

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760142

研究課題名(和文)凝縮・液膜・飛沫を考慮した液滴衝撃エロージョンのモデリングと低圧タービンへの応用

研究課題名(英文) Numerical Modeling of Liquid Droplet Impingement Erosion Considering of Condensation /Liquid Film/Splash and Application for Low Pressure Turbine

研究代表者

鈴木 正也 (SUZUKI, Masaya)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・航空本部・研究員

研究者番号：40548161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：既報のエロージョン予測法を拡張し、液滴衝撃エロージョンをモデル化した。二相流の時間スケールに対し、壁面形状変化の時間スケールが大きいことから、弱連成として取り扱うことができ、衝突液滴の位置・速度を得るため、オイラー・ラグランジュ法を使った。

液滴の発生には凝縮を考慮し、発生箇所・直径を計算できるよう拡張した。液膜の存在や衝突による飛沫の効果があるため、損傷量の相関式が固気系よりも複雑となった。相関式は、液滴の衝突速度・衝突角度・材料特性に加え、液膜の有無・衝突による飛沫を考慮して構築した。構築した手法を用いてベンドと低圧タービンを対象とした解析を行い、実験データを妥当に再現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：A Model of liquid droplet impingement erosion (LDIE) was developed based on previous model of erosion. The developed model was implemented. If the erosion phenomenon requires a long time, and the time scale is much longer than that of the two-phase flow, the changes in the two-phase flow and the wall shape can be treated by weak coupling. LDIE simulation required droplet impingement velocity and position, and so Euler-Lagrange coupling was selected.

Condensation was considered to obtain position and diameter of droplets. Liquid film and splash are important for LDI erosion process, the modeling becomes complex. The present model was developed considering not only velocity, angle, and material parameter but also liquid film and splash.

The developed procedure was validated by comparing experimental data of bend. Based on the validation, LDIE in a low pressure turbine was simulated, and the present results showed good agreement with experimental data.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：エロージョン 数値シミュレーション 流体工学 数値流体力学 連成問題 混相流 流体機械 タービン

## 1. 研究開始当初の背景

エロージョンとは、流体の繰り返し衝突により材料表面が機械的に損傷を受ける現象であり、流体機械の致命的な損傷理由の一つである。一般的に、エロージョンを引き起こす作用流体は混相流であり、液滴衝撃エロージョンとは気流中の液滴によるエロージョンである。液滴衝撃エロージョンは、発電所などに設置されている配管や低圧タービン翼などで発生することから、メンテナンス上の大きな問題になっている。以下の図は蒸気系配管と蒸気タービン低圧段における液滴衝撃エロージョンの概略図である。膨張に伴う温度の減少により、液滴の凝縮が始まり、流れの方向が変化する部位で液滴が衝突することで損傷が生じる。このため、配管では蒸気の漏洩、タービンでは翼の表面粗さの増加に伴う摩擦損失の増加によって性能が低下し、さらに損傷が激しくなると、流れの剥離・失速という事態に繋がる。

従って、損傷の程度が致命的になる前に、損傷部品の交換や修理をする必要があり、エロージョンの抑制や効率的なメンテナンスのため、エロージョン予測法の確立が求められている。近年、液滴衝撃エロージョンに関して、国内では原子力発電関係のグループが、国外では Cincinnati 大学や Tulsa 大学などのグループが実験的手法を中心として研究を行っており、損傷速度が衝突速度の指数乗に比例すること、衝突面での液膜・飛沫が損傷に影響を与えることが明らかになっている(e.g., Miska et al., 2010)。一方、数値計算については、液滴の凝縮に関する研究は数多く行われているが、液滴衝撃エロージョンのシミュレーションはほとんど行われておらず、メンテナンス計画や設計は経験に頼らざるを得ないのが現状である。

以上の背景を鑑み、本研究では、液滴衝撃エロージョンの数値計算法を構築し、蒸気タービンの低圧段におけるエロージョンの予測と解明を行う。申請者はこれまでに、気流中の固体粒子によるエロージョンであるサンド・エロージョン現象の数値計算に取り組んできた。申請者の開発した数値計算法は、ベンド・タービン・圧縮機などのサンド・エロージョン現象に適用され、実験データを受当に再現できることが示されている(次頁の図参照)。本手法は、実際に企業で利用され、設計に役立てられている。この研究成果を用いて、液滴衝撃エロージョン特有の現象に関する拡張を行うことで、短期間に計算コードを開発できる。

## 2. 研究の目的

蒸気タービン低圧段では、液滴衝撃エロージョンによる機械的損傷が生じる。エロージョンの抑制やメンテナンス計画の立案のために、損傷による寿命・性能の低下を予測できるツールが必要とされている。本研究課題

では、以下の三点の達成を目的としている。

### (1) 液滴衝撃エロージョンの数値シミュレーション法の構築

- ・申請者らの開発したサンド・エロージョン予測手法をベースに以下の拡張を行う。
- ・液滴の凝縮をモデル化し、液滴の発生箇所・液滴直径を計算できるようにする。
- ・損傷量を計算する相関式を構築する。液滴の衝突速度・衝突角度・材料特性に加え、液膜の有無・飛沫を考慮する。

### (2) 数値計算法の検証

- ・蒸気系配管のベンド部を対象として、計算結果の検証を行う。
- ・既存のデータとの食い違いが見られた場合、計算モデルの見直しを行う。
- ・パラメータを変更した計算を実施し、様々な条件で使用できることを確認する。

### (3) 蒸気タービンのエロージョン計算

- ・蒸気タービンの低圧段を対象とし、損傷箇所・損傷速度・性能低下を予測する。
- ・個々の液滴の運動などの可視化から、エロージョン発生メカニズムを解明する。
- ・様々な条件の結果を比較し、エロージョンを抑制するタービン翼の設計指針を得る。

本研究の達成により、損傷箇所・損傷速度・性能低下のメカニズムが解明され、蒸気タービンの信頼性向上に貢献できる。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、以下の三つのサブテーマを実施する。

### (1) 液滴衝撃エロージョンの数値シミュレーション法を構築する。

### (2) 配管のベンド部におけるエロージョンを対象に、構築した計算方法の検証を行う。

### (3) 蒸気タービンのエロージョンを予測し、タービンにおけるエロージョンの発生位置・損傷速度・性能低下を予測する。

申請者らの開発したサンド・エロージョン予測手法をベースに、液滴衝撃エロージョン特有の現象をモデル化・導入する。液滴衝撃エロージョンは連続相・分散相の時間スケールに対して、壁面形状変化の時間スケールが著しく大きいことから、弱連成問題として取り扱うことができる。また、液滴の衝突位置・衝突速度を得るために、オイラー・ラグランジュ法を使う。この点については、サンド・エロージョンと同様の取り扱いが可能である。

一方、液滴衝撃エロージョンの場合、液滴は単純に上流から流入するだけではなく、温度変化に伴う凝縮を考慮する必要がある。凝縮をオイラー的に取り扱う場合の計算例は多数あるが、ラグランジュ法では例がなく、液滴の発生箇所・液滴直径を計算できるように拡張する。

また、液膜の存在や衝突による飛沫の効果があるため、損傷量を計算する相関式がサンド・エロージョンよりも複雑になる。従って、損傷量を計算する相関式は、液滴の衝突速

度・衝突角度・材料特性に加え、液膜の有無・衝突による飛沫を考慮して構築する。

数値計算法の検証の対象とするテストケースとして、配管のベンド部を想定している。配管のベンド部における液滴衝撃エロージョンについては、原子力関係の研究者による実験データ(e.g., Morita, 2009)が提供されており、計算結果の妥当性を検討するための有用なデータがそろっている。これらの実験データと計算結果との比較を行い、その妥当性を検証する。

液滴衝撃エロージョンのようなマルチ・フィジックス現象の数値計算法の検証では、幅広い範囲のスケールで妥当な計算結果を与えることを確認することが重要である。損傷量の計算などに導入されるモデルには、適用可能な範囲が存在し、これを大きく逸脱すると実際の現象とはかけ離れた計算結果を与えてしまう。従って、ここでは結果に大きな影響を与えると思われるベンド径・材料・流速・液滴条件を変更した計算を実施し、十分に広い範囲のスケールで使用できることを確認する。

検証したコードを用い、蒸気タービン低圧段を対象とした計算を行う。タービン翼の場合、流れの強い三次元性・動静翼干渉・ハブからチップにわたる広い速度の範囲といった要素により、ベンドのケースに比べて複雑な現象が重なり合うため、実機試験や実験によりエロージョンの進行を調査するのは極めて困難である。従って、入手可能なデータは最終的な結果のみであるため、最終的な結果を予測できるかを検証し、途中経過は数値結果の詳細な検討により明らかにする。

本計算では、エロージョンの発生位置・損傷速度・性能低下を予測し、実験データとの比較により検証する。実験データとの不一致がある場合は、平成 24 年度の開発・検証を再度見直す。また、タービン流路内の個々の液滴挙動のような実験的には観察が難しい点について、数値的に明らかにすることによって、エロージョン発生メカニズムを詳細に調査する。液滴挙動が明らかになれば、液滴が翼面に衝突しづらい翼形状を選定することが可能である。

さらに、設計条件や運転条件による影響を明らかにするため、翼形状・翼材料・流速・湿り度などのパラメータを変更した計算を行う。様々な条件におけるエロージョンを比較することにより、エロージョンを生じにくいタービン翼の設計指針を得ることができる。

#### 4. 研究成果

図 1 にスプラッシュを考慮した場合の翼面に衝突した液滴の挙動を示す。翼前縁付近では液滴のスプラッシュが発生しないが、下流側での衝突ではスプラッシュが発生し、液滴が跳ね返りつつ飛散している様子が確認できる。

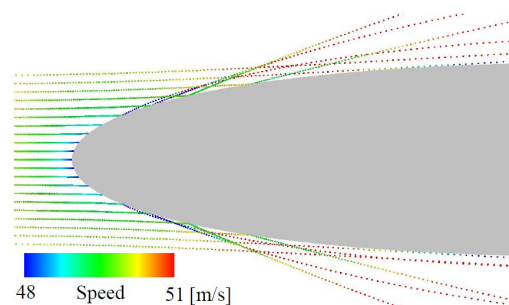


図 1 翼面に衝突する液滴のスプラッシュ

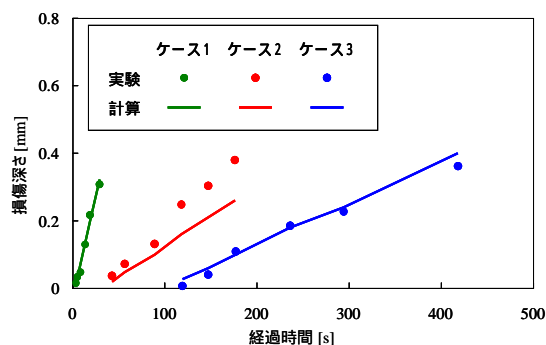


図 2 損傷量の時間変化

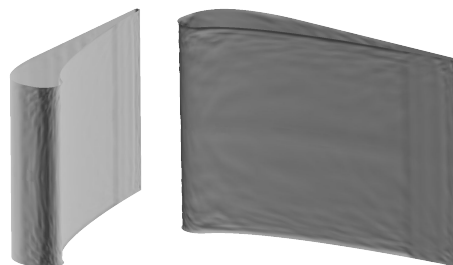


図 3 損傷したタービン翼形状

図 2 は液滴衝撃エロージョンによる損傷量の検証結果の一例である。図中では 3 種類のケースについて実験と解析の比較を示しており、実験との妥当な一致が得られたことが分かる。

計算手法の検証後、得られた解析手法をタービン翼のエロージョンに適用した。図 3 は解析により得られたエロージョン後のタービン翼プロファイルを示しており、一般に観察される前縁および正圧面の損傷が再現できていることが分かる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Matsui, K., Suzuki, M. and Yamamoto, M.: Three-Dimensional Multi-Physics CFD Simulations of Sand Transfer around a Cube, American Journal of Environmental Protection, Vol. 2, No. 6, pp. 188-193, 2014, Reviewed.

〔学会発表〕(計 8 件)

Matsuura, T., Suzuki, M., Yamamoto, M., Mizuta, I., Otsuka, H. and Murooka, T.: Numerical Simulation of Ice Accretion Phenomena on Spinner of Jet Engine, 23rd International Symposium on Transport Phenomena, 2012/11/22, Auckland, New Zealand.

Suzuki, M. and Yamamoto, M.: Numerical Investigation on Particle Motion in Rotor/Stator Interaction Field of Axial Compressor, 13th International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines, 2012/9/11, Tokyo, Japan.

Suzuki, M. and Yamamoto, M.: Computation of Particulate Erosion in a Jet Engine Fan, Asian Congress on Gas Turbines 2012, 2012/8/21, Shanghai, China.

Suzuki, M. and Yamamoto, M.: Numerical Simulation of Particulate Erosion in Two-Stage Compressor, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2012/7/10, Sao Paulo, Brazil.

Fujita, K., Suzuki, M. and Yamamoto, M.: Multi Physics Simulation of Liquid Droplet Impingement Erosion, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2012/7/9, Sao Paulo, Brazil.

Isobe, K., Suzuki, M. and Yamamoto, M.: Development of Numerical Procedure on Ice Accretion Phenomena Considering Splash and Bound, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2012/7/10, Sao Paulo, Brazil.

磯部敬介, 鈴木正也, 山本誠: スプラッシュ・バウンドを考慮した着氷現象計算法の開発, 第 17 回計算工学講演会, 2012 年 5 月 29 日, 京都, 日本.

藤田恵亮, 鈴木正也, 山本誠: 液滴衝撃エロージョンのマルチフィジックスシミュレーション, 第 17 回計算工学講演会, 2012 年 5 月 29 日, 京都, 日本.

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

該当なし

取得状況 (計 0 件)

該当なし

〔その他〕

該当なし

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 正也 (SUZUKI, Masaya)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
航空本部・研究員

研究者番号: 4 0 5 4 8 1 6 1

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし