

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2)

勝田 順一*・前田 穂積**
河野 和芳*・中島 正樹*

Effect of Separation on Strengths of Thermo-Mechanical Control Process Steel (Part2)

by

Junichi KATSUTA*, Hotsumi MAEDA**
Kazuyoshi KAWANO*, Masaki NAKASHIMA*

Summary

We had studied the effects of impact energy and impact speed on a quantity of separation occurred, and the distribution of in-plane fracture toughness in the TMCP steel plate with tendency to occur the separation.

Moreover, we had dealt with the fatigue crack propagation on the specimen with surface notch and the specimen with through thickness notch at room temperature, and showed the anisotropic effect of thickness direction in the TMCP steel plate with tendency to occur the separation.

1. はじめに

著者らは今までの報告で、新制御圧延鋼におけるセパレーションの発生が静的および動的靱性におよぼす影響について調べ、セパレーションが多く発生する温度域では、静的および動的破壊靱性が向上することを明らかにした¹⁾。また、静的破壊試験においては、セパレーション指数(SI)は適用できないことを明らかにし、試験片の絞り率により評価する必要があることを示した²⁾。

さらに、セパレーションを発生する鋼板の疲労強度についても調査し、試験片疲労破面にはマクロ的なセパレーションの発生が認められないにもかかわらず、最大セパレーション指数(SI_{max})の大きい鋼板ほど疲労寿命が長くなること、SI_{max}が同じ鋼板においても、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により疲労寿命は変化し、その影響もSI_{max}が大きい鋼板ほど大きいこと、および板厚方向の疲労強度には、SIの影響はほとんど認められないことを

明らかにした。そして、疲労亀裂の進展がフェライト・パーライト層によって影響される度合を疲労亀裂進展抵抗係数(κ)として評価することを提案した。

本報では、動的破壊靱性におよぼすセパレーション発生の影響のうち、衝撃エネルギーが一定の場合における衝撃速度の影響(前報¹⁾では、衝撃速度が一定の場合における衝撃エネルギーの影響)について調査し、衝撃エネルギー、および衝撃速度がセパレーション発生量におよぼす影響について明らかにした。さらに、落重試験の試験片破面に現れる脆性亀裂の折れ曲がりの原因を明らかにするために、セパレーションを発生する鋼板の面内靱性分布をシャルピー衝撃試験の結果により検討した。

また、前報¹⁾においては、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決定するにはかなりの時間を要し、かつ疲労亀裂が2箇所以上で発生し、その後合体するような場合の κ を求めることは困難であった。そこで、板厚方向、および板幅方向について

昭和61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)

疲労亀裂伝播試験を行い、疲労亀裂伝播速度におよぼす組織異方性の影響について調査し、その評価方法を検討した。

2. 供試鋼板

前報¹⁾で供試した鋼板と同様に、同じ化学成分のスラブ材を新制御圧延法 (Non AcC type) により、仕上げ圧延温度を変えて圧延し、セパレーションの発生量を変化させた3種類の50キロ級低温压力容器用炭素鋼板 (炭素当量 0.366%) を用いた。なお、3種類の供試鋼板の SI_{max} は次のとおりである。

- A 鋼 : $SI_{max} = 0.04$ ($-80^{\circ}C$)
- B 鋼 : $SI_{max} = 0.38$ ($-110^{\circ}C$)
- C 鋼 : $SI_{max} = 0.48$ ($-120^{\circ}C$)

3・セパレーション発生量の靱性への影響

衝撃エネルギーが一定 (200kgf・m) で、衝撃速度が変化する場合の落重試験を行った。Fig.1 に、C 鋼の結果を示す。この図から、衝撃速度が変化する場合

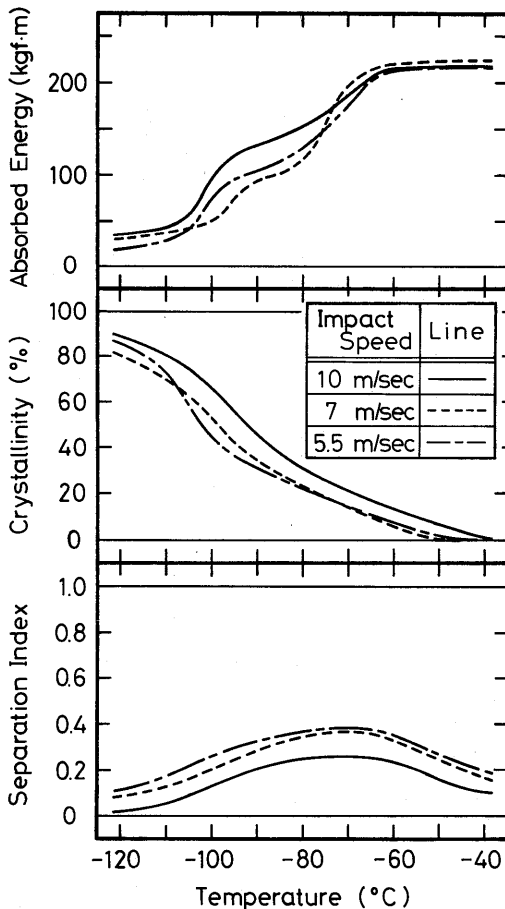


Fig.1 Results of drop weight test (Steel C)

には、吸収エネルギー曲線や脆性破面率曲線に大きな移動は認められないが、全温度域において衝撃速度が遅くなるほど、SIが増加していることがわかる。

前報¹⁾と本報の結果から、セパレーションの発生量によって、靱性が変わることが明らかになった。したがって、セパレーションの発生に影響する因子について、その影響を把握する必要がある。Fig.2 に、衝撃エネルギーと SI_{max} との関係を示す。

これらの図によると、衝撃エネルギーが変化しても SI_{max} にそれほど大きな変化は認められないが、衝撃エネルギーそのものの影響よりも、シャルピー衝撃試験での SI_{max} と落重試験での SI_{max} の違いに見られるように、衝撃物と被衝撃物の重量差や衝撃エネルギーなどを含めた衝撃度による影響が大きいものと考えられる。また、衝撃速度が速くなると、 SI_{max} が減少することがわかる。しかし、COD 試験 (衝撃速度がほぼ0) におけるセパレーション発生量の減少を考慮すると、 SI_{max} は単調に減少するのではなく、供試鋼板それぞれに異なる極大値が存在することが推察できる。

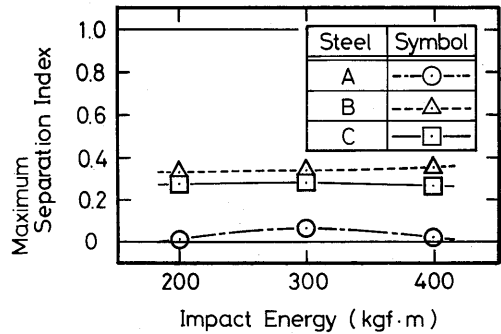


Fig.2 Relation between impact energy and maximum separation index

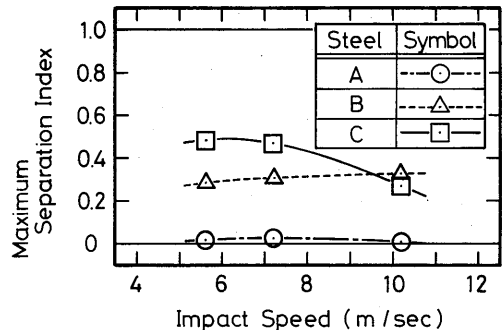


Fig.3 Relation between impact speed and maximum separation index

4. セパレーションを発生する鋼板の面内靱性分布

落重試験片の破断面には、脆性亀裂の折れ曲がりを観察される。この折れ曲がり、従来鋼には認められず、セパレーションを発生する鋼板が脆性破壊した場合にのみ起こる現象である。

Fig.4に、脆性亀裂の折れ曲がり角度とその試験温度、吸収エネルギーとのそれぞれの関係を示す。この図より、折れ曲がり角度は、試験温度、吸収エネルギーに関係なく、各供試鋼板ともほぼ100°から130°の間に分布していることがわかる。このことより、圧延方向に対して約55°の方向に材質的に脆い箇所が存在し、脆性亀裂が鋼板の脆い箇所を伝播していくために、折れ曲がるものと考えられる。

そこで、セパレーションの発生する鋼板面内の靱性分布を調べるため、試験片方向が圧延方向（以後0°方向と呼ぶ）、圧延方向に対して30°方向（以後30°方向と呼ぶ）、圧延方向に対して45°方向（以後45°方向と呼ぶ）、圧延方向に対して60°方向（以後60°方向と呼ぶ）、および板幅方向（以後90°方向と呼ぶ）となるように採取した試験片を用いて、Vノッチシャルピー衝撃試験を行った。

Fig.5に、C鋼のVノッチシャルピー衝撃試験の各方向の結果を示す。これらの図より、吸収エネルギー曲線に現れる棚の温度域、脆性破面率曲線、および

SI_{max}となる温度が、30°、45°、および60°方向の場合に比べて、0°および90°方向の場合にはそれぞれ低温側へ移動し、SI_{max}は、0°、および90°方向の場合のほうが、その他の方向の場合に比べて大きくなっていることがわかる。

次に、供試鋼板それぞれについて各方向の脆性破面率曲線をFig.6に示す。A鋼では、試験片採取方向の違いによる脆性破面率曲線の移動は、ほとんど認められない。ところが、B、C鋼における30°、45°、および60°方向の脆性破面率曲線とA鋼におけるすべての方向の脆性破面率曲線とはほぼ一致しているものの、0°と90°方向の脆性破面率曲線は約60℃ほど低温側へ移動していることがわかる。

これらのことより、セパレーションが多く発生する鋼板の動的破壊靱性が特に優れているのは0°と90°方向で、その他の方向においては、セパレーションをあまり発生しない鋼板の動的破壊靱性とほとんど変わらないことが明らかとなった。

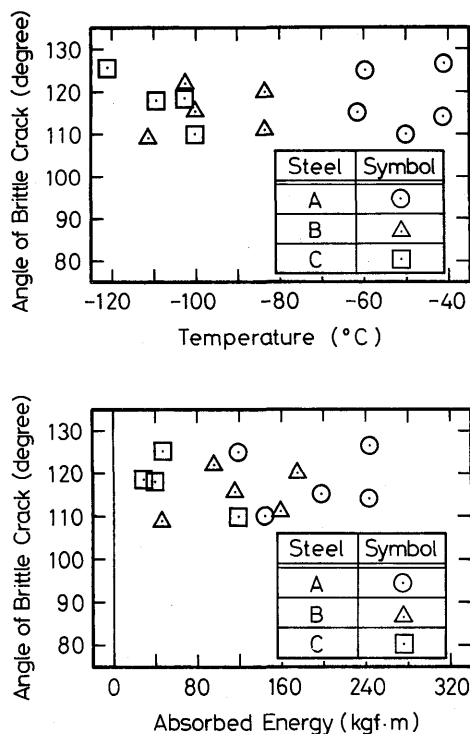


Fig.4 Bent angle of brittle crack in drop weight test

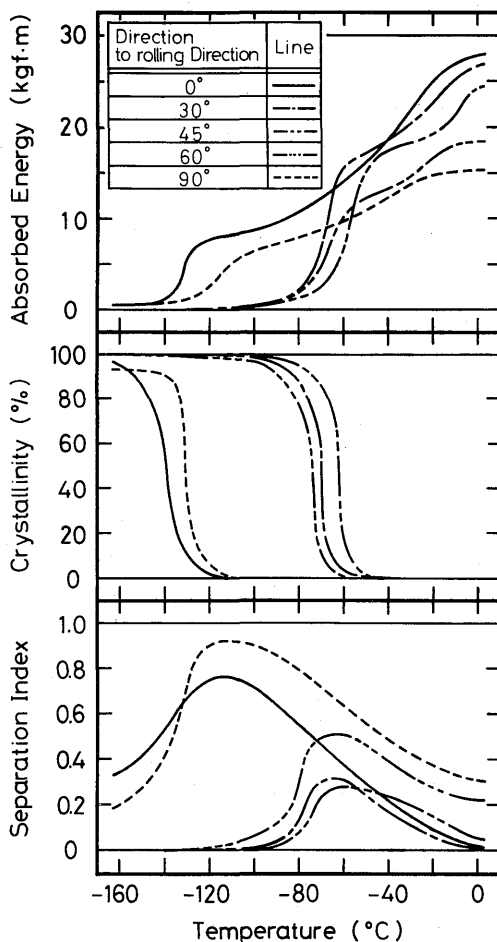


Fig.5 Results of V-notch Charpy impact test (Steel C)

供試鋼板それぞれの鋼板面内の靱性分布を比較するために、鋼板面内の50%脆性破面率温度 ($\sqrt{T_{rs}}$) の分布を Fig.7 に示す。なお分布曲線は、ルンゲの12縦

Direction to Rolling Direction	Line
0°	————
30°	-----
45°	-----
60°	-----
90°	-----

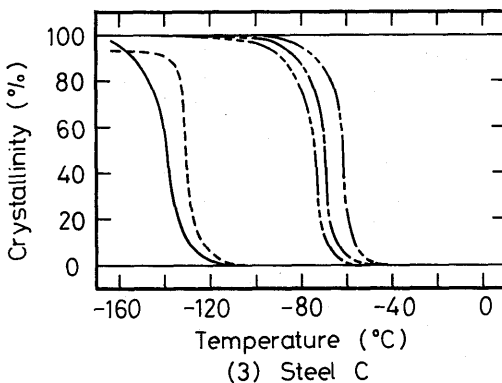
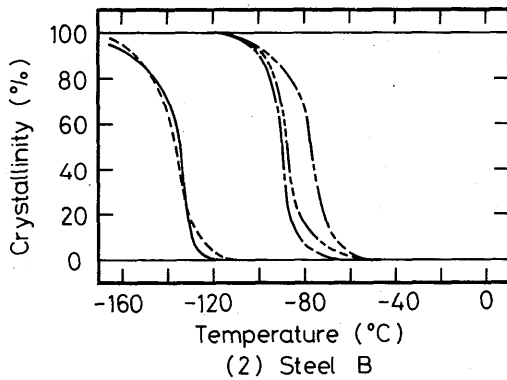
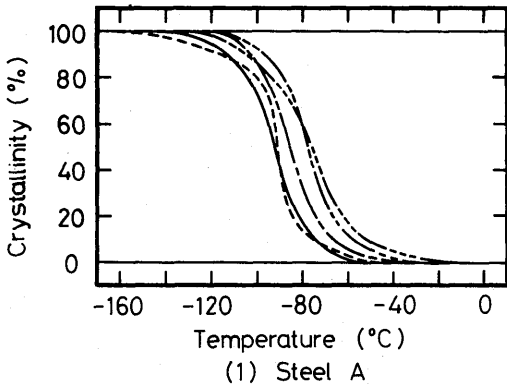


Fig.6 Crystallinity curves of each direction in V-notch Charpy impact test

座標式³⁾を参考にしてフーリエ級数を用いて、試験結果を整理して求めた。この図によっても、セパレーション発生量の多いB鋼、およびC鋼における0°と90°方向の $\sqrt{T_{rs}}$ は、他の方向の $\sqrt{T_{rs}}$ に比べて著しく低温側にあることがわかる。

Fig.7 に示した供試鋼板面内の $\sqrt{T_{rs}}$ 分布と落重試験片に現れる折れ曲がった脆性亀裂とを重ね合わせて Fig.8 に示す。この図より、折れ曲がって進む脆性亀裂は靱性が低くなっている方向に進展していることがわかる。しかし、脆性亀裂の折れ曲がりには、亀裂方向の靱性と他の方向の靱性とにある一定以上の差が存在することと、亀裂先端の応力分布状態が相互に影響して発生するために、脆性亀裂は最も靱性の低い方向に必ずしも進展しないものと推察される。

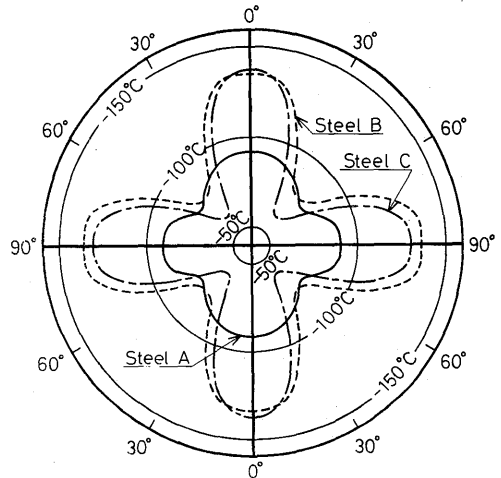


Fig.7 Distribution of $\sqrt{T_{rs}}$ in TMCP steel with separation appearance

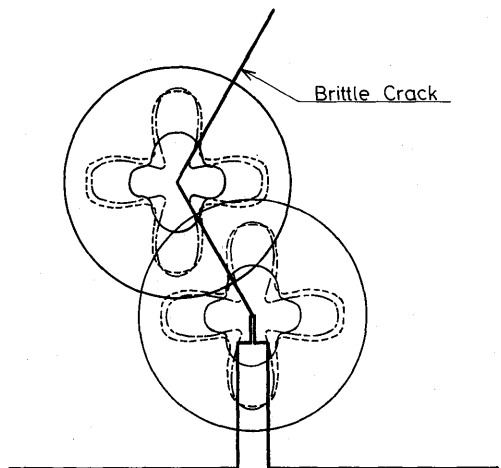


Fig.8 Schema of $\sqrt{T_{rs}}$ distribution and brittle crack

5. 疲労亀裂伝播速度におよぼす SI_{max} の影響と評価

室温における疲労亀裂伝播におよぼす SI_{max} の影響を調べるために、供試鋼板それぞれについて板厚方向および板幅方向の疲労亀裂伝播試験を行った。

疲労亀裂がフェライト・パーライト層を断ち切るように進展する場合、すなわち疲労亀裂が板厚方向に進展する場合を想定した表面ノッチ付試験片による試験では、ノッチ最深部で発生した疲労亀裂が試験片表面において観察されてからの亀裂伝播を対象とした。また、疲労亀裂がフェライト・パーライト層方向に進展する場合、すなわち疲労亀裂が板幅方向に進展する場合を想定した中央貫通ノッチ付試験片による試験では、機械加工ノッチの先端にさらに疲労予亀裂を約2mm入れた後の亀裂伝播を対象とした。

試験は、載荷速度420 cpm，最高荷重一定のもとで、応力比を0.01と0.50とに変化させるピーチマーク法を用いた^{4),5),6)}。

なお試験結果の整理は、伝播速度の算出にはセカント法^{4),5),6)}を、応力拡大係数範囲の算出は、板厚方向についての結果整理には Raju-Newman の解⁴⁾による(1)式を、板幅方向についての結果整理には(2)式を用いた。

$$\Delta K = \frac{\Delta\sigma}{E(K)} \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \left[\sin^2 \varphi + \left(\frac{a}{c}\right)^2 \cdot \cos^2 \varphi \right]^{1/4} \cdot F \quad \dots\dots(1)$$

$$F = \left[M_1 + M_2 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \cdot f_w \cdot g$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c}\right)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + a/c}$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1.0}{0.65 + a/c} + 14 \left(1.0 - \frac{a}{c}\right)^{24}$$

$$g = 1 + \left[0.1 + 0.35 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right] \cdot (1 - \sin \varphi)^2$$

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi c}{W} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2}$$

$$E(k) = \sqrt{1 + 1.464(1 - k^2)^{1.65/2}}$$

$$k^2 = 1 - (a/c)^2$$

$$\Delta\sigma = \Delta P / (W \cdot t)$$

$$\Delta P = P_{max} - P_{min}$$

W : 試験片板幅 t : 試験片板厚

a : 亀裂深さ c : 亀裂長さ

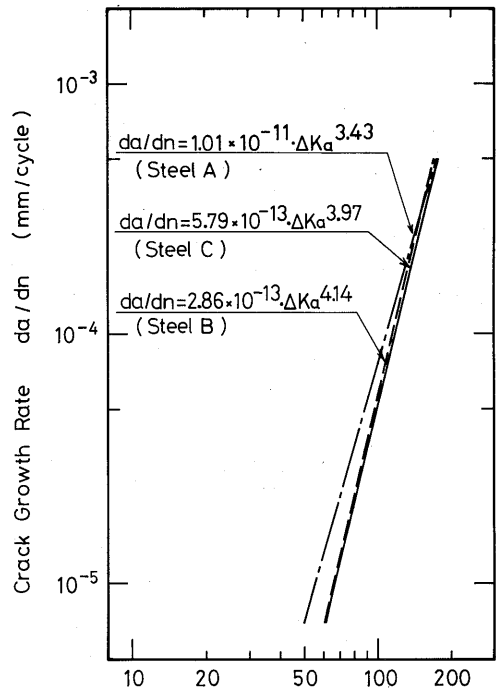
$$\Delta K = \frac{\Delta P}{t} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{2W} \sec \frac{\pi \cdot a}{2}} \quad \dots\dots(2)$$

$$\alpha = 2 \cdot c / W$$

$$\Delta P = P_{max} - P_{min}$$

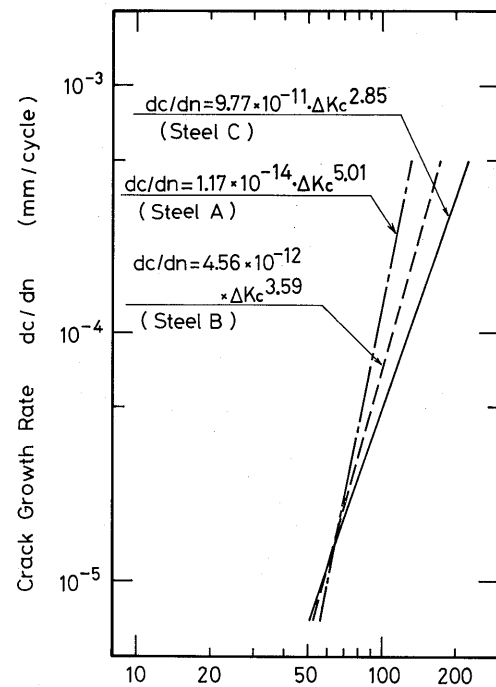
W : 試験片板幅 t : 試験片板厚

c : 亀裂長さ



Stress Intensity Factor Range ΔK_a (kgf/mm^{3/2})

Fig.9 Relation between ΔK_a and da/dn for crack depth of surface crack



Stress Intensity Factor Range ΔK_c (kgf/mm^{3/2})

Fig.10 Relation between ΔK_c and dc/dn for crack width of surface crack

Fig.9 に、板厚方向に亀裂が進展する場合の表面疲労亀裂最深部における応力拡大係数範囲 (ΔK_a) と伝播速度 (da/dn) の関係を示す。また Fig.10 に、同じ試験における表面疲労亀裂の試験片表面での応力拡大係数範囲 (ΔK_c) と伝播速度 (dc/dn) の関係を示す。Fig.11 には、 f 板幅方向に亀裂が進展する場合の結果を示す。この図には、SR 193 研究部会によるセパレーションを発生しない TMCP 鋼の母材のデータ⁷⁾ も示してある。

これらの図によると、疲労亀裂がフェライト・パーライト層に沿って進展する場合には、SR 193 研究部会において示されたデータとは差があるものの、供試した鋼板においては SI_{max} の大きさにかかわらず、伝播速度はほぼ一致していることがわかる。疲労亀裂がフェライト・パーライト層を断ち切るように進展する場合には、 SI_{max} の小さい A 鋼の伝播速度は、 SI_{max} の大きな B, C 鋼の伝播速度に比べて速くなることからわかる。ところが、B, C 鋼の $\Delta K_a \sim da/dn$ 線図には、あまり伝播速度の差が認められなかった。また、板厚方向に進展する場合における亀裂開口部の $\Delta K_c \sim dc/dn$ 線図の供試鋼板それぞれの伝播速度に差が存在するのは、試験片表面では疲労亀裂がフェライト・パーライ

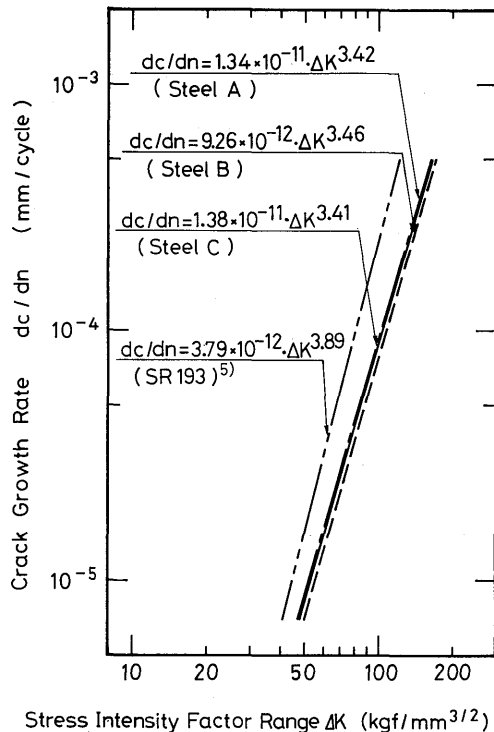


Fig.11 Results of fatigue crack propagation test for through thickness notch specimen

ト層に沿って進展しているものの、先行する亀裂最深部での遅延の影響が亀裂表面部まで及んでいるものと考えられる。

疲労亀裂が板厚方向に進展する場合の ΔK_a と ΔK_c の関係を Fig.12 に示す。線図の傾きは、 SI_{max} の小さい鋼板ほど大きく、亀裂最深部の応力拡大係数範囲が等しい場合でも、 SI_{max} の小さい鋼板のほうが亀裂表面部の応力拡大係数範囲が大きくなることわかる。

供試鋼板それぞれの表面疲労亀裂の進展形状を比較するため、Fig.13 に疲労亀裂が板厚方向に進展する

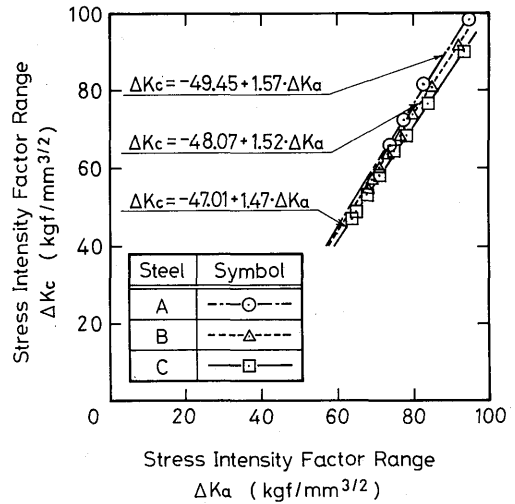


Fig.12 Relation between ΔK_a and ΔK_c

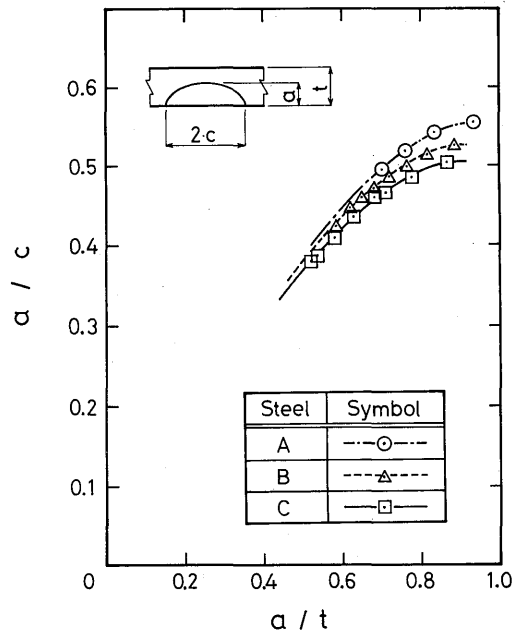


Fig.13 Relation between a/t and a/c

Table 1 Results of fatigue crack propagation test for surface crack

Steel	Distance of Propagation (mm)	Number of Cycles (cycles)	Average Rate of Propagation (mm/cycle)
A	4.682	120,000	$3.902 \cdot 10^{-5}$
B	4.694	240,000	$1.956 \cdot 10^{-5}$
C	5.336	320,000	$1.668 \cdot 10^{-5}$

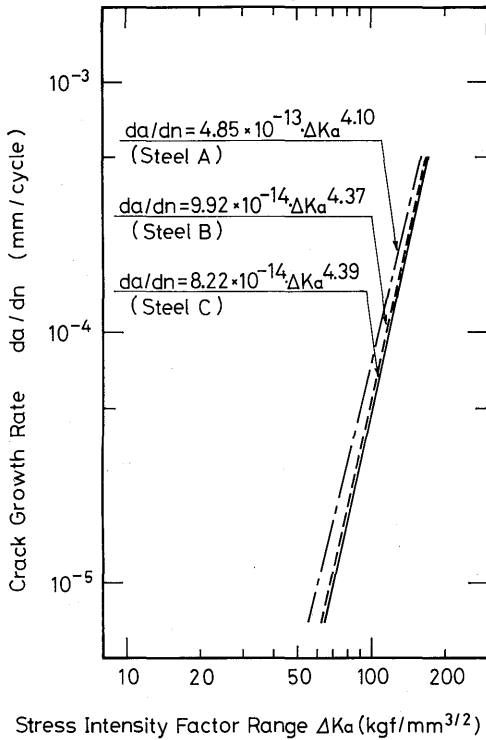


Fig.14 Corrected $\Delta K_a \sim da/dn$ curve for crack depth of surface crack

場合の試験片板厚 (t) と疲労亀裂深さ (a) の比 a/t と疲労亀裂幅 (c) と a の比 a/c との関係を示す。

この図から、板厚方向に進展する疲労亀裂の形状は、 SI_{max} の小さい鋼板の方が厚い半楕円状になり、 SI_{max} が大きい鋼板ほど薄い半楕円状になることがわかる。これは、 SI_{max} の大きい鋼板ほど、板厚方向の組織異方性の影響が大きく、疲労亀裂の進展に対して抵抗しているであろうことが推察できる。

次に、試験結果を整理する上で対象となった板厚方向の伝播距離と繰り返し数、およびその平均伝播速度を、Table 1 に示す。これらは直接比較できる結果ではないが、A 鋼の伝播速度に対する B 鋼の伝播速度は約 50% に、C 鋼のそれは約 43% にそれぞれ遅くなっていることがわかる。

以上のように、 SI_{max} の大きさによって表面疲労亀裂に形状の相違や、平均伝播速度に差異がある。とこ

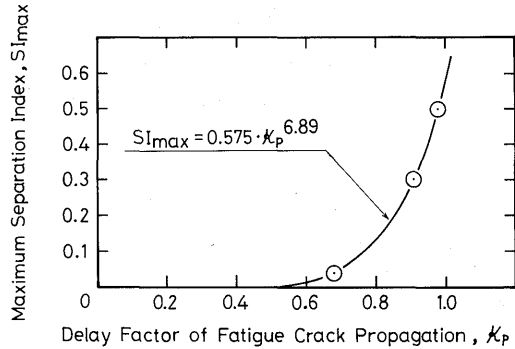


Fig.15 Relation between κ_p and SI_{max}

ろが、Fig.9 における B、C 鋼の試験結果はほぼ一致しており、前述の結果が線図に表れているとはいえない。そこで、従来の応力拡大係数範囲算出方法を用いて SI_{max} の影響を評価することを試みた。

Fig.13 での a/t ~ a/c の関係により、供試鋼板それぞれが同じ分布をしており、a/c のみが変わっていることに注目して、B、C 鋼の各データを A 鋼の線図との比により、a/c を補正した。補正した a/c から a を修正して、 $\Delta K_a \sim da/dn$ 線図を求め直した。その結果を Fig.14 に示す。なお、A 鋼の補正については B、C 鋼の補正を行う上での基準としたため、後に述べる方法を補正した結果を示してある。この図においても大きな相違は認められないが、B、C 鋼の $\Delta K_a \sim da/dn$ 線図に若干の差が認められるようになる。また、 SI_{max} の大きな鋼板のほうが、疲労亀裂伝播速度は遅いが、線図の傾きは大きくなることわかる。このことは、走査型電子顕微鏡によって確認される微小なセパレーションが SI_{max} の大きな鋼板ほど多く発生しており、伝播距離がセパレーション幅の総和分だけ見かけ上増加しており、疲労亀裂伝播速度が速くなるような結果が表れているものと推察される。したがって、板厚方向の組織異方性の影響が認められなかった板厚方向の試験結果と比較して増加した傾き分を、疲労亀裂伝播抵抗係数 (κ_p) と呼ぶことにする。この κ_p と SI_{max} の関係を Fig.15 に示す。この図より、 κ_p と SI_{max} の関係は既報¹⁾の κ と SI_{max} の関係と非常によく似ていることがわかる。また、 SI_{max} が 0 となっても

κ_p が存在するのは、従来圧延型の鋼板においても板厚方向の組織異方性の影響が存在するためであると考えられる。

なお、A鋼の κ_p は、Fig.15より推定した値である。さらに、この κ_p を用いてFig.14に示したA鋼の $\Delta K_a \sim da/dn$ 線図を求めた。

しかし、本報で用いた供試鋼板のように、板厚方向に組織異方性が存在し、疲労強度や、疲労亀裂伝播速度に影響を与える場合、疲労強度については前報¹⁾で提案した κ で十分に整理できるが、疲労亀裂伝播速度においてはASTM⁶⁾等に提案されている整理方法では今回提案した補正方法を行っても不十分であり、応力拡大係数範囲や、伝播速度を算出する段階から板厚方向の組織異方性を考慮して評価する方法を新しく考える必要があると思われる。

6. おわりに

衝撃エネルギー、衝撃速度が、セパレーション発生量におよぼす影響、およびセパレーションを発生する鋼板の面内靱性分布を明らかにした。また、最大セパレーション指数が疲労亀裂伝播速度におよぼす影響についても調査した。

得られた結果は、以下のとおりである。

- 1) セパレーションの発生量は、衝撃エネルギーや衝撃速度に影響され、セパレーションが発生することによって向上する靱性も変化する。
- 2) セパレーションを多く発生する鋼板の面内靱性は、圧延方向および板幅方向と他の方向に大きな差が存在し、このことと亀裂先端の応力分布によって脆性亀裂の折れ曲がりが発生する。
- 3) 疲労亀裂が板厚方向に進展する場合には、最大セパレーション指数が大きくなるほど疲労亀裂

伝播速度は遅くなるが、疲労亀裂が板幅方向に進展する場合には、最大セパレーション指数の相違は、疲労亀裂伝播速度に影響しない。

- 4) 疲労破面には、微小なセパレーションの発生が認められ、疲労亀裂が進展する方向をさえぎる方向に開口した場合には疲労亀裂伝播速度に影響が現れ、その影響度は最大セパレーション指数が大きいほど大きい。

参考文献

- 1) 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 (昭和60, 7)
- 2) 勝田, 前田, 河野, 中島: 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, 長崎大学工学部研究報告, 第16巻 第26号 (昭61, 1)
- 3) 沼倉: 測定値計算法, 森北出版 (昭31, 1)
- 4) 國尾, 中沢, 林, 岡村 編集: 破壊力学実験法, 朝倉書店 (1984),
- 5) FRC 小委員会: 原子炉構造物の強度安全性評価法の合理化に関する研究 (II) 成果報告書, JWES-AE-8204, p. 129, 日本溶接協会 (1982)
- 6) ASTM Standard: E 467-81, ASTM (1981)
- 7) 日本造船研究協会第193研究部会: 新製造法による50キロ級高張力鋼の有効利用に関する研究 総合報告書 (昭60. 5)
- 8) 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, (昭和60. 8)
- 9) 勝田, 中島, 前田, 矢島: セパレーションを発生する鋼板の疲労亀裂伝播速度について, 西部造船会会報, 第72号, (昭和61. 8)