

鑄鋼の引張り変形過程における樹枝状歪模様 ならびに微小き裂の発生、伝播についての観察

大 島 聡 範*
林 忠 夫**

Observation of Formation and Propagation of Dendritic Strain Pattern
and micro-cracks in Tensile Straining of Cast Steel.

Toshinori ŌSHIMA
Tadao HAYASHI

要 旨

表面を研摩した鑄鋼の平板引張試験片の変形過程であられる樹枝状歪模様の挙動と、微小き裂の発生伝播の状況を関連させて観察し、若干の考察を行なった。

Synopsis

An observation of the process of tensile straining in medium carbon low alloy cast steel is made. Mirror finish tensile test specimens were strained to various levels. Strain pattern coincide with dendrite morphology and mode of formation and propagation of micro-cracks were studied using optical microscope.

1 緒 言

鑄鋼の引張り変形過程は、鍛鋼と比較して、最大荷重点以後の変形量が少ないことが特徴であるが、これは、介在物や微小収縮孔などの欠陥が多く、き裂の発生伝播が生じやすいためであるとされている⁽¹⁾⁽²⁾。

著者等は、さきに、鑄鋼の引張り変形過程における種々の挙動について報告したが、表面を研摩した平板試験片の引張り変形において、表面に発生する歪模様が、樹枝状晶の組織形態と一致対応していることを見出した⁽³⁾。これは、ミクロ偏析によって生ずる樹枝状晶の樹枝部と樹間部の変形抵抗の相違によるものであり、変形抵抗の小さい樹枝部において、塑性変形が優先的に発生進行することにより、相対的に樹間部の変形が遅れ、樹枝部が凹面、樹間部が凸面となって、レリーフ状の歪模様が形成されることによるものと考えられ

る⁽³⁾。これは、necking 発生以前の均一変形域において、樹枝部と樹間部の変形挙動の差にもとづく応力と歪の不均一分布が生じることを意味するものであり、微小き裂の発生と密接に関連しているものと考えられる。しかしながら著者等の知るかぎりでは、このような点に注目した研究はほとんど行なわれていない。

本報では、樹枝状歪模様の発生伝播の過程と、微小き裂の発生生長を関連させて観察した結果を報告する。

2 実験方法

2・1 供試材料および試験片

供試材は前報⁽³⁾と同じく、高周波電気炉で溶製した中炭素 Cr-Mo 鋼の 30 kg 鋼塊を使用した。化学成分は Table 1 に示す。普通静凝固による鋼塊の等軸晶部を N 材、柱状晶部を NC 材、上層攪拌凝固による微細等軸晶鋼塊を S 材として、機械加工により Fig 1 に示す寸法形状の試験片を作成した。

熱処理は電気炉により、 10^{-3} Torr の真空中で加

* 教 授 機械工学科

** 技 官 機械工学科

Table1 chemical composition of specimens. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.55	0.15	0.60	0.03	0.025	0.25	0.09	0.15
~0.60	~0.35	~0.85	以下	以下	以下	~1.20	~0.03

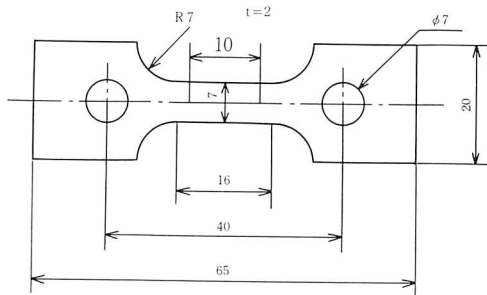


Fig 1 Dimension of specimen

熱し、次の条件のもとに行なった。

焼鈍 950°C×1 hr F.C

焼入れ 850°C×1 hr O.Q

焼戻し 650°C×1 hr O.Q

熱処理を終了した試験片は、表面を0.5 mm 研削して酸化脱炭層を除去したのち、鏡面研磨を行なった。研磨は、エメリー紙1200番から3 μ ダイヤモンドペースト、1 μ アルミナ、0.3 μ アルミナの順に行ない、各研磨段階において、超音波洗滌を行なって研磨材粒子の付着を防止した。

2・2 引張り試験装置

本実験のように、表面の微小な変形状況を連続的かつ詳細に観察するには、既製の試験機では種々の点で不便であることから、自作の小型引張り試験機を使用した。Fig 2にその外観を示す。①のウォーム減速機を介して②のネジ棒を回転させると③のクロスヘッドが移動し④の試験片に引張り荷重が加わる。ウォームの減速比は1/50、これをさらに平歯車で1/2に減速し、総減速比は1/100である。引張り軸のネジはP=2であるから、ハンドルの1回転につきクロスヘッドの移動は0.02 mmである。なお、平歯車はすべりキーを用いているので、噛みあいをはずして手動回転させることにより、試験片の取り付けに際して、クロスヘッドを迅速に移動できる。荷重の測定は⑤の環状バネ式ロードセルによって行なったが、これについては後述する。

2・3 応力と歪の測定

試験片の塑性歪は、裏面（検鏡面の反対側）に貼付した歪ゲージ（KYOWA KFC-5-C1-11）

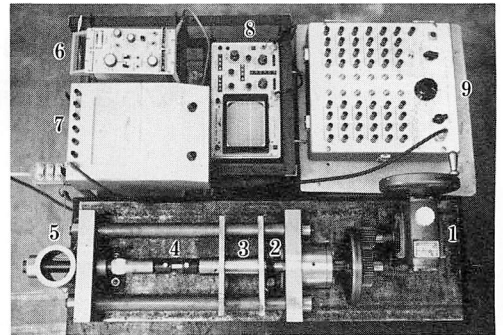


Fig 2 Experimental apparatus

- ① Worm reduction gear
- ② Loading screw
- ③ Crosshead
- ④ Specimen
- ⑤ Load cell
- ⑥ Dynamic strain meter
- ⑦ Static strain meter
- ⑧ Synchro scope
- ⑨ Switching and balancing box

によって検出した。ただし、ゲージの検出限界は $\epsilon=2\sim3\%$ であることから、それ以後は、ビッカース硬度計の圧痕をマークとして、標点間の伸びを工具顕微鏡によって測定した。

荷重は、環状バネに歪ゲージ（KYOWA KFC-5-C1-11）を貼付したロードセルにより測定した。校正値は1000 kgに対して $\epsilon=220\times10^{-6}$ strainであり、100~2000 kgの範囲で良好な直線性を示した。

2・4 マクロおよびミクロ組織の観察

試験片に所定の荷重および歪を与えたのち、その都度とりはずして表面の状態を観察した。高倍率検鏡には金属顕微鏡を使用し、低倍率の観察には、実体顕微鏡Olympus SZ-Trを使用した。一般の実体顕微鏡は鏡面に発生する歪模様の観察には不十分であるので、Fig 3に示すように改良を行なった。

本体に固定したアームの先端にランプハウス①を吊り下げて水平照明光源とし、対物レンズの先に取りつけたハーフミラー②により、光路変更して垂直落射照明を得た。この方式によって、ピンツ調節の際に鏡筒を上下移動させても、光源とハーフミラーの位置関係は変わらず、照明状態は一定に保たれた。さらに、試験片を球面座を有する

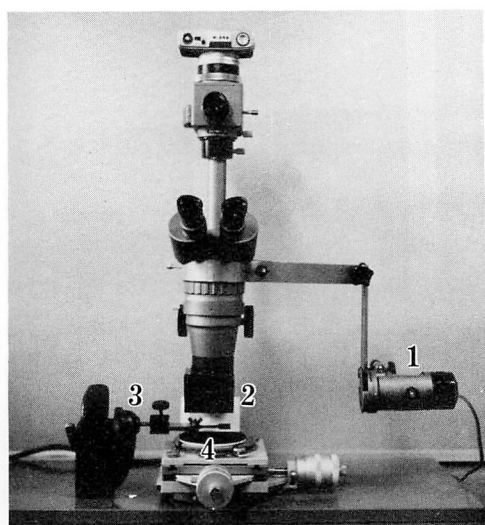


Fig 3 Devise for macrophotography

- ① Lamp house
- ② Half mirror
- ③ Specimen holder
- ④ Specimen

自在アーム付のホルダー③で支持し、照明光軸との角度を微調節することによって、表面の歪模様に適度のコントラストをつけて観察できるようにした。

3 実験結果ならびに考察

3・1 応力と歪の関係

Fig 4 に引張過程の応力-歪線図を示す。応力は nominal stress, 歪は conventional strain であり、図中のプロットは、試験片を取りはずして観

察測定を行なった位置に対応する。いずれも、降伏点に続いて、応力一定で変形の進行する降伏点伸び領域が存在し、延性的な挙動を示すことがわかる。柱状晶 NC 材と等軸晶 N 材は、同一鋼塊から採取したものであり、降伏点は 78 kg/mm^2 で等しい値を示している。微細等軸晶 S 材は、やや鋳造欠陥の多い部分から採取したので、降伏点が低く 62 kg/mm^2 である。

3・2 樹枝状歪模様の発生と伝播

Photo 1 A～D は、引張り変形にともなって発生した試験片表面の歪模様を連続的に観察したものである。Photo 1・D は比較材として用いた S 55 C 圧延材のものであるが、降伏点に達すると Lüders band が発生し、長手方向に伝播しつつ降伏点伸びを生ずる。表面の歪模様は微細であり、かつ、Lüders band の部分においてのみ発生しており、他の部分は全く平滑な状態に保たれている。変形の進行にともなって、Lüders band は全面に伝播し、降伏点伸び領域を終了するに至る。以上は圧延材の一般的な降伏挙動であるが、鋳鋼においては、これとかなり異なった挙動を示す。

Photo 1・A～1・C に鋳鋼の場合を示す。引張り歪が $0.02 \sim 0.04\%$ になると全面に微小な歪模様があらわれてくる。この歪模様は、すでに樹枝状晶の形態と対応していることが認められる。Lüders band はまだ発生していないが、前駆現象とみられるゆるいうねりが生じている。 $\epsilon = 0.05 \sim 0.1\%$ で Lüders band が発生する。樹枝状歪模様は全面でより鮮明に発達してくるが、Lüders band の表面でその傾向が強くなっている。

このように降伏挙動の基準である Lüders band の発生する以前に、すでに全面にわたって歪模様

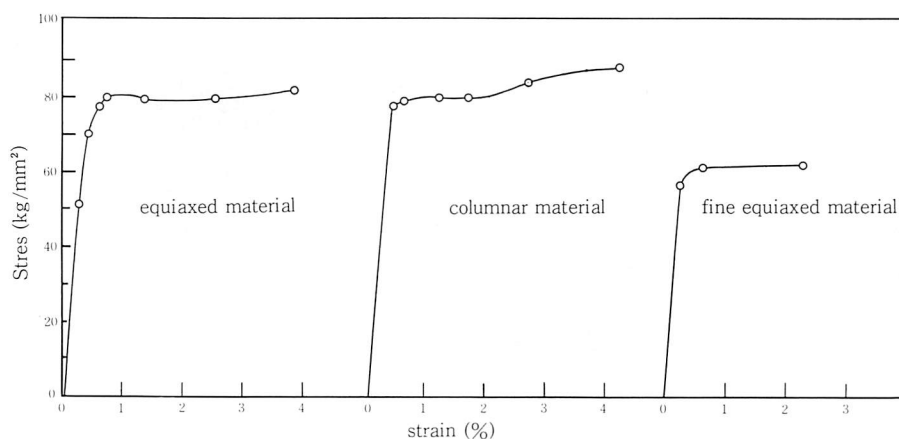
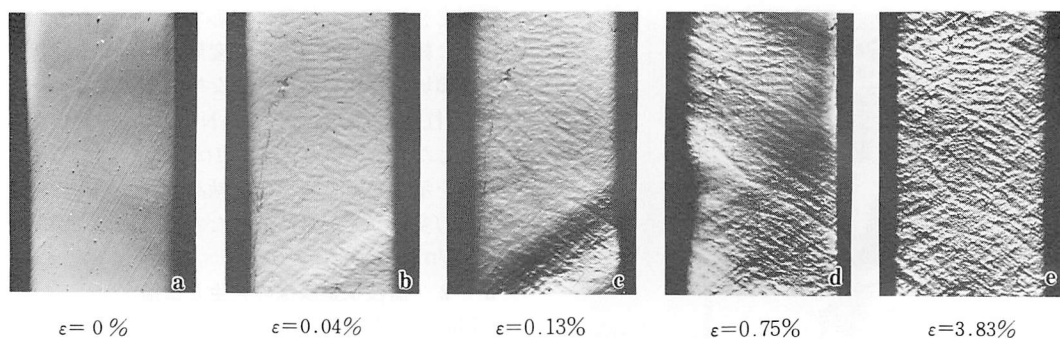
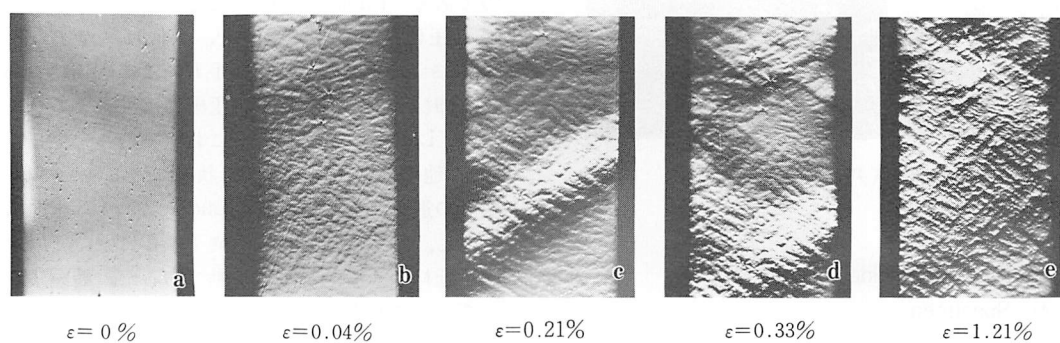


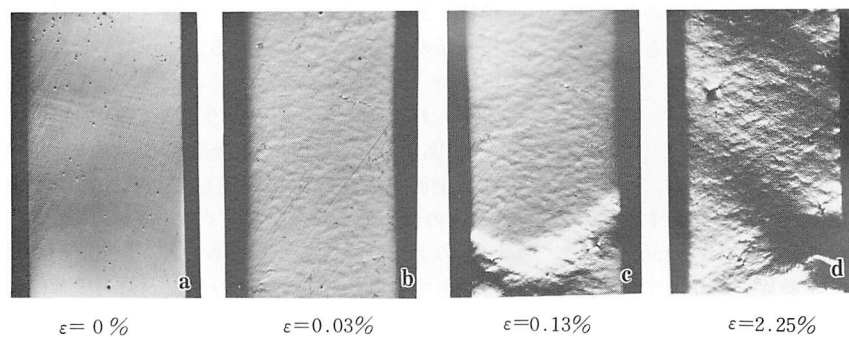
Fig 4 Stress-strain curves



A columnar material

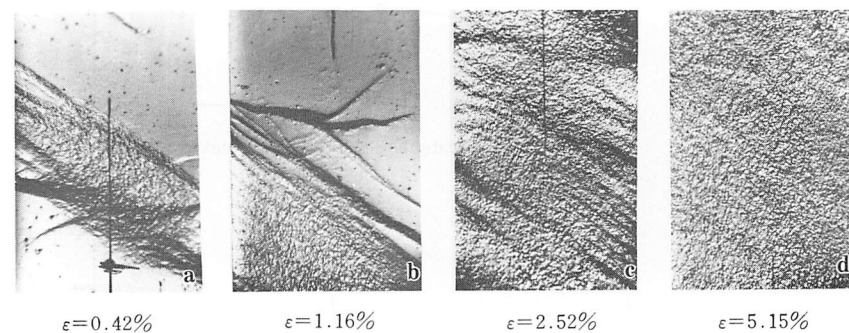


B Equiaxed material



C Fine equiaxed material

↑
↓
Axial direction



D Commercial steel S55C

Photo 1 Sequential macrographs of tensile specimen surface

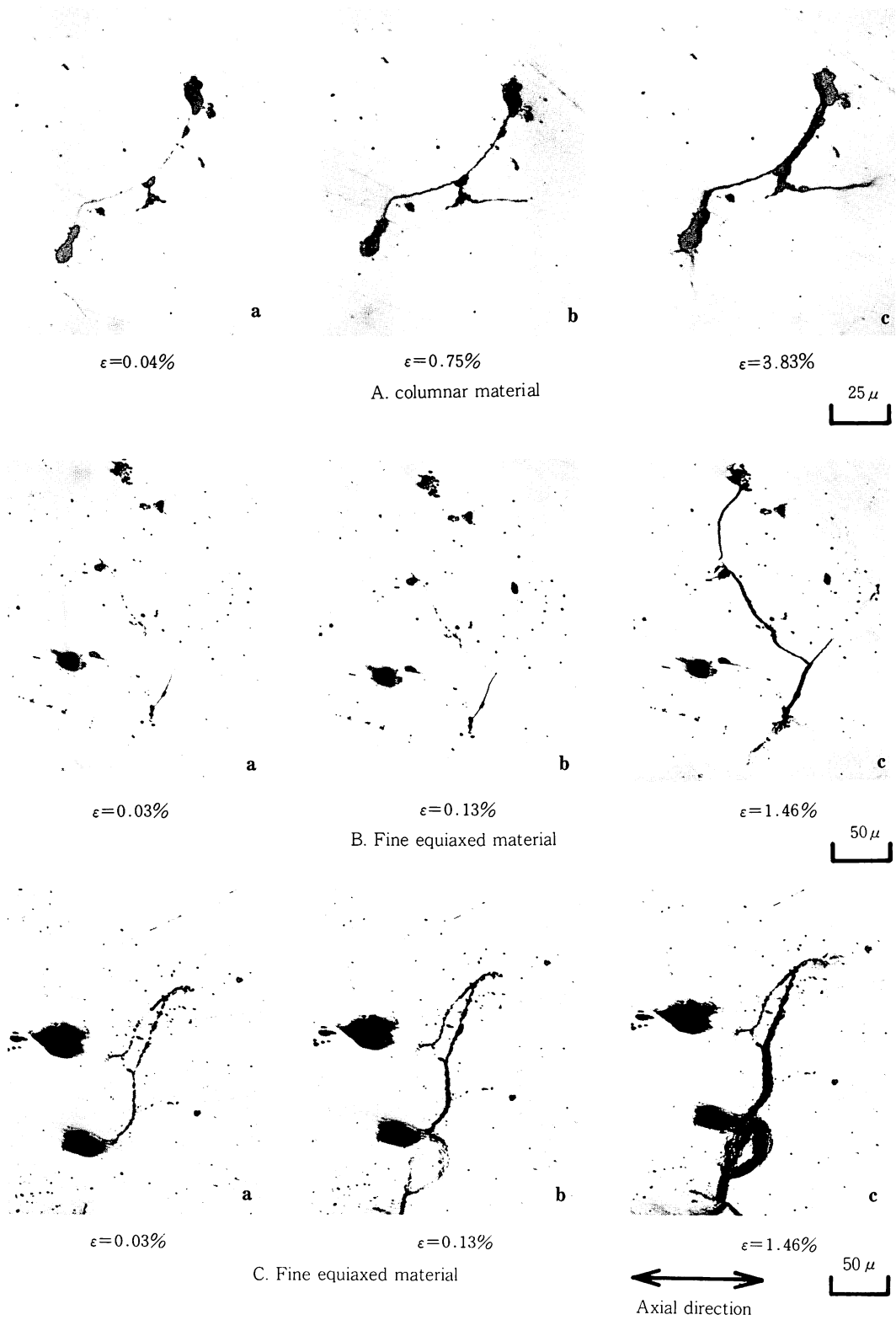


Photo 2 Formation and propagation of micro-crack associated with non-metallic inclusions

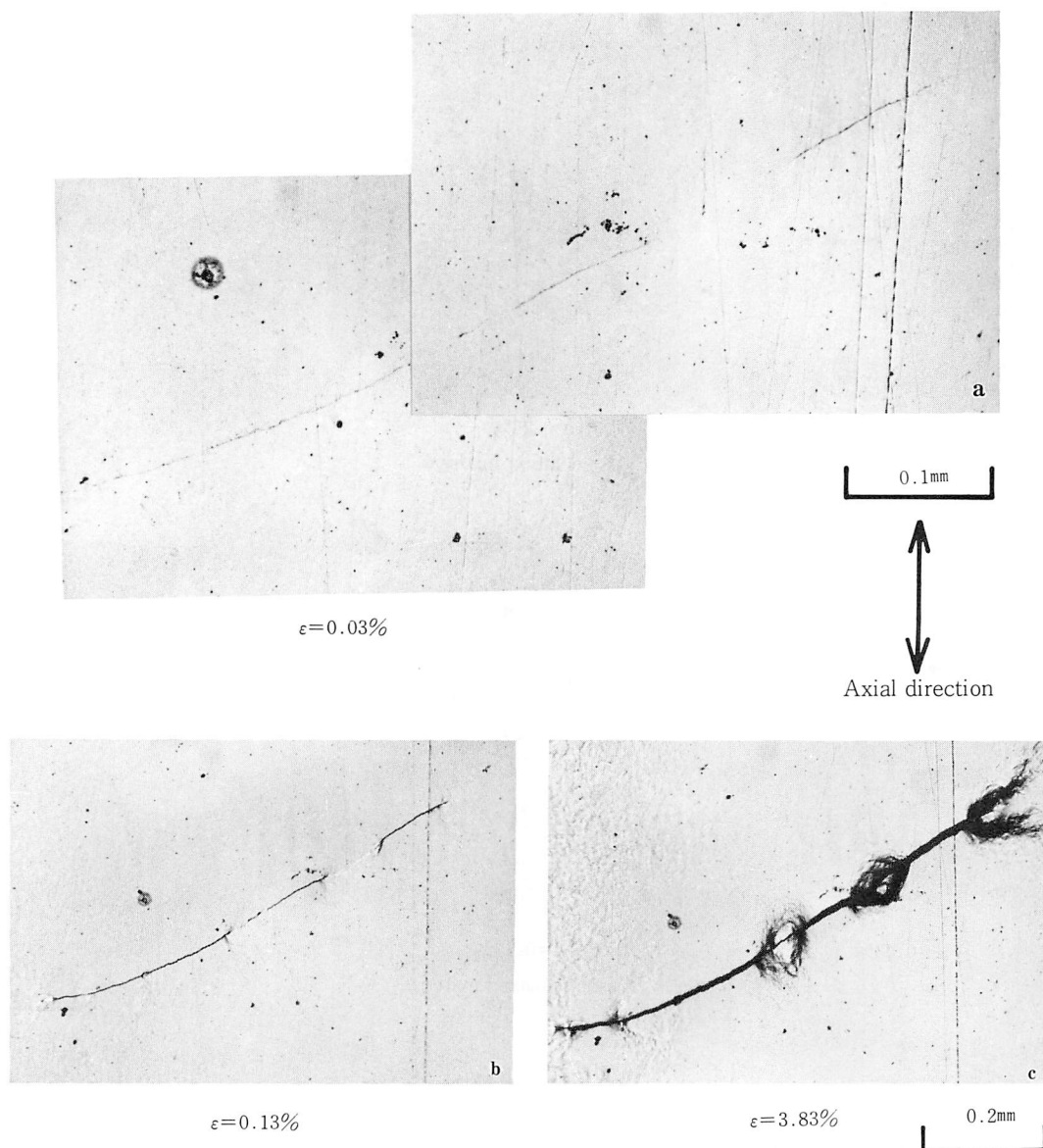


Photo 3 Formation and propagation of micro-crack unassociated with non-metallic inclusions

が発生していることは、Photo 1・D a～bのS 55 C圧延材で、Lüders band 以外の部分では全く変形が生じていないことと比較すると、鋳鋼特有の現象として注目すべき事柄である。

さらに変形が進むと Lüders band は伝播拡大して平行部全面をカバーし、さらにそれと交差する形で別の Lüders band が発生し、X形の変形が生じる。この段階になると、ミクロ的な欠陥を起点として発生したき裂が拡大して、マクロ的にも

識別し得る大きさに発達し、また、結晶の形態によって、歪模様の形に差があらわれてくる。Photo 1・A, 1・Bにみられるように、柱状晶は樹枝状晶の形態および方向性がはっきりとあらわれており、等軸晶もほとんど同様である。これに対して、微細等軸晶では形態がやや不明瞭であり、凹凸が樹枝状晶の形を正確にあらわしているとは、必ずしも認め難い。これは結晶形態およびデンドライトアームスペーシングの大きさに関係する

ものと考えられ、今後の検討課題である。

3・3 微小き裂の発生と伝播

Photo 2 は変形にともなって発生伝播する微小き裂の挙動を示すものである。ここで注目すべきは、Photo 2・A, B, C の a に示すように $\epsilon = 0.02 \sim 0.04\%$ というきわめて微小な変形状態で、すでにき裂が発生していることである。これらのき裂および周辺の介在物には塑性歪が認められないことから、発生状況は脆性的であると考えられる。マクロ的には、Photo 1・C・a のように Lüders band の発生以前であり、降伏点には達していないが、歪模様が全面にわたって発生する段階に対応する。前述の歪模様の形成機構を考慮すると、変形は延性の大きな樹枝部で優先的に進行し、樹間部ではほとんど変形が生じることなくして、このような脆性的き裂が発生するものと思われる。Photo 2・B・a ではき裂は介在物を連結する形式で発生しているが、隣接した微小収縮孔と思われる空洞には全く変化がない。しかし、Photo 2・C・a では、連点状介在物から発生したき裂が空洞に達してひずみを発生し、次のき裂と連絡していることが観察され、き裂の伝播における空洞の役割を示している。また、これらのき裂あるいは介在物の先端に塑性歪が発生するのは $\epsilon = 0.05 \sim 0.1\%$ であり、Lüders band の発生する時期に対応している。

Photo 3・a は介在物と関係なく、マトリクス中に発生したき裂を示す。引張り方向と垂直で、塑性歪は全く生じていないことから、脆性き裂であることがわかる。最初は、3つの部分にわかれて発生し、変形の進行にともなって、それぞれのき裂の先端に歪が集中したのち延性き裂が生じて連結している。このように、近辺に介在物が存在するにもかかわらずそれと無関係に発生伝播してゆくことは、注目すべきであり、この種のき裂には、さらに微細な介在物および炭化物との関連性を考慮せねばならないことを示すものである。

鋼の引張り変形過程におけるき裂の発生についての現在までの報告では、変形の進行にともなって介在物の先端に応力集中による歪が生じ、それが、き裂の発生点となることが認められている⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、鋳鋼において、微小欠陥からのき裂の発生が報告されている⁽¹⁾⁽⁶⁾。しかしながら、これらはいずれも降伏点を越えて、ある程度の塑性変形が生じた状態においての結果であって、本実験の

ような 0.02% という微小な変形状態でのき裂の発生伝播については殆んど報告されていない。前述のように、この現象はデンドライトの樹枝部と樹間部の変形挙動の相違にもとづく、応力および歪の不均一性、変形拘束、さらには応力集中源としての介在物その他の欠陥の分布形態などが複雑に関連しているものと考えられる。

現段階ではこれらの要因を含めた考察を行なうには未だデータ不足であり、本報では単なる観察結果を述べるに止めた。今後さらに実験条件を整備して深く追及してゆきたい。

4 総 括

表面を研磨した鋳鋼引張り試験片の変形過程を観察した結果は、次の如くである。

1. 0.02% 程度の微小な変形で樹枝状晶形態に対応する歪模様が発生し、その段階でミクロ的なき裂が発生する。
2. ミクロ的なき裂は殆んど脆性的に発生する。
3. き裂には介在物を起点とするものと、マトリクス中に発生するものがある。
4. Lüders band 発生時の歪は $\epsilon = 0.05 \sim 0.1\%$ であり、微小き裂の先端に塑性歪が生じる段階に対応する。

本研究を行なうにあたって、有益な御教示をいただいた北海道大学工学部高橋忠義教授、工藤昌行講師に深く感謝する。また、実験装置の製作にあたっては本校機械実習工場の技官各位に多大の御協力をいただいた。その他全般にわたってお世話になった機械工学科教職員各位にあわせて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 堺・清重・喜多：鋳物，(1978) 第 94 回講演概要集 p 78
- (2) T. クザルティエ・中島・倉部：鋳物，46 (1974)，5，441
- (3) 大島・林：苫小牧高専紀要，第 13 号 (1978) p 1
- (4) 岡田・川崎：鉄と鋼，vol 60 No. 4 (1974) S-185
- (5) 渡辺：日本製鋼所研究報告 No. 6，p 41
- (6) 三宅・喜多・西山：鋳物，vol. 45, No. 7 (1973) p 582

(昭和 53 年 12 月 7 日受理)

