数学モデルの要件とその確認方法

はじめに

研究会資料 3-2 S4 で示した審査フローに則って自動運航船に搭載される操船制御システムに対する試験が行われる。その試験においてシミュレータの利用が有効と思われるもの（例えばソフトウェア試験における制御アルゴリズムの検証）には，搭載する船舶の運動を模擬したシミュレータが必要となる。そこで本資料は，搭載する船舶の運動を再現する「シミュレータの運動計算部」に求められる要件（対象船舶の数学モデルの要件）を規定するとともに，その確認方法について例示する。

1. 対象船舶の数学モデルの要件

要件 1
操船制御システムの制御手段として使用されるアクチュエータ[1]の組合せとその操作による操縦運動[2]が適切に計算できること
要件 2
アクチュエータへの操作指令に対する実作動量の応答が適切であること
要件 3
潮流と風の外乱影響を考慮した操縦運動が適切に計算できること
要件 4
位置，方位，速度に波の周波数程度のノイズ[3]を考慮できること
要件 5
操船制御システムが必要とする演算周期以内で操縦運動を出力できること

2. 要件の確認方法について

2.1 前提条件

シミュレータに用いられている数学モデルが上記(1)～(5)の要件を満足していることを確認する方法として，2.2 以降の内容を示す。なお，特段の記載がない限り，平水中でのシミュレーションを行うものとする。

---

[1] 操船装置（例えば，プロペラ，舵，スラスタ等）を指す。
[2] 船体重心（あるいは船体中央）の前後，左右運動（加速度，速度，位置）および回頭運動（角加速度，角速度，方位）を指す。
[3] 制御アルゴリズムの検証では，波による動揺成分（周波数）の振動を抑制できることを確認する必要がある。そのため，位置，方位，速度にその周波数相当のノイズを入力できることが求められる。

2.2　　要件 1 の確認方法

操船制御システム評価用のシミュレータにおいて，再現されるべき操船要素を第二回研究会にて整理した（資料 2-2 参照）。そこで，離着桟操船を含む港内操船において重要かつ代表的な操船要素が含まれるような操船パターンをシミュレーションで再現し，その運動の妥当性を評価項目における参照値を基に確認することとする。アクチュエータの構成が 1 軸 1 舵（固定ピッチプロペラと通常舵）サイドスラスタつき（バウスラスタ，スタンスラスタ）の場合について，再現すべき操船パターンを表 1 に示す。他のアクチュエータ構成については，申請者がこれらの内容を参考に確認方法を定めることとする。なお，外力要素についてはここでは確認しない（別の要件にて確認する）。以下，それぞれの操船パターンについて具体例を交えて説明する。

表 1　　要件 1 を確認するための操船パターン

サイド スラスタ	操船パターン	操船要素	評価項目	評価の参照値 （統計データは Appendix 参照）
使用しない	(1) 直進 （船速と回転数の関係）	加減速・前後進	前進船速と回転数の比 後進速度と前進速度の比	海上公試の統計データより， $V/nD = 0.6\sim1.0$ $\lvert V_{\mathrm{astern}}\rvert/V_{\mathrm{ahead}} = 0.3\sim0.7$
	(2) 舵角 35 度旋回	旋回	縦距（A_{d}） 旋回圏（D_{T}）	海上公試の統計データより， $A_d/L_{\mathrm{pp}} = 2.5\sim4.0$ $D_{\mathrm{T}}/L_{\mathrm{pp}} = 2.5\sim4.5$ ただし，L_{pp}は対象船の垂線間長を表す
	(3-1) 10/10 zig-zag 操舵	前進・保針・変針	1st overshoot angle (Ψ_{10}, Ψ_{20})	海上公試の統計データより， $\Psi_{10} = 3\sim12$ [deg.]
	(3-2) 20/20 zig-zag 操舵			海上公試の統計データより， $\Psi_{20} = 6\sim24$ [deg.]
	(4) プロペラ逆転停止・後進試験 (Harbor half ahead →Harbor full astern)	停止，後進	停止距離（D_{stop}）	海上公試の統計データより， $D_{\mathrm{stop}}/L_{\mathrm{pp}} = 3.0\sim8.0$
	(5) 舵角 35 度加速旋回 （停止状態からの旋回）	加速・旋回	縦距（A_{d}） 旋回圏（D_{T}）	模型実験，シミュレーションから $A_d/L_{\mathrm{pp}} = 0.5\sim2.0$ $D_{\mathrm{T}}/L_{\mathrm{pp}} = 1.0\sim3.0$
使用する	(6) 離着桟操船	横移動，その場回頭	表 2 参照	表 2 および 2.2.7 参照

2.2.1　直進（船速と回転数の関係）

(a) 前進時

いくつかの正転プロペラ回転数において，直進のシミュレーションを実施し，定常状態における対水船速V [m/s]とプロペラ回転数n [rps]の比を計算する。そして，この比 $V/nD = 0.6\sim1.0$（D：プロペラ直径[m]）となることを確認する。

(b) 後進時

ある回転数を設定し，正転時（前進）と逆転時（後進）でそれぞれ直進のシミュレーションを実施する。そして，後進速度V_{astern}と前進速度V_{ahead}の比$|V_{\mathrm{astern}}|/V_{\mathrm{ahead}} = 0.3\sim0.7$となることを確認する。ただし，プロペラ逆転時の直進シミュレーションは舵角 0 度で実施し，必ずしも直進する必要はない。

2.2.2　舵角 35 度旋回

Harbor half ahead（約 10knots）で直進中に舵角 35 度で旋回させるシミュレーションを実施する。縦距A_{d} (Advance) と旋回圏D_{T} (Tactical diameter) を測定し，$A_d/L_{\mathrm{pp}} = 2.5\sim4.0, D_T/L_{pp} = 2.5\sim4.5$（$L_{pp}$：対象船の垂線間長[m]）となることを確認する。

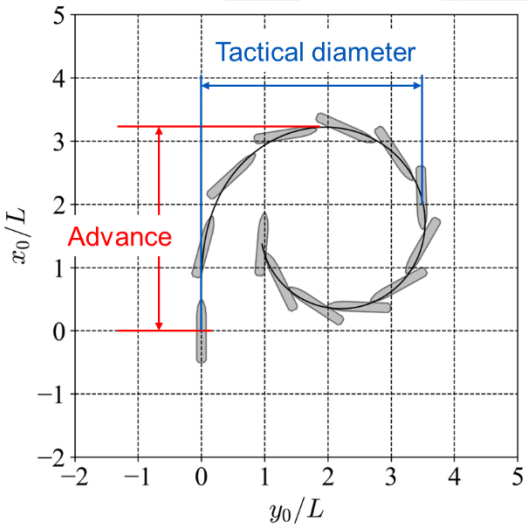


図 1　　35 度旋回試験のシミュレーション例

2.2.3　10/10 zig-zag 操舵・20/20 zig-zag 操舵

10/10 zig-zag 操舵では，Harbor half ahead（約 10knots）で前進している状態から舵角 10 度を取り，方位角が 10 度になったら逆側に舵角 10 度を取る。方位角が-10 度になったら逆側に舵角 10 度を取る。これを繰り返したシミュレーションを実施し，第一行き過ぎ角Ψ_{10}（1st overshoot angle）の値を測定する。20/20 zig-zag 操舵では，同様の操船シミュレーションを舵角 20 度，方位角 20 度で実施し，同様に第一行き過ぎ角Ψ_{20}を測定する。そして，$\Psi_{10} =$

$3\sim12\ [\mathrm{deg.}], \Psi_{20} = 6\sim24\ [\mathrm{deg.}]$となることを確認する。

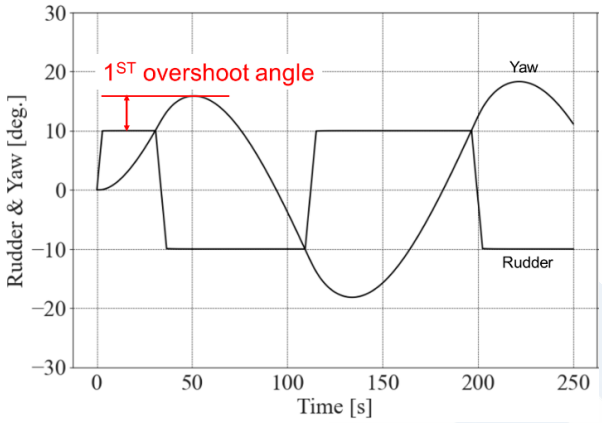


図 2　　10/10 zig-zag 操舵のシミュレーション例

2.2.4　プロペラ逆転停止・後進試験

Harbor half ahead（約 10 knots）で直進中にプロペラ逆転 Harbor full astern（前進約 12 knots 相当のプロペラ回転数）の指示を出して停止，引き続いて後進するシミュレーションを実施する。そして，停止距離D_{stop}（Track reach）が$D_{\mathrm{stop}}/L_{\mathrm{pp}} = 3.0\sim8.0$ となることを確認する。また，停止から後進するまでに至る運動航跡についても確認する。

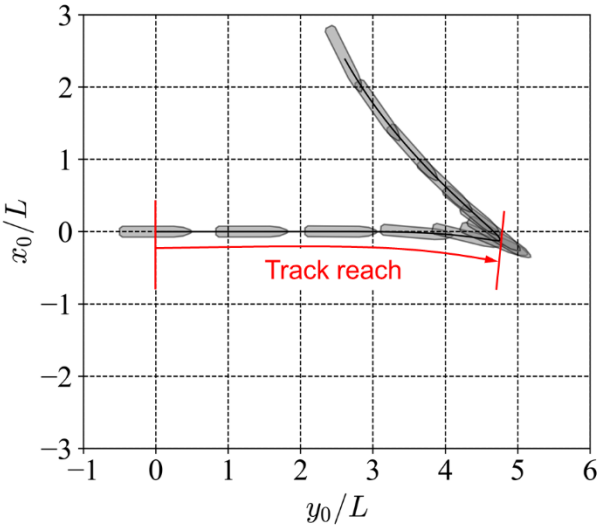


図 3　　プロペラ逆転停止のシミュレーション例

2.2.5　舵角 35 度加速旋回

停止状態からプロペラ回転数を Harbor half ahead に増速すると同時に，舵角 35 度で旋回させるシミュレーションを実施する。縦距A_{d}（Advance）と旋回圏D_{T}（Tactical diameter）を測

定し，$A_{\mathrm{d}}/L_{\mathrm{pp}} = 0.5\text{~}2.0, D_{\mathrm{T}}/L_{\mathrm{pp}} = 1.0\text{~}3.0$となることを確認する。

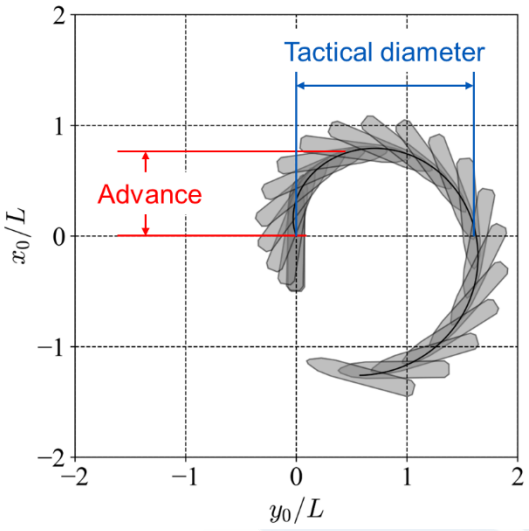


図 4　　35 度加速旋回試験のシミュレーション例

2.2.6　離着桟操船

停止状態から表 2 に示したアクチュエータ出力の組み合わせによるシミュレーションを実施して，主に離着桟操船時に使用する操縦運動の様子を確認する。また，表 2 に示した評価項目における参照値を基に運動の妥当性を判断する。なお，運動モデルの確認が目的であることから，フィードバック制御をかけないシミュレーションを実施する。

表 2　　アクチュエータの組み合わせ

	舵[deg.]	プロペラ回転数[%]	バウスラスタ[%]	スタンスラスタ[%]	評価項目
(a-1)	0	0	100	0	90 度回頭時間
(a-2)	0	0	0	100	90 度回頭時間
(b)	0	0	100	100	移動時間
(c)	0	0	100	-100	90 度回頭時間
(d)	0	100	100	100	運動航跡（定性評価）
(e)	0	-100	100	100	運動航跡（定性評価）
(f)	-35	100	100	0	運動航跡（定性評価）

※1 プロペラ回転数の 100 %は，Dead Slow/Dead Slow Astern（前進約 5knots 相当）とする
※2 スラスタの 100 %は申請者で設定すること（例えばスラスタの定格推力）

(a) 船首方向がx_0軸正方向となるよう原点に停止した状態から，バウスラスタまたはスタンスラスタのみを作動させ，おおよそ270度旋回するシミュレーションを実施する。そのとき

の運動航跡を定性的に確認するとともに, 90 度回頭するまでにかかる時間t_{90}[sec]を測定し, $t_{90}/\sqrt{\Delta L_{pp}/Y_{\mathrm{T}}} = 1.2\sim2.4$（$\Delta$: 船の排水量[MT], Y_T : スラスタ推力[kN]）となることを確認する。

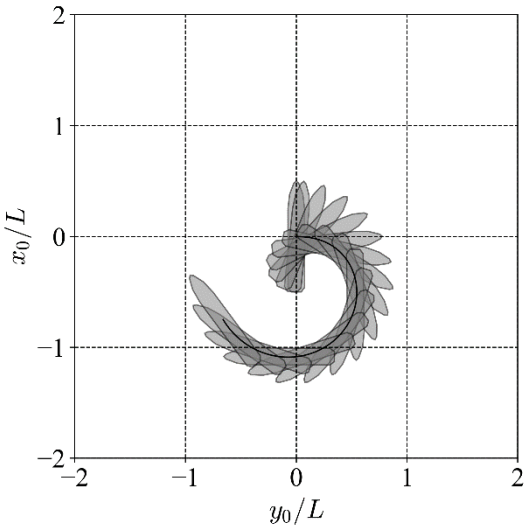


図 5-1　シナリオ(a)のシミュレーション例

(b) 船首方向がx_0軸正方向となるよう原点に停止した状態から，バウスラスタおよびスタンスラスタを同推力同方向で作動させ, 横移動のシミュレーションを実施する。その時の運動航跡を定性的に確認するとともに，y_0軸方向に一船長（L_{pp}）進むまでにかかる時間t_Lを測定し，$t_L/\sqrt{\Delta L_{pp}/Y_{\mathrm{T}}} = 2.4\sim4.8$となることを確認する。

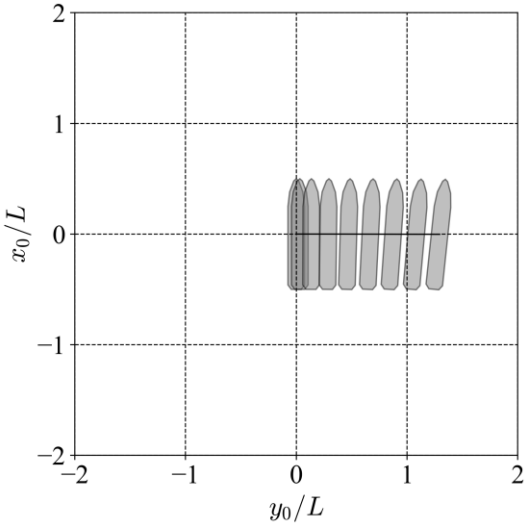


図 5-2　シナリオ(b)のシミュレーション結果の例

(c) 船首方向がx_0正方向となるよう原点に停止した状態から，バウスラスタおよびスタンス

ラスタを同推力逆方向で作動させ，その場回頭のシミュレーションを実施する。その時の運動航跡を定性的に確認するとともに，90 度回頭するまでにかかる時間t_{90}を測定し、$t_{90}/\sqrt{\Delta L_{pp}/Y_{\mathrm{T}}} = 1.2\sim2.4$となることを確認する。

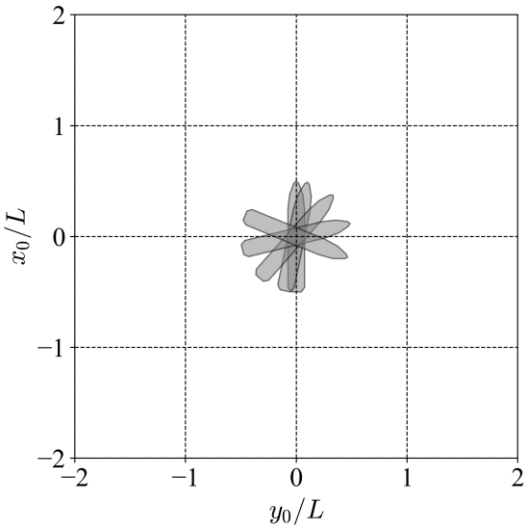


図 5-3　シナリオ(c)のシミュレーション結果の例

(d) 船首方向がx_0正方向となるよう原点に停止した状態から，バウスラスタおよびスタンスラスタを同推力同方向で作動させると同時に，プロペラ回転数を Dead slow（約 5knots） 相当にする。そして，おおよそ$10 \cdot \sqrt{\Delta L_{pp}/Y_{\mathrm{T}}}$秒間シミュレーションを実施し，運動航跡を定性的に確認する。

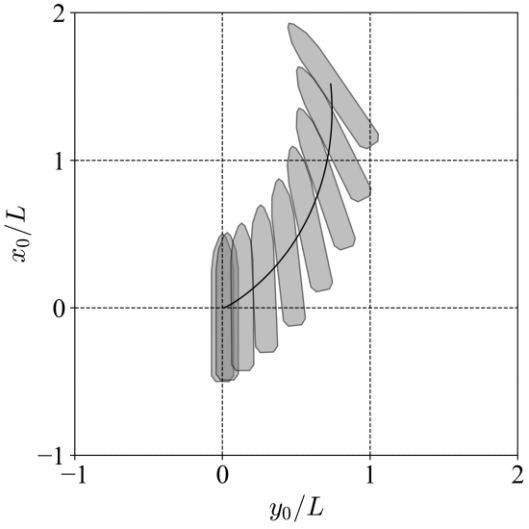


図 5-4　シナリオ(d)のシミュレーション結果の例

(e) 船首方向がx_0正方向となるよう原点に停止した状態から，バウスラスタおよびスタンス

ラスタを同推力同方向で作動させると同時に，プロペラ回転数を Dead slow astern 相当にする。そして，おおよそ$10 \cdot \sqrt{\Delta L_{pp}/Y_{\mathrm{T}}}$秒間シミュレーションを実施し，運動航跡を定性的に確認する。

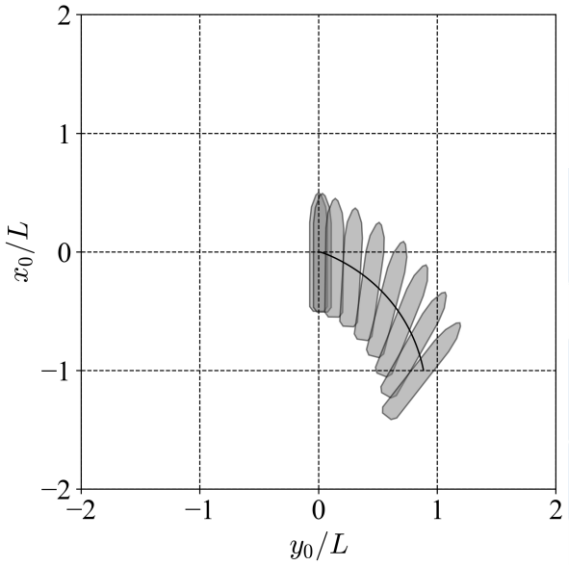


図 5-5　シナリオ(e)のシミュレーション結果の例

(f) 船首方向がx_0正方向となるよう原点に停止した状態から，バウスラスタを作動させると同時に，プロペラ回転数を Dead slow 相当，舵角を-35 度にする。そして，おおよそ$10 \cdot \sqrt{\Delta L_{pp}/Y_{\mathrm{T}}}$秒間シミュレーションを実施し，運動航跡を定性的に確認する。

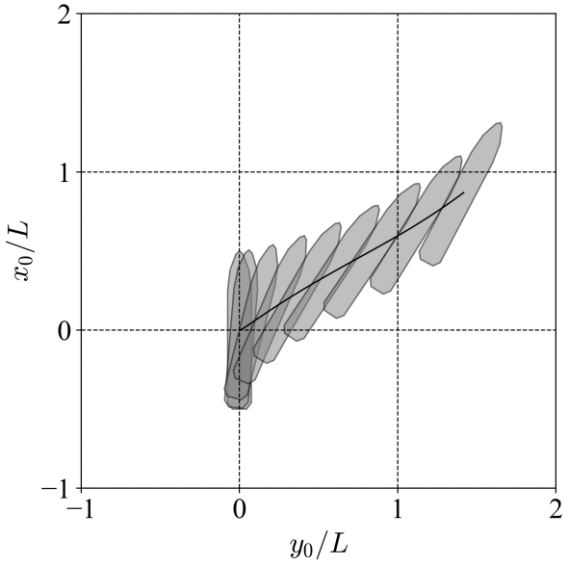


図 5-6　シナリオ(f)のシミュレーション結果の例
（スラスタの推力によって動きが異なることがある）

2.3　　要件 2 の確認方法

少なくとも，2.2.3 10 度 zig-zag 操舵および 2.2.4 プロペラ逆転停止のシミュレーション結果において，アクチュエータの指令に対する実操作量の応答計算結果（時系列）を示すとともに，実操作量の最大変動速度を設定できることを示す。

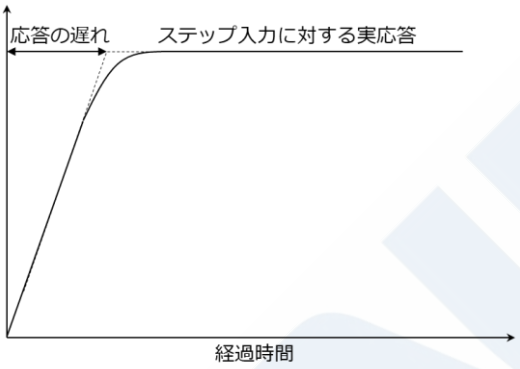


図 6　　応答計算結果の例

2.4　　要件 3 の確認方法

2.2.2 舵角 35 度旋回（初速：10knots）において正面からの潮流，定常風のそれぞれを与えた場合についてその運動航跡を計算し，定常旋回時の Drift（360 度旋回の漂流量）を基に確認することにする。外乱の与え方については参照値を表 3 に示す。

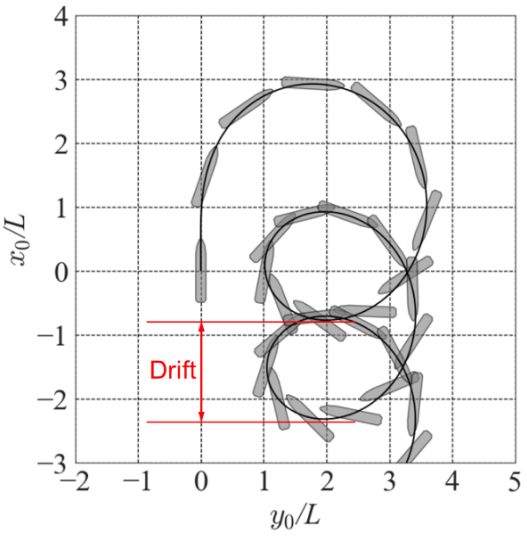


図 7　　潮流中 35 度旋回試験のシミュレーション例

表 3　　外乱の与え方に関する参照値

外力	外乱の強さ	操船パターン
潮流	潮流速度 =1.0 knots	舵角 35° 旋回
定常風	風速　　=15 m/s	舵角 35° 旋回

2.5　　要件 4 の確認方法

Harbor half ahead（約 10 knots）の定常直進シミュレーションにおいて，0.1~1 Hz 程度のノイズを位置，方位，速度に付加し，シミュレーション結果の時系列データにノイズの影響が反映されていることを確認する。なお，模擬の方法については IEC62065 に示された方法や正弦波の足し合わせといった方法が考えられる。

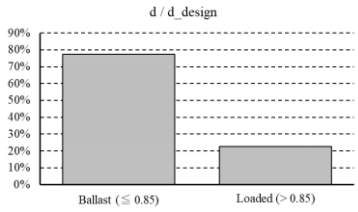
2.6　　要件 5 の確認方法

以下の確認方法が考えられる。

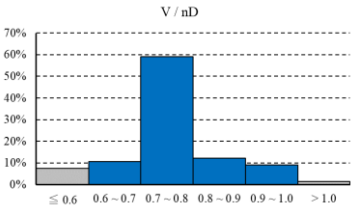
- シミュレーションの計算時間ステップが，操船制御システムの演算周期以下であることを確認する。
- シミュレーション計算にかかった実時間を計測し，操船制御システムで設定されている時間以下であることを確認する。

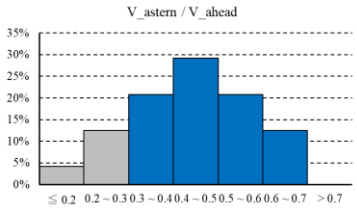
APPENDIX　海上公試の統計データ（ヒストグラム）

(1) 載荷状態

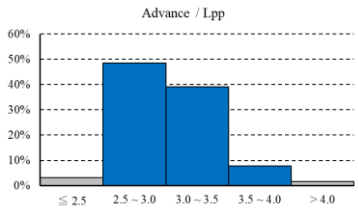


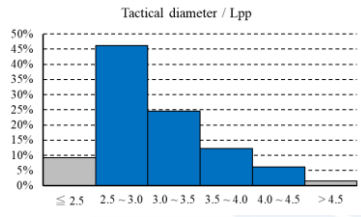
(2) 直進



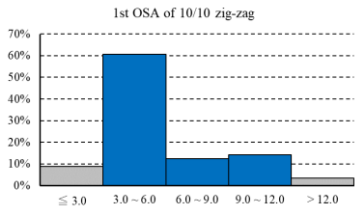


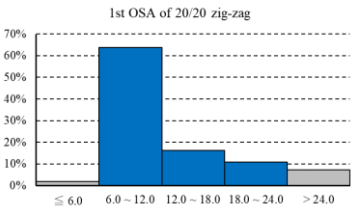
(3) 舵角 35 度旋回



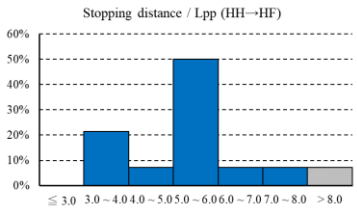


(4) Zig-zag 操舵

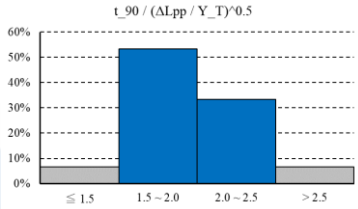




(5) プロペラ逆転停止



(6) 離着桟操船（バウスラスタ試験）



注意事項

- 海上公試の約 3/4 がバラスト状態で実施されているため，Z 試験のオーバーシュート角は小さい値の頻度が高い。
- 後進速度は，プロペラ逆転停止試験時に計測された値であり，後進整定までの時間が十分とられていないケースや旋回を伴うケースが散見された。（後進速度は低めに出ている可能性がある）
- バウスラスタ試験の整理に用いたスラスタ推力Y_Tはカタログ値である。