron is adopted in a chromosome in genetic algorithm. In the present study, intron acts like a gene which has no genetic information. The adoption of intron enables to optimize stacking sequences and total number of stacks simultaneously. Design reliabilities of genetic algorithm with intron are examined in details by comparing the reliabilities with a empty gene method. As a result, genetic algorithm with intron works well for optimization of total number of stacks and stacking sequences.

Key words : Genetic Algorithm, Composite Cylinder, Intron, Buckling, Optimization

1. 緒言

一般に複合材料積層構造物の航空宇宙機器への適用を考える場合、設計要求を満足する設計の中で軽量で力学的特性に優れた積層構成を設計することが重要である⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。

本研究ではロケット燃料タンクへの複合材料円筒殻の適用を想定し、軸圧縮応力が作用する CFRP 積層円筒殻を解析対象とし、その力学的特性として座屈応力を考える。複合材料積層円筒殻の座屈応力は、積層数と積層構成に大きく依存するため、積層数最適化と積層構成最適化を同時に行うことが重要となる。

そこで本研究では設計応力を与え、その設計応力を満足する最小の積層数を最適積層数とし、最適積層数において座屈応力が最大となる積層構成を最適積層構成と定義する。そして、積層数最適化と積層構成最適化を同時に行うアルゴリズムとしてイントロン法を考案し、従来法であるエンプティー遺伝子法と正答率を比較することで、その有効性を検討した。

2. 最適化問題

本研究では、複合材料積層構造の要求座屈応力を満足する最小積層数を求め、その積層数において最大座屈応力を示す積層構成を求める。円筒に対して座標軸を、軸方向x、円周方向、半径方向zとし(図1参照)、半径R、殻長L、全板厚tであるN層積層のCFRP円筒殻について各層厚さがhで等しいとする。両端単純支持条件の直交異方性プライCFRP円筒殻の軸圧縮応力 \bar{N}_x/t はTasiの基礎式⁽¹⁰⁾より以下の式で与えられる。

1) 軸対称座屈 $m=1, n=0$ の場合

$$\left(\frac{\bar{N}_x}{t}\right)_s = \frac{2}{Rt} \sqrt{\frac{d_{11}}{a_{22}} \left(\sqrt{1 + \frac{b_{12}^2}{a_{22}d_{11}}} + \frac{b_{12}}{\sqrt{a_{22}d_{11}}} \right)} \quad (1)$$

2) 非軸対称座屈 $n \neq 0$ の場合

$$\left(\frac{\bar{N}_x}{t}\right)_u = \frac{1}{Rt} \sqrt{\frac{d_{22}}{a_{11}} \left(\Phi_1 + \frac{\left(\Phi_3 + \sqrt{\Phi_1\Phi_2 + \Phi_3^2} \right)^2}{\Phi_2} \right) / \sqrt{\Phi_1\Phi_2 + \Phi_3^2}} \quad (2)$$

$$\text{ここで, } \Phi_1 = \frac{a_{11}d_{11}}{a_{22}d_{22}} m^4 + 2 \frac{d_{12} + 2d_{66}}{\sqrt{d_{11}d_{22}}} \sqrt{\frac{a_{11}d_{11}}{a_{22}d_{22}}} m^2 + 1$$

$$\Phi_2 = m^4 + 2 \frac{a_{12} + 0.5a_{66}}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} m^2 + 1$$

$$\Phi_3 = \frac{b_{12}}{a_{22}} \sqrt{\frac{a_{11}}{d_{22}}} m^4 + 2 \frac{\{0.5(b_{11} + b_{22}) - b_{66}\}}{\sqrt{a_{22}d_{22}}} m^2 + \frac{b_{21}}{\sqrt{a_{11}d_{22}}}$$

$$m^2 = \frac{l^2}{n^2} \sqrt{\frac{a_{22}}{a_{11}}}, \quad l = \frac{m\rho R}{L}$$

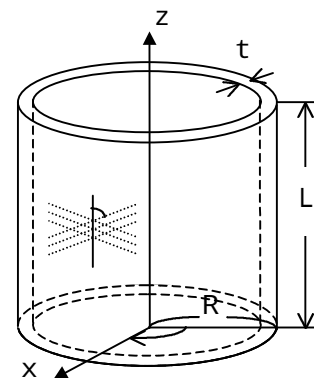


Fig1 Cylindrical coordinates

ただし, a_{ij} , b_{ij} , d_{ij} はコンプライアンスマトリックスの各成分, m は座屈モードの軸方向半波数, n は周方向波数である. 軸対称座屈の値と非軸対称座屈の値を比較し, 低い値を軸座屈応力として採用した.

3.1. 拘束条件

本研究では積層構成に関する経験的知識を拘束条件として, GAによる最適化過程に導入した. 本研究で導入した拘束条件は以下の3種である.

- (1) 45°層と-45°層の数が一致する.
- (2) 同一繊維配向角層が4層以上連続しない.
- (3) 隣接層配向角差を45°以内に抑える.

拘束条件(1)は垂直応力-せん断カップリングを抑制するために導入した. 曲げモーメント-ねじり曲率カップリングを防止するために45°層に対し-45°層を近接して配置させるようにする. これは染色体の解読において, "1"を有する遺伝子を交互に45°, -45°層と解読し, その数が一致していない場合には, 45°層を減らす操作と-45°層を増やす操作によって, 強制的にその数を一致させている.

拘束条件(2)は巨大マトリックス割れを防ぐために導入した. 拘束条件(3)は層間の熱応力差を減少させるために導入した. 隣接層の繊維配向角差が大きいとCFRPの大きな異方性に起因して, 隣接層との弾性率差が大きくなり, 異材接合と同様に応力特異性が大きくなる. そこで隣接層の繊維配向角差を45°以内に抑制し, 層間の熱応力を減少させ, 円筒殻に及ぼす影響を軽減することが拘束条件(3)の目的である.

3.2. 劣性遺伝子的遺伝子補修戦略

上記3種の拘束条件を導入するために, 著者らは劣性遺伝子的遺伝子補修戦略を考案した⁽¹¹⁾. 解析対象は, 0°, ±45°, 90°から成る一定積層数の対称積層円筒殻とした. 劣性遺伝子的補修戦略では, 遺伝子を0,1,2からなる3進数で表し, 遺伝子と繊維配向角の基本対応を定め, これに従い遺伝子の解読を行う(図2参照). この基本対応どおりに解読すると拘束条件に違反する遺伝子は, 基本対応をずらし, 遺伝子の読み替えを行い, 拘束条件を満足する繊維配向角に読み替えを行う(図3参照). つまり, 拘束条件に違反する遺伝子を積層構成に反映されない劣性遺伝子として取り扱うことで, 拘束条件を満足する積層構成に解読するという手法である.

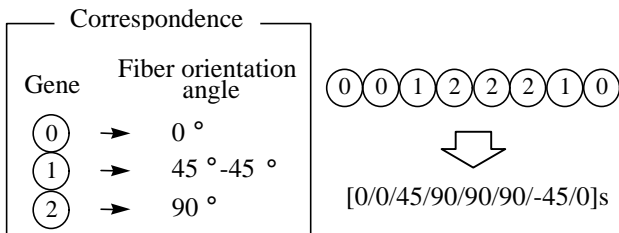


Fig2 Basic decoding system

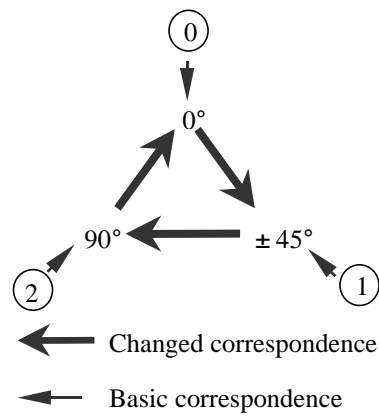


Fig3 Change of correspondence

3.3. イントロンを用いたGA

遺伝子とは, 遺伝情報をになう構造単位であり, 一般に高分子のDNAにより構成される. 遺伝子内部には翻訳されないDNA領域が存在し, この領域をイントロンと呼ぶ.

本研究では, イントロンを劣性遺伝子の拡張と位置づけ, GAにおける遺伝子と染色体の対応関係に応用し, 積層数最適化と積層構成最適化を同時に実施する.

本研究では解析対象を0°, ±45°, 90°から成る対称積層円筒殻とし, 積層数は8層~32層までの偶数層とする. そこで, 16個の遺伝子を持つ染色体を積層構成に対応させる. この対応関係においてイントロンを導入する. つまり, 染色体中の遺伝子を0,1,2,iで表し, 遺伝情報を有する遺伝子数により積層数を表し, 遺伝情報を有する各遺伝子の値(0,1,2)を各繊維配向角に対応させることにより積層構成を表す(図4参照). この手法により, 一定の長さを有する染色体によって, 積層数の異なる積層構成を表すことが可能となる.

劣性遺伝子的遺伝子補修戦略では遺伝子を3進数で表現したが, この手法では遺伝子を4進数で表現することでイントロンを遺伝子と繊維配向角の対応関係に導入できるため, コーディングが非常に簡便である.

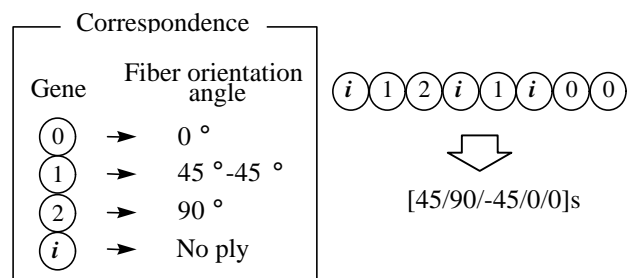


Fig4 Basic decoding system with Intron

3.2. エンプティー遺伝子法との比較

積層数最適化と積層構成最適化を同時に行うアルゴリズムとして, Haftkaはエンプティー遺伝子法⁽¹²⁾を提案している. この手法は本手法と同様, 遺伝情報を持

たない遺伝子としてエンティイ遺伝子を染色体と積層構成の対応関係に導入している。この手法では、染色体を積層構成に解読する際に、以下の規則に従い染色体の直接操作を行う(図5参照)。

- ・エンティイ遺伝子を解読の際、染色体外側に移動させる。
- ・エンティイ遺伝子が突然変異し、遺伝情報を有する遺伝子に変化した場合には、その影響を低く抑えるため、突然変異した遺伝子を染色体内側に移動させる。

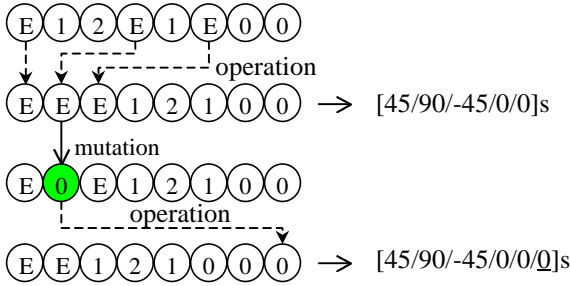


Fig5 Example of decoding with empty gene

これに対し本手法では、染色体の遺伝子进行操作せず、解読の際に読み替えを行う(図6)。本手法は、劣性遺伝子の遺伝子補修戦略を一部変更することによりイントロンを導入できるため、コーディングも非常に簡便である。

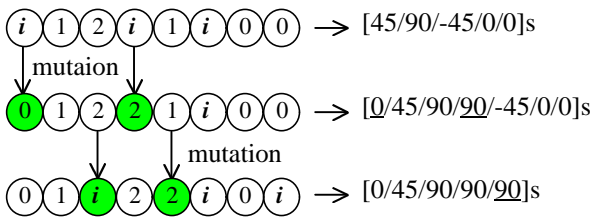


Fig6 Example of decoding with intron

4. 最適化問題

設計変数を積層数と積層構成とし、拘束条件(1)~(3)を満足する範囲内で、与えられた設計応力を満足する最小の積層数を求め、さらにその積層数において、座屈応力(軸圧縮応力の最小値: $\min(N_x/t)$)が最大となる積層構成を求める多目的最適化問題を考える。ここで、式(1), (2)で与えられる座屈荷重は直交異方性を仮定した場合の結果であるため、その妥当性を評価する指標として、以下に示す2つの異方性パラメータ⁽¹³⁾を用いた。

$$g = \frac{D_{16}^*}{(D_{11}^* D_{22}^*)^{1/4}}, \quad d = \frac{D_{26}^*}{(D_{11}^* D_{22}^*)^{1/4}} \quad (3)$$

この g, d が0.2よりも小さい場合には、直交異方性と近似することができる。そこで、 g, d が0.2より大きい場合にはその値をペナルティーとし目的関数の値を低くする。

以上より、GAにおける目的関数 f を次のように定義する。

$$f = \left\{ a(16-n) + b \frac{\text{現在の座屈応力}}{\text{設計応力}} \right\} \times 10 / (1+g+d) \quad (4)$$

- $\frac{\text{現在の座屈応力}}{\text{設計応力}} < 1$ のとき $(a,b) = (0,1)$
- $1 \leq \frac{\text{現在の座屈応力}}{\text{設計応力}} < 2$ のとき $(a,b) = (1,1)$
- $\frac{\text{現在の座屈応力}}{\text{設計応力}} \geq 2$ のとき $(a,b) = (1,0)$

ここで式(4)右辺第1項は積層数を最小化するための項であり、第2項は座屈応力を最大化するための項であり、各積層構成の座屈応力と設計応力の比に応じて、 a, b の値を変化させることで、2つの最適化の重みを変化させている。また、 n は積層数の半分を表わし、 g, d はそれぞれ $g < 0.2, d < 0.2$ の場合には0を取るものとする。この目的関数 f の最大化をGAにより実施することで、積層数最適化と積層構成最適化を同時に実施する。

5. イントロンを用いたGAによる最適化

上記の目的関数 f 、イントロンを用いたGAにより、集団数を10、世代数を500、交叉確率を0.8、突然変異確率を0.097とし、設計応力として50, 75, 100[MPa]を与えた場合についてCFRP積層円筒殻の積層数最適化と積層構成最適化を行った。ここで、CFRP(T300/Epoxy)の材料定数および円筒殻の寸法をそれぞれ表1, 表2に示す。また解析によって得られた最適積層構成および座屈応力を表3示す。

Table1 Composite moduli

E_x [GPa]	133.44
E_y [GPa]	8.78
E_s [GPa]	3.254
ν	0.26

Table2 Size of cylinder

R [m]	1.0
L [m]	3.0
h [mm]	0.125

Table3 Optimum stacking sequence

Design stress	Stacking sequence	Buckling Stress
50 [MPa]	[90/45/0/-45/0/45/90/-45]s [0/45/90/-45/90/45/0/-45]s	58.52 [MPa]
75 [MPa]	[0/45/90/-45/0/45/90/-45/-45/0/45]s [90/45/0/-45/90/45/0/-45/-45/90/45]s	80.23 [MPa]
100 [MPa]	[45/0/-45/90/45/90/-45/0/45/90/90/-45/0/0]s [45/90/-45/0/45/0/-45/90/45/0/0/-45/90/90]s	103.50 [MPa]

また、今回の解析対象である積層数が8層～32層までの対象積層円筒殻の各積層数における座屈応力、最適積層構成座屈モードを表4に示す。表4より各設計応力に対し解析によって得られた最適解が各積層数における最適解と一致していることが分かる。

Table 4 Optimum stacking sequence

Number of stacks	Buckling stress [MPa]	Stacking Sequence	Buckling mode
8	23.20	[0/45/90/-45]s	(1,)
10	33.25	[90/45/0/-45/90]s [0/45/90/-45/90]s	(7,5) (13,20)
12	38.53	[0/45/90/-45/0/0]s [90/45/0/-45/90/90]s	(17,20) (15,14)
14	49.28	[90/45/0/-45/-45/90/45]s [0/45/90/-45/-45/0/45]s	(1,0) (1,)
16	58.52	[90/45/0/-45/0/45/90/-45]s [0/45/90/-45/90/45/0/-45]s	(5,3) (11,20)
18	67.11	[45/0/-45/90/45/90/-45/0/0]s [45/90/-45/0/45/0/-45/90/90]s	(1,0) (1,)
20	72.66	[45/0/-45/90/45/90 /90/-45/0/0]s [45/90/-45/0/45/0/0 /-45/90/90]s	(19,20) (19,20)
22	80.23	[0/45/90/-45/0/45/90 /-45/-45/0/45]s [90/45/0/-45/90/45/0 /-45/-45/90/45]s	(1,) (1,0)
24	91.10	[45/0/-45/90/90/45/0 /-45/90/45/0/-45]s [45/90/-45/0/0/45/90/-45 /0/45/90/-45]s	(1,) (1,0)
26	98.34	[45/0/-45/90/45/90/-45/90/ 45/90/-45/0/0]s [45/90/-45/0/45/0/-45/0/ 45/0/-45/90/90]s	(20,19) (13,15)
28	103.50	[45/0/-45/90/45/90/-45/0/ 45/90/90/-45/0/0]s [45/90/-45/0/45/0/-45/90 /45/0/0/-45/90/90]s	(20,19) (7,8)
30	112.93	[0/45/90/-45/0/45/90/-45/ 90/45/0/-45/-45/0/45]s [90/45/0/-45/90/45/0/-45/ 0/45/90/-45/-45/90/45]s	(1,0) (1,)
32	121.72	[45/90/-45/0/0/45/90/-45/ 0/45/90/-45/90/45/0/-45]s [45/0/-45/90/90/45/0/-45/ 90/45/0/-45/0/45/90/-45]s	(14,19) (16,13)

さらにイントロン法を用いた場合の正答率とエンプティ法を用いた場合の正答率の比較を表5に示す。ここで、正答率は以下の式で計算した。なお、GAの計算回数は500回である。

$$\text{正答率(\%)} = \frac{\text{最適積層構成が得られた回数}}{\text{GAの計算回数}} \times 100 \quad (5)$$

Table5 Comparison between two reliability

Design stress	Intron Method	Empty Gene Method
50 [MPa]	100 %	99.4 %
75 [MPa]	89.8 %	88.2 %
100 [MPa]	74.6 %	78.4 %

表5から各設計応力において本手法を用いた場合の正答率とエンプティ法を用いた場合の正答率がほぼ同等であることが分かる。

6. 結言

複雑な操作を必要とするエンプティ法に対し、比較的簡便なコーディングにより積層数最適化と積層構成最適化を同時に実施できるアルゴリズムとしてイントロンを用いたGAを考案し、エンプティ法との正答率の比較を行い、本手法がエンプティ法と同等の性能を有することを示した。

さらに、イントロンを用いたGAによりCFRP積層円筒殻の積層数を最小化する積層数最適化と座屈応力を最大化する積層構成最適化を同時にを行い、最適解を得た。

参考文献

- (1) M. Miki, ASTM STP, 864, (1985) 387.
- (2) H.Hukunaga and H. Sekine; AIAA J.,30(1992)2791.
- (3) 薄, 機論, A, 55,516(1989)1892.
- (4) R.Le Riche and R.T.Haftka; AIAA J.,31,(1993)951.
- (5) 轟, 渡辺, 小林, 機論, A, 60(1994), 1266.
- (6) 福永, 関根, 日本航空宇宙学会誌, 42, (1994)371.
- (7) 座古, ほか3名, 材料, 45, 12(1996)1316.
- (8) 青木, 福嶋, 邊, 機論, A, 63 (1997)1028.
- (9) 太田, 成田, 引地, 第7回設計工学・システム部門講演会講演論文集(1997), 234.
- (10) J.Tasi; AIAA J., Vol.4, No.6(1966),1058.
- (11) 轟, 笹井, 日本複合材料学会 1998年度研究発表講演会予稿集(1998), 11
- (12) Peter N.Harrison, Rodolphe Le Riche, Raphael T.Haftka; AIAA-95-1163OP (1995)58
- (13) M.P Nemeth; AIAA J.,24,11,(1986)1831.