ISSN 2186-5647

1-18

進化的アルゴリズムを用いた複合材料の最適構造設計

日大生産工　○染宮 聖人，平山 紀夫

1.　緒言

高い比強度・比弾性率を有する複合材料は，航空宇宙分野や自動車をはじめとする輸送機の構造材料として広く使用されている．一般的に，構造材料として使用される複合材料の多くは繊維強化プラスチック（以下，FRP）であり，積層シェル構造体として使用されることが多い．そのため，座屈強度を最大化するための積層構成や板厚寸法の最適化が重要である．しかしながら，積層シェル構造体の設計変数は，各層の板厚，繊維配向角や材料種別等，離散値と連続値の両方の設計変数が非常に数多く存在している．また，局所解が多数存在するため，効率的に大域的な最適解を探索することは容易ではない．

そこで本研究では，積層シェル構造体の最適化設計に対して，少ない評価関数の計算で効率よく大域的な最適解の探索を行うための最適化手法として，従来の進化的アルゴリズムである差分進化法（以下，DE）[1]に勾配法を組み合わせた最適化手法（以下，Hybrid DE）を提案する．そして，一般的な進化的アルゴリズムである遺伝的アルゴリズム（以下，GA）と比較することで，提案したHybrid DEの探索能力と収束性について調査した．

2.　進化的アルゴリズム

進化アルゴリズム(Evolutionary Algorithms)は，個体集団を用いて，生物の進化過程や突然変異を模擬したアルゴリズムで，多峰性関数や他目的の最適化問題に対して局所解に陥らず，最適解を探索できるため，様々な工学分野で適用されている．

2.1　勾配法を組み合わせた差分進化法

勾配法は少ない評価関数の計算で効率よく最適解を探索できる手法であるが，局所最適解に陥りやすい．そこで本研究では，少ない評価回数で最適解を求めるため，多峰性関数に対して優れた探索性能を有するDEと単峰性関数に対して収束性の良い勾配法(以下，CG法)を組みわせたHybrid DEを開発した．このHybrid DEは，DEで大域的な探索を行い，各探索個体の更新レベルに応じて，CG法に切り替えて最適解を探索する手法である．具体的な最適化手法の手順を以下に示す．

(Step1)　DEによる最適解の探索

(Step2)　各個体の評価更新回数が規定値に達した場合，最良個体とランダムに選択した個体に対してCG法を実施する．

(Step3)　評価関数値を計算し，最良値を保存．

(Step4)　規定値に1を加算し，step1に戻る．

2.2　離散設計変数の計算処理方法

FRPの設計変数は離散値と連続値が混在しているが，一般的なDEの最適化演算は連続値で行うため，離散値を連続値に置き換えて計算する必要がある．そのため，著者らは離散値を連続値に変換する連続型手法を開発した[2]．この連続型手法では，繊維配向角や材料種別などといった離散設計変数に対して離散設計変数値 γ_j とテーブル番号 l を対応させた関数 f を定義する．そして INT 関数を用いて，更新された連続値をテーブル番号に変換し，関数 f に入力することで離散設計変数値を連続値で表現する手法である．この連続型手法であれば，各離散設計変数のテーブル数を任意に設定することができる．連続型手法の関数 f と離散設計変数値 γ_j を式(1)と(2)に示す．

$$f(l)=(l-1)\alpha \qquad (l=1,.....,\beta) \tag{1}$$

$$\gamma_j = f\left(INT\left(\beta x\right)\right) \tag{2}$$

ここで，x は区間[0　1]の連続値，α は離散設計変数の刻み値，β はテーブル番号の最大値，INT は指定された数以上のうち最小の整数値を返す関数を表している．

Structural optimum design of Composite Material using Evolutionary Algorithms
Masato SOMEMIYA and Norio HIRAYAMA,

3. 積層円筒殻の最適化問題

本研究の最適化問題は，半径R，殻長L，板厚TのN層に積層された積層円筒殻の半径方向外圧による座屈強度の最大化とする．Fig.1に示す積層円筒殻のモデルにおいて，設計変数は連続値である板厚および離散値である繊維配向角（3°刻み）とした．また，積層円筒殻の寸法と材料構成としては，G.Sun[3)]によって行われた殻長L=143.6mm，半径R=82.5mm，板厚T=0.5mmのGraphite/Epoxy積層円筒（E_L = 146GPa，E_T = 10.8GPa，G_{LT}= 5.78GPa，ν_{LT}= 0.29）とした．積層円筒殻の積層数は12層とし，対称積層となるように設定した．

各進化的アルゴリズムの最適化計算回数は，個体数10個と繰り返し回数50回の計500回とした. 加えて乱数により探索個体の初期値を100回変更し，各アルゴリズムの探索性能と収束性を評価した．また，積層円筒殻の外圧理論式を評価関数とした．評価関数となる座屈強度は式(3)に示す座屈圧力Pを用いて計算した．

$$P = \frac{\overline{N}_r}{R} = \left(\frac{R}{n}\right)^2 \left(T_{33} + \frac{2T_{12}T_{13}T_{23} - T_{11}{T_{23}}^2 - T_{22}{T_{13}}^2}{T_{11}T_{22} - T_{12}^2}\right) \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
T_{11} &= A_{11}(m\pi/L)^2 + A_{66}(n/R)^2 \\
T_{12} &= (A_{12} + A_{66})(m\pi/L)(n/R) \\
T_{13} &= (A_{12}/R)(m\pi/L) + (B_{12} + 2B_{66})(m\pi/L)(n/R)^2 \\
&\quad + B_{11}(m\pi/L)^3 \\
T_{22} &= A_{22}(n/R)^2 + A_{66}(m\pi/L)^2 \\
T_{23} &= (A_{22}/R)(n/R) + (B_{12} + 2B_{66})(m\pi/L)^2(n/R) + B_{22}(n/R)^3 \\
T_{33} &= D_{11}(m\pi/L)^4 + 2(D_{12} + 2D_{66})(m\pi/L)^2(n/R)^2 + D_{22}(n/R)^4 \\
&\quad + (2B_{22}/R)(n/R)^2 + A_{22}/R^2 + (2/R)B_{12}(m\pi/L)^2
\end{aligned} \tag{4}$$

ここで，$\overline{N}$ は円周方向膜力，nとmは座屈モードの周方向半波数と軸方向半波数，A，BおよびDは積層板の剛性係数成分である．

4. 最適化計算の結果

各最適化アルゴリズムの計算結果をFig.2に示す. GAは計算回数を重ねるごとに最適値に近づいているが, 計算回数が500回の時点で座屈強度143.7kPaであった．一方で, 連続型手法を用いたDEは，計算回数が500回の時点で座屈強度147.5kPaに到達しており，GAよりも収束性が向上していることがわかった．さらに，Hybrid DEは計算回数が300回の時点で座屈強度148.8kPaであった．これは，Hybrid DEがDEの大域的探索性能を維持しながら，CG法が少ない計算回数で大域的な最適解に収束するためと推察される．

5. 結言

本研究では，積層円筒殻の座屈強度最大化問題に対して，DEとCG法を組み合わせた最適化手法を適用し，その最適化手法の有用性について検証を行った．その結果，DEは，GAよりも収束性と探索性能が高いことが分かった．さらに，DEにCG法を組み込んだHybrid DEは少ない計算回数で大域的な最適解に収束し優れた探索性能を有していることが確認できた．一方で, Hybrid DEのCG法に切り換える切換え規定値は探索性能と収束性に影響を及ぼすことが考えられ，今後の課題として，探索性能と収束性を最大化する規定値の決定方法の確立が挙げられる．

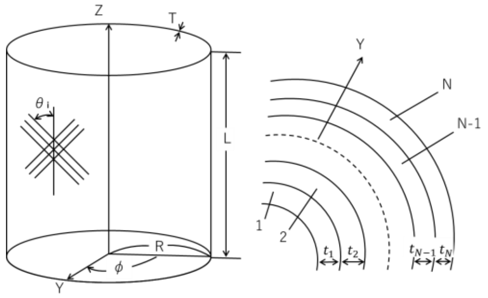

Fig.1 Laminated cylindrical shells.

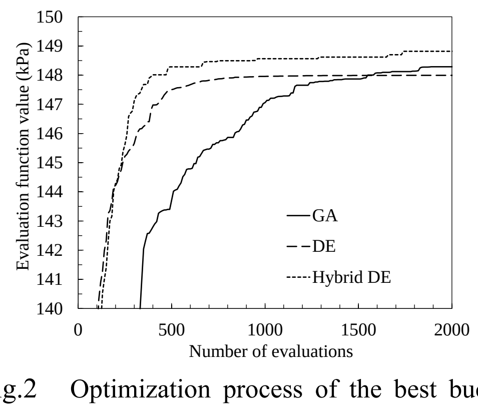

Fig.2 Optimization process of the best buckling strength value.

〈参考文献〉

1) R.Storn and K.Price, *Journal of Global Optimization*, **11** (1997), pp. 341-359.
2) 染宮聖人，平山紀夫，山浦和隆，荒井邦晴，設計工学，**55**, 1(2020) , pp. 61-72.
3) G.Sun, *Composites Science and Technology*, **36**, 3 (1989), 243.