錨泊における走錨検知に関する基礎的研究

井上 欣三*・臼井 英夫*・品川 史子**

A Study on Detecting the Risk of Dragging Anchor

Kinzo INOUE, Hideo USUI and Fumiko SHINAGAWA

Abstract

While a ship is anchoring, if the external force exceeds the holding force, the anchor moves and turns little by little. At last, dragging anchor starts. For officers, at anchor watch, it is very important to know the posture of the anchor. But, it is difficult to know it, because nobody can see the situation of the anchor on the seabed.

In this paper, a monitoring system to detect the risk of dragging anchor is proposed. A sensor is attached at the specified point of the anchor chain to measure the height of sensor from seabed. And, on the basis of the relationship between risk index of dragging anchor and the change of height of the sensor, the risk of dragging anchor can be judged.

Keywords : Anchoring, Dragging Anchor, Monitoring system

キーワード: 錨泊、走錨、補助システム

1. はじめに

荒天時に錨泊している船舶の操船者にとって重要なことは、走錨を早期に検知し、錨泊の安全を確保することである。従来行われてきた守錨法では、周期的な振れ回りが無くなり風を同じ舷から受けるようになる、正横の見通し線から船位の変位が認められるなど、走錨現象がおこってから検知にとどまっていた。走錨の検知が遅れば遅れるほど、次善の対応が取りにくくなるばかりでなく、周囲の船舶や構造物への衝突、乗り揚げといった事故を引き起こすことにもつながる。

現在行われている走錨判断では、走錨が検知された時点では既に一定速度で圧流されている状態であるといえる。また、船員の経験や感覚に依存した判断となっているといえる。船体が圧流されだした後には講ずる措置も重要であるが、走錨の危険をいち早く察知することの方がより重要であろう。このことより、走錨の危険を早期に判断し、対処できる新たな走錨危険の判断材料として考えられるのが、ここに提案する走錨検知システムのイメージである。

ここにいう走錨検知システムとは、海中に存在する錨鎖のカテナリー形状に着目し、これから得られる情報をもとに走錨の危険が存在するか否かを判断し、走錨する前に措置を行うことができるように当直者にアラームなどで危険を周知させ、走錨を回避することを目的としたシステムである。

具体的に述べると、錨泊中の船舶の錨鎖は海中ではカテナリー曲線を描いており、船体に加わる外力が小さければ海底に寝ている錨鎖が長くなり、カテナリー部は Slack 状態となる。反対に、外力が大きくなれば海底に寝ている錨鎖は短くなり、カテナリー部は Taut 状態となる。つまり、外力が加わるほど錨鎖は Slack 状態から Taut 状態へと移り変わる。この錨鎖のカテナリー形状の変化に着目し、何らかのセンサーを錨鎖の特定の位置に取り付け、常時、そのセンサーの海底からの高さを測定する。そして、船橋にモニタを設置し、センサーからの情報や振れ回りの様子などをモニタする。センサーの測定値が走錨の危険が迫っていると判断される高さにくるよ

* 正会員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1) k-inoue@cc.kshosen.ac.jp

** 学生会員 神戸商船大学大学院

うになると、船橋に設置されたアラームなどにより危険を知らせ、走錨を回避する措置をとるよう促すものが走錨検知システムの考え方である。

つまり、錨泊船の振れ回り運動によって形成される錨鎖のカテナリー形状の変化に着目し、錨鎖の特定の位置と海底との高さを求める。そして、その点の高さの変化と、錨・錨鎖への作用力の関係をもとに、走錨危険指数、走錨確率という走錨危険性の判断要素⁽¹⁾を用いて、走錨の危険が切迫しているか否かを判断する。本研究は、このような手順のもとで、走錨の危険発生情報をいち早く操船者に提供するための走錨判断方法を確立することを目的としている。

なお、実際に取り付けられるセンサーとしては、トロール漁船において用いられている超音波発信器に近いものをイメージしている。また、錨鎖への取り付け方法については、投錨作業終了後に、錨鎖に沿わせながらセンサーを降下し、所定の位置に留めることをイメージしている。具体的なセンサーの構成、取り付け方法などについては、技術的に解決すべき問題も多く残されており、次報における検討課題とする。

2. 錨鎖に取り付けるセンサー位置の検討

矢吹らは、錨泊船の振れ回り運動における走錨の危険を検知する方法として、錨泊状態モニタ装置を提案している⁽²⁾。この研究では、走錨のおそれの判断基準は、海底に横たわる錨鎖の長さがなくなった時としている。また、錨の位置は固定とし、移動しないものとして取り扱っている。さらに、錨に作用する力と走錨の危険の程度の関係には触れていない。

振れ回り運動は本来動的なものであり、錨に加わる力が把駐力を超えた時には、錨は移動する。そのため、走錨の検知にあたっては、錨に加わる力とともに、錨の移動を考慮する必要があり、それに加え

て錨への力のかかり具合が走錨発生の危険性の程度にどのように結びつくかの定量的相互関連性が明確でなければならない。

本研究において提案する走錨検知は以下の手順にしたがう。(1)錨の特定の位置にセンサーを取り付けることを検討する。(2)海底からセンサーまでの高さから、錨鎖の形状をカテナリー形状と仮定することにより、錨に働く外力を推定する。(3)錨への作用力と走錨危険指数、走錨確率との関連性から走錨発生の危険を判断する。

ここで重要となるのは、センサーの取り付け位置である。センサー取り付け位置の条件としては、(1)振れ回り運動中にセンサーが水面上に出ることがない、(2)振れ回り運動中にセンサーが海底に接地することがない、(3)錨鎖の上下変動をセンサーにより感度よく取り出すことができる、ことである。

Fig. 1 は、単錨泊時の錨鎖の海中での状態を示したものである。

Fig. 1 Posture of anchor chain in water

図中の記号は以下の通りである。

Q : センサー取り付け位置

Sac : 海底部に寝ている錨鎖の長さ(m)

S : カテナリー部の長さ(m)

x : 錨鎖の立ち上がりからセンサーまでの水平距離(m)

Table 1 Principal of test ships

Type of ship	PCC (6000Cars)		Container (3700TEU)		Bulk carrier	Tanker
Condition	Ballast	Full	Ballast	Full	Ballast	Ballast
Length (m)	210.0		237.0		315.0	311.0
Breadth (m)	32.2		32.2		52.0	58.0
Draft (m)	7.50	9.33	7.33	11.80	9.03	8.55
Dead Weight (ton)	24,540	32,889	38,301	69,051	122,317	111,562
Weight of anchor (ton)	10.5		12.3		12.68	14.1
Weight of chain (kg/m)	143.7		165.8		720.0	824.85
Diameter of chain (mm)	81.0		87.0		219.0	255.4

y : センサーから海底までの高さ(m)

T : 張力(kgf)

Th : 張力の水平分力(kgf)

Tv : 張力の垂直分力(kgf)

Table 1 に、計算対象とした船舶の要目を示す。アンカーは JIS 型及び AC-14 型とした。アンカーの把駐係数は、底質が砂の場合 JIS 型 3.5、AC-14 型 7.7、泥の場合 JIS 型 3.2、AC-14 型 10.6 とした。また、錨鎖の把駐係数は、底質が砂の場合 0.75、泥の場合 1 とした。

Fig. 2 は、錨鎖に取り付けたセンサーの海底からの高さとの関係を示したものである。計算条件は、対象船舶を PCC のバラスト状態、錨を JIS 型、錨鎖伸出長を 10 節、底質を砂、海底からベルマウスまでの高さを 30m としている。ここで、P は、外力と係駐力が等しい時の外力の大きさ、すなわち係駐限界の値を示している。また、センサーの取り付け位置はジョイニングシャックルを想定した。

Fig. 2 Relationship between external force and the height of sensor from seabed

Fig. 2 において、網掛けした部分は、水面及び海底を示している。前述のセンサー取り付け位置の条件より、センサー位置は、外力が変動しても、網掛け部分に入らないことが望ましい。錨から 9 節目のところにセンサーを取り付けた場合、外力が大きくなると空中に出てしまう。また、錨から 6 節目までの間にセンサーを取り付けた場合、海底に接地してしまう場合がある。そのため、センサーの取り付け位置は、錨鎖の上下変化を感度よく検出する意味からも錨から 7 節目又は 8 節目の位置に取り付けることが望ましいことが分かる。すなわち、伸出した錨鎖長から 2 節または 3 節引いた節数目的位置にセンサーを取り付けることが望ましいといえる。同様の検討を、船種船型、コンディション、水深、錨種類、錨鎖伸出長、海底底質を変えて行った。いずれの条件設定からも、錨鎖伸出長から 2 節または 3 節引いた節数目的位置にセンサーを取り付けるのが、もっ

とも有効であるとの結果を得た。

以上の検討から、先に挙げた(1)水面上に出ない、(2)海底に接地しない、(3)感度がよい、の条件を満たすセンサーの取り付け位置は、錨鎖伸出長から 2 節または 3 節引いた節数目的位置であることが分かった。

3. センサー取り付け位置の上下変動と走錨危険指数との関係

Table 1 に示した船舶を対象に、数値シミュレーションを行い、錨泊船の振れ回り運動を考慮した時のセンサーの取り付け位置の妥当性を検証するとともに、センサーの最大高さと、走錨危険指数との関係について検討を行った。

Fig. 3 は、数値シミュレーションによって取り出された、時々刻々の錨鎖張力と係駐力及び錨鎖伸出長から 2 節または 3 節引いた節数目的位置に取り付けたセンサーの海底からの高さの変化の一例を示している。計算条件は、対象船舶を PCC のバラスト状態、錨を JIS 型、錨鎖伸出長を 10 節、底質を砂、水深・喫水比 2.0、風は定常風とし、風速 20m/s としている。

(a) Change of chain tension and holding force

(b) Change of the height of sensor from seabed

Fig. 3 Relationship between vertical movement of sensor and chain tension

Fig. 3 より、船体に外力が加わり、錨に働く張力が変動するに伴い、センサーも上下動していること

が分かる。また、張力の値が大きくなると、センサーの位置も高くなっている。

また、係駐力と張力の関係に着目すると、張力が係駐力を超える場合が生じている。この時は、錨の移動が発生することを示している。したがって、張力が係駐力を幾たびも大きく超えることにより、走錨の危険が迫ってくるといえる。

そして、錨鎖張力の変化とセンサーの海底からの高さの変化は、よく一致していることが分かる。同様の検討を、船種船型、コンディション、水深・喫水比、風速を系統的に変化させて行った結果、錨鎖伸出長から2節または3節引いた節数目的位置に取り付けたセンサーの海底からの高さの変化は、錨鎖張力の変化とよく一致するとともに、伸出錨鎖長から2節または3節引いた節数目的位置にセンサーを取り付けることは、錨鎖の上下変動を感度よく取り出すことができるという観点からも妥当であることが分かった。

次に、走錨危険指数とセンサーの海底からの高さとの関係について検討を行った。Fig. 4 は、錨鎖伸出長から2節引いた節数目的位置に取り付けたセンサーの数値シミュレーション中における最大高さと、走錨危険指数との関係を示している。計算条件は、対象船舶をPCCのバラスト状態、錨をJIS型、錨鎖伸出長を10節、底質を砂、風は定常風とし、風速10m/sから30m/s、水深・喫水比を1.5から4.0まで、としている。

Fig. 4 Relationship between maximum height of sensor and value of risk index of dragging anchor

Fig. 4 より、センサーの海底からの最大高さが大きくなるにつれて、走錨危険指数は急激に大きくなることが分かる。また、水深・喫水比が大きくなる、すなわちより深い水深のところで錨泊する場合、同じ走錨危険指数の大きさとなるセンサーの海底から

の最大高さはより高くなることが分かる。また、図から分かるように、センサーの海底からの最大高さと走錨危険指数との間には一定の関係があるといえる。そこで、センサーの最大高さを説明変数に、走錨危険指数を従属変数として、 H/d ごとに指数近似を行い、以下に示す関係式を得た。

$$H/d: 1.5 \quad RI=0.0373e^{0.7586Hm} \quad \text{相関係数:0.952} \quad (1)$$

$$H/d: 2.0 \quad RI=0.0437e^{0.5576Hm} \quad \text{相関係数:0.933} \quad (2)$$

$$H/d: 3.0 \quad RI=0.0380e^{0.3766Hm} \quad \text{相関係数:0.886} \quad (3)$$

$$H/d: 4.0 \quad RI=0.3067e^{0.2085Hm} \quad \text{相関係数:0.982} \quad (4)$$

ただし、

RI: 走錨危険指数(%)

Hm: センサーの最大高さ(m)

これにより、どのような船が、どのような錨泊条件で錨泊する時、その時のセンサーの高さがどれ程にあると、走錨危険指数がどの程度となるかを関連づけるデータを得ることができた。つまり、センサーの海底からの高さを測定することにより、走錨危険指数を知ることができ、したがって、走錨の危険限界に対応する走錨危険指数の範囲が与えられれば、早い時期に走錨の危険が切迫していることを知ることが可能となる。

4. 走錨危険の判断方法

Fig. 5 は、走錨危険指数と走錨確率の対応関係をプロットしたものである⁽¹⁾。両者はかなりよい対応関係を示している。つまり、走錨危険指数が30%より小さい範囲においては走錨確率の値はほぼ同程度に低い。また、走錨危険指数が70%を超える範囲においては対応する走錨確率の値は急激に大きくなる。したがって、走錨危険指数が30%以内にあるならば、その錨泊条件下では実際に走錨に至る危険性は小さく、走錨危険指数が70%を超えると走錨に対する信頼性は急速に失われる状態にあるといえる。これらのことより、走錨危険指数が30%~70%の範囲は走

Fig. 5 Relationship between risk index of dragging anchor and probability of dragging anchor

錨の危険が切迫しつつある要注意域として位置付けることができる。

Fig. 6 は、走錨危険指数が 30%~70% の範囲になる時の、センサーの最大高さを求めるためのダイアグラムの一例である。このダイアグラムは、対象船舶を PCC のバラスト状態、錨を JIS 型、錨鎖伸出長を 8、10、12 節、水深・喫水比を 1.5、2.0、3.0、4.0、底質を砂として求めたものである。また、センサー取り付け位置は、錨鎖伸出長から 2 節引いた節数目の位置とした。

Fig. 6. Diagram for judgment of risk of dragging anchor

Fig. 6 より、操船者は、例えば水深・喫水比 3.0 の錨地に、錨鎖伸出長 10 節をもって錨泊した場合、センサーの最大高さが 15m 以下であれば、走錨危険指数が 30% 以下となって走錨の危険が無いと判断することができる。また、15m 以上となるような場合、走錨の危険が切迫しつつあり、要注意の状況であると判断できる。さらに、18m となった場合には走錨危険指数が 70% となり、走錨の危険が大きくなったと判断することができる。このようなダイアグラムを用いることにより、操船者は、走錨が現実になる前に、走錨の危険をいち早く判断することが可能となる。この判断ロジックを走錨検知システムに組み込むことにより、走錨の危険が切迫していると判断される時、船橋内にアラームなどで知らせることが可能となる。

5. おわりに

船舶にとっては、入港待機のための沖待ちや荒天避泊等といった錨泊の機会が多い。特に、荒天錨泊は、困難かつ危険をはらむ。また、通常時の錨泊においても、常に危険が存在することを認識しなければならない。

錨が把駐力を失い、船体が風下に圧流される現象である走錨は、一旦発生し、定常的な圧流状態となると船体姿勢を立て直すことは困難であり、他船への衝突、陸岸への乗り揚げなどの海難が発生する。海難が発生すると、自然環境や生態系の破壊等といった二次災害の発生も懸念される。したがって、錨泊中には、できる限り早い時期に走錨の危険を察知し、対策をとることが危険回避につながるため、走錨発生の危険性をいち早く予測検知することが重要である。

本研究では、海中の錨鎖形状に着目し、錨鎖の特定位置にセンサーを取り付け、海底との高さを常時測定することで、走錨する可能性のある錨鎖形状を知るとともに、走錨危険の有無を判断し、走錨前に所要の措置を行うことができるよう、船内にアラームなどで危険を知らせることを目的とした走錨検知システムのアイデアを提案した。

本提案に関連して得られた成果を以下にとりまとめる。

- (1) センサーを錨鎖のジョイニングシャックルに取り付けると仮定し、センサーが有効に働く位置を検討した。その結果、いかなる条件においても、錨鎖伸出長から、2~3 節引いた位置が有効であることが明らかとなった。
- (2) 錨泊船の振れ回り運動を数値シミュレーションにより再現することによって、振れ回り中における張力とセンサーの高さ変化、走錨危険指数との相互関係を求め、三者の対応関係を明らかにした。
- (3) 走錨危険指数の 30% 以下が安全域、70% 以上が危険域とする考え方をもとに、この安全域と危険域の間の範囲を走錨に対する要注意域と位置付け、この状態に対応するセンサー高さの範囲を走錨の危険を判定するための判断基準とした。

今後、実船に用いるセンサーの種類、形状、取り付け方法を検討する予定である。また、実際に錨泊している船舶に搭載し、走錨検知のための情報システムとしての有効性を検証する予定である。

参考文献

- (1) 井上欣三・臼井英夫:走錨危険指数から見た錨泊の設計指針—風速、水深と錨鎖—,日本航海学会論文集,90 号,pp.233-241,平成 6 年 3 月
- (2) 矢吹英雄・山下勝博・斎藤重信:実船実験による守錨基準の検討と錨泊状態モニタ装置の提案,日本航海学会論文集,108 号,pp.67-73,平成 15 年 3 月

質疑応答

芳村 康男（北海道大学）：走錨を検知する方法として、ユニークなアイデアを提案されました研究に敬意を表します。この方法では、索の深度を計測する水中超音波発信器を投錨時に然るべき索の位置に取り付ける必要があります。この発信器の大きさは現状のトロール網等を使用されている発信器を考えると必ずしも小型・軽量ではありません。現状の投錨システムにこうした取り外し可能な装置を現実問題として取り付けることが可能でしょうか？

臼井 英夫：本研究では、センサーを用いた走錨検知方法の基礎的な検討をしております。具体的なセンサーの内容については今後検討していく所存です。センサーの取り付けについては、投錨作業終了後センサーを錨鎖に沿わせながら、所定の位置にまで降下させることをイメージしております。具体的なセンサーの構成、取り付け方法について、技術的サポートをメーカーから頂きながら、実現すべく検討を進めていきたいと考えております。