

新制御圧延鋼に発生する セパレーションの評価方法について

勝田 順一*・前田 穂積**
河野 和芳*・中島 正樹*

On the evaluation of separation in TMCP type steel

by

Junichi KATSUTA*, Hotsumi MAEDA**

Kazuyoshi KAWANO* and Masaki NAKASHIMA*

Summary

The research on the evaluation of separation in TMCP steel plate is seldom found, although its fracture toughness and fatigue strength have been rather extensively studied.

Hence, in this paper, the authors intend to clarify unsolved problems in the evaluation of separation and determine the basis of the measuring separation.

Results obtained are summarized as follows;

- 1) The amount of separation occurred in TMCP steel plate is changed by impact energy. The maximum separation index should be obtained by the Charpy test with impact energy of 30kgf·m.
- 2) The separation consists of types a, b and c, but type c can be disregarded in the evaluation of separation.
- 3) It needs to measure the length of separation over 1 mm.
- 4) In the COD test, momentary slight drop of load by the occurrence of separation can be disregarded, and the separation can be evaluated by the reduction of specimen width.

1. はじめに

近年、日本工業規格において新制御圧延による製造方法 (TMCP 法) が承認されたことや新制御圧延鋼 (TMCP 鋼) の優れた強度特性や経済性等の理由によって、低温圧力容器用50キロ級炭素鋼が TMCP 化され、実用化されつつある。さらに、他の高張力鋼の TMCP 化も検討されようとしている。このような TMCP 鋼における問題点の1つである Non-AcC type (旧呼名: Type I, Type II) TMCP 鋼に発生する可能性があるセパレーションの問題については、仕

上げ圧延を A_{r3} 変態点以上の温度で行うことや AcC type (旧呼名: Type III) の TMCP 化により、その発生を回避する方向で処理されている。

しかし、著者らはセパレーション発生量が多い TMCP 鋼は疲労寿命の増加¹⁾、靱性の向上²⁾および脆性亀裂伝播停止特性の向上³⁾等が期待できることを明らかにした。また、セパレーションは発生しないとされている AcC type TMCP 鋼も、炭素当量を従来以下に下げて製造するためや、従来のままの炭素当量でより高い高張力化を図るためには、 A_{r3} 変態点付近または

昭和60年9月30日受理

* 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

** 構造工学専攻 (Graduate Student, Structural Engineering)

A₁₃変態点以下の温度で制御圧延を行う必要があり、セパレーション発生という問題が再び起こる可能性があると思われる。

そこで、セパレーション発生の問題については、さらに鋼板の材料特性におよぼす影響を明らかにする必要があるが、セパレーションそのものの定量的な評価方法が明確に定義されていないという問題が残されており、このことがセパレーションの発生状況やその影響を正確に把握できず、セパレーションの発生するTMCP鋼を積極的に使用できない原因のひとつであると思われる。

今回の報告では、現行のセパレーションの定量的評価方法に残されている不確定要素についてその問題点を把握し、評価基準を検討することにした。またCOD試験において、セパレーションが発生するために起こる未評価の現象について検討し、COD試験において発生するセパレーションを評価することを試みた。

2. 供試鋼板

前報²⁾で使用した鋼板と同様に、同じ化学成分のスラブ材を圧延温度を変えて制御圧延 (Non-AcC type) し、セパレーションの発生量を变化させた3種類である。Table 1に化学成分と機械的性質を示す。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

Steel	Thick. (mm)	Chemical Compositions (%)											Mechanical Properties		
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Sol. Al	Co ^W	Co ^H	Y.P. (kgf/mm ²)	T.S. (kgf/mm ²)	El. (%)
LT ³⁾	A	25	0.12	0.36	1.44	0.013	0.002	0.01	0.02	0.02	0.076	0.366	38.5	51.1	28
	B												43.6	55.0	24
	C												42.5	53.8	25

X: TMCP Type Low Temperature Application Steel (SLA33B Equivalent)

XX: Ceq. = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Ni + Cu) / 15

3. セパレーションの評価

3.1 セパレーション評価方法の現状

セパレーションはTMCP鋼に初めて発生したのではなく、パイプライン用鋼管が破壊した場合にも認められる現象であり、その定量的評価について述べた報告もある^{4), 5), 6), 7), 8)}。これらはいずれもセパレーションの定量的評価方法を明確に定義しているとはいえないが、シャルピー衝撃試験の試験片破面におけるセパレーションの評価に使用されている方法は以下のとおりである。

- i) 目視により開口が認められるセパレーションのうち、試験片断面を貫通するもの本数⁴⁾
- ii) 目視により開口が認められるセパレーションの本数⁵⁾
- iii) 目視により開口が認められるセパレーションの長さの総和⁶⁾

iv) 板面に平行に0.5mm間隔の平行線を引き、これらとセパレーションとの交点の総数⁷⁾

v) 目視により開口が認められるセパレーションのうち、長さ1mm以上のものの総和を破断面積で除した値 (セパレーション指数)

現在、TMCP鋼に発生するセパレーションの評価にはセパレーション指数が最も多く使用されている。しかし、定量的な評価のためにセパレーションを計測する場合には以下の問題点がある。

- 1) 衝撃エネルギーの違いによってセパレーションの発生量は変化しないか。(シャルピー衝撃試験において標準試験機の衝撃エネルギーは30kgf・mと50kgf・mのものがある。)
- 2) セパレーションは開口しているもののみか。(目視によって開口が認められるものを計測している。)
- 3) セパレーションの長さ1mm未満は無視してよいか。(長さ1mm以上のものを計測している。)

3.2 セパレーションの形状

セパレーションの形状についてはあまり取り上げられておらず、杉江らの報告⁸⁾においてわずかに述べられているに過ぎない。

著者らが行ったシャルピー衝撃試験と落重試験の試験片破面の観察結果から認められたセパレーションの形状の模式図をFig. 1に示す。タイプaは現在この形状のみがセパレーションとして評価されているもので、開口したセパレーションを主破面が断ち切るように進んだタイプである。このタイプはシャルピー衝撃試験における脆性破面率が0%となる温度以上での試験片破面に多く見られる。タイプbは主破面に直角方向に深い鋸歯状を呈したもので、さらに2つに分類される。すなわち、タイプb-1はどちらの主破面も鋸歯の片斜面がセパレーション面であるものであり、タイプb-2は主破面の片方においては鋸歯状がセパレーションによってなり、その箇所に対するもう一方の主破面はセ

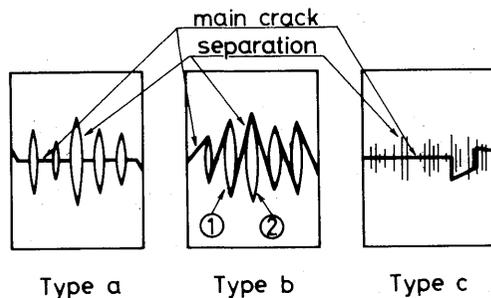


Fig. 1 The schematic shapes of separation

パレーションの無い鋸歯状破面となるものである。この2種類のタイプbは、シャルピー衝撃試験の破面ではタイプaと混在するが、落重試験ではほとんどタイプbのみである。また、タイプb-2の中にタイプaが存在する場合もある。現在の評価方法では、タイプaとタイプb-2が混在する場合には、中にある小さいタイプaのみがセパレーションであるとされている。

タイプaとタイプbが延性破面中に存在するのに対し、タイプcは脆性破面中に多く存在する。このタイプは低温のために主破面が形成される速度が早く、かつ延性が低くなっているために、開口されなかったタイプaと考えられる。現在の評価方法では無視されているが、これは未開口のセパレーションであるとして今回検討することにした。また、タイプcではセパレーションを境にして主破面がえぐられることがある。

3.3 セパレーション指数の基準

シャルピー衝撃試験において、圧延方向の試験片破

面に発生するセパレーションを対象にして、セパレーション指数 (SI) や鋼板の代表値として使用する最大セパレーション指数 (SI_{max}) を求める上での基準について検討した。

(1) 衝撃エネルギー

シャルピー衝撃試験では衝撃エネルギーが50kgf・mおよび30kgf・mのものがある。Fig.2に衝撃エネルギー50kgf・mにおける試験結果を、Fig.3に衝撃エネルギー30kgf・mにおける試験結果を示す。これらの図には、供試鋼板それぞれのSIの分布も示す。SIは、従来の評価法と同様に目視により開口が認められるセパレーション(タイプa)のうち、長さ1mm以上のものを計測して算出した。

これらの図より、 SI_{max} の小さいA鋼では、吸収エネルギーおよび脆性破面率遷移曲線には、衝撃エネルギーによる相違はほとんど認められない。ところが、 SI_{max} が大きいB鋼やC鋼では、衝撃エネルギーが大きい

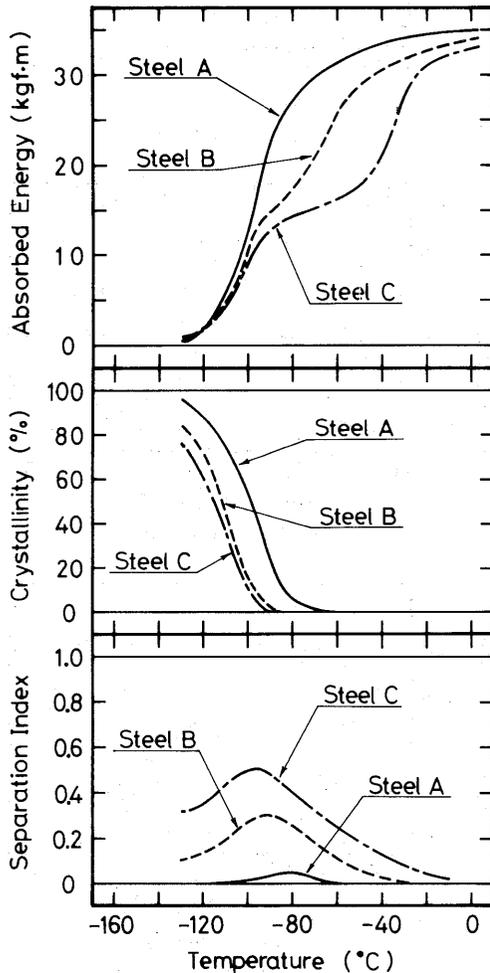


Fig. 2 Results of V-notch Charpy test (50kgf·m)

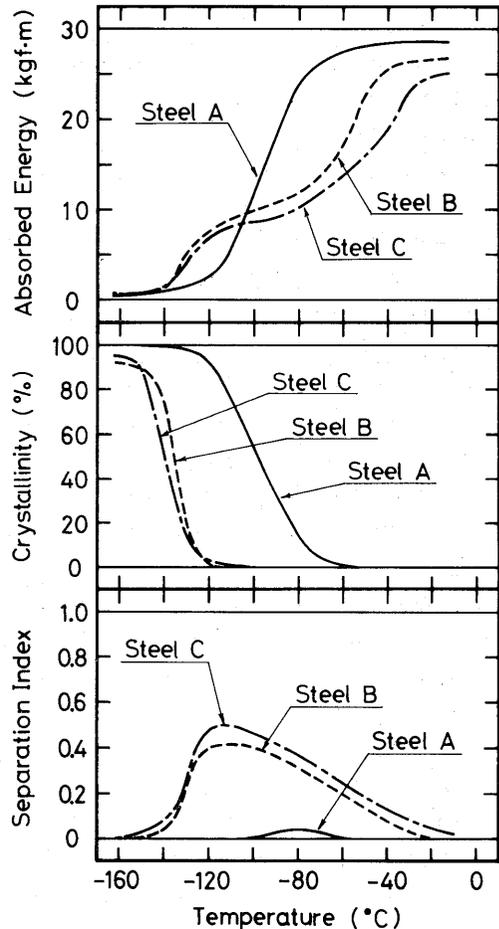


Fig. 3 Results of V-notch Charpy test (30kgf·m)

いほうが吸収エネルギー遷移曲線は立ち上がり、遷移温度領域が狭くなっている。セパレーションが発生するために現われる吸収エネルギー遷移曲線の棚における吸収エネルギー値や棚の発生温度も異なってくる。衝撃エネルギー30kgf・mの場合に生じたA鋼とB鋼、C鋼の吸収エネルギー遷移曲線の逆転域も衝撃エネルギー50kgf・mの場合には見られない。また、衝撃エネルギー50kgf・mの場合にはB鋼の吸収エネルギー遷移曲線に生じる棚も明確でなくなる。

衝撃エネルギー50kgf・mの場合のB鋼およびC鋼の脆性破面率遷移曲線は、衝撃エネルギー30kgf・mの場合よりも30°C程度高温側へ移行している。一般に衝撃エネルギーが大きくなると、吸収エネルギーおよび脆性破面率遷移曲線は高温側へ移行するとされている。しかし、SI_{max}の小さいA鋼では脆性破面率および吸収エネルギー遷移曲線が等しいことから、衝撃エネルギーの相違そのものよりも、セパレーションの発生状況の相違により、B鋼およびC鋼の脆性破面率遷移曲線が移行したものと考えられる。

また、炭素当量が等しい3種類の供試鋼板の最大吸収エネルギー値の相違は、衝撃エネルギー30kgf・mの場合には吸収エネルギーが試験機の限界付近であるために起こると考えられる。試験機の限界が吸収エネルギーよりもかなり大きい衝撃エネルギー50kgf・mの場合は、セパレーションを発生する鋼板を使用する上で不安視されている問題の1つである最大吸収エネルギー値の減少はほとんど認められない。

次にSIの分布については、A鋼では衝撃エネルギーによる相違は認められないが、B鋼やC鋼では異なっている。特にB鋼においては、衝撃エネルギー50kgf・mの方が小さくなっている。これは衝撃エネルギーが大きくと主破面形成速度が速くなり、セパレーションが発生する可能性のあるフェライト・パーライト層がすべて開口しないうちに主破面が形成されたためと思われる。

なお、前報²⁾でSI_{max}を示す温度は脆性破面率が0%となる温度と一致することを示したが、今回のように同じ供試鋼板において脆性破面率遷移曲線が移行した場合でも両者の温度は一致していることがわかる。

(2) セパレーションの形状

Fig. 4に、セパレーションの形状(タイプa, タイプa+タイプb, タイプa+タイプb+タイプc)を考慮して算出したSIの分布を供試鋼板それぞれについて示す。なお、セパレーションは衝撃エネルギー30kgf・mの試験の結果を用いて、長さ1mm以上のものを30倍に拡大して計測した。

この図から、タイプbおよびタイプcを考慮してSIを求めると、最大値が増加するのみでなく、その最大値を示す温度が低温側へ移動することがわかる。特にタイプaのみによるSIが低温側で0となる温度以下でも、タイプbおよびタイプcを考慮してSIを求めると、B鋼およびC鋼では0.3程度のSIが存在することがわかる。

したがって、タイプaを計測するのみではSI_{max}を示す温度よりも低温側で評価されないセパレーションが多くなるため、従来の開口が認められるセパレーションのみの評価では不十分であると思われる。しか

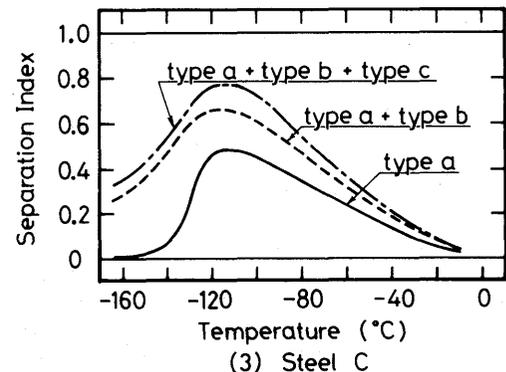
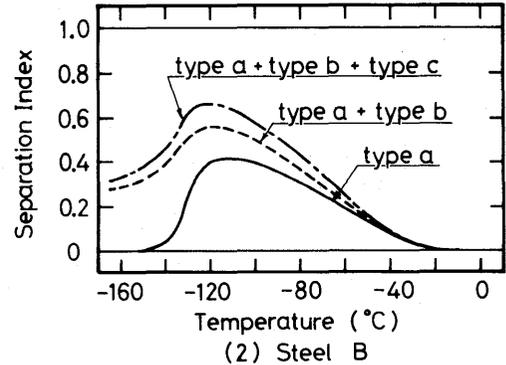
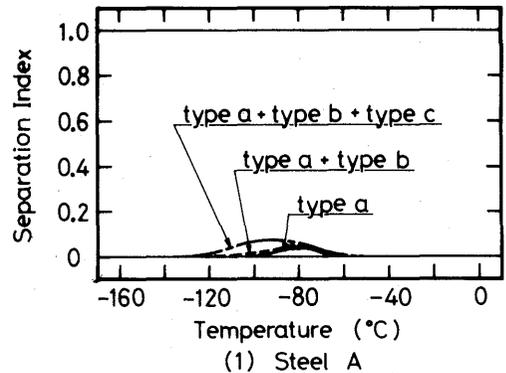


Fig. 4 Distribution of Separation Index corresponding to different shape of separation

し、タイプcを考慮した場合と無視した場合は SI_{max} とその指数を示す温度がほぼ等しく、タイプcを無視してもセパレーション評価結果に影響を与えないものと考えられる。

(3) セパレーションの長さ

Fig. 5 に、セパレーションの長さ(試験片破面を貫通する 8 mm, 1 mm 以上, 0.5mm 以上, 計測可能な0.1 mm 以上)を考慮して算出した SI の分布を供試鋼板それぞれについて示す。なお、セパレーションは衝撃エネルギー $30\text{kgf}\cdot\text{m}$ の試験結果を使用して、タイプaとタイプbを30倍に拡大して計測した。

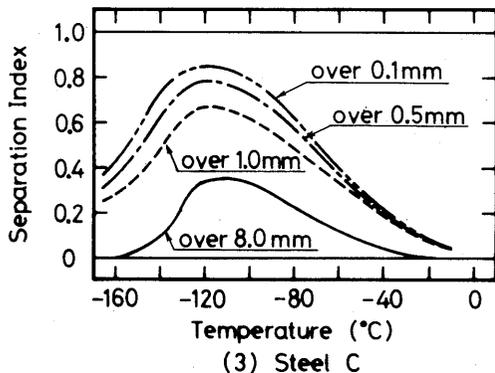
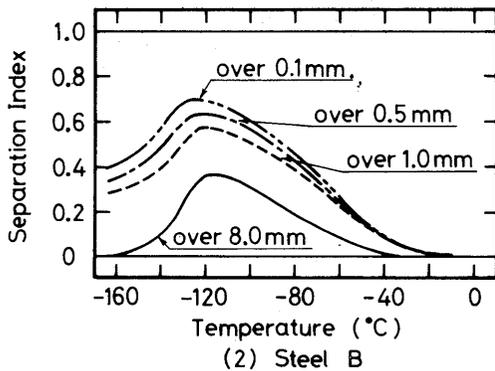
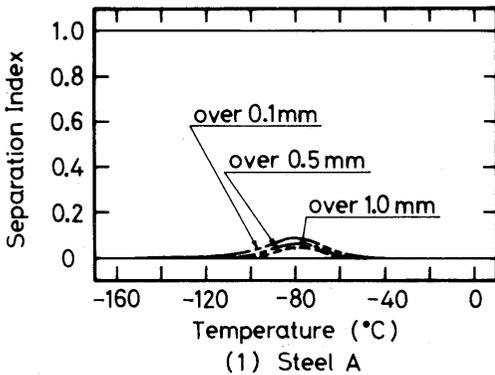


Fig. 5 Distribution of Separation Index corresponding to different length of separation

この図によると、試験片破面を貫通する 8 mm のセパレーションのみで評価した場合には、B鋼およびC鋼の SI_{max} がほぼ等しくなり、吸収エネルギーや脆性破面率遷移曲線の差を評価できない。しかし、各供試鋼板において SI_{max} には若干の差があるものの 1 mm 以上, 0.5mm 以上, 0.1mm 以上のセパレーションから求めた SI の分布は相似形であり、その最大値を示す温度もほぼ等しいことや、1 mm 未満のセパレーションは低温側での発生が多いことから、1 mm 以上のセパレーションを計測すれば危険な評価とはならないと考えられる。

3.4 有効なセパレーションの評価

著者らのうちの1名を含むグループは、現在使用されている TMCP 鋼の SI_{max} と破壊靱性の関係を調査して、板厚方向の中央切欠付大形引張試験結果から求めた破壊靱性値 ($K_c(Z)$) が $200\text{kgf}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ を示す温度 ($T_{Kc=200}(Z)$) は、板厚方向のシャルピー衝撃試験結果から求めた破面遷移温度 ($vT_{rs}(Z)$) との間に相関があり、また、 $vT_{rs}(Z)$ は圧延方向の破面遷移温度 ($vT_{rs}(L)$) や SI_{max} と相関があることを明らかにした。そして、これらの結果から下記の板厚方向の破壊靱性値推定式を導出した。

$$K_c(Z) = 200 \cdot \exp \left[\{ 5.16 \cdot T_{Kc=200}(Z) - 170 \} \times \{ 1/T_{Kc=200}(Z) - 1/T_K \} \right] \quad (1)$$

$$T_{Kc=200}(Z) = 0.908 \cdot vT_{rs}(L) + 202 \cdot SI_{max} - 23.9 \quad (2)$$

ここに、 T_K は温度 (°K)

しかし、前述のように衝撃エネルギーやセパレーション計測の基準の相違によって、 SI_{max} が大きく異なるために、(1)式および(2)式を用いて推定される $K_c(Z)$ も大きく変化する。C鋼におけるセパレーションの長さや形状の計測基準の相違によって変化する $K_c(Z)$ を Fig. 6 に示す。

そこで、現在用いられている SI による定量的な評価を有効な方法として使用するためには、試験条件や

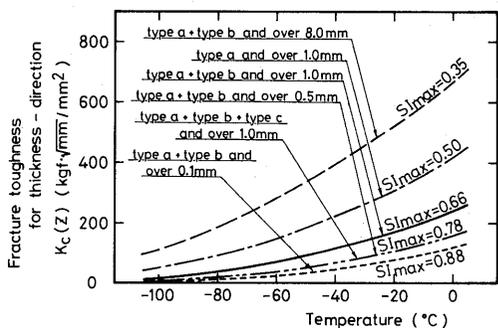


Fig. 6 Fracture toughness corresponding to different Separation Index

計測基準を明確に定義する必要がある。よって、前述の検討結果から SI を算出する基準を以下のように定め、セパレーションの定量的な評価を行うものとする。

- 1) 衝撃エネルギー $30\text{kgf}\cdot\text{m}$ の標準シャルピー衝撃試験における圧延方向の試験片破面から求めた最大セパレーション指数を鋼板の代表値とする。衝撃エネルギー $50\text{kgf}\cdot\text{m}$ のシャルピー衝撃試験におけるセパレーション指数は、衝撃エネルギー $30\text{kgf}\cdot\text{m}$ の場合のセパレーション指数よりも小さくなる場合がある。特に、 A_{F3} 変態点から A_{r1} 変態点までの低温で制御圧延した鋼板では、最大セパレーション指数を40%割増する必要がある。
- 2) セパレーションとして評価する形状は Fig. 1 に示したタイプ a とタイプ b とする。落重試験における試験片破面にはタイプ b のみ現われ、シャルピー衝撃試験においてもタイプ a のみでは最大セパレーション指数を示す温度よりも低温側のセパレーションの発生を把握できないため、タイプ b をセパレーションとして考慮する必要がある。なお、タイプ c のセパレーションは最大セパレーション指数にわずかに影響を与えるが、セパレーションの分布にはほとんど影響がなく、その発生特性を把握する場合に無視してもよいと思われる。
- 3) セパレーションとして計測する必要がある長さは 1 mm 以上とする。1 mm 未満のものを無視すると最大セパレーション指数に若干の影響を与えるが、1 mm 以上のものを計測した場合と 1 mm 未満のものも計測した場合のセパレーションの分布はほぼ等しく、さらに 1 mm 未満のセパレーションを計測するためには適切な照明と倍率の高い拡大鏡を有する計測器が必要となり、また、タイプ a やタイプ b とタイプ c またはセパレーションではないものの区別が非常に困難となるため、実用上 1 mm 以上のセパレーションを評価すれば、その発生特性は十分把握できるものと考えられる。

なお、従来セパレーションの長さ計測は目視により行ってきたが、目視では長さや形状が正確に計測できない。最低10倍程度の拡大鏡が必要である。我々は正確な計測を期するために、環状ライトの中央下部に X・Y 軸精密メカニカルステージを置き、30倍の拡大鏡で観察できる計測器を作成した。

SI とは異なる定量的評価方法として、前報²⁾において示した疲労亀裂進展抵抗係数 (κ) による方法が考えられる。Fig. 7 に κ と SI_{\max} の関係を示す。ここでの SI_{\max} は、目視により開口が認められる 1 mm 以上のセパレーションを計測して求めるといった従来の基準に

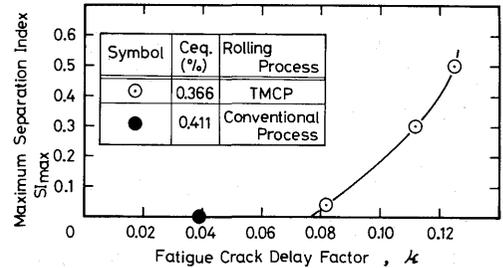


Fig. 7 Relation between SI_{\max} and κ

より算出してある。なお、同図には供試鋼板と同程度の炭素当量を有する従来圧延型高張力鋼の κ も示してある。セパレーションを発生する鋼板の κ を求めるためには疲労試験を行う必要があるが、SI のように計測基準や計測技量に大きく影響されることなく、フェライト・パーライト層と疲労亀裂進展方向のなす角度を計測することにより定量的評価を行うことができる。また、 SI_{\max} と κ が Fig. 7 に示すような関係にあることから、従来使用していた推定式や靱性比較図はわずかに修正するのみで κ による推定式や靱性比較図として用いることができる。例えば、板厚方向破壊靱性値は推定式(2)に(3)式を代入して推定式(1)を用いることにより κ からの推定ができる。

$$SI_{\max} = 50.77 \cdot \kappa^2 - 0.3105 \quad (3)$$

ただし $\kappa \geq 0.0782$

しかし、この κ はいろいろな炭素当量や鋼種のデータが不足しており、今後さらに多くのデータを収集して検討する必要がある。

4. COD 試験におけるセパレーションの評価

セパレーションを発生する TMCP 鋼の COD 試験を行った場合に、Fig. 8 に示すように、荷重～クリップゲージ変位曲線にポップインに似た荷重の一時的な低下を生ずることが知られている。ところが、この荷重

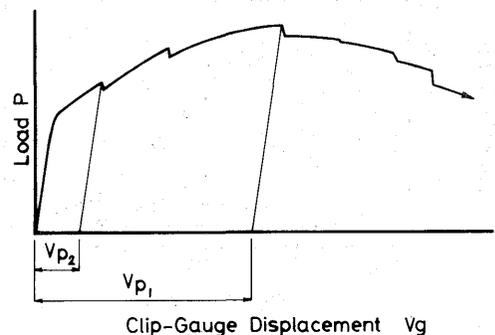


Fig. 8 Relation between load and clip-gauge displacement in COD test

低下は従来鋼で発生する場合があるポップインではなく、セパレーションの発生による荷重低下であることを試験を中断して確認した。一般には、TMCP 鋼の COD 試験を行った場合に発生するこのような荷重の一時的な低下は無視されているようである。

現在の COD 試験の規則では、セパレーションの発生による荷重低下の処理方法について触れていない。BSI (British Standard Institute) の規則では、限界開口変位は最初の不安定点や不連続点における荷重に対する値を採用するとされている。また日本溶接協会の規則では、限界開口変位は一旦荷重が落下した後再び上昇してから破壊した場合には、荷重が落下する直前の荷重に対する値を取るとされている。なお、限界亀裂開口変位量を導くために提案されているいずれの式にも、ノッチ方向に垂直な方向(板表面平行方向)の試験片の挙動を評価する項は含まれていない。

しかし、ポップインの場合には、荷重低下と共にクリップゲージの変位も急激に増加するが、Fig. 8 の荷重～クリップゲージ変位曲線を見ると、荷重のみが急激に低下しており、クリップゲージの変位はあまり変

化していないことがわかる。このことは、ポップインはノッチ先端に発生してノッチの開口変位に直接影響を与えるが、セパレーションはノッチに対して直角方向に発生し、ノッチの開口変位にほとんど影響を与えないためと考えられる。また、セパレーションの発生による荷重低下は、最高荷重に達した後にも起こることが試験で確認されている。

限界亀裂開口変位量(δ_c)は、荷重～クリップゲージ変位曲線より破壊の発生した時点の荷重(P)とクリップゲージ変位の塑性成分(V_p)を求めて算出する。ところが、Fig. 8 のようにセパレーションの発生による荷重低下が起こった場合、それを無視するか(V_{p1})、考慮するか(V_{p2})によって δ_c は大きく変わってくる。Fig. 9 に、COD 試験結果について、セパレーションの発生による荷重低下を無視した場合(限界亀裂開口変位量遷移曲線で表わす)と荷重低下を考慮した場合(プロット点で表わす)を示す。この図でわかるように、セパレーションによる荷重低下を考慮した場合には試験結果がかなりばらつく。これは、試験規則範囲内の載荷速度の変動などによるセパレーションの発生時機のばらつきが δ_c に大きく影響したためと考えられる。このように、不安定要素を多く含むセパレーションの発生による荷重低下を考慮して δ_c を求めることは実用的ではなく、圧延面に平行に発生するセパレーションが圧延方向の靱性に直接的に大きな影響を与えることはないと考えられるため、セパレーション発生による荷重低下を無視して δ_c を算出しても危険な評価とはならないと思われる。

COD 試験では最高荷重に達した後もセパレーション発生による荷重低下が起こるために、シャルピー衝撃試験の場合のようにセパレーション発生量を SI で評価することはできない。そこで Fig. 10 に示す

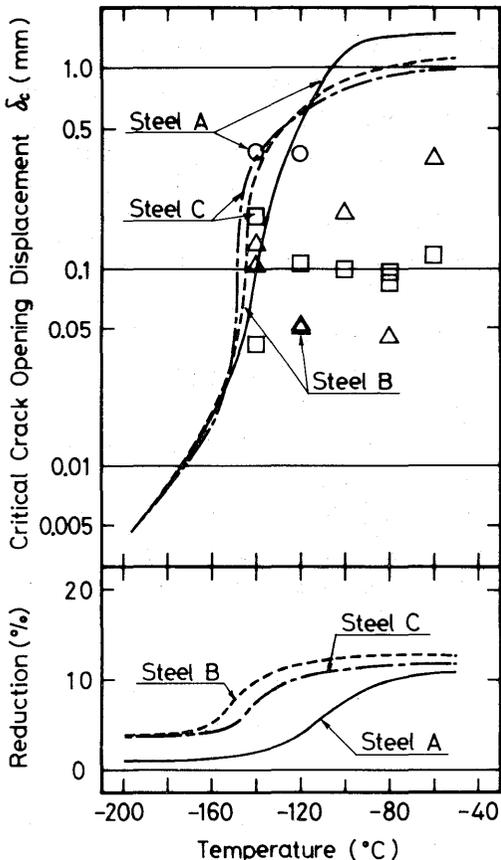
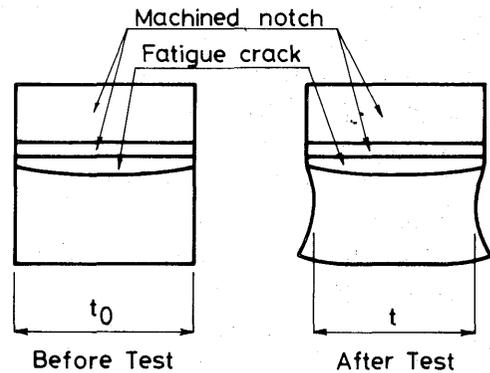


Fig. 9 Results of COD test



$$\text{Reduction (\%)} = (t_0 - t) / t_0$$

Fig. 10 Schema of reduction of width in COD test specimen

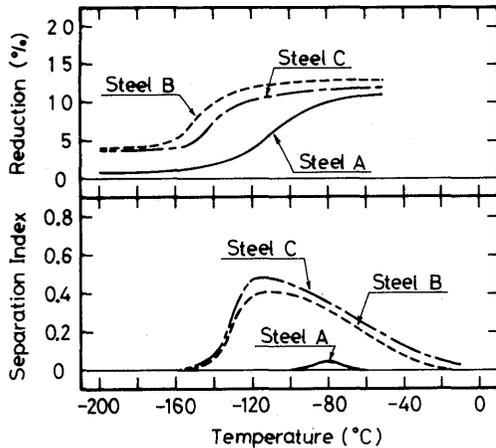


Fig. 11 Distribution of reduction of width in COD test and Separation Index in Charpy impact test

ように試験片厚さの絞り率によってセパレーション発生量を定量的に評価することを考える。Fig. 9に試験片厚さの絞り率遷移曲線を示す。セパレーション発生量が多い鋼板は絞り率も大きく、 δ_c の最大値付近では絞り率も最大となり、 δ_c の増加率の大きい温度付近で絞り率も急激に増加していることがわかる。Fig. 11には、試験片厚さの絞り率遷移曲線とSIの分布を比較してある。この図より、 SI_{max} を示す温度と絞り率が最大となる温度が一致していることがわかる。したがって、COD試験のような静的試験におけるセパレーション発生量の定量的評価方法としては、試験片厚さの絞り率が有効であると思われる。

5. おわりに

現行のセパレーションの定量的評価方法における不確定要素について問題点を検討し、セパレーションの評価基準を定義した。

得られた結果は以下のとおりである。

- 1) シャルピー衝撃試験において、衝撃エネルギー30kgf・mの場合に発生したセパレーションから求めた最大セパレーション指数を供試した鋼板の代表値とする。A_{r3}変態点からA_{r1}変態点までの温度で制御圧延された鋼板を衝撃エネルギー50kgf・mで試験した場合、最大セパレーション指数40%程度の割増が必要である。
- 2) セパレーションの形状には、タイプa、タイプb-1、タイプb-2およびタイプcが存在するが、セパレーションの定量的評価を行う場合にはタイプaとタイプbを考慮して計測し、セパレーション指数を求めればよい。

- 3) セパレーションを評価する場合、1 mm以上の長さのものを10倍以上の倍率の拡大鏡で計測すればよい。
- 4) 疲労亀裂進展方向とフェライト・パーライト層のなす角度を考慮した疲労亀裂進展抵抗係数によってもセパレーションの定量的評価ができ、従来の推定式や靱性比較図もわずかな修正で使用することができる。
- 5) COD試験において荷重〜クリップゲージ変位曲線の荷重が一時的に低下することがあるが、この現象は無視できる。なお、COD試験のような静的試験におけるセパレーションは、試験片幅の絞り率によって評価できる。

参考文献

- 1) 勝田, 中島, 出口, 多田, 矢島, 東田: 新制御圧延鋼の疲労強度におよぼすセパレーション発生量の影響と評価, 西部造船会々報, 第70号 (昭60, 8)
- 2) 勝田, 中島, 河野: 新制御圧延鋼の強度におよぼすセパレーションの影響とその評価(その1), 長崎大学工学部研究報告, 第15巻 第25号 (昭60, 7)
- 3) 多田, 矢島, 出口, 仁藤, 勝田: セパレーションを発生する鋼板の破壊靱性とその評価, 西部造船会会報, 第69号 (昭60, 3)
- 4) 三好, 福田, 橋本, 浅井: 大径管用鋼材で生じるセパレーションの感受性の材質的研究, 鉄と鋼, 第60年 (1974) S220
- 5) 福田, 国重, 杉沢: 高靱性熱延コイルのセパレーションの研究, 鉄と鋼, 第64年 (1978) 第6号
- 6) 飯野: Delaminationの成長条件と鋼の破壊靱性抵抗に及ぼす影響, 鉄と鋼, 第63年 (1977) A49
- 7) 波戸村, 田中, 田畑: コントロールド・ロールド材のセパレーションに及ぼすNの影響, 鉄と鋼, 第60年 (1974) S555
- 8) 杉江, 松岡, 秋山, 三村, 住友: パイプラインの延性破壊伝播抵抗とこれに及ぼすセパレーションの影響, 鉄と鋼, 第69年 (1983) 第9号