

逆解法設計を用いた水車ランナのキャビテーション抑制

岡本 秀伸* 後藤 彰**

Suppression of Cavitation in a Francis Turbine using the Inverse Design Method

by Hidenobu OKAMOTO, & Akira GOTO

A suppression of cavitation in a Francis turbine was attempted using the inverse design method. Blade loading parameters and influences by rake angles were studied. Numerical prediction of the blade-surface static pressure of a conventional runner and that of a runner designed using the inverse design method was done by CFD analysis and the results were compared. The inter-runner static pressure distribution was suppressed based on blade loading parameters. Consequently, the suppression of cavitation was achieved by increasing the minimal inter-blade static pressure. It was found that the inter-runner minimal static pressure was sensitive to the rake angle. Accordingly, blade loading parameters and rake angle control were used to design (using the inverse design method) a runner which carried high cavitation resistance properties. Such results suggested the possibility that the inverse design method could be an effective tool for designing turbine runners.

Keywords: Inverse design method, Cavitation, Francis turbine, Runner, Blade loading parameters, Rake angle, Static pressure, Suppression, CFD (Computational Fluid Dynamics)

1. ま え が き

ターボ機械の翼形状の効率的な設計手法として、逆解法による設計手法が発達してきている。逆解法設計では、対象物内の流れ場を形状パラメータではなく、流体的なパラメータを用いて制御することができる。このため、逆解法設計では、内部流れ及び翼形状を流れ場の物理的な考察に基づいて最適化することができ、逆解法の適用により、設計プロセスをより効率的に、系統的にできる。

(株)荏原総合研究所では、3次元逆解法設計手法の実用化について、長年にわたりロンドン大学と共同研究を進めており、自社内の設計システムに逆解法設計を組み込んで設計の効率化を図ると共に、大学とのジョイントベンチャーを設立して逆解法設計プログラムを市販している。また、著者らは、3次元逆解法を様々なターボ機械の設計に適用しており、これまでに、斜流ポンプのインペラやディフューザ、遠心及び斜流形のインペラ、スプリッタ付きの圧縮機インペラ、斜流ポンプ段落設計や、ポンプのシリーズ設計に適用している^{1)~4)}。

本稿では、逆解法をフランス水車のランナ設計に適

用した事例を紹介する。水車の羽根車（ランナ）の設計に当って最も重要なポイントの一つはキャビテーションの発生を抑えることである。キャビテーションは、キャビテーション壊食や振動・騒音の発生、安定した運転範囲の縮小など様々な問題を引き起こす。しかし、キャビテーションの発生と密接に結びついたランナ内の静圧分布は、流れの3次元性の影響でその制御は容易ではない。CFD (Computational Fluid Dynamics) の発達によって、ランナ内部の流れ場の評価^{5)~7)} をすることは比較的容易になったが、設計者が水車の流力設計する場合には、翼形状の修正とCFDによる流れの評価を試行錯誤的に繰り返さざるを得ない。翼形状パラメータとランナ内部の流れ状態の関係が明確でないため、この手法では、設計者は水車を効率的に、また系統的に設計することは難しい。著者らは、3次元逆解法を用いた、流体力学的考察によりランナ内の静圧分布を制御し、逆解法設計手法のキャビテーション抑制の効果を確認した⁸⁾。

2. 逆解法による設計手法

逆解法の理論はZangeneh⁹⁾により提案されたものを採用する。本稿では逆解法の詳細は記載しないが、翼面の負荷 ($P_s^+ - P_s^-$) は、非圧縮ポテンシャル流では次式で表される。

* (株)荏原総合研究所 機械研究室

** 同 工学博士

$$Ps^+ - Ps^- = 2\pi/B\rho W_{mbl} \partial(rV_\theta)/\partial m$$

ここに、 $\partial(rV_\theta)/\partial m$ を翼負荷パラメータと呼び、上式から翼面の負荷と線形関係にあるパラメータであることが分かる。本逆解法設計手法は、(1) 各流体的パラメータの影響を独立して評価できる、(2) 仕事量を保持したまま静圧分布を制御できる、(3) 逆解法設計に要する時間は非常に短い(技術計算用計算機やパソコンを用いて数分程度)、などの特長をもっている。逆解法の入力条件の中で、3次元流れ場と性能に最も影響するパラメータは子午面形状と翼負荷パラメータであるが、本稿では、レーキ角の制御によるランナ前縁付近で生じる翼内最低静圧値の改善も試みており、レーキ角と密接に関連するスタッキング条件も重要なパラメータである。

逆解法設計自身はポテンシャル理論に基づくため、粘性の影響は考慮されないが、流れのはく離がない限り、静圧分布に関しては粘性の有無は大きく影響しないと考えられるので、逆解法の設計パラメータによって内部の静圧分布を制御できる。逆解法にて翼形状が設計された後、CFDを行って粘性も考慮された流れ場を評価する。本稿ではCFDとして、ポンプ流れの評価方法として社内内で実績をもっているDawesコード¹⁰⁾を使用した。CFDによる水車ランナ内部流れの評価には、有効落差、ランナ効率、最低静圧値、最低静圧位置を用いた。

3. フランス水車への適用

3-1 既存ランナの解析

逆解法によるキャビテーション抑制の検討をする前に、既存ランナのCFDを行い、内部流れ及び水力性能

を評価する。このランナは羽根枚数16枚のフランス水車で、CFDの行われた流量は780 m³/min、回転速度600 min⁻¹である。CFDはランナ単体で行い、ポリウートとガイドベーンは考慮せず、羽根車から上流の流路は羽根車前縁から平行に延長される。図1にCFDに用いた解析グリッドの子午面断面形状を示す。図2にCFDによって得られたクラウンとバンドにおける無次元翼面静圧分布を示す。図2の横軸は無次元化された子午面距離で0.0が前縁、1.0が後縁を示す。縦軸はCFDの入口境界の静圧を基準とした静圧分布を、参照圧力で無次元化している。図2の破線は模型試験結果から得られたキャビテーション限界静圧を示す。図2から、バンドの前縁近くの負圧面において急激に静圧が低下し、キャビテーションはこの低静圧領域で発生すると考えられる。図3に、負圧面近傍及びバンド近傍における相対速度のコンタ図を示す。前縁近傍の負圧面とバンドのコーナー部に相対速度の速い領域が存在しており、この領域で図2の最低静圧が発生していると考えられる。模型試験でも同領域に強い渦キャビテーションが発生することが確認されている。

3-2 翼負荷パラメータによる制御

本節では、既存ランナのCFD結果の考察を基に、翼負荷パラメータによるキャビテーション抑制を検討する。本節中では、子午面形状及びレーキ角 α は既存ランナと同じ条件に固定してある。翼負荷パラメータ $[\partial(rV_\theta)/\partial m]$ は、翼の正負圧面間の圧力差と直結したパラメータで⁹⁾、翼負荷パラメータによって静圧分布を制御できる。既存ランナのCFD結果から、バンドの前縁付近の高翼負荷がこの場所における急激な静圧の低下

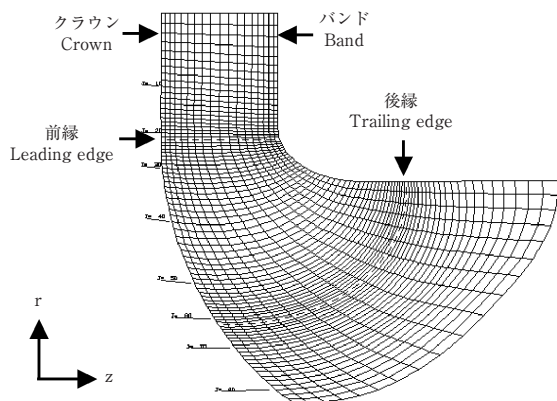


図1 水車ランナの子午面解析グリッド子午面断面
Fig. 1 Computational grid on meridional plane for runner

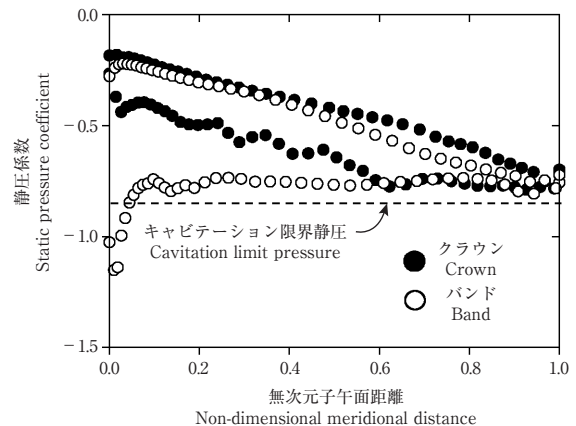
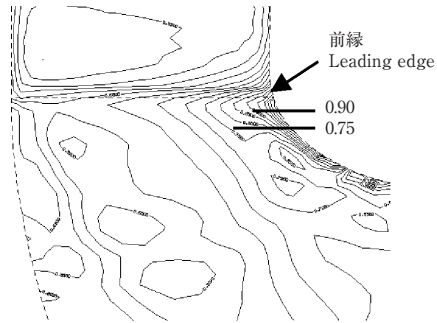
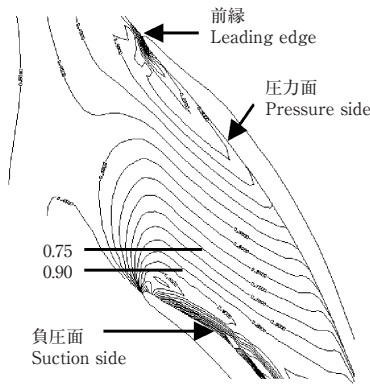


図2 既存ランナの翼面静圧分布
Fig. 2 Static pressure distribution of conventional runner



(a) 負圧面近傍
(a) Near suction surface



(b) バンド近傍
(b) Near band surface

図3 既存ランナの速度コンタ

Fig. 3 Velocity magnitude contour of conventional runner

をもたらしていると考えられる。この結果から、前縁近傍のバンド部で発生するキャビテーションを抑制するための翼負荷パラメータの傾向として、バンドの前縁近傍における翼負荷の低減が効果的と考えられる。

前述の考察に基づき、図4に示すキャビテーション抑制用の翼負荷パラメータを検討した。ランナのする仕事は既存ランナと同等に保持してある。翼負荷パラメータの分布は、前縁近傍のバンドの仕事量を低減するために、バンドにおいて極端な後半負荷にしており、クラウンにおいては翼前半におけるバンドのする仕事量の少なさを補うため、前半負荷としている。図5に、図4の翼負荷パラメータを用いて逆解法設計したランナの、クラウンとバンドにおける無次元翼面静圧分布を示す。狙いどおり、バンドの前縁付近における静圧低下が抑制され、翼面最低静圧値がキャビテーション発生限界静圧以上に改善されていることが分かる。また、効率は既存ランナに対して若干上昇した。

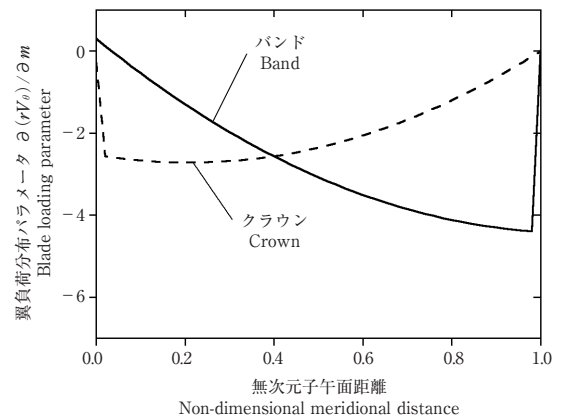


図4 キャビテーション抑制用の翼負荷パラメータ

Fig. 4 Blade loading parameters for suppression of cavitation

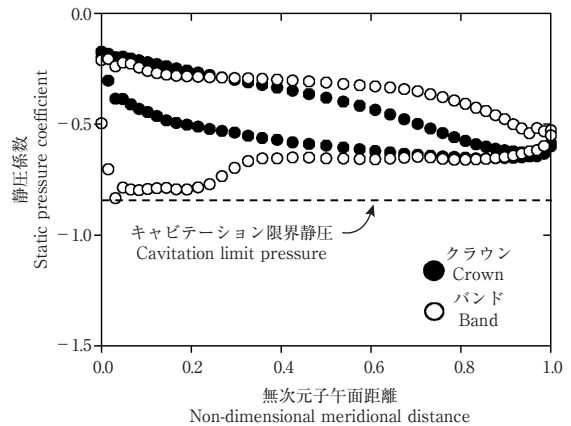


図5 逆解法設計（翼負荷パラメータ制御）ランナの翼面静圧分布

Fig. 5 Static pressure distribution of inverse design (by blade loading parameters) runner

3-3 レーキ角による制御

翼内の静圧分布の制御方法の一つとして、レーキ角をつける（翼を周方向に傾斜させる）ことが知られている。本逆解法では、スタッキングを用いてレーキ角を制御できる。本逆解法で用いているスタッキングとは、翼形状を設計する際の初期値条件で、任意の1箇所の子午面位置におけるスパン方向の翼線素の形状で定義され、逆解法設計中にこの形状は変化しない。この性質を利用し、ここでは、スタッキング位置をキャビテーションの制御をしたい前縁に設定し、線素を周方向に傾斜した直線素に設定してレーキ角を表現した。なお、本節中では、スタッキング以外のパラメータは既存ランナと同等の条件に合わせてあり、レーキ角の影響だけを検討している。

図6に、レーキ角 α の定義とレーキ角の効果の説明図

を示す。レーキ角の効果については後述する。図7にレーキ角の翼面最低静圧値に対する影響を示す。図7において、横軸はレーキ角を示し、正のレーキ角はランナの回転方向に対してバンドが先行していることを表す。図7から明らかなように、ランナ内の最低静圧値はレーキ角に対して非常に敏感であり、正のレーキ角をつけると翼面最低静圧は改善される。また、効率は既存ランナに対して若干上昇した。図8に負/正のレーキ角を与えたときのクラウンとバンドにおける翼面静圧分布を示す。正のレーキ角ではバンドの前半において最低静圧が上昇し、翼の囲む面積が小さく（前半におけるバンドの仕事量が少なく）なる。逆にクラウンにおいては翼の囲む面積が、特に翼の前半において大きくなり、クラウンによる仕事量が増えていることが分かる。

以下に、正のレーキ角によってバンドの最低静圧が改善される理由を考察する。図6に示すように、翼圧力面

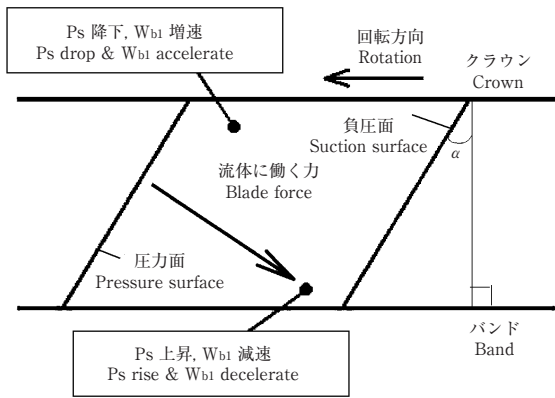


図6 レーキ角 α の効果説明図
Fig. 6 Effect of rake angle α in turbine runner

から負圧面に向かって働く力の反作用として、流体には左上から右下向きの力（図6中のBlade Force）が作用する。この力により、スパン方向の力の成分が発生し、これとバランスするようにバンド側の静圧が上昇し、クラウン側の静圧が下降すると考えられる。

3-4 逆解法設計によるキャビテーションの抑制

最後に、逆解法設計を用いたランナの耐キャビテーション特性向上の検証のために、翼負荷パラメータとスタッキング（レーキ角）の両方の制御を取り入れた逆解法によるランナの設計を行った。子午面形状は既存ランナと同一とし、翼負荷パラメータは図4を適用し、レーキ角 $\alpha = 24.9^\circ$ とした。図9は逆解法設計された3次元ランナ形状である。CFDの結果では、翼面最低静圧値が-0.76で耐キャビテーション性が向上していることが明らかとなった。ランナ効率は既存ランナより若干上昇した。図10では既存ランナと逆解法による耐キャビテ

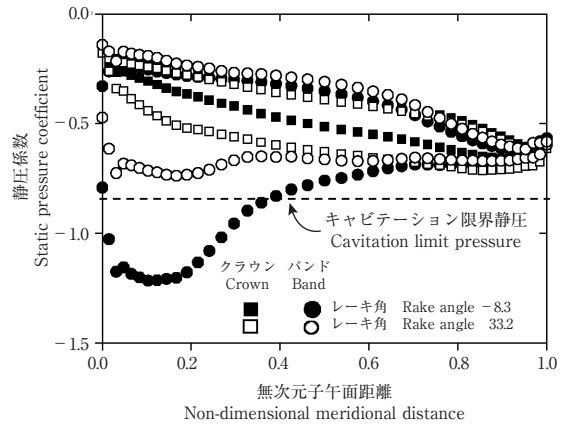


図8 レーキ角による翼面静圧分布の比較
Fig. 8 Comparison of static pressure distributions among typical rake angles

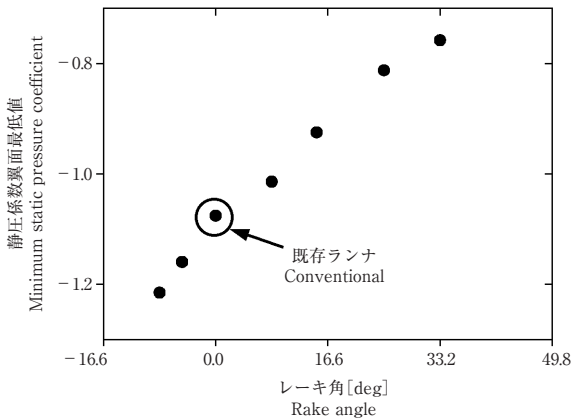


図7 レーキ角の影響
Fig. 7 Effect of rake angle



図9 逆解法設計ランナの3次元形状
Fig. 9 3-D geometry of inverse design runner

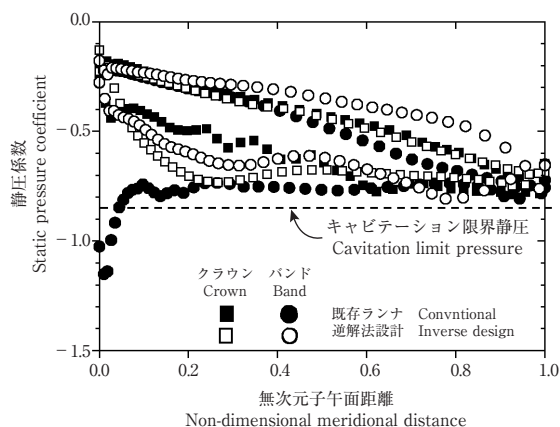


図10 既存ランナと最適化設計ランナの翼面静圧分布の比較
 Fig. 10 Comparison of static pressure distribution between conventional and optimized design runner

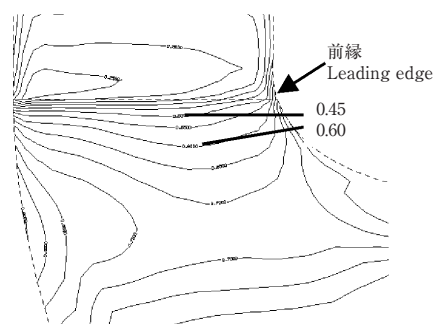
ーションランナの翼面静圧分布の比較をしている。耐キャビテーション設計により、既存ランナに対して低静圧領域が大きく改善されていることが分かる。図11に、図9のランナ形状に対する、負圧面近傍及びバンド近傍における相対速度のコンタ図を示す。既存ランナのコンタと比較して、急激な相対速度の変化が改善され、相対速度の分布が滑らかに変化していることが分かる。

4. あとがき

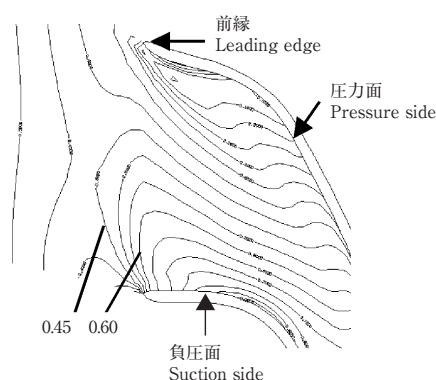
本稿では、3次元逆解法をフランス水車のキャビテーション抑制の目的で適用した。既存ランナと逆解法ランナのCFD結果の翼面静圧を比較し、次の結果を得た。

- (1) 翼負荷パラメータによってランナ内の静圧分布を制御できることが明らかとなった。本稿で示したような翼負荷パラメータを採用することにより、バンドの前縁に生じる急激な静圧低下を改善することができる。
- (2) 翼内の静圧分布はレーキ角（スタッキング）に敏感であることが明らかとなった。スタッキングもまた逆解法において翼内静圧分布を制御するために利用できる。
- (3) 翼負荷パラメータとスタッキング条件を用いて、逆解法により耐キャビテーション特性に優れたランナを設計することができた。

以上の結果から、逆解法設計手法は、水車の設計においても有益なツールとなりうることを示した。



(a) 負圧面近傍
 (a) Near suction surface



(b) バンド近傍
 (b) Near band surface

図11 最適化設計ランナ velocity コンタ

Fig. 11 Velocity magnitude contour of optimized design runner

参考文献

- 1) Zangeneh, M. 他2名, ASME Journal of Turbomachinery, Vol.120 (1998), 723.
- 2) Goto, A., Zangeneh, M., ASME Fluids 98 (1998), FEDSM98-4854.
- 3) Ashihara, K., Goto, A., ASME Fluids 99 (1999), FEDSM99-6846.
- 4) Sakurai, T. 他3名, ASME Fluids 99 (1999), FEDSM99-6845.
- 5) Keck, H. 他2名, Proceedings of the X VIII IAHR Symposium (1996).
- 6) Arakawa, C. 他2名, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.118 (1996), 285.
- 7) Nagafuji, T. 他3名, ASME Fluids 99 (1999), FEDSM99-7815.
- 8) Okamoto, H., Goto, A., ASME-European Fluids 02 (2002), FEDSM2002-31192.
- 9) Zangeneh, M., Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol.13 (1991), 599.
- 10) Walker, P. J., ASME Journal of Turbomachinery, Vol.112 (1990), 385.