

氏名	南部 洋平
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 873 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	微細深穴のドリル加工に関する研究
論文審査委員	委員長 教授 堀尾健一郎
	委員 教授 池野 順一
	委員 教授 山本 浩
	委員 連携教授 大森 整

論文の内容の要旨

船用ディーゼルエンジンの燃料噴射ノズルやガスタービンの燃料・水蒸気噴射ノズルの材料であるステライト等の耐熱合金やステンレスに対し、直径 0.2mm 以下でアスペクト比の大きな微細深穴をドリル加工する際の問題点の本質を追究し、その解決手段を検討した。

アスペクト比の大きい微細深穴加工の課題として切りくず排出性が悪いことや刃先冷却が進まないこと、工具剛性に対して相対的に切削抵抗（切削トルク・スラスト力）が大きいことを挙げ、その課題解決の手法としてドリル刃先へのシンニング、工具軸方向への超音波振動付加及び低周波振動付加について着目し検討を行った。

微細深穴加工におけるシンニングの効果について検討した。微細ドリル先端にシンニング加工を行う装置を開発し、直径 0.2mm のドリル先端にシンニング加工を行った。加工再現性は $\pm 4\mu\text{m}$ 以下となった。シンニングを行ったドリルを用いてステライトに対し深さ 4mm の微細深穴加工をしたところスラスト力は約 20%低減し、切りくずの刃先への溶着は約 25%低減した。シンニングによって形成されるチゼル部すくい角とスラスト力には大きな相関があり、すくい角が大きいときほどスラスト力が減少することを明らかにした。ステンレスに対して直径 0.2mm、深さ 4mm の微細深穴加工を行ったところ、スラスト力低減の効果と刃先強度の関係からチゼル部すくい角が $-10^{\circ}\sim 0^{\circ}$ のときに工具寿命が最長となった。実用性を考慮した工具軸に平行に切り込むシンニング方法によっても、砥石切り込み量を十分に確保して砥石先端 R を小さくするなどしてチゼル部すくい角を変えると同様の効果が期待できることが分かった。

微細深穴加工において工具寿命を確保しつつ加工時間を短くするため、工具軸方向に超音波振動を付加することを検討した。高アスペクト比微細穴である $L/D=10$ の加工実験を行い、刃先摩耗や切削動力の評価によって最適な振動振幅を導出した。ステンレスに対する直径 0.2mm、深さ 4mm の微細深穴加工を行ったところ、超音波振動を付加することで工具寿命が約 7 倍となるなど長寿命化やステップ量増加による加工時間短縮の効果があつた。さらに、そのときの知見を基にして $L/D=20$ の超高アスペクト比微細穴加工につ

いて検討を行った。L/D=10と同じ条件では切削油が供給困難になり、振動による冷却促進効果が薄れるため超音波振動付加の効果が発揮できなかった。超音波振動を付加することが加工に悪影響を及ぼすことの原因を調べるため、穴深さ毎の超音波振動効果を検討した。深さ毎に区間を区切り、それぞれの区間を別個のドリルで止まり穴加工し、慣用加工に対する振動加工のスラスト力比によって超音波振動効果の評価をおこなった。これによりステンレスに対して直径0.2mmの微細深穴加工を行うと深さ3mm以上で超音波振動効果が小さくなることが分かった。これに対して切削速度を落とすことやシンニングドリルを用いることで切削温度上昇の抑制を試みたところ、L/D=20の超高アスペクト比微細穴に対しても超音波振動を適用できることが分かった。これらの結果より、超音波振動を付加するときに、切削速度を小さくすることやシンニングドリルを用いることで工具寿命を長く保ちつつ、ステップ量を大きくして加工時間を短くできることを明らかにした。

微細深穴加工において低周波振動を工具軸方向に付加するとき、振動条件の評価を行い最適な振動条件を選択する手法について検討した。最適な振動条件を選択するため、切削時間比率 R_c 及び正速度時間比率 R_p を評価指標として提案した。工具軸方向に低周波振動を付加したときの刃先軸方向変位と切り取り厚さについて定式化し、振動1周期中の切り取り厚さが正となっている時間の比率を切削時間比率 R_c とした。切り取り厚さが正となっている時間中の振動速度が正となっている時間の比率を正速度時間比率 R_p とした。それぞれの指標が工具回転周波数 f_d と振動周波数 f_v の比である周波数比 f_v/f_d と1刃当りの送り F_z と振幅 A の比である振幅比 A/F_z の組み合わせに対応した1つの値となることに着目し、指標のマッピングを行った。これらのマップを用いて R_c が小さく R_p が大きくなる周波数比と振幅比の組み合わせを選択することで、微細深穴ドリル加工に適した振動周波数と振動振幅を決定できることが分かった。

ここまでの検討から、シンニングにはスラスト力低減の効果、超音波振動付加には平均切削抵抗低減や刃先冷却の効果、低周波振動付加には切りくず細分化や刃先冷却、平均切削抵抗低減の効果が見られた。各手法にはそれぞれ違った効果があるため、併用することでそれらを足し合わせた効果を得ることが期待できる。

これまでの手法を併用し、実加工へ適用するための取り組みを行った。具体的な事例として、シンニングと超音波振動付加を併用することで、ガスタービン用燃料噴射ノズルを想定したステンレスへの直径0.2mm、深さ4mmの微細深穴を安定して高品質に加工することを検討した。目標とする加工時間内で工具寿命が最長となる加工条件について検討を行い、基準加工条件とした。超音波振動付加及びシンニングによって切削動力の低減、工具の長寿命化を図れることが分かった。両手法を重ね合わせることで効果が相乗され工具寿命は約8倍となった。また、シンニングや超音波振動付加によって穴位置偏差が低減し、超音波振動付加によって穴内壁面が平滑化することが分かった。両手法を重ね合わせることで効果が相乗され穴位置偏差が約80%低減し穴内壁面が平滑化した。続いて、シンニング、超音波振動付加、低周波振動付加を併用することで、ガスタービン用水蒸気噴射ノズルを想定したステンレスへの直径0.1mm、深さ1.5mmの微細深穴加工の長寿命化について検討した。加工時間に影響の大きいステップ量を中心に加工条件を検討し、目標加工時間内で工具寿命が最長となる加工条件を基準条件とした。シンニング及び超音波振動付加により工具の長寿命化を図ることができた。また、超音波振動と低周波振動を併用した複合振動により、長寿命化と切りくず細分化を同時に実現することができた。シンニングと複合振動付加の併用によって効果が相乗され、工具寿命を約9倍とすることができた。

論文の審査結果の要旨

本論文は、直径 0.2mm 以下ときわめて小径でかつアスペクト比の大きな微細深穴をドリル加工する際の問題点の本質を追究し、その解決手段を検討した論文である。

第 1 章では、ステライト等の耐熱合金、ステンレスなどの難削材料を用いる船用ディーゼルエンジンの燃料噴射ノズルやガスタービンの燃料・水蒸気噴射ノズルなど、各種燃料噴射ノズルに微細深穴ドリル加工が必要とされる背景について説明し、現状の問題点を挙げた。

第 2 章では、微細深穴加工の課題として切りくず排出性が悪いことや刃先冷却が進まないこと、工具剛性に対して相対的に切削抵抗（切削トルク・スラスト力）が大きいことを挙げ、その課題解決の手法としてドリル刃先へのシンニング、工具軸方向への超音波振動付加及び低周波振動付加について着目し検討を行う意義について述べている。

第 3 章では、微細深穴加工におけるシンニングの効果について検討した。微細ドリル先端にシンニング加工を行う装置を開発し、直径 0.2mm のドリル先端にシンニング加工を行った。加工再現性は $\pm 4\mu\text{m}$ 以下となった。シンニングを行ったドリルを用いてステライトに対し深さ 4mm の微細深穴加工をしたところスラスト力は約 20%低減し、切りくずの刃先への溶着は約 25%低減した。シンニングによって形成されるチゼル部すくい角とスラスト力には大きな相関があり、すくい角が大きいときほどスラスト力が減少することを明らかにした。ステンレスに対して直径 0.2mm、深さ 4mm の微細深穴加工を行ったところ、スラスト力低減の効果と刃先強度の関係からチゼル部すくい角が $-10^{\circ}\sim 0^{\circ}$ のときに工具寿命が最長となった。実用性を考慮した工具軸に平行に切り込むシンニング方法によっても、砥石切り込み量を十分に確保して砥石先端 R を小さくするなどしてチゼル部すくい角を変えると同様の効果が期待できることなどを明らかにした。

第 4 章では、微細深穴加工において工具寿命を確保しつつ加工時間を短くするため、工具軸方向に超音波振動を付加することを検討した。高アスペクト比微細穴である $L/D=10$ の加工実験を行い、刃先摩耗や切削動力の評価によって最適な振動振幅を導出した。ステンレスに対する直径 0.2mm、深さ 4mm の微細深穴加工を行ったところ、超音波振動を付加することで工具寿命が約 7 倍となるなど長寿命化やステップ量増加による加工時間短縮の効果があつた。さらに、そのときの知見を基にして $L/D=20$ の超高アスペクト比微細穴加工について検討を行った。 $L/D=10$ と同じ条件では切削油が供給困難になり、振動による冷却促進効果が薄れるため超音波振動付加の効果が発揮できなかった。超音波振動を付加することが加工に悪影響を及ぼすことの原因を調べるため、穴深さ毎の超音波振動効果を検討した。深さ毎に区間を区切り、それぞれの区間を別個のドリルで止まり穴加工し、慣用加工に対する振動加工のスラスト力比によって超音波振動効果の評価をおこなった。これによりステンレスに対して直径 0.2mm の微細深穴加工を行うと深さ 3mm 以上で超音波振動効果が小さくなることが分かった。これに対して切削速度を落とすことやシンニングドリルを用いることで切削温度上昇の抑制を試みたところ、 $L/D=20$ の超高アスペクト比微細穴に対しても超音波振動を適用できることが分かった。これらの結果より、超音波振動を付加するときに、切削速度を小さくすることやシンニングドリルを用いることで工具寿命を長く保ちつつ、ステップ量を大きくして加工時間を短くできることを明らかにした。

第5章では、微細深穴加工において低周波振動を工具軸方向に付加するとき、振動条件の評価を行い最適な振動条件を選択する手法について検討した。最適な振動条件を選択するため、切削時間比率 R_c 及び正速度時間比率 R_p を評価指標として提案した。工具軸方向に低周波振動を付加したときの刃先軸方向変位と切り取り厚さについて定式化し、振動1周期中の切り取り厚さが正となっている時間の比率を切削時間比率 R_c とした。切り取り厚さが正となっている時間中の振動速度が正となっている時間の比率を正速度時間比率 R_p とした。それぞれの指標が工具回転周波数 f_d と振動周波数 f_v の比である周波数比 f_v/f_d と1刃当りの送り F_z と振幅 A の比である振幅比 A/F_z の組み合わせに対応した1つの値となることに着目し、指標のマッピングを行った。これらのマップを用いて R_c が小さく R_p が大きくなる周波数比と振幅比の組み合わせを選択することで、微細深穴ドリル加工に適した振動周波数と振動振幅を決定できることを明らかにした。

第6章では、これまでの手法を併用し、実加工へ適用するための取り組みを行っている。第3章から第5章までの検討から、シンニングにはスラスト力低減の効果、超音波振動付加には平均切削抵抗低減や刃先冷却の効果、低周波振動付加には切りくず細分化や刃先冷却、平均切削抵抗低減の効果が見られることを示したが、各手法にはそれぞれ違った効果があるため、併用することでそれらを足し合わせた効果を得ることができるか検討した。

具体的な事例として、シンニングと超音波振動付加を併用することで、ガスタービン用燃料噴射ノズルを想定したステンレスへの直径0.2mm、深さ4mmの微細深穴を安定して高品質に加工することを検討した。目標とする加工時間内で工具寿命が最長となる加工条件について検討を行い、基準加工条件とした。超音波振動付加及びシンニングによって切削動力の低減、工具の長寿命化を図れることが分かった。両手法を重ね合わせることで効果が相乗され工具寿命は約8倍となった。また、シンニングや超音波振動付加によって穴位置偏差が低減し、超音波振動付加によって穴内壁面が平滑化することが分かった。両手法を重ね合わせることで効果が相乗され穴位置偏差が約80%低減し穴内壁面が平滑化した。続いて、シンニング、超音波振動付加、低周波振動付加を併用することで、ガスタービン用水蒸気噴射ノズルを想定したステンレスへの直径0.1mm、深さ1.5mmの微細深穴加工の長寿命化について検討した。加工時間に影響の大きいステップ量を中心に加工条件を検討し、目標加工時間内で工具寿命が最長となる加工条件を基準条件とした。シンニング及び超音波振動付加により工具の長寿命化を図ることができた。また、超音波振動と低周波振動を併用した複合振動により、長寿命化と切りくず細分化を同時に実現することができた。シンニングと複合振動付加の併用によって効果が相乗され、工具寿命を約9倍とすることができた。

第7章では研究全体を総括し、今後の展望について議論している。

以上本論文では、工業的にもきわめて重要な問題である難削材料の微細深穴ドリル加工に関し、複数のアプローチを行いそれぞれに関して綿密な検討を行って数多くの知見を得るとともに実用的にも有益な技術を確立している。さらに、複数の技術を併用して相乗効果を挙げることについても実証している。本論文の成果は5編の学術雑誌論文、3件の特許出願として公表されている。また、1件の学会技術賞を授与されている。

以上を鑑み、審査委員会は博士（工学）の学位に十分に値すると判断した。