

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### QFD援用によるロケットターボポンプ多領域最適化設計

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

2013年10月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# QFD援用によるロケットターボポンプ多領域最適化設計\*

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

## Multidisciplinary optimal design for rocket turbopump by employing QFD\*

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

### Abstract

A rocket turbopump, high-speed, high-power turbomachinery, has suffered from various rotor vibration problems up to the present time. Establishment of an integrated design method consisting of turbopump components is eagerly expected to suppress the rotor vibration. We are now studying the design method of optimal rotor system by using multidisciplinary optimization due to information-sharing of turbopump components (pump, bearing, seal and turbine). A quality function deployment (QFD) is employed to visualize of the relation between turbopump components.

**Key Words:** Turbopump, Design of form, Multidisciplinary optimal design, Dynamics design, QFD

## 1. 緒言

ロケットターボポンプ(以下、TP と示す)は推進薬を燃焼室に高圧で送り出す高速回転機械であり、熱エネルギーを流体エネルギーに変換する。ターボポンプ効率を向上させることがロケット打上げ能力に大きく影響するため、TP の設計には「エネルギー変換効率が重要」とされ、インペラ、タービンなど流体要素の部分を最初に設計し、その後、残りの部分を順次設計する手順がとられる。図1に TP の構成部品を、図2に TP 従来設計の概念図を示す。従来設計では、TP システムからの個別要求仕様にに基づき個別の最適解を得て、その後、TP システムを統合して TP のシステム設計が行われるため、エンジン側からの TP 要求仕様に対して、必ずしも TP が最適になっているとは限らないと考える。

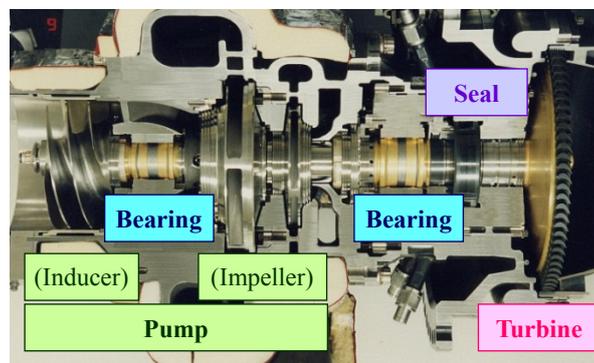


図1 ターボポンプ構成部品 (LE-7 liquid oxygen turbopump)

\* 平成 25 年 7 月 5 日受付 (Received 5 July 2013)

\*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・エンジン研究開発グループ  
(Engine System Research and Development Group, Space Transportation Propulsion Research and Development Center, Space Transportation Mission Directorate)

高速回転機械である TP には軸振動が頻発する。この解決のため、「エネルギー変換効率が重要」という流力性能を重視した設計思想の転換 (paradigm shift) を図り、TP の各構成部品間の関連性やロータ全体に及ぼす静的および動的力の影響を考慮し、「軸振動抑制」というロータシステムの安定性を第一目的とする新しい設計手法を設計 (The design of design) することを提案する。すなわち、要素設計ではなくシステム設計、形状 (shape) ではなく形態設計 (form) へという設計思想である。図3にその概念図を示す。TP 構成部品の中でポンプ、軸受、シールおよびタービンをサブシステムとして各々1領域とし、これら各領域間の情報の交換や、内部流れを媒介として各領域を統合しながら設計するところをマルチサブシステムと定義する。

本報告では、TP システムの内部流路設計の最適化を目的に、QFD を援用して多領域を最適化する設計手法を報告する。

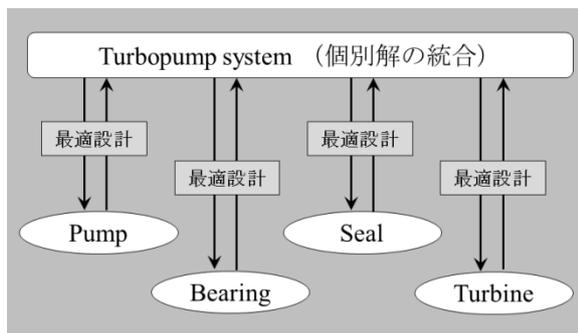


図2 ターボポンプ従来設計

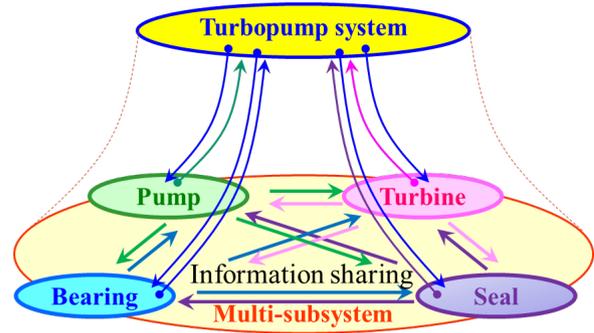


図3 多領域最適化設計

## 2. 研究背景と意義

エンジン側の多種多様な TP 要求仕様に対応するには、TP の基本設計に自由度を持たせることが重要である。ロケットエンジンの信頼性に直結する問題は TP の軸振動であり、これは TP の課題として現在も位置付けられている。現在、JAXA が取り組んでいる「ダイナミック設計を適用した多領域最適化によるターボポンプ形態設計<sup>(1)(2)</sup>」は、TP の軸振動を発生させないことを目的に、TP サブシステムのポンプ、軸受、シールおよびタービンを各々1領域と定義し、多領域でこれらを最適化しながら、TP の形態を設計して行く手法を確立することを目指している。各領域を統合して扱うところをマルチサブシステムとし、TP の内部流路設計を行うと共に、設計に関する情報の交換を多領域に渡って行う。TP の最適形態を得るまで大きく2ステップに分け、図4に設計フローの概念図を示す。

STEP1 はサブシステムの配置配列 (配置 = 方向, 配列 = 順序) を探索する。TP システムからの個別要求仕様に基づき、各サブシステムの個別の最適解 (RD 流体力を含む) を得て軸振動解析に入力することにより、配置配列の最適形態候補を設計する。

STEP2 は軸体格 (軸径, 軸長) を探索する。STEP1 で得られたサブシステムの配置配列や寸法形状に基づき内部流路に関係する圧力分布などの項目を算出した後、軸体格を設計する。

尚、STEP1 配置配列の求解中は軸体格を、STEP2 軸体格の求解中は配置配列を固定とする。

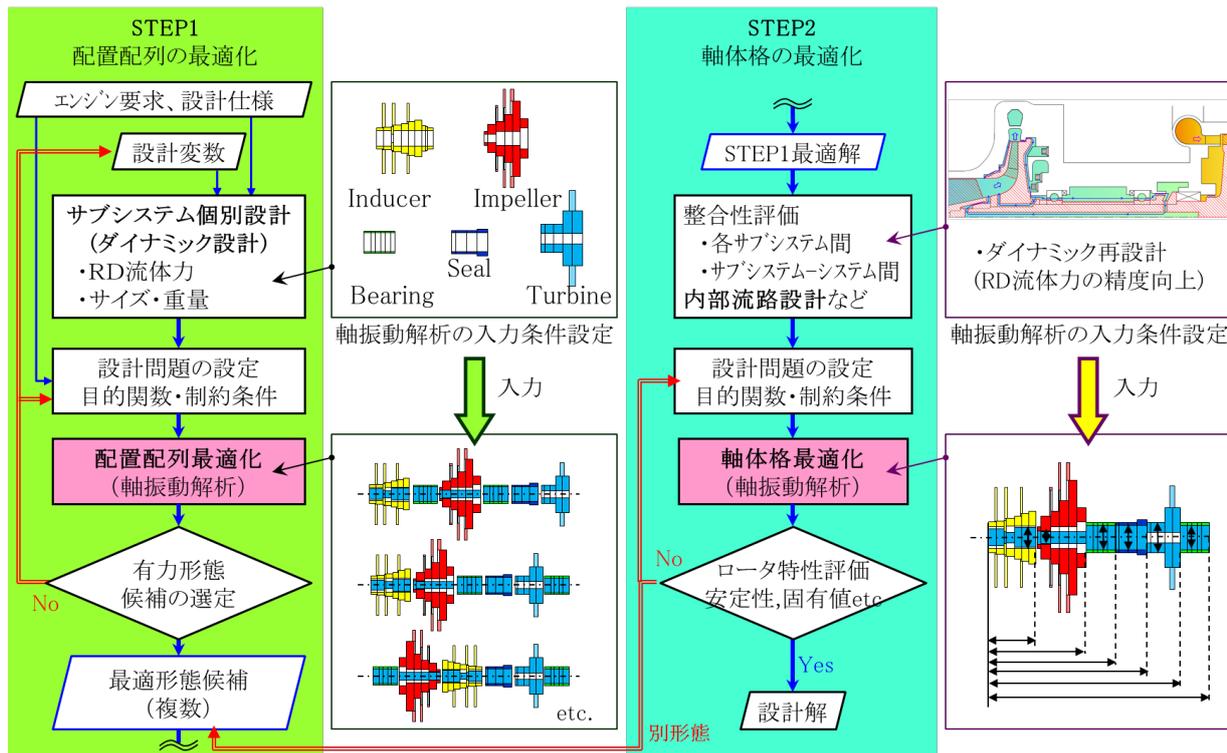


図4 ターボポンプ形態設計

内部流路設計は、サブシステムの個別設計およびサブシステムの配置配列の設計の後に行い、流体の圧力分布、内部循環流量、減圧部に必要な軸方向長さなどを出力情報として算出する。図5に内部流路設計フローの概念図を示す。

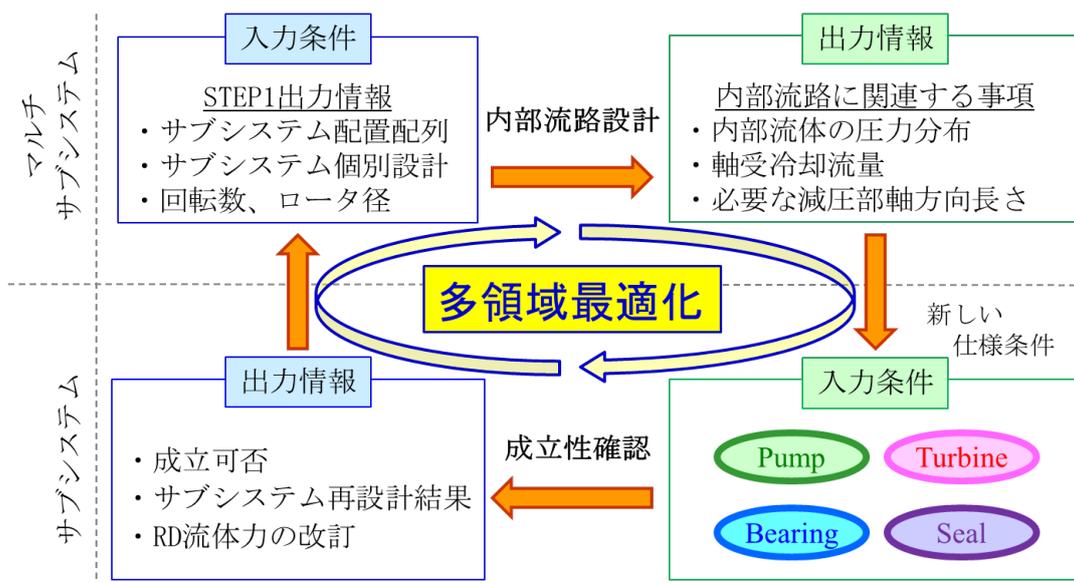


図5 内部流路設計フロー

TP の形態が決まると内部流路に関する情報が精度よく算出されるため、これがサブシステムの新しい仕様条件となり、その成立性の確認を行うことが必要となる。また、成立しない場合はサブシステムの再設計を行い、

その結果をマルチサブシステムへの入力条件とすることで、再度、内部流路設計を実施することが可能となる。しかし、この結果が他のサブシステムに影響を与えることも考えられる。このようにマルチサブシステムとサブシステムの出力情報から繰り返し計算しながら成立する解を導いていく。多領域最適化はTPシステムの最適化を目指すため、マルチサブシステムによる内部流路設計が最初に行われ、その後、成立性の評価を各サブシステムで行うことになる。

内部流路設計で各サブシステムが取り扱う項目を設計工程毎に分けて抜けが無いように抽出し、入力条件、設計変数、制約条件、評価関数および出力情報を各項目毎に図6に示す。

内部流路に関連する事項には、例えば、内部循環流量は「軸受の必要最低流量(軸受の制約条件)」を満足するか？、シール上流部圧力と下流部圧力によるシール差圧は「PV 値(シールの制約条件)」を満足するか？など、サブシステム制約条件に直接的に影響を与える項目がある。つまり、サブシステムが成立しない内部流路設計があり得ることになる。このように内部流路設計の制約条件となるサブシステム制約条件など、「この項目は、どの項目に影響を与えるか？」を把握することが重要であり、これが多領域最適化設計の考え方を作る第一歩である。内部流路設計では、各サブシステム間、TP システムとサブシステム間の影響が考えられる。また、多領域に影響を考える際は「他に影響しない」と判断することも重要である。次項では多領域に渡る各項目の影響の有無の表現方法として品質機能展開を活用し、各項目の影響の関連性を表現する。

	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	使用流体	使用流体	使用流体	使用流体	
	運用回転数	運用回転数	運用回転数	運用回転数	運用回転数	
	ロータ径	ロータ径	ロータ径	ロータ径	---	
	サブシステムの配置配列	軸受冷却流量ポンプ側	軸受冷却流量タービン側	シール上流部圧力	---	
	ロータ重量	軸受冷却流量タービン側	ラジアル荷重	シール下流部圧力	---	
設計変数	各サブシステム出力情報	インデューサ羽根枚数	軸受外径	メカシール径	タービン段数	
	バランスピストン外径	インデューサ翼形状	軸受外径	メカシール軸方向長さ	タービン翼形状	
	インペラ前面スワールブレイカ	インデューサ子午面形状	軸受幅	メイト径	部分挿入 (Partiality)	
	インペラ背面スワールブレイカ	インデューサ材料	駆動体サイズ	メイト軸方向長さ	動翼チップシュラウド	
	シール上流側流路抵抗 (等価面積)	インペラ段数	駆動体材料	FBS径	動翼反動度	
	シール下流側流路抵抗 (等価面積)	インペラ羽根枚数	インペラ子午面形状	FBS軸方向長さ	子午面形状	
	バランスホール抵抗 (等価面積)	インペラ材料	インペラ材料	---	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	
制約条件	バランスピストン機構の固有値	インデューサキャビテーション値	周速	軸出力 (または効率)	タービンチップ周速	
	シール上流部圧力	インペラ噴込比速度	面圧	PV値	タービンチップ周速	
	シール下流部圧力	インペラチップ周速	SV値	---	翼・ディスク応力	
	軸受冷却流量ポンプ側	インデューサ形状 (座標)	必要最低流量	---	翼固有値	
	軸受冷却流量タービン側	インペラ形状 (座標)	ポンプ効率	---	タービン流量	
評価関数	内部流路設計の減衰比	---	軸受剛性	シール性	トーマスフォース	
	軸方向振動最大振幅	---	---	---	---	
出力情報	内部流路設計結果	成立可否	成立可否	成立可否	成立可否	
	STEP1出力情報	STEP1出力情報	STEP1出力情報	STEP1出力情報	STEP1出力情報	
	ロータ径	子午面モデル座標 (座標)	内輪幅	必要な軸方向長さ	セクション情報	
	サブシステムの配置配列	インペラ段数	内輪質量	材料情報	材料情報	
	シール上流部圧力	流量率	シールRD係数MCK	質量	質量	
	シール下流部圧力	材料密度	シール輪	軸受剛性	トーマスフォース	
	軸受冷却流量ポンプ側	インデューサRD流体力係数	シール性	---	タービン軸出力	
	軸受冷却流量タービン側	インペラRD流体力係数	---	---	タービン軸方向推力	
	シール部戻り速度	ポンプ必要馬力	---	---	---	
	ラジアル荷重	必要ポンプ入口圧力	---	---	---	
	必要減圧部軸方向長さ (Min値)	インデューサ軸方向推力	---	---	---	
	各サブシステムの出力情報	必要インデューサ軸方向長さ	---	---	---	
	各サブシステムの改訂RD係数	改訂インデューサ軸方向長さ	改訂: インデューサRD流体力	改訂: 軸受剛性	改訂: シールRD係数	改訂: トーマスフォース
	---	改訂: インペラRD流体力	---	---	---	---

図6 内部流路設計で取り扱う項目

### 3. 品質機能展開

市場の要求品質を技術の品質要素に変換し、機能展開(あるべき姿)や機構展開(現状の技術力)を行うことで技術的な観点で関連付けする手法として品質機能展開<sup>(3)</sup>(以下、QFDと示す)がある。また、関連付けの際に、次の展開項目へ重要度を変換することが可能なため、展開が連続であれば重要度が次へと引き継がれる。

内部流路設計で取り扱う項目はQFDのマトリクスを活用し、図7に示す①から⑤までの展開を行うことにより各項目の関連付けを行い、軸振動抑制(ロータシステムの安定性)を目的としたTPの機能展開を対象に階層分析法(直接AHP)によって設定した重要度を図8に示す<sup>(4)</sup>。この軸振動抑制TP機能展開の重要度からスタートし、重要度変換を行うことで各項目が軸振動抑制に対しどの程度の重要度があるかを把握でき、また、サブシステムの入力条件の項目がロータにどう影響しているのか等の今まで考えていなかった関連性を可視化することが可能となる。

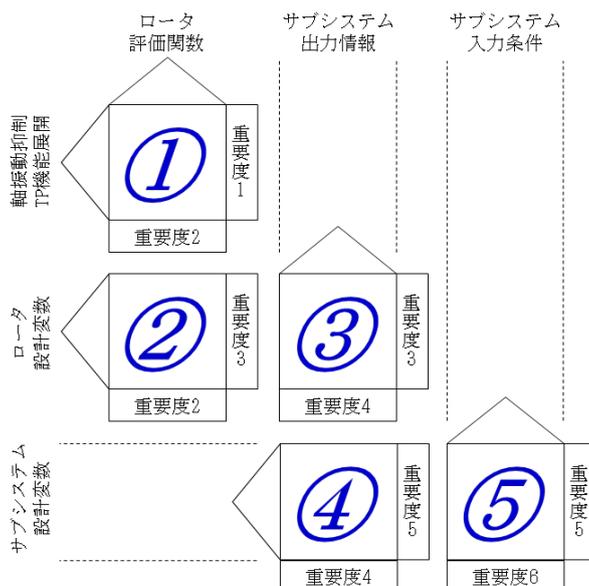


図7 マトリックスの展開

1次	2次	重要度
軸を拘束 (支持)する	軸を軸受で拘束する	3
	軸受をカートリッジで拘束する	2
	軸受+カートリッジをケージで拘束する	3
軸の曲げを制御する	要素配置配列により曲げを制御する	5
	要素間接続状態により曲げを制御する	3
	軸体格により曲げを制御する	3
振動源、振動要因を抑える	カービンのトマソスを抑える	9
	インデュサ不安定化力を抑える	11
	インペラ不安定化力を抑える	8
	隙間部不安定化力を抑える	10
	軸受の流体不安定化力を抑える	3
	カービン変動流体力を抑える	5
	インペラ変動流体力を抑える	7
	インデュサ変動流体力を抑える	7
	材料的アンバランスを抑える	2
機械的アンバランスを抑える	6	
振動を減衰させる	軸受で減衰させる	3
	軸受カートリッジで減衰させる	4
	ケージで減衰させる	2
	要素配置配列により減衰させる	6

図8 軸振動抑制 TP 機能展開の重要度<sup>(4)</sup>

《見える化》

(1) マトリックス①～⑤展開

- 軸振動抑制の機能展開からの重要度変換
- サブシステムのロータシステムへの影響
- サブシステム設計変数のキー特性の識別

(2) マトリックス③～⑤展開

- ロータシステムとサブシステムの関連付け
- サブシステム間の関連付け

図7の展開にはTPの機能展開(あるべき姿)からサブシステムの設計変数への重要度の変換が含まれるため、重要度の高いサブシステムの設計変数は、製品実現の設計・開発プロセスの中でTPの軸振動抑制に関する「キー特性」と識別ができ、この①から⑤までの展開は製品実現に向けた設計展開とも言える。図9に技術展開の中に盛り込んだマトリクス①～⑤展開の位置付けを示す。

図10にマトリクス⑤のサブシステムの設計変数と入力条件の展開の一部を示す。サブシステムの設計変数の重要度は、マトリクス①から④までの重要度変換の結果が反映され、ポンプ(インデューサとインペラ)とタービンの段数および子午面形状の重要度が高く、TPの軸振動抑制に関するキー特性となる結果となった。サブシステム設計変数が他の領域の入力条件とどのような関係になっているか表現することができ、重要度変換によりサブシステムの入力条件に重要度を設定した。要求仕様の回転数や設計完了後の解析結果のラジアル荷重を除き、サブシステムの配置配列の重要度が最も高く、TPのシステム設計がTP軸振動抑制に対し重要である結果となった。

図11にシール上流部圧力・下流部圧力、サブシステム配置配列および軸受冷却流量に関連する項目を例として、QFDの展開結果を示す。各項目を接続する線種は、マトリクスの関連付けで◎(太)または○(細)を太さで表現する。各マルチサブシステムの出力情報は、ポンプやタービンの設計変数との関連が大きく、ロータ評価関数のシステム減衰比、通過するモード数、危険速度からの離調率、不釣り合い振動応答、モード形状の全てに影響があることが分かる。

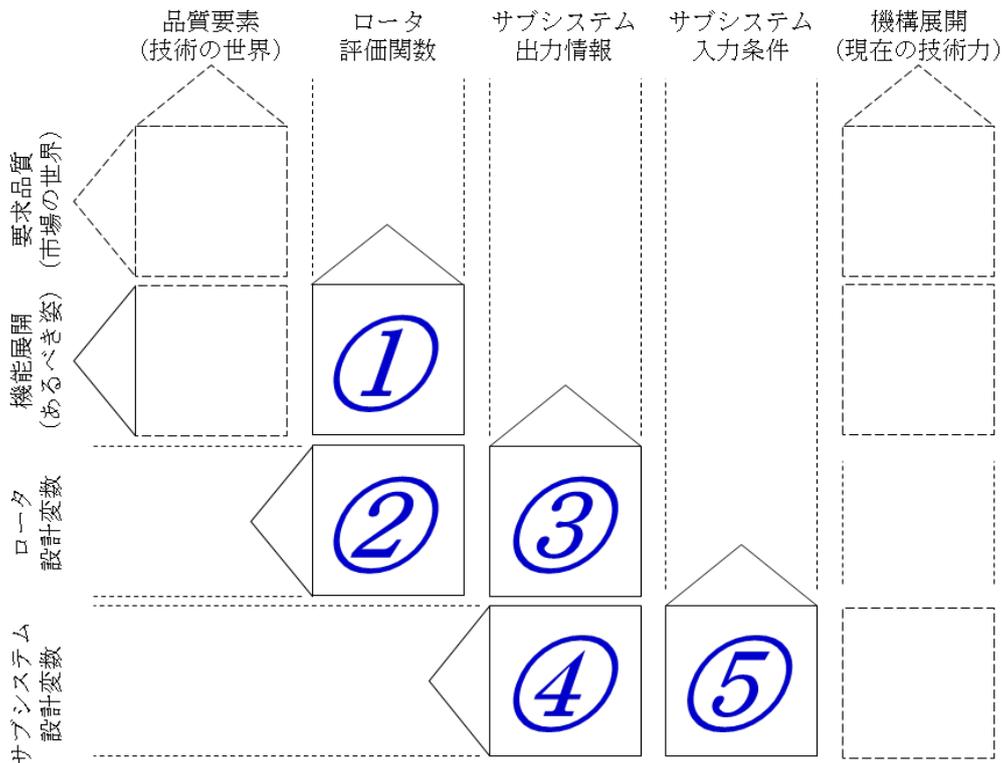


図9 製品実現に向けた設計展開

重要度	順位	サブシステム入力条件										内部流路設計																			
		要求仕様					サブシステム設計					タービン					マルチサブシステム					軸受					シール				
		回転数	使用流体	ロータ径	ポンプ出口圧力(エンジン仕様)	ポンプ流量(エンジン仕様)	ポンプ入口温度(エンジン仕様)	入口条件(エンジン仕様)	圧力比(エンジン仕様)	流量(エンジン仕様)	ポンプ必要馬力	運用回転数(要求仕様)	サブシステムの配置配列	ロータ重量	各サブシステムの出力情報(STEP1)	タービン軸方向推力	インデューサ軸方向推力	各サブシステムの出力情報(STEP2)	必要減圧部軸方向長さ	軸受冷却流量ポンプ側	軸受冷却流量タービン側	ラジアル荷重	シール上流部圧力	シール下流部圧力	シール部旋回速度						
2	28				○	○																									
3	16				○	○																									
5	1				○	○																									
1	34				○	○																									
4	5				○	○																									
2	31				○	○																									
5	2				○	○																									
1	34				○	○																									
3	19				○	○																									
3	11				○	○																									
4	3				○	○																									
2	32				○	○																									
1	33				○	○																									
2	26				○	○																									
3	20				○	○																									
4	4				○	○																									
2	29				○	○																									
3	20				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6				○	○																									
4	10				○	○																									
16	1				○	○																									
4	6																														

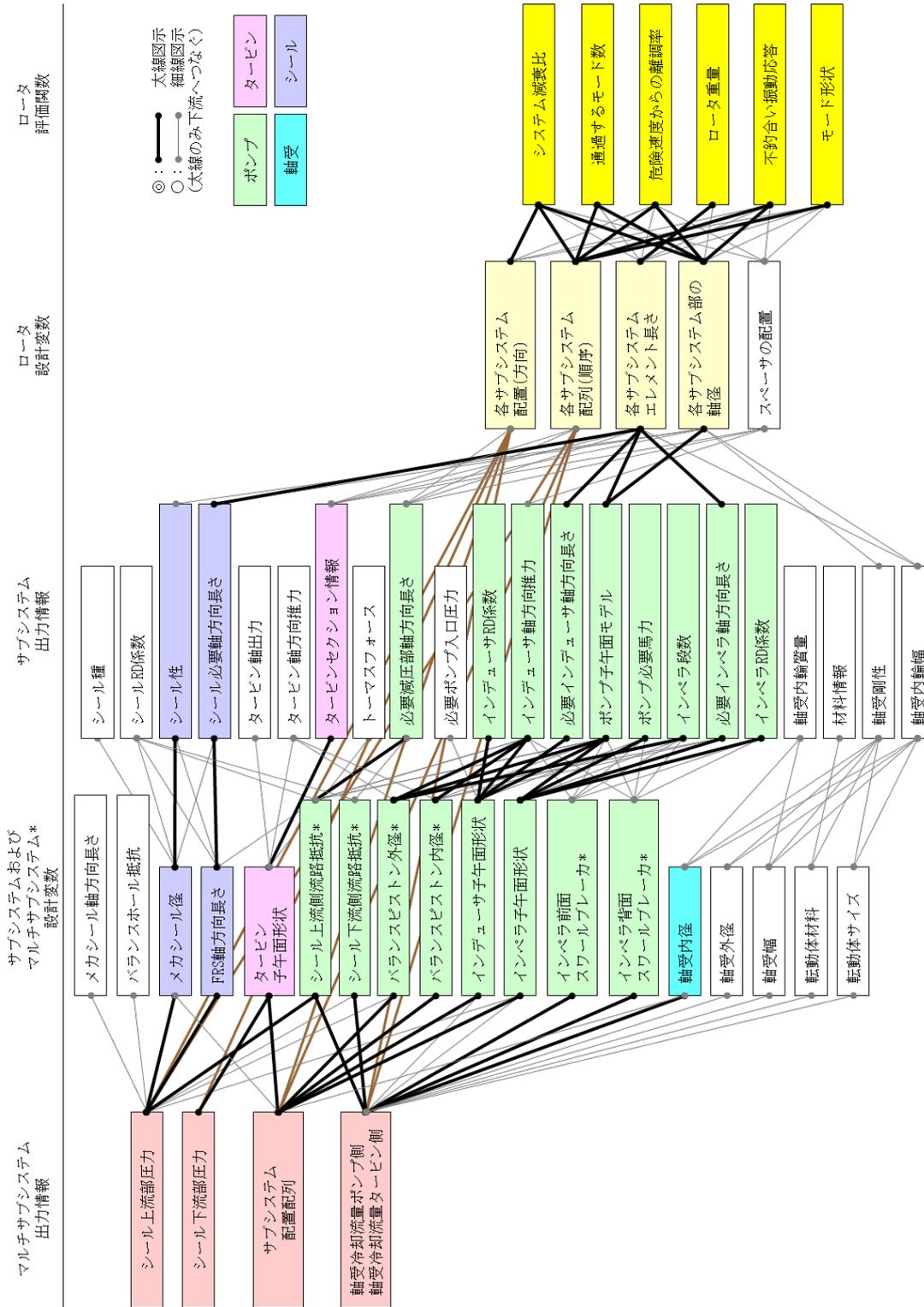


図11 シール上流部圧力・下流部圧力、サブシステム配置配列および軸受冷却流量ととの関連項目

#### 4. 内部流路の多領域最適化設計

多領域最適化設計は TP システムの全体最適を目指すため、TP システムの出力情報を最初に求め、その結果を各サブシステムで、その成立性を評価するものである。内部流路に関連するマルチサブシステム出力情報は、内部循環流量、シール下流部圧力・上流部圧力および軸受冷却流量となり、これらはポンプ効率に対しトレードオフ関係となっている。マルチサブシステムの出力情報とサブシステムの設計変数との関連をQFDによる関連付け結果から図12に示す。

サブシステムの制約条件により内部流路の成立解の有無が左右される。しかし、内部流路設計の段階では、サブシステム設計変数がある程度確定しているため、サブシステム制約条件に対し設計余裕を含んだ関連項目を設定することが可能である。そのため、PV 値(シール制約条件)に関連する「最大シール差圧」、必要流量(軸受制約条件)に関連する「軸受必要流量」をサブシステムで設定し、マルチサブシステム入力条件として先行して与えている。これにより、マルチサブシステム出力情報はサブシステムの制約条件を必ず満足することになり、サブシステムの成立性を確保しながら、マルチサブシステムでの設計を続けて行うことが可能になる。

TP はタービン駆動ガスから動力を得て、ロータを回転させる基本機能があり、ポンプ機能を考慮に入れたポンプ必要馬力は、タービン入力条件として設定されタービン軸出力として算出する。タービンがポンプ必要馬力を発生させることが実現可能か否かを確認することは、TP 要求仕様に対する設計検証となっており、内部流路設計の成立性確認の“設計検証”となっている。

以上述べてきたように内部流路設計と TP 基本機能を検証するポンプおよびタービンを明確に接続させることができ、多領域最適化設計を1つの流れにまとめることができる。しかし、タービンの設計が実現不可の場合には、マルチサブシステム設計変数の数値の見直しを行い、繰り返し計算により成立解を導いていく。さらに、この繰り返し計算により、成立解が見い出せない場合には、エンジン側からの TP 要求仕様に成立解はないと判断し、TP 要求仕様の見直しをエンジン側に要求することになる。

#### 5. 結言

- (1) 多領域最適化設計で行う内部流路設計において、取り扱うべき項目(入力条件、設計変数など)を抽出し、それぞれの項目が他の項目とどのような関係になっているかを、QFD のマトリックス展開を適用し見える化することができた。
- (2) また、軸振動抑制の機能展開からの重要度変換により、サブシステム入力条件がロータにどのように影響しているか表現することができ、「サブシステムの配置配列」の重要度が高いことが確認できた。
- (3) 各サブシステムの成立性を考慮しながら、設計余裕を均一化することができる多領域最適化の設計手法の「考え方」を示した。

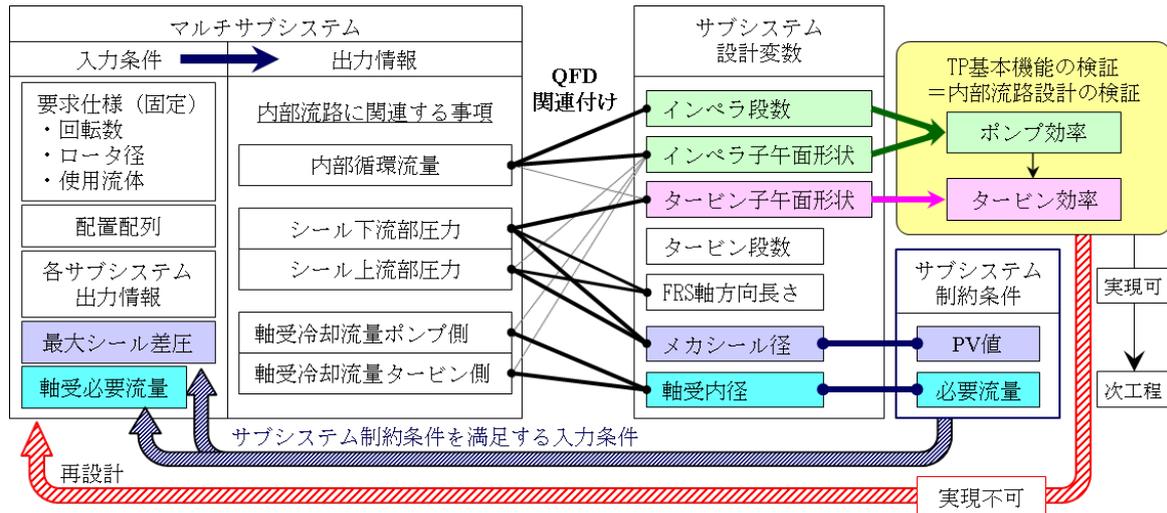


図12 内部流路の多領域最適化設計

### 参考文献

- (1) 内海政春, 吉田義樹, 岩壺卓三, ロケットターボポンプの軸振動抑制を目指したダイナミック設計, 第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集, JSASS-2011-0007, 2011 年 3 月
- (2) Uchiumi, M., Kawasaki, S., Shimagaki, M., Yoshida, Y., and Adachi, K., 2012, "Integrated Design Method of Turbopump Sub-system for Suppressing Rotor Lateral Vibration," Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Xi'an, China, AJCPP2012-044.
- (3) 赤尾, 品質機能展開入門 (品質機能展開活用マニュアル1), 1990 年, 日科技連出版社
- (4) 川崎聡, 内海政春, 島垣満, 瀧田純也, 弘松純, 中村智也, ターボポンプシステムの多領域最適設計における品質機能展開 (QFD) の援用, 第 68 回ターボ機械協会沖縄地方講演会, 2012 年 9 月, 琉球大学工学部, pp.179-184

