

表層超細粒鋼板の強度特性

矢島 浩*・佐藤 進*・高 允宝*
西川 和人**・石川 忠***・山本 元道****

Strength of New-Type Steel Plate Having Surface Layers
with Ultra Fine Grain Microstructure

YAJIMA Hiroshi, SATOH Susumu, KHO Yunbo,
NISHIKAWA Kazuto, ISHIKAWA Tadashi and YAMAMOTO Motomichi

Recently, a new-type steel plate having SUF (Surface layers with Ultra Fine grain microstructure) has been developed by the further improvement of the TMCP (Thermo Mechanical Control Process) technology. The SUF provides various advantages: for example, SUF improves dramatically crack arresting toughness against unstable brittle crack propagation, so that application of SUF steel plates to large scale steel structures in emergency cases is valuable.

In this paper, the advantages of using new-type steel plate with SUF are discussed from the viewpoints of the strength properties (crack arresting toughness against unstable brittle crack propagation, fracture toughness, fatigue strength and buckling strength).

1. はじめに

TMCP 技術をさらに発展させて、表層部(板厚の1/6程度)の組織を超細粒化(結晶粒径1~3 μm 程度)にした新しい高靱性鋼板[SUF (Surface layers with Ultra Fine grain microstructure)]が、新日本製鐵(株)で開発された。

この新しい表層超細粒(SUF)鋼板では、表層部の靱性が非常に優れているために、脆性不安定亀裂が板の表面から進入しにくいこと、脆性不安

定亀裂伝播停止性能が非常に優れていることなど、種々の特長がある^{1)~4)}。

本論文では、この新しい表層超細粒(SUF)鋼板の基本特性、脆性不安定亀裂伝播停止性能、破壊靱性、疲労強度、座屈・塑性崩壊強度および実構造物への適用例などについて紹介する。

2. SUF 鋼板の基本特性

全板厚50mm(表層部約8mm, 中央部約34mm)のSUF鋼板板厚断面の、マクロおよびマイクロ組織を

* 工学部 機械工学科 教授

** 工学部 機械工学科 助教授

*** 新日本製鐵株式会社

**** 広島大学 工学部

2000年11月30日受付

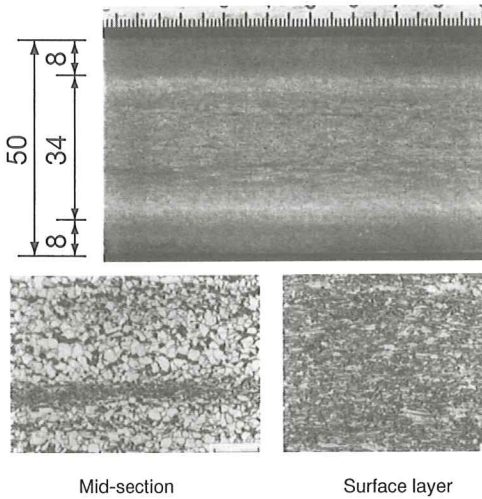


Fig. 1 Example of macro- and microstructures of cross section of SUF steel plate

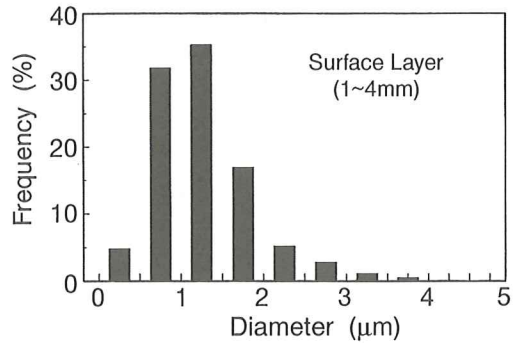
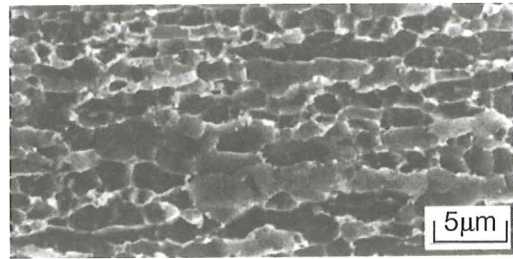


Fig. 2 SEM micrograph and grain size distribution in SUF region

Fig. 1 に示す。表層部の結晶粒径は 1 ~ 3 µm 程度であり、中央部の結晶粒径は 10 ~ 20 µm 程度である⁵⁾。

Fig. 1 に組織を示した鋼板とは別の SUF 鋼板表層部の SEM 組織写真を、Fig. 2 に示す。このような SEM 写真を用いて、表層部すなわち、SUF 部の結晶粒径のヒストグラムを求め、その一例を Fig. 2 に示す。平均円相当粒径が 2 µm 以下であることがわかる。また、表層部のマイクロ組織は、超微細なフェライトと、微細なセメントタイトであることが特徴である⁶⁾。

また、SUF 鋼板における板厚方向の粒径分布の一例として、板厚方向位置毎に平均円相当粒径を求めた結果を Fig. 3 に示す。SUF 部の粒径は、ほぼ均一であり、SUF 部と板厚内部での境界域で、急激に粒径が変化していることが明らかである⁴⁾⁶⁾。

Fig. 1 に組織を示した SUF 鋼板の、化学成分と機械的性質を Table 1 および Table 2 に示す。表層部は中央部に比べて、降伏点 (Y.P.) で約 17%、引張強さ (T.S.) で約 10% 高い値を示している⁵⁾。

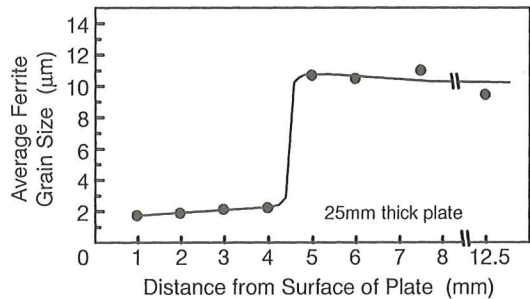


Fig. 3 Grain size distribution in thickness direction of SUF steel plate

Table 1 Example of chemical composition of SUF steel plate (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ceq*	Ceq (WES)
0.11	0.20	1.44	0.007	0.005	0.37	0.36

$$Ceq^* = C + Mn/6 + (Cu+Ni)/15 + (Cr+Mo+V)/5$$

$$Ceq(WES) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

3. 脆性不安定亀裂伝播停止性能

SUF 鋼板の大きな特徴は、脆性不安定亀裂の伝

播や拡大を阻止するアレスト性能が、従来鋼に比べて極めて優れている点である。

Table 2 Example of mechanical properties of SUF steel plate (50mm thick plate)

Position	Direction	Y.P. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	El. (%)
Surface layer	L	473	536	27
Mid-section		404	489	33

JIS 13B (t = 6mm)

SUF 鋼板は、鋼板表・裏層部に耐脆性破壊特性の優れた領域を有するため、SUF 鋼板に脆性不安定亀裂が伝播してきた場合、容易にシアリップが形成される。そのため、シアリップ部での塑性変形による亀裂伝播時のエネルギー吸収効果、および亀裂が埋没亀裂形態化することによる応力拡大係数の減少効果により、アレスト性能が飛躍的に向上するのである。

Fig. 4 に、アレスト性能を評価する試験である温度勾配型 ESSO 試験結果の、SUF 鋼板の破断面を示す⁶⁾。板厚内部は脆性破壊を呈しているが、板表層部は脆性破壊せずに延性破壊を呈している。この表層部がシアリップと呼ばれる塑性変形を伴った領域となっており、脆性不安定亀裂伝播時に大きなブレーキをかける役目をするために、鋼板のアレスト性能が飛躍的に向上するのである。

Fig. 5 は、SUF 鋼板と従来鋼板のアレスト性能を比較した結果である。SUF 鋼板が極めて優れたアレスト性能を有していることがわかる⁶⁾。供試鋼板は、化学成分の同等な板厚25mmの SUF 鋼板

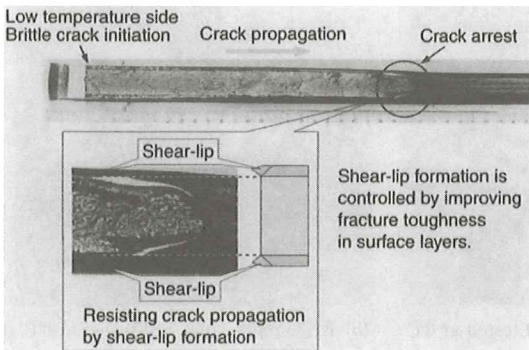


Fig. 4 Fracture surface and its cross section of ESSO test specimen

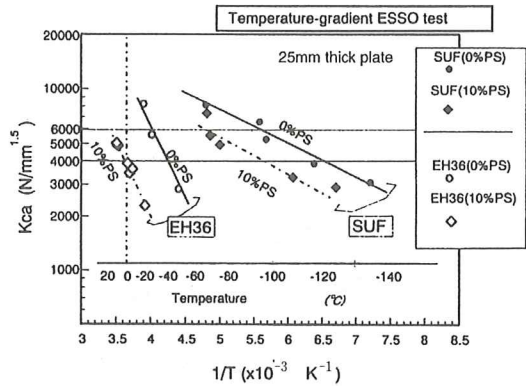


Fig. 5 Results of temperature gradient type ESSO tests

と、比較のための EH36 鋼板[KE36 鋼板, 日本海事協会 (NK) 規格材]である。Fig. 5 中に示したように、両供試鋼板に、引張荷重を負荷し10%程度の塑性歪を付与し、塑性歪による損傷を受けた場合のアレスト性能も評価した。

塑性歪の付与によりアレスト性能が大きく劣化し、EH36 鋼板の場合、塑性歪なし材では、Kca = 4000N/mm^{1.5}を示す温度が-40°C程度であったものが、10%塑性歪を付与されると0°C以上に劣化することが判明した。SUF 鋼板も塑性歪による劣化現象は確認されたものの、EH36 鋼板の塑性歪なし材より優れたアレスト性能を有していることがわかる⁶⁾。

次に、Fig. 6(a) に示す大型の超広幅混成 ESSO 試験片を用いて、高速で伝播してくる長大脆性不安定亀裂に対する停止性能を検証した。不安定亀裂伝播部には従来鋼板である EH36 鋼板を用い、試験対象鋼板に SUF 鋼板を使用した。その試験結果を Fig. 6(b) に示す。EH36鋼板を伝播した脆性不安定亀裂が SUF 鋼板に突入すると、シアリップを形成しながら脆性不安定亀裂を停止させることが観察された⁶⁾。

一方、大型船舶において、上甲板部で脆性不安定亀裂が発生し、シアストレーキ部へと伝播する現象が想定される。この場合 SUF 鋼板では、表層部の組織が超細粒組織であるため、鋼板表面から突入してくる脆性不安定亀裂に対する抵抗は、板

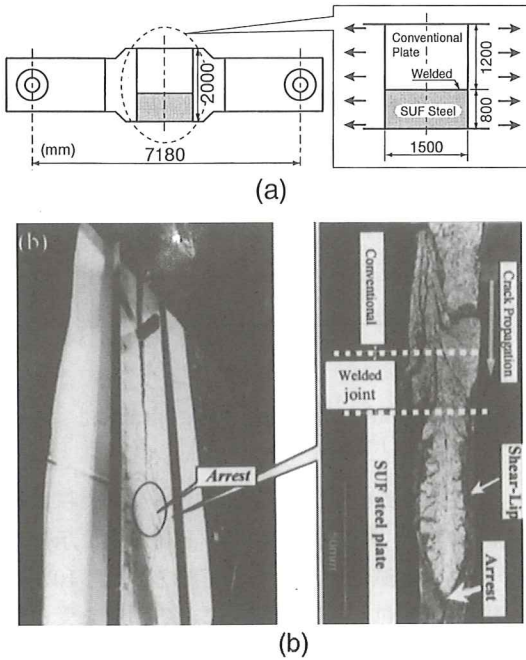


Fig. 6 Ultrawide plate duplex type ESSO test of SUF steel plate and fracture surface of test specimen

厚貫通不安定亀裂の場合よりも大きいと想定される。

そこで、脆性不安定亀裂が上甲板部から発生し、シアストレーキ部へ伝播突入する現象をモデル化した構造体試験を実施した。この超広幅混成 ESSO 型十字形試験片の形状を、Fig. 7 に示す。助走板と試験板を直交させるように完全溶け込み溶接し、さらに試験板と助走板の応力分布が均一になるように、試験板の下側に補助板を隅肉溶接で取り付けた。実際のシアストレーキでは補助板は存在しないので、脆性不安定亀裂が試験板を貫通後補助板で停止しても、試験板のアレスト性能は不十分であるとの評価になる。

超広幅混成 ESSO 型十字形

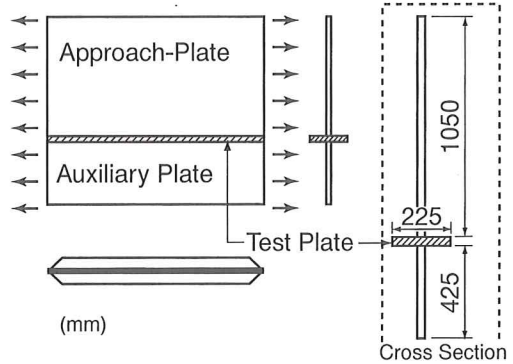
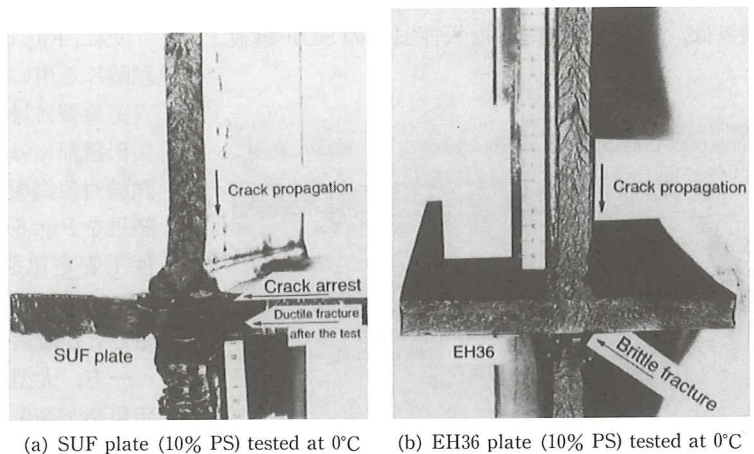


Fig. 7 Shape of ultrawide plate duplex cruciform type ESSO test specimen

Table 3 Results of ultrawide plate duplex cruciform type ESSO tests

Test Plate	Test Temperature	Result
SUF	-50°C	Arrest
EH36	-50°C	Go

試験結果の概要を、Table 3 および Fig. 8 に示す⁷⁾。Fig. 8 は、引張荷重により10%塑性歪を付与して、0°Cで試験した結果の破断面を示したもの



(a) SUF plate (10% PS) tested at 0°C (b) EH36 plate (10% PS) tested at 0°C

Fig. 8 Fracture surfaces of ultrawide plate duplex cruciform type ESSO test specimens

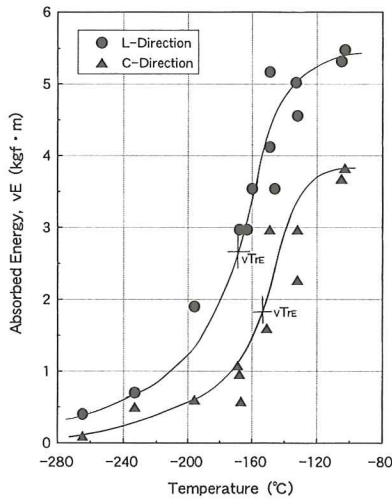


Fig. 9 Results of sub-sized Charpy V-notch impact tests (Surface layer)

である。助走板と試験板の溶接部まで伝播してきた脆性不安定亀裂が、試験板であるEH36鋼板に突入する場合には、試験板内を脆性不安定亀裂が伝播して破断に至った。試験板がSUF鋼板の場合には、亀裂が突入した表層部で、脆性不安定亀裂は直ちに停止した⁷⁾。

4. 破壊靱性

全板厚38mmの低温用 (JIS SLA37) 鋼板として製造されたSUF鋼板の表層部と中央部から、それぞれ板厚5mmの板を削り出して供試した⁸⁾。

サブサイズ試験片 (5×10×55mm) によるVノッチシャルピー衝撃試験結果を、Fig. 9およびFig. 10に示す。Fig. 9に示した表層部の結果では、破断面にセパレーションがたくさん発生し、脆性破面率を評価するのが困難であったため、脆性破面率は表示しなかった。また、吸収エネルギー遷移温度 (vTrE) および50%脆性破面率遷移温度 (vTrs) を、Table 4に示す。

なお、表層部の試験には、液体窒素では十分でなかったため、液体ヘリウムも使用した。Table 4には、参考までに、中央部の標準試験片による結

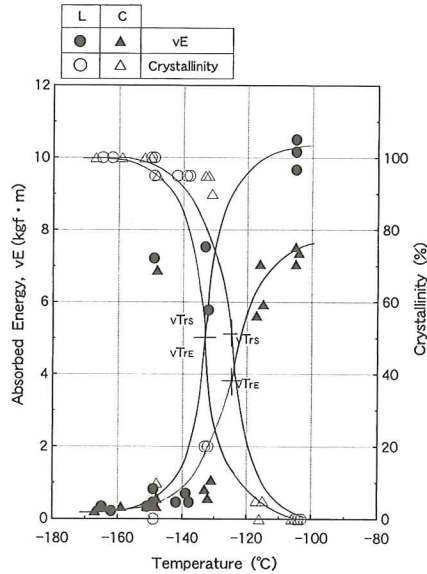


Fig. 10 Results of sub-sized Charpy V-notch impact tests (Mid-section)

Table 4 vTrE, vTrs of surface layer and mid-section

Size	Position	Direction	vTrE (°C)	vTrs (°C)
Sub-sized	Surface Layer	L	-167	—
		C	-153	—
Sub-sized	Mid-section	L	-133	-133
		C	-125	-125
Full-sized	Mid-section	L	-120	-120
		C	-115	-115

Sub-sized : 5mmx10mmx55mm

果も示した。表層部は中央部より、vTrEで約30°C程度低温であり、非常に優れた靱性を有しているといえる⁸⁾。

一方、表層部と中央部から削り出した、それぞれ板厚5mmの供試材による、中央切欠付小型引張試験を実施した。供試した試験片形状をFig. 11に示す。また、試験結果をFig. 12に示す。Fig. 12中には、供試鋼板 (全板厚38mm) 全板厚材に対する、標準試験片 (幅400mm、機械切削中央切欠き長さ160mm) による中央切欠付広幅引張試験結果も示してある⁸⁾。

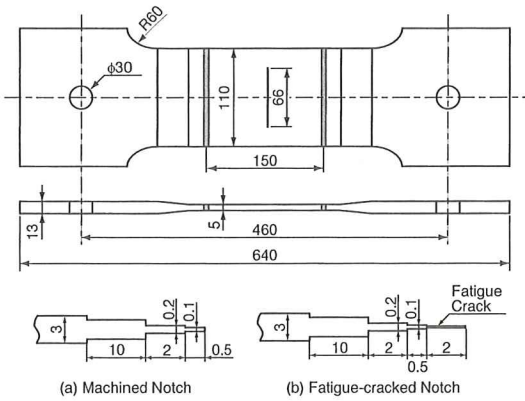


Fig. 11 Shape of center-notched small-sized tensile test specimen

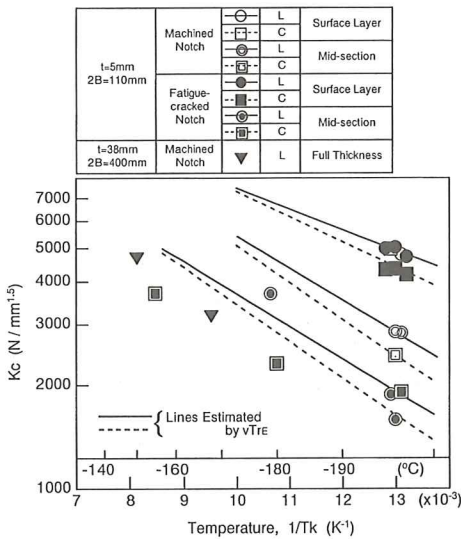


Fig. 12 Relation between Kc and temperature (Results of center-notched tensile tests)

全板厚材に対する標準試験片による中央切欠付広幅引張試験結果の破断面と crack pass を, Fig. 13 に示す⁸⁾。

Fig. 13 から明らかなように, 超細粒組織の表層部は脆性不安定破壊していない。従来組織である中央部を脆性不安定亀裂が走った後に, 表層部は延性破壊したものと考えられる。

超細粒組織の表層部と, 従来組織の中央部それぞれのサブサイズ (5×10×55mm) V-ノッチシャルピー衝撃試験結果から, 表層部・中央部それぞれの Kc 値推定に関して検討した。結論として, 以下の Kc 値推定式を導出した⁸⁾。

$$Kc = F \cdot 5.60 \cdot \sigma_y \cdot \exp \left\{ K_0 \left[\frac{1}{\sigma = \frac{1}{2} \sigma_y [T_1]_{a=40}} - \frac{1}{T_K} \right] \right\} \quad (\text{kgf} \sqrt{\text{mm}} / \text{mm}^2)$$

$$F = \frac{K_{c, \text{ Fatigue Cracked Notch}}}{K_{c, \text{ Machined Notch}}} = \begin{cases} 1.00 & (\text{Surface layer}) \\ 0.68 & (\text{Mid-section}) \end{cases}$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_y [T_1]_{a=40} = (0.00321 \sigma_y + 0.391) \sqrt{v T_{RE}} + 2.74 \sqrt{t} - 8.0$$

$$K_0 = 5.70 \{ \sigma = \frac{1}{2} \sigma_y [T_1]_{a=40} \} - 190$$

ただし

T_K : 温度 (K)

σ_y : 室温降伏点 (kgf/mm²)

t : 板厚 (mm) (本報では, 板厚 5 mm)

$v T_{RE}$: 吸収エネルギー-遷移温度 (K)

$\sigma = \frac{1}{2} \sigma_y [T_1]_{a=40}$: 中央切欠付小型引張試験結果の応力場 $\sigma = (1/2) \sigma_y$ における許容亀裂長さ (2a) 80mm に対する脆性不安定亀裂発生限界温度 (K)

先に, Fig.12中に示した実線および点線は, 上述の Kc 値推定式を用いて, 室温降伏点と, Table 4

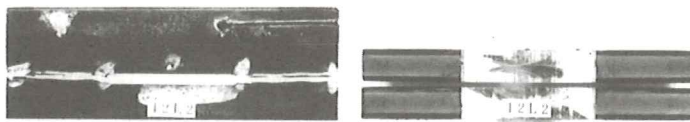


Fig. 13 Fracture surfaces and crack path of full thickness center-notched wide plate tensile test (Test temperature : -170°C)

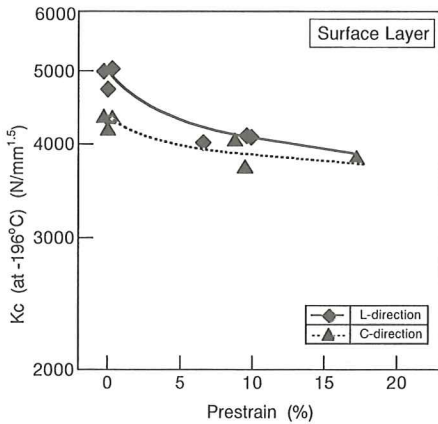


Fig. 14 Relation between Kc and prestrain (Results of center-fatigue-crack-notched tension tests)

に示したサブサイズ試験片 (5×10×55mm) による vT_{Re} から推定した, Kc 値と温度との関係を示したものである。推定した Kc 値と温度との関係は, 中央切欠付小型引張試験結果と良く一致しているといえよう。

さらに, 超細粒組織の表層部から削り出した板厚 5 mm の供試材に, 最大約 17.5% の引張予歪を室温で与え, その後, 中央切欠付小型引張試験を実施した。なお, 予歪材の中央切欠付小型引張試験片形状は, 先に Fig. 11 に示した試験片と概略同じであるが, 試験片幅 80 mm, 中央切欠き長さ 48 mm の疲労ノッチ付試験片とした。

与えた引張予歪と Kc 値との関係を, Fig. 14 に示す⁸⁾。予歪を 10~18% 位与えたにもかかわらず, Kc 値の低下は極僅かであることが明らかである。

5. 疲労強度

全板厚 50 mm (表層部約 8 mm, 中央部約 34 mm) の SUF 鋼板 (Fig. 1, Table 1 および Table 2 参照) を供試した。表層部, 中央部および境界部 (片面が表層部組織, 片面が中央部組織) から, Fig. 15 に示す要領で, それぞれ板厚 6 mm の板として削り出して供試した。なお, 板厚 6 mm の供試材は, 幅 60 mm, 長さ 170 mm とし, すべて圧延平行方向 (L 方向) に採取した⁵⁾。

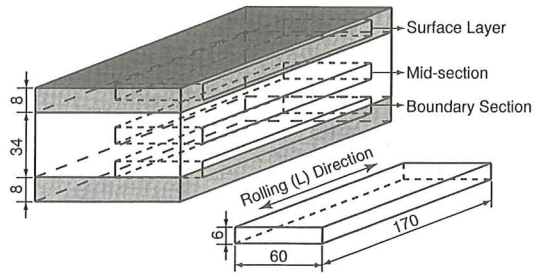


Fig. 15 Cutting plan of test SUF steel plate

疲労試験は大気中と人工海水中で行った。大気中では表層部と中央部について, 人工海水中では表層部, 中央部および境界部について実施した。大気中疲労試験片形状を Fig. 16 に, 人工海水中疲労試験片形状を Fig. 17 に示す。

大気中疲労試験は, 室温, 繰返し速度 5 Hz, 応力比 0.1 の軸力片振り引張荷重制御方式で実施した。また, 人工海水中疲労試験は, 100 kN 1 軸 5 連型腐食疲労試験機を用い, 室温 (25°C), 繰返し速度 0.17 Hz (海洋における波浪の周期と同等) の軸力片振り引張荷重制御方式で実施した。人工海水は, ASTM で規定 (ASTM D1141) された成

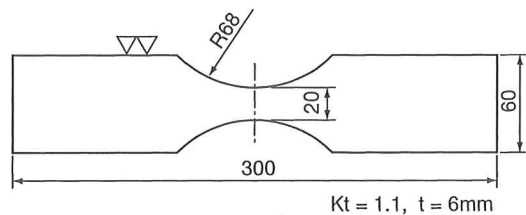


Fig. 16 Shape of fatigue test specimen (In air)

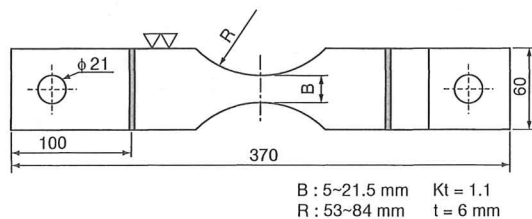


Fig. 17 Shape of fatigue test specimen (In artificial seawater)

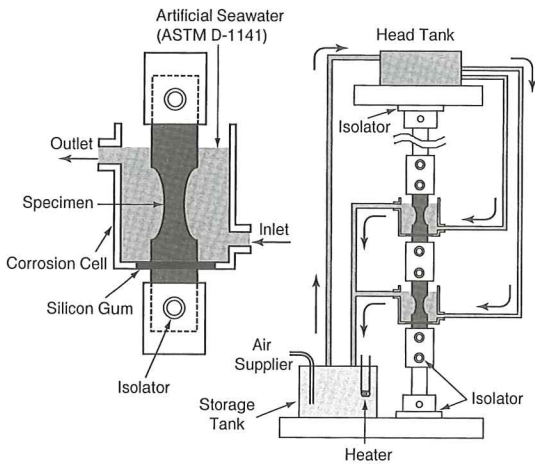


Fig. 18 Corrosion fatigue test system

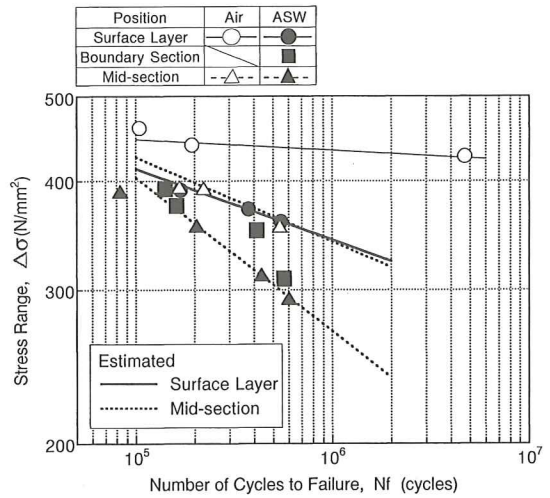
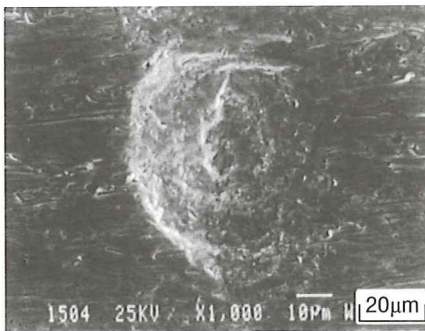
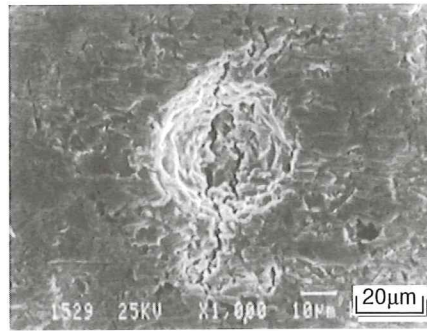


Fig. 19 Relation between stress range and number of cycles to failure (In air and in artificial seawater)

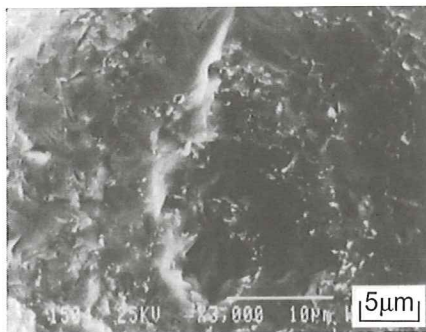


Surface layer side
(Pit diameter : about 50μm)

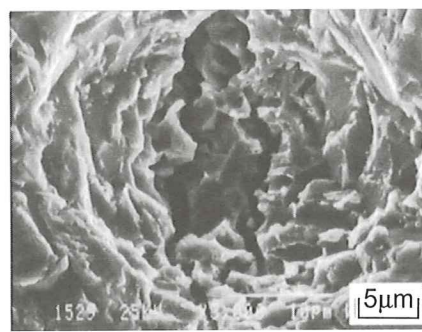


Mid-section side
(Pit diameter : about 40μm)

Fig. 20 Corrosion pit in boundary section specimen



Surface layer side
(Pit diameter : about 50μm)



Mid-section side
(Pit diameter : about 40μm)

Fig. 21 Inner surfaces of corrosion pits in Fig. 20

分を有する金属材料腐食試験用人工海水（アクアマリン）を用いた。人工海水の循環システムを Fig. 18 に示す⁵⁾。

大気中・人工海水中疲労試験結果を、Fig. 19 に示す⁵⁾。大気中でも人工海水中でも、表層部は中央部に比べて非常に強いことが明らかである。また、人工海水中の境界部では、中央部組織側から疲労亀裂が発生・進展し、破断に至ったため、中央部の疲労強度に近い値を示したものと考えられる。

人工海水中の境界部試験片で観察された、直径約40~50 μ mの小さな腐食ピットの代表例のSEM写真を Fig. 20 に、それらの腐食ピット内部を拡大した写真を、Fig. 21 に示す。

中央部組織側表面では、粒界腐食が先行して結晶粒がもぎ取られるようにしてピットが成長し、

ピット深さが深く、直径約40 μ mの腐食ピット底から疲労亀裂が発生していた。一方、表層部組織側表面では、少しずつ溶けながらピットが形成され、ピット深さが浅く、疲労亀裂は発生していなかった⁵⁾。

6. 座屈・塑性崩壊強度

全板厚25mm（表層部約4mm,中央部約17mm）のSUF鋼板〔船体用HT50（KE36）鋼板, Table 5 および Table 6 参照〕を供試した。

表層部は中央部に比べて、降伏点（Y.P.）で約30%、引張強さ（T.S.）で約10%高い値を示している。また、供試鋼板の板厚断面のビッカース硬さ分布を、Fig. 22 に示す。表層部は中央部に比べて、ビッカース硬さで約30程度硬くなっている⁹⁾。

供試SUF鋼板の座屈・塑性崩壊強度を実験的に把握するために、帯板試験体を用いた座屈試験を実施した。

さらに、本実験モデルに対して有限要素法による弾塑性大たわみ解析を行い、座屈・塑性崩壊強度に対する表層部の影響について考察した。

帯板座屈試験に供試した試験片の形状を Fig. 23 に示す。試験片は、板厚24mmに両表面を切削仕上げした供試鋼板から、幅50mmの帯板状に切り出して製作した。したがって、試験片全板厚（24mm）に対する両表層部（3.5mm \times 2）の割合は、約29%となっている。

試験片長さは、弾性座屈（L=710mm）、弾塑性座屈（L=500mm）および塑性座屈（L=360mm）の3種類の座屈現象が観察できるように決定した。また、座屈試験には、2000kN 万能試験機を用いた。

有限要素法解析には、汎用コードABAQUSを用いた。Fig. 24 に解析モデルおよび境界条件を示す。解析は、対称性を考慮して全体の1/4を対象としてモデル化し、4節点の次数低減積分型シェル要素を用いた。

Fig. 25 に示すように、板厚方向を12層に分割し、表層部、中央部に対応するそれぞれの層の降伏応力を、材料試験結果に基づいて、表層部では

Table 5 Chemical composition of SUF steel plate (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ceq*	Ceq (WES)
0.12	0.19	1.27	0.009	0.003	0.33	0.34

$$Ceq^* = C + Mn/6 + (Cu+Ni)/15 + (Cr+Mo+V)/5$$

$$Ceq(WES) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

Table 6 Mechanical properties of SUF steel plate

Position	Direction	Y.P. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	El. (%)
Surface layer	L	508	559	26
Mid-section		389	499	32

JIS 5 (t = 3.5 mm)

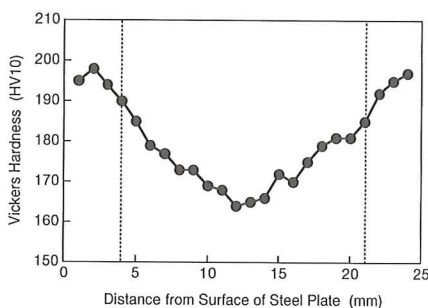


Fig. 22 Hardness distribution in cross section of SUF steel plate

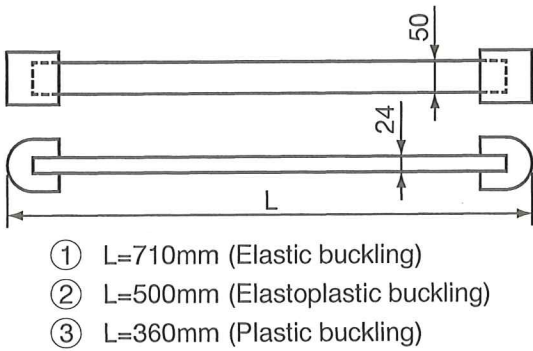


Fig. 23 Column buckling test specimen

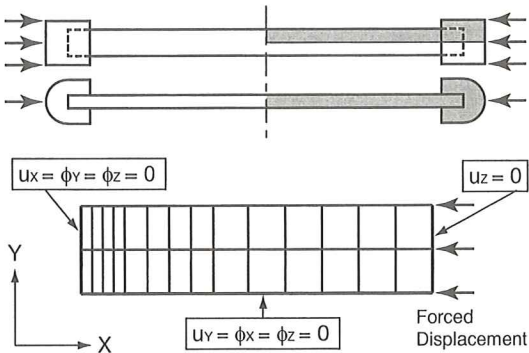


Fig. 24 Model for analysis and boundary conditions (Column specimen)

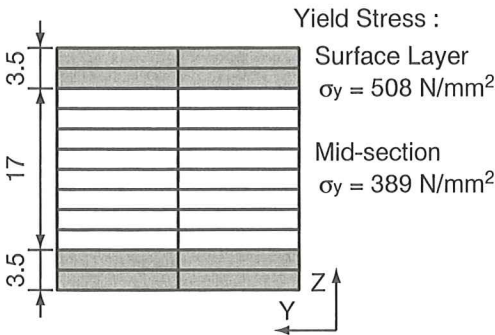


Fig. 25 Layers in cross section of shell finite element

508N/mm²、中央部では389N/mm²とした。また、完全弾塑性材料と仮定して解析した。

座屈強度に及ぼす表層部の影響を定量的に把握することを目的に、全板厚に対する表層部の割合

を、100%、本供試鋼板に相当する29%、および従来鋼板に相当する0%と変化させて、解析した。

弾性座屈 (L=710mm) および塑性座屈 (L=360mm) が生じる場合それぞれの、平均圧縮応力と平均圧縮歪との関係を、Fig.26に示す。Fig.26中の平均応力は板厚中央部の降伏応力 (σ_{ym} =389N/mm²) で、また平均歪は中央部の降伏歪 (ϵ_{ym}) で無次元化している。□、△、○印は、初期降伏点を表している⁹⁾。

弾性座屈が生じる場合も塑性座屈が生じる場合も、表層部の割合が29%の鋼板では、0%の鋼板

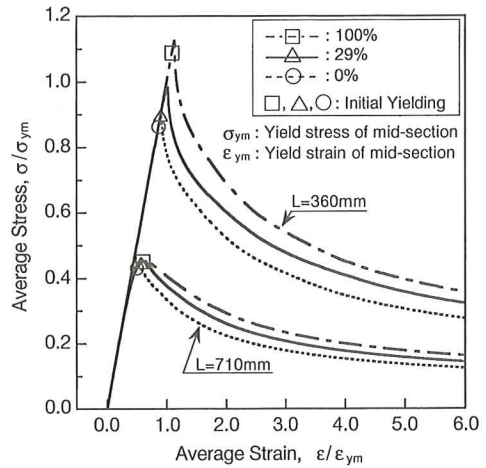


Fig. 26 Influence of SUF on average stress vs. average strain relationship (Column)

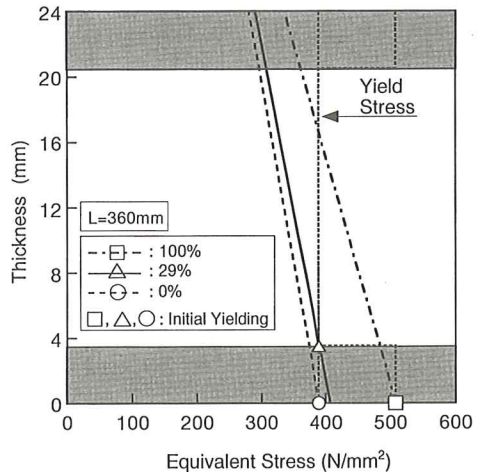


Fig. 27 Stress distribution at initial yielding

に比べて、初期降伏強度、最終強度およびその後の耐荷力が明らかに上昇している。

塑性座屈 ($L=360\text{mm}$) が発生する場合の初期降伏時の、解析モデル中央部要素の、板厚方向の応力分布を、Fig. 27 に示す。Fig. 27 中の点線は、中央部および表層部それぞれの降伏応力を、また○印は初期降伏位置を表している⁹⁾。

表層部の割合が0%の場合、降伏は表面で始まるが、表層部の割合が29%の場合、より大きな荷重で、中央部と表層部との境界内側で降伏が始まる。

SUF 鋼板は、両表面に高い降伏応力を有する表層部があるため、初期降伏荷重が上昇し、降伏が始まった後も、表層部はしばらく弾性のままであるので、最終強度およびその後の耐荷力も上昇することになる。

Fig. 28 に示す、長さ800mm、幅1000mmの矩形板を対象に、有限要素法による座屈・塑性崩壊強度解析を実施した⁹⁾。板は周辺単純支持されているとし、4 辺は直線を保って自由に変位できるとした。荷重は、長さ方向に面内圧縮の強制変位を与える形で負荷した。帯板の場合と同様に、汎用コード ABAQUS を用い、対称性を考慮して全体の1/4を解析した。

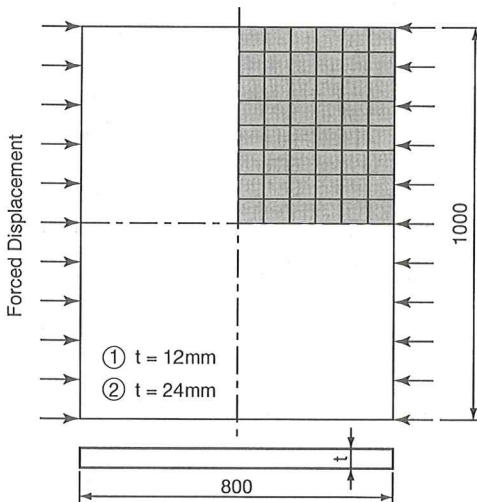


Fig. 28 Rectangular plate under thrust

板厚は12mmおよび24mmとし、板厚方向を12層に分割して、全板厚 (12mmおよび24mm) に対する表層部の割合を100%, 33%, 0%と変化させた。33%は、板の両表面を切削仕上げしない場合の表層部の割合に相当する。

平均圧縮応力と平均圧縮歪との関係を Fig. 29 に示す。図中の平均応力は板厚中央部の降伏応力で、また、平均歪は中央部の降伏歪で無次元化している。□, △, ○印は、初期降伏点を表している⁹⁾。

板厚12mmおよび24mmの両ケースとも、表層部の割合が33%の場合の最終強度とその後の耐荷力は、0%の場合の結果と比べて明らかに上昇している。また、板厚12mmの場合、初期降伏強度も明らかに上昇している。

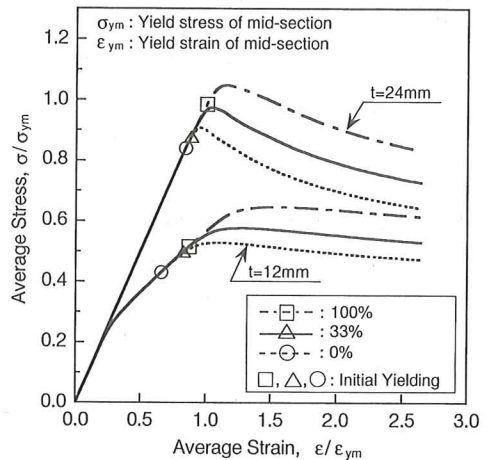


Fig. 29 Influence of SUF on average stress vs. average strain relationship (Plate)

7. 実構造物への適用例

大規模な地震や、船舶の衝突事故、座屈事故などの非常事態においては、大規模な塑性歪により鋼板の材質が劣化し、脆性不安定亀裂が発生・伝播拡大して、一瞬にして重大事故に至る可能性がある。しかし、Fig. 30 に示すように、塑性歪を受けても十分に高いアレスト性能を有するSUFG鋼板を重要部材に配置すれば、脆性破壊の伝播・拡

大を阻止し、重大事故を防止することができると思われる⁶⁾。

例えば、日本海事協会では、SUF 鋼板、あるいはそれに匹敵する、塑性歪を10%付与した条件下でも十分なアレスト性能を有する鋼板（設計温度で $K_{ca} \geq 6000 \text{ N/mm}^{1.5}$ ）を高アレスト鋼板と認定し、さらに高アレスト鋼板を船体の重要部材に適用した船舶の安全性を認定するための Class-Notation 制度を設定している¹⁰⁾。

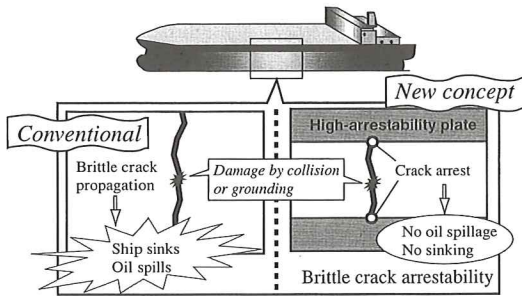


Fig. 30 Improvement of structure integrity by applying SUF steel plate for important members

SUF 鋼板は、1995年に、LPG(液化プロパンガス) 運搬船に初適用された。1996年には、バルクキャリアー(一般貨物船, Fig. 31) に、1997年にはチップ船と鉱石運搬船などに相次いで適用されている⁶⁾。

また、海洋構造物や老朽船の安全性確保の視点からも適用が検討されている。

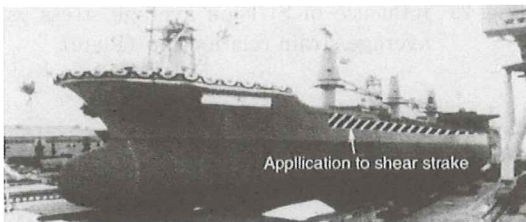


Fig. 31 Bulk carrier in which SUF steel is applied

8. おわりに

新日本製鐵(株)で開発された、表層超細粒(SUF) 鋼板の基本特性、脆性不安定亀裂伝播停止性能、破壊靱性、疲労強度、座屈・塑性崩壊強度および実構造物への適用例などについて紹介した。

SUF 鋼板は、上述の全ての特性において優れていることが明らかになった。

SUF 鋼板を大型鋼構造物の重要部材に適用することにより、脆性破壊に対する安全性が向上できると期待され、既に大型船舶に実際に適用されている。

今後、耐震高層建築構造物や海洋構造物など、脆性破壊に対する安全性が要求される大型鋼構造物においても、SUF 鋼板を適用することにより、その安全性の更なる向上および地球環境問題の改善に貢献できるものと期待する。

参考文献

- 1) 石川忠, 野見山裕治, 萩原行人, 粟飯原周二: 表層超細粒鋼の脆性き裂伝播停止特性(その1) —シアリップを活用した特性向上—, 日本造船学会論文集, 第177号(1995, 6), pp.259—267.
- 2) 石川忠, 井上健裕, 萩原行人, 大下滋, 黒岩隆夫, 橋本州史, 多田益男, 矢島浩: 表層超細粒鋼の脆性き裂伝播停止性能(その2) —塑性損傷後の特性および衝突後のき裂拡大防止への適用—, 日本造船学会論文集, 第178号(1995, 12), pp.555—563.
- 3) T. Ishikawa, Y. Nomiyama, Y. Hagiwara, H. Yoshikawa, S. Oshita, H. Mabuchi: New-Type Steel Plate with Ultra High Crack-Arrestability, OMAE (1995).
- 4) 石川忠, 萩原行人, 吉川宏, 野見山裕治, 間渕秀里: 表層超細粒化による高アレスト鋼板の諸特性, 溶接学会論文集, 第15巻第1号(1997, 2), pp.148—154.
- 5) 矢島浩, 山本元道, 石川忠, 福井努: 表層超細粒鋼板の海水中疲労強度とその評価, 西部造船会会報, 第94号(1997, 8), pp.183—193.
- 6) 石川忠: 脆性き裂伝播停止性能の優れた表層超

- 細粒鋼 (SUF 鋼), 圧力技術, 第38巻第 4 号 (2000. 7), pp.234-242.
- 7) 石川忠, 野見山裕治, 吉川宏, 今井嗣郎, 井上健裕: 表層超細粒化による超高アレスト鋼板 HIAREST, 新日鐵技報, 第365号 (1997. 11), pp.26-36.
- 8) 矢島浩, 山本元道, 萩原行人, 石川忠, 川上善道, 宮本哲生, 宮本寛志: 表層超細粒鋼板の破壊靱性に関する一考察, 西部造船会会報, 第91号 (1996. 3), pp.185-192.
- 9) 山本元道, 矢尾哲也, 矢島浩, 萩原行人, 石川忠, 宮本寛志, 守田聡: 表層超細粒鋼板の座屈・塑性崩壊強度特性に関する一考察, 西部造船会会報, 第93号 (1997. 3), pp.73-80.
- 10) M. Nishimura, T. Matsumoto, H. Kitada, H. Akiyama, D. Nomura : Safety Assessment of Hull Structures with Higher Crack Arrestor (New Optional Class-Notation), The 16th. International Conference on OMAE, Paper No.97-712 (1997. 4).