有限要素解析に基づくホットスポット応力評価手法の高精度化について

技術研究所　寺井幸司、山本規雄

1.　はじめに

近年、エリカ号（1999 年）やプレステージ号（2002 年）などの海難事故を受け、船舶の安全性に対する要求が高まっている。長期に亘る船舶の運航期間においてその安全性を維持するためには、設計時において船級協会の定める疲労強度評価基準（例えば参考文献 1)、2）など）を満足すること、並びに就航後における保守、点検及び余寿命評価が重要である。

船舶の疲労強度評価及び余寿命評価においては、一般に線形累積被害則が用いられている。線形累積被害則を用いて疲労強度評価及び余寿命評価を行うには、応力（大きさ、頻度）及び S-N 線図が必要である。S-N 線図に適用する応力には、構造的不連続による局所的な応力上昇影響を加味したホットスポット応力と、影響を加味しない公称応力がある。船体構造部材は複雑かつ多様な形状を持つため、これらの部材を統一的に評価するためにはホットスポット応力を用いる必要がある。

ホットスポット応力は通常、有限要素法を用いて評価される。一般にソリッド要素を用いて応力集中部の形状を忠実にモデル化した解析モデルを作成すれば、比較的精度良く実際の船体構造部材の変形挙動、応力分布を求めることができると考えられている。しかし、コンピューターの性能又はモデル作成に要する時間等の制約により、シェル要素を用いて解析モデルを作成することが一般的である。両者の応力分布を比較すると、応力集中部においてその相違は顕著となる。しかも、船体構造部材の形状によって、その相違の程度が異なる。また、両モデルにおけるホットスポット位置も異なる。

そこで、本研究ではシェル要素を用いて作成したモデル（シェル要素モデル）から得られた応力分布を、ソリッド要素を用いて作成したモデル（ソリッド要素モデル）から得られた応力分布と一致させる、簡便かつ任意の部材に用いることのできる手法について検討を行った。

2.　ホットスポット応力評価手法

2.1　ホットスポット応力評価位置

船体構造部材においては、疲労き裂は溶接継手部より生じることが多い。溶接継手部はソリッド要素及びシェル要素を用い、それぞれ**図 1** のようにモデル化される。**図 1** より明らかなように、シェル要素モデルはソリッド要素モデルと異なり、板厚や溶接ビードなどの詳細を十分モデル化することができない。また、実構造部材と解析モデルにおけるホットスポットの位置も異なる。

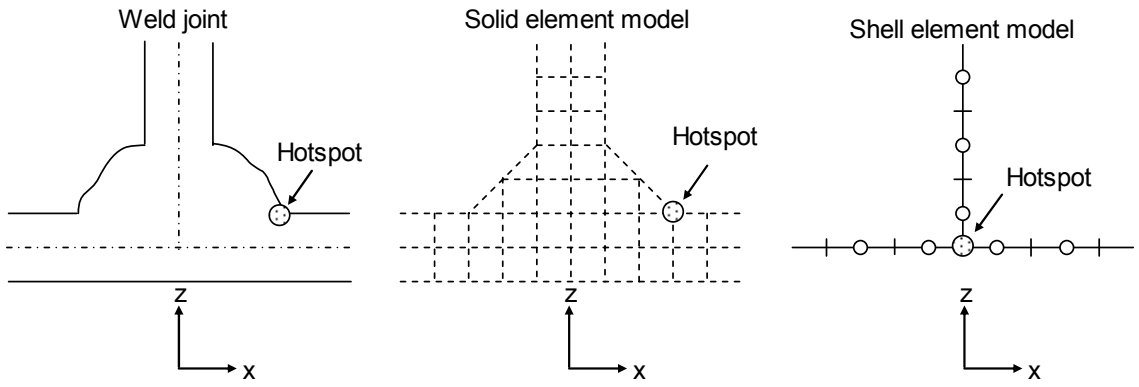


図 1　溶接継手部のモデル化

一般に、シェル要素モデルは実構造部材の板厚中心にシェル要素を配置し、モデル化している。しかし、シェル要素モデルにおいては実構造部材において板厚及び溶接ビードの存在により変形が拘束されている板交差部において変形が拘束されていない（図 2）。このため、本来解を得たいはずのホットスポット周辺において、シェル要素モデルの変形挙動は実構造部材の変形挙動をあらわしていない。それゆえ、ホットスポット周辺の応力分布についても十分信用できるとは言えない。そこで大沢らは、応力分布が信用できる範囲、すなわち板表面交差部より外側の応力分布を用いホットスポット応力を評価すべきである、と主張している[3)]。

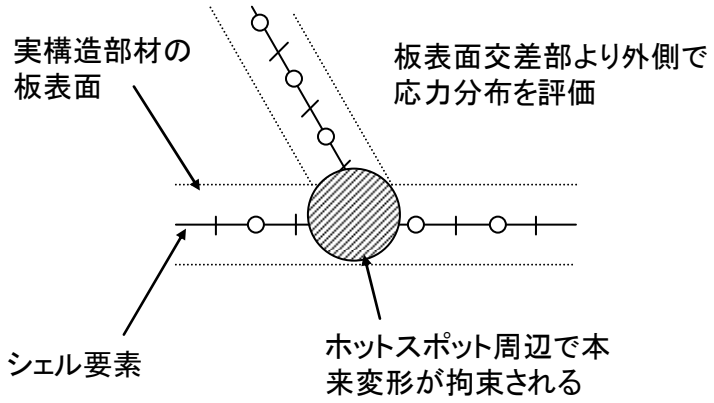


図 2　板交差部における変形の拘束

大沢らの提案手法の適用に際しては、図 3 に示す座標軸を用いる。すなわち、

① 板中心交差部を原点とする座標軸 x
② 板表面交差部を原点とする座標軸 ξ
③ 板表面と溶接ビードの交点を原点とする座標軸 d

の 3 つの座標軸である。このうち座標軸 x は従来のシェル要素モデル解析に用いられてきたもので、図 3 に示したように板厚及び溶接ビードの存在により変形が拘束されている影響を考慮

すると、応力分布は座標軸ξを用いて評価することが考えられる。ソリッド要素モデルの応力分布は溶接ビードがモデル化されている場合は座標軸dを、モデル化されていない場合は座標軸ξを用いて評価する。

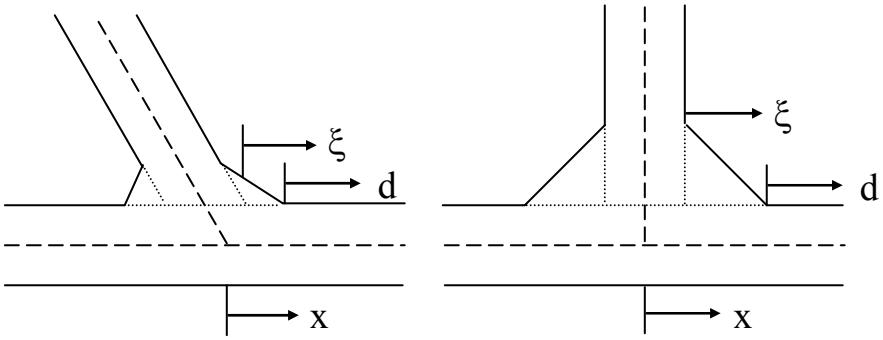
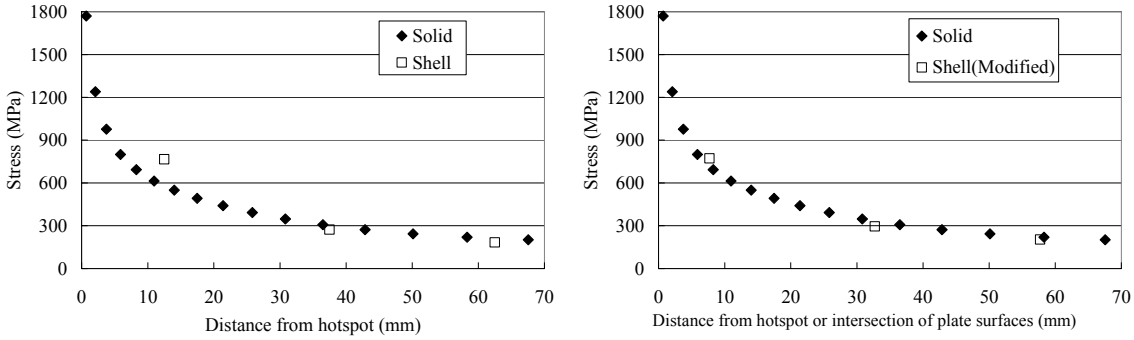


図 3　モデル上のホットスポット位置と座標軸の定義

現行のホットスポット応力評価法においては、ソリッド要素モデル及びシェル要素モデルともに解析モデル上のホットスポットを原点にとり、応力分布の比較を行っている（図 4(a)）。これに対し大沢らは、ソリッド要素モデルは解析モデル上のホットスポットを原点にとり応力分布を求めるのに対し、シェル要素モデルは板表面交差部を原点として応力分布を求めることを提案している[3]（図 4(b)）。大沢らはこの手法を様々な溶接継手に適用し、ソリッド要素モデルとシェル要素モデルで応力分布が良く一致することを示している[3]。



(a) シェル要素モデルの座標軸をxとした場合　(b) シェル要素モデルの座標軸をξとした場合

図 4　シェル要素モデル解析とソリッド要素モデル解析による応力分布の比較例

2.2　面外曲げに対する変形挙動の影響

これまでの研究、解析において、図 5 に示すような面外曲げ変形が生じる場合に対し、実構造における変形挙動とソリッド要素モデル及びシェル要素モデルにおける変形挙動の相違について考慮が十分に払われていなかった。しかし、大沢らにより、図 5 に示すような大きな面外曲げが生じる場合、シェル要素モデルとソリッド要素モデルの応力分布が大きく乖離する可能性が示されている[4]。

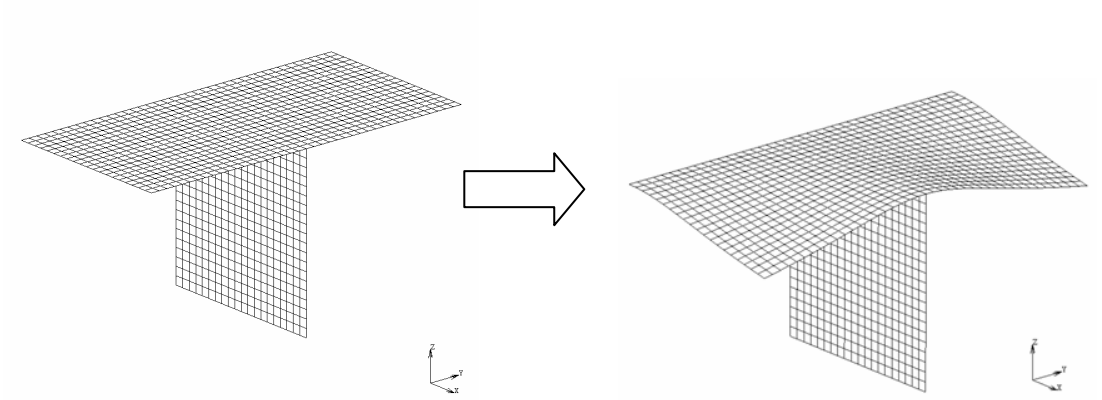


図 5　大きな面外変形を受ける溶接継手モデル

この影響について、大沢らは以下の算式を提案している[4]。本研究では、この算式を用い面外曲げの影響を考慮した。

$$\sigma_{sx,SOLID} = \sigma_{sx,SHELL} - 0.09\left(t_w / t_f\right)\sigma_{sy,B}$$

但し、

$\sigma_{sx,SOLID}$ ：ソリッド要素モデルにおける x 方向応力

$\sigma_{sx,SHELL}$ ：シェル要素モデルにおける x 方向応力

t_w ：溶接継ぎ手のウェブ板厚

t_f ：溶接継ぎ手のフランジ板厚

$\sigma_{sy,B}$ ：シェル要素モデルにおける y 方向応力の曲げ成分

3.　有限要素解析

3.1　解析対象船舶及び構造部材

解析対象船舶は、ばら積貨物船（二重船側、ケープサイズ）とした。主要目を**表 1** に示す。解析コードとして MSC.Nastran 及び MSC.Marc を用いた。解析に際し、船体中央部の 3 ホールドをモデル化した（ホールドモデル、**図 6**）。解析対象部材は疲労強度上重要である、ビルジホッパー斜板と二重底頂板の交差部（傾斜角 45 度、**図 7**）及びロワースツール斜板と二重底頂板の交差部（傾斜角 65 度及び 90 度、**図 8** 及び **9**）の 3 箇所とした。

表 1　解析対象船の主要目

L (m)	275.5
B (m)	45.0
D (m)	24.3
T_S (m)	17.8
C_B	0.85
V (knot)	14.0

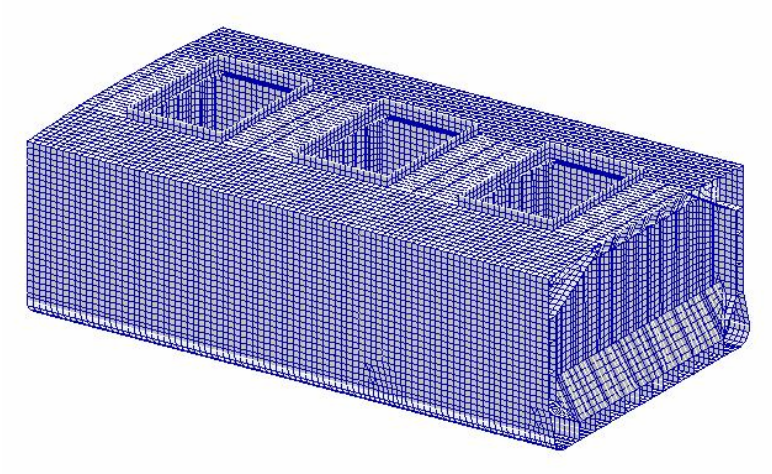


図 6　解析モデルの全体図（ホールドモデル）

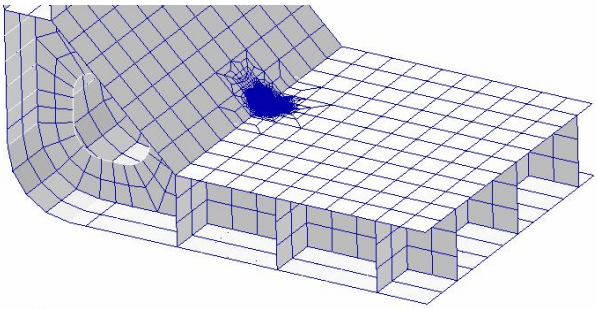


図 7　ビルジホッパー斜板と二重底頂板の交差部（傾斜角 45 度）の FE モデル

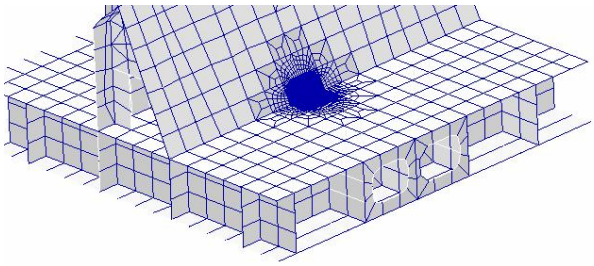


図 8　ロワースツール斜板と二重底頂板の交差部（傾斜角 65 度）の FE モデル

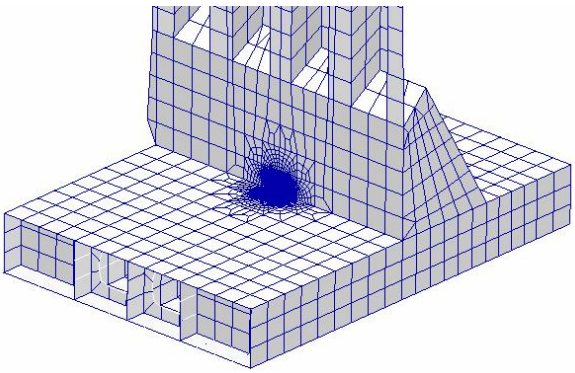


図 9　ロワースツール斜板と二重底頂板の交差部（傾斜角 90 度）の FE モデル

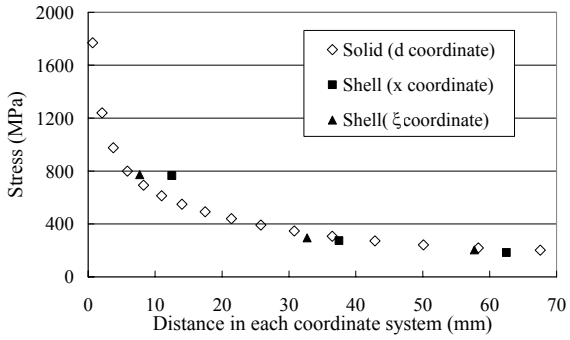
荷重はばら積貨物船のための共通構造規則[1)]で定められている設計波（H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 及びP2）を負荷し、積付状態は均等積状態、隔倉積状態、ノーマルバラスト状態及びヘビーバラスト状態を考慮した。

解析対象部材はシェル要素でモデル化し、ホットスポット周辺の要素サイズは板厚程度とした。シェル要素モデルで解析後、解析対象部材の周辺を取り出し、部分構造モデルを作成した。部分構造モデルではホットスポット近辺のみソリッド要素を用いて作成し、その他の部分はシェル要素を用いた。ソリッド要素とシェル要素は直交シェル結合法[5)]を用いて結合し、境界条件はシェル要素モデルのホールドモデル解析結果より与えた。ソリッド要素は板厚方向に 8 分割している。

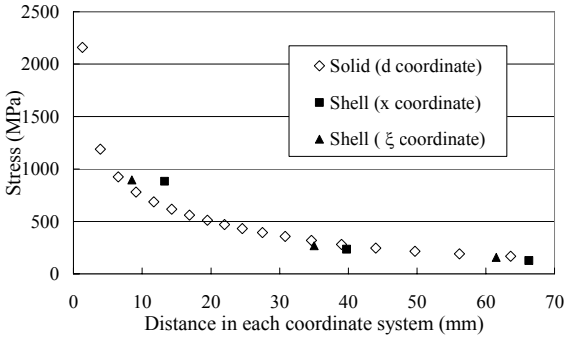
3.2　解析結果

解析結果を**図 10** 及び 11 に示す。横軸はそれぞれ座標軸 d 、x 及び ξ 、縦軸は溶接線に垂直な方向の表面応力である。ソリッド要素モデルの応力分布は溶接ビード止端部又は板表面交差部を原点とし、シェル要素モデルの応力分布は板中心交差部を、本研究で考慮している手法に基づいたシェル要素モデルの応力分布は板表面交差部をそれぞれ原点としている。

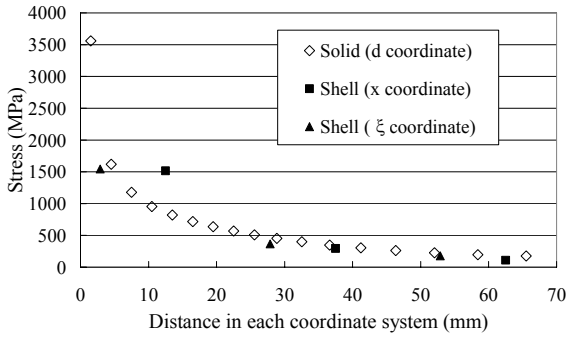
図 10 及び 11 よりソリッド要素モデルの応力分布と本研究で考慮している手法に基づいたシェル要素モデルの応力分布は、構造部材、積付状態及び設計波にかかわらずよく一致していることが分かる。



(a) ビルジ斜板（45 度）

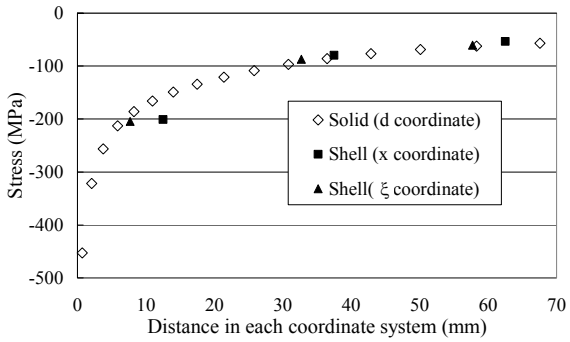


(b) ロワースツール斜板（65 度）

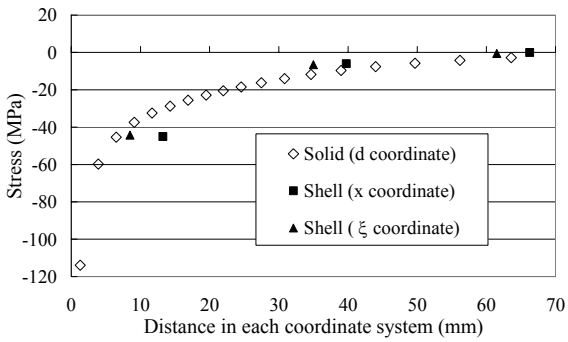


（c）ロワースツール斜板（90 度）

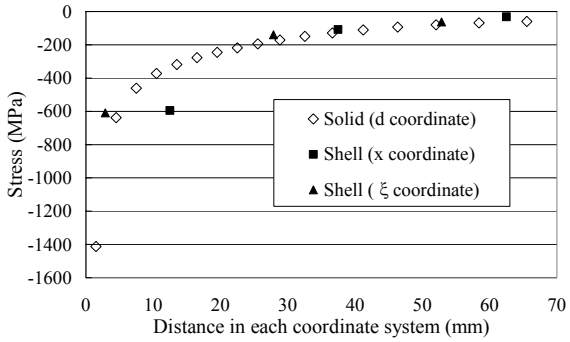
図 10　ホットスポット周辺の応力分布の比較（隔倉積状態、設計波 H1）



(a) ビルジ斜板（45 度）



(b) ロワースツール斜板（65 度）



（c）ロワースツール斜板（90 度）

図 11　ホットスポット周辺の応力分布の比較（ヘビーバラスト状態、設計波 F2）

4.　ホットスポット応力

有限要素解析結果より、本研究で考慮している手法を用いれば、シェル要素モデルの応力分布をソリッド要素モデルの応力分布とほぼ等しくなるよう修正できることが示された。次に、これらの応力分布を用いてホットスポット応力を求めた。

ホットスポット応力は、シェル要素モデルの場合は各座標軸の原点から 0.5t及び 1.5t（但し、tは二重底頂板の板厚）離れた点での応力を原点に外挿して求めた。一方、ソリッド要素モデルの場合は原点から 0.4t及び 1.0t離れた点の応力を原点に外挿して求めた。実構造部材においては、溶接止端部から 0.4t及び 1.0t離れた点に歪ゲージを貼付し、2 点の応力を溶接止端位置まで外挿してホットスポット応力を求めており[6]、実構造部材と応力状態が等しいと想定されるソリッド要素モデルにおいても同様に 0.4t及び 1.0t離れた点の応力を原点に外挿してホットスポット応力を求めた。外挿点とホットスポット応力の関係を図 12 及び 13 に示す。図中、四角形がシェル要素モデルで座標軸 x の応力、三角形がシェル要素モデルで座標軸 ξ の応力、そしてひし形がソリッド要素モデルの応力を示している。

図 12 及び 13 より、従来の一般的な定義でのシェル要素モデルにおけるホットスポット応力はソリッド要素モデルのホットスポット応力よりも大きいことが明らかである。一方、本研究で考慮している手法を用いたシェル要素モデルの応力分布はソリッド要素モデルのホットスポ

ット応力とほぼ一致する。

また**表 2** に、ソリッド要素モデル及びシェル要素モデルのホットスポット応力の比較結果を示す。表中「Ratio」はソリッド要素モデルのホットスポット応力に対する比を示している。**表 2** より、シェル要素モデルのホットスポット応力は斜板の傾斜角が大きくなるにつれ、ソリッド要素モデルのホットスポット応力との差が大きくなるが、大沢の手法により応力分布を修正すると斜板の傾斜角に関係なくシェル要素モデルのホットスポット応力はソリッド要素モデルのホットスポット応力と良く一致することが分かる。

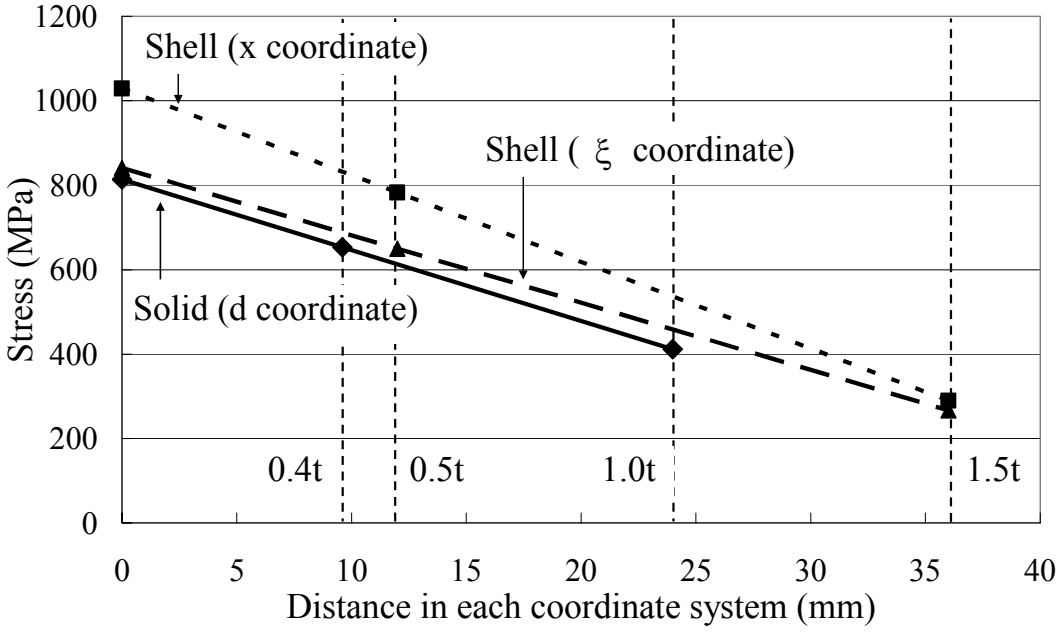


図 12　ビルジ斜板（45 度）におけるホットスポット応力（隔倉積状態、設計波 H1）

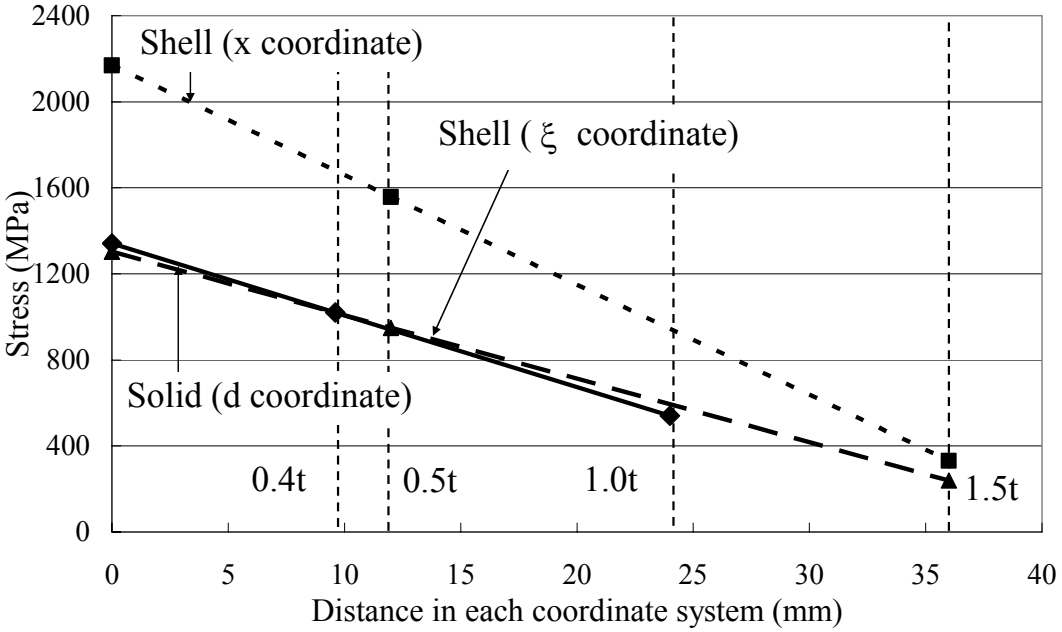


図 13　ロワースツール斜板（90 度）におけるホットスポット応力（隔倉積状態、設計波 H1）

表 2　ホットスポット評価応力の比較

(a)　隔倉積状態、設計波 H1

Alternate, H1	Bilge-InnBTM (45deg.)		L.Stool-InnBTM (65deg.)		L.Stool-InnBTM (90deg.)	
	HSS (MPa)	Ratio	HSS (MPa)	Ratio	HSS (MPa)	Ratio
$\sigma_{solid\ (d\ coordinate)}$	813.8	1.00	975.5	1.00	1341.6	1.00
$\sigma_{shell\ (x\ coordinate)}$	1028.6	1.26	1259.6	1.29	2169.7	1.62
$\sigma_{shell(\xi\ coordinate)}$	840.5	1.03	1024.4	1.05	1303.0	0.97

(b)　ヘビーバラスト状態、設計波 F2

H.Ballast, F2	Bilge-InnBTM (45deg.)		L.Stool-InnBTM (65deg.)		L.Stool-InnBTM (90deg.)	
	HSS (MPa)	Ratio	HSS (MPa)	Ratio	HSS (MPa)	Ratio
$\sigma_{solid\ (d\ coordinate)}$	-217.3	1.00	-48.2	1.00	-526.1	1.00
$\sigma_{shell\ (x\ coordinate)}$	-265.5	1.22	-68.8	1.43	-857.9	1.63
$\sigma_{shell(\xi\ coordinate)}$	-222.4	1.02	-50.9	1.05	-513.7	0.98

5. まとめ

疲労強度評価及び余寿命評価を実施するうえで、ホットスポット応力を精度良くも求めることが重要となる。そこで有限要素法を用い、シェル要素モデルから精度良くホットスポット応力を求める手法について検討を行った。検討結果を以下にまとめる。

1) 溶接継手部の板表面交差位置を原点としてシェル要素モデルによる評価応力を整理することにより、積付状態及び設計荷重に依らず、ソリッド要素モデルの応力分布とシェル要素モデルの応力分布を精度良く一致させることができる。
2) 上記手法を用いて求めたシェル要素モデルの応力分布において、板表面交差位置から 0.5t 及び 1.5t 離れた点の応力を外挿して求めたホットスポット応力は、IIW が推奨する、実構造において応力集中部から 0.4t 及び 1.0t 離れた点の応力を外挿してホットスポット応力を求める手法に倣って求めたソリッド要素モデルにおけるホットスポット応力と良く一致することが分かった。

但し、倉内肋骨端部の角回し溶接部など今回解析対象としなかったが疲労強度上重要な部材についても今後検討を行い、本研究で実施した解析対象部材における知見が一般性を有するか検証する必要がある。

また、ソリッド要素モデルにおいて応力集中部から 0.4t 及び 1.0t 離れた点の応力を外挿してホットスポット応力を求めているが、ソリッド要素モデルの応力分布と実構造部材の応力分布の比較を含め、外挿法の是非について検討する必要がある。

参考文献

1) 鋼船規則・同検査要領 CSR-B 編ばら積貨物船のための共通構造規則、(財) 日本海事協会、2007
2) ばら積貨物船の構造強度に関するガイドライン、(財) 日本海事協会、2002
3) Naoki Osawa, Kiyoshi Hashimoto, Junji Sawamura, Tohei Nakai and Shota Suzuki : Study on the relationship between shell stress and solid stress in the vicinities of ship's welded joints, the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition (ISOPE 2007), Proceedings of ISOPE, Vol.4, pp.3772-3779, 2007
4) Naoki Osawa, Kiyoshi Hashimoto, Junji Sawamura, Tohei Nakai and Shota Suzuki : Study on the relationship between shell stress and solid stress in fatigue assessment of ship structure, the 10th International Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures (PRADS 2007), Proceedings of PRADS, Vol.2, pp.1142~1149, 2007
5) 大沢直樹、橋本聖史、澤村淳司、中井棟平、鈴木章太：船体構造の疲労強度評価のためのシェル・ソリッド混合解析法の開発、溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集
6) International Institute of Welding (IIW), XIII-1539-96