

ホイットピングによる振動応力を考慮した疲労寿命評価法

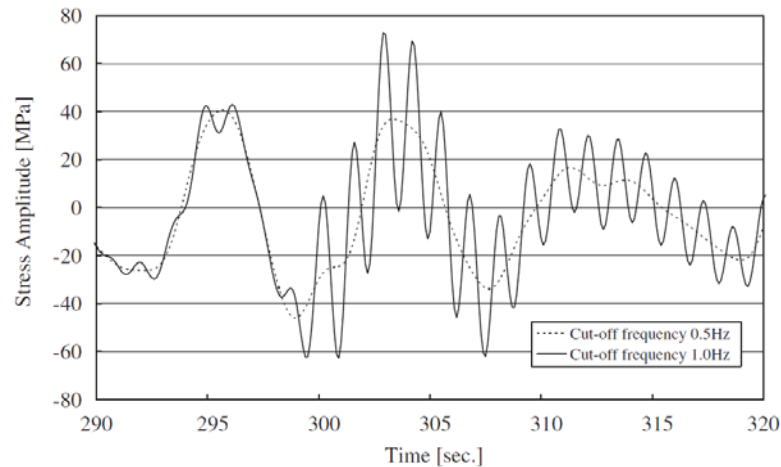
構造安全評価系

* 岡 正義

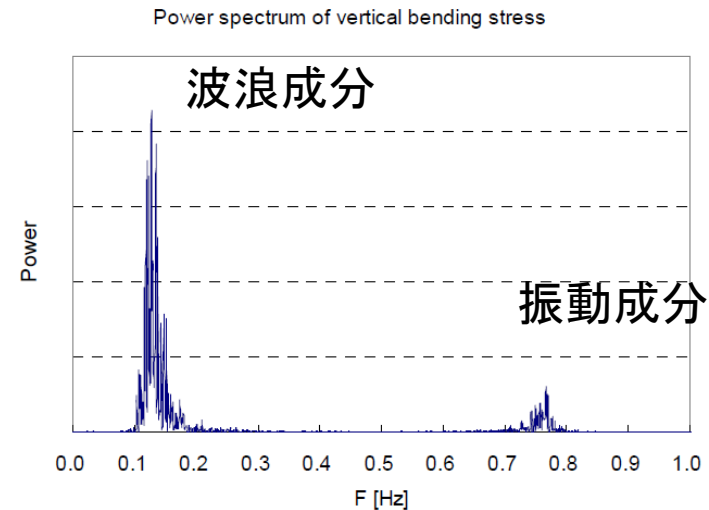
構造基盤技術系

丹羽 敏男

背景と目的



(Okada et.al, 2006)



(Oka et.al, 2009)

コンテナ船の実船モニタリングによる甲板応力波形及びパワースペクトル

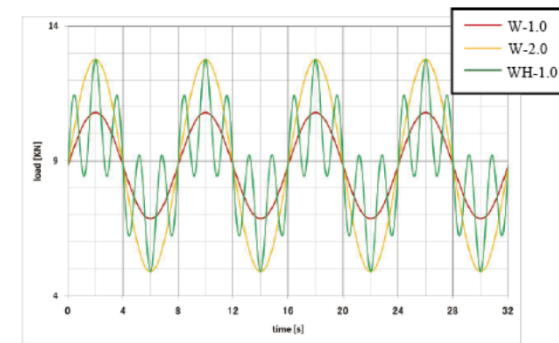
背景： 船の大型化に伴い弾性振動の応力レベルが増大
実船応力モニタリングでホイッピングが多数報告
疲労強度の低下が懸念 ⇔ 損傷報告は稀

目的： コンテナ船等の更なる大型化のニーズに応えるため、
ホイッピングの重畳による疲労寿命への影響の明確化を図る

評価法

(従来) マイナー則による疲労被害評価

- ホイッピングのある場合とない場合で、疲労寿命に2倍程度の差
 - 波形処理やピーク計数による評価結果の妥当性 (周波数フィルタ, レインフロー法, 等)
 - 荷重順序が考慮されない



き裂伝播則によるき裂長評価

- (先行研究) 重畳波形に対する実験的検証 (後藤ら, 角ら)
 - 重畳した振動の振幅が小さい場合は包絡波形で簡易に評価可能
- 実荷重での検証が課題
 - 多くの実船データが必要 (⇔データ不足)
 - **ホイッピングの影響を定量分析するため荷重をモデル化**
 - **疲労被害評価の検証**

後藤浩二他, 複数周波数成分を有する重畳応力条件下における疲労き裂伝播挙動解析, 日本船舶海洋工学会論文集 第17号, 2013
角洋一他, 小振幅荷重を重畳した繰返し荷重下の疲労き裂伝播について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 第16号, 2013

船体疲労寿命評価の流れ

線形荷重

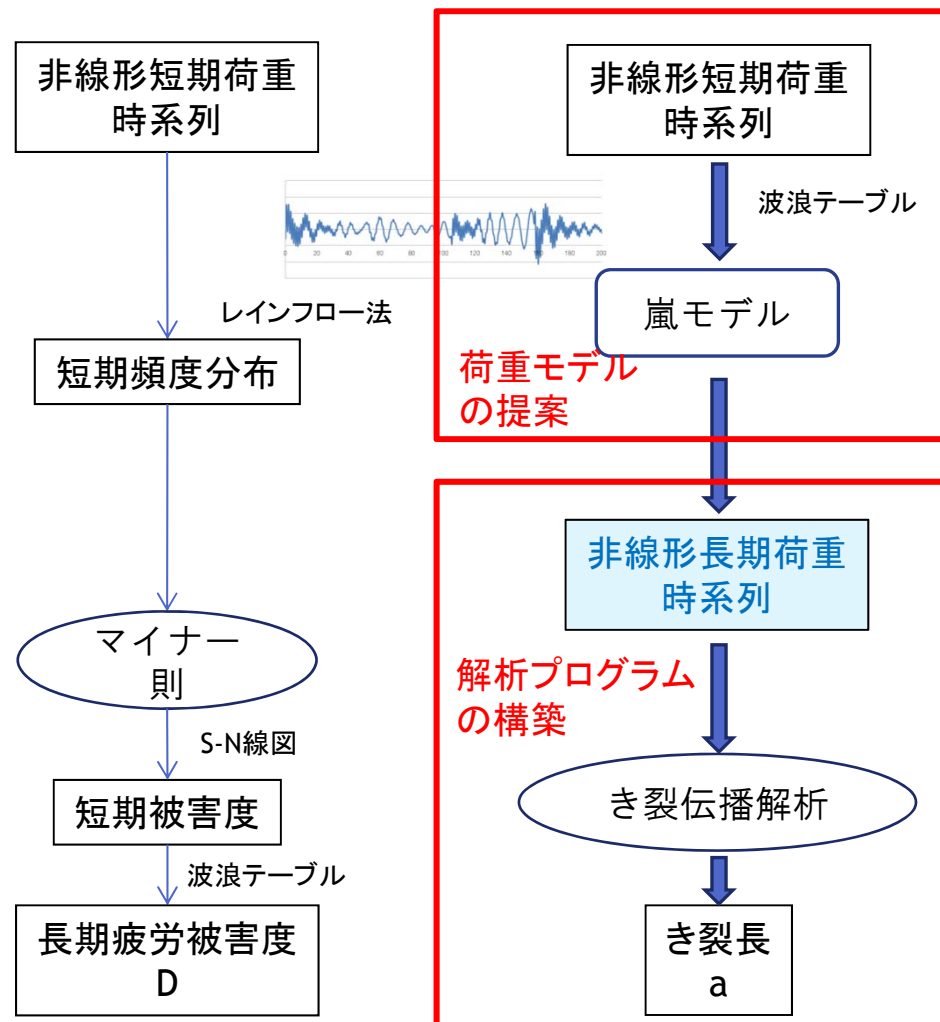
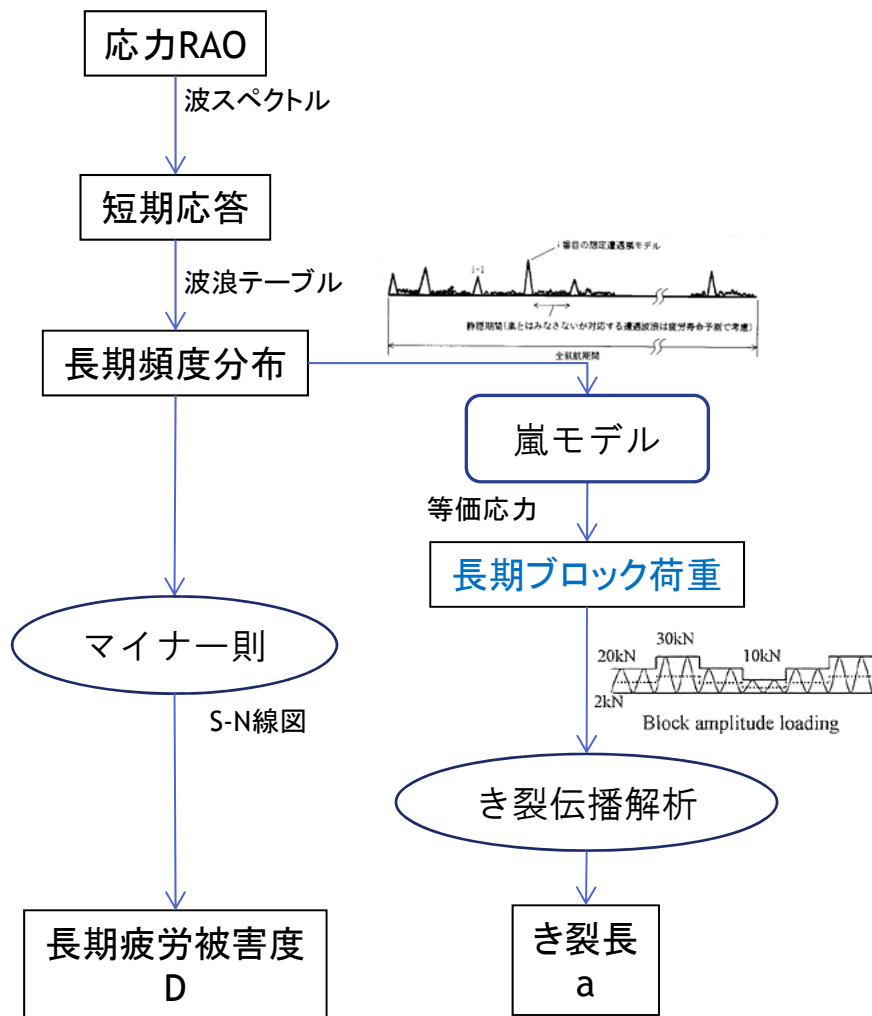
非線形荷重

マイナー則
(1990年頃)

き裂伝播則
(1992年頃)

マイナー則
(2000年頃～)

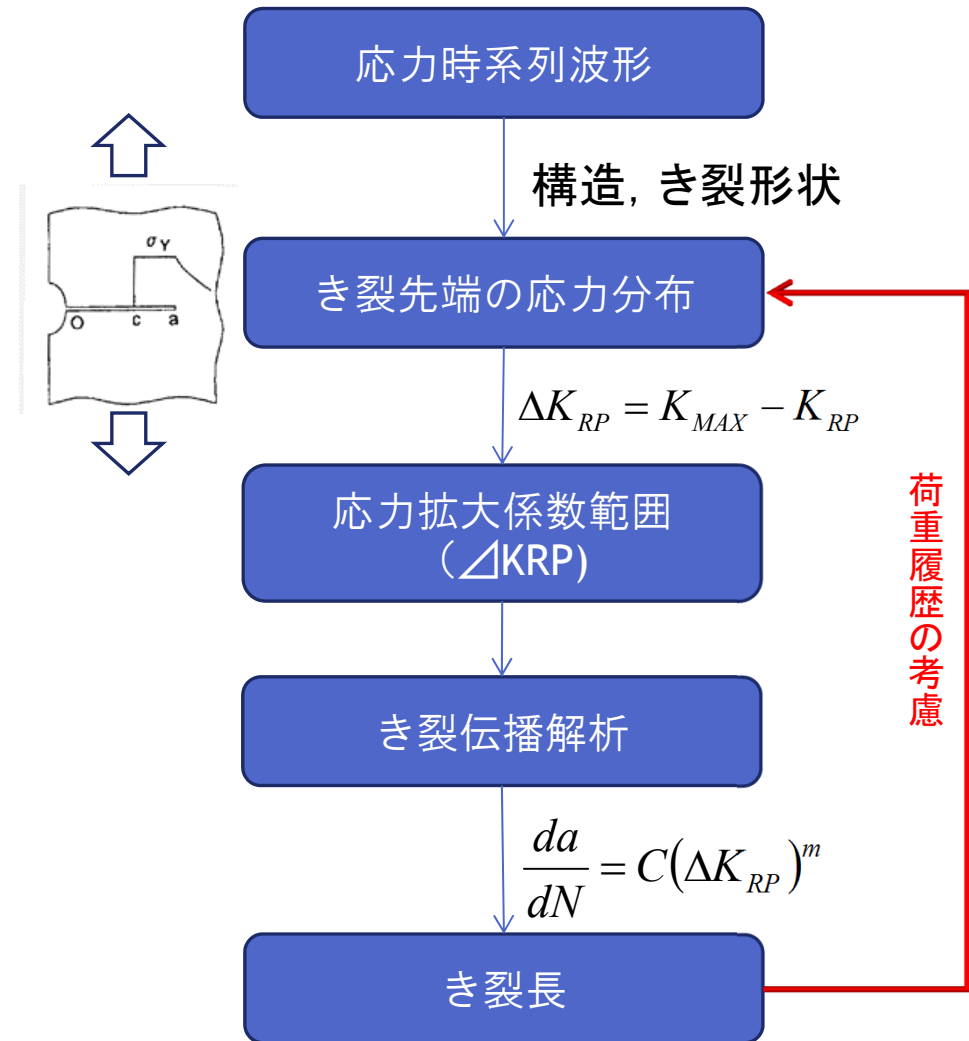
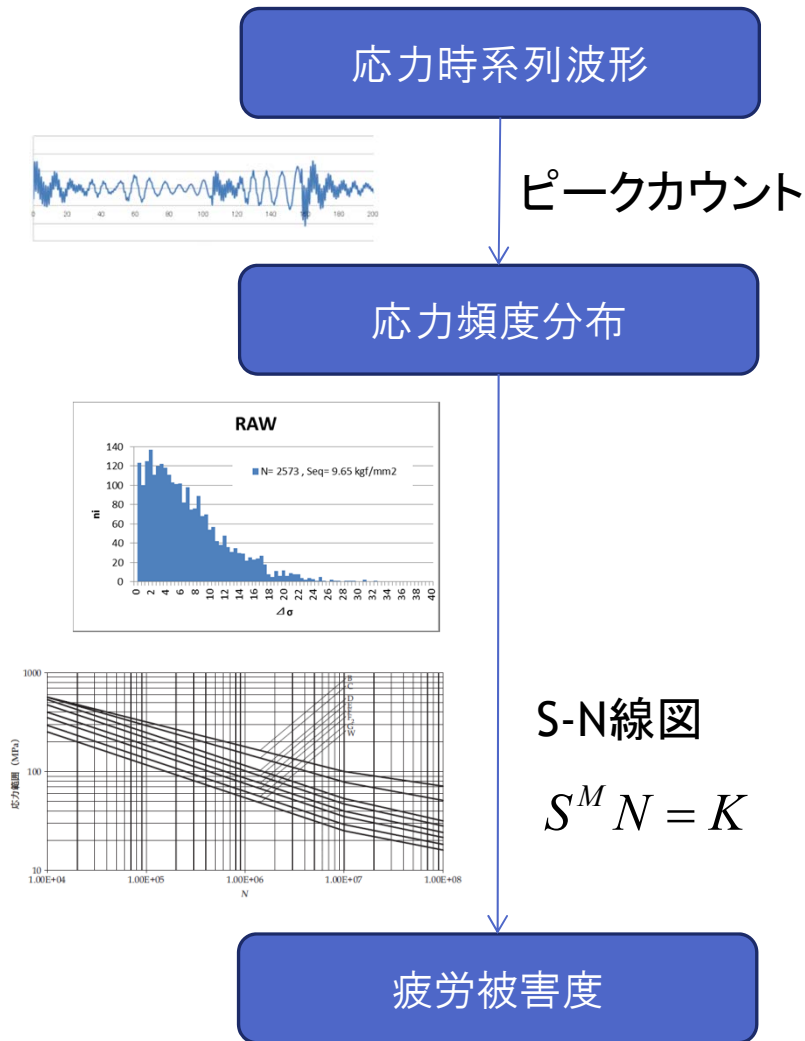
き裂伝播則
【本研究】



解析手法の比較

(疲労被害度による評価)

(き裂進展による評価)



疲労き裂伝播解析プログラム



ホイッピングの疲労寿命への影響評価に必要な
疲労き裂伝播プログラムの機能

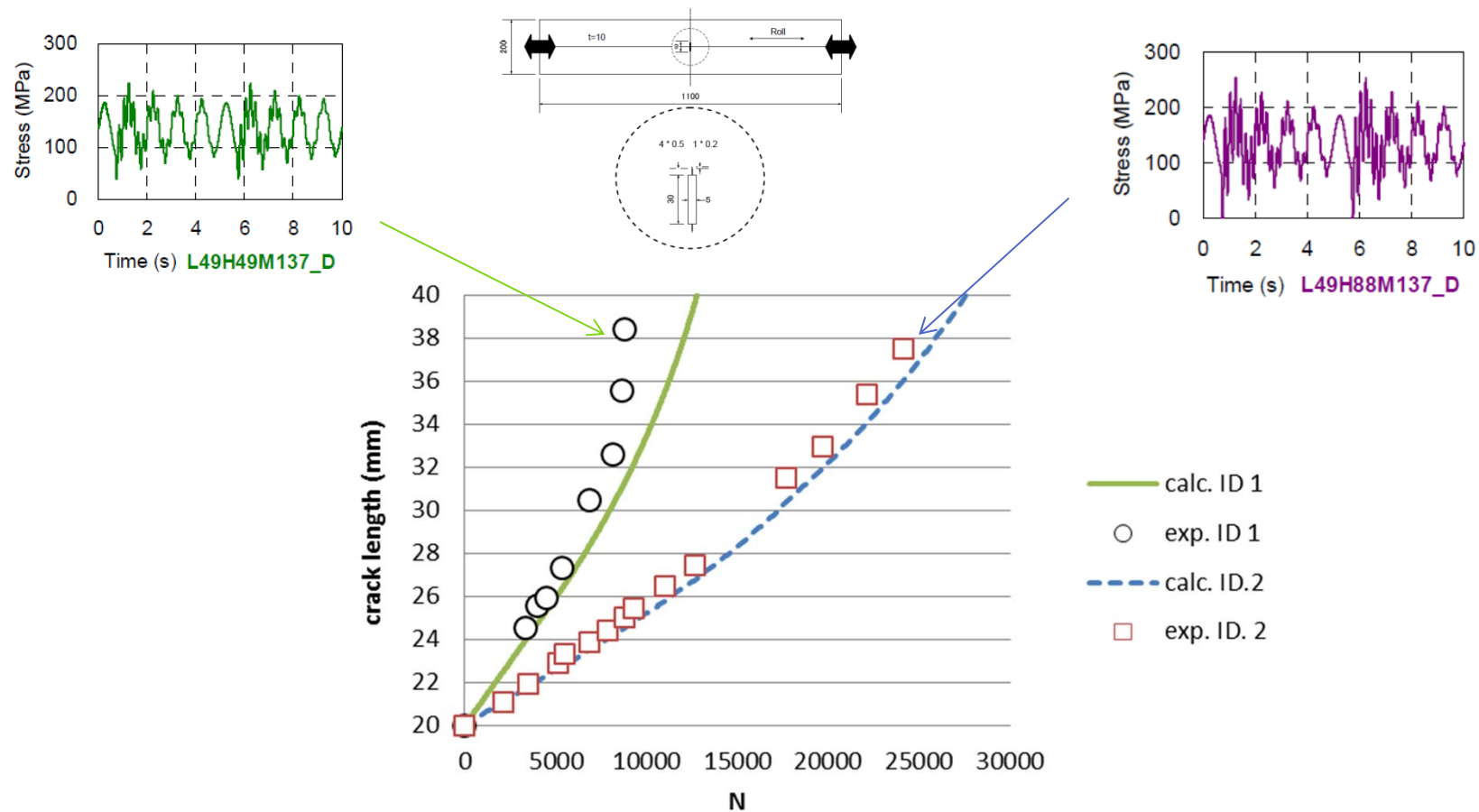
- 荷重順序に伴う加速・遅延現象の再現
- 毎サイクルのランダム変動荷重の処理

き裂先端の塑性挙動に着目
した結合モデルによるき
裂伝播解析法
(豊貞, 丹羽, 2001)

+

き裂進展に有意な荷重
サイクルを抽出するア
ルゴリズム
(後藤他, 2013)

解析プログラムの検証例



プログラムの解析結果と実験（北村他，2012.5）との比較

➤ ランダム波形での解析の信頼性を確認

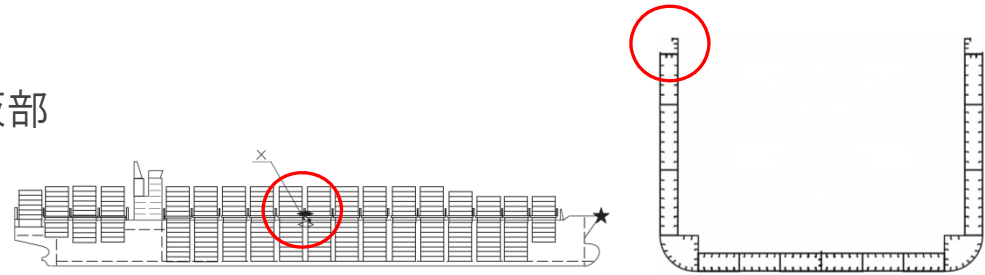
荷重モデル（長期）

「想定部材」

ポストパナマックスコンテナ船の甲板部

「静荷重」

平均応力： +100MPa



「遭遇環境」

1つの嵐（北太平洋で最大の嵐）



嵐モデル（模式図）

「嵐モデル」

Hs=5.5m→…→13.5m→…→5.5m

109個の短期海象（約5.7日）

Service speedの3/4，向波を想定

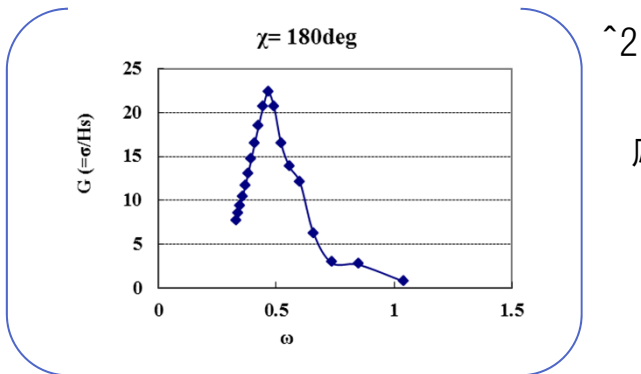
平均出会波周期：6.2sに固定

（平均波周期10s）

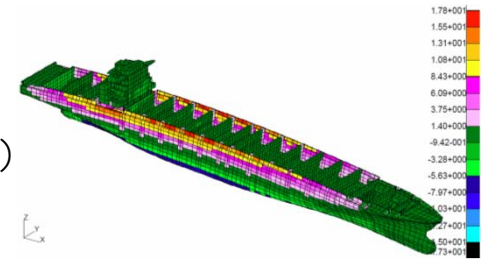
| Hs(m) | 5.5 | 6.5 | 7.5 | 8.5 | 9.5 | 10.5 | 11.5 | 12.5 | 13.5 | 12.5 | 11.5 | 10.5 | 9.5 | 8.5 | 7.5 | 6.5 | 5.5 | Total |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Ns | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 109 |

北太平洋で最大の嵐のプロファイル

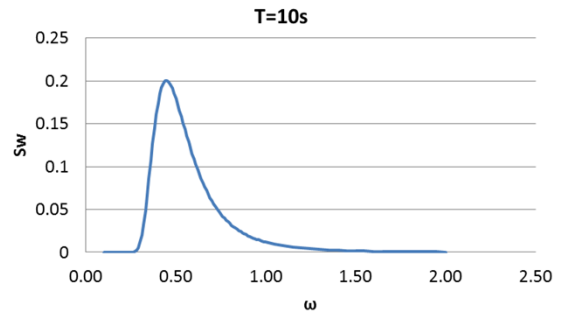
荷重モデル（線形波浪荷重）



応力RAO
(応力の周波数応答関数)

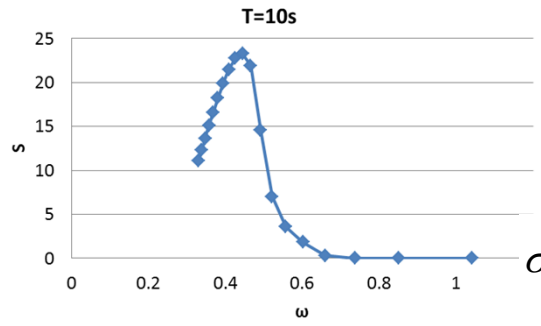


- 応力RAO ($G(\omega)$)
strip法+全船FE解析
- 波スペクトル ($S_w(\omega)$)
ISSC1964



波スペクトル

$\Downarrow S(\omega) = G(\omega)^2 \times S_w(\omega)$

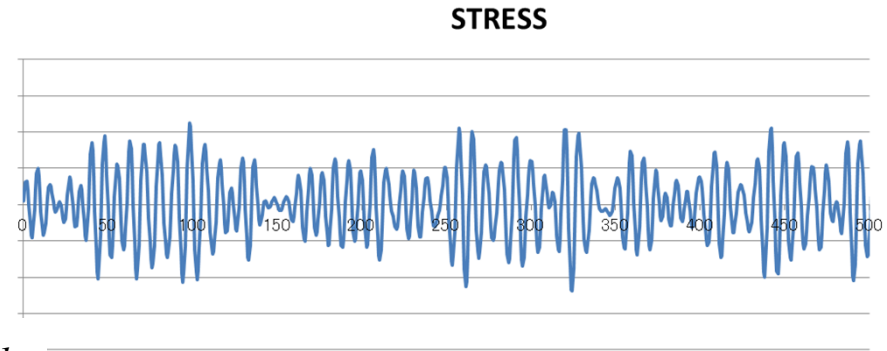


応答スペクトル

逆フーリエ変換

➔

$\sigma_{WF}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega$

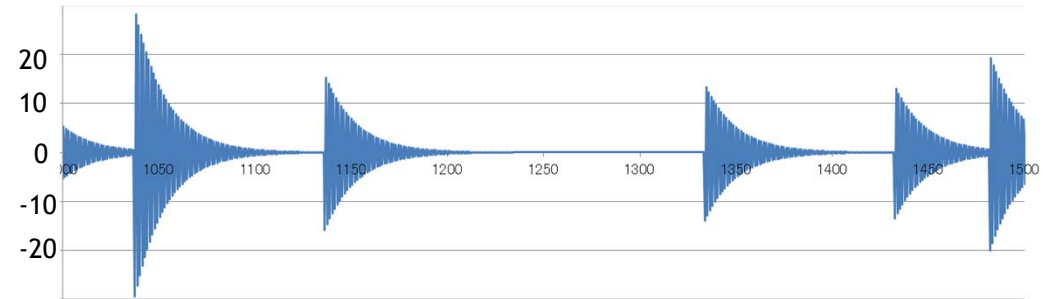


線形波浪成分の応力時系列波形の例

荷重モデル（ホイッピング）

減衰振動の式

$$\sigma_{\text{whipping}}(t) = \sigma_{\text{slam}} \exp\left(-\frac{\delta t}{T_{2n}}\right) \cos(\omega_{2n}t + \varepsilon)$$



ホイッピングの応力時系列波形の例

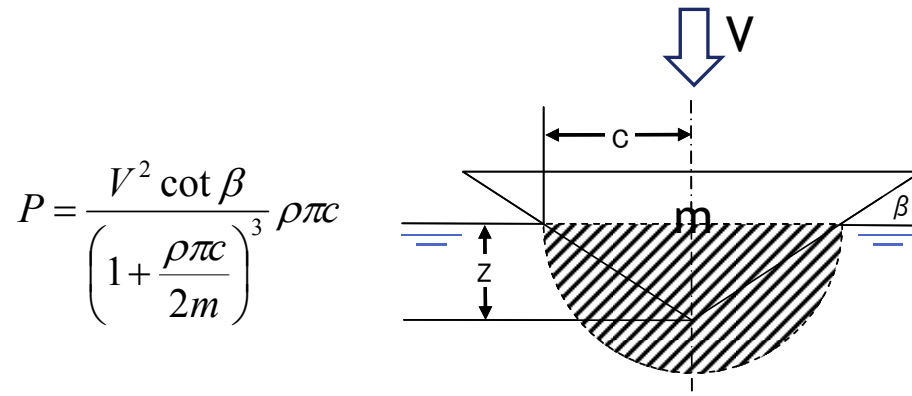
- 船体2節縦曲げ振動の固有周期： $T_{2n}=1.3\text{s}$
- 対数減衰率： $\delta=0.08$ （過去の実船データに基づき推測）
- スラミングの発生確率とタイミング： 8波(50s)に一回，定期的
- スラミング応力の最小値： $10\text{MPa}(1\text{kgf}/\text{mm}^2)$
- スラミング発生時には圧縮のピーク応力が作用（ $\varepsilon = -\pi$ ）
- スラミングによるピーク応力（ σ_{slam} ）の短期分布：レイリー分布

$$p(\sigma_{\text{slam}}) = \frac{\sigma_{\text{slam}}}{R_H^2} \exp\left(-\frac{\sigma_{\text{slam}}^2}{2R_H^2}\right)$$

荷重モデル（ホイッピング）

$$\text{MAX}_{1/N} [\sigma_{\text{slam}}] = (H / H_{\text{max}})^2 * (\text{MAX} [\Delta\sigma_{\text{WF}}])$$

- ホイッピングを含む最大応力は、実船データを参考に、線形波浪成分の最大応力の2倍を超えないとした ($\text{MAX}[\sigma_{\text{slam}}] = \text{MAX}[\sigma_{\text{WF}}]$)
- 各短期海象でのスラミング応力の最大値は、カルマンの衝撃理論に基づき、有義波高(H)の2乗に比例とする



$$P = \frac{V^2 \cot \beta}{\left(1 + \frac{\rho \pi c}{2m}\right)^3} \rho \pi c$$

カルマンの衝撃理論
 衝撃荷重は、波面と船体との相対速度の2乗に比例

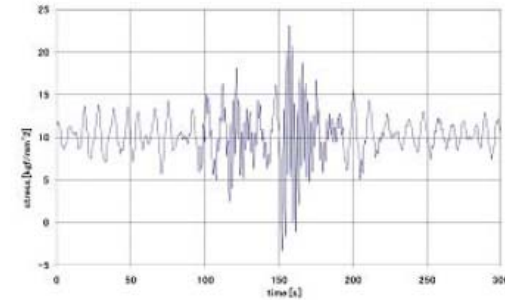


Fig. 7 Time-series of deck stress monitored on board.

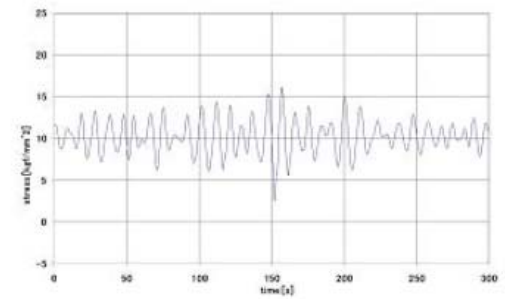


Fig. 8 Wave component of time-series of deck stress.

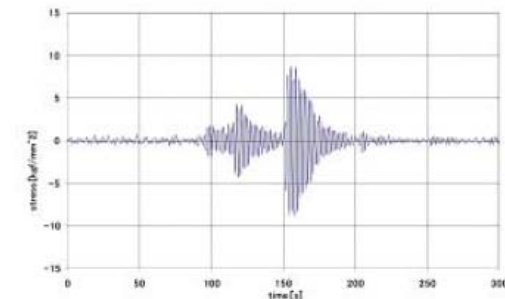
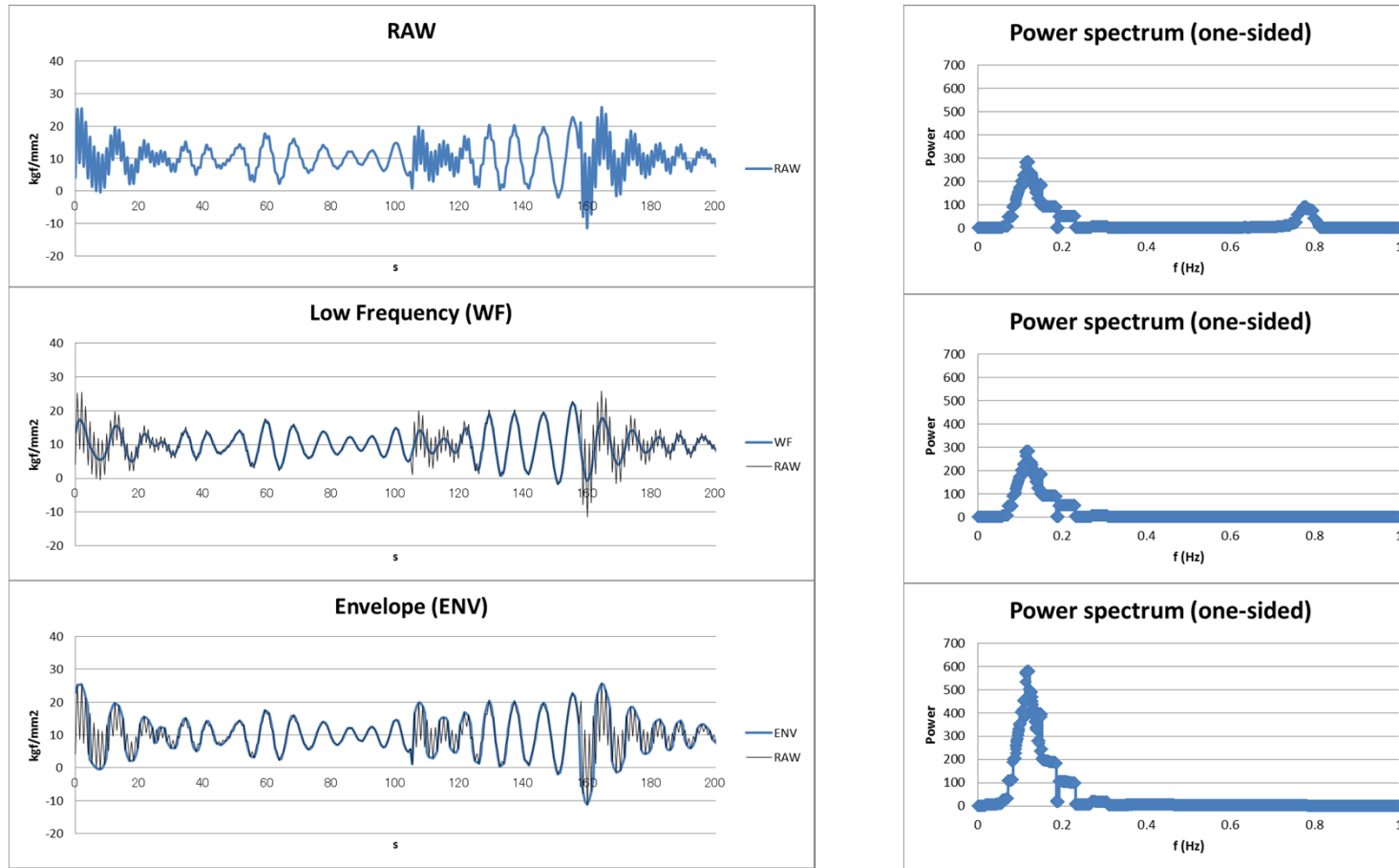


Fig. 9 Whipping component of time-series of deck stress.

実船応力波形の例

比較対象の応力波形

$$\sigma_{\text{RAW}}(t) = \sigma_{\text{WF}}(t) + \sigma_{\text{whipping}}(t)$$



WF：スラミングを含むホイッピングを除去した波形（＝線形波浪荷重）

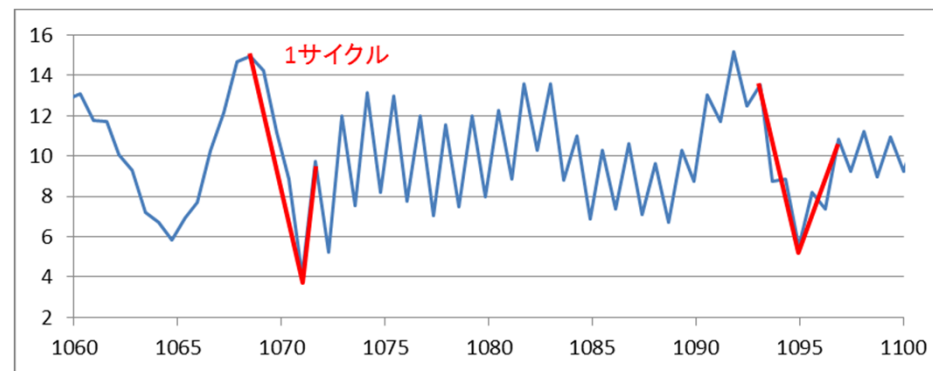
ENV：ホイッピングの過渡減衰振動を除去した波形

WF及びENVをホイッピングの無い波形と見なし、それぞれRAWの解析結果と比較

き裂伝播の解析条件

- 長さ20mmの初期貫通き裂
- 無限板の一様応力分布
- 材料定数： $C=4.505e-11$, $m=2.692$
- $E=206\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu=0.3$
- 降伏応力 $\sigma_Y=461\text{MPa}$
- 塑性拘束係数 $\lambda=1.21$ (平面ひずみ条件)
- き裂進展に有意な応力履歴の条件として, 後藤らの方法及び角らの方法を踏襲

$$\frac{da}{dN} = C(K_{\max} - K_{RP})^m$$

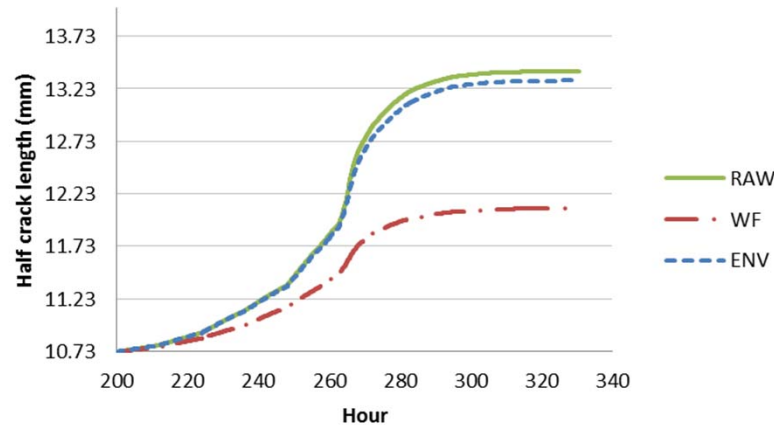


き裂進展に有意な荷重サイクル抽出のイメージ
(太線が抽出された荷重サイクル)

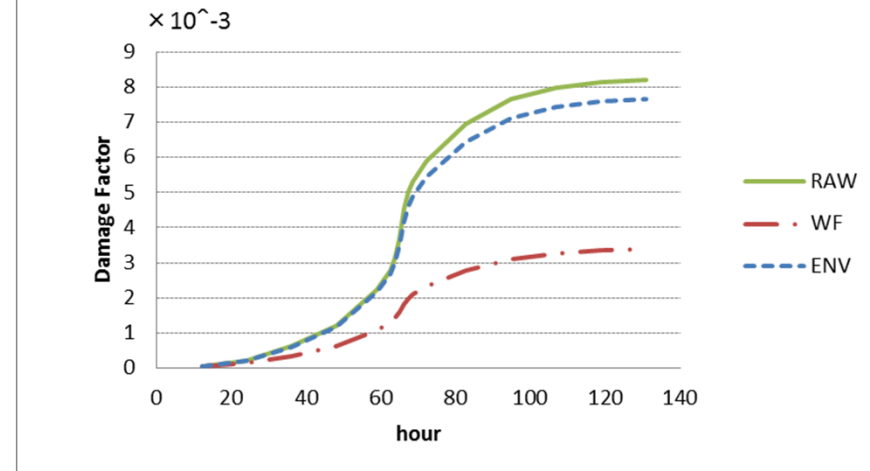
解析結果

評価法による比較

疲労き裂伝播解析



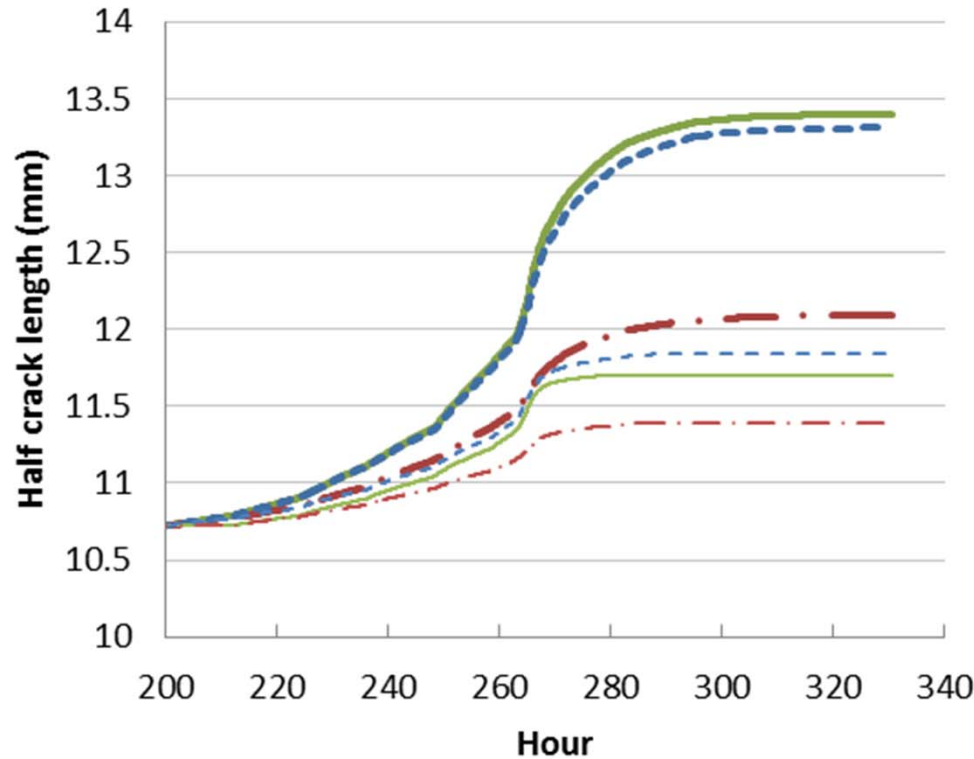
疲労被害度(RAINFLOW)



- マイナー則による疲労被害度と、き裂伝播則によるき裂長とは、同様の傾向を示す。
- スラミングを含むホイッピングの影響（RAWとWFとの比較）は、いずれも評価法も約2倍程度と顕著に表れる。
- ホイッピングの過渡減衰振動の影響（RAWとENVとの比較）は少なく、疲労寿命についてはENV波形で簡易的に評価できると考えられる。

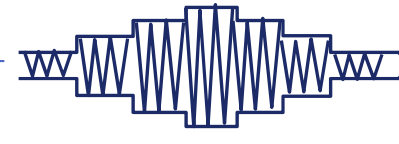
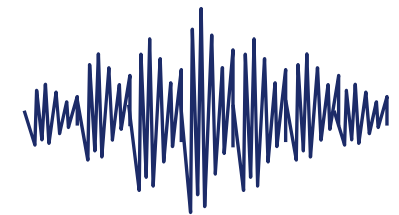
解析結果

ランダム波形とブロック波形との結果の比較



- RAW
- · - WF
- - - ENV
- RAW_EQ.
- · - WF_EQ.
- - - ENV_EQ.

ランダム波形



ブロック波形

- 今回の解析の範囲では、1サイクル毎のき裂進展とき裂先端塑性挙動を考慮したランダム荷重での解析結果は、等価応力によるブロック荷重の解析結果よりも、短寿命の評価となった。広帯域波形に現行の等価応力法を適用することに問題があると考えられる。

$$\Delta\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{\sum \Delta\sigma_i^{m'} \cdot n_i}{\sum n_i}}$$

- n_i : 各短期海象の応力繰返し数
- $\Delta\sigma_i$: 応力範囲
- m' : パリス則のべき (=3.5)

結論

ホイッピングの重畳荷重を入力とした疲労強度解析を行い、以下の結論を得た。

- 北太平洋での最大の嵐を対象に解析した結果、疲労被害度とき裂長は同様の傾向を示した。
- ホイッピングの疲労寿命への影響は、実波形からスラミングを含むホイッピング成分を除去した波浪成分波形の解析結果と比較すると影響は大きいですが、ホイッピングの減衰振動成分を除去した包絡波形の解析結果と比較すると影響は少なく、疲労寿命は包絡波形で簡易的に評価できると考えられる。
- 本解析の範囲では、1 サイクル毎のランダム荷重での解析結果は、等価応力によるブロック荷重の解析結果よりも、短寿命の評価となった。

今後、本研究で構築した解析システムを用いて、疲労強度の信頼性評価を行い、疲労寿命の明確化を図る。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤(C), 24560995）の助成を受けたものである。