

荒天時における沿岸域での海難事故から 見た船体強度に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON SHIP STRENGTH FROM THE VIEWPOINT OF
CASUALTIES IN COASTAL ZONE UNDER SEVERE WEATHER

笹 健児¹・Atilla INCECIK²・永井 紀彦³・水井 真治⁴
Kenji SASA, Atilla INCECIK, Toshihiko NAGAI and Shinji MIZUI

¹正会員 博(商船) 広島商船高等専門学校 商船学科 准教授
(〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272-1)

²非会員 Ph.D., Professor of Department of Naval Architecture and Marine Engineering,
University of Glasgow, United Kingdom

³フェロー会員 博(工) 港湾空港技術研究所 統括研究官
(〒739-0021 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴非会員 博(商船) 広島商船高等専門学校 商船学科 教授
(〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272-1)

It is necessary to study on the safety of "the refugee of harbour" from the viewpoint of port planning, too. Recently, breakage casualties of stranded ships become very serious in the port operation and the coastal environment. However, these problems have not been discussed among the coastal engineering and shipbuilding, neither. In this study, we summarize the importance of this point by showing the statistic of casualties. Then, the strength of ship hulls is calculated with strip method and the basic dynamics of material, when ships are designed to navigate in the ocean. Since the calculated results cannot explain the breakage casualties, the possibility of the enlarged stress due to the crack is also considered as a simple example. The results can explain that the breakage of stranded ships may be caused by the enlarged stress due to cracks on the ship hull. Therefore, the safety of coastal areas outside harbour should be considered totally with anchored ship motions and fracture mechanics of ships in detail in the future.

Key Words : *Coastal environment, stranded casualty, outside harbours, breakage of ships, ship strength, shear force, bending moment, crack damage, fracture mechanics, ship motions, waves*

1. 研究の背景および目的

港内静穏度の向上という観点より, これまで港内波高の低減, 長周期波の挙動, 港内係留船の動揺解析など様々な観点から研究が行われてきた^{1), 2)}. また港内の水域だけでなく, 船舶が入出港または港外避泊する場合の安全性を考えれば港外の水域についても安全性の検討を行う必要性も示された^{3), 4)}. この背景として, 荒天時に港外避泊した船舶が走錨・座礁し, 海岸や防波堤に漂着した後に船体破損した被害事例が近年, 多く発生していることがある. 当該海難により人命および貨物の損失だけでなく, 船内油の流出や沿岸域に長期間放置されることによる環境汚染, さらに高額なサルベージ処理費用の自治体負担も深刻な問題として指摘されている⁵⁾. しかし, これらに対する具体的な対策検討は未だ提案されていない. 現状では港湾計画の段階において, 港

外海域での船舶の安全性はほとんど検討されず, 船舶を運用する側の問題として認識されている. 一方, 船舶を設計する側においても大洋航海中の耐航性や港内外の操縦性等については検討されるものの, 港外避泊時における安全性については詳細な検討はなされず, 当該課題は港湾を計画・運用する一環としても検討しなければ, 今後もこのような海難は連続して発生するおそれがある. 著者らは港外避泊船の船体運動について波浪影響を詳細に考慮し走錨・座礁に至る状況を再現する数値解析法を提案してきたが, その後に船体が破損し, 環境汚染となる現象を力学的に解析・評価した例は存在しない. 本研究では日本近海で発生した海難事例を対象に, 船体荷重の主要因と考えられる波浪に起因する船体各部のせん断力, 曲げモーメントを船体運動論および材料力学的な数値解析によりまず検討した. さらに船体外板に亀裂が何らかの理由で生じていると仮定した上

での力学的な考察を実施し、船体破損に至った原因について全体的に検討するとともに、当該海難を防止する観点より港湾計画・運用の段階において今後検討すべき流れについて提案した。

2. 港外避泊における海難の現状

高度成長期から日本各地に建設された港湾は外洋に面した海域に立地するものも少なくなく、港湾計画にて港内波高を低減する防波堤配置が主な検討課題とされてきた。1980年代以降、係留中の船舶が長周期動揺する問題が顕在化し、長周期波の存在を考慮した港湾計画が大きく議論された。ただしこれらは港内水域の議論にとどまっており、荒天時に船舶が入出港する場合や港外避泊するときの安全性までは議論できていない。港湾計画として船舶に安全な水域を確保することが目的とされているならば、港外沿岸域にて発生する海難の安全性も網羅したものであると著者らは考える。そこで近年に日本近海で連続して発生している港外避泊時の海難事例を取りまとめ、問題点の再整理を行う必要がある。表-1に日本近海で発生した最近の主な海難事例を示す。

表-1 日本近海で発生した主な港外避泊の海難例

年月日	船型	海域	原因	備考
2002年 7/25	60,000トン 穀物船	S 港 太平洋	台風	船体 破損
2002年 12/5	3,000トン 貨物船	日立港 太平洋	低気圧	船体 破損
2004年 9/7	6,300トン 貨物船	下松港 瀬戸内海	台風	船体 破損
2004年 9/7	16,000トン 貨物船	高知港 太平洋	台風	
2004年 10/20	2,500トン 練習船	伏木港 日本海	台風	船体 破損
2004年 11/13	5,500トン 貨物船	石狩湾港 日本海	低気圧	船体 破損
2006年 10/6	90,000トン 貨物船	鹿島港 太平洋	熱帯 低気圧	船体 破損
2006年 10/24	80,000トン 貨物船	鹿島港 太平洋	低気圧	船体 破損

表より様々な船種・船型で港外避泊中の海難が発生しており、海域も太平洋、日本海、瀬戸内海と全国規模となっている。気象要因も台風および低気圧の両方で発生し、年間を通じて注意が必要なことも分かる。また1件を除く全てのケースで最終的には港外海域にて船体破損を伴っており、船舶および港湾だけでなく、沿岸環境にも深刻な被害が及んだ。

図-1に表-1に示した海難例の1つであるS港および港外の位置関係、港外避泊の位置、走錨・座礁の位置を示す。図に示すとおり、港外3kmの地点に錨泊した船舶は波浪と風により、錨により係止できなくなり2km近く走錨・圧流された後に水深10mの沿岸域で座礁に至った。その後、船体は座礁した状

態で波浪等の外力を受け続けた影響により、図-2に示すような形で船体中央部から真っ二つに破断している様子がよく分かる⁶⁾。

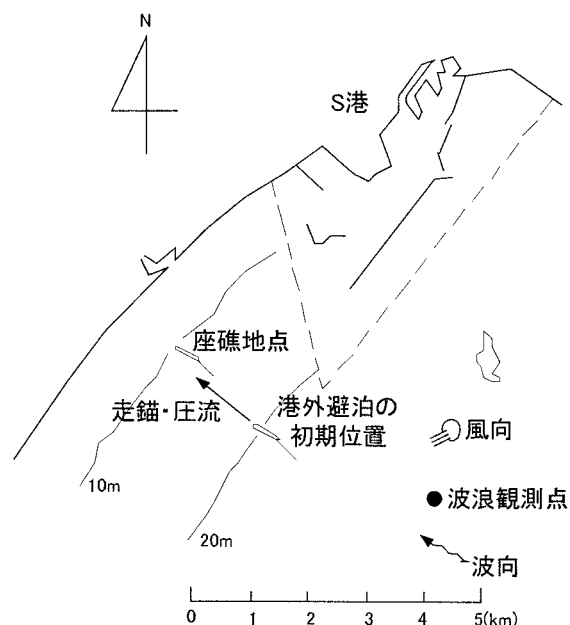


図-1 S港および港外の位置関係

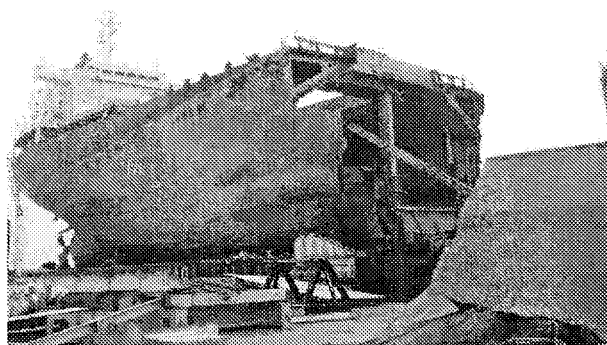


図-2 6万トン級穀物船の破損状況

海難事故後、数ヶ月間ほど海岸で放置された期間にも船内からの油流出があり、地元ボランティアも含めた回収作業に追われたほか、船体の撤収（サルベージ）作業にも非常に高額な経費が自治体負担として支出を余儀なくされた。当該船舶も含め、近年は外国船籍の船舶が座礁事故を起こした事例も多く、ほとんどのケースで高額な処理費用を負担できないことも影響している。港外の沿岸域における海難事故については、港湾を計画する立場からは港内静穏度の確保や恒常的な海岸環境の保全など従来の検討内容とはやや異なるため、検討事例は見られない。一方、船舶を設計する立場においても、大洋航海中の耐航性、浅水域での操縦性という観点から検討されるが、特定の港湾・海域における沿岸の海象特性

から見た港外避泊の安全性を検討された事例は残念ながら見られない。これより、港外避泊時の諸問題については船舶を運航する側の経験則での対応に依存せざるを得ない状況である。しかし、急激に発達する気象条件や港湾形状、海域の地域特性に依存する海象条件と船体運動の関係などについて、科学的な検討の裏づけをなしに運航者の経験と勘のみで判断することは安全性の面で非常に大きな問題である。特に最近では乗組員全員が外国人である船舶も多く、日本の港湾・海域事情に精通していないことによる海難事故の増加も多数報告されている。以上の背景より、本研究では港外避泊した船舶が不幸にも荒天によって走錨さらに座礁に至った場合、どのような状況にて図-2 のような船体破損がこれほど高い確率で発生しているかを考察することは将来的な対策検討の観点からも重要である。

3. 荒天時における船体強度の検討

船舶が設計される時の一般的な方法に従い、S港で発生した海難を事例に力学的な強度検討を行った。

(1) 船体に作用する波浪荷重、せん断力および曲げモーメント

船舶を設計する場合、太平洋など外洋を航行する時に受ける外力を通常想定する。過去に多くの波浪観測のデータベースが存在する大西洋のデータをもとに、20年確率の波浪条件を算定の上で検討することが多い。これは船の耐用年数が10～20年であることによる。想定する波浪条件が決定されれば、船体各部に作用する波浪荷重が船体運動論により求められ、さらに材料力学的に船体外板に作用するせん断力、曲げモーメント、振りモーメントが計算できる。計算にあたっては専用解析ソフト OCTOPUS⁷⁾を使用した。入力データとしては、港外で観測された波形データをスペクトル解析した成分波の振幅、周期、位相と船体諸元（長さ、幅、深さ、喫水など）、船体形状（長さ方向における船体断面の形状）、貨物の積載状態を考慮した船体長さ方向の重量分布が必要となる。これらをもとに静水時に船体に作用する長さ方向の位置 x_1 におけるせん断力 $Q_{3SW}(x_1)$ および曲げモーメント $Q_{5SW}(x_1)$ は次式にて求められる。なお、添え字の数字は船体運動のモードに対応しており、1: surge, 2: sway, 3: heave, 4: roll, 5: pitch, 6: yaw を示す。

$$Q_{3SW}(x_1) = -\int_{x_0}^{x_1} q_{3SW}(x) dx \quad (1)$$

$$Q_{5SW}(x_1) = \int_{x_0}^{x_1} q_{3SW}(x) \cdot x dx + x_1 \int_{x_0}^{x_1} q_{3SW}(x) dx \quad (2)$$

ここで、 $q_{3SW}(x)$ は単位長さあたりの断面 x に働く静的な上下方向の荷重であり、ニュートンの第二法則より次式で求められる。

$$q_{3SW}(x) = \rho A_s(x)g - m(x)g \quad (3)$$

ρ は海水密度、 $A_s(x)$ および $m(x)$ は位置 x での船体断面積、質量をそれぞれ示す。この状態で波浪などの動的な荷重が作用するため、水平および鉛直方向に作用する軸並行および軸周りの力・モーメントは以下のように求められる。

$$Q_{2D}(x_1) = -\int_{x_0}^{x_1} q_{2D}(x) dx \quad (4)$$

$$Q_{6D}(x_1) = \int_{x_0}^{x_1} q_{2D}(x) \cdot x dx - x_1 \int_{x_0}^{x_1} q_{2D}(x) dx \quad (5)$$

$$Q_{3D}(x_1) = -\int_{x_0}^{x_1} q_{3D}(x) dx \quad (6)$$

$$Q_{5D}(x_1) = \int_{x_0}^{x_1} q_{1D}(x) \overline{bG}(x) dx \quad (7)$$

$$+ \int_{x_0}^{x_1} q_{3D}(x) x dx - x_1 \int_{x_0}^{x_1} q_{3D}(x) dx$$

$$Q_4(x_1, z_1) = -\int_{x_0}^{x_1} q_{4D}(x, z_1) dx \quad (8)$$

ここで、 $q_{1D}(x)$ 、 $q_{2D}(x)$ 、 $q_{3D}(x)$ は単位長さあたりの断面 x に働く前後方向、左右方向、鉛直方向の動的な荷重、 $\overline{bG}$ は船体重心と各断面の面積中心との鉛直方向の距離を、 $q_{4D}(x)$ は重心位置からの鉛直距離 z_1 での単位長さあたりの断面 x に働く動的なねじり荷重を示す。これらの係数は船体運動論のストリップ法⁸⁾を用いて波向、波高、波周期をパラメータとして計算される。これより、運動方向の各モードに作用する静的および動的なせん断力、曲げモーメント、振りモーメントは波浪の角周波数 ω と時間 t をパラメータとした次式のようになる。

$$Q_2(x_1, \omega, t) = Q_{2D}(x_1) \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (9)$$

$$Q_3(x_1, \omega, t) = Q_{3SW}(x_1) + Q_{3D}(x_1) \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (10)$$

$$Q_4(x_1, z_1, \omega, t) = Q_{4D}(x_1, z_1) \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (11)$$

$$Q_5(x_1, \omega, t) = Q_{5SW}(x_1) + Q_{5D}(x_1) \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (12)$$

$$Q_6(x_1, \omega, t) = Q_{6D}(x_1) \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (13)$$

ここで、 ε は位相を表す。動的な荷重成分については、波向、波高、周期ごとに作用するせん断力、曲げモーメント、振りモーメントを計算したものを成分波ごとに重ね合わせれば不規則波が作用した場合における船体各部へのせん断力、曲げモーメント、振りモーメントが求められる。

(2) 破壊力学による船体への応力解析

船体を設計するにあたり、航海中に遭遇しうる波浪を想定した強度設計は(1)に示した方法によって概ね検討できる。一方、船は形状が一様な平板等とは異なり、局部的な応力集中が発生しやすい。また本研究にて対象とする沿岸での座礁時には海底での底触時に何らかの衝撃が加わって部分的な亀裂が生じる可能性も十分考えられる。このため、破壊力学の観点からも部分的な設計が検討される。船舶のような複雑な立体形状の場合、有限要素法等により船体全体を要素近似し、応力集中などが検討されることが多い。ただし、本研究ではまず簡易的に破壊現象を考察することとし、以下に示す理論をもとに検討した。図-3に示す無限板の中央に長さ $2a$ の亀裂があり、遠方で亀裂に垂直な引張り応力 σ_0 を受けるとすれば、亀裂部分の近傍に生じる x および y 方向の応力、せん断応力は次式のように計算される。

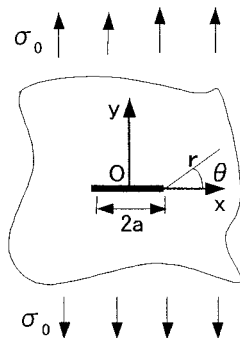


図-3 長さ $2a$ の亀裂を生じた無限板の様子

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (16)$$

ここで、 r および θ は亀裂の先端部を原点とする極座標系であり、 K_I は亀裂先端の特異応力場の強さを表すパラメーターで応力拡大係数と呼ばれる。これは引張り応力と亀裂長さの関数として表される。

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (17)$$

式(17)より船体外板に作用する引張り張力から亀裂長さをもとに応力拡大係数が求められる。船体外板は軟鋼が用いられているとすれば、材料から求められる降伏応力等から許容応力が定められる。ここでは船級協会で規定されている許容応力 175N/mm^2 （曲げ応力）、 110N/mm^2 （せん断応力）を用いた⁹⁾。

4. 船体強度の検討結果

(1) 検討条件

本研究では図-1に示すS港における座礁海難を検討対象とした。S港は太平洋に対して開けた湾奥に位置し、座礁した海域である湾奥の北西部は砂浜が直線状に広がってやや遠浅の海岸を形成している。海岸線の沖合約 $3,200\text{m}$ のところに 20m 等深線が、 $1,000\text{m}$ のところには 10m 等深線がそれぞれ海岸線にほぼ平行に延びている。湾の西側海域は水深が 50m より浅く、底質が砂又は泥で構成されている。対象船舶は $60,000\text{DWT}$ 級穀物船であり、垂線間長 215m 、幅 32.2m 、喫水 9.8m 、排水量 $57,093\text{t}$ であった。図-4にS港の港外に設置されているナウファスの波浪観測ポイントにおける2002年7月25日20:00の波浪スペクトルを示す。

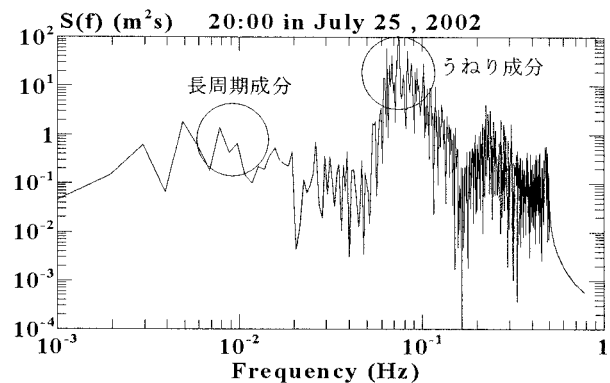


図-4 座礁海難時の港外波のスペクトル

図より座礁時（7/25 21:30）にてうねり成分（8～30s）の有義波高は 3.5m 、長周期成分は 0.5m であり、25日の深夜～翌26日の早朝まで高波浪および強風が継続した。当時は強風も連吹していたが、船体へのせん断応力や曲げモーメントは風圧力による影響は極めて小さいと思われるため、ここでは波浪のみを外力として考慮した。外力条件は7/25の20:00に観測された波形データをFFT解析した成分波をもとにストリップ法によって流体力、波力および船体動揺を求め、式(1)～(13)にて船体断面に働くせん断力、曲げモーメント、振りモーメントを計算した。

(2) せん断力および曲げモーメントの計算結果

船が漂流、座礁する過程で波向が様々変化するため、船首（ 0° ）から船尾（ 180° ）まで 30° ごとに7方向について取りまとめた。図-5に波向 60° におけるSurgeを除く船体動揺の時系列波形を示す。鉛直および水平方向、その軸周りにもPitch運動が卓越しており、これに伴い船体外板に作用するせん断力および曲げモーメントの大きさが許容応力とどのような関係になっているのかについて検証した。

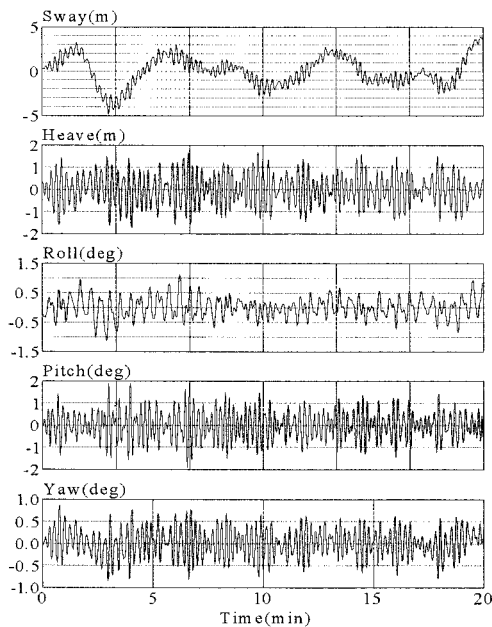


図-5 船体動揺の時系列波形（波向60°）

図-6に波向60°で船首から63mの位置での6モードに作用する内力および内部モーメントの計算結果を示す。これらの計算結果をもとに船体各部に作用するせん断応力および曲げ応力は次式によって求めた。

$$\tau_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad (i=1\sim3) \quad (18)$$

$$\sigma_i = \frac{Q_i}{Z_i} \quad (i=4\sim6) \quad (19)$$

ここで、 τ はせん断応力、 σ は曲げ応力、 A は内力が作用する船体外板の面積、 Z は船体断面に対する断面2次モーメントを船底から力の作用点までの高さで除した係数である。

図-7に船体各部での縦方向（波向0°）の曲げ応力およびせん断応力の最大値を示す。これらは静水時と波浪作用時の合計値であり、曲げ応力は船体中央で29N/mm²、せん断応力は船首で31.8N/mm²であった。船級協会で用いられている許容応力175N/mm²（曲げ応力）、110N/mm²（せん断応力）に対し、1/6～1/3の余裕があることが分かる。また図-8に船体各部における横方向（波向120°）の曲げ応力とせん断応力の最大値を示す。曲げ応力、せん断応力の最大値はそれぞれ3.3N/mm²（船体中央）、3.7N/mm²（船首から50m後方）であった。船級協会にて用いられている横方向の許容応力175N/mm²（曲げ）および70N/mm²（せん断）に対して1/50～1/20の余裕があり、船体外板が亀裂していない状態では当該外力が作用しても船体が破損する現象は必ずしも再現されているとは言えないことが計算結果から明らかとなった。

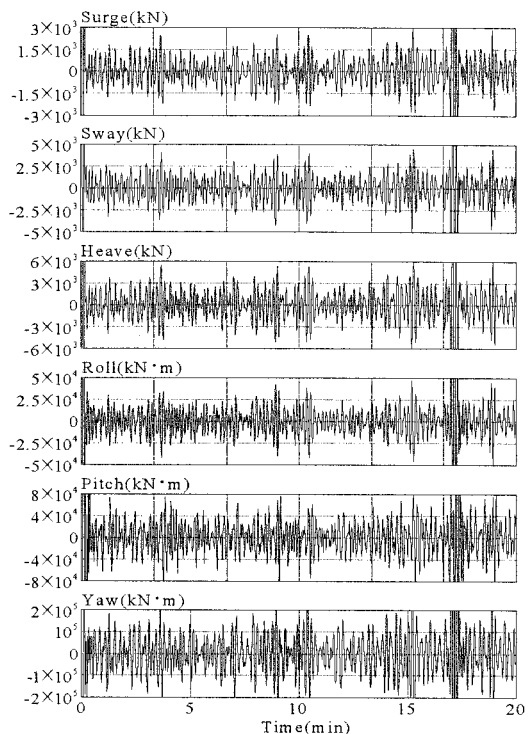


図-6 内力および内部モーメントの計算結果（波向60°，船首から63mの位置）

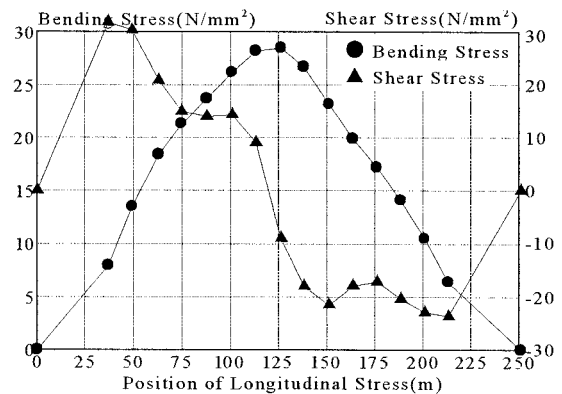


図-7 縦方向に発生する曲げ応力・せん断応力

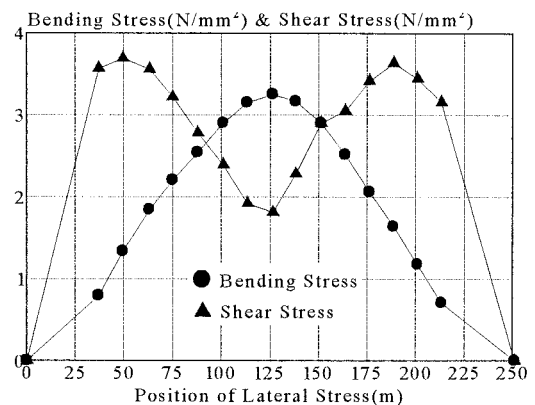


図-8 横方向に発生する曲げ応力・せん断応力

(3) 亀裂破壊の可能性についての検討

これまでの検討で海岸にて船体が破損した状況を再現できなかったため、座礁時に海底に触底した影響で何らかの亀裂が船体外板に生じたという仮定のもとで式(17)にて示した応力拡大係数を計算した。図-9に船側外板に長さ100mm, 200mm, 300mmの亀裂がそれぞれ生じたと仮定した場合について、応力拡大係数の計算結果を示す。図より船体中央では K_I は350~620N/mm^{1.5}となり、この程度の亀裂が何らかの衝撃で生じた場合でも波浪による動的な荷重が繰り返し作用することで船体破損となりうると思われる。ここでは静的な荷重・応力等の検討にとどめたが、港湾計画にて港外避泊の安全性を検討するにあたり、港外波浪の特性、港外海域の水深および底質、対象船舶の諸元を考慮し、図-10に示す流れにて安全性を検討していくことが望ましいと考えられる。

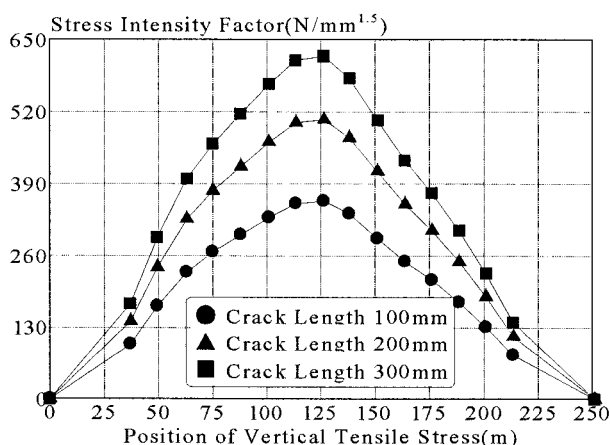


図-9 船側外板に作用する亀裂長さごとの応力拡大係数(波向0°)

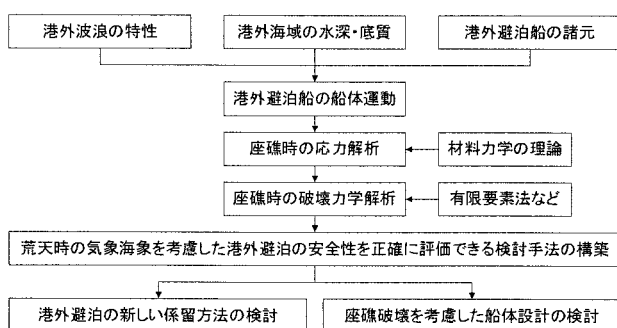


図-10 港外避泊の安全性からの港湾計画のあり方

5. 結論および今後の課題

本研究では港外避泊時に連続して発生した座礁船の海岸での破損事故に伴う問題点を対象に、港湾計画として考慮すべき事項について事例をもとに検討した。結論および今後の課題は以下の通りである。

- (1) 港外避泊時の海難にて高い確率で船体が破損し、沿岸域の深刻な環境破壊だけでなく、莫大な処理費用を自治体が負担せざるを得ない状況が多く発生している。
- (2) 海難例をもとに、船体および波浪データをもとに船体各部に作用するせん断応力および曲げ応力を求めた結果、いずれも許容応力の1/3以上の余裕がある結果となった。
- (3) 船舶設計時での通常材料力学的な検討だけでは、港外避泊時の海難に対する安全性および安全な沿岸環境を保持するためには不十分である。
- (4) 亀裂が座礁時の何らかの衝撃で発生したと仮定した場合で応力拡大係数を計算した。これより繰り返し荷重が作用することにより現場で発生している状況が発生しうることが分かった。
- (5) 今後の港湾計画・運用において、港外避泊時の安全性として、面積だけの観点から錨地を検討するのではなく、港外波浪、港外海域の水深・海底土質、錨泊時の船体運動、さらに有限要素法を用いた破壊力学的な検討を組み合わせた評価方法を構築する必要がある。

謝辞：船体強度に関する数値解析を実施するにあたり、Newcastle University (United Kingdom)の Mrs. Ana Mesbahi に助力を賜ったことを深謝する。本研究は著者の1人である笹が2006年度国立高等専門学校機構・在外研究員としてNewcastle Universityに派遣・実施されたことを付記する。

参考文献

- 1) 白石悟・久保雅義・上田茂・榊原繁樹：係留システムに着目した長周期波に対する動揺抑制対策，海岸工学論文集，第42巻，pp.941-945，1995。
- 2) 白石悟・久保雅義・榊原繁樹・笹健児：長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp.861-865，1999。
- 3) 笹健児・久保雅義・永井紀彦・米山治男・白石悟・水井真治：入出港時における沖合観測波形を用いた船体動揺の数値計算および着離岸作業の困難度評価，海岸工学論文集，第51巻，pp.1291-1295，2004。
- 4) 笹健児・Atilla Incecik・永井紀彦・清水勝義・水井真治：荒天時の観測波を用いた港外避泊船の船体運動の再現性に関する研究，海岸工学論文集，第54巻，pp.1321-1325，2007。
- 5) 国土交通省：放置座礁船対策の基本的方向について一省内検討会取りまとめ，http://www.mlitt.go.jp/kisha03/10/100702_.html，2003。
- 6) 大崎町ホームページ：座礁船コープベンチャー号の軌跡，<http://www.town.kagoshima-osaki.lg.jp/osaki06/osaki13.htm>，2003。
- 7) Journée, J.M.J. and Adegeest, L.J.M., Theoretical Manual of "Seaway for Windows", Technical University of Delft Report, No.1370, 336p., 2003。
- 8) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会：実践浮体の流体力学(前編—動揺問題の数値計算法)，成山堂書店，291p., 2003。
- 9) 山本善之・大坪英臣・角洋一・藤野正隆：船体構造力学(二訂版)，成山堂書店，221p., 2004。