

水域施設計画へのシミュレータの応用

Application of Ship Maneuvering Simulator to Port Planning

奥山有英*

早藤能伸**

清水勝義***

By Yasuhide OKUYAMA, Yoshinobu HAYAHUJI, Katsuyoshi SHIMIZU

Thanks to the striking development in the science and technology these days, ship maneuvering simulators having almost compatible maneuvering performance as that of real ship have been developed and they are actively used in the training and education of ship's officers. As a result, real ship experiments which have long been impracticable are now available through the use of such simulators. In this connection, attempts were made also in the area of port planning to assess the adequacy of a port construction plan by using a ship maneuvering simulator. Here, a real time type simulator and a fast time type simulator employed in the port construction plan will be given considering wave, wind, current, shallow effects, bank effects and tagboat assistance.

1. はじめに

電子計算機の驚異的な発展によって、従来では実験で確認していた事柄が数値計算にとって代わるようになった。実際、シミュレーションという術語も当初は乱数を利用したモンテカルロシミュレーションを意味する場合がほとんどであったが、現在では熱伝導や拡散計算等に見られるように現象を説明する理論式を立てて、その理論式を計算機によって解く場合に熱伝導シミュレーションとか拡散シミュレーションと呼んでおり、範囲が広がった。シミュレータはシミュレーションに含まれるが、計算ばかりでなく時間も実時間に合わせ環境も実際と同じよ

うにしているのが一般的である。航空機や船舶等の操縦シミュレータは、乗員の訓練等に利用されている。また、港湾技研では、既に船舶の操縦シミュレータをもとにしてリアルタイム型のシミュレータを水域施設計画に利用することを試みた¹⁾²⁾。その利用をとおして、水域施設の計画では、実時間である必要が無い場合もあること、機能の付加・拡充にはシステムとして完結したシミュレータでは融通が効かない場合も生ずることから、ファーストタイム型でしかも機能の付加・拡充に適する多くのサブルーチンからなるソフトウェアを開発した。またこれに合わせて、従来のリアルタイム型シミュレータの改良を行なった。ここでは、その概要と適用について報告する。

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 システム研究室長 (〒239 横須賀市長瀬 3-1-1)

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 主任研究官

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 システム研究室

2. シミュレータソフトウェアの構成

本ソフトウェアは、船舶の操縦シミュレーション計算を、実際の運航に即した条件のもとで行うもの

であり、時々刻々の船の運動に応じた流体力および外力を操縦運動数学モデルによって計算するサブルーチン群、船の運動を計算する数値計算サブルーチン、これらをコントロールするメインプログラムにより構成されている。このソフトウェアは、船体関係については、①船体流体力、②プロペラ力、③舵力、主機はディーゼル機関として応答計算を行い、外力は①風圧力、②波浪漂流力、③潮流力、④浅水影響、⑤側壁影響、⑥タグボートの使用を同時に計算できる。さらに、時々刻々の①操船指令、②環境条件、③船の運動、④船にかかる力およびモーメントを出力できる。なお、浅水影響、側壁影響、タグボートの使用は今回新たに付加した機能である。図-1は本ソフトウェア全体のフローチャートを示したものであり、シミュレーションは、図の(2)~(5)のプロセスを必要だけ繰り返して終了する。

2.2 操縦運動計算法

本ソフトウェアで取扱う操縦運動は、水平面の運動（前進、横流れ、旋回）にプロペラ回転系を加えたものであり、運動方程式は図-2に示す船の重心に原点を置いた船体固定座標系を用いて次式で表わされる。

$$\text{前進} \quad m(u-vr) = X_H + X_P + X_R + X_T + X_W + X_{WV} + X_C + X_B$$

$$\text{横流れ} \quad m(v-ur) = Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_W + Y_{WV} + Y_C + Y_B$$

$$\text{旋回} \quad I_{ZZ} \cdot r = N_H + N_P + N_R + N_T + N_W + N_{WV} + N_C + N_B$$

$$\text{プロペラ回転} \quad 2\pi I_{PP} \cdot n = Q_E + Q_P$$

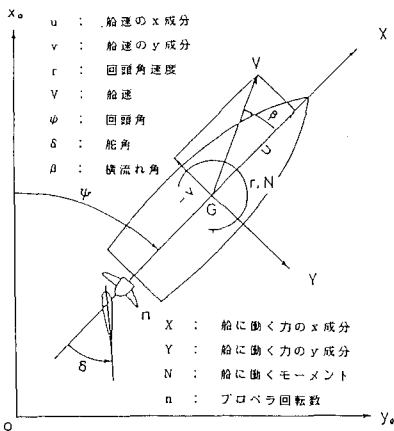


図-2 座標系

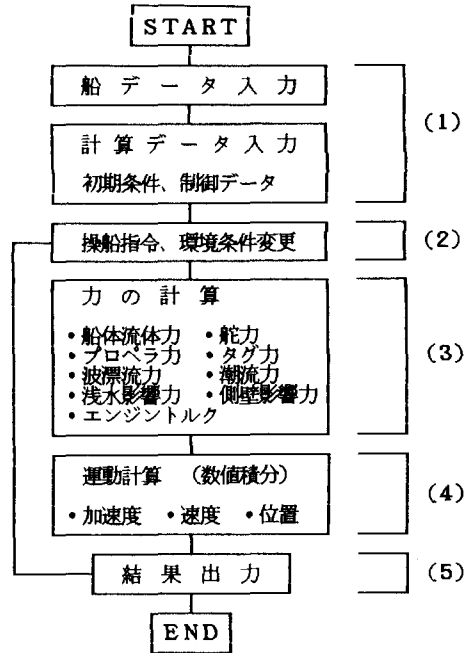


図-1 フローチャート

ここで u 、 v は対地速度の X 、 Y 成分を表わし、添字 H 、 P 、 R 、 T 、 W 、 WV 、 C 、 B 、 E を付した項は、それぞれ船体、プロペラ、舵、タグ、風、波、潮流、側壁、主機による力およびモーメントを表わす。図-3にタグ力、風、波、潮流の方向を示し、図-4に側壁影響を算定する際に必要な量の定義を示す。

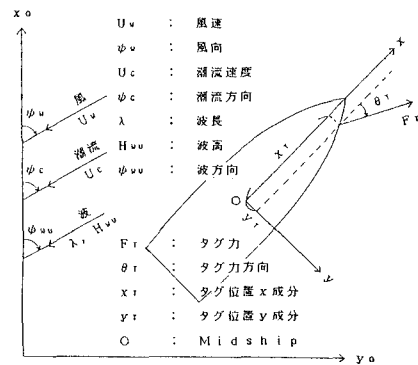


図-3 タグ力、外乱

図-2で u 、 v 、 r 、 V 、 X 、 Y 、 N 、 n 、 ψ 、 δ 、 β は、船速の X 成分、 Y 成分、回転角速度、船速、船に働く力の X 成分、 Y 成分、船に働くモーメント、プロペラ回転数、回頭角、舵角、横流れ角である。図-3で、 F_T 、 θ_T 、 x_T 、 y_T 、 O 、 U_W 、 ψ_W 、 U_C 、 ψ_C 、 λ 、 H_{WV} 、 ψ_{WV} は、タグ力、タグ力方向、タグ位置 X 成分、 Y 成分、船の重心、風速、風向、潮流速度、潮流方向、波長、波高、波方向を示す。図-4で、 Y_B 、 W 、 h 、 H は水路中央からの偏差、水路幅、水路深さ、水深である。

各々の力およびモーメントは時々刻々の船体運動（位置、速度、加速度）、操作量（舵、プロペラ、タグ力の大きさと方向）、環境条件（外乱、地形）の関数となるが、これらは理論および実験データによって裏づけされた数学モデルを用いて表現されている。この数学モデルによりある時刻の船体に働く力が計算されると上記の運動方程式から船体あるいはプロペラ回転の加速度が求まり、さらにこれらを数値積分することによって時々刻々の速度および位置が計算される³⁾。

3. リアルタイム型シミュレータ

3.1 概説

海上の交通の場である港内や航路においては、潮流・風・波などの気象・海象条件、他船の航行との相互関係、水深の変化、タグポートを利用した操船など、時々刻々と変化する条件の中での操船となるため、操船者がそのつど下す判断の良否が問題となる。そのため水域計画においては、これらの条件を忠実に再現し操船者の判断を考慮した検討を行う必要がある。

リアルタイム型シミュレータによる実験では、船長や航海士等の船舶操縦経験者が船橋（ブリッジ）における操舵、主機操縦等の模擬操船を行うことにより、個々の具体的な水域計画における施設の形状や規模等についての、操船者側の視点から評価が行える。

3.2 実験方法の概要

まず、実験開始前に以下に示すような条件等を設定する。

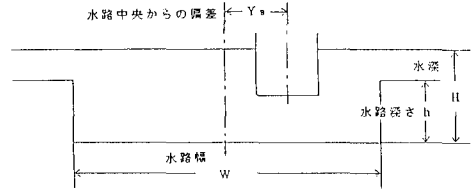


図-4 水路断面

1) 水域条件の設定

防波堤・パース・航路等の位置・形状、及び今回新たに導入した機能である側壁影響、浅水影響を考慮する場合は水深・水路幅・側壁の高さ等の条件を、水域計画に基づき設定する。

2) 気象・海象条件の設定

風向・風速、波向・波高・波長、潮流（方向・速さ）を設定する。

3) 対象船舶（自船）の選択

4) 他船の設定

他船の数は同時に10船まで可能で、1隻ごとにコースと速力を設定する。

5) 自船の初期位置・針路・速力の設定

6) タグポート

タグポートを利用した操船実験を行う場合には、その隻数（5隻まで可能）、及び1隻ごとのタグ力の大きさ・作用位置・作用方向を設定する。

操船実験は、以上の条件を設定してから、自船の主機操作・舵操作を行って、所定の出入港操船等を実時間で実施する形で行なわれる。運動結果及びすべての操船操作は磁気テープに記録され、各種の解析に用いられとともに、場合によっては、プレイバックにより操船状況の再現にも利用される。

また以上の条件のうち、気象・海象条件、他船のコース・速力の条件は、任意の時刻に自由に変更が可能であり、これらの変更操作は操船者以外の実験者により行われる。

3.3 視覚再現部の改良

視覚再現部は、方位表示計・船速計等とともに、操船者に対し船舶操縦に必要な多くの情報を与えるものであるが、従来のリアルタイム型シミュレータの視覚再現部は、地形固定の平面図描画方式であり常に北が上方であるので、南航の場合に画像と操舵が逆になり、また平面図では、実際の操船の臨場感がないとの指摘があり改良が望まれていた。

今回改良した視覚再現部は自船固定の平面図描画方式、及び自船ブリッジから眺めた刻々と変化する

景観を表示する3次元描画方式を採用しており、いずれの方式でも2秒間隔で表示する。なお、上記3つの描画方式は実験中任意に切り換えることができる。

3次元描画方式においては、自船・他船及び地上の建物などの物体を直方体で表現しており、また視点高・視界の角度・視線方向を自由に変更することもできる。図-7は図-6に示した視界角度 ± 50 度の範囲を視点高さ40mから眺めたときの図である。

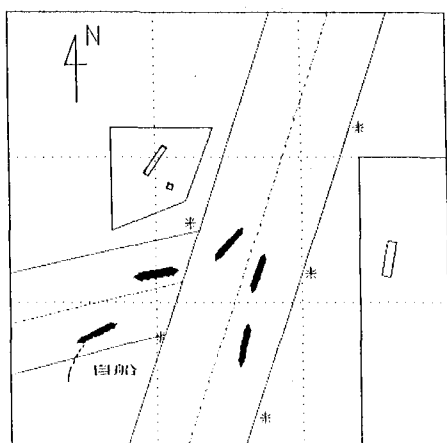


図-5 地形固定の平面図描画方式

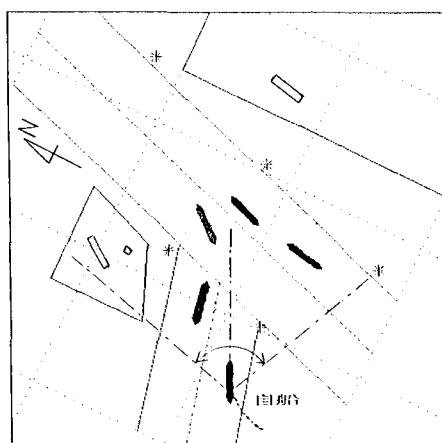


図-6 自船固定の平面図描画方式

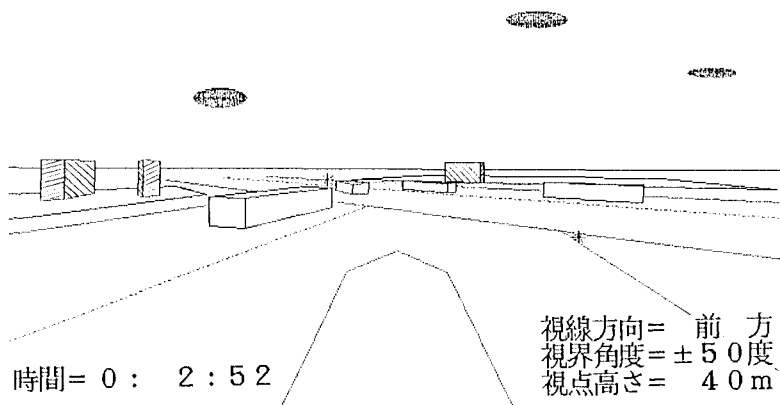


図-7 3次元描画方式

4. ファーストタイム型シミュレータ

4.1 概説

従来のシミュレータはリアルタイムで動作することから、一実験に30分以上かかるのが通例で数時間に及ぶこともあり、実験によっては実時間である必要がないという問題に直面した。

今回開発したファーストタイム型のシミュレータは、実時間ではなく電子計算機の演算速度で実験が終るもので、船舶の旋回性能、減速性能、加速性能、変針性能などを求める実験のように、操船者の判断を考慮する必要が無く、考慮すべきパラメータの組合せが非常に多い実験を短時間に行なえるようになった。

また、実時間ではないが一定時間間隔での操船指令の入力、及び、数ステップ戻っての実験再開ができるので、ある程度操船者の判断を考慮することもできる。

ここでは、このファーストタイム型シミュレータによる実験の結果を、旋回運動、風の影響、減速性能、及び今回新たに付加した機能である側壁影響、浅水影響を例に紹介する。

4.2 船舶モデルの諸元

4.3 ~ 4.7で述べる実験例は、以下に示すような諸元の船舶モデルを用いている。

船種 : 20000 ton BULK CARRIER
 垂線間長 : 155.0 m 型幅 : 24.0 m
 型深さ : 14.9 m 主機形式 : ディーゼル
 喫水 : 11.0 m (5.7 m)
 方形係数 : 0.778 (0.723)
 トリム : 0.0 m (1.7 m)
 排水量 : 33230 ton (15700 ton)
 プロペラ翼数 : 5 プロペラ直形 : 5.7 m
 舵面積 : 28.0 m² (27.4 m²)
 舵面積比 : 1/60.9 (1/32.3)
 風圧正面積 : 400 m² (530 m²)
 風圧側面積 : 1230 m² (2050 m²)
 主機馬力 (MCO) : 12000 HP
 主機回転数 (MCO) : 124 rpm

なお、上記諸元は満載状態におけるものであり、括弧内はバラスト状態における諸元である。

4.3 旋回運動

船が舵角0度で直進している状態から、ある舵角を与えてそれを保持したままであれば、船は回頭しながら図-8に示したように曲線運動を開始し、いずれはその舵角に対応する定常の回頭角速度、船速に達し、一定の中心の周りの円運動を行うようになる。

この運動の性質を旋回性能と呼び、操船の上からは、例えば衝突や座礁を回避する場合のように、回頭が早く行なわれること、また軌跡円の径が小さいことなどが要求される場合に重要な性質である。

図-9は舵角と旋回径・定常旋回径・縦距・横距の関係を示したものである。

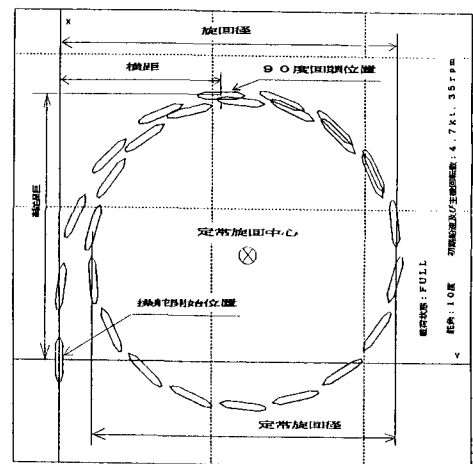


図-8 旋回運動

4.4 浅水影響

水深が浅くなると、舵力の低下や船体が水から受ける回頭モーメントの増加など、操船上好ましくない影響を受けて旋回性能は低下し、水深が極度に減少すると、遂には操舵に対して希望する回頭が得られず、操縦不能の状態に達することもある。

図-10は水深の減少による旋回運動の変化を、図-11は水深と定常旋回径の関係をそれぞれ示したものであるが、定常旋回径は、水深が小さくなるに従い急激に増大することがわかる。

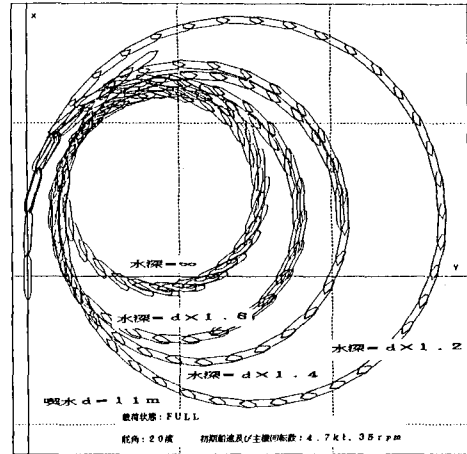


図-10 水深の変化による旋回運動の変化

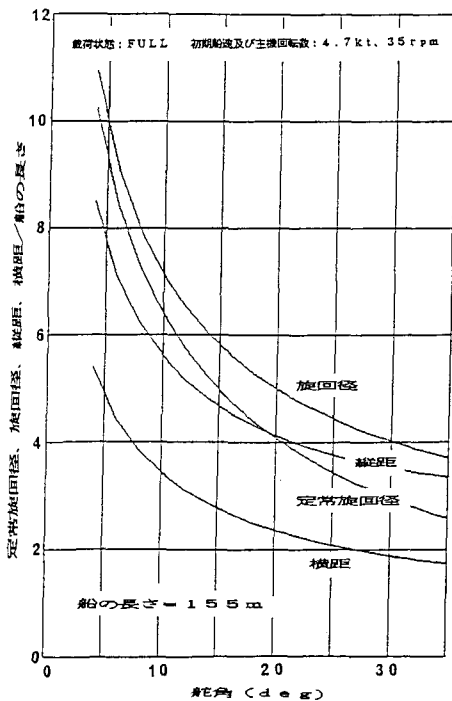


図-9 舵角による旋回運動の変化

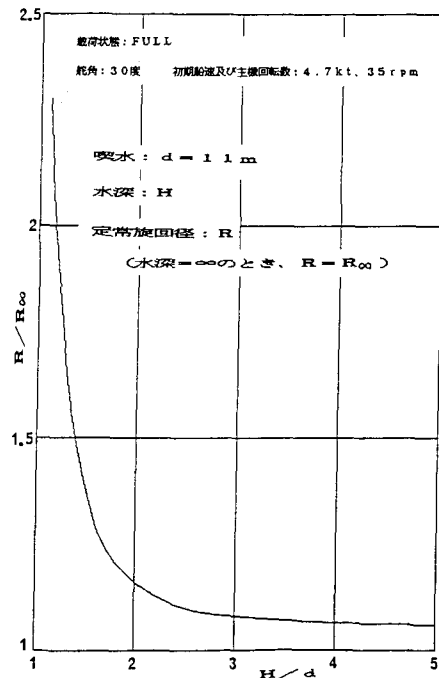


図-11 水深と定常旋回径の関係

4.5 側壁影響

運河や河川を航走するときのように水路の幅が制約されるときは、船体の周りでの流れの変化が激しくなり、船首と側壁との間の水位増加、船側から船尾にかけての水位低下などの影響により、船首は側壁から反発され、一方船尾は側壁に向って吸引される流体力を受ける。

そのため、船が水路中央を航走し、左右の側壁から全く対称的な反発及び吸引作用を受けるならば、船はそのまま釣合いを保って直進を続けるのであるが、水路中央ではなく、いずれか一方の側壁に接近して航走するときは、図-12のように回頭しながら原針路からそれるような運動をする。

図-13は側壁の高さと原針路からの変位の関係を示したものであるが、側壁が高くなり、また側壁に接近するに従い、原針路からの変位が急激に増大することがわかる。

4.6 操船におよぼす風の影響

船が船首・船尾方向以外の方向から風を受け、かつその作用中心が船の回頭軸に一致しないときは、船に回頭モーメントが与えられ、それに対応する釣合いの姿勢をとろうとして、風上または風下に向かって回頭するようになる。

このような風による回頭作用に対しては、あて舵をとって針路を保持させるのであるが、風速が非常に卓越したり船速が小さいときは、この所要のあて舵も非常に大きくなり、遂には一杯に舵角をとっても針路を保持できなくなる。

図-14は針路に対して90度の角度で風を受ける場合の、風速と、針路を保持するための所要舵角および横流れ角の関係を示したものであるが、操舵量はほぼ風速の2乗に比例し、船速の2乗に反比例して増加することがわかる。また、針路を保持するために必要な横流れ角の大きさも同様な傾向があるが非常に小さな値であり、実際の操船においては、この横流れ角の大きさは意識せずに所要保針舵角付近の操舵により、針路を保持するものと思われる。

4.7 減速性能

船が洋上を航走中、速力の調節を行なうことは特殊の例外を除いてほとんどない。しかし、港内や狭水道においては、障害物や衝突の回避、また安全に着岸するために十分な速力を保持する必要があるた

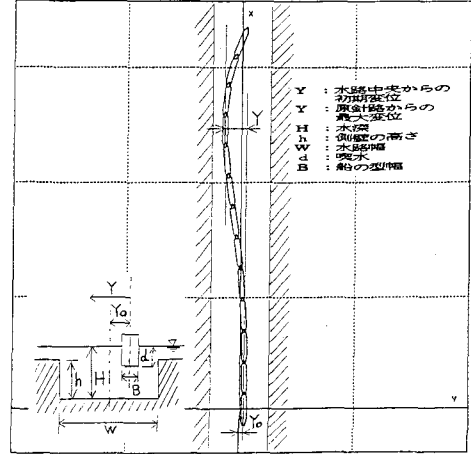


図-12 側壁影響

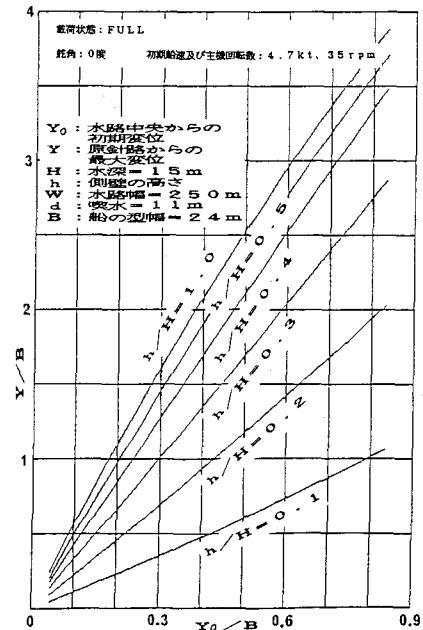


図-13 側壁の高さと原針路からの変位の関係

め、操船者は特に自船の減速性能を熟知して、安全かつ能率的操船を行わなければならない。

図-15は、ある回転数で機関を反転させた場合の、所定速力（ここでは2knot）に達するまでの航走距離を、機関を反転操作する前の速力をパラメータとして示したものであるが、軽貨状態と比較して満載状態では、約1.5～2.0倍の距離を要し、また、機関を単に停止させただけでは減速が困難であることがわかる。

5. おわりに

港湾計画にあたってのシミュレータの利用は操船訓練と異なり、港の近くにおける操船が重要であるが、従来のシミュレータで考慮できた風・波・潮流といった外力に加え、今回新たに、浅水影響・側壁影響・タグボートの利用などの外力が付加されたこと、および3.3で述べた視覚再現部の改良により、ケースバイケースで条件の異なる計画に対して、より忠実に再現された条件下での評価ができるようになった。

また、一つの水域計画が与えられたとき、非常に操船の上手な者がシミュレータで問題なく操船できたとしても、よい計画であるという保証はなく、各種の船舶性能図を基にした検討も行なうことが望ましい。4.で述べたファーストタイム型シミュレータによる実験は、さまざまな条件下における船舶の運動性能を、短時間のうちに評価することができるので、各種の船舶性能図を整備していく上で威力を発揮するものと考えられる。

6. 参考文献

- 1) 奥山：海上交通計画情報に関する研究、港湾技研資料No.536、運輸省港湾技術研究、1985.9
- 2) 奥山、早藤、吉田：水域計画シミュレータの操船実験について、土木学会第41回年次学術講演会、1986.11
- 3) 平野：初期設計時における船の操縦運動計算法について、日本造船学会論文集 147、1980
- 4) 岩井：操船論

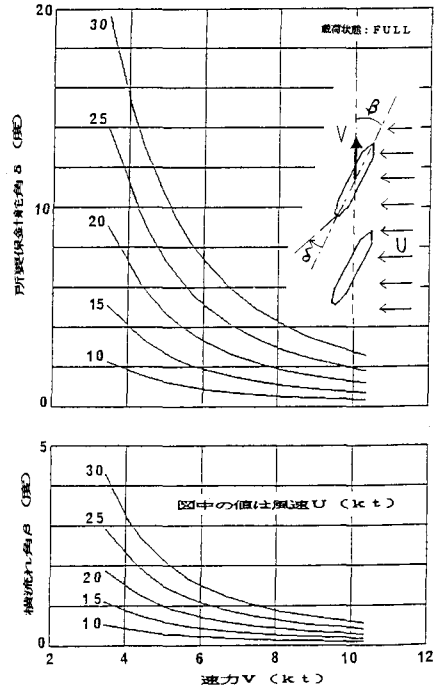


図-14 風速と保針所要舵角及び横流れ角の関係

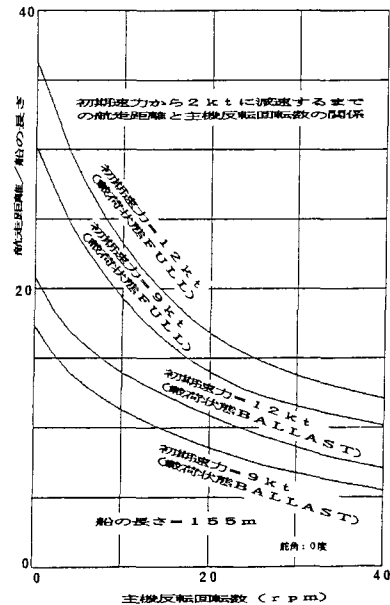


図-15 主機反転回転数と所定速力(2ノット)に減速するまでの航走距離の関係