

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### ロケット用ターボポンプの多領域システム設計における 品質機能展開(QFD)の援用

川崎 聡, 内海 政春, 島垣 満,  
瀧田 純也, 弘松 純, 中村 智也

2013年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# ロケット用ターボポンプの多領域システム設計における 品質機能展開(QFD)の援用\*

川崎 聡<sup>\*1</sup>, 内海 政春<sup>\*1</sup>, 島垣 満<sup>\*1</sup>, 瀧田 純也<sup>\*1</sup>, 弘松 純<sup>\*1</sup>, 中村 智也<sup>\*1</sup>

## Assistance of QFD for Multidisciplinary System Design of Rocket Turbopump

Satoshi KAWASAKI<sup>\*1</sup>, Masaharu UCHIUMI<sup>\*1</sup>, Mitsuru SHIMAGAKI<sup>\*1</sup>, Junya TAKIDA<sup>\*1</sup>,  
Jun HIROMATSU<sup>\*1</sup> and Tomoya NAKAMURA<sup>\*1</sup>

**Key Words :** QFD, Turbopump, Rocket, Multidisciplinary design, Optimal design

### 1. はじめに

ロケットエンジン用ターボポンプ（以下、TP と略す。）は、インペラ、タービン、軸受、シールなどの複数サブシステムにより構成される機械システムである（Fig. 1）。このような多領域に跨るシステムでは、上位システム要求に応じてメインシステムからサブシステムへ要求仕様が技術展開され、要求を満足するサブシステムを統合してメインシステムが設計される手法が用いられてきた。更にメインシステムの最適化を行う場合は、メインシステムとサブシステム間で仕様を調整し、サブシステム個別の最適設計後にメインシステムの最適設計が行われるケースが多い。サブシステム側では提示された仕様を満足し、サブシステムとして重要な機能に対する最適設計が行われ、サブシステムとしての最適解は得られる。しかし、それらを統合したメインシステムが必ずしも上位システム要求に対して最適になっているとは限らない。

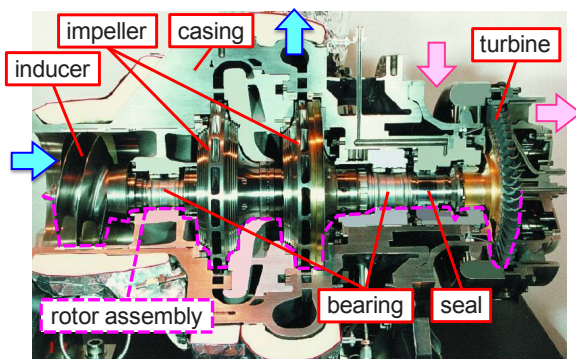


Fig. 1 ロケット用ターボポンプの構成

多領域に跨る設計のシステムレベルでの最適化については、いくつかの戦略<sup>(1)</sup>が研究されている。いずれの戦略においてもシステム間の結合と情報交換がシステムの全体最適化にとって重要なポイントであり、上位システム要求を適切に反映した情報の交換や共有を支援する手法があれば、システムの全体最適化を進める上で有効である。

仕様要求や機能要求を把握して設計に反映する有効な手法として品質機能展開（QFD）がある<sup>(2)</sup>。瀧田らは、設計要求を上位システムからの仕様と定義し、QFD を援用したタービンの最適設計を行った<sup>(3)(4)(5)</sup>。具体的には、QFD により重要設計パラメータを選定してロバスト設計を行った結果、要求に合致した最適化を効率良く実施できることを示した。このように設計プロセスの中に QFD を取り入れる提案<sup>(6)</sup>やその成功事例は多く報告されている。

上記 QFD の有用性を参考にして、著者らは TP システムの多領域最適設計を対象に、領域（サブシステム）間の関係性の可視化と情報の共有化を目的として QFD を実施した。その結果と効果について報告する。

### 2. 援用対象の設計手法

今回 QFD を援用した対象は「ダイナミック設計を適用した多領域最適化による TP 形態設計」である。初めにその設計手法およびその考え方を簡潔に示す。詳細については文献(7)(8)を参照されたい。

\* 平成 24 年 12 月 25 日受付 (Received 25 December 2012)

\*1 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系推進技術研究開発センター  
(Space Transportation Propulsion research and Development Center, Space Transportation Mission Directorate)

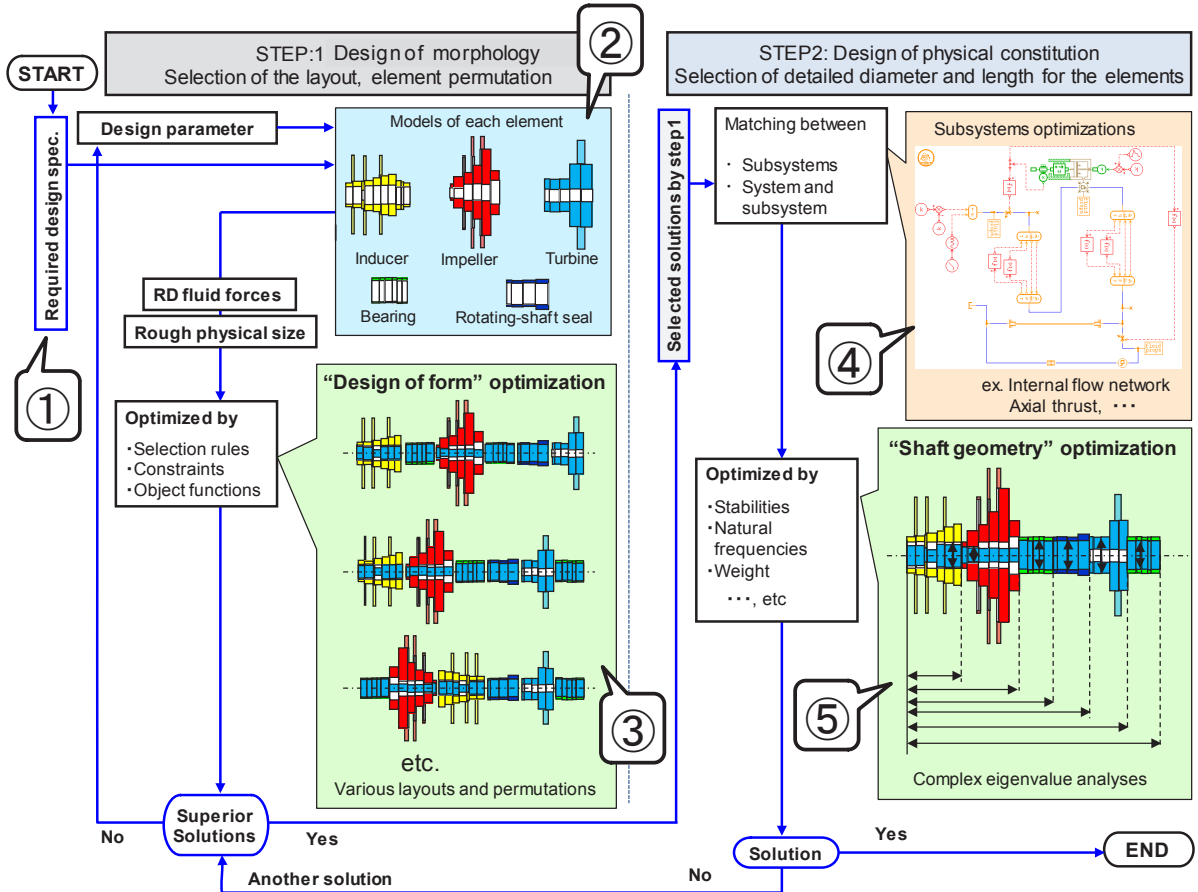


Fig. 2 多領域最適化によるターボポンプ形態設計のプロセス

- ・ **ダイナミック設計**：定常・一定・静的など、動きや応答などを取り入らない静的設計に対し、非定常・変動・安定性・相互干渉など動きやその応答を考慮する設計手法
- ・ **多領域最適化**：1つのサブシステムを1領域とし、領域毎に最適化を実行しつつ、それらを含むシステムにおいて全体最適を目指す方法。本設計対象においては、インペラ、タービン、軸受、シールなどのサブシステムが領域にあたる。
- ・ **形態設計**：翼プロファイルなどのような個々の要素形状を追求するのではなく、TPのサブシステムに跨る相互配列、配置、軸スラストバランス、内部循環流路など、システム形態を第一義に設計する手法

Fig. 2 に設計プロセスの概念図を示す。ロケットエンジンシステム（上位システム）からの要求仕様 (1) が TP システム経由で各サブシステムへの要求仕様として提示され、各サブシステムが概略設計 (2) を行い、ロータシステムのモデル

Table 1 用語の説明と関係

上位システム	エンジンシステム
メインシステム	ターボポンプ (TP) システム
サブシステム	タービン、ポンプ、軸受、シール、ケーシング ※「タービン領域」と呼ぶ
領域	サブシステム
多領域	メインシステムーサブシステム または サブシステムーサブシステム

構築に必要な情報を出力する。必要情報を TP システムが集結し、ロータの軸振動解析 (3) により初期最適形態を探索する。次に有力な形態候補に対して軸スラストバランスなどを考慮した内部循環流路の最適設計 (4) を行ったのち、各サブシステムの軸方向間隔や軸径を設計変数としたロータシステムの最適設計 (5) を行う。なお、インペラ翼形状などのサブシステムの詳細設計は、本設計プロセス (形態設計) によって最適形態が確定した後に行われる。

プロセス (③、⑤) で実行されるロータの軸振動解析には各サブシステムからの出力情報が必要であり、内部循環流路設計プロセス (④) においてはサブシステム間の情報交換が必要である。ここで言う情報には、Table. 1 に示した各システム間の入出力データだけでなく、設計思想や上位システムのニーズなど数値では表現し難い情報も含まれており、このような情報を技術の言葉に変換する QFD は有用であると考えられる。

なお、本稿で用いる用語と対応する項目を Table 1 に示す。

### 3. QFD 援用方法

QFD による援用として、以下に示す 2 つの展開ルートを実施して検討を進めた。Fig. 3 に検討の流れを示す。

- (1) 上位システムからの要求を抽出して「ターボポンプ要求品質」を定義し、それをベースに各領域の品質特性→機能→機構の順に展開表を作成し、品質表 (各展開表をマトリクスとして結合させた表) の関連付けを行い、重要度を算出した。
- (2) 本設計手法の主テーマである軸振動抑制に着目し、その機能としての有るべき姿から全領域の品質特性・機能・機構のそれぞれの展開表を並べて関連付けし、重要度を算出した。

前者は上位要求と各領域との関連性を、後者は TP システムの技術的重要機能と各領域との関連性を可視化するものである。この 2 つの展開ルートの併用により上位要求から見た TP の有るべき

姿を把握し、その中でも技術的に注視すべき項目における関連性や重要度を詳細に把握することができる。

なお、今回実施した QFD の手法に関する詳細は文献(2)などを参照されたい。

## 4. 上位要求からの QFD

### 4-1 TP に対する要求品質の重要度

上位システムからの要求を収集して抽出した TP 要求品質の重要度は、ロケットエンジンの研究開発に関わる機関を対象として階層分析法 (AHP) により算出した (Fig. 4)。全体の重要度分布に各機関による極端な差異は無いが、個別に見ると特徴的な違いが見られる。例えばエンジンメーカーでは条件の変化や作動状態の変化への対応を重要視しているが、TP メーカーでは故障や壊れにくさを重要視している。このような差異は立場の違いによるものであり、その相違を各領域の設計者が理解することは上位システム要求を意識して設計する思考に繋がる。

### 4-2 各領域の品質表作成と効果

TP 要求品質をベースに Fig. 3(1)に示す流れで各領域における QFD を実施した。

品質表の作成は、各領域と TP システムの設計者が共同に展開表作成と品質表の関連付けを行った。その共同作業において、対象領域の違いに基づく認識の相違が現れる。例えば、いくつかの領域にて作成された機能展開表において「軸振動を抑制する」に相当する機能項目がないケースが見られた。これは、軸振動の抑制はロータとしての

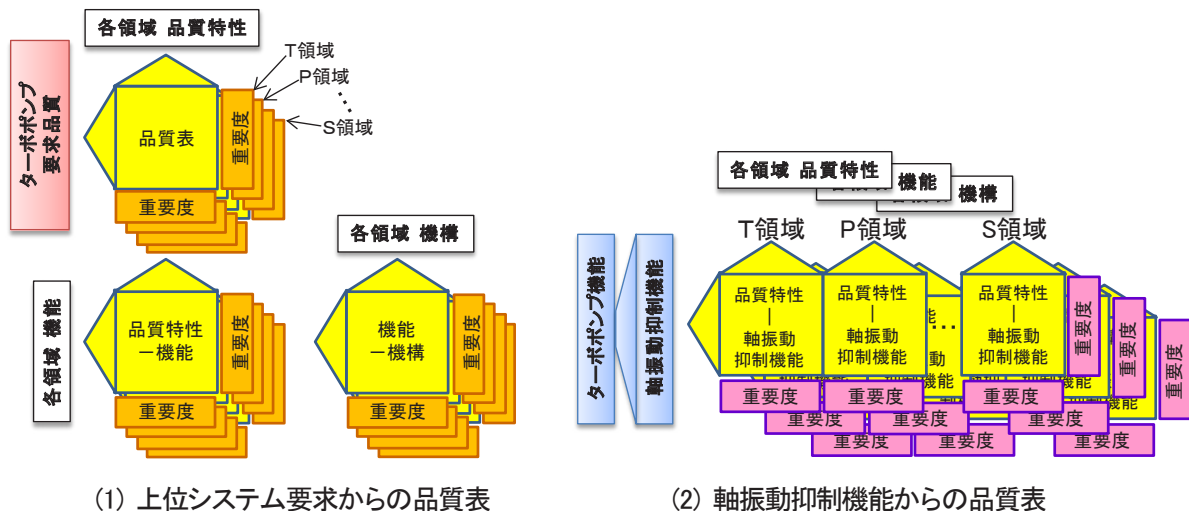


Fig. 3 QFD による検討の流れ

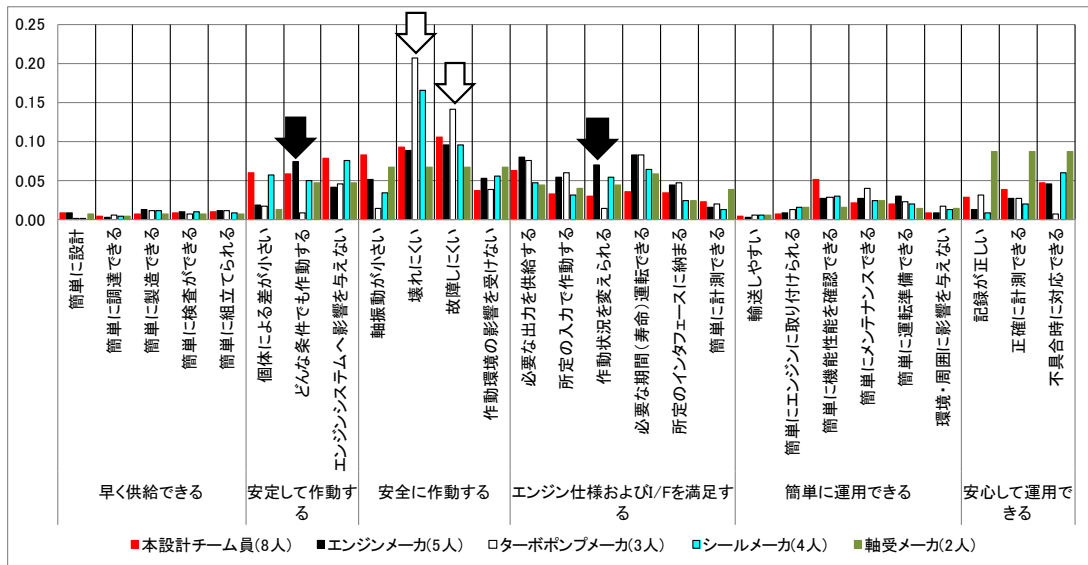


Fig. 4 ターボポンプ要求品質の AHP(Analytic Hierarchy Process)結果

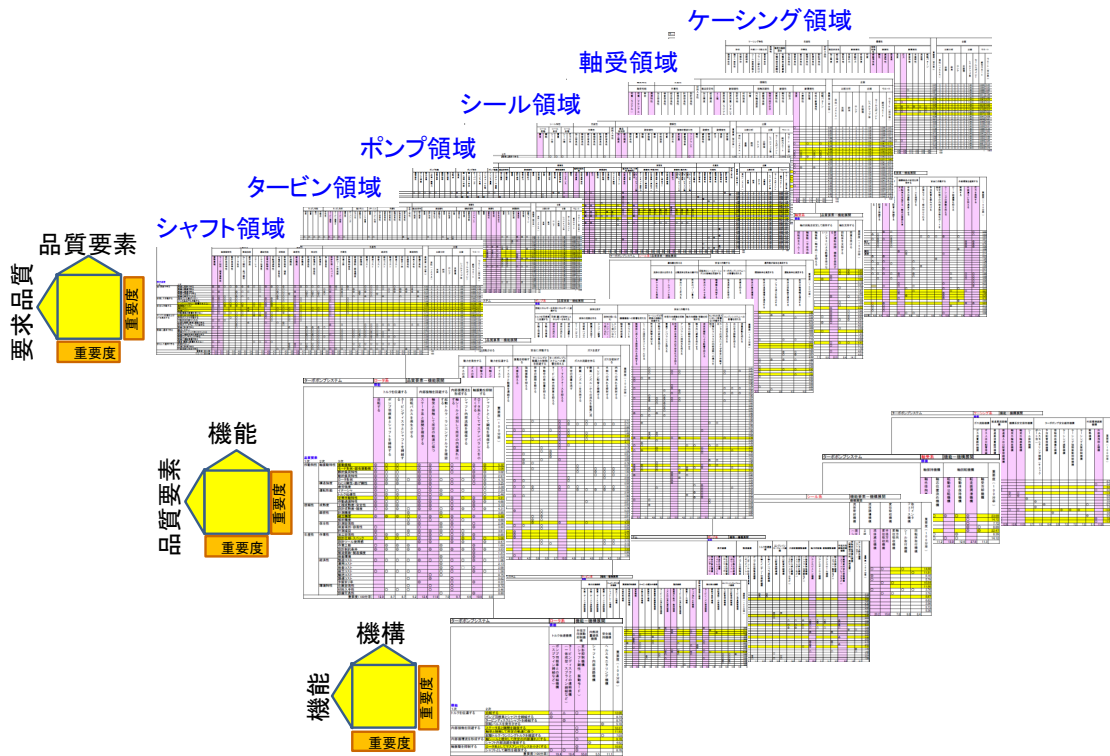


Fig. 5 ターボポンプシステムに関する各領域の品質表

機能であり、その領域のみでは制御できないとの考えからである。一方、TP システムから見れば軸振動はロータとして発現する事象であるが、そのロータを構成する各領域の特性や機能が影響すると捉えている。従って、現状技術で抑制ができるか否かは別にして、各領域の機能として認識すべきと考えられる。このような相違は、各領域単独の機能でなく多領域に跨り成立する機能に関して

見られ、それを把握することにより、設計者のメインシステムのメカニズムに関する技術的理解が促進された。

Fig. 5 に、要求品質を各領域における品質特性→機能→機構に関連付けした品質表の一覧を示す。重要度の高い項目に色付けすることにより、各領域において上位システム要求に対応する重要な品質特性や機能、機構を確認することができ、次節

で述べる各領域それぞれの改善すべき技術が明らかになる。一方、それぞれの領域で品質表をまとめたため、領域間の関連性について各表から直接把握することはできない。従って、領域間の関連性を明らかにするための手法や工夫が必要であり、5章にて詳細を示す。

### 4-3 各領域のボトルネック技術分析

各領域における品質表が完成した後、機能と機構の比較による各領域のボトルネック技術の抽出を行った。「機能」はその領域の有るべき姿、「機構」は現状の技術レベルとして見ることができる。従って、機能に対する対応機構が無い場合もしくは対応機構があっても十分に機能を満足していない場合は、その機構に関する技術がボトルネック技術であると判断できる。更に、重要度の高い機能は、上位システムが重要視する要求品質に対応する機能であり、それに関連するボトルネック技術を改善することが上位システム要求をより満足させることに繋がる。

Table 2 に、各領域における重要度の高い機能に対して抽出したボトルネック技術を示すが、振動や不安定化力に関連する設計技術が多く抽出された。各領域のボトルネック技術に関する分析結果は、以下を示唆している。

- (1) 振動や不安定化力などの TP システムのダイナミクスに関係する機能は、重要度が高い。つまり上位システム要求に強く関係している。これはダイナミック設計の考え方が上位システム要求に沿っていることを示している。
- (2) 振動や不安定化力に関連する重要機能は全領域で抽出された。これは全領域で上位システム要求が浸透し、共有されていることを示している。
- (3) 振動や不安定化力を抑制する設計技術の難易度は高いが、TP システム全体として抑制することは可能と考え、各領域においてそれらの特性を正確に把握することが必要と分析している。これは各領域が TP システムを理解し、システマ的思考が浸透したことを示している。

Table 2 各領域のボトルネック技術

領域	重要機能	対応機構	ボトルネック技術<>内は実施中の対策
タービン領域	トーマスフォースを抑える	ノズル出口流れ偏向機構 動翼流れ転向・整流機構 タービン出口流れ整流機構 チップ洩れ止め機構	タービン起因の不安定化力(トーマスフォース)を低減する為のタービン設計技術は未だ確立されていない。 <<トーマスフォース低減を目的とした、ロバスト設計によるパラメータ設計を実施中>>
	衝撃力を回転方向力に変換する	動翼流れ転向・整流機構 回転運動への変換機構	翼の効率を除けば、技術は確立されている。 <<性能向上を目的としたパラメータスタディを実施中>>
ポンプ領域	羽根車の半径方向の不安定化力を抑える	液体の吸込機構 高圧化機構(メインペラ) 隙間部旋回流れ抑制機構	設計的に不安定化力を抑える手法は確立されていない。抑制する設計技術確立は難易度が高い。システムとして軸振動を抑制するために、不安定化力の把握とモデル化が必要。 <<計測による特性把握を実施中>>
	液体圧縮性による影響を抑える	バランスピストン機構 内部流量確保機構	これまでは原因が不明であり、ボトルネック技術であった。 <<圧縮性影響と関係する設計パラメータが明らかになり、対応機構の設計指針が得られつつある。>>
	隙間部に流入する旋回流れを抑制する	隙間部旋回流れ抑制機構 バランスピストン機構 内部流量調整機構	スワールプレーカ機構による技術はあるが、定量的な予測および設計技術が低かった。 <<特性を定量的に把握し、設計指針が得られつつある。>>
シール領域	軸振動を抑制する	---	現状、積極的に軸振動を抑制する機構を保有していない。軸振動を抑制する設計技術の確立は極めて難易度が高い。システムとして軸振動を抑制するために、シールが発生する流体力の把握と推定する技術の確立が必要。 <<計測による特性把握を実施中>>
軸領域	軸振動(半径方向)を抑える	軸外径拘束機構 転走面潤滑機構	拘束強さ(剛性)を算出する方法は確立されているが、実機と差があり、精度が低い。また軸受剛性は軸振動に与える影響が大きい。 <<計測による特性把握を実施中>>
ケーシング領域	ケーシング側振動を抑える	軸受外輪拘束・減衰機構 ケーシング減衰・強制振動抑制・共振抑制機構	ケーシング形状で振動を抑制する機構・技術は確立されていない。

### 5. 軸振動抑制機能からのQFD

Fig. 3(1)の流れで作成した各領域の品質表により、ある領域と上位システム要求との関係性を把握できるが、領域が多く存在する場合、領域同士の関係性を一目で把握することは難しい。そこで各領域の展開表を並べ、関係性を明らかにしたい項目に対して関連付けする方法 (Fig. 3(2)) により領域間の関係性の可視化を試みた。今回は、本設計手法の主テーマである軸振動抑制について、その機能に対して関連付けを行った。

各領域を連結して作成した品質表において、複数の領域に関連付けされた機能を詳細に調べれば、領域間の関係が具体的に明らかとなる。その一例として、軸振動抑制機能の中の「隙間部の不安定化力を抑える」機能について整理し、各領域の関係をまとめた図を Fig. 6 に示す。なお、ここでの隙間はシール隙間を指す。隙間部の不安定化力に関しては、隙間を構成するシール領域とロータシステムだけでなく、シールを支持するケーシング領域やシール部上流の流れを決めるポンプ領域が関係していることが分かる。このような整理によ

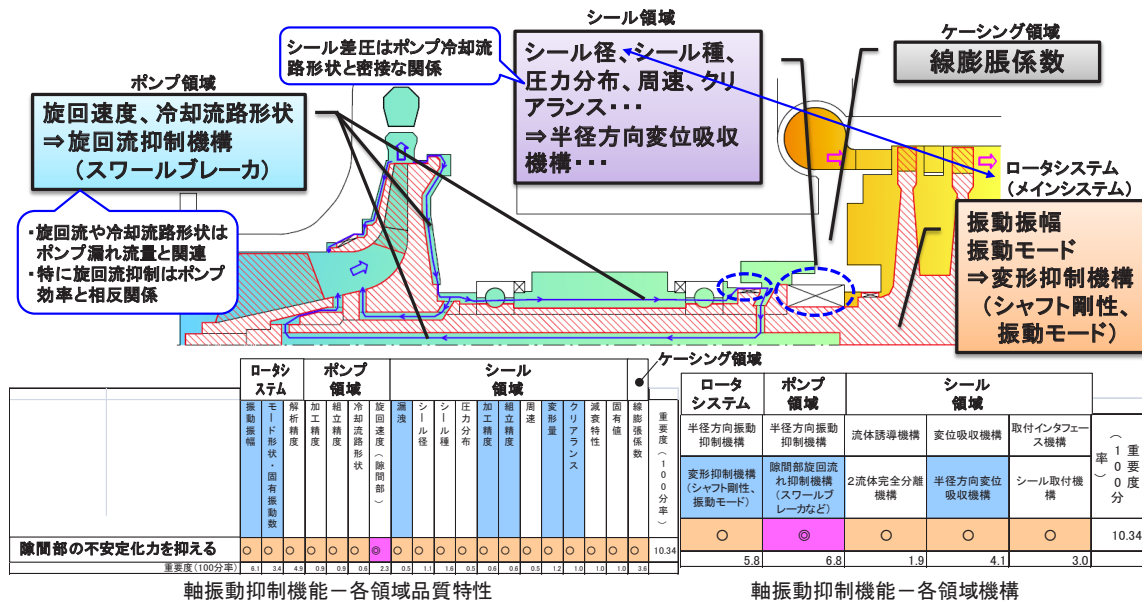


Fig. 6 「隙間部の不安定化力を抑える」機能をベースに整理した各領域の関連性

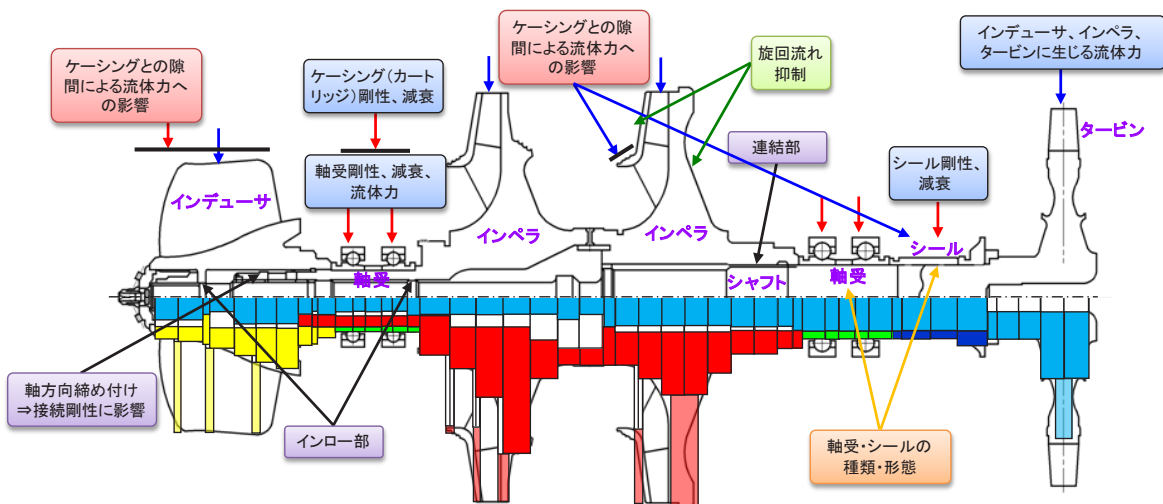


Fig. 7 軸振動抑制に強く関係する各領域の品質特性

り、領域間の関係性が明らかになるとともに、TPシステムとリンクして可視化され、各領域の設計者がTPシステムのメカニズムを理解することにも役立つ。

Fig. 7には、軸振動抑制機能に強く関連する各領域の品質特性を整理し、TP断面図に可視化して表現した図を示す。これらの特性はFig. 2に示す設計プロセスの軸振動解析(図中の③、⑤)において重要な情報であることを示しており、各領域から軸振動解析への入力項目に抜けが無いチェックするツールとして使用することができる。

## 6. 設計プロセスへのQFD適用

5章では、各領域の品質表を連結して多領域間の関連性を明らかにし、多領域の設計プログラムの入出力項目のチェックツールとして有効に援用できることを示した。

現在、更に一歩踏み込んでQFDを用いた多領域最適化のプログラム連結を試みている。具体的には、QFDにより各領域およびメインシステムの設計プログラムの入出力や設計変数、評価関数の相関性を整理し、それを基準に適切な計算フローを構築して設計プログラムを連結することを検討している。このようなQFDの適用が可能になれば、複雑なシステムの設計プロセスに直接的に上位システム要求を反映されることが可能になると考えられる。

## 7. おわりに

TPシステムの多領域最適設計に対してQFDを援用し、上位システム要求との関連性や各領域の関係性を可視化した。その結果、多領域最適化へのQFDの援用が、上位システム要求に合致した設計思想や方針のメインシステムと各領域との共有化に有効であることがわかった。

## 参考文献

- (1) 山川宏編, 最適設計ハンドブッカー基礎・戦略・応用一, (2003), pp. 80-88, 朝倉書店.
- (2) 赤尾洋二, 品質機能展開入門 (品質機能展開活用マニュアル1), (1990), 日科技連出版社.
- (3) 瀧田純也, 福岡勝, 國枝麿, 船崎健一, 内海政春, “ロケットターボポンプ用タービン設計へのQFDの適用”, 第41回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集 (2011-7), pp. 213-218.
- (4) 瀧田純也, 福岡勝, 國枝麿, 船崎健一, 内海政春, “ロケットターボポンプ用タービンのパラメータ設計 (第1報: QFDを用いた重要設計パラメータの抽出)”, ターボ機械, 40-12 (2012-12), pp. 705-714.
- (5) 瀧田純也, 藤本良一, 船崎健一, 内海政春, “QFDとロバスト設計手法を組合せたロケットターボポンプ用タービンの最適化”, 第42回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集 (2012-7), pp. 365-370.
- (6) 渡邊修, 森初男, 吳宏堯, “統合的設計管理手法の開発と応用 (その5) —多目的トレードオフ設計手法の解想像設計への拡張—”, 日本機械学会第21回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 1105 (2011-10), pp. 23-25.
- (7) 内海政春, 吉田義樹, “ターボポンプのダイナミック設計 (軸振動の抑制をめざしたロータシステムの最適化)”, ターボ機械, 40-6 (2012-6), pp. 324-329.
- (8) Uchiumi, M., Shimagaki, M., Kawasaki, S., Yoshida, Y., and Adachi, K., “Integrated Design Method of a Rocket Engine Turbopump Sub-system for Suppressing Rotor Lateral Vibration”, Proc. 28TH International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS2012), Brisbane (2012-9).



