

鋼材組織による溶接構造物の疲労寿命改善

—— 疲労特性に優れた船体用鋼板の開発 第3報 ——

正員 誉田 登^{*1} 正員 有持和茂^{*1} 正員 廣田一博^{*2} 正員 渡邊栄一^{*2}
 正員 多田益男^{*2} 正員 福井 努^{*3} 正員 北田博重^{*3} 正員 山本元道^{*4}
 正員 高 允宝^{*5} 正員 矢島 浩^{*5}

Improvement on Fatigue Fracture Life of Welded Structures by Micro-structure in Steels
 --- Research on Extension of Fatigue Life of Ship Structure Part 3 ---

by Noboru Konda, *Member* Kazushige Arimochi, *Member* Kazuhiro Hirota, *Member*
 Eiichi Watanabe, *Member* Masuo Tada, *Member* Tsutomu Fukui, *Member*
 Hiroshige Kitada, *Member* Motomichi Yamamoto, *Member*
 Yunbo Kho, *Member* Hiroshi Yajima, *Member*

Summary

It is clear that detection of fatigue crack initiation in complex welded structures like hulls is quite difficult, and that the crack length at recognition is mostly long compared to that in mechanical parts. From these facts, not only stress reduction at critical area by design improvement, but also newly developed steels excellent for fatigue crack propagation resistance are desirable for structural integrity. Newly developed structural steel FCA, in which fatigue crack propagation resistance was controlled by metallic microstructures, was introduced in the part one within a series of our research. Various fatigue properties of FCA in air and in synthetic sea water were reported in the part two. As the continuous research after these two papers, fatigue properties of various welded joints with FCA are compared with those with conventional steel. From these experimental results, it can be clarified that the fatigue life extension effect by FCA is observed also in welded joint specimens and welded structural models as the same as FAC itself.

1. 緒 言

船殻構造の強度健全性を向上させるために、今までに
 広い技術領域において絶間ない検討が進められており、

その成果には多大なものがある。これらの検討の中で、
 疲労破壊防止は今日においても極めて重要な課題のひ
 とつである。疲労破壊防止の主な柱は、危険部位で発生
 する変動応力をいかに抑制するかという観点で行われ
 てきた。

それに対し、著者らは「疲労特性に優れた船体用鋼板
 の開発 第1報」¹⁾において、疲労破壊防止を材料面か
 ら改善し得ることを提言した。すなわち、適切に制御さ
 れた金属組織では大気中の疲労き裂進展速度を抑制で
 きる旨を、その改善メカニズムとともに紹介した。また前報
²⁾においては、この疲労き裂進展抵抗性に優れた鋼材の
 大気中および人工海水中の疲労強度、ならびに人工海水
 中の疲労き裂進展特性を評価し、いずれも優れた特性を
 示すことを報告している。

*1 住友金属工業株式会社

*2 三菱重工業株式会社

*3 日本海事協会

*4 広島大学大学院工学研究科

*5 長崎総合科学大学工学部

原稿受付 平成15年9月26日

ところで、疲労特性に優れた鋼板も船殻部材として適用された場合には、従来鋼板と同様、切断加工や溶接施工が行われる。そのため、切断加工面を起点とする疲労特性や、溶接継手の疲労特性なども評価しておく必要がある。

本報告では開発鋼を溶接構造物に適用した場合における疲労寿命改善効果を検討した。具体的には小型継手として突合せ継手、ガセット継手を、また大型溶接構造モデル試験体として広幅片側ガセット継手、サイドロジモデル試験体を取上げ疲労特性を評価した。これにより、鋼板母材の疲労特性の改善によって、溶接部を起点とする構造物の疲労寿命をどの程度延伸できるかを実験により明らかにする。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は降伏応力 350MPa 級の Steel A~F の計 6 種類であり、各供試鋼板の化学成分、機械的性質をそれぞれ Table 1, Table 2 に示す。Steel A~C³⁾および Steel F は従来鋼、Steel D および E は疲労き裂進展特性に優れた新たに開発^{1),2)}したフェライト/バライト二相鋼板である。

Table 1 Chemical compositions of materials tested (mass%)

Steel	C	Si	Mn	Ceq	Remarks
A	0.15	0.17	0.99	0.32	Conventional
B	0.18	0.28	1.23	0.40	Conventional
C	0.10	0.23	1.34	0.33	Conventional
D	0.06	0.44	1.55	0.37	Developed
E	0.06	0.44	1.55	0.37	Developed
F	0.09	0.23	1.46	0.35	Conventional

Table 2 Mechanical properties of materials tested (L-direction)

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	Plate thickness (mm)
A	352	477	12
B	378	524	12
C	395	489	12
D	491	590	25
E	476	579	25
F	476	535	25

2.2 プラズマ切断条件

船舶をはじめとする大型構造物用鋼板の切断法に広く用いられ始めているプラズマ切断法を取上げ、プラズマ切

断面を起点とする疲労特性を評価した。プラズマ切断法は従来のガス切断法に比べ、切断速度が約 5 倍と速く、かつランニングコストも低いという利点^{4)~7)}がある。他方、プラズマ切断面を破壊起点とする疲労強度は、機械加工面を起点とする疲労強度に比べ著しく低下する場合のあることが矢島らの研究¹⁰⁾によって解明されている。

本検討でのプラズマ切断は、電流 240A、電圧 139V で、切断速度は直線部 2380mm/min、曲線部 2750mm/min の条件で施工した。電極はHFC100で、アシタガスとして酸素を使用した。

2.3 溶接条件

溶接継手、溶接構造モデルの溶接条件を Table 3 に示す。

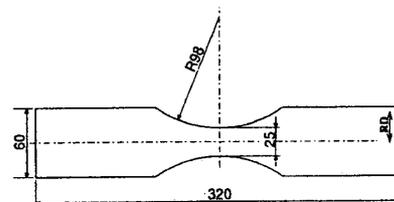
Table 3 Welding conditions

CO2 gas shield arc welding	
Wire	DW-100 (φ 1.4mm)
Current	270 A
Voltage	28 V
Speed	30 cm/min
Gas rate	25 L/min
Leg length	6 ~ 8 mm

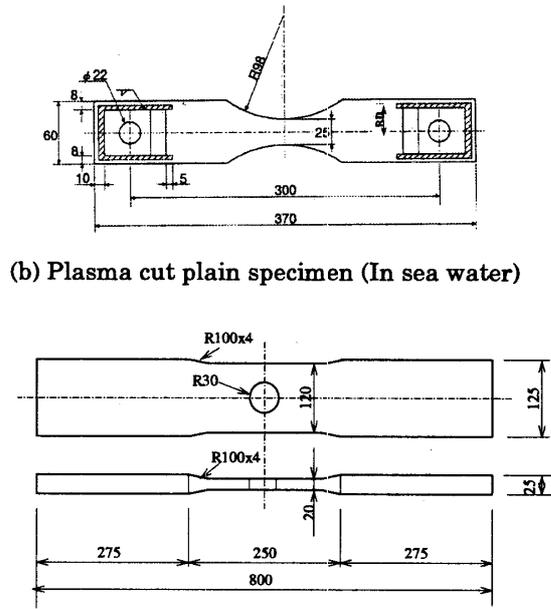
2.4 試験片

プラズマ切断面の疲労試験には Fig.1(a)および(b)に示す試験片を用いた。これらの試験片の最小断面部の応力集中係数 K_t は Peterson 線図¹¹⁾より 1.1 であった。また、Fig.1(c)に示すようにプラズマ切断による円孔切欠き材も準備し応力集中部を起点とする疲労特性も検討した。

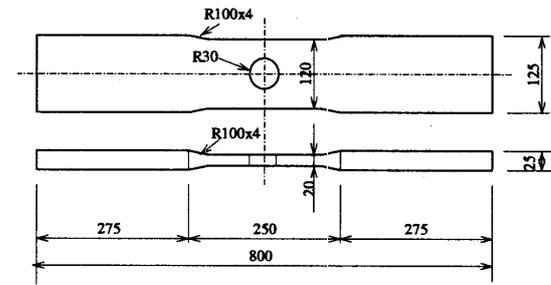
突合せ継手、ガセット継手、広幅片側ガセット継手とサイドロジモデル試験体の形状・寸法を同じく Fig.1(d)から(g)に示す。広幅片側ガセット継手には Fig.1(f)に示すように、疲労き裂の起点となるように機械加工切欠きを設けている。なお、サイドロジモデル試験体の形状は造船研究協会第 220 研究部会(SR220)で採用された形状と同一である。



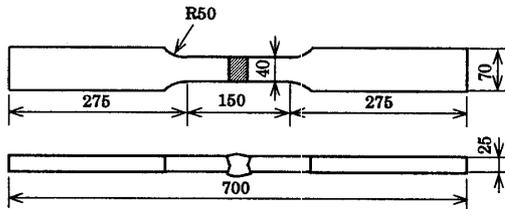
(a) Plasma cut plain specimen (In air)



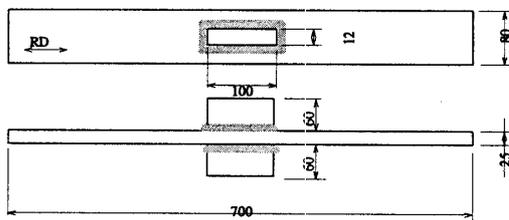
(b) Plasma cut plain specimen (In sea water)



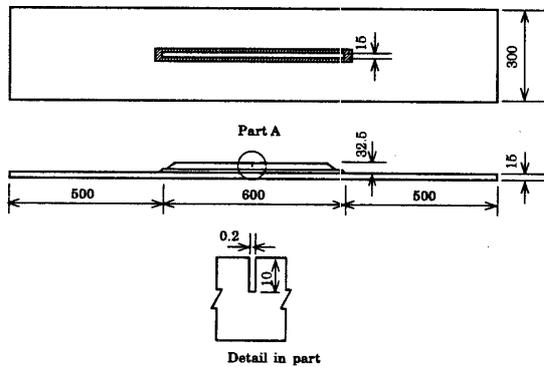
(c) Plasma cut notched specimen



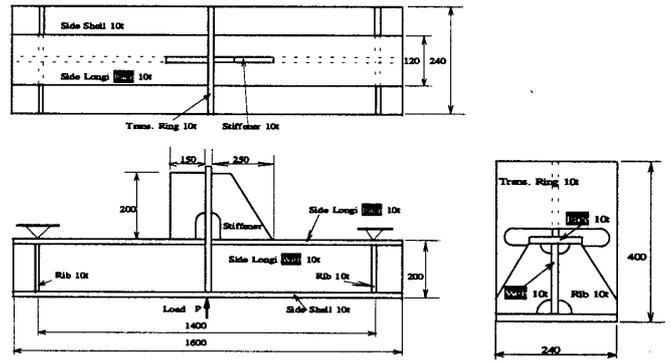
(d) Butt welded joints



(e) Gusset welded joints



(f) One side wide gusset welded joints



(g) Side longitudinal stiffener type structural welded model

Fig. 1 Size and shape of test specimens

2.5 疲労試験方法

プラズマ切断部を起点とする疲労試験は、大気中および人工海水中にて実施した。両環境とも荷重比は0.1であり、繰返し速度は大気中では約5Hz、人工海水中では0.17Hzとしている。

溶接継手の疲労試験はすべて室温大気中で実施し、荷重比は0.1とした。突合せ継手、ガセット継手では最大変位が初期値に対し1mm増した時を破断寿命と定義した。なお、突合せ継手、ガセット継手とも最大変位が1mm増大した時点では、疲労き裂の投影面積が断面の約80%以上を占める程度まで進展していた。また、広幅片側ガセット継手、サイドロングリナル試験体では疲労き裂長さを定期的に観察し、き裂が主板あるいはフェース材の全幅に達した時を破断寿命とした。

3. 実験結果

3.1 プラズマ切断材の大気中疲労試験結果

プラズマ切断面を起点とする大気中疲労試験結果をFig.2に示す。プラズマ切断面における疲労強度を鋼材間で比較すると、開発鋼のSteel Dの疲労強度が最も高かった。

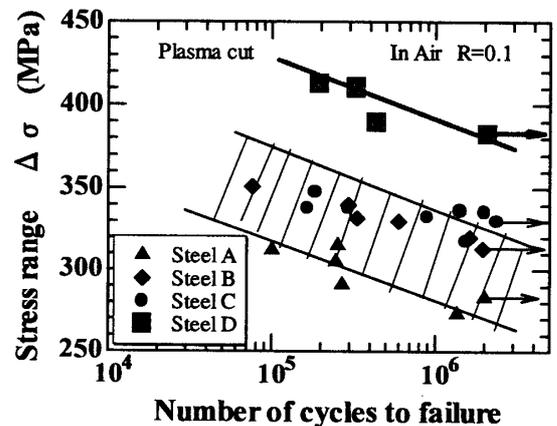


Fig. 2 Fatigue test results of plain specimens in air

Fig.3 には「ラス」マ切断で円孔切欠きを設けた場合の疲労試験結果を示す。切欠き材においても開発鋼の Steel E は従来鋼の Steel F に比べ疲労特性にすぐれていることが判明した。

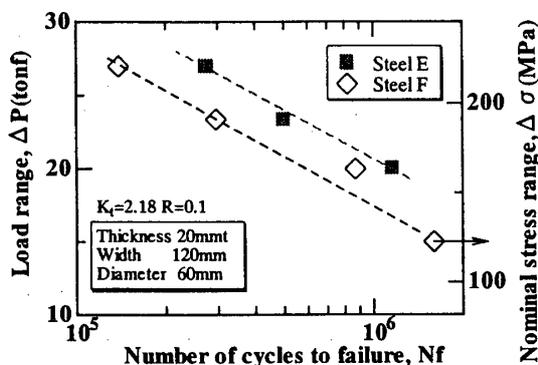


Fig. 3 Fatigue test results of circular notched specimens in air

3.2 「ラス」マ切断材の人工海水中での疲労試験結果

人工海水中における「ラス」マ切断面を起点とする疲労試験結果を Fig.4 に示す。

「ラス」マ切断面の疲労強度は、Steel A~C でほとんど相違が見られなかったが、開発鋼 Steel D はこれら従来鋼より高強度であることが示唆される。

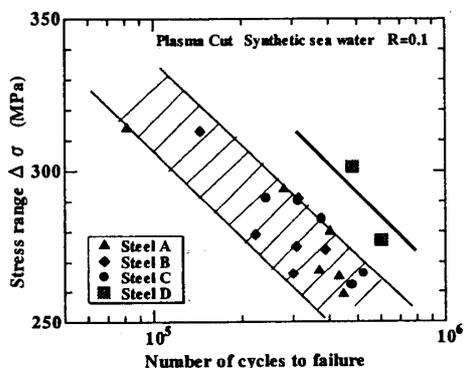


Fig. 4 Fatigue test results in synthetic sea water

3.3 小型溶接継手の疲労試験結果

疲労特性に優れる開発鋼を用いた溶接継手の疲労強度を従来鋼のそれと比較する。

Fig.5 には突合せ継手の疲労試験結果を示す。開発鋼 Steel D の継手疲労強度は従来鋼の「ゲ」マンド」の上位に位置しているのが判る。

次に、Fig.6 には「ガ」セット継手の疲労試験結果を示す。この継手形式では開発鋼 Steel E と従来鋼 Steel F で有意な相違は認められなかった。

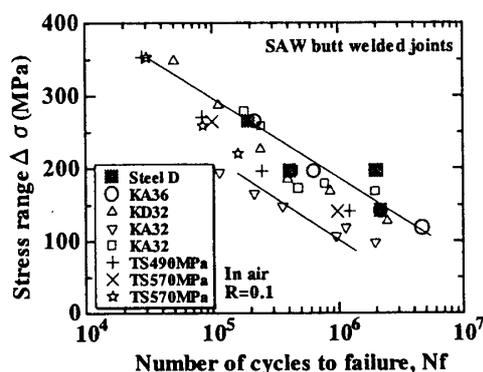


Fig.5 Fatigue test results of butt welded joints

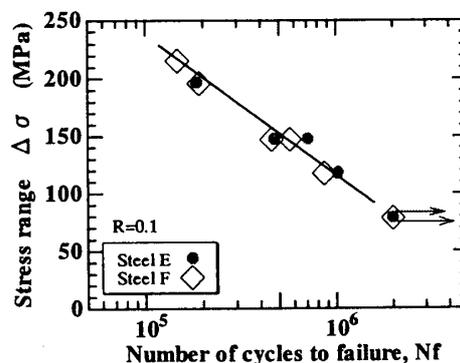


Fig.6 Fatigue test results of gusset welded joints

3.4 大型溶接継手の疲労試験結果

広幅片側「ガ」セット継手の疲労き裂成長曲線の測定結果を Fig.7 に示す。本試験では供試材にかかわらず切欠き先端から発生した疲労き裂は主板の板厚方向に進展した後、幅方向に進展していた。全幅まで進展するのに要する寿命を破断寿命として表したSN曲線を Fig.8 に示す。開発鋼 Steel E は従来鋼 Steel F に比べ破断寿命が大きく改善しているのが判る。また、Fig.9 には両鋼の破面を比較している。ほぼ等しいき裂増分毎に導入した「ベ」チマ」クより、き裂進展時のき裂形状は開発鋼と従来鋼で違いがないことが確認できる。

サイドロジック」試験では Fig.10 に模式的に示すように、廻し溶接余盛り止端から疲労き裂が発生し、7E」ス材の板厚、幅方向に疲労き裂が進展した。7E」ス材の板厚貫通後は疲労き裂進展速度は著しく増加した。Fig.11 には疲労き裂成長曲線の測定例を、また Fig.12 には全幅まで進展するのに要する寿命を破断寿命として表した試験荷重と寿命との関係、SN曲線を示す。

本試験からも鋼板母材の疲労特性を改善することにより、溶接構造物の疲労寿命を顕著に改善できることが明らかとなった。

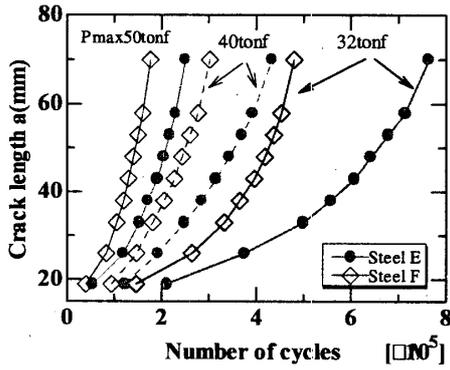


Fig. 7 Fatigue crack propagation behavior of one side wide gusset welded joints

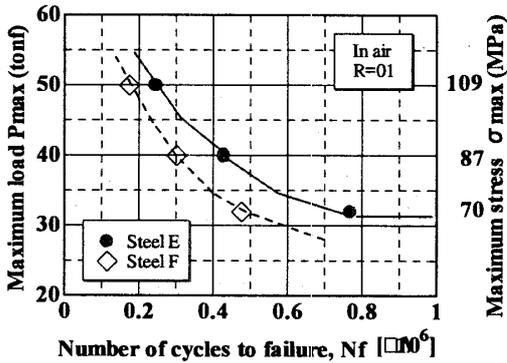


Fig. 8 Fatigue test results of one side wide gusset welded joints

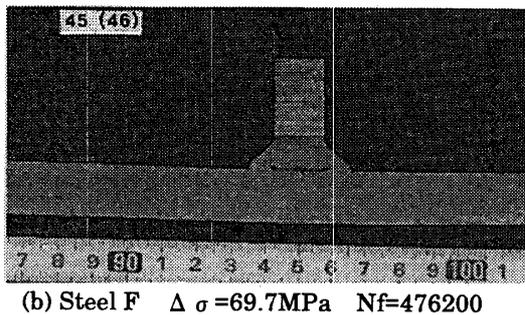
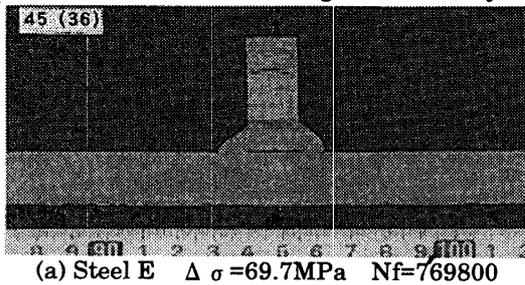


Fig. 9 Fatigue fracture surface of wide gusset welded joints

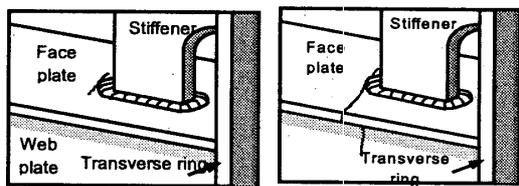


Fig. 10 Schematic diagram of fatigue crack initiation and propagation from welded toe

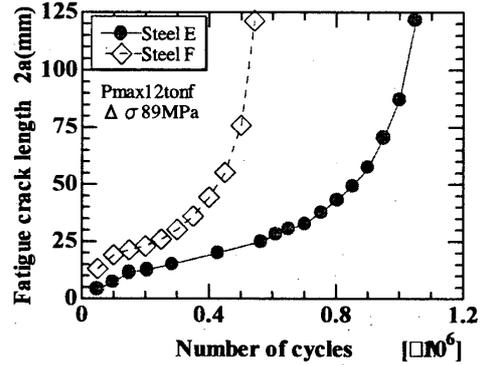


Fig. 11 Examples of measurement in fatigue crack propagation behavior in structural models

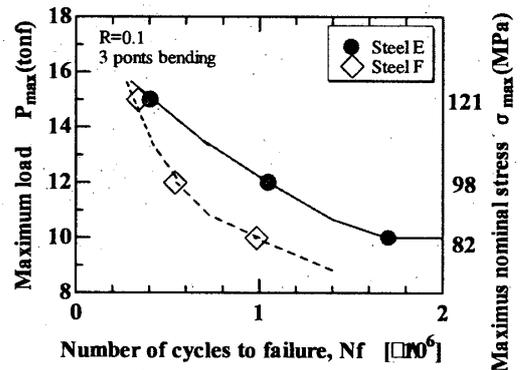


Fig. 12 Fatigue test results of structural models

4. 考察

4.1 プラズマ切断面を起点とする疲労特性

プラズマ切断面における疲労強度が機械加工面に比べ低下する理由に関して既に検討されており³⁾、切断部の組織・残留応力や、切断面の微細な凹凸による局所的な応力集中が影響していると考えられている。この内、切断部の組織は鋼材の成分や組織に依存する。

プラズマ切断部の材料特性を把握すべく金属組織を観察するとともに、硬度分布を測定した。

板厚中央部での金属組織の観察例を Fig. 13 に示す。Steel A では切断面から約 0.45mm の範囲で金属組織の変化が見られ、別途観察した結果、切断面から約 0.13mm の範囲は焼入れされマルテンサイトやベイナイト組織となっていた。Steel B~Steel D に対しても同様にこれらの領域を測定した。

次に、マイクロハース硬度計を用いて、押付け荷重 300gf (2.9N) で切断面から母材の方向に硬度分布を測定した。なお、端面からの硬度分布測定では表面にニッケルめっきを施してから樹脂に埋込み測定精度を高めている。測定位置は組織観察と同じく板厚中央部である。Fig. 14 に硬度分布を示すように、いずれの材料においてもプラズマ切断面に近づくほど急峻に硬度が高くなる傾向にあった。その中で、開発鋼 Steel D は切断面近傍の硬度が比較的低く、硬化深さが深くなっている点に特徴がある。

これら材料特性と DI 値と言われる焼入れ性指数¹²⁾とを比較すると、Table 4 に示すように、DI 値が高い材料ほど硬相領域が広くなり、かつ表層の最高硬度も高くなる傾向が認められた。

以上より、開発鋼 Steel D のプラズマ切断部の疲労強度が優れているのは、まず、疲労き裂が熱影響部を過ぎた母材部での疲労き裂進展抑制効果によるものと考えられる。次に、Steel D では鋼材成分系(DI 値)に依存した焼入れ性による適切な硬度(強度)上昇による疲労き裂発生 の遅延効果も重畳していると思われる。

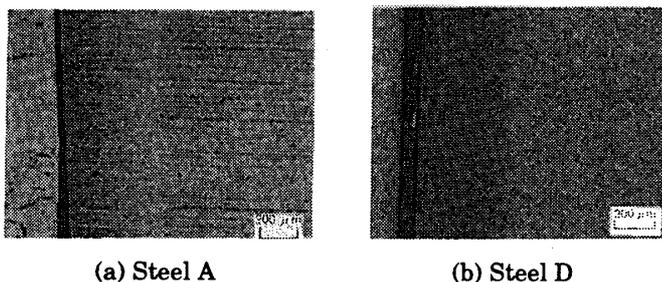


Fig. 13 Microstructure at cross section near plasma cut line

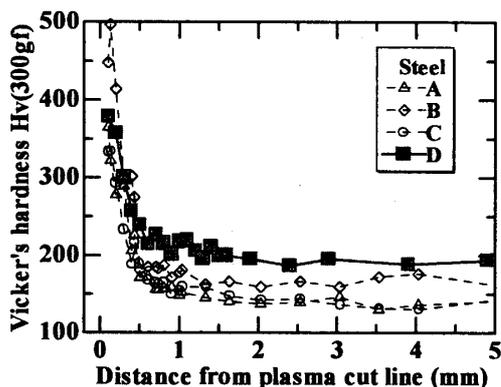


Fig. 14 Vicker's hardness distribution from plasma cut line

Table 4 Effect of DI on microstructure and hardness near plasma cut line

Steel	DI (mm)	Hardened area (mm)	Maximum Hv (300gf)
A	16.8	0.13	370
B	24.3	0.23	500
C	18.9	0.17	330
D	23.3	0.26	370

4.2 継手形式による疲労破壊挙動の相違

サイドロジックモデル試験では開発鋼適用による疲労寿命の延伸効果が明瞭に表れたのに対し、ガセット継手の試験においては開発鋼(Steel E)と従来鋼(Steel F)において疲

労寿命の顕著な相違は認められなかった。そこで、ガセット継手試験における繰返し数と表面き裂長さの関係を観察し、破断寿命のほぼ等しいサイドロジックモデル試験のき裂成長特性と比較した。疲労試験での応力範囲 $\Delta\sigma$ はサイドロジックモデル試験体で 89MPa、ガセット継手で 147MPa である。Fig.15 に示すように、疲労き裂はいずれの継手でも極めて初期に発生しているが、これらのき裂は廻り溶接余盛り止端で観察され、極めて浅くアスペクト比の大きなき裂と推定される。その結果、深さ方向にき裂が成長するまで疲労き裂長さは約 20mm で停留している。したがって、実質的にはこのき裂長さからの新たな成長時がき裂発生と見なせる。このように定義した疲労き裂発生後の疲労き裂成長挙動が、小型ガセット試験では開発鋼と従来鋼で大きな相違がないのに対し、サイドロジックモデル試験では開発鋼の優位性が顕著に認められた。この相違は継手形式によるものと推定される。つまり、小型ガセット継手では主板でのみ荷重を受持っているのに対し、サイドロジックモデル試験体では荷重経路が多いため、発生部位の局所剛性低下によりき裂発生後は他の部材が荷重をより多く分担していると思われる。

これに関連し、Fig.16 には小型ガセット継手とサイドロジックモデル試験体で余盛り止端から 5mm 離れた位置におけるひずみ測定値の変化をき裂長さを横軸にとり比較している。サイドロジックモデル試験体では初期ひずみが高いにも関わらず早期にひずみが低下しており、き裂が発生したフェース部材以外の部材で荷重は分担されていると思われる。一方、ガセット継手では主板でのみ荷重を受持っており、き裂発生後もひずみレベルは高い。この違いによりサイドロジックモデル試験体のような大型試験体では疲労き裂進展寿命の延伸という開発鋼の特性がより顕著に発揮されたものと考えられる。なお、実構造物においてはサイドロジックモデル試験体と同じように荷重経路が複数であるのが一般的である。

疲労破壊挙動における継手形式による相違を考察すべく、本研究で供試したサイドロジックモデル試験体、および全長 700mm、ガセット長 300mm のガセット継手に対し、き裂寸法と線形弾性応力拡大係数の関係を FEM(使用コード: MARC2001)にて解析した。き裂形状については、破面観察結果に基づきアスペクト比を定め、(表面長さ、深さ)で (2,0.5), (4,1), (24,6), (48,12) の 4 水準の寸法を設定した。Fig.17 には FEM の分割図を示す。

止端から 5mm 位置のひずみ解析値の変化を求め Fig.18 に示す。本解析結果からも、サイドロジックモデルではき裂の発生により荷重経路が変わり、ひずみが減少していることが判る。

次に、解析結果から、き裂前縁に沿った各位置の応力

拡大係数を比較したところ、今回設定したき裂形状では表面での応力拡大係数値が最も大きかったため、以後の考察では表面での応力拡大係数値を使用する。き裂半長と応力拡大係数の関係を Fig.19 に示す。ただし、本図では、き裂が最も小さな(2.0.5)においてガセット継手の応力拡大係数とサイドロンジモデル試験体のそれとが一致するように両継手形式で負荷荷重を設定している。

Fig.19 より、き裂成長に伴う応力拡大係数の変化は継手型式によって異なり、サイドロンジモデル試験体では荷重経路が多いため、き裂の成長に伴う応力拡大係数の増加が小さいことが判る。このため、実質的な疲労き裂発生後最終破断に至るまでの疲労き裂進展寿命が総寿命に占める比率は、サイドロンジモデルでは大きくなり、開発鋼の寿命延伸効果が顕著に表れたものと考えられる。

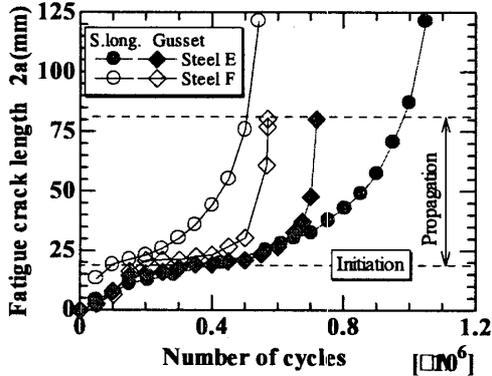


Fig.15 Comparison of fatigue crack propagation behavior between two types of welded joints

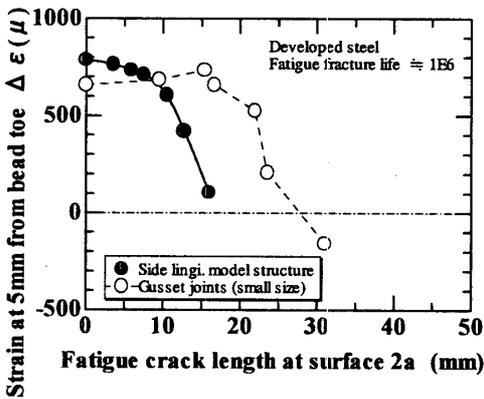
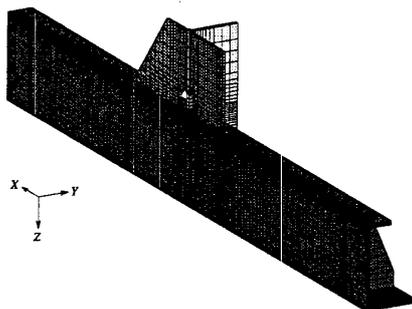
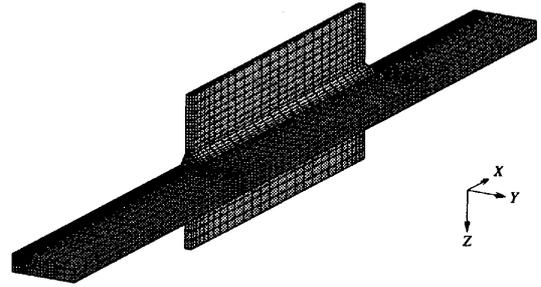


Fig.16 Effect of crack length on strain measurement near bead toe



(a) Side longi. model (16208~18847 Elements)



(b) Gusset welded joints (13103~14367 Elements)

Fig.17 Mesh models for FEM

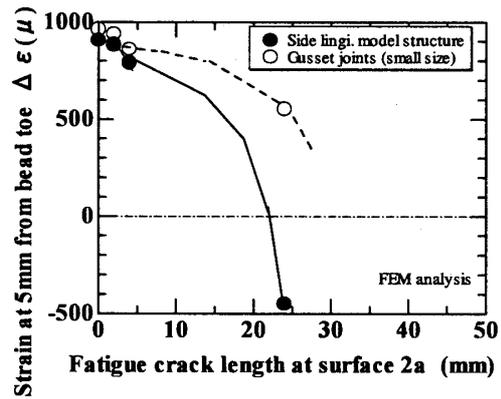


Fig.18 Relationship between crack length and FEM results on strain near bead toe

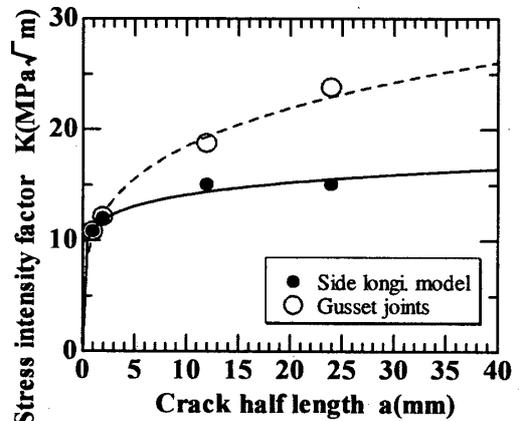


Fig.19 Effect of joint type on relationship between crack size and stress intensity factor

5. 結言

疲労特性に優れた開発鋼を用いて、切断や溶接などで熱履歴を受けた後の疲労特性を評価した。

その結果、開発鋼の疲労き裂発生特性は、前報で報告したように機械加工面を起点とする場合に優れるだけでなく、プラズマ切断面を起点とする場合にも優れていることが判明した。疲労特性に優れる理由は、適切な焼入

れ性に基づく硬度分布にあると考えられる。

また、開発鋼を用いた継手疲労強度は、継手形式により寿命延伸効果が異なり、カセット継手に代表される小型継手では改善効果が限定されるのに対し、実構造物を模擬したサイト・ロジックモデル試験体に代表される継手形式では、開発鋼の適用により構造疲労寿命を大幅に改善できることが明らかとなった。寿命延伸効果が顕著であった理由は、全寿命の比較的初期に疲労き裂が発生し、疲労寿命の大部分を疲労き裂進展寿命が占めているためである。

なお、本開発鋼を船殻に適用した場合には、プラズマ切断面疲労試験やサイト・ロジックモデル疲労試験で認められた寿命改善効果が発揮されるものと推定される。今後、本開発鋼を実船へ適用した場合のメリットに関し、定量的な検討を進める予定である。

本開発鋼適用による寿命延伸効果は船殻構造だけに限定されるものでなく、海洋構造物を始め、橋梁、建設機械等溶接構造物一般においても同様に発揮されることが期待される。

謝 辞

本研究を推進するにあたり、精力的に実験を進めて頂いた当時の広島大学工学研究科大学院生 小岩哲也氏、および広島大学工学部学生 長友武雄氏には、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 菅田登, 有持和茂, 藤原知哉, 永吉明彦, 稲見彰則, 山下正人, 矢島浩: 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 —, 日本造船学会論文集, 第190号
- 2) 菅田登, 有持和茂, 鈴木秀一, 渡邊栄一, 多田益男, 山本元道, 高允宝, 矢島浩: 海水中疲労特性に及ぼす鋼板組織の影響 — 疲労特性に優れた船体用鋼板の開発 第2報 —, 日本造船学会論文集, 第191号
- 3) 矢島浩, 高允宝, 西川和人, 山本元道, 菅田登, 渡邊栄一, 堀口秀樹: プラズマ切断部の大気中・海水中疲労強度に関する検討(その2), 西部造船学会報, 第101号(2001), pp.223-231.
- 4) 中野悦男: プラズマ切断, 溶接技術, 5月号(1988), pp.148-154.
- 5) 中野悦男: プラズマ切断, 溶接技術, 6月号(1988), pp.115-121.
- 6) 中野悦男: プラズマ切断, 溶接技術, 7月号(1988), pp.130-136.

- 7) 中野悦男: プラズマ切断における高精度加工の現状, 溶接技術, 5月号(1994), pp.77-82.
- 8) Ho, N-J, Lawrence, Jr., F. V. and Altstetter, C. J.: The Fatigue Resistance of Plasma and Oxygen Cut Steel, Welding Research Supplement (1981), pp.231-236
- 9) (社)日本溶接協会編, プラズマ切断の基礎と実際, 産報出版(1983)
- 10) 小岩哲也: 鋼構造部材プラズマ切断部の大気中・海水中疲労強度に関する研究, 広島大学修士論文, 2000年3月
- 11) Peterson, R. E.: Stress Concentration Design Factors, John Wiley & Sons, 193, p.28.
- 12) 井上, 第131・132回西山記念技術講座