

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	圧縮機へ流入する液滴挙動のCFDによる解析
著者(和文)	小泉 眞, 宇多村 元昭, 都築 宣嘉, 柴田 貴範, 明連 千尋, 宇多村 元昭
出典(和文)	第43回日本ガスタービン学会定期講演会, , , c - 1 6
発行日 / Pub. date	2015, 9

圧縮機へ流入する液滴挙動の CFD による解析

*小泉 眞，宇多村 元昭（東工大），都築宣嘉（エネ総研），
柴田貴範，明連千尋（MHPS）

CFD Analysis of Water Droplet Behavior in Compressor

*Makoto Koizumi, Motoaki Utamura(Tokyo Tech), Nobuyoshi Tsuzuki (IAE),
Takanori Shibata and Chihiro Myoren (MHPS)

ABSTRACT

Two dimensional numerical simulation on water droplet behavior in axial flow compressor is conducted in which break-up and coalescence of droplets are considered. Then the profile of erosion depth along blade surface is predicted based on a newly developed algorithm to accommodate multi-dispersed droplet size. The algorithm is verified by Ito's empirical correlation. The above method is applied to the first stage of compressor of gas turbine with inlet fogging system, the following results are obtained. (1) Large droplets are likely to break up into small ones around the leading edge of the rotor blades depending on their rotating speed. (2) Erosion depth predicted with break-up model is smaller than the one without break-up model.

Key words: Compressor, Inlet Fogging, Erosion, Water droplet, Gas turbine, CFD

1. 緒言

ガスタービンの吸気噴霧冷却システムは常温の微細な水滴群を吸気に噴霧し、液滴の蒸発に伴う気化熱で吸気を冷却することにより、高温時のガスタービンの出力低下を回復するものである。この時、様々な理由により吸気ダクト内で蒸発しきれなかった液滴群は、吸気に同伴して圧縮機に流入する。また圧縮機マニホールドに流入した液滴の一部はストラットや Inlet Guide Vane（以下 IGV と略称）などに付着し液膜流を形成したのち、液膜の分裂により後縁から大口径の二次液滴を生成する。このような一次、二次液滴群の一部は動翼に衝突し部材のエロージョンを誘起する可能性がある。この課題はフィールドデータや基礎実験の知見がそれなりに蓄積されているが、体系的に整理されていない。本研究では、これまでに提案されている実験式を新たなアルゴリズムとして市販の CFD コード（FLUENT）に組み込み、上記一次及び二次液滴によるエロージョン予測を試みた。従来のシミュレーション¹⁾では投入液滴の直径は一種類で飛行中も変わらない単分散液滴として扱ってきたが、本研究では液滴径の分布を考慮する多分散液滴として計算できるようにした。

2. エロージョン評価の方法

2. 1 エロージョン評価式の適用範囲

微粒子による固体壁のエロージョンについては色々な衝突粒子と衝突面との組み合わせで実験が実施され様々な経験式が提案されている。水滴と翼材とを組み合わせた実験も幾つか行われている。伊藤らは液滴径が $200\mu\text{m}$ 近傍の大きな液滴を用いて実験し、潜伏期間を考慮した実験式を提案している²⁾。また、坪内らは $30\mu\text{m}$ と比較的小さな液滴径を用いた実験結果を発表している³⁾。いずれの実験も噴霧ノズルから射出された粒径分布のある水滴を供試体面に垂直に衝突させ、代表粒径 D32 を用いて実験データを整理している。ガスタービン吸気噴霧冷却では微粒化された液滴を用いており、投入直後の一次液滴の直径は $20\mu\text{m}$ 前後であると考えられる。一方、一次液滴が飛行中に個体壁に付着して形成される液膜の分裂で生じる二次液滴は $100\mu\text{m}$ のオーダーと考えられる⁴⁾。伊藤らの提案したエロージョン深さ実験式の適用範囲にある。そこで、伊藤の提案した実験式の一次液滴への適用性を確認するため坪内らの実験との比較を行った。なお、本研究では、エロージョン深さが衝突液滴数に比例する安定期のエロージョンを評価の対象とする。

伊藤の式の安定期を示す部分は次のように示される。

$$E_{st} = a + bt \quad (1)$$

$$a = 0.541 \cdot V^{1.41} D^{1.42} H^{-1.09} \quad (2)$$

$$b = \text{const} \cdot V^{g_1(D,H)} D^{2.75} H^{9.77} N \quad (3)$$

$$g_1(D, H) = 19.5 + 0.386 \log_{10} D - 4.64 \log_{10} H \quad (4)$$

ここで、経過時間 $t(\text{hr})$ 、エロージョン深さ $E_{st}(\text{mm})$ 、衝突速度 $V(\text{m/s})$ （固体壁への垂直衝突が含意されている）、液滴径 $D(\text{mm})$ 、ビッカース硬度 $H(-)$ 、単位時間単位面積当たりの液滴衝突数密度 $N(1/(\text{hr} \cdot \text{mm}^2))$ とした。上記単位系では定数は次の通り。

$$\text{const} = 3.57 \times 10^{-53} \quad (5)$$

図1は伊藤、坪内の実験と式(1)～(5)による計算との比較を示す。実験値は供試体の材料が 12Cr stainless steel の場合で、実験パラメータが $H=235 \sim 520$ 、 $V=400 \sim 629 \text{m/s}$ 、 $D=32 \sim 269 \mu\text{m}$ の範囲のデータを示す。両者の一致は良好である。

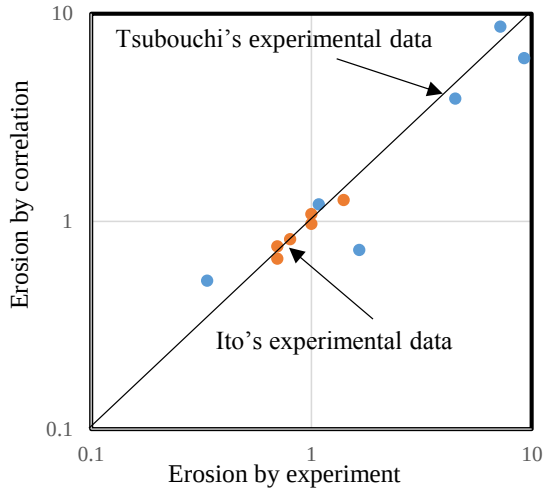


Fig.1 Erosion by Tsubouchi's and Ito's experiment compared with empirical correlation (unit: mm)

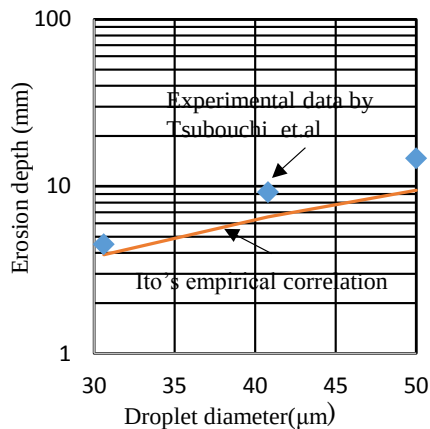


Fig.2 Dependency of erosion depth on droplet diameter

図2は坪内の実験でのエロージョン深さの液滴径依存性を、図3は衝突速度依存性を示す。式(1)は実験の傾向を良く再現している。以上より伊藤の式は液滴径が $30 \mu\text{m} < D < 260 \mu\text{m}$ で適用可能であり、一次液滴と二次液滴によるエロージョン評価に使えると判断した。

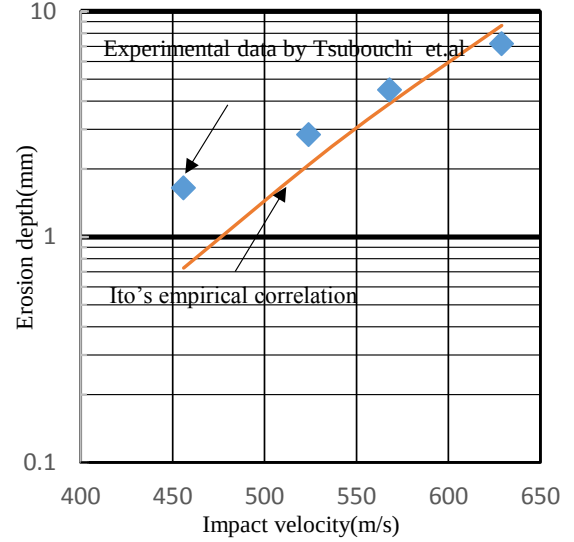


Fig.3 Dependency of erosion depth on impact velocity

2.2 パーセル近似アルゴリズム

翼に衝突する個々の液滴は液滴サイズ、衝突速度、衝突角度が異なる。これを考慮してエロージョン深さを評価する新アルゴリズムを開発し市販の流体解析コード FLUENT に組み込んだ。

FLUENT では、計算量を節約するためにパーセル近似を用いている。すなわち粒径の異なる液滴をいくつかのグループに分けて飛行中の液滴直径変化や軌跡を追跡する。ここでは次のようにパーセル単位で伊藤の式を計算する。以下、これをパーセル近似アルゴリズムと称する。

(I) 翼面上の計算要素に衝突するパーセルの総数を L としパーセルに付番する。パーセル番号 l の液滴直径、速度を用いて式(2)式(3)により a_l 及び b_l の値を求める。

(II) 衝突速度 V には衝突面での法線成分を用いる⁵⁾。

(III) エロージョン深さを評価するためには、各パーセルの係数 a_l 及び b_l を用いて全体の係数 a 及び b を評価する必要があるが、 b には単位時間、単位面積当たりの衝突数が含まれている。パーセル毎の衝突数の和は衝突箇所の液滴衝突数になるので、 b はパーセル毎の b_l の和とする。即ち、下式となる。

$$b = \frac{\tau}{t} \sum_{l=1}^L b_l \quad (6)$$

τ は運転時間、 t はCFDでのサンプリング時間である。これに対し、 a には衝突数は含まれていない。そこで、ここではパーセル毎に含まれる粒子数を重みとした平均値とする。

$$a = \frac{\sum_l a_l \cdot N_l}{\sum_l N_l} \quad (7)$$

3. CFDによる解析結果

3. 1 翼周りの気流

図4に解析体系を示す。対象は軸流圧縮機のIGVを含む1段目のTip位置における二次元翼列断面である。領域の左端から液滴を同伴する飽和湿り空気が流入するとした。入口流速は約143m/s、ローター回転数6140rpm、入口液滴径 $18\mu\text{m}$ 、噴霧量は空気の質量流量に対し0.63%とした。液滴の分裂・合体事象を模擬するため、非定常計算を実施した。時間ステップは境界面でのセルの移動が1時間ステップ内で収まるように指定した。本計算では40ステップで動翼が1ピッチ分移動する。

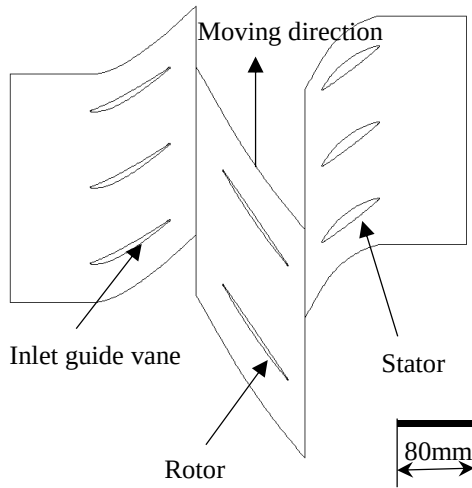


Fig.4 Computational domain

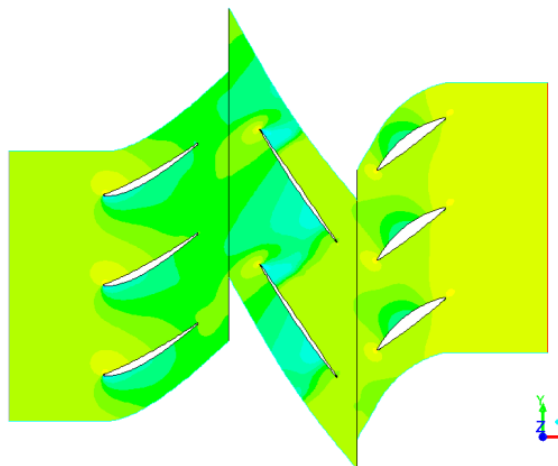


Fig.5 Static pressure distribution (relative value)

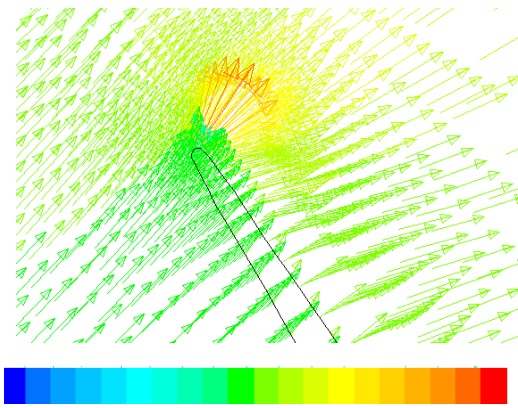


Fig.6 Velocity distribution around leading edge of rotor

エロージョンを評価するため、次のような方法を取った。①入口で投入した液滴が1段目を通し、十分定常状態に達したと見なせるように予め約5000ステップ計算する。②その後、各翼表面でのエロージョンに関する条件を初期化し、式(6)、(7)に従ってエロージョンを計算する。

図5は大気圧を基準としたときの静圧分布である。図に示すように翼間で圧力が低下し、翼前縁で圧力が高まる様子が示されており、妥当な計算がなされていると判断した。図6にこのときの動翼前縁付近での速度分布を示す。図に示すように前縁部では急激な速度変化が起こっている。

3. 2 液滴挙動

3. 2. 1 液滴分裂と速度

液滴と周囲の気流との速度差が大きいと液滴の自励振動により液滴が分裂することが知られている。FLUENTには次の液滴分裂モデルとしてTABモデルが組み込まれている。詳細は文献⁹⁾に譲るとして、TABモデルから液滴の安定性を計算すると、液滴が分裂する次式のウェーバー数を得る。

$$We_c = 1 / (1 + \exp(-(\frac{\pi}{\omega t_d}))) \quad (8)$$

ここで、

$$We = \frac{\rho_g u^2 D}{\sigma} \quad : \text{ウェーバー数、}$$

$$We_c = \frac{C_F}{2C_k C_b} We, \quad \omega^2 = C_k \frac{8\sigma}{\rho_l D^3} - \frac{1}{t_d^2}$$

$$\frac{1}{t_d} = \frac{2C_d v_l}{D^2}, \quad C_b = 0.5, C_k = 8, C_d = 5, C_F = \frac{1}{3}$$

D は液滴直径、 ρ_l は液滴密度、 η は動粘性係数、 σ は液滴の表面張力である。上式に20℃における水の密度(998.2kg/m^3)、動粘性係数($1.004 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)、

表面張力($74 \times 10^{-3} \text{N/m}$)を代入すると、 $We_c=0.527$ となり、ウェーバー数に書き直すと $We=12.6$ を得る。即ちウェーバー数で 12.6 を超えるものは最初の不安定波で分裂する。

図 7 は液滴が分裂する気液速度差と粒径との関係を示す。粒径が $18 \mu\text{m}$ の場合気流との速度差が $>210 \text{m/s}$ 以上で分裂する。なお、合体事象の生起確率は無視できるほど小さいことがわかった。

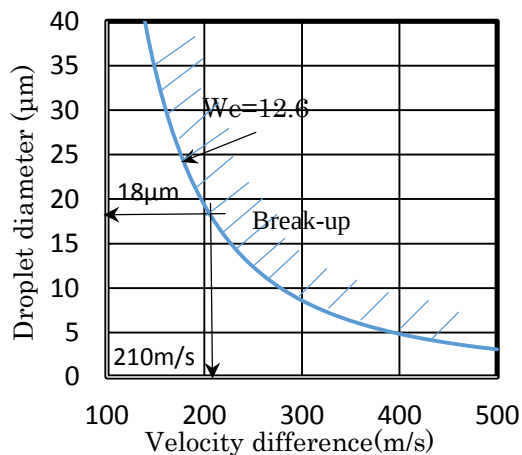


Fig.7 Break-up area of droplet

3. 2. 2 一次液滴の挙動

ノズル噴霧を模擬するため、圧縮機入口に液滴を投入した。このときのザウタ平均粒径 D_{32} は文献値⁷⁾を参考に $18 \mu\text{m}$ と仮定した。また、多分散の場合はロジックラムラー分布を仮定した。

図 8 は投入液滴が多分散で分裂合体ありの場合におけるほぼ定常時の液滴サイズの空間分布を表したものである。図に示す様に IGV の周りは液滴径の分布は一様であるが、動翼の近辺では液滴径が $5 \mu\text{m}$ 以下の小さい液滴が集まっている。これは、図 5 で示した翼前縁での急激な速度変化のため、液滴と気流流速との差が大きくなり、動翼前縁部では大きな液滴は不安定となり式 (8) に従って分裂するためである。分裂した小粒径の液滴は動翼に沿って流下し、動翼後縁から動翼を離れる。そのため、小粒径の液滴は動翼通過後、動翼の間隔に相当する間隔で集団となっている様子が伺える。

3. 2. 3 二次液滴の挙動

IGV に付着した液滴は、IGV の後縁から二次液滴として放出されると考えられている。内田ら⁴⁾は IGV を模擬した実験を行い、後縁から IGV コード長の $0.2 \sim 0.4$ 倍離れたところで、放出液滴径は最大 $300 \mu\text{m}$ で D_{32} は $100 \mu\text{m}$ 程度と報告している。ここでは、上記値を考慮して次のように計算条件を決めた。IGV での液滴の通過率を計算したところ約 30%が IGV でトラップされる。この値は文献

値⁷⁾と良く一致しているので IGV 後縁からの液滴投入量は噴霧液滴量の 30%とした。また、放出流速は、IGV 後縁近傍の流速を参考に 120m/s とした。

図 9 は多分散の場合の二次液滴径の空間分布を示す。一次液滴の場合と同様に動翼前縁で分裂を起こすが、小径化粒子の移動方向は一次液滴の場合と異なり IGV からほぼ直線的である。

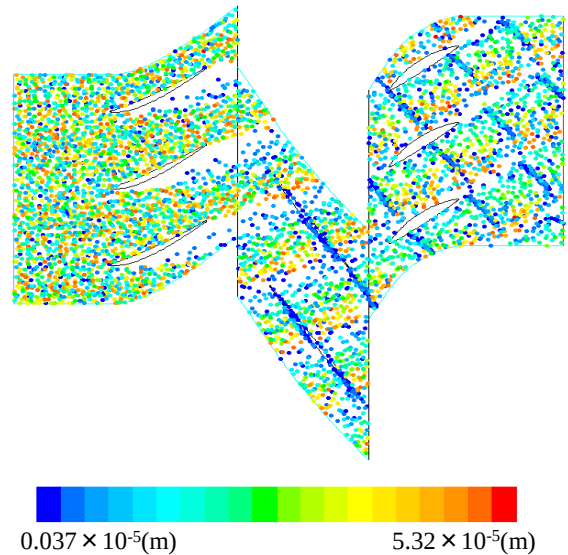


Fig.8 Distribution of droplet diameter in space

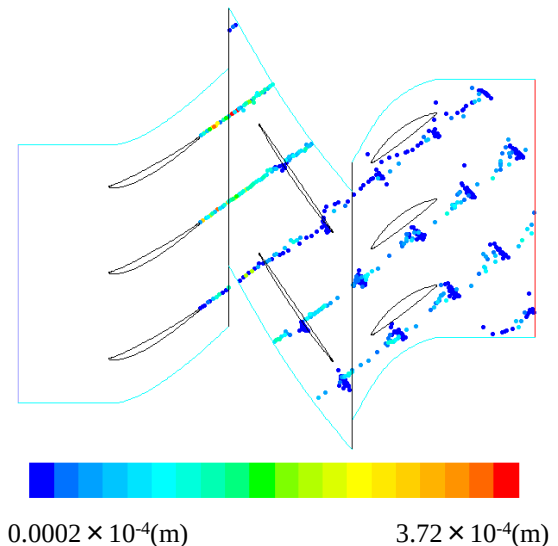


Fig.9 Distribution of droplet diameter in space in the case of secondary droplet

3. 3 エロージョン

3. 3. 1 エロージョン評価アルゴリズムの検証

図 10 は 2000 時間の連続運転後の動翼表面に沿ったエロージョン深さの分布を (1) 単分散 (2) 蒸発無し (3) 分裂・合体無しの条件で計算した結果を示す。横軸は翼長で規格化してある。図では 2 枚の動翼の圧力面側とサクシオン面側を同時に示してある。(黒及び緑は圧力面、赤及び青はサクシオン面側である。) 以降に述べるエロージョン

深さは本ケースの最大エロージョン深さで規格化した。最大エロージョンは動翼前縁に生じている。表 1 は、この数値解と、FLUENT で求めた N, V_n を用いて伊藤の経験式 (1) から直接求めた値とを比較した結果を示す。一次液滴、二次液滴の両ケースについて両者はよく一致している。このことから、(1) 衝突速度の法線方向成分をもちいる手法と (2) パーセル単位のエロージョンを加算して計算する手法の妥当性が証明された。

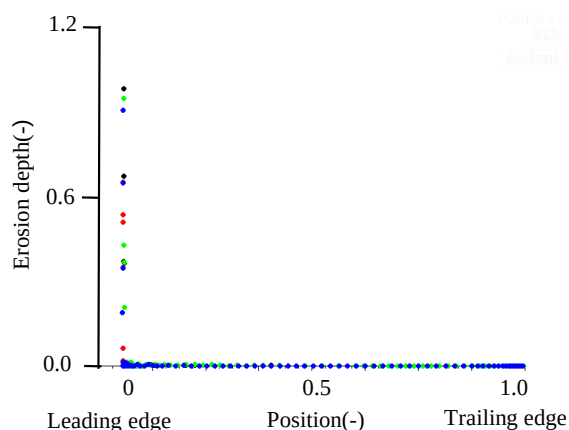


Fig.10 Erosion along the rotor surface in the case of inert, without break-up and monodispersity by droplets

Table 1 Verification of parcel approximation algorithm

Operation condition	Unit	Primary droplets	Secondary droplets
Diameter D	μm	18	100
Number ratio of impact droplets N	$1/\text{m}^2/\text{s}$	$1.73\text{E}+12$	$9.25\text{E}+10$
Velocity V_n	m/s	320	330
Vickers hardness H	—	350	350
Operation time	hr	2000	2000
Ito's correlation(1)~(5)	(-)	1.02	6.96
Solution of FLUENT (6),(7)	(-)	1.00	6.69

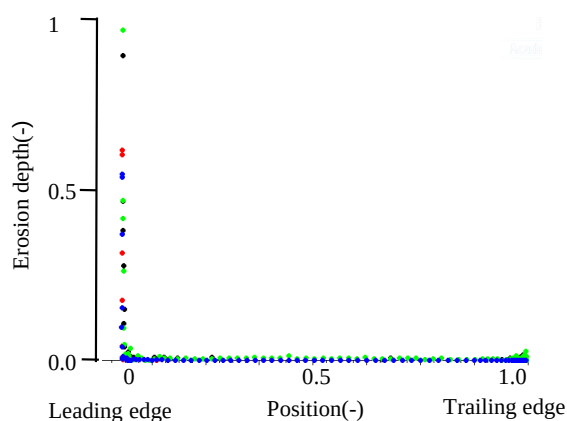


Fig.11 Erosion along the rotor surface in the case of inert, without break-up and polydispersity

図 11 は多分散の場合の蒸発無し、分裂・合体無しの場合のエロージョン深さの計算結果である。最大値は相対値で 0.96 であり D32 を用いた単分散

の結果 1.0 と良く一致する。この事実から、今回開発したパーセル近似アルゴリズムを多分散系のエロージョン評価に適用できることが明らかになった。厳密に言えば、衝突粒子の液滴径分布の D32 が投入噴霧の D32 と等しい場合の適用性を証明したことになるが、以降の議論では、飛行中に蒸発や分裂を経験して衝突時の液滴径分布の D32 が投入時と異なる場合にもこのアルゴリズムを拡張して適用した。

3. 3. 2 液滴の蒸発と分裂の影響

以下に示す 3 種の液滴状態を組み合わせて計算した。すなわち (1) 投入液滴径が単分散または多分散、(2) 蒸発の有無、(3) 分裂合体の有無である。

図 12 は多分散の場合の蒸発あり、分裂・合体ありの場合である。図に示す様にこの場合、最大エロージョン深さは 0.07 となり、分裂を考慮するとかなり小さくなる。これは、動翼前縁で大きな液滴は分裂し小さい液滴が衝突するためと考える。エロージョンの式を見るとエロージョンに大きく寄与するファクターは衝突速度と液滴径である。動翼の速度が大きいと液滴との相対速度が大きくなりエロージョンが加速する一方で、液滴は不安定となり分裂しやすくなる。分裂で多数の小径液滴が生成するがエロージョンへの寄与は小さい。このため、既出の図 7 に示した限界流速を越えた領域ではエロージョンが抑制される。

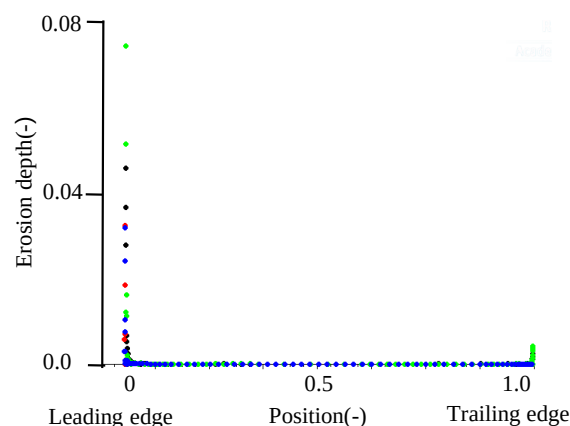


Fig.12 Erosion along the rotor surface considering with evaporation, break-up and polydispersity

表 2 は 8 通りの液滴の条件を組み合わせた場合のエロージョン深さを示す。分裂が無い場合、蒸発無しでの多分散と単分散の結果はほぼ一致するが、蒸発があれば分散性に依存して複雑な振る舞いが見られる。分裂ありのエロージョン深さは分裂無しの場合の 0.1~0.2 倍に減少する。このように、分裂事象はエロージョンを大幅に抑制することが推定される。

Table 2 Summary of erosion depth by primary droplet (unit: relative)

		Monodispersity	Polydispersity
Without break-up	Inert	1.00	0.96
	Evaporation	1.08	0.62
Break-up	Inert	0.10	0.08
	Evaporation	0.20	0.07

3. 3. 3 二次液滴によるエロージョン

図 13 は単分散で分裂・合体無し、蒸発無しの場合の動翼エロージョン計算結果である。最大エロージョンは一次液滴の場合の 6.7 倍となっている。これは、衝突液滴が約 $100\mu\text{m}$ と大きいためである。

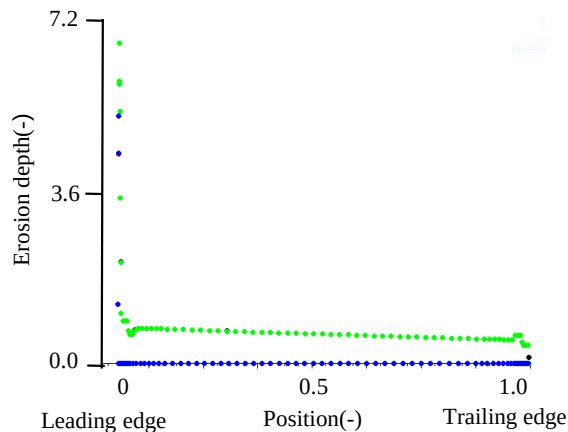


Fig.13 Erosion along the rotor surface in the case of inert, without break-up and monodispersity by droplets

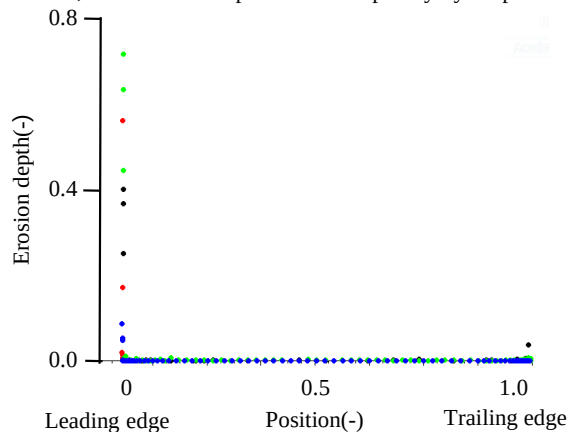


Fig.14 Erosion along the rotor surface considering with evaporation, break-up and polydispersity by droplets

図 14 は多分散で且つ蒸発あり、分裂・合体ありを考慮した場合の動翼のエロージョン深さである。最大エロージョンは 0.71 と分裂・合体無しの場合の 1/10 となっている。このように、飛行中の液滴分裂がエロージョンに及ぼす影響は極めて大きいと予想されるので、その発生条件に関する基礎的知識の集積が今後の課題である。

4. 結論

吸気噴霧冷却システムを用いたガスタービンに

おける液滴衝突によるエロージョンを予測するため、飛行中に蒸発や分裂で径が変化する液滴の衝突によるエロージョンを計算できるアルゴリズムを開発し、軸流圧縮機の第一段動翼のエロージョン解析に適用した。その結果下記のことが分かった。

(1) エロージョン評価において D32 を代表径とする単分散液滴群での近似評価手法は、蒸発や分裂がない場合には有効であるが、飛行中の蒸発や分裂を無視できない場合には適用できず、多分散液滴群の扱いが必要である。

(2) 動翼の回転速度が十分に大きいと動翼前縁部付近での速度の急激な変化により、大きな液滴は分裂し衝突前に小径化する。その結果エロージョンは大幅に抑制される。

(3) 液滴の蒸発の有無がエロージョンに及ぼす影響は小さい。

液滴分裂の発生条件に関する基礎的知識の集積が今後の課題である。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からエネルギー使用合理化先進的技術開発費補助金（高効率ガスタービン技術実証事業）の支援を受けた研究成果の一部である。支援に対し深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鈴木正也、山本誠 液滴衝撃エロージョンの数値シミュレーション 第 42 回日本ガスタービン学会定期公演会 講演論文集 pp 106-109 (2014)
- 2) 伊藤洋茂、岡部永年 金属材料の液滴エロージョン評価 日本機械学会論文集(A 編)59 巻 567 号(1993)
- 3) K. Tsubouchi, N. Yasugahira et.al, An Evaluation of Water Droplet Erosion for Advanced Large Steam Turbine, PWR-Vol. 10, Advanced in Steam Turbine Technology for Power Generation, ASME, Book No. G00518 (1990)
- 4) 内田竜郎、大友文雄、他 吸気冷却ガスタービン入口案内羽根後縁から噴霧する水滴の挙動と圧縮機動翼の浸食評価 日本ガスタービン学会誌 Vol.42 No.3 (2015)
- 5) 服部修次、角一将也 液滴衝撃エロージョンに及ぼす突角度の影響 日本機械学会論文集(A 編)78 巻 791 号 (2012)
- 6) P. J. O'Rourke, A. Amsden, The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Drop Breakup, SAE paper, No.872089, (1987)
- 7) C. Myoren, Y. Takahashi et.al, Evaluation of Axial Compressor Characteristics under Overspray Condition, Proceeding of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition GT2013, June 3-7, (2013)