



Title	舵に作用する外力について
Author(s)	稲葉, 恭人; INABA, Yasuhito
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 9(1), 37-42
Issue Date	1958-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23024
Type	departmental bulletin paper
File Information	9(1)_P37-42.pdf



舵に作用する外力について

稲葉 恭人

(北海道大学水産学部船舶運用学教室)

On the Forces Acting on the Rudder

Yasuhito INABA

Abstract

From the investigation of marine accidents caused by some troubles in the steering gear, it was ascertained that the greater part of them were caused by breaking of the steering chain and rudderhead due to the forces acting on the rudder. Hence, in order to examine the strength of the steering gear and further to contribute to experimental studies on the above forces, the writer, by computation, deduced formulas (3)-(17) and drew their graphs Fig. 1.-Fig. 5. in relation to wave forces in various sea conditions. Some consideration about them has been presented.

舵及び操舵装置等の故障が、直接又は間接の原因となつた海難を分析し、その原因と考えられる外力について、若干の考察を試みたのでその結果を報告する。

海難の分析

(1) 昭和24年より30年までの海難審判庁裁決録¹⁾中より、上記原因による海難を集めると、乗揚事件42、衝突事件12、遭難事件10、沈没事件7、転覆事件1となり、計72件が数えられる。即ち乗揚事件が過半数(58%)を占めて居て、接岸航海とか、礁海航海中の操舵不能が、このような結果をもたらして居るのであるが、故障復旧の時間的距離的余裕のある、広い海面において、起つたであろうと推察される舵故障の数はこれに数倍するものと考えられる。

(2) (1)を原因別に分けてみると、

1. 操舵鎖の切断によるもの	33件	5. 流木との接触によるもの	1件
2. 舵軸材の折損によるもの	12件	6. 鉄枷がはさまり回転不能のもの	1件
3. 止金、ピン等の脱落によるもの	11件	7. 麻索のてん絡によるもの	1件
4. 操舵鎖のてん絡によるもの	9件	8. その他原因不明のもの	4件

操舵鎖の切断によるものが一番多く46%を占め、次の舵軸材の折損によるもの12件を加えて63%が、材質の不良、疲労等も考えられるが、明らかに舵に加わる外力によるものと考えられる。

(3) (2)の1. 2. 項即ち外力に起因するものについて、海難数と舵の使用状態との相関を調べる。転舵中の件数と、舵中央のまま航進中に起つた件数との比をとつてみると2:1となる。これは転舵による舵圧が、外力に加算されることから当然の結果である。

(4) 次に(3)と同様外力に起因すると考えられるものについて、船速、針路、風浪等当時の状況の明記されているもの36件を集めて船体と風浪やうねり等の相対方向を求めてみる。船体の周囲を4等分し、船首方向に左右両舷45°づつ合せて90°、同じく船尾方向に90°、左右正横方向に90°づつと区分する。風浪やうねり等の相対方向をこれらに分類すると、船首方向19件54%、船尾方向11件30%、左右両舷が合せて6件16%となる。船首尾方向の場合に海難が多くて、両舷方向即ち横波の場合に割合少いことが注目される。定量的な比較は疑問であるが、これは船体の動揺²⁾を考えると Rolling よりも Pitching の場合に舵の海難が多いことになる。船首方向が船尾方向の2倍近くあつて多い。この傾向は正横方向の6件を正横線で分けてみても、前方に4件、後方に2件となつてあらわれている。これは船の前進速度により、波浪等の圧力が相対的

に強いと推定される。

外力について

(I) 転舵による圧力 舵に加わる圧力の内、通常考えられるものはこの転舵による圧力であるが、広く研究されて種々の理論式や実験式も導かれているので省略する⁶⁾。

(II) 波頂の圧力 波浪の形状をトロコイド曲線と考え、波頂の位置を基点0として、水面に鉛直下方にY軸をとると次式を導くことが出来る。

$$V_D = \frac{h}{2} \exp \left\{ -\frac{2\pi}{L} \left(y - \frac{h}{2} - \frac{\pi h^2}{4L} \right) \right\} \sqrt{\frac{2\pi g}{L}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V_D ：深海波任意の水深における水分子回転の速度
 h ：波高
 L ：波長
 g ：重力加速度

これは、水深が波長の約半分以下のところ即ち浅海部になると次式の如くなる。

$$V_s = \frac{h}{2} \operatorname{cosech} \left(\frac{2\pi D}{L} \right) \cdot \sqrt{\frac{\pi g}{L} \sinh \frac{4\pi}{L} \left\{ D - \left(y - \frac{h}{2} - \frac{\pi h^2}{4L} \right) \cdot \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1} \right\}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 V_s ：浅海波任意の水深における水分子回転の速度
 D ：浅海部の水深

(1) 及び(2)式における水分子の運動により舵面に生ずる圧力は、単位面積当り深海波では $\frac{\rho}{2} CV_D^2$ 、浅海

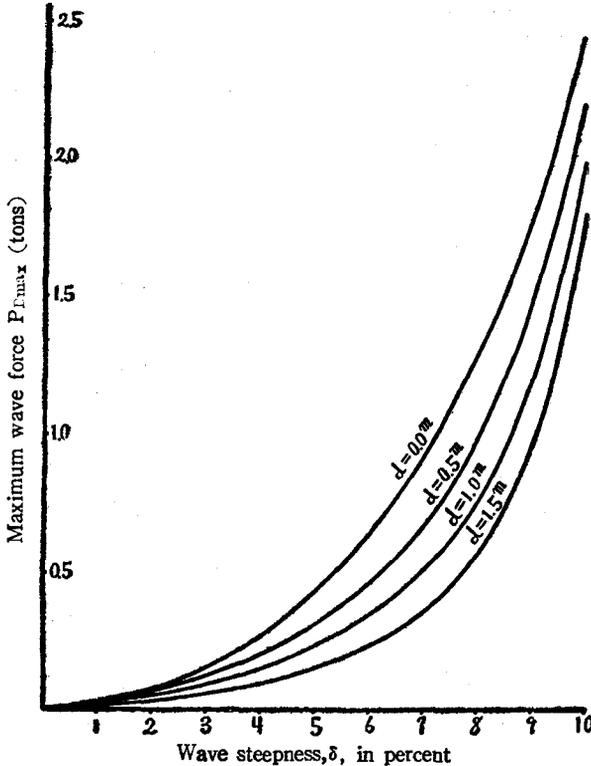


Fig.1. Effect of wave steepness δ on the maximum wave force in deep water $P_{D \max}$ ($B=1m, H=1m, L=20m$)

波では $\frac{\rho}{2} CV_s^2$ となる。⁸⁾ ρ は海水の密度であり、 C は抵抗係数で舵においては大略1.10~1.20程度の値である。勿論、波の圧力は船体の他の部分にも働くため船体自身の移動があつて、舵面に生ずる圧力の相対的な減少も考えられるが、実際の海上の不整一な不規則波中においては、特に小型軽量の場合を除き、船体の移動は無視し得るものと、本考察においては仮定する。舵面の有効幅を B とし、有効高さを H とすれば、深海波により舵面全体のうける最大圧力 $P_{D \max}$ は、波頂より舵面上縁までの深さ d の函数として、次式より求められる。

$$P_{D \max} = \int_d^{d+H} \frac{\rho}{2} CBV_D^2 dy = \frac{\rho g}{16} CBh^2 \left(1 - \exp \frac{-4\pi H}{L} \right) \exp \left\{ \frac{4\pi}{L} \left(\frac{\pi h^2}{4L} + \frac{h}{2} - d \right) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式を図示すればFig.1の如くなる。又(3)式より d 及び h について次の2式を得る。

$$\Delta P_{Dmax} = \frac{-\rho g}{4L} \pi CBh^2 (1 - \exp \frac{-4\pi H}{L}) \exp \left\{ \frac{4\pi}{L} \left(\frac{\pi h^2}{4L} + \frac{h}{2} - d \right) \right\} \Delta d \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta P_{Dmax} = \frac{\rho g}{16} CBh^2 (1 - \exp \frac{-4\pi H}{L}) \left(\frac{2\pi^2 h}{L^2} + \frac{2\pi}{L} + \frac{2}{h} \right) \exp \left\{ \frac{4\pi}{L} \left(\frac{\pi h^2}{4L} + \frac{h}{2} - d \right) \right\} \Delta h \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 1 及び (4), (5) 式より、舵の水深d及び波高h (換言すれば波の steepness δ) の変化に対する P_{Dmax} の変化が判る。即ちdが増加すれば P_{Dmax} は減少し、その減少量はhの大なるほど大きい。又同じd及びLに対しては、圧力は steepness の増加につれて急激に増大する。舵の幅に対しては P_{Dmax} は一次の比例関係である。(3) 式より又次式を得る。

$$\Delta P_{Dmax} = \frac{\rho g}{4L} \pi CBh^2 \exp \frac{-4\pi H}{L} \exp \left\{ \frac{4\pi}{L} \left(\frac{\pi h^2}{4L} + \frac{h}{2} - d \right) \right\} \Delta H \dots\dots\dots (6)$$

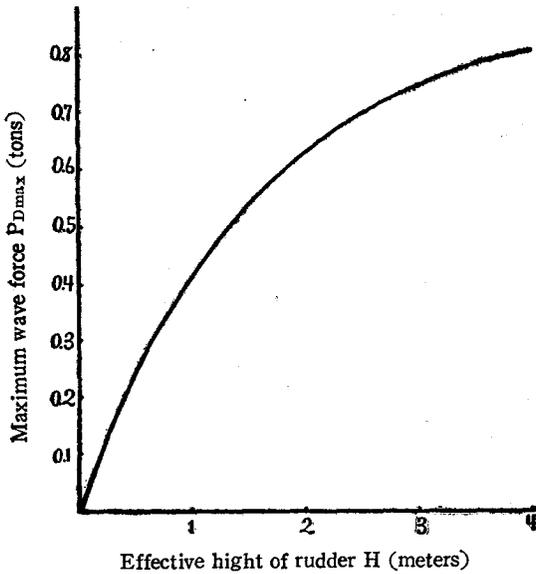


Fig. 2. Relation between the effective height of rudder H and the maximum wave force in deep water P_{Dmax} ($h=1m, d=0m, L=20m, B=1m$)

$$P_{Smax} = \int_d^{d+H} \frac{\rho}{2} CBV_s^2 dy = \frac{\rho g}{16} CBh^2 \operatorname{cosech}^2 \frac{2\pi D}{L} \left. \begin{aligned} & \sinh \frac{2\pi H}{L} \sinh \left\{ \frac{2\pi}{L} \left(2D - 2d - H + h + \frac{\pi h^2}{2L} \right) \right. \\ & \left. \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1} \right\} \dots\dots\dots (7) \end{aligned} \right.$$

これを図示すればFig. 3の如くなる。D, d, hの変化に対しては次の3式が導かれる。

これは舵の有効高さの変化に対する P_{Dmax} の変化を示すもので、図示すればFig. 2の如くなる。Hの小さい間は波の圧力は急激に変化するが、大きくなれば一定の値 $\left[\frac{\rho g}{16} CBh^2 \exp \left\{ \frac{4\pi}{L} \left(\frac{\pi h^2}{4L} + \frac{h}{2} - d \right) \right\} \right]$ に漸近する。浅海波による舵面の最大圧力を P_{Smax} とすれば、深海波の場合と同様にして、次式が得られる。

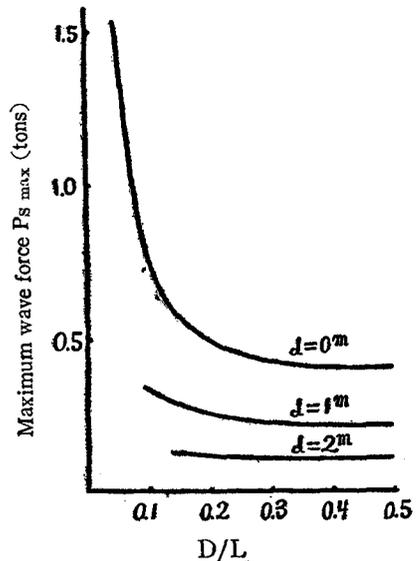


Fig. 3. Maximum wave force in shallow water P_{Smax} against ratio depth to wave length D/L ($B=1m, H=1m, h=1m, L=20m$)

$$\Delta P_{Smax} = \frac{\rho g}{8L} \pi C B h^2 \sinh \frac{2\pi H}{L} \operatorname{cosech}^2 \frac{2\pi D}{L} \left[\frac{2\pi}{L} \cosh \left\{ \frac{2\pi}{L} (2D - 2d - H + h + \frac{\pi h^2}{2L} \cdot \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1}) \right\} \right. \\ \left. \left\{ 2 - \frac{4\pi^2 h^2}{L^2} \frac{\exp \frac{4\pi D}{L}}{(\exp \frac{4\pi D}{L} - 1)^2} \right\} - 2 \operatorname{coth} \frac{2\pi D}{L} \sinh \left\{ \frac{2\pi}{L} (2D - 2d - H + h + \frac{\pi h^2}{2L} \cdot \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1}) \right\} \right] \Delta D \quad (8)$$

$$\Delta P_{Smax} = \frac{-\rho g}{4L} \pi C B h^2 \sinh \frac{2\pi H}{L} \operatorname{cosech}^2 \frac{2\pi D}{L} \cosh \left\{ \frac{2\pi}{L} (2D - 2d - H + h + \frac{\pi h^2}{2L} \cdot \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1}) \right\} \Delta d \quad (9)$$

$$\Delta P_{Smax} = \frac{\rho g}{16} C B h \sinh \frac{2\pi H}{L} \operatorname{cosech}^2 \frac{2\pi D}{L} \left[2 \sinh \left\{ \frac{2\pi}{L} (2D - 2d - H + h + \frac{\pi h^2}{2L} \cdot \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1}) \right\} + \frac{\pi h}{L} \right. \\ \left. \left(2 + h \cdot \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1} \right) \cosh \left\{ \frac{2\pi}{L} (2D - 2d - H + h + \frac{\pi h^2}{2L} \cdot \frac{\exp \frac{4\pi D}{L} + 1}{\exp \frac{4\pi D}{L} - 1}) \right\} \right] \Delta h \quad \dots \dots \dots (10)$$

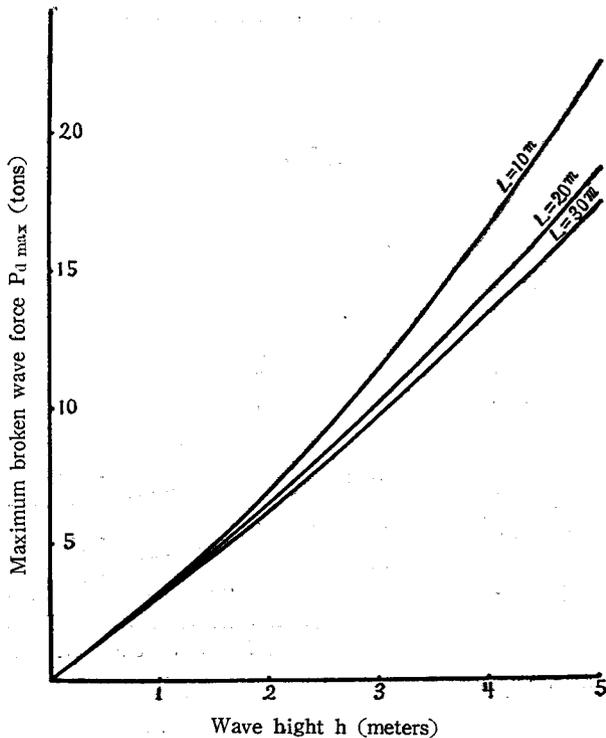


Fig. 4. Effect of wave height h on the maximum broken wave force in deep water $P_{d \max}$ ($B' = 1m, H' = 1m$)

D/L が 0.5 付近では、深海波の値に近くなり D に対して殆んど変化しないが、D の減少につれて ΔP_{Smax} は急増する。

(III) 砕波による圧力 波高が波長に比べて増大し、表面の水分子の速度が波の速度より大きくなると、砕波を生ずるに至る。砕波の圧力は、舵に加わる外力の内、最も強大な衝撃力で、小樽港において 35 ton/m^2 が記録されたことがある⁴⁾。永井⁵⁾ の式より舵に適用出来るように導いてみる。深海波による最大圧力を P_{cmax} とすれば、波頂の水分子が静水面に落下する速度と、水面における水分子が回転する速度とを合成することにより次式を得る。

$$P_{dmax} = 2B' H' \rho g h (1.5 + \frac{\pi h}{2L}) \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 B' : 舵の露出部の有効幅
 H' : 舵の露出部の有効高さ
 これを波高について図示すれば Fig. 4 の如くなる。波長及び波高による変化率は次式で求められる。

$$\Delta P_{dmax} = \frac{-B'H'\pi\rho g}{L^2} h^2 \Delta L \dots\dots\dots (12)$$

$$\Delta P_{dmax} = 2B'H'\rho g \left(1.5 + \frac{\pi h}{L}\right) \Delta h \dots\dots\dots (13)$$

即ち波長よりも波高に対して大きく変化する。hの大なる程、又Lの小なる程hの変化に対する ΔP_{dmax} は大きく、hが等しければLの大なる程 P_{dmax} は小さい。浅海波の場合は、静水面と波高中分線との差及び水分子の回転速度が前記各式と異つてくるので次式の如くなる。

$$P_{smax} = 2B'H'\rho g h \left(1.5 + \frac{\pi h}{2L} \coth \frac{2\pi D}{L}\right) \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 P_{smax} ：浅海部における碎波による圧力

$$\Delta P_{smax} = 2B'H'\rho g \left(1.5 + \frac{\pi h}{L} \coth \frac{2\pi D}{L}\right) \Delta h \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta P_{smax} = \frac{-\pi B'H'\rho g}{L^2} h^2 \left(\coth \frac{2\pi D}{L} - \frac{2\pi D}{L} \operatorname{cosech}^2 \frac{2\pi D}{L}\right) \Delta L \dots\dots\dots (16)$$

$$\Delta P_{smax} = \frac{-2\pi^2 B'H'\rho g}{L^2} h^2 \operatorname{cosech}^2 \frac{2\pi D}{L} \Delta D \dots\dots\dots (17)$$

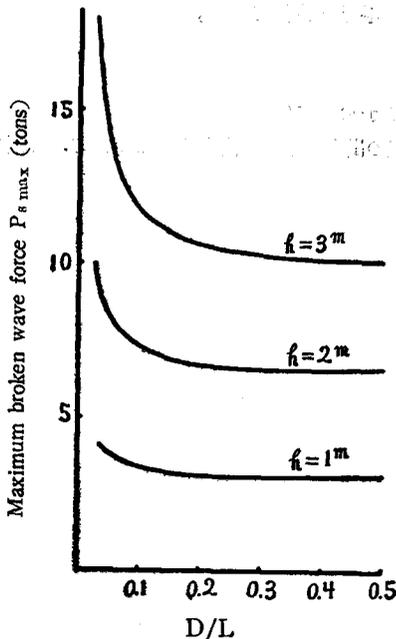


Fig. 5. Maximum broken wave force in shallow water P_{smax} against ratio depth to wave length D/L ($B'=1m$, $H'=1m$, $L=20m$)

(14)式を D/L について図示すればFig. 5の如くなる。(17)式より、 L を等しくすれば D の減少につれて ΔP_{smax} は急激に増大する。 D/L が $\pi/4$ を越えて大きくなつて行けば、 $\coth \frac{2\pi D}{L}$ は1に、又 $\operatorname{cosech}^2 \frac{2\pi D}{L}$ は0に夫々漸近して結局深海波の場合に移行して行く訳である。碎波の舵面に作用するのは、舵が水面上に露出した場合であるが、これら各式は何れも静水面の高さにおける値であり、それより上方ではこの各式の圧力より小さくなり、下方(波の谷間)では落下の終速度の増加により大きくなる。舵面露出の可能性も波の谷間において多い訳であるから、式の適用には若干の余裕を考えなければならない。

検 討

(II), (III)に導いた各式は、何れも舵面に水分子が垂直にあたる場合であつて最大値である。垂直面内において水分子軌道と舵面とのなす角を α 、水平面内において舵面と相対波向のなす角を β とすれば、直圧力は夫々 $P_{dmax} \sin^2 \alpha \sin^2 \beta$, $P_{smax} \sin^2 \alpha \sin^2 \beta$, $P_{dmax} \sin^2 \alpha \sin^2 \beta$, $P_{smax} \sin^2 \alpha \sin^2 \beta$ となる。 α , β は船体動揺、変針、転舵等により変化するが \sin の2乗できいてくるので一方が $\pi/4$ になれば約 $1/2$ ($=\sin^2 \frac{\pi}{4}$)となり、 α , β 共に $\pi/4$ まで下れば、直圧力は最大値の約 $1/4$ となる。(I), (II), (III)の外力の他に、船首底部のslammingに相当するもので、船体動揺による舵と水分子

との相対運動による圧力があるが、その主たる方向が舵軸の方向となるから、舵面そのものへの圧力は小さくlocking pintleさえ強力であれば、海難への影響は少ないと考えられる。上記各圧力が単独で、又は同時に合成されて舵面に作用するが、舵軸の許容振力率($\pi S^3 \sigma / 16$) (S : 径, σ : 材質の許容応力)より相当振力率 $(M + \sqrt{M^2 + T^2})$ (M : 軸の振力率, T : 軸の撓力率)が大きくなれば舵軸折損の危険があり、操舵

鎖に加わる張力（伝達機構により異なるMの函数）がその引張許容応力より大きくなると切断の危険が生ずることになる。舵軸、操舵鎖共に、方向及び大きさの種々に変化する荷重が作用するため、材質の静的極限強度よりもずっと低い応力で疲労破壊を起すこともあり、(II)、(III)の圧力は衝撃的でもあるので相当の安全率を考えなければならない。船舶設備規程には、動力による操舵装置にのみ、緩衝装置を強制して居るが、人力操舵装置においても操舵鎖保護のために有効な方法である。(I)の圧力は、転舵に若干の時間を要するのでその変化が連続的であることと、Jössel の実験式³⁾にも示される如く、圧力中心の移動による振力率の減少もあるので、急激粗暴なる転舵等を避ければ舵故障の原因とならず、ただ(II)、(III)等の外力に附加されるときに、海難の分析の(3)項の如く、その発生率を増すものと考えられる。舵の aspect ratio は小さい程、他の条件を同じにすれば、(I)、(II)共に直圧力は小さくなるが舵効も減少することになる。

(II)、(III)において浅海波の方が深海波より圧力が大きく、又応急処置の距離的、時間的余裕の少いことにもなるので、過度の接岸航海は避けなければならない。特に(III)の圧力は前2者に比べて著しく大きいから、勿論船体運動と波浪との相対的な位相差も考えられるが、操船者としては舵の露出を何よりも警戒し、船速又は針路の変更により出会周期を変えよとか、吃水を深くするとかの対策を考えなければならない。海難の分析において、Rolling 中より Pitching 中に操舵鎖の切断、舵軸の折損等が多い理由もここにあると推定出来る。

終りに種々御指導を賜わつた八反田教授並に川島助教授に厚く感謝する次第である。

文 献

- 1) 高等海難審判庁 (1949~55). 海難審判庁裁決録昭和24年1月分~30年12月分
- 2) 川島利兵衛 (1957). 荒天航法の解析的研究. 第2報 船と波の出会い周期及び出会い角度について. 日本航海学会誌 (16), 73-142.
- 3) 植松時雄 (1953). 水力学. 230P. 東京; 産業図書.
- 4) 鈴木雅次 (1932). 港工学. 730P. 東京; 常磐書房.
- 5) 永井荘七郎 (1956). 港湾工学. 252P. 東京; オーム社.
- 6) 7) 8) 立川春重 (1955). 艦装. 373P. 神戸; 海文堂.