

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

QFD援用によるターボポンプ内部循環流れの多領域最適化設計

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

2016年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

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設計*

黒木 康洋^{*1}, 内海 政春^{*1}, 川崎 聡^{*1}, 島垣 満^{*1}, 平木 博道^{*1},
四宮 教行^{*1}, 中村 智也^{*1}

Multidisciplinary optimal design of internal flow for turbopump by QFD*

Yasuhiro KUROKI^{*1}, Masaharu UCHIUMI^{*1}, Satoshi KAWASAKI^{*1}, Mitsuru SHIMAGAKI^{*1},
Hiromichi HIRAKI^{*1}, Noriyuki SHIMIYA^{*1}, Tomoya NAKAMURA^{*1}

Key Words: QFD, Turbopump, Multidisciplinary design, Optimal design, Internal flow

1. 緒言

ロケットエンジン用ターボポンプは、Fig. 1 に示すポンプ(インデューサ、インペラ)、軸受、軸シール、タービンなどのサブシステムによって構成されている。従来から行われているターボポンプの設計手法(Fig. 2)では、まず上位システムから各サブシステムに要求仕様が展開される。各サブシステムは、与えられた要求仕様の制約の範囲内で最適設計が行われ、その後ターボポンプシステムの統合化が行われる。ターボポンプシステムの設計では、個別最適化によって決定されたサブシステムの寸法形状をそのまま統合し、限られた設計変数によって最適化が行われることになる。

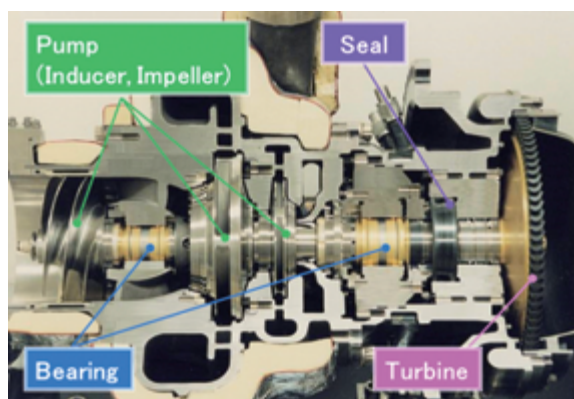


Fig. 1 ターボポンプのサブシステム

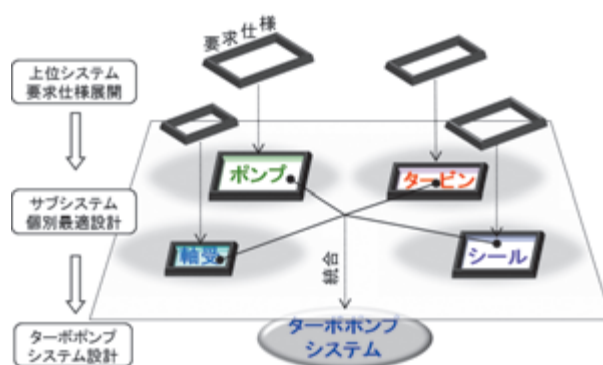


Fig. 2 従来の設計手法

それゆえ、ターボポンプシステムの設計空間は小さくなり、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。そこで、JAXA では単一のサブシステムを1つの領域と考え、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』の研究に取り組んでいる。多領域最適化のイメージはFig. 3に示すとおりであり、ターボポンプシステムを最適化するための変数としてサブシステム設計変数が使用されることになる。多領域最適化を行う場合、サブシステムのどの設計変数がターボポンプシステムに影響するのかを明確にする必要があり、両者の関連性を可視化することが重要となる。

* 平成 27 年 12 月 4 日受付 (Received 4 December 2015)

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

本研究では、ターボポンプシステムの重要項目の1つであるポンプ内部循環流れに着目し、内部循環流れの多領域最適化手法の構築を目標としている。本報では、品質機能展開(QFD)を援用し、内部循環流れの重要特性と設計変数の関連性を可視化する手法について報告する。更に、本手法により得られた重要設計変数とそれらをインプットとした多領域最適化設計の概要についても述べる。

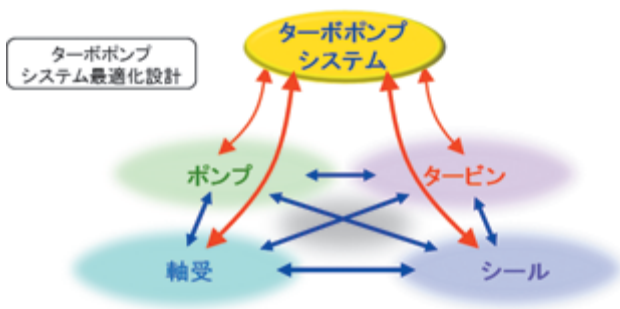


Fig. 3 多領域最適化設計

2. 対象範囲

QFD 援用の対象は、JAXA が取り組んでいる『ターボポンプのダイナミック設計⁽¹⁾⁽²⁾』における内部循環流れについてである。ターボポンプのダイナミック設計に関する研究は、ターボポンプの軸振動を発散に至らせないことを目的に、サブシステムとそれらを包絡する全体システムの最適化(最適形態、最適体格)を目指すものである。そのため、多領域最適化の着眼点は軸振動抑制に向けられており、内部循環流れについては、軸方向振動の抑制や軸スラストバランスの調整など、多領域にまたがる重要な機能を有するにも関わらず、成立性の確認のみにとどまっている。以上のことから、内部循環流れ設計をダイナミック設計に融合させることが必要であると見え、本研究の対象とした。

内部循環流れの多領域最適化を行う場合、Fig. 4 に示すような各サブシステム以外の内部循環流れに関わるシステムも考慮する必要があり、これらをマルチサブシステムと定義する。

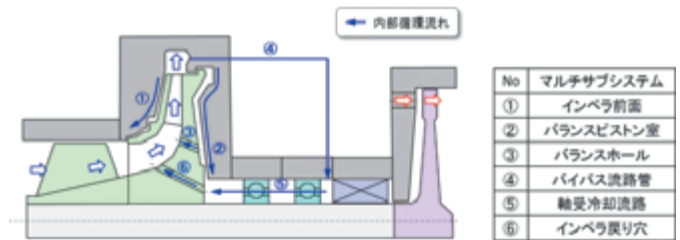


Fig. 4 マルチサブシステム

3. 品質機能展開の援用方法

QFD 援用により構築した展開表のフローを Fig. 5 に示す。内部循環流れに関わる要求品質の重要度がマルチサブシステム設計変数 x およびサブシステム設計変数 y の重要度に変換されるフローとなっている。Fig. 5 における重要な特徴は、設計者の思考を反映しやすくするために『評価項目』を導入したこと、また評価項目と設計変数との関連性をわかりやすく示すために『特性要因図』を導入したことである。本展開表のフローに関する詳細な特徴については以下に示すとおりである。

1) 展開表①から展開表③

ターボポンプ内部循環流れに関わる要求品質、品質要素、機能、機構展開を実施する。要求品質の重要度は階層分析法(AHP)により算出する。なお、展開表③まではターボポンプ全般を対象とする。

2) 条件設定④

展開表④以降は、具体化された内部循環流れシステムを前提に設計変数の抽出および関連付けを行うため、検討の対象を特定する必要がある。そこで展開表③と④の間において、サブシステムの種類と配置配列、内部循環流れシステムを設定する。本検討では、インデューサ付1段クローズドインペラ、玉軸受、メカニカルシール、1段タービンをサブシステムとし、配置配列および内部循環システムのフローパスは Fig. 4 のように設定した。

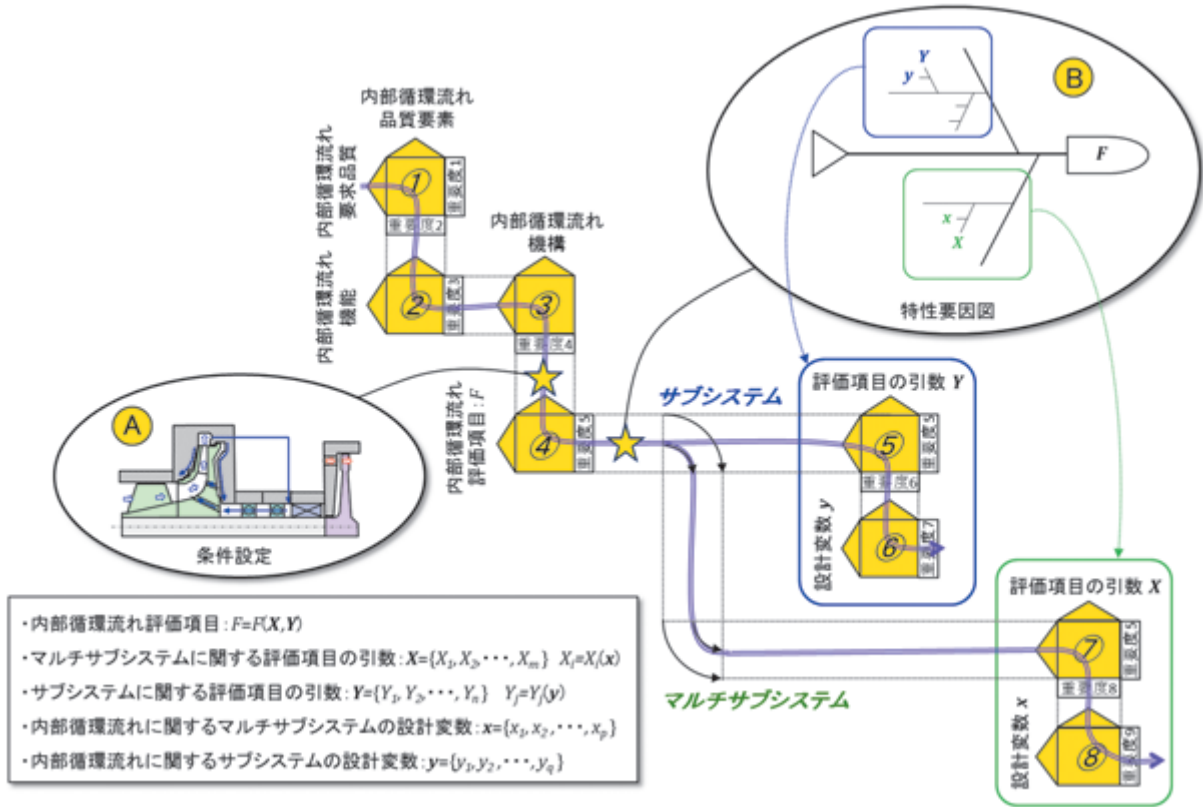


Fig. 5 内部循環流れに関する展開表のフロー

3) 展開表④

評価項目（ターボポンプ設計者が内部循環流れに対して評価が必要と判断する項目）を抽出し、機構との関連付けを行う。評価項目はブレインストーミングにより抽出し、抽出された評価項目 F とその特性を Table 1 に示した。Table 1 に示す評価項目は、内部循環流れに関する重要な特性である。

Table 1 内部循環流れ評価項目

No	項目	特性	定義
1	内部循環流量	望小	インペラ通過流量-ポンプ出口流量
2	軸方向の動特性	望大	安定性($=Re(\lambda)$)
3	軸方向の静特性	望大	軸推力調整能力(傾き、領域)
4	半径方向振動との連成性	望大	半径方向の危険速度と軸方向振動の離調度(faxial-fradial)
5	流路長	望小	トータル長さ
6	最大昇温量	望小	$abs(\Delta T)$ or $abs(\Delta \rho)$

$Re(\lambda)$:複素固有値の実部

faxial:軸方向振動の周波数, fradial:半径方向の危険速度

$abs(\Delta T)$:流体温度の変化量絶対値, $abs(\Delta \rho)$:流体密度の変化量絶対値

4) 特性要因図⑩

評価項目とサブシステムおよびマルチサブシステムの設計変数との関連性を整理する方法として、特性要因図を援用する。特性要因図の作成は、評価項目 $F(X, Y)$ を特性として扱い、以下のルールに従う。

- 一般的な特性要因図の作成方法と同様、項目については、具体化した後にシステム志向によるグループ化（たとえば、KJ 法的グルーピング）を行う。
- 評価項目が数学モデルで表現できる場合は、数学モデルを参考にして定義付けと特性の検討を行う。
- 1次（大骨）は評価項目ごとに決める。
- 2次（中骨）は部位を基本とする。
- 評価項目の引数 X, Y が3次の項目、設計変数 x, y が4次の項目となるように整理する。（Fig. 5 参照）
- 上半分にサブシステム関連の項目、下半分にマルチサブシステム関連の項目でまとめる。（Fig. 5 参照）

5) 展開表⑤および⑥

サブシステムに関する展開表を作成し、内部循環流れに関するサブシステムの重要設計変数を抽出する。展開表における関連づけは、特性要因図の上半分に抽出された項目を参照しながら行うことで、抽出漏れがなく容易に実施可能である。

6) 展開表⑦および⑧

マルチサブシステムに関する展開表を作成し、内部循環流れに関するサブシステムの重要設計変数を抽出する。展開表⑤および⑥同様、特性要因図の下半分を参照しながら関連付けを行う。

4. 実施結果

4. 1. 要求品質

要求品質は、抽出された項目について細分化した後、KJ 法的グルーピングを行い、1 次、2 次、3 次の階層でまとめた後、2 次の要求品質に対して AHP を実施した。抽出された要求品質およびその重要度を Fig. 6 に示す。本重要度は、ターボポンプ設計者の AHP 結果を相乗平均したものである。Fig. 6 は、軸スラスト調整と軸方向振動などが上位にあり、内部循環流れで技術的観点から重要と考える項目と照らしあわせて妥当な結果といえる。



Fig. 6 要求品質

4. 2. 重要度変換

要求品質の重要度は展開表①により品質要素の重要度に変換される。変換手法は QFD で一般的な独立分配法を使用する。更に品質要素の重要度は機能、機構、評価項目、評価項目の引数、設計変数の順に変換される。本研究で得られた展開表の作成例を Fig. 7 に示す。Fig. 7 はマルチサブシステムに関する内部循環流れの評価項目の引数と設計変数の展開表である。記号(◎, ○, △)による関連付けを行うことで、評価項目の引数の重要度(重要度⑧)が設計変数の重要度(重要度⑨)に変換される。



Fig. 7 展開表(作成例)

4. 3. 特性要因図

全ての評価項目について前項 4) に示したルールに基づき特性要因図を作成した。特性要因図の作成例を Fig. 8 に示す。Fig. 8 は『軸方向の動特性』に関する特性要因図である。特性(評価項目)に関わる設計変数が 4 次で表現されており、単一の評価項目に関しては、特性要因図により評価項目と設計変数の関連の有無を明確に可視化できることがわかる。また、サブシステムの設計変数とマルチサブシステムの設計変数を異なる色で識別することも、可視化に有効な手法である。

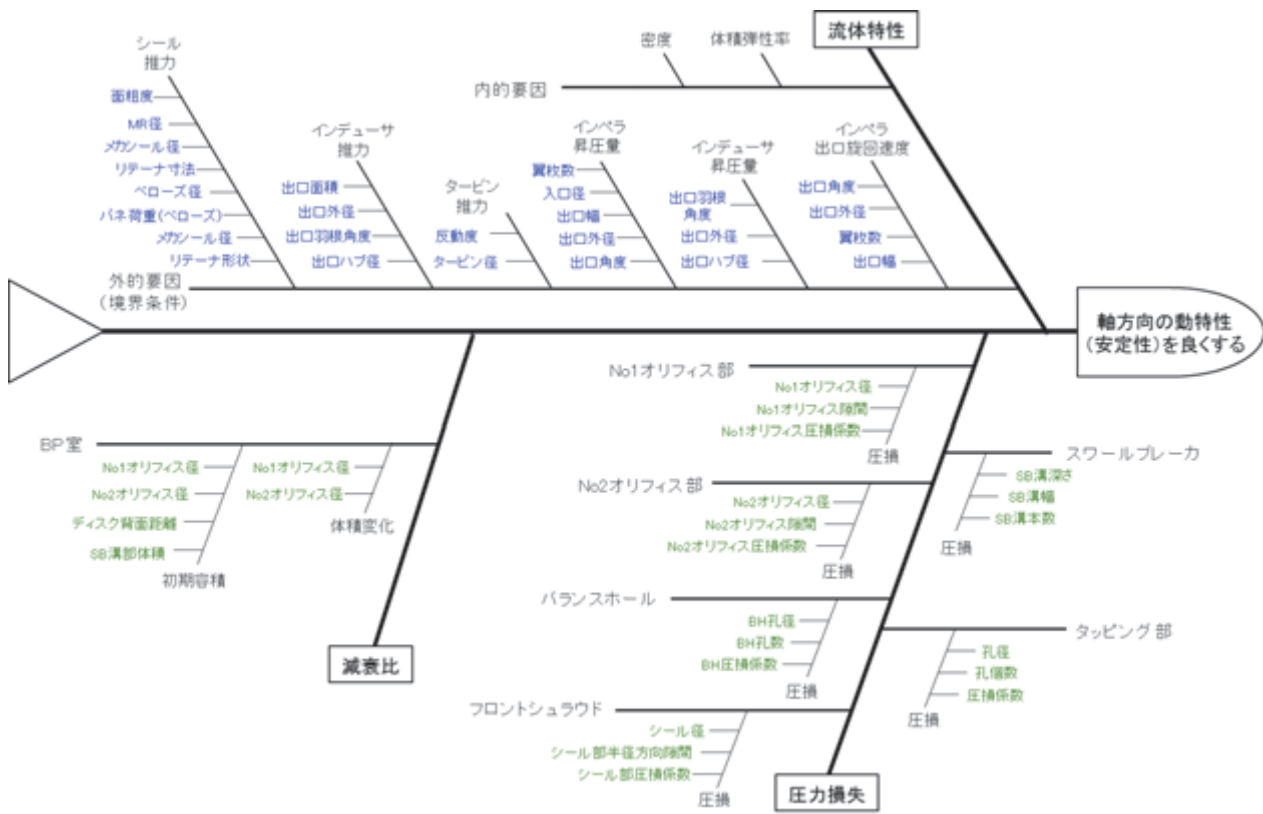


Fig. 8 特性要因図 (作成例)

4. 4. 重要設計変数の抽出

Fig. 5 の展開表のフローにより算出したサブシステムおよびマルチサブシステムの重要度を Fig. 9 から Fig. 11 に示す。Fig. 9、Fig. 10 および Fig. 11 は、評価項目ごとに色で識別して示しており、設計変数が影響する評価項目の種類および影響度合いが容易に可視化できる。

Fig. 9 は展開表⑥から得られたサブシステムの設計変数の重要度である。内部循環流れ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大きい。さらに軸受系およびタービン系からも重要設計変数が抽出されており、内部循環流れは多領域にまたがる特性であることが本研究で構築した展開フローからも明確化された。

Fig. 10 は各サブシステム設計変数の重要度の和を整理したものである。各サブシステム設計変数の総重要度は、ポンプ系：40%、軸受系：25%、シール系：13%、タービン系：22%であった。軸受系の総重要度が大きい要因の一つは、評価

項目に関連する設計変数の総項目数が多いことであり、軸受系が内部循環流れに及ぼす影響が相対的に大きいことを示している。タービン系は『半径方向との連成性』との関連は大きいものの、その他の項目との関連は小さく、内部循環流れに及ぼす影響はポンプ系程大きくない。シール系の総重要度が小さい要因は、『半径方向との連成性』が他のサブシステムと比較して小さいためであることが、この検討により明らかとなった。

Fig. 11 は展開表⑧で得られたマルチサブシステムの設計変数の重要度である。マルチサブシステムの重要設計変数は、バランスピストン周りに集中している結果が得られた。また Fig. 9 および Fig. 11 の重要設計変数は、ターボポンプ設計者が経験的に重要と考える変数とほぼ合致する結果となっており、結果の有効性が裏付けられた。また、設計者の暗黙知が可視化できるようになったといえる。

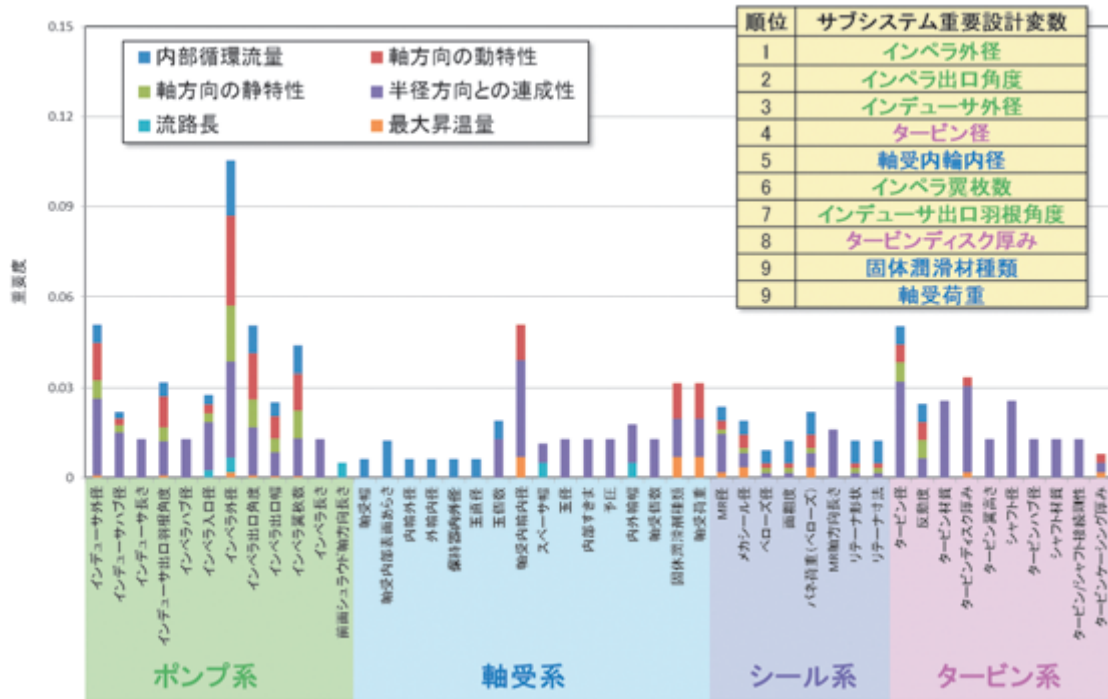


Fig. 9 サブシステムの重要設計変数

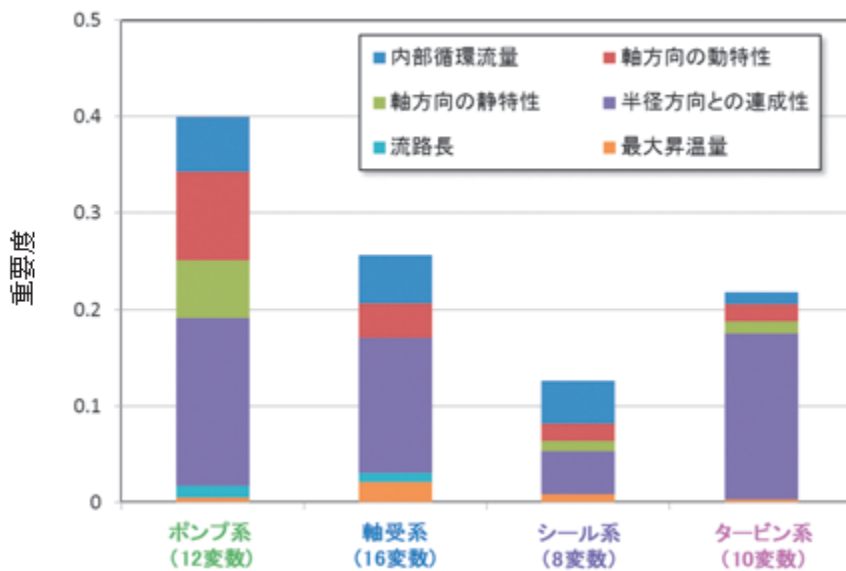


Fig. 10 各サブシステムで整理した重要設計変数の和

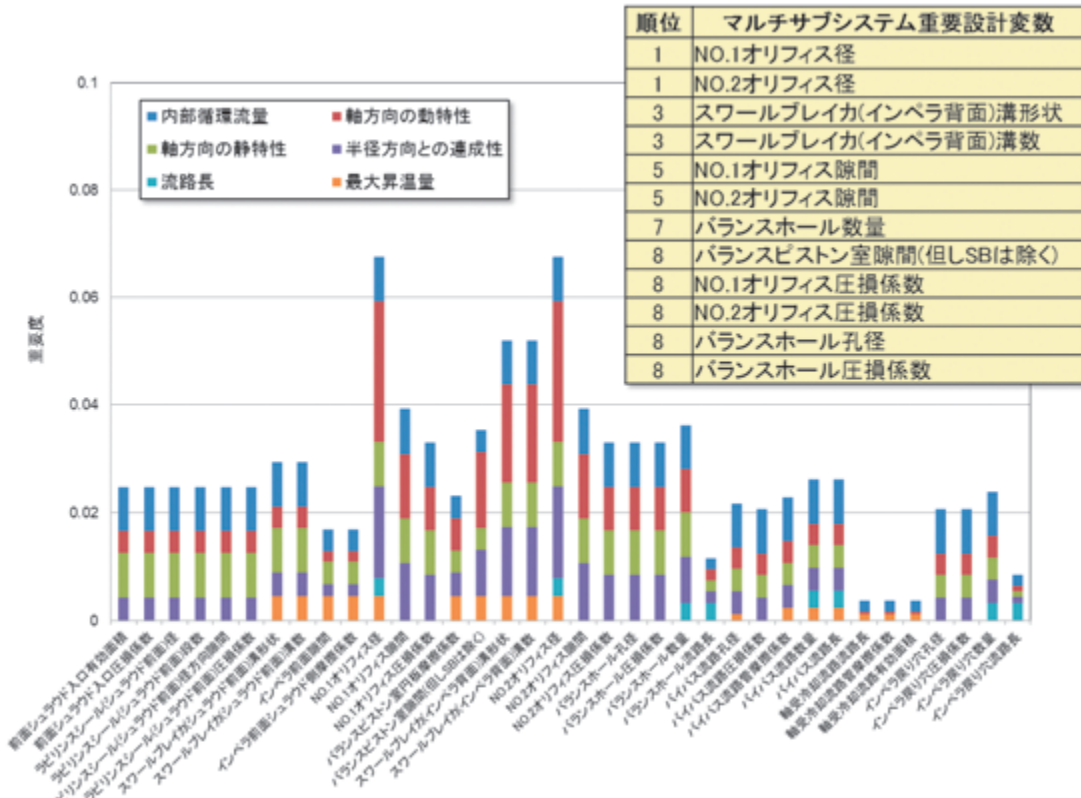
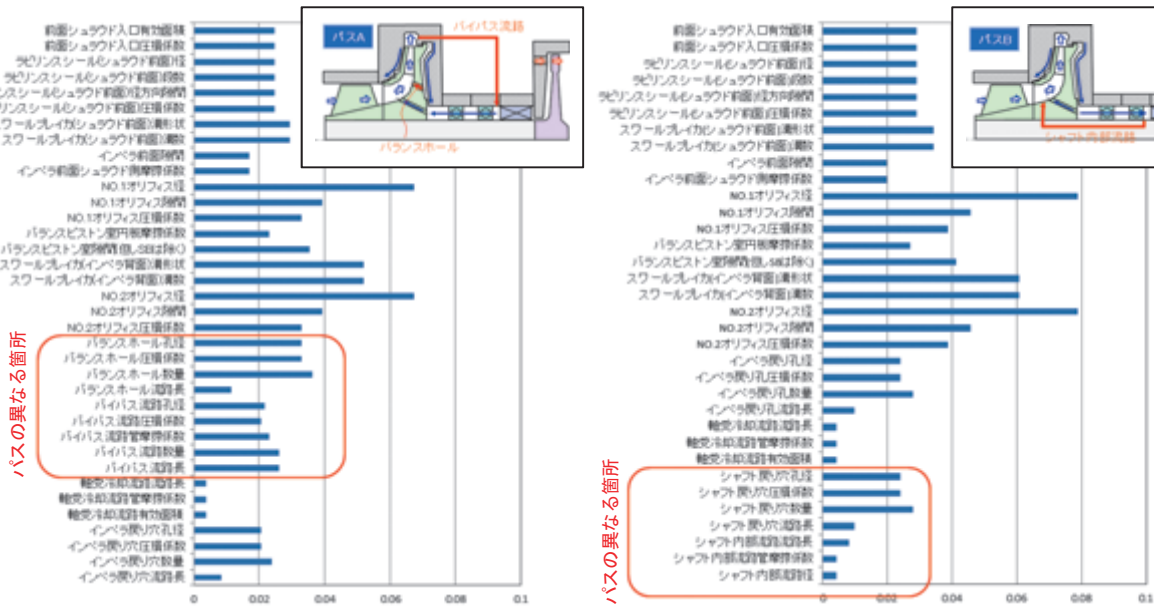


Fig. 11 マルチサブシステムの重要設計変数

4. 5. フローパスの影響

Fig. 11 は、展開表の 3.5 項 (Fig. 5 参照) において、内部循環流れシステムのフローパスを Fig. 4 のフローに設定したときのもの (パス A と

する) である。本項では、異なるフローパス (パス B とする) がマルチサブシステム設計変数に及ぼす影響について比較する。比較結果を Fig. 12 に示す。Fig. 12 より、マルチサブシステ



(a) パス A

(b) パス B

Fig. 12 フローパスがマルチサブシステムの重要設計変数に及ぼす影響

ムの重要設計変数はバランスピストン周りに集中しており、フローパスは設計変数の上位順位にほとんど影響しないことが解る。また、パス A のバランスホールに関わる設計変数の重要度は比較的上位にあり、バランスホールを内部循環流れシステムに適用する場合は、十分な配慮が必要となることに加え、設計難易度がパス B の場合よりも高いとの結論が導かれる。

5. 多領域最適化設計

本研究によって得られた重要設計変数を用いた多領域最適化設計手法について考える。内部循環流れの設計フローを Fig. 13 に示す。内部循環流れの設計を行う場合、内部循環流れに関わる理論解析のインプットがサブシステムおよびマルチサブシステムの設計変数となり、得られるアウトプットが評価項目となる。本研究で得られた評価項目はそのままアウトプットとして使用可能である。内部循環流れに関する最適化は、アウトプットにある“しきい値”を設け、そのしきい値の範囲における最適解あるいは満足解を導出することで行われる。解を得るためにインプット条件を変えてモンテカルロ法などにより探索を行うことになるが、マルチサブシステムおよびサブシステム全ての設計項目を変数として使用することは、解析時間および解析後のポスト処理に要する時間を考えると現実的ではない。そこで本研究で得られた重要設計変数を優先的に選定することで、要求品質の重要度を反映しつつ最適化を短時間で効率的に行うことが可能となる。内部循環流れに関する多領域最適化の解析手法は、例えば平木らが提案するバランスピストン機構の設計手法⁽³⁾のように、複数ある評価項目それぞれに制約条件を設定し、



Fig. 13 内部循環流れの設計フロー

制約条件を満足する設計変数の範囲を明確にする手法などが、ダイナミック設計との融合を考えた場合、有効であると考えられる。

本研究にて構築した展開表のフローを用いた多領域最適化設計は、ターボポンプの内部循環流れ以外の特性、更には一般的なターボ機械のシステム設計においても有効に活用できるものと考えられる。

6. 結論

- QFD 援用による展開表のフローに、評価項目および特性要因図を導入することにより、重要設計変数の抽出手法を構築した。
- 構築した展開表のフローにしたがい、内部循環流れに関わる評価項目と設計変数の関連性を可視化した。
- 構築した展開表のフローによる重要度変換により、内部循環流れに関わる重要設計変数を抽出した。
- 抽出された重要設計変数は、設計者が経験やノウハウから選定している重要設計変数と矛盾しないことから、本手法にて得られる結果の妥当性が確認できた。
- 本手法は多領域最適化設計を効率良く進めるために有効な手法である。

《参考文献》

- (1) 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, 324-329(2012)
- (2) Uchiumi, M. et al., 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) 平木 博道, 他 2 名, 動特性を考慮したターボポンプのバランスピストン機構の設計手法, ターボ機械第 72 回講演会, 大分高専, D-03(2014)

