船体施工･鋼材製造条件を考慮した極厚部材アレスト特性高精度推定統合数値モデル構築に関する研究

Development of Accurate Integrated Numerical Model Considering Ship Construction and Steel Manufacturing Conditions for Estimation of Arrest toughness of Extra Thick Steel Plate

東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 学籍番号 37-186358 相川 大昂
指導教員 川畑友弥 准教授

Keywords: Large container ship, Brittle fracture, Arrest toughness, Texture, Dynamic 3D FEA

1. 序論

コンテナ船が担う世界の海上輸送量は近年顕著に増加している。それに従いコンテナ船は大型化し、使用鋼板は極厚化することから脆性破壊の危険性が警鐘されている。安全性の観点から脆性亀裂が発生した場合を想定し、伝播停止特性の具備が要求される。脆性亀裂停止シナリオとしてはFig.1 に示す通り二つの想定がある。この二つのシナリオにおいて、シナリオ 1 はシナリオ 2 よりもき裂が停止しやすく、要求 K_{ca} はシナリオ 2 の方が過酷であるという実験的事実が知られている。本知見は Table1 に示す通り、国際船級協会（IACS）のルールとして反映され現在まさに制定されつつあるが、このシナリオによる特性差の原因は判っていない[1]。

また、鋼材の脆性亀裂伝播・停止挙動の高精度予測の観点で局所限界応力概念が用いられている[2][3][4]が、現状は最も単純な母材モデル提唱に留まっており、コンテナ船のアレスト部位にある集合組織、溶接残留応力などの複雑な因子が考慮できていない。上記のシナリオ間での特性差を解明するためには、このような因子の影響を適切に考慮することが必須であると考えられる。

以上のような背景から、本研究ではアレスト地点に作用する上記諸因子を考慮可能な限界破壊応力概念に立脚した、より高精度な脆性亀裂伝播停止モデルの構築を目的とする。

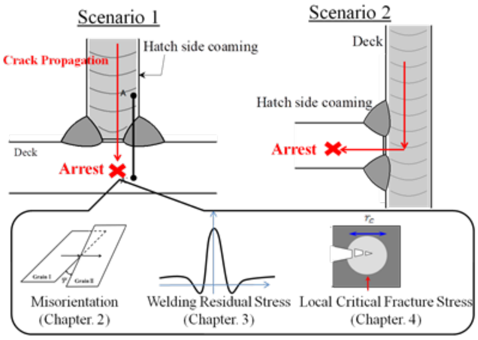


Fig.1 Container ship failure scenario and influence factors

Table 1 Fracture toughness requirement according to container ship failure scenario [1]

Scenario	Applicable Structural number	Required K_{ca} at -10℃ ($N/mm^{3/2}$) Thickness, t (mm) t≤80	Required K_{ca} at -10℃ ($N/mm^{3/2}$) Thickness, t (mm) 80<t≤100
#1	Upper deck	6000	6000
#2	Hatch side coaming	6000	8000

2. 集合組織材における亀裂伝播方向と脆性亀裂伝播特性の影響評価

2.1 伝播方向の結晶方位に着目した三面スリットシャルピー試験[5]

供試材として 3 種類の鋼種を用意した。1 つ目は市中より入手した板厚 40mm の 590MPa 級の集合組織が強く存在する TMCP 鋼(mark : S-TMCP)、2 つ目は 40mm、590MPa 級の集合組織の存在が弱い TMCP 鋼(mark : W-TMCP)、3 つ目は変態点を超す熱処理を複数回実施することにより結晶方位の偏りをなくした鋼種である(mark : NQT)。さらにこの 3 鋼種それぞれから、Fig.2 に示すように亀裂の伝播方向が板厚方向の試験片（Surface notch）と板幅方向の試験片（Cross section notch）を用意した。これらは Fig. 2 に示すシナリオ毎の伝播方向と凡そ対応している。

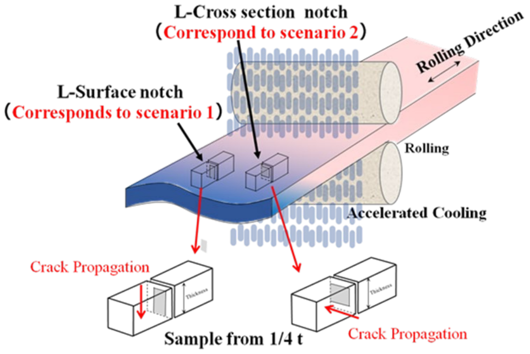


Fig. 2 Direction of test specimens

種々の温度で実験を行った後、特に本研究にとって重要な全面脆性破壊温度領域を特定し、その結果に着目して解析を行った。Table 2 に全面脆性破壊温度での吸収エネルギーを示す。Surface は表面ノッチの試験片、Cross は断面ノッチの試験片を示す。S-TMCP に関しては、板厚方向に亀裂が伝播する場合の方が吸収エネルギーが大きくなっており、1 で述べたシナリオ別の特性差が確認できた。一方 W-TMCP に関しては、伝播方向による差が明確に確認されなかった。これは W-TMCP は結晶方位の方よりが小さいためと考えられる。

Table 2 Test results of three-sided slit Charpy test

Specimen		Absorbed energy [J]
S-TMCP	Surface	13.2
	Cross	10.5
W-TMCP	Surface	7.64
	Cross	7.67
NQT	Surface	12.8
	Cross	8.60

2.2 結晶方位差と破壊靭性の相関に関する考察

先行研究[6]において、脆性亀裂が進展するのに必要なエネルギーは粒界の方位差に依存するとの知見が報告されている。粒界の方位差を 3 つの独立な成分で分類するとき、特に Twist 角の成分を大きく持つ粒界は亀裂が進展するのに必要なエネルギーが大きく、亀裂伝播に対して抵抗として働く。この観点から、今回の実験結果を考察した。すなわち、各鋼種につき、試験片から亀裂伝播面の結晶方位の情報を EBSD 解析により抽出し、各亀裂伝播方向について、Twist 角を算出した。以下にその手法を示す。

まず{100}面の法線ベクトルを求めて、亀裂進展方向に対して結晶面の法線ベクトルを投影し、投影後の法線ベクトルの内積を計算することで Twist 角を算出する。亀裂進展に対して Fig. 3 のように結晶粒 1,2 が並んでおり、y 軸方向に亀裂が進展すると考える。結晶粒 1 の{100}面の法線ベクトルを $\boldsymbol{n}_1=(a_x, a_y, a_z)$ 、結晶粒 2 の{100}面の法線ベクトルを $\boldsymbol{n}_2=(b_x, b_y, b_z)$とする。それぞれを亀裂進展方向である y 軸方向に対して投影した後のベクトルは、$\boldsymbol{N}_1 = (a_x , a_z)$、$\boldsymbol{N}_2 = (b_x , b_z)$となる。この二つのベクトルのなす角 θが Twist 角となるので、内積計算より Twist 角は以下の式で求まる。

$$\theta = cos^{-1}\left(\frac{a_x \cdot b_x + a_z \cdot b_z}{\sqrt{(a_x{}^2 + a_z{}^2)(b_x{}^2 + b_z{}^2)}}\right) \qquad (1)$$

法線ベクトルは EBSD 解析により抽出したデータより、オイラー角のマトリクスを求めることで算出できる。

以上の算出方法により材料・各方向の平均 Twist 角を算出した。その伝播方向平均 Twist 角により、完全脆性破面が得られた温度の吸収エネルギーについて整理した。この結果より、集合組織の強い S-TMCP と熱処理を施した NQT では吸収エネルギーと Twist 角に相関が得られた。一方 W-TMCP では、わずかながら逆の相関性が得られた。この理由としては W-TMCP の鋼種は集合組織の発達が弱く、板厚方向と板幅方向に関しては組織がそこまで偏っていないことが理由の一つとして考えられる。実際に Surface notch と Cross-section notch の吸収エネルギーの差も非常に小さく、平均 Twist 角の差も非常に小さいため、差が大きく出ていない。一定の吸収エネルギーの差がある場合、その差は平均 Twist 角と差があるといえる結果である。

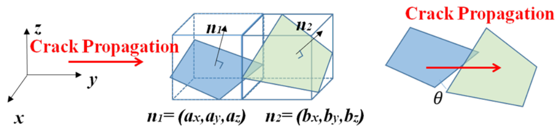


Fig. 3 Misorientation of neighbor two grains

さらに粒界数や亀裂伝播距離といった重要な因子を考慮するため、粒界数と亀裂伝播距離に対応する走査距離を考慮したパラメタ k を導入した。これは式(2)で数式表現される。伝播方向平均 Twist 角に 1μm あたりに存在する粒界数を乗じたものである。ここで、$\overline{\Psi}$は伝播方向平均 Twist 角、N は調査した粒界数の合計、l は全走査距離である。

$$k = \overline{\Psi} \cdot \frac{N}{l} \qquad (2)$$

この k によって Table 2 の試験結果を整理したのが Fig. 4 である。この結果より、特に TMCP 鋼については、鋼種によらず線形の関係で整理することができることが確認でき、亀裂方向に配列する Twist 角により、鋼の靭性が予想できる可能性が示唆された。

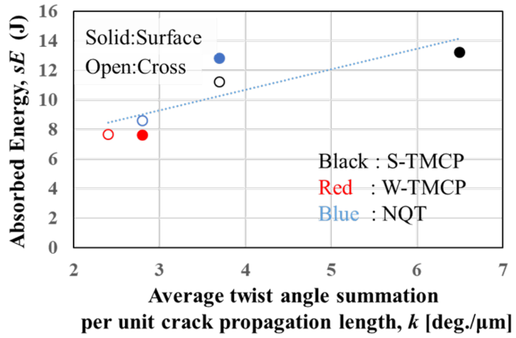


Fig. 4 Correlation of k and absorbed energy at the entirely brittle fracture temperature

2.3　検証のための特殊 DWTT 試験

この節では、脆性亀裂伝播停止現象とより直接的な対応を観察できる評価手法である DWTT 試験を実施した結果について述べる。試験片を特殊に加工し、試験片の中程を TMCP に置き換え、亀裂が板厚方向に進展する試験片と板幅方向に進展する試験片を用意し、実験を行った。試験結果としては、板厚方向に進展する試験片の方が板幅方向に亀裂が進展する場合より、10℃程度靭性が良好との結果を得られた。-20℃の実験結果の一つを Fig. 5 に示す。

Surface	Cross

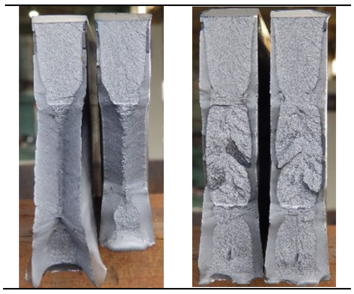


Fig. 5 Example of special DWTT test results at -20℃

3. 溶接残留応力を考慮した脆性亀裂伝播の数値シミュレーション

材料の各温度における応力歪曲線、熱伝導率、比熱、密度などの材料定数を便覧値などから取得し、熱弾塑性有限要素法により溶接後十分時間が経過した後の残留応力分布を求めた。そののちこの残留応力を考慮した脆性亀裂伝播有限要素シミュレーションを行い、残留応力の影響を評価した。ここでは紙面の関係上省略する。

4. 小型試験による限界破壊応力$\sigma_{f,propagate}$取得のための数値モデル構築

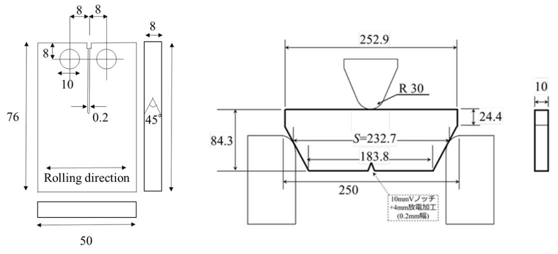
脆性亀裂伝播成立のための局所クライテリオンとして最も有力な候補として局所限界破壊応力が考えられる。これまでの検討 [4]によれば局所限界応力を実験により取得できれば数値シミュレーションにより脆性き裂伝播の再現計算が可能としている。そこで本研究では、局所限界破壊応力を小型試験にて同定するための実験および解析を実施する。

4.1　代替小型試験の探索

Table3 に示す供試材を用いそれぞれ Fig.6 に示す異なる小型試験（N50：DCB(Double Cantilever Beam)、NS32,NS50:テーパー付き曲げ）の局所限界破壊応力取得適用性を検討した。

Table3 Mechanical properties of steels used

Mark	YS [N/mm^2]	TS [N/mm^2]	vTrs [deg.C]	Small scale test specimen
N50	368	538	-54	DCB
NS32	326	498	-57	Taper bend
NS50	258	551	-16	



(a) DCB　　(b)Taper bend

Fig.6 Configuration of specimen used

有限要素法メッシュ分割の一例として DCB の有限要素モデルの概要を Fig. 7 に示す。DCB、テーパ曲げ試験どちらの解析モデルでも同様に、動的陰解法各ステップにて節点を開放し、動的亀裂を表現した。亀裂伝播部のメッシュサイズは両試験のモデルにおいて共通で 50μm×50μm×50μm である。出力データも共通で、亀裂前方先端 20 要素の亀裂進展方向の座標と亀裂開口方向の反力(RF)とした。この反力を用いて、式(3)より亀裂開口方向応力を算出した。ここで d は亀裂伝播方向の要素サイズ、t は板厚方向の要素サイズである。特性距離 r_c =150μm とした場合の板厚中心における開口方向応力の推移について整理した。

$$\sigma_f = \frac{RF}{d \times \frac{t}{2}} \tag{3}$$

N50 鋼の解析結果を Fig. 8、NS32 と NS50 の解析結果について Fig. 10 に示す。N50 の大型試験により取得されている局所限界破壊応力は 2070±100MPa である[4]ので、解析結果より亀裂伝播の大部分で局所破壊応力を同定できていることが確認できる。NS32、NS50 の解析結果においても亀裂先端の開口方向応力は一定に近い形で推移しており、NS32 と NS50 の局所限界破壊応力はそれぞれ 2000～2100MPa、1500～1600MPa 程度と推測できる。次の段階として大型試験による真の局所破壊応力を取得する必要がある。このためのサイドグルーブ付き試験片[4]の設計を行ったが紙面の都合で割愛する。

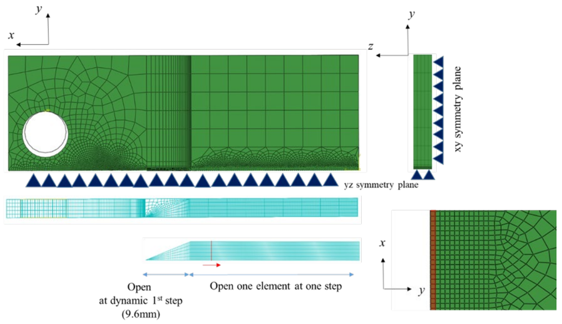


Fig. 7 Schematics of the dynamic 3D elasto-plastic FEM model simulating the preliminary experiments

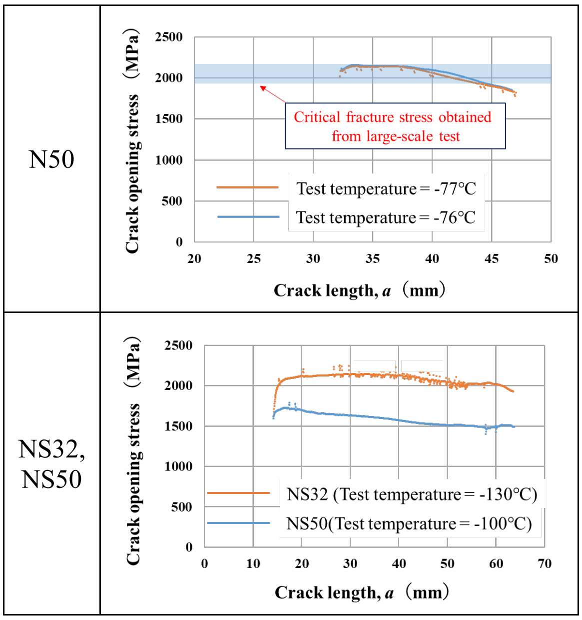


Fig. 8 Local stress at the crack tip calculating from FEM for N50, NS32 and NS50

4.2　さらなる簡易推定法の可能性

小型試験法が確立しても動的有限要素法は実施しなくてはならず、さらにそのためには低温や動的環境での応力歪曲線を実験的に得ることが必要であり、十分に簡便であるとは言えない。そこで、これまで研究室で保有している局所限界破壊応力データを含め５鋼種について、品質保証試験として採用されている温度勾配型 ESSO 試験との相関を検討したところ、Fig. 9 および式(4)に示すように-60℃とかなり低い温度における K_{ca} と良い相関があることが判った。式(4)はあと常温での降伏応力情報さえ入手できれば局所限界破壊応力が推定できることを示唆しており、適用範囲には留意する必要があるが、第一近似として有用である。

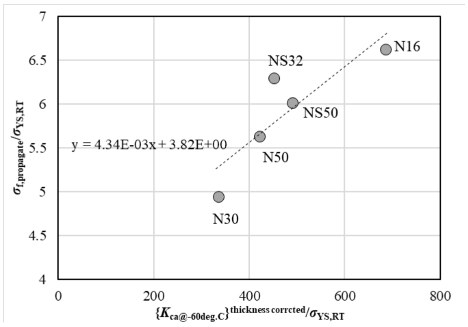


Fig. 9 Simplified regression of local critical stress by low temperature ESSO test results

$$\sigma_{f,propagate} = 4.34 \times 10^{-3} K'_{ca@-60deg.C} + 3.28\sigma_{YS}@RT \tag{4}$$

5. 結論と今後の課題

コンテナ船のシナリオ別脆性亀裂伝播停止性能の差異を明確化することを目的とし、材料の集合組織、溶接残留応力の影響を定量的に検討するための数値モデルを作成した。今後の詳細検討のためのフレームワークとなることを期待できる。また２種類の小型試験を行い、亀裂伝播速度を測定し、それを入力値とした有限要素モデルを構築して、各鋼種の局所限界破壊応力を推定した。以下に得られた結果を要約する。

・近年多く用いられる TMCP 鋼の亀裂伝播方向による伝播抵抗を定量化するため、採取方向を工夫した三面スリットシャルピー試験を実施した。亀裂伝播方向の粒界方位差である Twist 角と粒界数、走査距離を考慮することで吸収エネルギーを整理することでシナリオ別靭性差を説明できる可能性、また靭性予測の可能性が示された。

・溶接後の残留応力の数値解析とその結果を用いた脆性亀裂伝播モデルの構築フレームワークを作成し、脆性亀裂伝播に影響があることを確認した。

・N50 を用いた DCB 試験を行い脆性亀裂伝播速度履歴を取得し、それを入力値とした有限要素解析により、同鋼の局所限界破壊応力を簡易的に得た。別途大型試験と解析により得られている局所限界破壊応力と一致することから、小型試験のみで局所限界破壊応力を取得できる可能性が示唆された。同様に NS32 と NS50 の小型試験を行い、局所限界破壊応力を推定することができた。また、真の局所限界破壊応力を取得するためのサイドグルーブ付き試験片形状をパラメトリックスタディを通して設計した。

今後の課題としては、結晶粒間の他の成分の亀裂伝播への影響を考慮に入れる必要がある。溶接部残留応力に関する解析に関しては、実際の溶接残留応力を再現し、種々のパラメトリックスタディを行うとともに、実験も必要になろう。また局所限界破壊応力推定法に関しては、実際にサイドグルーブ付き試験片を行い、NS32 と NS50 の真の局所限界破壊応力を取得し、小型試験で得られた値の妥当性を検証する必要がある。

参考文献

[1] K. Matsumoto et al, *Proceedings of the IASTED International Conference on Information and Knowledge Sharing*, 2018, Anaheim, CA: ACTA Press., pp.122-127.
[2] 渡部、平成 23 年度東京大学修士論文
[3] 川畑ら, *日本船舶海洋工学会論文集*, Vol.16(2013), pp.77-87.
[4] F.Yanagimoto, *Materials & Design*, 144, 361-373,
[5] 出口、多田、矢島、日本造船学会論文集、第 167 号、pp.271-277
[6] D. Nakanishi et al, *Acta Materialia*, Volume 144, 2018, pp.768-776.
[7] 逸見, 平成 30 年度東京大学修士論文
[8] 西薗、平成 31 年度東京大学修士論文