

氏名	春日 博
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762号
学位授与年月日	平成22年3月24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	超精密研削システムの基底パラメータ選択とその効果に関する研究
論文審査委員	委員長 教授 三島 健稔
	委員 教授 池口 徹
	委員 教授 重原 孝臣
	委員 准教授 池野 順一
	委員 教授 土肥 俊郎（九州大学大学院）
	委員 連携教授 大森 整

論文の内容の要旨

本論文は、超精密研削で設定する多数の研削パラメータの中から、強い影響力を及ぼすものを「基底パラメータ」として区分し、当該パラメータを効率的に探索するシステムを提案し、その有効性を確認したものである。

研削パラメータの選択およびパラメータ値の設定は、超精密研削の結果と時間およびコストを左右する決定的要因となる。しかし、現状ではパラメータ空間の探索は、多くの場合、熟練者の経験則に基づき行う外はない。ただし、熟練者が持つ経験則は、定性的であり、熟練者本人への依存度が高い。そのため、選択されるパラメータは、各熟練者によって異なり、その客観性も保証されていない。したがって、研削パラメータの選択およびパラメータ値の設定の効率的探索が、超精密研削において重要な役割を果たす。

本論文では、「研削パラメータの抽出」、「組み合わせの削減」、「ELID研削の結果解析」、「基底パラメータに基づく実験」、「評価」の5つのステップから構成される基底パラメータの効率的探索システムを導入した。

研削パラメータの抽出のステップでは、被削材のサイズなどから半自動的に決定される研削パラメータやパラメータ値の変更時に時間やコストを要するものを除外することにより探索対象の絞込みを行う。

組み合わせの削減のステップでは、直交配列表を用いることにより、一度に複数の研削パラメータ値を変更可能な実験に改める。

ELID研削の結果解析のステップでは、ELID研削の実験データに基づき実験結果に対して強い影響を及ぼすパラメータを算出する。算出手法は、平均値の差を比較する手法として一般的なt検定を用い、その結果得られるt値の絶対値から各パラメータの影響度を算出する。

基底パラメータに基づく実験のステップでは、影響度が上位のパラメータを選定し、上位の研削パラメータから順にパラメータ値を変更した実験を行う。また、先行事例および同等製品の仕様などを参考にし、評価実験の目標値を設定する。

評価のステップでは、評価実験の結果を比較し、目標値に対して最も適切な研削パラメータの組み合わせを基底パラメータとして選択する。

そして、本システムを実際の研削実験に用い、各目的に応じた基底パラメータを探索した。対象とした材料と研削目的は、研削が困難とされる高硬度・脆性材料の中から今後、多くの需要が予想される以下のものである。

- ・ GZ-12 (歯科用セラミックス) : 高寸法精度
- ・ K-PSFn202, K-VC89, K-CaFK95 (光学レンズ用ガラス) : 高面精度 (表面粗さ)
- ・ 4H-SiC ウェーハ 0001 面 : 高能率

実験の結果、GZ-12 では、高寸法精度に対する基底パラメータとして、Y 軸送り速度、スパークアウト、On time、X 軸送り速度の 4 種類のパラメータを選択し、総切込み量 1000 μm における被削材除去量は、998, 1000, 1001 μm で、許容値である $\pm 20 \mu\text{m}$ を達成した。この基底パラメータを選択するまでに要した実験回数は 13 回 (3 日間) であり、熟練者が探索を行うのに要する時間 (2 ~ 3 日間) とほぼ同等であった。

K-PSFn202 では、高面精度に対する基底パラメータとして、スパークアウト、無負荷電圧、初期電解時間、切り込み速度、砥石周速度の 5 種類のパラメータを選択し、接触式表面粗さ測定機による算術平均粗さ (Ra) は、1.2, 1.2, 1.6 nm で、目標値である Ra 2 nm を達成した。この基底パラメータを選択するまでに要した実験回数は 25 回 (4 日間) であり、熟練者が探索を行うのに要する時間 (2 ~ 3 日間) に近い結果であった。

K-VC89 では、高面精度に対する基底パラメータとして、スパークアウト、切り込み速度、無負荷電圧、On time、砥石周速度、初期電解時間の 6 種類のパラメータを選択し、接触式表面粗さ測定機による算術平均粗さ (Ra) は、1.0, 0.8, 1.0 nm で、目標値である Ra 2 nm を達成した。この基底パラメータを選択するまでに要した実験回数は 25 回 (4 日間) であり、熟練者が探索を行うのに要する時間 (2 ~ 3 日間) に近い結果であった。

K-CaFK95 では、高面精度に対する基底パラメータとして、無負荷電圧、初期電解時間、砥石周速度、スパークアウトの 4 種類のパラメータ、または 4 種類のパラメータに切り込み速度を加えた 5 種類のパラメータを選択し、接触式表面粗さ測定機による算術平均粗さ (Ra) は、4 種類の場合、1.4, 1.2, 1.2 nm、5 種類の場合 1.0, 1.0, 1.2 nm で、目標値である Ra 2 nm を達成した。この基底パラメータを選択するまでに要した実験回数は 25 回 (4 日間) であり、熟練者が探索を行うのに要する時間 (2 ~ 3 日間) に近い結果であった。

4H-SiC (0001) 面では、上記の実験を踏まえ、砥石周速度、被削材回転数、初期電解時間、無負荷電圧、ピーク電流を高能率研削に対する基底パラメータとして選択し、パラメータ値を設定した。総切込み量 40 μm に対する被削材除去量は、32, 34, 30 μm で、目標値である 24 μm (60 %) を達成した。この基底パラメータを選択し、パラメータ値を設定するまでに要した実験回数は 8 回 (2 日間) であり、熟練者が探索を行うのに要する時間 (2 ~ 3 日間) と同等であった。

以上により、超精密研削で設定する多数の研削パラメータの中から、強い影響力を及ぼす基底パラメータの効率的探索システムを構築し、熟練者がパラメータの探索を行う場合に近い時間で、GZ-12, K-PSFn202, K-VC89, K-CaFK95, 4H-SiC ウェーハ 0001 面の研削目標値を達成した。

論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、当該学位請求論文に関わる公聴会を平成 21 年 12 月 24 日に開催し、引き続き審査会を開催した。その発表を含む学位請求論文の審査結果について以下に要約する。

本研究は、超精密研削に於いて設定する多数の研削パラメータから影響力の大きいものを「基底パラメータ」として抽出、その効率的探索手法を示し、且つ妥当性を実験的に明らかにしたものであって、本論文は 6 章と謝辞、付録、及び参考文献により構成されている。

第 1 章は、序論と題して研究の背景、目的および本論文の構成などについて述べている。すなわち、研削パラメータの選択とその値の設定は、超精密研削の結果を左右し、所用時間とコストに直結する決定的要因であること、パラメータの探索は、単純な場合であっても $2^{20} = 1048576$ にもなり、熟練者の経験則に基づく外はない現状にあること、その為、熟練者の資質に依存する定性的なものであってパラメータの選択に客観的な指標はないことなどを明らかにして、研削パラメータの選択とその値の探索効率化と客観的な指標の必要性を明らかにしている。

第 2 章は超精密研削とパラメータと題し、超精密研削加工を左右するパラメータとその選択法について、現状と問題点を明確にしている。すなわち、パラメータの選択について、経験則に基づくもの、研削加工プロセスモデルによるもの、ソフトコンピューティング手法によるもの、及び ELID 研削によるものなどに分類して、パラメータの選択問題について述べている。

第 3 章は ELID 研削と研削パラメータと題して、申請者の提案する基底パラメータとその選択手順について述べている。それは、① 経験則によるパラメータの取捨選択、② 直交配列表による組合せの取捨選択、③ 実験による確認、④ 基底パラメータ選択、⑤ 実験による確定 の 5 段階からなっている。そして、①、② の操作により得た 10 個程度のパラメータの影響力を実験により確認し、通例 4、5 個程度の基底パラメータにより加工目的に対するパラメータの影響力の 80% 程度を確定できるとしている。

第 4 章は硬脆材料を用いた研削パラメータの解析と題して、申請者の選択手法により代表的な素材を対象として高寸法精度、高能率、及び高面精度などの超精密研削実験を行っている。すなわち、高寸法精度研削としては GZ-12 (歯科用セラミックス)、高面精度研削実験は K-PSFn202、K-VC89、K-CaFK95 (光学レンズ用ガラス) によって、また、高能率研削の実験は 4H-SiC ウェーハ (0001) 面によって実験を行い、詳細なデータを集積している。

第 5 章は新手法による硬脆材料研削とその評価と題して、第 4 章に於いて示した実験結果について、高寸法精度、高能率、高面精度の研削実験結果を精査し、各々の目標を達成したとしている。

第 6 章は結論である。学位申請者の導入した基底パラメータ、その探索手法、及び値の設定手法によって、熟練者に依存する外はなかった研削工程に明確な指針を示し、これによってデータの客観性を確保したこと、熟練者でなくても数日の実験により、熟練者の設定する加工精度を上げることができるとしている。このことは必ずコスト低減と時間の短縮に貢献しているとしているのである。

以上に加えるに、謝辞、付録 A (歯科用セラミックスの表面粗さの測定データ)、付録 B (光学レンズ用ガラスの表面粗さの測定データ) 及び参考文献が付されている。

科学技術や産業の高度化を支える加工の高精密化と難加工素材加工への要請は時代の趨勢であるが、多くは熟練者の或る種の感覚に依存している。例えば、高硬度材料である酸化ジルコニウム (ZrO_2) の平面研削では、非熟練者が研削パラメータ探索に要する日数は 2～4 週間であるのに対して、熟練者は 2、3 日

であるといわれている。また、脆性材料である K-CaFK95（光学レンズ用ガラス）の ELID 平面研削では、研削パラメータ値の設定により表面粗さ（算術平均粗さ：Ra）に 533 倍の差が生じるとされている。このことは、セラミックスやガラスなどの難加工材料（高硬度・脆性材料）に対する高精度および高能率加工に対する強い需要のボトルネックになっているのである。学位申請者は、このような加工技術のボトルネックであるパラメータの選択とその値設定に関する解決を図ったのである。

申請者は、先ずパラメータ選択とその値設定に関する熟練者の経験則を分析して、現実的に処理不可能な実験回数を減らすのに利用している。これは、現在極めて優れた特性を有する ELID 平面研削を対象にしたものであるが、例えば、考慮すべき 37 個のパラメータを 11 個に減らしている。しかし、最も簡単な場合を仮定してもその値を定めるのに 2^{11} （2048）組のパラメータによる実験が必要であるが、現実には不可能であり、ここでも組合せの選択は経験則に拠っていたのである。ここで申請者は、直交配列表を利用して 10 個程度の組みを選択し、これに対して実験を遂行したのである。この選択は機械的であり客観性を保持するものである。更に、実験を通じて、4～5 個の組合せが全てを考慮した場合の 80% 程度の影響力を有し、それ以上は飽和現象を起すのみで意味がないことが明らかになったのである。

これは考慮すべき 2^{37} 個の組合せから 4～5 個の組合せを選択し実験することにより超精密研削の設定目標（熟練者の成果程度）を満足するシステムを構成できることを意味するもので、実に劇的な効果をもたらすものである。GZ-12 では 2^{37} 個の組合せが 4 個、K-PSFn202、K-VC89、K-CaFK95 では 2^{33} 個の組合せが 4～5 個、SiC ウェーハは 2^{33} 個の組合せが 5 個で十分であると明示されている。

また、加工精度についても、GZ-12 では $1000 \mu\text{m}$ の総切込み量に対する平均被削材除去量が $999.7 \mu\text{m}$ であり、許容値である $\pm 20 \mu\text{m}$ を達成したこと、算術平均粗さ（Ra）は、K-PSFn202 が 1.2、1.2、1.6 nm、K-VC89 が 1.0、0.8、1.0 nm、K-CaFK95 が 1.4、1.2、1.2 nm であり、目標値である Ra 2 nm を達成したこと、SiC ウェーハの $40 \mu\text{m}$ の総切込み量に対する平均被削材除去量は、 $32 \mu\text{m}$ であり、目標値である $24 \mu\text{m}$ （60%）を達成したことが示されている。なお、これらの基底パラメータの選択に要した実験回数は、歯科用セラミックスが 13 回（3 日間）、光学レンズ用ガラスが 25 回（4 日間）、SiC ウェーハが 8 回（2 日間）であり、熟練者が探索を行うのに要する時間（2～3 日間）とほぼ同等であった。

以上に明らかなように、熟練者の技量に依存していた超精密研削技術の技術継承とその機械化にも大きな道を開いたのであってその工学的価値、産業界に及ぼす影響の大きさは計り知れないものがある。

更に種々の材料によって、物理的性質、加工精度、機器による 3 次元マップの如きものを作成する方向へ必然的に発展すると思われるが、それによってほぼ自動化された研削システムを構成できることになるであろう。本研究はその端緒を拓いたのもである。

尚、学位申請者の学位請求論文に関係する刊行物は、学術誌論文 4 編（欧文 2）、国際会議論文 14 編、その他のシンポジウム論文など 22 編を数えている。

以上により、当学位審査委員会は全員一致して博士（工学）の学位を授与するに値すると判断し、合格とした。