

航空エンジン技術開発におけるタグチメソッドの適用

Application of Taguchi's Methods to Aero-Engine Engineering Development

藤 本 良 一 航空宇宙事業本部品質保証部 部長

タグチメソッドは、1980年代から日本生まれの技術開発手法としてアメリカで注目され、1990年代に日本に逆輸入された。当社の航空宇宙事業本部では、1994年ごろから普及・定着を開始し、現在までに多数の成功事例を蓄積することができた。これらの事例のうち、(1)難削材ドリル穴あけ加工条件の最適化 (2)難削材の高速切削条件の最適化 (3)エンジン・シャフト・スplineの最適設計、の三つの事例を基にタグチメソッドのパラメータ設計について、その効用と考え方を紹介する。

Taguchi's Methods are an engineering development tool that has been introduced in many countries. Many success stories have been reported such as quality problems resolved all at once, machining productivity increased by double and development lead time reduced by half, etc. The Aero-Engine & Space Operations of IHI introduced Taguchi's Method in 1994, and has contributed to every process improvement, such as optimization of vibratory drill machining for hard to cut material, optimization of milling for hard to cut material, and optimum design of engine-shaft-spline. Based on such best practices, this paper describes the overview and usefulness of Taguchi's Methods.

1. 緒 言

どんな使用条件や環境条件下においても、頑健で故障せずにその機能を発揮することができる製品の設計法がある。この方法は、アメリカではロバスト設計あるいはタグチメソッド、日本では品質工学とよばれている。タグチメソッドは、1980年代から日本生まれの技術開発手法としてアメリカで注目され、1990年代に日本に逆輸入された。この方法を適用することで 各種の品質不適合が一掃できた 故障も価格も半減できた 加工精度と生産効率が飛躍的に向上した 開発期間が半減できた、などの成果報告が相次いだため、現在では日本でも多数の企業が採用するまでに至っている。

当社の航空宇宙事業本部（以下、空本部と呼ぶ）では、1994年から普及・定着を開始し、現在まで多数の成功事例を蓄積することができた。本稿ではこのうちの幾つかの事例を基に、タグチメソッドの効用と考え方を紹介する。

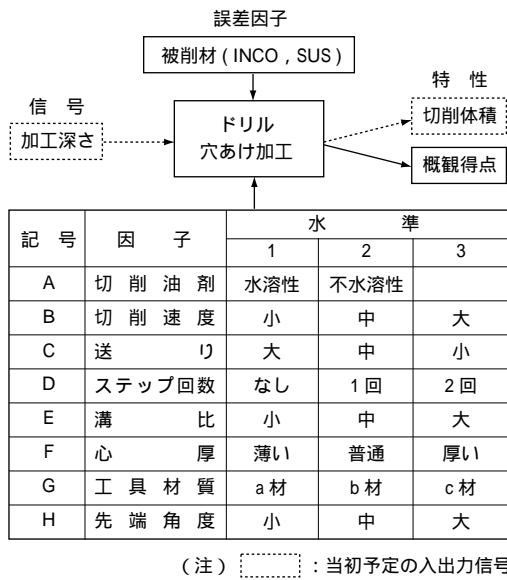
2. 難削材ドリル穴あけ加工条件の最適化

航空エンジン部品の多くは難削材であり、難削材の切削効率向上は生産技術における大きな課題である。この事例は田無工場生産技術部が1995年に取り組んだものである。

タグチメソッドと従来の実験計画との大きな違いは、作戦的に大きな誤差因子（以下、ノイズと呼ぶ）を用いて、

機能特性の安定性を SN 比という総合尺度で評価する点である。ノイズとは、製品機能のばらつきの原因となる製造誤差、劣化、使用環境のことで、故障の原因になる因子の総称である。開発段階にノイズが不十分な状態で製品の機能・性能を検討した場合、実使用段階で機能特性のばらつきが発生する。これを防ぐため、従来は使用制限や環境制御が必要であった。本事例ではノイズとして切削性の大きく異なる INCO718（以下、INCO と呼ぶ）と SUS304（以下、SUS と呼ぶ）の被削材を用いた。いずれの被削材にも穴あけができる最適加工条件をみつけることができれば、その加工条件はノイズに左右されない非常にロバストな加工条件のはずである。実験では、ドリル穴あけ機能として加工深さを入力信号とし、切削体積を出力特性とした。誤差因子は被削材質とし、制御因子は加工条件で4個、工具条件で4個とした。また、加工は当時もっとも切削性能が良いとされていた振動切削装置を使用することにした。難削材のドリル穴あけ加工のパラメータ図（以下、P-図と呼ぶ）を第1図に示す。

当初、振動切削をしても、同じ加工条件で硬度が大幅に異なる INCO, SUS いずれに対しても穴あけができるとは誰も思っていなかった。実験の結果、INCO で54本中34本が、SUS で54本中40本のドリルが折損あるいは切削不能となり、当初目的の入力信号を加工深さとする動特性の切削性の評価はあきらめるほかなかった。それでも、加工後の外観で得点をつけて、望小特性の SN 比を基に最適



第 1 図 難削材ドリル穴あけ加工の P - 図
Fig. 1 Parameter diagram for drilling the holes in hard to cut material

条件を予測し、その条件で加工確認をした結果、INCO、SUS ともに穴あけ可能な条件がみつかった。

要因効果図を第 2 図に示す。要因効果図とは、多次元（この場合は 8 次元）応答曲面を各因子 (A ~ H) の軸方向で輪切りにした断面と考えられたい。尺度は望小特性の SN 比であり、SN 比が相対的に大きいと、加工後の外観が良好でかつ、ばらつきも安定することになる。これから、F の心厚は薄いほう (F1) が、また H の先端角度は大きい方 (H3) が、飛躍的に良いことなどが読み取れる。

最適条件においては現状条件からの改善を示す利得は 14.62 dB (デジタル) と大きく、 $(10^{14.62/10})^{1/2} = 5.39$ から、ばらつきを従来比で 1/5.39 に改善できることを示した。さらに、この条件をベースに 2 度の実験を重ね、う余曲折の末、最終的には環境にやさしい水溶性の切削油で、通常のドリル加工でも難削材の切削効率を従来の 5 倍にすることができた。現在の多くのドリル加工がこの成果の恩

恵を受けている。高価な振動切削装置を用いることによる切削効率の改善が公称で 1.3 倍であり、通常切削で 5 倍という値は非常に大きな改善である。振動切削の最適が通常切削の最適になり得るのは、タグチメソッドによって得られた最適条件付近では、多少条件がずれても最適を維持できるという性質があるためである。

さらに技術的な成果としては、従来の学説では心厚は厚く剛性のあるツールが丈夫でよいとされたが、この実験では、逆に心厚は薄く、先端角度を大きくするほうが、切削性が良く長寿命であることが判明した。過去の経験にとらわれず実験条件を設定し、最適条件付近に網を張れたこと、あきらめずに最後まで追及したことが、この事例が成功した要因といえる。

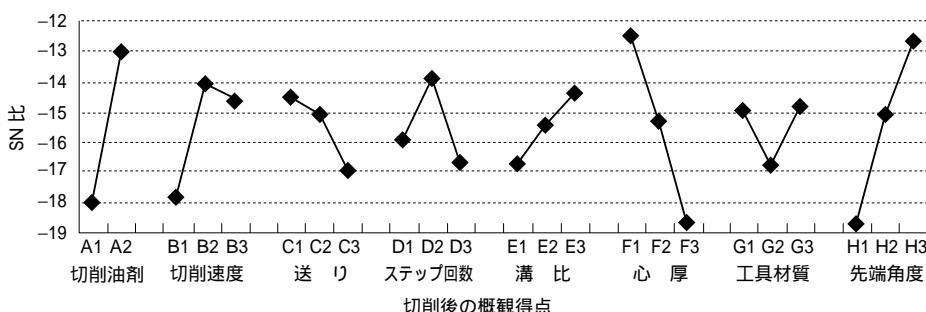
最近の技術開発競争では設計要求がでから生産技術を開発するのでは間に合わない。タグチメソッドではあらかじめどんな設計にも対応できる技術を準備しておく「設計に先行した生産技術」の体制を可能にすることができる。

3. 難削材の高速切削

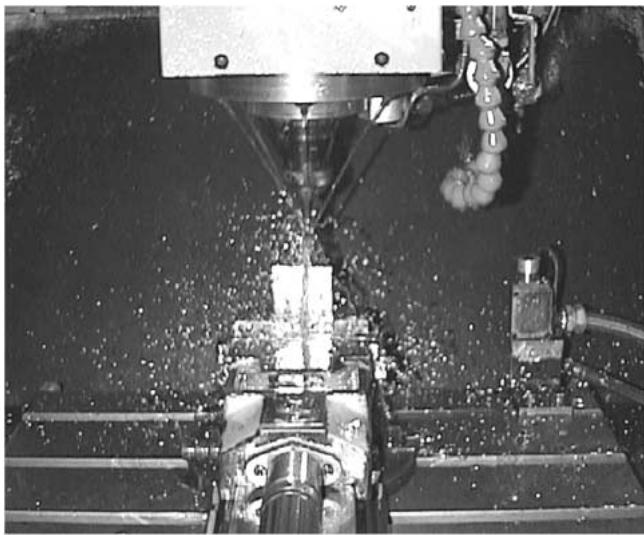
航空エンジン生産技術の開発において、インペラやブリスクなど、複雑な形状の難削材を高速で切削する技術は世界のすう勢である。1997 年に生産技術部で実施したこの研究は、「すべての機能エネルギーの変換」という考えに基づいて加工電力量で加工機能を評価する新しい試みであったが、田口玄一先生（日本規格協会）、矢野宏先生（日本規格協会）他、タグチメソッド最強の指導者に恵まれたこともあり、大成果を収めることができた。

実験では、ノイズを被削材の剛性（板厚）とし、入力信号を時間、出力特性を電力および切削除去重量とし、四つの加工条件と四つの工具条件を制御因子とした。特徴は、複雑な形状のインペラやブリスクを切削する代わりに、テストピースとして単純なチタン板材（薄板と厚板）を採用

したこと、スピンドル駆動電力や切削重量といったエネルギーや仕事量を特性に選んだことである。また、工具の大幅な改善が大幅な切削性の改善につながるとみて制御因子として工具設計のパラメータを四つ含ませたことである。高速加工実験の様子を第 3 図に示す。この実験は、 L_{18} 直交表に制御因子 8 個を割



第 2 図 望小特性 SN 比の要因効果図
Fig. 2 Response graph for signal noise ratio of smaller-is-better characteristics



第3図 チタン高速切削の加工実験
Fig. 3 High speed cutting of titanium

付けて、4枚刃ソリッドエンドミルで板のリム部を1パス切削、2パス切削、3パスと切削した場合の重量と電力を計測するもので、1ケースでテストピースは6枚、合計 $6 \times 18 = 108$ 枚のテストピースを使った大掛かりな実験となつた。

最適化手順は複雑なため省略するが、時間：切削除去重量（以下、重量と呼ぶ）、時間：電力、電力：重量の三つの機能性を検討して最適条件を予測し、確認実験を実施した。予測された最適条件の現状条件からの改善量である利得は、時間：重量では 20.46 dB 19.73 dB, 9.08 dB 8.83 dB と SN 比・感度ともに非常に良い再現性を示した。また時間：電力、電力：重量でも総じて良い再現性が確認でき、実験は妥当と判断できた。ただし、唯一、時間：電力の SN 比だけは再現性がなく、今後に課題が残った。

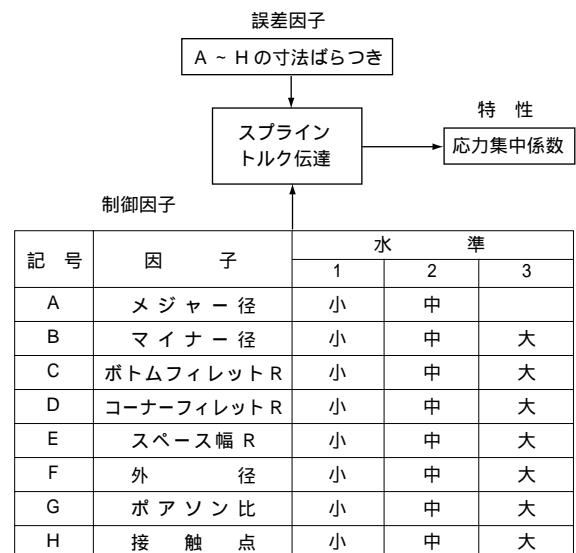
チタンは熱伝達率が低く、高速切削加工を試みて火を出したという話もあるが、実験の成果として加工表面粗さを落とすことなく、切削速度は従来の 10 倍、切削効率も 5 倍に向上できた。一方、技術的な成果としては、従来良いとされていた、低速、遅送り、深切込みの加工よりも、高速、早送り、浅切込みの加工が優れていることが分かった。1刃当たりの仕事量を少なくして加工の被削材に対する影響を小さくし、その代わり飛躍的に高速で切削して、切削量を稼ぐという方法である。素人でも道理にあった削り方であると理解できる。また、従来の表面粗さや寸法精度といった品質特性よりも、エネルギーである加工電力量や切削重量が加工機能を評価するうえで、はるかに有効な特性であることが確認できた。

4. エンジン・シャフト・スプラインの最適設計

日本でもここ数年、設計段階でのシミュレーション数値計算への適用事例が増加の傾向にある。この事例は 1996 年に民間エンジン技術部が実施したもので、エンジンのクリティカルな部位であるタービン・スプラインを数値実験（シミュレーション）で構造強度の最適設計を行ったものである。

まずタグチメソッド適用のため、多量のモデルを無人で計算できるよう、メッシュ切りも含めた FEM とタグチメソッドの計算を合わせたプログラムを作成した。計算を完全自動化した結果、従来、長時間掛けて数回の数値計算で済ませていたところを、100 回程度の計算も短時間で実施できるようになった。数値実験は、第4図のパラメータ図に示すように望目特性を用い、各制御因子（寸法）のばらつきをノイズとし、 L_{18} 直交表に 8 個の制御因子を割付けて実施した。SN 比と感度を計算し、第1表に示す。次に数値実験の結果を示す第5図の要因効果図を解説する。

SN 比は寸法ばらつきに対する応力集中係数の安定性を示し、大きいほうが良い。感度は、応力集中係数そのものを示し、小さい方が良い。A のメジャー径は、SN 比の効果は小さいが、感度の効果は大きい。したがって、ばらつきに影響なく、径を小さくして感度（応力集中係数）を小さくすることができるので A1 を選ぶ。B のマイナー径は SN 比・感度ともに効果は小さい。C のボトムフィレット R は SN 比・感度ともに大きく、R を大きくすると安定性は増すが逆に感度（応力集中係数）は大きくなる。ひとまず



第4図 シャフト・スプライントルク伝達の P - 図
Fig. 4 Parameter diagram for transmission of torque by shaft-spline

第1表 L_{18} 直交表による数値実験とSN比・感度
Table 1 Signal noise ratio and sensitivity for numerical experiment by L_{18} orthogonal array

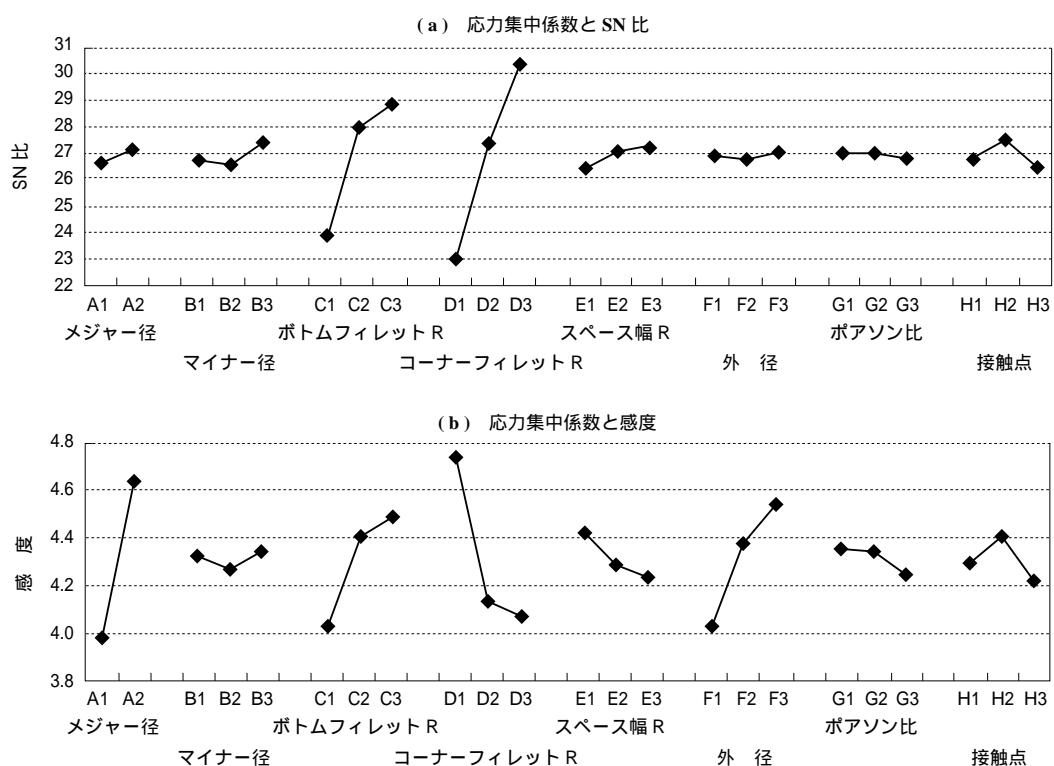
$L_{18} 2 \times 3^7$	因子の記号								SN比	感度
	A	B	C	D	E	F	G	H		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	18.90	3.99
2	1	1	2	2	2	2	2	2	28.81	4.07
3	1	1	3	3	3	3	3	3	31.66	3.92
4	1	2	1	1	2	2	3	3	18.92	3.90
5	1	2	2	2	3	3	1	1	28.40	3.98
6	1	2	3	3	1	1	2	2	31.98	3.78
7	1	3	1	2	1	3	2	3	23.78	3.87
8	1	3	2	3	2	1	3	1	31.42	3.53
9	1	3	3	1	3	2	1	2	25.88	4.80
10	2	1	1	3	3	2	2	1	27.68	4.13
11	2	1	2	1	1	3	3	2	24.37	5.55
12	2	1	3	2	2	1	1	3	29.13	4.29
13	2	2	1	2	3	1	3	2	24.85	3.85
14	2	2	2	3	1	2	1	3	30.26	4.63
15	2	2	3	1	2	3	2	1	24.80	5.49
16	2	3	1	3	2	3	1	2	29.27	4.43
17	2	3	2	1	3	1	2	3	24.83	4.74
18	2	3	3	2	1	2	3	1	29.44	4.70

安定性の高い C3 を選ぶ。D のコーナーフィレット R は SN 比・感度ともに効果は大きく、R を大きくすると安定性が大きく増し、かつ応力集中係数は大きく下がるので D3 を選ぶ。E も D と同様な傾向であるが、効果は小さい。F

の外径は感度の効果は大だが SN 比の効果は小さいので、安定性を維持しつつ応力集中係数の小さい F1 を選ぶことができる。G, H の因子の効果は小さい。

A や F のように、安定性を維持しながら感度を変更できる因子を調整因子というが、まず、SN 比優先で最適化し、感度で調整するといった 2 段階の最適化が、タグチメソッドの特徴である。現実の最適化は多くの設計制約条件下で行う必要があるが、最初から制約条件下での最適化を行うのではなく、まずタグチメソッド適用のシミュレーションで各パラメータの応答傾向を把握し、SN 比で最適化の後、制約条件に合うように感度で調整する方法を探る。最適条件による最適値の予測と確認計算の利得を比較すると、SN 比 6.33 5.17、感度 -0.94 -0.99 と再現性はきわめて良く、この数値実験の妥当性が確認された。

設計検討は予想外の短期間で終了できた。さらにこの機械要素については、航空エンジンの安全性構造設計の第一人者が検討した結果と同等の最適設計が、誰でも同じように短時間でできる体制が確立できた。この事例に引き続き各種クリティカル部品の最適設計標準化が進んでいる。最近の設計はブラックボックスのコンピュータプログラムに输入さえすれば、答えが输出される時代になりつつあるが、技術者は输入パラメータの変化が输出にどう影響するのか



第5図 数値実験における要因効果図
Fig. 5 Response graph for numerical experiment

把握して使う責任がある。ランダムに多数の計算をして入出力の傾向をつかむ方法は、入力パラメータが多くなると不可能に近い。上記の事例の場合、ノイズを決めるための予備計算で 18 回、最適条件を求める計算で 36 回、計 54 回の計算を行っている。この計算結果から、 $2 \times 3^7 = 4,374$ ケースの条件組合せを予測でき、またその条件でのばらつきの応答も評価・検討できる。

あるとき、あるクリティカル品目で最悪条件における最大応力の検討が必要になったことがある。その品目はタグチメソッド適用済みであったため、通常数週間も掛かる検討期間が即時にできたという例もある。この検討は内容においても海外技術者からも高い評価を得た。また、最近、空力設計と構造設計を同時にタグチメソッドで最適化して、開発期間を従来比で半減したという事例がでている。「開発期間が半減できる」という話は本当である。設計初期段階でのシミュレーションにおけるタグチメソッド適用の時代がきているといえる。

5. 結 言

空本部の成功事例をベースに、タグチメソッドの考え方や効用の一面を紹介した。総括すると、タグチメソッドの目的は現実の設計や生産活動の改善であり、工学本来の目

的である最適化を効率的に追求するものである。これを適用することで従来の経験を覆すとんでもない事実が分かり、飛躍的な改善が可能となる。

また、ノイズに対する安定性尺度である SN 比によってばらつきを検討できる唯一の設計手法でもある。ばらつきは故障の原因であり、ノイズはばらつきの原因であるから、ノイズに強い製品の設計法・故障しない製品の設計法ということである。

参 考 文 献

- (1) 田口玄一：品質工学応用講座　技術開発のための品質工学　日本規格協会 1994 年 3 月 pp.1 - 156
- (2) 藤懸 清：難削材の切削加工における品質工学的研究　品質工学会　品質工学 2000 年 12 月 第 8 巻 6 号 pp.55 - 61
- (3) 藤本賢志：Ti 高速切削工程の最適化　品質工学 フォーラム 第 6 回品質工学研究発表大会論文集 1998 年 6 月 pp.173 - 178
- (4) 田中智之：シャフト・スプライン歯型設計最適化　品質工学　品質工学会 2002 年 3 月 第 10 巻 3 号 pp.80 - 84