The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	研削加工とエキソ電子放射
Author(s)	石渡, 秋二
Citation	大阪大学, 1983, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1152
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

研削加工とエキソ電子放射

昭和57年11月

石　渡　秋　二

目　　次

第 1 章　序　章…… 1
まえがき…… 1
1.　エキソ電子放射…… 1
1.1.　エキソ電子の放射機構…… 2
1.2.　エキソ電子放射現象の応用…… 5
2.　本研究の構成…… 6

第 2 章　エキソ電子の測定方法…… 11
まえがき…… 11
1.　エキソ電子の一般的検出器…… 11
2.　本研究でのエキソ電子測定方法…… 12

第 3 章　砥粒からのエキソ電子放射…… 19
まえがき…… 19
1.　一般砥粒からのエキソ電子放射…… 19
1.1.　実験方法…… 20
1.2.　破砕率…… 20
1.3　砥粒別電子放射量…… 21
1.3.1.　焼成後破砕した砥粒…… 21
1.3.2.　焼成後の未破砕砥粒…… 23
1.3.3.　未焼成の破砕砥粒…… 24
1.3.4.　未焼成の未破砕砥粒…… 25
1.4.　同一砥粒での粒度別電子放射量…… 26

1.5.　同一砥粒での電子放射量と破砕率との関係……27
1.6.　電子放射の減衰現象……27
2.　CBN砥粒およびダイヤモンド砥粒からの電子放射……29
3.　熱履歴によるエキソ電子放射の変動……31
3.1.　未破砕砥粒の熱処理温度と電子放射量との関係……31
3.2.　破砕砥粒の熱処理温度と電子放射量との関係……33
結論……36

第 4 章　エキソ電子放射と加工現象との関連……39
まえがき……39
1.　砥粒からのエキソ電子放射と研削機構……39
2.　砥粒からのエキソ電子放射と研削油剤作用……41
3.　砥粒からのエキソ電子放射と砥石結合度……42
4.　砥粒からのエキソ電子放射と遊離砥粒加工……44
結論……49

第 5 章　研削油剤のレビンダ効果とエキソ電子放射……52
まえがき……52
1.　エキソ電子放射による研削油剤のレビンダ効果の吟味……52
1.1.　実験方法……53
1.1.1.　摩擦実験……53
1.1.2.　研削実験……54
1.1.3.　エキソ電子の測定……54
1.2.　摩擦実験と研削実験の比較……55
1.3.　各種添加剤の比較……62
1.4.　研削仕上面表層からのエキソ電子放射……65
2.　研削抵抗による研削油剤のレビンダ効果の吟味……69

2.1.　実験方法…… 70
2.2.　油剤塗布効果の吟味…… 72
2.3.　被削材材種に対する吟味…… 79
2.4.　オレイン酸の濃度に対する吟味…… 80
2.5.　各種添加剤の効果に対する吟味…… 82
結論…… 84

第 6 章　破砕砥粒の仕上面への埋め込み現象とエキソ電子放射の関係…… 87
まえがき…… 87
1.　研削仕上面への砥粒の埋め込み測定…… 87
1.1.　砥粒からのエキソ電子放射…… 87
1.2.　乾式研削面からのエキソ電子放射…… 88
1.3.　湿式研削面からのエキソ電子放射…… 91
1.4.　研削仕上面からのエキソ電子グロー曲線の型と砥粒埋め込みの度合…… 94
2.　ラッピング仕上面への砥粒埋め込み深さの測定…… 95
結論…… 96

第 7 章　総　括…… 98
謝　辞…… 102

第1章　序　章

まえがき

最近は加工精度に対するきびしい要求と共に各種難削材が出現して，精密加工の代表的な加工法である研削加工に対する期待とその使用範囲はますます増大している。[1)~4)] しかし，その加工機構，加工現象については理論的にも，実験的にもかなり研究[1)5)]されつつあるが，いまだ不明の点が数多く残されている。特に，その加工局部では，砥石作業面にランダムに配列された不規則形状の砥粒切れ刃[1)]が高速で摩擦，押しつぶし作用をともなう微小切削[6)]を繰り返し行っており，その実態のは握を困難にしている。しかし，研削加工現象の解明のために今日まで数多くの研究がなされ，新たな多くの考え方が提示されてきた。それら多くの研究の中で，クラマー効果[7)8)]として知られているエキソ電子放射現象にもとづくものが最近注目されている。[9)~15)]

1. エキソ電子放射[7)8)16)17)18)]

エキソ電子放射とは，金属などの固体が研摩，圧延などの機械加工やX線，紫外線などの照射を受けると，それら処理中においても，終了後も，しばらくの間，その表面から低エネルギの電子が放射する現象であり，通常，クラマー効果とも呼ばれている。（現在では，電子以外にイオン，中性粒子，光子などの放射も同時におこることが報告されている。[19)]）

この現象が最初にみいだされたのは，製作直後のガイガーミュラー計数管の異常な自然計数であった。[20)21)] その後，この現象について，J．Kramerが広範な研究[22)]を行ない，1950年にその成果を発表した。J．Kramerの研究に端を発し，この異常電子放射現象に関する研究が多方面で精力的に行われるようになった。[23)24)]

初め，J．Kramerはウッド合金の実験結果から，ウッド合金が凝固する時の潜熱

がもとで，この異常電子放射が起こり，発熱過程（exo－thermal process）に基づくものと考え，この放射される電子をエキソ電子と呼んだ。しかし，今日ではこの考えは否定されたが，J．Kramerの功績をたたえて，この現象をクラマー効果と呼び，放射する電子をエキソ電子と呼んでいる。[25] このエキソ電子の運動エネルギは小さく，平均エネルギで0.1～1 eV，最高エネルギでも数eV程度[24)26)]であるといわれている。また，エキソ電子放射は一定状態で続くものではなく，時間の経過とともに減衰し，最終的には放射がみられなくなってしまう。

ひとことでエキソ電子放射といっても測定する際の状況によっていくつかの種類がある。[27] 分類すると表1－1のように，励起した後に測定するものと，励起しながら測定するものとになる。仕事関数を越えて電子放射が起こるためには，前処理のほかにほとんどの場合，付加的エネルギが必要で，それが熱の場合には熱刺激エキソ電子放射（TSEE），光の場合には光刺激エキソ電子放射（OSEE，PSEE）である。OSEEは光電子放射限界波長よりも長波長の光を照射したり，波長を連続的に走査して測定するものである。これに対して，PSEEは通常の光電子放射も起こり得るような短波長の光も含む条件下で測定するものである。

表1－1　エキソ電子放射の分類

試料を励起した後に測定するもの	TSEE (Thermally Stimulated Exo-electron Emission) OSEE (Optically Stimulated Exo-electron Emission) PSEE (Photo- Stimulated Exo-electron Emission)
試料を励起しながら測定するもの	PSEE (Photo- Stimulated Exo-electron Emission) Dark Emission

1.1.　エキソ電子の放射機構

エキソ電子放射機構は，いまだ十分解明されていないが，エキソ電子を発生させる励起要因はA．Scharmann[28]によれば，次のように分類されている。

(1) 電離放射線による固体物質の励起。

(2) 物理吸着，あるいは化学吸着。

(3) 機械的処理（引かき，研磨，変形など）。

(4) 表面における化学反応。

(5) 相変換（金属凝固，結晶構造変化）。

(6) 焦電物質の分極効果。

特に，機械加工された金属仕上面からのエキソ電子放射に関して，次のことが重要であるといわれている。[17)28)]

(1) 新生金属表面が形成され，それに酸素や水分子の吸着が起こること。

(2) 金属中の格子欠陥の過剰な形成。

(3) 表面酸化物中の格子欠陥の形成。

エキソ電子の放射機構については，エキソ電子が固体のバルクおよび表面酸化物の性質によるものか，あるいは表面，特に水などの吸着物の性質に支配されるものかによって，大きく二つのグループに分けられる。[24)29)~31)]

① エキソ電子の放射源が固体バルクの場合。

J. Kramer[32)], J. Lepper[33)], A. Bohun[34)], W. Hanle[35)]らにより採用されたトラップによるモデル。これは，イオン結晶において，電子で満たされた負イオン空孔（色中心）のような欠陥準位があって，これが熱あるいは光によって刺激され，電導帯を経て放射されるという考えである。この考えは固体の熱ルミネッセンスとエキソ電子放射の温度依存性（グロー曲線）の比較に基づいている。両者が非常に類似した挙動を示すことから，固体のルミネッセンスの帯モデルにより，次のように説明されている。　活性体の導入によって生じた欠陥準位をもつ固体が刺激されると，図1－1(a)に示すように，充満帯(V)あるいはホール準位(A)の電子はトラップ準位(D)に移り，不安定状態（図1－1(b)）になる。この状態から安定状態へ移行する過程（図1－1(C)および(d)）に伴って，発光が起こる。図1－1(C)の過程ではトラップ準位にある電子は，わずかな熱エネルギで電導帯Cに移ることができる。電導帯内

で電子がその物質の仕事関数より大きい運動エネルギを持つものがあれば，物質外に飛び出してくる。

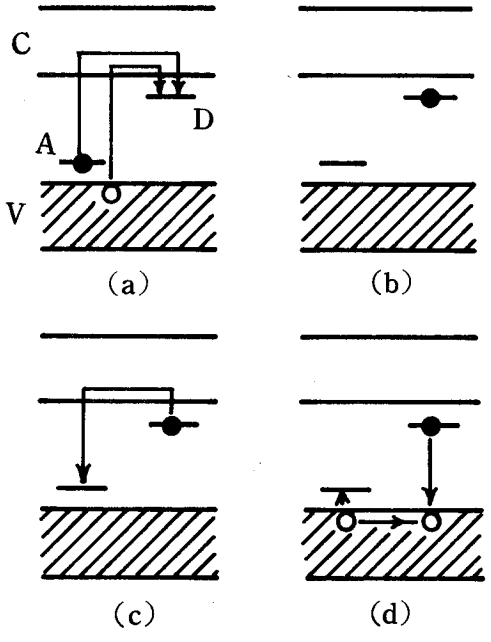


図１－１　　帯モデルによる電子励起と発光の説明[8)]

A．Bohun[37)]，H．F．Käämbre[38)39)]，E．I．Tolpygo[40)]らにより提案されたオージェ再結合モデル。これはトラップ準位の電子がホールなどの再結合中心と再結合するさいに放出されるエネルギを，そのごく近傍のトラップ準位電子が吸収して固体外部に放出されるというものである。

B．Sujak[41)]，H．Glaefeke[42)]，J．Drenckhan[43)]らにより提案された表面電界によるバンド湾曲モデル。これは絶縁体の二次電子放出係数が１より大きいとき，放射線照射により表面は正，内部は一次電子により負に帯電し，固体表面に強い電場が生じると考え，光刺激や熱刺激により伝導帯に上げられた電子がこの電場により十分に加速されて外部に飛び出してくるというものである。

B．Sujak[44)]らにより提案されたき裂内の電界によるモデル。これは試料が変形を受けた時に，その表面酸化層中にき裂が生じ，このき裂の相対する表面間に電場

が生じ，この電場により電子が加速され，放出されるというものである。

W.D.Von Voss[45], W.T.Rimbley[46], F.R.Brotzen[47]らにより提案された空孔拡散モデル。これは損傷によって生じた試料内の空孔が試料表面に拡散してゆき，そこで消滅するときに電子にエネルギを与えるというものである。また，これに関連し，A.H.Meleka[48]らは，亜鉛単結晶のラッセル効果の結果が転位のエッチピットの配置と類似していることから，エキソ電子源は転位の末端にあることを示唆している。

② エキソ電子源が表面の吸着物の場合

酸化物などでは，電子は電導帯を経ないで直接放射されるというもので，酸素の吸着中心などが電子源であると考えられている。[49)50)] この考え方に対し I.V.Krylova[51] はその放射過程を提唱している。X線照射などにより酸化物表面に吸着している水が物理化学的変化によって，以下の過程により放射がおこるとしている。

I）放射の励起（イオンや基の生成）

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} 2H^{+}ads + O^{2-}ads$$

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} H^{+}ads + OH^{-}ads$$

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} Hads + OHads$$

II）放射の刺激（イオンや基の再結合）

$$O^{2-}ads + Hads \xrightarrow{Q^*} OH^{-}ads + Qrec + e^{-}\uparrow$$

$$OH^{-}ads + Hads \xrightarrow{Q^*} H_2O^{-}ads + Qrec \rightarrow H_2O^{-}\uparrow$$

$$OHads + Hads \xrightarrow{Q^*} H_2Oads + Qrec \rightarrow H_2O\uparrow$$

（Q^* は加熱中に供給された熱エネルギを示し，Qrec は放射過程に必要な熱エネルギを示す。）

1.2. エキソ電子放射現象の応用

エキソ電子放射現象は固体の表面構造に非常に敏感であることにより，固体表面に関する研究手段として，多方面に応用されつつある。触媒作用のモニター，[18)52)]

エキソ電子顕微鏡の開発[53]，放射線量測定[24]などへの応用が研究されている。また，機械工学の分野では，切削加工，塑性加工，金属の疲労，摩擦，摩耗，そして潤滑における各種現象をエキソ電子放射の立場から吟味する研究[15]がなされつつある。たとえば，材料力学の分野において以下のことが報告されている。金属の引張実験において，ひずみが３～４％程度生じるとエキソ電子放射が生じ，ひずみの増加とともに放射強度も増加する。[54] また，金属の疲労実験におけるＳ―Ｎ曲線とエキソ電子放射とがよい対応関係を示し，疲労寿命の１０～２０％の繰り返し数においてエキソ電子放射の強度がピークを示す。[55] 以上のことより，材料の破壊予知，疲労寿命の予知に，エキソ電子放射現象を利用することは，有効な手段となることが考えられている。

トライボロジーの分野においては，以下のことが報告されている。[56] 摩擦実験において，動摩擦係数とその摩擦面からのエキソ電子放射強度との間には，よい対応関係がみられる。また，摩擦中のふん囲気はエキソ電子の放射強度に大きく影響し，ふん囲気分子の塩基性が，関係していることが報告されている。潤滑油の中には，極圧剤として塩基性のものが添加されており，エキソ電子放射の立場からの研究が期待されている。

2. 本研究の構成

研削加工の過程中，被削材である金属表面は，①，極限状態（高温，高圧）の局所的形成，②，新生面の生成，③，比表面積の増大，格子欠陥の著しい増加，などの状況にあることから，研削加工機構，また研削加工局部における研削油剤，特にその中に含まれる添加剤の作用にエキソ電子放射現象が重要な関連をもつことが考えられる。[14]

本研究は研削加工における工具である砥粒，および，研削仕上面から放射するエキソ電子を測定し，そのグロー曲線より，この測定方法が，研削加工の新たな評価手段となる可能性を検討し，さらにエキソ電子放射現象と研削加工現象との関連を

吟味するものである。

まず，第2章においては今日まで一般に使用されてきたエキソ電子の測定方法，および本研究に使用した測定方法[57]について述べる。

次いで，第3章においては現実の研削加工に使用されている各種砥粒からのエキソ電子を測定し，この測定方法が研削加工の工具となる砥粒を評価する有力な新たな手段となることを述べる。[57)58)] さらに，第4章においては，第3章の実験結果をもとにして，研削加工機構とエキソ電子放射との関連を吟味する。[14)59)] 第5章においては，研削油剤の作用，特に油剤中の添加剤の作用について，エキソ電子放射の立場より吟味するものであり，特に研削油剤のレビンダー効果の可能性を検討する。さらに，エキソ電子放射測定が研削仕上面表層を評価する新たな手段となることを述べる。[60)61)] そして第6章においては，仕上面への砥粒の埋め込みの度合を調べるのに，エキソ電子放射測定が一つの有力な手段となることを述べる。[62)]

第7章は総括である。

文　献（第1章）

1）津和：機械の研究，15, 2 (1963) 303.～同上，16, 5 (1964) 691.

2）最近の研削加工技術と研削盤，機械と工具，23, 4 (1979).

3）超砥粒砥石―ダイヤモンドとCBN，機械と工具，23, 10 (1979).

4）研削技術の最近の動向，機械と工具，24, 10 (1980).

5）精機学会編：新訂精密工作便覧，コロナ社（1970）.

6）T. Shonozaki and H. Shigematu: Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., 2,1 (1966) 8.

7）玉井，百瀬：潤滑，12, 2 (1967) 81.

8）佐藤：電気化学，34 (1966) 245.

9）J. Kramer and W. Engelland: Werkstattstechnik, 52, 4 (1962) 173

（吉川訳）：機械工作，11（1962）57.）．

10）大橋，佐藤，岡本：電気化学，32（1964）908．

11）松永，内藤：昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会前刷集，405．

12）井上，水原，臼井：潤滑，18，8（1973）615．

13）P．A．Thiessen：Z．Chem.，5（1965）162．

14）正野崎，石渡：潤滑，23，3（1978）167．

15）駒井：「エキソ電子放射とその応用」第2回研究連絡会議資料集，(1979) 48.

16）L．Grunberg：Wear，1（1957／58）142．

17）L．Grunberg und K．H．R．Wright：Acta．Phys．Austriaca，10.（1957）325．

18）佐藤：表面，13，4，221．

19）B．Rosenblum，P．Braunlich，C．Himmel：J．Appl．Phys．，48，5262（1977）．

20）W．Kutzer：Z．Phys．，23（1924）117．

21）W．B．Lewis，W．E．Burcham：Chamb．Proc．Phys．Soc．，32（1936）503．

22）J．Kramer：Der Metallishe Zustand，Van denhoef und Rupperecht（1950）．

23）「エキソ電子放射とその応用」第1回（1978），第2回（1979）研究連絡会議資料集．

24）川西：応用物理，49，2（1979）94.

25）Diskussionstagung "Exoelektronen"，Acta Physica Austriaca，10（1957）313.

26）斎藤：表面科学，1，1（1980）72．

27）斎藤，品田：Nikkei Mechanical，1979，5，28，P．52．

28）A．Scharman：Proc．4th Intern．Symp．on Exoelectron

Emission and Dossim.,held at Liblice (1973) 12.

29) 百瀬：金属表面科学(II)，朝倉書店，P.183.

30) A.Bohun：Phys.Stat.Sol.,3 (1963) 779.

31) 重川，兵藤：潤滑，27,6 (1982) 407.

32) J.Kramer：Z.Phys.,729 (1951) 34.

33) J.Lepper：Z.Naturtorsch Loa, (1955) 47.

34) A.Bohun,Czech：J.Phys.,5 (1955) 224, 429, 6 (1956) 141.

35) G.Gourge,W.Hanle：Acta.Phys.Austr.,10 (1957) 429.

36) K.Seeger：Angew. Chem.,68 (1956) 285.

37) A.Bohun,Czech：J.Phys.,5 (1955) 146.

38) H.F.Käamber,A.Bohun, Czech：J.Phys.,B14 (1964) 54.

39) V.B.Cheirn,H.Käamber：Phys.Stat. Sol.,(a)4 (1971) K235.

40) E.I.Tolpygo,K.B.Tolpygo, M.K.Sheinkman：Bull. Acad.of Sci.USSR,30 (1966) 1980.

41) B.Sujak：Acta.Phys. Pol.,20 (1961) 969.

42) J.Drenckhan, H.Gross, H.Glaefeke：Phys.Stat.Sol., (a) 2 (1970) K51. (a) 3 (1970) K185.

43) M.Schmiclt, H.Glaefeke, J.Drenckhan, W.Wild：Racl. Effects,17 (1973) 185.

44) A.Gieroszynsky, B.Sujak：Acta. Phys.Polon.,28 (1965) 337. 29 (1966) 533.

45) W.D.Von Voss, F.R.Brotzen：J.Appl.Phys.,30,11 (1959) 1639.

46) W.T.Pimbley, E.E.Francis：J.Appl.Phys.,32, 9 (1961) 1729.

47) R.N.Claytor, F.R.Brotzen：J.Appl. Phys.,36, 11 (1965) 3549.

48) A.H.Meleka and W.Barr : Nature, 187 (1960) 232.

49) H.Hieslmair and H.Müller : Z. Physik, 152 (1958) 642.

50) R.Menold : Z.Physick, 157 (1960) 499.

51) I.V.Krylova : Usp.Biol. Khimii, 45 (1976) 2138.
〔English transl. : Russian Chem. Rev., 45 (1976) 1101.〕

52) 島田，中島：日本金属学会会報，19, 7 (1980) 503.

53) 品田，浦本，斎藤：日本金属学会誌，42, 6 (1978) 623.

54) 品田，斎藤，本間：日本金属学会誌，41,5 (1977) 517.

55) 本間，品田，斎藤：日本金属学会誌，41, 5 (1977) 523.

56) 玉井，森：「エキソ電子放射とその応用」
第1回研究連絡会議資料集，(1978) 19.

57) 正野崎，石渡：精密機械，39, 11 (1973) 1146.

58) 正野崎，石渡：精密機械，41, 9 (1975) 925.

59) 正野崎，石渡：セラミックス，10, 8 (1975) 544.

60) 石渡，正野崎：潤滑，27, 9 (1982) 677.

61) 石渡，正野崎：潤滑，27, 9 (1982) 684.

62) S. Ishiwata: Reports of Faculty of Engineering
KANAGAWA UNIVERSITY, 19 (1981) 53.

第２章　エキソ電子の測定方法

ま　え　が　き

この章では，今日まで一般的に使用されてきたエキソ電子の検出器について述べ，次いで本研究に使用したエキソ電子の検出器，並びに測定方法について述べる。

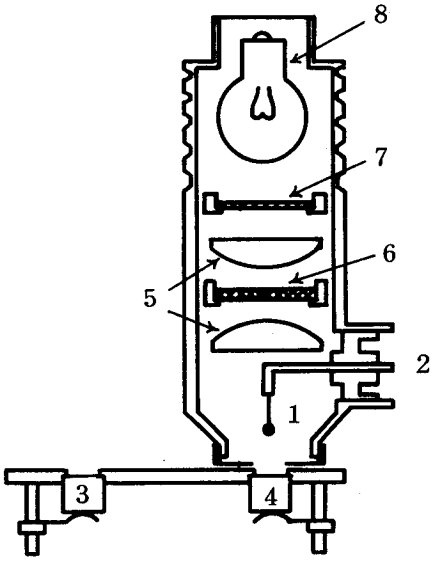
1.　エキソ電子の一般的検出器

エキソ電子の検出には，一般的にはガイガーミュラー計数管，ガスフロー計数管，二次電子増倍管，そして微小電流計などが用いられてきた。

一般市販の雲母窓をもつガイガーミュラー計数管では，エキソ電子の運動エネルギが小さいため，電子が雲母窓を通過することができず，測定できない。そこで，J.Kramer は主として図２－１に示すような計測窓を開放した空気ガイガーミュラー計数管[1)]を使用し，エキソ電子の測定を行った。空気ガイガーミュラー計数管は，装置が簡単であり，測定操作が容易であるが，計数特性が悪いという欠点をもつ。今日，一般には処理された試料をガイガーミュラー計数管内にそう入し，その後，計測ガスを詰めて測定する。図２－２に示すように，目的によって試料加熱装置，光照射装置を備えたもの[2)]を使用している。

図２－３に示すような二次電子増倍管[3)]を使用しても測定が行われている。これは試料から放射した電子を直接増幅する方式で，雰囲気として二次電子増倍管が作動する真空度を必要とする。

紫外線照射などにより，かなりのエキソ電子放射がおこる場合，図２－４に示すような極微小電流計[4)]も使用される。この方法はガイガーミュラー計数管法や電子増倍管法に比較して検出感度は低いが，大気中でも真空中でも測定可能である。



1.針（プラチナ球，直径0.1㎜の針金に直径0.2㎜の球がつく），
2.増幅器および高圧電源への導線，
3.平衡荷重，
4.試料と試料台，
5.レンズ，
6.干渉フィルタ，
7.仕切りフィルタ，
8.白熱電灯12V35W

図2－1　空気ガイガーミュラー計数管

2.　本研究でのエキソ電子測定方法[5)]

本研究では，取扱いの比較的簡単なガイガーミュラー計数管をエキソ電子の検出器として使用した。（現在では，電子以外にイオン，中性粒子，ルミネッセンスも同時に放射することが報告されているが，この測定方法によっては検出効率の高い電子が測定されていると考えられる。）

前章で述べたように，エキソ電子の運動エネルギが小さいため[6)7)]，ガイガーミュラ計数管の外部に試料を置いての測定はできない。そこで図2－5に示すガイガーミ

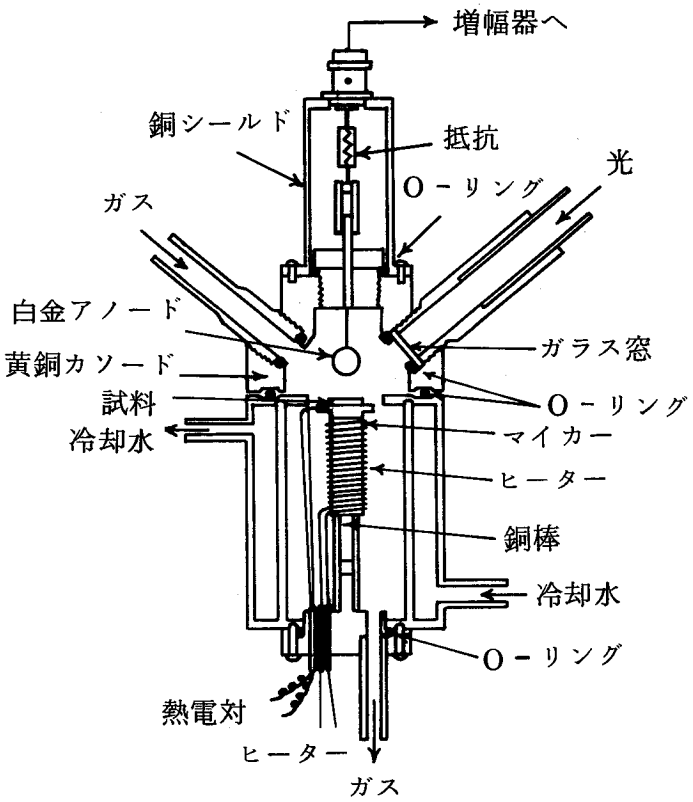
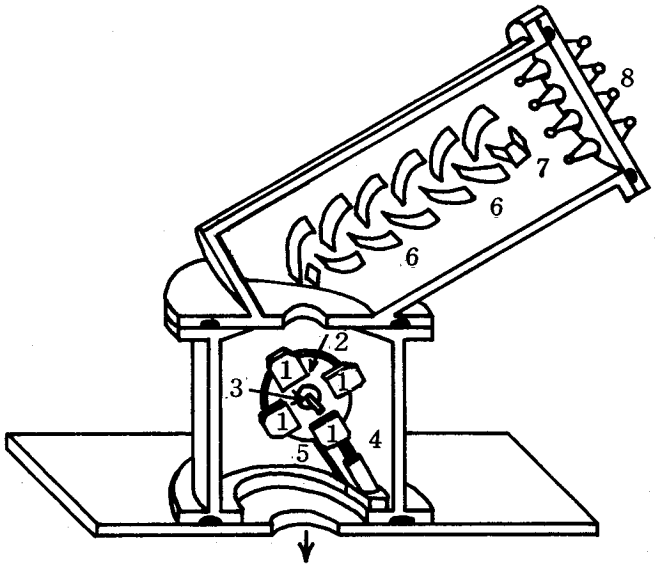


図２－２　加熱装置をもつ，ガスフロー型　ガイガーミュラー計数管



1.金属試片　2.試片保持回転円盤
3.軸　4.鋼ブラシ
5.研摩紙保持器　6.電子増倍電極
7.アノード　8.導電端子

図２－３　二次電子増倍管

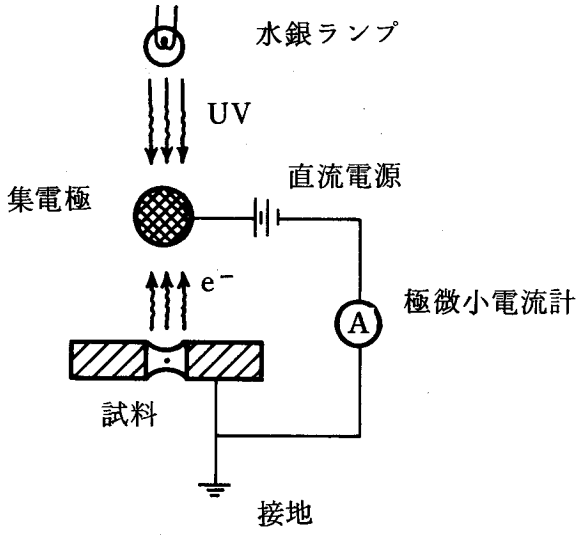
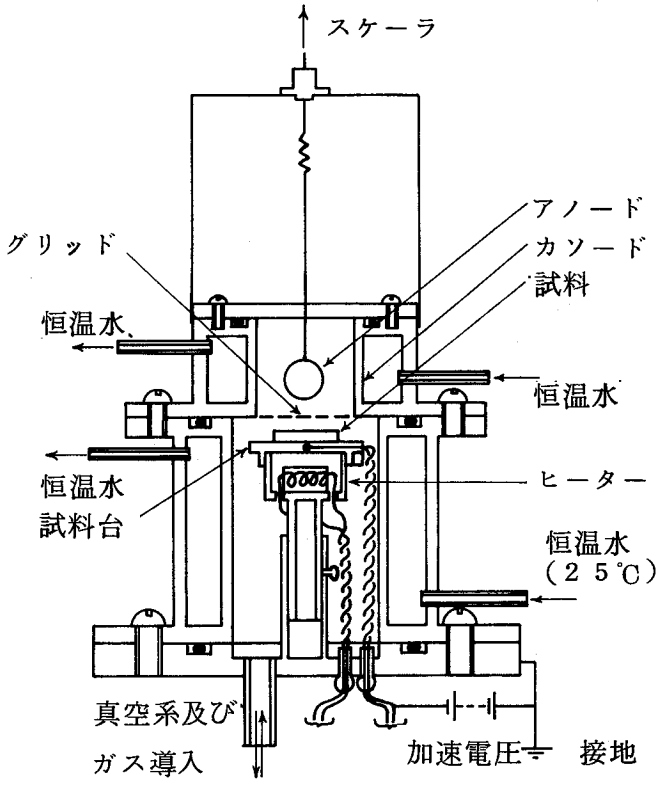


図２－４　極微小電流計

ュラー計数管を製作し，エキソ電子の測定を行った。このガイガーミュラー計数管は直径 0.05 ㎜のタングステン線を直径１０㎜のリングとしたものを端子とする陽極，接地されている半球状の陰極，その陰極に固定されている＃３６のグリッド，そしてその下に試料を置くための試料台から構成されている。試料台は陽極，陰極と電気的に絶縁されている。陽極と試料台との間にグリッドをもうけている。ガイガーミュラー計数管の管壁は温度変化による計数管のプラトー特性の変動をおさえるために ２５℃の恒温水にて冷却している。試料台表面を厚み 0.1 ㎜の純金板でおおい，試料台の酸化などによるよごれを防ぎ，また試料台からのエキソ電子の放射を防止している。その試料台の下部には試料を加熱するための小型電熱器を設置している。この電熱器は陽極，陰極，そして試料台から電気的に絶縁されている。その加熱温度測定のために，試料台中央にクロメル・アルメル熱電対を埋め込んでいる。この熱電対と試料台とは電気的につながっているため，熱電対の１本を利用して，グリッドと試料との間に，エキソ電子を効率的に測定するための加速電圧をガイガーミュラー計数管外部より加えられる。使用した計測ガスはアルゴンとエチルアルコールを４：１の割合で混合したものである。



カウンタガス：エタノール（20Torr）＋アルゴン（80Torr），
作動アノード電圧：1450V，加速電圧：100V，
自然計数：50counts／min（25℃～300℃）

図2－5　ガイガーミュラーカウンタの構造

ガス圧は100Torrである。図2—6に示すように，この計数管の計数特性プラトーは陽極電圧域1350〜1550Vである。本実験の測定は陽極電圧1450Vで行った。計数のバックグラウンドは50counts/min 程度である。この値は試料台を350℃まで加熱しても，図2—7に示すようにほぼ一定である。前述のように実験中，加熱温度は試料台に埋め込んだ熱電対により測定しているため，試料表面温度を知るために，図2－8に示すようにあらかじめ試料台温度と試料表面温度の較正を行った。この結果は本研究に主に試料として使用したアルミニウム合金板（板厚5㎜）を試料台に置き，その表面温度と試料台温度との対応を示したものである。

測定に際しては，加工，および処理された試料をガイガーミュラー計数管内試料台上に置き，計数管内の空気を10^{-3}Torrの圧力まで排気した後，計測ガスを封入する。そして，グリッドに対して100Vの加速電圧を試料に加える。この操作完了に6分要する。そのため，試料にそれぞれの加工，および処理を行った後，7分目からスケーラにより，1分毎の計数を開始する。試料台下部の小型電熱器により，試料台温度を15℃/minの昇温速度で加熱し，試料からの熱刺激エキソ電子放射（TSEE）を測定する。そして，試料表面温度と1分間隔のエキソ電子放射量との関係をグロー曲線として示し，吟味する。

なお，上述したガイガーミュラー計数管について，特に本研究において工夫したことは以下のことである。試料台を純金板でおおい，試料台の酸化などによるよごれを防ぎ，試料台からのエキソ電子の放射を防止した。加熱測定時に計数管の周囲に恒温水を流し，計数管のプラトー特性の変動をおさえた。

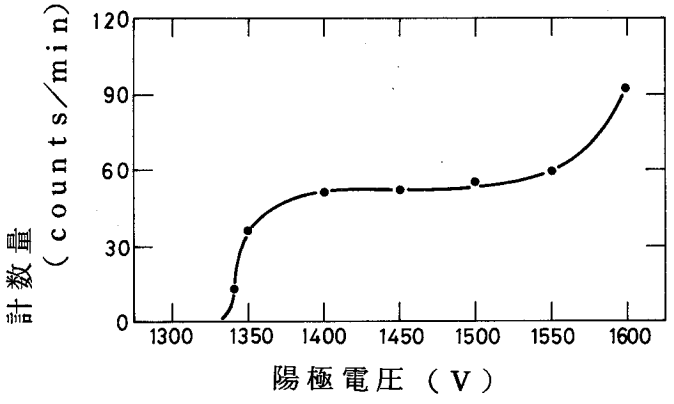


図２－６　プラトー測定

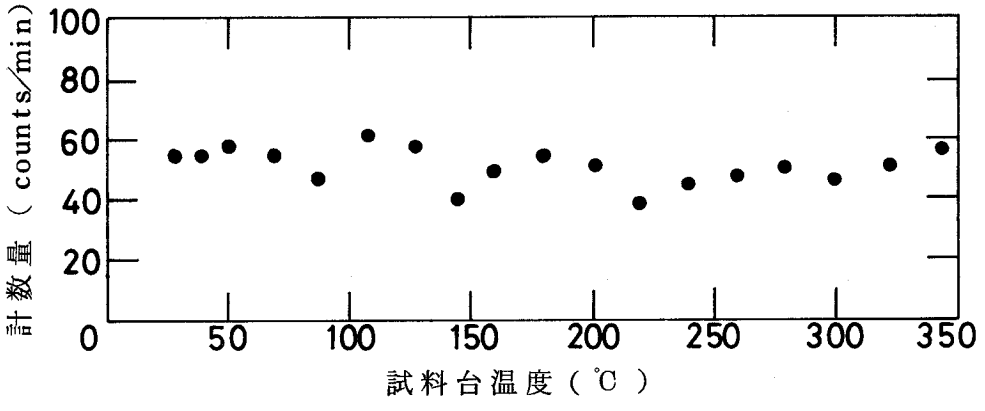


図２－７　自然計数値

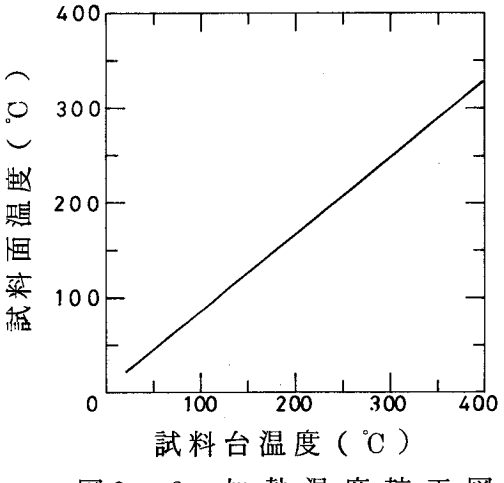


図２－８　加熱温度較正図

文　献（第２章）

1）J.Kramer and W.Engelland:Werkstattstechnik，52，4（1962)173（吉川訳：機械工作，11（1962）57）．

2）斎藤，品田，菅原：日本金属学会誌，37，12（1973）1293.

3）J.Lohff and H.Raether：Z.Phys.，142（1955）310.

4）本間，品田，斎藤：日本金属学会誌，41，5（1977）523.

5）正野崎，石渡：精密機械，39，11（1973）1146.

6）川西：応用物理，49，2（1979）94.

7）斎藤：表面科学，1，1（1980）72.

第３章　砥粒からのエキソ電子放射

ま　え　が　き

この章では，現実の研削加工に使用されている各種砥粒からのエキソ電子を測定し，この測定方法が研削加工の工具となる砥粒を評価する有力な新たな手段となることを述べる。

1.　一般砥粒からのエキソ電子放射[1)]

一般にエキソ電子放射は，金属が切削，研削などの機械加工によって新生面が出現すると，その金属仕上面から低エネルギの電子が放射する現象であると考えられているが，J.Kramer は一連の研究の中で，研摩材として使用される酸化アルミニウムや炭化けい素のような非金属材料でも機械的破砕によって，エキソ電子が放射する現象のあることを報告[2)]している。また，P.A.Thiessen は研削の際に砥粒の加工局部における状況をマグマプラズマモデル[3)]として次のように導いた。(図３－１参照)。砥粒が被削材である金属に高速で衝突すると，局部において高温，高圧が生じ，マグマプラズマ状態がきわめて短時間に微小部分に起こり，ミクロの

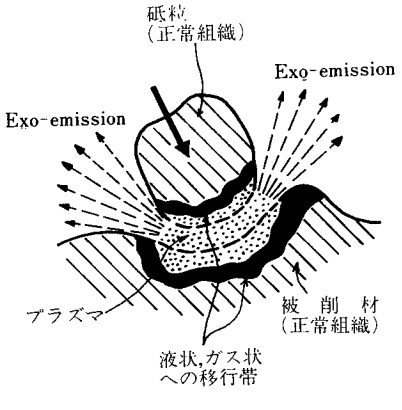


図３－１　Magma －Plasma Model[3)]

範囲で高い活性によって，液状からガス状への移行が考えられる。そして，その原子からは電子と光を放射する。溶融状態から急冷されるとそれら表面は多くの欠陥構造を内蔵することになると推察した。そして，この欠陥構造が固体のバンドギャップ内に，電子のトラップ準位を作り，エキソ電子放出源になると考えられる。

本研究は現実に種々の被削材に適用されている各種砥粒について購入した状態のもの（以後，未焼成砥粒と呼ぶ）と，ビトリファイド砥石の焼成と同一条件で焼成窯に入れて熱処理したもの（以後，焼成砥粒と呼ぶ）について，それぞれメノウ乳バチにて破砕して，そのときの電子放射量を測定し，新たな測定法としての可能性を吟味するものである。

1.1. 実　験　方　法

実験に使用した砥粒を表３－１に示す。２章に記したガイガーミュラー計数管により，各試験砥粒からのエキソ電子を測定する。一定量（0.5 g）の試験砥粒を20×20×5 ㎜のアルミニウム合金板（このアルミニウム合金板はあらかじめ 350 ℃で焼鈍し，この面からは，電子が放射しないことを確認した。）の上に並べて，ガイガーミュラー計数管内の純金板製試料台の上に置き，２章で述べた測定方法により，砥粒からの熱刺激エキソ電子放射（ＴＳＥＥ）を測定する。砥粒の破砕条件は一定量（0.5 g）をメノウ乳バチで，メノウつき棒の回転数を70rpm，押しつけ力10kgf で２分間押しつぶす。

1.2. 破　砕　率

上記の方法で破砕した砥粒の破砕前後の砥粒直径（長径と短径の平均）の差と破砕前の砥粒径との比を仮に破砕率とした。砥粒径の測定はそれぞれ50個を抽出して行った。その測定結果を図３－２に示す。図は粒度（#36）を一定で，各種砥粒の破砕性の比較を示す。Ｃ，ＧＣ砥粒が，破砕性が大きく，ＭＡ，Ａ，ＷＡ砥粒が，破砕性は小さく，ＲＡ砥粒以外はほぼ常識と同一傾向を示す。ＲＺ砥粒の粒度

表３－１　試験砥粒

α－アルミナ系	成分 (%)					比重	備考
	Al_2O_3	SiO_2	ZrO_2	Fe_2O_3	TiO_2		
WA－#36	99.74	0.03	－	0.03	－	3.97	
A－#36	96.81	0.75	－	0.09	2.35	3.97	
MA－#36	99.61	0.04	－	0.05	0.30	3.97	溶融単結晶型
RA－#36	99.14	0.18	－	0.33	0.28	3.98	WA砥粒の結晶中にCr_2O_3を置換固溶体として入れたもの
RZ－#16	73.80	0.40	25.20	0.40	0.20	4.32	Al_2O_3とZrO_2の共晶系

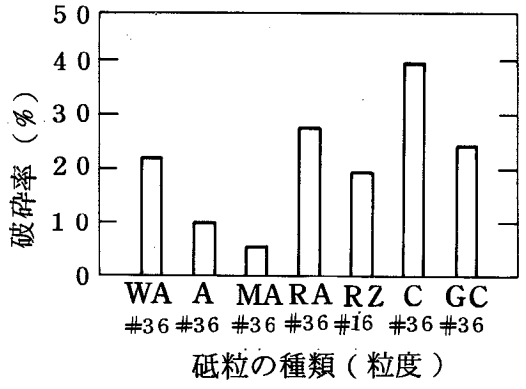
炭化珪素系	成分 (%)				比重	備考
	SiC	SiO_2	Fe	C		
C－#36	98.70	0.98	0.09	0.30	3.22	
GC－#36	99.00	0.30	0.04	0.30	3.22	

は＃16であるが，中間的な破砕性を示す。

1.3. 砥粒別電子放射量

1.3.1. 焼成後破砕した砥粒

まず，研削加工中の砥石作業面の砥粒の状況を想定して，静的ではあるが，ビトリファイド砥石の焼成と同一条件（ビトリファイド焼成炉使用，加熱温度1300℃炉冷）で熱処理した砥粒を破砕して，エキソ電子の測定を行った。焼成後破砕した砥粒を，砥粒別に25℃より250℃まで加熱した際の電子放射量の変化を測定した曲線（グロー曲線）を示したのが図３－３である。Al_2O_3系砥粒は低温（100℃前後）にピークがあり，その後，200℃前後より電子放射量は急激に増大する。Al_2O_3系の中では，WA砥粒が特に電子放射量は著しく，250℃では2,500 counts／minの値を示した。A砥粒は低温ではWA砥粒と同等のピークを示すが，250℃では400counts/min であって，MA砥粒が高温でWA砥粒に次ぐカウント数を



図中の粒度は破砕前を示す。

$$破砕率 = \frac{破砕前砥粒径 - 破砕後砥粒径}{破砕前砥粒径} \times 100$$

図３－２　砥粒別破砕率

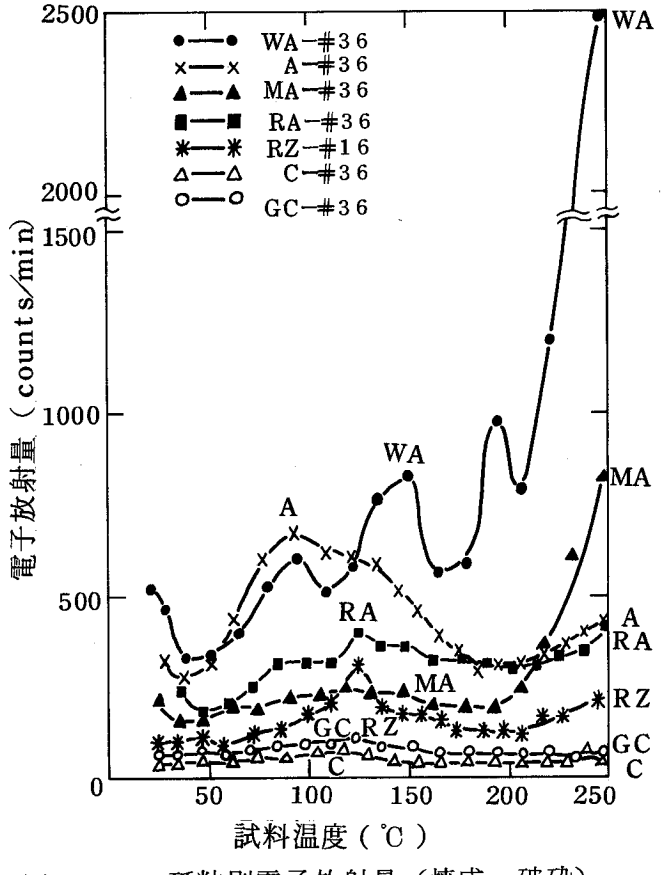


図３－３　砥粒別電子放射量（焼成，破砕）

示す。ＲＡ砥粒はA砥粒とほとんど同じ程度の放射量であるが，低温領域でややピークが低い。ＲＺ砥粒はＲＡ砥粒より一段と放射量が少ないが，同一傾向を示す。SiC系砥粒は最高でわずか１００counts/min 程度でほとんど有意な放射量は認められない。

以上の結果よりAl_2O_3系砥粒からは電子放射があり，SiC系砥粒からは ほとんど電子放射がないことがわかった。また図３－２に示した砥粒については，破砕率と電子放射との間には関係が認められない。

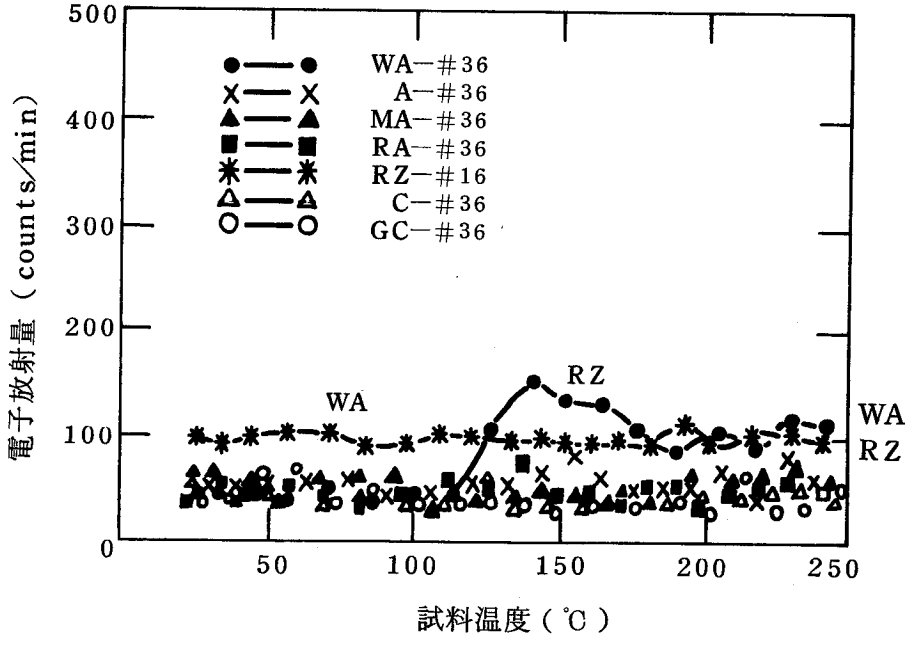


図３－４　砥粒別電子放射量（焼成，未破砕）

1. 3. 2.　焼成後の未破砕砥粒

焼成後の未破砕砥粒からの電子放射量の変化を示したものが図３－４である。WA砥粒が１４０℃付近で１５０counts/min 程度の放射量を示し，またＲＺ砥粒は ２５℃より １００counts/minを示して，その特異性を発揮するが，他の砥粒からはほとんど電子放射量は認められない。

1. 3. 3.　未焼成の破砕砥粒

ついで，ラッピング加工中の砥粒の状況を想定して，未焼成（購入した状態）の破砕砥粒について，エキソ電子を測定した結果を図３－５に示す。図３－３の結果と対比すると，同じ測定条件下で電子放射量は著しく多くなる。これは，未焼成砥粒はインゴットより粗砕，粉砕の工程を経て，砥粒の表層には大きな不規則の格子ひずみを生じていて，多くの格子欠陥が存在することが考えられる。これを更に改めて破砕することにより，それら欠陥が表面にあらわれ，エキソ電子源となって著しい電子放射が行なわれやすくなるものと考えられる。[4)5)]

図３－５において，特にＲＡ砥粒は低温領域でも１４０００counts/min,高温では１７０００counts/min の放射量を示し，ＷＡ砥粒に比して著しく多くの電子放射量を示す。またＲＺ砥粒も低温で２７００counts/minのピークを示す。ＲＡ砥粒は，

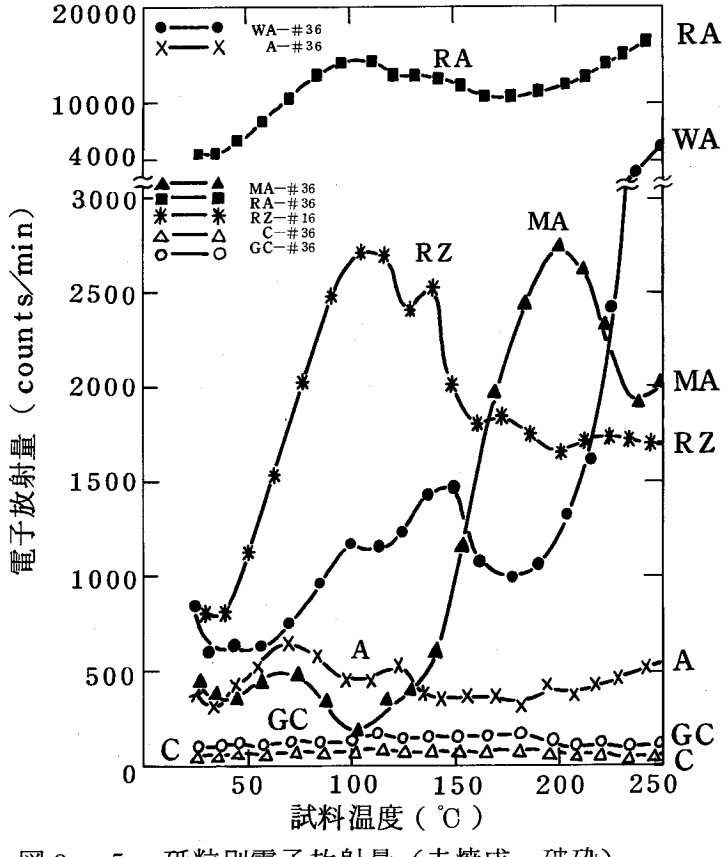


図３－５　砥粒別電子放射量（未焼成，破砕）

Cr_2O_3 を置換固溶体としてAl_2O_3の結晶中に入れたものである。またＲＺ砥粒はAl_2O_3とZrO_2の共晶体である。これら他分子がイオン結晶におけるエキソ電子源となる欠陥を作っていることが考えられる。

ＭＡ砥粒は粉砕工程がないためか，低温では焼成後のものと同程度で比較的放射量は少なく，高温においてのみ２８００counts/minのピークを示す。Ａ砥粒は意外に全温度範囲で焼成砥粒と同程度の放射量である。Ｃ，ＧＣ砥粒は，未焼成でもほとんど放射量は認められない。

1. 3. 4.　未焼成の未破砕砥粒

未焼成の未破砕砥粒からの電子放射量を図３－６に示す。図よりすべての砥粒と

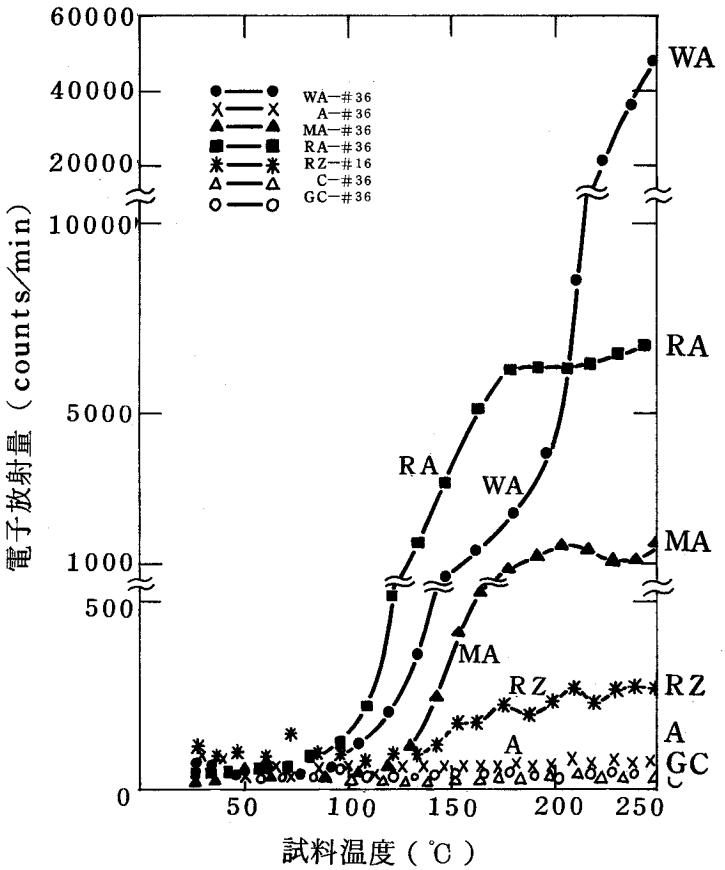


図３－６　砥粒別電子放射量（未焼成，未破砕）

も100℃まではほとんど放射が認められず，100℃以上において，電子放射量は増加し，WA，RA，MA，RZ，A，SiC系砥粒の順に放射量が多い。それらカウント数はWA，RA，MA砥粒などでは焼成後破砕した砥粒よりはるかに大きい数値を示す。これは砥粒製造時の粉砕工程中において，砥粒の表層内に多くの格子欠陥が生成し，それがエキソ電子源となり，エキソ電子が多く測定されたものと考えられる。

1.4. 同一砥粒での粒度別電子放射量

焼成後破砕したWA砥粒を粒度別にグロー曲線を求めると図3－7のようになる。

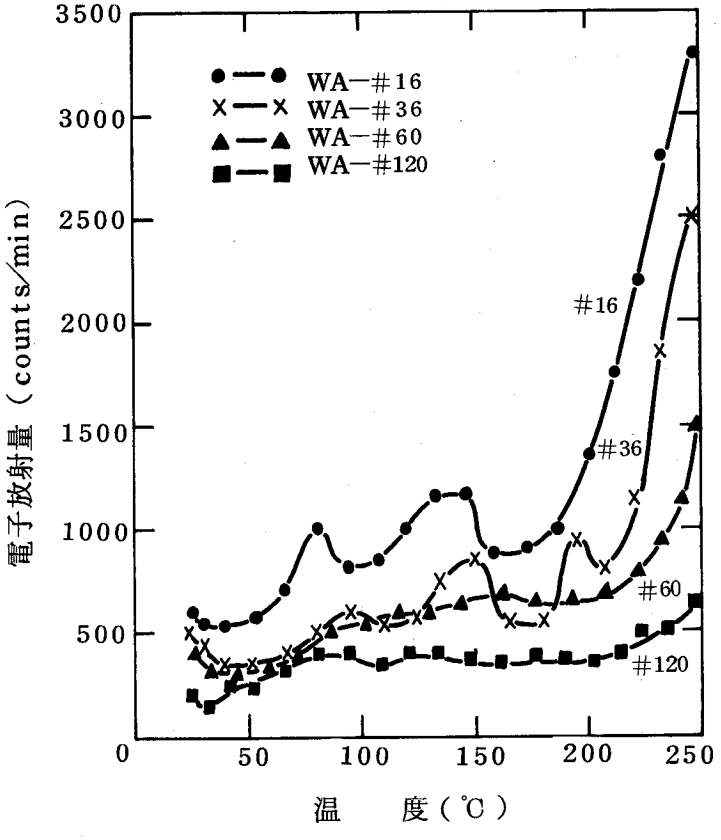


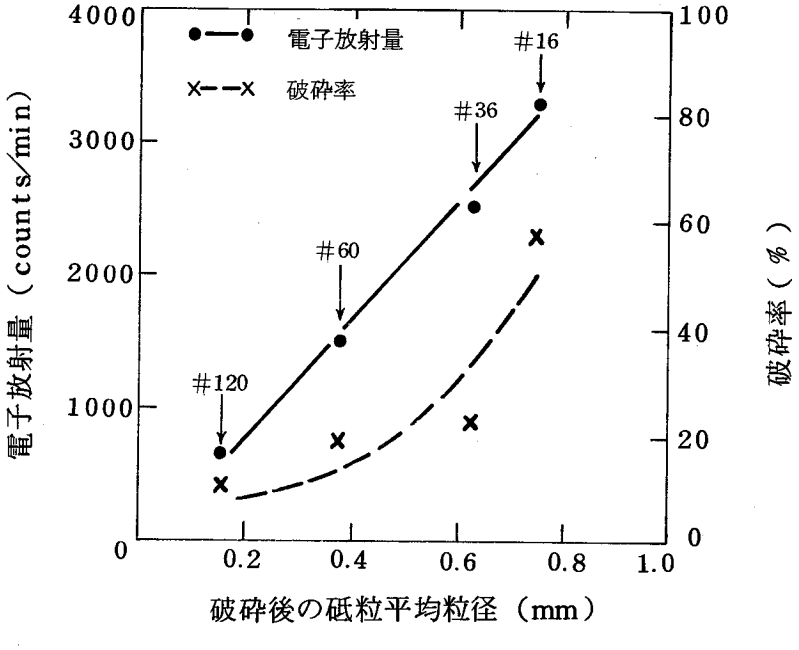
図3－7　粒度別電子放射量（焼成，破砕）

粒径が大きいほど，一般に破砕されやすく，大破砕をより多く起こし，露出新生面も広くなる。逆に粒径の小さなものほど，破砕されにくく，新生面の露出度合が小さいことを図３－７の電子放射測定結果は示していると考えられる。

1.5. 同一砥粒での電子放射量と破砕率との関係

図３－７における２５０℃付近の最大電子放射量と粒径，破砕率を関係付けると図３－８のようになる。粒径と最大電子放射量とは比例的関係を示し，破砕率と最大放射量との関係もほぼ同一傾向を示す。

1.6. 電子放射の減衰現象



ＷＡ砥粒（焼成，破砕）の２５０℃における放射量
図中の粒度は破砕前のものを示す

$$破砕率=\frac{破砕前砥粒径-破砕後砥粒径}{破砕前砥粒径}\times 100$$

図３－８　電子放射量と破砕率

エキソ電子放射の性質として時間とともに放射強度が減衰する多くの実験的な法則[6)]がある。すなわち，$N = a \times T^{n}$（Nは時間あたりの放射量，Tは時間，a，nは定数），両対数スケールで直線的に負の傾きを示す。

砥粒の破砕時のエキソ電子放射もこの傾向を示すものかを吟味した。いま，RA－#36の未焼成の破砕（破砕時間；3分間）砥粒について，その減衰傾向の一例を図3－9に示す。

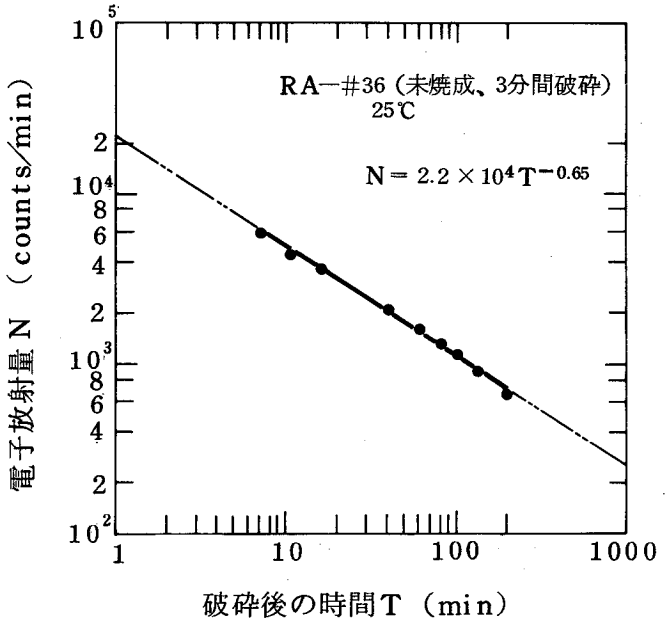


図3－9　電子放射の減衰

測定値はほとんど直線上にのり，

$$N = 2.2 \times 10^{4} T^{-0.65}$$

（N；counts／min，T；min）

の関係を示し，砥粒からのエキソ電子放射も機械加工された金属面からの電子放射の減衰現象と同一の傾向を示す。

2. ＣＢＮ砥粒およびダイヤモンド砥粒からの電子放射[7)]

最近，注目を集め，その使用度の高まっている窒化ほう素砥粒[8)]（本研究においては立方晶窒化ほう素砥粒について行った。以後，ＣＢＮ砥粒と記す。）と，これと比較するため，ダイヤモンド砥粒からのエキソ電子放射量を測定した。

表３－２に示すＣＢＮ砥粒とダイヤモンド砥粒からの電子放射量を測定した。実験方法は第一節と同一である。図３－１０にＣＢＮ砥粒からの電子放射量を測定した結果を示す。非コーティングで未破砕のものは１３０℃～１４０℃の範囲で放射がはじまり，２５０℃では#８０／１００のものからは約１２０００counts/min，#１２０／１４０のものからは約３００００counts/minと非常に多くの電子放射が認められる。これに反し，ニッケルコーティングしたもので未破砕のものからは２５０℃まで加熱しても，ほとんど電子放射は認められない。しかし，これを破砕すると，部分的にＣＢＮ面が現れるので，非コーティングのものを破砕した時の１／２～２／３程度の放射量が認められる。

図３－１１にダイヤモンド砥粒からの電子放射量を測定した結果を示す。天然の

表３－２　試験砥粒

ＣＢＮ砥粒	ダイヤモンド砥粒
非コーティング# ８０～#１２０	天　然# ８０～#１００
#１２０～#１４０	#１２０～#１４０
Ni コーティング# ８０～#１００	人　造# ８０～#１００
#１２０～#１４０	#１２０～#１４０

ものからは未破砕，破砕，どちらの場合にも２５０℃まで，ほとんど電子放射は認められない。人造のものからは，わずかではあるが，１５０℃前後で放射が始まる。それを破砕するとわずかではあるが，加熱しなくとも電子放射が認められ，未破砕の時と比べて５～６倍の放射量が認められる。しかし，量的にはＣＢＮ砥粒からの電子放射量と比較するとはるかに少ない。先のＳｉＣ砥粒，ダイヤモンド砥粒は共有結合の結晶である。一方エキソ電子を多く放射する固体は，アルカリハライドや，

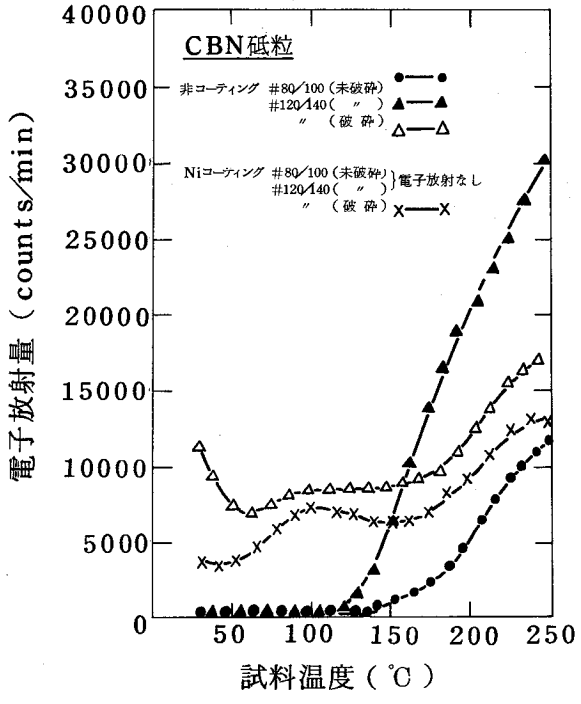


図３－１０　ＣＢＮ砥粒からの電子放射

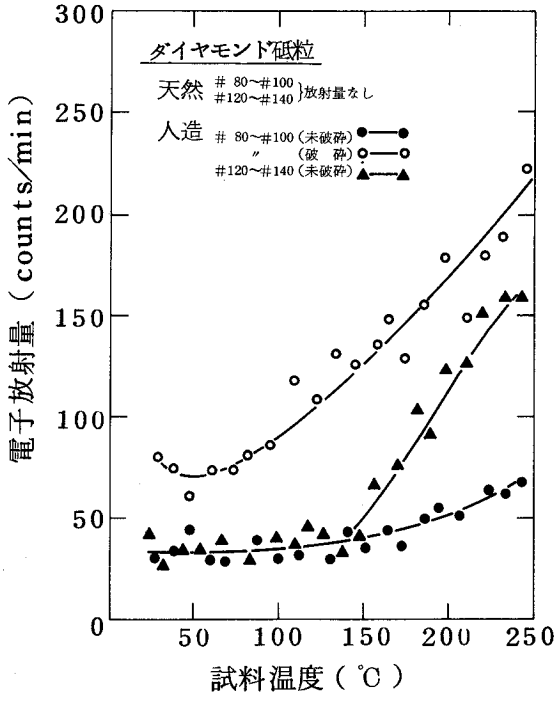


図３－１１　ダイヤモンド砥粒からの電子放射

Al_2O_3 のようなイオン結合をしている結晶であるという報告がある。[9] 共有結合をしているSiCやダイヤモンドには，エキソ電子源となるものが形成されないことが考えられる。

3. 熱履歴によるエキソ電子放射の変動[5]

研削砥石の焼成温度は使用する結合剤の種類によって，ほぼ決まっている。[10] レジノイド結合剤の場合は200℃前後であり，シリケート結合剤の場合は600～1000℃である。そして，ビトリファイド結合剤の場合は1300℃前後である。これら砥石中の砥粒の熱履歴を想定し，200℃～1300℃ の温度範囲内で各種砥粒を熱処理し，熱履歴による砥粒からのエキソ電子放射量の差異を吟味した。

実験に使用した砥粒を表3－3に示す。試験砥粒はあらかじめ図3－12 に示す熱処理カーブによって，電気炉で同時に熱処理（昇温速度は200℃/h）し，各温度

表3－3　試験砥粒

砥　　粒	WA－#36 A－#36 RA－#36 C－#36
熱処理温度	200℃，600℃，800℃ 1000℃，1300℃

（200℃，600℃，800℃，1000℃，1300℃）で30min保持（吉川の報告[11]によれば，砥粒の加熱による強度変化は30minの加熱によってほぼ一定値に安定することが確認されている。）し，室温まで空冷して試料とした。実験方法は第1節と同一である。

3.1. 未破砕砥粒の熱処理温度と電子放射量との関係

WA砥粒とRA砥粒について，熱処理温度別のグロー曲線を求めると図3－13

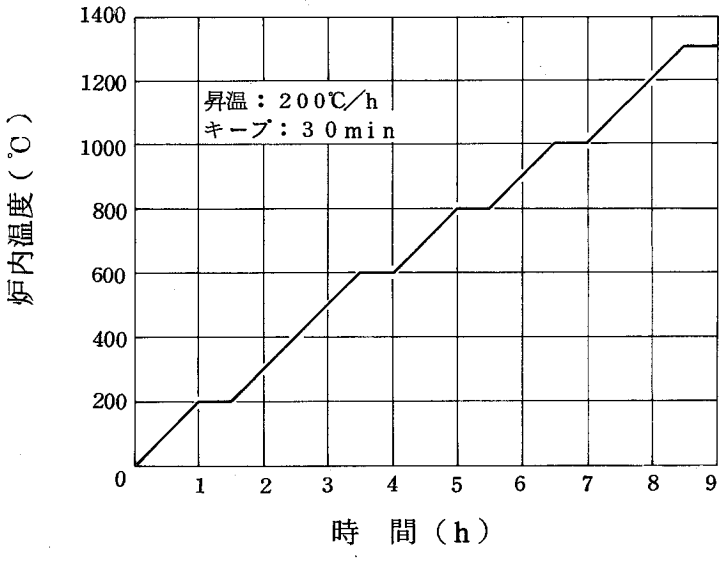


図３－１２　砥粒熱処理曲線

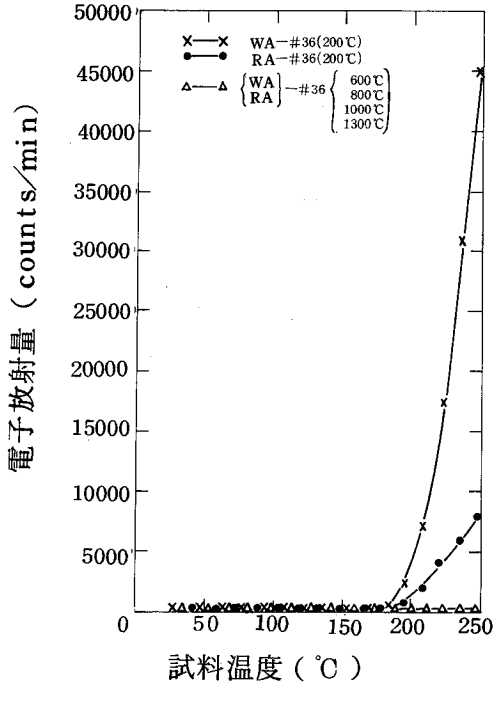


図３－１３　熱処理温度と電子放射量（未破砕）

のようになる。WA，RA砥粒ともに熱処理温度が200℃の場合は，試料温度が200℃以上で急激に電子放射量は増加し，250℃でWA砥粒からは約42000 counts/min, RA砥粒からは約8000counts/minである。しかし，熱処理温度が600℃以上のものからは，WA，RA砥粒共に電子放射は認められない。

3.2. 破砕砥粒の熱処理温度と電子放射量との関係

破砕したWA，RA砥粒からの電子放射のグロー曲線を熱処理温度別に示したものが図3－14，図3－15である。図3－14について吟味すると，試料温度が

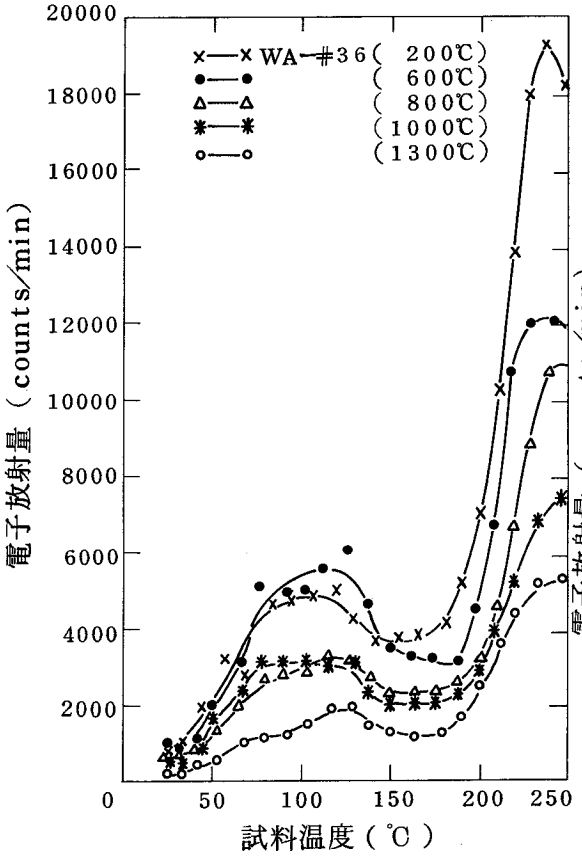


図3－14　熱処理温度と電子放射量（破砕）

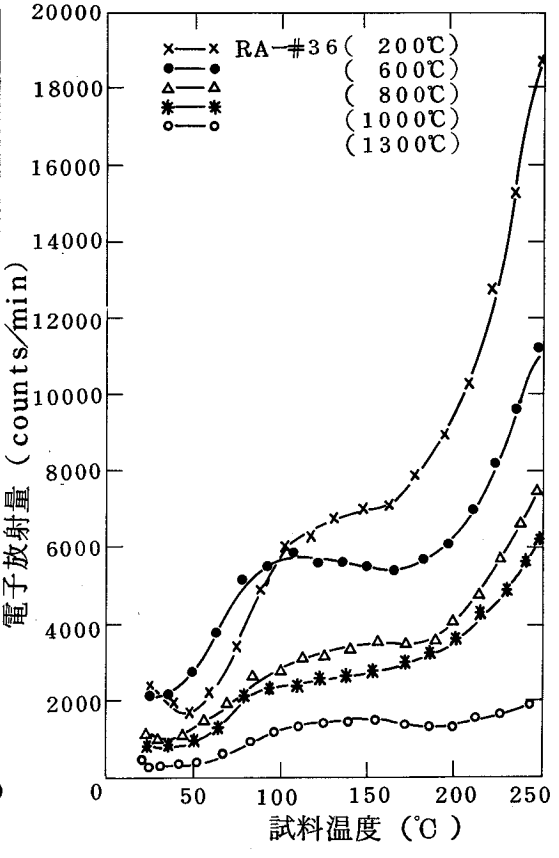


図3－15　熱処理温度と電子放射量（破砕）

100℃前後においてどの熱処理砥粒においても電子放射量のピークがあり，200℃あたりから急激に電子放射量が増加する。その増加率は熱処理温度の低いものほど著しい。特に熱処理温度が200℃の砥粒の場合には，約19000counts/minの計数値を示す。これに比べて，熱処理温度が1300℃のものからは，1/4の5000 counts/min 程度しか示さない。この傾向は図3－15のRA砥粒についてもほぼ同様である。RA砥粒の場合，熱処理温度が200℃の砥粒に比べて，1300℃のものからは1/10程度の電子放射量しか認められない。図3－14，図3－15のグロー曲線を更に吟味すると，熱処理温度が600℃以下のものと600℃～1000℃と1000℃以上で，三つの段階に分類できる。600℃以下は，試料温度100℃でのエキソ電子のグロー曲線の第1ピークがはっきり現れ，200℃以上でのグロー曲線の第2ピークも著しい。600℃～1000℃のものはグロー曲線の第1ピークがわずか認められ，グロー曲線の第2ピークはやや増加する。1000℃以上のものはグロ曲線の第1ピークはほとんど認められず，グロー曲線の第2ピークはやや増加傾向を示す。図3－13，図3－14，図3－15の結果は砥石として焼成する前の砥粒がインゴットより，粗砕，粉砕の工程を経て，表層に大きな不規則の格子ひずみを生じ，これが200℃前後の低温の熱処理ではそのひずみを除去し，結晶を充分安定な状態にすることが不可能なことを示している。ただ，図3－13に示すように，未破砕の場合では，熱処理温度が600℃～1300℃の範囲のものからは，電子放射の現象を示さないが，熱処理温度の低いものほど若干のひずみが残留し，結晶の安定化が不充分であるはずである。そこに更に破砕工程が加味されると，図3－14，図3－15，に示すように，熱処理温度の高低と電子放射の最大計数値との間に関連が生じてくるものと推察される。

図3－16にA砥粒に関してのグロー曲線を示す。（図には熱処理温度200℃のものと1300℃のものを示すが，600℃，800℃，1000℃のものもほとんど同様であった。）A砥粒は同じAl_2O_3系砥粒でありながら，WA砥粒，RA砥粒とは異った傾向のグロー曲線を示す。特に，未破砕の場合，破砕した場合，ともに熱処理

温度による電子放射量に大きな差異は認められない。電子放射量も，WA砥粒，RA砥粒に比べ，はるかに少なく，破砕した場合に電子放射量の最大値が100℃前後の低温側にある。　川西の報告[12]によると，機構ははっきりしていないが，イオン結晶におけるエキソ電子放射のグロー曲線の形状は不純物の種類，含有量によって変化することが明らかとなっている。A砥粒は微量ながらTiO_2，SiO_2などの不純

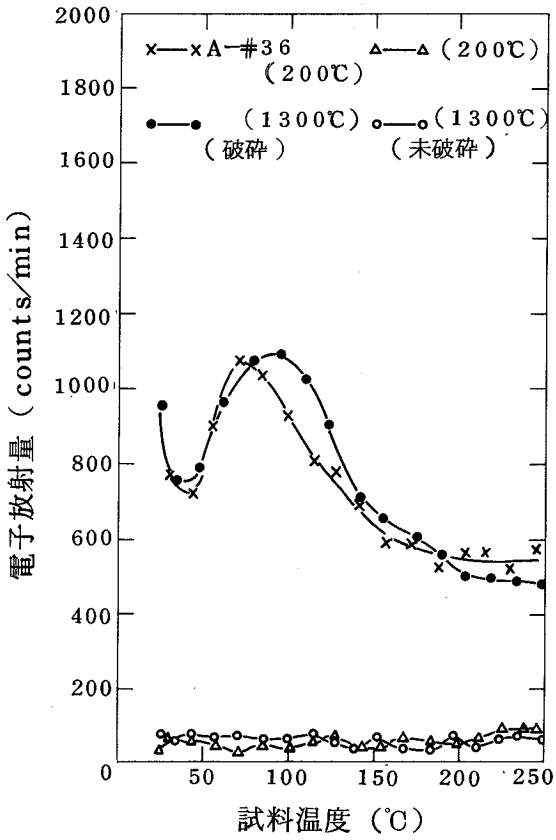


図3－16　熱処理温度と電子放射量（A砥粒）

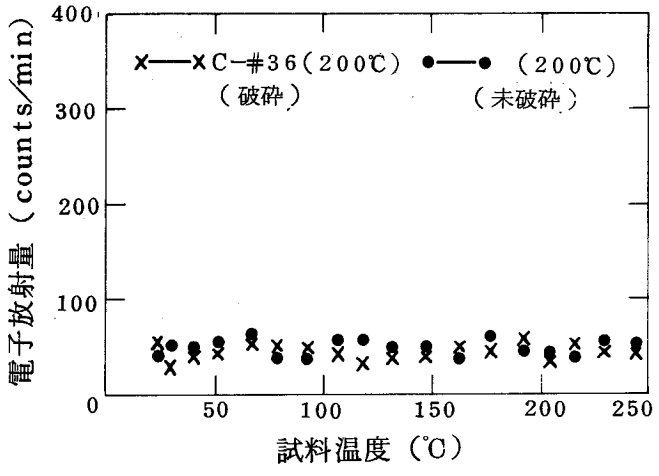


図３－１７　熱処理温度と電子放射量（C砥粒）

物を含有していることが原因となってWA砥粒とは異質な性格の電子放射のグロー曲線を示すことがうかがえる。

なお，C砥粒からは未破砕，破砕，熱処理温度の高低，いずれの場合にも図３－１７に示すようにほとんど電子放射は認められない。（図には代表例として熱処理温度２００℃のものを示す。）

結　論

以上の得られた結果を要約すれば，

(1) Al_2O_3系砥粒からのエキソ電子放射量はきわめて多く，特にWA砥粒からは著しい。SiC系砥粒からはほとんど測定されなかった。A砥粒，単結晶砥粒，ジルコニア系砥粒からは，中間的な電子放射量が測定された。

(2) 熱処理工程を経た砥粒からの電子放射量は著しく減少するが，それを新たに破砕すると再び電子放射量は増加する。

(3) 同一破砕条件下では破砕前の粒度番号が小さい（破砕前の粒径が大きい）ものほど，ほぼ比例的に電子放射量が増加する。

(4) 破砕砥粒からの電子放射は金属面からの電子放射の減衰と同様の傾向を示す。

(5) ダイヤモンド砥粒は250℃の熱刺激で人造のものからはわずかの電子放射が認められるが，天然のものからはほとんど認められない。しかし，CBN砥粒からはダイヤモンド砥粒よりはもちろん，WA砥粒よりもはるかに著しい電子放射が認められる。

(6) Al_2O_3 系砥粒はその熱処理工程の温度の低いほど，特に600℃を限界として，それ以下において電子放射量は多くなる。SiC系砥粒からは，熱処理の有無にかかわらず，ほとんど電子放射は認められない。

以上の結果より，砥粒からのエキソ電子放射測定は，研削加工の工具となる砥粒を評価する新たな手段となることが十分考えられる。

文　献（第３章）

1）正野崎，石渡：精密機械，39, 11 (1973) 1146.

2）J.Kramer and W.Engelland:Werkstattstechnik，52, 4 (1962) 173（吉川訳：機械工作，11 (1962) 57）.

3）P.A.Thiessen:Z.Chem.，5 (1965) 162.

4）中沢：結晶格子欠陥，朝倉書店，263.

5）川西：真空，24, 9 (1981) 520.

6）L.Grunberg und K.H.R.Wright:Acta Phys.Austriaca,10 (1957) 375.

7）正野崎，石渡：精密機械，41, 9 (1975) 925.

8）超砥粒砥石―ダイヤモンドとＣＢＮ，機械と工具，23, 10 (1979).

9）桐畑：エキソ電子とその応用第２回研究連絡会議資料，(1979, 2) 14.

10）研削砥石，日本陶器㈱，(1976) 14.

11）吉川：精密機械，29, 3 (1963) 225.

12）川西：応用物理，49, 2 (1979) 94.

第4章　エキソ電子放射と加工現象との関連 [1)～4)]

ま　え　が　き

前章の実験結果より，砥粒からのエキソ電子放射現象と加工現象との関連について述べる。

1. 砥粒からのエキソ電子放射と研削加工機構

前章の実験では測定装置の関係上，試料の加熱を250℃を限度としているが，意外に低温範囲でもかなりの電子放射量が計測された。しかし，実際の研削時における研削局部は2～4倍ほどの温度上昇を示し，砥粒切れ刃の熱刺激の度合も数倍になるはずである。チタンを乾式によって研削した実験結果によると，研削点局部の温度は700℃～900℃に達している。[5)] また，臼井ら [6)] の研究報告によると，Al_2O_3 の砥石を使用して研削加工中のエキソ電子放射を測定した結果，約10^5 Counts/min の測定値を得ている。したがって，研削加工中，破砕によって自生発刃した砥粒のへき開面から砥粒の種類によっては，非常に多くの電子放射が行なわれることも想像される。その放射されたエキソ電子が研削加工機構にどのような役割をするかについて考察する。

まず，前章の砥粒からのエキソ電子測定結果より，大きな傾向として，一般砥粒としては，Al_2O_3系砥粒からはエキソ電子放射が著しいが，SiC系砥粒からはほとんど電子放射が認められないことである。従来の研削加工でアルミニウム合金などの非鉄金属にはSiC系砥粒の砥石を用いることが常識とされていて，目づまりなども比較的少なく，良好な研削が行なわれる。しかし，アルミニウム合金などをAl_2O_3系砥粒で研削すれば著しい目づまり，特に砥粒切れ刃と切りくずとの凝着による付着型目づまりを生じてしまい，好ましい加工ができない。[7)] 今日

まで，この現象に対しては，砥粒と被削材との親和性の観点より理解されている。しかし，研削時に加工局部において，Al_2O_3系砥粒（切れ刃）から放射するエキソ電子（3章の図3－1に示したP. A. Thissen[8]のモデル）が，砥粒切れ刃と切りくずとの凝着にかかわりをもつ一因子となることが考えられる。この凝着過程は，エキソ電子の働きの立場からは下記のように想像される[9)10)]。すなわち，P. A. Thissen のモデル（図3－1）のように，砥粒切れ刃が衝撃的に被削材に激突して，加工局部が高温化し，被削材である金属を塑性流動させて，化学的結合力の作用する範囲内まで両固体原子が接近する。加工局部で発生するマイクロプラズマからの紫外線や電子が，砥粒（Al_2O_3）の表面励起を行う。その結果，砥粒切れ刃面が活性化し，金属との凝着が促進される。

一方，鋼材の研削には砥粒のじん性や耐摩耗性にも関連して，SiC系よりAl_2O_3系砥粒が一般に適用されているが，この場合も砥粒からのエキソ電子放射が一因としてかかわりをもつことが考えられる。硬度，抗張力の高い鋼材の微小切削においては，切れ刃が食込んで切削するまでにrubbing，ploughing作用[11)12)]があるが，このrubbing，ploughingをできるだけ少なくすることが良好な研削を行なうことにつながる。その際，砥粒切れ刃が金属仕上面に接触してから早期に切れ刃の食込みのきっかけのもとになるインターロッキングが生ずることが，微小切削機構上重要なことである。[11)12)] このインターロッキングが生ずるために，Al_2O_3系砥粒から放射するエキソ電子が役割をはたしていると考えられる。その過程については，前記したAl_2O_3系砥粒とアルミニウム金属との凝着過程と同様に想像している。しかし，竹山の報告[9)]にあるようにアルミニウムのような延性に富む金属の場合には，はげしく凝着が起こって付着型目づまりを生ずることになるが，アルミニウムに比べれば，機械的強度が高く，延性の小さい鋼材，特に工具鋼などにおいては、はげしい凝着までには至らず，切れ刃の金属への食込みのきっかけとなる食付きを生ずることになる。よって，鋼材研削においては，エキソ電子を放射しないSiC系砥粒よりも，エキソ電子を放射するAl_2O_3系砥粒

が適することになる。

また，鋼材でも，特に難研削材であるSKH材などに対しては，CBN砥粒による砥石が従来のWA砥石などに比して，非常に優れた研削性能を示している。例えば，SKH－4の研削例でも研削比において，WA 砥石のそれと比較して，100～800倍の値を示す実験結果もあるし，その切りくず長さがWA砥石などによるものより，はるかに長いことが報告されている[13]。このことは，CBN砥粒がその硬さ，破砕面の鋭さなど，WA砥粒よりも優れた点があるが，CBN砥粒からのエキソ電子放射と重要な関連作用があるものと考えられる。3章の図3－10に示したように，CBN砥粒からの電子放射量は3章の図3－3に示したWA砥粒からのものに比してはるかに多く，破砕面からは常温においても10000 Counts/min以上の値を計測した。このことは研削局部において，CBN砥粒から，かなりの電子放射が行われて，上記のように砥粒切れ刃と被削材である金属との食付きが活発に行われやすく，砥粒切れ刃が金属仕上面に接触してから，早期に切れ刃の食込みが行われて，rubbing，ploughingの現象を少なくして，薄く長い切りくずを造る良好な研削を行う原因になると思われる。

2. 砥粒からのエキソ電子放射と研削油剤作用

加工局部での砥粒からの電子放射が研削油剤の作用に及ぼす影響について考察する。

CBN砥石を使用するときの研削油剤については，それに含まれる極圧添加剤，油性剤の質と量が研削性能に大きく影響し，特に硫黄系，塩素系の極圧剤が極めて効果的であることが，他の砥粒による研削の場合よりきわだっているといわれている[14]。このことは，CBN砥粒からの著しい放射電子のエネルギが加工熱のエネルギに加味されて，添加剤化合物の解離エネルギとして作用し，その反応性をより効果的にすることも一原因と考えられる[15]。

上記の推察に関連する研究が最近報告されている。臼井ら[6]は金属切削，研削中

のエキソ電子放射を計測する装置を試作し，特にCCl_4 をしみださせながらの切削中の電子放射量を計測する実験を行い，エキソ電子がC－Cl 結合を破壊し，塩素のラジカルを発生させること，この塩素は被削材と反応し，その表面に塩化物を作ること，そして，このときの放射電子のエネルギは3eVであることを推察している。また，玉村ら[16]はCCl_4とC_6H_6 で各混合比の液を切削油剤とし，アルミニウムの低速切削を行い，次に示すような初期反応がおこることを推察し，

$$CCl_4 + C_6H_6 \xrightarrow{AlCl_3} (C_6H_5)_3C^{+-}AlCl_4 + 3HCl$$

この際アルミニウムとCCl_4が反応して，触媒作用をする無水の塩化アルミニウムができるが，安定な形のCCl_4から塩素を解離するエネルギ（3～4 eV ） が切削熱によるものであると説明できず，エキソ電子の中にかなり高いエネルギのものが分布しているのではないかと推論している。

3. 砥粒からのエキソ電子放射と砥石結合度

ついで，砥石結合度と砥粒からのエキソ電子放射との関連について考察する。

表4－1に示す砥粒を3章の図3－12に示した熱処理カーブによってあらかじめ熱処理を行い，それらの砥粒を使用して，レジノイド砥石（WA，RA，GC－

表4－1　　試験砥粒

砥　　粒	WA － #60 RA － #60 GC － #60
熱処理温度	200℃，400℃，600℃ 800℃，1000℃，1300℃

GC砥粒は200℃，1300℃ のみ

60－H－8－B ）を製作（レジノイド砥石焼成炉使用，加熱温度230°C，炉冷）した。そして，砥粒の熱処理温度の高低が砥石の結合度，つまり結合

剤と砥粒との親和性にどのように影響するかを調べた。なお，結合度の測定には大越式結合度試験機を使用した。測定結果を図４－１に示す。２本の一点鎖線の範囲がJISに規定されているビットのくい込み深さである。WA砥石，RA砥石の場合には，砥粒の熱処理温度が高いほど，ビットのくい込み深さは浅くなっていて，600℃以上ではほぼ一定化する。それに比べて，GC砥石の場合には熱処理温度の高低によらず，ビットのくい込み深さは一定である。一方，３章の図３－13に示したように熱処理温度が２００℃の砥粒からの電子放射量は，WA砥粒、RA砥粒ともに，試料温度２００℃より電子放射量は著しくなっており，熱処理温度が６００℃以上の砥粒からは，電子放射が認められない。GC砥粒からは熱処理温度の高低によらず，ほとんど電子放射は認められない。以上の実験結果より，砥粒か

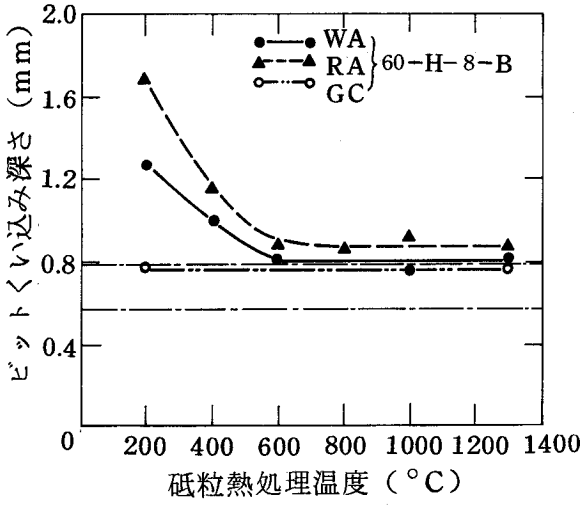


図４－１　砥粒の熱処理温度と砥石結合度の関係

らの電子放射とビットのくい込み深さについて検討すると，電子放射の多いものほど，ビットのくい込みが大きいことがうかがえ，電子放射は砥粒と結合剤の親和性あるいは結合剤の重合に何らかの作用をなすことがうかがえる。

Al_2O_3系砥粒をレジノイドボンド砥石に焼成する場合に，未処理砥粒を用いると，JIS に規定されている結合度より低い値を示すという事実は砥石メーカーの現場技術者において周知のことであるが，その理由については不明である。しかし，この原因としてまず考えられることは，砥粒をあらかじめ熱処理すること（砥石メー

カーでは仮焼と呼んでいる）によって，砥粒の圧壊強度が増すことが考えられる。吉川はAl_2O_3系砥粒の加熱による強度変化を詳細に実験し，報告している[17]。その実験結果によれば，砥粒を熱処理することにより，砥粒の圧壊荷重は増大する。しかし，加熱温度が800℃ まではあまり強度変化がなく，1100℃ から1300℃になると強度変化は著しい。もし，レジノイド砥石として焼成する前に行う仮焼による砥粒の圧壊強さの変化が，砥石結合度に影響するならば，大越式結合度試験機でのビットのくい込み深さは砥粒の仮焼温度600℃以下よりも600℃ 以上において，大きく変化しなければならない。しかし，図4－1の実験結果は逆であり，砥粒の熱処理による強度変化だけでは説明づけられない。そこで，Al_2O_3系砥粒から放射されるエキソ電子が結合度に影響することが考えられる。接着理論[18]によれば，接着力の主体は分子間の引きあう力，すなわち静電力とされており，200℃前後の焼成温度でレジノイド砥石を焼成する時，Al_2O_3系砥粒から放射するエキソ電子が電気的絶縁物であるレジノイド結合剤とAl_2O_3 系砥粒の界面に帯電し，接着力の主体である分子間力を弱める可能性が推察される。

4. 砥粒からのエキソ電子放射と遊離砥粒加工

最後に，遊離砥粒による代表的加工法であるラッピング加工，Extrude－hone加工※[19][20]とエキソ電子放射との関連について考察する。

ラッピング加工においては，一般に湿式ラッピング機構として，ラップ剤中の砥粒の挙動としては破砕を生じながらの転動，ひっかき，被削材への埋め込み，浮遊などの色々の運動をするが，砥粒がラップと被削材との間で積極的に切削作用をするのは転動とひっかきであり，その削除量は前者が多いが，仕上面あらさへの影響は，転動は梨地面的な仕上面となって，ひっかきより劣るとされている。この際，砥粒の材質，粒度，形状が異なれば，当然それらの効果が加工結果にあらわれるが，エキソ電子放射の立場からは次のように推論される。

ラップ剤として使用される砥粒は未焼成のものが主であって，加工局部において

研削砥石の焼成砥粒以上の多くのエキソ電子の放射が予想され，それが極微小切削作用に関連をもつことが推察される。いま，ラッピング加工局部の砥粒から放射するエキソ電子が，1節に記述した機構によって，食付きに役立つとすれば，砥粒の転動を防止して，ひっかき作用をし易くすることが考えられる。表4－2に示すラップ条件による実験例を図4－2，図4－3に示すが，電子放射の著しいWA砥粒を用いた場合には，電子放射のほとんど無いGC砥粒に比較し，ひっかき作用をする砥粒がより多くなったために削除量が減少して，仕上面あらさがよい結果になることも推察される。

表4－2　　ラッピング加工条件

使用機械	精密平面ラップ盤（浜井4BT）
被削材	S45C（焼鈍）⌀10㎜×4.7㎜
砥粒	WA－#400，GC－#400
荷重（圧力）	0.5，1.0，1.5，2.0，2.5，kgf／㎠
ラップ剤比率	軽油（4）：砥粒（1）
ラップ剤注入量	10秒毎に2C.C.
ラップ速度	23.8㎝／sec
加工時間	20min

表4－3に示すExtrude－hone加工条件による実験例[20]を図4－4に示す。WAメディアの場合には，加工初期において削除量が多く，加工時間の経過とともに削除量が減少する。これに対して，Cメディアの場合には，加工初期においてWAメディアの場合よりも削除量は少ないが，加工時間の経過に対してほとんど削除量の変化はない。この削除能率の差異は，砥粒切れ刃の摩滅が考えられるが，図4－6に示すように，加工前と5時間加工後の砥粒にほとんど差異は認められず，いわゆる古典的機構からは説明できない。そこで，砥粒から放射するエキソ電子の影響として考えてみる。Extrude－hone加工においても加工初期には，加工熱によって

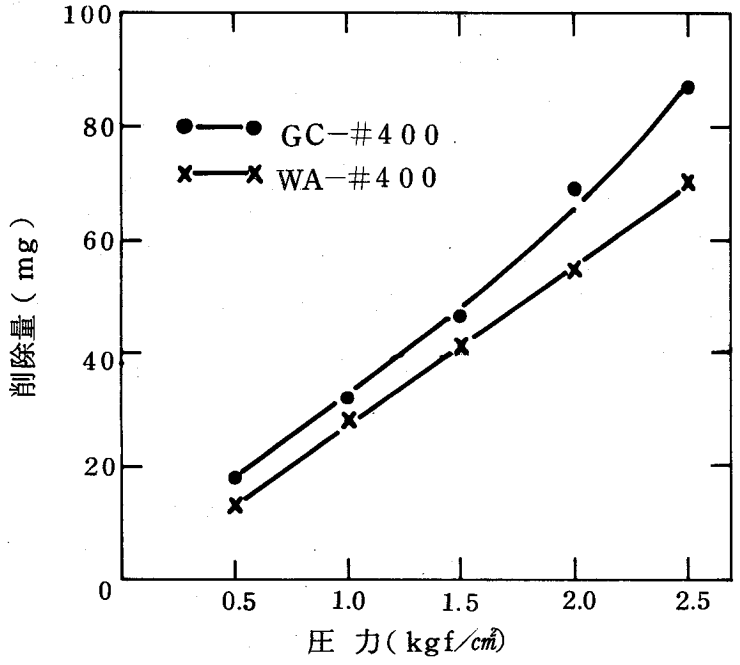


図４－２　砥粒の種類と削除量

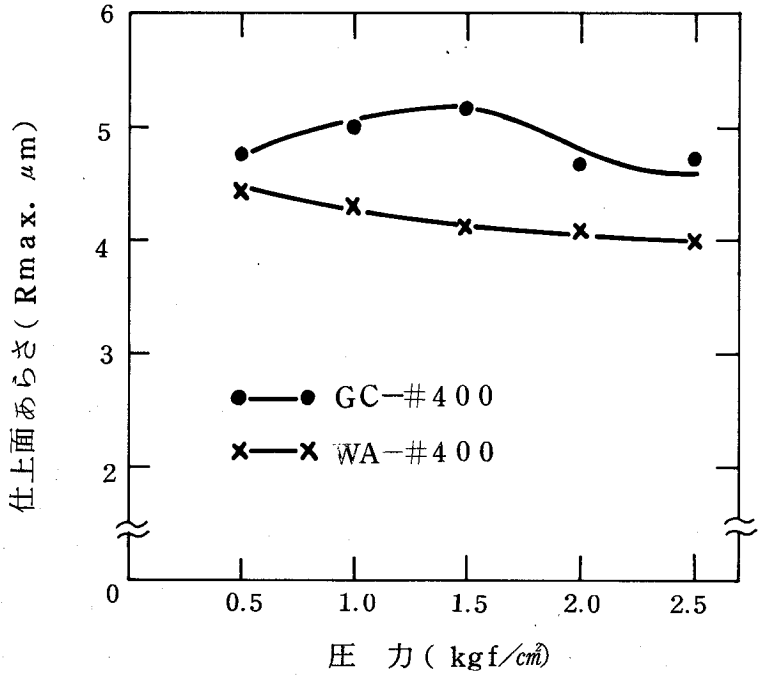


図４－３　砥粒の種類と仕上面あらさ

表４－３　　Extrude Hone　加工条件

使用機械	Extrude－Hone Machine （Mark Ⅶ－120）（東洋エックストウルードホーン）
使用メディア	C－#60，WA－#60
被削材	S45C（生材）直径φ22㎜×5㎜，穴径φ6㎜
加工圧力	100㎏f／㎠
加工時間	3分間

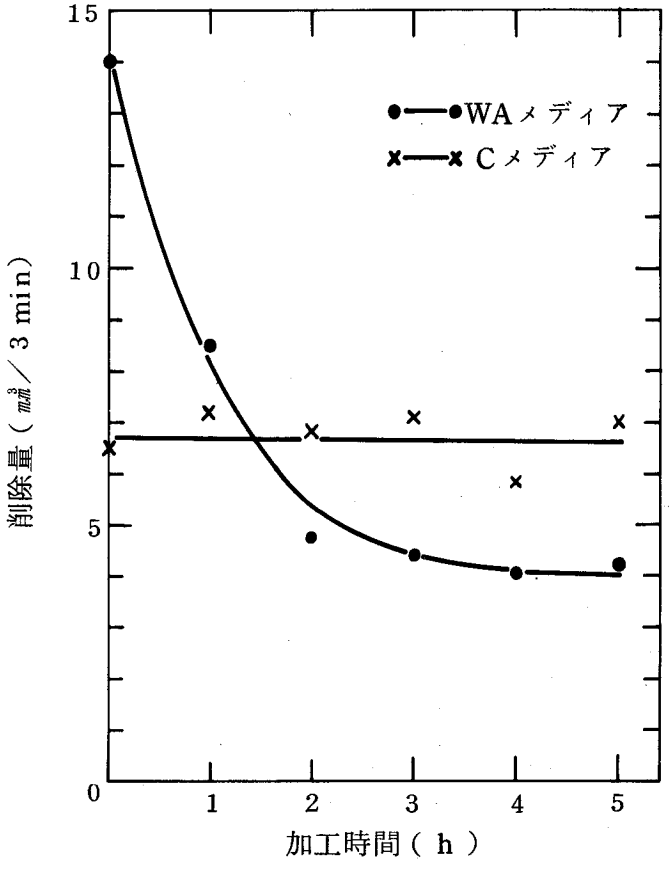


図４－４　砥粒別時間経過の研削効果

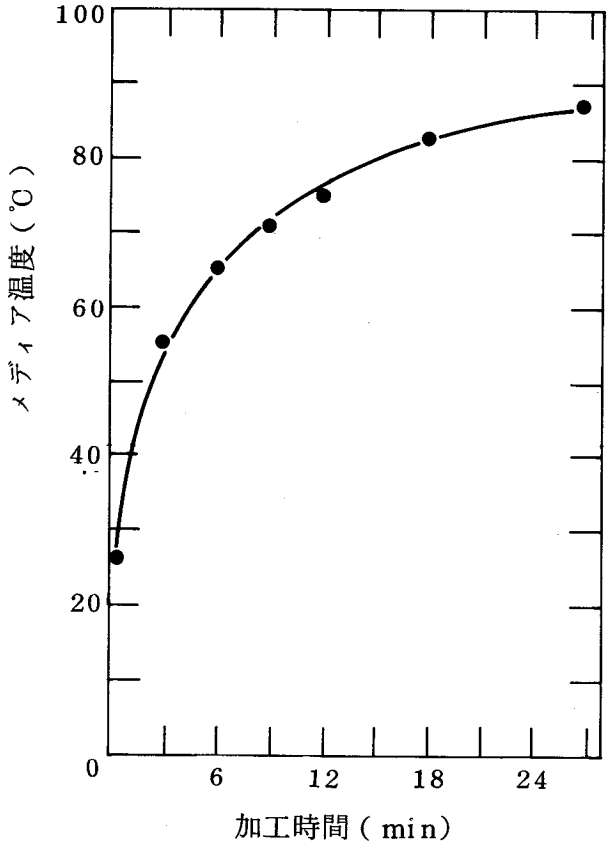
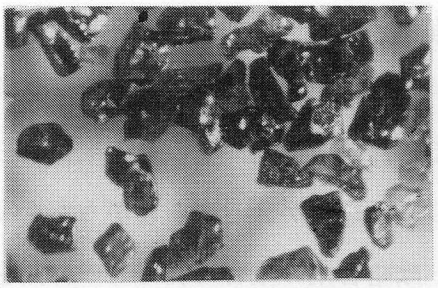


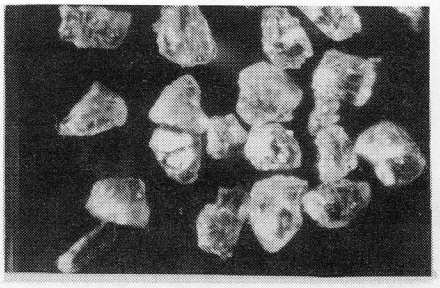
図４－５　加工時間の経過にともなうメディア温度の変化

励起され，放射するWA砥粒からのエキソ電子が被削材への砥粒の食付き（そのメカニズムは１節参照）に影響し，金属削除に有効に作用していることが考えられる。また，図４－５に示すように，メディア温度は２０分間程の加工によってほぼ一定になる。すなわち，飽和した一定のメディア温度（一定刺激状態）においては，３章の図３－９に示したように砥粒からのエキソ電子放射は時間の経過とともに減衰する。このことがWAメディアの削除効果の減少に何らかの影響を与えたことが考

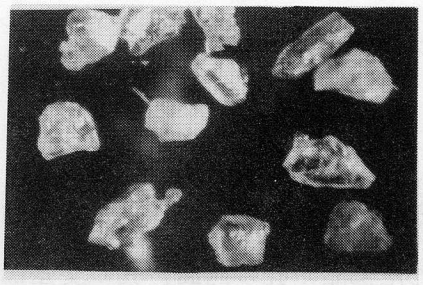


（a）Cメディア0時間

（b）Cメディア　5時間後



（c）WAメディア　0時間



（d）WAメディア　5時間後

図4－6　加工時間の経過と砥粒形状

えられる。一方，C砥粒は電子放射がないため，削除量は一定しているものと考えられる。

結　論

以上の考察を要約すると，

(1)　砥粒からの電子放射量の多少が研削加工における目づまり現象や砥粒切れ刃の微小切削機構，研削油剤の作用などに影響する一因子となり得ることが推察される。

(2)　CBN砥粒の砥石が難研削材の合金鋼に対して非常に優れた性能を示す考え方として，CBN砥粒から研削局部で著しい電子放射が行われ，それが切れ刃の微

小切削機構における食付きに作用し，また研削油剤中の添加剤の作用の活性化にも一因子としてかかわりをもつことが推察される。

(3) レジノイドボンド砥石において，砥粒からの電子放射と大越式結合度試験機のビットのくい込み深さについて検討すると，砥石に焼成する前の砥粒からのエキソ電子放射の多いものほど，ビットのくい込みが大きいことがうかがえ，電子放射は砥粒と結合剤の親和性，あるいは結合剤の重合に何らかの作用をなすことがうかがえる。

(4) 遊離砥粒による加工法であるラッピング加工，Extrude－hone 加工における砥粒切れ刃の極微小切削作用に，砥粒からのエキソ電子放射が何らかの影響を与えることがうかがえる。

※脚注：Extrude － hone 加工とは最近開発された特殊加工法で，複雑な孔加工された部品の孔の内面，孔の交差部分，細孔深孔部の研摩などを行う加工方式である。この加工法の特徴は，加工工具が半固体状の粘弾性材料（かんだチューインガムのような弾性と粘性流体の二様相を現わす物性で，特殊な高分子材料が使用される）を媒体として，これに砥粒を混練したもの（これをメディアと呼ぶ）を使用することである。そして，メディアに100～200 Kgf／cm²の圧力を加えて，加工物の内外表面に沿って砥粒を圧接移動させて金属削除を行う。なお，この加工法での実験例を示したのは，砥粒そのものの加工性の比較が行われやすいためである。

文　献（第4章）

1）正野崎，石渡：精密機械，39，11（1973）1146.

2）正野崎，石渡：精密機械，41，9（1975）925.

3）正野崎，石渡：セラミックス，10，8（1975）544.

4）正野崎，石渡：潤滑，23，3（1978）167.

5）正野崎，石渡：昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会論文集，441.

6）井上，水原，臼井：潤滑，18，8（1973）615.

7）石渡，正野崎：昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会論文集，155.

8）P. A. Thiessen：Z. Chem.，5（1965）162.

9）竹山：潤滑，12，2（1967）56.

10）G. Economos：J. Amer. Cer. Soc.，26（1953）403.

11）T. Shonozaki, H. Shigematu：Bull. Japan. Soc. of prec. Engi.，2，1（1966）8.

12）正野崎：機械と工具，（1964，12）13.

13）P. R. Lindsay，N. P. Navarro：Machinery，79，May－June（1973）56.

14）G. E. 社資料.

15）R. W. Mould, H. B. Silver，R. J. Syrett：Wear，19，1（1972）67. 22，2（1972）269. 26，1（1973）27.

16）玉村，中山，古市：日本機械学会論文集，41，343（1975）1024.

17）吉川：精密機械，29，3（1963）225.

18）日本接着協会編：接着ハンドブック（第2版），日刊工業新聞社，9.

19）坂本：機械と工具，18，5（1974）121.

20）坂本，原田：応用機械工学，15，8（1974）3.

第5章　研削油剤のレビンダ効果とエキソ電子放射

まえがき

この章では，まず，エキソ電子放射の観点より，研削油剤，特に油剤中に含まれる添加剤の作用の一つとして，レビンダ効果の可能性を示唆し，さらに，エキソ電子放射測定が研削仕上面表層を評価する新たな手段となることを述べる。ついで，研削抵抗の検討により，レビンダ効果を実証する。

1．エキソ電子放射による研削油剤のレビンダ効果の吟味[1)]

一般に金属を研削する際の加工局部においては，創成される金属仕上面や切りくずの新生面からはもちろん，また，3章に記したように研削砥石の砥粒の種類によってはその破砕面，摩擦面からも，かなりのエキソ電子が放射されていることが実験的にも示されており，[2)～6)]それがその周囲に存在する研削油剤の作用に何らかの影響を及ぼすことが考えられる。[6)7)]

一方，近年，切削油剤の作用に関する新しい考え方として，レビンダ効果[8)9)]が取り入れられてきた。[10)～12)]いわゆる有機極性物質を含む溶液が金属表面に吸着すると，その金属の機械的強度（降伏応力，加工硬化係数，など）が減少する効果である。この効果は切削加工においては実験的に確かめられ，考え方も定着してきた。しかし，このレビンダ効果は変形速度と密接に関連し，一般に低速切削領域で効果的であって，研削加工のような高速切削領域では，その効果は疑問視されている。だが，切削加工における研究[10)～12)]では，工具すくい角が小さくなる程，効果は高くなるし，また，切込量が少ない程，効果は高くなる結果を得ている。この結果より，一般切削加工よりもはるかに高速度ではあるが，研削加工においては，切れ刃である砥粒のすくい角が負であること，砥粒切れ刃の切込量が一般の切削加工よりもはるかに

微小であることを考えあわせると，研削加工における研削油剤の作用の一つとして，レビンダ効果が期待される。[13)14)]

また，このレビンダ効果について，P.A. Rehbinder らは摩擦実験で，摩擦された試片の表面をエキソ電子放射の観点から吟味し，報告している。[15)16)] それによると有機極性物質を含む溶液を摩擦面に潤滑剤として使用した場合と，無添加潤滑油を使用した場合を比較し，前者の摩擦面からのエキソ電子放射は後者に比べて著しく多い。しかも，エキソ電子の放射量と摩擦面の転位密度とは比例関係にあることを指摘し，摩擦におけるレビンダ効果の存在をエキソ電子放射の観点より説明している。

そこで本研究では研削油剤，特にその中に含まれる添加剤が仕上面表面および表層に及ぼす影響をエキソ電子放射の測定により，吟味し，研削油剤のレビンダ効果について検討する。さらにこの測定方法が研削仕上面表層を評価する新たな手段となることを述べる。

1.1 実 験 方 法

まず，Rehbinder らの報告[15)] と同様，単純なすべり摩擦実験を行った。ついで一般平面研削実験を行って，両者の試験片からのエキソ電子放射の現象を比較することを試みた。また，試験片仕上面のあらさ，微少硬度，加工抵抗も測定した。

1.1.1 摩 擦 実 験

図5－1に摩擦実験装置の略図を示し，表5－1に摩擦条件を示す。潤滑油は装置上部より滴下（5 mL／min）させ，摩擦円板に押しつけたハケにより摩擦部分へ供給した。摩擦係数は試作した二分力計により求め，摩耗量は摩擦前後の試片の寸法差より求めた。

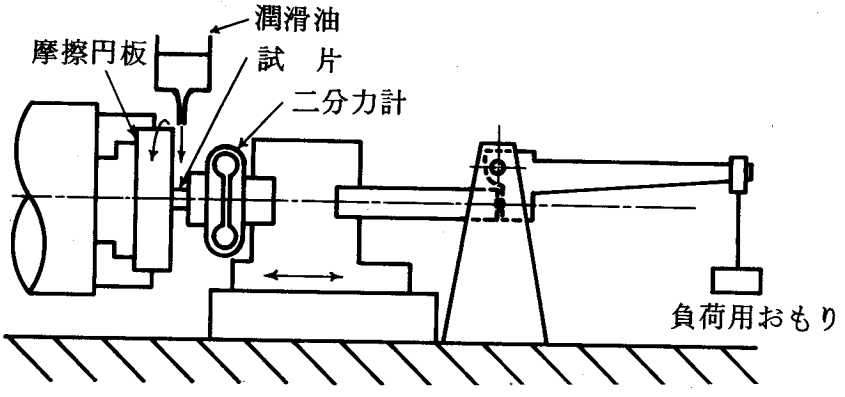


図5－1　摩　擦　実　験　装　置　概　略　図

1.1.2 研 削 実 験

研削実験は横軸平面研削盤を使用し，表5－2に示す研削条件により行った。使用したアルミニウム合金は，切削実験[12]においてレビンダ効果がよくあらわれた被削材である。使用した砥石はアルミニウムの研削に推奨されている SiC 系のものである。予備実験の結果，粒度＃80を使用した時，研削状態も良好であり，同一研削条件における仕上面からのエキソ電子放射量の変動も比較的小さかった。

研削性能評価として，研削抵抗，仕上面あらさ，仕上面の微小硬度を測定した。研削抵抗としては加工中の砥石軸モータの消費電力を測定した。研削油剤はアルミニウム研削に適している灯油とスピンドル油を混合したものを無添加油剤とし，それに研削油剤の添加剤として一般に使用されているものを混合したものである。添加量は一般研削油剤として使用される平均値的な値とした。

1.1.3 エキソ電子の測定

第2章に示したガイガミュラーカウンタにより，各実験終了後の試片仕上面からのエキソ電子を測定した。なお，試片は実験前に真空焼鈍を行ってあり，300℃まで加熱しても実験前のものからは，エキソ電子が放射しないことを確認した。

1.2 摩擦実験と研削実験の比較

表5－1に示す無添加試油とリン系試油についての摩擦実験結果を表5－3に，表5－2に示す研削条件による研削実験結果を表5－4に示す。研削実験では参考に乾式研削も行った。

表5－1 摩 擦 条 件

試　　片	アルミニウム合金 （A6063，10㎜×10㎜×5㎜） （425℃にて真空焼鈍）
摩擦円板	SUJ－2（焼入，HRC51）（#1000研摩紙仕上）
摩擦圧力	0.5 kgf／㎟
摩擦速度	10m／min
摩擦時間	30 min
潤 滑 油	① 無添加潤滑油 （灯油70％＋#60スピンドル油30％） ② 極圧剤添加潤滑油 （①＋リン酸エステル2％）

表5－2　研削条件

被削材	アルミニウム合金 （A6063，20㎜×20㎜×5㎜） （425℃にて真空焼鈍）
研削砥石	GC－80－H－m－V（外径⌀205×幅19㎜） （⌀204～⌀190の間で使用）
砥石周速度	V＝1900 m／min（⌀204）～1770 m／min（⌀190）
被削材速度	v＝15 m／min
砥石切込量	Δ＝25 μm×1回（up cutのみ）
研削油剤	①　無添加研削油剤 （灯油70％＋#60スピンドル油30％） ②　リン系極圧剤添加研削油剤 （①＋リン酸エステル2％） ③　塩素系極圧剤添加研削油剤 （①＋塩素化パラフィン4％） ④　硫黄系極圧剤添加研削油剤 （①＋硫化油脂0.8％） ⑤　脂肪酸系添加剤添加研削油剤 （①＋オレイン酸10％）

表5－3　摩擦実験結果

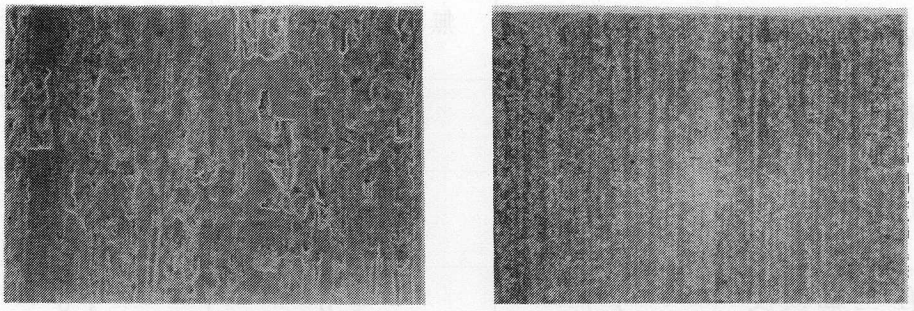
潤滑油	無添加潤滑油	リン系極圧剤添加潤滑油
摩耗量	13 μm	7 μm
摩擦係数	0.16～0.19	0.01～0.02
表面硬度（Hv.15g f）	60	43

表5－4　研削実験結果

研削油剤	乾式研削	無添加研削油剤	リン系極圧剤添加研削油剤
消費電力 (W)	453	215	141
仕上面あらさ (Rz)	19 μm	1.9 μm	2.0 μm
仕上面硬度 (Hv.15g f)	66	52	48

摩擦実験結果では摩耗量，摩擦係数ともに添加剤を含む試油の場合は予想通り無添加の場合に比較して摩耗量では半減し，摩擦係数も著しく減少し，表面硬度もかなり低いことを示す。図5－2の摩擦面をみても摩擦状態の差異が大きく認められる。すなわち，耐摩耗剤としてのリン系極圧剤の効果が十分に示されている。

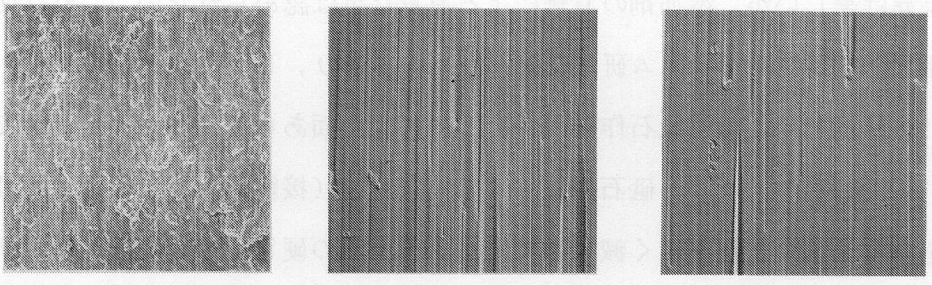
一方，同一材質の試験片の研削実験結果では，研削油剤の有無による仕上面あらさの差異は著しいが，添加剤の有無による有意な差は認められない。これは使用した無添加油剤がアルミニウム研削に適したものであり，しかも切込量25 μm でのワンパス研削でほとんど砥石作業面がそのまま仕上面あらさに写されたためである。(図5－3参照) しかし，砥石軸モータの消費電力（接線研削抵抗に相当）は，添加剤を含む油剤の方が著しく減少している。仕上面の硬さについては，乾式研削の場合，加工硬化の度合が著しく，ついで無添加油剤，極圧剤添加油剤の順に硬度は低くなっている。



0.2 mm

無添加潤滑油　　リン系極圧剤添加潤滑油

図5－2 アルミニウム摩擦面



0.2 mm

乾式　　無添加油剤　　リン系極圧剤添加油剤

図5－3 アルミニウム研削仕上面

次に摩擦試片と研削試片について，試験後，熱刺激によるエキソ電子放射特性を試油別に測定したグロー曲線を図5－4，図5－5に示す。摩擦面からのグロー曲線は試片の温度上昇とともに放射強度が次第に増大し，140～150℃付近で放射極大に達し，それから減衰した。リン系添加剤を添加した場合は無添加の場合に比して，著しく大きな放射強度を示した。研削仕上面からのグロー曲線は摩擦面から

のものと比較すると放射極大が２００℃付近に移行しているが，ほとんど類似している。

一方，P.A. Rehbinder らが１９６９年に摩擦実験で，摩擦した試片の表層の転位密度，そして表面からのエキソ電子放射を吟味している。[15)16)] すなわち，有機極性物質を含む潤滑油と無添加潤滑油を使用した場合を比較して，

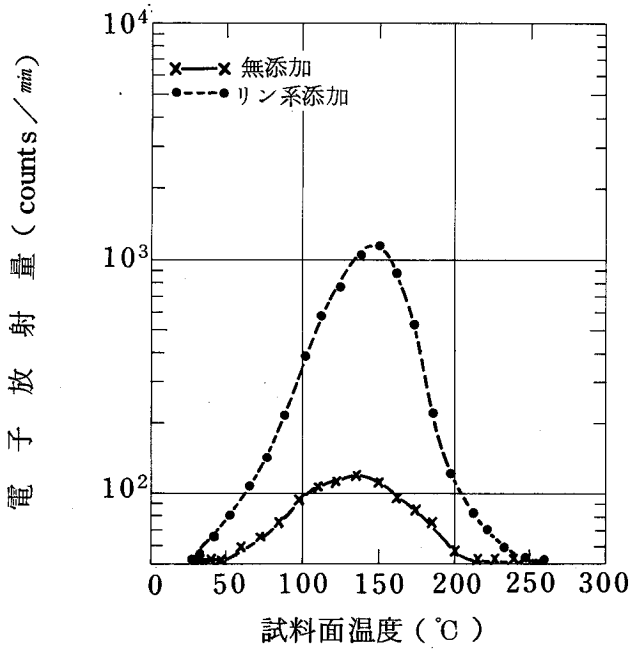


図５－４　摩擦面からの電子放射

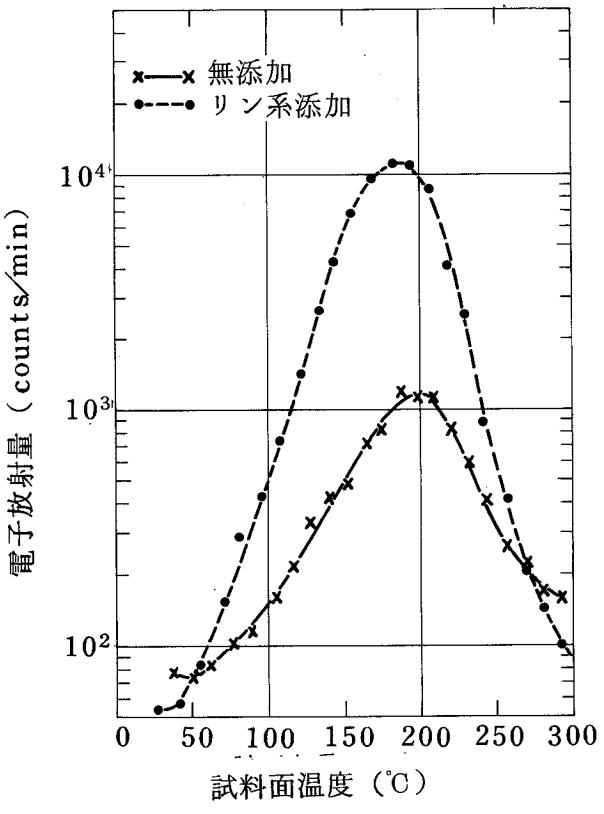


図5－5　研　削　仕　上　面　か　ら　の　電　子　放　射

いわゆるレビンダ効果によって，有機極性物質の存在が試片の薄い塑性流動層の転位密度を増大させるし[16]，そして前者の摩擦面からのエキソ電子が著しく多くなり，これは転位密度の増大と密接に関係するという実験例を示した[15]。Rehbinder の見解は広く認められたものではないが，塑性変形を生ずるような条件の範囲内で他分子の吸着が機械的挙動に変化を及ぼす効果は A.R.C.Westwood らも認めており[17]，転位の挙動によってマイクロクラックの形成の前兆になるようなケモメカニカル効果が作用することは充分考えられる[18]。

図5－4に示した実験結果はこの Rehbinder らの行った摩擦実験と類似の条件での摩擦実験を行い，摩擦面からの電子放射量をグロー曲線の上で吟味したものである。予想通り，リン系極圧剤を含む潤滑油を用いた摩擦面からは，無添加潤滑油の場合に比して著しく電子放射量が多い。これは Rehbinder らの実験結果と同一

傾向を示し，リン系添加剤が摩擦表面へ吸着し，表面エネルギを低下させて，そのため表層転位密度の増加によるエキソ電子の放射量が多くなり，また表層部分を脆弱化させて，表面硬度も低くなったものと考えられる。また，摩擦係数，摩耗量の減少に対しては上記のレビンダ効果も影響するが，従来から一般にいわれている耐摩耗剤としての作用も加味されたものと思われる。

一方，同じ材質の試片の研削実験結果でも，リン系極圧剤を用いた時は無添加油剤の場合とくらべ，加工抵抗の減少，加工硬化の減少などがみとめられる。摩擦表面の減摩作用とともに，表面がより加工されやすくなったことが考えられる。さらに研削仕上面からのエキソ電子のグロー曲線を摩擦面からのものと比較すると，研削加工では上記摩擦実験の約１８０倍の加工速度であるが，切削，おしつぶしとともに多くの摩擦作用を含んでおり，加工局部では，おしつぶし，盛り上りした部分など，単純摩擦より，はるかにじょうらんされた表層との複雑な摩擦が繰返されるので，摩擦部分により多くのマイクロクラックが発生しやすくなることが考えられる。したがって，新生面からのエキソ電子放射による油剤の活性化[6)7)19)20)]の度合も単純摩擦より圧力，温度，新生面の生成度合の激しい研削加工の方が著しくなると考えられ，同じ油剤を用いても摩擦面より，より多くの電子が放射されることが考えられる。研削試片面積は摩擦試片の約４倍であるが，それ以上の電子放射量がみられる。これは，研削面の方が前述のように摩擦面より新生金属面の露出がより多く，局部に存在する潤滑剤分子の吸着が著しいためと思われる。さらにこの実験の研削加工はアップカット方式で，仕上面表層の加工ひずみ，塑性流動も著しい。したがって，M.Ciftan の報告[18)] にある表層ひずみの大小によるケモストレス効果の影響が大きく作用するものと考えられる。そして，吸着する有機極性物質のケミカルポテンシャルを増加させて，いわゆるレビンダ効果をより効果的にすることが推察される。

1.3 各種添加剤の比較

前節においてはリン系添加剤の効果を対象にしたが，さらに塩素系，硫黄系，そして脂肪酸系添加剤の効果について同様の研削実験を行った。その研削実験結果を表5－5に示す。仕上面のあらさは，各添加剤を含む油剤と表5－4の無添加油剤とで差異は認められない。また，仕上面硬度は無添加油剤に比べて，わずかであるが，塩素系，硫黄系，そして脂肪酸系油剤の場合は低い。砥石軸モータの消費電力については，硫黄系油剤，脂肪酸系油剤の場合は表5－4のリン系油剤よりさらに減少し，塩素系油剤の場合はリン系油剤よりやや増加しているが，無添加油剤よりははるかに減少している。

表5－5　研削実験結果

研削油剤	塩素系極圧剤添加研削油剤	硫黄系極圧剤添加研削油剤	脂肪酸系添加剤添加研削油剤
消費電力 (W)	160	136	135
仕上面あらさ (Rz)	2.0 μm	1.8 μm	2.2 μm
仕上面硬度 (Hv,15g f)	51	49	51

※ 母材硬度：Hv＝34（15g f）

次に各添加剤別の油剤を使用して研削した仕上面からのエキソ電子のグロー曲線を図5－6に示す。

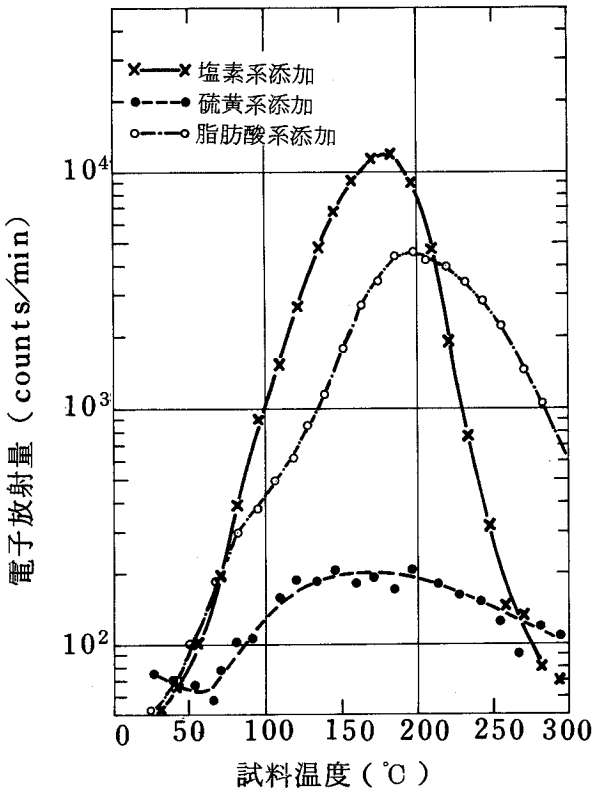


図5－6　研　削　仕　上　面　か　ら　の　電　子　放　射

塩素系油剤で研削した場合は，図5－5のリン系油剤の場合と全く同じグロー曲線の傾向を示し，無添加油剤の場合と比較して200℃付近のピークが著しく，約10倍の多くの電子放射量を示した。脂肪酸系油剤の場合は無添加油剤の場合の5倍程度の電子放射量を示した。ところが，硫黄系油剤の場合は，逆に無添加油剤の場合よりも全般的に電子放射量は少なく，ほとんどピークを示さない。したがって，図5－7に示す熱刺激（25～300℃，22分間）におけるエキソ電子の総計数値を比較しても各添加剤を含む油剤別の差異が大きく認められる。

各添加剤別の研削実験結果では，硫黄系が最も優れており，ついで脂肪酸系，リン系，塩素系の順になっている。仕上面からのエキソ電子のグロー曲線，総計数値では塩素系添加剤はリン系添加剤の場合とほぼ同程度の電子放射量を示し，脂肪酸系は2／3程度を示すが，硫黄系添加剤の場合のみ，無添加油剤の場合よりも電子

放射量が少ない。

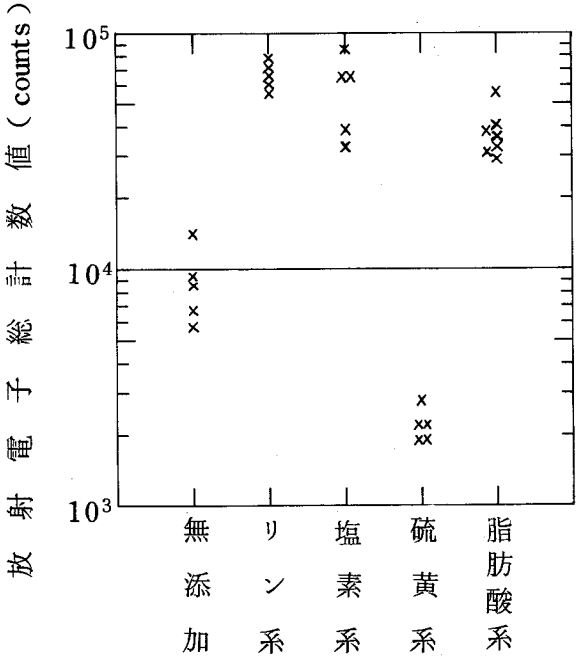


図5－7　油剤別放射電子総計数値
（25～300℃，22分間）

この事実については次のように考えられる。硫黄系添加剤を含む油剤で研削した場合，加工局部では他の添加剤同様，高温において金属と反応し，硫化被膜の生成，および次節で仕上面表層からのエキソ電子についての考察で述べるようにレビンダ効果が示されると考えられる。現実に加工結果は優れているが，仕上面に吸着した硫化被膜の種類によってはエキソ電子の放射が抑制されるものと考えられる。一方，研削局部で生成する切りくず表面からも当然エキソ電子の放射が考えられる。[6] 一般にいかなる砥石，加工油剤を用いても目つまり量に多少はあるが，必ず目つまり現象は観察される。このエキソ電子は，砥粒や結合剤との凝着による付着型目つまりを生じやすくする可能性が考えられる。[3)4)] 切りくず新生面に生ずる硫化膜によって，エキソ電子が抑制されれば，目つまり防止に幾分なりとも役立って，切りくず生成によい影響を与えることが推察される。

1.4　研削仕上面表層からのエキソ電子放射

エキソ電子放射は表面構造に敏感であることから，逆に仕上面および表層の特性について吟味する手段となっている。本研究でも各種油剤による研削仕上面表層の深さ方向の各層からのエキソ電子を測定することにより，各層の変形や転位などの構造変化について検討した。

研削加工した試片はNaOH 1％水溶液（25℃）を使用し，腐食によって表層を取り除きつつ，エキソ電子を測定した。表面構造により，腐食速度は異るが，目安とするために腐食時間と腐食量との関係の一測定結果を図5－8に示す。

まず，乾式研削と湿式研削（無添加油剤）での研削仕上面表層からのエキソ電子放射の深さ依存性を図5－9に，また，リン系および硫黄系添加剤を含む油剤の場合のエキソ電子放射と表層深さとの関係を図5－10に示す。図5－9において，乾式研削と湿式研削では両者の差異は著しい。乾式の場合，表面近くでは電子放射量は減少する。その後，内部になるにつれて増加し，10 μm 前後で一つのピークがあり，その後，急激に減少し，その後，小さなピークがあって減少する。湿式の

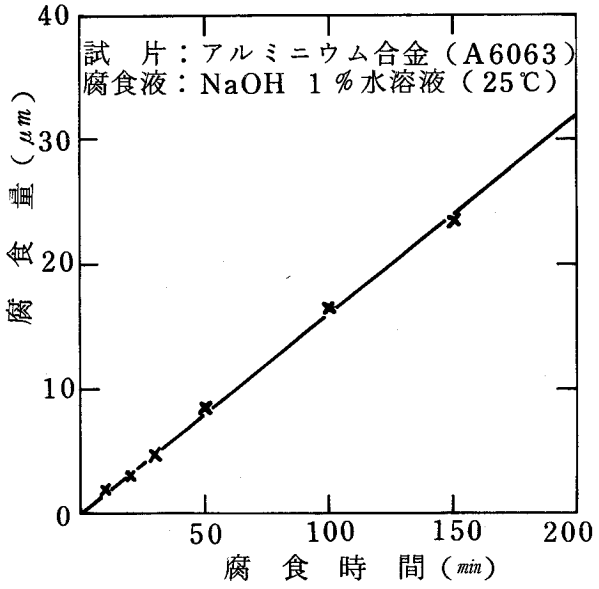


図5－8　腐食時間と腐食量の関係

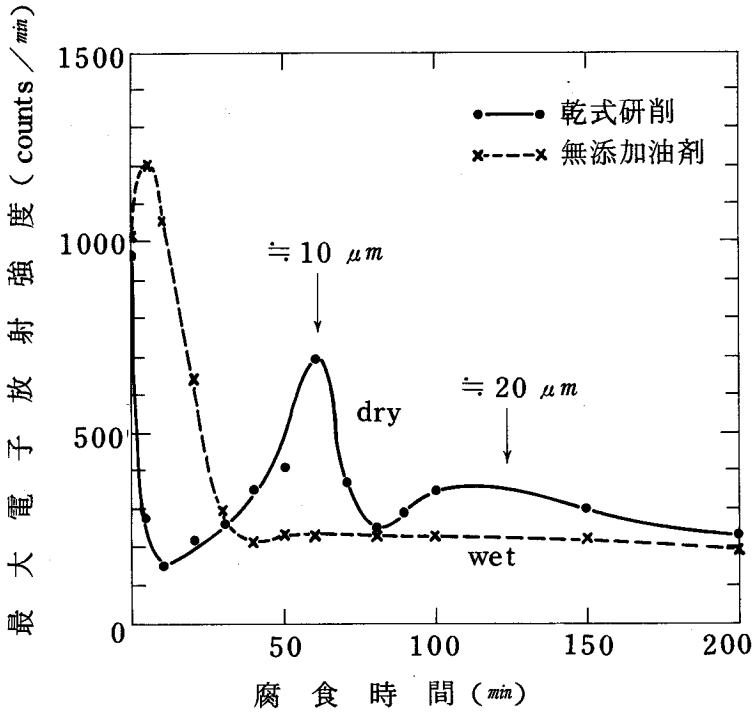


図5－9　研削仕上面表層からの Exo-Electron Emission の深さ依存性

場合は，電子放射量は表面より1～1.5 μm 付近でピークがあり，その後，急激に減少して5 μm 以上深いところでは，電子放射は認められない。リン系油剤の場合は，図5－10に示すように表面において最も電子放射量が多いが，内部に入るにつれ，1 μm 以内で急激に減少し，4～5 μm 以上では電子放射は認められない。ところが，硫黄系油剤の場合，表面より1～1.5 μm 腐食すると，図5－10に示すように無添加油剤の場合の曲線とは異なり，むしろリン系添加剤の場合の曲線と同様の傾向を示す。なお，参考に研削油剤別の仕上面表層を一定量腐食しつつ，微小硬度計での硬度測定値と表面からの深さを対応させた結果を図5－11に示す。

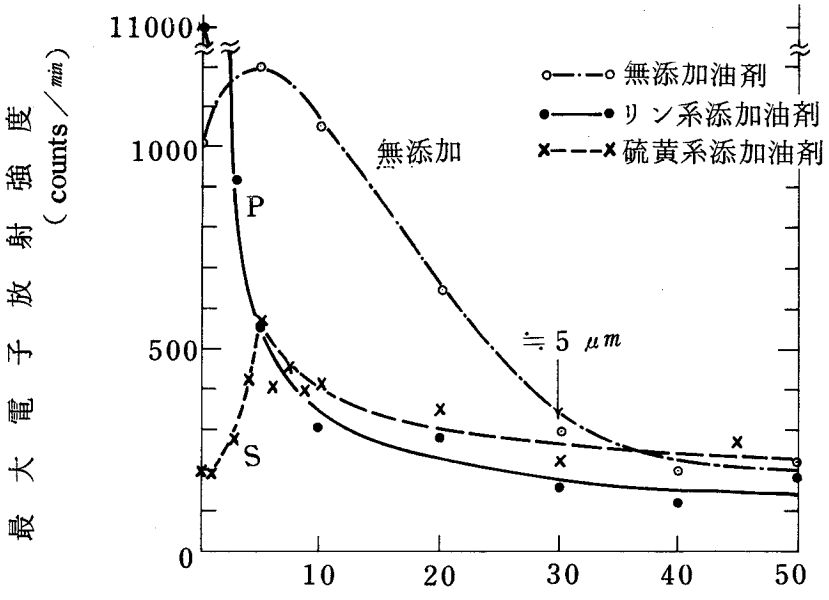


図5－10　研削仕上面表層からのExo-Electron Emissionの深さ依存性

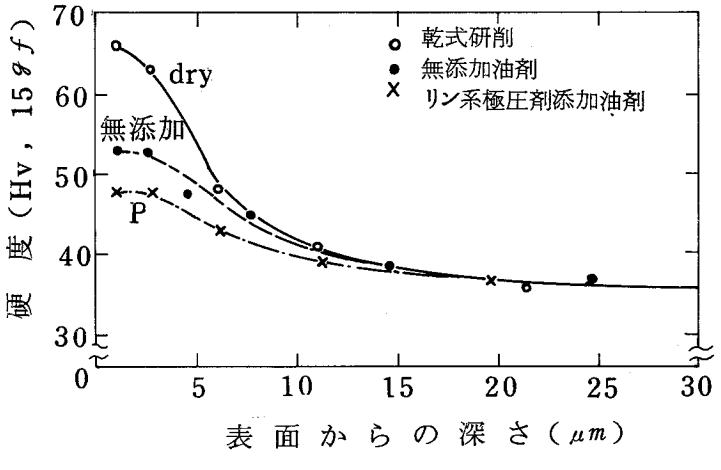


図5－11　研削仕上面表層の硬度変化

表層内の硬度の値は表層からのエキソ電子放射の関係のように複雑ではなく，単純に加工硬化の程度の差をマクロ的に表示している。

以上，研削仕上面表層からのエキソ電子放射と表面からの深さとの関係については乾式と湿式，無添加油剤と極圧剤添加油剤との間で全く異なる曲線を示し，研削油剤が仕上面表層に及ぼす影響を敏感に表示している。また，微小硬度の測定結果を合わせて考察すると一応複雑な表面構造を説明し得る。すなわち，乾式研削の場合には，仕上面表層は大きな加工抵抗のためにかなり内部まで結晶が大きくひずんでおり，10 μm 付近に1つのピークが存在していること（L. Grunberg の実験[21]と類似の結果）は，この付近に電子源となる格子欠陥が多く存在しているものと思われる。逆に表面より，3～5 μm の範囲は加工熱によって電子源が消失したものと思われる。5 μm 以上の深さでは加工熱の伝導も少なく，エキソ電子が増加する。また，極表層において電子放射が急激に増加するのは，表面に加工直後に生成する酸化膜中に存在する多くの格子欠陥の近傍に放射源が存在するものと考えられる。[6)22)23)]

湿式研削の場合は R.K.Mueller らの実験結果[24]と類似の傾向を示しており，1 μm 以内の極表層に一つのピークを示し，それ以上内部にいくにつれ，電子放射量が減少する。これは湿式によって好ましい加工が行われ，加工抵抗も小さく，乾式ほど内部まで大きな結晶ひずみが生じないと思われる。

次に油剤中の極圧剤の有無による研削仕上面表層からのエキソ電子分布について考察する。リン系極圧剤添加油剤の場合（図5－10）と無添加油剤の場合（図5－9）との比較については，前述した P.A. Rehbinder らのレビンダ効果の作用とエキソ電子の考え方がそのまま表層からのエキソ電子の分布にも適用される。硫黄系極圧剤添加油剤の場合については，仕上面，および極表層からのエキソ電子放射量は無添加油剤の場合よりも少ない。しかし，1～1.5 μm 表層を除去するとエキソ電子放射量は増大する。これは仕上面に生成した硫化被膜にはエキソ電子源がなく，また硫化被膜が内部からのエキソ電子の放射を抑制しているものと思われる。前述の図5－11 に示すように硫黄系油剤の場合も，表面より 1.5 μm 以上におい

ての電子放射量の表層深さ依存性はリン系油剤の場合と全く同一傾向を示しており，加工瞬時においては硫黄系油剤の場合も表層ではリン系の場合と同じ傾向に立ち上ることが予想される。[25)※] そして加工局部において，浅い仕上面表層には一応マイクロクラックの発生があり，その面にもただちに硫化被膜が生成され，クラックの再溶着の防止，クラックの増殖の一因となって，いわゆるレビンダ効果が発揮されると推察される。

研削仕上面から放射するエキソ電子の測定結果から，高速切削である研削加工においても油剤の作用の一つとしてレビンダ効果の存在が示唆される。また，エキソ電子放射測定が，研削仕上面表層を調べる有力な手段となり得ることが考えられる。

※脚注：文献25において，アルミニウム合金の乾式研削実験で，研削仕上面表層（0.5 μm 以内）からのエキソ電子放射を測定した結果，研削直後のものからは表面において電子放射は多く，内部にいくにつれて減少する。一方，同一研削条件で研削したものを一週間後に測定すると，表面においてはほとんど電子放射は認められず，内部にいくにつれて増加し，0.15 μm ほどで研削直後のものと同程度の放射量が測定され，以後，研削直後のものと同様に減少する。これは研削直後に表層に生成する酸化膜中に存在する放射源が，一週間の放置期間中に表面にあらたに生成する酸化膜によって抑制，または消失したものと考えられる。これと同様のことが，時間的経過は異なるが，硫黄系油剤の場合にもおこったものと推察される。

2．研削抵抗による研削油剤のレビンダ効果の吟味[26)]

前節において，研削仕上面から放射するエキソ電子放射をもとに研削油剤の作用の一つとして，レビンダ効果の存在を示唆した。

この節においては平面研削加工によって，研削加工中の研削抵抗の二分力（接線分力，垂直分力）の変動をもとにレビンダ効果の存在を検討する。特に，レビンダ

効果を発揮する代表的物質であるオレイン酸，一般研削油剤中に使用される各種添加剤の効果の差異，被削材材種間の効果の差異を中心に実験を行った。

2.1 実験方法

実験は横軸平面研削盤を使用して行った。図5－12に示すように平面研削盤のテーブル上に圧電素子を利用した動力計を取りつけ，その上に幅10㎜，長さ100㎜の表5－6に示す各種被削材を取りつける。取りつけた被削材表面に表5－7に

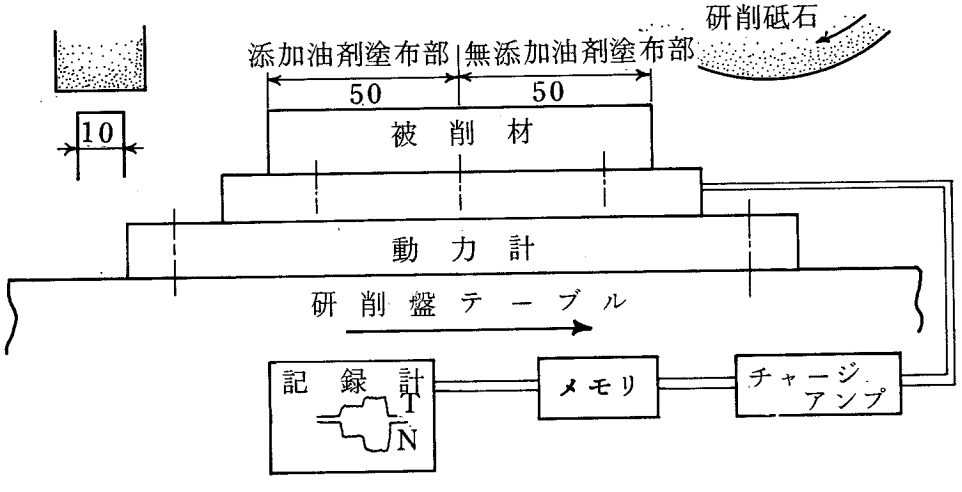


図5－12 実験方式概略図

表5－6 被削材

被削材寸法	幅10㎜×長さ100㎜
被削材材種	タフピッチ銅
	アルミニウム合金（A6063）
	チタン合金（4Al－4Mn）
	軸受鋼第2種（SUJ－2）

表5－7　研削油剤

① 無添加	灯油（70％）＋＃60スピンドル油（30％）
② 塩素系	①＋塩素系添加剤（塩素分4％）
③ 硫黄系	①＋硫黄系添加剤（硫黄分0.8％）
④ リン系	①＋リン系添加剤（リン分2％）
⑤ 脂肪酸系	①＋脂肪酸（オレイン酸10％）

※ オレイン酸は原液も使用した。

示す無添加油剤をぬれる程度に塗布し，2 μm 切込みにてダウンカット研削で1パス，表面仕上を行う。その状態を基準にして，まず，被削材前半分50 mmに無添加油剤を被削材がぬれる程度に薄く塗布し，ついで後半分50 mmに同様に各種添加剤を含む油剤を塗布する。そして，表5－8に示す研削条件により，一定の切込みを与えて，アップカット，1パス，プランジ研削を行う。動力計により，研削加工中（0.6 sec）の接線分力，垂直分力を検出し，チャージアンプを介してメモリー装置に一度記憶し，後にレコーダに記録した。上記の研削加工中の加工抵抗測定以外に，仕上面あらさの測定，切りくず形態，仕上面の観察を行ない，各種油剤の効果を無添加油剤を基準にして吟味した。各油剤中に含まれる添加剤の含有量は一般市販油剤に含有される率をもとにした。

なお，研削油剤を普通給油法でなく，塗布によって実験を行った目的は研削油剤

表5－8　研削条件

砥石回転数	3000 rpm（チタン合金のみ1000 rpm）
研削砥石	GC－46－J－8－V（軸受鋼のみWA砥石）（φ200～φ190）
工作物速度	10 m／min（プランジ研削）
砥石切込み量	5 μm（up cut，1パス）
ドレッシング	単石ダイヤモンドドレッサ
	送り速度 0.3 mm／rev
	切込み量 20 μm×4，10 μm×3，スパークアウト

の洗浄作用などの二次的効果をできるだけ排除し，加工局部での一次的効果を検討しやすくすることにある。

2.2　油剤塗布効果の吟味

まず，レビンダ効果を著しく発揮することが知られている有機極性物質の代表的なものであるオレイン酸を使用して，塗布効果を吟味した。図5－13は切削実験[12]でレビンダ効果の生じやすかった銅を被削材として使用し，オレイン酸原液と表5－7の無添加油剤をそれぞれ被削材に塗布して研削を行った時の研削抵抗の記録の一例である。図5－14にそれぞれの仕上面あらさ，仕上面の写真，そして切りくずの写真を示す。図5－13において，オレイン酸塗布部では無添加油剤塗布部に対し，二分力ともに急激な抵抗減少がみられる。特に，接線分力は1／2以下に減

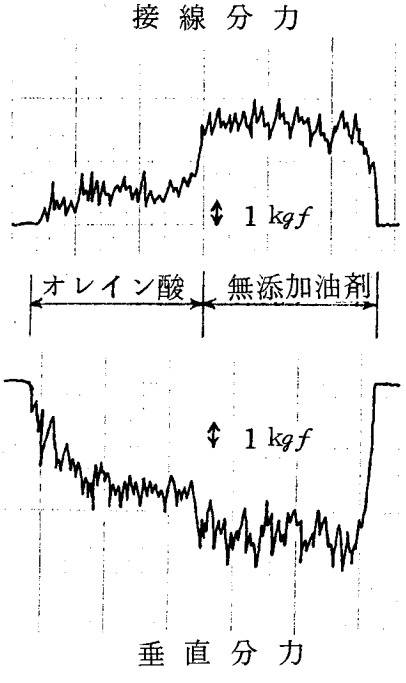


図5－13　研削抵抗測定例（被削材；銅）

少する。図５－14より，オレイン酸塗布部では仕上面あらさも向上し，仕上面の状況も良好となり，切りくずも長くなり，流れ型と考えられるものもみられるようになる。以上の結果より，無添加油剤に比べて，オレイン酸をわずか塗布することによって，研削状態が非常に向上し，良好な微小切削がなされていることがわかる。

ついで，切削実験において銅の次にレビンダ効果の生じやすかったアルミニウム

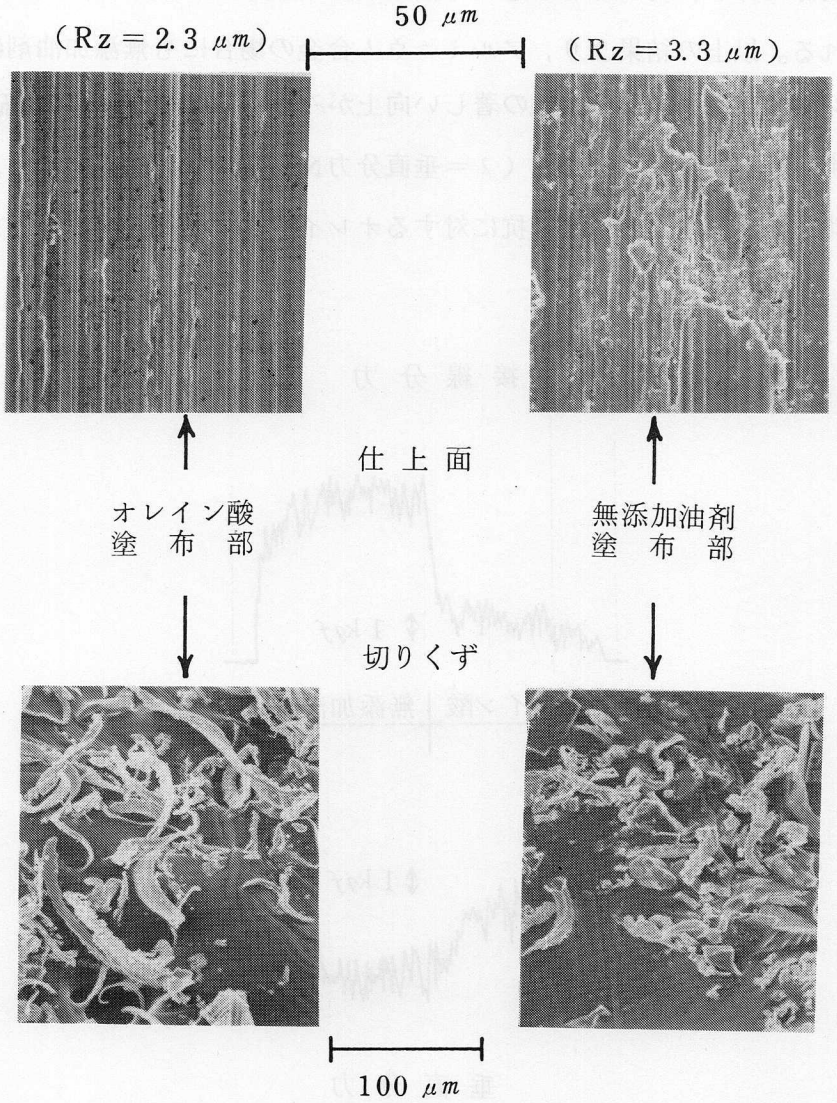


図５－14　仕上面及び切りくずの比較（被削材；銅）

合金を被削材とし，オレイン酸原液を使用して，砥石切込み量を変化させて実験を行った。図5－15に砥石切込み量10 μm での二分力の変動を示す。図5－13の銅の場合と同様，オレイン酸塗布部で急激に抵抗が減少し，この場合も特に接線分力の減少が著しい。図5－16に仕上面あらさ，仕上面の写真，そして切りくずの写真を示す。やはり，オレイン酸塗布によって仕上面あらさも向上し，仕上面の状況も良好であり，切りくず形態にも無添加油剤塗布のものと比べて大きなちがいがみられる。以上の結果より，アルミニウム合金の場合にも無添加油剤に比して，オレイン酸塗布による研削状態の著しい向上がみられる。図5－17に砥石切込み量に対する研削抵抗，二分力比（λ＝垂直分力N／接線分力T）を示し，図5－18に抵抗比（無添加油剤塗布部抵抗に対するオレイン酸塗布部抵抗の割合）を示す。

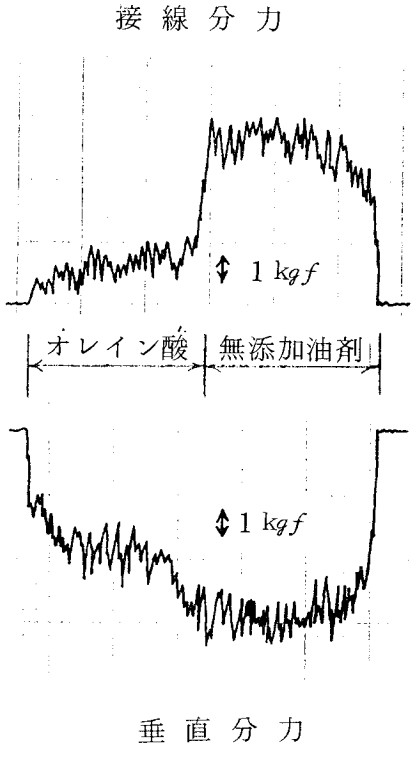


図5－15　研削抵抗測定例（被削材；アルミ合金）

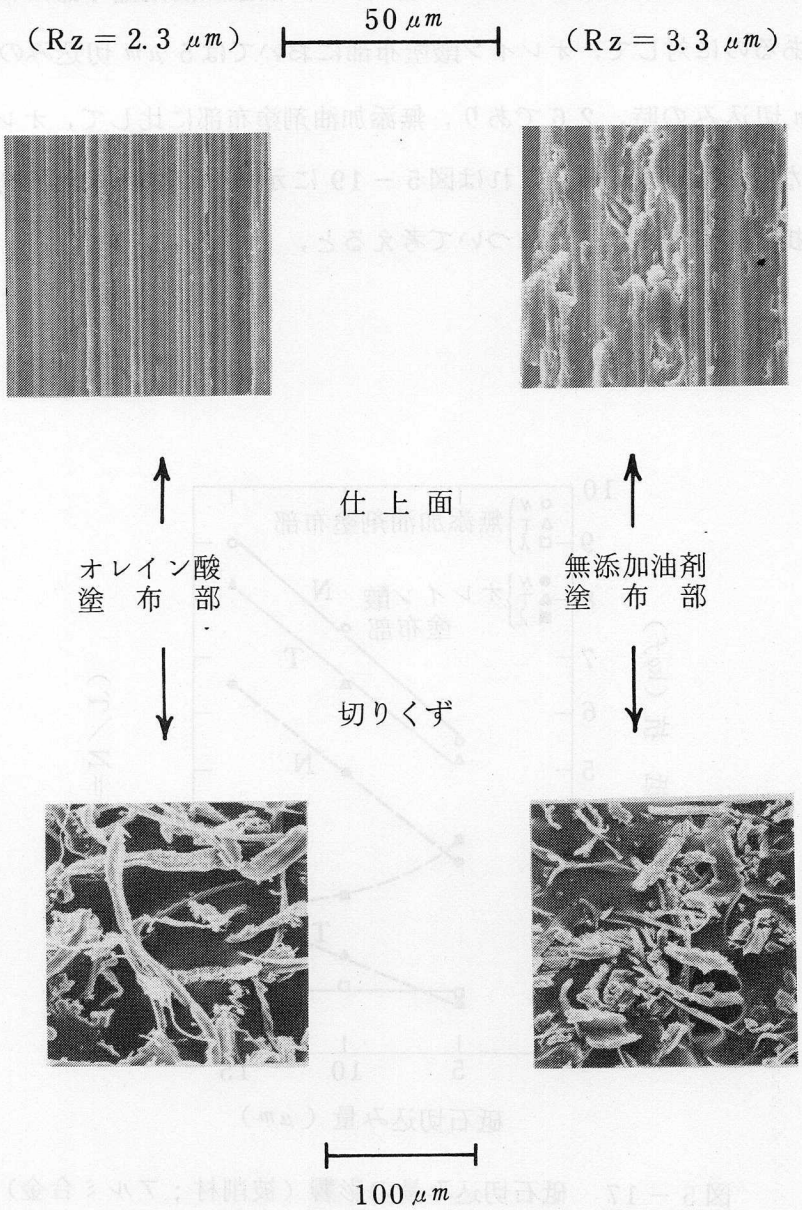


図5－16　仕上面及び切りくずの比較（被削材；アルミ合金）

図5－17において，砥石切込み量の増加にしたがって，一般に研削抵抗は直線的に増大するが，オレイン酸塗布部の研削抵抗は著しく小さい。また，図5－18より，砥石切込み量の減少とともにオレイン酸塗布による研削抵抗の減少割合は増大し，特に垂直分力の減少割合に比して，接線分力の減少割合が著しい。二分力比（λ＝

N／T）として吟味すると，図5－17より，無添加油剤塗布部において，$\lambda=1.1$ 程度であるのに対して，オレイン酸塗布部においては5 μm 切込みの時，$\lambda=3.8$，15 μm 切込みの時，2.6であり，無添加油剤塗布部に比して，オレイン酸塗布部が大きな値となっている。これは図5－19に示すモデル的な砥粒切れ刃のすくい面の見掛上の摩擦角（β）について考えると，

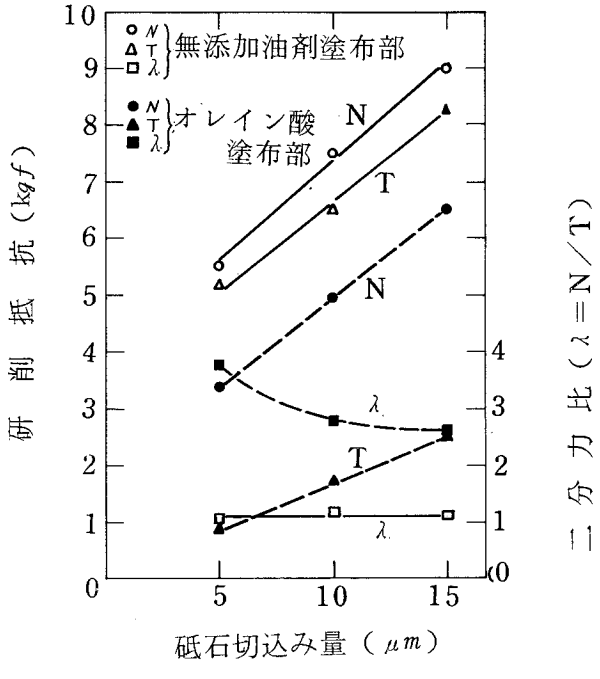


図5－17　砥石切込み量の影響（被削材；アルミ合金）

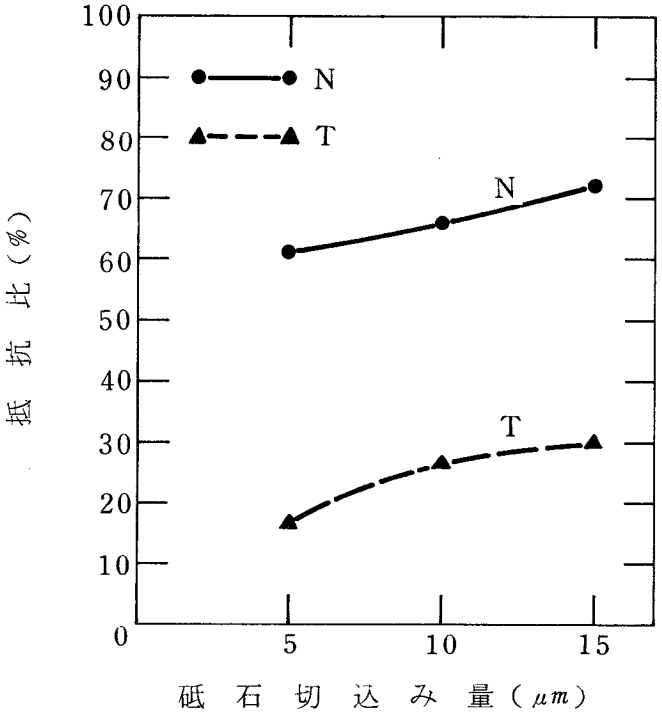
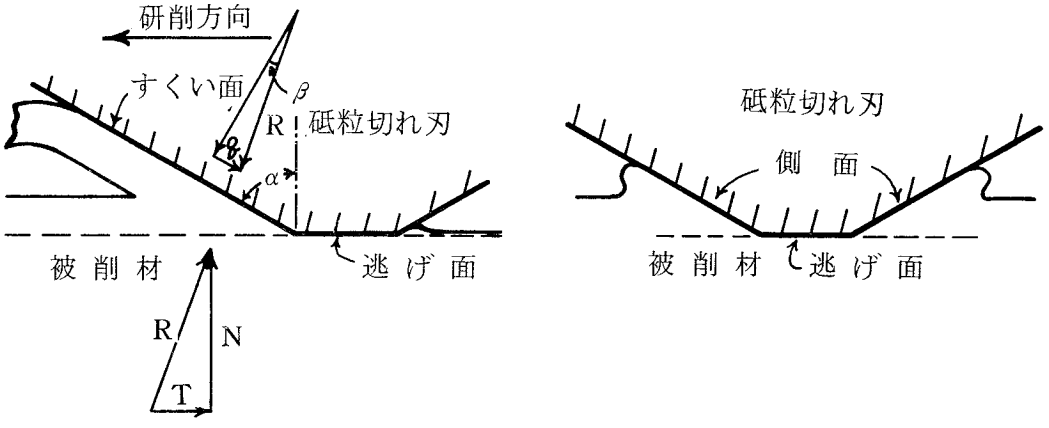


図5－18　砥石切込み毎の無添加油剤塗布部抵抗に対する
オレイン酸塗布部抵抗の割合（被削材；アルミ合金）



(a)　研削方向に平行な断面　　(b)　研削方向に直角な断面

図5－19　砥粒切れ刃の切削模型

$$\lambda = N / T = \tan(\alpha + \beta) \cdots\cdots\cdots (1)$$

であるから，（1）式より，砥粒切れ刃すくい角（α）を一定とすれば，オレイン酸塗布によって，λが大きくなることは摩擦角（β）が大きくなることになる。すくい面摩擦角（β）が増大することは，切削時の切れ刃すくい面の摩擦に及ぼす一般潤滑状態としては逆効果である。一方，研削加工の場合，上記切れ刃すくい面の潤滑効果以外に，図5－19に示した切れ刃逃げ面，切れ刃側面での摩擦に及ぼす潤滑効果もかなりの比重をしめていることも考えあわせなければならない。特に，切れ刃逃げ面における潤滑効果は上記すくい面潤滑とは逆に，垂直分力はさほど減少させずに，接線分力を減少させる。このように考えると，オレイン酸塗布による効果はすくい面以外での一般潤滑効果であるはずである。しかし，この効果が著しい時は切れ刃の上すべりの原因ともなって，切れ刃がくい込みにくく，切削現象を少なくする。ところが，現実の実験結果は図5－16に示すようにオレイン酸塗布によって，切れ刃はよくくい込んで長い良好な切りくずを排出している。したがって，オレイン酸塗布によって，砥粒切れ刃のすくい面，逃げ面における一般潤滑効果によって図5－17に示すような，著しい研削抵抗の減少がおこったとは考えがたく，これは加工すべき表層に塑性変形されやすい状況が出現したものと考えられる。

以上のことより，オレイン酸塗布による研削抵抗減少効果は，いわゆる工具すくい面，逃げ面，そして側面における一般潤滑効果を第一に考えるよりも，むしろ前節において研削仕上面からのエキソ電子放射の検討より述べたように，被削材表面に吸着したオレイン酸が表面エネルギを低下させ，せん断領域においてすべりを生じやすくさせ，生じた微小クラック部分にもオレイン酸が吸着し，微小クラックの再溶着を防止するとしたほうが妥当である。その結果，その周囲に多くの転位が生じ，ごく表層をぜい弱化させて，切りくずの生成を容易にし，接線分力を大きく減少させたものであり，いわゆるレビンダ効果が発揮されたものであると考えるのが妥当である。

2.3　被削材材種に対する吟味

上記のオレイン酸の効果をもとに，ついで被削材材種に対する効果の差異を吟味する。表5－6に示す本実験にもちいた4種の被削材は，切削実験[27]においてレビンダ効果が顕著にあらわれた銅，ついで効果の大きかったアルミニウム，あまり効果を示さなかった軸受鋼，そして研削加工において著しい付着型目つまりの発生などのために難研削性を示すチタンである。これら4種の被削材に対するオレイン酸のレビンダ効果を吟味した実験結果を図5－20，図5－21に示す。これらの結

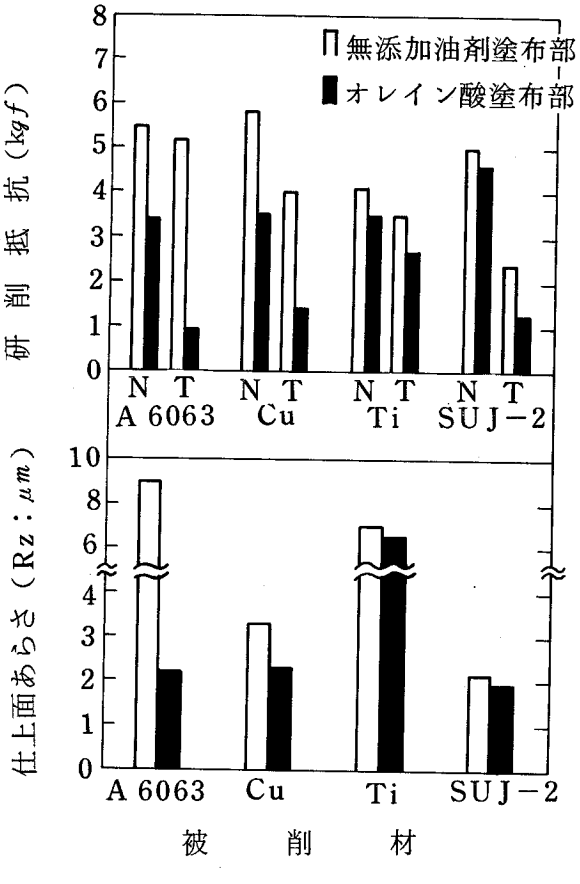


図5－20　被削材材種に対する効果

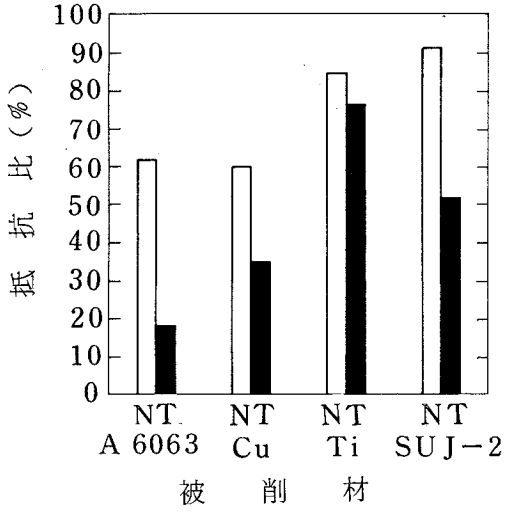


図5－21　被削材毎の無添加油剤塗布部抵抗に対するオレイン酸塗布部抵抗の割合

果より，どの被削材においてもオレイン酸の塗布効果がみられ，無添加油剤塗布部研削抵抗に対するオレイン酸塗布部研削抵抗の減少割合からみると，アルミニウム合金において最も効果が著しく，ついで銅，軸受鋼，そしてチタン合金の順となっている。チタン合金において，あまり効果がみられなかったのは，難研削性のため，砥石周速度を600 m／min程度に下げて実験を行った（チタン研削では酸化，付着型目づまりの発生などのため，より砥石周速度を下げた方が研削性が良好になるといわれている）が，わずか油剤を塗布するだけでは充分研削性を向上させることができず，その結果，砥粒の脱落も多くなったと考えられる。（図5－22参照）

2.4　オレイン酸の濃度に対する吟味

以上はオレイン酸の原液を使用しての無添加油剤に対する効果の差異をみてきた

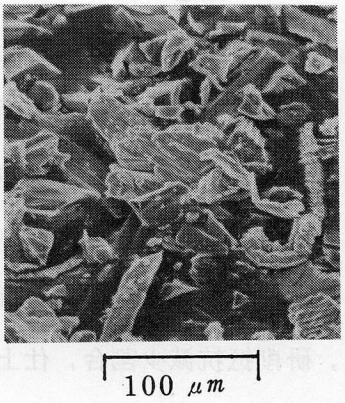


図5－22　チタンの切りくず

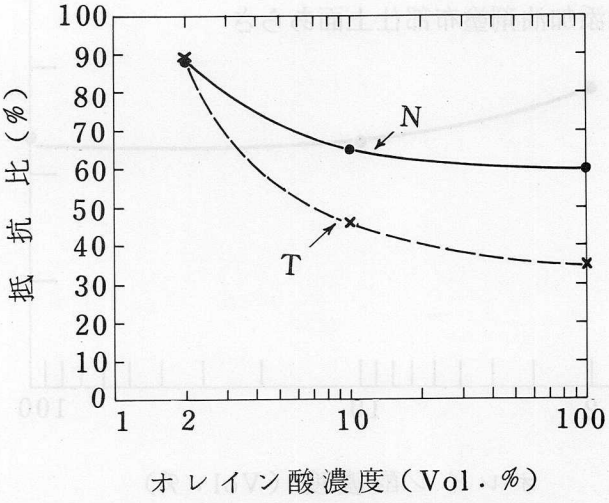


図5－23　無添加油剤塗布部抵抗に対するオレイン酸濃度別油剤塗布部抵抗の割合（被削材；銅）

のであるが，ついでオレイン酸の濃度による効果の差異を吟味した。被削材として銅を使用し，無添加油剤にオレイン酸を２％，１０％，それぞれを混合したもの，そして原液を使用し，無添加油剤との差異を実験した。その結果を図５－23，図５－24に示す。２％においては一割程の減少しか示さず，二分力とも減少割合はほぼ等しい。しかし，１０％オレイン酸を含むものの抵抗減少割合は垂直分力において３５％，接線分力において５４％であり，特に，接線分力の減少割合が大きい。仕上面あらさにおいても１０％の場合，原液の時とほとんど同じである。１０％のものはこの結果からすると，研削抵抗減少割合，仕上面あらさからみてオレイン酸原液に匹敵する効果を示すことがわかる。

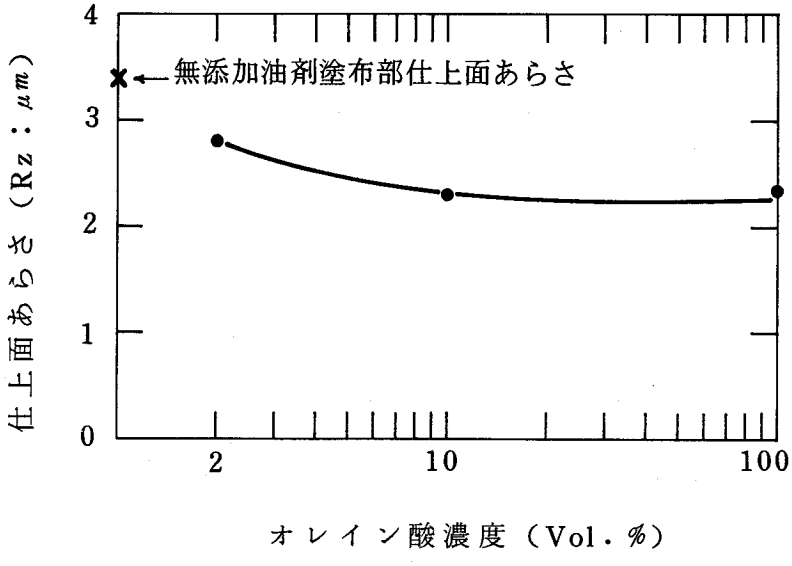


図５－24　油剤中のオレイン酸濃度と仕上面あらさ（被削材；銅）

2.5　各種添加剤の効果に対する吟味

ついで表５－７に示す各種添加剤を含む試油について銅を被削材とし，表５－８に示す研削条件にて塗布効果の吟味をした。なお，本実験に使用した添加剤は一般

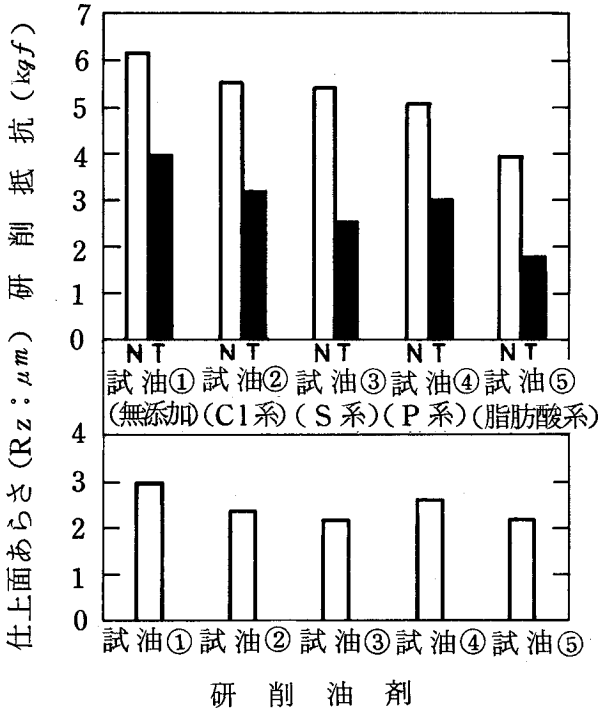


図5－25　各種添加剤の効果（被削材；銅）

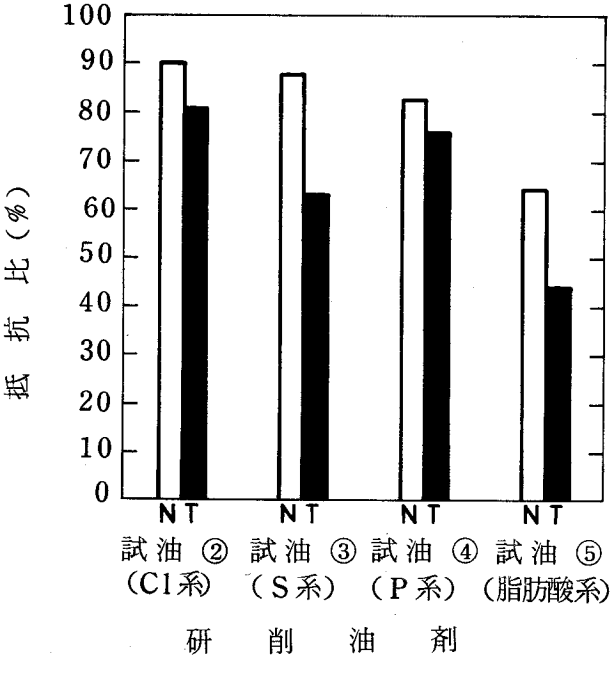


図5－26　無添加油剤塗布部抵抗に対する他試油塗布部抵抗の割合（被削材；銅）

の研削油剤中に含まれる塩素系，硫黄系，そしてリン系の極圧剤と，上記実験に使用したオレイン酸を脂肪酸系添加剤として，一般研削油剤中に含有される平均的添加率をもとに，本実験で基準油剤としている無添加油剤中に混合した。その実験結果を図5－25，図5－26に示す。どの試油においても効果を示すが，特にオレイン酸を含む脂肪酸系のものの効果が著しく，ついで硫黄系，リン系，塩素系の順である。

結　論

以上の得られた結果を要約すれば，

(1) 研削加工において，その存在が疑問視されている研削油剤のレビンダ効果について，研削仕上面からのエキソ電子放射の測定結果から，高速切削である研削加工においても油剤の作用の一つとして存在の可能性があることを示唆できた。また，エキソ電子放射測定が，研削仕上面表層を調べる有力な手段となり得ることが考えられる。

(2) 油剤塗布による研削実験を行い，オレイン酸の塗布効果を吟味すると，その効果は一般潤滑効果よりもレビンダ効果にもとずくものであると考えることが妥当である。

(3) 被削材に対するレビンダ効果はアルミニウム合金において著しく，ついで銅，軸受鋼，チタン合金の順であった。

(4) オレイン酸の濃度に対する効果の差異を吟味した結果，10％においても原液に匹敵する効果を示すことがわかった。

(5) 各種添加剤の効果においては，脂肪酸系のものが著しく，ついで硫黄系，リン系，そして塩素系の順であった。

以上の結果より，高速であるが，微小切込み加工である研削加工においても研削油剤の作用の一つに，レビンダ効果を充分考える必要があると結論される。

文　献（第５章）

1) 石渡，正野崎 ： 潤滑，２７，９（１９８２）６７７．

2) J.Kramer，W.Engelland ： Werkstattstechnik，５２，４（１９６２）１７３．〔（訳）吉川弘之 ： 機械工作，１９６２，１１，P.５７

3) 正野崎，石渡 ： 精密機械，３９，１１（１９７３）１１４６．

4) 正野崎，石渡 ： ４１，９（１９７５）９２６．

5) 正野崎，大島，百瀬 ： 精密機械，４２，７（１９７６）６６８．

6) 井上，水原，臼井 ： 潤滑，１８，８（１９７３）６１５．

7) 玉村，中山，古市 ： 日本機械学会論文集，４１，３４３（１９７５）１０２４．

8) V.I.Likhtman，P.A.Rehbinder，G.V.Karpenko ： Effect of a Surface-Active Medium on the Deformation of Metals（１９５４）．英訳（１９５８）．

9) 玉井，松永 ： 潤滑，１２，２（１９６７）７５．

10) 榊田，渡辺，益子 ： 日本機械学会論文集，３８，３１６（１９７２）３２４６．

11) 榊田，渡辺，益子 ： 日本機械学会論文集，４２，３５３（１９７６）３０７．

12) 大島，石渡，鈴木 ： 茨城大学研究集報，２３（１９７５）１７

13) 益子，他 ： 潤滑，２３，１２（１９７８）８９６．

14) 西脇，他 ： 潤滑，２３，１２（１９７８）９０４．

15) V.D.Evdokimov and P.A.Rehbinder ： Doklady Akademii Nauk SSSR，１８５，６（１９６９）１２７０

16) V.D.Evdokimov and G.E.Movsesov ： Doklady Akademi Nauk SSSR，１８６，２（１９６９）３０２．

17) A.R.C.Westwood ： Phil.Mag.，７（１９６２）６３３

18) M.Ciftan，E.Saibel ： Wear，５６（１９７９）６９．

19) L.Grunberg ： Proc. Phys. Soc.，LXVI，３－B，１５３．

20) H.A.Smith, T.Fort : J.Phys. Chem., 62 (1958) 519.

21) L.Grunberg, K.H.R.Wright : Acta. Phys. Austriaca, 10 (1957) 375.

22) A.Scharman, G.Seibert : Z.Phys., 183 (1965) 249.

23) A.Gieroszynski, B.Sujak : Acta. Phys. Polon., 28 (1965) 311.

24) R.K.Mueller, Ken Pontinen : J.Appl. Phys., 35, 5 (1964) 1500.

25) 正野崎，石渡 ： 昭和46年度精機学会秋季大会講演会前刷集，173.

26) 石渡，正野崎 ： 潤滑，27，9 (1982) 684.

27) 正野崎，石渡 ： 昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会前刷集，391.

第6章　破砕砥粒の仕上面への埋め込み現象とエキソ電子放射の関係[1)]

ま　え　が　き

この章においては，仕上面への砥粒の埋め込みの度合を調べるのに，仕上面から放射するエキソ電子を測定することが一つの有力な手段となることを述べる。

1.　研削仕上面への砥粒の埋め込み測定

砥粒加工された仕上面には，多くの砥粒が埋め込まれることはよく知られている。そして，その埋め込まれた砥粒が摩擦面の摩耗を増大させたりして，種々の問題を引きおこす。したがって，仕上面への砥粒埋め込みの度合を調べることは，意義のあることである。

研削仕上面からのエキソ電子放射を測定手段として，種々の研削条件で研削加工した仕上面への砥粒の埋め込みの度合をエキソ電子放射のグロー曲線より吟味する。

1.1　砥粒からのエキソ電子放射

砥粒加工された金属仕上面から放射するエキソ電子の放射源として考えられることは，金属自身からのものと仕上面へ埋め込んだ破砕砥粒からのものとが考えられる。[2)～4)] すでに，3章に示したように砥粒の種類によってエキソ電子の放射状態はさまざまであるので，まず，本実験に使用した研削砥石に使用されているWA砥粒，GC砥粒からの電子放射を測定した。図6－1は本実験に使用した研削砥石（WA，GC－80－H－m－V）を単石ダイヤモンドドレッサーにてドレッシングを行ない，脱落した破砕砥粒（結合剤も含む）（0.1g）からの電子放射のグロー曲線である。図より，WA砥粒からは多くの電子放射（120℃において22000 Counts／min，240℃においては63000 Counts／min）が認められ，GC

砥粒からはほとんど認められない。すなわち，WA砥石で研削した金属仕上面から放射する電子は金属からのものと，埋め込んだWA砥粒からのものとが合成されたものであり，GC砥石で研削した金属仕上面から放射する電子は金属のみからのものであると考えられる。

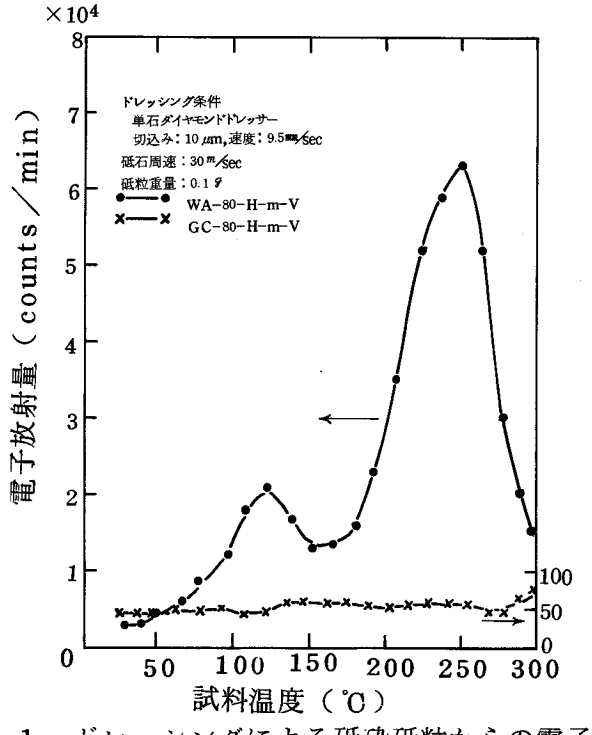


図６－１　ドレッシングによる砥砕砥粒からの電子放射

1.2　乾式研削面からのエキソ電子放射

表６－１に示す研削条件によって，アルミニウム合金（この材料は砥粒を比較的埋め込みやすく，エキソ電子が多く放射される。）を乾式で平面研削し，仕上面からのエキソ電子放射を測定した結果が図６－２，図６－３である。図６－２はＧＣ砥石で研削した結果である。180℃前後に１つのピークが現れ，重研削になるほど，放射強度が増大する傾向にある。重研削になれば，研削抵抗，研削熱も増大し，仕上面あらさもあらくなる。それにともない，仕上面には酸素空孔を持つ酸化膜がより生成しやすくなり，その酸化膜をより埋め込みやすくなるし，格子欠陥も多くなるはずである。そのため，重研削になるほど，電子放射量が増す傾向になったものと

表6－1　　研　削　条　件

被　削　材	アルミニウム合金（A 6063）
同　形　状	20×20×5㎜
研削砥石	WA / GC } －80－H－m－V
砥石周速	V＝30m／sec
被削材速度	v＝5m／min，15m／min
切込み量	Δ＝5μm，25μm
研削油剤	乾式
	湿式（JIS W2種2号，×50）
	（〃 2種1号）
ドレッシング	単石ダイヤモンドドレッサー
	切込み20μm×1，10μm×2
	速度9.5㎜／sec

考えられる。

つづいて，WA砥石により研削した仕上面からの電子放射を測定した結果が図6－3である。図6－2のGC砥石で研削した場合と比較すると，はるかに電子放射量が多く，グロー曲線の型も異ったものとなっている。このグロー曲線の型は図6－1に示したWA砥粒からのものとほとんど同じである。そして，研削条件によって電子放射量の差異が非常に大きく，重研削になるほど電子放射量は増加する。すなわち，アルミニウム合金自身からは，GC砥石で研削した場合と同程度の電子放射があるのであろうが，それよりも仕上面へ埋め込んだWA砥粒からはるかに多くの電子放射があることがわかる。条件別にみると，砥粒一粒当りの最大切込み深さが大きくなるのに比例して，より多くの破砕砥粒が仕上面へ埋め込まれ，そのため電子放射量が多くなるものと考えられる。

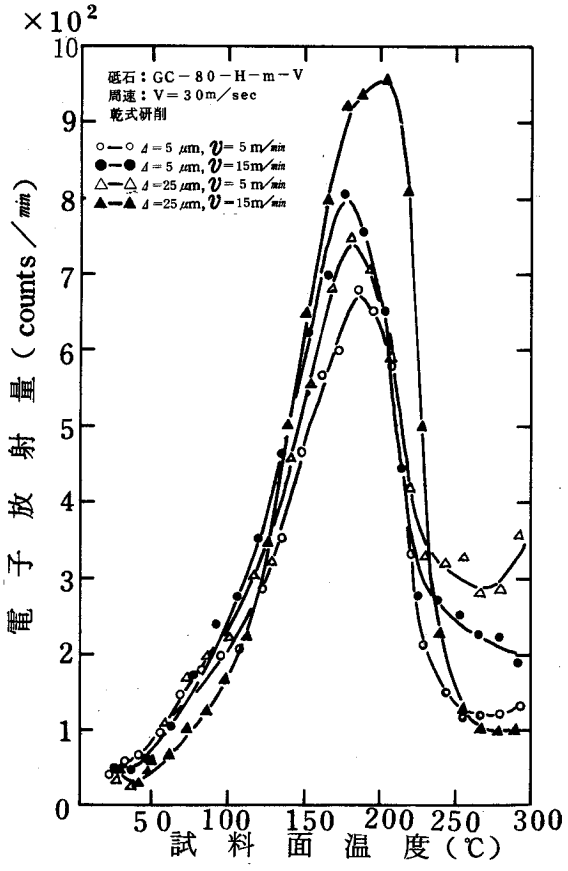


図６－２　GC砥石による研削仕上面からの電子放射

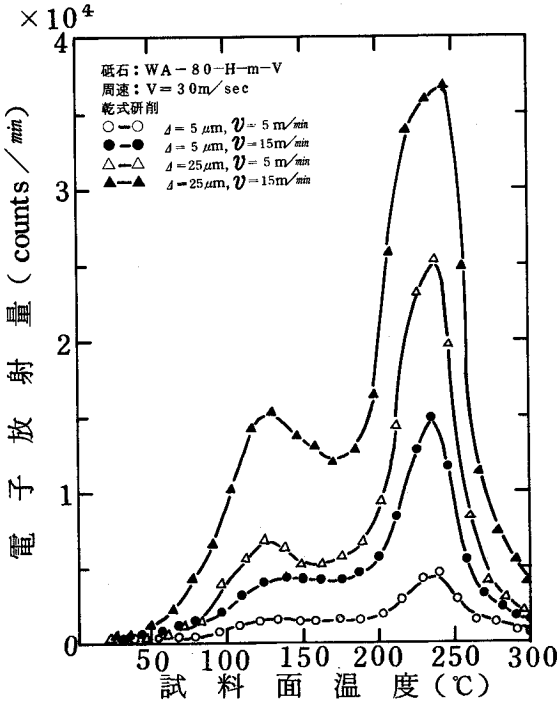


図６－３　WA砥石による研削仕上面からの電子放射

1.3　湿式研削面からのエキソ電子放射

図６－４は水溶性研削油剤（ＪＩＳ・Ｗ２－２,希釈倍率５０倍）を使用して研削した仕上面からの電子放射を測定した結果である。図６－２，図６－３の乾式研削の場合と比較すると電子放射量は減少している。特に，ＷＡ砥石で研削した場合は著しく減少している。湿式研削になれば,研削抵抗,研削温度は減少し,仕上面あらさも向上し,特に，仕上面への砥粒の埋め込みが著しく少なくなるものと考えられる。WA砥石で研削した場合，金属からの電子放射量（同一研削条件にてＧＣ砥石で研削した仕上面からのエキソ電子放射量）と埋め込んだ破砕砥粒からのものとが同程度となり，図６－４のグロー曲線の型は両者を合成したものと考えられる。

図６－５は不水溶性研削油剤（ＪＩＳ・２－１）を使用して，図６－４の場合と同一の研削条件にて研削した仕上面からの電子放射を測定した結果である。WA 砥石

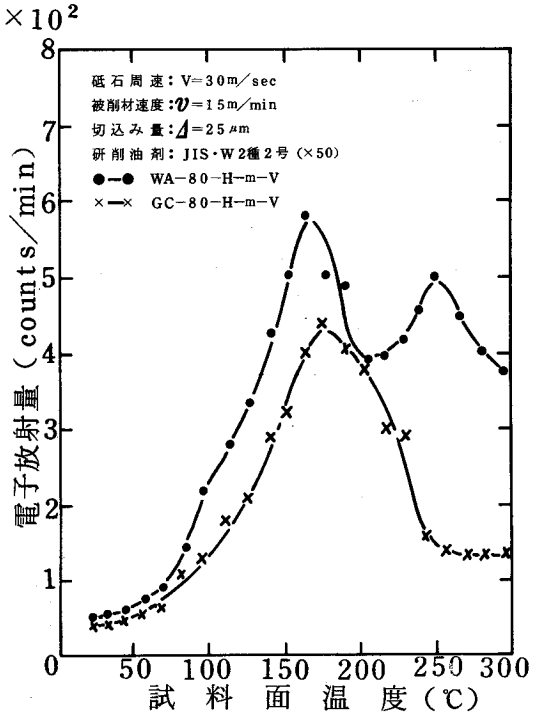


図６－４　湿式研削仕上面からの電子放射

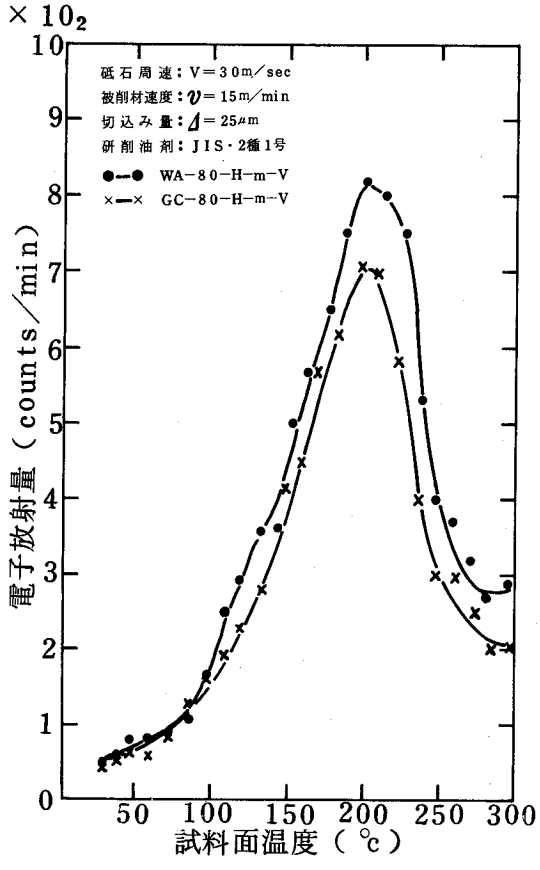


図６－５　湿式研削仕上面からの電子放射

で研削した場合のグロー曲線の型がＧＣ砥石の場合とほとんど同一であり，電子放射量もほぼ同程度である。つまり，不水溶性油剤を使用して研削した場合，ほとんど仕上面への砥粒の埋め込みがなくなるものと考えられる。

1.4　研削仕上面からのエキソ電子グロー曲線の型と砥粒埋め込みの度合

以上の実験結果をグロー曲線の型より整理すると図６－６のようになる。

①仕上面への埋め込み破砕砥粒が非常に多い場合，②，③仕上面への破砕砥粒の埋め込みがわずかとなり，砥粒からのエキソ電子放射量と被削材である金属からのものとが同程度となった場合，④仕上面への破砕砥粒の埋め込みがほとんどなくなった場合。

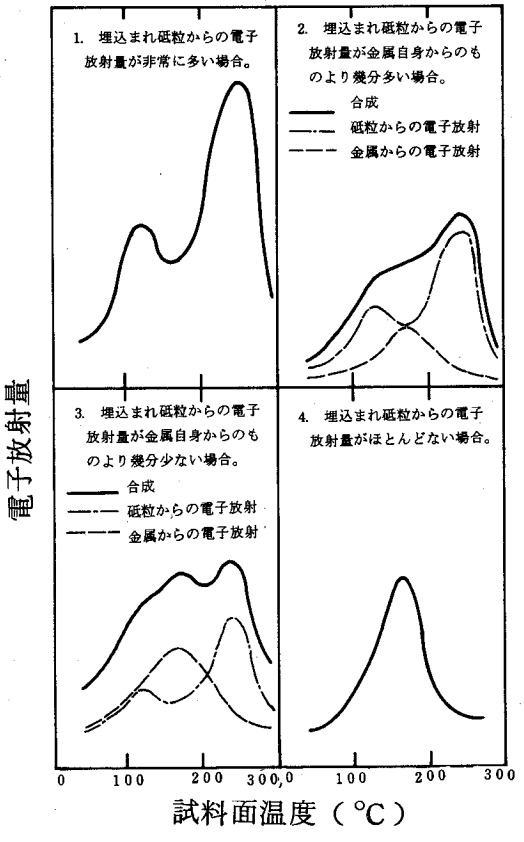


図６－６　研削仕上面からの電子放射の模型図

2. ラッピング仕上面への砥粒埋め込み深さの測定

従来から，ラッピング加工においては，仕上面へ非常に多くの砥粒が埋め込まれることが知られている。そこでどの程度の深さまで埋め込まれるものかを仕上面からのエキソ電子放射によって吟味した。表6－2に示すラッピング条件によりS45C材をラッピング加工した。なお，S45C材をGC砥粒でラッピング加工した仕上面表層からは，ほとんどエキソ電子放射は認められなかった。表に示すWA砥粒によって，ラッピング加工した仕上面を腐食（5％ナイタル）によって取り除き，焼鈍材，焼入材，それぞれの仕上面表層からの電子放射量を測定した結果が図6－7である。焼鈍材の場合，電子放射は徐々に減衰しながらかなりの深さまでみられるが，焼入材の場合には，ごく表層からは焼鈍材よりも多く放射されるが，急激に減

表6－2　ラッピング条件

被削材	S45C（焼鈍）（焼入）（φ10×5㎜）
ラップ定盤	鋳鉄
ラップ剤	WA#400，GC#400
ラップ油剤	軽油
混合比	軽油4：砥粒1
ラップ圧	2.0kgf／㎠
ラップ速度	18m／min
ラップ時間	20min

少し，測定できなくなってしまう。焼鈍材の場合には37μm，焼入材の場合には4.8μmになるとほとんど電子放射は認められなくなる。すなわち，これらの深さになるとほとんど埋め込み砥粒がなくなったものと考えられる。これらの結果より，焼鈍材の場合には30μm程度の大きな砥粒が埋め込まれており，焼入材の場合には2～3μmの微細な砥粒が数多く，ごく表層に埋め込まれていると考えられる。

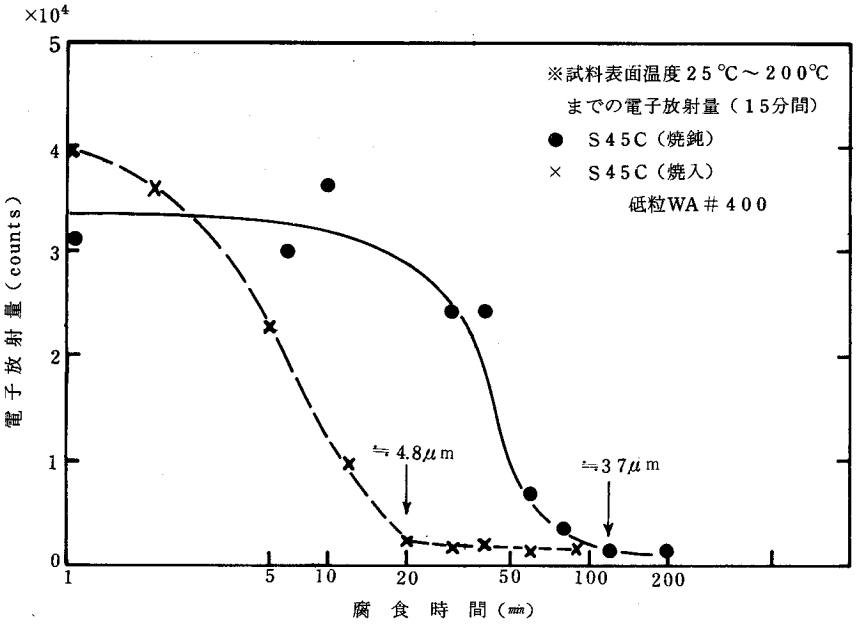


図6－7　ラッピング面表層からの電子放射量

結　論

以上の測定結果より，砥粒加工した仕上面からのエキソ電子放射測定はそのグロー曲線より，定性的には仕上面への砥粒の埋め込み度合，定量的には埋め込んだ砥粒の深さを判断する有効な一つの手段となることがわかった。

文　献（第６章）

1）S. Ishiwata：Reports of Faculty of Engineering KANAGAWA UNIVERSITY, 19（1981）53.

2）正野崎，大島，百瀬：精密機械、42, 7（1976）668.

3）松永，内藤：昭和44年度精機学会春季大会学術講演会前刷集, 75.

4）松永，内藤：昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会前刷集, 403. 同（第3報），同405.

第7章　総　　括

従来から，研削加工機構，加工現象については多くの研究がなされているが，研削加工は多分に摩擦作用を伴う微小切込みの高速切削であり，また，その工具となる研削砥石中の砥粒の形状や大きさが不規則であり，さらに，研削加工中に砥粒の破砕や目つまりなどが時々刻々変化するために，その詳細については不明な点を多々残している。

そこで，本研究は研削加工での切れ刃となる砥粒，および仕上面からのエキソ電子放射を測定し，この測定方法が研削加工における新たな評価手段となり得ることを述べ，さらにエキソ電子放射現象をもとにして，研削機構，研削油剤のレビンダ効果，仕上面の状態などについて，新たな考え方を提唱しようとしたものである。

本研究の結果，明らかとなった事項は，それぞれの各章の考察および結論の項で述べたので，ここでは，これらを通観して，主要な事項の概要を記述する。

(1)　第1章では，エキソ電子放射現象（クラマー効果）について，その研究経過，意義，そしてその放射機構，応用について述べ，ついで本研究の目的と意義について述べた。

(2)　第2章では，今日まで一般的に使用されてきたエキソ電子の検出器について述べ，ついで，本研究においてエキソ電子の検出器として使用したガイガーミュラー計数管の構造，計数特性，そして測定方法について述べた。特に本研究において工夫したことは以下のことである。計数管の試料台を純金板でおおい，試料台の酸化などによるよごれを防ぎ，試料台からのエキソ電子の放射を防止した。加熱測定時に計数管の周囲に恒温水を流し，計数管のプラトー特性の変動をおさえた。

(3)　第3章では，現実の研削加工に使用されている各種砥粒からのエキソ電子を

測定し，この測定方法が砥粒を評価する新たな手段となり得ることを吟味した。

その結果，砥粒の種類によるエキソ電子放射特性としては，

i）　Al_2O_3系砥粒からのエキソ電子放射量はきわめて多く，特にWA砥粒からは著しい。また，SiC系砥粒からはほとんど測定されなかった。A砥粒，単結晶砥粒，ジルコニア系砥粒からは中間的な電子放射量が測定された。

ii）　ダイヤモンド砥粒は250℃程度の熱刺激で人造のものからはわずか，天然のものからはほとんど電子放射が認められない。しかし，CBN砥粒からはダイヤモンド砥粒よりはもちろん，WA砥粒よりもはるかに著しい電子放射が認められる。

破砕砥粒からのエキソ電子放射特性については，

i）　同一破砕条件下では破砕前の粒度番号が小さい（破砕前の粒径が大きい）ものほど，ほぼ比例的に電子放射量が増加する。

ii）　破砕砥粒からの電子放射は金属面からの電子放射の減衰と同様の傾向を示す。

砥粒の熱処理工程の差異によるエキソ電子放射特性については，

i）　熱処理工程を経た砥粒からの電子放射量は著しく減少するが，それを新たに破砕すると再び電子放射量は増加する。

ii）　Al_2O_3系砥粒はその熱処理工程の温度の低いほど，特に600℃を限界として，それ以下において電子放射量は多くなる。SiC系砥粒からは熱処理の有無にかかわらず，ほとんど電子放射は認められない。

以上の結果より，エキソ電子放射測定が砥粒の新しい評価手段となることがわかった。

(4)　第4章では，第3章の結果をもとに，砥粒からのエキソ電子放射現象と研削加工現象との関連を吟味した。その吟味の結果，

i）　砥粒からの電子放射量の多少が研削加工における目づまり現象や砥粒

切れ刃の微小切削機構，また，研削油剤の作用などにつながりをもつ一因子となり得ることが推察される。

ii）　ＣＢＮ砥粒の砥石が難研削材の合金鋼に対して非常に優れた性能を示す考え方として，ＣＢＮ砥粒から研削局部で著しい電子放射が行われ，それが切れ刃の微小切削機構上，有利に作用し，また，研削油剤中の添加剤の作用にも一因子としてかかわりをもつことが，推察される。

砥粒から放射するエキソ電子が砥石結合度に及ぼす影響については，

i）　レジノイドボンド砥石において，砥粒からの電子放射と大越式結合度試験機のビットのくい込み深さについて検討すると，砥石に焼成する前の砥粒からのエキソ電子放射の多いものほど，ビットのくい込みが大きいことがうかがえ，電子放射は砥粒と結合剤の親和性，あるいは結合剤の重合に何らかの作用をなすことがうかがえる。

遊離砥粒加工における砥粒切れ刃の極微小切削作用に，砥粒からのエキソ電子放射が何らかの影響を与えることがうかがえる。

以上，砥粒からのエキソ電子放射が研削加工現象と関連をもつ一因子となり得ることを推察した。

(5)　第５章では，研削加工においては高速切削であるがために，その存在が疑問視されている研削油剤のレビンダ効果について，エキソ電子放射現象の観点より，その存在の可能性を示唆することを試みた。さらに，エキソ電子放射測定が研削仕上面表層を評価する新たな手段となることを述べた。ついで，油剤の二次的な洗浄作用などの効果を排除しての油剤塗布による研削実験を行い，その加工中の研削抵抗の検討により，研削油剤のレビンダ効果について検討した。

その結果，エキソ電子放射の観点より，

i）　研削仕上面からのエキソ電子放射の測定結果から，高速切削である研削加工においても，研削油剤の作用の一つとして，レビンダ効果の存在の可能性があることを示唆できた。また，エキソ電子放射測定が，研削

仕上面表層を調べる有力な手段となることが考えられる。

油剤塗布による研削実験結果より，

i） 普通給油法において，充分一般潤滑効果の期待できる無添加油剤を基準として，油剤塗布による研削実験を行い，オレイン酸の塗布効果を吟味すると，その効果は一般潤滑効果よりもレビンダ効果にもとずくものであると考えることが妥当である。

ii） 被削材に対してはアルミニウム合金においてレビンダ効果が著しく，ついで銅，軸受鋼，チタン合金の順であった。

iii） オレイン酸の濃度に対する効果の差異を吟味した結果，１０％にても原液に匹敵する効果を示すことがわかった。

iv） 各種添加剤の効果においては，脂肪酸系のものが著しく，ついで硫黄系，リン系，そして塩素系の順であった。

以上のことより，高速であるが，微小切込み加工である研削加工においても研削油剤の作用の一つにレビンダ効果を考える必要があると結論される。また，エキソ電子放射測定が，研削仕上面表層を調べる有力な手段となることがわかった。

(6) 第６章では，仕上面への砥粒の埋め込みの度合を仕上面から放射するエキソ電子を測定することにより検討した。その結果，砥粒加工した仕上面からのエキソ電子放射測定はそのグロー曲線より，定性的には仕上面への砥粒の埋め込み度合，定量的には埋め込んだ砥粒の深さを判断する有効な一つの手段となることがわかった。

謝　辞

終りに，本研究の遂行にあたり，終始御指導，御鞭撻を賜わりました神奈川大学工学部教授　正野崎友信先生に厚く御礼申し上げます。本研究をまとめるにあたり，いろいろ御教示下されました大阪大学工学部長　津和秀夫先生，大阪大学工学部教授　井川直哉先生，山田朝治先生，長谷川嘉雄先生，大阪大学産業科学研究所教授　川西政治先生に厚く御礼申し上げます。また，有益な討論，および御高配をいただいた相模工業大学工学部教授　重松日出見先生，神奈川大学工学部教授　鈴木昭先生，茨城大学工学部教授　百瀬義広先生，ヤナセ製油株式会社，日本陶器株式会社，協同油脂株式会社，東洋研磨材工業株式会社に厚く御礼申し上げます。さらに，本研究に御協力下さった神奈川大学工学部教務技術員 (故)落合勝治先生，古川進先生，佐々木安則先生をはじめ，正野崎研究室の方々に厚く御礼申し上げます。