

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20360088

研究課題名(和文) 航空用ガスタービン遷音速ファンにおけるサンドエロージョン現象の数値的解明

研究課題名(英文) Numerical Investigation of Sand Erosion Phenomena in Transonic Fan of Jet Engine

研究代表者

山本 誠 (YAMAMOTO MAKOTO)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：20230584

研究成果の概要(和文)：サンドエロージョンは、流体中に含まれる固体微粒子が壁面に繰り返し衝突し、壁面が機械的損傷を受ける現象であり、流体挙動、流体中の固体微粒子挙動、壁面形状変化が相互に干渉して起こる典型的なマルチ・フィジックス現象である。また、サンドエロージョンは、各種流体機械にとって致命的な現象として知られている。航空用ガスタービンでは、型式承認時に安全性確認のための砂吸い込み試験が課されており、一定量の砂を吸い込んでもエンジンが健全に稼動することを実証しなければならない。本研究は、航空用ガスタービンの遷音速ファン動翼におけるサンドエロージョン現象を数値的に再現することによって、その発生原因・物理的メカニズムを明らかにすることを目的としたものである。平成20年度は、ファン動翼とともに回転運動する衝撃波を微粒子が通過する際の挙動のモデル化および検証計算を実施した。平成21年度には、3次元動静翼干渉の再現のためにコードを作成し、3次元ファン動翼(NASA Rotor37)に対する検証計算を実施し、コードの健全性を確認した。平成22年度は、さまざまなファン運転条件におけるサンドエロージョン現象を数値予測し、サンドエロージョンの発生状況とサンドエロージョンによる翼性能の低下を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Sand erosion is a phenomenon whereby solid particles impinging on a wall cause serious mechanical damage to the wall surface. This phenomenon is a typical gas-solid two-phase turbulent flow and can be considered as a multi-physics problem in which the flow field, particle trajectory, and wall deformation interact. On the other hand, aircraft engines operating in a particulate environment are subjected to the performance and lifetime deterioration due to sand erosion. Therefore, in the development it must be proved that the engine can operate without any trouble when a certain amount of sand is sucked in the engine. In the present study, we apply our three dimensional sand erosion prediction code to a transonic fan, and clarify the physical mechanism. In 2008, a particle motion through a shock wave, which generally appears in a transonic fan blade passage, was modeled and verified. In 2009, we newly developed a sand erosion prediction code for a three-dimensional rotor/stator interaction field of a fan. NASA Rotor 37 was adopted as the target of the code verification. In 2011, the code was applied to different operating conditions of fan blade. Investigating the numerical results, the flow change, the sand erosion phenomena on the blade, the eroded blade geometry and the performance deterioration were clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：流体工学

キーワード：流体工学，流体機械，航空用ガスタービン，サンドエロージョン，遷音速ファン

1. 研究開始当初の背景

- (1) サンドエロージョンは，流体中に含まれる固体微粒子が壁面に繰り返し衝突し，壁面が機械的損傷を受ける現象であり，流体挙動，流体中の固体微粒子挙動，壁面形状変化が相互に干渉して起こる典型的なマルチ・フィジックス現象である。
- (2) サンドエロージョンは，各種流体機械にとって致命的な現象として知られている。
- (3) 航空用ガスタービン（ジェットエンジン）では，型式承認時に安全性確認のための砂吸い込み試験が課されており，一定量の砂を吸い込んでもエンジンが健全に稼動することを実証しなければならない。
- (4) サンドエロージョンに関する研究は，流体力学および破壊力学の両面から行われてきた。例えば，シンシナティ大学（米国）のグループは 20 年以上にわたり流体力学的な面から精力的な研究を続けている。
- (5) ほとんどの研究は流体/微粒子/壁面変形の相互干渉（マルチフィジックス性）を考慮したものではなく，実験に基づくエロージョン量の相関式提案とその検証といった側面が強い。
- (6) 国内外でサンドエロージョンを研究している他のほとんどの研究者・グループも同様のアプローチを採用している。

2. 研究の目的

- (1) 航空用ガスタービンの遷音速ファン動翼におけるサンドエロージョン現象を数値的に再現することによって，その発生原因・物理的メカニズムを明らかにすることを目的とする。
- (2) ファン動翼とともに回転運動する衝撃波を微粒子が通過する際の挙動のモデル化および検証計算を実施する。
- (3) 3次元動静翼干渉の再現のためにコードを作成し，3次元ファン動翼（NASA Rotor37）に対する検証計算を実施し，コードの健全性を確認する。
- (4) 構築したサンドエロージョン予測コードを活用し，さまざまな粒子条件（吸込み量，粒子径分布）およびエンジン運転条件におけるサンドエロージョン現象の解明を行い，耐サンドエロージョン性に優れた遷音速ファンの設計指針を提供する。
- (5) 開発したコードを Web 上で公開する。

3. 研究の方法

- (1) 本研究の第一段階として，平成 20 年度は，微粒子の衝撃波通過挙動を再現可能なモデ

ルを開発する。垂直衝撃波を通過する微粒子挙動は 2003 年度に完了しているため，当該研究を進展させ，ファン動翼に生じる斜め衝撃波に対する微粒子挙動の詳細を数値的に解明し，垂直・斜め両衝撃波に適用可能な物理モデルを提案・構築する。サンドエロージョンに寄与するような微粒子が斜め衝撃波を通過する際に作用する力は抗力，圧力，重力，揚力，仮想質量力，履歴力（バセット力）などであり，BBO 方程式により記述される。斜め衝撃波の問題では揚力や圧力の寄与が相対的に重要になってくるものと考えられ，また，斜め衝撃波通過時に受けるトルクにより，微粒子の回転運動が発生・強化され，回転効果が重要となることも予想される。したがって，平成 20 年度は，微粒子の挙動を可能な限り厳密に数値解析し，微粒子の斜め衝撃波通過時に，どのような力の寄与が支配的であり，どの寄与を計算上・実用上省略可能なかを明らかにする。

- (2) 平成 21 年度は，上記平成 20 年度の研究成果に基づき，遷音速ファンにおけるサンドエロージョン現象の再現を実施する。まず，平成 20 年度に開発した微粒子の衝撃波通過モデルを既存の 3次元コードに組み込み，コードのデバッグおよび動作確認を行う。次いで，サンドエロージョンを伴う遷音速翼に関する実験データは申請者の知る限り存在しないので，コードの動作確認に際しては，サンドエロージョンを伴わない遷音速ファンの流れによって流れ場計算部分の動作確認を行い，サンドエロージョンの実験データが豊富な曲がり管によってエロージョン部分の動作確認を行う。最後に，NASA が実験データを公開している遷音速ファン動翼

（Rotor37）に対してコードを適用し，コードの健全性と予測精度の検証を実施する。Rotor 37 は NASA が実験検証用にデータを蓄積・公開している軸流ファンであり，翼先端におけるマッハ数が 1.5 と高く，翼間に斜め衝撃波の発生が確認されている。

- (3) 平成 22 年度は，以上の研究経過・成果を受けて，これまでに構築したサンドエロージョン予測コードおよびサンドエロージョン・シミュレータ（平成 21 年度導入）を活用し，さまざまな粒子条件（吸込み量，粒子径分布等）およびエンジン運転条件（巡航，離陸，着陸条件等）におけるサンドエロージョン現象の解明を行い，耐サンドエロージョン性に優れた遷音速ファンの設計指針を提供する。また，開発したコードの Web 公開に向けて，マニュアルおよび公開ソフトの整

備を行う。

4. 研究成果

(1) 平成 20 年度は、微粒子の衝撃波通過挙動を再現可能なモデルを開発した。本研究により、微粒子が斜め衝撃波を通過する際に支配的なものは抗力のみであること、微粒子の回転は衝撃波通過時に誘起されるがその効果は微小であり実用上は無視できること、したがって、斜め衝撃波を伴うファン動翼まわりの粒子軌道計算であっても抗力のみを考慮し、非回転と仮定すれば、サンドエロージョン現象を再現・解明する上で十分であることが明らかとなった。

(2) 平成 21 年度は、遷音速ファンにおけるサンドエロージョン現象の再現を実施した。まず、平成 20 年度に開発した微粒子の衝撃波通過モデルを既存の 3 次元コードに組み込み、コードのデバッグおよび動作確認を行った。NASA が実験データを公開している遷音速ファン動翼 (Rotor37) に対してコードを適用し、コードの健全性と予測精度の検証を実施し、開発したコードが良好な予測性能を有することを確認した。

(3) 平成 22 年度は、前年度までに構築したサンドエロージョン予測コードをさまざまな粒子条件およびエンジン運転条件に適用し、パラメータ・スタディを行った。計算結果の一例を図 1 から図 3 に示す。本研究の結果、遷音速ファンのサンドエロージョンは動翼の前縁付近および静圧面のチップ付近に集中すること、動翼に衝突した粒子が遠心力でケーシング側へ運ばれるため、動翼後縁チップ付近の損傷が著しく、チップ・クリアランスを 10% 程度上げてしまうこと (したがって、漏れ損失が増加)、動翼後流に置かれた静翼では動翼後縁チップ付近に粒子が集中した結果として前縁チップ付近のみにエロージョン損傷が発生すること、などを明らかにした。

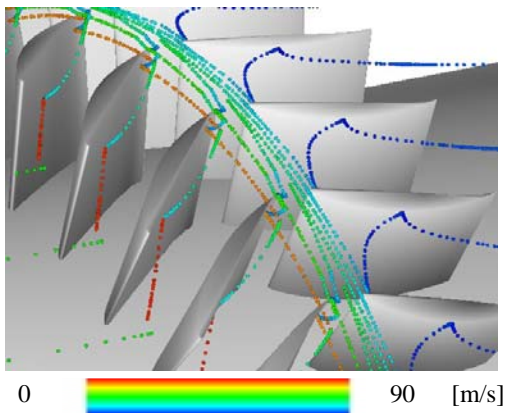


図 1 動静翼を通過する粒子の挙動

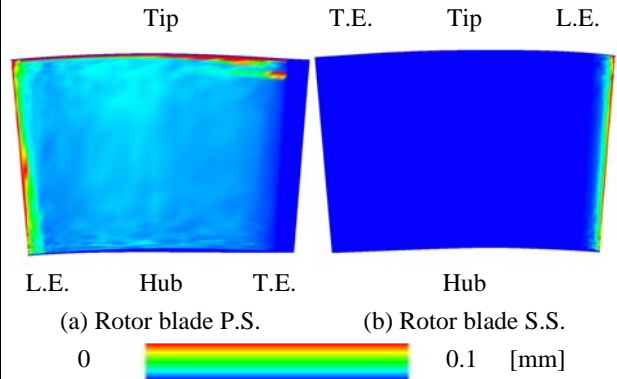


図 2 エロージョン損傷の深さ (動翼)

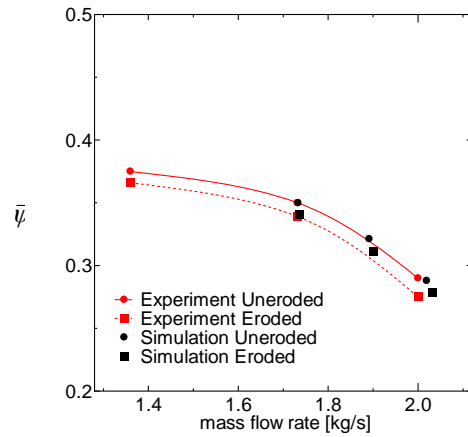


図 3 エロージョン前後における空力性能の変化

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 78 件)

- ① "Numerical Simulation of Sand Erosion Phenomena in a Single-Stage Axial Compressor", M. Suzuki and M. Yamamoto, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.6, No.1, (2011), pp. 98-113
- ② "Numerical Investigation on Detonation Wave through U-Bend", S. Otsuka, M. Suzuki and M. Yamamoto, Journal of Thermal Science, Vol.19, No.6, (2010), pp. 540-544
- ③ "単段軸流圧縮機におけるサンドエロージョンの数値予測", 鈴木, 山本, 日本機械学会論文集, B編, 76 巻, 765 号, (2010), pp. 795-803
- ④ "電気化学加工プロセスのマルチフィジックス・モデリング(モデル化 1way, 2way 手法の効果)", 坪井, 山本, 日本機械学会論文集, B編, 75 巻, 750 号, (2009), pp. 203-212
- ⑤ "Numerical Simulation of Sand Erosion in a Square-Section 90-Degree Bend", M. Suzuki, K. Inaba and M. Yamamoto, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.3, No.7, (2008), pp. 868-880
- ⑥ "Multi-Physics Simulation of Electro-Chemical Machining Process for Three-Dimensional Compressor Blade", T. Fujisawa, K. Inaba, M. Yamamoto and D. Kato, Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.130, No.8,

(2008), pp. 081602_1-081602_8

〔学会発表〕(計 107 件)

- ① “翼端噴出による翼端漏れ渦の制御に関する数値シミュレーション”, 中村, 鈴木, 山本, 第 26 回生研TSFDシンポジウム講演論文集, (2011), pp. 9-12
- ② “ファン動翼のサンドエロージョンにおけるノーズコーン形状の効果”, 鈴木, 山本, 日本機械学会 2010 年年次大会度講演会論文集, Vol. 8, (2010), pp. 63-64
- ③ “遷音速圧縮機動翼におけるサンドエロージョンの数値シミュレーション”, 鈴木, 山本, 日本流体力学会年会 2009 拡張要旨集, (2009), pp. 1-6
- ④ “単段圧縮機動翼におけるサンドエロージョンの数値予測”, 鈴木, 山本, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, Vol. 6, (2009), pp. 7-8
- ⑤ “サンドエロージョン現象の数値予測手法の開発と応用”, 鈴木, 山本, 第 24 回生研TSFDシンポジウム講演論文集, (2009), pp. 36-43
- ⑥ “タービン翼における付着現象の数値予測”, 卷田, 山本, 日本流体力学会年会 2008 拡張要旨集, (2008), pp. 1-2

〔図書〕(計 1 件)

- ① 乱流工学ハンドブック “21. 4. 3 流体機械”, 山本, 朝倉書店, (2009), pp. 488-492 (分担執筆)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/~yamamoto/index.j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本誠 (YAMAMOTO MAKOTO)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：202300584

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし