

球圧子の押込みによる硬さと変形抵抗との対応*

石橋達弥**, 下田 茂**

The Correlation between Hardness (Mean Contact Pressure ; by the Spherical Indenter) and the Flow Stress

by Tatsuya ISHIBASHI and Shigeru SHIMODA

In order to correlate hardness P_m by the spherical indenter with the flow stress Y , it is necessary to determine the total mean strain of the indentation, which corresponds to the total strain in a uniaxial stress field. Firstly, the total mean strain of the indentation ε_{ic} is defined, by means of multiplying the total corresponding strain coefficient of the indentation C_{ic} by the total profile coefficient of the indentation (d/D_c) at the end of the plastic flow of a specimen; $\varepsilon_{ic} = C_{ic}(d/D_c)$. Then Hardness/Flow stress ratio C is obtained experimentally, $C = 9.8 P_m/Y$, Y in MPa, and formulated as follows; $C = 1.1 + (2/3) \ln(\varepsilon_{ic} \cdot E_s/Y)$, E_s is the Young's modulus of a specimen. Further, an example of the flow stress-strain characteristic curve of SUS 304 specimen is shown in a wide range of the strain by means of a calculation using this formula and the former reported formula; $P_m = P_{up}(d/D_p)^{2p}$, etc.

Key Words: Material Testing, Hardness, Mean Contact Pressure, Total Mean Strain of Indentation, Flow Stress, Hardness/Flow Stress Ratio, Stress-Strain Characteristic Curve

1. 結 言

球圧子の押込みによる硬さと変形抵抗との関係を扱う場合、平均接触圧力を硬さと定義したものと、単軸状態の応力を変形抵抗としたものとを対応させて考えるのが通例である。この際、圧子球の押込みによるくぼみ周辺部の平均ひずみと、単軸状態のひずみとの対応づけも必要となる。

実際、試料に塑性変形が生ずる場合、硬さを9.8倍したものと変形抵抗 [MPa] との比：硬さ/変形抵抗比 C は押込み条件により約1.1から3程度に変化することが、これまでの研究において理論的にも実験的にも明らかにされている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

C の値が3程度となる場合は、圧子球下の試料が完全塑性変形状態にある場合であり、硬さ/変形抵抗比の定量的な関係は、Taborをはじめとする研究者らによりすでに確立されていると考えてよい⁽¹⁾⁽⁵⁾。

一方、 C の値が約1.1から3くらいに至るまでの範囲は、試料の弾-塑性遷移過程と称されるものであり、この部分を扱ったものとしてはHill⁽²⁾による球状空洞

押し広げ理論の解を拡張したJohnson⁽⁶⁾の研究があるが、硬さと変形抵抗とを対応づける際のくぼみの平均ひずみに関する考え方などに不十分な点が見られ、そのため両者の定量的対応づけはまだ不完全な状態にある。

本研究はこのような点を考察することに主眼を置き、前報に続いて新たに押込終了時のくぼみ形状係数：全くくぼみ形状係数を導入し、まず圧子球と試料の弾性接触状態と試料の完全塑性変形状態というふたつの状態に着目して、弾-塑性遷移押込過程における全くくぼみひずみ相当係数を導き、これと全くくぼみ形状係数とを掛け合わせるにより単軸状態の全ひずみに相当する全くくぼみの平均ひずみを定義した。

次に、それを基にして硬さと変形抵抗との実測値を対応させた結果、球圧子の弾-塑性遷移押込過程での両者の関係は、Hillの解を拡張したJohnsonの式と同じ形であらわされ、係数のみことなる式で定式化できることが明らかになった。

さらに、この定式化した関係式と前報⁽⁶⁾で得た弾-塑性遷移押込過程での諸量の関係を定める式とを併用して、かなり小さいひずみ範囲に至るまでの変形抵抗-ひずみ特性を、球圧子の押込硬さ試験から推定できることをSUS 304を例にとって示した。

* 昭和61年4月1日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年7月1日。

** 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

2. 試料の完全塑性変形状態における
硬さと変形抵抗との対応

圧子球下での試料が完全塑性変形状態に達した時の硬さと変形抵抗との対応関係は、Tabor⁽¹⁾により明らかにされている。そこで次にしめすような記号を用いて Tabor が鋼球圧子の押込みの場合に得た関係を要約すると式(1)~(4)のようになる (Y in MPa).

P_m : 硬さ [平均接触圧力]

Y : 変形抵抗 [応力]

C : 硬さ/変形抵抗比

L : 荷重

d : 永久くぼみ直径

R, D : 圧子球の半径, 直径

(d/D) : 永久くぼみのみかけの形状係数

C_{ca} : みかけのくぼみひずみ相当係数

ϵ_{ia} : みかけのくぼみの平均ひずみ

$$C = 9.8 P_m / Y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C \approx 2.8 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{ia} = C_{ca} (d/D) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{ca} \approx 0.2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

この時、硬さ P_m は

$$P_m = 0.102 \times 4L / (\pi d^2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

で示す平均接触圧力で定義する。また加工硬化性の試料の場合は、式(3)に示すみかけのくぼみの平均ひずみに相当する(単軸状態の)ひずみの時の変形抵抗をもって硬さに対応させるとというのが Tabor の考えかたである。

3. 試料の弾-塑性遷移過程における
これまでの硬さと変形抵抗との対応

Marsh⁽⁷⁾は、ピラミッド圧子の押込みにおいて、硬さ/変形抵抗比 C の実測値は、 E_s を試料のヤング率、 Y_s を降伏応力とすれば

$$C = A + B \ln(E_s / Y_s) \quad \dots\dots\dots (6)$$

のような形に整理でき、かつこれは Hill による球状空洞押し広げ理論の解の形に一致することを示した。ただし、係数 A, B は Hill の解とは異なる数値である。

その後これらの研究を基にして、Johnson⁽⁶⁾は球状空洞の体積膨張分と圧子により移動させられた体積分とが等しいと仮定することにより、Hill の解を圧子頂角を含んだ形に拡張し、円すい圧子や球圧子の弾-塑性遷移押込過程における硬さ/変形抵抗比 C の式(7)を与えた [図 8 (b)].

$$C = \frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \left(\frac{1}{3} \frac{E_s}{Y} \tan \beta \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

この時試料が加工硬化性材料 [図 3 (b)] であれば、塑性くぼみの平均ひずみ ϵ_{ip} は Tabor と同じ形の

$$\epsilon_{ip} = 0.2 \tan \beta \quad \dots\dots\dots (8)$$

で与えることにし、これに相当する単軸状態の塑性ひずみ ϵ_p の時の変形抵抗をもって硬さに対応させるとしている。さて Johnson の式中の $\tan \beta$ は図 1 (a) の幾何学的関係より式(9)で与えられるものである。

$$\tan \beta = a / (R_c - \delta_c) \approx (a/R_c) = (d/D_c) \quad \dots (9)$$

これは後述する著者らの全くくぼみ形状係数 (d/D_c) と意味は同じものであるが、この (d/D_c) はくぼみの塑性分と弾性分を含むものであるため、それを用いて塑性くぼみの平均ひずみ ϵ_{ip} を算出する考えかたは妥当ではない。また圧子球下での試料の弾-塑性遷移過程においては、くぼみ周辺部のひずみとしては塑性分と弾性分についての考察が必要であるが、それらの点についても不めいりょうであり、くぼみの平均ひずみに関する考えかたなどについても不十分な点がみられる。そのため以下の章においてこれらの問題点を考察する。

4. 硬さとくぼみ形状係数との関係

くぼみの平均ひずみを定義するまえに、まずその基本となる硬さとくぼみ形状係数との関係を検討する。

4.1 全くくぼみ形状係数と他のくぼみ形状係数

試料平面に圧子球を押し込んだ時、試料の塑性変形が終了した時点での接触状態を図 1 (a)、除荷した状態を図 1 (b) のようにモデル化して表す。

ここで E_i, E_s, μ_i, μ_s をそれぞれ圧子球と試料のヤング率、ポアソン比とし、また圧子球の、試料のおよび圧子球と試料との、それぞれ接触に関する弾性パラメータを $I(E), S(E), f(E)$ 、として

$$I(E) = (1 - \mu_i^2) / E_i \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$S(E) = (1 - \mu_s^2) / E_s \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$f(E) = I(E) + S(E) \quad \dots\dots\dots (12)$$

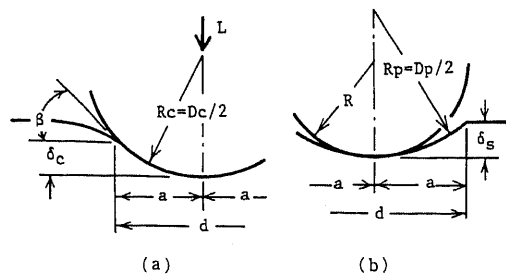


図 1 圧子球と試料との接触のモデル図

のように与える。さらに荷重と圧子球直径の二乗との比を荷重率 C_{LR} [式(13)]

$$C_{LR} = 0.102L/D^2 \dots\dots\dots (13)$$

とすれば、図1(b)に荷重 L が作用したときの接触関係については式(14)ようになる。

$$d = [3Df(E)L / \{1 - (D/D_p)\}]^{1/3} \dots\dots\dots (14)$$

またその時の圧子球と試料との共通接触凹球面直径 $D_c (=2R_c)$ は

$$D_c = D / \left[1 - \frac{I(E)}{f(E)} \left\{ 1 - \left(\frac{D}{D_p} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (15)$$

のようにそれぞれ Hertz の弾性接触論より与えられる。したがって押込終了時のくぼみ形状係数 (d/D_c) は、式(10)~(15)を用いて

$$\begin{aligned} (d/D_c) &= (d/D) [1 - \{3 \times 9.8 C_{LR} I(E) / (d/D)^3\}] \dots\dots\dots (16) \\ &= \left(\frac{d}{D} \right) \left\{ 1 - \frac{3 \times 9.8 C_{LR} f(E)}{(d/D)^3} \right\} \\ &\quad + \frac{3 \times 9.8 C_{LR} S(E)}{(d/D)^2} \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

のようになる。しかるにこの得られた式(17)の右辺第1項は、次式

$$(d/D_p) = (d/D) [1 - \{3 \times 9.8 C_{LR} f(E) / (d/D)^3\}] \dots\dots\dots (18)$$

で示すように前報で与えた永久くぼみの真の形状係数 (d/D_p) ($D_p = 2R_p$: 永久くぼみの凹球面直径), すなわちくぼみの塑性変形分の形状係数にほかならず、また右辺第2項は $(d/D_p) = 0$ となる弾性接触の場合にはこの項だけ残るわけであるから、これはくぼみの弾性変形(回復)分を表す形状係数の項にほかならない。したがってこれを弾性くぼみ形状係数 $(d/D)_r$ として

$$(d/D)_r = 3 \times 9.8 C_{LR} S(E) / (d/D)^2 \dots\dots\dots (19)$$

のように与えると、押込終了時のくぼみ形状係数 (d/D_c) は式(20)のような形、

$$(d/D_c) = (d/D_p) + (d/D)_r \dots\dots\dots (20)$$

すなわちくぼみ形状係数の塑性変形分と弾性変形(回復)分との和で表される形(図2)となるから、本論文ではこれを全くくぼみ形状係数と定義することにする。

4.2 弾性接触の場合における硬さとくぼみ形状係数との関係 必要な記号に Suffix として e を付け弾性接触時の関係を表すものとし、関係する式や図などにおいて $D_p = \infty$ であることに注意すれば、式(5), (14)よりまず硬さ P_{me} とくぼみのみかけの形状係数 (d_e/D) との関係式

$$P_{me} = 0.102 [4 / \{3\pi f(E)\}] (d_e/D) \dots\dots\dots (21)$$

が得られ、また式(12), (15)より次式

$$D_c \cdot S(E) = D \cdot f(E) \dots\dots\dots (22)$$

を得、それを式(21)に代入することで弾性接触時の硬さ P_{me} と全くくぼみ形状係数 (d_e/D_c) との関係式(23)を得る。

$$P_{me} = 0.102 [4 / \{3\pi S(E)\}] (d_e/D_c) \dots\dots\dots (23)$$

4.3 永久くぼみを生ずる場合の硬さと全くくぼみ形状係数との関係 前報⁽⁶⁾での弾-塑性遷移押込過程における硬さ P_m と永久くぼみの真の形状係数 (d/D_p) および永久くぼみのみかけの形状係数 (d/D) との関係を示したのが式(24), (25)である。

$$P_m = P_{up} (d/D_p)^{x_p} \dots\dots\dots (24)$$

$$P_m = P_{up} \left[\left(\frac{d}{D} \right) \left\{ 1 - \frac{3 \times 9.8 \pi f(E)}{4(d/D)} P_m \right\} \right]^{x_p} \dots\dots\dots (25)$$

式(13), (16)より次式

$$(d/D_c) = (d/D) [1 - \{3D \cdot I(E) \cdot L / d^3\}] \dots\dots (26)$$

を得、これと式(12), (5), (25)とをあわせ用いると、永久くぼみを生ずる場合の硬さ P_m と全くくぼみ形状係数 (d/D_c) との関係は式(27)となる。

$$P_m = P_{up} \left[\left(\frac{d}{D_c} \right) \left\{ 1 - \frac{3 \times 9.8 \pi S(E)}{4(d/D_c)} P_m \right\} \right]^{x_p} \dots\dots\dots (27)$$

この時 P_{up} , x_p をそれぞれ球圧子の押込みによる最終塑性硬さ、塑性硬化指数と称する。

4.4 硬さとくぼみ形状係数および変形抵抗とひずみとの相互関係 以上述べた硬さ P_m と各くぼみ形状係数 (d/D) , (d/D_p) , (d/D_c) などとの関係を両対数グラフ上に示したのが図2である。式(21), (25)に示す $P_m - (d/D)$ の関係は前報でも示したように圧子球材質に依存し1本では表しえない。例えば図2中の破線は超鋼合金球圧子(W ball)を、二点鎖線は鋼球圧子(S ball)を用いたときの $P_m - (d/D)$ の関係をモデル的に表したものである。それに対し式(23), (27)による $P_m - (d/D_c)$ の関係は、図2に示すように圧子球材質に関係なく1本で表されることが分かる。また同じ図2中には変形抵抗を0.102倍したものとひずみとの関係も比較・対照のために示してある。したがって、以上の関係を参考にすれば、変形抵抗 Y -全ひずみ ϵ 特性に対応させる時の基本として考えるべき関係としては、硬さ P_m -全くくぼみ形状係数 (d/D_c) の関係でなければならぬことが理解できる。

5. 圧子球の押込みによるくぼみの平均ひずみ

以上の考察に基づいて本章では、くぼみ形状係数からくぼみの平均ひずみを定義する方法について述べる。

まず前報でも述べたように、多くの材料の単軸圧縮試験では変形抵抗 Y と全ひずみ ϵ [式(30)], 塑性ひずみ ϵ_p [n 乗硬化則: 式(28)] との関係は図3に示すような形に表され、また弾性ひずみ ϵ_r は式(29)のように与えられる。

$$Y = C_p \cdot \epsilon_p^n \dots\dots\dots (28)$$

$$\epsilon_r = Y/E_s \dots\dots\dots (29)$$

$$\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_r \dots\dots\dots (30)$$

したがって、これらの点をもとにして全くほみ形状係数の式(20)と全ひずみの式(30)とを比較・対照した上で、Taborの与えた式(3)にならつくほみ形状係数にくほみひずみ相当係数をかけたものをくほみの平均ひずみと定義することにし、それが単軸状態での各ひずみに相当するものと考えれば、以下に示す記号を用いて式(31)~(33)を得る。

$\epsilon_{ic}, \epsilon_{ip}, \epsilon_{ir}$: それぞれ球圧子の押込みによる全くほみの、塑性くほみの、弾性くほみの平均ひずみ

C_{ec}, C_{ep}, C_{er} : それぞれ球圧子の押込みによる全くほみひずみの、塑性くほみひずみの、弾性くほみひずみの相当係数

$$\epsilon_{ic} = C_{ec}(d/D_c) \rightarrow \epsilon \dots\dots\dots (31)$$

$$\epsilon_{ip} = C_{ep}(d/D_p) \rightarrow \epsilon_p \dots\dots\dots (32)$$

$$\epsilon_{ir} = C_{er}(d/D) \rightarrow \epsilon_r \dots\dots\dots (33)$$

5・1 弾性くほみひずみ相当係数 C_{er} この係数を定める方法としては、圧子球下での試料と単軸応力状態下での試料とが弾性変形から塑性変形へ移行する位置を等しくするようによればよいという点に着目する。まず圧子球下で試料の塑性変形が開始されるときの平均接触圧力は、試料の硬化性、非硬化性(図3(a), (b))などの特性にかかわらず $0.102 \times 1.1 Y_{ye}^{(1)}$ (Y_{ye} : 降伏応力) に達した時であると考えれば

$$P_{mey} = 0.102 \times 1.1 Y_{ye} \dots\dots\dots (34)$$

を得る。すなわちこの点での硬さ/変形抵抗比 C の値は1.1を意味するわけであり、かつこの対応がなされるためには図2に示す④点 [$P_{mey}, (d_e/D_c)_y$] の位置を③点の示す [$0.102 \times 1.1 Y_{ye}, \epsilon_{ye}$] の位置まで動かす必要があり、その量が求めようとしている弾性くほみひずみ相当係数にほかならない。

ところで塑性変形開始の点は試料が弾性状態である場合の式(29), (23)をそれぞれを満足する点でもあるから、 ϵ_r を ϵ_{ye} , Y を Y_{ye} として式(29)から $Y_{ye} = E_s \epsilon_{ye}$ が得られ、これを式(34)の右辺に、および式(23)を左辺に代入して整理する[この時 Suffix に y を付けたものは降伏点における値(たとえば、 ϵ_y : 降伏ひずみ)をさすものとし、また $(1-\mu_s^2) = 0.9$ と考える]と、

$$\epsilon_{ye} = [4 / \{3.3\pi(1-\mu_s^2)\}] (d_e/D_c)_y \dots\dots\dots (35)$$

を得る。この式が③点の ϵ_{ye} と④点の $(d_e/D_c)_y$ との横軸の位置関係を表しているわけであるから、同じグラフ上に描けば図2のように式(35)の係数の量だけ異なって示されることになる。

また弾性変形の最終の点(塑性変形開始の点)でもあるこの点では、 $(d_e/D_c)_y$ が $(d/D)_r$ を意味するから、結局弾性くほみひずみ相当係数 C_{er} は式(33)を参照して式(36)として得られる。

$$C_{er} = 4 / \{3.3\pi(1-\mu_s^2)\} \approx 0.43 \dots\dots\dots (36)$$

5・2 塑性くほみひずみ相当係数 C_{ep} 圧子球下での試料が完全塑性変形状態に移行した時点以後に着目すると、弾性くほみの形状係数 $(d/D)_r$ は永久くほみの真の形状係数 $(d/D)_p$ に比べてかなり小さい値となるから、 $(d/D) \approx (d/D_c) \approx (d/D)_p$ の関係が得られることになる。そこで Tabor による式(3)と本章の序で与えた式(32)とから、 $C_{ep} \approx C_{ea}$ としても大差ないことが分かる。よって塑性くほみひずみ相当係数 C_{ep} を式(37)のように与える。

$$C_{ep} = 2 / \{3.3\pi(1-\mu_s^2)\} \approx 0.21 \dots\dots\dots (37)$$

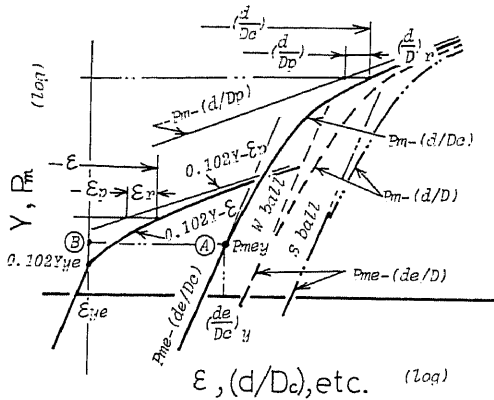


図2 硬さとくほみ形状係数, 変形抵抗とひずみ

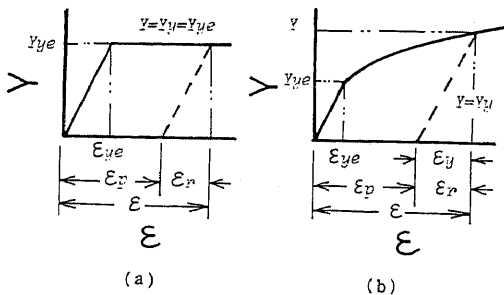


図3 材料の非硬化, 硬化特性

5.3 全くほみひずみ相当係数 C_{ec} 以上より、全くほみ形状係数を単軸状態下の全ひずみ ϵ に変換する全くほみひずみ相当係数 C_{ec} は、これまでに求めた諸式を用いると式(38)のように表される。

$$C_{ec} = \frac{2}{3.3\pi(1-\mu_s^2)} \times \left[1 + \frac{S(E)}{\left\{ \left(\frac{d}{D} \right)^3 / (3 \times 9.8 C_{LR}) \right\} - I(E)} \right] \dots\dots\dots (38)$$

すなわち、この式は圧子球と試料の弾性接触時には式(36)に一致し、試料が完全塑性変形状態に達した時には式(37)に相当することになる。

5.4 全くほみの平均ひずみ ϵ_{ic} ゆえに球圧子の弾-塑性遷移押込過程におけるくほみ周辺部の平均ひずみ：全くほみの平均ひずみ ϵ_{ic} は最終的には式(31)を参照して式(39)の形で得ることができる。

$$\epsilon_{ic} = 0.21 \left[1 + \frac{3 \times 9.8 C_{LR} \{ S(E) - I(E) \}}{\left(\frac{d}{D} \right)^3} \right] \left(\frac{d}{D} \right) \dots\dots\dots (39)$$

6. 実験方法

6.1 圧子および荷重 圧子としては表1に示すそれぞれの直径が2mmと5mmの超硬合金球圧子(W2圧子, W5圧子)を使用した。また荷重の載荷装置としては、0~490NまではVickers硬さ試験機を、490~4900Nまでは小形圧縮試験機を用いた。

6.2 試料 変形抵抗の測定が可能であることという基本条件から、市販の直径50mmの棒材を用いることにし、材質や硬化特性に多様性をもたせるため熱処理や予ひずみを与えるなどして表2に示す試料を準備した。まずSS41(A)とAA(A)の試料は表2中の温度で5hの焼なましを行った後、直径48mm、長さ70~75mmとし、200tの圧縮試験機により圧縮を行い表2中の()内に示した予ひずみを与えた。他の材料の変形抵抗測定用の試料としては棒材の半径方向における非均質性を考えて、球圧子の押込試験部分に相当する位置から押込方向に直径12mm、長さ約30mmの試験片を削出し、はく大ひずみゲージをはり付けた後30tの圧縮試験機により圧縮を行った。いずれの材料も球圧子の押込用試料としては、約φ50、厚さ9~15mmのものを製作した。また押込試験面の均質性を検討するため荷重を段階的に変えてHVの測定を行った。

6.3 永久くほみ形状の測定 永久くほみの形状に関する諸寸法の測定には、前報と同じように工具顕微鏡を用いた。

7. 実験結果と考察

7.1 変形抵抗 Y-全ひずみ ϵ 各試料の変形抵抗(0.102×Y)-全ひずみ(ϵ)の実測値を両対数グラフ上に示したのが図4~7と図9である。SS41(A)とAA(A)のような予ひずみを与えた試料はほぼ弾完全塑性材料(図3(a))として扱える。また加工硬化性を示す試料としてはSUS630H900, AA, SUS304であるが、特にSUS304はその傾向が顕著である。

7.2 硬さ P_m -全くほみの平均ひずみ ϵ_{ic} 試験面の均質性という点から、ごく小荷重率までの P_m の測定はSUS630H900とAAの試料とに限定した。

表1に示すW2圧子(●印)とW5圧子(○印)とを各荷重で押し込んだ時の硬さ P_m と式(39)から算出した全くほみの平均ひずみ ϵ_{ic} との関係も図4~7と図9に示してある。弾完全塑性材料に近いSS41(A)やAA(A)の試料では、(d/D)の値がそれぞれ0.15や0.2くらいより大きくなると P_m は一定値をとるようになり、圧子球下での試料が完全塑性変形状態になっていることが分かる。一方、加工硬化性を示す試料では、(d/D)の値が0.4とか0.5を超しても P_m は増加し続けている。特に降伏ひずみ ϵ_{ve} が高いSUS630H900やAA(ヤング率も小さい)の試料では、図中の範囲において弾-塑性遷移押込過程が主であることは次の図8からも分かる。

7.3 硬さ/変形抵抗比 C-全くほみの平均ひずみ ϵ_{ic} , 全くほみの平均ひずみ/くほみの弾性回復ひずみ比(ϵ_{ic}/ϵ_r) P_m - ϵ_{ic} と0.102Y- ϵ との関係に基づ

表1 圧子諸元

Indenter	Ball Material	D mm	Ei GPa	μ_i	I(E) 1/(10 ³ GPa)
W 2	Tungsten	2	608	0.21	1.57
W 5	carbide	5			

1GPa=102Kgf/mm²

表2 試料諸元

Metal {JIS}	Hardness HV 9.8N-490N	Es GPa	S(E) 1/(10 ³ GPa)
SS41(A) {SS41} (38.5%) 650 °C	185-175	206	4.37
AA(A) {A2017} (20%) 415 °C	82-85	71	12.7
SUS630 {SUS630} H900	430	196	4.5
AA {A2017} Commercial	125-135	72	12.5
SUS304 {SUS304} Commercial	210-170	190	4.7

1N=0.102Kgf, 1GPa=102Kgf/mm²

いて C を求めた結果を ϵ_{ic} に対して片対数グラフ上に示したのが図 8 (a) である。

$C-\epsilon_{ic}$ の関係は各試料によってそれぞれ異なり、おそらく各々の降伏点やヤング率の違いなどに影響を受けているためと考えられ、この状態での C の定式化

は不可能である。

そのため、ここで Hill の式(6)や Johnson の式(7)を参考にして考えると、 C に対しての横軸のとり方としてはそれぞれの式の中にある E_s/Y の項、すなわち弾性回復ひずみ $\epsilon_r = Y/E_s (= \epsilon_{ir})$ [図 3 (a), (b)]

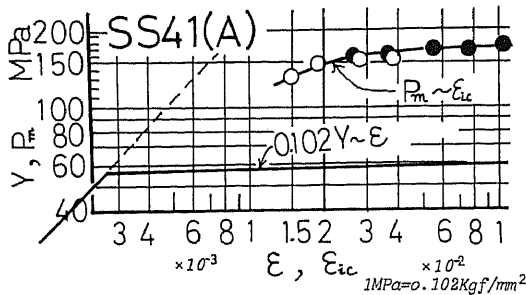


図 4 SS 41(A) 試料の $0.102Y-\epsilon, P_m-\epsilon_{ic}$

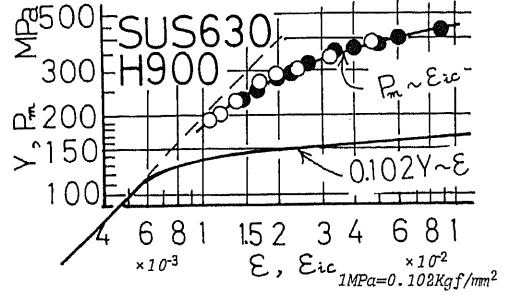


図 6 SUS 630 H 900 試料の $0.102Y-\epsilon, P_m-\epsilon_{ic}$

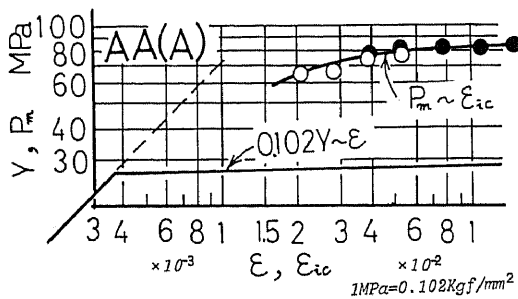


図 5 AA(A) 試料の $0.102Y-\epsilon, P_m-\epsilon_{ic}$

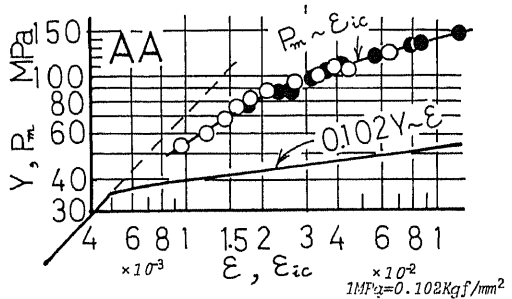
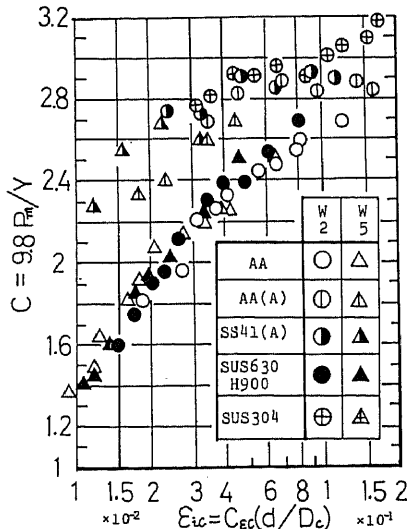
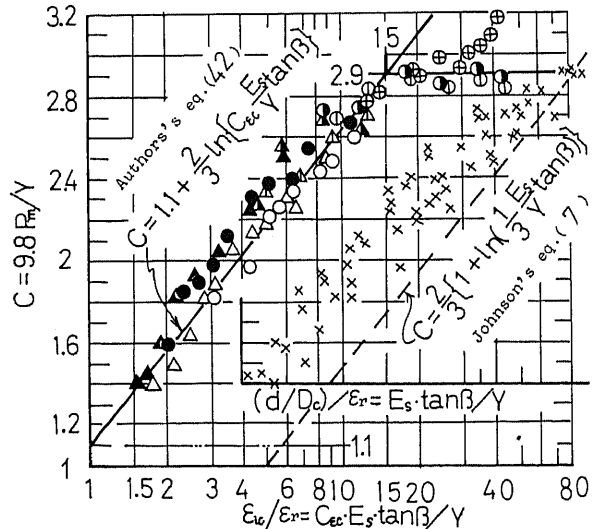


図 7 AA 試料の $0.102Y-\epsilon, P_m-\epsilon_{ic}$



(a) 硬さ/変形抵抗比 $C-\epsilon_{ic}$



(b) 硬さ/変形抵抗比 $C-(\epsilon_{ic}/\epsilon_r)$

に関連させればよいとの予想ができる。

この観点に立って C の実測値を $(\epsilon_{ic}/\epsilon_r)$ に対して片対数グラフ上に示した結果が図 8 (b) である。図 8 (a) とは異なり試料の硬化・非硬化特性、ヤング率、降伏点などの違いにもかかわらず実測値はまとまっており、まず C の値は 1 近辺から始まる様子を見せ、次いで若干上方に凸形状を示すもののほぼ直線的に上昇し、最後に $(\epsilon_{ic}/\epsilon_r)$ の値が 15 付近で少し湾曲しながら一定値に達することを図 8 (b) は示している。

すなわち、球圧子の弾-塑性遷移押込過程における硬さ/変形抵抗比 C は、全くほみの平均ひずみ/くほみの弾性回復ひずみ比 $(\epsilon_{ic}/\epsilon_r)$ の関数として表すことができることを実験結果は示しているわけである。

したがって本論文では次式 (40), (41) に示すように、試料の (1) 弾-塑性遷移過程, (2) 完全塑性変形状態とに分けて $C-(\epsilon_{ic}/\epsilon_r)$ の関係を定式化する。

$$(1) \left. \begin{aligned} 1 < (\epsilon_{ic}/\epsilon_r) < 15, 1.1 < C < 2.9 \\ C = 1.1 + (2/3) \ln(\epsilon_{ic}/\epsilon_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (40)$$

$$(2) 15 < (\epsilon_{ic}/\epsilon_r) \quad C = 2.9 \dots\dots\dots (41)$$

また図 8 (b) 中には Johnson と同じように横軸を $E_s \tan \beta / Y = (d/D_c) / \epsilon_r$ とした場合の実測値 (全試料とも × 印) と Johnson の式 (7) による計算値とを示してある。この結果からすると両者の定量的な違いのほかに、くほみの弾性回復ひずみ ϵ_r に対して全くほみの平均ひずみ ϵ_{ic} をとらず、単に全くほみの形状係数 (d/D_c) をとっているため弾性接触への移行点での不連続性が生じていることを示している (Johnson の論文中の Fig.4)。

ここでさらに式 (40) は

$$C = 1.1 + \frac{2}{3} \ln \left\{ C_{ec} \frac{E_s}{Y} \tan \beta \right\} \dots\dots\dots (42)$$

のように書きなおせることから、この式は Johnson が Hill の球状空洞押し広げ理論による解 [式 (6)] を理論拡張して得た式 (7) と同じ形を示しており、係数のみ異なっていることがわかる。

8. 球圧子の押込硬さ試験から変形抵抗-ひずみ特性を推定する方法

Vickers 圧子はその幾何学的形状から荷重を変えてもくぼみ周辺部の平均ひずみ (球圧子の押込みにおける $(d/D) = 0.375$ の時に相当するもので約 8% のひずみ、図 9 の SUS 304 試料の HV の位置および図中の表の (d/D) 参照) が変わらないため硬さ値も変化しないという重要な点を有する反面、硬さ試験からはほぼ一定のひずみ位置における変形抵抗しか推定できないことになる。これに対し球圧子の押込みでは荷重を変えると硬さが変わるという点が不利とはされているものの、先に示した硬さ/変形抵抗比 C のごく低ひずみ域まで定式化した結果を利用すれば、変形抵抗-ひずみ特性をかなり広い範囲で推定できることになる。以下その方法について概略を述べる。

8・1 荷重 (率) を変化させても硬さが変化しない試料 およそ (d/D) の値が 0.2 くらいより大きな値をとる押込条件で、硬さが一定値に達するかまたは一定値のままである (図 4, 5) ような試料は大体弾完全塑性材料と考えてよいから、式 (41) により変形抵抗を推定でき、図 4, 5 に示すような変形抵抗-ひずみ特性を有すると考えればよい。

8・2 荷重 (率) を変化させた時硬さが変化する試料 硬さが変化する試料は加工硬化性材料であると判断する。特に硬化性が顕著な材料ほど製作した試料面の深さ方向などの均質性を欠くため、低荷重 (率) での硬さ

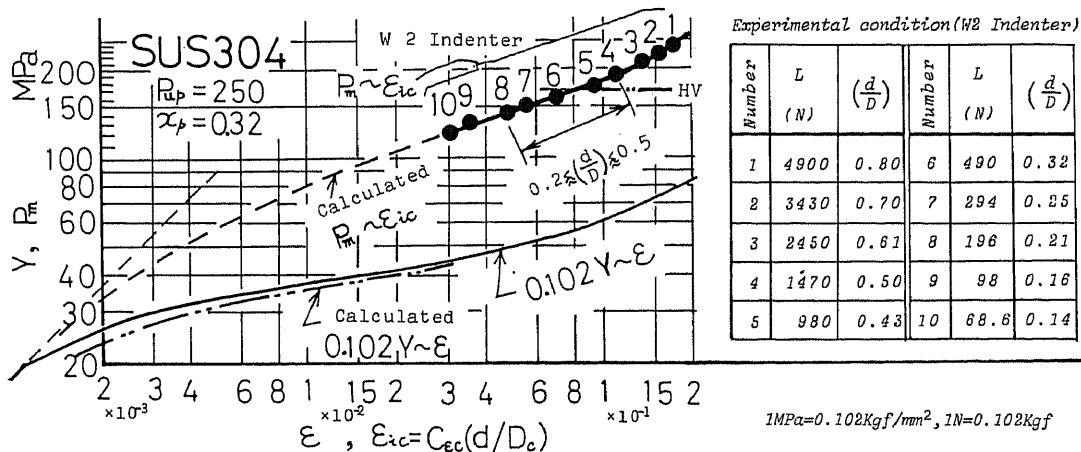


図 9 SUS 304 試料の $0.102 Y-\epsilon, P_m-\epsilon_{ic}$ の実測値と計算値

測定は本来求めようとする母材の硬さを意味しないおそれが多分にある。そのため本報および前報で求めた諸式を用いて計算により低ひずみ域までの変形抵抗を推定する方法を図9に示すSUS 304試料を例にとつて述べる。

まず (d/D) が 0.2~0.5 くらいの範囲の硬さ測定より式(24)における P_{up}, x_p を求める。次に式(25), (39)を用いて $P_m - (d/D) - C_{LR} - \varepsilon_{ic}$ の関係(図9の破線)を求める。この $P_m - \varepsilon_{ic}$ の各組合せを式(40)に代入し $\{\varepsilon_r = Y/E_s$ より}, 式を満足する時の変形抵抗 Y を順次求めてゆけばよい。図9中の二点鎖線はこのようにして計算から求めた場合の $0.102 Y - \varepsilon$ の関係を示しており、実線で示してある実測値とのかなり良い一致が見られる。しかし大荷重(率)の押込み(図9中の表)などにおいては、先の範囲で求めた P_{up}, x_p の値が適用できない場合も硬化性の顕著な材料の時にはあることが図9から分かる。このような試料の場合は、 (d/D) が 0.5 くらいより大きい押込みでの硬さを測定し、その約 3.3 倍した値をもって変形抵抗と考えればよいことを図8(b)は示している。またその時のひずみは式(39)によるものを使えばよい。以上のようなやり方を行えば低ひずみ域から中ひずみ域(20%弱くらい)までの変形抵抗-ひずみ特性を硬化性材料の場合についても推定できる。

9. 結 論

以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) 硬さ/変形抵抗比 C の定量的関係式を求めるにあたって、まず押込終了時のくぼみ形状係数すなわち全くほみ形状係数を考え、硬さ P_m と全くほみ形状係数 (d/D_c) との関係が変形抵抗 Y と全ひずみ ε と

の関係に対応させられるべきことを示した。

(2) 単軸応力状態下の全ひずみに相当すると考えるくぼみの平均ひずみを求めるため、試料が弾性変形から塑性変形に移行する点と、試料が完全塑性変形状態にある点との2点に着目して全くほみひずみ相当係数 C_{ec} を得、Tabor にならつてこれを全くほみ形状係数 (d/D_c) に掛けることで、全くほみの平均ひずみ ε_{ic} を定義した。

(3) 各種試料に対して実測した $P_m - \varepsilon_{ic}$ と $0.102 Y - \varepsilon$ とを対応させることにより硬さ/変形抵抗比 C を得、これを全くほみの平均ひずみ $(\varepsilon_{ic})/$ くぼみの弾性回復ひずみ (ε_r) 比の関数として定式化できることを示した。

(4) 硬さ/変形抵抗比 C の式と前報で示した球圧子の弾-塑性遷移押込過程における物理的諸量の関係式とを併用することにより、低ひずみ域に至るまでの変形抵抗-ひずみ特性を球圧子の押込硬さ試験から推定できることを、SUS 304 試料を例にとつて示した。

本研究を遂行するにあたり、終始変わらぬご指導・ご激励を賜った東京工業大学 神馬 敬教授に心から感謝申し上げます。

文 献

- (1) Tabor, D., *Hardness of Metals*, (1951), 46, OXFORD.
- (2) Hill, R., *Mathematical Theory of Plasticity*, (1950), 256, 97, OXFORD.
- (3) 吉沢・黒木, 機誌, 64-513 (昭36), 1453.
- (4) 山本・飯塚, 硬さ, (昭49), 207, コロナ社.
- (5) 黒木, 機誌, 26-170 (昭35), 1435.
- (6) Johnson, K. L., *J. Mech. Phys. Solids*, 18-2 (1970), 124.
- (7) Marsh, D. M., *Proc. R. Soc., Ser. A*, 279-1378 (1964), 424.
- (8) 石橋・下田, 機論, 52-480, A (昭61), 1958.

討 論

〔質問〕 黒木 剛司郎 [茨城大学]

本論文と同質の問題の解析について、かつて苦労した経験をもつ一研究者としての意見を述べさせていたきたい。

本論文に引用されている Tabor の考え方が発表されて以来、多くの研究者がこの問題に取り組んできたが、硬さ~変形抵抗比を加工硬化性材料の場合、どの

ように考えるべきかは、未解決のままであった。 $C \sim \varepsilon_{ic}/\varepsilon_p$ の関係に着目した著者の解析方法は、理論およびそれを裏づける実験の面において、さらに、硬さ試験の物理的意義の明確化という点および、変形抵抗~ひずみ特性を硬さ試験から推定できることを立証している点で、工学的価値の高いものと思う。