

審査の結果の要旨

氏名 永尾 陽典

工学士 永尾 陽典 提出の論文は、「成形爆薬による超高速射出装置の開発と CFRP 板への超高速衝突による損傷評価法に関する研究」と題し、7 章よりなる。

近年、人工衛星などの宇宙機の増加は人類に大きな利益をもたらしているが、スペースデブリの衝突によってこれらの宇宙機が機能を失う可能性も増えるという課題も同時に投げかけている。そのため、国際宇宙ステーションではデブリ衝突に対する防御が求められ、アルミニウム合金板をデブリが貫通する限界式などが実験的に求められている。一方、軽量化要求から昨今の衛星構造には複合材料がほぼ全面的に用いられているが、超高速のデブリが衝突した時の事象や構造健全性に与える影響についてほとんど明らかにされていない。従って、デブリ衝突による影響を考慮した設計を可能にするとの観点から、複合材料に対する超高速衝突損傷事象の把握と評価手法を明らかにすることは重要である。本研究では、低軌道での平均的デブリ速度 10km/sec を実現できる成形爆薬 (CSC) 超高速射出装置を開発・改良し、射出体の材料相の影響を含めた損傷評価手法を提案すると共に、炭素繊維強化エポキシ樹脂複合材料への超高速衝突試験結果の知見を基に、複合材料特有の貫通限界について議論し、さらに炭素繊維の強度が超高速衝突損傷に与える影響についても明らかにしている。さらに複合材料に対する超高速衝突シミュレーションの簡易手法の提案を行っている。

第 1 章は「序論」であり、本研究の背景についてまとめ、従来研究の問題点を総括するとともに、本研究の目的と本論文の構成について述べている。

第 2 章は、「成形爆薬による速度 7km/sec 級の超高速射出装置の開発」であり、固体と熔融体の混合相である可能性が高い CSC による射出体と、固体を射出する 2 段式軽ガスガンによる損傷との直接比較を目的として、ガスガンの上限速度である 7 km/sec 級の速度で射出できる CSC の開発について示している。CSC 各部の寸法を、シミュレーション結果を参考としながら設定し、所定の速度と質量を射出できる CSC 超高速射出装置の開発に成功している。

第 3 章は、「速度 7km/sec 級の成形爆薬射出装置の改良」であり、前章で課題となった後追いジェット除去方法を開発し、実験によってその効果を確認している。さらに CSC 射出体形成の詳細シミュレーションと実験結果との比較によってシミュレーションの有効性を明らかにしている。

第 4 章は「2 段式軽ガスガンと CSC 装置による超高速衝突損傷の相関」であり、射出体形状が損傷に与える影響をガスガンによる衝突実験から明らかにしている。また、速度 7km/sec で同質量の射出体を用いた CSC とガスガンの損傷量比較から、CSC を用いた場合の等価損傷固体質量の定量化に成功している。さらに材料相からの議論によって、この関係は 10km/sec でも適用できることを示している。

第 5 章は「高強度炭素繊維強化複合材料への超高速衝突による損傷」であり、射出体の運動工

エネルギーと積層板内部損傷面積の関係を定式化できることを示し、併せて複合材料の貫通限界は板厚で基準化した衝突エネルギーで表すとほぼ一定の値となり、金属と異なる事象を示すことを明らかにしている。その要因については、シミュレーションによって得られる樹脂温度からの検討を行っている。また、超高速衝突試験後に複合材料の非破壊検査と残存強度測定を行うことで、損傷量と健全性評価が可能であることを示している。さらに、超高速衝突により発生する応力波により樹脂層破壊が早期に発生するであろうとの推論から、板厚方向特性を繊維直角方向の特性で代表するモデル化を提案し、シミュレーション結果が試験の層内破壊位置を良く再現することから、2次元簡易モデル化によって損傷部位の推定が可能であることを示している。これらの知見は、費用と時間のかかる超高速試験の数を軽減し、デブリ損傷を考慮した設計に貢献するものである。

第6章は「炭素繊維の差異が損傷へ及ぼす影響とCSC装置によるCFRP衝突損傷の評価」であり、繊維強度が低いと内部損傷が広がるよりも繊維破壊が早期に起こることから、繊維の強度が損傷域に与える影響について明らかにしている。簡易シミュレーション手法によってもこの傾向が現れることを示している。さらに本研究で明らかにした、CSC装置とガスガンによる損傷の差異を示す関係式の複合材料への適用可能性について、10km/sec級のCSC装置による試験を行うことにより明らかにした。

第7章は「総括」であり、本研究で得られた結論を述べ、今後の課題について検討している。

以上要するに、本論文では、地上でのデブリ衝突を再現できるほぼ唯一の装置である、CSC超高速射出装置を用いた定量的な損傷評価法を確立すると共に、繊維強化複合材料に対する超高速衝突実験による知見を基に、デブリ衝突に対する貫通限界を求める手法と繊維や樹脂が損傷に与える影響を明らかにすることに成功している。また本論文で得られた成果は、繊維強化複合材構造の耐デブリ設計を支援する汎用的な数値シミュレーション手法を提供しており、超高速衝撃下における複合材料工学、損傷力学、複合材料構造設計の新しい発展に大いに寄与する有益な知見を与えている。とくに衛星構造の設計・製造を行う産業界への貢献は極めて大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。