

ターボ機械開発への CAE の適用

宮地利和*・白神隆文*・仲山善裕*・田中宏明**・寺田 進***・伊藤三彦****

*機械事業部・開発部 **機械事業部・回転機技術部 ***エンジニアリング事業部・エネルギー機器センター

****神鋼テクノ㈱

Application of the CAE Method to Turbomachinery Development

Toshikazu Miyaji・Takafumi Shirakami・Yoshihiro Nakayama・Hiroaki Tanaka・Susumu Terada・Mitsuhiko Ito

This paper describes the application of the CAE method to Kobe Steel's turbomachinery development, to reduce the development period and the cost. Internal flow models based on Navier-Stokes CFD analysis, were developed for the turbomachinery impeller and diffuser. Forced vibration analysis was also investigated for an open impeller blade to prevent resonance due to external forces.

まえがき = 圧縮機分野のグローバル競争は、ターボ機械に大幅なコストダウンと高速化・小型化とともに高い信頼性と高性能化を要求している。これらマーケットの厳しい要求に応じてゆくためには、強度面・振動面の設計段階における十分な検討をおこなうとともに、内部の流れを予測し損失の少ない流れとなるよう流路設計をおこなわねばならない。

いっぽう、近年のグラフィックワークステーションの高速化・大容量化は CAE (Computer Aided Engineering) 手法の適用を身近なものにし、三次元 CAD によるソリッドモデルの作成とこれに基づく FEM による応力・振動解析, CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) による流れの計算, CAM による NC 加工へと続く一連の検討を日常的におこなうことを可能にしている。

とくにターボ機械の設計における CFD の進歩はめざましく、これを利用したインペラやディフューザなどの空力要素の設計は性能の改善と開発のスピードアップに大きな効果を上げている^{1)~3)}。

本稿では、当社のターボ機械におけるこれら CAE の活用事例の一端を紹介する。

1. CAE を利用したターボ機械の開発

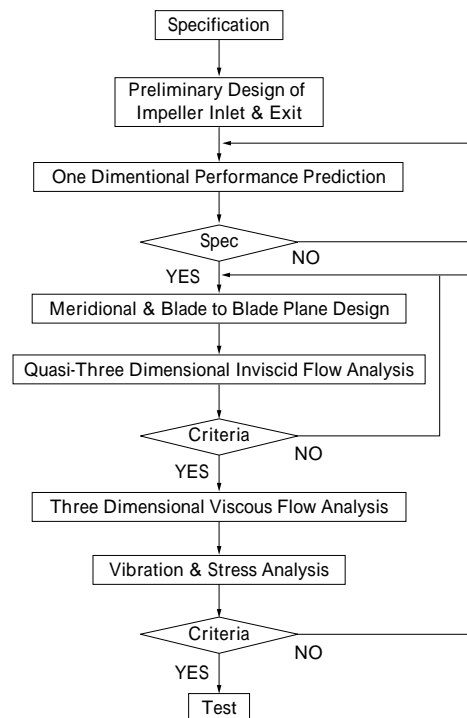
ターボ機械の設計は、仕様に基づき性能面、応力・振動面、構造面のすべての条件を満たすように多数のケーススタディをおこない、その結果から空力要素やそのほかの流路形状を決定する必要がある。

このため実務設計では基準となる開発済みのインペラに対し、実験結果と CFD を含む各種数値解析手法を組合わせて検討がなされる。新しいインペラが開発されるとその試験結果はデータベースに反映され、設計ツールをキャリブレーションしていくことになる。

ターボ機械におけるインペラ開発のフローを第 1 図に示す。最初に、与えられた仕様に対して一次元設計を実施して性能を満足するよう主要寸法を決める。次に、粘性を考慮しない流線曲率法などの準三次元的手法と経験に基づく規準を組合わせてインペラ、ディフューザの

詳細設計がおこなわれる。この方法は過去の経験の範囲内の仕様に対しては十分に有効な手法であるが、従来の経験を超える高性能なインペラに対応するには必ずしも十分ではなく、テストの負担を軽減するためにも設計段階でできるだけ性能を解析的につかんでおく必要がある。このため、粘性を考慮した三次元の流動解析を実施して事前に性能を評価してゆく。これらが満足されれば、このあと応力解析・振動解析により強度面の評価をおこない、すべての基準を満たすまでこれらが繰り返される。このうち、NC5 軸加工のためのデータを CAM により作成し、短期間に試作インペラをテストに供することができる。

これら一連の解析に必要なデータはインペラ・ディフューザの形状が決まるとただちに作成できるよう、形状データの共通化とインターフェースの充実が計られている。



第 1 図 インペラ開発フローチャート
Fig. 1 Impeller development flow chart

る。

ターボ機械の設計において従来より使われている流線曲率法などの準三次元的手法では、流れを非粘性のみとし、その速度を算出してブレードの三次元的な曲りによる速度分布から境界層の発達などを評価してきた⁴⁾が、現在ではナビエ・ストークスによる三次元の粘性流動解析⁵⁾により、乱流モデル⁶⁾や計算グリッド、境界条件などによる精度面の課題は残るもののインペラとケーシングの間隙間流れや二次流れの評価、マッハ数の影響や境界層の成長・剥離までも捉えられるようになってきている。また、適用対象もインペラのみならず、ディフューザとの相互干渉を評価するための大規模な解析や、定常から非定常流れの把握へと複雑な解析が試みられるようになってきている。

以上のようなコンピュータを利用したCAE手法により、ターボ機械開発に必要な膨大な繰り返し作業と試験の一部が低コストの数値実験に置き換えられつつある。

2. 当社ターボ機械におけるCAEの適用事例

当社のターボ機械開発において、CAE・CFDをツールとしてもちい、性能・信頼性の向上を図っている事例を紹介する。

2.1 インペラの設計

インペラの設計では、まず入口・出口の流れ条件を満たすように一次的に基本形状を決定したのち非粘性の流れ解析を実施してインペラ内部の概略の流れの状態を把握する。この時点では従来の経験に基づき流れの減速が過度とならないように入口・出口の形状やブレード形状を変化させながらインペラ内部の速度の状態を決定する。従来の設計手法では非粘性流動解析をもちいて速度の減速比を求め、これと実験データとの比較から判定していたが、粘性流動解析をもちいれば粘性による損失や、流れの剥離の評価も可能となり、より実際の現象に沿った形で流れを判断できるようになってきている。

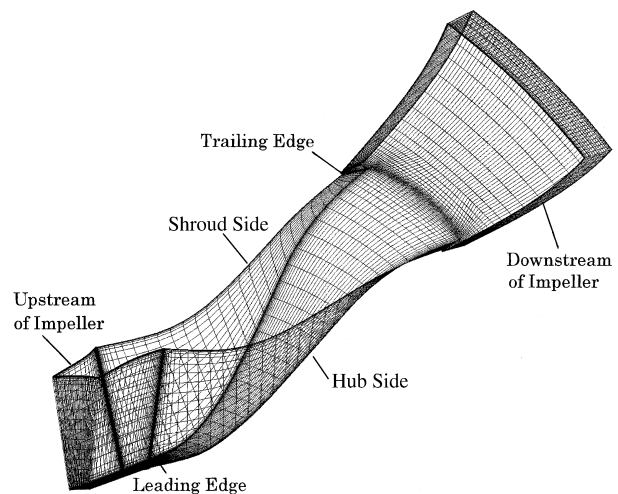
また粘性流動解析をもちいれば、部分負荷状態の検討も可能となる。圧縮機の運転状態が変化すると、流量の変化による流入角度や流速の変化の影響でインペラ入口部やインペラ内部の速度分布が変化し、マッハ数も高くなっていく。高いマッハ数の状態では各部の損失が増大するとともに境界層の剥離の危険も増えてくるため、部分負荷での検討も重要となる。

さらに、オープンインペラではインペラとケーシング間隙間流れの影響で流れが乱され損失が増大するが、隙間は小さいほうがよいものの、機械組立ての精度などから適切な値を選定せねばならず、この流れと主流のバランスを保ちながら流れ全体をコントロールする必要がある。

第2図にインペラの三次元ソリッドモデル⁷⁾、第3図にはインペラの粘性流動解析に使用した計算グリッドを示している。解析に使用したグリッド数は、入口から出口方向に106、翼間方向に48、ハブからシュラウド方向に31である。状態量の変化が大きいと予想される壁面近傍などのグリッドは密にし、詳細な計算結果がえられる



第2図 インペラソリッドモデル
Fig. 2 Impeller solid model



第3図 計算グリッド
Fig. 3 Calculation grid

ようにしている。

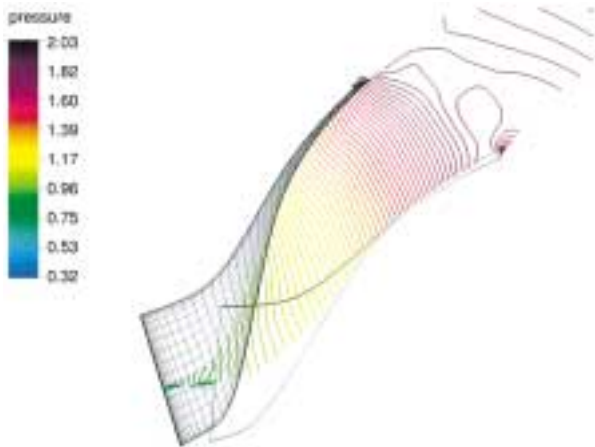
第4図に解析の結果えられた圧力分布を示している。第5図、第6図、第7図、第8図および第9図にマッハ数で色分けされた速度分布を示しているが、第6図、第7図および第8図に示すようにインペラ隙間からの流れが入口から出口に向う主流に影響を与えている。

第9図にはこの隙間流れやハブ・シュラウド間、ブレード圧力面・負圧面間の曲率により生じる2次流れがコントロールされ、スムーズな速度分布が実現されていることを示している。

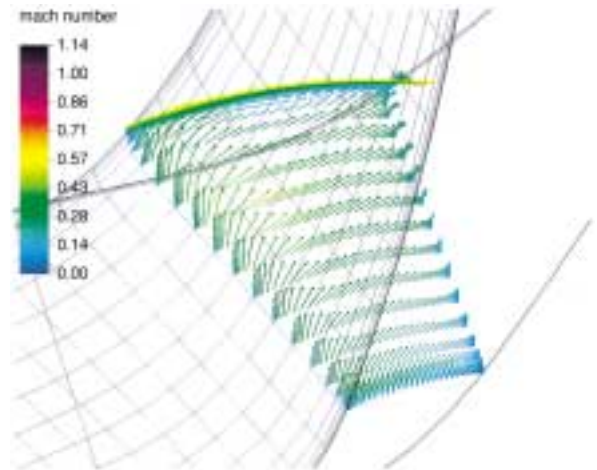
なお、第10図にカバー付きインペラを搭載している圧縮機の三次元モデル⁷⁾と第11図にカバー付インペラのカットモデル⁷⁾、第12図、第13図にこのインペラの流れを解析したものを示しているが、これも、剥離もなくスムーズな流れが実現されていることがわかる。

2.2 ディフューザ設計

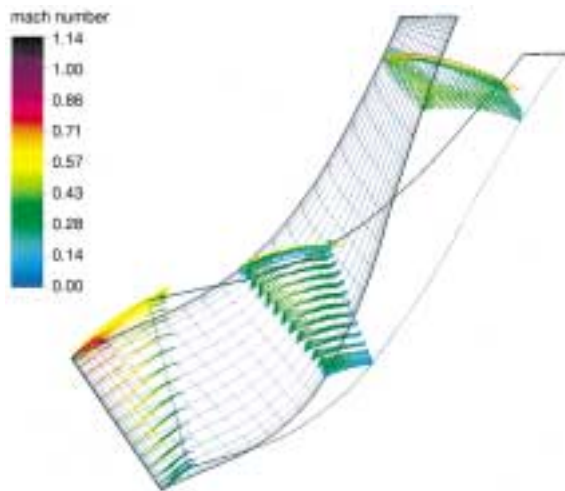
ディフューザはインペラでガスに与えられた速度を減速させて圧力に変換する要素であり、第14図の計算グリッドに示すようにインペラの出口に配置される。なお、この図はくさび型ディフューザをモデル化した三次



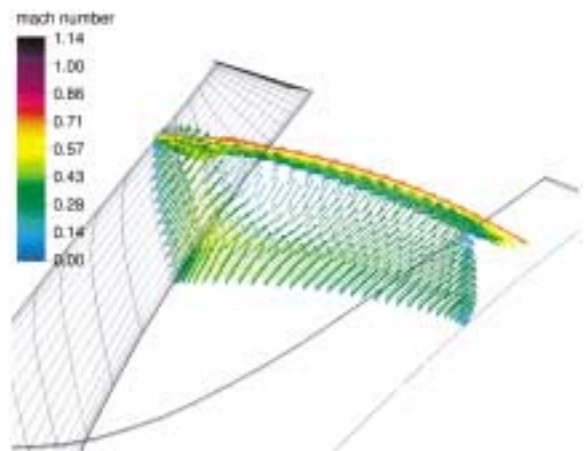
第4図 圧力分布
Fig. 4 Pressure distribution



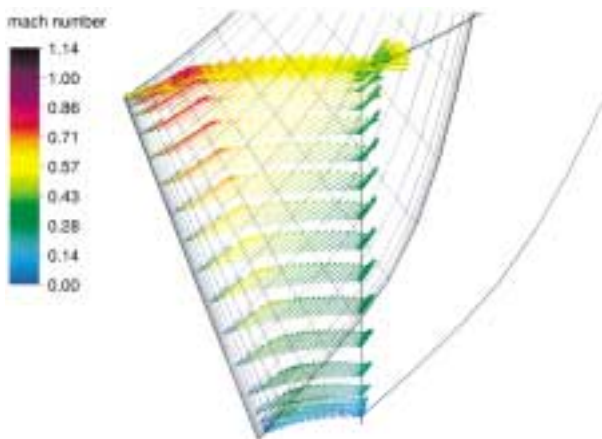
第7図 相対速度マッハ数分布（インペラ中央部）
Fig. 7 Mach number distribution of relative velocity
(Impeller mid section)



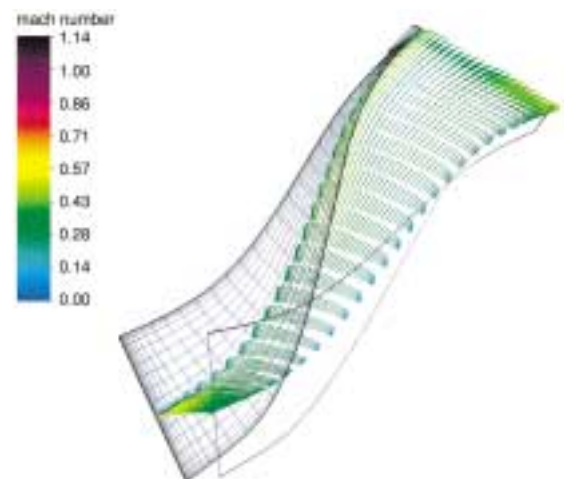
第5図 相対速度マッハ数分布
Fig. 5 Mach number distribution of relative velocity



第8図 相対速度マッハ数分布（インペラ出口部）
Fig. 8 Mach number distribution of relative velocity
(Impeller exit section)



第6図 相対速度マッハ数分布（インペラ入口部）
Fig. 6 Mach number distribution of relative velocity
(Impeller inlet section)



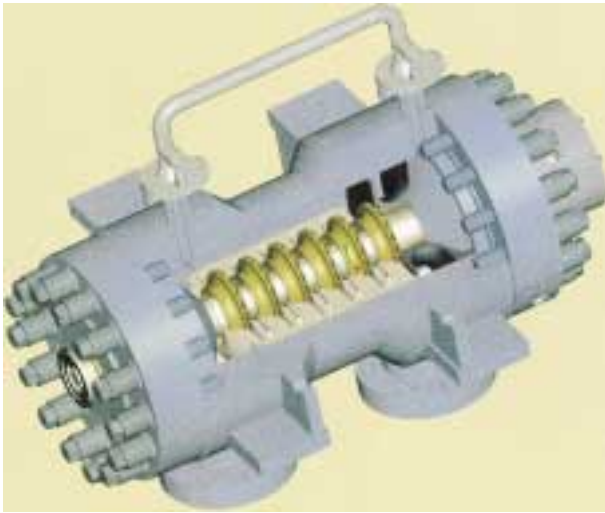
第9図 相対速度マッハ数分布（通路全体）
Fig. 9 Mach number distribution of relative velocity
(Whole flow section)

元粘性解析のグリッド例である。

インペラから出てくる流れはインペラから受ける仕事や損失の影響を受けて三次元的に歪んでおり、これがディフューザ内部での減速によりさらに助長されるためディフューザでの損失は大きくなる。また、インペラからの流れはブレード間の流路から出てくるため非定常な流

れとなり、ディフューザの形状は二次元的でも三次元的に複雑な流れとなっている。また、部分負荷時はインペラからの流れの歪みも大きくなり、剥離しやすい流れとなってサージ点やチョーク点などの運転範囲にも影響をあたえる。

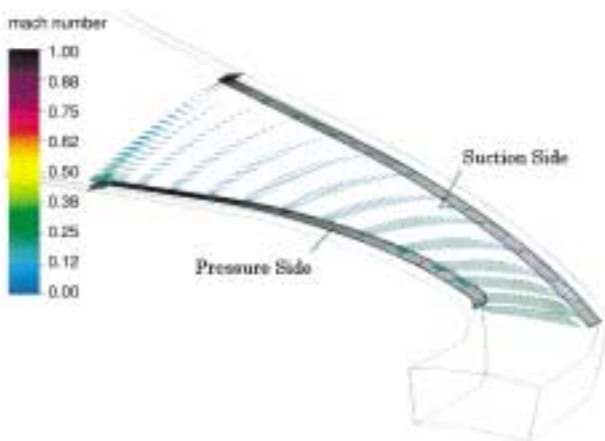
第15図と第16図はくさび形状と翼形状の2種類の



第10図 カバー付インペラ圧縮機モデル
Fig. 10 Compressor model with shrouded impellers

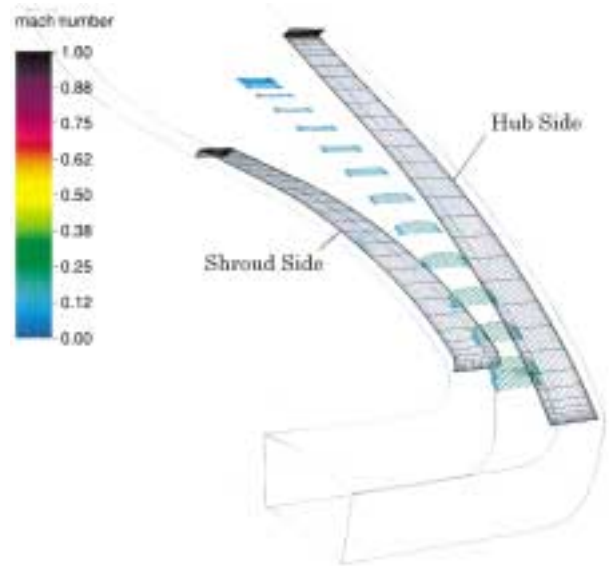


第11図 カバー付インペラカットモデル
Fig. 11 Cutting model of shrouded impeller

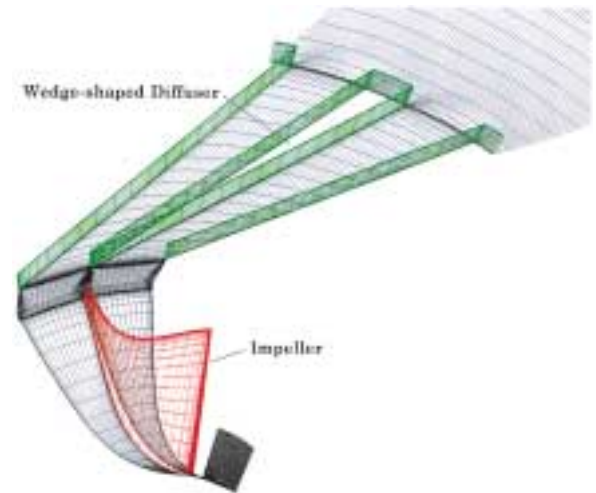


第12図 カバー付インペラ相対速度マッハ数分布 (翼間)
Fig. 12 Mach number distribution of relative velocity for shrouded impeller (Blade to blade)

ディフューザにおける流速分布の解析事例を示している。ここでは三次元の流れを翼間方向と子午面方向に分



第13図 カバー付インペラ相対速度マッハ数分布 (ハブ シュラウド間)
Fig. 13 Mach number distribution of relative velocity for shrouded impeller (Hub to shroud)



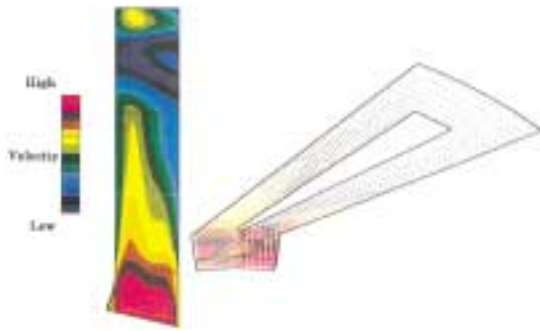
第14図 くさび形状ディフューザの三次元流れ解析グリッド
Fig. 14 Grid for three dimensional flow analysis of wedge-shaped diffuser

けて表示しており、本事例では子午面内の流速分布において翼形状ディフューザのほうが偏流が小さいことがわかる⁸⁾。

遠心圧縮機の内部の流れはこのように複雑なものであるが、従来実験的にしかアプローチできなかったものが計算手法や乱流モデルの改良により、事例に示すように内部の流動状態を判断できるようになってきている。

2.3 インペラブレードの振動解析

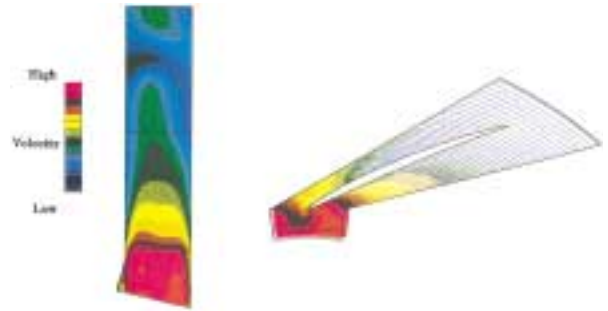
インペラやディフューザにはその相対運動に起因する周期的な圧力変動が生じる。インペラのブレードには上流側の構造物やガイドベーンなどからの変動力も加わる。また、少流量側ではローテーティングストールやこれがひどくなるとサージ現象を引き起こしブレードの破損にいたることもある。したがって、インペラブレードの設計では遠心力に対する静的強度を確保するのみならず、これら変動外力により疲労破壊を引き起こさないよ



Flow Distribution in Meridional Plane Flow Distribution in Blade to Blade Plane

第15図 くさび形状ディフューザ流速分布

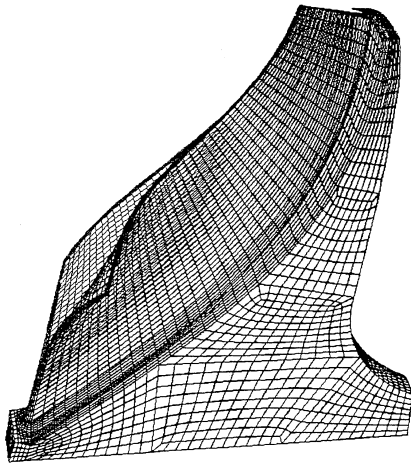
Fig. 15 Flow distribution in wedge-shaped diffuser



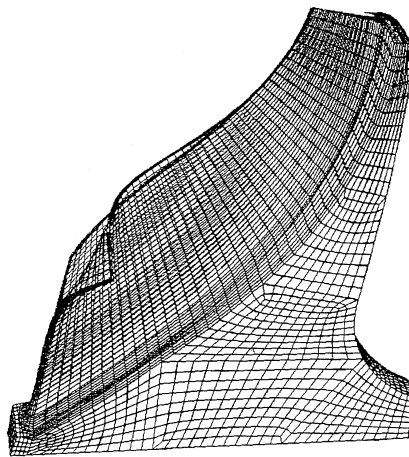
Flow Distribution in Meridional Plane Flow Distribution in Blade to Blade Plane

第16図 翼形状ディフューザ流速分布

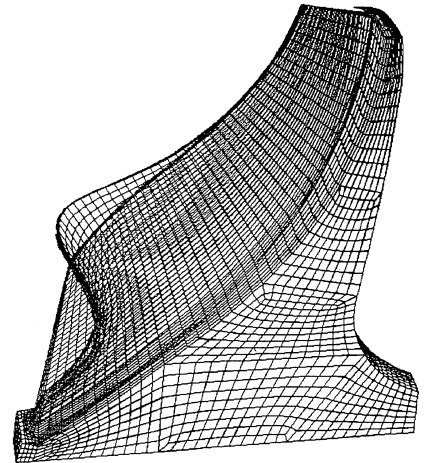
Fig. 16 Flow distribution in vaned diffuser



(a) 1-st mode of natural frequency



(b) 2-nd mode of natural frequency



(c) 3-rd mode of natural frequency

第17図 インペラの振動応答解析

Fig. 17 Vibration response analysis of impeller

動的強度の確保をおこなっている。

第17図(a)~(c)はインペラブレードの有限要素法による振動応答解析例で、ディスクを含めたブレードの1次~3次の固有振動数に応じた変形モードを示している。変動外力とこのような振動解析を組合わせて評価することにより、ブレードの疲労破壊に対する設計指針を与えることができる。なお、変動外力は、周期性を持った非定常流れとしてCFDをもちいた検討が可能である⁹⁾。

むすび=コンピュータとCAD・数値解析技術の発展とともにターボ機械の設計手法も大きく進展した。性能面では粘性流動解析はインペラとケーシングのすきまの流れを含む三次元的な挙動までも把握し、従来の経験則による設計を置き換えられる部分も出つつある。またFEM解析はブレードの振動を正確に捉え、流れの非定常性に起因するさまざまな加振源との共振を避けることができるようになってきている。これらCAE手法は三次元CADを主体としたエンジニアリングシステムと相

まって、ターボ機械のコンパクト化や高性能化のための開発の重要なツールとなってきており、今後ますますCAE/CFDの適用範囲は拡大し、数値実験による開発コストの低減化・短期化が進むものと考えられる。

参考文献

- 1) Kano F. et al, ASME Paper 82-GT-17, (1982).
- 2) Kano F. et al, Proceedings of the 13th Turbomachinery Symposium, (1984), p.139.
- 3) Fukao Y. et al, ASME Computers in Engineering, Vol.1, (1992), p.303.
- 4) O. E. Balje, "Turbomachines", John Wiley & Sons Inc. (1981).
- 5) Pulliam T. H. et al, AIAA Journal. Vol.18 No.2, (1980), p.159.
- 6) Baldwin B. S. et al, AIAA Paper. 78-257, (1978).
- 7) Parametric Technology Corporation, "Pro Engineer" User's Guide, (1997).
- 8) Computational Dynamics Limited, STAR-CD Version 3.0 User's Guide, (1996).
- 9) Hibbitt & Sorensen Inc., ABAQUS User's Manual (1996).