

氏名	佐藤昌彦
生年月日	
本籍	山形県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第189号
学位授与の日付	平成11年3月25日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	熱放射線による微小切削温度の研究
論文審査委員	(主査) 上田 隆司 (副査) 黒部 利次, 木村 繁男, 米山 猛, 細川 晃

学位論文要旨

Abstract

The fundamental characteristics of an infrared radiation pyrometer with an optical fiber are investigated theoretically and experimentally. The infrared rays radiated from the object are accepted by the optical fiber and led to the infrared detector. The tool face temperature in micro-cutting by a conical tool is measured using this pyrometer. The temperature increases very rapidly and reaches 1000°C at about 40 μs after the beginning of cutting. The temperature increases with the increase of cutting speed and shows a tendency to saturate the melting point of workpiece. The cooling of the tool is extremely rapid and the temperature decreases to one fourth of the maximum temperature in 1ms after cutting. Tool face temperature of single crystal diamond in ultra-precision cutting is also measured using this pyrometer. The temperature measured is good agreement with that of calculated.

1. 緒言

近年、製品に対する高精度化の要求の高まりとともに、超精密切削加工や精密研削加工、高速エンドミル加工などといった微小切削加工はますます重要視されている。

切りくずの生成のために消費されたエネルギーのほとんどは熱となって切削温度を上昇させ、様々な熱損傷を引き起こす。要求精度の高い微小切削の場合、加工熱の影響にはより厳密であり、熱的な影響について検討することは特に重要となる。加工熱の影響について論ずる場合、加工温度を測定することが必要とされる。しかしながら、微小切削においては、測定対象領域が極めて微小であること、温度変化が急激であること、接触型の温度計では切削過程や切削温度場が影響を受けることなどといった特殊な状況にあるため、微小切削温度の測定は、これまでほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、主として微小切削における工具刃先温度の測定を目的として、放射温度計を用いた新たな温度測定方法を確立する。すなわち、光ファイバと赤外線検出素子を組み合わせた温度計を製作し、諸特性と有用性について検討するとともに、主要な機械加工法である切削加工と研削加工の中から、微小切削として研削加工における砥粒切れ刃による切削と、単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削を取り上げ、それぞれの切削温度をそれぞれに適した温度計を製作することにより測定している。

2. 温度計

2.1 光ファイバ型赤外線放射温度計の基本構成と相対感度

光ファイバ型赤外線放射温度計の基本構成を図1に示す。測定対象物から放射された赤外線を光ファイバで受光して伝送し、レンズを介して赤外線検出素子に集光、電気信号に変換する。したがって本温度計の基本的な性能は、光ファイバの光伝送特性、赤外線検出素子の感度特性、増幅回路の増幅特性などによって決定される。

図2に本研究で使用した光ファイバの伝送損失特性を示す。石英ガラス光ファイバは $\lambda = 2 \mu\text{m}$ 以上から損失が大きくなるのに対し、フッ化物ガラス光ファイバでは約 $4 \mu\text{m}$ 程度の赤外線まで、カルコゲナイドガラス光ファイバは全体的に損失が大きくなるが、S系のファイバは約 $7 \mu\text{m}$ 、Te系のファイバは約 $12 \mu\text{m}$ までの赤外線を伝送できる。

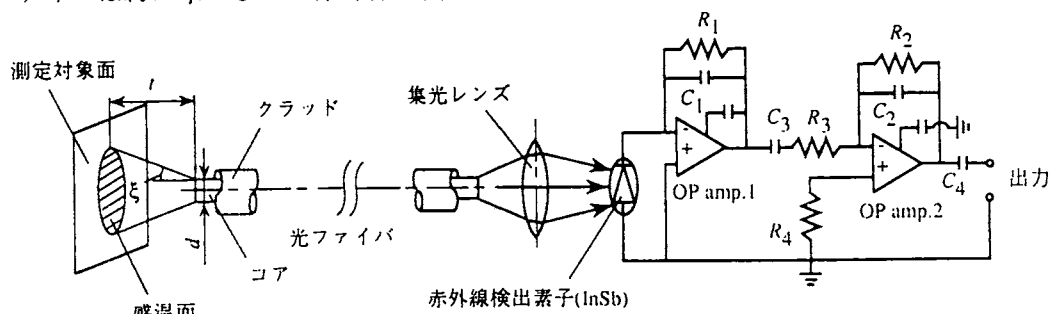


図1 光ファイバ型赤外線放射温度計の基本構成

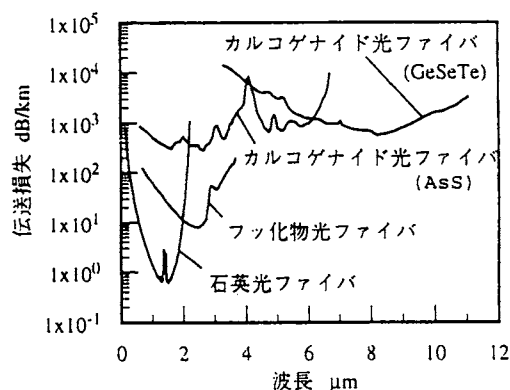


図2 光ファイバの伝送損失

図3は赤外線検出素子の分光感度特性である。本研究で使用したものは、Ge, InSb, HgCdTe(MCT)の各素子である。これらの応答速度は $1 \sim 2 \mu\text{s}$ と極めて速く、微小領域で高速で変化する過渡温度特性に十分追従できると考えられる。ただし、増幅回路の周波数特性が約 100kHz であることから、温度計全体の周波数特性は増幅回路によって決定される。

本温度計を用いて温度 T の黒体から放射される赤外線エネルギーを測定したときに得られる出力、すなわち相対感度 A は、黒体の放射能を $J_\lambda(\lambda, T)$ 、光ファイバの分光透過率を $F(\lambda)$ 、集光レンズの分光透過率を $G(\lambda)$ 、赤外線検出素子の分光感度特性を $D(\lambda)$ とすると、次式で与えられる。

$$A = \beta_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ただし、 β_0 は比例定数、 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ は測定可能な波長範囲である。

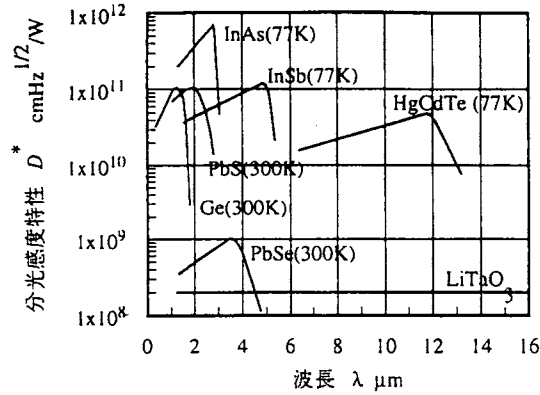


図3 赤外線検出素子の分光感度特性

2.2 感温面積と受光エネルギー

微小領域の温度を測定しようとするとき、測定面積を正確に特定できることは温度計の極めて重要な性能となる。測定対象面に対して光ファイバの中心軸が垂直に位置している場合、感温面積 S は、図1より、

$$S = \pi \left(t \cdot \tan \xi_{\max} + \frac{d}{2} \right)^2 \quad (2)$$

で与えられる。 t は測定距離、 ξ_{\max} は受光角、 d は光ファイバのコア径である。このような場合に限らず、測定対象面が傾斜している場合や、曲率を有している場合でも、測定対象の形状と測定距離が明確であれば正確に特定できる。

温度計の出力信号の大きさは、赤外線検出素子に入射する赤外線エネルギーの量で決まる。そこで、光ファイバに入射するエネルギー量を解析的に調べることにする。

図4は光ファイバの中心軸が感温面よりも大きな測定対象面に対して角度 θ だけ傾斜している場合を表わしている。感温面 S_t 内に微小面積 df をとると、 df から立体角 $d\Omega$ で表わされるコア内の微小面積 dF に、入射角 ϕ で、単位時間に放射される波長範囲 $(\lambda - d\lambda/2 \sim \lambda + d\lambda/2)$ のエネルギー量 de_λ は、測定対象面の法線方向の放射強度を $J_{\lambda n}$ とすると

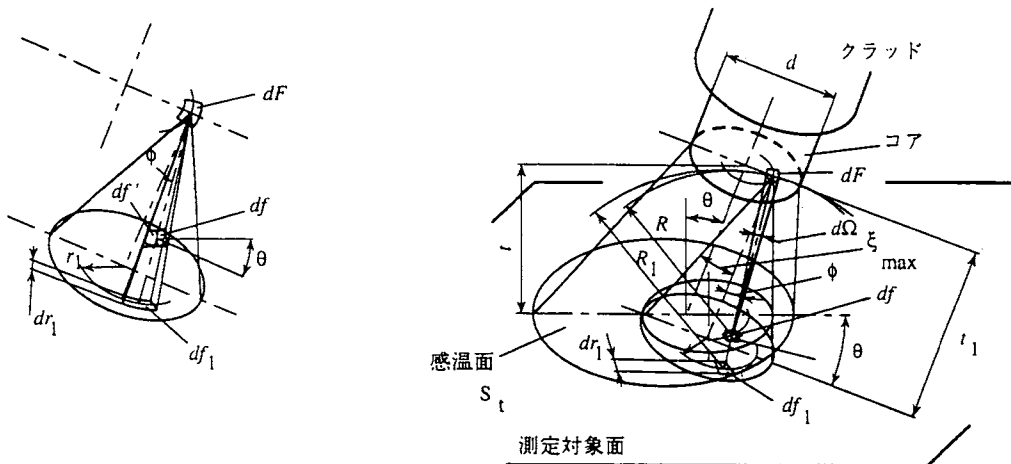


図4 温度計の受光エネルギーモデル

$$de_{\lambda} = J_{\lambda_{\lambda_1}} d\lambda \cos\varphi \cos\theta df d\Omega \quad (3)$$

で与えられる、 df を df_1 に投影し、式(3)を df_1 、 dF_1 に関して積分することによりコア全体が測定対象面から受光するエネルギー E_{λ} を求めることができ、

$$E_{\lambda} = \frac{\pi^2 d^2}{8} J_{\lambda_{\lambda_1}} d\lambda (1 - \cos 2\theta_{\max}) \quad (4)$$

となる。式(4)には測定距離 t および傾斜角 θ が含まれておらず、光ファイバが受光する放射エネルギーは測定距離や角度に影響されないことが分かる。また、測定対象面が球面のように曲率を持った面に対しても、コアが受ける全受光エネルギー E_{λ} は式(4)で表わされ、測定距離や測定対象面形状は温度計の出力信号に影響しないという結論が得られる。

2.3 光ファイバ型2色温度計

測定対象が感温面よりも大きい場合には、前節までに示した温度計が十分適用できるが、微小領域の温度測定においては、測定対象が感温面よりも小さく、大きさが不明確な場合や、大きさが変動するような場合も生じ得る。そのような場合には面積の補正が難しく、正しく温度を測定することは困難となる。そこで、測定対象の大きさによらない温度測定ができるように、2色温度計を製作した。2色温度計とは、測定対象からの熱放射のうち、異なる2つの波長における放射強度の比がその物体の温度によって決まることを利用した温度計であり、測定対象の大きさの影響を受けない。製作した光ファイバ型2色温度計は、光カプラ型2色温度計と、2層素子型2色温度計の2種類である。

光カプラ型2色温度計の基本構成を図5に示す。測定対象面から放射された赤外線は1本の光ファイバで受光し、融着型光カプラにより2本のファイバに分岐する。分岐、伝送された赤外線は異なる分光感度特性をもつ2つの赤外線検出素子InSbとGeにレンズによって集光され、電気信号に変換、増幅して出力を得る。両者の出力比から、温度に換算する。図3に示すように、Geは短波長域の赤外線を、InSbは長波長域の赤外線を電気信号に変換する。光カプラ型2色温度計は光ファイバとして光ファイバカプラが構成できる石英ファイバを使用するため、主として高温域の温度測定に適している。

次に、2層素子型2色温度計の基本構成を図6に示す。測定対象面から放射された赤外線は1本の光ファイバによって受光、伝送され、集光レンズを介して赤外線検出素子に導かれる。この赤外線検出素子はInSbとMCT(HgCdTe)を重ねた2層構造となっている。それぞれの素子の分光感度特性は図3の通りである。赤外線検出素子に入射した赤外線のうち、 $5\mu\text{m}$ 以下の短波長域の赤外線を、手前のInSbで電気信号に変換し、InSbを透過した $5\mu\text{m}$ 以上の赤外線を、奥側のMCTで電気信号に変換する。2層化していることにより、光カプラを用いて赤外線を分岐する必要がなく、カルコゲナイドファイバを使用することにより、低温域の測定を行うことができる。

測定対象により、これらの温度計を適宜使い分ける。

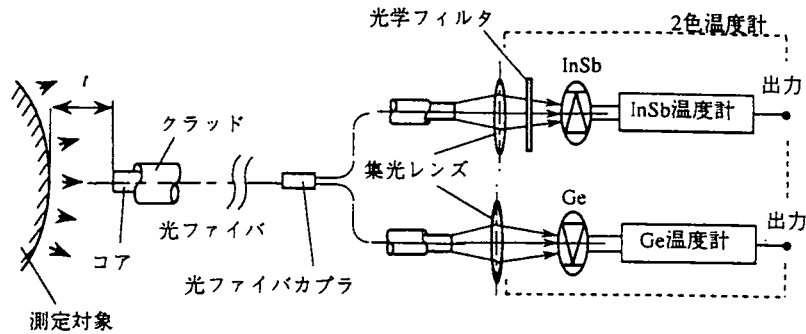


図5 光ケーブル型2色温度計

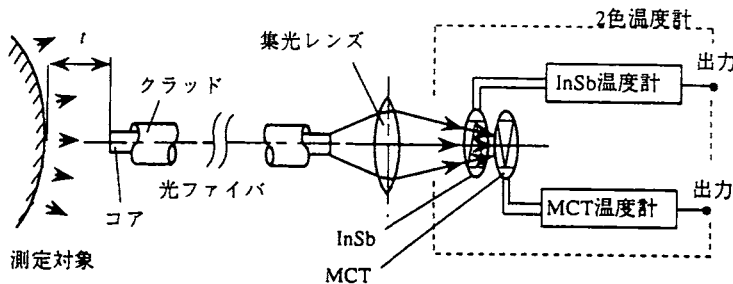


図6 2層素子型2色温度計

3. 微小切削における工具刃先温度の冷却過程の測定と切削点温度の推定

研削加工は砥石を構成する個々の砥粒による高速微小切削の集積によって加工を行う。このため、研削抵抗や研削熱の発生は砥粒による微小切削によるものであり、砥粒研削点温度は研削機構に関連した極めて重要な値である。しかし、砥粒による切りくずの生成は微小領域で極めて短い時間に行われる特殊な状況にあるため、適当な測定手段がなく、これまで詳細に検討した報告は少ない。本節では、砥粒研削点における微小切削過程を円錐形工具による微小切削として置き換え、切削直後の工具刃先温度を測定して刃先温度の冷却特性を明確にするとともに、測定結果に伝熱理論を併用して切削点温度を推定する。

実験装置を図7に、実験条件を表1に示す。工具を縦軸エアスピンドルに取り付けた円盤に取り付け、被削材を垂直方向に一定速度で移動可能なスライダに取り付ける。被削材にあらかじめ切込みを与えて固定しておき、スピンドルを所定の切削速度を得る回転数で回転させた後、スライダを垂直方向に動かすことによって切削を行う。

工具刃先温度を測定するための光ファイバは、切削点から角度 θ 離れたスピンドル外周部に設置しており、切削点で高温に加熱された工具が光ファイバの感温面を通過するとき、工具先端から放射される赤外線を受光し、InSb温度計へ伝送する。したがって、角度 θ を細かく変えて工具刃先温度を測定することによって、切削後の工具刃先温度の冷却特性を明らかにでき、さらに、得られた冷却特性から切削点での工具刃先温度を推定することができる。

切削点での工具刃先温度を推定するために、刃先温度の冷却特性を解析的に求めておく必要がある。工具内の熱の流れを一次元として取り扱い、切削終了後における工具内温度分布を求めてそれを初期条件とし、冷却時間 t_c における工具刃先温度を解析的に求めると、工具表面温度は、

$$\frac{T(0,t_c) - T_i}{T_0 - T_i} = \exp\left(\frac{\gamma}{\eta^2}\right) \cdot \left(\zeta + \frac{1}{\eta}\right) \left[\exp\left(\frac{\gamma}{\eta^2}\right) \left\{ \frac{\zeta}{\zeta^2 - \frac{1}{\eta^2}} - \frac{1/\eta}{\zeta^2 - \frac{1}{\eta^2}} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\gamma}}{\eta}\right) \right\} - \frac{\zeta}{\zeta^2 - \frac{1}{\eta^2}} \exp(\zeta^2 \gamma) \operatorname{erfc}(\zeta \sqrt{\gamma}) \right] \quad (5)$$

となる。 $\gamma = \alpha t_c$ 、 α は工具の温度伝導率、 η は切削終了時の温度分布を与える定数、 $\zeta = h/k$ 、 h は対流熱伝達係数、 k は工具の熱伝導率。式(5)を実験結果に適用し、切削点での工具刃先温度を推定する。

工具刃先温度の測定波形例を図8に示す。工具が温度計の感温面を通過する際のパルス状の波形が明瞭に得られている。冷却時間 t_c は、測定した切削抵抗の法線分力が0となる点を切削終了点とし、温度出力波形のピークが現れるまでの時間とした。

工具刃先温度と冷却時間との関係を図9に示す。それぞれの図中のプロットは測定結果であり、実線は式(5)を切削点での温度 T_0 をパラメータとして計算したものの中で、実験結果とよく一致するものである。

S55Cを被削材とした同図(a)において、測定温度の中で最も高かったのは1120°Cである。求めた冷却曲線から、冷却時間が0すなわち切削終了時における工具刃先温度を推定すると、 $T_0 = 1500^\circ\text{C}$ と、被削材であるS55Cの融点に近い温度となっている。切削時間が0.22msであるから、工具刃先は極めて短時間で加熱されることが分かる。また、切削温度の冷却は極めて速く、切削後1msで500°Cまで低下している。

Tiを被削材とした場合、測定最高温度は1380°C、Moの場合は1590°Cである。

求めた冷却曲線から推定した切削終了時の刃先温度は、Tiでは $T_0 = 1600^\circ\text{C}$ と、S55Cの場合と同様、被削材の融点に近い温度に達しており、Moの場合でも1800°Cと極めて高い温度に達している。このため工具にとって極めて過酷な状態で切りくずを生成しているといえる。

表1 実験条件

切削速度	1350 m/min
切り込み	30 μm
切削長さ	5mm
乾式	
被削材	炭素鋼：S55C チタン：Ti モリブデン：Mo
工具	窒化珪素：Si ₃ N ₄ 円錐頂角 120° 先端半径 100 μm

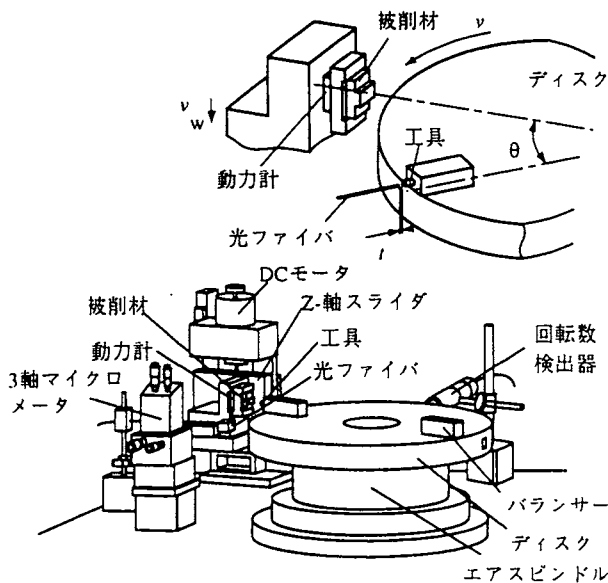


図7 実験装置

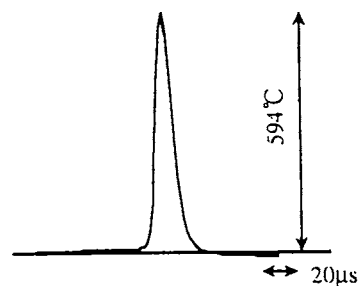


図8 測定波形

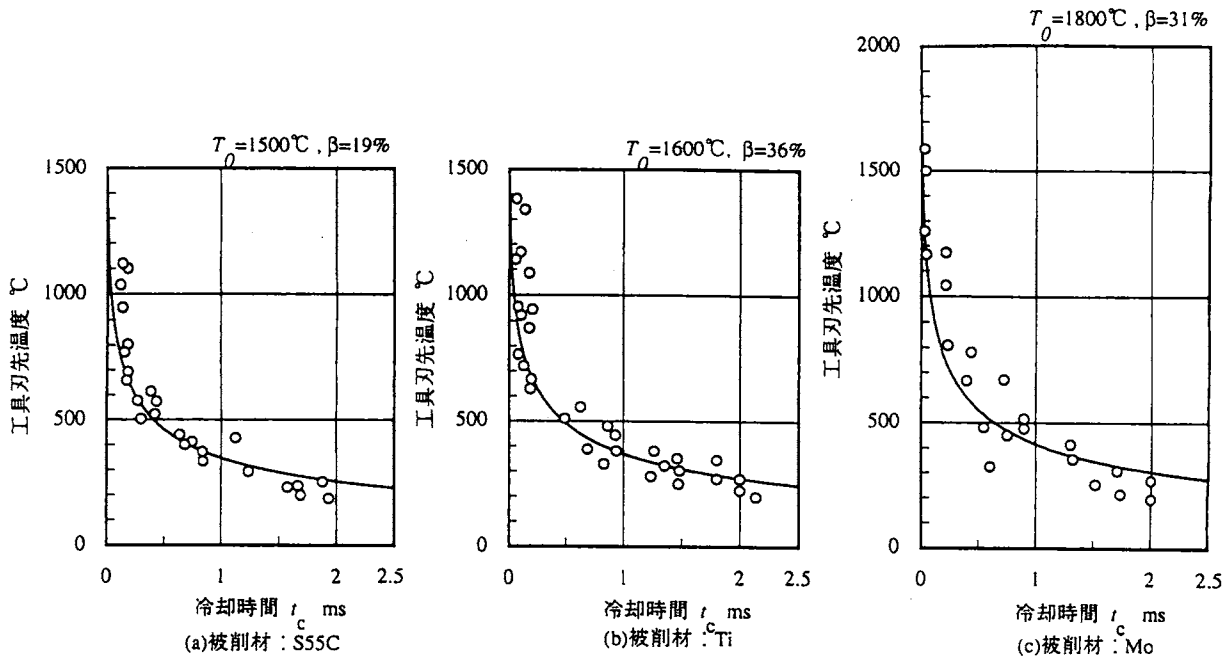


図9 工具刃先温度と冷却時間との関係

4. 工具-切りくず接触面温度の測定

前節で示したように、工具刃先の温度は、ごく短時間の切削で被削材の融点に近い温度まで上昇し、切削後は極めて急激に冷却される。加熱時において、砥粒切れ刃は数百 μ sのうちに被削材の融点に近い高温まで上昇することから、砥粒に加わる熱衝撃は極めて大きいと考えられ、砥粒切れ刃の加熱過程を詳しく検討することは重要であると考えられる。

切削中における工具-切りくず接触面温度を測定するための実験装置及び切削工具であるアルミナ工具の断面を図10に、実験条件を表2に示す。スピンドルに取り付けた円盤に被削材を取り付ける。工具は、動力計とともに送りテーブルに取り付けてある。スピンドルを所定の周速で回転させ、送りテーブルを同図のx軸方向に送ることにより切削を行う。

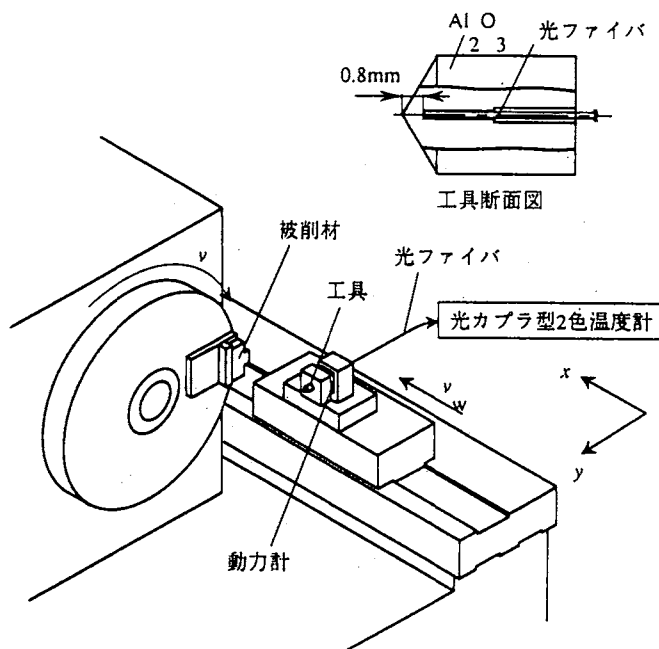


図10 実験装置

表2 実験条件

切削速度	100 - 2300 m/min
切込み	30 μ m
被削材	S55C
工具	工具形状：円錐 円錐頂角：120° 材質：Al ₂ O ₃ 先端半径：100 μ m

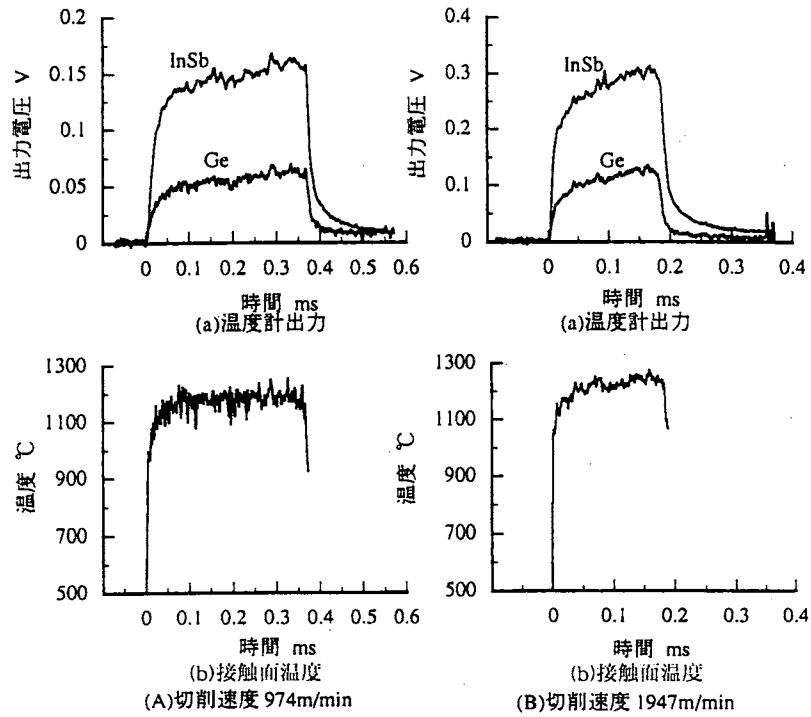


図11 出力波形

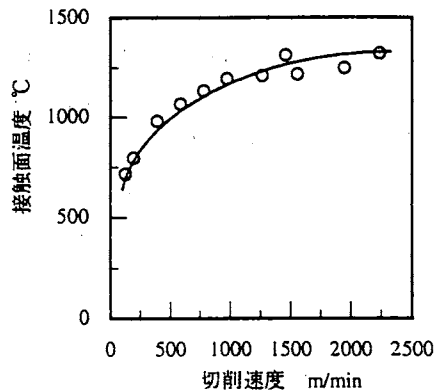


図12 切削速度と工具-切りくず接触面温度との関係

切削工具には、同図に示すような小孔が工具底面から刃先近傍まで開けられており、光ファイバが挿入してある。アルミナは赤外線透過する性質を有しており、切削中に高温に加熱された工具-切りくずの接触面から放射された赤外線は工具を透過し、挿入した光ファイバによって受光され、温度計に伝送される。使用した温度計は、光カプラ型2色温度計である。

図11にGe温度計、InSb温度計の出力波形、およびこれらの波形の比をとることによって求めた温度波形を示す。同図(A)は切削速度が974m/min、同図(B)は切削速度が1948m/minである。切削に伴う接触面温度の上昇と切削中の接触面温度の過渡的な変化を明瞭に測定できていることが分かる。切削開始時における接触面温度の上昇は極めて急激であり、例えば同図(A)において、切削開始後わずか40 μ s(切削距離:0.65mm)において1100 $^{\circ}$ Cまで上昇している。その後、切削中の刃先温度は緩やかに上昇し、1200 $^{\circ}$ Cに達してほぼ定常状態になっている。

図12は切削速度と工具-切りくず接触面温度との関係である。切削速度の上昇とともに刃先温度は高くなるが、約1200 $^{\circ}$ Cに達した後では切削速度の影響は小さくなっていくことが分かる。と

ここでこの測定結果は、工具一切りくず接触面の温度分布が均一との仮定でもとで換算しているが、実際には微小な領域でも温度分布があり、温度の分布状態にも依存するが、この領域の最高温度は1400℃～1500℃と、被削材である鋼の融点に近い温度まで上昇していると考えられる。

5. 単結晶ダイヤモンド工具のすくい面温度の測定

ダイヤモンド工具による超精密切削において、工作物の温度上昇による寸法誤差を予測、抑制することは製品の精度や品質を高めるために重要であり、熱的影響について検討することは極めて重要である。しかしながら、ダイヤモンド切削の場合には、切込みが微小であること、ダイヤモンドが電気絶縁体であるために熱起電力が生じないことなどから、切削温度を測定することは極めて難しい。そこで、赤外線に対する透過率が大きいというダイヤモンドの特性を利用し、切削中に工具一切りくず接触面から放射されて工具内を透過してきた赤外線を工具裏面から検出する方法により、ダイヤモンド切削における工具すくい面温度の測定を行った。

実験方法の概略を図13に、実験条件を表3に示す。切削は2次元切削である。工具シャンクにダイヤモンドを取り付けてあり、光ファイバを挿入するための細い溝がシャンク裏面からダイヤモンド裏面まで貫通して削ってある。切削中に工具一切りくず接触面における切りくず表面から放射された赤外線は、同図のようにダイヤモンド内を透過し、シャンクに挿入した光ファイバによって受光され、温度計に伝送される。使用した温度計は、2層素子型2色温度計である。

表3 実験条件

工具	単結晶ダイヤモンド
すくい角	-5°
被削材	アルミニウム(Al), 銅(Cu)
切込み	10μm
切削幅	1mm
切削速度	400 - 900m/min
乾式切削	

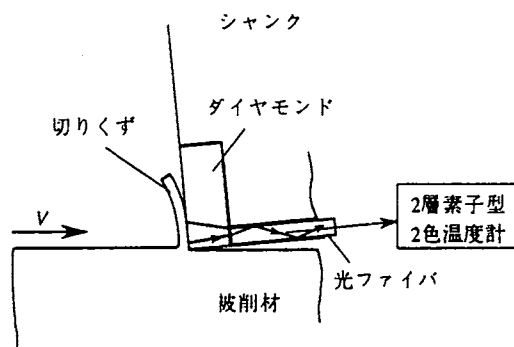


図13 実験方法

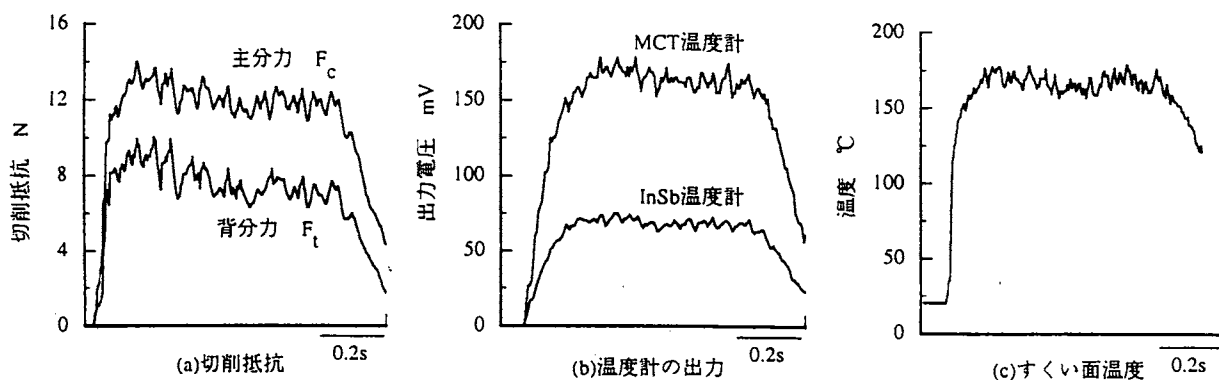


図14 測定波形

被削材：Al, 切削速度：518m/min

図14に切削速度が518m/minの場合のアルミニウムを被削材とした測定波形例を示す。同図(a)は切削抵抗の主分力 F_c と背分力 F_t である。切削中の抵抗の変化は小さく、安定した切削が行われている。同図(b)はInSb温度計およびMCT温度計の出力波形であり、切込みが小さいにも関わらず、明瞭な測定波形が得られている。両者の比を求めて温度に換算した波形が同図(c)である。図より、工具すくい面温度は切削の開始に伴って直ちに増加し、短時間でほぼ定常的な温度、約171℃となっている。

切削時における工具すくい面は温度分布を有しており、測定した結果は温度分布の影響を含んだものとなる。そこで、有限要素法により温度分布を解析的に求め、温度分布の影響を補正することにより、すくい面最高温度を推定した。

得られた温度分布を図15に示す。計算したすくい面上の最高温度は約174℃、平均温度は約170℃である。同図に示すすくい面温度分布より、刃先から約20 μ mの位置の温度が最も高いことが分かる。縦軸は最高温度 T_{max} を1とおいたものである。測定値に含まれる温度分布の影響を考慮し、同図のような温度分布を有する面を本温度計で測定したときに測定温度171℃が得られるためのすくい面上の最高温度 T_{max} を求めると175℃となる。

全ての測定結果に対して温度分布の影響を考慮し、切削速度とすくい面上の最高温度との関係を求めた結果を図16に示す。測定値と解析値が、被削材、切削速度においてよく一致していることから、本手法により、すくい面温度を精度よく測定できていることが分かる。

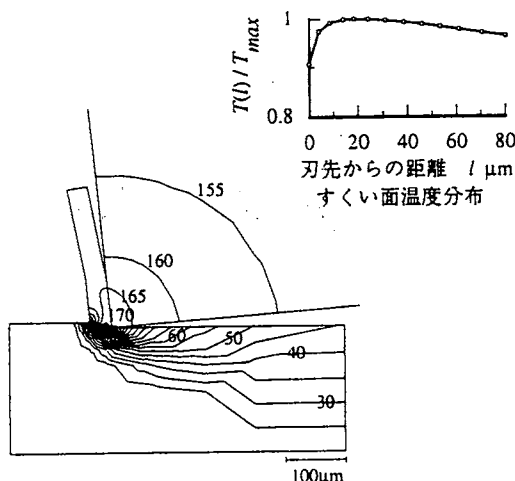


図15 温度分布

被削材：Al, 切削速度：518m/min

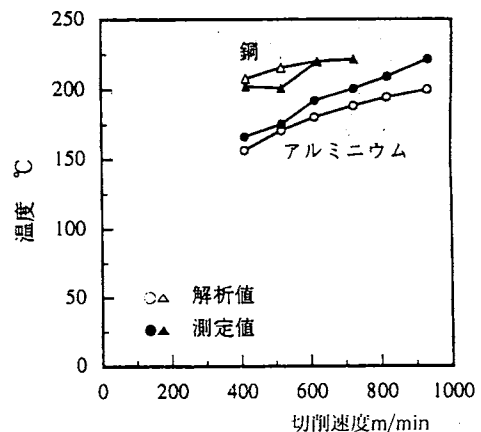


図16 切削速度とすくい面最高温度との関係

6. 結言

本研究では、放射温度計を用いた新たな温度測定方法を確立し、主要な機械加工法である研削加工と切削加工の中から微小切削として研削作業面における砥粒切れ刃による切削と単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削を取り上げて微小切削温度の測定を行い、微小切削温度に関する種々の新たな知見を得た。

学位論文審査結果の要旨

平成10年12月10日に第1回学位論文審査委員会を開催し、平成11年2月1日に口頭発表ならびに第2回審査委員会を開催して慎重に審査した結果、以下のように判定した。

研究歴および学力 申請者は平成4年金沢大学大学院工学研究科精密工学専攻を修了し、現在富山県立大学工学部機械システム工学科助手の職にある。その研究歴は約7年であり、国内国外の学会誌に掲載された多数の論文、及び口頭発表時の質疑応答の内容を評価した結果、博士課程修了者と同等以上の学力を有するものと判定した。

論文 本論文は切り込みがマイクロオーダーの微小切削における工具刃先温度を測定する方法の開発、及び工具刃先の熱伝導解析を行っている。光ファイバと光電変換素子を組み合わせた赤外線輻射温度計を製作し、この温度計の特性を理論的・実験的に検討することにより新しい温度測定法を確立している。この温度測定法により、砥粒をモデル化した円錐形工具で融点などの熱的特性の異なる金属材料を切削したときの刃先温度を測定し、切削開始後数 μs で $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ を越える高温に達すること、切削終了後 1 ms 程度で $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上低下することなどを見出している。また、これまで測定することのできなかった単結晶ダイヤモンドバイトのすくい面温度の計測に成功している。

以上のように、本論文は独創的な温度計測方法を考案することにより、精密切削に不可欠な加工温度を計測することに成功して多くの新しい知見を得ており、博士(工学)論文に値するものと判定した。