日本流体力学会年会2004講演論文集

F 241

タービン翼列におけるサンドエロージョン現象の数値シミュレーション

Numerical Simulation of Sand Erosion Phenomena on Turbine Brade Surface

○ 鈴木正也 (東理大工), 戸田和之 (東理大工), 山本誠 (東理大工)

Masaya SUZUKI*, Kazuyuki TODA** and Makoto YAMAMOTO**

*Grad School of Mech Eng., Tokyo University of Science 1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601, Japan **Dept. of Mech Eng., Tokyo University of Science 1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601, Japan

This paper presents a newly-developed numerical procedure to predict three-dimensional sand erosion phenomena. It is well known that sand erosion is a typical multi-physic problem, that is, the interactions among flow field, particle motions and wall deformation are important. To simulate this phenomenon, turbulent flow field, particle trajectories and amount of erosion on an eroded wall are calculated repeatedly. In computations of the flow field, compressible Navier-Stokes equations and low-Reynolds-number type $k - \varepsilon$ turbulence model are adopted. Assuming that the concentration of suspended particle is dilute, particle-particle collision and the influence of particle motions on the flow field are neglected. The Neilson-Gilchrist erosion model is used to estimate the weight loss due to erosion. Based on this numerical procedure, the gas-particle two-phase turbulent flow field around a turbine blade is simulated, in order to investigate sand erosion phenomena on the blade surface. Moreover, the effect of conditions of injected particles is clarified.

1. 緒言

諸工業分野における機械、装置の損傷を引き起こす原因の一 つにエロージョンがある。その中で、サンドエロージョンは他 のエロージョンに比べて損傷速度が大きく、一旦発生すると装 置の性能や寿命を著しく低下させる。発電所や大型船舶などの 広い分野で利用されている蒸気タービン、ガスタービンにおい ても、輸送管などから剥がれ落ちた固体粒子によりタービン部 でサンドエロージョンが発生し、タービン効率の低下を引き起 こすだけではなく、場合によっては事故が発生する可能性もあ る。このため、翼前縁に耐エロージョンコーティングを行うこ とで対策を講じているが、根本的な解決に到ってはおらず、サ ンドエロージョンを精度良く予測する方法の確立が望まれてい る。さらに、サンドエロージョンとそれに伴う流れ場の連成解 析を行うことにより、設計段階における形状の最適化やメンテ ナンスの効率化を図ることが期待できる。

本研究は、タービン翼列内で生じるサンドエロージョン現象 を数値的に再現し、エロージョン進行に伴う流れ場の変化を解 明することを目的として行われたものである。タービン翼列に おける流体の損失を詳細に調べるために、研究の対象となる流 れ場は3次元圧縮性乱流場とした。粒子の挙動を Lagrange 的 に追跡し、壊食形状における粒子の挙動、さらに反射粒子によ る再エロージョンも考慮に入れてシミュレーションが行われた。 加えて、流入粒子の条件の効果に注目し、流入粒子の位置や径 の効果を明らかにした。

2. 数值解析手法

2.1 計算アルゴリズム

サンドエロージョン予測の計算手順は以下の通りである。

Step1: 流れ場計算を行い収束解を得る。

- Step2: 粒子軌道計算を行い、粒子と壁面の衝突判定を行う。
- Step3: 粒子が壁面に衝突した場合は壊食量を求め、Erosion Line Approach により各計算格子セルの壊食量を決定 する。もしセルの壊食総量が許容値を超えた場合、セ ル (壁面)が脱落したとし、そのセルは流れ場として取 り扱う。
- Step4: Step1 へ戻る。

この手順を予め与えられた計算終了時刻まで繰り返す。

2.2 流れ場計算

気相は 3 次元圧縮性乱流と仮定し、乱流モデルには低レイノル ズ数型 $k - \varepsilon$ モデル (Shimada-Nagano, 1996) を導入した。計算 コードは差分法を用いて離散化した。非粘性項には Yee-Harten (1987) の 2 次精度風上型 TVD スキーム、粘性項には 2 次精度 中心差分、時間進行には 4 段階ルンゲ・クッタ法を用いている。

2.3 粒子軌道計算と壊食計算

粒子相は Lagrange 法により計算された。粒子の反射は Neilson-Gilchrist エロージョンモデルに基づいて計算される。 このモデルでは、壊食機構を変形壊食 W_D と切削壊食 W_C との 和と考え、さらに、切削壊食 W_C は衝突角度 α により関係式が 異なる。それぞれの壊食量は、次式のように表わされる。

$$W_{D} = \frac{\frac{1}{2}M(V\sin\alpha - V_{e})^{2}}{\varepsilon}$$
$$W_{C1} = \frac{\frac{1}{2}MV^{2}\cos^{2}\alpha\sin n\alpha}{\beta} \qquad (\alpha \le \alpha_{0})$$
$$W_{C2} = \frac{\frac{1}{2}MV^{2}\cos^{2}\alpha}{\beta} \qquad (\alpha \ge \alpha_{0})$$

ただし、Mは粒子質量、Vは粒子速度、 V_e は弾性変形限界速度、 $\beta \geq \varepsilon$ は単位質量の材料を取り去る際のエネルギ、nはモデル 定数、 α_0 は衝突後に水平方向速度が0となる角度である。

3. 計算条件

タービン部は静翼と動翼により構成されているが、本研究で は図1に示す静翼のみを計算対象とした。表1に静翼の形状 データを記す。計算格子は221×122×51とし、これは流れ場 に221×62×51格子と、壊食用ブロックとして翼壁内部に流れ 場の最小格子幅で設けた221×60×51格子の和である。

境界条件については、流入境界では全圧、全温を固定し、計算 領域からマッハ数を外挿する。流出境界では静圧を固定し、そ の他の物理量を外挿している。壁面境界ではすべり無しの断熱 条件を課している。上下境界面に関しては周期境界条件を与え ることにより翼列流路を再現している。表2に流れ場の計算条 件を示す。エロージョン予測に用いた粒子材質および壁面材質 はそれぞれ Silicon Carbide、Aluminum である。流入粒子の条 件は3つのケースについて計算した。詳細を表3に示す。

Stator Blade	Chord length	[mm]	51.55		
	Pitch length	[mm]	36.0		
	Stagger angle	[deg.]	59.0		
	Inflow angle	[deg.]	0.0		
	Outflow angle	[deg.]	68.4		
	Height	[mm]	20.62		

Table1 Turbine Dimension

Table2	Computational	Conditions
100102	Companyanona	Conditions

Inflow Total Pressure	[Pa]	1.975×10^{5}
Inflow Total Temperature	[K]	382.15
Inflow Mach Number		0.203
Outflow Static Pressure	[Pa]	1.016×10^{5}

Table3 Inlet Condition of Particle

Case	Diameter [µm]	position	velocity
1	100	Regular	Zero relative velocity
2	100	Random	Random
3	20	Regular	Zero relative velocity





Fig.1 Computational Domain

 $(D_p = 100 \mu m)$

4. 結果と考察

図2に代表的な粒子軌道図を示した。前縁付近に衝突する粒子と翼正圧面に衝突後、隣接する翼の負圧面に再衝突している 粒子が存在している。図3に静翼の壊食状況を示した。ここでは、紙面の都合上、Case2についてのみ示している。サンドエロージョンにより静翼の形状が変化していることが確認できる。 図4に Span 方向各断面の翼面静圧係数(*C_p*)を示した。*C_p*値の 定義は以下の通りである。

$$C_p = \frac{P_s - P_{s,out}}{P_{t,in} - P_{s,out}}$$

ここで P_s , $P_{i,in}$, $P_{s,out}$ はそれぞれ翼面静圧、入口全圧、出口静圧 である。グラフにおける c, h はそれぞれコード長と翼高さであ る。エロージョンの発生により、圧力が全体的に上昇している。 また、 C_p 曲線が囲む面積が減少しているので、エロージョンに よる翼性能の低下が予想される。

5. 結言

本研究により得られた知見は以下の通りである。





Fig.4 Static Pressure Coefficients (Case2)

- 1. タービン翼列(静翼)における3次元サンドエロージョン 現象を数値予測することができた。
- 2. 粒子径が大きい場合、壊食が集中するのは翼正圧面と翼 前縁部であり、変形壊食が支配的である。(Case1,2)
- 3. 粒子径が小さい場合、壊食が集中するのは翼負圧面であ り、切削壊食が支配的である。(Case3)
- 流入粒子の条件に違いにより、エロージョンパターンと 流れ場特性は明らかに変化する。
- 5. エロージョンの発生によるタービン性能の低下が確認で きた。

参考文献

- 1) I. Finnie : Wear, 3 (1960) 87.
- 2) J.G.A. Bitter : Wear, 6 (1963) 5-21, 169-190.
- J.H. Neilson and A. Gilchrist : Wear, 11 (1968) 111-122, 123-143.
- W. Tabakoff : Trans. ASME, J. Fluids Engineering, 106 (1984) 125-134