

氏名（本籍）	深川 仁（岐阜県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第484号
学位授与日付	平成27年9月30日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	航空機用 CFRP に対するブラストを用いた高効率孔あけ技術の開発 (Development of high efficiency hole-preparation technology using blast for aircraft CFRP)
学位論文審査委員	(主査) 教授 三宅 卓志 (副査) 教授 王 志剛 教授 仲井 朝美

論文内容の要旨

本論文は、難削材料として知られる航空機用の炭素繊維強化複合材料（CFRP と記す）の孔加工における課題を明らかにし、孔加工に必要な各手法の特徴を比較評価することで、目的に応じて最適な手法が選択できる指針を構築することを目的とした。この目的を達成する上で、ドリルを使用せず CFRP を加工する技術として、砥粒を高压で噴射して材料を加工するブラストという特殊加工技術を提案し、これを研究開発することで、加工法選択の幅を広げた。本論文では全7章で構成されており、各章の構成は以下のとおりである。

第1章は緒言として、現状の国内外の最新研究技術の調査と分析を行ない、研究を進める上での課題が何であるかを明らかにした。次に第2章では、航空機用 CFRP を対象に、戦略的な加工法選択の視点から、ドリル、ブラスト、レーザ加工法について、加工能力・孔径・加工効率の面から分析した。各種加工法の中から最適な方法を戦略的に選択する方法について考察するうえで、CFRP の加工がなぜ難しいかを、ロジックツリーアナリシスにて分析した。

第3章では、ドリル以外の、従来にない全く新しい手法として、ブラストによる効率的な孔あけ方法を提唱した。ブラストによる CFRP の材料除去メカニズムを明らかにし、CFRP に効率よく多数の小径孔をあけるために、微細砥粒と直圧式ブラストによる孔加工実験を行った。また、CFRP の板厚、孔径などブラスト条件変更による孔精度・品質への影響を調べた。この結果、CFRP に対し小径孔を同時多数、効率良く加工できる基本的加工条件として、マスクの板厚、砥粒、噴射圧力、送り速度、加工回数（パス数）などを設定することができた。

第4章では、ブラスト加工法を実用化するため、詳細な加工実験を進めた。ブラストによる孔あけ過程には、材料の違いによるエロージョン過程の進展差など不明な点が多く、実用化して一般性を高めるため、実験値と理論的計算値との比較などの分析や検討を進めることを目的とした。このため、加工する材料などの条件を変化させ、エロージョン体積の実験値と理論的な計算値との比較などの分析や考察を行った。

第5章では、径の異なる孔に対して使用する最適砥粒を検討した。これまで、直径1~2 mm の孔加工を中心に加工効率に重点を置き、砥粒のサイズは実験に用いるブラスト装置の制約から、限られたサイズの砥粒を使用してきた。実験結果から孔精度・加工効率に影響するパラメータには、ノズルの送り・加工圧力・マスク材の厚さなどがあげられた。さらに小径を加工するには、砥粒径が重要なパラメータと予想され、最適条件を見出すことを目的とした。そこで、0.1~2.0mm までの孔径を盛り込んだマスクパターンを作り、3種類の径の砥粒を用意し、加工進展状況を観察し、孔精度および加工効率から、各孔径に対する最適砥粒径の検討を行った。その結果、異なる孔径に対する各種砥粒による孔精度および加工効率の影響と、孔径ごとの砥粒の選定基準を明らかにした。

第6章では、マスク材料の摩耗に注目し、従来のマスクより摩耗の小さいマスクを開発するため、各種材料の耐摩耗性を測定・評価することを目的とした。前章までの研究より、フォトマスクを利用することで CFRP 薄板への小径孔加工が可能であることを明らかにしたが、孔がテーパ形状を呈することや、加工時にマスク材料が摩耗するとマスク孔が拡大することが、テーパ形状を呈する原因の1つであると予測した。このため、マスク厚の孔精度への影響および、耐摩耗性と機械的特性との相関を明らかにし、より高性能なマスク材料選定のためのデータを得た。

第7章では、航空機用 CFRP に対する最適孔加工技術とブラストによる孔加工方法についてまとめた。また、具体的な航空機部品(エンジンカウルに用いる吸音パネル)を選び、そこに適用するためのケーススタディならびに加工工程の検討を行った。さらに、ブラスト加工法を実際使う場合に必要な工程検討について論述し、実用化に向けた将来見通しと課題を述べた。

論文審査結果の要旨

本論文は、難削材料として知られる航空機用の炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の孔加工における課題を明らかにし、要求性能 (孔径、孔精度等) に応じて最適な手法が選択できる指針を構築することを目的とするものである。CFRP は、その軽くて強い特性によって省エネルギーを実現するものとして、航空機のみならず自動車や家電等に更なる応用が期待されている。部品同士の組付けにファスナーを使用しており、その組付け用の穴を成形時にあけることは困難であるため、後工程にトリミング加工や孔あけ加工が必要となる。しかしながら、CFRP の切削加工では、工具摩耗が激しいこと、バリや層間はく離等が発生することが課題となっており、高能率・高品質に加工することが求められている。また、CFRP はその成形方法の相違によって特性に違いがあり、加工形態にも相違が見られる材料である。このような背景において、要求性能に応じた最適な孔あけ手法が選択できる指針を構築することは、工学的な意義を有する。

本論文では、上記目的を達成する上で、ドリルを使用せず CFRP を加工する技術として、砥粒を高圧で噴射して材料を加工するブラストという特殊加工技術を提案し、これを発展させることで加工法選択の幅を広げた。CFRP の材料除去メカニズムを明らかにし、CFRP の板厚、孔径などブラスト条件が孔精度・品質へ及ぼす影響を検討した。その結果、マスクの板厚、砥粒、噴射圧力、送り速度、加工回数などの設定指針を構築した。ブラストによる孔あけ過程には、材料の違いによりエロージョン過程の進展差が生じるため、実用化して一般性を高めるため、エロージョン体積の実験値と理論的な計算値との比較などの分析や考察を行った。ブラスト加工に関する研究事例は非常に少なく、複合材料の孔加工に応用し、小径孔を同時に効率よく加工が可能な技術として確立したことは、工業的な価値が高いと言える。次に、ブラスト砥粒および小径孔加工用マスク材料が孔精度に及ぼす影響について検討し、孔径ごとの砥粒の選定および高性能なマスク材料選定基準を明らかにした。最後に、航空機用 CFRP に対する最適孔加工技術とブラストによる孔加工方法についてまとめている。さらに、ブラスト加工法を実際使う場合に必要な工程検討について論述し、実用化に向けた将来見通しと課題を述べた。

以上の結果より、目的に応じた CFRP 孔加工法が選択できる指針を設けることができた。これら成果を、学術面だけでなく、広く社会に還元することにより、国内における CFRP 加工技術の発展に貢献するものと期待できる。

このように、本論文は有用な知見を数多く見出しており、新規性、有用性の点で優れていると判断できることから、学位論文審査委員会は、審査の結果、この論文を学位論文に値するものと判定した。

最終試験結果の要旨

学位論文審査委員会は、提出論文の基礎となる発表論文 (査読付き論文 4 本) の内容を確認し、平成 27 年 8 月 7 日に開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、最終試験に合格と判定した。

発表論文 (論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ)

1. ブラストによる CFRP の孔加工技術の開発、深川仁、廣垣俊樹、加藤隆雄：砥粒加工学会誌、56 (2012) pp.50-55
2. Development of Hole Generation Technologies for Aircraft CFRP Parts, H. FUKAGAWA, T. HIROGAKI, T. KATO, A. KATO, M. SEKI: Key Engineering Materials, vol.523-524 (2012), pp.226-231
3. Multi-hole Drilling Method by Abrasive Blasting for CFRP and Composite Materials, H. FUKAGAWA, T. HIROGAKI, I. YAMADA, A. KATO, K. SHIMIZU, K. NISHIKAWA: Advanced Materials Research, vol.1017 (2014), pp.38-43.
4. Investigation of Decision Criteria for Abrasive Conditions in Multi-Small-Hole Drilling of CFRP by Blast Process, H. FUKAGAWA, T. HIROGAKI, K. SHIMIZU, K. NISHIKAWA: Advanced Mechanics and Materials, vol.806 (2015), pp.119-124.