



Title	実験計画法を用いた複合材料構造の多目的最適化
Author(s)	上甲, 康之; 本田, 真也; 成田, 吉弘
Citation	日本機械学会論文集. C編, 76(765), 1062-1067
Issue Date	2010-05-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/52202
Rights	© 2010 日本機械学会
Rights(URL)	https://www.jsme.or.jp/
Type	article (author version)
File Information	NKRC76-765_1062-1067.pdf



[Instructions for use](#)

実験計画法を用いた複合材料構造の多目的最適化

上甲康之^{*1}, 本田真也^{*2}, 成田吉弘^{*2}

Multi-objective Optimum Design of Composite Structures by Using the Design of Experiments

Yasuyuki JOKO, Shinya HONDA and Yoshihiro NARITA^{*3}

^{*3} Division of Human Mechanical Systems and Design,
Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
N13W8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

The fiber reinforced plastics are widely used in engineering structures because they have excellent features of high specific strength and stiffness ratio. These advanced composites are fabricated typically by stacking orthotropic layers, each of which is composed of reinforcing fibers and matrix material. In this work, an optimum design approach is proposed to deal with multi-objective design for buckling behaviors of laminated composite plates. The approach consists of two parts: the first part is to calculate the influence factors and determine the estimated model of each objective function by using design of experiments, and the second part is to explore Pareto sets from the estimated model. In numerical examples, the fiber orientation angles of symmetrically laminated plate are optimized for maximizing the buckling parameters simultaneously for two different compression loadings. It is shown that the proposed approach is quite effective in obtaining Pareto sets with reduced calculation cost. Moreover, the influence analysis found that outer layers are more effective than the inner layers, and the interactions between adjacent layers are also important on buckling behavior of the laminated plates.

Key Words : Optimum Design, Laminated Construction, Buckling, Composite Material, Design of Experiments, Analysis of Variance, Multi-objective Design, Response Surface

1. 緒言

高分子系繊維強化複合材料(Fiber Reinforced Plastics: FRP)は、高い比強度と比剛性を有しているため自動車や航空機等の軽量化材料として活用されている。FRP積層板は、炭素繊維などの強化長繊維と母材から構成される薄い異方性ラミナを積層して作られる。ラミナの配向角度により積層板全体の力学特性が変化することから、振動特性など⁽¹⁾⁽³⁾の目的に合わせた最適な積層構成を設計する必要がある。

積層構成の最適設計は、離散化された繊維配向角を直接に設計変数とすると組合せ最適化問題になり、計算規模が積層数に伴い急激に増大する。また、板の剛性は繊維配向角に対して非線形性と多峰性の特徴を示すことから、その最適設計法にはこれまで積層パラメータ⁽⁴⁾⁽⁵⁾が主に使われてきた。積層パラメータは同一材料であれ

ば積層数に依存しない媒介変数であり、板の剛性は積層パラメータに対して線形性を示す。最適な積層パラメータ値を求める手法としては、勾配法を用いる方法⁽⁶⁾⁽⁷⁾、遺伝的アルゴリズム(以下 GA)と応答曲面法を用いる方法⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾などが提案されている。最適な積層パラメータ値から具体的な積層構成を算出する際には、幾何学的考察に基づく積層構成決定法⁽¹¹⁾や応答曲面を応用したフラクタル分枝限定法⁽¹²⁾が提案されている。特に実験計画法⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾による応答曲面法は効率的な解析方法として、積層パラメータやGAと合わせて用いられる。しかし、過去の報告はいずれにおいても、 0° , 90° , $\pm 45^\circ$ などの限定された繊維配向角を扱っており、詳細な積層構成の決定に重点を置いていない。また、これらは単一の力学特性を目的関数としており、トレードオフの関係にある複数の力学特性を同時に向上する問題は考えていない。自由度の高い設計法を確立するには、複数の設計上の要求に対して、最適な積層構成を詳細に決定する多目的設計の方法が必要である。

本研究ではFRP積層板の座屈特性を複数個同時に最適化するため、実験計画法による多目的最適化手法を提案する。本手法は、実験計画法を用いて各層の繊維配向

*原稿受付 0000年00月00日

^{*1} 学生員, 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

^{*2} 正員, 北海道大学大学院工学研究科.

E-mail: ynarita@eng.hokudai.ac.jp

角が板の座屈特性に及ぼす影響度を定量化し、さらに座屈特性の推定式を目的関数ごとに作成する。その後、推定式上で全実行可能解を算出し、逐一比較することでプレート最適解集合⁽⁶⁾を直接的に求める。その際、解精度の向上を図るために構造解析へのフィードバックを行う。このように、本手法は実験計画法による影響度解析と独自の多目的最適化手法を組み合わせた統合的な最適設計法であり、計算コストの面で高い効果を有するといえる。本手法の有用性を確認するために、計算例として2つの異なる圧縮比の下における積層板の臨界座屈荷重値を考え、全探索結果との比較を行う。なお、推定式には Chebyshev の直交多項式⁽⁴⁾、座屈荷重値解析には計算時間に有利な Ritz 法⁽⁷⁾を用いる。

2. 解析方法

2・1 Ritz 法による座屈荷重値解析 図1に、各層に一方方向強化繊維を有する異方性ラミナが、板の中央面に対して対称に積層された長方形板を示す。その板寸法を $a \times b \times h$ (h : 板厚) とし、各層の弾性定数は、縦弾性係数 E_L 、 E_T 、せん断弾性係数 G_{LT} 、ポアソン比 ν_{LT} 、 ν_{TL} (L : 繊維配向方向、 T : 繊維と直交方向) とする。

本研究では対称積層板を考え、その積層数を $2K$ とする。板の座屈荷重値は以下に表す座屈直後のつりあい方程式の固有値として求められる。

$$\begin{aligned} & D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \\ & + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ & = N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし w は積層板のたわみ、 D_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) は積層板の曲げ剛性であり、各層の弾性係数から決まる。 N_x 、 N_y は各方向の垂直合応力、 N_{xy} はせん断合応力である。

一般的な積層と境界条件に対して、式(1)の解析解を導くことは困難であるため、Ritz法を用いた座屈荷重値

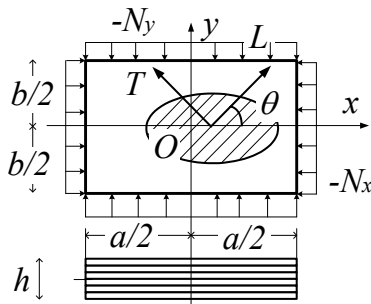


Fig. 1 Symmetrically laminated rectangular plate under biaxial compression

解析を行う。Ritz法は、FEM解析と比べて計算コストが低く、繰返し計算が必要な最適化問題に適している。

まず積層板内に貯えられる全エネルギー V

$$V = V_s + V_L \quad (2)$$

を求める。ここで V_s は曲げによるひずみエネルギー

$$V_s = \frac{1}{2} \iint_A \{\kappa_1\}^T \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \{\kappa_1\} dA \quad (3)$$

ただし、 $\{\kappa_1\}$ は曲率ベクトル

$$\{\kappa_1\} = \left\{ -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right\}^T \quad (4)$$

である。 V_L は面内荷重による仕事

$$V_L = \frac{1}{2} \iint_A \{\kappa_2\}^T \begin{bmatrix} N_x & N_{xy} \\ N_{xy} & N_y \end{bmatrix} \{\kappa_2\} dA \quad (5)$$

ただし $\{\kappa_2\}$ は勾配ベクトル

$$\{\kappa_2\} = \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \right\}^T \quad (6)$$

である。ここで座屈モードを

$$w(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{mn} X_m(x) Y_n(y) \quad (7)$$

で表す。ここで A_{mn} は未定係数、 $X_m(x)$ 、 $Y_n(y)$ は変位関数であり、平板の4辺それぞれで自由、単純支持、固定の任意の境界条件を許す境界条件インデックスを持った「べき関数」である。式(7)を式(4)、(6)に代入して式(3)、(5)の積分結果を用いて、平板に貯えられる全エネルギーを算出し、その極値

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial A_{mn}} &= \frac{\partial}{\partial A_{mn}} (V_s + V_L) = 0 \\ (m &= 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1) \end{aligned} \quad (8)$$

を求めることで一軸及び二軸圧縮における臨界座屈荷重値を算出し、それを無次元化して以下のような座屈パラメータ λ として表す。

$$\lambda = \frac{N_x a^2}{D_0} \quad (9)$$

ここで $D_0 = E_r h^3 / 12(1 - \nu_{LT} \nu_{TL})$ は基準剛性であり、二軸圧縮比は $\beta (= N_y / N_x)$ を用いて表し、せん断荷重 N_{xy} は考慮しないものとする。座屈特性最適化問題において、座屈パラメータ λ は目的関数であり、最大化することで最適積層構成を求める。

2・2 実験計画法 本研究の実験計画法では、因子を各層の繊維配向角、特性値を座屈パラメータ λ とし、因子の組合せに対する特性値の応答から、各層の繊維配向角が座屈パラメータ λ に与える影響度の解析を行う。

さらに、設計変数を繊維配向角、目的関数を座屈パラメータ λ とする推定式を作成する。なお、特性値の計算には2.1節のRitz法による座屈荷重値解析を用いる。積層板の剛性は繊維配向角に関して多峰性を持つが、本最適化手法では実行可能解全ての推定値から探索を行うため、多峰性による局所解問題を回避することが可能となる。本節では実験計画法の基本的な手順について述べる。

解析データは各因子の水準値の組合せに対する特性値の応答であり、本研究では多元配置法⁽¹³⁾を用いて作成する。多元配置法は各因子の水準の全組合せから解析データを作成する方法であり、水準数や因子数、因子間の交互作用を任意に設定することが可能である。因子の水準設定の段階では、最適な積層構成を予測できないことから、いずれの因子についても水準範囲を最大とする。表1は、例題に用いる対称8層積層板 $[\theta_1/\theta_2/\theta_3/\theta_4]_s$ についての因子を示す。多元配置法で得られた $5^4=625$ 通りの組合せに対して、特性値である座屈荷重値をRitz法により算出する。

分散分析⁽¹³⁾は前項で得た解析データを用いて、因子が特性値に与える影響を検定・定量化するために適用される。本研究では因子の変動を次数成分に直交分解することで詳細な分析を行う。因子の効果は F 検定により5%、1%の危険率でその有意性を判断する。有意と判断された因子・次数成分は、その純変動が全変動に占める割合を「寄与率」として算出し、因子の影響度を定量化する。

2.3 推定式の作成 本研究ではChebyshevの直交多項式⁽¹⁴⁾を適用して特性値の推定式を作成する。この直交多項式は各次数項が互いに独立した回帰式であり、係数の大きさにより低次項が優先となる。また、 F 検定において有意であると判断された因子のみを設計変数とするため、非常に低い計算コストで計算が可能である。ここで、設計変数 x_i が m 個存在するとき推定式は

$$Y = Y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m) \quad (10)$$

と表すことができ、各次数項は次式のようになる。

$$Y = \sum_{i=1}^m y_i - (m-1)b_0 \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

$$y_i = b_0 + b_{1i}(x_i - \bar{x}_i) + \dots + b_{ni}\xi_n(x_i) + \dots$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_0(x_i) = 1 \quad (n=0) \\ \xi_1(x_i) = x_i - \bar{x}_i \quad (n=1) \\ \xi_n(x_i) = \frac{1}{4\{4(n-1)^2 - 1\}} \left[\xi_{n-1}(x_i)\xi_1(x_i) - (n-1)^2 \{a_i^2 - (n-1)^2\} h_i^2 \xi_{n-2}(x_i) \right] \\ \quad (n=2, 3, 4, \dots) \end{array} \right. \quad (11)$$

Table 1 Level values of each factor

Factor	Level				
	1	2	3	4	5
θ_1 [°]	-90	-45	0	45	90
θ_2 [°]	-90	-45	0	45	90
θ_3 [°]	-90	-45	0	45	90
θ_4 [°]	-90	-45	0	45	90

ここで \bar{x}_i は水準平均値、 a_i は水準数、 h は水準間隔、 n は次数である。係数 b_0 、 b_m は、推定式の持つ直交関係より

$$\left. \begin{array}{l} b_0 = \frac{1}{(a_i)^m} \sum_{i=1}^m \sum_{v=1}^{a_i} T_{iv} \\ b_m = \frac{\sum_{v=1}^{a_i} \{\xi_n(x_{iv})\} T_{iv}}{r \sum_{v=1}^{a_i} \{\xi_n(x_{iv})\}^2} \end{array} \right\} (v=1, 2, 3, \dots, a_i) \quad (12)$$

と表せる。ここで、 $\xi_i(x_{iv})$ の x_{iv} は変数 x_i の各水準値、 T_{iv} は各水準値における特性値の和を示す。

例題で用いる推定式は、交互作用を考慮すると各設計変数に関する4次多項式の積和で表されるため、その次数は8となる。

2.4 多目的最適化

一般的に、 p 個の目的関数 $F_k(x)$ ($k=1, 2, \dots, p$)を同時に最大化する多目的最適化問題は

$$\text{Objective : Maximize } \{F_1(x), \dots, F_p(x)\} \quad (13)$$

$$(x \in X)$$

と定式化できる。ただし、 X を実行可能解の集合とする。式(13)のような多目的最適化問題において目的関数同士にトレードオフの関係が成り立つ場合、全ての目的関数を同時に最適化する解は存在しない。

本研究では、複数の目的関数の重み付き線形和を考察するのではなく、合理的な多目的解として、以下で定義されるパレート最適解を考える。

ある設計変数 $x_\alpha, x_\beta \in X$ に対して

$$F_k(x_\alpha) \geq F_k(x_\beta) \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (14)$$

を満たすとき、「 x_α は x_β に優越する」あるいは「 x_β は x_α の劣解」という。逆に、式(14)を満たす x_α が存在しない場合には、「 x_β は非劣解」という。実行可能解領域において、 p 個の目的関数 $F_k(x)$ に対する非劣解の集合がパレート最適解である。

例として、図2に二目的最適化問題におけるパレート最適解集合を示す。図中に実線及び点線で示されるパレート最適解が形成する面をパレート・フロントと呼び、

このパレート・フロント上にある解集合から意思決定者が設計上の要求に応じて解を選択することになる。

本研究では、実験計画法により目的関数ごとに推定式を作成し、推定式上でパレート最適解集合を探索する手法を提案する。用いる推定式は低次の多項式であるため、非常に低い計算コストで実行可能解領域全体の推定値を求めることが可能である。

本手法の手順は2ステップに分けられ、図3にその概念図を示す。ステップ1では、実験計画法により p 個の目的関数ごとに作成した推定式を用いて、実行可能解全体の推定値 $Y_{\text{esti},k}$ ($k=1, 2, \dots, p$) を計算し、それらの優劣関係を逐一調べることで近似的に非劣解の集合を抽出する。優劣関係の判定には以下に示す判定式

$$Y_{\text{esti},k}(x_\alpha) \geq Y_{\text{esti},k}(x_\beta) \quad \left(\begin{array}{l} x_\alpha, x_\beta \in X \\ k=1, 2, \dots, p \end{array} \right) \quad (15)$$

を用いる。上式を満たす優越解 x_α が存在する場合に、実行可能解の集合から劣解 x_β を除外することとし、この判定を実行可能解全てに対して逐一行うことで非劣解の集合を抽出する。本研究ではこの非劣解集合を「推定パレート最適解集合 P_{esti} 」とする。推定パレート最適解集合 P_{esti} は、 $Y_{\text{esti},k}$ 間の比較から得られた解集合であるため、Ritz法による座屈荷重値解析へフィードバックを行うことで精度の向上を図る。

ステップ2では、まず推定パレート最適解集合 P_{esti} に属する解を Ritz 法による座屈荷重値解で再計算し、 $Y_{\text{Ritz},k}$ ($k=1, 2, \dots, p$) を求める。次に、 $Y_{\text{Ritz},k}$ の優劣関係を調べることで集合 P_{esti} 内から非劣解を抽出する。優劣関係の判定には次式で表される判定式

$$Y_{\text{Ritz},k}(x_\alpha) \geq Y_{\text{Ritz},k}(x_\beta) \quad \left(\begin{array}{l} x_\alpha, x_\beta \in P_{\text{esti}} \\ k=1, 2, \dots, p \end{array} \right) \quad (16)$$

を用いて、ステップ1と同様の方法で集合 P_{esti} 内に残存する劣解を取り除く。そして最終的に集合内に残った解を「本手法におけるパレート最適解集合 P 」とする。

3. 数値計算例及び考察

3.1 数値計算例 本節では、弾性定数 $E_L=138\text{GPa}$, $E_T=8.96\text{GPa}$, $G_{LT}=7.1\text{GPa}$, $\nu_{LT}=0.3$ を持つ対称8積層 $[\theta_1/\theta_2/\theta_3/\theta_4]_s$ の正方形CFRP積層板を考える。最適化問題では、2つの異なる圧縮比 ($\beta=0$ と $\beta=2$) における積層板の臨界座屈荷重値を、同時に最大化する積層構成を求める。なお、変位関数中の項数 $m \times n = 10 \times 10$ とし、境界条件は自由辺をF、単純支持辺をS、固定辺をCで表し、正方形の左辺から順に反時計回りに表す。

3.2 影響度解析 分散分析で得られた各因子の寄与率を表2に示す。この表より、 θ_1 と θ_2 の寄与率は θ_3

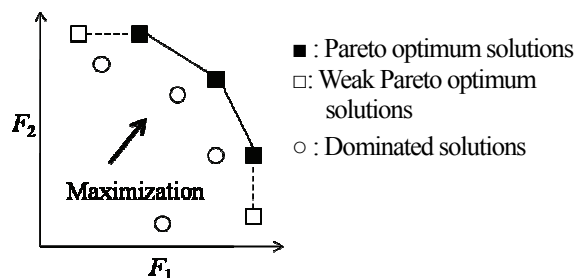


Fig. 2 Pareto optimum solutions

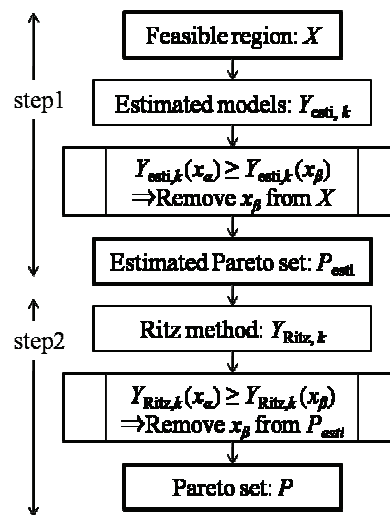


Fig. 3 Procedure of the present optimization approach

と θ_4 に比べて大きく、外側に配置された層の方が座屈荷重値に与える影響が大きいことがわかる。よって最適化計算では、各層の繊維配向角の刻み幅を外層から内層にかけて傾斜を付けて設定することで効率化を図る。また、交互作用項 $\theta_1 \times \theta_2$ の寄与率が大きい条件下では、 θ_1 と θ_2 が互いに影響し合うため、1層ずつ順に決定していくのではなく2層同時に決定する必要がある。

3.3 推定式の精度の検証 最適化精度は推定式の精度に大きく依存するため、最適化を行う前に推定式の精度の検証が重要である。本研究では、推定式の精度を決定係数

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_{\text{Ritz}} - Y_{\text{esti}})^2}{\sum (Y_{\text{Ritz}} - \bar{Y}_{\text{Ritz}})^2} \quad (-1 \leq R^2 \leq 1) \quad (17)$$

により検証した。ここで、 Y_{Ritz} , Y_{esti} は解析データに用いた特性値、推定値であり、 \bar{Y}_{Ritz} は全特性値の平均を表す。式(17)は、残差の相対的な大きさを表す指標の一つであり、 R^2 の値が1に近いほど推定精度が高いことを意味する。本結果では、いずれの推定式においても、決定係数 R^2 は0.97~1.00と1に近い値を与えていたため、推定式は高い精度を有しており、最適化計算に用いることが可能であるとわかった。

Table 2 Contribution ratios (%) of factors obtained by analysis of variance

B.C.		Factor							Total
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	$\theta_1 \times \theta_2$	$\theta_1 \times \theta_3$	$\theta_2 \times \theta_3$	
SSSC	$\beta = 0$	21.8	12.3	2.6	0.1	52.0	7.1	2.6	98.4
	$\beta = 2$	54.2	13.9	2.1	0.0	22.9	4.1	1.8	99.1
SCSC	$\beta = 0$	17.3	6.7	1.4	0.0	60.8	9.5	2.7	98.5
	$\beta = 2$	68.6	10.6	1.1	0.0	15.3	2.3	1.1	98.9
CCCS	$\beta = 0$	60.3	21.1	3.8	0.1	11.7	2.1	0.8	99.7
	$\beta = 2$	15.6	3.1	0.6	0.0	65.1	10.1	3.6	98.2
CCCC	$\beta = 0$	48.1	21.7	3.6	0.1	21.6	3.2	1.2	99.5
	$\beta = 2$	25.1	2.1	0.0	0.0	53.6	10.9	5.8	97.4

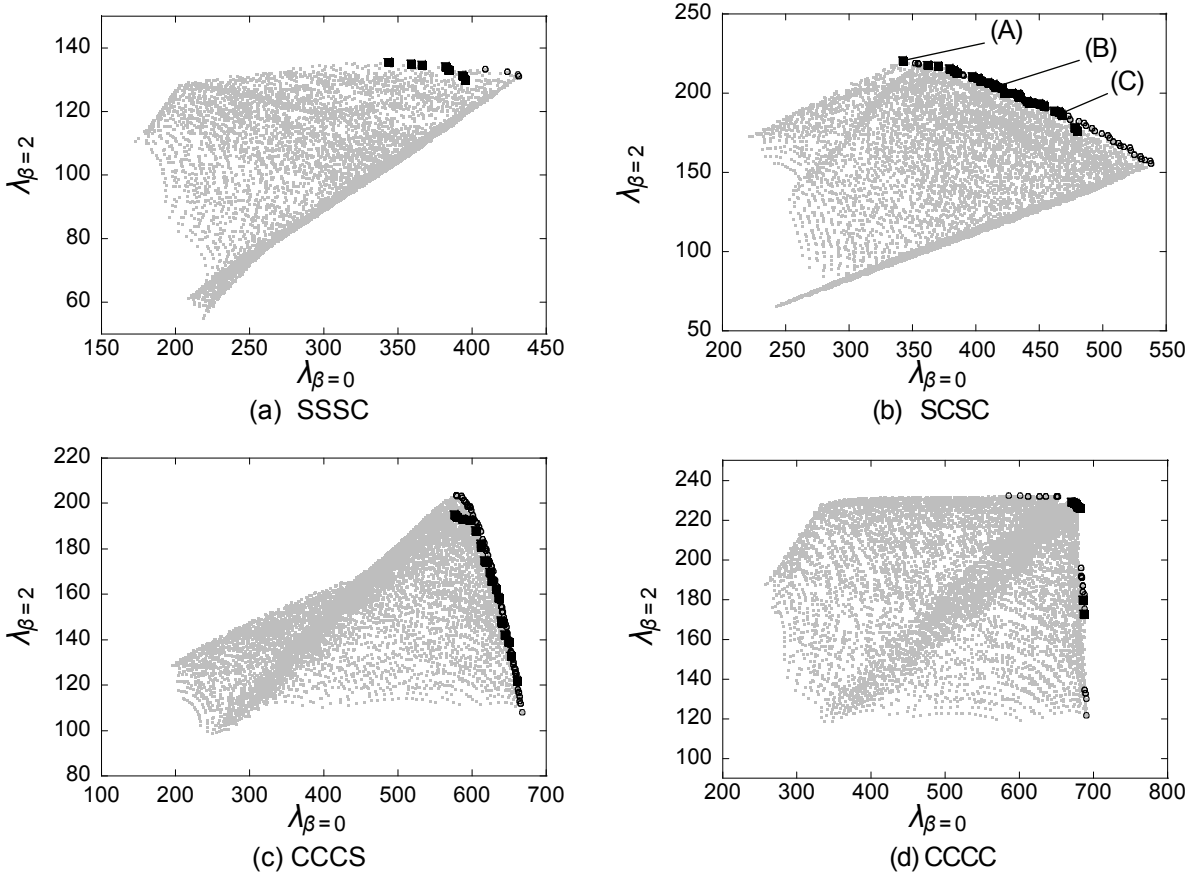


Fig. 4 Comparison between solutions by present approach (denoted by ■) and solutions (denoted by ○) obtained by calculating all stacking sequences in the feasible region (denoted by ●)

3・4 最適化計算の結果 本手法の精度を全探索結果と比較することで検証する. 最適化問題は座屈パラメータ $\lambda_{\beta=0}$, $\lambda_{\beta=2}$ を用いると以下のように定式化できる.

$$\begin{aligned}
 &\text{Objective : Maximize } \{ \lambda_{\beta=0}, \lambda_{\beta=2} \} \\
 &\text{Design variable : } [\theta_1 / \theta_2 / \theta_3 / \theta_4]_s \\
 &\text{Subject to : } -90^\circ < \theta_i \leq 90^\circ \quad (i = 1, 2, 3, 4) \\
 &\text{Increment : } \Delta\theta_1 = 5^\circ, \Delta\theta_2 = \Delta\theta_3 = 15^\circ, \Delta\theta_4 = 45^\circ
 \end{aligned} \tag{18}$$

式(18)より実行可能解は, $36 \times 12 \times 12 \times 4 = 20736$ 通りの積層構成から成る集合であり, 全探索では Ritz 法による座屈荷重値解析で全ての実行可能解を算出する. さらに, それらの優劣関係を本手法と同様に逐一判定すること

で「全探索によるパレート・フロント P_{Ritz} 」を得る.

図 4 に, Ritz 法による座屈荷重値解析で求めた実行可能解領域を●, 全探索によるパレート・フロント P_{Ritz} を○, 本手法で得たパレート最適解集合 P を■でそれぞれ示す. 図より, 境界条件(a) SSSC については, 得られた解に一部劣解を含むが, おおむねパレート・フロント上に分布している. 境界条件(b) SCSC 及び(c) CCCS では, 得られたパレート最適解はパレート・フロント上の広域に分布しており, 多様なパレート最適解を得ることができた. 最適な積層構成の例として, 図 4(b)中の(A), (B), (C) を与える積層構成は, それぞれ $[75^\circ / -60^\circ / -75^\circ / 45^\circ]_s$, $[60^\circ / -60^\circ / -75^\circ / -40^\circ]_s$,

[60°/-45°/-45°/0°]s であり、いずれも似た傾向を示していることがわかる。境界条件(d) CCCC では、得られたパレート最適解は、パレート・フロント上にあるがその数は少ない。これは、パレート・フロントも偏って分布していることからわかるように、境界条件(d) CCCC は他の境界条件に比べ座屈パラメータの挙動が複雑であり、推定式で正確に再現できていない部分があるためである。この問題を回避する方法の一つとして、推定式作成に用いるサンプル点の増加、すなわち水準間隔の狭幅化が有効と考えられるが、計算コストも増大する。

計算コストの有効性は、最も計算負荷の高い構造計算の繰返し回数を全探索結果と比較することで検証する。全探索が20736×2=41472回の構造計算の繰返しを要したのに対して、本手法は多くとも(625+132)×2=1514回の繰返しであった。よって、本手法は全探索と比べて約4%の構造計算の繰返しで済んだことになる。

以上の結果より、境界条件によってはパレート最適解の分布にばらつきがあるものの、全般的に精度の高いパレート最適解集合の探索が可能であり、計算コストの面で高い効果を有することが確認できた。

4. 結 言

本研究では、実験計画法に基づいた多目的最適化手法を提案し、全探索結果と比較することでその有用性を検証した。本手法は実験計画法を用いて影響度解析と推定式の作成を効率的に行い、その推定式上でパレート最適解集合を探索する手法である。その際、構造解析へフィードバックすることで精度の向上を図った。

計算例として、2つの異なる圧縮比における積層板の臨界座屈荷重値を同時に最大化するような積層構成を求めた。影響度解析では、境界条件によっては最外層から1層ずつ順に決定していくのではなく、2層同時に決定する必要があることを示した。最適化結果では、ほとんどの境界条件でパレート最適解を得ており、計算コストも非常に低いことから、本手法の有効性を確認した。

なお本研究は、科研費(21360105)の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) Adali, S. and Verijenko, V.E., Optimum Stacking Sequence Design of Symmetric Hybrid Laminates Undergoing Free Vibrations, *Composite Structures*, Vol.54 (2001), pp.131-138.
- (2) Duffy, K.J. and Adali, S., Optimal Fiber Orientation of Antisymmetric Hybrid Laminates for Maximum Fundamental Frequency and Frequency Separation, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.146 (1991), pp.181-190.

- (3) Topal, U. and Uzman, U., Frequency Optimization of Laminated Folded Composite Plates, *Material and Design*, Vol.30 (2009), pp.494-501.
- (4) Gurdal, Z., Haftka, R. and Hajela, P., *Design and Optimization of Laminated Composite Materials*, (1999), John Wiley & Sons.
- (5) Diaconu, C.G., Sato, M. and Sekine, H., Layup Optimization of Symmetrically Laminated Thick Plates for Fundamental Frequencies Using Lamination Parameters, *Structural and multi-disciplinary Optimization*, Vol. 24 (2002), pp. 302-311.
- (6) Fukunaga, H., Sekine, H. and Sato, M., Optimal Design of Symmetric Laminated Plates for Fundamental Frequency, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 171, No.2 (1994), pp. 219-229.
- (7) Honda, S. and Narita, Y., Buckling Optimization of Laminated Composite Plates by Minimizing Errors of Discrete Lamination Parameters (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 72 (2006), pp. 144-151.
- (8) Todoroki, A. and Ishikawa, T., Design of Experiments for Stacking Sequence Optimizations with Genetic Algorithm Using Response Surface Approximation, *Composite Structures*, Vol.64, (2004), pp.349-357.
- (9) Todoroki, A. and Ishikawa, T., Design of Experiments for Response Surfaces of Stacking Sequence Optimizations Using Genetic Algorithm (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.66 (2000), pp.118-125.
- (10) Todoroki, A. and Sasaki, M., Stacking Sequence Optimizations Using GA with Zoomed Response Surface on Lamination Parameters, *Advanced Composite Materials*, Vol.11 (2002), pp.299-318.
- (11) Fukunaga, H. and Sekine, H., Stiffness Design Method of Symmetric Laminates Using Lamination Parameters, *AIAA J.*, No.30-11 (1992), pp.2791-2793.
- (12) Todoroki, A. and Hirano, Y., Stacking Sequence Optimization of Composite to Improve Panel Flutter at Supersonic Flow Using Fractal Branch and Bound Method (in Japanese), *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.69 (2003), pp.239-244.
- (13) Taguchi, G., *Design of Experiments (Third Edition)* (in Japanese), (1976), pp.511-527, 529-550, Maruzen.
- (14) Kashimura, T., Shiratori, M. and Yu, Q., *Optimization of Nonlinear Problem by Design of Experiments -Statistical Design Support System-* (in Japanese), (2007), pp.8-39, 116-151, Asakura Pub.
- (15) Kashimura, T., Shiratori, M., Yu, Q. and Kohda, I., Structural Optimization Using the Design of Experiments and Mathematical Programming (in Japanese), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 62 (1996), pp. 218-223.
- (16) Murakami, M. and Yoshizawa, S., Multiobjective Optimization Using Neighborhood Model Genetic Algorithms (in Japanese), *Information Processing Society of Japan*, Vol.40 (1999), pp.1792-1800.
- (17) Narita, Y., Combinations for the Free-vibration Behaviors of Anisotropic Rectangular Plates under General Edge Conditions, *Trans. ASME, Journal Applied Mechanics*, Vol.67, (2000), pp.568-573.

