

タービン流れの非定常シミュレーションの可視化について

才木一寿^{*1}, 松本秀樹^{*2}, 西澤敏雄^{*1}, 野崎理^{*1}

Visualization for Unsteady Simulation of Turbine Flow Field

by

Kazuhisa SAIKI^{*1}, Hideki MATSUMOTO^{*2}, Toshio NISHIZAWA^{*1}, Osamu NOZAKI^{*1}

ABSTRACT

The unsteady flow phenomenon in turbomachinery changes drastically with changing operating condition. It is important that the various flow phenomena are predicted accurately from unsteady simulations of complicated flow field in blade rows. The period and scale of unsteady phenomena should be known for simulation in advance. In this study, the visualization system, which can visualize the unsteady flow phenomena during computation, has been applied to analyzing turbine flow field. The system which was conducted for multi-block parallel computing visualized effectively the unsteady flow behavior inside a turbine stage such as Karman vortex shedding, nozzle-rotor interaction, periodic separation occurrence on the rotor blade, etc.. In this paper, the advantage of the visualization approach is clarified.

1. はじめに

ターボ機械の内部流れにおいては羽根車の作動条件に伴って流れ現象が大きく変化するが、妥当な数値シミュレーションを実施するためには多くの計算パラメータを適切に定める必要がある。特に、発生する流れ現象に対して、格子解像度や時間刻みに関して予め充分考慮しなければならない。しかしながら、非定常現象のスケール(周期性や規模)について予測した上で数値シミュレーションを実施することは難しい。

流体機械内部で発生する未知の非定常現象を解明することを目的として数値シミュレーションを実施する場合、一般に試行錯誤的に解析作業が進められることが多い。すなわち、数値計算・可視化作業を繰り返しつつ、非定常現象の事象にあわせて計算格子や境界条件の改良を施していく。この時、流れ現象の把握のために数値計算の結果データを時系列的にディスクに一旦保存して流れ場の時間的変化を調べなければならない。さらに、羽根車の作動状態等を変化させるようなパラメトリックスタディを実施すると、ディスクに保存された多量の時間履歴データから現象を適切に把握しつつ、数値解析を進める必要がある。

ここで、数値計算実行中に発生する非定常流れ現象をある程度リアルタイムに把握することが出来るならば、多量の計算結果をストアし後処理を施すための負荷が軽減される。さらに発生する諸現象を迅速に捉えることが可能となるため、解析作業をより効率良く進めることが出来ると期待される。

そのため、本報では数値計算の実行中に非定常流れの可視化が可能なシステムをタービン非定常流れのシミュレーションに適用した結果について報告する。

2. 数値計算および可視化法

航空宇宙技術研究所の大型計算機(VPP300)において、タービン非定常流れの数値シミュレーションに対してリアルタイム可視化を行った手法について以下に記す。

まず、計算対象であるタービンの計算格子をFig.1に示すが、計算対象のタービンはノズル48枚、動翼96枚から成る。計算格

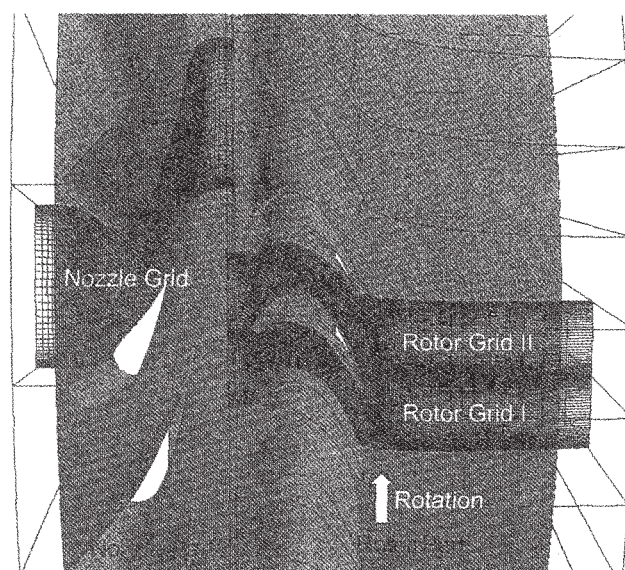


Fig.1 Computational Grid

^{*1} 航空宇宙技術研究所 ^{*2} NEC 情報システムズ

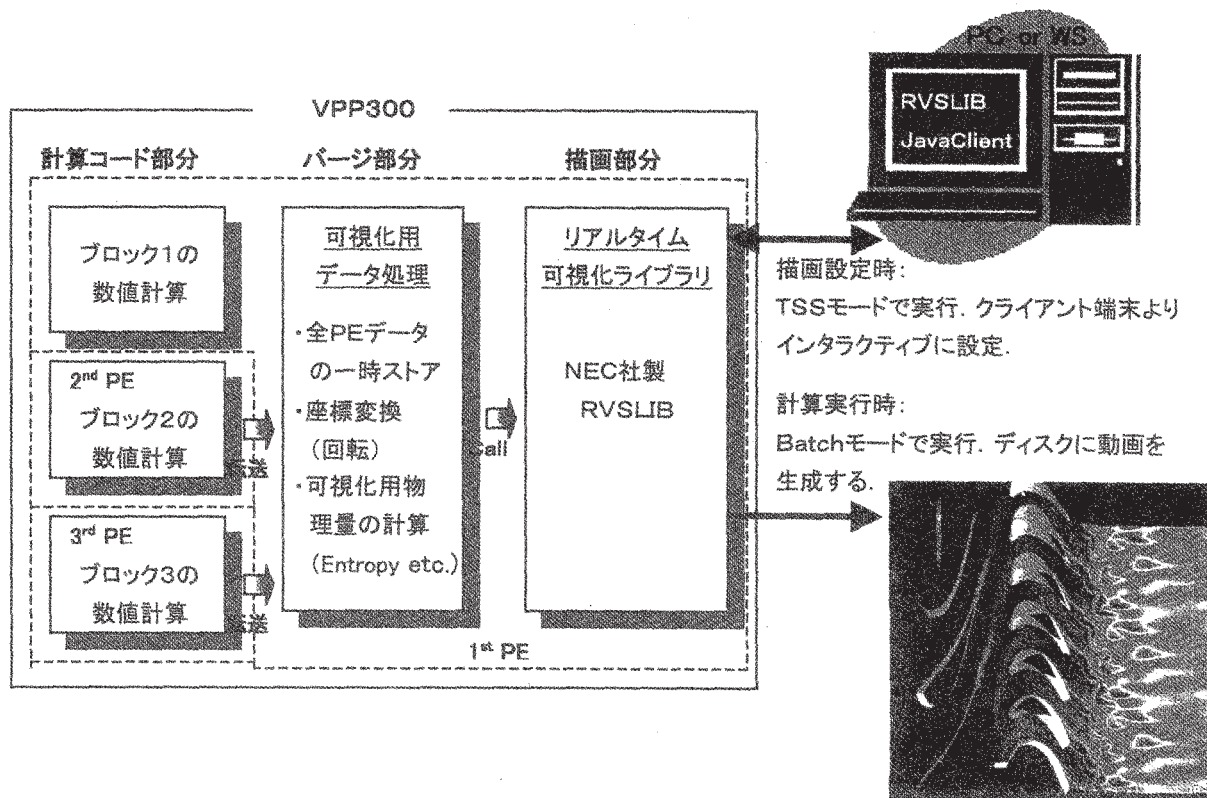


Fig.2 Numerical Computation and Visualization System

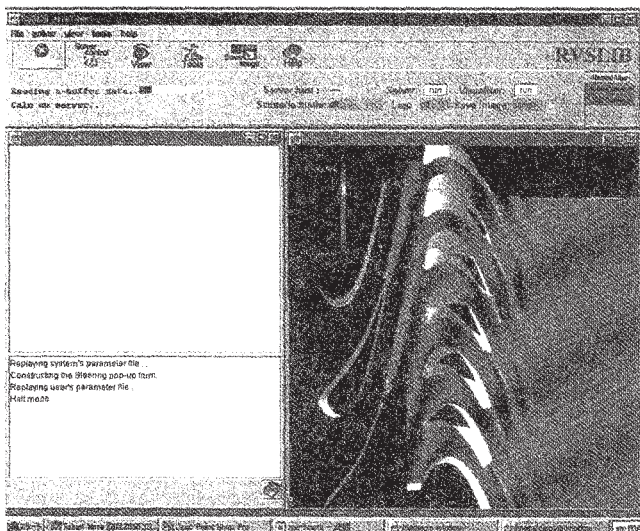


Fig.3 Parameter Set-Up for Real-time Visualization by Remote Connection between Client PC and Super-Computer

子はノズル部(101×61×61)が1ピッチ、動翼部(115×61×61)が2ピッチの計3ブロックから構成される段解析用マルチブロック格子である。数値計算には多段翼列用の非定常CFD並列計算コード[1][2]を用いた。Navier-Stokes 方程式の離散化は差分法であり、対流項は Chakravarthy-Osher のTVDスキームにより評価される。連立一次方程式は LU-ADI 法により解かれ、Newton 反復を行うことによって時間積分される。なお、乱流モデ

ルは Baldwin-Lomax モデルを用いた。

可視化には NEC 製リアルタイム可視化ライブラリ RVSLIB[3][4][5]を使用した。大型計算機と端末計算機にそれぞれサーバソフトとクライアントソフトをインストールすることにより、ソフトによるリモート可視化処理を実現出来るが、この可視化ライブラリの利点である。

大型計算機がベクトル型分散メモリ環境であるため Fig.2 に示すバージ部を作成した。数値計算はブロック毎に各PEで CFD コードにより並列計算されるが、可視化ライブラリによる描画は特定の単一PE上で行われる。そのため、時間積分により解かれた密度、運動量ベクトルおよびエネルギーを描画PEのメモリへ転送する。さらに、ノズルに対して動翼が相対的に回転しているが、可視化に際して動翼部の座標および運動量ベクトルに対して回転座標変換を施して RVSLIB ライブラリに必要なデータを受け渡す。RVSLIB における可視化設定は、TSS モードにて大型計算機とソケット通信を行うことにより、手元の端末計算機からインタラクティブに設定出来る。Fig.3 はクライアントPC (Windows マシン) から大型計算機に接続し、描画パラメータ設定を行っている例である。動画作成の際にはこの描画設定ファイルを用いて、Batch モードの長時間 JOB を投入する (Fig.2)。計算の進行とともに動画ファイルが生成されるので、必要に応じて計算進行状況のモニタリングが可能である。また、手元の端末計算機にダウンロードした動画ファイルを再生することにより、非定常流動現象をすぐに把握することが出来る。

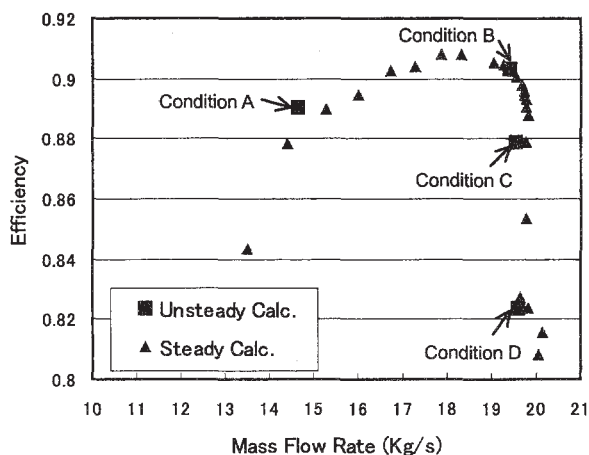


Fig.4 Efficiency Characteristics of Turbine

3. 可視化計算結果

タービンの効率特性曲線を Fig.4 に示す。横軸が質量流量であり、縦軸は動翼列の断熱効率を表している。質量流量が増加するに従って、効率が徐々に上昇し極大値に達する。さらに、この最大効率点より質量流量が増加すると、効率は低下し始め、質量流量 19kg/s 付近から効率が急激に低下する。

Fig.4 には4つの流量条件に対する非定常計算により得られた効率値が併せてプロットされているが、Condition A が最大効率点より低流量側の作動状態であり、Condition B, C および D が最大効率点より大流量側の作動状態である。構築した計算・可視化システムを適用してこれら4つの作動条件におけるタービン流れの可視化計算を実施した。翼通過周期の2倍の周期 T (ノズル 1 枚に対して動翼が2枚通過する周期)の時間について可視化計算を行い、時間積分刻みはこれを 3200 分割した $T/3200$ と設定した。10ステップ毎に前章で述べた可視化用データ処理および描画を行っているので、大型計算機において各計算条件毎に 320 回の動画生成のための描画作業がリアルタイムに行われていることになる。

Fig.5 から Fig.8 が生成した動画のスナップショット画像であり、ミッドスパンにおけるエントロピー分布を表示している。計算はノズル部 1PE(1 ピッチ)、動翼部 2PE(2 ピッチ)で周期境界条件を課することで計 3PE で行ったが、可視化の際は表示のためにコピー処理を施しノズル部について2ピッチ、動翼列については6ピッチの描画作業を行っている。

まず、Fig.5 に示す Condition A のスナップショット画像であるが、ノズル後縁より下流へ延びているノズルウェークが明瞭に認められる。このノズルウェークは、ノズルに対して相対的に回転している動翼と干渉して切断され、動翼流路内を歪みながら下流へと流れていく。また、この切断されたウェークは動翼下流に流れ去ってゆくことがわかる。さらに、ノズル後縁より規則的にカルマン渦が巻き上がるため、ノズルウェーク内にカルマン渦列の構造を呈していることが可視化されている。一方、この Condition A の作動状態では動翼列に流入する流れの質量流量が小さいた

め、動翼のインシデンスが負の値をとる。その結果動翼圧力面の前半部には圧力面境界層の流れのはく離が生じることになる。Fig.5 において現れている圧力面側の高いエントロピーを示す領域が、この圧力面はく離域である。

Fig.6 は最高効率点より流量の大きい Condition B 作動状態 (Fig.4)における同様の可視化結果である。Condition A (Fig.5)と同じく、ノズル後縁よりカルマン渦列構造を呈するウェークが動翼列と干渉する様子が現れている。一方、翼負荷の増大に伴って、動翼ウェークにおけるエントロピー値が増加している。

さらに流量条件の大きな状態である Condition C と D の数値計算結果が Fig.7 および Fig.8 である。これらの作動点は効率が急激に低下する領域 (Fig.4)に位置しており、動翼が失速に至る不安定領域にあるといえる。Fig.7 と Fig.8 では動翼のウェークが著しく発達しており、ウェークの非定常性が顕著に認められる。とりわけ、Condition D においては Fig.8 のように動翼ウェークが時間的とともに大きく蛇行する様子が現れている。さらに、この作動領域ではインシデンスが増加するため翼負圧面の非定常はく離が発生する。Condition D におけるミッドスパン面上の相対速度ベクトル (動翼固定座標系)とエントロピー分布を表した図を Fig.9 に示す。Fig.9(a)から(b)にかけては、動翼翼負圧面前部に境界層のはく離が生じはじめ、前縁部にはく離泡が形成されるまでの過程である。相対速度ベクトルによると、このはく離泡内部の速度ベクトルが渦状のパターンを示していることから、はく離泡内にはく離渦が生じていると考えられる。この渦構造を内包するはく離泡が、時間の経過とともに下流へと移流する様子が認められる (Fig.9(b)~(d))。Fig.7 と Fig.8 の動翼前縁近傍に現れているエントロピーが大きな領域がこのはく離泡であるが、その発生と消滅は正確な周期性 T (翼通過周期の2倍)を持つ。動翼の非定常はく離の発生・移流プロセスが、ノズルウェークが通過する周期に同期するためである。

4. まとめ

ベクトル大型計算機において数値計算実行中に流れの可視化が可能な計算・可視化システムを構築し、タービン非定常流れシミュレーションに適用した。可視化結果には以下の非定常流動現象が認められた。

- タービンノズルより放出されるカルマン渦列を伴うノズルウェークが動翼列と干渉し、動翼流路を下流へ移流する。
- 流量が増加するに従って動翼ウェークの非定常性が強まり、時間とともに蛇行する。
- 高負荷作動(高流量)条件下の動翼負圧面において、ノズルウェークの通過周期と同期した非定常的な前縁はく離泡が発生する。

以上のようにタービンのノズル・動翼流れにおける非定常流れ現象が効率的かつ明瞭にとらえられたことから、本計算・可視化方法の有効性が確かめられた。

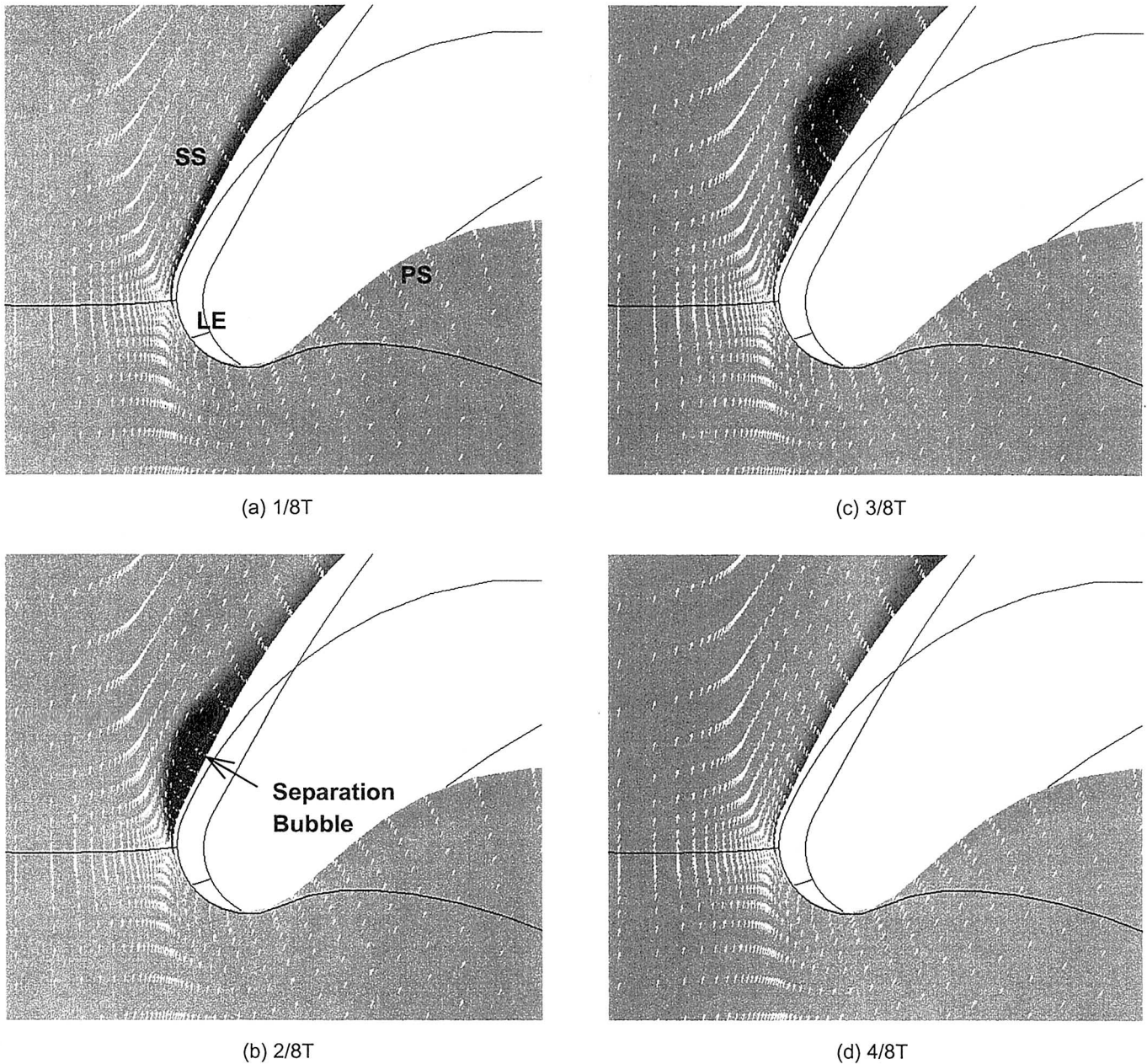
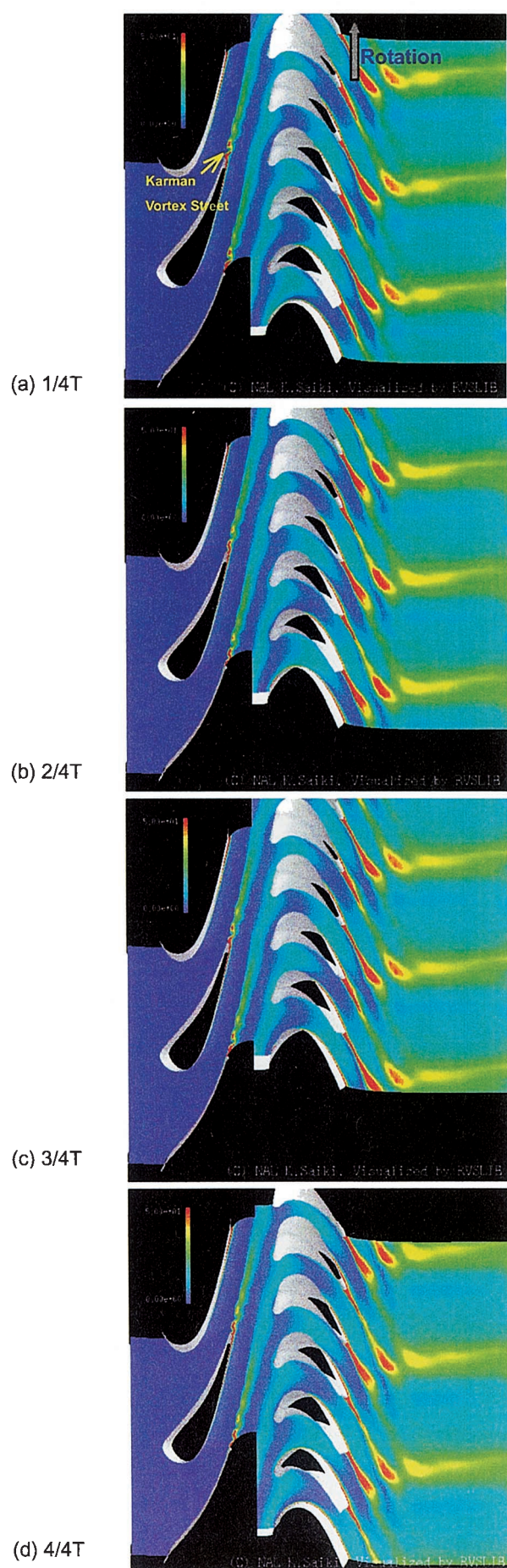
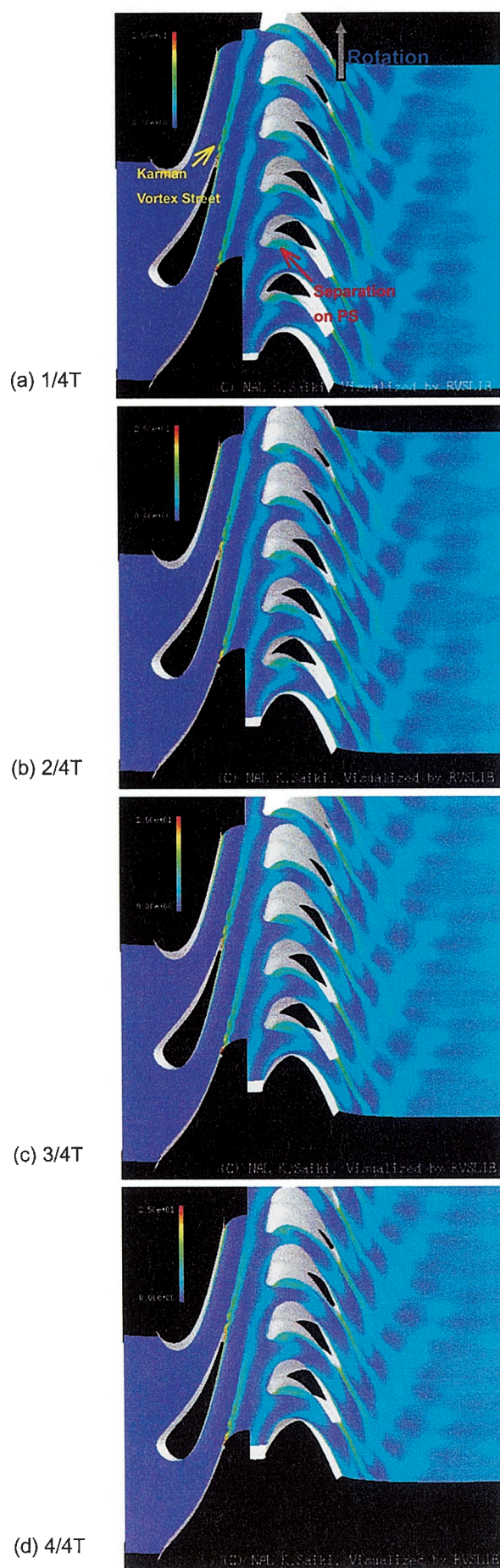


Fig.9 Entropy Distribution and Relative Velocity Vectors around Rotor at Midspan in Condition D

参考文献

- [1] Nozaki, O., Kikuchi K., Nishizawa, T., Matsuo, Y., Ooba, Y. and Kodama, H., "Unsteady Three-Dimensional Viscous Flow Computations of Multiple-Blade-Row Interactions," Proc. of 14th International Symposium on Airbreathing Engines, ISABE Paper 99-7032, 1999.
- [2] 野崎理・児玉秀和, 「ターボファンエンジンの大規模流れ解析」, ターボ機械, 第28巻, 第12号, pp.35-40, 2000.
- [3] 姫野龍太郎・松本秀樹・土肥俊, 「回転飛行する野球ボール周り流れの数値計算」, 第13回数値流体力学講演要旨集, pp.237, 1999.
- [4] 武井利文・松本秀樹・土肥俊, 「大規模非定常数値シミュレーションのリアルタイム可視化ー並列計算サーバによる可視化方式の実用化に向けてー」, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No. SIG 8(HPS 2), pp.107-118, 2000.
- [5] 小野謙二・松本秀樹・姫野龍太郎, 「ボリュームレンダリング法の車室内空調設計への適用」, 第14回数値流体力学講演要旨集, pp.124, 2000.



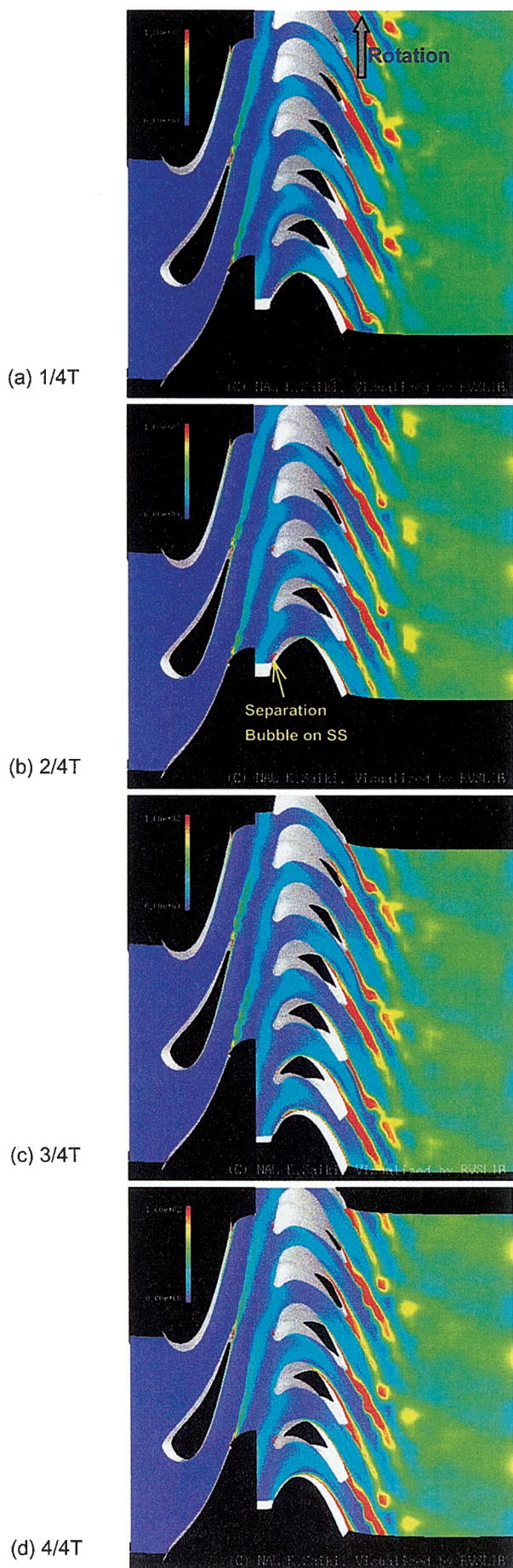


Fig.7 Condition C

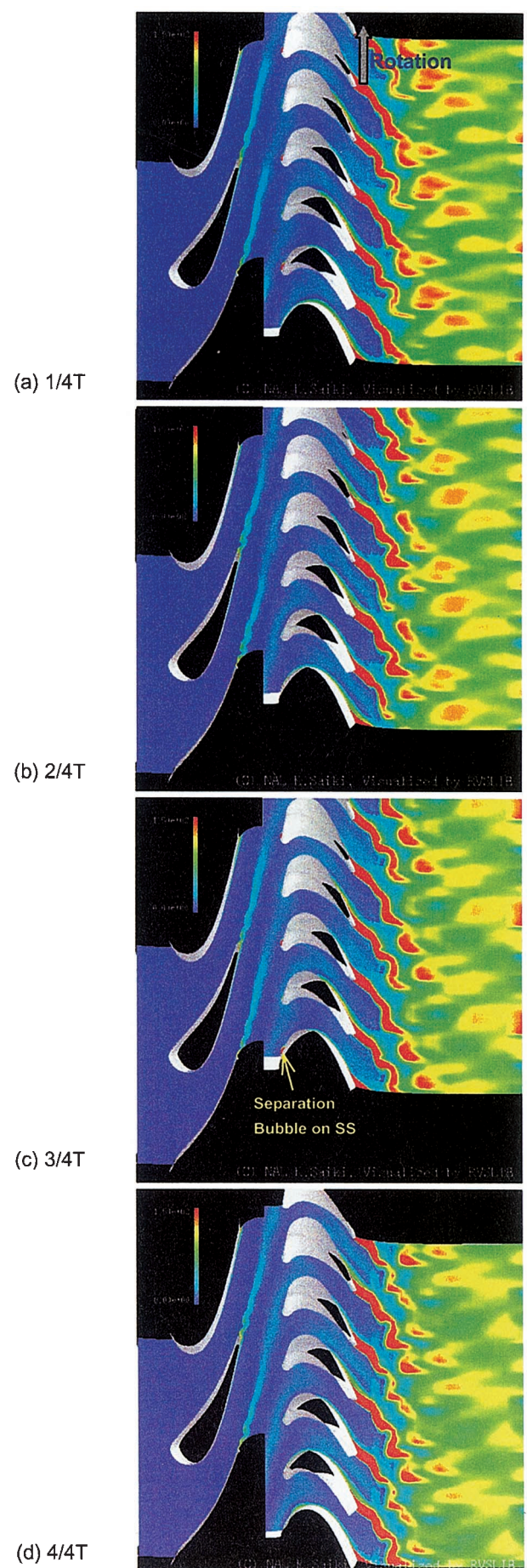


Fig.8 Condition D