操船シミュレーションソフトウェアによる小型船舶の操縦性の分析

An analysis of Maneuverability of Pleasure Boat with Ship Simulation Software

○平井一徳(長岡高専) 正 外山茂浩(長岡高専) 正 池田富士雄(長岡高専)

瀬田広明(鳥羽商船高専) 江崎修央(鳥羽商船高専)

Kazunori HIRAI, Shigehiro TOYAMA, Fujio IKEDA, Nagaoka National College of Technology,

Hiroaki SETA, Nobuo EZAKI, Toba National College of Maritime Technology

Key Words: Pleasure Boat, Maneuverability, Ship Simulation Software

1 緒言

一般に船舶の操縦にはある程度の熟練が必要である。なぜならば、操縦運動を支配する流体力が航行状況に応じて複雑に変化するからである。熟練操船者は、航行状況に応じて適切な操縦動作を長年の経験に基づき行っている。しかし、経験の浅い操船者は特に緊急時に航行状況に応じた操作を見誤る可能性が高く、このことが近年の海難事故増加の要因の一つとなっていることが予想される。しかし、文献[1]のような小型船舶の操縦性に関する研究は数多くは見受けられない。

そこで本研究では、操船シミュレーションソフトウェア Ship Simulator 2008を用いて小型船舶の操縦性に関する分析を行った。その分析結果を報告するとともに、手動式油圧操舵機構の操舵感覚に関する検討結果を報告する。

2 Ship Simulator 2008 による小型船舶の操縦性評価

Ship Simulator 2008 は実際の複雑な操縦運動を忠実に再現し、操船訓練に応用可能なシミュレーションソフトウェアである。視点を様々な位置へと変更可能で、図 1(a)に示すような 1 人称視点とすれば実際の操船状況をシミュレーションできる。図 1(b)に示す Pilot Boat の他、24 種類の船舶が選択できる。それら船舶の運動は、実船実験データに基づく 6 自由度の厳密な数学モデルによって計算され 3DCG 技術で詳細に描写される。本研究でこのソフトウェアを利用した理由の一つに風潮流等の環境が自由に設定可能である点が挙げられる。風潮流を無くす設定とすれば、実船実験に比べ明確に操縦性を分析・評価できると考えた。本報告では、図 1(b)に示す Pilot Boat の操縦性についてシミュレーションを行った。表 1 に Pilot Boat の仕様を示す。

図 2 はプロペラ回転数を 300[rpm]、舵角を 15[deg]のステップ入力とした場合と、プロペラ回転数を 900[rpm]、舵角を 30[deg]のステップ入力とした場合の回頭角速度の時間応答を示している。比較的低速で小舵角時の回頭角速度は 1 次遅れ系のステップ応答と見て取れる。しかし、高速・大舵角時の回頭角速度は、横滑りの影響^[2]で 1 次遅れ系のステップ応答と大きく異なり高次系の応答となる。

図 3 にプロペラ回転数を 200[rpm]一定から 1000[rpm]一定まで段階的に変化させたそれぞれの条件において、ステップ

高さを 2[deg]から 45[deg]まで種々変化させた舵角入力に対する定常回頭角速度を示す。図 3 からわかるように定常回頭角速度は舵角に対して単調増加とならず非線形性を示す。特にプロペラ回転数が上がるに連れ単調増加とならない傾向は顕著となる。これは高速時に働く非線形流体力^[2]が原因である。

以上のことから、操船者は図 3 に示す静特性に加えて、図 2 に例示したような動特性も含めた操縦性を体得しなければならず、このことが船舶の操縦性を複雑なものとしていることが明らかになった。

(a) Viewpoint of cockpit

(b) Pilot Boat

Fig.1 Ship Simulator 2008

Table1 Specification of Pilot Boat

Length Loa [m]	18.8	Engines [kW]	2×746
Width [m]	6.1	Max propeller rev. [rpm]	2100
Draught [m]	1.03	Top speed [Kn]	32
Displacement [t]	34	Roll period [s]	6.1

Fig.2 Step response of rate of turn

Fig.3 Steady rate of turn

3 手動式油圧操舵機構の操舵感覚

鳥羽商船高専教習艇あさま(図 4)にも装備されている手動式油圧操舵機構(図 5)を対象に操舵感覚の検討を行った。そのブロック線図を図 6 に、各パラメータ値を表 2 に示す。

ブロック線図において直圧力 P_N を入力、舵輪の反トルクを出力とするモデルを舵角の零近傍で線形近似すると、伝達関数は次式のように表せ、そのゲイン線図は図 7 のようになる。

$$G(s) = \frac{2\pi A_p d_r J_h}{V_d} \left\{ \frac{s^2}{(J - m_p d_l^2)s^2 + c_r s + \frac{2d_l A_p^2 \kappa}{V_o}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 A_p [m²]は油圧シリンダのピストン断面積、 κ [Pa]は作動油の体積弾性係数、 V_o [m³]は平衡時の油圧シリンダの右室、左室の容積、 m_p [kg]はピストン部質量、 d_l [m]は舵回転軸からロッド取り付け位置までの長さ、 J [kgm²]は舵板の慣性モーメント、 c_r は舵板に関する粘性抵抗係数を表す。また V_d [m³]はヘルムポンプの押しのけ容積、 d_r [m]は舵前縁から直圧力中心までの距離、 J_h は舵輪の慣性モーメントである。

低速・小舵角時、高速・大舵角時それぞれに対する操舵反トルクの計算例を表 3 に示す。表 3 からわかるように低速・小舵角では、直圧力が大きく発生しないため操舵反トルクは小さい。また、高速・大舵角では直圧力は大きく発生するが、転覆を防ぐために舵をゆっくりと動作させることを考慮すると、操舵反トルクは小さくなる。したがって、通常で考えられる航行状況では反力感が得にくいことがわかった。

次に図 6 のブロック線図において、舵角 δ の初期値応答を数値シミュレーションによって求め、セルフステア性について検討した。一例として、初期舵角を20[deg]、有効流入速度 v_r を1～10[Kn]の間で変化させた場合のシミュレーション結果を図 8 に示す。図 8 からわかるように有効流入速度が大きいほど過渡特性は良好であるが、どの条件においてもオフセットが大きく発生する。これは、有効流入速度が小さい領域では直圧力が大きく働かず^[3]、セルフアライニングトルクが十分に発生しないことが原因として考えられる。

Table2 Parameters of rudder mechanics

J [kg・m ²]	0.8	m_p [kg]	10
c_r [Ns/m]	10	A_p [m ²]	1.963×10^{-3}
d_l [m]	0.06	V_r [m/s]	24
d_r [m]	0.079	A_r [m ²]	0.3
l [m]	0.479	V_d [m ³ /rev]	2.9×10^{-5}
κ [Mpa]	5×10^2

Fig.4 Training boat "Asama"

Fig.5 Manual hydraulic steering mechanics

Fig.6 Block diagram of steering mechanics

Fig.7 Frequency characteristics of helm reaction torque

Table3 Example of helm reaction torque

Flow velocity [Kn]	2.5	10
Rudder angle [deg]	25	5
Normal pressure [N]	4.75	15.7
Frequency [rad/s]	1	0.4
Gain [dB]	-20	-30
Helm reaction torque [N]	0.475	0.496

Fig.8 Initial condition response of rudder angle

4 結言

Ship Simulator 2008 を用いたシミュレーション実験によって小型船舶の操縦性を明らかにした。プロペラ回転数、舵角に対して操縦性は強い非線形動特性を有するので、操船にはある程度の経験が必要となることがわかった。次に、油圧操舵機構の数学モデルを基に小型船舶の操舵感覚について検討した。油圧操舵機構では反力感を得られずセルフステア性が低下する状況があることから、操船者にとって常に十分な操舵感覚を得られない可能性があることがわかった。

最後に、本研究は平成 21 年度ユニオンツール育英奨学会研究助成金によることを記し、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] 中谷, 小型船舶の操縦性と制御について, 富山船高等専門学校研究集録, 41, 23/27, 2008.
- [2] 大津, GPS を利用した船舶の誘導について, 計測と制御, Vol.44, 254/259, 2005.
- [3] 本田, 操船通論, 成山堂書店, 2000.