

劣性遺伝子的補修法を用いたGAによる 積層円筒座屈強度最大化の設計信頼性向上

轟 章^{*1}, 笹井正史^{*2}

Improvement of Design Reliability for Buckling Load Maximization of Composite Cylinder Using Genetic Algorithm with Recessive Gene like Repair

Akira TODOROKI and Masafumi SASAI

Genetic algorithms are applied to obtain the optimal stacking sequences for maximizations of buckling load of composite cylinders. In this problem, three rules for empirical stacking are implemented as constraints. The first is that the laminates have to be balanced. The second is that more than 4 contiguous plies of the same orientation is not allowed. The third is that difference of fiber orientations between adjacent plies must not exceed 45 degree. The difficulty of handling constraints in genetic optimizations are handled by adoption of a new repair system. The new repair system operates when the chromosome violating the constraints is decoded to a stacking sequence. This repair system does not alter genes of the chromosome but changes decoding rules to introduce the constraints. This is similar to recessive genes in biology. By using this repair system, a chromosome of {2 2 2 1 1 1 0 0 0} is decoded to [90/90/90/45/90/-45/-45/0/45]s. Design reliability of the genetic algorithm with the new repair system are examined in detail by comparing the reliability with a penalty method. As a result, the genetic algorithm with the repair system is shown to provide higher design reliability.

Key Words : Genetic Algorithm, Repair System, Recessive Gene, Optimum Design, Penalty Method, Composite Material, Buckling

1. 緒言

一方向プリプレグを多方向に積層して作成する複合材料積層板では、積層構成の最適化が必要である^{1)~3)}。複合材料積層構造では、積層される繊維配向角が数種に限定されるため、積層構成最適化は組合せ最適化問題となる。最近、組合せ最適化問題の解析手法として遺伝的アルゴリズム(GA)が注目されており、GAによる積層構成最適化が実施されている^{4)~9)}。

本研究では、ロケット燃料タンク等への複合材料円筒殻適用を想定し、設計制約を考慮して稼動時の動圧による座屈破壊に対する強度最大化の積層構成最適設計を例題として取り扱い、劣性遺伝子的補修法による制約条件導入法の有効性を検討することを目的としている。設計制約条件としては、対称積層構成、アングルプライのバランス(バランスルール)、巨大マトリッ

クス割れ防止のための4層を超える同一方向層の積層禁止(4層ルール)が一般的なルールとして考慮されている。加えて、液体ロケット燃料搭載時等の極低温冷却時に発生する潜在欠陥からの層間はく離防止等のため、各隣接層の繊維配向角差を一定範囲内に抑制するという拘束条件(配向角差ルール)をGAによる最適化過程に導入する。

一般に拘束条件をGAに組み込むことは容易でない。GAへの拘束条件の導入法としてはペナルティー法が用いられているが、ペナルティー値の調節が困難であり、GAの設計信頼性の低下を引き起こす可能性を有している。著者らの一部は、既にGAへの拘束条件の導入に対して設計信頼性の低下を防止可能な劣性遺伝子的補修法を考案し、与えられた積層パラメータへのマッチング問題へ適用した¹⁰⁾。

既報告では、バランスルールと4層ルールを新遺伝子補修法で導入した¹⁰⁾が、本論文ではそれらに加え配向角差ルールを導入した。そして、新遺伝子補修法を用いたGAを、軸圧縮荷重が作用するCFRP対称積

*平成10年6月 日受付

〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1

*1 東京工業大学工学部

*2 東京工業大学大学院

層円筒殻の座屈荷重最大化のための積層構成最適化問題に適用する．そして積層構成の最適化を実施し，GAの設計信頼性を求め，ペナルティー法を用いた場合の設計信頼性と比較検討し，実機構造での最適設計における設計信頼性向上を実証する．

2. 円筒殻の解析

本研究で解析対象とした円筒殻を図 1に示す．

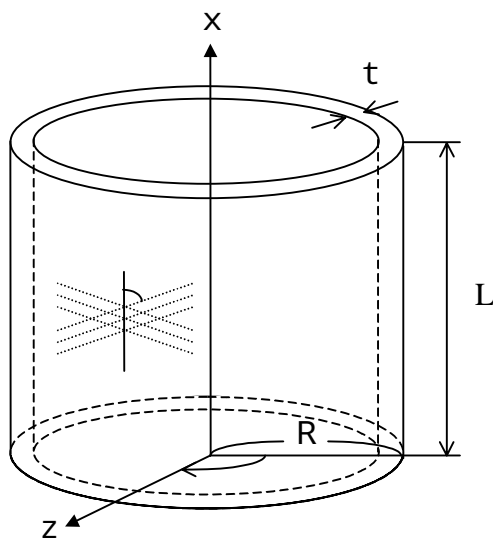


Fig.1 Cylindrical coordinates

軸方向x，円周方向，半径方向zとする．半径R，殻長L，板厚tであるN層積層のCFRP円筒殻について各プライの層厚さがすべてhで等しいとすると，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の基礎式より次式で与えられる¹¹⁾．

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

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

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

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

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

$$\mu^2 = \frac{\lambda^2}{n^2} \sqrt{\frac{a_{22}}{a_{11}}}, \quad \lambda = \frac{m\pi R}{L}$$

ただし， a_{ij} ， b_{ij} ， d_{ij} は複合材料弾性マトリックス

の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．

座屈応力としては，軸対称座屈の値と非軸対称座屈の値を比較し，両者のうち低い値を示す方を限界座屈応力として採用した．非軸対称座屈の場合の座屈解析では， m, n を1~20の範囲で変化させ，最小値探索を実施した． $m=1, n=20$ の時には $m=0$ として解析した値と比較し，小さい方の値を座屈応力として採用した．なお，Tasiの式は各層が直交異方性であることが必要であり，本研究では設計信頼性向上の確認のために近似的に用いている．

3. GAへのインプリメント

GAは初期集団から各個体に評価，選択，交叉，突然変異という操作を行い，適応度の高い個体を次世代に複製することによって，最適化を行う手法である．流れ図を図 2に示す．

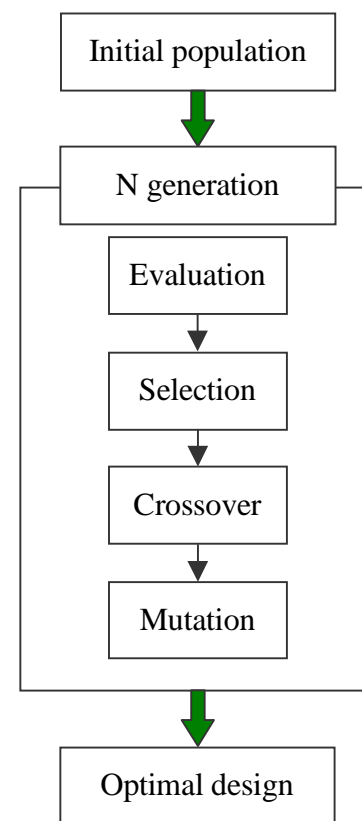


Fig.2 Process of genetic algorithm

本研究では，各個体の適応度評価を行う目的関数を各個体の座屈応力とすることが望ましい．しかし，式(1)，(2)で与えられる座屈応力は直交異方性体を仮定した場合のものであるため，解の直交異方性近似の適切性を評価する必要がある．その指標として，以下に示す2つのパラメータを用いた．

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

この γ, δ が0.2よりも小さい場合には，直交異方

性近似することができる¹²⁾。そこで、GAにおける目的関数 f を以下のように定義する。

$$f = \min(N_X/t) / (1 + \alpha + \beta) \quad (4)$$

ここで、 α 、 β はそれぞれ 0.2、0.2 の場合に $\alpha = 0$ 、 $\beta = 0$ の値を取るペナルティーであり、直交異方性近似することが不適当である場合にはペナルティーにより適応度を低くする。このように直交異方性近似の適切性に応じてペナルティーを与えることによって、直交異方性近似することが適切である積層構成は淘汰され、直交異方性近似することが適切である積層構成だけが集団中に生存することとなる。

4. GA への拘束条件導入法

4.1 拘束条件とその導入

本研究では $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ から成る16層対称積層円筒殻を解析対象とし、以下の3種の拘束条件を導入した。

(1) 同一繊維配向角層が4層を超えて連続しない。

(4層ルール)

(2) 隣接配向角差を 45° 以内に抑える。

(配向角差ルール)

(3) 45° 層と -45° 層の数が一致する。

(バランスルール)

拘束条件(1)は巨大マトリックス割れ防止が目的である。拘束条件(2)は熱応力による層間破壊防止が目的である。拘束条件(3)は垂直応力-せん断カップリング抑制が目的である。さらに本研究では、式(4)のペナルティー導入によって、曲げ-ねじりカップリングを防止するようにしている。

一般に、GAへの拘束条件の導入が困難な理由は、染色体の解読時に、拘束条件に違反する遺伝子(致死遺伝子)が発生することである。拘束条件の導入において、この致死遺伝子の扱いが問題となる。

ペナルティー法は致死遺伝子を含む染色体にペナルティーを与え、その適応度を低下させる方法である。この方法では、致死遺伝子を含む染色体は進化の過程で淘汰されることとなる。しかし、ペナルティーを小さくすると淘汰がうまく実施できない。またペナルティーを大きくしすぎると最適化コストが大きく増加してしまうという問題点がある。

そこで本研究では設計信頼性低下を防止し、最適化コストを増加させない拘束条件導入法として、劣性遺伝子的遺伝子補修法を開発した。

本補修法では、染色体の遺伝子には操作を施さず保存し、解読の際に致死遺伝子の読み替えを行う。つまり、致死遺伝子の解読において、遺伝子と繊維配向

角の対応関係を変化させることで、拘束条件を導入する。これは致死遺伝子を、積層構成に反映されない劣性遺伝子として扱うものである。これにより、染色体の解読時に実行不可能解の発生を防ぐことができる。著者らの一部は既に拘束条件(1)(3)をこの手法で積層パラメータマッチング問題に適用した¹⁰⁾。

4.2 劣性遺伝子的補修法

本研究では解析対象を $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ から成る対称積層円筒殻としているため、積層数 N の半分である $N/2$ 個の遺伝子を有する染色体を考え、遺伝子の値は0,1,2から成る3進数で表す。

解読は、積層板曲げ剛性に影響の大きい外側から順に解読する。このように外側から解読することで、曲げ剛性に影響の大きい遺伝子列は可能な限りそのまま積層構成に解読され、内側で調節を自動的に実施することになる。

染色体の解読において遺伝子と積層構成の基本対応として、遺伝子0を 0° 層、遺伝子1を $\pm 45^\circ$ 層、遺伝子2を 90° 層と解読する。遺伝子1の解読においては外側から奇数番目の遺伝子1を 45° 層、偶数番目の遺伝子1を -45° 層と解読する。

また染色体の解読は2段階に分け、第1段階で拘束条件(1)(2)を、第2段階で拘束条件(3)を導入する。

第1段階では、染色体の外側に位置する遺伝子から基本対応通りに解読し、順次拘束条件(1)(2)をチェックする。拘束条件を満足している場合には次の遺伝子の解読を行い、拘束条件に違反している場合には遺伝子の読み替えを行う。

遺伝子の読み替えは、遺伝子0の場合にはまず $\pm 45^\circ$ 層と読み替る。この際積層構成の外側から交互に 45° 層、 -45° 層が存在するように 45° 層または -45° 層に読み替える。読み替えを行った結果に対し拘束条件(1)(2)をチェックし、拘束条件を満足する場合には 45° 層または -45° 層に解読し、拘束条件に違反する場合にはさらに 90° 層と読み替え、拘束条件(1)(2)を再度チェックする。 $\pm 45^\circ$ 層、 90° 層のいずれに読み替えても拘束条件(1)(2)に違反する場合には基本対応通り 0° 層と解読する。同様に遺伝子1は $90^\circ, 0^\circ$ の順に、遺伝子2は $0^\circ, \pm 45^\circ$ の順に読み替える(図3参照)。どの繊維配向角層に読み替えても拘束条件(1)(2)に違反する場合には基本対応通りに解読し、違反する拘束条件の数に応じてペナルティーを与える。この操作を染色体中の遺伝子すべてに対し行うことで、ほとんどの染色体が拘束条件(1)(2)を満足する積層構成に解読され、解読結果が拘束条件に違反する積層構成の場合には、ペナルテ

ィーによって淘汰されることとなる．例として染色体 {0 1 1 2 2 2 2 0} が解読される過程を図4に示す．

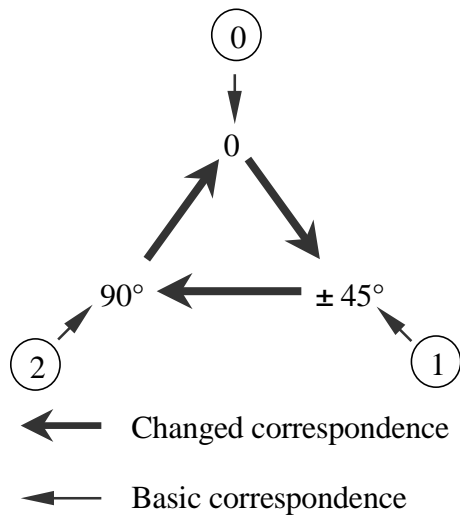


Fig.3 Change of correspondence

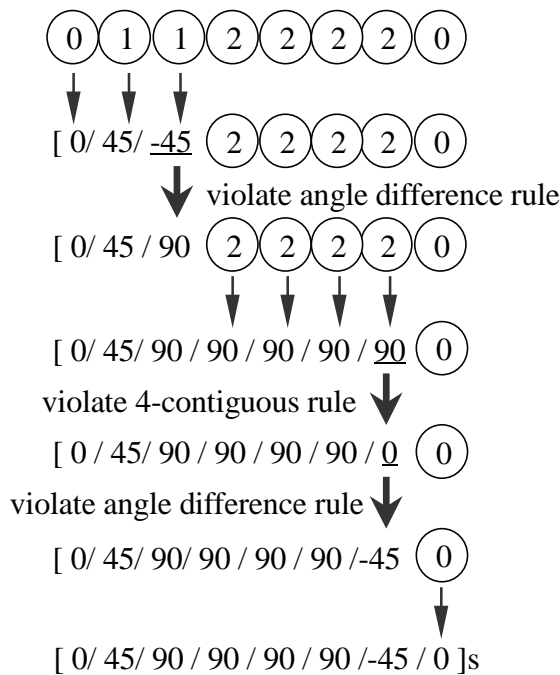


Fig.4 Example of decoding by repair system

第2段階では拘束条件(3)を導入する．第1段階後の積層構成に対し拘束条件(3)をチェックし，拘束条件を満足する場合には染色体の解読を終了する．第1段階において積層構成の外側から交互に45°層，-45°層が存在するように解読を行ったため，拘束条件に違反する場合には45°層が1枚余分に存在していることとなる．45°層と-45°層の数を一致させるため，45°層を減らす操作(+45補修アルゴリズム)と-45°層を1枚増やす操作(-45補修アルゴリズム)を適用する．

+45補修アルゴリズムとは積層中の45°層を90°層または0°層に読み替える操作であり，45°層が積層中に2枚以上存在する場合だけに適用する．積層板剛性に対する影響を考え，読み替える45°層は積層の内側に存在するものから順に選び，まず90°層と読み替えその

結果に対し拘束条件(1)(2)をチェックする．拘束条件を満足する場合には90°層と解読し，拘束条件に違反する場合には0°層と読み替え，再度拘束条件をチェックする．0°層，90°層のいずれに解読しても拘束条件に違反する場合には，操作を行った45°層の次に内側に位置する45°層に対し同様の操作を行う(図 5参照)．積層中のすべての45°層に対し上記の操作を行っても拘束条件(1)(2)(3)を満足する積層構成に解読できない場合には-45°層を増やす操作 (-45補修アルゴリズム)を行う．

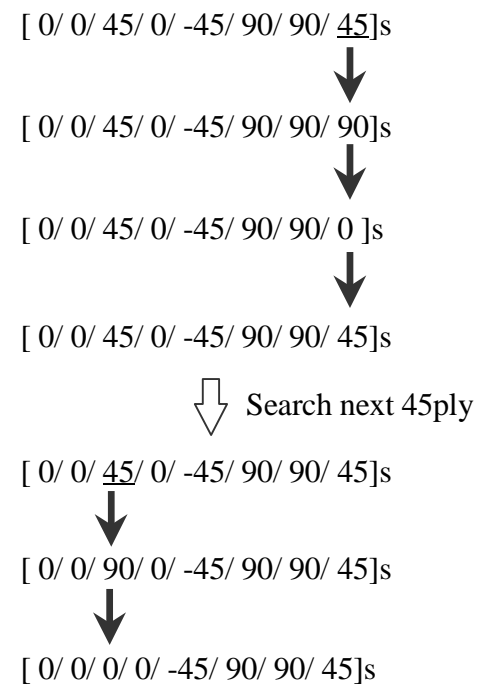


Fig.5 Example of +45 repair algorithm

-45補修アルゴリズムとは積層中の0°層または90°層を-45°層に読み替える操作であり，以下の場合に適用する．45°層が積層構成中に1枚しか存在しない場合，+45補修アルゴリズムにより拘束条件を満足する積層構成に解読できなかった場合，-45°層への読み替えを行う場合，曲げモーメント-ねじりカップリングを防ぐために45°層に対し-45°層を近接して配置させることが必要である．そこで積層の内側に位置する45°層から順に選択し，その45°層から2層目に位置する層が0°層または90°層である場合にその層を-45°層への読み替えの対象とする．その際45°層に対し内側の層，外側の層の順に読み替えを行い，その結果が拘束条件(2)を満足する場合に読み替えを行う(図 6参照)．積層中のすべての45°層に対し上記の操作を行っても拘束条件を満足する積層が得られなかった場合には，積層の内側から順に0°層または90°層を-45°層へ読み替え，拘束条件(2)を満足する場合に読み替えを行う．上記染色体の解読および補修例を図 7に示す．

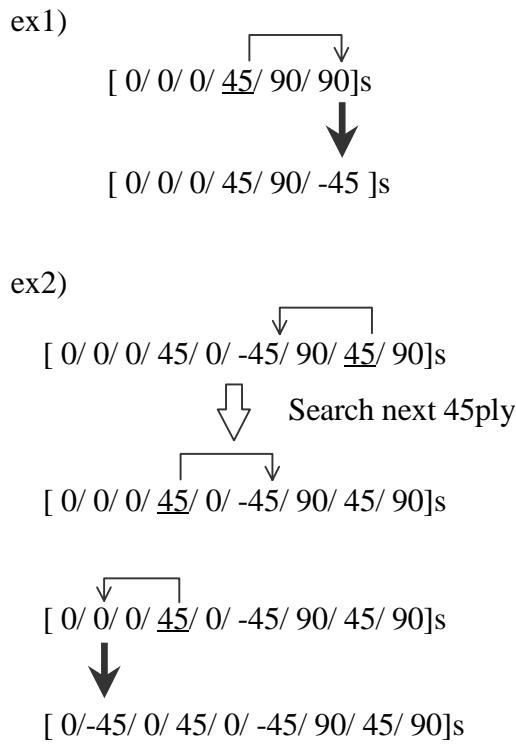


Fig.6 -45-repair algorithm

{00000000}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 0/ 0/ -45]s
{00000110}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 90/ -45/ 0]s
{00001201}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 90/ 0/ -45]s
{00002020}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 0/ 0/ -45]s
{00002121}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 90/ 90/ -45]s
{00022022}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 0/ -45/ 90]s
{00102120}	[0/ 0/ 45/ 0/ 0/ -45/ 90/ 90]s
{00120211}	[-45/ 0/ 45/ 90/ -45/ 90/ 45/ 90]s
{00200022}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 0/ 0/ -45]s
{01002220}	[0/ 45/ 0/ 0/ 0/ 0/ -45/ 0]s
{01020211}	[0/ 45/ 0/ 0/ 0/ 0/ -45/ 90]s
{01222220}	[0/ 45/ 90/ 90/ 90/ 90/ -45/ 0]s
{02012020}	[0/ 45/ 90/ 90/ 90/ 90/ -45/ 0]s
{02220211}	[0/ 0/ 0/ 0/ 45/ 90/ -45/ 90]s
{10002000}	[45/ 0/ 0/ 0/ 0/ -45/ 0/ 0]s
{10102220}	[0/ 0/ -45/ 0/ 0/ 0/ 0/ 45]s
{12001000}	[45/ 90/ -45/ 0/ 45/ 0/ 0/ -45]s
{12102221}	[45/ 90/ -45/ 0/ 0/ -45/ 0/ 45]s
{11111111}	[45/ 90/ -45/ 90/ 45/ 90/ -45/ 90]s
{21020020}	[90/ 45/ 0/ 0/ 0/ 0/ -45/ 0]s
{21221220}	[90/ 90/ 90/ 90/ -45/ 90/ 90/ 45]s
{22222222}	[90/ 45/ 90/ -45/ 90/ 45/ 90/ -45]s

Fig.7 Examples of repaired laminates

この補修法を用いて染色体長さが 4,8,16(それぞれ積層数が 8,16,32 に対応)の染色体の解読を行った。それぞれの染色体長さが 4,8,16 の場合における染色体の総

数は $81(=3^4)$, $6561(=3^8)$, $43046721(=3^{16})$ となるが、本補修法によりすべての染色体を拘束条件(1)(2)(3)を満足する積層構成に解読できることを確認した。

5. 劣性遺伝子的補修法とペナルティー法の比較

劣性遺伝子的補修法を用いたGAとペナルティー法を用いたGAによる設計信頼性の比較を行う。ただし、劣性遺伝子的補修法を用いた場合の目的関数 f は上記式(4)とし、ペナルティー法を用いた場合の目的関数 f は以下の式(5)で定義する。

$$f = \frac{\min(N_x/t)}{(1+\alpha+\beta+A+B+C)} \quad (5)$$

ここで、 α , β は式(4)同様 0.2, 0.2 の場合に $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.2$ の値を取るペナルティーであり、A,B,C はそれぞれ拘束条件(1)(2)(3)に違反した場合のペナルティーであり $A=B=C=0.1$ とした。

GA における集団数を 10, 世代数を 500, 交叉確率を 0.8, 突然変異確率を 0.10~0.36 で変化させる。ここで、突然変異は集団 10 個体において突然変異を起こす染色体 8 個体を選択し、選択された染色体中 2 個の遺伝子が必ず突然変異を起こすものと定める。このように突然変異を定義したため突然変異確率は各染色体長さに応じて変化することとなり、染色体長さが 4 の染色体では突然変異確率が 0.36, 染色体長さが 8 の場合には突然変異確率が 0.19, 染色体長さが 16 の場合には突然変異確率が 0.10 となる。

積層数 N を 8 から 32 までの偶数とし対称積層 CFRP 円筒殻 $[R=1.0[m], L=3.0[m], h=0.125[mm]]$ の積層構成最適化を行い、劣性遺伝子的補修法により得られた最適解とペナルティー法により得られた最適解を比較した。その結果、劣性遺伝子的補修法により得られた最適解はペナルティー法により得られた最適解と同じかあるいは優れた解であることを確認した。表 1 に各積層数における座屈応力、最適積層構成、座屈モードを示す。表 1 より得られた最適解は拘束条件(1)~(3)を満足していることがわかる。

表 2 に劣性遺伝子的補修法とペナルティー法を用いた場合の設計信頼性を比較して示す。ここで設計信頼性 R は以下の式(6)を用いて計算した。

$$R(\%) = \frac{N_o}{N_r} \times 100 \quad (6)$$

ここで、 N_r は GA 計算回数であり、 N_o は最適積層構成が得られた回数である。

式(6)において、GA の計算回数は積層数が 8~20 の場合が 100 回であり、積層数が 22~32 の場合が 500

回である．表 2 より劣性遺伝子的補修法を用いた場合の設計信頼性が常にペナルティー法を用いた場合の設計信頼性よりも高い値を示していることがわかる．劣性遺伝子的補修法は遺伝子を直接補修しないため，GA の有益変化を妨げない．さらに一つの積層構成に対応する染色体が多数存在することが可能であるため，設計信頼性が向上している．例えば，積層構成 [0/45/90/-45/90]s には染色体 {01111},{01112},{01212} が対応している．

Table 1 Optimal 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)

また，表 2 において積層数が 14, 22, 30 の場合にはペナルティー法を用いた場合の設計信頼性が 0 になっている．基本対応通りに染色体を解読した結果が拘束条件に違反する場合，ペナルティー法ではその適応度を

ペナルティーによって低く設定する．劣性遺伝子的補修法では拘束条件を満足する積層構成への読み替えを行う．特に -45 補修によって，-45°層が増加するアルゴリズムは直接対応では実現できない連続した -45°層を作成する．積層数 14, 22, 30 の場合の最適解はいずれもこの連続した -45°層を有しており，ペナルティー法では実現不可能な積層構成であるため，設計信頼性が 0 となっている．以上より劣性遺伝子的補修法は，ペナルティー法が対象としている解空間よりも広い解空間の探索が可能であることがわかる．

Table 2 Comparison between two absolute reliability

Number of stacks	Reliability of recessive gene like repair(%)	Reliability of penalty method(%)
8	100	100
10	100	100
12	100	100
14	100	0
16	100	79
18	100	48
20	100	48
22	83.8	0
24	36	25.8
26	98.8	7
28	85.6	12.6
30	10.2	0
32	37.2	8.8

さらに，計算コストが最大である積層数が 32 の場合について，劣性遺伝子的補修法，ペナルティー法を用いた場合に必要とする計算時間の比較を行った．なお，計算時間は Pentium 266MHz を使用して測定したものである．

積層数が 32 の場合，劣性遺伝子的補修法，ペナルティー法を用いた場合の設計信頼性 R はそれぞれ，37.2% ,8.8% である．それぞれの手法により信頼性 80% を得るために必要な計算回数 N を以下に示す．また，GA による最適化 10 回に要する時間を計測したところ，劣性遺伝子的補修法を用いた場合 208.31[sec]，ペナルティー法を用いた場合 207.10[sec]であった．これより，GA による最適化 1 回に要する時間 t を計算した結果を以下に示す．

(劣性遺伝子的補修法)

$$R=0.372 \text{ より, } N=\log 0.2 / \log (1-R)=3.46[\text{回}]$$

$$208.31[\text{sec}/10 \text{ 回}] \text{ より, } t=20.8[\text{sec}/\text{回}]$$

(ペナルティー法)

$$R=0.088 \text{ より, } N=\log 0.2 / \log (1-R)=7.59[\text{回}]$$

$$207.10[\text{sec}/10 \text{ 回}] \text{ より, } t=20.7[\text{sec}/\text{回}]$$

以上より，それぞれの手法により信頼性 80% を得るために必要な計算時間 T を以下に示す．

(劣性遺伝子的補修法) $T=20.8 \times 3.46=72.0[\text{sec}]$

(ペナルティー法) $T=20.7 \times 7.59=157.1[\text{sec}]$

以上の結果より、計算時間を比較した場合においても、劣性遺伝子的補修法がペナルティー法に比べて優れていることがわかる。

さらに積層数が 22~32 の場合において、最適積層構成の示す座屈応力に対し 0.5%の誤差の範囲に属する座屈応力を示す積層構成を、実用上有効な積層構成として設計信頼性を計算した。その結果を表 3 に示す。表 3 の実用解の設計信頼性においても、ペナルティー法と比較して劣性遺伝子的補修法は高い設計信頼性を有している。積層数が 22, 30 の場合、ペナルティー法ではやはり設計信頼性が 0 になっており、正解に近い解が得られていないことを示している。

Table 3 Comparison between two practical reliability

Number of stacks	Reliability of recessive like gene repair(%)	Reliability of penalty method(%)
22	85.2	0
24	36	25.8
26	100	28.4
28	100	32.4
30	10.2	0
32	86.4	8.8

また積層数が8層,16層,32層の場合について、本補修法により解読した全ての積層構成(拘束条件(1)(2)(3)を満足するすべての積層構成)の座屈応力を求め、座屈応力が最大となる積層構成を求めた結果、劣性遺伝子的補修法を用いたGAにより得られた最適解と一致することを確認した。以上のことから、本研究における劣性遺伝子的補修法は、ペナルティー法により拘束条件を導入する場合よりも設計信頼性が著しく向上することが示された。

6. 結 言

GA の設計信頼性の低下を防ぐ拘束条件導入法として、劣性遺伝子的補修法を提案し、この手法に基づき染色体の解読を行う補修法を開発した。これらを用いた GA とペナルティー法を用いた GA により CFRP 積層円筒殻の座屈荷重を最大化する積層構成最適化を行い、得られた最適解、設計信頼性を比較することで、本手法がペナルティー法よりも高い設計信頼性を与える有効な拘束条件導入法であることを示した。

参考文献

- (1) M. Miki,ASTM STP, 864, (1985) 387.
- (2) H.Fukunaga 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) 轟, Haftka, 機論, A, 64(1998), 515.

(11) J.Tasi; AIAA J.,Vol.4,No.6(1966),1058.

(12) M.P Nemeth; AIAA J.,24,11,(1986)1831.