浅水域の船首沈下(bow squat)の簡易推定

芳村 康男*

Simple Prediction Model of Bow Squat in Shallow Water

Yasuo YOSHIMURA

Abstract

When a ship is proceeding into the shallow water, ship's sinkage and bow trim are increased. These tendencies become larger as the bottom clearance is decreased. This phenomenon is generally called as squat, and this sometimes makes the bottom touch or aground in harbour or fairway, and then caused the serious marine disaster such as oil prolusions. The researches of squat have been developed particularly in western countries where many canal and river water ways are provided. There are many methods for predicting the squat. However, the prediction methods that are mainly proposed based on potential theory are complicated and not sufficient in accuracy.

In this paper, the simple prediction formula of bow squat is presented based on experimental model tests as well as theoretical approach. Firstly, the increment of sinkage and trim in shallow water is investigated, where it is found that that the Tuck's simple sinkage model ⁽²⁾ is available for predicting the increment of midship sinkage in stead of the absolute value of sinkage. Meanwhile, the increment of bow trim in shallow water has been introduced from the experimental model tests because of the difficulty of theoretical approach. Finally, adding the bow sinkage in deep water, the simple prediction model of bow squat is proposed here. As the bow squat can be easily calculated from ship's particulars L_{PP} , B , d , C_b , ship's speed U , water depth h and width, this formula will help for the evaluation of safety keel clearance on board.

Keywords : *Squat, Prediction model, Shallow water, Model test*

キーワード : スコット, 推定計算式, 浅水域, 模型試験

1. はじめに

船舶が港湾などの浅い水域を航行する場合、船首が大きく沈下して船底が海底に触底する事故が発生する。触底した場合は、単に船舶の安全性のみならず、船底損傷に伴う油の流出事故といった莫大な二次災害などにつながるため、操船者、運航管理者、港湾管理者にとって重要な問題である。

Squat の研究は運河や河川の航行が多い欧米を中心に進められ、今日まで数多くの推定法が提案されている。これらの多くは最長体理論などによるポテンシャル計算が中心であるが、これらに加えて今後は CFD の活用も期待される。しかし、これらの計算は複雑な上、船が航走すると squat の大きさによっ

て船体姿勢が変わり、キールクリアランスが停止状態から更に小さくなるなど、計算する上で種々な問題があり、工夫が必要である。また、船体重心あるいは中央の沈下量は比較的精度良く計算できても、船首トリムまで精度よく計算することは容易でない。

Fig. 1 Schematic diagram for the explanation of squat.

* 正会員 北海道大学大学院水産科学研究院 (〒041-8611 函館市港町 3-1-1) y-yoshi@fish.hokudai.ac.jp

野中^{(3), (4)} は従来から提案されている多くの推定法を系統的に整理し、代表的なコンテナ船型(SR108 コンテナ船)とタンカー船型(Esso Osaka, VLCC)を対象として、squat の推定計算結果を比較し、推定の現状を要約している。これによると、推定結果は計算手法によって相当の開きがあり、どの手法が妥当であるか、またどの船型に適しているかと言った評価が容易でないとしている。

以上の背景を踏まえ本論では、従来の理論計算結果をベースとした基本式をもとに、これに主要目を大幅に変えた供試模型船の実験結果を加えて squat の推定式を提案する。具体的には、まず浅水域に対する船体中央の船体沈下と船首トリムの増分を明らかにし、これに深水状態の船首沈下量を加えることによって、船体主要目と船速、および水深と航路幅だけをパラメータとした簡単な計算式でスコットの推定を可能にしている。この推定式は操船現場で容易に計算できる形となっているので、船舶運航に際する安全性の検討のみならず、航路設計などへの応用が期待される。

2. 模型実験

著者は以前、浅水域の操縦性能の推定に関連して模型実験結果⁽⁵⁾ を提示した。その際の実験写真を Fig.2 に示す。角水槽内に浅水域用の仮床(false bottom)を設置して実験を行っており、長水槽の実験ではないから、広い浅水域での実験結果に対応する。この中で、浅水域における船体沈下とトリムの計測例についても紹介した。その際、計測された船体中央における船体沈下やトリムを水深のフルード数 F_{nh} に対してプロットした場合、ポテンシャル理論⁽¹⁾ では基本的に

$$\text{sinkage} \propto \frac{F_n^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}} \quad (1)$$

ただし、 $F_{nh} = U/\sqrt{hg}$ 、

U :船速、 h :水深

となるが、実験結果による船体沈下量は水深に対して異なった特性となり(1)式のように統一した形で表現できないことを示した。これは、深水域の航走でも少なからず船体沈下が発生しており、この量が浅水域の船体沈下量に含まれているからと考えられ、浅水によって発生する船体沈下量を評価するには、深水域を同一船速で航行する場合の船体沈下量を差し引いて取り扱う必要がある。このような仮定に基づき、計測された船体沈下量から深水時のものを差引き、純粋に浅水に対する増分だけを抽出したのが Fig.3 である。なお、模型船の主要目を Table 1 に示す。PCC と Self Propelled Barge は文献(5)に紹介した模型船であり、PCC の $C_b/(L_{pp}/B)$ は 0.1 以下のやせた船型であるが、Self Propelled Barge は 0.2 を超える超幅広船である。これらの船型は両極端であるので、本論では新たに一般貨物船($C_b/(L_{pp}/B)=0.138$)の結果を追加した。実験方法は文献(5)と類似である。

Fig.3 では計測された船体中央の船体沈下と船首トリムの増分 ΔS 、 ΔT を垂線間長 L_{pp} で無次元化し、水深に対するフルード数 F_{nh} に対して示している。水深喫水比はいずれの模型船も $h/d=1.2$ および 1.5 であるが、水深の値にかかわらず、浅水域における ΔS 、 ΔT は、いずれも F_{nh} の自乗で増加し、その増加は船型によって大きく異なることを示している。

Fig.2 Arrangement of the false bottom for shallow water experiment.

Table 1 Principal particulars of ship and chain model.

		PCC ⁽⁵⁾	General Cargo Ship	Self Propelled Barge ⁽⁵⁾
L_{pp}	m	3.0000	3.2103	2.9055
B	m	0.5367	0.5897	0.7839
d	m	0.1367	0.1638	0.1463
C_b		0.548	0.750	0.797
$C_b/(L_{pp}/B)$		0.098	0.138	0.215

Fig.3 Comparison of increment of midship sinkage for various water depth and ship's speed, measured and calculated.

Fig.4 Comparison of increment of bow trim for various water depth and ship's speed, measured and calculated.

3. ΔS , ΔT の推定式

広い浅水域における船体沈下の推定について Tuck⁽¹⁾は細長体理論で(1)式の関係を示したが、更に船型に適当な仮定を置き、 $F_{nh} < 1.0$ の範囲で船体沈下 S を算出する次の簡単な推定式を提案した⁽²⁾。

$$S = 0.13 \left(\frac{U^2 \nabla}{h L^2} \right) \quad (2)$$

ただし、 U は船速(knot)、 ∇ は排水容積で上式の記号の単位は feet である。この船体沈下量が深水域からの増分(船体中央) ΔS に相当すると考え変形すると、

$$\begin{aligned}\frac{\Delta S}{L_{PP}} &= 1.5 \left(\frac{d}{L_{PP}} \right) \left(\frac{C_b}{L_{PP}/B} \right) F_{nh}^2 \\ &= 1.5 \left(\frac{d}{h} \right) \left(\frac{C_b}{L_{PP}/B} \right) F_n^2\end{aligned}\quad (3)$$

となり、浅水による船体沈下の増分は船速の自乗、 (d/h) および、船体質量の無次元量を表わす $C_b/(L_{PP}/B)$ に比例するという簡単な式となる。この式による船体沈下の増分の計算結果を Fig.3 に各曲線で実測と比較する。計算値は船型（船体の無次元質量）が大幅に異なるにもかかわらずよく一致し、本計算式は浅水域の船体沈下の増分を推定する簡便かつ有力な方法と言える。

一方、トリムの増分 ΔT については上式のような簡単な推定式はなく、著者の前報(5)に示したように、計算式の基本構造は(3)式に従うと仮定し、その係数を実験結果に合うよう決める。すなわち、

$$\begin{aligned}\frac{\Delta T}{L_{PP}} &= 30 \left(\frac{d}{L_{PP}} \right) \left(\frac{C_b}{L_{PP}/B} \right)^3 F_{nh}^2 \\ &= 30 \left(\frac{d}{h} \right) \left(\frac{C_b}{L_{PP}/B} \right)^3 F_n^2\end{aligned}\quad (4)$$

この推定曲線を Fig.4 に示している。計算値は ΔS と同様、船型が大幅に異なるにもかかわらず浅水による船首トリムの増分を上手く表現できていると言える。

4. 浅水域の bow squat の計算式

前述のごとく、船体中央における船体沈下の増分と船首トリムの増分が計算できれば、船首における船体沈下は(3)、(4)式から次式で与えられる。

$$\text{bowsquat} = L_{PP} \left(\Delta S / L_{PP} + 0.5 \Delta T / L_{PP} \right) + \left(\text{bow sinkage} \right)_{\text{in deep water}} \quad (5)$$

ここで浅水域の bow squat を推定するには、(3)、(4)式だけでなく、深水域における船首沈下を数式化する必要がある。この一例として Fig.5 には、Taylor の図表⁶⁾ から $F_n=0.295$ における深水時の船首沈下量を $C_b/(L_{PP}/B)$ に対して示す。 $C_b/(L_{PP}/B)$ に対する船首沈下は概略直線で近似でき、これを次式で表現する。

$$(\text{bow sinkage in deep water}) / L_{PP} = 0.7 (C_b B / L_{PP}) F_n^2 \quad (6)$$

以上の(3)~(6)式より、広い浅水域における bow squat は次式で計算することができる。

Fig.5 Bow sinkage in deep water for various ship hull form⁽⁶⁾ ($F_n=0.295$).

Fig.6 Comparison of bow squat (presented characteristics by eq.(7) are added to the results of Nonaka's calculations⁽⁴⁾).

bow squat [m]

$$\begin{aligned}&= (0.7 + 1.5 d/h) C_b (B/L_{PP}) (U^2/g) \\ &\quad + 15 (d/h) \{ C_b (B/L_{PP}) \}^3 (U^2/g)\end{aligned}\quad (7)$$

この推定式の特性を、本論冒頭に示した野中の各種の提案式で計算された bow squat の計算結果⁽⁴⁾と比較して Fig.6 に示す。水深喫水比(h/d)はいずれも 1.2 である。計算対象となる供試模型船 SR-108 および "Esso Osaka" VLCC の bow squat の実験結果がないため、どの推定特性が優れているかといった評価はできないが、本推定法の結果はいずれの船型に対しても、平均的な特性となっていることがわかる。

5. 制限水路における bow squat の計算式

港湾の航路などでは浅水域に加えて航路幅の制約を受けることが多い。こうした左右方向からも閉塞された状況の bow squat は前述の広い浅水域とは異なり大幅に異なることが予想される。これを忠実にモデル化することは容易ではないので、本論では簡便に、船底のみならず左右からも閉塞された状況では相対流速が増加することに着目し、この流速の増加のみを考慮する。すなわち、航路の断面積を Fig.7 のように A とすると、船舶がこの航路を通過する時、航路の断面は $(A-Bd)$ に減少するから、流体の連続の条件から船舶の回りの相対流速 U_e が次式で得られる。

$$U_e = U \left(\frac{A}{A-Bd} \right) = U \left(\frac{1}{1-\alpha} \right) \quad (8)$$

ただし、 α : 航路断面閉塞率($=Bd/A$)で、直立側壁の場合は、水路幅を W とすると $\alpha=1/\{(W/B)(h/d)\}$ となる。

Fig.7 Schematic diagram for the explanation of restricted water channel.

制限水路における bow squat の推定は、この速度を単純に(7)式に適用することとし、最終的に以下の計算式で書き表される。

bow squat [m]

$$= (0.7 + 1.5 d/h) C_b (B/L_{pp}) (U_e^2/g) + 15 (d/h) \{C_b (B/L_{pp})\}^3 (U_e^2/g) \quad (9)$$

Fig.8 Comparison of bow squat measured and calculated by presented model with T-maru⁽⁷⁾.

Fig.8 には、わが国で bow squat の計測例として良く引用される文献(7)から $h/d=1.2, 1.5, 2.0$ の結果を示す。この供試模型はタンカー船型($L/B=6.02$ 、 $C_b=0.808$)であり、 $W/B=6.025$ の長水槽 (制限水路) で実施されている。同図には(8)式を含む(9)式の計算結果をそれぞれの水深に対応して示すが、実測値と概ね一致し、本計算法が妥当であることを示している。ただし、より詳細に見れば、 $h/d=1.2$ でフルード数が 0.1 を超えた付近から外れ、水深のフルード数 F_{nh} が過度に大きくなる局面では推定精度がやや低下する傾向にあると言える。

6. おわりに

従来の理論計算結果をベースとした基本式をもとに、主要目を大幅に変えた供試模型船の実験結果を加えて bow squat の実用的な簡易式を提案した。得られた結論を以下に要約する。

- 1) 本論で提案した bow squat の推定式(8)、(9)式は、船の主要目(L_{pp} 、 B 、 d 、 C_b)、船速および航路の水深や幅で簡単に計算することができ、操船現場での活用が期待できる。
- 2) 従来から提案されている推定式の計算結果は手法によって相当の開きがあり評価が容易でないが、本報による推定は概ねこれらの中間的な特性を与える。
- 3) わが国で bow squat の計測例として良く引用されるタンカー船型の模型試験結果に対して、実測値と概ね一致し、本論に示した計算法の妥当性が確認できた。ただし、水深のフルード数 F_{nh} が過度に大きくなる局面では推定精度がやや低下することに注意を要する。

参考文献

- (1) Tuck, E. O.: Shallow water flows past slender bodies, *Journal of Fluid Mechanics*, **26** (Part 1), (1966).
- (2) Tuck, E. O., Taylor, P. J. : Shallow wave problems in ship hydrodynamics, 8th Symposium Naval Hydrodynamics, (1970).
- (3) 野中晃二, スコットの推定法について— I , *NAVIGATION*, **148**, pp8-13, (2001).
- (4) 野中晃二, スコットの推定法について— II , *NAVIGATION*, **149**, pp8-16, (2001).
- (5) 芳村康男, 浅水域の操縦運動数学モデルの検討, *関西造船協会誌*, **200**, pp41-51, (1986).
- (6) Harold E. Saunders, Hydrodynamics in ship design, Vol.α, Chap.58, SNAME, (1957).
- (7) 神戸商船大学港湾技術研究会, 瀬戸内海における船体沈下に関する研究, (1967).

質疑応答

山田孝三郎 :

発表の船首沈下の推定式は、その前の状態が even keel であると考えてよろしいでしょうか。(運航の現場では最初 aft trim で浅水域にさしかかり、船首沈下を見込んでトリムを even keel に近づけるという例があるため。)

芳村康男:

ご指摘のように、実験は全て停止時に even keel となる状態で行ったものです。事前に船尾トリムを付ける場合は(4)式に対応するトリムを付ければ、所定の浅水域の航走で even keel になると考えられます。しかし、厳密には船体沈下によりトリムした状態と even keel とでは船底の流れが異なってきますので、トリム変化が過度に大きくなる場合は、注意が必要と思われます。