Taguchi method の複合材料構造設計への適用

Design of Composite Structures by Using Taguchi Method

○学 田中 聡一朗 (北大院)

Soichiro TANAKA, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, N13W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido

正 本田 真也 (北大)

正 成田 吉弘

Shinya HONDA, Hokkaido University

Yoshihiro NARITA, Hokkaido University

Key Words: Composite Material, Taguchi method, Design of experiment, Robust design, Statistical modeling, Thermal deformation, Antenna

The carbon fiber reinforced plastics have been widely used to manufacture the precise structure, such as antenna reflectors, due to their lightweight and high dimensional stability as compared to the metallic materials. When one uses CFRP laminates to antenna reflectors for space telescopes, thermal deformation invokes a serious problem. This deformation can be suppressed if the laminates are stacked symmetrically. It is known, however, that CFRP laminates show unpredictable deformation caused by the ply angle misalignments. Since the ply misalignment is unavoidable, it is important to choose the lay-ups that mitigate the misalignment effects. In this study, the lay-ups and supporting positions are optimized in robust sense by using Taguchi method (TM). Although it is not possible to take into account the effect of interactions between parameters. This is because TM decreases the optimization accuracy in some cases. Therefore, Taguchi method with statistical modeling (TM/S) which considers the interaction effects by using statistical estimated model is proposed. Finally, the performance of TM and TM/S are compared each other.

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) は比強度、比剛性に優れるため、軽量化が重要な課題となっている航空機、宇宙分野で広く利用されている。また、CFRP は熱膨張係数が小さく、疲労強度が高いという性質から寸法安定性に優れている。現在、それらの特徴を活かし、衛星搭載アンテナや宇宙望遠鏡のリフレクタなど、高精度が要求される構造体への適用が期待されている。Carlin ら⁽¹⁾は許容できるアンテナ鏡面全体の表面誤差 (理論的なパラボラ面からの誤差) は、使用する観測波長の約 1/20 から 1/50RMS (Root Mean Square) 以内に抑える必要があると述べている。誤差が生じる主な原因としては、製造・組立時の誤差や軌道上での温度変化がある。人工衛星は太陽光が当たる日照時と日陰時との間に約 200K にも達する温度差が存在する⁽²⁾。CFRP の熱膨張係数は金属材料に比べ非常に小さいが、アンテナのような高精度が要求される構造体ではマイクロあるいはナノオーダーの変形により機能が大きく減じるため、太陽光熱入力は深刻な問題である。また、Carlin らは寸法安定性を維持するために、アンテナに用いる材料は、等方性であることが望ましいと述べている。CFRP のような積層複合材は、繊維を一方に引きそろえたラミナと呼ばれる薄い層を積層して製造されるため、繊維方向と繊維直交方向で熱膨張率が大きく異なる異方性材料である。しかし、各層の繊維配向角度を任意に決定することで、様々な機械的特性をテーラリングできるため、適切な積層構成により熱変形を抑制する設計も可能である。また、アンテナ鏡面の精度要求の向上に対応するため佐々木ら⁽³⁾は、CFRP 製アンテナの下部にアクチュエータを設けたスマート構造を対象とし、アクチュエータの最適配置により、鏡面の任意の誤差形状に対する制御性能を評価した。このように鏡面をアクティブに変形できるスマート構造に関して多くの研究がなされているが、アクチュエータを取り付けると重量が大きく、高コストになりやすいといった欠点がある。したがって、材料の特性

を最大限に活用した、アクチュエータ不要な構造を設計することが重要である。

CFRP 積層材の製造誤差を生じる主要な原因の一つに、成形中のラミナを積み重ねる際に生じる繊維配向角度のずれ (配向不整) がある。Yurgartis⁽⁴⁾によるとこの配向不整は一般的に $0.7\sim 2^\circ$ 存在すると結論付けられている。さらに、配向不整が面外変形に与える影響は積層構成によって大きく異なるという報告⁽⁶⁾がいくつかなされている。以上のことから、配向不整が生じたときに、表面誤差の RMS 値が想定以上に大きくなり、許容値を超えてしまうことが考えられる。したがって、配向不整が生じて表面誤差の RMS 値は変化しないような寸法安定性が必要である。しかし、過去の報告はいずれにおいても、配向不整を考慮した設計は行っておらず、解析も擬似等方性やクロスプライなどの代表的な積層構成に限定されている^{(5), (6), (7)}。

本研究では CFRP アンテナの積層構成と支持位置を最適化し、アンテナ鏡面の RMS 誤差を最小化すると同時に、配向不整を与えた時に RMS のばらつきも最小にするというロバスト最適化問題を扱う。そこで、最適化手法として、ノイズが生じて機能も失われないロバストな設計が可能な Taguchi method を採用する。しかし、Taguchi method は設計変数間の交互作用を考慮することができないという欠点があるため、本最適化の設計変数である積層構成のように設計変数間の交互作用が大きい問題では最適化の精度が下がってしまう危険性がある。そこで、本研究では Wu and Hamada ら⁽⁸⁾による回帰分析を用いた線形モデルによるパラメータ設計を参考に、統計モデルを導入した Taguchi method with Statistical modeling を提案し、設計変数間の交互作用を考慮したパラメータ選択を行い、通常の Taguchi method との最適解の比較を行った。

2. 解析モデルおよび最適化問題

本研究では、汎用有限要素解析ソフトウェア (ANSYS) を用いて図 1 に示す CFRP アンテナのモデル化を行った。積層シェルのモデル化には、線形積層シェル要素 (SHELL181) を用い、半径方向に 10、周方向に 27 の要素に分割した。アンテナの表面形状は、直径 0.2m、焦点距離 $f=0.6$ の放物線によって表されるパラボリック面とする。境界条件は全周自由、温度変化は宇宙空間での利用を想定し 200K とした。ただし、積層シェル内部の熱分布は考慮せずに、積層シェルの温度は一様に変化するものとする。ANSYS を用いて静的解析を行うことで、各節点の熱変形による面外方向変位を求めた。CFRP の材料データを表 1 に示す。ここでは、面内の繊維方向を x 、繊維と直交方向を y 、面外方向を z で示す。

3. Taguchi method による最適化

3-1 Taguchi method

Taguchi method は田口玄一氏が開発した品質問題を未然に防止し、開発効率を上げるための手法である⁽⁹⁾。Taguchi method は、いくつかの手法の総称であるが本研究では、パラメータ設計を採用する。パラメータ設計では、製品性能に問題を発生させているノイズを設計に取り込み、ロバストな製品設計あるいは工程設計を実現することができる。まず、設計第一段階でノイズによるばらつきが小さくなる条件を探し、第二段階で平均値を目標値に合わせる二段階設計と呼ばれる手法によりロバスト設計を実現している⁽¹⁰⁾。

パラメータ設計では、製品の機能に影響を及ぼす二種類の要因、制御因子とノイズ因子がある。制御因子は材料の選択や寸法、成形温度のように技術者が自由に選ぶことができる要因である。ノイズ因子は技術者によって決めることが不可能な因子あり、環境変動、材料劣化、製造誤差などがある。

Taguchi method では直交表を解析の効率化を行っているため、設計者は各制御因子に対し適切な水準を設定することが必要になり、水準数は、通常 2-4 水準で取られることが多く、ノイズ因子は直交表の外側に割り付けられる。つまり、ノイズ因子が n 個のとき、 $[(直交表の行数) \times n]$ 回の実験を行うことになる。また、誤差因子の水準範囲はできる限りシステムの機能に大きな影響を及ぼすように選択する必要がある。

作成した直交表に従った実験を全てのノイズ因子に対して行い、出力の平均と標準偏差

$$\text{Mean: } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

$$\text{S.D.: } \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Fig.1 Finite element model for the present optimization problem.

Table 1 Mechanical properties of the CFRP.

Young's modulus	E_x	106	GPa
	E_y, E_z	9.85	GPa
Shear modulus	G_{xy}, G_{zx}	4.17	GPa
	G_{yz}	3.67	GPa
Poisson's ratio	ν_{xy}	0.34	-
Density	ρ	1468	kg/m ³
Thermal expansion coefficient	α_x	0.296	$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
	α_y, α_z	38.9	$\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

を求める。各制御因子の最適水準は、SN 比 (Signal to Noise ratio) と感度によって決定される。SN 比は大きいほどばらつきが小さいことを意味するため、ロバスト性評価の尺度となる。また、SN 比はシステムの出力に求められる性質により三種類に分けられ、それぞれ以下のように求める。

望小特性 (非負で小さいほど望ましい特性)

$$\eta_S = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

望目特性 (ある一定の目標値を持つ特性)

$$\eta_T = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

望大特性 (非負で大きいほど望ましい特性)

$$\eta_L = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5)$$

出力の平均値の対数を対数変換したものを感度 (Sensibility) と呼び以下の式で与えられる。

$$S = 10 \log \bar{y}^2 \quad (6)$$

SN 比および感度の単位はデシベル [dB] によって表される。

各設計変数の各水準に対する SN 比と平均出力それぞれについて平均値を求めると要因効果が求まる。これをグラフにプロットしたものは、要因効果図と呼ばれ最適パラメータの選択に用いられる。まず二段階設計の第一段階として SN 比を最大化し、次に感度 (平均出力) を目標値に合わせる。このとき制御因子は以下の四つのグループに分けられる。

- (1) SN 比と感度の両方に効果を持つ因子
- (2) SN 比にのみ効果を持つ因子
- (3) 感度にのみ効果を持つ因子
- (4) SN 比にも感度にも効果を持たない因子

(1)と(2)のグループは 2 段階設計の第 1 段階目である、システムのばらつきを減らしロバスト性を向上させる目的に使われる。(3)のグループは第 2 段階目の平均を目標値に合わせる目的に用いられる。(4)のグループはどの水準を選んでも出力に影響はないのもっともコストのかからないものを選ぶ。ただし、SN 比および感度に対する効果の有無の判定に関しては、絶対的な基準はなく、要因効果図を見る設計者の主観に依存する。以上が最適パラメータの選択方法である。

3-2 Taguchi method 最適化問題への適用

対称積層アンテナシェルモデルのロバスト最適化問題は以下のように定式化できる。本最適化では、熱変形による面外方向変位の RMS 値を最小化することが目的であるため、特性値は望小特性であり、SN 比 η は以下の式で表される。

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Where: } y_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{ij}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ここで、 n はノイズ因子の数、 N は有限要素モデルの節点数、

u_i は節点 i におけるアンテナの板厚方向の熱変形変位である。望小特性の SN 比によるパラメータ設計の場合、SN 比が平均値とばらつきを併せもった尺度であるため感度はなく、2 段階設計を行う必要はない。

配向角度の刻み角は 15° 、支持位置は 3 点支持とし、図 2 の候補点の中から選び、選ばれた節点を全自由度拘束する。ノイズである配向不整は、全ての層について考えると計算回数が膨大になるため、特に面外変形に大きな影響を及ぼす上下面の外側 2 層ずつの合計 4 層についてのみ配向不整を与える。さらに、積層複合材の特性上、積層構成を対称にすることにより、面外変形をキャンセルすることができることから⁽¹¹⁾、最適化に取り入れる配向不整を表 2 に示す非対称性が最も強く出る 4 つのパターンに絞る。また、直交表は L_{81} 直交表⁽¹²⁾を用いた。

以上より、最適化問題を次のように定式化する。

$$\begin{aligned} \text{[Objective] :} & \quad \text{Maximize } \eta(\text{SN-ratio}) \\ \text{[Design variables] :} & \quad [\theta_1/\theta_2/\theta_3/\theta_4]_s, (p_1, p_2, p_3) \\ \text{[Constraints] :} & \quad -90 < \theta_i \leq 90 (i=1, 2, 3, 4) \\ & \quad 0.1 < p_j \leq 0.9 (j=1, 2, 3) \\ \text{[Noise factor] :} & \quad N_1, N_2, N_3, N_4 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 θ_i は各層の繊維配向角度、 p_j は支持位置を中心からの距離で表している。

3-3 多段階最適化手法

Taguchi method では、直交表を用いた最適化を行うため、一度の最適化で多くの水準を取ることができない。そこで、最適化を繰り返し行い、水準設定を段階的に修正することで最適解精度の向上を図る多段階最適化手法を提案する。Taguchi method により得られる解精度は水準設定に大きく依存するため、適切な水準範囲が不明な場合には最初に設計変数が取り得る最大の水準範囲で最適化し、その最適化結果をフィードバックして水準範囲を修正することで最適解が存在すると予想される領域まで水準範囲を段階的に移動させることが必要である。本研究では、このような多段階最適化手法の手順を以下の 3 つのステップに分ける。

Fig. 2 Candidates for supporting positions.

Table 2 Selected noise factors for the outer four layers.

Noise factor	Misalignments($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$)
N_1	($+2^\circ, +2^\circ, -2^\circ, -2^\circ$)
N_2	($+2^\circ, -2^\circ, +2^\circ, -2^\circ$)
N_3	($-2^\circ, +2^\circ, -2^\circ, +2^\circ$)
N_4	($-2^\circ, -2^\circ, +2^\circ, +2^\circ$)

Step1

最適解の存在範囲が予測できないため、繊維配向角度が取りうる最大の範囲 $-90 \leq \theta_i \leq 90 (i=1, 2, 3, 4)$ を水準範囲とする。支持位置はアンテナモデルの中心と端部の中間付近にあると予想できるため、水準は以下のように定める。

$$\begin{aligned} \theta_i^{\text{Step1}} &= 0, \pm 60 (i=1, 2, 3, 4) \\ p_j^{\text{Step1}} &= 0.4, 0.5, 0.6 (j=1, 2, 3) \end{aligned} \quad (9)$$

Step2

前ステップで得た最適解が水準の中心となるように水準範囲を平行移動する。配向角は水準幅を前ステップの 1/2 となるように狭幅化する。また、Step2 では角度と支持位置に関する水準はそれぞれ前ステップで求められた最適解からの変化量を意味する。したがって、水準は

$$\begin{aligned} \Delta \theta_i^{\text{Step2}} &= 0, \pm 30 (i=1, 2, 3, 4) \\ \Delta p_j^{\text{Step2}} &= p_j^{\text{Step1}} + \begin{cases} 0 & (j=1, 2, 3) \\ \pm 0.1 & (j=1, 2, 3) \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

Step3

Step2 と同様に、前ステップで得た最適解が水準の中心となるように水準範囲を平行移動し、配向角の水準幅が前ステップの 1/2 となるように狭幅化する。したがって、水準は

$$\begin{aligned} \Delta \theta_i^{\text{Step3}} &= 0, \pm 15 (i=1, 2, 3, 4) \\ \Delta p_j^{\text{Step3}} &= p_j^{\text{Step2}} + \begin{cases} 0 & (j=1, 2, 3) \\ \pm 0.1 & (j=1, 2, 3) \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。

4. 統計モデルの導入

4-1 Taguchi method への統計モデルの導入

Taguchi method は設計変数が特性値に対して持つ非線形効果(主効果)を利用し、ノイズの影響を減衰させることに重点を置いているため、設計変数間の交互作用は考慮していない。そこで交互作用項を含んだ特性値の推定式を求め、推定式上でパラメータ選択を行うことにより最適化する手法を提案する。特性値は目的関数である SN 比とし、直交表から得られる因子の組合せに対する特性値の応答から、各設計変数が SN 比に与える影響度を解析し、推定式を作成する。なお、特性値の計算には 3-2 節と同様に望小特性の SN 比を用いる。

直交表も 3-2 節と同様に L_{81} 直交表を使用する。 L_{81} はべき乗型直交表の一つで、特定の列に交互作用が現れるため、交互作用を取り上げたい場合によく用いられる。交互作用の割付けには線点図の利用が便利である。線点図とは、制御因子を点で表し、2 点を結んだ線分を交互作用に対応させたグラフである。線点図は過去の研究により多くのものが提案されているため、そこから設計者が取り上げたい交互作用を組み込めるものを選べばよい。本最適化では、繊維配向角度 θ_1 から θ_4 間の交互作用が強い影響を持っていると考えられるので、図 3 の線点図を用いて設計変数を割付けた。したがって、考慮される交互作用は $\theta_1 \times \theta_2, \theta_1 \times \theta_3, \theta_1 \times \theta_4, \theta_2 \times \theta_3, \theta_2 \times \theta_4, \theta_3 \times \theta_4, \theta_1 \times p_1, \theta_1 \times p_2, \theta_1 \times p_3$ の 9 個である。

4-2 推定式の作成

直交表の推定式には一般に、P. L. Chebyshev の直交関数である直交多項式⁽¹³⁾が用いられる。この直交多項式は各次数項

Fig.3. Liner graph for L_{81} orthogonal array ⁽¹²⁾.

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。つまり、低次の項を当てはめたが、推定精度が十分でないときは、さらにその上の高次の項を足し合せればよい。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ことにより、計算コストを低減することが可能であるが、本研究では全ての因子を推定式に取り入れても計算短時間で済むため、F検定による因子の選定は行わない。ここで、設計変数 ξ_i が n 個存在するときの要因 A の直行多項式の展開式は

$$y = b_0 + b_1(A - \bar{A}) + b_2 \left[(A - \bar{A}) - \frac{a^2 - 1}{12} h^2 \right] + b_3 \left[(A - \bar{A})^2 - \frac{3a^2 - 7}{20} (A - \bar{A}) h^2 \right] + \dots + b_n \xi_n(A) + \dots \quad (12)$$

と表すことができ、 $\xi_n(A)$ は

$$\begin{cases} \xi_0(x_i) = 1 & (n=0) \\ \xi_1(x_i) = x_i - \bar{x}_i & (n=1) \\ \xi_n(x_i) = \frac{1}{4\{4(n-1)^2 - 1\}} \left[\xi_{n-1}(x_i) \xi_1(x_i) - (n-1)^2 \left\{ a_i^2 - (n-1)^2 \right\} h_i^2 \xi_{n-2}(x_i) \right] & (n=2, 3, 4, \dots) \end{cases} \quad (13)$$

である。 $\bar{A}$ は要因 A の水準平均で以下の式で表せる。

$$\bar{A} = A_1 + \frac{a-1}{2} h \quad (14)$$

係数 b_0, b_m は、推定式の持つ直交関係より

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{y_1 + \dots + y_a}{ar} \\ b_1 &= \frac{(A_1 - \bar{A})y_1 + \dots + (A_a - \bar{A})y_a}{\left[(A_1 - \bar{A})^2 + \dots + (A_a - \bar{A})^2 \right] r} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (15)$$

と表せる。しかし、実際には $b_1, b_2, \dots$ の推定は式(11)を解くことなく表3から読み取った λ, S, W_i を以下の式に代入することにより、簡単に算出することができる。

$$b_i = \frac{1}{r(\lambda S) h^i} (W_1 T_1 + W_2 T_2 + \dots + W_a T_a) \quad (16)$$

Table 3 Coefficients of orthogonal contrast vectors ⁽¹³⁾.

Level	$a=2$		$a=3$		$a=4$	
	b_1	b_2	b_1	b_2	b_3	b_4
W_1	-1	1	-1	1	-1	1
W_2	1	0	0	0	0	0
W_3			1	1	1	1
W_4					3	1
S	1/2	2	2/3	5	4	9/5
λ	2	1	3	2	1	10/3

Fig.4 Procedure of the present optimization approach.

交互作用を考慮する場合、交互作用項は各設計変数の積和で表されるため、例えば a 水準の要因 A と b 水準の要因 B についての交互作用の項は以下ようになる。

$$y = b_{11}(A - \bar{A})(B - \bar{B}) + b_{21} \left[(A - \bar{A})^2 - \frac{a^2 - 1}{12} h_A^2 \right] (B - \bar{B}) + b_{12} \left[(A - \bar{A})^2 - \frac{a^2 - 1}{12} h_A^2 \right] (B - \bar{B}) + \dots \quad (17)$$

これを式(12)の主効果のみの推定式に加えることで、交互作用項を考慮することができる。交互作用項の係数 b_{ij} は以下の式によって算出される。

$$b_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^a W_l \left[\sum_{j=1}^b W_j (T_{lj}) \right]}{r(\lambda_n S_n h_A^n)(\lambda_m S_m h_B^m)} \quad (18)$$

推定式の計算コストは低いため、総当たりによって SN 比が最大となる最適パラメータを求めることができる。本最適化の流れを図4に示す。

4-3 推定式の精度の検証

本手法では、推定式上で最適化を行うため最適解の精度は強く推定式の精度に依存する。したがって、最適化を行う前に推定式の精度の検証が重要である。そこで、推定式の精度を以下の式で表される決定係数⁽¹⁴⁾により検証した。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_{ANS} - Y_{est})^2}{\sum (Y_{ANS} - \bar{Y}_{ANS})^2} \quad (-1 \leq R^2 \leq 1) \quad (19)$$

ここで、 Y_{ANS} は ANSYS による解析データから求めた SN 比、 Y_{est} は推定式から求めた特性値である SN 比の推定値、 $\bar{Y}_{ANS}$ は SN 比の平均を表す。式(19)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。

5. 最適化結果および考察

通常の Taguchi method を TM, 統計モデルを導入した Taguchi method を TM/S(Taguchi method with Statistical model) と表記する. TM による各ステップの最適化結果を図 5, TM/S による最適化結果を図 6 に示す. 縦軸は面外方向変位の RMS で, 横軸の配向不整は外側 2 層の全ての配向不整の組合せを示している. ただし, 配向不整は RMS が低い順になるように並び替えているので各ステップで異なる順序で配向不整の組合せをプロットしている. また, 表 4 は各ステップの SN 比と TM/S における推定式の決定係数, 表 5 は各ステップの最適解である.

図 5 からわかるように TM では, 徐々に RMS の最大値が下がりノイズに対する応答も緩慢になっていることから, 多段階最適化が順調に進んでいることがわかる. これに対し TM/S の最適化結果では, 表 4 からわかるように Step1 から Step3 にかけて SN 比の改善が見られない. そこで, Step3 と同様の最適化をもう一度繰り返した結果(Step4), 若干の解の改善は見られたが, TM による最適解と同等の結果であった. これらの原因として次の 2 つのことが考えられる.

i) 局所解に陥っている

目的関数である SN 比は繊維配向角度に対して多峰性を有していることが考えられる. したがって, Step1 あるいは Step2 などの初期段階で局所解に陥り, それ以降の最適化が局所解から抜け出せなかったことが考えられる. 実際に表 5 の各ステップにおける最適解を見ると, TM/S は Step2 からほぼ積層構成が変化していないことがわかる. 局所解に陥った原因として, Step1 の決定係数が 74.8%と低い値を示していることから, 最適化精度が下がっていることが予測できるが, TM の最適解を見ると Step1 での最適解は TM/S よりも劣っているにもかかわらずその後の最適化は順調に進んでいるため, こちらが原因であると断定することはできない.

ii) 目標のノイズ因子に対して最適化の効果が薄い

本最適化の目的関数である SN 比はノイズ因子の各水準における特性値を 1 つのデータに縮約している要約統計量であり, ノイズの各水準が持つ特性値への効果の情報が損失している. つまり, 誤差因子の個別の効果が不明なため, 最も RMS が大きく出してしまうノイズ因子に対して最適化の効果が得られないという結果が生じる. 図 7, 8 は図 5, 6 のプロットからノイズ因子として取り上げた $N_1 \sim N_4$ に関する RMS を抽出したものである.

図 7 は TM の結果であるが, いずれのステップにおいても, RMS が大きい値を取るノイズに対して最適化の効果が現れていることがわかる. 例えば, Step1 の N_2 と N_3 に対する RMS は 4 つのノイズの中で際立って大きい値を示しているため, 最適化の効果を持たせたい水準となる. 一方で, N_1 と N_4 は低い RMS を示しているため, 最適化の効果を持たせる必要はない. 次に, Step2 では, N_3, N_4 に対する RMS 値は大きく下がっていることから, 最適化の効果が現れていることが分かる. 同様に Step3 についても, N_1 と N_4 に最適化の効果が現れているため, 全体としてロバスト化が順調に進んでいることが見て取れる.

図 8 の TM/S では, Step1 の N_3 や Step3 の N_1 のように RMS が大きく出ているにもかかわらず, これらのノイズに対して最適化が機能していないことがわかる. この原因として, ノイズ因子の影響を SN 比という一つのデータに縮約することにより, 最適化の効果が 4 つのノイズ水準すべてに現れ, 必要のない因子にも最適化の効果が現れることで, 全体として最適化が進んでいることが考えられる. したがって, ノイズ

因子の各水準が特性値に与える影響を詳細にモデル化する必要があると考えられる.

Table 4 Optimization results of SN-ratio among each step.

	Step1	Step2	Step3	Step4
TM[dB]	76.33	77.82	78.20	—
TM/S[dB]	77.93	77.57	77.40	78.58
(R^2 [%])	(74.8)	(93.6)	(96.2)	(93.5)

Table 5 Optimum solutions obtained using TM and TM/S.

	TM	TM/S
Step1	[60/-60/60/0] _s (0.4,0.4,0.4)	[0/-60/60/0] _s (0.4,0.4,0.4)
Step2	[90/-60/60/0] _s (0.3,0.3,0.4)	[30/-30/90/0] _s (0.3,0.5,0.4)
Step3	[90/-45/60/-15] _s (0.4,0.4,0.4)	[30/-15/90/0] _s (0.4,0.5,0.3)
Step4	—	[30/-15/90/0] _s (0.5,0.4,0.3)

Fig. 5 RMS comparison among each step of multi-step optimization in ascending order from TM.

Fig. 6 RMS comparison among each step of multi-step optimization in ascending order from TM/S.

Fig. 7 RMS comparison among each step of multi-step optimization for four noise factors from TM.

Fig. 8 RMS comparison among each step of multi-step optimization for four noise factors from TM/S.

6. 結言

本研究では、衛星搭載アンテナを模擬したモデルに対し、Taguchi method(TM)と統計モデルを導入した Taguchi method(TM/S)の2つの手法で最適化を行い、結果の比較を行った。TM/S は設計変数間の交互作用を考慮している分、最適化精度が良くなることが予想されたが、結果的に両者に大きな差は見られなかった。これには、TM/S が多段階設計における初期段階で局所解に陥ったこと、ノイズ因子と設計変数間のモデル化が十分ではないことなどが原因として考えられる。対策としては Step1 での推定式の決定係数を高くするために、交互作用項の選び直し、設計変数の再検討、直交表の変更を行う。あるいは、重回帰分析を用いた推定式の作成を行い、個々の誤差因子と設計変数間の効果を考慮したより詳細な推定式の構造を把握した上で、最適パラメータを選ぶ必要がある。

参考文献

- (1) P. S. Carlin, Light weight mirror systems for space craft –An overview of materials & manufacturing needs, *IEEE Xplore*, (2000), pp. 169-181.
- (2) 臼井基文, 脇田和紀, 近藤健介, レティタイタン, 松井康将, 磯部大吾郎, 宇宙用大型展開アンテナの熱変形抑制手法について, 日本機械学会論文集(C 編), 第 77 巻, Vol. 89, (2012), pp.13-17.
- (3) 佐々木要, 石村靖男, 田中宏明, シェル型リフレクタの形状制御におけるアクチュエータ及び支持構造の最適配置, 第 55 回構造強度に関する講演会, (2013), pp. 124-126.
- (4) S.W. Yurgartis, Measurement of Small Angle Fiber Misalignments in Continuous Fiber Composites, *Composites Science and Technology*, Vol.30, (1987), pp. 279-293.
- (5) Y. Arao, J. Koyanagi, S. Utsunomiya, H. Kawada, Geometrical stability of CFRP laminate considering ply angle misalignment, *18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, (2011).
- (6) Y. Arao, J. Koyanagi, S. Utsunomiya and H. Kawada, Effect of ply angle misalignment on out-of-plane deformation of symmetrical cross-ply CFRP laminates: Accuracy of the ply angle alignment, *Composite Structures*, (2011), Vol.93, pp.1225-1230.
- (7) S. J. Thompson, Influence of ply misalignment on form error in the manufacturing of CFRP mirrors, *OPTICAL MATERIALS EXPRESS*, Vol. 4 (2014), pp. 79-91.
- (8) C. F. J. Wu, M. S. Hamada, Experiments Planning, Analysis, and Optimization, (2009), John Wiley & Sons.
- (9) 立林和夫, 入門タグチメソッド (2004) 日科技連.
- (10) 渡部義晴, はじめてのパラメータ設計 (2013), 日科技連.
- (11) Z. Gurdal, R. T. Haftka, P. Hajela, Design and Optimization of LAMINATED COMPOSITE MATERIALS, (1999), John Wiley & Sons.
- (12) 田口玄一, 直交表と線点図, (1962), 丸善株式会社.
- (13) 柏村孝義, 白鳥正樹 于強, 実験計画法による非線形問題の最適化 (1998), 朝倉書店.
- (14) 菅民郎, Excel で学ぶ実験計画法 第 2 版, (2012), オーム社.