

討13 Delaminationの成長条件と鋼の破壊抵抗に及ぼす影響

新日本製鐵 製品技術研究所

飯野 牧夫

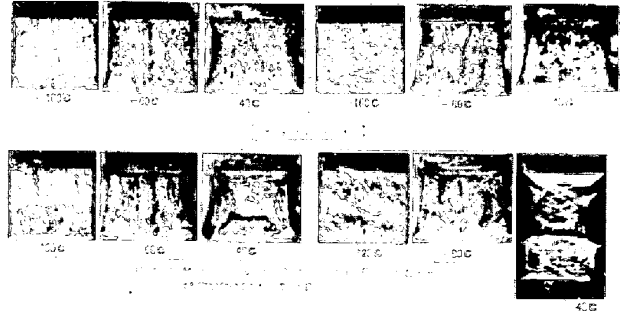
1. はじめに 大径ラインパイプ用鋼の製造のために現在制御圧延 (Control-rolling) が広く採用されている。この制御圧延は高い強度靱性要求を満足させるために実施される工場管理の行き届いた圧延方法であって、鋼中のニオブ (Nb) の性質をうまく活かすことが出来、今日では Nb の使用と相俟って有力な手段として知られている。

一方 Control-rolling の結果板厚方向の凝集力の弱い組織が発達し、その機械的異方性が鋼の衝撃値や破壊靱性に变化をもたらすことが期待される。この組織 (fibrous structure) が亀裂尖端の三軸応力の存在下で delamination の原因になり、その結果として起る応力緩和によって材料の脆性破壊伝播抵抗が上昇することは既に A.T. English [1] によって指摘されている。この期待は原則として正しいものと考えられるが、この破壊靱性に及ぼす delamination の影響の定量的把握はこれまでになされていなかった。また、delamination はシャルピー試験の衝撃遷移温度を低温側にずらす反面、衝撃値 shelf を低くするというように、好ましい影響や好ましくない影響を及ぼしうるので、鋼を制御圧延によって製造する場合には delamination の諸影響の総合的な正しい (できれば定量的な) 把握が重要となる。

この報告では主として delamination のこれらの影響に関する著者等の研究結果をかいつまんで述べる。この場合 delamination は試片内でいつどのような条件下で生成されたのかを知る必要が生じてくる。そこで delamination の生成条件に関する著者等の考え方についても触れたい。

2. 予備的観察[2]

予備的観察として delamination に関する観察を行って試よう。先ず Photo 1 は典型的な大径ラインパイプ用制御圧延鋼材のシャルピー試験破面のマクロ写真であるが、ここに示されるように delamination は破面遷移温度域に著しく現われる。この delamination の発生点は圧延で伸びた非金属介在物にほぼ 1:1 に対応する。これは、たとえば、Photo 2 に示す断面観察によってわかる。この介在物は EPMA により MnS であることの推定はついている。Photo 1



に用いた試料の成分と機械的性質は Table 1 の中に示した。

Delamination の

面を走査電子顕微鏡で少し詳しく調べてみると、同じ delamination でもその発達する温度によってその出来はずいぶん違うことがわかる (Fig 1)。先ず遷移温度 ($vTrs$) 近辺の温度で生じたものは、MnS と地の界面のまわりは劈開でこわれて行った跡が観察されるが、 $F_{TP} + 40^\circ C$ 以上の温度では MnS と地の界面どうしを結びつける破面は dimple mode である。この温度域で delamination を成長させることは、劈開で進む場合に比べて、難かしくなっているものと考えられる。鋼中のサルファ (S) 含有量が少くなると、この領域 (Fig 1 の III) では delamination は成長できなくなり、もっぱら遷移温度域に集中する。この遷移温度域集中

[1] A.T. English : Fracture M edited by H.Liebowitz, 1969, Academic Press, p83

[2][3] M.Iino, H.Mimura and N.Nomura : On Delamination in Linepipe Steels Ⅱ, to be published in Trans. ISIJ 17 (1977)

型の delamination は次に述べる意味で注目に値する。領域Ⅲの衝撃値は最早 delamination に影響されず、一方遷移温度域に集中的に生成する delamination は後に述べるように $vTrs$ を低温側にずらす方向に働く。結局このタイプの delamination は衝撃遷移曲線を有利な方向だけに動かす。S = 0.002%程度を含む鋼はこのタイプの鋼の仲間に入っている。

3. Delaminationの発生時期と成長条件[2]

Delamination は材料の破壊抵抗に著しい影響を及ぼす(この問題は次節以降に述べる)。では、Delamination は破壊過程のどの段階でどのような条件を満たした時生成されるのであろうか？ 次節以降の実験結果の理解のためにはこの問題の考察が必要となる。まず実験事実を見る。Fig 2は、いろいろな角度からハンマーを振り下ろすことによって横軸に示したエネルギーをシャルピー試片に与えた場合に形成される delamination の発達の度合いを調べたものであって、このデータから実際の衝撃試験過程における delamination の発生時期を推し測ることとする。縦軸の ΣL はこの場合の delamination の発達の度合いの目安として選んだものであって、便宜上 delamination が切欠延長面をきる長さの合計という量で表わしている。

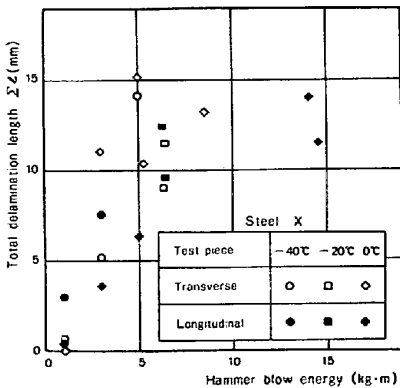


Fig 2 Plot of Total Delamination Length versus Hammer Blow Energy

経験していることは次の観察からわかる。Fig 1の領域Ⅱの中の NDT 以下の温度域で叩いたシャルピー試片の破面を軽く研磨して見ると、切欠底に未発達 delamination が認められる。この温度域で叩いた試片の特徴は、表面のじり線が切欠底から反対側迄到達 (general yield) していることである。

このように、未発達な delamination も含めれば、遷移温度域を含む広い温度域で delamination が起っていることがわかる。このうち遷移温度域で起ったものだけが特によく発達するのは、この温度域では衝撃試験時に試片長手方向 (σ_{yy}) したがって板厚方向 (σ_{zz}) の stress pulse の持続時間が長くなる (Fig 3を見よ) ために delamination が充分発達するチャンスを与えられた結果であると考えることができる。更に試験温度が高くなると、delamination の成長に

Table 1 Chemical Composition and Mechanical Properties of the Specimens Used

Spec.	Chemical Composition (Wt% Percent)						Tensile Properties ⁽¹⁾		
	C	Si	Mn	P	S	Nb V	Yield Strength (kg/cm ²)	Elong. (%)	Reduct. of Area (%)
SP1	0.18	0.30	1.38	0.018	0.011	0.04	48.0	56.1	23.8
SP2	0.18	0.28	1.36	0.018	0.011	0.04	48.8	56.3	24.8
SP3	0.18	0.25	1.25	0.018	0.011	0.04	54.8	61.7	25.9
SP4	0.18	0.24	1.27	0.018	0.011	0.04	49.0	56.0	24.0

(1) (a) In the longitudinal direction
 (b) Charpy-notch
 (c) Charpy-see-Temp.

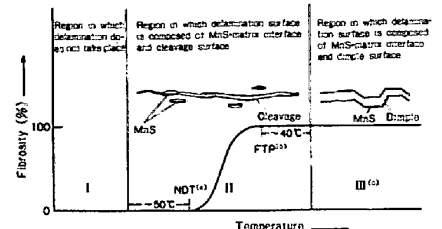


Fig 1 Dependence on Test Temperature of the Mode of Delamination Cracking

(a) Ductility Transition Point
 (b) Fibreity Transition Point
 (c) It was observed that in region III delamination does not grow for Steel U which contains as low as 0.001% S.

この場合主破面は与えられたエネルギー 1 Kg·m と 3 Kg·m の間で発生することも同時に観察されたので、切欠底の delamination の発生は主破面発生の前であることが推定される。

2.に述べたように delamination は吸収エネルギー遷移温度 $vTrs \sim vTrs$ 近辺の温度に著しく現われる。ところで、このエネルギー遷移は衝撃時間の遷移によるものであって、最高衝撃荷重の急激な変化によるものではないことを数種の軟鋼について示した実験はこれまでにある[4]。Fig 3は制御圧延で造られた大径ラインパイプ用鋼についての計装化シャルピー試験結果であるが、この図からこれらの鋼についても上述のことが言えることが確認できる。

Delamination が、遷移温度域以下の温度においても、発生だけは

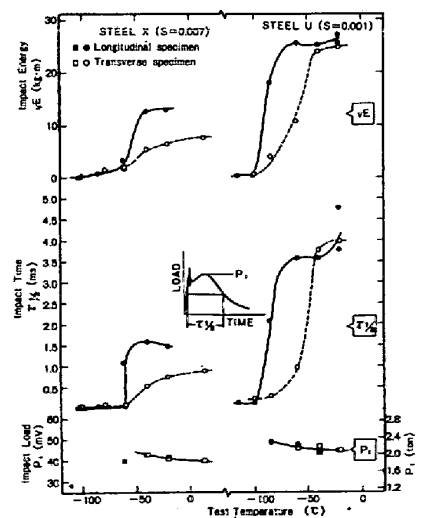


Fig 3 Change in Impact Time Accompanying Energy Transition

[4] G.D. Fearnhough and C.J. Hoy : J.Iron. Steel Inst. 202 912(1964)

対する抵抗が増すために delamination は減る。反対に試験温度がほぼ (NDT-50°C) 以下になると delamination は認められない。これはその温度の近くで破壊応力遷移が起っているためであると考えられる。破壊応力遷移が起れば板厚方向の応力 σ_{zz} もその温度の所で急激に低下し delamination cracking の発生条件 (応力条件) [2] を満足しなくなることが期待されるからである。

4. 脆性破壊伝播抵抗に及ぼす delamination の影響 [3]

さて delamination が適当なサイズに成長すれば、まわりの三軸応力を緩和することによって、試料の脆性亀裂伝播抵抗に影響を及ぼすことが期待される。4. ではこの問題を取扱う。

材料の脆性亀裂伝播抵抗は、通常二重引張り試験等の大型試験における Kc 値、あるいはシャルピー試験のような小型試験における破面遷移温度で評価されている。ここではこの両方の評価方法に基いて delamination の影響を調べた結果について述べる。ただし、シャルピー試験そのものは特に脆性亀裂伝播抵抗を調べるように工夫された方法ではないので、ここではノッチの入れ方を実験的にいろいろ検討した結果 Fig 4(b) に示すシェブロン型ノッチ付きの試片を選び、これについて実験した結果を述べることにする。この場合ノッチ深さを Fig 4(b) のように選んだ理由は、この深さにして初めてノッチ底に発生した脆性破面が延性破面に変るタイプの破面を作ることを実験的に確かめたからである。

小型試験

Delamination は衝撃遷移温度の近辺で著しく

現われる。また、delamination は主破面が形成される前に既に起っている (3)。それでは、脆性亀裂伝播抵抗に及ぼす delamination の影響を考える場合に、その深さ d あるいは d/t (t は delamination より local に薄くなっている板の厚さ) がどの位あれば効果を発揮しうるか? これを明らかにするために、厚さ $t = 7$ mm の鋼板 2 枚を重ねノッチ延長面相当位置の両側 d の距離を電子ビーム溶接で精度よく結合した 2 枚板から Fig 4(b) に示した形状の試験片を切り出した。実験は d/t を $d/t = 0, 0.5/7, 1/7, 2/7, 4/7, \infty$ と変えた時の脆性破壊抵抗 (破面遷移温度) の変化を調べようとするもので、試料としては元来 delamination の生じない焼入れ焼戻し鋼 steel V (Table 1 参照) を用いている。結果は Fig 5 に示されるように、わずか $d/t = 0.5/7$ の相対深さの (人工) delamination が破面遷移温度を 40°C 以上も低温側にずらせており、この効果は完全な 2 枚板 ($d/t = \infty$) にすることによる効果とあまり変りない。delamination による脆性亀裂伝播抵抗増加の効果はクラック尖端の local な三軸応力緩和が原因になっているものと考えられるが、この効果を発揮するために必要な応力緩和領域の local なひろがり板厚に比べて非常に狭くて充分であることがわかる。

大型試験

小型試験について認められた delamination の著しい効果が大型試験の場合にも認められるかを確かめることは興味深い。そこで、予め機械加工で板厚をいろいろに減少させた試験板から 2 重引張り試験片を切り出し、温度勾配型の試験から脆性亀裂停止の Kc 値を求め、原厚試験片の Kc 値と Fig 6 に比較した (Steel X; ●●を○印と比較する)。規準材として元来 delamination を生じない焼入れ焼戻し鋼 Steel V (Table 1 参照) についての同様な比較の結果を同じ図の中に ▲▲及び △△で示した。期待通り Kc 値の板厚依存の認められた Steel V の場合に比べて、破面に delamination の認められる制御圧延鋼 Steel X の場合には Kc 値の板厚効果は非常に少ない。この現象は、亀裂尖端に delamination を生じた試料 (Steel X) が実質上薄

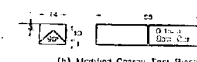
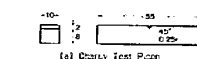


Fig 4 Geometry of Test Pieces for Small Scale Tests (unit: mm)

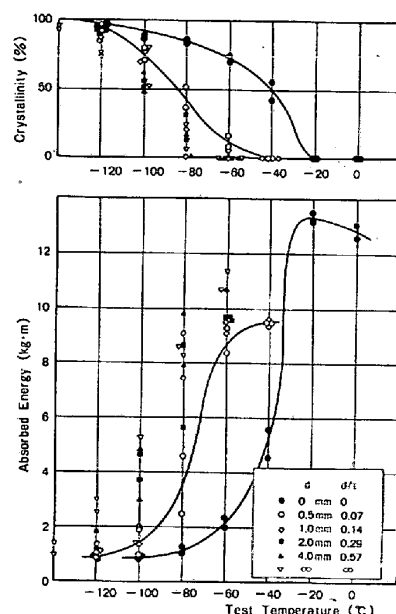


Fig 5 Influence of Artificial Delamination Depth on Impact Properties (Steel V, Longitudinal)

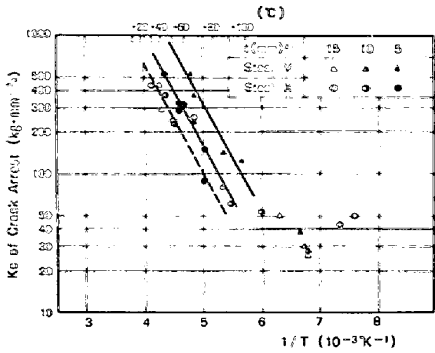


Fig 6 Influence of Plate Thickness on Double Tension Test Result
a) t is plate thickness. Test plates were machined from mid-thickness

用して delamination の割合が vEd/A (A は破面の面積) に及ぼす影響を定量的に測定しようとするものである。ここに delamination の尺度としては、その長さ l の一破面上の総和 $\Sigma l = L$ (ただし $l \geq 1\text{mm}$) を A で除した値を選んでいる。Fig 7(a) から先ず：(1) vEd/A は一般に delamination によって低下する。(2) 低下の割合は試片方向、鋼中の S 含有量により大きく異なることがわかる。この傾向は予め板を薄くして重ね合わせた試片についての $vEd/A - Le/A$ 関係 (Fig 7(b) に示した) と同じような関係になっている。これは、Fig 7(a) に示した delamination の効果が実質的には delamination による有効板厚減少からくるものである；別の言葉で言えば延性破壊抵抗の議論の場合にも delamination の入った鋼は薄板の重ね合わせと等価であることを示している。ここに $Le/A = (1/t) - (1/10)$ (t は重ね合わせた薄板の厚さ；mm)。

以上の実験から delamination による vEd 低下の定量的予測ができそうである。実際にはいろいろな長さや深さの delamination が混在するので、このことを考慮に入れた単純化モデル計算の結果を Fig 8 に実線で示す。 β は、delamination の深さ d と delamination が試片内を走り切ったと仮想した時の板厚 (等価板厚) t_e との比に対して $\beta < d/t_e$ が成立するような delamination だけが vEd に影響を及ぼしうると仮定された数である ($E = vEd(L)$, $E_0 = vEd(0)$)。Fig 8 には実験データもプロットされているが、この図によれば β として 0.25 と 0.75 の間のある値を選べば計算と実験の一致はよい。一方、このように浅い ($\beta = 0.25 \sim 0.75$) delamination が吸収エネルギーに影響を及ぼしうると言う仮定は、深さをいろいろに変えた人工 delamination の入った試片での実験結果 (Fig 9 に示す；試料は Steel W, Table 1 参照) から妥当であることがわかる [5]。

6. むすび

ラインパイプの低温靱性要求値は年々高くなってきており、この要求に応える材料の開発に当って delamination による亀裂尖端の応力緩和の利用も可能である。delamination という欠陥の活用は、材料強度制御のための転位の活用と似た所があり、下手に使うとこわい。充分な総合的な検討が必要である。この報告では、脆性亀裂伝播抵抗及び延性破壊抵抗に及ぼす delamination の効果について総合的な、しかもなるべく定量的な検討に一つのポイントをおいた。

板の重ね合わせ材になっていると考えることにより説明できる。このように脆性亀裂伝播抵抗に及ぼす delamination の効果 (小型試験の場合にも大型試験の場合にも) は実質上薄板の重ね合わせの効果によるものであると考えることができる。

5. 延性破壊抵抗に及ぼす delamination の影響 [3], [5]

ここでは延性破壊抵抗の尺度としてシャルピー試験における 100% 延性破断試片への吸収エネルギー vEd を選ぶ。先ず一枚の鋼板の同じような個所から多数のシャルピー試片を切り出し、同一温度で試験した結果を Fig 7(a) に示す。この試験の狙いは、同じ試料内であっても delamination の割合に統計的な変動があることを予測し、この変動を利用

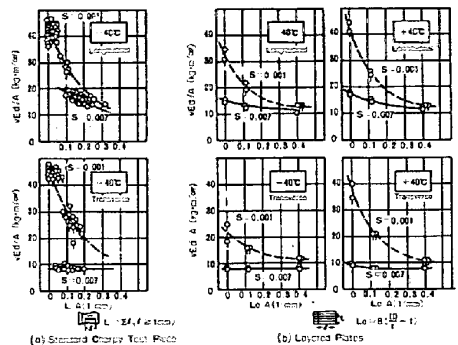


Fig 7 Comparison of Test Results between for Standard Charpy Test Piece and Layered Plates (3)
a) -40°C is a temperature at which transition is observed.
b) 40°C is a temperature at which no delamination is observed for size W, S = 0.0005%.

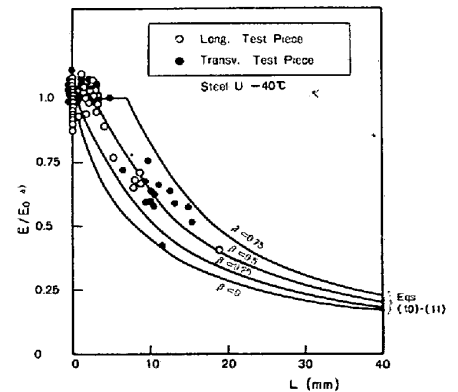


Fig 8 Theoretical (lines) and Experimental (circles) Dependence of E/E_0 on L (5)
a) $E_0 = 42.9\text{kJ/m}$ for Steel U tested at -40°C

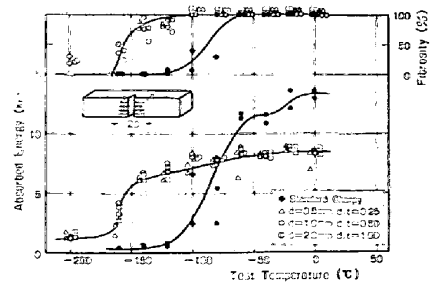


Fig 9 Influence on Impact Toughness of Depth of Artificial Delamination (Steel W, Longitudinal) (5)

[5] M. Iino : On Delamination in Linepipe Steels, to be published in Trans. ISIJ 17 (1977)