

# 荒天時の観測波を用いた船体運動による港外避泊船の安全性評価

笹 健児\*      ・永井紀彦\*\* ・白石 悟\*\*\*  
米山治男\*\*\*\* ・水井真治\*\*\*\*\*

台風や低気圧などの荒天を避けるため、港外避泊していた船舶が走錨・座礁する海難が連続して発生し、乗組員の人命や船体および貨物の損傷、油流出による環境汚染が深刻な問題となっている。本研究では座礁海難の状況を調査し、これまでの研究で未検討の波浪影響に注目した。この結果、海難時には波浪も顕著な発達が見られ、アンケート調査によっても現状の港外避泊に対する検討の不十分さが様々な側面から明らかとなった。風および波浪影響を正確に考慮できる錨泊船の船体運動に関する数値シミュレーションを構築し、外力影響を検証した。この結果、風と波浪が同時に作用する状況下ではじめて走錨・座礁となる様子が再現できる。

## 1. 研究の目的

港外波浪が厳しい条件の場合、うねり・長周期波の影響が顕著となり、船舶の入出港や港内の荷役・係留が非常に困難となる。台風や低気圧の接近で上記作業が困難な場合、現行の運用基準では船舶は港外海域へ避泊するように定めている。これは気象海象の条件が港内よりもさらに厳しい港外で錨泊することで荒天を凌ぐという経験的な運用方法と言え、港湾計画や台風避泊の検討において、模型実験により求めた流体力微係数をもとにした操縦運動論により錨泊船の船体運動を計算した結果から運用基準が検討されている。これらの検討では風のみを外力として考慮し、波浪（うねり、長周期波、変動漂流力）の影響が正確に検討されておらず、また解析手法も水平方向の運動のみが対象とされ、運動方程式において周波数に依存した流体力で評価するため、長周期運動の再現精度に問題がある。よって、現状での港外避泊の安全性の検討は極めて不十分と言わざるを得ない。近年、日本近海で港外避泊した船舶が走錨・座礁する海難事故が多数発生し、人命、船舶、貨物の損傷・損失や油流出などの環境汚染が改めて深刻な問題となっている。本研究ではまず港外避泊の現状に関するアンケート調査を行い、太平洋沿岸の港湾沖での海難事故を対象に波浪データの分析、避泊時の船体運動に関する新たな数値モデルの構築した。これら計算結果より風と波浪の影響について定量的に比較検討し、安全性の評価方法を考察した。

## 2. 近年の港外避泊船に関する海難状況

近年、日本近海において港外避泊船の海難が連続して発生しているが、2002年7月に九州南部の太平洋岸に面したS港の沖合海域で発生した6万トン級穀物船の座礁海難を取り上げる。当該海難は詳細な調査結果が報告されており（海難審判庁, 2003）、事故状況と時間的な経過および位置関係は表-1 および図-1 のようであった。

表-1 座礁海難の事故状況（S港、6万トン級穀物船）

| 月 日  | 時 間   | 船の状況            |
|------|-------|-----------------|
| 7/23 | 15:00 | 代理店より第一警戒体制が発令  |
|      | 10:40 | 荷役中断・離岸し、港外へ向かう |
| 7/24 | 11:30 | 右舷錨（165m）を投じ、錨泊 |
|      | 17:00 | 台風接近に伴い風浪が強くなる  |
| 7/25 | 21:00 | 船が走錨しだす         |
|      | 21:40 | 船が圧流され座礁        |

船舶はS港の沖合3kmの海上に錨泊し、台風9号の接近を知りながらも勢力が弱まると判断したこと、他の海域へ移動すると時間的な損失も発生するためにS港沖にて錨泊し続け、機関を使用しながら荒天を凌ぐ方法を取った。台風9号は強い勢力を保ったままS港の数十キロの海上を通過したため、非常に強い風浪が来襲したと推定できる。このため、錨による把駐が困難となり最終的には走錨・座礁に至った。乗組員19名は救命ボートで脱出するが、激しいうねりのために全員が海に投げ出され、そのうちの4名が死亡した。また座礁した船体は真二つに破損し、裂けた箇所から多量の重油が流出したために7kmの海岸線にわたって油による環境汚染が二次災害として深刻な問題ともなった。このような海難事故に対し、風だけでなく波浪外力による影響がどの程度であるのかを定量的に検証した事例は見当たらず、次章以降にて順に検討していくこととする。

\* 正 会 員 博(商船) 広島商船高等専門学校助教授 商船学科  
\*\* フェロー 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究室長  
\*\*\* 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部長  
\*\*\*\* 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 海洋構造研究室長  
\*\*\*\*\* 博(商船) 広島商船高等専門学校教授 商船学科

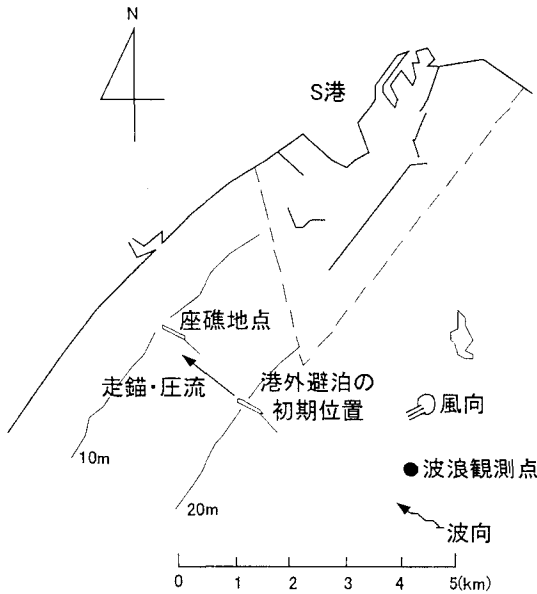


図-1 S港沖における座礁海難時の位置関係

### 3. 座礁海難時における海象条件の分析

ここでは港外にて観測された波浪データを分析し、座礁海難との時間的な関係および周波数特性について検討した。対象としたS港の沖合にもナウファスの波浪観測ポイントが構築されており、海難事故時における波浪データについて整理した。図-2に7月24日～25日における周期帯別の波高の時系列変化を計算した結果を示す。

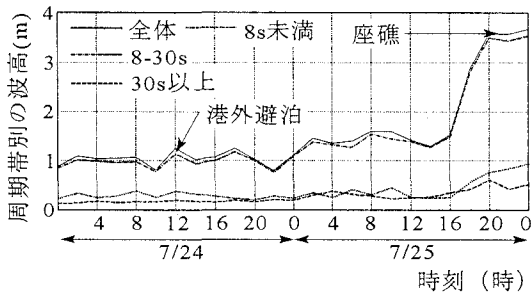


図-2 周期帯別波高の時系列変化 (S港)

これらはナウファスの定義に従い、観測波形をもとに風波成分（8s未満）、うねり成分（8-30s）、長周期波成分（30s以上）の成分波の時系列を計算し、ゼロアップクロス法を用いて求めた。図よりうねり成分が支配的であり、港外避泊時に1mであった波高は24時間後に1.5mまで徐々に上昇した後、25日の16:00から4時間後の20:00には3.5mまでに急に上昇している状況であった。長周期波成分もうねり成分の上昇とともに0.5m

近くまで発達している。海難審判裁決録によれば、風速は25日16時ごろから15 m/sに発達し、17時過ぎから暴風圏に入った。台風の接近に伴い、風向は北～北東～東北東へと徐々に変化しながら20時過ぎには25 m/sの平均風速（瞬間最大風速41 m/s）が観測された。これより、強風だけでなく変動漂流力などの非線形な波力の影響が強い高波浪および長周期波が同時に作用する極めて厳しい気象海象条件であったといえる。

### 4. 港外避泊の現状に関するアンケート調査

港外避泊の現状に関し、検討が不十分な点がいくつか見受けられるが、実際の運航者はどのような感じているかを把握するため、国内の船会社、代理店等を中心にアンケート調査を実施した。アンケートは115社に発送し、41社より回答を得た。以下、主なアンケート結果を取りまとめたものを順に示す。図-3に避泊状況に関するアンケートの集計結果を示す。

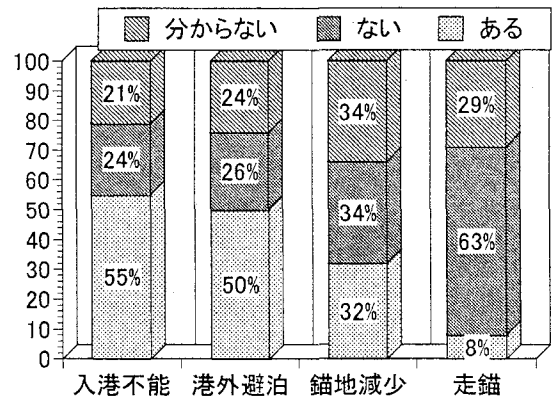


図-3 港外避泊に関するアンケート結果

図より全体の55%が荒天により入港できなかったことがあり、50%が港内から港外へ避泊した経験があることが分かった。これより、半数近くが港外避泊を経験している状況であるといえる。また全体の3割が近年における静穏な海域における錨地の減少を感じており、これも外洋に面した海域にて避泊せざるを得ない大きな要因となっていると考えられる。この背景には埋め立て地の増加による影響が強いと考えられる。さらに8%が錨の把駐力が効かなくなる走錨状態を経験していることも明らかとなった。図-4に港外避泊の主な気象要因および港外避泊時に船舶の座礁に対し最も危険と思われる船体運動のモードについて集計した結果を示す。

気象要因については台風時が全体の半数近くであり、低気圧時も約4割を占めている。これより、台風だけでなく低気圧の接近時にも港外避泊の検討も必要である。従来の検討で対象とされていた水平方向の運動

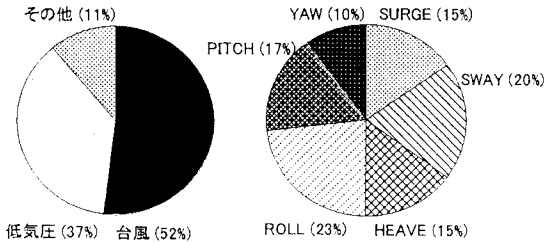


図-4 港外避泊の気象要因および座礁に対し最も危険と思われる船体運動

(SURGE, SWAY, YAW) は全体の45%であり、波浪によって発生する HEAVE, ROLL, PITCH がこれより10%多い55%を占めている。このことから波浪の影響を正確に考慮した数値的な検討が必要であるといえる。

##### 5. 波浪強制力および変動漂流力を考慮した錨泊船の船体運動に関する数値解析

本研究では風圧力と波力を同時に考慮した錨泊船の船体運動を再現できる数値解析の構築を試みた。錨泊船の振れ回り運動については過去に多数検討されているが、①水平方向の3モードの運動のみを対象としている、②流体力係数を運動方程式中で周波数に依存した一定値として代表させている、③外力を風のみとしており波浪を詳細に考慮していないことが問題点と考えられる。これらを考慮した数値解析を新たに構築し、外力の影響を詳細に比較検討することで座礁海難の状況を特定することが可能となる。船体運動は式(1)に示す時間領域での運動方程式による解法(Cummins, 1962)により解析した。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_{ij}(\infty)) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau + D_{ij} \dot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + H_{ij}) X_j(t) = FWV_j(t) + FDF_j(t) + FWD_j(t) \quad (i, j=1-6) \quad (1)$$

ここで、 $M$ : 船体質量、 $m(\infty)$ : 不変付加質量、 $L(t)$ : 遅延関数、 $D$ : 粘性抵抗係数、 $C$ : 復原力係数、 $H$ : 錨鎖および錨による係留力係数、 $FWV(t)$ : 波浪強制力、 $FDF(t)$ : 変動漂流力、 $FWD(t)$ : 風圧力、 $X(t)$ : 船体変位、 $t$ : 時間を示す。不変付加質量および遅延関数は周波数ごとに求めた流体力係数に対するインパルス応答を計算することで求められる。式(1)のように運動方程式中で流体力を周波数に依存しない形で表現することで係留船舶の長周期動揺が精度良く再現できることが観測データを対象に検証されている(久保ら, 1997; 白石ら, 1999)。付加質量、減衰係数などの流体力および波浪強制力は周波数領域において船体形状を任意に考慮できる三次元グリーン関数法(John, 1950)により計算した。

変動漂流力については、流体力および波浪強制力の計算結果をもとに摂動展開法(斎藤ら, 1995)により波高の二乗に比例する非線形波力として計算した。錨鎖による係留力に関してはカタナリー理論に基づく方法(井上, 1982)、錨鎖全体を差分化して計算する方法(鞠谷ら, 1983)などいくつかの手法が提案されているが、ここでは浮体構造物の動揺計算にてカタナリー理論を応用した係留錨鎖の張力計算法(上田ら, 1981)を用いた。ただし船舶の場合、浮体構造物と異なり錨鎖張力が錨の把駐力を超える場合にはそれ以上の張力は発生せず、錨が海底を掻きながらある程度の距離を引きずられた後に走錨する現象が生じる(井上ら, 1995)。錨の把駐力は図-5に示す錨鎖の係駐部長さのほかに、錨の形状、海底土質などをパラメーターとして次式で定義される。

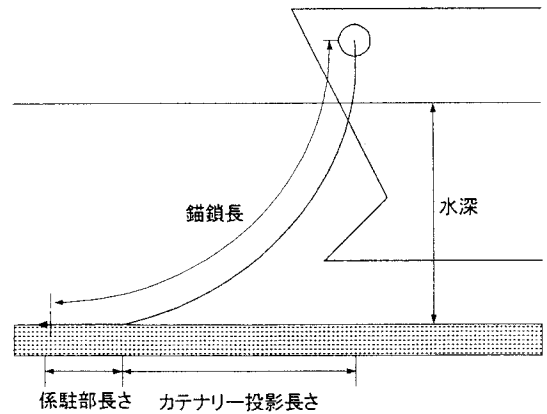


図-5 錨鎖のカテナリー状態における係駐部長さ

$$P = w_a \lambda_a + w_c \lambda_c \ell \quad (2)$$

ここで、 $P$ : 錨の把駐力、 $w_a$ : 錨の重量、 $\lambda_a$ : 錨の標準把駐係数、 $w_c$ : 錨鎖の単位長さ当りの重量、 $\lambda_c$ : 錨鎖の摩擦抵抗係数、 $\ell$ : 錨鎖の係駐部長さをそれぞれ示す。図より係駐部長さは錨鎖張力の増大とともに短くなるため、錨の限界把駐力は逆に減少する。ここでは、走錨を考慮しない理論上の錨鎖張力と式(2)に示す限界把駐力を時々刻々に計算し、錨鎖張力が数回ほど限界把駐力を上回れば走錨したと定義する。また座礁時に影響する船体沈下量についても次式で計算し、沈下量を定量的に検討した。

$$SV(t) = X_3(t) + \frac{B}{2} \cos X_4(t) + d(\cos X_4(t) - 1) - \left( \frac{L_{pp}}{2} - YG \right) \sin X_5(t) + d(\cos X_5(t) - 1) \quad (3)$$

ここで、 $SV(t)$ : 時間  $t$  における船尾部分の沈下量、 $B$ : 船幅、 $L_{pp}$ : 船の垂線間長、 $YG$ : 船体中央から重心まで

の前後距離,  $X_3(t)$ : Heave の動揺量,  $X_4(t)$ : Roll の動揺量,  $X_5(t)$ : Pitch の動揺量をそれぞれ示す。

## 6. 数値解析による座礁海難の検証

ここではS港での座礁海難を対象に数値的な検証を行う。対象とした6万トン級穀物船は垂線間長215 m, 船幅32.2 m, 喫水9.8 m, 排水量57,093 t, メタセンター高さ3.48 m, 正面受風面積573 m<sup>2</sup>, 側面受風面積2,190 m<sup>2</sup>の諸元であった。水深25 mの海底に右舷の錨のみを使用した単錨泊を行っており, 錨鎖長は165 mほど伸出していた。表-2に式(2)における錨および錨鎖の計算諸元を示す。

表-2 錨および錨鎖の計算諸元

|             |          |             |        |
|-------------|----------|-------------|--------|
| $w_a$       | 6,975 kg | $w_c$       | 146 kg |
| $\lambda_a$ | 7.0      | $\lambda_c$ | 0.75   |

表-2の係数を用いた計算結果では実質的な走錨に対する錨の把駐限界は510kN程度であった。表-3に座礁海難となる直前であった7/25の20:00の状況に対する再現シミュレーションの外力条件(4ケース)を示す。

表-3 再現シミュレーションのケース

| ケース | 波浪条件      |           | 風条件 |        |
|-----|-----------|-----------|-----|--------|
|     | $H_{1/3}$ | $T_{1/3}$ | 風向  | 平均風速   |
| A   | なし        |           | ENE | 25 m/s |
| B   | 3.57 m    | 12.8 s    | なし  |        |
|     | 変動漂流力なし   |           |     |        |
| C   | 3.57 m    | 12.8 s    | ENE | 25 m/s |
|     | 変動漂流力なし   |           |     |        |
| D   | 3.57 m    | 12.8 m    | ENE | 25 m/s |
|     | 変動漂流力あり   |           |     |        |

波浪および風については, 沖合の観測点で得られた時間波形およびダーベンポートのスペクトルをもとにした。ケースAは風圧力のみを考慮し, ケースBは波浪強制力のみを考慮し, ケースCは変動漂流力のみを考慮せず, ケースDのみ風圧力, 波浪強制力, 変動漂流力を全て考慮した外力条件とした。図-6にケースA~Dの重心の振り回り運動による軌跡の計算結果を示す。

外力を風のみとした場合, 規則的な8の字運動振り回りを生じているが, 外力が波浪のみの場合にはX軸方向にはほとんど運動が生じていない。一方, 波浪と風が同時に作用する風浪状況ではケースAおよびBに対し振り回り運動はかなり大きくなっている。さらに波浪の非線形性に起因する変動漂流力を外力に加えた場合, 振り回りの運動量はさらに大きくなっていることが分かる。

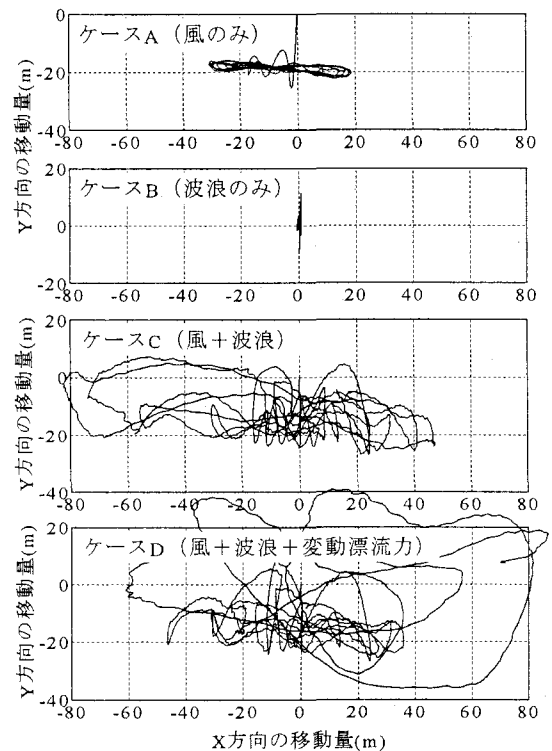


図-6 重心の振り回り運動の軌跡

これまで振り回り運動は波やうねりでは起こらないために風のみを外力条件で検討すればよいと考えられていたが(本田, 1984), ケースCおよびDのように線形および非線形な波力, さらに風圧力が共存する外力条件とした場合の方が振り回り運動の振幅は風のみで検討した場合よりもかなり大きくなっていることが分かる。図-7に錨鎖張力の時系列をケースごとに比較した結果を, 表-4に式(3)によって計算した船尾部分の最大沈下量の最大値を比較した結果をそれぞれ示す。

錨鎖張力もケースA, Bに対し, ケースC, Dは限界把駐力を何回も超えており, 実際には走錨に至っている現場の状況が再現された。また上下方向の運動はケースAではゼロに近いが, ケースB, C, Dでは1.9 m, 3.6 m, 7.8 mの船体沈下量が生じ, 風と変動漂流力まで含めた波浪条件を正確に考慮することにより水平方向の振り回り運動と鉛直方向の運動の合成で走錨から座礁に至った海難が発生していると推定できる。ただし, 船体運動が大きくなり走錨に至る詳細な状況, 走錨後に圧流され座礁に至る波浪場の再現などが正確に考慮できておらず, 今後の課題として検討する必要がある。

## 7. 結論および今後の課題

結論および今後の課題は以下のとおり要約される。

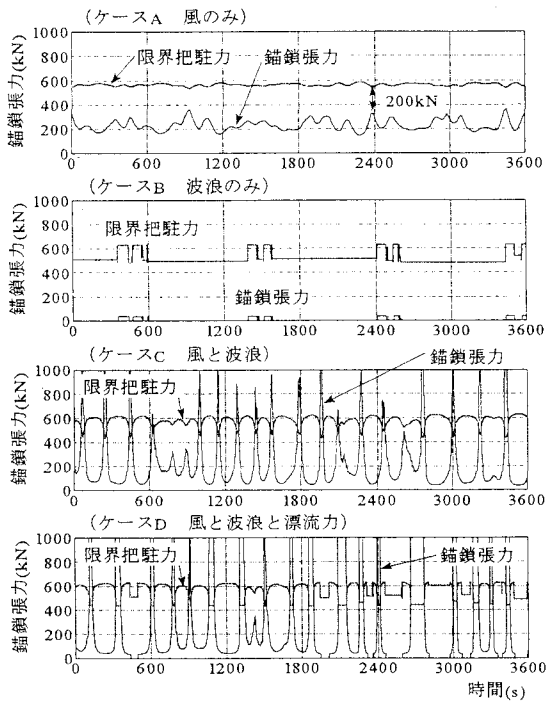


図-7 錨鎖張力の時系列

表-4 船尾沈下量の最大値の比較

|            | A      | B      | C      | D      |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| $SV_{max}$ | 0.04 m | 1.91 m | 3.64 m | 7.79 m |

- (1) S港の波浪データを分析した結果、座礁時には風速だけでなく波浪も座礁の数時間前から急上昇しており、強風、うねりおよび長周期波成分が卓越する条件であった。
- (2) 約半数が荒天下で入港できなかった、または港外避泊の経験があり、32%が良好な錨地が近年減少していると感じており、8%が港外避泊中に走錨を経験している。
- (3) 港外避泊時に座礁の観点から危険と思われる船体運動については、水平方向への運動だけでなく、鉛直方向の運動がむしろ危険であるとの回答結果が多かった。
- (4) 波浪影響を考慮し錨泊船の振れ回り運動を正確に再現できる数値解析モデルを新たに構築した。S港の座礁海難を再現した結果、外力が風のみとした場合には海難状況が再現できず、風、波浪さらに変動漂流力を考慮した場合に振れ回り運動や船体沈下量も非常に

増大し、錨鎖張力も限界把駐力をたびたび超える状況が再現された。

- (5) 港外避泊の安全性を検討するには風による振れ回り運動を検討するだけでは不十分であり、風、波浪および変動漂流力を外力とした船体運動の解析による錨鎖張力や船体沈下量を詳細に検討する必要がある。
- (6) 走錨に至る正確な状況の再現と走錨後に圧流され座礁に至る正確な波浪場の再現を含めた数値シミュレーションでのモデル化が不十分であったため、今後の研究にて検討する必要がある。また船型、係留条件、海域、外力条件などが異なる条件における適用性を検討するとともに座礁防止の対策についても今後検討する必要がある。

**謝辞：**本研究の実施にあたり、アンケート調査および海難資料や波浪等のデータ整理に助力頂いた広島商船高等専門学校・学生 小林龍馬君に感謝の意を示す次第である。なお本研究は平成16年度科学研究費補助金（若手研究(B)研究代表者：広島商船高等専門学校助教授 笹健児）の交付を受けて実施されたことを付記する。

## 参考文献

- 井上欣三(1982)：単錨泊船の振れ回り運動中に生じる錨鎖張力の緩和に関する研究－Ⅱ－バウスラスタを利用した錨鎖張力の緩和－、日本航海学会論文集，第66号，pp. 153-161。
- 井上欣三・宇佐美茂・橘秀幸(1995)：AC14型アンカーの走錨挙動に関する模型実験，日本航海学会論文集，第92号，pp. 223-230。
- 上田茂・白石悟(1981)：カテナリー理論による最適係留錨の選定法および計算図表，港湾技研資料，No.379，55p。
- 海難審判庁(2003)：貨物船コープベンチャー乗揚事件，平成15年門司地方海難審判庁裁決録14-132，<http://www.mlit.go.jp/maia/04saiketsu/15nen/moji/mj1506/14mj132yaku.htm>
- 鞠谷宏士・鶴田三郎・福谷恒男(1983)：錨鎖張力の動的解析に関する実験研究，日本航海学会論文集，第69号，pp. 17-23。
- 久保雅義・笹健児・白石悟・榎原繁樹(1997)：数値計算手法が長周期波作用下における長周期船体動揺へ及ぼす影響について，海岸工学論文集，第44巻，pp. 236-240。
- 斎藤勝彦・J.M.A. Spencer・久保雅義(1995)：係留船の長周期動揺に関する数値シミュレーション，日本航海学会論文集，第93号，pp. 131-139。
- 白石悟・久保雅義・榎原繁樹・笹健児(1999)：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。
- 本田啓之輔(1984)：操船通論，成山堂書店，310p。
- Cummins, W.E.(1962)：“The Impulse Response Function and Ship Motions.” Schiffstechnik, Bd.9, Heft 47, pp. 101-109。
- John, F.(1950)：On the Motion of Floating Bodies II, Comm. Pure & Appl. Math., Vol.3, No.1, pp. 45-101。