

(昭和 26 年 4 月造船協会春季講演会に於て講演)

鋼材の切欠脆性に及ぼす塑性歪の影響

正員 工学士 秋 田 好 雄*

正員 田 中 信 治郎*

正員 山 崎 福 太 郎*

Effect of Pre-Strain on the Notch-Sensitivity of Mild Steel

By Yoshio Akita, *Kogakushi, Member*Shinjiro Tanaka, *Member*and Fukutaro Yamazaki, *Member*

Abstract

The effect of magnitude and gradient of pre-strain distribution on the notch-brittleness of steel plate for ships was studied. Test pieces were of 450×70×16mm size, centrally notched (Fig. 4), and tested by slow tension. The pre-strains were given by two ways. One is ordinary way (uniform distribution), and its magnitudes were 0% (A-series), 5%(B), 10%(C), 15%(D). Another way was the gradient pre-strain distribution, which are given with a perforated test piece without notch (Fig. 2), and its magnitudes at notch-bottom were 5% (E-series), 10%(F), and 15%(G)

The results were obtained as follows:

- (1) The pre-strain of 5% raises the transition temperature and more pre-strain does not raise the transition temperature (Fig. 8). But the pre-strain lowers the energy level.
- (2) The gradient of prestrain distribution has little effect on the transition. (Fig. 9)
- (3) Comparing with the experiment of Prof. Boodberg, the transition curve are sharper, and a Japanese ship plate (rimmed) showed the transition temperature of the same order with Prof. Boodberg's "C"-steel (semi-killed) after correction of r/t (Fig. 10), where r , t are the radius and thickness of test piece.

1. 緒 言

戦時中米国において大量に建造された溶接船がしばしば亀裂を生じ、時には船体を二分するとき重大な事故を生じた。この事故に対して米国では大規模な調査委員会 (Board of Investigation) が設けられて調査研究が行われ、事故は使用鋼材の切欠脆性に基くことが報告されている⁽¹⁾。

本試験は鋼材に塑性歪 (常温加工) を加えると、鋼材の切欠脆性が如何に変化するかを調査し、塑性歪の許容程度を求めると共に、米国鋼材の試験と比較して、国産鋼材の切欠脆性の一資料を得るのを目的とする。

与えられた塑性歪 (pre-strain) が鋼材の切欠脆性に及ぼす影響の試験としては、米国においては Scotchbrook の Lehigh 試験⁽²⁾や、Osborn の行つた Charpy⁽³⁾ 試験があるが、前者の試験結果では塑性歪の影響は材料及び遷移温度の定め方によつて random な結果を与え、後者のは一応塑性歪の影響があるという結論を出してい

* 運輸技術研究所船舶構造部

(1) Final Report of Board of Investigation; The Design and Method of Construction of Welded Steel Merchant Vessels; W. J. July 1947

(2) A. F. Scotchbrook etc.; Effect of Welding on Pressure Vessel Steels; Trans A. S. M. E 1949

(3) C. J. Osborn; Effect of Plastic Strain and Heat Treatment; W. J. Ang. 1949

るが、測定点のばらつきが著しい難点がある。両者の実験とも遷移温度が sharp に出ないのが原因であるから、ここでは遷移温度が sharp に出る slow tension test が塑性歪の試験に適していると考えて $450 \times 70 \times 16\text{mm}$ の試験片につき、中央部に切欠をつけて引張試験を行い破壊を観察した。

又前記の二実験では塑性歪としては一様な塑性歪（以後一様歪と呼ぶ）を与えた場合のみであるが、ここではその他に穴のまわりに集中した残留歪（分布歪と称す）を与えたものと二種につき切欠試験を行い、塑性歪とその分布状態（勾配）が切欠脆性に如何に影響するかを調べた。

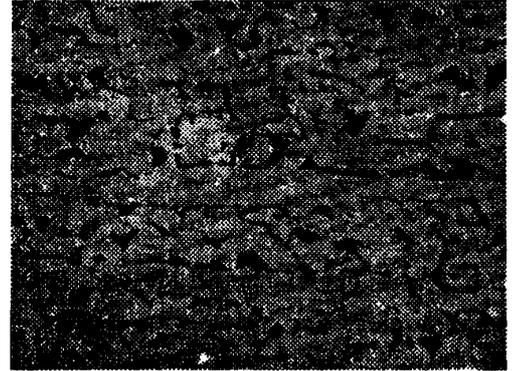
なお本試験に続いて鋼材研究会による大規模な系統試験が行われようとしていることを附記する。

2. 試 験 方 法

(1) 材 料

鋼材は最近の造船用鋼材の AB 規格材で石川島造船所より入手したもので板厚 17mm の rimmed 鋼で次の銘柄である。

製造者	日本鋼管株式会社鶴見製鉄所		
Roll No.	G-8599		
Charge No.	T-52-2		
材 質	SS41		
化学成分レール分析		製品分析	
C	0.15%	C	0.17
Mn	0.39	Mn	0.48(Mn/C=2.8)
Si	—	Si	trace
P	0.047	P	0.063
S	0.034	S	0.030
		Cu	0.23



第 1 図 金属顕微鏡写真 $\times 100$

なお金属顕微鏡写真を第 1 図に示す。

(2) 試 験 片

$10\text{m} \times 5\text{m} \times 17\text{mm}$ の板より端部の切断の影響を避けるために長辺にそつて 90mm 短辺にそつて 80mm 切り取り、機械加工により 80 箇の試験片を作つた。その際、採取位置による試験結果のかたよりを防ぐために各 series の位置をラテン方陣を用いて random に定めた。なお板の roll 方向は試験片の長手の方向と一改させた。

(3) 試験片の種類

受取つたまま塑性歪を加えないもの (as received) を A series, 一様な引張りを与え残留歪が 5, 10, 15% のものを B, C, D series, 試験片の中央に円孔をあけた後、引張り、円孔の側部に集中した歪を与え、この量が 5, 10, 15% のものを E, F, G series とし、表示すれば次のとおりである。

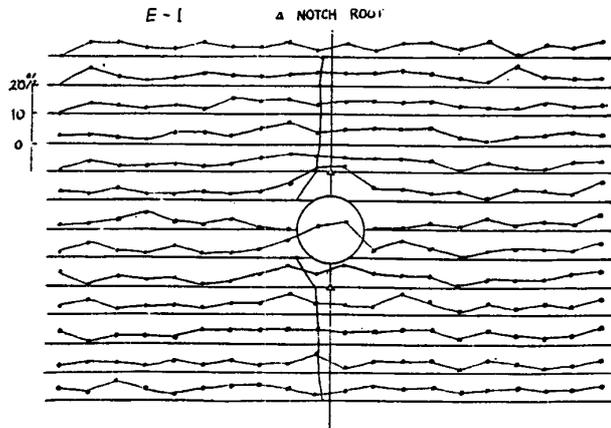
Series	塑性歪	試験片箇数	
A	なし	15	
B	5%一様歪	10	
C	10%一様歪	10	
D	15%一様歪	10	
E	5%分布歪	10	
F	10%分布歪	10	
G	15%分布歪	10	
Z	予 備	5	計 80 箇

(4) 塑性歪の加工(常温加工)

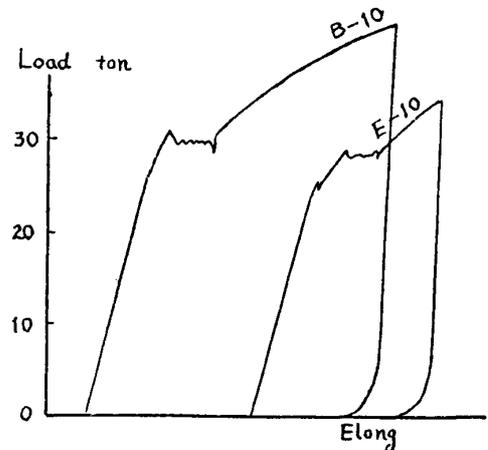
一様歪の B, C, D series では無孔試験片を Riehle 100 ton 試験機にて常温で引張を与えた。塑性歪は予め試験片に附した 5mm 間隔の格子線を comparator で読み、略一様なことを確めた。各試験片の塑性歪の平均

値の変動は例えば B series では最小 4.5% 最大 5.4% 程度である。

分布歪の E, F, G series では試験片中央に 12mm 径の円孔をうがつて引張りを行い切欠（後から加工）底部に相当する点の残留歪が 5, 10, 15% になるごとく塑性歪を与えた。その一例を第 2 図に示す。塑性歪は穴の側方に集中し、応力勾配が生じている。このときの荷重伸曲線の一部を第 3 図に示す。上降伏点より以下で、荷



第 2 図 分布歪の分布



第 3 図 塑性歪加工時の荷重伸曲線

重 25ton 附近で円孔の附近の降伏が生じている。

(5) 切欠の加工

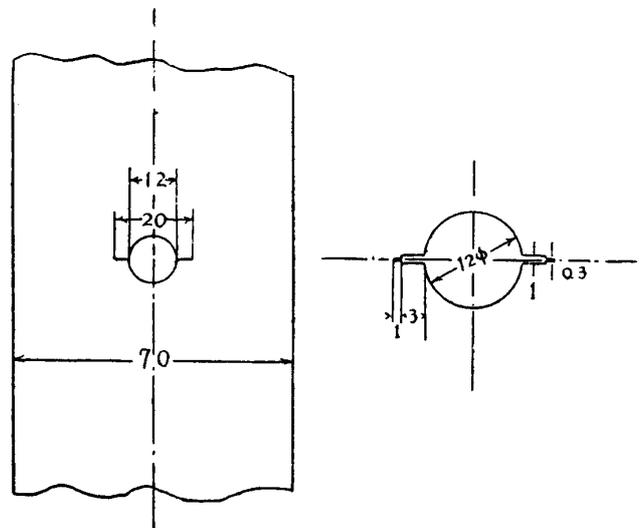
A series では母材より直ちに切欠加工を行つて試験を行い、B, C, D, E, F, G series では塑性歪を与えた後常温で一週間を経て第 4 図に示すごとく試験片中央に 12mm 径の円孔と、通常の hacksaw による第一段の切欠と、更に小型 machine saw による最終の切欠をつけ試験を行つた。最終切欠は深さ 1mm 幅 0.3mm (最小のもの 0.30mm 最大 0.34) で切欠底部はやや不規則な半円状をなし、円とみれば切欠半径は 0.15mm である。

(6) 予冷及び恒温

試験片の試験中の温度は -30°C より $+35^{\circ}\text{C}$ の範囲にかえて一定に保つ必要があるため試験片を予め所定の温度に保つために alcohol と dry ice を混合した液中に約一時間漬け、更に試験機に取付けた際に温度を一定に保つために dry ice-alcohol 液を用いた恒温槽で周囲をかこみ、熱の散失を防いだ。

(7) 荷重試験

各試験を通じ Amsler 50 ton 試験機を用い、荷重速度を一定 (約 0.3ton/sec) とし、試験片の温度を thermocouple で測定した。



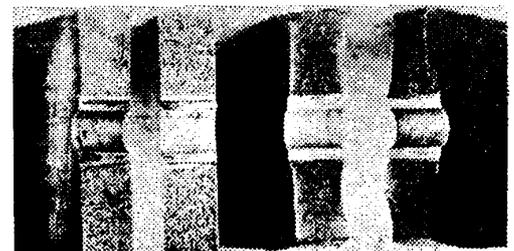
第 4 図 切欠形状

3. 試験結果

(1) 一般

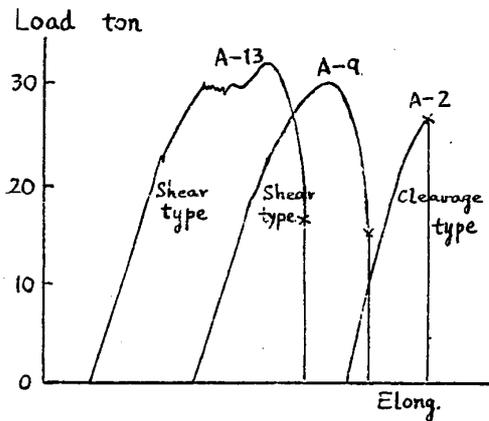
一般的な傾向としては遷移温度より高温で起る shear type の破壊においては破断面は灰白色で絹糸状であり写真に示すごとく切欠附近をのぞいて試験片表面と 45° に近い傾斜をなしている。破壊時の音響は静かで亀裂伝播速度は極めて除々である。又塑性流を起すために試験片の温度の上昇が見られる。

之に対し遷移温度以下で起る cleavage type の破壊では破断

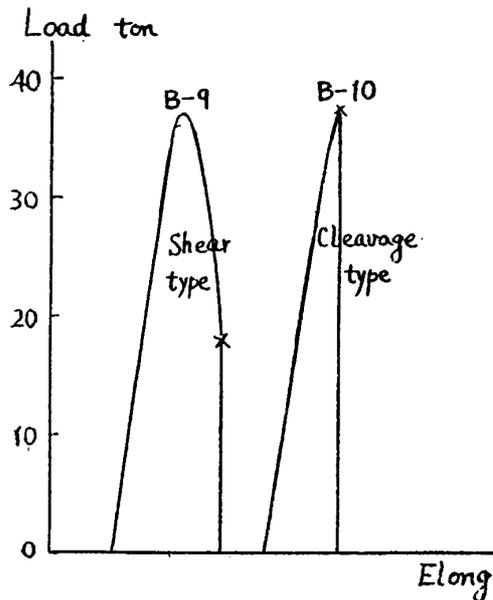


第 5 図 破断面。右は cleavage 型
左は shear 型

面は銀白色で破面は写真に示すごとく試験片表面に垂直であり破壊時の音響は極めて大きく、破壊時の温度上昇は見られない。亀裂伝播速度は極めて大きい。



第 6 図 塑性歪を与えないときの三種の荷重伸曲線



第 7 図 塑性歪を与えたときの荷重伸曲線

(2) 荷重伸曲線

第 6 図に A series の代表的な shear 及び cleavage type 及び中間的な shear type の三例を示す。何れも 25ton 附近で切欠附近の降伏が見られる。shear type のときには最大荷重を過ぎて一旦荷重が下つて 18ton 附近で完全に破壊する。

B series 以下の塑性歪を加えたものは前述の 25ton 附近での降伏は見られない。第 7 図にその荷重伸曲線を示す。図に示すように A series のごとき上降伏点以後の降伏が続く状態はない。

(3) 遷移温度

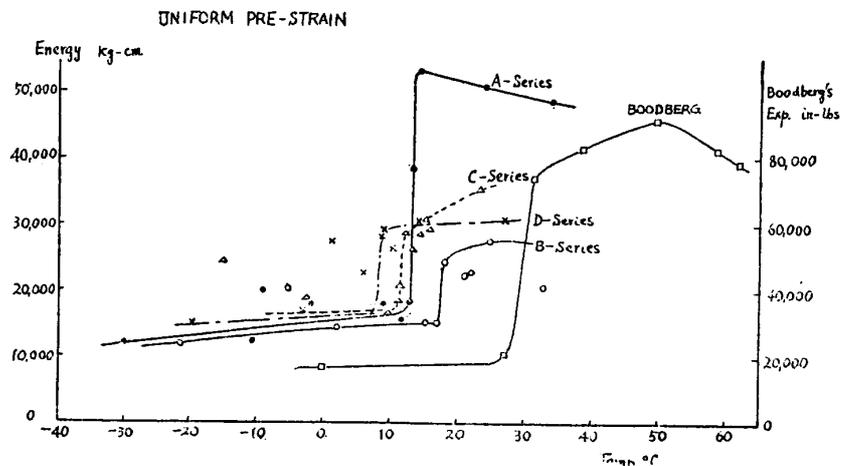
第 8 図に A series 及び一様歪のときの B, C, D series についての荷重伸曲線から求めた energy 温度曲線を示す。A series では 13.3°C を境として吸収 energy が急激に上昇し $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以下で鋭敏に変化する。この energy 曲線から求めた遷移温度 (transition temperature) は 13.3°C であることを示している。

塑性歪を与えた B, C, D series については吸収 energy が著しく低下している。然しながら遷移温度は塑性歪が大きくなるにつれて一旦上昇し次いで降下し、大きな変化は見られない。

第 9 図に分布歪のときの energy-温度曲線を示す。前図と同様の傾向が見られ、本試験程度の歪分布 (勾配) は大した影響を及ぼさぬことを示している。

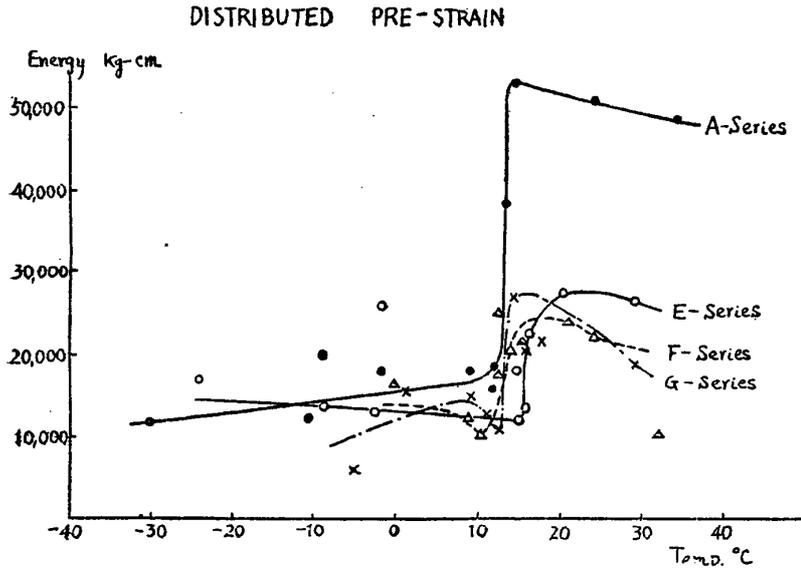
(4) r/t の修正

周知のように試験片の形状及び切欠形状は遷移温度に著しく影響するが Boodberg⁽⁴⁾, Bagsar⁽⁵⁾及び Thomas⁽⁶⁾の実験から見ると、材質及び試験方法が一定ならば遷移温度に最も影響する因子は試験片の板厚 (t) 及び切欠底部の半径 (r) である。二つの因子 t と r の代りに t 又は r を parameter にして r/t を変数として Boodberg, Bagsar, Thomas の実験を解析すると第 10 図が得られる。

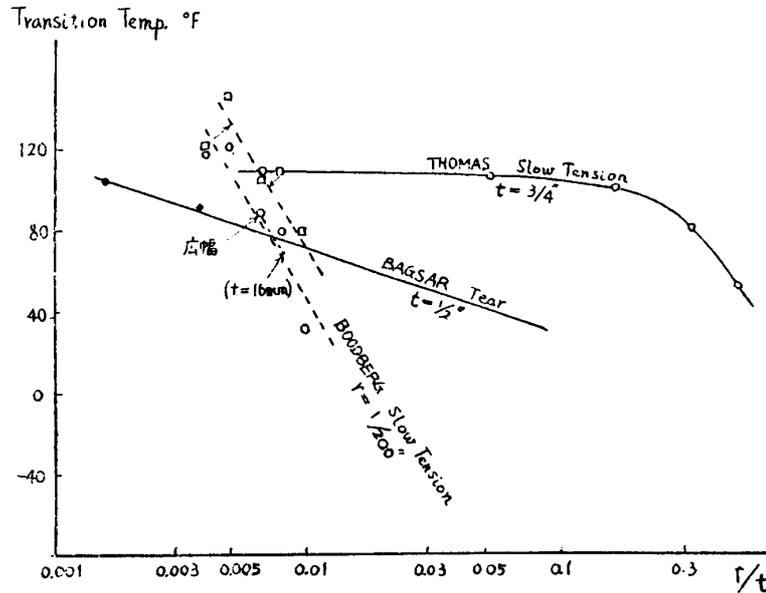


第 8 図 一様歪のときの energy-温度曲線

- (4) A. Boodberg; Causes of Cleavage Fracture in Ship Plate; W. J. Apr. 1948
- (5) A. B. Boodberg; Notch Sensitivity of Mild Steel Plates; W. J. Oct. 1949
- (6) H. R. Thomas; A Study of Slotted Tensile Specimens for Evaluating the Toughness of Structural Steel; W. J. Apr. 1948



第9図 分布歪のときの energy-温度曲線



第10図 t 又は r を parameter とした r/t -遷移温度曲線

変数 r/t は三次元的な応力集中 (多軸性) を表現する parameter と考えられ、一般に r/t が増すと応力の多軸性が減り遷移温度が下る傾向がある。

本試験においては切欠半径 r は一定であるが板厚は塑性歪の大きいものほど薄くなっている。従つて塑性歪を与えない A series ($t=16.2\text{mm}$, $r/t=0.00987$) を標準として他の series のものについては第10図で Boodberg の slow tension test (r は一定) の結果に平行に移動させて遷移温度の修正を行うと遷移温度は次表

系列名	塑性歪	energy より求めた遷移温度 (°C)	横収縮より求めた遷移温度 (°C)	t mm	r/t の修正をした遷移温度 (°C)
A	なし	13.3	13.1	16.2	13.3
B	5%一様歪	17.5	17.6	15.8	19.2
C	10%一様歪	11.6	11.8	15.3	15.5
D	15%一様歪	8.8	8.2	15.1	13.6
E	5%分布歪	15.8	15.9	15.7	18.0
F	10%分布歪	13.2	12.6	15.6	15.8
G	15%分布歪	12.8	13.4	15.3	16.7

註 % shear より求めた遷移温度は energy より求めたものと全く一致する。

の最終行のごとくなる。但し修正式は第 10 図より求めて、 ΔT を修正温度 ($^{\circ}\text{C}$) Δt を板厚の減少量としてで

$$\Delta T = 70 \Delta t / t$$

与えてある。

各 series とし塑性歪を与えない場合より遷移温度が上昇し悪い結果を与えている。何れも 5% 程度の塑性歪を与えたときが最も高い遷移温度を示し、15% 歪の場合には却つて減少している。

(5) 塑性歪の影響

塑性歪は前述のごとく遷移温度には比較的影響が小さいことが判る。然し吸収 energy の値には非常に影響する。

Scotchbrook の実験によれば塑性歪の影響が遷移温度を上昇せしめる場合もあり減少せしめる場合もあり統一的な結果を与えていない。この様な材質による塑性歪の影響が異なるのは或いは本質的なものかも知れないが、一つの原因は energy 断面収縮及び %shear から定めた三つの遷移温度 (T_E, T_N, T_B と略記する) が著しく異なるために、或る材料では塑性歪の影響が T_N, T_E を下げ、 T_B を上げている。

Osborn によれば塑性歪の影響は一応規則的な変化を与えるごとき曲線を得ているが、実験点のばらつきが著しく従つて得られた曲線の信頼性が少い難点がある。

本試験では測定点のばらつきは少く、遷移温度が sharp に出ているので得られた曲線の精度は高いと考えられる。

(6) 米国鋼材との比較

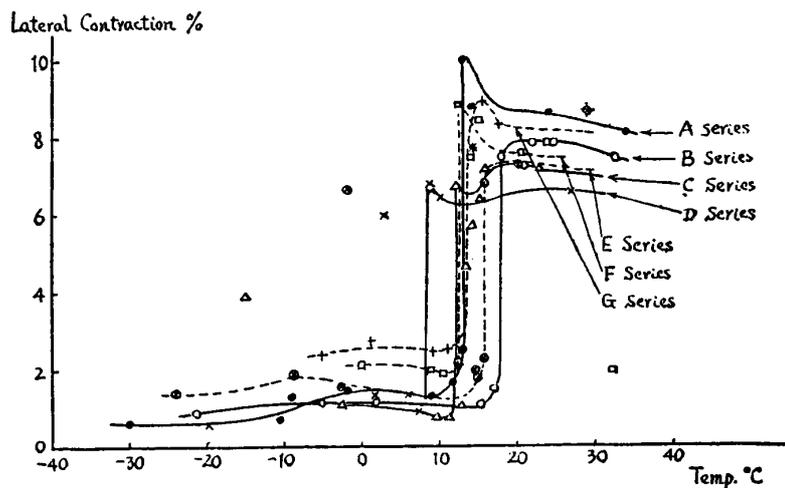
第 8 図の中に米国の Boodberg の行つた中央部に切欠をつけた広幅の引張試験の結果を挿入してある。この材料は同論文中の "C Steel" と呼ばれる semi-killed 鋼であり、成分は

$$\text{C } 0.24, \text{ Mn } 0.48, \text{ Si } 0.05, \text{ P } 0.012, \text{ S } 0.026 \quad (\text{Mn/C}=2.0)$$

であり殆んど rimmed 鋼に近い成分を持つている。この遷移温度は 32°C であり、かなり悪いことになるが、 $t=3/4''$ $r/t=0.0067$ であり本試験の A series の t 及び r/t に換算すると遷移温度は約 18°C となる⁽⁶⁾。即ち本試験の鋼材と略同じ遷移温度を与えている。

(7) 横収縮

第 11 図に横収縮と温度との関係を示す。横収縮としては板幅の減少量を % で示した。前図と同様に遷移温度が非常に sharp に出しており、横収縮から求めた遷移温度は前表に示すごとき energy 曲線から求めたものと非常によく一致している。



第 11 図 横収縮—温度曲線

(8) 破面の情況

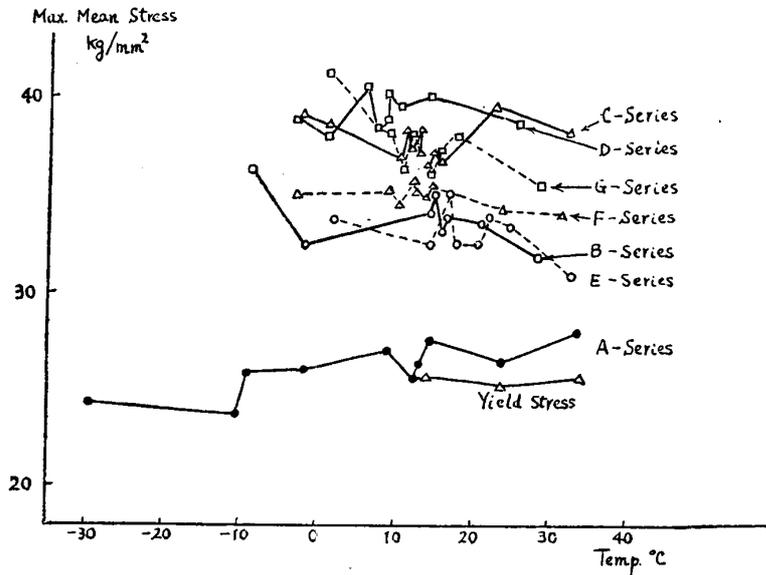
本試験では破断面の情況は遷移温度より高温の場合には殆んど 100% shear となり、遷移温度以下では僅かに切欠底部に抛物線状に shear の部分が残るごとき 3% shear 程度の brittle な破壊を行つている。遷移温度が sharp に出る現象はこのように中間 %shear の破壊が少ないことから明らかである。

(6) 換算法は第 10 図で先ず広幅試験の点から Boodberg の線に平行に $r/t=0.00987$ まで移動させる。

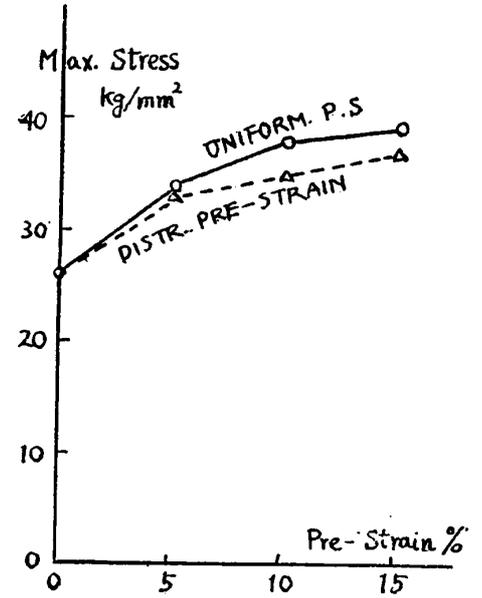
米国の試験では遷移温度附近で中間 %shear のものが多く測定されているが、本試験では一二の例しか見られなかつた。中間 %shear の破壊が少く従つて遷移温度が sharp に出るのは試験法の差に基くものと思われる。

(9) 最大荷重

第 12, 13 図に最大荷重と温度との関係を示す。これによれば塑性歪を与えたものは最大荷重が増加する。し



第 12 図 最大荷重—温度曲線



第 13 図 塑性歪—最大荷重曲線

かし破壊様式に対しては最大荷重は殆んど変化はなく、たゞ塑性歪を加えない A series では低温で最大荷重が稍減少する傾向を持つ。

4. 結 論

- (1) 塑性歪の量及び塑性歪の勾配は鋼材の遷移温度に影響し、切欠脆性を悪くする。また吸収 energy を減少せしめ最大荷重を増加せしめる。
- (2) 国産鋼材の切欠脆性は米国鋼材と同程度であるという一つの例が得られた。
- (3) 遷移温度が極めて sharp に得られ又 energy, 横収縮及び %shear (破断面の情況) から求めた三つの遷移温度はよく一致した。米国鋼材の試験結果と比べて中間 %shear の破壊様式が少く、遷移温度が sharp に出るのは試験片形状の差に基くものと思われる。

最後に本試験の start を与えられた菅部長、御協力を得た石川島造船所、東日本重工材料試験場、運研溶接部の各位に厚く御礼申上げる。