

討 18 延性破壊の開始の透過電子顕微鏡的観察

日本鋼管 技術研究所 高瀬 恭二

1. 緒言

延性破壊という現象はなかなか複雑多岐で、単純な法則では割切れない面がある。しかしもう一度、根本的な出発点に立歸って、延性破壊はどのような式で記述されなければならないかということを考えて見るとは、今後の研究を進める上に不可欠なことであろう。そこでここでは巨視的立場の考え方の骨子と、それを裏付ける実験的事実とについて述べることにする。以下議論を簡潔にするために、変形は一定変形様式¹⁾かつ準静的とする。

2. 延性変形

これは3つの主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ と、3つの主歪 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ との6つの量——実際は $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \div 0$ という条件があるから、近似的に、5つの量で完全に記述される等である。これに対して、現在延性変形を規定する関係式は4つ知られている。すなわち

$$\bar{\sigma} = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3), \quad \bar{\varepsilon} = g(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3), \quad (\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon} \text{ は共に不変量}),$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 + p, \sigma'_2 = \sigma_2 + p, \sigma'_3 = \sigma_3 + p, \quad p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (p: \text{応力静水圧成分})$$

という記号を用いて、4つの関係式は次のように表わされる。

$$\text{降伏条件} \quad \bar{\sigma} = h(\bar{\varepsilon}, p) \quad (1)$$

$$\text{変形様式一定の条件} \quad \varepsilon_1 : \varepsilon_2 : \varepsilon_3 = \text{一定} \quad (2)$$

$$\text{Lévy-Mises 則} \quad \frac{\sigma'_1}{\varepsilon_1} = \frac{\sigma'_2}{\varepsilon_2} = \frac{\sigma'_3}{\varepsilon_3} \quad (3), (4)$$

独立変数は5つあるから、もう1つの関係式が追加されれば、延性変形の記述は完結されることになる。延性変形の現象で書き落したものは何か。それは内部変形様式¹⁾のような内部変形の不均一性に因するものである。内部変形の不均一性は、これを一言で言い表わすのに最も便利で妥当と考えられる概念はエントロピーである。すなわち塑性エントロピーとも稱すべき量を想定して、これを記述する式を1つ追加すれば記述は完結されると考えられる。一方上記の4つの関係式の中で、殆ど作用していない量がある。それは p である(式(1)は p に殆ど無関係)。従って残りの1つの関係式では p が主役を演じると考えるのが自然である。故にその関係式は、 S を塑性エントロピーとして次の形をとるであろう。

$$S = q(p, \bar{\varepsilon}) \quad (5)$$

3. 塑性エントロピーと応力静水圧成分との関係

塑性エントロピーには少なくとも2種類が考えられる。1つは準微視的領域の不均一変形に相当するもので、これは著者が以前に内部変形様式と名付けたものである。他方1つは取位の分布状態に相当するもので、取位の *tangle* の密度、分布、*cell* の大きさ等に関するものである。エントロピーの基本的性質により、塑性エントロピーはこれら2つのエントロピーの和をもって表わすことができる。

a) 不均一変形のエントロピー 外形の変形は同じでも、不均一度の大きい変形は、その小さい変形よりも体積を大きくすることが予想される。それは構成原子のポテンシャル場の形状が平衡位置に因して対稱でなく外側の方に広がっていることによる。従って応力静水圧成分を増せば体積の増大を妨げることにより、変形は不均一になり難くなる。一方不均一変形のエントロピーは不均一度の大きい方が大きい。従って応力静水圧成分を増すことは不均一変形のエントロピーの増大を妨げることになる。

ここで不均一性を表示する量について考えておこう。一般に、不均一性を表示するのに2つの量(振幅と周期)が必要。この中で周期の方は材料に固有のもつと考えられるから、ここで問題となる不均一性の度合は主として振幅の意味になる。

b) 散位分布のエントロピー 散位分布の記述には *tangle* の分布と *cell* の大きさとの2種の量が必要である。この両者の中で応力静水圧成分の作用を受けるのは主として *tangle* の方であると考えられ(下に説明, 図3~7), *cell* の大きさは変形量で大きくなってしまふものと考えられる。*tangle* の分布を表示するには、不均一変形の場合と同様、振幅と周期の2量が必要であるが、*tangle* の場合はどちらか一方をきめれば、他方は自動的にきまるものと考えられ、応力静水圧成分によって変るものは矢張り1つの量に帰着される。さて散位の総数を与えたとき、小数の大きな *tangle* になつた方が、多数の小さい *tangle* になつた方よりも、散位を含めた全体の体積は大きくなることから予想されるから、応力静水圧成分を大きくすると、小さい *tangle* が多数できる方に傾くことになる。一方 *tangle* の形成はエントロピー増大の現象であるから、小さい多数の *tangle* の分布の方が大きい少数の *tangle* の分布よりもエントロピーが小さいことになる。

従つて応力静水圧成分の増大は散位分布のエントロピーの増大を妨げることになる。

このようにいづれの場合にも、応力静水圧成分の増大は塑性エントロピーの増大を妨げることになる。なお、*tangle* の分布をきめる量は、不均一変形の度合をきめる量と與える局所歪がきまることによりきまり、結局、塑性エントロピーは1つの量によつてきまってしまうことになる。すなわち、式(5)で ρ を與えられたとして、 $\bar{\epsilon}$ をきめれば S はきまることになる。これで変数の数の不一致はないことになる。

4. 延性破壊

この現象は開始と成長との2つの段階に分けて考えることができる²⁾。延性破壊の開始は延性変形中に起る現象であるから、開始の時迄、上述の關係式(1)~(5)は全部成立っていないわけにはならない。しかも記述は完結しているのだから、延性破壊開始条件として新しい別個の關係式(2つ以上の変数間の)を持ち込むことはできない。故に延性破壊の開始は、關係式の中の何か1つの変数が或る値に達したときに起るとする以外に記述の方法はない。さて破壊の開始には応力静水圧成分が大いに關係していることが既に知られている²⁾から、(5)の關係を基礎にして考えるのがよい。この

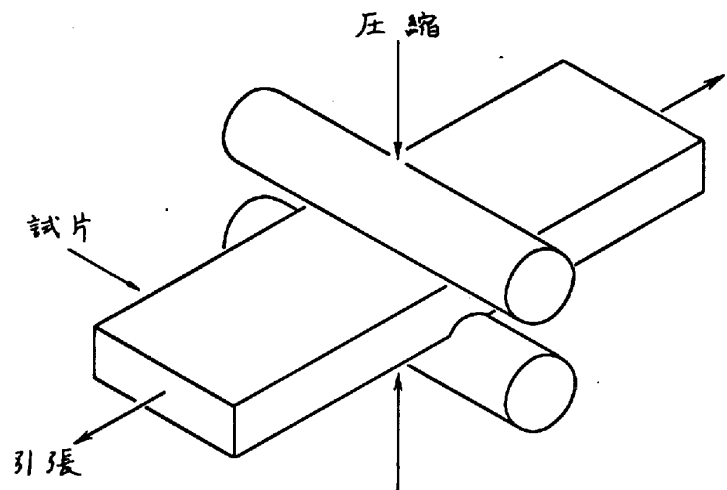


図1. 可変静水圧成分平面歪加工法

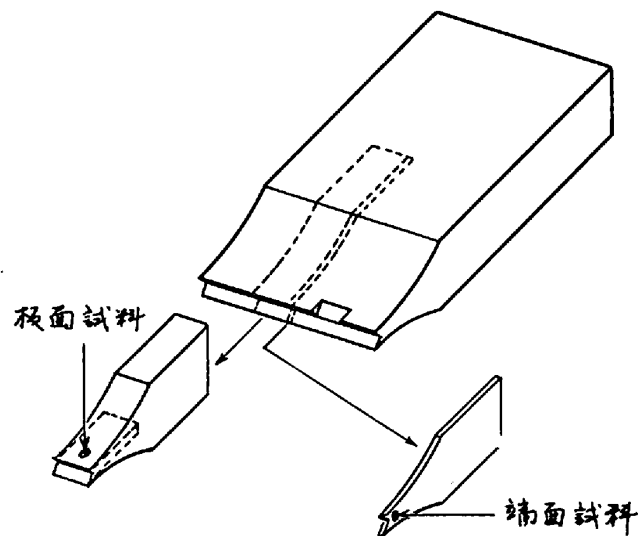


図2. 透過電顕用薄膜素材切出法

式で表数は $p, \bar{E}$ の2つであるが、破壊の開始は、 p で考えるより、 $\bar{E}$ で考えた方が解りよい。 $\bar{E}$ はもちろん式(1)を通じて $\bar{\sigma}$ と結がついているが、 $\bar{E}$ の本来の意味は歪エネルギーの総和である。式(5)は p を固定として、エネルギー密度の分布特性を示す。すなわち $\bar{E}$ がどのように分配されているかを示す。従って $\bar{E}$ が或る値に達すると破壊が開始するということは局部的エネルギー密度の最高値が或る値に達すると、その局所で破壊が始まるということと同義になる。エネルギー密度最高の所が破壊の種になると考えるのである。すなわち破壊の開始は次りように考えることができる。

1° 塑性歪形によって数種の *tangle* や、*cell wall* ができる。この部分のエネルギー密度は塑性歪と共に高くなつて行くが、その高くなり方は、応力降氷圧成分によって左右され、応力降氷圧成分が低い程、*Tangle* や *cell wall* のエネルギー密度は高くなる。

2° このエネルギー密度が或る値以上になると、その部分はマイクロクラックの種となり、低いエネルギー状態に落ち込み、その余分のエネルギーを放出する。この放出エネルギーは隣接部を刺激して、そのエネルギーと相加、又或る一定値を超えることになる。そうすると又マイクロクラックの種が成長する。この連鎖反応は、エネルギーがその一定値に達しなくなる迄続く。このようにして1つ又1つマイクロクラックが形成される。

このようなマイクロクラックは、その随伴している組織成分の大きさと同程度の振りをもっている。これは組織成分に捕捉されるエネルギー量が、組織成分の大きさに比例するからである。破壊の開始は、このように2段階に分けて考えられる(種生成とその成長によるマイクロクラックの形成)が、マイクロクラックの形成迄を開始とするのが適当である。それは種生成が起こると、上記の連鎖反応は、種近傍のエネルギーを断続的に消費して、マイクロクラックの形成迄必然的に進行してしまうからである。



図3. $\bar{E}_p = 1.30, H = -0.54$, 端面.

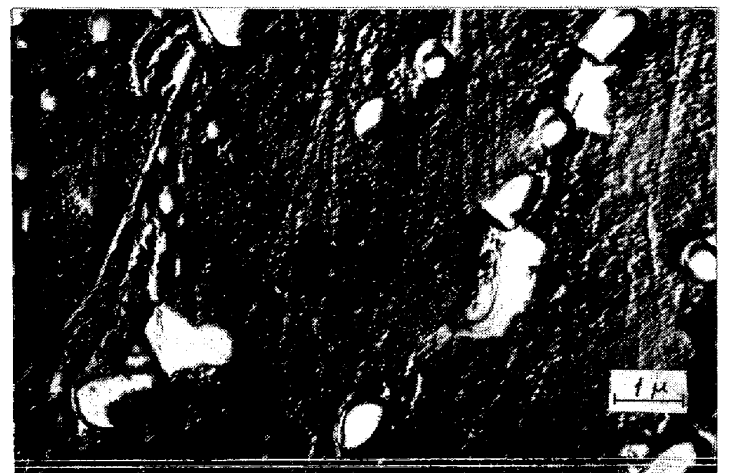


図4. 上に同じ(カーボンレプリカ).

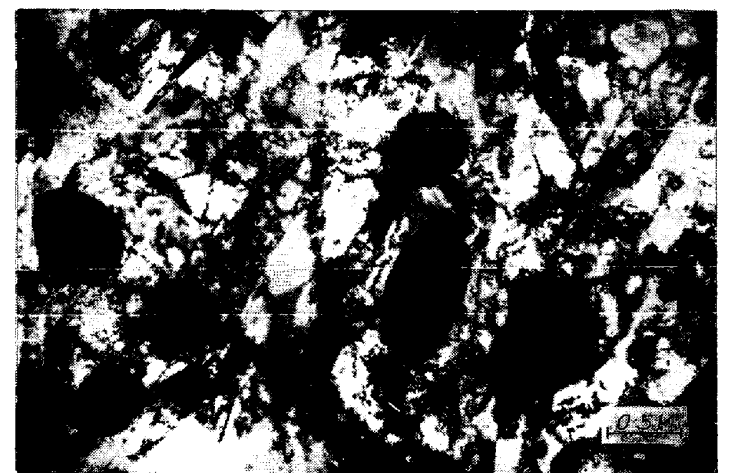


図5. $\bar{E} = 1.60, H = 0.53$, 端面.

5. 実験

一定変形様式としては平面歪を採用し、応力静水圧成分を変化するには2軸材料試験機によつた。すなわち図1のように帯板試片の両面に丸棒を圧入すると同時に試片長手方向に引張り、この圧入力と引張力との組合せを変化して、常に平面歪に保ちながら、応力静水圧成分を変化した。このようにして試片を破断する迄加工し、破断後の試片から図2のように透過電顕用薄膜素材を切出し、MeieranとThomasの方法と同様の手順で薄膜を作つた。試片の材料としては0.48% C鋼を球状化処理したものを用いた。これはフェライト中に発生するマイクロクラックを調べるのに便利な材料だからである。

以下の顕微鏡写真で、 H は p/σ を意味し、 H , $\bar{\epsilon}_f$ は主に破断部の値であつて、写真の視野はこの近傍ということである。 $\longleftrightarrow$ 印は試片の加工による伸び方向を示している。

図3は応力静水圧成分の低い方の例で、これと図4(レプリカ)とを比較すると、鋭い(濃い) cell wall または粒界にマイクロクラックが発生することと解る。すなわちエネルギー密度の最も高い所は cell wall の粒界に、ここにマイクロクラックが形成されるとき、その周囲の tangle からエネルギーが供給されるものと想像される(マイクロクラックの核は、ほぼ tangle の範囲と同じことか5)。又無限に小さいマイクロクラックはないということは重要なことである。有限の大きさということとは、それが空孔の拡散とか、転位の堆積による応力とかによるものではなく、最大の要素はエネルギーであるということを示唆している。図5は応力静水圧成分の高い方の例である。図3と比較して、cell の大きさは密でないが、cell wall の様子は大分変つている(濃くて長大なものが多い)。これを板面で見ると tangle の分布状況がよく解る(図6, 7)。応力静水圧成分が高くなると tangle は小さくなり、その数は多くなる。これらの顕微鏡所見は上記の推論をよく裏付けている。

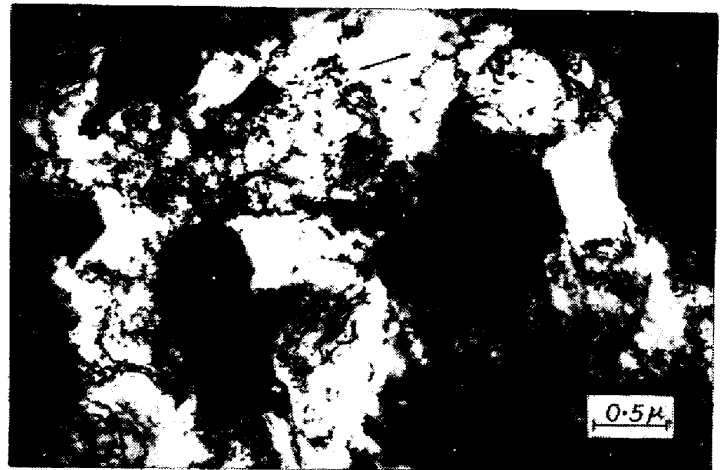


図6. $\bar{\epsilon}_f = 1.30$, $H = -0.54$, 板面.

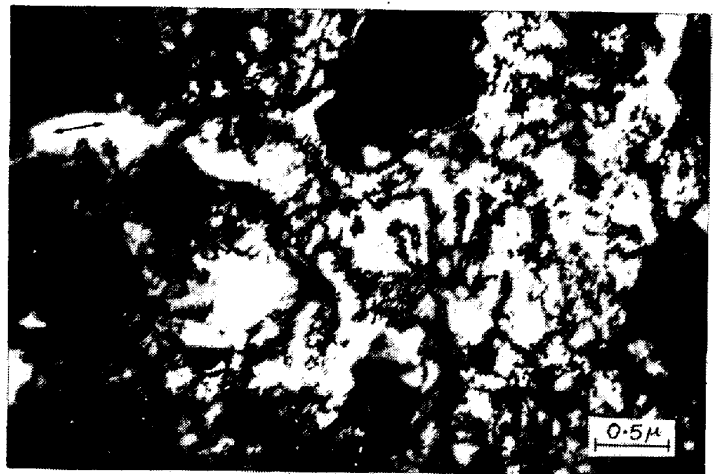


図7. $\bar{\epsilon}_f = 1.60$, $H = 0.53$, 板面.

6. 結論 延性破壊の記述はより考察および透過電顕的観察に基づき、次の結論が導かれる。

- 1° 延性変形の記述を完結するためには、塑性エントロピーに関する記述を追加せねばならない。
- 2° 塑性エントロピーの延性変形による増大は、応力静水圧成分の増大によつて妨げられる。応力静水圧成分を高めると延性破壊の開始が遅れるのは、この作用による。
- 3° 延性破壊の開始は延性変形により局所に集積されたエネルギーによつて律せられる反応である。

- 文献: 1) Takase, K.: Proc. 1st ICF Vol. 3, p. 1837 (1966),
 2) Takase, K.: Proc. ICSMA p. 969 (1968),
 3) Meieran, E.S. and Thomas, D.A.: Trans. Met. Soc. AIME Vol. 227, p. 284 (1963).