

宇宙船設計支援システムの研究

－ 概念設計のためのパラメータ感度解析手法の検討 －

Study of Design Support System for Spaceship

-Parameter Sensitivity Analysis Method for Concept Design-

○角 有司¹⁾, 丸 祐介²⁾, 三好 寛³⁾ 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
古賀 毅⁴⁾, 丹羽 隆⁵⁾, 青山 和浩⁶⁾ 東京大学大学院 工学系研究科

Usually it is difficult to apply sensitivity analysis to concept design phase, because engineers cannot define control factors and noise factors quantitatively. In this paper, we suggest a new sensitivity analysis method (Product and Operation sensitivity analysis method) that can be applied for concept design phase without defining control factors and noise factors. The prototype system based on this method is implemented, and some examples are shown.

1. 緒言

1.1 本研究の背景

近年、宇宙マーケットの多様化・低コスト化が進行しており、我が国は、欧米各国だけでなく中国・インドといった新興国も巻き込んだ、厳しい技術競争にさらされている。これまでの我が国の宇宙開発は、実機試験を通じた性能把握及び課題抽出を行う開発手法で行われており、開発期間・開発費用が長期化する傾向があった為、最近ではシミュレーション技術の導入などを通じた、宇宙機開発の高信頼化・低コスト化の取り組みが進められている。

しかし、これからの宇宙マーケットでの技術競争をリードしていく為には、従来の高信頼化・低コスト化に向けた検討のみならず、新しい宇宙輸送システムの概念(コンセプト)の構築が重要であり、そのためには、従来の開発手法を抜本的に見直した、

新しい設計手法の確立が必要である。

筆者らは、平成 20 年度より、宇宙輸送システムの概念設計を行うための新しい設計手法(P&O 設計手法: Product and Operation design method(図 1.1))を検討するとともに、設計手法を導入した宇宙船設計支援システム(SODAS: System Of Design and Analysis for Spaceship)のプロトタイプシステムを構築し、有効性の検証を進めている。

一般に、設計とは、制約条件を満足させるための設計解を探索する知的作業である。しかしながら、宇宙輸送機の概念設計段階においては、始めから達成すべき設計要件(飛行高度、ペイロード要求、等)が必ずしも明確でないため、試行錯誤的に多くの検討を実施しながら、設計要件と、それを満たす設計解(機体形状、エンジン仕様、等)とを両方とも明確にしていくアプローチが必要である。設計要件と設計解とが取り得る範囲は多岐に亘るため、有効な設計パラメータを選択し、そのパラメータの感度を把握しながら、設計を進める必要がある。

ところで、パラメータの感度を把握する手法として、タグチメソッドのパラメータ設計手法が有効であるとの報告がある。しかしながら、パラメータ設計手法は、主に詳細設計・製造設計等における品質の作り込みに用いられる場合が多く、概念設計段階に適用される場合は少ない。

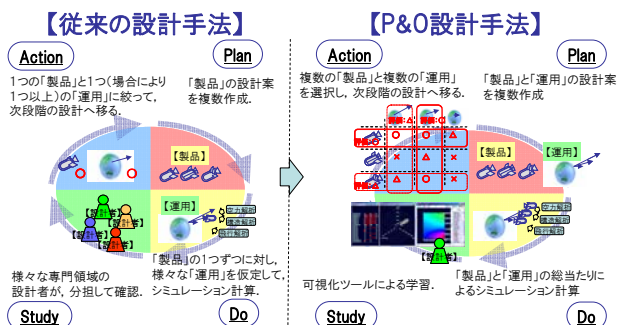


図 1.1. P&O設計手法の概念図

1.2 本研究の目的

本研究では、概念設計で利用できる新しいパラメータ感度解析手法として、P&O 感度解析手法 (Product and Operation sensitivity analysis method) の検討を行うこととした。本手法は、P&O 設計手法におけるモデル定義を有効に利用した一つのツールとして位置づけられる。本論文では、まず、従来のパラメータ設計手法を P&O 感度設計手法とするための要件整理を行い、モデル化を行ってプロトタイプシステムに実装し、実際に宇宙輸送機概念設計に適用し、有効性を検証した内容を報告する。

2. P&O 設計手法とは

2.1 従来の設計手法

従来の宇宙輸送機の設計手法の多くは、一つの「製品」(機体)と一つの「運用」(軌道設計)に絞ることを前提に、設計解を探索する方法であると認識できる。一つに絞ることによってターゲットを明確にでき、基本設計以降の設計作業を進め易くなる利点がある。

しかし、この設計手法で得られた一つの設計解は、設計の進捗に応じて、新たな要求や要因(例えば、コストダウン要求、計画と異なる機器・材料の使用、等)が新たに加わる事により、概念設計の後工程の基本設計、詳細設計で変更される可能性がある。設計変更を繰り返した結果、概念設計で予定した性能が得られない事態や、一連の設計変更のしわ寄せが特定の機器に集中するといった事態を招き、システム全体としての信頼性に悪影響を及ぼす場合が存在する。

2.2 P&O 設計手法の特徴

筆者らが提唱する P&O 設計手法とは、複数の「製品」と複数の「運用」とを、同時並行かつ継続して検討する手法であり、次のメリットが挙げられる。【文献1】

- ① 一度に多くの「製品」と「運用」の組み合わせを検討できるため、効率が良い設計が出来る。
- ② 多くの「製品」や「運用」と比較し、全体像を把握しながら、最適な設計解を選択する事が出来る。

- ③ 一つの「製品」で複数の「運用」が可能な、多目的宇宙機概念設計が出来る。

2.3 宇宙船設計支援システム「SODAS」の概要

SODAS とは、P&O 設計手法の実現を目的として、宇宙輸送機概念設計を対象として試作されたプロトタイプシステムであり、オブジェクト指向言語である Smalltalk (Visual Works 7nc)【文献2】によって構築されている。以下に、システムの概要を示す。

2.3.1 SODAS におけるモデル定義

SODAS では、以下のとおり、「製品」、「運用」、「解析」がモデルとして定義されている。

「製品」の例: 機体外形, エンジン, タンク, 主翼, 等。

「運用」の例: 打上地点, レーダ局, 地球環境, エンジン燃焼時刻, 姿勢制御の時系列データ, 等。

「解析」の例: 飛行解析, 空力解析, 構造解析, 等。

2.3.2 SODAS の設計サイクルと設計支援機能

SODAS では、PDSA (Plan-Do-Study-Action) サイクルにならって4つのステップを順に実行し、設計を行うこととしている。

(1) 設計案定義<Plan>

「製品」「運用」を定義する事が可能である。設計者は入力画面を介して、データを追加・修正・削除する。

(2) 解析実行<Do>

「製品」「運用」のモデルの組合せを作成し、「解析」を実施する機能である。解析を実行する解析ツールは、実際に宇宙輸送機プロジェクトで利用されているものを導入して利用することが可能である。

(3) 結果確認<Study>

ユーザが、解析した結果を確認し、次段階の効果的な設計とするための学習を実施するためのツールとして、4種類の可視化ツール(3D表示ツール、自己組織化マップ、グラフツール、データマイニングツール)を準備している。

今回の P&O 感度解析手法は、解析結果を利用して、感度・SN比を表示し、設計者に判断材料を提供するツールであるため、PDSA サイクルのうち結果確認<Study>に位置づけられると考えられる。

(4) 結果のスクリーニング<Action>

SODASには、結果のスクリーニング(ふるい分け)をするツールが準備されている。設計者は本ツールに対し制約条件とその値を指定することで、「製品」と「運用」のそれぞれについて、制約に対する満足度を計算し、順位付けをする事が可能である。設計者は、本ツールにより、制約の満足度が高い(筋が良い)「製品」と「運用」の組合せを複数個抽出し、次の段階の設計におけるリファレンスとして利用する。

3. P&O 感度解析手法とは

3.1 概念設計における感度解析手法の現状

タグチメソッドに代表される感度解析手法は、概念設計での利用が難しいと評価される場合がある。その理由の一つとして、概念設計では、設計の制約と設計解が不明確かつ取り得る範囲が広いため、何を「制御因子」とし、何を「誤差因子」として扱って良いか、定量性も含めて判断することが困難であるという理由を挙げることが出来る。

3.2 P&O 感度解析手法の特徴

P&O感度解析手法は、「製品」と「運用」との組合せを全て列挙し、「製品」から見て「運用」が誤差因子であり、「運用」から見て「製品」を誤差因子として扱う手法である(図 2.1)。「制御因子」「誤差因子」といったパラメータを新たに定義する必要が無く、通常的设计で利用する解析ツールのパラメータがそのまま利用できるため、以下のメリットが期待できる。

- ① 概念設計用のツールを導入・適用することで、そのまま概念設計段階でも利用が容易となる。
- ② 感度解析で利用したパラメータ値と、他の解析や可視化ツールとデータの共通利用が期待できる。これにより、他のツールの観点から、感度解析の

【誤差因子】				【誤差因子】					
制御因子	製品	運用	SN比	感度	制御因子	製品	運用	SN比	感度
	総当たりのシミュレーション	計算	→	→		総当たりのシミュレーション	計算	→	→

「製品」から見て「運用」が誤差因子。「運用」から見て「製品」が誤差因子。

図 2.1 新しい感度解析手法(P&O 感度解析手法)

パラメータ値の評価が可能となる。

3.3 SODAS における P&O 感度解析手法の実現

3.3.1 既存の感度解析手法

P&O 感度解析手法の評価手法は、静特性の望目特性の評価手法を参考とすることとした。望目特性とは、タグチメソッド(パラメータ設計手法)の中でも、製品開発の際によく利用されるものの一つであり、狙いや目標値に対して全てのデータが揃っていることを理想とする評価特性である。【文献3】

望目特性は以下のフローで実施される。

- (A1) 制御因子、誤差因子の定義。計算表への割付
- (A2) 解析の実行。
- (A3) 解析結果の計算表への割付
- (A4) 解析結果をもとにした、感度、SN 比の計算。
- (A5) 要因効果図の作成。

3.3.2 P&O 感度解析手法への拡張

望目特性解析における情報生成過程を整理し、P&O 感度解析手法とするための要件を示す。

- (A1) 制御因子、誤差因子に関する要件
 - 統合化されたシステムとするために、SODAS で定義されている「製品」と「運用」のモデルが利用出来る事が必要である。
 - 製品から見て運用が誤差因子、運用から見て誤差因子と扱えるために、「製品」と「運用」とを入れ替えても計算が可能である事が必要である。
 - 感度と SN 比の計算を正しく実行するために、「製品」および「運用」は直交表によって作成されている事が必要である。
- (A2) 解析の実行に関しては、統合化されたシステムとするために、SODAS で定義されている「解析」のモデルが利用出来る事が必要である。
- (A3) 解析結果の計算表への割付けに関しては、「製品」と「運用」との多対多の検討が出来ること。つまり、任意の個数の「製品」「運用」が扱える事が必要である。
- (A4) 上記(A1)~(A3)の情報をもとに、感度、SN 比の計算を可能とする機能が必要である。

(A5) 上記(A1)~(A3)の情報をもとに、要因効果図の作成を可能とする機能が必要である。

3.3.3 P&O 感度解析手法のモデル化

P&O 感度解析手法の実現に向け、以下のモデルを定義することとした。

① 直交表モデル(SSParameterTemplate)

直交表を利用して、製品および運用の多くの設計案を一度に生成する機能を有する。

② 直交表一行モデル(SSParameterTrial)

直交表の一行に該当するモデルであり、直交表モデルによって管理されている。一つの「製品」(もしくは「運用」)と、それに対して実施した複数(任意)の解析結果を集計・管理し、感度およびSN比の計算を実行する事が可能である。

③ 要因効果図モデル(SSTaguchiTool)

要因効果図のモデルであり、本感度解析手法のアウトプットに該当する。これは出力パラメータ毎に、最大値に対する「感度」と「SN比」、最小値に対する「感度」と「SN比」の4つの表を作成する。

④ 入力パラメータ管理モデル(SSMethodPackage)

入力パラメータと解析結果との関係を管理するもので、要因効果図作成を容易とするための中間モデルである。②直交表一行モデルによって生成され、③要因効果図モデルの要因効果図作成に利用される。

⑤ 出力パラメータ管理モデル(SSOutputPackage)

出力パラメータと解析結果との関係を管理するもので、要因効果図作成を容易とするための中間モデルである。②直交表一行モデルによって生成され、③要因効果図作成に利用される。

3.3.4 P&O 感度解析手法の情報の流れ

ここまでで定義したモデルを利用することで、P&O 感度解析手法の流れは以下となる(図 3.1)。

(P1) 「製品」と「運用」の設計案の作成

設計者が SODAS の「製品」および「運用」定義機能により、「製品」と「運用」を1つずつ作成する。生成されたモデルをリファレンスモデルと呼ぶ。

(P2) 直交表による複数設計案の作成

設計者が「直交表モデル」を利用し、リファレンスモデルの「製品」と「運用」のそれぞれについて、新たなモデル(サブタイプモデルと呼ぶ)を複数生成する。

直交表の種類は、 $L18(2^1 \times 3^7)$ 直交表と $L36(2^{11} \times 3^{12})$ 直交表の2種類を準備している。後者を使用すれば最大で36個のサブタイプモデルを作成でき、パラメータは23種類まで利用できるため、概念設計であれば十分であると考えられるが、不足するのであれば、より大きな直交表を SODAS に導入し対応することとなる。

(P3) 制御因子、誤差因子への「製品」「運用」の割付

直交表モデルが、「製品」と「運用」のサブタイプモデルのデータを、従来の制御因子、誤差因子に該当する位置に割り付ける。「製品」を制御因子とする場合と、「運用」を誤差因子とした場合とで、2とおりの計算表を作成することとなる。

(P4) 解析の実行

SODAS の解析機能を利用し、解析を実行する。 $L36$ 直交表を利用して「製品」と「運用」のサブタイプモデルを作成した場合は、計算表に従って、 $36 \times 36 = 1296$ (回)の計算を実施することとなる。

(P5) 解析結果の集計

直交表モデルが、SODAS の解析結果を抽出し、計算表の実験データの欄に割り付けを行う。

(P6) 感度、SN比の計算

直交表一行モデルが、感度、SN比の計算を実施し、要因効果図モデルに出力する。

(P7) 要因効果図の作成

要因効果図モデルが、出力パラメータの数だけ要因効果図のグラフを作成し、入力パラメータの水準値に対応する感度、SN比の計算結果を表示させる。要

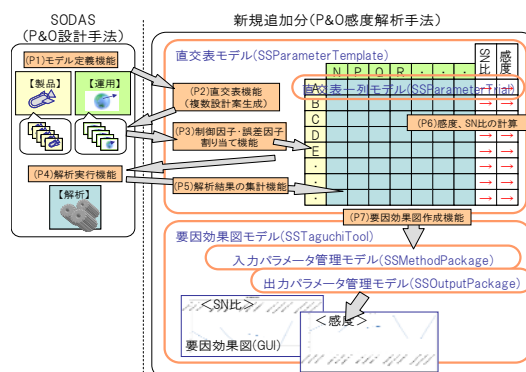


図 3.1. P&O 感度解析手法の情報の流れ

因効果図のグラフは、表計算ソフト(Excel)を利用しており、報告書作成等の2次利用に配慮している。

4. 概念設計への適用

4.1 SEEDの概要

本年度は、JAXA 宇宙科学研究所が中心となって検討を進めているスペースプレーン技術実証機(SEED)への適用を試行した。SEEDとは、超音速で飛行する機体の検討を通じて、スペースプレーンの実現に不可欠な基礎的技術の取得を狙うものである。今年度(2008年度)より、WG(ワーキンググループ)形式にて検討が開始され、現在は概念設計を進めている段階である。「製品」としては1種類、「運用」としては、(経路A; Pullup and Boost(以下P&Bとする)と、(経路B; Boost and Glide(以下B&Gとする)の、大きく2種類のアイデアが提示されている。

本研究では、WGにて検討されているデータをリファレンスモデルとして、水準2に割り付け、「製品」に関しては±10%、「運用」に関しては±20%の範囲で値を振ったものを採用した(図4.1)。(経路B; B&G)は、エンジン燃焼開始時刻は0秒で固定であるため水準値には出てこない点と、姿勢制御のタイミングの数が少ない点が大きく異なっている。

以下の検討は、制約条件を、マッハ数4.5以上、動圧100[kPa]以下、の2つとして進めたものである。

4.2 経路A; (P&B)への適用

(経路A; P&B)で検討して得られた要因効果図を図4.2に示す。マッハ数を上げ、動圧を下げるためには、「製品」は機体重量の軽減および翼面積・リフト係数の増加が有効であり、「運用」は「製品」程効果は大きく無いが、全体的な傾向として、エンジン点火前に制御角を上げて、点火後は制御角を下げると良いことが、滑らかな感度曲線から読みとれる(図中○印)。

上記の確認として、リファレンスデータに対し「運用」のみ反映して計算したところ、マッハ数が向上し、動圧が下がる良好な結果が得られた(図4.3)。これらの



図 4.1. SEED の「製品」及び「運用」パラメータ

感度情報(特に運用)は、従来は実機試験を通じて得られるものであり、設計者の暗黙知とされてきたが、本システムにより容易に取得でき、かつその情報を利用した設計改善が可能であることが分かった。

4.3 経路B; (B&G)への適用

(経路B; B&G)に適用した場合の要因効果図を図4.4に示す。(経路A; P&B)と比較し、動圧が低いが、マッハ数も低い事が分かる。また「製品」では推力係数、翼面積が(経路A; P&B)とは逆の傾向を示しており(図中○印)、空気が薄い上空にいるうちに加速し終わった方が良い事、落下しながら加速する場合には翼は抵抗に過ぎない事が分かる。

4.4 2つの経路を同時に満たす製品の検討

続いて、P&O設計手法の特徴を生かし、一つの「製品」で、(経路A; P&B)と(経路B; B&G)の両方を満足する「製品」の感度解析を行った結果を以下に示す(図4.5)。2つの「運用」の間で、推力係数、翼面積、等のパラメータは逆の傾向を示していたが、推力係数については、上昇させるとマッハ数、動圧ともに効果があり、翼面積については大きくすれば動圧に有利(マッハ数はほとんど変化無し)であることが分かる(図中○印)。

4.5 ロバスト設計解の感度解析結果

最後に、P&O設計手法とP&O感度解析を両方活用した事例として、(経路A; P&B)を対象として「機体」と「運用」のロバスト設計解を得取した上で、今回のP&O感度解析手法を実施した例を示す(図4.6)。このロバスト設計解は、スクリーンツールを利用し、36個の「製品」と「運用」のうち上位3つを選

択し、そのパラメータ範囲を次段階の入力条件として作成したものである。今回の例では動圧 100 [kPa]の制限が必ず満足できるロバスト設計解が得られており、設計者は動圧以外のパラメータにターゲットを絞って、感度情報を活用した設計を進めることが可能である。

5. 結言

5.1 本研究の結論

従来は感度解析手法の適用が困難とされていた概念設計段階を対象とした新しい「P&O感度解析手法」を提案し、実際にプロトタイプシステムを試作・利用することで、従来は設計者の暗黙知であった「製品」と「運用」の感度情報を取得するとともにそれを利用した設計改善が可能である事を確認し、本手法の有効性を示した。

5.2 今後の課題 (信頼性への寄与)

- (1) P&O 設計手法を利用し、様々な「運用」を想定したロバストな「製品」の設計解が得られる事が期待される。またその検討に、P&O 感度解析手法による感度情報を利用する事で、性能把握、設計探索が効率的に行える事が期待される。
- (2) 設計改善を繰り返すうちに、特定の機器にしろ寄せが集中してトータルの信頼度に悪影響を及ぼす場合が存在する。P&O 設計手法によって、スタート時から現段階までの全ての設計案を把握した上で、P&O 感度解析手法の感度情報によって設計改善を行うことで、より信頼性の高い設計案の選択が効率的に行える事が期待できる。

6. 参考文献

[1] 角有司, 他; 製品情報と運用情報の組み合わせ探索による概念設計手法の検討, 日本機械学会論文集 2009 投稿予定。

[2] Smalltalk(NC); <http://smalltalk.cincom.jp/>

[3] 入門パラメータ設計, 日科技連出版, 2008

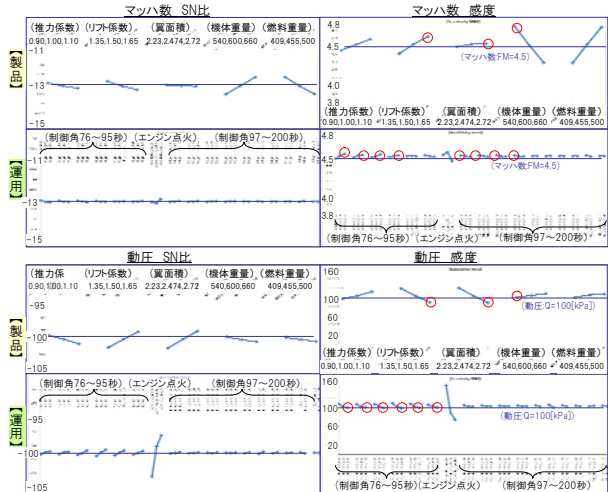


図 4.2 (経路 A:P&B)の SN 比, 感度情報

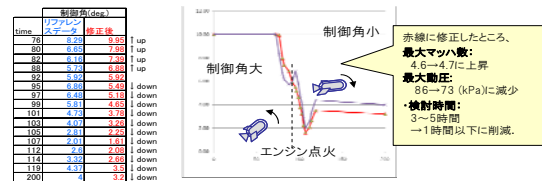


図 4.3 感度情報を利用した設計変更

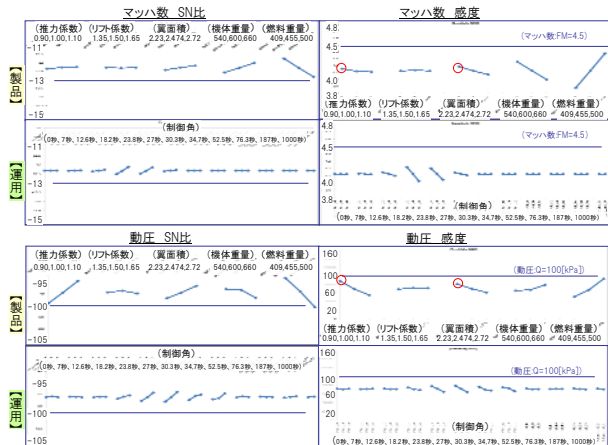


図 4.4 (経路 B:B&G)の SN 比, 感度情報

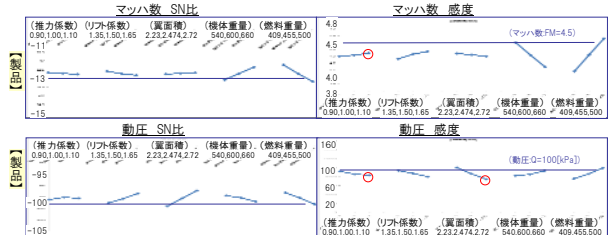


図 4.5 経路 A,B を満足する製品の SN 比, 感度情報

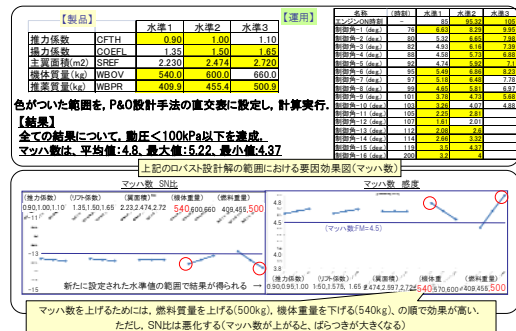


図 4.6 ロバスト設計解に対する SN 比, 感度情報