

Title	熱輻射線による研削温度と切れ刃分布の測定
Author(s)	細川, 晃
Citation	大阪大学, 1985, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/867
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

熱輻射線による研削温度と切れ刃分布の測定

昭和60年1月

細川 晃

熱輻射線による研削温度と切れ刃分布の測定

昭和60年1月

細 川 晃

E

次

۷

はじめに

使用記号	vii
第1章 序 論	1
1.1 はしがき	1
1.2 從来の研究	2
1.2.1 研削温度の測定法に関ける研究経過と問題点	2
1.2.2 研削温度の理論解析に関する研究経過と問題に	5
1.3 研究の目的と研究方法	6
务考文献	9
第2章 光ファイバレ光感度光電素工を用いた赤外線輻射温度計	12
2.1 はいがき	12
2.2 熱輻射の法則と温度測定原理	13
2.3 光ファイバの伝送原理とその特性	14
2.4 赤外糠検出素子	17
2.5 温度测定装置	18
2.5.1 温度計の構造	18
2.5.2 温度計の相対感度	20
2.5.3 温度計の応答速度	24
2.6 温度計の出力校正	25
2.6.1 ファイズ端面性状	25

j ·

2.6.2 出力校正实験	26
2.7 温度計の測定精度についての考察	29
2.8 ± kb	32
参考文献	33
第3章 ファイバの設定位置が温度計の出力に及ぼす影響	35
3.1 はしがき	35
3.2 感温面積	35
3.3 受光エネルギーの理論解析	36
3.3.1 測定対象面 Soo が感温面 St よりたきい場合	36
3.3.2 測定対象面 Sob がコゴ面より小さい場合	38
3.3.3 一般的な場合への拡張	40
3.3.3.1 測定対象面の中心が感温面の中心と一致する場合	42
3.3.3.2 測定対象面の中心が感温面の中心からずれていら場合	44
3.3.4 码粒切以双温度测定への通用	44
3.3.4.1 測定対象面の中バが感温面の中バを通過する場合	46
3.3.4.2 測定対象面の巾バボ感温面の巾ベからずNT通過す至場合	46
3.4 ステップ型効モードファイズの羌伝送特性実験	49
3.4.1 ファイバ設定位置の影響	49
3.4.2 フィイバの軸ずれによる伝送損失	50
3.5 \$ LB	52
务为文献	53
第4章 赤外線輻射温度計による研削温度の測定	54
4.1 はいがき	54

ii

4.2 実験方法	55
4.3 研制表面層温度	57
4.3.1 実験結果	57
4.3.2 熱電対の応管速度の測定	58
4.3.3 測定法の応答速度が測定結果に反ぼす影響	61
4.3.4 研削表面温度(砥石研削点温度)	62
4.3.5 研削液が熱源温度に及ぼす影響	64
4.4 ファインセラミックスの研削温度	.66
4.4.1 実験方法	66
4.4.2 実験結果	67
4.5 ± LB	68
参考文献	69
第5章 研削時におけろ破殺切れ刀温度と切れ刀分布	71
5.1 はしがき	71
5.2 砥粒切以刃温度の測定 -連続・た1パス研削による測定・	- 72
5.2.1 実験装置および実験方法	72
5.2.2 実廠結果	75
5.2.2.1 研削後 4.2 ms の 切れ刃温度	75
5.2.2.2 切屑の影響	78
5.3 車面研削における砥粒切り刃の熱拳動	79
5.3.1 切れ刃温度の解析	79
5.3.1.1 磁粒切れ刃のモデル化	79
5.3.1.2 切削時における切れ刃の加熱	80
5、3、1、3 空転時における切れ刃の冷却	82

iii

5.3.2	砥粒切れ刃温度の測定 - 測定角田を変化させた場合-	86
5.3.2	2.1 実験方法	86
5.3.2	2.2 実験結果	86
5.3.3	研削点における切い刃温度の推定	88
5.4 7	山工条件が切り刃温度と切り刀分布に反ぼす影響	90
5.4.1	砥石切込み深さを変化させた場合	91
5.4.2	研制作業進行に伴う研削状態の変化	93
5.5	まとめ	95
参考丈献		96
第6章 稔	括	98
あとがき		101
付録A	輻射によろ伝熱理論	102
付録B	受光エネルギーの算出	103
付録C	温度計出カバルスの算武	107
付録D	- 定熱流吏における - 次元熱伝導	108

iv

本論文は著者が大阪大学大学院基礎工学研究科(物理系専政,機械工学分野) 在学中に行なった研究の成果をまとめたものである. 論文の内容は,研削時に 発生する熱輻射線に注目!,高感度赤外後検出素エと光ファイバを組み合わせた 赤外線輻射温度計を使用!(研削温度と切り、可分布を測定した結果に関するもの で,全体を6章から構成している.

第1章は宇論であり、研削温度に関すな研究の歴史的背景を述べたおと、本研究の意義を明らかにしている。

第2章は初所労で戦後1た光ファイズを用いた赤外線輻射温度計のシステムに 関すろもので、本温度計の種々の特徴が原理的、実験的に説明されている。

第3章では、ファイバの設定位置が温度計のよかい反ビす影響を理論的、実験的に解析し、本温度計の所削温度測定への適用の有効性を確認している。

第4章では、本温度計を用いて、加工物砺相表面層の過渡的な温度変化を測定 した結果について出ぐており、温度計の応答速度が測定結果に及ぼす影響について検討を加えている。

第5章では、平面所前における随粒切り刃温度の測定と、砥石作業面上の切り 刃分布のインアロセスでの観測についてばべている. すないち、研削条件や不可 削続行に伴う随粒切り刃の休動状態を、切り刃温度と切り刃分布状態の変化から 候封している. たらに、砥粒切り刃の加熱、冷却サイクルに対し適当な伝熱モ デルを適用して研削時における切り刃の熱的挙動について解析している.

第6章は総括であり、本研究の成果をまとめたものである。

以上の各章を構成していろ研究内容は、全て精密機械学会論文誌、精密機械学 会学術講演会, Transactions of the ASME, J.Engg.Ind. において発表, あるいは掲載決定されたものである. 以下にそのリストを示す.

学会旅論文

- 1. 上田隆司,細川 晃,山本明, "光ファイバを用いた赤外線輻射温度測定法, 一研削温度測定への適用-, 精密機械, 48, 5(1982), 629-634.
- 2. 上田隆司, 細川 見, 山本明, "光フィイバを用いた赤外線輻射温度計によろ研削温度の測定, " 精密機械, 50, 12(1984), 1896 1901.
- 3. Takashi Ueda, Akira Hosokawa, Akira Yamamoto, "Studies on Temperature of Abrasive Grains in Grinding, -Application of Infrared Radiation Pyrometer," to be published in the Journal of Engineering for Industry, Trans.ASME.

講演会論文

1. 上田隆司,細川 晃,山本 明, "研削随石の研削によける切以刃温度," 精務学会昭和好年度開西地方定期学術講演会講演論文集,(1983),1-2.

1985年1月

使用記号

a	砥石切立み深さ	μm
a_d	ドレッシング切込み深さ	μm
A	熱流入面積,切以又面積	μm²
b_{ω}	加工物幅	mm
В	砥石幅	mm
c_g	砥粒(すぃミナ)の比熱	J/(Kg•K)
c, c_a, c_d	定数	
<i>C</i> ₁	第1輻射定数	3.742×10 ⁸ W•µm ⁴ /m ²
<i>C</i> ₂	第2 輻射定数	1.439×10⁴ µm•K
d	コア径	μm
dA, dA _c , dA _s	黒体の微小面積	μm²
dAp	da の入射方向からみた投影面積	μπ²
de	da 友通過1, du 的K射出さ以为工	κ11μ [°] − W
de_{λ}	df から dF K射出さりう輻射エネル	°F− W
$df = r dr d\phi$ $= r' dr' d\psi$	5 内の微小面積	μm²
dF=ududθ	F 肉の微小面積	μm²
$dF_p = dF \cos \xi$	df の入射方向の投影面積	μm²
đω	微水立体角	sr
$d\omega_c = dA_c / R^2$	d.a. で与えられる微小立体角	sr
$d\Omega = dF_{p}/R^2$	dFpで与えられる微小立体角	sr
D *	光電素子の比検出能	cm√Hz/W
<i>D</i> (λ)	光電素子の分光感度特性	
e_{λ}	df から輻射され、コアに受光されるI	$x_{1}x_{1}x_{1} = w$
E _λ	ファイバが受光すう輻射エネルギー	W
$E_{\lambda m}$	ファイバが受光する最大エネルギー	W
$E_{\lambda s}$	S。から輻射され、コアに受発されらう	[ネルギー W

$f(t, t_h, r_{ob})$	測定面積	μm²
E	コブ内の受光面積	μm²
F _n	研削抵抗法稳方向分力	N
	研削抵抗接線方向分力	N
$F(\lambda)$	ファイバの分光透過率	
g	超粒切なみ深さ	μm
g(t,r)	感温面内におけろ輻射エネルギ	-の重み関数
<i>G</i> (λ)	集光レンズの分光差過率	
h	砥石周表面の熱伝達率	W/(m²•K)
Ι(ξ,ψ)	輻射強さ	W/(m²·sr)
Ι' (ξ,ψ)	指向性輻射強さ	W/(m²•sr)
$I_{\lambda b} = I'_{\lambda b}, n$	単色黒体輻射強さ	W/(m²•µm•sr)
I' _{λb}	单色指向性黑体輻射強さ	W/(m²•µm•sr)
Jb	黑体輻射能	W/m²
J _d	実際の物体表面の輻射能	W/m ²
$J_{\lambda B}$	单色黑体輻射能	W/(m²∙µm)
k	熱伝導率	₩/(m•K)
k_{g}	砥粒の熱伝導率	₩/(m•K)
K	ゲイン定数	
Zc	硝石 - 加工物接触弧長さ	mm
Z _w	加工物長さ	mm
L_{f}	フィイバ長さ	m
n	外気の屈折率	· ·
n ₀	コアの屈折率	
n_1	クラ m, ドの屈折率	· .
N	砥石回転数	min ⁻¹
Ng	観測切り刀数	
NA= $\sin\xi_m \simeq \sqrt{2\Delta} \cdot n$	。 ファイバの開日数	
q_{g}	砥粒切り内に供給さりの気量	W

q_i	碰粒内部入伝導力了熱量	W
<i>q₀</i>	磁拉表面上り外质入伝達す 万熱量	W
\mathcal{Q}	研削時代発生す了熱量	W
Q_1	切削における切解せん断面で発生する熱量	W
Q ₂	エ具すくい面と切脣の摩擦により発生すん熱量	W
2,2'	極座標系における距離	μm
$r_{f} = t \cdot \tan \xi_{m}$		μm
r _{ob}	測定対象面の半径	μm
$r_s = d/2 - t \cdot \tan \xi_m$	臨界感温雨の半径	μm
$r_t = d/2 + t \cdot \tan \xi_m$	感温面の半径	μm
R	af と aF との距離	μm
R _F	研削抵抗の増加率	
R _G	観測切り双数の増加率	
R ₁	Q1の内切屑へ流入する割合	
R ₂	Q2の内切脣へ流入する割合	
8	ラプラス演算子	
$S_{c} = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^{2}$	コブ断面積	μm^2
$S_{ob} = \pi r_{ob}^2$	测定対象面積	μm²
$S_{s} = r_{s}^{2}$	臨界感温面積	μm²
$S_t = r_t^2$	感温面積	μm²
t	ファイズの設定距離	μm
t_h	窓温面と測定対象面の中心間距離	μm
t_x	測定対象面の進行方向に対する感温面との距離	μm
t_y	測定対象面が感温面上を通過すう時の両差のずれ	μm
T, T_d, T_t	絕対温度	μ m
T_{g}	砥粒切以刃逃げ面温度	°C
T_i	常温	°C
T_m, \overline{T}_m	砥石研削点温度	°C
T_r	硝粒切り カナイ い雨温度	°C

ix

θ	御を際余におけら用度	rad
η	磁粒切り 刃の初期温度 SP配を キスカ指数	m
$\zeta = h/k$	at left a stand of the start of	m ⁻¹
ϵ_{λ}'	单色指向性輻射率	,
ε'_n	重直輻射率	
ε_{e} , ε_{t}	有効輻射率	
е Е	全輻射率	
$\Delta t_{u} = (r_{t} + r_{ob}) / 10$	· · · ·	μm
Δτ	温度計のよカバルス幅	μs
$\Delta = (n_0 - n_1) / n_0$	フィイドの比索折率差	
δ	建稳切水刀開闢	mm
γ=α τ		m²
$g^{=\kappa} g' g g' g$	四月10月1日、学学	
α	四次化学干	m ² /s
Z	加工物研制衣明からの深さ	μι m ² /s
<i>y</i> (τ)		
y .	加工期内進父性際 温度計のより	μm
x	砥粒表面からの深さ	μm
V	砥石周速度	m/min
υ	加工物速度	m/min
u(T)	単位ステップ関数	
u	比研削エネルギー	N • m / m ³
T(x,z)	加工物研制表面層温度分布	°C
T_{ω}	加工物平均温度	° C
T S	切屑せん断面温度	°C
T	冷却開始時にお けろ 切り 刃 表面温度	°C

\$

X

$\theta_0(u,r)$	F支表的ろための角度関数	
Θ	ファイズの設定用	deg
ĸ	温度計の実感度指数	
λ	波長	μm
$\lambda_1 \sim \lambda_2$	温度計の測定可能波長範囲	μm
Λ	温度計の相対感度	
Λ_a	温度計の実感度	m۷
$v = 2 \sqrt{\alpha_q \tau_h}$		m
ρ _g	砥粒の密度	kg/m³
σ	Stefan-Boltzmann 定数 5.670×10 ⁸ W/	(m²•K4)
τ	時間	s
$\tau_0 = l_c / v$	測温点が砥石 - 加工物接触领域下专通過す了時間	ms
τ	砥粒切り丸の冷却時間	s
τ_h	磁粒切りの加熱時間	s
τ	時定数	s
φ	極座標系における角度	rad
$\phi_0(t,t_h,r_{ob})$	s を求めろための角度関数	
$\phi_{_{\mathcal{O}}}=\sin^{-1}\left(n_{_{1}}^{'}/n_{_{0}}^{'}\right)$	臨界角	deg
ф _в	せん断角	deg
ψ	極座標系における角度	rad
ω,ω _ς ,Ω	立体角	sr
£	入射角	deg
^E m	受光角	deg

第1章 序 論

1.1 はいがき

研削加工は高硬度微小多刃工具によって微細な切屑を排出すろ加工法であろた め、機械部品の精密仕上加工や難削材加工なども比較的容易に実現できろ加工法 として, 生産加工技術の中で占める役割は大きい. そして今日では、超精密加 I技術追求の一方で、高速研制やクリープフィード研削などの高能率研削法が開 発され、実用化されている. 1).2) しかしこれら高能率研削法は、砥石周速度、 または砥石切込み深さを大きくとろため、研削エネルギー、すなわち、研削熱を 著しく増大させる結果となり、加工物の熱的損傷を生じやすく、この対策も重大 事となっていろ、3.4 これは研削作用が上述したように、微細な切屑の発生す る切削現象であるため、寸法効果によってその比研削抵抗が他の加工法と比べて 著しく大きく、5)このエネルギーが塑性変形、弾性変形、破壊、摩擦などの研削 仕事ののち、最終的にはその99%。以上が砥石、加工物、切屑の加熱という形態 で消費されるからである. 従って、これら研削構成要素の温度は非常に高くな り、切屑生成箇所の温度上昇が加工材料の被削性を上昇させるという利点を除い て,加工物の組織変化やす法精度の低下,砂石摩耗の促進や研削能の鈍化など種 々の悪影響を及ぼすことは一般の研削においても問題とされろところである.こ のように,研削熟を源とする研削温度が研削性能に反ぼす影響は大きく,また研 削機構を論ずる上で極めて重要な役割をもっため、これまで数約くの研究がなさ れていろ 5)~22)

ここで、研削温度とは研削作用によって生じろ温度場を対象とした漠然とした 温度であろが、注目する箇所に応じて次の4種類に分類できる. これら研削温 度はけっして独立したものではなく、砥粒研削点温度を基本として密接な関係が あり、それぞれ研削の実際に関わりをもっている.

(1) 砥石研削点温度 Tm, Tm

Fig.1.1に示すように、砥石と加工物の見かけの接触面の温度であり、平均温度と最高温度が考えられる. この温度は研削焼けや割れ等の加工物の熱的損傷と関係がある.

(2) 加工物研削表面層の温度分布 T(X,Z)

加工物内の研削点近傍の温度分布であり,研削割れや製品の反りと関係がある. また,この温度と研削後の冷却状態は,加工物の組織変化や残留応力などの研削 加工変質層の生成機構に大きな影響を及ぼす.

(3) 加工物全体の温度上昇 ん

加工物に流入した熱による温度上昇であり、熱膨張による製品の形状および寸 法精度の低下の原因となる。

(4) 砥粒研削点温度 Ts, Tr, Tg

研削砥石はその作業面にある砥粒のうち、突出したもののみが研削にあづかり、 この切削砥粒をモデル化すれば Fig.1.2のようになる. ここで、切以刃すくい 面と切屑との接触面, 逃げ面と加工物との接触面, および切屑せん断面の温度を 総称して砥粒研削点温度と呼んでいる. この温度は砥粒摩耗, 破砕, 切屑の 溶 着などに関係していろ. 後って, 砥粒研削点温度は切以刃の自生作用や研削性, 研削離率などに関連するだけでなく, 研削機構と直結しており, 切以刃の作動状 態を論ずるよて極めて重要な温度である.

このほかに、切屑温度も加えることができる。 鋼林研削では切屑は研削火花して観察される。

1.2 従来の研究

1.2.1 研削温度測定法に関する研究経過と問題点、

研削温度に関する本格的な研究は1951年, Shaw 6)によって始まった。彼



Fig.1.1 Wheel-work interference zone geometry.



Fig.1.2 Chip formation geometry.

は砥石と加工物で熱電対を形成させて砥粒研削に温度を測定し,佐藤ⁿも同様の 方法で測定した. しかし, この方法は絶縁体であるAl2O3 砥石には適用でき ないという大きな欠点があり, まに微弱な熱起電力の検出や温度校正など種々の 問題点がある. そして, 測定されに温度は砥石 - 加工物干渉領域内の全接触部 のある種の平均温度を表わしている.

その後, Shaw と Mayer ⁸⁾は加工物表面からの熱輻射をカップ型砥石の円筒 面にあけた穴を通して PbS セルズ受光する方法を考定した この温度は定性 的には,その変化傾向が簡単な切削理論によって与えられるせん断面温度と一致 するものの,定量的には 1/3 ~ 1/5程度低い結果になっている. この測定法も 正確な温度校正が難かしい.

LittmannとWulff⁹⁾や高沢¹⁰⁾は加工物に小孔を研削表面並傍まであけ、この 中に埋めこんだ数細導線と加工物との間で熱電対を形成する方法によって、研削 表面層の温度分布を測定した. そして、温度と加工物の硬度変化について言及 している. また、高沢¹¹⁾とHahn¹²⁾は研削条件が研削温度に及ぼす影響につい て議論しており、松井ら¹³⁾によって研削焼けの研究にも用いられている.

Peklenik¹⁴⁾は絶縁した白金線を加工物ではさみ込み, 砥粒切れ刃がこれを切削するとき, 白金線と加工物に生じたかえりが接触して熱電対を形成することを 利用して砥粒研削点温度を測定している. しかしこの場合も, 高温における温 度校正义, 高温接点の大きさ等によって変化する応答速度等の問題があり, 研削 に伴う過渡的な温度変化に追従できるとは考えられない. なな, この方法は砥 石研削点温度や砥粒切れ刃間隔の動的測定に対しては非常にすぐれた方法として, 90くの研究者に利用されてきた.

また最近, Kopsと Shaw¹⁵⁾は単粒砥石を用いたかラス板研削において、磁粒切りスと加工物の干渉部で発生する熱輻射の強度変化を測定していろが、定性的な観察にとどまっている。

1.2.2 研削温度の理論解析に関する研究経過と問題点、

一方,解析的に研削温度を求める試みも数知くの研究者によってなされている. これは、バイト切削において発展した切削温度の理論*ţ応用したものである. ところが研削温度の理論解析の場合、研削依用が砧石依業面上に不規則に散在す ろ砥粒切れ又による微小切削のため、研削領域におけるエネルギー配分とその加 工物、砥粒、切屑への流入割合支求めることが非常に難かしい。研削熱の流入 割合についてに Outwater と Shaw 6)、佐藤¹⁶⁾、小野¹⁷⁾、高次¹⁸⁾、Malkin とAnderson¹⁹⁾、鍵和田と斉藤²⁰⁾によって実験的あるいは理論的に検討されて いる

磁粒研削点温度についてはOutwaterとShaw⁶⁾がすくい角 0°の切削モデ ルにおいて, せん断面の平均温度は約1200°Cになると算出している.また, 小野^{TTD}は磁粒切り刃のすくい面と逃げ面温度について解析し, 佐藤²⁰⁾は砥粒切り 刃のせん断面温度 万, および逃げ面摩耗面温度 7g が, 砥石切込み深さ a, 砥 石間速度 V, 加工物速度 v としてそりぞみ, 万 $\propto a^{-0.12}$ v $^{-0.24}$ V^{0.24}, および 万 $\propto a^{0.22}$ v^{0.19} V^{0.21}なる関係があることを示している. さらに, Zerkle と Des Ruissaux²²⁾は炭素鋼研削において, 最大せん断面温度は約2540°C に近づくと算出している.

砥石研削点温度については、佐藤16)は Tm~ a0.63 v0.26 V0.24 なる関係があ

* 切削において生ずろ熱には,(1)とん断面におけるせん断の塑性変形により生 ずる熱 Q1と(2)切屑とエ具すくい面の摩擦により発生する熱 Q2があり,それぞ いの一部 R1.R2が切屑へ,残りは加工物またはエ具に伝導されると考える. 熱 の分配割合 R1 は切屑になされた仕事量から算出した切屑平均温度上昇と,加工 物上を物動する熱源の平均温度が等いいとして求め, R2 は Q2を工具に対して は静止熱源,切屑にとっては物動熱源とし,その平均温度が等いいとして求める.

ることを示し、加工物温度に関しては、小野が連続円筒研削の場合について考察している。

研削表面層の温度は高沢¹⁰⁾によって加工物速度の影響や,加工変質層の生成機 しの関連において理論的に検討さいている。

1.3 研究の目的と研究方法

以上のように、研削温度の場合、その測定対象が小さくかつ急激な温度勾配が おり、しかもそれが短時間で変化するため測定が非常に困難である。例えば、 一般の研削では砥粒研削点のたきさは直径数十から数百 jumのオーダーで、それ が30m/s 程度の速さで物動している。 砥粒研削点温度は、その重要性に反し て実測した報告は非常に少なく、またその測定法の精度に関してもこれらし比較 し得る 適当な測定方法がないため、これまで全く検討されていないといえる。

また,理論解析を進める上でも,実際の対象は有限体でしかも刑状や大きさも 一様ではなく,取り扱いが非常に複雑で,厳密解を得ろことは容易ではない.実際,温度解析の前提となる研削熱の配分割合に関しても各研究者によって大きな 差があるのが実状である.^{6),16)-20)}

従って、研削温度研究に際しては、その研究目的にかなった測定技術の確立し その信頼性のある実測値との対比において理論的考察を進めることが要求されて いる.

そこで本研究は、従来に例のない新しい温度測定法を考案し、それによって研 削過程における種々の温度を実測し、研削機構解明のための新しい構報を得るこ しを目的としている. すなわち、最近光通信の分野で用いられている光伝送用 ファイバレ高感度赤外線検出素子を組み合わせた非常に応答速度の速い、微小領 域の測定に適した赤外線輻射温度計を製作し、微小領域で高速で変化する温度を 非接触で測定する方法について検討を加えるとともに、平面研測における研削温

度の測定に応用した、本論文は以下のような構成になっている。

第2章では、光ファイバを用いた赤外線輻射温度計のシステムについて述べて いろ. まず温度計の相対感度をその原理に基づいて計算し、実際の温度校正実 験で得た感度曲線と定性的に一致することを示すとともに、被測体の種類、表面 状態が自身の輻射率に及ぼす影響について言及する. この温度計は一般の赤小 線輻射温度計が装着している光学系の役割を一本のファイバがほとんど全て受け 持つため、取り扱いが容易でかつ物体の内部の測温も可能である利点がある反面, ファイバの性状が温度計の精度に大きく休用してしまう. そこで、ファイバの 光伝送能を実験的に調べ、最後に温度計全体の精度向上について述べる.

第3章では、ファイバの設定位置が温度計の出力に反ぼす影響を幾何光学の面 から理論的に解析を行なう、 これは本温度計の研销温度測定への適用に対する 有効性,延いては他の温度測定への汎用性を確認するための検討である. 测定 対象物は静止している場合と移動している場合の二つを考える。 静止している 被測体については、ファイバのコア径と設定距離によって決まる感温面と測定対 泉面との大小、および位置関係によって変化する受光Iネルギーを求める。 ¥ の結果、測定対象面が十分大きい場合、ファイバの設定位置は温度計の感度に影 響を及ぼさないことがわかった。動的測定については、砥粒切れ刃温度を想定 し、温度一様な四形断面の測定対象物が感温面上を研削速度に等しい速さで通過 した時の受光Iネルギーの変化を求める. すなわち,温度計の計示温度の信頼 性が出力ペルス幅によって評価できることが示される. そして、レーザ光を光 源として使用したファイバの光伝送特性実験によって,上記理論解析の妥当性を 確認している。これは、光を照射したステップ型のモードファイバの出射端面 の光強度分布はコア断面全体にわたって一様であることから、この面をある一定 温度にある物体表面として取り扱之ることを利用した実験である.

第4章は、この温度計を使用して、加工物内研測表面層の温度分布を測定した

結果について基べていろ. 実験に際し,輻射温度計については赤外線検出素子 としてそれぞれ応管速度の異なる PbSセルとInAs セルの2種類を使用し,従 来の熱電対法を含めた3種類の温度測定法で,個々の砥粒切れのによって研削表 面に生ずる熱パルスの測定に適用している. 測定法が違之ば得られる結果もお のずと差が生じ,それらを比較することにより,個々の測定法の特徴について検 討するしともに,応答速度が出力波形に及ぼす影響を調べる. また,熱電対の 応答速度の推定も試みている. そして,最も拒後性があるInAs-温度計を用い て,湿式研削における温度測定も行ない,研削液の供給効果について検討を加え ている. さこに,この温度計の特徴を活かして,熱電対法では測定不可能であ ろ絶縁材料のファインセラミックスの平面研削時の温度測定を行なっている.

第5章では高速記録装置であるデジタルメモリを同いろことによって、 平面研 削における磁粒切れ刃温度と砥石休業面上の切削切れ刃の分布を取り扱っている. 切れ刃温度については、連続した1 バス研削での砥石間上の同一部分の測定, お よびファイベの設定角度を砥石外間部にわたって変化させた場合の測定の2種類 を行なう. 前者は研削進行に伴う砥粒切れ刃の履歴の観察を目的とし、 後者の 実験からは砥石を転時における砥粒切れ刃の次却特性に関するデータを得ること ができる. - 方で、 加工物切削時の砥粒切れ刃の加熱、 および空転時における 冷却器程に対して適当な伝熱理論を適用して理論解析を行ない、 砥粒切れ刃の熱 挙動についての検討を加える. そして、 得られた解析結果に実測データを対応 させることによって、研削点における切れ刃温度を求めている. また、 研削条 件が切れ刃温度に及ぼす影響を、 切れ刃厉布の測定結果と対比させながら論じて いる.

第6章では本研究で得た結果についての総括を行なう.

参考 文 献

 Opitz,H., Ernst,W., Mayer,K.F., "Grinding at High Cutting Speeds," Proc. 6th Int. MTDR Conf., (1965), 581-595.

2. 塩崎 進, "フリープフィード研削, " 機械と工具, 21, 2(1977), 26.

- 3. Opitz, H., Guhring, K., "High Speed Grinding," Ann. CIRP, 16, 1 (1968), 61-73.
- 4. Shafto, G.R., Howes, T.D., Andrew, C., "Thermal Aspects of Creep Feed Grinding," 16th MTDR, (1975).
- Backer, W.R., Marshall, E.R., Shaw, M.C., "The Size Effect in Metal Cutting," Trans. ASME, 74,1 (1952), 61.
- Outwater, J.O., Shaw, M.C., "Surface Temperature in Grinding," Trans. ASME, 73, (1952), 73-86.
- 7. 佐藤健二, "研削理論(第7報) 真空管電位差計によろ研削に温度の測定," 精密機械, 20, 2(1954), 55.
- Mayer, J.E., Shaw, M.C., "Grinding Temperatures," J.Am.Soc.Lub Engg., 13, (1957), 22-27.
- 9. Littmann, W.E., Wulff, J., "The Influences of the Grinding Process on the Structure of Hardened Steel," Trans.ASM., 47, (1955), 692-714.

- 11. Takazawa,K., "Effects of Grinding Variables on Surface Structure of Hardened Steel," Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., 2, 1(1966), 14.
- 12. Hahn, R.S., "The Relation Between Grinding Conditions and Thermal Damage in the Workpiece," Trans.ASME, 78, (1956), 807.
- 13. 松片正已, 本物良辰, 瀬户口良三, "石間焼けに関する研究, " 精密機械, 31, 12 (1965), 996.
- 14. Peklenik, J., "Der Mechanismus des Schleifens und die Überschliffzahl," Ind.-Anz., 80, 1(1958), 10-17.
- 15. Kops,L., Shaw,M.C., "Thermal Radiation in Surface Grinding,", Ann.CIRP, 31, 1(1982), 211-214.
- 16. 佐藤健二, "研削理論(第6報) -研削切屑の温度と研削面の温度, " 精密機械, 19, 4 (1953), 154.
- 17. 小野浩二,研削仕上,横書店, (1962), 31-59.
- 18. 高沢孝哉, "研削熱の加工物、の流入割合 石間温度に関する理論的解析 (第2報)-, 精密機械, 30, 12(1964), 914.
- 19. Malkin,S., Anderson,R.B., "Thermal Aspects of Grinding. part 1
 -Energy Partition-," J.Engg.Ind., Trans.ASME, 76, (1974),
 1177-1183.
- 20: 鍵和田忠男,斉藤勝政, "研削におけろ発生熱の配分の理論," 日本機械 学会論文集(第3部), 48, 367(1977), 1966 - 1975.
- 21. 佐藤健二, 「新剤」温度の測定法, 常務機械, 30,1(1964),89.

22. Des Ruissaux, N.R., Zerkle, R.D., "Thermal Analisis of the Grinding Process," J.Engg.Ind., Trans.ASME, 92, 2(1970), 428-434.

第2章 光ファイバと高感度光電素子を用いた赤外線輻射温度計

2.1 はしがき

温度測定器には液体対入がラス温度計, バイメタル温度計, 圧力式温度計, ボ ロメータ, 電気式温度計などの接触型温度計と焦電気ボロメータ, 各種の赤外線 輻射温度計などの非接触型温度計がある。 1 工学の万野でよく用いられている 接触型温度計として熱電対がわろが、これは与えられた温度範囲では比較的容易 に正確な温度が測定できる、 埋め込むことにより物体内部の測温が可能であるな どの利点があり,研削温度や切削温度の測定に広く用いられている.しかし, その感過部を接触させて測定される温度と同一にしなければならないため、応答 速度が遅くなる,温度場を乱す,高温では変質し易い,動いていろ物体の測温は 難しいなどの欠点を持っている.20 これに対し、赤外線輻射温度計,特に光電 素子を用いたものは非接触で測定できるため温度場を乱さない、応答速度が速い、 動いてい 3物体の測定が容易, 而打な性が大きく高温の測定に適するなどの特長を 持っているが、反面、被測面の輻射率を正確に知る必要がある、表面の温度しか 測定できないなどの欠点がある。また、微小領域の温度を測定しようとすると き、光学顕微鏡に相当する拡大装置が必要となろため、装置がたがかりになると ともに、測定距離が極端に短かくなってしまい、使用範囲が限定される。以上 のように、両型温度計にはそれぞれ長所、短所があり、目的に応じて使いわけを する必要がある。 しかし、両者の特長を活かした温度計があれば、より応用範 田の広い測定が可能になろう.

そこで、最近、光通信の分野で用いられている光伝送用ファイバを光学系として使用し、発熱体から輻射される赤外線を受光して、赤外線検出器へ伝送する新しいシステムを考えれば、微小領域で高速で変化する温度を非接触で測定することが可能になる。 本章では、上記のような考えに基いて製作した光ファイバを

用いた赤外線輻射温度計について述べる. まず、温度計システムを構成してい ろ個々の要素、すなわち、光ファイバレ光電素子について述べ、それらを使用し た温度計の構造を示すとともに、その相対感度を原理的に求める. 次に、この 種の赤外線輻射温度計で最も問題となる温度校正を実際に測定する材料(第4, 5章参照)を試料として用いた実験によって行なう. そして、温度計の測定構 度を被測温物体表面の輻射率の変動や、ファイバ端面性状によって変化する伝送 エネルギー等の問題を含めて検討し、しかろべき実験に対する有効性を示すこと にする.

2.2 熱輻射の法則と温度測定原理

絶対零度を除いて、ある温度にある固体、液体、もしくは気体は、すべてその 熱エネルギーを電磁波の形で放出している. そして、そのエネルギーは主とし て、その物体の表面の温度によって与えられるため、この輻射エネルギー量を検 知することによってその物体の温度を知ることができる. 今、理想的な完全吸 収体拡散面(乱反射面)を考えいば、このような面から射出される輻射エネルギ ーは温度と波長のみの関数である. すなわち、黒体から輻射されるエネルギー は Planckの式で次のように表わされる.³⁾

$$J_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$
(2.1)

ここに, Ju = 単色黒体輻射能, W/(m²·µm)

元 = 波長, μm

C1 = 第1幅射定数, 3.742×10⁸ W·,um⁴/m²

C2 = 第2輻射定数, 1.439×10⁴ µm·K

Fig. 2.1は式(2.1)を温度アをパラメータとして表わしたものである。 高温にな

るほど短波長のIネルギー成分が増加している(Wienの変位則)。 式(2.1)を え=0からえ=∞まで横分することにより, 全輻射Iネルギーを求めることがで きる. これが Stefan-Boltzmannの法則であり, 次式で表わされる.

$$J_{b}(T) = \int_{0}^{\infty} J_{\lambda b}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^{4}$$
(2.2)

ここに, Jb=全黒体輻射能, W/m2

凡= Stefan-Boltzmann定数, 5.670×10-8 W/(m²·K4)

式(2.2)より, 黒体から輻射され ろエネルギーは絶対温度の4乗 にに例しており, これより赤外 線輻射温度計が高温望底に適し ていろのがらかる. 以上の法 則は黒体について成り立つもの であり, 実際の装置では波長が 九=0から九=∞までの輻射線 を検知することは不可能であり, あろー定の波長域を検出するり りの検知エネルギー Ja は

Spectral emissive power W/(m².µm) 10⁸ 10⁶ 5000 K 104 2000 K 10² 1000 K 1 300 K 10⁻² 100 K 10-" 10 ² 10⁻¹ 1 10 Wavelength λ μm

Fig.2.1 The Planck distribution law; blackbody emissive power as a function of temperature and wavelength.

で表わされる. ここで、Eeは検出波長範囲および射出範囲によって決まろ有効 輻射率, Kは検出帯の分光感度特性等で定まる指数, Caは定数である.

2.3 光ファイバの伝送原理とその特徴

 $J_{\vec{d}} = \varepsilon_{\rho} C_{\mathcal{A}} \cdot T^{\kappa} \qquad (2.3)$

一般に, 光ファイバの構造はFig.2.2に示すように, 中心部(コア部)と被覆



Fig.2.2 Illustration of the ray passage along a flat-ended cilindrical fiber.

材(クラッド部)から成り、コアの屈析率 た。がクラッドの屈析率 たくより大き くなっている.⁴⁾ ファイズ端面にその中べ軸に対して角度多で入射した光線は Snellの法則に従ってファイズ内部では 3。になり、角度 9。でコア側面にあた る. そして、 9。がコアレクラッドの屈折率によって決まる臨界角 9c より大 きいとき、この光は境界面で全反射し、ファイズ内の境界面を同じ角度であたり ながら伝播されていき、出射端面から入射角と同じ角度で出射さいる. また、 Fig. 2.2の破線で示さいろように、大きな角度で入射した光はコアからクラッド を抜けてファイバ外へ逃げてしまう. 従って、コアとクラッドの屈折率によっ て決まるある限界角 5m, すないち、食光角より小さな角度で入射した光だけが 伝送されることになる. この受光角とファイバの屈折率との関係を示すと以下 のようになる.

臨界角をは

$$\sin\phi_{c} = \frac{n_{1}}{n_{0}}$$

Snellの法則より

15

(2.4)

$$n\sin\xi_{m} = n_{0}\sin(\frac{\pi}{2}-\phi_{c}) = n_{0}\left[1-(\frac{n_{1}}{n_{0}})^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(2.5)

すなわち,

$$n\sin\xi_m = (n_0^2 - n_1^2)^{\frac{1}{2}} = NA$$
 (2.6)

このれsin3mはファイバの開口数*と呼ばれ、ファイバの特性を決定すろ値である.あろいは、コァとクラッドの屈折率差(れ。-れ)とコア部の屈折率 れ。 との比を比屈折率差と呼び

$$\Delta = \frac{n_0 - n_1}{n_0}$$
(2.7)

で表わされる。 従って、ムとNA との関係は以下のようになる。

 $NA \simeq \sqrt{2\Delta} \cdot n_0 \tag{2.8}$

れは通常空気中でありのでれ=1となり、式(2.6)より、受光角 5_m は $\xi_m = \sin^{-1}(NA)$ で表いされる.

このようにして入った光の全てがファイバ内を伝送さいろわけではなく、以下に示すような原因によって減衰されろ.

(1)入射端面での空気とコア材との間の屈折率の相違によるフレネル反射損失
 (2) 光路長に応じたコア材の吸収による損失

* 本節における光の解析はファイバ軸を光線が通過するメリディオナル光を対 暴としたもので、正確にはメリディオナル開口数と呼ばれる. すなわち、式(2.6) で与之られる受光周 3m より大きな角度で入射した光でも伝送される場合がある が、その量は入射周多=0~ 3m までのエネルギーに比べて少なく、温度計の感 度への影響は小さい. 従って、第3章で行なう受光エネルギーの理論解析は、 この全受光周 3mを採用している. (3) コアとクラッドとの間での全反射の不完全さによろ損失

(4) 出射端面でのフレネル反射損失

2.4 赤外凝検出素子

赤外線検出器を動作原理 によって分類すると、外部 光電効果(光電子放出効果) と内部光電効果(光導電効 果,光起電力効果),およ び光エネルギにより物体の 温度上昇1た結果起ころ震 质的効果(熱電効果, 焦電 効果)の3種類に大別され ろ.⁵⁾ PbS≫PbSeなど の硫化物やかくの酸化物。 ハロゲン化物および墨物金 唐などは、赤外線が入射す ると抵抗値が減少する光導 電素子で, 同じ波長域の他



Fig.2.3 Spectral sensitivity of some typical photoelectric cells.

The second secon	Table	2.1	Characteristics	of	some	typical	photoelectric	cells
--	-------	-----	-----------------	----	------	---------	---------------	-------

	Photoconductive cells		Photovoltaic cells		Photodiode	
Infrared detectors	PbSe	PbS	InSb	InAs	Ge	
Spectral response, µm	1.0∿5.0	0.8~2.5	1.0∿5.5	1.0~3.5	0.9~1.9	
Peak wavelength, µm	3.8	2.2	4.8	3.1	1.55	
Specific detectivity $D_{\lambda}^{*}(\lambda_{p},900,1), cm/Hz/W$	1×10 ⁹	1×10 ¹¹	7×10 ¹⁰	4×10 ¹¹	7×10 ¹⁰	
Response time, µs	2	100 ~400	1	1	2	
Operating temperature, K	R.T.	R.T.	77	. 77	R.T.	

の検出素子と比較すると検出能が高く,室温動作が可能なため,広く利用されている. また,Geフォトダイオード, InAs, InSb 光起電力型素子は赤外線が入射すると起電力を発生する光起電力効果を利用した半導体素子で,赤外線量と電流が直線的に変化する.

こいら素ふにはそいぞれ特有の性質(検出波長範囲, 感度, 暗抵抗, 温度依存 性, 応客速度など)があり, 測定対象物, 測定条件に応じて使用検出器を選ぶ必 要がある. 代表的な赤外線検出素子, PbS, PbSe, InSb, InAs, Geの分光感度 特性をFig. 2.3に, それらの特性値をTable 2.1に示す.

2.5 温度測定装置

2.5.1 温度計の構造

Fig. 2.4に本研究で試作した温度測定装置を示す. 赤外線検出素子はPbSと IASの2種類で、PbSは常温使用、IASとルは液体窒素で77Kに冷却して、SN 比の向上、感度の上昇を企っている、 測定対象物から輻射された赤外線を光フ マイバズ 受光し、集光レンズを介して光電変換素子へ伝送し、電気信号に変換後, 増幅してシンクロスコープ等で観測する. 光ファイズは自由に曲げろことがで きろし直径100μm 程度のファイズの最小曲率半径は10mm程度¹⁰)ため、複雑 に入り組んでいる箇所からも容易に赤外線を弾き出すことができる. 従って, 測度対象物にファイバが入る程度の小さな穴をあければ、内部の温度測定も可能

* 比検出能 D*: 1Wの光入力があった時に、検出素子の交流的なSN 比がど いだけあるかを示すまので、検出素子面積によらずに材料の特性そのまのを比べ らいるように検出素子面積1cm²、雑音帯域幅1Hzで規格化された値である。D* の表示は一般に D*(A, B, C) で表いし、Aは光源の黒体温度、波長、あるいはC^o - り技長、Bはチョッピング周波数、Cは維音帯域である。



Fig.2.4 Two pyrometer systems used.



Fig.2.5 Photographs of two types of IR-pyrometers; (a) PbS-pyrometer, (b) InAs-pyrometer.

になる. また,コア径の小さなファイバを用いれば簡単に微小領域の温度測定 が可能であり, 低損失ファイバを同いれば, その長さを数十m以上にしても使用 できる. さらに,ファイバを束ねて用いれば, 感度を上げろことも可能である. Fig. 2.5に両温度計の外観を示す.

2.5.2 温度計の相対感度

Fig. 2.4 に示すような,光ファイバと赤外線検公素子を組み合わせた温度計で, 温度Tの黒体から輻射される赤外線エネルギーを測定したときに得られるよ力, すないち温度計の相対感度 /1 は

- (1) 光ファイバが受光する輻射エネルギはPlanckの式 [式(2.1)] で与えられる 波長分布をもっている。
- (2) 光ファイバの分光透過率を F(れ) とする.
- (3) 集光レッズの分光透過率をG(れ)とする.
- (4) 赤外線検出素子の分光感度特性をD(れ)とする. とすると次式で与えられる。

 $\Lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta J_{\lambda b}(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D(\lambda) d\lambda \qquad (2.9)$

ここに、Bは使用ファイバの特性値等によって決まう定数、Ja(2,T)は単色黒 体輻射能、2,~2は測定可能な波長範囲である. 一般に、測定対象物が輻射す ろエネルギは黒体よりも小さく、また波長分布や指向性なども異なり、さらにフ マイバの入い損失などの種々の損失もあいまって、実際に得られる感度は式(2.9) で与えられるものよりも小さくなるが、定性的にはこの式で与えられるものと考 之られる. Fig. 2.6は石葉ガラス系ファイバの伝送損失特性である. 低OH基 石葉ガラスファイバの伝送損失は波長によって変化し、主に短波長域ではレーリ 散乱、長波長域ではOH墓による吸収によって損失が急増するが、波長域 0.5,4m から 2.0,um の可視かよび逝 赤外領域に対すろ損失は数 dB/km と極めてかない⁸⁾ Fig. 2.7は集光レンズの分 光透過率である. フリン ト硝子の場合, 波長域がお よそ0.4~1.5 ,um の光を 損失なく透過させるが, 石 英ドラス の場合は 0.25,um から 2.2 ,um 程度にまで透過 域形広がっていろことがわ かる. 9)

-方, Fig. 2.8, Fig. 2.9 はそれぞれ本研究で使用(たPbSおよびIn-lsセルの方 光感度特性であり, PbSは 波長3,um, In-Asでは3.5,um 程度までの赤外線を検出す ろことがうスファイバの 透過域をカバーしている. ここで, Fig. 2.1より波長 0.3,um以下では輻射Iネル ギーが十分小さく無視(得 ろので, 2,=0.3,umとおき,



Fig.2.6 Spectral transmission loss of SiO_2 fiber.



Fig.2.7 Spectral transmission curves of condenser materials.

ろので、2,=0.3,umとおき、ファイバのコア材質によって変化する元をパラメー



Fig.2.8 Relative sensitivity of PbS cell.



Fig.2.9 Relative sensitivity of InAs cell.


Fig.2.10 Theoretical relative sensitivity of PbS-pyrometer.





9 11て式(2.9)支計算した結果がFig. 2.10およびFig. 2.11である. Fig. 2.10は 検武器がPbS, 葉光レンズが石英ガラス使用のもので、Fig. 2.11はそれぞい InAs, およびフリントガラス使用の場合である. 温度が高(ないば惑度が急激に上昇 しており、特にPbS - 温度計にその傾向が強い. なお、ファイバの長さんf を 0.5~2.0mの場合を考えて $F(n) \simeq 1$ としていろが、たとえば 50m としても たきな差は注じない.

温度計の応管速度 2.5.3 温度計の応答速度は測定 誤差の大きな要因の一つで あろ 砥粒切れれから輻 射されろ赤外線をファイバ で受光する場合, その赤外 線パルス幅は孤粒切りのの 大きさ,砥石周速度,ファ イバのコア経や設定距離に よって異なるが、本研究で 行なった実験の場合、およ そ数+Jus と推定される. PbSセルを用いた温度計の 応告速度は増幅回路よりも セルの応答速度で決まる. Fig. 2.12-(a) は赤外線を



Fig.2.12 Frequency characteristics of pyrometers; (a) PbS-pyrometer,(b) InAs-pyrometer.

パルス状に入力したときの温度計の周波散時性であろが、10~400Hzの範囲で 損失が 0.5 d B 以内である。

-方, Fig. 2.12-(b)はInAsセルを用いた温度計の増幅器の周波数特性である. 上回は方形波, 下回は単一ベルスの正弦波を入力させたときのもので, それぞれ 10 Hz ~ 100 kHz, 6 us~50 ms の範囲で損失が 0.5 dB以内でほぼフラットな特 性を持っている. なお, 1回中の H.P.F.は, 測定対象によっては低周波域が不必 要であるため, 高域フィルタによって低周波をカット 1 た場合の曲線で, この場 合それぞれ 2~100 kHz, 6~50 us の帯域幅となる. InAsセルの応答速度が 約1 us であろこと から, この温度計は上記周波数帯域において十分な精度で実 験に用いることができる.

2.6 温度計の出力校正

2.6.1 ファイズ端面性状について

ファイド端面の形状,表面状態はファイドが受光越赤外線エネルギー量に大き (影響し,温度計の測定満度に最も影響を及ぼす箇所である. 従って,ファイ ド端面を最も光伝述に適した状態で、かっその状態を常に保持しながら使用すう 必要がある. 一般に、ファイド端面はファイド軸を垂直にかっ滑らかな完全平



Fig.2.13 Apparatus for checking the transmittance of fiber.

面にするのが理想的で最も損失が小 さい. しかしこのような端面を得 ることは難しく、現段階では、(1)切 断法と(2)研釋法のこっが一般的にな っている. (1)は起硬チップなどで クラッド側面に一定圧力で小さなり ラックを付けた後、引っぱって切断 すち方法で、必ずしも良好な端面が 得らいろとは限らないが、比較的理



Fig.2.14 Scope trace of output signal of PbS-pyrometer under certain illumination.

想面に近い端面が得られる、一方,(2)はファイバ端面をバフ仕上する方法で; 最適研修条件は現段階では明らかではないが;損失特性は(1)の場合より少し悪く なるが、安定した端面状態が得られる。

本研究では、伝送特性のすぐれたいの切断法を採用し、その端面性状を次に示 す装置でチェックト、ファイズ端面性状の影響による測定設美を取り除いて、フ アイズ使用による温度計の測定精度の低下を防ぐことにトた・ Fig.2.3 に示すような一定電力(80V,0.44A)を供給した赤外線ランプによって依り出さ いる赤外線を定速で回転するチョッパでによってベルス状の信号に変換し、この信 号をファイバズ受光するようになっており、温度計の出力、すたいち振幅があら かじめ定めた基準値の±3%以内に入るファイバを測定に使用することにする。 Fig.2.4はPbS - 温度計の基準信号の出力波形である。

2.6.2 出力校正実験

温度計の出力と温度との定性的な関係,すなわち,相対感度は式(2.9)によって表わされるが,定量的な関係を理論的に求めることは難かしい。⁽⁰⁾特に,赤 外線輻射温度計では,測定対象物の表面状態や温度上昇に伴う輻射率の変化など

94くの不安定要因があるからである。 そこで本研究では次のような方法で検正実験を行なった。



Fig.2.15 Schema of proposed calibration apparatus.

Fig.2.15 に示すように、一定温度に加熱された試片から輻射される赤外線を、 試片表面から一定距離はなれた位置で光ファイバで受光し、温度計の出力を記録 する. このとき、試片温度は埋め込まれた C-A熱電対で監視している. ファ イバの設定距離は後述するように、温度計の出力に殆んど影響しないので、ここ では約0.5 mmとした. また、チョッピング周波数は温度計の周波数特性がフ ラットな範囲で行なっている.

得らいた校正曲線をFig. 2.16, Fig. 2.17に示す。 Fig. 2.16はPbS-温度計の もので,試片材料は炭素鋼 S55C, 集光レンズは石英がラスで使用ファイバは Table 2.2 に示す中の C-ファイバである。 なお, PbS-温度計の場合, Fig. 2.4

Table 2.2 Ondradderiddiod of opportune							
Fiber designation	A (3322-2)	B (3321-1)	C (1Y25-1)	D (1Y25-2)			
Core diameter d , μ m	130	48	50	20			
Relative index difference Δ, %	0.4	0.7	1.14	1.20			
Numerical aperture NA	0.134	0.177	0.226	0.232			
Acceptance angle ξ_m , deg	7.7	10.2	13.1	13.4			

Table 2.2 Characteristics of optical fibers

の回路四におけろ供給費圧 Es によって実感度が変化 するが、ここではEs=45V としている Fig.2.17 はInAs-温度計のもので、 試片材料として炭素鋼,砥 石A36K, 砥粒塊Al, O3の 3種類で、集光レンズはフ リントガラス,使用ファイ バはC-ファイバである. ない、炭素鋼話号の表面は フライスイセトの粗い面, 平 研仕上の滑らかな面、およ びその中間の粗さの3段階 に変化させている。 実線 144WEW Fig. 2.10, Fig. 2.11 の相対感度曲線のうち、図 に記入した れの値のもの ちあてはめたものであり, データはこの領上に分布し ていろことがわかる. Fig. 2.17より, 炭素鋼と砥

石の場合には同じ曲線で表 わされろことから,両者の 輻射率は400℃以上では



Fig.2.16 Calibration curve of PbS-pyrometer.



Fig.2.17 Calibration curves of InAs-pyrometer.

ほとんど等しいと言之よう. また、炭素鋼試片の表面状態の違いによる出力の 変化もみられない. 一方、砥粒塊 AL2O3では感度が少し上がり、輻射率が大き くなっているが、温度1000 °Cの時に約50°C程度の差しかない. 従って、 砥粒切れ刃温度測定に際し、たとえば切れ刃に切屑が溶着していたとしても、大 きな影響は受けないことがわかろ. 温度計の出力は検知エネルギーに比例する ことから、Fig.2.16 および Fig.2.17 に示した各温度計の実感度曲線は式(2.3) の形に近似することができる. すないち、

 $\Lambda_{\alpha}(T) = \varepsilon_{e} C_{\alpha} \cdot T^{\kappa}$ (2.10)

ここに、人は温度計の実感度、Caは使用ファイバ、検出器等によって決まる 定数である. Table 2.3 に温度計の近似実感度を示す.

Table 2.3 Summary of actual sensitivities of IR-pyrometers Actual sensitivity: $\Lambda_{r} = \epsilon_{r} C_{r} \cdot T^{\kappa}$

				<u></u>	<u>е и</u>
IP detector	r Condenser	Fiber	Object	Coefficients	
				ε _e C _a	κ
РЬЅ	Quartz	С	Steel	7.69×10 ⁻²²	8.00
InAs	Flint	С	Alumina	1.30×10 ⁻²⁰	7.25
InAs	Flint	С	Steel	0.92×10 ⁻²⁰	7.25
InAs	Quartz	С	Alumina	1.57×10 ⁻²⁰	7.30
InAs	Quartz	С	Steel	1.66×10 ⁻²⁰	7.58

2.7 温度計の測定精度についての考察

ここで本温度計の測定精度に影響を与える要因について考えると、次のような ものが考えられる。^{11),12)} ただし、ここでは温度計自体の基本的な誤差要因であ って、次章で述ぶちファイズの設定位置による影響は省いている。

- (1) 輻射率の影響
- (2) 外部光の影響
- (3) 光路での光の損失によう誤差

(4) 光路中におけるダストなどの散乱

(5) 温度計自体の安定度レドリフト

物体の輻射率(ϵ_{h} : 単色指向性輻射率)は波長,射出方向,表面温度,表面粗 さ,表面の不純物などによって変化すろ.⁽³⁾ 実際の温度測候で問題となるの は温度計によって定まる波長範囲および射出範囲で定義」た有効輻射率 ϵ_{e} であ ろが,本研究では測温物と同種の物体からの熱輻射強度を測定」て温度被正を行 なったことにより,対象となる輻射波長範囲や温度変化に伴う輻射率の変化によ ろ酸差は非常に小さい. また,炭素鋼試片の表面粗さの違いによる出力の皮化 もみらいなかったことから,最も大き(輻射率に影響を反ぼすものと」て,表面 の酸化膜などの不純物生成が考えらいる. 被正実験において,炭素鋼表面の輻 射エネルギーバ非金属でほとんど光沢のない砥石表面やアルミナ表面と殆んど変 わらないという結果から考えれば、炭素鋼表面は酸化面でおり,その輻射率は比 較的たきな値,すなわち $\epsilon_{n}^{\prime*} \simeq 0.6 \sim 0.9^{(4) \sim 161}$ 程度であろう. 実際の温度測 定の場合,炭素鋼は加工物と切屑,アルミナは磁粒切れ刃が測定対象であり,と もに 1000°C 前後の高温で非常に活性化された状態で、酸化が定識に強むもの と考えらい、輻射率としては上記の範囲にあるとしてよいであろう.

なて、ここで輻射率の変動がどれほど測定温度に影響を反ぼすれを考えよう. 温度ア、輻射率 \mathcal{E}_e の被測物体を測定 1 た ときの温度計の出力は式(2.10)より、 $\underline{\Lambda_a} = \varepsilon_e c_a \cdot \pi^{\kappa}$ と表わさ 以 な. 従って、今、温度 \mathcal{T}_e 、輻射率 \mathcal{E}_t の物体を幅 * 有効輻射率 \mathcal{E}_e の値を定めることは難か 1 く、一般に全半球方向、全波長域 で定義 1 た全半球輻射率 \mathcal{E} で近似さ いろ、 さら に、より簡単に測定するため、 全半球輻射率 \mathcal{E} を垂直輻射強さで決定 1 た垂直輻射率 \mathcal{E}_h^{\prime} で並似することがある が、この近似構度に関1 ては、電気良 尊体では $1.0 \leq (\mathcal{E}/\mathcal{E}_h^{\prime}) \leq 1.3$ 、不良 尊体で は 0.95 $\leq (\mathcal{E}/\mathcal{E}_h^{\prime}) \leq 1.0$ なる関係があり、全半球輻射率のかなり良い 近似値と 1 て使用することができる. ⁽¹⁷⁾ 以後、有効輻射率を単に輻射率ということにする. 射率をの物体として測定し、ななる温度を得たとすりば

 $\epsilon_e \cdot r_a^{\kappa} = \epsilon_t \cdot r_t^{\kappa}$ (2.11) 従って,真の温度と測定温度との誤差, すたいち温度差は次式で表りさいる.

$$T_{d} - T_{t} = \left[1 - \left(\varepsilon_{e} / \varepsilon_{t}\right)^{\frac{1}{K}}\right] T_{d}$$
(2.12)

輻射率が 0.6~0.9の間で変動することによって 生じろ温度差は, 式(2.12)より, InAs-温度計の場合(Table 2.3 参照), 測定温度 1000℃で最大 70℃で であろ.

(2)の外部光の影響は常温近くの測定、あるいは輻射率が非常に小さく微弱なた~ 外線を検出する時に問題とされるものである. (3)の光路での光の損失としては, 光ファイバ端面におけろ損失と大気中の水蒸気によろ吸収が考えられる. 光フ マイバ端面によろ損失は,前節で述べたように,その伝送能を測定前にチェック することにより, 誤差を±3%以内におさめている. また, 大気中における吸収 は測定対象物とファイバ入射端面との距離が100 μm以内と非常に小さく,かつ 研削液などの光吸収媒体を使用していないので問題はなく、これは(4)に対しても 言えろことであろ. (5)の温度計自体の安定度は、周囲の温度変動による温度測] 定装置そのものからの赤外線によるものと,装置内部の回路や赤外線検出素子の 不安定さい起目すらものがある。前者は(2)の場合と同様,常温程度の温度測定 の場合に無視できないものであり、高温測定においてはその影響は極めてれさい、 後着については,増幅回路に低バイアス電流,高入カインビーダンスのFET入 h型OPアンプを使用することによって安定化を企っており、また素子もInAs セルの場合、液体窒素で常に77Kの状態で使用しており、ドリフトの問題は非 常に小さい · 41て素子雑音は10mV程度であり, 高温測定の場合は無視でき ろ範囲である.

以上の考察より、本温度計の測定精度は次のごとくになる.

(1) 光ファイバを含めた温度計自体の精度は±3%以内であろ. 2以は主と いて、ファイバ端面性状に起因するもので、端面形状精度を上げることによって 市販の赤外額輻射温度計と同程度(±0.5~±1.0 % ^{18),19)})にまで上昇させ ろことができる。

(2) 測定対象面の表面粗さや温度上昇などによる輻射率の変動による測定誤差は Fig. 2.13 および Fig. 2.14より高々 50°C である。

(3) 測定対象面の酸化膜などの不発物生成をも含めた輻射率の変動による測定 設差は最大で約70℃である。

2.8 1kb

発熱体から輻射される赤外線を光伝送用ファイバで受光して,赤外線検出素子へ伝送する赤外線輻射温度計を製作し,微小領域の温度を非接触で測定する方法について検討した。 その結果をまとめると次のようになる.

 光ファイバを用いた赤外額輻射温度計の相対感度は、ハールを測定可能な波 長範囲、 ふを単色黒体輻射能、F(れ)、G(れ)をファイバおよび集光レンズの分 光透過率、D(れ)を赤外線検出素子の分光感度とすろと、

 $\Lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta J_{\lambda b}(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D(\lambda) d\lambda$

で表的される. ここで、βは使用ファイバの特性値などで決まる定数である. 2. 光ファイバを用いた赤外線輻射温度計の実感度曲線は、上式で几,=0.3,um $\mathcal{R}_2 = 2.3 \sim 2.5$,umとおいて計算した曲線とよく一致している. また、実感度 \mathcal{A}_a は $A_a = \varepsilon C_a \cdot T^{\kappa}$ なる式で近似することができる. ここに、Cat定数、 εは全輻射率、Tは絶対温度、Kは感度指数である.

3. 炭素鋼 S55Cと砥石A36Kの輻射率は400°C 以上ではほとんど等1く, 砥粒塊 Al203では輻射率が少したきく,感度が上昇しているが,温度1000°C の時に約50°C程度の差があろだけであろ. また、炭素鋼試片の表面粗さの 違いによる出力の変化もみらいなかった.

 4. 光ファイバを含めた温度計自体の基本的な測定精度は±3%以内であり、こ 小は使用ファイバの端面生成精度の向上によって、±0.5~±1%程度にまで上 げろことが可能である. また、測定対象面の表面粗さや温度変化に伴う輻射 率の変動による誤差は最大50℃で、表面の吸着不純物生成をも考慮した誤差 は最大で70℃程度である.

务 考 文 献

1. 芝 亀吉, 温度:計量管理技術双書(16), 第15版, 7日十社, (1978).

- 2. 三東測器工業計測器事業部床外線開発グループ, "赤外線放射温度計, " 三葉技術レポート, 103, (1979).
- Holman, J.P., "Radiation Heat Transfer," Heat Transfer, 4th ed., McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. (1976), 273-353.
- 4. Kapany, N.S., "Geometrical Optics of Fibers," Fiber Optics, Academic Press, (1967), 5-35.
- Chappell, A. (ed.) in Texas Instruments Ltd., "Photoelectric Detectors," Optoelectronics: Theory and Practice, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., (1981), 1-10.
- 6. 浜松フォトニクス、赤外線検出器カタロワン
- 7. 前揭文献 4.

- 8. 野田健一, 電子通信学会編, 光ファイズ伝送, 第3版, コロナ社, (1980), 44.
- 9. 理料年表, 東京天文台編集, (1982), 516.
- 10. Mayer,J.E., Shaw,M.C., "Grinding Temperature," J.Am.Soc.Lub. Engg., 13, (1957), 22-27.
- 11. 前揭文献 1. , 142.
- 12. 前揭文献 2.
- 13. Siegel, R. Howell, J.R., "Definitions of Properties for Nonblack Surfaces," Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. (1972), 42-81.
- 14. 前揭文献 1., 第35表, 133-134.
- 15. 前揭文献 3., Table A-10, 508-509.
- 16. 前揭文献
- 17. 黒崎夢夫, "ふく射によろ伝熱(3), "機械の研究, 34, 3(1982), 423 -426
- 18. 前揭文献 1., 第39表, 153.
- 19. 前揭文献 2., 10-14.

第3章 ファイバの設定位置が温度計の出力に及ぼす影響

3.1 はいがき

光ファイボは Fig. 2.2 に示したように、コアとクラッドとの屈折率の違いによって起ころ全反射を利用して光を伝送するため、その屈折率差によって決まる受 光角 3m より小さな角度で入射した赤外線しか伝送できない、そのため、ファ イズの設定位置によって感温面積が異なり、測定対象物の大きさ、および感温面 との相対的な位置関係によってファイズが受光する赤外線エネルギーが変化し、 温度計の測定精度に大きな影響を反ぼすことが考えられる.

そこで本章では、測定対象物な温度一様な平面にモデル化して考え、その大き さい感温面との相対位置がファイバの受光エネルギーに反ぼす影響を理論的に考 察するとしもに、その妥当性を実験によって確かめている. これは碰粒切れ刃 温度測定における温度計の出力、すなわち、計示温度の信頼性を評価することを 目的としたものである.

3.2 感温面積

Fig.3.1はコア径d, 受光角多m のファイバを測定対象面より距離t の位置においたときの感温面 S_t t 表中1たものである. Fig.3.1よ り, S_t は

 $S_t = (\frac{d}{2} + t \cdot \tan \xi_m)^2 \pi$ (3.1) で表わされる. 逆に言えば、ファ イバは St から輻射される赤外線 (



Fig.3.1 The target area S_t of a fiber placed at a distance of t from the object.

が受光できないわけである。 トレボッイ, 測定対象物のたきさによって、St を変化させることができ、感温面をいさくするためにはファイバを測定対象面に 近ずけなければならない。 そして、 t=0のとき感温面は最小になり、コア新 面積と一致する。

3.3 受光エネルギーの理論解析

以下に述べろファイズの受光エネルギーの解析にあたっては、ファイズは測定 対象面と垂直に設置されており、コア断面と測定対象面は平行になっていろとす ろ. また、測定対象面は拡散面で穿方性輻射を行ない、ファイズのコア断面は 波長、方向に関係なく受光角内で入射した輻射を全て受光する完全吸収体、すな わち、測定対象面、コア断面をともに黒体平面として取り扱うことにする.

3.3.1 測定対象面が感温面より大きい場合

Fig. 3.2 に示すように、測定対象面 S_{ob} が十分大きく、感温面 S_{t} が常にこの 面内にあるようにファイバが設置されている場合の受光エネルギー支求める. のとき、測定面 f が感温面 S_{t} に等! くたる. Fig. 3.2 において、感温面 S_{t} 内の微小面積 df から、入射角多で、微小な体角 dΩ で表わされるコア内の微小 面積 dF に 单位時間に輻射される波長範囲 ($\eta - dn/2 \sim \eta + dn/2$)のエネルギー量 dC₂ は次式で表わされる.

 $de_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \cos \xi \cdot d\Omega$ (3.2) ここに、 $I_{\lambda b} は 単色黒体 輻射強 さ で あ ろ.$ 付録Aより、微小な体角 dΩ は

$$d\Omega = \frac{dF}{R^2} = \frac{dF\cos\xi}{R^2}$$
(3.3)

であるから, 式(3.2)は



Fig.3.2 Model of acceptance energy for large object.

$$de_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot \cos^2 \xi \frac{1}{R^2} df dF \quad (3.4)$$

ただし、dFitdfからみたdFの投影面積、RitdfとdFとの距離である。 Fig. 3.2におけろ位置関係より、

$$\cos\xi = \frac{t}{R} \tag{3.5}$$

$$\tan\xi = \frac{r'}{t} \tag{3.6}$$

今, df=F'dr'dy とおけば, 式(3.6)より

$$\mathrm{d}r' = \frac{t}{\cos^2 \xi} \mathrm{d}\xi \tag{3.7}$$

であるから,式(3.4)は次式で表わさりる.

$$de_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot \cos^{2} \xi \frac{1}{(t/\cos\xi)^{2}} t \cdot \tan\xi \frac{t}{\cos^{2} \xi} d\xi d\psi dF$$
$$= I_{\lambda b} d\lambda \cdot dF \cdot \frac{1}{2} \sin(2\xi) d\xi d\psi$$
(3.8)

従って、測定面からdF に入射するエネルギー G は入射角弓が受光角 3m以内の輻射線であるから

$$e_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot dF \int_{0}^{\xi_{m}} \int_{0}^{2\pi} \frac{1}{2} \sin(2\xi) d\xi d\psi$$

= $I_{\lambda b} d\lambda \cdot dF \cdot \frac{\pi}{2} [1 - \cos(2\xi_{m})]$ (3.9)

コア全体が受光すろエネルギー Eamはコア面積全体にわたって積分すればよいか

$$E_{\lambda m} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot S_c \cdot \frac{\pi}{2} [1 - \cos(2\xi_m)] = I_{\lambda b} d\lambda \cdot \pi S_c (NA)^2$$
(3.10)

ここに、 Se はコア断面績、NAはファイバの開口数である。 式(3.10) にばた が含まいておらず、ファイベが受光する輻射エネルギーはファイバのコア断面積 と開日数で決まり、ファイバの位置に弦停しないことがわかる。 従って、測定 対象面が十分大きければ、ファイバの設定位置は温度計の測定感度に影響しない.

3.3.2 測定対象面がコア面より小さい場合

Fig. 3.3 に示すように、ファイバ軸がその中にも通ろような半径 た の円断面 Ss を考えろ. ただし、 ちは $r_s = d/2 - t \cdot tan \xi_m$ で与えられ、 たっのより、 $t < (d/2)/tan \xi_m$ でなければならない. このとき、 Ss 内からその法線と なす角が Sm 以内で射出した輻射線は全てコマに受光されることにたろ. ここ で、測定対象面 Sou が Ss 内にあり、かっ Sou 以外からの輻射社ないものとした とき、すなわち測定面が測定対象面 に等しい場合のファイバの受光エネ ルギーを求める. Fig. 3.3 におい て、測定対象面 Soo 内の微小面積 d 5 から輻射される赤外線のうち、 微小な体角 d C で表わされる半径尺 の半球面上の微小面積 d F に入射す ろ輻射エネルギー d C は式(3.2) で 与えられる. このとき、 d f の中 べを原点とする極座標糸 (R, 5, 4) を 用いれば、付録A上り、 微小女体 角 d C は



Fig.3.3 Model of acceptance energy for small object.

 $d\Omega = \sin\xi d\xi d\psi$ (3.11) で与えら以ろから, 式(3.2)は

 $de_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \cdot \cos\xi \sin\xi d\xi d\psi = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \cdot \frac{1}{2} \sin(2\xi) d\xi d\psi$ (3.12) 従って、 df から輻射され、 っアド受光されろエネルギー(Fig. 3.3の斜線で示 した領域に入射すろエネルギー) C_{λ} は式(3.12)を受光角内領域にわたって績分 すれば得られる、 すなわち、

$$e_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \int_{0}^{\xi_{m}} \int_{0}^{2\pi} \frac{1}{2} \sin(2\xi) d\xi d\psi = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \cdot \frac{\pi}{2} [1 - \cos(2\xi_{m})]$$
(3.13)

よって、測定対象面全体からファイバが受光すろエネルギーEnsは

$$E_{\lambda s} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot S_{ob} \frac{\pi}{2} [1 - \cos(2\xi_m)] = I_{\lambda b} d\lambda \cdot \pi S_{ob} (NA)^2 \qquad (3.14)$$

式(3.14)にはたが含まれていないことから、O<t<tsの間に置かれたファイバが受光すろエネルギーはその位置に依存しないことがわかる. ただし、

 $t_s = (d/2 - r_s)/\tan\xi_m \quad \text{(bb}.$

なお、四上り明らかなように、セフなぞはなが大きくなろに従ってコアが受光 する輻射エネルギーは減少1 てぃくが、この場合については次節で解析する。

3.3.3 一般的な場合への拡張

前節ではあろ限らいた場合における受光エネルギーを求めたが、本節でけより 一般的な場合の受光エネルギー, すなわち、測定対象面 Sou が感温面 Se 内にあ り、かっ Ss よりたさい場合について考えることにする. ここで、取り扱いを 簡単にすろため、測定対象面 Souは半径 Fou の円形断面を有しており、その中で が感温面の中にと-致している場合と、そうでない場合に分けて考える。

Fig. 3.4は一般的な場合として、Fig. 3.1のようにファイズが設置されていろ ときの受光エネルギーを求めるためのモデル図である。 コア断面の中べを O_c 、 それより距離たにある感温面 S_t の中べを O_t とし、感温面全体にわたって一様 に赤外線が輻射されており、種々の損失はないものとする.

感温面の中バOt 上り距離とのところの微小面積 df から、入射角ろでコ了内の微小面積 dF に単位時間に射出さいろ波長範囲(れ-dれ/2 ~れ+ dれ/2)の輻射エネルギー denは式(3.2)より

$$de_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \cos \xi \frac{dF \cos \xi}{(t/\cos \xi)^2} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \frac{\cos^4 \xi}{t^2} dF \qquad (3.15)$$

従って、dチよりコアに受光さいろエネルギーCR(なト)は式(3.15)をFにわたっ て積分すいば得らいる、なな、Fはdチから輻射さいろ赤外線のうち、ファイ だが受光する領域で、Fig.3.4上図の斜線で示した部分である。 すなわち、





$$e_{\lambda}(t,r) = \iint_{F} I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \frac{\cos^{4} \xi}{t^{2}} d\vec{r}$$
(3.16)

ところが、 dF=ududo, tang=u/t とおけば

$$de_{\lambda} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \frac{t^2 u du d\theta}{(t^2 + u^2)^2}$$
(3.17)

であることから、式(3.16)は次式のようになる.

$$e_{\lambda}(t,r) = \iint_{F} I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \frac{t^2 u d u d \theta}{(t^2 + u^2)^2} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot df \cdot g(t,r)$$
(3.18)

ここに,

$$g(t, r) = \iint_{F} \frac{t^{2}u}{(t^{2}+u^{2})^{2}} du d\theta$$
 (3.19)

従って、コアが受光する全輻射エネルギーEnは式(3.18)を測定面チにわたって 績分すれば得られる。

$$E_{\lambda} = \iint_{f} I_{\lambda b} d\lambda \cdot g(t, r) df \qquad (3.20)$$

この理論を次に示す個々の場合に適用することにする.

3.3.3.1 測定対象面 Subの中心 Oub が感温面 St の中心 Ot と-致すろ場合

こて、 No6の半径を 106 とすいば、式(3.20)において測定面積 5 が Fig. 3.5 に示すように、次のニッに場合分けできる。

(I) $f = S_{ob}$ for $r_{ob} \leq r_t$

(II) $f = S_t$ for $r_{ob} > r_t$

なぜなら,(II)ではファイバは感温面からの輻射線し氷受光し伝送されないからであり,この場合の受光エネルギーは3.3.1節の場合にあてはまろ。 従って,

$$(I) \quad \stackrel{r_{ob}}{=} \leq \stackrel{r_{t}}{=} E_{\lambda}(t, r_{ob}) = \iint_{S_{ob}} I_{\lambda b} d\lambda \cdot g(t, r) df = \int_{0}^{r_{ob}} \int_{0}^{2\pi} I_{\lambda b} d\lambda \cdot rg(t, r) d\phi dr$$

$$(3.21)$$

(II)
$$r_{ob} > r_t$$

 $E_{\lambda} = E_{\lambda m} = \iint_{S_t} I_{\lambda b} d\lambda \cdot g(t, r) df = \int_0^{r_t} \int_0^{2\pi} I_{\lambda b} d\lambda \cdot rg(t, r) d\phi dr$
 $= I_{\lambda b} d\lambda \cdot \pi S_c (NA)^2$ (3.22)

Fig. 3.6は測定対象面の半径 6b とファイズの受光エネルギー Ezの関係を表 いしたものである. 四より, Sobの面積が St の 1/2 で受光エネルギー Ezが Ezmの約 87% であることがわかる. ここで, Ezmはファイバが受光し得る最





Fig.3.5 Model of acceptance energy in the case when center of object is on center axis of fiber.

Fig.3.6 Variation of the radiant energy accepted by a fiber with radius of object. 大エネルギーで,式(3.10),式(3.22)で与えられる. なお,式(3.18)および 式(3.21)の数値計算の詳細は付録Bに示してある.

3.3.3.2 測定対象面 Sobの中心 Oob が感温面 G の中心 Ot からずれてい ろ場合 この場合, Fig. 3.4 に示すように, 測定面積 f は測定対象面のたきさのみなら ず, 感温面との距離 ち によっても変化する. 従って, 受光エネルギー Ez は

$$E_{\lambda}(t,t_{h},r_{ob}) = \iint \begin{bmatrix} I_{\lambda b} d\lambda \cdot g(t,r) df \\ f(t,t_{h},r_{ob}) \end{bmatrix}$$
(3.23)

で表わされる. Fig. 3.7は種々のないに対して、Our とOt の距離な とファ イズの受光エネルギー E2 の関係を表わしたもので、それぞれの場合について 式(3.23)を数値積分(什録B参照))で求めたものである.* ながたきく、また ないが小さぐなろにっいて受光エネルギー E2 が急激に減少しているのがわかる.

3.3.4 砥税切り刃温度測定への適用

3.3.3節で述べたように、ファイバの感温面 St と測定対象面 Sob の位置およ びた小関係によって、ファイバの受光エネルギーが変化することから、実際の温 度測定に際し、温度計の出力が測定対象面の温度に必ずしき対応しないと、う問 題が生じろ.たと之ば、測定対象面が非常に小さ、場合とか、測定対象面のほ んのわずかの部分のみが感温面内にある場合などは受光エネルギーが小さく、低 い温度の物体として表示さいる. 本研究の場合、測定対象物である砥粒切い刃 がファイバ端面下を、定方向に、定速度で通過するわけであるから、温度計の出 力は断続的なパルス波形となる. 従って、そのパルス幅より測定対象面の大き

* 数値計算に際しては, 第5章で扱う砥粒切り刃温度測定におけろ実験条件を 用いていろ、 すないち, d=50,um, 3m=13.1°, t=100,um である。



Fig.3.7 Variation of radiant energy accepted by a fiber with the distance between centers of s_{ob} and s_t for some values of \mathbf{r}_{ob} .

さ、および通過位置を推定し、出力と真の温度との関係を考察することにする.

なお,以下の考察においては,実際の実験条件;コア径d=50,um, 受光角 3m=13.1°, ファイバ設定距離t=100,um, 測定対象物速度V=1713m/min; 下での現象を対象としている.

3.3.4.1 測定対象面 Sob の中バ Oob が感温面 St の中バ Ot 上を通過する場合 この場合, 出力のパルス幅が測定対象面の大きさを表わし, 次式により計算で きる.

 $2r_{ob} = V\Delta\tau - 2r_{t}$

2 = c, $\Delta \tau$ は $\pm h$ の $\wedge \nu \pi$ 幅 \vec{v} の h ϵ は $\vec{z}(3.1) \pm \eta$ 容易 $\kappa \vec{z}$ め ϵ h σ ϵ \vec{z} \vec{z} , $\Delta \tau = G_{\mu s}$ $k \neq W$ \vec{x} , $\vec{z}(3.1)$ $\vec{z} + \vec{z}$ $\vec{z}(3.24) \pm \eta$ $\epsilon = 48.3 \mu m$, $\epsilon_{b} = 37.4 \mu m$ $k \pm 3 \sigma$. \vec{z} \vec{z}

3.3.4.2 測定対象面 Sab の中心 Oab が

感温面 St の中心 Ot からずれて通過する場合

(3.24)

平均的なたきさの砥粒切N刃の測定対象面 Son * が感温面の中心からずれて通 温した場合のファイバが受光するエネルギーの時間的変化, すなわち温度計の出 カペルスの様子を Fig.3.7を用いて表わしたのが Fig.3.8 である. ここで, 両

* 問題を簡単にするため、実験で得られたパルス幅より測定対象面、すなわち 磁粒切れ刃面の平均的なたきさを推定し、その値を用いて考察を行なう. 実験 結果上り、ベルス幅の平均値はAT=8.7µs. 従って、式(3.24)より、測定対 象物の平均径は Fa=V-AT/2-左=75.0 μmとなる.



 $\Delta t_y = (r_t + r_{ob})/10$



Fig.3.8 Appearances of energy accepted ${}^{E}_{\lambda}$ in which the object ${}^{S}_{Ob} \left(r_{Ob}$ =75.0 $\mu \rm m \right)$ passes through the target area ${}^{S}_{t} \left(r_{t}$ =48.3 $\mu \rm m \right)$ at a constant speed (V=1713 m/min) with various deviation of ${}^{t}_{y}$.

着のずい t_y (0 $\leq t_y \leq t_z + t_{ob}$) $\frac{1}{2}$ $n_{7X} - q \geq 1$, ずれの間隔 $\Delta t_y \leq \Delta t_y = (t_z + t_{ob})/10$ ≥ 1 $\tau \cup 5$. 四上り, t_y が大きくなろに従って受光エネルギーが急激に減小すろとともに、 ペルス幅も小さくなっ $\tau \cup 5$ の Khかる. ここで、温度計の Δt_y n_{1X} t_y Δt_y n_{1X} t_y t_y

して, 温度計の出カパルス幅ΔT レダ光エネルギー ERの関係を 示したもので、付録Cに記した 「法で算出」たものである。図 より、 パルス幅ATが 7usでは ほとんどの場合で受光エネルギ - Ez # Ezmの 80% 以上に なっていろのがわれる。 (たんが 125 Jum 以上の場合には 80% 以下になっているが、実験に使 用した砥石A36の早均教経が約 500 jun であることを考えれば、 測定対象面である切りれ逃げ面 摩耗領域が任250,um以上にな ろのは非常に少ない.)



Fig.3.9 Relation between acceptance energy E_λ and pulse width $\Delta\tau$ of the pyrometer for several values of r_{ob} .

3.3.4.1, 3.3.4.2節の考察より, パルス幅が 7,45 以上の出力はほぼ95% 以上の信頼度で測定対象面の温度と対応(ていろと言える. 送にパルス幅がそ 以以下の場合は Fig. 3.9の曲線を用いて出力校正することも可能であるが,本温 度計の間波数特性(Fig. 2.12 参照)からも,この場合の出力は大きく低下して 171まう.

従って,本研究ではハルス幅が7,4s以上のものを測定対象とし,これらの砥粒 - 切りれがファイバの真下を通過したものとみなすことにする.

3.4 ステップ型のモードファイバの光伝送特性実験

3.3節ではファイズの設定位置が温度計の出力に及ぼす影響を理論的に解析し、 本温度計の特徴や測定精度について検討したが、本節では、前節の解析にあたっ て用いた種々の仮定の妥当性、したがって、理論解析結果の正当性を実験によっ て確認している。

3.4.1 ファイバの設定距離の影響

感度に影響しない,"ことが導びかいろ.

式(3.1)で与えら此万フ Jutput ャイバの感温面積 St 全面 から赤外線が輻射されてい (1)(2)(3)(4) (1) $t \approx 10 \, \text{mm}$ ろとき、ファイバが受光す $(2)t \approx 5 \text{ mm}$ $E_{\lambda m} = I_{\lambda b} d\lambda \cdot \pi S_c (NA)^2$ $(3)t \approx 1 \text{ mm}$ ろエネルギーEam は式(3.10) $(4)t \approx 0 \text{ mm}$ $\ddagger') E_{2m} = I_{Tb} dn \cdot \pi S_c (NA)^2$ Influence of distance between Fig.3.10 object and incidence face of optical fi-ber on sensitivity of IR-pyrometer. ベ与文らNろ. この式に はファイバの設定距離もが含まれていないことから、この温度計の重要な性質の 一つである、"測定対象面が十分大きけりば、ファイバの設定位置は実用上測定

Fig.3.10は-定温度に加熱されていろ十分大きな試片に対して、ファイズの受光面との距離と支変化させたときの温度計の出力を測定した結果である. 入力はチョッパを使って交流に変換しているため、振幅が出力を表わしている. 図より明らかなように、コア経 50,umに対しくの約200倍の10mmまでと支変化さ

せても振幅は変動しておらず、温度計の出力がファイバの設定位置に影響さいないことが確認された.

3.4.2 ファイバの軸ずいによろ伝送損失

ファイバボ受光すろエネルギー En はファイバの設定位置 t, 測定対象物の大きさなb,および Sobと St との中バ間距離なの関数として式(3.23)で与えらいることを示した.(Fig. 3.7参照)

$$E_{\lambda}(t,t_{h},r_{ob}) = \iint I_{\lambda b} d\lambda \cdot g(t,r) df \qquad (3.23)$$

$$f(t,t_{h},r_{ob})$$

$$g(t, p) = \iint_{F} \frac{t^{2}u}{(t^{2}+u^{2})^{2}} du d\theta$$
(3.19)

この式は、測定対象面が理想的な拡散面であり、かファイバ軸となす角が受光 角多m以内で入射した赤外線はコマ全面で均一に伝送さいるとの仮定の下で導び かいている. そこで、この仮定の妥当性を確認するために次のような実験を行 なった.

Fig. 3.11 に示すように、レーザ光源(He-Neレーザ、波長几s=632.8 nm,



Core

Fig.3.11 Illustration of measurement of optical power accepted by fiber.

Fig.3.12 Microscope photograph at fiber face emitting visible light; core diameter d=50 µm.

NEC-GLG5350)から照射されたレーザ光をファイバ-1(Table 2.2, C-ファイバ)

の一端で受光する. 使用 ファイバはステップ型切毛 -ドファイバであろことか ら,その他端のコア断面全 体から均一にレーザ光が放 射されろことになり、3)こ の面をあら、定温度にある 測定注象面(1.1=d/2)と 考えろことができら、 従 って,この面から距離もの ところにファイバ-2の後 光面を設置し, 面ファイバ の軸べ(コアの中バ)のず れちを変化させ、このと きのファイバー2の伝送エ マルギーを光パワーメータ (安藤電気, AQ-1111)で 測定すれば、測定対象面と 感温面の位置関係によって 変化すろ谷光エネルギーを 実験的と求めろことができ 5. ht. Fig. 3.12 11 可視光線をファイバに照射 1たときの出射面の顕微鏡



Fig.3.13 Photograph of optical power measurement set-up.



Fig.3.14 Influence of transverse displacement between optical fibers on transmission loss.

写真であろが、コア部全面で光強度分布が一様であり、また、クラッド部からの 光の漏れも無視できる:しがわかる.

実験装置の外観をFig. 3.13 に、測能結果をFig. 3.14に示す. 四の実線は、 アイバー1の出射面全体から均一にエネルギーが射出さめ、かっ、ファイバー2 が受光角内(Fig. 3.12の斜線の部分)で受光したエネルギーを損失なく伝送すろ ものとして式(3.23)より計算した結果である. ナが大きくなるに従い、実測値 と計算値の間に少し差が生じていろものの、両者はよく一致しており、受光角内 ベ入射したエネルギーがコア全面で均一に伝送さめて、また、Fig. 3.13 で確認 されたように、測定対象面であろファイバー1のコア部からは均一にエネルギー が射出されていろことがわかる. よって、本温度計の感温面積、および受光エ ネルギーはそれぞれ式(3.1)、式(3.23)によって与えられ、3.3節で行なった理 論的検討が妥当なもので、実際の温度測定に適用できろことが確認された.

3.5 まとわ

ファイバの設定位置が温度計の出力に及ぼす影響について、理論的および実験的に検討を加えた. すなわち、測定対象面を温度一様な平面にモデル化して考え、そのたささや感温面との位置関係によって変化するファイバの受光エネルギを数値計算によって求めろとともに、その妥当性を実験的に確認した結果をまとめろと次のようになる.

1. 本温度計の感温面積はSt=(t kan 3m + d/2)2 ルズ与えられる. また,フ ァイバの長さを数mで使用する限り, 受光角内でファイバに入射したエネルギ

-はコア全面で均一に、かつ損失なく伝送されると考えて差しっかえない。 2. 預度対象面 Sobが十分たきく、感温面 St が常にこの面内にあれば、ファイ バが受光するエネルギーは Enm = Intoduit Se (NA)² で与えられる。 すなわ ち、測定対象面が十分大きければ、温度計の測定感度は、ユア断面績とファイ バの開口数によって一意的に定まり、ファイバの設定位置に影響されない.

- 測定対象面 Sobの中バ Oobが感温面 St の中バ Ot と 致している場合, Sob の面積が St の 1/2 でそ光 エネルギー En が Enmの約87% に減少する.
 だし, Enmはファイズが受光し得る最大エネルギーである.
- 4. コア径 d = 50 μm, 受光角 3m = 13.1°, ファイバの設定距離 t = 100 μm なろ条件下で定まる感温面上を,研削速度 V = 1713 m/minで通過する測定対 象面の温度を測定する場合, その温度計出力のペルス幅 Δ τ が 7 μs 以上の t のを選べば,約95%以上の精度で温度を測定できる.

参考文 献

- 1. Kruse,P.W., Mcglauchin,L.D., Mcguistan,R.B., "Infrared Sources," Elements of Infrared Technology, John Willey & Sons, Inc., (1962), 11-86.
- 2. Wong, H.Y., "Thermal Radiation," Heat Transfer for Engineers, Longman, Inc., (1977), 88-128.
- 3. 末松安晴,伊賀健一, "光を導く現象の基礎," 光ファイバ通信入門, オーム社, (1980), 13-28.

4.1 は1がき

研削時に砥石と加工物の干渉領域で発生すろ熱によってもたらされる種々の悪、 影響のうち,加工物に目を向ければ,研削焼け,研削割以,あるいは残留応カや 組織変化などの加工物表面および表面下ごく薄い層におけろ熱的損傷が問題とな ることが知い. もちろん,砥石側では切れ刃の摩耗や自住休用,従って砥石寿 命に関係し,住産能辛とも重要な関係をもつ. 熱擾傷の発生機構の解析に対し ては,研削時における加工物研削表面層の温度とその変化の挙動を知る必要があ り, 1) 約 くの研究者はその実測値との対比において検討を加えている. 2),3) 加 工物内の温度測定法としては,Littmann⁴⁾ や高沢⁵¹,あろいは Peklenik⁶⁾ら の熟電対の原理を巧みに応用した方法*がその取り扱いの簡単さのため,広く一 般化されている. しかし,この種の熱電対によろ方法では加工物の融点がくの 高温における温度校正义,高温接点の大きさ等によって変化する応答症度等の問 題があり,必ずしも研削に伴う過渡的な温度変化に追従できるとは考えらいない. しかも、これら熱電対法による測定の精度に関して、これと比較し得る適当な方 法がないため、これまで全く検討されていない.

く、で本章では、前章で製作した光ファイバを用いた赤外線輻射温度計を平面 研削中の加工物内の温度測定へ適用し、特に、砥石と加工物の接触面の温度、す ないち砥石研削点温度、および加工物研削表面層の温度を加工物側より測定する。 そして、この方法では、赤外線検出素子さえ遅べば、従来までの研削表面層の平 均的な温度と昇のひからず、研削表面において個々の砥粒切以刃によって生ずる 熱バルスの測定ま可能になる. また、赤外線検出素子として PbS セルと In As

* 第1章, 1.2.1節参照

4.2 実験方法

実験装置の概略図をFig.4.1, その主要部外観をFig.4.2,また実験条件を Table 4.1 に示す. 実験は定切り込み耳面研削で行なった. 光ファイバを用 、た赤外線輻射温度計では,加工物の底面から研削表面近傍まであけた直径0.4 ~0.6 mm の小私にコア径 50 μm の C - ファイバ (Table 2.2 参照)を一本挿入 し、受光面が穴の底面に接する位置で固定する. このファイバによって,砥石が 小孔上部の加工物を研削するときに小孔の底面から輻射される赤外線を受光する ことができ,小私が研削表面に貫通するまで所定の切込みを与えた1 パス研削ご とに測定をくり返せば,研削表面下種々の深さにおける過渡的な温度変化が測定 できる. このとき,研削表面下種々の深さにおける過渡的な温度変化が測定 できる. このとき,研削表面がらの深さ Z は小私の底部を研削したときをま=0 とした. 石葉ガラスの軟化点、および溶融点はおよそ 1600~1800 でであり^{の,2)} 高温状態にある時間が非常に短いため,研削熱によってファイバが変質あるいは 溶融して測定感度に影響を及ぼすことはない. また、小私の底部はドリル加工 した状態であり、温度校正曲線を求めたときの加熱試片に近い組さにあると考え ることができる.

一方,熱電対法による測定は,研削表面層の温度を高沢らの方法^{9),10)},研削表面の温度をPeklenik¹¹⁾の方法で行なった. 前着では,先と同様の小孔を加工物 にあけ,小孔の底面に線径100 μmのコンスタンタン線を点溶接した. この浴



Fig.4.1 Schematic illustration of experimental set-up.

Table 4.1 Summary of experimental conditions

	 Operating parameters 					
	Number of revolutions of wheel, N	1800 min ⁻¹				
	Peripheral wheel speed, V	1696∿1713 m/min				
	Work speed, v	10 m/min				
	Wheel depth of cut, $lpha$	20 µm				
	Up grinding					
	•Grinding fluid					
	Soluble oil (1:50 in water)					
	•Grinding wheel					
A36K7VC(3)B, (300∿303)×30×127 mm						
	$V_p = 40.0 \%$, $V_q = 49.1 \%$, $V_b = 10.9 \%$					
•Workpiece						
	0.55 % carbon steel, Hv 200					
	Width, b_w	6 mm				
	Length, l_{w}	52 mm				



Fig.4.2 Close-up photograph of experimental set-up.

培部が加工物-コンスタンタン線熱電対の高温接点になる. 溶接に際しては接 点のたきさが線径以下となるように接合電荷量を調節し,他の部分は絶縁してい ろ. 後者では,線径約20μmのコンスタンタン線を薄い雲母箔を加して加工物 で圧着した. この方法は切り用による切削依用によってかえりを生じ,これが 橋渡しとなってコンスタンタン繰と加工物の間に高温接点が形成さりる. この ため表面温度しか測定できない. 広力はサンプリング間隔2μsでデジタルメモ りに記録させた後,X-Y レコーダで再生する. なお,研削液の供給効果を調べ るため,湿式研削における測定を行なった.

4.3 研削表面層温度

4.3.1 実験結果

Fig. 4.3が測定結果であり、3種類の温度計の出力波形を比較している. 縦軸が研削温度、横軸が時間であり、1msが加工物長さにして約0.15mmに相当する. 図 の数字は研削表面からの深さを表わしている.



Fig.4.3 Comparison of outputs measured with three kinds of pyrometers; the signals show the grinding temperature histories for various depth below the ground surface. 熱電対では感温部が大きく、激い、温度変化に追従できないため、出力技形は 滞らかにだり、個々の砥粒切れれによろ熱バルスは現われていない. 応答速度 が200 μsのPbS-温度計になると、研削表面下 20 μm で熱バルスが測定されて いろ. しかし、その数は少なく、ビーク先端を鋭くとがっておらず、温度計の 応答速度は十分ではない. この二つの結果の比較から、点溶接した熱電対の応 答速度は 200 μs よりもはろかに遅く、msのオーダーであろうと推察される. こいに対し、応答速度が数 μsの LAs-温度計になると、熱バルスが研削表面化 40 μmから現れ、20 μmでは先端が鋭くとがったビークが数好く測定されている. また、数百 μs の時間間隔で100℃程度の変動をしており、時には変動幅が2002 にも違している. このよう公加工物研削表面層の局部的な高温度、高温度勾固 は加工物表面下の残留応力の原因となり、加工物の破壊強度以上の残留応力が発 生した場合には研削割れとなる. すなわち、研削焼けなどの加工物の化学的変 化に影響する平均的な温度上昇を、研削割れたどに影響する局部的な温度変んと はその取り扱いを区別しなければならないと考えられる.

このように,研削表面層の温度測定に温度計の応管速度が及ぼす影響は極めて 大きく, 今後, 加工物にあけろ小私をより小さくし, ユア径のより小さな万イバ を用いろように改良すいば, さらに精度よく測定することが可能であろ. また, 本温度計がこのような高温における温度変化によく追従していろもう-つの理由 は,赤外線輻射温度計の感度が高温になるほど向上するためである. (Fig.2.13, Fig.2.14 参照)

4.3.2 熱電対の応管速度の測定

熱電対は研削温度測定などに広く使用さいており, かっその応答速度が測定対 象によってはたきく結果に影響さいろにもかかわらず, その高温接気のたきさと 線径に依存するという程度にしかわかっていない。 前節の実験結果から考えれ
ば、雑程100μmの表面熱電対* ぞその応答速度が200μsよりもかなり遅いという結果を得ている. 本節では、熱電対の応答特性を一次違いの系とみなし、与 えられた入力に対する出力の解析よりその時定数で、を求める.

ー次運いの系に対し、単位ステップ関数((て)を入力したときの出力み(て)は

 $y(\tau) = K[1 - \exp(-\frac{\tau}{\tau_{e}})]$ (4.1)

で表わされろ.¹²⁾ ここに, Kはゲイン定数, Ts は時定数である.

実験は,一般のF-C裸熱電対およびF-C表面熱電対によろ2種類で行なった。 Fig. 4.4 に示すように,裸熱電対の場合はその温接点を溶融した金属(スズ)に

瞬時1、浸1,表面熱 Cold 雷村の場合は鉄線を junction-Constantan wire A-D converter ちらかじめな融金属 に浸してないた状態 Iron wire え、コンスタンタン Osciloscope Sr 線を瞬間的に浸した Furnace Furnace 時の熱転電力友A-D *y*(τ) 変換器を介1てオシ (a) Ordinary (b) Surface thermocouple thermocouple ロスコープ上に映像 Fig.4.4 Experimental equipment for measuring time constant of thermocouples; (a)ordinally 化する. 後者の場 F-C thermocouple, (b) surface thermocouple.

* 種類の異なったニマの素維からなる一般的な熱電対に対し、物体の表面の温 度測定などの場合、その物体を一方の熱電対素線と考え、その表面に他種の微細 道線を点落接、あるいけ圧着して形成した熱電対を表面熱電対と称し、一般的な 熱電対と区別している。 研削温度測定の場合には多くはこのタイプの熱電対が 利用されている。



Fig.4.5 Photograph of oscilloscope screen showing the traces of emf versus time for two thermocouples; (a)ordinally F-C thermocouple, (b)surface F-C thermocouple.

Table 4.2 Experimental values of time constant of thermocouples

· ·	- Time constant τ_s , ms -	
Diameter d_{th} , µm	Ordinally F-C thermocouple (275 \sim 650 °C)	Surface F-C thermocouple (410 \sim 470 °C)
100	4 ~ 7	5 ~ 6
300	30 ∿ 38	•••••
800	110 ∿ 120	10

- 台、コンスタン縺が溶融金属に接」た瞬間に熱電対が形成され、コンスタンタン 線の底部全体が一様な温度になると考える. Fig. 4.5 にそいぞれ、両者のまカ 波形の一例を示す. Table 4.2 は実験結果をまとめたもので、測定温度および 熱電対素練の径を変化させていろ. 熱電対の時定数は温度にはほとんど関係な いが、雑径によってたきく変化していろことがわかる. これは一般的な熱電対 には特に顕著で、練径が100 μm ではTs 24~7 ms なのに対し、300 μm では、 34 ms, 800 ms では 0.1 s 程度にまでたきくなっていろ. 一方、表面熱電対 の場合、線径の違いによる影響はそれほどたきくなく、線径 800 μm で Ts 210 ms となっている. これらの結果を総合すれば、前節で行なった実験において、点 溶接1た熱電対の応答速度は Ts≈5 ms と考えて妥当であろう.

4.3.3 測定法の応答速度が測定結果に及ぼす影響

ここでは測温点(hn 1物におけた水虱の底面)の温度変化をFig. 4.6のように 三フの場合にモデル化し、輻射温度計及び熱電対の時定数が出力に及ぼす影響に ついて調べる. ここで、 To は砥石 - hn 1物接触領域下を測温点が通過するの に要する時間で、 ゲイン定数Kを1とする.

モデル(1) モ=0 で温度がステップ状に上昇し、O<て≤ての間-定を保ち、 てって、で減少していく

モデル(2) T=0からT=To12まで一定速度で上昇し、To12くT < To の間 一定を保ち、TフToで減少していく、

モデル(3) モ=0からて=ひまで一定速度で上昇し、 てっていで減少していく、 温度計が一次遅れの応管特性を持っまのとすれば、上記入力モデルに対すろ出力 ないは次のように表わされな、

(1) $y(\tau) = 1 - \exp(-\frac{\tau}{\tau_s})$

 $0 \leq \tau \leq \tau_0$ (4.2)



Fig.4.6 Influence of time constant on output.

(2)
$$y(\tau) = \frac{2}{\tau_0} \left\{ \tau - \tau_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_s}\right) \right] \right\}$$
 $0 \le \tau \le \frac{\tau_0}{2}$ (4.3)

$$y(\tau) = 1 + 2\frac{s}{\tau_0} [1 - \exp(\frac{\tau_0}{2\tau_s})] \exp(-\frac{\tau}{\tau_s}) \qquad \frac{\tau_0}{2 - \tau_s} \leq \tau \leq \tau_0 \qquad (4.4)$$

(3)
$$y(\tau) = \frac{1}{\tau_0} \left\{ \tau - \tau_s \left[1 - \exp(-\frac{\tau}{\tau_s}) \right] \right\} \qquad 0 \le \tau \le \tau_0 \qquad (4.5)$$

ここで PbS - 温度計の時定数は 200 μ s, 熱電対の時定数は 5 ms であり, 砥石- 加 工物接触長さが本実験条件では 2.45 mm であることから, て。 $\simeq 15$ ms となる. こ れらの値を用いて式(4.2) ~式(4.5)を計算 1 た結果を Fig. 4.6 に示している. て=てったおいて, PbS - 温度計と熱電対の間には, 熱源の後端付近で最高温度に なる Jaeger ⁽³⁾の物動熱源モデルに近いモデル(3)で約 30 % の差があり, 実際の 研削週程に近いと考えらいろモデル(2)で約12 % の差が生じている. 実測結果 では, 研削表面下 20 μ m において, PbS - 温度計と熱電対による温度差は約 20% であり, この解析結果とよく合っている. このように, 測定器の時定数が出力 に及ぼす影響はたまく, この差が Fig. 4.3の測定結果の主たる原因と考えらいる.

4.3.4 研育表面温度(砥石研育点温度)

Fig. 4.3の測定結果から、各研削表面下の最高温度を読み取り、研削表面の温度を外挿して推定した結果がFig. 4.7である. 図より明らかなように、応答速度の速い温度計伝ど高い温度を示しており、研削表面では1100°Cを越える高温に達していると推定される.

Fig. 4.8はPeklenikの方法によって測定した結果である. コンスタンタン線 しかご物間にはさみひんだ雲母箔によって温度場け乱さいていろが,原理的には 研削表面の温度が測定さいていろし考えらいていろ. こいは, 砥粒切りのがコ ンスタンタン線を切削してその切屑しかご物が接触して初めて熱電対が形成され, 温度測定が可能になると考えらいるからである。 しかし、 出力が連続で、その

上に細かいと~クが乗っていを波動 から判断して,加工材料またはユン スタンタン経が塑性流動して広い領域 で熟電対を形成し、その領域を砥粒切 ルカが通過するときに生ずる熱パルス を測定していると考えることができる。 熱電対では高温接点を形成している。よ りたきな領域の温度がその出力を支配 することから、切中刃による熱パルス の出力は低く仰えられてしまう。 このため、Fig. 4.3のInAs-温度計の出 力波動し比較するとと~-ク温度は低く、 最高でも800°C 程度となっている。



Fig.4.7 Comparison of probable values of wheel-work interference zone temparature.



Fig.4.8 Output measured with Peklenik's thermocouple method.

4.3.5 研削液が熱源温度に及ぼす影響

研削熱を原因とすろ砥石 寿命の減退と加工物の表面 性状の劣化に対して,最も 有効な改善策け潤湄性,冷 却性,浸透性を持った研削 液の使用があげられる. ~ 般に,研削液は加工物表面 の残留応力の除去⁽⁴⁾ン研削 焼け⁶⁰などには効果がある が,研削割れの防止にはく



Fig.4.9 Supply of grinding fluid.

れほど効果がみとめられないとされている. これは理論的に言って,高温,高 圧の砥石接触面に研削液は侵入出来ず,その周辺を冷却するのみであろからでわ. る.

4、で本節では、湿式研削におけるか工物研削表面層温度をLAAs -温度計で測定し、研削液の供給効果について検討する. なお、研削液は Fig.4.9に示すように、ノズルによって、回転している砥石に直接その接線方向から噴出させて上えており、他の実験条件は転式の場合と同じである. (Table 4.1 参照)

Fig.4.10は温度計の出力波形を示したもので、研削表面下 Z=20~80 μmの変 化を示している. 研削液を使用していろため、加熱後の冷却速度は速く、高温 部の時間は短かくなっていろが、石削表面下 40 μm ですでに切れれたよろ熱ペル スが数かく観測されており、 Z=20 μm ではビーク温度が依然として 1000 ℃以 上の高温に達していろことがわかる. このように、研削液は加工物全体の温度 上昇を防ぎ、熱晦張によって生ずろす法誤差を小さくすろことはできろが、砥石 と加工物の干渉領域、特に切れれによろ局部的な温度上昇に対しては、その効果 が期待できないことがわかる.



Fig.4.10 Variation of temperature in surface layer at various depths below the ground surface in wet grinding. 4.4 ファインセラミックスの研削温度

セラミックスはその絶縁性, 誘電性, 磁性, 半導性, 透光性, あろいけ耐熱性, 抗圧性, 化学的安定性, 耐摩耗性などのすぐれた特性のため, エレクトロニクス や機械材料の分野で広く用いらいている。特に最近では、IC基板や熱機関部 村などの材料として、精選さいた材料からなるファインセラミックスが注目をあ びていろ、16,10 そしてこれらセラミックスにおいては従来の成形, 烧結工程だ けでは所定の精度が得られず、高精度かっ高能率の2次加工を必要としている. しかし、セラミックスは常温においては硬く脆いと、う通性を持っため、金属材 料に比べてその加工は難かしい。現段階ではダイャモンド弧石を用いて研削加 エすろのが唯一の高能率加工手段しされて、ろが、その研削機構には不明な点が 92く,特に砥石寿命にたきく影響を及ぼすと考えらいろ研削温度すら測定さいて いない. これは、セラミックスが維緑体であろため、これまでのような熱電対 法を適用できないことによっている. そこで、ここでは本輻射温度計の特長を 話かりて、ファイブとラミックノの研創温度の測定し試みた。ファインセラミ リクスは同時に熱の不良導体であることから、当然研削温度は高温になるものと 考えられる. 従って,研削現象解明のためにも研削温度を知る必要性に迫られ 1: 5.

4.4.1 実験方法

加工材料には常圧焼結に よる窒化珪素 SigN4 を用 いた. 材料の物性値を Table 4.3 に示す. 実験は 4.2 節と同様, 平面研削で 術にった 磁石回転数 N Table 4.3 Characteristics of workpiece material Si₃N₄ Density : 3.2 g/cm³ Bending strength : 784 MPa at R.T. : 490 MPa at 1200 °C Fracture toughness : 4.5 MN/m^{3/2} Hardness : Hv 1800 Elastic modulus : 32×10⁴ MPa Thermal conductivity : 20.9 W/(m•K)

行なった、 磁石回転数N=1500 min-1, 加工物速度V=6m/min, 磁石切込み

a=5,umで、ダイヤモンド砥石:KD60MB1(集中度 80, レジンボンド)を使用 1、乾式研削である。

セラミックスは穴あけ加工が困難なため、ダイヤモンドブレードによって幅約 800,umのスリットを加工物底面から研削表面近傍まで入い、その中にュア経50,um のC-ファイバを挿入して測定を行なった。

4.4.2 実験結果

炭素鋼に比較して,セラミ ックスの研削表面層では温度 勾配が極めて急激なため,研 削表面下 5,4mで初めて出力が 得られた. Fig. 4.11の測定 結果は高々 550℃に達してい ろにす酸ないが,研削表面で はかなり高い温度に達してい ろものと考えられる. また、



Fig.4.11 Output from InAs-pyrometer in surface grinding of Si $_3N_4$.

切込み深さ支増して a=10 µm としたときも同様であった. これは硬脆性材料 のセラミックスの研削機構が銀材研削の場合と異なること、Si3N4の熱伝華率が 鋼の1/4 程度であること、ダイヤモンド砥粒の熱伝華率がマルミナの数十倍であ ることなどが影響して、ると考えられる. このような環境条件下では、加えら れたカ学的エネルギーの一部が固体的部に取り入れられて、メカノケミカルな形 で接触点局部の活性化をもたらし、この研削界面における化学現象は砥粒切れ刃 の摩耗にも影響し、延、ては加工機構にも密接に関係すると考えられ、今後、さ らに詳細に検討する火要がある. 4.5 ± 2 b

光ファイバと光電変換素子 InAs や PbS セル支組み合わせた, 応管速度が速、赤外線輻射温度計や熱電対を用いて, 砥粒切れガによって研削表面層に生ずる熱ペルスを測定1, 温度測定器の応管速度が St カ 波形や測定精度に及ぼす影響について検討1, 次のような結果を得た。

- 1. 研削表面層の温度測定に温度計の応管速度が及ぼす影響はたまく、応管速 度が約5msの熱電対では滑らかな出力波形が得られ、ビーク温度は研削表面 下 20,um で 750°C 程度であったのに対1、応管速度が数,us の InAs-温度 計では温度変化によく逆従1、研削表面下 40,um から先端が鋭くとがったビ - クを数知く持った出力波形が測定さい、その温度を1000℃を越えるもの があった. また、内部温度を外挿して得られた研測表面温度もはろかに高 温となった.
- 2. Peklenikの熱電対法では温度変化によく反応しており、切れ刃間隔を測定す ろには適していろが、微細な切りつのたり削によう温度変化に通復することは強 かしい。
- 3. 湿式研削においてき,研削表面下 60 μm 以内で 900~1100 ℃ の温度分布を もっており, 砥石 - 加工物接触領域下の局部的な温度と昇に対して研削液の供 給効果はほとんど認められなかった。
- 4. ダイヤモンド砥石を用いたファインセミックス研削では,加工物研削表面下 5,um で550°C に達していろが,温度勾配が極めて急激なため,読み面温度を 外挿して求めることはできなかった。

- 小野浩二, "研削仕上面の品質," 研削仕上, 模書店, (1972), 121-147.
- 2. 松片正已,本勿良振, 瀬户日良三, "研削燒け比閑する研究," 精密機械, 31, 12(1965), 996.
- 3. Littmann, W.E., Wulff, J., "Influence of the Grinding Process on the Structure of Hardened Steel," Trans.ASM, 47, (1955), 692-714.
- 4. 前揭文献 3.

塗

- 5. 高沢孝哉, "研削面表層温度分布の理論とその測定法 一研削温度に関する理論解析(第1報)-, 構築機械, 30, 11(1964), 851-857.
- 6. Peclenik, J., "Der Mechanismus des Schleifens und die Überschliffzahl," Ind.-Anz., 80, 1(1958), 10-17.
- 7.野田健-(編, 著), "光ファイバケーブル, " 光ファイバ伝送, 第3版, 電子通信学会, (1980), 130.
- 8. 理科年表, 東京天文台編集, 丸善, (1982), 487.
- 9. 前揭文献 3.
- 10. 前揭文献 5.
- 11. 前揭文献 6.

- 12. 松村文夫,"時間於容," 自動制御,朝倉書店,(1979),38-47.
- 13. Jaeger, J.C., "Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts," Proc.Roy.Soc.New South Wales, 76, (1942), 203-224.
- 4. 佐田登志夫,他, "研削盤作業の基礎," 高能率研削(I) 基礎編,大河 出出版, (1974), 193.
- 15. 前揭文献 1., 146.
- 16. セラミックス材料技術集成編集委員会編,セラミックス材料技術集成,初版, 産業技術センター,(1979)。
- 17. 今中治, 鳴灘則彦, 編, ファインセラミックス利用技術集成,サイエンスフ オ・ラム, (1982).

第5章 研削時における磁粒切い刃温度と切れ刃分布

5.1 はしがき

研削加工におけろ加工物の除去機構は微視的には砥粒切り刃の切削作用と考え ろことができる. 切削にあずかろ値粒切り以は砥石作業面上に不規則に散在し, 突出量(碰超切込み深さ)や形状,大きさも一つ一つ異なっていろため,切此刃 による切削現象を解析することは難しく、その幾何学的形状を適当なモデルで仮 定すろか, 1),2)確率的手法を用いて解析3)していろのが現状である. そこで. 砥石作業面上の切りれま詳細に観測すろことによって,研削中の砥粒切りの季 動を把握しようとすろ試みが行なりれている。4),5) これは,磁粒切り刃と加工 物の干渉(摩耗,塑性変形,切削など)の結果が切り刃の逃げ面摩耗の増たなど に反映していろと考えらいろからである。 いかし、高速度で加工物と干渉す ろ結果しして発生する熱,すないち砥粒切れ刃の温度によろ熱ハルスの状態を測 定すろことができりば、インプロセスで切り刃の作動状態を知ろことができる。 磁粒切れ刃の温度は、最終的には主として, 砥粒切込み深さや砥粒切削長さな どの砥粒-加工物間の干渉パラメータによって与えられる。 従って、切り刃温 度は第1章で述べたように、研削熱の発生源であり碰種の熱的損傷や磁石毒命と 窓接な関係があろのみならず, 砥税切れカによる切削機構解明に対しても価値あ る情報を提供してくれらものである.しかし、その微かかっ高速現象のため, 適当な測定方法がないことから、実理した報告は非常に少ないことは先に述べた また、解析的に砥粒研削に温度を求める試みも、その解析の前提 通りである。 となる熱分配率によって結果がたさく変動している. 17,8)

光ファイズを用、た赤外線輻射温度計は微小領域で高速で変化する温度測定に 対して非常に有効であることは第3章で述べた通りであるが、磁粒切り取のよう に極めて高温に達する測定対象に対しては、測定精度とからも特にそのなかを発

揮する. 本章では、光ファイバを用いた赤外線輻射温度計によって、研削直後 における砥石依葉面上の切り刃温度の測定を行なう. この方法によりば、砥石 依葉進行にともなう砥石作業面上の切り刃の履歴や形状、ムーイ切り刃行布の鍵 察が可能になる. また、切り刃の温度測定は研削点を外して測定しているため、 研削点の温度を推定する必要がある. よこで、切削直後の砥石空転時における 砥粒切り刃の次却特性を測定するとともに、切り刃の加熱と冷却過程に対して適 当な伝熱理論を適用して解析を行ない、研削点における温度推定を試みる. さ らに、研削条件を変化させた実験を行なうことによって、研削変数が切り刃温度 や切り刃分布に反ぼす影響、延いては研削機構についての考察を行なう.

5.2 砥粒切り刃温度の測定 -連続1た1ベス研削による測定-

5.2.1 実験装置および実験方法

実験は第4章の加工物内温度測定の場合と同様,日本確容研削盤(GHL-300S) 志用いて, 製式で足切込みで面研削で行なった. Fig. 5.1 (実験装置および測) 定系の概略回, Fig. 5.2 にその外観を示す. - Fig. 5.1 に示すように, 砥石係業 面に向かい合うように取り付けたファイバホルダ(ファイバホルダは砥石間上の 任意点の温度が測定できろようになっている.)にファ径50, 4mmのC-ファイバ (長さ約2m)を一本挿入し,砥石周表面との距離なをファイバホルダに装着し たマイクロメータによって 100, 4mm に設定する. 測定点は国に示すように,研 削点(鉛直下方)より研削方向に Θ=45。近人だ位置に選んでいる. 本来は, 加工物に応をなけるなどして,研削点(Θ=0°)で測定すべきであるが, 加工物の 振動れどで測定条件が不安定になる上, 得られるデータの数が限られる. さら に,測定値に切屑のデータが混り, 両者を区別することが困難であることから, 上記位置で測定した. 加工物に一定切込みを与え1回研削する. この時, 砥 石表面の砥粒切り切から輻射さいる赤外線をファイバで後光する. 従って, 測



Fig.5.1 Schematic illustration of experimental arrangement.



Fig.5.2 Photographs of experimental apparatus; (a)surface grinding machine, (b)fiber holder with micrometer.

定対象となろのは碰粒切り刃逃げ面の温度万である。温度計の出力はデジタ ルメモリ(サンプリング間隔 1,us,サンプリング数 4096 個)に記憶させた後 X-Yレコーダイ再 生する。 デジタ Table 5.1 Summary of experimental conditions Grinding conditions ルメモリは砥石便 1800 min⁻¹ Number of revolutions of wheel, N1668∿1713 m/min 面のなろますった Peripheral wheel speed, V 10 m/min Workpiece speed, v 箇所からの反射光 20 um Wheel depth of cut, aNo grinding fluid used により反応するフ •Grinding wheel オトトリがによっ Designation, A36K7VC(3)B Structure, V_p=40.0 %, V_c=49.1 %, V_B=10.1 % イ作動(, 砸石周 Wheel diameter, D 295∿303 mm Wheel width, B 30 mm 上の同一部分支測 Workpiece 定できろようにし 0.55 % carbon steel Hv 200 Vickers hardness てある、 従って, Work length, L, 52 mm Work width, b,, 6 mm

イバス研削ごとに 測定を繰り返せば, 砥粒切りれの時間

Output voltage

Evn ,mV

Z



Conical diamond dresser with grinding fluid

20 um

Output voltage Evt ,mV

Decising conditions



的変化を観察すろことができる. なお、測定の始めに田錘ダイヤモニドドレッ サーに切り込み $a_d = 20 \mu m \xi - 52$ 、湿式で数回ドレストた後、スパークアウト を1回施した. 温度測定は加工物を終け込み $100 \mu m$ (研削量約 $31.2 mm^2$)研 削し、定常研削状態になった後に行なった. また、研削状態をチェックするた めに、加工物取り付け具下の弾性へ角リングに貼り付けた歪 ゲージにより、研削 地抗(水平分力 F_{ϵ} 、垂直分力 F_{n})を測定し、記録した. Fig. 5.3 に研削抵 抗検正曲線、Table 5.1 に実験条件を示す.

5.2.2 実験結果

5.2.2.1 研削後 4.2 ms の切れ刃温度

Fig.5.4 に得られた実験結果の一例を示す. 121は定常研削状態における,ファイズの設定角面=45°の位置のもので,国の数字(1)へ(1)は全て同一場所におけろ連続したしべて研削ごとの測定結果である. 横軸は時間でフルスケールが約4ms, 砥石間との距離にして約116 mm である. 出力べいスの高さが温度,幅が砥粒切り入りたきさ, パルス開隔が切りみ間隔をあらわしている. なお,四イは時間軸を圧縮していろため, ペルス幅はよからなくなっていろ. 第3章の解析結果より, ペルス幅が 745 以上のものを測定対象とし,この出力はファイズの感温面の中でを通過した砥粒のものとみなして,ここではペルス幅によろ校正は行なっていない.

国より明らかなように, 確粒切り刃の温度は個々の砥粒によって大きな差があ り, 1400℃ 近くの高温まで広く分布している. また, 砥粒による切削状態は 砥石間上の同-場所においても異なり, たしえば Fig. 5.4 において, 砥粒αに注 目すりば, (1), (2), (3)と温度が上昇し, (4)では下降し, (5), (6)と再び上昇してい ろ. 砥粒Dは(4) ではまれがみられず, (5)から再び現らりている. このよ うに, 砥粒個々の切削状態は砥石の振動, あるいは隣接する砥粒切り刃との相互



Fig.5.4 Output signals of typical experimental results for a series of one-pass grinding.

作用等によって同一条件の下でも研削の度に変化している。 すなわち, これら による砥粒切込み深さの変化に応じて, と滑り(弾性接触)や切屑を生じない強 り起し作用, および切屑を成とこつの状態が生じる. また, 隣接切り刃による 堀り起しによって盛りとげらりた部分を通り状, 砥粒切取み深さは実質的に大きく なる. 同じ切れ刃であるにもかかわらず温度が変化するのはこのような原因に よろのである. 砥石休業面上の切り刃の分布状態を知るために, 従来, 朱肉, カ・ボン紙等を介して砥石表面を転写する方法のや切り刃摩耗面からの正反射光 を測定する方法¹⁰などが行なわりて来たが, このような静定条件下の測定では不 十分であり, 本方法のようにイングロセスで測定する動的測定を行なう必要があ ることがわかる.

Fig. 5.5は研削方法の違いが、砥粒切り泅度におよぼす影響を調べた結果で、 (a)は上向き研削,(b)は下向き研削のものである. 四より、最高温度はともに 1300°C程度なのに対し、上向き研削では500°C程度の低温の切り刃数が増加 していることがわかる. これは、下向き研削では切り刃の食い付き初期に砥粒





切込み深さが最大になろのに対し、上向き研削では磁粒切込み深さが除々に増加 する幾何学的形状のため、切屑発生に到らず、上すべりや押しのけに留まる切れ カが多く存在するためと考えられる. しかし、研削では上向き、下向き研削に おける切削面積の差はフライス削りほど著しくないので、全体的に面研削方法で ムルほど大きな差は認められなかった.

5.2.2.2 切屑の影響

発生1 た切屑の大部分はFig. 5.6のように遠心かによって接触方向に飛散す る. 炭素鋼研削ではこの切屑は研削火花として観察さいる. 砥粒切りみ温度 測定に際し、ファイバで観測さいる温度バルスが切りれのものか、切屑のものか が当然問題となろが、四にみるように、ごく一部の切屑のみが測定点 @=45°に 到達していろにすぎない. さらに、砥石表面とファイバの受光面との距離がわ ずかに100 jum であろことから、切屑がファイバの感温面上をファイバ端面に触 れずに通過すろ可能性は極めて低くなる. きた、切屑が砥石表面の砥粒間の気



Fig.5.6 Infrared photograph of surface grinding of 0.55% carbon steel; exposure time: 1/125 s (approximate 1/4 revolution of the wheel).

私上に推續され、溶着する目ブまりは、アルミニウム合金×銅などの軟質非鉄金 層研削によく見られるが、鋼材を研削する場合にはたとんど見られたいので、無 視できょう.¹¹¹ 仮に起ったとしても、アルミナと炭素鋼の輻射率に大きな差が いことし下ig. 2.14参照)などから、これらの現象が測候精度に及ぼす影響は小 さいと考えてぞ者であろう. 実際、切脣によ、てファイズ端面の性状がなんし、 測定旋行が不可能になった例はほとんどみられなかった.

5.3 平面研削におけろ磁粒切り刃の熱拳動

前節で述べたように、測定されろ切れ刃温度は研削点におけろ切削中のもので なくいかご物接触面を離れてからのものであった。 そこで、切削中の温度(砥 粒研削点温度)を知ろ必要が生じる. このため、簡単な伝熱理論によって研削 面温度を求め、その温度変化を適用して研削点におけろ切れ刃温度を求めろこと にする. また、ここで求めた理論式によって、加熱、冷却のヒートサイクルに おける砥粒切れ刃の熱拳動を考察する.

5.3.1. 切れ刃温度の解析

Ÿ,

5.3.1.1 砥粒切れ刃のモデル化

磁粒切りまれして物を切削するときに発生する熱で加熱され、空転時に冷却さ れ、再びは削して加熱されるという過程を繰り返している. この繰り返し加熱 によって、磁粒内部の温度分布は複雑になるが、ここでは取り扱いを簡単にする ため、加熱さいた切れれは空転時に冷却され、再び研削額域に戻ってきたときは 常温になっているものとする. 実際には、このときも依然として高温状態にわ ろ切れれが存在し、この温度から再び加熱されるわけであるが、加熱、冷却の定 性的な傾向を調じるにはこの取り扱いで十分であろう.

砥粒切りメによろ加工物除去モデルをFig. 5.7のように考える。研削熱は切り、 リタすくい面および逃げ面から砥粒に流入する。流入した熱は砥粒を通して結



Fig.5.7 Thermal model for abrasive grain in cutting.

合剤へ、また、磁粒表面から外足へと流れ、これらの熱の流れによって磁粒内部の温度介布が決まる。 ところがアルこナ磁粒の熱仏導率は鋼に比べて小よく、⁸⁾ しかも加熱時間が非常に短かいこしから、外くの切れ刃は加工物との接触部とその近傍の薄い層のみが高温になる。 そこで、Fig.5.7に示す切削磁粒を一次元 半照限体として扱うことにする。 すなわち、熱はは削時に切れ刃すく、面と逃 げ面を合わせた切れ刃面みを通って磁粒内部に流入し、法線方向(ス軸方向)に のみ伝導されるものとする。 この他、KK下の仮定の下に解析を進めて、く、

(1) 切以刃成加工物を切削していろ間,単位時間,単位面積当リー定の熱量が切り刃面イから砥粒内部に流入する.

- (2) 材料の熱定数は位置および温度によらず一定であろ。
- 5.3.1.2 切削時における切れ刃の加熱 前節の仮定より、切削時における切れ刃には常に一定量の熱が供給される、そ

こで、切れ刃が加工物を切削し始める時点をて=0とし、て=で、後の砥粒切れ 刀内の温度分布を求めてみる。前節の熱伝導に関する仮定から、Fig. 5.7に示 すモデル犯した砥粒内の温度分布 ア(エ,て) に対して、次の基礎式が成り立つ.¹²⁾

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$
(5.1)

切削前の切れ刃砥粒の温度は常温 万 に等 1 いし、う仮定から, 初期条件は

 $T(x,0) = T_i$, $x \ge 0$ (5.2) 切山刃面Aが単位時間当たり β_g の切削熱を受け取るものとすれば、境界条件は

$$\frac{q_g}{A} = -k_g \frac{\partial T}{\partial x} , \qquad x=0, \ \tau>0$$
(5.3)

ここで、Pg=密度:kg/m³, Cg=比熱:J/(kg·K), kg=熱伝導率:W/(m·K), dg=温度伝導率= Cg/(gCg):m²/S で、添字gは磁粒材料を表わしていろ、 式(5.2)、式(5.3)を満足すろ式(5.1)の解、すなわち、加熱時間 Th 後の砥粒内部の 温度分離は次式で与えられる」(付録 D参照)

1

$$T(x,\tau_h) - T_i = \frac{q_g}{k_g} \left\{ \frac{v}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{x}{v}\right)^2\right] - x \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{v}\right) \right\}$$
(5.4)

ここに、 v = 2/ag 5んである. 種々の加熱時間 ひん に対して式(5.4)を計算した結果を Frg. 5.8に示す. * ひんたきいほど切れ刃の切削時間が長く、流入熱量が知くなり、切れ刃温度が高くなる. 実際の研削の場合、熱流入面は平面で

* 計算に際し、熱速数はそ以ぞれ、kg=3.0×10 W/(m·K), Cg=7.5×10² J/(kg·K), Sg=3.9×10³ kg/m³ とした. これは、(i)化学便覧・基礎編正, p.985,表8-164. (ii)ファインセラミックス利用技術集成、サイエンスフォーラム, p.40,表-1., (iii) INTRODUCTION TO CERAMICS、W.D.Kingery, John Wiley & Sons. Inc. p.487, Fig. 14.21. から引用、あろいは推定したものである.



Fig.5.8 Temperature distribution below the cutting grain surface when a constant heat flux runs into during time of τ_h .

5.3.1.3 空転時におけろ 砥粒切りの冷却

1111後, 切り刃面は速度V, 温度 Fc の外気にさらさりろため, 磁粒内の熱は 切り刃面より外気 人熱伝達, 熱輻射, 内部へは熱伝導によって拡散し, 冷却さい ろ、(Fig. 5.9 参照) このうち, 熱輻射によろ冷却は温度が非常に高い場合 にの ム間随しなり, 一般にふさいと考えられることから, ここでけ熱伝達と熱気 算の二つを考える.* すなわち,



Fig.5.9 Cooling model for abrasive grain during the non-cutting portion of a revolution.

^{*} 切れ刃面を黒体と考えた場合、熱輻射によって外気く逃げる熱量は式(2.2)より温度 1000℃で約1.5×105 W/m2 となり、熱伝達による放熱量る20.5×105~2.0×105 W/m2 と 同じオーダーで、高温の場合無視できない量になる。しかし結果的に、この程度の放 熱量では後述(p.84~86)の解析結果、"乾式研削の場合、砥粒切り刃は主とて内部 いの気 準拡散によって冷却さい、外気いの設熱量は無視できる。"に影響を与えない、なお、泡気 研削の場合、熱伝達率はたましなって熱幅射のみ無視でき、本節の解析がそのまま使用できよう。

 $hA(T_{i} - T) = -k_{g}A\frac{\partial T}{\partial x} , \qquad x=0, \ \tau \geq 0$ (5.5)

ここに、んは切り刃面の熱伝達率である. 初期条件は式(5.4)で与えらいろが、 形が複雑なため、このままでは適用できない. そこで Fig. 5.8の曲線の形状 から式(5.4)を次式のように近似する.

 $T(x,0) = (T_{o} - T_{i}) \exp(-\frac{x}{\eta}) + T_{i}, \qquad x \ge 0$ (5.6)

ここに、 てと な はそいぞれ x=0 および x= ~ における初期温度である.また、 2は初期温度勾配を決定する定数である. 種々の 2の値に対して式(5.6) を計算した結果が Fig. 5.10 であり、Fig. 5.8の曲線刑状をよく表中している. を は長士の単位をもつ係数であるが、 Fig. 5.9、 Fig. 5.10より明らかなように、 式(5.4)における てんに相当する係数で、2の増加は てんの増加,すなわち、延 粒に流入した熱の増加を表中している. 従っ て、2の値がたきいほど切り切の 温度が高いことを意味している.

初期条件式(5.6)の下で基礎式(5.1)をラブラス変換すれば

 $\frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial x^2} - \frac{s}{\alpha_g} \overline{T} = -\frac{1}{\alpha_g} \left[\left(T_o - T_i \right) \exp\left(-\frac{x}{\eta} \right) + T_i \right]$ (5.7)

また, 境界条件, 式(5.5)をラブラス変換すると

 $hA(\frac{\overline{\imath}}{s}-\overline{T}) = -k_g A \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} , \qquad x=0$ (5.8)

式(5.8)を満たす式(5.7)の解を求めると

$$\overline{T}(x,s) = (\zeta + \frac{1}{\eta}) \frac{T_o - T_i}{(\alpha_g / \eta^2 - s)(\zeta + \sqrt{s} / \alpha_g)} \exp(-\sqrt{s / \alpha_g} x) - \frac{T_o - T_i}{(\alpha_g / \eta^2 - s)} \exp(-\frac{x}{\eta}) + \frac{T_i}{s}$$
(5.9)

式(5.12)を逆変換すると求める解が得られる.

$$\frac{T(x,\tau)-T_{i}}{T_{o}-T_{i}} = \exp\left(-\frac{x}{\eta}+\frac{\gamma}{\eta^{2}}\right)$$

$$-\left(\zeta+\frac{1}{\eta}\right)\left\{\frac{1}{2}\exp\left(\frac{\gamma}{\eta^{2}}\right)\left[\frac{1}{\zeta+\frac{1}{\eta}}\exp\left(-\frac{x}{\eta}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\gamma}}-\frac{\sqrt{\gamma}}{\eta}\right)\right.$$

$$+\frac{1}{\zeta-\frac{1}{\eta}}\exp\left(\frac{x}{\eta}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\gamma}}+\frac{\sqrt{\gamma}}{\eta}\right)\right]$$

$$-\frac{\zeta}{\zeta^{2}-\frac{1}{\eta^{2}}}\exp\left(\zeta x+\zeta^{2}\gamma\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\gamma}}+\zeta\sqrt{\gamma}\right)\right\} (5.10)$$

猴って, 空転時間 Te におけろ砥粒切り刃表面の温度は ス=0 とすりけ得らりろ.

$$\frac{T(0,\tau_{c})-T_{i}}{T_{o}-T_{i}} = \exp(\frac{\gamma}{\eta^{2}})$$

$$-(\zeta+\frac{1}{\eta}) \left\{ \exp(\frac{\gamma}{\eta^{2}}) \left[\frac{\zeta}{\zeta^{2}-\frac{1}{\eta^{2}}} - \frac{\frac{1}{\tau_{1}}}{\zeta^{2}-\frac{1}{\eta^{2}}} \exp(\frac{\sqrt{\gamma}}{\eta}) \right] - \frac{\zeta}{\zeta^{2}-\frac{1}{\eta^{2}}} \exp(\zeta^{2}\gamma) \operatorname{erfc}(\zeta\sqrt{\gamma}) \right\}$$
(5.11)

ここに、 $\varsigma = h/k_g$, $\gamma = \alpha_g \tau_c$ であり、 て=0は切りれが切削を終了した時点 にとろ. 式(5.11)は研削後の施粒切りス表面の温度変化を表的しており、その 数値計算した結果を Fig. 5.11 に示す. ここで、ん=100 W/(m²·K) とした. んは砥粒表面の熱伝毒率であろが、その正確な値を求めろことは困難であろ. そ こで、鍵和田ら⁽³⁾と同様に、砥石外周の長さに等しい平板上に研削速度に目ぼ等 しい空気流を想定した場合の乱流熱伝達率を求め、この値を用いた. なお、 式(5.11)において、ん=50~200 W/(m²·K) の範囲で変化させて計算してみ たが、Fig. 5.11 の結果とほとんど差は生じなかった. 従って、熱伝達による 熱の拡散は小さく, Fig. 5.9 に おいて硝粒側面からの熱伝達を ないものとした仮定が無理のな いものであったことがわかる. Fig.5.11 は Fig.5.10 と同様に 確粒内部の初期温度与布を決め ろ係数2をハラ× -タとして用 いていろが, 咽にみろように, らがたきく(てんがたきい), 高温状態にある切りのほど冷却



Fig.5.10 Temperature distribution below the cutting grain surface for various values of η .



Fig.5.11 Cooling characteristics of cutting grains for various values of η with convection boundary condition.

曲線がゆるやれで、逆にとが小さく低温の砥粒ほど冷却曲線の勾配が急で早く冷却さいろことがわかる. 5.3.3節では、この計算結果を実験結果に適用して研 削点における切り刃温度の推定を行なう.

5.3.2 砥粒切以刃温度の測定 一測定角田を変化させた場合-

5.3.2.1 実験方法

実験はTable 5.1の実験条件の下で定切込 み平面研削で,1パス研削を行なった、測 定方法の詳細は 5.2.1節で述べた通りで, ここではファイバの設定角を Fig 5.12 K 示す方法で @=22.5°から @= 180°まで 22.5°おまに変化させて測定を行なった。

5.3.2.2 東顧結果

種々の測胞角のにおけろ出力波形の例を Fig.5.13に示す. 横軸は時間ベフルスケ ールが約4ms, 砥石間との距離にして約



Fig.5.12 Arrangement to measure temperature of active grains.

114 mm である. 四中,(1)から(6)に向かってファイズの設定角 @ がたきくなっており, 測底点までの冷却時間 て が長(なる. 例えば,(1)の @=22.5° および B=180° イはそいぞれ切削後 Tc=2.1 ms, および て=16.7 ms である. 図に見るように, Bがたきくなるに伴い, なカベルス数が減少し, なカモを体的に低くなっていろ様子が小かる. これらの結果からそいぞれの測定位置における温度分布を求めとストグラムで表わしたものが Fig.5.14 である. 1回より,冷却時間の経過としもに観測切れ刃数が急激に減少しているが,1000°C 以上の比較的高温の砥粒数はそれほど減少していない. Fig.5.14 の結果に対し, て、が



Fig.5.13 Variation of typical outputs from IR-pyrometer for one-pass grinding with setting angle Θ ; Θ is angle from grinding point around circumference of wheel.



Fig.5.14 Temperature distributions of cutting grains at different time τ_c after cutting.

16.7msにおいて測定された極地切れ刃は研削点(て=0) イは当然高温領域に 分布しているものと考えることができる。 そこで、て=16.7msにおいて測定 された切れ刃と同数の切れ刃を各ヒストグラムにおいて高温側からハッチングを 施して示とば、これらが高温切れ刃群の真の冷却過程を表わしている。 次節で はこのハッチングで示した切れ刃群に注目し、その冷却過程について詳細に検討 支加える。

5.3.3 研創ににおける切れ刃温度の推定

Fig. 5.14のヒストグラムにおいて, ハッチングで示す切り刃碰粒群の平均温度 を冷却時間に対してプロット (1みろと Fig. 5.15 になる. この温度変化に対応するものを Fig. 5.11 の曲線群から探してみると 2=1/900 mの冷却曲線が 2 出が Fig. 5.11 の実線である. 砥粒切り刃は高温であるため, 2の値も当然 Fig. 5. 11 に 示 1 た内の大きいものとなっている. この曲線から, これらわれ双群の研削時の温度を求めると、平均 1250 ℃になる. また, Fig. 5.14より て。= 14.6 ms, および 16.7 ms においてもなお 1320°C 前後の高温の切れ刃が停 在するが、これらこつの砥粒にこの変化曲線をあてはめてみると、研削点ではそ いぞれ 1890°C, 1920°C の高温にわることがわかる. しかしこれら砥粒は、 たとえば て。= 2.1 ms (B=22.5°) でおよそ 1650°C 程度の高温にあるはずであ るが、Fig. 5.14 の結果では 1500°C 以上の砥粒は一つも測定されていない、現 在のところこの原因は明らかではないが、次のような可能性が募えられる. 加 エ材料である炭素鋼の融点が 1500°C 前後であることから、切屑生成領域で発生 する熱が増たして加工物が局部的に融解したとすれば、たきなの融解潜熱を必要と するから融点以上に温度は土がりにくい、 比切削エネルギーが比融解エネルギ - に近 ざくと指摘した Malkin¹⁴⁾ らの研究をある. さらに、 重研削において、 溶



Fig.5.15 Cooling characteristic of cutting grains.

融して球状になった切屑が観察されることもあるので、この可能性は十分にある. そして、このような場合、冷却時には凝固潜熱を放出すろので、 て、=16.7 ms においてもなお 1400°C 近くの高温の切れ刃が浮在することが説明できる.

5.4 加工条件が切り引温度と切り以分布に反ビす影響

磁石車の円筒面に散在すろ切削砥粒をフライス削りにモデル化してみると、1刃当たりの切削する最大厚さ、すないち磁粒切込み深さらは平面研削では次式で表 中さいろ、150

 $g = C\delta \frac{v}{v} \sqrt{a/D}$

(5.12)

ここに、よけ切りれい、4、いけ加工物速度、レけ磁石周速度、Qは磁石切込み深さ、Dは砥石直径であり、Cは定数とおけろ値である。

また、単位時間当りの発生熱量は理論的に次のように表わされる.

 $uab_v v$ (5.13)

ここに、Uは比研削抵抗、bwt加工物幅である. と式にみちように、研削温度 に大きな影響を与える研削条件は a とひである. 砥粒1個当りでは、ひと aの 増加によって アが大きくなり、切削仕事量が増して発生熟量が大きくなる. 式(5.12) において、切れ A ビッチ チンは研削の場合、フライス削りと 夏ってその値 を一覧的に定めることは難かしい. なぜなら、5.2節の結果からもわかうよう に、砥粒の切削状態、すなりち切い A 間隔は同一砥石、同一研削条件の下でも研 削毎に異なり、またドレス条件によってき変化するからである. このような切い A 間 隔の変化に伴って、砥粒切込み深さ 3 が変化し、砥粒1個に依 用する切削抵抗 F が変わる. そして F が過去 になると、砥粒の 脱落や破砕が起こり、それに伴っ て低粒の 自生 2 摩託の増大 などが 上じ、研削点における発熱量も変化する いけで ある.

本節では砥石切込み深さるが切り又温度と切り又分布に及ぼす影響を調べてみろ. これは,上述したように,研削状態にたいに関係するため,実験にあたり 接線研削抵抗と作用切り又数の関係も測定し,考察に役立てろことにする.

5.4.1 砥石切込み深さを変化させた場合

上に記1たように,砥石切込みのを増すと,砥石の接触面積,砥粒切込み深さ がますため砥石研削に温度は上昇し、160,100加工物表面の熱的損傷も増大する. 1かし、OutwaterとShow¹⁹⁾が砥石-加工物熱電対法によって測定した平均的 な砥粒研削点温度は砥石切込みながおよそ50μm以上からはある-定値(約1350℃) に収束している. Fig. 5.16はTable 5.1の研削条件の下で研石切込み深さのの みを変化させた時の砥粒切り刃温度分布を表わしたものである。 縦軸は砥石周 上1m あたりの度数である、 図より、切り刃の温度は (1) の a= 10 jum で最高 が1300°C程度なのに対し、(4)のa=40,um で約1400°C とそれほどたきく上昇 していない、また、温度分布形態も切込み増加とともに、600℃程度までの比 較的低温の切れ刃が増加して、ろが,着しい変化けみられない. Fig. 5.17は砥 石切込み深さのと研創抵抗接線なかなよび観測した切以刃数の増加割合の関係を 示す咽であろが、その増加は相伴うことがみられる。 式(5.12)において、砥粒 切込み深すりはなによって増加するが、単位面積当りの切れ刃数が増加すれば、 よが減少するので9はさほど大きくならない。 石脂1抵抗は砥粒1個当たりのそ いの総知であって, aの増加に伴って幾何学的に砥石接触面積が増1, これによ って総切り刃散も増しているから当然研削抵抗は増大すろ. Fig. 5.16 Kおいて, aを増加しても最高切い刃温度がたまくと昇しなかったのは, 磁粒切込み深さら に目立った変化がなかったと考えてよかろう.



Fig.5.16 Temperature distributions of cutting grains for some values of wheel depth of cut a.



Fig.5.17 Influence of wheel depth of cut on tangential grinding force and number of active grain in surface grinding.

5.4.2。研削作業進行に伴う研削状態の変化

Fig. 5.18 は研削作業進行に伴う切れ刃温度分布の変化であり,(1)はドレス後の総切立みが約100μmまでの初期作業面,(2)は約1000μmの時のものである。1 回の砥石切込み深さるは20μm であろから,総研削長さは(1)が0.26m,(2)が 2.6mになる。 こつの温度分布を比較して,(2)の方が低温の切れ刃の度数が 増しているが,最高温度には大きな差はない。 この結果も,研削施行によって 切削にあずかろ切れ刃の状態に大いに関係している。 Fig. 5.19は単位長さ当り の切れ刃数の分布を示している。 適当なドレッシング条件で,鋭い切れ刃を匆 く作っても、ドレッシングで損傷を受けた砥粒は暫らくの研削で脱落,破砕し, ある切れ刃数に落着く。 その後は、切れ刃に作用する所削抵抗の大きさに応じ て、前述のように、切れ刃は季耗とか自生作用を行なってその切れ刃数が変化す る. Fig. 5.19 の結果は(2)では切れ刃間隔が(1)よりも小さくなり、切れ刃







Fig.5.19 Variation of effective successive cutting-edge spacing as grinding operation proceeds.
数の増大を示している. 従って, 式(5.12)における砥粒切込み深さらが変化してFig.5.18のような温度分布になったと考えられる.

5.5 ILB

光ファイバを用いた赤外線輻射温度計と高速記録装置を用いろことによって, 研削時におけろ砥粒切い刃温度,および研削作業進行に伴う砥石作業面上の切い 刃の消長の観察が可能になり,次のような結果を得た。

- 1. 砥粒切り刃の温度は1400°C程度の高温まで広く分布しているが,加工物融 点を越える切り刃は苛酷な研削条件の下でもみらりながった。
- 2. 砥粒切り刃の切削状態(切り刃温度,切り刃間隔)は砥石間上の同一場所, 同一研削条件の下でも研削の度に変化しており,砥石作業面上の切り刃の挙動 観察はインプロセスで行なうできである.
- 3. 加工物との干渉時における碰粒切り刃の加熱および空転時における冷却過程 に対して適当な伝熱理論を適用した解析によりば、整式研制では主として陥石 内部への伝導拡散によって切り力は冷却さりる。
- 4. 砥粒切りりは砥石空転時に急激に冷却さいろが、比較的冷却が遅い高温切り 双群が岸たする.
- 5、研削直後の切り刃温度実測値に、上記 3.の解析結果を適用して研削点における高温切り刃群の平均温度を求めたところ、本実験条件では1250℃となった。
- 6.砥石切込み深さを増すと研削仕事量が増すので、加工物温度は上昇するが、 最高切り刃温度は殆んど変化がなく、約1400 ℃にとどまり、低温を示す切り スがやや知くなる. これは研削条件の苛酷さに応じて切り刃の自生依用など が起こり、単位面積当りの切り刃数が増すためであると考えらりる.
- 7. 研削作業の施行によって、上記 6. 2 同様に、切削におづかる切り刃数の変化が起こる. 本研究で行なった研削条件の下では平均の連続切り刃間隔が約

80% に減少1 た. この結果、切れ刃温度の最高値にたきな変化はなかったが、低温のものがやや増加1た.

备 若 文 献

- 1. 岡村健二郎,中島利勝, "砥粒切り切によろ切削現象の研究(第2報)
 -切込み始点におけろ砥粒切り刃のとすべり現象の解析-, 端緒機械, 32,8(1966),551-557.
- 空月早司,津和秀夫, "砥石作業面上の定量化に関する研究(第2報)
 -切以刃の幾何学形状-, 満審機械, 42,10(1976),937-941.
- 3. 松日正已, 庄司克雄, "統計的千法によろ研削機構の若察(第1報), " 請察機械, 3%, 10(1970), 676-682.
- 4. 澤和奔夫, "研削における砥粒の挙動について(第1報), "精密機械, 26,4(1960),199-205.
- 5. Tsuwa, H., "An Investigation of Grinding Wheel Cutting Edges," J.Engg.Ind. Trans.ASME, (1964), 371-382.
- 6. 須藤徹也, 和月田徹, 佐田登志夫, "石峭)加ェにおける砥石作業面のインプ ドロセス測定, 精密機械, 36,10(1970), 676-682.
- 7. Outwater, J.C., Shaw, M.C., "Surface Temperature in Grinding," Trans.ASME, 73, (1952), 73-86.

- Des Ruissaux, N.R., Zerkle, R.D., "Thermal Analisis of the Grinding Process," J.Engg.Ind. Trans.ASME, 92, 2(1970), 428-434.
- 9. 竹中規雄, 笹谷重康, 日本機械学会論文集, 26, 163(1960), 403.
- 10. 注靴秀夫, "研削におけろ砥粒の挙動トゥッて(第5報), " 精密機械学 会春季大学前刷集, (1963), 73.
- 11. 小野浩二, "研石の寿命, "研削仕上, 模書店, (1962), 193.
- 12. Holman, J.P., "Unsteady State Heat Transfer," Heat Transfer, 4th ed., McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., (1976), 107-167.
- 13. 鍵和田忠男, 脊藤勝政, "平面研削におけろ被削枝温度の測定," 日本機 械学会論文集(第3部), 42, 358(1976), 1925-1936.
- 14. Malkin,S., Anderson,R.B., "Thermal Aspects of Grinding," part 1-Energy Partition," J.Engg.Ind., Trans.ASME, 96, (1974), 1777-1183.
- 15. 前揭文献 11. "研削切屑," 1-13.
- 16. 高沢孝哉, "研削熱の加工物への流入割合 -研削温度 K 関する理論解析 (第2章)-," 精密機械, 30,21 (1964),914-920.
- 17. 前揭文献 11. "研削温度, " 52-59.
- 18. 河村末久,西口重雄, 岩尾幸博, 「研削焼けの基礎的研究(第1報)-皮膜の成長過程と膜厚の計算-, 「 積密機械, 43, 6(1977), 702-707.
 19. 前掲文献 7.

第6章 稔

括

研削時に砥石し加工物の接触面で発生する熱は研削性能にたきな影響を及ぼすのみならず,研削機構解明のための存力な情報を含んでいる。 時に,高速で回転すろ砥石依業面上に点散すろ徴小切削切以刃の温度を測定すろことは研削現象を研究すろとで大きな課題であった。 本研究は光伝送用ファイバと高感度赤外線検出素手を組み合わせて非常に応答速度の速い微小領域の測定に適した赤外線輻射温度計を製作し,これを用いて研削温度を測定した。 この温度計し高速記録装置を組み合わせて使用することにより加工物表面層に生ずる熱ベルス,砥石依業面上の砥粒切り刃温度を測定することが可能になった。 ほかに,切りの 分布状態もイングロセスで観察することができた。

まず第2章では、本研究で製作1 た光ファイバを用いた赤外線輻射温度計のシ ステムおよびその基本的な胜能について検討を加えた.本温度計の相対感度は 光ファイバーを発レンズの分光透過率、および赤外線検出素子の分光感度特性に よって表わらい、これは温度校正実験で得た実感度曲線とよく一致1た.また この実験の結果、炭素鋼、砥石、ブルミナの輻射率は400°C以上では大きな差 はなく、切屑が磁粒に付着1たとしても大きな影響がないことがわかった. イ、光ファイバを含めた温度計自体の測度精度は±3%以内であり、測定対象 面の表面超さや温度変化による輻射率変動のための設差は最大50°Cで、表面の 吸着物生成まで考慮しても最大70°C 程度である.

第3章では高速で物動する高温微小物体の測温に対して問題しなる,ファイベの設定位置が温度計の出力に及ぼす影響を,理論的および実験的に検討した.その結果,測定対象面がよ分大きく,ファイベの特性値と設定位置によって定まる 感温面が岸にこの面内にあれば,温度計の測定感度はファイズのコア新面積と開 日数NAによって一意的に定まり,ファイズの設定位置には影響さいないことが

98

確認された. また, 敏動物体の測温に対しては, 温度-様な円形断面の測定対 象物が感温面上を通過した場合について解析し, 温度計の出力バルス幅によって 測定対象物のたきさや 通過位置が推定できることがあか。た. すなわち, ファ イベの走査線中ベ上に微水熱源があるとは限らず, これを外れている場合には温 度が低く測定されることを考慮し, 本研究の条件下では温度計の出力バルス幅が てんちん下のものを落すことにした. これによって, 95% 以上の精度で温度を 測定できる.

第4章では、本研究で製作1た光ファイズを用いた赤外線輻射温度計を用いて、 砥粒切れ刃によって加工物の研削表面層に生ずる熱いいての測定に適用した.す ないち、加工物の裏面から表面近傍まで小孔をなけてファイバを挿入し、研削す ろことによって表面から深さの方向の温度の布がわかろれ、熱い ルスも測定でき 実験は応答速度の異なる工種類の赤外線検出器を使用した輻射温度計し後 ŧ. 来の熱電対法による3種類で行ない,測定法の応答速度が出り波形を測定温度に 反ぼす暴響についても検討した. その結果,研削表面層の温度測定に温度計の 応答速度が及ぼす影響はたきく, 応答速度が約5msの熱電対では滑らみな出力波 形が得られ、ビーク温度も研削表面下 20 Jum で750°C 程度であったのに対し、 応管速度数,usのInAs-温度計では温度変化によく追從し、石脂、表面下40,umか ら鋭くとがったビークを数如く持った出力波形が測定さい,その温度も1000°C を越えろものがあった、 また、研削表面温度もはろかに高温となったが、これ は研削液を供給しても変わらなかった。 ちらに、ダイヤモンド砥石を用いたフ マインセラミックス研削では、加工物研削表面下 5μm で 550 ℃ に達している が、温度勾配が炭素鋼に比べて極めて急なたわ、表面温度を外挿して起めること けできなかった.

第5章では、研削直後の砥石作業面上の砥粒切れ刃から射出される熱輻射線を 受光することによって、切削切れ刃の温度測定、おらび研削作業進行に伴う砥粒

99

切れ刃の履歴や形状,そして切れ刃分布の観察を行なった。また、切削中の切 NJ温度を推定すろため,簡単なモデルとして一次元熱伝導を考え,加熱冷却サ イクル中の切れ刃温度の理論解を求め、この冷却開始直後の温度降下曲線を用い て、実験値から研削面における温度を推定した。 その結果, 磁粒切り刃の温度 は1400°C程度の高温まで広く分布していて、研削ににおける高温切いの群の平 均温度は約1250℃程度と推定さいろが、加工物融点を越えろ切い刃は苛酷なる开 削条件の下でもみられなかった. そして、研削中の砥石表面の同-切れ刃に注 目すろと、切削状態は砥石の振動や先行切れ刃で生じたかえりたびで研削の度に 変化しており, 切り刃の分布とその切削挙動の観察はインプロセスで行なうべき であることも指適できた。 さらに、砥石切込み深さの増た、あるいは研削作業 の施行によって,切削にあずれる切り刃数の増加がみらいたが,切り刃温度の分 布状態は低温を示す切い刃がやや増加するものの,大きな変化は生いず,最高温 度も約1400 どにしじまっていた. こいは,前者では研削条件の苛酷さに応じ ※ 不明れ刃の自生依用などが起り、単位面積当りの切りみ数が増すためであると考。 大らい、後者では、砥粒切い刃の摩耗にともなう切削性能の鈍化によって、他の 砥粒が切りりとして作用し始めるためであると考えられる.

本研究を行なうに際し,終始御懇切な御指導と御鞭達を載いたた阪大学基礎工学部山本明教後に深く感謝いたします.

また,有益な御敬示,適切な御助言を賜わったた阪大学基礎工学部林卓夫教授ならびに言信宏夫教授をはじめ総械工学科の諸先生方に厚く御礼申」とげます.

さらに,研究上角溢な御助信と励ましをいただいた切削加工研究室の前田良昭 講師, 中村示助手をはじめとする知くの単生諸君, および日頃御討論載いた上田 隆司助手に深創いたします.

最後に,光ファイバの提供を受けた議倉電線(K.K.),日本電信電話公社,および暗石の提供を受けた瑞穂研書砥石(K.K.)の各社に厚く御礼申」とげます.

付録A 輻射による伝熱理論

Fig. A.1において, ある微小面積 dA を通過し, (ち,4)方向の微小 立体角 dw:内に射出さいろ単位時間 あたりの輻射エネルギー de は

 $de = I(\xi, \psi) dA_p d\omega \qquad (A.1)$ $de = I'(\xi, \psi) dA d\omega \qquad (A.2)$

ここで, I'(3,4)は単位表 面積当たりの輻射強さ, I(3,4) は単位射影面積当たりの輻射強さ, aApはdAの(5,4)方向と至直な



Fig.A.1 Radiant energy from elemental area.

面入の投影面積である. 今, Frg. A. 2 に示すような極座標系において、半径尺の半球で囲まれた黒体の敵小面積 u As,および半球面上の微小面積 d A。を考える. 黒体表面からの輻射に対しては Lambertの余弦法則が成立する. 従って、 d As-から d Ae に単位時間あたりに射出さいろ波長範囲 ($n - dn_{2} \sim n + dn_{2}$)の輻射エネル ギー d Cn は $de_{\lambda} = I'_{\lambda b} d\lambda \cdot dA_{s} \cdot d\omega_{c}$



Fig.A.2 Spherical coodinate system used in derivation of radiant energy transfer.

$$I_{\lambda b} = I'_{\lambda b} d\lambda \cdot dA_s \cdot d\omega_c$$

$$= I_{\lambda b} \cos\xi d\lambda \cdot dA_s \frac{dA_c}{R^2}$$

$$= I_{\lambda b} \cos\xi d\lambda \cdot dA_s \cdot \sin\xi d\xi d\psi$$
(A.3)

ここに, Izb, Izb はそれぞれ単色黒体 輻射強士, および単色指向性黒体輻射 強さである。

よって, Fig. 3.2 に示さいたよう な位置関係において, dfからdFへ 伝達さいう輻射エネルギーoleaは次式で表わさいる.

 $de_{\lambda} = I_{\lambda b} \cos \xi d\lambda \cdot df \cdot d\Omega$

廃温面内の徴小面積 df よりコアに受光されるエネルギー G2(t, r)の算出に 際し, df からのコアの受光面 Fは Fig. 3.4 上部の斜線領域で与えられるから, 式(3.18) および式(3.19)は次のようになる.

 $e_{\lambda}(t,r) = I_{\lambda b} d\dot{\lambda} \cdot df \cdot g(t,r)$ (3.18)

$$g(t,r) = \iint \frac{t^{2}u}{(t^{2}+u^{2})^{2}} du d\theta = \int \frac{t^{2}u}{(t^{2}+u^{2})^{2}} \theta(u,r) du , \quad 0 \leq r \leq r_{t} (B.1)$$

$$F(t,r) \qquad \Delta u(t,r)$$

$$\theta_0(u,r) = \cos^{-1}\left[\frac{r^2 + u^2 - (d/2)^2}{2ru}\right]$$
(B.2)

北る関数を定義し、式(3.18)を数値積分するため、Fig. B.1に示すように場合方 けして考えいば、式(B.1)で与えられる感温面内の重み関数g(t,1)はそれぞい 以下に示す績分範囲ム((t,1)で与えられる. ただし、²f = t·tansmである.

(I)
$$0 \leq r_{f} \leq d/2$$

(i) $0 \leq r \leq d/2 - r_{f}$
 $\theta(u,r) = 2\pi$, $0 \leq u \leq r_{f}$ (B.3)
(ii) $d/2 - r_{f} \leq r \leq d/2$
 $\theta(u,r) = 2\pi$, $0 \leq u \leq d/2 - r$ (B.4)
 $\theta(u,r) = 2\theta_{0}(u,r)$, $d/2 - r \leq u \leq r_{f}$ (B.5)

(A.4)

(iii)
$$d/2 \leq r \leq r_t$$

 $\theta(u,r) = 2\theta_0(u,r)$, $r - d/2 \leq u \leq r_f$
(B.6)
(II) $d/2 \leq r_f \leq d$

$$= f$$
(i) $0 \le r < r_f - d/2$
 $\theta(u,r) = 2\theta_0(u,r)$, $d/2 - r \le u \le r + d/2$
(B.7)

(I) 0≤ ¼ < d/2</p>



(II) $d/2 \le r_f < d$







(III) $d \leq r_f$

(i) $0 \le r < d/2$

(ii) $d/2 \leq r < r_f - d/2$ (iii) $r_f - d/2 \leq r \leq r_f$





Fig.B.1 Configuration of incident area derivation of the weight function g(t,r). in fiber face in

(if)
$$r_{f} - d/2 \leq r \leq d/2$$

 $\theta(u,r) = 2\pi$, $0 \leq u \leq d/2 - r$ (B.8)
 $\theta(u,r) = 2\theta_{0}(u,r)$, $d/2 - r \leq u \leq r_{f}$ (B.9)
(if) $d/2 \leq r \leq r_{t}$
 $\theta(u,r) = 2\theta_{0}(u,r)$, $r - d/2 \leq u \leq r_{f}$ (B.10)
(III) $d \leq r_{f}$
(i) $0 \leq r \leq d/2$
 $\theta(u,r) = 2\pi$, $0 \leq u \leq d/2 - r$ (B.11)
 $\theta(u,r) = 2\theta_{0}(u,r)$, $d/2 - r \leq u \leq d/2 + r$ (B.12)
(ii) $d/2 \leq r \leq r_{f} - d/2$
 $\theta(u,r) = 2\theta_{0}(u,r)$, $r - d/2 \leq u \leq r + d/2$ (B.13)
(iii) $r_{f} - d/2 \leq r \leq r_{t}$
 $\theta(u,r) = 2\theta_{0}(u,r)$, $r - d/2 \leq u \leq r_{f}$ (B.14)

上記(I)~(II)の場合に対して、それぞれ、重子関数g(t,r)が数値的に与えら れれば、式(3.23)によって、ファイバの受光エネルギー 5元が求められる。

$$E_{\lambda}(t,t_{h},r_{ob}) = \iint I_{\lambda b} d\lambda \cdot g(t,r) df , \qquad 0 \leq t_{h} \leq r_{t} + r_{ob} \qquad (3.23)$$
$$f(t,t_{h},r_{ob})$$

ここで、Fig.3.7の下四の斜線領域で表的されるように測定面積チを考えれば、 式(3.23)は次のように表的される。

$$E_{\lambda}(t, t_{h}, r_{ob}) = \int I_{\lambda b} d\lambda \cdot 2rg(t, r) \phi(r, t_{h}, r_{ob}) dr \qquad (B.15)$$
$$\Delta r(t, t_{h}, r_{ob})$$

ここで

$$\phi_{0}(r, t_{h}, r_{ob}) = \cos^{-1}\left(\frac{t_{h}^{2} + r^{2} - r_{ob}^{2}}{2t_{h}r^{2}}\right)$$
(B.16)

なろ関数を定義し、式(3.23)を数値積分すろため、測定対象面の大きさを前と 同様にニッに場合分けすれば、式(B、15)の積分範囲は以下のごとく与えられろ、

(II)
$$r_t / 2 \leq t_h < r_{ob}$$

(1) $0 \leq t_h < r_t - r_{ob}$
 $\phi = \pi$, $0 \leq r \leq r_{ob} - t_h$ (B.21)
 $\phi = \phi_0 (r, t_h, r_{ob})$, $r_{ob} - t_h \leq r \leq r_t$ (B.22)
(ii) $r_t - r_{ob} \leq t_h < r_{ob}$
 $\phi = \pi$, $0 \leq r \leq r_{ob} - r_t$ (B.23)
 $\phi = \phi_0 (r, t_h, r_{ob})$, $r_{ob} - r_t \leq r \leq r_t$ (B.24)
(iii) $r_{ob} \leq t_h < r_t + r_{ob}$

$$\phi = \phi_0(r, t_h, r_{ob}) , \quad t_h - r_{ob} \le r \le r_t$$
(B.25)

(III)
$$r_t \leq r_{ob}$$

(i) $0 \leq t_h < r_{ob} - r_t$
 $\phi = \pi$, $0 \leq r \leq r_t$ (B.26)

(ii) $r_{ob} - r_t \leq t_h < r_{ob}$		
$\phi = \pi ,$	$0 \leq r \leq r_{ob} - t_{h}$	(B.27)
$\phi = \phi_0(r, t_h, r_{ob}) ,$	$r_{ob} - t_h \leq r \leq r_t$	(B.28)
(iii) $r_{ob} \stackrel{<}{=} t_h < r_t + r_{ob}$		
$\phi = \phi_0(r, t_h, r_{ob}) ,$	$t_h - r_{ob} \leq r \leq r_t$	(B.29)

上記(I)~(11)の場合に対して,受光エネルギー Ex(t,ち,ち,か数値的に計算でき, Fig.3.8の曲線が得らいる.

付録C 温度計出力パルスの算出

Fig. C.1 において、th は Oou と Ot との距離、tz は測定対象物の 進行方向の Oou と Ot との距離、そ 1 て ty は 版者のずいである. 四 より、 $f_{2}^{2} = t_{2}^{2} + t_{2}^{2}$ なう関係 があり、また、ファイバは th < bu + た なる条件下で測定対 象面からの輻射絶を受光することが できる. 従って、測定対象面と感 温面のずれ ty に対するよカパルス 幅 $\Delta \tau(t_{2})$ は

 $\Delta \tau(t_{y}) = \frac{2\sqrt{(r_{ob} + r_{t})^{2} + t_{y}^{2}}}{V}$





(C.1)

ベ与えらいろ. なお、ファイズが受光するエネルギーは、Fig.3.8 に示すように、なしないの関数として与えらいろ.

付録D - 定熱流束なる境界条件下の- 次元熱に導

温度ア(ス、て) に関すろ熱伝導基礎式

 $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1 \partial T}{\alpha \partial \tau} \tag{D.1}$

に対し, 初期条件および境界条件を次のように与える.

 $T(x,0) = T_{i}, \qquad x \ge 0 \qquad (D.2)$

 $\frac{q}{A} = -k\frac{\partial T}{\partial x} , \qquad x=0, \ \tau>0$ (D.3)

22に, fは密度, Cは比熱, kは熟伝導率, αは温度伝導率であり, fは供給 熱量, Aは熱流入面積である. ネ明保件, 式(D.2)の下で式(D.1)をラプラス 変換; [[[(ω,τ)]=F(ω,s); すろと

$$\frac{\partial^2 \overline{T}}{\partial x^2} - \frac{s}{\alpha} \overline{T} = -\frac{T_i}{\alpha}$$
(D.4)

境界条件,式(D.3)をラフッラス変換すれば

 $\frac{1q}{sA} = -k\frac{\partial \overline{T}}{\partial x} , \qquad x=0$ (D.5)

式(10.5)を満足すろ式(10.4)の解しまめろと

$$\overline{T}(x,s) = \frac{q}{kA} \cdot \frac{1}{s\sqrt{s/\alpha}} \exp\left(-\sqrt{s/\alpha x}\right) + \frac{T}{s}$$
(D.6)

式(D.6)を逆変換すろことによって求めろ解が得られる.

$$T(x,\tau) - T_{i} = \frac{q}{kA} \left\{ \frac{v}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{x}{v}\right)^{2}\right] - x \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{v}\right) \right\}$$
(D.7)

ここに、 v=2√at である.

108

. . • .