

高効率プレス製羽根車の開発

川畑潤也* 後藤 彰**
榎本 隆** 足原浩介**

The Development of Sheet Metal High Efficiency Impeller

by Junya KAWABATA, Akira GOTO, Takashi ENOMOTO, & Kosuke ASHIHARA

Many stainless steel sheet metal impellers are used in relatively small pumps since they provide excellent volume efficiency. On the other hand, the shape of these impellers is virtually identical to that of conventional cast impellers since the shape of general cast impellers provides an approximate template for the shape of press-formed sheet metal impellers.

To improve the performance and efficiency of stainless steel sheet metal impellers, we have developed an impeller in the innovative shape of an S-shaped meridian, by designing it in the shape of a blade surface through an inverse design method and then narrowing down various parameters by numerical analysis. The performance of the impeller, which was developed to achieve a relative velocity of 120 to 280 (min^{-1} , m^3/min , m), was tested in the same casing in which conventional impellers are used, the tests verified that it achieved a pump efficiency improvement of about 0.5% to 14% over conventional impellers.

Keywords: CFD, Inverse design method, Stainless steel sheet metal impeller, Meridian shape

1. ま え が き

ステンレスプレス製羽根車はプレス工程と溶接工程を経て生産される量産効果の高い部品である。また、素材表面はさびにくく、かつ、滑らかなので摩擦損失が小さくポンプ効率面でも有利であることから、比較的小型のポンプに多数採用されている。一方で、その設計は一般的な鋳物製羽根車の形状をプレス成形可能な形状に近似したものであるため、従来から設計されてきた羽根車形状との差異はないと言える。

このようなプレス製羽根車の性能・効率を改善するために、従来からの常識にとらわれない子午面形状を持つ羽根車を比速度120～280 (min^{-1} , m^3/min , m)の範囲をターゲットにして、逆解法を応用した翼形状の作成、及び、数値解析を活用した諸パラメータの絞込みを行い

開発した。本報告ではその内容を紹介する。

2. 効率改善へのアプローチ

2-1 リミットロード特性

小型ポンプの多くは不特定多数の顧客に迅速に供給できるようにあらかじめ生産・在庫し販売する形態をとっている。そのために、一般的に羽根車カットによる性能調整を行わなくても規定の軸動力を超えないような羽根車の設計が求められる。このように軸動力曲線が直線的右上がりではなく、一定の軸動力を超えないような特性をリミットロードと称している(図1)。一般的にリミットロードの羽根車は相対的に羽根車外径が大きくなるため高効率との両立は困難とされているが、今回報告の高効率プレス羽根車はリミットロード特性を与えるよう設計している。

2-2 子午面形状

羽根車の設計において、羽根車の入口から出口の流路面積は滑らかに変化させることが一般的な設計手法となっている。したがって、羽根車の子午面におけるシェラウド側形状で面積変化を調整すると円弧形あるいは直線形となる場合が多い。今回ターゲットにしている比較

* 風水力機械カンパニー 技術生産統括 開発統括部 標準
ポンプ開発設計室 標準ポンプグループ
** 同 同 同
** 同 同 富津工場 ポンプ
技術第一室
** 同 企画管理統括 企画管理統括部
企画室

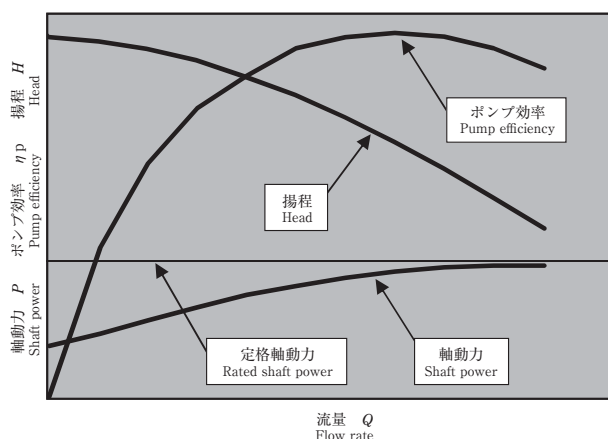


図1 リミットロードのポンプ性能曲線
Fig. 1 Pump performance curve of the limit load

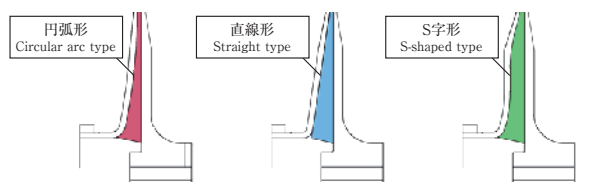


図2 羽根車の子午面形状
Fig. 2 Impeller meridian shapes

的低比速度の羽根車の場合、子午断面上の翼入り口から出口の距離が長く子午面形状の影響は大きいと考えられるので図2に示す比速度120 (min⁻¹, m³/min, m)で3種類の子午面形状の羽根車のRP (Rapid prototyping) 模型を試作し比較試験を実施した。

図中左からシュラウド側形状が円弧形、直線形、S字形になっている。各羽根車を同一ケーシングで試験した結果を直線形羽根車の最高効率点を基準とした比率で図3に示す。羽根車の入り口から出口までの変化が滑らかな円弧形のポンプ効率が最低で、S字形が最も優れ、直線形がその中間という結果となった。この結果は羽根車の子午面形状を従来の形状にとらわれずS字形のようにダイナミックに変化させることが効率改善に寄与することを示唆していると考え、各比速度の羽根車子午面形状に特長のあるS字形シュラウドを採用することにした。

2-3 逆解法の適用

3次元逆解法¹⁾で羽根車の翼形状を得るためには羽根車のハブ側とシュラウド側の流線、翼の厚さ、及び各流線に与える負荷分布が必要である。子午面形状、負荷分

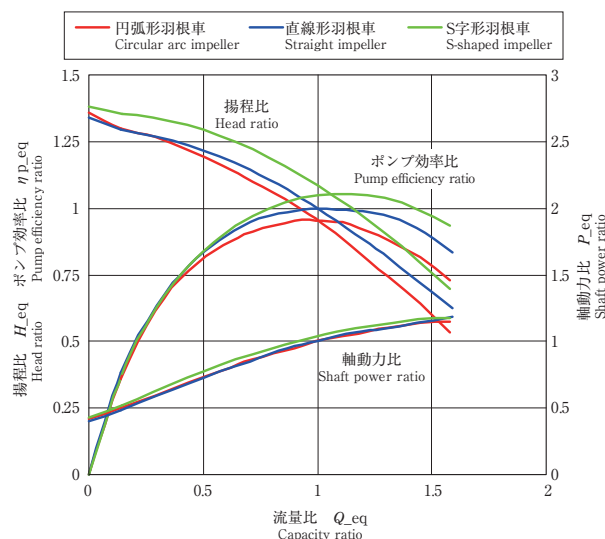


図3 各羽根車の試験結果
Fig. 3 Test results of each impeller

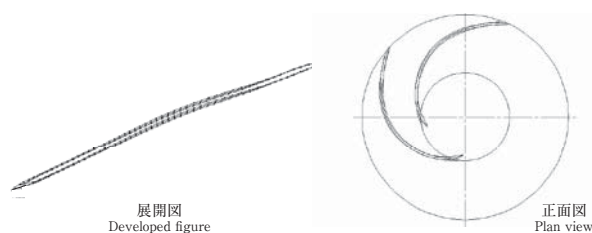


図4 3次元逆解法にて設計した2次元羽根車
Fig. 4 Two-dimensional impeller designed using the three-dimensional inverse design method

布を設計者が与えると目標とする理論揚程を満足する翼形状を導き出すツールで、負荷分布パラメータを変化させることで様々な翼形状が得られ、また、設計者は計算された翼形状を与えた負荷分布という工学的に理解しやすい形で把握できる。そのために、翼入り口角、出口角を決定しその間を滑らかにつなぐ従来の翼設計法より応用設計範囲が拡大すると考えられる。プレス羽根車は2次元羽根車であるために、3次元逆解法でほぼ2次元の翼形状(図4)を求めてから3次元CADで完全な2次元翼になる近似形状を作成した。2-2で述べたS字形の子午面形状に様々な負荷分布パラメータを与え、流動解析と比較検討した結果、ある負荷分布を与えると、高效率とリミットロードを両立できることが分かった。

2-4 数値解析による検証

S字形子午面に3次元逆解法で適切な負荷分布を与えて得られた比速度120 (min⁻¹, m³/min, m) 新設計羽

根車と、従来の直線形羽根車を汎用流れ解析コード AN-SYS CFX²⁾ を用いて比較した。その結果を従来の直線形羽根車の最高効率点における流量 Q_{bep} を基準として理論揚程比 H_{th_eq} 、羽根車効率比 Eff_{i_eq} 、軸動力比 $P_{_eq}$ をプロットしたものを図5～7に示す。また、ここにおける主な記号を以下に示す。

$$\text{理論揚程 } H_{th} = (U_2 CU_2 - U_1 CU_1) / g$$

$$\text{羽根車効率 } Eff_i = \Delta H / H_{th}$$

$$\text{軸動力 } P = 2 \pi N \cdot T_i$$

U : 羽根車周速

CU : 絶対速度の周方向成分

g : 重力加速度

ΔH : 羽根車出口と入口の質量流量平均全圧差

N : 回転速度

T_i : 羽根車トルク

添字1 : 羽根車入口

添字2 : 羽根車出口

理論揚程 H_{th} は従来の直線形羽根車と比較するとS字形羽根車が主に部分流量側で高く、流量が増すに連れてその差は小さくなっている。その傾向を反映し、軸動力 P はS字形が大きい、リミットロード特性が強く現れていて、最大軸動力はほぼ同等、羽根車効率はS字形が全域で勝るといった結果が得られた。

3. 試作結果

これまで検討した比速度 $120 \text{ (min}^{-1}, \text{ m}^3/\text{min, m)}$ のS字形羽根車の子午面形状、及び3次元逆解法のパラメータを参考にして比速度 $120 \sim 280 \text{ (min}^{-1}, \text{ m}^3/\text{min, m)}$ の羽根車をステンレスプレスにて試作し、従来の直線形羽根車と同一ケーシングにおける性能比較を行った。試験には写真に示すライン形ポンプを使用し、そのポンプ効率を直線形羽根車基準で比較したものをポンプ効率改善率 R として図8に示す。

ここにおけるポンプ効率改善率 R は次式で計算している。

$$R = (Eff_2 - Eff_1) / Eff_1 \times 100 \text{ (\%)}$$

Eff_1 : 直線形羽根車のポンプ効率 (%)

Eff_2 : S字形羽根車のポンプ効率 (%)

S字形羽根車のポンプ効率は直線形から約0.5～14%改善されている。特に、低比速度側における改善効果が大きい結果となった。

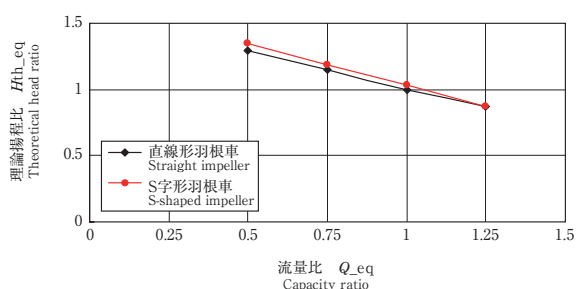


図5 理論揚程比較

Fig. 5 Comparison of theoretical head

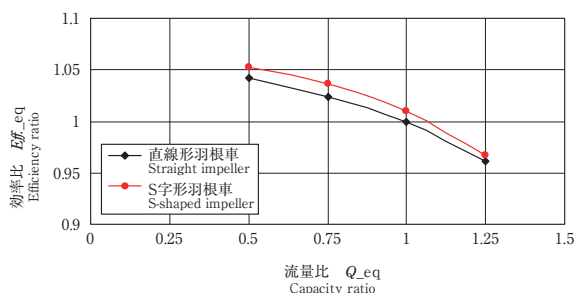


図6 羽根車効率比較

Fig. 6 Comparison of impeller efficiency

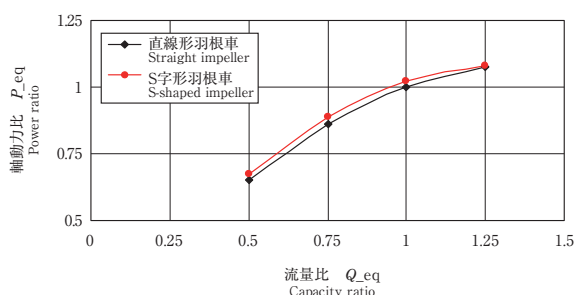


図7 軸動力比較

Fig. 7 Comparison of shaft power



写真 ライン形ポンプ
Photo Inline pump

12-102 01/237

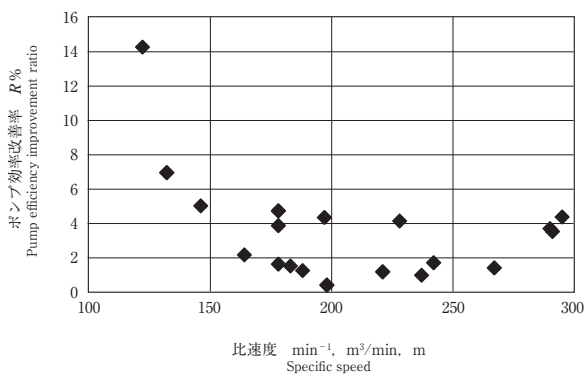


図8 各比速度におけるポンプ効率改善率

Fig. 8 Pump efficiency improvement ratio at each specific speed

4. 考察

羽根車の水力損失は摩擦損失と混合損失で占められている。前者は主に翼面、及びシュラウド内面、ハブ内面と流体との摩擦による損失で、後者は流体の剥離等に代表される流れの不均一性によるものである。JISに記載されているポンプの性能換算法³⁾では最高効率点における摩擦損失率 δ_{Eopt} として次式で示している。

$$\delta_{Eopt} = 0.1 (1.4Ns^{0.1} - 0.07)$$

Ns : 比速度 (min^{-1} , m^3/min , m)

本式によると、比速度が小さくなるほど摩擦損失率は増加する。今回の試作結果で比速度が小さくなるほど効率改善効果が大きかったことからS字形羽根車は主に摩擦損失を低減させる効果が大きいと考えられる。羽根車の表面粗さは直線形羽根車、S字形羽根車ともにステンレス鋼板を使用し同一条件であることから、摩擦損失低減は羽根車内の流れ相対速度がS字形羽根車の方が小さいことによるものと予想される。改めて、比速度120 (min^{-1} , m^3/min , m)における数値解析結果の相対速度に着目し、直線形とS字形羽根車の最高効率点における相対速度分布を比較した(図9)。両者を比較すると明らかにS字形羽根車の方が内部での減速領域が大きいことが分かる。また、子午面距離に対する面積平均相対速度をグラフ化したものを図10に示す。羽根車入口付近ではS字形羽根車の相対速度が若干大きい、全体としては直線形羽根車より小さく抑えられており摩擦損失低減による効率改善が達成されていることを示している。

従来から羽根車内の相対速度分布はポンプ効率と関連性が強いとされており、特に羽根車入口の相対速度を羽根車内相対速度最小値で割った値を減速比と称して羽根

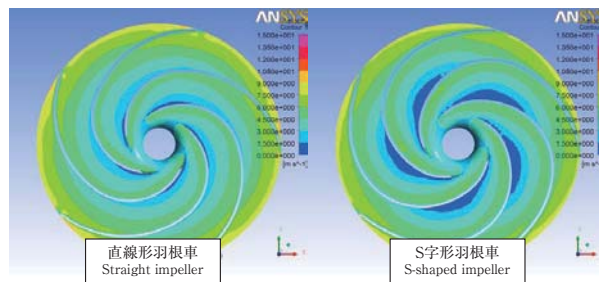


図9 相対速度分布比較

Fig. 9 Comparison of relative velocity distributions

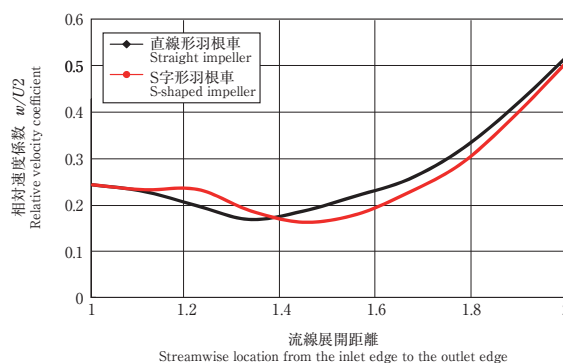


図10 面積平均相対速度比較

Fig. 10 Comparison of area-averaged relative velocity

車数値解析評価の指標となっていた。減速比を変化させる設計パラメータの一つは羽根車の外径であり、理論揚程を一定とすれば羽根車外径を小さくし、翼の出口角を大きくすることで全体の相対速度が下がり減速比は増加するが、翼の負荷が増加するために減速しすぎると部分流量域が不安定になり、またリットロード特性が失われるという欠点がある。S字形羽根車はこのような欠点をなくすため羽根車外径は変化させずに相対速度を下げるのに適した子午面形状であると考えられる。

5. あとがき

相対速度分布や減速比は準3次元解析が使用されていた時期に羽根車内の摩擦損失、あるいは流れの剥離を想定する指標として用いられてきた。その後、粘性解析が主流となり、解析で剥離現象を捉えたり、解析結果からポンプ効率等が計算できるようになったりすると、相対速度分布からポンプ効率追求に視点が移っていく。

今回開発したS字形羽根車は、解析上の効率より羽根

車外径を変化させずに羽根車内部の相対速度を下げる手段を追及した結果得られた形状であり、粘性解析で相対速度分布や減速比を評価しながら決定した。

現在使用できる流れ解析コードは乱流境界層をモデル化して実際の現象の全てを解いているわけではないが、設計品質向上のためのひとつの重要アイテムになっている。そのアイテムが導き出す計算結果の解釈、及びその対策が現在の設計者の主たる役割であり、経験やア

イデアが介在する部分は大きい。

参考文献

- 1) Zangeneh,M.,” A Compressible Three Dimensional Blade Design Method for Radial and Mixed Flow Turbo-machinery Blades,” Int. J NumericalMethods in Fluids, Vol.13, 1991, pp.599-624.
- 2) ANSYS Inc., ANSYS CFX, Canonsburg,Pennsylvania, U.S.A.
- 3) JIS B 8327-2002, 模型によるポンプ性能試験方法－実物への諸量の換算.

