



## 巨大船の操舵速度について

正員 元良 誠三\*

### 1. 緒 言

船の操舵時間は、現在、船の大きさに無関係にある時間に押えるように政府あるいは船級協会の規則に決められており、その状況は第1表に示す通りである。第1表からわかるようにほとんどすべての規則が SOLAS 条約に準じて片舷 35° から反対舷 30° まで 28 秒以内と定められている。最近 30 万トンを超えるタンカーが出現しつつあるが、このような大型船でも小船同様の操舵時間を要求することが妥当であるかどうかについて公に議

論されたのは、著者の記憶では昭和 40 年 7 月の操縦性シンポジウムで講師の岡田正次郎氏に対して同種の質問がなされた時だったと思われる。この時岡田氏は、巨大船は当然時定数が大きいので操舵時間を時定数に応じて長くするのが合理的ではないかと返答している。実際長さ 100 m 程度の船では船の舵に対する応答の時定数 (T) が 10 秒程度であって舵を片舷一杯に取る時間と同じ程度であり、したがって操舵速度の大小がかなり船の反応の速さに影響するが、10 万トン、20 万トンといった巨大船では時定数が 50 秒から 100 秒位あるので操

第1表 主操舵装置比較表

規則	動力操舵装置の要求	操舵可能最大舵角	操舵能力
SOLAS 条約	明記されず	最大航海速力で 35°-35° (旅客船)	最大航海速力で 35°-30°まで 28秒以内 (旅客船)
船舶設備規程	L > 60 m	国際航海の旅客船に対して最大航海速力で 35°-35°	国際航海の旅客船に対して、最大航海速力で 35°-30°まで 28秒以内
NK 規則	L > 60 m 或いは 上部舵頭材の規定の径 > 228.6 mm	Clean bottom calm sea計画夏季興水、連続最大出力の速力で 35°-35°	左記の速力で 35°-30°まで 28秒以内
LR 規則	旅客船 および 500 G.T. 以上の貨物船	動力操舵装置に対して、最大航海速力で 35°-35°	動力操舵装置に対して、最大航海速力で 35°-30°まで 28秒以内
AB 規則	L > 76 m 或いは 上部舵頭材の規定の径 > 228 mm	max. continuous rated shaft rpm. の速力で 35°-35°	動力操舵装置に対して、左記の速力で 35°-30°まで 28秒以内
NV 規則	明記されず	全 左	動力操舵装置に対して、Full speed で 30°-30°まで 30秒以内
漁船検査規則	明記されず	全 左	規定回転数の速力で 35°-35°まで 手動式 L < 21 m 30秒以内 21 ≤ L < 25 m 45 " L ≥ 25 m 60 " 機動式 25秒以内

舵時間を 10 秒や、15 秒程度長くしても船の反応速度は事実上ほとんど変わらない。このことが契機となりちょうど同年に海難防止協会で設置された船舶の設備の改善に関する研究委員会の操舵設備小委員会でのこの問題が取り上げられることになったり。なお参考までに同委員会の委員構成を附録 1 に示す。

当初この委員会では巨大船の操舵速度を小船並に早くするのは意味がないという見地から現行の 28 秒より遅くすることが討議された。しかしながら単に操舵速度を遅くするだけでは巨大船といえどもわずかながら船の反応が遅くなることは事実であり、一方巨大船の操縦性の劣化が問題にされつつある現況を考えると、例えわずかでも船の反応速度が遅くなり、したがって操縦性が劣化する方向に変えることは望ましくない。したがって単に合理的であるからというだけで操舵速度を遅くするのではなく、操舵速度を遅くすることにより余裕の出た操舵馬力を舵面積を増すことに振り向けて操縦性の向上を計ることを主旨とすることになった。

ここで操縦性というのは、緊急時——例えば衝突回避の場合——の操船性であって主としてアドバンスを小さくすることが衝突回避性能を向上させるものであるという観点に立って議論が進められた。

\* 東京大学工学部

2. 操舵速度と船の反応遅れおよび  
アドバンスの関係

1) 操舵速度と船の反応遅れ時間の関係

最初に操舵時間が船の反応の速さにどれほどの影響を持つかを検討して見よう。

船の操縦運動方程式は次のように線型化して書くことができる<sup>2)</sup>。

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \dot{\phi}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\dot{\phi}}{dt} + \dot{\phi} = K\delta + K T_3 \frac{d\delta}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\dot{\phi}$  は旋回角速度,  $\delta$  は舵角である。

また  $T_1 T_2 T_3$  および  $K$  は船型によって決まる係数である。今操舵時間  $t_1$  で舵角  $\delta_0$  を取り, 以後  $\delta_0$  を保持する場合を考えると操舵終了後の船の回頭角は,

$$\begin{aligned} \phi = & K\delta_0 \left[ t - (T_1 + T_2 - T_3) - \frac{t_1}{2} \right. \\ & + \frac{T_1 - T_3}{T_1 - T_2} \cdot \frac{T_1^2}{t_1} (e^{t_1/T_1} - 1) e^{-(t_1/T_1)} \\ & \left. - \frac{T_2 - T_3}{T_1 T_2} \cdot \frac{T_2^2}{t_1} (e^{t_1/T_2} - 1) e^{-(t_1/T_2)} \right] \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

で与えられ, これを図示すると第1図のようになる。もし船が操舵発令と同時に定常旋回に入ったとすると,

$$\psi = K\delta_0 t \dots\dots\dots (3)$$

となるはずであるから船は定常に達するまでに,

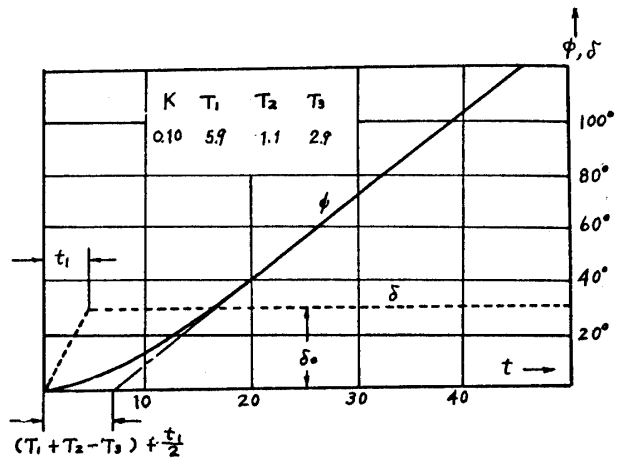
$$\Delta t = (T_1 + T_2 - T_3) - \frac{t_1}{2} \dots\dots\dots (4)$$

だけの時間遅れを生じることになる。あるいは野本氏の一次系近似を用いて時定数を  $T$  とすると,

$$\Delta t = T - \frac{t_1}{2} \dots\dots\dots (4')$$

と書くことができ, これだけの時間遅れを生じて定常旋回に入ることになる。例え操舵時間  $t_1$  を0にしても, 時定数  $T$  だけは遅れることになり時定数の大きな船では操舵時間を少々変えても小船ほどには時間遅れが大幅に変化しないことは明らかである。

(4)' より, 同じ船で操舵速度を変えて旋回実験を行なえば, 船の反応の遅れは操舵時間の変化の1/2だけ変わるはずである。この関係を検証するために船研, 阪大, 九大等で模型実験が行なわれたが, その結果は



第1図 回頭運動の線型計算の一例

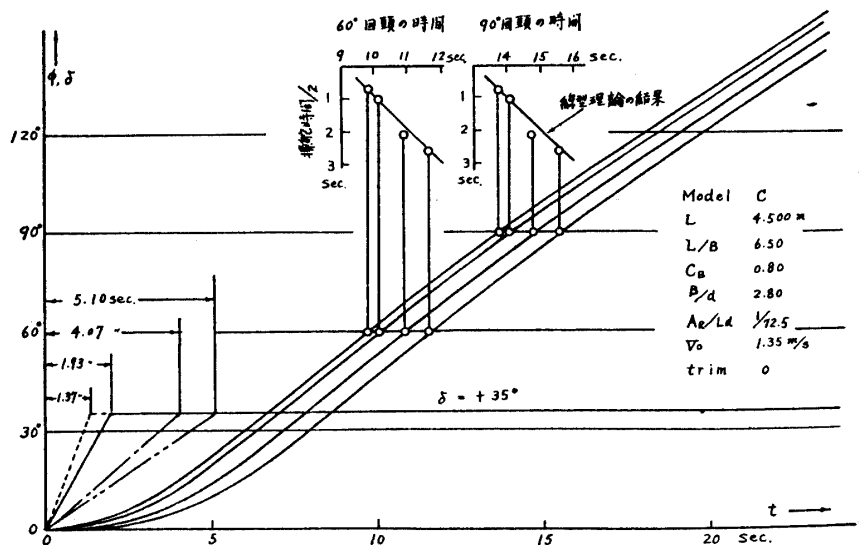
1例を第2図に示すように, (4)' の関係に極めて近い値を示し線型方程式から導かれた結果の妥当性を示した。この結果から操舵時間を変えると, その変えた分の1/2だけ船の反応遅れ時間が変化することがかなりの精度でいえることが判る。

2) 操舵時間とアドバンスの関係

つぎに衝突回避性能と最も密接な関係があると思われるアドバンスが, 操舵時間とどのような関係にあるかを調べて見よう。第1図で船は遅れ時間  $T + \frac{t_1}{2}$  の間全く変針せず,  $T + \frac{t_1}{2}$  時間経って急に定常旋回に入るものと近似的に考えるとアドバンス  $D_A$  は,

$$D_A = V_0 \left( \frac{t_1}{2} \right) + R_S \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。またこれを  $t_1$  で微分すると, 操舵時間の変化に対するアドバンスの変化は次式のようにになる。



第2図 操舵時間が回頭おくれにおよぼす影響, タンカー模型

$$\frac{dD_A}{dt_1} = \frac{1}{2} V_0 t_1 \dots\dots\dots (6)$$

ここに  $V_0$  はアプローチスピード、

$R_s$  は定常旋回半径である

実際は船は操舵と共にわずかながら反応を始めるし、また前進速度も旋回が進むにつれて変わるので (6) 式は厳密には成立たない。そこで、(6) 式がどの程度の近似を与えるかを調べる意味で船研、九大等で模型実験が、また川重、日立造船、商船大学等で実船試験が行なわれた。その1例を第3図に示す。第3図から判るように、操舵時間の変化に伴うアドバンスの変化は (6) 式で表わされるものに非常に近いことから、近似的に (5) 式を用いてアドバンスを評価して差えないと考えられる。

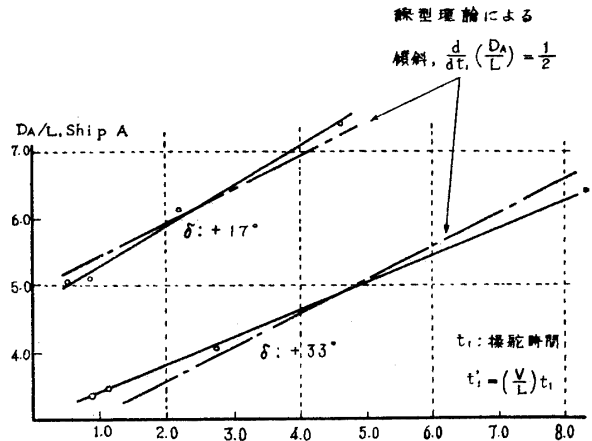
**3) 操舵機の馬力一定の条件で操舵時間および舵面積を変えた場合のアドバンスの変化**

2) では操舵時間を変えた場合のアドバンスの変化について考えたが、舵面積を変えたらアドバンスがどう変わるかを考えて見よう。

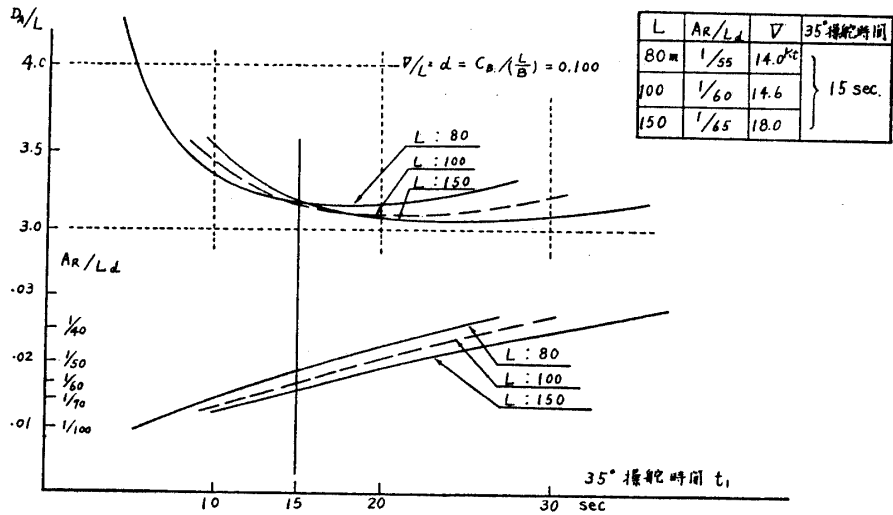
舵面積を仮に増したとすると、(5) 式において旋回半径  $R_s$  が当然減少する。また方向安定性がよくなるために時定数  $T$  も多少小さくなる。したがって舵面積を増すとアドバンスは減少し、衝突回避という面では好ましい。そこで次に緒論に述べたように、操舵時間を長くし、そのため余裕の出た操舵馬力に見合うように舵面積を増した場合を考えて見る。(5) 式より操舵時間を長くしたため  $\frac{t_1}{2} V_0$  の項が増加するが、舵面積を増加することにより  $R_s$  と  $TV_0$  が減少するのでアドバンス全体が増加するか減少するかは一概にいえない。

操舵馬力一定という条件で、種々の大きさの船につき操舵時間とアドバンスの関係を野本氏が計算した結果は第4図および第5図のようになった。第4図は貨物船、第5図はタンカーの例である。

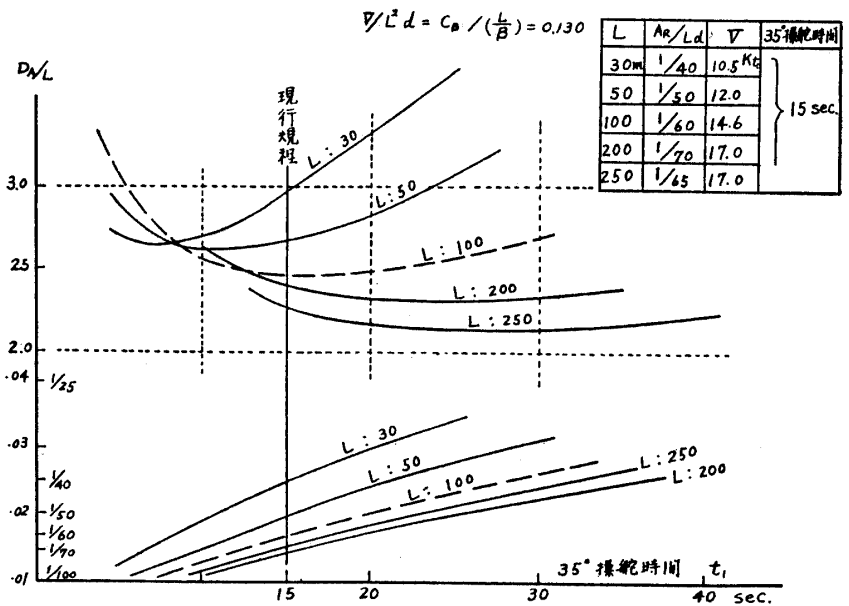
この計算を行なうには、舵面積と



第3図 操舵時間がアドバンスに及ぼす影響



第4図 操舵機馬力一定の条件で操舵時間がアドバンスにおよぼす影響、一般貨物船



第5図 操舵機馬力一定の条件で操舵時間がアドバンスにおよぼす影響、小型船およびタンカー

操舵馬力の関係、舵面積と追従性指数  $T$  との関係を知る必要があるがそれには次のような仮定を設けてある。

- a) 舵面積と旋回半径の関係は宝田氏の方法<sup>3)</sup>を用いる。
- b)  $T$  指数は舵面積により変化しない。
- c) 操舵機馬力は舵面積比の 1.5 乗に比例し、操舵時間に反比例する。

さて、第 4 図および第 5 図を見るとある大きさの船につきアドバンスは操舵時間が短かすぎても長過ぎても大きくなり、ある optimum な操舵時間があること、およびその optimum な操舵時間は大船ほど長くなり、現行の片玄 15 秒という時間は大体長さ 100 m 程度の船の optimum な操舵時間に相当していることがわかる。したがって、長さ 100 m より大きな船では現行の操舵時間よりゆっくり舵を取り、その代り舵面積を大きくする方がアドバンスを小さくすることができるわけであり、巨大タンカー等の場合操舵時間が過度に短いために操舵機の馬力が大きくなり、舵面積が大きく取れないような場合には、操舵時間を長くして舵面積を大きくすることに對する障壁を除いてやるのは合理的であるといえよう。

このような結果を基にして海防協の操舵設備小委員会では次のような試案を出した。

イ. 片玄 35 度より反対玄 30 度までの操舵時間は次式で与えられる時間より短かくなければならない。ただし、①案では長さ 60 m、②案では長さ 100 m 未満の船では一律に 28 秒以内とする。

$$\text{①案 } t_1 = 7.15 \sqrt{L} \text{ 秒} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{②案 } t_1 = 2.80 \sqrt{L} \text{ 秒} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $L$  は船の垂船間長 (m)

ロ. 操舵時間が 28 秒を越える船では次式で与えられる面積以上の舵面積を持たねばならない。

$$\frac{A}{L \cdot d} = \frac{A_0}{L \cdot d} \sqrt{\frac{t_1}{28}} \dots\dots\dots (9)$$

ただし  $A_0$  は標準舵面積で例えば次式を用いることができる。

$$\frac{A_0}{L \cdot d} = \frac{[0.1335 - 0.0121 C_b B/d] 2d/L}{1 - 0.0363 C_b B/d} \dots\dots\dots (10)$$

$A$  = 舵面積 (m<sup>2</sup>)

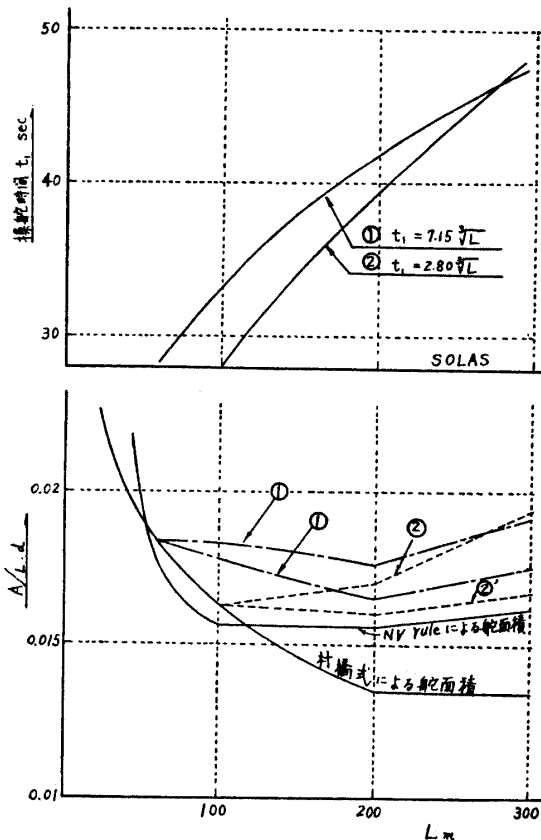
$d$  = 計画満載喫水 (m)

この式で与えられる操舵時間および舵面積を第 6 図に示す。

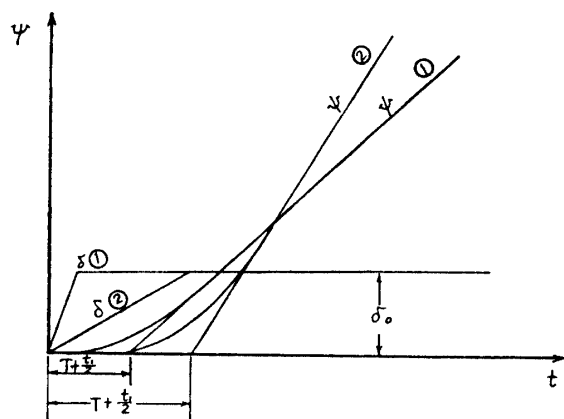
この試案の欠点は、操舵時間を 28 秒より一寸でも長くしようとすると、標準面積以上の舵面積を要求されるのに対し、28 秒ならば舵面積に従来通り何等の制限がなく、不連続を生じる点である。

一方日本海事協会でもこの問題を取り上げ、昭和 41 年春技術委員会の中に操舵速度小委員会を設置して専門にこの問題を検討し、同協会の関係規則の再検討をすることになった。その委員構成は附録 2 に示してある。同委員会でも最初衝突回避性能としてアドバンスを考えたが、その後幅寄せ操舵、すなわち障害物を避けて、元の航路からある距離距った平行な航路に乗り移る場合に、どの位の距離を走ったら新航路に移れるかということも衝突回避能力として一つの大きな目安になるのではないかと議論が出て来た。すなわち操舵時間をあまり長くすると、この航路の移動に要する距離が長くなるのではないかとというところである。この距離が操舵時間の延長により長くなるか短くなるかは原、新航路の距離による。すなわち第 7 図に示すように短い操舵時間で小さい舵を操舵する場合、①と、長い操舵時間で大きな舵を動かす場合、②の時間——回頭角曲線はある時間で交わる。すなわちこの時間より長い時間、換言すれば距った新航路に乗り移る場合には、②のように操舵時間が長い方がよく、それより短い時間または近い航路の場合には、①の方がよいことになるわけである。

国米氏<sup>4)</sup>は offset 操舵の場合の航路の距離と、乗り移りに要する距離の関係をさらに詳しく計算して水槽委員



第 6 図



第 7 図

会第 2 部会に発表している。

操舵速度小委員会ではこれらのことを考慮して、船が一船長進んだ時の角速度をその時の航跡の曲率半径で表わし、この曲率（旋回）半径と船長の比がある値に収まるように舵面積と操舵速度の関係を選ぶという考えの下に操舵速度を舵面積の関数として表わすと下記のような算式を誘導した。

$$7.22 \frac{L}{V} \left[ 1 - \frac{L \cdot d}{A_e} \frac{B \cdot C_b}{L} / (13.3 - R) \right] \text{ 秒}$$

ただし

$L$  = 船の長さ (m)

$V$  = 船の速力 (ノット)

$d$  = 船の満載喫水 (m)

$B$  = 船の幅 (m)

$C_b$  = 方形係数

$$A_e = A_R \left( 0.6 + 0.4 \frac{D}{h} \right) / \left( 0.45 + 0.675 \frac{1}{\lambda} \right)$$

$A_R$  = 舵の可動部分の側面積 (m<sup>2</sup>)

$D$  = プロペラの直径 (m)

$h$  = 舵の可動部分の平均高さ (m)

$\lambda$  = 舵のアスペクト比 (舵の平均高さとの平均幅の比)

$R$  = 次の二つの算式により算定される値のうちいずれか大きい方の値

$$3.0 \left( \frac{B}{d} + 5 \right) \frac{L \cdot d}{A_e} \times 10^{-3}$$

$$4.2 \left( \frac{L}{B \cdot C_b} \right)^2 \cdot \left( 3 \frac{B}{d} - 1 \right) \frac{L \cdot d}{A_e} \times 10^{-5}$$

この式は鋼船規則の操舵時間に関する現行規定の付帯条項として客船以外の船に適用され、この式で算出された時間を越えない限度で操舵時間を長くすることができるようにすることが、委員会の提案として近く会長に報告されることになっている。同協会がこの提案を採用し

て規則改正に踏え切るかどうか、また採用するとしてこの式の形のままかどうか、は現在の段階では未定であるが、採用されれば巨大タンカーの舵面積を大きくする上での一つの障壁が取除かれることになるといえよう。

参 考 文 献

- 1) 航海設備などの基準および改善に関する研究, 日本海難防止協会報告, 昭和 41 年.
- 2) 野本 謙作 “船の操縦性について” 第 2 報, 造船協会論文集 101 号, 昭 32.
- 3) 宝田直之助 “実船解析による 旋回性能の研究” 造船協会論文集 110, 111, 昭 36, 37.
- 4) 国米 昭久 “幅よせ 操縦に関する一計算” 水槽委員会 2 部会で講演, 昭 43-9-24.

付録 1 日本海難防止協会操舵設備小委員会構成

所 属	委 員
東京大学	田 宮 真
〃	元 良 誠 三
九州大学	井 上 正 祐
大阪大学	野 本 謙 作
運輸省船舶技術研究所	山 内 保 文
東京商船大学	谷 本 初 蔵
特定船舶整備公団	小 滝 治 雄 (国部 淳)
横浜国立大学	竹 沢 誠 二
日本造船研究協会	菅 四 郎
海上保安庁船舶技術部	三 宅 教 雄
日立造船	高 木 又 男 (岡田正次郎)
三菱重工業	豊 田 昭 三
水産庁漁船研究室	土 屋 孟
日本海事協会	榎 田 吉 郎
長崎造船大学	山 川 新 二 郎
運輸省船舶局	前 田 至 孝
〃	工 藤 博 正
〃	勝 呂 誠

付録 2 日本海事協会操舵速度小委員会構成

所 属	委 員	会議出席者
東京大学	平本 文男	平本 文男
〃	元良 誠三	元良 誠三
船 研	山内 保文	山内 保文
運輸省船舶局	前田 至孝	前田 至孝
日本船主協会	真田 良	真田 良, 古川 修
〃	川原 隆	森川 卓, 市瀬 列
〃	藤瀬 柴朗	金丸 順治, 人見 重美
石川島播磨重工	森 正彦	青木 進
浦賀重工	宝田直之助	森 正彦
川崎重工	岡本 洋	宝田直之助
日本鋼管	瀬尾 敏一	岡本 洋
日立造船	岡本 富保	瀬尾 敏一, 須藤 正信
三菱重工	泉 晃	桂 豊, 丸山 哲郎
日本海事協会	〃	泉 晃, 津田 真也
〃	〃	守屋 公平, 佐藤 正彦
〃	〃	志波 久光, 渋谷 享
〃	〃	折田 吉郎, 阿部 三雄
〃	〃	入江隆一郎