

Title	連続微小押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







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

	5	
н		~ V/~
		・ハ

						目、次	
第	1 韋	Ê	序	-			1
第:	2 章	Ī	加	L	硬	性材料の圧子押込みの解析ならびに連続微小押込み	
		法	17	お	ける	荷重-押込み深さ曲線の数式化	7
2	2•	1		ま	えた	き	7
:	2•	2		加	工	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	
4	2•	3		加	工石	化性材料の角錐および円錐圧子押込みの解析 20)
	2	٠	3	•	1	三次元圧子押込み変形の近似解	
	2	•	3	•	2	锋伏応力比	
	2	•	3	•	3	変形領域と予ひずみ率	
2	2•	4		均	t _e	材質の単一表面膜を有する場合の圧子押込み変形 23	;
2	2•	5		荷	重 -	甲込み深さ曲線の数式化	;
	2	•	5	•	1	便さと荷重ー押込み深さ曲線との関係	
	2	٠	5	٠	2	素地材料が表面膜を有する場合の荷重-押込み深さ	
					Ħ	泉	
2	?•	6		ま	とめ		
第:	} 章	•	圧	子	押ジ	み試験による近似解ならびに変形挙動の検討 35	
3	•	1		ま	えカ	き	

•

1

- - 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
- 第4章 連続微小押込み法のシステム開発 ……………………………………67

 - - 4 2 1 押込み機構および検出機構の検討
 - 4 2 2 連続微小押込み装置の構造と性能
 - 4 3 荷重 押込み深さ曲線におよぼす押込み速度,表面あらさ。
 - 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

 - 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 • 1 AD変換に伴う精度

4・5・2 各種サブルーチンの有する変換精度

- 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 ………… 90

 - 5・4 めっき膜を有する場合の膜厚測定 …………………………………………… 96

5・4・1 めっき膜を有する場合の荷重-押込み深さ曲線

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

- 5・5 その他の表面膜を有する場合の荷重 押込み深さ曲線 ……… 105
- 5 7 自動データ処理システムによる実験 110
 - 5 7 1 解析プログラムの概要
 - 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

荷重一押込み深さ曲線

参	考	文	献	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	122
謝			辞		126

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。

-1-

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10µm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歩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

ー押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-押 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 からの圧子押込みに伴なう荷重と押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 - 押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) 押込み荷重ならびに押込み深さの高感度・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込み変形挙動解明への糸口を見出す。

-3-

(3) 押込みによる変形抗力と荷重一押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,押込み変形に対する基本的性質を仮定 し,押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,この押込みによる変形抗力と荷重一押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,押込み速度を一定とし た押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が 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込みに関し、 三つの基本的性質と押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、荷重一押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 荷重一押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,連続微小押込み装置の試作を行った。次いで,荷重と押込み量の特性を求め,荷

-4-

重一押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込み 深さ曲線を求め,それぞれの荷重一押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,自動データー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込み解析 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

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,連続微小押込み法によって得られる荷重 – 押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込みの理論的解析が必要であり,中でも押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Pm 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

-7-

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込み量に依存しないという立場から, 圧子押 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

-8-

る場合の圧子押込み変形挙動の解明を行なった。また,荷重-押込み深 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込みの解析⁴⁰⁾

2・2・1 二次元圧子押込み変形の近似解

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II(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応する応力を平均接触 圧力Pm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 eg と相当降伏応力 g を考える。すなわち、領域 I の内部は 代表ひずみ eg に相当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Pmは g 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,

$$\overline{\sigma} = \mathbf{a}_0 \cdot \overline{\varepsilon}^n \tag{2 \cdot 1}$$

になる。ここです:真応力、 $\overline{\epsilon}$: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 e_0 を与えると、そ の後その材料は e_0 に相当する応力 e_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 $\sigma_n(\sigma_B)$ に相当する公 称ひずみを e_n とし、 e_n および e_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、

 $i = n / \overline{\epsilon_0} \qquad i \ge 1 \qquad (2 \cdot 2)$

となる。この結果、初期降伏応力 6(真応力)は、

 $\overline{q}_0 = a_0 \cdot \left(\frac{n}{i}\right)^n \qquad (2 \cdot 3)$

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 の内部が領域IIに相当す



図 2 • 1 くさび圧子による押込み 変形の模式図

る。

押込みの結果,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,

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{\sin \theta} - 1 \tag{2 \cdot 4}$$

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、

-11-

変形領域 I の内部の材料は(ā, + ā,)の対数ひずみに相当する応力を 相当降伏応力 σ, としてもつことになる。対数ひずみ ā, と対数ひずみ ā, の比を,

$$j = h / \overline{\epsilon_{\theta}} \qquad i \ge j \ge 1$$
 (2 • 5)

とおけば、相等降伏応力 ō₆(真応力)は、

$$\overline{\sigma_{\theta}} = a_0 \cdot \left(\frac{n}{i} + \frac{n}{j}\right)^n \qquad (2 \cdot 6)$$

となる。ここで n, j および θ の間には,

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

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 Pmはすべり線場の理論⁴¹⁾よ り,

 $P_{\rm m} = 2k_{\theta} \,(1 + 2 \,\psi) \,(2 \cdot 8)$

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、

$$\mathbf{k}_{\theta} = \mathbf{\sigma}_{\theta} / \sqrt{3} \tag{2 \cdot 9}$$

が成立し, ↓の値は,

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

を満足する。結局, 頂角2θのくさび圧子の押込みの結果, σ₀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σ₀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Pmは式2・6, 2・8および2・9により,

$$P_{m} = \frac{2}{\sqrt{3}} a_{0} \cdot \frac{\left(\frac{n}{i} + \frac{n}{j}\right)^{n}}{e^{\frac{n}{i}} \cdot e^{\frac{n}{j}}} (1 + \psi) \qquad (2 \cdot 11)$$

となり、材料の加工硬化指数 n、予ひずみ率 i およびくさび角 2 θ 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 $\sigma_\theta \ge \sigma_0$ 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'O₁I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⁾。

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

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,

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

となり、K₀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Pmとくさび角20の関 係を示したのが図2・2であ る。同一材料であってもPm 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すとき, Pmの最大値または最小値はく





-14-

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C₀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C₀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C₀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 ($P_m \neq \sigma_0$)

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_g と等しくな る。

図2・4はくさび角と降伏応力比 C_{θ} との関係を示すもので、 C_{θ} の値 はnやiに関係せず、くさび角2 θ 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_{θ} 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C₄

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 Eg

さび角 28(*) 90 40 60 105 120 136 150 1.924 1,000 0.4/4 0.260 0.155 0.079 0.035 0.00 Е

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 θ = 75° 以下では,全ての材料について圧痕面で亀裂を生じるよ うな押込み変形になると予想される。このような押込み変形を亀裂型 押込みと称する。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込まれるような押込み変形,すなわち圧縮型 押込みであり,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 削型押込みになるものと思われる。角錐や円錐圧子による押込み変形 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,一様ひず 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 くさび押込みによる弾 塑性限界の最大深さηと 接触幅aの比K₀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。 の値も大きくなるが、Pm あるいはCo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込 み変形の面からみるなら ば, この破線は押込み変



図2・6 くさび押込みにおける弾塑性限界
 線の最大深さと接触幅との比K₀

-18-

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°の圧子による押込み変形模様であり,押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°の圧子による押込み変形模様を示し, i の値が 減少すると押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込みの解析⁴⁵⁾

2・3・1 三次元圧子押込み変形の近似解

三次元圧子の押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

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Pm は,

 $P_m = C_\theta \cdot \sigma_\theta \qquad (2 \cdot 1 4)$

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 よる押込み変形の模式図

-20 -

込み変形あるいは図2・8の(b)で示すLockettの円錐圧子押込み変形 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る)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Pm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σ₀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K₁は次式で表わされ る^{48),49)}。

 $K_1 = \left(\frac{\eta}{2}\right)^2$

 $=\frac{(7-2\nu)C_0^{-8\pm\sqrt{\{(7-2\nu)C_0^{-8}\}^2-16\{4+(2\nu-1)C_0^{-8}\}}}{8}$

 $(2 \cdot 15)$

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,三次元圧子押込みにおいても,その平均接触圧力Pm 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20によって一義的に定まる。なお,この場合の

-21-

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20と降
 伏応力比C₀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。
 C₀の値は材料の加工硬化指数
 れや予ひずみ率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、



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_a

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。

2・3・3 変形領域と予ひずみ率

図2・10は降伏応力比C₀とK₀およびK₁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K₀およびK₁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。C₀の値が5以上になるとK₀とK₁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 押込みによって生じ る変形領域が角錐また は円錐圧子押込みによ って生じる変形領域よ りはるかに大きいこと を意味する。中でも,



を意味する。中でも、 図2・10 降伏応力比C₀とK₀およびK₁との関係 K₁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、圧子押込みによる変形領域のひずみ硬化分布模様が押 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

-23-

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の圧子押込みの 変形模様が押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、 押込みの増加と共にひずみ硬化分布模様が変化し、押込み方向に硬さ変 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, H₁(一定)で ある。

-24-

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 II 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 $H_1(-定)$ と素地材料の硬さ $H_0(-c)$ 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 • 1 5 からK₁の値が求まる。そこで、求めたK₁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K₁= $(\eta/a)^2$ の関係式に代入すれば、圧子の押込み深さの限界

-25-

値 ぷ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、実験で得られる押込み深さの限界値は x₀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σωと硬さ比βを条件に,次式からK1の値が求まる。

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

$(2 \cdot 16)$

 $C' = C_0 \cdot \beta$ 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の成立する押込み深さ の限界値 x_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 ν = 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 θ の関係から、弾塑性限界線の最大深 さと押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、実験で得られる押込み深さの限界 値は x_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 て得られる押込み深さの限界値は $x_0 \ge x_1$ 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

-26-

ひずみの小さいとき, 押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節の押込み変 形モデルからいえば, $\beta \ge 1$ であって押込み によって試料の破壊が 生じないとき, Stage



図2・12 角錐または円錐圧子押込みに おける弾塑性限界線の最大深 さと押込み深さとの比K₁

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Stage Ⅱ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、押込み深さと領域 I の最大深さとの関係より、押込み深 さの限界値x3と表面膜厚ℓとの比は近似的に、

 $\lambda = \sqrt{2} \cos \theta \qquad \theta : \mathbb{E} \mathcal{F} \mathfrak{F} \mathfrak{h} \qquad (2 \cdot 17)$

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,押込み深さの限 界値x4が定まる。したがって,この限界値x4に関しては,

-27 -

 $\lambda = 1$

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 荷重一押込み深さ曲線の数式化

2・5・1 硬さと荷重 – 押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込み法によって得られる押 込み量 x と押込みに必要な荷重 P の連続的な関係,すなわち荷重 – 押 込み深さ曲線と上述の結果との関係を求める。なお,押込み荷重 P は 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 H(x)と深さ x 点まで押込むのに必要な荷重 P(x)との間には

次式が成立する。

$$P(x) = \alpha \,\overline{H}(x) \, \int_0^x (x - \xi) \, \xi \, d\xi \qquad (2 \cdot 19)$$



次に、図2・13で 示すように、試料表面 からの深さくのみによ 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(ら)とす れば、H(ら)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

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

の関係式が成立する。この式を二階微分すると,

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

となり, 試料表面から深さ x 点における抗力 H(x)は連続微小押込み法 によって得られる荷重-押込み深さ曲線 P(x)の二階微分値でもって表 わされる。

一方, 式2・19を二階微分すれば,

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

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。

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

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, $\overline{H}(x) = H_0 = -\overline{c}$ という条件の場合,式2・23より $H(x) = \overline{H}(x) = H_0$ が成立する。すなわち,相似則が成立する場合,硬さ値 $\overline{H}(x)$ 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。

 $\widehat{H}(x)$ が変化する場合, H(x)と $\widehat{H}(x)$ 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 $\widehat{H}(x) = H_0(\beta - a_H x)$ あるいは $\widehat{H}(x) = H_0(\beta + a_H \cos x)$ の変化をする場合(ここで $\widehat{H}(x) > 0$ である), H(x)は $\widehat{H}(x)$ 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化すると見なされ る。 以上の結果,荷重-押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H(x) = H(x)= $H_0(-)$ 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ー押込み深さ曲線P(x)は、

 $P(x) = \frac{\alpha}{2} H_0 x^2$ $H_0 = -\overline{z}$ (2 • 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 $H(x) = H_1$)を有する 場合、図2・14のOAに相当するStage Iの押 込み範囲において、

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

と求まり, この荷重変化 率曲線は図2・14の曲

H₁=一定



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,

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

$$(2 \cdot 26)$$

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、 $\ell_{\rm B}$ は $\overline{\rm OB}$ に相当する押込み深さである。また、図2・14中に示した $A_{\rm I}$, $A_{\rm 0}$ 点はそれぞれ2・4節で述べた深さの限界値 $x_{\rm I}$, $x_{\rm 0}$ に相当し、 $B_{\rm I}$, $B_{\rm 0}$ 点はそれぞれ限界値 $x_{\rm a}$, $x_{\rm A}$ 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 重一押込み深さ曲線は,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色的な変化 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 IIへの移行点に相当する押込み 深さを ℓ_B、押込みが 0 ~ 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 – 押込み深さ曲線は次式となる。

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

 $(2 \cdot 27)$

この式の右辺の一項目は押込み深さxが ℓ_B 以上において成立し、二項 目は $0 \leq x \leq \ell_B$ 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込み力を必要 とし, 十分な加工材に近いほど押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 II → Stage II 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込みに関する理論的展開を行なった。その結果、圧 子押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 るくさび押込み試験ならびに角錐および円錐圧子押込み試験を行なった。 そして、各々の圧子押込み変形挙動の特色、圧子面に作用する平均接触 圧力 Pm,降伏応力比 Co, Cg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:20×20mm²)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

-35-



(a) 試料の寸法・材質



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、0~30%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 $\overline{\epsilon_0}$ 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 $\overline{\sigma}$ および対数ひずみ $\overline{\epsilon}$ はそれぞれ $\overline{\sigma} = \sigma(1+\epsilon), \ \overline{\epsilon} = \ell n(1+\epsilon)$ 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。

くさび押込み試験(押込み速度 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,3kgであり,図2・1中2aに相当する圧痕幅および押込み荷重 (150~180kg)の精度はそれぞれ50µm,0.5kg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,十分電解研摩したのち,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込んだときの実 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



(b) 予ひずみ (32.2%)を 与えた場合

引張り方向

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) の場合は圧縮型押込みに, (f)および(g)の場合は切削型 押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 θ=136° 銅焼鈍材



(b) くさび角 2θ = 90° 銅焼鈍材



- (c) くさび角 2 θ = 150° 軟鋼
 予ひずみ率 i = 1.17
- ほぼ一致する。(d)および(e) 図 3・4 圧痕面,側面にあらわれる
 の場合は圧縮型押込みに,
 ダ形模様ならびに圧痕断面の 組織に関する観察結果
 (f)および(g)の場合は切削型
 (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 (g) くさび角 $2\theta = 136^\circ$ 軟鋼 予ひずみ率 i = 1.17



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ことは困 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 C₀, C₀ 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_g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 Pm 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 eg 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 あらさ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



図 3・6 くさび押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 $\theta \ge P_m$ の関係を表わし、理論値と実験値は θ が 60°~75°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,圧縮型押込みとみなさ れる範囲内で平均接触圧力 Pmの実験値と理論値は一致し,焼鈍材の Pm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 のもとの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 カ 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°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

	予ひずみ率	くさび半角68°		くさび半角 45°		くさび半角 30°	
記号	i	理論値	実験値	理論値	実験值	理論値	実験值
•	1.85	2.71	2.3	1.93 3.59	3.6	1.13 3.85	2.7
\$	3.32	2.98	3.0	2.52 3.86	3.2		
۵	6.86	3.60 3.61	3.8	3.59 4.88	5.1		
0	15.31	4.78 4.91	4.4	5.38 6.93	6.7		
Ū	258.00	18.08 21.54	19.5	22.92 30.34	21.0	19.78 35.12	20.0

表 3・1 銅試料の予ひずみ率を変えた場合の Ko の値



(a) くさび角 2 $\theta = 136^{\circ}$

(b) くさび角2θ = 90°



図3・8 変形領域の模式図

-46-

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,電解研摩により 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 ε₀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 σ₀の求め方などは,くさび押込みの場合と全く同じ

	軟 錮		金同		黄飼	
	著 者	Tabor	着者	Tabor	(60/40)	
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? Hv	90	156	34	39	85(荷重 100g) 73(荷重1000g)	
焼艶 条件 (℃)	870		650		420~560 (N₂がス 封入)	
表上烧鲀材	電解研摩		电解研摩		電解研 摩	
面げ 予ひずみ 仕 員荷役	なし		なし		銅 めっき (厚さ 368µm)	
試験片の 寸法·形状	*30 - 取録と銅の場合はくさび押込みの場 合と同じ試料を用いたので、ここでは 黄銅のみについて述べる (mm) 本 の (mm) た の (mm) た の (mm) た の (mm) た の の し の し の し の し の し の し の し た の で 、 ここでは 、 ここでは 、 の の し に の し に の で 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う の の い に の の い に の で 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 、 の の の に 、 ここでは う 、 ここでは う 、 ここでは う 、 、 こ で 、 、 こ で 、 こ で 、 こ で 、 、 、 こ で の 、 、 の の 、 、 、 の の で の の の の の の の こ の の の こ の の の の の の の の の の の こ の の の の こ の の し い か い の い の の の こ の の の の の こ の の の で の の こ の の の こ の の の の の の の の の の の の の					
焼金柱初降伏 <u> 応力 0。(ドリ/mati</u>	/0.5 0.2 %	14.9 ひすみ(2./5 《相当	1.94	5.80	

表3・2 試料の機械的性質

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 1000 g で, 正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, 梨地面の状態で試験を行った。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

-48-

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。また押込み速 度は 0.5 mm/minで, 押込み荷重は 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100g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28~47µm内にあることから,圧痕相互の最小間隔を100µm 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 200g/ℓと硫酸80g/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

-49 -

表3・3 銅試料の圧痕表面形状

寻ひす"み €。		2. = 0	$\mathcal{E}_{o} \coloneqq \mathcal{E}_{n}$	
		戏 金屯 林	(引張り強きに相当)	破 断点近傍
圧	90			
子角	120			
			(d)	(e)
(°)	136			<u>300 µт</u>
			(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,その押込み型式は切削型に近い。圧子角が 90°以下の場合,押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、 $\epsilon_0 \ge \epsilon_n$ 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 $C_0(=H_v/\sigma_0), C_\theta(=H_v/\sigma_0)$ 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 子押込みの場合でも降伏応力比 C₀, C₀の実験結果を見てみると、代表 ひずみ c₀ 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 きのひずみに依存することが判る。また、予ひずみの小さいほど C₀ の値は大きくなり、これは今までに求められた C₀ 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。 C₀ 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さ





(a) 銅試料の平均接触圧力とその降伏応力比 Co, Ca

図3・11 角錐圧子押込みによる予 応力比C₀, C₀との関係(-





(b) 軟鋼試料の平均接触圧力とその降伏応力比 Co, C_a

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)

-55-

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_{θ} 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さ 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_{θ} 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_{θ} の関係を示す。実験値はAtkinsら^{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_n 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°~150°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 Pm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 2 θ が 90°~150°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。

ここで改めて押込み荷重について考察してみる。降伏応力比 C₀の 実験結果がほぼ理論の傾向に一致し、代表ひずみ c₀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、押込み荷重の大部分は圧痕の極く近傍の変形抗力に 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も推察される。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 Hv = 130 ~ 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。

-59-





(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限界 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限界 線は三次元的にほぼ押込 み方向に凸の球面を成し ている。この弾性限界線 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。したが って,円錐圧子による押 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

-60-

びに K₁の実験値は理論値に 近く,二次元圧子押込みの 場合と同様に、三次元ポン チ押込みの弾性解を利用し た弾塑性限界線は、角錐な * 0.2% いずみを降伏条件とした時の値

の黄銅焼鈍材の硬さ値なら 表3・4 黄銅焼鈍材の硬さ値なら びに K1の値

	圧子庫	¶ 90°	圧チ育	≩ /36°	
	理論値	実験値	理論値*	実験値	
Hv (ビッカース硬さ)	53.7	70	61.8	73	
K.	4.30	3.5	4.05	3.5	

らびに円錐圧子押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°のくさび押込みを行った場合、そ の弾塑性限界は理論上 K₀ = 12.5 ~ 14.0 と求まり,三次元圧子押込み による変形領域の大きさは二次元圧子押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°の押込み結果で、そのうち(a)および(b)は押込 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 (L.23) (L43) (L.24) (L.14) (L.14)

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°

ma



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 れるような押込み段階であることがわかる。これよりさらに押込み量 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 当ると思われるが、素地材料がめっき膜を有する場合の押込み変形は 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 型押込みの場合ないしは切削型押込みの場合には,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 押込み変形の模式図に類似する。ポンチ押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、二次元圧子押込みの場合の変形領域 は、三次元圧子押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、その押込み変形は、押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。これは理論的に想 定した Stage I, Stage II および Stage II の3 段階に対応するもの と考えることができる。

-65-

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

-67-

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 µm 以内で、 その硬さ値Hv 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 µm,5000 9 で十分である。また、連続な荷重一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った。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、その三角形状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

-68-
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





図4・1 押込み機構部略図

う問題が生じる。そこで,荷重-押込み深さ曲線上で,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・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,8:板ばね,9:ノズル

了压子

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

押込み速度は0~3.5 μm/secの範囲を連続可変することができる。

押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, 押込み量 検出には, ③の差動トランス(感 度 0.2 µm)を用いた。押込み 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, 押込み変位に伴ない圧子 には押込み方向に対して直角な 横方向の移動 *d ε* と押込み方向自 体の方向変化 *d* η が考えられる。 そこで, この両者の量は単純な



(a) 押込み深さ



図4・4 押込み深さおよび変 形抗力の時間特性

幾何学的計算により、押込み量 100 μ m に対し、それぞれ $d \epsilon \leq 0.05$ μ m 、 $4\eta \leq 0.06^{\circ}$ 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 µm 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(Hv=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0.59の荷重出力による)の背圧値より *d*hcを前もって求めておき、hcと *d*hcの差をもって圧子先端と試料表面との間隔を



(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 µm以内の精度で定めることができた。

実験方法は、図4・3のブロックダイヤグラムで示すように、押込 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 込み深さ曲線P(x)を記録させる方式とした。

荷重 - 押込み深さ曲線の 一例を図4・6に示す。A 点は作動開始点,B点は押 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。

荷重検出器自体の精度は 0.5 9 であるが, X-Yレコーダーの荷重 記録範囲内で 20~30 µm の十分な押込みを行なうには,荷重の検 出感度を下げざるを得なく,通常荷重-押込み深さ曲線上では 1.4 9 かまたは 4 9 の精度で実験を行った。押込み量の精度は 0.3 µm 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 9 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 荷重ならびに押込み深さの較正線図

4・3 荷重一押込み深さ曲線におよぼす押込み速度,表面あらさ等の 影響

本装置を使って荷重-押込み深さ曲線を得るには,押込み速度⁶⁰,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 り,また一般の微小ビッカース硬さ試験と同様,0~5 μ mの微小な押 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。

押込み速度が 0.5 μm/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-押込み深さ曲線が得られる。そして,押込み速度の増



(a) 押込み速度 0.4 μm/secの場合
(b) 押込み速度 1.2 μm/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 μm/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 ~ 2.5 μm/sec



図4・9 表面あらさおよびバフ研摩面の 荷重-押込み深さ曲線への影響

内とし,通常 1.2 μm/sec を押込み速度として選んだ。

図4・9の(b),(c)の荷重ー押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 メリーペ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摩仕 上げを行って作成したものである。素地材料の荷重-押込み深さ曲線を 求めたものと比較すれば,微小押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と も考えられる。また、荷重および押 込み量の測定精度を無視できない押 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 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

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くてはならない。

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ディジタル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)



(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。

連続微小押込み装置は、
第4章でも述べたように、
試料に圧子を圧入すると
きの押込み量xと押込み
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 \sim 3.5 μ m/sec
最大押込み量	100 µm
最大荷重	5 kg
成 度 (押込み量	0.2 µm
^{尼仅} 【荷 重	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 ビット
サンフ*リンク*	40, 80, 60 Hz
周波教	2, 4, 8 kHz
出力表示 AD	2進ビット + 符号)ビット
金力電圧 DA	-10V ~+10V
	0.3%フルスケール(マルチプレクサ)
AD支援 イ目 反	0.6% フルスケール(アンフペレクサ)
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

太 休	記録容量	8 k word
· · · · ·	使用言語	FASP アセンフ・ラ言語
		基本命令 28個
	£ -	凝似命令 8個
	<u> </u>	一命令 6~11µs
紙テープ	読取り速度	80 文字 / 秒
1)-9"-		
9170	読取り速度	20 文字/ 秒
ライター	打ち出し速度	20 文字/ 秒
製作所	富士通 品名	FACOM-R

表4・4 ディジタルX-Y プロッタの仕様

プロット速度	Х,	丫軸	400	ステップ・/	秒	
	Z	車由	10	回/秒		
プロット幅			0.1	mm		
記録紙寸法	Х	車曲	有効	記録長さ	35	m
	Y	軸	有効	記録長さ	270	mm
製作所 岩	崎通1	È	品石	DPL-6	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ィジタル化し、同時に直 接計算機にデータを送出するか、一度ディ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 からのディジタルデータを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 ナログデータのディジタル化を行い、このディ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8K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ィジタ 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 ディジタルX-Yプロッタは計算機の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 カ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 ディジタル値、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ィ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	サファレーチン ナンバー	データ形成	入力範囲	ステッフ *教 (word*)
中央饥理	1806024	台めとする制作	即用サブルー	税ステッ フ⁹教
装置	チン、18	140を始めと	するデータ変	3499
	授用サプル	-チン , その他	1 演算用サフ゛	
	ルーチンタ	事多数 のサブル	ーチンガあ	
	3			
917°71	IAOE1	固定小数点	-32767	53
<i>9</i> -	IAIE1	一倍精度	~32767	162
-	1A0E2	固定小数点	-32767 <i>9999</i>	75
	IAIE2	二倍精度	~327679 99 9	220
	IAOFI	没审力小教白	±10723709/1×10	2/2
	IAIF2		~/0.723709//×/0 ⁷⁶	205
	1F000	浮動小教点	周上	
るなな	ICIEO	固定小数点	-1024	106
	ICOFO	浮動小敏点	~1023	172
ディジタル	IF001		-/350	554
XY7977	1F002		~1350	441
~ • • • • • • • •	1F003	固定小教点	(丫軸)	157
	/F004			133
	1F005			209
デ-9変換	JE2E0	齪→浮動	-32767	107
-	IE2FI	浮动→ 固定	~ 32767	202

* /6ビット 構成をもって | word とする。

.

表4・6 各種サブルーチンの動作概要

	(7	n)
サブルーチン ナンバー	動作内容	備考
A 0 E A E A 0 E 2 A E 2 A 0 F A F 2	タイプライターより固定小牧点あるいは浮動 小牧点の定牧入刀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 カする	
× Icieo Icofo	A-D変換器から訂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	
<i> </i> E 2 E 0	A-D変換器より訂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 数点データを四則漢算ならびに実数漢算のた めに浮動小数点に変換する	
/E2F1	データの訂算結果= ディ ジタルXYプロッタ に 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
180,60	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
18140 その112多数	データの四剧演算ならびに関数演算を行 なう	99,5 19
 F001	ディ ジタルXYプロッタの基本的動作を 別向するためのシステムサブルーチンご ある	岩通提供
1F002	ディジタルXYプロッタに文字表示を行 なう	
/ F003	同上に 2連巻教値表示を行なう	
F004 F005	かラフ表示を行なう	



図4・13 AD 変換に伴う誤差

-84-

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ィジタル値、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異なるディジ 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10 mV 以内であり、この値はディジタル値にして1以内に相当する。

連続微小押込み装置から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 μm, 2000 g と考える必要があり、他方ではこれらのディジ



図4・14 押込み量のディジタル変換較正線図 -85~

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,押込み量 x = 100 μm お よび荷重 P(x) = 2000 g をそれぞれおおよそ 2000のディジタル値に 対応させた。この対応値自体は押込み量について 0.05 μmまでの精度 を,また荷重について 1 g 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 荷重のディジタル変換較正線図

押込み量 x のディジタル変換値 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 のディ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,押込み量のディジタル値 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)のディジタル値Yもディジタ 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、 荷重のディジタル値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,ディジタル変換後の誤差はそれぞれ 0.4 µm,29と なった。

4・5・2 各種サブルーチンの有する精度

ディ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

-87-



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 カ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1×10⁻²%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1×10⁻²%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。

-88-

4・6 ま と め

微小変位ならびに押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込み機構を有する連続微小押込み装置の製作 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) 本装置は押込み機構,荷重検出機構,押込み量検出機構,試料保持 機構ならびに圧子接触点検出機構から成り,荷重および押込み量の検 出精度としてそれぞれ 0.5 9, 0.3 µm を有し, 0~3.5 µm/sec ま で連続可変な押込み機能を有する。
- (2) 荷重-押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,ディジタル X-Yプロッタおよび連続微小押込み装置から成り立ち,その基本動 作は連続微小押込み装置から出力したアナログデータをディジタル化 し、各種のデータ変換と演算を経て,ディジタル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ィジタル表示値の1×10⁻²%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。荷重および押込み量のディジタル化に伴う精度はそれぞれ29,0.4 μm 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

電解研摩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30mm, ,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。電解研摩法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1μm以内である。

表	5	1	宝騇冬母	-
25	U	T	大吹木门	1

試 料	素地材料の	めっき腰の	めっき膜厚	表面あ	らき (µm Rmax)
材質	表面仕上け法	材質	(µm)	素地材料面	めっき面
		金同	10 ~ 30		
金同	銅電解研摩法		$5 \sim 30$	1	3 以下
A Int			$5 \sim 20$	1~1	
		亜 鉛	$5 \sim 20$		
前了全部	雨解研藤井	金司	10~110	1	2 ** =
<u>キト</u> 単門	更而加浮丛	型 鉛	20~100		7% 6
PILS	南征研南-+	THEIL MALAN	膜厚 (µm)	1.115	酸化面
ニウム	更 P## 1011 / 学 7云	M/MERCILIA	$4 \sim 50$	1 141	1 以下
压子 角 (°)	(60), 90, 120, 136, 150 (ダイヤモンド製)				

表 5 • 2 電解研摩条件

試料 材質	銅および黄銅	軟 錮	アルミニウム
溶	リン酸 /75cc	リン酸 400c	リン酸 400c
租	エチル アルコール ¹⁷⁵ cc	7日ム酸 200g	硫酸 100 cc
成	水 /75 cc		7日ム酸 25g (無水)
液温	20°C	88 ~ 90°C	40°C
電 圧	2.7V	3.2 V	20 V
電流	3.3 ~4.4 A	1.8 ~ 1.9 A	1.5 ∼ 2.5 A
陰極材	銅板		軟 鐲

表5・3 電気めっき

条件

き	めっき材	金同	ニッケル	亜 鉛	7 🗆 4
	溶組成	疏 酸銅 ^{Ⅰ00g/} 500cc 硫酸 25cc/500cc	硫酸ニッケル 180g/ 塩化アンモニア 25g/l 研酸 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7口厶酸 200g/g 硫酸 0.42cc/g
	液温	常温~ 50℃	26 ∼45°C	20~30°C	30 ~ 40°C
	電 圧	0.28 V	1.0 ∼1.8 V	0.8 \sim 1.0 V	3.2 V
	電流	0.4 \sim 0.9 A	0.25~0.35 A	Q3~Q5A	4.0~5.0 A
	陽極校	銅板	ニッケル 板	亜鉛板	炭素棒

表 5 • 4 陽極酸化条件

液租成	/58硫酸(溶量パーセント)
液温	20 ± 1 °C
電流宽度	2 A/dm²
. 电流	直 流

連続微小押込み法における押込み速度はほぼ 1.2 µm/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¹⁹⁾も素地材料の荷重-押込み深さ曲線は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、0~50**9**の微 小荷重の範囲、すなわち押込み量にして1~4 μmの範囲で、硬さ変化



図5・3 素地材料の荷重-押込み深さ曲線

-93-

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。dP/dxの値は、押込み深さのきざみ値 dxを1 μ m とした場合の荷重 – 押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 g/μ m であり、曲線③、④の場合 4 g/μ m である。この誤差は、荷重の計測誤差が押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

-94-

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。 しかし、本実験のように変形抗力



図5・5 圧痕の干渉顕微鏡 写真(試料:銅素 地材料)

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 方位と押込み方向および押込 み量によって著しく影響を受 ける単結晶試料の押込み変形 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-押込み深さ曲線

図5・8に示した荷重-押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 の圧子押込み試験で、試料表面から押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-押込み深さ曲線によれば、押込み開始からA点までほ 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。

この荷重一押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 II 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°の場合の圧子押込みは圧痕面がめっき膜のみから 形成される圧縮型押込みであり、圧子角90°の場合は、Stage II で圧 痕面に素地材料が現われ始めることから、亀裂型押込みである。

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β≈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) 連続微小押込み法

(b) 微小ビッカース硬度法



(c) 押込み深さ16µmにおける圧痕近傍の表面写真

図 5 • 1 0 銅素地材料にクロムめっきを施した場合の 荷重 - 押込み深さ曲線

-99-

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込み変形過程は めっき膜厚 ℓ,硬さ比 β および圧子角 2 θ によって異なることがわか った。その中でも,押込みによって試料表面上に破壊が生じない場合, その押込み変形過程は式 2 • 2 7 で H(x) = 一定とおいたときに意味す る荷重 – 押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込み深さと硬さ変化との関係を本法の荷重 – 押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。

-100 -

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、軟鋼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 $\beta \ge 1$ 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・1 2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_i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 ・ 1 2 の曲線①で は、C₁点の荷重変化率値とStage I の延長線上でC₁点の押込み位置に 相当するC₁点の荷重変化率値との差は 3 g / μ m であり、この曲線に 対する荷重変化率値の誤差は 1.4 g / μ m であるので、C₁点は明らか にピークとみなすことができる。同様に、C₃点とC₃点の荷重変化率値 の差は 5 g / μ m であるから、C₃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C₁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 と押込み量の対応を図5・12の模 式図で示した。押込み変形は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 点までの押込み量 4 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 論上求めた最小押込み量 OA, と最大押込み量 OA。の間にあり、(b)の場 合、最大押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 Ι 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 押込み量 🕼

庄 子 角 2θ(*)	最小押込 み重ŌĀi(µ***)	実験結果 !A (4m)	最大押込 み量 (7A。(µm)
150	1.1		2.6
136	1. 6	1.8	3. <i>9</i>
120	2.3	4.0	5.5
90	4.7	7.2	9.6
98 B	15 1100		

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

膜を有する場合

膜厚 (μm)	最大押込 み量 ŌĀ。(µm)	実験結果 LA (µm)
4	2.6	
7	4. 5	3.0
12	7.7	5.8
15	9.6	7.2
28	17.9	14.5

次に, 試料表面からB 点 までの押込み量 6とめっき 1.5 膜厚ℓの比λを求め、図5 \prec 걋 13に示した。硬さ比β とんとの 1.0 によって入の値は異なるが, å 同一材料であれば、 6の値 0.5 は10%の誤差で求めるこ 90 とができた。この実験値と 式2・17で表わした理



図5・13 圧子角とんの関係 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 た数点の箇所で、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 Gok」(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。K₁およびλが未知の場合には,上 記と同様の方法で、まず K₁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。

-104 -


5・5 その他の表面膜を有する場合の荷重一押込み深さ曲線

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



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、その荷重ー 押込み深さ曲線は図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 • 1 7 の荷重変化率曲線よ り、 ℓ_{A} および ℓ_{B} を求めると、 K₁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込み変 形は Stage I および Stage II の段階では圧縮型押込みとな り, Stage Ⅲの段階から、塗 膜に対して切削型押込みとな る。

図5・18は銅素地材料の 表面をブンゼンバーナーの酸



-106 -

化炎で20分間加熱処理した 場合の荷重ー押込み深さ曲線 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 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。

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

-107-

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 H₀ ≈ 100 H_v 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 4s は単位押込み量あたり、

 $\Delta \mathbf{s} = \boldsymbol{\gamma} \left(\boldsymbol{\beta} - 1 \right) \tag{5 \cdot 1}$

となる。ここでrは α ・ 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 μ m 精 度の押込み深さで移行点を求め ようとするならば、4sの値は平 均変化率値の誤差 $1.4 g / \mu$ m 以上になる必要がある。し たがって、素地材料の硬さが $H_0 = 100 H_v$ 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と、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

-108-

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 $4\varphi = 2^\circ$



~ 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 4φ としたとき,式5・2で示すような β と 4φ の間 の関係式から求めることができる。

 $\beta_{1} = \frac{\gamma + \tan \Delta \varphi}{\gamma - \gamma^{2} \tan \Delta \varphi} \qquad \beta = \beta_{1} \ge 1$ $\beta_{2} = \frac{\gamma - \tan \Delta \varphi}{\gamma + \gamma^{2} \tan \Delta \varphi} \qquad 0 < \beta_{2} = \beta \le 1$ $\left. \left(\begin{array}{c} 5 \cdot 2 \end{array} \right) \right.$

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,ディジタル値に変換後,硬さ値の算出を行い, ディジタル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ィジタ 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,2KHz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当りのサンプ 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 µm /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 9, 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 μm)をきざみ値(1 μm)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 求めるには押込み精度を少なくとも0.025 μm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 法により荷重ー押込み深さ曲線の 2次式: $P(x) = \alpha_0 x^2 (\alpha_0 = \alpha H_0) \wedge$ のあてはめを行い,素地材料の硬さ値を係数値のα₀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ー押込み深さ曲線をX-Yプロッタに出力 した。なお,X-Yプロッタ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-押込み深 さ曲線

> 図5・22はX-Yプロッタに出力した荷重-押込み深さ曲線の一 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ー押込み深さ曲線は $X - Y \nu$ 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 μ m のニッケルめっき膜を有する場合の荷重一押込み深さ曲 線では、C.P.点からA点までがStage I に、B点以後がStage II に相 当するものと思われ、押込み量 ℓ_B の値は15.6 μ m であった。Stage II の変形過程内にC₁, C₂の遷移点が得られた。





5・8 まとめ

連続微小押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。

- 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一押込み深さ曲線は原 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込み変形過程は Stage I, Stage II および Stage II から成り立ち,膜厚,硬さ比および圧子角によって押込み型式が異なる。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-押込み深さ曲線は 理論上想定した押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 重一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。

第6章 総 括

圧子を試料表面から連続的に押込んだときに得られる押込み量と押込み荷重 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込み変形挙動の内少くとも変形 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 - 押込み深さ曲線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込み法によって得られる荷重 --押込み深さ曲線との関係を理論的に求めた。そして,連続微小押込み装置の製 作を行ない,静的圧子押込み試験ならびに連続微小押込み装置を使った試験に より, 圧子押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。

- 第1章では、硬さ試験ならびにその連続押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込み変形の理論的展開を行い、この解析結果と荷重一押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込み力を必要 とし,十分な加工材に近いほど押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た。

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 - 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の変形 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 II 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

-117 -

え,くさび,角錐ならびに円錐圧子による押込み試験を行い,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,亀裂型押込みの場合ない しは切削型押込みの場合には,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込み変形 の模式図に類似するものとなった。

ポンチ押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、二次元圧子押込み の場合の変形領域は、三次元圧子押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°~150°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、その押込み変形は、押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込み機構を有する連続微小押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,連続微小押込み装置は押込み機構,荷重検出機構,押込み量検 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 込み量の検出精度としてそれぞれ 0.5g, 0.3 µm を有し, 0 ~ 3.5µm/secま で連続可変な押込み機能を有する。

荷重 - 押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, ディジタル X - Yプロッタおよび連続微小押込み装置から成り立ち, その基本動作は連続 微小押込み装置から出力した アナログデータ をディジタル化し, 各種のデ - タ変換と演算を経て, ディジタル 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ィジタル表示値の 1×10^{-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。荷重および押込み量のディジタル化に伴う精度はそれぞれ 29、0.4 μ mであった。

(5) 第5章では、連続微小押込み装置を使って、素地材料およびこれがめっき

-119 -

膜を有する場合について圧子押込み試験を行い,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込み変形過程は Stage I, Stage I および Stage IIから成り立ち, 膜厚, 硬さ比および圧子角によって押込み型 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。実験で得た荷重一押込み深さ曲線は理論上想定した押込み変形モデル 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一押込み深さ曲線 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

- Hugh O'Neill:Hardness Measurement of Metals and Alloys, Chapman and Hall LTD (1962).
- 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,<u>20</u>,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,<u>31</u>,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.F_{ARMER}, et al. : J. Mech. Phys. Solids, 19 (1971) 369.
- A. Shindo: Mem. Faculty of Engineering, Kobe University, NO. 18 (1972) 65.
- 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.

-123-

- 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).
- A. I. Luré : Three-Dimensional Problems of the Theory of Elasticity, John Wiley (1964).
- 50) Frocht : PHOTOELASTICITY Vol. 2, John Wiley (1964).
- 51) R. Hill: Phil. Mag., <u>41</u>, 319 (1950) 745.
- 52) E. Wondris, et al.: Stahl u. Eisen, <u>80</u>, 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) 戸澤はか: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.

-124 -

- 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:転位論ーその金属学への応用ー,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

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。