

研究論文

複合材補強パネルの複数積層構成最適化のための
拡張フラクタル分枝限定法関城 正登*¹, 轟 章*²

(2004年5月14日受付)

Extended Fractal Branch and Bound Method for Optimization of
Multiple Stacking Sequences of Stiffened Composite PanelMasato SEKISHIRO*¹ and Akira TODOROKI*²

(Received May 14, 2004)

A stiffened composite panel is usually adopted for a structural component of an aircraft to avoid buckling. It is well known that stacking sequence optimizations are indispensable for the laminated composite structures. For the stiffened composite panel, they usually have more than two stacking sequences because they consist of a panel skin laminate and stiffener laminates. This causes that a couple of stacking sequences should be optimized together in the structural optimization of the stiffened composite panel. Authors have proposed a new stacking sequence optimization method called fractal branch and bound method for optimizing a single laminate. In the present study, the fractal branch and bound method is extended to optimize the multiple stacking sequences. The extended method is applied to obtain two optimal stacking sequences for a maximization of buckling load of a hat-stiffened composite panel. The improved method successfully provides two optimal stacking sequences determinately in a short time.

1. 緒 言

一方向プリプレグシートを様々な方位に積層して作成する複合材料積層板は、比剛性、比強度が従来の金属材料と比較して優れており、近年航空宇宙機器などの構造材料として適用が拡大している。この積層板構造では、軽量化を目的とした構造要素の薄肉化のため、座屈を生じやすくなる。そのため実機複合材料構造では、ハット型やブレード型などの断面形状を有する補強板付きの複合材積層板が多用される。

積層板の特性を引き出すためには積層構成の最適化が不可欠である。Miki¹⁾やFukunagaら²⁾は積層パラメ

ータを用いた積層構成最適化手法を提案している。実際の複合材料構造の製作では、製造上の理由のみならず設計上必要な実験データの不足により、実現可能な繊維配向角は数種類に限定される。また、巨大マトリックス割れ防止などの理由から幾つかの拘束条件が存在する。これらの要求から、積層構成最適化問題は拘束条件のある組合せ最適化問題となる。複合材補強パネルは、パネルスキンと補強板の2つの積層板から構成されるため、独立な2つの積層構成を有するが、それらは座屈特性に関して相互に関連がある。そのため、最適設計では2つの積層構成の相互作用を考慮して、同時に最適化する必要がある。

従来、このような最適化問題では、確率論的な探索手法であるGAによって最適設計が行われてきた³⁾。しかし、GAでは積層数が増大すると正答率が低下し、改善には多数のGAパラメータのチューニングが必要となる。また、一般に拘束条件をGAに組み込むことは容易ではないため、著者らは改良手法を提案している⁴⁻⁶⁾。加えて、GAでの個体評価の繰り返しによる計算コストを削減するため、積層パラメータを変数とする

*¹ 東京工業大学大学院 (152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

Graduate Student, Department of Mechanical Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

*² 東京工業大学大学院理工学研究科助教授

Associate Professor, Department of Mechanical Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

目的関数の応答曲面を用いた手法を提案している^{7,8)}。

GAの他に著者らは、目的関数に2次多項式の応答曲面を利用する場合には、さらに低コストでかつ決定論的な積層構成最適化が実現可能であることを明らかにし、積層構成最適化手法、フラクタル分枝限定法を提案した^{9,10)}。本手法は設計空間が積層パラメータ空間上で作るフラクタル構造の発見に基づいており、組合せ最適化手法である分枝限定法¹¹⁾を用いている。これまでに、座屈荷重最大化問題¹²⁾やフラッタ限界速度最大化問題^{13,14)}などの拘束条件を含む最適化問題に対して適用され、有効性が示されている。しかし、適用範囲は単一の積層構成最適化問題に限定されていた。

そこで本研究では、複合材補強パネルの最適設計など、複数の積層を有する構造の複数積層構成最適化問題に適用するため、フラクタル分枝限定法の適用範囲を拡張した。ここで、最適化問題の目的関数には、複数の積層構成に対する積層パラメータを変数とした2次多項式応答曲面を用いる。拡張した提案手法を、ハット型補強パネルの座屈荷重最大化に対するパネルスキンと補強板の複数積層構成最適化問題に適用し、その有効性を検証した。

2. 最適化問題

本研究では複数積層構成最適化問題の例題として、Fig. 1に示すハット型補強パネルの座屈最大化問題を取り上げる。パネルスキンとハット型補強板で2つの積層構成を有しており、共に16層対称積層板であるとす。境界条件はBushnellら¹⁵⁾の解析と同様に設定する。負荷断面は固定端、荷重方向に平行な断面は自由端とする。加えて、荷重方向に平行な断面で x 軸周りの回転変位 $rot_x=0$ とする境界条件を課し、近似的に y 方

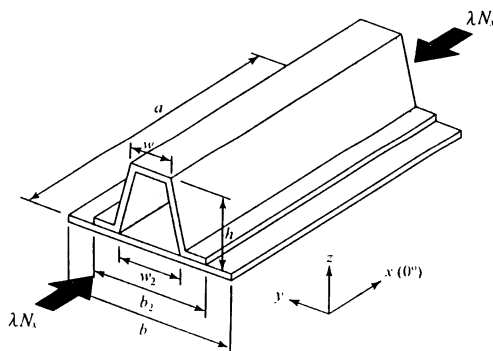


Fig. 1 Analysis model of a hat-stiffened panel.

向に同じモデルが無限に連なる構造をモデル化している。 x 軸方向に単軸圧縮荷重 (λN_x) を負荷し、ハット型補強パネルの寸法および材料定数は以下に示す通りである。材料定数にはT300/5208の値を用いた。

$$\begin{aligned} a &= 1 \text{ m}, \quad b = 0.25 \text{ m}, \quad b_2 = 0.16 \text{ m}, \quad w = 0.05 \text{ m}, \\ w_2 &= 0.11 \text{ m}, \quad h = 0.05 \text{ m}, \quad E_x = 181 \text{ GPa}, \\ E_y &= 10.3 \text{ GPa}, \quad G_{xy} = 7.17 \text{ GPa}, \quad \nu_{xy} = 0.28 \end{aligned}$$

また、各層厚さは0.125 mmである。

ハット型補強パネルの座屈荷重には、補強板の間隔や形状寸法、積層板の板厚が大きく影響する。そのため、構造の形状寸法や積層数は、最適化問題の重要な設計パラメータとなる。本研究では、積層構成最適化手法の構築と有効性の検討に主眼を置くため、問題を単純化する目的で、そのような連続変数の設計パラメータについては最適化対象とせず、積層構成のみを最適化することとする。そこで、寸法値については、Vitaliら¹⁶⁾によるハット型補強パネルの寸法最適設計の結果を参考にして、所与の値として上述の通り設定した。この設計例と本研究とでは荷重条件などが異なるため、この最適化結果の寸法を用いることは厳密には正しくない。ただし、この結果は本研究に対しても妥当な寸法であると考えられるため、参考値として用いることとした。また、2つの積層構成の積層数についても、得られた解の最適性の確認を容易にする目的で、共に同数の16層とした。合わせて、構造の破損モードが座屈破損となることも考慮している。

x 軸方向の圧縮荷重は参照荷重 $N_x=100 \text{ kN/m}$ との比率として表され、座屈荷重に達した時の比率が座屈荷重比 λ となる。座屈解析には汎用FEMソフトANSYSを用いた。要素は積層シェル要素を用い、要素数2,800、節点数8,858とした。

また、前述の製造上および設計上の理由により、利用可能な繊維配向角は $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ に限定し、さらに以下の拘束条件を適用する。

- (1) 同一繊維配向角の連続を4層以内とする(4層ルール)。
- (2) 45° 層と -45° 層の層数を一致させる(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)は引張-せん断カップリング、曲げ-ねじりカップリングの抑制が目的である。

以上の条件の下、ハット型補強パネルの座屈荷重の最大化を目的とし、パネルスキンとハット型補強板、2つの最適積層構成を同時に求めることが取り扱う複数積層

構成最適化問題である。

3. 積層パラメータ

対称積層板の面内/面外剛性は積層パラメータを用いて記述される。本来、1つの積層構成について面内/面外積層パラメータ V_i^* , W_i^* はそれぞれ $i=1\sim 4$ まで存在するが、本研究では前述の通り積層構成の拘束条件を適用するため、 V_3^* , V_4^* , W_3^* , W_4^* はそれぞれ0、あるいは小さな値になる。そのため、積層パラメータ V_1^* , V_2^* , W_1^* , W_2^* の4個のみを用いる。

積層数 $2N$ の対称積層板における面内/面外積層パラメータは次式で定義される。

$$V = \begin{bmatrix} V_1^* \\ V_2^* \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N (a_{k-1}^V - a_k^V) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \end{bmatrix}$$

$$a_k^V = \frac{N-k}{N} \tag{1}$$

$$W = \begin{bmatrix} W_1^* \\ W_2^* \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N (a_{k-1}^W - a_k^W) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \end{bmatrix}$$

$$a_k^W = \left(\frac{N-k}{N}\right)^3 \tag{2}$$

ここで、 θ_k を外側から k 番目 ($k=1\sim N$) の層の繊維配向角とする。

複合材補強パネルの最適化問題の場合、2つの積層構成のそれぞれに対して積層パラメータを考慮するので、パネルスキンの積層パラメータ V_{1p}^* , V_{2p}^* , W_{1p}^* , W_{2p}^* , 補強板の積層パラメータ V_{1s}^* , V_{2s}^* , W_{1s}^* , W_{2s}^* の計8個を用いることとなる。

4. 応答曲面法

応答曲面法は M 個の説明変数 x_i ($i=1\sim M$) と応答 y の関係式が明らかでない場合に、関係式を実験的に近似する手法であり、2次多項式応答曲面は次式となる。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^M \beta_i x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j>i}^M \beta_{ij} x_i x_j \tag{3}$$

ここで β は未知係数であり、最小二乗法により推定される。本研究で目的関数を応答曲面近似する場合には、説明変数 x_i は積層パラメータ V_i^* , W_i^* であり ($x_1 = V_{1p}^*$, $x_2 = V_{2p}^*$, $x_3 = W_{1p}^*$, $x_4 = W_{2p}^*$, $x_5 = V_{1s}^*$, $x_6 = V_{2s}^*$, $x_7 = W_{1s}^*$, $x_8 = W_{2s}^*$)、応答 y は目的関数値 ($y = \lambda$) である。

最小二乗法で応答曲面を得るためには、 x_i とそれに対応する y のデータを、未知係数の個数以上の数だけ、解析もしくは実験によって得ておく必要がある。限られた実験点数で、得られる応答曲面の推定精度を向上させ

るためには、その実験点を適切に選ぶ必要がある。そこで本研究では、実験計画をD最適基準で実施し、実現可能な積層構成の集合から適切な実験点を選択する。

5. フラクタル分枝限定法

フラクタル分枝限定法は、目的関数の応答曲面を用いて、拘束条件を満たした最適積層構成を決定論的に求める積層構成最適化手法である^{9,10)}。前述の通り、フラクタル分枝限定法による積層構成最適化はその適用範囲が単一の積層構成だけに限定されていた。

単一積層構成最適化問題の目的関数の応答曲面式 f が式 (3) の形で得られたとする。説明変数は単一積層構成の積層パラメータ V, W である。

$$f = f(V, W) \tag{4}$$

この時、最適積層構成とは、この応答曲面式 f の応答が最大となる実現可能な積層構成である。探索対象の積層構成は、外側層から順に繊維配向角を決定することで、Fig. 2 のような木構造となる。ここで、積層パラメータの式 (1), (2) 中の余弦は、 θ_k が $+45^\circ$ と -45° で同じ値を取るため、木構造ではまとめて 45° と表記している。フラクタル分枝限定法は、分枝限定法を用いて最適積層構成を探索する。分枝限定法では、探索中に木構造の枝刈りを行うために、効率的な評価関数が必要となる。本手法の評価関数は、積層パラメータのフラクタル性に基いて構築される。

5.1 積層パラメータのフラクタル性

積層パラメータの式 (1), (2) の三角関数のベクトルは、拘束条件より以下の3種に限定される。

$$0^\circ \pm 45^\circ \quad 90^\circ$$

$$\begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

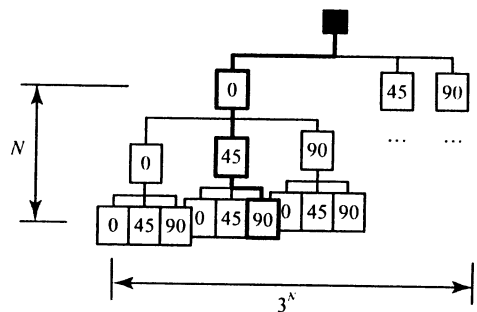


Fig. 2 Tree structure of a stacking sequence.

また、式 (1), (2) のベクトルの係数は全て正数であり、また、係数の総和は明らかに次式を満足する。

$$\sum_{k=1}^N (a_{k-1}^V - a_k^V) = 1, \quad \sum_{k=1}^N (a_{k-1}^W - a_k^W) = 1 \quad (6)$$

これにより、全積層パラメータの値域は、式 (5) の3つのベクトルを頂点とする三角形領域に限定される。

次に、積層構成 $[\theta_1/\theta_2/\dots/\theta_d/*/*/\dots/*]_S$ について考える。これは、外側から d 層目までが決定済みで、それより内側層は未定の積層構成の枝を意味する。この時に、この積層構成の枝が存在しえる積層パラメータの値域を求める。この枝の積層パラメータは式 (1), (2) から次式で表される。

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + a_d^V \mathbf{V}', \quad \mathbf{W} = \mathbf{W}_0 + a_d^W \mathbf{W}' \quad (7)$$

ここで、

$$\mathbf{V}_0 = \sum_{k=1}^d (a_{k-1}^V - a_k^V) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}_0 = \sum_{k=1}^d (a_{k-1}^W - a_k^W) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{V}' = \frac{1}{a_d^V} \sum_{k=d+1}^N (a_{k-1}^V - a_k^V) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \end{bmatrix}$$

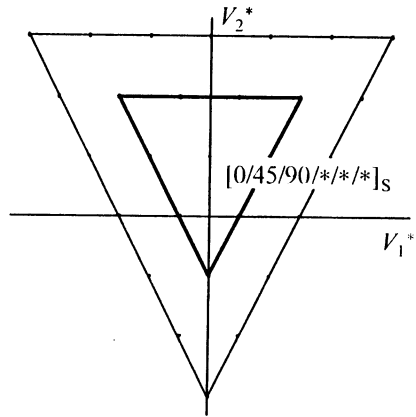
$$\mathbf{W}' = \frac{1}{a_d^W} \sum_{k=d+1}^N (a_{k-1}^W - a_k^W) \begin{bmatrix} \cos 2\theta_k \\ \cos 4\theta_k \end{bmatrix} \quad (9)$$

式 (8) は決定済みの層のみに関係するため、一意に求められる。一方、未決定の層に対応する式 (9) について考えると、各ベクトルの係数は正数であり総和は1となることから、式 (5), (6) との類推で、 \mathbf{V}' , \mathbf{W}' は同様に式 (5) の3つのベクトルを頂点とする三角形領域に限定されることが分かる。最後に、式 (7) の \mathbf{V} , \mathbf{W} の係数 a_d^V , a_d^W は定義より1よりも小さな正値となる。よって、積層構成の枝 $[\theta_1/\theta_2/\dots/\theta_d/*/*/\dots/*]_S$ の取り得る積層パラメータ \mathbf{V} , \mathbf{W} の値は、中心が \mathbf{V}_0 , \mathbf{W}_0 移動し、 a_d^V , a_d^W だけ縮小した三角形領域に含まれることとなる。

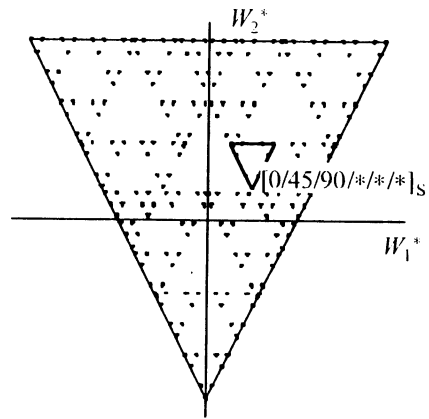
一般に係数 a_d^V , a_d^W は d が増えるに伴い1から0に漸減するため、層番号が内側に進むほど三角形領域は自己相似な三角形に縮小する。よって、実現可能な全積層構成は積層パラメータ空間上で Fig. 3 に示すようなフラクタル図形を描く。Fig. 3 は12層対称積層構成の場合のフラクタル図形である。図中に積層構成の枝 $[0/45/90/*/*/*]_S$ (Fig. 2中、太枠で示した枝) に対応する縮小した三角形領域を示す。

5.2 評価関数の導入

前節で述べた積層パラメータのフラクタル性から、本



a) In-plane lamination parameter coordinates



b) Out-of-plane lamination parameter coordinates

Fig. 3 Fractal pattern drawn by plotting all feasible laminates of 12 plies ($N=6$).

手法の評価関数 g を構築できる。前述の積層構成の枝 $[\theta_1/\theta_2/\dots/\theta_d/*/*/\dots/*]_S$ での応答曲面の応答は、目的関数の応答曲面式 f に式 (7) を代入して、

$$f = f(\mathbf{V}, \mathbf{W}) = f(\mathbf{V}_0 + a_d^V \mathbf{V}', \mathbf{W}_0 + a_d^W \mathbf{W}') = f_0 + f_V + f_W + f_{V-W} \quad (10)$$

ただし、 f_0 : 定数項, f_V : \mathbf{V}' の2次多項式, f_W : \mathbf{W}' の2次多項式, f_{V-W} : \mathbf{V}' と \mathbf{W}' の交互作用項で整理する¹⁰⁾。

この時、評価関数 g を次式で定義する。

$$g = f_0 + \max(f_V) + \max(f_W) + \max(f_{V-W}) \quad (11)$$

ここで、 g の計算では \mathbf{V}' と \mathbf{W}' を独立な三角形領域内

の連続変数とみなす。

実際の f では積層パラメータ V, W は相互影響のある離散値であることから、恒等的に $g \geq f$ を満たす。そのため、評価関数 g は常に安全側（必ず実際の存在しえる積層構成の数値より大きく、正解を逃すことがない）の見積もりを与える。 f_v, f_w は単純な2次多項式であるため最大値は容易に求まる。また、 $f_{v,w}$ の最大値は必ず三角形領域の頂点で得られる。よって、式(11)の g は容易に計算可能な評価関数である。

5.3 分枝限定法

フラクタル分枝限定法による解探索は、Fig. 2の木構造を枝先に向かって枝分かれさせること、つまり、積層構成を外側から順に決定することによって実施される(分枝操作)。その過程、各枝において、それまでに得られた暫定解よりも良い実行可能解が枝先に存在するか否かを前節の評価関数 g を用いて安全側に評価し、存在しない場合にはその枝を探索から削除する(限定操作)。例えば、最外層のみが決定済みの積層構成の枝 $[0/*/\dots/*]_s$ の評価を行った時、最外層が 90° の積層構成の枝 $[90/*/\dots/*]_s$ の取り得る積層パラメータの三角形領域において、評価関数 g の値が暫定最大値に劣って

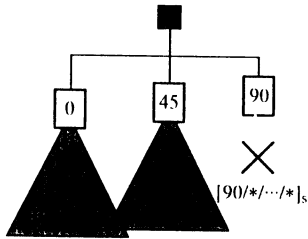


Fig. 4 Pruning process for stacking sequence optimization.

いたとすれば、枝刈りを実施しこれ以降この枝の枝先の探索は行わない (Fig. 4)。同様にして、探索中各枝において g による評価を行い、不要な枝を枝刈りすることで、探索時間を大幅に削減可能となる。

以上の方法により、分枝操作と限定操作を全ての枝先まで実施することで、フラクタル分枝限定法では決定論的に最適解を得る。

6. 複数積層構成最適化手法

複数積層構成最適化問題の目的関数の応答曲面式 f は2つの積層構成に対する積層パラメータを変数として、次式で表される。

$$f = f(V_p, W_p, V_s, W_s) \quad (12)$$

ここで、積層パラメータの添え字 p, s はそれぞれパネル (Panel) と補強板 (Stiffener) を表す。

式(12)の形の応答曲面式を作成すれば、複数積層構成の木構造、評価関数 g のそれぞれについて、単一積層構成の拡張を考えることで、フラクタル分枝限定法を拡張させ、複数積層構成最適化問題に適用することが可能となる。

6.1 複数積層構成の木構造

最初に、複数積層構成における木構造を構築する。パネルスキンと補強板の木構造を仮に分離し、Fig. 5のような2つの木構造を考える。積層板では、一般に外側の層ほど面外剛性への影響が大きいため、構造の座屈荷重に対しても、積層構成のうち外側層ほど影響が大きくなる。分枝限定法による探索で効果的な枝刈りを行うには、目的関数に対して影響の強い因子から順に決定することが望ましい。つまり、複数積層構成における探索では、2つの積層構成でできるだけ外側層、つまり2つの木構造のできるだけ浅い側から決定すべきであ

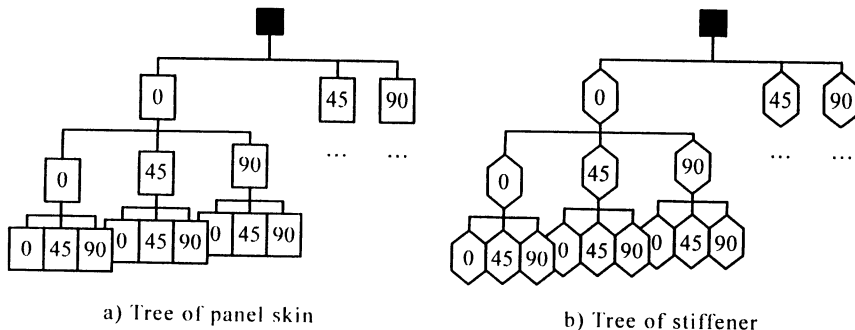


Fig. 5 Tree structures of each stacking sequence.

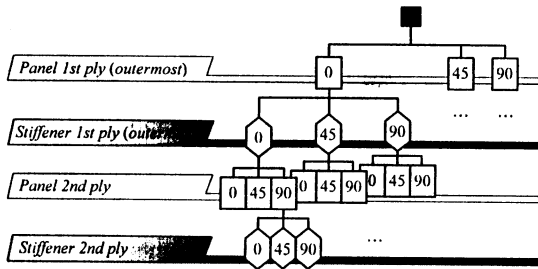


Fig. 6 Tree structure of multiple stacking sequences.

る。そこで、積極的に浅い側から決定するため、複数積層構成の木構造は Fig. 6 のようなパネルスキンと補強板が外側層から交互に枝分かれしたものを考えることとする。

6.2 複数積層構成問題における評価関数

次に、評価関数 g を導入する。ある節点で枝評価を行う時、探索が以下のような積層構成の枝に達していると考える。

$$\begin{aligned} \text{Panel} &: [\theta_{1p}/\theta_{2p}/\dots/\theta_{dp}/*/\dots/*]_s \\ \text{Stiffener} &: [\theta_{1s}/\theta_{2s}/\dots/\theta_{ds}/*/\dots/*]_s \end{aligned} \quad (13)$$

この枝に対応する積層パラメータは、式 (7) からそれぞれの積層構成に対して、

$$V_p = V_{op} + a_{dp}^v V_p, \quad W_p = W_{op} + a_{dp}^w W_p \quad (14)$$

$$V_s = V_{os} + a_{ds}^v V_s, \quad W_s = W_{os} + a_{ds}^w W_s \quad (15)$$

式 (14), (15) を目的関数の応答曲面式 (12) に代入して、

$$\begin{aligned} f &= f(V_p, W_p, V_s, W_s) \\ &= f(V_{op} + a_{dp}^v V_p, W_{op} + a_{dp}^w W_p, V_{os} + a_{ds}^v V_s, W_{os} + a_{ds}^w W_s) \\ &= f_0 + f_{v'p} + f_{w'p} + f_{v's} + f_{w's} + f_{int} \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、 f_0 : 定数項、 $f_{v'p}$, $f_{w'p}$, $f_{v's}$, $f_{w's}$: 各積層パラメータの2次多項式、 f_{int} : 交互作用項、である。よって、複数積層構成の評価関数 g は、式 (11) の拡張として次式で定義する。

$$\begin{aligned} g &= f_0 + \max(f_{v'p}) + \max(f_{w'p}) + \max(f_{v's}) \\ &\quad + \max(f_{w's}) + \max(f_{int}) \end{aligned} \quad (17)$$

上式の各項は、式 (11) の場合と同様に容易に求められる。

7. 計算結果と考察

提案する複数積層構成最適化手法を、2章に示したハット型補強パネルの座屈荷重最大化問題に適用する。

最適化計算ではまず応答曲面の作成を行う。応答曲面の未知係数の数は45個であり、実験点の数は経験的に未知係数の2倍程度とされているので90点の実験データを得ることとする。実験計画により、実行可能な積層構成の集合から90通りの実験点となる積層構成を選択する。選択した実験点と、積層パラメータ空間の原点 ($V=W=0$) とで FEM 解析を実施し、各点での座屈荷重比 λ を求める。ここで、積層パラメータ空間の原点は、積層パラメータ空間中央部でのバイアス減少のために実験点に追加しており、擬似等方積層構成に対応する。最大値付近での近似度を上げるためと中央でのバイアス減少のために、得られた91点のデータのうち、FEM 解析値の上位2点、原点を2倍回帰に追加した、計97点から、座屈荷重比 λ を応答として最小二乗法で応答曲面の未知係数を求める。上位点を複数回帰に追加することで、応答曲面の回帰精度を最適値付近で向上させることができる。

得られた応答曲面を以下に示す。ここで、 $y, x_1 \sim x_8$ は4章での置き換えに従う。

$$\begin{aligned} y &= 4.451 - 1.987x_1 - 1.060x_2 - 0.6633x_4 + 2.342x_5 \\ &\quad + 0.4612x_6 - 0.2378x_8 + 2.810x_1^2 + 0.5904x_1x_2 \\ &\quad - 2.314x_1x_3 - 1.163x_1x_5 + 0.3706x_1x_7 + 0.4702x_1x_8 \\ &\quad - 0.4692x_2x_3 + 0.5032x_2x_4 + 0.4337x_3x_4 \\ &\quad - 0.4725x_4^2 + 0.3534x_4x_8 - 1.434x_5x_6 \\ &\quad - 1.196x_6x_7 + 0.5097x_6x_7 - 0.9049x_6x_8 \\ &\quad - 0.7577x_7x_8 + 0.4271x_8^2 \end{aligned} \quad (18)$$

この応答曲面の自由度調整済み決定係数 $R_{adj}^2 = 0.903$ であり、近似は良好である。

得られた応答曲面を用いて最適積層構成の探索を行う。得られた積層構成を Table 1 に示す。表には応答曲面式の応答と併せて、FEM 解析を行って得られた真の目的関数値も示した。2つの誤差は2.3%と小さく、

Table 1 Optimal stacking sequences using response surface.

Stacking sequences		RS val.	FEM val.
Panel skin	$[\pm 45/45/90_2/-45/90_2]_s$	8.123	8.312
Stiffener	$[\pm 45/45/0_2/-45/0_2]_s$		

Table 2 Optimal stacking sequences with sufficient optimality.

Stacking sequences		FEM val.
Panel skin	$[(\pm 45)_4]_s$	8.816
Stiffener	$[(\pm 45)_2/0/90/0_2]_s$	



Fig. 7 Buckling mode shape of optimum.

Table 3 Buckling load factor of quasi-isotropic laminates.

Stacking sequences		FEM val.
Panel skin	$[45/0/90/-45/90/-45/45/0]_s$	4.253
Stiffener	$[45/0/90/-45/90/-45/45/0]_s$	

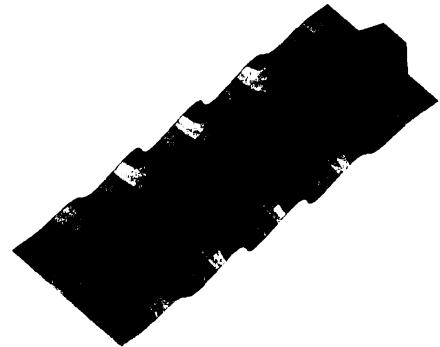


Fig. 8 Buckling mode shape of quasi-isotropic laminates.

作成した応答曲面が最大値近傍で良好な精度を有することが確認できる。

提案手法は決定論的な解法であるため、応答曲面から得られた計算結果 (Table 1) が真の最適解でないとするれば、その誤差は応答曲面の推定誤差から生じている。そのため、より良い解を得るためには、最大値付近での FEM 解析の実験点を増やして応答曲面を作成し直せばよい。追加 FEM 解析を幾つかの実験点において実施し、最適性判定手法¹⁷⁾と修正応答曲面法¹⁸⁾を用いることにより、許容誤差 0.5% で最適性の十分な解が得られる。得られた積層構成を Table 2 に示す。この解を得るために実施した追加 FEM 解析の回数は 100 回程度であり、Table 1 の解との誤差は 5.7% である。よって、最初の応答曲面による最適化でも、実用上十分な精度の最適解が得られたことが確認された。

参考のため、Table 2 の解での構造の座屈モード形状を Fig. 7 に示す。また、擬似等方積層板の場合の座屈荷重、座屈モード形状をそれぞれ Table 3, Fig. 8 に示す。擬似等方積層板ではパネル部だけの局所座屈を生じているが、最適な積層構成の構造は全体座屈を生じており、またその座屈荷重比も 90% 程度向上している。

8. 結 言

本研究では、複合材補強パネルの最適設計など、複数

積層構成最適化問題に適用可能な手法を構築するため、複数積層構成における木構造と評価関数を明らかにし、従来単一積層構成の場合に限られていたフラクタル分枝限定法の適用範囲を拡張した。次に、拡張した提案手法を、ハット型補強パネルの座屈荷重最大化に対するパネルスキンと補強板の複数積層構成最適化問題に適用し、その有効性を検証した。また、実用上 5% 程度の誤差が許容される場合には 1 回の全体応答曲面作成で十分であることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) M. Miki : ASTM STP, 846 (1985), pp. 387-400.
- 2) H. Fukunaga & T.W. Chou : *J. Composite Mater.*, 22 (1998), 1156-1169.
- 3) S. Nagendra, D. Jestin, Z. Gürdal, R.T. Haftka & L.T. Watson : *Computers & Structures*, 58, 3 (1996), 543-555.
- 4) A. Todoroki & R.T. Haftka : *Composites Part B*, 29B (1998), 277-285.
- 5) 轟 章, 笹井正史 : 機論 (A), 65, 631 (1999), 614-620.
- 6) 轟 章, R.T. Haftka : 機論 (A), 64, 621 (1998), 1138-1145.
- 7) 轟 章, 石川哲也 : 機論 (A), 66, 645 (2000), 978-985.
- 8) 轟 章, 笹井正史 : 日本複合材料学会誌, 26, 5

- (2000), 187-197.
- 9) 寺田雄一郎, 轟 章, 島村佳伸: 機論 (A), 66, 644 (2000), 714-720.
 - 10) A. Todoroki & Y. Terada: *AIAA J.*, 42, 1 (2004), 141-148.
 - 11) R.T. Haftka & J.L. Walsh: *AIAA J.*, 30, 3 (1992), 814-819.
 - 12) 轟 章, 寺田雄一郎: 機論 (A), 69, 679 (2003), 552-557.
 - 13) 轟 章, 平野義鎮: 機論 (A), 69, 678 (2003), 239-244.
 - 14) 平野義鎮: 日本複合材料学会誌, 29, 3 (2003), 98-105.
 - 15) D. Bushnell & W.D. Bushnell: *Computers & Structures*, 55, 5 (1995), 819-856.
 - 16) R. Vitali, R.T. Haftka & B.V. Sankar: *J. Aircraft*, 39, 1 (2002), 158-166.
 - 17) A. Todoroki & M. Sasai: *Adv. Composite Mater.*, 11, 3 (2003), 299-318.
 - 18) A. Todoroki, K. Suenaga & Y. Shimamura: *Adv. Composite Mater.*, 12, 1 (2003), 35-55.