走錨危険指数から見た錨泊の設計指針

— 双錨泊の安全性検討 —

井上 欣三*・臼井 英夫**

Guideline for Safe Anchoring Based on a Risk-Index of Dragging Anchor

— Safety of Mooring at Two Anchors —

Kinzo INOUE and Hideo USUI

Abstract

In the previous paper, the risk-index which can show numerically the risk level of dragging anchor was introduced. In this paper, we discuss about the safety measures of the mooring at two anchors such as the angle between anchor cables and the length of anchor cable to be paid based on the proposed risk-index.

As the results, the desirable angle between anchor cables is from 50 to 60 degrees when the wind comes perpendicular to the line which connects each points of the two anchors. Under these conditions, the risk-index shows the value less than 30% and the safe anchoring can be kept. If the wind angle changes, the safety level of anchoring rapidly reduces.

The diagrams are provided illustrating the equal risk potential conditions of a dragging anchor as guidelines of safe anchoring. These diagrams allow us to find the length of anchor cable required to ensure safety in relation to the wind force.

1. はじめに

筆者らは、第 1 報^①において走錨に対する危険度を降水確率と同様な感覚で判断できる走錨危険指数を定義し、この指標のもとで単錨泊時における走錨に対し一定の安全レベルを維持するに必要な錨鎖の繰り出し長さに関するガイドラインを示した。

走錨危険指数は、衝撃力の 1 回 1 回のかかりかたに対する重み付けをせずに、一定期間内に生じた衝撃力の総数のうち何%が限界係駐力を越えたかに着目してその錨泊状態に潜在する走錨の危険の程度を求めるものであるが、この指標値と、錨への作用力のかかり方に応じて変化する錨の動的挙動を考慮に入れて求められる走錨確率^②の値との間には一定の対応関係がある。この両者の対応関係から見ると、走錨危険指数が 30%以下なら安全、70%以上なら危険との目安が設定できる。そこで、本第 2 報においては、船舶が双錨泊を行う時の安全確保の問題をこの評価基準のもとで検討を行うことにする。

具体的には、まず、荒天の時間経過とともに錨が海底をすべることにより当初設定した錨鎖の開き角が狭まっていく様子をシミュレーションで再現し、双錨泊をダイナミックな運動のなかで捕らえながら問題点の指摘を行う。そして、双錨泊を行う時の安全な錨鎖の伸出長と錨鎖の開き角、風向の変化に伴う安全性の変化の問題等を代表的な船種船型について解析し、双錨泊を安全に実施するための運用上のガイドラインを示す。

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 正会員 広島商船高等専門学校 (〒725-02 広島県豊田郡東野町 4272-1)

2. 錨の移動を考慮した双錨泊シミュレーション

2.1 用語の定義

2.1.1 座標系

シミュレーションに使用する座標系を図1に示す。ここで $O-XY$ は O を原点とする静止空間座標である。 $G-xy$ は船体重心を原点とする船体固定座標である。風は Y 軸に沿って図の上方から下方に向かって吹くものとする。

2.1.2 開き角

開き角 (θ) は、2本の錨鎖のなす角を意味し、船首位置が2つの錨を結んだ直線すなわち2錨線の2等分線上にあり、かつ、錨鎖がトート状態になっているときの2本の錨鎖のなす角度と定義する。また、時間の経過とともに錨が移動すると錨鎖の開き角は少しずつ狭まってくる。そこで、特定の錨鎖の開き角を指すときは、錨鎖がその開き角 ± 5 度の範囲を保持する間をいうこととした。例えば、開き角 60 度というときは、錨鎖が開き角 55 度から 65 度までの範囲を保持する間を指すことになる。

2.1.3 風向角

風向角 (α) は、2錨線の2等分線と Y 軸とのなす角と定義する。すなわち、オープンムアの状態からの風向きの変化量を意味し、2錨線と風向が直交するときを 0 度とし、左回りに測ることとする。

2.1.4 船首角

船首角 (ϕ) は、 Y 軸と船首尾線とのなす角とする。 Y 軸と船首尾線が一致するときを 0 度とし、右回りに測ることとする。

2.2 双錨泊シミュレーション

船体運動は平面運動に限定して取扱い、次式に示す運動方程式を用いて表す。

$$(m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr = X_w + X_{C1} + X_{C2} + X_H \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$(m + m_y)\dot{v} - (m + m_x)ur = Y_w + Y_{C1} + Y_{C2} + Y_H \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$(I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_w + N_{C1} + N_{C2} + N_H \quad \dots\dots\dots(3)$$

m : 船体質量

m_x : x 軸方向付加質量

m_y : y 軸方向付加質量

I_{zz} : Yawing に関する慣性モーメント

J_{zz} : Yawing に関する付加慣性モーメント

式(1)～(3)の u 、 v 、 r は船体重心を原点とする船体固定座標における船首尾方向、正横方向、回転方向の速度成分である。 X 、 Y はそれぞれ x 軸方向、 y 軸方向の外力を、 N は重心回りの外力モーメントを表している。添え字 W 、 $C1$ 、 $C2$ 、 H はそれぞれ、風、第1錨の錨鎖、第2錨の錨鎖、船体に働く流体抵抗に起因する力またはモーメントであることを示している。計算は全て実船値を用い、時間刻みを1秒としてオイラー法による数値積分を行う。その他シミュレーションに当たって設けた基本的な仮定は以下のとおりである。

- (1) 風向は一定とする。風速については、Davenport のパワースペクトルにより推定した不規則風⁽¹⁾とする。風圧力係数は辻らの模型実験結果⁽²⁾を用いる。
- (2) 錨鎖と海底との摩擦及び錨鎖に働く流体力は

図1 座標系

無視し、錨鎖は常に同一鉛直面上にあるものとする。

- (3) 錨鎖反力は、錨鎖の船体側取付点と錨位置との幾何学的関係を用いてカテナリー理論に基づいて計算する。
- (4) 本船は、プロペラの回転及び操舵は行わない。
- (5) 流体力に関する諸係数は、錨泊時の振れ回り運動のように横運動が支配的な運動の様子をよい精度で近似できるモデル⁽⁴⁾を使用する。
- (6) シミュレーション開始時の船体初期位置は、船体に働く外力と、設定した開き角による二つの錨の錨鎖反力の合力が釣合う点とし、初期位置において風軸に対し船首方位角 10 度の初期偏角を与える。そして、計算を始めてから運動が整定するまで 1800 秒間は空計算させる。

また、計算の対象とした船舶の主要目を表 1 に示す。

表 1 計算対象船舶主要目

船 種	6,000 台積 自動車専用船	3700TEU コンテナ船		タンカー
コンディション	BALLAST	FULL	BALLAST	BALLAST
長さ (m)	210.0	273.00		311.0
幅 (m)	32.2	32.2		58.0
喫水 (m)	7.5	11.80	7.33	8.55
排水量 (ton)	24,540.0	69,051.0	38,301.0	10,562.0
正面受風面積 (m ²)	831.9	1,053.1	1,132.2	1,581.5
側面受風面積 (m ²)	5,051.1	6,324.0	4,819.1	6,830.9
水面から錨孔までの高さ (m)	11.71	8.8	13.27	16.38
錨重量 (ton)	10.5	12.3		14.1
錨鎖破断荷重 (ton)	344.65	560.7		824.85
錨鎖径 (mm φ)	81.0	87.0		107.0
錨鎖単位重量 (kg/m)	143.7	165.8		255.4

2.3 錨の移動の考慮

船体に働く外力が、錨及び錨鎖による限界係駐力を越えたとき、錨の移動が発生することになる。このときの錨の運動は以下の基本的仮定の考慮にもとづくが、この他の詳細の考え方については前報に述べたものと同様の方法によった。

- (1) 錨は、衝撃力がピークを迎えるまで移動しない。
- (2) 錨に作用する衝撃力が限界係駐力を越えてピークを迎えた場合、錨は船首側の錨鎖取付け点と錨を結んだ線上を、錨鎖のカテナリーが限界係駐力と等しい張力を発生する位置まで瞬時に移動する。
- (3) 錨が移動する際に船体に作用する錨鎖反力は、限界係駐力と等しいものとする。

ただし、ここで錨は JIS 型、底質は砂とし、限界係駐力を求めるために使用した錨、錨鎖の把駐力係数をそれぞれ、3.5、0.75 とした。

3. 走錨危険指数から見た双錨泊の安全性

3.1 オープンムア ($\alpha=0$) の双錨泊

ここでは、2 錨線が風軸に対して直交するオープンムアの場合について述べる。

図2は、計算条件を6,000台積PCC、バラスト状態、水深20m、錨鎖伸出長10節、変動風の平均風速20m/sとしたときの錨の移動の様子を示している。格子線は1/2船長を、○印は開き角が90度、60度、30度、0度の時の錨位置を、●印は2時間毎の錨位置を示している。この図より時間の経過に伴い錨は互いに接近し、錨鎖の開き角が徐々に狭まっていく様子がよくわかる。そして、最終的には錨はほぼ同じ位置まで接近し、いわゆる2錨泊の状態に至る。

図2 双錨泊における錨の移動
($\alpha=0$)

図3、図4は、当初錨鎖の開き角を90度の状態から錨泊を始めるとしたとき、その後荒天の継続とともに錨鎖の開き角がどのように狭まってくるか、そしてそれとともに走錨確率の値がどのように変化し錨泊に対する信頼性がどのように失われていくかを表している。なお、走錨確率が1に近づくほど錨泊に対する信頼性は失われ、走錨確率が1ということは完全に錨泊に対する信頼性を失っていることを示している。風速が20m/sを越えるほどの強風の場合には、荒天の継続とともに一気に60度くらいまで開き角が減少するが、その後は開き角が60～50度の間において一旦開き角の減少が収まり、その開き角を比較的長時間にわたり保持し続ける。しかし、開き角が50度よりも狭くなるころから再び開き角が急速に減少していく。

図3 時間経過に伴う走錨確率及び開き角の変化 (パラメータ: 風速)

図4 時間経過に伴う走錨確率及び開き角の変化 (パラメータ: 錨鎖伸出長)

開き角が急速に減少していくということは、走錨が進行中であることを意味し、したがって、その間の錨泊に対する信頼性低下は著しくなる。一方、同じ開き角を長く保持し続けるということは、ほとんどその間は走錨が進行していないことを意味し、したがって、走錨確率の値にも変化が現れず、それ以上錨泊に対する信頼性の低下もない。それだけ安全な錨泊状態にあるといえる。

図3、図4をみてわかるように、風速が弱いほど、また、同じ強風下でも錨鎖を長く伸ばすことにより、錨鎖の開き角が60～50度においてより長く安全な錨泊状態を維持できることが明らかである。

図5は、錨鎖の開き角が60度の場合の、錨の移動の様子とその間の船首、船体重心、船尾の運動軌跡を示している。○印は、錨の初期位置である。シミュレーションの計算条件は、6,000台積PCC、バラスト状態、水深20m、錨鎖伸出長10節、変動風の平均風速20m/sである。この間、船体はほとんど振れ回ることなく、開き角60度の状態は約12時間にわたって保持され、その間、約40m風下に圧流されただけであった。そして、このときの走錨危険指数は30%以下であり、このように錨鎖の開き角が適切に設定されるなら、強風下でも安全な錨泊状態を維持できることがわかる。

これと同じ計算条件のもとで、錨鎖の開き角を0度から90度まで10度ごとに変えたときの、船体の振れ回り運動と走錨に伴う錨泊状態の変化の様子を調査した。図6は、その結果を船体重心の振れ回り範囲、振れ回り周囲、その間の最大船首角の大きさ、そして、同じ錨鎖の開き角を保持する時間の長さ、その間の風下圧流距離、およびその開き角における走錨危険指数の値についてプロットしたものである。

図中、振れ回り範囲、振れ回り周期、最大船首角の値が開き角 40 度以下にしかプロットされていないのは、それ以上の錨鎖の開き角では振れ回り運動が抑制され周期的振れ回りを示さないためである。特に、開き角 50～60 度では、図 5 にも示したように、振れ回り運動が抑制されるので錨に働く衝撃力も小さくなり、結果的に走錨危険指数の値も十分小さなものとなる。開き角 70～90 度では振れ回りは小さいものの錨を断続的に引きずりながら風下に圧流される運動が主となるため、錨には常に大きな衝撃力が作用し、結果的に走錨危険指数は大きくなる。

なお、開き角 0 度の場合は、その状態を保持する時間区間を決めることができないので、この場合は、同じ錨鎖の開き角を保持する時間の長さとその間の風下圧流距離についてはプロットしていない。開き角が 40 度以下になると錨鎖による船体運動拘束効果が失われ、この開き角の範囲では船体では周期的に振れ回るようになり、走錨危険指数は比較的大きな値を示す。

3.2 双錨泊における安全な錨泊条件

図 7 は、6,000 台積 PCC、バラスト状態、水深 20m、錨鎖伸出長 10 節の計算条件のもとで、変動風の平均風速をパラメトリックに変化させてシミュレーションを行い、その結果を、錨鎖の開き角と走錨危険指数の関係に着目してとりまとめたものである。錨泊に対し安全と考えられる走錨危険指数 30%以下と、錨泊に対し危険と考えられる 70%以上にハッチングを施している。

図 6 錨鎖の開き角と錨泊特性値の関係

図 7 錨鎖の開き角と走錨危険指数の関係
(パラメータ：風速)

自動車専用船の場合、風速 20m/s までなら錨鎖の開き角を 50～60 度に設定することによって走錨危険指数を 30%以下で安全に錨泊できることがわかる。これは錨鎖伸出長 10 節、風速 20m/s の同じ条件下における単錨泊の走錨危険指数 60%に比べ、倍以上の安全レベルを確保できるといえる。しかし、このように双錨泊を行う場合でも風速が 25m/s を越えるようになると十分な安全レベルを確保できなくなるので注意が必要である。

なお、開き角 0 度はいわゆる 2 錨泊の状態である。この場合、振れ回り運動は単錨泊の状態と同様の様子を示すが、走錨危険指数による安全レベルは単錨泊の場合に比べ、ほぼ倍程度向上するとみてよい。ただし、これも安全に錨泊できる風速には限界があり、風速 25m/s を越えると要注意である。

図 8 は、同様のシミュレーション計算を変動風の平均風速を 20m/s として、錨鎖伸出長をパラメータに実施し、その結果をとりまとめたものである。風速 20m/s の条件では少なくとも 7 節以上の錨鎖伸出長をもって開き角を 50～60 度に設定すると、ほぼ走錨危険指数は 30%以下に押さえることができるようである。

図 9 は、6,000 台積 PCC (バラスト)、3,700TEU 型コンテナ船 (フル、バラスト)、VLCC (バラスト) の 3 船種、4 コンディションについて、変動風の平均風速 20m/s、錨鎖伸出長 10 節、水深喫水比 3.0 の条

件のもとでシミュレーション計算を行い、結果を錨鎖の開き角と走錨危険指数の関係に着目してとりまとめたものである。

オンデッキにコンテナを満載した状態のコンテナ船（フル）やPCCのように受風面積が大きい船型は、走錨危険指数が最小となる特定の錨鎖の開き角条件においてのみ錨泊の安全性が確保できる。この場合、走錨危険指数が30%以下となる錨鎖の開き角はPCCでは50～60度、コンテナ船（フル）では70度前後である。ただし、コンテナ船（フル）については風速が20m/sよりも強くなるにつれて望ましい錨鎖の開き角条件は70度よりも狭くなりやはり50～60度あたりが中心となる。船の大きさが異なるものの共にアフトブリッジ船型でプロフィールが類似しているオンデッキにコンテナを積載しない状態のコンテナ船（バラスト）とVLCCでは、走錨危険指数の錨鎖開き角に対する変化傾向はよく似ている。やはり、錨鎖の開き角を50～60度にすると走錨危険指数を30%以下に押さえることができるが、この種の船の場合にはそれよりも小さな開き角においても比較的安全に錨泊できる可能性がある。

図8 錨鎖の開き角と走錨危険指数の関係
(パラメータ：錨鎖伸出長)

図9 錨鎖の開き角と走錨危険指数の関係
(パラメータ：船種)

3.3 双錨泊における所要錨鎖伸出長

ここでは、船型の面からみて錨泊に不安が伴うコンテナ船（フル）とPCCにおいて、双錨泊を行うにあたり、予想される風速に対し十分な安全を確保するためには、どれほどの錨鎖を伸出すべきか容易に判断できるガイドラインをダイアグラムの形で提示する。

図10、図11は、錨鎖の開き角を50度として双錨泊を行うときのガイドラインを与えている。これらの図は、風速と錨鎖伸出長を系統的に組み合わせて種々の錨泊条件下で走錨危険指数を求め、風速と伸出錨鎖長の関係において、安全な錨泊が確保できる走錨危険指数30%以下の錨泊条件の範囲と走錨の危険を大きく含む走錨危険指数70%以上の錨泊条件の範囲を区別できるように、図上に走錨危険指数30%と70%の等リスクポテンシャル曲線を描いたものである。

このダイアグラムより、錨鎖の開き角を50度とした場合、片舷10節ずつの双錨泊で、PCCでは風速24m/s、コンテナ船（フル）では風速29m/s程度まで安全な錨泊ができると考えられる。なお、PCCが

図10 所要錨鎖伸出長のガイドライン
($\alpha=0$, $\theta=50$, PCC)

図11 所要錨鎖伸出長のガイドライン
($\alpha=0$, $\theta=50$, コンテナ船フル)

単錨泊するとき安全な錨泊が確保できるのは、10 節の錨鎖伸出長でせいぜい風速 16m/s までであった⁽¹⁾ことを考えると、オープンムア、開き角 50～60 度という条件さえ整えば、双錨泊はかなりの強風まで耐えることができそうである。

4. 双錨泊の問題点

4.1 錨泊中の風向変化

ここでは、当初予測した風向に対しオープンムアになるように錨位置を設定し、その開き角を走錨に対する危険が少ない 60 度としたにもかかわらず、その後風向が変化する場合の問題点について検討する。

図 12～14 は、開き角 60 度の条件下で風向角を 30、60、90 度と設定したときの錨の移動の様子を示している。図の見方は図 2 と同様である。当初は Riding Cable となる右舷錨の移動が大きく、錨が互いに接近してくるにつれ左舷錨も移動を始め、最終的には 2 錨泊の状態に至る。

図 12 風向変化に伴う錨の移動
($\alpha = 30$)

図 13 風向変化に伴う錨の移動
($\alpha = 60$)

図 14 風向変化に伴う錨の移動
($\alpha = 90$)

図 15 は、時間経過に伴う走錨確率及び開き角の関係を風向角をパラメータに示している。風向角が 0 度以外の場合は荒天の継続とともに当初設定した開き角は急速に狭まり、錨泊に対する信頼性が急激に失われていく様子がよくわかる。図 16 は、6,000 台積 PCC、バラスト状態、変動風の平均風速 20m/s、錨鎖伸出長 10 節で、錨鎖の開き角 60 度の状態において、風向角を 0 度から 90 度まで 10 度ずつ変えたときに、開き角 60 度を保持している間の走錨危険指数の値を求めて、風向角と走錨危険指数との関係としてプロットしたものである。オープンムアの状態から風向が少しでも変化すると走錨危険指数は大きくなり、風向角が 20 度以上になれば走錨危険指数は 70% に近い値となって、錨泊の安全がそこなわれる状態となる。

図 15 時間経過に伴う走錨確率及び開き角の変化 (パラメータ: 風向角)

図 16 風向角と走錨危険指数の関係

したがって、双錨泊はオープンムアの場合にはかなりの安全を確保できるものの、風向角が変化した場合にはその安全性が著しく低下する特性をもっているといえ、運用にあたっては十分な注意が必要である。

4.2 絡み錨の危険性

計算条件として、6,000 台積 PCC、バラスト状態、錨鎖伸出長 10 節、変動風の平均風速 20m/s、風向角 60 度とした時の、開き角が 60 度付近にあるときの振れ回り軌跡を図 17 に示す。○印は錨位置を示している。

図 17 において、船体が右方から左方に移動するとき、船首が左舷錨の位置を越えてさらに左方に移動すると、錨鎖は V 字型から X 字型になる。このように錨鎖が X 字型と V 字型を繰り返すような振れ回りをしている間に風向がどんどん変化すると、場合によっては錨鎖が絡むことになる。

一方、開き角が 0 度となった時点では 2 つの錨が相ならぶことになるが、このとき錨が移動する際に両舷の錨がそれぞれ近づきあう方向に回転し、どちらか一方がもう一方を乗り越えた場合には錨が絡むことになる。

このように、双錨泊には風向の変化や錨鎖の開き角がなくなって 2 錨泊の状態となる際に絡み錨を生じる危険性も含んでおり、もうひとつ別の運用上の困難性が伴うといえる。

図 17 振れ回り軌跡

($\alpha = 60, \theta = 60$)

5. むすび

錨の移動を考慮したシミュレーションを通じて、走錨危険指数を評価指標に、双錨泊において所要の安全レベルを維持するのに必要な錨泊条件、ならびに、双錨に潜む問題点について検討を行い、実務的な観点から以下のような運用指針を得た。

- (1) 時間の経過とともに錨は走錨し、当初設定した錨鎖の開き角は徐々に狭まって、最終的には 2 錨泊の状態に移行する。この過程において開き角 50～60 度は最も長い時間安定した錨泊状態を維持する。
- (2) 双錨泊において、走錨危険指数を 30% 以内に抑えることのできる錨鎖の開き角は 50～60 度である。それ以外の開き角では走錨危険指数は 70% を越える可能性が高くなる。
- (3) 双錨泊を行うにあたり、錨鎖の開き角を 50 度とした場合、予想される風速に対し十分な安全を確保するために必要な錨鎖伸出長を容易に判断できるガイドラインをダイヤグラムの形で提示した。
- (4) オープンムア、開き角 50～60 度という条件さえ整えば、双錨泊は単錨泊に比べ走錨に対し安全な錨泊方法であるといえる。
- (5) ただし、風向が変化してオープンムア以外の状態になると錨泊の信頼性が低下するので要注意である。
- (6) 双錨泊では、風向の変化によって錨が絡む危険性、および、2 錨泊の状態において絡み錨になる危険性が存在する。

参 考 文 献

- (1) 井上欣三ほか：走錨危険指数からみた錨泊の設計指針 一風速、水深と錨鎖長一、航海学会論文集、第 90 号、平成 6 年 3 月
- (2) 井上欣三：荒天時避泊の安全性解析と港湾施設計画への適用に関する研究、昭和 60 年
- (3) 辻ほか：船体に働く風圧力に関する模型実験、船舶技術研究所報告、第 7 巻、第 5 号、1970 年
- (4) 小瀬ほか：低速で航行する船の操縦運動モデルについて、日本造船学会論文集、第 155 号、1984 年

質 疑 応 答

野村士平（弓削商船高等専門学校）：錨鎖張力の発生回数の定義はどのようなものですか？

臼井英夫：錨鎖に衝撃的な張力が働いたときを発生回数 1 回としております。

鶴田三郎（東京商船大学）：モデル化した対象と適用限界について教えてください。

臼井英夫：錨は JIS 型とし、底質は砂を想定しております。錨の挙動による把駐力の変化などについて走錨危険指数の算出にあたっては考慮しておりませんが、そのような錨の動的挙動を考慮に入れて求められる走錨確率との対応から見て走錨に対する危険度を十分説明できているものと考えております。