

単段タービン性能予測に対する非定常段解析と定常段解析の比較

*1 平井健二、*1 児玉秀和、*1 大山亜希彦、*2 野崎理、*2 菊地一雄、*2 西澤敏雄、*2 松尾裕一

Comparison between Unsteady Stage Analysis and Steady Stage Analysis for Evaluation of Aerodynamic Performance of Single-Stage Turbine

by

Kenji Hirai, Hidekazu Kodama, Akihiko Oyama,

Osamu Nozaki, Kazuo Kikuchi, Toshio Nishizawa, Yuichi Matsuo

ABSTRACT

A three-dimensional time-accurate Reynolds-averaged Navier-Stokes code has been extended for use in a parallel supercomputer called Numerical Wind Tunnel(NWT) developed by the Japanese National Aerospace Laboratory. This study focuses on comparison between steady stage analysis and unsteady stage analysis for a stator-rotor configuration of a high pressure turbine. The result of the unsteady stage analysis shows better agreement with experimental data than that of the steady stage analysis. This is mainly attributed to better prediction of secondary flow near the casing by the unsteady stage analysis than the steady stage analysis.

1 はじめに

航空機エンジンを構成する翼列の設計は、現状では定常流れ解析が主流であるが、実際の翼列内部は上流の翼列の伴流の影響等によって非定常性の強い流れとなっており、これは下流の翼列の性能にも大きく影響する。そのため、より高性能な翼列設計のためには、非定常な空力性能を評価し、その影響を考慮する必要がある。著者らは、数値風洞を活用する非定常3次元粘性流れ解析用並列化コードを開発してきたが、今回は高圧タービンの単段解析を実施し、試験値との比較を通じて、定常段解析と非定常段解析の翼列性能の予測精度の違いを調査したので報告する。

2 解析方法及び解析対象

解析方法

基礎方程式に非定常3次元ナビエ・ストークス方程式を用い、乱流モデルとして Baldwin-Lomax モデル(Baldwin ら、1978)を使用した。解法は差分法を基礎とし、近似因子分解を用いて陰的に解いている。対流項は Chakravarthy and Osher の TVD スキーム

(Chakravarthy ら、1985)で評価し、粘性項は中心差分で評価した。なお定常段解析については、定常解への収束を早めるために、局所時間刻みを用いて解析を行った。本解析では NAL の所有する並列計算機(NWT)を用いて並列計算を行っており、各翼間流路に対して1計算機を割り当てる並列計算アルゴリズムを用いた。

解析対象

解析対象は内外壁径はともに一定で、静翼28枚、動翼57枚から構成される単段高圧タービンである(図1)。本解析では簡素化のため静翼と動翼の翼枚数比を1:2となるように、実際の動翼の翼枚数57枚を数値解析では56枚と仮定し、静翼1枚と動翼2枚から成る1/28周を解析領域とした。この翼枚数の変更による動翼のソリディティの変化は2%以下であり、空力性能に与える影響は小さいと考えられる。比較のため、この仮定は非定常段解析および定常段解析で同様とした。但し、定常段解析の場合には解析領域は静翼1枚と動翼1枚とした。

*1 石川島播磨重工業 *2 航空宇宙技術研究所

入口境界条件として、全温、全圧、流れ角を与え、出口境界条件として静圧分布を与えた。また、翼面やハブおよびケーシング壁面では滑りなし条件とした。これらの境界条件は、非定常段解析、定常段解析ともに同一としている。静翼と動翼の接続境界では、定常段解析の場合、基礎方程式の基本変数を全て周方向流量平均した値を受け渡しているため、各基本変数は周方向に一定であり、半径方向分布のみを持つことになる。一方、非定常段解析の場合、各時間刻み毎に接続境界の基本変数に格子点の相対位置に応じた線形補間を行った値を受け渡しているため、周方向及び半径方向に分布を持っており、静翼と動翼の位置に従って時間とともに変化する。

解析格子には非定常段解析および定常段解析ともに同一なH型格子を用いた。静翼、動翼ともに格子点数は流れ方向、円周方向および半径方向にそれぞれ、 $119 \times 51 \times 61$ とした(図2)。なお、動翼のチップクリアランス部には半径方向に5点配置した。各翼列間の接続部では、計算の効率化を図るために、隣り合う翼列同士で半径方向に格子線を同一位置となるようにして、格子線上で情報のやりとりを行えるようにした。

3 結果

収束判定について

図3は基本変数の平均残差の収束履歴を示す。非定常段解析の場合、当然ながら解が一定の値に収束せず時間に対して周期的な変動をするが、本解析では、計算中に基本変数の時間変動量をモニターすることにより、その周期性を用いて収束の判定を行った。具体的には物理量の変動が周期的な変動を6~7周期繰り返したところ(図3中の6000イテレーション付近)で収束したと判断した。また、本論文には示していないが、流量などその他の物理量自体の時間変動の周期性についても、この収束判定方法を用いることに問題の無いことを確認している。計算時間については、PE3台による並列計算で約20時間要した。なお、非定常段解析結果のデータ処理については、収束と判断してから一周期分の結果を時間平均した。

一方、定常段解析では6000回の繰り返し計算を行い、残差が初期残差の 10^{-3} 倍以下となったことを確認

し、収束したと判断した。計算時間についてはPE2台による並列計算で約5時間要した。

動翼下流での解析結果の比較

図4に非定常段解析結果と計測結果について、動翼後縁より78%コード下流の計測面での全温分布の比較を示す(平井ら、1998)。静翼のウエイクの影響で形成される高温領域など、定常段解析では得られなかった周方向分布を捕らえている。さらに、図5に周方向流量平均した全温、全圧および流れ角の半径方向分布について、計測結果、非定常段解析および定常段解析の比較を示す。非定常段解析結果の方が定常段解析結果よりも全体的に計測結果と良く一致していることが分かる。特に、定常段解析では計測結果の示す80%スパン付近に存在するピークを再現できておらず、65%付近にピークがずれている。

また、時間変動量を見ると、各変数で非定常性が強く現れる場所が様々である。スワール角は、二次流れ渦のある80%スパンの変動が特に大きくなっているが、全温はミッドスパンを中心にかかなり広範囲にわたり非定常性が認められる。

二次流れの発達について

図6に非定常段解析結果との定常段解析結果の動翼負圧面近傍の全温分布の比較を示す。定常段解析ではケーシング側で大規模な二次流れが発生しており、動翼後縁において約45%スパンを占めるまで発達しているのに対して、非定常段解析では約30%スパンを占めており、二次流れの発達をより小さく予測していることが分かる。この原因を考察するために、上流の静翼内の二次流れの発達について調査した(図7)。静翼負圧面のケーシング近傍で発達する静翼内の二次流れについても、定常段解析と非定常段解析の結果に違いが出ていることが分かる。この二次流れが発達し始める1/2コード付近(図7(1))から、全圧分布に差が生じ始めており、徐々にその差が大きくなっていることが分かる(図7(2),(3))。静翼後縁付近の全圧分布において、定常段解析では流路中央部の全圧の2%程度減少する全圧分布が70%から100%スパンに幅広く存在しているのに対して、非定常段解析の結果を時

間平均した結果では最大で 1% 程度減少する全圧分布が 80% から 100% スパンの位置に局所的に存在しており、定常段解析に対して非定常段解析は二次流れを小さく予測している (図 7 (3))。

一方ハブ側については、全圧損失の大きさもほぼ同じであり、また、ハブ近傍に存在する極値的な分布もほぼ一致することから、定常段解析結果と非定常段解析結果の間に大きな違いは無いことが分かる。チップ側の全圧分布において定常段解析結果よりも非定常段解析結果の方が二次流れが小さいという傾向が動翼及び静翼の両方に存在することから、上流に存在する静翼内の二次流れの発達の違いが、動翼下流での定常解析結果と非定常解析結果の半径方向分布の違いの一因と考えられる。

4 結論

同一の空間離散化方法及び計算スキームを用いた単段タービンの定常段解析と非定常段解析を実施し、両者の解析法の違いが翼列性能の予測に与える差を明らかにした。

非定常段解析はタービン静翼負圧面のケーシング近傍において、定常段解析と異なる二次流れを予測することが判明した。その結果生じる静翼出口分布の差から、動翼内二次流れ分布の予測が異なっており、動翼下流での各物理量のスパン方向分布が異なっていることが分かった。

参考文献

Chakravarthy, S.R., Osher, S., "A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws", AIAA-85-0363, 1985

Baldwin, B., Lomax, H., "Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows", AIAA-78-0257, 1978

平井、児玉、野崎、菊地、西澤、田村、松尾、「航空機エンジン内の 3 次元非定常流れ解析」、航空宇宙技術研究所特別資料 SP-37 “第 15 回航空機計算空気力学シンポジウム論文集”、1998 年 2 月

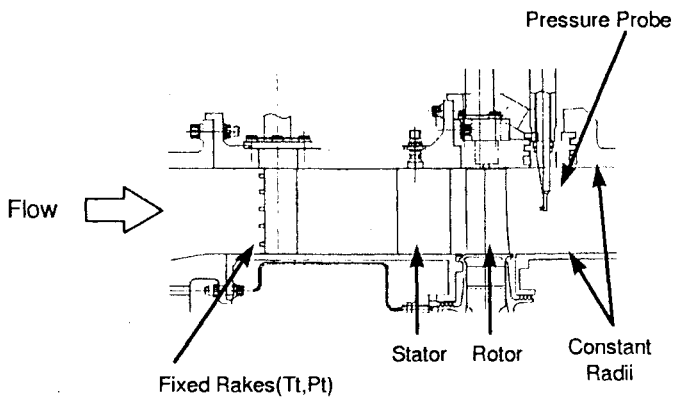


図1 試験装置

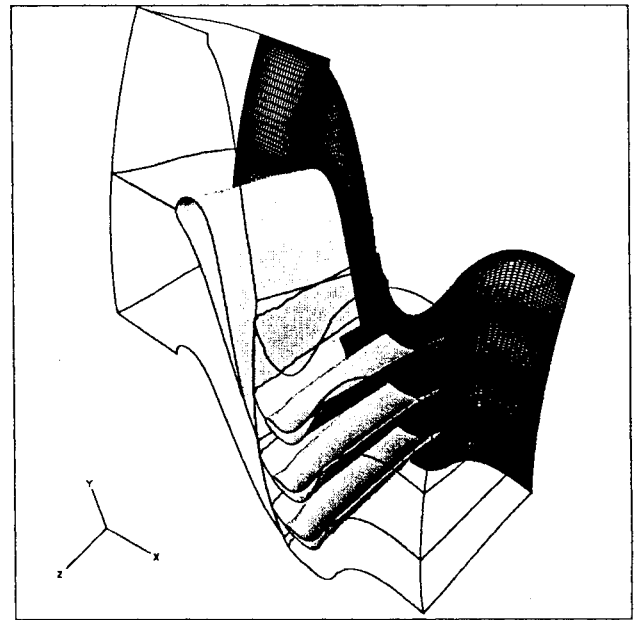


図2 解析格子

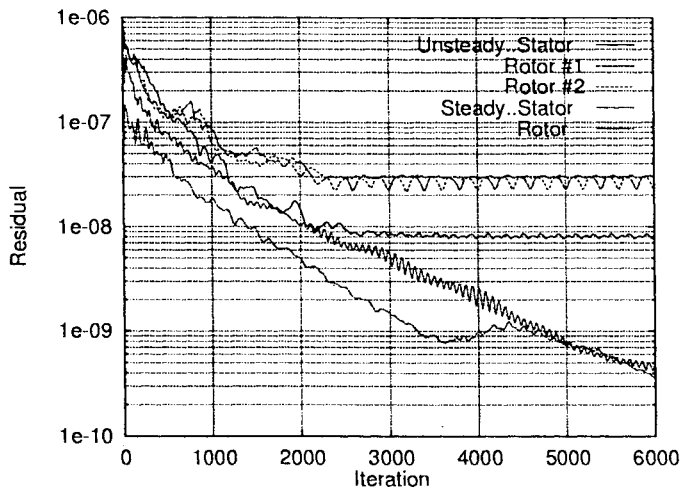
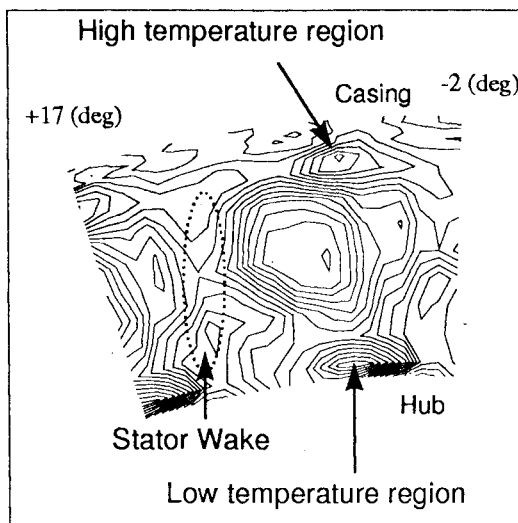
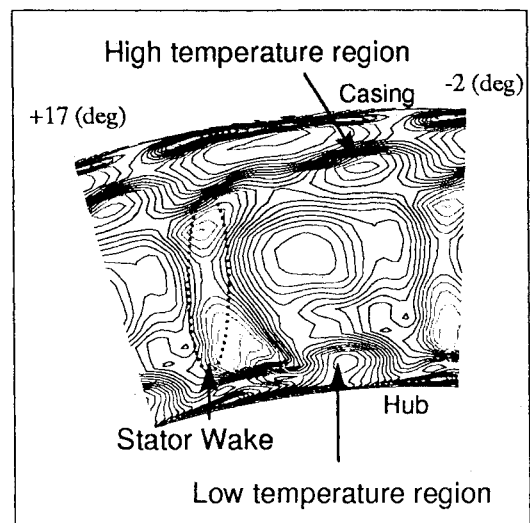


図3 収束履歴



(a) 試験値



(b) 計算結果

図4 動翼後縁から78%コード後流での時間平均した絶対全温コンター図の比較

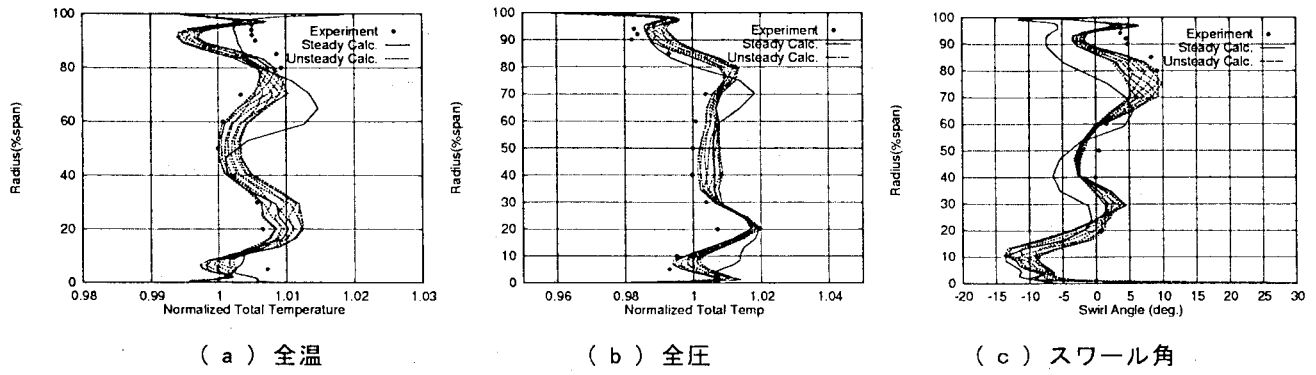


図5 動翼後流での時間平均および周方向平均した各物理量のスパン方向分布の比較

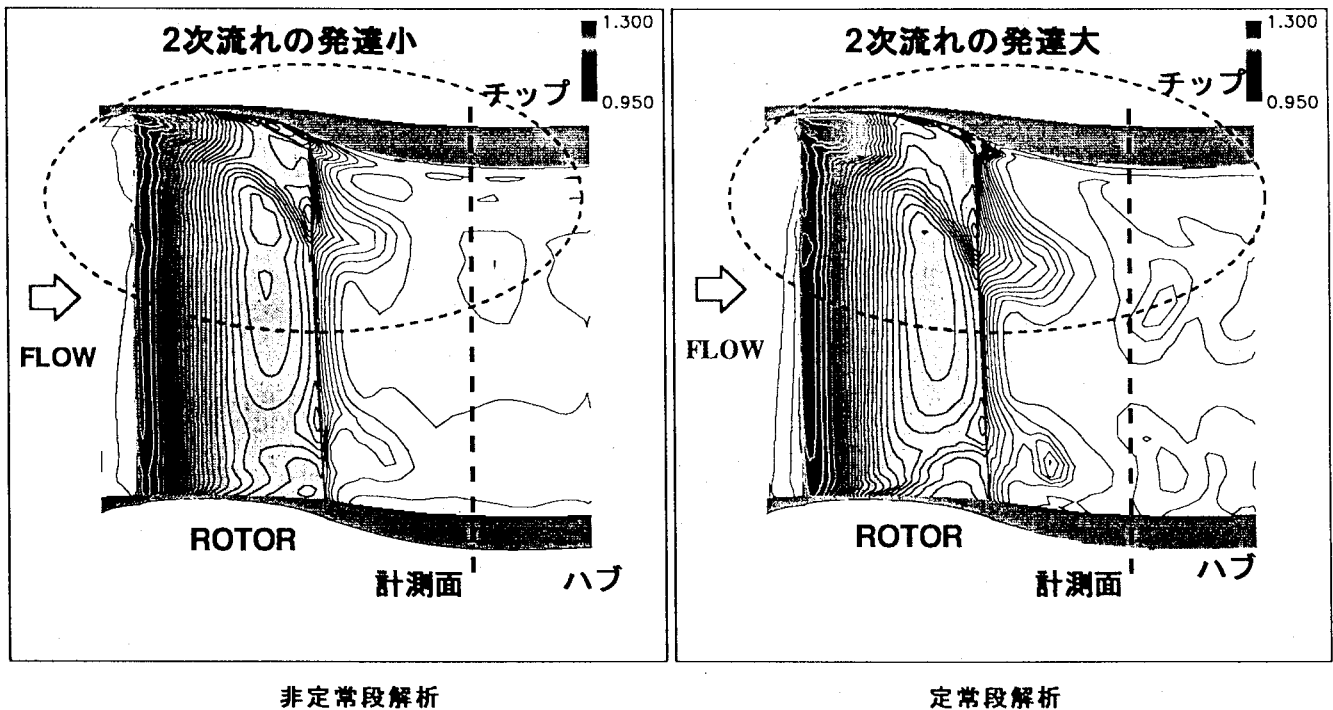


図6 動翼負圧面近傍の等全温線図

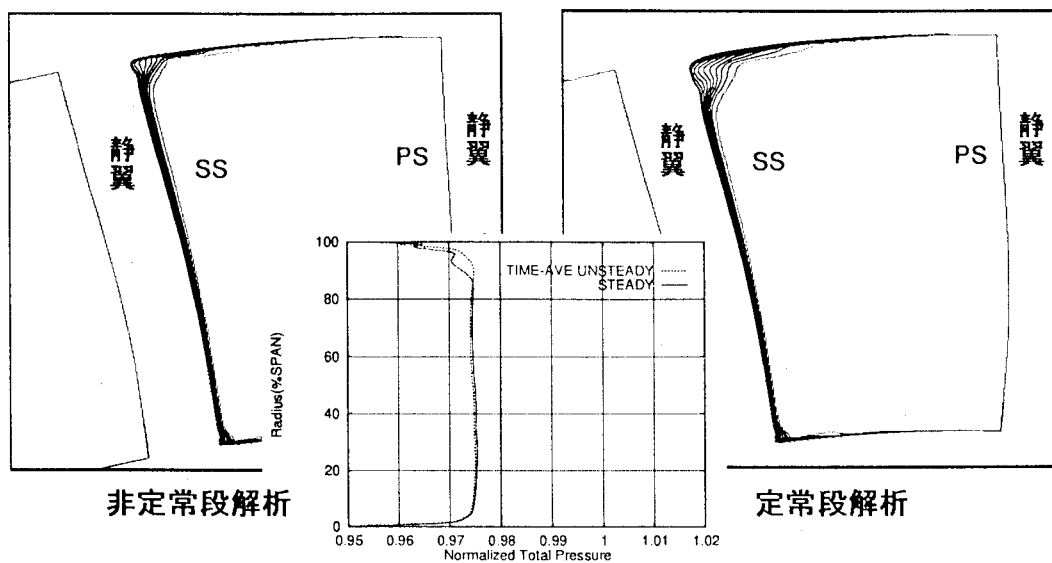


図7-(1) 静翼内全圧分布 (流れ方向 1/2 コード付近: 後視)

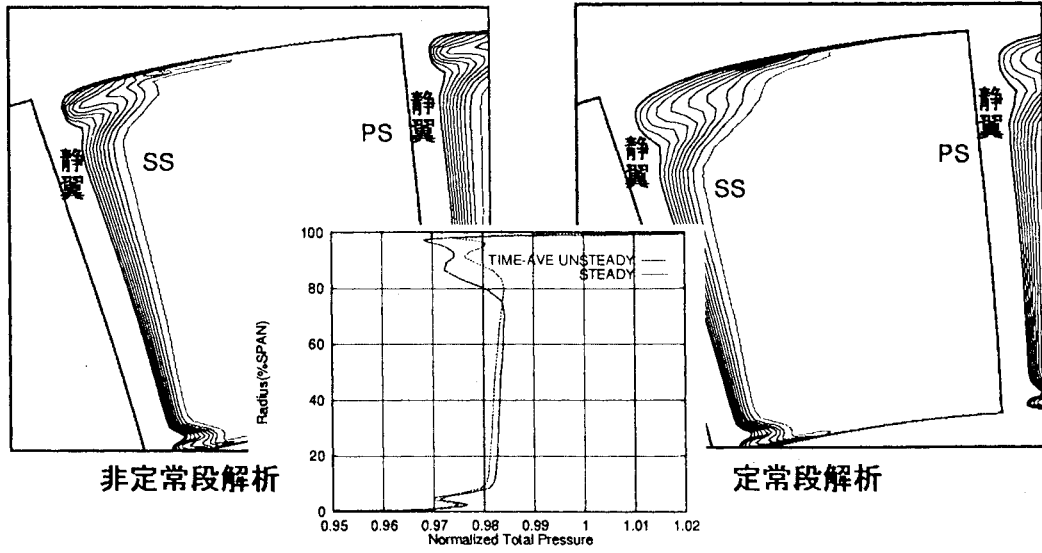


図7-(2) 静翼内全圧分布 (流れ方向 3/4 コード付近 : 後視)

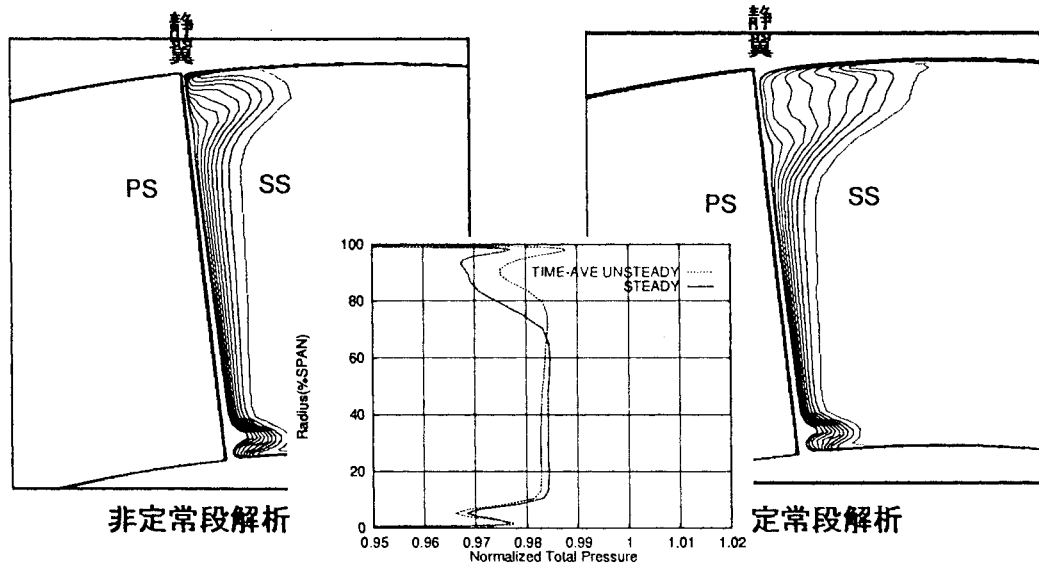


図7-(3) 静翼内全圧分布 (流れ方向 T.E.付近 : 後視)