

航空機用材料のサンドエロージョンに関する研究

KARASAWA, Hidechika / 柄澤, 秀親

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

117

(発行年 / Year)

2024-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第598号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2024-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030492>

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

論文題目	航空機用材料のサンドエロージョンに関する研究		
氏名	柄澤 秀親		
学位の種類	博士（工学）		
学位番号	第 598 号		
学位授与年月日	2024 年 3 月 24 日		
学位授与の要件	法政大学学位規則第 5 条第 1 項第 1 号該当者（甲）		
論文審査委員	主 査	新井 和吉	教授
	副 査	御法川 学	教授
	副 査	吉田 一朗	教授
	副 査	津田 健	名誉教授（東京工業大学）

1. 論文内容の要旨

航空機において、運用中に鳥、石、雹、砂などの様々な異物が衝突することがあり、これらの衝突によって機体が損傷する現象は FOD (Foreign Object Damage) と呼ばれている。FOD の中でも、気体中に含まれる砂や塵などの粒子が材料に繰返し衝突することで材料表面が機械的損傷を受け脱離していく現象はサンドエロージョンと呼ばれ、航空機などの流体機械にとって致命的な事故原因となりうる。航空機において、燃費性能向上を目的とした軽量化のために、軽量で強度や剛性に優れるアルミニウム合金やチタン合金、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) などの複合材料が用いられており、これらの材料の耐サンドエロージョン性を明らかにすることは重要である。特に、ターボファンエンジンにおいては、離着陸の際に空気中に含まれる多量の砂や塵などの固体粒子を吸い込むことがあり、そのときの固体粒子速度は 100 m/s 以上となる。このため、エンジンを構成するファンブレードやファンケース、出口案内翼 (Fan Exit Guide Vane, FEGV) などは絶えず高速なサンドエロージョン環境に曝される。また、エンジン内では気流の断熱圧縮によって翼が加熱されるものと考えられる。このような環境におけるサンドエロージョンによる材料の寿命予測すなわち、損傷量を予測することは極めて肝要である。

CFRP 単体の耐サンドエロージョン性は、アルミニウム合金やチタン合金と比較して劣ることが知られている。したがって、CFRP をターボファンエンジンなどのサンドエロージョン環境で用いる場合には、高温において耐サンドエロージョン性に優れる材料でコーティングすることが必要である。CFRP へのコーティングに関して、近年では軽量の樹脂コーティング材が検討されており、ポリウレタン系のコーティング材が注目されてきた。

これらの背景を踏まえ、本論文では航空機用材料を対象にサンドエロージョンに関する種々の研究が行われている。本論文の構成は、以下に示す通りである。

第 1 章では、本研究の背景および目的、本研究の構成について述べている。また、サンドエロージョンに関する既往の研究について述べるとともに、現在の航空機用材料の状況についても述べている。

第2章では、現在、粒径 100 μm 以上の粒子を高速度で短時間かつ効率的に実施できるサンドエロージョン試験装置はほとんど存在していないため、汎用のブラスト型サンドエロージョン試験装置を用いて低速度領域で得られた結果を高速度領域に外挿可能かを明らかにすることを目的としている。航空機用材料として多用されているアルミニウム合金とチタン合金を用いて、一段式軽ガス銃を用いた高速サンドエロージョン試験を実施し、損傷評価方法を提案し、本手法を用いることで低速度領域におけるサンドエロージョン結果を高速度領域へ外挿できることが示されている。また、アルミニウム合金とチタン合金の試験結果から、先行研究における金属材料の損傷量予測式に基づき、低速度から高速度領域にわたる体積損傷速度の予測式が得られている。

第3章では、航空機材料として用いられている純チタン、Ti-3Al-2.5V、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al の3種類を対象としてサンドエロージョン試験を行い、耐サンドエロージョン性が比較されている。その結果、Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al が最も優れた耐サンドエロージョン性をもつことが明らかになっている。また、サンドエロージョン試験および軟体衝突試験と数値解析結果から、材料の降伏応力に及ぼすひずみ速度依存性が損傷の主たる要因であることを明らかにしている。さらに、先行研究における金属材料の損傷量予測式に基づき、チタン系材料の体積損傷速度の予測式が得られている。

第4章では、高温環境下でのCFRPおよびポリウレタン系コーティング材の耐サンドエロージョン性について検討されている。ガラス転移温度の異なる5種類のポリウレタン系材料を用いて、耐サンドエロージョン性に及ぼす粒子の衝突速度、衝突角度および温度の影響を検討し、体積損傷速度と温度の間にもべき乗則が成り立つこと、コーティング材の温度のべき数が粒子の衝突角度によって変化し、温度のべき数と衝突角度の間には線形関係があることが明らかになっている。また、先行研究の粒子の衝突速度、衝突角度に対する体積損傷速度の予測式に温度の影響を考慮した修正式が提案されている。

第5章では、位置によって衝突速度、衝突角度、衝突頻度を表わす衝突密度係数および温度が異なる三次元形状体のサンドエロージョン損傷量予測について検討されている。三次元形状体としてFEGVを対象にCFD解析を行い、各位置における衝突速度、衝突角度、衝突密度係数および温度を求め、前章までに得られたCFRPとポリウレタン系コーティング材の体積損傷速度の予測式と連成させることで、各位置の損傷量の予測が行われている。FEGVに対し、前章において最も優れた耐サンドエロージョン性を示したコーティング材をCFRPに適用した場合、CFRP単体と比較して損傷量が最大で約1/60となり、高い耐サンドエロージョン性を示すことが明らかになっている。また、実際にFEGVへコーティングを施工する際のコーティング膜厚を決定する設計式が提案されている。

第6章では、本研究を総括し結論を述べている。

2. 審査結果の要旨

本論文は、航空機用材料のサンドエロージョンによる損傷を予測することを最終的な目

的とし、航空機用材料の耐サンドエロージョン性について衝突試験、既往の研究の損傷量予測式、数値解析などの様々な方法を用いて検討したものである。本論文から、汎用のブラスト型サンドエロージョン試験装置を用いて低速度領域で得られた損傷結果が高速度領域に外挿可能であること、チタン系材料の中でも Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al が最も優れた耐サンドエロージョン性をもつこと、材料の降伏応力に及ぼすひずみ速度依存性が損傷の主たる要因であることが示されている。また、ポリウレタン系コーティング材が CFRP の耐サンドエロージョン性を向上させること、コーティング材の材料選定の際にはガラス転移温度が重要な要因となることが示されている。さらに、三次元形状体を対象に CFD 解析を行い、各位置における粒子衝突因子および温度を求め、各材料の体積損傷速度の予測式と連成させることで、各位置の損傷量の予測が行われ、実機すなわち高速度領域における三次元形状翼材料の損傷量を予測している。これらのことは、基礎研究のみならず製品開発の面からも大いに実用的であると考えられる。

本論文から得られた知見は、航空機のみならず、ヘリコプター、自動車、新幹線などの輸送機械や、粉体輸送などのサンドエロージョン環境下における材料の損傷量予測に応用されることが期待され、工学に資するところが大きい。口頭試問を含む審査の結果、以上の点において学術的新規性と工学的有効性を確認した。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した。