HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	青函航路に於ける連絡船の波浪による横搖れの研究
Author(s)	川島, 利兵衛
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 6(3), 216-227
Issue Date	1955-11
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/22930
Type	bulletin (article)
File Information	6(3)_P216-227.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

青函航路に於ける連絡船の波浪による横揺れの研究

川　島　利　兵　衛
(北海道大学水産学部運用学教室)

A Study on the Wave-Induced Rolling Motion of the Ship in a Seaway (SEIKAN KORO)

Rihei KAWASHIMA

Abstract

From the point of view of forecasting a ship's motion on the sea, as connected with the manoeuvering of the ship, the author studied about the ferry boat TOYAMARU, Type S especially on the rolling motion of the ship.

The studies and conclusions come under the following headings:

(1) The determination of motion of seaway itself.

According to the theory of forecasting wave and swell by H. U. Sverdrup and W. H. Munk, the wave height and period on the standard course (Figs. 1~2) for 8 principal directions and various wind velocities (10 m/sec., 20 m/sec. and 30 m/sec.) were calculated for the Seikan Koro and shown in Figs. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 and 10.

(2) The equation of rolling motion of ship.

Using Table 2 and the result of experiment for rolling motion of ferry boat, the works made calculations of the damping coefficient, restoring force and exciting force by waves for underway condition of ship, and the equation of motion was determined [eq. (1)].

(3) The study of rolling motion in a seaway (Seikan Koro)

1. Solving the equation of the rolling motion and assuming that the seaway was consisted of a regular train of waves, then

$$\varphi_{max} = \frac{\phi'}{\sqrt{(1-\Lambda_e^2)^2+(2\kappa\Lambda_e)^2}}$$

Where: φ_{max} : Maximum angle of roll
ϕ' : Effective wave slope
Λ_e : Effective turing factor
κ : Dimensionless damping coefficient

From the above equation, the relation between maximum roll angle and turning factor for various wave slopes was shown in Fig. 13.

2. Effective wave slope $\phi' = \phi . \gamma . \sin\chi$
ϕ : Wave slope
γ : Effective wave slope coefficient
χ : Angle of wave and ship encounter

3. Turning factor on seaway (Seikan Koro)

Effective turning facters (T_R/T_e) were shown in Figs. 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, and 21.

According to the above theoy, finding the position of ship and condition of wind, the maximum angle of roll at any point on standard course can be forecasted.

In addition, the author studied on the properties of seaway (Seikan Koro) and the relationship of ship and seaway.

I 緒 言

造船学に於て，海上に於ける船の運動の研究は，船の凌波性及び耐波性の問題として行われている。G. Weinblum 及び M. St. Denis[1]は今日の造船学上の重要な問題は，速度範囲の拡大であり，然も速度の上限界は，装備される機関の馬力の限界によるのではなくて，海上に於て船の受ける加速度の如何によると述べ，更に海上に於ける船の運動の研究の困難さの原因の一つは，抵抗，推進の問題の様に，簡単な係数による比較の出来ない点にあることを指摘し，(1)航路自体の運動，(2)静水中の船の運動，及び(3)航路に於ける船の運動について研究している。

航海者の立場は，ある与えられた船—即ち，航海性能が定る—を任意の航路に於て外力に抗して安全且つ効率良く航行せしめるにある。従つて，海上に於ける船の運動については，航路に於ける船の運動の予報の問題として研究する必要がある。

従来，航海者が，航路に関する風及び波浪に充分の注意を払つたことは勿論であるが，之等と船体の相互作用については極めて経験的に処理されて来た。然し乍ら，海上に於ける船の運動の予報の為には，船体と海上状態との力学的関係の定量化が必要となる。

例えば，船体の激しい横揺れが起ると，経験的に波浪と船首の出会の角度を変えることによつて，之を避ける法がとられているが，之は横揺れの運動方程式の解について，特に波浪による強制外力を考えて吟味すると，以上の操作即ち出会角度の変化は出会周期を変え之が波との同調を避け，且つ，強制外力の振巾項を小ならしめることが分る。即ち，最近の波浪の予報理論と，船体と波の動力学的研究と相俟つて海上に於ける船の運動の予報が可能であり，且つ，復原性の観点からの考察を加えれば危険予報も出来得ると考えられる。

著者はこの観点から青函航路の連絡船の横揺れについて研究した。

II 青函航路に於ける波浪[2)3)4)5)6)]

H. U. Sverdrup 及び W. H. Munkの波浪及びうねりの予報理論[2)]に従うと，海上のある点に於ける波浪はその発生域に於ける風向，風速，吹送時間及び吹送距離が決定されると可成りの精度の予報が出来る[2)]。

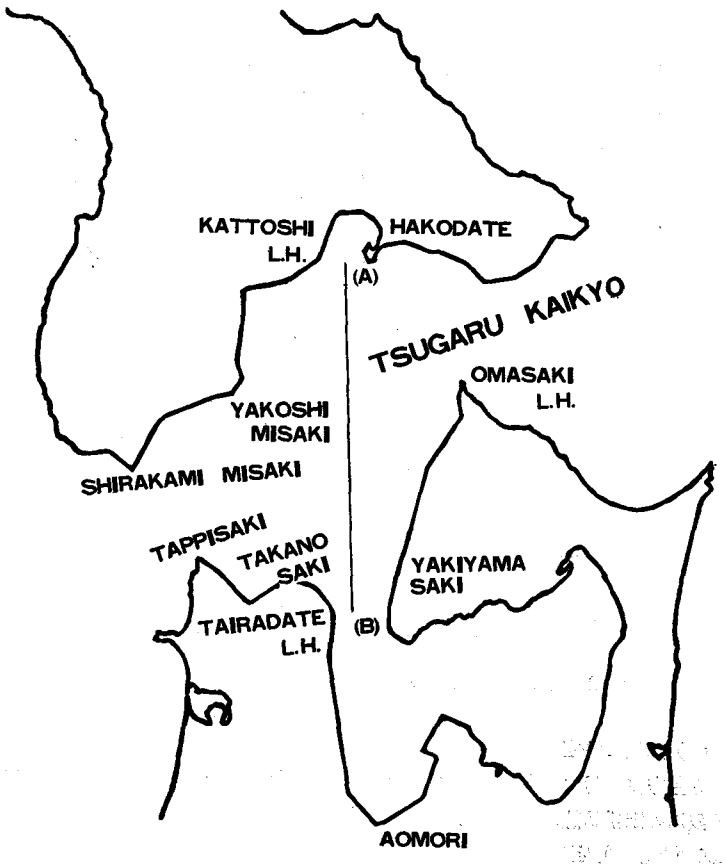

Fig. 1. Chart of TSUGARU KAIKYO

従つて，算定の基準として，国鉄青函局の指令に基いて基準航路を定め，この航路上の点に対して8主方位についての吹送距離を求め，この距離に対して定常に達した場合として波浪を求めた。

(1) 基準航路[7]

袰登支灯台，N88°E 2.5浬沖の点から，平館灯台，N88°E 2.0浬沖の点の間とすると，真針路358°又は178°となる。

(2) 吹送距離

基準航路に対して，N，NE，E，SE，S，SW，W，及びNWの各方位について航路上の各点に対して連続的に吹送距離を求めた。又 Fig. 1 に示される様に，複雑な海岸線を1浬以内の範囲で直線化して計算を簡単にした。基準航路を横座標として Fig. 2 に示す。

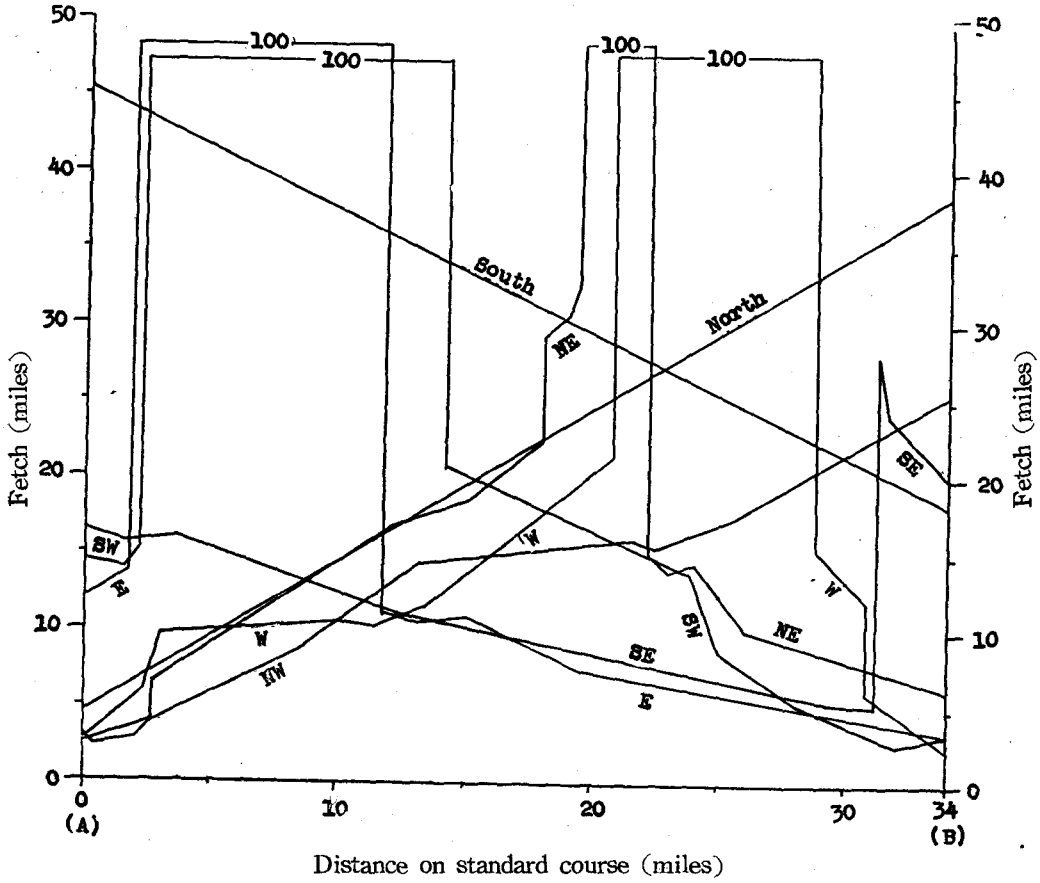

Fig. 2. Fetch on the standard course in Fig. 1, for 8 principle directions

(3) 風浪の決定

8主方位に対する吹送巨離について，風速が夫々 10m/sec., 20m/sec. 及び 30m/sec. に対して，生成される波浪の定常状態に達した場合の波の周期及び波高を求めた。但し，吹送距離 100 浬以上に対しては，距離100浬として算定した。

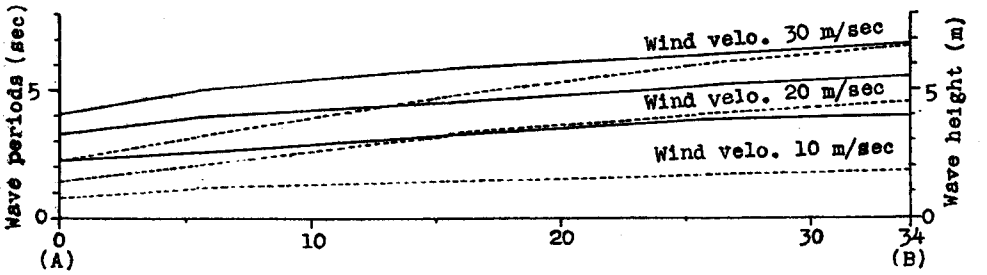

Fig. 3. Wave height and period for North

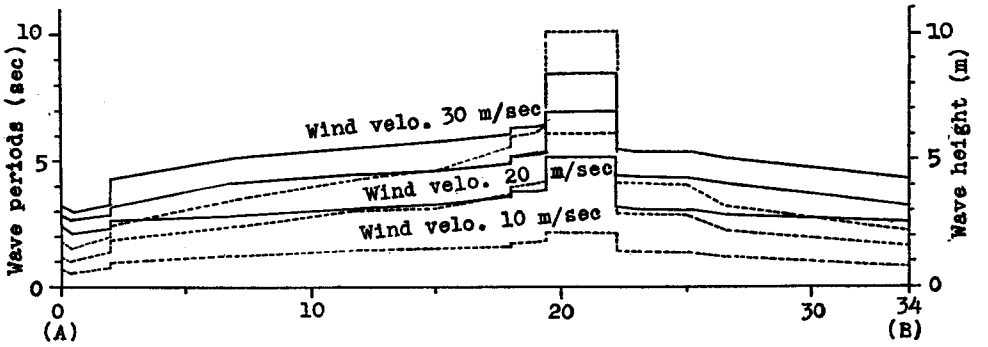

Fig. 4. Wave height and period for NE

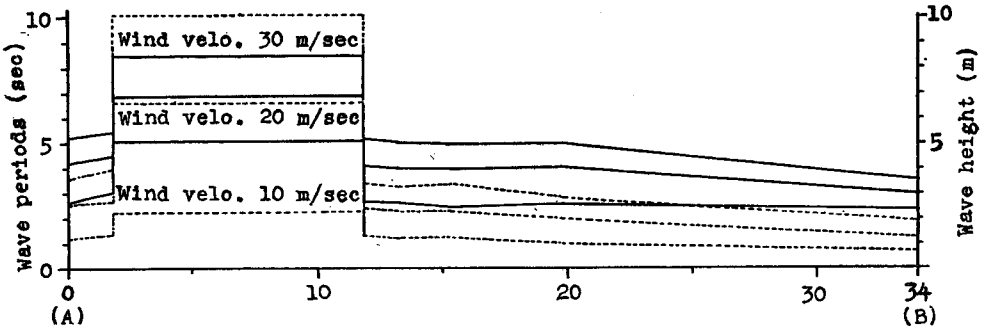

Fig. 5. Wave height and period for East

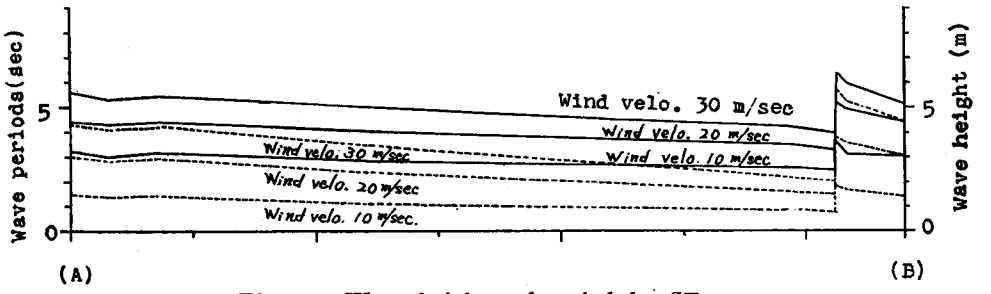

Fig. 6. Wave height and period for SE

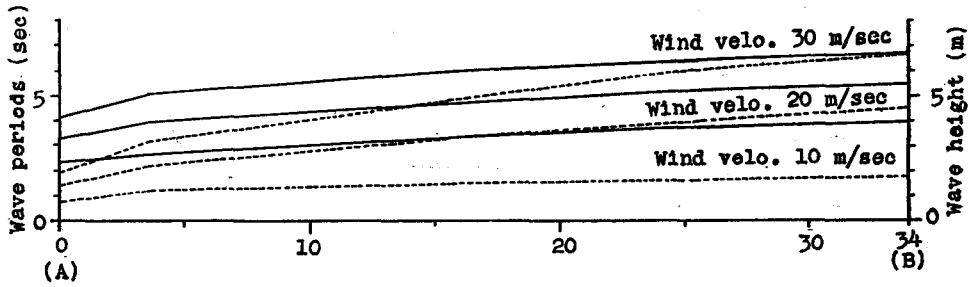

Fig. 7. Wave height and period for South

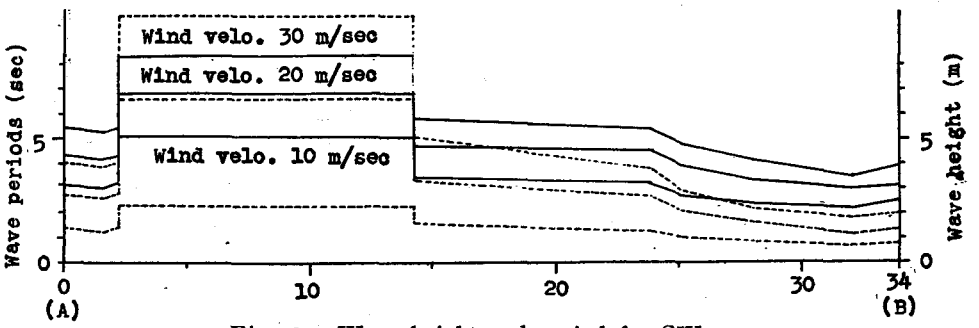

Fig. 8. Wave height and period for SW

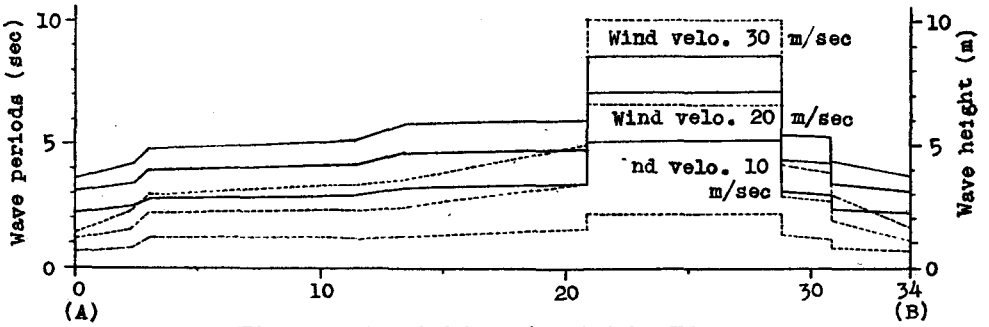

Fig. 9. Wave height and period for West

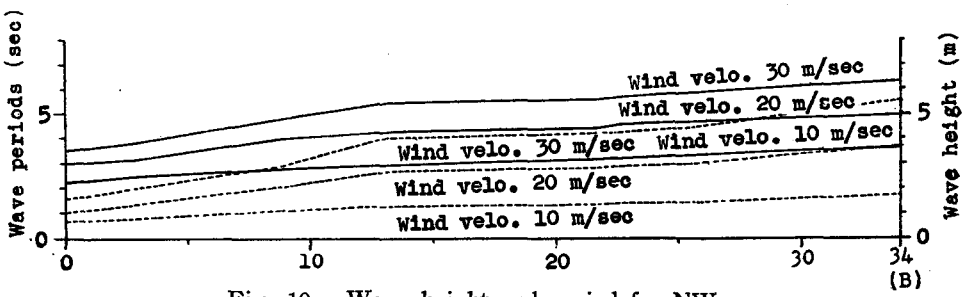

Fig. 10. Wave height and period for NW

In Figs. 3~10, —— Wave height, …… Wave period

III 連絡船（S型）の波浪中に於ける横揺の運動方程式

連絡船の横揺れを近似的に線型であるとすると，横揺れの運動方程式は次式で与えられる。[8)9)10)]

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2}+2\kappa\nu_0\frac{d\varphi}{dt}+\nu_0^2\varphi=\nu_0^2\phi.\gamma.\sin\chi\cdot\sin\nu_e t$$

但し， φ：横揺れ角， κ：無次元横揺減衰係数， ν_0：自由横揺の角振動数， ϕ：波の傾斜，
γ：有効波傾斜係数， ν_e：船と波の出会の角振動数（$2\pi/T_e$, T_e：出会周期）
χ：船と波の出会角度

(i) 減衰係数

S型連絡船の実験の結果によると，

$$\frac{d\Theta}{dt}=0.188\Theta+0.0087\Theta^2 \qquad \text{但し，}\Theta\text{：横揺れ角度}$$

之より各横揺れ角に対する減衰係数を求めると[11)] Table 1 となる。

Table 1. Dimensionless damping coefficient (κ) for φ_{max}

φ_{max}	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
a_e	0.232	0.275	0.318	0.362	0.406	0.450	0.493	0.536	0.580	0.623
κ	0.074	0.087	0.100	0.114	0.128	0.141	0.155	0.168	0.181	0.195

(ii) 横揺試験の結果により，航海状態について横揺の周期（T_s）に基づき，ν_0^2 を次式により算定する。

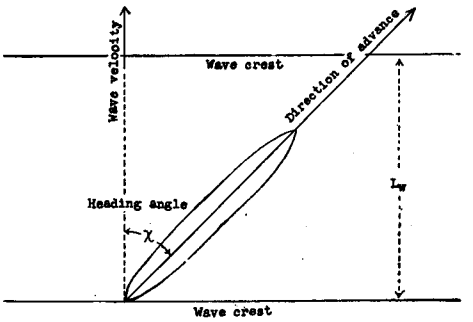

Fig. 11. Position of ship in waves

$$T_s=12.5\text{ sec.} \qquad \nu_0=\frac{2\pi}{T_s}$$

(iii) 波浪による強制外力（M_φ）

$$M_\varphi=\nu_0^2\,\varphi\,\gamma\sin\chi\cdot\sin\nu_e t$$

一般に船が波浪を斜に受ける場合は，Fig.11に示す様に，船の進行方向と，波頂の進行方向とが χ であるとすると，見掛けの振動数（出会角振動数 ν_e）は，

$$\nu_e=(1-\frac{V}{c}\cos\chi)\,\nu_w$$

但し，ν_w：波の振動数（$=2\pi/T_w$ T_w：波の周期），V：船の速度，（=7.5m/sec.），c：波の速度（$=1.57\cdot T_w$ m/sec.）

γ については[8)]，

$$\gamma=1-\frac{\phi}{b}\cdot\frac{b}{m}$$

$$\phi/b=P\cdot\beta+Q\beta^2+R\cdot\beta^3,\quad P=\frac{1}{3}(f_1-\alpha^2K_2),\quad Q=\frac{1}{b}(\frac{f_2}{5\alpha}-\frac{3}{2}f_1K_1\alpha+\frac{3}{4}\alpha^3K_3),$$

$$R=\frac{1}{b}(\frac{2}{3}\alpha^2K_2f_1-\frac{f_2}{5}-\frac{1}{5}\alpha^4K_4),\ \alpha=\frac{C_b}{C_w}\cdot\frac{h}{b},\quad \beta=\frac{4\pi^2b}{gT^2_w},\quad f_1=\frac{A_2}{A_1},\quad f_2=\frac{A_3}{A_1},\ A_1=C_w$$

$$A_2=1-\frac{3}{n+1}+\frac{3}{2n+1}-\frac{1}{3n+1},\quad A_3=1-\frac{5}{n+1}+\frac{10}{2n+1}-\frac{10}{3n+1}+\frac{5}{4n+1}-\frac{1}{5n+1},\quad n=\frac{C_w}{1-C_w}$$

$$K_1=1-2\lambda,\quad K_2=1-3\lambda+3\lambda^2,\quad K_3=1-4\lambda+6\lambda^2-4\lambda^3,\quad K_4=1-5\lambda+10\lambda^2-10\lambda^3+5\lambda^4,$$

$$\lambda=\frac{C_w}{C_b}\cdot\frac{OG}{h}$$

但し，b：船の半巾，C_b：方形肥瘠係数，C_w：水線面積係数，h：吃水，m：GM，OG：吃水線から重心迄の距離（水線下方向を正とする），g：重力加速度

Table 2. Condition of ship (TOYAMARU)

L_{pp} = 113.2 m, B = 15.85 m, D = 6.80 m,

		Light condition	U/W condition	Full condition
Disp.		3,964.00 tons	5,258.70 tons	5,364.10 tons
Draft	Fore	3.57 m	4.73 m	4.81 m
	Aft	4.36 m	5.01 m	5.06 m
	Mean	3.97 m	4.87 m	4.94 m
GM		0.91 m	0.91 m	0.98 m
KG		6.62 m	6.44 m	6.36 m
C_p		0.603	0.640	0.643
C_b		0.542	0.584	0.587
C_w		0.735	0.799	0.804

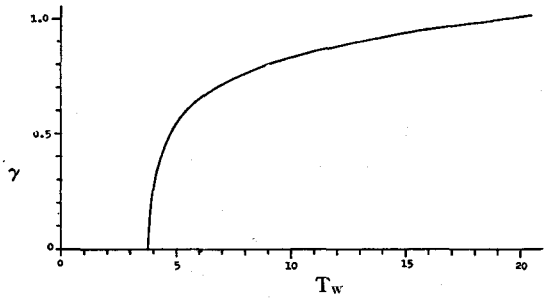

Fig. 12. Effective wave slope coefficient

Table 2 の航海状態について，γ を計算すると，

$$\gamma = 1 - 0.676\beta + 0.462\beta^2 - 0.157\beta^3$$

$$\beta = \frac{32}{T_2}$$

之を図示すると，Fig. 12 となる。

IV 航路に於ける波浪による横揺れ

IIに於て計算した波浪は，有意義波であるが，今，航路の波浪を，この算定した波と同一の波高波周期の規則波であるとして，横揺れの運動方程式を解き，波浪による強制横揺れのみを考えると，横揺の最大振巾は次式[9]で与えられる。

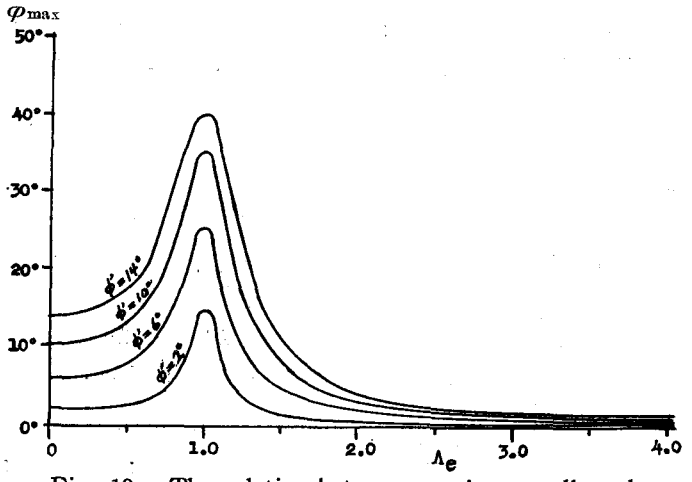

Fig. 13. The relation between maximum roll angle and effective turing factor

$$\varphi_{max} = \frac{\phi'}{\sqrt{(1-\Lambda_e^2)^2 + 4\kappa^2\Lambda_e^2}} \quad (1)$$

但し，φ_{max}：横揺の最大角，Λ_e：出会周期と船の横揺固有周期の比 ($T_s/T_e = \nu_s/\nu_e$)

ϕ'：有効波傾斜($=\phi\gamma\sin\chi$)

$\varphi' = 2°, 6°, 10°, 14°$に対して，$\varphi_{max}$と$\Lambda_e$との関係を Fig.13に図示する。

基準航路に於けるΛ_eについては，連絡船は基準航路を往復するから，IIに於て計算した8主方位に対して，出会の周期は各々二つの値をとる。近似的に基準航路を真方位 0°とすると，Figs. 14～21 となる。

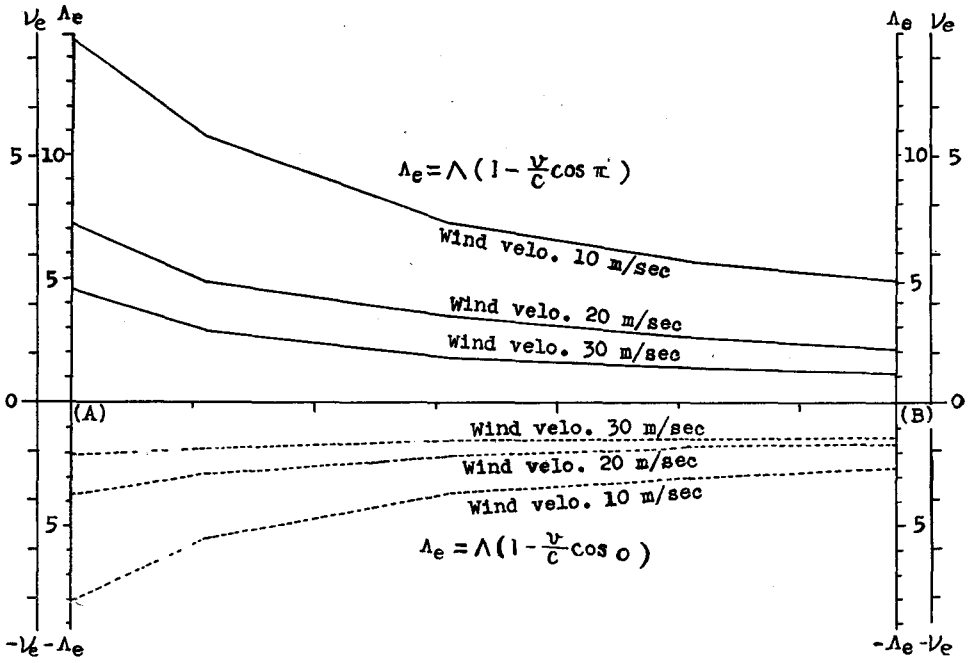

Fig. 14. Effective turning factor on the standard course for North

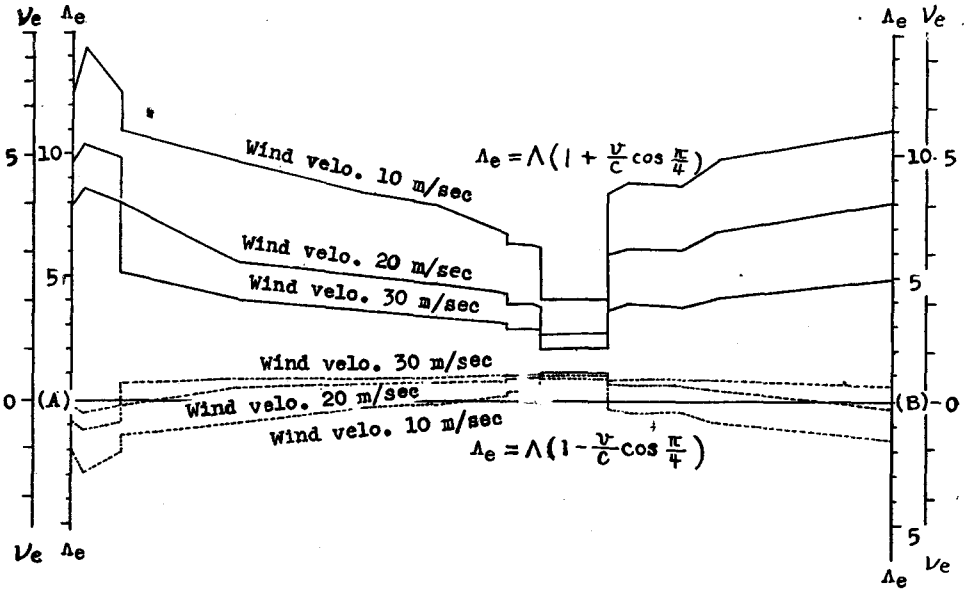

Fig. 15. Effective turning factor on the standard course for NE

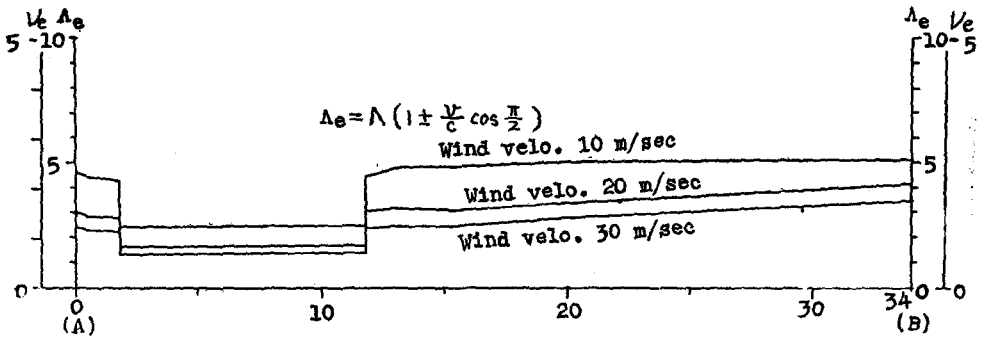

Fig. 16. Effective turning factor on the standard course for East

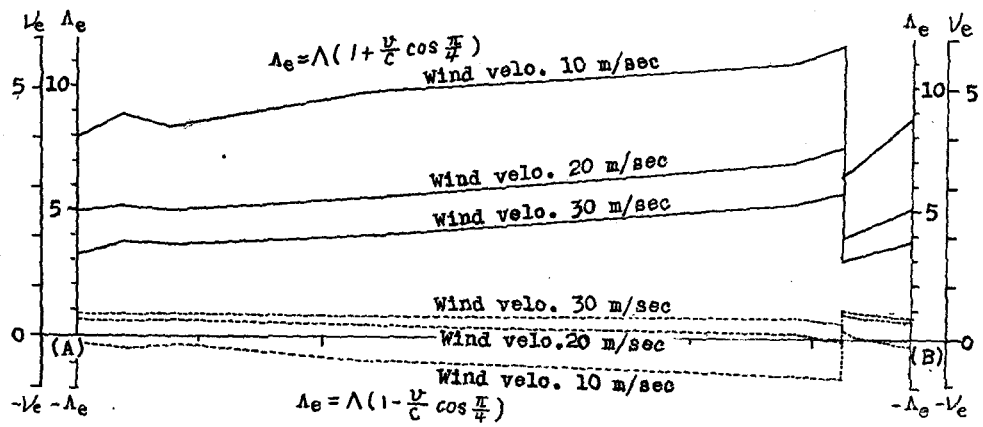

Fig. 17. Effective turning factor on the standard course for SE

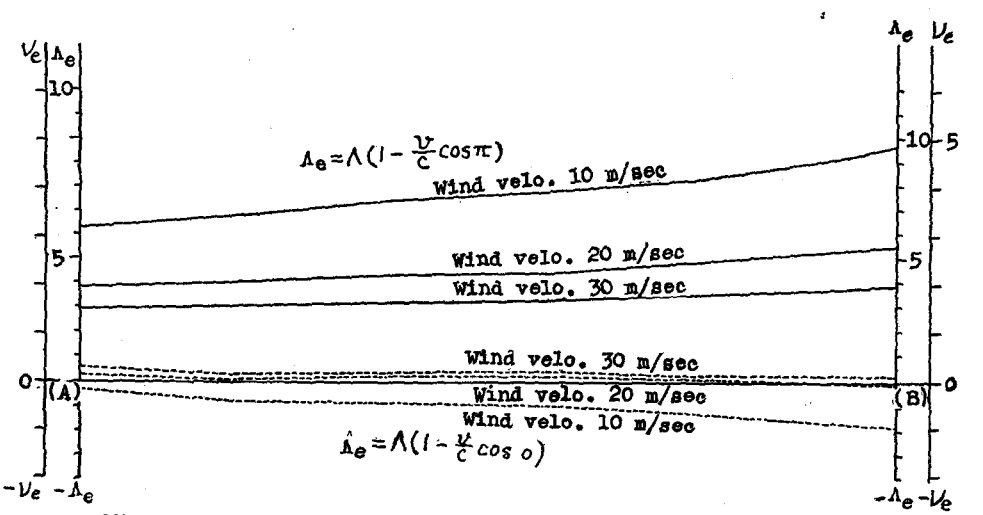

Fig. 18. Effective turning factor on the standard course for South

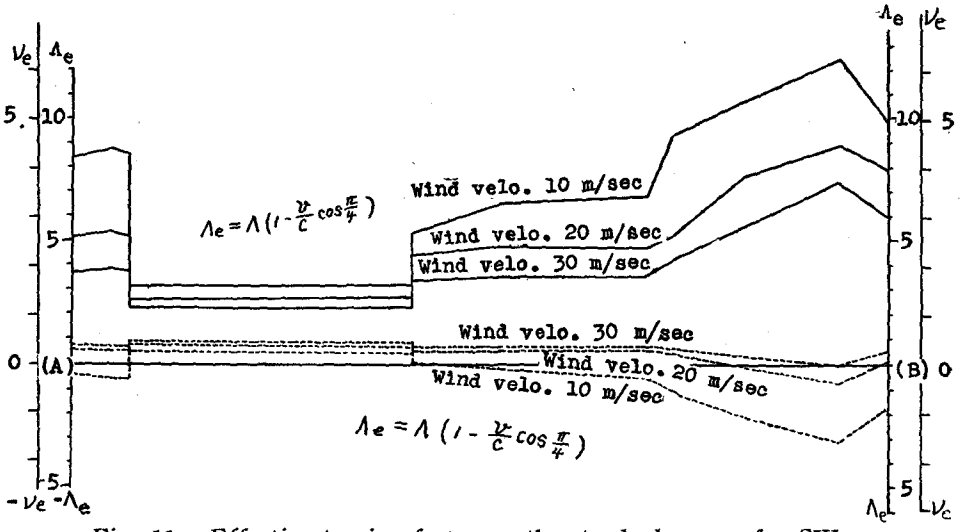

Fig. 19. Effective turning factor on the standard course for SW

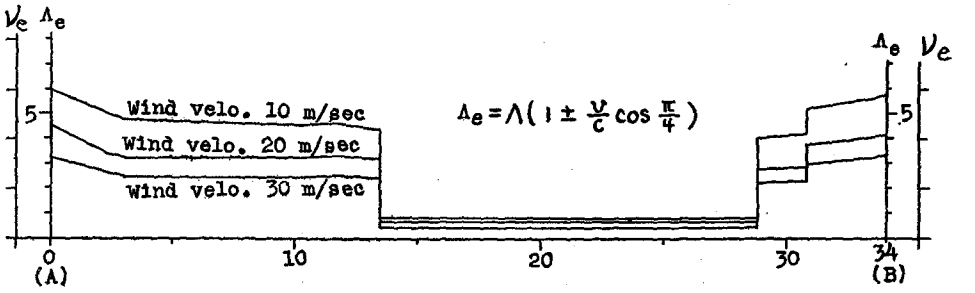

Fig. 20. Effective turning factor on the standard course for West

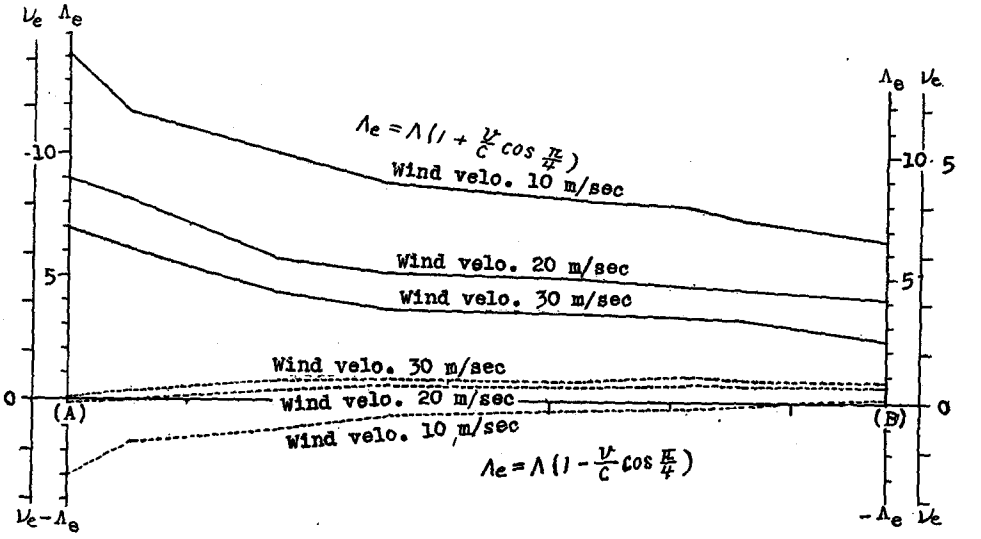

Fig. 21. Effective turning factor on the standard course for NW

V 考 察

(1) 航路上の任意の点に於ける横揺れの予報

Fig. 1 の基準航路上の点が定まると，Fig. 2 より各方位に対する吹送距離が分る。その時の風速，風向が分ると，Figs.3～10より，波高，波周期が分り，$L_W=1.57\cdot T_W^2$(波長)から，波傾斜($\phi=\pi\cdot\frac{H_W}{L_W}$)，Fig.12より有効波傾斜係数 γ を求め，船の進行方向が定まれば，Figs.14～21より Λ_e 及び χ が分る。

従つて，有効波傾斜角 ϕ' 及び，出会周期，横揺固有周期比が分るから，Fig.13から，その点に於ける最大横揺れ角を予報することが出来る。

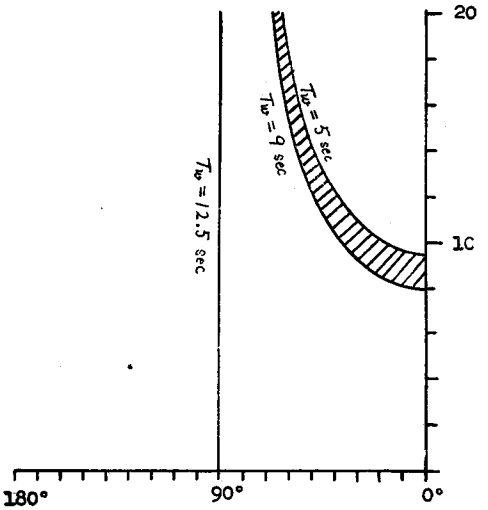

Fig. 22. The relation between speed and direction sea encounter when heavy rolling motion occurs for wave period 5 sec. to 9 sec.

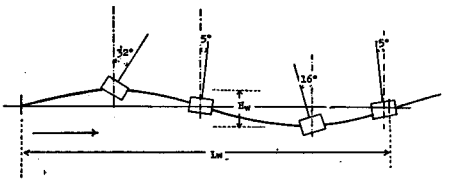

Fig. 23. Relative position of ship to wave when maximum angle of roll occurs for $T_W=10$ sec. and $H_W/L_W=1/20$

(2) 航路上に於ける横揺れ

Fig. 13 に示す様に $\Lambda_e=1$ のとき，横揺れ角は最大値をとり，且つ，$\Lambda_e\fallingdotseq 1$ の附近では，横揺れ角は大きな値をとる。従つて，Figs. 14～21に於て Λ_e のこの値の附近の航路上の点では特に注意が必要となる。又之より分る様に，吹送距離の大きな地点，方向には特に注意を要する。

(3) 有效傾斜係数 γ は Fig. 12 に示す通り $T_W=3.8$ sec. に於て $\gamma=0$，従つて，之より短い波に於ては横揺れは起きないことが分る。

(4) 最大横揺れの起る場合の船と波の相対位置をFig. 23に示す。

之は，$\varphi=\varphi_{max}\sin(\frac{2\pi}{T_e}\cdot t-\varepsilon)$，$\varepsilon=\tan^{-1}\frac{2\kappa\Lambda_e}{1-\Lambda_e^2}$より求め，傾斜方向は横揺の角速度の符号より定める。

(5) 激しい横揺れを避ける法

i. 出会角度を変える法，$\phi'=\phi\cdot\gamma\cdot\sin\chi$に於て，$\chi$ を変えると，有効傾斜角は小となる，従つてFig.13に示す様に，横揺れ角は小となる。

ii. 速度を変える法，$T_e=T_s$のとき最大の横揺れが起る。[9]従つて，

$$T_s=\frac{L_W}{c-V\cos\alpha}$$

但し，α：船と波の進行方向のなす角(船尾より測る)より$T_W=5$～9sec.について求めると Fig. 22 となる。この間に於て激しい横揺れの起る範囲を避ける速度又は出会角度をとればよい。

VI 結 言

本論文に於て，(i)波浪の算定に当つては，吹送距離の不連続点について特別に考慮していない。(ii)横揺れ以外の動揺との相互作用を考えていない。(iii)危険予報に言及していない。

今後の問題として，極めて一般的な理論と，仮定を用いているので，実際の予報の適用に当つては，航路上に於ける波浪と気象状態との対応，特に生成過程に於ける波浪に対する考察，横揺れが一般に非線型であることに対する考察及び，連絡船上に於ける実測の結果の解析を必要とする。

例えば実測値として昭和24年12月1日より25年1月31日，青森県大間崎沖を通過する際の横揺角を海上状

態に対して Fig. 24に示す如きものがある。[13]

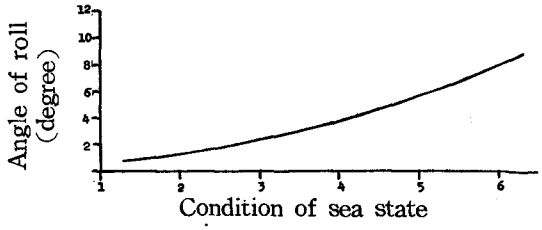

Fig. 24. The maximum angle of roll as observed on the ship

最後に，この研究についての資料を下さつた東京大学工学部船舶工学科元良助教授並びに国鉄青函局津野実氏に深謝する。

文　　献

1) Weinblum, G. & Denis, M. St. (1950). On the motions of the ships at sea. *Trans. Soc. N.A. & M. E.* (58), 184-248.

2) Sverdrup, H. U. & Munk, W. H. (1947). *Wind, sea and swell; theory of relation for forecasting.* 37p. H. O. pub. 601.

3) 海上保安庁 (1950). 風波及びうねりの予報 (その1). 水路要報 (19), 126-135.

4) ———— (1950). 同　上 (その2). 同　誌 (20), 200-209.

5) ———— (1950). 同　上 (その3). 同　誌 (21), 234-239.

6) 造船協会 (1954). 風波の生成と減衰，及びその予報の理論. 造船協会誌 (309), 9-21.

7) 海上保安庁 (1949). 津軽海峡水深図. 海図 (6075).

8) 造船協会 (1953). 船舶工学便覧 第2分冊. 364p. 東京; コロナ社.

9) 米国造船協会 (1943). 基本造船学 下巻. 536p. 東京; 天然社.

10) 松平　精 (1953). 基礎振動学. 292p. 東京; 共立出版.

11) Williams, A. J. (1952). An investigation into the motions of ships at sea. *Trans. Inst. Nav. Arch.* (95), 70-91.

12) 梶浦欽二郎・三好寿・高野健二 (1955). 八丈島の波浪. 海洋資源開発調査研究報告 (1), 1-5.

13) 加藤　弘 (1955). 縦列矩形板型彎曲部竜骨の横動揺防止効果に就いて. 造船協会論文集 (87), 87-96.