

3次元逆解法と流れ解析を用いたターボ機械の最適化設計

渡 邊 啓 悦* 関 野 夕 美 子*

Blade Optimum Design by using Three Dimensional Inverse Method and CFD

by Hiroyoshi WATANABE, & Yumiko SEKINO

This paper introduces the optimum design process by using the three-dimensional inverse method, CFD (Computational Fluid Dynamics), and multi-objective design optimization method such as multi-objective genetic algorithm, and its applications.

Two applications of the optimum design process for different pump types and purposes of optimization are described. These examples show a wide applicability of the optimization method that uses the blade loading distribution (the hydrodynamic parameter) as a design parameters. The optimum blade loading distribution parameter obtained by this optimization process can be correlated with the performance improvement mechanism for easy understanding, which is advantageous in inheritance of skills. Continuously updating the optimum design database obtained through the optimum design process enables pumps to be quickly customized to meet customer needs.

Keywords: Optimum design, CFD, Three dimensional inverse method, Multi objective design optimization, Response surface, Mixed flow pump, Performance, Inducer, Cavitation, Instability

1. はじめに

ターボ機械の最適化設計手法は、1980年代の2次元翼型に関する非粘性流れ解析と境界層計算を組み合わせた解析手法と勾配法を用いた最適化手法から始まり、計算機や流れ解析手法の発展に合わせて、特に軸流ターボ機械設計分野における自動設計手法や数値最適化アルゴリズムを利用した最適化設計手法の研究によって発達してきた。1990年代以降は、2次元設計から3次元設計、非粘性流れ解析から、RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) 流れ解析を適用した最適化手法に発展してきた。

当社では1990年代から行ってきたロンドン大学 Zangeneh教授との共同研究により羽根負荷分布に基づき3次元羽根形状を計算する3次元逆解法設計技術¹⁾を実用化し、最近ではターボ機械の最適化設計に取り組んでいる。本稿では3次元逆解法と流れ解析を利用した最適化設計のプロセスと適用事例を紹介する。

2. 最適化設計のフロー

図1には最適化設計のフローの一例を示す。羽根車やガイドベーン的设计においては、第一に設計線図や従来ポンプの形状などを基にして子午面形状を決定する。次に、定義された子午面形状を用いて、3次元逆解法により羽根形状を設計する。3次元逆解法は、羽根入口と出口の周方向平均角運動量 rV_θ と羽根面上の負荷分布に基づき、3次元の羽根形状を計算により求めるものである。

設計パラメータとなる羽根負荷分布 (周方向平均角運動量 rV_θ の子午面方向微分値 $\partial(rV_\theta)/\partial m$) は図2のように放物線と直線を組み合わせて定義することでハブ面とシュラウド面各々最低4個 (計8個) という非常に少ない設計パラメータ (Incidence, NC, ND, slope) で羽根全体の負荷分布を設定し、3次元羽根形状の設計をすることができる。スプラインやベジエ曲線を用いて羽根形状を定義する既往の手法は、例えば2次元羽根形状でも17個のコントロールポイント²⁾、3次元羽根形状では24個のコントロールポイントを用いる³⁾など設計パラメータが多く、最適化のための解析ケース数が多い。これに対して3次元逆解法設計では少ない解析ケース数で最適化設計が可能という利点がある。

* 風水力機械カンパニー 開発統括部 技術開発部 流体開発グループ

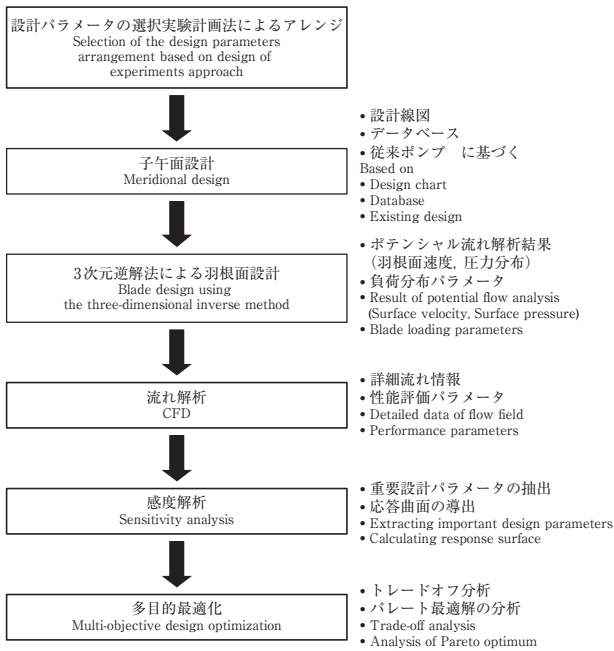


図1 最適化設計プロセスのフローチャート
Fig. 1 Flow chart of the optimization process

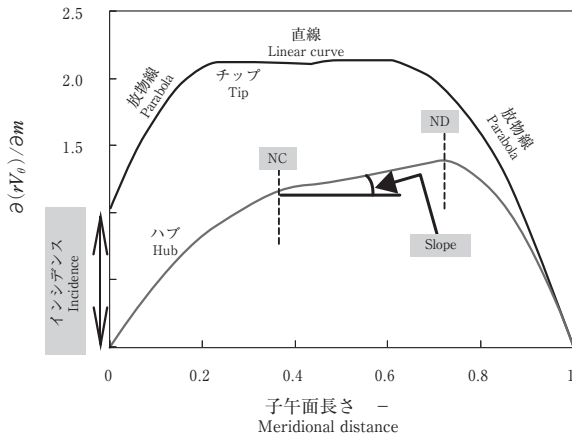


図2 羽根負荷分布と負荷パラメータ
Fig. 2 Blade loading distribution and parameters

本設計フローでは子午面形状を決定する形状パラメータと羽根負荷分布を制御する負荷分布パラメータを最適化すべき設計パラメータとする。最適化プロセスでは設計パラメータ全てを例えば遺伝的アルゴリズムなどを適用して設計パラメータ領域に制限を設けずに探索的に最適化を行う手法（直接最適化）や、実験計画法を適用して最適化検討を行う設計パラメータの組合せを直交表などを用いてアレンジし、より少ない設計数によって設計

パラメータの影響を評価する手法がある。実験計画法による最適化では、あらかじめ設定した設計パラメータ空間内での最適化検討であり、直接最適化と比べて探索空間は狭いが、スーパーコンピュータレベルではない数コア～30コア程度の限られた計算機リソースを利用した実務設計プロセスでの利用も可能と考えている。

実験計画法では直交表に基づいて設計された形状に対して流れ解析を行い、詳細な流れ場の情報とともに、効率やポンプのヘッドなど性能評価パラメータを計算する。

次に、統計的処理により設計パラメータの性能評価パラメータに及ぼす影響を分析する（感度解析、主効果分析）。これにより、性能評価パラメータに大きく影響する重要設計パラメータを同定する。また、続く最適化プロセスでは重要設計パラメータ以外を考慮しなくて済むので最適化プロセスの省力化、効率化が可能となる。

直交実験計画法に従って求められた各設計パラメータと性能特性値の関係は応答曲面によって表すことができる。応答曲面には設計パラメータの多項式表現が多く用いられている。

$$f = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{j=2}^{j-1} \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 f は性能特性値、 x と β は設計パラメータと係数である。

各設計パラメータと性能特性の関係を定量化した応答曲面が作成できれば、応答曲面を利用して多目的遺伝的アルゴリズム（MOGA）によって性能のトレードオフ分析、パレート最適解の分析を実行することができる。MOGAでの多目的最適化には応答曲面の精度が重要であるが、3次元逆解法での負荷分布パラメータは性能特性に直接関係するため、応答曲面の精度が高い利点がある⁴⁾。

3. 適用事例

3-1 高比速度斜流ポンプの多目的最適化設計

排水機場や発電プラントなどに用いられる高比速度斜流ポンプは、図3に示すように、高い効率はもちろんのこと、締切時軸動力が大きくないこと、また揚程特性に右上がり不安定特性がないことが求められる。しかしながら、これらの性能特性はトレードオフ関係にあり、全てを最適にすることが困難である。したがって、ポンプ設計に際して、設計パラメータがこれら性能特性にどのように影響するか、また、性能特性間のトレードオフ関係はどのようになっているかを定性的、定量的に把握しておくことが、多様な顧客要求に適切に対応する上で大

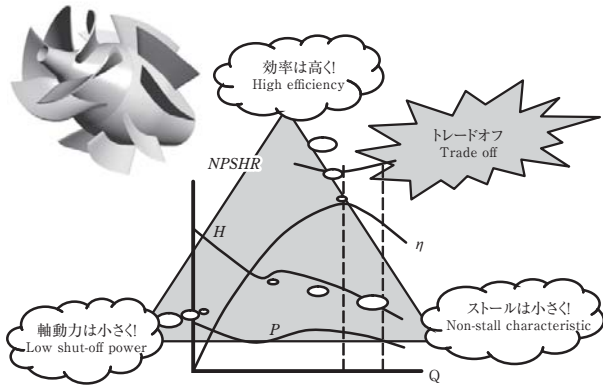
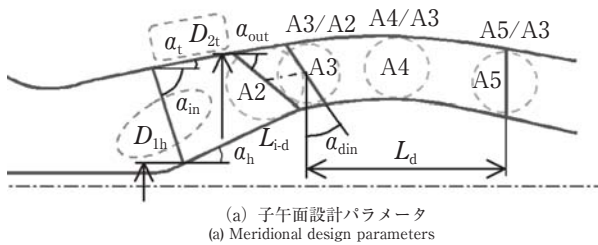
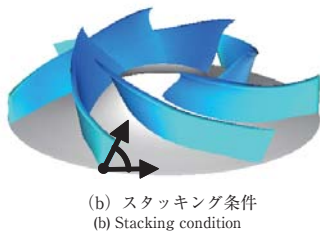


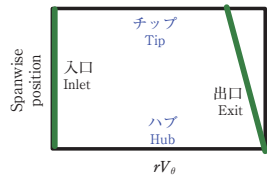
図3 高比速度斜流ポンプの性能特性
 Fig. 3 Performance characteristics of high specific speed mixed flow pump



(a) 子午面設計パラメータ
 (a) Meridional design parameters



(b) スタッキング条件
 (b) Stacking condition



(c) スパン方向仕事分布
 (c) Spanwise work distribution

図4 斜流ポンプ設計パラメータ
 Fig. 4 Design parameters of mixed flow pump

変重要である。この目的のため、高比速度斜流ポンプ（比速度 1300 [min⁻¹, m³/min, m]）に対して多目的最適化を適用した事例⁹⁾を示す。

設計パラメータは図2に示した負荷分布パラメータと図4に示した羽根車とディフューザの子午面形状パラメータ、羽根後縁の傾き（スタッキング）形状並びに羽根高さ方向の rV_{θ} 分布 (rV_t) である。表1は羽根車とディ

表1 設計パラメータ
 Table 1 Design parameters

インペラ Impeller design	ディフューザ Diffuser design
α and D_{2t}	L_{i-d}
α_{in} and D_{1b}	$A3/A4$
α_h	$A4/A3$
α_{out}	$A5/A3$
incidence _t	α_{din}
incidence _h	L_d
slope _t	Z_d
slope _h	incidence _t
stacking	incidence _h
rV_t	slope _t
	slope _h

フューザの設計パラメータで、設計パラメータ数は羽根車が10個、ディフューザが11個である。性能評価パラメータは効率 (Eff), 縮切軸動力比 (P_o/P_d), 縮切ヘッド比 (H_o/H_d), 揚程曲線の傾き (dH/dQ) である。

最適化プロセスの第1ステップとして羽根車の設計パラメータに関して図1に示した最適化プロセスの感度解析までを行い、重要設計パラメータを抽出する。次にディフューザの設計パラメータに関して感度解析までを行い、重要設計パラメータを抽出し、最後に羽根車とディフューザの重要設計パラメータだけを用いてトレードオフ分析、パレート最適解の分析など多目的最適化設計を行っている。

本事例では、最高効率並びに部分流量における揚程の右上がり不安定特性や縮切時性能を適切に評価する流れ解析手法が必要である。性能評価パラメータを求めるため、120%流量から縮切まで10%流量刻みで13流量の流れ解析を行うことでポンプ性能曲線を求めている。最適化プロセスにおける解析時間を短縮するため、流れ解析手法としては周期境界条件を適用して羽根車並びにディフューザ1ピッチだけを解析領域とした定常流れ解析を活用している。また、乱流モデルは標準k-εモデルを適用している。1ピッチだけを解析領域とすることで、一つの性能曲線を約半日で解析している（全周モデルの非定常解析は40倍程度の解析時間が必要である）。

図5には1ピッチの流れ解析によって求めた四つのポンプ（Base, Type 1, Type 2, Type 3）の性能曲線を示した。設計パラメータの組合せの違いに応じて、最高効率や部分流量における右上がり不安定特性の有無、縮切軸動力、縮切ヘッドに差が見られる。

右上がり不安定特性や縮切時性能はポンプ内部の逆流

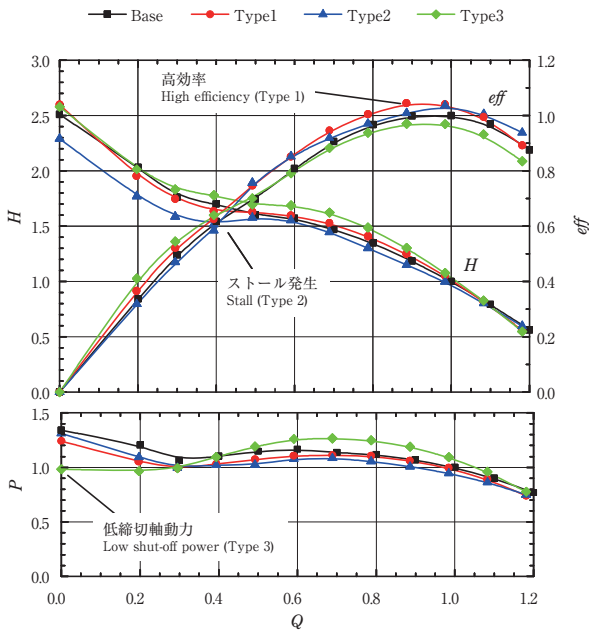


図5 ポンプ性能計算結果例
Fig. 5 Examples of calculated pump performance

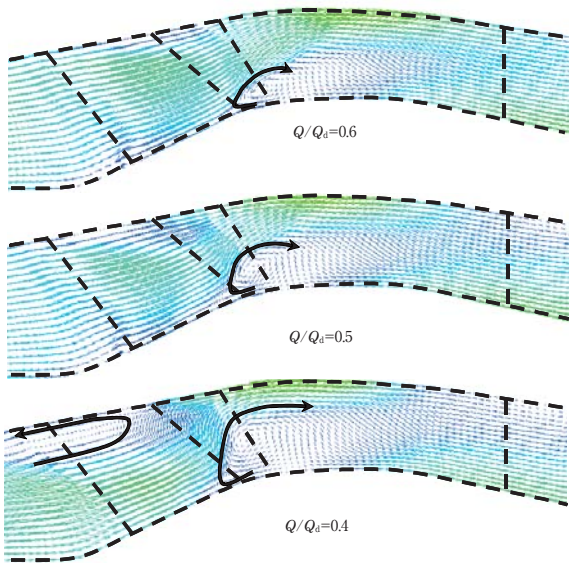


図6 ストール発生流量付近の子午面速度ベクトル
Fig. 6 Meridional velocity vectors around stall point (Pump Type 2)

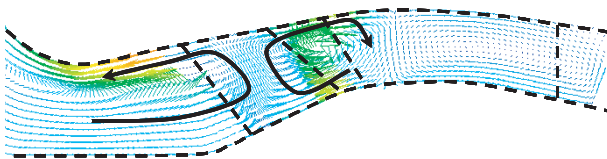


図7 締切点での子午面速度ベクトル
Fig. 7 Meridional velocity vectors at shut-off (Pump Type 2)

領域の発達状態に左右される。図6にはポンプType 2の右上がり不安定発生時の羽根車入口と出口における急速な逆流領域の発達を示している。更に締切時には図7に示すように羽根車入口から上流部と羽根車出口からディフューザにわたる大きな逆流領域の発達が見られる。

右上がり不安定特性の有無や締切軸動力の大小などの流れ解析の予測制度は実証実験により評価し、1ピッチの流れ解析が適用可能であることを確認している。乱流モデルや、解析領域 (1ピッチか全周モデル)、定常解析か非定常解析の影響などの詳細については関野ら⁶⁾が報告している。

図8には設計パラメータを最小値,中間値,最大値 (-1,0, 1で示す) の3水準に変えた場合の各性能評価パラメータの変化,すなわち設計パラメータの性能評価パラメータに対する感度を示す。

図9にはMOGAにより求めたトレードオフ分析の結果であり、右上がり不安定特性 (Stallと表記) と効率, 締切軸動力比の関係を示している。図9を利用すれば、たとえば設計1は効率最大でかつ右上がり不安定のない設計, 設計2は締切軸動力比が小さくかつ右上がり不安定のない設計など、特徴的な設計を選択することが可能となる。このような多目的最適化結果をデータベースとすることで、顧客仕様に応じたカスタム設計の迅速化に活用している。

3-2 インデューサの吸込性能とキャビテーション不安定現象を考慮した最適化設計

低温液化ガス輸送用のクライオジェニックポンプやロケットポンプでは、ポンプの吸込性能を高めるためにインデューサが用いられる。インデューサは通常運転状態においても羽根面上にキャビテーションが発生してい

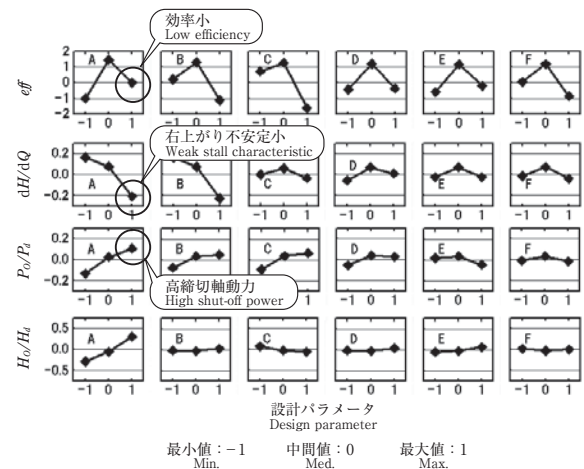
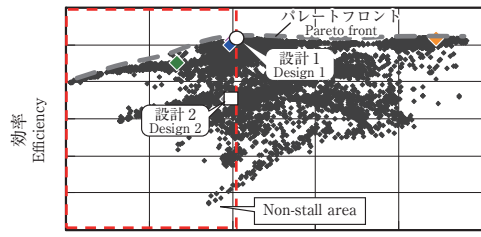
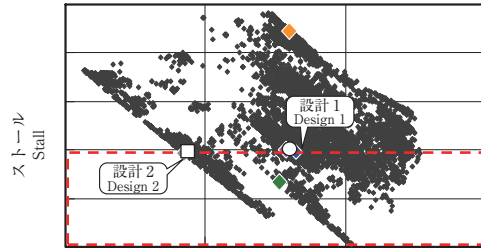


図8 性能パラメータに対する主効果
Fig. 8 Main effect on performance parameter

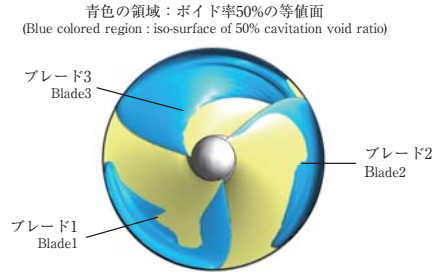


(a) ストール特性と効率のトレードオフ
(a) Stall vs. efficiency

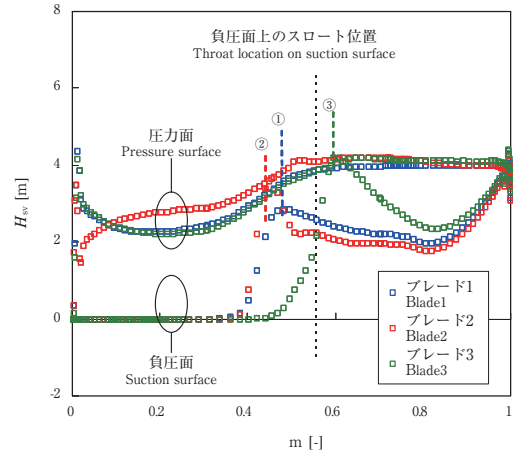


(b) ストール特性と締切軸動力のトレードオフ
(b) Stall vs. shut-off power

図9 パレトフロントの例
Fig. 9 Example of pareto front



(a) インデューサ羽根面上のキャビテーション発達の様子
(a) Development of cavitation on inducer blades



(b) チップ側の羽根面圧力分布
(b) Surface pressure distribution near the tip section

図10 CFDで計算された非対称的キャビテーション分布
Fig. 10 Asymmetrical cavitation distribution investigated in CFD Analysis ($Q/Q_d = 0.8$, $\sigma / \sigma_o = 0.72$)

るため、旋回キャビテーションなどのキャビテーションに起因する不安定現象の発生による振動などが問題になる場合がある。羽根面上のキャビテーションの発達は羽根面上の圧力分布に大きく依存するため、羽根面圧力分布（羽根面負荷分布）のコントロールが重要である。以下に述べる事例は、筆者ら⁷⁾が3次元逆解法と実験計画法、キャビテーションモデルを含めた流れ解析を組み合わせ、キャビテーション領域の発達や非一様性と負荷分布の関係を評価することにより、吸込性能の向上とキャビテーション不安定現象の抑制を考慮した最適化設計を行った結果である。

最適化を行う設計パラメータは高比速度斜流ポンプの場合と同様に、逆解法設計におけるインデューサのハブ、チップにおける負荷分布パラメータと羽根高さ方向の分布である。図2に示した負荷分布はNCとNDを固定し、ハブとチップにおけるSlopeとIncidence、並びに rV_θ 分布で五つのパラメータを設計パラメータとしている。また、最適化の評価パラメータは以下を適用している。

- ・キャビテーションなしの状態における性能特性としてインデューサのヘッドと効率。
- ・吸込性能の評価としてインデューサ内のキャビテーションボイド率。
- ・キャビテーション不安定性の評価としてインデューサ内キャビテーション分布のばらつき。

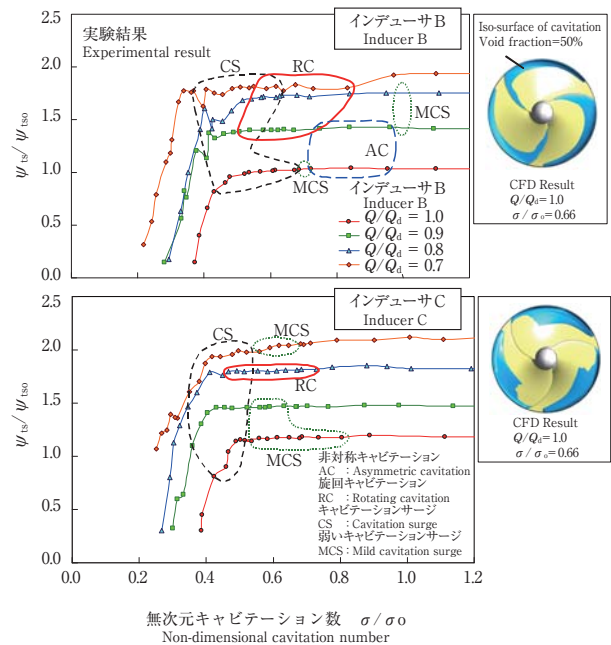


図11 吸込性能とキャビテーション不安定現象発生領域
Fig. 11 Suction performance and occurrence regions of various cavitation instability

キャビテーション分布のばらつきの指標として図10に示すチップ側の負圧面静圧の極大値の子午面位置①, ②, ③の分散を用いている。

実験計画法では設計パラメータを3水準に変化させ、L27の直交表を適用して設計と流れ解析を行った後、設計パラメータの性能評価パラメータに対する感度解析を行っている。

図11には感度解析の結果に基づき、キャビテーション不安定性に不利となる負荷分布パラメータの組合せを用いたインデューサBと、キャビテーション不安定性を抑制すると考えられる負荷分布パラメータを用いたインデューサCのキャビテーション性能試験結果を示している。図11中、線で囲まれた領域はキャビテーション不安定現象の発生する運転領域を示しており、インデューサCのキャビテーション不安定現象の発生領域がインデューサBよりも小さくなっていることが分かる。

4. おわりに

本稿で紹介した、3次元逆解法を適用した二つの最適設計事例は、ポンプの形式や最適化の目的が異なり、流体力学的パラメータである負荷分布を設計パラメータとする最適化手法の幅広い適応性を示していると考えられる。また、本最適化プロセスで得られた最適負荷分布パラメータは性能改善メカニズムに結び付けて解釈することが容易であり、技術伝承の面でも有利と考えられる。今後もこのような最適化設計プロセスを進め、継続的に最適設計データベースを更新することで、顧客ニーズに迅速に対応するカスタムポンプ設計を行いたい。

参考文献

- 1) Zangeneh, M., "A Compressible Three Dimensional Blade Design Method for Radial and Mixed Flow Turbo-machinery Blades," Int. J Numerical Methods in Fluids, Vol.13, 1991, pp. 599-624.
- 2) Trigg, M. A., Tubby, G. R., "Sheard, A. G., Automation Genetic Optimization Approach to Two-Dimensional Blade Profile Design for Steam Turbines," ASME Journal of Turbomachinery, Vol.121, 1999, pp.11-17.
- 3) Burguburu, S., Toussaint, C., Bonhomme, C., Leroy, G., "Numerical Optimization of Turbomachinery Bladings," ASME Journal of Turbomachinery, Vol.126, 2004, pp.91-100.
- 4) Bonaiuti, D, and Zangeneh, M., "On the Coupling of Inverse Design and Optimization Techniques for Turbomachinery Blade Design," Proceedings of ASME Turbo Expo, GT2006-90897, 2006.
- 5) Takayama, Y., Watanabe, H., "Multi-Objective Design Optimization of A Mixed-Flow Pump," ASME Paper FEDSM2009-78348.
- 6) Sekino, Y., Tanabe, Y., "Numerical Analysis of Design and Off-Design Performance of High Specific Speed Mixed Flow Pumps," Proceedings of ASME-JSME-KSME Engineering Conference 2011, AJK2011-06051.
- 7) Watanabe, H., Tsukamoto, H., "Design Optimization of Cryogenic Pump Imducer considering Suction Performance and Cavitation Instability," Proceedings of ASME-JSME-KSME Engineering Conference 2011, AJK2011-05010.