

# 金属組織制御による鋼材の疲労き裂進展特性の改善 —疲労特性に優れた船体用鋼板の開発 第1報—

住友金属 ○菅田登 有持和茂 藤原知哉 永吉明彦 稲見彰則  
姫路工大 山下正人 内田仁 長崎総科大 矢島浩

## 1 緒言

船殻構造のような複雑な溶接構造物の疲労き裂問題における特徴として、溶接部で発生した疲労き裂が、比較的長いき裂寸法に成長するまで発見され難い場合が考えられることが挙げられる。このような疲労き裂問題に対し、構造設計の段階において、危険部での応力低減が行われてきている。本研究は船殻構造の疲労寿命延伸を、応力低減だけでなく、材料の疲労き裂進展抵抗性を増すことにより達成することを最終目的としている。特に、微視組織の影響が既に指摘されているき裂進展下限領域ではなく、疲労き裂進展速度が Erdogan-Paris 式で近似できるいわゆる第IIb 領域で、疲労き裂進展速度に及ぼす鋼材組織の影響を検討している。その結果、第IIb 領域でも疲労き裂進展速度に及ぼす鋼材組織の影響は認められ、疲労き裂進展抵抗性に関し適した組織を見出した。また、そのような組織を有する鋼材が疲労き裂進展抵抗性に優れた機構についても考察した。

## 2 疲労き裂進展試験方法

**2.1 供試材** 供試した材料は、板厚25mmの開発鋼と従来船級規格 KA36 鋼である。開発鋼はフェライト相とベイトン相からなる結晶粒の細かな二相組織鋼で、従来鋼はフェライト・パーライト鋼である。化学成分および機械的性質を Table1, Table2 に示す。

Table 1 Chemical composition of materials tested

	C	Si	Mn	Ceq	Pcm
Developed steel	0.06	0.44	1.51	0.35	0.16
KA36	0.15	0.18	1.01	0.34	0.21

Table 2 Mechanical properties of materials (L-d)

	YS(MPa)	TS(MPa)	vTrs(°C)
Developed steel	474	595	-90
KA36	381	516	-64

**2.2 試験片** 疲労き裂進展試験には W が 50mm の CT 試験片を用いた。

**2.3 試験条件** 疲労き裂進展試験はすべて室温大気中で実施した。繰返し速度は 15Hz 前後であり、適当な繰返し毎に試験片を取外し、金属顕微鏡にて疲労き裂成長量を測定した。

## 3 試験結果

開発鋼と従来鋼の疲労き裂進展試験結果を Fig.1 に示す。

Fig.1 より  $\Delta K$  の広い領域にわたり、開発鋼の進展速度は従来鋼に比べ抑制されているのが判る。 $\Delta K$  の小さな領域では速度の相違が大きくなる傾向にあり、実構造物の疲労寿命延伸に開発鋼が効果的に寄与できる可能性を示唆している。なお、

Fig.1には材料学会(77年集1)における KA36 鋼の進展速度も併せて示すが、今回供試した従来鋼の結果とよく対応している。

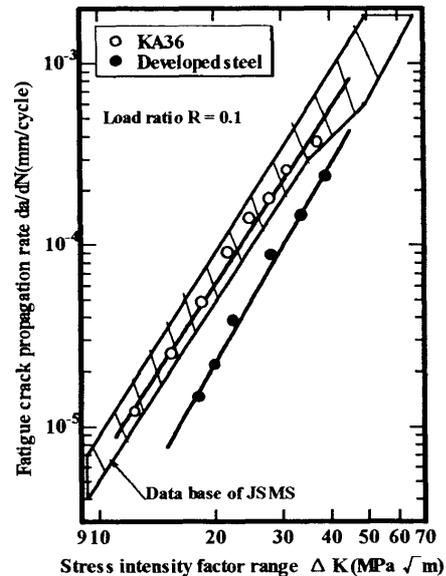


Fig.1 Fatigue crack propagation test results

## 4 考察

**4.1 相境界における疲労き裂進展速度の抑制** 開発鋼の疲労き裂進展挙動の観察から、フェライト相とベイトン相の相境界で疲労き裂進展速度が抑制される現象を見出した。その挙動をより定量的に評価するためフェライト単相とベイトン単相の鋼板を積層させた材料を準備し、 $\Delta K 25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  一定条件で疲労き裂を接合界面に垂直に進展させた。

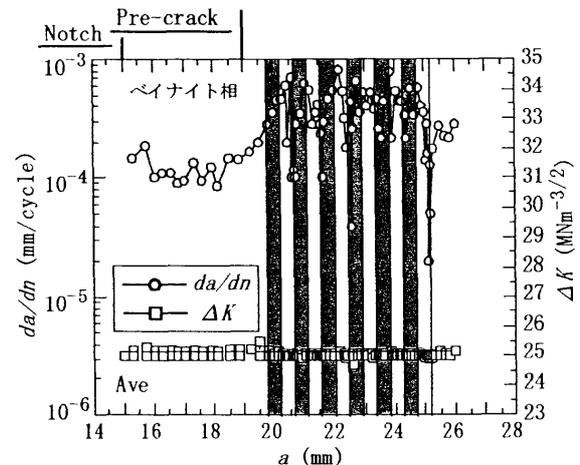


Fig.2 Fatigue crack propagation test result of clad material

Fig.2には疲労き裂の位置と速度を示す。フェライト相からベイトン相へ進展する時に速度が大きく抑制されているのが判る。ベイトン相からフェライト相へ進展する時にわずかに加速しているも

のの全体として、各単相材の進展速度より抑制されている。なお、低硬度材から高硬度材への進展で速度が低下することは向井ら2)によって報告されている。

**4.2 繰返しひずみに伴う応力変化** 開発鋼ではき裂近傍の硬度が母材硬度に比べ低下する現象が認められた。そこで、正負交番ひずみを材料に与えた時の材料応答、すなわち繰返し軟化・硬化特性について開発鋼と従来鋼を比較した。その結果、最大ひずみが $\pm 1.2\%$ のインクリメンタルステップ波形を12Block 負荷した前後の、ひずみ $+1.2\%$ での応力変化はTable3に示すように、開発鋼と従来鋼では大きな相違が認められた。

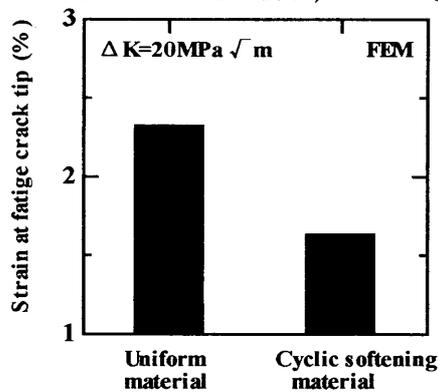
**Table 3** Cyclic softening test results

	$\sigma 1(\text{MPa})$	$\sigma 15(\text{MPa})$	$\sigma 15/\sigma 1$
Developed steel	538	479	0.885
KA36	403	411	1.02

繰返し軟化が疲労き裂進展特性に及ぼす影響を、き裂の駆動力と進展に対する抵抗の両面から検討した。

**(1) き裂先端の応力ひずみ挙動に及ぼす繰返し軟化の影響**

疲労き裂の周囲が繰返しにより軟化した材料に覆われていると仮定して、き裂周辺の応力ひずみ関係の応力値を母材の80%に減じた材料を想定して有限要素解析(ABAQUS Ver.5-7)を行った。応力拡大係数が $22.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となる負荷条件でのき裂先端におけるひずみ値はFig.3に示すように、均質材のひずみより小さなことが判明した。これより、同じ外力を受けてもき裂先端のひずみが小さく、き裂進展の駆動力として有利と考えられる。なお、き裂先端の狭い領域のひずみ量によって進展が支配されていることが指摘3)されている。



**Fig.3** Fatigue crack propagation test results

**(2) 予ひずみによる破壊抵抗変化に及ぼす繰返し軟化の影響**

鉄鋼材料を室温大気中で疲労試験に供した場合、疲労き裂進展面には通常延性スライエーションが形成される。この延性スライエーションは繰返し荷重に対応して形成され、延性的な破壊の痕跡である。つまり、疲労き裂進展挙動は繰返し延性破壊と見なすことができる。疲労き裂進展速度とは繰返し荷重毎に発生する延性破壊量に相当する。

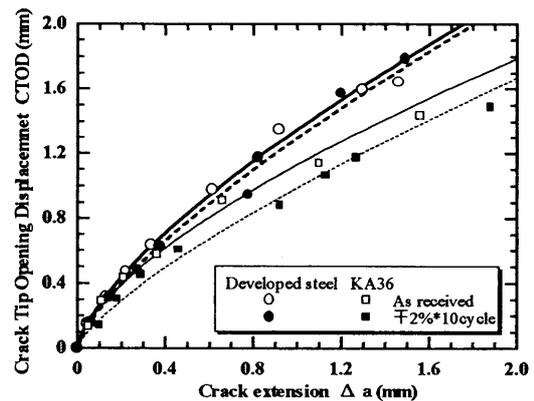
なお、疲労き裂を有する材料に外力が負荷されると、き裂先端部には繰返し塑性域が形成される。疲労き裂進展における材料特性としては、受け入れままの材料ではなく、繰返し予ひずみを受けた後の材料特性が重要である。つまり、疲労

き裂進展速度は、予ひずみを受けた後の安定破壊抵抗曲線、R 曲線、が影響していると考えられる。

そこで、圧縮側に2%の予ひずみを加えた後、引張側に2%変形させ、残留変形がなくなる荷重履歴を1cycle と数え、これを10cycle 付与した後のR 曲線を測定した。予ひずみを受けない状態でのR 曲線とともにFig.4に示す。

Fig.4より、予ひずみ有無のいずれの場合にも、開発鋼の安定破壊抵抗は従来鋼より高いことが判る。特に、従来鋼では予ひずみによって破壊抵抗が大幅に低下するのに対し、開発鋼では予ひずみによる劣化が小さい。

Seokら4)は予ひずみ後の破壊抵抗低下を材料の効果現象から説明している。開発鋼において、予ひずみによる劣化が少ないのは繰返し軟化特性に関係していると思われる。



**Fig.4** Comparison of R-curve for both as-received materials and strained materials

## 5 結 言

船体構造の疲労寿命を材料面から向上すべく、疲労き裂進展抵抗性の優れた鋼材を開発した。開発鋼の疲労き裂進展速度を従来鋼と比較するとともに、疲労き裂進展抑制機構を考察した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 化学成分、機械的性質など日本海事協会船級規格を満足し、かつ疲労き裂進展速度を抑制し得る鋼板を、フェライト・ベイライトの二相組織を最適に制御することにより実現できた。
- (2) 疲労き裂進展速度の抑制機構を考察し、相境界での抑制効果、繰返し軟化によるき裂開口抑制効果、繰返し軟化による予ひずみ後延性破壊抵抗の低下抑制効果の三つが疲労き裂進展速度の抑制に寄与していると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本材料学会編：金属材料疲労き裂進展抵抗データ集、Vol.1(1983)
- 2) 向井喜彦、西村新：溶接学会誌、Vol.51、No.11(1982)、pp.903-908.
- 3) 大路清嗣、小倉敬二、大久保好二：日本機械学会論文集(第1部)、Vol.42、No.355(1976)、pp.643-648.
- 4) Chang-Sung Seok et al：Trans. Int. Conf. Struct. Mech. React. Technol. 15<sup>th</sup>, Vol.5(1999)、pp. V.487-V.494.