

論文の内容の要旨

論文題目 複合材ファンブレードの異物衝突による周縁部破壊の抑制
Suppression of Peripheral Edge Fracture of Composite Fan Blades due to Impact of Foreign Object Collision

氏名 梶原 翔

近年、航空機の軽量化の需要が高まっており、航空機ファンブレードの複合材化が積極的に取り組まれており、軽量のCFRP製の複合材ファンブレード開発されている。航空機ファンブレードは異物が高速で衝突するという環境下にあり、異物衝突問題の最も厳しい条件としてバードストライクに耐え得ることが求められる。CFRPは従来の金属材料に比べて衝撃耐性が劣るため、現在開発されている複合材ファンブレードは、衝撃点となる前縁部は金属で補強されている。その一方で、先端や後縁の周縁部においても破壊が生じ得ることが懸念されており、現在の複合材ファンブレードでは、周縁部をコンプライアントチップに置換、あるいは金属シースで補強されている。しかし、ファンブレードのバードストライクに関する先行研究は、衝撃直下の破壊に関する研究に限られており、周縁部の破壊抑制手法が存在しないため、より高性能な複合材ファンブレードを達成するためには周縁部での破壊メカニズムに注目する必要がある。また、従来のバードストライクの研究に関しては、実験と有限要素解析が主な手法であったが、ファンブレードの設計指針を示す上で、様々な数値実験を通して知見を得ることが必要であり、そのため、解析コストを落とした簡易的なモデルが必要である。そこで本論文は、複合材ファンブレードに異物が高速で衝突した際のファンブレードの周縁部破壊を研究対象とし、ファンブレードのバードストライク現象を模擬する数値解析モデルを作成し、ファンブレードの衝撃応答に関する解析を行うことで、衝撃によって発生し周縁部に伝播する曲げひずみを特定した。また、その曲げひずみのピーク値を低減するための手法やメカニズムの解明に取り組んだ。

まずは、バードストライク現象を簡易的に表現した数値解析モデルを作成した。ファンブレードはディスクに完全固定された片持ち矩形板としてモデル化され、回転する長方形板に関する基礎的な理論式を導出した。古典積層理論を用いて複合材の積層構成が考慮されており、平板の平衡方程式は、Hamiltonの原理を用いて弱形式で満たされてい

る。また、Rayleigh-Ritz法に基づき、片持ち梁と両端自由端の梁の変形を表すそれぞれの形状関数の掛け合わせで板の変位関数を表現した。これらの近似手法を統合し、ラグランジュ方程式を解くことで、複合材ファンブレードの運動方程式を導出した。また、提案するモデルの計算結果の妥当性を確認するための有限要素解析モデルについても作成した。さらに、実際のファンブレード形状をした有限要素解析モデル(フルモデル)を用いて、鳥に見立てた粒子群を衝突させるというようなバードストライクシミュレーションを行った。粒子群は状態方程式とSPH法を用いて定義されている。構築したこれらの解析モデルを用いて、固有振動解析や衝突についての過渡応答解析を行い、ファンブレードの周縁部での動力学について解析を行った。

簡易矩形板数値解析モデルでは、面外方向の変形に関する固有振動数と固有振動モード形状が得られた。また、同解析条件の有限要素解析モデルの結果と比較され、よい一致を示していることが確認された。フルモデルにおいても固有振動数と固有振動モード形状が得られ、面外方向の変形に関するモードが低次で生じていることが分かった。数値解析モデルの過渡応答解析では、スパン方向ひずみがファンブレード後縁に伝播し、ピーク値を持つということが示された。その一方で、コード方向ひずみはファンブレードの先端に伝播し、ピーク値を持つことが分かった。これらの時間履歴を、幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析モデルの結果と比較を行い、非線形性の影響が表れにくい高周波な時間帯においてはよい一致を示していることが確認され、数値解析モデルの計算結果の妥当性が示された。また、周縁部でのひずみの時間履歴についてモード分解を行い、ひずみのピークを引き起こす主要なモードの抽出したところ、主要モードの固有振動モード形状の曲げ変形と、周縁部でのひずみピーク発生箇所が対応していることを確認した。その一方で、フルモデルでの解析においても、ファンブレード後縁側でスパン方向ひずみがピーク値を持ち、ファンブレード先端でコード方向ひずみがピーク値を持つという結果が得られた。これにより、数値解析モデルのバードストライク現象を再現できており、周縁部での破壊はこれらの曲げひずみによるものであるということが示唆された。

さらに、ファンブレードを回転させた状態での解析を行い、遠心力の影響で面内引張りが定常時に発生し、その引張力による幾何剛性の影響で固有振動数は上昇し、低次モードほどその影響が大きいことが示された。また、高次モードが支配的な周縁部でのひずみの初期の立ち上がりに関しては、数値解析モデルではほとんど変化はなかったが、その一方で、フルモデルで得られた履歴はピーク値のみが上昇するという結果となった。衝撃荷重や衝撃直下の変位量を比較したところ、遠心力の影響で幾何剛性が増加したことにより、ファンブレードによる反力が増加し、その結果としてピーク値が上昇したということが示され、衝撃荷重を一定にしている数値解析モデルを使用する際の注意点となる。加えて、数値解析モデルを用いて、衝突が生じる箇所の感度や、ファンブレードのアスペクト比を変化させたときの周縁部でのひずみピークの変化を解析した。周縁部

でのひずみピークに関係する主要モードを誘発するような位置において荷重が負荷される場合に最も大きなピークが生じることが分かった。また、その主要なモードが低次側になるほどピーク値も上昇するため、周縁部での局所的な変形が多数発現する低アスペクト比のファンブレードほど周縁部でのひずみのピーク値は大きくなることが示された。

さらに、ファンブレード周縁部に伝播するひずみを低減する手法を、数値解析モデルを用いて探索した。衝撃によって曲げによる変形が生じるという解析結果を踏まえ、既存の複合材ファンブレードに適用されているコンプライアントチップや金属シースによる曲げ剛性の増減による効果を検証するとともに、CFRPの異方性を活かした曲げ剛性の異方性を設けて数値実験を行った。ファンブレードを前縁側、後縁側、翼根側、先端側の4つの領域に分けて解析を行ったところ、後縁側のスパン方向の曲げ剛性を増加させると、後縁でのスパン方向ひずみが低減され、先端側のコード方向の曲げ剛性を増加させスパン方向での曲げ剛性を低下させると、先端におけるコード方向ひずみが低減されることが示された。これにより、周縁部において曲げ剛性の異方性を設けることが効果的であることが分かり、周縁部においてCFRPの繊維配向角を変化させ曲げ剛性の異方性を強めた解析を行ったところ、同様の伝播ひずみ低減効果が得られた。また、バードストライクシミュレーションにおいても部分的に繊維配向角を変化させて解析を行い、その効果が検証された。

さらに、CFRP積層板の破壊モードの一つである層間剥離について、エネルギー解放率を使用して簡易的に評価した。動解析によって得られた変位分布の履歴を与えることで、動的エネルギー解放率を取得できることを示した。また、数値解析モデルで得られたバードストライクによる衝撃応答を用いて、ファンブレード先端に初期き裂が存在する場合でのエネルギー解放率の履歴を得た。エネルギー解放率は、き裂近傍の曲げひずみに大きく依存し、その結果、周縁部での曲げひずみを低減することがエネルギー解放率を下げき裂進展を抑制するということが示唆された。

最後に、本論文で得られた知見と今後の課題についてまとめられており、本論文の総括とした。