

鑄鋼のデンドライト形態と延性破壊過程について

大 島 聡 範*・林 忠 夫**

On the Dendrite Morphology and the Ductile Fracture Behavior in Cast Steel.

Toshinori OSHIMA and Tadao HAYASHI

要 旨

鑄鋼の引張り過程におけるき裂の発生と伝播の状況を観察し、デンドライト形態ならびに介在物分布形態と延性破壊挙動との関係について調べた。その結果、き裂の発生伝播を支配する要因は樹間部自体の形状と介在物の分布形態であることがわかった。以上の結果は、有孔鋼板の引張り実験により確認された。

Synopsis

The relationship between macrostructure and ductile fracture behavior of cast steel was studied.

It was found that variation in ductility is a consequence of variation in dendrite morphology and ductility is inversely proportional to the size of interdendritic region.

A mechanism is proposed to account for this correlation based on the initiation and growth of unit cracks in the interdendritic region and these linking across the dendritic region.

I 結 言

鑄鋼の強度と延性は、その凝固組織と密接に関連しており、デンドライトの微細なものは、引張り試験における伸び、絞り値が良好であることが知られている¹⁾。デンドライトの微細化にともなう延性向上の理由として、たとえば Petch による機械的性質の粒度依存性を、デンドライトセルサイズに対して適用することは可能であるが、実際、デンドライトの微細化によって向上するのは主に延性であって、強度はほとんど変わらないという事実²⁾を充分説明し得るものではない。

延性を支配するもう一つの要因は、介在物、ミクロポロシティなどの微小欠陥であるが、これらについては、延性破壊過程において演ずる役割が明らかにされており、欠陥の体積率が増加すれば延性は減少するという一般的な傾向が認められている³⁾。しかしながら、これらは、いずれも圧延鍛

造材を対象としたものであり、欠陥の分布は殆んど均一である。これに対して、鑄鋼では、微小欠陥の大部分がデンドライト樹間部内に存在し、その分布形態は必然的にデンドライト形態に対応した不均一なものとなっている。これは、破壊の発生点が樹間部分の微小欠陥であり、伝播経路はデンドライト形態に対応することを意味するもので、二つの主要因、すなわち、デンドライト形態と欠陥の分布形態の両者を関連づけて検討を行なう必要があることを示唆するものである。

本研究では、微細粒状晶と粗大樹枝状晶の二つの異なる結晶形態を有する鋼塊について、引張り過程における変形、き裂の発生伝播の様相を、デンドライト形態ならびに介在物分布形態に注目しつつ観察し、延性を支配する要因について検討した。さらに、介在物を想定した小孔を、デンドライト形態を模して配列した有孔鋼板の引張り実験を行ない、鑄鋼についての実験結果との比較検討を試みた。

* 教 授 機械工学科

** 技 官 機械工学科

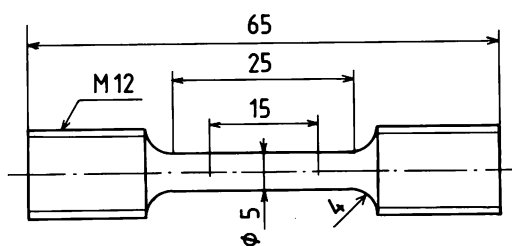
II 実験方法

II-1 供試鋼塊および試験片

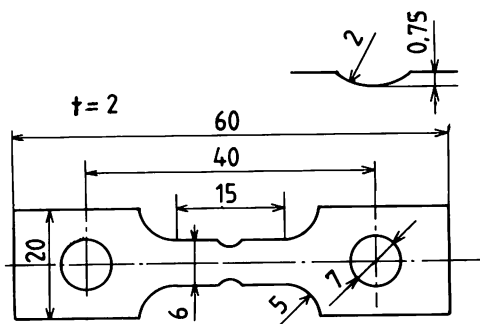
供試材は表1に示す化学成分の中炭素 Cr-Mo 鋼で, SCM 5 を目標として高周波炉にて溶解し, 大気中で砂型に鑄込んだ。鋼塊の重量は 30 kg, 寸法形状は図1に示す。ここで, デンドライト形態の異なる鋼塊を得るために, 二種類の凝固法を採用した。一方は普通凝固であり, 他方は上層攪拌凝固である。これは凝固過程で溶湯の上層部を攪拌することによって, 微細結晶を底部から沈降堆積させ, 全体を微細粒状晶とする方法である⁴⁾。写真1に鋼塊のマクロ組織を示す。普通凝固鋼塊が典型的な樹枝状晶であるのに対し, 上層攪拌凝固鋼塊では全体が微細な粒状晶となっている。

この両鋼塊から, 図2に示す寸法形状の引張り試験片を作成した。丸棒試験片は主として機械的性質の測定に用い, 平板試験片は表面を鏡面研磨して, 引張り過程中的変形, き裂の発生伝播をより詳細に観察するために使用した。熱処理は真空炉中で表2に示す条件により焼鈍, 焼入, 焼戻しを行なった。

また, 組織要因として, デンドライトアームスペーシング, 清浄度, 介在物分布形態について, 前報⁵⁾と同様の方法により測定した。



(a) 丸棒引張り試験片



(b) 平板引張り試験片

図2 試験片の寸法形状

表1 供試材の化学成分

(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.43	0.15	0.60	<0.030	<0.030	0.90	0.15
~0.48	~0.35	~0.85			~1.20	~0.30

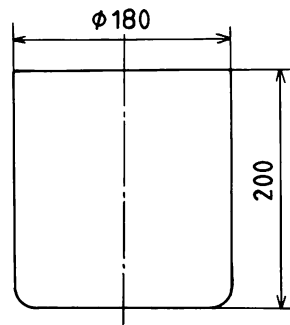


図1 鋼塊の寸法形状

表2 試験片の熱処理

950℃×1hr F.C, 850℃×1hr O.Q, 650℃×1hr O.C

II-2 機械的性質ならびに組織要因

表3に供試材の機械的性質を示す。粒状晶は, 引張り強さ, 伸び, 絞り, 硬さのいずれにおいても樹枝状晶より大きく, 強度が高いにもかかわらず延性がすぐれている。また両者とも, 樹間部の硬さは樹枝部よりも高くなっており, ミクロ偏析による樹間部のへの炭化物および固溶元素の富化を示している。

表4は供試材の組織要因である。デンドライトアームスペーシングは, 樹枝状晶の 0.4 mm に対して粒状晶は 0.24 mm と微細である。清浄度, 介在物数は両者ほとんど同様であるが, 介在物分布形態をあらわす介在物集中度は大巾に異なっている。

表3 供試材の機械的性質

組織	降伏点 kg/mm ²	引張り強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %	微小硬さ 樹枝部	微小硬さ 樹間部
樹枝状晶	76.3	83.9	10.2	14.2	265	327
粒状晶	82.3	91.8	14.4	21.2	295	344

表4 供試材の組織的要因

組織	デンドライト アームスペーシング mm	清 浄 度	介在物数 per mm ²	介在物集中度
樹枝状晶	0.24	0.111	4.3	176×10 ⁻³
粒状晶	0.16	0.105	4.1	85×10 ⁻³

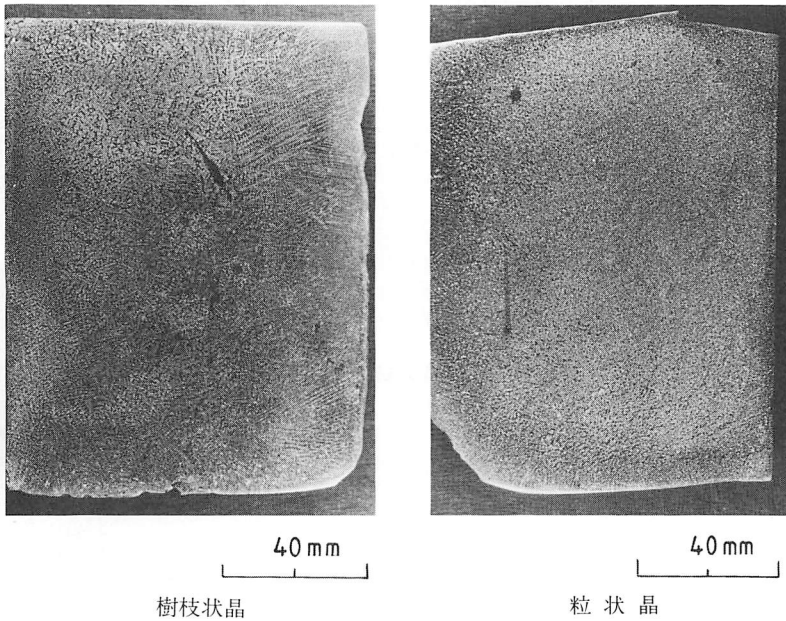


写真1 鋼塊のマクロ組織

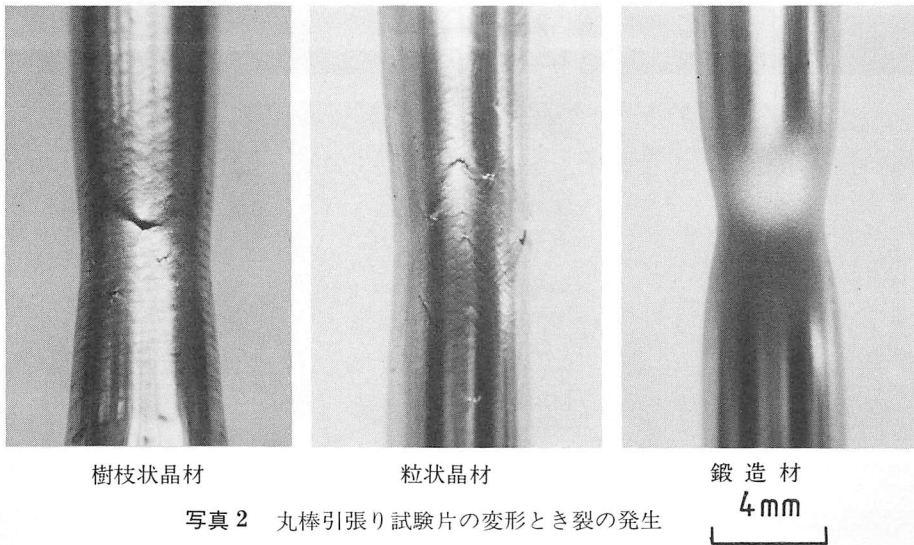


写真2 丸棒引張り試験片の変形とき裂の発生

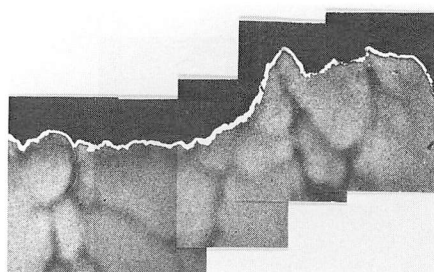
る。これは、樹枝状晶では、介在物の分布が粒状晶とくらべて不均一であり、特定部分へ集中して存在することを示している。なお、この点に関してはIII-3において述べる。

III 実験結果ならびに考察

III-1 引張り変形過程とき裂の発生伝播

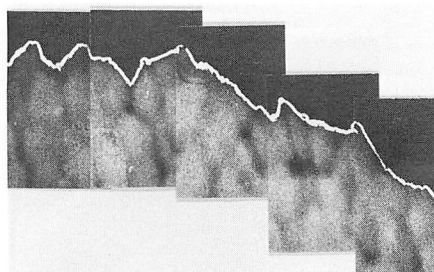
写真2は丸棒引張り試験片の変形状況である。樹枝状晶、粒状晶のいずれにおいても、necking 発

生にともなって表面にき裂が生じている。これに対して、比較材としての鍛造材では、き裂は全く認められない。このような表面のき裂は、铸鋼の延性を支配する重要な因子であると考えられる。写真3は破面のプロファイルである。破断面は、黒色の樹間部に沿っており、その屈曲はデンドライト形態に対応して、樹枝状晶は比較的大きく単純であるのに対し、粒状晶では小さく複雑である。これは、き裂が硬く脆い樹間部で発生し、樹間部



0,5mm

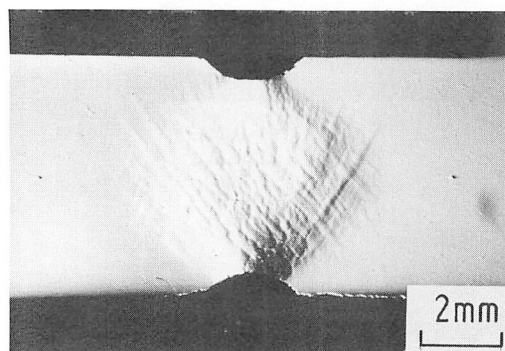
樹枝状晶



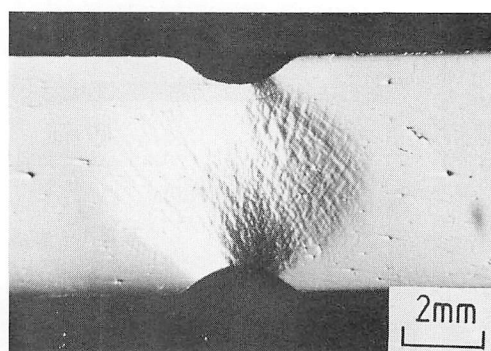
0,5mm

粒状晶

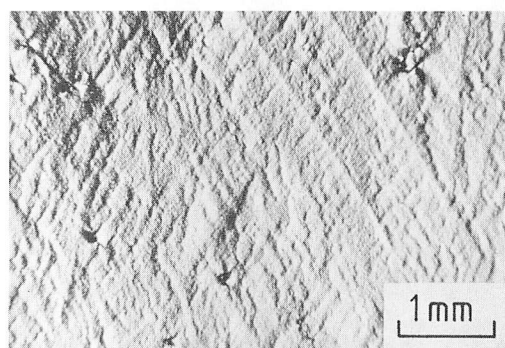
写真3 丸棒試験片の破面プロフィール



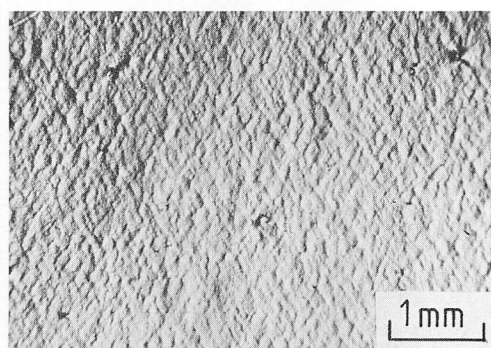
2mm



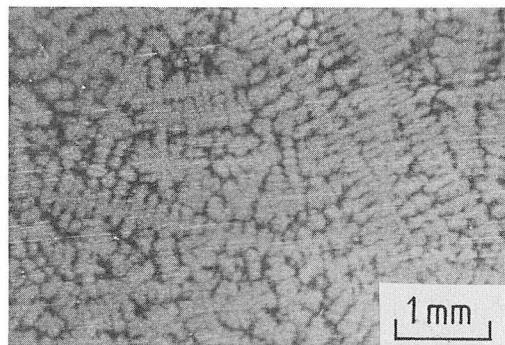
2mm



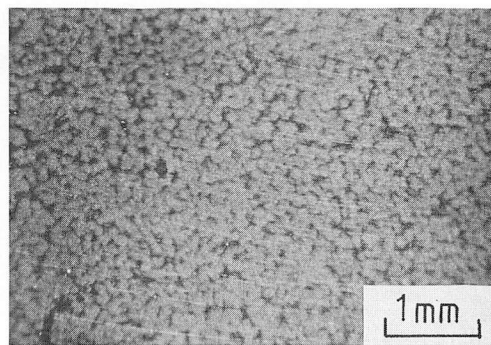
1mm



1mm



1mm

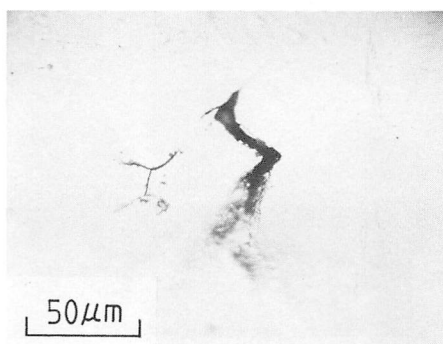
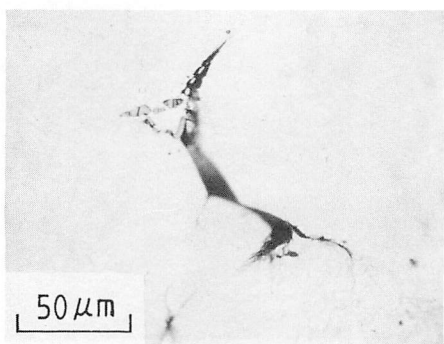
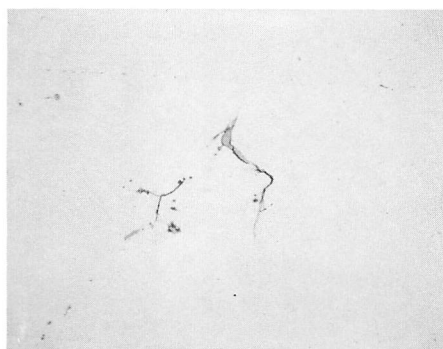
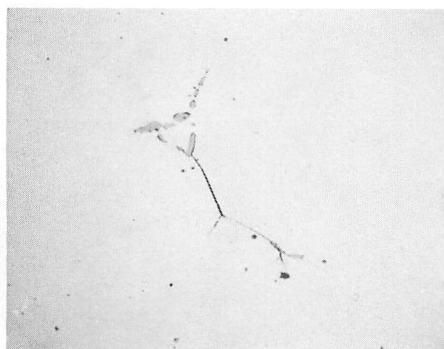


1mm

樹枝状晶

粒状晶

写真4 平板引張り試験片の変形状況



樹枝状晶

粒状晶

写真5 平板引張り試験片の表面におけるき裂の発生と伝播

を辿って伝播してゆくことを示すものであると同時に、破壊の様相がデンドライト形態によって異なることを示すものである。

写真4は平板引張り試験片の表面における変形状態である。上段は約5%の歪を与えた状態で、デンドライト形態に対応した歪模様が形成されている。オーバーホッファー腐食を行なった下段の写真と対比させれば、樹間部は凸面、樹枝部は凹面となっていることがわかる。これは引張りにともなって、軟らかい樹枝部が優先的に変形し、硬く脆い樹間部の変形が遅れることによって生ずる不均一変形である。

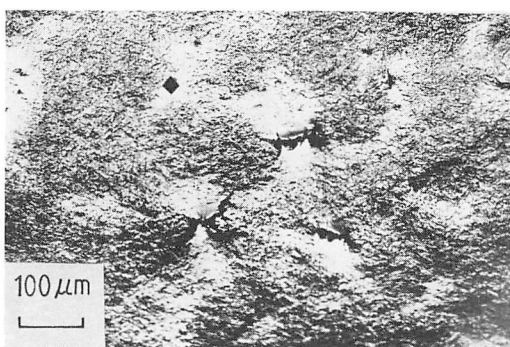
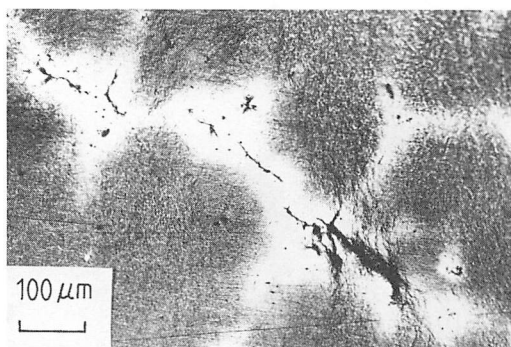
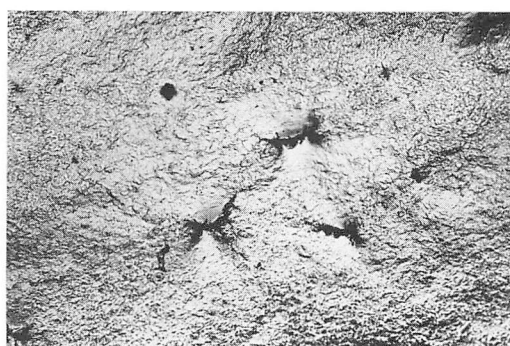
写真5は平板試験片の表面におけるき裂の発生伝播を示すものである。上段は約1%、下段は約5%の変形を与えた状態であるが、粒状晶、樹枝状晶のいずれも介在物を起点としてき裂が発生し、変形とともに介在物間を連結する形式で伝播している。き裂は樹間部内では塑性歪を伴わず、ほとんど脆性的に伝播しているが、樹枝部に達すると一旦その進展は停止し、やや開口する。さらに引張りが加わると、き裂先端の樹枝部内に塑性歪が集中して延性き裂が発性し、再び進展を開始する。このような脆性的き裂から延性き裂への移

行は、硬く脆い樹間部から軟らかく延性に富む樹枝部への進展に対応するもので、鋳鋼特有の現象である。

III-2 単位き裂の形成と連結

写真5にみられるように、樹間部いっぱいには拡大進展し、一時停止した状態のき裂に着目し、これを単位き裂と定義すれば、その長さは樹間部の大きさに比例し、デンドライト形態に対応した大きさになると考えることができる。この状況は写真6および写真7に示される。下段の白色部分は樹間部であり、単位き裂は樹間部の大きさ、すなわちデンドライト形態に対応している。

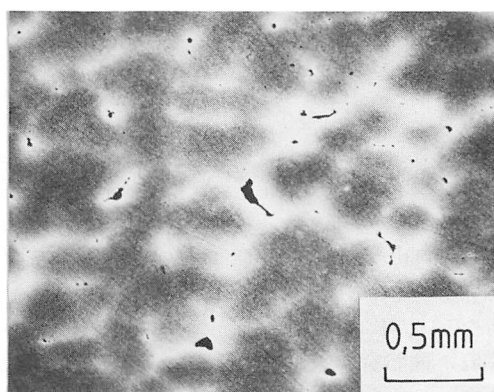
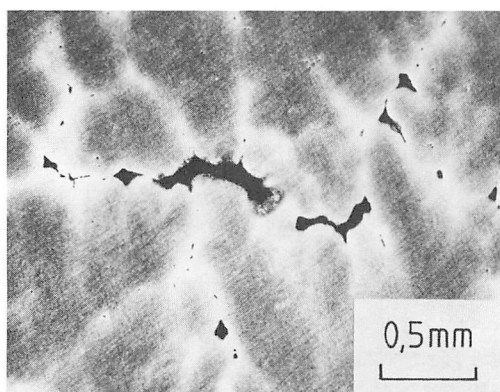
最終破断に至るき裂は、各所の樹間部に発生したこれらの単位き裂が、樹枝部を横切って進展し、互いに連結合体することによって形成されるものと考えられるが、その難易はデンドライト形態によって異なることが推察される。すなわち、樹枝状晶では単位き裂が大きく発達し、また、樹間部自体の形状からして、単位き裂の連結合体が起り易い。これに対して粒状晶では単位き裂が小さく、樹間部自体の形状も樹枝部に囲まれて孤立した状態であり、単位き裂の連結合体は起り難い。



樹枝状晶

粒状晶

写真6 平板引張り試験片における単位き裂の形成



樹枝状晶

粒状晶

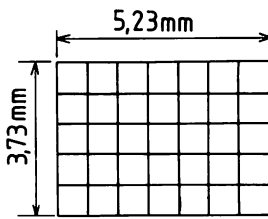
写真7 丸棒引張り試験片の内部における単位き裂の形成

以上は平板の表面における状況であるが、丸棒試験片の内部においても同様である。写真7はnecking部分の縦断面であるが、き裂はすべて樹間部で発生し、そのうちのいくつかは単位き裂となっている。樹枝状晶は粒状晶とくらべて単位き裂が大きく、その形態からして連結合体が起こりやすいことは明白である。

III-3 介在物分布形態とき裂の発生

以上の観察結果を整理すると、鑄鋼の延性破壊は次のような過程を経て生ずるものと考えることができる。

- (1) 樹間部内の介在物を起点とする初生き裂の発生。
- (2) 介在物を連結するき裂の伝播。



マス目の実寸法

$$P_x = \frac{e^{-m} m^x}{x!}$$

$$D = \sum |P_x - E_x|$$

X	1 マス中の介在物数
m	1 マス中の平均介在物数
E_x	実際の分布確率 1 マス中に X 個の介在物が含まれるマス数の全マス数に対する割合。
P_x	ポアソン分布確率 介在物がポアソン分布した場合の 1 マス中に含まれる介在物数別の確率。
D	介在物の集中度 ポアソン分布と実際の分布の差の絶対値の総和。

図 3 介在物分布の定量化方法

(3) 樹間部の大きさに対応する単位き裂の形成。

(4) 単位き裂の連結合体。

(5) 最終破断に至るき裂の形成。

これらのうち、(3)と(4)はデンドライト形態に依存するものであるが、(1)と(2)においては介在物の分布形態が重要な因子であると考えられる。そこで介在物の分布状況を定量的に示すために、ポアソン分布を用いて介在物の集中度を求めた。方法の詳細は前報⁹⁾に述べたので図 3 にその概要を示す。

図 4 はその結果である。ここで E_x は実際の介在物の分布をあらわすものであり、 P_x は介在物がポアソン分布すると仮定して、平均介在物数から計算した分布曲線である。 P_x と E_x の両曲線の形状に相異があるということは、D の値が大きいこと、すなわち、介在物の分布が不均一で、特定部分に集中して存在する傾向の強いことを意味するものである。樹枝状晶、粒状晶に対応する添字を D, G とすれば、 $m_D = 1.83$, $m_G = 1.76$ で両者ほとんど等しいが、 $D_D = 171 \times 10^{-3}$ に対し、 $D_G = 85 \times 10^{-3}$ となって、樹枝状晶は粒状晶にくらべて特定部分への集中度が大きい。この特定部分とは樹間部に相当するものであるから、樹枝状晶は粒状晶よりも介在物の集中度が大きく、き裂の形成がより容易に行なわれるものと考えることができる。

IV 有孔鋼板の引張り試験

IV— 1

鋳鋼の延性を支配する要因が、デンドライト形態ならびに介在物分布形態であることが明らかになったので、介在物を想定した小孔を、デンドラ

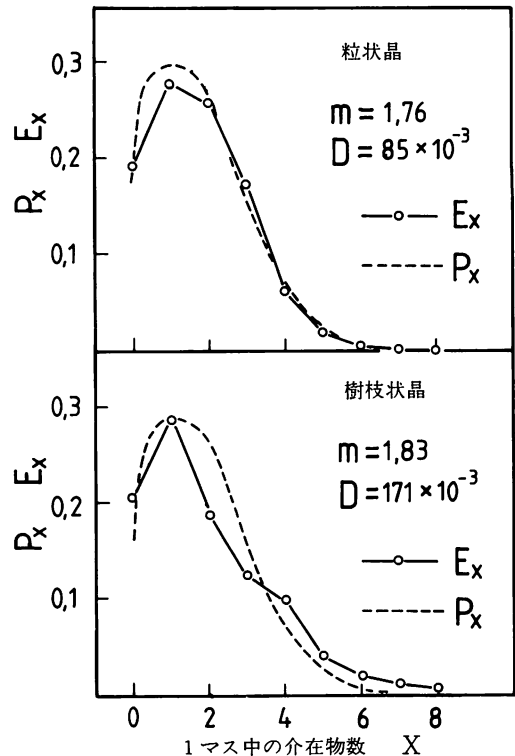


図 4 介在物の分布曲線

イト形態を模して配列した有孔鋼板をモデルとして引張り試験を行ないこれを検証することを試みた。

試験片は市販の SS 材で、図 5 に示す寸法形状の中央部分に直径 1.0 mm の小孔をドリルであけて作成した。孔の配列は図 6～8 に示すように、圧延鍛造材を想定した均等配列 A シリーズと鋳鋼を想定した不均等配列 B, C シリーズである。孔

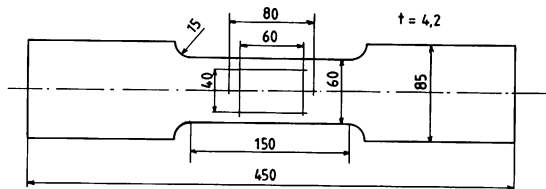


図5 有孔鋼板試験片の寸法形状

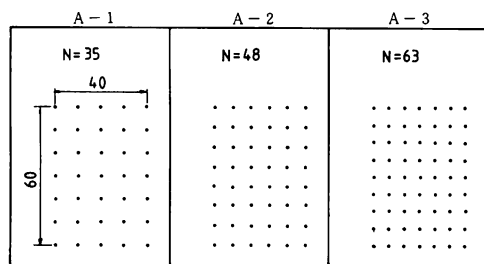


図6 有孔鋼板の孔配列 (Aシリーズ)

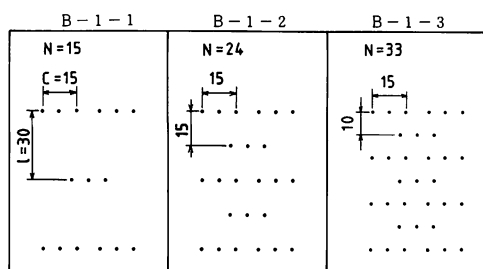


図7-1 有孔鋼板の孔配列 (Bシリーズ)

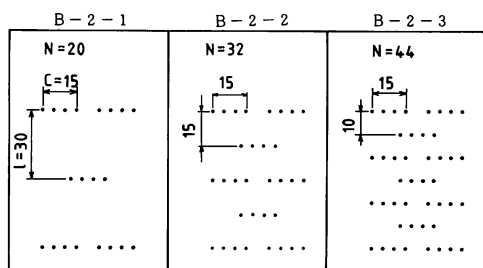


図7-2 有孔鋼板の孔配列 (Bシリーズ)

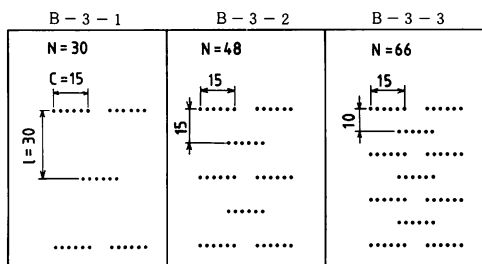


図7-3 有孔鋼板の孔配列 (Bシリーズ)

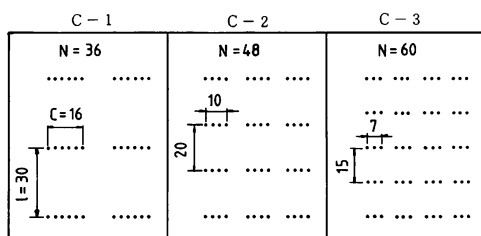


図8 有孔鋼板の孔配列 (Cシリーズ)

表5 有孔鋼板の孔配列と鑄鋼組織の対応

	有孔鋼板	鑄 鋼
N	孔 数 →	介在物数
c	孔列長さ →	単位き裂長さ
ℓ	孔列間隔 →	デンドライトアームスペーシング

の配列パターンと鑄鋼のデンドライト形態との対応は表5に示す。

図9は均等配列についての結果である。孔数が増加するにつれて伸びは減少しているが、強度はほとんど変らない。これは第二相体積率と伸びの関係にみられる一般的傾向³⁾とよく似ており、このモデルの設定が適当であることを示している。

図10は不均等配列の場合であるが、孔の存在する場所が限定されていることから、必然的に孔は特定個所に集中する。この孔の集団を孔列として孔列間隔(一定面積内での孔列数)を変えれば、結果的に孔数は変わる。単位孔列長さ当りの孔数を孔密度と定義し、孔密度一定の場合、孔列数を増加させれば孔数は増加する。それにもなって強度はわずかに減少するが、伸びは明らかに増加しており、孔数の増加が延性を減少させるものとはならない。

不均等配列で孔数Nを一定とした場合、孔列間隔ℓを変えると必然的に孔列数は変化し、それにもなって孔密度も変化する。図11はこのような孔密度の変化に対する伸びの変化を示すものである。孔密度の増加にともなって伸びは減少しており、併記した均等配列の場合も同様の傾向を示している。

図12は図11の結果を孔列間隔と伸びの関係として整理したものである。これより各孔密度レベルにおいて、孔列間隔ℓが大きくなれば伸びは減少することがわかる。

以上により、有孔鋼板の伸びを支配するものは孔密度と孔列間隔であり、孔密度が一定の場合、孔列間隔が大きくなれば伸びは減少し、孔列間隔

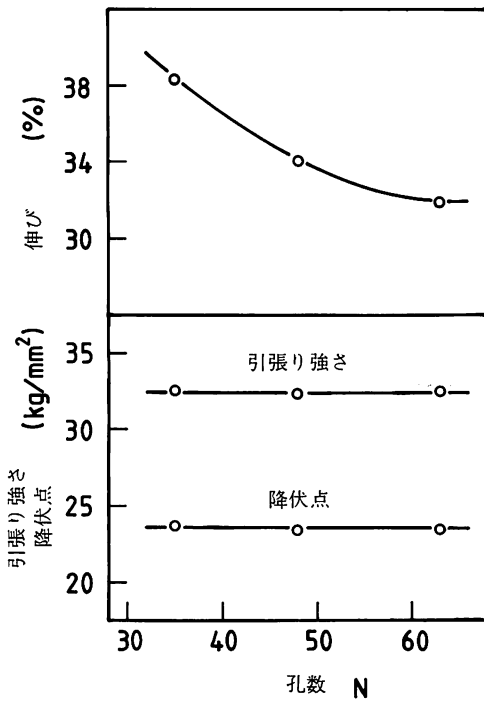


図9 有孔鋼板Aの孔数と伸び、強度の関係

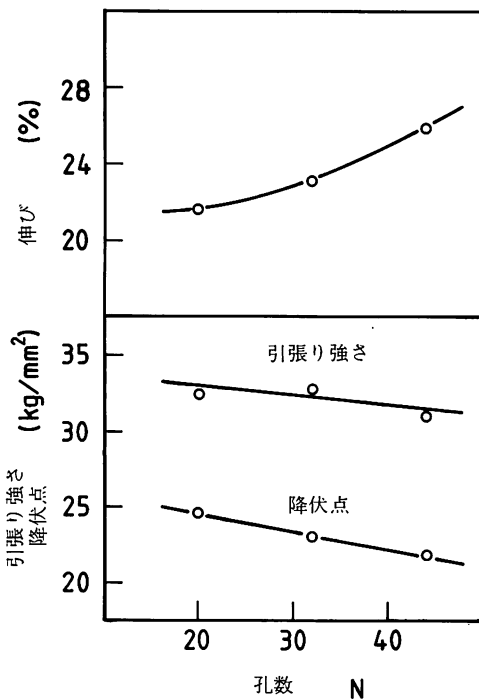


図10 有孔鋼板B-2の孔数と伸び、強度の関係

が一定の場合は、孔密度が大きくなると伸びは減少することが認められた。

有孔鋼板の変形破壊過程を観察すると写真8, 9のように、引張りの進行にともなう孔の縁に歪が集中し、最大荷重点で歪が限界に達してき裂が発生する。発生したき裂は孔同志を連結し、孔列長さ単位のき裂となる。さらに変形が進むと、この単位き裂が孔列間を連結して最終破断に至る。これは鋳鋼の延性破壊過程と良い対応を示している。

ここで単位き裂に相当するのは孔列長さ c であるから、デンドライト形態に対応するモデルとしての孔列パターンは孔列長さ c を変化させたものがのぞましい。ここで c を変えれば、デンドライト形態との対応からして、 l も変化させねばならない。このような考えによって、孔列パターンC

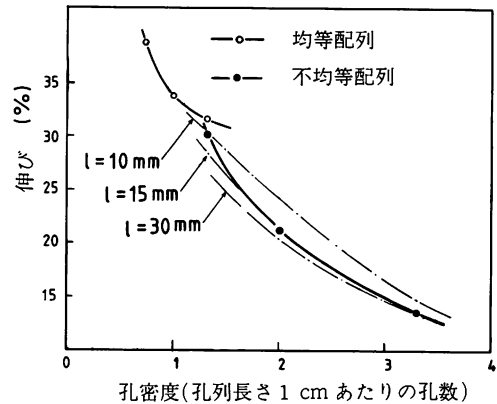


図11 有孔鋼板Bシリーズの孔密度と伸びの関係

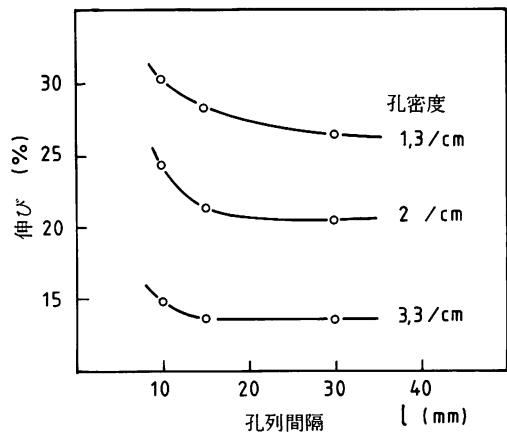


図12 有孔鋼板Bシリーズの孔列間隔と伸びの関係

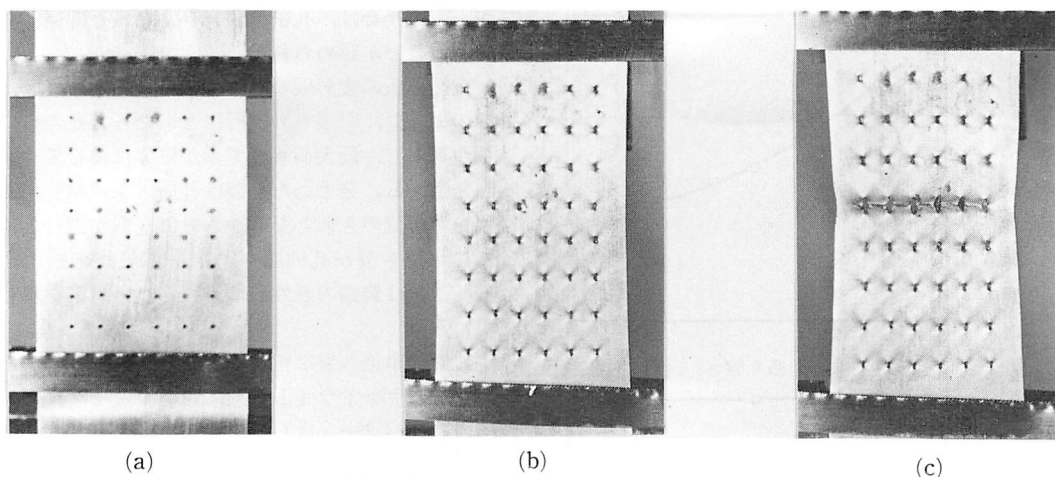


写真8 有孔鋼板 (A-2) の引張り破断過程

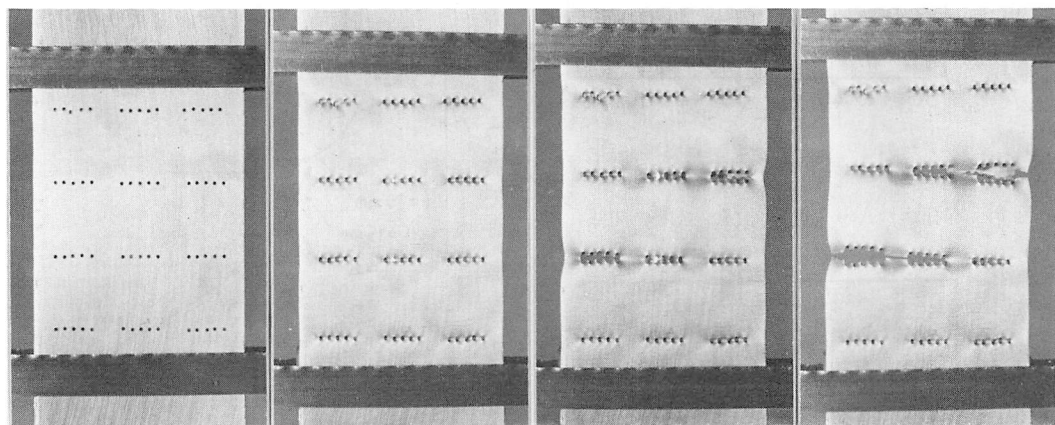


写真9 有孔鋼板 (C-2) の引張り破断過程

シリーズを作成した。ここで孔列長さ c を単位き裂長さとした場合、応力集中係数および応力拡大係数が c に比例することから、孔列の横方向間隔を c に比例した長さとした。

実験結果を図13, 14に示す。図13では孔列間隔 l 、孔列長さ c の増加にともなって伸びが減少している。 l 、 c の値は孔列パターンの粗密をあらわすもので、 l はアームスペーシング、 c は樹間部長さ、単位き裂長さに対応する。これらの結果は、デンドライトの粗大なものが延性が小さいという一般的傾向と一致する。また図14では、孔数 N の増加につれて伸びが増加している。これは、欠陥数が増加すれば延性は減少するという一般的事実と相反するものである。このことは、有孔鋼板の伸びが、単なる孔数ではなく、孔の配列によって支配されることを示すものであり、鋳鋼の延性が

単なる介在物数だけでなく、デンドライト形態と関連するその分布形態によって支配されることに対応するものであろう。

V 結 言

鋳鋼のデンドライト形態と延性破壊過程の関係について実験を行ない、次のような結果を得た。

- 1, き裂の発生点は樹間部の介在物である。
- 2, 発生したき裂は樹間部長さに対応した単位き裂を形成し、これが連結合体して最終破断に至る。
- 3, デンドライトの粗大な樹枝状晶は介在物が集中して存在し、き裂が発生し易い。
- 4, デンドライトの粗大な樹枝状晶は単位き裂が大きく、連結合体し易い。

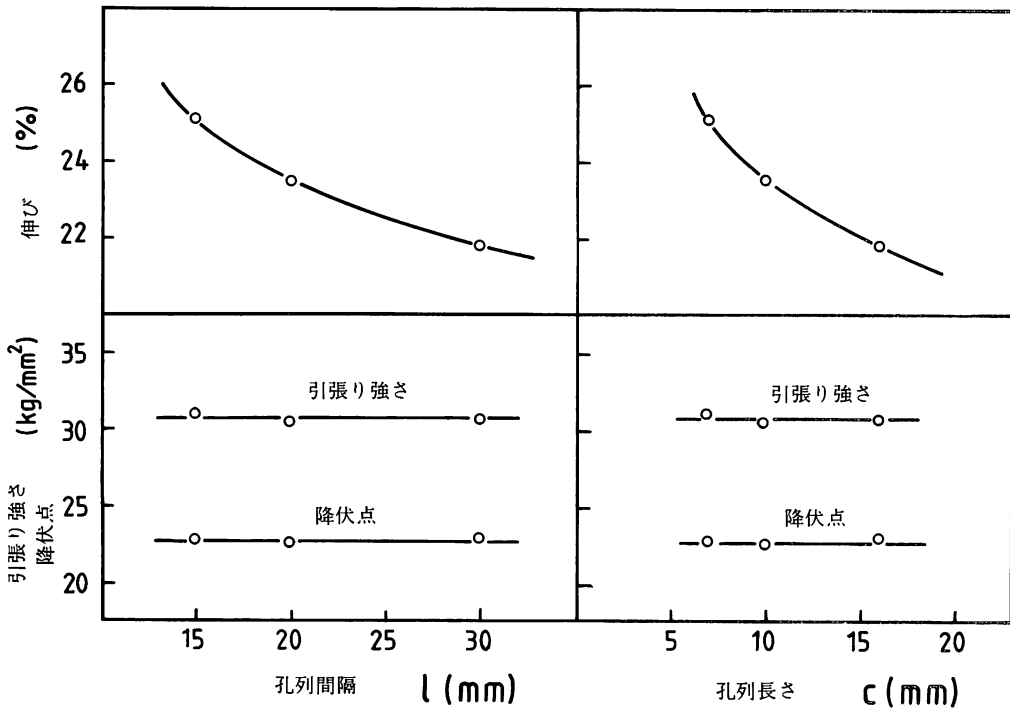


図 13 有孔鋼板 C の孔列間隔、孔列長さと伸び、強度の関係

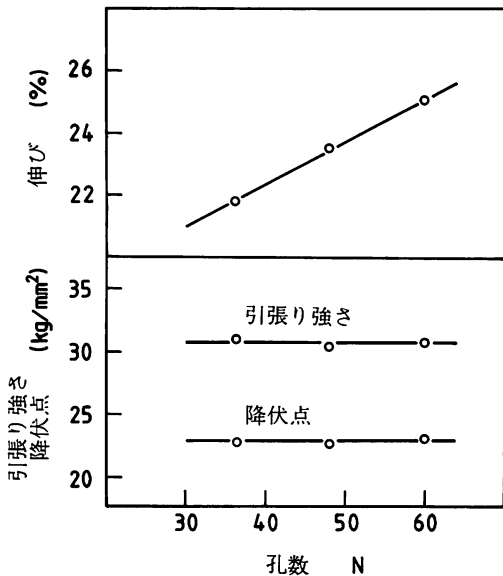


図 14 有孔鋼板 C の孔数と伸び、強度の関係

5, デンドライトの微細な粒状晶では, 介在物の集中度が小さく, また単位き裂も小さいので, き裂の発生伝播, 単位き裂の連結合体は起り難い。

6, 以上の結果は, 介在物を想定した小孔をデンドライト形態を模して配列した有孔鋼板の引張り試験により確認された。

参 考 文 献

- 1) R.F. Polich and M. C. Flemings : Modern Castings, 47 (1965) 84
- 2) P. Wieser and J. F. Wallace : Modern Castings, 4 (1966) 129
- 1) B. I. Edelson and W. M. Baldwin, Jr., : Trans. ASM, 55 (1962) 230
- 4) 高橋, 工藤, 萩原 : 日本金属学会誌, 32, 9 (1986) 826
- 5) 大島, 林 : 苫小牧高専紀要 第 13 号 (昭和 53 年 3 月)

(昭和 55 年 12 月 2 日受理)

