



## 動的係留力および波浪伝播を考慮した港外避泊船の 安全性評価

笹, 健児

Incecik, Atilla

---

(Citation)

土木学会論文集B2(海岸工学), 67(2):I\_756-I\_760

(Issue Date)

2011

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2011 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002904>

## 動的係留力および波浪伝播を考慮した港外避泊船の安全性評価

## Safety Evaluation of Anchored Vessel Considering Dynamic Mooring and Wave Diffraction

笛 健兒<sup>1</sup> · Atilla Incecik<sup>2</sup>

Kenji SASA and Atilla INCECIK

The offshore harbor refugee is one of the most important topics in harbor planning and operation. Numerical simulations have been improved, however, they do not consider dynamic chain forces and wave diffraction in coastal area. The influence of dynamic chain forces is compared with the static catenary method. Ship motions become irregular, and the chain tension is much larger. Anchored ship motions are reproduced by considering the dynamic chain analysis and wave diffraction due to the Boussinesq Equations. New simulation method can improve the accuracy against our previous models. The effectiveness of two anchoring is verified. Simulated results show that the two anchoring is not effective in heavy seas at all. It is necessary to reconsider the current definition of offshore harbor refuge as the new stage of port planning.

## 1. 研究の背景・目的

港湾は貨物の荷役だけでなく、荒天時の船舶に安全な水域を提供する「避難港」としての役割も求められる。しかし、長周期波による係留問題が全国的に顕在化し(白石ら, 1995), 荒天時に船舶は港外避難の勧告より港外海域での錨泊が通常選択される。避泊地は当初、静穏な湾内海域が対象であったが、埋立てによる海域不足や遠距離の移動による避泊コストを低減するために外洋性海域に錨泊する事例も多い。このため、外洋の高波浪や強風のために錨泊できず、走錨・座礁する海難が各地で発生し、現在も有効な対策は見つかっていない。著者らはこれまでに波浪外力を考慮すること、インパルス応答型の運動方程式を使用する必要を述べ、再現性の向上を示した(笠ら, 2005)。ただし、錨鎖の係留力を静的な二次元カテナリー手法で計算しており、錨鎖のねじれなど三次元的な挙動や動的な張力変動が考慮できていない。また走錨によって数キロの海域を移動しながら発生する船体運動を再現するにあたり、沖合波浪の伝播による振幅・位相の変形を考慮していない点も課題であった。本研究では錨鎖の係留力を三次元的および動的に計算できる三次元ランプドマス法(中嶋ら, 1983)の理論を導入し、船体運動を含めた計算結果の違いを比較した。さらに船舶が走錨および座礁する海域に対し、ブシネスク方程式で各時点の船体位置における波浪変形を求め、船体運動を計算するアルゴリズムに改良した。前報(笠ら, 2007)にて定義した座礁危険度によって安全性を総

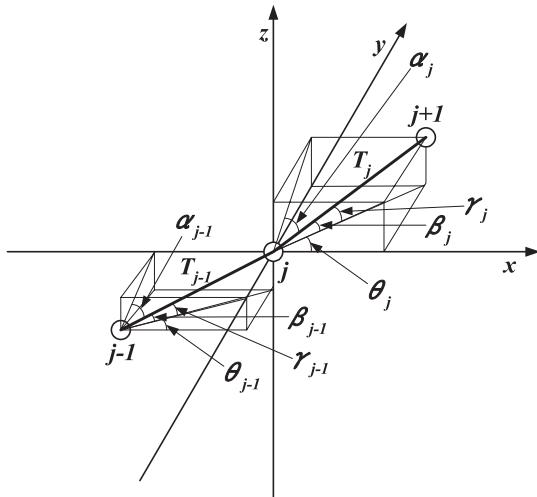
合的に判断し、荒天時の錨泊方法として経験的に推奨される二錨泊の有効性についても数値的に検証した。

## 2. 数値計算における改良点

### (1) 鎚鎖張力の数値解析

船舶の錨鎖張力は静的なカテナリー手法が標準的とされてきた。著者らも応用カテナリー手法（上田ら, 1981), 伸びを考慮したカテナリー手法（平石ら, 1991）を使用した。これは錨と船の錨口の位置関係から錨鎖の張り具合を判定し、張力を求める計算方法であり、変位に対応した非線形な力を取り扱える。しかし、当該理論は橋梁に懸垂するワイヤー張力などの計算用に開発され、空気中のように流体抵抗が小さくかつ系全体が一直線上に配置する場合を前提としている。船舶のように流体抵抗の大きな水中を錨鎖が運動する場合、錨鎖自身にも付加慣性力と造波減衰力が作用する。運動時に錨鎖は常に一直線上の配置になるとは限らず、錨鎖張力が大きくなると緊張状態とスラック状態を繰り返す過程で三次元的な挙動が顕著となる。カテナリー理論は錨鎖運動による流体力が微小かつ錨鎖配置にねじれが生じない範囲が前提であり、錨鎖張力がある程度より大きくなる場合は適用限界が指摘されている（鶴田, 1977）。本研究では動的な三次元ランプドマス法を導入し、カテナリー理論での計算結果の違いを比較した。三次元ランプドマス法とは図-1に示すように、錨鎖を微小長さに要素分割し、各要素の質点に力が働くとモデル化する。このとき各質点に働く張力の釣り合い方程式は以下のようになる。

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. of University of Strathclyde, Dept. of  
Naval Architect and Marine Engineering,  
United Kingdom

図-1  $j$  番目の質点に働く錨鎖張力の関係

$$FZ_j = T_j \sin \gamma_j - T_{j-1} \sin \gamma_{j-1} + f_z - \delta_j \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで  $FX$ ,  $FY$ ,  $FZ$  は  $j$  番目の質点に作用する  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向への合力,  $T$  は質点に作用する張力,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  は質点間のなす角度,  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  は質点に作用する抗力の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  成分,  $\delta$  は質点の水中重量をそれぞれ示す。

分割した各要素の両端長さは錨鎖の分割長に等しいといふ拘束条件を満足しなければならず, 次式に示す関数  $\Phi$  に関する条件式を定義する。

$$\Phi_j^{n+1} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{l} \left( x_j^{n+1} - x_{j-1}^{n+1} \right)^2 + \left( y_j^{n+1} - y_{j-1}^{n+1} \right)^2 + \left( z_j^{n+1} - z_{j-1}^{n+1} \right)^2 \\ - \left( \frac{S_C}{N-1} \right)^2 \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで,  $(x^{n+1}, y^{n+1}, z^{n+1})$  は現在の時間ステップ  $n$  の 1 ステップ先における質点座標,  $S_C$  は錨鎖長,  $N$  は質点の分割個数をそれぞれ示す。一方, 錨鎖質点の張力  $T$  については推定値  $\tilde{T}$  と微小補正量  $\Delta T$  の和として考える。

$$T_j^n = \tilde{T}_j^n + \Delta T_j^n \quad \dots \dots \dots (5)$$

$\Phi$  は張力  $T$  の関数でもあるため,  $n+1$  時点の値を  $n$  時点の値を  $T$  について一次の項のみテーラー展開で近似すると次式のように表される。

$$\Phi_j^{n+1} \approx \tilde{\Phi}_j^{n+1} + \frac{\partial \tilde{\Phi}_j^{n+1}}{\partial \tilde{T}_{j-2}^n} \Delta T_{j-2}^n + \frac{\partial \tilde{\Phi}_j^{n+1}}{\partial \tilde{T}_{j-1}^n} \Delta T_{j-1}^n + \frac{\partial \tilde{\Phi}_j^{n+1}}{\partial \tilde{T}_j^n} \Delta T_j^n \quad \dots \dots \dots (6)$$

変数の上に  $\sim$  が付いているのは第一次近似値であることを意味する。式 (6) を展開し, 高次項を省略すると,  $\Delta T$  を未知数とする連立一次方程式が次式のように導かれる。

$$\begin{bmatrix} -\tilde{F}_2^{n+1} & \tilde{G}_2^{n+1} & & & & 0 \\ \tilde{E}_3^{n+1} & -\tilde{F}_3^{n+1} & \tilde{G}_3^{n+1} & & & \left[ \begin{array}{c} -\tilde{\Phi}_2^{n+1} \\ -\tilde{\Phi}_3^{n+1} \\ -\tilde{\Phi}_4^{n+1} \\ \vdots \\ -\tilde{\Phi}_N^{n+1} \end{array} \right] \\ \tilde{E}_4^{n+1} & -\tilde{F}_4^{n+1} & \tilde{G}_4^{n+1} & & & \\ & \ddots & & \Delta T_2^n & \\ 0 & & \tilde{E}_N^{n+1} & -\tilde{F}_N^{n+1} & \Delta T_3^n & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \Delta T_{N-1}^n \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{c} -\tilde{\Phi}_2^{n+1} \\ -\tilde{\Phi}_3^{n+1} \\ -\tilde{\Phi}_4^{n+1} \\ \vdots \\ -\tilde{\Phi}_N^{n+1} \end{array} \right] \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで, 各係数は以下のように表される。

$$\tilde{\Phi}_j^{n+1} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{l} \left( \tilde{x}_j^{n+1} - \tilde{x}_{j-1}^{n+1} \right)^2 + \left( \tilde{y}_j^{n+1} - \tilde{y}_{j-1}^{n+1} \right)^2 + \left( \tilde{z}_j^{n+1} - \tilde{z}_{j-1}^{n+1} \right)^2 \\ - \left( \frac{S_C}{N-1} \right)^2 \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$\tilde{x}_j^{n+1} = 2x_j^n - x_{j-1}^{n-1} + R_j^n \tilde{T}_j^n - P_j^n \tilde{T}_{j-1}^n + U_j^n \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\tilde{y}_j^{n+1} = 2y_j^n - y_{j-1}^{n-1} + O_j^n \tilde{T}_j^n - H_j^n \tilde{T}_{j-1}^n + V_j^n \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$\tilde{z}_j^{n+1} = 2z_j^n - z_{j-1}^{n-1} + S_j^n \tilde{T}_j^n - Q_j^n \tilde{T}_{j-1}^n + W_j^n \quad \dots \dots \dots (11)$$

式 (7)、式 (9)～(11) における  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $R$ ,  $P$ ,  $U$ ,  $O$ ,  $H$ ,  $V$ ,  $S$ ,  $Q$ ,  $W$  は錨鎖質点の位置, 質量, 形状から決まる係数であり, 数式の詳細は参考文献 (中嶋ら, 1983) を参照されたい。各時間ステップにて式 (8) の値が 0 となること, これと同時に式 (7) を満たす  $\Delta T$  が十分に収束するまで  $T$  の値を繰り返し計算によって求め, 式 (5) により張力値を決定する。現在の時間ステップにおける値が決定された後, これらを次ステップの値を求めるときの初期値として代入し, 同様の計算を繰り返すことで時々刻々の錨鎖張力が決定される。

## (2) 変動する波動場における波力の数値解析

錨による係留力を喪失した船舶は走錨し, 数キロにわたる海域を移動しながら沿岸域で座礁に至る。港内係留船の動揺であれば船舶が移動する距離はせいぜい数メートルであり, 一点における波浪の時間変動にて波力をほぼ正確に算定できる。一方, 水深や地形が大きく変化する海域を移動する場合, 船舶が受ける波浪は時間および空間的に時々刻々で変化する。これまで沖合観測点における波浪の振幅と位相が変形せずに伝播すると近似し波力を計算していたが, 時々刻々の船体位置における振幅と位相の空間および時間変化を考慮しなければならない。ここでは港湾や海岸などの形状も含めた沿岸域における波浪場を非線形成分まで精度よく再現できる修正ブシネスク方程式 (平山, 2002) を用い, 沖合の波浪観測点における波形を入力波とした場合の計算領域内の点  $(x, y)$  の時間  $t$  における表面水位  $\eta(x, y, t)$  をあらかじめ求めておく。計算された  $\eta(x, y, t)$  をスペクトル解析すれば, それぞれの角周波数  $\sigma$  に対する振幅  $A(x, y)$  や位相  $\varepsilon(x, y)$  が求められる。また時々刻々の船首方位と波向から求め

られる相対波向 $\phi$ ，角周波数 $\sigma$ に対する応答関数が求まり，波浪強制力 $FW$ および変動漂流力 $FSD$ は次式によつて算定される。ここで添字 $i, j$ は成分波番号， $k$ は運動モード番号をそれぞれ示す。

$$FW_k(t) = \sum_{i=1}^N A_i(x, y) W_i(\phi) \cos(\sigma_i t - \psi_{ik} - \varepsilon_i(x, y)) \quad (12)$$

$$FSD_k(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{i-1} A_i(x, y) A_j(x, y) S_{ij,k}(\phi) \times \cos((\sigma_i - \sigma_j)t - \delta_{ij,k} - \varepsilon_i(x, y)) \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここで， $W, \phi$  は相対波向 $\phi$ における応答関数の振幅，位相を示し，三次元グリーン関数法（John, 1950）にて計算した。 $S, \delta$  は相対波向 $\phi$ における二次オーダーの応答関数の振幅および位相であり，摂動展開法（斎藤ら，1995）によって計算した。

### (3) 锚泊時の船体運動の運動解析

これらの改良点を取り込んだ運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_g(\infty)) \ddot{X}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_i(\tau) d\tau \\ & + \sum_{i=1}^6 D_j \dot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 (H_{ij} + C_{ij}) X_j(t) \\ & = FW_j(t) + FSD_j(t) + FWD_j(t) \quad (j=1-6) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$M$ は船体質量または慣性モーメント， $m(\infty)$ は不变付加質量， $L$ は遅延関数， $D$ は粘性抵抗に関する係数， $H$ は錨鎖張力に関する係数， $C$ は復原力係数， $FWD$ は風圧力を示す。係留力は応用カテナリー手法または三次元ランプドマス法で計算し，錨鎖張力が錨の把駆力を超えた場合は走錨すると判定し，走錨量は錨と錨鎖張力の土中における釣り合い方程式を解くことで求めた。また走錨量が錨長の15倍を超えた時点にて，錨の把駆力係数が大きく低下するとした（笛ら，2007）。三次元ランプドマス法を用いる場合，錨鎖が緊張状態となると張力値が過大となり式(7)が発散する傾向がある。このため，錨鎖張力が把駆力を超える値または錨鎖の展開長さが錨鎖長の98%を超える場合は前ステップ求めた張力が作用するとした。前報で定義した時刻 $t$ での余裕水深 $UKC(t)$ を座礁危険度として使用する。これは上下揺れ，縦揺れ，横揺れの鉛直方向への変位を持つ動揺量から結果的に生じる鉛直変位量を換算し，当時の水深との関係から船首・船尾の船底部分が海底に接触するか否かを求めている。ここでも $UKC(t) \leq 0$ となった時点で座礁したと判断する。

## 3. 海難事例の再現計算

### (1) 計算条件の設定

構築された数値モデルに対し，実際の海難事例を対象

に再現性の検証を行う。対象は図-2に示す太平洋に面したS港の沖に港外避泊した6万トン級の穀物船（垂線間長：215m，船幅：32.2m，喫水：9.8m，排水量：57,093t，メタセンタ高さ：3.48m）であり，2002年7月25日に接近した台風の影響で港内から港外へ移動し，図中に示す位置で右舷側の錨を165mの錨鎖にて海底に係留していた。図中に示すとおり，S港の沖合で観測されるナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）の波浪データから，図-3に示す周期別別の有義波高の変動が見られた。図よりうねり成分の波高が16:00から急激に上昇し，船舶が走錨した20:00頃には波高が3.5mを超え，風については当時の海難記録より18時過ぎは平均風速15m/s，20時過ぎには25m/sであった。当該船舶は走錨された後，21:40頃に海岸へ漂流され座礁した。風圧力についてはダーベンポートのスペクトルにて変動風を再現し求めた。

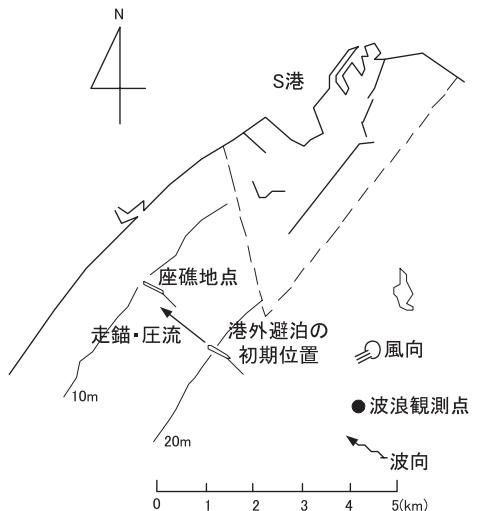


図-2 計算対象としたS港の港外海域および避泊船の錨泊・座礁地点

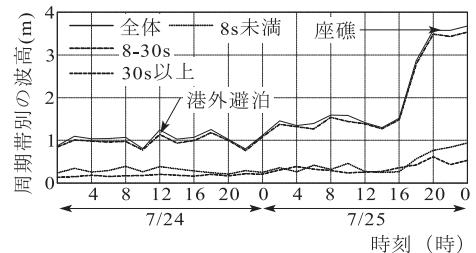


図-3 S港沖合での周期別波高の時間変化

### (2) 係留力の計算手法ごとにおける船体運動の比較

錨鎖張力の計算を静的（カテナリー手法）および動的（ランプドマス法）な手法により計算した場合の船体運動および錨鎖張力の違いを比較した。係留状態は前述した海難当時の状況と同一とし，外力は平均風速15m/sの

変動風が作用しているとした。図-4に両手法による船体重心の移動軌跡、図-5は錨鎖張力の比較をそれぞれ示す。図-4よりカテナリー手法に比較してランプドマス法で計算した結果の方が完全な8の字を描かず、若干不規則で軌跡が大きい。図-5より動的な手法で計算した場合は運動振幅も若干大きいことも影響していると考えられるが、ある程度運動が大きくなると、三次元的な影響で動的な張力が卓越し、最大値で約4.2倍の値(556.3kN)が発生したものと考えられる。図より張力の変動特性は長周期成分だけでなく、短周期成分にも強く現れており、過去の研究(藤井ら、1979)にて示された現地観測の傾向と類似している。この理由として、動的な手法では錨鎖張力の計算ステップにて前ステップからの錨鎖節点の移動速度、加速度に比例する流体力を考慮しているが、静的手法では単に変位量に比例した張力を計算していることが影響していると推察される。運動振幅が大きくなる場合、両者の差が顕著に現れ、静的な手法の適用限界の指摘(鶴田、1977)とも一致すると考えられる。

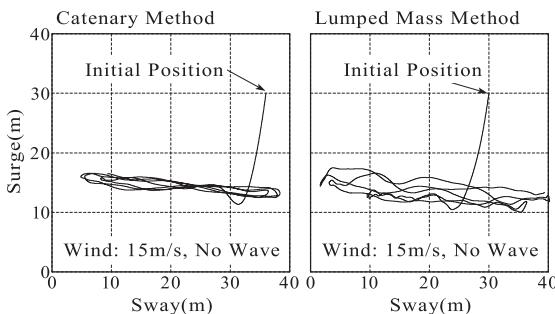


図-4 船体重心の運動軌跡に関する計算結果

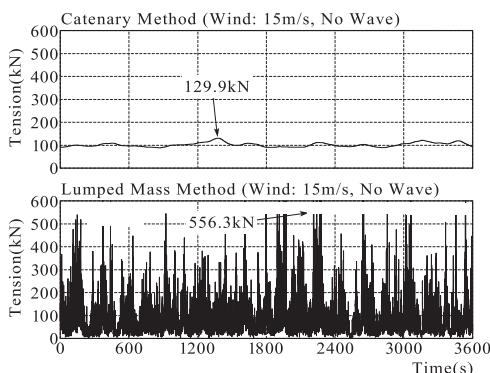


図-5 錨鎖張力に関する計算結果

### (3) 波浪変形を考慮した場合の船体運動の比較

沖合波浪が海岸に達するまでの波浪変形をブシネスク方程式で考慮し、波力を式(12)および(13)で計算した場合の船体運動を解析した。S港を含めた沿岸の計算領域は6km×6kmで定義し、格子間隔は10mとした。船

体運動は式(14)で求められるが、錨鎖張力は動的な手法を用いた。図-6に図-2に示す海難事故に対し、当時の外力条件(沖合の有義波高・周期が3.5mおよび12s、平均風速は25m/s)をもとに再現計算した船体重心の移動軌跡を示す。座標原点は初期の錨泊位置とした。入力波形は沖合観測波の時系列を使用し、波浪の位相関係も再現した。図-7に余裕水深から見た座礁危険度の時間変化の結果を示す。

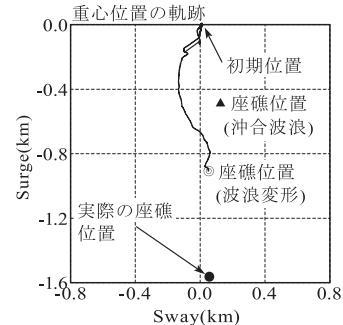


図-6 船体重心の運動軌跡(海難時の状況を再現)

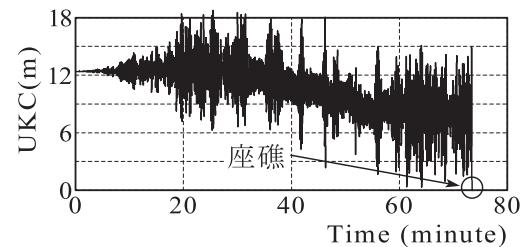


図-7 座礁危険度の時間変化(海難時の状況を再現)

図より静的手法で錨鎖張力を計算し、波浪変形を考慮しない場合の座礁位置に比べて約400m岸側に移動した。これより本研究での計算方法の改良で精度向上が認められるが、実際の座礁位置とはまだ700m近く異なる。この要因として、余裕水深がゼロとなった時点で座礁と判定しているが、実際にはさらに漂流しながら何度も船底の海底接触を繰り返した後に座礁すると考えられる。また台風の接近に伴い、風向が著しく変化するが、この点が考慮できていない。実際の状況をさらに正確に推定するためにはこれらの点を今後改良する必要がある。

### 4. 現状の避泊方法に関する理論的検証

通常の錨泊で係留困難と判断される場合、左右2本の錨を用いた二錨泊が荒天時に推奨されている(本田、1984)。しかし、その有効性を理論的に検証した事例は見られない。そこで当該海難時に船舶が二錨泊していた状況を想定し、荒天対策としての効果を検証した。図-8に二錨泊する状況を示す。外力条件は海難時と同じとした。

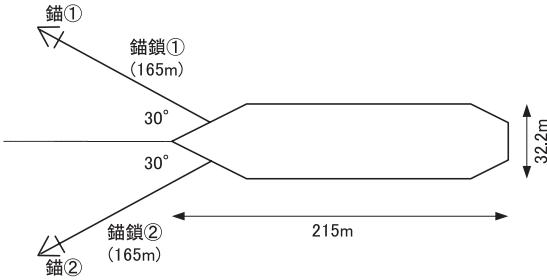


図-8 二錨泊したと想定した場合の係留図

図-9に船体重心の軌跡の計算結果を示す。これより、二錨泊をした場合でも走錨は発生し、約60分後に約1.5km岸側で座礁する結果となった。経験的に推奨されている二錨泊も荒天時には有効でないことが示された。今後の荒天時の避泊方法について、現状の錨による係留方法では限界が見られると考えられ、係留方法の根本的な見直しを含めて検討していく必要がある。

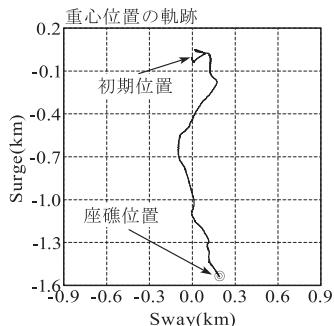


図-9 船体重心の移動軌跡（二錨泊した場合）

## 5. 主要な結論

- 動的な係留力を考慮した場合、カテナリー法のような静的手法で計算した場合に比べ、船体運動の航跡が複雑となり、錨鎖張力も4倍以上発生した。張力の周波数特性も長周期成分だけでなく短周期成分の錨鎖張力も卓越しており、船体運動がある程度以上大きくなる場合には静的な手法に適用限界がある。
- 動的な係留力と沿岸海域での波浪伝播を考慮した計算結果より、変動漂流力を含めた外力では海難状況の再現精度は従来の結果より向上している。これより当該手法の妥当性が確認できるが、実際の座礁位置とは700m近くの差異が見られる。
- 荒天時の係留方法として推奨される二錨泊の有効性を検証したが、当該海難時の外力条件ではほとんど効果が見られない。外力および係留力の影響を正確に再現した安全性の検討が必要である。

## 6. 今後の課題

- 座礁位置のずれを補正するため、計算で求められる座礁危険度と船舶が実際に座礁する状態との関係を把握し、台風や低気圧が接近する時の風向および風速の変動状況を明確化および数値的に再現する必要がある。
- 錨が土中で走錨するときの抵抗係数、錨鎖が水中で運動するときの流体力係数に関しデータベースが十分でないため、これらを蓄積する必要がある。
- 今後、荒天時の避泊について錨泊による方法の妥当性を様々な状況を対象に検討し、錨や係留索だけではなく、新たな係留方法を含めた研究が必要と思われる。

**謝辞：**本研究の実施にあたり、ナウファスの波浪データを提供していただき、ブシネスク方程式による計算アルゴリズムに関しても教授して頂いた港湾空港技術研究所・海洋研究領域の方々に深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 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图表、港湾技研資料、No.379, 55p.
- 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.
- 笛健児・永井紀彦・白石 悟・米山治男・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.
- 笛 健児・Atilla Incevik・永井紀彦・清水勝義・水井真治（2007）：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.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榎原繁樹（1995）：係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動搖抑制対策、海岸工学論文集、第42巻、pp.941-945.
- 鶴田三郎（1977）：カテナリー理論の応用限界、日本航海学会論文集、第57号、pp.139-144.
- 中嶋俊夫・元良誠三・藤野正隆（1983）：質点系モデルによる係留ラインの3次元動的解析法、日本造船学会論文集、第154号、pp.192-202.
- 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.
- 平山克也（2002）：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究、港湾空港技術研究所資料、No.1036, 162p.
- 藤井照久・橋本 進・大本直宏・松原昭一・岡辺光邦・古莊 雅生・新井康夫（1979）：錨泊中の実船の振れ回り軌跡について、日本航海学会論文集、第62号、pp.145-151.
- 本田啓之輔（1984）：操船通論、成山堂書店、310p.
- John, F. (1950): On the Motion of Floating Bodies II, Comm. Pure & Appl. Math., Vol.3, No.1, pp.45-101