高速打込みに関する研究*

(ひずみ模様について)

佐藤 悌 介** 高木 直 温***

A Study on High Speed Indentation (Strain Figures and Their Characteristics)

by

Teisuke SATO

(Department of Precision Mechanics College of Engineering, Tokushima University, Tokushima)

and Naoharu TAKAGI

(Koyo Seiko Co., Ltd., Tokushima)

Recently high energy rate forging has been developed. In a high speed stamp forging, the indentation velocity reaches the range of several decades or 100 m/s. High speed indentation involves numerous interesting problems from the view points of plasticity, metal physics and metallurgy. The high speed indentation of mild steel has been investigated using cylindro-conical punches of several cone angles.

In this paper is reported the comparison of strain figure in dynamic indentation with that in static indentation. And in this report the characteristics of strain figures are also studied. By comparing the strain figure with the recrystallized stress zone, it can be concluded that the domain which is uniformly etched in the strain figure agrees with the recrystallized field of the stress zone. In static indentation the uniformly etched domain is wide, and the domain which is etched in the form of individual curved lines is narrow and there are but a small number of lines. On the other hand, in dynamic indentation the uniformly etched domain is narrow, but the domain which is etched in individual curved lines is wide, and there are a large number of lines. In both cases of indentation, static and dynamic, the uniformly etched domain in the strain figure agrees with the work hardening region.

From the above mentioned points, the following conclusions appear to be valid.

(1) The strain figure is useful in the research of plastic deformation. Especially so when the strain figure is used with hardness test *etc.*

(2) In static indentation the workhardening region is wide. On the contrary in dynamic indentation the workhardening region is narrow, but the irregularly deformed region which is etched in individual curved lines in the strain figure is wide.

(Received July 18, 1969)

1 緒 言

近時高エネルギー高速度加工法の発展に伴い高速鍛造の型入れ作業などでは毎秒数 10 m から場合によっては 100 m に達する打込み作業が行なわれている。こうした高速打込みにおいては硬度計圧子の押込試験におけるような静的押込みとはいろいろ違った現象が現われるものと思われる。また、円錐圧子の打込みにおいては一般に高速試験として用いられる高速引張り、および高速圧縮試験より高いひずみ速度の試験も可能であるといわれている。このようなことから最近 F. U. Mahtab^{1,2)}らによりこうした円錐の高速打込みの

研究が発表されている。本報告もこうした高速打込み時の現象を解明するために行なったものの一部である。

塑性変形の様子を知る方法としてよく用いられるものに、硬度測定、再結晶処理による粗大結晶粒の観察などがあり、そのほかリュウダース帯の観察もよく用いられる。しかしリュウダース帯は鏡面に仕上げた自由表面でしか観察できないため塑性変形全般に広く用いることはできない。一方 Fry などによるひずみ模様では任意の断面において観察でき、しかも一目で全体の様子を知ることができるという利点を持っている。高速打込み後の硬度変化および再結晶についてはすでに報告した³⁾。そこでわれわれは、ここではひずみ模様を用い高速打込みと静押込み時の変形の様子を調べた。あわせて再結晶および硬度変化と比較し、ひずみ模様

* 原稿受理 昭和44年6月18日

** 正 会 員 徳島大学工業短期大学部 徳島市南常三島町

*** 光洋精工(株) 徳島県板野郡藍住町

の特質を検討し、その利用できる範囲を考えた。

2 実験方法

本実験には前報、硬度測定に用いたのと同程度の低炭素鋼を用いた。実験に用いた低炭素鋼の化学成分を Table I に示す。試料形状は $40 \times 40 \times 40$ mm の立方体とした。ひずみ模様を明らかに検出するためには適当な熱処理が必要である。この熱処理の持つ意味についてはのちに考察する。本実験に用いた熱処理サイクルおよびそのときの組織写真をそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 1 に示すように試料をまず 930°C 3 時間保持後空冷して標準組織にする。これをさらに 930°C 3 時間保持後水冷する。その後 A_1 変態点直上 $730 \sim 750^\circ\text{C}$ で $20 \sim 30$ 分保持後 $14 \sim 15$ 時間かけて約 600°C まで徐冷する。水冷温度は $20 \sim 25^\circ\text{C}$ が最も明りょうなひずみ模様が検出でき、腐食後の表面状態も非常によいことがわかった。

Table I. Chemical composition of specimens (%).

C	Si	Mn	P	S
0.11	0.26	0.51	0.013	0.019

Normal structure ($\times 400 \times 2/3$) Spherical structure ($\times 600 \times 2/3$)

Fig. 2. Microstructures of specimen.

腐食液は調合がやや複雑ではあるが、Fry の腐食液よりもよい結果が得られやすい児玉の腐食液を用いた。ここでわれわれが用いたのは酢酸銅を主成分とするものである。腐食液および腐食法については児玉の詳細な論文があるのでここでは省略する。

3 実験結果および考察

3.1 ひずみ模様とリュエダース線および再結晶との関係

ひずみ模様を考えるためには、ひずみ模様の性質を知る必要がある。そこでわれわれはまずひずみ模様とリュエダース線および再結晶処理における粗大結晶粒の分布との間の関係を調べた。リュエダース線とひずみ模様との比較を Fig. 3 (a)(b) および(c)に示す。図より明らかなようにひずみ模様とリュエダース線とはよ

(a) High speed indentation

(b) Middle speed indentation

(c) Static indentation

Fig. 3. Comparison of strain figures with Lüders bands (Cone angle: 30°).

い対応を示す。つぎに再結晶とひずみ模様との比較を Fig. 4 に示す。Fig. 4 よりひずみ模様腐食において一様な腐食を受けた領域と再結晶領域が非常によい一致を示していることがわかる。一方、一本一本の曲線としてひずみ模様が観察されるのは再結晶領域の外側のある限られた範囲内である。再結晶処理により結晶粒が異常に成長するのは、処理温度および処理時間で多少の差があるが、ひずみが約 5 % 前後のところであるといわれている。本実験においては 860°C 1 時間保持後炉冷した。一方、尾崎らがテーパーのある引張試験片を作成し、1 試験片内に広範囲なひずみを凍結してストレッチャ、ストレインの発生を調べた結果によると凍結されたひずみが 2 ~ 4 % のところでストレッチャ、ストレインが目視できたと報告されている。再結晶領域と硬度変化領域の比較を Fig. 5 に示す。これより硬度変化領域と再結晶領域がよい一致を示すことがわかる。

3.2 ひずみ模様と降伏伸び

前述の結果からもひずみ模様が降伏点伸びと密接な関係があることが考えられるので、降伏点伸びを考えることにより、ひずみ模様試験用の熱処理およびひず

Fig. 4. Comparison of strain figure with recrystallized zone (Cone angle: 60°) (High speed indentation).

Fig. 5. Comparison of recrystallized zone with Vickers' hardness distribution.

み模様の性質などを考える。周藤によると降伏伸びは次式で表わされる。

$$\epsilon_y \cong \frac{n}{2} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_B} \right)^{1/n} + \frac{n}{8} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_B} \right)^{2/n} \quad (1)$$

ここで ϵ_y : 降伏伸び, σ_y : 下降伏点, σ_B : 引張強度, n : ひずみ硬化係数

一方, 降伏点伸びは結晶粒が大きいほど小さくなることが古くから知られている。とくに焼なまし後の試料にこの傾向が明りょうに認められる。さきにわれわれはひずみ模様用試験片は球状化処理を行なったほう

Fig. 6. Dimensions of tensile test specimen.

がよいことを示した。ここでわれわれはその処理の持つ意味を考える。単に機械的性質を知るだけで、ひずみ模様検出の良否が判別はできないと思われるが、ここでは便宜的に機械的性質のみの比較を試みた。まず試料の機械的性質を知るために Fig. 6 示す引張試験片を作成した。これは JIS 7 号試験片に相当する。これらの試験片は 3 つの異なる熱処理を行なったものから作った。熱処理サイクルを Fig. 7 に示す。引張試験は島津製インス

トロン型引張試験機により行なった。そのときの平均ひずみ速度は $6 \times 10^{-4}/s$ であった。試験結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より下降伏点, 引張強度, ひずみ硬化係数および降伏点伸びを求め、あわせて(1)式より各降伏点伸びを計算により求めた。これらの結果を Table II に示す。Table II よりわかるように、実験結果と計算結果では 1 % 程度の開きがあるが、いずれの場合も標準処理を行なった試料に比べ球状化処理を行なった

Fig. 7. Heat treatment cycles.

Fig. 8. Stress-strain curve.

Table II. Mechanical properties.

Specimen No.	Lower yield point σ_y (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	σ_y/σ_B	Modulus of strain hardening n	Yield point elongation $\epsilon_y(\%)$	Yield point elongation (Calculation) $\epsilon_y(\%)$
1	29.2	41.6	0.700	0.259	2.4	3.47
2	31.2	40.5	0.772	0.236	3.2	4.27
3	31.0	39.6	0.785	0.235	3.5	4.58

ものは降伏点伸びが増加している。また Fig. 2 の組織写真においても球状処理後の結晶粒が標準組織のそれより小さくなっており降伏点伸びが大になる傾向が示されている。標準処理の試料でもリュウダース線は充分目視できるはずであるが、任意断面においてひずみ模様を検出するにはひずみ模様が不均一変形による撰択腐食に原因するものとすればリュウダース線を検出する以上に局部電池の原因となる塑性変形部と未塑性変形部における変形量および内部応力などの差が大きいことが必要であると考えられる。そこで腐食に関する充分なデータはないが降伏点伸びにおける 1% 以上の差は重要な意味を持つものと考えられる。軟鋼などに塑性加工を行なったとき試料内には不均一変形帯が起こる。すなわち塑性変形帯と未塑性変形帯が生ずる。くさびの押込みにおける不均一変形模様を Fig. 9 に示す。Fig. 9 において白色部は未塑性変形帯であり黒色部は塑性変形帯である。ここにおいて全体が塑性変形を受けている部分（一様に黒くなっている部分）はさきに述べたように硬度変化を観測できる部分とよい対応を示すのでこの部分を便宜上加工硬化部と呼ぶ。また塑性変形部と未塑性変形部の混在する部分は、降伏点伸びによる不均一変形に関係するものと思われるので、この部分の塑性変形部を降伏点伸び変形部と呼ぶことにする。このように定義すると塑性変形した試料内には加工硬化部、降伏点伸び部および未降伏部の 3 者が共存することになる。そして、理論と比較しやすい一本一本の曲線としてひずみ模様が検出できるためには降伏点伸び変形部と未降伏部の混在する範囲が広く、しかも降伏点伸び変形部と未降伏部の差が大きいことが必要であると思われる。そのためひずみ模様を検出するためには試料を降伏点伸びの大きくなるような方向で調しつなければならぬ。一方ひずみ模様と理論との比較にあたって対比されるすべり線場理論においては被加工材料は均質で等方性であり弾性変形をせず、また加工硬化しない。すなわち、剛塑性体を仮定している。そのためひずみ模様を検出するためには理論の仮定とますますはなれる方向の処理を行なわねばならず、しかも理論の適用している加工硬化領

域では理論と比較しやすい一本一本の曲線としてはひずみ模様が検出できず、ただ一様に腐食されるのみである。これがひずみ模様の持つ最大の矛盾であり欠点である。ゆえにひずみ模様を利用するときには充分この点を考えて使用しなければならない。

3.3 ひずみ模様とすべり線場理論

さきに述べたようにひずみ模様は加工硬化領域においては一本一本の曲線としては検出不可能である。そこでこのままでは理論とひずみ模様とを比較することができない。そのため一つの仮定をおく。すなわち理論において剛体と考えられている領域内で最大せん断応力の方向が、塑性域におけるすべり線を延長した線に沿い、（ただし、ここでの最大せん断応力は理論的には降伏応力には達していない）そして、この部分の降伏点伸び部がこの最大せん断応力方向に沿って存在すると仮定する。以上のように仮定することにより直接塑性域内で理論と比較することはできないが、理論のすべり線を延長したものと比較することができる。この比較のため頂角 60° のくさびの近似平面ひずみ押込みを行ない、そのひずみ模様を検出した。結果を Fig. 10 (a) に示す。自由表面において直角二等辺三角形をなすすべり線場が存在するという境界条件と、最大せん断応力方向は互いに直交するという条件より、曲線を補ったものを Fig. 10 (b) に示す。Fig. 11 にこれらの曲線群を完成させる過程を示す。Fig. 11 (b) における破線が Fig. 10 (b) の白線に相当する。Fig. 11 (b) に示す φ を各曲線に沿って求めるとほぼ一定でありこ

Fig. 10. Strain figures under static indentation of a wedge.

White part: Plastically undeformed region
Black part: Plastically deformed region
Fig. 9. Sketch of irregularly deformed region under indentation of a wedge.

Fig. 11. Family of curves in strain figure.

の値は 7° であった. このことは剛性域内のひずみ模様における曲線に対しても Hencky の第 1 定理に相当する関係が近似的に成立することを示すものである. そこでひずみ模様と比較するため 7° 間隔の等角扇形すべり線場を作成し, すべり線は互いに直交し, くさび先端方向に沿って対称であるという仮定のもとに延長した. これと Fig. 11 (b) より曲線群を完成したものを Fig. 11 (c) に同時に示す. 図中実線は理論解の延長であり, 破線はひずみ模様の結果である. なお理論解を求めるにあたっては, くさび角として圧こんのくさび角を採用した. 理論解の延長とひずみ模様の結果は互いにかなりよく一致しているが, ひずみ模様の結果がふくらみが大きく下方への伸びが少ない. しかし, 以上のことからすべり線場理論において剛性域と考えられている部分の降伏点伸び部は理論における塑性域内のすべり線の延長上にあることが示された. このことからまだ不明なすべり線をひずみ模様と境界条件より求めることはある程度可能であると思われる. 一方 Morrison¹¹⁾ らは特別に調整した微小結晶粒 (結晶粒直径 $2\sim 3\mu$) を持つ低炭素鋼の試験片で電子顕微鏡により, リューダースフロントを観察した. それによ

ると木変形成域から変形成域の間で転位の急激な増加により, リューダースフロントが識別できる. この急激な転位の増加は結晶粒にして $3\sim 4$ 個の間に起こることを報告している.

3・4 高速打込み後のひずみ模様

平行部を持つ円錐ポンチの HILTI-DX 100 L 鋸打機による高速打込み (外挿法により求めた初速 $100\text{ m/s}\sim 200\text{ m/s}$ ¹²⁾) およびオルセン試験機による静押込み (初速 $= 6.5\times 10^{-2}\text{ mm/s}$) 後のひずみ模様について述べる. なおポンチの円錐角は $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ および 120° のものを適宜使用した. ポンチおよび HILTI-DX 100 L 用空包に

ついでの詳細はすでに報告しているのでここでははぶく, 高速打込みと静押込み後の押込み深さをそろえたときの各円錐角に対するひずみ模様を Fig. 12~15

Fig. 12. Comparison of strain figures in dynamic indentation with that in static one (Cone angle: 30°).

Fig. 13. Comparison of strain figures in dynamic indentation with that in static one (Cone angle: 60°).

に示す。まず円錐角 30° の場合を Fig. 12 に示す。静押込みの場合圧こんを中心にして丸く腐食されている部分は一様に腐食された部分で、さきに定義した加工

硬化部に相当するものと思われる。この部分が高速打込みに比べ非常に広い、一方、高速打込みの場合は一様に腐食された部分が静押込みほどきわだっておらず、

その範囲は狭いが一本一本の曲線として腐食されている範囲は非常に広く、曲線の数もはるかに多い。また、円錐角が 30° の場合、押し広げの要素が強くなり、硬度測定結果、ポンチ下方にはほとんど加工硬化域がなく、ポンチ横方向に加工硬化域が存在することをすでに報告したがひずみ模様においても、ポンチ下方には一様に腐食された領域がなく、ポンチ側面のみ存在することからもこのことがいえる。Fig. 13 に円錐角 60° の場合のひずみ模様を硬度測定結果とあわせて示している。上面における様子は円錐角 30° の場合と同じである。断面においては一様に腐食される領域と加工硬化領域がよく対応している。円錐角が増加するに従い、加工硬化領域が圧こんを中心として円形に大きく広がることが Fig. 14 および Fig. 15 において一様に腐食された領域より示され、これは硬度測定結果

とよく対応している。以上のことから、静押込みにおいては加工硬化領域が広く、降伏点伸び変形部と未降伏部の混在する領域はさほど広くない。一方、高速打込みにおいては加工硬化領域が狭いが、そのほかに降伏点伸び変形部と未降伏部の混在する不均一変形部が非常に広く存在することが知られた。Fig. 3 および Fig. 12 ~ 15 より各打込速度に対するひずみ模様において一本一本の曲線として目視できる曲線の数に大きな違いがある。そこでこのような曲線の数は変形の進行とともに増加するか、初期にできたものが成長するだけかという疑問が起こる。そこでわれわれはまず火薬「弱」により打込み、ひずみ模様を検出後圧こんに重ねて火薬「中」による打込みを行ない再びひずみ模様の検出をし、さらにその上に火薬「強」による打込みを行ないひずみ模様を検出するという方法で変形に伴うひずみ模様の成長の様子を調べた。結果を Fig. 16 に示す。図より今回の打込試験においては一本

Fig. 14. Comparison of strain figures in dynamic indentation with that in static one (Cone angle: 90°).

Fig. 15. Comparison of strain figures in dynamic indentation with that in static one (Cone angle: 120°).

Fig. 16. Change of strain figure with increment of plastic deformation (High speed indentation).

一本目視できる曲線の数は変形の増加によってほとんど増加せず、初期にできた曲線が成長していくだけであることが示された。

4 結 言

ひずみ模様とリューダース線および再結晶とを比較し、あわせて降伏点伸びについての考察からひずみ模様の意味を考えた。高速打込み時のひずみ模様と静押込み時のひずみ模様を比較した。これより一様に腐食される領域は硬度測定の場合と同じで静押込みの場合がかなり広い。一方降伏点伸び変形部と未降伏部が混在していると考えられる一本一本の曲線としてひずみ模様が目視できる領域は高速打込みの方が広く、高速打込みにおいては不均一変形部が広がることが示された。最後にひずみ模様検出についていぬいなご指導をして下さいました高知高専の児玉教授、また本研究を終始ご指導下さいました徳島大学の稲田教授、賀勢教授、秋園教授に謝意を表します。

(昭和44年5月21日 日本材料学会第18期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Mahtab, F. U., W. Johnson, and R. A. C. Slater, Int. J. Mech. Sci., **7**, 685 (1965).
- 2) Mahtab, F. U., W. Johnson, and R. A. C. Slater, Proc. Inst. Mech. Engrs., **180**, part I No. 11, 285 (1966).
- 3) 佐藤悌介, 高木直温, 平田正弘, 精密機械, **35**, No. 3, 146 (1969).
- 4) 児玉元一, 坂本雅之介, 日本機械学会論文集, **26**, No. 161, 63 (1960).
- 5) 児玉元一, 坂本雅之介, 日本機械学会論文集, **27**, No. 182, 1606 (1961).
- 6) 児玉元一, 日本機械学会誌, **65**, No. 517, 52 (1962).
- 7) 日本鉄鋼協会, 鋼材の性質と試験, p. 213 (1959) 地人書館
- 8) 日本金属学会, 金属便覧, p. 320 (1960) 丸善
- 9) 尾崎康二, 吉田清太, 阿部邦雄, 福井伸二, 塑性と加工, **4**, No. 33, 624 (1963).
- 10) 周藤悦郎, 塑性と加工, **4**, No. 33, 611 (1963).
- 11) Morrison, W. B., GLENN. R. C. J. Iron steel Inst., **206**, Part. 6, 611 (1968).
- 12) 佐藤悌介, 高木直温, 精密機械, **35**, No. 2, 74 (1969).