集合組織を考慮した脆性き裂伝播停止温度とシャルピー遷移温度の相関

半田 恒久*・田川 哲哉*²・南 二三吉*²

Correlation between Charpy Transition Temperature and Brittle Crack Arrest Temperature Considering Texture

Tsunehisa HANDA, Tetsuya TAGAWA and Fumiyoshi MINAMI

Synopsis : The correlation between ESSO test results and Charpy impact properties has been empirically proposed to qualify brittle crack arrest toughness, K_{Ic} of structural steels. The brittle crack arrest temperature T_{K6000} at $K_{Ic}=6000\text{N/mm}^{3/2}$, conventionally used as a measure of crack arrest property, is interrelated generally with the Charpy transition temperature $vTrs$. However, ESSO test results occasionally deviates from the T_{K6000} - $vTrs$ correlation in some TMCP steels. Considering a thickness effect in ESSO test results, T_{K6000} was converted to a reference temperature ${}_{25}T_{K6000}$ for 25mm thickness. Nevertheless, a scatter is found in ${}_{25}T_{K6000}$ - $vTrs$ correlation. This study focuses on the effect of texture intensity on crack arrest properties. It is found that steel plates with texture show lower ${}_{25}T_{K6000}$ than other steels without texture, even if the transition temperatures $vTrs$ of these steels are on the same level. The role of the (211) texture is more significant than the (100) texture. A new parameter, $vTrs (^{\circ}\text{C}) - 12X_{(100)} - 22X_{(211)}$, is proposed in this study to correlate the crack arrest temperature ${}_{25}T_{K6000}$ with the material properties of structural steels, where $X_{(100)}$: pole density of (100) parallel to surface of steel plate, $X_{(211)}$: pole density of (211) parallel to surface of steel plate.

Key words: brittle fracture; brittle crack arrest toughness; ESSO test; charpy transition temperature; charpy impact test; thick steel plate.

1. 緒言

船舶や压力容器等の分野においては、溶接部から脆性破壊が発生した場合であっても、脆性き裂が母材に突入するように意図的に溶接線をシフトさせる、あるいは高速伝播する脆性き裂が溶接残留応力の影響により母材側に偏進することなどを利用し、母材において脆性き裂の伝播を停止させ、破壊の拡大を防ぐという概念が古くからある¹⁻⁴⁾。そのため、鋼板の脆性き裂伝播停止性能を確保することが大型鋼構造物の安全性確保の上で重要と考えられている^{4,5)}。しかし、鋼板の脆性き裂伝播停止性能の把握にはESSO試験あるいは二重引張試験などの大型試験が必要であり、脆性き裂伝播停止性能の簡便な推定手法が望まれている。

従来から工業的に広く用いられているシャルピー衝撃試験により得られる特性値と脆性き裂伝播停止靱性との関係が、実験的に検討されている^{1,6,7)}。脆性き裂の発生および進展の両事象を考えた場合、シャルピー吸収エネルギーは主に前者に対する抵抗となっている点などの議論はあるが、シャルピー衝撃試験で得られる遷移温度は、脆性き裂伝播停止靱性とある程度相関があることが知られている^{1,6)}。

一方、二相域圧延鋼では、シャルピー遷移温度が同じであっても、脆性き裂伝播停止靱性に大きな差異を生じ得ることが報告されている⁸⁻¹⁰⁾。これは、二相域圧延により発達した加工集合組織（鋼板表面に平行に(100)面が集積）に起因すると考えられている⁹⁾。この点に着目して、材料面からの脆性き裂伝播停止靱性の向上策として、変態集合組織を活用する高強度鋼開発¹¹⁾もなされている。しかしながら、シャルピー特性と脆性き裂伝播停止靱性の相関に及ぼす変態集合組織の影響に関する知見はほとんど解明されていない。

本研究では、変態集合組織（主に鋼板表面に平行に(211)面が集積する場合）に着目して、シャルピー遷移温度と脆性き裂伝播停止温度の相関に及ぼす集合組織の影響を調査した。また、従来から報告のある(100)面の集積の影響とも比較検討し、脆性き裂伝播停止温度とシャルピー遷移温度の相関に集合組織がどのように関与するかを考察する。

2. 実験方法

2・1 供試鋼

供試鋼は、引張強さが496MPaから979MPaの19種類の

平成22年11月1日受付 平成23年9月14日受理 (Received on Nov. 1, 2010; Accepted on Sep. 14, 2011)

* JFEスチール(株)スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835)

*2 大阪大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Osaka University)

低炭素鋼で、意図的に集合組織を発達させたタイプA, B, およびランダム組織のタイプCの3グループに分けられる。タイプAのSteel A1~A5は、主に未再結晶オーステナイト域において圧延後ベイナイト変態させ、鋼板表面に平行に(211)面を集積させることを狙った。タイプBのSteel B1~B5は、主に二相域圧延により、鋼板表面に平行に(100)面を集積させることを狙った。一方、タイプCのSteel C1~C9は、主に圧延後の再加熱熱処理によりランダムな結晶方位となるようにした。Table 1に各供試鋼板の機械的性質を示す。

各供試鋼板の組織方位集積度は、X線回析法による反転極点図強度（インバース強度）から測定した。すなわち、板面に平行な(211)面および(100)面に着目し、供試鋼板のX線回析強度とランダム組織標準試料とのX線回析強度の比、 $X_{(211)}$ および $X_{(100)}$ で組織集積度を評価した。Fig. 1に板厚中央部で計測した(211)面の集積度と(100)面の集積度の関係を示す。Steel A1~A5では、(211)面の集積度 $X_{(211)}$ が(100)面の集積度 $X_{(100)}$ よりも高くなっており、ランダム標準試料の1.5倍程度以上の(211)面配向となっている。一方、Steel B1~B5では、逆に、(100)面の集積度が(211)面の集積度よりも高く、ランダム標準試料の2倍程度以上の(100)面配向になっている。Steel C1~C9では、 $X_{(211)}$ および

$X_{(100)}$ はともに1近辺にあり、特定の集合組織は発達していないことがわかる。

2・2 靱性評価試験方法

全供試鋼に対してシャルピー衝撃試験およびESSO試験を行った。シャルピー衝撃試験はVノッチ標準試験片を用

Fig. 1. Relationship between $X_{(100)}$ and $X_{(211)}$ of steel plates tested. [$X_{(100)}$, $X_{(211)}$: pole densities of (100) and (211) parallel to steel plate surface at middle thickness position]

Table 1. Mechanical properties and brittle crack arrest temperature of steel plates tested.

Steel	Thickness (mm)	YS*1 (N/mm ²)	TS*2 (N/mm ²)	vTrs*3 (°C)	T _{K6000} *4 (°C)	²⁵ T _{K6000} *5 (°C)
A1	15	493	599	-154	-122	-111
A2	25	533	668	-131	-88	-88
A3	38	480	627	-62	-15	-34
A4	75	470	587	-36 (-13)	26	3
A5	25	471	640	-69	-36	-36
B1	25	374	504	-90	-54	-54
B2	25	380	507	-111	-73	-73
B3	38	771	814	-79	-23	-40
B4	50	790	828	-114 (-91)	-27	-45
B5	50	906	944	-59	2	-18
C1	25	366	538	-42	-3	-3
C2	25	378	496	-70	-4	-4
C3	25	354	506	-47	-6	-6
C4	25	435	545	-61	-3	-3
C5	38	772	828	-90	-10	-15
C6	50	849	885	-77	-7	-24
C7	50	882	932	-57	7	-9
C8	50	889	939	-64	7	-6
C9	50	923	979	-88 (-61)	12	-4

*1: Yield strength [lower yield point or 0.2% proof stress]

*2: Ultimate tensile strength

*3: Charpy transition temperature at middle thickness position
[(): a quarter thickness position]

*4: Crack arrest temperature at Kca=6000N/mm^{3/2} in longitudinal direction

*5: Crack arrest temperature at Kca=6000N/mm^{3/2} for 25mm thickness [Ref.WES3003¹⁾]

い、JIS Z 2242に準拠して -196°C から 20°C の温度範囲で実施した。試験片の採取位置は脆性き裂伝播停止靱性Kcaとの相関を考慮し $1/2t$ 部 (t : 鋼板厚さ) としたが、一部の供試材では $1/4t$ 部からも採取した。試験片の長手方向は主に圧延方向 (L方向) としたが、一部の供試材では圧延直角方向 (T方向) および圧延方向から 45° 傾いた方向 (LT方向) も用いた。

ESSO試験は日本溶接協会の鋼種認定試験方法¹²⁾に従い、温度勾配型試験を実施した。Fig. 2に試験片形状および試験片採取方向を示す。脆性き裂伝播停止特性は鋼板の試験方向により大きく異なるとの報告がある¹⁰⁾。そこで、Steel A2, A5およびC2については、日本溶接協会の鋼種認定試験方法¹²⁾に規定されているL方向以外に、LT方向およびT方向についても試験を行った。

ESSO試験に使用した試験機は、横型ピンジョイント負荷方式の大型構造物試験機^{13,14)}で、板厚 $15\sim 50\text{mm}$ の鋼板の試験には容量 12MN の試験機、板厚 75mm の鋼板の試験には容量 80MN の試験機を用いた。試験機のピン間距離は各々 3m , 5m である。Fig. 3に試験体の試験機タブ板へのセット図の例を示す。試験片接合部に角変形が生じないように配慮して試験機タブ板に試験片を溶接して取り付け、脆性き裂発生部を冷却してき裂進展方向に $0.3^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ の温度勾配となるように制御して、試験片厚さ 1mm 当り 1 分間以上の温度保持を行った後に試験を実施した。試験では、所定の引張試験応力を負荷した後、楔を衝撃的にノッチ部に打ち込むことにより、脆性き裂を発生、伝播させた。

Fig. 2. Specimen geometry and test direction of ESSO test.

Fig. 3. Geometry of ESSO test specimen.

脆性き裂の伝播、すなわちき裂長さの増大に応じて応力拡大係数は増加するが、き裂先端は靱性の高い高温領域に進入していくため、ある位置で脆性き裂は停止する。試験後、未破断部を十分に昇温させた後、強制的に延性破断させ、停止き裂長さを測定した。停止き裂の前縁形状は一般にサムネール状になるが、ここでは最長伝播部 (通常は板厚中央部) の長さを停止き裂長さとして定義し、そのき裂先端位置における温度をき裂停止温度とした。

各供試鋼板とも3~4体の試験を試験片幅の中心温度を変化させて実施し (温度勾配は $0.3^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)、脆性き裂伝播停止靱性Kcaの温度依存性を把握した。試験片に負荷する引張応力は、脆性き裂がなるべく試験片幅中央付近で停止するよう、過去のデータベース⁹⁾等を参考にして設定した。

3. 実験結果

3.1 シャルピー衝撃試験結果

Fig. 4にシャルピー遷移曲線の一例を示す。また、Fig. 5

Fig. 4. Charpy transition curves for steels A2 and C2.

に、L方向、LT方向、T方向試験片の破面遷移温度 $vTrs$ を整理して示す。Steel A2, A5およびC2は、いずれも板厚が25mmの供試鋼板で、脆性き裂伝播停止特性を同板厚と比較検討することをねらっている。Steel A2, A5は(211)面を集積させた鋼板で、Steel C2は集積度 $X_{(211)}$ および $X_{(100)}$ が供試鋼板の中で最も1に近い鋼板である。シャルピー遷移曲線は、Steel A2の方がSteel C2よりも低温側にあるが、き裂伝播方向への依存性が大きくL方向よりもLT方向の遷移曲線が高温側で、集合組織による靱性の異方性が大きい。Fig. 5では、過去の二相域圧延TMCP鋼の結果¹⁰⁾も比較として示している。二相域圧延により(100)面が鋼板表面に平行に集積した鋼板は、靱性に異方性を示すことが知られており^{9,10)}、(211)面の集積したSteel A2, A5も同様の傾向がある。

Table 1には全供試鋼板のシャルピー試験結果を示している。1/4t部の方が1/2t部よりも $vTrs$ が高温側となる鋼板については、() 付きで1/4t部の $vTrs$ をTable 1に付記している。

3・2 脆性き裂伝播停止試験結果 (温度勾配型 ESSO 試験結果)

Fig. 6にSteel A2, A5およびC2の脆性き裂伝播停止靱性 Kca の温度依存性を示す。これらの供試鋼板はいずれも

Fig. 5. Charpy transition temperatures $vTrs$ in L, LT and T directions.

Fig. 6. Temperature dependence of brittle crack-arrest toughness for steels A2, A5 and C2.

板厚が25mmである。脆性き裂伝播停止靱性の目安として用いられることの多い $Kca=6000\text{N/mm}^{3/2}$ を参照値として、 Kca が $6000\text{N/mm}^{3/2}$ を示す温度 T_{K6000} を全鋼板について算定した。その結果をTable 1に示す。

Fig. 7にSteel A2, A5およびC2の脆性き裂伝播停止温度 T_{K6000} の試験方向依存性を示す。図中には、過去の二相域圧延TMCP鋼の結果¹⁰⁾も比較のために示している。二相域圧延により(100)面が鋼板表面に平行に集積した鋼板では、脆性き裂伝播停止靱性が良好であることが知られている^{9,10)}が、(211)面の集積したSteel A2, A5も同様に良好な脆性き裂伝播停止特性を示している。また、二相域圧延鋼と同じくき裂伝播停止能に異方性がみられ、LT方向試験片の T_{K6000} の方がL方向試験片よりも高い傾向を示している。

Fig. 7の T_{K6000} の結果をFig. 5の $vTrs$ と比較すると、試験方向への依存性は、 T_{K6000} の方が小さくなっている。また、Fig. 5の $vTrs$ の場合に比較して、 T_{K6000} の方がSteel A2の結果がSteel C2と比べてより低温側になっている。すなわち、組織集積の影響は、シャルピー衝撃試験と ESSO 試験で必ずしも同じでない。

4. 脆性き裂伝播停止温度 T_{K6000} とシャルピー破面遷移温度 $vTrs$ の相関関係

ESSO 試験では、脆性き裂伝播停止時のき裂前縁形状は、通常、板厚方向にサムネール状となり、き裂伝播停止靱性 Kca は板厚中心 (1/2t部) の靱性の影響を強く受ける⁷⁾といわれている。

Fig. 8は脆性き裂伝播停止温度 T_{K6000} と1/2t部におけるシャルピー破面遷移温度 $vTrs$ の関係を示している。なお、T方向試験片およびLT方向試験片の T_{K6000} は、それぞれT方向およびLT方向の試験片のシャルピー破面遷移温度 $vTrs$ と対応させて整理している。Fig. 8より、 T_{K6000} と $vTrs$ は、集合組織の有無やき裂伝播方向によらず、概ね比例関係にあることがわかる。ただし、バラツキが大きく、同じ $vTrs$ で比

Fig. 7. Brittle crack arrest temperatures T_{K6000} at $Kca=6000\text{N/mm}^{3/2}$ in L, LT and T directions.

較した場合、 T_{K6000} に約80℃もの違いが生じている。

Fig. 9にESSO試験の破面写真の代表例を示す。停止き裂前縁形状はFig. 9(a), (c), (d)に示すサムネール状のものの

Fig. 8. Relationship between Charpy transition temperature vTrs at middle thickness position and brittle crack arrest temperature T_{K6000} at $Kca=6000N/mm^{3/2}$.

Fig. 9. Examples of fracture appearance of ESSO test specimen.

Fig. 10. Relationship between Charpy transition temperature vTrs at crack arrest position (middle or quarter thickness position) and brittle crack arrest temperature T_{K6000} at $Kca=6000N/mm^{3/2}$.

けでなく、Fig. 9(b)に示すSteel A4のように二重サムネール状となって最長伝播部が1/4t付近となる鋼板もあった。そこで、そのような鋼板 (Steel A4, B5およびC8) については、1/4t部のシャルピー破面遷移温度を採用し、脆性き裂伝播停止温度との関係を検討した。Fig.10にその結果を示す。Fig. 9と比較すると、より良好な T_{K6000} とvTrsの相関を与える傾向にあるが、依然としてバラツキが大きく、同vTrsと比較した場合に T_{K6000} に最大で約60℃もの違いが生じている。

5. T_{K6000} とvTrsの相関関係に及ぼす諸因子の影響に関する考察

脆性き裂伝播停止温度 T_{K6000} とシャルピー破面遷移温度vTrsの相関向上のため、 T_{K6000} に及ぼすvTrs以外の影響因子を解明すべく、板厚効果および集合組織の存在をふまえた考察を行う。

5・1 板厚25mmに換算した脆性き裂伝播停止温度 ${}_{25}T_{K6000}$ とvTrsの関係

本研究の供試鋼板の板厚は15mmから75mmの範囲にある。脆性き裂伝播停止温度 Kca は試験片板厚 t の影響を受けることから^{1,6)}、Fig.10に示した整理には板厚効果も重畳していると考えられる。 Kca の板厚効果は、例えば日本溶接協会規格WES3003解説によれば、板厚30mmの値 Kca_{30mm} を基準として(1)式で表されている¹⁾。本研究の供試鋼板の板厚は25mmのものが最も多いため、ここでは、(1)式に加えて(2)式を用いて、ESSO試験で得られた Kca を板厚25mm相当の値 Kca_{25mm} に換算した。

$$f(t) = \frac{Kca}{Kca_{30mm}} = \begin{cases} 1 - 0.05(t - 30) : t \leq 35mm \\ \frac{54}{65} - \frac{3}{1300}t : 35mm \leq t \leq 100mm \end{cases} \quad (1)$$

$$Kca_{25mm} = Kca \times f(25) / f(t) \quad (2)$$

換算した Kca_{25mm} についてFig. 6と同様の整理を行い、 $Kca_{25mm}=6000N/mm^{3/2}$ となる温度 ${}_{25}T_{K6000}$ を求めた。Table 1に、全供試鋼板について求めた ${}_{25}T_{K6000}$ の結果を示している。

Fig.11に温度 ${}_{25}T_{K6000}$ とシャルピー破面遷移温度vTrsの関係を示す。なお、vTrsはFig.10と同様に伝播停止き裂の前縁形状に応じて1/2tあるいは1/4t部の値を用いている。Fig.10と比較すると、vTrsとの相関は ${}_{25}T_{K6000}$ の方が良好となる傾向にある。ただし、依然としてバラツキが大きく、き裂伝播停止温度とvTrsの相関には、なお検討の余地を残している。

5・2 ${}_{25}T_{K6000}$ とvTrsの相関に及ぼす集合組織の影響

本実験でもみられたように、集合組織の発達は脆性き裂伝播停止特性に影響を及ぼすことから、シャルピー破面遷

移温度と脆性き裂伝播停止温度の関係には集合組織の存在を考慮する必要がある。

Fig.11に示したように、脆性き裂伝播停止温度 $_{25}T_{K6000}$ はシャルピー破面遷移温度 $vTrs$ に依存するため、 $_{25}T_{K6000}$ に及ぼす集合組織の影響を考える場合、等しい $vTrs$ の下で $_{25}T_{K6000}$ を比較する必要がある。ここではFig.12に示す手法で各供試鋼板の $_{25}T_{K6000}$ を等しい $vTrs$ 相当値に換算することにした。すなわち、 $vTrs$ と $_{25}T_{K6000}$ の関係図において、Fig.11の全データ回帰直線と同勾配の直線上で個々の実験点を移動させ、全データの中央付近の $vTrs = -75^{\circ}C$ に相当する $_{25}T_{K6000}$ の値 $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ を求めた。

Fig.13にその換算結果を鋼板シリーズ別に整理して示す。(211)面が集積したSteel A1~A5および(100)面が集積したSteel B1~B5の $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ は、ランダム組織のSteel C1~C9よりも明らかに低温側の値を示す傾向が認められる。また、(211)面が発達したSteel A1~A5は、(100)面が発達したSteel B1~B5に比較して、 $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ がさらに低温側となる傾向が認められる。

Fig.14, Fig.15に、それぞれ $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ と(100)面の集積度 $X_{(100)}$ の関係、(211)面の集積度 $X_{(211)}$ との関係を

Fig. 11. Relationship between Charpy transition temperature $vTrs$ at crack arrest position and brittle crack arrest temperature $_{25}T_{K6000}$ at $K_{Ic} = 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ for 25mm thickness.

Fig. 12. Schematic illustration of determination of $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$.

示す。各々の集合組織の影響を把握するため、Fig.14においては $X_{(211)}$ が1~2の範囲の鋼板について $X_{(100)}$ の影響を、また、Fig.15においては $X_{(100)}$ が1~2の範囲の鋼板について $X_{(211)}$ の影響を整理している。また、集積度 $X_{(100)}$ 、 $X_{(211)}$ が1未満のデータは、集合組織の無い標準試料よりも(100)面もしくは(211)面の集積が低いため、参考データとして、括弧付きで示している。Steel Cはそもそもランダム組織のため、 $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ のバラツキが大きい。これに対し、Fig.14でもFig.15でも、集合組織が発達すると、 $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ は低下し、き裂伝播停止性能が向上する傾向にある。この傾向は $X_{(100)}$ よりも $X_{(211)}$ の方が大きい。

Fig.14, Fig.15は、脆性き裂伝播停止温度 $_{25}T_{K6000}$ とシャルピー破面遷移温度 $vTrs$ の相関は、集合組織の影響を組み入れて検討する必要があることを示唆している。Fig.14およびFig.15に示した $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ と集積度 $X_{(100)}$ 、 $X_{(211)}$ の関係は必ずしも線形でないが、本研究では便宜上、これらのパラメータを組み入れて、き裂伝播停止温度 $_{25}T_{K6000}$ とシャルピー破面遷移温度 $vTrs$ の相関を求めることにした。その結果、Fig.16に示すように重回帰パラメータとして $vTrs - 12X_{(100)} - 22X_{(211)}$ が得られた。Fig. 8, Fig.10, Fig.11と比較すると、Fig.16では相関係数の高い良好な比例関係が得られていることがわかる。

Fig. 13. Comparison of $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ among steels tested.

Fig. 14. Relationship between $_{25}T_{K6000}(vTrs = -75^{\circ}C)$ and (100) pole density.

以上、脆性き裂伝播停止温度には、 $vTrs$ の他に集合組織の果たす役割も大きく、集合組織としては鋼板表面に平行な(100)面の集積よりも、(211)面の集積の影響の方が大きいことが分かった。

6. 結言

靱性レベル、板厚、組織集合度の異なる19種類の低炭素厚鋼板を用いてESSO試験を行い、脆性き裂伝播停止温度と、シャルピー靱性との相関について検討した。以下に得られた知見をまとめる。

(1) 脆性き裂伝播停止温度 T_{K6000} は、集合組織の有無やき裂伝播方向によらず、板厚中央部のシャルピー破面遷移温度 $vTrs$ に大きく依存する。ただし、関係にはバラツキが大きく、 $vTrs$ だけでは統一的な整理が困難であることが示唆された。

(2) 停止脆性き裂前縁形状は概ねサムネール状で最長伝播部は板厚中央付近となる。しかし、二重サムネール状となり最長伝播部が1/4t付近となるケースも認められた。この点を考慮し、停止き裂長さが板厚方向で最大となる位置(板厚中央もしくは1/4t部)での $vTrs$ と T_{K6000} の関係を整

理したが、依然大きなバラツキが認められた。

(3) 脆性き裂伝播停止温度 T_{K6000} は板厚の影響を受けることから、板厚25mm相当に換算した脆性き裂伝播停止温度 ${}_{25}T_{K6000}$ と $vTrs$ との関係を整理した。相関はより良好となったが、依然としてバラツキは大きく、別の因子の考慮が必要であることが示唆された。

(4) 脆性き裂伝播停止温度には、集合組織の果たす役割も大きい。集合組織としては従来から鋼板表面に平行な(100)面の集積が知られているが、本研究の供試鋼では(211)面の集積の影響の方が大きいという結果を得た。これらの検討をふまえ、脆性き裂伝播停止温度 ${}_{25}T_{K6000}$ と材料特性の相関を表すパラメータとして、 $vTrs(^{\circ}C)-12X_{(100)}-22X_{(211)}$ を得た。シャルピー破面遷移温度 $vTrs$ が低く、(100)面集積度 $X_{(100)}$ および(211)面集積度 $X_{(211)}$ が高いほど、脆性き裂伝播停止温度 ${}_{25}T_{K6000}$ が低くなることを明らかにした。

文 献

- 1) 低温用圧延鋼板判定基準, WES3003-1995, 日本溶接協会, (1995).
- 2) 日本造船研究協会報告書第87号, 日本造船研究協会第147研究部会, (1978).
- 3) 日本造船研究協会報告書第100号, 日本造船研究協会第193研究部会, (1985).
- 4) S.Machida, N.Ishikura, N.Kubo, N.Katayama, Y.Hagiwara and K.Arimochi: *J. High Press. Inst. Jpn.*, **29** (1990), 341.
- 5) T.Fukui, H.Kitada, M.Tada, K.Hirota and T.Ishikawa: *J. High Press. Inst. Jpn.*, **41** (2003), 303.
- 6) データシートシリーズ4, 構造用鋼板の破壊靱性値, 日本鉄鋼協会, 東京, (1982).
- 7) H.Shimanuki and Y.Hagiwara: *Preprints of the national meeting of JWS*, **49** (1991), 108.
- 8) H.Yajima, M.Tada, T.Haze, T.Ishikawa and J.Katsuta: *Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects*, **81** (1990), 249.
- 9) M.Tada, H.Yajima, A.Deguchi, H.Nitoo and J.Katsuta: *Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects*, **69** (1984), 227.
- 10) J.Katsuta, M.Ueda and M.Toyosada: *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, **167** (1990), 261.
- 11) T.Handa, T.Kubo, K.Amano, M.Okatsu, K.Miyamoto and M.Satoh: *Proc. of 2004 ASME Int. Mechanical Engineering Cong. ASME*, New York, (2004), IMECE2004-59739.
- 12) 鋼種認定試験方法, 日本溶接協会, (2000).
- 13) K.Ikeda: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **21-4** (1971), 50.
- 14) T.Funakoshi, M.Tanaka, Y.Nakano and K.Fujimoto: *Kawasaki Steel Giho*, **8** (1976), 284.

Fig. 15. Relationship between ${}_{25}T_{K6000}(vTrs=-75^{\circ}C)$ and (211) pole density.

Fig. 16. Relationship between ${}_{25}T_{K6000}$ and $vTrs-12X_{(100)}-22X_{(211)}$.