

氏 名	ほつ きり がわ かず お 堀 切 川 一 男
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 59 年 3 月 27 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	金属のアブレシブ摩耗機構に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 萱場 孝雄
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 萱場 孝雄 東北大学教授 川崎 正 東北大学教授 北條 英典 東北大学教授 松井 正己 東北大学助教授 加藤 康司

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

機械の摩擦面における摩耗は、機械の性能劣化の原因となり、延いては機械要素の交換あるいは機械全体の廃棄にもつながるため、経済的立場からも、また省資源・省エネルギーの立場からもその対策が急がれている。中でもアブレシブ摩耗は、工業界に於ける摩耗被害の50%にも及ぶと言われている。しかし、アブレシブ摩耗に関してはこれまでも多くの研究がなされてきたにも拘らず耐摩耗材料の開発や機械の設計あるいは最適な機械の使用条件に指針を与え得る知識は未だ乏しい状態である。その大きな原因は、単一接触点に於ける微視的なアブレシブ摩耗機構の解明が不十分であり、さらにそれが現実の多点接触下で起こる巨視的なアブレシブ摩耗特性に結びつけられていないことにある。

そこで本研究に於ては、工業上最も広く用いられる金属材料について、単一硬突起が自身の塑性変形を起こさずに相手平面を摩擦できる条件及び単一硬突起の摩擦に伴う相手材表面からの摩耗粒子の生成機構を微視的な立場から明らかにし、これらの結果と、現実の多点接触下の巨視的なアブレシブ摩耗特性との定性的並びに定量的な結合を図ることを目的とする。

第2章 アプレシブ摩擦における単一突起の塑性降伏条件

本章では、先ず、単一くさび形硬突起と軟平面との摩擦において硬突起が塑性降伏する条件を、3組の同時降伏平面ひずみすべり線場モデルを仮定することにより理論的に示した。すなわち、摩擦界面せん断応力を零と仮定すれば、硬突起の塑性降伏条件は次の様に簡単に表わされる。

$$\theta \leq (\theta_c)_{f=0} \quad (1)$$

但し

$$\begin{cases} (\theta_c)_{f=0} = \frac{2r + \pi - 2}{2 - r} & , \quad r \geq \frac{4}{4 + \pi} \text{ のとき} \\ r = \frac{2 - 2 \cos \{ (\theta_c)_{f=0} \}}{2 + (\theta_c)_{f=0}} & , \quad r < \frac{4}{4 + \pi} \text{ のとき} \end{cases}$$

θ : 突起頂角 $(\theta_c)_{f=0}$: 臨界突起頂角

r : 平面の硬さ/突起の硬さ

さらに、走査型電子顕微鏡（以下SEMと呼ぶ）試料室内にてモデル突起を用いた摩擦試験を行った。図1は、突起頂角 θ と硬さ比 r の関数として摩擦対の分布をあらわしたものである。この図より判る様に、(1)式で与えられる臨界頂角以下の頂角を有する突起はすべて塑性変形を起こしている。従って(1)式は、アプレシブ摩擦下における硬突起の塑性降伏を判断する妥当なクライテリオンとみなすことができる。

第3章 アプレシブ摩擦におけるウエッジ形成の微視的機構

本章では、第2章で得られた知見にもとづき、突起頂角が臨界頂角以上の場合とそれ以下の場合についてSEM内で摩擦試験を行ない、接触点を連続観察することによりウエッジ形成過程の解析を行なった。そして摩擦開始とともに突起の塑性降伏が起こる場合と起こらない場合のそれぞれに対し、ウエッジ形成過程として、ウエッジの成長・破断・ウエッジと母材との摩擦の3段階から成る過程と、周期的なき裂を残しながら破断せずにウエッジの成長が続く過

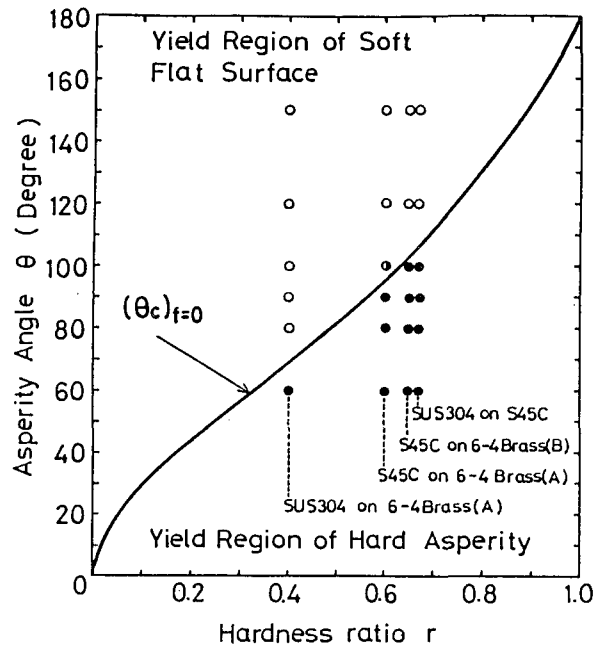


図1 突起頂角 θ と硬さ比 r の関係

- : 突起のみが塑性変形を起こした場合
- : 平面のみが塑性変形を起こした場合
- ◐ : 突起と平面の両方が塑性変形を起こした場合

程の2種類が観察され、合計4種類のウェッジ形成過程の存在を確認した。さらに、摩擦力の変化と対応させたそれらの過程のモデルを提案した。図2は、一例として臨界頂角以上の頂角を有する突起により周期的なき裂を残しながらウェッジが成長する過程を示したものである。

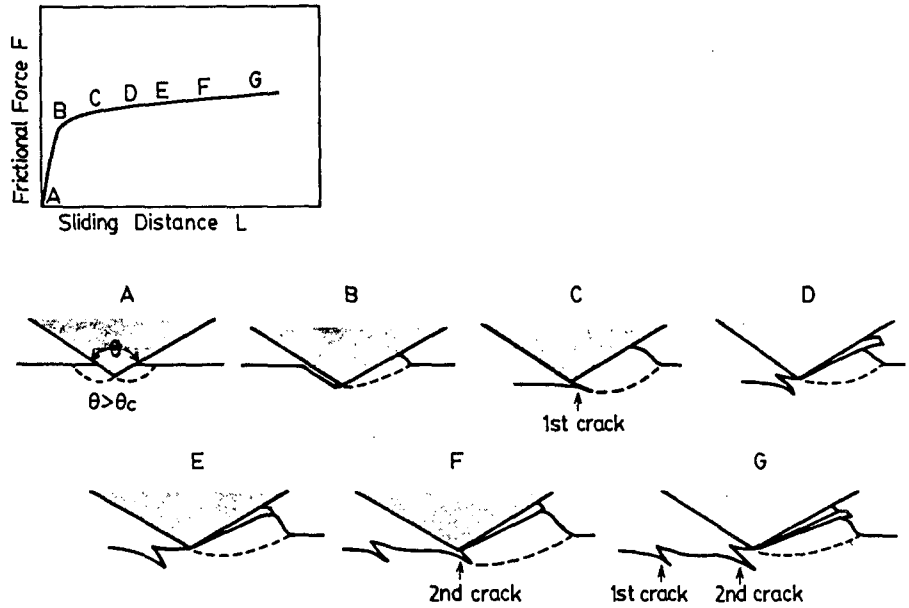


図2 ウェッジ形成過程の一例

これらの結果は、摩擦対のうちの硬い材料が摩耗に至る機構、摩耗粒子による目づまりの機構、引抜き・押し出しなどの塑性加工におけるかじりの発生機構などの解析にも有効な情報を与えるものである。

第4章 アブレシブ摩耗に対する硬さ比の影響について

—— 単一突起の引っかけ条件にもとづく理論解析及び実際の砥粒への適用 ——

アブレシブ摩耗においては、砥粒硬さと相手材料との硬さ比が、摩耗率に影響を及ぼすことが、実験的に確かめられている。しかし、その現象を明らかにする様な理論的研究は、皆無に近い。そこで本章に於ては、第2章、第3章で得られた知見をもとに単一突起の引っかけ条件が求められ、さらにこの条件と突起頂角の分布モデル（正規分布及び一様分布）を用いて、多点接触下のアブレシブ摩耗に及ぼす硬さ比の影響を理論的に示した。即ち、接触している全突起のうちの有効突起（臨界頂角以上の頂角を有する突起）の割合を、有効突起率 ϕ_{eff} 、とすると、 ϕ_{eff} は、次の様に表わされる。

頂角が正規分布に従って分布する場合：

$$\phi_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\frac{2\tau+\pi-2}{2-\tau}}^{\pi} e^{-(\theta-\theta_m)^2/2\sigma^2} d\theta \quad (2)$$

頂角が一様分布に従って分布する場合：

$$\phi_{\text{eff.}} = \begin{cases} 1 & , r \leq r_1 \quad \text{のとき} \\ A - \frac{B}{2-r} & , r_1 \leq r \leq r_2 \quad \text{のとき} \\ 0 & , r \geq r_2 \quad \text{のとき} \end{cases} \quad (3)$$

但し

$$r_1 = \frac{2\theta_m - 2\sqrt{3}\sigma - \pi + 2}{2 + \theta_m - \sqrt{3}\sigma}, \quad A = \frac{1}{2} + \frac{2 + \theta_m}{2\sqrt{3}\sigma}$$

$$r_2 = \frac{2\theta_m + 2\sqrt{3}\sigma - \pi + 2}{2 + \theta_m + \sqrt{3}\sigma}, \quad B = \frac{2 + \pi}{2\sqrt{3}\sigma}$$

θ_m : 平均頂角 σ : 頂角 θ の標準偏差 r : 硬さ比

次に、 Al_2O_3 砥粒について実際に砥粒頂角の分布を求め、その分布を、正規分布あるいは一様分布で近似できることを確認した。図3は、(2)式（正規分布の場合）を適用して得られた有効突起率 $\phi_{\text{eff.}}$ と硬さ比 r の関係を示したものである。この図から判る様に理論曲線は過去の研究者によって得られている実験データと良い一致を示しており、本理論の妥当性を示すものと言える。これらの結果は、これまで明らかにされていなかったモース硬さ試験の物理的な意味づけを可能にするものであり、また硬さ値の近い摩擦対におけるアブレシブ摩擦解析に有効な情報を与えるものである。

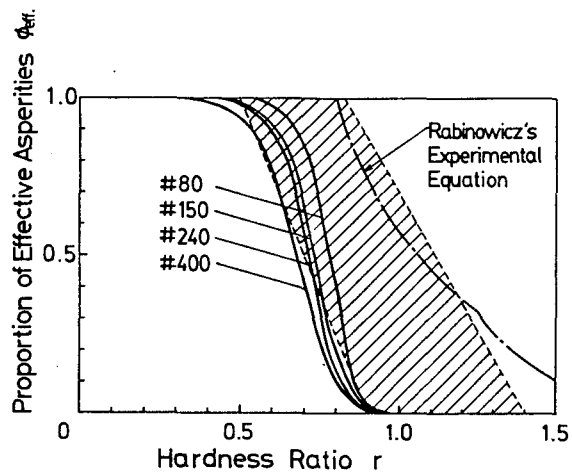


図3 有効突起率 $\phi_{\text{eff.}}$ と硬さ比 r の関係（正規分布の場合）

第5章 アブレシブ摩擦の微視的機構と巨視的特性

本章に於ては、無潤滑及び高真空グリスによる潤滑の両場合について、半球状の微小モデル突起を用いてSEM内摩擦実験を行ない、摩擦過程のその場観察により、アブレシブ摩擦形態として、掘起しタイプ、ウェッジ形成タイプ、フレーキングタイプ、切削タイプの4種の摩擦形態が存在することを示した。図4は、S45C平面の場合について、食いこみ度（突起の食いこみ深さ／接触半径）の増加に伴う摩擦発生率（摩擦痕体積のうちの摩擦粒子として排出される割合）の変化を、摩擦形態とともに示したものである。また図5は、図4の a_1 , $a_2 \sim d_1$, d_2 の各点に対応する接触点のSEM写真を示したものである。これらの図から、食いこみ度の増加とともに摩擦形態が、掘起しタイプ、ウェッジ形成タイプ、切削タイプへと遷移し、それに伴い摩擦発生率も増加すること、潤滑すると切削タイプの領域が大きくなることなどが判る。

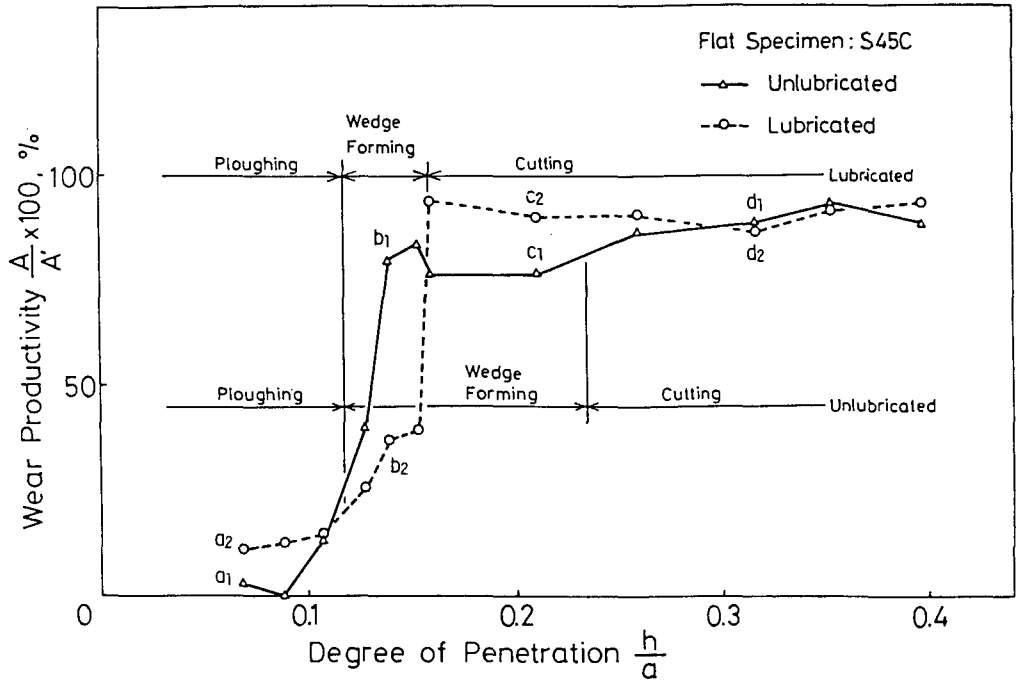


図4 食いこみ度 h/a と摩耗発生率 A/A' の関係

さらに、研磨紙を用いて、10種の金属材料に対して多点接触下の巨視的アブレイブ摩耗実験を行ない、無潤滑及びタービンオイルによる潤滑の両場合について、摩耗抵抗（比摩耗量の逆数）を求め、潤滑した場合の方が摩耗しやすいこと、材料硬さだけでは耐摩耗性を一義的に決定できないことなどを明らかにした。

一方、前者の微視的実験結果にもとづいて多点接触下の摩耗体積が次式で表わされることを示した。

$$V = \frac{\phi_{\text{eff}} (\alpha_w f_w m_w^2 + \alpha_c f_c m_c^2)}{k \Psi_m} \cdot \frac{WL}{H} \quad (4)$$

V : 摩耗体積 ϕ_{eff} : 有効突起率

α_w, f_w, m_w : ウエッジ形成に関する係数

α_c, f_c, m_c : 切削に関する係数

k, Ψ_m : 突起形状に依存する係数

W : 垂直荷重 L : すべり距離

H : 材料硬さ

そして、(4)式により理論的に求められた摩耗抵抗値は、後者の巨視的実験による摩耗抵抗の実測値の60～98%と定量的に比較的良い一致を示し、また潤滑した場合の方が摩耗抵抗が小さくなる

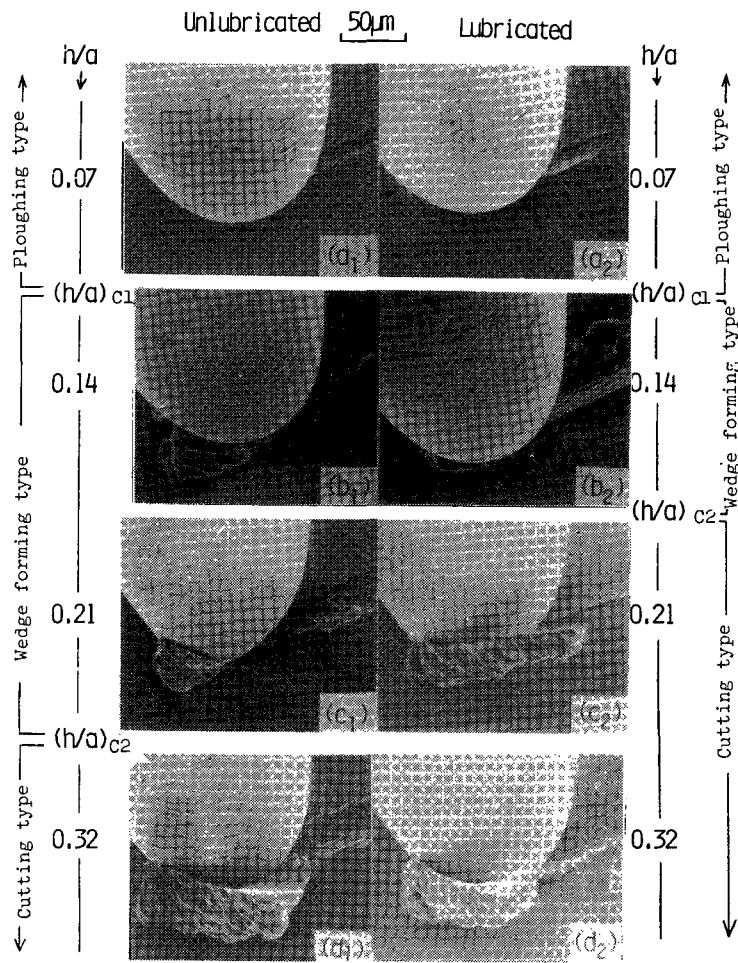


図5 食いこみ度の変化に伴うアブレイブ摩耗形態の変化
平面試験片：S45C

点で定性的にも一致した。従って、(4)式は、アブレイブ摩耗に対する有効な摩耗式と言える。

第6章 結 論

第2章から第5章において得られた結果とその有効性及び今後の展望を述べた。

審査結果の要旨

機械の摩擦面における摩耗，特にアブレシブ摩耗は機械の性能劣化の原因となり，延いては機械要素の交換あるいは機械金体の廃棄にもつながるため，省資源，省エネルギーの立場からも，その対策が急がれている。しかしこの摩耗の機構の解明は未だ不十分であり，耐摩材の開発，機械の設計あるいは最適使用条件に適切な指針を与え得る知識は乏しい現状である。本論文は，単一点および多数点接触下のアブレシブ摩耗に対し，塑性力学的解析とSEM内実験を行い，その機構を定性的ならびに定量的に明らかにしたもので，全編6章から成る。

第1章は序論であり，本研究の位置づけ，目的等について述べている。

第2章では，硬い単一突起と軟い平面との摩擦において，硬突起が塑性降伏する条件を，同時降伏すべり線場モデルを仮定することにより理論的に示している。その結果，硬突起の塑性降伏に対しては臨界頂角が存在することを明らかにしている。更にモデル突起により臨界頂角を実験的に求め，理論結果と非常に良く一致することを示している。

第3章では，前章の結果を踏まえ，臨界頂角以上および以下の突起頂角の場合に対する摩擦試験を行い，ウエッジ形成の過程に対し4種のモデルを提案している。これは塑性加工におけるかじりの発生に対しても有用な情報を与えるものである。

第4章では，突起頂角の分布モデル（正規分布，一様分布）を用いて，多数点接触下のアブレシブ摩耗に及ぼす硬さ比の影響を理論的に示し，更に Al_2O_3 砥粒に対する結果と既存の実験結果を比較することにより，その理論の妥当性を示している。これらの結果は，従来のモース硬さ試験の物理的な意味づけを可能にするものである。

第5章では，無潤滑および高真空グリス潤滑の場合について，半球状突起による摩擦実験を行い，アブレシブ摩耗形態としては，掘起しタイプ，ウエッジ形成タイプ，フレーキングタイプおよび切削タイプの4種の形態が存在することを明らかにしている。そして喰い込み度に伴ない，その形態が遷移すること，摩耗形態に応じて摩耗発生率が異なることなど数多くの新たな知見を得ている。これらの結果は，材料の耐摩耗性の評価，摩擦条件とアブレシブ摩耗との関係などの解明に有用である。

第6章は結論である。

以上要するに，本論文はアブレシブ摩耗に対し，微視的，巨視的立場より，理論的ならびに実験的な解析を行い，その機構を明らかにしたもので，トライボロジならびに機械工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。