

進化的アルゴリズムを用いた積層円筒殻の最適構造設計

日大生産工 染宮 聖人, 平山 紀夫

1. 緒言

繊維強化プラスチック (以下, FRP) 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, その多くがプリプレグシートを様々な角度で積層して成形された積層シェル構造である. このような積層シェル構造では, 構造設計の自由度が高いが, 積層シェル構造の薄肉化による座屈が生じやすいため, FEM等の数値計算手法を用いて, 座屈強度を最大化する最適座屈設計が必要となる. しかし, 積層シェル構造の設計変数は, 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, 積層シェル構造の最適座屈設計問題に対して, 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を提案する. 本報告では, 局所解への停留を回避する効率的な最適化手法である進化的アルゴリズムに勾配法を組み合わせた最適化手法を開発した. 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, 提案した最適化手法の探索能力と収束性について明らかにした.

2. 進化的アルゴリズム

粒子群最適法 (以下, PSO) や差分進化法 (以下, DE) などの進化アルゴリズム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最適化アルゴリズムで, 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最適化アルゴリズム

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PSOおよびDEに単峰性関数に対して収束性の良い勾配法(以下, CG法)を組み合わせたHybridアルゴリズムを開発した. このHybridアルゴリズムは, 進化的アルゴリズム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 進化的アルゴリズム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. 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.

$$f(l) = (l-1)\alpha \quad (l=1, \dots, \beta) \quad (1)$$

$$\gamma_j = f(\text{INT}(\beta x)) \quad (2)$$

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。

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 (5° 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.Sun¹⁾によって行われた殻長 $L=143.6\text{mm}$, 半径 $R=82.5\text{mm}$, 板厚 $T=0.5\text{mm}$ の Graphite/Epoxy 積層円筒 ($E_L = 146\text{GPa}$, $E_T = 10.8\text{GPa}$, $G_{LT} = 5.78\text{GPa}$, $\nu_{LT} = 0.29$) 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。

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

ここで, \bar{N}_r は円周方向膜力, n は座屈モードの周方向半波数である。

4. 最適化計算の結果

各アルゴリズムにおいて最も収束性が良かったケースの最大座屈強度値と各設計変数値をTable.1に示す。また, Table.1に示す各アルゴリズムの収束過程をFig.2に示す。Fig.2に示すように, 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と収束性が悪いことが確認できる。一方で, 連続型手法を用いたPSOとDEは, 計算回数が500回の時点で座屈強度146.7kPaと147.5kPaに到達しており, GAよりも収束性が高いことがわかる。さらに, CG法を組み合わせるHybridアルゴリズムは, CG法を組み合わせない進化的アルゴリズムよりも探索性能が向上している

ことが確認できる。特に, HybridアルゴリズムはCG法に切り替わるまで進化的アルゴリズムと同じ収束性能を示しているが, 途中でCG法に切り替えたことにより, 局所解である極値に収束し, 探索性能が向上したと推察される。

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, 進化的アルゴリズムにCG法を組み合わせる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, Hybrid アルゴリズムは, GAよりも収束性と探索性能が高いことが分かった。したがって, 進化的アルゴリズムにCG法を組み込むことで少ない計算回数で大域的な最適解に収束し, 優れた探索性能を示すことが確認された。

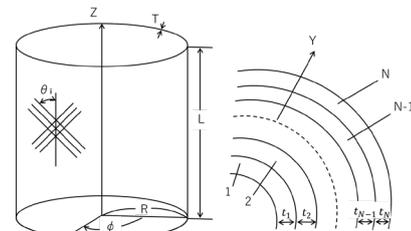


Fig.1 Laminated cylindrical shells.

Table 1 Optimum calculation results.

Optimum design variables	GA	PSO	DE	Hibrid PSO	Hibrid DE
Evaluation value [kPa]	148.64	147.97	148.09	148.61	148.85
t1,t2 [mm]	0.0582	0.0569	0.0574	0.0564	0.0545
t3,t4 [mm]	0.0339	0.0480	0.0347	0.0359	0.0311
t5,t6 [mm]	0.0509	0.0466	0.0351	0.0577	0.0614
t7,t8 [mm]	0.0382	0.0293	0.0539	0.0320	0.0341
t9,t10 [mm]	0.0388	0.0310	0.0289	0.0360	0.0382
t11,t12 [mm]	0.0301	0.0383	0.0401	0.0320	0.0307
Ply angle [°]	[±90/±25/±10/ ±35/±90/±90]	[±90/±30/±15/ ±25/±90/±90]	[±90/±30/±20/ ±20/±90/±90]	[±90/±35/±10/ ±30/±90/±90]	[±90/±40/±15/ ±25/±90/±90]

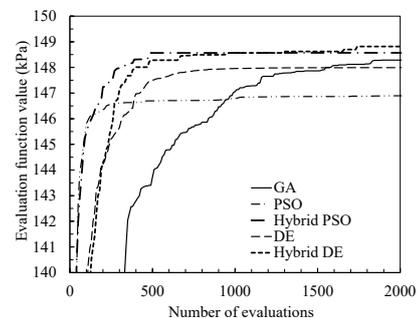


Fig.2 Optimization process of the best buckling strength value.

〈参考文献〉

- 1) G.Sun, *Composites Science and Technology*, **36**, 3 (1989), 243.