

技術論文

流れシミュレーションによるトルクコンバータ特性の予測

Prediction of the Torque Converter Characteristics by Fluid Flow Simulation

加納 伸也

Shinya Kano

寺坂 裕二

Yuji Terasaka

矢野 巧造

Kouzou Yano

トルクコンバータ(以下トルコンと記す)は、流体の角運動量の授受でトルクを伝達する流体継手であり、原動機を保護し、各部の寿命を伸ばす。これは荷役作業など過酷な作業条件における有効なトルク発生などに優位性を発揮している。しかし効率面などでの弱点もあり、いかに高効率のトルコンを設計できるかが重要なポイントの一つとなるが、翼形状が複雑で流路の曲率も大きい流路内の流れの制御は容易ではない。一方製造では、性能に直結した複雑な翼形状を製作するための製造要件の見極めや改善案の検討も難しく、経験に基づいた試行錯誤によって決定されているのが現状である。そこで我々は、コンピュータによるトルコン内の流動解析を試み、トルコン特性の予測や性能評価検討ツールとしての可能性について研究を進めている。本報では、流れシミュレーションによる翼形状の検討を例にその一端を紹介する。

Torque converter is a hydraulic coupling that gives and receives the angular momentum of a fluid to transmit torque while effectively protecting the prime mover and extending the service life of components. It shows excellence in effectively generating torque under severe working conditions, such as material handling. On the other hand, it has disadvantages in efficiency, etc. So, it is important how to design a high-efficiency torque converter. But, because of complicated blade shape and large curvature of flow passage, it is not easy to control internal flow. Concerning manufacture, it is difficult to determine the requirements for manufacturing the complicated blades that directly influence performance or to investigate improvements. Therefore, presently they are determined by trial and error based on experience. In these circumstances, we are studying the analysis of torque converter internal fluid flow using computer to see its feasibility as a tool to predict the characteristics and evaluate the performance of torque converter. This report introduces part of the analysis method, taking the investigation of blade shape by fluid flow simulation for example.

Key Words: Fluid Flow Simulation, Finite Volume Method, CFD (Computational Fluid Dynamics), FLUENT, Torque Converter, Rothalpy, Simulation, CAE, Fluid Flow Analysis

1. はじめに

トルクコンバータ(以下トルコンと記す)は、流体の角運動量の授受でトルクを伝達し、入出力軸の回転速度差に応じて自動的に伝達トルクが決まる回転速度差感応型の流体継手である。トルコンはエンジンのトルク変動や減速機から入力される振動を吸収減衰し、滑らかなトルク伝達特性を有する。それは、原動機の始動を容易にし、過負荷の状態が生じても原動機を保護し、軸系のねじり振動や衝撃を切断吸収して各部の寿命を伸ばす。また、変速の自動化ができるなどの利点となり、荷役作業など過酷な作業条件における原動機や出力側の歯車伝達装置の保護や、土砂すくい込み作業時での有効なトルク発生などに優位性を発揮している。ただし、歯車変速装置に比べ最大効率は80~90%と低く、特に作業時に多い低速運転では燃費の問題に繋がるため、いかに効率の良いトルコンを設計できるかが重要なポイントの一つとなる。そのためには、内部羽根車流路内の流れを把握し、望ましい流れになるように形状を決定しなければならないが、トーラスの内部をポンプ、ター

ビン、ステータの順に各翼に沿って循環し、かつ曲率も大きい複雑な流路内の流れを制御する形状を決定することは容易ではない。一方製造では、性能に直結した複雑な翼形状を製作しなければならないが、性能に影響が出ないための製造要件の見極めや、性能を下げない改善案の検討は難しく、これらは経験などに基づいた数多くの試行錯誤によって決定されているのが現状である。トルコン内部の流動現象を解明するために数多くの可視化実験法も行われてきているが、目的とする解を得るまでに実験を繰り返さなければならない。最適案検討手法としての適用は難しい。これに対し、近年のコンピュータ技術の進歩により、数値計算によって解くアプローチ(CFD: Computational Fluid Dynamics)が試行されはじめている。そこでここでは、流れシミュレーション(CFDと同義とする)によるトルコン内流動解析への適用を試み、トルコン特性の予測や流量損失による性能評価法についての検討や、原価改善案検討ツールとしての可能性について検討した内容について報告する。

2. トルコン内流れシミュレーション手法の検討

2.1 流れシミュレーション用解析モデルの作成 (全体モデル)

流れシミュレーションを行うためには、構造解析など他の数値解析同様、3次元の形状を作成し、それを離散化した解析用のモデルを構築しなければならないが、流れシミュレーションでは、設計された製品形状そのものを解析の対象とする構造解析などとは異なり、構造体によって形成される空間「流体が流れる空間」を対象としなければならない。このため、

- 1) 流れシミュレーション用に新たに流路空間を抽出して解析形状を作成しなければならない(モデリングの重複)。
 - 2) 解析対象が流路空間であるため、構造解析のようにシェル化による厚み方向の簡略化などができず、ソリッドによる3次元空間の離散化(3Dメッシュ作成)を行わなければならない(メッシュ作成が難しい、解析に必要な容量が大きく節約が難しい)。
 - 3) 流れシミュレーションは作成されたメッシュ形状(アスペクト比)によって収束性や解析結果(解析精度)にうける影響が他の解析よりも比較的大きく、歪んだメッシュを使用することができない(メッシュ作成が難しい、解析に必要な容量が大きくなり節約が難しい)。
- など一般的にモデル作成が難しい。これらの問題に対しては、以下のようにモデル作成手順を工夫することにより問題の回避を試みた。

- 1) 3D-CADモデルを有効に利用し、Pro/Eアセンブリモデルの中でトルコンモデルから翼表面形状およびシェル、コア内面形状を抽出し、流路形状を構成することで、トルコンモデルと相関のある流路形状モデルの作成を行った。(図1-(a))
- 2) 周期性のある最小モデル単位を抽出してメッシュを作成し、メッシュ作成後、その周期モデルをコピーして全体モデルとすることで、同一形状部位や対称部位でのメッシュ形状のバラツキを抑えた良好なメッシュ作成を行った。(図1-(b))
- 3) 流路空間のメッシュ要素数が多い問題については、上記1)で抽出した流路モデルにある微小なサーフェスをマージ処理することによって、微細メッシュ要素の発生を防ぐとともに、できるだけ大きさの整ったメッシュサイズにそろえることで解析精度の劣化を防止した。(図1-(c))
- 4) 高精度が要求される翼表面については、翼形状に沿った層状のメッシュを作成することにより、メッシュ要素数の増加を抑えるとともに、良好なメッシュの作成を行った。(図1-(d))

これらの処理を行うことにより、処理なしでは500万~700万メッシュ要素(通常1台のコンピュータでは100万~150万メッシュ要素が解析計算の限界)になるトルコン解析モデルを60万~90万メッシュ要素ほどで作成することが可能となった。一連のモデリング作業手順を図1に示す。

a)流体空間モデルの抽出 b)ポンプ、タービン、ステータそれぞれの周期性のある最小モデル単位の抽出 c)微小なサーフェスのマージ d)翼形状回りに層状メッシュを作成する e)流路空間のメッシュを作成する f)周期モデルをコピーし全体モデルを作成する。

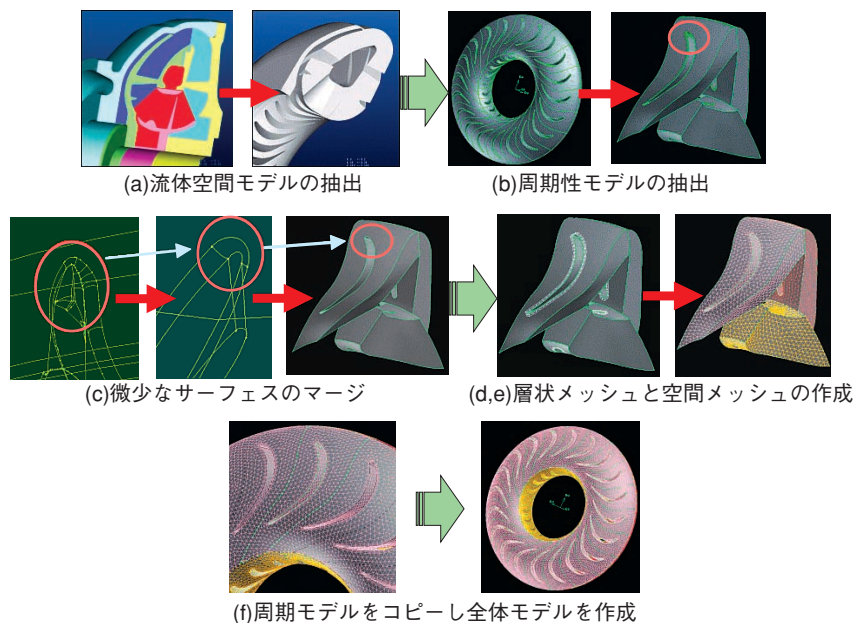


図1 解析モデル作成手順

2.2 流れシミュレーション用解析モデルの作成 (部分モデル)

入出力軸の回転速度差による伝達トルクの計算により、トルコンの効率やトルク比を求める場合には、翼枚数の差による位相差が許容できる全体解析モデルで解析を行うことが望ましいが、使用できるメッシュ要素数には限界がある。

さらに詳細な特定部位の検討を行うためには、解析モデルの解像度(メッシュ要素数)をあげる必要があり、その手段として、周期性のある形状で領域を切り出し解析を行う「部分モデル解析」がある。トルコンにおいて周期性のある最小モデル単位は、図1-(b)にも示したポンプ、タービン、ステータ各形状での翼1枚分の組み合わせとなる。しかしこの場合、翼枚数の位相差や各形状の接触境界面近傍の翼形状により、接触境界での断面が一致せず、ポンプ→タービン→ステータそれぞれの境界面での流体循環が成立しない(接触していない面は障害壁となる：図2-(a)参照)。そこで、部分解析を行う場合には、図2-(b)のように、質量が保存されながら流体循環が可能な、3要素の翼の最大公約数でチーズケーキ状に切り出した解析モデルを作成することで対応することとした。

2.3 検証

性能試験の実測結果を持つ2種類のトルコンに関して解析計算を行い、計算結果と実測結果を比較することによって解析精度の検証を行うこととした。流れ計算には有限体積法を用いる汎用CFDソフトのFLUENTを使用した。計算に必要な諸設定として、k-e乱流モデル、2次壁関数、油温90℃としたときの油の動粘性係数0.012 cm²/sを用いた。

検証解析に用いた丸型トルコンを図3-(a)に、偏平型トルコンを図3-(b)に示す。

ある時間での丸型トルコンの解析結果(速度ベクトル図)を図4に、各速度比での解析結果と実測結果の比較を図5に示す。

これより、解析計算結果と実測結果は効率、トルク比、プライマリトルク係数にほぼ一致している。

次に、偏平型トルコンでの、各速度比での解析結果と実測結果の比較を図6に示す。

これより、偏平型トルコンにおいても丸型同様、解析計算結果と実測結果は効率、トルク比、プライマリトルク係数にほぼ一致している。

これらから、2.1項の作成手順で作成された解析モデルを用いた流れシミュレーションにより、効率、トルク比、プライマリトルク係数などのトルコン性能特性予測が実用的に可能であることが確認できた。

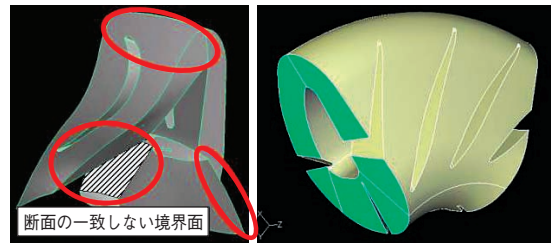


図2 部分モデル解析について
(a)循環流で質量が保存されない (b)最大公約翼数で境界面を一致

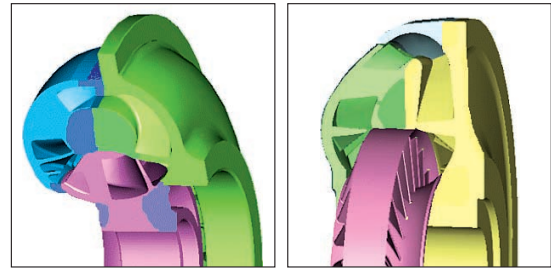


図3 解析モデル
(a)丸型トルコン (b)偏平型トルコン

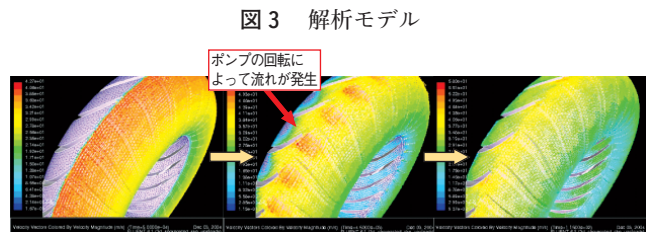


図4 解析計算結果(速度ベクトル図)

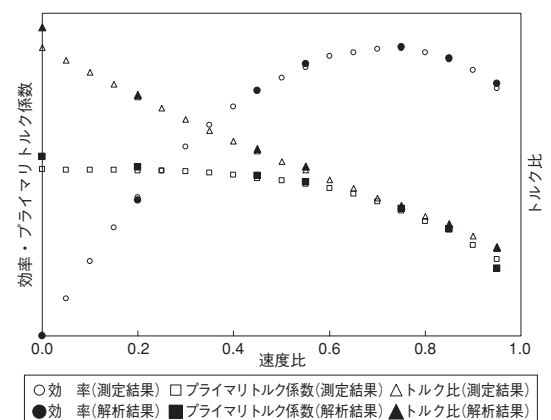


図5 丸型トルコン性能特性測定結果と解析結果の比較

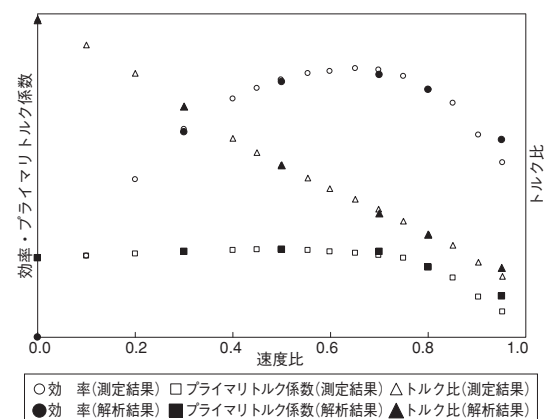


図6 偏平型トルコン性能特性測定結果と解析結果の比較

3. 流れシミュレーションによるトルコン性能評価法の検討

トルコンの性能改善を検討する場合、流路内を流れる流体の流れ損失を小さくし、いかに効率よく3要素内を循環させるかが重要なポイントとなる。そのために流路内の流れを解明し、流速のばらつきや流れの淀みができるだけ少なくなるように翼形状(流路形状)の改善を行う。しかし、明らかに流れ方に問題がある場合を除いては、なかなか流れ方の良否を判定することは難しい。そこで、ここでは流路内の流れの流量損失が評価できるロータルピ¹⁾という指標を用い、流れの評価を試みた。

3.1 損失評価式

ロータルピは次式で定義され、発生損失が評価される。

$$I = P / \rho + 1/2 W^2 - 1/2 U^2 \dots\dots\dots (1)$$

I: ロータルピ P: 静圧 ρ: 密度 W: 相対速度
U: 周速度

$$\Delta I = I - I_0 \dots\dots\dots (2)$$

ΔI: 要素入り口を基準としたロータルピ変化
I₀: 要素入り口のロータルピ

$$\eta = 1 + \Delta I / \Delta E \dots\dots\dots (3)$$

η: 要素の効率
ΔE: 理論上のエネルギー上昇量(下降量)

式(1)~式(3)を流れシミュレーション内の各メッシュ要素で計算できるようにシステム内に同式を付加し改良することによって、ロータルピでの評価を可能にした。

3.2 ロータルピを用いた解析結果の比較

2項で用いた偏平型トルコンと丸型トルコンの解析結果を用いて、効率の違いを流路内流量損失で評価した。

丸型、偏平型両トルコンの効率の比較を図7に、解析結果(速度ベクトル図)の比較を図8に示す。

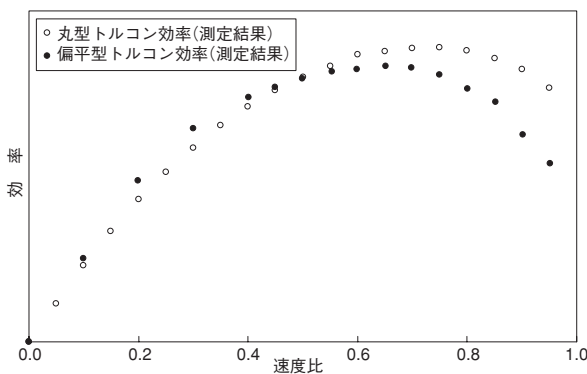


図7 丸型トルコンと偏平型トルコンの効率の比較

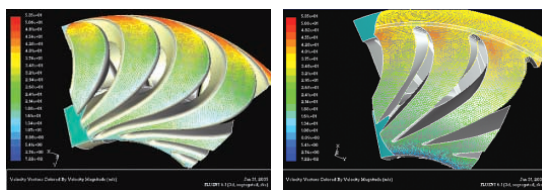


図8 解析結果(速度ベクトル図)

図7より、丸型トルコンの方が偏平型トルコンより効率が高いことが分かる。しかし、内部の流れ方や流速の大きさを示す速度ベクトル図(図8)からはその違いを分析することは難しい。流量損失がどの程度発生しているかわからないからである。そこで、ロータルピを適用し、内部流の比較を行った。ポンプに関するロータルピの比較を図9に、タービンに関するロータルピの比較を図10に示す。

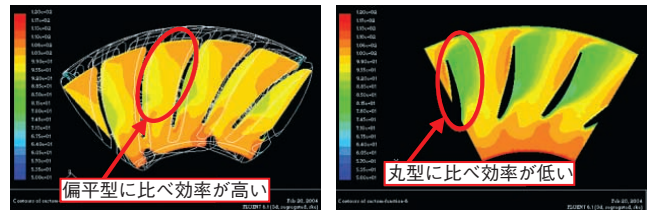


図9 ロータルピによる流路内効率分布(ポンプ)

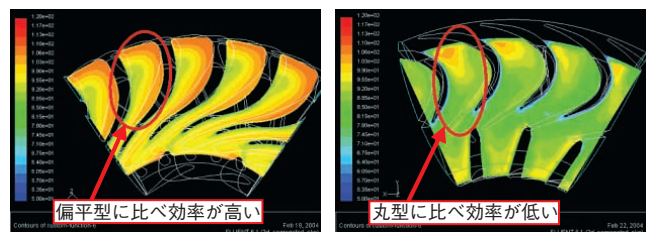


図10 ロータルピによる流路内効率分布(タービン)

図9および図10より、丸型トルコンは偏平型トルコンに比べ、ポンプ、タービン共に明らかに流量損失(エネルギー損失)の大きな領域が少ないことが分かる(レンジ色が下→上になるほど流量損失が大→小)。従って本翼形状における場合、偏平型トルコンより丸型トルコンの方がバランスの良い流体循環が実現されており、高効率に有利な形状であると評することができる。

以上より、ロータルピが翼形状(流路形状)検討の有効な評価ツールであることが確認できた。

4. 製造面からの翼形状の検討

建設機械に用いられるトルコンは主に鋳造にて製造されるが、目的に応じたトルコン形状によってその製造難易度は異なる。たとえば、3次元の曲率の大きな羽根車を製造する場合は、2次元的な曲率の羽根車を製造する場合より多くの中子を必要としなければならず(図11参照)、翼枚数分の中子をセットするための工数や、中子の隙間に発生するバリを除去するための工数、また中子の隙間の適切な管理を必要とすることなど、その製造難易度は高い。これらの理由から、2次元曲率翼のトルコンの方が製造しやすく、生産個数を同等とすると原価的に優位な場合が多い。そこで、2次元曲率翼偏平トルコンの翼入口角と翼出口角を操作することによって、3次元曲率翼丸型トルコンと同等の性能特性が得られないかの検討を行った。ここでの検討には、2.3項で検証に用いた3次元曲率翼丸型トルコンと2次元曲率翼偏平トルコンを用いた。このトルコンの性能特性の比較を図12に示す。

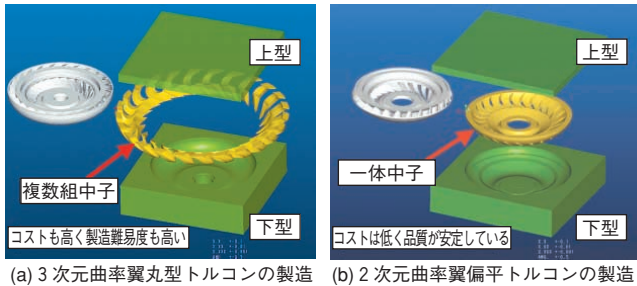


図11 製造工程(造型法)の比較

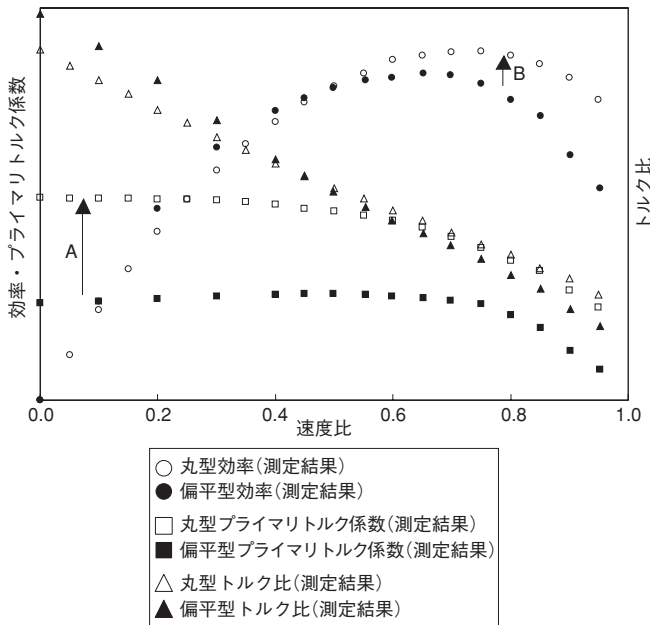


図12 3次元曲率翼丸型トルコンと2次元翼偏平型トルコンの性能特性の比較

4.1 プライマリトルク係数の検討

図12から、性能特性を合わせるためには、まず偏平トルコンのストール時のプライマリトルク係数を上げなければならない(図12-A部参照)。しかし、プライマリトルク係数とトルク比との間には背反の関係があり、不用意にプライマリトルク係数を上げるとトルク比が下がってしまう。そこで、布部らの実験結果より²⁾、プライマリトルク係数およびトルク比に影響が大きなポンプ翼出口角を操作してプライマリトルク係数を目標値より上昇させ、プライマリトルク係数には影響が小さくトルク比に影響が大きいポンプ翼入口角とタービン翼の入口、出口角を変更し、下がったトルク比を上昇させる手法を用いることとし、流れシミュレーションを繰り返し実施することによって値の調整を試みた。流れシミュレーションによって得られた改良偏平トルコンの解析計算結果と、丸型、偏平型トルコン性能特性(プライマリトルク係数とトルク比)との比較を図13に示す。

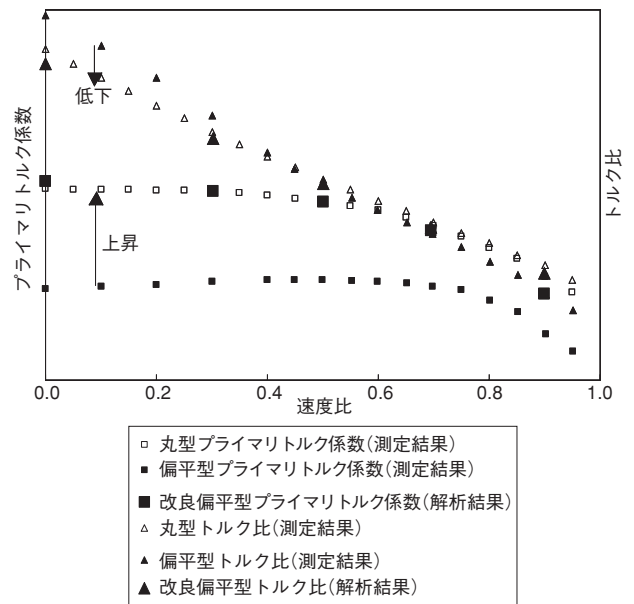


図13 改良偏平型トルコンの解析結果と、丸型、偏平型トルコンの測定結果との比較

図13より、2次元曲率翼偏平トルコンにおいて翼角度を調整することによって、トルク比の低下をできるだけ抑え、ストール時のプライマリトルク係数を丸形トルコン同等の約2倍近くに上昇できる可能性のあることが、流れシミュレーションにより明らかとなった。

4.2 効率の検討

次に、高速度比域において偏平トルコンの効率を上昇させなければならない(図12-B)問題に対して、まず現状偏平トルコンのロータルピによる評価を行いエネルギー効率の悪い流れ部位を選定、先に取り組んだプライマリトルク係数とトルク比の関係を壊さないように翼長さや翼の曲率位置、扁平率などの調整を流れシミュレーションを繰り返し行い検討を試みた。従来の偏平トルコンと改良を加えた偏平トルコンとのロータルピの比較を図14に示す。

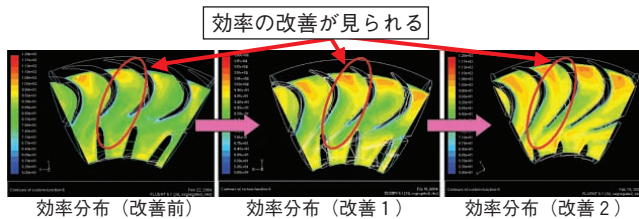


図14 流路形状(翼形状)の変更によるエネルギー効率の改善

図14より、改良トルコンで流路内流れの流量損失が改善されていることが分かる。3次元曲率翼丸型トルコンと改良2次元曲率翼偏平トルコンとの性能特性の比較を図15に示す。

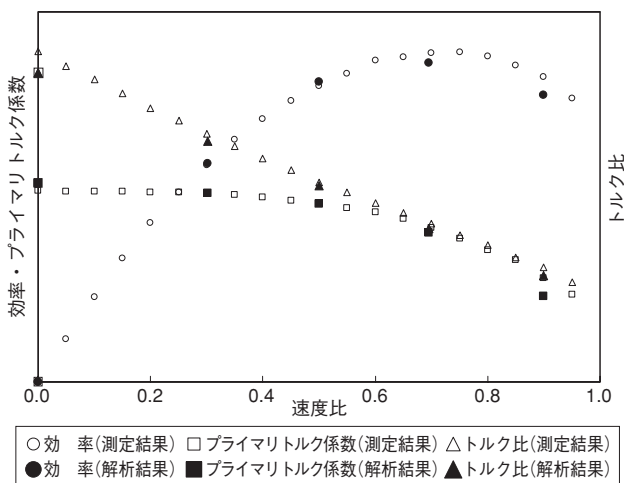


図15 改良偏平型トルコンの解析結果と、丸型トルコン測定結果との比較

図15より、ロータルピによる流路形状検討を行うことによって、プライマリトルク係数およびトルク比の値をあまり低下させることなく、中・高速度域での効率改善を検討することができる。しかしまだ約数パーセント目標には到達しておらず、さらなる検討が必要である。

5. まとめ

流れシミュレーションの適用によって、これまで実施が困難であった多数の水準実験を机上にて行うことができ、新規設計や原価低減のための改善を実施する際の事前検討として有効であることが確認できた。今後は、測定が難しい現象を可視化できるシミュレーションの特徴を生かし、急加速時など試験が難しい使われ方をした時の性能評価や周りの部品を含めた構造的な評価についても検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 江尻永治ほか：機械学会論文集(B編)，Vol.64，No.623，p.144－150（1998）
- 2) 布部誠ほか：日立造船技報，第56巻，第1号，p.26－33（1995）

筆者紹介



Shinya Kano
かのう しんや
加納 伸也
1989年、コマツ入社。
現在、生産本部生産技術開発センター所属。



Yuji Terasaka
てらさか ゆうじ
寺坂 裕二
1983年、コマツ入社。
現在、生産本部生産技術開発センター所属。



Kouzou Yano
やの こうぞう
矢野 巧造
1999年、コマツ入社。
現在、生産本部生産技術開発センター所属。

【筆者からひと言】

最近のコンピュータ技術と、数値解析技術の進歩には目を見張るものがある。少し前なら一枚の翼回りの流れ解析で限界を感じたものが、ポンプやタービンの動きまで考慮した流れが予測できるのである。これまではほんの思考の刺激だったCAEもかなりの内容ができるようになってきた。この見えない現象を見せる力、もっと有効に活用できるよう精進を重ねていかなければ。