

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

品質機能展開を利用したターボポンプの多領域設計支援

川崎 聡, 内海 政春, 島垣 満, 黒木 康洋,
中村 智也, 平木 博道, 矢田 和之, 國枝 磨

2016年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

品質機能展開を利用したターボポンプの多領域設計支援*

川崎 聡^{*1}, 内海 政春^{*1}, 島垣 満^{*1}, 黒木 康洋^{*1},
中村 智也^{*1}, 平木 博道^{*1}, 矢田 和之^{*1}, 國枝 磨^{*2}

Supporting Method for Multidisciplinary Design of Turbopump Using Quality Function Deployment*

Satoshi KAWASAKI^{*1}, Masaharu UCHIUMI^{*1}, Mitsuru SHIMAGAKI^{*1}, Yasuhiro KUROKI^{*1},
Tomoya NAKAMURA^{*1}, Hiromichi HIRAKI^{*1}, Kazuyuki YADA^{*1} and Maro KUNIEDA^{*2}

1. はじめに

ロケットターボポンプは、ロケットのタンクから推進剤（液体酸素や液体水素など）を高圧状態にしてエンジン燃焼室に送り込むための回転機械である。図1に現在運用されているH-IIAロケットのメインエンジンLE-7Aに搭載されている液体水素ターボポンプの断面と主要な仕様を示す。ロケットは、総重量の低減が打上げ能力の向上に直結するため、エンジンおよびターボポンプに対しても厳しい軽量化が求められ、一般の産業用回転機械と比較して極めて高速な回転が要求される。図1に示す液体水素ターボポンプの場合、作動点における回転

速度は42,000rpmであり、3次危険速度を超える回転速度で運転されている。そのため、ターボポンプ開発時には高速回転に伴う軸振動トラブルを多く経験してきた⁽¹⁾⁽²⁾。従って、ターボポンプ開発においては、性能や効率の向上とともに高速回転に対する軸振動の問題も重要な技術課題として存在する。

ターボポンプは複数のサブシステム（ポンプ、タービン、軸受、軸封シールなど）から構成される機械システムである。ターボポンプシステムを最適設計する場合、サブシステムの個別最適設計結果を統合しただけでは、必ずしも上位システム（エンジンシステムやロケット機体シ

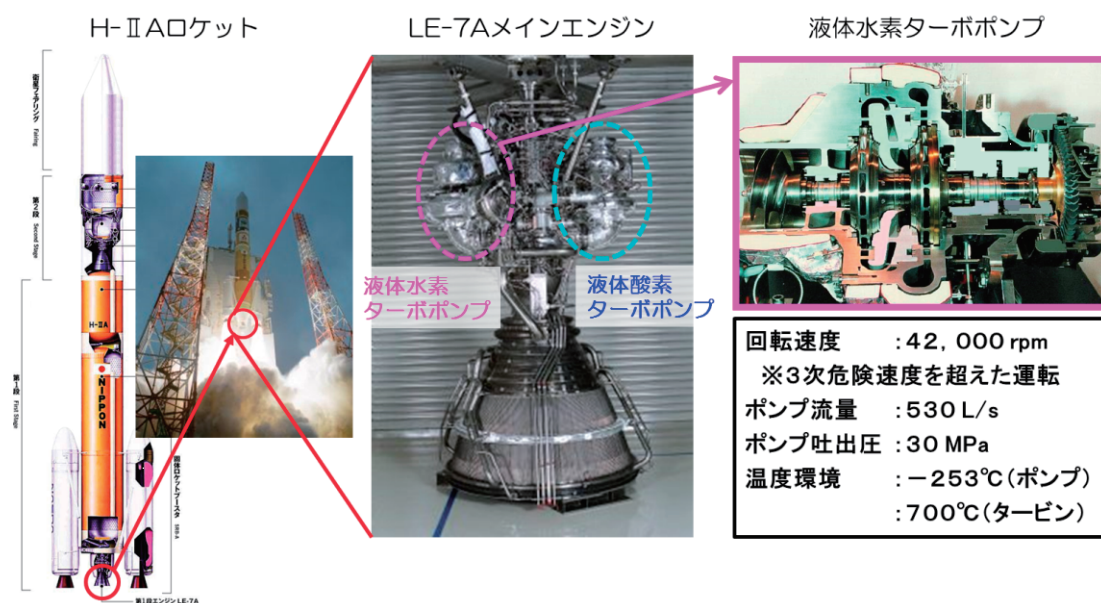


図1 ロケットエンジンとターボポンプ

* 平成27年12月16日受付 (Received 16 December, 2015)

*1 研究開発部門 第四研究ユニット (Research Unit IV, Research and Development Directorate)

*2 TERA Consulting 主幹/株式会社ロゴ ビジネスパートナー

システム)の要求に対してターボポンプシステムが最適化されているとは限らない。例えば、前述した軸振動問題は複数サブシステムの特性が相互に影響するため、軸振動特性を最適化するためには各サブシステムの関係性を把握した上で全体最適を行う必要がある。

そこで、著者らは各サブシステムを「領域」として捉え、全領域にまたがるターボポンプシステムを最適化する「多領域最適化」の研究を進め⁽³⁾⁽⁴⁾、QFD(品質機能展開)を援用したターボポンプの多領域最適設計手法の構築と試行を行ってきた。本稿では、多領域最適設計に対するQFD援用方法の具体例とその有用性について紹介する。なお、表1に本稿で用いる用語の定義を示す。

表1 用語

領域	サブシステム
多領域	複数サブシステム
ターボポンプシステム (=メインシステム)	サブシステムを包含したターボポンプ全体システム
サブシステム	ターボポンプを構成する各システム (ポンプ、タービン、軸受、シールなど)
マルチサブシステム	多領域にまたがるシステム (内部循環流路に関するシステムなど)
上位システム	ターボポンプの上位システム (エンジンシステム、ロケット機体システム)
設計変数 設計パラメータ	ここでは同義語として使用

2. ターボポンプの構造と設計

2.1 ターボポンプの機能と構造

図2に液体酸素ターボポンプを例にしてターボポンプの構造とサブシステム(領域)の機能を示す。ターボポンプは、駆動ガスのエネルギーを推進剤の昇圧エネルギーに変換するエネルギー変換機械システムであり、駆動ガスにより軸動力を発生させる「タービン」、低圧の推進剤を、要求される吐出圧まで昇圧し送り込む「ポンプ(インデューサ+インペラ)」、ロータを支持する「軸受」、ポンプ領域の推進剤とタービン領域の駆動ガスを分離する「軸封シール」の4つの領域に大別される。

ターボポンプに対しては、性能や効率とともに極めて高い信頼性が求められ、構造強度や振動への対応も要求される。特に軸振動問題はこれまでの開発においてしばしば発生し、大きな手戻り作業を生じさせてきた。なお、ターボポンプでは半径方向と軸方向の軸振動問題があり、両者とも重要な技術課題である。

図3に、ターボポンプのロータにかかる力を模式的に図示する。ターボポンプの軸振動特性は、羽根車やシールに発生する流体力、機械的加振力(不釣合、ミスアライメント)、軸受反力などが影響する。すなわち軸振動問題は複数サブシステムの特性が影響する多領域問題であると言え、ターボポンプが安定して高速回転を維持するためには、多領域問題を最適化する必要がある。

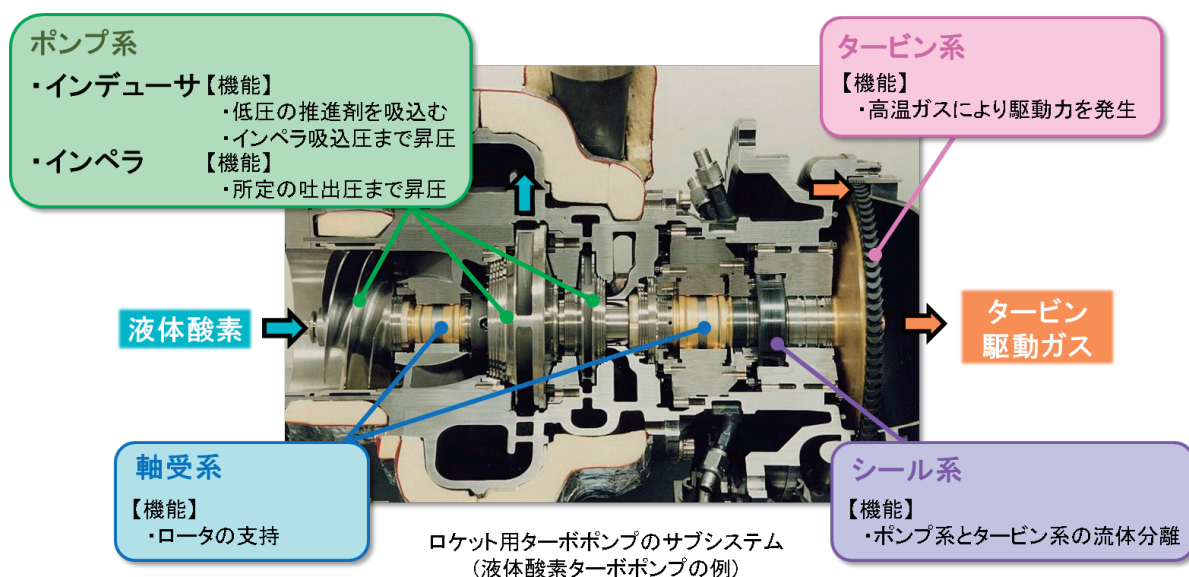


図2 ターボポンプを構成するサブシステムの機能と構造

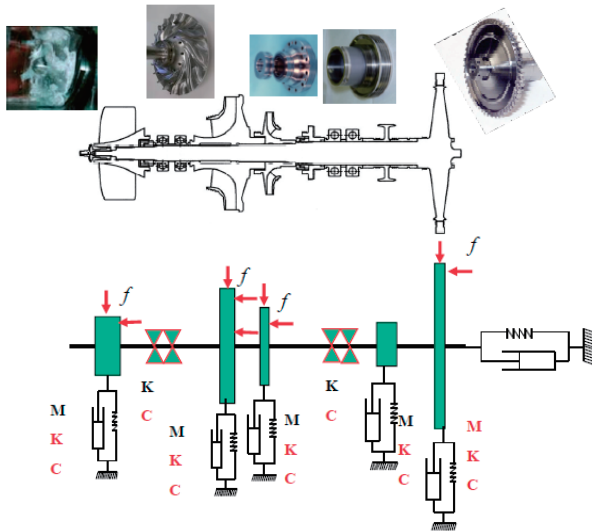


図3 ターボポンプロータにかかる力

2.2 ターボポンプの新たな設計手法

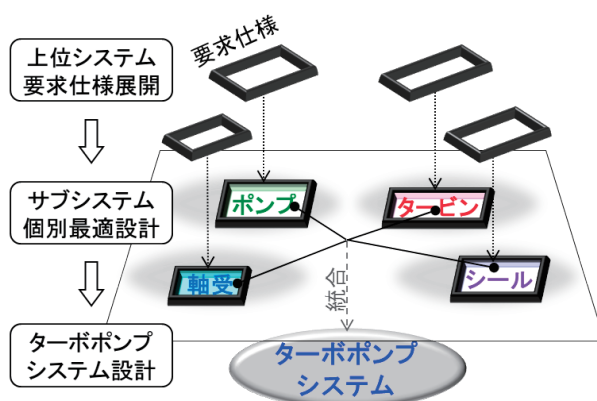
(1) 従来の設計手法

従来のターボポンプ設計の流れは、以下の通りである。上位システムであるエンジンシステムからターボポンプシステムに対する要求仕様を各サブシステム（ポンプ系、タービン系、シール系、軸受系）の要求仕様に分解して展開する。各サブシステムにおいては、展開された要求仕様を満足し、かつサブシステム固有の特性を最適化するように設計する。各サブシステムの最適設計結果を統合し、ターボポンプシステムとして取り扱うことが可能な設計変数を用いてシステム最適化を行い、システムとしての最適解を得る。つまり、各サブシステムの個別最適化がベースとなりターボポンプシステム

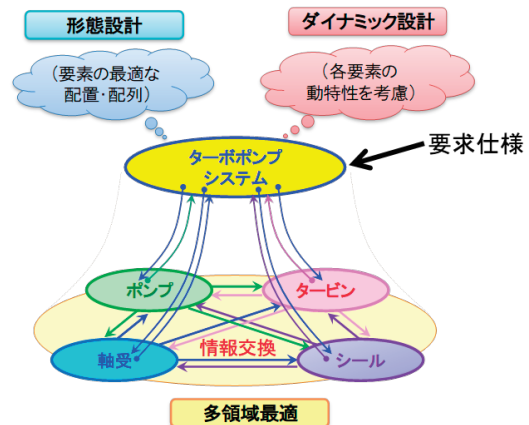
ムが設計される。従来の設計手法の流れはシンプルであり、各サブシステムの設計においては個々のサブシステムが有する技術的な情報や知見を用いて個別に最適設計を行うことが可能である。一方、ターボポンプシステム全体としては、限られた設計変数による最適設計となるため設計自由度は狭まり、得られる設計解がエンジンシステムの要求仕様に対する最適解であるとは限らない。また、ターボポンプシステムに対する要求仕様から各サブシステムの要求仕様への分解および展開が最適化に対して大きく影響する。軸振動問題などの多領域のシステム問題の場合、サブシステムに対して定量的かつ適切に要求仕様を分解することは極めて困難であり、その結果、有効な最適解が得られない可能性がある。

(2) 新たな設計手法（ダイナミック設計）

上記問題を解決するため、著者らのグループでは、「ターボポンプのダイナミック設計」という新たな概念の設計手法を構築し、試行してきた。各サブシステムの形状設計、例えばインペラの翼形状設計などは、今日では逆解法や多目的最適化の設計ツール適用により比較的容易に最適化を図ることが可能である。一方、軸振動などのターボポンプのダイナミクスに関わる特性は、全領域が関連するシステム特性であり、設計開発の上流段階で適切な最適化が成されずにトラブルが発生した場合、状況によってはシステム全体の再構成が必要となり、極めて大きな手戻り作業が生じる恐れがある。そこで、設計開発の上流段階で軸振動抑制を優先し



(a) 従来の設計イメージ



(b) 多領域最適設計イメージ

図4 ターボポンプの設計手法

たターボポンプ形態を最適化する設計手法の研究を行い、リファレンスターボポンプに対する最適設計の試行を行ってきた。本設計手法は、各サブシステムの概略形状を設計しつつ、それらを包含する上位階層であるターボポンプシステムの最適形態を探索する点が特徴であり、このような設計方法を「多領域最適設計」と呼んでいる。

図4に従来設計と多領域最適設計のイメージを比較して示す。多領域最適設計では、各領域間および全体システムとの情報の交換や共有化が重要であることが分かる。従って、設計の流れとしては従来設計と比較して複雑なものとなり、情報の交換や共有化に対して何かしらの工夫が必要となる。そこで、QFDを利用して情報の交換や共有化を支援するとともに、QFDを援用した多領域最適設計手法の構築を試み、具体的な援用方法を確認してきた。QFD援用方法の研究は現在も継続して実施しており、ロケットターボポンプに限定されず様々な

システム機械に適用可能な手法として利用できるように体系化を進めている。

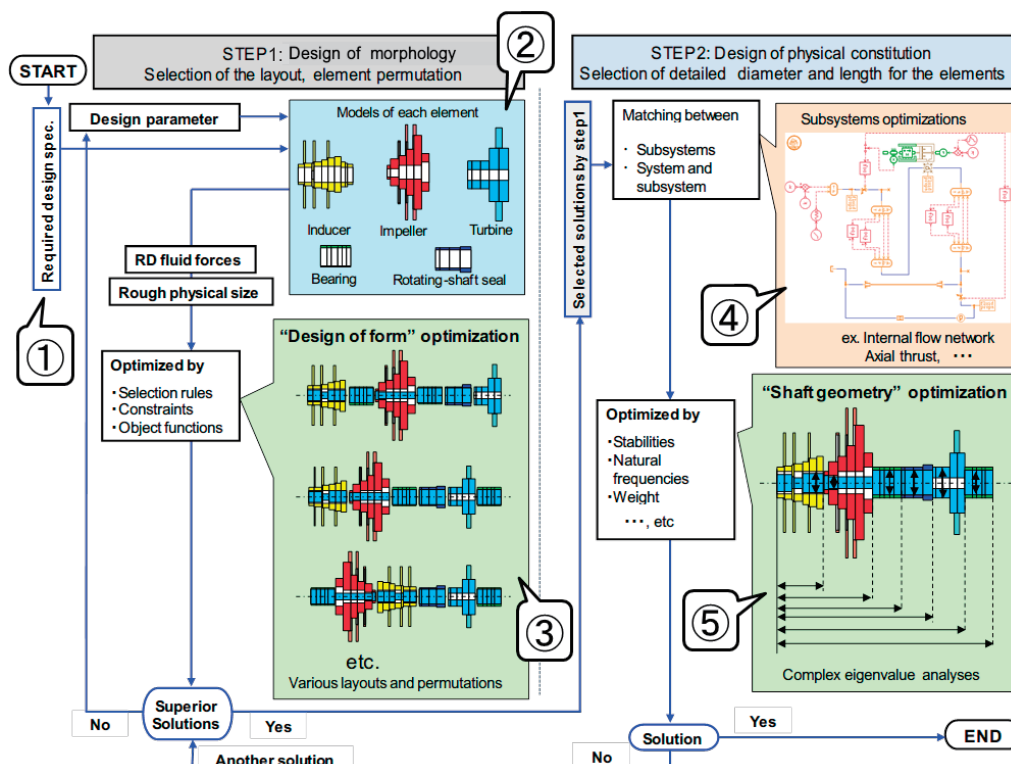
図5に、新たな設計手法であるダイナミック設計のフロー図を示す。ダイナミック設計の詳細については文献(5)～(7)を参照されたいが、簡潔に設計の流れを説明する。

<STEP 1>

ターボポンプシステムからの個別要求仕様に基づき各サブシステムの概略形状を決定し、サブシステムの配置配列をパラメータとした軸振動解析を実施し、半径方向軸振動抑制に最適な形態を選定する。

<STEP 2>

STEP1で得られたサブシステムの配置配列および概略形状に基づき、内部循環流路（軸受冷却や軸方向振動特性に影響する流路）の成立性などを確認した後、軸体格の最適化を実施する。



①	ロケットエンジンシステムからの要求仕様
②	サブシステムの概略設計
③	ロータシステムの軸振動解析と形態最適化
④	軸推力バランスなどを考慮したTP内部循環流路システムの設計
⑤	軸方向長さ・軸径・要素径を設計変数としたロータシステム最適化

図5 ターボポンプのダイナミック設計フロー

2.3 サブシステム設計への QFD 援用

多領域最適設計への QFD 援用に関する内容を紹介する前に、ターボポンプのサブシステム設計に QFD を援用した事例を紹介する。

初期のダイナミック設計研究において、瀧田らはタービンの設計技術の獲得を目的として、QFD とパラメータ設計を連携させた設計を実施し、その有用性を示した^{(8)~(11)}。具体的には、QFD により市場の声をタービンの設計パラメータまで展開して重要設計パラメータを選定し（図 6）、それらの設計パラメータを用いてロバスト設計および遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計を行った。なお、ここでの市場とは、ターボポンプに関わるステークホルダ（ターボポンプおよび上位システムであるロケッ

トエンジンやロケット機体の開発・設計・製造に携わる全ての関係者）として定義している。

最適設計の結果、タービン動翼で発生する軸振動を不安定化させる力を、現行翼に対して 40%低減させることに成功し、軸振動問題で苦慮しているステークホルダの要求に応じた設計解が得られた。従来の最適設計では設計パラメータの選択が設計者の知識や経験に依存し、最適設計にて得られた結果が必ずしも市場要求を反映していない場合があったが、QFD とロバスト設計を組合せた本最適設計プロセスにより、市場要求に合致した最適化が可能になると考えられる。また、本設計手法はロジカルであるため設計者にとっては扱い易く、実践的設計手法として有用である。

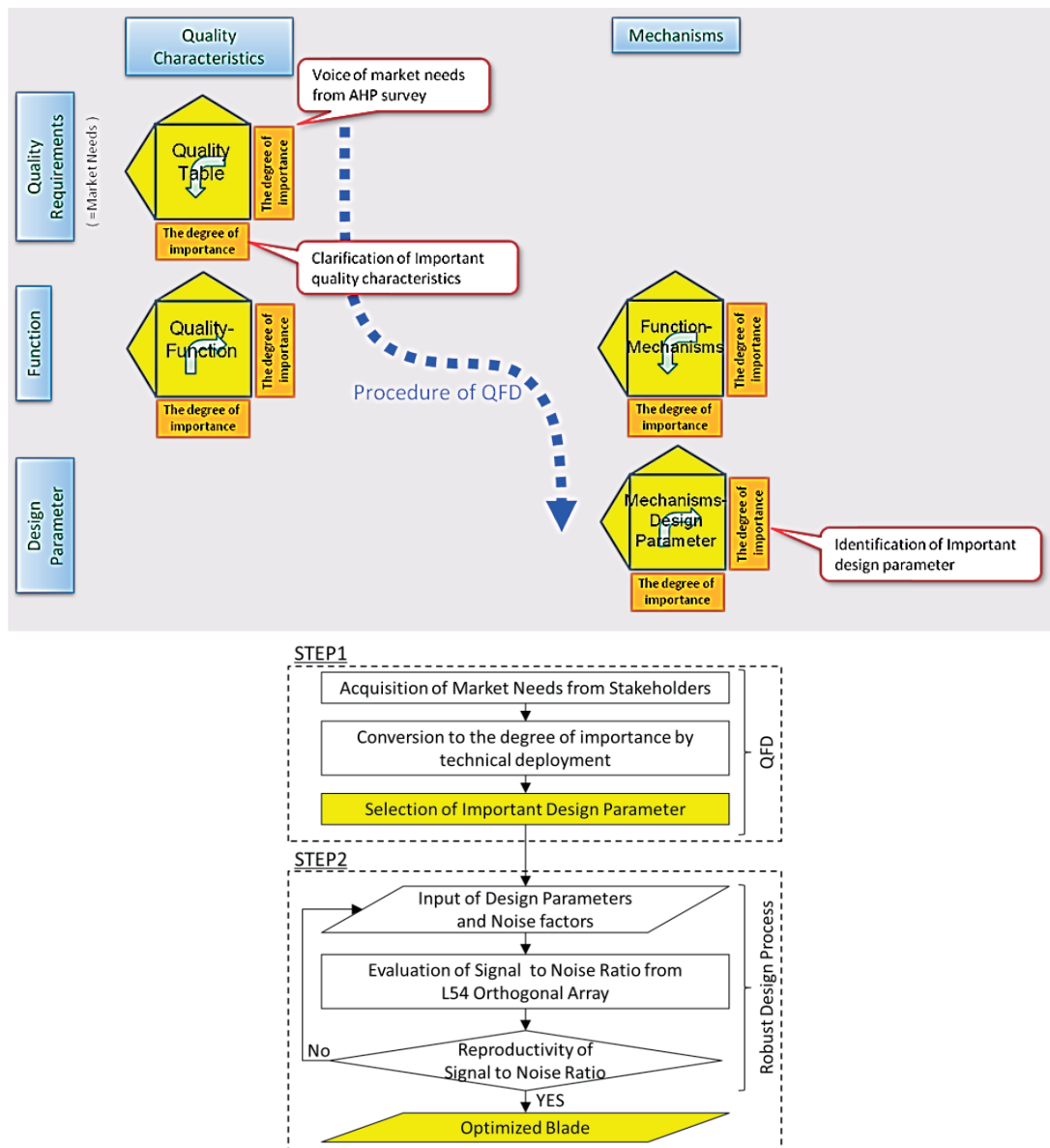


図6 QFD による重要設計パラメータ選定とロバスト設計の組合せたタービンの最適設計プロセス

3. QFD 援用によるターボポンプの 多領域最適設計

3.1 多領域の関係性把握

ターボポンプの軸振動特性は複数サブシステムの特性が影響するシステム特性である。実際の設計においては、メインシステム設計者はシステム特性に関しては理解しているが、サブシステム固有の特性との関連性の詳細までは把握しきれない場合がある。一方、サブシステム設計者はサブシステム固有の特性については熟知しているが、他のサブシステムやメインシステムに対する影響については把握できていない場合がある。このような状況では、メインシステムが上位システム要求を把握していても、サブシステムに適切な要求を展開することは困難である。そこで、各設計者が多領域の関係性を共有して把握するために QFD を用いた整理方法を試みた。まず、各サブシステムに対して上位システム要求品質→品質要素→機能→機構まで QFD を実施し（図 7(a)）、重要なターボポンプ機能である軸振動抑制機能に対して各サブシステムの品質表を連結して関連付けを行い、領域間の関係を調べた⁽¹²⁾⁽¹³⁾（図 7(b)）。更に、領域間の関係性を図示することにより見える化を行った。その一例として、「シール隙間部の不安定化力を抑える」機能について整理

した結果を図 8 に示す。シール隙間部の不安定化力抑制に対しては、隙間を構成するシールとロータだけでなく、シールを支持するケーシングやシール部上流の流れを決めるポンプ内部循環流路が関係していることが分かる。このような整理により領域間の関係性が明らかになるとともに、ターボポンプのシステム特性に関するメカニズムの技術的理解が促進される。

多領域最適設計プロセスの構築を行う際には、まず初めに上記のように多領域の関係性の可視化を行い、各設計者の認識を共有化することが重要である。各サブシステムの QFD 作業はある程度の負荷を伴うが、次節以降で紹介する多領域最適設計への QFD 援用に流用することが可能であるとともに、大きな手戻り作業の発生を未然に防ぐためには有効な作業である。

なお、サブシステムの QFD はサブシステム設計者が単独で実施することも可能であるが、メインシステム設計者と共同に実施するほうが望ましい。特に多領域にまたがる機能に関する部分では、設計者間の認識の相違が生じるケースがある。その違いを把握することにより、サブシステム設計者はメインシステム特性のメカニズムを、メインシステム設計者はサブシステム特性のメカニズムを相互により深く理解することができる。

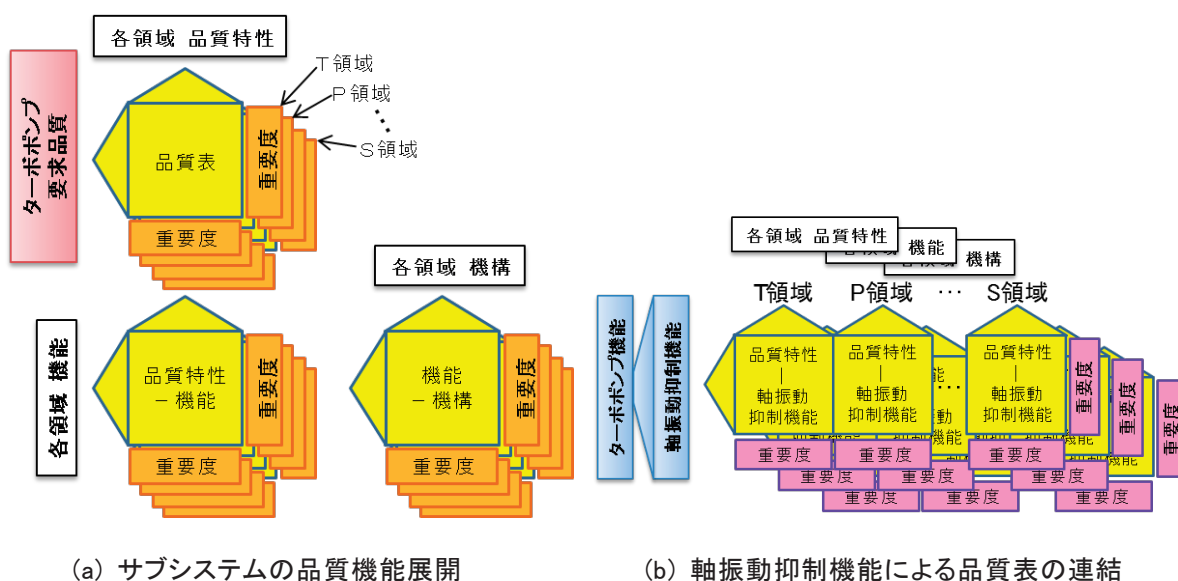


図 7 多領域の関係性把握のための QFD と品質量の連結

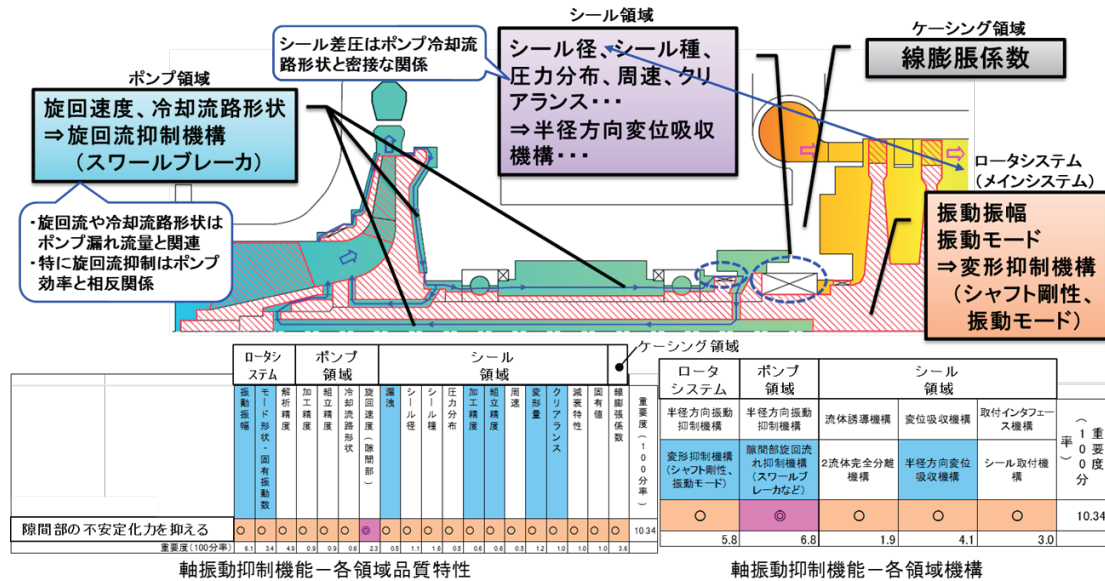


図8 「シール隙間部の不安定化力を抑える」機能に対する多領域の関連性

3.2 多領域設計プロセスの構築

前節では、多領域の関連性を設計者が共有して認識する方法を示したが、実際の設計においては各設計プロセスの入出力を結びつけ、設計順序や設計変数の取り扱い方法を定め、全体の設計プロセスを構築する必要がある。ここでは、QFDを援用してターボポンプの内部循環流路設計プロセス（図5の④設計プロセス）を構築した事例を示す⁽¹⁴⁾。

表2にターボポンプの内部循環流路設計に関わる各領域の入出力情報・設計変数・評価関数を抽出したリストを示すが、各項目の影響関係を整理しなければ、適切な多領域設計プロセスの構築は困難である。なお、表2におけるマルチサブシステムは、内部循環流路に関わる複数サブシステムを統合する領域を示し、内部循環流路において各サブシステムに含まれない設計情報はマルチサブシステムにおいて扱う。表2に示す設計情報の関係性を整理する際に、内部循環流路に関わる範囲に限定すると、ターボポンプ全体としてのシステムに要求される機能との関連が途切れてしまう。そこで、ダイナミック設計の設計思想を反映させるために、重要なターボポンプ機能である軸振動抑制機能から内部循環流路に関わる設計情報へ展開を行い、関連付けを実施する。

図9に展開のフローを示す。設計プロセスを構築する際に、設計者としてはサブシステムやマルチサブシステムの入力に対するメインシ

ステム（ロータ系）の特性（ロータ系評価関数）への影響を把握したい。しかし、これを直接的に関連付けすることは困難であるので、設計プログラムを連結するイメージでサブシステムの入力条件と出力情報を繋げることを目指す。設計プログラムでは、入力条件を設計変数に変換し、システムの関数によりシステム特性が算出され、出力情報が得られる。従って、入力条件と出力情報の間に設計変数を介して展開を行うことにより、設計者はスムーズに関連付けを行うことが可能となる。以上の方法で展開を行って整理することにより、多領域の設計情報の関連性が明確になる。

上記方法で展開を行い、関連性を整理して図示した例を図10に示す。図10では、マルチサブシステムの出力情報であるシール上流部圧力・下流部圧力、サブシステム配置配列、軸受冷却流量に関する多領域の設計情報との関連性を示しており、関連図通の連結線の太さは関係性の強弱を表している。この整理方法により、設計者は内部循環流路に関わる設計情報の繋がりを把握することができ、内部循環流路に関わる入力条件がメインシステム（ロータ系）に対してどのような影響を及ぼすかを理解することができる。

上記の展開方法により作成した関連図を基に内部循環流路の設計プロセスを構築した。その設計プロセスのフローを図11に示す。設計プロセスの構築は、担当する設計者の技術レベ

ルに依存するが、関連図を用いることにより多領域の設計情報の関連性が把握でき、設計プロセスに反映することが可能となる。このように

して QFD 援用により得られた関連図は、多領域設計プロセス構築のための有用な支援ツールとして使用することができる。

表2 ターボポンプの内部循環流路設計に関わる各領域の設計情報

	マルチサブシステム	ポンプ	軸受	シール	タービン
入力条件	使用流体 運用回転数 ロータ径 サブシステム配置配列 ロータ重量 各サブシステムの出力情報	使用流体 運用回転数 ロータ径	使用流体 運用回転数 ロータ径 軸受冷却液ポンプ側 軸受冷却液タービン側 ラジアル荷重	使用流体 運用回転数 ロータ径 シール上流体圧力 シール下流体圧力 シール部流体速度	使用流体 運用回転数
設計変数	バランスピストン外径 バランスピストン内径 インペラ前面スワールブレイカ インペラ背面スワールブレイカ シール上流側流路抵抗 (等価面積) シール下流側流路抵抗 (等価面積) バランスホール抵抗 (等価面積)	インデュースコピ抵抗数 インデュースコピ形状 インデュースコピ断面形状 インデュースコピ材料 インペラ段数 インペラ冷却抵抗数 インペラ子午面形状 インペラ材料	軸受内径 軸受外径 軸受軸 軸受体サイズ 軸受体材料	メカシール径 メカシール軸方向長さ メイト径 メイト軸方向長さ FRS径 FRS軸方向長さ	タービン段数 タービン翼形状 部分挿入 (Partiality) 動葉チップシユラウド 動葉反動度 子午面形状 タービン翼枚数 チップクリアランス タービン材料 タービン出口翼角度 軸出力 (本ホは効率) タービンチップ間隙 翼・ディスク応力 翼間距離 タービン重量
制約条件	バランスピストン機構の自由度 シール上流体圧力 シール下流体圧力 軸受冷却液ポンプ側 軸受冷却液タービン側	インデュースコピ変形係数 インペラ設計速度 インペラチップ間隙 インデュースコピ形状 (座標) インペラ形状 (座標) ポンプ効率	面圧 SY値 必要最低速度	潤滑 PV値	タービン重量
評価関数	内部流路設計の減衰比 軸方向振動最大振幅 バランスピストン釣合点のオリフィス	成立可否 STEP1出力情報 子午面モデル座標 (座標) インペラ段数 Young率 材料密度 インデュースコピ伝達率係数 インペラ伝達率係数 ポンプ必要動力 必要ポンプ入口圧力 インデュースコピ軸方向推力 必要インデュースコピ軸方向長さ 必要インデュースコピ伝達率係数 必要インペラ伝達率係数 改訂: インペラ伝達率係数	軸受剛性	シール性	トーマスフォース
出力情報	使用流体 運用回転数 ロータ径 サブシステムの配置配列 シール上流体圧力 シール下流体圧力 軸受冷却液ポンプ側 軸受冷却液タービン側 シール部流体速度 ラジアル荷重 必要軸圧縮軸方向長さ (Wig値) 各サブシステムの出力情報 各サブシステムの改訂伝達率	内部流路設計結果	成立性確認結果の入力		

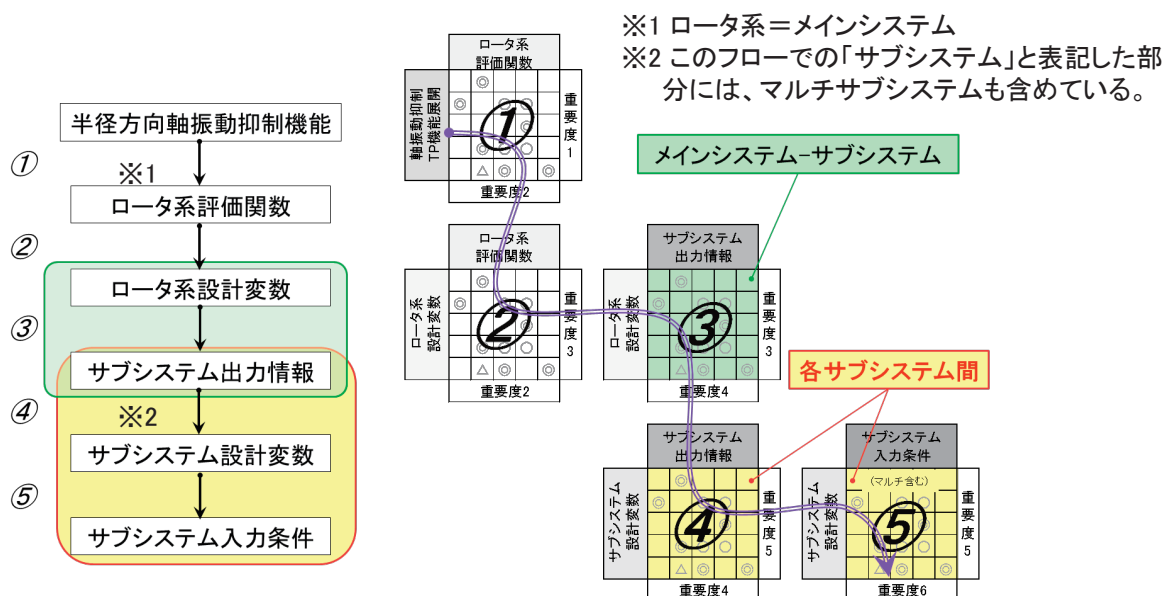
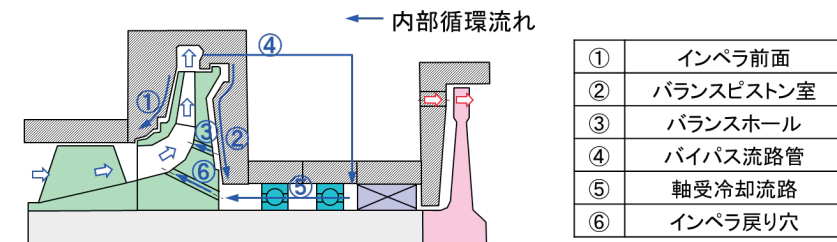


図9 軸振動抑制機能から内部循環流路設計情報への展開フロー

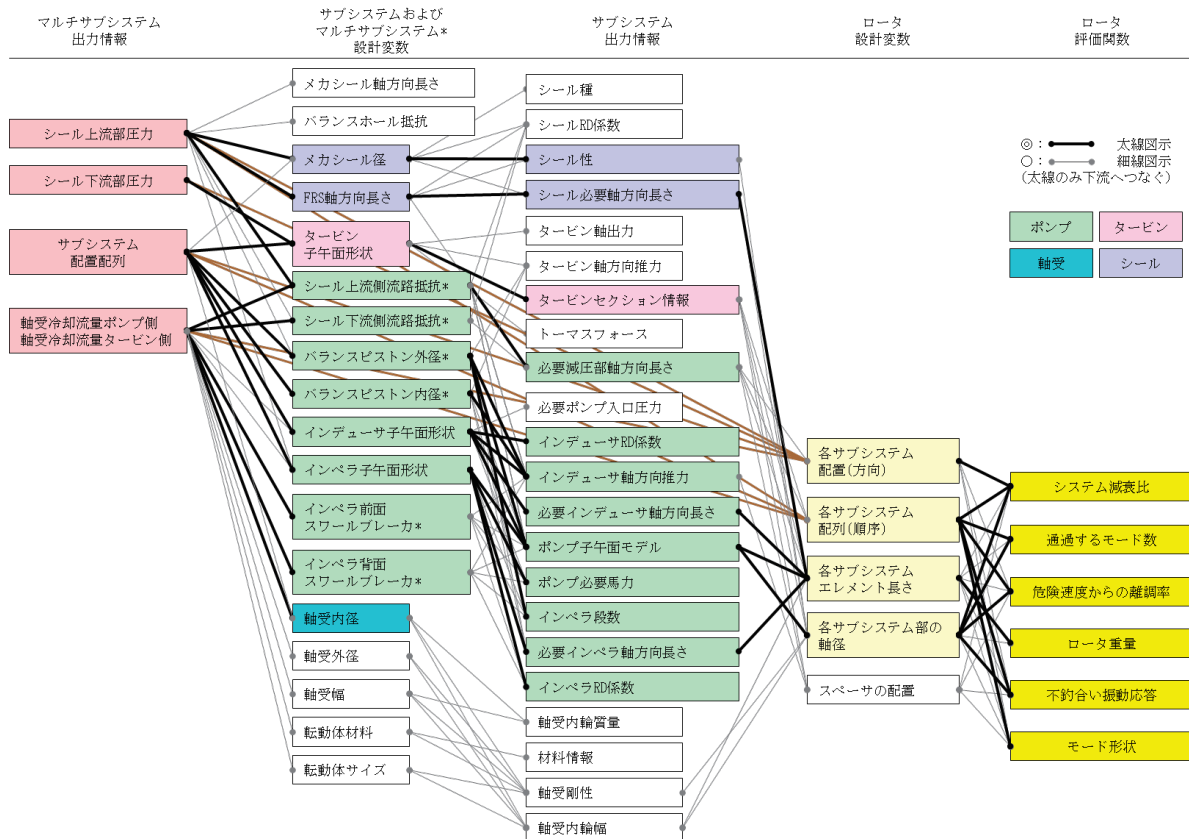


図10 シール上流部圧力・下流部圧力、サブシステム配置配列、軸受冷却流量に対する各領域の設計情報との関連性

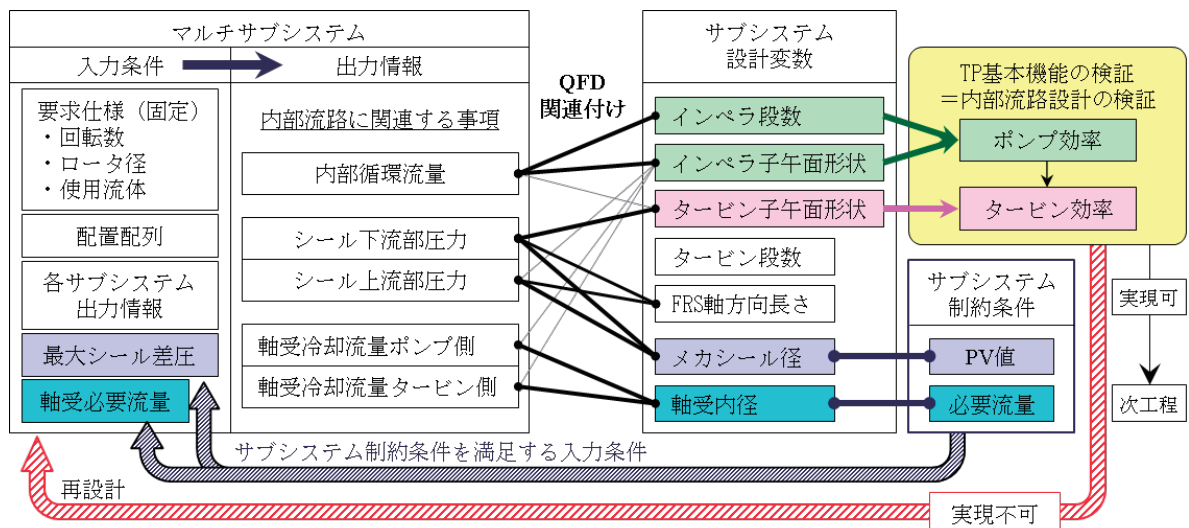


図11 QFDによる関連付けを援用した内部循環流路の設計プロセスの構築

3.3 多領域最適設計への援用

2.2 節で示した新しいターボポンプの設計手法であるダイナミック設計は、半径方向振動の抑制を主要目的としてターボポンプ形態の最適化を図る手法として構築され、軸方向振動に影響を及ぼす内部循環流路に関しては、その成立性を確認する設計フローとなっている。しかし、軸方向推力の調整（静特性）と軸方向振動の抑制（動特性）を両立させるような内部循環流路の設計は難易度が高く、適切に設計できていない場合、ターボポンプの機能喪失に結びつくトラブルに結びつく可能性があることが最近の研究から分かってきた。そこで、内部循環流路に対しても、成立性確認のみでなく最適設計を実施できる手法の検討を行った。

3.2 節では設計の入出力情報を中心に多領域の関連性を明らかにした。この展開方法は、確立された設計ツール同士のインターフェースを効率良く調整するためには有用であるが、物理現象の理解のためには必ずしも有効ではない（入出力情報が物理現象と直接的に関連していない場合もあるため）。そこで、今回は物理現象の理解を主眼に置いた QFD を行い、内部循環流路の多領域最適化を試みた。図 1 2 に展開表のフローを示す。展開の特徴は以下の通りである。

- ・設計者が思考しやすい評価項目を用いて展開
- ・「評価項目」から「設計変数」の間に「評価項目の引数」を介し、物理的な関係式を用いて関係性を整理
- ・評価項目と設計変数との関連性を分かり易く示すために特性要因図を導入

図 1 3 に特性要因図の作成ルールを示す。図 1 4 には、評価項目「軸方向の動特性を良くする」と引数、設計変数を整理してまとめた特性要因図を示す。特性要因図の作成作業の負荷は比較的大きいが、作成ルールに従えば、展開表は特性要因図から半自動で完成する。

以上の方法で内部循環流路の各評価項目をサブシステムおよびマルチサブシステムの設計変数まで展開し、重要度を算出した。その結果を図 1 5 および図 1 6 にそれぞれ示す。サブシステムの設計変数の重要度を見ると、内部循環流路の境界条件となるポンプ系の設計変数の重要度が比較的高い。更に軸受系およびタービン系からも比較的重要度の高い設計変数が抽出されており、内部循環流路に関連する特性は多領域にまたがっていることを確認できた。マルチサブシステムの設計変数の重要度を見ると、重要度の高い設計変数はバランスピストンに関連する設計変数で独占されている。バラ

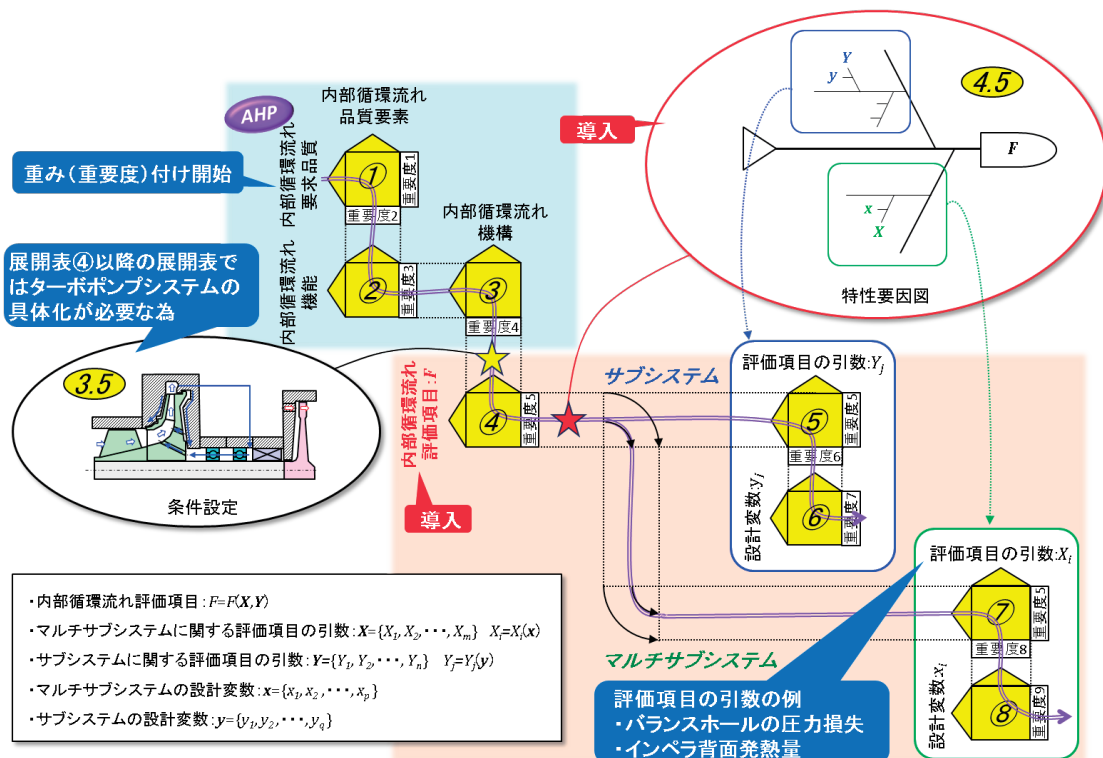


図 12 内部循環流路に関する展開表のフロー

ンスピストンは軸方向推力を調整する機構（静特性に関連する機構）であるが、軸方向の動特性や内部循環流量にも影響を及ぼすため、全体的にバランスピストン関連の設計変数の重要度が高くなっている。

以上のように QFD 援用によりサブシステムおよびマルチサブシステムの重要設計変数を抽出し、図 17 に示す設計フローを実行することによって、多領域に影響する重要な設計変数を考慮した最適設計が可能となる。

《特性要因図書き方のルール》

- 上部にサブシステムに関わる項目、下部にマルチサブシステムに関わる項目を配置
- 特性要因図の3次が評価項目の引数、4次が設計変数となるように1次と2次を決める。

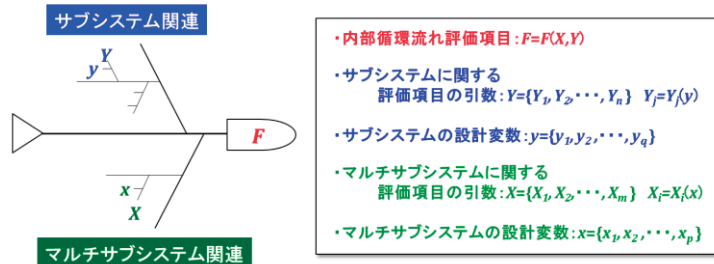


図13 特性要因図の作成ルール

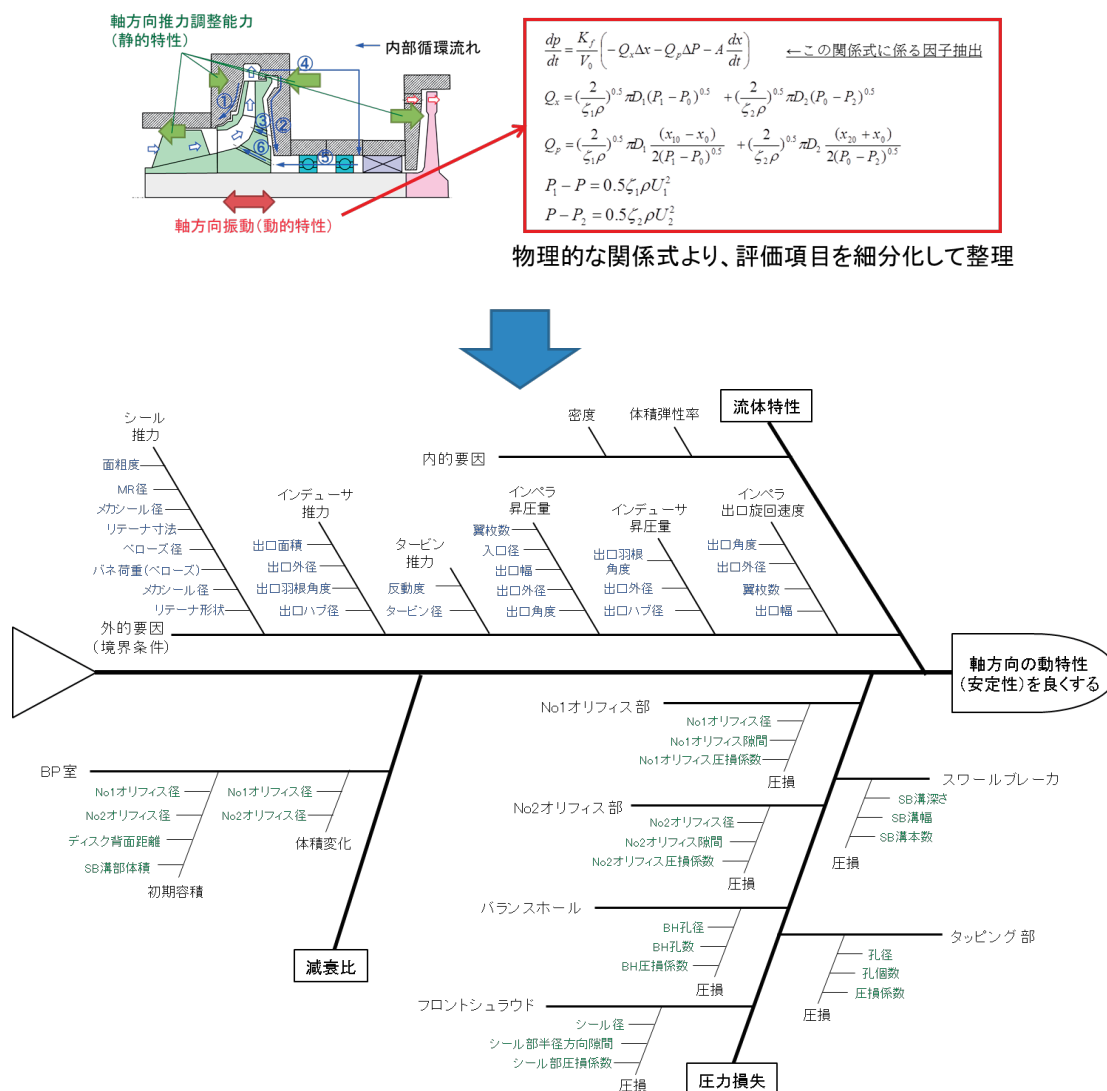


図14 評価項目「軸方向の動特性を良くする」に対する特性要因図の作成例

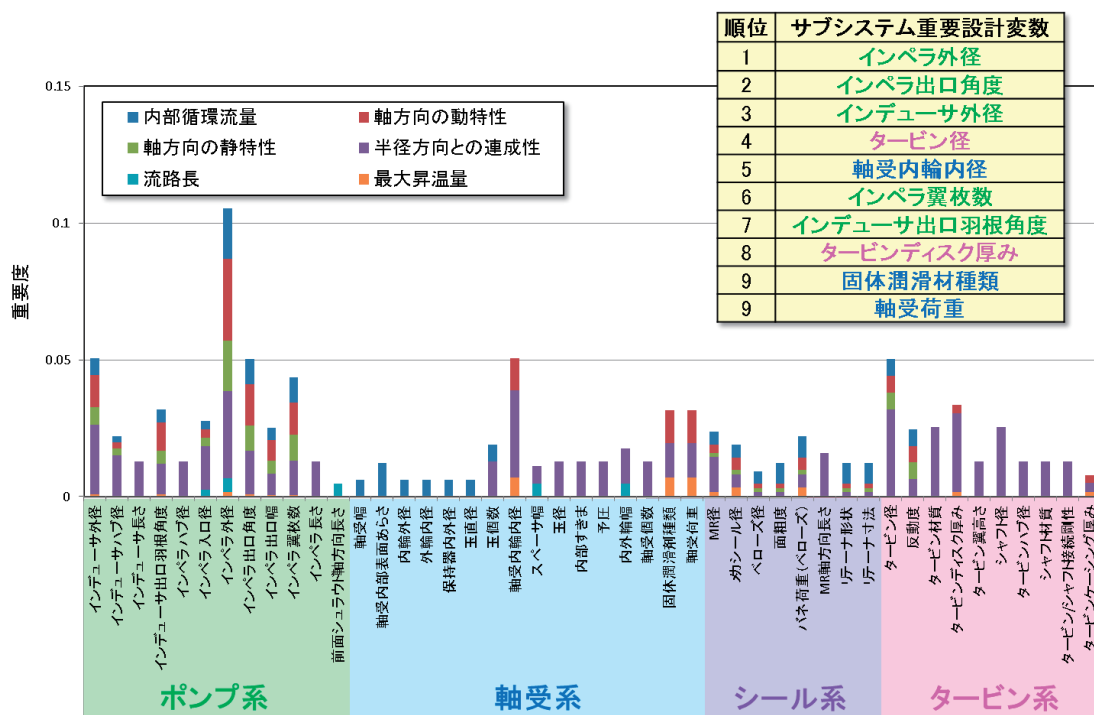


図15 サブシステムの設計変数重要度

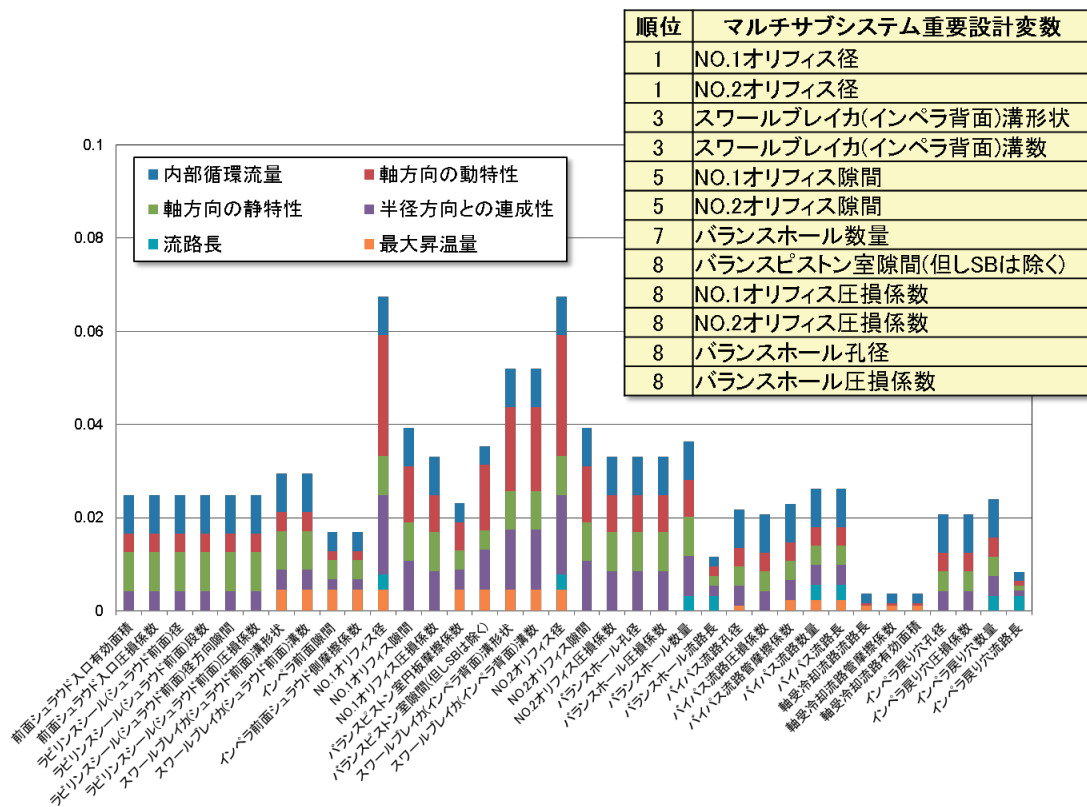


図16 マルチサブシステムの設計変数重要度

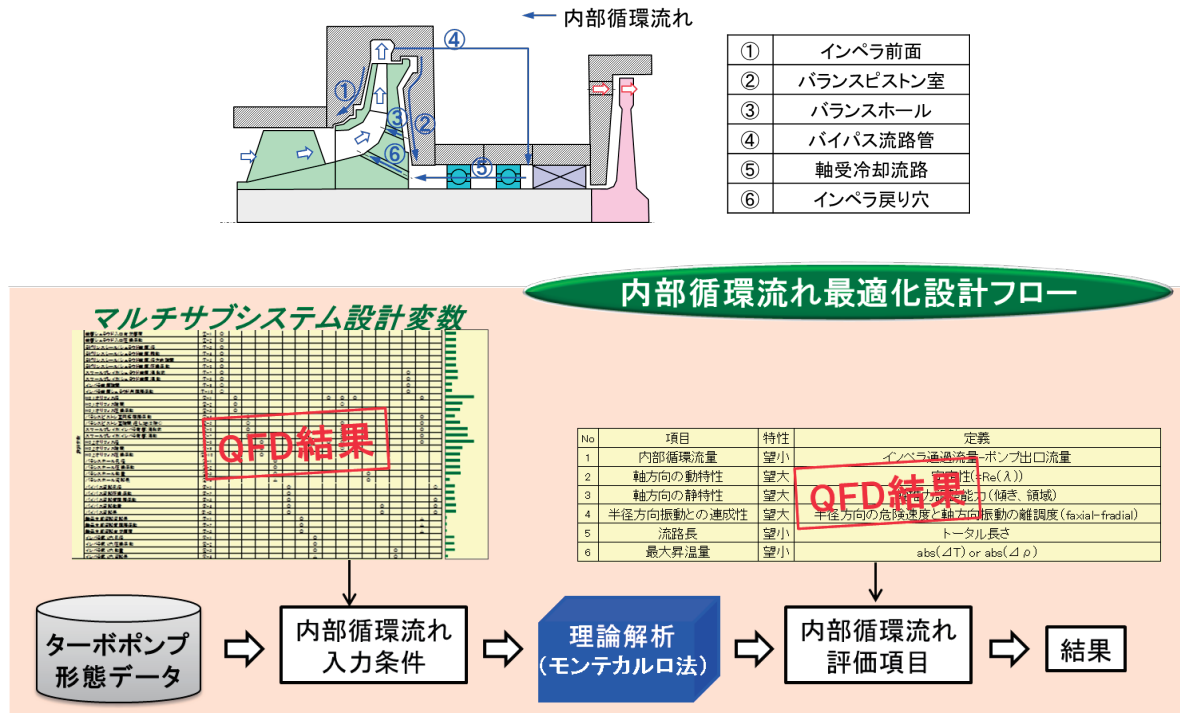


図17 内部循環流路の多領域最適設計

4. おわりに

多領域にまたがるシステム機械の設計においては、領域間の関連性を明らかにし、適切に設計プロセスへ反映することが重要である。しかし、複雑なシステムになるほど、その関連性を明確にすることは容易でなくなる。サブシステムに関する設計情報を、その担当設計者は十分理解しているが、他のサブシステム設計者やメインシステム設計者が十分理解できていないことも多い。また、設計者同士が情報交換をしても、多領域での設計情報の関連性を全体として把握することは難しい。一方、QFDは市場のニーズを技術の言葉に変換して関連性を見える化する事が可能な手法であり、サブシステム間やメインシステムとサブシステム間の設計情報の関連性を見える化する場合にも有効に機能すると考えられる。

ただし、関係性を明確にしたい項目を単純に並べ、展開表を作成しただけでは上手く関連付けができない場合があり、以下に示すような工夫が必要である。

- ・橋渡し的な中間項目を追加することにより関連付けが容易になる

- ・特性要因図を組み合わせた展開方法は、多領域最適設計への援用手法として有効である。

上記のような工夫は他にもあると考えられ、様々なアイデアを取り込むことにより QFD 援用の範囲は広がり、その効果も増大すると考えられる。

本稿で紹介した内容はロケットターボポンプという特殊な機械を対象にしているが、基本的な考え方は複数サブシステムで構成されるシステム機械に対しても有効であると考えられる。多領域最適設計が必要なシステム機械の設計開発に対して、少しでも役立つ知見を提供できれば幸いである。

なお、本稿は 2015 年 11 月 13 日に開催された第 21 回品質機能展開シンポジウム（主催：一般財団法人 日本科学技術連盟 日本科学技術連盟）において講演した「QFD 援用によるロケットターボポンプの多領域最適設計」の要旨集掲載内容を再編集したものである。

参考文献

- (1) 岡安彰, 太田豊彦, 尾池守, 藤田敏彦, “LE-7 用液体ターボポンプ軸系振動問題と対策”, ターボ機械, Vol. 26, No.8 (1998), pp. 456-462.
- (2) 山田仁, 内海政春, “ロケット用ターボポンプの流体関連振動事例”, ターボ機械, Vol. 36, No.2 (2008), pp. 67-73.
- (3) 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”, Proceedings of 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2012), Brisbane (2012).
- (4) 内海政春, 島垣満, 川崎聡, “ターボポンプのダイナミック設計(その 2)”, ターボ機械, Vol. 41, No. 10 (2013), pp. 578-585.
- (5) “特集: ターボポンプのダイナミック設計①”, ターボ機械, Vol. 40, No. 6 (2012), pp. 322-379.
- (6) “特集: ターボポンプのダイナミック設計②”, ターボ機械, Vol. 40, No. 7 (2012), pp. 426-460.
- (7) “特集: ターボポンプのダイナミック設計③”, ターボ機械, Vol. 41, No. 10 (2013), pp. 577-632.
- (8) Takida, J., Akao, Y., Funazaki, K. and Uchiumi, M., “Application of QFD Method for Design of Rocket Turbopump Turbines”, Proceedings of 17th International QFD Symposium (ISQFD 2011), Stuttgart (2011).
- (9) 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, Vol. 40, No. 12 (2012), pp. 705-713.
- (10) 瀧田純也, 船崎健一, 内海政春, 島垣満, “ロケットターボポンプ用タービンのパラメータ設計(第 2 報: タービン Thomas Force 低減のための最適化)”, ターボ機械, Vol. 41, No. 6 (2013), pp. 368-377.
- (11) 瀧田純也, 福田太郎, 宇山遼一, 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 3 報: タービン諸特性(回転部重量、翼応力、動翼共振回避、Thomas Force)を考慮したロケットターボポンプタービンの多目的最適化)”, ターボ機械, Vol. 41, No. 2 (2013), pp. 78-88.
- (12) 川崎聡, 内海政春, 島垣満, 瀧田純也, 弘松純, 中村智也, “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”, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-12-009 (2012).
- (13) 川崎聡, 瀧田純也, 弘松純, 内海政春, 島垣満, 中村智也, “ロケット用ターボポンプの多領域最適設計における品質機能展開(QFD)の援用”, ターボ機械, Vol. 41, No. 10 (2013), pp. 602-607.
- (14) 弘松純, 内海政春, 島垣満, 川崎聡, 瀧田純也, 中村智也, “QFD 援用によるロケットターボポンプ多領域最適化設計”, 第 53 回航空原動機・宇宙推進講演会 講演論文集, JSASS-2013-0019 (2013).
- (15) 黒木康洋, 内海政春, 川崎聡, 島垣満, 平木博道, 四宮教行, 中村智也, “QFD 援用によるターボポンプ内部循環流れの多領域最適化”, ターボ機械協会 第 73 回総会講演会 講演論文集 (2015).

