

# 圧縮機動静翼干渉場における サンドエロージョン現象の三次元数値シミュレーション

鈴木 正也

東京理科大学 工学部 機械工学科

**目的:** サンドエロージョンとは、固体粒子が壁面に衝突することにより、壁面が機械的損傷を受け、その一部が脱落していく現象である。この現象は固気二相流と壁面固体材料との干渉によるマルチフィジクス連成問題である。航空用ジェットエンジンや発電用のガスタービンは、設計や運転条件によっては、深刻なサンドエロージョンの被害を受ける。ジェットエンジンの場合、特に圧縮機で問題になる。設計段階からサンドエロージョンによる被害が予測できれば、性能低下を防ぐことが可能となり、ひいてはシステムのオーバーホール回数を減らすことが出来るため、多くの研究が行われてきた。この種の問題の実験は、製品の高度化による広範囲にわたる空力的・熱力的条件に対応する試験設備が要求される上、試験のたびに製品が破壊されるため、非常にコストが高い。このため、数値シミュレーションが有効であると考えられる。本稿では、単段軸流圧縮機におけるサンドエロージョン現象の三次元数値予測<sup>(1)</sup>について報告する。

本計算では、マルチブロック構造格子法を用いて、圧縮機動静翼干渉場の計算を行っている。マルチブロック法の計算結果を可視化するのは面倒な作業である。さらに、ローターの回転により、ブロック間の相対的な位置が時間的に変化するため、可視化作業はさらに煩雑になる。また、運転条件や幾何形状を変えたパラメータ・スタディを行うため、大量の計算結果を処理することになる。従って、これらの計算結果を自動的に処理する方法が必要とされる。本研究では、比較的安価な商用可視化ソフトである MicroAVS を用いて可視化を行い、ユーザーの立場から可視化処理の自動化について考察する。

**方法:** 計算手法の詳細は文献<sup>(2)</sup>に示されている。本手法では、サンドエロージョンの予測は、連続相(気体の流れ)、分散相(固体粒子の流れ)、壁面変形の計算の三つのステップを繰り返すことにより行われる。連続相は、圧縮性乱流場を仮定し、Faver 平均された連続の式、Navier-Stokes 方程式、エネルギー式に基づいて計算される。この際、マルチブロック法を用いて構造格子に分割され、有限差分法により離散化される(図 1 参照)。分散相はラグランジュ法により、個々の粒子軌道が追跡される。壁面変形は Neilson-Gilchrist モデルに基づいて計算される。

可視化には MicroAVS Ver. 10.0 Rev. D を用いる。MicroAVS は三次元の可視化を GUI により容易に行うことができ、スクリプト機能を用いることで可視化の自動化が可能である。近年、知的可視化<sup>(3)</sup>のように可視化に関する体系的なやり方が提案されてきているが、研究の現場では経験に頼った可視化が行われることが多い。このように直感的な判断による場合、どのような可視化をするのかを検討するために、GUI は有効である。GUI により可視化の方法を決定した後、大量の計算結果に対して同様の処理を行う。処理の自動化には CUI が有効である。さらに、可視化の再現性という面からも CUI は有利である。ここでは、

MicroAVS のスクリプト機能を用いて、各々のブロックごとの FLD ファイルから MVG ファイルを生成し、全ての MVG ファイルを同時に読み込み、圧縮機全体を可視化する。

**結果:**

代表的な粒子軌道を図 2 に示す。流入した粒子は動翼の前縁あるいは正圧面で衝突し、その運動量のほとんどを最初の衝突で失う。従って、ロータリ流路を抜ける粒子は相対的に低速である。その後、動翼での衝突により減速した粒子は、遠心力によりチップ側へと移動する。このため、粒子の衝突は下流へ進むほどチップ近傍で頻繁に生じ、チップ側でシビアなエロージョンが生じる。また、静翼での衝突速度は、ほぼローターの回転速度によって決まり、粒子の軸方向速度は小さいため、静翼の前縁付近に集中して衝突する。

エロージョンによる翼面の損傷深さを図 3 に示す。翼の前縁から正圧面までエロージョンによるダメージを受けていることがわかる。一方、負圧面にはほとんど損傷は見られない。動翼正圧面は全体的に損傷を受けているが、チップ付近での損傷が激しい。静翼の損傷は

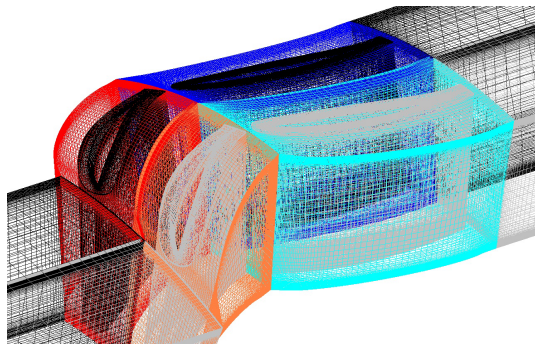
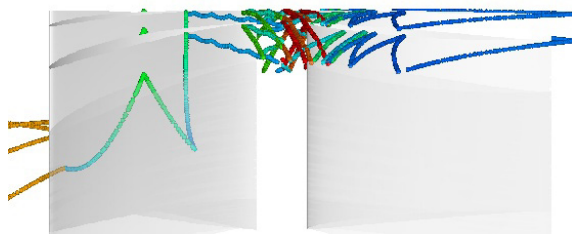
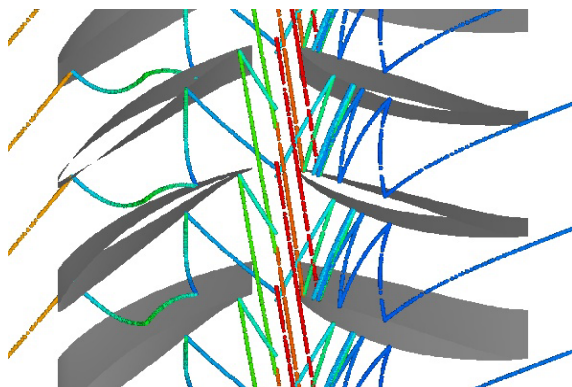


Fig. 1 Computational grid

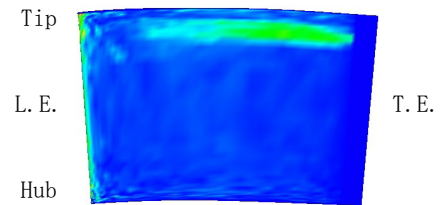


(a) Side view

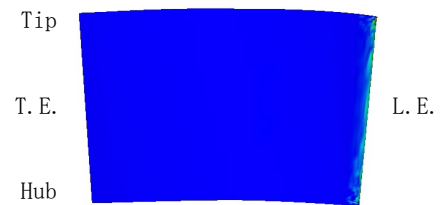


(b) Top view

Fig. 2 Particle trajectory (red: high speed, blue low speed)



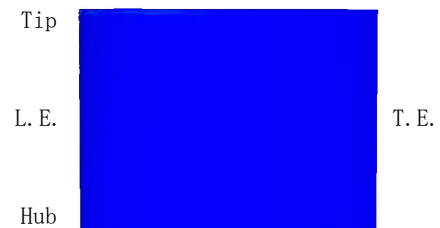
(a) Rotor pressure side



(b) Rotor suction side

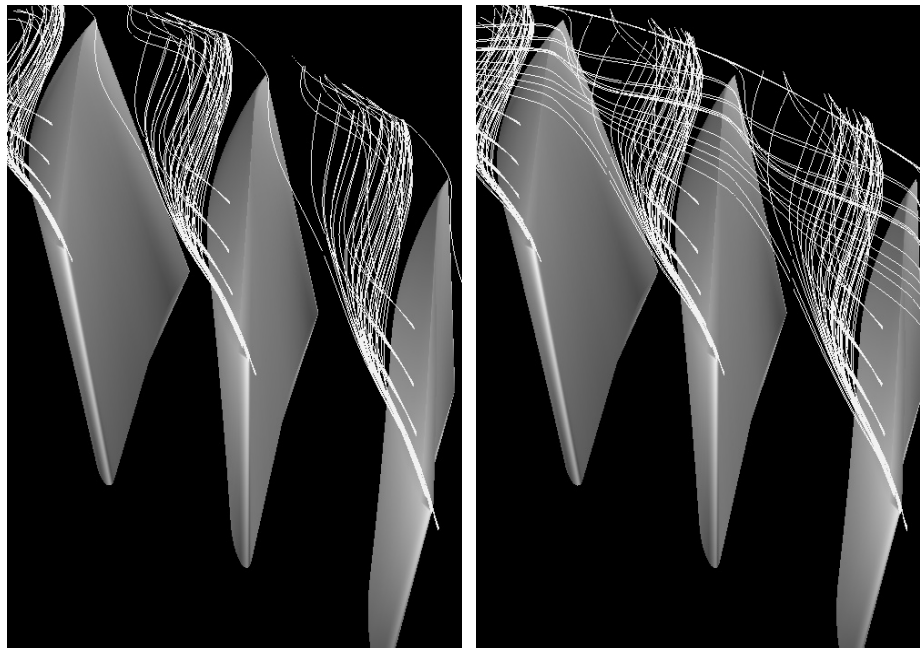


(c) Stator pressure side



(d) Stator suction side

Fig. 3 Depth of erosion (red: deep, blue: shallow)



(a) Before erosion (b) After erosion  
 Fig. 4 Streamline around tip clearance of rotor blade

では正圧面のチップ近傍に限られる。

図 4 は動翼チップクリアランス付近の流線を可視化したものである。エロージョンの発生により流れ渦が強くなっていることが確認できる。前述のとおり、チップ近傍のエロージョンによるダメージが大きいため、チップ付近の流れの変化は性能低下の重要な原因となる。

上記のような結果には多数のマウスクリックが要求され、特にアニメーションを作成する場合は、数百回にも及ぶクリックが必要になる。しかし、スクリプト機能を使用すれば、数回のクリックで計算結果を可視化することができる。

**結論：**単段圧縮機におけるサンドエロージョンを予測し、エロージョン前後における圧縮機の性能変化を再現した。本研究は、寿命の予測や性能低下を抑える設計に役立つと考えられる。MicroAVS のスクリプトを用いた自動化により、マルチブロック法を用いた計算結果の可視化を容易に行うことができた。

#### 参考文献

- (1) Suzuki, M., Inaba, K. and Yamamoto, M., Numerical Simulation of Sand Erosion Phenomena in Rotor/Stator Interaction of Compressor, *Journal of Thermal Science*, Vol. 17, No. 2 (2008), pp. 125-133.
- (2) 鈴木正也, 因幡和晃, 山本誠, 正方断面 90 度バンドにおけるサンドエロージョン現象の数値予測, 日本機械学会論文集(B編), Vol. 74, No. 743 (2008), pp. 1478-1487.
- (3) 白山晋, 計算力学レクチャーシリーズ 8 知的可視化, (2006), Maruzen Ltd.