

船体設計における疲労亀裂伝播評価のための荷重履歴モデル設定法に関する一考察

三好, 祐司
株式会社大島造船所設計部

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

細川, 竜我
今治造船株式会社

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/7361950>

出版情報 : Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
40, pp.655-658, 2025-05-29. 日本船舶海洋工学会

バージョン :

権利関係 : © The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



船体設計における疲労亀裂伝播評価のための荷重履歴モデル設定法 に関する一考察

正会員

三好 祐司 *

正会員

松田 和貴 **

細川 竜我 ***

正会員

後藤 浩二 **

A Study on Modeling Method of Load History for Evaluation of Fatigue Crack Propagation in Hull Design

by Yuji Miyoshi *, *Member*Kazuki Matsuda **, *Member*

Ryuga Hosokawa ***

Koji Gotoh **, *Member*

Key Words: *Fatigue crack growth, Paris law, Re-tensile plastic zone generated load,
Stress long-term prediction*

要旨

船体が設計寿命の内に受ける波浪変動外力の長期頻度分布に基づき、種々の荷重履歴モデルを作成し、Paris則とRPG荷重基準の亀裂伝播則を用いた疲労亀裂伝播挙動解析を実施した。Paris則による伝播解析結果と比べRPG荷重基準の伝播則による解析結果は亀裂伝播が遅かった。これは高い引張応力の作用後に生じる亀裂進展遅延効果をParis則では考慮できないためであった。RPG荷重基準の亀裂伝播則を用いた場合、早期に高い応力が作用する荷重履歴モデルほど早期に遅延効果が生じるため亀裂伝播は遅かった。実際の材料においても過大荷重による亀裂進展遅延効果が生じることを勘案すると、Paris則による推定結果は過度に安全側の予測結果を与える可能性が示唆された。

*株式会社大島造船所 設計部 九州大学 大学院

**九州大学 大学院 工学研究院 海洋システム工学部門

***今治造船株式会社 (研究当時 九州大学 工学部)

©日本船舶海洋工学会

1. 緒 言

CO₂削減を目的にアンモニア、メタノールなど新燃料の利用が拡大しており、これらの輸送を目的とした船舶の建造も拡大しつつある。これら液体輸送船の荷物タンク（区画）の合理的な設計手法として、荷物タンクを構成する構造から万一疲労亀裂が発生しても不安定な破壊挙動を示す脆性破壊が発生する前に内容物の漏洩を確認することでこれを回避するという“Leak before Failure”の思想を満足する設計の採用が好ましい。この思想に基づき設計されたタンクはタイプ B に分類され、航行中に貨物タンク中の溶接継手を起点に成長する疲労亀裂成長履歴を適切に評価する必要がある。タイプ B の思想に沿って疲労亀裂成長評価を行う具体的な手順¹⁾として、疲労亀裂伝播解析において、船舶が設計年数 25 年で受ける荷重 10⁸ 回のうち 1 回の頻度で受ける荷重の大きさを表している 10⁻⁸ 期待値の応力を最大値として、応力を減少させる方向で 8 分割以上行うとする応力履歴モデル（Fig.1 参照）で解析を行うことが提示されているが、このモデルの設定根拠は提示されていない。

ところで、疲労亀裂伝播履歴は式（1）で与えられる Paris 則を用いることが一般的である。

$$da/dN = C_1(\Delta K)^{m_1} \quad (1)$$

ここで、 a ：疲労亀裂長さ、 N ：繰返し数、 da/dN ：疲労亀裂伝播速度、 ΔK ：応力拡大係数範囲、 C_1 、 m_1 ：材料定数。

タイプ B タンク設計では Paris 則を用いることが一般的であるが、Paris 則は変動荷重履歴下において疲労亀裂伝播履歴の推定精度が劣る場合が多いという問題がある。一方、豊貞ら²⁾は、亀裂先端に引張塑性域が形成される時の荷重（Retensile Plastic zone Generated load: RPG 荷重）を基準とする有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとした疲労亀裂伝播則を用いることで変動荷重履歴下においても良好に疲労亀裂成長履歴推定できることを報告している。

$$da/dN = C_2(\Delta K_{RPG})^{m_2} \quad (2)$$

ここで、 a 、 N 、 da/dN ：式（1）と同じ、 ΔK_{RPG} ：RPG 荷重基準の有効応力拡大係数範囲、 C_2 、 m_2 ：材料定数。

本研究では、Paris 則と ΔK_{RPG} をパラメータとする亀裂伝播則である式（1）と（2）を疲労亀裂伝播則として採用し、Fig. 1 およびこれに類似する複数の応力履歴条件下における疲労亀裂伝播解析を実施し、結果を比較することで応力履歴モデルの設定法が疲労亀裂伝播推定結果に及ぼす影響を考察した。

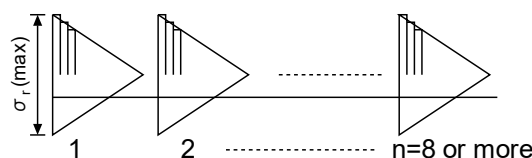


Fig. 1 Stress histories considering the long-term stress prediction.

2. 応力履歴モデルの設定

波浪荷重の長期頻度分布を考慮し、船の設計寿命のうちに作用する応力振幅とその回数を Table 1 に示すように設定した。この応力頻度分布を 9 分割し、Fig. 2 に示すように (a) 漸増モデル、(b) 漸減モデル、(c) 漸増&漸減モデルの 3 種類の履歴モデルを作成した。なお、Fig. 2 は模式的に各レベルの応力の横幅（Count）を均等に描画しているが、実際には Fig. 3 に例示するように、各応力の回数は 10 倍ずつ異なり、繰返し数全体の約 9 割は 10⁻¹ 期待値の応力振幅が占めている。また、応力頻度分布の分割数が亀裂伝播挙動に及ぼす影響を調査するため、Table 1 と同じ履歴を 300 分割したモデルも作成した。Table 1 に示した荷重履歴のうち、10⁻⁸ 期待値と 10⁻⁷ 期待値の応力の回数はそれぞれ 9 回、90 回であり、300 分割すると回数が 1 回未満となるが、数値解析的にはサイクル数は 1 回未満でも実数値として入力できるため、300 分割後の 10⁻⁸ 期待値と 10⁻⁷ 期待値の応力の回数はそれぞれ、0.03 回、0.3 回として荷重履歴モデルを作成した。

一方、疲労寿命を作用応力の 10⁻⁴ 期待値や 10⁻² 期待値が一定振幅で作用するとして評価する場合もあることから、これら一定応力振幅条件における解析も実施した。また、Paris 則による解析ではさらに、式（3）で表される等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} を用いた解析も併せて実施した。

$$\Delta K_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^8 \Delta K_i^{m_1} N_i}{\sum_{i=1}^8 N_i} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (3)$$

ここで、 ΔK_i ： i 番目の応力レベルにおける応力拡大係数範囲、 N_i ： i 番目の応力レベルの繰返し回数。

なお、全ての荷重履歴モデルにおいて応力比は $R=0$ としており、全寿命中における平均応力変動の影響は考慮していない。

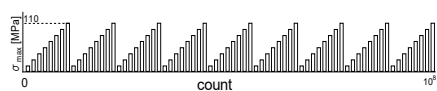
3. 疲労亀裂伝播解析

3.1 解析条件

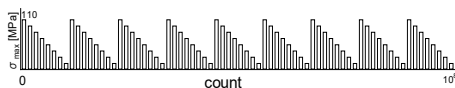
解析対象材料として、液体タンクの製作に供されることが多い低温用圧延鋼材 KL33 (Class NK) を想定し、ヤング率 206,000 MPa、ポアソン比 0.3、及び降伏応力 325 MPa と設定した。Paris 則と RPG 荷重基準の亀裂伝播則における C 、 m

Table 1 Applied stress ranges and corresponding counts.

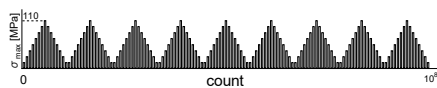
Return Period	Stress [MPa]	Count
10^{-8}	110.0	9
10^{-7}	96.3	90
10^{-6}	82.5	900
10^{-5}	68.8	9000
10^{-4}	55.0	90000
10^{-3}	41.3	900000
10^{-2}	27.5	9000000
10^{-1}	13.8	90000000
Total Count		99999999



(a) Increase model



(b) Decrease model



(c) Increase & Decrease model

Fig. 2 Schematic illustration of applied stress history models.

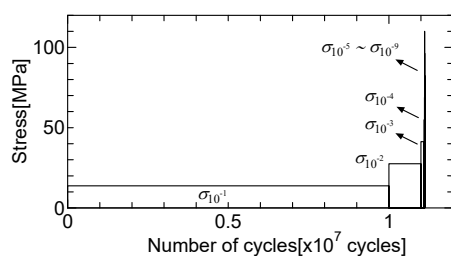


Fig. 3 An example of actual relation between number of cycles and stress range (one block in Fig.2 (a)).

の値を Table 2 に示す. Table 2 に示した材料定数は著者らが同程度の降伏応力値を有する溶接構造用鋼を対象に同一材から採取した試験片により実施した疲労亀裂伝播試験結果より式 (1) 及び式 (2) の形に最小二乗近似して決定された値³⁾である.

解析対象形状として, 無限平板中に存在する中央貫通亀裂を想定し, 初期亀裂半長を 5 mm として, 前章に示した応力

履歴モデルの応力履歴を載荷し, 亀裂伝播履歴を Paris 則, 及び RPG 荷重基準の亀裂伝播則を用いて推定した. 後者については豊貞らによる疲労亀裂伝播シミュレーションコード FLARP²⁾を用いた結果である.

荷重履歴モデルと亀裂伝播則を組み合わせた解析条件一覧を Table 3 に示す. なお, 等価応力拡大係数範囲 ΔK_{eq} を用いた解析条件は ΔK が一定の (応力に換算すると一定でない) 条件となるが, Table 3 においては Constant 条件に含めている.

Table 2 Material constants for each fatigue crack propagation law.

(unit in MPa $m^{0.5}$ for ΔK and ΔK_{RPG} , m/cycle for da/dN)

	C	m
Paris' law	1.332×10^{-12}	3.512
Crack propagation law based on RPG criterion	4.505×10^{-11}	2.692

Table 3 Calculation conditions for each stress history and propagation law.

Condition	Propagation law	Constant/Variable	Model
RPG-inc	based on RPG	Variable	Increase
RPG-dec			Decrease
RPG-in&de			Increase & Decrease
RPG-300-inc			Increase
RPG-300-dec			Decrease
RPG-300-in&de			Increase & Decrease
RPG- 10^{-2}		Constant	10^{-2} stress
RPG- 10^{-4}			10^{-4} stress
Paris-inc	Paris	Variable	Increase
Paris-dec			Decrease
Paris-in&de			Increase & Decrease
Paris- 10^{-2}		Constant	10^{-2} stress
Paris- 10^{-4}			10^{-4} stress
Paris-eq			Equivalent ΔK

3.2 解析結果と考察

Table 3 に示した条件下での伝播解析により得られた亀裂成長曲線を Fig. 4 に示す. Fig. 4 より, 亀裂伝播挙動を大別すると, 降順で Paris-eq を除く一定振幅条件, 次いで Paris 則による変動振幅条件と等価応力拡大係数範囲を用いた条件, そして RPG 基準の伝播則による変動振幅条件の順となった.

一定振幅条件では伝播則による亀裂伝播挙動の差異は小さい. 一定振幅条件が変動振幅条件と比べて亀裂伝播が速い理由としては, 変動応力条件では亀裂進展に殆ど寄与しない 10^{-1} 期待値の応力振幅が全繰返し数の 9 割を占めているためと考えられる. 10^{-1} 期待値の応力振幅まで考慮した等価応力

拡大係数範囲条件 (Paris-eq) では, Paris 則による解析結果と同等の亀裂伝播速度が得られた。

変動応力条件においては, Paris 則による推定結果の方が RPG 基準の亀裂伝播則を用いた推定結果よりも亀裂伝播が速い。この原因は, Paris 則では過大荷重による亀裂進展遅延効果を考慮できないためと推測される。Paris 則による変動条件の推定結果の中で見ると, Paris 則による伝播推定では繰返し応力と亀裂長さにより計算される ΔK の値に応じて da/dN が加速されて亀裂長さ a が増加していくため, 高い応力がより早く作用する漸減, 漸増&漸減, そして漸増の順に亀裂伝播が速い結果が得られたと考えられる。

RPG 基準の伝播則による変動条件の推定結果の中では, Paris 則時の推定結果とは逆に, 亀裂伝播挙動は降順で漸増, 漸増&漸減, そして漸減の順に亀裂伝播が速いことが分かる。これは, 高い応力がより早く作用した方が亀裂進展遅延効果が早期に発生するためであると考えられる。また, 300 分割した荷重履歴モデルはいずれも 9 分割の漸減モデルと類似した亀裂伝播挙動を示しており, 全体的に 9 分割モデルと比べ亀裂伝播が遅く, モデル毎の伝播速度の差異が小さいことが分かる。この挙動も亀裂進展遅延効果が関係していると考えられ, 300 分割では 9 分割と比べ早期に高い応力が作用し, 遅延効果が早期に生じたことに依ると推測される。

以上より, Paris 則による伝播解析は全体的に RPG 荷重基準の伝播則による解析と比べ, 過大荷重による亀裂進展遅延効果が考慮されないため, 亀裂伝播が速い結果が得られた。実際の疲労亀裂伝播挙動の測定データと比較していないため, 定量的な評価は出来ないが, 実際の材料においても過大荷重による亀裂進展遅延効果が生じることを勘案すると, Paris 則による推定結果は過度に安全側の予測結果を与えている可能性が示唆される。

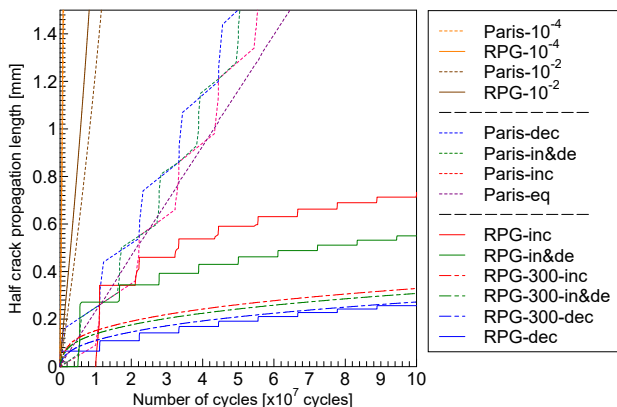


Fig. 4 Crack growth curves obtained from the simulation under various calculation conditions.

4. 結言

船体が設計寿命の内に受ける波浪変動外力の長期頻度分布に基づき, 種々の応力履歴モデルを作成した。そして, Paris 則と ΔK_{RPG} をパラメータとする亀裂伝播則を用いた疲労亀裂伝播解析を実施し, 解析結果を比較することで応力履歴モデルの設定法が疲労亀裂伝播推定結果に及ぼす影響を考察した。得られた結論を以下に示す。

- (1) Paris 則による亀裂伝播解析結果と比べ RPG 基準の伝播則による解析結果は亀裂伝播が遅い。これは高い引張応力が作用した後に生じる亀裂進展遅延効果を Paris 則では考慮していないためである。
- (2) RPG 基準の亀裂伝播則を用いた場合, 早期に高い応力が作用する荷重履歴モデルほど亀裂伝播は遅かった。この原因は, 早期に大きな応力が作用するほど, より早い段階で亀裂進展の遅延効果が生じるためである。これと同じ理由で, 応力頻度分布の分割数を増やした方が亀裂伝播は遅い傾向を示した。

将来課題としては, 平均応力変動も考慮して設定した応力履歴下での疲労亀裂伝播解析結果や実測結果も考慮しつつ, 過度に安全側評価にならない, 適切な荷重履歴モデルの提案が挙げられる。また, 実機を考慮すると表面亀裂問題を対象とする検討も必要であろう。

参考文献

- 1) Emi H., Oka M., Yamamoto N.: An Empirical Study on Reliability of Strength for Independent Prismatic Tank Type B, ClassNK Technical Journal No.215, pp.9-50, 1991(II) (in Japanese)
恵美洋彦, 岡実, 山本規雄: 独立型方形タンクタイプ B の強度信頼性に関する実証的研究, 日本海事協会会誌, No. 215, pp.9-50, 1991 (II)
- 2) Toyosada M., Gotoh K., Niwa T.: Fatigue crack propagation for a through thickness crack: a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, Int J Fatigue, 26(9), pp.983-992, 2004
- 3) Toyosada M., Niwa T.: Prediction of fatigue life for steel structures, Kyoritsu Shuppan Co., Ltd., 2001 (in Japanese)
豊貞雅宏, 丹羽敏男: 鋼構造物の疲労寿命予測, 共立出版, 2001.