Osaka University Knowledge Archive

Title	鉄鋼材料の精密研削におけるαAl203系砥粒切れ刃の摩耗機構に関する研究
Author(s)	山田, 弘文
Citation	大阪大学, 1976, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1874
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

鉄鋼材料の精密研削における αAl_2O_3 系砥粒切れ刃の摩耗機構に関する研究

昭和50年9月

山　田　弘　文

鉄鋼材料の精密研削における αAl_2O_3 系砥粒切れ刃の摩耗機構に関する研究

昭和50年9月

山　田　弘　文

目　次

第1章　緒論 ---------- 1

第2章　研削中における砥粒切れ刃と工作物の干渉状態 ---------- 5
2.1　緒言 ---------- 5
2.2　研削中砥粒切れ刃にかかる力（研削抵抗）---------- 5
2.2.1　実験方法 ---------- 6
2.2.2　砥粒切れ刃にかかる力 ---------- 7
2.2.3　研削抵抗の数式化 ---------- 8
2.2.4　研削抵抗と研削条件との関係 ---------- 9
2.3　砥粒切れ刃および砥石の摩擦面温度（研削温度）---------- 12
2.3.1　砥粒切れ刃の摩擦面の温度 ---------- 13
2.3.2　実験方法 ---------- 13
2.3.3　起電力の信号と研削温度 ---------- 16
2.3.4　研削温度の解析 ---------- 17
2.3.5　研削温度と研削条件との関係 ---------- 20
2.3.6　研削方式と研削温度 ---------- 22
2.4　砥粒切れ刃と工作物の摩擦長さ（接触弧の長さ）---------- 23
2.4.1　接触弧の長さおよび総研削長さ ---------- 23
2.4.2　実験方法 ---------- 24
2.4.3　接触弧の長さの計算式 ---------- 25
2.4.4　接触弧の長さと研削条件との関係 ---------- 27
2.5　研削抵抗、研削温度および接触弧の長さの相互関係 ---------- 29
2.6　結言 ---------- 29

第3章　砥粒切れ刃の摩耗と研削現象---------- 32
3.1　緒言---------- 32
3.2　砥粒切れ刃の摩耗性状---------- 32
3.2.1　実験方法---------- 33
3.2.2　摩耗に伴なう砥粒切れ刃の形状の変化---------- 35
3.2.3　砥粒切れ刃の摩耗面の性状-------- 35
3.2.4　第2摩耗領域の生成臨界条件------ 37
3.3　砥粒切れ刃の摩耗に伴なう研削現象の変化---------- 40
3.3.1　実験方法---------- 40
3.3.2　第2摩耗領域生成度数率---------- 41
3.3.3　第2摩耗領域生成度数率と研削現象との関係---------- 42
3.4　砥粒切れ刃の摩耗と仕上精度-------- 43
3.4.1　実験方法---------- 44
3.4.2　砥粒切れ刃の摩耗と仕上精度------ 46
3.5　結言---------- 47

第4章　αAl_2O_3 系砥粒の摩耗機構（その1）
—高温における αAl_2O_3 と鉄との反応—-- 50
4.1　緒言---------- 50
4.2　αAl_2O_3 の性質---------- 51
4.3　実験方法---------- 53
4.4　高温における αAl_2O_3 と純鉄との界面反応---------- 55
4.5　反応層の成因---------- 59
4.6　$FeAl_2O_4$ および反応層の性質-------- 62
4.7　ルビー単結晶と純鉄との界面反応------ 65
4.8　多結晶 αAl_2O_3 ならびに砥粒インゴ

ットと純鉄との界面反応 ---------- 67
4.9 反応層のIMA分析 ---------- 68
4.10 結言 ---------- 70

第5章 αAl_2O_3系砥粒の摩耗機構（その2）
—摩擦試験— ---------- 72
5.1 緒言 ---------- 72
5.2 αAl_2O_3系砥粒の摩耗機構の史的考察 ---------- 72
5.3 実験方法 ---------- 73
5.4 摩擦面上の反応生成物 ---------- 76
5.5 摩耗粉のX線分析 ---------- 81
5.6 αAl_2O_3の摩耗に与える酸素の影響 ---------- 82
5.7 鉄鋼材料と摩擦する場合のαAl_2O_3の
摩耗機構 ---------- 83
5.8 A砥粒の高速摩擦試験 ---------- 85
5.9 結言 ---------- 88

第6章 αAl_2O_3系砥粒切れ刃の摩耗機構 ---------- 90
6.1 緒言 ---------- 90
6.2 実験方法 ---------- 91
6.3 単粒研削におけるαAl_2O_3の摩耗機構 ---------- 92
6.4 研削砥石の砥粒切れ刃の摩耗機構 ---------- 96
6.5 研削砥石の減耗量 ---------- 101
6.6 結言 ---------- 103

第7章 総括 ---------- 105

謝辞 ---------- 107

第1章　緒論

近年機械部品の高精度化に伴ない、高い寸法精度が得られ，しかも仕上品の品質やあらさが1段と秀れている加工法が必要となり，多くの精密加工法が行なわれてきた。

研削は各種の材料に対して上記の要求を満足させることができ、しかも比較的良好な加工能率をもつ加工法であるため[1]，精密加工法および仕上加工法の1つとして多用されている。研削作用は，多刃の回転工具による高速高温下の切削および摩擦作用とみなすことができる[2]。したがって、切削の場合と同様に，工具と工作物とは互いに激しく摩擦し合うため，砥粒切れ刃は工作物に比べて相当かたいにもかかわらず研削長さが増大するに伴ない摩耗する。しかし従来の加工理論によれば，研削加工中の砥粒切れ刃は自生作用によって新生されるため，研削砥石は常に良好な切れ味を持続すると考えられてきた[3]。最近，加工量の少い精密研削や仕上研削を行なう場合には自生作用はほとんど認められなくなり、研削砥石の作業面に存在する大部分の砥粒切れ刃はその先端が平坦にすりへり摩耗して、鈍化の一途をたどることが明らかにされてきた。[4]

切削における切れ刃の摩耗が切削現象や切削仕上品の精度に影響を与えると同様に、研削においても砥粒切れ刃の摩耗は研削現象をはじめ、仕上品の精度や品質に影響を与えることが明らかにされている。[5]

最近、研削加工の適応制御化や数値制御化をはかるため、砥粒および砥粒切れ刃の摩耗特性を明らかにすることが必要となり、多くの研究がなされてきた。これまでの研究によれば、砥粒切れ刃は破壊[6]、変形[7]およびすべり

を生じて機械的に摩耗するほか、工作物との接触界面で生ずる物理化学的な機構によって摩耗する[8]と考えられているが、統一的な見解が得られるまでにはなお詳細な検討が必要とされている。

元来物質の摩耗現象は、摩擦作用に伴なう物質表面の逐次減少であるから、摩耗現象を解明するにはまず、摩耗が生ずる摩擦場の状態を正確に把握することが必要である。[9] 摩擦が行なわれる基礎的な条件すなわち、摩擦材の条件、接触条件、摩擦条件、摩擦系条件および雰囲気などが決定され、物体の相互移動が起るとそこに摩擦現象が生ずる。摩擦に伴なって生ずる摩擦現象すなわち、摩擦面温度、摩擦力、摩耗粉などは摩擦場の状態を端的にあらわすものとされている。

本研究は多用されている鉄鋼材料をAl_2O_3系砥石を使用して精密研削する場合の、砥粒切れ刃の摩耗機構を、研削機構および研削結果と関連させ実験的に検討するものである。

第1章は緒論である。

第2章では、研削機構を微視的に観察し、研削中砥粒切れ刃がおかれる摩擦の場を解析し、4章で行なうモデル実験の条件を検討する。研削中砥粒切れ刃にかかる力として研削抵抗、砥粒切れ刃の摩擦面温度として研削温度、砥粒切れ刃と工作物の摩擦長さおよび移動熱源の大きさの算定基準として接触弧の長さをとりあげ、これらを実測するとともに解析的な検討を加える。

第3章では、研削中における研削現象および研削結果と砥粒切れ刃の摩耗との関係をとり扱う。まず砥粒切れ刃の摩耗過程を微視的に観察してその実体を把握したのち、砥粒切れ刃の摩耗と研削砥石の切れ味との関係を調べる。ついで工作物の仕上精度および仕上品質と砥粒切

れ刃の摩耗との関係を検討する。

第4章では、鉄鋼材料とαAl_2O_3系砥粒とを摩擦する場合に、両者の接触界面で生起する現象をモデル実験で追求する。すなわち、αAl_2O_3系砥粒を単結晶αAl_2O_3で、鉄鋼材料を純鉄でおきかえ，2章で得られた高温条件下において、両者の接触界面で生起する現象を準静的に検討する。

第5章では、αAl_2O_3および同系砥粒と鉄鋼材料との摩擦試験を行ない、摩擦の結果排出される摩耗粉および摩擦材の摩耗面に存在する物質を分析し、4章で得られた結果を考慮して、αAl_2O_3の摩耗機構を実験的に検討する。ついで軟鋼と摩擦する場合のA砥粒の摩耗量を摩耗機構の面から論ずる。

第6章では、鉄鋼材料を研削する場合の砥粒切れ刃の摩耗機構を5章とほぼ同様な手順でとり扱う。すなわち単粒研削試験，定切込みおよび定圧研削試験を行なって、砥粒切れ刃の摩耗面、研削仕上面、切屑などを分析した結果に前章までに得られた解析結果を考慮して、αAl_2O_3系砥粒切れ刃の摩耗機構を検討する。ついで摩耗機構をもとにして砥石の減耗量を説明することを試み、砥石の摩耗を研削温度の関数として表わすことを検討する。

第7章は総括である。

なお本論文において特に示さない限り砥石とは研削砥石を，αAl_2O_3とは単結晶ホワイトサファイヤを意味している。図中において折れ線で示すのは，実験値である。

参考文献

1) 田中、津和：精密工作法(上)，共立出版，東京 (1955) 161.

2) 津和：機械加工学，養賢堂，東京（1973）148.
3) たとえば 熊谷：機械と工具，（1962−10）5.
4) たとえば
津和：精密機械，26，4（1960）199.
武野，長岡：精密機械，30，1（1964）38.
河村，山田：精密機械，37，8（1971）607.
5) H.Tsuwa, H.Yamada : Technol. Reports, Osaka Univ., 25(1975)1242.
6) R.P.Steijn : J.Appl. Phys., 32(1961) 1951.
7) N.S.Eiss, C.Richard : J.Am.Ceram. Soc., 49, 4 (1966) 221.
8) W.R.Brown, N.S.Eiss, H.T.Mcadams : J.Am. Ceram. Soc., 47, 4 (1964) 157.
9) 笹田：機械の研究，23，7（1971）89.

第2章　研削中における砥粒切れ刃と工作物の干渉状態

2.1　緒言

一般に摩擦および摩耗現象を正確に把握するためには、これらの現象の生起している場の状態や条件すなわち摩擦温度，雰囲気，摩擦荷重，摩擦距離などを明らかにする必要がある。砥粒切れ刃の摩耗を論ずるにあたっては、砥粒切れ刃が工作物を研削除去する干渉領域内でおかれている状態を明らかにしなければならない。

研削作用は多刃の回転工具による高温高速下の微小切削作用であり[1]，研削現象の生起する時間も極めて短いため，研削作用の実体を正確に把握することは困難なこととされてきた。従来の研削理論では単純化した幾何学的モデルを用いて砥粒切れ刃と工作物の干渉している場を説明してきたが、このモデルを用いては説明できない現象が存在することが明らかになり[2]，研削の実相により近いモデルを用いて干渉の場を説明することが必要になってきた。

本章では砥粒切れ刃の摩擦および摩耗現象が生起している場の状態を解明し，摩耗機構のモデル実験の条件を決定するため研削の実相を微視的に観察し，研削中砥粒切れ刃にかかる力として研削抵抗，摩擦面温度として研削温度および摩擦距離および摩擦による発熱源の大きさの算定基準として接触弧の長さについて，実験的および解析的に検討する。

2.2　研削中砥粒切れ刃にかかる力（研削抵抗）[3]

研削中砥粒切れ刃にかかる力は研削抵抗と呼ばれ，砥粒切れ刃にかかる力を示すのみならず，砥粒摩擦面温度，砥石と工作物との接触，加工系の振動などを見積る基準となる。

本節では研削中の砥粒切れ刃にかかる力を実験的に求め，研削抵抗をあらわす実験式を検討する。

2.2.1 実験方法

図2.1に研削抵抗測定装置の概要を示す。横軸型精密研削盤のテーブル上にとりつけた八角弾性リング型研削動力計（固有振動数，接線方向1200 Hz，法線方向900 Hz）のバイスに炭素工具鋼製工作物をとりつけ，これをA系砥石で研削する。1パスのみの研削（以下1パス研削と称する）によって除去された工作物の高さを測定するには電気マイクロメーターを使用し，研削前後の工作物の高さを測定し，その差から研削量を求める。[4)]

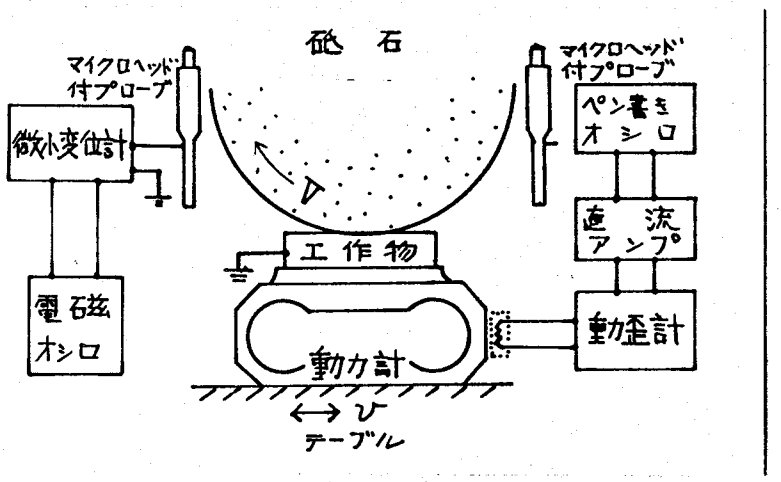


図2.1 実験装置の概要

砥粒切れ刃が工作物と接触する部分は，図2.2に示すように，砥石作業面上で光沢をもつ摩耗面として観察される。砥粒切れ刃の摩耗面積の平均値は，津和の方法[5)]で求めた砥石作業面の摩耗面積率ε（%），見かけの砥石と工作物の接触面積S_w(mm^2)および同時研削切れ刃数をもとに算出する。

表2.1に実験の条件を示す。

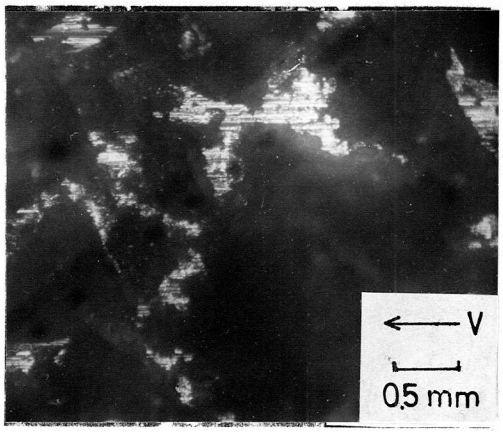


図2.2 砥石作業面の1例

表2.1 研削試験の条件

項　目	条　　件
砥　石	A46KmV
砥石周速度(V)	1000,1250,1600,1890 m/min
工作物速度(v)	5, 10, 15 m/min
切込み(t_3)	5,7.5,10,12.5,15,20,30μm
ドレッシング	ダイヤモンド単石ドレッサー 送り　0.02 mm/rev t_3:　10μmx2, 5μmx2 0μmx2回
研削方式	乾式・UP cut

2.2.2　砥粒切れ刃にかかる力

研削はフライス加工と同様に過渡的加工法[6]であるため，砥粒切れ刃にかかる力は，砥粒切れ刃と工作物の干渉領域の全長にわたって連続的に変化する[7]。排出される切屑の厚さもまた同様の変化をする。最近研削における最も基本的なパラメーターは平均切屑厚さであることが明らかにされ[2]，平均切屑厚さは研削現象，仕上精度および砥石摩耗などと密接な関係にあることが判った。研削抵抗の大きさと砥粒切込み深さは対応しており，平均切屑厚さに応ずる研削抵抗は干渉領域内で生ずる研削抵抗の平均値に等しいとみなせる。2.2.1でのべた方法で測定される研削抵抗の値は干渉領域内で発生する研削抵抗の平均値を示していると考えられているため[8]，測定値をもとに砥粒切れ刃にかかる力を論ずることができると考えられる。

同時研削切れ刃数をn，見かけの砥石・工作物の接触面積をS_w，平均切れ刃間隔をw(mm)とすると，F(kg)なる研削抵抗を生ずる場合1つの砥粒切れ刃にかかる力

F_g (Kg) は

$$F_g = \frac{F}{n}, \qquad n = \frac{S_w}{w^2} \qquad (2.1)$$

1例として粒度番号46の研石では w の実測値ならびに計算値は0.6~0.7mmであるから，表2.1の研削条件下で接線研削抵抗 F_t が2kg，法線研削抵抗 F_n が4kgである場合には接線方向（砥粒切れ刃の移動方向）に約0.2kg，法線方向（砥粒切れ刃の逃げ面に垂直な方向）に約0.4kg程度の力がかかることになる。接触面の圧力は摩耗面積率 ξ を（2.1）式の S_w に乗じて求めることができる。

2.2.3 研削抵抗の数式化

研削抵抗は研削条件，被削材の種類[8]，砥粒切れ刃の摩耗[9]および研削過程によって変化することが，実験的に確かめられてきた。

研削抵抗は接線研削抵抗，および法線研削抵抗に分けることができ，各々の成分は図2.3に示すように切削項（サフィックスC）および摩擦項（サフィックスf）より構成されていると考えると，次式で示すことができる。

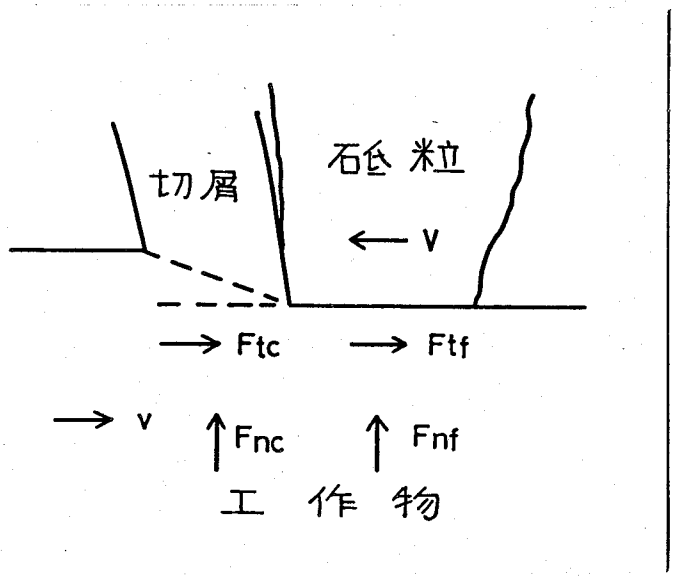


図2.3 砥粒切れ刃の切削モデル

$$F_t = F_{tc} + F_{tf} \qquad (2.2)$$

$$F_n = F_{nc} + F_{nf} \qquad (2.3)$$

(2.2) および (2.3) 式において，切削項は設定された研削条件によって変化する成分であり[10]，摩擦項は砥粒切れ刃と工作物の間で生ずる摩擦力にもとづく成分とみなすことができる。したがって研削試験を行ない，研削除去された工作物の高さおよび使用砥石の摩耗面積率 ε などを求めれば，(2.2) および (2.3) の関係より，研削抵抗を算出する実験式を導びくことができる。

2.2.4 研削抵抗と研削条件との関係

ドレッシングされた直後の砥石の摩耗面積率はほとんど0％とみなすことができる[11]から，ドレッシング直後の砥石で1パス研削を行なう場合の研削抵抗は，(2.2)および(2.3)式の第2項が0である場合のそれに相当するとみなせる。

A系砥石を用い焼入炭素工具鋼（SK-3）を1パス研削する場合の研削抵抗に与える研削条件の影響を，図2.4

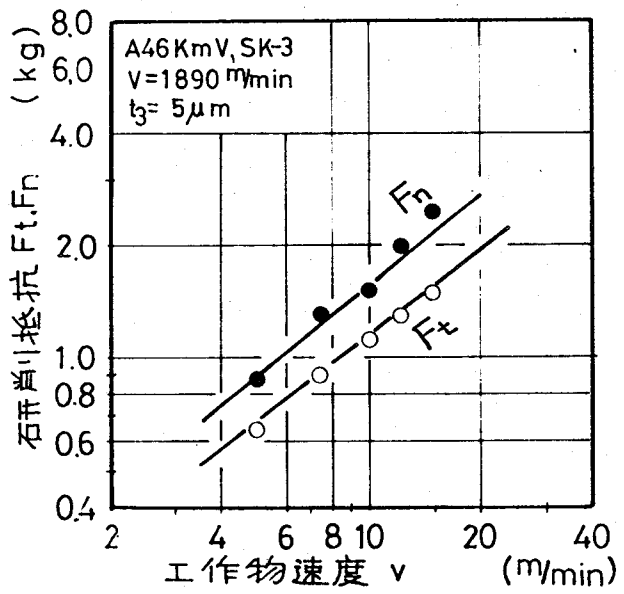


図2.4 工作物速度の影響

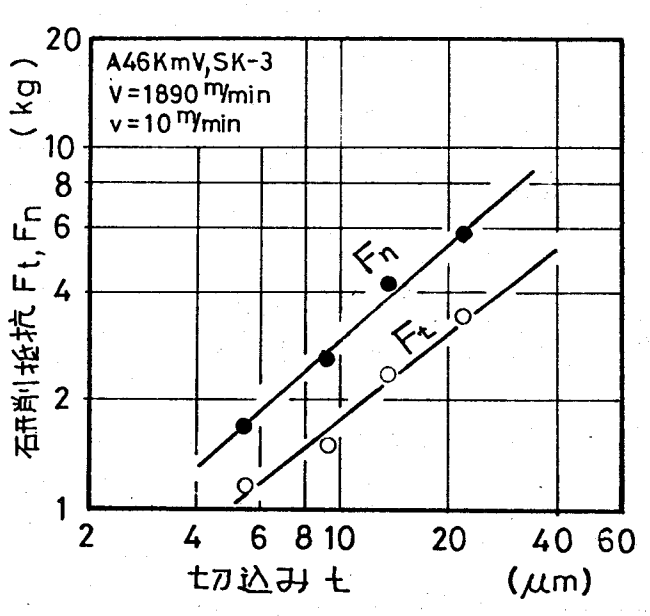


図2.5 切込みの影響

図2.5および図2.6に示す。これらの関係と研削抵抗が研削幅に比例するという経験則から，研削抵抗と研削条件の関係をあらわす実験式として，つぎの2式が得られる。

$$F_{tc} = k_{tc} \cdot V^{-0.75} \cdot v^{0.75} \cdot t^{0.83} \cdot B^{1.0} \qquad (2.4)$$

$$F_{nc} = k_{nc} \cdot V^{-0.78} \cdot v^{0.78} \cdot t^{0.87} \cdot B^{1.0} \qquad (2.5)$$

ただし，k_{tc}, k_{nc}：定数，t：切込み(mm)，V：砥石周速度(m/min)，v：工作物速度(m/min)，B：研削巾(mm)，t_3：砥石の設定切込み

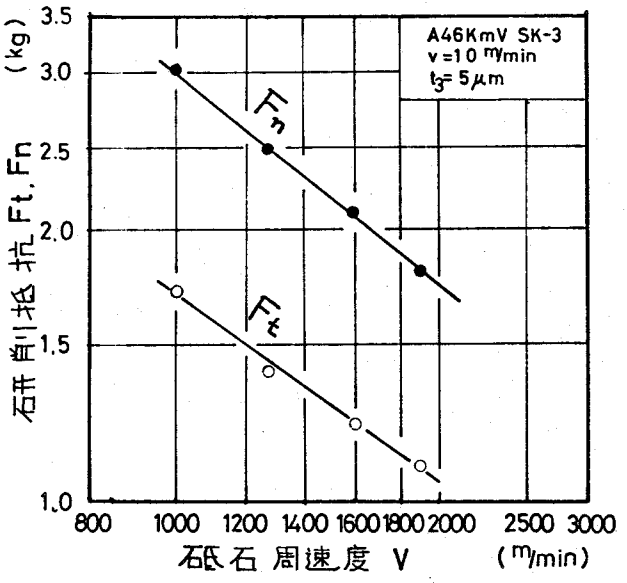


図2.6 砥石周速度の影響

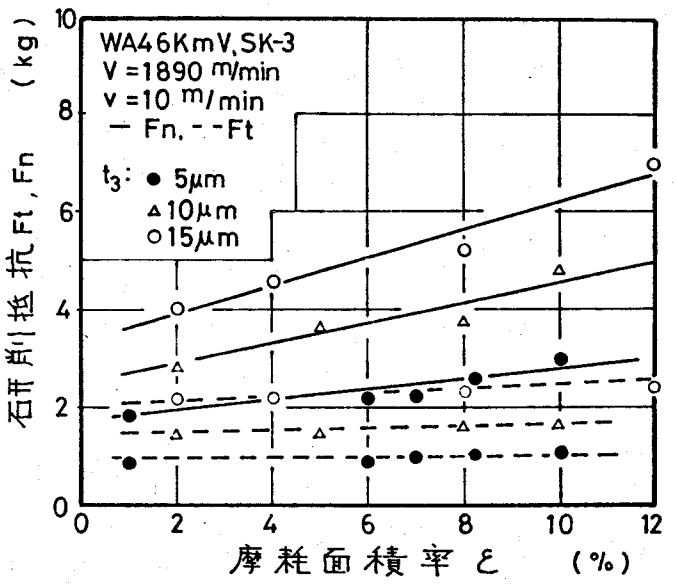


図2.7 摩耗面積率の影響

一方摩擦項は主として砥粒切れ刃の逃げ面と工作物との間に生ずる摩擦抵抗[12]であるから，摩耗面積率εが既知の砥石で研削する場合についてεが研削抵抗に与える影響を求めることにより，研削抵抗に与える摩擦項の影響を明らかにすることができる。図2.7に焼入炭素工具鋼をA系砥石で1パス研削する場合の，研削抵抗に与える

摩耗面積率の影響を示す。Malkin[12]の実験結果と同様に、F_tおよびF_nはεの増加に比例して増大することがわかる。

砥石と工作物の平均接触面積を$\bar{a}_R$(mm²)，平均接触圧力を$\bar{P}$(Kg/mm²)，摩擦係数をμとすれば，研削抵抗の摩擦項はそれぞれつぎの関係であらわされる。

$$F_{tf} = \mu \cdot \bar{a}_R \cdot \bar{P} \quad , \quad F_{nf} = \bar{a}_R \cdot \bar{P} \qquad (2.6)$$

摩耗面積率は砥石作業面々積に対する砥粒切れ刃摩耗面々積のパーセント比であるから，接触弧の長さをl_s(mm)とすると(2.2)および(2.3)式は最終的につぎの2式となる。F_tとF_nをKgで表わすと

$$F_t \fallingdotseq k_{tc} \cdot V^{-0.75} \cdot v^{0.75} \cdot t^{0.83} \cdot B^{1.0} + \mu \cdot \bar{P} \cdot l_s \cdot B \cdot \varepsilon \qquad (2.7)$$

$$F_n \fallingdotseq k_{nc} \cdot V^{-0.78} \cdot v^{0.78} \cdot t^{0.87} \cdot B^{1.0} + \bar{P} \cdot l_s \cdot B \cdot \varepsilon \qquad (2.8)$$

A46KmV砥石を用いて焼入工具鋼を研削する場合には

k_{tc} = 5.5 (Kg/mm$^{1.8}$)

k_{nc} = 8.1 (Kg/mm$^{1.8}$)

μ = 0.3 ～ 0.5 で

$\bar{P}$ = 130 (Kg/mm²)

となっている。ここで切込みtは実際に研削除去された深さをあらわしている。

(2.7)および(2.8)の関係は1パス研削のみならず、連続研削過程においても成立する。

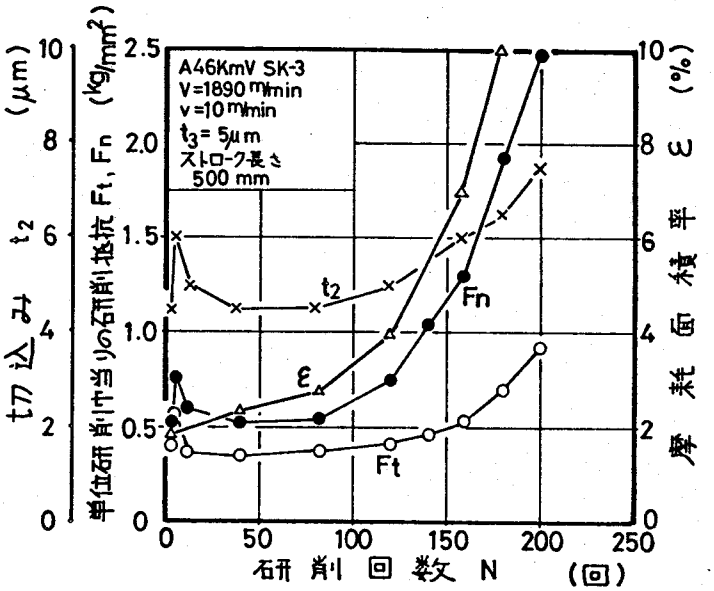


図2.8 研削過程におけるε, t_2の変化

すなわち，連続研削過程においては研削熱の影響を受けて工作物が熱膨張するため，砥石の切込み t_2 (μm) は変化する。[9] また砥粒切れ刃の摩耗は ε を増大させる。ここで，研削1回は工作物の全長を1回研削することを意味している。図2.8にこれらが変化する状態の1例を示す。

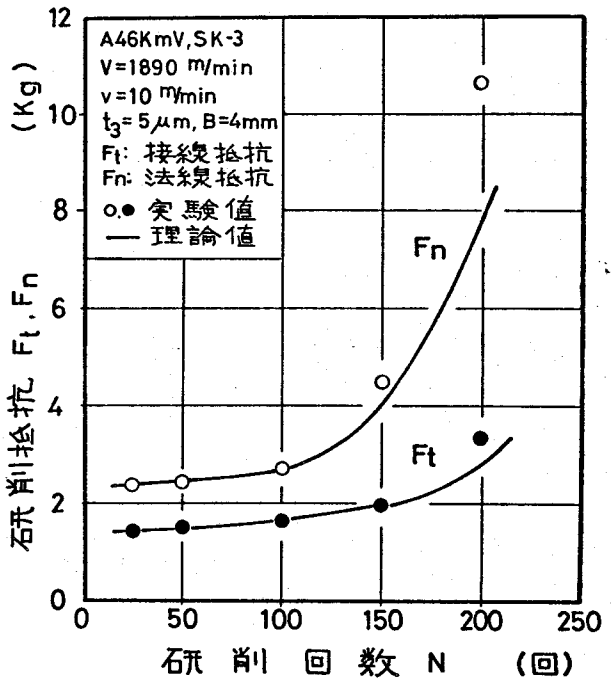


図2.9 計算値と実験値との比較

図2.9に連続研削過程における研削抵抗の実験値と、研削条件および ε をもとに(2.7)および(2.8)式を用いて算出した計算値との比較を示す。実用される研削回数の範囲内で計算値と実験値とは比較的よく一致することがわかる。なお l_s は(2.21)式で求める。

以上本節でのべた結果から，研削中砥粒切れ刃にかかる力を見積ることができる。

2.3 砥粒切れ刃および砥石の摩擦面温度(研削温度)[13]

砥粒切れ刃の切削作用に伴なって消費される研削エネルギーの大半は，砥粒切れ刃と工作物との摩擦によって生ずる摩擦熱に変換され，砥石の損耗を促進させるとともに工作物に熱的な影響をおよぼす。

本節では研削中における砥粒切れ刃の摩擦面温度を研

削温度としてとらえ，実験的および解析的に検討する。

2.3.1　砥粒切れ刃の摩擦面の温度

研削中の砥粒切れ刃の摩擦面および工作物の表面は、砥粒切れ刃の切削作用に伴なって発生する剪断熱および摩擦熱によって、極めて高温に加熱される。Peklenik[14]によれば，研削中の砥粒切れ刃の先端の温度は，瞬間的に2000°Cにも達すると言われている。

研削に伴なって生起する砥粒切れ刃および工作物の温度上昇を研削温度と称し，つぎのような温度を意味する。

(1)砥粒研削点温度 θ_g (°C)

砥粒切れ刃のすくい面と切屑との接触面，砥粒切れ刃の逃げ面および切屑剪断面における温度の総称で，砥粒切れ刃の摩耗および寿命と密接な関係にある。[15]

(2)砥石研削点温度 θ_s (°C)

砥石と工作物との接触面内における温度のことであり，研削焼けなど工作物仕上面の状態と密接な関係にある。

(3)工作物温度 θ_w (°C)

工作物の温度であり，工作物の熱変形，研削割れなどと密接な関係にある。

上記の関係から，研削中砥粒切れ刃がおかれる温度場を解明することは研削温度，とりわけ砥粒研削点温度を明らかにすることにほかならない。

2.3.2　実験方法

図2.10に研削温度を測定する実験装置の概要を示す。研削動力計上に固定した測温用工作物（焼入炭素工具鋼

製の工作物のほぼ中央に厚さ5μm の雲母を介して30μmφ のクロメル細線を挟み、アラルダイトを含ませてバイスで圧着してある）を砥石で研削すると、クロメル細線は切れ刃によって工作物に圧着されるため、両者の間に接点が構成される。この接点はクロメル－工作物の熱電対の温接点として作用するため、シンクロスコープを含む回路には熱起電力が生ずる。牧野[16]らと同様な方法を用いて調べた結果、接点の温度感応範囲は15μm であることがわかった。

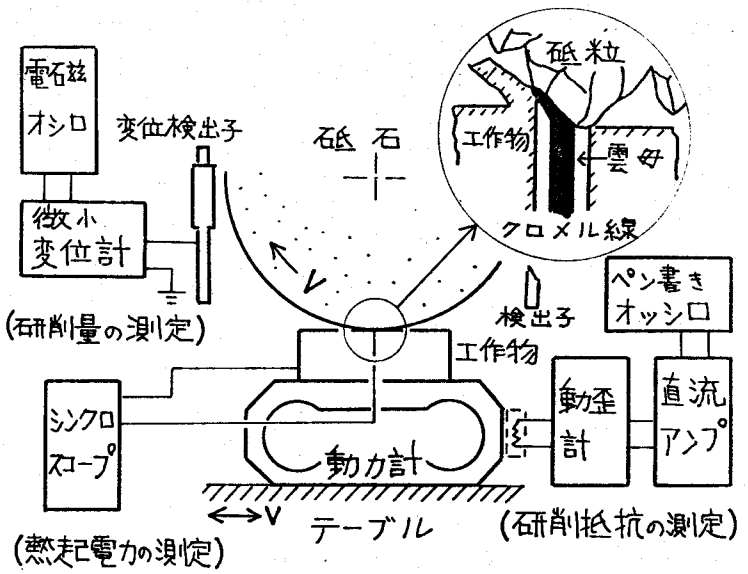


図2.10　実験装置の概要

構成された接点を熱電対の温接点とみなし、つぎの仮定の下に測定回路の温度応答性を求める。

(1)接点の温度感応答囲は接点から15μmの範囲にある。

(2)接点の比熱は鉄とクロメルの比熱の平均値で示せる。

(3)接点の体積は温度感応範囲に等しい。

(4)回路は全体として一次おくれの応答性を有する。

ある瞬間において温接点近傍の温度 θ_1 が θ_{10} から θ_2 に急変する場合の熱電対回路の温度感度 η は[17]

$$\eta = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (2.9)$$

ただし　τ：時定数（Sec），t：時間（Sec）

τ は測温部の熱容量 C（cal/°c）および移動熱源理論によって求めることができる摩擦熱の熱移動定数 K_1（cal/°c·sec）

から，次式により求めることができる。

$$\tau = \frac{C}{K_1} \qquad (2.10)$$

本実験の範囲内では $C \fallingdotseq 9.8 \times 10^{-8}$ (Cal/oc)，$K_1 \fallingdotseq 9.8 \times 10^{-3}$ (Cal/oc·Sec) と計算できるから，$\tau \fallingdotseq 1.1 \times 10^{-5}$ (Sec) となる。ここでA46KmV砥石で測温用工作物を研削するときの砥粒研削点の温度上昇を求める場合には，(2.9)の t に平均の摩耗長さをもつ砥粒切れ刃が温接点上を通過するのに要する時間 $t \fallingdotseq 6.7 \times 10^{-6}$ (Sec) を代入すると η はほぼ0.47となる。

同様に砥石研削点の温度上昇を求める場合には接触弧の長さが熱源の長さに等しくなるから，η はほとんど1に等しくなる。

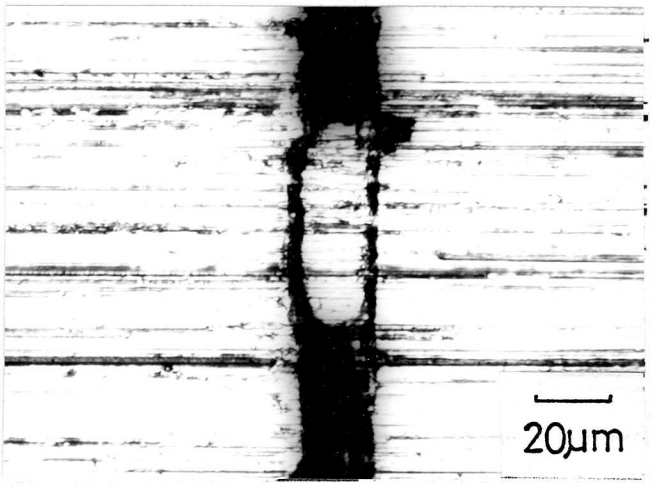


図2.11 細線の埋込み状態

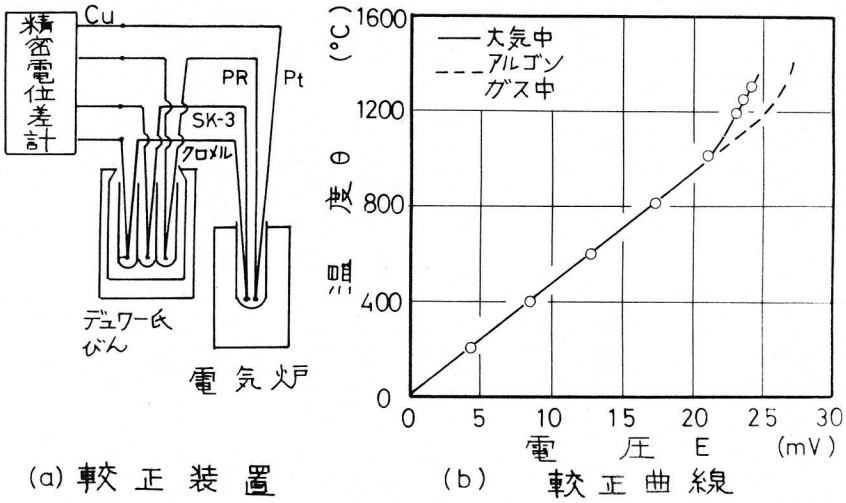


図2.12 熱電対の温度較正

図2.11はクロメル細線の埋込み状態を示している。細細は両側から圧着され楕円形に変形している。

図2.12は熱電対の較正法および較正曲線を示し，シン

クロスコープ上に描かれた信号は図2.12(b)の較正曲線を使用して温度に換算される。

表2.2に実験の条件を示す。

図2.13は実験装置の概観を示しており、1は変位検出子，2は外部トリガー用触針，3はA46KmV砥石，4は研削動力計および工作物5は工作物速度検出子，6は動歪計7は直流アンプ、8はペン書きオシロ，9および10は微小変位計，11は電磁オシロ，12はシンクロスコープを示す。

表2.2 研削試験の条件

項目	条件
砥石	A46K (M.P)mV
工作物	SK-3(焼入れ, Rc=60) 80×40×4mm クロメル線埋込み
砥石周速度	V=1890 m/min
工作物速度	v=5, 7.5, 10, 12.5 m/min
切込み	t_g=5, 10, 15, 20 μm/ストローク
ドレッシング	ドレッサー送り速度 50mm/min 切込み 10×2.5×2.0×2 μm
研削方式	乾式研削，プランジカット

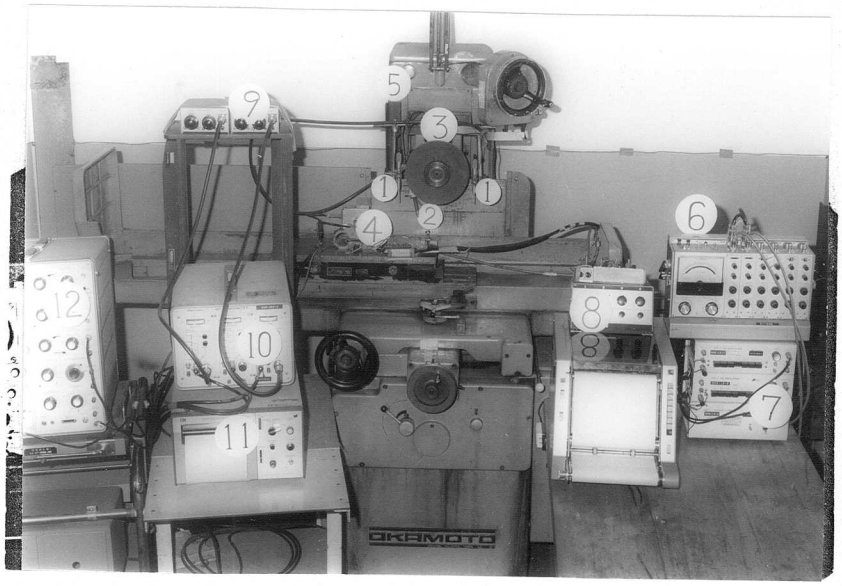


図2.13 実験装置の概観

2.3.3 起電力の信号と研削温度

研削中にシンクロスコープのブラウン管上に描かれる熱起電力の信号を図2.14に示す。

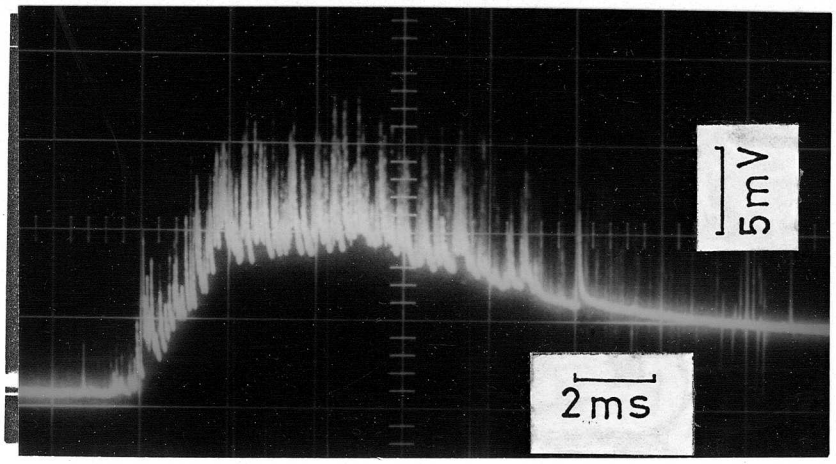


図2.14 熱起電力信号の1例

図2.14の信号は図2.15に示す意味をもっている。熱電対の冷接点は室温であるから，E_{ws}は工作物の研削表面温度上昇$\Delta\theta_{ws}$に応ずる出力，E_{sm}は砥石研削点温度上昇$\Delta\theta_s$の最大値に応ずる出力およびE'_{gm}は見かけの砥粒研削点温度上昇$\Delta\theta'_{gm}$に応ずる起電力を示している。

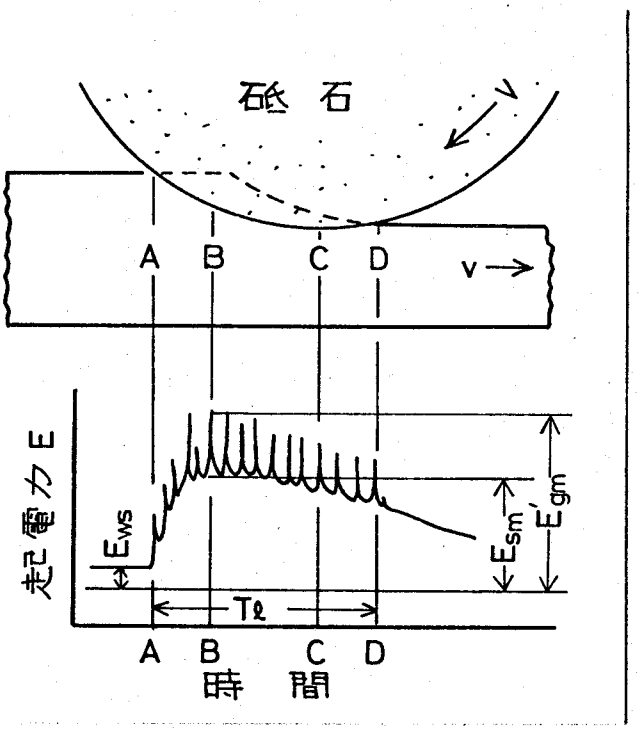
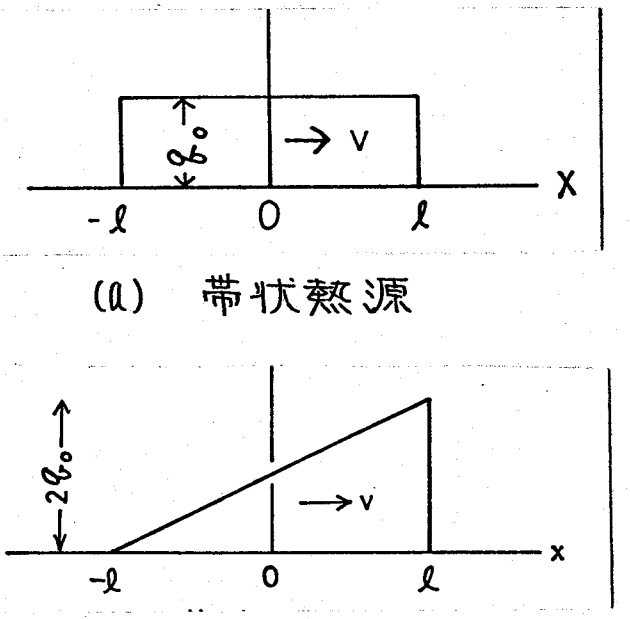


図2.15　信号の意味

またパルス状信号の持続時間T_ℓは，接触弧が接点上を通過するに要する時間であるから，T_ℓをもとにして平面研削における接触弧の長さを求めることができる。

2.3.4　研削温度の解析

研削温度は特定のエネルギー分布をもって移動する熱源によって生ずる砥粒研削点，砥石研削点および工作物の温度上昇とみなすことができる。研削エネルギーの分布は研削抵抗の関数であるから，移動熱源の形状は研削抵抗の分布形状でおきかえることができる。



(a)　帯状熱源

(b)　楔状熱源

図2.16　熱源の形状

砥粒研削点温度を解析す

る際の熱源の形状は,移動熱源の無次元特性値が極めて大きいから，図2.16(a)に示すように帯状熱源とみなせる。一方砥石研削点温度を解析する際の熱源の形状は、接触弧内における熱刺激の数が100回/sec以上であるため，接触弧そのものを熱源と考える。この場合の熱源の形状は研削抵抗の接触弧内における分布形[7]と同様な，図2.16(b)に示す楔形となる。

ここで砥粒切れ刃または砥石と工作物との接触界面の温度は，工具側から計算しても工作物側から計算しても等しいはずである。そこで以下の解析では工作物側を基準にして研削温度をとりあつかうことにする。

研削中の砥粒切れ刃と工作物との相互関係を，半無限体平面上を熱的に絶縁されて滑る幅$2l$の半無限体ライダーとみなすと，Jaeger[18]の移動熱源理論を適用して砥粒切れ刃と工作物の摩擦面温度すなわち砥粒研削点温度を求めることができる。

砥粒研削点の温度上昇の最大値$\Delta\theta_{gm}$およびその平均値$\Delta\bar{\theta}_g$は，C.G.S.単位系を用いるとつぎの2式で表わせる。

$$\Delta\theta_{gm} = \frac{4 \cdot \lambda_w q_g \cdot K \cdot L^{\frac{1}{2}}}{K(V+v)\pi^{\frac{1}{2}}} \qquad (2.11)$$

$$\Delta\bar{\theta}_{gm} = \frac{\Delta\theta_{gm}}{1.5} \qquad (2.12)$$

ただしq_g：単位時間単位面積当りの発熱量(cal/sec・cm²)（$q_g = F_{tg}(V+v)/J \cdot B \cdot l_s \cdot \varepsilon$），$F_{tg}$：砥粒切れ刃1個にかかる接線研削抵抗(g)，$V$：砥石周速度(cm/sec)，$v$：工作物速度(cm/sec)，$B$：研削巾(cm)，$l_s$：接触弧の長さ(cm)，$\varepsilon$：摩耗面積率(%)，$L$：熱源特性値(

$=l\cdot V/2\kappa$)，l：熱源（摩耗面）の長さの半分（cm），K：熱伝導率（cal/cm·sec·°C），κ：温度伝導率（cm²/sec），α_w：工作物への熱の流入割合。

一方，砥石研削点温度の上昇量$\Delta\theta_s$は，Jaeger[18]の(55)式を楔状熱源について適用し，次式を得る。

$$\Delta\theta_s=\frac{2\cdot\alpha_w\cdot K\cdot q_s}{\pi\cdot K\cdot v}\int_{X-L}^{X+L}e^{-u}\cdot K_0(|u|)\cdot\left(1-\frac{X}{L}\right)du$$

$$-\frac{1}{L}\frac{2\cdot\alpha_w\cdot K\cdot q_s}{\pi\cdot K\cdot v}\int_{X-L}^{X+L}e^{-u}\cdot K_0(|u|)\cdot u\cdot du \qquad (2\cdot13)$$

ただし，q_s：単位時間単位砥石面積当りの発熱量（cal/sec·cm²）（$=F_t\cdot(V+v)/J\cdot B\cdot l_s$），$K_0(|u|)$：2種0次の変形ベッセル関数。

図2·17に(2·13)式の数値計算結果を示す。図の横軸における$|X/L|\leqq1$は熱源の移動方向の長さと，接触弧の無次元長さをあらわしている。$1\leqq L\leqq10$の範囲，すなわち通常の研削条件の範囲では，温度上昇の最大値は接触弧の中央付近（$X/L\fallingdotseq0$）に存在していることがわかる。

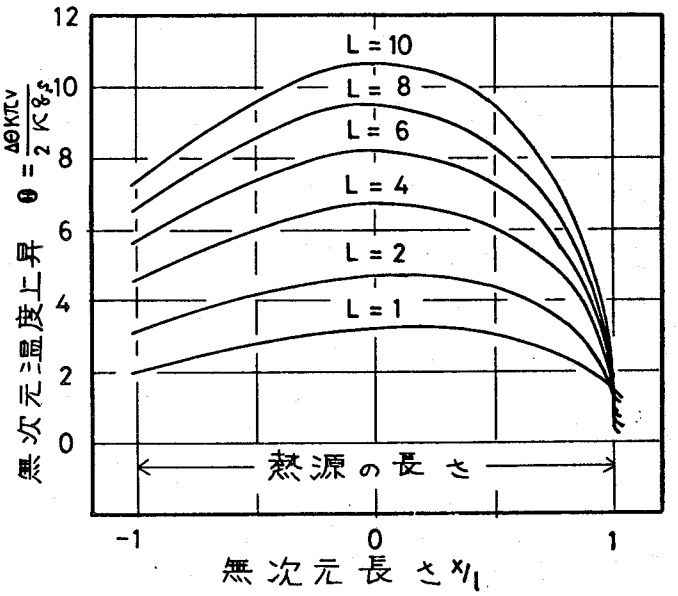


図2.17 数値計算結果

ここでJaegerの移動熱源理論を研削温度の解析に適用するには，高温における物性値および摩擦面の熱の絶縁性など正確さを欠く点もあり，充分注意すべきであるが，Trial法により近似値

を求めて使用するほか，発生する熱の流入割合 α_w を考慮することにより補正を行なう。

α_w の計算方法は，砥粒切れ刃の切削機構をも考慮してある高沢の方法[19]による。

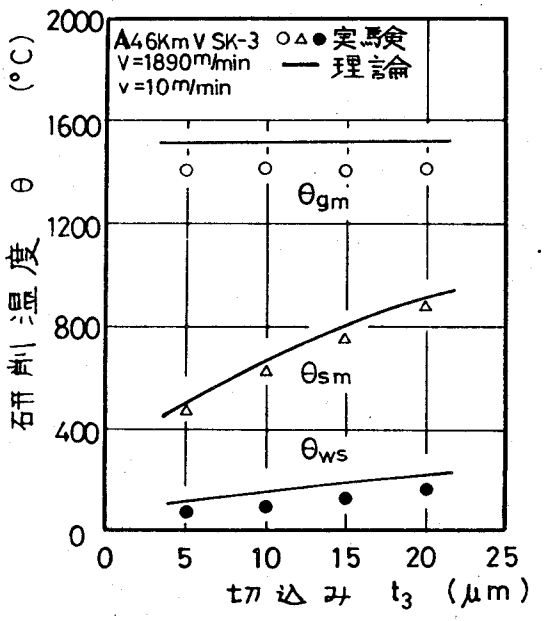
α_w の計算結果を表2.8に示す。

表2.8　熱の流入割合

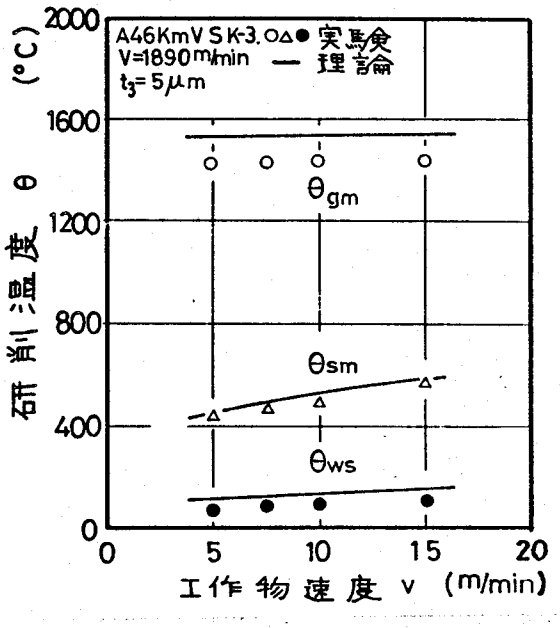
砥石周速度(V)	切込み (t_3)	工作物速度(v)	単位巾当りの接線研削抵抗(F_T/B)	流入割合(α_w)
1890 m/min	5 μm	5.0 m/min	0.20 kg/mm	0.76
		7.5	0.23	0.72
		10.0	0.25	0.69
		15.0	0.30	0.62
	5 μm	10 m/min	0.25 kg/mm	0.69
	10		0.40	0.70
	15		0.65	0.71
	20		0.80	0.72

本実験の範囲内では，全発熱量のうち約70～80 %が工作物側へ流入することがわかる。

2.3.5　研削温度と研削条件との関係



(a) 切込みとの関係



(b) 工作物速度との関係

図2.18　研削温度と研削条件との関係

シンクロスコープのブラウン管上に描かれる熱起電力信号を撮影した写真フイルムを解析し，熱電対の感度を補正して研削温度の実測値を求める。この方法を用いる場合には，高速信号に対するフィルムの感度が重要な問題となる。本実験では Transient recorder を使用して電気的に記録した信号と，同時に撮影したフイルム上の信号とを比較した結果両者のピーク値が等しいことから，十分な感度を有する記録法を使用していると考えられる。

図2.18に研削温度の測定結果とこれに対応する理論値を示す。図2.18には研削行程にはいる直前の工作物の表面温度θ_{ws}と，階差法で計算したθ_{ws}の理論値も付記してある。砥粒研削点温度θ_gの最大値θ_{gm}，砥石研削点温度θ_sの最大値θ_{sm}およびθ_{ws}の実験値ならびに理論値は，研削条件の関数であることがわかる。θ_{gm}が1400℃付近に一定しているのは，熱電対を構成しているクロメルの融点が1420℃であるので，この温度以上では熱電対の作用をなさないためと考えられる。またθ_{gm}の理論値は，研削熱が工作物の融解に消費されるために，工作物(SK－3)の融点をこえない。表2.4に(2.11)および(2.12)式を

表 2.4　数値表

項目	比重 ρ (g/cm³)	熱伝導率 K (cal/cm.sec°C)	比熱 C (cal/g°C)	温度伝導率 κ (cm²/sec)
A砥粒	3.9	3.7×10^{-3}	0.18	5.27×10^{-3}
A砥石	2.2	1.8×10^{-3}	0.16	5.1×10^{-3}
工作物	7.8	0.13	0.11	0.15

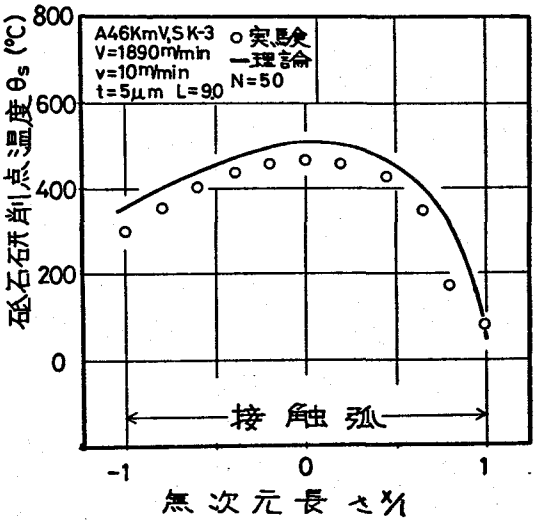


図2.19　θ_sの分布形

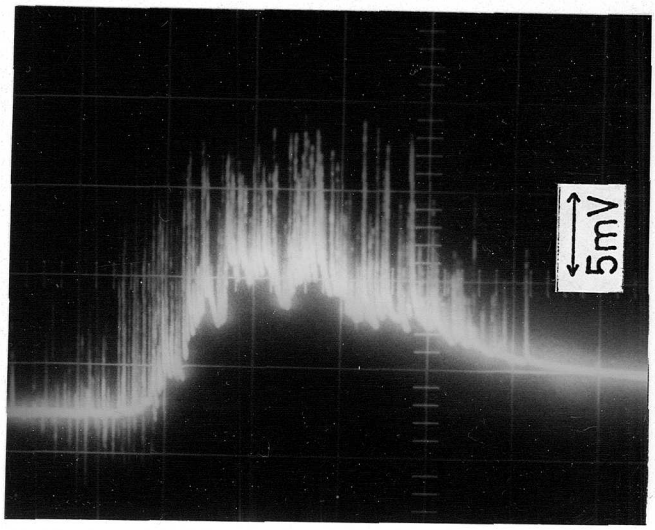
用いて研削温度を求める際に使用する物性値を示す。

図2.19に接触弧内部において研削方向に測定した砥石研削点温度の分布状態を示す。θ_{sm}の得られる位置が接触弧の中央付近にあること,および理論値と実験値とは比較的よく一致することがわかる。

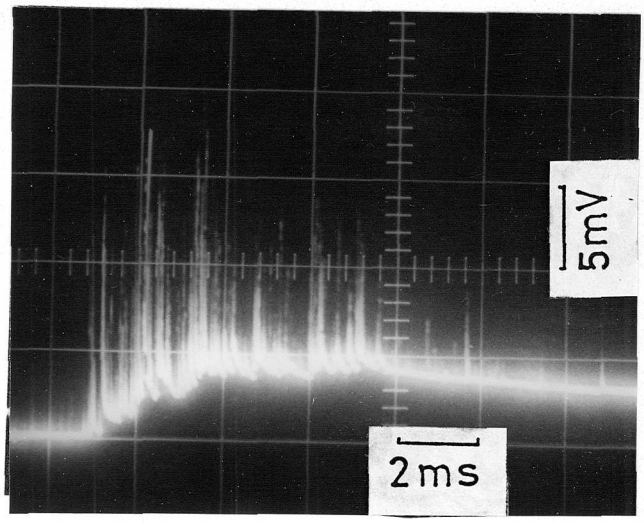
2.3.6 研削方式と研削温度

図2.20(a)に下向き研削時の，図2.20(b)に水道水を用い湿式研削する際に発生する熱起電力信号の1例を示す。図2.14に示した上向き研削のそれにくらべ，下向き研削ではθ_sのたち上りが早く，温度分布の形状も円弧状に近づいていることがわかる。したがって，下向き研削の方が上向き研削にくらべて砥粒切れ刃の食い込みもよくなっているものと予想される。θ_{gm}の値は両者とも等しい。

乾式研削と湿式研削研削とを比較すると，θ_{gm}の値はほぼ等しいが，θ_sおよびθ_{ws}の値は湿式研削のそれらの方が低い。したがって，砥粒研削点温度は研削方式にかかわらず常に一定であ



(a) 下向き研削 (N=40)



(b) 湿式研削 (N=40)

図2.20 信号の1例

るとみなすことができる。また研削液の冷却効果はθ_gよりもむしろθ_sの方に顕著にあらわれるものとみることができる。

以上のべてきたごとく、本節の解析および実験結果によって、研削中に砥粒切れ刃がおかれている温度場が明らかになるとともに、静的モデル実験を行なう場合の入力条件を得ることができた。

2.4 砥粒切れ刃と工作物の摩擦長さ（接触弧の長さ）[4]

研削中の砥粒切れ刃は断続的に工作物と接触し切削を行なう。両者が接触する領域は接触弧と呼ばれ、すべての研削現象が生起する領域であるほか、砥粒切れ刃と工作物が摩擦し合う場でもある。

本節では、砥粒切れ刃が工作物を1回研削する際の両者の摩擦長さが、砥石および工作物の弾性変形を考慮した接触弧の長さに等しいことに着目し、接触弧の長さを検討し、あわせて移動熱源の大きさをも明らかにする。

2.4.1 接触弧の長さおよび総研削長さ

接触弧の長さlは、砥石および工作物の直径を夫々D_GおよびD_Wとすれば、幾何学的な関係式から

$$l = \left(1 \pm \frac{v}{V}\right)\sqrt{\frac{t}{\frac{1}{D_W} \pm \frac{1}{D_G}}} \qquad (2.14)$$

ただし、1般的な研削条件では$v/V \fallingdotseq 0$，切込みtは砥石の設定切込みt_3で代用されている。

したがって、研削作業中1つの砥粒切れ刃が研削する工作物の長さすなわち総研削長さ L_G は

$$L_G = N \cdot n \cdot \frac{L_w}{v} \cdot l \qquad (2.15)$$

ただし N：研削回数，n：砥石回転数，L_w：工作物の長さ，v：工作物速度

しかし最近になって砥石が弾性体であること、研削中の接触弧の長さは（2.14）式で求まるそれよりも可成り長いことが明らかにされ[16]（2.14）式の修正が必要となってきた。

2.4 2　実験方法

研削中の接触弧の長さを測定するには，前節の図2.12の装置を使用し表2.2で示した条件で研削試験を実施した。前節図2.15に示した信号の持続時間 T_l は，接触弧の全長が温接点上を通過するに要する時間に等しい。したがって T_l と工作物速度 v が判れば，接触弧の長さ l を算出できる。

工作物速度は，研削盤のテーブル上に一定間隔でセンサーをとりつけ，センサーから出る信号と標準タイマーから出る信号とを比較して求めた。

接触弧の長さを算出するのに必要な切込み t（研削除去された深さ）は，非接触型微小変位計を用いて測算定した。

いま平面研削における接触弧の長さを l_s，測温部の接点の感応範囲を Δl_s とすれば

$$l_s \fallingdotseq \frac{50}{3} \cdot v \cdot T_l - 2\Delta l_s \qquad (2.16)$$

ただし V：工作物速度(m/min)，T_ℓ：信号の持続時間(Sec)，Δl_s：温度感応範囲(mm)（本実験の場合 Δl_s は 0.015 mm）

2.4.3 接触弧の長さの計算式

研削点近傍における砥石と工作物の接触状態を図2.21に示すモデルであらわすと，接触弧の長さは幾何学的関係から導出できる。

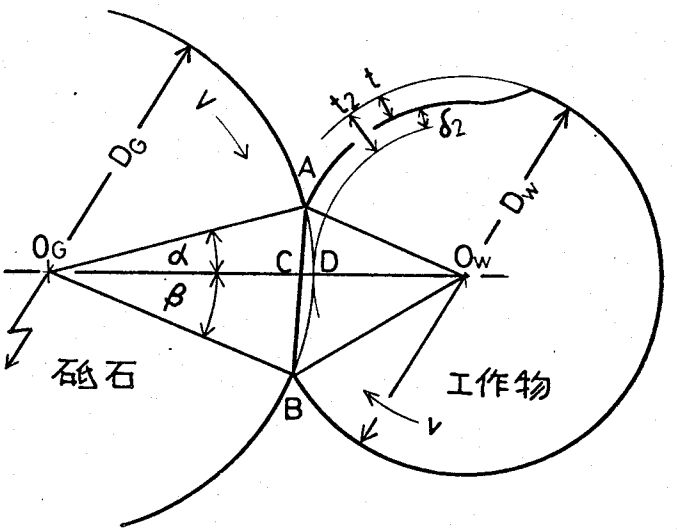


図2.21 接触弧の解析図

図2.21において，接触弧の長さ l_s は弧 $\overset{\frown}{AB}$ に等しい。ここで砥石と工作物の弾性変形量は $\overset{\frown}{AB}$ にくらべ小さいから $\overset{\frown}{AB} \fallingdotseq \overline{ACB}$ となる。したがって純幾何学的な関係から接触弧の長さ l は次式であらわすことができる。

$$l \fallingdotseq \left\{ \frac{t+\delta_2}{\frac{1}{D_W} \pm \frac{1}{D_G}} \right\}^{\frac{1}{2}} + \left\{ \frac{\delta_2}{\frac{1}{D_W} \pm \frac{1}{D_G}} \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (2.17)$$

ただし，t：切込み(mm)，δ_2：砥石および工作物系弾性変形量の和(mm)，D_G：砥石直径(mm)，D_W：工作物直径(mm)

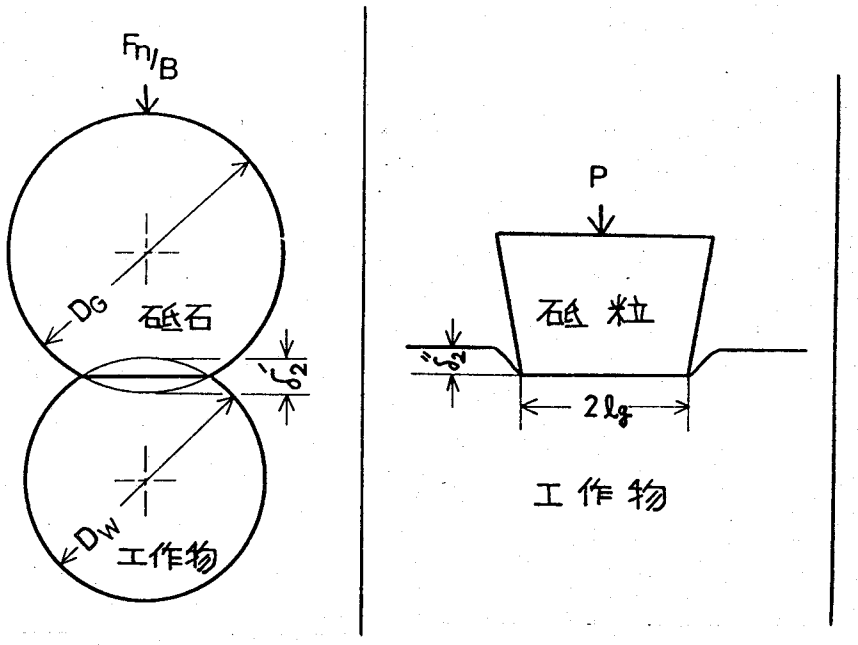
ここで δ_2 は，砥石と工作物との静的な弾性接触モデル（図2.22(a)）による変位 δ_2' (mm) および，砥粒と工作との静的な弾性接触モデル（図2.22(b)）による変位 δ_2''

(mm) の和とみなすと.

$$\delta_2 = \delta_2' + \delta_2'' \qquad (2.18)$$

であらわすことができる。

ここで δ_2' は、2円筒が互いに弾性接触する場合の中心間の距離の近より量として Hertz の公式より[20]



(a)砥石と工作物　(b)砥粒と工作物

図2.22　接触のモデル

$$\delta_2' = \frac{2F_n}{\pi B}\left[\frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1-\nu_G^2}{E_G}\right)+\left(\frac{1-\nu_W^2}{E_W}\right)\right\} + \frac{1-\nu_G^2}{E_G}\ln\frac{4D_G}{l_s} + \frac{1-\nu_W^2}{E_W}\ln\frac{4D_W}{l_s}\right] \qquad (2.19)$$

ただしサフィックスGおよびWは夫々砥石ないし工作物を示す. ν：ポアソン比, E：縦弾性係数 (kg/mm²)
Fn/B：単位研削巾当りの法線研削抵抗 (kg/mm)

一方 δ_2'' は、砥粒切れ刃の逃げ面の圧力は均一であり、砥粒は工作物に比べて剛体に近いと仮定すると、剛体スタンプを弾性体に押しつける際の変位量として求まる。[20]

$$\delta_2'' = \frac{P}{\pi E_W}\cdot 2(1-\nu_W^2)\ln 2 \qquad (2.20)$$

ただし，$P = F_n \cdot w^2/(4 \cdot l \cdot B \cdot l_g)$，$w$：平均砥粒間隔(mm)，$2l_g$；砥粒切れ刃の摩耗長(mm)。

ここで平面研削における接触弧の長さ l_s(mm)は(2.17)式において $D_w \to \infty$ として

$$l_s = \left\{D_G(t+\delta_2)\right\}^{\frac{1}{2}} + (D_G \cdot \delta_2)^{\frac{1}{2}} \qquad (2.21)$$

実際に(2.21)式を使用して l_s を求めるにはTrial法によって計算をすすめる。

なお，理論値計算に必要な砥石の縦弾性係数は中山[21]や海野[22]らによる値を，ポアソン比は田中[23]らの値を用い，E_w は 2.1×10^4 Kg/mm² を用いる。

2.4.4 接触弧の長さと研削条件との関係

図2.23に接触弧の長さ l_s と工作物速度 v との関係を示す。l_s は v の増大に伴なって

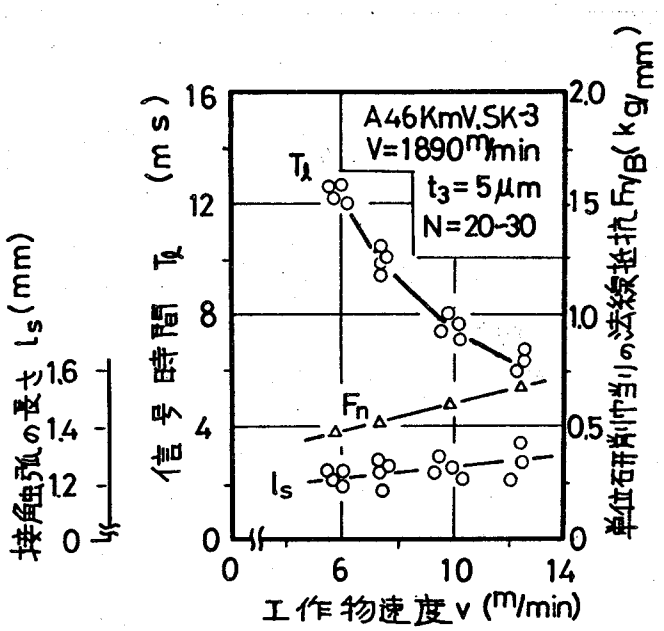


図2.23 工作物速度との関係

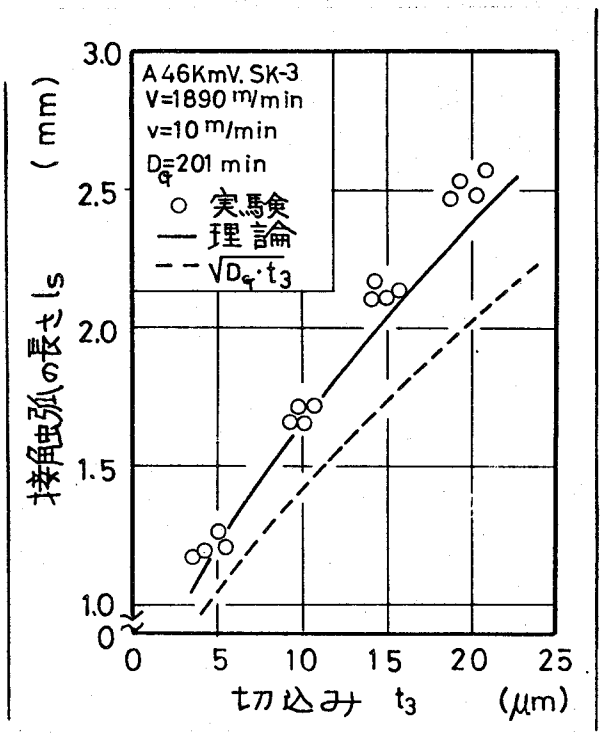


図2.24 切込みとの関係

わずかづつ長くなっている。ここで実際に砥粒切れ刃が工作物と干渉する軌跡はトロコイド曲線であるため、vの変化に伴なって生ずるトロコイド曲線の増加が問題になる。図2.23におけるvの変動範囲では、トロコイド曲線の長さ変化は0.1%以下であり、l_sの増加に寄与するvの効果は無視できる。したがってl_sの増加は、vの増大に伴なって生ずる法線研削抵抗F_nの増大（式(2.8)参照）の影響を受けているものと考えられる。

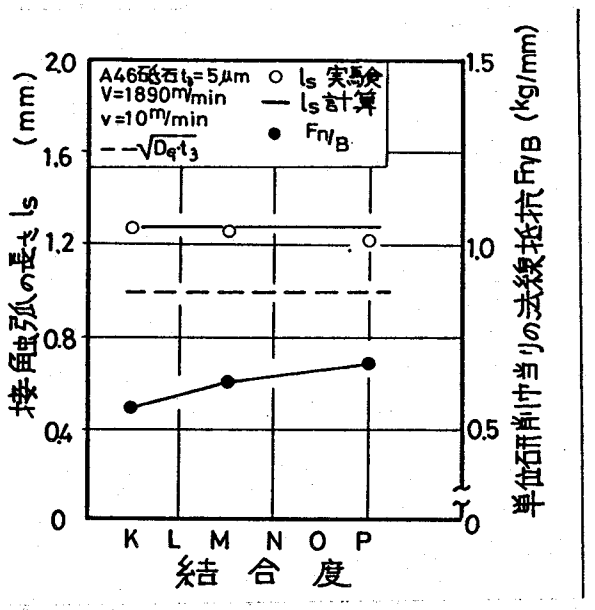


図2.25　結合度との関係

図2.24はl_sと、砥石に与えた切込みt_3(μm)との関係を示す。l_sはt_3が大なるほど長く、(2.14)式による計算値に比べ実験値は20～30%程度長くなっている。また図2.23および2.24において実線で示されているl_sの理論値は、実験値の傾向をよく示している。

図2.25にl_sと砥石の結合度との関係を示す。砥石の結合度は砥石の縦弾性係数と研削抵抗に影響を与えるから、l_sには両者の相乗効果があらわれているとみることができる。(2.21)式によって求めたl_sの計算値は実験値と比較的よく一致している。

本節の解析により、砥粒切れ刃と工作物が摩擦し合う長さを有効に示すことができる理論式を得ることができた。

2.5 研削抵抗，研削温度および接触弧の長さの相互関係

(2.7)(2.8),(2.11) および(2.21)式は研削中の砥粒切れ刃の摩擦状態を示すことが判った。各々の式中に含まれる変数を検討すると，共通の変数を持つ式が2つ以上存在し，各々の式であらわされる現象が相互に影響を与え合うことがわかる。したがって，研削中に砥粒切れ刃にかかる力，砥粒切れ刃の摩擦面温度および砥粒切れ刃と工作物との摩擦長さは，いずれの1つが増大しても他の現象を変化させる。例えば,砥粒切れ刃にかかる力が増大すれば，全体として研削抵抗は増加し研削温度すなわち砥粒切れ刃の摩擦面温度の上昇をもたらす。同時に砥粒切れ刃の摩擦長さたる接触弧の長さも増大するため，ついには砥粒切れ刃と工作物との摩擦の条件が一層過酷になる。過酷な摩擦条件は砥粒切れ刃の摩耗を進行させ，工作物の仕上精度をも低下させることに連なる。

2.6 結言

研削中に砥粒切れ刃がおかれている摩擦場の状態を明らかにし，モデル実験で設定しなければならない条件を見出すために，研削抵抗，研削温度および接触弧の長さを検討した。得られた主要な結果をまとめるとつぎのようになる。

1. 砥粒切れ刃にかかる力（研削抵抗）
   (1)研削中砥粒切れ刃にかかる力は，研削抵抗と同時研削切れ刃数より求めることができる。
   (2)砥粒切れ刃の摩耗を考慮した研削抵抗を求める実験式を導出した。A46KmV砥石で焼入炭素工具鋼を研

削し、実験式の適合性を調べた。実験式で求めた研削抵抗値は実験値の傾向とよく一致している。

(3)研削抵抗は摩耗面積率に比例して大きくなる。

(4)実験式は1パスおよび連続研削過程における研削抵抗の変化をよく説明できる。

2.砥粒切れ刃の摩擦面温度(研削温度)

(1)特製の測温用工作物を研削して，砥粒研削点温度，砥石研削点温度および工作物表面温度を実測した。

(2)移動熱源理論を用いて研削温度を算出した。理論値は実験値の傾向をよく説明している。

(3) A46KmV砥石で焼入炭素工具鋼を研削する場合，砥粒研削点温度は鋼の融点付近，砥石研削点温度は400～800°Cにまで達する。

(4)砥粒研削点温度は研削の方式によってはほとんど変化しない。

3.砥粒切れ刃の摩擦長さ(接触弧の長さ)

(1)測温用工作物を研削する際に発生する熱起電力信号の持続時間をもとに，接触弧の長さを実験的に求めた。実験値は従来多用されている接触弧の式を使用して求めた理論値より20～30%長い。

(2)砥石と工作物の接触をモデル化し，両者の弾性変形を考慮した接触弧の理論式を導出した。理論値と実験値はほぼ一致する。

(3)接触弧の長さは研削抵抗，砥石および工作物の大きさと物性ならびに切込みによって変化する。

4.研削抵抗，研削温度および接触弧の長さは，いずれの1つが増大しても他の現象が変化し，その結果砥粒切れ刃がうける摩擦条件は過酷になる。

参考文献

1) 津和：機械加工学，養賢堂，東京（1973）143.
2) R. Snoys: Annals of the CIRP, 20, 2 (1971) 183.
3) H. Tsuwa, H. Yamada, S. Kawamura: Bull. of the Japan Soc. of Prec. Engg., 投稿中.
4) 津和，山田，河村：精密機械, 41, 4 (1975) 358.
5) H. Tsuwa: Trans. ASME, B, 86, 2 (1964) 371.
6) 岡村，中島：精密機械，36, 2 (1970) 141.
7) D. Graham, R.M. Baul: Wear, 19 (1972) 307.
8) たとへば
木野：研削仕上，槙書店，東京（1962）23
渡辺：精密機械，18, 10 (1952) 342.
9) 津和，山田，河村：昭和48年度精機学会東海支部大会前刷 (1973) 89.
10) 木野：研削仕上，槙書店，東京（1962）14.
11) R.W. Story: Trans. ASME, B, 90 (1968) 408.
12) S. Malkin, N.H. Cook: Trans. ASME, B, 93, 3 (1971) 1120.
13) 津和、山田：精密機械投稿中.
14) J. Peklenik: Ind.-Anz., 1, 3, (1958) 10.
15) N.R. Des Ruisseaux, R.D. Zerkie: Trans. ASME, B 92, May (1970) 432.
16) 牧野，須藤，福島：機械試験所々報，20, 1 (1966) 11.
17) 富沢：計測工学，森北出版，東京 (1972), 176.
18) J.C. Jaeger: Proc. Roy. Soc. N.S.W., 76 (1942) 203.
19) 高沢：精密機械，30, 12 (1964) 914.
20) 津村：強度設計データブック，裳華房 (1971) 1077.
21) 中山：精密機械，36, 12 (1970) 826.
22) 海野，塩崎：精密機械，38, 4 (1972) 349.
23) 田中，矢野，樋口：精密機械，37, 10 (1971) 754.

第3章　砥粒切れ刃の摩耗と研削現象

3.1　緒言

研削加工の特徴の1つは砥粒切れ刃が自生作用をもつことであると言われてきたが，近年になってこの種の自生作用は，比較的大きな切込みを与える研削作業や，或る種の処理を行なった砥粒を使用する砥石で研削する場合に観察されるものであり，加工物の精度を重視する仕上研削やあらさを重視する鏡面研削を行なう場合の砥石についてはほとんど観察されないことが判った[1]。後者のような場合には，砥粒切れ刃の先端部は平坦に摩耗し，砥石はすみやかに寿命に達することが明らかになっている[2]。

研削中における砥石の摩耗については従来多くの研究がなされているが，これらのほとんどが砥石半径の減耗ならびに摩耗による砥石作業面の巨視的形状変化を論ずるものであり[3]，砥粒切れ刃自体をとりあげ微視的な見地より検討したものは極めて少い[4]。

本章では，研削の進行に伴なって生じる砥粒切れ刃の幾何学的形状の変化および切れ刃摩耗面の性状の変化を，微視的な見地より検討し，砥粒切れ刃の摩耗挙動を把握する。ついで砥粒切れ刃の摩耗が，研削現象や工作物の仕上精度に与える影響を実験的に検討する。

3.2　砥粒切れ刃の摩耗性状

本節では，研削によって生ずる砥粒切れ刃の幾何学的な形状の変化，および砥粒切れ刃の摩耗性状をとり扱う。

3.2.1　実験方法

触針式仕上面検査機を利用し、砥石を研削盤の砥石軸から取り外すことなく、研削前後の砥粒切れ刃の形状を測定する装置の概要を図3.1に、その検出部の概観を図3.2に示す。砥石作業面上の同一周上を走査できるよう

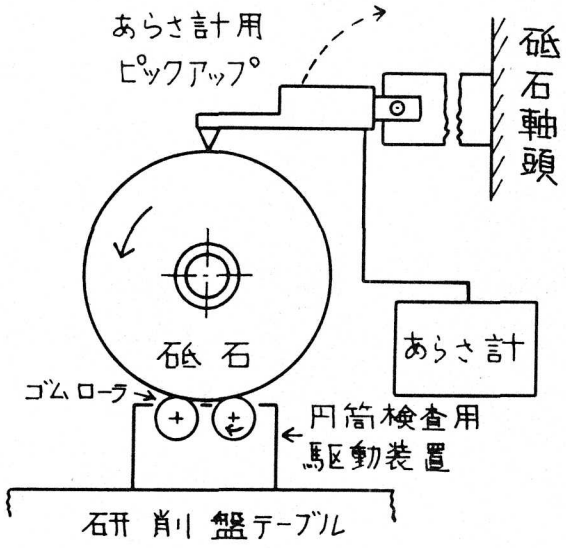


図3.1　測定装置の概要

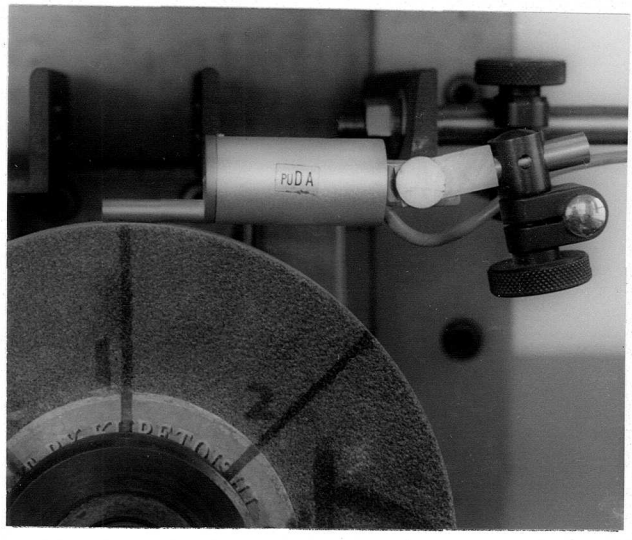


図3.2　検出部の概観

に、ピックアップ支持部にはストッパーがついている。砥石作業面上にアセチルセルロース製レプリカ膜を貼り、その上から触針を走査させてできた膜上の触針痕を光学顕微鏡を使用して観察し、触針の走査位置の再現性を検討した。その結果触針は±15 μmの誤差の範囲内で設定されることがわかった。形状測定時の砥石の回転は、小坂式円筒検査用駆動装置によって与えられる。

砥粒切れ刃の摩耗面の性状を観察するには、まず、付着した溶着物を希塩酸で溶去し水洗乾燥させる。この摩耗面について、津和ら[1]のレプリカ転写法によって作成し

たレプリカ膜を位相差顕微鏡および走査型電子顕微鏡を使用して観察した。また一部の試料については透過型電子顕微鏡を用いて詳細に観察した。

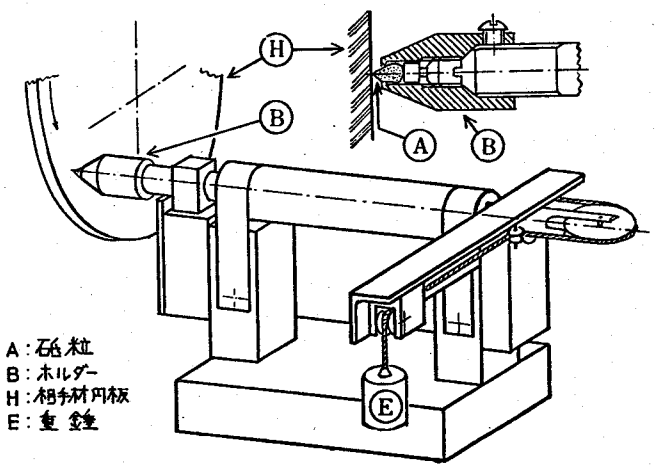


図3.3　摩擦試験装置の概要

摩耗面の性状を検討するためのモデル実験には，図3.3に示す摩擦試験装置を試作し，これを平面研削盤のテーブル上にとりつけ，砥石軸に取り付けられて回転する軟鋼（S45C），鋳鉄（3.1％C）および不銹鋼（SUS27）製円板と組合わせて摩擦試験を行なった。[5)]

研削試験には横軸型平面研削盤を使用し，マシンバイスに固定した焼入炭素工具鋼（SK-3，4×110×50）を乾式プランジカット方式で研削した。

表3.1に研削試験の，表3.2に摩擦試験の条件を示す。

表3.1　研削試験の条件

項　目	条　　件
砥　石	A46KmV
砥石周速度(V)	1600，1750，1890 m/min
工作物速度(v)	5，10，15 m/min
t切込み(t_3)	5，7.5，10，12.5，15，20，30μm
ドレッシング	ダイヤモンド単石ドレッサー 送り　0.02 mm/rev t_3：　10μm×2，5μm×2 0μm×2回
研削方式	乾式，up cut

表3.2　摩擦試験の条件

項　目	条　　件
砥　粒	JIS 2A
摩擦速度(V)	1000，1250，1500，1750 (m/min)
荷　重 (w)	0.3，0.5，0.7 (kg)
摩擦距離(L_f)	500，1000，2000，3000(m)
その他	円板面の粗さ　Rmax≦4μm 大気中，乾式，くり返し摩擦 予摩擦を実施

3.2.2　摩耗に伴なう砥粒切れ刃の形状の変化[2)]

図3.4に摩耗に伴なう砥粒切れ刃の形状の変化を測定した1例を示す。ドレッシング直後の砥粒切れ刃の先端は鋭く，切れ味が良好な切れ刃稜が存在することを示しているが，研削回数が増加するにつれ砥粒切れ刃の先端は平坦に摩耗してゆくことがわかる。研削回数N＝180回においては工作物の仕上面に研削焼けが観察されることから，この時期には砥石は寿命に達しているものと考えられる。

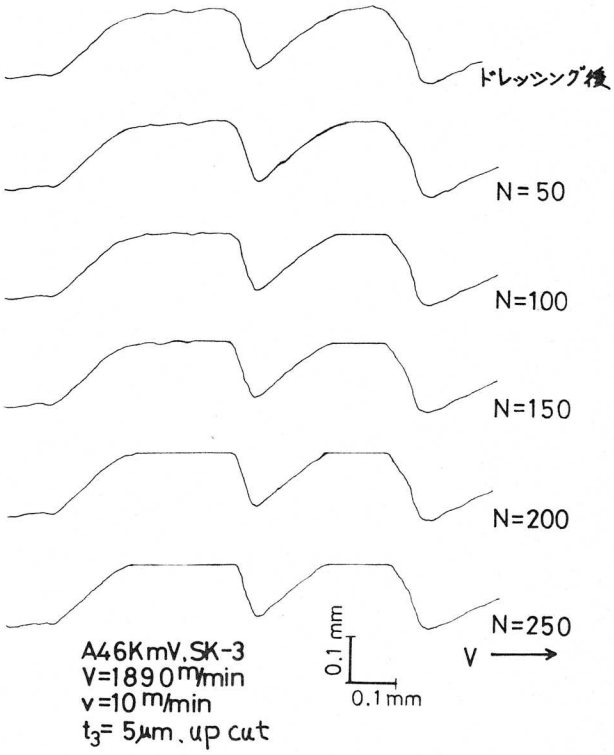
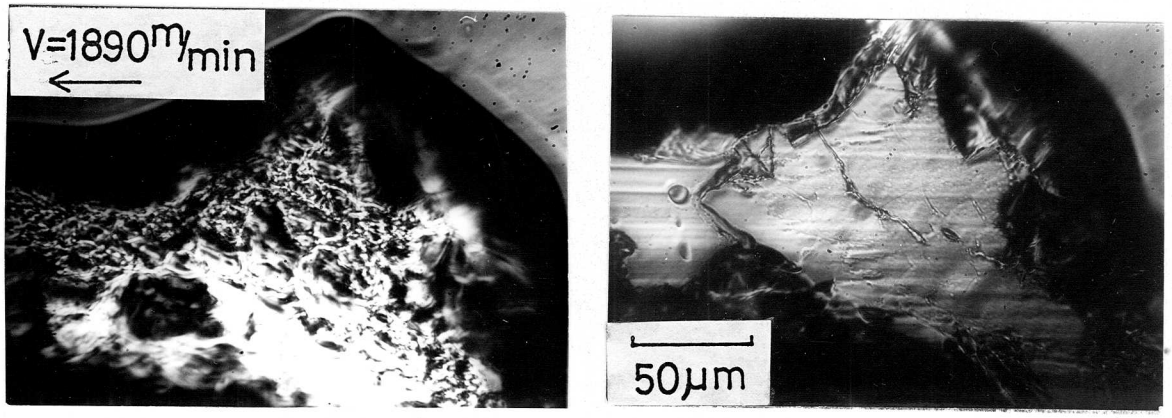


図3.4.　形状の変化の例

3.2.3　砥粒切れ刃の摩耗面の性状

研削後得られる砥粒切れ刃の摩擦面には金属が溶着し

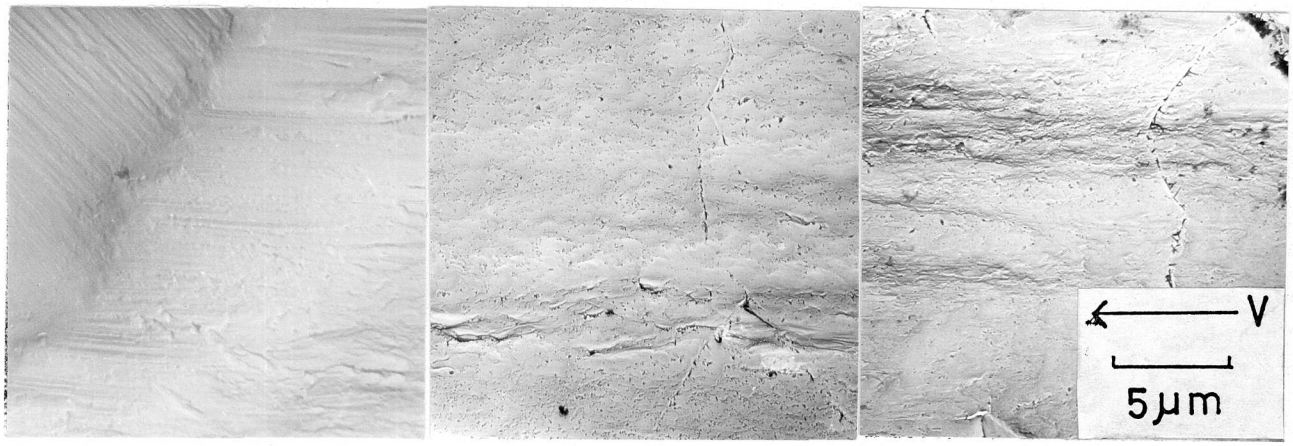


(a) ドレッシング直後　　(b) N＝100回

図3.5　砥粒切れ刃の摩耗面の1例

ているため，摩耗面を詳細に観察することはできない。そこでこの溶着物を希塩酸で溶去すると，砥粒切れ刃の摩耗面が露出する。本論文においては特別に示さない限り，摩擦面とは摩擦したままの面を，摩耗面とは溶着物が付着していない面を意味する。

図3.5にA系砥石を用い焼入炭素工具鋼を研削する場合の，A砥粒切れ刃の摩耗面の性状をレプリカ膜に転写して観察した結果の1例を示す。ドレッシング直後の砥粒切れ刃は微細な凹凸が存在するが，研削長さが増すのに伴なって砥粒切れ刃は摩耗し，ついには第2摩耗領域[6]と呼ばれるびらん状を呈する部分が摩耗面上に観察されるようになる。図3.5(b)がこれに相当する。

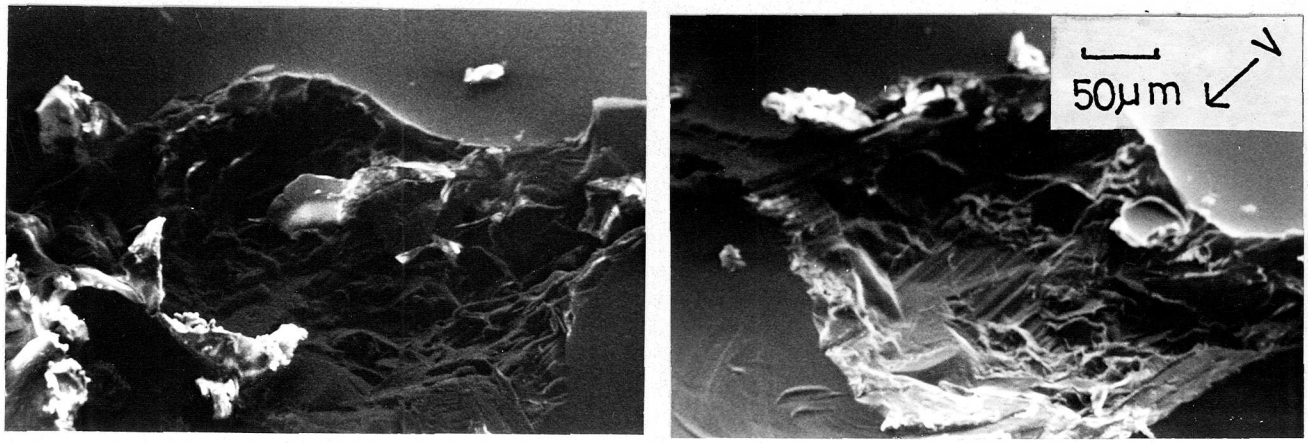


(a) 切れ刃稜付近　(b)第2摩耗領域内　(c)第2摩耗領域後端

図3.6 A砥粒切れ刃摩耗面のレプリカ電顕写真

図3.6はA砥粒切れ刃の摩耗面の電顕観察結果の1例を示している。砥粒切れ刃の摩耗面は激しい摩擦を受け溶融流動していることがわかる。また砥粒切れ刃のすくい面には，排出される切屑と摩擦して生じたと考えられる摩耗痕が存在している。

図3.7に砥粒切れ刃をレプリカ膜に転写し，これを走査型電子顕微鏡で観察した結果の1例を示す。写真上に



(a) ドレッシング後　　(b) N = 50 回

図3.7. レプリカ膜に転写した砥粒切れ刃の走査電顕写真

現われる凹凸が逆になっている点に注意すれば，図3.4を得た走査法および図3.5，図3.6を得た観察法に比べ、砥粒切れ刃の摩耗挙動および研削作用を検討するのに有効であることがわかる。

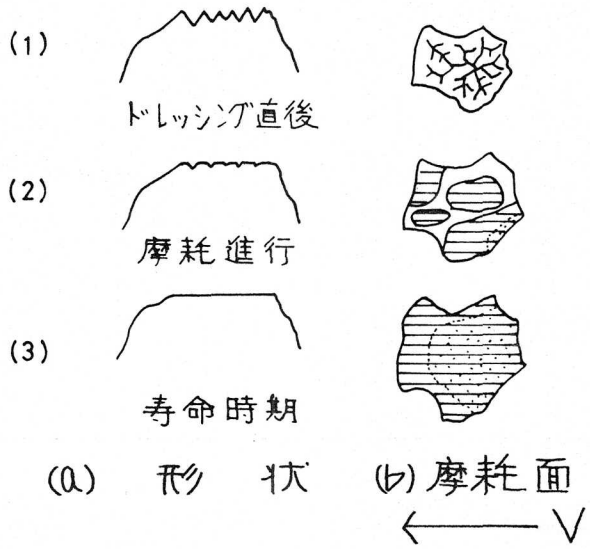


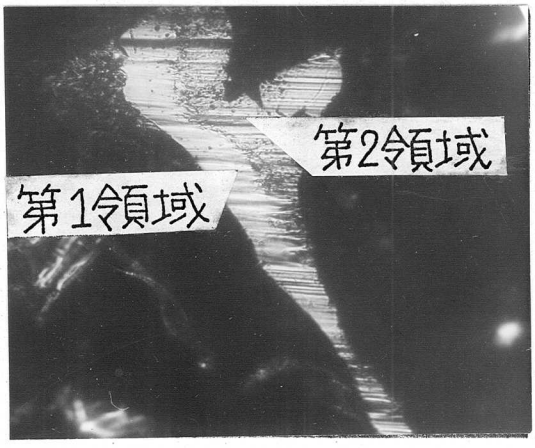
図3.8 砥粒切れ刃の摩耗モデル

前項の観察結果と本項の観察結果より、研削によって生ずる砥粒切れ刃の摩耗過程を，図3.8に示すようにモデル化できる。図3.8(b)の黒点であらわされている領域は第2摩耗領域を意味する。

3.2.4. 第2摩耗領域の生成臨界条件

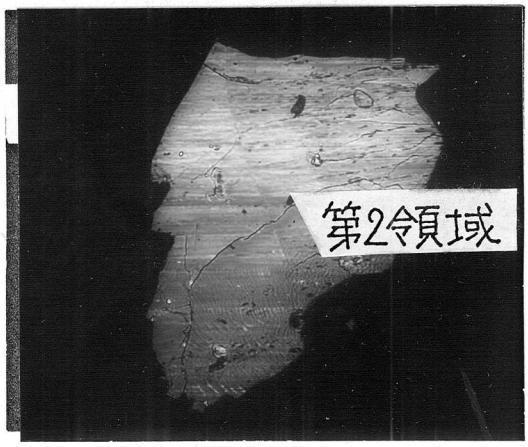
河村[6]によればA系砥石およびWA系砥石で鋼類を研削する際に、砥粒切れ刃の摩耗面に生成される第2摩耗領

域の大きさは、砥粒切れ刃の摩耗した程度および研削条件すなわち，砥粒切れ刃と工作物との摩擦条件によって影響をうけ変化することが明らかにされている。前項までの観察により、砥粒切れ刃の摩耗性状とりわけ摩耗面の性状は砥粒切れ刃の摩耗機構と関連をもつと予想される。



(a) 軟鋼

(b) 不銹鋼



(c) 鋳鉄

← V

摩擦速度 V = 1500 m/min
荷　重 W = 0.5 kg
摩擦距離 L_f = 1000 m/min

0.1 mm

図3.9 相手材による砥粒摩耗性状の相異

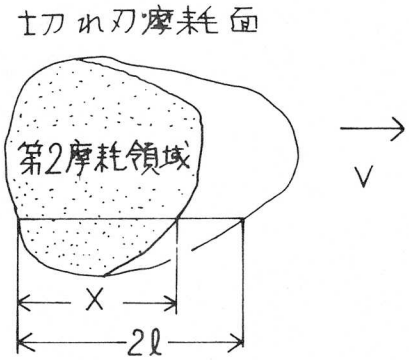


図3.10 第2摩耗領域発生比 X/2ℓ

図3.9に単粒摩擦試験で得られたA砥粒の摩耗面を示す。摩擦の相手材によりその生成のされ方は異るが、摩耗面には第2摩耗領域が生成されていることがわかる。

摩耗面に生成された第2摩耗領域を定量的にとり扱うため、SiCの場合[7]と同様に第2摩耗領域発生比$x/2\ell$を定義し、$x/2\ell=0$となる状態を第2摩耗領域の生成される臨界状態とする。(図3.10)

図3.11に摩耗面上で第2摩耗領域が消滅する($x/2\ell=0$となる)部分における摩擦条件の関係を示す。見かけの接触圧力W(Kg/mm²)と摩擦速度V(m/min)および温度伝導率K(cm²/sec)を砥粒摩耗面の長さに組合わせて求まる無次元特性値L(=$\ell V/2K$)の間には、$W\sqrt{L}\fallingdotseq$ const. なる関係があることが判った。砥粒と摩擦円板との接触状態は、Jaegerの理論におけるライダーとスライダーの関係でおきかえることができると仮定すれば、$\mu\cdot W\sqrt{L}$は(2.11)式の熱源の強度と大きさをあらわす項に含まれる(μ:摩擦係数)。$\mu\cdot W\sqrt{L}\fallingdotseq 4$とし、(2.11)式を適用して摩擦面温度を試算すると1480°Cとなる。したがって第2摩耗領域は鋼の融点付近の温度で生成されるものと推定できる。

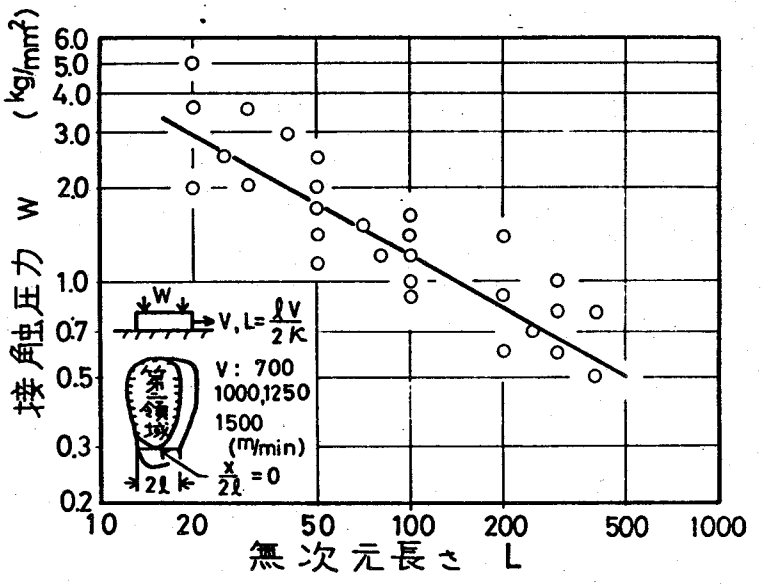


図3.11 $x/2\ell=0$となる摩擦条件

図3.11は相手材として軟鋼(S45C)を選定して摩擦試験を行なう場合に得られた結果であるが、不銹鋼および鋳鉄との摩擦においても、同様の結果が得られるものと

考えられる。

3.3　砥粒切れ刃の摩耗に伴なう研削現象の変化[8),9)]

研削中砥粒切れ刃が摩耗し砥石の切れ味が変化するに伴ない，研削に付随して生起する研削現象も変化する。従来，研削現象の変化は研削条件および研削回数の関数として取り扱われてきたが，研削現象を統一的に説明するには至らない。

本節では，研削現象が砥粒切れ刃の切削作用に伴なって生ずる現象であることに着目し，研削現象を砥粒切れ刃の摩耗の関数としてあらわすことを検討し，研削過程における砥粒切れ刃の摩耗の意義を考察する。

3.3.1　実験方法

横軸型平面研削盤を使用し，研削中の研削現象を測定する実験装置を図3.12に示す。八角弾性リング型研削動力計を使用し研削抵抗を，指示騒音計を用いて砥粒切れ刃が切削する際に発する研削騒音を測定する。砥石台上には金属顕微鏡を固定し，砥石作業面を写真撮影して得られるフイルム上の砥粒切れ刃の摩耗面積をもとに摩耗面

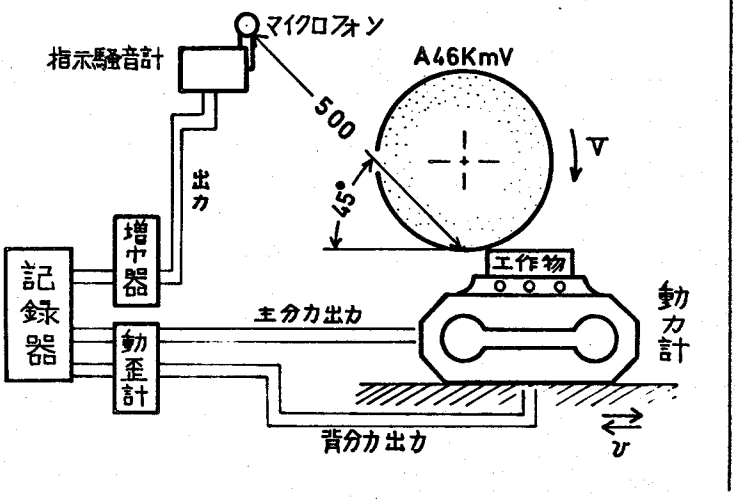


図3.12　実験装置の概要

積率を算出する。砥石半径減耗量は転写法によって作成した黄銅板の転写痕を、あらさ計で測定して求める。

研削に先立ち砥石は精密ドレッシングされる。研削方式は乾式かつ連続研削であり、工作物は規定の研削回数に達するまで研削される。研削終了後の砥石は前述の諸量を測定し再びドレッシングされたのち、つぎの試験に使われる。

工作物には焼入炭素工具鋼（幅4mm，高さ50mm，長さ110mm）を使用し，砥石周速度V＝1750m/min を用いるほかは表3.1の条件と同一の研削条件で研削した。

3.3.2 第2摩耗領域生成度数率

3.2節で示したごとく，第2摩耗領域は砥粒切れ刃の摩耗した度合と密接な関係がある。したがって，砥石が摩耗した度合も第2摩耗領域発生比（$X/2l$）に類似した別の特性値で説明し得る。そこで，新たに第2摩耗領域生成度数率ηなる特性値を定義する[8]。ηの定義は図3.13に示されている。

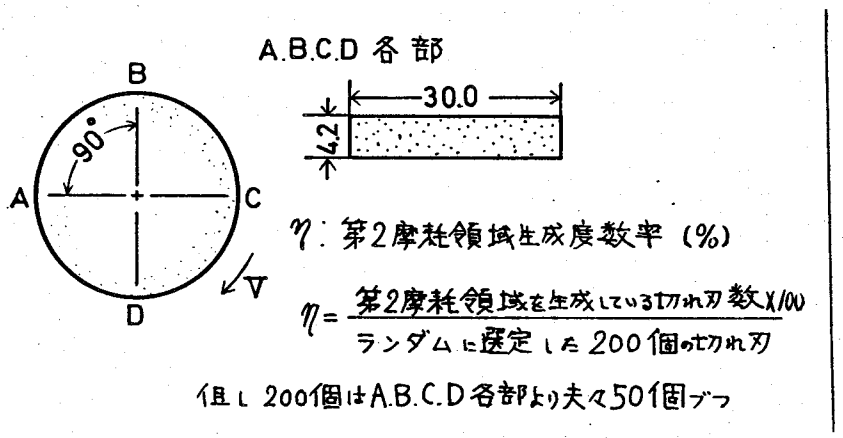


図3.13 第2摩耗領域生成度数率

砥石作業面上の90°離れた4点を中心とし，夫々4.2×30（mm²）の面積に含まれる砥粒切れ刃のうちから，ランダムに選定した50個（合計200個）のうちで，第2摩耗領域を生成している砥粒切れ刃の数を求め，これらのパーセント比で砥石の第2摩耗領域の生成程度をあらわ

す。

図3.14に研削回数の関数としてあらわした第2摩耗領域生成度数率ηの変化を示す。ηは研削回数の増加に伴なって増加することがわかる。また図3.14には、極度に摩耗した砥粒切れ刃のうち、摩耗面上に微小なクラックが存在する切れ刃率も付記してある。

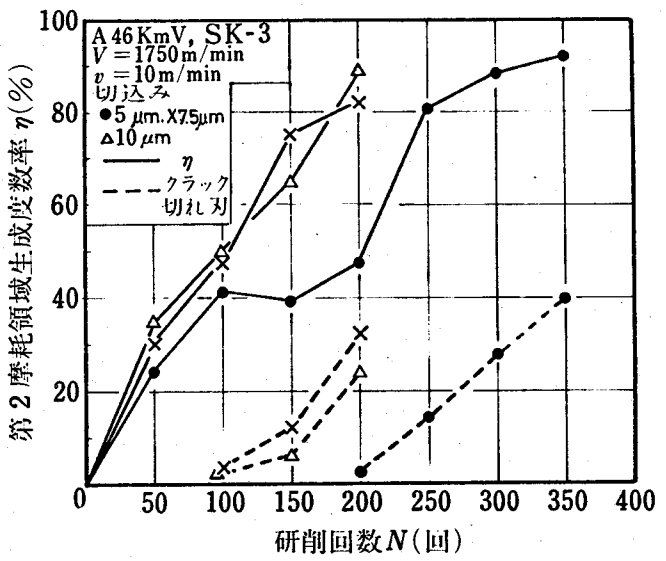


図3.14. ηの変化の1例

3.3.3 第2摩耗領域生成度数率と研削現象との関係

図3.15に研削回数と研削抵抗との関係を示す。接線研削抵抗F_tおよび法線研削抵抗F_nは、研削回数Nの増加に伴ない増加し、砥石が寿命に達すると（切込みt_3＝5μmの場合にはN≒200回程度），その後は急激に増加する。

図3.15に示した研削抵抗のほか、研削音圧、砥石研削点温度、砥石の振動などの諸量も同様な傾向にある。

しかし，異る研削条件の下では研削抵抗が急上昇する時期

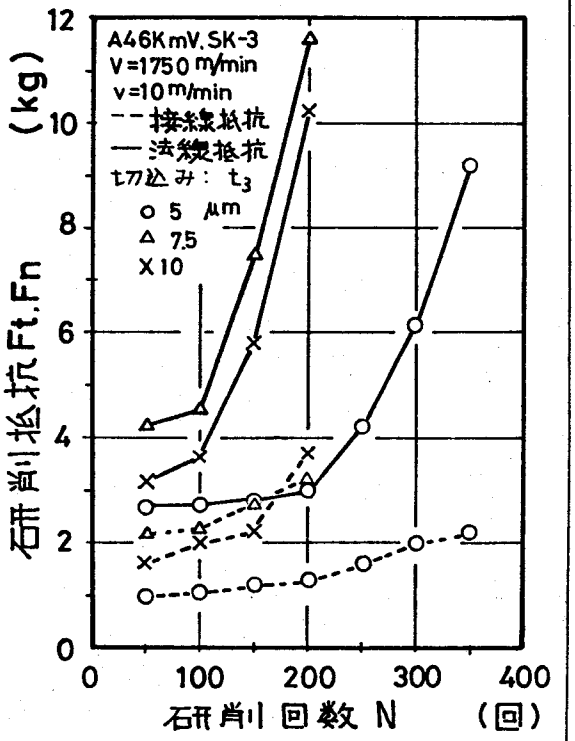


図3.15 研削抵抗の変化

が異ることがわかる。

図3.16に第2摩耗領域生成度数率ηを横軸にとり、図3.15に示した研削抵抗を再プロットした関係を示す。砥石軸頭に与えた切込みt_3の如何に関らず、研削抵抗が急増する範囲は$50 \leqq \eta \leqq 60\%$に相当することがわかる。

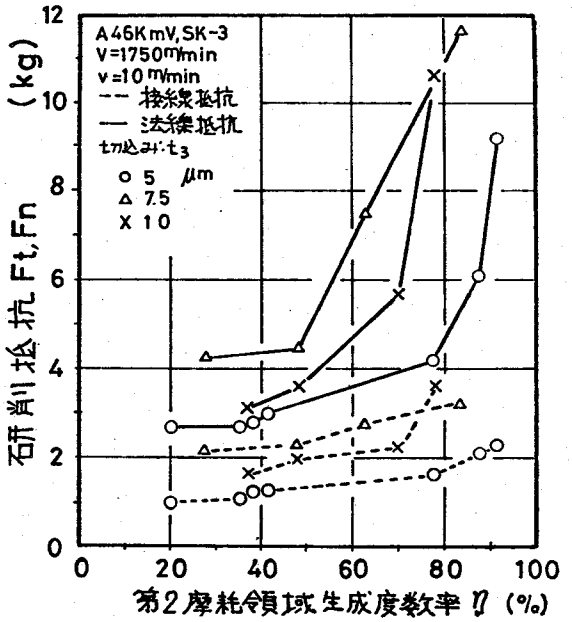


図3.16 ηの関数としてあらわした研削抵抗

図3.16に示した関係は、砥石寿命の判定基準として用いられているすべての研削現象についても成立する[2]から、研削現象と砥粒切れ刃の摩耗は密接な関係にある。またηは砥石の寿命時期を定量的に判定する有効な基準となり得る。したがって砥粒切れ刃の摩耗した度合と観察される研削現象とは対応していることがわかる。

3.4 砥粒切れ刃の摩耗と仕上精度[9][10]

研削後に得られる工作物の仕上精度および品質は、研削中における研削現象の様相と密接な関係がある。したがって前節の結果を考慮すると、研削仕上された工作物の仕上精度および品質は砥粒切れ刃の摩耗によって影響を受けることになる。

本節では砥粒切れ刃の摩耗が仕上精度および仕上面の品質に与える影響を検討する。

3.4.1　実験方法

研削試験装置の概要を図3.17に示す。研削熱によって試料に生ずる熱変形とその影響をできる限り小さくするため，摩耗程度が既知の砥石（ドレッシングしたのちあらかじめ工作物①を研削し摩耗させる）で別のマシンバイスに固定した測定用試料②を研削する。研削は乾式1パス研削とし，$V=1890$ m/min，$v=10$ m/min，$t_3=10\mu m$なる研削条件を使用する。なお，残留応力を検討する場合にのみ砥石周速度を1600 m/min，砥石台の切込みを20μmとした。

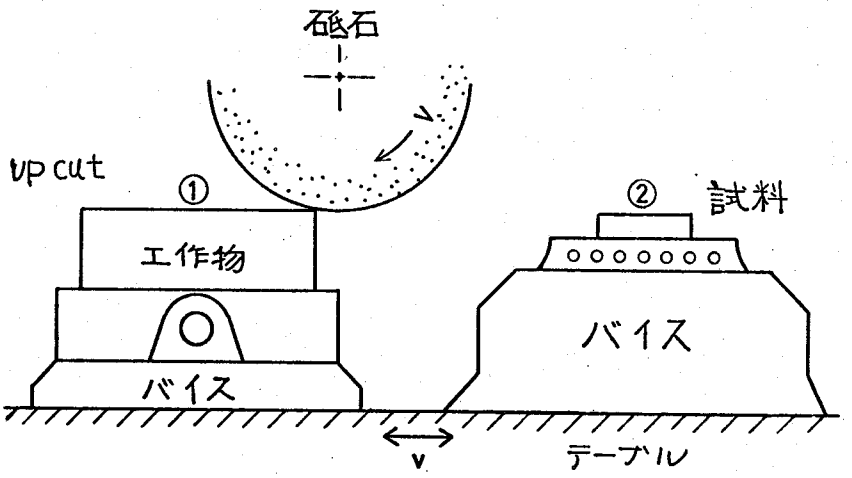


図3.17　実験装置の概要

図3.18に，仕上後の工作物上面の中凹量を測定する装置の概要を示す。研削前後の工作物上面について表面の形状を電気マイクロメーターを用いて測定し，工作物の中凹量を求める。

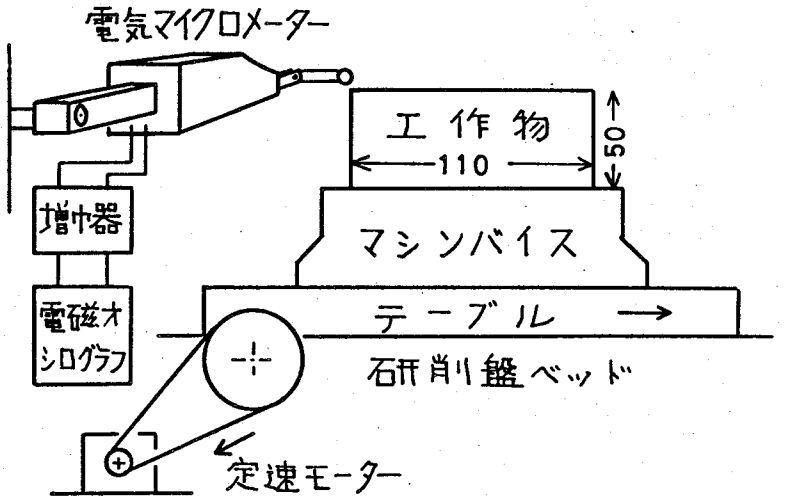


図3.18　中凹量測定装置の概要

加工硬化した研削表面層のかたさの測定にはビッカース硬度計を使用

し、測定荷重25g保持時間30秒で測定した。研削後の試料を仕上面に垂直に研削方向に直角な方向に切断したのち、エメリー紙およびバフ盤を使用して切断面を研摩する。研摩によって生じた加工変質層を電解研摩して除去して、かたさ測定面を得る。表面からの測定深さが等しい4点についてかたさを測定し，4つの平均値でその点のかたさをあらわす。

研削加工層内の組織が研削によって塑性流動した深さすなわち，図3.19に示すような白色帯状層の厚さを観察するには、かたさ測定用試料と同様にして作成研摩した試料断面を、9%ナイタルでエッチングして組織を露出させ，金属顕微鏡を使用した。

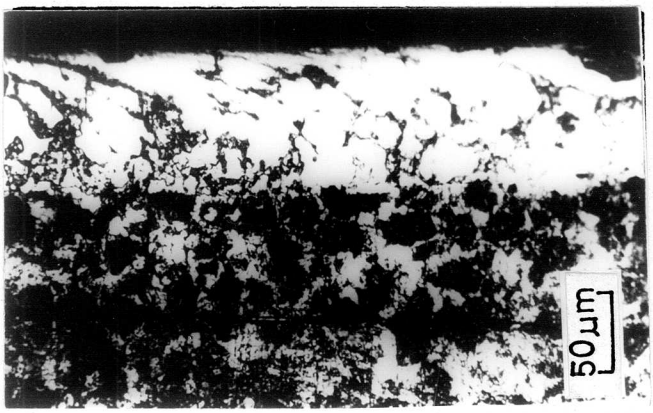


図3.19　研削加工表面下の組織の1例（研削方向）

研削加工層の残留応力はX線応力解析法[11]を使用して測定した。電解研摩法によって加工層を規定の深さまで除去した試料表面について背面反射カメラを使用して、加速電圧30KV，電流10mAのCoKα線による鉄の(211)面からの回折像を撮影した。回折角は0°,15°,30°,45°の4種である。

表3.3に測定用試料の条件を示す。

表3.3　測定用試料の条件

項目	炭素工具鋼	構造用鋼
材質	SK-3	S45C
形状	4x110x50	4x40x15
熱処理	水焼入れ	真空焼鈍
かたさ	Rc 62	Rc 15
使用目的	研削現象 仕上面の性質・精度	かたさ 残留応力

砥粒切れ刃の摩耗は第2

摩耗領域生成度数率ηを用いてあらわす。

3.4 2　砥粒切れ刃の摩耗と仕上精度

研削された試料の仕上面の精度および表面層の性質に与える砥粒切れ刃の摩耗の影響の1例を図3.20に示す。

砥粒切れ刃が摩耗しηが増大するにつれ，工作物の中凹量ΔH，かたさが素地のそれに等しくなるような点の研削表面から測った深さすなわち加工硬化層厚さD_H，および白色帯状層の厚さd_wはともに増大することがわかる。ここでΔHおよびD_Hは研削温度の影響をうけているから，図3.20に示した関係は，研削温度に与えるηの影響をも示唆しているものと考えられる。

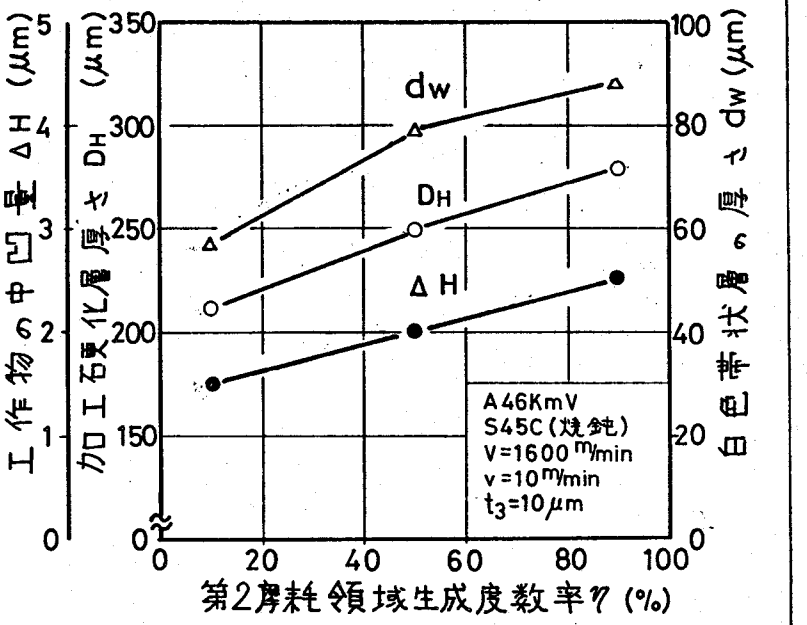
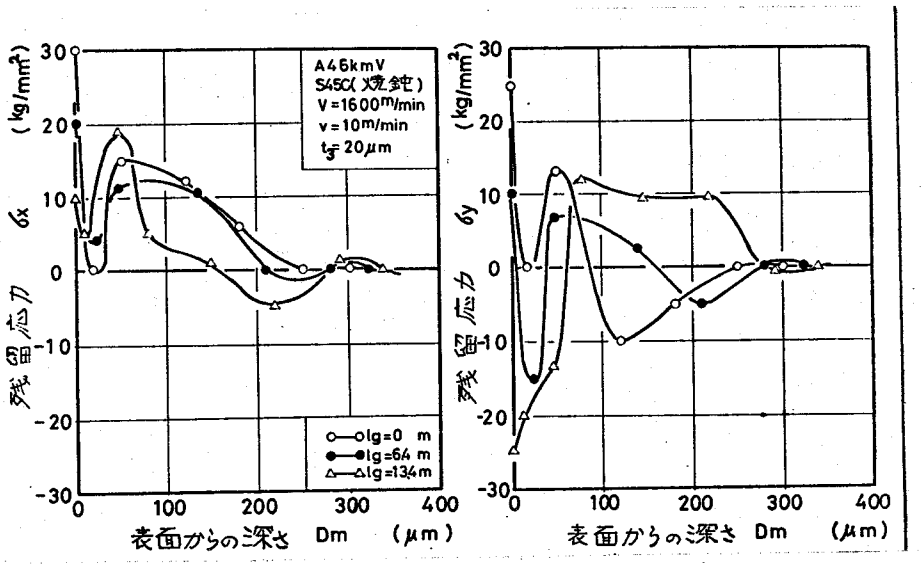


図3.20　仕上精度に与えるηの影響（1 pass 研削による研削結果）

図3.21に，研削後100時間経過した時期において測定した，工作物の研削加工層内の残留応力分布の1例を示す。図中の残留応力値はMoor[12]らによって導びかれた補正式によって補正されている。研削長さ$l_g=0$は$\eta \fallingdotseq 0$を，$l_g=6.4$ mは$\eta \fallingdotseq 40\%$を，$l_g=13.4$ mは$\eta \fallingdotseq 80\%$を意味している。図より，研削加工層内の残留応力は砥粒切れ刃が摩耗しηが増大するに伴ない，引張り応力側か

ら圧縮側に移っているほか、応力の分布深さも深くなることがわかる。



(a) 研削方向　　(b) 垂直方向

図3.21 研削加工層内の残留応力分布

このように摩耗した砥粒切れ刃をもつ砥石で研削して得られる結果は，摩耗していない砥石で得られる結果に比べ，一般的に劣る傾向にあることがわかる。したがって砥粒切れ刃の摩耗を抑制または制御することは，研削加工の精度向上に寄与するものと考えられる。

3.5 結言

本章では，研削中に生ずる砥粒切れ刃の摩耗様相と，砥粒切れ刃の摩耗が研削現象，仕上精度および仕上面等の性質に与える影響を検討した。

得られた主要な結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) 微小な切込みを与えて行なう研削においては，砥粒切れ刃の自生作用は認められなくなり，砥粒切れ刃先端は平坦に摩耗する。砥粒切れ刃の摩耗形状を実測し，摩耗面を観察して砥粒切れ刃の摩耗過程のモデルを示した。

(2) 砥粒切れ刃の摩耗面に生成される第2摩耗領域には

生成の臨界条件が存在する。Al_2O_3 を主基とする砥粒の1例としてA系砥粒について検討した結果，その条件として $W\sqrt{L} \fallingdotseq 10$ なる関係が得られた。

(3)研削砥石の摩耗程度を示す尺度として第2摩耗領域生成度数率 η を定めた。

(4)第2摩耗領域生成度数率 η を用いると研削現象の変化を統一的に示すことができる。

(5)研削中の砥石の寿命時期を $50\% \leqq \eta \leqq 60\%$ で表わすことができる。

(6)研削仕上された工作物の仕上精度，仕上面の性質は砥粒切れ刃が摩耗するほど悪くなる。

参考文献

1) H.Tsuwa, S.Kawamura ; Bull. of the Japan Soc. of Prec. Engg. 21 (1966) 40.

2) 玉井，河村，山田，久保：防衛大学校理工学研究報告，11, 2 (1973) 65.

3) たとえば
C. Pollock : Trans. ASME, B, 90 (1968) 365.
D.I. Kolog : Microtecnic, 13, 1 (1959) 12.

4) たとえば
津和：精密機械，26, 4 (1960) 199.
河村，山田：精密機械，37, 8 (1971) 607.

5) 河村、山田：昭和46年度精機学会秋期学術講演会前刷 (昭46) 203.

6) 河村：精密機械，36, 3 (1970) 189

7) 河村，山田，精密機械，37, 8 (1971) 607.

8) 河村，山田，久保：精密機械，39, 3 (1973) 64.

9) 津和，難波，山田，河村：精機学会昭和50年度関西地

方定期学術講演会前刷（1975）48.
10) H.Tsuwa, H.Yamada: Technol. Repts. of Osaka Univ., 25, 1243 (1975) 135.
11) 日本材料学会編：X線応力測定法，養賢堂，東京（1960）261.
12) M.Moor, W.Evans: SAE. Trans., 66 (1958) 343

第4章　αAl_2O_3系砥粒の摩耗機構（その1）
―高温におけるαAl_2O_3と鉄との反応―

4.1　緒言

2章において明らかにされたごとく，研削中の砥粒切れ刃は数キログラムの荷重を受けつつ短時間に鋼の融点付近の高温にまで加熱され，工作物とはげしく摩擦し合う。このような極めて過酷な摩擦条件下では，鋼に比して極めて高いかたさをもつαAl_2O_3も摩擦にともなって徐々に摩耗する。3章で得られた結果から，研削中に砥粒切れ刃が摩耗しないならば，砥石は常時良好な切れ味を維持し同一品質の仕上品を作りだすこと，および砥粒切れ刃の摩耗を抑制または有効に見積ることができる場合には，品質の秀れた仕上品のみを得ることができると思われる。高精度高品位の研削仕上品を作りだすための1方策として，研削中において摩耗した砥粒切れ刃を考慮した研削方式または砥粒切れ刃を摩耗させない研削方式を挙げることができる。いずれの場合も砥粒の摩耗機構にもとづく対策を講ずることが必要となる。

従来の研究によれば鉄鋼材料と摩擦する場合には，αAl_2O_3はつぎに示す3つの機構によって摩耗するといわれてきた。

(1) 機械的な破壊[1]（へき開およびチッピングなど）
(2) 塑性流動[2]
(3) 被削材との化学反応[3]

研削中の砥粒切れ刃についてみると，それが受ける摩擦条件は極めて過酷なため，(1)～(3)にのべた機構はすべて生起するものと考えられる。

しかし，3章でものべたように，鏡面研削や仕上研削の

ように微小な切込みを与えて研削する場合には，砥粒切れ刃は機械的な破壊や塑性流動によって摩耗するよりもむしろ，研削条件や砥石と工作物の組合せに起因する摩耗が主体であり，砥粒切れ刃は化学反応によって摩耗するものと考えられている。しかし具体的な反応過程が確認できないことから、砥粒切れ刃の化学的な摩耗機構にについては不明な点が多い。

本章では研削中のαAl_2O_3系砥粒切れ刃と鉄鋼材料との接触界面で生起する化学反応を、高温下における純鉄とαAl_2O_3との静的な接触反応でモデル化し，研削界面における砥粒切れ刃の摩耗機構を検討する。このため，まずαAl_2O_3単結晶（人造ホワイトサファイヤ）と純鉄とを高温で接触させ，両者の接触界面における化学反応の機構を検討する。ついで多結晶αAl_2O_3や砥粒インゴットなどについても同様な手法により反応性を検討する。

4.2 αAl_2O_3の性質[4)]

鋼類の研削に多用されるWAおよびA系砥粒の主成分はいずれもαAl_2O_3であり（純度：WA系約99%，A系約96%），単結晶または多結晶である。本章ではこれらの砥粒を単純化し，αAl_2O_3でモデル化する。

αAl_2O_3の結晶構造は最密六方晶であり，結晶の単位格子中におけるAl原子とO原子の比は3:2となっている。

単結晶αAl_2O_3は白色透明の結晶であり，機械的に力を加えた場合に生ずる代表的なすべり系は$(1\bar{2}10)$面で$[10\bar{1}0]$方向，(0001)面で$[11\bar{2}0]$方向である。

αAl_2O_3は常温では塑性変形せず，脆性破壊を起すが耐摩耗性は極めて高い。αAl_2O_3の代表的な物理的性質を

表4.1に示す。熱膨張係数は高温になるほど大きく熱伝導率は1000℃～2000℃で最小である。

図4.1はαAl_2O_3の高温強さを示しているが、1200℃前後において強さの屈曲点が存在することがわかる。

表4.1 αAl_2O_3の物理的性質

酸素含有率	60%(at.) 47.07%(by mass)
分子量	101.9612
密度	3.97 g/cm³
生成熱 $-\Delta H^\circ_{298}$	1675.557×10^{-6} J/Kg-mol
エントロピー S°_{298}	51.020×10^{-3} J/Kg-mol·deg
融点	2319.7±8 °K
沸点	3253 °K

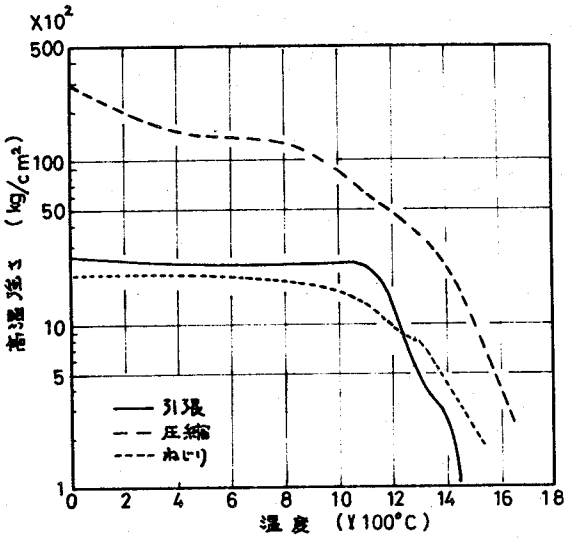


図4.1 αAl_2O_3の高温強さ[5)]

表4.2 αAl_2O_3の反応性[5)]

酸化物	融液生成温度	化合物 ( )内は融点, *分解融点 ○分解点、$BA_6=BaO6Al_2O_3$
BaO	1425℃	B_3A(1620), BA(1815), BA (1915)
BeO	1835	BA (1870), BA_3(1910)
CeO	1800	
Cr_2O_3		
FeO	1310	F_3A (1222°), FA (1780*)
CaO	1400	C_3A (1535*), C_5A_3(?), CA(1600) CA (1720) CA_6(?)
MgO	1995	MA (2150)
MnO	1520	MA (1560*)
GaO		GA (800°)
SiO_2	1595	AS (1880* or 1850)
ThO_2	1750	
TiO_2	1750	AT (1860)
ZnO	1700	ZA (1950)
ZrO_2	1885	

αAl_2O_3はそれ自体では高温における化学的安定性はダイヤモンドのそれより秀れているが、他の多くの金属酸化物と高温において反応して、固溶体や複合酸化物をつくる。表4.2にαAl_2O_3と反応する物質の代表例と、その反応条件を示す。特に鉄との反応ではFeOとのみ反応し$FeAl_2O_4$が生成されることが冶金学的に確かめられてい

3。[6)]

4.3 実験方法

図4.2に大気中におけるαAl_2O_3と純鉄との溶着試験装置の概要を示す。高周波加熱炉を利用し，1500°C以上に加熱したαAl_2O_3の試料(3)表面に同温度の純鉄(アームコ鉄)を接触させる。炉内温度はPt-PR熱電対を用いて較正した光温度計を使用し，αAl_2O_3の表面で測定した。

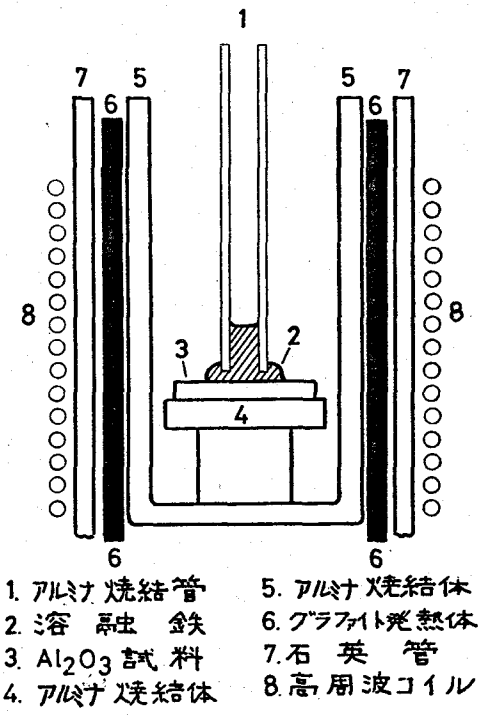


図4.2 実験装置の概要

純鉄およびその酸化物の融点以下における温度雰囲気(1300°C以下)における溶着試験には，図4.3に示す構造の治具を作成し，これをホットプレス炉のピストン上に設置して使用した。溶着用試料は治具と共に所定の温度に加熱されたのち，20秒間90 kg/cm²の圧力で圧着後除荷され，その後規定の時間だけ実験温度に保たれる。

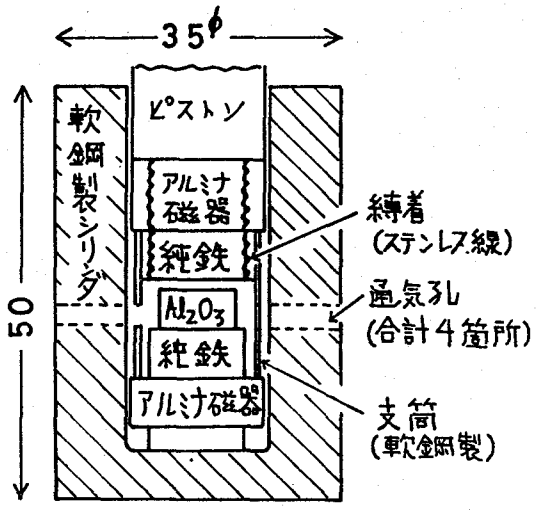


図4.3 治具の概要

図4.4にタンマン型電気炉を利用したAr_2ガス中の溶着試験装置の概要を示す。大気中の場合と同様に，αAl_2O_3上にアルミナ製の管を通じて純鉄試料を接触させる。Ar_2

ガスは炉の下側の流入口⑧より炉内に供給され，上方に抜ける。純鉄をαAl_2O_3上に接触させるには、ふた⑨をゆるめて操作する。ふたを外しても炉内のガス圧が負にならないように，常時Arガスを供給する。雰囲気調整用のArガスは脱酸除湿してある。しかも炉内はグラファイト発熱体の還元作用によって還元され，酸素分圧は10^{-11}気圧以下である。

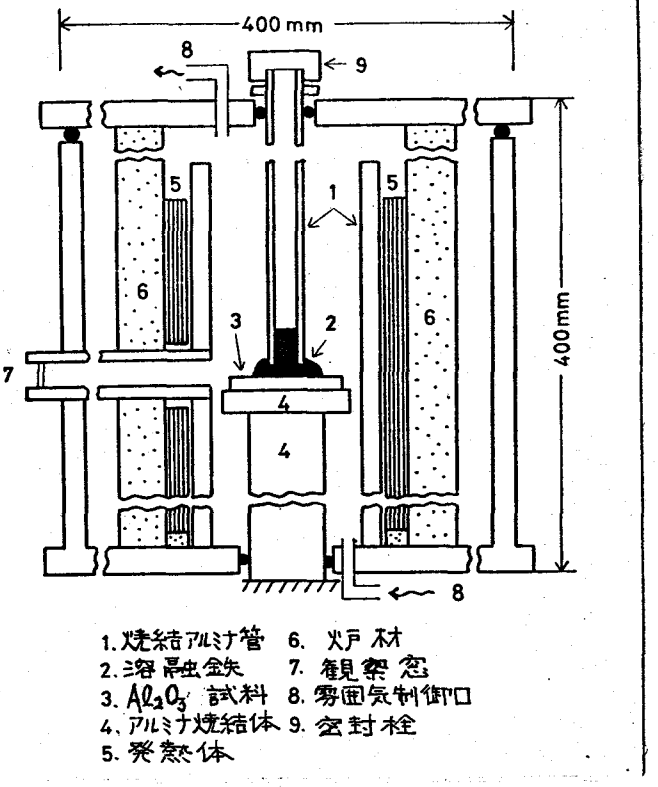


図4.4　実験装置の概要

上述の装置を用いて純鉄とαAl_2O_3を溶着させたのち，一定時間保持反応させ電源を切り，15分間炉冷したのち試料をとり出す。

表4.3に溶着試験に使用した試料の条件を示す。

表4.4は実験の条件を示している。

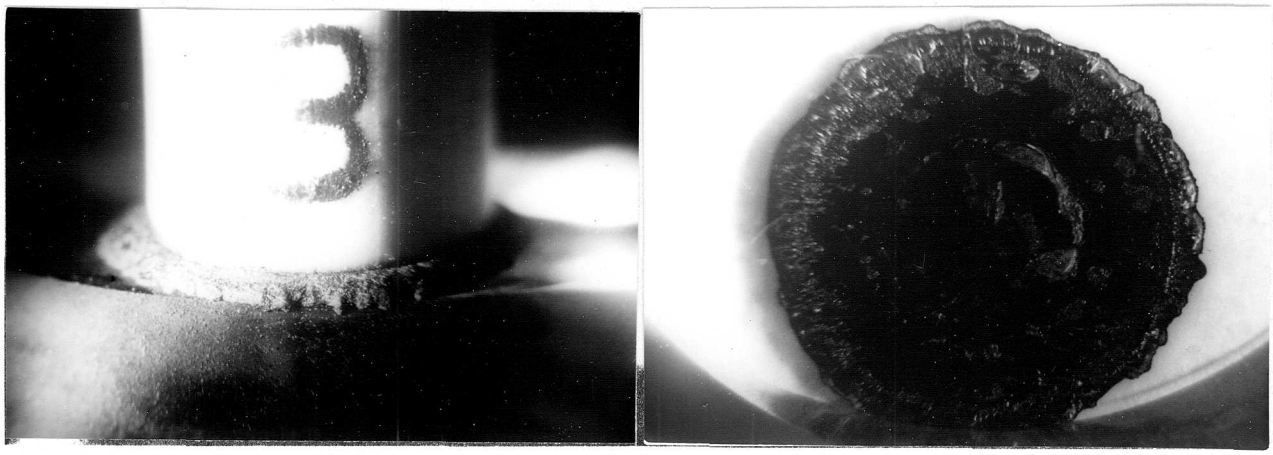
表4.3　試料の条件

試料	条件等
αAl_2O_3	単結晶ホワイトサファイア. 表面あらさ　Rmax 1.2μm ダイヤモンド砥粒によりラップ仕上 酸洗(HCl)後 水洗 乾燥. 仕上表面　(1$\bar{1}$00)
鉄	工業用純鉄 溶滴量約 1gr

表4.4　実験の条件

項目	雰囲気	
	大気中	アルゴンガス中
温度 (°C)	800 . 1000 1200 . 1500 1600 . 1700	1600
時間 (分)	3 . 5 . 10 25 . 45 (1600°C において)	3 . 45

実験後得られた試料の界面反応を観察するには、X線マイクロアナライザー（以下EPMAと呼ぶ）とイオンマイクロアナライザー（以下IMAと呼ぶ）を使用し、反応表面を観察するには金属顕微鏡，偏光顕微鏡および走査型電子顕微鏡（以下SEMと呼ぶ）を使用して観察した。反応界面の組成分析にはIMA，微小焦点X線回折装置およびディフラクトメーター法によるX線回折法を使用した。また反応生成物の性質を知るため，溶着後の試料の引張り試験，引っかき試験などの諸試験を行なった。これらの実験条件はその都度示す。



(a) 溶着の状態　　4mm　　(b) 溶着面

図4.5　溶着試料の概観（大気中）

図4.5に1600°Cの下で実験して得られた試料の溶着状態を示す。溶融した純鉄は接触角90°以下でαAl_2O_3上に溶着し（図4.5(a)），密着（図4.5(b)）していることがわかる。

4.4　高温におけるαAl_2O_3と純鉄との界面反応

溶着後の試料は，αAl_2O_3表面に垂直な方向にダイヤモンド

切断砥石を使用して切断したのち，切断面をダイヤモンドパウダーで研摩する。

図4.6に切断面の1例を示す。とくに1370°C以上の大気中における溶着試験では，αAl_2O_3 単結晶と純鉄のほか焼結アルミナ管と純鉄との反応も確認された。

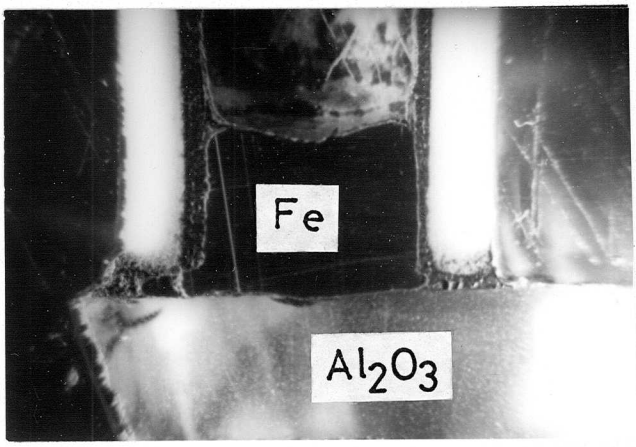
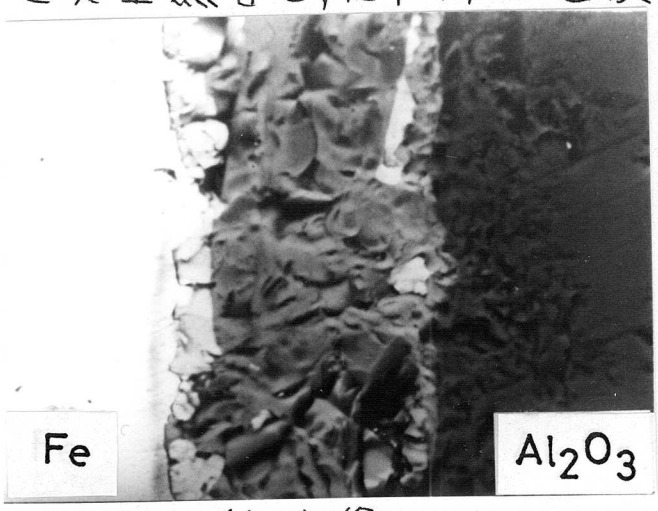
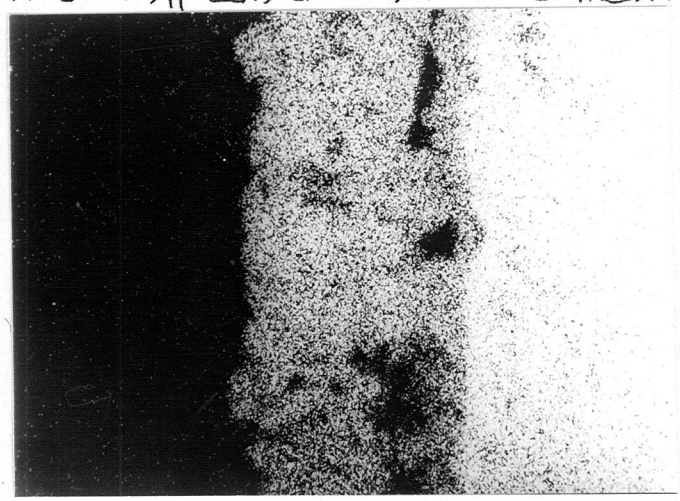


図4.6　切断面の1例

断面を研摩した試料にはAgを真空蒸着し，EPMAを使用して界面反応の有無を観察



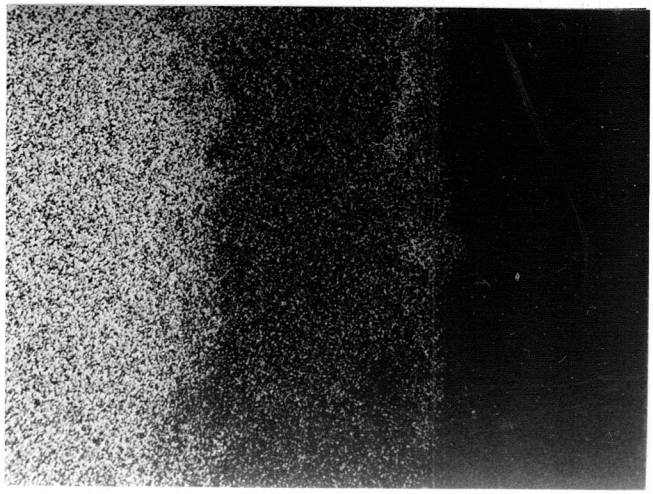
(a)　組成像



(b)　Al Kα 像

30 μm

1600°C，大気中
保持時間3分間



(c)　Fe Kα 像

図4.7　単結晶 αAl_2O_3 と純鉄の接触界面のEPMA分析

する。

図4.7に大気中におけるαAl_2O_3と純鉄の溶着界面をEPMA分析した結果の1例を示す。両者の界面には母材と組成を異にする物質が層状に生成され，その主たる組成はAl Kα およびFe Kα 線を出す物質であることがわかる。

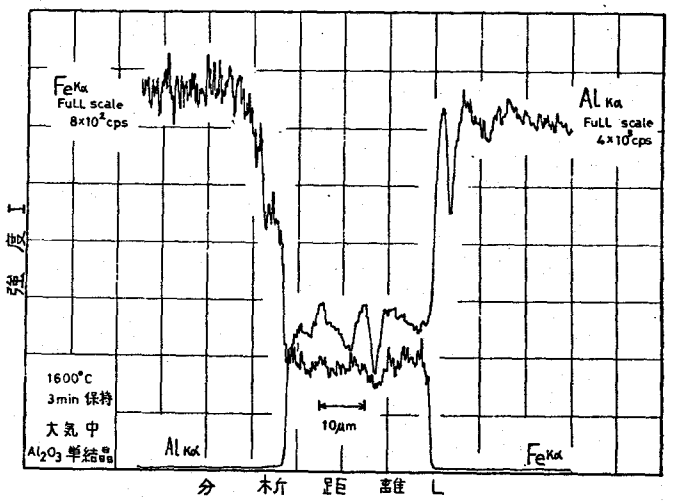
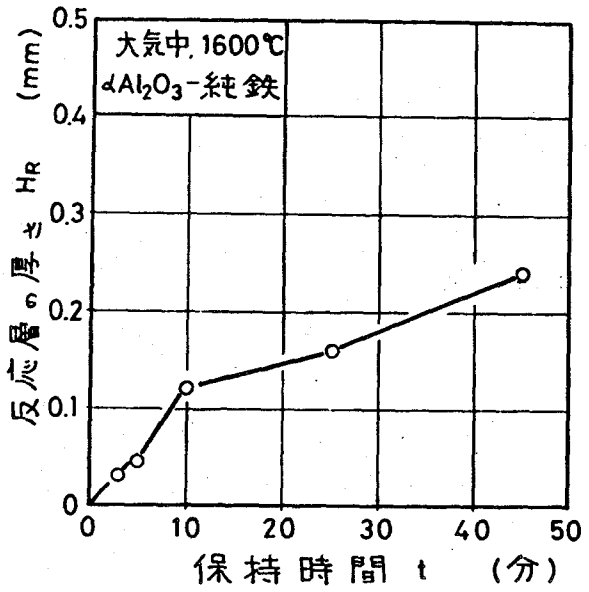
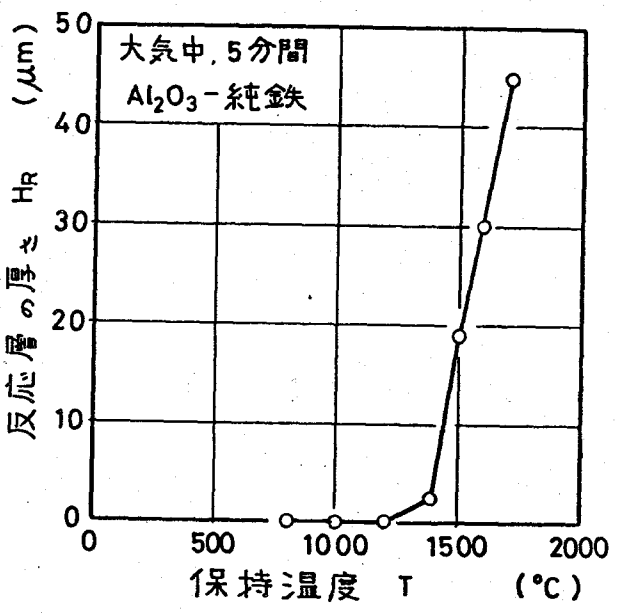


図4.8　反応層の線分析

この層を反応層と呼ぶことにする。図4.7の試料をEPMAで線分析した結果（図4.8），反応層内におけるAlとFeの濃度比はほぼ一定で、反応層は約30μmの厚さをもつことがわかる。しかも線分析の結果得られた曲線が肩部を形成していることから，接触界面では拡散律則[7]の化学反応が生起していることがわかる。



(a)保持温度の影響

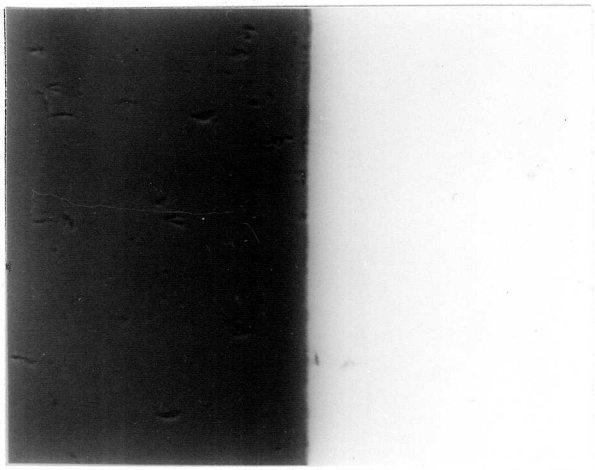


(b)保持時間の影響

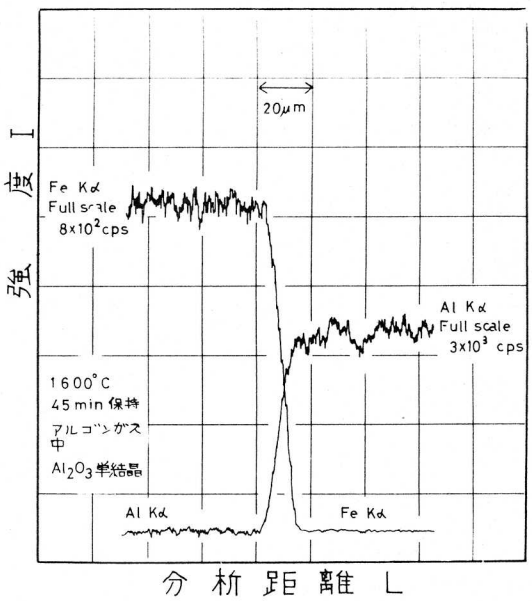
図4.9　反応層の厚さに与える加熱条件の影響

図4.9に反応層の厚さに与える加熱条件の影響を示す。保持時間が5分の場合，反応層は温度1300℃付近から生成され始め，温度の上昇に伴なって急速に厚くなるが（図4.9(a)）、加熱時間の増加につれゆるやかに厚さを増す。図4.9に示した結果には冷却時の温度による反応促進効果が含まれるため定量的な評価はできないが、αAl_2O_3と純鉄の接触界面では拡散律則の化学反応が生起し、反応生成物の量は放物線型速度則または対数速度則によって律則されていることが推定できる。Olsson[8]らによれば溶融したFeO（純鉄は酸化されFeOに変化しているものと考えられる）中へのαAl_2O_3の拡散係数は$D_0 = 3 \times 10^{-5}\ cm^2/sec$といわれている。

図4.10にAr_2中におけるαAl_2O_3と純鉄との接触界面をEPMA分析した1例を示す。図4.10は保持時間45分間の反応結果であり，図4.7の場合に比べ極めて長いにも関らず，接触界面には反応層が存在しないことがわかる。



(a) 組成像



(b) 線分析結果

図4.10 アルゴンガス雰囲気中の接触界面のEPMA分析

Ar_2 雰囲気中における酸素分圧は 10^{-11} 気圧以下であることを考慮すると、高温における αAl_2O_3 と純鉄との反応には酸素の存在が大なる影響を与えているものと推察できる。

4.5 反応層の成因

図4.11に、反応層（厚さ約100μm）の組成を微少焦点X線発生装置を使用して、50μφに収束させたCrKα線（50KV－1.2 mA）で同定した結果を示す。反応生成物は $FeAl_2O_4$ であることが判定できるラウエ斑点が存在する。

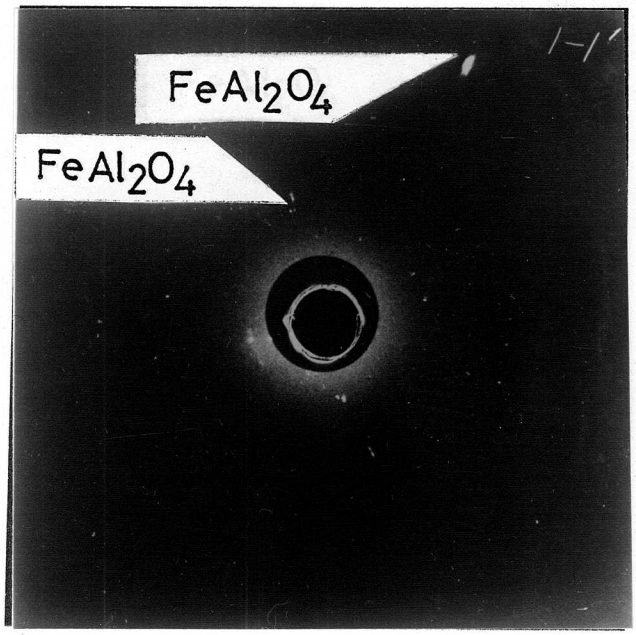


図4.11　反応層のマイクロラウエ写真例（8時間露出）

図4.12に反応層を粉末にしX線分析（ディフラクトメーター法、CoKα、30KV、15mA）をおこない、反応生成物の組成を同定した結果を示す。反応生成物がスピネル型構造の $FeAl_2O_4$（ハーシナイト）であることがわかる。

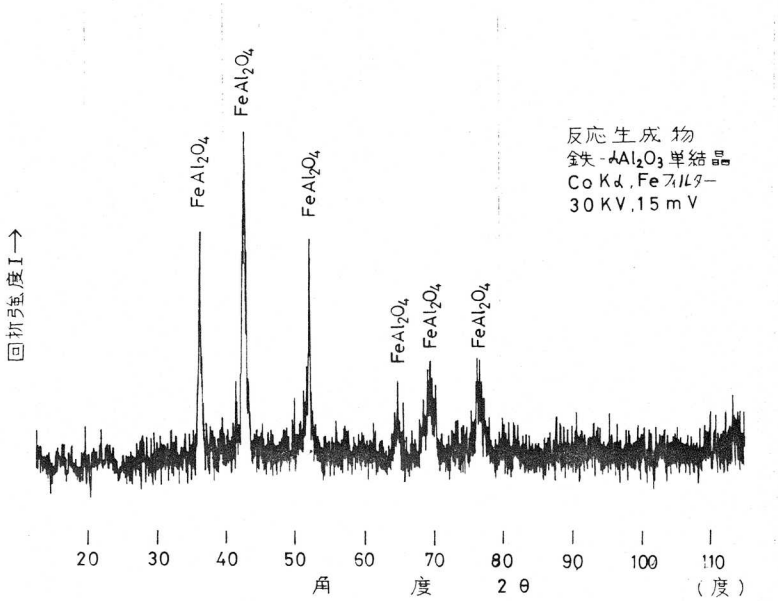


図4.12　反応生成物のX線分析

表4.2に示した

ように、αAl_2O_3 は高温において金属酸化物と反応する。鉄の場合は FeO との反応になるため，図4.13に示す FeO（ブスタイト）の存在する範囲外では反応が生起しないものと考えられる。Ar_2 雰囲気中における溶着試験で、得られた試料の αAl_2O_3 と純鉄の接触界面に反応層が存在しない事実は、高温において純鉄が FeO に変化したのち αAl_2O_3 と反応するという過程を実証するものにほかならない。

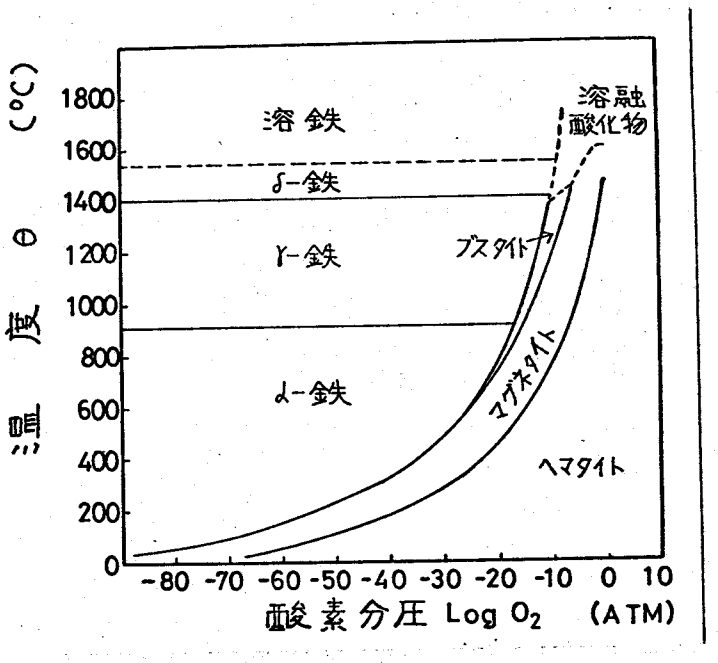


図4.13　FeO（ブスタイト）の存在範囲[9]

$FeAl_2O_4$ の生成過程を知るため、FeO ないし Fe_2O_3 の微粉末と αAl_2O_3 の微細砥粒とを混合して作成した粉体をアルミナ製ルツボに入れ，酸化物の融点まで急速に加熱してその反応生成物を調べた。反応生成物の同定には X 線を使用し、$CoK\alpha$ 線（加速電圧30KV，電流15mA）による分析を行なった。

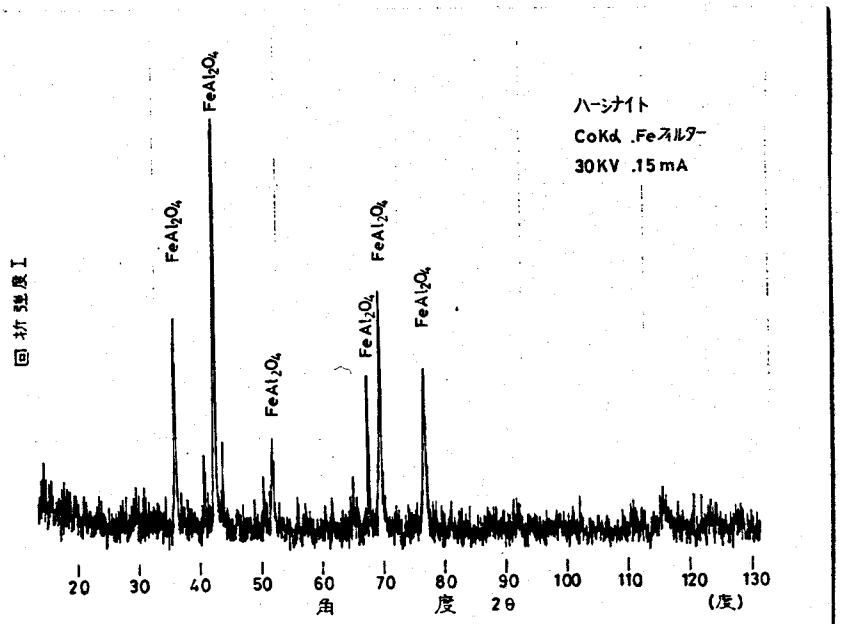


図4.14　FeO と αAl_2O_3 の混合による反応生成物

図4.14は FeO と αAl_2O_3 の混合物の

加熱で生成された反応生成物を示している。反応生成物が$FeAl_2O_4$（ハーシナイト）であることがわかる。

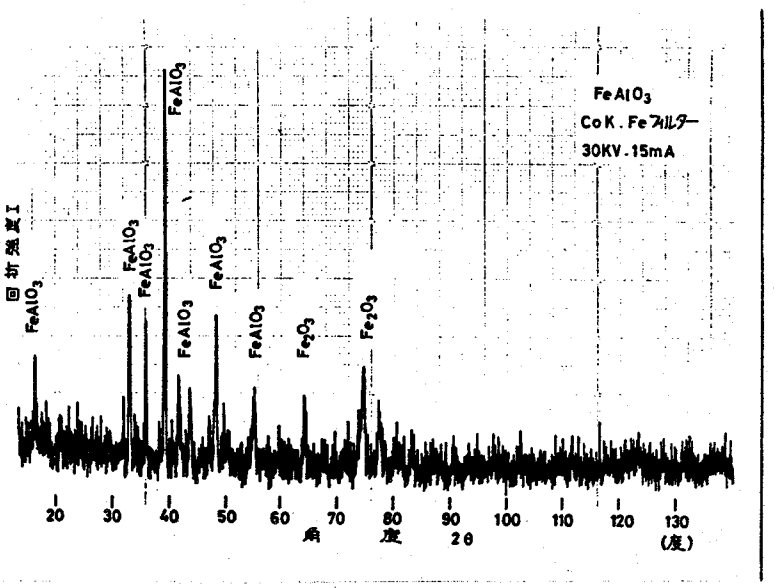


図4.15　Fe_2O_3とγAl_2O_3の混合による反応生成物

図4.15はFe_2O_3とγAl_2O_3とを反応させる際に生成される反応生成物の分析結果を示し，この系の反応によって$FeAlO_3$が生成されることを意味している。

図4.14および図4.15の結果から，図4.7に示した接触界面では

$$FeO + Al_2O_3 = FeAl_2O_4 \qquad (4.1)$$

なる反応が生起していることがわかる。（4.1）式であらわされる反応系においては、不純物としてSiO_2[10]が存在する場合には、反応速度が極端に加速され反応生成物の融点も2元系の反応の場合よりも低くなることが知られている。

なお高温におけるγAl_2O_3と純鉄の溶着試験では、純鉄が酸化される反応

$$2Fe + O_2 = 2FeO \qquad (4.2)$$

が（4.1）の反応に先行して起っていることに注意する必要がある。

実際に砥粒切れ刃が工作物を研削している接触界面では、雰囲気が高温高圧となっているため酸素分圧も低いと考えられるから、鉄は酸化されFeOとなっているもの

と考えられる。

4.6 $FeAl_2O_4$ および反応層の性質[11)]

$FeO-Al_2O_3$ 系の反応は，FeO が溶融状態にある場合には，両者の接触が起ると瞬時に拡散律則反応が生起し $FeAl_2O_4$ が生成される。生成された $FeAl_2O_4$ は一般につぎの性質を有する。

結晶型：立方晶，8面体単位格子に対し $A_8B_{16}O_{32}$ の構造をもつ。へき開面：(111)。比重：約4.39。モース硬度：7½～8。屈折率：1.82。融点：1910℃。一般に脆性に富む多結晶体である。αAl_2O_3 に比べて $FeAl_2O_4$ の引張り強さおよびねじり強さは約1/3，圧縮強さは同等である。

このように $FeAl_2O_4$ は αAl_2O_3 に比べ機械的性質が劣ることが判る。

図4.16に反応層のインストロン引張り試験結果を示す。溶着痕の大きさから破断時の引張り強さは10.4 kg/mm² となる。また図4.16のグラフから，破断が極めて脆性的に行なわれることがわかる。

引張り試験によって溶着物を除去したのちに得られた，αAl_2O_3 上の破断面の形状を図4.17(a)に，これをHClを用いて72時間エッチングした後の形状を図4.17(b)に示す。反

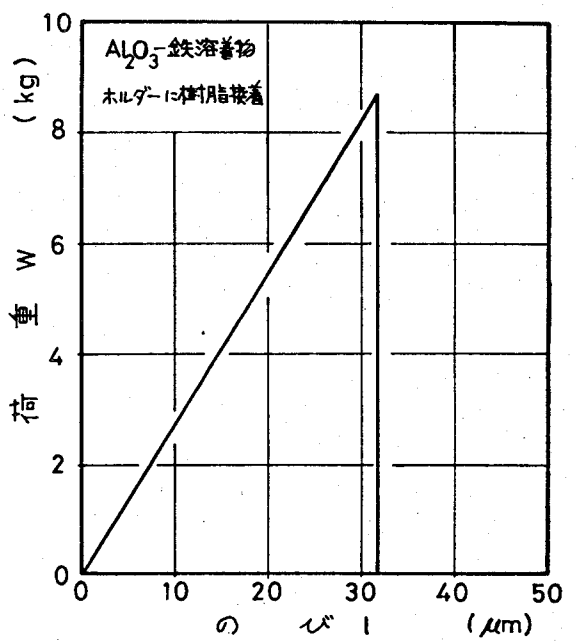


図4.16 溶着試料の引張り試験例

応層の内部で引張りによる破壊が生じたことおよび、反応層がαAl_2O_3よりもHClによってエッチングされやすいことがわかる。

図4.18にαAl_2O_3上の破断面をSEM観察した結果の1例を示す。反応生物が多結晶体であり(図4.18(a))、$FeAl_2O_4$をエッチングして除去した

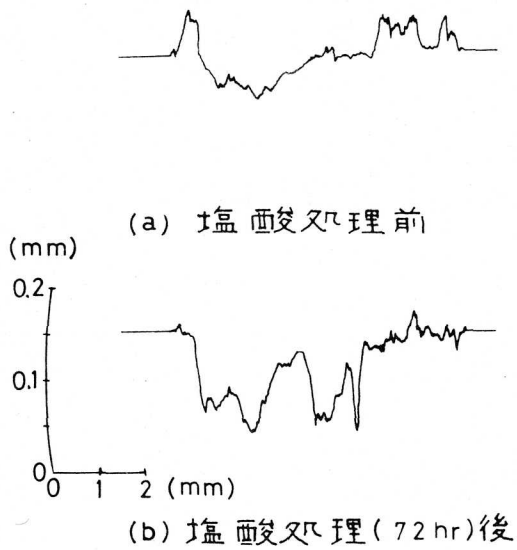
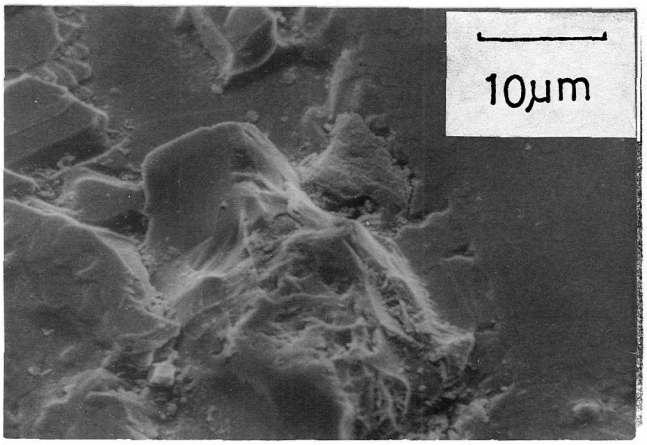
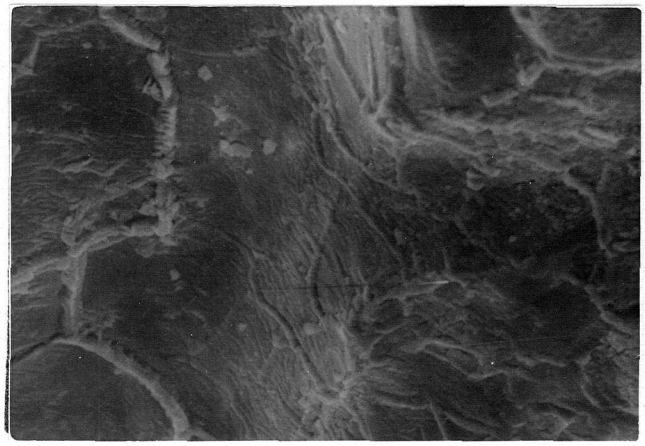


図4.17 破断面の形状



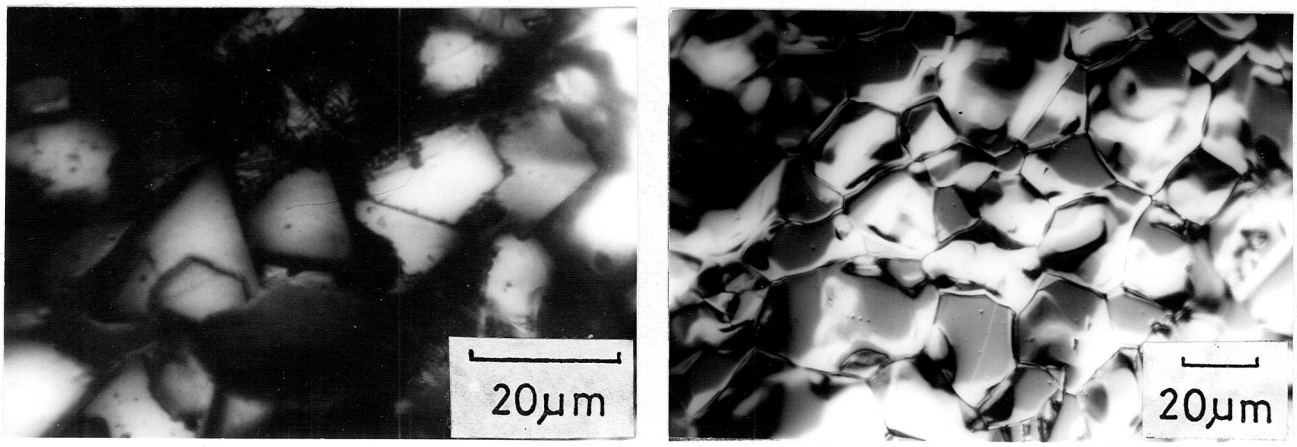
(a)引張り試験直後



(b)エッチング後

図4.18 破断面のSEM観察結果の1例

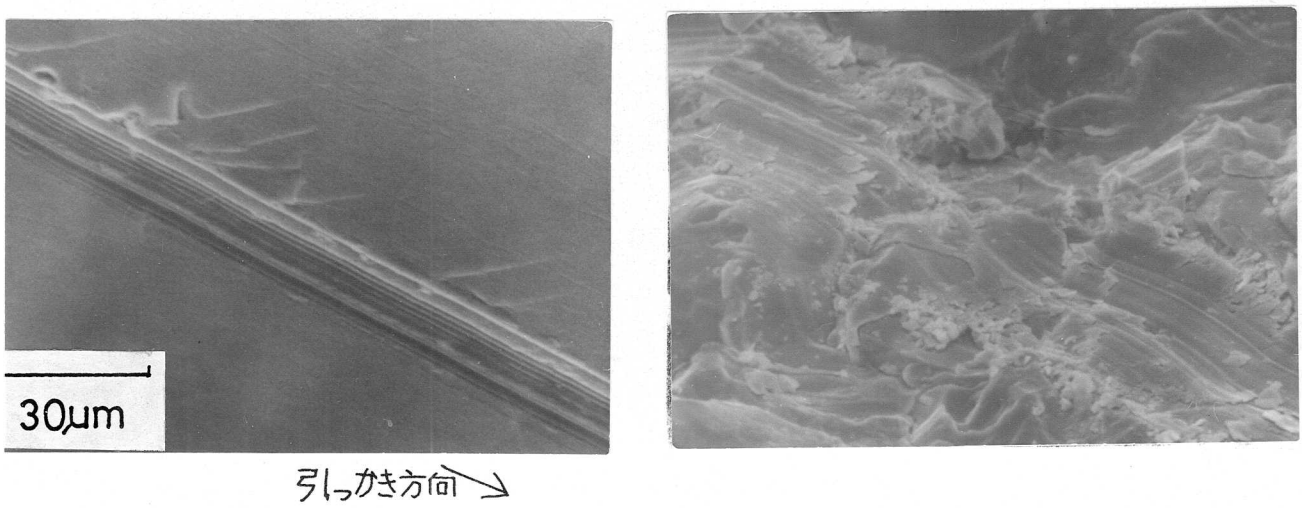
αAl_2O_3上に約120°の角度をもって交叉する帯状の模様が存在する(図4.18(b))ことから、MgOとαAl_2O_3とが反応する場合と同様に[12]、αAl_2O_3上に生成される$FeAl_2O_4$は(111)面で生長することがわかる。上述のような破断面の結晶学的様相は図4.19に示す観察結果によく現われている。図4.19(a)は反応層の内部で破壊した部分の観察結果を示し、反応生成物が多結晶であり、(111)面で



(a) 反応層内部　　(b) αAl_2O_3 の近傍

図4.19 破断面の偏光顕微鏡写真の1例

破壊が起ったことがわかる。図4.19(b)は破断面のうちαAl_2O_3表面に近い部分の観察結果を示し，反応生成物が特定の面にそって成長した多結晶体であることを示している。

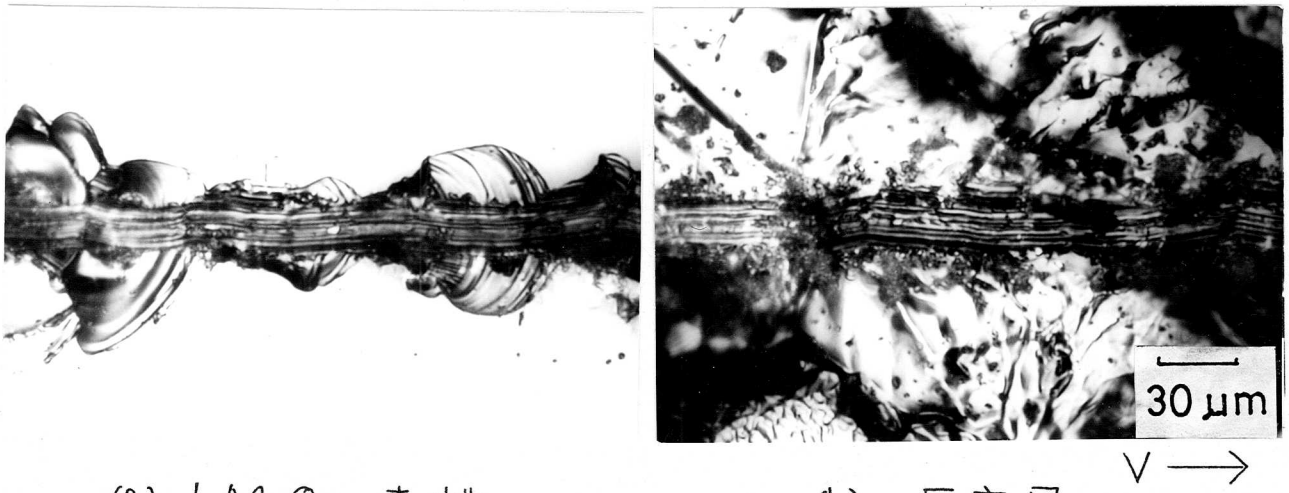


(a) αAl_2O_3 素地　　(b) 反応層

図4.20 引っかき試験痕のSEM写真

図4.20にαAl_2O_3および反応層を低速引っかき試験（引っかき速度5.5cm/min，荷重150g，）して得られた，引っかき痕およびその周辺のSEM写真を示す。頂角90°の円錐台圧子の引っかきにより，αAl_2O_3の引っかき痕

の周辺には微細なクラックが存在するのが観察される。一方純鉄と反応して生成された$FeAl_2O_4$の部分では（図4.20(b)）、(a)のようなクラックを認めることはできず、引っかき痕内部とその周辺に微細な破砕片と塑性変形が起ったと思われる痕跡が観察される。



(a) αAl_2O_3 素地　　(b) 反応層

図4.21 引っかき痕の偏光顕微鏡写真（透過光）

図4.21に引っかき痕の偏光顕微鏡写真を示す。αAl_2O_3素地の引っかきにおいては、表面下に貝がら状のクラックが発生していることがわかる。これに対し反応層では引っかきによって生じた屑と塑性変形の痕跡が認められる。

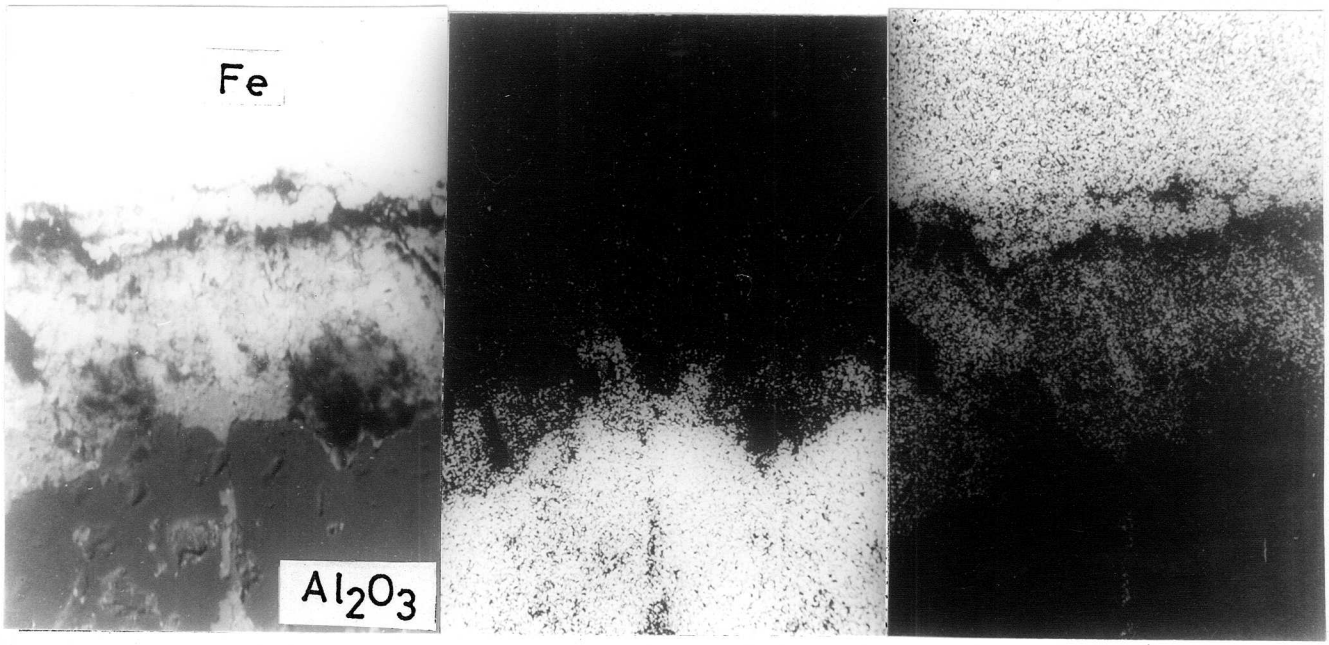
以上の結果から、αAl_2O_3と純鉄との高温における反応によって生成される反応層（$FeAl_2O_4$）は、多結晶で構成されているほか、αAl_2O_3に比べて機械的性質および化学的性質が劣ることがわかる。

4.7 ルビー単結晶と純鉄との界面反応

WA系砥粒がαAl_2O_3単結晶でモデル化できるのに対

し、A系砥粒はルビー単結晶でモデル化できる。したがって、A系砥粒切れ刃と鉄系工作物との間で研削中に生起する界面反応は、ルビー単結晶と純鉄との界面反応でおきかえることができる。

図4.22に、大気中1600°Cにおいて、ルビー単結晶と純鉄とを接触させる際に生成される反応層のEPMA分析結果を示す。図4.7に示したと同様に、ルビー単結晶と純鉄の接触界面には両素地と組成を異にする反応生成物が生成され、それがFeおよびAlを主体とする反応生成物であることがわかる。ルビー単結晶の場合に生成される反応層は、αAl_2O_3と純鉄との接触で生成される反応層の厚さより厚い。なお、この場合に生成される物質の組成も$FeAl_2O_4$であることがX線的に確かめられた。



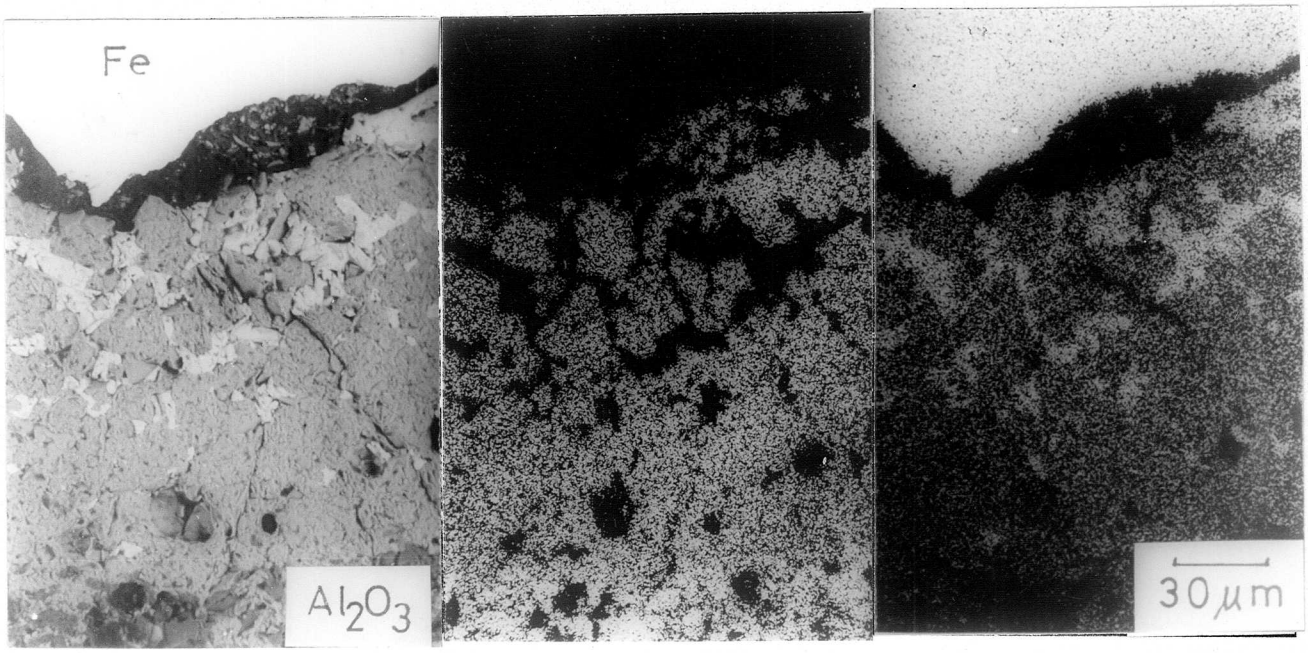
(a)組成像　(b) Al Kα 像　(c) Fe Kα 像

図4.22 ルビー単結晶と純鉄の接触界面のEPMA分析（1600°C、大気中、保持時間3分間　40μm　）

4.8 多結晶 αAl_2O_3 ならびに砥粒インゴットと純鉄との界面反応

研削に使用される砥粒はわずかに不純物を含有し、一般には多結晶である。

本節では,多結晶砥粒切れ刃と鉄系工作物との界面反応を多結晶 αAl_2O_3 と純鉄との界面反応でモデル化し，接触界面における反応を検討する。ついで,A砥粒インゴットの場合についても純鉄との界面反応の有無を検討する。実験に先立ち両試料ともあらさ 2 μm (Rmax) に研摩仕上される。この試料を図4.2の装置を使用し、大気中 1600 ℃で3分間純鉄と接触させる。溶着試験後の試料の処理方法は αAl_2O_3 のそれと同様である。

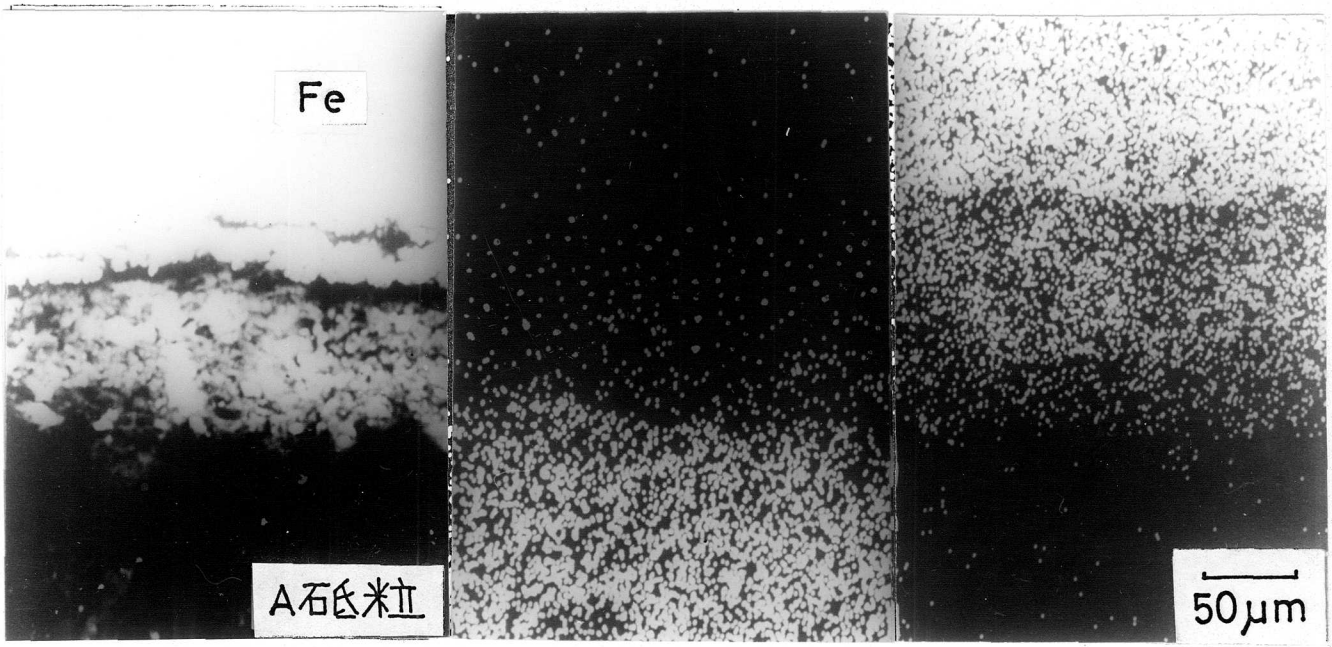


(a) 組成像　　(b) Al Kα 像　　(c) Fe Kα 像

図4.23 多結晶 αAl_2O_3 と純鉄の接触界面のEPMA分析 (1600℃, 3分間)

図4.23に多結晶 αAl_2O_3 と純鉄の接触界面をEPMA分析した1例を示す。多結晶 αAl_2O_3 表面近傍には反応層が

生成されているほか、結晶粒界または空隙に侵入した溶融鉄とAl_2O_3とが反応している。したがって反応層の厚さは160μmと厚くなっていることがわかる。



(a) 組成像　　(b) AlKα 像　　(c) Fe Kα 像

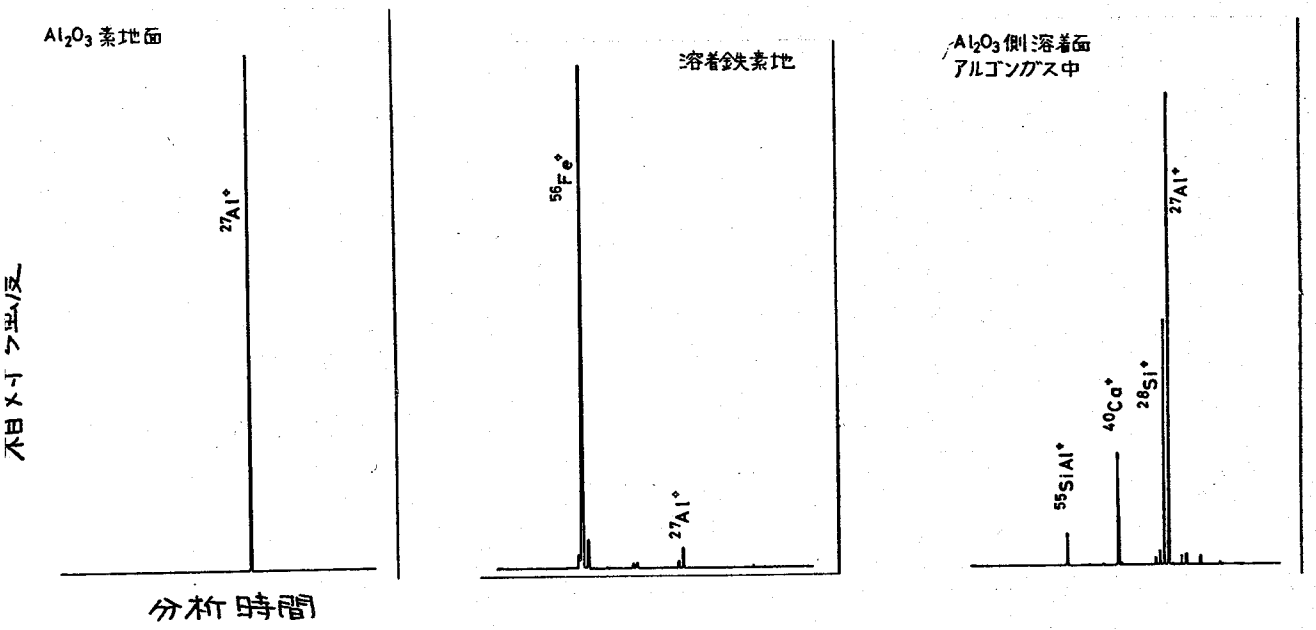
図4.24 A砥粒インゴットと純鉄の接触界面のEPMA分析（1600°C, 3分間）

図4.24はA砥粒インゴットと純鉄の接触界面をEPMA分析した結果を示している。図4.23の場合と同様に，空隙および結晶粒界に侵入した溶鉄が反応層を厚くしていることがわかる。

4.9 反応層のIMA分析

イオンマイクロアナライザー（IMA）は，10^{-7}気圧程度の高真空中においてアルゴンまたは酸素イオンを加速して物質に衝突させ，1次イオンによって生ずるエッ

チング効果を利用して試料をイオン化させ，放出される2次イオンを類別記録することによって試料の分析を行なう装置であり，高い分解能を有する。



(a) αAl_2O_3　　(b) 純鉄　　(c) αAl_2O_3接触部

図4.25　IMAによるαAl_2O_3と純鉄の接触界面の分析（アルゴンガス雰囲気，1600℃，45分間）

図4.25にアルゴンガス雰囲気中において，単結晶α-Al_2O_3と純鉄とを接触させた場合に得られる接触界面部を，IMAを使用し分析（加速電圧10KV，O_2イオン使用）した結果を示す。AlおよびFeイオンとも代表的な，$^{27}Al^+$および$^{56}Fe^+$イオンを検出できる範囲のみをとり出して記録してある。$^{27}Al^+$と$^{56}Fe^+$イオンはイオン化率が異るため，図に示されたスペクトルから直ちに両イオンの絶対量を判断することはできないが，分析箇所にいかなる元素が存在するかを判別できる。(c)図から，アルゴンガス中では純鉄とαAl_2O_3は反応しないことがわかる。

これまで取り扱ってきたαAl_2O_3と純鉄の界面反応は、単に温度場を重視した静的な解析手段である。しかし、反応し合う過程が拡散律則される反応系であることからも、研削の場合のように高い接触圧力が作用する界面においては、塑性流動に伴なって生ずる転移拡散やPipe拡散が加わるため[13]、αAl_2O_3と鉄系材料との反応速度は益々助長されるものと考えられる。

4.10 結言

本章では、高温下で生起するαAl_2O_3系砥粒と鉄鋼材料との界面反応を、鋼の融点付近におけるαAl_2O_3と純鉄との静的溶着試験によって検討した。両者の界面には反応生成物が存在することがわかった。得られた主要な結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) αAl_2O_3と純鉄とは鋼の融点付近で酸素の存在の下に反応し、反応生成物$FeAl_2O_4$（ハーシナイト）を生成する。反応は拡散律則される。

(2) $FeAl_2O_4$の生成過程はつぎの2段階にわけられることを実験的に確かめた。

$$2Fe + O_2 = 2FeO$$

$$FeO + Al_2O_3 = FeAl_2O_4$$

(3) 酸素分圧が10^{-11}程度のアルゴンガス雰囲気中では、αAl_2O_3と純鉄とは反応しない。

(4) 生成された$FeAl_2O_3$は微細な多結晶であり、αAl_2O_3に比べ機械的性質も化学的性質も劣る。

(5) A系砥粒と同質のルビー単結晶と純鉄との反応においても$FeAl_2O_4$が生成される。

(6) 多結晶質αAl_2O_3と純鉄との界面反応では、粒界拡散

がくわわるため、単結晶の場合にくらべ反応層は厚くなる。

(7) 砥粒インゴットと純鉄との接触界面においても反応が生起し、$FeAl_2O_4$ が生成される。

参考文献

1) R.P.Steijn : J.Appl.Phys.,32(1961)1951.
2) N.S.Eiss, C.Richard : J.Am.Ceram.Soc., 49,4(1966)221.
3) W.R.Brown, N.S.Eiss, H.T.Mcadams : J.Am.Ceram.Soc., 47, 4(1964)157.
4) M.L.Kromberg : ACTA.Metal. 5(1957)507.
5) 今田, 河嶋; 耐熱材料ハンドブック, 朝倉書店(1965)686.
6) 荻野, 足立, 野城 : 鉄と鋼, 59, 9(1973)1237.
7) 高島(訳) : 固体の化学, 広川, 東京(1969)193.
8) R.G.Olsson, T.F.Rerzak, V.Koump : Trans.Met.Soc of AIME, 243(1968)184.
9) 宗宮(訳) : 酸化物の相平衡, 技報堂, 東京(1971)28.
10) R.B.Snow, W.T.Macaughey : J.Am.Ceram.Soc., 25(1942)154.
11) 今田, 河嶋 : 文献5)に同じ.
12) 中野, 山口, 斉藤 : 窯業協会誌, 79, 3, (1973)22.
13) 山本(訳) : 金属物理学, 丸善, 東京(1965)329.

第5章 αAl_2O_3 系砥粒の摩耗機構（その２）
—摩擦試験—

5.1 緒言

２種類の物質を摩擦する場合，その摩擦界面では多量の摩擦熱が発生し摩擦面の温度は局部的に極めて高温に達するため，接触界面はしばしば溶融状態になることが明らかにされている[1]。

２章の解析によって明らかにされたごとく，砥粒切れ刃の材料除去作用は，一方において高温高圧下の砥粒切れ刃と工作物との摩擦作用に帰着させることができる。αAl_2O_3系砥粒を用いて鉄鋼材料を研削する場合には，砥粒切れ刃は鋼の融点付近の高温下にさらされ，数Kgの荷重をうけて摩擦させられている。

本章では,主として軟鋼とαAl_2O_3単結晶との摩擦試験を行ない、４章で解明した界面反応が摩擦界面においても生起するか否かを検討する。まず比較的軽度な摩擦条件で摩擦を行ない、摩耗粉をX線で,摩擦面をX線，電子線およびイオンビームで分析し、摩擦界面における化学反応を検討する。ついで研削と同程度の速度で摩擦試験を行ない化学反応の存在を検討する。得られた結果をもとにし，鉄鋼材料とAl_2O_3とを摩擦する際のAl_2O_3の摩耗機構をモデル化し，摩耗現象の統一的説明を試みる。最後に軟鋼製回転円板とA系砥粒との摩擦試験を行ない，摩耗機構にもとづいて摩耗量を論ずる。

5.2 αAl_2O_3系砥粒の摩耗機構の史的考察

従来，鉄鋼材料を研削する際に生ずるαAl_2O_3系砥粒の摩耗に関する研究は，単砥粒と工作物材料との摩擦試験ないし同系砥石を用いた研削試験によって検討され，αAl_2O_3系砥粒が機械的および化学的な摩耗機構によって摩耗することが明らかになってきた。

仕上研削や鏡面研削のように微小な切込みを加え砥石をかたく作用させる研削作業においては，砥粒切れ刃は機械的な破壊に起因する摩耗機構よりもむしろ，より微視的な機構によって摩耗することが明らかにされてきた。

すなわち，1950年代から1960年代にわたって行なわれた多くの研究によって，αAl_2O_3系砥粒切れ刃で鉄鋼材料を研削する場合に，砥粒が化学的な機構によって摩耗するという事実が報告されたが[2]，その詳細は明らかにされずに現在に至っている。

しかし，上述のように一方では摩擦界面における化学反応の存在を認めながらも，他方では摩擦の結果生ずるαAl_2O_3系砥粒の摩耗量については，摩耗量は摩擦荷重と摩擦距離に比例するという摩耗則がそのままあてはまるものと考えられてきた。このため摩耗データも同様な考え方によって処理されているものが多く，摩耗機構を考慮することなく摩耗量を処理するという矛盾する局面もでてきている。これまでに得られた摩耗データを見ると，同一の摩擦条件下においてもαAl_2O_3の摩耗量には可成りのばらつきが認められている。このようなデータのばらつきは，砥粒の異方性にもとづくものとされてきた。しかし，高速摩擦条件の下では砥粒の異方性はほとんど無視できることを考慮すると[3]，従来の摩耗試験で得られた砥粒の摩耗率を使用するにあたっては，適用条件を限定しなければならないと考えられる。

一方，得られている摩耗データの中には，摩擦する相手

材との適合性を取り扱ったもの[4]、摩耗量に与える摩擦速度の影響を論じたもの[5]などが存在することは、αAl_2O_3系砥粒の摩耗機構と摩耗量との関係を見出す指針を与えているものと考えられる。4章でのべたような高温度条件下における固相－液相または固相－固相の系の化学反応は，律則される過程が拡散によるため，化学反応自体確率的な過程となるから，化学的な摩耗機構が存在すれば砥粒の摩耗量自体その影響をうけることとなる。

5.3. 実験方法

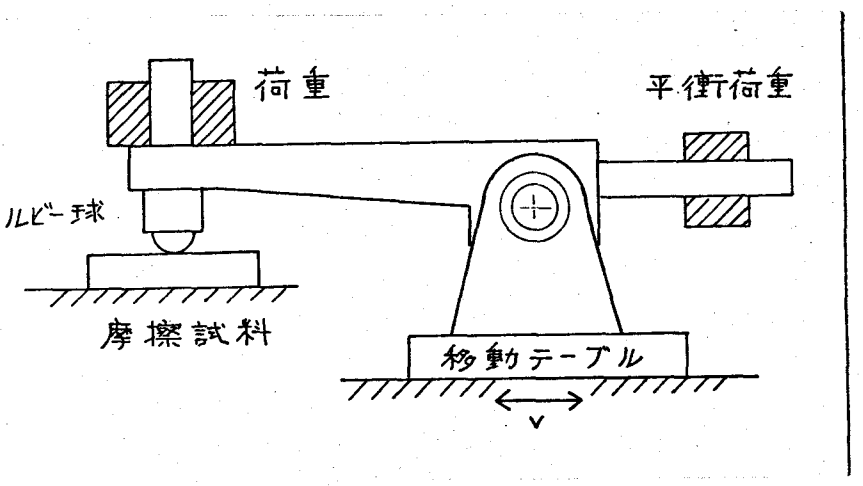


図5.1　低速摩擦試験装置の概要

図5.1に低速摩擦試験の装置を示す。精密すべり案内面を利用した移動テーブルは、低速サーボモーター～ベルト～送り桿および同ナットよりなる駆動系によって駆動される。低速摩擦試験ではαAl_2O_3による食いつき現象を防止するためαAl_2O_3試料と同じ成分をもつ直径3mmのルビー球を使用し，真空溶解した高純度純鉄（99.99%の純度を有する。Alの含有量0.001%）を摩擦する。処女面摩擦を行なう場合には，テーブルの移動方向に直角な方向にホルダー軸支持台を移動させる。本装置による摩擦試験の摩擦条件は軽度な条件であるため，摩耗粉を排出しない場合の摩耗状態を検討することができる。

Pin-on-Dram方式の摩擦機構を応用して試作した中速摩擦試験装置の概要を図5.2に示す。

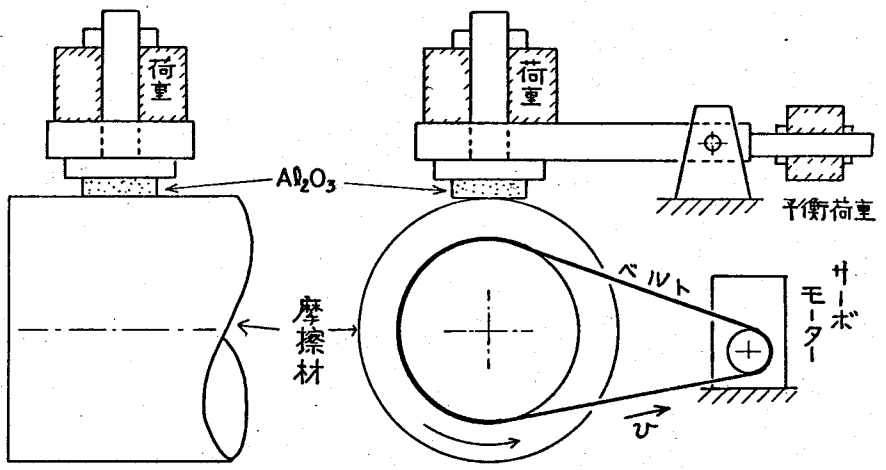


図5.2　中速摩擦試験装置の概要

αAl_2O_3 と軟鋼(S45C)製の摩擦ドラムは、平面－円筒の接触をする。本装置はまたアルゴンガス雰囲気中におけるαAl_2O_3と軟鋼との摩擦にも使用される。その場合には摩擦ドラム、摩擦試料および同ホルダ軸はアクリル樹脂製の箱中に収納され，可撓接手およびOリングを使用して外界と隔絶されている。アルゴン雰囲気中で摩擦を行なう場合には、まず箱中の雰囲気をアルゴンガス(純度99%，乾燥)で十分に置換したのち，0.06ℓ/min のアルゴンガスを常時流入させ，箱中の気圧を正圧に保っておく。

摩擦試験に先立ち摩擦ドラム表面は炭素工具鋼製バイトを使用して仕上切削する。

高速摩擦試験には図5.3に示した摩擦試験装置を使用し，これを高速精密旋盤の刃物台にとりつけ、主軸にとりつけられて回転する摩擦円板との間で摩擦を行なう。摩擦円板は旋削後WA砥石を用いて研削仕上され，あらさ約Rmax 4μm，外周における主軸方向のふれ最大5μmに保たれている。

A砥粒と軟鋼との摩擦試験を行なう場合には、砥粒をランダムにホルダーにとりつけたのち，摩擦試験に先立

ち摩擦円板との間で予摩擦[4]を実施して砥粒先端を平坦にしてある。

砥粒の摩耗量をあらわすには、摩耗高さΔhをもってあらわし、単位摩擦長さあたりの摩耗高さを摩耗率g_hと呼ぶことにする。

表5.1　摩擦試験の条件

試験	組合わせ	摩擦速度V(m/min)	摩擦荷重W(kg)	摩擦方式
低速	ルビー球－純鉄	0.06	0.2	処女面
中速	Al_2O_3－軟鋼	6.0	1.2	くり返し
高速	Al_2O_3 A砥粒－軟鋼	1000～1750	0.3～0.7	くり返し

$$g_h = \frac{\Delta h}{L_f} \qquad (5.1)$$

$$\Delta h = \frac{3w}{g} \Big/ \left(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2}\right) \qquad (5.2)$$

ただし L_f：摩擦距離，w：摩耗重量，g：砥粒の比重
A_1：予摩擦後の摩耗面積，A_2：摩擦試験後の摩耗面積

ここでA_1およびA_2は砥粒摩耗面の顕微鏡写真フィルム上で，wは砥粒をホルダーに装着したまま精密天秤で測定する。

摩擦試験後すみやかに電子回折法，IMA，EPMAおよび光学顕微鏡を使用し試料の摩擦面を，X線回折法を使用して摩耗粉を分析する。

表5.1に摩擦試験の条件を示す。αAl_2O_3は単結晶で、$(11\bar{2}0)$面で摩擦される。

5.4　摩擦面上の反応生成物

図5.3に中速摩擦試験を行なって得られたαAl_2O_3の摩擦面をEPMAで観察した結果を示す。摩擦面は全体にわたり同一色調でありほぼ同一組成であることがわかる

ほか、摩擦面には組成の異る物質（図中白点で示されている）が溶着していることがわかる。

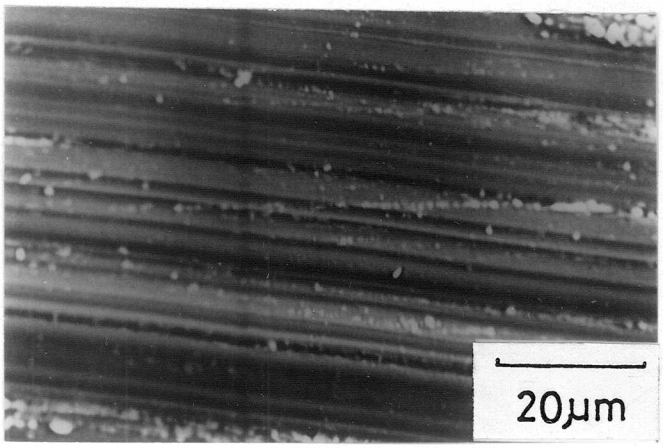
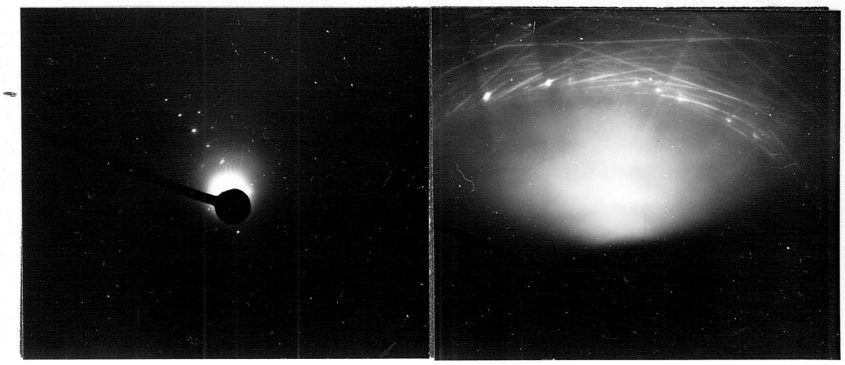


図5.3　αAl_2O_3摩擦面のEPMA分析(組成像)

αAl_2O_3上に付着した物質をブランクレプリカを使用して除去した摩擦面の電子線回折結果を図5.4に示す（加速電圧：100 KV，電流：65mA，試料フィルム間距離：31 cm）。摩擦前のαAl_2O_3の表面は良好な単結晶性を示しているが（図5.4(a)），軟鋼と摩擦したのち得られた摩擦面上における回折では弱い回折環と菊地模様が得られており，摩擦面はαAl_2O_3の素地に近いがその表面には別な物質が存在することがわかる。



(a) 摩擦前　　(b) 摩擦後

図5.4　αAl_2O_3の電子線回折例

図5.5は中速摩擦試験の相手材たる軟鋼の摩擦面の電子線回折結果の1例を示している。軟鋼の表面には素地のα鉄とは組成の異る物質が存在している。

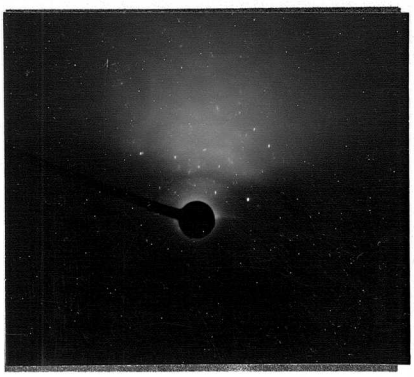


図5.5 軟鋼摩擦面の電子線回折

表5.2に図5.4および図5.5の

解析結果を示す。摩擦後の軟鋼およびαAl_2O_3の摩擦面上には、$FeAl_2O_4$が存在していることがわかる。したがって軟鋼とαAl_2O_3との接触界面において$FeAl_2O_4$を生成する化学反応が生起したことを予測できる。

表5.2 摩擦面の分析結果

摩擦面				比較物質									
単結晶	I/I₀	軟鋼	I/I₀	Al_2O_3	I/I₀	$FeAl_2O_4$	I/I₀	αFe	I/I₀	FeO	I/I₀	Fe_2O_3	I/I₀
2.45Å	W	2.53Å	VS	2.55Å	9	2.45Å	10					2.52Å	10
2.38	S	2.45	S	2.38	4					2.08Å	8		
2.04	W	2.04	VS	2.08	10	2.03	7	2.03Å	10	2.15	10	2.08	2
1.56	VW	1.60	M	1.60	8	1.56	9					1.61	3
1.27	VW	1.52	M	1.40	3	1.28	3			1.52	6		
		1.43	W	1.37	5			1.43	2				
		1.30	VW	1.17	5					1.24	2		
		0.96	VW			0.97	1	1.01	1	0.98	2	1.09	2
						0.79	2						

VS: 最強, S: 強, M: 中, W: 弱, VW: 極弱

一方研削速度と同程度の摩擦速度でαAl_2O_3と軟鋼とを摩擦する場合にも、表5.2と同様な結果が得られている。[2)]

低速摩擦試験を行なったルビー球および純鉄の摩擦面を電子線回折した結果からは、$FeAl_2O_4$の存在を確認できなかった。低速摩擦試験においても上記反応は生起していると考えられるが、$FeAl_2O_4$が微量かつ薄層の場合には、電子線の試料面への侵入深さの関係もあり、$FeAl_2O_4$の存在を検知できないと思われる。

図5.6にIMAを使用し低速摩擦試験後得られた純

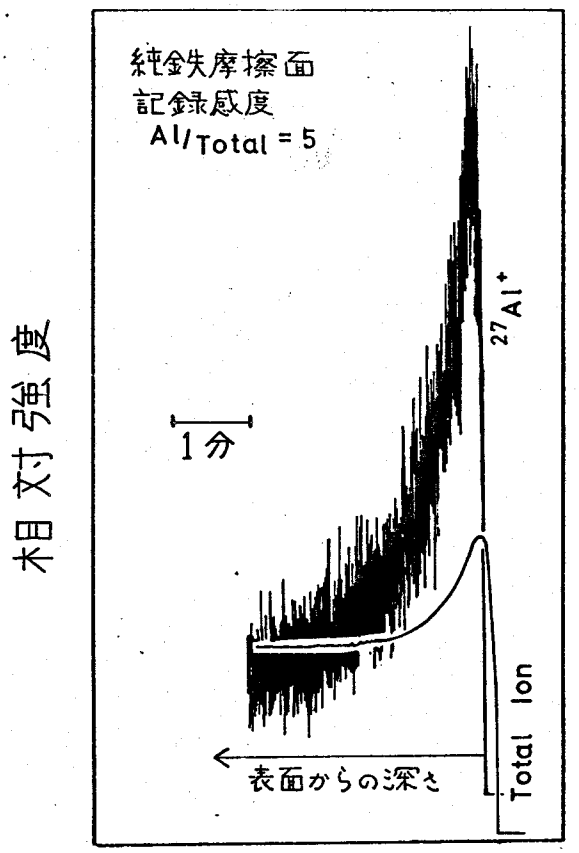
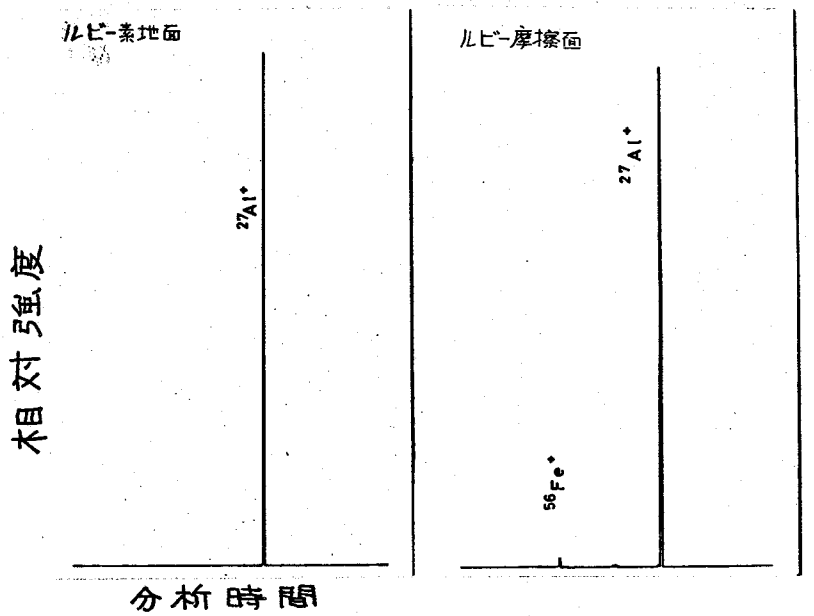


図5.6 純鉄摩擦面のAlイオン濃度分布

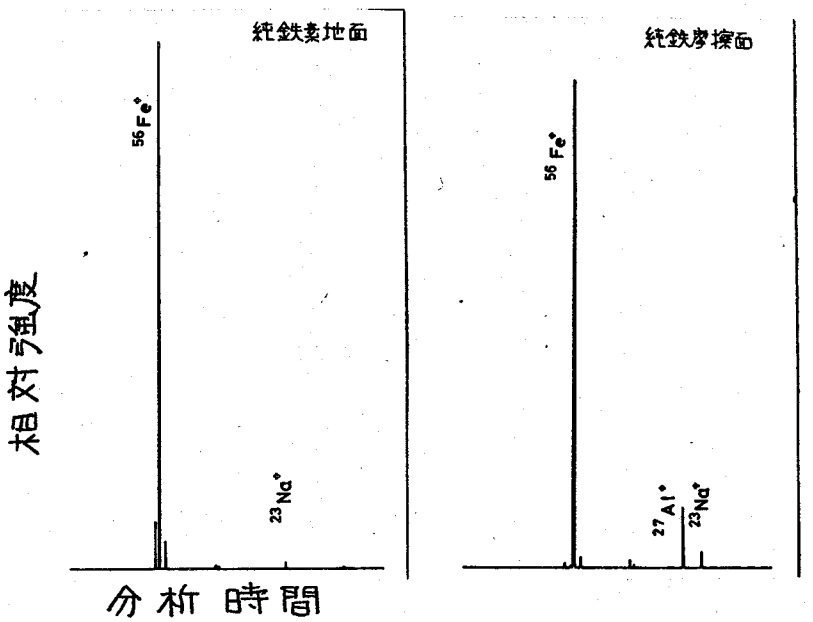
鉄摩擦面について，摩擦表面に垂直な方向に内部に向って分布する$^{27}Al^{+}$の濃度変化を追跡した結果の1例を示す。横軸の分析時間は表面からの深さに相当する。Total Ion量に対する$^{27}Al^{+}$の比をとってみると、比は分析時間が長くなる(表面からの深さが深くなる)ほど減少するから、$^{27}Al^{+}$が単に鉄の表面の付着物より出たものでなく、濃度分布がある化合物に起因するイオンであることがわかる。したがって表層は化合物となっていることがわかる。

図5.7および図5.8に、それぞれ、低速摩擦試験後の、ルビーおよび純鉄の摩擦面のIMA分析結果を示す。摩擦の条件が極めて軽いにもかかわらず、摩擦前後のルビー球および純鉄表面の分析結果をくらべると、ルビーの摩擦面には



(a)摩擦前　　(b)摩擦後

図5.7 ルビー摩擦面のIMA分析



(a)摩擦前　　(b)摩擦後

図5.8 純鉄摩擦面のIMA分析

$^{56}Fe^{+}$ の増加が、純鉄の摩擦面上には $^{27}Al^{+}$ の増加が認められるため、低速摩擦試験における接触界面においても、$FeAl_2O_4$ を生成する化学反応が生起したものと考えられる。

図5.9に、純鉄表面に均一に出来たIMA分析痕を示す。

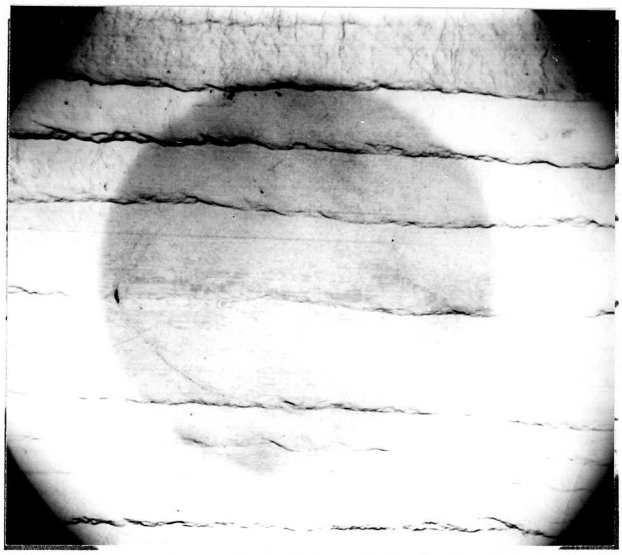


図5.9　IMA分析痕

表5.3は中速摩擦試験を行なった際に生じた、軟鋼製摩擦ドラム表面の色調変化を定性的に示している。表には摩擦で得られる摩耗粉の色調もあわせ示されている。摩擦表面の色調が時間の経過とともに変化し、72時間後の色調は褐色を呈している。摩擦ドラム表面の色調は摩耗粉のそれと同様であり、ドラム表面の色調の変化は摩耗粉の移着によるものと思われる。摩擦ドラム表面の色調は、FeO と αAl_2O_3 が異る比率で結合して生成する $FeAl_2O_4$ の色調の相異と類似していることから、摩擦の過程で生成される $FeAl_2O_4$ の鉄中に占める濃度の割合が異るものと考えられる。

表5.3　摩擦面の色調変化

対象	5min後	1hr後	24hr後	72hr後
相手材	黒	黒緑	黒褐	褐
摩耗粉	黒	黒緑	黒褐	褐

これまでに得られた結果から、大気中における αAl_2O_3 と軟鋼の摩擦においては、αAl_2O_3 は鉄と反応して $FeAl_2O_4$ を生成しながら摩耗することがわかる。

5.5 摩耗粉のX線分析

摩耗現象は、摩擦に伴なって生ずる摩擦材の減耗挙動であって、この現象は摩擦面の一部が摩耗粉として脱落するために生ずる。したがって摩耗粉の組成を調べることによっても摩擦界面で生起している現象を解明できる。

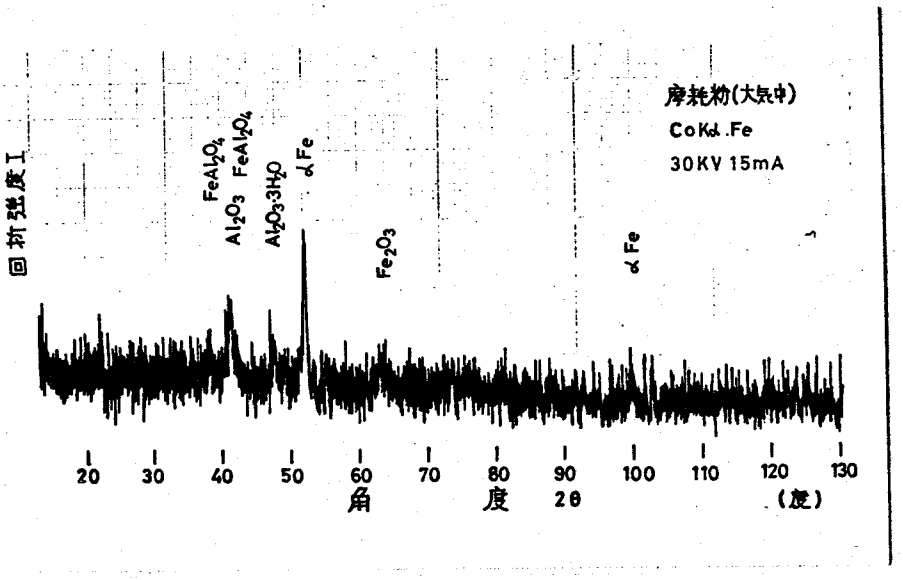


図5.10 大気中摩耗粉のX線分析

表5.4 大気中摩耗粉のX線分析結果

材料	分析結果
Al_2O_3単結晶	αAl_2O_3
相手材(軟鋼)	αFe
摩耗粉	αFe, $FeAl_2O_4$, FeO Fe_2O_3, αAl_2O_3

中速摩擦試験を大気中で行なって得られた摩耗粉の組成をX線回折法を用いて分析(図5.10)し、その分析結果をまとめて表5.4に示す。摩耗粉には両摩擦母材のほか鉄の酸化物および生成された$FeAl_2O_4$が含まれている。両母材は摩擦中の切削作用や振動によって生じて混入したものであり、鉄の酸化物は摩擦熱の影響を受けて摩擦ドラムの表面が酸化されて生じたものと考えられる。

前節表5.3に示した摩耗粉の色調の変化は、摩擦の各段階において生ずる摩耗粉の組成比(母材、酸化物および$FeAl_2O_4$)が異ることに起因すると考えられる。

5.6 αAl_2O_3の摩耗に与える酸素の影響

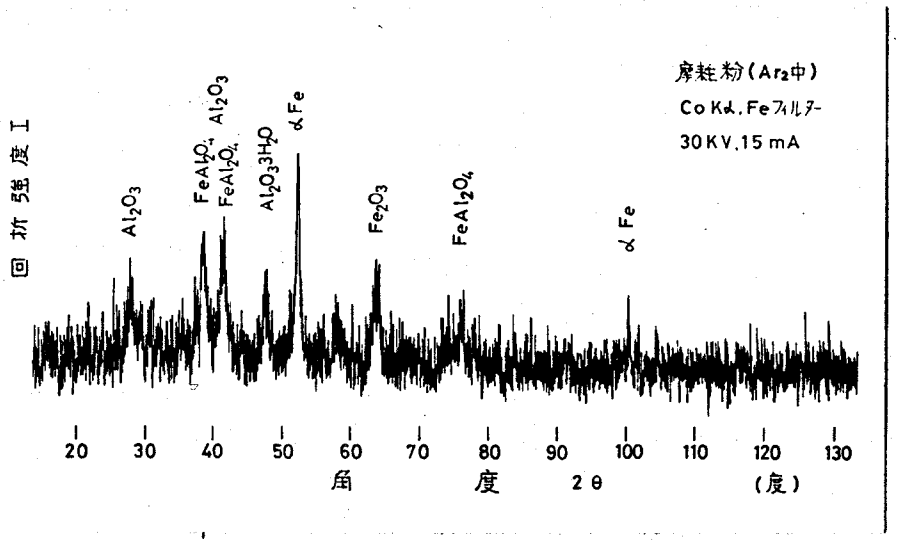


図5.11 Ar₂中の摩耗粉のX線分析

4章で明らかにされたように、酸素の存在は$FeAl_2O_4$の生成に大きな影響を与えている。軟鋼と摩擦する際のαAl_2O_3の摩耗機構が$FeAl_2O_4$を生成する化学的な摩耗機構であれば、酸素が余り存在しない雰囲気において摩擦する場合には、αAl_2O_3の摩耗量は減少すると考えられる。

表5.5 摩耗量の比較
(摩耗高さで測定)

条件	摩擦速度 V	
	6 m/min	1000 m/min
大気中	大	最大
アルゴンガス中	小	中

w=1Kg , L_f=25 Km

図5.11にアルゴンガス中(酸素分圧10^{-3}気圧)で、αAl_2O_3と軟鋼の中速摩擦試験を行なって得られた摩耗粉のX線分析結果の1例を示す。摩耗粉の組成は大気中のそれとほぼ同じである。酸素分圧が10^{-8}気圧以下にならなければ高温において鉄は酸化物を生成すること[6]を考慮すると、図5.11の結果は説明できる。

表5.5はαAl_2O_3単結晶を(11$\bar{2}$0)面上で[0001]方向に摩擦する際の摩耗量を、大気中およびアルゴンガス中について比較した結果を示している。アルゴンガス中における摩耗量を1とすると大気中のそれは約2.5となっていることから、酸素の存在がαAl_2O_3の摩耗に大なる影響

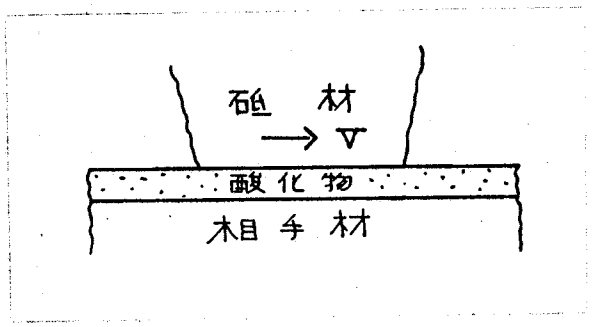
を与えることがわかる。

5.7 鉄鋼材料と摩擦する場合のαAl_2O_3の摩耗機構

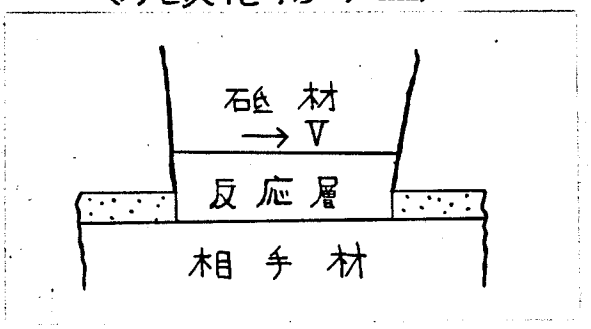
4章および本章のこれまでに得られた結果から、鉄鋼材料と摩擦する場合には、αAl_2O_3は$FeAl_2O_4$を生成して化学的に摩耗することが判った。

鉄鋼材料と摩擦する場合のαAl_2O_3の摩耗機構は図5.12に示すようにモデル化できる。

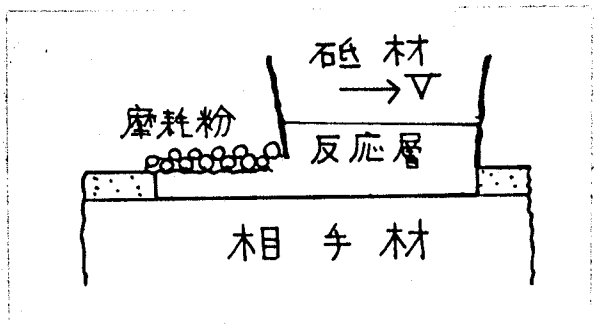
摩擦界面が局部的に高温になり相手材表面に酸化物が生成されて、摩擦の組合せがαAl_2O_3と酸化物(FeO)との組合せに変化する(図5.12(b))。同時に拡散律則された化学反応が図5.12(a)の過程を経て生



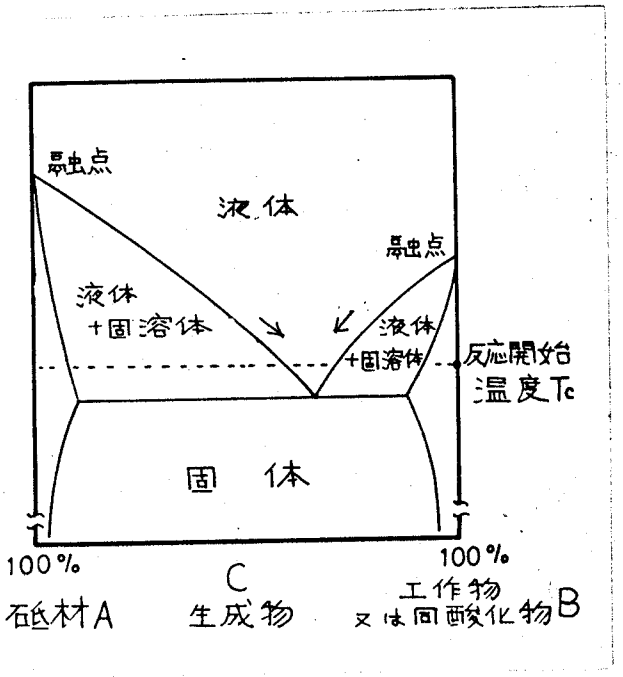
(b)酸化物の生成



(c) 反応の生起



(d) 摩耗



(a)反応のモデル

図5.12 αAl_2O_3の摩耗機構のモデル

起し反応生成物が摩擦界面に生成される（図5.12(c)）。すなわち，図5.12(a)において，摩擦面の温度が物質B（多くは金属酸化物）の融点に達するとBは融解し、液相－固相の反応が生起し始める（T_c）。この反応系には常に2相が混在するため両物質の混合割合は変化し，反応界面の融点が最も低い状態に達したのち連続的な化学反応が持続する。反応面は常に移動しているため，接触界面に生成された反応生成物は剪断および圧縮されて摩擦面を離脱し、相手材の表面に付着または溶着する（図5.12(d)）。摩擦界面から離れた反応生成物は急冷されて凝固し，その一部は摩耗粉として脱落する。

くり返しのある摩擦を行なう場合には，2回目以降の摩擦はαAl_2O_3と反応生成物を含む相手材表面との摩擦が行なわれることになり、反応成生物はαAl_2O_3の前方のエッジで削り取られるなどして除去され，残余は摩擦界面にはいって摩擦される。

αAl_2O_3と軟鋼とを大気中で摩擦する場合には、図5.12(a)のモデルは図5.13のAl_2O_3－FeO系の二元状態図となる。摩擦表面に生成されたFeOは1330°Cにおいて液体となり，αAl_2O_3と反応して$FeAl_2O_4$（ハーシナイト）を生成する。摩擦による相対運動によって除去された$FeAl_2O_4$は軟鋼表面に付着するか、またはαAl_2O_3によって切削除去された軟鋼粉に混入して摩耗粉となる。表5.4に示した分析結果

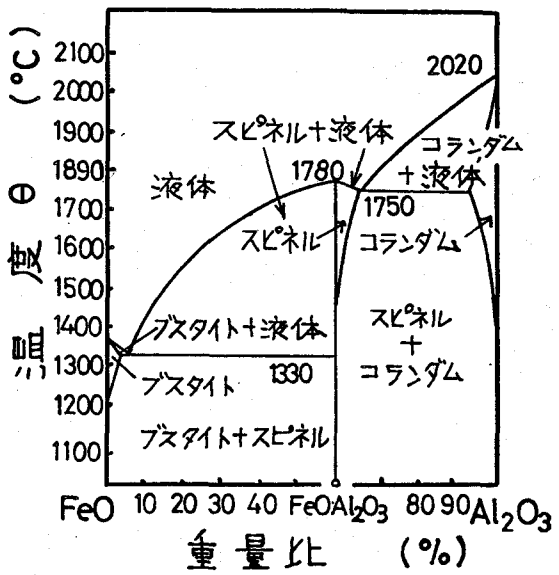


図5.13 Al_2O_3－FeO系状態図[6]

はこの事実を実証するものである。

摩擦する場合にαAl_2O_3の摩耗量が最も多いと言われているSiO_2との摩擦においても図5.12に示したモデルは成立する。この場合図5.12(a)のモデルは図5.14の$Al_2O_3-SiO_2$系状態図となる。両物質とも融点は高温に存在するにもかかわらず、SiO_2が約90%含まれる状態では反応生成物の温度は約1600°C程度となり、反応生成物の$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$(ムライト)[6]を生成する。摩耗粉中にSiO_2とムライトが存在するのは上記理由によるものと考えられる。

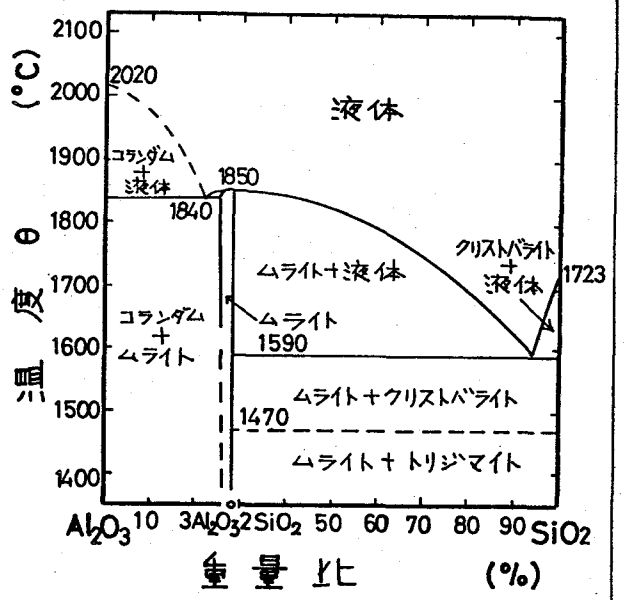


図5.14 $Al_2O_3-SiO_2$系状態図[6]

図5.12に示した摩耗機構は、αAl_2O_3と反応しスピネル系化合物を生成する金属(例えば、Ti, Mg, Ca, Be, Ba Znなど)とαAl_2O_3とを摩擦する場合についても適用できる[6]。したがって本節でのべたαAl_2O_3の摩耗機構のモデルは、αAl_2O_3と鉄鋼材料との摩擦のみならず他の物質との組合せについても成立するため[7]、一般性をもつものである。

5.8 A砥粒の高速摩擦試験

前節までに得られた結果から、鉄鋼材料と摩擦する場合のαAl_2O_3の摩耗量は相手材との化学反応性に依存する

ことがわかった。

A砥粒は若干の不純物を含む（αAl_2O_3の純度約96％）がその主成分はαAl_2O_3である。WA砥粒に比べじん性があるため、摩耗機構の解明に使用するには適当である。

高速摩擦試験装置（図3.3）を使用し、大気中でA砥粒と軟鋼とを摩擦する際に生ずるA砥粒の摩耗進行曲線を図5.15に示す。砥粒の重量摩耗量は摩擦長さの増大に伴なって放物線的に増加してゆく。しかし図にも示されているように、摩擦面の圧力は摩擦長さの増大に伴なって低下してゆく。ここで摩擦面の圧力は摩擦面の温度と密接な関係にあることを考慮すると（Jaeger[8]によれば矩形の移動熱源の場合，一定摩擦荷重条件下の摩擦面の平均温度は，長さlの摩擦長さがΔlだけ増加すると温度は$3\Delta l/(2l^{\frac{5}{2}})$だけ低下するといわれる）、図5.15は、異なる摩擦状態を同一尺度でとり扱ったことになる。

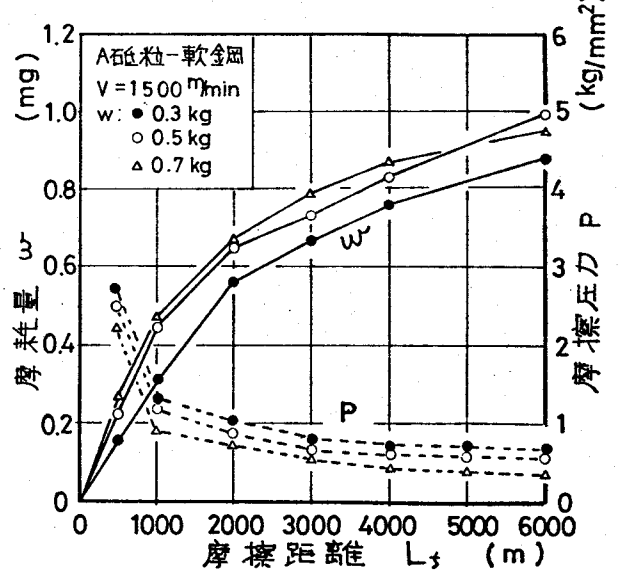


図5.15　A砥粒の摩耗曲線

図5.16は、（5.1）および（5.2）式を使用してA砥

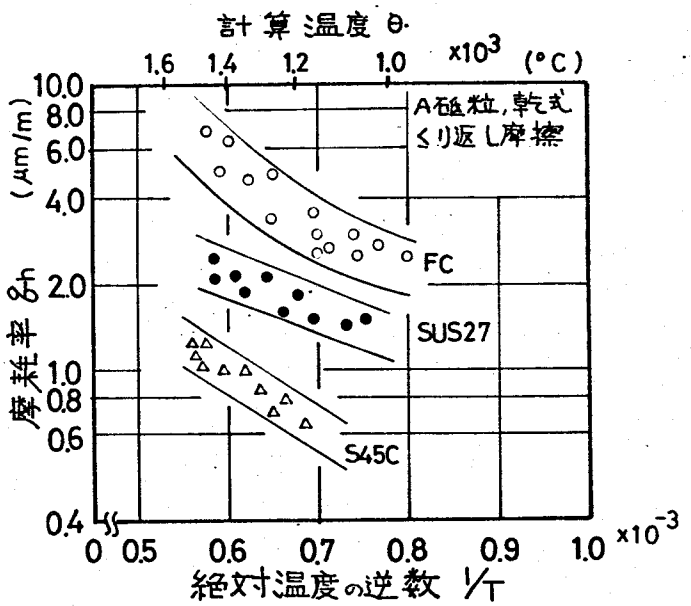


図5.16　A砥粒の摩耗率

粒の摩耗率を求め，砥粒摩耗面を平均摩耗長さを一辺とする矩形にモデル化[9]し，(2.12) 式を使用して求めた摩擦面の平均温度の関数としてあらわした摩耗率の変化を示している。摩擦面の温度を算定するのに必要な摩擦面積は摩擦試験後のそれから，摩擦力は図5.17の測定装置を用いて測定した。なお図5.16には鋳鉄（3.4%C）および不銹鋼（SUS27）と摩擦する場合の摩耗率もあわせて示してある。

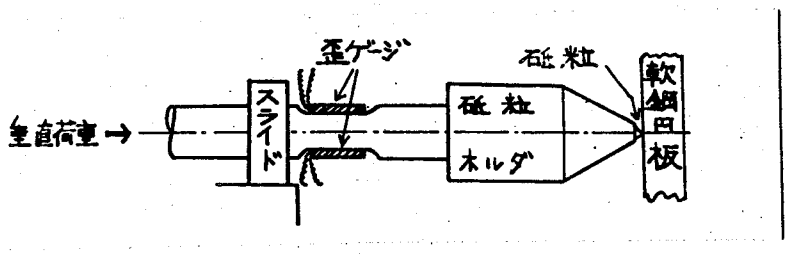


図5.17 摩擦力の測定装置

図5.16によれば、A砥粒の摩耗率は摩擦面の温度が高くなるほど大きくなる傾向にあることがわかる。換言すれば、摩擦圧力および摩擦速度の増大するのに伴なって摩耗率が増加することがわかる。また摩耗率 q_h は摩擦面の温度の関数として

$$q_h = f\left\{e^{-\frac{K}{T}}\right\} \qquad (5.3)$$

なる関係式であらわされる傾向にある。

また図に示されている3種類の摩擦の組合せでは，鋳鉄と摩擦する場合のA砥粒の摩耗率が最も大きく，軟鋼との組合せによる摩耗率が最も小さいことがわかる。鋳鉄には多量のSiおよびSiCが含有され，不銹鋼にはCr，Tiなどの添加物が存在するため，αAl_2O_3 は鉄のほかこれらの物質とそれぞれ反応して反応生成物を生成する[10]。したがって鋳鉄および不銹鋼との摩擦におけるA砥粒の摩耗率の方が軟鋼と摩擦する際のA砥粒の摩耗率よりも大きくなる。

5.9 結言

本章では、各種の摩擦件の下でαAl_2O_3およびA砥粒と鉄鋼材料とを摩擦し、得られた摩擦面および摩耗粉を電子線、X線およびイオンビームなどを使用して観察分析し、αAl_2O_3およびA砥粒の摩耗機構を検討した。得られた主要な結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) 大気中でαAl_2O_3と軟鋼を摩擦して得られる両者の摩擦面上には$FeAl_2O_4$（ハーシナイト）が存在している。また摩擦時に排出される摩耗粉は$FeAl_2O_4$が主体をなしている。

(2) 軽い摩擦条件で純鉄とルビー球（αAl_2O_3）とを摩擦したところ、純鉄摩擦面上に$^{27}Al^{+}$イオンの増加が認められた。

(3) αAl_2O_3と鉄鋼材料との摩擦においては、酸素はαAl_2O_3の摩耗量を増大させる。

(4) 大気中でαAl_2O_3と鉄鋼材料とを摩擦する際のαAl_2O_3の摩耗機構を明らかにした。

(5) 大気中でA砥粒と、軟鋼、不銹鋼および鋳鉄との摩擦試験を行ない、A砥粒の摩耗率が摩擦界面の温度と密接な関係にあることを明らかにした。

参考文献

1) 曽田(訳)：摩擦と潤滑，丸善，東京(1956)2.
2) W.R.Brown, N.S.Eiss, H.T.Mcadams：J.Am.Ceram.Soc. 47, 4 (1964) 157.
3) D.R.Miller：Proc.Roy.Soc., 269, (1962) 368.
4) 松尾, M.C.Shaw：精密機械, 36, 4 (1970) 278.
5) 河村、山田：昭和46年度精機学会秋期学術講演会前刷

(昭46)203.
6) 宋宮(訳): 酸化物の相平衡, 技報堂, 東京(1971)28.
7) 杉田: 高精度, 4, 1 (1973) 13.
8) J.C.Jaeger: Proc. Roy. Soc. N.S.W., 76 (1942) 203.
9) N.R. Des Ruisseaux: Thermal Aspects of Grinding Processes, University Microfilms, Inc., Ann Arbor, Michigan (1968) 33.
10) L.Coes: Abrasive, Springer-Verlag, New York (1971) 154.

第6章　αAl_2O_3 系砥粒切れ刃の摩耗機構

6.1　緒言

研削砥石は砥粒を結合剤で固めて種々の形状に成形した一種の工具であり，図6.1に示すように砥粒，結合剤およびその間の空隙の3者より構成されている。研削にあたってはこれら砥粒と結合剤は切れ刃となり[1]，工作物と干渉し合うことにより切屑を排出する。2章および3章でのべたように，研削作用は砥粒切れ刃による材料の除去作用と，砥粒切れ刃と材料との摩擦作用にほかならない。研削中，砥粒切れ刃の先端は高温高圧下にさらされるため，αAl_2O_3 系砥粒切れ刃のように高硬度かつ高融点の物質も摩耗して，3章でのべたような種々の影響を工作物に与える。

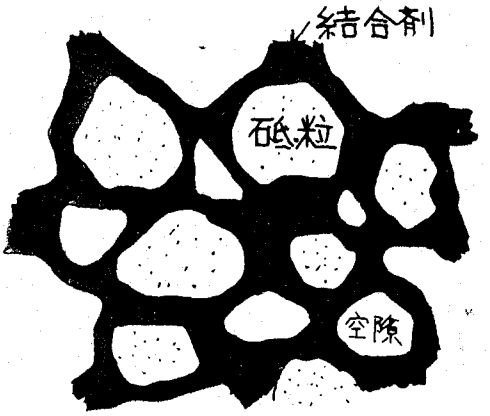


図6.1 砥石の模型

本章では，4および5章でのべた αAl_2O_3 の摩耗機構をもとにし，研削中の αAl_2O_3 系砥粒切れ刃の摩耗機構をしらべる。

まず αAl_2O_3 単結晶を用いて純鉄を単粒研削し，4および5章でのべた界面反応および摩耗機構が研削過程にも適用できるかどうかを検討する。ついで αAl_2O_3 系砥石（WAおよびA砥石）を用いて鉄鋼材料を研削する場合の砥粒切れ刃の摩耗機構を調べ、その結果に基づき研削砥石の摩耗量を統一的にあらわす方法を検討する。

6.2 実験方法

(1) 単粒研削試験

αAl_2O_3 単結晶（幅3mm、長さ3mm 高さ2mm）1個をエポキシ系接着剤でアルミニウム円板（直径200mm）の外周に接着し，これを単粒研削用砥石として砥石周速度2000m/min，切込み $t_3 = 2\mu m$，工作物速度10m/minの研削条件で，真空焼鈍した純鉄（純度99.99%）を平面研削した。

研削に先立ち単石ダイヤモンドドレッサーを使用して、単粒砥石を精密ドレッシングし，切れ刃を生成させる。

研削試験後の砥粒および工作物は真空デシケータ中に保存し，48時間以内に砥粒作業面および工作物仕上面を電子線回折，EPMA およびIMAを使用して分析する。

(2) 研削試験

研削試験には横軸型平面研削盤および小野式押付け（定荷重）研削試験装置の2種類の研削盤を使用し，WA46KmV または A46KmV 砥石で純鉄，軟鋼（S45C），焼入工具鋼（SK-3），不銹鋼（SUS27），鋳鉄（3.4%C）を乾式で研削した。

平面研削試験においては特別な場合を除きプランジカット方式の研削方式を採用し，砥石幅より小さい幅の工作物（幅4mm）を，砥石周速度 V＝1890m/min，工作物速度 v＝10m/min，切込み $t_3 = 5\mu m$ で研削した。

押付け研削試験装置の概要を図6.2に示す。押付け力は重錘によって滑車を介して与えられる。幅4mm長さ15mmの工作物を砥石周速度 V＝1890m/min，押付け

荷重0.8 Kg～2.5 Kgの条件で研削する。研削中発生する研削熱によって生ずる工作物の軟化を防止するために、工作物の研削端から当初の位置で3mm離れた箇所に，銅板製の放熱板とガーゼ製の冷却ジャケットをとりつけ，この部分に0.2ℓ/min の水道水をかけて冷却する。

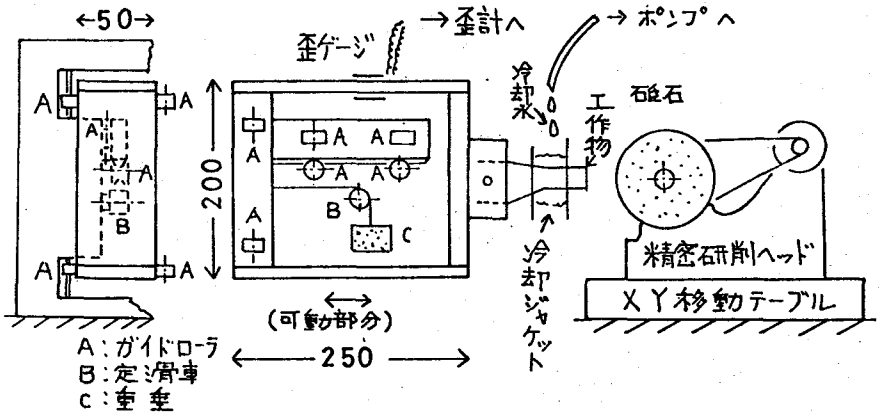


図6.2　押付け研削装置の概要

両試験とも研削に先立ち単石ダイヤモンドドレッサーを使用し、切込み t_3 10μm X 2，5μm X 2，0μm X 2，ドレッシング速度1890 m/min，送り0.02mm/rev の条件で砥石をドレッシングした。

6.3　単粒研削における αAl_2O_3 の摩耗機構

図6.3に，単粒研削試験で得られた αAl_2O_3 砥粒切れ刃の摩擦面および仕上面の電子線回折（加速電圧100KV，電流65mA）結果を示す。αAl_2O_3 砥粒切れ刃の摩擦面についてみると（図6.3(a)），中速摩擦試験における回折結果（図5.4(b)）と異り，摩擦面には αAl_2O_3 の多結晶化をあらわす回折環や $FeAl_2O_4$ の存在を示す回折環などが現われている。純鉄研削面（図6.3(c)）上には、素地（図6.3(b)）と組成が異る物質が存在する。図6.3の

(a) αAl_2O_3 砥粒面　(b) 純鉄素地　(c) 純鉄研削面

図6.3　単粒研削後の αAl_2O_3 砥粒および純鉄研削面の電子線回折

回折像の解析結果を表6.1に示す。電子線の回折結果から、αAl_2O_3 砥粒切れ刃と工作物（純鉄）との接触界面で、$FeAl_2O_4$ を生成する化学反応が生起したことがわかる。

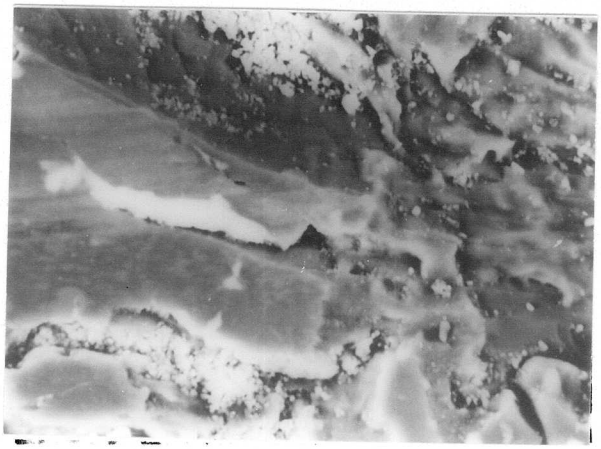
表6.1　単粒研削面の電子線回折結果

研削面				比較物質									
砥粒	I/I₀	純鉄	I/I₀	αFe	I/I₀	αAl_2O_3	I/I₀	$FeAl_2O_4$	I/I₀	FeO	I/I₀	Fe_2O_3	I/I₀
2.55Å	S	2.55Å	S			2.55Å	9					2.52Å	10
2.45	M	2.45	VS					2.45Å	10	2.48Å	8		
2.10	VS	2.13	S			2.08	10			2.15	10	2.08	2
2.04	S	2.05	S	2.03Å	10			2.03	7				
1.60	M	1.60	M			1.60	8					1.61	3
1.55	S	1.51	M					1.56	9	1.52	6		
1.40	W	1.43	M	1.43	2	1.40	3						
1.23	M	1.22	M					1.28	3	1.24	2		
1.05	W	1.07	W	1.01	1							1.09	2
0.92	VW	0.90	W	0.91	1			0.94	1	0.98	2		
0.81	VW	0.81	WW	0.83	6			0.79	2				

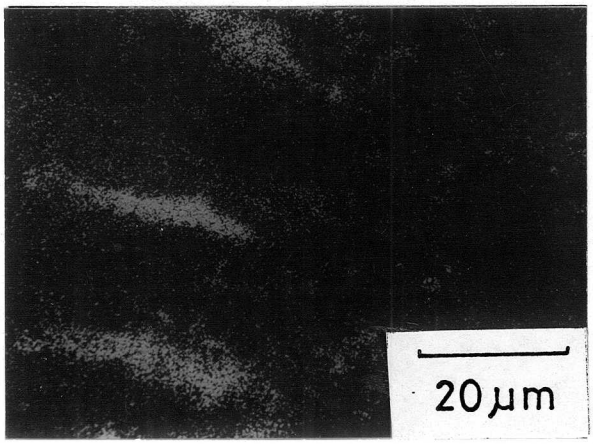
VS：最強，S：強，M：中，W：弱，VW：極弱

図6.4は単粒研削で得られた図6.3(a)の回折像を与える αAl_2O_3 砥粒摩擦面のEPMA分析結果を示す。研削により砥粒切れ刃摩擦面は溶融状を呈し、組成がわずかに異る第2摩耗領域が摩擦面上に存在することがわかる。またドレッシングによって生じたと思われる摩擦面の凹部にも αAl_2O_3 と組成の異る物質が存在している。図6.4(b)の $FeK\alpha$ 像によれば、これらの組成の異る物質はFe基に富む物質であるといえる。

図6.5に単粒研削された純鉄研削面のEPMA分析結

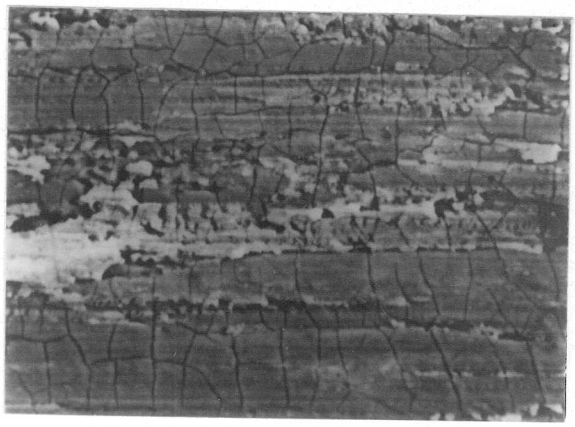


(a) 組成像

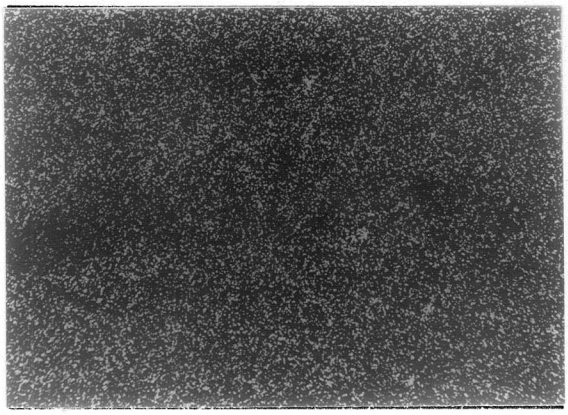


(b) Fe Kα 像

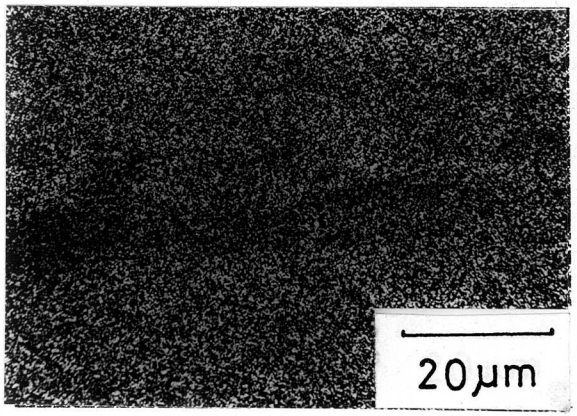
図6.4 αAl_2O_3 砥粒摩擦面のEPMA分析 (V=1890 m/min)



(a) 組成像



(b) Al Kα 像



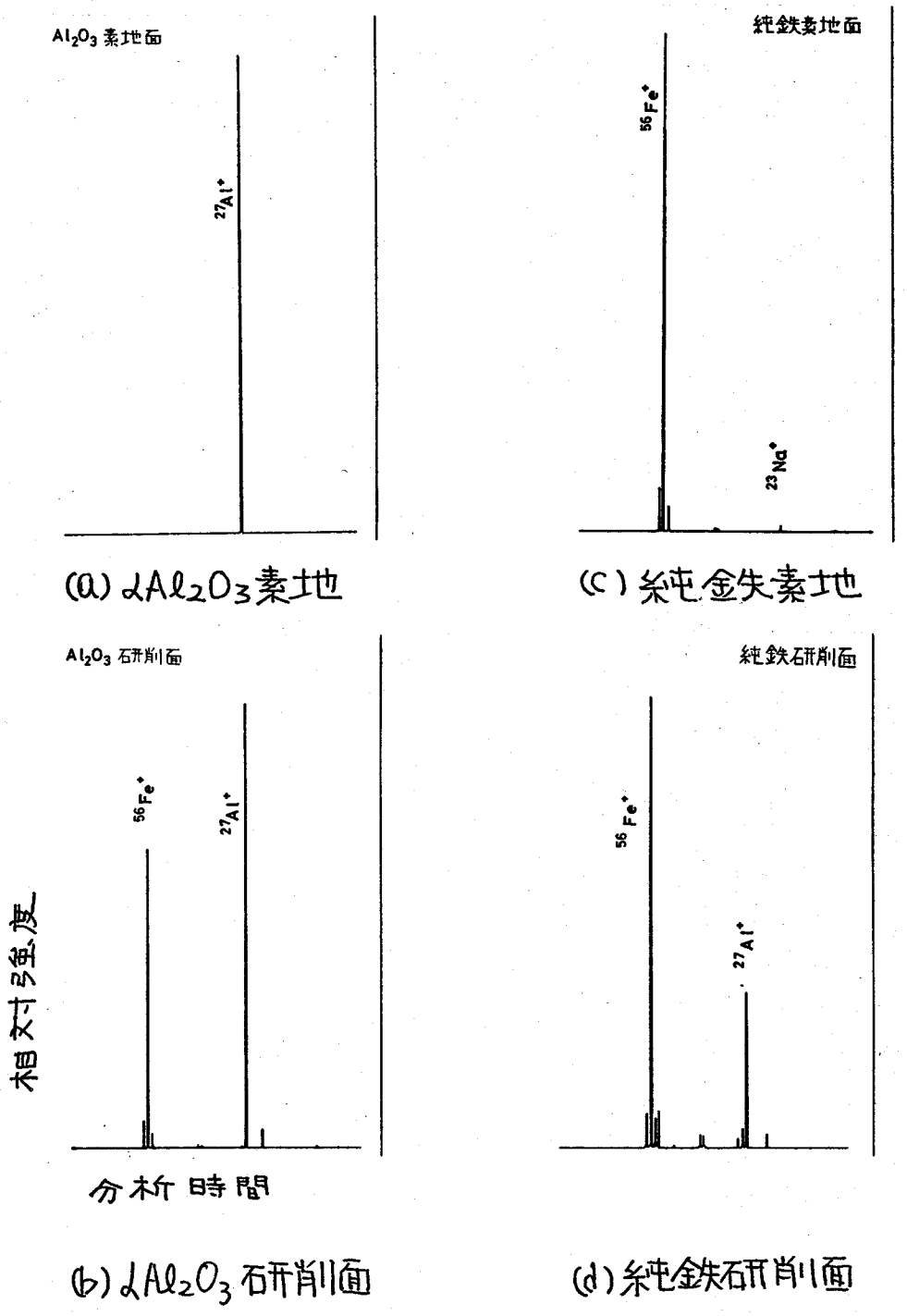
(c) O Kα 像

図6.5 研削仕上面のEPMA分析 (V=1890 m/min)

果を示す。仕上面には明瞭に組成が違った部分が存在し、その部分にはAl Kα および O Kα の特性X線を出す物質が存在することがわかる。また図6.5(a)において、より黒く写っている部分は研削焼けを発生してい

る部分であることから，研削けが単に酸化物の干渉色だけではないことを意味している。

図6.6に単粒研削後のαAl_2O_3および工作物（純鉄）研削面のIMA分析結果を示す。αAl_2O_3表面には、研



(a) αAl_2O_3素地　　(c) 純金失素地

(b) αAl_2O_3研削面　　(d) 純鉄研削面

図6.6　単粒研削面のIMA分析

削前（図6.6(a)）には存在しない$^{56}Fe^{+}$が多量に検出される。一方工作物たる純鉄表面（図6.6(d)）上には、素地には検出されていない$^{27}Al^{+}$が検出されている。したがって研削作用に伴なって生ずる摩擦によってFeとAlのイオンが入り混った状態に等しい表面が得られていることがわかる。

本節の結果から，αAl_2O_3単粒で純鉄を研削する場合にも、砥粒切れ刃と工作物の接触界面では，(4.1)式であらわされる反応が生起し，αAl_2O_3は$FeAl_2O_4$に変化して摩耗することがわかった。したがって単粒研削においても5.7節でのべたαAl_2O_3の摩耗機構が成り立つことがわかる。

6.4 研削砥石の砥粒切れ刃の摩耗機構

表6.2に4種類の鉄鋼材料をA46KmV砥石で研削する場合の，砥石半径減耗量の比較を示す。表6.2の傾向は小野[2)]の結果と定性的に一致している。砥石半径の減耗が工作物材料に依存するという事実は，砥粒切れ刃の摩耗が化学的な機構によって生ずることを意味している。

表6.2 砥石半径減耗量の比較

純鉄 (アームコ)	工具鋼 (SK-3)	不銹鋼 (SUS27)	鋳鉄 (FC15)
小	中	大	最大

研削条件 A46KmV, V=1890 m/min, v=10 m/min, t_3=5 μm

一般に,研削に付随して生起すると予想される化学反応は、図6.7に示すごとく，1次的な反応のみでも6通りの反応が考えられる。

図6.8にWA砥石を用い純鉄（アームコ鉄）を乾式研削する際の研削切屑のX線分析結果を示す。切屑中に界面反応生成物たる$FeAl_2O_4$が存在することがわかる。

表6.3は、図6.8と同様な方法で得られた純鉄，炭素工具鋼，不銹鋼の研削切屑を分析した結果を示している。砥粒切れ刃の素材（Al_2O_3）および工作物の素材（α Fe）に混入して、酸化物や反応生成物（$FeAl_2O_4$）などが存在する。

研削切屑中に反応生成物が存在することは，研削界面においても4章でのべた化学反応が生起しているものと考えられる。

図6.9に、研削後の砥石作業面をX線分析した1例を示す。

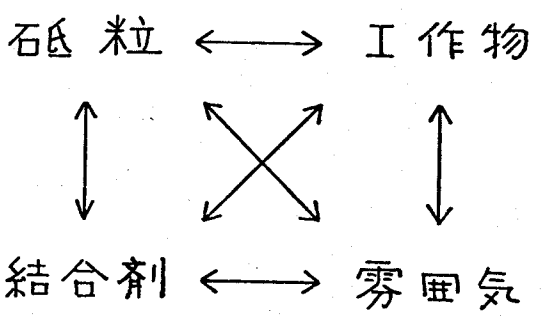


図6.7　研削の化学反応

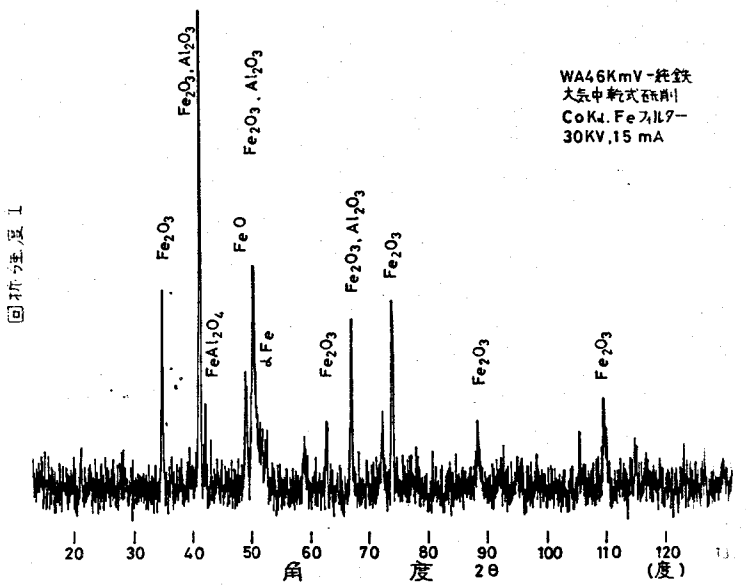


図6.8　研削切屑のX線分析

表6.3　切屑のX線分析結果

	純鉄	炭素工具鋼	不銹鋼
分析結果	$FeAl_2O_4$	$FeAl_2O_4$	$FeAl_2O_4$
	Fe_2O_3	Fe_2O_3	Fe_2O_3
	FeO	FeO	FeO
	$FeAl_2SiO_6$	$FeAl_2SiO_6$	
	α Fe	α Fe	α Fe
	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3

砥石作業面には，図6、8に対応して$FeAl_2O_4$が存在することがわかる。砥石作業面に反応生成物が存在する事実は，軟鋼，炭素工具鋼および鋳鉄をαAl_2O_3系の砥石で研削する場合にもあてはまることがわかっている[3)4)]。

図6.10は純鉄（純度99.99%）をWA46KmV砥石で研削した仕上面をIMAで分析した結果得られた質量スペクトルを示している。研削仕上された表面には，砥粒から移着したと考えられるイオン（$^{27}Al^+$）と，結合剤から移着したと考えられる$^{28}Si^+$などのイオン

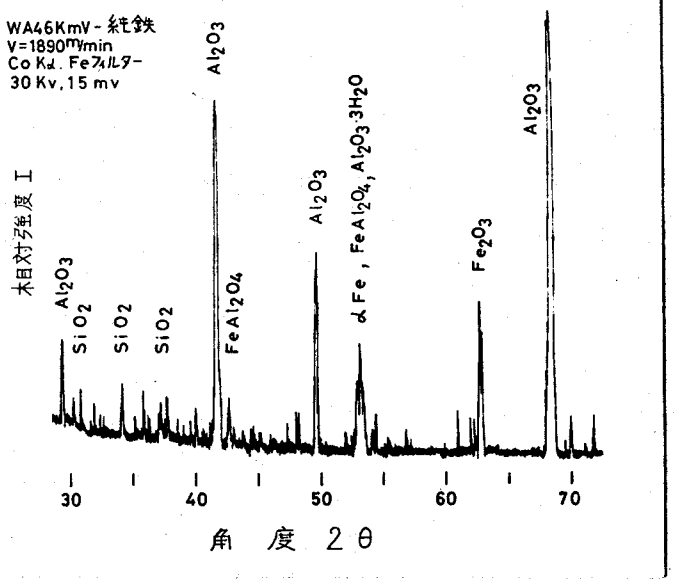
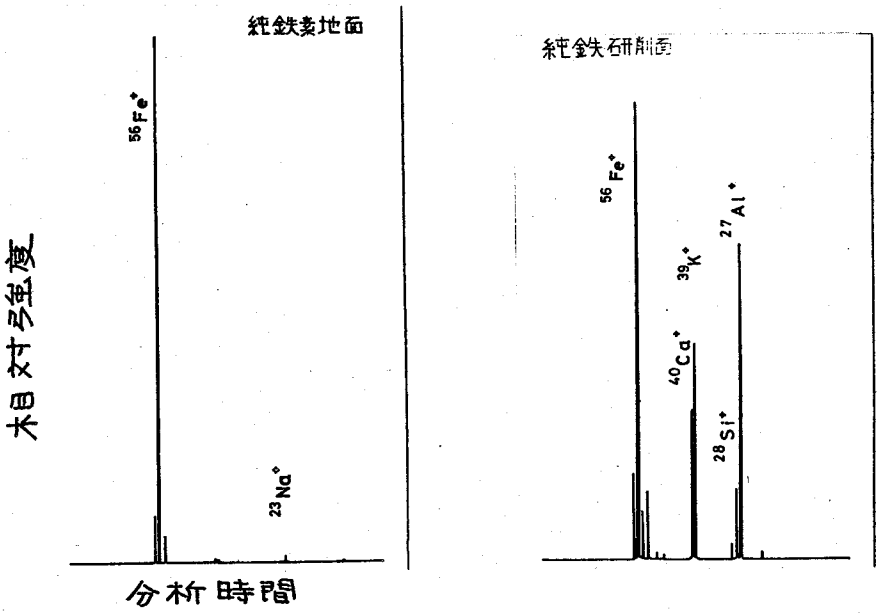


図6.9　砥石作業面のX線分析例



(a)素　地　　(b)研削面

図6.10　純鉄研削面のIMA分析
(WA46KmV．V=1890m/min)

が存在することが検出された。また単粒研削の場合と同様に，IMAの分析痕の部分は研削焼けによる干渉色が消えていることから（図6.11），研削焼けの干渉色は単に酸化膜による色だけではないことがわかる。

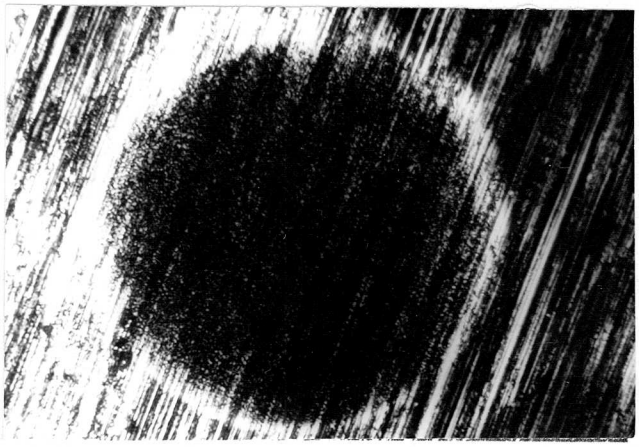


図6.11　純鉄研削面のIMA分析痕

図6.12に純鉄研削面をEPMA分析し，仕上面上に移着したAlイオンを放出する物質の平面的な分布を観察した結果を示す。図中央を境にして研削面と素地とが観察できるよう試料を作成し，両部分におけるAl Kα線の強度を比較することができる。Al Kα線の分析によると，研削仕上面上で得られるKα線の強度の方が素地で得られるそれよりもわずかに高いことが判る。この傾向は任意の分析位置についても得られたため，Al Kα線を放出する物質は仕上面上にほぼ均一に分布していることがわかる。

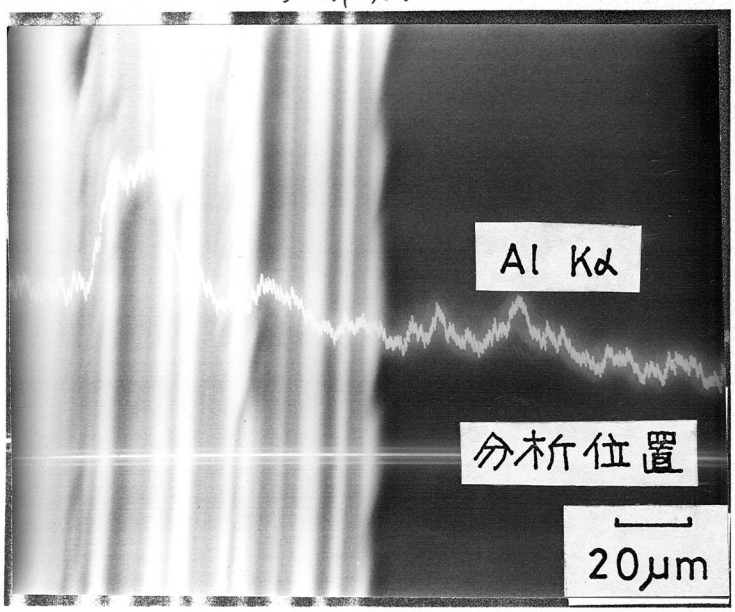


図6.12　純鉄研削面のEPMA分析（加速電圧10KV）

図6.13に研削仕上面（純鉄）の電子線回折結果の1例

図6.13 純鉄研削面の電子線回折像の1例

表6.4 電子回折結果

研削面		Fe		$FeAl_2O_4$		Fe_2O_3	
格子定数	強度	格子定数	強度	格子定数	強度	格子定数	強度
2.57Å	S					2.52Å	10
2.40	M			2.45Å	10	2.70	2
2.04	S	2.03Å	10	2.03	7	2.08	2
1.60	S			1.56	9	1.61	3
1.43	M	1.43	2	1.43	9	1.48	5
1.23	M	1.17	3	1.28	3	1.27	1
1.00	M	1.01	1			1.09	2
0.91	W	0.91	1	0.94	1		
0.80	VW	0.83	6	0.79	2		

S:強, M:中, W:弱, VW:極弱

を示す。研削仕上面には$FeAl_2O_4$が存在していることがわかる。したがって,図6.10(b)の$^{27}Al^+$も図6.12のAlKα線もともに$FeAl_2O_4$によるものであることを推定できる。

これまでに述べてきた分析結果から、αAl_2O_3系砥で鉄鋼材料を研削する場合には、研削界面で$FeAl_2O_4$を生成する化学反応が起っていることがわかる。この種の反応は、図6.7に示した反応のうち,砥粒ー工作物ー雰囲気ー結合剤の組合わせによる総合反応と考えられる。砥粒切れ刃と工作物との接触界面でこの種反応が生起すると、砥粒切れ刃と工作物は反応し合い、反応生成物を切屑として排出または仕上面に移着させながら摩耗することがわかる。したがって摩耗機構は図5.12のモデルによってそのまま説明できる。ただし研削における砥粒切れ刃の場合には、図5.12(a)のモデルは3元系の状態図となる。αAl_2O_3系砥粒のビトリファイド砥石で鉄鋼材料を研削する場合には、図6.14に示す$FeO-Al_2O_3-SiO_2$[4]系の状態図を用いて説明できる。この三者が研削熱により高温下におかれ反応し、$FeAl_2O_4$, SiO_2を含有する液相の温

度は約1200°C付近にまで降下する。そして,反応生成物$FeAl_2O_4$は研削切屑中に混入されるか,または研削仕上面上に付着するなどして失われてゆく。

このように研削砥石における砥粒切れ刃の摩耗は三元系の化学反応によって生ずることがわかる。

したがって、研削中に生ずる砥石損耗量を見積るため単粒摩擦試験で得られた砥粒の摩耗率をそのまま適用することは、二相の反応結果を三相の反応に適用することとなり、本質的に誤りであることがわかる。

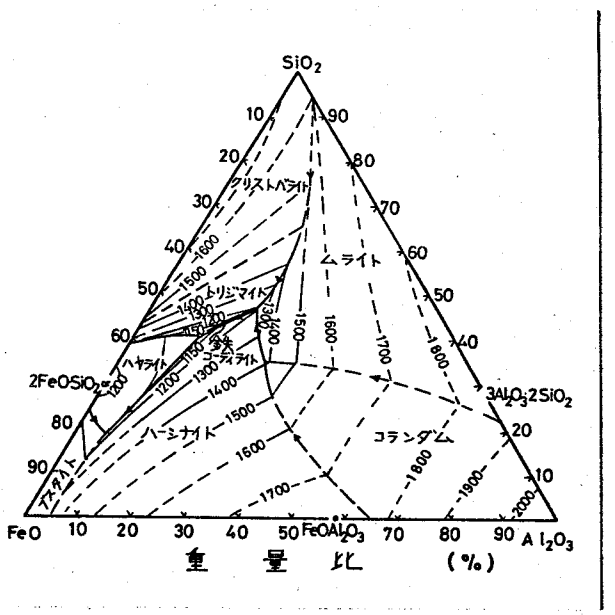


図6.14. $FeO-Al_2O_3-SiO_2$系状態図(液相)[5]

6.5 研削砥石の減耗量

砥粒切れ刃は,研削界面で生起する化学反応によって摩耗する。したがって,化学的な摩耗機構の立場から砥粒切れ刃の摩耗量すなわち砥石の減耗量を論ずることができると考えられる。

本節では,平面研削過程(定切込み研削)と定圧研削過程において生ずる砥石の減耗量を比較検討する。

図6.15に定圧および定切込み研削方式で軟鋼(S45C)を研削する際の砥石半径減耗曲線の1例を示す。各々の研削方式における研削抵抗の大きさが異るため,半径減耗量の絶対値を比較することはできないが,砥粒研削長

さ l_g が5m以上の研削区間における両曲線の変化の様相は，各研削方式の特徴を示しているものと考えられる。

図6.16に砥粒研削長さ l_g の関数としてあらわした接線研削抵抗 F_t，法線研削抵抗 F_n の変化を示す。定切込み研削における研削抵抗は，研削初期と研削末期において上昇するが，定圧研削の F_t は研削初期に上昇

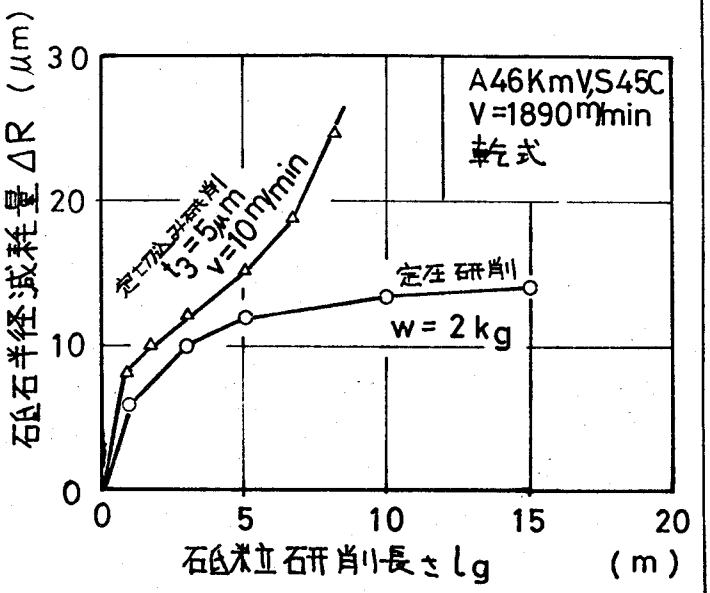


図6.15 砥石半径減耗曲線の1例

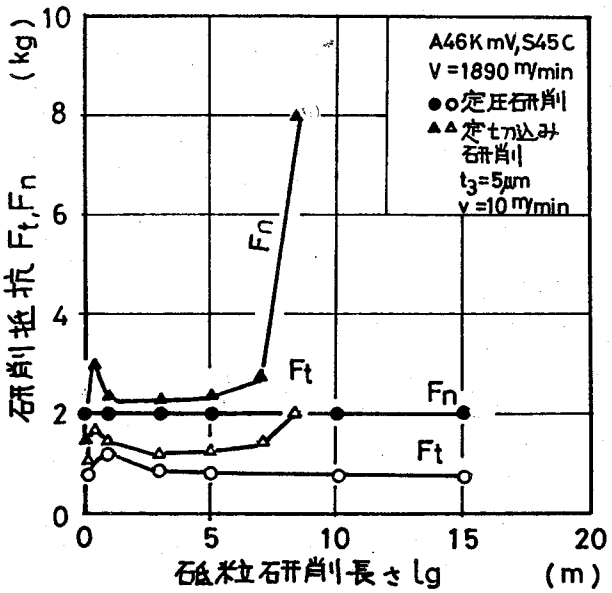


図6.16 研削抵抗の変化

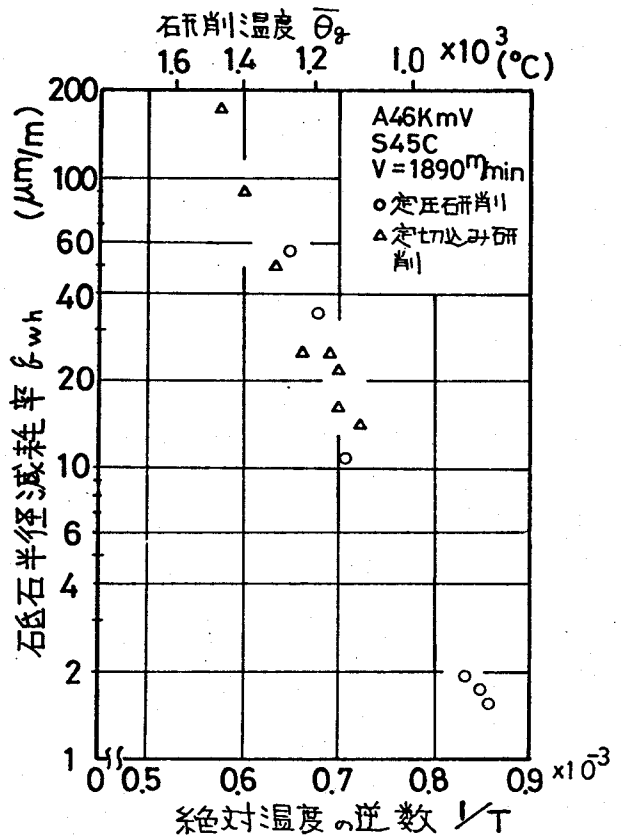


図6.17 半径減耗率の変化

したのち砥粒研削長さの増大に伴なって減少する。

図6.17に、実測した砥石半径減耗量から算出した砥石半径減耗率（同一砥粒切れ刃について求めた単位研削長さあたりの砥石半径減耗量）と、2章3節と類似または同様な方法で測定した研削温度との関係を示す。$\bar{\theta}_g$であらわされている研削温度は砥粒研削点温度の平均値を意味している。図6.17の関係は、連続研削過程における砥石について得られた関係であるため、定切込み研削と定圧研削とでは時間的な関係が逆になっている。すなわち、定圧研削では時間経過につれて図の左上より右下に変化し、定切込み研削では右中央より左上方に変化する。γ_{wh}と$1/T$の関係は両研削方式における関係がほぼ直線的になっている。すなわち、図6.15に示した方法ではあたかも異る機構によって砥石が減耗すると考えられるが、図6.17の関係から両研削方式における砥石半径の減耗は、1つの機構によって生じていることがわかる。このように、砥粒研削点温度を用いれば、砥石半径減耗率すなわち砥粒切れ刃の摩耗率を統一的に示すことができる。

以上述べてきたように、鉄鋼材料を精密研削する場合のαAl_2O_3系砥石の摩耗は、化学反応に基づくものであることがわかった。したがって、将来において砥粒切れ刃の摩耗を有効に抑制するためには、砥粒－結合剤－雰囲気－工作物の間の化学反応を抑制することも必要であることを忘れてはならない。化学反応は、雰囲気、物質の量、触媒によって制御されると言う事実は、この問題に対する有効なヒントを与えることになろう。

6.6 結言

本章では，モデル実験で得られたαAl_2O_3の摩耗機構が，αAl_2O_3系砥石の砥粒切れ刃の摩耗にも適用できるか否かを実験的に検討した。得られた主要な結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) αAl_2O_3系砥粒を用いて純鉄を単粒研削する場合には，αAl_2O_3切れ刃は$FeAl_2O_4$を生成して摩耗する。

(2) αAl_2O_3系砥石の砥粒切れ刃は，鉄鋼材料研削中，工作物，結合剤および研削雰囲気と化学的に反応して摩耗する。SiO_2系の結合剤は砥粒切れ刃の摩耗を促進させる傾向にある。

(3) 研削砥石の摩耗速度を予測するには，研削試験によって求められたデーターを利用しなければならない。

(4) 砥石半径減耗率は，砥粒研削点温度の影響をうける。

参考文献

1) 田中,津和,河村：精密機械，31,3(1965)227.
2) 小野：研削仕上，槙書店,東京(1962)175.
3) 今中：関西砥粒加工研究会資料(1973-12).
4) 今中：精密加工,4,6(1974)20.
5) 宗宮(訳)：酸化物の相平衡，技報堂，東京(1971)115.

第7章　総括

本論文は、αAl_2O_3 系砥石で鉄鋼材料を精密研削する際の、砥粒切れ刃の摩耗機構を解析したものである。

本研究の結果明らかにされた点は、それぞれの章の結言において述べられている。ここでは各章の結言を通観し、主要な事項についてのべる。

第2章では研削が行なわれる“場”を微視的な見地より検討し，砥粒切れ刃にかかる力、砥粒切れ刃の摩擦面温度、砥粒切れ刃と工作物との摩擦長さを明らかにした。

研削中の砥粒切れ刃には数キログラムの力がかかり，摩擦面の温度は鋼の融点にまで達すること，砥粒切れ刃と工作との摩擦長さは従来の式によって求まるものより1.2倍以上長いことが明らかになった。

第3章では研削中の砥粒切れ刃の摩耗様相と、砥粒切れ刃の摩耗が研削現象、加工精度および仕上面直下の材料の性質に与える影響を検討した。まず砥粒切れ刃の摩耗面を微視的に観察し、摩耗面の性状変化をも含めた砥粒切れ刃の摩耗過程のモデルを示した。ついで砥石の摩耗した尺度をあらわすパラメーターとして、第2摩耗領域生成度数率 η が有効であることを明らかにし，η と研削現象、仕上精度および仕上面直下の材料の性質との関係を求め、砥粒切れ刃の摩耗機構を解明することの必要性を示唆した。

第4章では研削中の砥粒切れ刃と工作物との接触界面の状態を調べるため，2章で明らかにした砥粒研削点温度と同程度の高温条件の下で，αAl_2O_3 単結晶と純鉄との溶着試験を行なった。αAl_2O_3 と純鉄の接触界面では酸素の存在のもとに拡散律則の化学反応が生起し，多結晶の $FeAl_2O_4$（ハーシナイト）が生成されることを明らか

にした。またこの反応は砥粒インゴットと純鉄の溶着界面においても生起することがわかった。

5章ではαAl_2O_3と鉄鋼材料との乾式摩擦試験を行ない、4章で解明した界面反応と同じ反応が摩擦界面でも生起し、反応生成物$FeAl_2O_4$が生成されることを明らかにした。この反応は極めて軽い摩擦条件下における摩擦においても生起し、αAl_2O_3と摩擦した相手材表面へAl原子を移着させる。これらの解析結果をもとにし、αAl_2O_3と鉄鋼材料とを摩擦する場合のαAl_2O_3の摩耗機構を提唱した。

6章では研削中の砥粒切れ刃の摩耗機構を検討した。単粒研削および砥石による研削では、αAl_2O_3系砥粒切れ刃は5章で明らかにした機構によって摩耗することがわかった。αAl_2O_3系砥石における砥粒切れ刃は、砥粒－工作物－結合剤－雰囲気の間に生起する化学反応によって摩耗する。αAl_2O_3系砥石で鉄鋼材料を研削する場合には砥粒切れ刃は鉄の酸化物と化合し、$FeAl_2O_4$（ハーシナイト）を生成する。この反応生成物は研削切屑中に混入すること、砥石作業面に付着することおよび工作物仕上面に付着するため、砥粒切れ刃が摩耗することを明らかにした。

謝　辞

本論文の終りにのぞみ，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大阪大学教授津和秀夫先生に衷心より感謝申し上げます。

また，日頃から御指導賜わっている大阪大学教授川辺秀昭先生，山田朝治先生，築添正先生，井川直哉先生，牧之内三郎先生，中川憲治先生，荻野和巳先生，田村英雄先生，長谷川嘉雄先生，西田俊夫先生，防御大学校教授河村末久先生，元大阪大学非常勤講師井上賭先生はじめ精密工学教室の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

本研究に関し終始御協力いただきました大阪大学工学部精密工学教室津和研究室，同冶金工学教室荻野研究室，防衛大学校機械工学教室河村研究室の皆様方に厚く御礼申し上げます。

なを，本研究の物質分析に色々と御協力賜わりました，大阪大学工学部分析センター江口正治氏，日本電子株式会社金子光雄氏，数値計算を御指導賜わりました，元大阪大学工学部応用物理学教室研究生田原明彦氏に厚く御礼申し上げます。

また，研究の道に入る機会をお与え下さり，御鞭撻賜わりました故防衛大学校教授王井康人先生に感謝申し上げます。