極低炭素鋼の曲げ遷移挙動と変形速度との関係に及ぼす 結晶粒子の大きさの影響について*

坂 卷 清 司** 稲 田 貞 俊** 糸 田 川 龍 雄***

Effect of Grain Size on the Relationship between Transition Behaviour and Bending Speed of Low Carbon Steel

by

Kiyoshi SAKAMAKI, Sadatoshi INADA and Tatsuo ITOTAGAWA

(Faculty of Engineering, Tokushima University, Tokushima)

The effect of grain size on the relation between non-ductile transition behaviour and bending speed of a low carbon steel has been examined with Charpy type specimens (V-notch).

The principal results obtained are summarized as follows:

(1) Under a constant bending speed, the relation between non-ductile transition temperature T_B and grain size D is represented by the following form

$$1/T_B = A' - B' \log D \quad (a)$$

where A' and B' are constants. However, this relation does not hold when the bending speed becomes higher and the grain size is larger.

(2) In the regions of higher bending speed and of larger grain size, the non-ductile transition temperature is lower than that estimated from eq.(a) and the difference between them increases with increasing speed and grain size. It may be considered that difference arises because the plastic constraint force is affected by grain size.

(Received Dec. 20, 1977)

キー・ワード：遷移温度，変形速度，結晶粒子の大きさ，拘束力

1 緒 言

前報¹⁾において変形速度を広範に変え得る，ただ一種類の試験機を用いて極低炭素鋼のV切欠き付きシャルピー型試験片について変形速度（クロスヘッド速度） $10^{-4} \sim 10^4 \text{ mm/s}$ の範囲において曲げ試験を行い，延性-ぜい性遷移挙動と変形速度との関係について報告した。上記の関係は，結晶粒子の大きさとか，前ひずみ量によって影響をうけることが考えられる。そこで極低炭素鋼の延性-ぜい性遷移挙動との関係に及ぼす結晶粒子の大きさの影響を調べることを計画した。

延性-ぜい性破壊挙動と結晶粒子の大きさとの関係については多くの報告が行われている。²⁾しかし，たとえば遷移温度と結晶粒子の関係为例にとりて考えると，遷移温度を T ，結晶粒子の大きさを D としたとき， T と $\log D^{-1/2}$ とが直線関係にあるという報告³⁾とか， $1/T$ と $\log D$ とが直線関係にあるという報告⁴⁾が

あり，必ずしも一致した見解はないようである。さらに，たとえこれらの間の関係が得られたとしても，変位速度とか荷重速度をぬきにしては解決し得ない問題であろうと思われる。

そこで本報告は，種々の結晶粒子の大きさについて，遷移挙動の変形速度依存性を調べることによって遷移挙動を明らかにしようとするものである。

2 実験方法

試料は Table I に示す組成の極低炭素鋼で，ひずみ焼なまし法により結晶粒子の大きさを変化させた。結晶粒子の平均直径は $0.02 \sim 0.18 \text{ mm}$ の範囲である。

試験片の形状寸法は Fig.1 に示すようなV切欠きを有するシャルピー型試験片である。平滑試験片を用いると，切欠き付き試験片よりも応力解析の面で単純である。しかし，切欠きをつけたものは，その形状から考えて切欠き底に最大応力が発生し，ひとたびき裂が発生すると，ただちに成長し，進展するであろうと考えられる。したがってそのときの応力および温度はき裂の発生機構と関係づけられるのではないかと考え，

* 原稿受理 昭和52年12月20日

** 正会員 徳島大学工学部 徳島市南常三島町

*** 学生会員 徳島大学大学院 徳島市南常三島町

Table I. Chemical compositions of specimens (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	N	O
0.014	0.1	0.1	0.004	0.007	0.01	0.01	0.01	0.031	0.003	0.008

Fig. 1. Test piece.

この形の試験片を用いることにした。

曲げ試験機は、広範に速度を変え得るカム式定速度引張試験機の試験片保持部に曲げ試験用アタッチメントを取り付けたものである。

曲げ試験は、試験片を曲げ支持台に取り付けて、所定の温度で約20分間保持したのち、所定の变形速度（試験片下中央部に一定のクロスヘッド速度で変位を与える）で行った。そのときの曲げ変形抵抗-時間曲線および破面観察等を行い、曲げ遷移挙動と変形速度との関係を、種々の結晶粒子の大きさのものについて求めた。

3 実験結果および考察

変形速度一定のもとで曲げ試験を行うと、その場合の曲げ性質と温度との関係は Fig. 2 のように表すことができる。ここで、降伏と同時に破壊するところの温度を T_B 、その点での荷重を P_B とし、全面降伏と同時に破壊するときの温度を T_G 、その点での荷重を P_G とし、さらに、延性が急激に減少しはじめるときの温度を T_D 、その点での荷重を P_D と記号した。Fig. 2 の形は曲げ速度の変化によって変わることは既に報告したが¹⁾、さらに結晶粒子の大きさの変化によってもその形状は変化することが認められた。本報告は、これらの点のうち、特に無延性遷移挙動と変形速度との関係を種々の結晶粒子の大きさのものについて調べたものである。

Fig. 3 は種々の結晶粒子の大きさのものについて、無延性遷移温度 T_B とクロスヘッド速度 V との関係を示したものである。いずれの結晶粒子の大きさの場合

Fig. 2. Schematic representation of transition range.

Fig. 3. Variation of T_B with bending speed at various grain sizes.

も、 T_B は V とともに高温側へ移動している。しかしその傾向は結晶粒子の小さい場合と大きい場合とは異なるようである。本実験の範囲では、結晶粒子の大きさが $0.02 \sim 0.07$ mm のとき、 T_B は V の増大とともに漸次高温になり、そのレベルは結晶粒子が大きくなるほど高温域になっている。しかし結晶粒子が 0.13 mm になると、 V の小さいところでは、結晶粒子が大きくなるに従って T_B は高くなるという傾向と一致しているが、 V が大きくなると、結晶粒子の大きさが 0.07 mm の場合の T_B とほとんど同じ値を示しており、結晶粒子の大きさの変化による T_B の変化は少くなっている。結晶粒子の大きさが 0.18 mm になると、その傾向はさらに大きくなり、 V が最も小さい場合を除くと、 0.07 および 0.13 mm のものよりも低い温度を示している。いずれにせよ、無延性遷移温度に及ぼす変形速度の影響は、結晶粒子の大きさによって変化する。あるいは、無延性遷移温度に及ぼす結晶粒子の大きさの影響は、変形速度によって変化することが認められた。

ここで、Fig. 3 の関係を $1000/T_B$ vs. $\log V$ で整理すると Fig. 4 のようになる。前報において、結晶粒子の大きさが 0.04 mm の場合の曲げ遷移温度 T_B と変形速度 V との関係は、 A および B を定数としたとき、次のように表されることを報告した。

$$1000/T_B = A - B \log V \quad (1)$$

Fig. 4 から明らかなように、結晶粒子の大きさが小さい範囲 ($0.02 \sim 0.07$ mm) では無延性遷移温度と変形速度との関係は(1)式の形で表されることがわかる。

Fig. 4. Variation of inverse of T_B with bending speed at various grain sizes.

しかもそれらのこう配 B は結晶粒子の大きさに依存せず、一定値とみなすことができる。また A は結晶粒子の大きさに依存し、結晶粒子が小さいほど大きい値を示している。しかし、結晶粒子の大きさが 0.13 および 0.18 mm など、かなり大きくなると、無延性遷移温度と変形速度との関係は(1)式を満足しなくなることが認められる。なお Fig. 4 では、結晶粒子の大きいときの遷移温度と変形速度の関係は、変形速度 5.5×10^{-3} mm/sec の場合の遷移温度の値を基準にして、結晶粒子の小さい場合と同様のこう配をもった直線（破線）で示した。まず、結晶粒子の大きさが小さい範囲のものについて考えてみる。

今、結晶粒子の大きさを一定とした場合には、前述のように遷移温度と変形速度とは(1)式の形で表される。そして B は結晶粒子の大きさに無関係に一定値であるが、 A は結晶粒子の大きさに依存する値である。そこで A と結晶粒子の大きさとの関係を求めると Fig. 5 のようになる。したがって A と結晶粒子の大きさ D との関係は次のように表される。

$$A = a - b \log D \quad (2)$$

ここで a および b は定数である。したがって(2)式を(1)式に代入して整理すると次のように表される。

$$1000/T_B = \log 10^a D^{-b} V^{-B} \quad (3)$$

(3)式は結晶粒子が小さい範囲での無延性遷移温度、結晶粒子の大きさ⁵⁾および変形速度の関係を表したものであり、Louat らによって示された結果と一致するものである。ただし結晶粒子の大きさには制限はついて

Fig. 5. Relation between grain size and A in Eq. (1).

いない。また、負荷速度を用いている点で本実験とは異っている。(3)式において結晶粒子の大きさを一定とすると、 T_B と V との関係 ((1)式) が得られる。そして変形速度を一定とすると、 T_B と D との関係が次のように表される。

$$1000/T_B = a' - b \log D \quad (4)$$

ここで a' および b は定数である。

そこで実験結果を $1000/T_B$ vs. $\log D$ について整理すると Fig. 6 のようになる。図から明らかなように、変形速度が小さい範囲では、結晶粒子の全域にわたって(4)式を満足している。しかし変形速度が大きくなると、結晶粒子の小さい範囲では、(4)式を満足するが、結晶粒子の大きい範囲では(4)式からずれてくるようになる。

Fig. 6. Variation of inverse of T_B with logarithm of grain size at various bending speeds.

ところで、遷移温度 T と結晶粒子の大きさ D との関係については種々の報告があるが、Petch によると

$$T = A' - B' \log D^{-1/2} \quad (5)$$

で表されることを報告している。他の研究者の多くもこの形式で整理している場合が多いようである。しかし一方では、遷移温度の逆数と結晶粒子の大きさの対数値とが(6)式のような直線関係にあるという報告もある。⁴⁾

$$1/T = A'' - B'' \log D \quad (6)$$

このように遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係について異った結果が報告されているということについては、次のようなことが考えられる。

(1) 遷移温度として実験的にはどのような温度を対象としているか。

(2) その遷移温度を決定するのにどのような実験方法が用いられたか。

すなわち遷移温度は、吸収エネルギーによるものや破面外観によるものなど、統一した定義によるものでないためとも考えられる。たとえば(5)式の場合には75%へき開破面率とか、あるいはある一定値の吸収エネルギー値に対する温度を遷移温度として取り扱っているも

の多いようである。(6)式の場合には吸収エネルギーが急激に減少するときの温度を対象とし、しかもき裂が発生すればそれは必ず材料全体の破壊にまで発達するという仮定から導かれている。本実験のようにV切欠き付き曲げ試験片で、しかも無延性遷移温度を対象とするときには、発生した微小き裂は大きな応力こう配のためにほとんど残留することなく成長し、伝ばしていくものと推定される。したがって(6)式の形式と一致するのではないと思われる。しかしこのことは、結晶粒子の比較的小さい範囲においてのみいえることである。

つぎに試験片の形状が問題となるであろう。遷移挙動に及ぼす結晶粒子の大きさの影響を調べるときには平滑試験片が理想的である場合が多いが、切欠き付き試験片も多く用いられている。切欠きを有する試験片が外力をうけて微小でも変形しようとする、そこには拘束力が生じることになる。この拘束力は試験方法や結晶粒子の大きさによって変わるものと考えられ、したがって遷移挙動に対して、結晶粒子の大きさによる直接の影響と拘束力の影響があるため、広範な結晶粒径に関しては、遷移挙動と結晶粒子の大きさとの関係が複雑になっていることも考えられる。したがって上述のように研究者により異った報告があるのではないと思われる。

Fig. 7 は種々の形状の試験片について、種々の変形速度Vにおける無延性遷移温度 T_B と結晶粒子の大きさDとの関係の一例を示したものである。Fig. 7において、曲線AおよびBはV切欠き付きシャルピー型試

Fig. 7. Variation of T_B with grain size at various bending speeds.

験片の種々の変形速度における無延性曲げ遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係を示している。変形速度が小さいときには(曲線A), T_B はDの増加とともに徐々に増加しており、 T_B とDとの関係は実験した全結晶粒径にわたって(4)式の形で表される。しかし変形速度が大きくなると(曲線B), Dが小さいところでは T_B は徐々に増加し、この範囲では(4)式が成立するが、Dが大きくなると、 T_B は結晶粒子の大きさ全域が(4)式に従うとしたときの値(曲線Bの破線で示したもの)よりも低温となり、かなりの温度差が認められる。

これまでにも、遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係については多くの報告がある。しかしほとんどは結晶粒子の大きさの小さい範囲での研究が多いようである。また、結晶粒子の大きい範囲について、遷移温度と結晶粒子の大きさの関係を求めている場合でも、結晶粒子の大きいところでの実験値はあまり考慮せずに関係式が求められているようである。たとえば Petch³⁾ は遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係を Fig. 8 の

Fig. 8. Grain size dependence of transition temperatures (by Petch³⁾).

ように示しているが、図中の結晶粒子が大きいときの実験点(矢印)はあまり考慮されていないようである。このように、結晶粒子が大きくなると直線からずれて低い遷移温度を示していることは、実験結果としては著者らの実験結果と同様の傾向を示しており、結晶粒子の大きさの全域にわたって一つの関係では表現し得ないものであろうと思われる。

そこで種々の形状の試験片を用いて遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係を求め、変形速度および結晶粒子の大きさの大きい範囲での無延性遷移温度の低下の原因を考察した。

まず、平行部 $\phi 5 \times 15$ mm で両端にM12のねじ部をもつ引張用平滑試験片について、引張速度一定のもとで遷移挙動と結晶粒子の大きさとの関係を求めた。Fig. 7の曲線Cは変形速度 1.1×10 mm/s の場合の結果を示したものである。この場合には、結晶粒子が大きくなると無延性遷移温度が低下するような傾向は認められず、実験した結晶粒子の大きさ全域にわたって

Fig. 9. Test piece.

(4)式の形で表される。また、Fig.9 に示すようなV切欠き付き引張試験片について、平滑引張試験と同じ速度での結果を曲線Dで示す。この場合には結晶粒子の大きさが大きくなるに従って T_B は高くなっているが、結晶粒子が大きくなると、その上昇の程度は少くなり、(4)式の形で表される値（曲線Dの破線で示す値）よりもかなり低い温度を示すようになる。

これらの結果から考えると、結晶粒子の大きさが大きくなったときに T_B があまり上昇しないか、あるいは低下するというような傾向を示すようになるのは、切欠きを有する場合の試験片においてのみ起る特徴であろうと想像される。しかも変形速度が大きいときに限るようである。しかし、試験片の形状が異なると、試験片変形部の実変形速度も異なるので、この影響も考慮しなければならないと思われる。

そこで、切欠き付き曲げ試験片の実際の変形速度⁹⁾ v を微小硬度法で評価した。今、試験機のクロスヘッド速度を V とすると、平滑丸棒引張試験片の実変形速度 v_{ST} および切欠き付き丸棒引張試験片の実変形速度 v_{VT} はいずれも V である。一方、切欠き付き曲げ試験片の切欠き底での試験片長手方向の実変形速度 v_{VB} は $0.14V$ と評価される⁹⁾。したがって v_{VB} は v_{VT} よりも小さいことがわかる。それにもかかわらず Fig.7 の曲線BおよびDから明らかなように、結晶粒子の大きさに対する無延性遷移温度の異常性は、曲げ試験片の方が大きく表れている。すなわちこのような現象は変形速度だけの問題ではなく、試験片の形状およびその負荷形式によっても影響をうけるものと想像される。さらに、曲げ試験片の切欠き部を除いた形状の平滑曲げ試験片（7×5.5×55 mm）について、無延性遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係を求めた。Fig.7 の曲線Eはその一例を示したものである。平滑曲げ試験での無延性遷移温度は結晶粒子の大きさとともに漸増し

Fig. 10. Test piece.

ており、曲線Dのような傾向は認められない。しかし平滑曲げ試験片での実変形速度 v_{SB} はクロスヘッド速度 V の $1/200$ 程度と推定されるので、 v_{SB}/v_{VB} の値は約 $1/30$ となるが、この程度の速度差では遷移温度の挙動が極端に変わることはないであろうと思われる。したがって平滑曲げ試験では、結晶粒子の大きさに対する無延性遷移温度の異常性は認められないと考えてもよいものと思われる。

つぎに曲線Fは、Fig.10 に示すように切欠き部に五角形断面を作り、その頂点に最大引張応力が加わるような曲げ試験片を変形速度 $V=1.1 \times 10$ mm/s で曲げ試験したときの無延性遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係を示したものである。この場合、結晶粒子が大きくなるとともに無延性遷移温度は高くなり、前述のような無延性遷移温度の低下は認められなかった。Fig.10 の試験片と Fig.1 のそれとでは、切欠き底における拘束力の違いがある。すなわち前者においては、切欠き底の頂点では拘束力はほとんどないものと推定されるが、後者では切欠き底に大きい拘束力が発生すると考えられる。したがって結晶粒子の大きさによる無延性遷移温度の変化は、切欠き底の拘束力によって影響されるものと思われる。一般には拘束力の大きい試験片では遷移温度が高くなるといわれている。今、Fig.1 の試験片では拘束力が大きく、したがって無延性遷移温度は全体的に高いことが予想されるにもかかわらず、結晶粒子が大きくなると逆に低くなることが認められる。一方、Fig.10 の試験片では、破壊が発生しはじめると考えられる切欠き底の頂点では拘束力はほとんどないものと考えられ、無延性遷移温度の、結晶粒子の大きさによる異常な変化も認められないものと思われる。

このことから考えて無延性遷移温度の、結晶粒子の大きさによる異常な変化は、拘束力が結晶粒子の大きさによって変化するためであろうと推定される。すなわちV切欠き付きシャルピー型試験片では、切欠き底に拘束力が作用するが、今、仮定としてその拘束力は、結晶粒子の大きさが小さい間は結晶粒子に関係なくほぼ一定値であるが、結晶粒子が大きくなると低下する

と考える。そうすれば遷移温度は結晶粒子の小さい間では、結晶粒子の大きさの増加とともに高くなるが、結晶粒子が大きくなると拘束力の減少に応じて遷移温度は逆に低くなることが考えられる。もし、結晶粒子の大きさに関係なく拘束力が一定であるならば、遷移温度と結晶粒子の大きさとの関係は、全結晶粒子域にわたって(4)式の形で示されるであろう。しかし、拘束力の結晶粒径依存性のために、無延性遷移温度の結晶粒径依存性に異常が表れるものと思われる。さらにこの効果は、変形速度が小さいときにはそれほど大きな効果として表れないが、変形速度が大きくなると顕著に表れるものと推定される。

4 結 論

極低炭素鋼のシャルビー型試験片を用いて、曲げ試験によって無延性遷移挙動と変形速度との関係に及ぼす結晶粒子の大きさの影響について調べた。得られた結果は次のようにまとめられる。

(1) 変形速度一定としたとき、無延性遷移温度を T_B 、結晶粒子の大きさを D として、 A' および B' を定数とすると

$$1/T_B = A' - B' \log D$$

が得られた。ただしこの関係式が成り立つのは、変形速度が小さい場合か、変形速度が大きくても結晶粒子の小さい範囲であり、変形速度が大きく、かつ結晶粒子が大きくなると上式は成立しなくなる。

(2) 変形速度および結晶粒子の大きい範囲では、上式で示される無延性遷移温度よりも低い値を示し、変形速度および結晶粒子が大きくなるほど上式と実際の無延性遷移温度との差は、ますます大きくなることが認められた。この差は、変形に対する拘束力が結晶粒子の大きさによって変化するためであろうと推定される。

(昭和52年5月25日 日本材料学会第26期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 坂巻清司, 稲田貞俊, 材料, **26**, 658 (1977).
- 2) たとえば, Cottrell, A. H., Trans. AIME, **212**, 192 (1958).
- 3) たとえば, Petch, N. J., in Fracture, B. L. Averbach, *et al.*, eds., M. I. T., Wily, New York, p. 54 (1959).
- 4) たとえば, 幸田成康, 金属物理学序論, p. 356 (1964) コロナ社
- 5) Louat, N., and H. L. Wain, in Fracture, B. L. Averbach, *et al.*, eds., M. I. T., Wily, New York, p. 177 (1959).
- 6) Leslie, W. C., Met. Trans., **2**, 1989 (1971).
- 7) Iandra Gupta, Met. Trans., **3**, 601 (1972).
- 8) Wilshaw, T. R., J. I. S. I., **205**, 936 (1966).
- 9) 坂巻清司, 稲田貞俊, 徳島大学工学部研究報告, No. 23, 75 (1978).