

ロケット用ターボポンプの多領域最適設計における 高信頼性評価手法の構築

Construction of High-Reliability Evaluation Method Concerning Multidisciplinary Optimal Design for Rocket Turbopump

久保世志 技術開発本部基盤技術研究所数理工学研究部
都丸裕司 航空・宇宙・防衛事業領域技術開発センター宇宙技術グループ 主幹

高い信頼性が求められるロケット用ターボポンプは、タービン、インペラ、軸受などの要素から構成される。このような多領域の最適設計を考える場合、まず各要素の配置・配列を決定し、定義した設計変数の組合せに対して軸振動の安定化・抑制を目的とした最適化を行う。このとき、軸振動特性に対する誤差因子の寄与を考慮することで、信頼性の高い最適設計が可能となる。本稿では、信頼性評価指標として評価指標の標準偏差を用い、応答曲面を援用した高信頼性評価手法の枠組みを提案する。さらに、提案手法を用いたロケット用ターボポンプの多領域最適設計事例について報告する。

Rocket turbopumps that are required to have a high degree of reliability are composed of turbines, impellers, bearings, etc. In a multidisciplinary optimal design process of such a complicated rotating system, the shape optimization of each component is addressed to stabilize the dynamic behavior of a rotating system after a design of the component array. In this paper, the shape optimization method based on the response surface incorporating with the magnitude of distribution is proposed. As for estimating the influence of error factors in terms of rotor dynamics, the standard deviation is introduced. As a numerical example, a multidisciplinary optimization of rocket turbopump is presented to verify the utility of our proposed method.

1. 緒 言

軸振動の安定化は、回転機械のロータシステムの基本設計における重要な課題である。特に高回転・高圧のロケット用ターボポンプにおいては、ロータ系と流体系の相互作用に起因するロータダイナミック流体力（RD 流体力：たとえば、タービン動翼先端からの漏えい量が周方向に不均一であるために生じるトルクアンバランス力）が及ぼす不安定化作用による振動現象が問題となることがある⁽¹⁾。しかしながら、このような軸振動現象の解析技術は十分に確立されておらず、一般的にロータシステムが最適化されているとは言い難いのが現状である。

また、ロケット用ターボポンプを一つの大きなロータシステムと捉え、そのサブシステムとしてターボポンプの構成要素である、①タービン ②インペラ ③インデューサ ④軸受 ⑤シール、を位置付ける。このとき、ターボポンプの軸振動の安定化・抑制を目的にサブシステムの配置・配列を最適化したのちに、各サブシステムの寸法を設計変数とした最適化を行う多領域最適設計手法が提案されている⁽²⁾。ここでいう配置・配列とは、たとえば軸受配置や

タービンインペラ配列を意味する。各サブシステムを個別に設計してからそれらを組み合わせる従来の設計手法とは違い、各サブシステムを同時に扱う点に特徴がある。すなわち多領域最適設計手法とは、各サブシステムを同時に扱うことでロータシステムとして最適な設計を行うための手法である。この提案手法では、事前に予測した RD 流体力を考慮した軸振動解析を行っているが、RD 流体力の変動に対する軸振動の信頼性を評価するまでには至っていない。

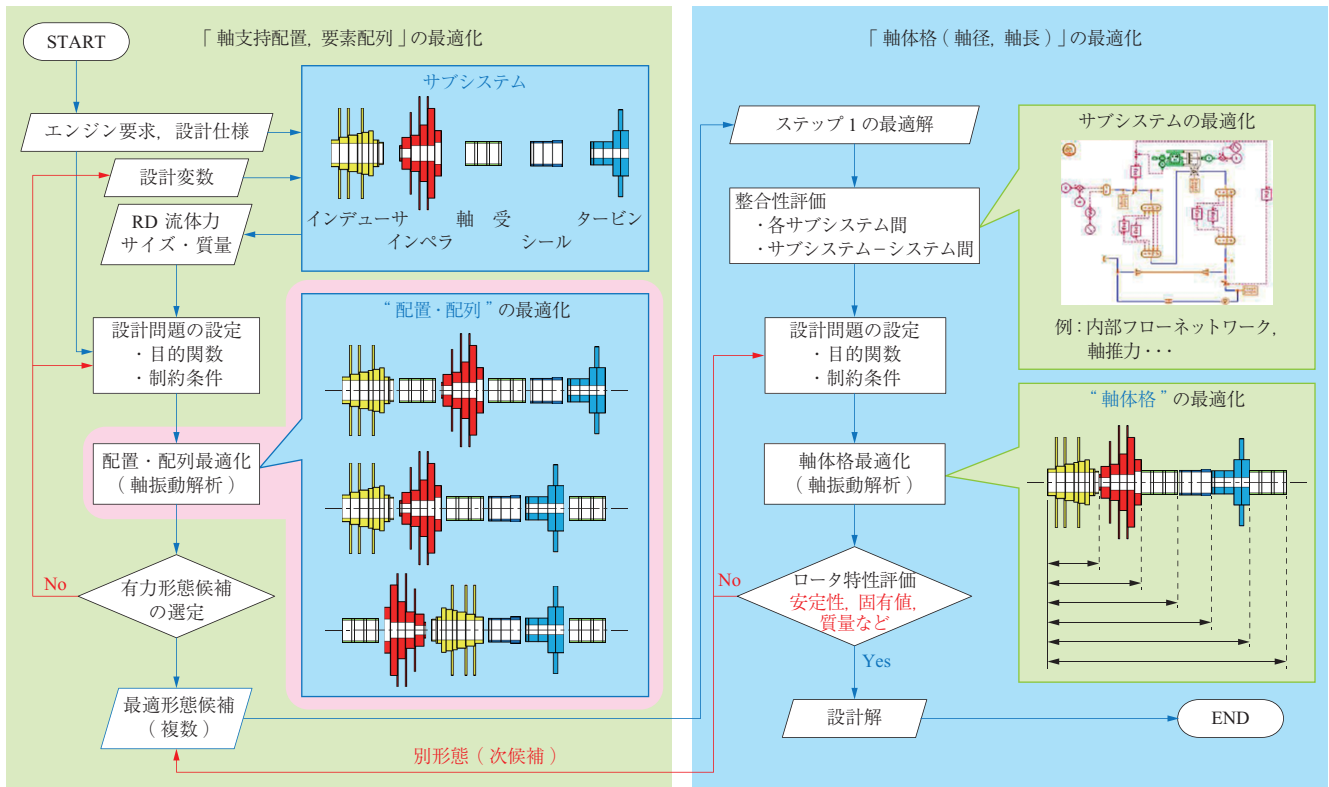
そこで本研究では、多領域最適設計手法を対象に、RD 流体力の変動を考慮したロータシステムの高信頼性評価手法の構築を目的とする。また、RD 流体力に加えて各サブシステムの変形比率や寸法比率（概念設計から詳細設計へ進む過程で見込まれる設計寸法値の変化率）が、ポンプの評価指標に与える影響も考慮して、軸振動特性の信頼性評価を行うための手法を構築する。

2. ターボポンプの多領域最適設計手法⁽³⁾

本研究で対象とする上段エンジン用液体水素ターボポンプの多領域最適設計手法⁽³⁾を第 1 図に示し、その概要を

(a) ステップ1：形態設計

(b) ステップ2：軸体格設計



(注) RD : Rotor Dynamic

第1図 ターボポンプの多領域最適設計手法⁽³⁾
Fig. 1 Multidisciplinary optimal design process of rocket turbopump⁽³⁾

述べる。

本設計手法は大きく次の二つのステップに分かれている。

(1) ステップ1

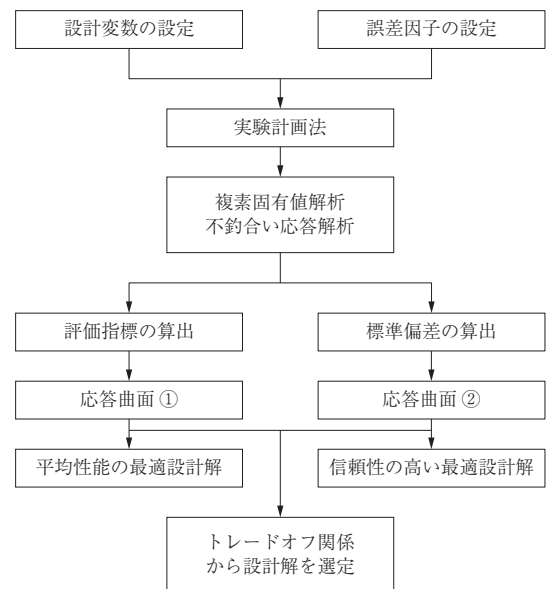
ターボポンプの各サブシステムの組合せ順序（配置・配列）を設計変数としてターボポンプの形態を最適化し、設計候補の絞り込みを行う。形態要素数があまり多くないターボポンプでは、物理的に不成立な形態を除いた全形態（84通り）に対して軸振動解析を行い、軸振動特性に優れた上位の形態をステップ2の設計対象として選定する。

(2) ステップ2

ステップ1で得られた設計候補に対して各サブシステムの寸法や剛性を設計変数としてモンテカルロ法によって軸振動解析を行い、最終的な設計解を得る。

3. 高信頼性評価手法

本研究で提案する評価手法による高信頼性設計手順の概略を第2図に示す。



第2図 高信頼性設計手順
Fig. 2 Flow chart of a highly reliable design process

本研究で提案する最適化の枠組みは、誤差因子を考慮する場合としない場合の二つの最適化手順から構成される。その特徴は、軸振動解析を行った結果得られる第1表に示す各評価指標に対して、作成する二つの応答曲面を用い

第 1 表 評価指標
Table 1 Evaluation indexes

評価指標	単位	クライテリア	特性
ロータ質量	kg	-	望小
モード通過数	数	-	
不釣り合い応答振幅	-	<1.0	
最小システム減衰比	-	>0.0	望大
最小離調率	-	≥0.05	

て設計解を選定する点にある。

評価指標の平均値を表す応答曲面第 2 図に示す①からは、軸振動特性と設計変数との関係を近似した全設計解が得られる。また、評価指標の標準偏差を表す応答曲面第 2 図に示す②は、評価指標のばらつきとして定義した標準偏差の近似曲面であり、全設計解の信頼性を評価できる。こうして得られた二つの応答曲面を利用して、性能とばらつきのトレードオフ関係から最終的な設計解を決定する。

ここで信頼性評価指標である標準偏差 σ は次の (1)、(2) 式によって定義する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 N は評価する誤差因子の組合せの数、 x は各評価指標を意味し、 m は (2) 式で求められる各評価指標の平均値である。

4. ロケット用ターボポンプの信頼性評価

4.1 軸振動特性の評価指標と設計対象

多領域最適設計のステップ 1、2 では、第 3 図に示すターボポンプの有限要素モデルに各部の RD 流体力の作用を考慮した軸振動解析⁽⁴⁾を基に軸振動特性を評価する。軸振動特性は第 1 表に示した五つの指標で表され、各指標の重み付き線形和として (3) 式で表される最大値 1 の総合評価値 F_{Σ} ⁽⁵⁾を目的関数としてこれを最大化す

ることを試みる。

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^5 w_i F_i / \sum_{i=1}^5 w_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 F は正規化された各評価指標を表し、 w は技術者を対象とした AHP (Analytic Hierarchy Process)⁽⁶⁾によって設定される重みである。また、次元の異なる複数の評価指標を扱うため、(4) 式に従い各評価指標を正規化している。

$$F_{\Sigma} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{f_i - f_i^*}{f_i - \bar{f}_i} \right)^{\gamma_i}, & \text{sgn}(f_i^* - \bar{f}_i) \times (f_i - f_i^*) < 0 \\ 1, & \text{sgn}(f_i^* - \bar{f}_i) \times (f_i - f_i^*) \geq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 f_i 、 f_i^* 、 \bar{f}_i 、 γ_i はそれぞれ評価指標、理想値、希求水準および感度の乗数を示す。第 2 表に、評価指標に対する理想値、希求水準、乗数と重みを示す。

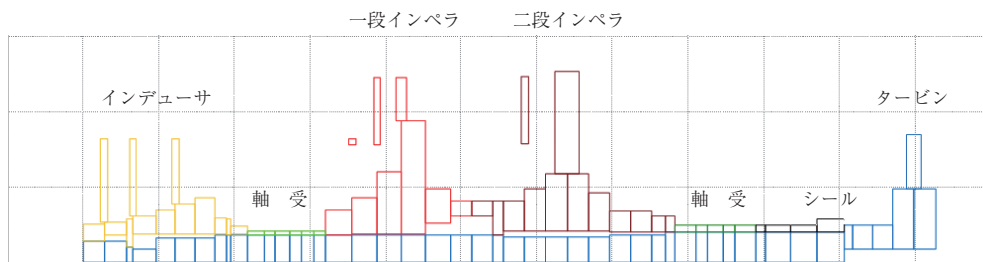
ステップ 1 で選定されたタイプ 1、2 のターボポンプの模式図を第 4 図に示す。本研究では、タイプ 1 (第 4 図 - (a)) およびタイプ 2 (- (b)) の 2 形態⁽⁵⁾を対象に、ステップ 2 において信頼性を考慮した軸体格 (各サブシステムの寸法および軸受剛性) の多領域最適設計手法を構築する。ここで、2 形態ともに軸径は 30 mm、回転数は 70 000 rpm である。なお、タイプ 1 (第 4 図 - (a)) およびタイプ 2 (- (b)) の総合評価値はそれぞれ 0.64、0.50 であった。

4.2 設計変数と誤差因子

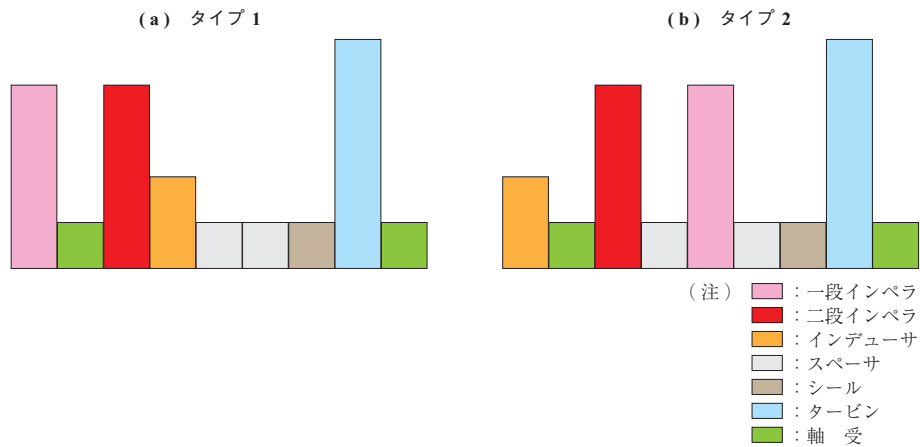
本研究における設計変数および誤差因子を第 3 表および

第 2 表 評価指標に対する理想値、希求水準、乗数と重み
Table 2 Ideal value, aspiration level, multiplier and weighting factor for each evaluation index

評価指標	理想値	希求水準	乗数	重み
ロータ質量	15	25	1	0.016
モード通過数	0	1	1	0.108
不釣り合い応答振幅	0.2	0.6	2	0.362
最小システム減衰比	0.1	0.0	1	0.352
最小離調率	0.20	0.05	3	0.161



第 3 図 ターボポンプの有限要素モデル
Fig. 3 Finite element model of the turbopump



第 4 図 タイプ 1, 2 のターボポンプの模式図
Fig. 4 Schematic diagrams of Type 1 and 2 turbopump designs

第 3 表 設計変数

Table 3 Design variables of turbopump

設計変数	記号	下限値	上限値
インデューサ軸長	InL	1.0	2.0
インペラ軸長	ImL	1.0	1.2
タービン入口長	TuL	0.5	1.5
軸受軸長	BeL	0.5	1.5
軸受剛性	BeS	0.5	1.5

び第 4 表に示す。なお、設計変数の上下限値および誤差因子の各水準値は基準値に対する比率である。なお、誤差因子の上下限値の設定には、各サブシステムに対する異なる設計思想や設計者の違いによるばらつきの範囲を想定した値を採用した。

4.3 実験計画法

本研究では、五つの設計変数に対してラテン超方格に従い初期ケースとして 50 ケースを生成し、各ケースに対して直交表 (L18) に割り付けた 18 ケースの誤差因子の組合せの軸振動解析 (総計算数: $50 \times 18 = 900$ ケース) を実施した。

4.4 最適化結果

第 5 図にターボポンプの設計解集合を示し、RBF (Radial Basis Function) を用いて作成した応答曲面上で

MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm) によって最適解を仮想探索した際に生成された設計解の総合評価値と標準偏差の散布図を示す。なお本稿では、多峰性を有する応答にも対応できるように RBF を、極値をもれなく探索するために MOGA を用いた。総合評価値は望大特性、標準偏差は望小特性であるため、第 5 図において図の右下に位置する解ほど優れた設計解であることを意味する。

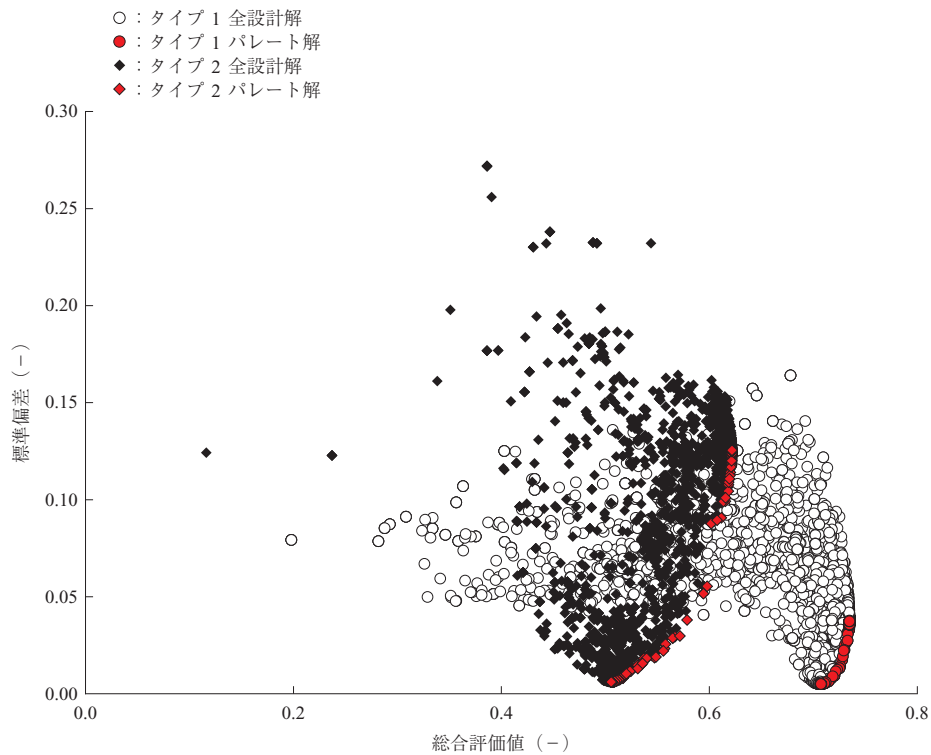
第 5 図から、タイプ 1 に比べて総合評価値の劣るタイプ 2 でも、タイプ 1 と同等の標準偏差を有する設計解を選択できることが分かる。ただし、ステップ 1 の評価どおり、総合評価値はタイプ 2 に比べてタイプ 1 が優れており、信頼性を考慮してもタイプ 1 の方が優れた配置・配列であることが分かった。

第 6 図にタイプ 1 のパレート解を構成する設計変数の傾向 (多次元解析チャート) を示す。多次元解析チャートには、各設計変数と総合評価値および標準偏差が横軸に、それぞれの上限値および下限値が縦軸に示されており、一つの折れ線が一つの設計解に対応する。第 6 図の結果から、選ばれたパレート解は標準偏差にばらつきはあるものの、総合評価値の高いパレート設計解群が抽出され

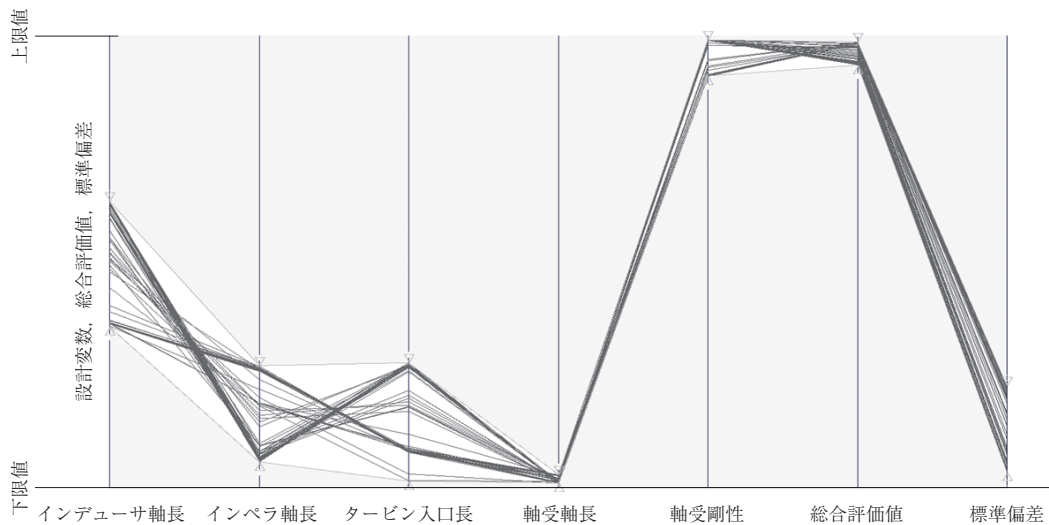
第 4 表 誤差因子

Table 4 Error factors of turbopump

誤差因子	記号	第 1 水準値	第 2 水準値	第 3 水準値
インデューサ変形比率	InRAR	0.89	1.00	1.15
インペラ変形比率	ImRR	0.93	1.00	
インデューサ RD 流体力 C	InRDC	0.80	1.00	1.20
インデューサ RD 流体力 k	InRDk	0.80	1.00	1.20
インペラ RD 流体力 M	ImRDM	0.80	1.00	1.20
タービンディスク径比率	TDiskR	0.90	1.00	1.10
シール軸方向長さ比率	AR	0.90	1.00	1.10
軸受支持減衰	BDR	0.80	1.00	1.20



第 5 図 ターボポンプの設計解集合
Fig. 5 Design set for turbopump



第 6 図 パレート解を構成する設計変数の傾向
Fig. 6 Parallel coordinate chart for pareto-optimal set

ていることが分かる。また、パレート解を構成する設計解の設計変数の傾向はほぼ一致しており、設計変数の値を適切に選ぶことで、軸振動特性に優れた信頼性を有する設計解を選定できることが示唆されている。

次に、第 6 図に示すタイプ 1 のパレート解から設計解を選定し確認計算を行った。設計解の設計変数と総合評価値および標準偏差を初期設計解の値と比較して第 5 表に

示す。なお、初期設計解とはすべての設計変数が基準値で構成される解である。第 5 表から、総合評価値および標準偏差のいずれも初期設計解に比べ優れた設計解を選定することができた。特に初期設計解に比べ選定解の標準偏差値が大きく改善されており、信頼性の高い解を選定することができた。

第 5 表 設計解の設計変数と総合評価値および標準偏差
Table 5 Design variables, evaluation index and standard deviation of design solution

設計解	設計変数					応答曲面近似値		確認計算値	
	InL	ImL	TuL	BeL	BeS	F_{Σ}	σ	F_{Σ}	σ
選定解	1.63	1.03	0.85	0.55	1.32	0.70	0.039	0.66	0.030
初期設計解	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-	0.64	0.094

5. 結 言

本研究では、ロケット用ターボポンプの多領域最適設計手法を対象に信頼性を評価する手法を提案した。提案した手法は、誤差因子を考慮する場合としない場合の 2 通りの応答曲面を作成し、全設計解から性能と信頼性を両立するパレート解を選定するものである。

提案した手法を用いてターボポンプの軸体格を設計変数として RD 流体力に対する信頼性評価を実施した結果、性能と信頼性を両立する設計解の存在、およびその設計解群を構成する設計変数に特定の傾向があることを示した。また確認計算によって、特に信頼性に優れた設計解を選定できることを示した。

今後は、本手法を多領域最適設計手法における配置・配列の最適化へも展開していく。

— 謝 辞 —

本研究は国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) からご協力をいただき、JAXA-DDT (Dynamics Design Team) の活動成果を基に実施したものである。また、軸振動解析については JAXA で実施していただきました。関係各位のご厚誼^{こうぎ}に対して、ここに記し深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) D. W. Childs : Vibration Characteristics of the HPOTP (High-Pressure Oxygen Turbopump) of the SSME (Space Shuttle Main Engine) Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol. 107 No. 1 (1985. 1) pp. 152 - 159
- (2) M. Uchiumi, S. Kawasaki, M. Shimagaki, Y. Yoshida and K. Adachi : Integrated Design Method of Turbopump Sub-system for Suppressing Rotor Lateral Vibration Asian Joint Conference on Propulsion and Power Xi'an China (2012. 3)
- (3) 久保世志, 内海政春 : ターボポンプの高信頼度評価手法 ターボ機械 第 45 巻 第 3 号 2017 年 3 月 pp. 136 - 147
- (4) 安達和彦, 内海政春, 島垣 満, 四宮教行, 川崎 聡, 井上剛志 : 軸振動解析に基づくターボポンプの形態設計法の開発 第 72 回ターボ機械協会大分講演会講演論文集 2014 年 10 月
- (5) 川崎 聡, 島垣 満, 内海政春, 安達和彦 : 要素の配置配列をパラメータとしたロケット用ターボポンプの形態設計 日本機械学会論文集 第 82 巻 第 842 号 2016 年 p. 16-00134
- (6) R. W. Saaty : The analytic hierarchy process — what it is and how it is used Mathematical Modelling Vol. 9 Issue 3 - 5 (1987) pp. 161 - 176