

数値風洞による遠心圧縮機インペラーアディフューザ翼列の 非定常数値解析

山根 敬*

An Unsteady Simulation of a Centrifugal Compressor Stage Using the NWT

by

Takashi YAMANE

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

Numerical calculations have been performed for the analysis of the impeller/diffuser interaction flow field of a centrifugal compressor using the Numerical Wind Tunnel (NWT) system. The three dimensional unsteady simulation took enormous calculation time but the parallel processing on the NWT solved its problem. The calculation using 16 processor elements (PE) achieved 11 times faster speed than on a single PE.

1. 緒 言

圧縮機の動翼と静翼の非定常数値解析は干渉の効果が及ぼす翼列性能への影響の解明に寄与すると期待されているが、膨大な計算時間を必要とすることを考慮するとあまりに不経済と言わざるを得ず、動翼と静翼の組合せの全体的な性能評価を目的として数値解析をする場合は、動静翼接続境界で翼ピッチ方向に平均することによる定常的段解析で全体性能を調べる方法が行なわれてきた。この定常解析による結果は、現実の非定常現象の時間平均結果と比較してそれほど矛盾するものではなく、費用対効果を考えると経済的であると言つうことができる。

しかしながら、粘性の影響を考慮した時、前置翼列からの流れに大きな剥離域が存在する流れ場の場合では、定常段解析では剥離部分が平均化されてしまい、後置翼列への影響が考慮されなくなる。特に遠心圧縮機で

はインペラーアウトletsにおいて、多くの場合大きなWake領域が翼の負圧面側のシュラウド寄りに現れることが知られており、このWakeのディフューザ翼列の流入角への影響は無視できない。筆者はこれまでに遠心圧縮機の非定常数値解析を行ない、定常段解析結果と比較することによって、両者の結果の違いを明らかにしてきた¹⁾。しかし膨大な計算時間のために数多くの条件での解析は困難であった。

しかし数値風洞の導入はその問題を解決した。1つの要素計算機(PE)が富士通 VP400 に匹敵する性能をもつ数値風洞は、1PE の利用では従来の VP シリーズ上で開発されたプログラムをほとんどそのまま使用でき、またプログラムを並列化することで複数の PE を使ってより速く計算結果を得、またより多くのメモリを使うことができる。本報告では、数値風洞における数値解析コードの並列化手法を紹介し、その成果について述べる。

*航空宇宙技術研究所

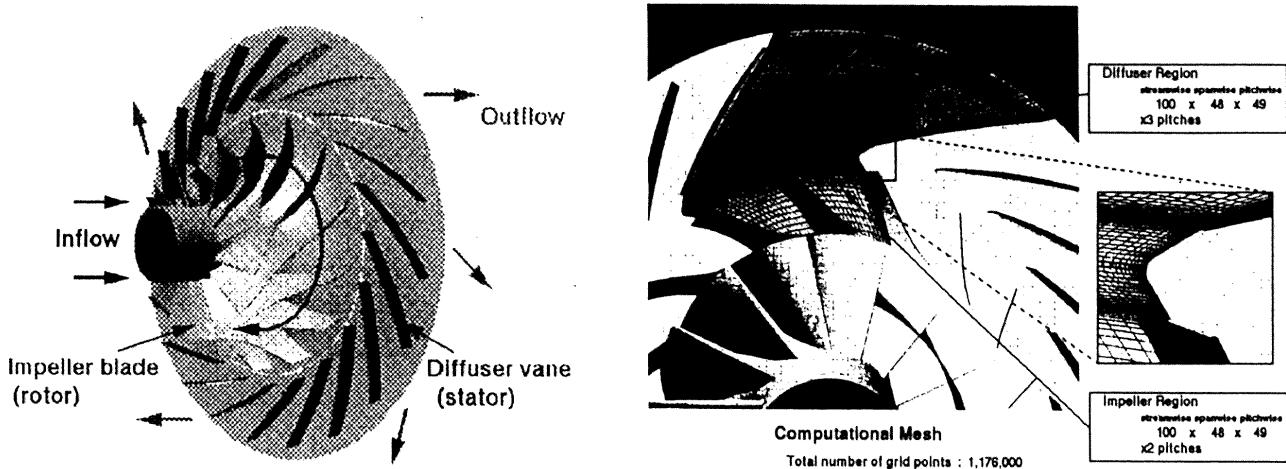


図 1: 遠心圧縮機と計算格子

2. 計算モデルと数値解析手法

図1に計算対象とした遠心圧縮機と計算格子を示す。数値解法には、Chakravarthy-Osher の TVD 法を基本に、流束制限関数に Differentiable limiter を使用する手法を用いた。また、時間積分には LU-ADI 法を用いた。乱流粘性には Baldwin-Lomax の代数モデルを使用している。

計算対象とした圧縮機のインペラーダイамeterは 136mm で、回転数は 70000rpm とし、ディフューザ出口静圧を変化させたいいくつかの作動条件での解析結果を得ることを目標とした。格子点数はインペラーディフューザとともに翼間 1 ピッチあたり $100 \times 48 \times 49$ であり、インペラーディフューザの接続部では 1 格子分重ね合わせて、1 タイムステップ毎に値をやりとりする。定常解析の場合はピッチ間平均した値を相対系-絶対系の変換をして相互に渡すため、翼枚数に関わらず計算にはインペラーディフューザとともに 1 ピッチあれば十分であるが、非定常計算ではインペラーダイамeterの回転に伴って周方向の格子点は移動するので最寄りの格子点の値から補間する。本研究ではインペラーワーク翼 14 枚、ディフューザ翼 21 枚のモデルについて解析を行なったので、実際に必要な計算領域はインペラーワーク 2 ピッチ、ディフューザ 3 ピッチである。したがって全計算領域は 5 つに分割されており、各領域を順に計算した後境界条件の処理で接続する。

3. 並列化手法

本研究の計算対象の場合は、並列化手法として以下の 2 つの方法を検討した。

・翼ピッチを並列に処理する（図 2 左）

もともと 5 つの計算領域に分かれているので、それを並列化すれば良い。この方法の利点は、

- プログラミングが容易

という点にあるが、一方で、

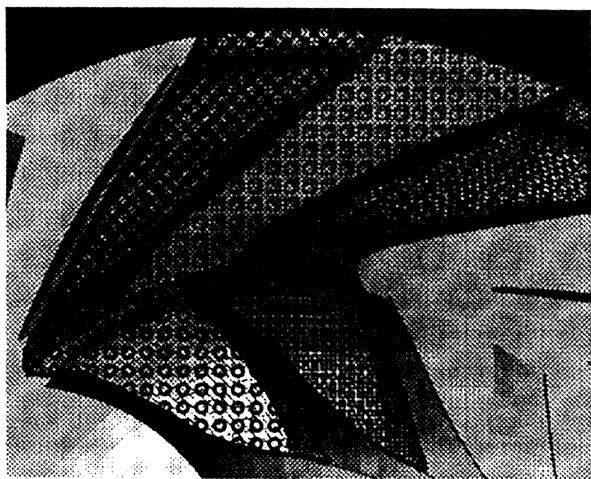
- 使用する PE 台数は常に 5 台であるため、それ以上高速化できない。
- 一つの翼ピッチ間の格子点数は 1PE のメモリ容量で制限される。
- 単独翼列の計算では並列計算できない。

という欠点がある。

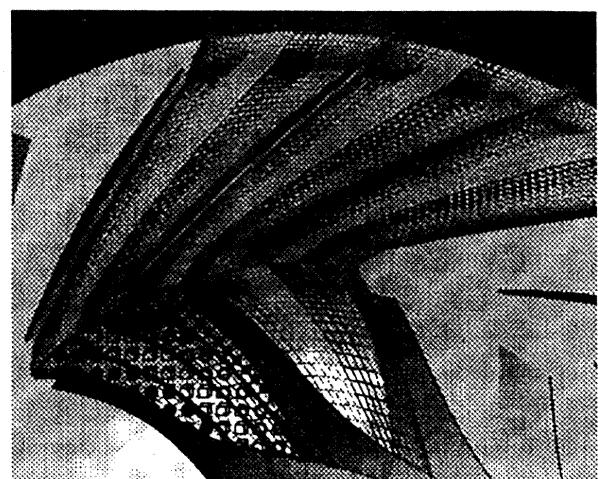
・一つの翼間を複数の PE で処理する（図 2 右）

そしてその一方で各計算領域はこれまでどおり順に計算する。この方法ならば、

- より多くの PE を利用でき、前記の方法より高速化可能。
- 計算領域の数に左右されないため、段解析や単独翼列解析でも並列化による高速計算ができる。
- PE 台数の選択に自由度がある。



Decomposition of Multiple Regions



Decomposition of Single Region

図 2: 並列処理のための空間分割方法

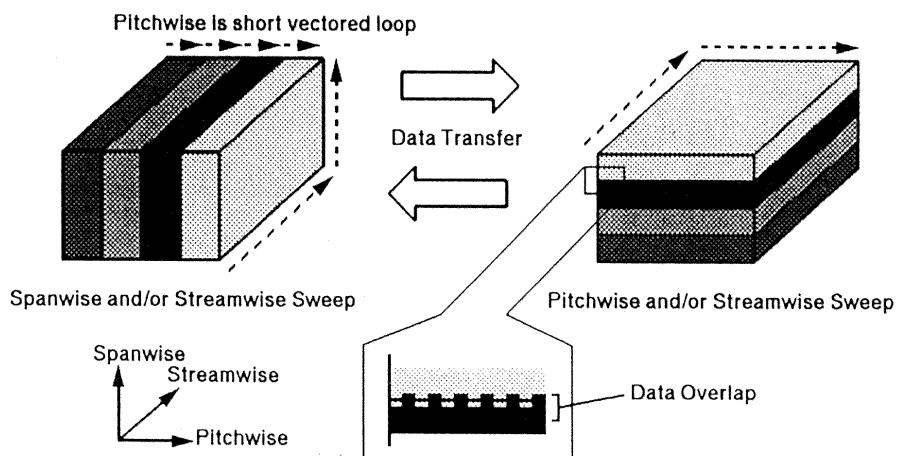


図 3: 計算空間分割の概念図

- 格子点を増してメモリが不足すれば、PE台数をふやせばよい。
- と、前者の方法より多くの利点がある。しかしながら、
- プログラミングは複雑である。
- データ転送によるオーバーヘッドが前者の方法よりはるかに大きい。
- 作業用にメモリを消費する。

という欠点も挙げられる。

以上の点を考慮し、高速化を優先して後者の手法を選択した。一つの計算領域内の並列化処理を模式的に書くと図3のようになる。ここでは4PEによる分割を

例としているが、分割方向の格子点数が許す限りPE台数は増やすことができ、実際の計算では後述の通り最大16PEを使用した。まず、流れ方向と翼スパン方向のDO LOOPは図の左側のように分割された空間で処理される。一方、翼ピッチ方向のLOOPについては、左の分割方式では4つの短いLOOPに分けられているが、それぞれのPEがベクトルコンピュータでもある数値風洞では、短いDO LOOPはベクトル性能を悪化させるため計算速度低下の一因となる。そこで図の右側のように計算空間を分割し直し、データをすべて転送してから翼ピッチ方向の計算を行なった後、ふたたび左の分割へデータを再転送した。この場合、ひとつの配列変数に対して二つの分割方式が必要

なため実際にはそれぞれに変数を宣言しなければならず、必要なメモリは2倍になるうえデータの転送の待ち時間が発生する。さらに、粘性計算においては各格子点の上下左右前後すべての点の情報が必要になるので、分割された境界上でオーバーラップ領域を設けて、境界+1の情報を各PEが保持しなければならない。このオーバーラップの領域もメモリをよけいに消費し、また値を適宜修正するために待ち時間が発生する場合がある。これらのオーバーヘッドは、分割による境界の数が増すほど大きくなるので、PE台数を増やすほど並列化による速度向上が次第に頭打ちになることが予想できる。

さて、究極的には前記の2つの並列化手法を組み合わせることも可能であるが、プログラミングがさらに複雑になるため今のところ試みていない。

4. 並列化の効果と数値解析結果

図4に示すのが本研究での計算例の場合のPE台数と速度比の関係を示すグラフである。16台のPEを使えば速度比は16倍になるのが理想であるが、前述の通りオーバーヘッドが発生するので現実の速度比は理想値よりも小さくなる。また、格子点数がPE台数で割り切れるかどうか、並列化の効果を左右することになる。本研究のケースでは、翼スパン方向の48の格子点および翼ピッチ方向の49の格子点を分割したので、16PEのケースでは両端の境界の点を除けば各PEがほぼ均等に3格子点を受け持つことになり、速度比で11倍とまことに性能を発揮した。しかし、これ以上は使用PE台数を増やしても1台あたりの格子点数が2ないし3となるため、速度向上はほとんど望めないと推定される。

最後に計算結果の一例を示す。これまでにディフューザ出口静圧をパラメータとして5条件での非定常解析を行なったが、出口静圧が低いと流れはディフューザ翼列のスロート部でショーケした。図5はショーケし始める条件での結果を、ミッドスパンの絶対マッハ数等高線で表示している。インペラーウィングのディフューザ翼列に対する相対位置の変化によって、ショーケにともなう超音速領域が周期的に出現したり消滅したりす

る様子がとらえられた。しかし、定常段解析ではこのような周期的変動は当然ながらまったくあらわれない。

5. まとめ

遠心圧縮機インペラーやディフューザの非定常解析を数値風洞システム上で並列化したプログラムによって行なうことにより成功し、これまで現実的ではなかつた多くの条件での計算が可能になった。また、16PEを使用して最大11倍程度の計算速度の大幅な向上を達成できた。

これ以上の高速化は現在の格子点数では効率的でないことが推定されたが、さらにプログラムが複雑になることをいとわなければ、図2で示した2つの並列化手法を組み合わせることにより、80PEを使用して50倍以上の計算速度を得られる可能性がある。

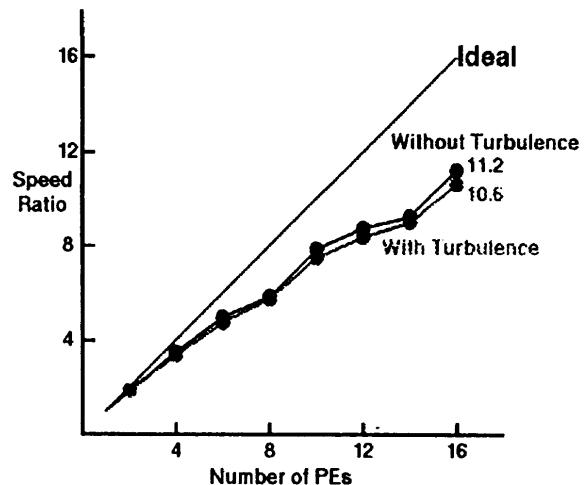


図4：並列化の効果

参考文献

- 1) 山根 敬、長島 利夫「遠心圧縮機の内部流れに関する数値解析」、第10回航空機計算空気力学シンポジウム論文集、NAL SP-20, 1993

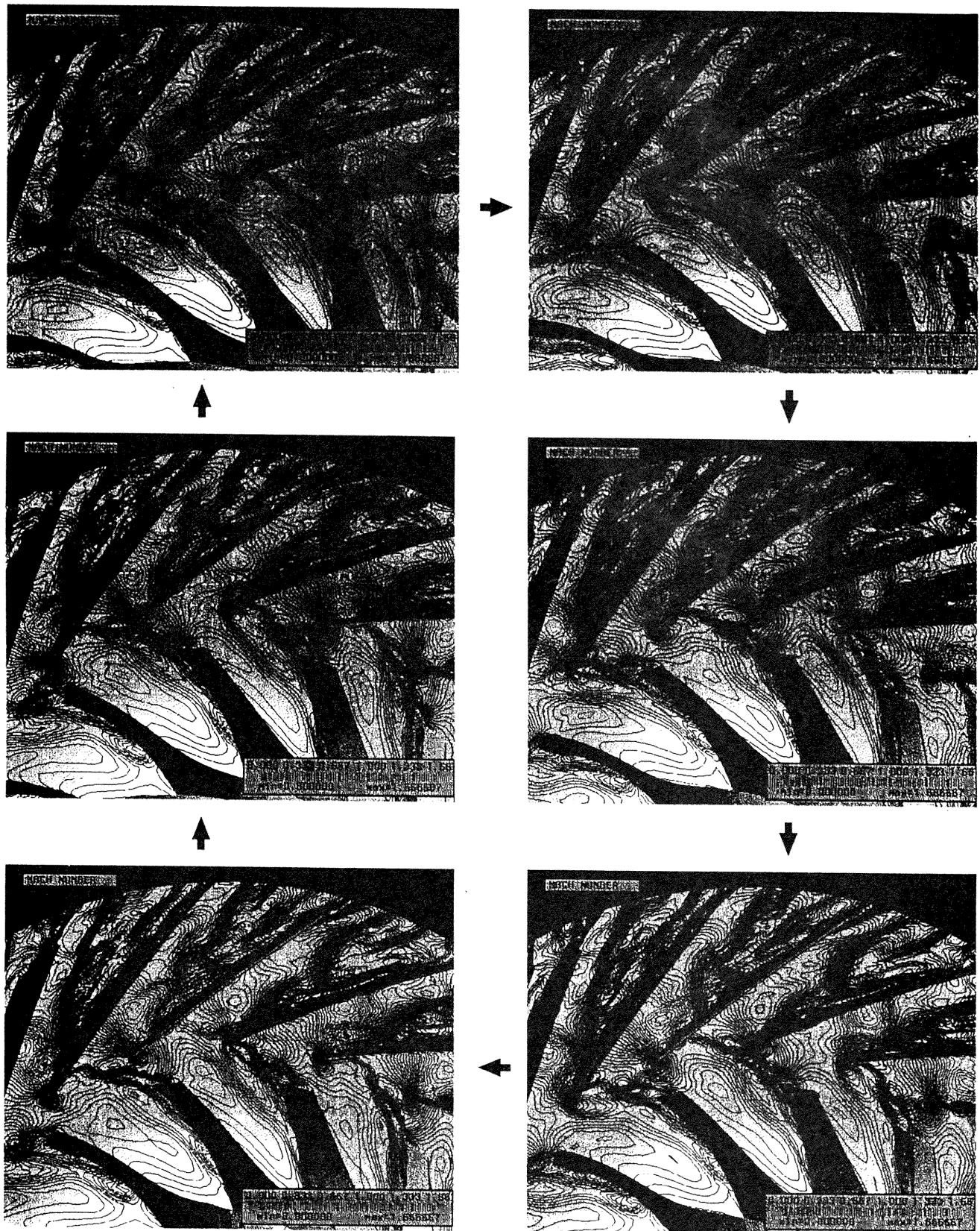


図 5: 非定常計算結果（ミッドスパンでのマッハ数）

