



Title	連続微小押し込み法による硬さ測定の基礎的研究
Author(s)	堀井, 健
Citation	大阪大学, 1977, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1795
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

連続微小押込み法による 硬さ測定の基礎的研究



昭和51年8月

堀 井 健

連続微小押し込み法による
硬さ測定の基礎的研究

昭和51年8月

堀 井 健

目 次

第1章 序 論	1
第2章 加工硬化性材料の圧子押込みの解析ならびに連続微小押込み	
法における荷重－押込み深さ曲線の数式化	7
2・1 まえがき	7
2・2 加工硬化性材料のくさび押込みの解析	9
2・2・1 二次元圧子押込み変形の近似解	
2・2・2 平均接触圧力と予ひずみ率	
2・2・3 降伏応力比	
2・2・4 代表ひずみおよび平均硬化度とくさび角	
2・2・5 変形領域と予ひずみ率	
2・3 加工硬化性材料の角錐および円錐圧子押込みの解析	20
2・3・1 三次元圧子押込み変形の近似解	
2・3・2 降伏応力比	
2・3・3 変形領域と予ひずみ率	
2・4 均一な材質の単一表面膜を有する場合の圧子押込み変形	23
2・5 荷重－押込み深さ曲線の数式化	28
2・5・1 硬さと荷重－押込み深さ曲線との関係	
2・5・2 素材材料が表面膜を有する場合の荷重－押込み深さ	
曲線	
2・6 まとめ	33
第3章 圧子押込み試験による近似解ならびに変形挙動の検討	35
3・1 まえがき	35

3・2	くさび押し込み試験	35
3・2・1	実験方法	
3・2・2	変形挙動の特色	
3・2・3	平均接触圧力および降伏応力比	
3・2・4	変形領域と予ひずみ率	
3・3	角錐および円錐圧子押し込み試験	47
3・3・1	実験方法	
3・3・2	変形挙動の特色	
3・3・3	硬さ値および降伏応力比	
3・3・4	代表ひずみ	
3・3・5	変形領域	
3・3・6	素地材料がめっき膜を有する場合の変形挙動	
3・4	まとめ	64
第4章	連続微小押し込み法のシステム開発	67
4・1	まえがき	67
4・2	連続微小押し込み装置の試作	68
4・2・1	押し込み機構および検出機構の検討	
4・2・2	連続微小押し込み装置の構造と性能	
4・3	荷重-押し込み深さ曲線におよぼす押し込み速度、表面あらさ等の影響	74
4・4	自動データ処理システムおよびシステムサブルーチンの概要	76
4・4・1	自動データ処理システムの概要	
4・4・2	システムサブルーチンの概要	
4・5	データ変換に伴う精度	81

第 1 章 序 論

一般に、硬さ試験は材料試験の一つにあげられ、その特色は測定法が簡単でしかも測定対象を特に限定する必要がない点にあり、また、試料全体を破壊しないですむという近似的な意味での非破壊性を有する点にある。さらに、硬さすなわち圧子押込みの際生じる変形抗力は、材料の各種機械的性質と密接な関係のあることがよく知られている^{1),2),3)}。

そこで、この試験法は材料の機械的性質を知るという目的だけに限らず、その特色を生かして、材料が表面層や表面膜を有する場合に、それらの厚さあるいは具備する性状を計測するためにも用いられている。

表面層や表面膜の性状を計測するということに対しては、今日まで種々の測定法や観測法が研究、開発されてきたが^{4),5)}、そこには測定にあたって対象物が材質、形状の面から制約されたり、特殊な技巧ならびに時間や手数を必要とするという難点がある。ところが、硬さ試験はその特色からしてこれらの難点のいくつかを補うものであり、また得られる硬さ値自体は表面層や表面膜の性状を直接的に応力面から捉えた唯一の表面物性値として意義の深いものである。

硬さ試験そのものについては現在までに多くの方法が提案されているが⁶⁾、その中で上記の目的には、圧子押込みの際の押込み深さと変形抗力との関係を連続的に求める方法が有利であると考えられる。その理由の一つとして、この方法は上述の特色に加えて、一回の圧子押込み試験で試料表面から押込み深さに至るまでの抗力変化を迅速かつ連続的に得ることができると期待されるからである。

以下、主に表面層や表面膜の計測を対象とした連続的測定法の発展過程について述べ、問題点と本論文の目的を述べるとつぎの通りである。

松永⁷⁾のラップ加工層の測定、高沢⁸⁾および浅枝ら^{9),10)}の加工層の深さ測定などは、試料断面の硬さ分布状態から層内の力学的性質を推定し、加工条件との関連を見出そうとするもので、試料表面から素地材料そのものの硬さに至る点までの距離と層厚さとの対応を述べている。しかし、これらの場合は試料の破壊を避けることができない。また、表面層の厚さが数10 μm 以内のものになると測定が非常に困難となる。一方、青木ら^{11),12)}はめっきを施した試料のめっき面で荷重を順次変えてビッカース硬さ測定を行ない、めっき膜の硬さのみの測定から、硬さ測定値が急に低くなり、素地材料の影響が現われはじめる臨界点をもってめっき膜の厚さを推定している。Bückle¹³⁾はめっき膜を均一なものとして仮定した場合の圧子押込み挙動を考え、めっき膜の厚さを推定する関係式を提案している。これは青木らの方法を一步進めたものと考えられるが、これらの二つの方法はいずれも個々の試料について多数の測定回数を必要とするため手数がかかる。この点を改良したのが吉野¹⁴⁾であって、予めめっき膜と素地材料の組合せのみによって定まる特定な関係曲線を求めておけば、めっき面で一回の硬さ測定を行うことにより、めっき膜の厚さが決定できると報告している。さらに、松井¹⁵⁾は超仕上げ面上に生成された加工変質層の厚さを求めるため、改良微小硬度法を提案した。これは硬さが連続に変化するような表面層の押込み変形を理論的に取り上げた初めてのものである。また、吉越¹⁶⁾は浸炭硬化層を有する試料表面に圧子を押込み、残留くぼみの直径より硬化層深さを近似的に推定している。この押込み特性を連続した荷重-押込み深さの関係曲線として表わしたのが黒木¹⁷⁾であり、硬化層深さの大小が定性的にこの関係曲線から判別できると述べている。また、この方法は山本ら¹⁸⁾と同様に、対角線長さの測定が困難な場合を改善したものとなっている。荷重を一定量ずつ増加させるというこれらの方法と異なって、押込み速度を一定とする方法により、連続した荷重

一押し込み深さ曲線を求めたのが後藤ら^{19),20)}である。均一な材質の試料の荷重一押し込み深さ曲線は座標軸の原点を通る二次曲線で求まり、圧子面に作用する抗力には押し込み深さよりかなり内部の影響があらわれると指摘している。

以上の報告をまとめると、試料垂直断面上での硬さ分布図を取る方法と試料表面からの圧子押し込みに伴う荷重と押し込み量の関係を求める方法とになる。表面層や表面膜の厚さならびに力学的性質の実用的計測には後者の方が有利であると考えられるが、上述の報告例からも判るように、今日に至っても測定法の基本的性質ならびにその応用への進展はあまりなされていない。この原因の一つは圧子押し込みによる硬さに関する解明、すなわち変形抗力と材料の変形挙動に関する塑性論上での基本的な解明があまりできていないためである。その結果、この方法によって得られる荷重一押し込み深さ曲線と材料の硬さおよび表面層や表面膜の力学的性質ならびに厚さとの関係を見出すことが困難となっている。均一な材質の試料の硬さについてさえもこのような状況であるから、連続した硬さ変化を示すような表面層を有する場合の圧子押し込み変形挙動を理論的に取り扱うことは非常に困難である。

以上の結果、ここでは材質自体が異なるかまたは明らかに硬さの異なる表面膜を有する場合について解析の対象とし、圧子押し込みによる材料の変形の変化過程を利用して、試料の硬さおよび表面膜の力学的性質ならびに厚さを求めていくには、次の三点について問題を考えていかねばならないことがわかった。

- (1) 押し込み荷重ならびに押し込み深さの高感度・高精度な検出機構を有し、可変速で、なめらかな圧子押し込み機構を有する試験機を作成する。
- (2) 均一な材質の試料の押し込みによる変形抗力ならびに変形領域に関する理論的取り扱いを行ない、表面膜を有する場合の押し込み変形挙動解明への糸口を見出す。

(3) 押し込みによる変形抗力と荷重－押し込み深さ曲線との関係について、その成立条件と一般的な関数表示を求める。

著者はこれらの問題に対して、まず、押し込み変形に対する基本的性質を仮定し、押し込みによる変形抗力を2、3の機械的性質のみによって顕示しようとした。そして、変形挙動の一つとして、材料内部の変形領域を定量的に得ようとした。また、この押し込みによる変形抗力と荷重－押し込み深さ曲線との間の関数関係を見出そうとした。次いで、この理論的考察から、押し込み速度を一定とした押し込み機構が最適であると推察され、具体的には板ばねの弾性変位を利用した押し込み装置を作成した。

そこで上記の論拠をもとに、一連の研究を進めたのが本論文であって、連続微小押し込み法による硬さ測定の基礎的研究について、以下に記する順序に従って述べている。

第2章では、加工硬化性材料のくさびならびに角錐および円錐圧子押し込みに関し、三つの基本的性質と押し込み変形とを仮定し、近似解を求めた。そして、変形抗力すなわち圧子接触面に作用する平均接触圧力と材料の機械的性質ならびに変形挙動との関係を調べた。また、荷重－押し込み深さ曲線と平均接触圧力との関数関係を求め、均一な材質の材料の場合ならびにこの材料が表面膜を有する場合の荷重－押し込み深さ曲線について一般式を導いた。

等3章では、加工硬化性材料に関するくさびならびに角錐および円錐圧子による押し込み実験を行ない、実験結果と近似解との比較検討により理論の適用範囲を求めた。また、素地材料がめっき膜を有する場合の圧子押し込みを行ない、理論上求めた変形挙動との関係を調べた。

第4章では、まず押し込み機構と検出機構に必要な諸条件の検討を行ない、連続微小押し込み装置の試作を行った。次いで、荷重と押し込み量の特性を求め、荷

重一押し込み深さ曲線に影響をおよぼす諸要因との関係を調べた。また、連続微小押し込み装置から得られるデータの自動処理を目的として、小型計算機を用いた自動データ処理システムの開発を行ない、その概要を説明すると共に、システムの精度について検討を行なっている。

第5章では、連続微小押し込み装置を使って、素地材料、素地材料がめっき膜を有する試料および陽極酸化したアルミニウム試料などについて荷重一押し込み深さ曲線を求め、それぞれの荷重一押し込み深さ曲線の特性を述べると共に、第2章で求めた関係式との検討を行った。また、荷重変化率曲線より硬さ値とめっき膜厚の測定を行ない、表面膜を有する場合の押し込み変形特性について検討を加えた。そして、極く単純な押し込み変形を仮定した場合の膜厚の検出精度と限界についても述べた。最後に、自動データ処理システムを使って行なった実験結果を示している。

第2章 加工硬化性材料の圧子押し込み解析 ならびに連続微小押し込み法にお ける荷重—押し込み深さ曲線の数式化

2・1 ま え が き

圧子を押込んだとき材料の示す変形抗力と押し込み深さとの関係を利用して材料の硬さおよび表面膜の具備する性状を知ろうとしても、圧子押し込みの解明が今だ十分になされていないため、非常に困難であると指摘した。この問題に対する解決の糸口となる要因は材料が有する加工硬化性にある。したがって、連続微小押し込み法によって得られる荷重—押し込み深さ曲線から材料の具備する種々の性状を調べていこうとするとき、まず材料が有する加工硬化性を考慮した圧子押し込みの理論的解析が必要であり、中でも押し込み荷重と材料の機械的性質との関係、変形領域との関係ならびに荷重—押し込み深さ曲線との関係を見出さなくてはならない。

現在まで、圧子押し込みの理論的研究は数多くなされており、その基本には加工硬化性を考慮しないすべり線場の理論が適用されている^{1), 3), 21), 22)}。これらの理論の中で、平均接触圧力 P_m は圧子角の大きい範囲で十分加工硬化した材料の硬さ試験値に近いと報告されている。加工硬化性を考慮した場合、数値解析による方法²³⁾を考えることもできるが、圧子押し込みのような大きな塑性ひずみを取り扱うとき、その解析は非常に困難となる。進藤の研究^{24), 25)}は圧縮試験から求めた応力を上界法に加味し、ここに加工硬化性を評価しようとするものであるが、加工硬化性の大きい材料になるほどその相当ひずみは実験結果より小さくみつもられている。また、Taborら^{26), 27)}の加工硬化性材料に関する実験結果によれば、硬

さ値は同一材料であっても前加工度によって異なり、圧子角に依存する代表ひずみと関係の深いことがわかる。

一方、上記の理論から押し込みによる変形領域としてすべり線場が考えられるが、Mulhearnら^{28), 29)}およびMilliamsら³⁰⁾の実験結果と比較すると、圧子下の変形領域ならびに硬化状況の二点においてかなりの違いが認められる。Bishop³¹⁾およびShield³²⁾の可容応力場、あるいはHill³³⁾によるブロック切断のすべり線場も変形領域の一つとみなせるが、変形挙動を説明できるまでには至っていない。Shawらの報告^{34), 35)}は押し込みによって生じた材料内部の変形領域を定量的に求めたものであるが、加工硬化の影響を導入することはできない。Hirst³⁶⁾およびJohnson³⁷⁾の報告は弾塑性材料の硬さ値を理論づけたものの一つと考えられるが、材料が前もって受けた加工硬化の違いによって生じる変形領域の違いを導くことができない。

このように、圧子押し込み変形はかなり複雑であり、平均接触圧力および変形領域等を塑性の基礎式から解析的に求めることは困難である。しかし、すべり線場の理論から求められる平均接触圧力と代表ひずみを関係づけることによって、押し込み荷重の近似解を求めることができると予想され、また均一な材質の加工硬化性材料の押し込みでは相似性が成立するという実験事実^{21), 38), 39)}をもとに、押し込みによって生じた変形領域内のひずみ硬化分布模様が押し込み量に依存しないという立場から、圧子押し込みの理論的取扱いが可能と考えられる。

そこで本章では、加工硬化性材料の圧子押し込みに関する理論的取り扱いについて述べ、この結果得られた近似解と材料の機械的性質ならびに変形挙動との関連を検討した。そして、均一な材質の単一表面膜を有す

る場合の圧子押し込み変形挙動の解明を行なった。また、荷重-押し込み深さ曲線と平均接触圧力との関数関係を求め、均一な材質の材料の場合ならびにこの材料が表面膜を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線に関する一般式を展開した。

2・2 加工硬化性材料のくさび押し込みの解析⁴⁰⁾

2・2・1 二次元圧子押し込み変形の近似解

材料が加工硬化性を有する場合、くさび押し込み変形の塑性力学的な解を求めることは著しく困難となる。その原因の一つに、例えば圧子下の材料の塑性ひずみ、すなわち変形抗力が一定でなく各点で異なると考えなければならないという問題が含まれている。しかし、これに関しては、十分に変形が進行した段階で、変形に関与する部分全体についてのある平均的な降伏応力（加工硬化後の降伏応力）と平均的ひずみ（代表ひずみ）を考えることにより近似解を得ることができる。

そこで、加工硬化性材料のなめらかなくさび押し込み変形を取扱うにあたり、従来の研究結果から下記の三つの基本的仮定を設けることができた。

- (1) 材料の応力-ひずみ線図は n 乗硬化特性を示す。
- (2) 押し込みによって、くさび角に依存する複雑なひずみ硬化を受けた変形領域が形成されるが、この変形領域は領域Ⅰ（結晶粒の形状変化が観察される領域=拡張したすべり線場）、領域Ⅱ（各結晶粒内部での塑性的変形は認められるが、結晶粒の形状変化が認められない領域=微小塑性変形領域）および領域Ⅲ（弾性領域）の三つからなる。

(3) 変形領域内に生じた加工硬化の度合に相應する応力を平均接触圧力 P_m に加味する必要があり、これにはくさび角に依存する代表ひずみ ϵ_0 と相当降伏応力 σ_0 を考える。すなわち、領域 I の内部は代表ひずみ ϵ_0 に相當する分だけ一様にひずみ硬化するものとし、ここにすべり線場の理論が成立するとすれば、平均接触圧力 P_m は σ_0 を降伏条件に Hill の理論⁴¹⁾を適用して求める。

まず、材料の応力-ひずみ線図を数式であらわすと、

$$\bar{\sigma} = a_0 \cdot \bar{\epsilon}^n \quad (2 \cdot 1)$$

になる。ここで $\bar{\sigma}$ ：真応力， $\bar{\epsilon}$ ：対数ひずみ， n ：加工硬化指数*， a_0 ：材料定数を表わす。このような材料に予ひずみ ϵ_0 を与えると、その後その材料は ϵ_0 に相當する応力 σ_0 を初期降伏応力にもつ材料と同じような応力-ひずみ関係を示す²¹⁾。引張り強さ σ_n (σ_B)に相當する公称ひずみを ϵ_n とし、 ϵ_n および ϵ_0 の対数ひずみをそれぞれ求め、両者の比を予ひずみ率 i とおけば、

$$i = n / \bar{\epsilon}_0 \quad i \geq 1 \quad (2 \cdot 2)$$

となる。この結果、初期降伏応力 $\bar{\sigma}_0$ (真応力)は、

$$\bar{\sigma}_0 = a_0 \cdot \left(\frac{n}{i} \right)^n \quad (2 \cdot 3)$$

と表わされる。

図 2・1 はくさび押込みによって生じた変形領域の模式図であって、

*以下本研究で示した n 値はいずれも予ひずみゼロのときの初期値を示す。

領域Ⅰは点O'AB'CHDからなる拡張したすべり線場を示し、点Dは点Hからくさび先端下になめらかに延長した点である。領域Ⅱは、くさびに変わって点FB'O₁Iなる剛体ポンチ(幅2a)が作用するとみなした結果、材料内に生じる剪断応力線と領域Ⅰとをなめらかに接続した点CH'Eの外側にあたる。点DHCH'Eの内部が領域Ⅱに相当する。

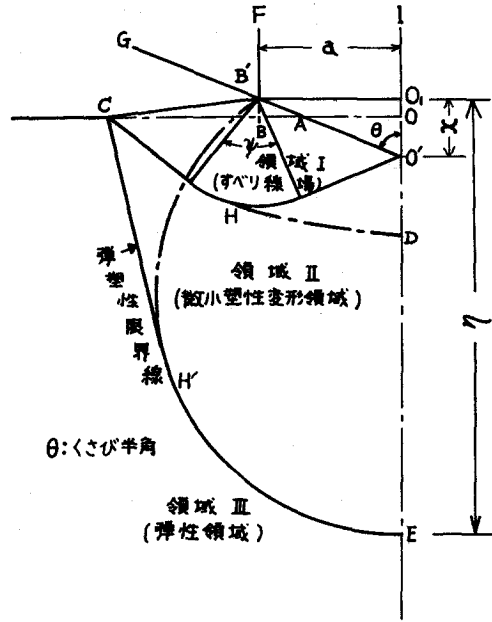


図 2・1 くさび圧子による押し込み変形の模式図

押し込みの結果、変形領域Ⅰ内部の材料はくさび角に依存する代表ひずみ ϵ_θ を一様に受けるとみなすことになるが、この ϵ_θ の値は材料の表面 \overline{OAB} が単純に一様伸び変形をし、表面 $\overline{O'AB'}$ を形成すると仮定したときの伸びひずみに相当すると考える。ここで、くさび半角 θ と代表ひずみ ϵ_θ の間には、

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{\sin \theta} - 1 \quad (2 \cdot 4)$$

の関係式が成立する。また、 ϵ_θ の値は一様伸びの条件から、 $0 \leq \epsilon_\theta \leq \epsilon_n$ とし、この値が ϵ_n より大きくなると、材料は剛塑性体とみなす。また、

変形領域 I の内部の材料は $(\bar{\epsilon}_n + \bar{\epsilon}_\theta)$ の対数ひずみに相当する応力を相当降伏応力 σ_θ としてもつことになる。対数ひずみ $\bar{\epsilon}_n$ と対数ひずみ $\bar{\epsilon}_\theta$ の比を,

$$j = h / \bar{\epsilon}_\theta \quad i \geq j \geq 1 \quad (2 \cdot 5)$$

とおけば、相等降伏応力 $\bar{\sigma}_\theta$ (真応力) は,

$$\bar{\sigma}_\theta = a_0 \cdot \left(\frac{n}{i} + \frac{n}{j} \right)^n \quad (2 \cdot 6)$$

となる。ここで n , j および θ の間には,

$$\frac{n}{j} = \ln \left(\frac{1}{\sin \theta} \right) \quad (2 \cdot 7)$$

の関係が成立する。

次に、くさび面に作用する平均接触圧力 P_m はすべり線場の理論⁴¹⁾より,

$$P_m = 2k_\theta (1 + 2\psi) \quad (2 \cdot 8)$$

と求まる。ここで k_θ は相当せん断応力であって、von Mises の降伏条件から,

$$k_\theta = \sigma_\theta / \sqrt{3} \quad (2 \cdot 9)$$

が成立し、 ψ の値は,

$$\cos(2\theta - \psi) = \frac{\cos \psi}{1 + \sin \psi} \quad (2 \cdot 10)$$

を満足する。結局、頂角 2θ のくさび圧子の押込みの結果、 σ_0 を初期降伏応力としてもつ加工硬化性材料の変形領域内の一部に、相当降伏応力 σ_θ を降伏応力としてもつような一様な硬化領域すなわち領域 I を生じ、この状況のもとで力の平衡が成立すると考えたことになる。

平均接触圧力 P_m は式 2・6、2・8 および 2・9 により、

$$P_m = \frac{2}{\sqrt{3}} a_0 \cdot \frac{\left(\frac{n}{i} + \frac{n}{j} \right)^n}{e_i^{\frac{n}{i}} \cdot e_j^{\frac{n}{j}}} (1 + \psi) \quad (2 \cdot 11)$$

となり、材料の加工硬化指数 n 、予びずみ率 i およびくさび角 2θ によって一義的に定めることができる。平均接触圧力 P_m と初期降伏応力 σ_0 または相当降伏応力 σ_θ との比； $C_0 = P_m / \sigma_0$ 、 $C_\theta = P_m / \sigma_\theta$ ならびに σ_θ と σ_0 の比； $m = \sigma_\theta / \sigma_0$ は、硬さ試験と材料の機械的性質との関係を知るうえで重要な数値である。なお、以上の理論的取り扱いには押込みの接触面に摩擦力が作用する場合にも適用できる。

最後に、弾塑性限界を求めるには、de Saint-Venant の定理にもとづいて、剛体ポンチ押込みの弾性解を適用すればよい。すなわち、くさび押込みによってその変形領域は、高度に加工硬化された領域から微小変形域、そして弾性域と接合されたものであり、この状態で力学的には平衡状態にある。そこで、図 2・1 において、点 $GB'AO'I$ から成るくさびにかわって、点 $FB'O_1I$ から成る剛体ポンチに平均接触圧力 P_m が一様応力として作用すると考えれば、求めようとする弾塑性限界線は材料内部のせん断応力 τ が $\sigma_0 / \sqrt{3}$ なる所である。この位置は $\overline{B'O_1}$ の 2 倍の長さを弦とし、点 B' とこの軸対称点を 2 定点とする等色線上にあり、この弦に立つ円周角を ω とすると、次式が成立する位置となる⁴²⁾。

$$\sin \omega = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_0}{P_m} \quad (2 \cdot 12)$$

図 2・1 において $\overline{O_1E}$ で示した弾塑性限界線の最大深さ η と辺 a の比を K_0 とおけば,

$$K_0 = \cot \frac{\omega}{2} \quad (2 \cdot 13)$$

となり, K_0 は n , i および θ によって定まる。式 2・12 の剪断応力条件は材料全体が m 倍一様に硬化したとみなした時の条件であるから, 式 2・13 で示された弾塑性限界線は変形領域の最小を求めたことになる。

2・2・2 平均接触圧力と予ひずみ率

くさび面に作用する平均接触圧力 P_m とくさび角 2θ の関係を示したのが図 2・2 である。同一材料であっても P_m の値は予ひずみ率 i によって変化し, i が大きくなるとある圧子角の値で最大値または最小値を示す。一般に, 既存の材料が有する加工硬化指数 n の値は 0.6 以下であるが⁴³⁾, n の値がこの条件を満たすとき, P_m の最大値または最小値はく

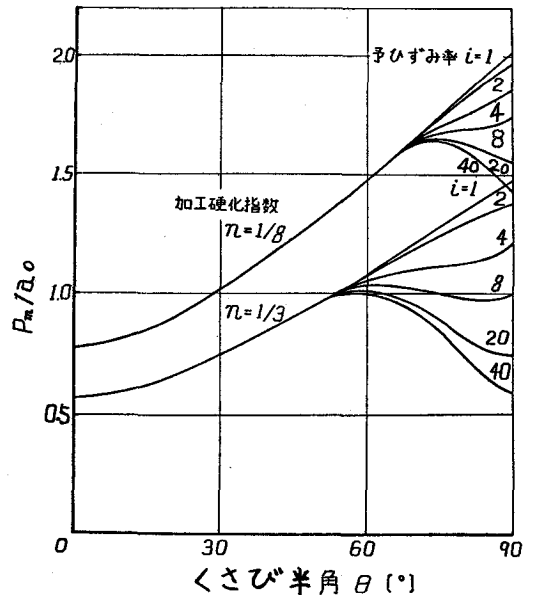
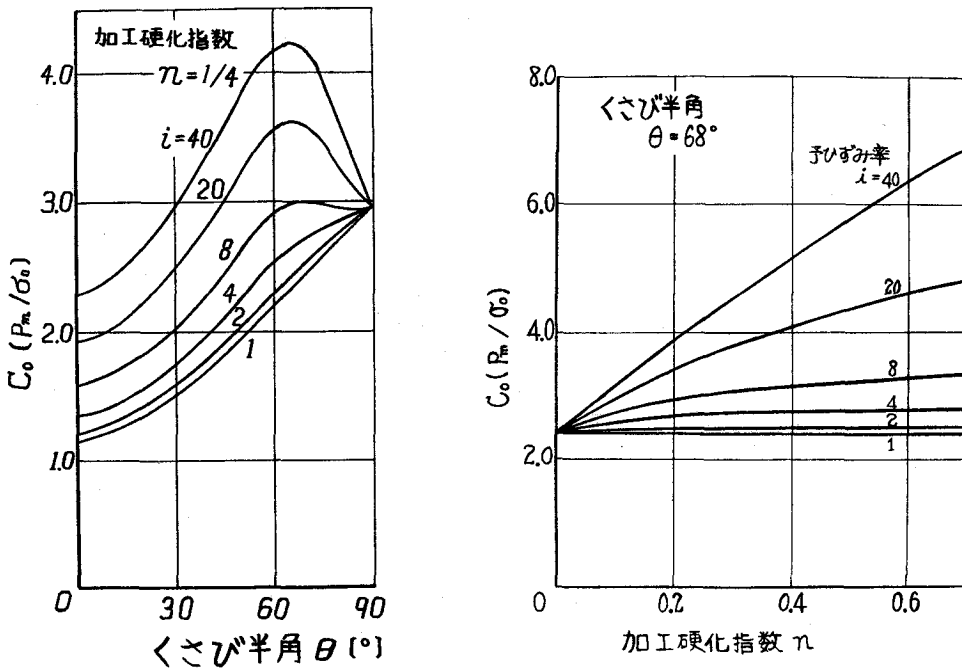


図 2・2 平均接触圧力 P_m

くさび角の値が 105° 以上の所に存在する。 $i \leq 1$ の場合、材料は剛塑性体とみなされ、 P_m の値は n の値のいかんによらず Hill の理論値⁴¹⁾ に一致する。

2・2・3 降伏応力比

図 2・3 は降伏応力比 C_0 とくさび角との関係を表わす。 図の(a)を見ると、くさび角と C_0 の最大値あるいは最小値の関係は平均接触圧力 P_m の関係線図と同じ傾向にあることがわかる。 図の(b)によれば、降伏応力比 C_0 は予ひずみ率の値が小さくなると加工硬化指数 n よりも予ひず



(a) くさび角と降伏応力比 C_0 との関係 (b) 加工硬化指数と降伏応力比 C_0 との関係

図 2・3 降伏応力比 $C_0 (P_m / \sigma_0)$

み率 i の影響を受け、その値はほぼ一定となる。この場合に用いたくさび角はビッカース圧子角に相当するものであって、 C_0 の値は十分加工硬化を受けた材料の硬さ試験結果²¹⁾に近い。予ひずみ率 $i \leq 1$ の場合、降伏応力比 C_0 の値はすべての n に対して降伏応力比 C_0 と等しくなる。

図 2・4 はくさび角と降伏応力比 C_0 との関係を示すもので、 C_0 の値は n や i に関係せず、くさび角 2θ のみで定まる。図中、摩擦係数 $\mu = 0$ のときの値が Hill の理論値⁴¹⁾であり、摩擦力が作用するときの値は Grunzweig の理論値⁴⁴⁾である。摩擦力が作用するとき、あるくさび角以上になると理論値は存在しないが、くさび近傍にデッドメタルを想定することによって C_0 の値を求めることができる。

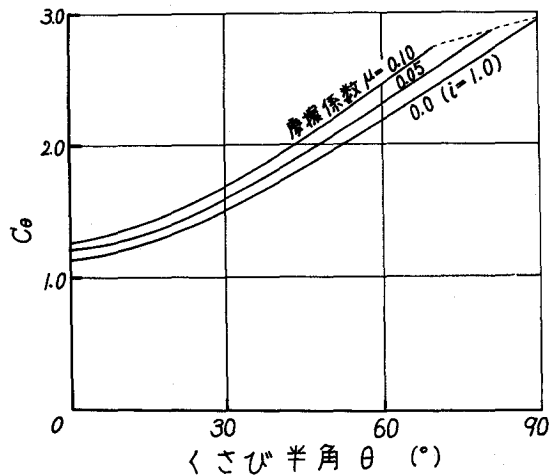


図 2・4 くさび押込みにおける降伏応力比 C_0

2・2・4 代表ひずみおよび平均硬化度とくさび角

表 2・1 はくさび角に対する代表ひずみの値を示したものである。これらの値から次のような押し込み変形を想定することができる。一般

表 2・1 代表ひずみ ϵ_0

くさび角 $2\theta(^{\circ})$	40	60	90	105	120	136	150	170
ϵ_0	1.924	1.000	0.414	0.260	0.155	0.079	0.035	0.004

に、既存の材料の加工硬化指数は 0.6 以下と考えられるから、くさび角が $2\theta = 75^{\circ}$ 以下では、全ての材料について圧痕面で亀裂を生じるような押し込み変形になると予想される。このような押し込み変形を亀裂型押し込みと称する。それ以上のくさび角の場合は、予ひずみの小さいとき試料表面がそのまま押し込まれるような押し込み変形、すなわち圧縮型押し込みであり、予ひずみが大きくなると亀裂型かあるいは圧縮型押し込みになるものと考えられる。一方、十分加工硬化した材料で剛塑性体に近い試料の場合には、くさび角によらずすべり線場の理論に近い切削型押し込みになるものと思われる。角錐や円錐圧子による押し込み変形の場合も、くさび圧子と同じ変形挙動に基づくならば、上記と同様の現象が生じるものと思われる。

図 2・5 はくさび角と平均硬化度 m の関係を表わす。この平均硬化度は圧子押し込みによって材料の変形領域が受ける加工硬化の度合を表わすもので、理論上領域 I 内はこの値だけ一様に加工硬化するとみなされる。平均硬化度 m も材料の予ひずみ率に大きく依存し、一樣ひず

みの条件からあるくさ
び角以下では一定値と
なる。

2・2・5 変形領域と予ひずみ率

くさび押し込みによる弾
塑性限界の最大深さ η と
接触幅 a の比 K_0 は図 2
・6 のとおりである。一
般に、加工硬化指数 n お
よび予ひずみ率 i がとも
に大きくなるに従って K_0
の値も大きくなるが、 P_m
あるいは C_0 の場合と同様、
あるくさび角のときその
値、すなわち塑性変形領
域が最大となる場合がお
こる。図中の破線は $K_0 =$
 $\cot \theta$ の関係を表わし、
この線上でくさび先端と
弾塑性限界線が一致する。
この関係をくさびの押し
込み変形の面からみるなら
ば、この破線は押し込み変

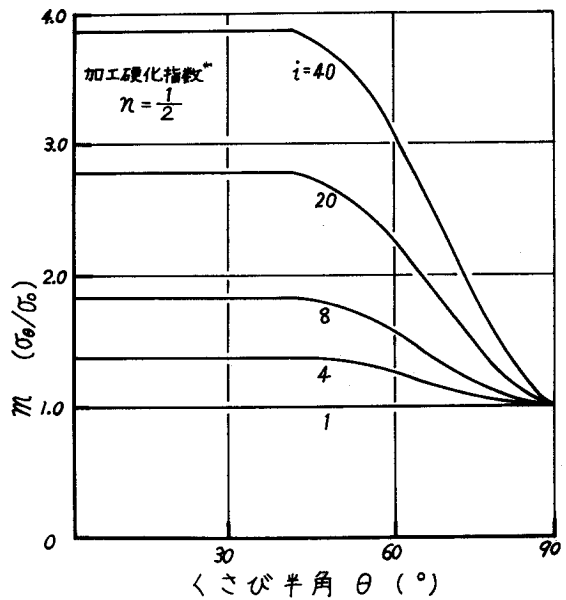


図 2・5 平均硬化度 m

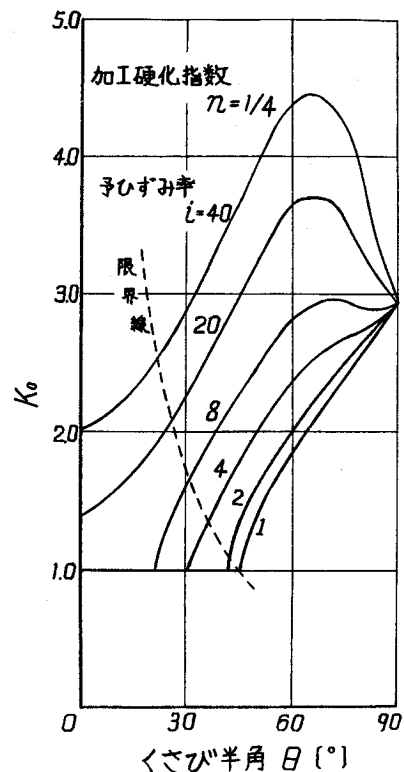
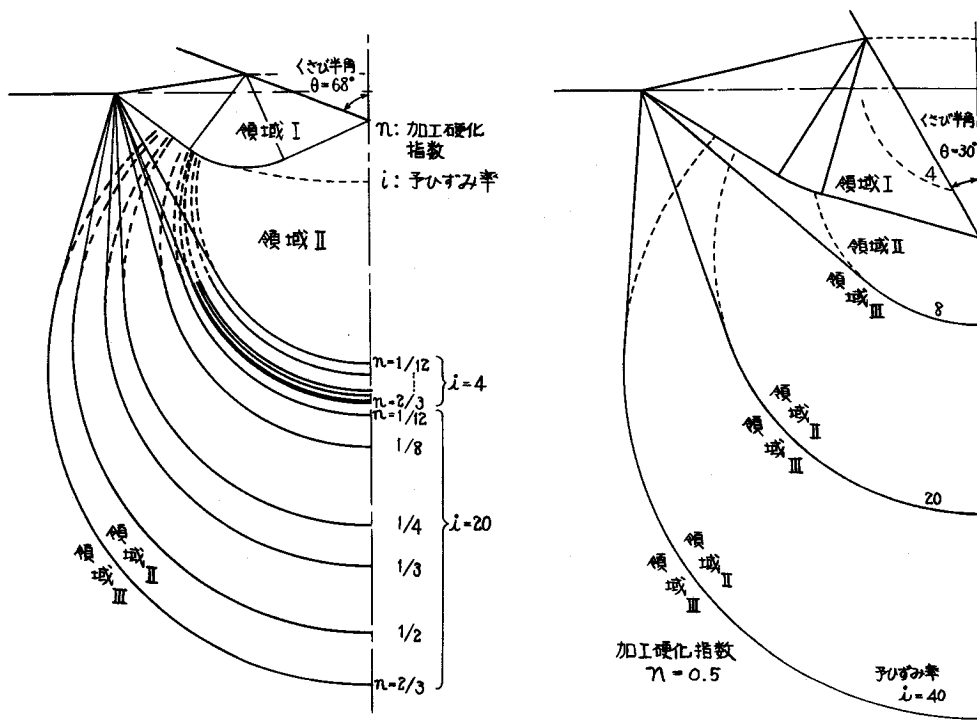


図 2・6 くさび押し込みにおける弾塑性限界線の最大深さと接触幅との比 K_0

形の違いを示す限界線であって、限界線より右側のくさび角では**圧縮**型であり、左側のくさび角では切削型であると推察される。 $\theta = 90^\circ$ の場合に得られる値と Bishop が求めた値³¹⁾とを比較すると、その理由についてはまだ十分にわかっていないが、後者は前者の約 3 倍になる。

図 2・7 は変形領域を模式化したものである。図の(a)はくさび半角 68° の圧子による押し込み変形模様であり、押し込みによる変形の影響は焼鈍材に近いものになるほど十分深いところまでおよんでいる。この弾塑性限界線の位置に対する影響は n より i の方が大きい。また、図



(a) くさび角 136° の場合

(b) くさび角 60° の場合

図 2・7 加工硬化指数と予ひずみ率が変化したときの変形領域の模式図

の(b)はくさび半角 30° の圧子による押し込み変形模様を示し、 i の値が減少すると押し込み変形は圧縮型から切削型へ移行する。

2・3 加工硬化性材料の角錐および円錐圧子押し込みの解析⁴⁵⁾

2・3・1 三次元圧子押し込み変形の近似解

三次元圧子の押し込み変形においても二次元の場合と同様、2・2・1節で述べた三つの基本的仮定が成立するものとし、代表ひずみ ϵ_θ の値

も式2・8で表わしたように材料の表面が単純に一様に伸び変形を

した値に等しいものと考えれば、相当降伏応力 σ_θ は二次元の場合と同様に式2・6でもって表わすこ

とができる。まず、角錐または円錐圧子に作用する平均接触圧力 P_m

は、

$$P_m = C_\theta \cdot \sigma_\theta \quad (2 \cdot 14)$$

の関係式より求めることができる。

ここで C_θ の値には、角錐圧子の場合Haddowの理論値⁴⁶⁾を、円錐圧子の場合Lockettの理論値⁴⁷⁾をそれぞれあてはめればよい。

次に、押し込み変形には図2・8の(a)で示すHaddowの角錐圧子押

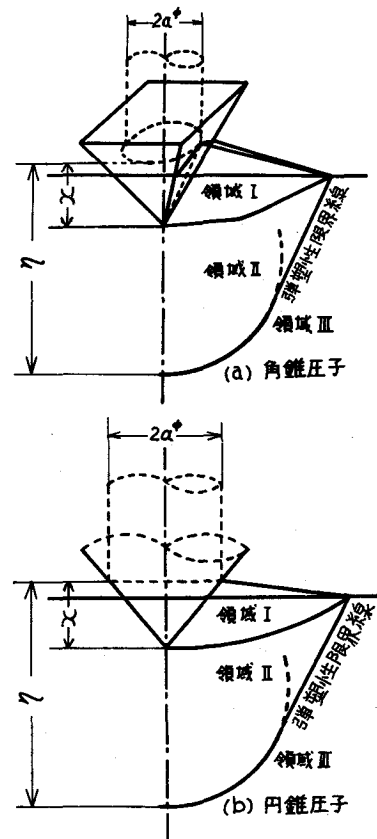


図2・8 角錐ならびに円錐圧子による押し込み変形の模式図

込み変形あるいは図 2・8 の(b)で示す Lockett の円錐圧子押し込み変形を適用する。その結果、これらのすべり線場（圧子先端下では二次元の場合と同様に拡張したものとす）は領域 I に相応するものとなり、変形領域の模式図はこのすべり線領域下に領域 II, III の存在するものとなる。

弾塑性限界を求めるには円柱状剛体ポンチ押し込みの弾性解を適用する。すなわち、円錐または角錐圧子にかわって、円柱状の剛体ポンチに式 2・14 で得られる平均接触圧力 P_m が一様に作用すると考えれば、弾塑性限界はポンチの中心軸線上において、材料内部の剪断応力が初期降伏応力 σ_0 に等しくなる条件から求めることができる。したがって、弾塑性限界線の最大深さ η と円柱の半径 a との比 K_1 は次式で表わされる^{48), 49)}。

$$K_1 = \left(\frac{\eta}{a} \right)^2 = \frac{(7-2\nu)C_0 - 8 \pm \sqrt{\{(7-2\nu)C_0 - 8\}^2 - 16\{4 + (2\nu - 1)C_0\}}}{8} \quad (2 \cdot 15)$$

ここで、 $C_0 = P_m / \sigma_0$ であり、 ν は材料のポアソン比を表わす。角錐圧子の場合には、本来角柱状剛体ポンチの押し込み解を考えなくてはならないが、円柱状剛体ポンチの解析結果に近いと考えられ、この場合も式 2・15 を用いる。

以上の結果、三次元圧子押し込みにおいても、その平均接触圧力 P_m ならびに弾塑性限界は材料の加工硬化指数 n 、ポアソン比 ν 、予ひずみ率 i および圧子角 2θ によって一義的に定まる。なお、この場合の

弾塑性限界線も変形領域の最小を求めたことになる。

2・3・2 降伏応力比

図2・9は圧子角 2θ と降伏応力比 C_θ との関係を示すもので、実線はHaddow⁴⁶⁾の角錐圧子押込みの場合に相当し、一点鎖線はLockett⁴⁷⁾の円錐圧子押込みの場合に相当する。 C_θ の値は材料の加工硬化指数 n や予ひずみ率 i に関係せず圧子角のみによって定まる。角錐圧子押込みの場合には、

摩擦力が作用するときの理論値も求められている。しかし、

円錐押込みの場合、圧子角が 105° 以下になると解を求めることはできず、また摩擦力の作用するとき、その数値解を求めることは困難である。

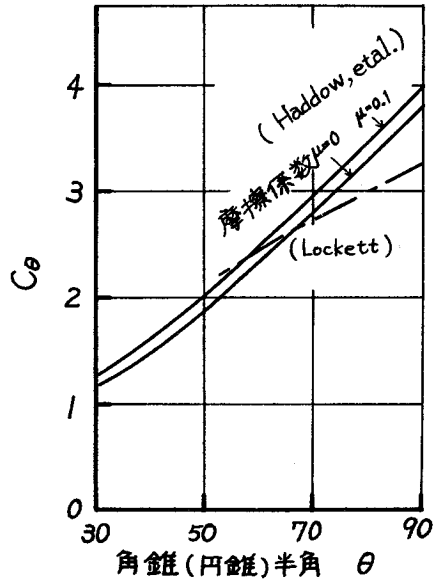


図2・9 角錐または円錐圧子押込みにおける降伏応力比 C_θ

2・3・3 変形領域と予ひずみ率

図2・10は降伏応力比 C_0 と K_0 および K_1 との関係を示したもので、圧子押込みによって生じる変形領域の範囲を知ることができる。ここで K_0 および K_1 はそれぞれ二次元圧子押込みおよび三次元圧子押込みの場合に相当する。 C_0 の値が5以上になると K_0 と K_1 の値の間には2~5

倍の違いが認められる。

これは、同じ材料に同一の圧子角を使用するという条件で、くさび押し込みによって生じる変形領域が角錐または円錐圧子押し込みによって生じる変形領域よりはるかに大きいこと

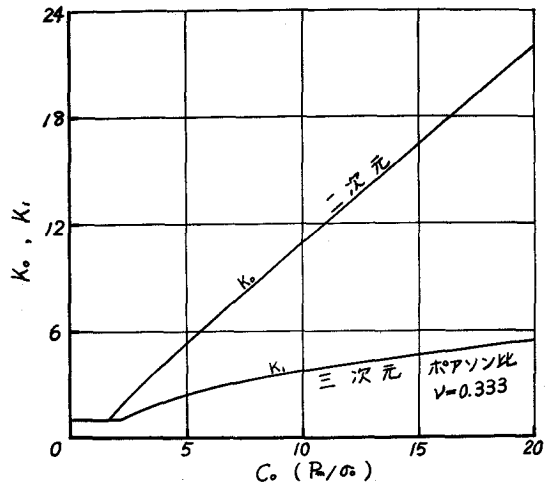


図2・10 降伏応力比 C_0 と K_0 および K_1 との関係
 K_1 の値は予ひずみ率 i に対する依存度が高い。

2・4 均一な材質の単一表面膜を有する場合の圧子押し込み変形

一般に、均一な材質の材料のビッカース硬さ試験ならびに微小ビッカース硬さ試験を行うと、その硬さ値は押し込み荷重によらず一定となる^{1), 21)}。これは荷重の大きさをいかにとっても、くぼみの形が相似であると同時に、接触面上の平均接触圧力が一定であることを意味し、通常このことを相似則と称する。2・3節の解析結果は、この相似則が成立するという基本的な条件のもとで、均一な材質の材料（以後、素地材料と称する）の押し込みについて成り立つものである。

ここで、相似則の成立する条件を圧子押し込み変形挙動の面から考えてみると、材料が加工硬化性を有しない場合か、あるいは、加工硬化性を有するとしても、圧子押し込みによる変形領域のひずみ硬化分布模様が押し込み量に依存しない場合にこの条件は満たされる。通常、材料は加工硬

化性を有するので、相似則が成立するのはひずみ硬化分布模様が押し込み量に依存しない条件の場合と考えられ、これは図2・8の圧子押し込みの変形模様が押し込み量に依存しないことを意味する。

素地材料が表面膜を有すると、一般に相似則は成立しなくなる。すなわち、素地材料と表面膜との材質の違いあるいは硬さの違いによって、押し込みの増加と共にひずみ硬化分布模様に変化し、押し込み方向に硬さ変化が生じる。

そこで、図2・11の(a)で示したような素地材料が単一表面膜を有する極く単純な場合の圧子押し込み変形について考えてみる。この単一表面膜

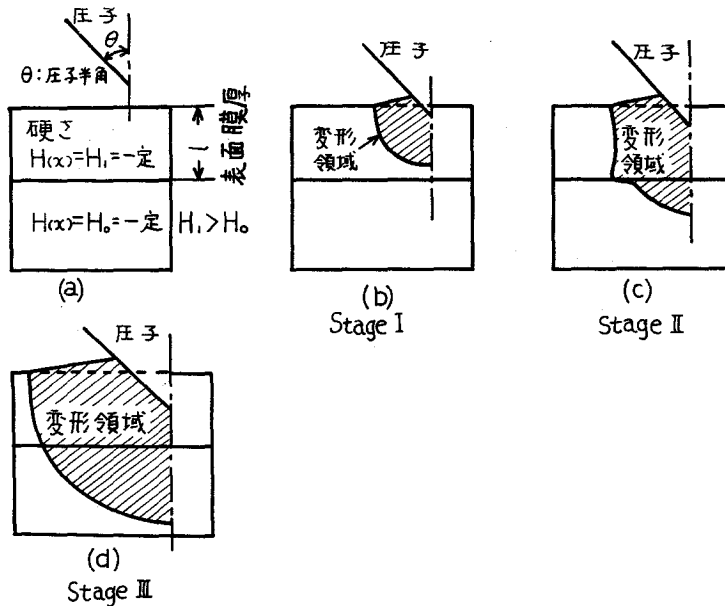


図2・11 均一な表面膜を有する場合の押し込み変形モデル

は均一な材質であり、その膜厚および硬さはそれぞれ l , H_1 (一定) である。

圧子押込みが始まると、最初は押込み変形の及ぶ範囲が表面膜内にとどまり、変形領域の外郭を表わす弾塑性限界線が表面膜と素地材料との境界に至るまでの段階である。この段階では相似性が成立し、図2・11の(b)で示すようにStage Iと称する。次は、押込みによって結晶粒内部にとどまるような塑性変形、すなわち領域Ⅱに相当する部分が素地材料内に除々に進展していく過程で、この過程を図2・11の(c)で示すようにStage IIと称する。そして、これよりさらに押込みが行なわれると、素地材料にも結晶粒の形状変化が観察される、すなわち領域Ⅰに相当する部分の存在が認められるようになり、表面膜と素地材料とが連続した変形領域を形成して行く過程である。この過程での変形領域は新たに相似性の成立するひずみ硬化分布模様を示すと考えられ、この過程を図2・11の(d)で示すようにStage IIIと称する。

次に、これらのStageと押込み量の関係を理論的に推定する。このとき、表面膜と素地材料とは弾性範囲内において連続的なものとして取り扱い、また表面膜の硬さ H_1 (一定)と素地材料の硬さ H_0 (一定)との比 β 値によって、押込み変形挙動の違いが生じることを考慮する。

まず、Stage Iの限界は、圧子押込みによって生じた表面膜内の変形領域が押込み量の増加と共に押込み方向に進展し、その弾塑性限界線が表面膜と素地材料の境界線に達するときの条件をもって定めることができる。

硬さ比 β が1より小さいとき、表面膜の初期降伏応力 σ_0 とポアソン比 ν を条件に式2・15から K_1 の値が求まる。そこで、求めた K_1 の値、 $a = x \tan \theta$ の押込み深さ x と円柱の半径 a との関係式および $\eta = \ell$ の境界値を $K_1 = (\eta/a)^2$ の関係式に代入すれば、圧子の押込み深さの限界

値 α_0 を求めることができる。このときの降伏条件は変形領域の最小を求めるものであるから、実験で得られる押し込み深さの限界値は α_0 より小さいと考えられる。

硬さ比 β が1より大きいとき、表面膜の初期降伏応力値と比べて素地材料の方の値が小さいため、表面膜に対する弾塑性限界線よりも素地材料に対する弾塑性限界線が先に存在する。したがって、このとき素地材料の初期降伏応力 σ_0 と硬さ比 β を条件に、次式から K_1 の値が求まる。

$$K_1 = \left(\frac{\eta}{a}\right)^2 = \frac{(7-2\nu)C' - 8 \pm \sqrt{\{(7-2\nu)C' - 8\}^2 - 16\{4 + (2\nu - 1)C'\}}}{8}$$

(2 ・ 16)

$C' = C_0 \cdot \beta$ ν : 表面膜のポアソン比

上述の場合と同様に、この K_1 の値からStage Iの成立する押し込み深さの限界値 α_1 が求まる。この値は硬さ比 β と表面膜の予ひずみによって定まり、図2・12にポアソン比 $\nu = 0.333$ の材料の C' と K_1 との関係を示した。ここで K_1' の値は $K_1' = K_1 \tan \theta$ の関係から、弾塑性限界線の最大深さと押し込み深さとの比として求めたものである。この場合の降伏条件は変形領域の最大を求めるものであり、実験で得られる押し込み深さの限界値は α_1 より大きいものと考えられる。以上の結果、実験でStage Iとして得られる押し込み深さの限界値は α_0 と α_1 の間にあると考えられる。

Stage IIIの成立する条件は、圧子押し込み変形を受けたのち、変形領域内の境界線上で相接する箇所の表面膜ならびに素地材料の各々のひずみ量が相等しくなる条件である。この条件は表面膜および素地材料共に予

ひずみの小さいとき、
 押し込み変形ののち境界
 線上で相接する箇所の
 表面膜の硬さ値と素地
 材料の硬さ値との比が
 最初の硬さ比 β に等し
 くなる条件と同じであ
 る。

2・3節の押し込み変
 形モデルからいえば、
 $\beta \geq 1$ であって押し込み
 によって試料の破壊が
 生じないとき、Stage

Ⅲが成立する条件は領域Ⅰが素地材料に達するときであると考えられる。
 もしStageⅡの最終までに素地材料に内部方向へへこむような変形が生
 じないならば、押し込み深さと領域Ⅰの最大深さとの関係より、押し込み深
 さの限界値 α_3 と表面膜厚 l との比は近似的に、

$$\lambda = \sqrt{2} \cos \theta \quad \theta : \text{圧子半角} \quad (2 \cdot 17)$$

として表わされる。

硬さ比 β が1よりかなり小さい場合か、あるいは圧子角が小さくて押
 込み変形が亀裂型であり、圧子先端下に流動域がほとんど認められない
 場合には、圧子先端が素地材料に達した条件をもって、押し込み深さの限
 界値 α_4 が定まる。したがって、この限界値 α_4 に関しては、

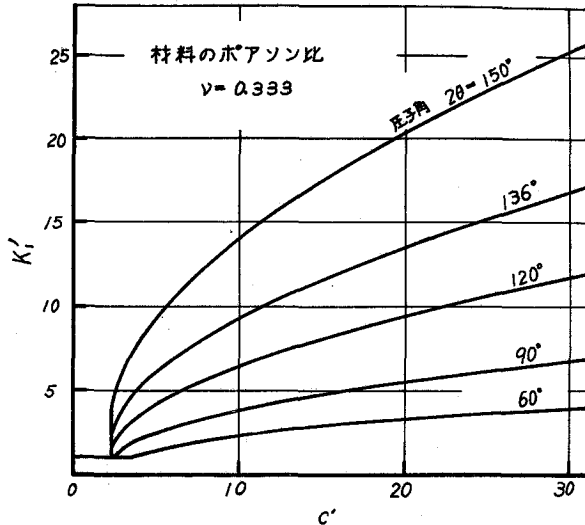


図2・12 角錐または円錐圧子押し込みにおける弾塑性限界線の最大深さと押し込み深さとの比 K_1'

$$\lambda = 1$$

(2 · 18)

が成立する。この場合相似則の条件が満たされるとはいいがたいが、実験的にはかなり顕著な現象を得ることができると考えられる。なお、押し込みによって試料の破壊を生じる場合にはStage IIIを見出すことは困難である。これは β が1よりかなり大きいときに生じるものと考えられる。

Stage I と Stage III の間が Stage II である。これは圧子押し込み中に表面膜と素地材料との境界線を境にしてひずみ量の違いを生じ、その結果変形模様は押し込み量に依存しなくなる過程であり、表面膜と素地材料との密着性あるいは境界線の存在などによって影響されるものと考えられる。

2 · 5 荷重－押し込み深さ曲線の数式化

2 · 5 · 1 硬さと荷重－押し込み深さ曲線との関係

2 · 3 節および 2 · 4 節では、相似則が成立するという基本的条件のもとで圧子押し込み解析を行ない、その変形挙動を明らかにすることができた。そこで、この節では連続微小押し込み法によって得られる押し込み量 x と押し込みに必要な荷重 P の連続的な関係、すなわち荷重－押し込み深さ曲線と上述の結果との関係を求める。なお、押し込み荷重 P は以後 $P(x)$ という関数表示で行なう。

まず、従来のビッカース硬さの定義からすれば、圧子を試料表面から深さ x 点まで押し込んだとき、単位接触面積当りの抗力として表わした硬さ値 $\bar{H}(x)$ と深さ x 点まで押し込むのに必要な荷重 $P(x)$ との間には

次式が成立する。

$$P(x) = \alpha \bar{H}(x) \int_0^x (x - \xi) \xi d\xi \quad (2 \cdot 19)$$

$$\alpha \text{ の 値 } \begin{cases} \text{角錐} & \frac{4 \sin \theta}{\cos^2 \theta} \\ \text{円錐} & \frac{\pi \sin \theta}{\cos^2 \theta} \end{cases}$$

次に、図 2・13 で示すように、試料表面からの深さ ξ のみによって表わされ、押込みによる影響を受けないような抗力を $H(\xi)$ とすれば、 $H(\xi)$ と深さ x 点まで押込むのに必要な荷重 $P(x)$ との間には、

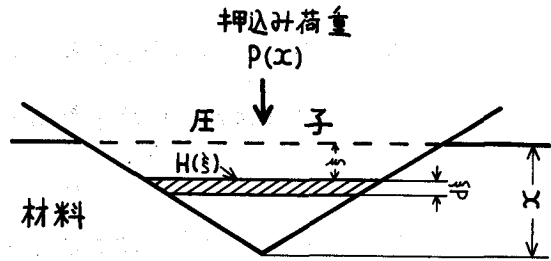


図 2・13 押し込み荷重と圧子面に作用する変形抗力との平衡状態図

$$P(x) = \alpha \int_0^x H(\xi) (x - \xi) d\xi \quad (2 \cdot 20)$$

の関係式が成立する。この式を二階微分すると、

$$d^2P/dx^2 = \alpha H(x) \quad (2 \cdot 21)$$

となり、試料表面から深さ x 点における抗力 $H(x)$ は連続微小押し込み法によって得られる荷重-押し込み深さ曲線 $P(x)$ の二階微分値をもって表

わされる。

一方、式 2・19 を二階微分すれば、

$$d^2P/dx^2 = \alpha \left\{ \frac{x^2}{2} \bar{H}''(x) + 2x \bar{H}'(x) + \bar{H}(x) \right\} \quad (2 \cdot 22)$$

となり、式 2・21 と式 2・22 の右辺が相等しくなるためには、硬さ値 $\bar{H}(x)$ と抗力 $H(x)$ との間に次式が成立しなければならない。

$$H(x) = \frac{x^2}{2} \bar{H}''(x) + 2x \bar{H}'(x) + \bar{H}(x) \quad (2 \cdot 23)$$

ところで、この二階微分方程式の一般解を求めることは困難である。そこで、以下の二つの場合について検討する。

まず、素地材料への圧子押込みのような、 $\bar{H}(x) = H_0 = \text{一定}$ という条件の場合、式 2・23 より $H(x) = \bar{H}(x) = H_0$ が成立する。すなわち、相似則が成立する場合、硬さ値 $\bar{H}(x)$ は荷重-押込み深さ曲線の二階微分値で表わされ、そのときの押込みによる変形領域は図 2・8 の変形モデルに一致する。

$\bar{H}(x)$ が変化する場合、 $H(x)$ と $\bar{H}(x)$ とは同値とみなすことができない。しかし、 $H(x)$ より押込み変形挙動を見出すことができる。このとき、任意の点 x より $\bar{H}(x) = H_0 (\beta - a_H x)$ あるいは $\bar{H}(x) = H_0 (\beta + a_H \cos x)$ の変化をする場合（ここで $\bar{H}(x) > 0$ である）、 $H(x)$ は $\bar{H}(x)$ に応じて変化するが、 β や a_H の大きさいかんによっては負の値も取りうる。負の値に対しては、任意の点に到達する瞬間に押込み速度より材料の変形速度の方が大きく、見かけ上抗力低下をきたすという解釈ができる。変形領域に関しては、当然ひずみ硬化分布模様が変わると見なされる。

以上の結果、荷重-押し込み深さ曲線の二階微分値すなわち $H(x)$ でもって材料の硬さや圧子押し込み挙動を求めればよいことがわかった。しかし、通常曲線の二階微分値を求めることは困難であるため、一階微分値の荷重変化率値からそれらを求めればよい。

2・5・2 素地材料が表面膜を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線

最初に、素地材料の場合を考えてみる。このとき、硬さ値 $\bar{H}(x)=H(x)=H_0$ (一定)となり、式2・21より、圧子を材料表面から深さ x まで押し込んだときの荷重-押し込み深さ曲線 $P(x)$ は、

$$P(x) = \frac{\alpha}{2} H_0 x^2 \quad H_0 = \text{一定} \quad (2 \cdot 24)$$

と求まる。これは座標軸の原点を通る二次式として表わされる。これを荷重変化率曲線で示すと、図2・14の曲線①となる。

次に、素地材料が均一な材質の単一表面膜(硬さ値 $\bar{H}(x)=H_1$)を有する場合、図2・14の \overline{OA} に相当するStage Iの押し込み範囲において、

$$P(x) = \frac{\alpha}{2} H_1 x^2 \quad (2 \cdot 25)$$

$$H_1 = \text{一定}$$

と求まり、この荷重変化率曲線は図2・14の曲

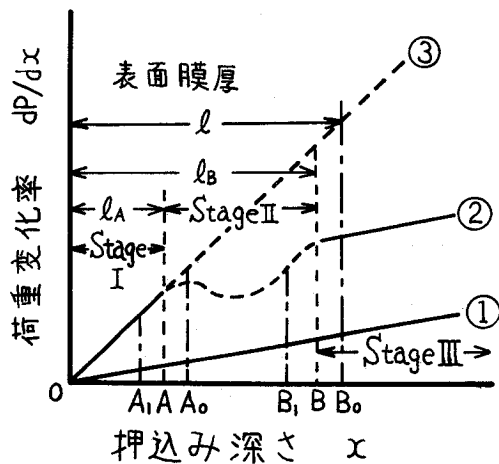


図2・14 荷重変化率曲線

線③に相当する。図 2・14 の B 点以後に相当する Stage III の範囲で、その荷重-押し込み深さ曲線 $P(x)$ は、

$$P(x) = \frac{\alpha}{2} \{ H_0 x^2 + 2 \ell_B (H_1 - H_0) x + \ell_B^2 (H_1 - H_0) \} \quad (2 \cdot 26)$$

となる。これは荷重変化率曲線として図 2・14 の曲線②で表わされる。ただし、 ℓ_B は \overline{OB} に相当する押し込み深さである。また、図 2・14 中に示した A_1, A_0 点はそれぞれ 2・4 節で述べた深さの限界値 x_1, x_0 に相当し、 B_1, B_0 点はそれぞれ限界値 x_3, x_4 に相当する。

以上の結果、素地材料が均一な材質の単一表面膜を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線は、表面膜自体の 2 乗曲線から Stage II を経て素地材料自体の 2 乗曲線へとなめらかな変化を示すことがわかった。また、Stage I から Stage II への移行において変形挙動上特徴的な変化の見られることがわかった。すなわち、 $\beta < 1$ の場合、素地材料の硬さ値の方が表面膜の硬さ値より大きいので、なめらかな移行となる。一方、 $\beta > 1$ の場合、 A_1 点以上に圧子押し込みが進んだとしても、表面膜の弾性条件が大きく作用し、素地材料に対しある未知の分布荷重が作用したと同じ条件となり^{*}、この分布荷重がある値を越えると、急に素地材料内へ変形が進行するような急激な移行を示すものと考えられる。

素地材料が表面層を有する場合にも上述のような変化をするものと考えられるが、この場合 Stage I と Stage II の区別は困難になると思

^{*} 弾塑性限界近傍で押し込み変形は球状に進行することを考慮する^{29), 30), 50)}。

われる。そこで、Stage IIからStage IIIへの移行点に相当する押し込み深さを l_B 、押し込みが $0 \sim l_B$ の間にあるとき、材料の示す抗力を $H(x)$ とおけば、表面層を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線は次式となる。

$$P(x) = \frac{\alpha}{2} H_0 (x^2 - 2 l_B x + l_B^2) + 2 \int_{x-l_B}^x dx \int H(x) dx$$

(2 ・ 27)

この式の右辺の一項目は押し込み深さ x が l_B 以上において成立し、二項目は $0 \leq x \leq l_B$ において成立する。したがって、この式は素地材料の荷重-押し込み深さ曲線を表面層に依存する量だけ x, y 両軸方向に、平行移動したことを意味する。

加工層の問題を取り上げた松井¹⁵⁾の改良微小硬度法は式2・27中 $H(x)$ を x の一次式に置換えたものに相当し、黒木ら¹⁷⁾の押し込み深さ曲線と表面硬軟化層深さに関する報告は式2・27と類似の結果を表わすと思われる。

2・6 ま と め

解析結果は次の通りである。

- (1) 二次元および三次元圧子押し込みの場合共に、平均接触圧力、その降伏応力比ならびに弾塑性限界線は、材料の加工硬化指数、予ひずみ率ならびに圧子角によって一義的に定まり、下記の諸点を明らかにすることができた。

すなわち、圧子角が小さくなると焼鈍材に近いほど押し込み力を必要とし、十分な加工材に近いほど押し込み力が少なくてよいこと、平均接

触圧力と相当降伏応力との比は、圧子角のみの関数となること、圧子押込みの変形型式には圧縮型と切削型ないしは亀裂型があり、圧子角と予ひずみによって変形型式の違いが生じること、くさび押込みによって生じる弾塑性限界線の最大深さは、角錐または円錐圧子押込みによるものの2～5倍以上であり、焼鈍材のように予ひずみの小さい材料の変形領域は従来の理論結果よりはるかに大きく求まること、および特にこれらの諸点は予ひずみに依存する度合いが高いこと等である。

(2) 圧子押込みによる変形領域内のひずみ硬化分布模様が押込み量に依存しない場合、硬さ値は荷重－押込み深さ曲線の2階微分値から求めることができる。

(3) 素地材料の荷重－押込み深さ曲線は座標軸の原点を通る2次式で表わされ、この素地材料が表面層を有する場合の荷重－押込み深さ曲線は表面層自体の荷重－押込み深さ曲線からStage IIIの段階で素地材料に関する一般の2次式として表わされる。

中でも、単一表面膜を有する場合の圧子押込み変形挙動の考察から、表面膜を有する場合の圧子押込みはStage I → Stage II → Stage IIIという段階的な変形過程から成り立ち、この現象は表面膜の加工硬化指数、予ひずみ率ならびにポアソン比、表面膜と素地材料の硬さ比および圧子角に依存することが明らかとなった。

第3章 圧子押し込み試験による近似解 ならびに変形挙動の検討

3・1 ま え が き

第2章では、三つの基本的仮定のもとで、均一な材質で加工硬化性を有する材料の圧子押し込みに関する理論的展開を行なった。その結果、圧子押し込み変形は材料の予ひずみに大きく依存することが明らかとなった。

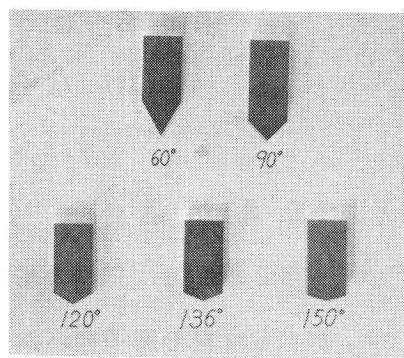
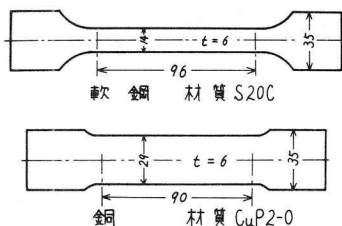
そこで本章では、ほぼ完全焼鈍したのち、ひずみを与えた試料に対するくさび押し込み試験ならびに角錐および円錐圧子押し込み試験を行なった。そして、各々の圧子押し込み変形挙動の特色、圧子面に作用する平均接触圧力 P_m 、降伏応力比 C_0 、 C_θ および変形領域を実験的に求め、第2章で述べた理論の適用範囲を検討した。

また、素地材料がめっき膜を有する場合に対する円錐圧子押し込み試験を行ない、素地材料が均一な材質の単一表面膜を有する場合の解析結果との比較検討を行なった。

3・2 くさび押し込み試験⁴⁰⁾

3・2・1 実験方法

試料の寸法および材質は図3・1の(a)に示した通りであり、単純引張りひずみを与える関係上、試料の形状は通常の引張り試験片に類似なものとした。平行部をバフ仕上げしたのち、軟鋼は870℃で、銅は650℃で6時間真空焼鈍を行った。以後これらを焼鈍材と称する。くさびの材質にはSK5(角材: 20×20 mm²)を用い、くさび面は焼入れ後ラップ仕上げを行った。図3・1の(b)に示したように、実験に用いたくさ



(a) 試料の寸法・材質

(b) くさび圧子

図 3・1 試料ならびにくさび圧子

び角は 60° 、 90° 、 120° 、 136° および 150° の 5 種であり、刃の寸法は 20 mm である。

インストロン型引張り試験機を使って、 $0\sim 30\%$ までの引張りひずみ（引張り速度 0.5 mm/min ）を焼鈍材に与え、予ひずみとした。引張り後焼鈍材に引いた標線（公称 60 mm ）の残留伸び量を測定し、予ひずみ ϵ_0 を求めた。一様ひずみの条件ができるだけ満足されるように、予ひずみの値は 30% までにとどめた⁴³⁾。この場合弾性ひずみは無視することができた。

真応力-対数ひずみ線図から求めた加工硬化指数 n と予ひずみ ϵ_0 の対数ひずみ $\bar{\epsilon}_0$ との比を予ひずみ率 i とし、予ひずみ ϵ_0 に相当する応力を初期降伏応力 σ_0 とした。真応力 $\bar{\sigma}$ および対数ひずみ $\bar{\epsilon}$ はそれぞれ $\bar{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon)$ 、 $\bar{\epsilon} = \ln(1 + \epsilon)$ の関係式⁴³⁾ から算術的に求めた。算術的に求めた真応力値と実験から求めた真応力値との差は 1% 以内であった。

くさび押し込み試験（押し込み速度 0.2 mm/min ）は、引張り方向と直角な

方向で行ない，グリースを潤滑剤とした。押込み面は試験片の厚さに相当する面であり，引張り後の面仕上げは行っていない。押込み面上の圧痕間隔は10mm以上とし，同一くさび角に対し2回の圧子押込みを行った。引張りによる残留伸びおよび圧子押込みによる圧痕幅の測定は読取り顕微鏡で行った。伸びおよび引張り荷重の精度はそれぞれ50 μm ，3 kgであり，図 2・1 中 2a に相当する圧痕幅および押込み荷重（150～180 kg）の精度はそれぞれ50 μm ，0.5 kgである。

くさび押込みの実験では二次元流れの条件を満たす必要があり，また押込み方向の試料の厚さによっては圧子下の変形領域の影響を考慮しなくてはならない。まず二次元流れの条件を満たすには，圧子押込みによる試料の両側面への変形を拘束する必要があるが，拘束の仕方によっては摩擦力の影響が大きいと考えられ，これらの方向への変形は自由とした。押込みと共に圧子下に進展する変形領域による影響^{24),28),51)}を考慮し，押込み量は圧痕幅にして1.0～1.2 mm内とした。実測した側面への変形は試料厚さの1%にも満たず，平均接触圧力への影響は小さいと考えられる。

一方，同一試験片に引張りひずみと圧子押込みを多数回繰り返し与えることは非常に困難である。その理由の一つは，一個の試験片の平行部における押込み回数が限定されるためであり，他の一つは，圧子押込みを行ったのちさらに試料にひずみを与えると圧痕近傍に局部変形が生じ，伸びならびに引張り荷重の測定が困難になるためである。そこで焼鈍材として同一の板材から5個の試験片を作製し，各試験片に所定のひずみを与えた。各焼鈍材の応力-ひずみ線図はほぼ同形で，その差異は無視できた。

圧子押込みによる変形領域については、圧痕断面を15%硝酸液でエッチングし、領域内の組織観察を行った。また試験荷重 100 g で微小ビッカース硬さ試験を行い、断面上での硬さ分布を求めた。この断面は加工硬化の影響が生じないようにエメリーペーパーで試料の厚さを 1.5 mm 削除し、十分電解研磨したのち、わずかにエッチングした試料側面である。図 3・2 には頂角 136° のくさびを銅試料に押し込んだときの試験例を示している。ビッカース圧痕相互の最小間隔は 100 μm 以上とし、圧子先端はできるだけ粒界をさけ粒内に入るように押し込みを行った。銅焼鈍材の平均粒度は 120 μm であり、予ひずみが大きくなると引張り方向に結晶粒の流動変形が見られた。これらの組織写真をそれぞれ図 3・3 の(a)および図 3・3 の(b)

に示した。

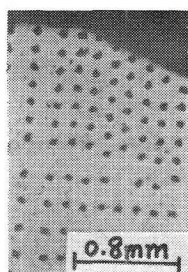
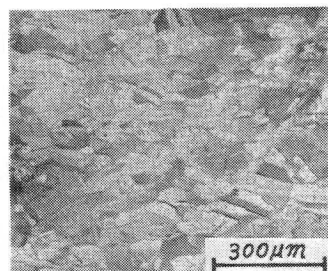


図 3・2 圧痕断面上の
微小ビッカース
硬さ試験例



(a) 焼鈍材



←→ 引張り方向

(b) 予ひずみ (32.2%) を
与えた場合

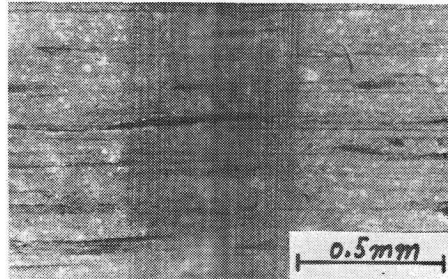
図 3・3 銅試料の組織

3・2・2 変形挙動の特色

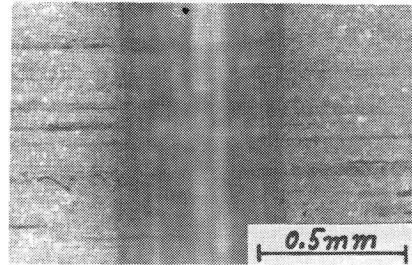
まず、くさび押し込みによって生じた圧痕面、試料側面への変形および圧痕断面の組織の観察を行った。その観察結果の一部を図 3・4 に示す。図中(a), (b)および(c)は圧痕近傍の表面写真であって、(a)では圧痕

面と試料表面の間に変形による状態の違いはほとんど見られない。しかし(b)および(c)では、押し込みの結果圧痕面に試料表面の亀裂が見られる。これは図中白い条痕をなしている。くさび角 60° および 90° の場合には予ひずみに関係なくすべての圧痕面に亀裂が見られた。くさび角 120° 以上になると予ひずみの大きい場合に亀裂が生じた。

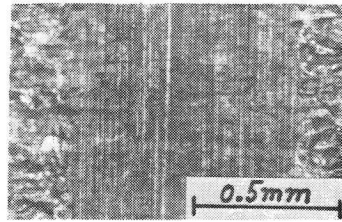
写真(d), (e), (f)および(g)は予ひずみ率 i を変えた場合の試料側面に現われた変形領域を示すもので、この輪郭は押し込みによって側面にはみ出した変形の外郭とほぼ一致する。(d)および(e)の場合は圧縮型押し込みに、(f)および(g)の場合は切削型押し込みに近いことがわかる。また、圧子下の変形は圧子



(a) くさび角 $2\theta = 136^\circ$ 銅焼鈍材

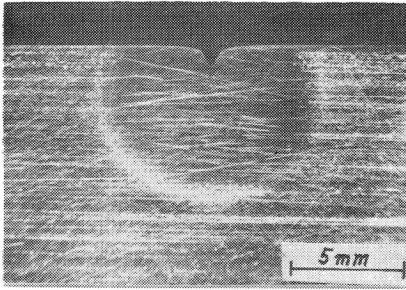


(b) くさび角 $2\theta = 90^\circ$ 銅焼鈍材

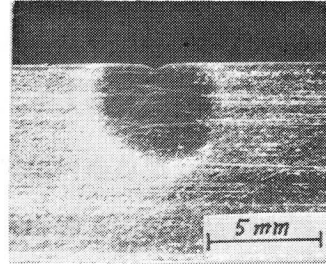


(c) くさび角 $2\theta = 150^\circ$ 軟鋼
予ひずみ率 $i = 1.17$

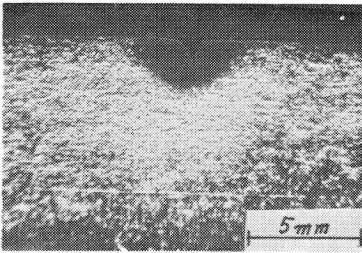
図3・4 圧痕面，側面にあらわれる変形模様ならびに圧痕断面の組織に関する観察結果
(その1)



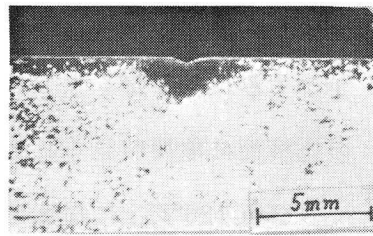
(d) くさび角 $2\theta = 60^\circ$ 軟鋼焼鈍材



(e) くさび角 $2\theta = 136^\circ$ 軟鋼焼鈍材



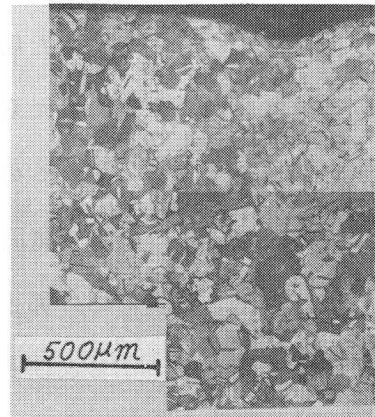
(f) くさび角 $2\theta = 60^\circ$ 軟鋼
予ひずみ率 $i = 1.17$



(g) くさび角 $2\theta = 136^\circ$ 軟鋼
予ひずみ率 $i = 1.17$



(h) くさび角 $2\theta = 90^\circ$ 銅焼鈍材



(i) くさび角 $2\theta = 136^\circ$ 銅焼鈍材

図 3・4 圧痕面，側面にあらわれる変形模様ならびに圧痕断面の組織に関する観察結果（その 2）

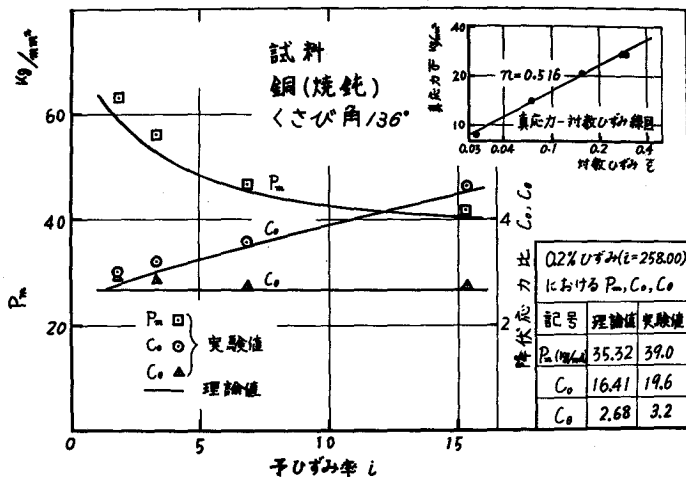
先端から十分深い所で円形状に進行することもわかる。このような側面へはみ出した変形を観察することによっても、くさび押込みの変形模様を定性的に知ることができる。Wondris⁵²⁾やLee⁵³⁾も腐食法によって材料内部のひずみ模様を求め、圧子下の変形は円形状に進展すると報告している。

結局、くさびの押込み変形には圧縮型押込みと切削型押込みおよび亀裂型押込みがあり、これは材料の予ひずみとくさび角に依存することが明らかになった。この変形型式の違いについては戸澤ら^{54),55)}の実験結果と一致する。

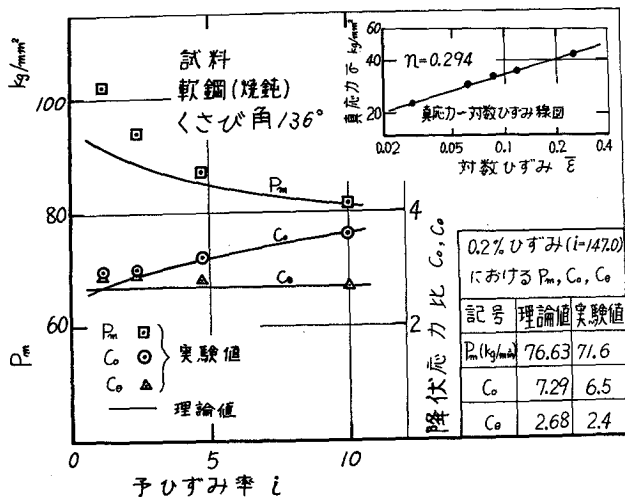
写真(h)および(i)は圧痕断面の組織観察を行ったもので、圧痕近傍に結晶粒の流動変形を見ることができる。この近傍では理論で仮定した領域 I の条件が満たされている。この現象は予ひずみの異なる場合でも同様に観察されるが、予ひずみが十分大きくなると予ひずみを負荷した時点で流動変形を生じており、それとの差異を見わけるとは困難になる。

3・2・3 平均接触圧力および降伏応力比

軟鋼および銅試料に予ひずみを与え、くさび角 136°の圧子による押込みを行った。このときの平均接触圧力 P_m ならびにその降伏応力比 C_0 、 C_θ の実験結果は図 3・5 に示す通りである。図中実線は摩擦力（摩擦係数 μ を 0.1 と仮定した）が作用するとみなしたときの理論値であり、記号は実験値を表わす。平均接触圧力 P_m の各点での値はそれぞれ 2 回の測定結果の平均値であり、2 回の測定値の間には 5 ~ 10% の差があった。また、 P_m はくぼみ投影面積当りの平均圧力を表わす。予ひず



(a) 銅 試料

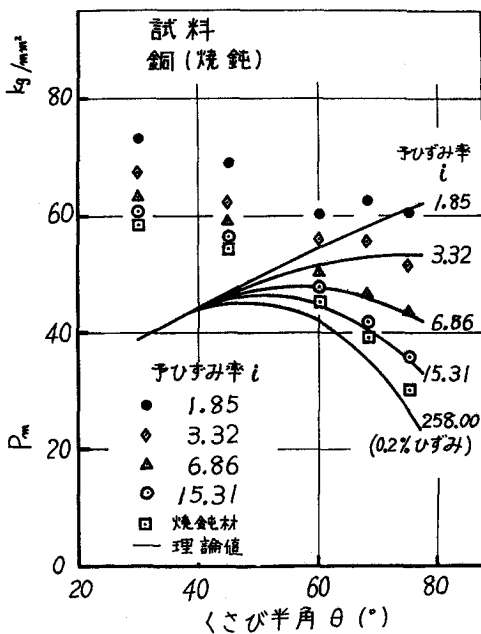


(b) 軟鋼 試料

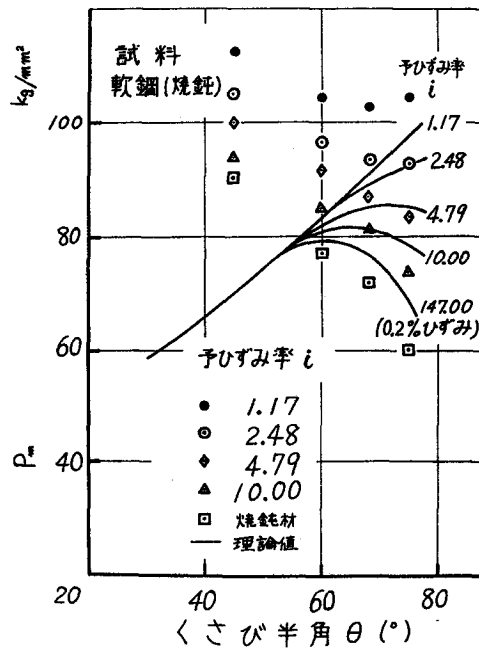
図 3・5 くさび押し込みによる予ひずみ率と平均接触圧力およびその降伏応力比 C_0, C_θ との関係

み率 i が 3 以上の場合、実験結果は理論の傾向をよく表わしている。降伏応力比 C_θ の実験結果は軟鋼および銅共にほぼ一定値とみなされる。戸澤ら⁵⁴⁾ の実験結果からも推察されるように、このことは平均接触圧

力値 P_m が圧痕の極く近傍の変形応力にその大部分が依存することを意味するものと思われる。また、代表ひずみ ϵ_p についていえば、その値は圧痕面が試料表面の単純伸びによって形成されると考えたときのひずみ値に依存することを意味している。しかし、 i が 1 に近くなると実験値は理論値よりかなり大きく求まる。この理由の一つに、この条件のとき押し込み変形は亀裂型となり、その結果圧痕近傍の局部変形に必要な応力増加が考えられる。他方ひずみが大きくなると、試料には三次元的なひずみ硬化ならびにひずみの方向性が生じるため、押し込みに必要な応力増加が考えられる。また、予ひずみの大きいほど表面あらかの影響が大きくなるとも考えられる。図中の表に示すごとく、各焼鈍材の実験値は 0.2% ひずみに相当する応力を降伏条件として式



(a) 銅試料



(b) 軟鋼試料

図 3・6 くさび押し込みによるくさび角と平均接触圧力との関係

2・11 から求めた理論値に近い。

図 3・6 はくさび半角 θ と P_m の関係を表わし、理論値と実験値は θ が $60^\circ \sim 75^\circ$ の範囲においてほぼ 15% 内で一致している。特に、予ひずみが小さいとき、すなわち予ひずみ率 i の大きいとき、 θ が小さくなるとともに P_m の値は大きくなり、 i が 1 に近づくに従って一定となり、ついには減少するという実験的傾向が理論的に求められている。Dugdale^{56), 57)} や Atkins²⁶⁾ らも硬さ試験を行ない同じ傾向を認めている。しかし、 θ が 60° 未満ではくさび角が小さいほど実験値は理論値より大きくなる。これは図 3・4 の箇所でも述べたように、主に圧痕近傍の局部変形に起因するものと考えられるが、 θ が小さくなると摩擦の影響がより大きくなるためとも思われる。

以上、図 3・5 および図 3・6 の結果から、圧縮型押し込みとみなされる範囲内で平均接触圧力 P_m の実験値と理論値は一致し、焼鈍材の P_m の値は 0.2% ひずみに相当する応力を降伏条件として求めた理論値で代表できることが明らかになった。

3・2・4 変形領域と予ひずみ率

図 3・7 は圧痕断面上の硬さ分布を示したもので、材料のものと硬さ値の変動範囲は 5% である。図中の数値はその領域内の最小値を表わし、微小塑性変形領域すなわち

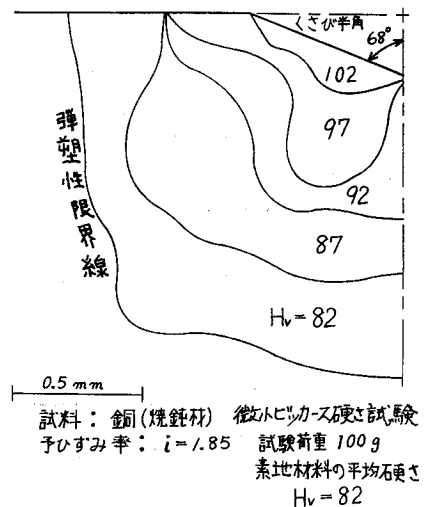


図 3・7 圧痕断面上の硬さ分布図

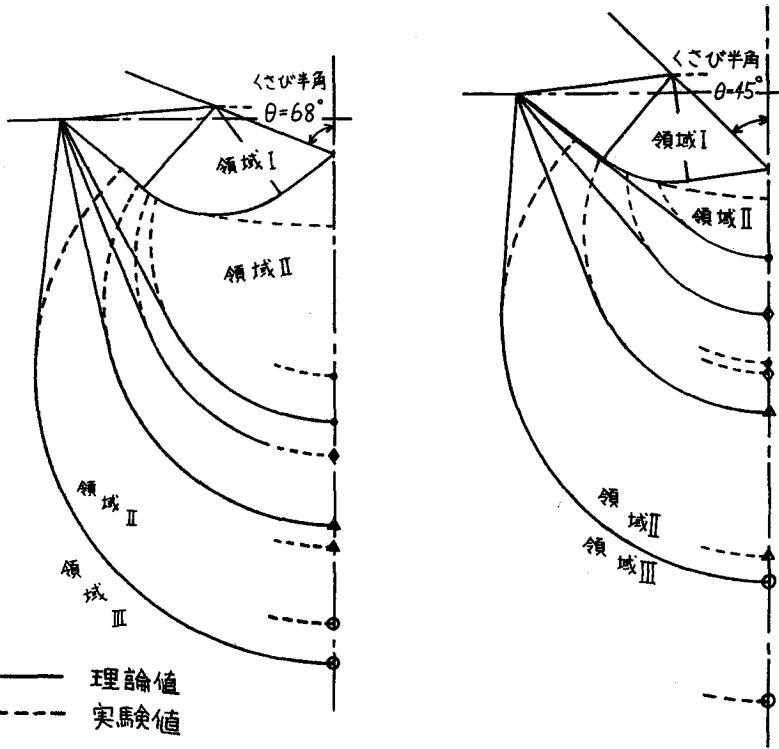
領域Ⅱに相当する箇所にもかなり塑性変形の及んでいることがわかる。材料のもとの硬さ値を示すようになる弾塑性限界近傍では、押し込み変形は円形状に進行している。この弾塑性限界線を求めるにあたっては図で示した位置を中心に最大 $a/2$ の誤差を考えなくてはならない。Milliams³⁰⁾も同じ方法で試験を行ない、圧子下の十分深い箇所での変形模様は円形状になると報告している。

この弾塑性限界線の最大深さ η と接触幅 a との比 K_0 を求め、表 3・1 に示す。表中、理論値の上段は式 2・11 から求めた平均接触圧力 P_m がポンチに作用したとみなしたときの値であり、下段は実験で得られた P_m が作用したとみなしたときの値である。計測誤差を考慮に入れると、実験値はほぼ両理論値の間にある。中でも、くさび半角 $\theta = 68^\circ$ の場合、実験値と理論値は非常に近い。

この関係を模式化したのが図 3・8 であり領域Ⅰは摩擦力（摩擦係数 $\mu = 0.1$ ）が作用する場合の拡張したすべり線場である。図中の記号は表 3・1 の記号と対応しており、理論線は上段の場合が示されて

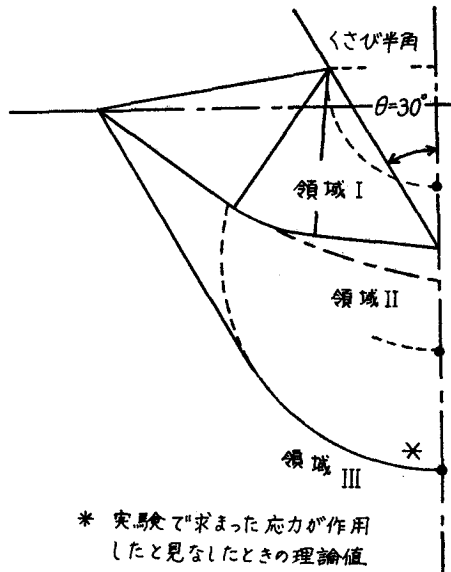
表 3・1 銅試料の予ひずみ率を変えた場合の K_0 の値

記号	予ひずみ率 ϵ	くさび半角 68°		くさび半角 45°		くさび半角 30°	
		理論値	実験値	理論値	実験値	理論値	実験値
●	1.85	2.71 3.00	2.3	1.93 3.59	3.6	1.13 3.85	2.7
◇	3.32	2.98 3.23	3.0	2.52 3.86	3.2	—	—
△	6.86	3.60 3.61	3.8	3.59 4.88	5.1	—	—
◎	15.31	4.78 4.91	4.4	5.38 6.93	6.7	—	—
□	258.00	18.08 21.54	19.5	22.92 30.34	21.0	19.78 35.12	20.0



(a) くさび角 $2\theta = 136^\circ$

(b) くさび角 $2\theta = 90^\circ$



(c) くさび角 $2\theta = 60^\circ$

図 3・8 変形領域の模式図

いる。図3・7の硬さ分布図によって示した変形領域は、図3・8の(a)で記号・に相当し、実線で示した理論値に近い。また、これらの模式図は図3・4の(d)~(g)の変形模様を定量的に表わしたものと考えることができ、焼鈍材に近い材料の変形領域の最大深さは、従来のすべり線場から得られるものよりはるかに大きいことが実験的にも確認できた。

主に硬さ試験を行なう際の試料の有効寸法を実験的に求めようとした報告^{28), 30), 52), 53)}では、そのほとんどは焼鈍した試料の圧子押込みによる変形領域が求められており、変形領域の最大深さと押込み量との関係には予ひずみの影響が考慮されていない。したがって、ポンチ押込みの弾性解を利用する方法は加工硬化性材料のくさび押込みによる変形挙動を知る上で非常に有効である。戸澤ら⁵⁵⁾も述べているように、変形領域の大小、あるいは形状は試料の予ひずみに依存することが明らかとなった。

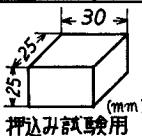
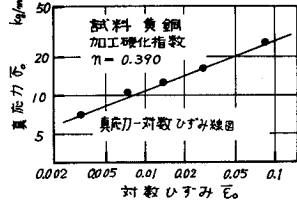
3・3 角錐および円錐圧子押込み試験⁴⁵⁾

3・3・1 実験方法

くさび押込みの実験と同様、試料には真空焼鈍後、電解研磨により表面仕上げをした焼鈍材を用いた。焼鈍材の材質、機械的性質ならびに寸法・形状は3・2の通りである。

インストロン型引張り試験機を用いて一個の試験片に0~30%までの引張りひずみを段階的に与え、その都度予ひずみ ϵ_0 を求めた。予ひずみの測定法および精度、引張り荷重の精度ならびに予ひずみ率 i および初期降伏応力 σ_0 の求め方などは、くさび押込みの場合と全く同じ

表 3・2 試料の機械的性質

	軟 鋼		銅		黄 銅 (60/40)
	着 者	Tabor	着 者	Tabor	
加工硬化指数 n	0.294	0.377	0.516	0.587	0.390
粒 度 (μm)	—	—	120	—	80
焼鈍材の硬さ Hv	90	156	34	39	85(荷重 100g) 73(荷重 100cg)
焼鈍条件 ($^{\circ}C$)	870	—	650	—	420~560 (N_2 ガス 封入)
表上 面げ 仕	焼鈍材 予ひずみ 負荷後	電解研磨	—	電解研磨	—
	なし	—	なし	—	銅めっき (厚さ 368 μm)
試験片の 寸法・形状	 <p>軟鋼と銅の場合はくさび押し込みの場合と同じ試料を用いたのど、ここでは黄銅のみについて述べる</p>  <p>35 (mm), 8 (mm), 3 (mm), 圧縮試験用</p>				
焼鈍材の降伏 応力 σ_p (kg/mm^2)	10.5	14.9	2.15	1.94	5.80
	0.2% ひずみに 相当				

である。

予ひずみを与えるごとに微小ビッカース硬さ試験を5回行い、その平均値をもって予ひずみ率 i における硬さ値とした。試験荷重は 1000g で、圧子の一つの対角線は引張り方向と一致した状態である。測定値の変動範囲は 5% 内であった。測定箇所としてはできるだけ試験片の中央部を選んだ。予ひずみを段階的に与えるに際し、前もって行った微小ビッカース硬さ試験による圧痕の影響は無視できた。予ひずみが大きくなると、材料表面は梨地模様を示すようになるが、梨地面の状態で行った。予ひずみによる異方性を考慮し、圧子の対角線を引張り方向に対して 45° とした場合の微小ビッカース試

験も同時に行ったが、実験の範囲内においてその影響は無視できた。

圧子押し込みによって生じた材料内部の変形状態を求めるため、黄銅試料に図3・9で示すような頂角の異なる2種の円錐圧子を使って、押し込み試験を行なった。この円錐圧子の材質はSK4で、その表面には表面焼入れ後ラップ仕上げを施した。また押し込み速度は0.5 mm/minで、押し込み荷重は150～400kgの範囲で行ない、グリースを潤滑剤とした。押し込み量と円錐角の精度はそれぞれ50 μm、10′である。

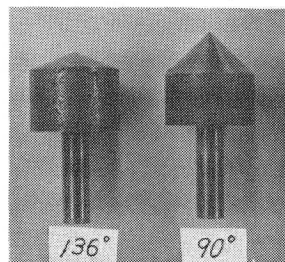


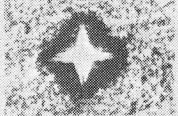
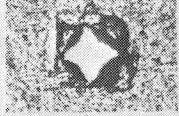
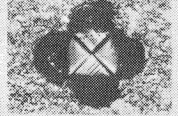
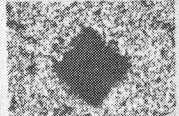

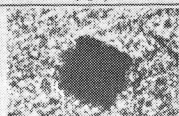
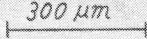
図3・9 円錐圧子

円錐圧子を押し込んだのち、圧痕の垂直断面を取り、この垂直断面に20%硝酸液でエッチングを施したのち、変形領域の組織観察を行った。また、試験荷重100 gで微小ビッカース硬さ試験を行ない、この断面上での硬さ分布を求めた。微小ビッカース硬さ試験では圧痕の大きさが28～47 μm内にあることから、圧痕相互の最小間隔を100 μm以上とし、圧子先端はできるだけ粒界をさけ粒内に入るように押し込みを行った。さらに、黄銅に銅めっきを施した試料に円錐圧子を押し込み、このときの圧痕断面の観察を行った。めっき浴の成分は硫酸銅200 g/lと硫酸80 g/lであり、電流密度は2.0 A/dm²である。また、断面の観察法は上記と同じである。

3・3・2 変形挙動の特色

表3・3はダイヤモンド製角錐圧子押し込みによる圧痕近傍の表面写真であり、予ひずみと圧子角とを変えたときに生じる圧痕表面形状の違い

表 3・3 銅試料の圧痕表面形状

予ひずみ ϵ_0		$\epsilon_0 = 0$ 焼鈍材	$\epsilon_0 \approx \epsilon_n$ (引張り強さに相当)	破断点近傍
圧 子 角 (°)	90	 (a)	 (b)	 (c)
	120		 (d)	 (e)
	136		 (f)	

を求めている。表中の写真(a)について見るならば、圧痕面中白く光っている部分は、圧子押し込みによって焼鈍材の表面に亀裂が生じた結果、表面下の材料が新たに圧痕表面を形成する所であり、三角状の黒い部分は焼鈍材のもとの面が圧痕面を形成している所である。写真(b)から(c)へと予ひずみが大きくなるほど、圧痕表面には焼鈍材のもとの面から形成される部分は少なくなり、表面下の材料によって形成される部分が多くなる。写真(c)の場合は表面下の材料のみによって形成されており、その押し込み型式は切削型に近い。圧子角が90°以下の場合、押し込み型式は予ひずみのいかんにかかわらず全て亀裂型であった。圧子角が136°以上になると、押し込み型式は写真(f)のごとく全て圧縮型であった。圧子角が120°の場合、押し込み型式は予ひずみが引張り強さに相当するひずみ以下のとき、写真(d)のような圧縮型であるが、予ひずみが十分大きくなると、写真(e)のごとく

亀裂型となった。

したがって、予ひずみ ϵ_0 が小さいとき、すなわち $\epsilon_0 < \epsilon_n$ のとき、 120° 、 136° および 150° の角錐圧子による圧痕表面は試料表面の伸びによって形成されると考えてもよい。また圧痕近傍の変形は圧子角によらず、焼鈍材に対しては沈降型であり、 $\epsilon_0 \geq \epsilon_n$ では盛り上り型となっている。

以上の結果はくさび押込みの場合とほぼ同じであって、圧子による押込み変形は予ひずみと圧子角に依存することがよくわかる。

図3・10の(a)、(b)は黄銅試料に円錐圧子を押込んだときの圧痕断面の組織写真である。(a)は円錐角 136° の実験結果であって、圧痕近傍に材料の流動変形域の存在が認められ、この流動変形が最大と思われるところは圧子先端下押込み深さの約1.5倍近傍にあたる。この箇所を拡大したのが(c)である。材料表面への盛り上り量は微小であり、この近傍での流動変形は認めることができない。円錐角 90° の場合、(b)に示すごとく流動変形域は圧痕面の中央部で最も顕著に生じており、この拡大図を(d)に示した。この流動変形域は圧痕断面の中心軸を対称にして左右に2つ存在する。圧痕表面近傍の変形は粒子性が認められないほどに進んでおり、 136° の場合と比較してはるかに変形量の大きいことがわかる。川辺ら⁵⁸⁾の単結晶を使って行った実験においても、圧痕面の極く近傍における流動変形域が求められている。また、圧子角による変形模様の違いは、光塑性から圧子角と変形模様の関係を求めた西田の報告⁵⁹⁾と類似するものである。材料表面への盛り上り量は 136° の場合と同様に微小であり、この近傍における流動変形は見られない。図3・10の(e)は焼鈍材のもとの組織を拡大したものである。

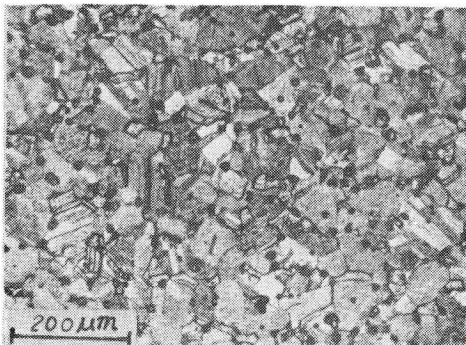
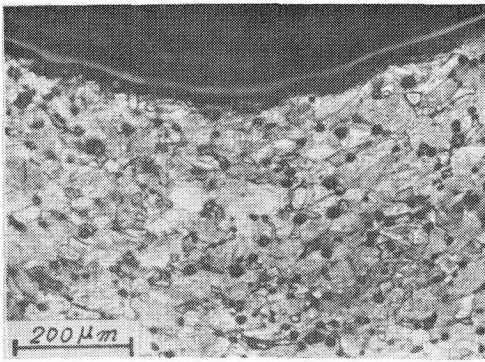
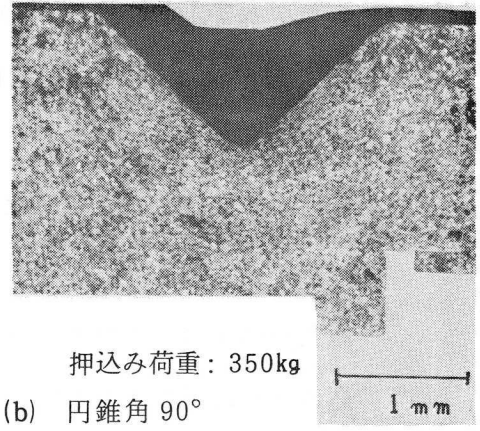
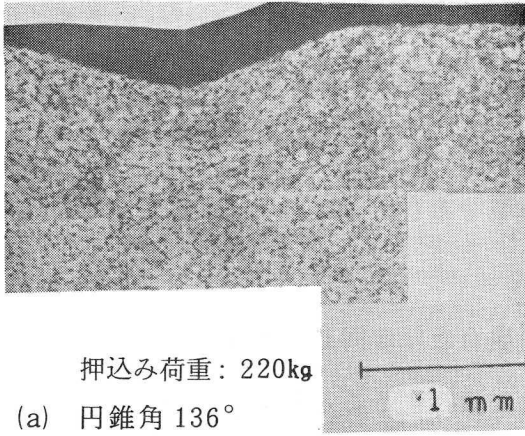


図 3・10 圧痕断面の組織観察

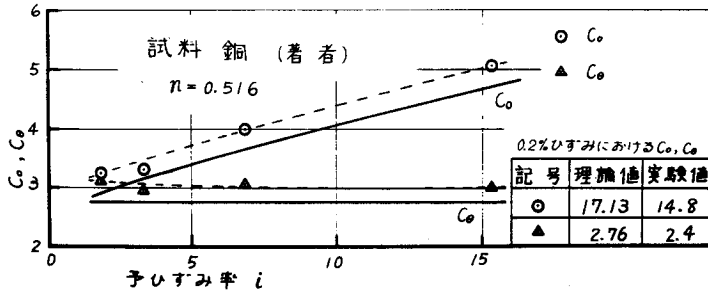
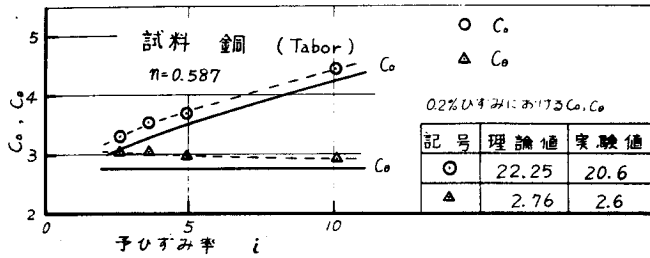
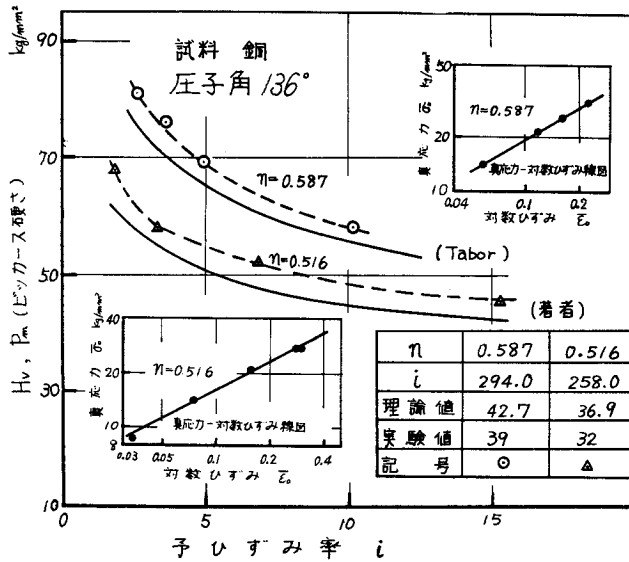
圧痕断面の変形挙動と圧痕表面の変形模様とを合わせて考えてみると、予ひずみと圧子角によって押し込み変形は圧縮型か亀裂型あるいは切削型の変形挙動をなすと考えられる。またこれらの結果は、戸澤ら^{54), 55)}がモアレ縞を使って求めた実験結果と同じ傾向を示している。

3・3・3 硬さ値および降伏応力比

軟鋼および銅試料の微小ビッカース試験を行い、図3・11に予ひずみ率 i とビッカース硬さ値およびその降伏応力比 $C_0 (= H_v/\sigma_0)$, $C_\theta (= H_v/\sigma_\theta)$ の関係を示した。また同時に、Tabor²¹⁾による実験結果も一部示した。図中記号は実験値を、実線は摩擦力が作用しないときの理論値をそれぞれ表わしている。

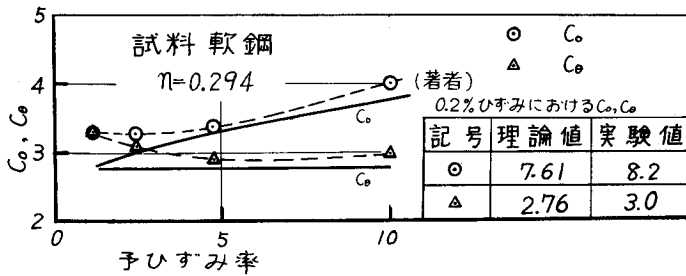
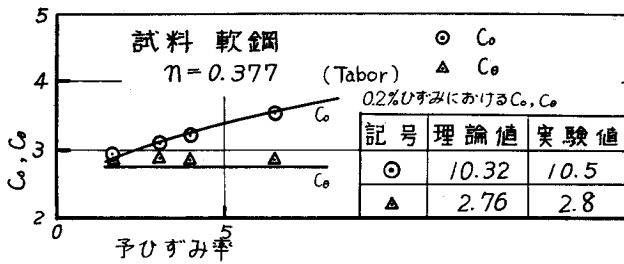
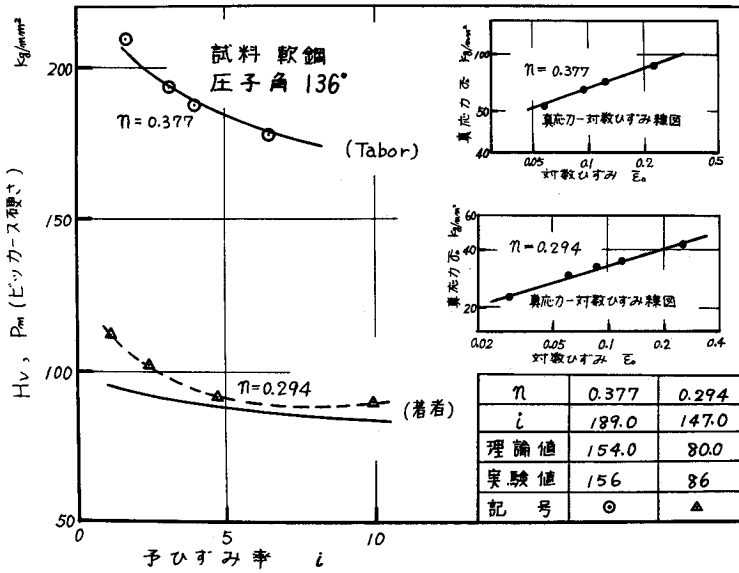
これらの実験結果はほぼ理論的傾向に一致しており、特に三次元圧子押し込みの場合でも降伏応力比 C_0 , C_θ の実験結果を見てみると、代表ひずみ ϵ_θ は圧痕面が試料表面の単純伸びによって形成されたと考えたときのひずみに依存することが判る。また、予ひずみの小さいほど C_0 の値は大きくなり、これは今までに求められた C_0 に関する実験結果^{21), 56)}と同じであるが、理論的には本論文でもって初めて明らかにすることができた。 C_0 の値は予ひずみ率が大きくなるに従ってある値に漸近する傾向が認められ、漸近値はほぼ理論値に近い。この傾向は他の圧子角 120° や 150° の場合にも成り立つことがわかった。 90° 圧子の場合にもこの漸近的傾向は認められるが、その漸近値は理論値より大きくなる。これは押し込み変形の違いによって生じたものと考えられる。

予ひずみが大きくなると、実験値は理論的傾向からはずれるようになるが、これは一様ひずみの条件が成立しなくなることや表面あらし



(a) 銅試料の平均接触圧力とその降伏応力比 C_0, C_θ

図 3・11 角錐圧子押し込みによる予
応力比 C_0, C_θ との関係 (一



(b) 軟鋼試料の平均接触圧力とその降伏応力比 C_0, C_0

ひずみ率と平均接触圧力およびその降伏部の実験値は Tabor²¹⁾ による)

等の影響が著しくなるためである。図中の表に示すように、焼鈍材自体の硬さ値は 0.2% ひずみに相当する応力を降伏条件として求めた理論値によく一致する。

次に、円錐圧子の場合、Atkinsら²⁶⁾が求めた実験結果について、理論値との比較を行ってみた。図 3・12の(a), (b)から、圧子半角 θ が 60° から 75° の範囲において、軟鋼および銅試料の実験結果は共に理論値に近いことがわかる。中でも、 θ がこの範囲において、同一材料でも予ひずみが小さいとき、圧子角の小さいほど硬さ値は大きく求まり、

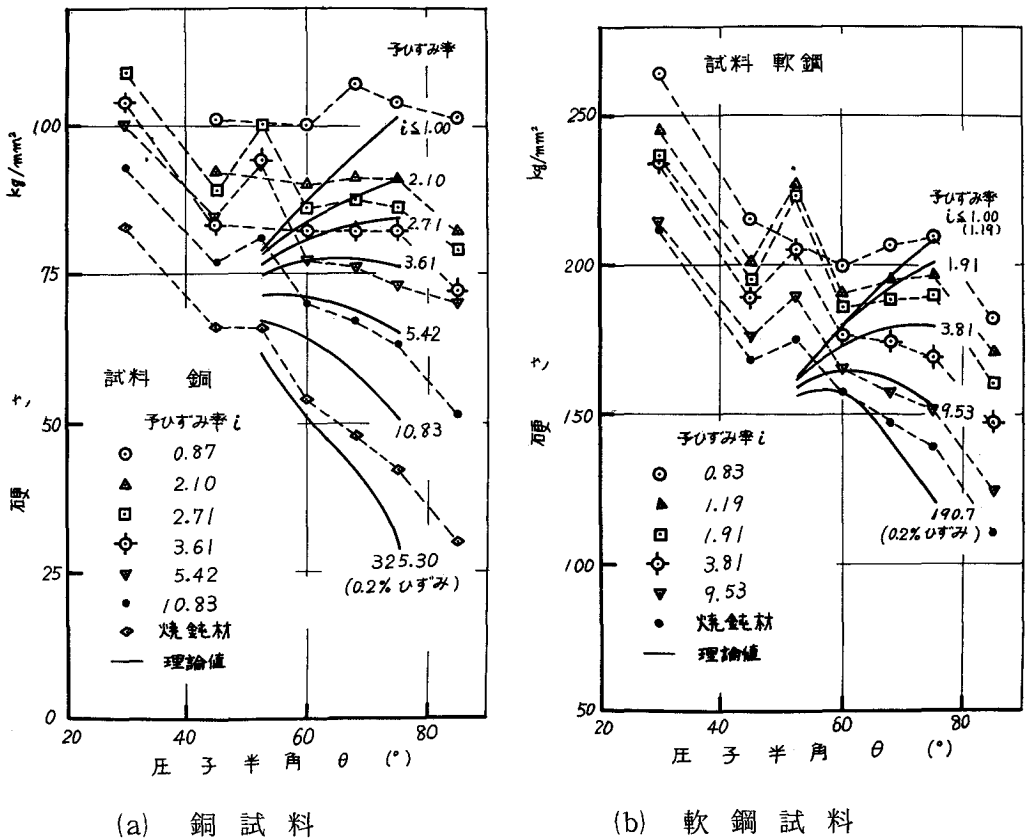


図 3・12 円錐圧子押し込みによる円錐角と平均接触圧力との関係 (実験値は Atkins, et al.²⁶⁾による)

予ひずみが大きくなると、すなわち加工硬化が増すに従って、硬さ値は小さく求まるという実験結果を理論的に十分説明することができる。しかし、 θ がこの範囲をはずれると、実験結果は理論的傾向からはずれてくるが、その理由は前述の角錐圧子の場合と同様、主に一様ひずみの条件が満たされないためと考えられる。

圧子角が 136° の場合の加工硬化指数 n と降伏応力比 C_0 との関係を求めたのが図 3・13 である。接触面に作用する摩擦や表面あらか等の影響により理論的傾向とは必ずしも一致しないが、 C_0 の値は加工硬化指数 n によらず 2.6 ~ 3.2 の範囲内にあることがわかった。

3・3・4 代表ひずみ

図 3・14 は圧子角と代表ひずみ ϵ_0 の関係を示す。実験値は Atkins^{26), 27)} によって得られたものであり、理論値は試料の単純伸びが

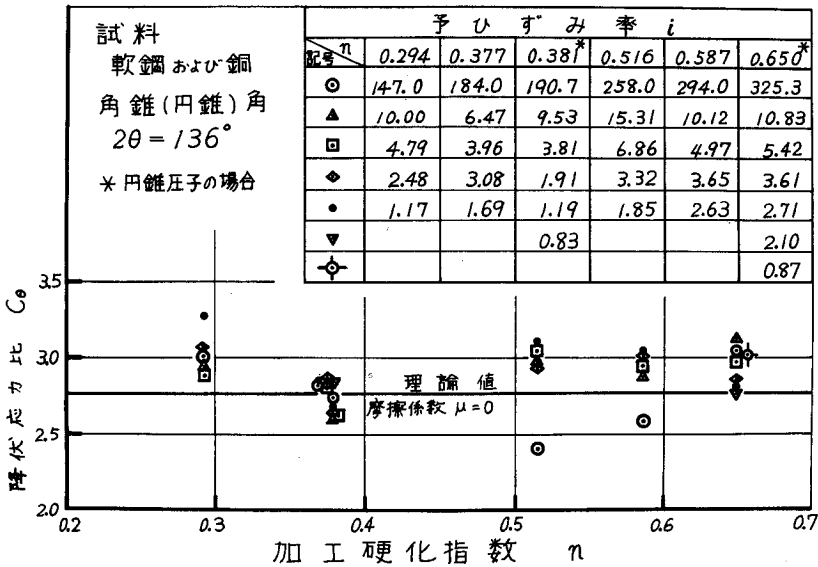


図 3・13 加工硬化指数 n と降伏応力比 C_0 との関係

無限に許されるとしたとき、式 2・4 から求めた値である。圧子角 2θ が $90^\circ \sim 150^\circ$ の範囲において、実験値は理論値に近い。

予ひずみの大きな試料になると、理論上例えば図中の破線で示したように代表ひずみの値は圧子角が 120° 以下一定と見なされる。したがって、予

ひずみの小さい場合と比べて予ひずみの大きい場合、代表ひずみの理論値と実験値とが一致する範囲は狭くなる。このことを平均接触圧力 P_m にふりかえて見るならば、同一材料でも予ひずみの小さいときは図 3・11 および図 3・12 に示す如く、圧子角の比較的広い範囲で実験値と理論値とは一致し、予ひずみが大きくなるに従ってそれらが一致する範囲は狭くなる。

以上の結果、代表ひずみ ϵ_θ は 2θ が $90^\circ \sim 150^\circ$ の範囲において、圧子角に依存すると見なしたひずみ値にほぼ等しいことがわかった。

ここで改めて押し込み荷重について考察してみる。降伏応力比 C_θ の実験結果がほぼ理論の傾向に一致し、代表ひずみ ϵ_θ の理論値がある限られた範囲内ではあるが実験値に近いということは、3・2・3 節で述べたと同様に、押し込み荷重の大部分は圧痕の極く近傍の変形抗力に

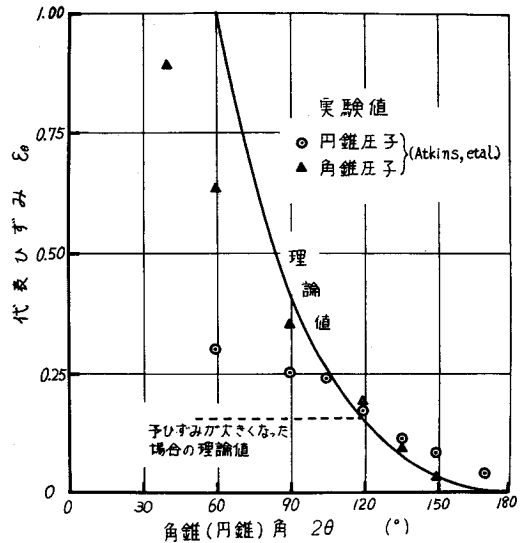


図 3・14 圧子角 θ と代表ひずみ ϵ_θ との関係 (実験値は Atkins, et al.^{26), 27) による)}

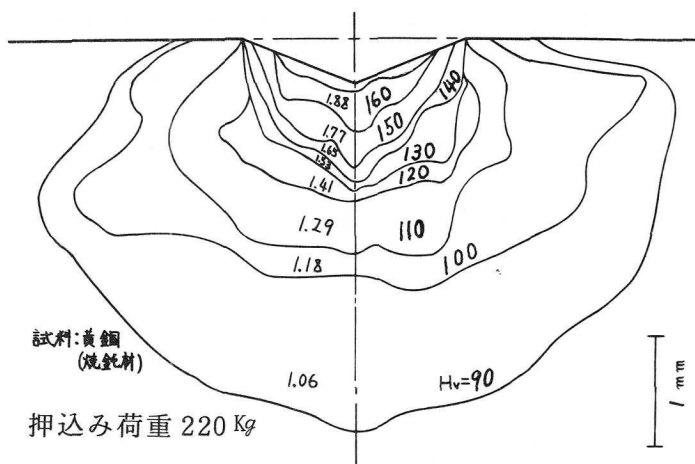
依存すると考えられる。また、このことは 3・2・4 節で圧痕断面の硬さ分布を求めるとき、圧痕の極く近傍の領域では 50 μm の縦間隔で、20 Hv 以上の硬さ変化を得ることができることから推察される。なお、横間隔は押込み変形相互の影響を受けないように 150 μm 以上に取っている。

3・3・5 変形領域

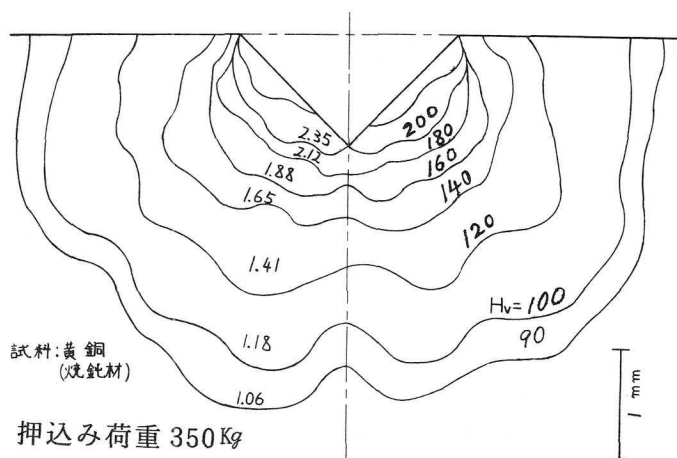
図 3・15の(a)および(b)の硬さ分布図はそれぞれ図 3・10の(a)および(b)で示した圧痕断面上で求めたものである。図中の数字のうち右側は硬さ値であり、左側はこの硬さ値と焼鈍材のもとの硬さ値との比である。これらの値はその領域内の最大値を示す。

このような結晶性を示す試料の硬さ値を求めるにあたっては結晶粒の大きさによる影響、すなわち圧痕が粒内に完全に入るような押込みとなる場合、個々の結晶粒の結晶方位の違いから生じる硬さ値の違い⁶⁰⁾や粒界押込みによる硬さ値の違いなどを考慮しなくてはならない。しかし、本実験の場合、結晶粒の大きさは最も大きくて圧痕の対角線長さの 1.5 倍であり、測定結果は測定箇所近傍の平均的ひずみに依存すると考えてよい。焼鈍材のもとの硬さ値は粒内、粒界をとわずその変動幅は 5 %であった。

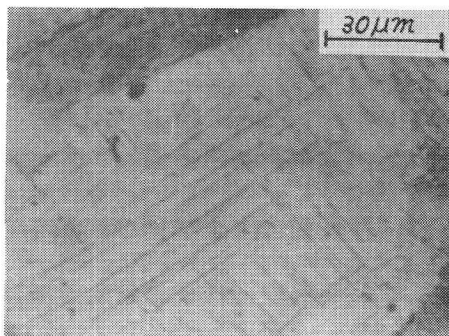
組織観察からも判断できるように、圧子角の小さいほど圧痕面近傍の硬さ値は大きく、押込みに際し試料表面に大きな伸び変形をもたらすことがわかった。また、組織観察から求められる流動変形域は、両円錐角共に硬さ分布図において硬さ値が $H_v = 130 \sim 140$ 以上の領域に相当し、理論上想定した変形領域 I にほぼ等しい。



(a) 円錐角 136°



(b) 円錐角 90°



(c) 領域 II における結晶粒内のすべり変形

図 3・15 圧痕断面上の硬さ分布図

この硬さ分布図から、流動変形域と弾塑性境界線に至るまでの中間領域が領域 II として決定できる。図 3・15 の(c) に示した領域 II 内の組織写真では、粒内すべりが認められる。圧子先端から十分深い所にある弾塑性境界線は三次元的にはほぼ押し込み方向に凸の球面を成している。この弾性境界線を求めるにあたっては、図で示した位置を中心に最大 $a/2$ の誤差を考えなくてはならない。したがって、円錐圧子による押し込み変形は、材料表面への盛り上がり部を省略した場合の変形モデルに近く、この変形モデルは角錐圧子の場合にも適用できる。

表 3・4 で示したように、圧子角が 136° の場合

の黄銅焼鈍材の硬さ値なら
びに K_1 の実験値は理論値に
近く、二次元圧子押し込みの
場合と同様に、三次元ポン
チ押し込みの弾性解を利用し
た弾塑性限界線は、角錐な

表 3・4 黄銅焼鈍材の硬さ値なら
びに K_1 の値

	圧子角 90°		圧子角 136°	
	理論値*	実験値	理論値*	実験値
H _v (ピカース硬さ)	53.7	70	61.8	73
K_1	4.30	3.5	4.05	3.5

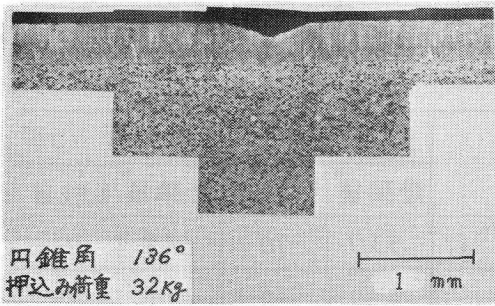
* 0.2%ひずみを降伏条件とした時の値

らびに円錐圧子押し込みによる変形領域の大きさを知る上で非常に有効
である。本来、弾性と塑性の取り扱い方には理論的にかかなりの隔りが
あり、塑性の問題に単純に弾性解を用いることはできないが、Shaw^{34),35)}
や神宮^{61),62)}の報告も本論文と同様、弾性解を有効に利用したものであ
る。また、黄銅焼鈍材に圧子角 136°のくさび押し込みを行った場合、そ
の弾塑性限界は理論上 $K_0 = 12.5 \sim 14.0$ と求まり、三次元圧子押し込み
による変形領域の大きさは二次元圧子押し込みの場合と比べてかなり小
さいことが実験的にも確認できた。

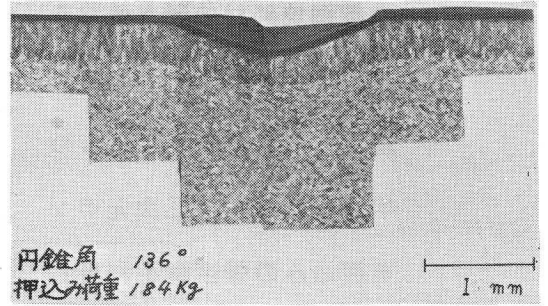
3・3・6 素地材料がめっき膜を有する場合の変形挙動

素地材料が表面膜を有する場合の一例として、素地材料がめっき膜
を有する場合の押し込み変形挙動を調べた。具体的には、黄銅焼鈍材に
厚さ 368 μm の銅めっき膜を施した場合の円錐圧子押し込み試験を行い、
圧痕断面の組織観察と硬さ分布を求めた。表面膜と素地材料との硬さ
比 β から言えば、この試料は $\beta < 1$ にあたる。

図 3・16 は円錐角 136°の押し込み結果で、そのうち(a)および(b)は押し
込み量の大小による変形挙動の違いを見たものであり、(c)および(d)はそ
れらの硬さ分布をそれぞれ求めたものである。図中の硬さ値ならびに

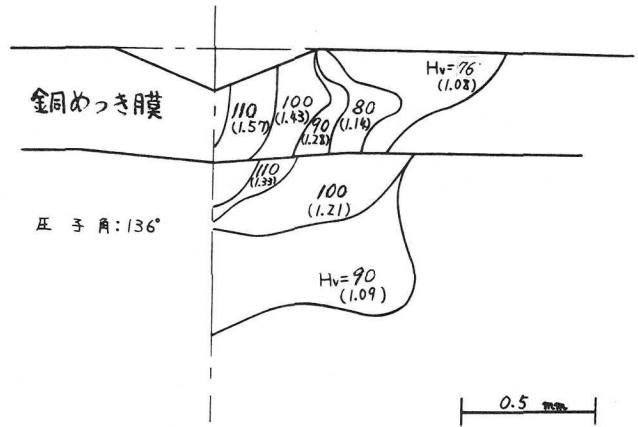


(a) 円錐角 136°



(b) 円錐角 136°

(c) (a)図の硬さ分布図



(d) (b)図の硬さ分布図

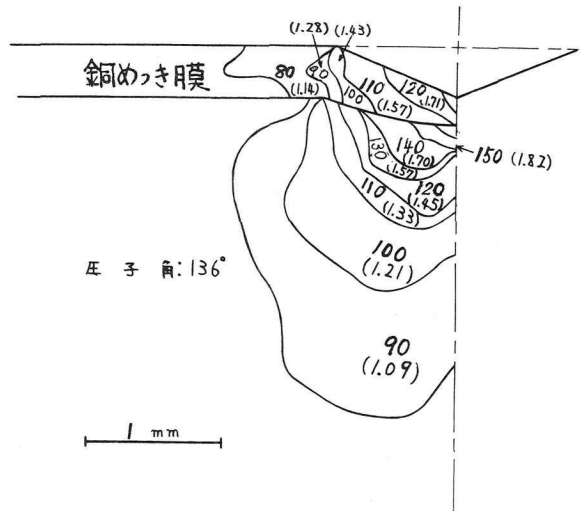
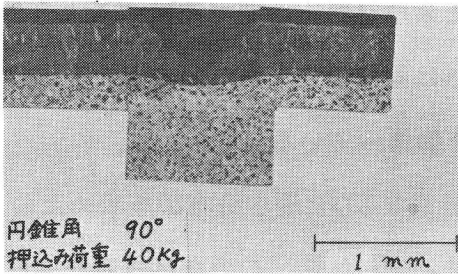
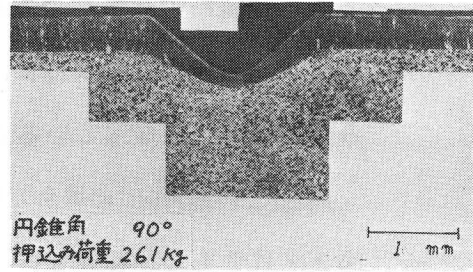


図3・16 黄銅焼鈍材が銅めっき膜を有する場合の圧痕断面の組織観察と硬さ分布図



(a) 円錐角 90°



(b) 円錐角 90°

(c) (a)図の硬さ分布図

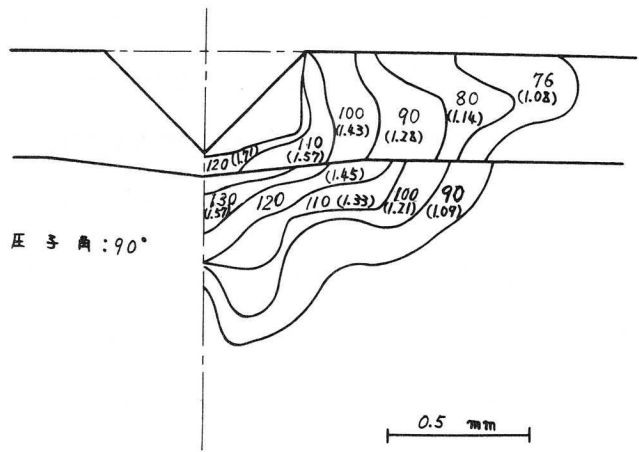


図 3・17 黄銅焼鈍材が銅めっき膜を有する場合の圧痕断面の組織観察と硬さ分布図

括弧内に示した硬さ値と黄銅焼鈍材のもとの硬さ値との比の値はそれぞれの領域内の最大値を示す。

(a)と(b)の結果を合せて考えてみると、局部的に圧子先端で素地材料の流動変形が見られるが、全体として、めっき膜と素地材料の境界で明らかに変形模様が異なり、めっき膜の流動変形がこの境界で阻害されるような押し込み段階であることがわかる。これよりさらに押し込み量を増すと、図 3・16の(b)の様になり、素地材料内にも圧子下全体にわたって結晶粒の流動変形を生じ、めっき膜と素地材料とが一体となったような流動変形を行なうことがわかる。また、(d)の硬さ分布図を見

ると、括弧内の数値がめっき膜と素地材料との間で連続するようになり、理論で予測したように、これは両者の変形領域が一体化し、ひずみ分布が連続になっていることを物語っている。

同様に、円錐角 90° の場合の組織観察ならびに硬さ分布図を求めたのが図3・17である。図3・17の(a)および(c)から、この押し込み段階ではまさにめっき膜と素地材料との変形領域が一体となるような流動変形を形成しようとしている。(b)の押し込み段階になると、めっき膜と素地材料とが全く一体となった流動変形を生じていることがわかった。また、圧子押し込みによる材料内部の変形はほぼ球状に進行し、明瞭な境界が存在する様な試料に生じる色々な押し込み変形挙動は、明らかに圧子角に依存することが認められる。

以上の実験結果をまとめてみると、図3・16の(a)は理論で述べた Stage II の初期段階に当り、図3・16の(b)ならびに図3・17の(a)は Stage II の最終段階で、図3・17の(b)は Stage III の段階にそれぞれ相当と思われるが、素地材料がめっき膜を有する場合の押し込み変形は理論上想定した変形過程にほぼ近いことが実験的に確認できた。

3・4 ま と め

くさび、角錐ならびに円錐圧子による押し込み試験結果は次の通りである。

- (1) 圧痕の表面観察より、圧縮型と亀裂型の押し込み変形が確認され、この現象は圧子角と予ひずみに依存することがわかった。
- (2) 平均接触圧力およびその降伏応力比の実験結果はそれぞれ理論の傾向によく一致しており、その値は圧縮型押し込みとみなせる圧子角が

120°～150°の範囲において理論値と15%内で一致する。しかし、亀裂型押し込みの場合ないしは切削型押し込みの場合には、実験値と理論値の差は大きくなる。

一方、焼鈍材そのものの実験値は0.2%ひずみに相当する応力を降伏条件として求めた理論値に一致する。

- (3) 圧痕断面の組織観察より、圧痕近傍に結晶粒の流動変形が認められ、その変形量は圧子角の小さいほど大きい。圧痕断面上の硬さ分布図は押し込み変形の模式図に類似する。ポンチ押し込みの弾性解を利用して求めた弾塑性限界は変形領域の大きさを知る上で有効である。また、焼鈍材のような予ひずみの小さい試料の変形領域はすべり線場の理論で考えられるものよりかなり大きく、二次元圧子押し込みの場合の変形領域は、三次元圧子押し込みの場合と比べて深さにして数倍大きいことが実験的にも確認できた。
- (4) 代表ひずみに関しては、圧子角が90°～150°の範囲において、理論値と実験値とは一致する。
- (5) 素地材料がめっき膜を有する場合の圧痕断面に対する組織と硬さ分布を考察して見ると、その押し込み変形は、押し込みが始まるとまずめっき膜内でのみ流動変形を生じ、押し込み量が増すと境界における流動変形の阻害の過程を経る。そして、さらに押し込みの進行と共に流動変形は素地材料にまでおよび、最終段階では両者の変形領域が一体化して流動変形を生じるといった段階的な変形過程を示す。これは理論的に想定した Stage I, Stage II および Stage III の3段階に対応するものと考えることができる。

第4章 連続微小押込み法のシステム開発^{63), 64)}

4・1 ま え が き

第1章で述べたように、今までに連続的な圧子押込み機構を用いた実験装置に関する報告は、黒木ら¹⁷⁾、山本ら¹⁸⁾ および後藤ら¹⁹⁾ 等によってなされている。これらを押込み機構の点から分類してみると、その一つは、荷重を一定量ずつ増加させたときに生じる変位量を逐次測定する方法^{17), 18)}であり、他の一つは、一定の速度で押込みを行ないそのとき生じる押込み荷重の変化を連続測定する方法¹⁹⁾である。

前者の押込み機構は、例えばタンクの中に一定速度で液体を注入するような方法で解決でき、準死荷重方式であるため荷重値の信頼性が高い。しかしながら、構造が複雑で大型化すること、振動の影響が加わるため負荷速度を余り大きくできないことなどの欠点が考えられ不都合である。その点後者は、押込み速度を自由に変えることができ、簡単な構造でしかも小型のものにできる可能性がある。したがって、もし荷重精度を十分高めることができるならば、この押込み機構は目的にそうことができると考えられる。

そこで本章では、まず押込み機構と検出機構に必要な諸条件の検討を行ない、その結果にもとづいて、連続微小押込み装置を作製し、機構を含めた性能ならびに特性を検討した。また、負荷特性と押込み変位特性を求め、荷重－押込み深さ曲線に影響をおよぼす諸要因について検討を加えた。

この段階で一応初期の目的を十分達成することができた。しかし、さらにデータ処理の迅速化を図る必要があった。そこで、連続微小押込み

装置から得られるアナログデータの自動処理をするため、AD変換器と小型計算機を用いた自動データ処理システムの開発を行った。そして、そのシステムとデータ変換精度について検討を行った。

4・2 連続微小押込み装置の試作

4・2・1 押込み機構および検出機構の検討

上でも述べたように、押込み速度一定という方式で装置の押込み機構を考えることにし、薄い表面膜、すなわち膜厚は $30\ \mu\text{m}$ 以内で、その硬さ値 H_v は 800 以内にあるような表面膜を計測対象とすることにした。これらの条件より、連続微小押込み装置を作製するのに必要な押込み量ならびに荷重の設計基準値はそれぞれ $100\ \mu\text{m}$ 、 $5000\ \text{g}$ で十分である。また、連続な荷重-押込み深さ曲線を得るために電気的出力による検出器を用いることにし、具体的には、押込み量検出には差動トランスを、荷重検出には動ひずみ計を使用した。

この結果得られたのが図4・1の押込み機構部であって、これは荷重検出用ロードセル、押込み量検出用差動トランスおよび片持ちの三角状板ばねから成り立つ。板ばねの支持方式として、片持ちばり方式の他に両持ちばり方式が考えられるが、この方式は温度に非常に敏感であって、良い結果を得ることができなかつた。そのため片持ちばりを用いた。板ばねの使用によって微量の垂直変位を得ることが可能となり、その三角形から横ぶれを防ぐことができる。また、差動トランスを使って変位を検出しようとするとき、コアの回転ならびにコイルとの接触をさけなくてはならないが、コアを板ばねに固定することによりこれらの欠点をさけることができた。さらに、この機構はロ

ロードセル上の力点，コアおよび圧子が同一軸上にあり，計測器における Abbe の原理に従うという最適な機構である。

次に，この押し込み機構によれば，圧子が試料表面に達した直後，荷重の大きさが検出感度以内であるため，荷重検出ができず，圧子と試料面との接触開始点をとらえることができないとい

う問題が生じる。そこで，荷重-押し込み深さ曲線上で，圧子と試料面との接触点の検出を何らかの方法で行う必要がある。これには無接触

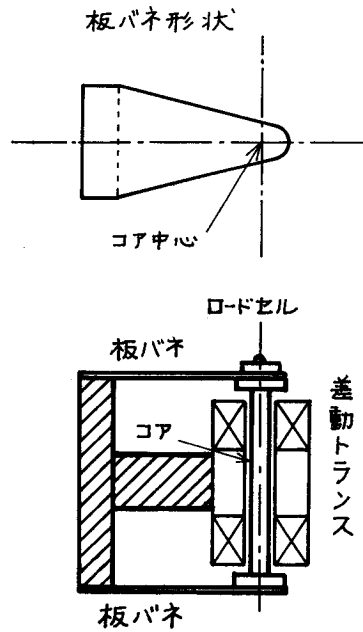


図4・1 押し込み機構部略図

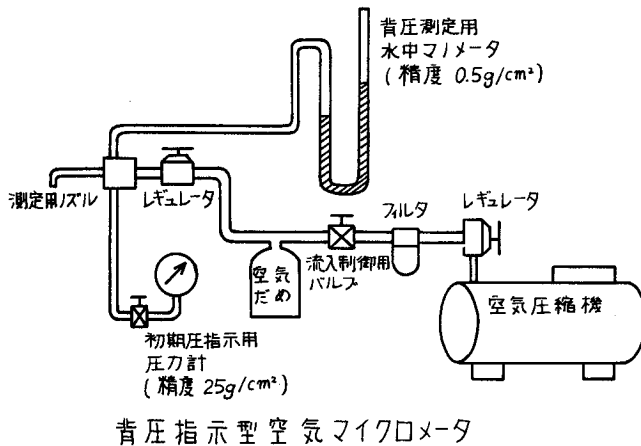


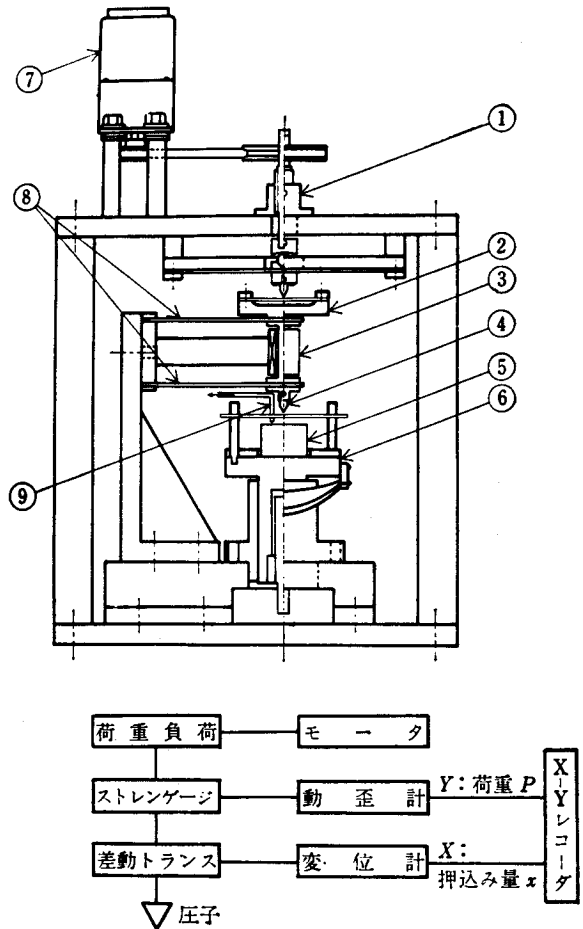
図4・2 圧子と試料面との接触点検出機構の略図

検出方式の空気マイクロメーター⁶⁵⁾が便利であると考えられ、これを用いて接触点を決定することとし、図4・2にその検出機構の概略を示した。それは空気圧縮機、初期圧指示用圧力計、背圧測定用マノメータおよび測定用ノズルから構成され、中圧用背圧指示型空気マイクロメータを応用したものである。

4・2・2 連続微小押込み装置の構造と性能

図4・3には作成した連続微小押込み装置が示されており、これは圧子に連続な押込みを与えるための押込み機構、荷重検出機構、押込み量検出機構ならびに試料保持機構から成っている。

押込みは、⑦の駆動用モーターによってねじ①（直進式：ピッチ 0.5 mm）を駆動し、板ばね⑧をたわませて行われる。



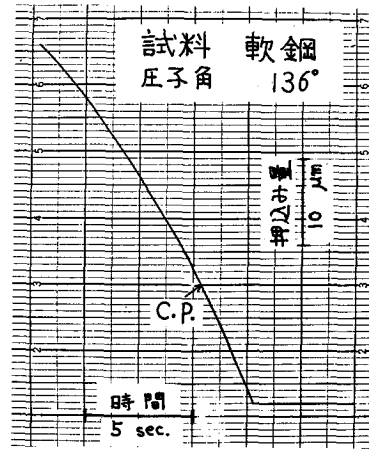
1: 負荷部, 2: 荷重検出部, 3: 差動トランス, 4: 圧子, 5: 試料, 6: 試料台, 7: 駆動用モーター, 8: 板ばね, 9: ノズル

図4・3 連続微小押込み装置およびブロックダイヤグラム

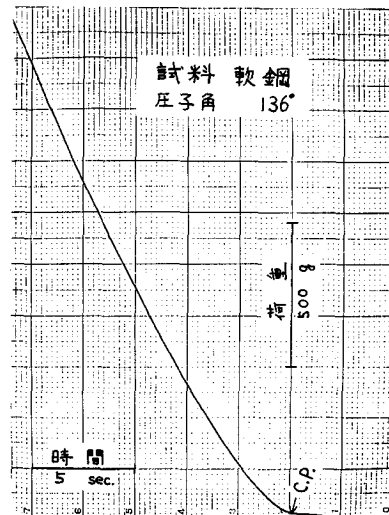
押し込み速度は $0 \sim 3.5 \mu\text{m}/\text{sec}$ の範囲を連続可変することができる。

押し込み深さの時間特性の一例を図4・4に示した。図4・4の(a)に示すように押し込み速度が一定という条件を満たさないのは、負荷によるねじ部および荷重検出部の剛性が影響をおよぼすものと思われる。また、変形抗力の時間特性に対する一例を図4・4の(b)に示した。

荷重検出には、②の動ひずみ計（感度 $0.5 g$ ）を、押し込み量検出には、③の差動トランス（感度 $0.2 \mu\text{m}$ ）を用いた。押し込みのとき、コアおよび圧子取付部には圧縮変形が生じるが、その量は無視できた。また負荷に伴なう差動トランスの電気的特性の変化は認められなかった。構造上、押し込み変位に伴ない圧子には押し込み方向に対して直角な横方向の移動 $d\epsilon$ と押し込み方向自体の方向変化 $d\eta$ が考えられる。そこで、この両者の量は単純な



(a) 押し込み深さ

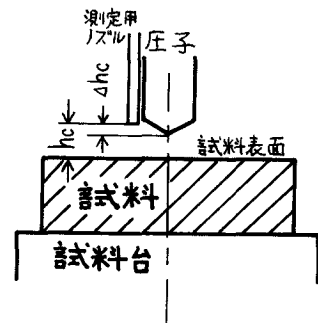
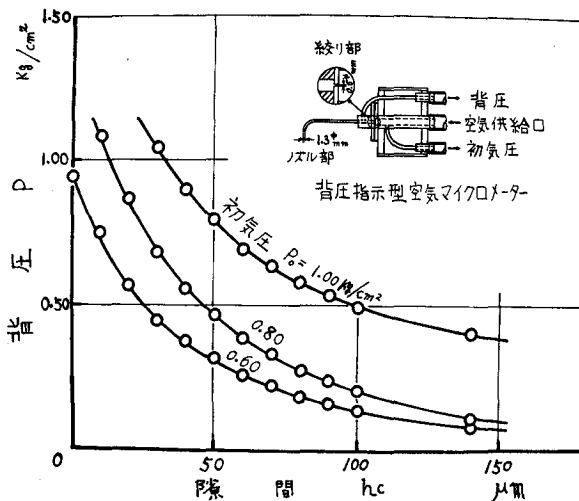


(b) 変形抗力

図4・4 押し込み深さおよび変形抗力の時間特性

幾何学的計算により、押し込み量 $100\ \mu\text{m}$ に対し、それぞれ $\Delta\varepsilon \leq 0.05\ \mu\text{m}$ 、 $\Delta\eta \leq 0.06^\circ$ となるように設計を行い、検出精度内におさまるようにした。また、試料の支持方法は押し込み荷重に対して十分大きな保持荷重で試料を上方から支持するという方法を用いた。この結果、試料を保持台に密着させることができた。

圧子先端と試料表面との隙間の検出は空気マイクロメーター⑨で行った。この空気マイクロメーターの特性曲線は図4・5の(a)に示す通りであり、感度は $0.1\ \mu\text{m}$ である。図4・5の(b)に示すように、試料はネジ駆動により試料台を上方に移動し、適当な所で試料台をロックした状態にある。そこで、接触点の検出には、まず試料台に保持した硬さ基準片 ($H_v = 700$) を静かに上昇させ、圧子先端と接触した時点 (これは X-Yレコーダー上で $0.5g$ の荷重出力による) の背圧値より Δh_c を前もって求めておき、 h_c と Δh_c の差をもって圧子先端と試料表面との間隔を



(b) 接触点の検出法

(a) 空気マイクロメーターの特性曲線

図4・5 空気マイクロメーターの特性曲線と接触点の検出法

求める方法を取った。この方法により、圧子先端と試料表面との接触点 C.P. は $0.8\ \mu\text{m}$ 以内の精度で定めることができた。

実験方法は、図 4・3 のブロックダイアグラムで示すように、押し込み量 x を X 軸に、荷重 P を Y 軸に取り、X-Y レコーダーに荷重-押し込み深さ曲線 $P(x)$ を記録させる方式とした。

荷重-押し込み深さ曲線の一例を図 4・6 に示す。A 点は作動開始点、B 点は押し込み終了点を表わす。直線 A, C.P., B は板ばね⑧の応力を示している。銅の素地材料に対する荷重-押し込み深さ曲線は十分なめらかな曲線であるが、この素地材料が Ni めっき膜を有する場合、その荷重-押し込み深さ曲線には、めっき膜に起因すると考えられる変化点が見られる。

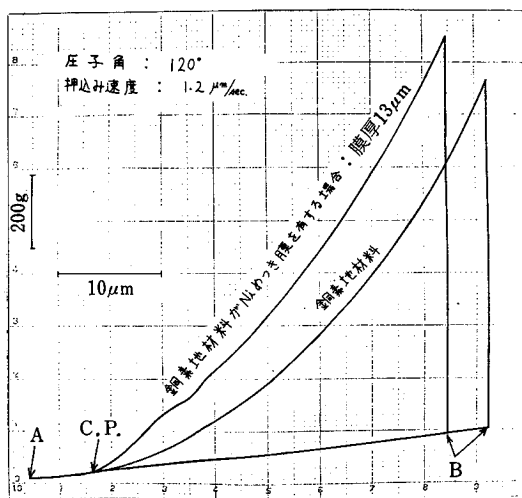


図 4・6 荷重-押し込み深さ曲線

荷重検出器自体の精度は $0.5\ \text{g}$ であるが、X-Y レコーダーの荷重記録範囲内で $20 \sim 30\ \mu\text{m}$ の十分な押し込みを行なうには、荷重の検出感度を下げざるを得なく、通常荷重-押し込み深さ曲線上では $1.4\ \text{g}$ かまたは $4\ \text{g}$ の精度で実験を行った。押し込み量の精度は $0.3\ \mu\text{m}$ であった。図 4・7 は X-Y レコーダー上に記録された荷重ならびに押し込み量の目盛較正線図を示す。これらの較正方法として、荷重には $0.2\ \text{g}$ の精度を有する錘りを順次加えて行く方法を取り、変位量には 0.3

μm の精度を有するダイヤルゲージ用検定器でコアに一定量の変位を与える方法を取った。

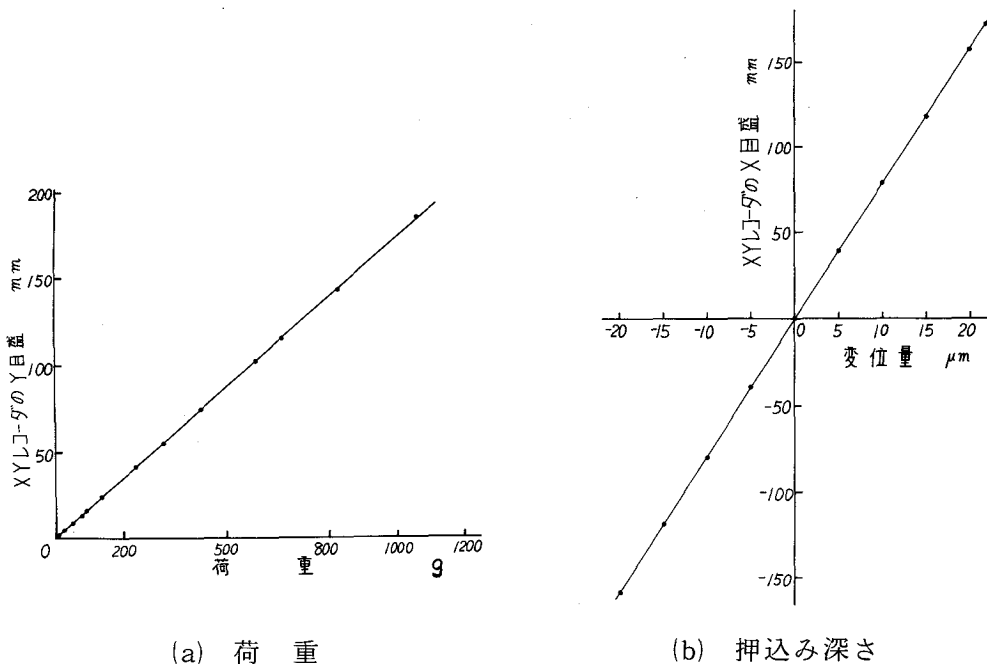
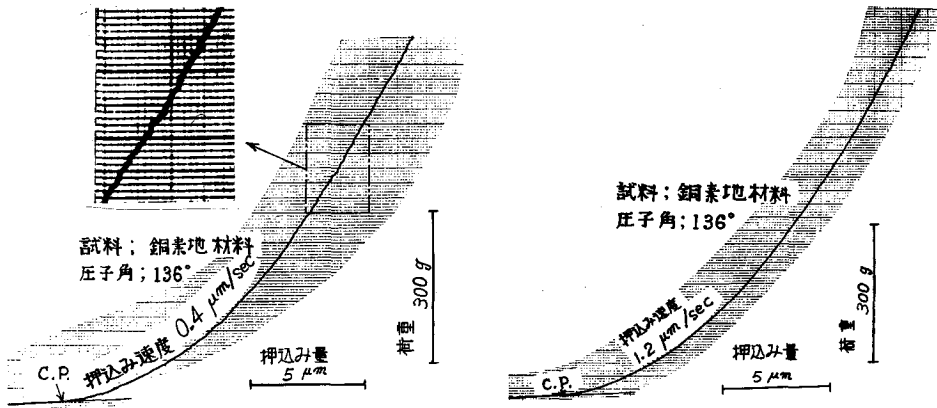


図 4・7 荷重ならびに押し込み深さの校正線図

4・3 荷重—押し込み深さ曲線におよぼす押し込み速度、表面あらさ等の影響

本装置を使って荷重—押し込み深さ曲線を得るには、押し込み速度⁶⁶⁾、試料の表面あらさ⁶⁷⁾ならびに表面仕上げ法⁶⁸⁾等の影響を考慮する必要がある、また一般の微小ビッカース硬さ試験と同様、 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ の微小な押し込み範囲に対しては微小荷重に対する問題^{69), ~, 74)}を含むことを考慮しなくてはならない。

押し込み速度が $0.5 \mu\text{m}/\text{sec}$ 以下の場合、図 4・8 の(a)で示したようなびびり状の荷重—押し込み深さ曲線が得られる。そして、押し込み速度の増



(a) 押込み速度 $0.4 \mu\text{m}/\text{sec}$ の場合 (b) 押込み速度 $1.2 \mu\text{m}/\text{sec}$ の場合

図 4・8 押込み速度の荷重-押込み深さ曲線への影響

加とともに図 4・8 の(b)の如くなめらかな曲線が得られ、押込み速度が $3.0 \mu\text{m}/\text{sec}$ 以後、押込み荷重は 6~8% 大きく求まる。

したがって、荷重-押込み深さ曲線は材料の変形速度に依存することが判った。そこで、本実験を通じて、押込み速度は $0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}/\text{sec}$

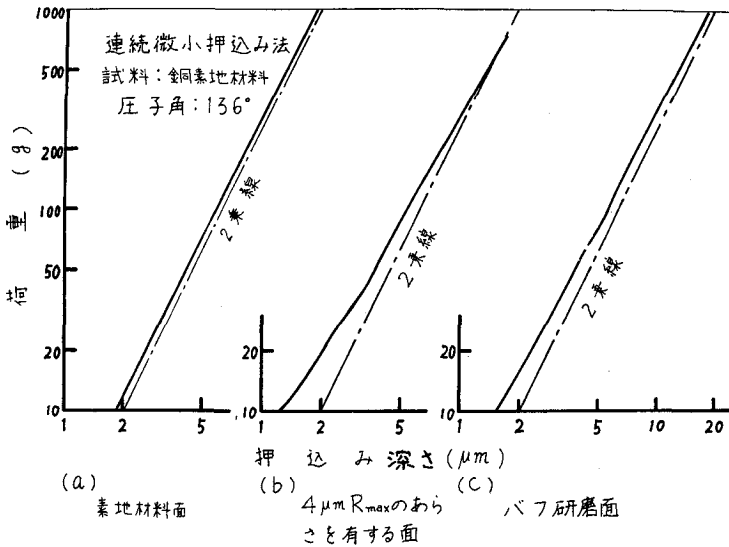


図 4・9 表面あらしおよびバフ研磨面の荷重-押込み深さ曲線への影響

内とし、通常 $1.2 \mu\text{m}/\text{sec}$ を押し込み速度として選んだ。

図 4・9 の(b), (c)の荷重-押し込み深さ曲線はそれぞれ表面あらさ、ならびに面仕上げ法の影響を調べたもので、これらの試料は素地材料にエメリーパーで軽く表面あらさを付与するかあるいは軽いバフ研磨仕上げを行って作成したものである。素地材料の荷重-押し込み深さ曲線を求めたものと比較すれば、微小押し込み域でそれらの影響が認められる。

微小ビッカース硬さ試験においても図 4・10 に示す如く表面あらさに対する同様の結果が得られている。しかし、この範囲に生じる種々の現象は、結晶粒⁷⁵⁾、圧子先端の形状誤差あるいは荷重依存性等の微小荷重に対する問題そのものに起因することも考えられる。また、荷重および押し込み量の測定精度を無視できない押し込み範囲でもある。

したがって、微小荷重に対する問題あるいは面仕上げ法そのものに起因する変質層を計測対象とする場合は別として、微小な表面膜の厚さ検出にあたってはこのような問題を考えに入れておかななくてはならない。

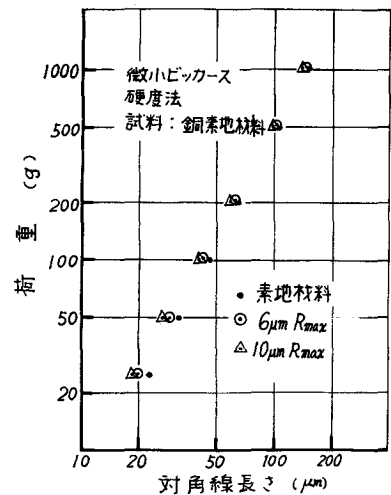


図 4・10 表面あらさを有する試料の微小ビッカース硬さ試験

4・4 自動データ処理システムおよびシステムサブルーチンの概要

4・4・1 自動データ処理システムの概要

本システムは図 4・11 に示されており、大別すると①連続微小押

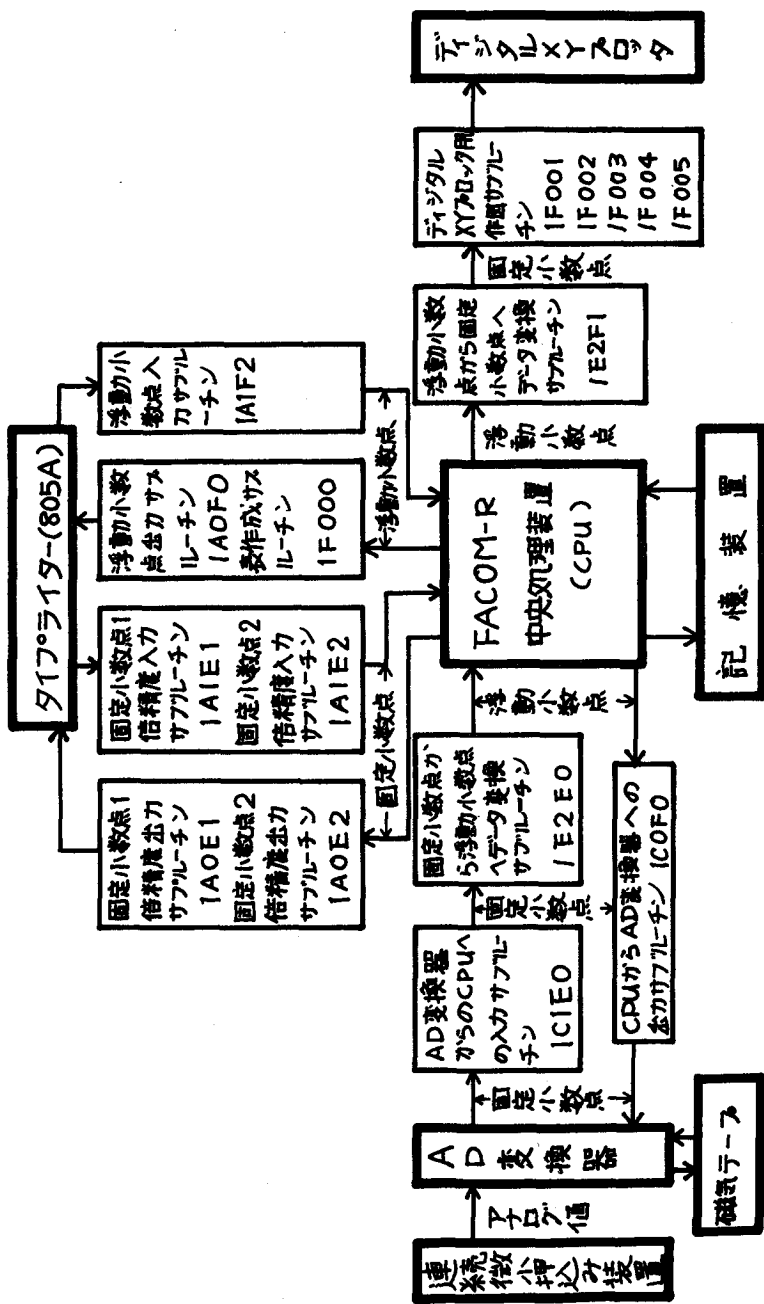
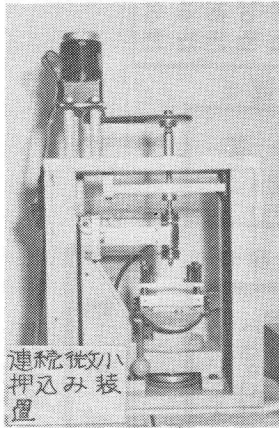
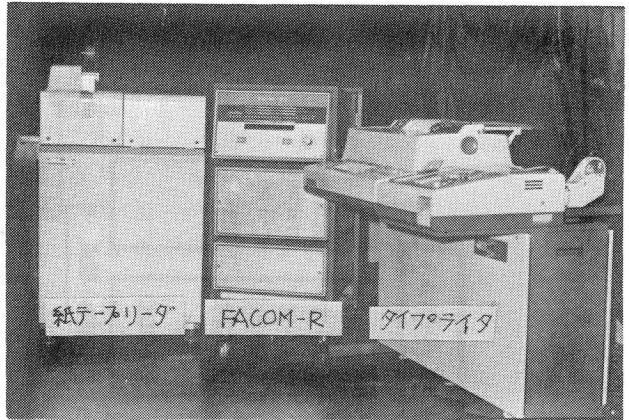


図4・11 連続微小押込み法における自動データ処理システム

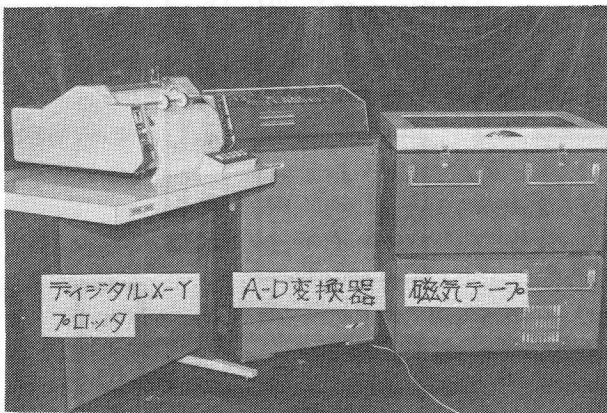
込み装置，②AD変換器，③小型計算機および④デジタルX-Yプロッタの4つの基本要素から成る。図4・12はこれらの要素の概観であり，これらの仕様と定格をそれぞれ表4・1，表4・2，表4・3および表4・4に示した。



(a)



(b)



(c)

図4・12 システムの装置写真

各構成要素の概略は次の通りである。

- ① 連続微小押し込み装置は，第4章でも述べたように，試料に圧子を圧入するときの押し込み量 x と押し込み荷重 $P(x)$ とをアナログ値として出力する装置であって，これらのアナログ値はそれぞれ差動トランスおよび動ひずみ計から電圧として出力される。

表 4・1 連続微小押込み装置の仕様

押込み速度	0 ~ 3.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$
最大押込み量	100 μm
最大荷重	5 kg
感度 { 押込み量 荷 重	0.2 μm 0.5 g

表 4・2 AD変換器の仕様

入 力	10チャンネル (最大32チャンネル)
入力電圧 AD	-10V ~ +10V
入力信号 DA	並列2進10ビット + 符号1ビット
サンプリング 周波数	40, 80, 60 Hz 2, 4, 8 kHz
出力表示 AD	2進ビット + 符号1ビット
出力電圧 DA	-10V ~ +10V
AD変換精度	0.3%フルスケール (マルチアプレクサ) 0.6%フルスケール (アンプレクサ)
DA変換精度	0.4%フルスケール

製作所 岩崎通信 品名 DATAC-1500型

表 4・3 小型計算機の仕様

本 体	記録容量 使用言語 命 令 処理時間	8 k word FASP アセンブラ言語 基本命令 28個 疑似命令 8個 -命令 6~11 μs
紙テープ リーダー	読取り速度	80 文字/秒
タイプ ライター	読取り速度 打ち出し速度	20 文字/秒 20 文字/秒

製作所 富士通 品名 FACOM-R

表 4・4 デジタル X-Y
プロッタの仕様

プロット速度	X, Y 軸	400 ステップ/秒
	Z 軸	10 回/秒
プロット幅		0.1 mm
記録紙寸法	X 軸	有効記録長さ 35 m
	Y 軸	有効記録長さ 270 mm
製作所 岩崎通信		品名 DPL-602型

- ② AD 変換器は多数チャンネルのアナログ電圧をマルチプレクサで高速走査し、各点のアナログ電圧を逐次デジタル化し、同時に直接計算機にデータを送出するか、一度デジタル磁気テープに記録した後、これを再生して計算機にデータを送出する装置である。また逆に、本装置で記録した磁気テープを再生するか、または計算機からのデジタルデータを DA 変換し、アナログ信号として取り出すことができる。具体的には、連続微小押込み装置から出力したアナログデータのデジタル化を行い、このデジタル化した実験値を計算機に転送する。
- ③ 小型計算機は基本ユニットとして 8 K 語磁心記憶装置、処理装置、通信制御装置および 4 種の標準入出力制御装置を内蔵するデジタル小型計算機であり、その中で入出力装置としてタイプライタおよび紙テープリーダを有する。主な動作は紙テープリーダまたはタイプライタからのデータ入力、AD 変換器より転送されたデータの変換、演算および結果の出力等である。
- ④ デジタル X-Y プロッタは計算機の入出力装置の一つであり、計算機から送られてきたデータのグラフ表示を行う。

したがって、②、③および④までの構成要素が上で述べた自動デ

ータ処理システムであり，①の構成要素を色々な機械的，物理的実験あるいは生産計測に適用することによって広範囲な自動データ処理システムを構成することができる。

4・4・2 システムサブルーチンの概要

上記のシステムを運用するのに必要なシステムサブルーチンの開発を行った。その主なものは，計算機本体と各入出力装置間の制御用サブルーチン⁷⁶⁾，データ入出力サブルーチン，データ変換サブルーチン⁷⁶⁾および演算サブルーチン等であり，その一覧表を表4・5に示す。また表4・6にその動作概要を一括して説明した。

4・5 データ変換に伴う精度

4・5・1 AD変換に伴う精度

本システムではデータ変換を数回行う必要があり，これに伴って生じる誤差を検討しなくてはならない。ここではAD変換の場合について述べる。

AD変換に伴う誤差には，AD変換器自体の有する誤差ならびに入力データの増幅あるいは制約に伴う誤差の2つが考えられる。

まず，マルチプレクサの高速走査による誤差を測定するには，あるデジタル値，例えば300に相当する基準電圧3000mVの±10mVの範囲の電圧を電圧発生器より1mV精度でAD変換器に段階的に与え，このとき得られるデジタル値から精度を見出すという方法を取った。なお，電圧発生器は0から10mV，100mV，1V，10V，100Vおよび1000Vの出力レンジを持ち，各レンジ内で5桁の精度

表4・5 各種サブルーチンのステップ数

構成要素	サブルーチン ナンバー	データ形成	入力範囲	ステップ数 (word*)
中央処理 装置	18060を始めとする制御用サブルーチン, 18140を始めとするデータ変換用サブルーチン, その他演算用サブルーチン等多数のサブルーチンがある			総ステップ数 3499
タイプライ ター	IAOE1	固定小数点	-32767	53
	IAIE1	一倍精度	~32767	162
	IAOE2	固定小数点	-327679999	75
	IAIE2	二倍精度	~327679999	220
	IAOF1	浮動小数点	$\pm 10.72370911 \times 10^{76}$	212
	IAIF2		$\sim 10.72370911 \times 10^{76}$	205
	IF000	浮動小数点	同上	
AD変換器	ICIE0	固定小数点	-1024	106
	ICOF0	浮動小数点	~1023	172
デジタル XYプロッタ	IF001	固定小数点	-1350	554
	IF002		~1350	441
	IF003		(Y軸)	157
	IF004		133	
	IF005		209	
データ変換	IE2E0	固定→浮動	-32767	107
	IE2F1	浮動→固定	~32767	202

* 16ビット構成をもって 1 word とする。

表 4・6 各種サブルーチンの動作概要

(その1)

サブルーチン ナンバー	動 作 内 容	備 考
/A0E1 /A1E1 /A0E2 /A1E2 /A0F1 /A1F2	タイプライターより固定小数点あるいは浮動 小数点の定数入力または計算結果の出力を行 なう	作 成
/F000	タイプライター用紙に計算結果を表形式で出 かする	
* /C1E0 /C0F0	A-D変換器から計算機あるいはその逆の場 合のデータ転送に伴なう制御を行なう制御サ ブルーチンである。処理時間:約1 msec	
/E2E0	A-D変換器より計算機に入力されたデー タ形式の変換を行ない、この変換された固定小 数点データを四則演算ならびに実数演算のた めに浮動小数点に変換する	
/E2F1	データの計算結果=デジタルXYプロッタ へ出力するために固定小数点に変換する	

* これらのサブルーチンを使用する際、計算機からの記録周波数または計
 算機への転送周波数は 40, 80 および 160 Hz のうちいずれかでなければ
 ならない。

表 4・6 各種サブルーチンの動作概要

(その 2)

サブルーチン ナンバー	動作内容	備考
18060	計算機本体とタイプライタまたは紙テー プリーダとの間のデータ交換にともなう制御 を行なう制御サブルーチン変換である	富士通提供 2,3のサブルー チンの改良を 行った
18140 その他多数	データの四則演算ならびに関数演算を行 なう	
1F001	デジタルXYプロッタの基本的動作を 制御するためのシステムサブルーチンで ある	岩通提供
1F002	デジタルXYプロッタに文字表示を行 なう	
1F003	同上に2進数値表示を行なう	
1F004 1F005	グラフ表示を行なう	

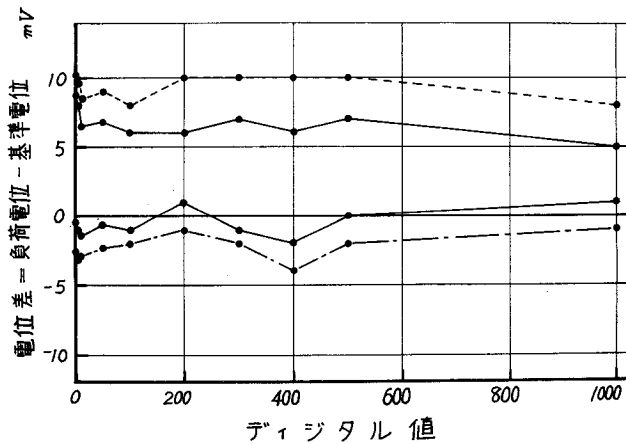


図 4・13 AD 変換に伴う誤差

を有する。

図4・13はこの測定例であり、縦軸の電位差ゼロをもって誤差ゼロと考えることができる。実線で囲まれた領域内の電位であれば、基準電位に対応するデジタル値、すなわち基準値を示すが、実線と点線または一点鎖線に囲まれた領域内では、基準値と±1異なるデジタル値が混入する。これらの領域外の電位領域ではそれぞれ基準値と±1だけ異なる値を示す。ゆえに、AD変換器自体が有する誤差は10mV以内であり、この値はデジタル値にして1以内に相当する。

連続微小押し込み装置からAD変換器にアナログ量を入力するとき、一方では押し込み量 x および荷重 $P(x)$ の最大到達値を少なくともそれぞれ $100\mu\text{m}$ 、 2000g と考える必要があり、他方ではこれらのディジ

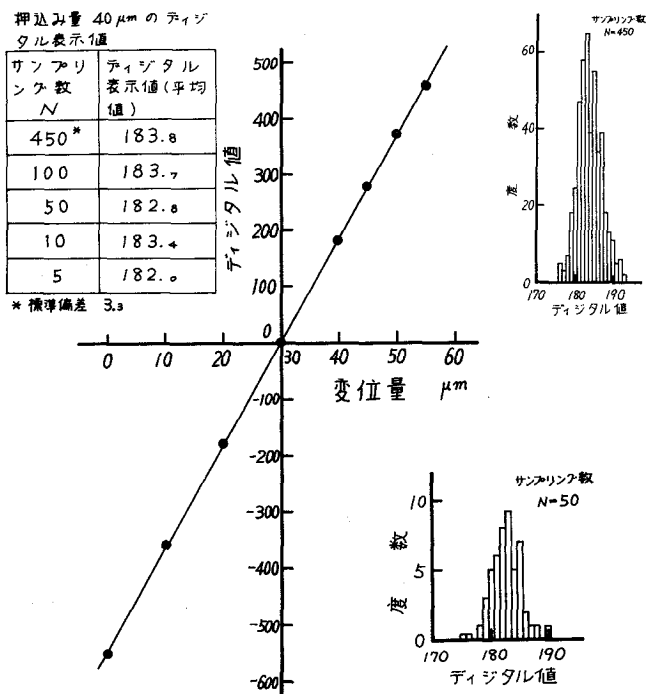


図4・14 押し込み量のデジタル変換較正線図

タル表示値に差動トランスならびに動ひずみ計の感度まで精度を持たせる必要がある。

そこで、連続微小押し込み装置から出力したアナログ量の増幅（増幅器自体が有する誤差は無視できる）を行い、押し込み量 $x = 100 \mu\text{m}$ および荷重 $P(x) = 2000 \text{g}$ をそれぞれおおよそ 2000 のデジタル値に対応させた。この対応値自体は押し込み量について $0.05 \mu\text{m}$ までの精度を、また荷重について 1g までの精度を保証するものであり、荷重変化率曲線を求めるにあたっては 5% の精度を保証するものである。この変換結果をそれぞれ図 4・14 と図 4・15 の較正線図に示す。これらの較正法は X-Y レコーダーの場合に用いた方法と同じである。

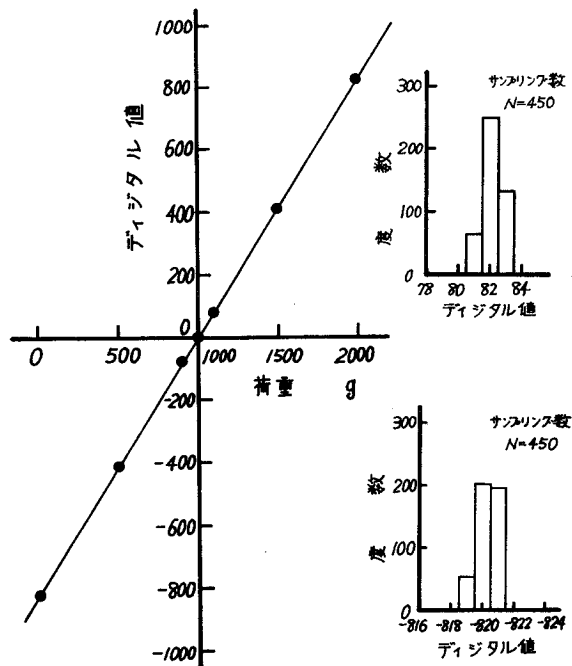


図 4・15 荷重のデジタル変換較正線図

押込み量 x のデジタル変換値 X は図4・14のようにばらついており、図中に示した一例からもわかるようにほぼ正規分布となる。この結果の一因は増幅によって差動トランス自体の有する感度以上のデジタル表示をした点にあるかも知れないが、本質的に、差動トランスによる検出法ではこのばらつきを取り除くことが困難であった。そこで図中でも示したように、サンプリング数を変えてもその平均値相互の変動幅はサンプリング数450のときの標準偏差内におさまるので、押込み量のデジタル値 X は5個のサンプルの平均値とした。

また、図4・15のように荷重 $P(x)$ のデジタル値 Y もデジタル値 X と同様に変動する。これは図中の度数分布図からもわかるように、上で述べたAD変換器自体の誤差に起因する。したがって、荷重のデジタル値 Y も5個のサンプルの平均値とした。

以上の結果、押込み量ならびに荷重は較正線図の上で十分直線性が得られ、デジタル変換後の誤差はそれぞれ $0.4 \mu\text{m}$ 、 $2 g$ となった。

4・5・2 各種サブルーチンの有する精度

デジタル変換をしたデータには、さらに各種サブルーチンを通じてデータ形式の変換や四則演算がなされ、その結果誤差を生じる。

この誤差のうち、データ形式の変換によるものは主に浮動10進数から浮動2進数への変換に伴う、すなわちサブルーチン/A1F2を用いて定数をタイプライタから入力する場合に生ずるものである。図4・16はこの場合の相対誤差を求めたものであり、実験においてその

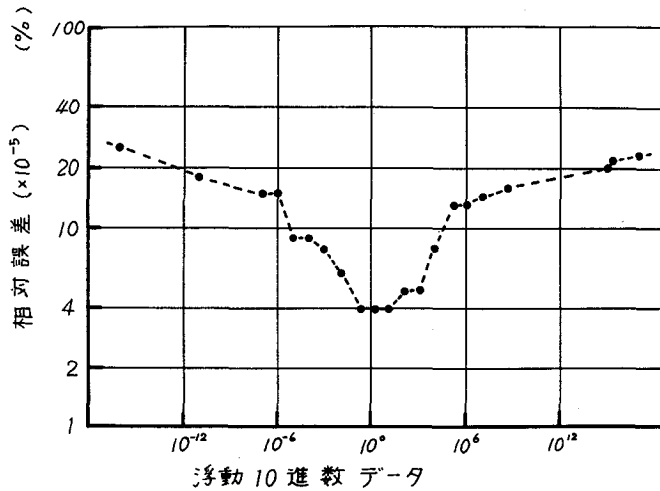


図4・16 サブルーチン/A1F2 のデータ変換に伴う誤差

誤差量は全く無視することができる。また、浮動小数点のデータを固定小数点に変換するとき、一般に小数点以下は切り捨てとなり、ここに誤差を生じる。これはサブルーチン/F2F1を使用してX-Yプロッタに出力する場に相当するが、そのとき入力データの精度にまで出力データを桁上げしてやれば、出力精度は入力精度と等しくなり、このサブルーチンによる誤差は考慮しなくてもよい。同様に、サブルーチン/C0F0を用いてAD変換器にデータを出力する場合には4桁出力に対し $1 \times 10^{-2}\%$ の相対誤差を有する。

一方、四則演算や関数演算を行うためには多くのサブルーチン⁷⁶⁾を使用しなくてはならないが、これらのサブルーチンに含まれる相対誤差は最も大きくて $1 \times 10^{-2}\%$ である。

したがって、本システムの総合精度はAD変換に伴う精度によって決定されることがわかった。

4・6 ま と め

微小変位ならびに押し込み速度一定という基本的な条件のもとで、板ばねの弾性変位を利用した押し込み機構を有する連続微小押し込み装置の製作を行い、この装置から出力されるデータを自動処理するため、AD変換器ならびに小型計算機を組入れた自動データ処理システムの開発を行い、次のような結果を得た。

- (1) 本装置は押し込み機構、荷重検出機構、押し込み量検出機構、試料保持機構ならびに圧子接触点検出機構から成り、荷重および押し込み量の検出精度としてそれぞれ 0.5 g 、 $0.3 \text{ }\mu\text{m}$ を有し、 $0 \sim 3.5 \text{ }\mu\text{m}/\text{sec}$ まで連続可変な押し込み機能を有する。
- (2) 荷重-押し込み深さ曲線は試料の変形速度に依存し、試料の粒度、試料面の仕上げ法ならびに表面あらさ等の試験条件は、従来の微小ビッカース硬さ試験と同様、微小荷重域で影響が大きい。
- (3) 開発した本システムの構成要素は小型計算機、AD変換器、デジタルX-Yプロッタおよび連続微小押し込み装置から成り立ち、その基本動作は連続微小押し込み装置から出力したアナログデータをデジタル化し、各種のデータ変換と演算を経て、デジタルX-Yプロッタおよびタイプライタに解析結果の出力を行う。
- (4) データ変換ならびに演算等による相対誤差はたかだかデジタル表示値の $1 \times 10^{-2}\%$ であり、本システムにおける総合精度はAD変換に伴う精度によって決定される。荷重および押し込み量のデジタル化に伴う精度はそれぞれ 2 g 、 $0.4 \text{ }\mu\text{m}$ であった。

第5章 連続微小押込み法による硬さなら びに表面膜厚の測定^{63), 64)}

5・1 ま え が き

第4章では、任意の押込み速度のもとで、連続的な圧子押込みの可能な連続微小押込み装置の製作ならびにその特性について述べ、十分な精度でもって荷重-押込み深さ曲線を得ることができることを示した。

そこで本章では、この連続微小押込み装置を使って、まず素地材料および素地材料がめっき膜を有する場合の荷重-押込み深さ曲線を求め、それぞれの曲線の特性を述べると共に、荷重変化率曲線より硬さを求め、この曲線上に生じた移行点または遷移点とめっき膜の性状とについて第2章で得た近似解を含めて論議し、さらに、めっき膜厚の測定について述べた。

また、陽極酸化したアルミニウムおよび塗膜を施した試料等の荷重-押込み深さ曲線の特性を述べると同時に、素地材料が表面膜を有する場合の押込み変形挙動について検討を加えた。そして、極めて単純な押込み変形の仮定のもとで、本装置で検出可能な膜厚 l と硬さ比 β の検出精度について検討を行った。

最後に、自動データ処理システムを使用した実験結果について述べた。

5・2 実験条件

電解研磨仕上げを十分に行い、表面の加工変質層を除去したとみなされる材料を素地材料として供試した。素地材料は直径 $30\text{ mm } \phi$ 、長さ 20 mm の丸棒材であり、その材質ならびに他の実験条件は表5・1に示す通

りである。また、図5・1には使用したダイヤモンド製圧子の概観を示した。電解研磨法⁷⁷⁾、電気めっき法⁷⁸⁾および陽極酸化法⁷⁷⁾の諸条件はそれぞれ表5・2、表5・3および表5・4に示した。

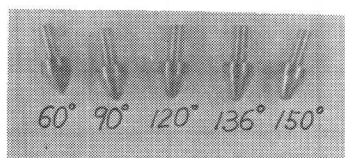


図5・1 角錐圧子

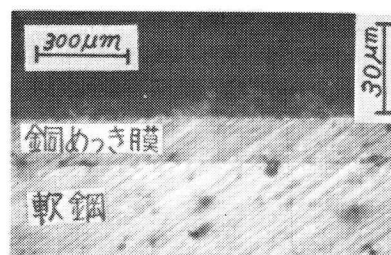


図5・2 銅めっき膜の斜め切断面

めっき膜厚と塗膜厚の測定には斜め切断法と磁気膜厚測定法とを併用した。測定値の変動範囲はいずれも15%であった。図5・2は斜め切断法による銅めっき膜の切断面を示したものである。また、陽極酸化膜の膜厚測定にはPermascope EC (HELMVT FISCHER GMBH製; 精度0.5 μm)を用いた。その測定誤差は1 μm以内である。

表5・1 実験条件

試料 材質	素地材料の 表面仕上げ法	めっき膜の 材質	めっき膜厚 (μm)	表面あらさ (μm Rmax)	
				素地材料面	めっき面
銅	電解研磨法	銅	10 ~ 30	1以下	3以下
		ニッケル	5 ~ 30		
		クロム	5 ~ 20		
		亜鉛	5 ~ 20		
軟鋼	電解研磨法	銅	10 ~ 110	1以下	3以下
		亜鉛	20 ~ 100		
アルミ ニウム	電解研磨法	陽極酸化膜	膜厚 (μm) 4 ~ 50	1以下	酸化面 1以下
圧子角 (°)	(60), 90, 120, 136, 150 (ダイヤモンド製)				

表 5・2 電解研磨条件

試料材	銅 および 黄銅	軟 鋼	アルミニウム
溶 組 成	リン酸 175cc エチルアルコール 175cc 水 175cc	リン酸 400cc 70%酸 200g	リン酸 400cc 硫酸 100cc 70%酸 25g (無水)
液 温	20°C	88 ~ 90°C	40°C
電 圧	2.7V	3.2V	20V
電 流	3.3 ~ 4.4 A	1.8 ~ 1.9 A	1.5 ~ 2.5 A
陰極材	銅 板	鉛	軟 鋼

表 5・3 電気めっき条件

めっき材	銅	ニッケル	亜 鉛	ク ロ ム
溶 組 成	硫酸銅 100g/500cc 硫酸 25cc/500cc	硫酸ニッケル 180g/l 塩化アンモニア 25g/l 硼酸 30g/l	硫酸亜鉛 240g/l 塩化アンモニア 15g/l 硫酸アルミニウム 30g/l	無水70%酸 200g/l 硫酸 0.42cc/l
液 温	常温 ~ 50°C	26 ~ 45°C	20 ~ 30°C	30 ~ 40°C
電 圧	0.28 V	1.0 ~ 1.8 V	0.8 ~ 1.0 V	3.2 V
電 流	0.4 ~ 0.9 A	0.25 ~ 0.35 A	0.3 ~ 0.5 A	4.0 ~ 5.0 A
陽極材	銅 板	ニッケル板	亜鉛板	炭素棒

表 5・4 陽極酸化条件

液 組 成	15% 硫酸(溶量10%)
液 温	20 ± 1°C
電流密度	2 A/dm ²
電 流	直 流

連続微小押し込み法における押し込み速度はほぼ $1.2 \mu\text{m}/\text{sec}$ とし、比較検討のため微小ビッカース硬さ試験を行った。このとき、同一荷重について5回測定を行い、その平均値を測定値とした。5回の測定値の変動範囲は5%であった。

5・3 素地材料の硬さ測定

図5・3は軟鋼および銅の素地材料に対する本法および微小ビッカース硬度法の実験結果である。これらはすべて一点鎖線で示した2乗線に対しほぼ平行であり、本法による素地材料の荷重-押し込み深さ曲線 $P(x)$ は式2・24で近似できることが判った。ここで、微小ビッカース硬度法における押し込み深さは圧痕の対角線長さより幾何学的に算出したものである。

後藤ら¹⁰⁾も素地材料の荷重-押し込み深さ曲線は2次式で表わされると報告しており、微小ビッカース硬度法の結果とあわせて、これは微小荷重に到るまでの相似則を裏付けるものである。しかし、0~50gの微小荷重の範囲、すなわち押し込み量にして1~4 μm の範囲で、硬さ変化

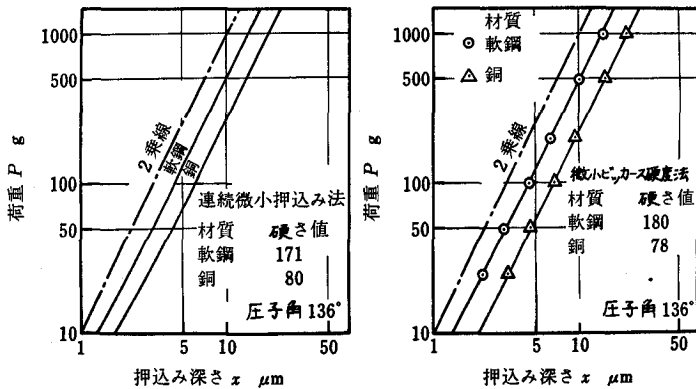


図5・3 素地材料の荷重-押し込み深さ曲線

を示すような実験結果も 2, 3 得られている。その原因は荷重-押し込み深さ曲線の検出精度, 角錐先端の形状誤差, C.P.点の検出精度, 表面あらさ, 粒度あるいは荷重依存性などにあるように考えられる。したがって, 微小荷重の範囲については相似則を明確に言及できるものではないが, この範囲を越えて押し込み量の大きい範囲において, 図 5・3 の実験結果は吉沢らの報告⁷⁹⁾と一致するものと考えられる。

圧子角を変えた場合の銅素地材料に対する荷重変化率曲線を求め, その結果を図 5・4 に示した。 $\Delta P/\Delta x$ の値は, 押し込み深さのきざみ値 Δx を $1 \mu\text{m}$ とした場合の荷重-押し込み深さ曲線の平均変化率値である。荷重変化率値の誤差は, 曲線①, ②の場合 $1.4 \text{ g}/\mu\text{m}$ であり, 曲線③, ④の場合 $4 \text{ g}/\mu\text{m}$ である。この誤差は, 荷重の計測誤差が押し込み量の計測誤差に比べて大きいので, 荷重の計測誤差のみに依存する。

荷重変化率曲線はそれぞれ多少とも曲線を示すが, 図 5・5 の干渉顕微鏡写真で示したように, この原因は押し込みによる材料の盛り上り現象が著しく作用したものと思われる。一方, 引張りあるいは圧縮試験等において, 塑性ひずみの範囲における変形力と変形量の間には一般に非線形性が成立すると報告⁸⁰⁾されているが, このことから推察する

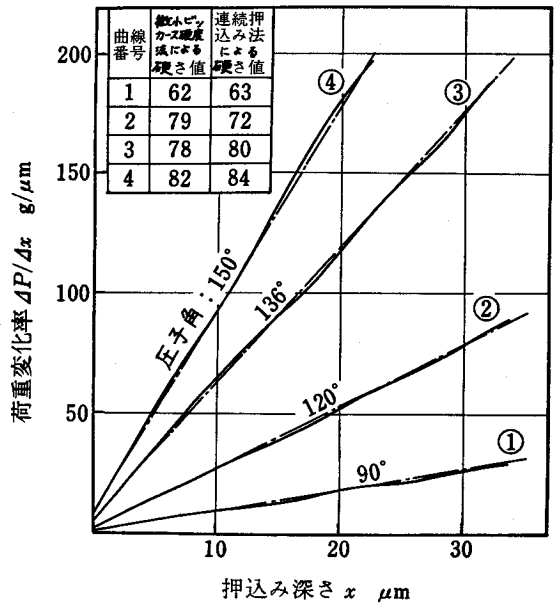


図 5・4 圧子角を変えた場合の荷重変化率曲線

と、圧子押込みによる材料の変形過程を微細に検討するならば、たとえ素地材料であっても、その押込み量と抗力の間には本来非線形性の関係があるものと思われる。

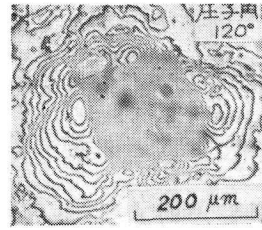


図5・5 圧痕の干渉顕微鏡写真(試料:銅素地材料)

しかし、本実験のように変形抗力

を変形領域全体にわたって積分するような方法において、この関係は近似的に直線とみなされる。

図5・4の表中に示した微小ビッカース硬さ値と本法による硬さ値の間にはほとんど差異は認められない。素地材料そのものは予ひずみの大きいものに相当し、圧子角が小さくなるに従って硬さ値も小さく求まっている。これらは第3章でも述べたように、Dugdale^{56), 57)}やAtkinsら²⁶⁾が求めた予ひずみの大きい場合の実験結果と一致している。本法によ

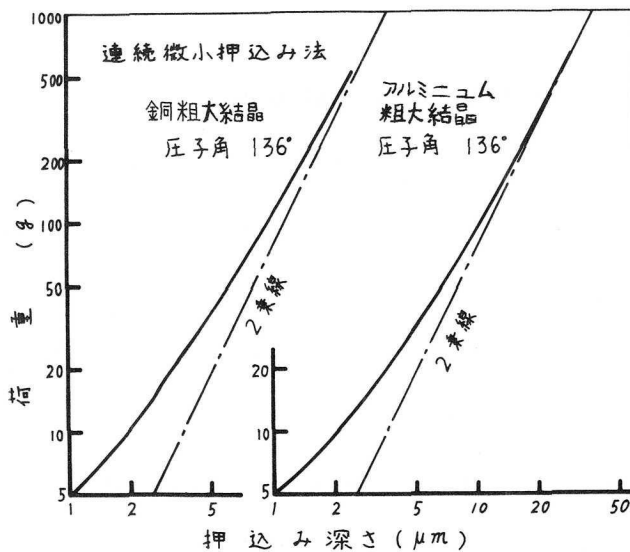


図5・6 粗大結晶に対する荷重-押し込み深さ曲線

る硬さ値は図5・4に示した一点鎖線の傾きから求めた。アルミニウムの素地材料についても上記と同様の結果が得られた。

図5・6と図5・7はアルミニウムおよび銅の面方位の異なる粗大結晶を使って行った実験結果である。上で求めた素地材料の場合と比較すると、試験荷重の範囲内で荷重依存性が認められる。この原因の一つとして、結晶の面方位と押し込み方向および押し込み量によって著しく影響を受ける単結晶試料の押し込み変形挙動が考えられる⁸¹⁾。

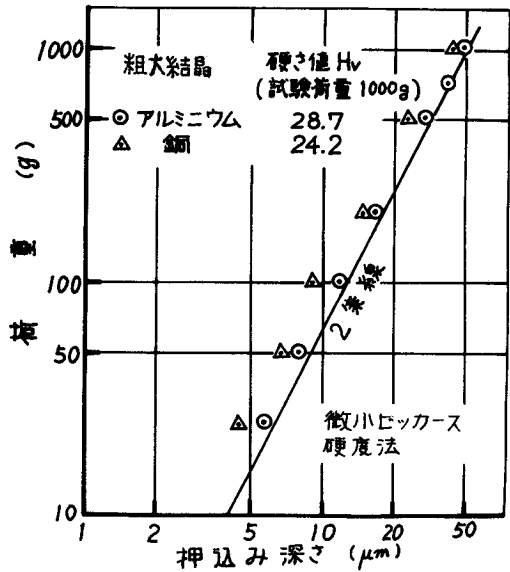


図5・7 粗大結晶に対する微小ビッカース硬さ試験

5・4 めっき膜を有する場合の膜厚測定

5・4・1 めっき膜を有する場合の荷重－押し込み深さ曲線

図5・8に示した荷重－押し込み深さ曲線は素地材料がめっき膜を有する場合の代表例で、本法と微小ビッカース硬度法との比較を行ったものである。これらの測定に要する時間は一曲線当り本法で20～30秒、微小ビッカース硬度法で7～8分である。したがって、一回の圧子押し込み試験で、試料表面から押し込み深さに至るまでの硬さ変化を迅速かつ連続的に知ることができるという本法の特性が明らかに認められる。また、いずれの曲線上にもA、Bの記号で示した変化点を

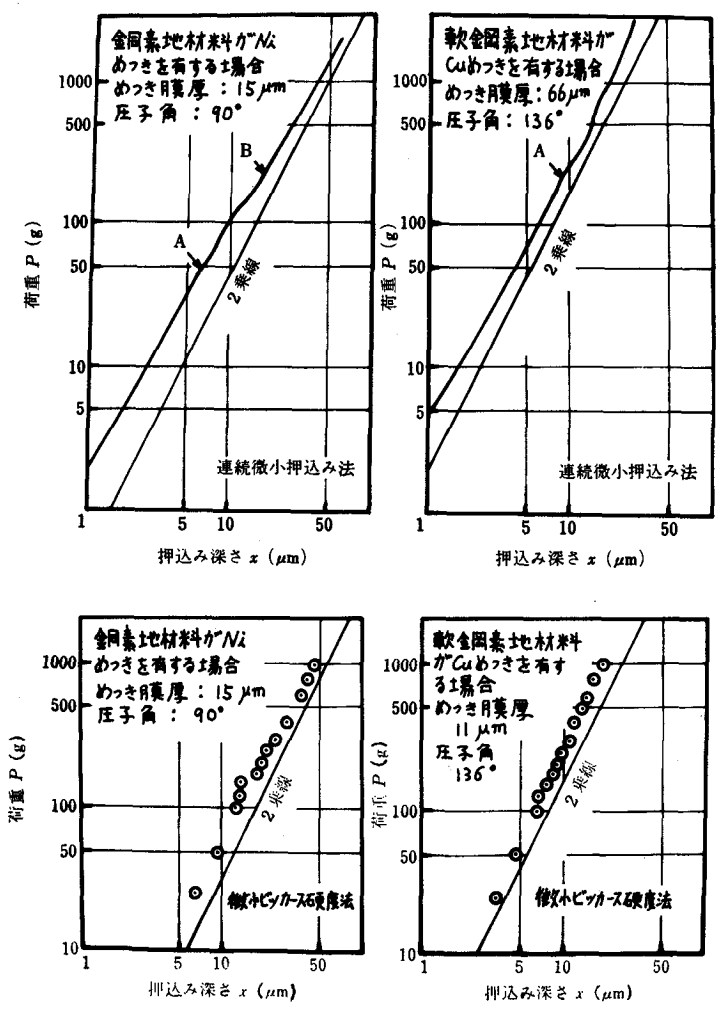


図5・8 めっき膜を有する試料の荷重-押し込み深さ曲線

認めることができる。図5・3の場合と比較しても明らかなように、このような曲線は表面膜を有する試料特有のものである。

めっき膜自体複雑な内部ひずみを有し、必ずしも均一な表面膜と見なすことはできないが、例えば、銅素地材料にニッケルめっきを施した試料の荷重-押し込み深さ曲線によれば、押し込み開始からA点まではほぼ2乗線に平行であり、A、B点間でなめらかな変化をした後、B点

より 2 乗線に漸近するような変化をしている。したがって素地材料がめっき膜を有する場合の押し込み変形挙動は、3・3・6 節の実験結果も含めて、2・5・2 節で述べた均一な材質の表面膜を有する場合の変形挙動に近いと見なされる。

この荷重-押し込み深さ曲線を荷重変化率曲線として表わしたのが図 5・9 である。押し込み開始から A 点までが Stage I, A, B 点間は Stage II, B 点以後は Stage III に相当する。この A 点は青木ら¹¹⁾ や Bückle¹³⁾ が述べている臨界点に相当すると考えられる。図中に示した圧痕の表面ならびに断面写真からもわかるように、Stage I および

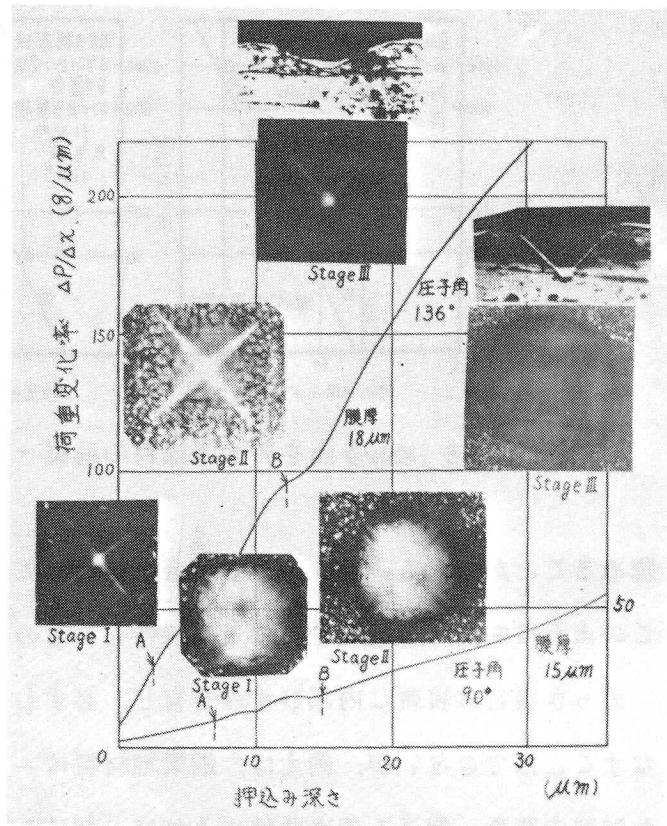
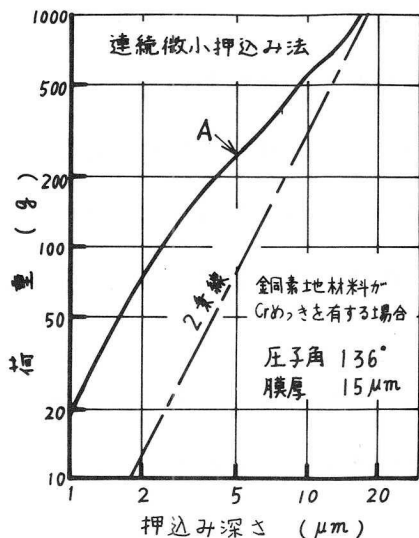


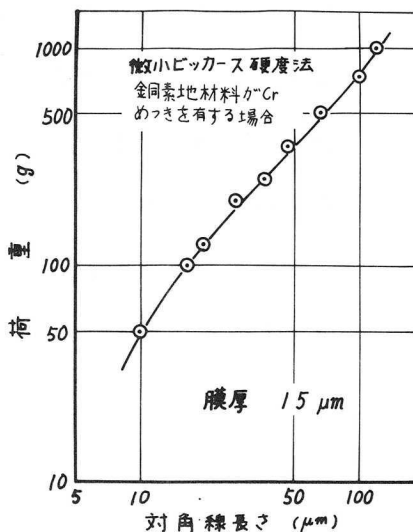
図 5・9 軟鋼素地材料に銅めっきを施した場合の荷重変化率曲線

Stage II は圧子の浸入深さがめっき膜厚以下のときに生じる変化過程である。圧子角 136° の場合の圧子押し込みは圧痕面がめっき膜のみから形成される圧縮型押し込みであり、圧子角 90° の場合は、Stage III で圧痕面に素地材料が現われ始めることから、亀裂型押し込みである。

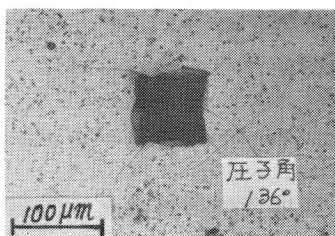
一方、図 5・10 は銅素地材料がクロムめっきを有する場合（硬さ比 $\beta \approx 8$ ）の実験結果であって、その変形挙動は図 5・8 の場合と同様であるが、図の(C)で示した圧痕近傍の表面写真の一例からもわかるように、圧子押し込みの結果、圧痕周囲のかなり広い範囲にわたって破



(a) 連続微小押し込み法



(b) 微小ビッカース硬度法



(c) 押し込み深さ $16 \mu\text{m}$ における圧痕近傍の表面写真

図 5・10 銅素地材料にクロムめっきを施した場合の荷重-押し込み深さ曲線

壊が生じ、Stage II から Stage III への明確な区別はむずかしくなる。
また、微小ビッカース硬度法では対角線長さの測定が非常に困難であった。

以上の結果、素地材料がめっき膜を有する場合の押し込み変形過程はめっき膜厚 l 、硬さ比 β および圧子角 2θ によって異なることがわかった。その中でも、押し込みによって試料表面上に破壊が生じない場合、その押し込み変形過程は式 2・27 で $H(\alpha) = \text{一定}$ とおいたときに意味する荷重-押し込み深さ曲線の平行移動を裏付けるものである。青木ら¹¹⁾ が実験的に求めためっきを施した試料に対する $h-H_v$ 曲線、Bückle¹³⁾ がモデル化を行った表面層と素地材料との特性曲線間の関係および吉野¹⁴⁾ が実験的に求めた押し込み深さと硬さ変化との関係を本法の荷重-押し込み深さ曲線でもって全て求めることができる。したがって、荷重-押し込み深さ曲線上の移行点を利用すれば、膜厚計測への足掛を見つけることができる。

その他の条件として、めっき膜と素地材料との密着性を無視することはできないが、これについては現在のところわかっていない。

5・4・2 移行点または遷移点とめっき膜厚および硬さ比との関係

3・3・6 節ならびに上述の結果から、素地材料がめっき膜を有する場合の押し込み変形では、理論的に想定した変形挙動がよくあてはまることがわかった。そこで、ここでは押し込みによって圧痕の周囲に破壊が生じないような場合の荷重変化率曲線から、各移行点とめっき膜厚 l および硬さ比 β との関係を実験的に求め、理論値と比較検討しながら膜厚計測について述べる。

図5・11と図5・12はそれぞれ銅素地材料がニッケルめっき膜 ($\beta \cong 3.5$) を, 軟銅素地材料が銅めっき膜 ($\beta \cong 0.44$) を有する場合の荷重変化率曲線であり, 硬さの組合せでいえば, 全く逆の場合を取りあげている。

まず, Stage I から Stage II への移行過程を比較すると, 図5・11の曲線②のように $\beta \geq 1$ のとき, A点を過ぎるとまず荷重変化率値は急激に減少し, 次いで増加の過程を経て C_1 点に至るが, 図5・12の曲線①のように $\beta < 1$ のとき, A点を過ぎても増加のみの過程で C_1 点に至る。この両者の相違は硬さ比 β に起因すると考えられ, 2・5・2節で想定した移行過程とよく一致する。

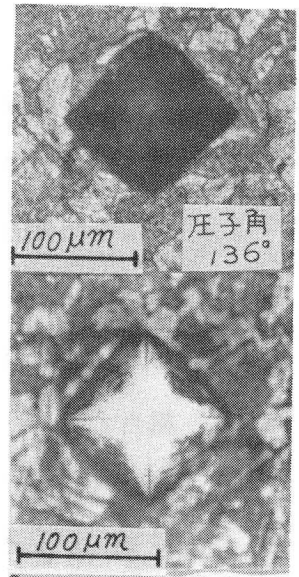
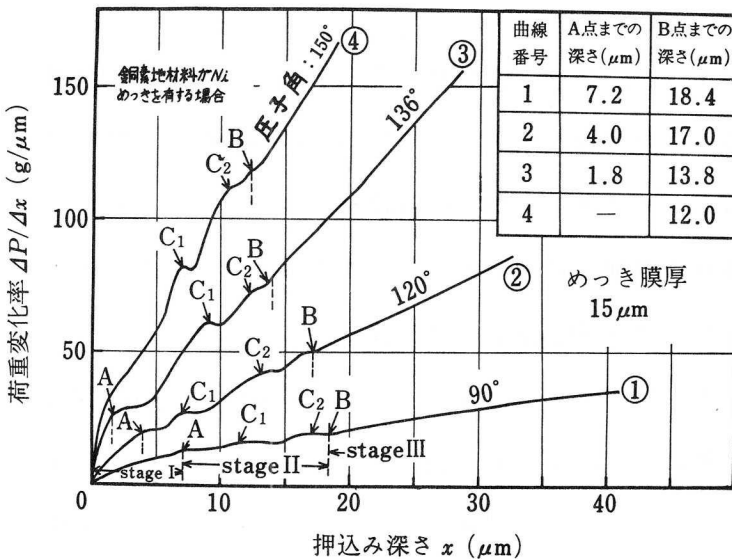


図5・11 銅素地材料にニッケルめっきを施した場合の荷重変化率曲線

Stage IIIにおける圧痕近傍の表面写真

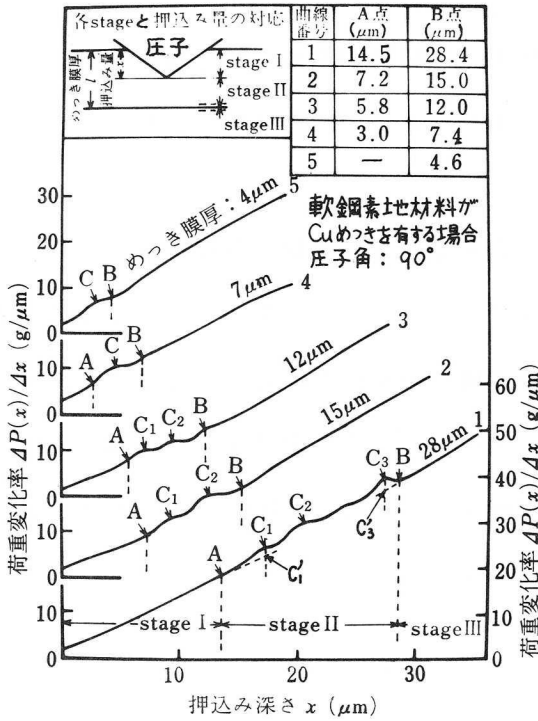
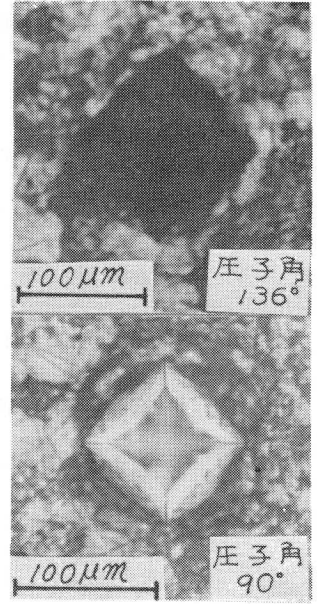


図5・12 軟鋼素地材料に銅めっきを施した場合の荷重変化率曲線



Stage IIIにおける圧痕近傍の表面写真

各図の曲線①のように、めっき膜が厚くなると C_1 の記号で示した遷移点が数個現れる。これは膜厚 l が大きくなると変形過程が連続的ではなく間欠的になるためであろうが、その理由についてはよくわかっていない。この移行点の検出について、例えば図5・12の曲線①では、 C_1 点の荷重変化率値とStage Iの延長線上で C_1 点の押し込み位置に相当する C'_1 点の荷重変化率値との差は $3 \text{ g} / \mu\text{m}$ であり、この曲線に対する荷重変化率値の誤差は $1.4 \text{ g} / \mu\text{m}$ であるので、 C_1 点は明らかにピークとみなすことができる。同様に、 C_3 点と C'_3 点の荷重変化率値の差は $5 \text{ g} / \mu\text{m}$ であるから、 C_3 点の検出はいっそう容易になる。したがって、A点はStage I線上から C_1 点への移行点として、またB点

はC₃点から Stage III への移行点としてそれぞれ決定できる。

このようにして求めたAおよびB点の原点からの深さ値は、図中の表に示した通りであり、各 Stage と押し込み量の対応を図5・12の模式図で示した。押し込み変形は136° 圧子の場合圧縮型であり、90° 圧子の場合亀裂型であった。また、Stage IIIにおける圧痕近傍の表面写真からはいずれの場合も圧痕周囲の破壊は認められなかった。表5・5は図2・14で示した試料表面からA点までの押し込み量 l_A と式2・6から求めた理論値との比較を行ったもので、(a)の場合、実験値は理論上求めた最小押し込み量 $\overline{OA_1}$ と最大押し込み量 $\overline{OA_0}$ の間にあり、(b)の場合、最大押し込み量より小さく求まる。これらの結果は理論上推定した通りであり、理論的に求めた弾塑性限界は、圧子押し込みによって材料内部に生じる変形領域の大きさを知る上で非常に有意義である。

この結果、荷重変化率曲線上の Stage I は硬さ比 β および圧子角 2θ によってその範囲が定まり、その限界値は三次元円柱ポンチ押し込みを利用して求めた弾塑性限界値から推定することができる。なお、このときめっき膜厚の影響は無視してもよい^{11), 14)}。

表5・5 押し込み量 l_A

(a) 銅素地材料がニッケルめっき膜を有する場合 (b) 軟銅素地材料が銅めっき膜を有する場合

圧子角 $2\theta(^{\circ})$	最小押し込み量 $\overline{OA_1}(\mu\text{m})$	実験結果 $l_A(\mu\text{m})$	最大押し込み量 $\overline{OA_0}(\mu\text{m})$
150	1.1	—	2.6
136	1.6	1.8	3.9
120	2.3	4.0	5.5
90	4.7	7.2	9.6

膜厚 15 μm

膜厚 (μm)	最大押し込み量 $\overline{OA_0}(\mu\text{m})$	実験結果 $l_A(\mu\text{m})$
4	2.6	—
7	4.5	3.0
12	7.7	5.8
15	9.6	7.2
28	17.9	14.5

圧子角 90°

次に、試料表面からB点までの押込み量 l_B とめっき膜厚 l の比 λ を求め、図5・13に示した。硬さ比 β によって λ の値は異なるが、同一材料であれば、 l_B の値は10%の誤差で求めることができた。この実験値と

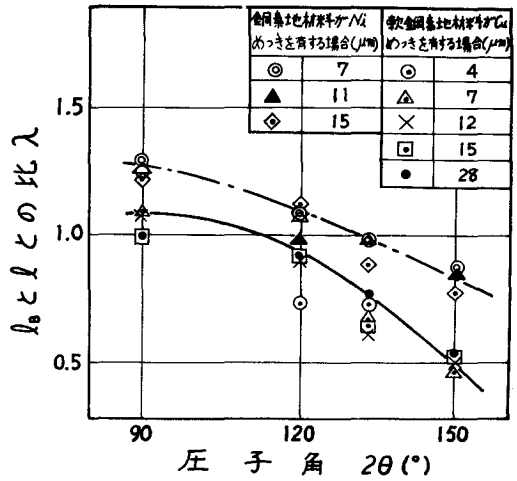
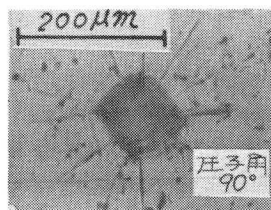
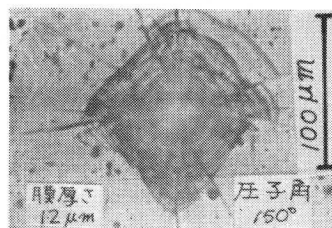
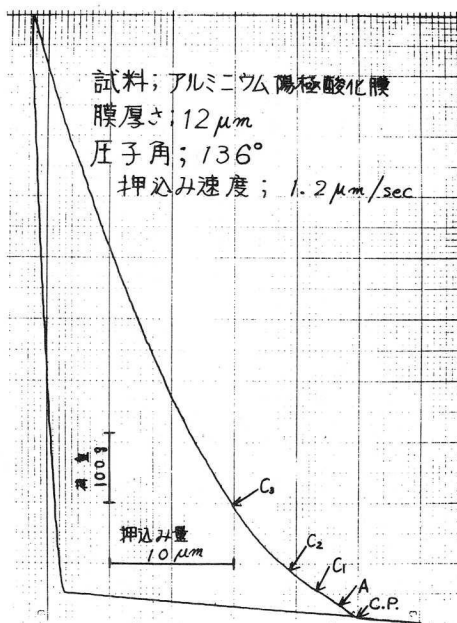


図5・13 圧子角と λ の関係

式2・17で表わした理論値との比較をしてみると、両者の傾向はほぼ一致しているが、実験値の方は理論値より大きく求まる。この理由として、3・3・6節の実験結果からも明らかなように、素地材料が内部方向にへこむような変形をするためであり、この影響は β が1より大きくなるに従って大きくなる。

以上の結果、本法でめっき膜厚計測を行う場合、試料上の隣り合った数点の箇所、圧子角を変えた場合のいくつかの荷重変化率曲線を求め、これらの曲線から得られるそれぞれの l_A の K_1 （既知とする）倍または l_B の $1/\lambda$ （既知とする）倍の値をめっき膜厚 l とすればよい。その計測誤差は10%以内である。 K_1 および λ が未知の場合には、上記と同様の方法で、まず K_1 ないしは λ に対する較正曲線を求めなくてはならない。また、 l が小さくて 2θ が大きいとき、荷重変化率過程を十分検討した上でB点を求める必要がある。なお、押込みによって圧痕周辺に破壊が生じるような場合には、その膜厚計測ははなはだ困難になる。



圧痕表面写真

図5・14 陽極酸化したアルミニウムの荷重—押し込み深さ曲線

5・5 その他の表面膜を有する場合の荷重—押し込み深さ曲線

図5・14は陽極酸化したアルミニウム試料に対する荷重—押し込み深さ曲線で、圧痕周辺に破壊が生じないものの一例である。しかし、通常図中の圧痕近傍写真からも判るように破壊が発生し、その荷重変化率曲線を求めると図5・15のようになり、移行点と膜厚との対応は一義的でない。

一般に、表面膜と素地材料の

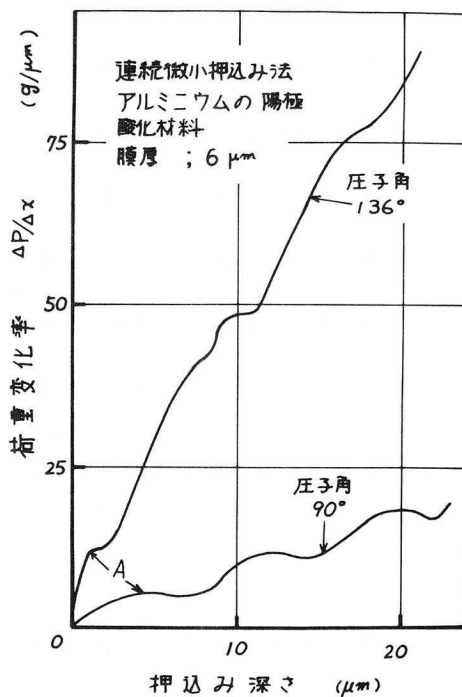


図5・15 陽極酸化したアルミニウムの荷重変化率曲線

硬さの差が大きくなると破壊が発生する。ところが、同じように硬さの差が大きくても、軟鋼素地材料に塗膜を施し6日間自然乾燥した試料の場合破壊は生じなく、その荷重-押し込み深さ曲線は図5・16のようになり、A点およびB点を求めることができる。図5・17の荷重変化率曲線より、 l_A および l_B を求めると、 K_1 の値は式2・15から求まる理論値に、 λ の値は1に誤差範囲内で一致し、理論モデルをそのまま適用できることがわかった。また、圧痕面の観察よりこの場合の押し込み変形はStage IおよびStage IIの段階では圧縮型押し込みとなり、Stage IIIの段階から、塗膜に対して切削型押し込みとなる。

図5・18は銅素地材料の表面をブンゼンバーナーの酸

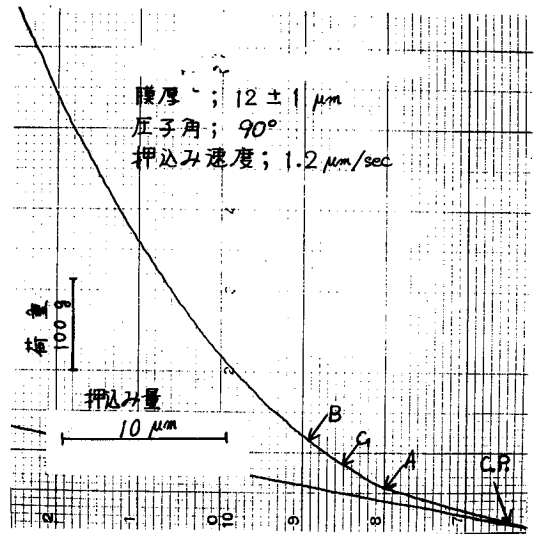


図5・16 軟鋼素地材料が塗膜を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線

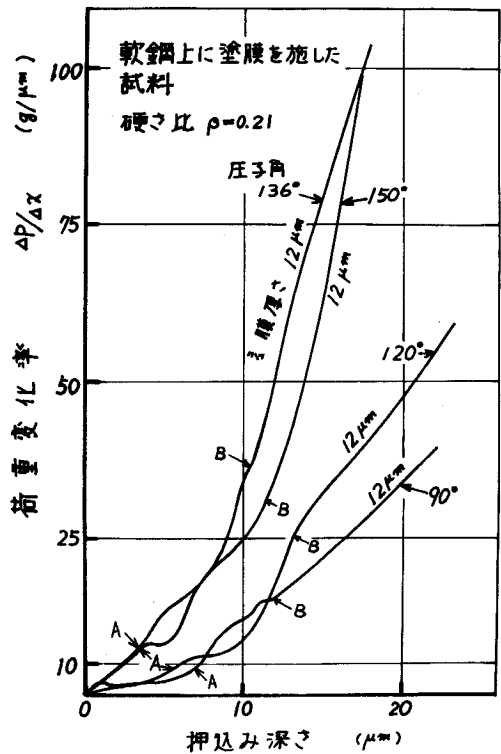


図5・17 軟鋼素地材料が塗膜を有する場合の荷重変化率曲線

化炎で20分間加熱処理した場合の荷重-押し込み深さ曲線である。酸化膜は薄いと思われるが、しかし微小荷重域で侵入酸素による効果を認めることができる。

以上の結果、本法は圧子押し込みによって圧痕周辺に破壊を生じることがなく、素地材料と表面膜の間に明確な境界が存在するような試料に対す

る膜厚計測に十分適用でき、その際の圧子押し込みの変形過程は、第2章で述べた変形モデルに近いことがわかった。特に、 β 値が1より小さくなると理論にはほぼ一致する。また、本法は非金属材料ならびに非鉄金属材料といった広範囲の材料の膜厚計測に適用することができる。しかし、表面膜と素地材料の境界が不明瞭であるか、もしくは、破壊の生じる場合にはさらに検討を要する。

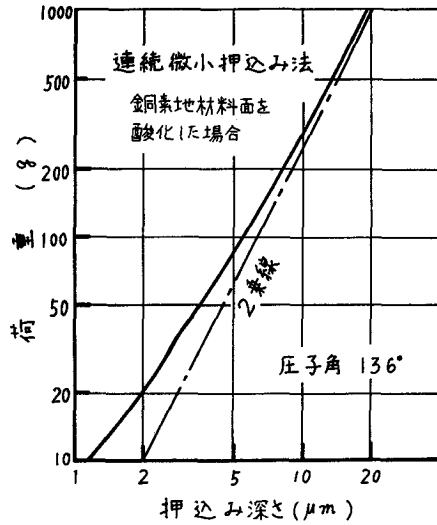


図5・18 銅素地材料の表面を酸化した場合の荷重-押し込み深さ曲線

5・6 表面膜厚の検出精度⁸²⁾

上述の実験結果からもわかるように、本法による表面膜厚の検出精度には膜厚 l や硬さ比 β によって限界値のあることが推測される。しかし、荷重変化率曲線上で得られる移行点と膜厚とを対応させるという観点でこのことを論議することは、現在のところ困難である。そこで、銅素地材料がニッケルめっき膜を有する場合や軟鋼素地材料が銅めっき膜を有

する場合のように、ここでは表面膜ならびに素地材料とも均一な材質とみなせる場合で、しかも、押し込みによって破壊が生じない場合について表面膜厚の検出限界を求める。以後、素地材料の硬さ値が $H_0 = 100 \text{ Hv}$ としたときの検出精度を求め、硬さ値がこの値より大きい場合検出精度は高くなり、逆の場合低くなると理解する。

上記の場合の変化過程を模式化したのが図 5・19 であって、図中の Q 点以後硬さ比 β の変化を生ずるならば、素地材料と表面膜との荷重変化率値の差 Δs は単位押し込み量あたり、

$$\Delta s = r (\beta - 1) \quad (5 \cdot 1)$$

となる。ここで r は $\alpha \cdot H_0$ なる検出係数とする。この式自体からは、 $\beta < 1$ のとき、すなわち表面膜の硬さが素地材料の硬さより小さい試料ほどその膜厚検出は困難になることがわかる。

荷重変化率曲線上、 $1 \mu\text{m}$ 精度の押し込み深さで移行点を求めようとするならば、 Δs の値は平均変化率値の誤差 $1.4 \text{ g} / \mu\text{m}$ 以上になる必要がある。したがって、素地材料の硬さが $H_0 = 100 \text{ Hv}$ のとき、移行点を検出可能な硬さ比は $\beta_1 = 1.4$ 以上あるいは $\beta_2 = 0.5$ 以下となり、荷重変化率曲線上の移行点から膜厚を検出しようとする、本

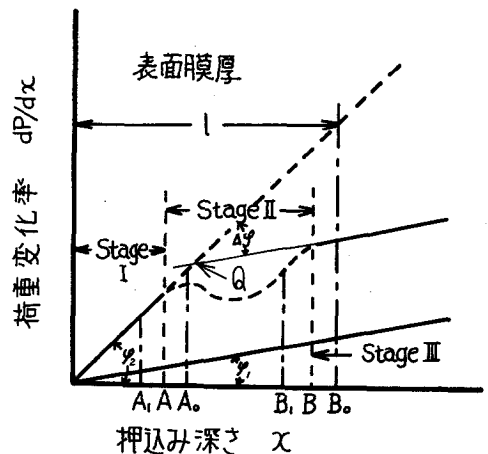


図 5・19 均一な単一表面膜を有する場合の荷重変化率曲線

法は理論上硬さ比の大きい試料にしか適用できない。しかし、このことは押し込み変形挙動を考慮しないために生じた理論的結果であって、実際には図5・20に示した銅素地材料が銅めっき膜を有する場合のように、硬さ比 β_2 が0.93である場合の検出が可能であった。この硬さ比の値は、図5・19において直線①と直線③の両直線が二直線として識別できる角度差を $\Delta\varphi = 2^\circ$

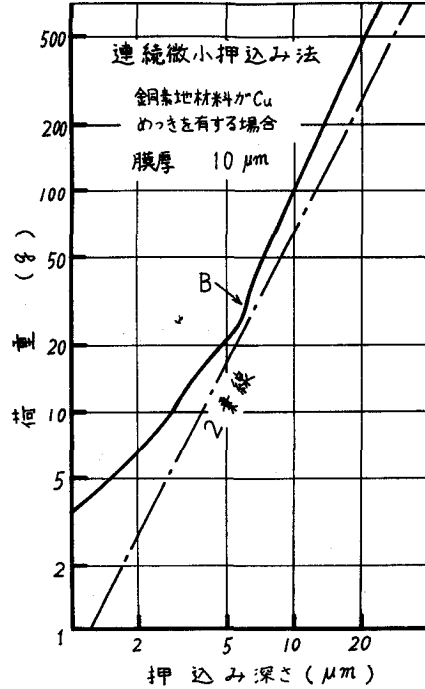


図5・20 銅素地材料に銅めっきを施した場合の荷重-押し込み深さ曲線

～ 3° とおいたとき、理論的に得られる限界値にほぼ等しくなる。この限界値は、直線①と直線③の両直線が x 軸となす角度をそれぞれ φ_1, φ_2 とし、その角度差を $\Delta\varphi$ としたとき、式5・2で示すような β と $\Delta\varphi$ の間の関係式から求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{r + \tan \Delta\varphi}{r - r^2 \tan \Delta\varphi} & \beta &= \beta_1 \geq 1 \\ \beta_2 &= \frac{r - \tan \Delta\varphi}{r + r^2 \tan \Delta\varphi} & 0 < \beta_2 = \beta &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (5 \cdot 2)$$

以上の結果、表面膜と素地材料との間に明瞭な境界（表面膜と素地材料とが同質材料であってもよい）が存在する試料ならば、たとえ硬さ比が極く小さいものであっても、膜厚検出に本法を適用できることがわか

った。

最後に、現時点で検出可能な最小膜厚を理論的に導くことは困難であるが、実験的に4～5 μm の膜厚の検出が可能であった。

5・7 自動データ処理システムによる実験

5・7・1 解析プログラムの概要

連続微小押込み装置から出力した押込み量および荷重のアナログデータをサンプリングし、デジタル値に変換後、硬さ値の算出を行い、デジタルX-Yプロッタに荷重-押込み深さ曲線を出力するための解析プログラムを作成した。そのフローチャートは図5・21の通りである。

AD変換の結果、荷重および押込み量の時間的に連続したデジタル値を得ることができるが、すでに4・5節で述べたように、ある時点におけるこれらの値には誤差が含まれていると考えなくてはならない。そこで、2 KHzのサンプリング周波数でAD変換を行い*、0.5秒、すなわち押込み量にしておおよそ0.6 μm ごとに連続した5個のデータを荷重および押込み量個々について取り、それぞれの平均値をもってその時点での荷重ならびに押込み量とした。この連続した5個のデータに含まれる荷重あるいは押込み量の増加分は無視できる。

しかし、このような方法でデータを収録したとしても、荷重変化率曲線を求めるにあたっては、4・5・1節で述べたAD変換に伴う押

* n チャンネルのアナログデータを入力すると、アナログデータ一つのサンプル数/秒はサンプリング周波数の $1/n$ となる。したがって、押込み速度1.2 $\mu\text{m}/\text{sec}$ で1データあたり(1/1000秒間隔)の荷重および押込み量の最大値はそれぞれ0.2 g, 0.0012 μm に相当する。

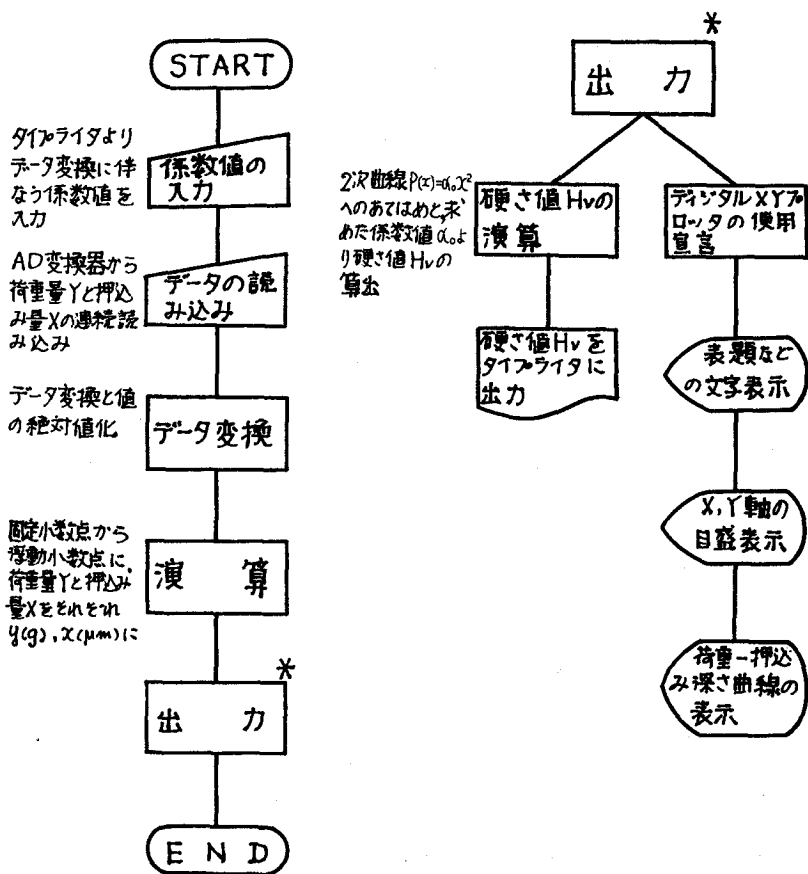


図5・21 解析プログラムのフローチャート

込み量の誤差 ($0.4 \mu\text{m}$) をきざみ値 ($1 \mu\text{m}$) の誤差として考慮する必要がある。その結果、荷重変化率値は約 40% の誤差を含む。したがって、現状において荷重変化率曲線の信頼性は低く、この曲線を求めるには押し込み精度を少なくとも $0.025 \mu\text{m}$ の精度まで向上する必要がある。

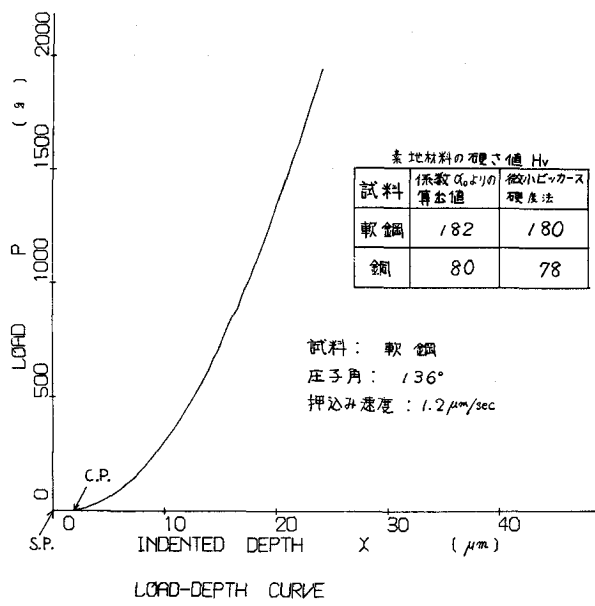
実験的にはまず、上記の方法から求めたデータを使って、最小二乗法により荷重-押し込み深さ曲線の 2 次式: $P(x) = \alpha_0 x^2$ ($\alpha_0 = \alpha H_0$) へ

のあてはめを行い、素地材料の硬さ値を係数値の α_0 より求め、算出結果をタイプライターに出力した。次に、素地材料および素地材料がめっき膜を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線をX-Yプロットに出力した。なお、X-Yプロット自体が有する出力誤差はX、Y両軸とも1ステップ内であり、無視することができる。

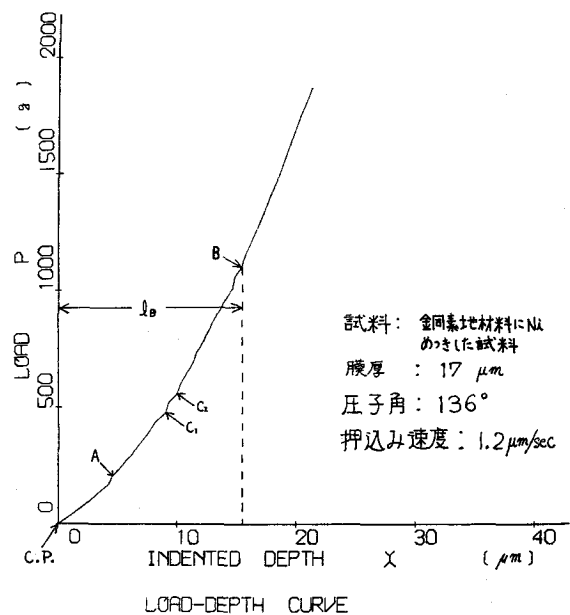
5・7・2 素地材料および素地材料がめっき膜を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線

図5・22はX-Yプロットに出力した荷重-押し込み深さ曲線の一例である。その内(a)は軟鋼の素地材料であり、(b)は銅の素地材料がニッケルめっき膜を有する場合であり、図中に算出した硬さ値が示されている。この曲線の荷重値Pには板バネの応力は含まれない。

軟鋼素地材料の荷重-押し込み深さ曲線はX-Yレコーダ上で得られる曲線とほぼ一致しており、C.P.点は空気マイクロメータの誤差範囲内で定めることができた。また、素地材料の硬さ値は連続微小押し込み装置の作動開始時より50秒内で求めることができた。銅素地材料が膜厚 $17\mu\text{m}$ のニッケルめっき膜を有する場合の荷重-押し込み深さ曲線では、C.P.点からA点までがStage Iに、B点以後がStage IIIに相当するものと思われ、押し込み量 l_B の値は $15.6\mu\text{m}$ であった。Stage IIの変形過程内に C_1 、 C_2 の遷移点を得られた。



(a) 軟鋼素地材料



(b) 銅素地材料にニッケルめっきを施した場合

図5・22 X-Yプロッタに出力した荷重-押し込み深さ曲線

5・8 ま と め

連続微小押し込み法による硬さならびに膜厚測定および自動データ処理システムを用いた実験結果は次の通りである。

- (1) 本法には微小ビッカース硬度法と比較して、一回の圧子押し込み試行により深さ方向の情報が迅速かつ連続に得られるという利点がある。
- (2) 軟鋼、銅およびアルミニウム素地材料の荷重－押し込み深さ曲線は原点を通る2乗曲線で求め、荷重変化率曲線の傾きから求めた硬さ値は微小ビッカース硬度法のものとほぼ一致し、その計測誤差は5%である。粗大結晶に対する押し込み試験では荷重依存性が認められた。
- (3) 素地材料がめっき膜を有する場合の押し込み変形過程は Stage I , Stage II および Stage III から成り立ち、膜厚、硬さ比および圧子角によって押し込み型式が異なる。中でも、Stage I から Stage II への移行過程は、押し込みによる流動変形の阻害現象に起因するものであり、硬さ比によって明確な違いが生じた。実験で得た荷重－押し込み深さ曲線は理論上想定した押し込み変形モデルに対する曲線にほぼ一致した。

しかし、硬さ比があまり大きくなると圧痕周辺に破壊が生じ、その結果、複雑な変形過程となり、膜厚計測は困難であった。

- (4) 荷重変化率曲線上の移行点は10%の誤差で求めることができ、移行点に相当する押し込み深さについては、表面膜と素地材料の硬さ比が1よりかなり小さいとき、理論値とよく一致する。表面膜の検出にあたって、表面膜と素地材料の間に明確な境界が存在するような試料ならば、その硬さ比ならびに非鉄金属および非金属材料を問わず本法を適用することができる。

表面膜厚の検出には、角度の異なる2, 3の圧子を選んで、それぞ

れの荷重変化率曲線から得られる膜厚の平均値を求めればよく、その計測誤差は10%である。また、表面膜厚の検出に適する圧子角は 90° ~ 120° の間にあり、検出可能な最小膜厚は4 ~ 5 μm であった。

- (5) 自動データ処理システムを用いた実験で、荷重変化率曲線から圧子押し込みの変形特性を解析しようとするときは、さらに押し込み量の検出精度の検討とその向上を必要とするが、素地材料の硬さ値ならびに荷重-押し込み深さ曲線は十分な精度で得ることができ、硬さ値は50秒内で求めることができた。

第 6 章 総 括

圧子を試料表面から連続的に押し込んだときに得られる押し込み量と押し込み荷重との関係を利用して、試料の硬さや表面膜の具備する性状を知ろうとすると、押し込み量と荷重との関係を連続的に求める方法の基本的特性の解明はもちろんのこと、まず、圧子の押し込み変形挙動そのものの解明が必要である。したがって、この方法に関する研究を進めるには圧子押し込み変形挙動の内少なくとも変形抗力と変形領域の 2 点について理論的解析を行なう必要があり、またこれらと荷重－押し込み深さ曲線との関係を理論的に求め、この曲線を得るための検出機構やその精度等の問題を解決しなくてはならない。

そこで本研究では、圧子押し込み変形の一解析法を提案し、材料の機械的性質と変形抗力や変形領域との関係および表面膜を有する場合の押し込み変形モデルを求めると同時に、この解析結果と連続微小押し込み法によって得られる荷重－押し込み深さ曲線との関係を理論的に求めた。そして、連続微小押し込み装置の製作を行ない、静的圧子押し込み試験ならびに連続微小押し込み装置を使った試験により、圧子押し込みの変形挙動ならびに試料の硬さや表面膜の性状等を実験的に求め、解析結果との比較検討を行っている。

本研究の結果明らかになった事項を通観して、その概要を述べると次のようになる。

- (1) 第 1 章では、硬さ試験ならびにその連続押し込み法に関する従来の研究結果を略述するとともに、本研究の目的と意義について述べた。
- (2) 第 2 章では、三つの基本的仮定をたて、加工硬化性材料に対する圧子押し込み変形の理論的展開を行い、この解析結果と荷重－押し込み深さ曲線との関係を求めた。

その結果、二次元および三次元圧子押し込みの場合ともに、平均接触圧力、その降伏応力比ならびに弾塑性限界線は、材料の加工硬化指数、予ひずみ率ならびに圧子角によって一義的に定まり、下記の諸点を明らかにすることができた。すなわち、①圧子角が小さい場合焼鈍材に近いほど押し込み力を必要とし、十分な加工材に近いほど押し込み力が少なくてよい。②平均接触圧力と相当降伏応力との比は圧子角のみの関数となる。③圧子押し込みの変形型式には圧縮型と亀裂型ないしは切削型があり、圧子角と予ひずみによって変形型式の違いが生じる。④くさび押し込みによって生じる弾塑性限界線の最大深さは、角錐または円錐圧子押し込みによるものの2～5倍以上であり、焼鈍材のように予ひずみの小さい材料の変形領域は従来の理論的結果よりはるかに大きく求まる。以上の4点である。

圧子押し込みによる変形領域内のひずみ硬化分布模様が押し込み量に依存しない場合、硬さ値は荷重－押し込み深さ曲線の2階微分値から求めることができた。

素地材料の荷重－押し込み深さ曲線は座標軸の原点を通る2次式で表わされ、この素地材料が表面層を有する場合の荷重－押し込み深さ曲線は表面層自体の荷重－押し込み深さ曲線から Stage III の段階で素地材料に関する一般の2次式として表わされる。中でも、単一表面膜を有する場合の圧子押し込みの変形挙動の考察から、表面膜を有する場合の圧子押し込みは Stage I → Stage II → Stage III という段階的な変形過程から成り立ち、この現象は表面膜の加工硬化指数、予ひずみ率ならびにポアソン比、表面膜と素地材料との硬さ比および圧子角に依存することが明らかとなった。

(3) 第3章では、軟鋼、銅および黄銅の各焼鈍材に段階的に引張りひずみを加

え、くさび、角錐ならびに円錐圧子による押し込み試験を行い、圧痕表面や断面の組織観察および硬さ分布を求めた。

その結果、圧痕の表面観察より、圧縮型と亀裂型の押し込み変形が確認され、この現象は予ひずみに依存することがわかった。

平均接触圧力およびその降伏応力比の実験結果はそれぞれ理論の傾向によく一致しており、その値は圧縮型押し込みとみなせる圧子角が $120^{\circ} \sim 150^{\circ}$ の範囲において理論値と15%内で一致する。しかし、亀裂型押し込みの場合ないしは切削型押し込みの場合には、理論値と実験値の差は大きくなった。一方、焼鈍材そのものの実験値は0.2%ひずみに相当する応力を降伏条件として求めた理論値に一致した。

圧痕断面の組織観察より、圧痕近傍に結晶粒の流動変形が認められ、その変形量は圧子角の小さいほど大きい。圧痕断面上の硬さ分布図は押し込み変形の模式図に類似するものとなった。

ポンチ押し込みの弾性解を利用して求めた弾塑性限界は変形領域の大きさを知る上で有効である。また、焼鈍材のような予ひずみの小さい試料の変形領域はすべり線場の理論で考えられるものよりかなり大きく、二次元圧子押し込みの場合の変形領域は、三次元圧子押し込みの場合と比べて深さにして数倍大きいことが実験的にも確認できた。

代表ひずみに関しては、圧子角が $90^{\circ} \sim 150^{\circ}$ の範囲において理論値と実験値とは一致した。

素地材料がめっき膜を有する場合の圧痕断面の組織と硬さ分布模様を考察してみると、その押し込み変形は、押し込みが始まるとまずめっき膜内でのみ流動変形を生じ、押し込み量が増すと境界において流動変形の阻害の過程を経る。そして、さらに押し込みの進行と共に流動変形は素地材料にまでおよび、最終

段階では両者の変形領域が一体化して流動変形を生じるという段階的な変形過程を示すものであり、理論的に想定した Stage I, Stage II および Stage III の 3 段階に対応するものと考えることができた。

- (4) 第 4 章では、微小変位ならびに押し込み速度一定という基本的な条件のもとで、板ばねの弾性変位を利用した押し込み機構を有する連続微小押し込み装置の製作を行ない、この装置から出力されるデータを自動処理するため、AD 変換器ならびに小型計算機を組入れた自動データ処理システムの開発を行った。

その結果、連続微小押し込み装置は押し込み機構、荷重検出機構、押し込み量検出機構、試料保持機構ならびに圧子接触点検出機構から成り、荷重および押し込み量の検出精度としてそれぞれ $0.5g$ 、 $0.3\mu m$ を有し、 $0\sim 3.5\mu m/sec$ まで連続可変な押し込み機能を有する。

荷重－押し込み深さ曲線は試料の変形速度に依存し、試料の粒度、試料表面の仕上げ法ならびに表面あらさ等の試験条件は、従来の微小ビッカース硬さ試験と同様、微小荷重域で影響が大きい。

開発した本システムの構成要素は小型計算機、AD 変換器、デジタル X-Y プロッタおよび連続微小押し込み装置から成り立ち、その基本動作は連続微小押し込み装置から出力したアナログデータをデジタル化し、各種のデータ変換と演算を経て、デジタル X-Y プロッタおよびタイプライタに解析結果の出力を行なう。

データ変換ならびに演算等による相対誤差はたかだかデジタル表示値の $1 \times 10^{-2}\%$ であり、本システムにおける総合精度は AD 変換に伴う精度によって決定される。荷重および押し込み量のデジタル化に伴う精度はそれぞれ $2g$ 、 $0.4\mu m$ であった。

- (5) 第 5 章では、連続微小押し込み装置を使って、素地材料およびこれがめっき

膜を有する場合について圧子押し込み試験を行い、硬さやめっき膜厚の検出を行うとともに、変形挙動および検出限界の検討を行い、自動データ処理システムを用いた実験を行った結果、本法には、微小ビッカース硬度法と比較して、一回の圧子押し込み試行により深さ方向の情報が迅速かつ連続に得られるという利点があった。

軟鋼、銅およびアルミニウム素地材料の荷重－押し込み深さ曲線は原点を通る2乗曲線で求まり、荷重変化率曲線の傾きから求めた硬さ値は微小ビッカース硬度法のものとはほぼ一致し、その計測誤差は5%であった。粗大結晶に対する圧子押し込み試験では荷重依存性が認められた。

素地材料がめっき膜を有する場合の押し込み変形過程は Stage I, Stage II および Stage III から成り立ち、膜厚、硬さ比および圧子角によって押し込み型式が異なった。中でも、Stage I から Stage II への移行過程は押し込みによる流動変形の阻害現象に起因するものであり、硬さ比によって明確な違いが生じた。実験で得た荷重－押し込み深さ曲線は理論上想定した押し込み変形モデルに対する曲線にほぼ一致した。しかし、硬さ比があまり大きくなると圧痕周囲に破壊が生じ、その結果複雑な変形過程となり膜厚計測は困難であった。

荷重変化率曲線上の移行点は10%の誤差で求めることができ、移行点に相当する押し込み深さについては、表面膜と素地材料の硬さ比が1よりかなり小さいとき理論値とよく一致した。表面膜の検出にあたって、表面膜と素地材料の間に明確な境界が存在するような試料ならば、その硬さ比ならびに非鉄金属および非金属材料を問わず本法を適用することができる。

表面膜厚の検出には、角度の異なる2, 3の圧子を選んで、それぞれの荷重変化率曲線から得られる膜厚の平均値を求めればよく、その計測誤差は10%であった。また表面膜厚検出に適する圧子角は90°～120°の間にあり、検

出可能な最小膜厚は 4 ~ 5 μm であった。

自動データ処理システムを用いた実験で、荷重変化率曲線から圧子押込みの変形特性を解析しようとするときは、さらに押込み量の検出精度の検討とその向上を必要とするが、素地材料の硬さ値ならびに荷重-押込み深さ曲線は十分な精度で得ることができ、硬さ値は50秒内で求めることができた。

参 考 文 献

- 1) Hugh O'Neill: Hardness Measurement of Metals and Alloys, Chapman and Hall LTD (1962).
- 2) Small: Hardness Theory and Practice PART I, Service Diamond Tool CO. (1960).
- 3) 山本ほか: 硬さ, コロナ社 (1974).
- 4) 松永: 表面測定, 誠文堂 (1962).
- 5) 大谷: 金属表面工学, 日刊工業新聞社 (1969).
- 6) 吉沢: 硬さ試験法とその応用, 裳華房 (1967).
- 7) 松永: 精密機械, 20, 2 (1954) 49.
- 8) 高沢: 精密機械, 27, 6 (1961) 346.
- 9) 浅枝ほか: 精密機械, 20, 6 (1954) 199.
- 10) 浅枝ほか: 精密機械, 20, 8 (1954) 297.
- 11) 青木ほか: 印刷局研究報告, 2 (1958) 37.
- 12) 青木ほか: 印刷局研究報告, 2 (1958) 46.
- 13) H. Bückle: VDI-Berichte, 41 (1961) 14.
- 14) 吉野: 日本機械学会論文集, 32, 238 (1966) 851.
- 15) 松井: 精密機械, 24, 10 (1958) 539.
- 16) 吉越: 新三菱重工技報, 3, 1 (1961).
- 17) 黒木ほか: 日本機械学会論文集, 31, 229 (1965) 1409.
- 18) 山本ほか: 中央計量検定所報告, 7, 2 (1958) 15.
- 19) 後藤ほか: 昭和44年度精機学会秋季大会前刷 (1969) 207.
- 20) 後藤ほか: 昭和45年度精機学会春季大会前刷 (1970) 107.

- 21) D. Tabor: The Hardness of Metals, Oxford (1951).
- 22) R. Hill: 塑性学, 培風館 (1968).
- 23) L. E. FARMER, et al. : J. Mech. Phys. Solids, 19 (1971) 369.
- 24) A. Shindo: Mem. Faculty of Engineering, Kobe University, NO. 18 (1972) 65.
- 25) A. Shindo: Mem. Faculty of Engineering, Kobe University, NO. 19 (1973) 135.
- 26) A. G. Atkins, et al. : J. Mech. Phys. Solids, 13 (1965) 149.
- 27) A. G. Atkins, et al. : Int. J. Mech. Sci., 7 (1965) 647.
- 28) L. E. Samuels, et al. : J. Mech. Phys. Solids, 5 (1957) 125.
- 29) T. O. Mulhearn: J. Mech. Phys. Solids, 7 (1959) 85.
- 30) G. H. Milliams, et al. : J. Iron. St. Inst., 182 (1956) 266.
- 31) J. F. W. Bishop: J. Mech. Phys. Solids, 2 (1953) 43.
- 32) R. T. Shield: Proc. Roy. Soc., A 233 (1955) 267.
- 33) R. Hill : J. Mech. Phys. Solids, 1 (1953) 265.
- 34) M. C. SHAW, et al. : Transactions of the ASME, Series B, Vol. 92 (1970) 469.
- 35) M. C. SHAW, et al. : Transactions of the ASME, Series B, Vol. 92 (1970) 480.
- 36) W. Hirst, et al. : Proc. Roy. Soc., A 311 (1969) 429.
- 37) K. L. Johnson: J. Mech. Phys. Solids, 18 (1970) 115.
- 38) D. S. Dugdale: J. Mech. Phys. Solids, 2 (1954) 265.
- 39) D. S. Dugdale : J. Mech. Phys. Solids, 2 (1954) 14.
- 40) 堀井ほか : 精密機械, 42, 5 (1976) 351.

- 41) R. Hill, et al. : Proc. Roy. Soc., A 188 (1947) 273.
- 42) エヌ・イ・ベズーホッフ : 弾性・塑性論, 日刊工業新聞社 (1956).
- 43) 山田 : 塑性学, 日本機械学会 (1960).
- 44) Grunzweig, J., et al. : J. Mech. Phys. Solids, 2 (1954) 81.
- 45) 堀井ほか : 精密機械, (1976) 投稿中.
- 46) J. B. Haddow, et al. : Int. J. Mech. Sci., 3 (1961) 229.
- 47) F. J. Lockett : J. Mech. Phys. Solids, 11 (1963) 345.
- 48) 宮本 : 3次元弾性論, 裳華房 (1967).
- 49) A. I. Luré : Three-Dimensional Problems of the Theory of Elasticity, John Wiley (1964).
- 50) Fröcht : PHOTOELASTICITY Vol. 2, John Wiley (1964).
- 51) R. Hill : Phil. Mag., 41, 319 (1950) 745.
- 52) E. Wondris, et al. : Stahl u. Eisen, 80, 6 (1960) 356.
- 53) C. H. Lee ほか : 第22回塑性加工連合講演会前刷 (1971) 199.
- 54) 戸澤ほか : 第22回塑性加工連合講演会前刷 (1971) 429.
- 55) 戸澤ほか : 昭和46年度塑性加工春季講演会前刷 (1971) 231.
- 56) D. S. Dugdale : J. Mech. Phys. Solids, 3 (1955) 206.
- 57) D. S. Dugdale : J. Mech. Phys. Solids, 3 (1955) 197.
- 58) 川辺ほか : 精密機械, 39, 9 (1973) 961.
- 59) 西田 : 日本金属学会会報, 1, 12 (1962) 727.
- 60) E. R. Petty : J. Inst. Metals, 91 (1961) 54.
- 61) 神宮 : 精密機械, 41, 3 (1975) 280.
- 62) 神宮 : 精密機械, 41, 9 (1975) 931.
- 63) 堀井ほか : 精密機械, 40, 12 (1974) 1054.

- 64) K. Horii, et al. : Technol. Rep. Kansai Univ., NO.15 (1974) 71.
- 65) 築添 : 精密測定学, 養賢堂 (1971).
- 66) 山城ほか : 材料試験, 8, 68 (1959) 8.
- 67) 町田 : 日本機械学会論文集, 26, 161 (1960) 151.
- 68) 吉野 : 日本機械学会論文集, 30, 218 (1964) 1113.
- 69) J. B. Haddow, et al. : Int. J. Mech. Sci., 4 (1962) 1.
- 70) 明石ほか : かたさ研究会資料, 34-99 (1959).
- 71) R. Schulze : MICROTECNIC, 8, 1 (1952) 13.
- 72) H. Bückle : VDI-Berichte, 41 (1961) 21.
- 73) H. Bückle : VDI-Berichte, 41 (1961) 171.
- 74) K. Hild : VDI-Berichte, 41 (1961) 47.
- 75) R. M. Douthwaite : J. Iron. St. Inst., 208 (1970) 265.
- 76) 富士通編 : FACOMR ハードウェア・ソフトウェア解説書 (1970).
- 77) 田島 : 表面処理ハンドブック, 産業図書 (1960).
- 78) 加瀬ほか : めっき技術, 日刊工業新聞社 (1964).
- 79) 吉沢ほか : 日本機械学会論文集, 19, 79 (1953) 58.
- 80) 日本金属学会編 : 転位論—その金属学への応用—, 丸善 (1971).
- 81) 川辺ほか : 昭和49年度精機学会秋季大会前刷 (1974) 249.
- 82) K. Horii, et al. : Technol. Rep. Kansai Univ., NO.16 (1975) 133.

謝

辞

本研究を行うにあたり、終始懇切なるご指導とご助言を賜わり、また本論文作成にさいしても、綿密なご校閲をいただいた大阪大学工学部山田朝治教授、川辺秀昭教授、築添正教授ならびに関西大学工学部友田泰行教授に対し、謹んで感謝の意を表わすとともに、本研究を行うためご援助を与えて下さいました大阪大学工学部精密工学科の井川直哉教授、津和秀夫教授、中川憲治教授、牧之内三郎教授および関西大学工学部管理工学科の諸先生方に対し深く感謝の意を表します。

また実験の遂行にあたり、多大のご協力をいただいた関西大学工学部管理計測研究室の卒業生諸氏に厚くお礼申し上げます。