

制御圧延した厚板のセパレーションにおよぼすバンド組織の影響

Effect of Banded Structures on Separations in Controlled Rolled Steel Plates

岡 部 龍 二*
Ryuji Okabe

榎 並 禎 一**
Teiichi Enami

森 徳 明***
Tokuaki Mori

Synopsis:

Using controlled rolled steels with different chemical compositions, effects of pearlitic and/or bainitic banded structures and intensity of {100} texture on the initiation and propagation of separations were investigated.

Separation increased in length with the increase of banded structure density and (100) intensity. Separations initiated at banded structure and propagated preferably along them. As for the initiation behavior of crack, three types were observed: (i) separation preceded the formation of main crack, (ii) main crack and separation occurred simultaneously and (iii) main crack initiated, followed by separation.

1. 緒 言

制御圧延鋼板の衝撃試験片や DWT 試験片の破断面には、板面に平行な剥離（セパレーション）がしばしば観察される。

セパレーションは遷移温度を低温側に移行させる効果を有する反面、延性域低温側の吸収エネルギーを低下させる欠点を有する¹⁾。このため不安定延性破壊阻止のためのパイプライン設計上の要請から、セパレーションの発生しない鋼板が要求されることがある。したがって、UOE 鋼管用厚板においてはセパレーションの発生を制御する技術の確立が望まれる。

セパレーションの発生は試験片への負荷時に板厚 (Z) 方向に誘起される応力と、板厚方向の破壊強度との相対関係によって支配される。このうち Z 方向の応力の大小におよぼす要因は材料強度および試験片の形状寸法（厚み、切欠の曲率半径）などである。これに対し、Z 方向の破壊強度におよぼす要因には、(100) 集合組織^{2,3)}、介在物^{2,4)}、

バンド組織⁵⁾、偏析²⁾、フェライトの粗粒帯⁶⁾などがあり、このほかに C, P⁷⁾, Nb, N⁸⁾などの化学成分や残留ひずみなどの影響も報告されている。Z 方向に負荷される応力は普通、需要家側の要求によって必然的に決定されるので、鋼板メーカーとしては Z 方向の破壊強度におよぼす上記諸要因が、セパレーションの発生や伝播におよぼす影響を定量的に把握し、それらを制御することが重要である。

本研究では、制御圧延材に一般によく観察されるバンド組織が、セパレーションの発生過程および長さにおよぼす影響について検討した。

2. 実験方法

2-1 供試鋼板

供試鋼板の化学成分、最終圧延温度および板厚を Table 1 に示す。

鋼 1, 2 および 3 は Nb 系であり、最終圧延温度を順次低下させた鋼板である。鋼 4 と 6 は Cr 添

* 技術研究所水島研究室

*** 技術研究所企画室主査(掛長待遇)

[昭和55年9月12日原稿受付]

** 技術研究所水島研究室主任研究員

加により、また鋼7と8は低炭素化により、それぞれバンド組織を減少させた鋼板である。鋼5は偏析にともなうバンド組織の影響を調べるために、特に偏析の著しい部分を供試材としたものである。鋼9はNb-V-Cu-Ni系の低温仕上材、鋼10はNb-V系でやや高炭素の材料、鋼11はNb-V-Mo系の低温仕上材である。供試鋼板のS量は0.002~0.004%であるが、鋼4のみは0.006%と高い。

Table 2に供試鋼の機械的性質を示す。降伏強さは46.0~57.3kgf/mm²であり、これは衝撃試験時の主クラック面のZ方向応力に影響する。Photo. 1に圧延方向に直角な断面(T断面)のミクロ組織を示す。フェライト粒とバンド状のパーライトまたはベイナイトの組織から成っている。

2・2 バンド組織密度、集合組織およびセパレーション延べ長さの測定

供試鋼板の圧延方向に平行な断面と直角な断面の板厚中心部(Z方向4mm以内)の各100視野のバンド組織の長さ分布を、画像解析装置(QTM-720)により測定した。バンド組織密度は、単位面積あたりに存在する長さ100μm以上のバンド組織の個数を、両断面について測定し、それらの平均値で表した。

集合組織測定用試料は板厚中心部より板面に平行に採取した1.5mm厚×33mmφの試片を、リン酸クロム液により電解研磨して作成した。この試料を用いて反射法により正極点図を、普通法により反転極点図を求めた。

Table 1 Chemical compositions, finishing rolling temperature and plate thickness of steels used

Steel	Chemical composition (%)												T _f (°C)	t (mm)
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo		
1	0.09	0.28	1.63	0.012	0.002	0.026	0.068	—	—	—	—	—	770	22
2	0.09	0.28	1.63	0.012	0.002	0.026	0.068	—	—	—	—	—	720	22
3	0.09	0.28	1.63	0.012	0.002	0.026	0.068	—	—	—	—	—	680	22
4	0.09	0.29	1.57	0.017	0.006	0.062	0.041	0.045	—	—	0.30	—	755	13.5
5	0.09	0.29	1.43	0.016	0.003	0.039	0.039	0.032	0.19	0.20	0.31	—	715	14.6
6	0.09	0.29	1.43	0.016	0.002	0.039	0.039	0.032	0.19	0.20	0.31	—	770	13.6
7	0.05	0.29	1.49	0.015	0.002	0.038	0.036	0.025	0.34	0.19	—	0.12	765	16.3
8	0.05	0.25	1.47	0.016	0.002	0.045	0.033	0.025	0.31	0.16	—	0.12	705	14.5
9	0.10	0.24	1.60	0.013	0.002	0.034	0.040	0.033	0.19	0.23	—	—	700	16.7
10	0.14	0.23	1.29	0.018	0.004	0.015	0.030	0.020	—	—	—	—	710	15.5
11	0.11	0.26	1.58	0.015	0.003	0.033	0.029	0.029	—	—	—	0.13	705	16.7

T_f: Finishing rolling temperature

Table 2 Tensile and impact properties of steels used

Steel	Treatment	Tensile properties				Impact properties		
		Y.S. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	El. (%)	R.A. (%)	vE ₂₀ (kgf·m)	vT _S (°C)	T _{SA100} * (°C)
1	As rolled	46.4	57.5	31	73	12.5	-52	7
2	"	46.0	55.1	31	68	16.5	-104	-64
3	"	55.4	61.3	25	63	7.9	<-140	-98
4	"	51.7	59.6	31	69	9.1	-78	-41
5	"	57.3	63.6	25	63	7.4	-117	-78
6	"	51.0	60.7	30	68	6.4	-48	-6
7	"	51.5	60.7	31	76	22.8	-94	-90
8	"	53.1	61.4	29	77	21.7	-83	-80
9	"	56.6	63.2	26	62	11.2	-87	-79
10	"	48.4	57.9	27	64	6.6	-82	-40
11	"	54.5	63.5	26	63	8.5	-88	-54

*T_{SA100}: Minimum temperature showing 100% shear area

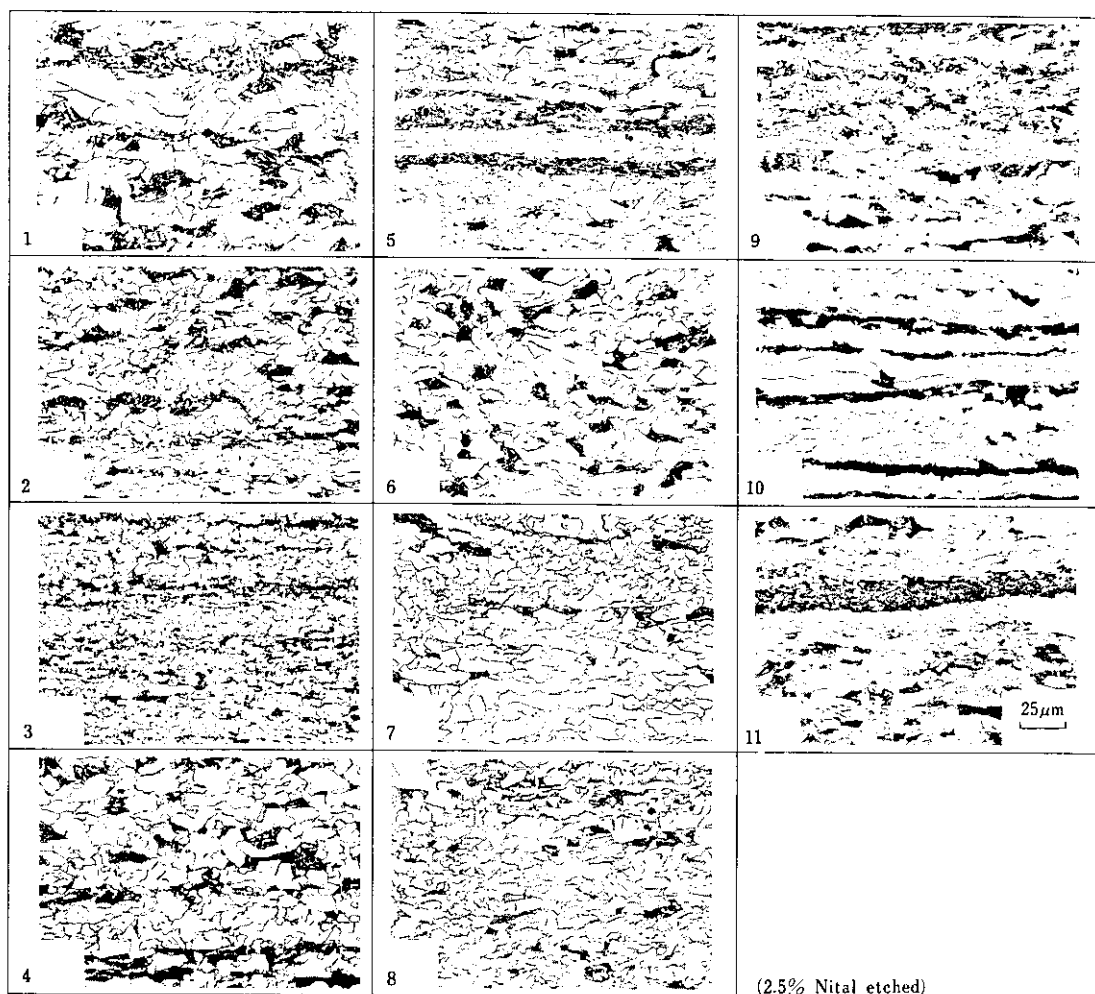


Photo. 1 Microstructures of steels used

セパレーション延べ長さは、JIS 4号シャルピー衝撃試験片 (T方向) の破面を投影機により 5 倍に拡大して測定した。

2・3 セパレーション発生過程の観察

衝撃試験機の振子の持上げ角度を変えることにより、JIS 4号シャルピー衝撃試験片 (T方向) に標準試験条件より低い種々のレベルの衝撃エネルギー (EI) を与える低エネルギー衝撃試験を行った。これらの試験片の切欠部を含む中心部を、Fig. 1 に示すように 10mm 角 × 5mm 長さに切断した後、それぞれ矢印に示す方向から X 線透過撮影を行い、主クラックとセパレーションの発生過程を観察した。

3. 実験結果

3・1 バンド組織密度および集合組織

Table 3 に供試鋼板のバンド組織密度および (200) 強度比を示す。鋼 10, 11 は高炭素のため、鋼 5 は偏析のため、それぞれ高いバンド組織密度を示しているが、鋼 7, 8 は低炭素のため低密度を示している。

(200) 相対強度は最終圧延温度にほぼ反比例しているが、最終圧延温度の割に鋼 11 のそれは低く、鋼 7 のそれは高い値を示している。

3・2 低エネルギー衝撃試験

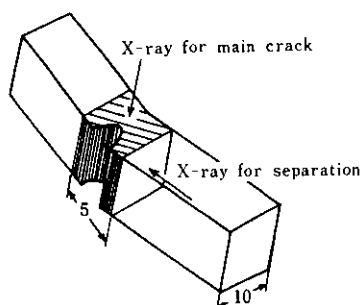


Fig. 1 Shape of specimen for X-ray radiography

Table 3 Density of banded structure and (200) intensity of steels used.

Steel	Density of banded structure (number/0.5mm ²)	(200) intensity
1	2.87	1.94
2	7.80	2.27
3	6.23	6.35
4	4.51	1.44
5	10.50	2.53
6	4.82	1.36
7	0.10	2.94
8	0.03	2.58
9	8.15	2.81
10	22.09	3.60
11	13.06	1.44

前述した方法により、一定温度で衝撃エネルギーのレベルを低レベルから順に標準レベルまで変化させ、主クラックとセパレーションの発生過程を観察した。この方法により、主クラックまたはセパレーションの発生が認められる下限の吸収エネルギー (El_c) を求め、このエネルギーと標準衝撃試験時の吸収エネルギー (Ef) との比をもって、主クラックまたはセパレーションの発生時期と考えた。したがって、 El_c/Ef が 0 に近い材料ほど、標準衝撃試験の衝撃エネルギーを受けた場合、試験片に主クラックまたはセパレーションが、より早期に発生すると考えられる。

Photo. 2 は低エネルギー衝撃試験により、主クラックおよびセパレーションの発生過程を観察した例である。ここで、タイプ A は主クラックより先にセパレーションが発生した場合、タイプ B は両者が同時期に発生した場合、タイプ C は主クラックより遅れてセパレーションが発生した場合を

示している。このようにセパレーションの発生時期は、主クラックの前^{2,9)} だけでなく、3 種類あることが示される。

Fig. 2 は各供試材の主クラックとセパレーションの発生時期を試験温度に対してプロットしたものである。Fig. 2 から、主クラックの発生時期は、延性域では試験温度依存性が少なく、また最終圧延温度、化学成分によってもそれほど変化せず、 $El_c/Ef \approx 0.2$ であることがわかる。これに対し、セパレーションの発生時期は試験温度依存性があり、高温になるほどその発生時期は遅くなる傾向にある。このように、両者の発生時期の試験温度依存性の違いから、3 種類のセパレーション発生時期が生ずることになる。したがって、一つの供試材においても Fig. 2 の鋼 3 の例のように、試験温度が変わるとセパレーション発生時期も、3 種類に変化する場合が生ずる。

4. 考 察

4.1 衝撃試験時の切欠底の応力状態

衝撃試験片の切欠底における 3 軸方向の応力は弾性状態で塑性状態かで異なる。セパレーションが発生する温度域では、切欠底は塑性変形を伴っているから後者の応力状態を考えればよい。

いま、Fig. 3 (a) のように、切欠を含む材料において切欠に垂直に一樣な応力 σ が作用しているとすると、切欠底が局部降伏した場合の塑性域における x 軸上の x , y および z 方向に働く応力は次式¹⁰⁾ で表される。

$$\sigma_y = \sigma_0 \left\{ 1 + \ln \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_x = \sigma_y - \sigma_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \nu(\sigma_y + \sigma_x) \\ &= \nu\sigma_0 \left\{ 1 + 2 \ln \left(1 + \frac{x}{\rho} \right) \right\} \end{aligned}$$

…平面歪状態 (t : 大) … (3)

$\sigma_z = 0$ …平面応力状態 (t : 小) … (4)

$\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$: x 軸上 ($y=0, z=0$) のそれぞれ y, x および z 方向の応力

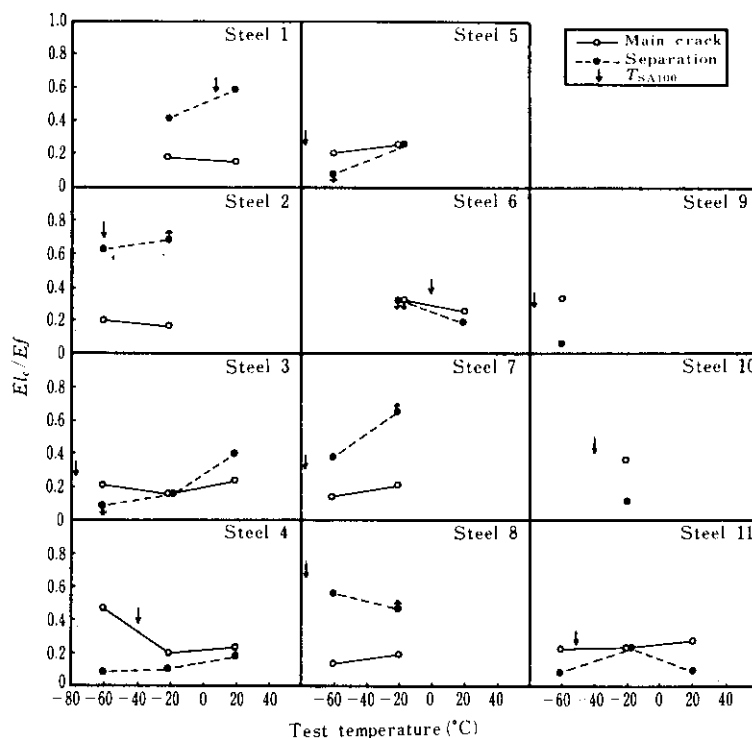
σ_0 : 単軸引張りにおける降伏応力

		Type A				Type B				Type C			
E_l/E_f		0.06	0.17	0.54	0.79	0.37	0.59	0.71	0.86	0.20	0.47	0.63	0.82
Appearance of notch roots													
X-ray radiography	Main crack												
	Separation												
Notes		Steel 9 0.10C-Nb-V-Cu-Ni Band dens. : 8.15 (200) Intens. : 2.81 Test temp. : -60°C				Steel 10 0.14C-Nb-V Band dens. : 22.00 (200) Intens. : 3.42 Test temp. : -20°C				Steel 2 0.09C Nb Band dens. : 7.80 (200) Intens. : 2.27 Test temp. : -60°C			

○ : Not recognized

× : Recognized

Photo. 2 Main crack and separations in low blow Charpy specimen revealed by X-ray radiography

Fig. 2 Ratio of energy(E_l)required for initiation of main crack or separation to total absorbed energy(E_f)

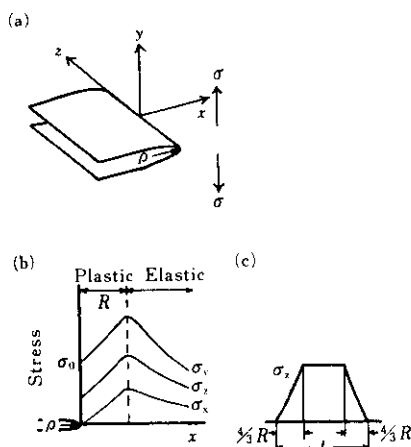


Fig. 3 Schematic illustration of stress distributions in vicinity of notch root

ν : ポアソン比 (塑性域で 0.5)

ρ : 切欠底の曲率半径 (mm)

t : 材料の z 方向厚み

z 方向厚みが小さい場合は平面応力状態となるから z 方向応力は 0 となるが、厚みが大きい場合は平面歪状態となり z 方向の応力が生ずる。その応力分布は Fig. 3 (b), (c) のようになる。平面歪状態では z 方向応力は次式で示す弾塑性境界 R_m で最大となる¹⁰⁾。

$$R_m = \rho \{ e^{(\pi - \omega)/2} - 1 \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ω : 切欠の開き角 (rad)

このときの σ_z すなわち σ_z の最大値 ($\sigma_z^{\max}$) は (3) 式より、

$$\sigma_z^{\max} = \nu \sigma_0 \left\{ 1 + 2 \ln \left(1 + \frac{R_m}{\rho} \right) \right\} \quad \dots\dots (6)$$

となる。

このように、セパレーション発生時の原動力となる z 方向応力は単軸引張りにおける降伏強さに比例する。

4.2 セパレーション発生量の温度依存性

Fig. 4 はセパレーション発生量の温度依存性の例を示したものである。セパレーションの発生量は温度の下降とともに増加するが、ある温度以下になると減少する。セパレーションの発生量は本来低温になるほど、材料の降伏強さの上昇による z 方向応力の上昇と、 z 方向あるいは z 面の靱性劣化とにより増加する傾向を示すものである。しか

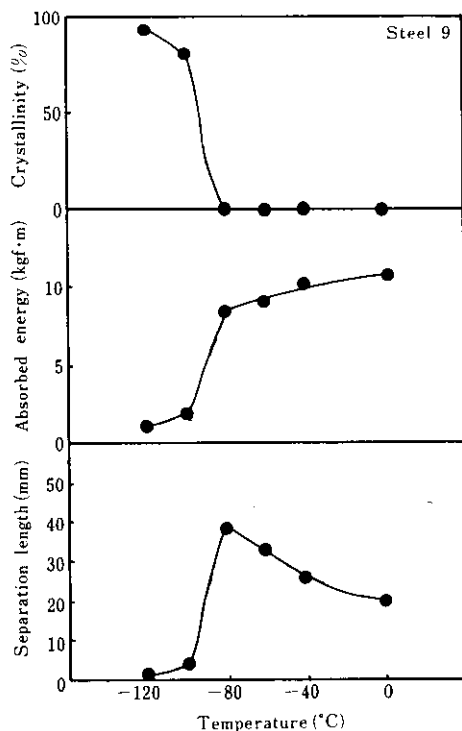


Fig. 4 Temperature dependence of crystallinity, absorbed energy and separation length in Charpy impact test

し、低温になり主クラックの破面にも、一部脆性破壊が発生しはじめるようになると、急速に z 方向の応力が解放されるようになるため、セパレーションは減少する。したがって、セパレーションの発生量が最大となる温度は、主クラックの破面が 100% 延性破面を示す下限温度 (T_{SA100}) にほぼ等しい。

供試鋼板の最大セパレーション量を比較するためには T_{SA100} でのセパレーション量を比較する必要がある。しかし、 T_{SA100} は材料により異なるため、 T_{SA100} での供試鋼板間の降伏強さの相違は室温における相違以上に開くと考えられる。したがって T_{SA100} での供試鋼板間の z 方向応力の相違も、室温でのそれ以上に大きくなると考えられる。セパレーション発生量および発生状況におよぼすバンド組織の影響を調べるためには、 z 方向応力が同一レベルで、しかもバンド組織以外の z 方向の破壊強度に影響する要因が同一レベルのもでなければならない。したがって、ここでは、まず

Z方向の応力レベルをできるだけ同一のレベルにするために、 T_{SA100} より高温側の特定の温度で、セパレーションの発生量および発生状況におよぼすバンド組織の影響を検討した。温度を一定にして比較すれば、供試鋼板間の降伏強さの相違、したがって、Z方向応力の相違は、ほぼ室温でのその範囲におさまると考えられる。

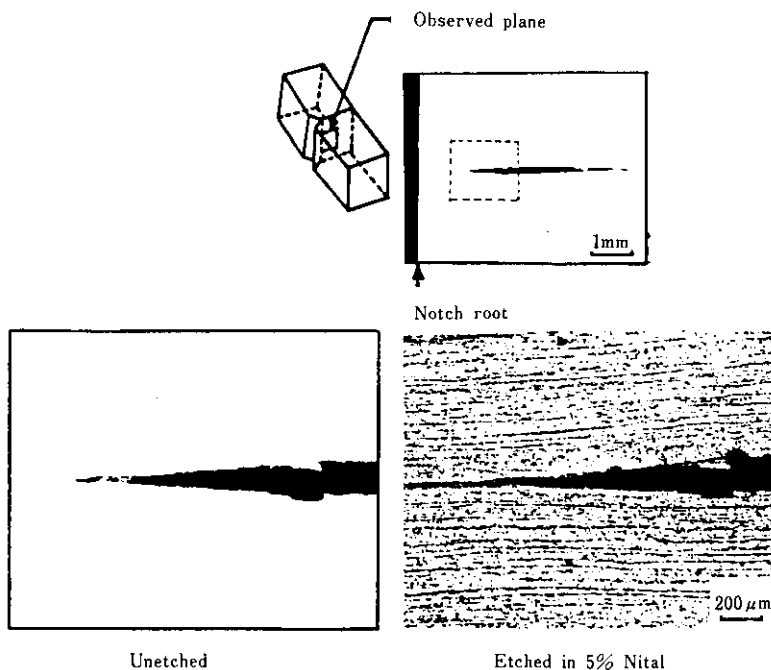
なお、供試材にみられるバンド組織にはパーライトバンドとベイナイトバンドの2種類があり、前者にはNb、後者にはP、Nb、Mo、Si、Mn、Sなどが偏析している。セパレーションはパーライトおよびベイナイトのいずれのバンドにもみられることから、この両者はセパレーションの進展に対してほぼ同程度の影響をおよぼしていると考えられる。したがって、ここでは特に区別せずに扱った。

4・3 セパレーションの伝播および発生量 におよぼすバンド組織の影響

本実験においても、鋼1、2、3の例のように同一成分の材料であれば低温圧延により(100)集合組織が強くなるほど T_{SA100} は低温側に移行するとともに、セパレーション発生量は大きくなる傾向を示した。このような(100)集合組織の影響以外にセパレーションの発生位置に注目すると、セパレーションはバンド組織内を伝播している場合がしばしば見受けられる。例えばPhoto. 3は低エネルギー衝撃試験によりセパレーションの初期の状況を観察したものであるが、セパレーションはバンド組織内を伝播していることが示されている。

Photo. 4はセパレーションの破面と同一位置の光顕組織とを対応させて観察した例である。セパレーション表面には、フェライト地の脆性破面(a)と、パーライトの破面(b)が存在すること、および破面上でパーライトの部分が区別できることがわかった。

Photo. 5はバンド組織密度の最小材と最大材のセパレーション表面を走査型電子顕微鏡により比



0.10%C-Nb-V-Cu-Ni (0.002% S)
-60°C, $EI/Ef = 0.17$

Photo. 3 Separation initiated at banded structure in a low blow Charpy specimen

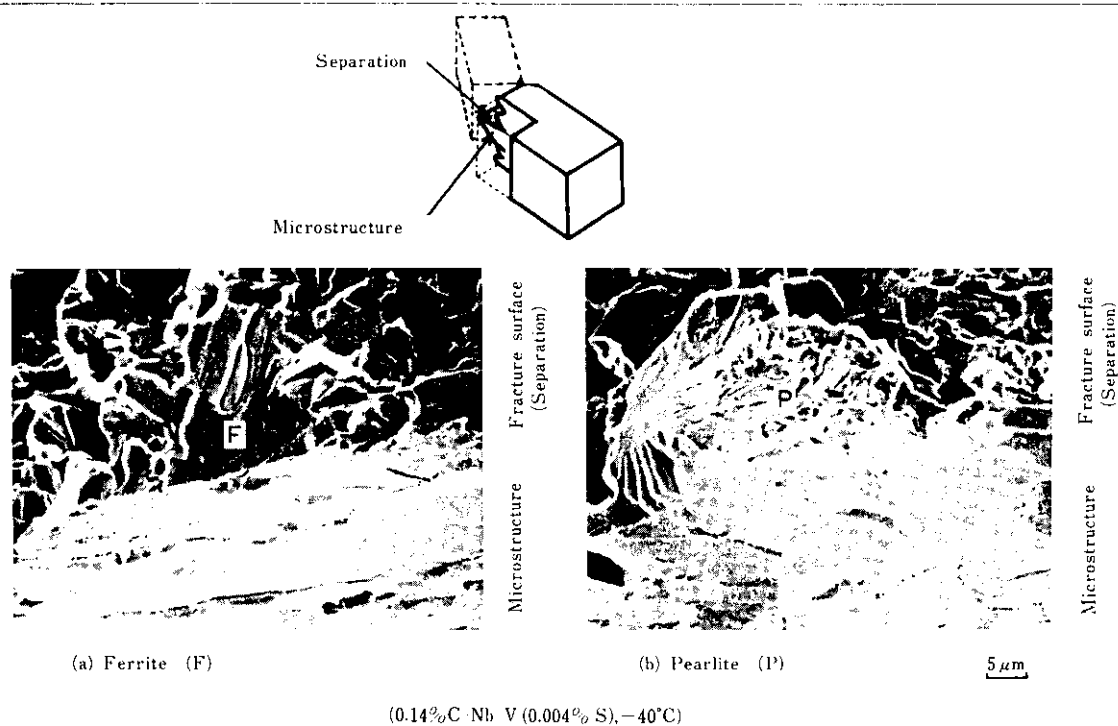


Photo. 4 Simultaneous observation of fractured surface and microstructure

Density of banded structure	Microstructure	Fractograph of separation surface	
		Unetched	Etched in 5% nital
0.03			
22.00			

Photo. 5 Fractograph in separation surface and microstructure of steels with minimum and maximum density of banded structure

較観察した例である。セパレーション表面を5% ナイタルでエッチすることにより、パーライト部はさらに鮮明に区別できる。このようにして両者を比較するとバンド組織密度の最大材のセパレーション表面はほとんどパーライトである。一方、バンド組織密度の最小材のセパレーション表面にもパーライトが観察され、それがセパレーション表面に占める割合は約50%であり、光顕観察部のパーライト面積率1.9%よりはるかに大きい。このことから、セパレーションはバンド組織を選択的に伝播したことがわかる。

そこで、 T_{SA100} より高温側の特定温度として0°Cの場合について、(200)相対強度とバンド組織密度のセパレーション発生量におよぼす影響を整理したものがFig. 5である。Fig. 6は-20°Cの場合について、(200)相対強度で層別してセパレ

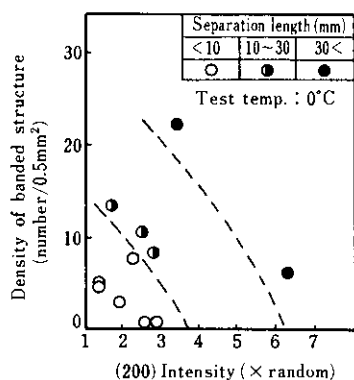


Fig. 5 Effects of (100) texture and banded structure on separation length

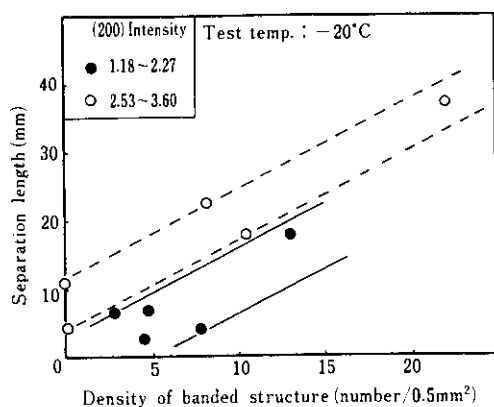


Fig. 6 Effect of banded structure on separation length

ーション発生量におよぼすバンド組織密度の影響をみたものである。これらから、セパレーション発生量は(200)相対強度が増加するほど多くなるほか、バンド組織密度が大きくなることによっても、より多くなることがわかる。

4.4 セパレーション発生時期におよぼすバンド組織の影響

セパレーション発生時期におよぼすバンド組織と(100)集合組織の影響については、Fig. 2に示したように、バンド組織密度の大きい鋼10, 11はバンド組織密度の小さい鋼7, 8より、早期発生傾向を示していること、および鋼1と3を比較してわかるように、低温仕上げにより(200)相対強度が大きくなると、より早期に発生する傾向があることなどがわかる。

そこで、セパレーション発生時期におよぼすバンド組織密度の影響を、(200)相対強度で層別してみたものがFig. 7である。Fig. 7から、S量の多い鋼4と(200)相対強度の最も高い鋼3を除くと、(200)相対強度が1.18~3.60の範囲では、バンド組織密度が大きくなるほど、セパレーションは早期に発生することが示される。

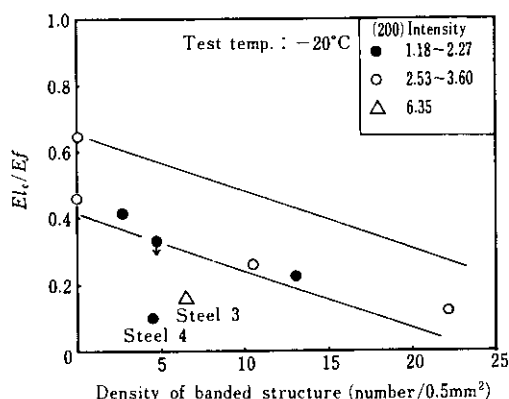


Fig. 7 Effect of banded structure on ratio of energy required for initiation of separation to total absorbed energy

このことは、セパレーションの発生初期段階の光顕観察からも首肯される。この段階では、セパレーションに成長する前の状態のボイド(マイクロクラックを含む)が切欠底にもクラックの発生

時期と相前後して発生しているのが観察される。その形状は Photo. 6 に示すように、偏平でほとんど塑性変形を伴わないものと、丸味を帯び塑性変形の形跡のあるものがある。その発生位置はバンド組織や偏析帯が多い。これらのポイドがある臨界サイズまで成長し、Z 方向の脆性破壊条件に達すると脆化層を含む Z 面を脆性破壊的に進展するものと考えられる。

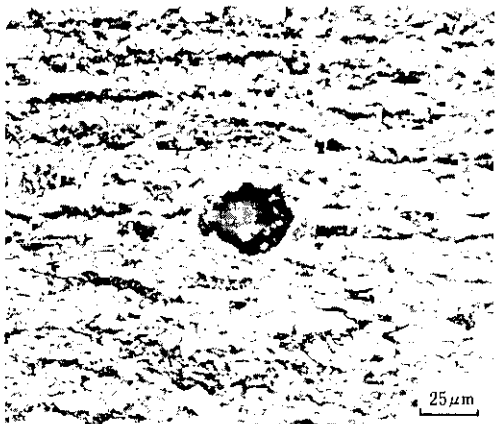
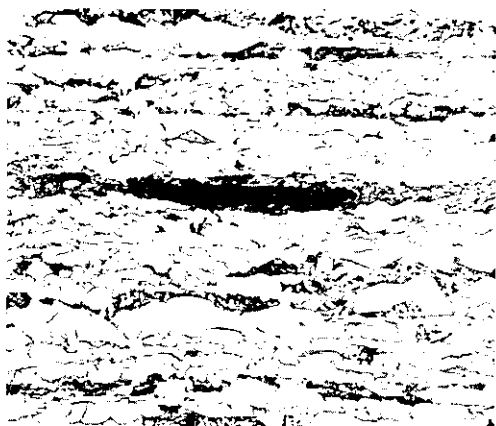


Photo. 6 Voids observed in low blow Charpy specimens

ここで、セパレーションの発生時期と完全破断時のセパレーション量との関係を見ると、Fig. 8 に示すように鋼 4 を除いて、セパレーションの発生時期が早期になるほど、セパレーション量は増加することがわかる。

特に、鋼 3 のように (100) 集合組織のよく発達した材料か、または鋼 10 のようにバンド組織密度

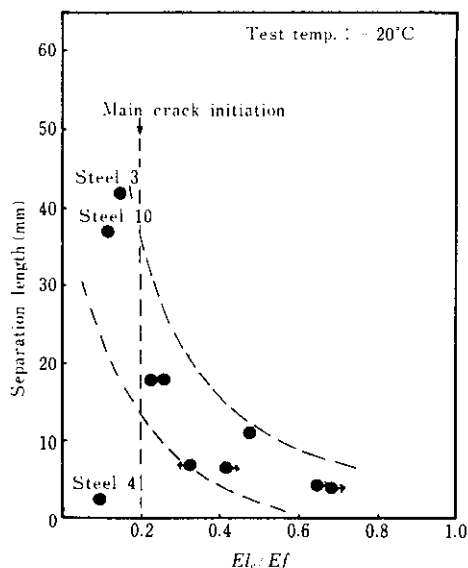


Fig. 8 Relation between separation length and ratio of energy required for initiation of separation to total absorbed energy

の大きい材料では、セパレーションは主クラックより早く発生するとともにセパレーション量は飛躍的に多くなることが示されている。すなわち、(100) 集合組織やバンド組織は、セパレーションを発生しやすくするとともに、その伝播拡大をも助長しているといえる。一方、鋼 4 のように、(100) 集合組織とバンド組織密度が低い鋼板の場合には、セパレーションが主クラックより早期に発生しても、セパレーションの伝播が抑制されて、完全破断時のセパレーション量は少なくなる。鋼 4 は供試材中で最も S 量が高く、硫化物系介在物が最も多かったと推定されるから、介在物の存在は、セパレーション発生の原因にはなるが、介在物だけでは、セパレーションは大きく伝播し得ないといえる。

5. 結 言

バンド組織の密度および集合組織の強さの異なる厚板を、化学成分、制御圧延条件を変えることによって製造した。これらの厚板について、シャルピー試験を行い、破面のセパレーション量を測定するとともに、セパレーションおよび主クラックの発生に必要な吸収エネルギーを求めた。これ

らの結果からセパレーションにおよぼすバンド組織の影響について検討し、以下の結論を得た。

- (1) バンド組織密度が高いほどセパレーション量は増加する。この理由は、バンド組織の存在がセパレーションの発生を容易にすると同時にその伝播経路となっていることによる。
- (2) 主クラックの発生に必要な吸収エネルギーは、延性域では試験片の破断に必要な吸収エネルギーの約 20% に相当し、この割合は材料、試験温度に依存しない。
- (3) これにたいし、セパレーションの発生に必要

な吸収エネルギーの全吸収エネルギーにたいする割合は、バンド組織密度の増加とともに低下する。

- (4) セパレーションの発生時期については、セパレーションは主クラックより先行して発生する場合、ほぼ同時に発生する場合、遅れて発生する場合の 3 とおりが観察された。
- (5) (100) 集合組織はセパレーションの発生、伝播にたいし、バンド組織と同様の影響を与えるが、硫化物系非金属介在物はセパレーションの発生に必要なエネルギーを低下させるだけで、伝播には大きい影響を与えない。

参 考 文 献

- 1) T. Tanaka, N. Tabata, T. Hatomura and C. Shiga: "Three stages of the controlled-rolling process", Microalloying 75-Internl, Symposium on high-strength, low alloy steels, (1977), 88 [Union Carbide Corp.]
- 2) 三好, 寺崎, 福田, 金子: 低温熱延材の破面にみられるセパレーションの成因に関する二, 三の実験結果, 鉄と鋼, 60 (1974) 4, S 219
- 3) 山口, 平, 平林, 松本: 「衝撃荷重によって生じるセパレーションの発生について」, 鉄と鋼, 60 (1974) 11, S 214
- 4) 山口, 平, 平林: 「引張変形によって生じるセパレーションの発生について」, 鉄と鋼, 60 (1974) 11, S 213
- 5) 松田, 川島, 関口, 岡本: 「制御圧延材のセパレーションの発生機構について」, 鉄と鋼, 65 (1979) 11, S 501
- 6) R. Schofield, G. Rowntree, N. V. Sarma, R. T. Weiner: "Arrowhead" fractures in controlled-rolled pipeline steels", Metals Technology, 1 (1974) 7, 325
- 7) 福田, 国重, 杉沢: 「ホットコイルにおけるセパレーションについて」, 鉄と鋼, 62 (1976) 11, S 274
- 8) 波戸村, 田中, 田畑: 「コントロールド・ロール材のセパレーションに及ぼす N の影響」, 鉄と鋼, 60 (1974) 11, S 215
- 9) 飯野: 「Delamination の成長条件と鋼の破壊抵抗に及ぼす影響」, 鉄と鋼, 63 (1977) 2, A 49
- 10) A. S. Tetelman, A. J. Meevily, JR: 「構造材料の強度と破壊①」, (1970), 271, [培風館]