

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### QFDを用いたロケットターボポンプ用タービンの 重要設計パラメータの抽出

瀧田 純也, 福岡 勝, 國枝 磨, 船崎 健一, 内海 政春

2012年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# QFD を用いたロケットターボポンプ用タービンの 重要設計パラメータの抽出\*

瀧田 純也<sup>\*1</sup>, 福岡 勝<sup>\*2</sup>, 國枝 磨<sup>\*3</sup>, 船崎 健一<sup>\*4</sup>, 内海 政春<sup>\*1</sup>

## Identification of Important Design Parameters for Rocket Turbopump Turbine by Using QFD\*

Junya TAKIDA<sup>\*1</sup>, Masaru FUKUOKA<sup>\*2</sup>, Maro KUNIEDA<sup>\*3</sup>,  
Kenichi FUNAZAKI<sup>\*4</sup> and Masaharu UCHIUMI<sup>\*1</sup>

### Abstract

An application of QFD (Quality Function Deployment) method for the design of rocket turbopump turbines is presented in this paper. Generally rocket turbopump turbines are designed as supersonic impulse turbines, and because of its special specifications, improvements on turbine efficiency and robustness is difficult. Further improvement on turbine design techniques is needed, because turbine performance directly affects engine performance and reliability in a liquid rocket propulsion system. The purpose of present work is to improve turbine design techniques by applying QFD method to the rocket turbopump turbines. In this presentation, the QFD results for the identification of important design parameters and for the visualization of the market needs which was obtained from rocket engine stakeholders are discussed.

**Key Words:** Quality Function Deployment, Market needs, Important Design Parameter, Supersonic Impulse Turbine

### 1. 緒言

近年のロケットエンジンでは、エンジン全体の高信頼性やエンジンシステム簡素化の観点から、エンジンサイクルとして Open Cycle Engine (以降 OCE と称す) であるエキスパンダーブリードサイクル (以下、EB と称す) が選定されることが多い<sup>1)</sup>。ロケットエンジンの主要コンポーネントの一つにターボポンプがある。ターボポンプはタンク内の低圧の推進剤を吸い込み高圧にして燃焼室に送るという機能を有するが、このような OCE に搭載されるターボポンプ用のタービンでは、航空機用エンジンのものとは異なり、圧力比が高く取られ、ノズルや動翼内部での流れが音速を超える超音速タービンとなる

為に高効率化が難しく、構造強度面での制約もあり技術的難易度は高いものの、エンジン性能や信頼性を向上させる為にターボポンプ用タービンの設計技術の更なる向上が望まれている。

しかしながら現在のターボポンプ用タービンを取り巻く環境は、上記の通りタービンの仕様自体が特殊である為にこれまで十分な研究が行われていないことに加え、現行ロケットエンジンの開発完了から 20 年以上に渡り新規開発の機会が無くタービン設計技術そのものが形骸化していること、更に当時の開発を知る技術者も既に退職しており技術継承が困難になっている等、ロケットターボポンプ用の超音速タービン設計技術そのものの獲得が急務になっている。

\* 平成 24 年 1 月 26 日受付 (Received 26 January 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 エンジン研究開発グループ

(Engine System R&D Group, Space Transportation Propulsion R&D Center, Space Transportation Mission Directorate)

\*2 宇宙航空研究開発機構 元信頼性評価委員会委員

\*3 TERA Consulting 主幹

\*4 国立大学法人 岩手大学工学部 (Division of Mechanical Engineering, Iwate University)

以上のような背景から、本研究では、超音速タービン設計技術の獲得、即ち、“仕様に応じて自在にタービンが設計できること”を目的としている。設計技術獲得の手段としてはロケットターボポンプ用タービンを対象としたパラメータ設計により獲得してゆくが、タービンの設計パラメータ全てを対象とすることは現実的ではなく、また従来は設計者の経験に基づき設計パラメータを選定していた。しかしながらタービン設計技術が欠如している現状においては、パラメータ選定においても選定の根拠や基準が必要となる。

従って本報では、開発/設計の効率化を高めるため品質機能展開<sup>2)</sup> (Quality Function Deployment: 以下、QFDと称す)を用いて、ロケットエンジン関係者を対象とした市場の声の見える化(=市場のニーズを技術の言葉に置換えた)と、重要設計パラメータの選定(=市場のニーズが反映された設計パラメータ)を行い、設計技術の獲得に向けてパラメータ選定を行った結果について述べる。

## 2. QFDの対象と目的、検討ステップ

### 2.1 QFDの適用対象

本報にてQFDの対象とするロケットターボポンプ用超音速タービンの概略図を図1に、代表的な諸元を表1示す。

ロケットエンジンの主要コンポーネントであるターボポンプ用超音速タービンに対しQFD手法を適用した事例はこれまでに無いが、設計技術の獲得が急務である現状においては、重点志向であるQFDのアプローチ

チこそが有効であると考えられる。

ロケットエンジン関係者によるブレインストーミングの結果、EB系のエンジンを前提とし、エンジン推力10～30トン級のターボポンプ用超音速タービンをQFDの対象として選定した。このようなタービンは、極力高い圧力比、極力少ない流量での作動となる為、極端な低アスペクト比の翼となること、またノズル出口で超音速流れとなりタービン翼列内で衝撃波を伴うような複雑な流れ場となることが特徴である。

### 2.2 QFDの位置付けと目的

本報におけるQFDは、超音速タービンの設計技術獲得の為に実施するパラメータ設計を行う上で、その対象とすべき“設計パラメータ選定に用いる手段”としての位置付けである。(図2参照)従って本報におけるQFDの目的は、超音速タービンのパラメータ設計を行う上で必要な、以下の情報を獲得することである。

- 1) 市場の声(ニーズ)を見える化すること
- 2) ロケットターボポンプ用超音速タービンの重要設計パラメータを特定すること

### 2.3 QFDの検討ステップ

今回実施したQFD全体の検討ステップを図3に示す。

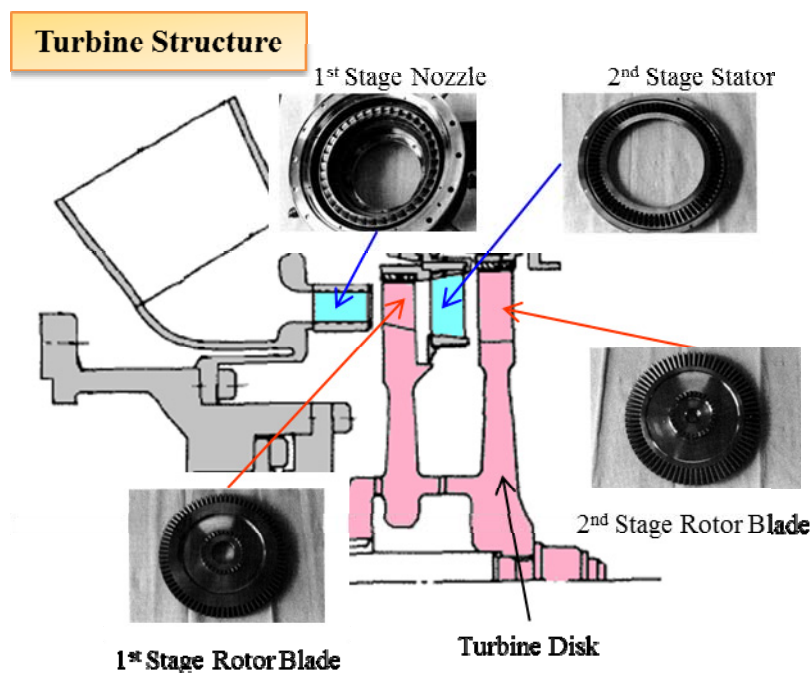


Figure 1: Schematic of rocket turbopump turbine

Table 1: Typical specifications of rocket turbopump turbine

Turbine Type	Impulse Turbine
Stage Number	1 <sup>st</sup> Stage or 2 <sup>nd</sup> Stage
Working Fluid	GH2 (Temperature ~500K)
Rotational Speed	~50,000 rpm
Pressure Ratio	~10
Mach Number at Nozzle Exit	> 1 (Supersonic)

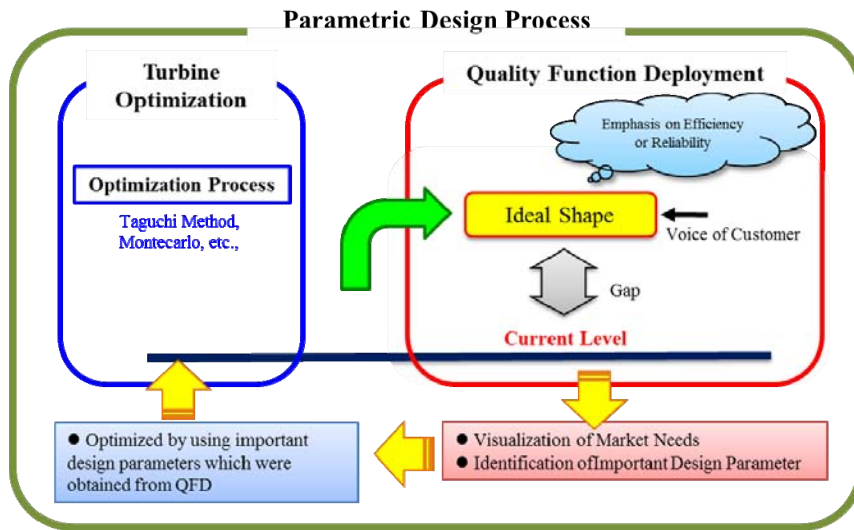


Figure 2: Position of QFD

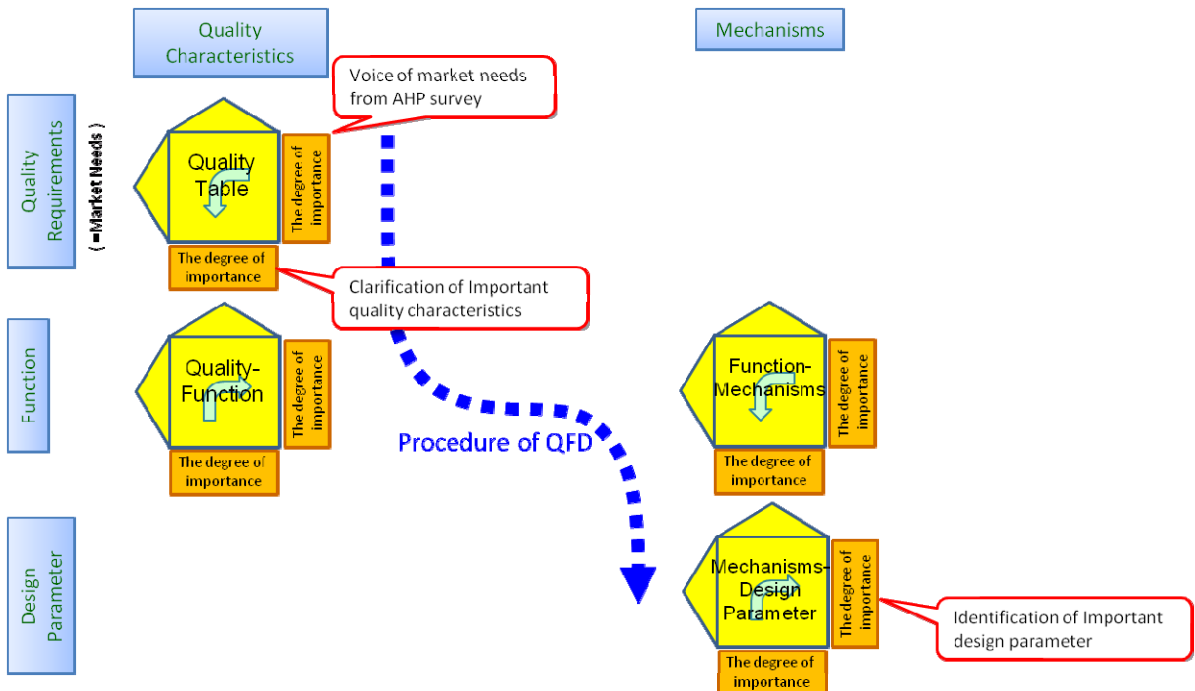


Figure 3: Whole procedure of QFD

### 1) 要求品質の抽出

「ターボポンプ用タービンとしてあるべき姿」をテーマにロケットエンジン関係者を対象に市場の声(=ニーズ)を収集し、要求品質展開表に纏めた。

### 2) 要求品質重要度の算出

抽出した要求品質を対象に、AHP法(階層分析法)による一対比較によって重要度を算出した。要求品質重要度は、ロケットエンジン関係者を対象に延べ47名からのAHPアンケート結果によって求めている。

### 3) 品質要素への重要度変換

市場のニーズ(=要求品質)を技術の言葉(=品質要素)に置き換え、品質要素展開表を作成した。次に、要求品質-品質要素展開表(=品質表)にて関連付けを行い、要求品質重要度を品質要素重要度に変換した。これにより市場の声が見える化されたことになる。

更に「当たり前品質」を抜けなく抽出する為に、後述のタービン機能に対しても直接AHP比較を行い、技術的な面(=機能重要度)からも品質要素重要度への変換を行い、両者の比較を行った。

### 4) 技術展開による重要度変換

品質要素の重要度を特定した後、その重要品質を実現する為の技術に結びつける必要がある<sup>3)</sup>。タービン機能(=はたらき)や、機構(=仕組み)を媒介として、更に重要度の変換(=技術展開)を行った。

### 5) 重要設計パラメータの特定

技術展開の最終ステップとして、機構-設計パラメータ展開表により重要度の変換を行い、市場の声が反映された重要設計パラメータを特定した。

関係者延べ47名を対象に要求品質に対するAHPアンケートを行い、要求品質の重要度を求めた。アンケート対象者の内訳を表2に示す。

この47名という数字は、日本のロケットエンジン開発に携わる関係者の約半分に相当する。よってロケットターボポンプ用超音速タービンに対する“市場の声(=ニーズ)”は抜けなく抽出出来ていると考える。

ロケットターボポンプ用タービンは世の中の一般的な製品とは異なり、一般には馴染みのない製品である。今後本製品(=タービン)をより良くして行く為には、本製品をよく知るロケットエンジン関係者や製造メーカーからの要求(=ニーズ)が重要であると考え、上記関係者を「市場」と定義した。

アンケートの集計方法については、表2で示したグループ毎を対象に、各個人より得られた回答を相乗平均することでグループ毎の重要度として整理している。図4には、グループ毎に要求品質重要度を比較した結果を示す。

図4に示す通り、要求品質に対する重要度はグループ毎に特徴のある結果となった。「JAXA T/P関係者」の要求品質重要度は、全ての項目について全体的に高い傾向が得られた。一方で「T/Pメーカー」の要求品質重要度は、製造、設計部門共に、「壊れにくい」や「故障しにくい」等のロバスト性を重要視する結果となった。この傾向は「JAXA ENG関係者」においても見られる。また「ENGメーカー」では、製造、設計部門共に、「個体差が無いこと」を最重要視する結果が得られた。以上より、ターボポンプ用超音速タービンに対する各ステークホルダの“市場の声(=ニーズ)”が明らかになった。

## 3. QFD 適用結果

### 3.1 要求品質重要度の算出

ターボポンプ用超音速タービンに対し、幅広く関係先(各ステークホルダ)からの要求を把握し、見える化する必要がある。そこでJAXA及び製造メーカーを含

### 3.2 品質要素への重要度変換

技術者が「市場のニーズ」を理解できるよう、要求品質から品質要素へと重要度の変換を行う。

品質要素への重要度の変換は要求品質-品質要素展開

Table 2: Breakdown of the AHP subjects

Group		Number of respondents
1	Turbopump designer of JAXA	15
2	Rocket engine designer of JAXA	15
3	Turbopump manufacturer design section	2
4	Turbopump manufacturer manufacturing section	3
5	Rocket engine manufacturer design section	6
6	Rocket engine manufacturer manufacturing section	6
Total		47

表 (= 品質表) により行う。品質表の一例を図5に示す。品質表の配点法については、標準的な手法である独立配点法を用いている。図6には、グループ毎に品質要素重要度を比較した結果を示す。

図6に示す通り、重要な要求品質と関連性が高い品質要素の重要度が高くなっており、グループ毎に特徴のある結果となった。

「JAXA T/P 関係者」の品質要素重要度は、「効率」や「馬力」等、性能に関する項目の重要度が高くなる結果が得られた。一方で「T/P メーカー」の品質要素重要度は、製造、設計部門共に、「定常応力」や「変動応力」、「非定常流体力」等の耐破壊性や耐振性を重要視する結果となった。

この傾向は「JAXA ENG 関係者」においても同様であった。また「ENG メーカー」では、製造、設計部門共に、「タービン翼型」の重要度が最も高くなった。また、全てのグループで「重量」や「クリアランス」の重要度が高くなる結果が得られた。

上記は「要求品質」経路で重要品質を整理したが、市場のニーズである要求品質からだけでは、所謂「当たり前品質」が抜け落ちる可能性がある。よって、技術展開により得られた「タービン機能展開表」に対して直接 AHP 比較を行い、技術的な面 (= 機能重要度) からも「機能 - 品質要素展開表」によって品質要素への変換を行い、両者の比較を行った。尚、タービン機能に対する直

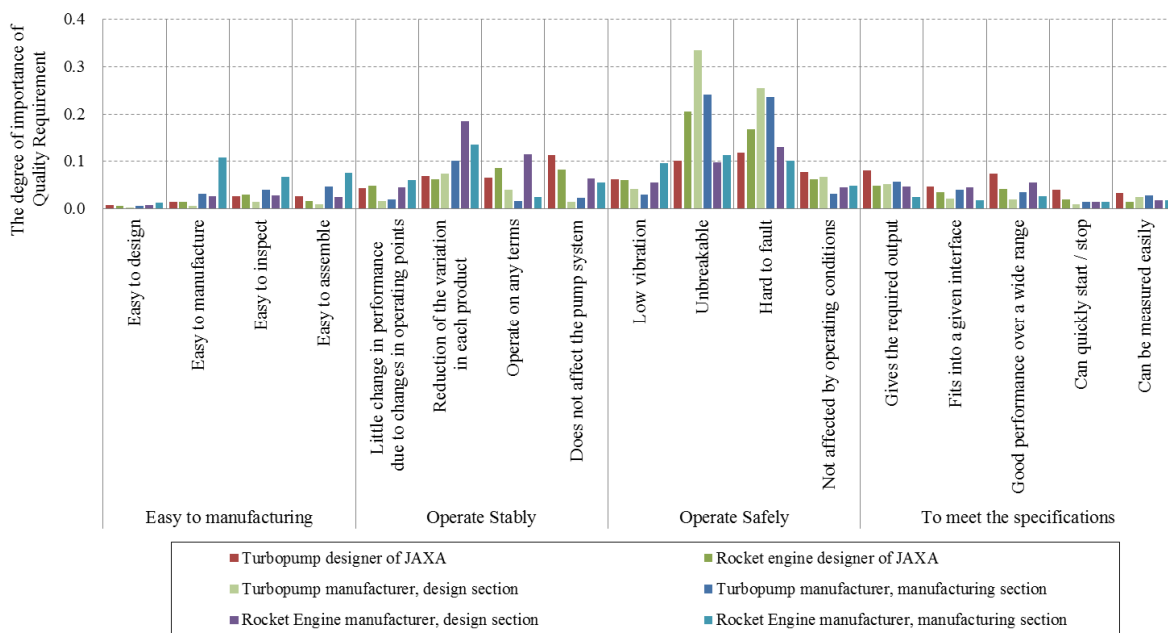


Figure 4: Comparison of the degrees of importance of quality requirements for each group

1st	2nd	Turbine characteristics													Productivity								
		Performance				Turbine shape					Axial Thrust		Inertia		Workability								
		efficiency	flow rate	horse power	operating point	mean diameter	blade shape	blade height	Number of Stage	Blade number	overhang	pressure distribution	Pressure fluctuation	disk Area	Weight	Outer diameter	Easiness of manufacturing	Easiness of inspection	Easiness of Assemble	Easiness of repair	Easiness of measurement	Easiness of Design	
Easy to manufacture	Easy to design	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○	⊙	○
	Easy to manufacture																						
	Easy to inspect																						
	Easy to assemble																						
Operate Stably	Little change in performance due to changes in operating points		○		⊙		⊙		○		○		○		○		○		○		○		○
	Reduction of the variation in each product				○		⊙		○		○		○		○		○		○		○		○
	Operate on any terms				⊙		○		○		○		○		○		○		○		○		○
	Does not affect the pump system	⊙	⊙	⊙	○		○		○		○		○		○		○		○		○		○
Operate Safely	Low vibration				○		○		○		○		○		○		○		○		○		○
	Unbreakable				○		○		○		○		○		○		○		○		○		○
	Hard to fault						○		○		○		○		○		○		○		○		○
	Not affected by operating conditions																						
To meet the specifications	Gives the required output	⊙	⊙	⊙	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Fits into a given interface																						
	Good performance over a wide range	⊙			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Can quickly start / stop																						
	Can be measured easily																						

Figure 5: Part of the quality table



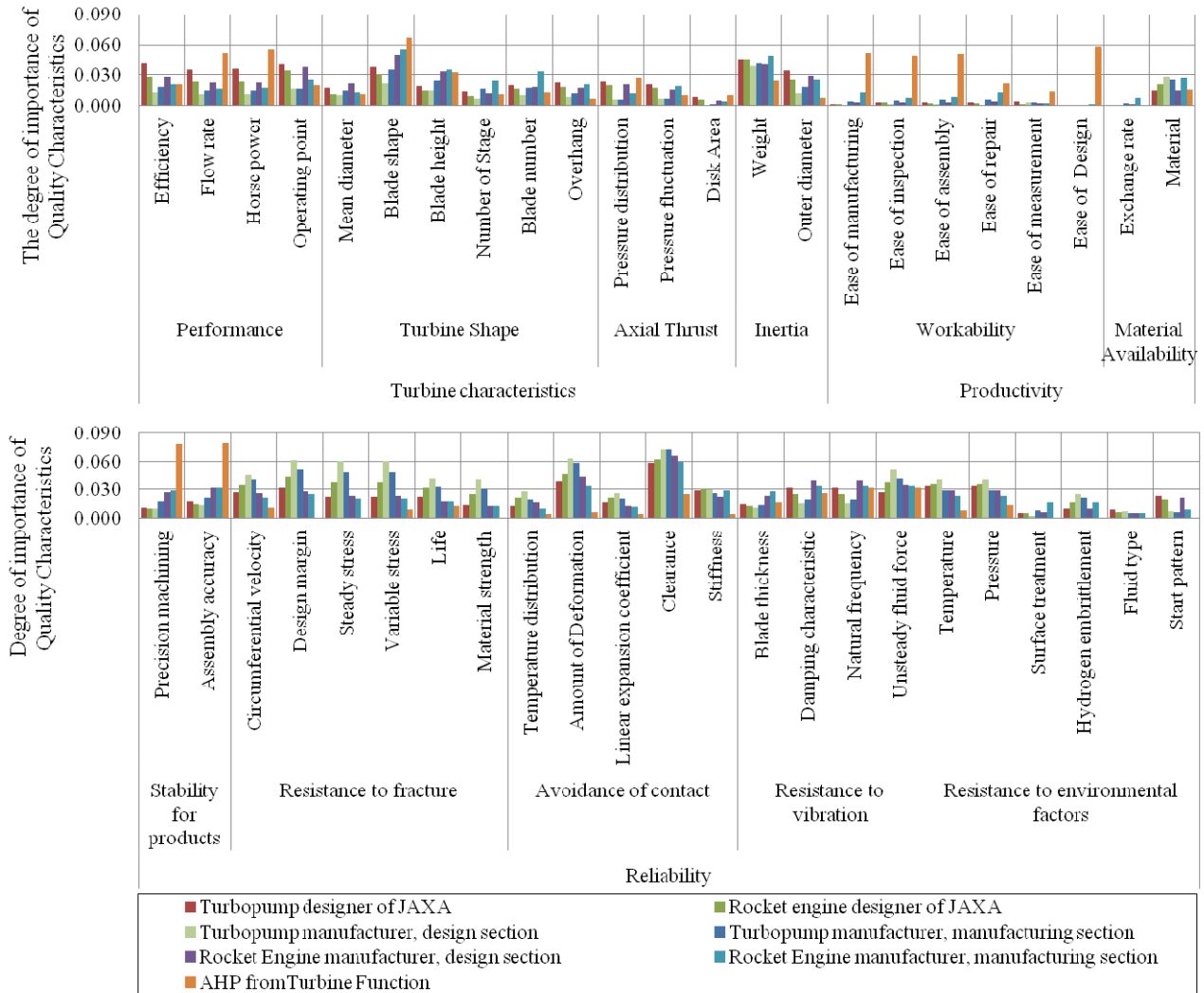


Figure 6: Comparison of the degrees of importance of quality characteristics for each group

接 AHP 比較は、製品を良く知る「JAXA TP 関係者」を対象に実施している。上記により得られた「機能重要度」経由の品質要素重要度も図 6 に併記している。

「機能重要度」経由の品質要素重要度は、「効率」や「馬力」等のタービン性能に関する重要度が高いことに代表されるように、「要求品質」経由のものと同程度対応する結果が得られたが、両者の比較で特徴的なのは「タービン翼型」や「加工精度」、「組立精度」等、製品安定性に関する重要度が高くなっている点である。一般製品と異なり、製作台数が限られるロケットエンジンにおいては、製品毎のばらつきを極力抑えることが重要であり、上記の違いはこの点が反映された結果とも言える。即ち「製品安定性」に関する項目が、新たに「当たり前品質」として抽出された。

以上より、ターボポンプ用超音速タービンに対する重要品質を、「市場のニーズ」経由に加え、「技術的な重要度」の面からも見える形に整理することが出来た。

### 3.3 重要設計パラメータの特定

品質要素の重要度に変換したのみでは不十分であり、その重要品質を実現する為の技術に結びつける必要がある (= 技術展開)。「品質要素 - 機能展開」の後、「機能 - 機構展開」によって重要度の変換を行い、重要機構を抽出した。

設計パラメータへの展開は、上記手順により抽出された重要機構に絞り込んで行っている。重要機構に対応する部品 (= 重要部品) として、「1 段ノズル」や「動翼」、「タービンディスク」を抽出し、これらの部品毎に設計パラメータの形に整理した。その結果を図 7、及び表 3 に示す。なお設計パラメータの抽出に際しては、先に述べた部品経由による設計パラメータ抽出に加え、抜けが無いようにする為、FMEA の手法を用いた故障モード経由からのパラメータ抽出も行っており、表 3 はその結果も反映している。前述の部品経由と FMEA 経由とを比較すると、

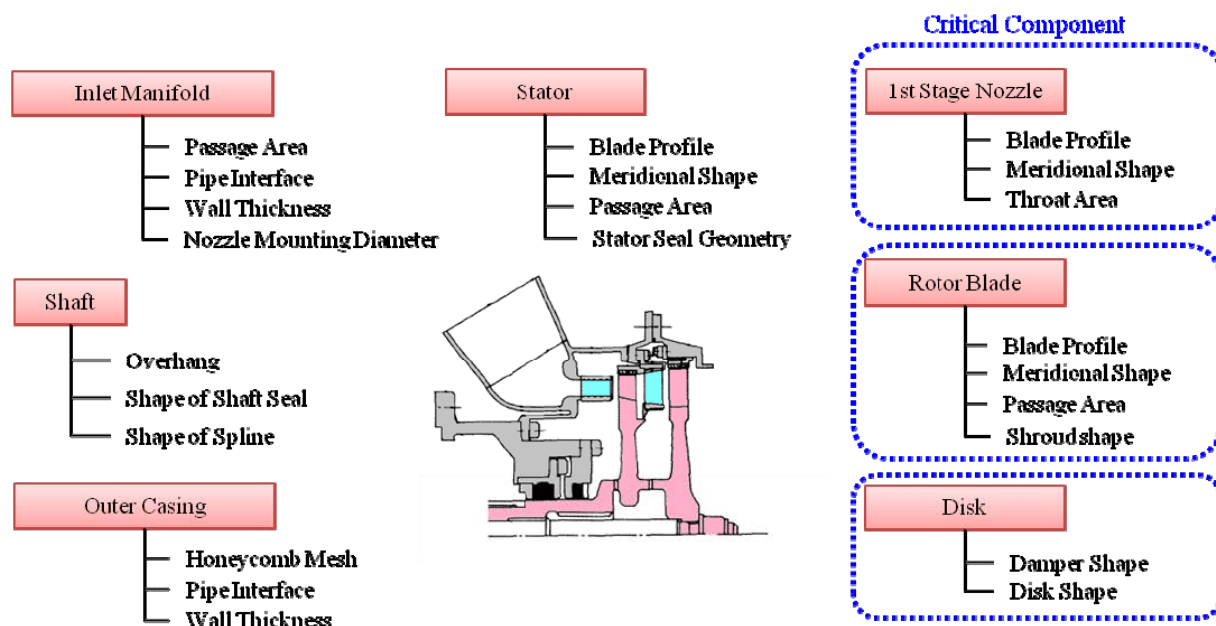


Figure 7: Critical components from important mechanisms

Table 3: Design parameter deployment

Components	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
1 <sup>st</sup> Stage nozzle	Blade profile	Maximum blade thickness chord ratio
		Turning angle
		Pitch chord ratio
		Throat exit area ratio
		Nozzle length
		Nozzle departure angle
		Leading edge angle
		Leading edge wedge angle
		Trailing edge radius
		Trailing edge wedge angle
Meridional shape		Blade aspect ratio
		Partiality
		Leading edge tip radius
		Trailing edge tip radius
Rotor blade	Blade profile	Maximum blade thickness chord ratio
		Turning angle
		Pitch chord ratio

両者は概ね整合する結果が得られたが、FMEAにて故障リスクの高い一部のパラメータ (=例: スロート/出口面積比) に抜けが見られており、今回実施したFMEAの援用による設計パラメータ抽出のアプローチの有用性を確認出来た。

技術展開の最終ステップとして、機構 - 設計パラメータ展開表により、設計パラメータへの重要度の変換を行った。図8には、グループ毎に設計パラメータの重要度を比較した結果を示す。

図8の結果から、重要度の高い設計パラメータの内、代表的なものを部品毎に整理した結果を表4に示す。

重要度の高い設計パラメータについての考察を行う。

例えば1段ノズルを見ると「翼ピッチ/コード比」の重要度が高くなっている。先に示した通り、「市場の声の見える化」からは高効率化のニーズが高くなっており、特にノズル特性がタービン全体の性能に大きく影響するような衝動タービンにおいては翼プロファイルに関するパラメータが重要である。(翼プロファイルに関わる設計パラメータの重要度は全体的に高くなっている。) 従って「翼ピッチ/コード比」は、重要品質要素である「タービン性能」に対応した設計パラメータである。

同じく「市場の声の見える化」からはロバスト性に対するニーズも高くなっている。「翼ピッチ/コード比」は、ノズルからの励振周波数や非定常流体力との関連が強い



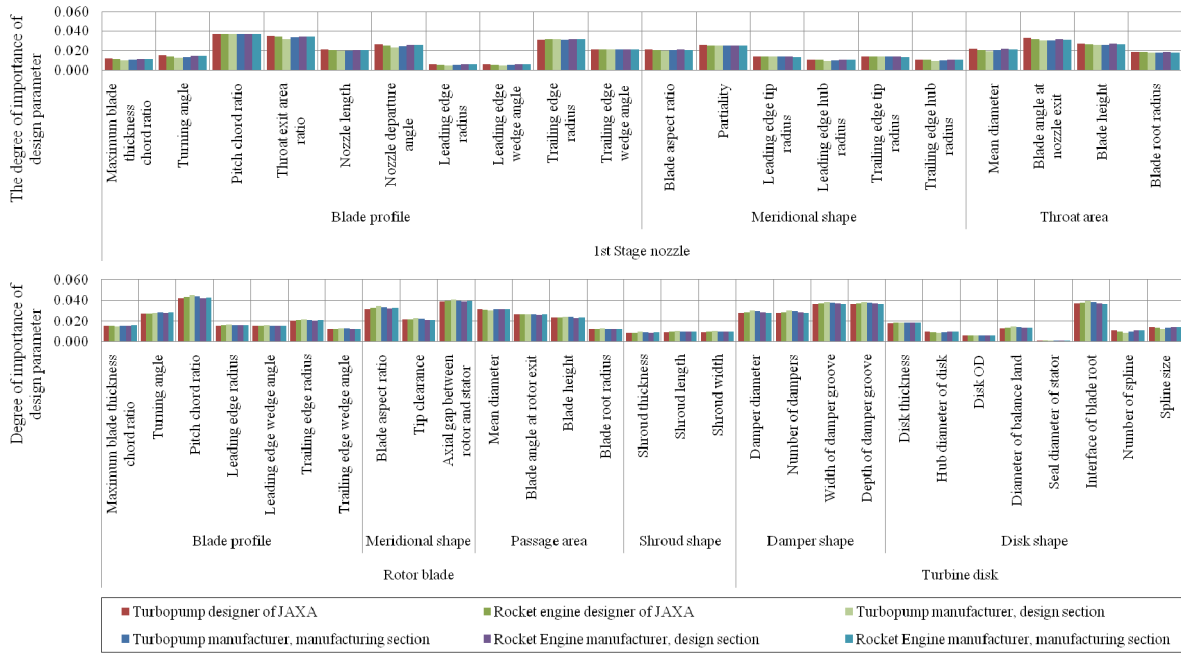


Figure 8: Comparison of the degrees of importance of design parameters for each group

Table 4: Important design parameter for rocket turbopump turbine

Component	Important design parameters
1 <sup>st</sup> Stage nozzle	Pitch chord ratio
	Trailing edge radius
	Blade angle at nozzle exit
Rotor blade	Pitch chord ratio
	Blade aspect ratio
	Axial gap between rotor and stator
Turbine disk	Width of damper groove
	Depth of damper groove
	Interface of blade root

ことから、「ロバスト性」に対応した設計パラメータでもある。同様にその他の設計パラメータについても、品質表を用いることによって市場のニーズとの対応関係を読み取ることが出来る。

以上のQFDの技術展開によって、「市場のニーズ」が反映された形でのターボポンプ用超音速タービンに対する「重要設計パラメータ」が特定出来た。

#### 4. 結言

ロケットターボポンプ用超音速タービンのパラメータ設計を行う上で、その対象とすべき設計パラメータを選定する為、QFDの手法を適用した。得られた結論は以

下の通りであり、ロケットターボポンプ用超音速タービン設計技術の獲得に向けて一歩前進出来たと考える。

- 要求品質に対する AHP アンケートから、ターボポンプ用超音速タービンに対する「市場の声 (= ニーズ)」が明らかになった。
- 品質表により要求品質の重要度を品質要素の重要度に変換した。これによって、ターボポンプ用超音速タービンに対する「市場のニーズ」を「技術の言葉」によって見える化した。
- QFD の技術展開により、「市場のニーズ」が反映された形での「重要設計パラメータ」を特定した。

- 重要設計パラメータを特定した結果、従来の設計パラメータ選定の根拠や基準が明確になった。

今後は本報告にて特定した重要設計パラメータを用いたロケットターボポンプ用超音速タービンのパラメータ設計を行い、QFD 手法を援用した本設計プロセスの妥当性を検証する予定である。

#### 参考文献

- 1) William F. Sack, et al., (2003), “DEVELOPMENT PROGRESS OF THE MB-XX CRYOGENIC UPPER STAGE ROCKET ENGINE”, AIAA Paper No. AIAA 2003-4486
- 2) 赤尾洋二著 (1990) : 「品質展開入門」, 日科技連, ISBN978-4-8171-0257-7
- 3) 赤尾洋二著 (2010) : 「品質機能展開」, 日本規格協会, ISBN978-4-542-50176-8