タグボート推進器後流による曳引力減少に関する一検討 —深水域の模型実験—

定兼 廣行*・境 善行**

A Study on the Towing Force Reduction due to the Jet Stream Caused by Tug Boat Propeller —Model Experiment in Deep Water—

Hiroyuki SADAKANE and Yoshiyuki SAKAI

Abstract

We have well known that the towing ability of a tugboat decreases because of a reaction of the jet stream caused by tugboat propeller, which acts on the ship hull of a VLCC. However at present, this fact has not yet been taken into account in the estimation of towing force. Maybe it is the reason that the influence of the jet stream on the towing force is not examined exactly and systematically and also series data on the reduction of towing force are not shown.

In this paper, the change of the towing force reduction relating to the length of towing line was studied experimentally. Model experiments were carried out by using a water-tank and a pair of ship models, namely a VLCC model and a tugboat model. And two kinds of examination conditions were selected, namely (1) the rest condition which both ship models were fixed by two dynamo-meters respectively and (2) the moving condition which the VLCC model was moved laterally by the tugboat model.

We obtained following results ;

- (1) It could be confirmed that the towing force decreased by the jet stream of the tug boat propeller. And the efficiency of the towing force relating to the length of tug line was suggested based on series experiment.
- (2) The above efficiency more decreased in the moving condition which the VLCC was moved by the tugboat.

1. はじめに

大型船舶がバースに離着岸する際にタグボートの支援を受ける。そしてこのタグボートの必要能力は曳引力を基に検討されるが、曳引力には公称曳引力 (published tug-pull) が用いられ⁽¹⁾、これは普通には建造時等に実施されるボラード試験から得る数値である。しかし、タグボートの曳引力や押力は、タグボート推進器が流体を加速し後方に押し出して発生する噴流 (以下では、推進器後流) の反力によっ

て生じるものであるから、この推進器後流の流れ方や作用の如何によっては曳引力に明確な差違が生じる。例えば本船の離着岸について言えば、推進器後流は本船の横移動方向つまり曳引する方向とは逆向きに作用することとなり、タグボートの曳引力は実質的に減じる。このことは容易に想像できることであるが、現在の必要曳引力算定にはタグボート推進器後流の影響はほとんど考慮されていない。これの理由は、推進器後流が曳引力に及ぼす影響を推定するための信頼できる資料と合理的方法が示されてい

* 正 会 員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

**学生会員 神戸商船大学大学院 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

ないためであり、この種の系統的な調査や研究進展が望まれる⁽²⁾⁽³⁾。

タグボート推進器後流による曳引力減少の程度は、タグライン長、水深、周囲岸壁の状況、タグボートの本船船首尾への配置場所、潮流の有無などによって変化すると考えられる。これら種々の条件の変化に対応して、船体の横移動速度等の制御を的確に、安全に行うためには種々の条件や状況による曳引力能力の差違や変化に関する情報や知見が欠かせない。またこのような曳引力変化等の実際は、タグボート操船の研修や訓練などを目的とする操船シミュレーターに取り入れることによって研修・訓練の効果を上げることが期待できる。

本論文では水槽模型実験の手法により、タグ操船時に遭遇する種々の状況や条件のうち最も基本的である深水域・船体中央曳引に限って、タグライン長による曳引力の減少変化を (1)船体静止状態、及び (2)船体横移動状態、の 2 種類について調査する。(2)は実際の船体移動時を想定したものであり、実用的観点から必要な実験であるが、同時に流体力学的にも両者の状態では船体周囲の流れが相違するので実曳引力に差違が現れることが予想される。

なお、実曳引力とはタグボートが有する曳引力ではなく被曳引物体に有効に働く曳引力のことである。

2. 模型実験

実験は、本学の浅長水槽（長さ：60 m，幅：6 m，水深：1.5 m）において実施した。供試模型船は、1/100縮尺のタンカー船型とタグボートであり、各模型船の主要目と実験状態を表 1 に、また模型の外形を写真 1 と写真 2 に示す。タンカーの載貨状態は半載状態である。このタンカー模型船は半載状態で方形係数 C_b が 0.74 であり、比較的スマートである。このタグボート模型船はアジマスサークル・ドライブ・プロペラ (A.D.P) を装備しており、40 gf から 50 gf

表 1 供試模型船主要目

Ship model	Length Lpp (cm)	Breadth B (cm)	Draft d (cm)	Ship Weight (kgf)	Block Coe. Cb	Load Con.
tanker	300.0	48.0	11.7	109.2	0.74	Half
Tugboat	39.0	10.6	4.6	1.035	—	—

写真 1 供試タンカー模型船

の推力を出力できる。この模型船には検力計を取り付け、この検力計でタグボート推力を検出した。

今回は初期研究であるので、複雑な影響は排除することとして実験は深水域を想定して水深喫水比 5.0 とした。また普通にはタグボートの支援を受ける船舶の後方には岸壁等が存在するが、これも排除した。

実験は 1 章後半に述べたように、(1)船体静止状態、及び (2)船体横移動状態、を計画したので、以下に各状態における実験装置等を述べる。

(1) 船体静止状態の実曳引力計測装置

この状態ではタグラインを取らず、図 1 に示すように配置したタンカー模型船とタグボート模型船は各検力計を介して台車に固定される。この後、タグボートのプロペラを駆動させてタグボートに推力（曳引力） F_t を与え、推進器後流を発生させる。そしてこの後流によって生じるタンカー模型船への流体反力 F_s をタンカーの検力計で計測する。 F_s が曳引力の減少分となる。両模型船の間隔をタグライン長 l_e としてこれを 20、40、100、120 cm に変えて実験する。この距離は実践対応では 20、40、100 及び 120

写真 2 供試タグボート模型船

図 1 船体静止時の実験装置配置図

mに相当する。タグボートは本船のほぼ船体中央に配置した。船体中央は推進器後流の影響が最も顕著に現れる場所として選ばれた。

(2) 船体横移動状態における実曳引力解析の実験

この状態での実曳引力の解析方法は後の4章で説明する。ここでは実験装置について述べる。この実験においては、実際にタグボート模型船にタンカー模型船を曳かせるためタグラインに相当する金属製の固着パイプを両船間に設置した。「ライン」を固着パイプとしたのはタグボートの振れを抑え、安定して曳かせるためである。両船は一体物体としてタグボートの曳引力によって横移動する。具体的実験方法については4.2節に述べる。

3. 船体静止状態における実曳引力の調査

本章では船体静止状態の実験方法及び結果について述べる。

3.1 実験方法

タンカー模型船はヒービング・ロッドと検力計を介して横行台車に固定される。図1に示すタンカー模型船に設置の検力計でタグボート推進器後流により生じる流体力反力を計測する。これが2章で述べた曳引力の減少分となる。一方、タグボート模型船に設置の検力計からプロペラ駆動によって発生する曳引力が計測されるので、両者の差から実曳引力を抽出することができる。これらの力の電気信号はA/D変換器を通して時系列データとしてコンピュータに記録した。

3.2 解析方法

タグボートの曳引力 F_t と、タンカー模型船が受けたタグボートの推進器後流の流体反力 F_s との差が実曳引力 F_{ta} となる。つまり、

$$F_{ta} = F_t - F_s \quad (1)$$

またタグボートの発生曳引力 F_t に占める実曳引力 F_{ta} の割合を実曳引力比 η_{ta} と定義することができる。つまり、

$$\eta_{ta} = F_{ta} / F_t \quad (2)$$

タグボート模型船を作動させた後、 F_t と F_s が定常となったところからそれぞれの平均的な値を読みとり(2)式を用いて各タグライン長 le における実曳引力比を比較すればタグライン長による、推進器後流影響や実曳引力の変化を見ることができる。次節にこれを示す。

3.3 結果

実曳引力比 η_{ta} の実験解析値を図2に×印で示す。縦軸に実曳引力比 η_{ta} を、横軸にタグライン長 le を取っている。なお、この横軸 le も無次元値で表示する

のが望ましいが、これについては、流体力学的にはタグライン長を本船幅 B または喫水 d で無次元化したもの、もしくは実用的にはタグボート船長で無次元化したものがよいと考えられる。しかし現在はこちらが好ましいかは判断できないので、今回は模型スケールのままとした。図中の×印は数個の実験解析値の平均を示している。実線は実曳引力比を対数近似した平均曲線である。対数近似はタグライン長 le が無限に長くなると実曳引力比は一定値に収束するという仮定のもとに行った。平均曲線は次式のように表示される。

$$\eta_{ta} = 0.1206 \ln(le) + 0.1894 \quad (3)$$

この平均曲線の相関係数は0.9605であった。

図2 船体静止状態におけるタグライン長 le と計測実曳引力比 η_{ta} との関係 (縮尺1/100模型)

3.4 まとめ

船体静止状態における実曳引力比はタグライン長20 cmで0.55、40 cmで0.6強、100 cmで約0.75、120 cmで約0.8弱、また図の平均線から140 mの数値を外挿すれば実曳引力比は約0.8となる。この実験結果から推進器後流が曳引力に及ぼす影響の傾向と程度を知ることができ、この結果はタグラインが相当に長い、100 cm (タグボート船長の約3.6倍) であっても曳引力には約20%程度の減をもたらすことを示している。一方で意外にも、タグライン長20 cm (タグボート船長のおよそ半分) のごく短い場合であっても実曳引力比は約0.55であり、曳引力の減少分は約45%に止まっている。

上記は船体が静止している場合の特殊例であるので、次章では移動中の場合について検討する。

4. 船体横移動状態における実曳引力の解析

4.1 解析方法

前章では両模型船を固定してタンカー模型船に働

く流体力とタグボート推力（曳引力）を直接検出した。しかし、実際のタグボート支援操船ではタグボートが本船を曳いて共に移動する。そこで、タグボート模型船でタンカー模型船を実際に曳引させる実験を行った。しかしこの実験では、タンカー模型船を自由にするためこれに働くタグボート推進器後流の影響を直接検出することは不可能である。そこで、次の解析方法に従って実曳引力を推定する。

- (1) 一定タグボート曳引力 F_t による本船の時々刻々の横移動距離を計測する。
- (2) 横移動の運動方程式を用い、これを解いて(1)の横移動距離 s と比較して、上記(1)の移動距離曲線と(2)の解曲線が合うように(2)の運動方程式中の曳引力を決める。
- (3) この曳引力を実曳引力 F_{ta} と見なし、実曳引力比 η_{ta} を求める。

上記の手順で問題になるのは、(2)の運動方程式を適切に定めることであるが、現段階では単純を旨として次式を用いる。

$$\ddot{s} = \frac{1}{M} \left(F_t - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{wy} \cdot L \cdot d \cdot v_y^2 \right) \quad (4)$$

ここに、 s ：船体の横移動距離、 M ：船体横方向の見掛質量、 ρ ：水の密度、 L ：船の長さ、 d ：喫水、 C_{wy} ：横力係数、 v_y ：横移動速度、また $\ddot{}$ は時間による2回微分を表す。

なお(4)式は曳引力 F_t の作用によって船体は真横に移動することを前提としており、 C_{wy} は移動開始初期においては船体移動距離／経過時間によって顕著に変化するので過渡的横力係数^{(4),(5)}を使用する。

4.2 実験方法

実験装置の配置図を後の図3に示す。タグライン長 le は20、40、80、140 cmに設定した。タグボートのプロペラを作動させて所定の曳引力 F_t （タグボートの検力計で検出）でタンカー模型船を曳引し、この模型船の時々刻々の横移動距離を図上方に示す超音波式変位センサーにより検出する。

図3 船体移動時の実験装置配置図

4.3 実験と計算との比較

実験と計算の結果を図4に示す。縦軸に横移動距離 s を横軸に時間 t を取っている。上から図(a)、(b)及び(c)はそれぞれタグライン長が20、80、及び140 cmの結果であり、細い波形実線が実験で得られた横移動曲線①、太い実線がタグボートの曳引力 F_t を(4)式に入れて計算した横移動曲線②、点線の曲線③は上記①の横移動曲線に合うように(4)式のタグボート曳引力を選んで求めた横移動曲線である。この曳引力を実曳引力 F_{ta} とするのである。

タグボートの設定曳引力 F_t がすべて有効に作用

(a) タグライン長さ 20cm

(b) タグライン長さ 80cm

(c) タグライン長さ 140cm

図4 各タグライン長 le による船体横移動運動の違い（実験計測、計算の比較）

したならば実験の実線①は太線②と一致するはずである。しかし、船体が移動を開始した直後こそ一致しているが、移動距離が伸びるにつれて差が生じ、やがてその差は大きくなっていく。曲線①と②のこの差がタグボート推進器後流の影響の現れである。この差はタグライン長が120 cmの(c)図の場合では少なくなってくる。

曲線③は実験曲線①に合うように曳引力を調整したものであるが、タグライン長の違いに対しても両曲線は良く一致しており、これは方程式(4)の妥当性を示していると考えることができる。図4(b)の場合についてタグボートの発生曳引力 F_t と実曳引力 F_{ta} とを比較すると、46.9 gfと30.0 gfとなり、これは約35%の曳引力減少である。なお図4は単に時間経過に対して模型実験と計算結果が一致することを示す。

4.4 実曳引力比の推定

前節4.3で示した実験と計算の比較から実曳引力 F_{ta} が解析できたので、実曳引力比 η_{ta} を求めることができる。

結果を図5に示す。船体静止時と同様、縦軸に実曳引力比を、横軸にタグライン長 le をとっている。●印は解析値を示している。実曳引力比 η_{ta} はタグライン長さ20 cmで0.46、40 cmで0.55、80 cmで0.64、140 cmで0.75となった。点線は船体静止時と同様、対数により近似した平均曲線である。この曲線は次式で表される。

$$\eta_{ta} = 0.1463 \ln(le) + 0.01469 \quad (6)$$

平均曲線の相関係数は0.9949である。

4.5 まとめ

船体横移動状態においては、実曳引力を直接計測することができないため、船体横移動距離の計測と運動方程式の解曲線を比較することによって実曳引

力を解析した。船体静止状態と同様、タグライン長 le が長いほど実曳引力比が大きくなる結果を得たが、これを船体静止時と比較すると全体に横移動時の方が低めに現れた。これについては次章で述べる。

5. 議 論

(1) タグライン長の影響

船体の静止状態、移動状態ともに実曳引力比はタグラインが長いほど大きくなり、曳引効率が上がることが示された。これはタグラインが長いほどタグボート模型船の推進器によって加速された噴流がタンカー模型船の舷側に至るまでに減衰が進むためである。また、タグラインが長い場合はタグボート模型船の推進器によって加速された水流の拡散が生じるため、この水流の下部はタンカー模型船の船底を迂回して後方に抜けるが、タグラインが短い場合は、加速された水流はまだ十分に拡散していないのでこの水流の主要部分がタンカー模型船の船側に当たり流体反力を強めるためである。

(2) 船体の静止時と移動時の実曳引力比

4.5節後半に船体の移動状態の実曳引力が静止状態に比べて低く現れたことを述べた。図6に船体静止状態と船体移動状態の実曳引力比の比較を示す。船体移動状態の方が船体静止状態より低い値を示している。これは、船体静止状態では船体にはタグボートの推進器後流のみが作用しているが、船体移動状態では船体が移動することによって船体周囲に固有の別な流れが生じるため、推進器後流のflow patternが変化したことと、船体が移動することによって推進器後流の拡散が少し抑えられたため後流の噴流速度が強まったと考えられる。

上記はまだ推測の域を出ておらず、差違の原因については今後の検討に待つことになる。

図5 船体横移動中におけるタグライン長 le と解析実曳引力比と η_{ta} との関係 (縮尺1/100模型)

図6 船体の静止状態と移動状態における実曳引力比 η_{ta} の比較 (縮尺1/100模型)

(3) 実験における縮尺影響

今回の研究は推進器後流が曳引力に及ぼす影響の存在を確認し、合わせてその傾向を調査するのが目的である。これらについては模型実験で事足りるので、縮尺影響についての検討は後日の課題となる。

6. おわりに

本論文では、模型実験を通し、タグボートの推進器後流が曳引力の減少を引き起こすことを指摘し、それらを評価する指標として実曳引力比を提案した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) タグボートの推進器後流により曳引力は減少することを模型実験により確認した。そしてその程度を、タグラインがタグボート船長の0.5～3.6倍の範囲について調査し、ラインは長いほど曳引効率はよい。
- (2) 船体静止状態と船体移動状態ではタグライン長さによる実曳引力比の傾向は同様の結果となったが、実曳引力比は船体移動状態の方が低めに現れた。
- (3) 曳引力の減少はタグボートの推進器後流による減少の他に船体移動によって生じる減少がある。

今回は深水域で船体中央曳引のみの検討を行った。しかし実際のタグボート支援操船では浅水域であるため、浅水域の実験も行う必要がある。また船体周辺の岸壁等の影響についても調査の必要があるかも知れない。これらは今後の課題としたい。

最後に本研究の実験と解析の一部は当時第4学年出野耕太君、山崎良太君の卒業研究として行われました。ここに記して謝意とします。

参 考 文 献

- (1) 本田啓之輔：二港揚げVLCC離着棧横移動時の

タグ所要支援力, 日本航海学会論文集 第80号, pp.17～24, 1988.

- (2) (社)日本作業船協会：引船の曳航力に関する設計指針の調査研究, 報告書, 昭和54年3月.
- (3) 中島利雄：曳船操船—そのテクニック— 海文堂 昭和54年12月.
- (4) 定兼廣行：静止から横移動を開始する船体の横力係数に関する検討, 日本航海学会論文集 第95号, pp.193～200, 1996.
- (5) 定兼廣行・鶴田広巳：静止から横移動を開始する船体に働く過渡的流体力 —模型実験による検討—, 日本航海学会論文集 第90号, pp.273～279, 1993.

質 疑 応 答

佐藤治夫(東海大学海洋学部)：タグライン長さによる分析をされていますが、タグボートの馬力が大きい場合は、どのようになるのでしょうか。

境 善行：今回はタグボートの馬力は1種類しか実験を行っていません。今回の実験から推測しますと、馬力が大きくなるということは、推進器後流の影響も大きくなることを意味します。そのため、実曳引力比は小さくなると考えます。その場合、タグライン長による傾向は同様になると考えられます。

松本朋子(古野電気株式会社)：実験を行ったタグライン長はどのようにして決めたのでしょうか。

境 善行：実験施設の制約上タグライン長を最大140cmとしました。また、タグラインが非常に短い場合を考え、タグボート船長の約半分の長さに相当する、20cmから140cmまでの実験を行いました。実用上はこの範囲に内に収まっていると考えます。