

# 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)

勝田 順一\*・中島 正樹\*  
河野 和芳\*

## Effect of Separation on Strengths of Thermo-Mechanical Control Process Steel (Part 1)

by

Junichi KATSUTA, Masaki NAKASHIMA  
and Kazuyoshi KAWANO

Recently, Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) type 50kgf/mm<sup>2</sup>-class high-tensile steel plates are used to welded structures such as large LPG-tank, ship-hull, etc. for higher efficiency and lower cost. But, in some cases, the occurrence of "separation" in TMCP steel plate becomes a problem. Last year, it became clear that the TMCP steel plate with high maximum separation index (SI<sub>max</sub>) was excellent in brittle crack propagation-arrest characteristic.

In this paper, we had studied the effect of separation on the fracture toughness and fatigue strength of TMCP steel plates. To reiterate the results written in it, they are as follows.

- 1) The occurrence of separation in TMCP steel plate improve its fracture toughness.
- 2) The fatigue strength is influenced by the angle between fatigue crack direction and ferrite-pearlite layers in the steel plate with separation appearance.

### 1. はじめに

大型のLPG貯槽、橋梁や船舶などの溶接構造物には、その高性能化、低コスト化を図るために多くの箇所に高張力鋼が使用されている。ところが、従来の高張力鋼は高強度を得るために合金成分が添加されており、炭素当量が高くなっている。そのために、低入熱溶接時の熱影響部の硬化割れや、大入熱溶接時の熱影響部の脆化が問題となり、溶接施工時には溶接割れ防止のための対策が必要であった。

最近、実用化され始めた新制御圧延法により製造された高張力鋼は、ミクロ組織の改善により軟鋼なみの炭素当量で高強度、高靱性が得られるようになった。

さらに、低炭素当量であるために良好な溶接性を有しており、溶接割れ防止対策が不必要となった。また、高価な合金成分の増加を伴わないことや、熱処理を行わなくてもよいことなど省工程のために安価で、入手までの期間が短くなるなどの利点が多い。

ところが、このような新制御圧延鋼は従来の圧延温度よりも低温域で圧延するために、セパレーションと呼ばれる圧延面に平行な層状の割れが発生する場合がある。セパレーションは母材中には存在せず、シャルピー衝撃試験などにより鋼板を破壊させた時に起こる主破面に直角な割れである。その発生要因としては低温加工度の増大や仕上げ圧延温度の低下などの低温

昭和60年5月8日受理

\* 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

圧延条件の強化によって、鉄のへき開面である [100] 面が圧延面に平行な集合組織となることや、非金属介在物が圧延面に平行に延伸することなど<sup>1)</sup> があげられている。これらの要因により、圧延面平行方向と板厚方向との靱性差が大きくなる温度域において、板厚方向に大きな引張応力が作用した場合に発生するとされている。現在、実用化されている新制御圧延鋼においては必要以上の低温域圧延を避ける傾向にあり、さらに、 $A_{r3}$ 変態点付近で圧延を停止し、制御冷却を行う新しい新制御圧延法により製造された高張力鋼も実用化されつつある。しかし、セパレーションを発生する鋼板は脆性亀裂伝播停止特性が非常に優れている<sup>2)</sup> ことを著者の1名を含むグループは明らかにしており、セパレーションが新制御圧延鋼の強度におよぼす影響を把握し、脆性亀裂に対するクラック・アレスター材としてセパレーションを発生する鋼板の有効利用を図ることで、溶接構造物の脆性破壊に対する安全性を高めることができると考えられる。

本研究では、同一化学成分のスラブ材において、セパレーションの発生量を変化させた3種の新制御圧延鋼を使用し、破壊靱性および疲労強度におよぼすセパレーションの影響について明らかにした。

2. 供試鋼板

今回、実験に供試した鋼板は、同じ化学成分のスラブ材をオーステナイト・フェライトの二相域で圧延する新制御圧延法において、2回行う制御圧延の温度域を変えてセパレーションの発生量を変化させた3種類

である。制御圧延温度域の概略を Fig. 1 に示す。A鋼は、実用化されている新制御圧延法 Type I と同様に、2回目の制御圧延を $A_{r3}$ 変態点付近までに終えた鋼板である。B鋼は、1回目の制御圧延を $A_{r3}$ 変態点直上で、2回目の制御圧延を二相域で行った鋼板である。C鋼は、2回の制御圧延とも二相域内で行った鋼板である。

Table 1 に使用する鋼板の化学成分と機械的性質を示す。これらの供試材は日本工業規格の低温压力容器用炭素鋼 (SLA33B) 相当の鋼板である。

3. 静的破壊靱性への影響

供試鋼板それぞれの圧延方向について COD 試験を行った。Fig. 2 に供試した試験片の形状を示す。

Fig. 3 に圧延方向の COD 試験結果を示す。この図から、セパレーション発生量の多い鋼板のほうが静的破壊靱性は優れていることがわかる。また、B鋼とC鋼の静的破壊靱性はあまり変わらない。

4. 動的破壊靱性への影響

供試鋼板それぞれの圧延方向および板厚方向について V-ノッチシャルピー衝撃試験を行った。Fig. 4 に供試した試験片の形状を示す。なお、板厚方向の試験片は供試鋼板の板表面にそれぞれ同種の鋼板を電子ビーム溶接して製作した。

Fig. 5 に圧延方向と板厚方向の V-ノッチシャルピー衝撃試験結果を示す。同図には、圧延方向の試験片破断面に発生したセパレーションから算出したセパ

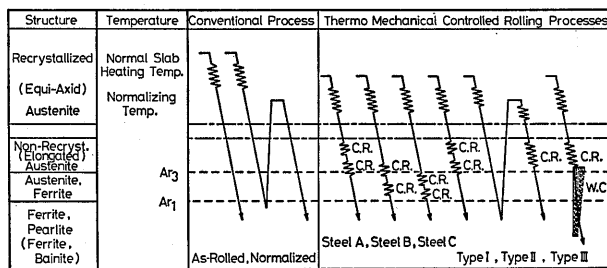


Fig. 1 Schematic diagrams of conventional process and thermo-mechanical controlled rolling process of 50kgf/mm<sup>2</sup>-class high-tensile steel plates

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

| Steel | Thick. (mm) | Chemical Compositions (%) |      |      |       |       |      |      |      |         |       | Mechanical Properties       |                             |         |
|-------|-------------|---------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|---------|-------|-----------------------------|-----------------------------|---------|
|       |             | C                         | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Sol. Al | Ceq** | Y.P. (kgf/mm <sup>2</sup> ) | T.S. (kgf/mm <sup>2</sup> ) | El. (%) |
| LT*   | A           | 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      |

\*: TMCP Type Low Temperature Application Steel (SLA33B Equivalent)

\*\*X: Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15

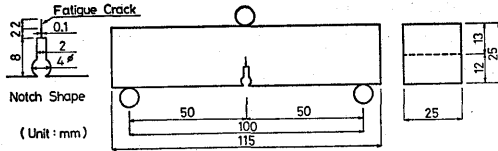


Fig. 2 Shape of COD test specimen

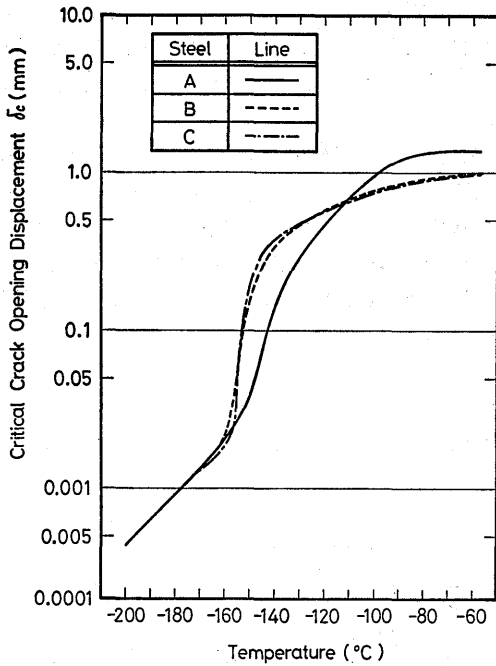


Fig. 3 Results of COD test

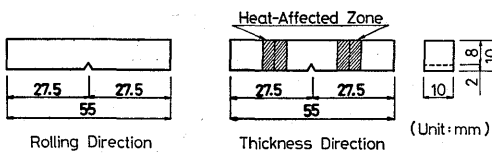


Fig. 4 Shape of V-notch Charpy test specimens

レーション指数 (SI) の分布も示してある。セパレーション指数 (SI) は一般的に使用されている定量的評価法であり、次式により求める。

$$SI = \sum l_i / A$$

ここに、 $l_i$ : 個々のセパレーションの長さ

A: 破断面の断面積

また、セパレーション指数 (SI) 分布の最大値がその鋼板の代表値として用いられている。今回、供試した鋼板の最大セパレーション指数 ( $SI_{max}$ ) と、その最大セパレーション指数発生温度は次のとおりである。

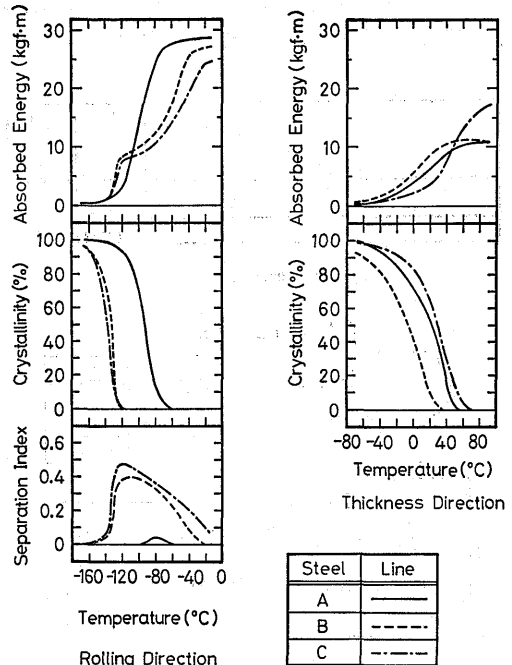


Fig. 5 Results of V-notch Charpy test

A鋼 : 0.04 (−80 °C)

B鋼 : 0.38 (−110 °C)

C鋼 : 0.48 (−120 °C)

これらの図から、セパレーション発生量の多い鋼板のほうが動的破壊靱性は優れていることがわかる。また、セパレーション発生量の多い鋼板のほうが最大吸収エネルギーは減少する。これが、セパレーションの発生が不安視される原因のひとつである。しかし、溶接構造用圧延鋼板に対する JIS の要求は、0 °Cにおける吸収エネルギーが 2.8kgf·m 以上であり、現在使用されている溶接構造用圧延鋼板の 0 °C における吸収エネルギーは 15~25kgf·m であるから、セパレーション発生による最大吸収エネルギーの減少は実用上問題とはならないと思われる。

セパレーション指数の分布は脆性破面率が 0 % となる温度で最大となる。セパレーション発生量が多くなると、セパレーション指数が最大値となる温度付近で吸収エネルギー曲線に棚ができ、この温度域では、セパレーション発生量の多い鋼板のほうが吸収エネルギーは高くなる。これは、主破面方向と板厚方向との靱性差がセパレーションが十分発達できる程大きく、しかも、主破面が形成される前にセパレーションが形成され、試験片が薄板の積層状態となるために板厚方向への変形が容易になって、衝撃力がより多く吸収されるためであると考えられる。

次に、供試鋼板の圧延方向について落重試験を行った。Fig. 6 に試験片形状と試験概要を示す。

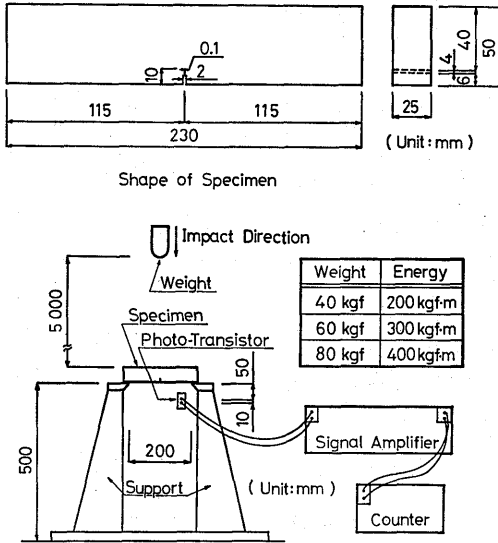


Fig. 6 Shape of drop weight test specimen and outline of testing method

試験は、重錘の重量を40, 60および80kgf と変えてそれぞれ5mの高さから自然落下させ、200, 300および400kgf·mの衝撃エネルギーを試験片に加えることにより行った。なお、試験片に取り付けた銅・コンスタントン熱電対により計測した衝撃直前の温度を試験温度とした。吸収エネルギーは、10mm 間隔で設置したフォト・トランジスターを通過する重錘の速度を計測し、試験片を置かないで空振りさせた場合の速度より算出した運動エネルギーと、試験片を破断した後の速度より算出した運動エネルギーとの差によって求めた。

Fig. 7 に、C鋼の衝撃エネルギーの違いによる落重試験の結果を示す。なお、衝撃エネルギーの異なる試験結果を比較するために、吸収エネルギーは空振りした場合の運動エネルギーで除した吸収エネルギー率で示してある。この図から、吸収エネルギー曲線は衝撃エネルギーが大きくなるほど高温側へ移動することがわかる。また、いずれの場合の衝撃力においても、吸収エネルギー曲線は120kgf·m付近に棚ができ、その棚の発生温度域は衝撃力が高いほど高温側へ移動

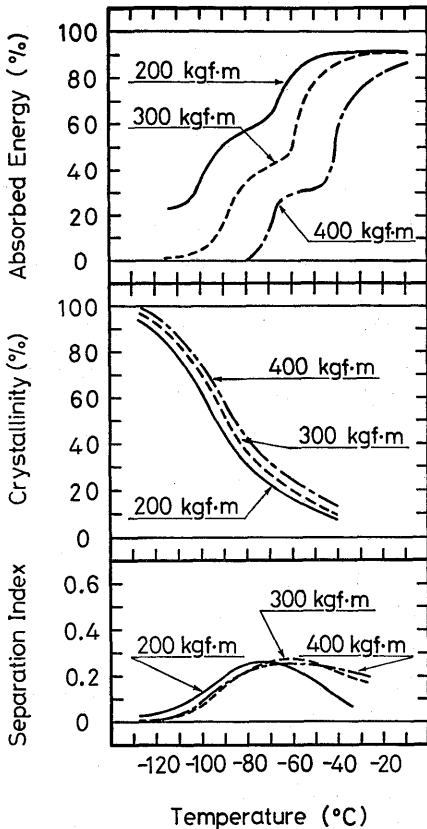


Fig. 7 Results of drop weight test (C steel)

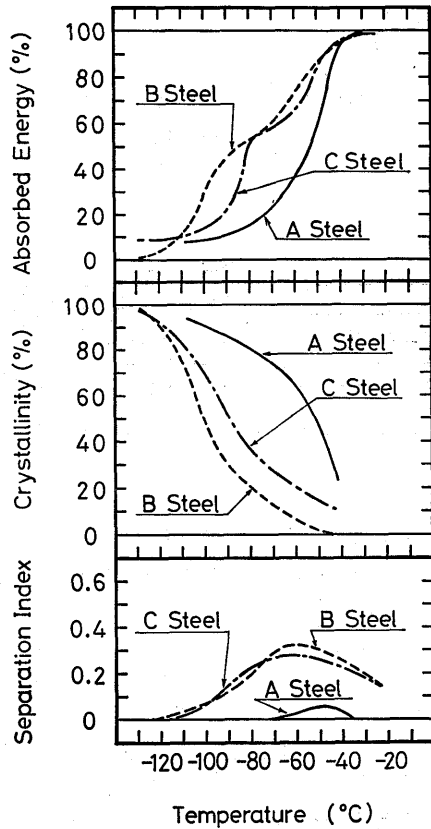


Fig. 8 Results of drop weight test (300kgf·m)

する。脆性破面率曲線も衝撃力が大きくなるほど高温側へ移動するが、その移動幅は吸収エネルギー曲線の移動幅よりもかなり小さい。衝撃力が大きくなると、最大セパレーション指数発生温度よりも高温域においてセパレーション指数は増加し、最大セパレーション指数の発生温度は高温側へ移動する。ところが、最大セパレーション指数はほとんど変わらず、その値はシャルピー衝撃試験の結果より小さい。

Fig. 8 に衝撃エネルギー 300kgf・m を与えた場合の供試鋼板それぞれの試験結果を示す。シャルピー衝撃試験においてはC鋼のほうがB鋼よりセパレーション指数は大きくなり、脆性破面率曲線は低温側にあるが、この図より、落重試験ではセパレーションが多く発生したB鋼のほうがC鋼よりも脆性破面率曲線は低温側にあることがわかる。B鋼およびC鋼の吸収エネルギー曲線にはそれぞれの最大セパレーション指数となる温度域付近に棚が発生している。また、落重試験においては、セパレーション指数が大きくなると吸収エネルギー曲線は低温側へ移動しており、 $-120^{\circ}\text{C}$  付近を除いてセパレーション指数が大きくなると吸収エネルギー曲線は高温側へ移動するというシャルピー衝撃試験の結果と相反している。これは、シャルピー衝撃試験と落重試験の衝撃条件の違いにより、シャルピー衝撃試験では $-120^{\circ}\text{C}$  付近に発生した曲線の逆転域が落重試験においては試験温度の全域に渡って現われているものと考えられる。

5. 疲労強度への影響

供試鋼板の圧延方向と板厚方向について完全片振り引張疲労試験を行った。Fig. 9 に供試した試験片の形状を示す。なお、板厚方向の試験片は、供試鋼板の板表面にそれぞれ同種の鋼板を電子ビーム溶接して製作し、圧延方向と板厚方向の結果を比較するために同じ秒時計形試験片を供試した。

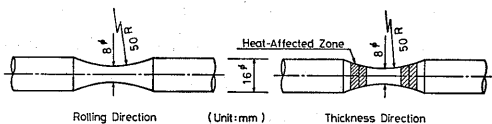


Fig. 9 Shape of fatigue test specimens

試験の結果、試験片の疲労破面には、セパレーションの発生は認められなかった。Fig. 10 に圧延方向の疲労試験結果を、Fig. 11 に板厚方向の試験結果を示す。同図の縦軸は引張強さが異なる鋼板を同じ図上で比較するために、公称応力範囲 ( $\sigma_R$ ) をそれぞれの母材の引張強さ ( $\sigma_B$ ) で除して求めた無次元応力範囲 ( $\sigma_R/\sigma_B$ ) で示してある。これらの図より、試験片の

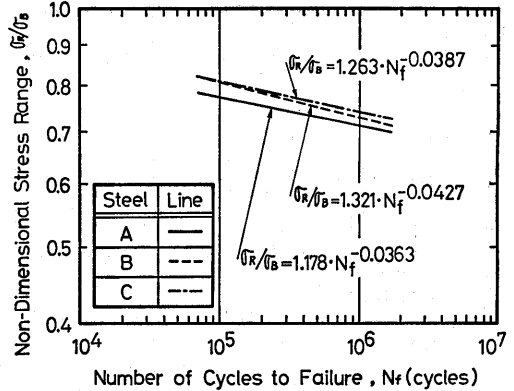


Fig. 10 S- $N_f$  ( $\sigma_R/\sigma_B-N_f$ ) curve of rolling direction

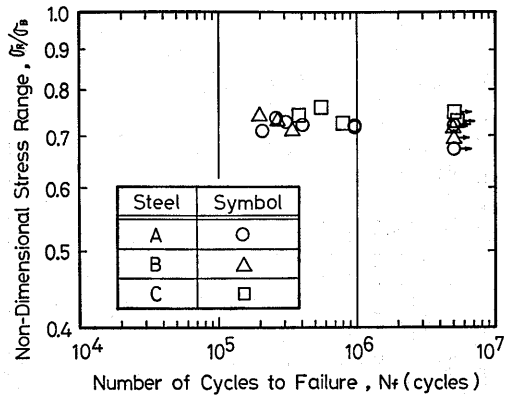


Fig. 11 Results of fatigue test for thickness direction

疲労破面にセパレーションの発生は認められないにもかかわらず、セパレーション指数の大きい鋼板のほうが圧延方向の疲労寿命は長くなることがわかる。また、板厚方向の疲労試験では、試験した無次元応力範囲 (0.69~0.75) において20万回~100万回での破断、500万回以上での未破断という結果が同じ応力レベルで現われているが、セパレーション指数の大きさの違いによる差はほとんど見られず、しかも、その応力レベルは圧延方向の疲労強度と比較してもあまり変わらなかった。

さらに、供試した圧延方向疲労試験片の圧延面に平行なフェライト・パーライト層と疲労亀裂進展方向のなす角度 ( $\theta$ ) が疲労寿命におよぼす影響について調べた。この結果より、 $\theta$  が0度となるように修正した結果を Fig. 12 に示す。Fig. 13 には、供試鋼板それぞれについて、 $\theta$  が0度から90度まで変化した場合に  $\sigma_R/\sigma_B-N_f$  線図が移動する領域を示してある。これらの結果によっても、セパレーション指数の大きい鋼板ほど圧延方向疲労寿命は長くなり、疲労亀裂進展方

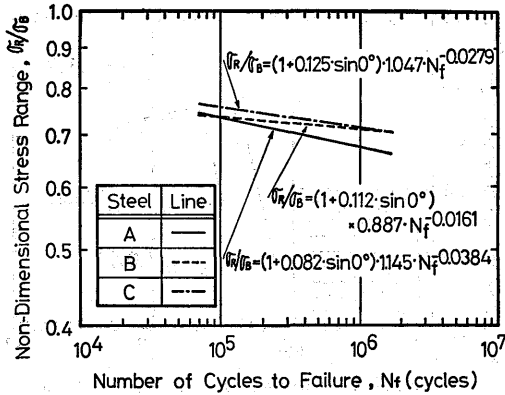


Fig. 12 Corrected  $S-N_f$  ( $\sigma_R/\sigma_B-N_f$ ) curve of rolling direction

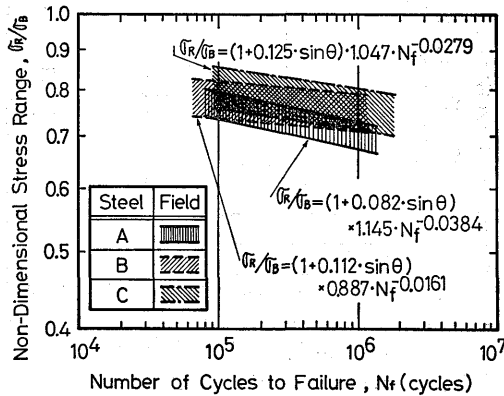


Fig. 13 Assumed range for  $S-N_f$  ( $\sigma_R/\sigma_B-N_f$ ) curve of rolling direction

向の影響も大きくなることわかる。

次に、圧延方向疲労試験におけるフェライト・パーライト層と疲労亀裂進展方向のなす角度 ( $\theta$ ) に関する修正項を含んだ  $\sigma_R/\sigma_B$  と  $N_f$  の関係式を、それぞれの供試鋼板について示す。

$$\text{A鋼: } \sigma_R/\sigma_B = (1 + 0.082 \sin \theta) \cdot 1.145 N_f^{-0.0384} \quad (1)$$

$$\text{B鋼: } \sigma_R/\sigma_B = (1 + 0.112 \sin \theta) \cdot 0.887 N_f^{-0.0161} \quad (2)$$

$$\text{C鋼: } \sigma_R/\sigma_B = (1 + 0.125 \sin \theta) \cdot 1.047 N_f^{-0.0279} \quad (3)$$

ここに、各式の  $(1 + \kappa \cdot \sin \theta)$  が  $\theta$  を考慮した項である。 $\theta$  は、実際の試験において疲労亀裂が進展した方向を表し、 $\kappa$  は、疲労亀裂進展方向によって亀裂の進展が遅延することを考慮した疲労亀裂進展抵抗係数である。

## 6. おわりに

同一化学成分のスラブ材で、セパレーション発生量を変えた3種の新制御圧延鋼を使用し、破壊靱性および疲労強度におよぼす影響について調査した。

得られた結果は以下のとおりである。

- 1) セパレーションが多く発生する温度域で限界開口変位は増加し、静的破壊靱性は向上する。
- 2) セパレーションが多く発生すると、脆性破面率により判断される動的破壊靱性は向上する。
- 3) 衝撃力の大きさによってセパレーションの発生量は変わり、その最大値の発生温度も移動する。
- 4) 試験片の疲労破面にセパレーションの発生は認められないにもかかわらず、セパレーション指数が大きい鋼板ほど圧延方向の疲労寿命は長くなる。
- 5) 同じ供試鋼板においても、疲労亀裂進展方向と、フェライト・パーライト層とのなす角度によって圧延方向の寿命は変わり、セパレーション指数が大きい鋼板ほどその影響は大きい。
- 6) 板厚方向の疲労強度には、セパレーション指数の相違による影響はほとんど認められない。

なお、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 ( $\theta$ ) が圧延方向の疲労寿命におよぼす影響を考慮する目的で、疲労亀裂進展抵抗係数 ( $\kappa$ ) を提案し、この  $\kappa$  と  $\theta$  による修正項を有する無次元応力範囲と疲労寿命との関係式を示した。

最後に、卒業研究として実験に協力された本学卒業生前田穂積、湯浅幸嗣両氏に、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば
  - 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報告書、研究資料 No. 367 (昭58. 3)
  - 日本造船学会：新しい製造法による鋼材 (TMCP鋼) の溶接構造物への適用に関するシンポジウムテキスト (昭58. 11)
  - 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、64 (1978) 6
  - 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、69 (1983) 9
- 2) 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、西部造船学会会報、第69号 (昭60. 3)