

バラストタンクの浚水のための簡易計算モデルの構築に関する研究

劉, 廣帥
九州大学大学院工学研究院

篠田, 岳思
九州大学大学院工学研究院

渡邊, 虎春
九州大学大学院工学府

黒木, 賢二
株式会社名村造船所

他

<https://hdl.handle.net/2324/7181918>

出版情報 : 36, pp.309-312, 2023-06-01. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

バージョン :

権利関係 : © The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



バラストタンクの浚水のための 簡易計算モデルの構築に関する研究

正 会 員 劉 廣 帥*
 学生会員 渡 邊 虎 春**
 正 会 員 中 森 隆 一***
 正 会 員 田 中 太 氏*

正 会 員 篠 田 岳 思*
 正 会 員 黒 木 賢 二***
 正 会 員 小 畑 英 郎***

Establishment of a Simplified Mathematical Model for Drainage of Ballast Tank

by Guangshuai Liu, *Member*
 Toraharu Watanabe, *Student Member*
 Takakazu Nakamori, *Member*
 Takashi Tanaka, *Member*

Takeshi Shinoda, *Member*
 Kenji Kuroki, *Member*
 Hideo Obata, *Member*

Key Words: Ballast Water Discharge System, Mathematical model, Hydrodynamics, Orifice and weir

1. 結 言

船舶の荷役時において、バラスト水の浚水システムの良否は、荷主や海上輸送を担う海運会社の収益にかかわる重要課題である。この問題の解決課題には短時間に浚水を終える必要があり、またバラストタンク内の残水量を最小にする必要が求められ、船舶の機能の付加価値の向上にも繋がる。

先行研究では模型実験と数値流体計算によってドレンホール配置の最適化やポンプ容量等の条件が及ぼす浚水効率への影響を明らかにした¹⁾²⁾。本研究では、バラストタンクにおける浚水状態を数理モデルを用いて表わした簡易計算法の構築を目的とする。

2. 浚水計算簡易化の課題

先行研究では、バラストタンクの流れ現象を解明し、水理模型実験と数値流体計算を用いて、高効率なバラストタンク設計が提案された。数値計算は非常に精緻で信頼性に足るものであるが、内部の詳細な流動現象全ての解析を行うため非常に計算コストが大きい。Fig. 1 に示す実船の 8×8 タンクモデルの数値計算の場合、スーパーコンピュータを使っても 15 日間に連続計算するには 576 コアが必要である。バラスト浚水の数理モデルを構築し、この問題を解くことでこの計算コストは大幅に削減できるため、造船所の設計段階におけるメリットは非常に大きい。

3. バラスト浚水の簡易計算法

今回使用したモデルはパナマックス型バルクキャリアのバラストタンクを参考としたもので、実船サイズの 1/10 のスケールモデルである。水理模型実験ではアクリル板を用いて実験模型を作成した。ダイヤフラムポンプをバラストポンプとして使用し、超音波センサを用いて、水位計測を行って、水位変化から積算流量を算出した。数値計算はオープンソースの CFD (Computational Fluid Dynamics) ソフトウェアの OpenFOAM を用いた。数値計算の信頼性は既に検証されており、数理モデルの確立に使用するための信頼性は十分である³⁾。

3.1 水位式

バラスト浚水の数理モデルの構築のために以下のようにモデル化を行った。

バラスト浚水の数理モデルの構築では区画の水位と排水量が重要であり、タンク内の流動現象はここでは重要ではない。そのため、各区画の水位とポンプの排水効率をネットワーク構造としてすればよく、計算量が大幅に削減できる。本研究ではバラスト浚水を Fig. 2 に示すようなネットワークシステムに単純化した⁴⁾。1 つの区画について考えると、隣接する区画からの流れのみを考慮すればよい。(m-n)区画の単位時間当たりの水位変化は(1)式のように記述される。

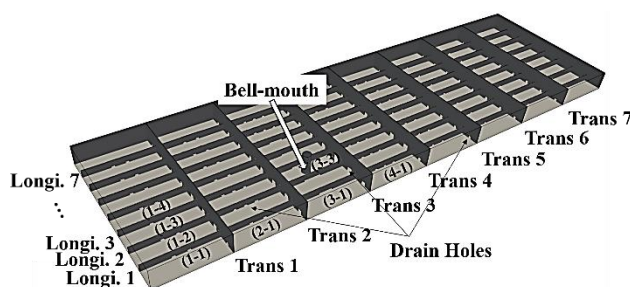


Fig. 1 The arrangement of 8×8 ballast tank in a real ship.

* 九州大学大学院工学研究院
 ** 九州大学大学院工学府
 *** (株) 名村造船所

原稿受付 令和 5 年 3 月 3 日
 公開日 令和 5 年 5 月 25 日
 春季講演会において講演 令和 5 年 6 月 1, 2 日
 ©日本船舶海洋工学会

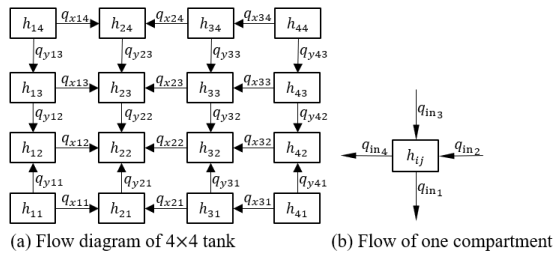


Fig. 2 Schematic diagram of simplified model.

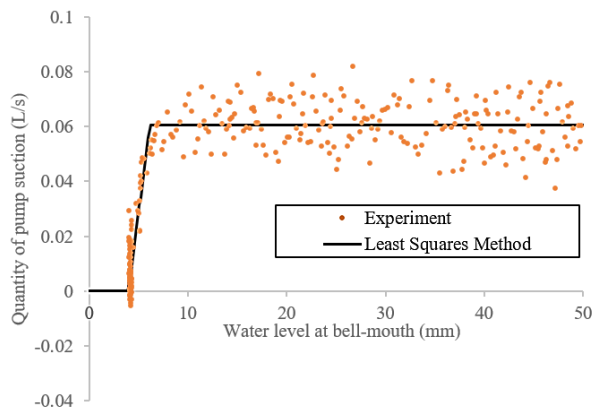


Fig. 3 Pump characteristic curve

$$\frac{dh_{mn}}{dt} = (-q_p + \sum q_{in(m,n)_k}) \frac{1}{A_{mn}} \quad (1)$$

以上の式では、 q_p はポンプの吸引量で、ベルマウス区画の設置区画以外の区画ではポンプ流量 $q_p = 0$ となる。 $q_{in(m,n)_k}$ は、Fig. 2に示すように隣接する区画との流量で、正の値をとる時、その区画に水が流入していることを示し、負の値の時は流出していることを示す。 A_{mn} は区画の面積である。

3.2 ポンプ特性曲線

ポンプ流量は作動中一定値ではなく、水位がベルマウスの下端に近づくとき水と空気が混ざって吸引されるため、ポンプの排出効率が低下する。Fig. 3は、実験と数値計算結果から算出したポンプ吸引量とベルマウス付近の水位の関係である。最小二乗法によって、Fig. 3の黒い実線で示すように、ポンプの特性曲線をベルマウス区画の水位のみに依存する関数として表現した。

3.3 隣接区画との流量計算

隣接する区画間の流れはバラストタンクの構造上ロンジの上を超える流れとドレンホールを通過する流れの2つに大別される。Fig. 2(c)のモデルはオリフィスのある堰構造であり、この場合の流量合計を直接計算する手法はほとんどない。最も単純な手法としては、(2)式のように堰とオリフィスが独立して機能すると仮定し、それぞれを足し合わせることで隣接する区画間の流量合計 q_{total} を計算する方法がある。

$$q_{total} = q_{over} + q_{hole} \quad (2)$$

q_{over} はロンジ上を超える流れ、 q_{hole} はドレンホールを通過する流れである。

隣接する区画のロンジ上部の水位の状態から、ロンジが堰として現れ方により次の3caseに分類できる。

(1) 潜り堰

この場合は上流下流の水位がロンジの上端より高く、上流の流れが下流の流れに影響を及ぼす。越流水深が深い場合、流量は(3)式で表すことができる⁴⁾。

$$q_{over} = c_{over} \sqrt{2gL(h_2)} \sqrt{h_3} \quad (3)$$

ここに、 c_{over} は流量係数、 g は重力加速度、 L はロンジ長さ(越流幅)、 h_{up} 、 h_{down} は上流と下流の水位、 h_{longi} はロンジ高さ(堰高)である。水位差をそれぞれ堰頂から測った上流水位 $h_1 = h_{up} - h_{longi}$ 、堰頂から測った下流水位 $h_2 = h_{down} - h_{longi}$ 、上下流の水位差 $h_3 = h_{up} - h_{down}$ とする。Rajaratnam⁵⁾によると、この式は、 h_2 が h_1 の90%を超える場合にのみ適用でき、 c_{over} は約0.90の定数をとる。90%未満の場合、式(4)の越流堰公式である Villemonte Formula⁶⁾方法を用いた。

$$q_{over} = q_{submerged} = K q_{free} \quad (4)$$

$$K = \left[1 - \left(\frac{q_{down} - q_{longi}}{q_{up} - q_{longi}} \right)^{1.5} \right]^{0.385} \quad (5)$$

$$q_{free} = c_{free} \frac{2}{3} \sqrt{2gL} h_1^{1.5} \quad (6)$$

式(5)は Villemonte Formula の係数Kの実験式であり、式(6)は薄板堰上の自由越流の Kindsvater-Cater Formula⁷⁾である。流量係数 c_{free} は ISO 規格 (ISO1438-2017)⁸⁾ によって与えられた推奨条件に基づいて、式 (7) のように求めた。

$$c_{free} = 0.602 + 0.083 \frac{h_1}{h_{longi}} \quad (7)$$

(2) 自由越流堰

この場合は、下流の水位は堰頂よりも低い、自由越流の薄堰モデルである。流量は式(6)および $q_{over} = q_{free}$ に従つ

て直接計算できる。

(3) 越流がない場合

この場合は、上下流の水位が堰高寄りも低い場合であり、越流は無く、流量 $q_{\text{over}} = 0$ となる。このため、ロンジやトランス材に浚水のために設置されたドレンホールの現れ方により次の 3case に分類できる。

Case 1) ドレンホールが完全に没水した場合

Fig. 2 (d)により、上流下流の水位はドレンホールの上端よりも高く、流れは両側の水位差にのみ影響される。

$$q_{\text{hole}} = c_{\text{hole}} \sqrt{2gbz} \sqrt{h_{\text{up}} - h_{\text{down}}} \quad (8)$$

ここに、排水係数 $c_{\text{hole}} = 0.65$ であり、 b, z はそれぞれドレンホールの幅と高さである。

Case 2) ドレンホールが部分的に没水した場合

下流の水位のみがドレンホールの上端よりも低くなる場合、つまり、Fig. 2 (e)により、総流量はドレンホールの上部と下部の流量をそれぞれ考慮し、合計して求めた。

$$q_{\text{hole}} = c_{\text{hole}} \frac{2}{3} \sqrt{2gb} \left[(h_{\text{up}} - h_{\text{down}})^{1.5} - (h_{\text{up}} - z)^{1.5} \right] + c'_{\text{hole}} \sqrt{2gbh_{\text{down}}} \sqrt{h_{\text{up}} - h_{\text{down}}} \quad (9)$$

この場合右辺第一項はドレンホールの上部の自由流れである。第 2 項は完全に潜水したオリフィス部分の流れであり、排水係数 $c'_{\text{hole}} = 0.52$ である。

Case 3) ドレンホール内に自由表面流れが現れる場合

Fig. 2 (f)に示すように、ドレンホールが部分的に没水した状態であるが、上流および下流ともドレンホールの上端よりも水位が低い場合であり、流れの上部と下部に分割して考慮する。上部はチャネル流れ、なお、完全に潜水した下部はオリフィス流れとしてみなした。

$$q_{\text{hole}} = c_{\text{hole}} \frac{2}{3} \sqrt{2gb} \left[(h_{\text{up}} - h_{\text{down}})^{1.5} - (h_{\text{up}} - z)^{1.5} \right] + c'_{\text{hole}} \sqrt{2gbh_{\text{down}}} \sqrt{h_{\text{up}} - h_{\text{down}}} \quad (10)$$

$$R = \left[(h_{\text{up}} - h_{\text{down}}) b / 2 \right] / \left[b + (h_{\text{up}} - h_{\text{down}}) \right]$$

$$I = (h_{\text{up}} - h_{\text{down}}) / l$$

ここに、右辺の前部分はマンニングの式であり、 n はマンニングの粗度係数である。アクリル材の場合、0.01 をとる。 R は動水半径（径深）、 I は単位長さ当たりの摩擦損失水頭で表される動水勾配である。

3.4 ポンプ影響係数

数値計算結果の分析によると、ポンプの吸引によってベルマウス近くのドレンホールの流量が以上で求めた流量より増加することが分かった³⁾。ドレンホールのベルマウスからの距離が大きくなるにつれてこの影響は減少することがわかっており、この現象を受けたポンプ吸引力の影響を考慮した流量は式(11)に示すように影響係数 c_p を掛け合わせることで計算した。

$$q_{\text{hole-act}} = c_p q_{\text{hole}} \quad (11)$$

ここで影響係数は 1 以上である。 $c_p = 1$ の場合、ポンプの影響がないことを示す。式(11)の $q_{\text{hole-act}}$ は実験または数値計算から求めることができ、 q_{hole} は式(8)~(10)に従ってドレンホール両側の水位を利用して計算できる。これ

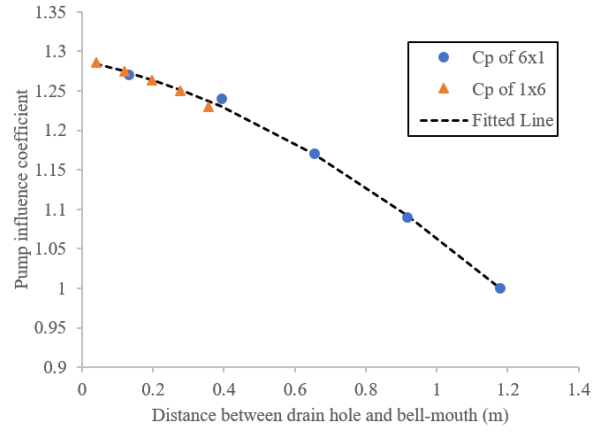
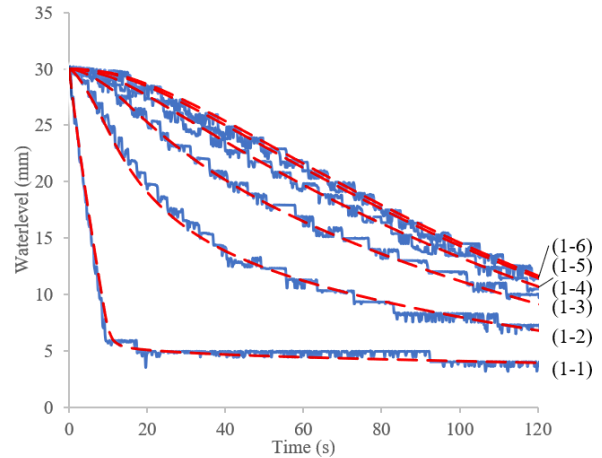
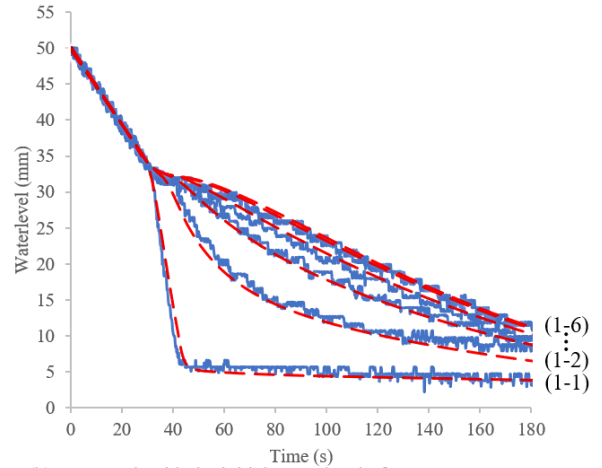


Fig. 4 The relationship between the influence coefficient and the distance from the drain hole to the bell-mouth.



(a) 6 × 1 tank with the initial water level of 30 mm



(b) 1 × 6 tank with the initial water level of 50 mm

Fig. 5 The results of Simplified mathematical model in the single arrangement tank

により、ポンプ影響係数の計算方法が得られる。

$$c_p = q_{\text{hole-act}} / f(h_{\text{up}}, h_{\text{down}}) \quad (12)$$

式(12)の方法を用いて、縦に配置された 6×1 区画バラストタンクと横に配置された 1×6 区画バラストタンクにおけるベルマウスからの距離の変化に対する c_p の値を計算し、Fig. 4 に示すように分布を得られた。次に、これらを 2 次元近似より、式(13)のようにポンプ影響係数とベル

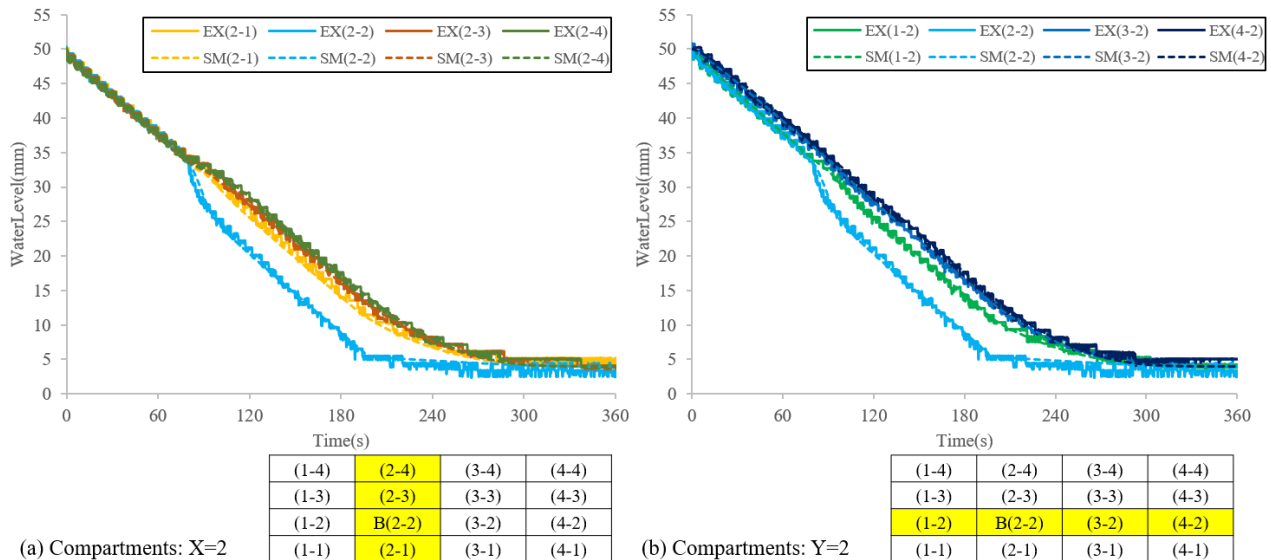


Fig. 6 Comparison for experiment and simplified mathematical model (4×4 tank model).

マウスからの距離の関係式を取得し、Fig. 4 の点線により示される。

$$c_p = -0.1228L_{p-h}^2 - 0.1008L_{p-h} + 1.2884 \quad (13)$$

簡易計算モデルとポンプ影響係数の妥当性を評価するために、影響係数を用いて計算結果と水理模型実験結果の比較を Fig. 5 に示す。(a)は 6×1 区画モデルで初期水位が 30mm の場合、(b)は 1×6 区画モデルで初期水位が 50mm の場合である。以上のように算出された影響係数の妥当性は証明された。

4. 二次元配置タンクの浚水簡易計算

前章で導いたポンプ影響係数を 2 次元配置タンクの浚水計算に適用し、簡易計算法の精度の更なる検証を行った。対象としたモデルは 4×4 区画モデルである。設定条件として、4×4 区画ではポンプ流量は単列のケースと同じ実船スケールで 200ton/h.に相当する 3.3L/min.で、ベルマウス区画の設置位置は(2-2)区画、ドレンホルのサイズは 9×6mm, ロンジ高さは 30mm, トランス高さは 80mm, 初期水位は 50mm である。

Fig. 6 は 4×4 区画タンクの、水理実験結果と簡易計算法による結果の比較を示す。図より、実験結果と簡易計算の結果は概ね一致していることがわかる。

5. 結 言

バラストタンクからの浚水をモデル化し、数値流体計算と水理模型実験の結果を基に、水位条件に合わせた簡易計算式を立式し、これらの妥当性を検証した。先行研究によって構築された本計算式によって計算される流量にポンプの吸引力による影響を考慮したポンプ影響係数を掛け合わせるにより、計算の補正を図った。この係数を用いた浚水計算を構造が単純な単列タンクに適用し、信頼性を実証した後、4×4 区画の 2 次元配置のタンクに適用した。4×4 区画タンクでは結果が良く合い、2 次元配置の場合においても、簡易計算式の適用が可能であることを示した。ただし、ポンプの容量やドレンホルの開

口大きさと配置などの複数の要因が簡易計算結果に影響を与える可能性があるため、今後の研究で検討する必要がある。また、本研究で取り扱ったモデルは実船寸法の 1/10 スケールに縮尺したものであり、実船寸法の場合の計算精度についても考慮する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Toraharu Watanabe *et.al.*: EVALUATION FOR BALLAST TANK DRAINAGE BY HYDRAULICS EXPERIMENT, ICSOT Indonesia 2021, 10.3940 / rina.icsotindonesia 2021.21, 2021
- 2) Liu Guangshuai *et.al.*: Two-phase Flow Analysis for Small-scale Ballast Water Tank Model by Hydraulics Experiment and Simulations, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol 972, 012048, 2022.
- 3) Liu Guanshuai *et.al.*: EVALUATION FOR BALLAST TANK DRAINAGE BY TWO PHASE FLOW MODEL, ICSOT Indonesia 2021, 10.3940 / rina.icsotindonesia 2021.21, 2021
- 4) FUKUCHI, N., SHINODA, T., 'A Practical Method for Analysing the Indeterminable Problems in the Design of Ship Equipment (Part 1) - The System Collecting Oil and Water Through the Tank Bottom Structure', J. Soc. Nav. Arch. Japan, 1989.
- 5) Rajaratnam, N., & Muralidhar, D. Flow below deeply submerged rectangular weirs. Journal of Hydraulic Research, 7(3), 355-374. 1969.
- 6) Villemonete, J. R. Submerged weir discharge studies. Engineering news record, 139(26), 54-56. 1947.
- 7) Kindsvater, C. E., & Carter, R. W. Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs. Journal of the Hydraulics Division, 83(6), 1453-1. 1957.
- 8) International Organization for Standardization: ISO 1438-2017: Hydrometry — Open Channel Flow Measurement Using Thin-plate Weirs, ISO: Geneva, Switzerland. 2017.