

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

A Study on Reproduction of Ship Motions in Offshore Refugee Outside Harbour using Observed Waves

笹 健児¹・Atilla INCECIK²・永井紀彦³・清水勝義⁴・水井真治⁵

Kenji SASA, Atilla INCECIK, Toshihiko NAGAI, Katsuyoshi SHIMIZU and Shinji MIZUI

In recent years, anchored vessels sometimes dragged their anchor and stranded in coastal zones during the evacuation at stormy weathers. It is very important to verify the accuracy of numerical simulation of anchored ship motions. In this study, some points of numerical simulations are improved to reproduce accurately the phenomenon of stranded casualties. The situation of the dragging anchor can be reproduced by solving the equation of motion at seabed. The approximated hydrodynamic forces of the anchor chain make the accuracy better. Finally, the detailed situation can be reproduced by considering the dragging anchor, the drifting of ship and the hydrodynamic forces of mooring chain. It makes possible to simulate accurately the safety of anchored vessels offshore harbour as the new planning scheme.

1. 研究の目的

港湾を計画・運用するにあたり、泊地の静穏度、長周期波による係留問題が詳細に検討され、最近では船体運動による入出港の困難さ(笹ら, 2003)についても現地観測を含めた検討の必要性が提言された。一方、荒天により港内で係留不能となる場合や入港できない船舶の場合、気象海象が静穏となるまで錨と錨鎖を用いた海底での係留による港外避泊が一般的な対応とされる。近年、外洋性港湾の港外に荒天避泊した船舶が走錨、座礁に至る海難事故が日本近海で連続的に発生し、乗組員の人命や船舶の損傷だけでなく、油流出による環境汚染も大きな問題となっている。著者は前報(笹ら, 2005)において、実務者に港外避泊に関する現状をアンケート調査し、波浪による港外避泊の問題点を明らかにするとともに、波浪と風の両方を外力として考慮したインパルス応答関数による運動方程式で解析することにより、港外避泊船の走錨から座礁に至る海難状況が定性的に再現されることを示した。ただし、船体運動時に錨が海底で運動し、最終的に走錨および座礁に至る状況を物理的に再現できておらず、長周期運動時に錨鎖に働く動的な減衰力も正確に考慮されていないという課題が残されていた。本研究では、錨の運動方程式を考慮した走錨のアルゴリズム、長周期運動時の錨鎖に作用する減衰力、さらに船体そのものが漂流する現象を考慮し、実際に外洋性港湾

にて台風接近時に発生した 6 万トン級貨物船の海難事例を対象に走錨および座礁の状況に対する再現度を条件ごとに比較した。これらの検討結果より、港外避泊船の船体運動に対する数値解析の再現精度を支配するパラメータとその影響について定量的な考察を行った。

2. 錨泊船の船体運動の特性

錨泊船が波浪および風による外力を受けて運動する場合、インパルス応答を考慮した運動方程式 (Cummins, 1962) によって解析した。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_{ij}(\infty)) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau \\ & + \sum_{i=1}^6 D_{ij} \dot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 (H_{ij} + C_{ij}) X_j(t) \\ & = FWW_j(t) + FDF_j(t) + FWD_j(t) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで、 M は船体質量および慣性モーメント、 $m(\infty)$ は不変付加質量、 $L(t)$ は遅延関数、 D は錨鎖および船体運動に伴う減衰係数、 H は錨鎖のパネ定数、 C は復原力係数、 $FW(t)$ は三次元グリーン関数法による波浪強制力 (John, 1950)、 $FDF(t)$ は 2 次オーダーの波力 (斎藤ら, 1995)、 $FWD(t)$ は風圧力、添え字 j は運動のモード ($j=1 \sim 6$)、 t は時刻を示す。船舶が港外で錨泊する場合、船首部分から錨および錨鎖を海底に投下し、錨の爪が海底土中に掻き込むことによって発生する把駐力とこれに連結している錨鎖反力によって係留力を確保している。ただし、洋上のプラットフォームやメガフロートのような海洋構造物と異なり、錨鎖張力が錨の把駐力を超える場合、錨自体が海底土中を掻きながら移動する走錨現象が発生する。また走錨距離が錨長の 10 ～ 15 倍以上になると錨が土中で反転し、錨が完全に海底から

1 正会員 博(商船) 広島商船高等専門学校准教授 商船学科
2 Ph.D Prof., Glasgow University, UK
3 フェロー 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部長
4 正会員 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究室長
5 博(商船) 広島商船高等専門学校教授 商船学科

離れ、係留力がゼロとなることが確認されている(井上ら, 1995)。錨鎖による係留方法の場合、船体運動の周期は岸壁係留中よりもかなり長くなるため、計算値の評価として時刻 $t=0 \sim 1200$ s を計算の助走時間として走錨が発生しないと、1200 s 以降にて把駐力を超える場合に走錨量を計算するアルゴリズムとした。なお計算時間は最大で 7200 s とした。海洋構造物の係留に関する事例より、錨鎖により係留された浮体が長周期運動する際に錨鎖自体の運動に伴う流体力が発生することも示されている。港外避泊船の船体運動に関する精度向上のため、これらの点について次章のように改善を行った。

3. 数値計算の改善点

本研究では以下に示す項目について、数値計算上の改良を数点について実施した。

(1) 海底での錨の運動解析

図-1 に海底土中で錨に発生する力の種類およびバランスを示す。

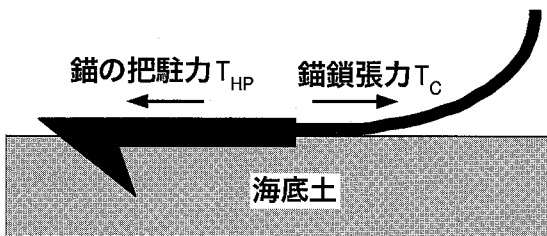


図-1 海底土中で錨に発生する力

船体運動により発生する錨鎖張力を T_C 、錨の把駐力を T_{HP} 、錨の質量を M_A 、錨の付加質量を m_A 、錨の土中での抵抗係数を D_A とすれば以下の運動方程式が成り立つ。

$$(M_A + m_A)\ddot{X}_A(t) + D_A\dot{X}_A(t) = T_C(t) - T_{HP}(t) \quad (2)$$

ここで、 $X_C(t)$ は時刻 t における錨の変位を示す。錨の土中における付加質量は経験式を用いた(浦ら, 1980)。 D_A の値は過去の実験値(本田, 1970)を参考とした。

$$m_A = \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_A}{\tan \phi} + \frac{1}{2} \right) M_A \quad (3)$$

ここで、 λ_A は錨の把駐力係数(通常時は 7、走錨時は 2)、 ϕ は錨の爪と海底のなす角度(ここでは 35°)を示す。時々刻々に求められる錨鎖張力 T_C および把駐力 T_{HP} を式(2)に代入すれば、錨の海底土中での変位量が求められる。また、錨の把駐力は次式によって求められる。

$$T_{HP}(t) = w_A \lambda_A + w_C \lambda_C \ell \quad (4)$$

ここで、 w_A : 錨の重量、 w_C : 錨鎖の単位長さ当りの重

量、 λ_C : 錨鎖の摩擦抵抗係数(通常および走錨時とも 0.75)、 ℓ : 錨鎖の係駐部長さをそれぞれ示す。ここで、 $T_C \geq T_{HP}$ となる場合、錨は海底に静止するのが困難となり移動変位が生じ始める。走錨距離が錨長さの 2 倍を超える場合、錨の把駐力係数は走錨時の値に低下するとした。走錨距離が錨長の 15 倍を超える場合、錨は海底より完全に離れ、錨の係留力がゼロの状態、すなわち漂流する状況も一部のケースで検討した。これらを式(1)における時系列解析にて発生した錨鎖張力に対応する移動変位を求めれば、時々刻々における走錨判定、走錨距離が求められる。

(2) 錨鎖が長周期運動するときの流体力

係留船舶の動揺問題を考える場合、係留系の固有周期は船型や係留方法によっても異なるが、通常数分～数十分のオーダーとなる。岸壁に係留した船舶の場合も長周期運動時には係留系のヒステリシス特性に起因した粘性抵抗が生じるが(久保ら, 1980)、海洋構造物などをチェーン係留した場合にも長周期運動時に同様の流体力が働くことが示されている(小寺山ら, 1988)。特に海底からチェーンを用いて係留した場合、船体だけでなく錨鎖も水中で運動するため、錨鎖自体の運動による加速度および速度に比例する流体力が発生する。このため、厳密には錨鎖の係留力は動的な扱いが必要となり、錨鎖をいくつかの要素点に分解し荷重がこれらの点に作用すると考える Lumped Mass 法(Walton ら, 1960; Thresher ら, 1975)などが提案されている。一方、動的な解析方法では計算時間が大きくなるため、静的なカタナリー理論(上田ら, 1981)をもとに動的な減衰力を推定した事例(中村ら, 1989)があり、実験により計算精度も問題ないとされている。このため、本研究では後者の近似的に動的な流体力を推定した方法を用いた。

(3) 錨鎖の伸びによる船体運動への影響

荒天時には錨鎖が緊張状態になる状況で伸びがわずかに発生し、伸びを考慮したカタナリー理論が提案されている(平石ら, 1991)。本研究では基本的にはこの手法を用いたが、一部で破断張力に至る前に走錨状態にて錨鎖に伸びの影響がどの程度生じるかを検討した。

(4) 船体運動による余裕水深量の計算

船が風浪に起因する運動で岸側へ流される場合、水平方向の運動にて圧流された地点の水深と上下方向の運動の関係により座礁の危険性を判定しなければならない。本研究では時々刻々の地点の水深を $H(x, y, t)$ 、上下揺の値を $X_3(t)$ 、横揺の値を $X_4(t)$ 、縦揺の値を $X_5(t)$ 、垂線間長を L 、船幅を B 、船体喫水を D_R 、船体中央から重心までの距離を MG とすれば船首の船底部分と海底との鉛直距離である余裕水深 $UKC(t)$ は以下のように求められる。

$$UKC(t) = H(x, y, t) - D_R - \left(\frac{L}{2} - MG \right) \sin X_4(t) - \frac{B}{2} \sin X_5(t) - X_3(t) \dots\dots\dots (5)$$

時系列計算において、 $UKC(t) \leq 0$ となった時点で座礁したと判断し、計算を終了するアルゴリズムとした。

4. 検討条件および計算結果

前章にて示した改良を加えた数値モデルを用い、港外避泊船の船体運動について条件ごとに検証計算にて精度の改善度を定量的に比較した。計算条件は以下のように設定を行った。図-2に計算対象としたS港の港外海域および避泊船の錨泊地点、座礁地点の関係を示す。

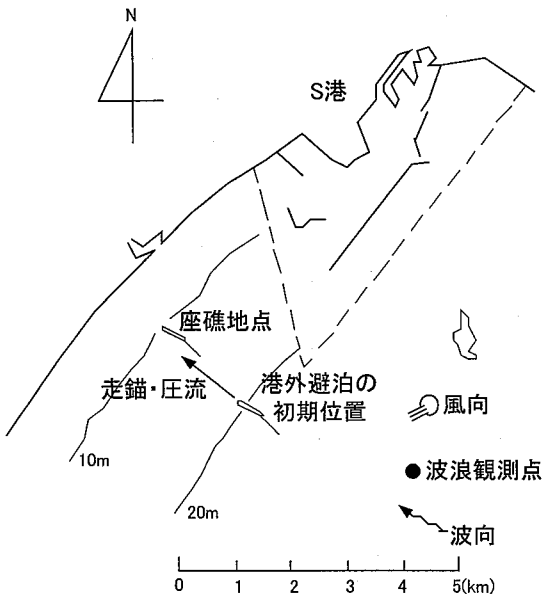


図-2 計算対象としたS港の港外海域および避泊船の錨泊・座礁地点

S港は太平洋に面した港湾であり、2002年7月25日に接近した台風の影響で港外避泊していた6万トン級の穀物船（垂線間長：215 m，船幅：32.2 m，喫水：9.8 m，排水量：57,093 t，メタセンタ高さ：3.48 m）が21:00過ぎに走錨し、21:40頃に海岸へ圧流され座礁した。当時の気象海象は台風が接近したため、係留地点の近くで計測されているナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）の波浪データを分析すると図-3に示すような周期帯別の有義波高の変動であった。

一方、風については当時の海難記録より18時過ぎは平均風速15 m/s，20時過ぎには25 m/sであったため、ダーベンポートのスペクトルにて変動風を再現した。

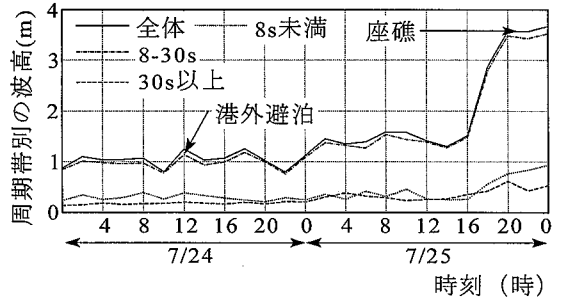


図-3 S港港外での周期帯別波浪の時間変化

表-1 数値計算の実施ケース

ケース	張力計算	走錨計算	錨鎖流体力	外力条件
A	C-1	D-1	-	W-1
B	C-2	D-1	-	W-1
C	C-2	D-1	○	W-1
D	C-2	D-1	○	W-2
E	C-2	D-2	○	W-3

表-1に検討した数値計算の実施ケースの内訳を示す。

表中において、C-1は伸びを考慮しないカタナリー理論、C-2は伸びを考慮したカタナリー理論、D-1は走錨のみ考慮した場合、D-2は錨長の15倍の距離を走錨した後に漂流するとした場合、W-1は走錨直前の時刻（7月25日20:00）に観測された波浪（1次オーダーの波力のみ）および平均風速25 m/sの外力条件、W-2は当時の外力条件において風のみを外力とした場合、W-3はW-1の条件に2次オーダーの波力を考慮した場合をそれぞれ示す。図-4にケースAおよびケースBの船体重心の移動図を比較したものを示す。

図に示すとおり、船が走錨される現象は生じているが、実際の座礁海域とはかなり離れた地点に圧流されていることが分かる。図-5にケースCの船体重心の移動軌跡を示す。

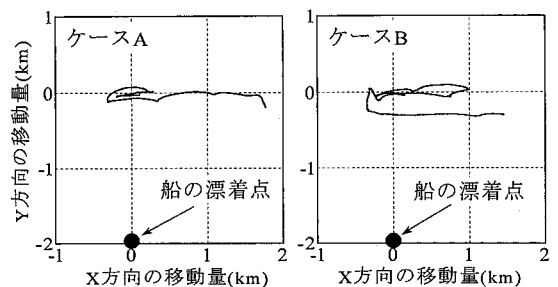


図-4 船体重心の移動軌跡の比較(ケースAおよびB)

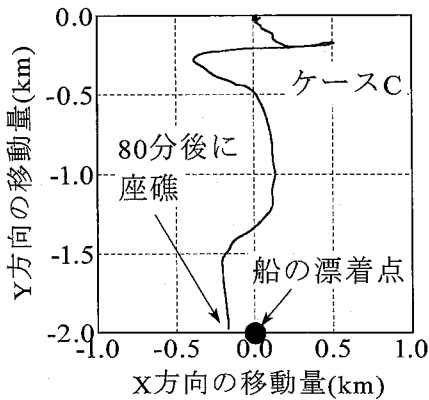


図-5 船体重心の移動軌跡 (ケース C)

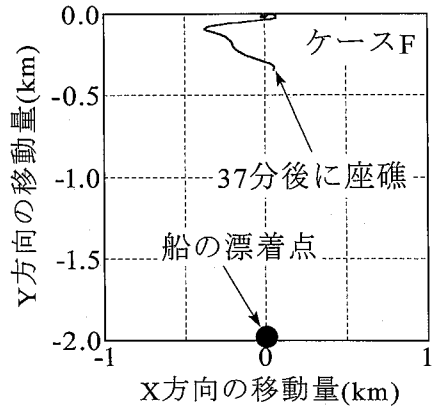


図-7 船体重心の移動軌跡の比較 (ケース E)

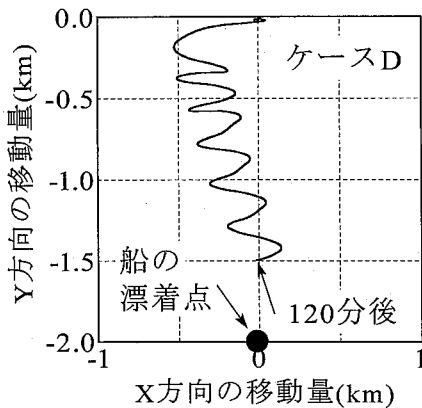


図-6 船体重心の移動軌跡の比較 (ケース D)

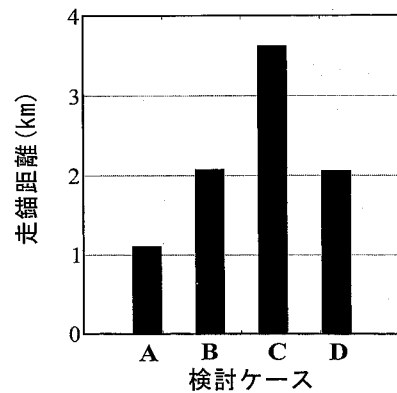


図-8 走錨距離の比較 (ケース A ~ D)

ケース C は走錨による圧流で約 80 分後に UKC 値がゼロとなり座礁し、実際の船の漂着点に非常に近い位置となっている。これは海難記録での座礁時刻 (計算開始 100 分後) および地点にも非常に近い結果と言える。外力の違いが走錨状態の船体運動に及ぼす影響について図-6 にケース D (外力は風のみ) の船体重心の移動図を示す。

ケース D は振れ回り時に現れる 8 の字運動の軌跡を描きながら走錨で圧流されるが、120 分後の時点においても座礁する状況は再現されていない。後者は外力を風のみとしているため、上下方向の変位が小さいだけでなく、波浪による水平方向への圧力寄与もかなり大きいことを示すものと想像できる。図-7 に船舶の走錨後における漂流現象も考慮したケース E の船体重心の移動図を示す。

図より初期位置から 400 m ほど圧流されたところ (計算開始後 37 分) で UKC 値がゼロとなり、実際に船が漂着した地点よりも 1.5 km ほど沖側である。これより走錨・漂流する過程で 2 次オーダーの波力による上下

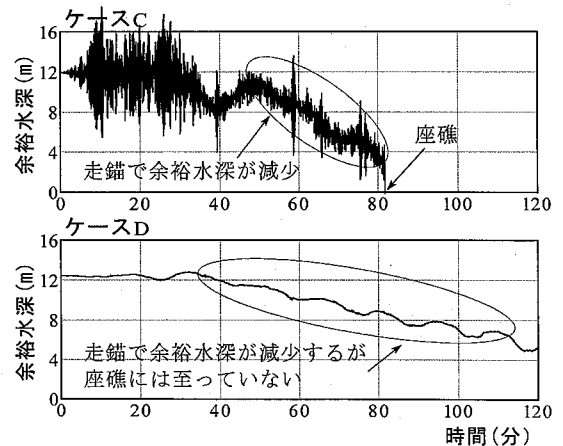


図-9 余裕水深量の時間変化 (ケース C および D)

変位量はかなり大きく生じたと推察できる。図-8 にケース A ~ D の走錨距離を比較したものを示す。

これより最も精度が良かったケース C は走錨距離が

3.6 km で最も長く、他のケースは 1~2 km であった。この結果より、S 港については荒天避泊時には港外海域で 1~4 km の走錨距離を考慮しておかなければならないことを示唆している。図-9 にケース C およびケース D について余裕水深量の時間変化を示す。

ケース C は波浪による上下運動と水平方向の圧流成分が風圧力と合成して UKC 値が計算開始後 50 分あたりから走錨の影響で小さくなり、最終的には 80 分過ぎにゼロとなった。一方、ケース D は走錨の影響で UKC 値は約 12 m から約 5 m まで減少するが、計算開始後 120 分の時点でもゼロとはなっていない。これからも改良した数値解析モデルの妥当性が検証できたと考えられる。

5. 結論および今後の課題

本研究における結論および今後の課題は以下のようまとめられる。

- (1) 海底にて発生する錨鎖張力、錨の把駐力および海底土中で発生する抵抗力を考慮した錨の運動方程式を時系列解析で考慮した。これより、どのケースにおいても、船が錨および錨鎖によって係止することができず、海岸方向へ走錨される現象が再現されることが確認された。
- (2) 外力を波浪および風とし、伸びを考慮したカタナリー理論をもとに錨鎖運動による流体力を組み合わせた場合、計算開始 80 分後に海難記録に記載された地点のほぼ近くで座礁する結果となり、伸びを考慮した錨鎖係留力とその運動による流体力を考慮することで再現精度が向上することが分かった。
- (3) 風のみを外力とした場合、走錨する現象は再現されるが、座礁に至る状況は再現されない。これは風圧力では上下運動が微小であること、波浪による水平方向の波圧が船体運動に強く影響しているためであると推察できる。
- (4) 対象とした海難データより詳細な船体運動の状況を検証することが難しく、今後の検討においては水理実験等により船体運動、錨鎖張力、余裕水深などに関する詳細な検証データを同時に得る必要がある。
- (5) 錨鎖の運動により生じる流体力を近似的に表現することで精度は向上したが、Lumped Mass 法などの動的なモデルを数値モデルに組み込み、また二次オーダーの波力に伴う波漂流減衰力 (Wichers, 1988) などの影響および違いについて今後考察する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたり、錨の土中における走錨現象について(有)中村技研工業の橋本正春氏に、数値計算の

改良に関し Newcastle University の Dr. Hoi-Sang Chan に貴重な助言を賜ったことに深く感謝の意を表す。なお本研究は著者の 1 人 (笹健児) が 2006 年度の独立行政法人国立高等専門学校機構在外研究員として Newcastle University (United Kingdom) に派遣・実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 井上欣三・宇佐美茂・橋 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鎖の選定法および計算図表, 港湾技研資料, No. 379, 55p.
- 浦 環・戸島敏雄(1980): 繫留された浮体の過渡応答に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第 148 号, pp. 121-127.
- 久保雅義・今枝彬郎・奥村宗行(1980): 長周期船体運動計測装置の試作と計測結果について, 神戸商船大学紀要, 第 2 類, 第 28 号, pp. 289-298.
- 小寺山巨・中村昌彦(1988): 浮遊式海洋構造物の長周期動揺減衰力の研究, 日本造船学会論文集, 第 164 号, pp. 161-169.
- 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.
- 笹 健児・久保雅義・白石 悟・永井紀彦・趙翼順・水井真治・小林 豪(2003): 外洋性港湾における入出港時の着離岸作業障害に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1311-1315.
- 笹 健児・永井紀彦・白石 悟・山治男・水井真治(2005): 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, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 1246-1250.
- 中村昌彦・小寺山巨・経塚雄策(1989): 係留鎖に働く海洋構造物長周期動揺への影響, 日本造船学会論文集, 第 166 号, pp. 163-172.
- 平石哲也・本城 智(1991): 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討, 港湾技術研究所報告, Vol. 30, No. 2, pp. 3-41.
- 本田啓之輔(1970): 現代商船アンカーの把駐性, 日本航海学会誌, 第 43 号, pp. 74-80.
- 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.
- Thresher, R.W. and Nath, J.H. (1975): Anchor-Last Deployment Simulation by Lumped Masses, *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Division, ASME*, Vol.1, No. WW-4, Paper 11709, pp. 419-433.
- Walton, T.S. and Polachek, H. (1960): Calculation of Transient Motion of Submerged Cables, *Mathematics of Computation*, Vol. 14, pp. 27-46.
- Wichers, J.E.W. (1988): Simulation Model for a Single Point Moored Tanker, *Journal of MARIN*, No. 797, Wageningen, The Netherlands, 243p.