



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	船体運動に対する人体の応答からみた船上作業の安全評価法に関する研究
Author(s)	木村, 暢夫
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産学)
Dissertation Number	乙第3798号
Issue Date	1990-06-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/32716
Type	doctoral thesis
File Information	3798.pdf



学位論文内容の要旨

学位の種類	水産学博士	氏名	木村 暢 夫
学位論文題名			
船体運動に対する人体の応答からみた 船上作業の安全評価法に関する研究			
漁労作業の安全性を向上させる上で、海中転落など人間がバランスを崩すことが原因で引き起こされる人身事故は深刻な問題であり、その対策は極めて重要となる。人身事故の中で、特に海中転落事故は事故発生時の死亡率が極めて高く、旧来早急な対策の必要性が叫ばれてきた問題である。しかし、この種の事故は、作業環境をはじめとして人的要素等数多くの要因が影響しあった結果発生しており、事故対策の上から画一的取扱いは困難であった。そのことが具体的対策を設定できなかった理由でもあった。本論文においては、船上での人身事故の問題を、力学的視点から船体運動によって引き起こされる物理現象として位置づけた。船体運動は、人間の作業及び行動における力学的バランスに振動的な強制力として大きな影響を与えている。人体に発生する揺れやバランスが崩れるメカニズムの解明は、複雑な過程を持つ船上での人身事故を、船体運動に対応する事象として捉えることで可能となった。従って、船体動揺と人体のバランスの安定性の側面から漁労作業の安全性を考えることが出来る。 【人体のバランス系】 漁船甲板上に発生する動揺に対し、そこに存在する人間は常時バランスを保持しようとしており、船体動揺と人体に発生する揺れとの間には、入出力関係が成り立つ。この応答系は、船体動揺が船上にいる人間への入力となり、人体の揺れが出力として発生するところから人体のバランス系とした。一方、海洋波と船体動揺との間に			

も同様に応答関係が存在し、これを船体運動系とした。海洋波、船体運動及び船上にいる人間のバランスの間には、2つの入出力系が連続した応答系として存在することになる。従って、船上における人体のバランスは、海洋波に起因する一連の応答の結果として表現できる。本論では、入力となる海洋波が極端に大きくないという条件のもとで、各入出力系に線形理論に基づく応答理論が適用できるものとした。

【実船実験】

航走中の船舶に発生する船体運動と甲板上における被験者の重心位置の変動並びに加速度応答の同時連続計測記録を得るために、北海道大学練習船及び調査船を用いて実船実験を行った。被験者には、X、Y及びZの3軸方向からなる加速度計を人体の重心高さとはほぼ等しい腹部に設置して人体の揺れを計測した。また、水平面方向における重心位置の変動は、フォースプレートを使用して計測した。種々な船体運動の大きさや周波数帯を得るために、波と船首の相対方向を変化させて実験を行った。

【結果及び考察】

- (1) 船上にいる人間の重心位置の変動は、主に両足間に分布する。前後方向においては正規分布し、左右方向においては必ずしも正規分布とはならない。横波状態で航走する横揺れや左右揺れが大きい場合、左右の足のうち支え足にピークを持つ分布となることが判明した。
- (2) 人体のバランス系において、人体の加速度応答は船体運動に対して強い線形性を持つことが判明した。そして、人体の加速度応答に対する船体運動成分のパワー寄与率から、人体に発生する加速度は、同軸方向における船体運動の加速度成分の影響を最も強く受けることを明かにした。
- (3) 人体のX、Y及びZ軸方向における加速度応答 $Y_n(s)$, $n=1, 2, 3$ は、船体の6自由度運動のうち影響の小さい船首揺れを除く5成分 $X_j(s)$, $j=1, \dots, 5$ を入力とする多入力一出力系の出力としてモデル

化することができる。システムの同定にフィードバックを有する多次元自己回帰モデルとして次式のように適用した。

$$Y_n(s) = \sum_{k=1}^5 \sum_{m=1}^m h_{Y_n X_k(m)} X_k(s-m) + u_n(s)$$

$$X_j(s) = \sum_{k=1}^5 \sum_{m=1}^m h_{X_j X_k(m)} X_k(s-m) + \sum_{m=1}^m h_{X_j Y_n(m)} Y_n(s-m) + v_j(s)$$

ここで、 $h_{Y_n X_k(m)}$ 、 $h_{X_j X_k(m)}$ 及び $h_{X_j Y_n(m)}$ はインパルス応答関数を表し、 $u_n(s)$ 、 $v_j(s)$ は雑音を表す。回帰モデルの次数は、 X 、

Y 及び Z のいずれの軸方向においても、4~7次の範囲であった。

(4) 船体動揺という数量的変量から人間のバランスという定性的反応を判定する手法として、判別分析が極めて有効であることを明らかにした。バランス状態の判定要因としては、船体加速度のパワースペクトルの1次モーメント $M1$ が有効で、 X 、 Y 及び Z 軸の3方向の $M1$ の値で、人体のバランス状態を十分推定できることが判明した。

その結果、次式に示す線形判別関数

$$T = M1x + 0.1659M1y + 0.1133M1z$$

により、甲板上における乗組員のバランス状態を、統計的に判断することが可能となった。また、人間がバランスを崩し始める閾値 $T=0.220$ を統計的に推定した。

(5) 水槽実験やOSM計算により、北海道で代表的に使用されている4種の漁船の甲板上における加速度分布を推定した。その結果、どの漁船においても向い波から横波までの航走状態で漁船甲板上には大きな加速度が発生し、船速の減速が甲板上における加速度環境の改善に極めて有効であることが確認された。また、漁船規模が小さくなるほど甲板上に大きな加速度が発生している。

(6) 人間のバランス状態に関する船体加速度による評価法と水槽実験やOSMによる船上に発生する加速度の推定法を組み合わせることにより、船上の作業環境を人体のバランス系の側面から評価する

ことを可能した。

(7) 具体的な漁業への適用として、オホーツク沿岸で行われているほたて桁曳き網漁業に従事している漁船を対象に、船上に発生する動揺と作業甲板の位置の関係から漁労作業の安全性を検討した。その結果、現在一般的に使用されているブリッジ前方に作業甲板が位置する漁船に比べ、船首船橋楼型の漁船の方が作業の安全性確保の点で優れていることを指摘した。

【漁業への具体的提案】

これらの研究成果に基づき、漁船乗組員がバランスを崩すことによって発生する海中転落事故など人身事故安全対策を(1)漁労作業を安全に行うための限界波高に対する漁船の運用条件の基準化(2)漁船設計時における構造上の改良による動揺環境の改善(3)船上での作業環境をリアルタイムに推定するために、漁船への計算機の普及とその有効利用を提案する。

なお、漁船乗組員のバランス状態の判定を行った線形判別関数及びバランスの安定性に関する閾値は、実船実験のデータを基に統計的に推定しているため、より一層被験者及びデータ数をふやすことが必要である。また、被験者の船体動揺に対する学習効果や疲労の影響に関する調査は今後の課題である。

船体運動に対する人体の応答からみた
船上作業の安全評価法に関する研究

平成 2 年

木村 暢 夫

目次

第 1 章	緒論	1
第 2 章	船上作業中の海中転落事故要因の分析	9
2 - 1	漁労作業の安全性に関する問題点	9
2 - 2	漁船海難における海中転落事故	11
第 3 章	船体運動に対する人体の応答システムと解析法	18
3 - 1	応答の力学的関係	18
3 - 2	計測記録の処理と統計的解析	26
3 - 2 - 1	統計解析	26
3 - 2 - 2	周波数解析	27
	(1)パワースペクトル	27
	(2)マルチプルコヒーレンシ	27
	及びパワー寄与率	
3 - 2 - 3	多次元自己回帰モデル	32
第 4 章	人体のバランス系に関する実験と結果	37
4 - 1	調査船及び練習船による実験	37

4 - 1 - 1 実験船	37
4 - 1 - 2 船体運動及び被験者の重心位置における加 速度応答の計測	38
4 - 1 - 3 被験者の重心位置の変動の計測	39
4 - 1 - 4 波高の計測	40
4 - 2 甲板上における人体の重心位置の変動	42
4 - 2 - 1 フォースプレート上に射影した人体の重心 位置の分布	43
4 - 2 - 2 重心位置の変動にみられる統計的特性	45
4 - 3 船体運動に対する人体の応答特性	47
4 - 3 - 1 船体運動と人体の加速度応答の パワースペクトル	49
4 - 3 - 2 周波数領域における応答特性	49
4 - 4 人体のバランス系の同定	51
4 - 4 - 1 加速度応答の多次元自己回帰モデル	51
第 5章 人間の状態維持に関する船体加速度の評価法	81
5 - 1 人間のバランス状態に関する判別分析	81
5 - 1 - 1 線形判別関数による評価	82

5 - 1 - 2	人間のバランス状態を評価するための 判別要因の選定	84
5 - 2	判別要因と人体のバランス評価	85
5 - 2 - 1	船体加速度のパワースペクトルの一次モ ーメントによる評価	86
第 6 章	漁船甲板上に発生する加速度の分布に関する実験	98
6 - 1	水槽実験	98
6 - 1 - 1	供使模型船	98
6 - 1 - 2	実験施設及び装置	100
	実験水槽及び模型船曳航電車	100
	運動計測装置	100
	波高計	101
6 - 2	実験方法	102
6 - 3	漁船の規則波中における加速度応答	103
6 - 3 - 1	漁船種類と加速度応答	104
6 - 3 - 2	船速と加速度応答	105
第 7 章	各種漁船上での作業の安全評価	120

7 - 1	漁船の作業甲板上に発生する加速度の OSMによるの推定	120
7 - 2	総合判別指数 Tによる安全評価	122
第 8章	総合考察	143
8 - 1	総合判別指数 Tによるほたて貝桁曳網漁船の 漁労作業の安全評価	144
8 - 1 - 1	操業状態	144
8 - 1 - 2	船首船橋楼型漁船におけるの船型の特徴	145
8 - 1 - 3	総合判別指数 Tによる作業環境の判定	146
8 - 2	漁業への具体的提案	148
	謝辞	158
	参考文献	159

記号表

第3章

t, V, χ	時間、船速、波の進行方向と船首方向との相対角
$E(t; V, \chi)$	波浪外力
$X_j(t)$	船体運動系の出力。添字 $j=1, 2, \dots, 6$ は、船体運動系の出力の成分を表す。以後、各系の入出力成分を表すために添字 k, n などを使用する。
$h_{x_j E}(\tau; V, \chi)$	海洋波に対する船体運動の成分 $X_j(t)$ のインパルス応答関数。以後、 V を固定して全ての応答を表現する。 $h_{x_j E}(\tau; V, \chi)$ は、 $h_{x_j E}(\tau; \chi)$ と表現される。
$Y_n(t), Y_n(t; \chi)$	人体バランス系の出力
$h_{Y_n X_j}(\tau)$	船体運動 $X_j(t)$ に対する人体のバランス系の出力 $Y_n(t)$ のインパルス応答関数
$M(t)$	人体に発生する揺れ
ω	円周波数
$S_E(\omega; \chi)$	波のパワースペクトル
$S_{x_j x_j}(\omega; \chi)$	船体6自由度運動のパワースペクトル
$R_{x_j x_j}(\tau; \chi)$	船体6自由度運動の自己相関関数
$E[]$	統計的な期待値
$S_{x_j E}(\omega; \chi)$	海洋波と船体運動系の出力成分のクロススペクトル
$H_{x_j E}(\omega; \chi)$	船体運動系における周波数応答関数
$C_{0x_j E}(\omega; \chi)$	コスペクトル
$Q_{ux_j E}(\omega; \chi)$	コードレイチャスペクトル
$\sigma_{x_j E}(\omega; \chi)$	位相特性
$S_{x_j x_k}(\omega; \chi)$	船体6自由度運動の各成分間のクロススペクトル

$R_{x_j x_k}(\tau; \chi)$	船体6自由度運動の各成分間の相互相関関数
$S_{Y_n Y_n}(\omega; \chi)$	人体バランス系の出力 $Y_n(t; \chi)$ のパワースペクトル
$R_{Y_n Y_n}(\tau; \chi)$	人体バランス系の出力 $Y_n(t; \chi)$ の自己相関関数
$Y_{0n}(t; \chi)$	$Y_n(t; \chi)$ のうち入力に線形に対応する部分
$u_n(t)$	雑音(入力に対し線形な関係を示さない)
$S_{Y_n X_k}(\omega; \chi)$	人体のバランス系の入出力間のクロススペクトル
$R_{Y_n X_k}(\tau; \chi)$	人体のバランス系の入出力間の相互相関関数
$S_{Y_{0n} Y_{0n}}(\omega; \chi)$	入力に対し線形に対応する部分が占めるパワースペクトル
$H_{Y_n X_k}(\omega; \chi)$	人体のバランス系の周波数応答関数
$h_{Y_n X_k}(\tau; \chi)$	人体のバランス系のインパルス応答関数
Δt	A/D変換における読み取り時間間隔
N, h	時系列のデータ数、ラグ数
$X(s)$	$X(t)$ を Δt でA/D変換した時系列データ、 $s=1, \dots, N$
$a(0), a(1), a(2)$	ハニング・ウィンドウ
$\gamma^2_{Y_n}; 1, 2, \dots, 6(\omega)$	マルチプルコヒーレンシー
$X_0(s), Y_0(s)$	サブシステムの出力。
$u(s), v(s)$	サブシステムの出力に入り込んでいる雑音
$h_{YX}(m), h_{XY}(m)$	サブシステムのインパルス応答関数、 $m=1, \dots, m$
$h_{Y_n X_k}(m)$	$X_k(s)$ から $Y_n(s)$ へのインパルス応答関数
$h_{jk}(m)$	$X_k(s)$ から $X_j(s)$ へのインパルス応答関数
$X_j(\omega), V_j(\omega)$	$X_j(s), V_j(s)$ のフーリエ変換したもの
$H_{jk}(\omega)$	$X_k(s)$ から $X_j(s)$ への周波数応答関数
$X(\omega), V(\omega)$	$X_j(\omega), V_j(\omega)$ のマトリックス表現
$H(\omega)$	$H_{jk}(\omega)$ のマトリックス表現
I	単位行列

$b_{jk}(\omega)$	$v_k(s)$ から $X_j(s)$ への周波数応答関数
$B(\omega)$	$b_{jk}(\omega)$ のマトリックス表現
$S v_k(\omega)$	$v_k(s)$ のパワースペクトル
$r_{7k}(\omega)$	パワー寄与率
$A_{7j}(m)$ 、 $A_{77}(m)$	回帰係数
MFPE(m)	多次元最終予測誤差
M 、 k 、 σ_m	モデルの次数、モデルの次元、予測誤差の共分散行列

第4章

L 、 B 、 D	船長（垂線間長さ）、幅、深さ
Disp.	総トン数
D_f 、 D_a 、 D_m	船首喫水、船尾喫水、平均喫水
Trim	トリム
GM	横メタセンター高さ
Tr	横揺れ周期
X_c 、 Y_c	フォースプレート上に射影した人体の重心位置
Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4	Z軸方向のロードセルにおいて発生した歪量
X_l 、 Y_l	フォースプレートの中心からロードセルまでの水平距離
L_x 、 L_y	前足の爪先から後ろ足のかかとまでの前後方向の距離、 左右方向における足の最大開脚幅
MEAN、 σ	X_c 、 Y_c の平均値、標準偏差

第5章

C_x 、 C_y 、 C_z	線形判別関数の係数
A_x 、 A_y 、 A_z	船体加速度のr.m.s.値
F_x 、 F_y 、 F_z	船体加速度の周波数
M_{1x} 、 M_{1y} 、 M_{1z}	船体加速度のパワースペクトルの1次モーメント

T 総合判別指数

第6章

KG 基線から重心までの垂直距離
✕G 船体中央から重心までの水平距離
kyy 縦慣動半径
Fn フルード数
 $\sqrt{L/\lambda}$ 船長波長比の平方根
 λ 波長
F.P., ✕, A.P. 船首垂線、船体中央、船尾垂線
SS 船体の船首尾方向における位置
Zaccel. 船体加速度 (Z軸方向) の全振幅
 ξ_a 波高
g 重力加速度 (9.8m/sec^2)

第7章

x, y, z 船体重心位置に対する任意の位置 Pの相対座標
 $\ddot{\xi}_p, \ddot{\eta}_p, \ddot{\zeta}_p$ P点に発生する加速度成分
 $\ddot{\xi}_g, \ddot{\eta}_g, \ddot{\zeta}_g$ 重心位置に発生した加速度成分
 $\ddot{\theta}, \ddot{\phi}, \ddot{\psi}$ それぞれ、縦揺れ、横揺れ、船首揺れの角加速度
 $H_{1/3}$ 有義波高
 T_w 平均周期

第8章

λ/L 波長船長比

Figure Contents

- Fig. 2- 1 Annual death rate of marine personal disaster.
- Fig. 2- 2 Annual number of marine personal disaster.
- Table 2-1 The statistics of marine personal disaster
in near the coast of Hokkaido, Japan.
- Table 2-2 The situation of occurrence on the marine
personal disaster.
- Fig. 3- 1 Block diagram of the input-output representations
from the wave excitation to the subject's motion.
- Fig. 3- 2 Simplified feed back system of input/output
response.
- Fig. 4- 1 The lines of USHIO-MARU.
- Fig. 4- 2 The lines of HOKUSEI-MARU.
- Fig. 4- 3 A general view and the arrangement of load
cell of FORCE-PLATE.
- Fig. 4- 4 Relative direction of the ship's course
for the wave.
- Fig. 4- 5 Experimental area of the USHIO-MARU.
- Fig. 4- 6 Experimental area of the HOKUSEI-MARU.
- Fig. 4- 7 The record of the movement of C.G. of human
body in the X, Y-direction.
- Fig. 4- 8 The state of the subject's balance on the
FORCE-PLATE.
- Fig. 4- 9 Examples of the distribution of C.G. of human body
on the FORCE-PLATE.
- Fig. 4-10 Histogram of the distribution of C.G. of human
body on the FORCE-PLATE in the X, Y-direction.
- Fig. 4-11 The relationship between input and output to
the response system of the human body.

- Fig. 4-12 Recorded data of ship motions and human response accelerations.
- Fig. 4-13 Power spectra of the accelerations occurred on the human body and ship motions.
- Fig. 4-14 Multiple coherency of the response of a human body for the ship motions.
- Fig. 4-15 Power contribution of the response of a human body for the ship motions.
- Fig. 4-16 Power spectra of the accelerations occurred on the human body and ship motions.
- Fig. 4-17 Multiple coherency of the response of a human body for the ship motions.
- Fig. 4-18 Power contribution of the response of a human body for the ship motions.
- Fig. 4-19 Comparision between the forecasting values used the multiple auto regressive model and measured values.
- Table 4-1 Main particulars and experimental conditions of USHIO-MARU.
- Table 4-2 Main particulars and experimental conditions of HOKUSEI-MARU.
- Table 4-3 Relationship between wave scale and wave height.
- Table 4-4 Classification of subjects participated in the experiments.
- Table 4-5 The properties of the distribution for the C.G. of the subject in the X, Y-direction.
- Table 4-6 Impulse response function of the response of human body used multiple auto regressive model (model order 7).
- Photo 4-1 Research ship USHIO-MARU.

- Photo 4-2 Training ship HOKUSEI-MARU.
- Photo 4-3 View of acceleration measurement device on the subject.
- Photo 4-4 View of measuring condition.
- Fig. 5- 1 The balance of the subject based on the frequency and r.m.s value of ship acceleration.
- Fig. 5- 2 Power spectra of ship acceleration.
- Fig. 5- 3 Power contribution of components of ship accelerations for the accelerations occurred on the subject in the X-direction.
- Fig. 5- 4 Power contribution of components of ship accelerations for the accelerations occurred on the subject in the Y-direction.
- Fig. 5- 5 Power contribution of components of ship accelerations for the accelerations occurred on the subject in the Z-direction.
- Fig. 5- 6 Power contribution of ship accelerations for the accelerations occurred on the subject.
- Fig. 5- 7 The relationship between human balance and distribution of first spectra moment of ship acceleration.
- Fig. 5- 8 Discrimination of the state of human posture by the linear discriminate function.
- Fig. 5- 9 Boundary value of spectra first moment of ship acceleration for the threshold value.
- Fig. 6- 1 The lines of 19.9 GT small salmon fishing vessel.
- Fig. 6- 2 The lines of 96 GT salmon fishing vessel.
- Fig. 6- 3 The lines of 124 GT trawler.
- Fig. 6- 4 The lines of 349 GT big offshore trawler.

- Fig. 6- 5 Schematic diagram of a towing tank.
- Fig. 6- 6 Schematic diagram of a measuring system.
- Fig. 6- 7 Arrangement of the accelerometers on the deck and positions on which response functions were estimated by OSM.
- Fig. 6- 8 Acceleration response function in the Z-direction, ship speed; Fn. 0.00.
- Fig. 6- 9 Acceleration response function in the Z-direction, ship speed; Fn. 0.08.
- Fig. 6-10 Acceleration response function with 96 GT fishing vessel in the Z-direction.
- Table 6-1 Principal dimensions and conditions of the model ships.
- Table 6-2 Correspondence of the towing speed of model ship to the full scale ships.
- Photo 6-1 View of wave making motor.
- Photo 6-2 View of wave making flap.
- Photo 6-3 View of measurement apparatus.
- Photo 6-4 View of capacitance wave gages for wave height set on carriage.
- Fig. 7- 1 Comparision between experimental value and estimated value by OSM with 96 GT fishing vessel.
- Fig. 7- 2 Acceleration response function with 19.9 GT fishing vessel, ship speed; Fn. 0.08.
- Fig. 7- 3 Acceleration response function with 96 GT fishing vessel, ship speed; Fn. 0.08.
- Fig. 7- 4 Acceleration response function with 124 GT fishing vessel, ship speed; Fn. 0.08.

- Fig. 7- 5 Acceleration response function with 349 GT fishing vessel, ship speed; F_n . 0.08.
- Fig. 7- 6 ISSC standard sea spectra.
- Fig. 7- 7 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 19.9 GT fishing vessel, wave height 2.0m, ship speed; F_n . 0.08.
- Fig. 7- 8 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 96 GT fishing vessel, wave height 2.0m, ship speed; F_n . 0.08.
- Fig. 7- 9 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 124 GT fishing vessel, wave height 2.0m, ship speed; F_n . 0.08.
- Fig. 7-10 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 349 GT fishing vessel, wave height 2.0m, ship speed; F_n . 0.08.
- Fig. 8- 1 A characteristic type of a scallop vessel.
- Fig. 8- 2 The lines of scallop vessel.
- Fig. 8- 3 An arrangement plan of the fore bridge type scallop vessel.
- Fig. 8- 4 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 0.5m, ship speed; F_n . 0.082.
- Fig. 8- 5 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 1.0m, ship speed; F_n . 0.082.

Fig. 8- 6 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 0.5m, ship speed; F_n . 0.411.

Fig. 8- 7 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 1.0m, ship speed; F_n . 0.411.

Table 8-1 Principal characteristics of scallop vessel.

第 1 章 緒 論

人間が交通・生産活動の手段として船舶を利用して以来、海難事故は常に付帯してきた問題であり、漁業従事者にとって極めて身近な問題となってきた。そのため、古くから漁船漁業の安全性を確保するために数多くの分野で努力が払われてきた。具体的には、漁船船体の耐航性が向上し、更に航海・通信機器の発達が行の安全性を高めた。また、漁業機械や計測機器の発達が行作業のシステム化・省力化をおしすすめた。こうした船体や設備の改善・近代化が進んだ結果、近年我国における漁船の海難事故発生件数は減少傾向にある^{〔1〕～〔3〕}。船舶海難に因らない人身事故の発生件数においても、年変動はあるものの同様に減少傾向が見られる。人身事故の中で、特に海中転落事故は発生件数こそ少ないが、事故発生時の死亡率が極めて高く、旧来早急な対策の必要性が叫ばれてきた問題である。

海中転落事故は、船舶全体からみても殊に漁船において数多く発生しており、漁業従事者にとって常に深刻な問題となってきた。北海道及びその周辺を含めた北洋水域における漁業には、厳冬期の厳しい自然条件が備わっている。更に、一人乗り漁船の割合が高いという労働条件も加わり、海中転落事故発生が直接重大事故へと結び

付く可能性が極めて高い。しかし、この種の事故は、作業環境をはじめとして人的要素等数多くの要因が影響しあった結果発生したものと考えられ、事故対策の側面から検討した場合、画一的な取扱は困難であった。また、事故が必ずしも漁船の極限状態において発生しているのではなく、むしろ日常的な漁労作業の過程において数多く発生していることが、この問題に関する原因の解明を複雑にしてきた。このように、人的要素が複雑に加味された問題に対し、発生原因とその過程を総合的に判断することは非常に困難であり、そのことがこの問題に対する具体的方策を設定できなかった大きな理由であった。

海中転落事故に対する安全対策への取り組みは、従来から種々行われてきた。基礎的な分野としては、海中転落事故の発生原因に関する実態的な調査・研究が、日本海難防止協会^{〔1〕}～^{〔3〕}等を中心として行われている。また、漁業における労働災害の調査研究は、海上労働科学研究所を中心として行われている。服部ら^{〔4〕}、三輪ら^{〔5〕}は、同研究所の研究事業として漁船員の海中転落事故の発生要因について調査報告を行っている。最近では因子分析等の統計解析の手法が良く用いられる様になり、人間のエラーといった感覚的な捉え方しかされなかった部分にも統計的な判断が下されるようになった。桐谷^{〔6〕}は、海中転落事故発生メカニズムや事故のパター

ンを数量化理論を用いて因子分析を行った。

これらの調査研究の多くは、事故発生の要因を項目として提示するにとどまり、事故防止に対する具体的な提起はなされなかった。結局、多くの場合において、安全対策は漁労従事者個々の注意に委ねられる結果となってきた。

一般に海中転落事故に至る過程は複雑であり、その要因も単一の場合より複数の要因が重合している場合が多い。しかし、力学的視点から見れば、海中転落事故は、基本的には船体運動により引き起こされる物理現象として捉えることができる。川島ら^{〔7〕}は、漁業を対照とした実態調査資料を基に検討し、第一の要因は、剛体としての空間における漁船の6自由度運動であると規定した。そして、O S M (Ordinary Strip Method)を用いて、漁船の波浪中での船体運動の理論計算を行い、甲板上に発生する加速度応答関数を推定した。今枝ら^{〔8〕～〔9〕}は、重心位置測定装置を使用して、船体運動により発生する身体動揺について報告している。また、斉藤ら^{〔10〕}は、人間の姿勢に関する研究から、水平方向における振動入力に対する生体の応答について報告している。近年、こうした振動現象に対する人間のバランス状態に関する研究は、著者らを中心として行われてきた^{〔11〕～〔17〕}。

船体運動は、人間の作業及び行動における力学的バランスに振動

的な強制力として大きな影響を与えている。従って、船体運動によって人体に発生する揺れやバランスが崩れるメカニズムを解明することは、複雑な過程を持つ海中転落事故を、船体運動に対応する事象として捉えることが可能となる。そして、甲板上に発生する動揺と人体のバランス状態との関係からこの問題を検討することができる。

船体動揺が乗船している人間にあたえる影響については、国際標準化機構 (International Standardization Organization) を中心に基準化が成されている^[13]。そして、この評価法に基づき、振動と居住環境に関する報告が行われてきた^{[19] ~ [21]}。神田ら^{[22] ~ [24]}は、高速艇の繰り返し衝撃、振動が腰痛へあたえる影響について報告している。また、船体動揺が人間の乗り心地に与える影響では、船酔との関係から数多く報告がされている^{[25] ~ [27]}。しかし、海中転落事故の防止を目的に、船体動揺が人間に与える影響に関する研究は、ほとんど報告がされていない。

近年、海中転落事故の防止策以外にも、事故発生後の生存という別側面からの取り組みも行われている。漁船から海中に転落した後救助されるまでの期間、洋上で生存するための作業衣を兼ねたイメージョン・スーツの開発研究である^[28]。しかし、基本的には海中転落事故防止策を考えることが重要である。

船体に発生した動揺が原因で乗組員がバランスを崩すことは、海中転落事故へ至る大きな要因であるが、他の人身事故の発生においても重要な要因となることが多い。乗組員が漁具や漁労機械との接触等により引き起こされる人身事故に関しては、見上^[29]により要因分析と漁業機械側からの安全機構の提案が成されている。

本論においては、海中転落事故の問題に乗組員がバランスを崩すことによって発生する接触事故等の場合も含め、動揺する船舶の甲板上での人間のバランスの安定性とその維持能力について究明することが、この問題を解明していく上で最も重要な物理的視点になると考えた。人間が持つ能力の問題を含め漁労作業の安全性を考えることは、漁船漁業全体をマン・マシン・システムとして体系化する上からも重要である。人間工学的視野にたち漁労作業の安全性を確立してこそ、海中転落事故等の人身事故の減少につながると判断した。

基本的には、船体運動が人間のバランス状態に及ぼす影響を明確にする必要がある。そのためには、船体運動が人体の入力となり、応答の結果として人体に揺れが発生するという入出力系を設定し、応答関係の解明と入出力系の同定を行う必要がある。次に、旧来より漁業従事者に経験的にしか捉えられていなかった、種々の海面状況で航走中の漁船甲板上に発生する加速度の分布状況を、明確にし

なければならない。更に、船体の動揺に対し人体がバランスを保つ姿勢維持能力について統計的に推定し、基準化することが必要である。これら一連の過程を明確にすることにより、船体に発生する動揺という環境条件から漁労作業の安全性を推定し、体系的に安全対策を構築することが可能となる。

上記した諸研究について、本論文では次のような構成で論ずる。

第2章において、先づ本論で問題とする海中転落事故の海難に占める位置とその重要性を要救助海難統計資料等を基に論ずる。

第3章においては、船体運動と甲板上にいる人間に発生する揺れとの力学的な関係を明確にし、船体動揺に対する人体の応答システムとして定義する。そして、船体の6自由度運動が人体への入力となり、その応答の結果として人体に揺れが発生するといった多入力応答系を設定する。また、計測データの処理法や応答モデルの周波数解析及びその同定法について詳述する。

第4章においては、漁船甲板上に発生する船体動揺とそれに対応する人体の応答関係及びそのバランス維持能力を調査するために、北海道大学調査船や練習船を使用して実船実験を行った。まず実験に使用した供使船の特徴のほか船体運動や被験者の重心位置及び加速度変動等の計測に用いた計測装置の概要や計測方法について述べる。第3章で定義した応答系に対し統計及び周波数解析を行い、パ

ワースペクトル、マルチプルコヒーレンシー及びパワー寄与率等から諸特性を求める。これらの結果に基づいて、船体動揺に対する人体の応答システムの特性について論じる。さらに、船体運動に対する人体の応答システムの同定を多次元自己回帰モデルを用いて行い、入出力の関係を明確にする^{〔30〕～〔32〕}。

第5章においては、船体運動に対する人体のバランス維持の関係を判別分析を用いて明らかにする^{〔33〕}。船体の運動成分に対する判定要因の選択と人間のバランス状態を判定する線形判別関数を推定する。その結果に基づき、甲板上に発生する加速度という物理的な環境条件に対して人間が姿勢を維持できなくなる閾値の推定を試みる。

第6章においては、各種漁船の甲板上に発生する加速度の分布特性を明らかにするために、北海道周辺海域においてよく使用されている代表的な漁船4種の模型船を用い曳航・自航実験を実施した。この水槽実験において使用した模型船の特徴や水槽施設、計測装置やその実験方法についての説明を行う。模型実験の結果に基づき、向い波状態で航走中の漁船甲板上に発生する加速度の応答特性を、漁船種類や船速の関係から明らかにする。

第7章においては、種々の波浪状況下における漁船の作業甲板上に発生する加速度を、OSMを用いた計算から推定する。船体動揺

からみた漁労作業の安全性を、第5章において明らかにした線形判別関数と人間がバランスを崩しはじめる船体加速度に対する閾値との関係に基づき比較検討を行い、バランスの安定性の側面から論ずる。

第8章においては、上記結論に基づき、人間のバランス能力による船上作業の安全評価について総合的な考察を行う。具体的な漁業との対応として、北海道オホーツク海沿岸で行われているほたて桁びき網漁業に従事している漁船を対象に、船首船橋楼型の専用漁船に盛り込まれた構造上の改良が漁労作業の安全性向上に及ぼす影響を、甲板上に発生する船体動揺と乗組員のバランスの安定性の関係から論ずる^[34]。さらに、海中転落事故など漁船乗組員がバランスを崩すことが原因となり発生する人身事故を防止するための対策を提案する。

第2章 船上作業中の海中転落事故要因の分析

漁船漁業は、海中転落事故を含めた人身事故が多発している。海中転落事故に対する安全対策を究明するためには、まずこの漁船漁業が包括している安全性に関する問題点を明確にする必要がある。また、人身事故の発生状況を統計的に分析することにより、海中転落事故が人身事故に占める重要性を認識する。さらに、事故発生の基本要因を推定し、研究の視点を定める必要がある。

本章で使用する統計資料は、漁船勢力に関しては北海道農林水産統計年報に基づき、海難関係については第一管区海上保安本部の救助海難に関する報告に従う。対象とする海域は、北海道海区とする。

2-1 漁労作業の安全性に関する問題点

漁船甲板上には、限定された狭い労働空間に、漁具や漁労機械さらに各種ロープ等が混在している。また、風や波により漁船甲板上には常時船体動揺が生起している。漁労に従事する乗組員は、海水や漁獲物等のために滑りやすくなっている甲板上に、バランスを保持しながら作業に従事しなければならない。このように、漁船漁業においては、自然に支配される労働環境と漁船という限定された作

業空間等によって、陸上作業とは異なった特殊性が存在している。

また、漁労機器等の改良が進められているが、対象資源の探索及び漁獲過程において、人間の適切な判断が加味される必要があり、生産手段の自動化が難しいのが現状である。従って、人間の介在箇所が多いほど人為的エラーの発生確率は高くなる。

対象とする資源との関係から、時間的に限られた漁期の中に、最大限の生産性が要求される。そのため、漁期という時間的制約と海況という自然条件の間で操業を行えるか否かが判断される。船体規模が大きくなるほど漁船としての耐航性が増大し荒天操業も可能となるが、作業に従事する人間の能力には限界がある。結局、過酷な労働とその作業環境は海難事故を引き起こす大きな要因となり、事故発生後の対応にも直接的影響を及ぼす。

北海道における漁船勢力は1987年現在 40231隻で、このうち動力漁船は 39801隻である。漁船の構成をみると、船外機付の小型漁船が圧倒的に多く、漁船隻数全体の66%を占めている。また、無動力漁船の動力化も進んでいる。これら小型漁船のなかには、経営上の問題や従事者不足等により省力化された機械設備の導入が計られ1人乗り漁船が増加している^{[3]、[4]}。発生する海難事故に備え、集団操業方式などの安全対策をとってはいるが、事故発生時における対応の緊急性・確実性を考えると安全対策としては不十分である。1

人乗り漁船で発生する海難事故においては、2人以上乗船してさえいれば、事故の防止が可能であると判断できる場合も多く、小さなミスが大きな海難事故へと結び付く危険性がある。

2 - 2 漁船海難における海中転落事故

船舶の海難によらない人身事故（海浜事故を除く）は、大きく海中転落、負傷、病気及びその他（傷害、中毒、自殺等）の4つに区別される。

Table 2 - 1に、1974年から1988年までの15年間にわたる漁船の人身事故の発生状況を示す。また、人身事故における海中転落事故の発生状況及びかかる死亡率の経年変動をFig. 2 - 1～2に示す。

Fig. 2 - 2 によると、1974年以降漁船の人身事故の発生件数は多少の年変動はあるものの減少傾向にある。海中転落事故の発生件数は横這い状態を示していたが、1985年以降減少し始め1988年にはこれまで最低の21件となった。死亡率も、1978年以降横ばい・減少傾向を示して1986年には73.3%と最低となったが、1987年以降は増加に転じ1988年現在も90%を越える極めて高い状況にある（Fig. 2 - 1）。このように、海中転落事故の発生件数は確実な減少傾向を示してはいるが、死亡率が増加し以前と同じ高い値を示している。このことが、逆に人身事故全体の死亡率を高める結果となり、海中転

落事故の人身事故に占める比重が相対的に増大している。

また、1974年から15年間の人身事故は、2322人に対して発生している。このうち、海中転落事故の発生は586人で、負傷1023人、病氣630人、その他83人である。項目別には海中転落事故、負傷および病気の3項目で発生件数全体の96.4%を占めている。この中で、海中転落事故の発生件数は病氣とほぼ同じ全体の約25%に達している。しかし、死亡・行方不明者数では、海中転落事故が病氣の5.1倍の人数に昇っており、人身事故全体の死亡・行方不明者数733人中514人と全体の約60%に達している。さらに、事故発生件数に対する死亡率は15年間の平均では87.7%と非常に高い値を示している。このように、事故発生が直接死亡・行方不明に至る危険性が高いという点が、この問題の特徴である。

1973年から1981年までの過去9年間にわたる海中転落事故発生状況を、漁業種類や漁船のトン数別にTable 2-2に示す。この期間中の漁業において、海中転落事故を起こした人数は388人で、一般の船舶を含めた海中転落事故全体435人中89.2%に達している。発生状況別には、「漁労作業中」に事故が発生している場合が多く193人で、漁船において発生した転落事故合計388人中ほぼ半分の49.7%を占める。「その他の作業中」の状況において73人が海中転落事故を起こしており、全体的に見て61.1%がこの2つの状況において

発生していることになる。従って、何等かの船上作業中に海中転落事故が多く発生していることが確認できる。また、「不在に気づく」74人そして「甲板・タラップの歩行中」31人といった状況においても高い発生頻度を示し、海中転落事故が極めて日常的な環境においても多数発生していることがわかる。

魚種別にみた発生状況は、たら漁船(85人)、さけます漁船(69人)及びいか漁船(60人)に多く発生している。近年、北洋漁業が縮小しているためさけます漁船における発生件数に減少傾向がみられる。トン数別には、以前数多く発生していた100トン以上の漁船での発生件数が減少し、5トン未満の小型漁船に多く発生するようになってきた。

海難統計の分析結果からも明らかなように、海中転落事故が発生している状況は「漁労作業中」を含めた船上作業中が最も多く、発生原因としても漁具によるもの、船体動揺によるもの及び網やロープ等に足をからめたもの等非常に多様である。海中転落事故に至る過程も複雑であり、漁船乗組員に常時作用している船体動揺が、必ずしも転落事故の発生要因に該当している訳ではない。しかし、事故原因のうちから、漁具や漁網・ロープ等による接触や巻き込み等の発生原因とされる漁労手段と事故遭遇者との位置的問題を除いた場合、船体動揺は海中転落事故の要因の中で特に重要となる。小型

漁船で発生した海中転落事故における生存者に対する実態調査の結果からも、船体動揺と投揚網が原因^{〔1〕}、^{〔2〕}の大部分を占めていたとの報告が成されている。また、「甲板・タラップを歩行中」、「不在に気づく」といった発生状況においても、船体動揺が原因あるいは影響して数多くの転落事故が発生していると推定される。

このように、波浪中における漁船の船体動揺が、甲板上で漁労作業等に従事している乗組員の行動・作業などの諸状態における力学的バランスに振動的な強制力となって作用している。船体動揺と人体のバランスとの間には、乗組員が常時この船体動揺に対しバランスを安定に保持しながら平衡状態を保っているという応答関係が設定できる。従って、人体のバランスは入力に対する一つの制御系の出力と同様にみなされ、海中転落事故は許容量を越えた入力に対する出力の結果となる。船体動揺という物理的条件が海中転落事故発生の基本的な要因であり、海中転落事故が船体動揺に起因する物理現象であると推定できる。船体動揺に対する人体のバランスとその安定性の関係を解明することにより、この問題を検討した。

Item Year	MAN- OVERBOARD	INJURY	DISEASE	OTHERS	TOTAL
1974	51 (45)	114 (13)	69 (6)	9 (6)	243 (80)
1975	47 (44)	82 (7)	55 (5)	12 (3)	196 (59)
1976	55 (52)	96 (9)	64 (5)	12 (2)	227 (68)
1977	27 (24)	79 (5)	55 (9)	2 (0)	163 (38)
1978	40 (39)	53 (4)	35 (3)	2 (1)	130 (47)
1979	36 (32)	71 (5)	40 (6)	6 (2)	153 (45)
1980	40 (34)	83 (8)	44 (11)	5 (3)	172 (56)
1981	33 (29)	63 (6)	28 (4)	7 (3)	131 (42)
1982	45 (38)	53 (2)	43 (6)	4 (4)	145 (50)
1983	59 (49)	55 (5)	37 (7)	10 (4)	160 (65)
1984	35 (30)	56 (3)	40 (12)	2 (2)	133 (47)
1985	43 (35)	68 (6)	37 (6)	2 (1)	150 (48)
1986	30 (22)	51 (2)	25	3 (1)	109 (25)
1987	24 (22)	46 (4)	30 (6)	5 (3)	105 (35)
1988	21 (19)	53 (3)	28 (5)	2 (1)	104 (28)
TOTAL	586 (514)	1023 (82)	630 (101)	83 (36)	2322 (733)
DEATH RATE(%)	87.7	8.0	16.0	43.4	31.6

· () the number of death or missing

Table 2-1 The statistics of marine personal disaster
in near the coast of Hokkaido, Japan.

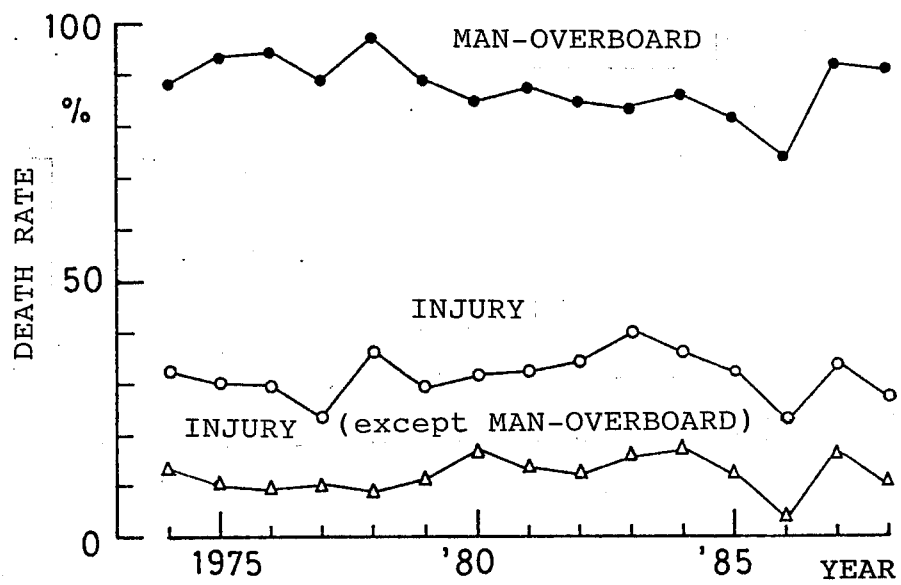


Fig. 2-1 Annual death rate of marine personal disaster.

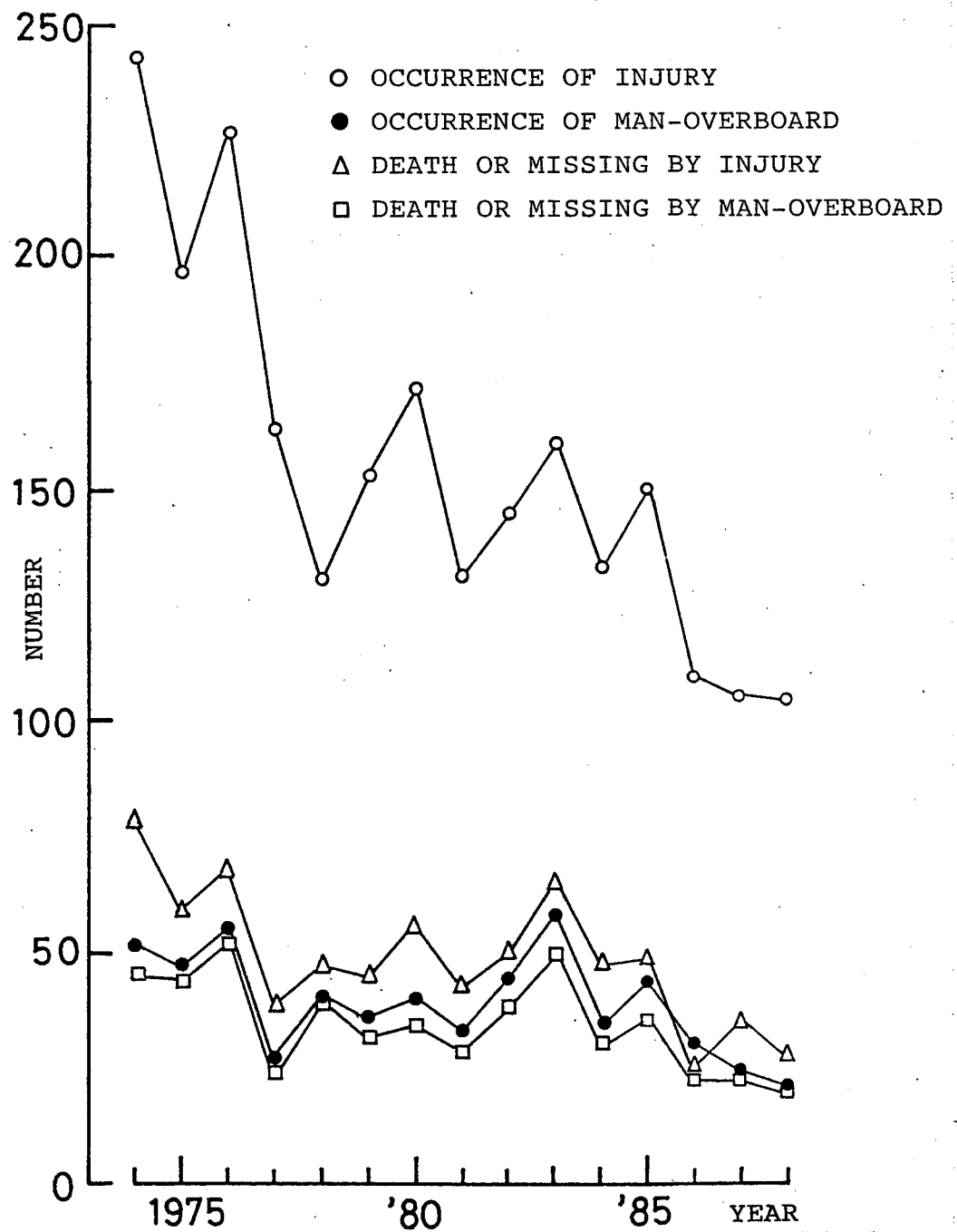


Fig. 2-2 Annual number of marine personal disaster.

Year	Classification		Kinds of fishing									Other vessel	State of occurrence					Age					Gross tonnage			
	Total	Fishing vessel	Salmon·trout	Crab	Cod	Cuttlefish	Shrimp	Flat fish	Mackerel pike	Marine algae	Others		Fishing operation	Other operation	Missing	Walking on the deck	Others	Less than 20	20 to 30	30 to 40	40 to 50	More than 50	Less than 5ton	5ton to 20ton	20ton to 100ton	More than 100ton
1973	70	66	11	8	12	8	3	3	2	3	14	6	34	6	14	9	7	7	15	28	14	6	12	6	26	26
1974	54	45	14	4	17	5	3	0	0	4	4	3	29	7	10	1	7	5	16	21	8	4	1	6	24	23
1975	52	48	7	6	17	4	4	2	1	4	2	5	27	11	8	4	2	3	18	11	15	5	5	5	17	25
1976	62	52	9	3	11	11	4	1	1	3	12	7	21	21	7	4	9	5	13	20	15	9	3	12	27	20
1977	29	20	5	1	2	6	4	0	1	3	5	2	16	2	4	4	3	0	10	6	12	1	4	7	10	8
1978	44	42	5	4	6	7	2	1	2	0	13	4	18	11	3	0	12	3	11	11	13	6	10	9	13	12
1979	39	36	4	2	7	8	1	1	1	3	9	3	14	4	8	3	10	1	10	7	13	8	13	5	13	8
1980	45	40	10	0	3	7	0	3	1	6	10	5	21	4	10	4	6	1	5	11	15	13	16	9	13	7
1981	40	33	4	1	10	4	2	2	1	4	5	7	13	7	10	2	8	4	11	9	8	8	10	8	9	13
Total	435	388	69	29	85	60	23	13	10	30	74	42	193	73	74	31	64	29	109	124	113	60	74	67	152	142

Table 2-2 The situation of occurrence on the marine personal disaster.

第3章 船体運動に対する人体の応答システムと解析法

本章においては、まず船体運動と人体に発生する揺れとの力学的な関係を明確にする。この関係に基づき、船体運動を入力、人体に発生する揺れを出力とした応答モデルを同定する。さらに、人体の応答特性の推定に用いる周波数解析法や応答モデルの同定法について詳述する。

3 - 1 応答の力学的関係

漁船甲板上に発生する動揺に対し、そこに存在する人間は常時バランスを保持しており、船体動揺と人体に発生する揺れとの間には、入出力関係が成り立つ。また、海洋波に対する船体動揺の間にも同様に応答関係が存在する。従って、海洋波、漁船の船体運動及び船上にいる人間のバランスとの間には、2つの入出力系が連続した応答系が存在することになる。

一つは、風によって生成された海洋波が、航行する船舶への入力となり、船体運動を発生させる船体運動系である。もう一方は、船体運動系で発生した船体動揺が、船上にいる人間への入力となり、人体の揺れが発生するという人体のバランス系である。それぞれが個々のサブシステムを構成しながら、海洋波から人体のバランスま

での一連のシステムを形成している。この様に、船上における人体のバランスは、海洋波に起因する一連の応答結果として定義することができる。これらのシステムは、時間的な相互関係に基づくダイナミックシステムである。

自然現象としての海洋における波浪は、不規則現象の代表的な例であり、船舶の海洋における不規則な応答に対する主要な入力となる。ある力学系に作用する外力（ここでは、システムへの入力）が不規則現象であるとき、力学系の応答特性そのものには不確定要素がないとしても、力学系の応答（システムからの出力）は、また一つの不規則現象となる。一般に、外力の大きさが小さい場合、このような不規則現象に対する線形の近似が、極めて有効である場合が多い。

本論においても、入力となる海洋波が極端に大きくないという条件の基で、各サブシステムを通じての入出力系における応答に、線形理論に基づく応答理論が適用できると推定した。

一般に、船体振動の周波数範囲が、船体運動の周波数範囲とは重合せず、大きく離れているので、船体は剛体として扱われる。剛体の空間における6自由度の運動成分は、 x 、 y 、 z 軸に平行な3つの直線運動と、各軸まわりの3つの回転運動より成る。 x 、 y 、 z 軸方向における直線運動は、それぞれ前後揺れ（Surging）、左右揺

れ (Swaying) 及び上下揺れ (Heaving) であり、 x , y , z 軸回りの回転運動は、それぞれ横揺れ (Rolling)、縦揺れ (Pitching) 及び船首揺れ (Yawing) である。

これまで述べてきた、海洋波から人体に発生する揺れまでの一連の入出力関係を、Fig. 3-1のブロック図に示す。この図に示す、サブシステムの記号との対応としては、添字 $1, 2, \dots, 6$ がそれぞれ船体6自由度運動の、前後揺れ、左右揺れ、上下揺れ、横揺れ、縦揺れ及び船首揺れの各成分に対応する。

まず、船体運動系への入力となる海洋波は時間 t 、船速 V 、波の進行方向と船首方向との相対角 α との関数 $E(t; V, \alpha)$ として示さる。この応答系に線形応答理論を適用すると、海洋波に対する船体運動系の出力 $X_j(t)$ ($j=1, 2, \dots, 6$) は、次式に示す畳込み積分で表される。

$$X_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{x_j}(\tau; V, \alpha) E(t-\tau; V, \alpha) d\tau \quad (3-1)$$

ここで、 $h_{x_j}(\tau; V, \alpha)$ は海洋波に対する船体運動の各成分のインパルス応答関数である。

船体運動系の出力が、連続する人体のバランス系への入力となる。船体運動系と同様に、線形応答理論を適用する。船体の6自由度運動の各成分 $X_j(t)$ に対する人体のバランス系の出力 $Y_n(t)$ ($n=1, 2,$

… , 6) は、次式で示される。

$$Y_n(t) = \sum_{j=1}^6 \int_{-\infty}^{\infty} h_{Y_n X_j}(\tau) X_j(t-\tau) d\tau \quad (3-2)$$

この人体の応答系の出力 $Y_n(t)$ が合成されたものが、海洋波を入力とする一連のシステムの結果となり、人体の揺れ $M(t)$ が出力される。

不規則現象の代表とされる海洋波は、統計的には定常性・エルゴード性を有する確率過程とみなされる。また、その分布特性よりガウス過程として取り扱われる。

定常性・エルゴード性が成り立っている不規則な船体運動の各成分に対し、人体のバランス系が線形性を保つならば、その出力として人体に発生する揺れ $M(t)$ に対しても、定常性・エルゴード性が成立する。

以下に、この一連の定常確率過程における入出力関係を、周波数領域の上で考える。

海洋波により、船体に発生する6自由度運動のパワースペクトル $S_{X_j X_j}(\omega; \chi)$ は、波のパワースペクトル $S_E(\omega; \chi)$ 、船体運動系における周波数応答関数 $H_{X_j E}(\omega; \chi)$ 、 $j=1, 2, \dots, 6$ の関係により、次式のように示される。

$$S_{X_j X_j}(\omega; \chi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{X_j X_j}(\tau; \chi) \cdot \text{EXP}(-i\omega\tau) d\tau \quad (3-3)$$

$$= |H_{X_j E}(\omega; \chi)|^2 \cdot S_E(\omega; \chi) \quad (3-4)$$

ここで、 $R_{X_j X_j}(\tau; \chi)$ は、船体運動の各成分における自己相関関数であり、次式のように表現できる。

$$R_{X_j X_j}(\tau; \chi) = E[X_j(t; \chi) \cdot X_j(t+\tau; \chi)] \quad (3-5)$$

ここで、 E は統計的な期待値を表す記号である。簡単化のため、海洋波は、船速 V が一定という条件で、時間 t と波と船首との相対角 χ との関数とした。また、出力 $X_j(t; \chi)$ も同様に表現できる。

(3-4)式は、

$$|H_{X_j E}(\omega; \chi)|^2 = S_{X_j X_j}(\omega; \chi) / S_E(\omega; \chi) \quad (3-6)$$

と書き換えられる。この関係式から $H_{X_j E}(\omega; \chi)$ の振幅特性が求まる。

周波数応答関数 $H_{X_j E}(\omega; \chi)$ は、インパルス応答関数 $h_{X_j E}(\tau; \chi)$ をフーリエ変換することにより求められる。また、インパルス応答関数は、周波数応答関数を逆フーリエ変換することにより求められる。

$$H_{X_j E}(\omega; \chi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h_{X_j E}(\tau; \chi) \cdot \text{EXP}(-i\omega\tau) d\tau \quad (3-7)$$

海洋波に対する船体運動系の出力成分の位相特性 $\sigma_{X_j E}(\omega; \chi)$ は、クロススペクトル $S_{X_j E}(\omega; \chi)$ を用いることで求められる。

$S_{X_j E}(\omega; \chi)$ は、次式のように示される。

$$\begin{aligned}
 S_{x_j E}(\omega; \chi) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_j E}(\tau; \chi) \cdot \text{EXP}(-i\omega\tau) d\tau \\
 &= H_{x_j E}(\omega; \chi) \cdot S_E(\omega; \chi) \quad (3-8)
 \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned}
 H_{x_j E}(\omega; \chi) &= |H_{x_j E}(\omega; \chi)| \cdot \text{EXP}(i\sigma_{x_j E}(\omega; \chi)) \\
 &= S_{x_j E}(\omega; \chi) / S_E(\omega; \chi) \quad (3-9)
 \end{aligned}$$

$R_{x_j E}(\tau; \chi)$ は、一般に偶関数なので $S_{x_j E}(\omega; \chi)$ は一般に実関数にはならず、複素関数となる。

そして、次の二つの実関数 $C_{0x_j E}(\omega; \chi)$ 、 $Q_{ux_j E}(\omega; \chi)$ で表される。

$$S_{x_j E}(\omega; \chi) = C_{0x_j E}(\omega; \chi) - iQ_{ux_j E}(\omega; \chi) \quad (3-10)$$

ここで、 $C_{0x_j E}(\omega; \chi)$ をコスペクトル (Co-Spectrum)、 $Q_{ux_j E}(\omega; \chi)$ をコードレイチャスペクトル (Quadrature Spectrum)と呼び、次式のように示される。

$$C_{0x_j E}(\omega; \chi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_j E}(\tau; \chi) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (3-11)$$

$$Q_{ux_j E}(\omega; \chi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_j E}(\tau; \chi) \sin(\omega\tau) d\tau \quad (3-12)$$

この二つの実関数を用いることで、振幅特性及び位相特性が次式のように求められる。

$$|H_{x_j E}(\omega; \chi)| = \frac{\{C_{0x_j E}^2(\omega; \chi) + Q_{ux_j E}^2(\omega; \chi)\}^{1/2}}{S_E(\omega; \chi)} \quad (3-13)$$

$$\sigma_{x_j E}(\omega; \chi) = \tan^{-1} \{ Q_{u x_j E}(\omega; \chi) / C_{o x_j E}(\omega; \chi) \} \quad (3-14)$$

さて、船体の6自由度運動の各成分間のパワースペクトル、クロススペクトルは次式のように示される。

$$S_{x_j x_k}(\omega; \chi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_j x_k}(\tau; \chi) \cdot \text{EXP}(-i\omega\tau) d\tau \quad (3-15)$$

$$R_{x_j x_k}(\tau; \chi) = E [X_j(t; \chi) \cdot X_k(t+\tau; \chi)] \quad (3-16)$$

ここで、 $j=1, 2, \dots, 6$ 、 $k=1, 2, \dots, 6$ で船体の6自由度運動の各成分に対応する。 $j=k$ のとき、 $S_{x_j x_k}(\omega; \chi)$ はパワースペクトルを表し、 $R_{x_j x_k}(\tau; \chi)$ は自己相関関数を表す。 $j \neq k$ のとき、 $S_{x_j x_k}(\omega; \chi)$ はクロススペクトルを表し、 $R_{x_j x_k}(\tau; \chi)$ は相互相関関数を表す。

人体のバランス系の出力 $Y_n(t; \chi)$ のパワースペクトル

$S_{Y_n Y_n}(\omega; \chi)$ 、自己相関関数 $R_{Y_n Y_n}(\tau; \chi)$ も、(3-3)、

(3-5)式と同様に表される。

$$S_{Y_n Y_n}(\omega; \chi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{Y_n Y_n}(\tau; \chi) \cdot \text{EXP}(-i\omega\tau) d\tau \quad (3-17)$$

$$R_{Y_n Y_n}(\tau; \chi) = E [Y_n(t; \chi) \cdot Y_n(t+\tau; \chi)] \quad (3-18)$$

ここで、 $n=1, 2, \dots, 6$ で、人体のバランス系における出力の6つの成分にそれぞれ対応する。

人体のバランス系は、船体の6自由度運動を入力とする多入力システムとして説明してきたが、人体のバランス系の出力 $Y_n(t; x)$ は、各入力に線形に対応する部分 $Y_{0n}(t; x)$ と雑音（線形な関係を示さない） $u_n(t)$ との和として表現できると考えられる。

ここで、 $u_n(t)$ は船体運動の成分 $X_j(t; x)$ と無相関であるとする。

$$Y_n(t; x) = Y_{0n}(t; x) + u_n(t) \quad (3-19)$$

このうち、入出力間のクロススペクトル $S_{Y_n X_k}(\omega; x)$ 、入力に対し線形に対応する部分が占めるパワースペクトル $S_{Y_{0n} Y_{0n}}(\omega; x)$ は、次式の様に示される。

$$S_{Y_n X_k}(\omega; x) = \sum_{j=1}^6 H_{Y_n X_j}(\omega; x) \cdot S_{X_j X_k}(\omega; x) \quad (3-20)$$

$$S_{Y_{0n} Y_{0n}}(\omega; x) = \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 H_{Y_n X_j}(\omega; x) \cdot H_{Y_n X_k}^*(\omega; x) \cdot S_{X_j X_k}(\omega; x) \quad (3-21)$$

ここで、(*)は共役複素数を表す。人体のバランス系の周波数応答関数 $H_{Y_n X_k}(\omega; x)$ は、(3-7)式と同様に次式のように示される。

$$H_{Y_n X_k}(\omega; x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h_{Y_n X_k}(\tau; x) \cdot \text{EXP}(-i\omega\tau) d\tau \quad (3-22)$$

以上に、Fig. 3-1のブロック図に基づき、システムへの最初の入力となる海洋波から人体のバランス系の出力まで、一連の入出力過程を、周波数応答特性を用いて説明した。

3 - 2 計測記録の処理と統計的解析

3 - 2 - 1 統計解析

船体運動によって引き起こされる人体の重心の揺れのうち、上下方向を除く X、Y 軸方向の揺れは、フォースプレート（第 4 章）に設置されたロードセルの歪量から、フォースプレート上へ射影された重心位置として算出される。同時計測記録された、フォースプレートの Z 軸方向の各歪量の記録に対し、読み取り時間間隔 $\Delta t = 0.10$ sec で A/D (analog / digital) 変換を行い、データのデジタル化を行った。さらに、X、Y 軸方向における被験者の重心位置を連続計測し、時系列データを得た。

Fig. 3-1 において説明したように、人体の揺れは海洋波を最初の入力とする一連の応答系の出力と考えられる。従って、人体の重心の揺れも船体運動と同様な統計的性質をもつことが考えられる。そこで、不規則な変動を示す二次元の重心の分布特性を解析するために、正規分布 (normal distribution) の検定を行った。

また、被験者にとってフォースプレート上での足の位置は、バランスを維持するうえで大きな影響を及ぼすことが考えられる。従って、前後方向においては被験者の前足の爪先から後足のかかとまで

の距離、左右方向では最大開脚幅に対する各方向の重心の分布の分散の割合を計算し、被験者のバランスの安定性を検討する。

3 - 2 - 2 周波数解析

(1) パワースペクトル

船体運動及び被験者の加速度変動の同時連続計測記録に対し A/D 変換を行い、時系列データとして計算処理を行った。A/D変換における読み取り時間間隔 Δt は、船体に発生する動揺の周波数との関係から、調査船うしお丸におけるデータでは 0.20 sec、練習船北星丸におけるデータでは 0.50sec とした。なお、連続した時系列 $x(t)$ を Δt で A/D 変換した離散的な時系列を、今後 $x(s)$ と表す。

データ数 N は 500 ~ 1000、ラグ数 (スペクトル分割数) h は 100 とした。パワースペクトルの計算には、ブラックマンターキー (Blackman-Tukey) 法を用いた。スペクトルの平滑化のため用いたウィンドウはハニング・ウィンドウ (Hanning window) であり、その値は $a(0)=0.50$, $a(1)=0.25$, 及び $a(2)=0.00$ となる。

(2) マルチプルコヒーレンシー及びパワー寄与率

船体に発生した 6 自由度運動を入力、人体に発生した加速度を出力とした人体の応答系を設定した。この多入力システムの統計的性

質を、マルチプルコヒーレンシー及びパワー寄与率を用いて推定した。

これら統計値の定義及び計算式を下記に示す。

(a) マルチプルコヒーレンシー (multiple coherency)

船体運動 $x_j(s)$ 、 $j=1,2,\dots,6$ を入力、人体の加速度応答 $Y_n(s)$ 、 $n=1,2,\dots,6$ を出力とした応答系におけるコヒーレンシー関数は、出力 $Y_n(s)$ の中で、入力 $x_j(s)$ と線形関係で表現される部分の割合を表す。

(3 -20)、(3 -21) 式の関係より、 $S_{Y_0nY_0n}(\omega; \chi)$ は次式のように表される。

$$S_{Y_0nY_0n}(\omega; \chi) = \sum_{k=1}^6 S_{Y_nX_k}(\omega; \chi) \cdot H_{Y_nX_k}^*(\omega; \chi) \quad (3-23)$$

出力 $Y_n(s)$ のパワースペクトル $S_{Y_nY_n}(\omega; \chi)$ との関係から、マルチプル・コヒーレンシー $\gamma_{Y_n}^2; 1,2,\dots,6(\omega)$ は、次式のように示される。

$$\gamma_{Y_n}^2; 1,2,\dots,6(\omega) = S_{Y_0nY_0n}(\omega; \chi) / S_{Y_nY_n}(\omega; \chi) \quad (3-24)$$

$\gamma_{Y_n}^2; 1,2,\dots,6(\omega)$ は、多入力ー出力システムにおける線形関係の強さを示しており、 $\gamma_{Y_n}^2; 1,2,\dots,6(\omega)$ の値が大きい周波数

領域において、線形システムが満たされる。

(b) パワー寄与率 (power contribution)

漁船甲板上にいる乗組員の人体に発生する揺れは、船体の6自由度運動を入力とする人体のバランス系の出力として表現される。漁船の船体が小さい場合、人体に発生した揺れは船体運動系の入力に加わり、その出力に影響を及ぼす。さらに、時間的な遅れを伴って人体のバランス系の入力に加わり、この系の出力に影響を及ぼす結果となる。従って、一連の応答関係を、人体のバランス系と船体運動系の二つのサブシステムから成り立つフィードバックシステムとして設定することができる。なお、このシステムは、線形動特性を持つ閉ループの応答系でモデル化することができる。Fig. 3-2に、単純化したフィードバックシステムのブロック図を示す。

ここで、 $X(s)$ は人体のバランス系の入力であり、 $Y(s)$ は船体運動系の入力である。 $u(s)$ 、 $v(s)$ はそれぞれサブシステムの出力 $Y_0(s)$ 、 $X_0(s)$ に加わっている雑音であり、システムを動かす源動力である。 $u(s)$ は海洋波などの船体に及ぼす影響、 $v(s)$ は風などの人体に与える影響に相当する。 m を十分大きくすることにより、 $Y(s)$ 、 $X(s)$ は、次式のように近似表現できる。

$$Y(s) = \sum_{m=1}^m h_{yx}(m) X(s-m) + u(s)$$

$$X(s) = \sum_{m=1}^m h_{xy}(m) Y(s-m) + v(s) \quad (3-25)$$

ここで $h_{yx}(m)$, $h_{xy}(m)$ は、それぞれサブシステムのインパルス応答関数である。

(3-25)式で表されたモデルを、船体の6自由度運動を入力とする多次元線形フィードバックシステムに拡張すると、次式のように表現できる。

$$Y_n(s) = \sum_{k=1}^6 \sum_{m=1}^m h_{ynxk}(m) X_k(s-m) + u_n(s) \quad (3-26)$$

ここで、 $h_{ynxk}(m)$ は、船体運動 $X_k(s)$ から人体のバランス系の出力 $Y_n(s)$ へのインパルス応答関数である。

さらに、出力 $Y_n(s)$ 、 $u_n(s)$ の成分 n を固定して、 $X_7(s)$ 、 $v_7(s)$ に置き換えると、次式のように表現することができる。

$$X_j(s) = \sum_{k=1}^7 \sum_{m=1}^m h_{jk}(m) X_k(s-m) + v_j(s) \quad j=1,2,\dots,7 \quad (3-27)$$

ここで、 $h_{jk}(m)$ は、 $X_k(s)$ から $X_j(s)$ へのインパルス応答関数である。 $X_j(s)$ が、自分自身以外の成分 $X_k(m)$ ($j \neq k$)と雑音 $v_j(s)$ から構成されているので $h_{jj}(m)=0$ である。また、その周波数応答関数 $H_{jk}(\omega)$ は、次式により求められる。

$$H_{jk}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^m h_{jk}(m) \text{EXP}(-i\omega m) \quad (3-28)$$

また、 $X_j(s)$ 、 $V_j(s)$ のフーリエ変換したものをそれぞれ $X_j(\omega)$ 、 $V_j(\omega)$ とし、下記に示す行列表現で表す。Iは単位行列を表す。

$$X(\omega) = \begin{vmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \vdots \\ X_7(\omega) \end{vmatrix}$$

$$H(\omega) = \begin{vmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) & \cdots & H_{17}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & H_{27}(\omega) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{71}(\omega) & H_{72}(\omega) & \cdots & H_{77}(\omega) \end{vmatrix}$$

$$V(\omega) = \begin{vmatrix} V_1(\omega) \\ V_2(\omega) \\ \vdots \\ V_7(\omega) \end{vmatrix} \quad (3-29)$$

(3-27)式に示す応答システムは、次式のように与えられる。

$$(I - H(\omega))X(\omega) = V(\omega) \quad (3-30)$$

$$X(\omega) = (I - H(\omega))^{-1} V(\omega) \quad (3-31)$$

ここで、 $v_k(s)$ から $X_j(s)$ への周波数応答関数を $b_{jk}(\omega)$ とし、その周波数応答関数行列を $B(\omega)$ とする。 $b_{jk}(\omega)$ は、閉ループの周波数応答関数である。

$B(\omega) = (I - H(\omega))^{-1}$ であるので、(3-31)式は次式のように示される。

$$X(\omega) = B(\omega)V(\omega) \quad (3-32)$$

従って、外部からの雑音 $v_k(s)$ に対する出力 $X_7(s)$ のパワースペク

トル $q_{7k}(\omega)$ は、 $v_k(s)$ のパワースペクトル $S_{v_k}(\omega)$ と周波数応答関数 $b_{7k}(\omega)$ を用いて、次式のように表すことができる。

$$q_{7k}(\omega) = |b_{7k}(\omega)|^2 \cdot S_{v_k}(\omega) \quad (3-33)$$

また、人体に発生する揺れ $X_7(s)$ のパワースペクトルは、 $v_k(s)$ の各成分によって発生したパワースペクトル $q_{7k}(\omega)$ の和となり、次式で表される。

$$S_{77}(\omega) = \sum_{k=1}^7 q_{7k}(\omega) \quad (3-34)$$

次式に示す $r_{7k}(\omega)$ は、周波数 ω における、 $v_k(s)$ からの $X_7(s)$ のパワースペクトルへの寄与分を表す。

$$r_{7k}(\omega) = \frac{q_{7k}(\omega)}{S_{77}(\omega)} \quad (3-35)$$

$r_{7k}(\omega)$ は、一般的に雑音寄与率と呼ばれる値である。ここでは、人体のバランス系における出力の船体運動成分への依存度を示しており、パワー寄与率と定義する。

3 - 2 - 3 多次元自己回帰モデル (Multiple Auto Regressive model)

フィードバックシステムの解析には、定常時系列の自己回帰表現を利用することが、実用的である。従って、この多入力系の応答に、多次元自己回帰モデルを適用する。

人体のバランス系からの出力 $Y_n(s)$, $n=1,2,\dots,6$ が定常な時系列であるとする。簡単化のため、(3-27) 式と同様に出力 $Y_n(s)$ 、 $u_n(s)$ の成分 n を固定して、 $X_7(s)$ 、 $N_7(s)$ と置き換える。 $X_7(s)$ は、船体運動成分の変量 $X_j(s)$ と出力 $X_7(s)$ 自身の過去の m 時点の間の値 $X_j(s-1), \dots, X_j(s-m)$ の線形結合に、雑音 $N_j(s)$ が加わった形で、次式の様に表現される。

$$X_7(s) = \sum_{j=1}^7 \sum_{m=1}^m A_{7j}(m) X_j(s-m) + N_7(s) \quad (3-36)$$

ここで、 $A_{7j}(m)$, $m=1,2,\dots,m$ は、人体のバランス系の入力 $X_j(s)$ 及びその出力 $X_7(s)$ から、出力 $X_7(s)$ への影響を表す回帰係数である。 $j=1,2,\dots,6$ が船体の 6 自由度運動の各成分に対応し、 $j=7$ が人体のバランス系の出力に対応する。 $N_7(s)$ はホワイトノイズである。

また、(3-36) 式における回帰係数 $A_{7j}(m)$ と (3-27) 式におけるインパルス応答関数 $h_{7j}(m)$ の関係は、次式のように示される。

$$h_{7j}(1) = A_{7j}(1)$$

$$h_{7j}(m) = A_{7j}(m) + \sum_{l=1}^{m-1} A_{77}(l) h_{7j}(m-l) \quad (3-37)$$

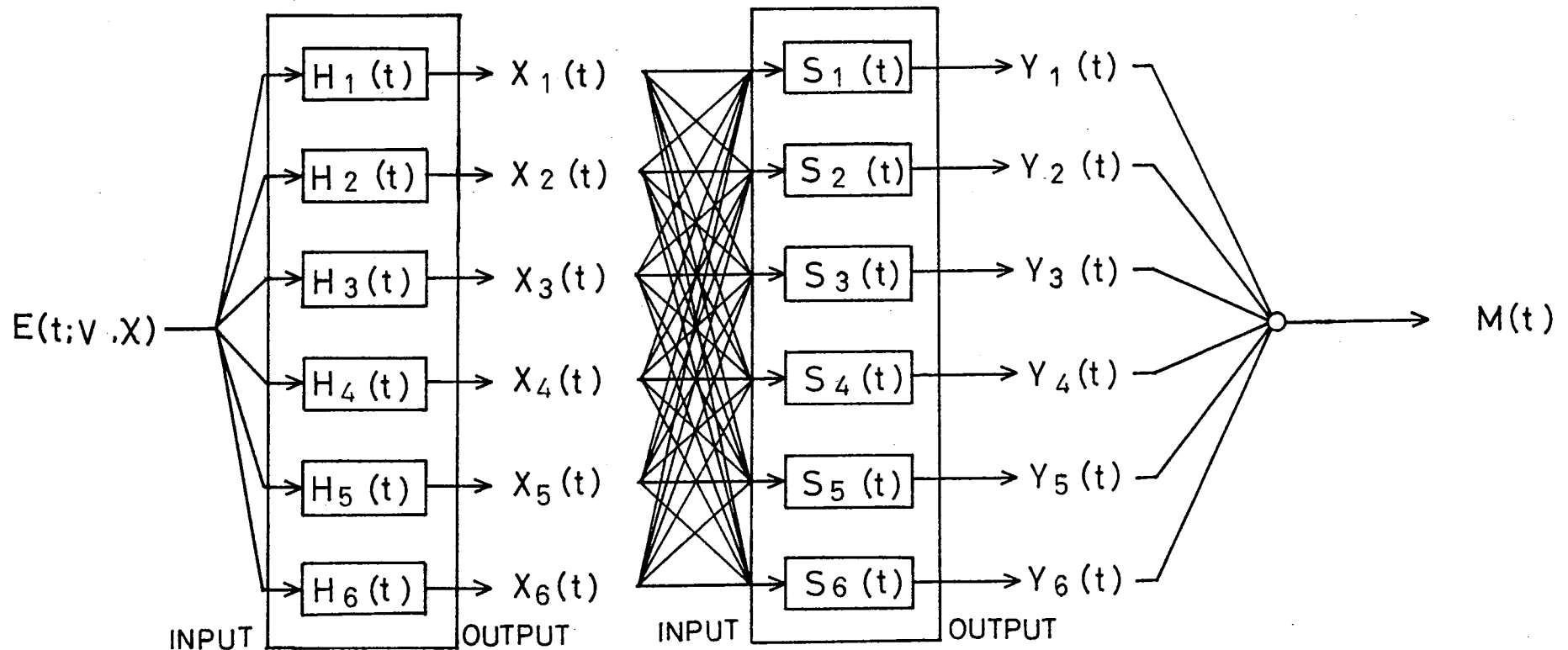
多次元自己回帰モデルの次数 m は、次式により推定される多次元最終予測誤差 MFPE (Multiple Final Prediction Error) の最小値から決定した。

$$MFPE(m) = (1 + (mk+1)/N)^k \cdot (1 - (mk+1)/N)^{-k} | \sigma_m | \quad (3-38)$$

ここで、 N は時系列データの数、 k はモデルの次元、 σ_m は予測誤差の共分散行列を表す。

以上、人体の応答特性の推定及び応答システムの同定に用いる解析法について詳述した。

WAVE SHIP MOTION COMPONENT SUBJECT COMPONENT COMBINED SUBJECT
EXCITATION SUB-SYSTEM RESPONSE SUB-SYSTEM RESPONSE RESPONSE MOTION



Subscript 1;SURGE, 2;SWAY, 3;HEAVE, 4;ROLL, 5;PITCH, 6;YAW

Fig. 3-1 Block diagram of the input-output representations from the wave excitation to the subject's motion.

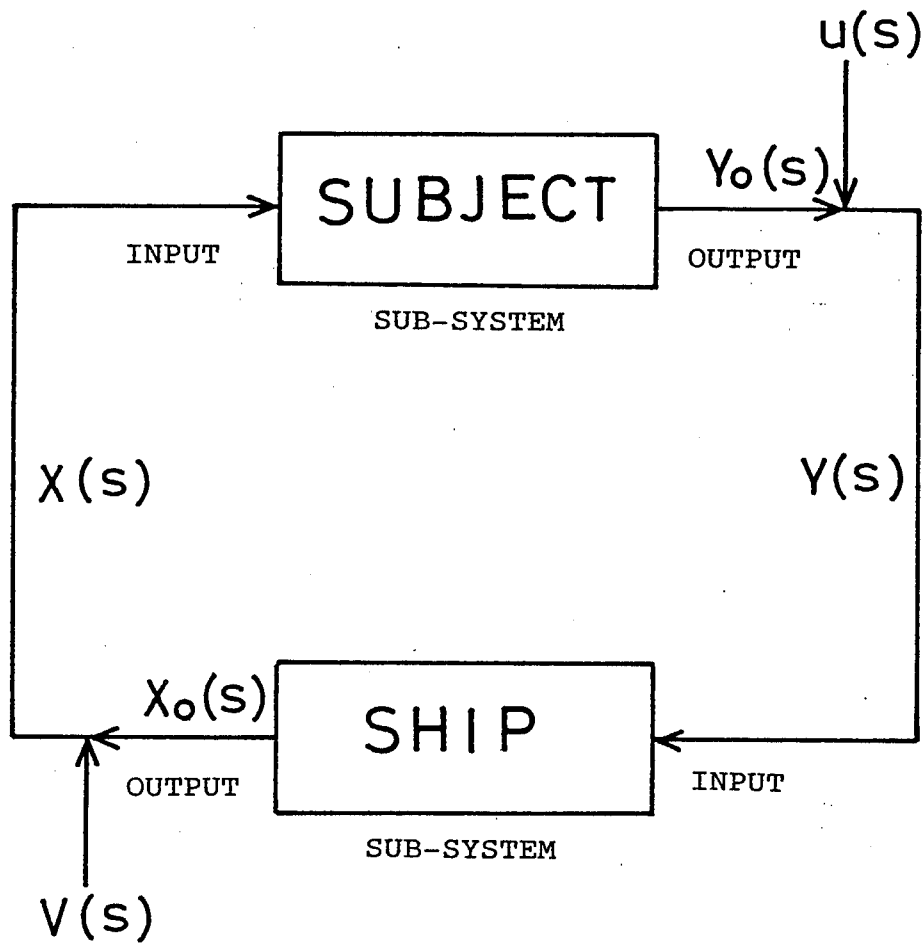


Fig. 3-2 Simplified feed back system of input/output response.

第 4 章 人体のバランス系に関する実験と結果

本章においては、第 3 章で示した船体運動と人体の揺れの統計的な関係を、実船実験の記録をもとに明らかにする。第 3 章で詳述した解析法によって、船体運動に対する人体のバランス系の応答特性を推定し、応答システムの同定を行う。さらに、人体の重心位置の水平面内変動とバランスの安定性について論ずる。

4 - 1 調査船及び練習船による実験

本研究において使用した実験船及び計測装置の概要を以下に記す。

4 - 1 - 1 実験船

航走中の船舶に発生する船体運動と甲板上における被験者の重心位置の変動並びに加速度応答の同時連続計測実験には、北海道大学調査船うしお丸を使用した。本研究において実施した実験の大部分は同船による。また、船上に発生する船体動揺に周波数範囲等の変化を加えるため、北海道大学練習船北星丸を使用して、同様の実験を実施した。同船における実験においては、波、船体の 6 自由度運動及び人体の加速度応答の同時連続計測を行った。これら実験船の外観を Photo 4-1~2 に、船体線図は Fig. 4 -1~2 に示す。また、実

験時の各実験船の主要目及び諸状態をTable 4-1 ~ 2 に示す。

4 - 1 - 2 船体運動及び被験者の重心位置における

加速度応答の計測

(a) 船体運動

横揺れ、縦揺れ及び船首揺れの計測には動揺計測装置（日本航空電子製）を使用した。検出器は、船体の横揺れ角、縦揺れ角を検出するパーティカルジャイロ（Full scale ± 50 deg）及び船首揺れの角速度を検出するレートジャイロ（Full scale ± 50 deg/sec）からなる。しかし、うしお丸で実施した1983年11月の実験においては、船首揺れを計測を行っていない。

前後揺れ、左右揺れ及び上下揺れの計測には、ひずみゲージ式加速度変換器（共和電気、Full scale $\pm 2G$ ）を用いた。加速度変換器は、被験者の足もとに近い甲板上に設置し計測を行った。

計測中の船速は、船橋に表示される電磁ログの値を用いた。

(b) 被験者の加速度変動

被験者に発生する揺れの計測には、ひずみゲージ式加速度変換器（共和電気、Full scale $\pm 2G$ ）を用いた。この計測器は、船体運動の前後揺れ等の計測に用いたものと同じである。Photo 4 -3に示す

様に加速度計の作用軸をそれぞれ90°ずらし X, Y及び Zの3軸方向を測定できるようにした装置を、統計的に人体の重心高さとされる^[35]重心高さ身長比0.55/1.0とほぼ等しい腹部に設置して、計測を行った。

4 - 1 - 3 被験者の重心位置の変動の計測

甲板上における被験者の重心位置の変動は、フォースプレート（共和電気EFP-386A）を用いて測定した。このフォースプレートは、X、Y及びZの各軸方向ごとにそれぞれ4つのロードセルを設置しており、これらへ加わる負荷量の差からフォースプレート上に射影した人体の重心位置や各軸方向へ加わった力の大きさを計測する。フォースプレートの外観及び設置されているロードセルの配置を、Fig. 4-3に示す。

各ロードセルにおいて測定された歪量から、フォースプレート上に射影した X、Y軸方向における人体の重心位置（ X_c , Y_c ）が次式により計算される。

$$X_c = \frac{(Z_1+Z_4) - (Z_2+Z_3)}{(Z_1+Z_2+Z_3+Z_4)} \times X_l \quad (\text{mm}) \quad (4-1)$$

$$Y_c = \frac{(Z_1+Z_2) - (Z_3+Z_4)}{(Z_1+Z_2+Z_3+Z_4)} \times Y_l \quad (\text{mm}) \quad (4-2)$$

ここで、 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 は、それぞれ Z 軸方向のロードセルにおいて発生した歪量である。 X_l, Y_l は、それぞれ X, Y 軸方向におけるフォースプレートの中心から Z 軸方向のロードセルまでの水平距離を表す。0点はフォースプレートの中央を基準とし、 X 軸方向においては船首よりを正、 Y 軸方向においては右舷側が正とした。

4 - 1 - 4 波高の計測

波高は、北星丸船首部に設置されたマイクロ波式波高計（鶴見精機WM-2、 $\pm 14.5\text{m}$ ）を用いて計測した。

上記の計測装置を使用して、船体運動と人体の加速度応答及び重心位置の変動の計測を行った。

調査船うしお丸を使用した航走実験においては、種々な船体運動の大きさや周波数帯を得るため、波の主成分波の進行方向と船首方向との相対角は、向い波（Head sea）、左右の斜め向い波（Bow sea）、横波（Beam sea）、斜め追い波（Quartering sea）及び追い波（Following sea）の8状態を設定した。波との出会い角を変化させて実施した各航走実験において、波の進行方向と船首の相対方

向との関係を Fig. 4-4 に示す。

それぞれの波方向に対して行った航走実験の各計測時間は 3 ～ 5 分の範囲であった。各方向別の航走実験において発生した船体運動と甲板上のフォースプレート上に立っている被験者の加速度応答の計測項目を同時計測記録した。

実験時の計測状態を Photo 4-4 に示す。被験者が加速度計を取り付け、フォースプレート上に立って計測を行っている状態を示している。実験時の被験者の基本姿勢は、被験者自身がごく自然な姿勢でフォースプレート上に立った、いわゆる自然体の状態であった。

海上における実験時の波浪状況は、同調査船にとっては厳しい時化た日を選定して実施した。実験時の海況の一部に気象庁の定めた風浪階級で 2 の状態の時もあったが、ほとんどの海況は風浪階級 3 ～ 4 の範囲であった。気象庁風浪階級と海上に発生する波高との関係を、Table 4 -3 に表す。

実験時の船速は、全速前進状態に設定し、8.5 ～ 10.5 knots の範囲であった。また、実験海域は、Fig. 4-5 に示す北海道南部白尻港沖合である。

練習船北星丸を使用した実験では、フォースプレートは使用せず、波高、船体運動及び被験者の加速度応答等の項目を同時計測記録した。

実験は、北星丸の昭和62年度34次航海において、航走中、稚魚ネット曳航中及びトロール操業実習中等の状態において実施した。実験実施時の海況は、風浪階級で3～4の範囲であった。実験を実施した海域及び航跡をFig. 4-6に示す。

計測を行った被験者はすべて男性であり、北海道大学水産学部漁船運用学講座教職員、同講座の大学院生、学生及びうしお丸乗組員の中から選出した。実験に参加した被験者の身分、年齢構成等は、Table 4-4に表す。

4 - 2 甲板上における人体の重心位置の変動

フォースプレートによって計測されたZ軸方向のロードセルの歪量から、(4-1)、(4-2)式により、フォースプレート上に射影したX、Y軸方向における被験者の重心位置 X_c 、 Y_c を算出した。Fig. 4-7に、被験者の X_c 、 Y_c の時間変動の1例を示す。 X_c 、 Y_c の変動が0点を中心としていないのは、計測開始時における被験者のフォースプレート上での位置が中心とずれていたためである。図に示した X_c 、 Y_c の時間変動より、被験者が計測開始直後、右斜め後方にバランスを崩して、フォースプレート上からでてしまったことが確認出来る。また、計測再開後の X_c 、 Y_c の時間変動も非常に激しく、被験者がバランスを保持するには困難な状態にあることを

示している。

Fig. 4-8に、フォースプレート上における X_c 、 Y_c の時間変動とバランスの安定性の関係を3つの範囲によって示す。図において、 L_x は被験者の前足の爪先から後ろ足のかかとまでの前後方向の距離を示し、 L_y は左右方向の最大開脚幅を示す。この L_x 、 L_y で囲まれる範囲で X_c 、 Y_c が変動している時、被験者のバランスは非常に安定しており Very stable な状態とした。次に、船体動揺が激しくなり、計測開始時の足の位置をずらさなければバランスは保てないが、フォースプレート上には立っていられる状態を stable な状態とした。さらに、フォースプレートという設定された範囲内で、被験者がバランスを保持できない状態を Off balance な状態とした。

この様に、 X_c 、 Y_c の時系列データを基に、重心位置の分布特性とバランスの安定性について解析する。

4 - 2 - 1 フォースプレート上に射影した人体の重心の 分布

Fig. 4-9 (a)~(e)に、向い波から追波までの5つの航走実験における、フォースプレート上での被験者の X_c 、 Y_c の分布を示す。これらの計測は、1983年うしお丸を使用した実験によるもので、被験者はNo.5の番号に該当する。これらの分布は、100秒間の計測記

録を、読み取り時間間隔 0.1 secで、A/D変換を行い算出した1000個の時系列データから成る。また、計測開始時のフォースプレート上における被験者の足の位置を、破線で示した。Fig. 4- 8 に示した様に、 L_x 、 L_y は、計測開始時のフォースプレート上における被験者の足の位置より設定した範囲である。 X_c 、 Y_c の分布がこの範囲をこえた場合、計測中に被験者が足の位置をずらしてバランスを維持したことになり、 X_c 、 Y_c の分布と L_x 、 L_y の範囲との関係は被験者のバランスの安定性を検討するうえで重要である。

これら5つの航走実験を通して、被験者は、Fig.4 -9(a) 向い波とFig.4- 9(b) 斜め向い波状態における航走実験中に、バランスを崩してフォースプレート外へでてしまっている。従って、これらの X_c 、 Y_c の分布は、被験者にとってバランスを維持することが困難な状態を示している。 X_c 、 Y_c の分布が、フォースプレートの後方へ連続して移動して下端にまで達していることから、被験者がバランスを崩してフォースプレート外へでてしまうまでの過程がわかる。また、バランスを崩した時以外にも、 X_c 、 Y_c の分布が L_x 、 L_y の範囲をおおきくこえており、被験者がフォースプレート上における足の位置をかなり動かしてバランスをとっていたことが推測される。Fig.4 -9(c) 横波状態においては、 Y_c が L_y の範囲を少しこえた分布をしており、航走実験中に右足を少し外側へ広げたことが確認

できる。しかし、この航走実験中の被験者のバランスは、安定な状態であったと判断できる。Fig.4-9(d) 追い波とFig.4-9(e) 斜め追い波状態においては、 X_c 、 Y_c が L_x 、 L_y の範囲内に分布しており、被験者は非常に安定な状態であったことが確認できる。

以上の様に、フォースプレート上における X_c 、 Y_c の分布を L_x 、 L_y の範囲を基準として検討することにより、被験者のバランスの安定性を推定することができる。

4-2-2 重心位置の変動にみられる統計的特性

第3章において詳述した様に、人体への入力となる船体運動は、一般に定常確率過程であるとみなされる。人体の応答系が入出力の過程で線形性を保つならば、その出力もまた定常確率過程となる。従って、フォースプレート上での足の位置がずれない、バランスが非常に安定な状態においては、被験者の X_c 、 Y_c の分布も同様な統計的性質を持ち、正規分布になることが推定される。重心位置の分布特性を明確にするため、 X_c 、 Y_c の分布が正規分布をしているか否か、 χ^2 検定を行った。Table 4-5 に、 X_c 、 Y_c の分布の平均値 MEAN と標準偏差 σ 及び正規分布に対する χ^2 検定の結果等を示す。表中において、網がけ部分は、計測中に被験者がバランスを崩して、フォースプレート外へでてしまったことを示す。

また、Fig. 4-10 (a)～(e)に、Fig. 4-9 (a)～(e)に示した向い波から追波状態までの5つの航走実験における、フォースプレート上での被験者の X_c 、 Y_c の分布のヒストグラムを各軸方向ごとに示す。図において、●印は X_c 、 Y_c の分布の MEAN と σ による正規分布を示す。

X_c 、 Y_c の分布に対する有意水準 5%での χ^2 検定の結果、 X_c の分布は、正規分布をすることが判明した。しかし、 Y_c の分布は必ずしも正規分布をしていない。特に、Fig. 4-10(c)に示す横波状態で行った航走実験のように横揺れや左右揺れが大きい場合、左右の足の支点位置にそれぞれピークを持つ分布になる傾向がある。

人体におけるバランスの安定性と X_c 、 Y_c の分布範囲との関係については、 X_c 、 Y_c が L_x 、 L_y でかこまれた範囲内で分布している時、バランスは非常に安定な状態であると推定される。従って、 X_c 、 Y_c の分布が L_x 、 L_y の範囲を越えるか否かを基準として、被験者のバランスの安定性を判断することができる。そこで、 L_x 、 L_y の値に対する σ_x 、 σ_y の値の割合で標準化して、バランスの安定性を評価するための分布指数 ($L_x/2\sigma_x$ 、 $L_y/2\sigma_y$) として定義した。

Table 4- 5において、被験者がバランスを崩した4例は、いずれも X軸方向に対して発生している。分布指数を基に、この方向における被験者のバランスの安定性を推定した。その結果、分布指数の

値が3以上の場合、 X_c 、 Y_c が L_x 、 L_y でかこまれた範囲内に分布していることが判明した。 X_c 、 Y_c の変動が大きくなるに伴って、 σ_x 、 σ_y の値も大きくなり、相対的に分布指数の値が小さくなる。そして、分布指数の値が3を下回ると足の位置を動かさずにバランスを維持して行くことが困難になると推定することができる。ガウス過程では、確率的に平均値 $MEAN \pm 3\sigma$ の範囲に分布の99.7%がおさまる。また、被験者の X_c の分布も正規分布することが判明している。このことから前後方向における人体の X_c の分布も、確率的に同様な性質をもっており、分布指数によりバランスの安定性を判断することが可能となった。

4 - 3 船体運動に対する人体の応答特性

第3章においては、人体のバランス系への入力として船体の6自由度運動を設定し、その応答関係について詳述した。しかし、船首揺れを計測できなかった実験があったことから、人体のバランス系の応答特性に及ぼす船首揺れの影響を計算により推定した。入力を船体の6自由度運動としたシステムと船首揺れを除く5成分で構成したシステムとを用いて、周波数応答特性の上での船首揺れの影響を調べた。その結果、船首揺れの影響が極めて小さいことが判明した。そこで、入力成分を同一にするために、船体の6自由度運動の

うち船首揺れを除く5成分を入力として、人体のバランス系を設定した。応答特性を計算する上で対象とした人体のバランス系への入出力の構成要素とその流れを、Fig. 4-11に示す。船体の前後、左右及び上下揺れの運動成分は、船体に設置した加速度計のX、YおよびZ軸方向の出力が対応し、船首揺れは、人体のバランス系へのノイズ成分に含まれるものとして取り扱う。

人体のバランス系の出力である重心位置に発生したX、Y及びZ軸方向の加速度の計測記録には、人体が傾斜することによる重力成分の影響が含まれている。また、船体の前後、左右及び上下揺れの計測記録にも、人体に発生した加速度の計測記録と同様、横揺れや縦揺れの影響が含まれている。従って、本章で行う応答計算に用いる人体及び船体運動の計測記録には、前記傾斜角の影響が含まれており、人体に発生した加速度と船体運動との整合性をとるために傾斜角による修正は行っていない。

以上、説明した入出力成分を用いて、人体のバランス系における応答特性を考察する。

Fig. 4-12に、船体運動及び人体の加速度応答の計測記録例を示す。これらの計測記録は、1983年うしお丸を使用した実験による。

4 - 3 - 1 船体運動と人体の加速度応答の

パワースペクトル

Fig. 4- 13(a)～(c)に、 X、 Y及び Z軸方向における人体の重心位置に発生した加速度、 船体の加速度、 船体の横揺れ及び縦揺れをパワースペクトルで表す。これらは、 右斜め向い波状態で航走実験を行った時の結果で、 実験船はうしお丸である。また、 北星丸を使用した実験の結果を、 Fig. 4- 16(a)～(c)に示す。なお、 被験者は両船とも同じである。船体規模の小さいうしお丸の方が、 高い周波数領域での船体運動が発生している。しかし、 いずれの実験においても、 被験者に発生する加速度は、 船体の同一方向における加速度の周波数帯及びパワーがよく対応していることが確認できる。また、 人体に発生する加速度の特徴として、 X軸方向の加速度において、 $\omega = 0.0$ に近い低周波数帯で、 パワーが存在している。

4 - 3 - 2 周波数領域における応答特性

Fig. 4- 14(a)～(c)に、 Fig. 4- 13の実験における、 船体運動に対する被験者の加速度応答のマルチプルコヒーレンシーを、 X、 Y及び Zの各軸方向ごとに表す。また、 Fig. 4- 15(a)～(c)に、 パワー寄与率を表す。同様に、 Fig. 4- 17(a)～(c)に、 Fig. 4- 16の実験におけるマルチプルコヒーレンシーを、 Fig. 4- 18(a)～(c)にパ

ワー寄与率を表す。マルチプルコヒーレンシーの計算は、(3-23)
～(3-25)式、パワー寄与率の計算は(3-25)～(3-35)式によっ
た。

X、 Y 及び Z のいずれの軸方向においても、船体運動にパワーが
存在する周波数範囲で、マルチプルコヒーレンシーは、ほぼ 1.0 に
近い極めて高い値を示している。このことから、船体運動に対する
人体の加速度応答が、非常に強い線形性を有していることがわかる。

パワー寄与率により、人体のバランス系への入力となる船体運動
成分への依存の関係を検討する。

船体運動のパワースペクトルが存在する周波数領域において、人
体の加速度応答に対する船体運動 5 成分からのパワー寄与率は、合
計で 80 ～ 100 % に近い極めて高い値を示している。

被験者の加速度応答は、 X、 Y 及び Z 軸のいずれの方向におい
ても、同一方向の船体加速度へのパワー寄与率が高い。また、 X 軸方
向においては縦揺れ、 Y 軸方向においては横揺れのパワー寄与率
が高くなっている。 Z 軸方向においては、それぞれ船体運動の加速
度成分にパワーが存在する周波数帯において、同成分への寄与率が高
くなっている。

従って、これらマルチプルコヒーレンシーやパワー寄与率などの
応答特性から、人体の加速度応答は船体運動を入力とした多入力系

の線形応答システムとして、(3 - 36) 式を用いてモデル化できることが判明した。また、人体のバランス系への入力としては、本来船体の 6 自由度運動のすべての成分を考える必要があるが、船首揺れを除く船体運動の 5 つの成分で充分人体の入出力関係を表現できることが明かとなった。

4 - 4 人体のバランス系の同定

4 - 4 - 1 加速度応答の多次元自己回帰モデル

前項において詳述した周波数領域における人体のバランス系の応答特性より、人体の加速度応答は、船体運動を入力とする線形な多入力ー出力システムとしてモデル化でき、応答系への入力としては船首揺れを除く船体運動の 5 成分を考慮すると充分であることが判明した。また、3 章において、船体運動と人体に発生する揺れとの間の入出力関係には、Fig. 3-2 に示したフィードバックの影響を加える必要があることも明かになった。

これらの条件に基づき、船体運動に対する人体の加速度応答を、多次元自己回帰モデルを用いて次式のように決定した。

$$Y_n(s) = \sum_{k=1}^5 \sum_{m=1}^m h_{n \times k}(m) X_j(s-m) + u_n(s) \quad (4 - 3)$$

$$X_j(s) = \sum_{k=1}^5 \sum_{m=1}^{\infty} h_{x_j x_k}(m) X_k(s-m) + \sum_{n=1}^3 h_{x_j y_n}(m) Y_n(s-m) + v_j(s) \quad (4-4)$$

ここで、 $j; k=1, 2, \dots, 5$ は、それぞれ船体運動の横揺れ、縦揺れ、前後揺れ、左右揺れ及び上下揺れの成分に対応する。 $n=1, 2, 3$ で、それぞれ人体に発生した、 X 、 Y 及び Z 軸方向の加速度に対応する。 $h_{y_n x_k}(m)$ は、入力 $X_k(s)$ から $Y_n(s)$ へのインパルス応答関数、 $h_{x_j y_n}(m)$ は $Y_n(s)$ から $X_j(s)$ へのインパルス応答関数をそれぞれ表す。また、 $h_{x_j x_k}(m)$ は、 $X_k(s)$ から $X_j(s)$ へのインパルス応答関数である。 $X_j(s)$ は、自分自身以外からの船体運動成分の変量 $X_k(s)$ 、人体のバランス系の出力 $Y_n(s)$ が船体運動系の入力に入り込むフィードバックの影響及び雑音 $v_j(s)$ から成り立っている。従って、 $h_{x_j x_k}(m)$ においては $j \neq k$ であり、 $j=k$ のとき $h_{x_j x_k}(m)=0$ となる。

(4-3)、(4-4)式における、インパルス応答関数 $h_{y_n x_k}(m)$ 、 $h_{x_j y_n}(m)$ 、 $h_{x_j x_k}(m)$ の推定及び次数 m の決定は、第3章におけるパワー寄与率の関係式(3-39)、(3-40)及び多次元自己回帰モデルの次数推定式(3-41)によった。

多次元自己回帰モデルのインパルス応答関数をTable 4-6に示す。表において、 ϕ は縦揺れ、 θ は横揺れ、Ship acc.Xは前後揺れ、

Ship acc.Yは左右揺れ、Ship acc.Zは上下揺れの各船体運動成分を示し、Sub. acc.Zは被験者のZ軸方向における加速度応答を示す。この結果は、うしお丸を用いた実験のうち、被験者番号No.3、右斜め向い波状態での航走実験における、人体の上下方向の加速度応答によるもので、モデルの次数は7次である。

Fig. 4-19(a)～(c)に、多次元自己回帰モデルによる、被験者に発生した加速度応答の同定結果を各軸方向ごとに示す。

1000個の時系列データのうち、500個までのデータを用いてインパルス応答関数及びモデルの次数を計算し、多次元自己回帰モデルを推定した。時系列データの600～1000時点までの範囲において、1時点先の予測を行うことにより推定したモデルの同定を行った。

推定されたモデルの次数 m は、X、Y及びZのいずれの方向においても4次の場合が最も多く、全体でもほとんどが4～7次の範囲であった。

Fig. 4-19によると、X軸方向における振幅に多少過大な部分が発生しているが、Y及びZ軸方向においては、非常によく近似が行われている。また、いずれの軸方向においても、時間的な位相のずれは発生していない。このことから、多次元自己回帰モデルを用いることにより、人体のバランス系を、船体運動を入力とする多入力一出力システムとして同定することが可能になった。



Photo 4-1 Research ship USHIO-MARU.



Photo 4-2 Training ship HOKUSEI-MARU.

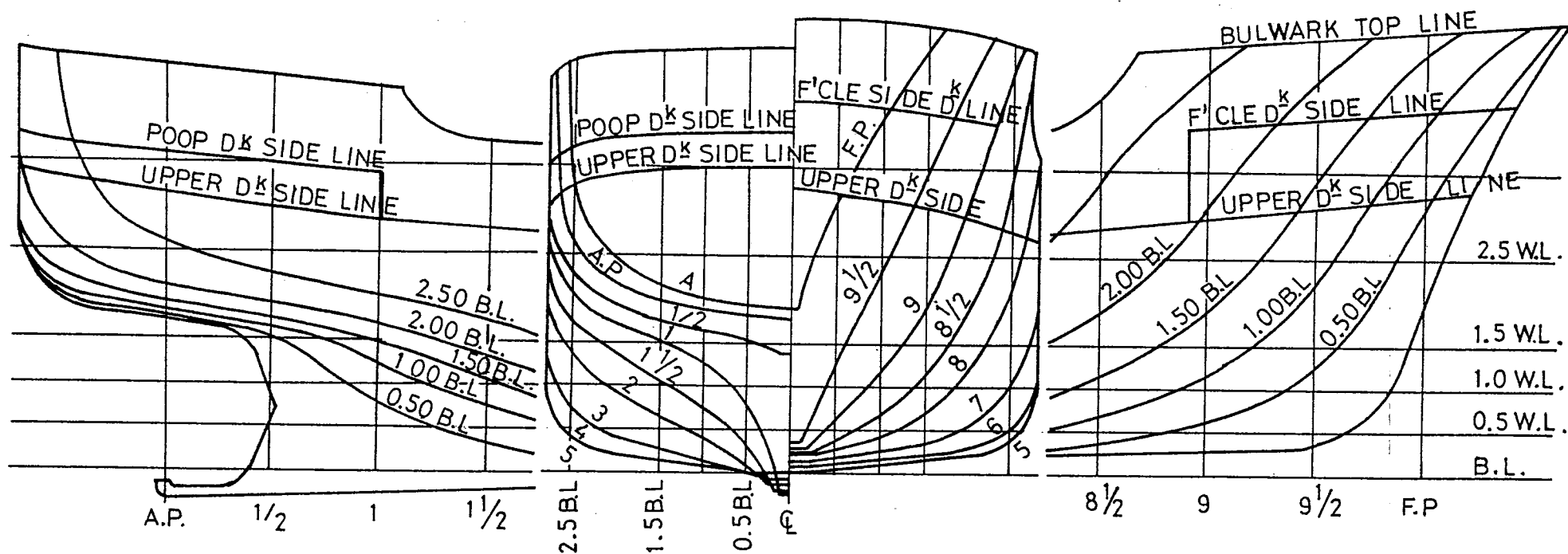


Fig. 4-1 The lines of USHIO-MARU.

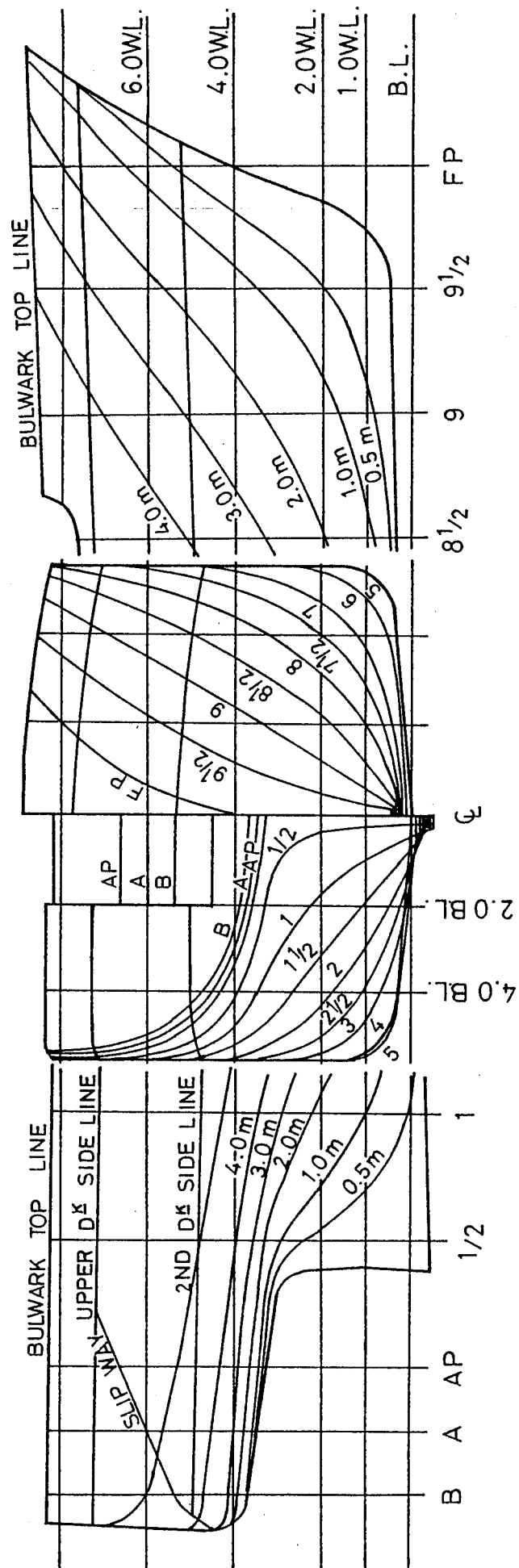


Fig. 4-2 The lines of HOKUSEI-MARU.

USHIO - MARU	
Item	Dimension
L (m)	24.70
B (m)	5.60
D (m)	2.50
Disp. (ton)	188.19
Df (m)	1.62
Da (m)	2.43
Dm (m)	2.03
Trim(m)	0.81
GM (m)	0.51
Tr (sec)	6.80

Table 4-1 Main particulars and experimental conditions of USHIO-MARU.

HOKUSEI - MARU	
Item	Dimension
L (m)	56.00
B (m)	11.10
D (m)	4.60
Disp. (ton)	1600.44
Df (m)	2.88
Da (m)	5.02
Dm (m)	3.95
Trim(m)	2.14
GM (m)	0.92
Tr (sec)	7.14

Table 4-2 Main particulars and experimental conditions of HOKUSEI-MARU.



Photo 4-3 View of acceleration measurement device on the subject.

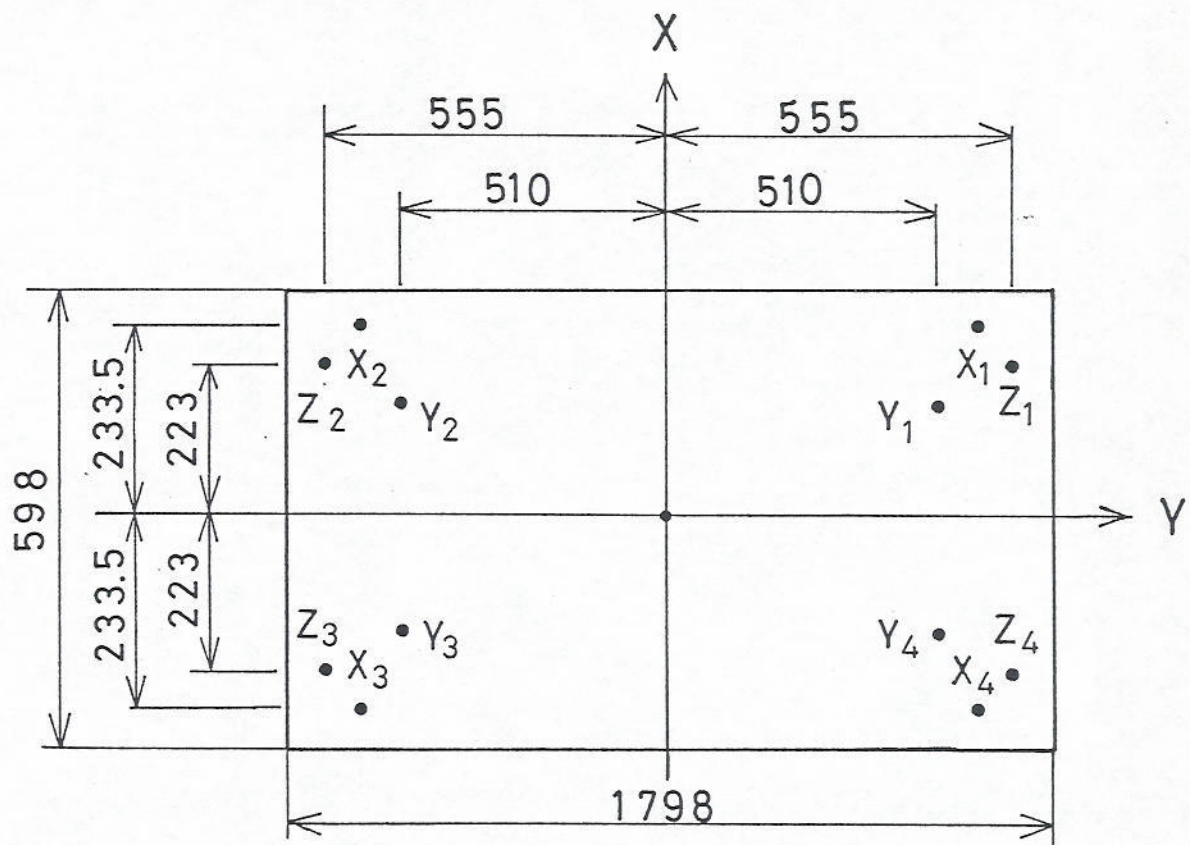


Fig. 4-3 A general view and arrangement of load cell of FORCE-PLATE.



Photo 4-4 View of measuring condition.

Wave scale		Wave height H
Rank	Name	Range (m)
0	Calm (grassy)	0
1	Calm (rippled)	$0 < H \leq 0.1$
2	Smooth	$0.1 < H \leq 0.5$
3	Slight	$0.5 < H \leq 1.25$
4	Moderate	$1.25 < H \leq 2.5$
5	Rough	$2.5 < H \leq 4.0$

Table 4-3 Relationship between wave scale and wave height.

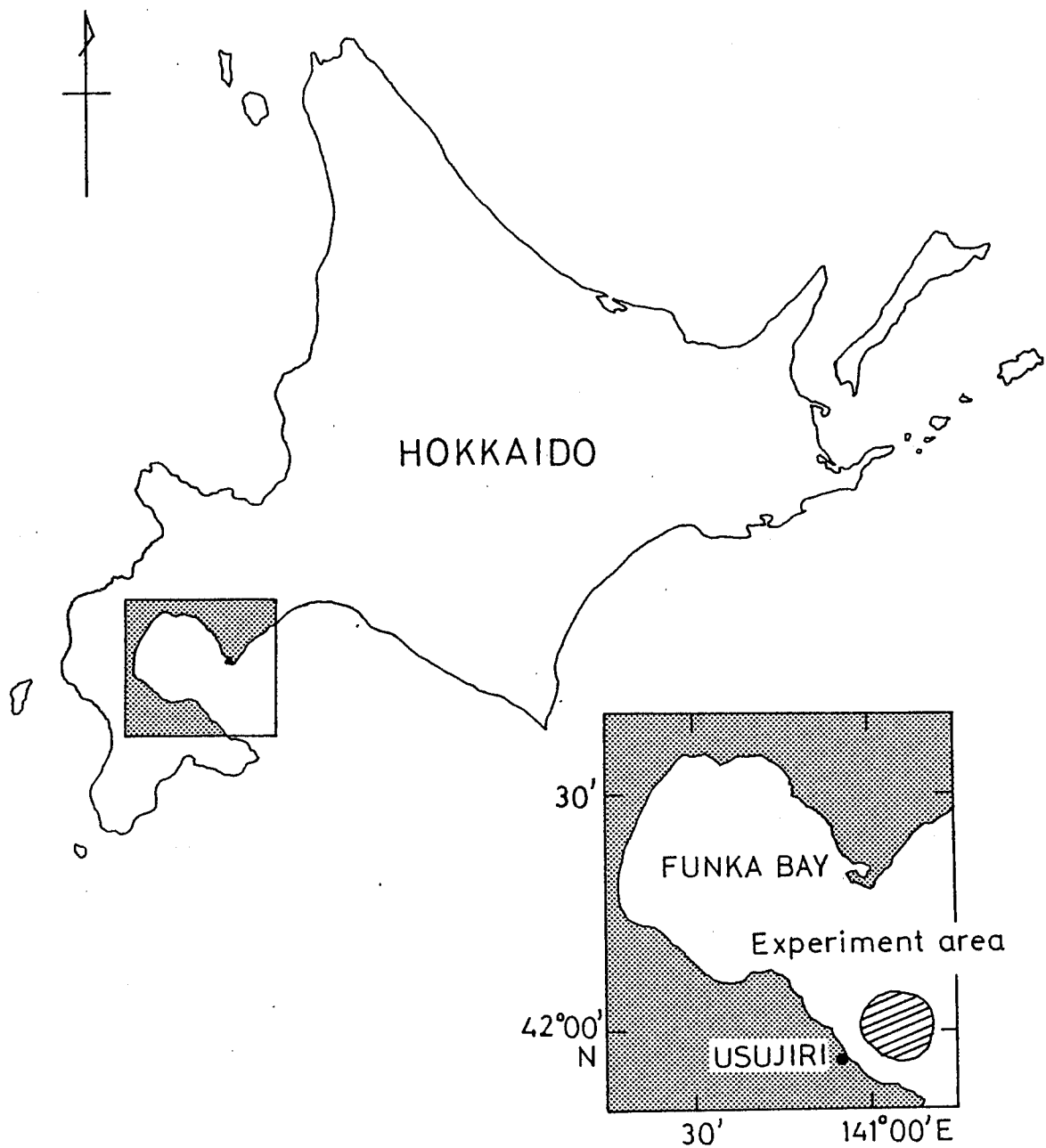


Fig. 4-5 Experimental area of USHIO-MARU.

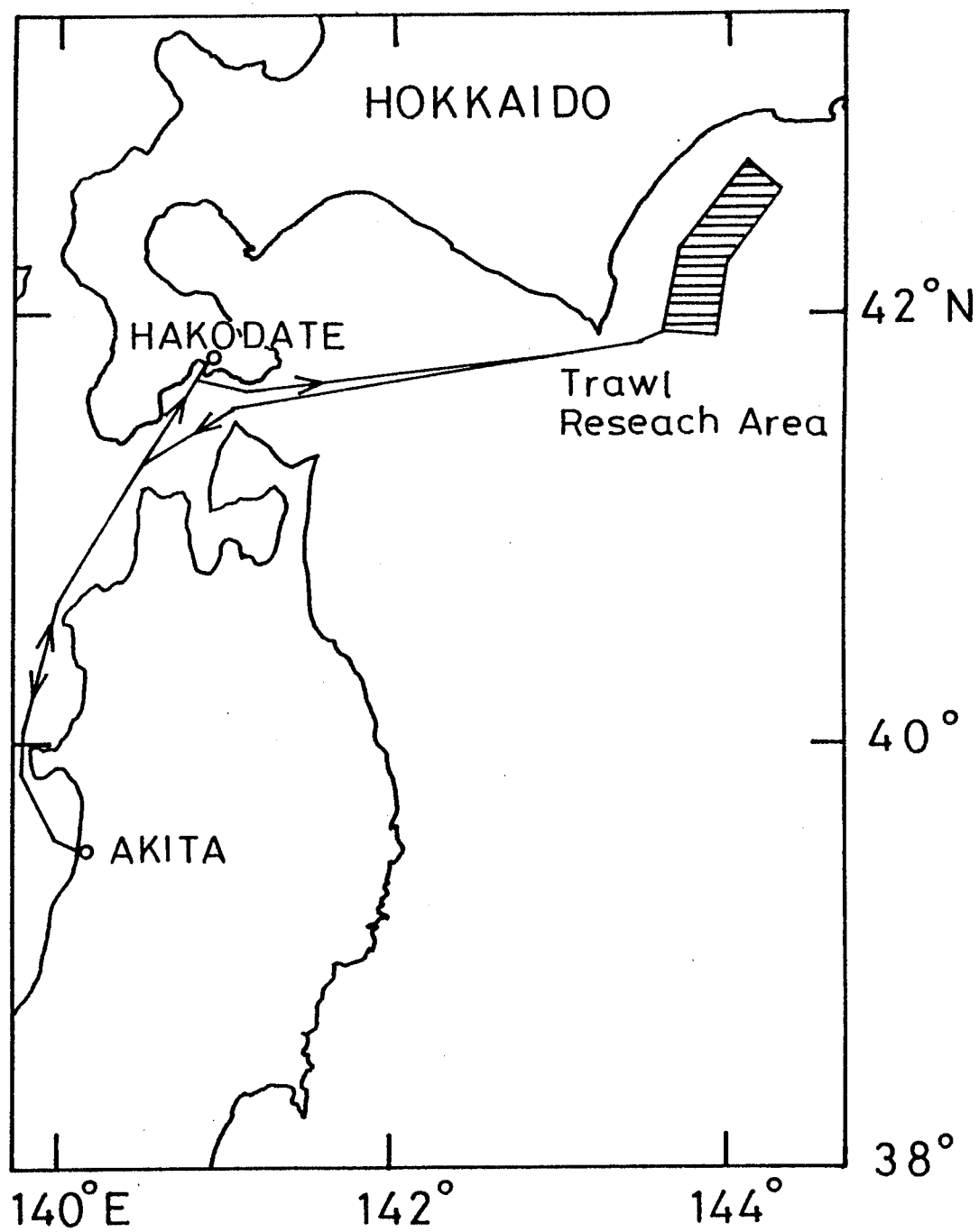


Fig. 4-6 Experimental area of HOKUSEI-MARU.

Date	Ship	No.	Age	Station
1982. 8. 3	Ushio-maru	1	21	Student
1983. 6. 7 ~ 6. 8	Ushio-maru	1	21	Student
		2	22	"
		3	56	Teacher
		4	29	Student
1983.11.29 ~11.30	Ushio-maru	1	22	Student
		2	23	"
		3	52	Teacher
		4	56	"
		5	26	Student
1983.12.27	19.9GT fishing vessel Marunaka-maru	1	52	Sailor
1984.11.12 ~11.14	Ushio-maru	1	57	Teacher
		2	22	Student
		3	23	"
		4	47	Sailor
		5	53	Teacher
1987. 4. 1 ~ 4.10	Hokusei-maru	1	55	Teacher
		2	29	Teacher

Table 4-4 Classification of subjects participated in the experiments.

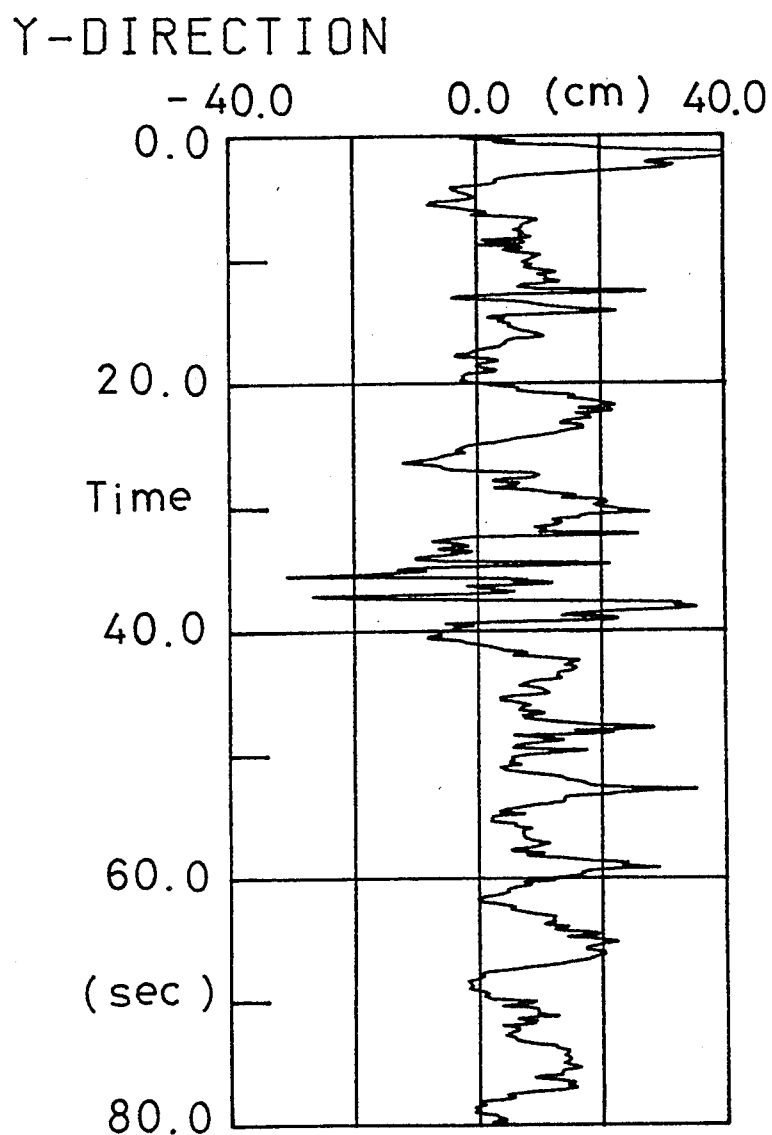
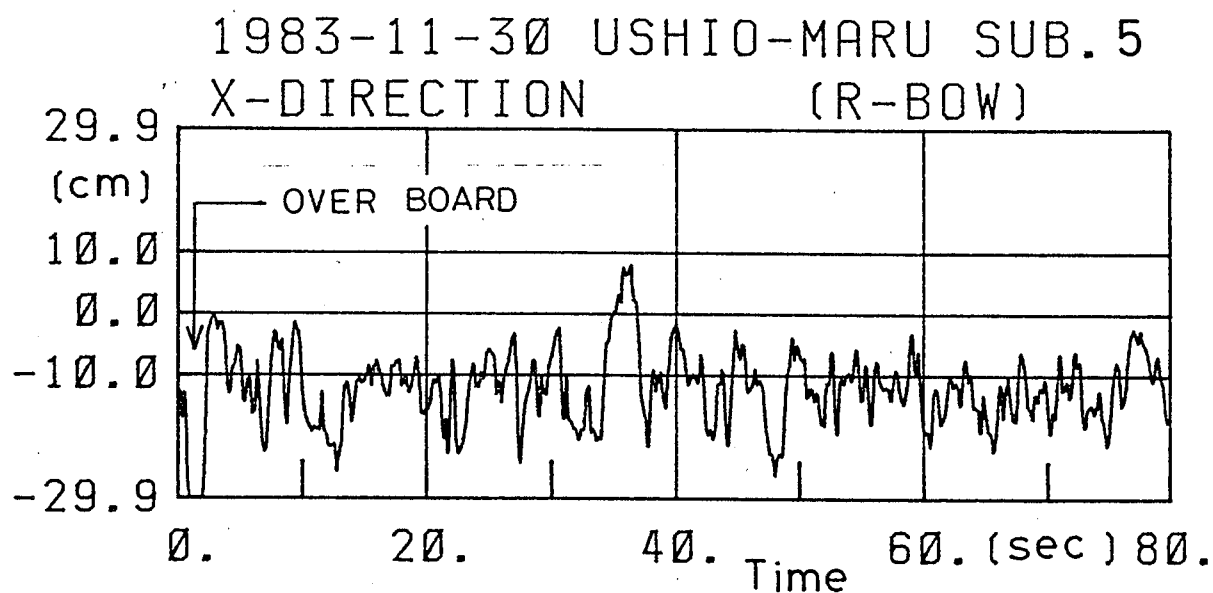


Fig. 4-7 The record of the movement of C.G. of human body in X, Y-direction.

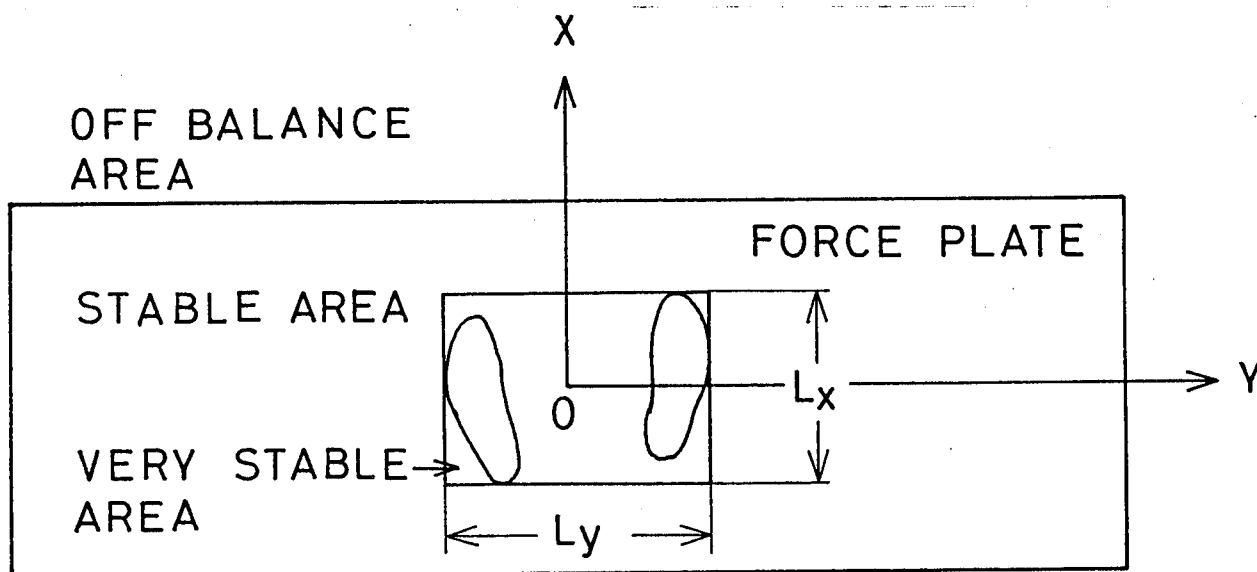
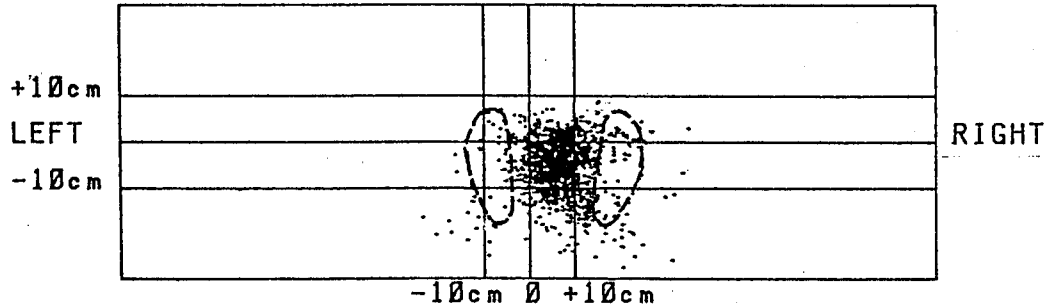


Fig. 4-8 The state of the subject's balance on the FORCE-PLATE.

1983-11-30 USHIO-MARU SUB. 5
FORCE PLATE FOR.

HEAD

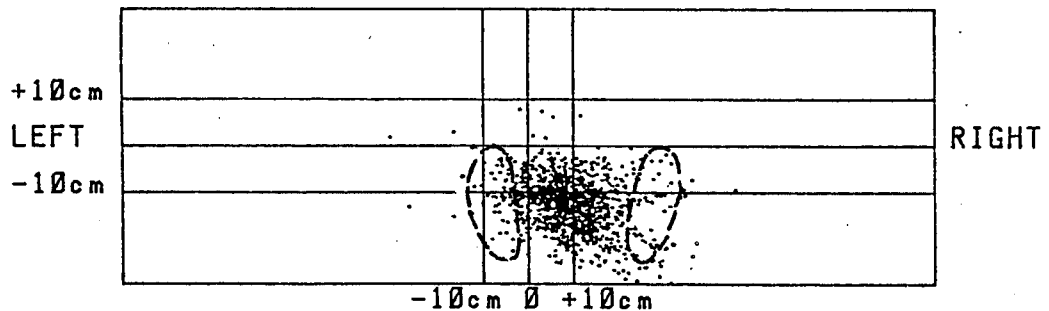


MEAN X = -5.7010 X-VARI = 42.4119
MEAN Y = 6.9042 Y-VARI = 52.4421

Fig. 4-9(a) Head sea

1983-11-30 USHIO-MARU SUB. 5
FORCE PLATE FOR.

R-BOW

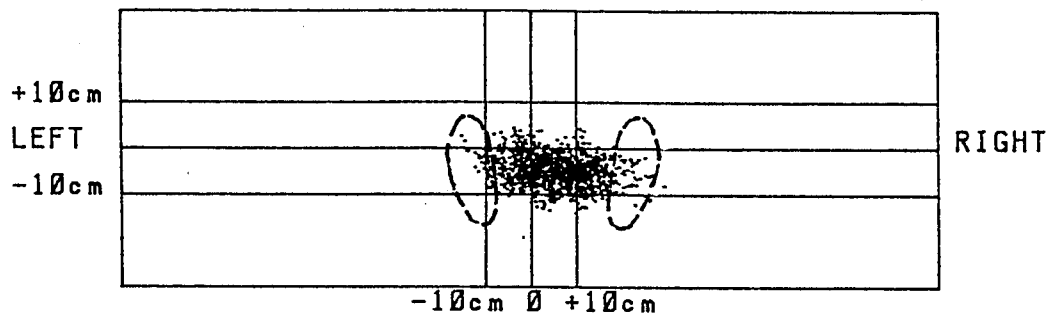


MEAN X = -13.4292 X-VARI = 54.2473
MEAN Y = 10.6371 Y-VARI = 96.2979

Fig. 4-9(b) R-Bow sea

1983-11-30 USHIO-MARU SUB. 5
FORCE PLATE FOR.

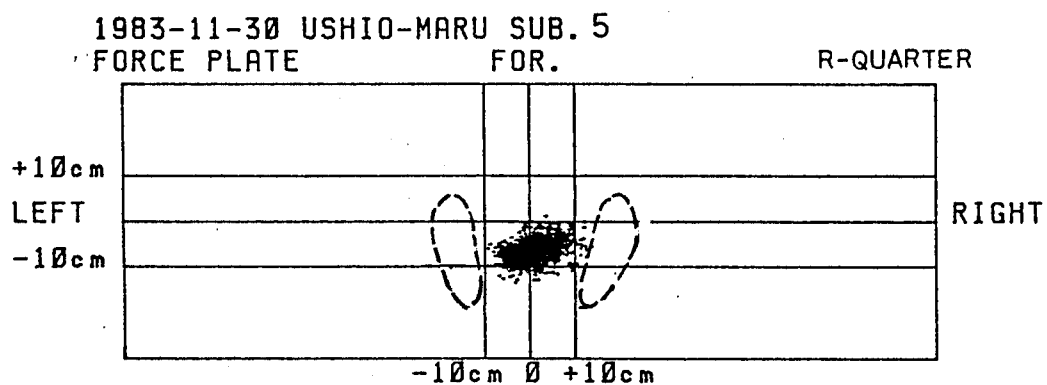
R-BEAM



MEAN X = -4.7328 X-VARI = 10.7462
MEAN Y = 5.4624 Y-VARI = 63.3529

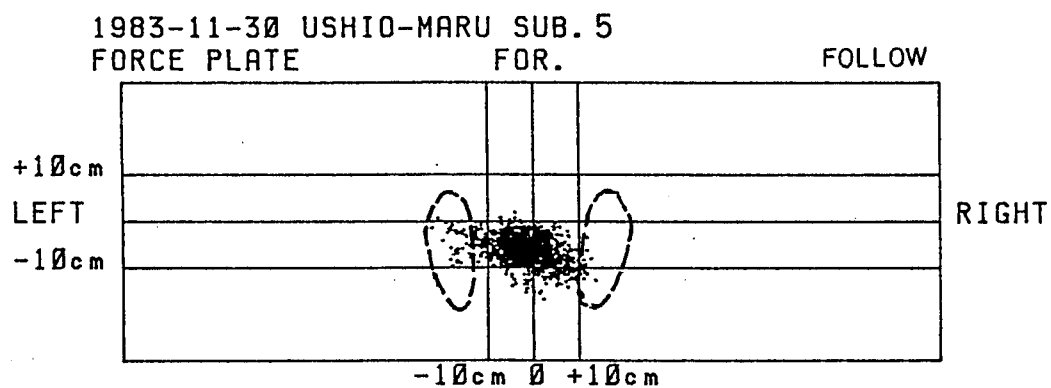
Fig. 4-9(c) R-Beam sea

Fig. 4-9 Examples of the distribution of C.G. of human body on the FORCE-PLATE.



MEAN X = -6.6346 X-VARI = 5.4966
 MEAN Y = 1.2957 Y-VARI = 16.1898

Fig. 4-9(d) R-Quartering sea



MEAN X = -6.2859 X-VARI = 9.1125
 MEAN Y = -1.6271 Y-VARI = 35.4916

Fig. 4-9(e) Following sea

SUBJECT	No	X-MEAN	σ_x	$Lx/2\sigma_x$	%	$\chi^2(0.05)$	Y-MEAN	σ_y	$Ly/2\sigma_y$	%	$\chi^2(0.05)$
Sub. 1	1	-3.04	5.820	5.39	100.00	19.675 > 19.575	-3.44	11.660	6.88	100.00	27.587 > 24.494
	2	-2.85	8.372	4.49	100.00	23.685 > 16.835	-1.46	17.184	5.67	100.00	30.144 > 21.540
	3	-3.74	8.142	4.55	100.00	23.685 > 11.289	-0.57	22.689	4.93	100.00	35.172 > 18.641
	4	-3.99	3.269	7.19	100.00	16.919 > 10.843	-1.74	13.174	6.47	100.00	23.685 < 40.013
	5	-3.66	1.805	9.67	100.00	14.067 > 10.377	-1.37	5.982	5.52	100.00	21.026 > 5.573
Sub. 2	1	-3.04	5.820	4.80	100.00	23.685 > 10.056	-0.44	8.173	8.22	100.00	21.026 < 53.650
	2	-4.99	8.372	4.75	100.00	22.362 < 27.549	-1.01	9.755	7.52	100.00	24.996 > 13.054
	3	-5.59	4.992	5.82	100.00	18.307 > 12.021	-1.77	43.470	3.56	99.96	35.652 < 95.041
	4	-4.42	7.331	7.47	100.00	16.919 < 23.858	-2.00	9.115	7.78	100.00	23.685 < 29.932
	5	-6.44	1.817	9.64	100.00	14.067 > 9.152	-2.43	10.878	7.13	100.00	24.996 < 52.012
Sub. 3	1	-3.51	12.094	3.74	99.98	27.587 > 27.427	4.88	13.179	5.37	100.00	30.144 > 26.572
	2	-0.77	20.143	2.89	99.74	30.144 > 19.687	9.63	49.252	2.78	99.46	40.113 < 46.670
	3	-5.57	5.562	5.48	100.00	21.026 > 6.504	9.97	28.059	3.68	99.98	38.885 > 31.339
	4	-6.39	2.770	7.82	100.00	15.507 > 6.534	7.08	9.780	6.24	100.00	24.996 > 12.590
	5	-6.46	4.071	6.44	100.00	18.307 > 8.144	7.00	13.595	5.29	100.00	28.869 < 47.649
Sub. 4	1	-2.50	17.546	3.10	99.80	33.924 > 19.901	-0.74	13.690	7.84	100.00	28.869 > 19.480
	2	-4.12	22.737	2.73	99.36	35.172 > 24.499	0.39	31.368	5.18	100.00	40.113 > 35.937
	3	-8.99	8.739	4.39	100.00	24.996 > 13.817	4.47	66.656	3.55	99.96	43.773 < 45.464
	4	-9.84	3.460	6.99	100.00	16.919 > 11.026	1.19	13.232	7.97	100.00	28.869 > 28.422
	5	-9.43	5.436	5.57	100.00	21.026 > 19.164	-0.97	19.493	6.57	100.00	30.144 > 28.270
Sub. 5	1	-5.62	40.596	1.96	95.86	36.415 < 76.174	6.92	51.388	3.13	99.84	42.557 < 104.108
	2	-12.64	33.766	2.15	97.50	37.652 < 74.097	9.84	74.059	3.06	99.97	43.773 < 44.893
	3	-4.73	10.746	3.14	99.84	26.296 > 11.375	5.46	63.353	3.08	99.80	43.773 < 49.890
	4	-6.63	5.497	5.33	100.00	21.026 < 23.157	1.29	16.190	6.09	100.00	27.586 > 22.415
	5	-6.29	9.113	4.14	100.00	24.996 < 29.386	-1.63	35.492	4.11	100.00	36.415 < 57.184

NO.1:HEAD,NO.2:R-BOW,NO.3:R-BEAM,NO.4:R-QUARTER,NO.5:FOLLOW

Table 4-5 The properties of the distribution for the C.G. of the subject in the X, Y-direction.

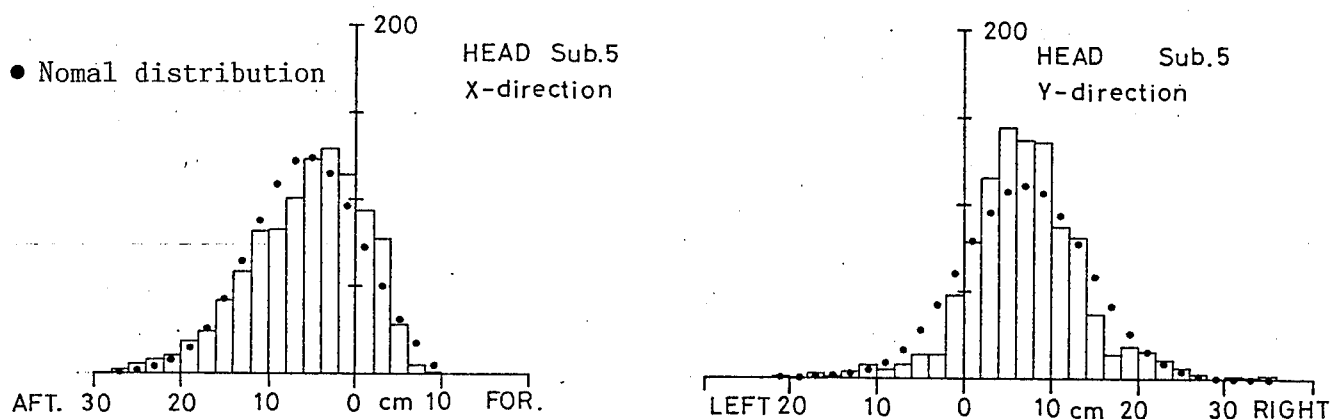


Fig. 4-10(a) Head sea

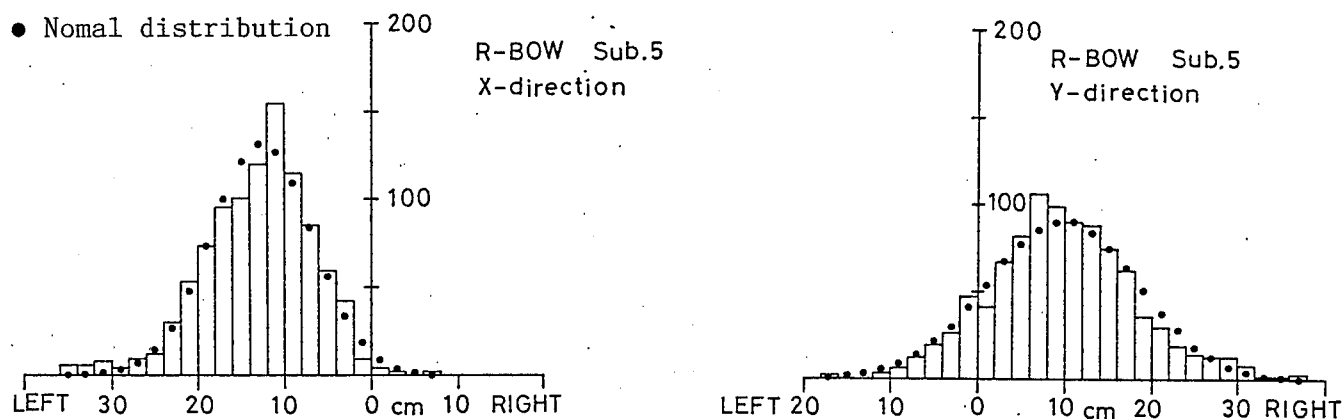


Fig. 4-10(b) R-Bow sea

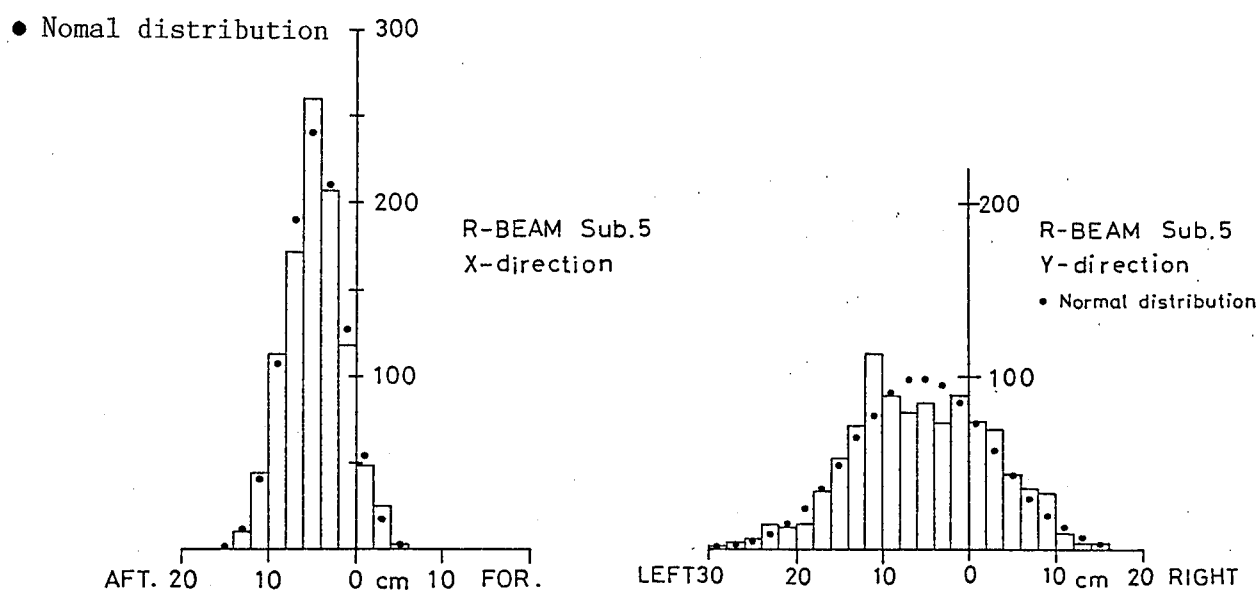


Fig. 4-10(c) R-Beam sea

Fig. 4-10 Histogram of the distribution of C.G. of human body on the FORCE PLATE in the X, Y-direction.

• Nomal distribution

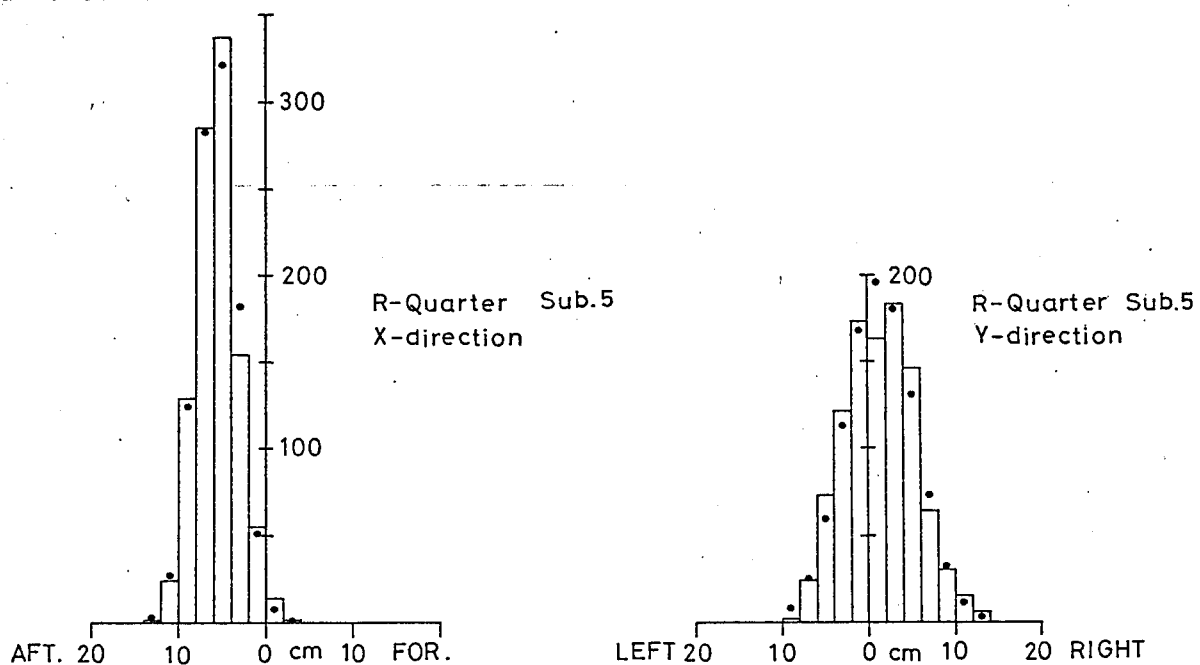


Fig. 4-10(d) R-Quartering sea

• Nomal distribution

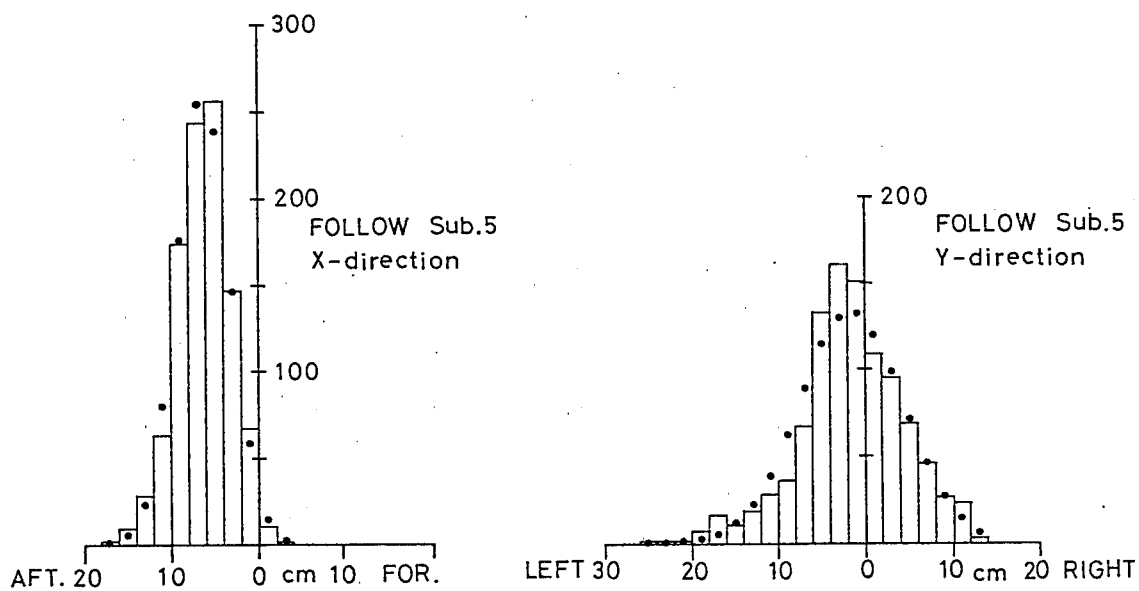


Fig. 4-10(e) Following sea

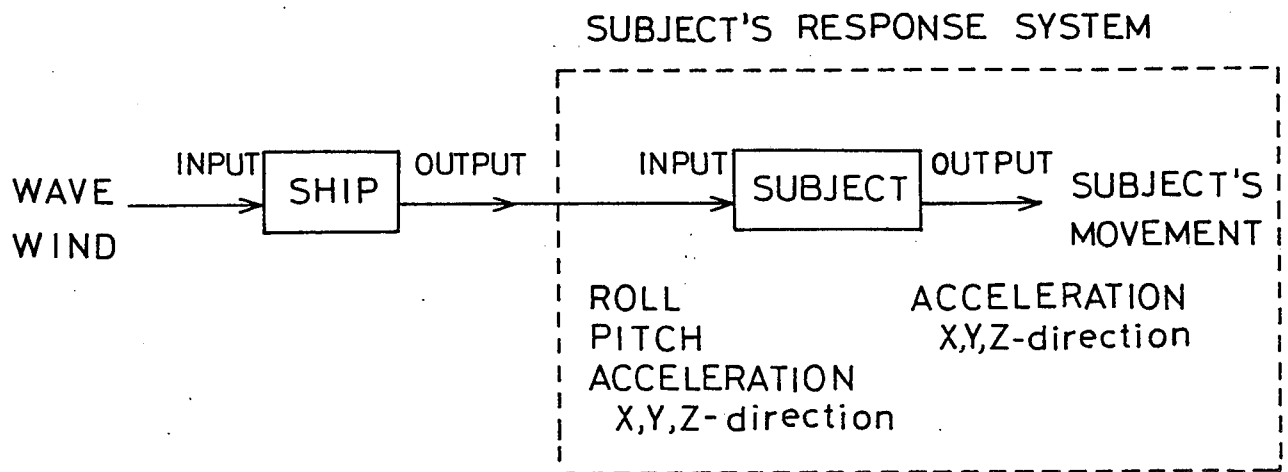


Fig. 4-11 The relationship between input and output to the response system of the human body.

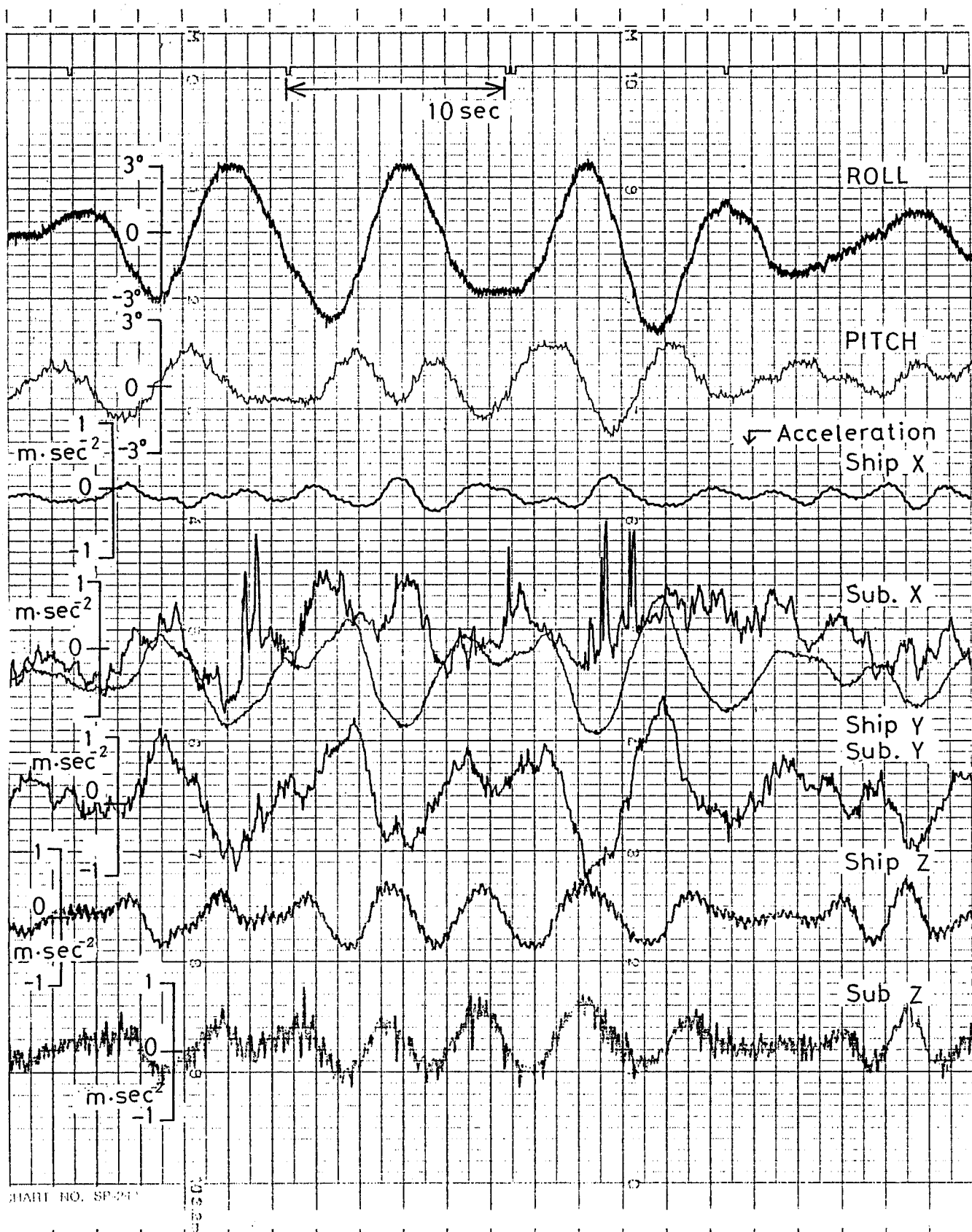


Fig. 4-12 Recorded data of ship motions and human response accelerations.

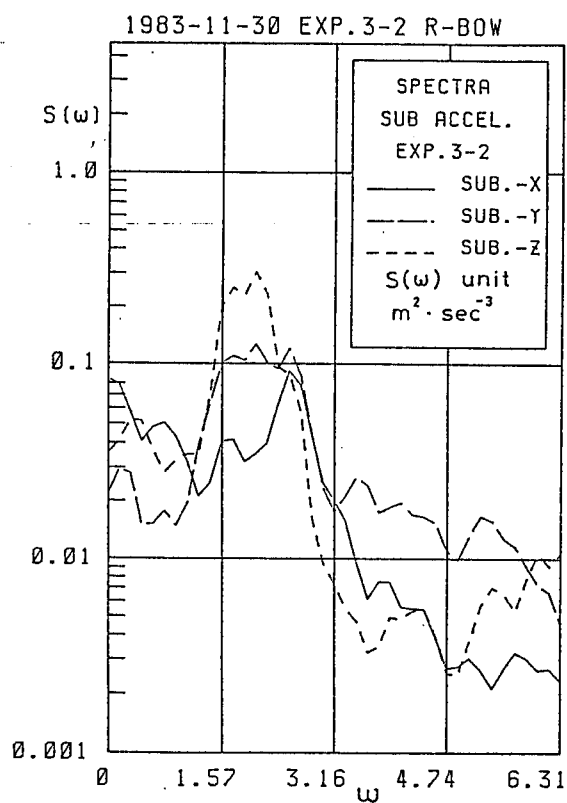


Fig. 4-13(a) Accelerations occurred on the human body.

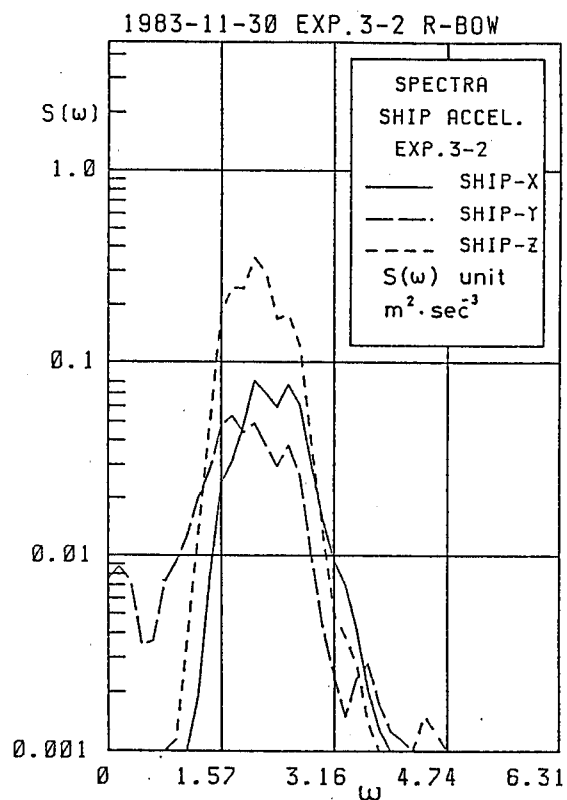


Fig. 4-13(b) Ship accelerations.

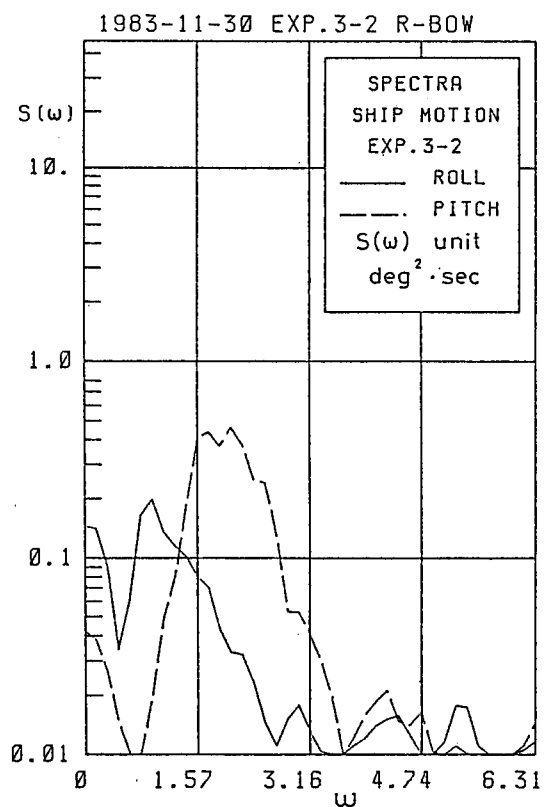


Fig. 4-13(c) Rolling and pitching.

Fig. 4-13 Power spectra of the accelerations occurred on the human body and ship motions.

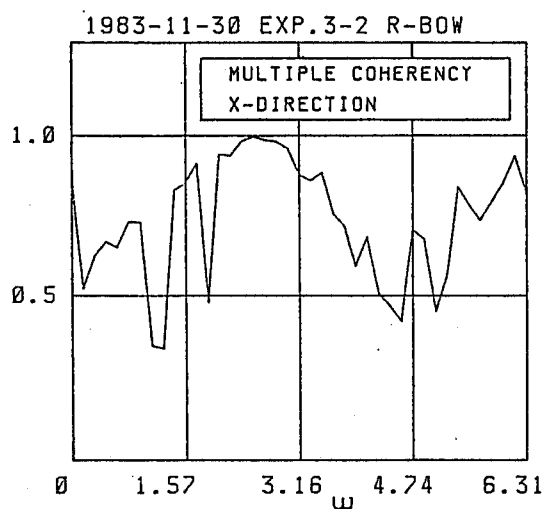


Fig. 4-14(a) In the X-direction.

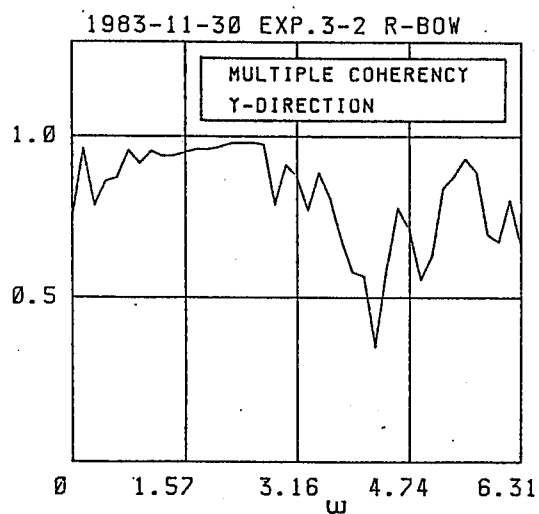


Fig. 4-14(b) In the Y-direction.

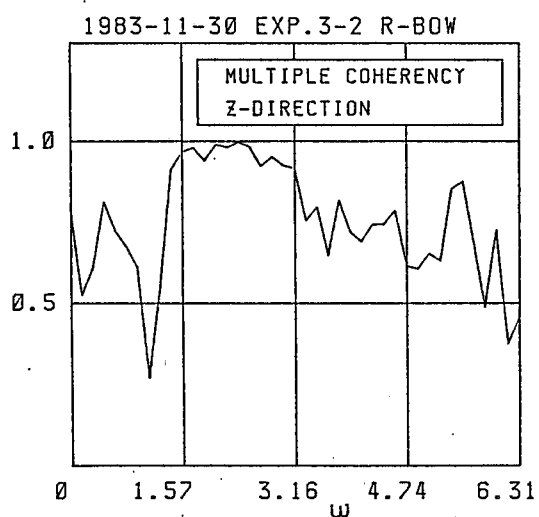


Fig. 4-14(c) In the Z-direction.

Fig. 4-14 Multiple coherency of the response of a human body for the ship motions.

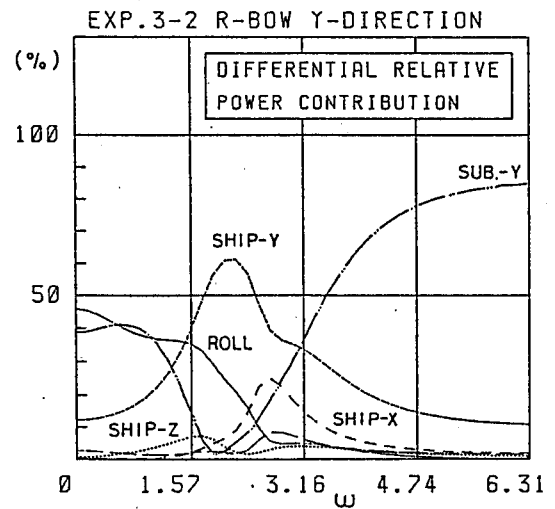
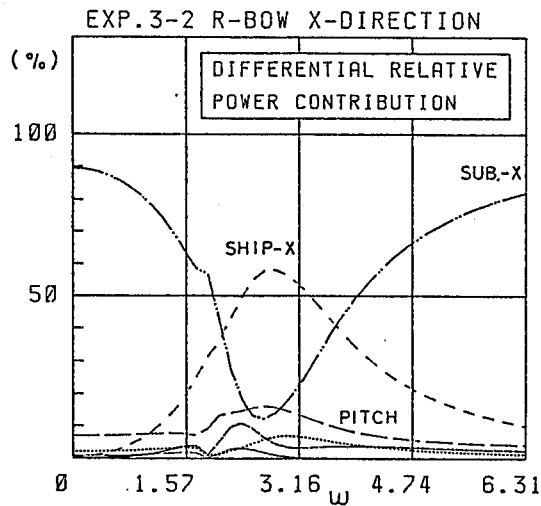


Fig. 4-15(a) In the X-direction. Fig. 4-15(b) In the Y-direction.

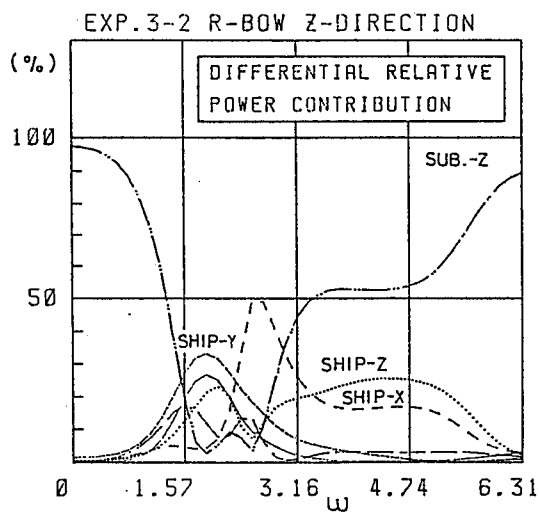


Fig. 4-15(c) In the Z-direction.

Fig. 4-15 Power contribution of the response of a human body for the ship motions.

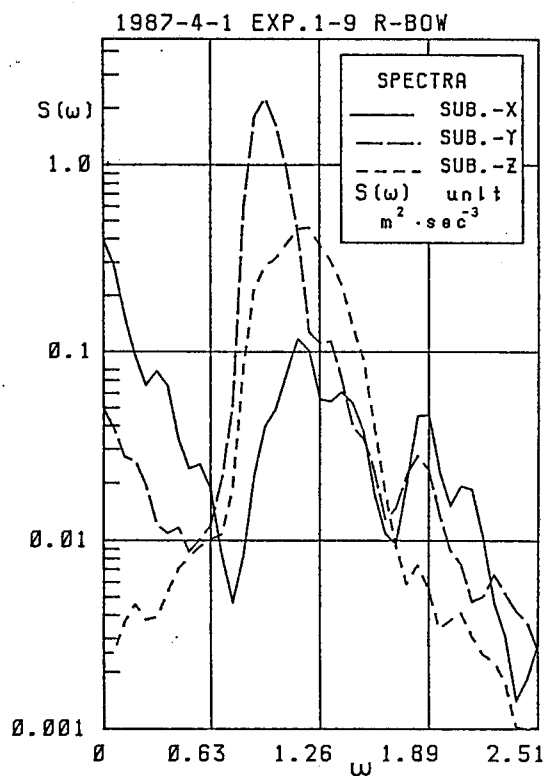


Fig. 4-16(a) Accelerations occurred on the human body.

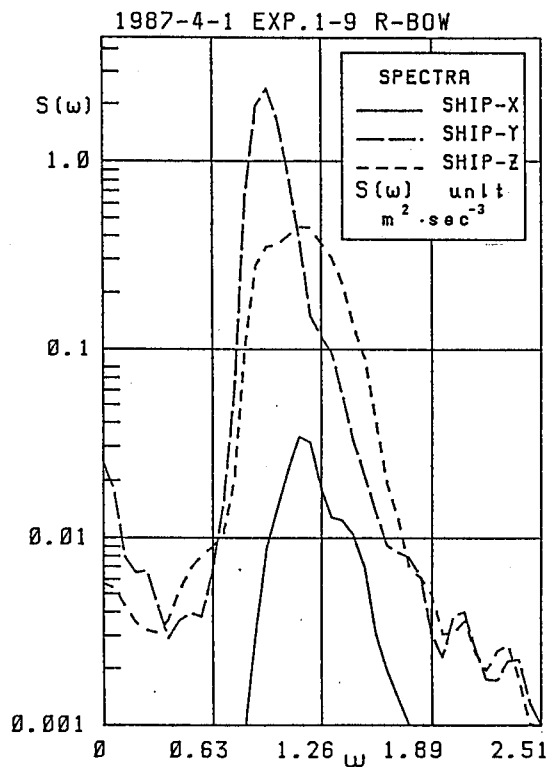


Fig. 4-16(b) Ship accelerations.

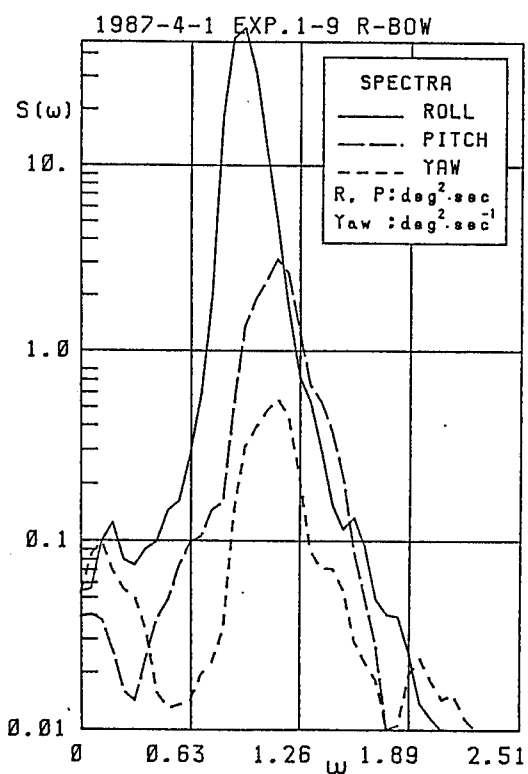


Fig. 4-16(c) Rolling, pitching and yawing.

Fig. 4-16 Power spectra of the accelerations occurred on the human body and ship motions.

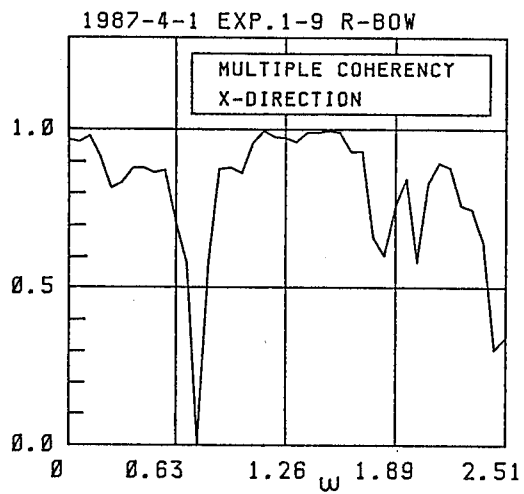


Fig. 4-17(a) In the X-direction.

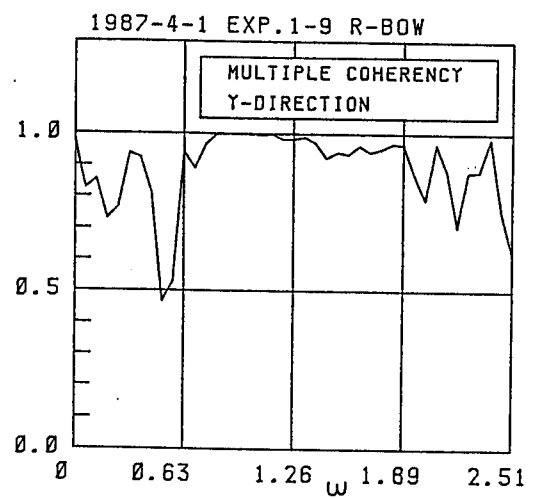


Fig. 4-17(b) In the Y-direction.

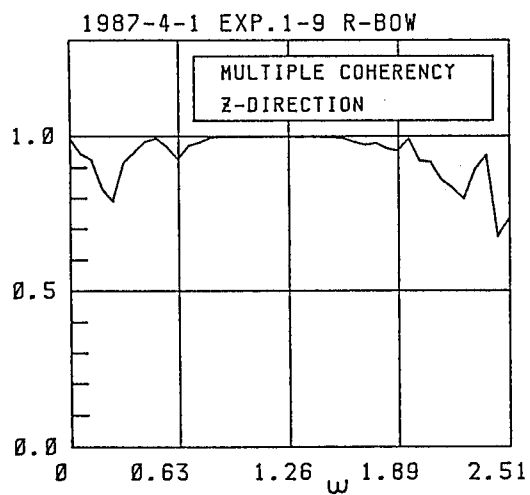


Fig. 4-17(c) In the Z-direction.

Fig. 4-17 Multiple coherency of the response of a human body for the ship motions.

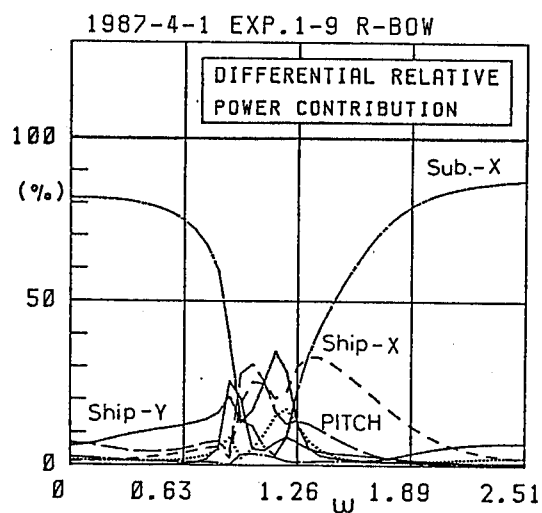


Fig. 4-18(a) In the X-direction.

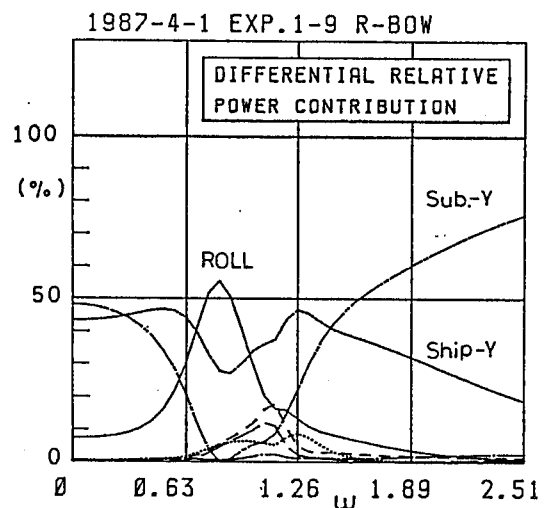


Fig. 4-18(b) In the Y-direction.

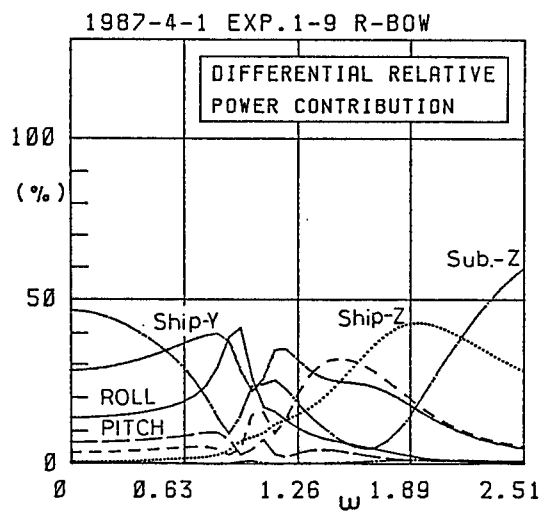


Fig. 4-18(c) In the Z-direction.

Fig. 4-18 Power contribution of the response of a human body for the ship motions.

	Φ	Θ	Ship acc.X	Ship acc.Y	Ship acc.Z	Sub acc.Z
Φ		-0.121215	0.258380	-1.209555	-0.746477	-0.027439
		-0.024401	0.429332	1.139946	0.989950	0.093765
		-0.068369	-1.343782	0.022694	-0.515210	-0.011530
		-0.138491	1.258331	-1.310462	-0.906457	-0.026929
		-0.074070	-0.209121	0.240208	0.621699	0.061695
		-0.003888	-0.373735	0.086754	-0.453200	0.015935
		-0.091751	0.825419	0.194499	-0.032782	-0.043069
Θ	-0.008935		-1.308071	-1.463598	0.331934	0.044227
	-0.002226		0.891283	1.051331	-0.359459	0.097761
	0.063231		0.778088	-0.352069	0.672076	-0.095060
	-0.121190		0.486130	-0.136541	-0.890083	-0.094871
	-0.013489		-0.284099	-0.688933	0.618423	-0.085759
	-0.038152		1.086306	0.430681	-0.320616	-0.033276
	-0.030199		0.488418	-0.091009	0.598076	0.004906
Ship accel. X	0.000526	-0.025013		-0.061606	0.123816	0.007036
	0.001381	-0.049233		0.192866	-0.025938	0.016640
	-0.000012	-0.053077		-0.007193	-0.020366	0.023748
	0.004659	-0.032073		-0.050636	-0.102891	0.023166
	0.003666	-0.010122		-0.068051	-0.122568	0.009371
	0.002806	0.009003		0.000262	0.056997	-0.017457
	-0.003037	0.025870		0.019197	0.055597	-0.035120
Ship accel. Y	-0.014226	-0.000175	0.115397		-0.328690	0.000746
	-0.033531	0.003698	-0.001652		0.163142	0.003593
	-0.050932	0.006906	-0.032811		0.017085	0.003804
	-0.065071	0.000069	-0.045285		-0.121558	0.005613
	-0.058307	-0.008801	0.050308		-0.055936	0.006472
	-0.039937	-0.003102	0.045472		-0.001544	0.006881
	-0.015984	0.009323	0.051461		-0.013152	-0.002310
Ship accel. Z	0.012149	-0.017136	-0.052509	-0.289869		0.002145
	0.025814	-0.040112	0.138176	0.134787		0.005600
	0.033641	-0.054465	0.066811	0.084667		0.012979
	0.034691	-0.045431	0.127744	0.053055		0.019999
	0.027407	-0.022202	-0.033880	0.096242		0.021530
	0.013077	-0.008064	-0.290117	0.293074		-0.005831
	-0.001923	-0.006301	-0.258208	0.190804		-0.022697
Sub. accel. Z	0.061278	-0.034981	-0.173513	0.754889	1.300125	
	-0.028856	0.023766	-1.446794	-0.822191	-0.038593	
	-0.029091	-0.144187	1.769572	0.025495	-1.670871	
	0.005747	0.001593	-1.211500	1.370404	3.083944	
	0.031406	0.018898	0.190886	-1.297041	-2.983283	
	0.005917	-0.008127	0.131536	0.448996	1.129278	
	-0.011731	0.031472	-0.085551	-0.031238	0.054490	

Table 4-6 Impulse response functions of the response of human body used multiple auto regressive model (model order 7).

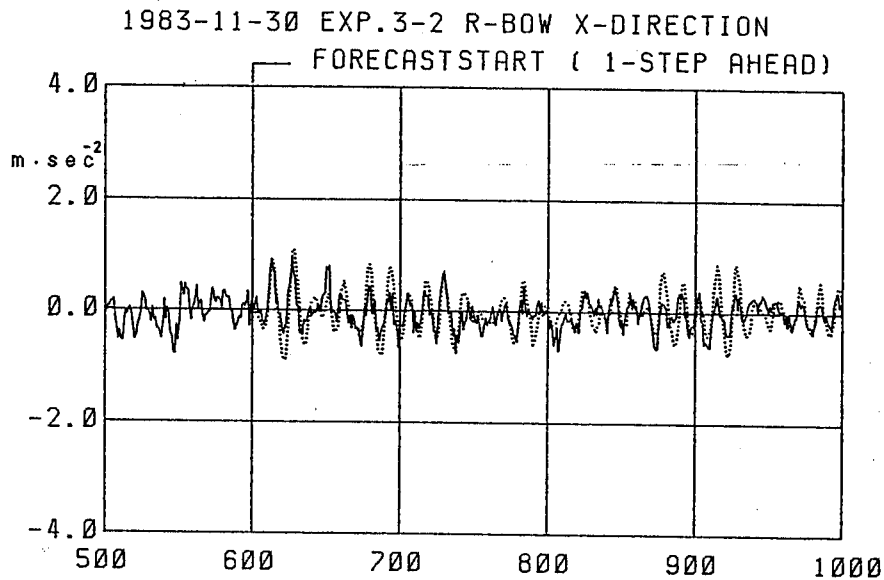


Fig. 4-19(a)

In the X-direction.

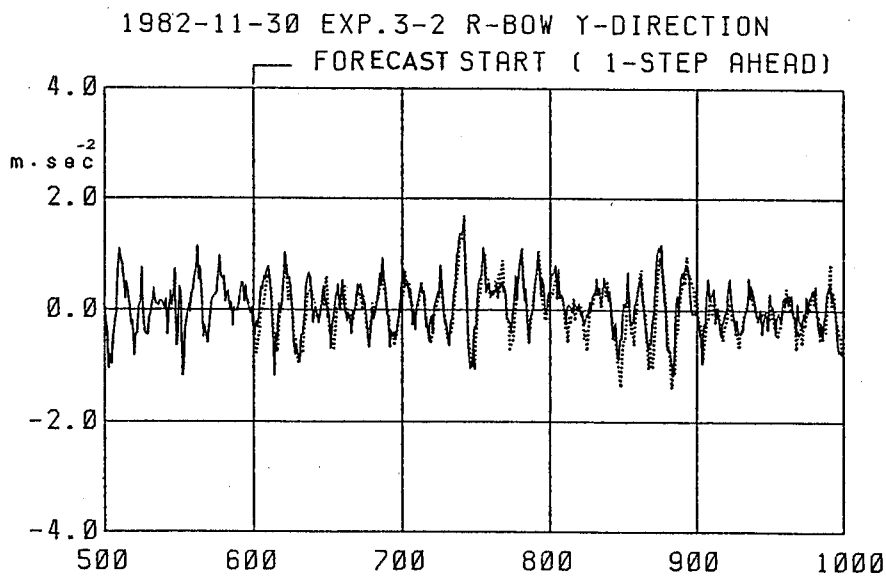


Fig. 4-19(b)

In the Y-direction.

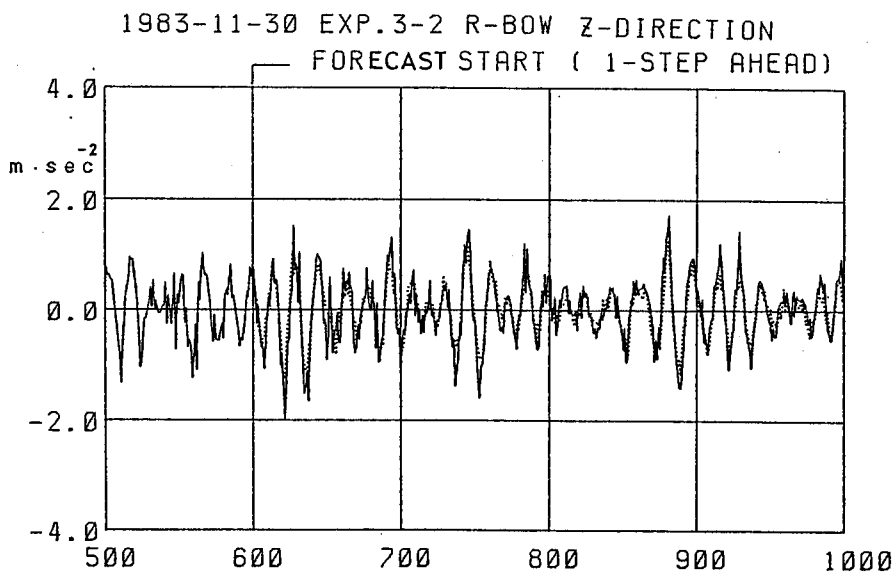


Fig. 4-19(c)

In the Z-direction.

Fig. 4-19 Comparison between the forecasting values used the multiple auto regressive model and measured values.

第5章 人間の状態維持に関する船体加速度の評価法

第4章においては、Fig.4-8に示すフォースプレート上に射影した人体の重心位置 X_c 、 Y_c の分布と L_x 、 L_y の範囲より、人間のバランスが Very stable な状態から Stable な状態へと変化していく過程を、統計的に明らかにした。本章においては、さらに、船体動揺が激しくなるにつれて、人間のバランスが Stable な状態から Off balance な状態へと変化していく過程を、船体運動の成分をもとに明らかにし、その指標化を行う。

5 - 1 人間のバランス状態に関する判別分析

前章における、人体のバランス系の応答特性に関する解析の結果、船体運動に対する X 、 Y 及び Z 軸方向における人体の加速度応答には強い線形性が見られ、多次元自己回帰モデルを用いてこのシステムを同定することができるということが判明した。船体運動を入力として人体の重心位置における加速度応答を同定できることから、同様に人体のバランスの状態も、船体運動を用いて推定できることが予想される。船体運動に対し人体がバランスを維持することできる許容範囲を推定することが可能ならば、甲板上に発生する動揺環境の側面から、漁労作業の安全性を確立することができる。

5 - 1 - 1 線形判別関数による評価

船体運動という数量的変数から、人間がバランスを維持できるか否かという定性的反応を判別する手法として判別分析 (discriminatory analysis) を用いる。

人間のバランス状態は、船体運動を中心に様々な影響を受けており、船体運動の個々の成分の数量的変数だけから、人間のバランス状態を的確に予想することは困難である。前章における周波数解析により、人体の加速度応答は、同軸方向の船体加速度成分の影響を一番強く受けることが明かとなった。Fig. 5-1(a)~(c)に、船上の X、Y 及び Z 軸方向の加速度に対し人間がバランスを保持出来たか否かを、その加速度の r.m.s. (root mean square) 値と周波数の関係より示した。図中、(○) は被験者がフォースプレート上でバランスを保持できた、Stable な状態であったことを示し、(×) はバランスを保てなかった、Off balance な状態であったことを示す。周波数は加速度振動の peak-to-peak 間の平均周波数を使用している。なお、人間がバランスを崩したか否かの判断は、被験者が計測期間中、フォースプレート上に状態を保持できたかどうかを判断基準としている。また、1 計測時間は 1 分間とした。

船体運動に対する人体のバランス系の応答解析によって、船体に発生した加速度は人体の加速度応答に強い影響を及ぼすことが判明

した。しかし、Fig. 5-1より、船体の X、Y及び Z軸といった単軸方向の加速度だけでは、被験者のバランス状態を的確に判断できないことがわかる。

人間のバランス状態へ影響を及ぼす船体運動の成分を判定要因として1つの総合判別指数にまとめ、判別基準と比較することによりバランス状態を判定する。この総合判別指数は、次式に示す線形判別関数 (linear discriminate function) として表せる^[33]。

$$T = \sum_{j=1}^P C_j X_j = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_P X_P \quad (5-1)$$

ここで、Tは総合判別指数、Xは各判定要因の値、Pは判定要因の個数そしてCは線形判別関数の係数をそれぞれ表す。

この線形判別関数は、計測期間中バランスを保てた群とバランスを崩した群との群間変動を大きくし、群内変動を小さくするように係数Cを決定することにより求まる。また、この線形判別関数を用いることにより、船体運動に対する人体のバランス状態を判定する判別基準 (discriminatory standard) を推定することが可能となる。判別基準値は、(5-1)式に各群の平均値を代入し、それぞれの群における判別関数の期待値を求める。次に、判別関数による誤分類を両群平等とし、各群の期待値の中央値を判別基準として設定した。

5 - 1 - 2 人間のバランス状態を評価するための判定要因の決定

船体運動から、船上にいる人間のバランス状態を容易に推定するためには、線形判別関数を構成する判定要因の項数をできるだけ軽減し、判別関数を簡単化する必要がある。

船体の6自由度運動から判定要因を選択する方法として、第4章におけるパワー寄与率を使用した。Fig. 4-15、Fig. 4-18に示した、人体のバランス系の出力に占める入力成分のパワー寄与率においても、船体の加速度成分が人体の加速度応答へ強い影響を及ぼすことが判明している。従って、船体の加速度成分は人間のバランス状態を評価する上で極めて重要な要素であり、その大きさや周波数帯は人間のバランスへ直接的影響を及ぼすと推定できる。

Fig. 5-2(a)～(e)に、船と波との出会角度を向い波から追い波状態へと変化させ航走実験を行った時、甲板上に発生したX、Y及びZ軸方向の加速度のパワースペクトル $S(\omega)$ を示す。ここで、 ω は円周波数である。

これらの異なった船体加速度の発生状況における、人体の加速度応答に占める船体加速度のパワー寄与率を、Fig. 5-3～5(a)～(c)に各軸方向ごとに示す。Fig. 5-3(a)、Fig. 5-4(b) 及び Fig. 5-5(c) から確認できるように、人体の各軸方向における加速度応答に対しては、同軸方向における船体加速度成分のパワー寄与率が高く

なっている。X、Y及びZ軸方向の船体加速度のパワー寄与率を累積し、船体加速度の3成分が出力に占めるパワー寄与率を Fig. 5-6(a)~(c)に示す。Fig. 5-6 から、いずれの航走実験の場合でも、人体のバランス系の入出力関係においては、船体加速度の3成分が非常に高い寄与率を占めることが確認できた。第4章において説明したように、解析に用いた船体加速度は、船体傾斜による横揺れや縦揺れの影響を含んでいる。そのため、人体の加速度応答に占める横揺れや縦揺れの寄与分が、船体加速度の占めるパワー寄与率に加わっており、結果として横揺れや縦揺れのパワー寄与率が小さくなったと考えられる。従って、3軸方向の船体加速度成分で被験者の加速度応答を充分表現し得ると判断した。

この結果、船体の6自由度運動のうちX、Y及びZ軸方向における船体加速度の3成分を判定要因として、人間のバランス状態を推定した。

5 - 2 判別要因と人体のバランス評価

船体甲板上に発生したX、Y及びZ軸方向の加速度を判定要因として判別分析を行った。

各軸方向における船体加速度の大きさとその周波数が、人体のバランス状態に大きな影響を与えているので、線形判別関数の説明変

数にはこれらの要素が含まれている必要がある [16], [17]。

従って、線形判別関数は次式のように示される。

$$T = C_x \cdot A_x \cdot F_x + C_y \cdot A_y \cdot F_y + C_z \cdot A_z \cdot F_z \quad (5-2)$$

ここで、 C_x, C_y, C_z : 線形判別関数の係数

A_x, A_y, A_z : 船体加速度の r.m.s. 値

F_x, F_y, F_z : 船体加速度の周波数

しかし、この判別関数は、各軸方向の加速度項に船体加速度の r.m.s. 値とその卓越周波数の積値という2変数を含んだ構成となっている。判別関数のより簡単化のために、これらの変数に対応するものとしてパワースペクトルを周波数で重み付けをしたスペクトルモーメントを用いた。

5-2-1 船体加速度のパワースペクトルの1次モーメントによる評価

判別要因として船体加速度のパワースペクトル $S(\omega)$ の1次モーメント $M1$ を用いた。解析には、これまでの実船実験により得られた、被験者延べ13人、256例の計測データを用いた。

$S(\omega)$ の1次モーメント $M1$ は、次式のように示される。

$$M1 = \int_0^{\infty} \omega \cdot S(\omega) d\omega \quad (5-3)$$

M1の値と被験者のバランス状態との関係をFig. 5-7に示す。図中各軸は、それぞれの方向におけるM1の値を示す。また、(・)は計測期間中被験者の状態が安定していたことを示し、(×)は被験者がバランスを崩したことを示す。

Fig. 5-7の3次元分布においては、被験者がバランスを維持できた事象とできなかった事象とがよく区別され、分布の上から重合部分が極めて少ない。従って、各軸方向におけるM1の値がある許容範囲を越えた時、被験者のバランス維持が困難になることが予想される。この結果、船体加速度のM1が人間のバランス状態を評価する上で適当な判定要因であると判断した。

M1を判定要因とした線形判別関数を(5-4)式に示す。

$$T = C_x \cdot M1_x + C_y \cdot M1_y + C_z \cdot M1_z \quad (5-4)$$

ここで、添字 x、y及び zは、それぞれの軸方向を示す。

計測データを基に線形判別関数の係数を合理的に決定した。つまり、バランスを保てた群とバランスを崩した群の母集団の期待値の

差を2母集団を一つにした分散で割った値を最大化している。なお、それぞれの係数は比例するので、 $Cx=1$ になるように設定して残りの係数を調整した。得られた線形判別関数を(5-5)式に示す。

$$T = M1x + 0.1659M1y + 0.1133M1z \quad (5-5)$$

バランスを維持できるか否かの判別基準値は、誤分類の確率を同じく設定して求めた結果0.220になった。

(5-5)式による分類結果をFig. 5-8に示す。

図中、横軸は線形判別関数による指数Tを表わす。また、上部ヒストグラムは計測期間中被験者のバランスが安定であったことを示し、黒塗りのヒストグラムはバランスを崩した状態を示す。

誤分類の確率が同じくなるように設定してあるため、判別基準値より低い値においても2例ほどバランスを崩した事例がみられる。マハラノビスの汎距離(群間の距離)を基に、正規分布表より推定した誤分類の確率は6.6%と低く、全体的に非常に良く分類されていると判断できる。この結果、判別分析を用いた解析が船体加速度から人間のバランス状態を判断する上で極めて有効であることが判明した。

従って、実船実験を基に判別分析により推定された判別基準値を、

人間がバランスを崩し始める船体加速度の閾値 (Threshold value) と定めた。

Fig. 5-9に、人間がバランスを安定に保持できる船体加速度の許容範囲を、(5-5) 式によって推定されたバランス評価法に基づき、閾値と各軸方向における船体加速度のM1の値の関係から示す。線形判別関数が簡単化され、各軸方向における船体加速度のM1値の3成分だけから構成されているため、甲板上に発生する加速度から簡単に人間のバランス状態を判定できる。

このように判別分析を用いることにより、船上に発生する加速度と人体のバランス維持との関係については、統計的に判断することが可能となった。

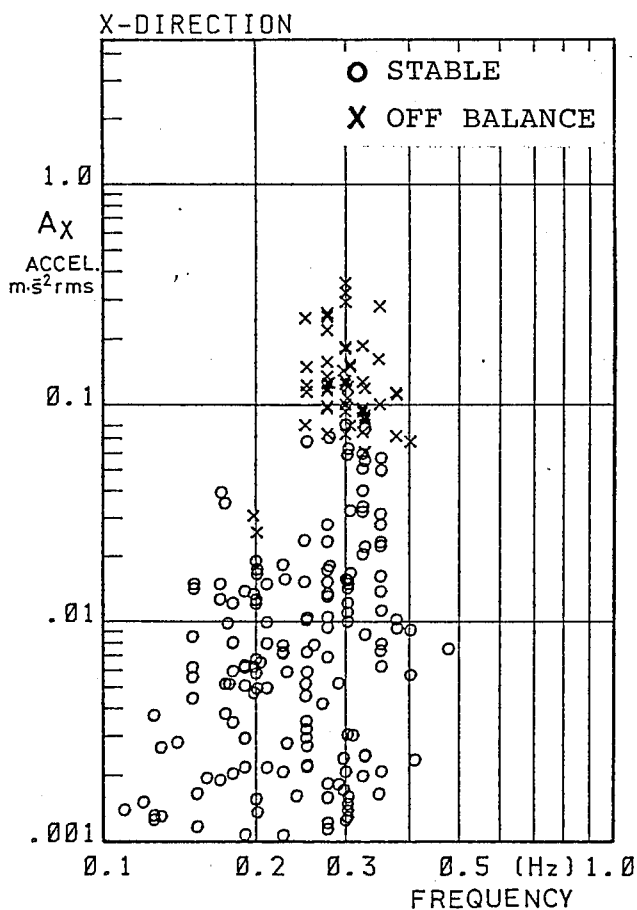


Fig. 5-1(a) In the X-direction.

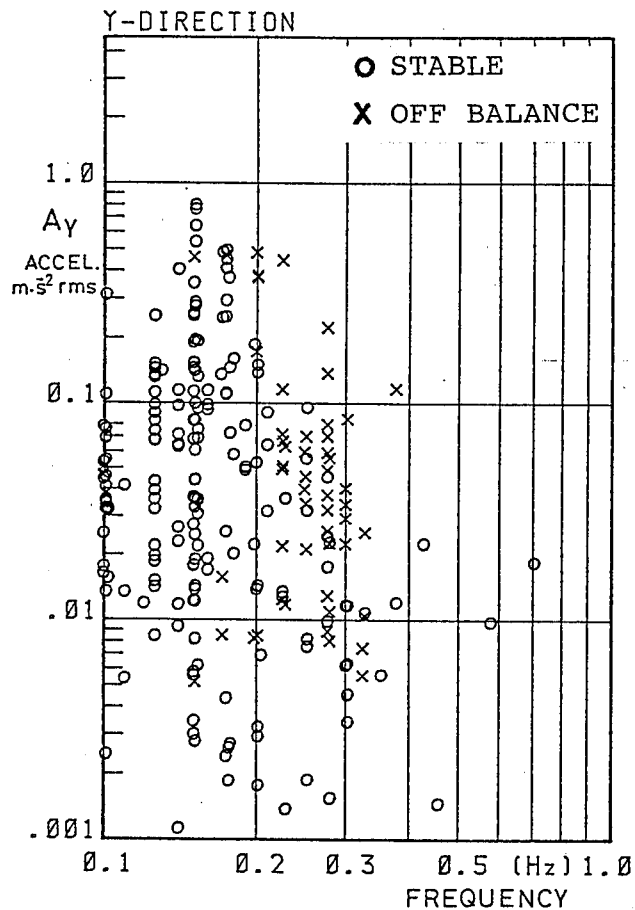


Fig. 5-1(b) In the Y-direction.

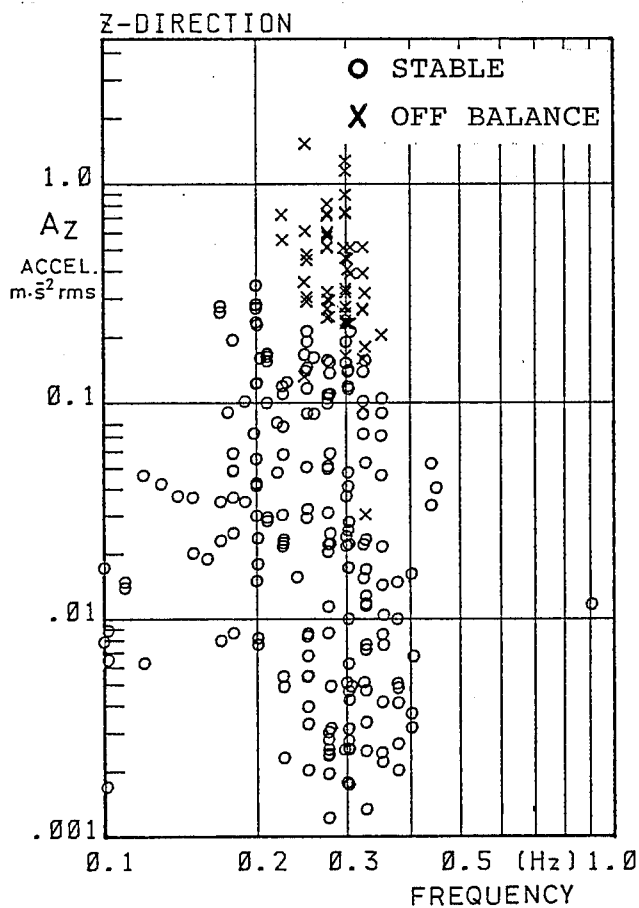


Fig. 5-1(c) In the Z-direction.

Fig. 5-1 The balance of the subject based on the frequency and r.m.s value of ship acceleration.

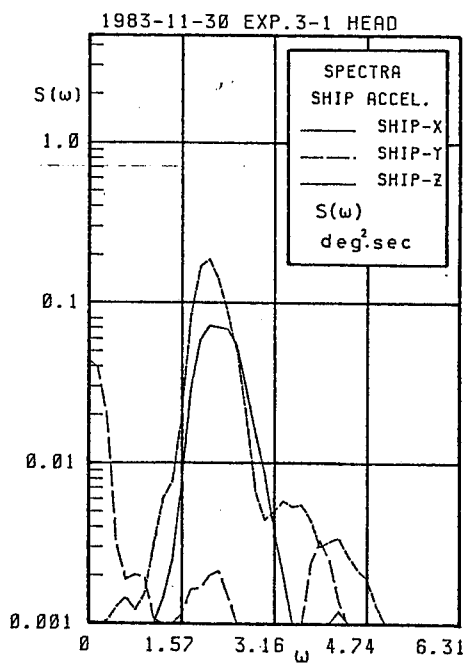


Fig. 5-2(a) Head sea.

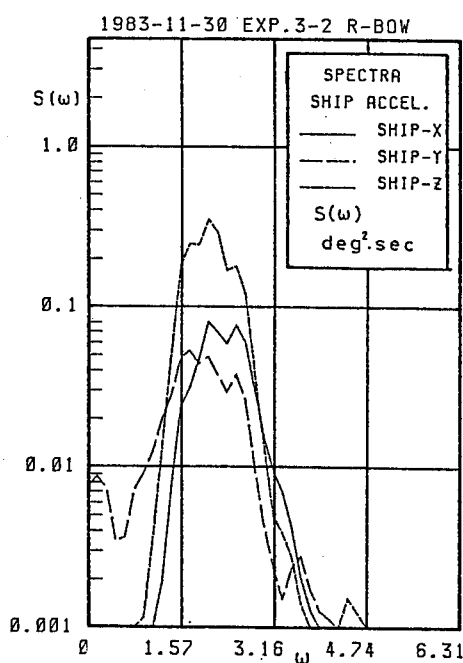


Fig. 5-2(b) R-bow sea.

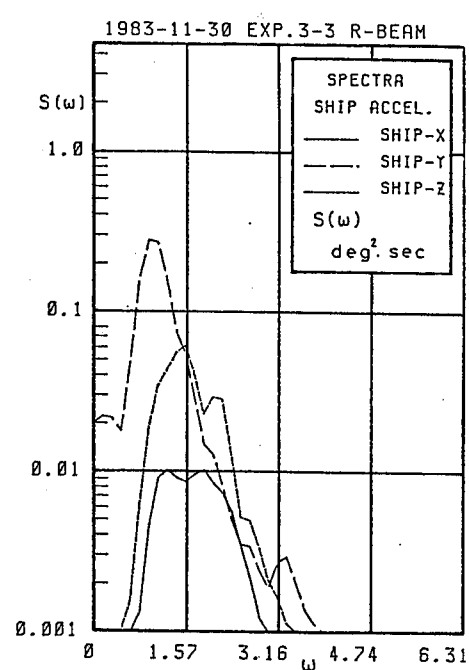


Fig. 5-2(c) R-beam sea.

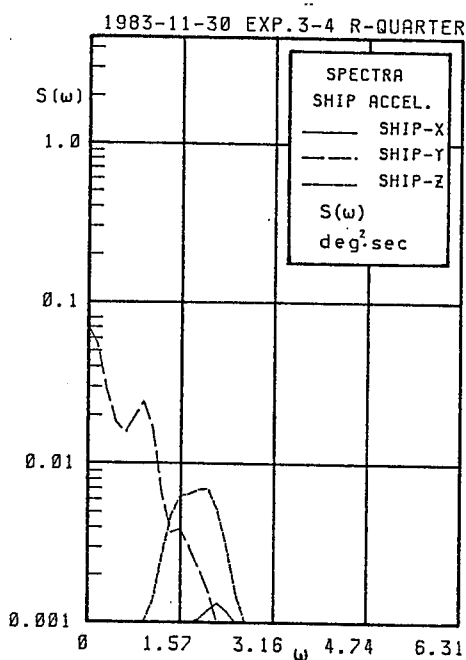


Fig. 5-2(d) R-quartering sea.

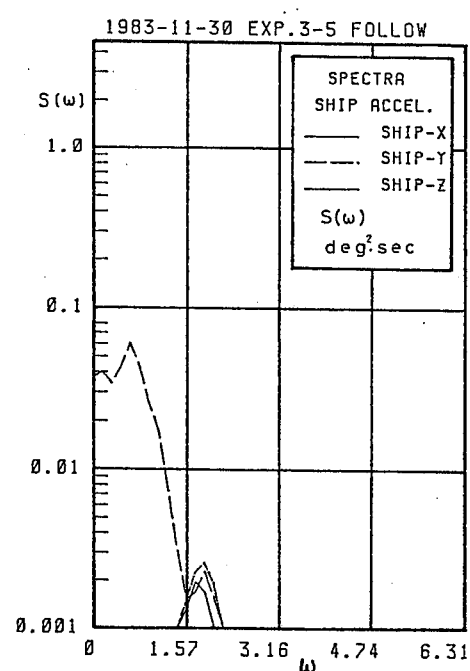


Fig. 5-2(e) Following sea.

Fig. 5-2 Power spectra of ship acceleration.

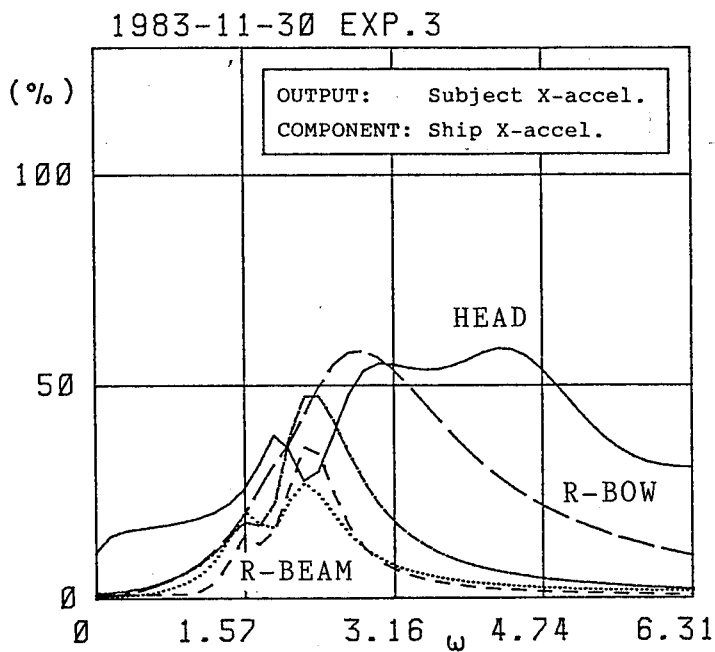


Fig. 5-3(a) Component;
ship acceleration
in the X-direction.

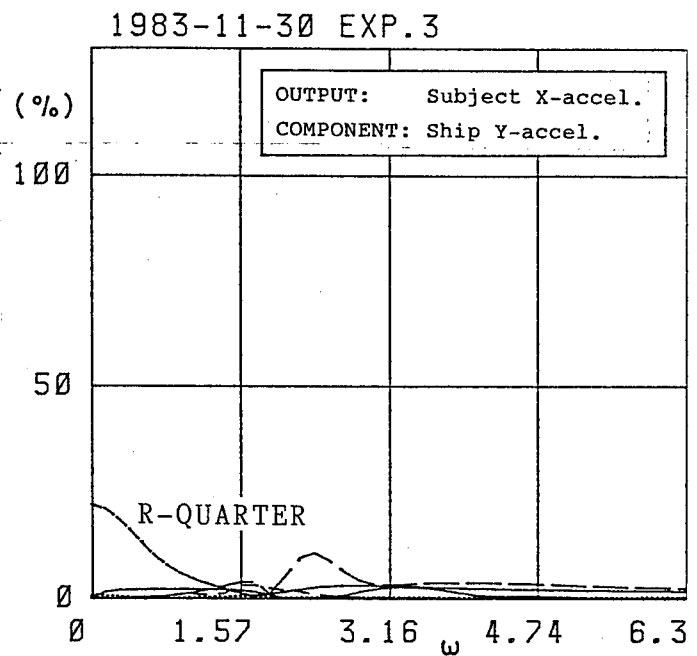


Fig. 5-3(b) Component;
ship acceleration
in the Y-direction.

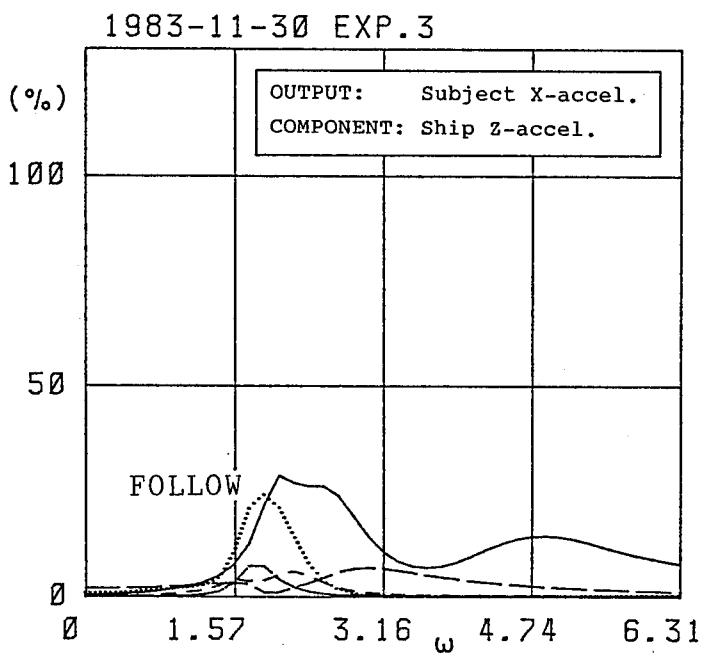


Fig. 5-3(c) Component;
ship acceleration
in the Z-direction.

Fig. 5-3 Power contribution of components of ship accelerations for
the acceleration occurred on the subject in the X-direction.

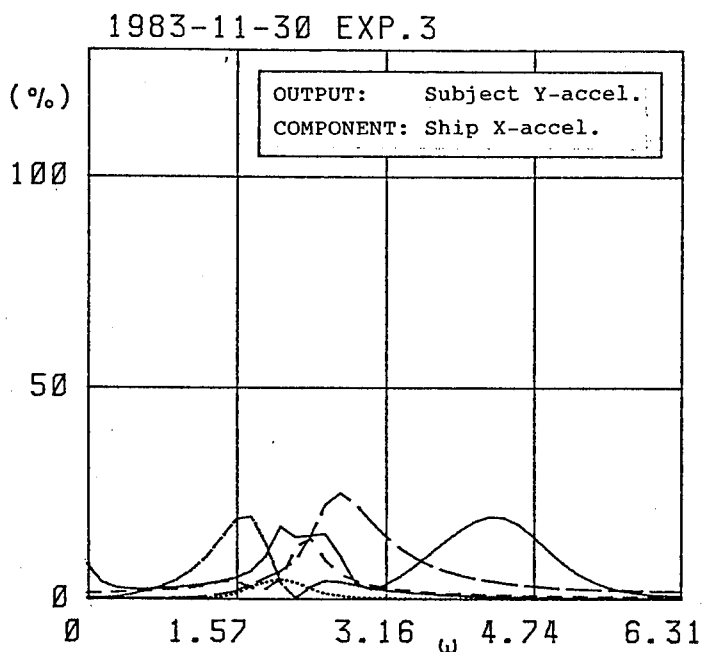


Fig. 5-4(a) Component;
ship acceleration
in the X-direction.

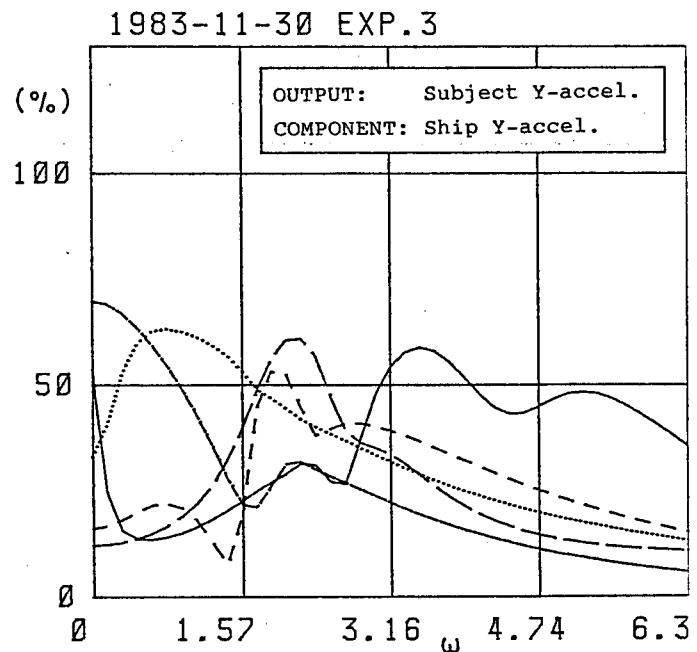


Fig. 5-4(b) Component;
ship acceleration
in the Y-direction.

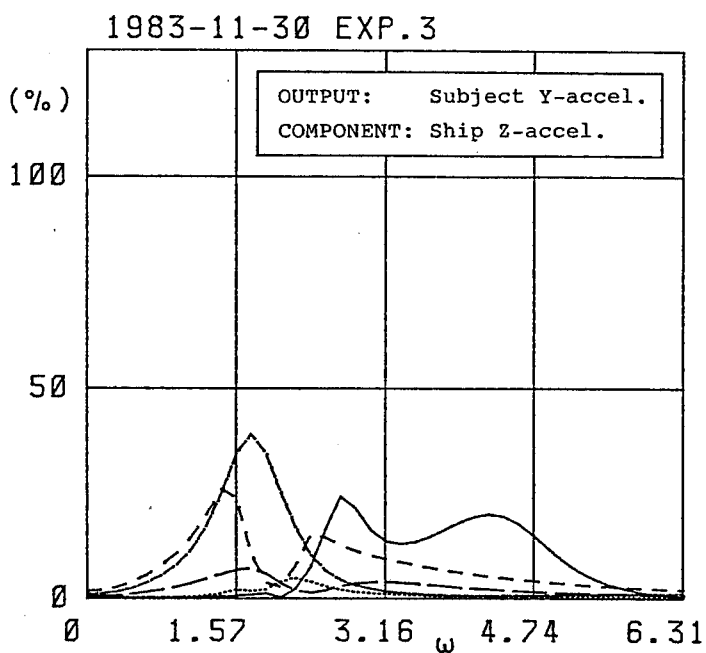


Fig. 5-4(c) Component;
ship acceleration
in the Z-direction.

Fig. 5-4 Power contribution of components of ship accelerations for
the acceleration occurred on the subject in the Y-direction.

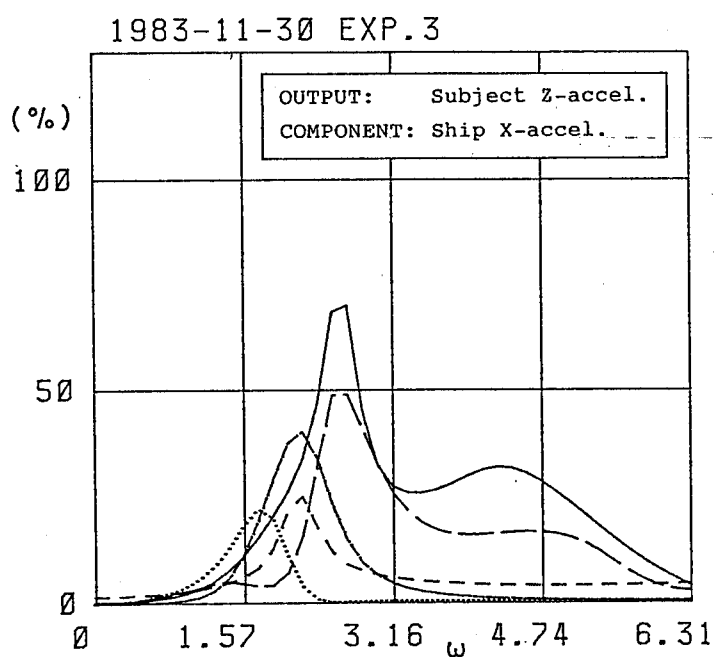


Fig. 5-5(a) Component;
ship acceleration
in the X-direction.

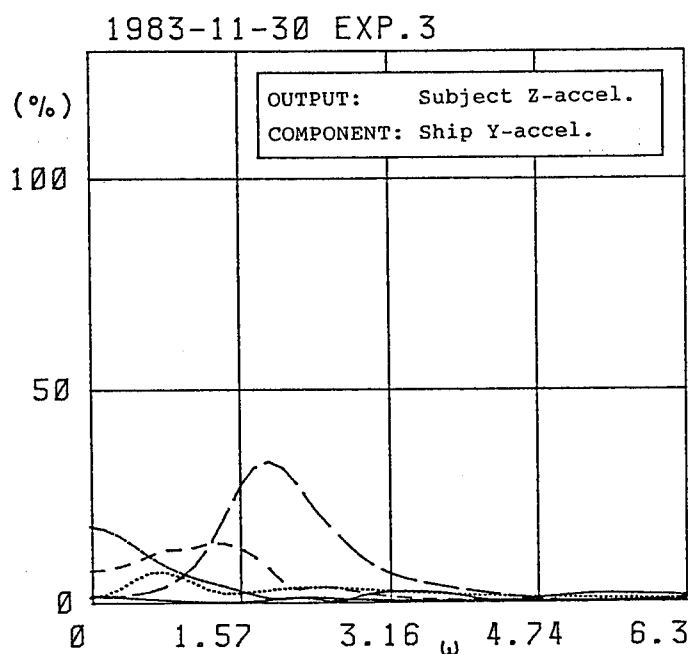


Fig. 5-5(b) Component;
ship acceleration
in the Y-direction.

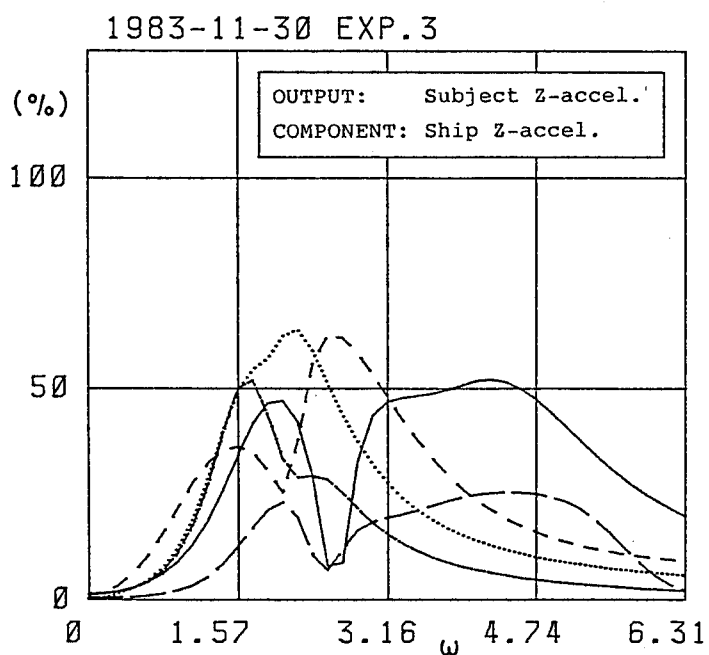


Fig. 5-5(c) Component;
ship acceleration
in the Z-direction.

Fig. 5-5 Power contribution of components of ship accelerations for
the acceleration occurred on the subject in the Z-direction.

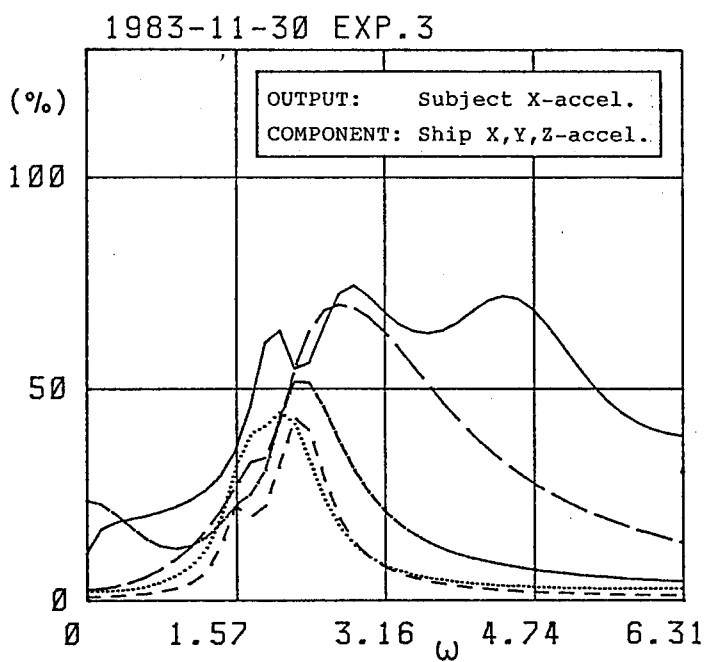


Fig. 5-6(a) In the X-direction.

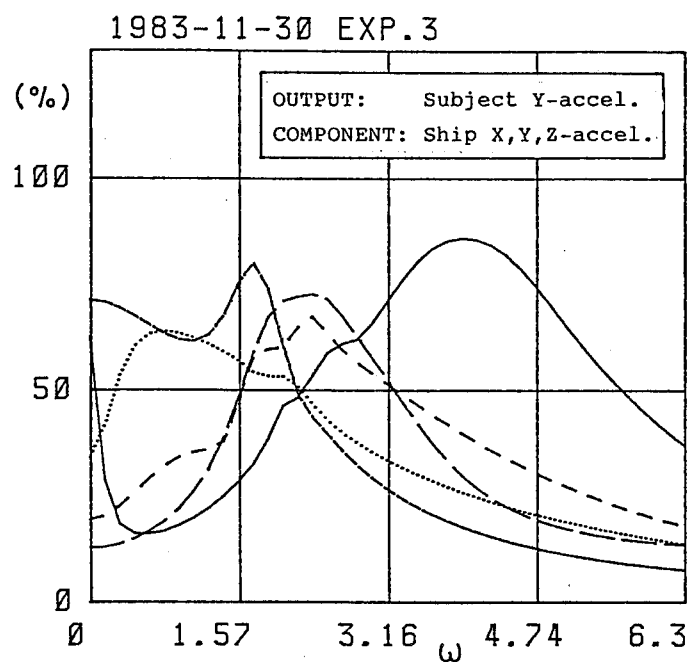


Fig. 5-6(b) in the Y-direction.

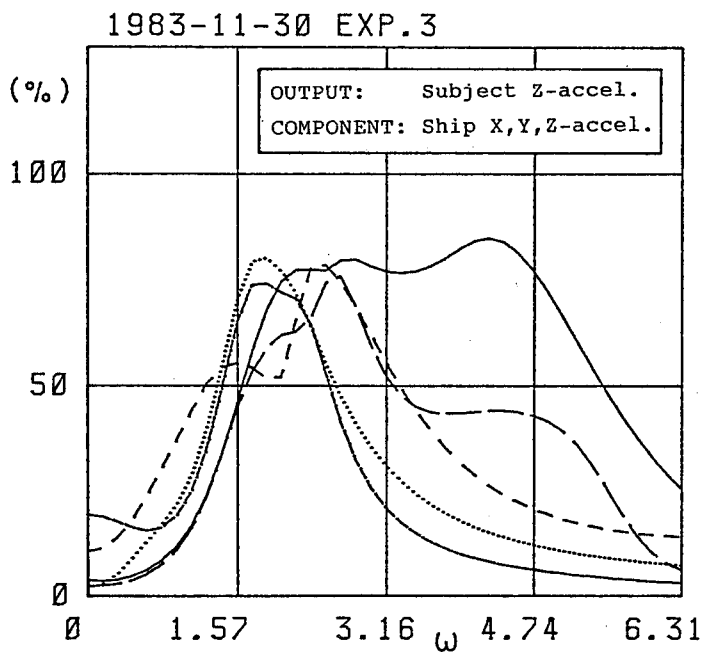


Fig. 5-6(c) in the Z-direction.

Fig. 5-6 Power contribution of ship accelerations for the acceleration occurred on the subject.

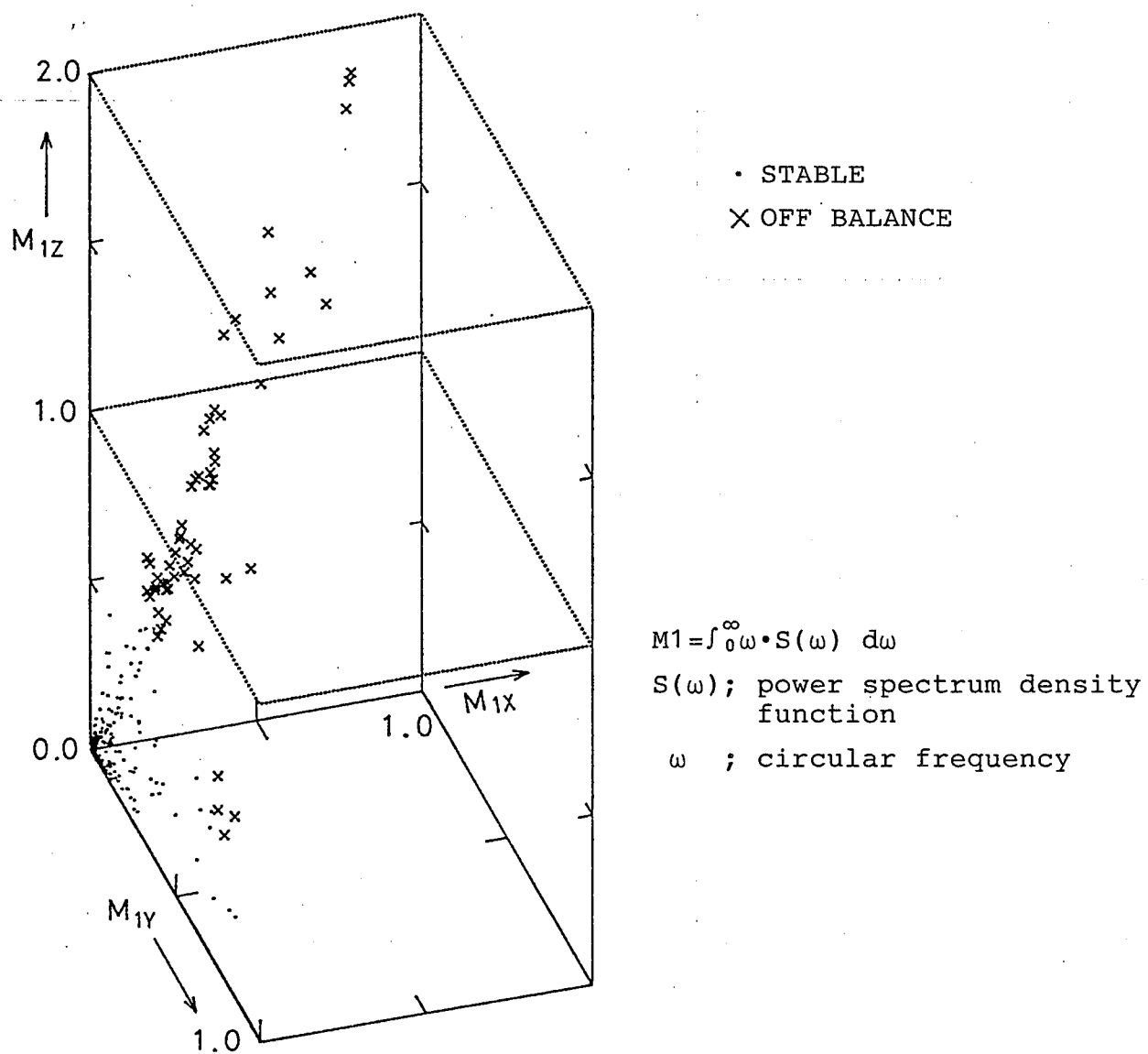


Fig. 5-7 The relationship between human balance and distribution of first spectra moment of ship acceleration.

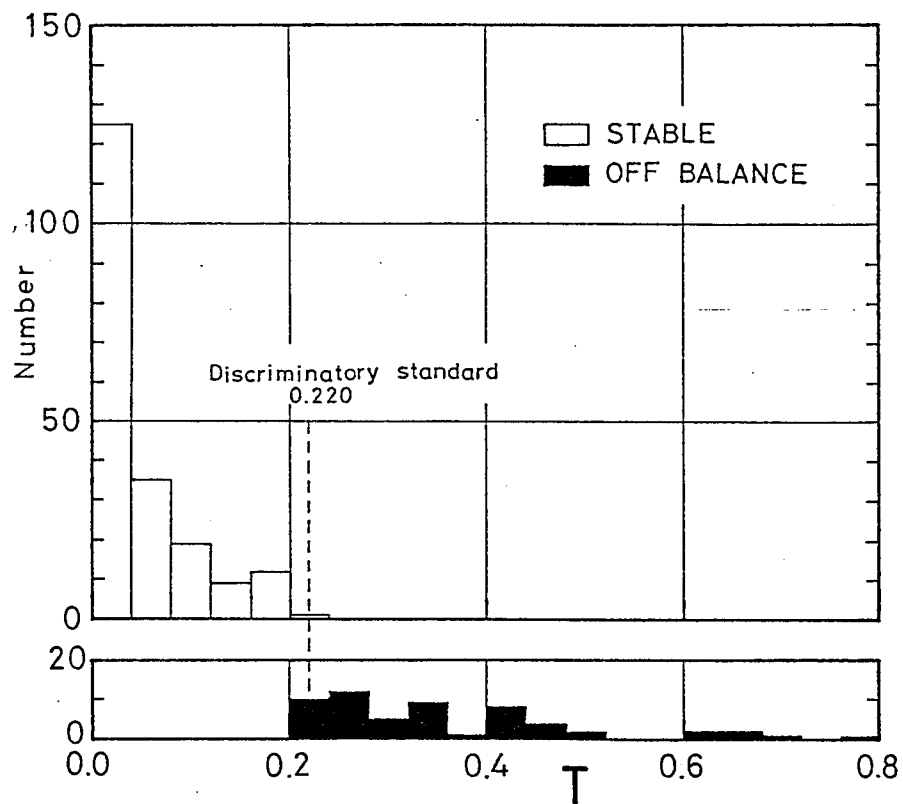


Fig. 5-8 Discrimination of the state of human posture by the linear discriminare function.

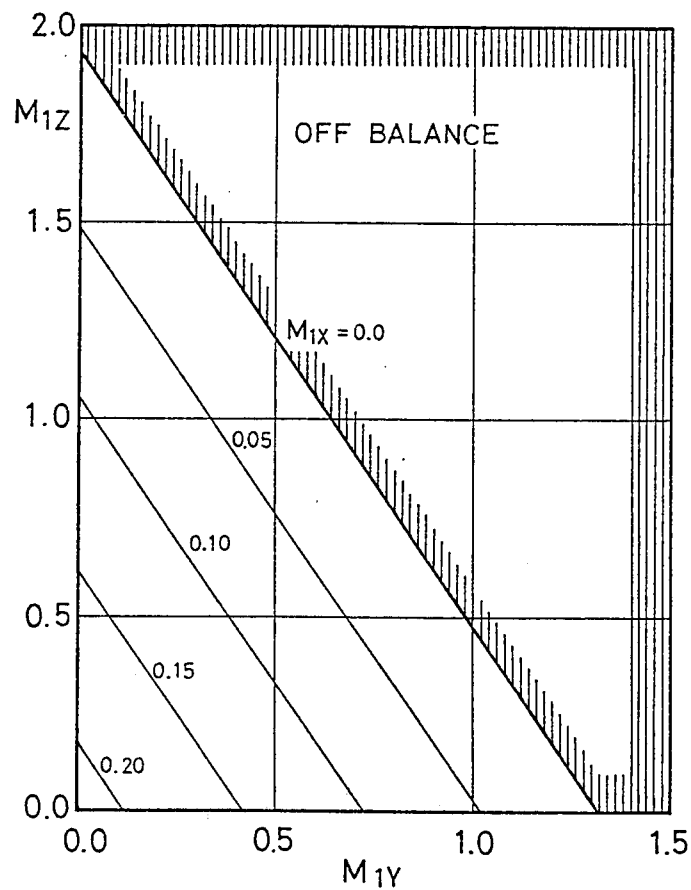


Fig. 5-9 Boundary value of first spectra moment of ship acceleration for the threshold value.

第6章 漁船甲板上に発生する加速度の分布に関する実験

前章においては、船上に発生する加速度を判別要因として、人体のバランス状態を判定するための線形判別関数を同定した。さらに、この関数を用いて、人体がバランスを維持することができなくなる閾値を推定した。第3章において詳述したように、人体のバランス状態を判定するための要因となる船体に発生する加速度は、波浪に対する船体運動系の出力成分として表現できる。本章においては、波浪中を航走している漁船の船上に発生する加速度とその甲板上における分布特性を、水槽実験をもとに明らかにする。

6 - 1 水槽実験

海上を航行中の漁船の甲板上に発生する上下方向の加速度及びその分布特性を、船速や漁船種類との関係を含めて明確にするために、実験水槽において漁船模型の曳航及び自航実験を実施した。

6 - 1 - 1 供使模型船

模型実験には、19.9GT型小型さけます流網漁船の1/7.6、96GT型さけます流網漁船の1/14.15、124GT型沖合底曳網漁船の1/15.1及び349GT型大型底曳網漁船の1/24.5スケールの垂線間長2m模型船を

用いた。対象とした漁船は、北海道沿岸から北洋水域にかけてよく使用されている代表的な4種類である。

各漁船の船体線図を Fig.6-1~4に示す。また、それぞれの船体主要目及び実験状態は、Table 6-1に示す。

各漁船における船体の特徴は次の通りである。

19.9GT型漁船は、角型の広い船尾部を持ち、小型漁船の特徴である張り出しから船体に比べて大きなブルワークが立ち上がっている。

96GT型漁船は、船の長さに対して幅が広く、船尾が肥えており、船首楼と船橋楼を持った一層甲板船である。

124 GT及び 349GT型漁船は、船尾式底曳網漁船で作業甲板が高く、遮浪甲板を持つ二層甲板船である。

漁船の載貨状態は、漁場へ向け出航してから帰港するまでの間に大きく変化する。それに対応し、漁船船体の波浪に対する応答特性も変化する。本実験において、それぞれの模型船は、同船建造時における重心重量計算書に従って漁場発満載状態に適合させ、Table 6-1に示すコンディションに調整した。

また、無次元慣動半径 k_{yy}/L は漁船の積載状態から推定して、ほぼ 0.25~0.30の間に成るように設定した。ここで、 k_{yy} は Y軸まわりの縦慣動半径を、 L は垂線間長さを表す。

6 - 1 - 2 実験施設及び装置

(a) 実験水槽及び曳航電車

実験は北海道大学水産学部大型水理実験水槽において行った。

同水槽は、概要をFig. 6-5に示すように、長さ 50.0m、幅 3.5m、深さ 1.8mの長水槽であり、水槽の両端にそれぞれ消波ポンドを有している。

また造波装置は、Photo 6-1 に示すような Flap Typeの造波機を備えており、Photo 6-2 に示す造波用モーター (5.5 kw) の回転数と同モーターの回転軸に接続したアームの長さを調整することにより波高 1.5～32.0cm、波長 0.5～8.5mの範囲で任意の規則波を造ることが可能である。

また模型船の曳航に使用した電車 (出力 2.2kw) は、0.01～2.20 m/secの範囲で任意に速度設定を行うことができる。電車の増減速時における加速度は0.06Gである。

実験実施時における水槽の水深は約1.3mであった。

(b) 運動計測装置

模型船の甲板上に発生する Z軸方向の加速度は、加速度変換器 (Full scale $\pm 2g$)を模型船の甲板上に設置して計測した。

曳航実験における模型船の上下揺れ、縦揺れ及び横揺れの計測は、

ポテンシヨメーターを使用した。ポテンシヨメーターの上下揺れの計測範囲は $\pm 10\text{cm}$ 、縦揺れと横揺れの計測範囲は $\pm 30^\circ$ である。縦揺れと横揺れを計測するポテンシヨメーターは、曳航電車と模型船とを接続するジンバルジョイントに取り付けられており、このジンバルジョイントが模型船の重心位置になるように調整した。また、上下揺れを計測するポテンシヨメーターは、曳航電車と模型船を接続する昇降部に設置されている。曳航電車に設置された運動計測装置及び接続された模型船の外観をPhoto 6-3に表す。

また、自航実験における上下揺れ、縦揺れ、横揺れ及び横揺れ角速度の計測は、実船実験において使用した動揺計測装置を模型船に積載して行った（第4章参照）。

(c)波高計

波高の計測には、Photo 6-4に示すような容量式波高計（Full Scale $\pm 50\text{cm}$ ）を用いて行った。波高、波速及び波長を計測するために、曳航電車の前方に取り付け間隔 $60\sim 80\text{cm}$ の範囲で波高計2台を設置した。

これらの模型船甲板上に発生した加速度変動、上下揺れ、縦揺れ、横揺れ、電車の曳航速度及び波高等のデータは、16CHデータレコーダに記録し、8chマルチコード上に出力された。これらの曳航・自航実験における計測システムをFig. 6-6(a)～(b)に示す。

6 - 2 実験方法

19.9GT、96GT及び349GT型の3種類の漁船模型に対しては曳航電車による曳航実験を、124GT型漁船模型に対しては自航実験を実施した。曳航実験では、船首揺れと前後揺れを固定して、規則波中向波状態で実験を行った。自航実験においては、曳航電車を一定速度で走行させながら、それに追従するように模型船の船速及び針路をラディオコントロールによって操作した。波状態は、曳航実験と同様とした。

Fig. 6-7(a)~(d)に各漁船模型におけるZ軸方向の加速度計設置位置を示す。船体Y軸方向における加速度計の設置位置は模型船の船首尾線上とした。これらの図において、断面の数字SS(ordinate No.)は、船体の船首尾方向における位置を示す。F.P.は船首垂線、☒は船体中央、A.P.は船尾垂線を表す。

模型船の曳航・自航実験に用いた速度は、停船状態から0.35、0.66及び1.33 m/sec (フルード数 Fn で、0.00、0.08、0.15 及び0.30) の4種類に設定した。各々模型船の航行速度と実船の船速との対応をTable 6-2に示す。これらの速度は、たとえば96GT型漁船では停船状態 ($Fn=0.0$) から微速前進 ($Fn=0.08$)、そしてほぼ全速前進 ($Fn=0.3$) までの速度範囲にあたる。

また、実験時の波の状態は、船長波長比の平方根 $\sqrt{L/\lambda}$ が、

0.5～ 1.5 の範囲となるように、造波装置のコンディションを選択した。ここで L は模型船の垂線間長、 λ は波長を表す。実験水槽において発生させる規則波は、深海波と同様であるとみなされる。深海波の場合 $\lambda = (g/2\pi) \cdot (2\pi/\omega)^2$ として表すことができる^[36]。ここで、 g は重力加速度 (9.8m/sec^2)、 ω は円周波数を表す。従って、 $\sqrt{L/\lambda}$ は $\sqrt{L/(2\pi g)} \cdot \omega$ に等しく ω に比例するので、周波数表現となる。

6 - 3 漁船の規則波中における加速度応答

模型船を使用した規則波中曳航・自航実験において甲板上に発生した Z 軸方向の加速度の応答関数を、 $F_n=0.0$ の場合については Fig. 6-8(a)～(d)に、 $F_n=0.08$ の場合については Fig. 6-9(a)～(d)に示す。また、Fig. 6-10(a), (b)に、96GT型漁船の $F_n=0.15$ 、 0.30 の船速における応答関数を示す。

これらの図において、横軸は、船体の船首尾方向における位置を示す。また、 ξa は波高、 $Z_{\text{accel.}}$ は船体加速度の全振幅を表わす。左側縦座標 $Z_{\text{accel.}}/(\xi a \cdot g/L)$ は加速度の応答関数を示し、右側縦座標 $Z_{\text{accel.}}/(\xi a \cdot g)$ はそれぞれの周波数の波高に対し発生する加速度振幅の割合を示す。

6 - 3 - 1 漁船種類と加速度応答

Fig. 6-8及びFig. 6-9に示す波の周波数 $\sqrt{L/\lambda}$ に対する加速度応答の結果から、各漁船とも船体重心位置で一番小さな応答をし、重心位置から船首尾方向に距離が離れるにつれて応答が大きくなっていることが確認できる。漁船の場合、一般に船体の重心位置が船体中央より後方にあるため、船尾側よりも船首側で応答が大きくなっている。96GT型漁船において、 $F_n = 0.00$ 、 $\sqrt{L/\lambda} = 0.91$ から1.04にかけて、他の漁船に比べて大きな応答を示しているが、他の波の周波数 $\sqrt{L/\lambda}$ に対する各漁船の応答は、ほぼ等しい値を示している。無次元化した応答関数のうえでは、ほぼ等しい大きさの加速度が発生しているが、実際の漁船上に発生した加速度を考えた時、船長 L の比率だけ発生する加速度の大きさに違いが生じる。一例として、右側縦座標に示される応答値で見た場合、19.9GT型漁船の $F_n = 0.08$ 、 $SS = 9.0$ （作業甲板の前端）における応答の最大値は0.73となる。この値は96GT型漁船の約 1.4倍、124GT型漁船の約 1.7倍、349GT型漁船の約 2.9倍と極めて大きな値となっている。応答関数の上から各漁船ほぼ同じ応答を示しているが、右側縦座標における運動の応答値においては、船長の比率だけ相対的に発生する加速度に違いが生じていることが確認できる。従って、漁船規模が小さくなるほど大きな加速度が発生していることになる。

なお、実海面における漁船甲板上に発生する加速度については、波高に対する波の周波数特性も充分考慮する必要がある。

6 - 3 - 2 船速と加速度応答

船速と甲板上に発生する加速度の関係については、96GT型漁船を代表例としてFig. 6 -8(b)、Fig. 6 -9(b)、Fig. 6 -10(a) 及び Fig. 6 -10(b) にそれぞれ示す。船速が停船状態から $F_n = 0.08$ 、 0.15 、 0.30 と増大するにつれ応答関数の値が大きくなることを示している。

ここで、加速度変動が大きい、作業甲板の前端に近い $SS=8.0$ の位置において、加速度応答関数の比較を行う。この船首尾線方向における位置は、流し網揚網用ネットホーラーが設置される位置に相当する。 $\sqrt{L/\lambda}=0.90$ 、 $F_n=0.30$ の船速で航走した時の応答関数の値は、 $F_n=0.08$ の場合の 1.3 倍、また $F_n=0.30$ で一番大きな応答値を示す $\sqrt{L/\lambda}=0.77$ では、 3.5 倍と微速状態に比べ高速状態で航走した時には、きわめて大きな加速度が発生している。このことから、向い波状態において、船速を低下させることが発生する上下方向の加速度の軽減に極めて有効であることが確認できる。

Fig. 6-1 The lines of 19.9 GT small salmon fishing vessel.

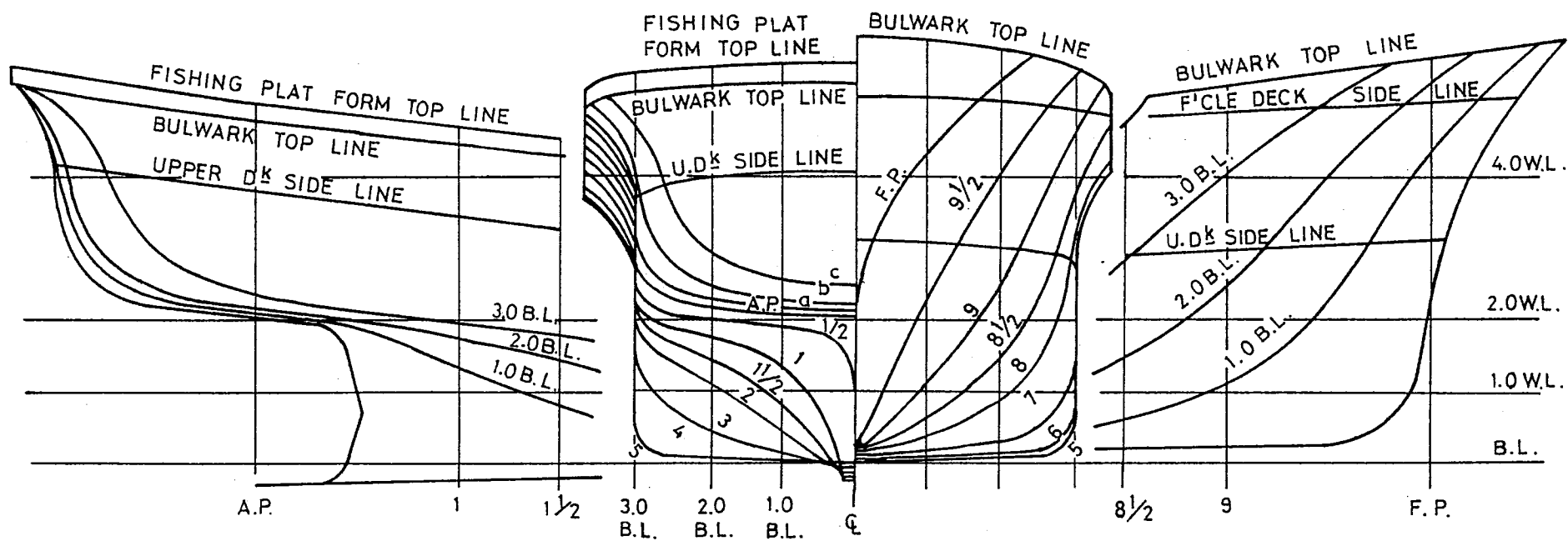


Fig. 6-2 The lines of 96 GT salmon fishing vessel.

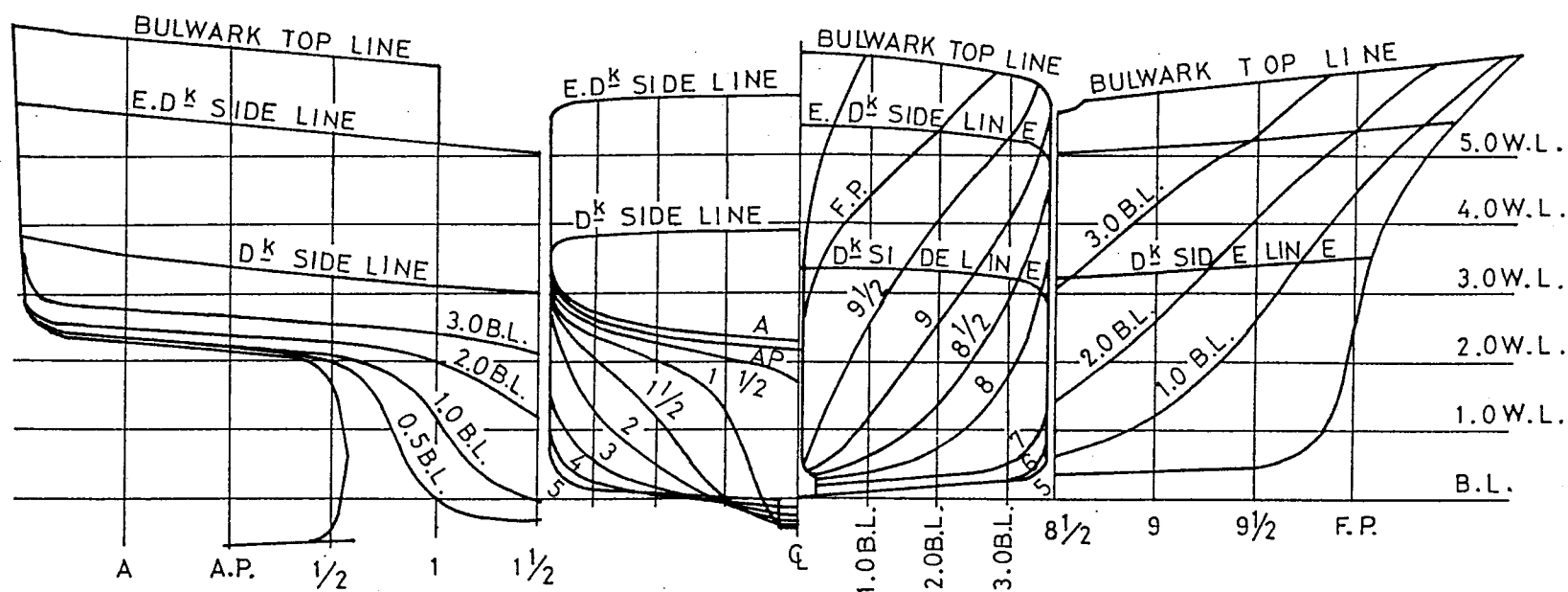


Fig. 6-3 The lines of 124 GT trawler.

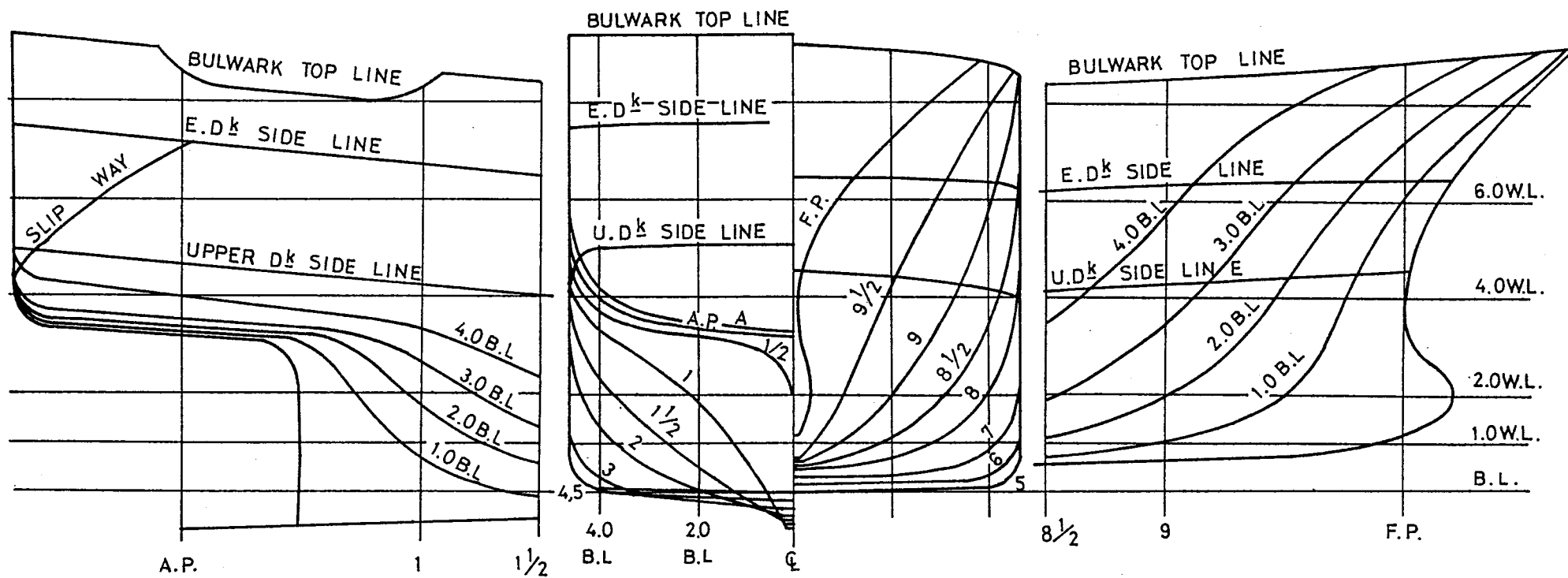


Fig. 6-4 The lines of 349 GT big offshore trawler.

Item	19.9 GT type		96 GT type		124 GT type		349 GT type	
	Model	Full	Model	Full	Model	Full	Model	Full
L	2.000m	15.20 m	2.000m	28.30 m	2.000m	30.00 m	2.000m	49.00 m
B	0.500m	3.80 m	0.429m	6.07 m	0.474m	7.16 m	0.378m	9.25 m
D	0.195m	1.48 m	0.187m	2.65 m	0.175m	2.65 m	0.229m	5.60 m
Disp.	137.1kg	59.8ton	86.4 kg	246.6ton	115.3kg	406.6ton	66.3 kg	975.7ton
df	0.112m	0.68 m	0.066m	0.94 m	0.108m	1.63 m	0.052m	1.27 m
da	0.245m	1.72 m	0.255m	3.61 m	0.245m	3.71 m	0.219m	5.36 m
dm	0.179m	1.20 m	0.161m	2.27 m	0.176m	2.08 m	0.135m	3.32 m
GM	0.066m	0.51 m	0.041m	0.58 m	0.085m	1.28 m	0.021m	0.52 m
KG	0.177m	1.34 m	0.173m	2.45 m	0.107m	1.62 m	0.150m	3.67 m
KG	0.174m	1.32 m	0.173m	2.45 m			0.080m	3.48 m
Kyy/L	0.277	-----	0.275	-----		-----	0.249	-----
Scale	1/7.6		1/14.15		1/15.1		1/24.5	

Table 6-1 Principal dimensions and conditions of the model ships.

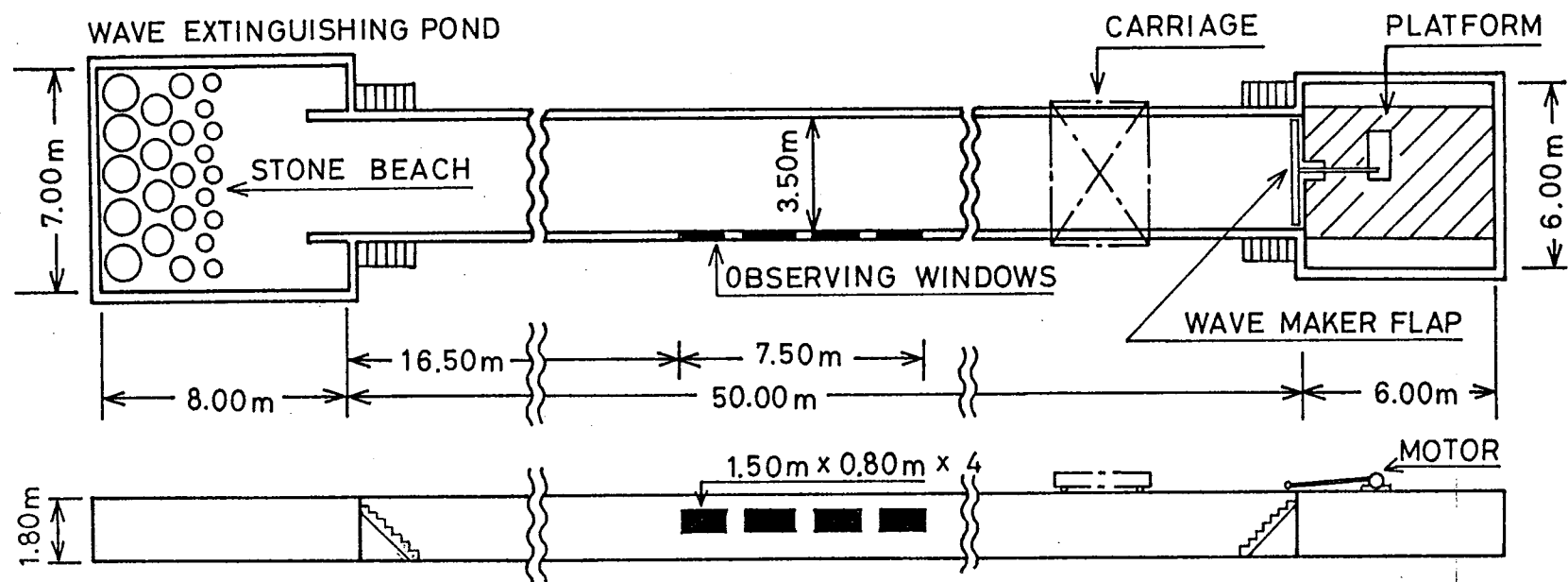


Fig. 6-5 Schematic diagram of a towing tank.

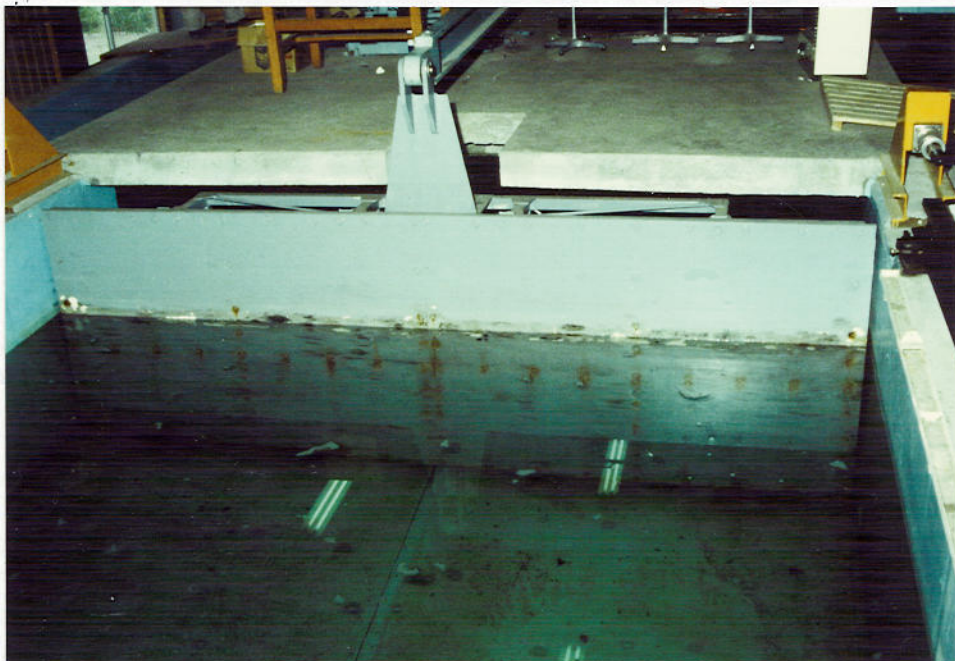


Photo 6-1 View of wave making flap.

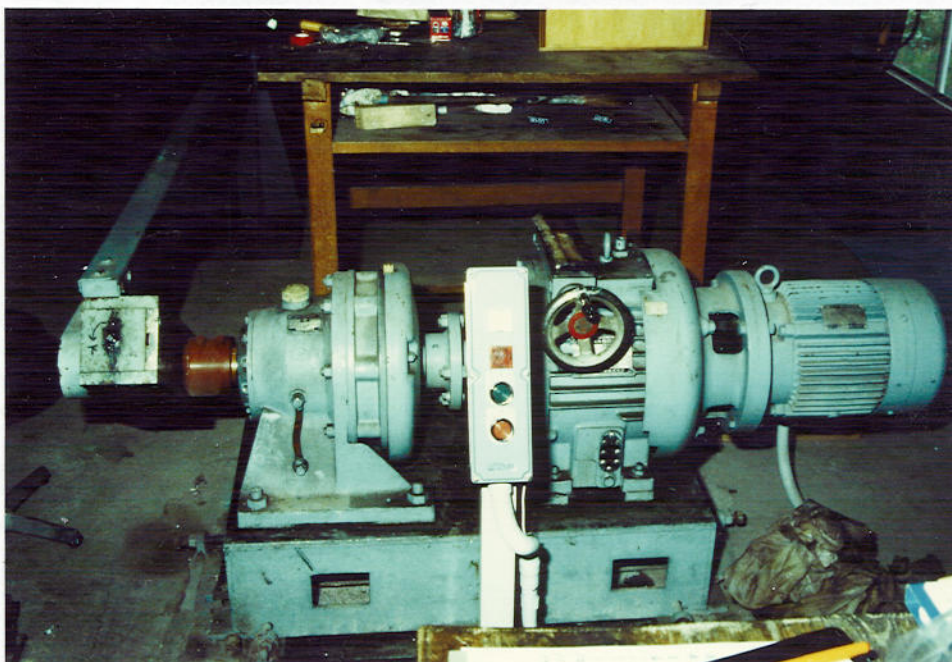


Photo 6-2 View of wave making motor.

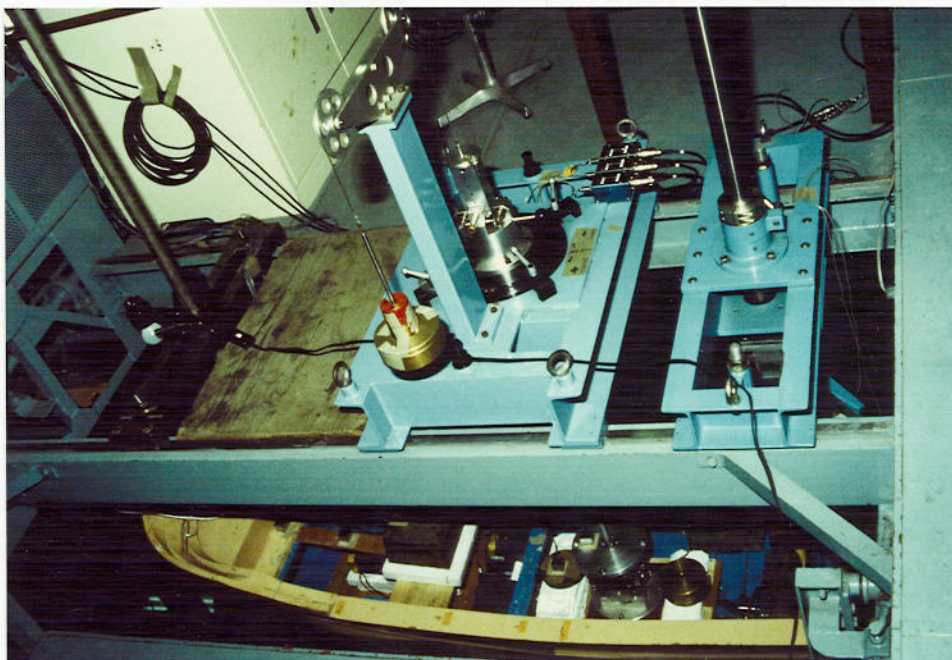


Photo 6-3 View of measurement apparatus.

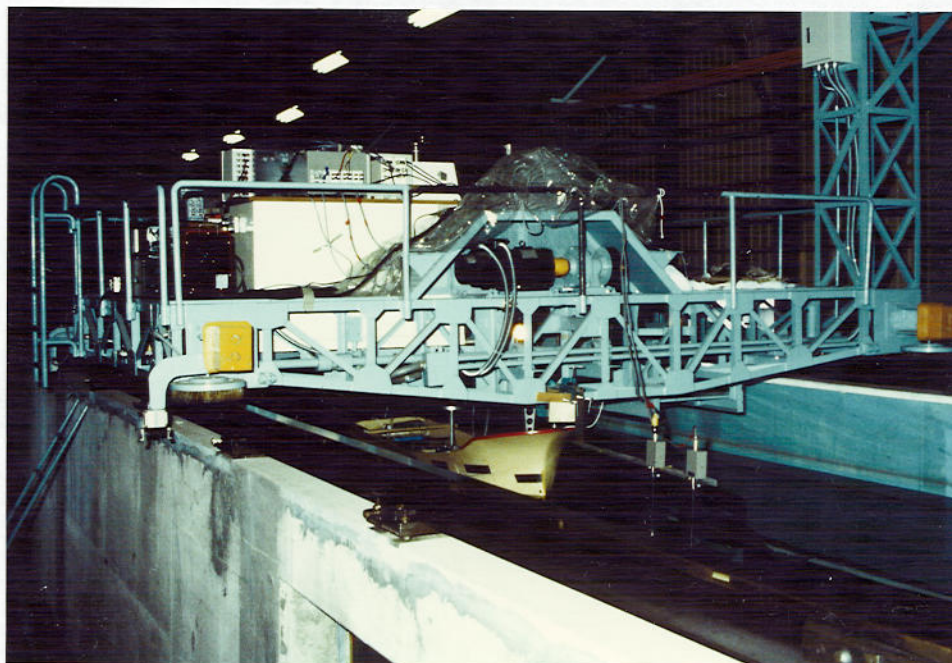


Photo 6-4 View of capacitance wave gages for wave height set on carriage.

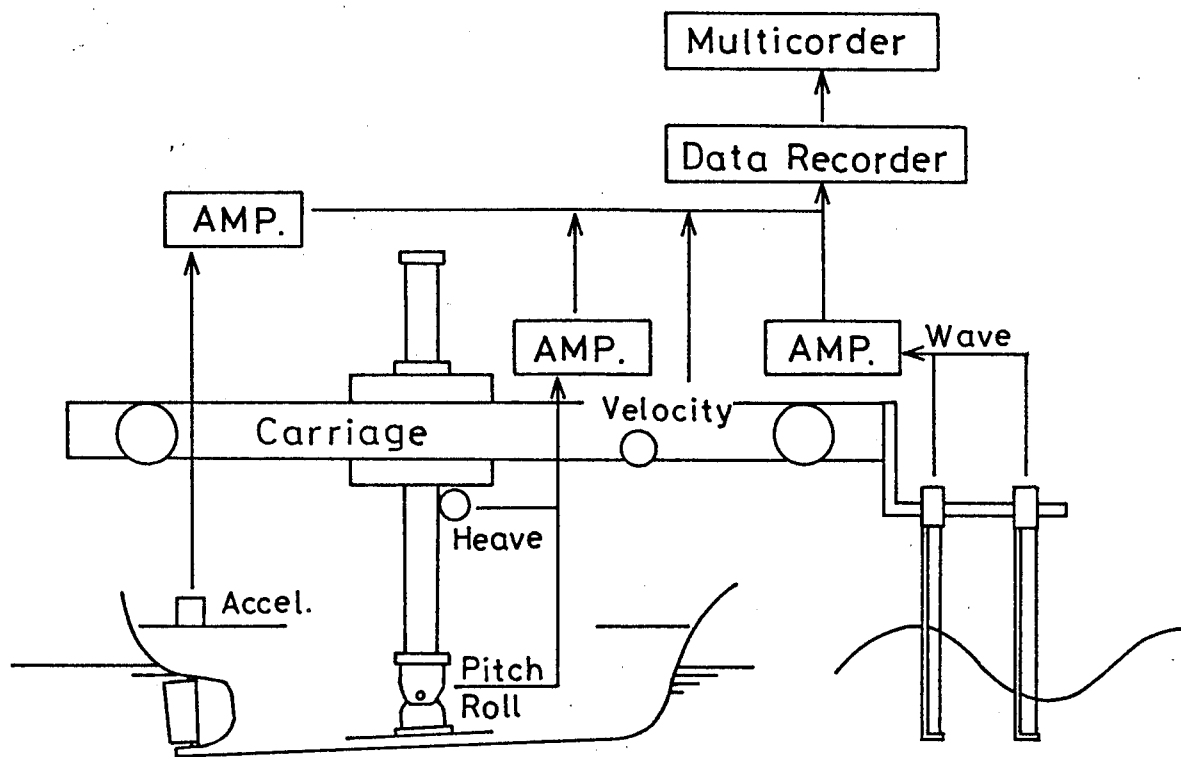


Fig. 6-6(a) Towing test.

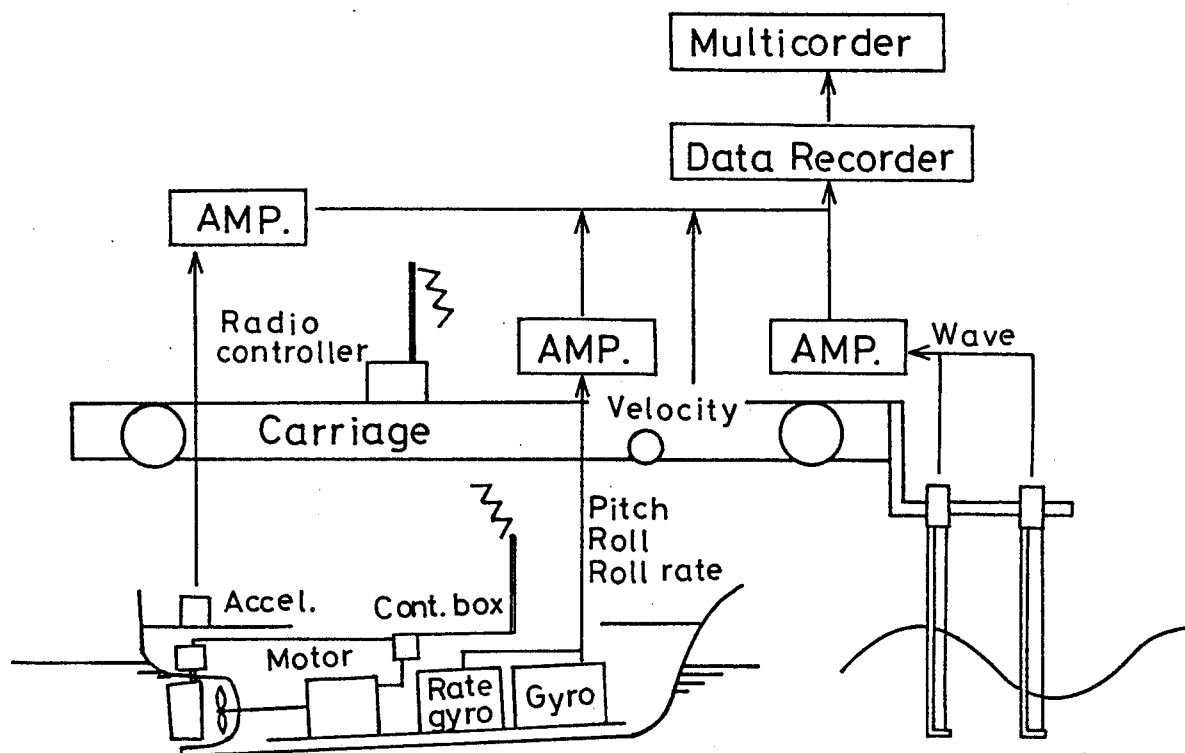


Fig. 6-6(b) Self-propulsion test.

Fig. 6-6 Schematic diagram of a measuring system.

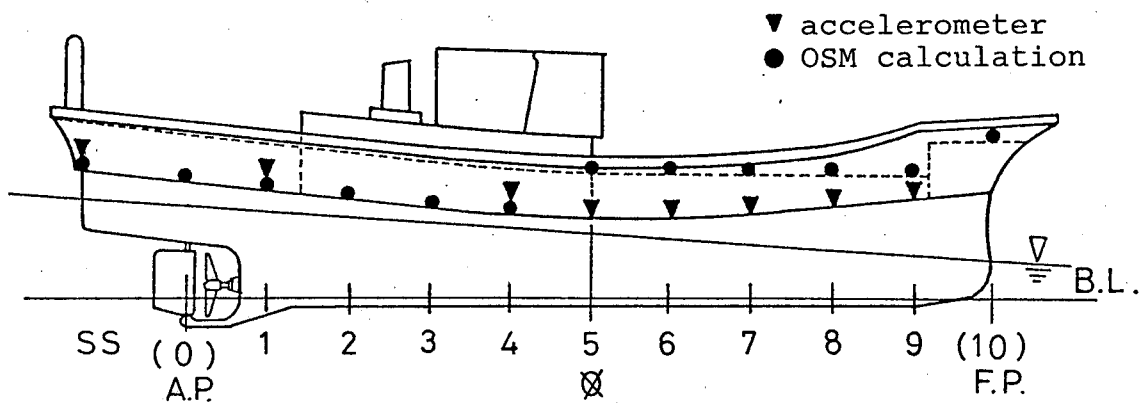


Fig. 6-7(a) 19.9 GT small salmon fishing vessel.

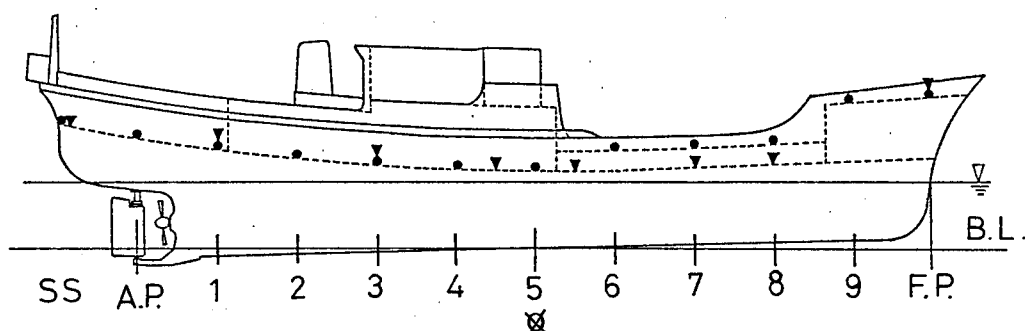


Fig. 6-7(b) 96 GT salmon fishing vessel.

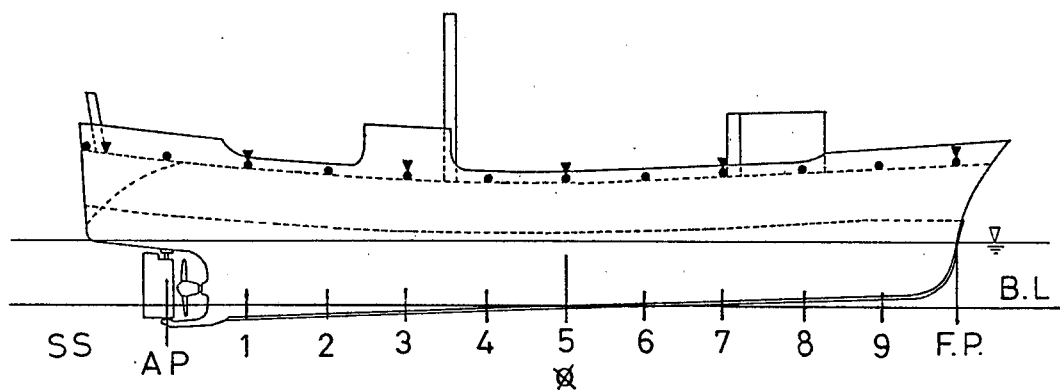


Fig. 6-7(c) 124 GT trawler.

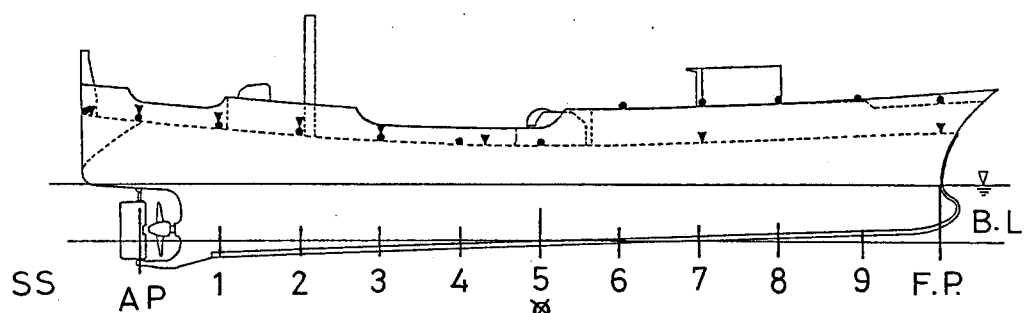


Fig. 6-7(d) 349 GT big offshore trawler.

Fig. 6-7 Arrangement of the accelerometers on the deck and positions on which response functions were estimated by OSM.

Fn	Model	Full scale (knot)			
	m/sec	19.9GT	96GT	124GT	349GT
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.08	0.35	1.90	2.59	2.68	3.41
0.15	0.66	3.56	4.86	5.02	6.39
0.30	1.33	7.12	9.71	10.03	12.78

Table 6-2 Correspondence of the towing speed of model ship to the full scale ships.

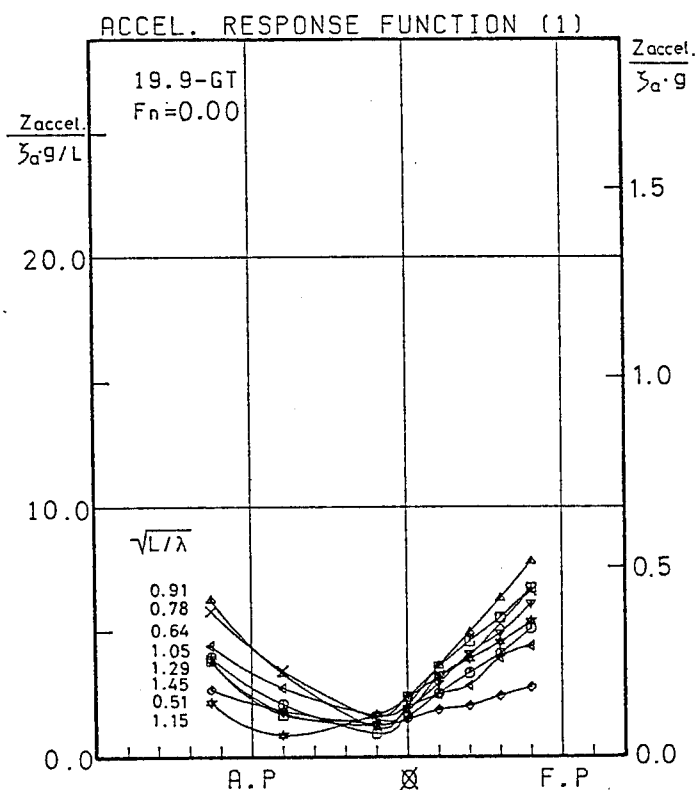


Fig. 6-8(a) 19.9 GT small salmon fishing vessel.

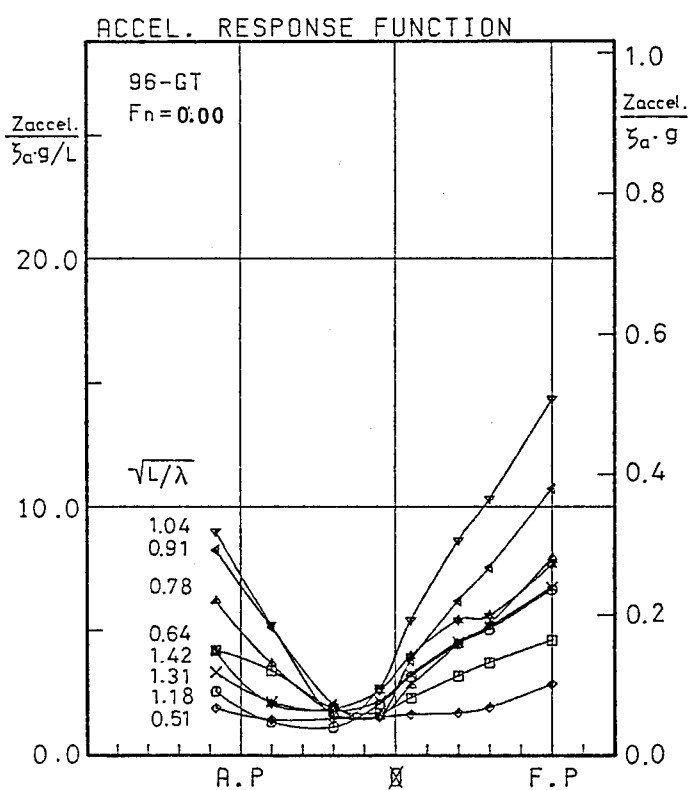


Fig. 6-8(b) 96 GT salmon fishing vessel.

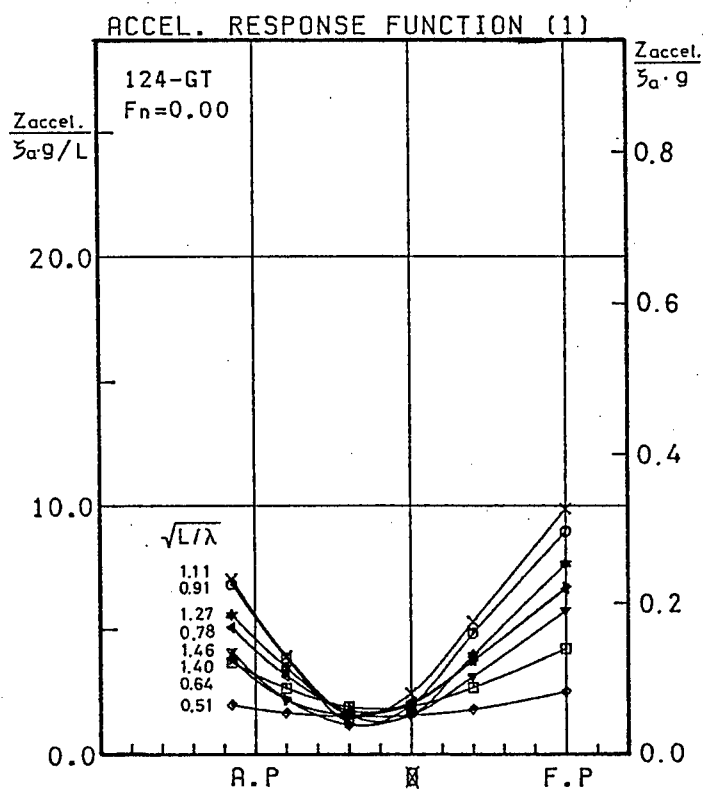


Fig. 6-8(c) 124 GT trawler.

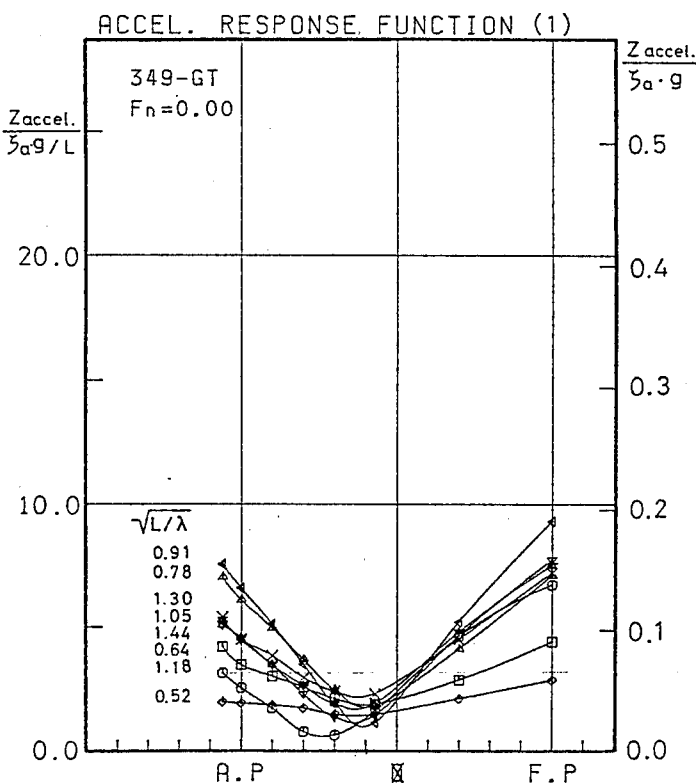


Fig. 6-8(d) 349 GT off-shore trawler.

Fig. 6-8 Acceleration response function in the Z-direction, ship speed; F_n 0.00.

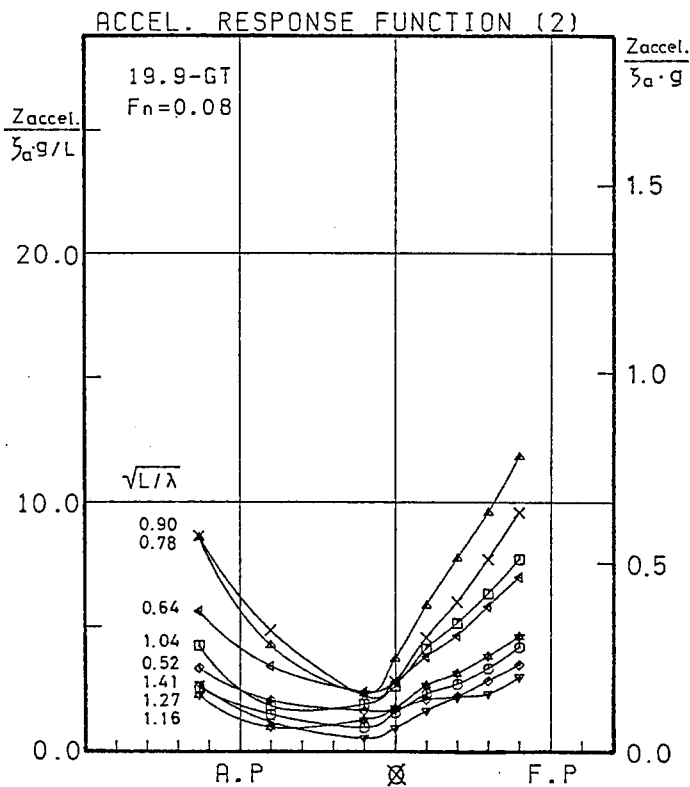


Fig. 6-9(a) 19.9 GT small salmon fishing vessel.

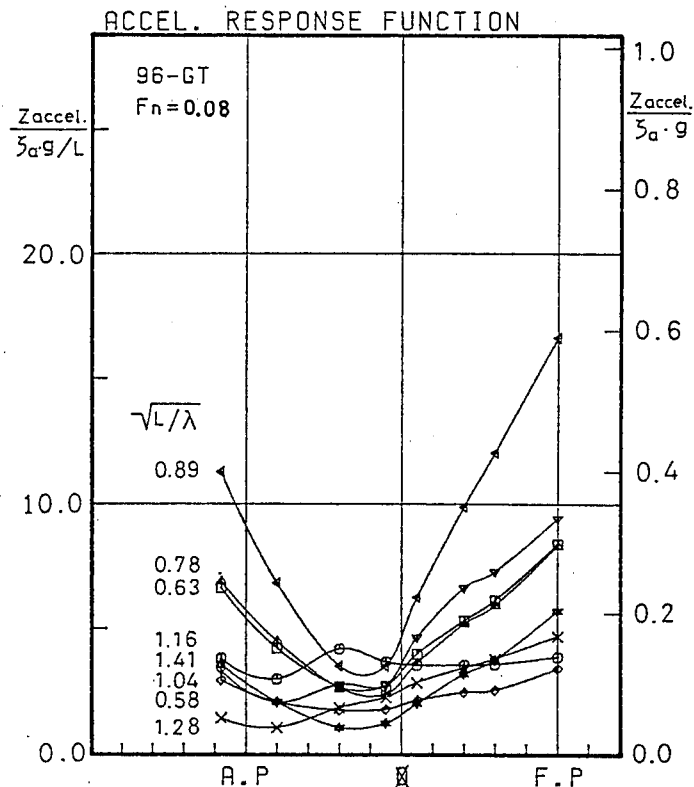


Fig. 6-9(b) 96 GT salmon fishing vessel.

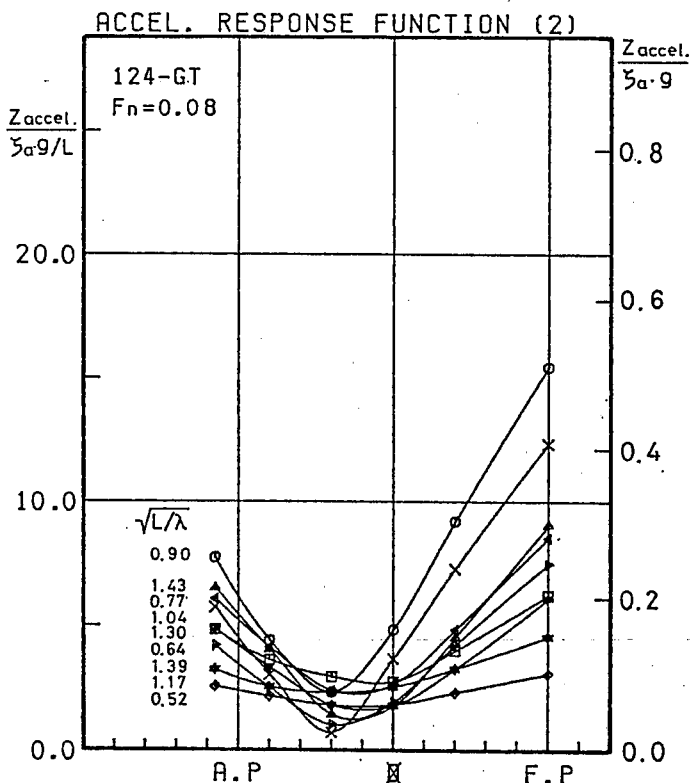


Fig. 6-9(c) 124 GT trawler.

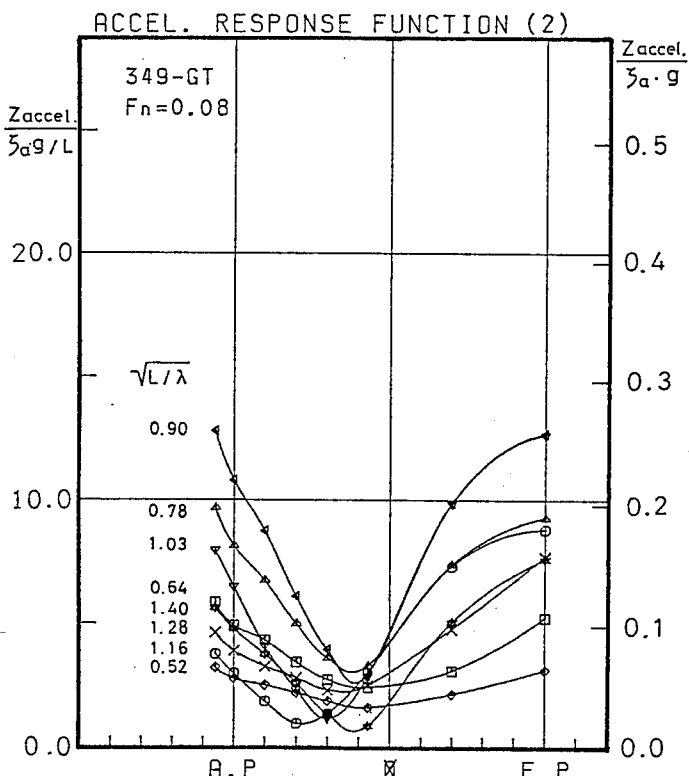


Fig. 6-9(d) 349 GT off-shore trawler.

Fig. 6-9 Acceleration response function in the Z-direction, ship speed; F_n 0.08.

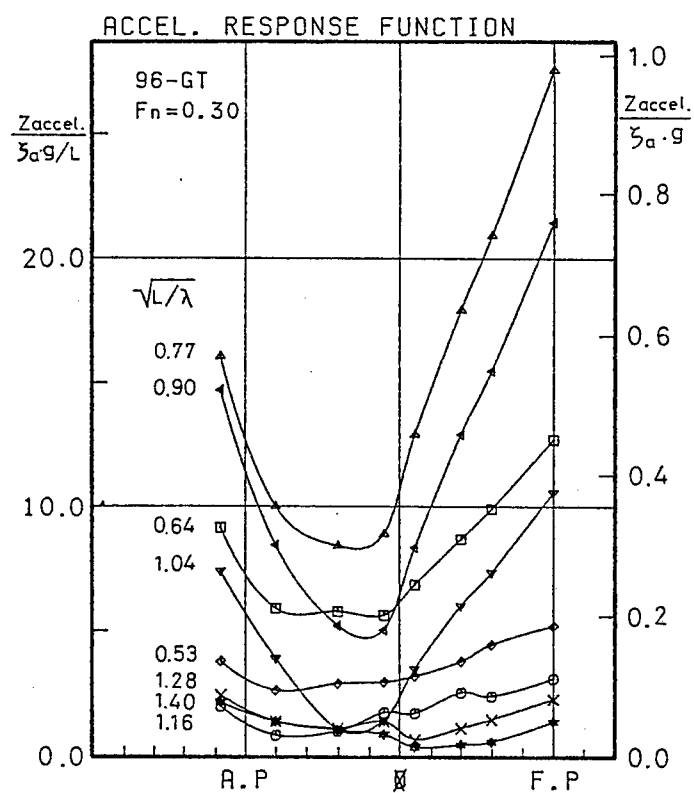
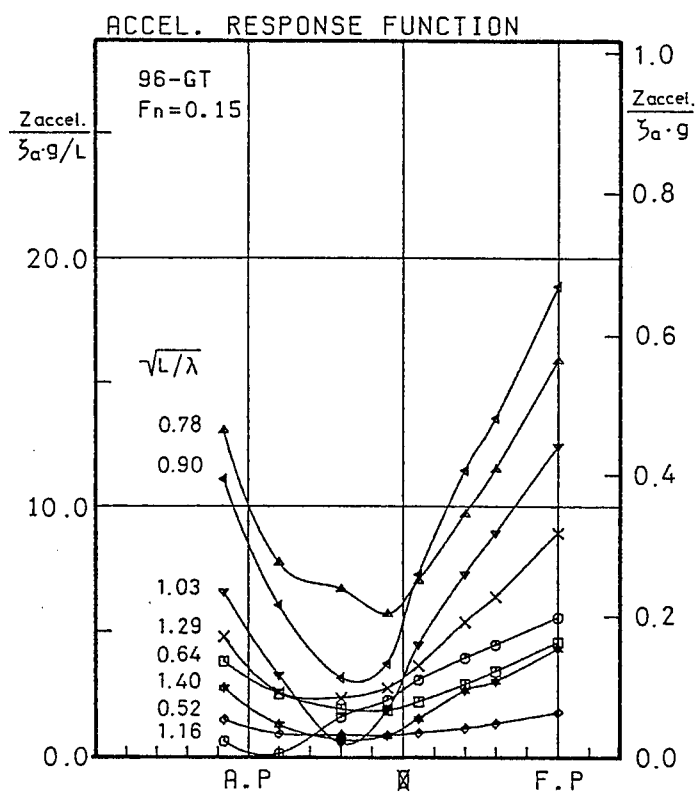


Fig. 6-10(a) Ship speed; Fn. 0.15. Fig. 6-10(b) Ship speed; Fn. 0.30.

Fig. 6-10 Acceleration response function with 96 GT salmon fishing vessel in the Z-direction.

第7章 各種漁船上での作業の安全評価

OSMを用いた波浪中における船体運動の評価法は、コンテナ船等の大型船舶に対しては種々模型実験及び実船実験が行われ理論計算との比較検討がなされてきた。その結果、波浪中での船体運動を推定する際の実用的計算法としての地位を確立している。漁船は、一般の船舶に比べ、船長に対する船幅の割合が大きく、OSM等の理論計算の基礎となっている線型性の仮定からかけはなれた船型といえる。しかし、波浪中における漁船の船体運動の評価法としては、種々実験の結果充分実用に耐えることが確認されている〔36〕～〔42〕。模型実験の結果と比較検討することにより、OSMによる理論計算値の有効性を確認し、OSMを用いて様々な波浪状況における漁船甲板上において発生する加速度の推定を行う。

7 - 1 漁船の作業甲板上に発生する加速度のOSMによる

の推定

向い波状態で船速を $Fn=0.0$ から 0.30 の範囲で変化させた時、甲板上に発生する加速度の応答特性について、実験値と計算値の比較を行った。対象とした漁船は、96GT型さけます流し網漁船である。

Fig. 7-1 (a)～(d) において、4種類の曲線によって示されている

のが OSMによる数値計算より推定した加速度応答関数で4種類のマークにより表されているのが規則波中における曳航試験より得られた実験値である。

停船状態 ($F_n=0.0$) で、 $\sqrt{L/\lambda}$ がほぼ1.0の時、特にF.P.位置における応答関数の値において、実験値が理論計算による推定値を大きく越えているなど、若干の相違が見られる。しかし、 $F_n=0.08$ から0.30までの航走時における加速度応答関数は、実験値と計算値とが良く近似している。従って、OSMによる計算は、船上に発生する加速度の推定に対し極めて有効な手段であることが確認できた。

OSMを用いた計算により船体の重心位置における6自由度運動が推定された場合、更に船体の任意の位置に発生する加速度を求めることができる。船体重心位置に対する相対座標 (x, y, z) の点に発生する X, Y 及び Z 軸方向の加速度 ($\ddot{\xi}_p, \ddot{\eta}_p, \ddot{\zeta}_p$) は次式により表せる。

$$\ddot{\xi}_p = \ddot{\xi}_G - y\ddot{\psi} + z\ddot{\theta} \quad (7-1)$$

$$\ddot{\eta}_p = \ddot{\eta}_G + x\ddot{\psi} - z\ddot{\phi} \quad (7-2)$$

$$\ddot{\zeta}_p = \ddot{\zeta}_G + y\ddot{\phi} - x\ddot{\theta} \quad (7-3)$$

ここで、 $\ddot{\theta}$ は縦揺れ角加速度、 $\ddot{\phi}$ は横揺れ角加速度、 $\ddot{\psi}$ は船首揺れ角加速度をそれぞれ表す。また、($\ddot{\xi}_G, \ddot{\eta}_G, \ddot{\zeta}_G$) は、船体重心位

置における各軸方向の加速度成分を表す。

すなわち、船体甲板上の任意の位置に発生する合成加速度は、位置の座標(x, y, z)が与えられると、(7-1~3)式より推定することができる。

7-2 総合判別指数 T による安全評価

Fig. 7-1 (a)~(d)において、模型実験による実測値から得られた応答関数と OSM計算により推定した応答関数が一致することから、OSMによる理論計算の有効性が確認された。そこで、OSM計算を用いて、実船の波に対する加速度応答関数を推定する。

Fig. 7-2(a)~(c)に、19.9GT型漁船の甲板上に発生した加速度の応答関数を X 、 Y 及び Z の各軸方向ごとに示す。斜め向い波状態で航走している時は、他の波状態で航走している時に比べ、 Z 軸方向の加速度応答関数が一番大きな値をとる。 X 、 Y 軸方向の加速度応答も大きい。総合的にみて、この波状態で航走中に、一番大きな合成加速度が発生する。向い波状態で航走中の場合、 Y 軸方向の加速度応答はないが、 Z 軸方向における加速度応答は大きな値をとる。また同様に横波状態で航走中の場合には、 X 軸方向の加速度応答は発生しないが、 Z 軸方向における加速度応答は大きな値をとる。ゆえに、これらの場合も、大きな合成加速度が発生することが推測さ

れる。斜め追い波や追い波状態での加速度応答関数の値は各軸とも小さく、大きな合成加速度は発生していないことが推測できる。

Fig. 7-3 から Fig. 7-5(a)～(c) に、96GT型漁船、124GT型漁船及び349GT型漁船の加速度応答関数をそれぞれ示す。波に対する船首の相対方向と発生する加速度の関係は、応答関数の値に違いはあるものの、各船とも同様の傾向を示すことがわかる。

以上のように OSM 計算により得られた船体加速度の応答関数と入力となる波スペクトルを用いて、波浪中を航走している漁船の甲板上に発生する加速度分布の推定を行う。

さらに、推定された X、Y 及び Z 軸方向の加速度が、漁船甲板上で作業を行っている乗組員にとって、バランスを維持する上で安全かどうかの環境条件の判断を行った。人体のバランス状態の判定には、第5章において示した線形判別関数 (5-5) 式を用いた。そして、推定された総合判別指数 T と人間がバランスを維持できなくなる閾値との関係により、甲板上における漁労作業の安全性を判定した。

OSM 計算によって推定された船体の加速度応答関数を用いて船上に発生する加速度を推定するための波入力としては、ISSC (International Ship Structure Congress) が推奨している標準波スペクトルを用いた^{[36]～[38]}。

ISSC スペクトルは、有義波高 $H_{1/3}$ と平均周期 T_w の 2 パラメータ表

示になっており次式のように表される。

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{1/3}^2 \cdot T_W \left(\frac{T_W}{2\pi} \omega \right)^{-5} \cdot \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T_W}{2\pi} \omega \right) \right\}^{-4} \quad (7-4)$$

$$\text{ここで } T_W = 2\pi (m_0/m_1) \quad (7-5)$$

m はスペクトルモーメントを表し、添字はその次数を表す。

Fig. 7-6に、ISSC標準スペクトルを表す。また、波の平均周期 T_W は、実海面における統計^[43]より $\sqrt{L/\lambda} = 0.4 \sim 1.6$ の範囲に設定した。

Fig. 7-7からFig. 7-10(a)～(e)に、各漁船の船体船首尾線方向における T 値の分布を $\sqrt{L/\lambda}$ の関係から図示した。縦座標は、線形判別関数(5-5)式により計算した総合判別指数 T を示す。条件として、有義波高 $H_{1/3} = 2$ mの海上を $Fn = 0.08$ の船速で航走している状況を設定した。2mの有義波高は、19.9GT型漁船にとって操業を行うことが厳しいとされる波浪条件である^[44]。総合判別指数 T が閾値を越えた範囲は黒塗りで示してある。波と船との出会角度 α については、 $\alpha = 180^\circ$ (向い波)、 135° (斜め向い波)、 90° (横波)、 45° (斜め追波) 及び 0° (追波) の5つの場合を設定した。

Fig. 7-7(a)～(e)に、今回計算を行ったなかで一番小型の19.9GT型漁船における総合判別指数 T の分布を示す。この型の漁船が対

象とする漁業種類は、さけます流し網漁業のほか、さんま棒受網やたら刺網漁業などである。揚網作業などを行う作業場は、船橋より前方の上甲板上で、 $SS = 5.0 \sim 9.0$ の範囲にあたる。ブルワークは船体規模の割には高いが、漁労作業との関係から魚倉のハッチの上に板を敷き詰め作業場を設けてあるため相対的に低くなり、バランスを崩した際の転落事故の防止には役立たない。有義波高2mにおいて発生頻度が高いと推定される波周期は4.5～7.1 secの範囲^[43]で、周波数表現では $\sqrt{L/\lambda} = 0.43 \sim 0.69$ の範囲にあたる。向い波から追い波までのすべての波状態において、漁船上のすべての場所で閾値を越えた加速度分布が発生している。船体動揺に対する人間のバランス維持能力の上から、乗組員がバランスを維持することが困難な状況であると推定され、船上作業を行うことが危険な状況にある。従って、この波高での操業は困難であると予想される。

Fig. 7- 8(a)～(e)は96GT型漁船の、Fig. 7- 9(a)～(e)は124GT型漁船の総合判別指数 T の分布をそれぞれ示す。

96GT型漁船が対象とする漁業種類は、母船式さけます流し網漁業のほか、まぐろ延縄、さんま棒受網、いか一本釣り漁業等である。揚網や揚縄の作業を行う作業場は、19.9GT型漁船と同様にブリッジより前方の上甲板で、 $SS = 5.3 \sim 8.3$ の範囲にあたる。ブルワークも19.9GT型漁船の場合と同じ状態で使用されているため、相対的高

さは低い。流し網の揚網を行うネットホーラーは左舷SS=7.8に設置され、延縄の揚縄用ラインホーラーは右舷SS=7.6に設置されている。また、船尾に網や縄置場が設けられていることから、投網や投縄は、船尾部分において行われるのが一般的である。同漁船において、発生頻度が高いと推定される $\sqrt{L/\lambda}$ の範囲は0.60~0.94である。向い波から横波までの航走で、作業甲板の大部分において閾値を越えた加速度分布が発生している。これらの結果、96GT型漁船にとっても2mの有義波高は、動揺環境の面から船上作業を行うことが困難な波浪状態であると判断できる。

124GT型漁船は船尾式底曳網漁船である。漁労作業は、船橋後方に設置されているトロールウィンチから船尾後端までの範囲で行われる。従って、船体中央から後部までの加速度分布が重要となる。発生頻度が高いと推定される周波数が $\sqrt{L/\lambda}=0.62 \sim 0.97$ の範囲において、向い波から横波までの航走で総合判別指数Tが閾値を越える。操業上、投揚網の過程において、船を横波状態にする必要はない。しかし、有義波高2mの海上を向い波から横波までの状態で航走することは、作業甲板上に過大な動揺を発生させ、漁労作業の安全性の上から操業を行うことが厳しい状況にあると判断される。

Fig. 7-10(a)~(e)は、一番大型の349GT型漁船における総合判別指数Tの分布を示す。349GT型漁船は、124GT型漁船と同様船尾

式底曳網漁船である。従って、漁労作業は船体中央から船尾にかけての甲板上において行われる機会が多く、船体後部の加速度分布が重要となる。この型の漁船にとって、発生頻度が高いと推定される $\sqrt{L/\lambda}$ の範囲は 0.78 ~ 1.01 である。向い波、斜め向い波の状態では閾値を越える加速度が発生している箇所が見られる。ただし、向い波状態で閾値を越える加速度が発生している場所は船首部分だけである。斜め向い波状態においては、船首尾の甲板上で閾値を越えた加速度分布が認められる。従って、漁労作業が行われる船尾後端のガロースからスリップウェイにかけた甲板での投揚網時におけるオッターボードの取り付け・取り外しといった作業などは、十分な注意をはらう必要がある。横波、斜め追波及び追波状態で、甲板上に閾値を越える加速度の発生はない。

124GT型漁船や349GT型漁船は、大きな加速度が発生する船尾付近のブルワークが高く、バランスを崩すことによる引き起こされる転落事故の防止に有効な構造となっている。

一般的に、船速が増大すると、それに伴って船と波との出会い周波数が変化し、加速度応答関数の値も大きくなる。従って、総合判別指数 T の値も増大するので、船速と発生する船体動揺の関係には、充分留意する必要がある。

この様に、人間のバランス維持に関する船体加速度の評価法と水

槽実験や OSM計算といった船上に発生する加速度推定法とを組み合わせることにより、船体動揺を作業環境の面から評価することが可能となった。このことは、漁労作業の安全性を考えて行く上で極めて有効な手段であると思われる。

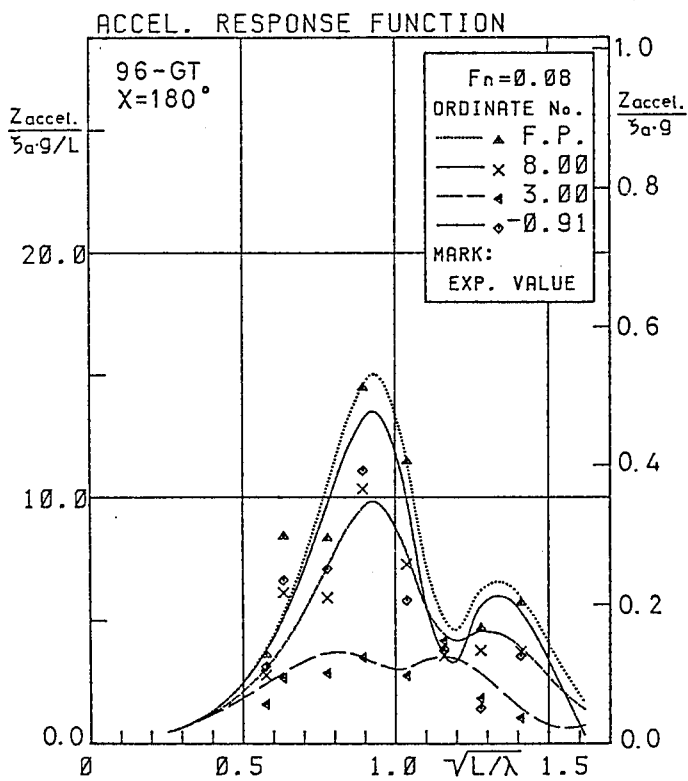
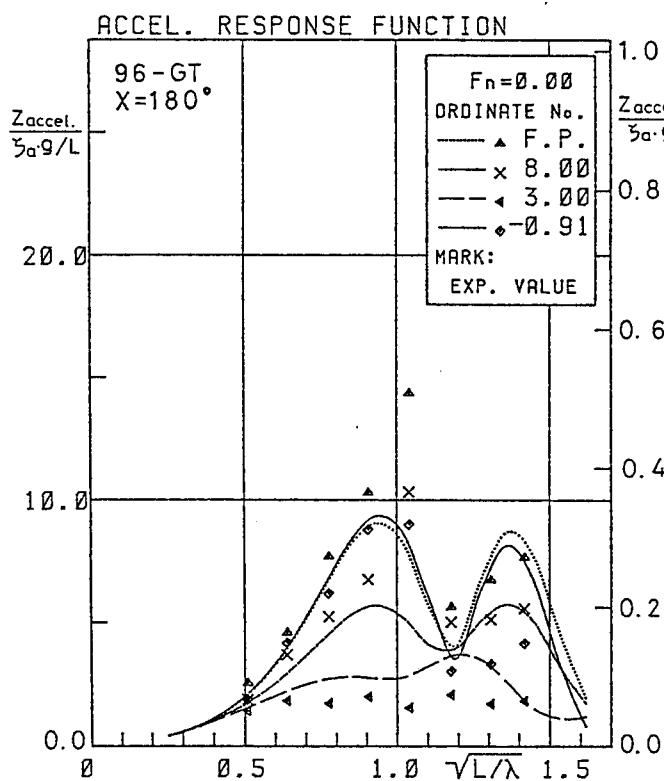


Fig. 7-1(a) Ship speed; $F_n = 0.00$. Fig. 7-1(b) Ship speed; $F_n = 0.08$.

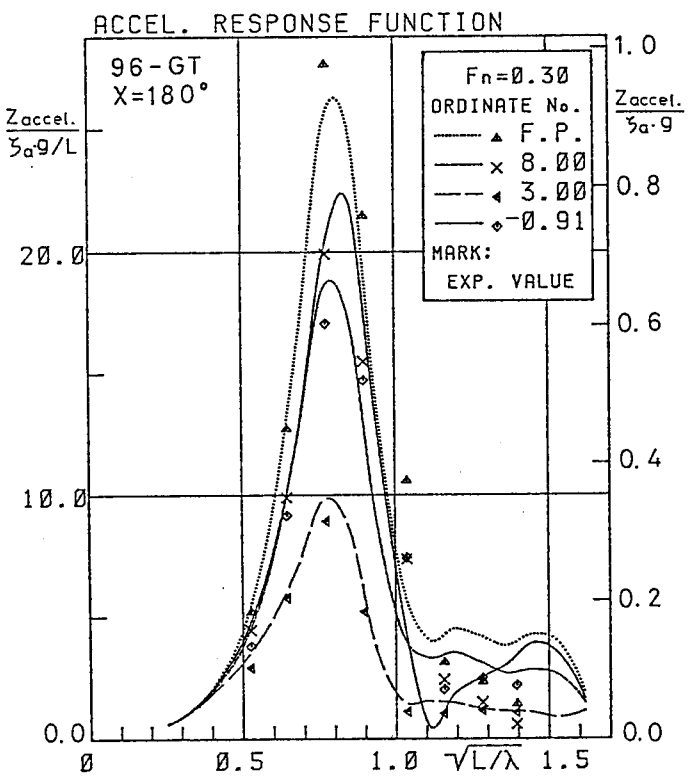
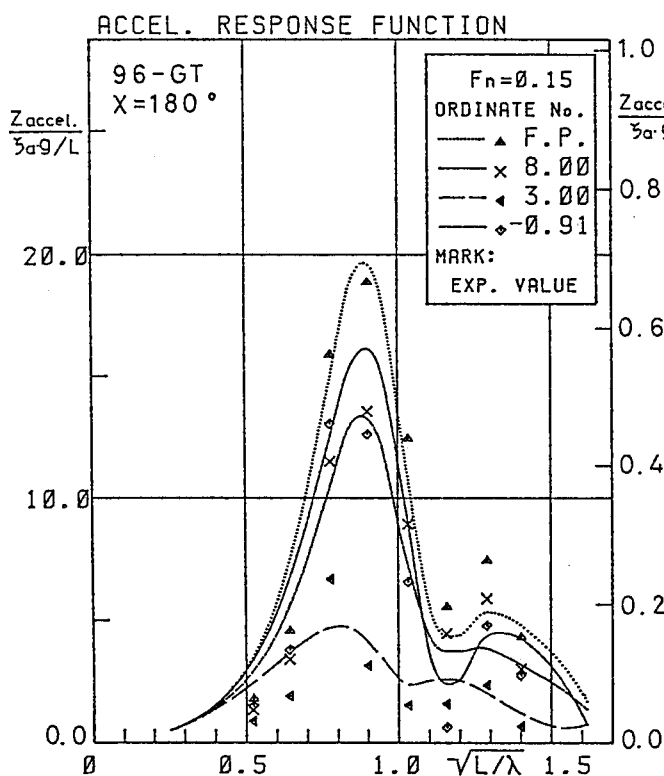


Fig. 7-1(c) Ship speed; $F_n = 0.15$. Fig. 7-1(d) Ship speed; $F_n = 0.30$.

Fig. 7-1 Comparison between experimental value and estimated value by OSM with 96GT fishing vessel.

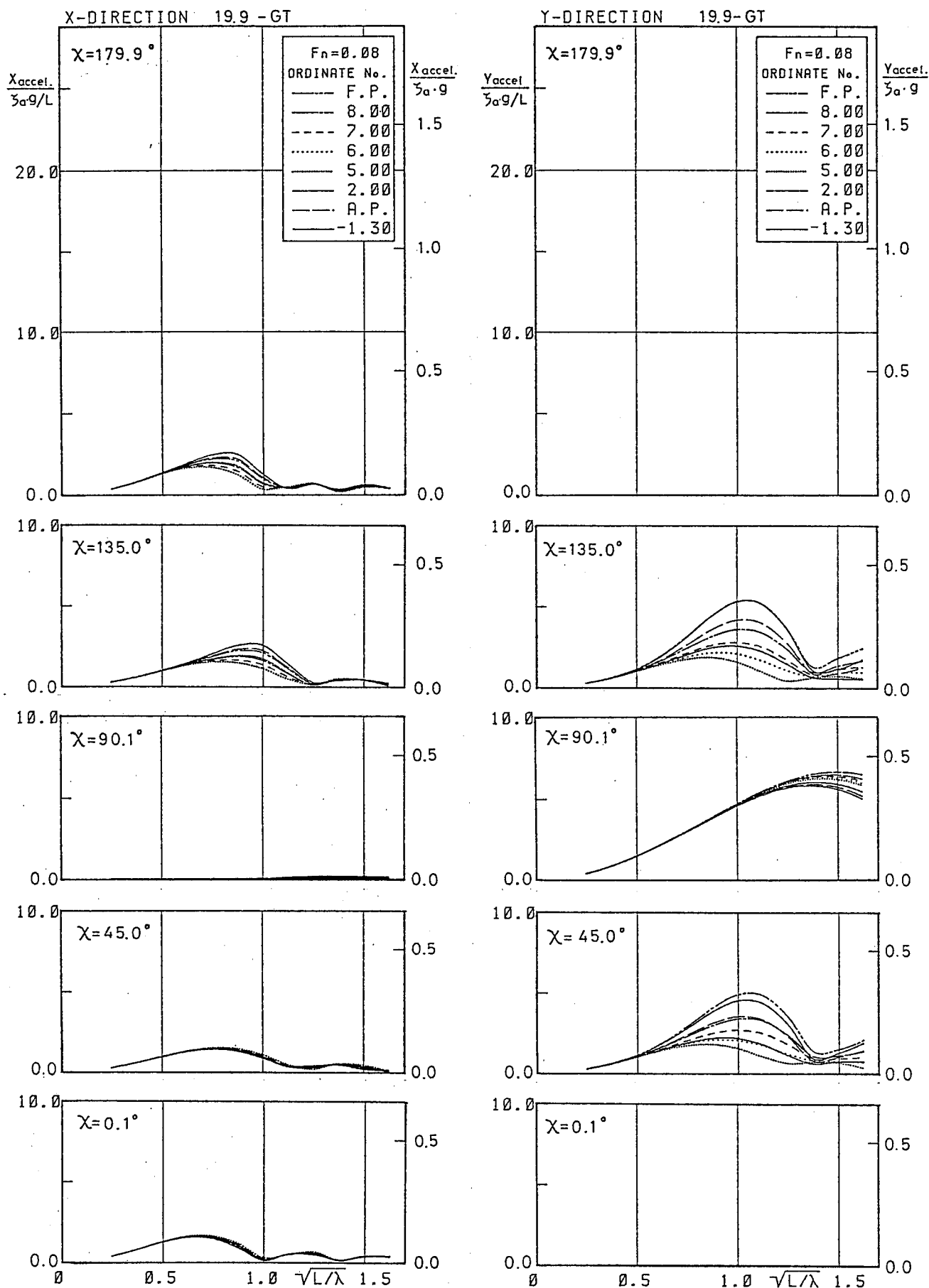


Fig. 7-2(a) In the X-direction.

Fig. 7-2(b) In the Y-direction.

Fig. 7-2 Acceleration response function with 19.9 GT small salmon fishing vessel, ship speed; F_n 0.08.

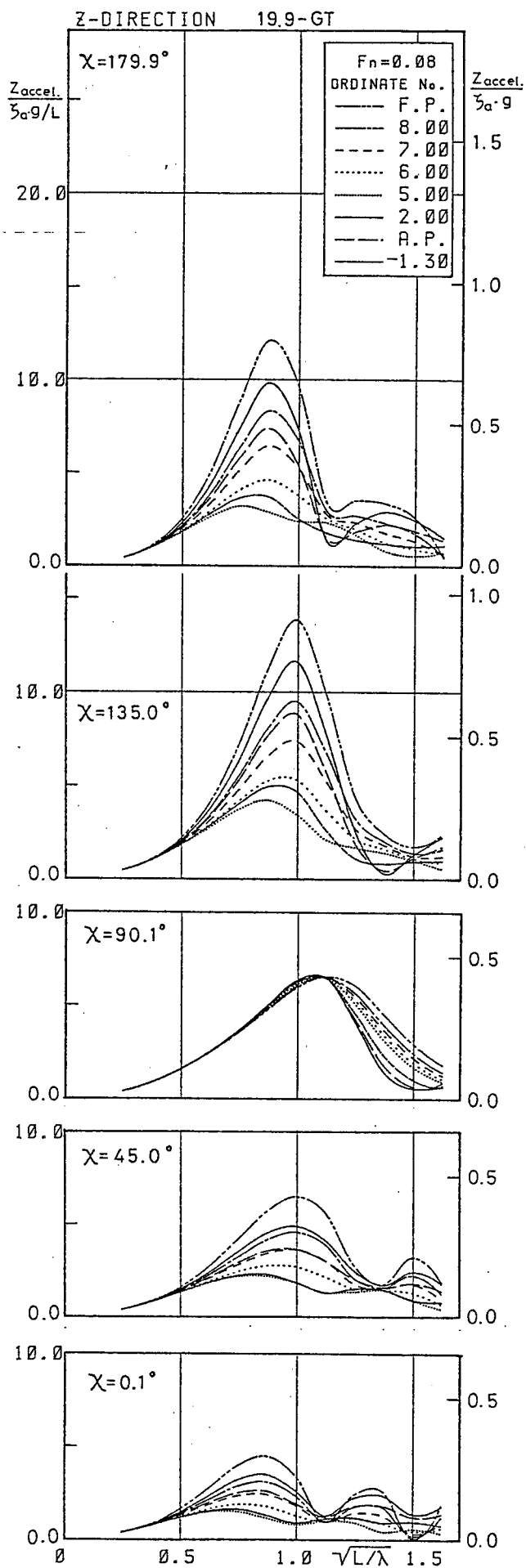


Fig. 7-2(c) In the Z-direction.

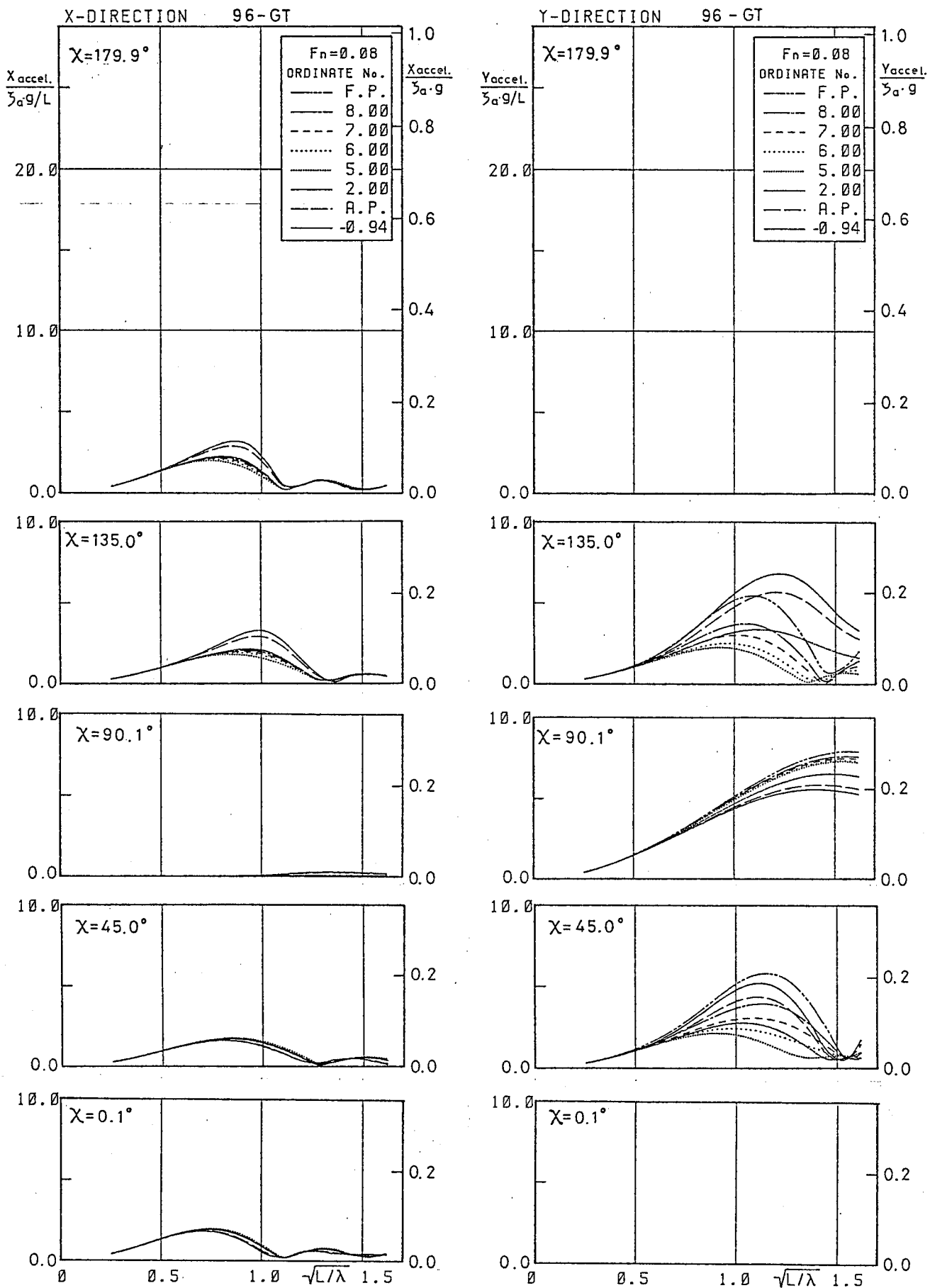


Fig. 7-3(a) In the X-direction.

Fig. 7-3(b) In the Y-direction.

Fig. 7-3 Acceleration response function with 96 GT salmon fishing vessel, ship speed; F_n 0.08.

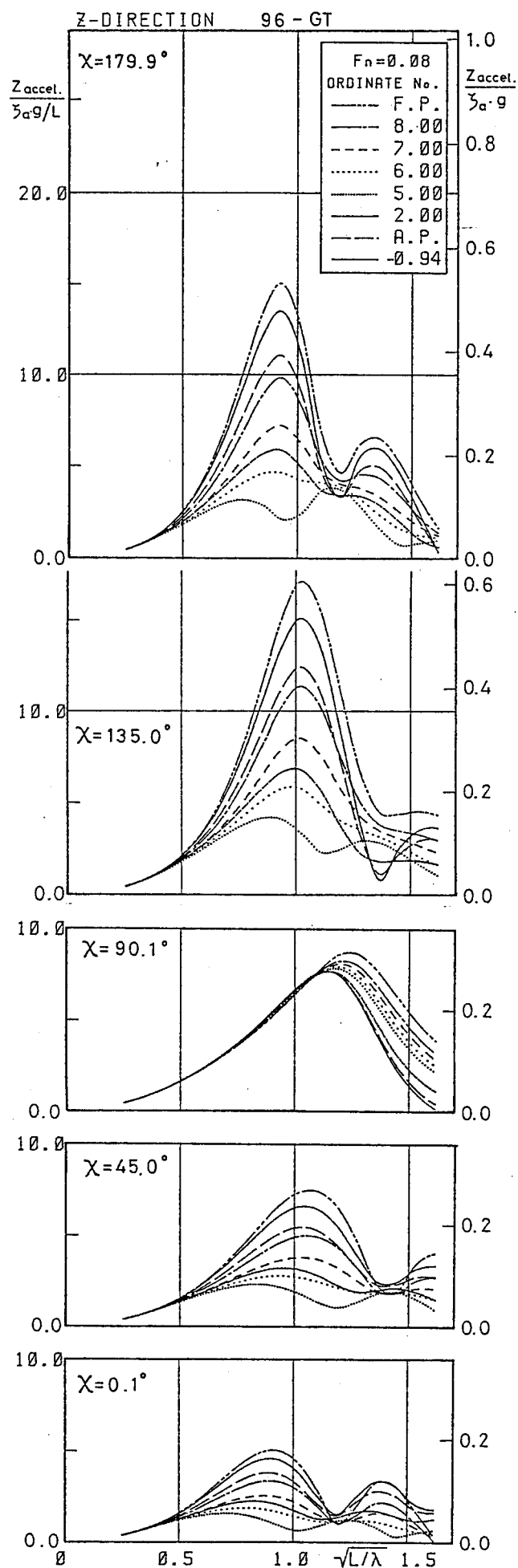


Fig. 7-3(c) In the Z-direction.

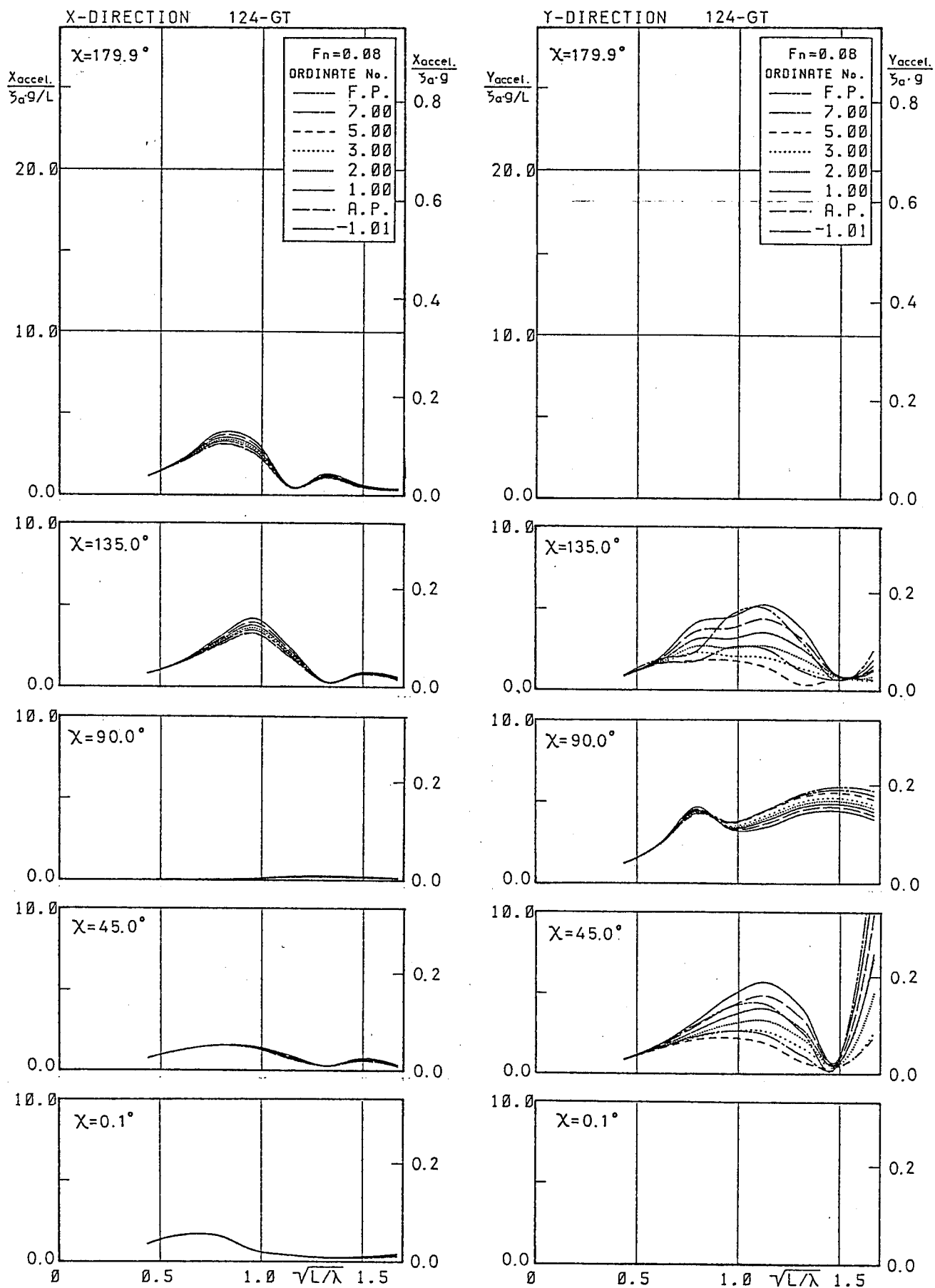


Fig. 7-4(a) In the X-direction. Fig. 7-4(b) In the Y-direction.

Fig. 7-4 Acceleration response function with 124 GT trawler, ship speed; F_n 0.08.

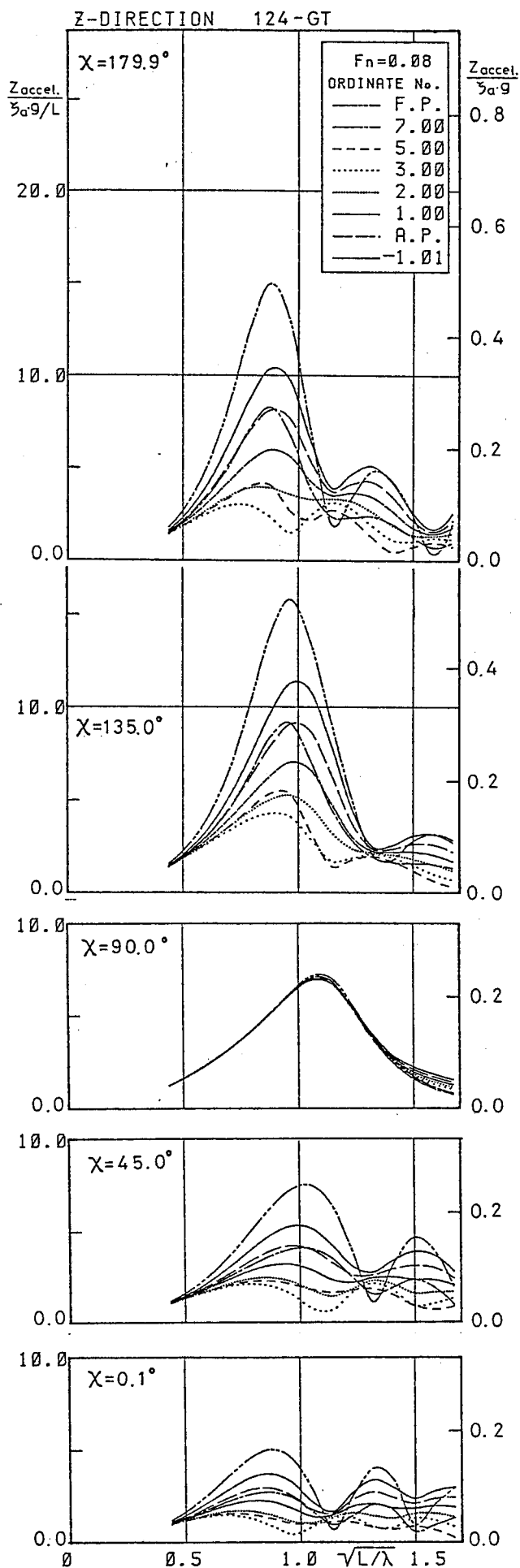


Fig. 7-4(c) In the Z-direction.

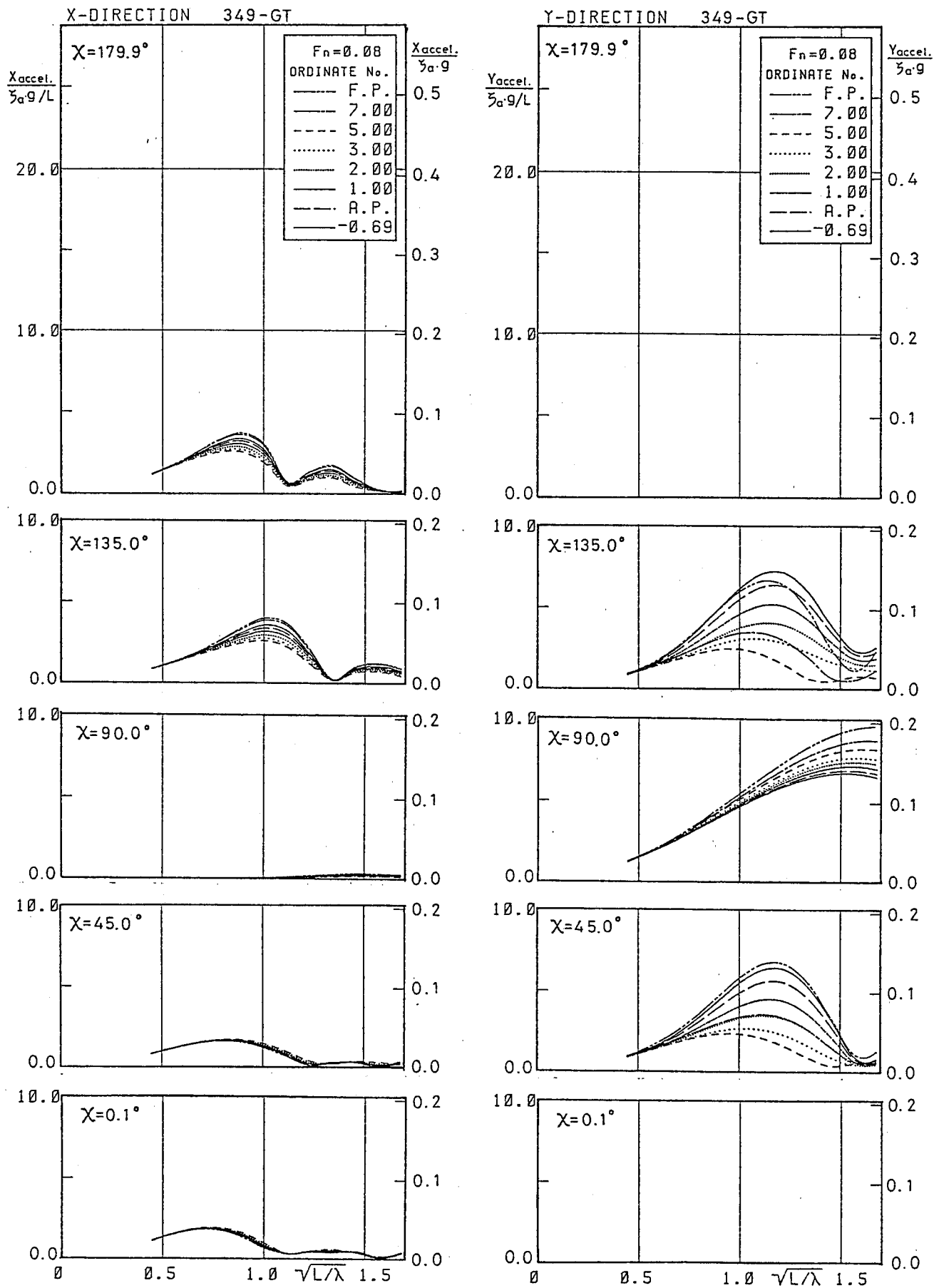


Fig. 7-5(a) In the X-direction. Fig. 7-5(b) In the Y-direction.

Fig. 7-5 Acceleration response function with 349 GT big offshore trawler, ship speed; F_n 0.08.

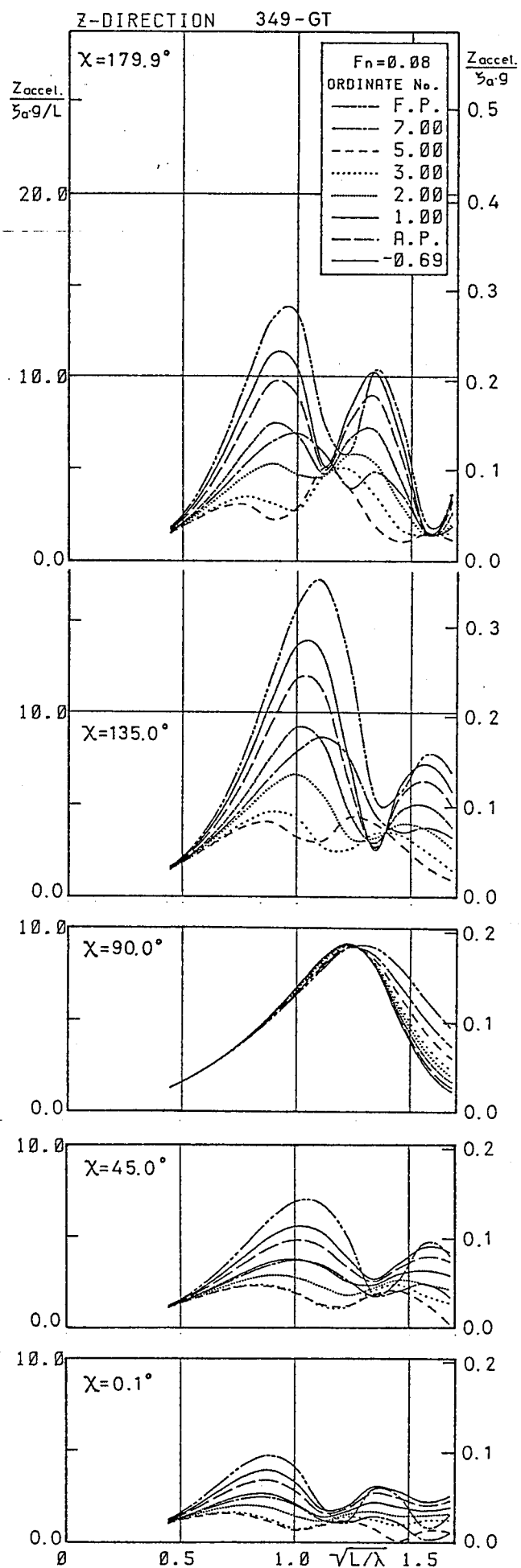


Fig. 7-5(c) In the Z-direction.

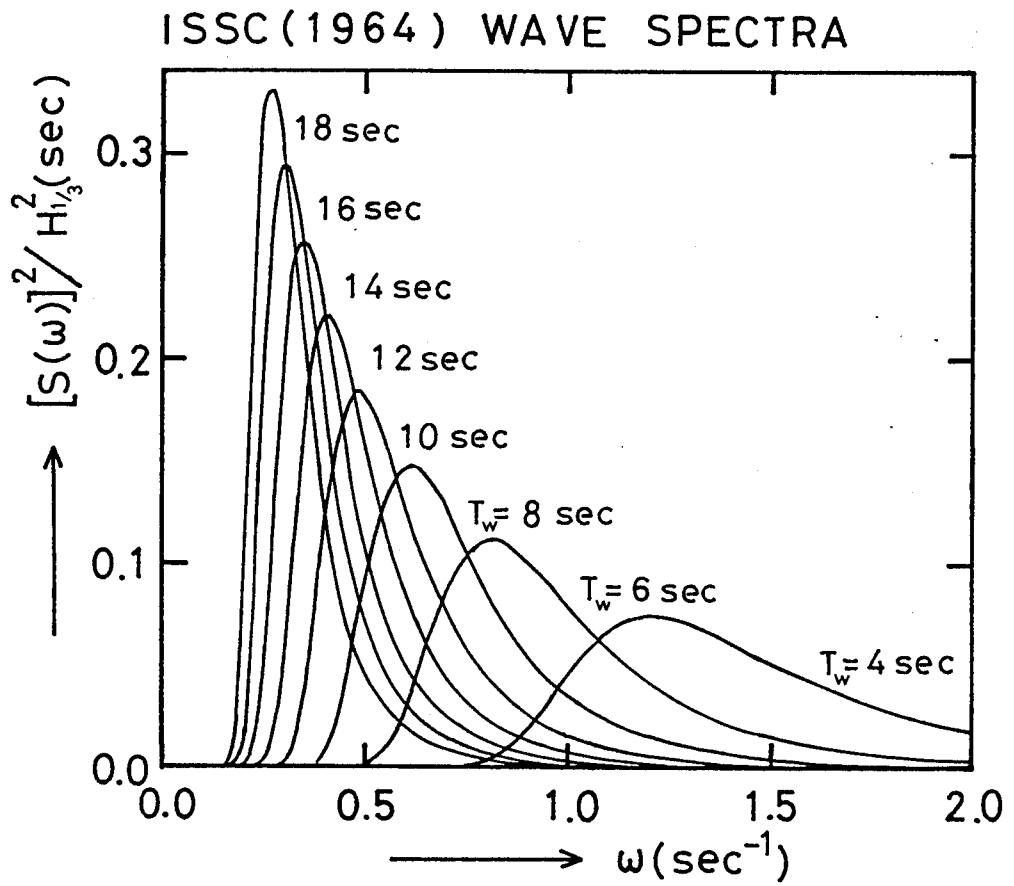


Fig. 7-6 ISSC standard sea spectra.

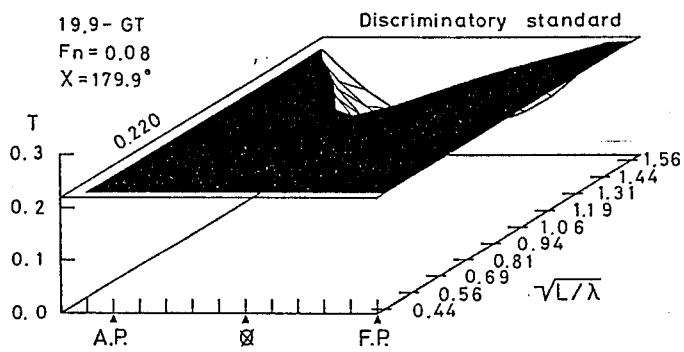


Fig. 7-7(a) Head sea

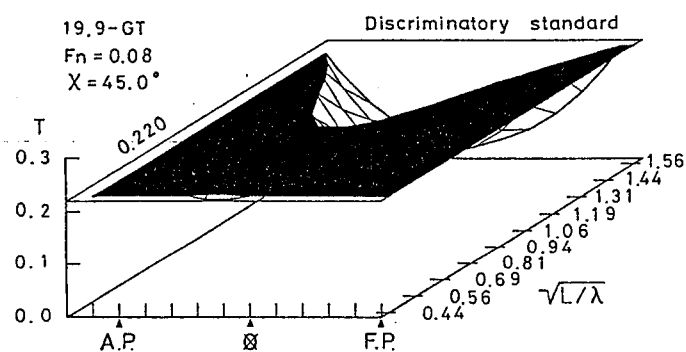


Fig. 7-7(d) Quartering sea

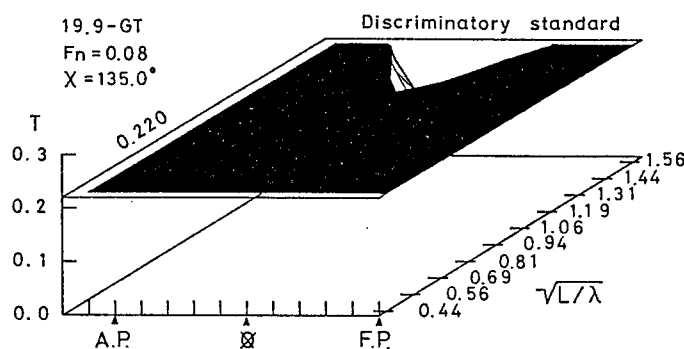


Fig. 7-7(b) Bow sea

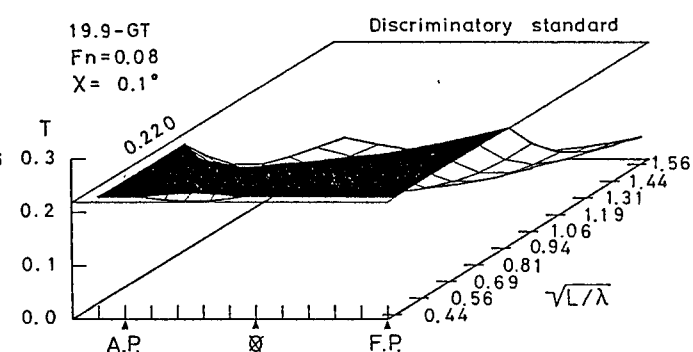


Fig. 7-7(e) Following sea

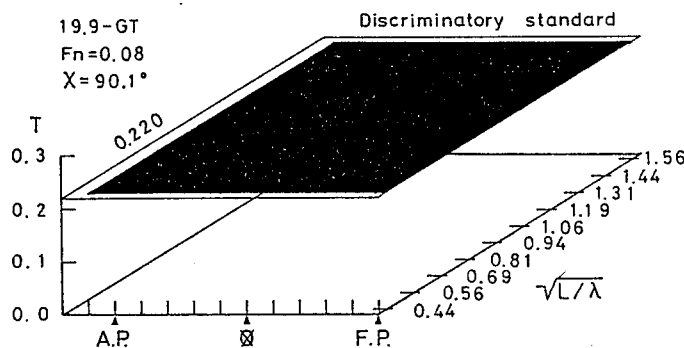


Fig. 7-7(c) Beam sea

Fig. 7-7 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 19.9 GT small salmon fishing vessel, wave height 2.0 m, ship speed; Fn. 0.08.

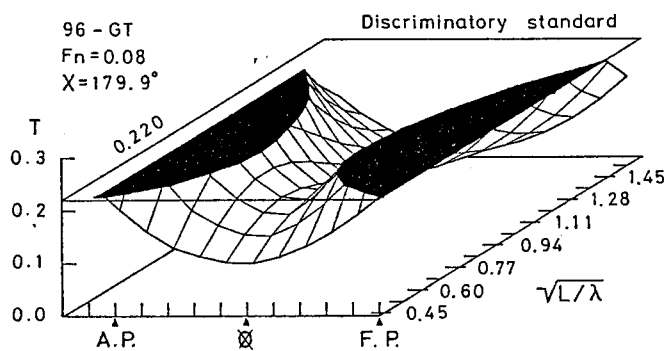


Fig. 7-8(a) Head sea

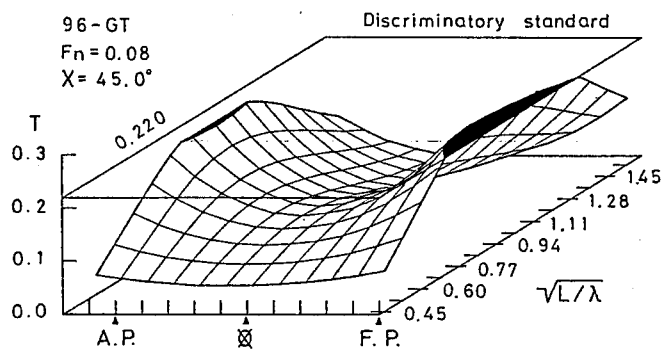


Fig. 7-8(d) Quartering sea

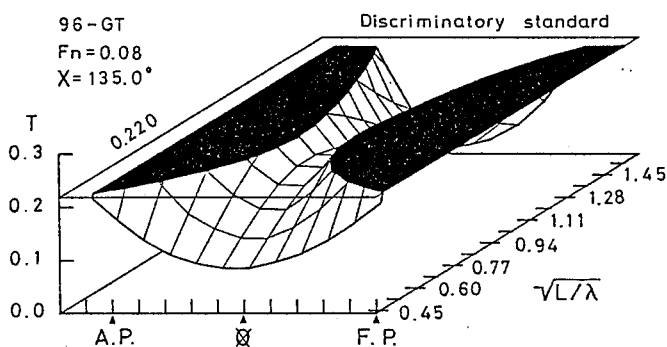


Fig. 7-8(b) Bow sea

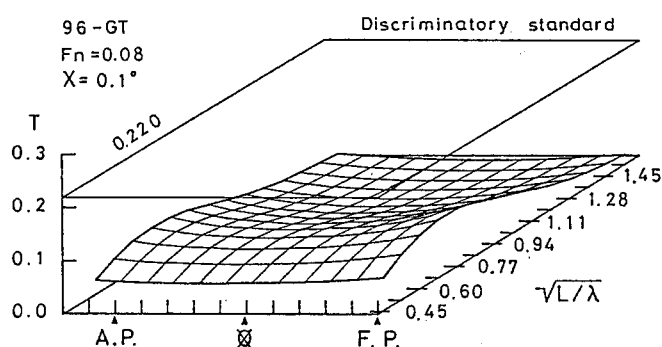


Fig. 7-8(e) Following sea

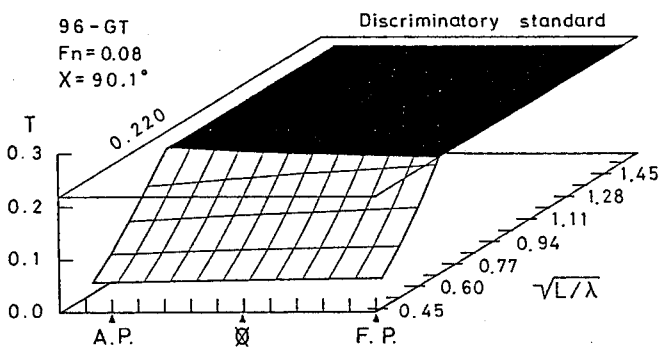


Fig. 7-8(c) Beam sea

Fig. 7-8 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 96 GT salmon fishing vessel, wave height 2.0 m, ship speed; Fn. 0.08.

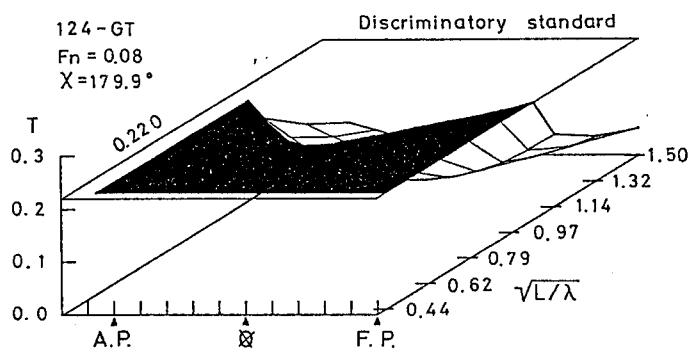


Fig. 7-9(a) Head sea

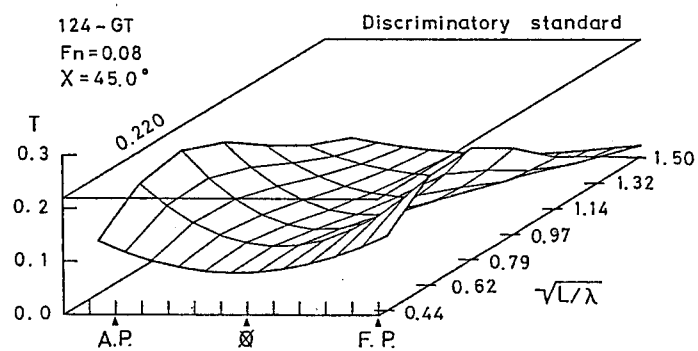


Fig. 7-9(d) Quartering sea

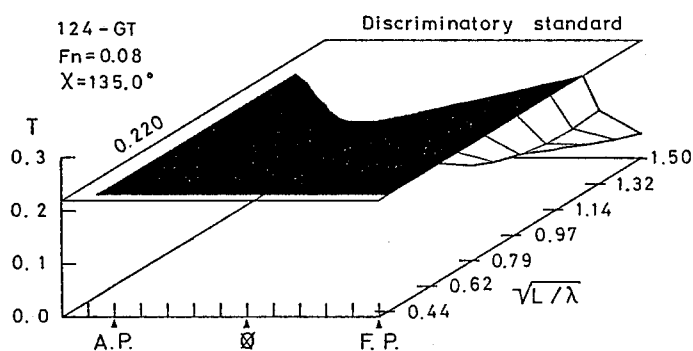


Fig. 7-9(b) Bow sea

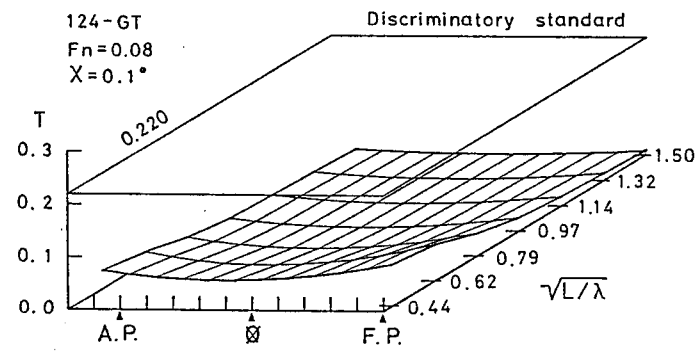


Fig. 7-9(e) Following sea

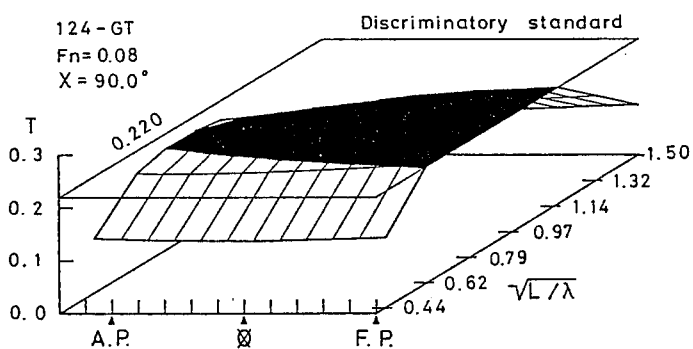


Fig. 7-9(c) Beam sea

Fig. 7-9 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 124 GT trawler, wave height 2.0 m, ship speed; F_n 0.08.

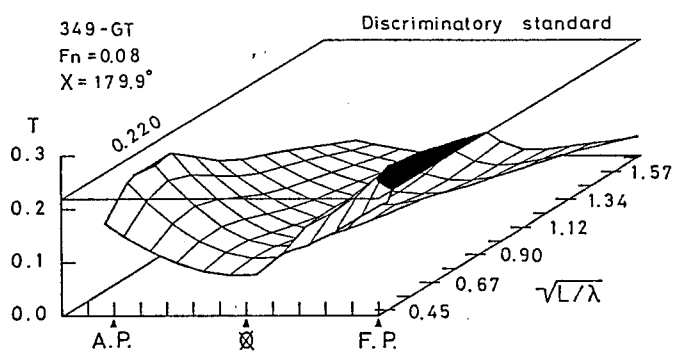


Fig. 7-10(a) Head sea

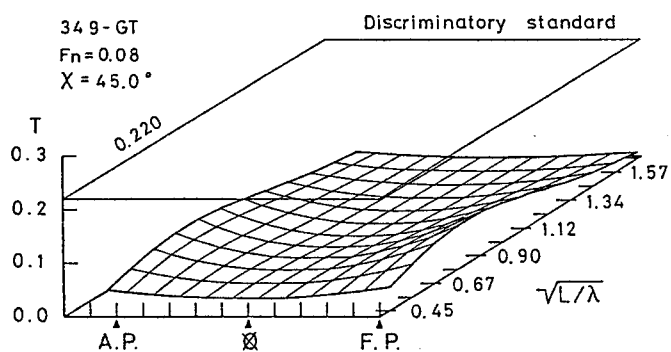


Fig. 7-10(d) Quartering sea

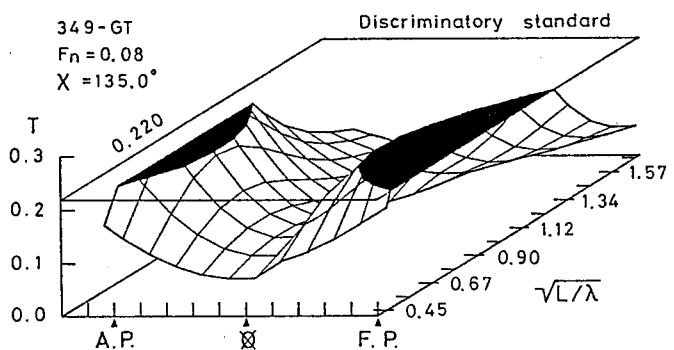


Fig. 7-10(b) Bow sea

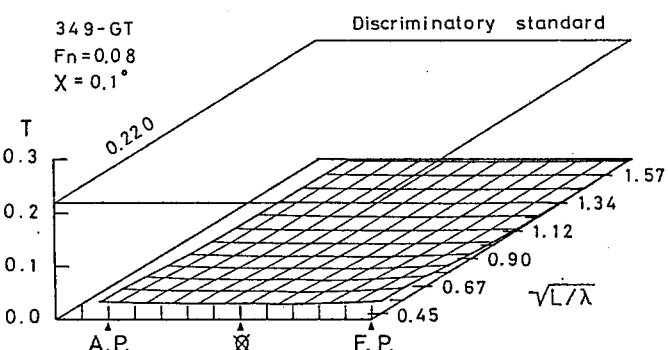


Fig. 7-10(e) Following sea

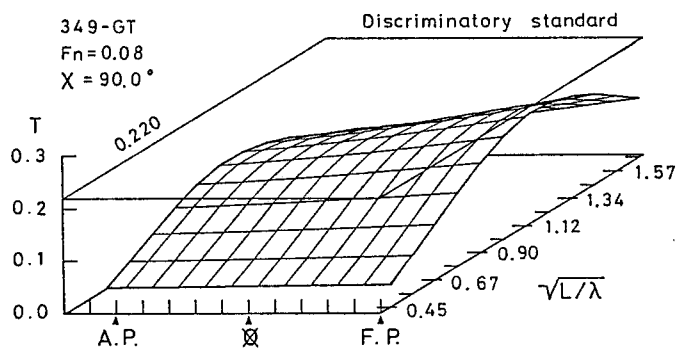


Fig. 7-10(c) Beam sea

Fig. 7-10 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, 349 GT big offshore trawler, wave height 2.0 m, ship speed; Fn. 0.08.

第 8 章、総合考察

漁労作業の安全性を向上させる上で、海中転落など人間がバランスを崩すことが原因で引き起こされる人身事故は深刻な問題であり、その対策は極めて重要となる。本論文においては、海中転落事故の問題を、力学的視点から船体運動によって引き起こされる物理現象として位置づけた。そして、船体運動を入力、人体に発生する揺れを出力とする応答系を設定し、その応答特性や船体動揺に対する人体のバランス維持能力について解析を行い、船上における人間のバランスの安定性について考察を行った。また、各種漁船模型を用いた水槽試験や O S M を用いた理論計算により、波浪によって船上に発生する加速度とその分布特性を推定し、動揺環境の側面から船上作業の安全性の考察を行った。

以上述べてきた研究成果をもとに、漁船甲板上で行われる漁労作業の安全性を向上させるための具体的な対策を検討する。第 1 項においては、実際の漁業への適応として北海道漁業において重要な地位をしめる、ほたて貝桁曳網漁業をとりあげた。ほたて貝桁曳網漁業においては、近年漁労災害を防止する為の新しい形の漁船が提案されている^[34]。この漁船に対し行われた構造上の改善が、漁労作業の安全性の向上に及ぼす影響を、漁船甲板上における加速度分布

と人間のバランスの安定性をもとに検討する。第2項においては、これらの結果に基づき、今後漁船の設計段階や運用上において考慮されなければならない海中転落事故などの人身事故対策を、漁業への具体的提案として行う。

8 - 1 総合判別指数 Tによるほたて貝桁曳網漁船の

漁労作業の安全性評価

ほたて貝漁業は、さけ定置網漁業や昆布養殖業とならび、北海道における「つくり育てる漁業」の中核をなしている。

ほたて貝漁業は、オホーツク海と噴火湾を中心に行われている。漁業形態の上から、オホーツク海は地蒔式、噴火湾は垂下式に分けられる。ここでは、オホーツク海におけるほたて貝桁曳網漁業に従事している漁船を対象に、漁労災害を防止する為に提案された新しい形の漁船の改良点が、漁労作業の安全性の向上に及ぼす影響について検討する。

8 - 1 - 1 操業状態

オホーツク海沿岸において、ほたて貝桁曳網漁業に従事している漁船勢力は、1988年には合計 112隻であった。

Fig. 8-1に、ほたて貝桁曳網漁船の船型にみられる特徴を示す。

旧型 (Old type) は最も旧式の船型で、作業甲板上を引き綱がはしっているため、作業中引き綱との接触などにより引き起こされる人身事故が多かった。次の標準型 (Standard type) の船型は、巻揚げ機が操舵室後部の船尾位置まで移されており、引き綱が舷側を走ることになった。1978年に提案され、現在では最も多い型である。最後の船首船橋楼型 (Fore bridge type) は、船首に操舵室を設置し、巻揚げ機をその後部に設置した型で、1989年時点でまだ一隻しか造られていない。この船型は、提案された漁業システムに基づく船型で、ほたて貝桁曳網漁業の専用漁船である。

8 - 1 - 2 船首船橋楼型漁船における船型の特徴

Fig. 8-2に船首船橋楼型漁船の船体線図を示す。Table 8-1 に船体主要目及び諸状態を表す。漁船規模は、14トン型となっている。Fig. 8-3に概要を示すように、船首楼、船首操舵室型で、後部甲板が全て作業甲板となっている。魚倉は作業甲板の下に設けられ、倉口内にコンテナが積載されて荷役作業の簡単・省力化が計られている。また、桁曳網ウインチを船首楼背後の甲板室部に設置することにより、漁獲物の処理作業を行う位置がウインチ位置と分離されている。

8 - 1 - 3 総合判別指数 Tによる作業環境の判定

Fig. 8-4 から Fig. 8-7 に、船体船首尾線方向における総合判別指数 Tの分布を波長船長比 λ/L の関係から図示した。 λ/L も $\sqrt{L/\lambda}$ と同様に、周波数表現である。

波高 0.5m、船速 $F_n = 0.411$ (10 knots) で波長が船長よりも長い波 (波周期 $T_w = 3.2$ sec) の向い波、斜め向い波状態において、F.P. 位置から $SS=7.0$ の間の甲板上で、閾値を越えた加速度が発生している。従って、この範囲にいる乗組員は、バランスを維持できないと推定される。しかし、漁労作業を行う甲板部分を $SS=6.0$ より船尾側に設定してあるため、漁労作業を行う乗組員のバランスは維持できる。横波、斜め追い波及び追い波状態において発生する加速度は小さく、閾値を越えることはない。また、この船速において波高が 1.0m になると、向い波、斜め向い波状態では、乗組員はバランスを維持できない。横波状態では、波長が船長の 2 倍より短い波 ($T_w = 4.5$ sec) に対して、加速度分布が閾値をこえるが、斜め追い波、追い波状態ではその心配はない。

船速の低下は加速度環境の改善に極めて有効である。波高 1.0m の状態で船速を $F_n = 0.082$ (2 knots) に低下させた場合、向い波及び斜め向い波状態において F.P. 位置から $SS=6.0$ までの甲板上と船尾から $SS=1.0$ までの甲板上の範囲で閾値を越える加速度分布が発生し、

この範囲での乗組員のバランス維持が困難になる。しかし、漁労作業を行う甲板部分の加速度分布は、ほとんどの部分で閾値を下回り、乗組員のバランス維持が可能となる。横波状態に対しては、船速の低下による加速度への影響がほとんど見られない。

総合判別指数 T による作業環境の判定の結果、ほたて貝桁曳網漁業において、漁労作業を行う甲板部分を船体中央から船尾側に設定している船首船橋楼型の漁船は、甲板上に発生する動揺が要因となっている人身事故を防止する上で極めて望ましい設計となっていることが確認できた。また、漁獲物の収納や処理を行う作業甲板の位置がウインチの位置と分離されているため、引き綱との接触など他の人身事故を防止する上からも優れた設計となっている。さらに、一面化された作業甲板は、漁労作業の効率化にも役立つことが予想される。総合的にみて、漁労作業の安全性対策が充分備わった船型と判断できる。

今回提案されたほたて貝桁曳網漁船のように、今後の漁船の設計にあたっては、甲板上に発生する加速度とバランスの安定性など、漁労作業における乗組員の安全性が充分考慮される必要がある。この基盤にたち、それぞれの漁業にあった漁船設計がなされ、漁労作業のシステム化が行われてこそ、海中転落事故や他の人身事故の軽減にもつながるものと判断する。

8 - 2 漁業への具体的提案

以上のように、作業甲板上に発生する加速度は、船上における作業甲板の位置や漁労機械の配置にみられる構造上での改良により、改善することが可能である。船上に発生する加速度を軽減することは、海中転落事故やバランスを崩すことにより引き起こされる他の人身事故を防止する上で極めて重要な対策となる。従って、漁船の甲板上に発生する動揺を作業環境の面から評価することは、漁労作業の安全性を考えて行く上で有効的な手段となる。また、船体運動の大きさを動揺環境として基準化する上で、船体加速度に対する人間のバランス状態の評価法は、極めて実用的な方法となる。

これらの研究成果に基づき、漁船乗組員がバランスを崩すことによって発生する海中転落事故など人身事故への安全性対策を下記に示す。

(1) 漁船は、対象とする魚種や使用されている地域により数多くの船形が存在し使用状態も異なる。各地域における季節的な波浪状況は統計的に推定することが可能であり、船速や波と船首の相対方向といった漁船の使用条件を加えることで、対象とする漁船の作業甲板上に発生する船体動揺を推定することができる。このことから、バランスの安定性を基準として、漁労作業を安全に行うための限界

波高等運用上の条件を基準化することができる。

(2) 漁船の作業甲板上に発生する動揺は、船上における作業甲板の位置や漁労機械の配置などの構造上の改良により、改善することができる。OSMによる計算等により船上に発生する動揺を推定し、人間の動揺に対するバランス維持能力に基づいて漁労作業の安全性を判断することは、漁船の設計段階においても漁労作業の安全対策を組み込むことができ、漁業における人身事故防止に寄与することができる。

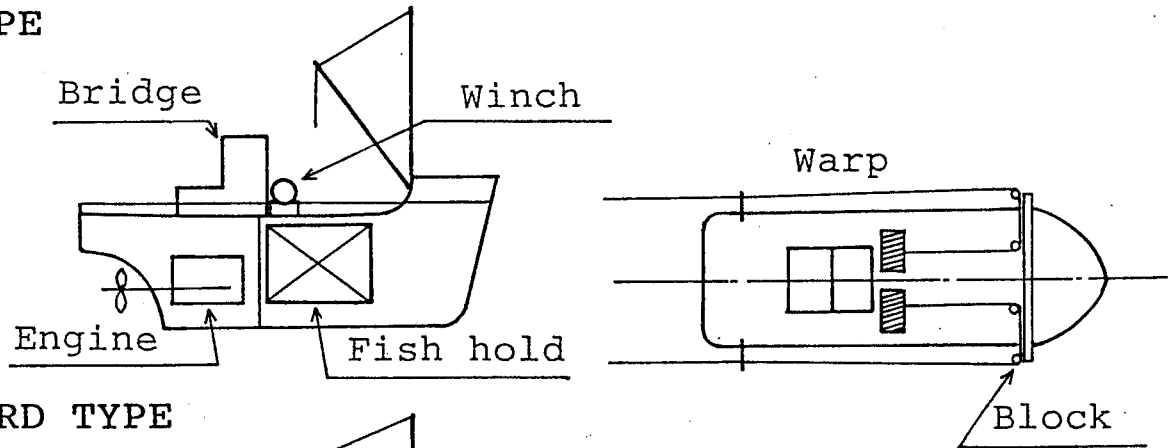
(3) 現在の計算機の発達はめざましく、船体運動を推定するためのOSMによる計算も普及している安価な計算機で行うことが可能である。さらに、今後益々、計算機の小型化、高速化及び低価格化が進むことが予想される。これに伴って、計算機が漁船に積載される機会も増大し、様々な航海・漁労情報の処理等に利用されることが予想される。漁労作業の安全対策の側面から漁船における計算機の使用を押し進めることは、実際に船が直面している波浪状況において甲板上の任意の作業位置での船体動揺を推定し、乗組員のバランスの安定性の関係から漁労作業の安全性を判断できることから極めて有効である。また、漁労作業を行っている場所に発生する船体動揺がバランスを崩し始める閾値を越える場合、漁船の船速や波浪に対する船首相対方向を変化させることにより動揺環境を軽減させる

等の対策を決定することも可能となり、変化する船体の積載状況や波浪状況に対し適時、漁船の運用面から安全対策をとることが出来る。

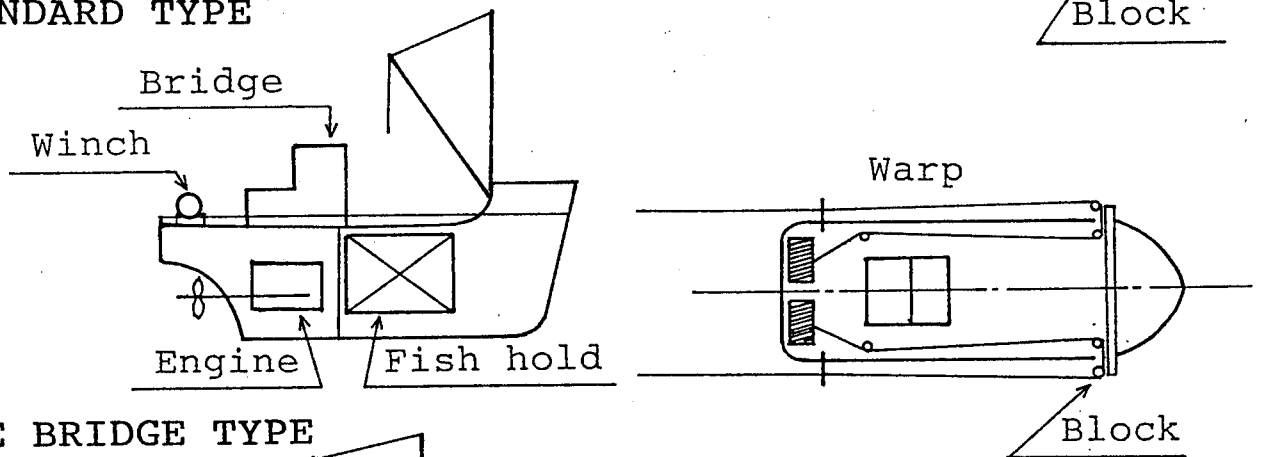
以上、波浪によって船上に発生する動揺と乗船している人間のバランスの安定性の関係に基づき、漁労作業の安全対策を総合的に考察した。今後、海中転落事故等の人身事故を減少させて漁労作業の安全性を高めるためには、上記のような技術的な対応が早急に実施されるとともに、漁業者自身の安全性に対する意識の高揚と海況に対応した漁船の的確な運用が不可欠と考える。

なお今後に残された課題としては、漁船乗組員のバランス状態の判定を行った線形判別関数及びバランスの安定性に関する閾値は、実船実験のデータを基に統計的に推定しているため、より一層被験者及びデータ数をふやすことが必要である。また、被験者の船体動揺に対する学習効果や疲労の影響なども、調査する必要がある。

OLD TYPE



STANDARD TYPE



FORE BRIDGE TYPE

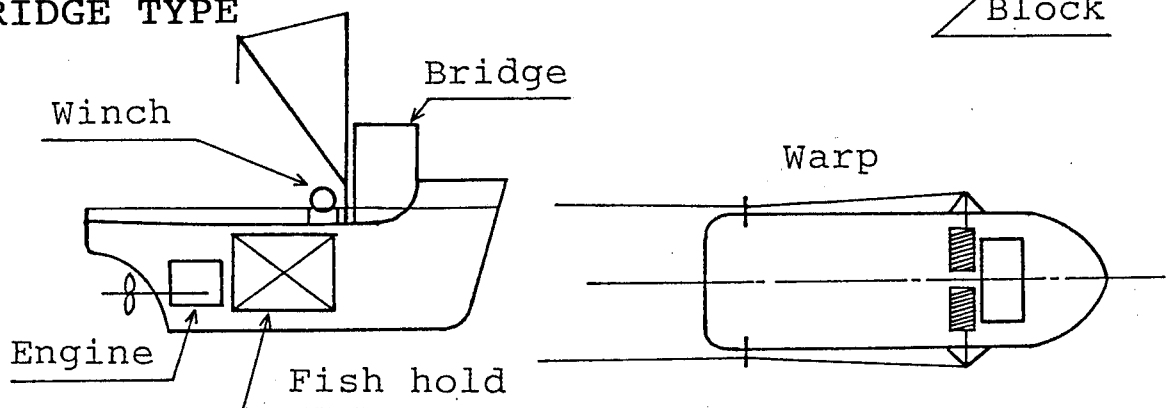


Fig. 8-1 A characteristic type of a scallop vessel.

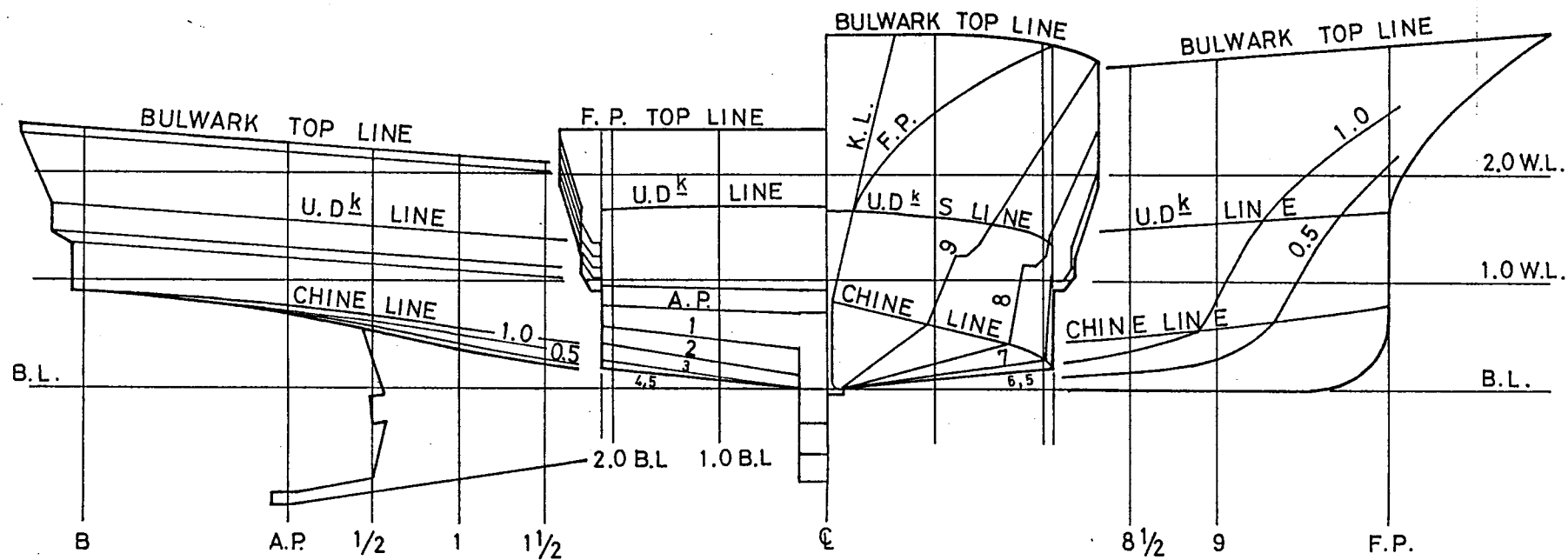


Fig. 8-2 The lines of scallop vessel.

Item	Dimension	
L	16.00	m
B	4.18	m
D	1.20	m
Disp.	52.873	ton
df	1.080	m
da	1.029	m
dm	1.055	m
GM	0.953	m
KG	1.367	m
$\bar{X}G$	0.572	m
Kyy/L	0.290	

Table 8-1 Principal characteristics of scallop vessel.

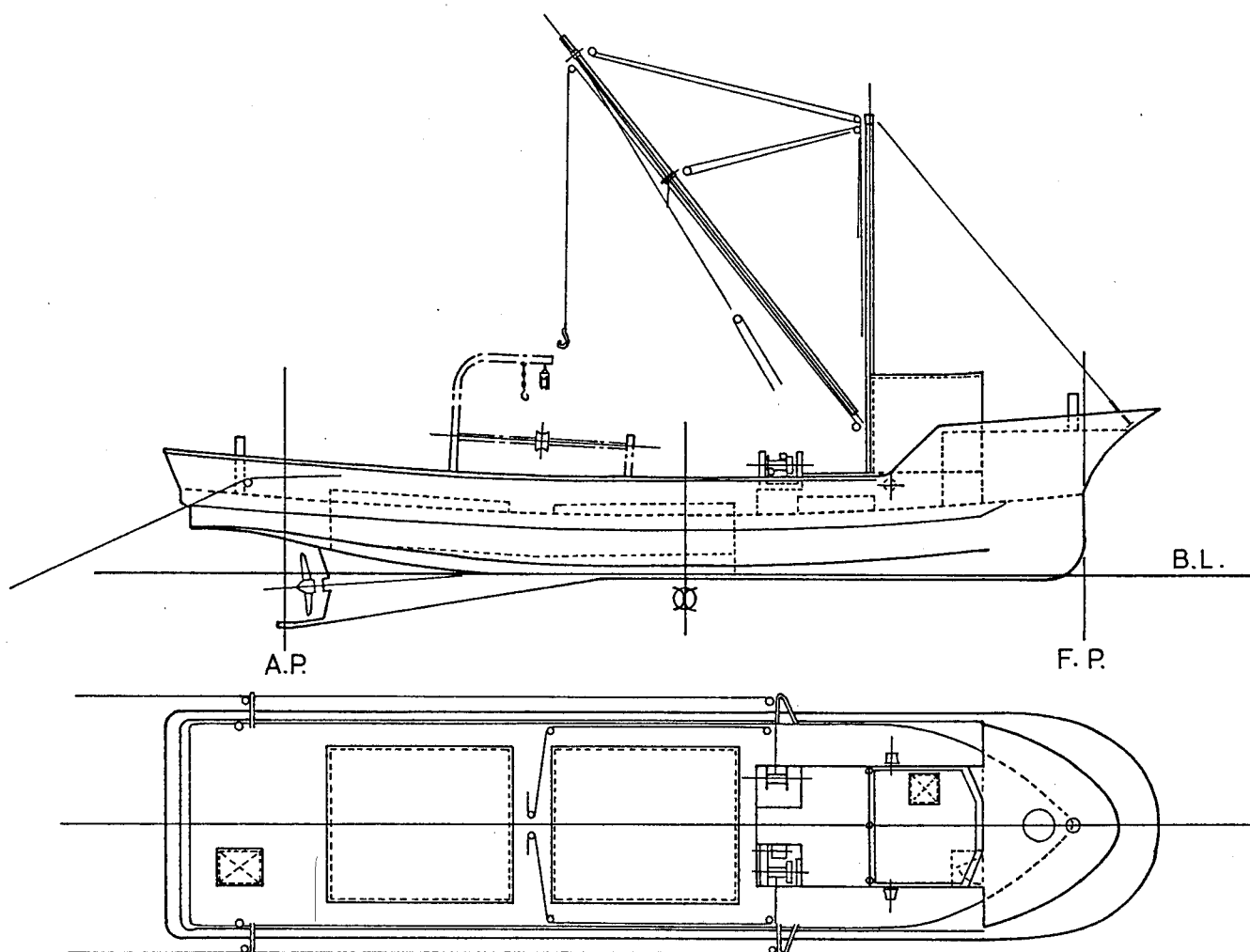


Fig. 8-3 An arrangement plan of the fore bridge scallop vessel.

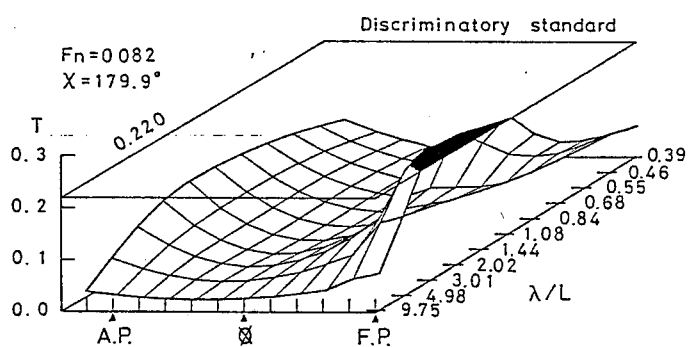


Fig. 8-4(a) Head sea

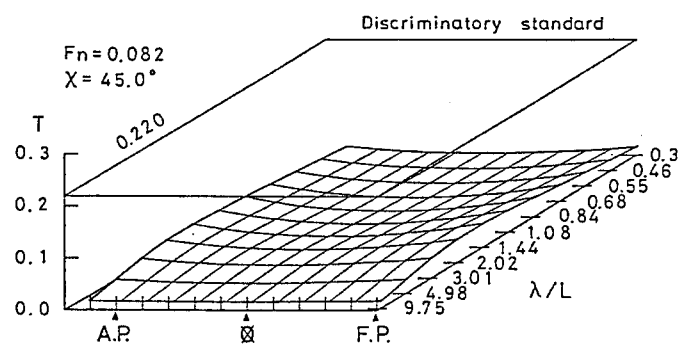


Fig. 8-4(d) Quartering sea

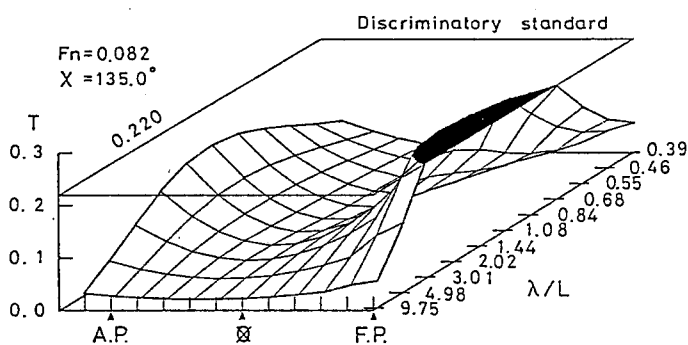


Fig. 8-4(b) Bow sea

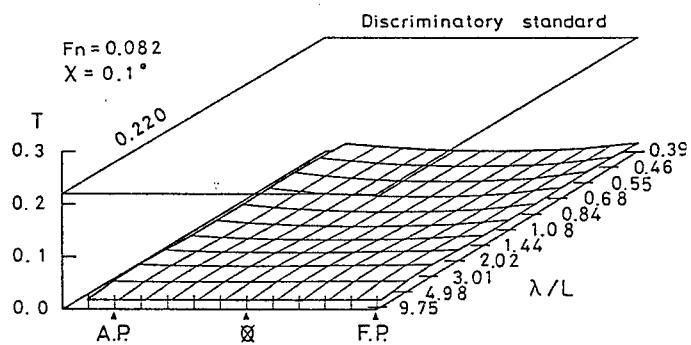


Fig. 8-4(e) Following sea

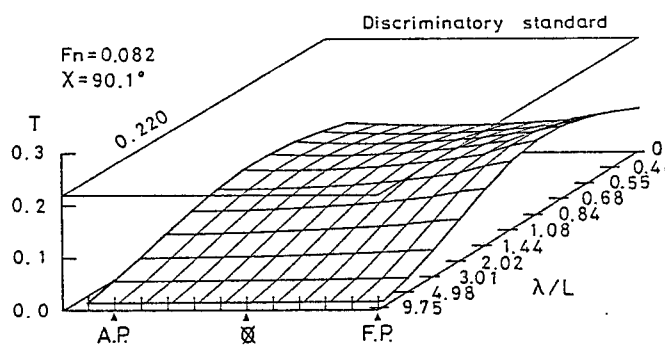


Fig. 8-4(c) Beam sea

Fig. 8-4 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 0.5 m, ship speed; F_n . 0.082.

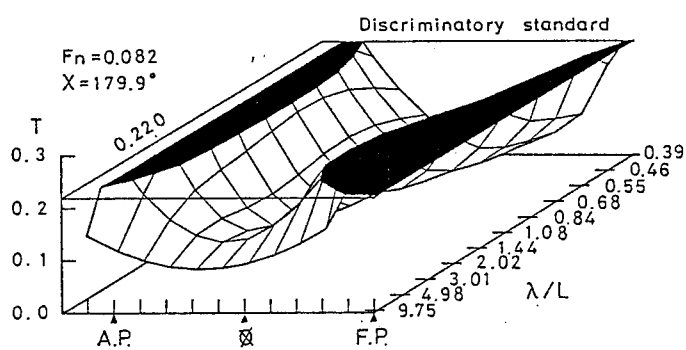


Fig. 8-5(a) Head sea

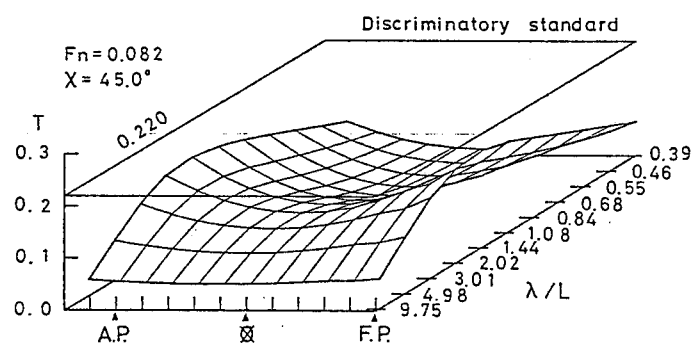


Fig. 8-5(d) Quartering sea

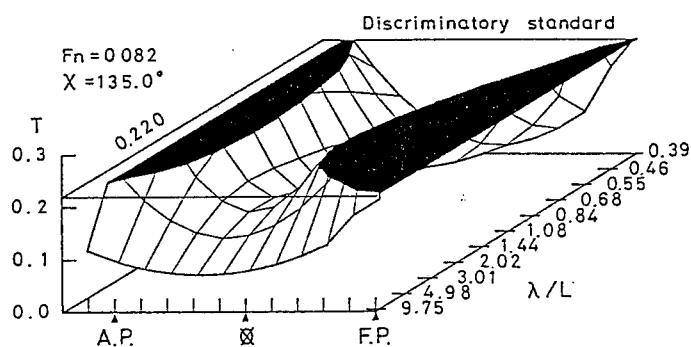


Fig. 8-5(b) Bow sea

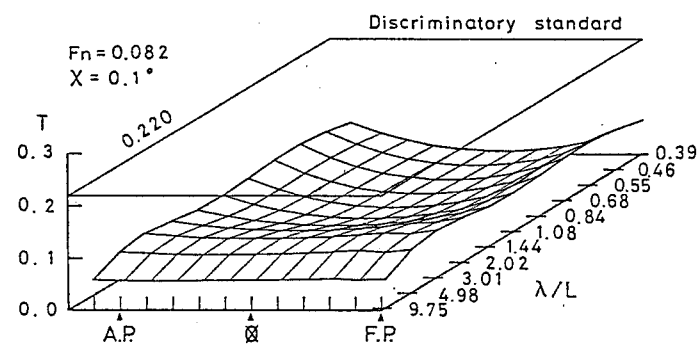


Fig. 8-5(e) Following sea

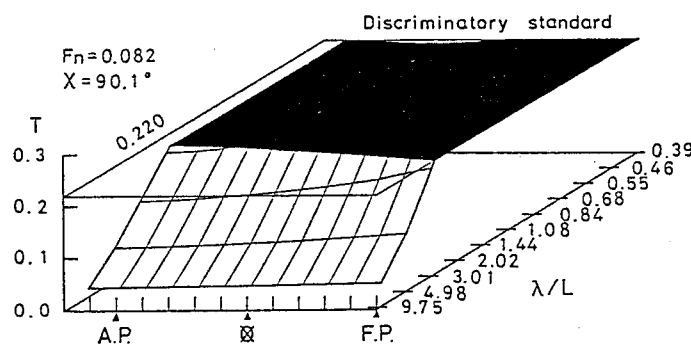


Fig. 8-5(c) Beam sea

Fig. 8-5 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 1.0 m, ship speed; F_n 0.082.

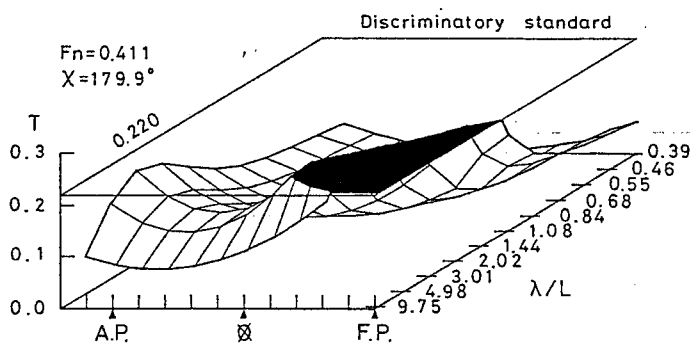


Fig. 8-6(a) Head sea

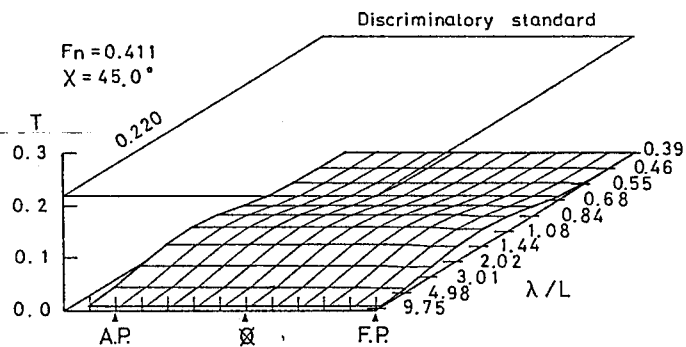


Fig. 8-6(d) Quartering sea

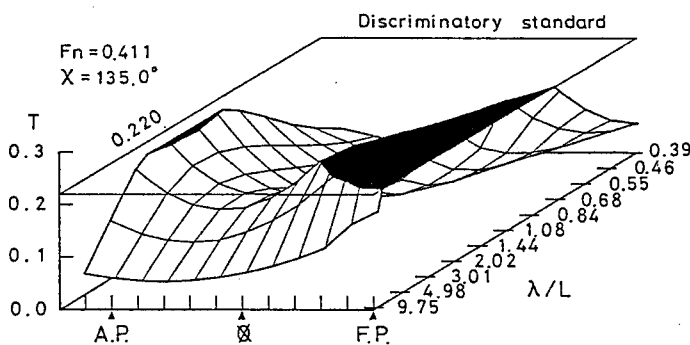


Fig. 8-6(b) Bow sea

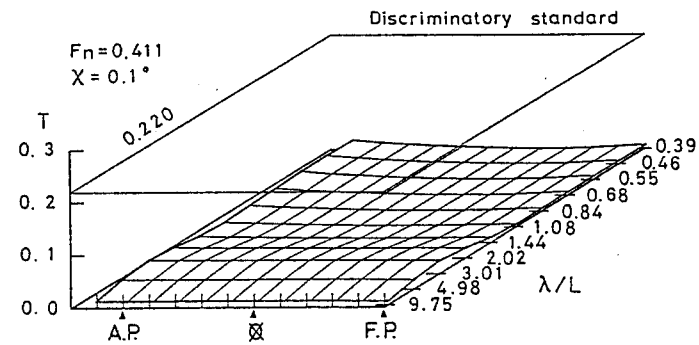


Fig. 8-6(e) Following sea

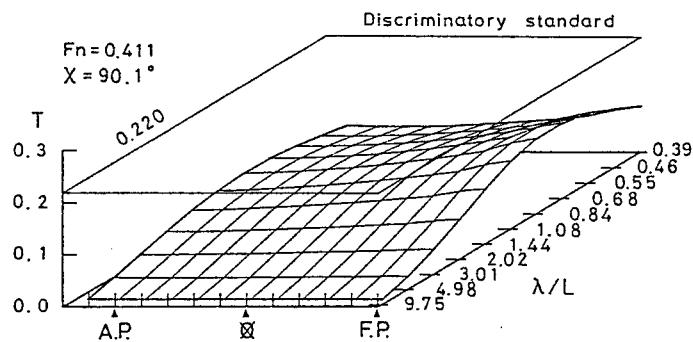


Fig. 8-6(c) Beam sea

Fig. 8-6 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 0.5 m, ship speed; F_n 0.411.

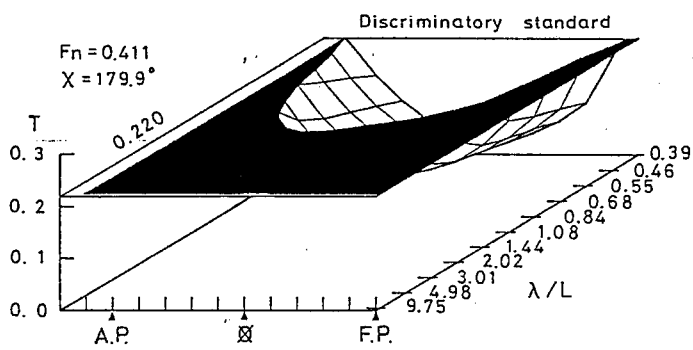


Fig. 8-7(a) Head sea

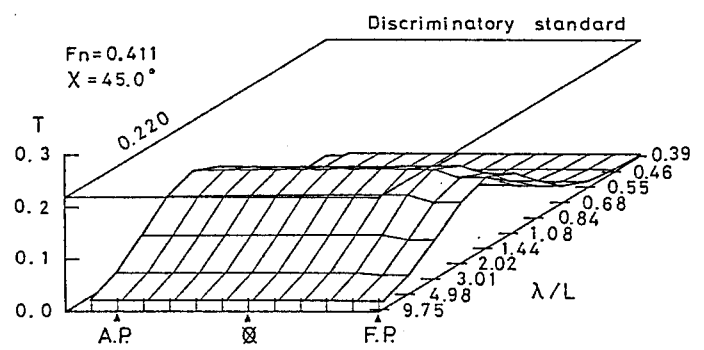


Fig. 8-7(d) Quartering sea

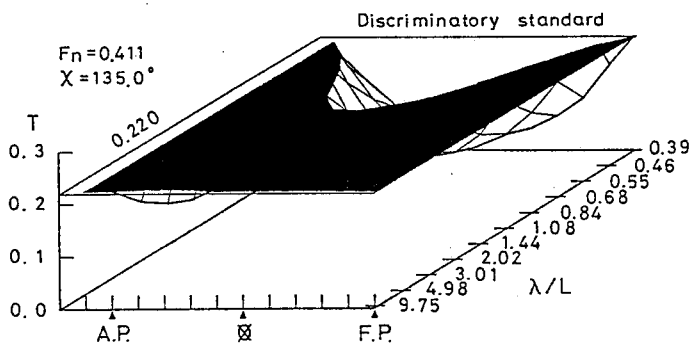


Fig. 8-7(b) Bow sea

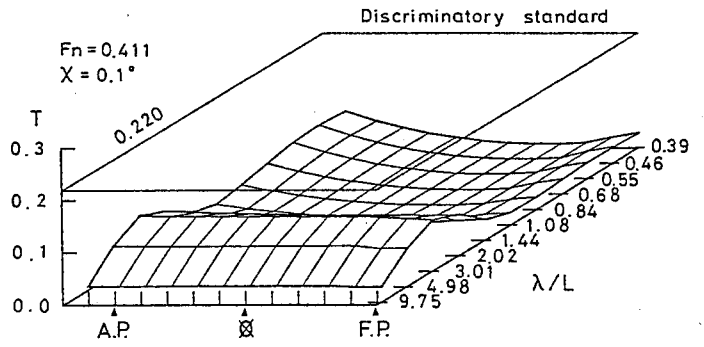


Fig. 8-7(e) Following sea

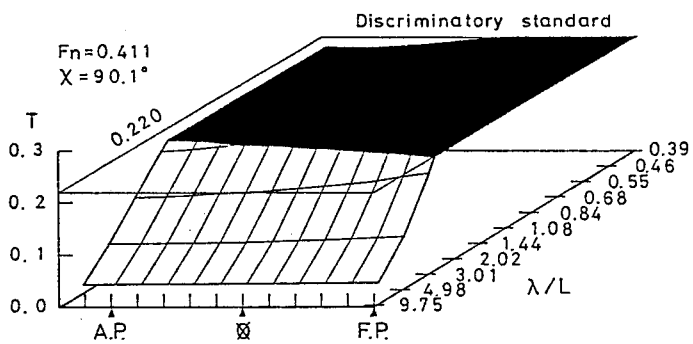


Fig. 8-7(c) Beam sea

Fig. 8-7 The distribution of the range where the crew is not able to maintain his balance, fore bridge type scallop vessel, wave height 1.0 m, ship speed; F_n 0.411.

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始懇切な御指導を頂きました北海道大学水産学部稲葉 恭人教授に深謝の意を表する。

査読をお願いした同学部五十嵐 脩蔵教授、天下井 清助教授には種々有益な御教示を頂き謝意を表する。

北海道薬科大学川島 利兵衛教授には、多大な御教示を賜りました。また、海上労働科学研究所神田 寛博士にも有益な御教示を頂き、重ねて謝意を現す。

実験および準備に御協力いただいた北海道大学調査船松島 寛治船長、北海道大学水産学部漁船運用学講座森田 省二技官にもあわせて謝意を表す。また、同講座大学院生・学生諸兄及び同調査船うしお丸乗組員の皆様には、実験における被験者を務めて頂き感謝する。

最後に、実船実験に際し種々御協力・援助を賜った北海道大学練習船北星丸士官及び乗組員の皆様に感謝する。

参考文献

- (1) 日本海難防止協会；昭和52年度海難防止の調査研究事業中間報告書（漁船における海中転落事故防止にかんする調査研究）、1978.
- (2) 日本海難防止協会；昭和53年度海難防止の調査研究事業完了報告書（漁船における海中転落事故防止にかんする調査研究）、1979.
- (3) 日本海難防止協会；昭和57年度海難防止の調査研究事業報告書（小型漁船におけるマン・マシン・システムとしての安全性に関する調査研究）、1983.
- (4) 服部 昭 他；漁船員の海中転落事故の発生要因に関する調査研究、海上労働科学研究所、1983.
- (5) 三輪千年；漁船員の海中転落事故の発生要因に関する調査研究、一まき網漁業について一、海上労働科学研究所、東京、1～30pp, 1985.
- (6) 桐谷 伸夫；海中転落の要因分析、日本航海学会論文集第71号、77～82pp, 1984.
- (7) 川島 利兵衛 他；漁船における海中転落のメカニズムについて、日本航海学会論文集第61号、137～149pp, 1979.
- (8) 今枝 彬郎 他；回転台上での身体動揺と眼振の発生
日本航海学会論文集71号、55～61pp, 1984.
- (9) 今枝 彬郎 他；船体運動による直立時の身体動揺－I
日本航海学会論文集72号、117～124pp, 1985.

- (10) 齊藤 進 他; 姿勢 第二回姿勢シンポジウム論文集、
人間と技術社、東京、225～233pp, 1977.
- (11) 木村 暢夫 他; 船体運動と人体の応答に関する基礎研究－I
日本航海学会論文集第69号、67～75pp, 1983.
- (12) 木村 暢夫 他; 船体運動と人体の応答に関する基礎研究－II
日本航海学会論文集第70号、133～141pp, 1984.
- (13) 木村 暢夫 他; 船体運動と人体の応答に関する基礎研究－III
日本航海学会論文集第71号、23～30pp, 1984.
- (14) 川島 利兵衛他; 漁船における海中転落に関する研究、
昭和59年度科学研究費助成金（一般研究A）研究成果報告書、
1～61pp, 1985.
- (15) N. Kimura & R. Kawashima ; Human Dynamic Response to Os-
cillatory Motion of Fishing Vessels in Ocean Waves,
Proceeding of The Fifth International Congress of The
International Association of The Institute of NAVI-
GATION, Tokyo, 293～300pp, 1985.
- (16) 木村 暢夫 他; 船体運動と人体の応答に関する基礎研究－IV
日本航海学会論文集第81号、55～65pp, 1989.
- (17) N. Kimura et al.; On the Relationship Between the Main-
tenance of Human Posture and the Ship Oscillatory Mo-
tions, Proceedings World Symposium on Fishing Gear and
Fishing Vessel Design, 564～568pp, 1988 (Canada).
- (18) Guide for the evaluation of human exposure to
whole-body vibration, ISO-2631, 1974.

- (19) 神田 寛 他；船舶の居住性能－人間工学的研究－、成山堂書店、東京、1～297pp,1964.
- (20) 後藤 大三；人体に対する振動許容基準、石川島播磨技報第16巻第4号、473～484pp, 1976.
- (21) 大島 正光 他；人間と機械の安全、人間と技術社、東京1～236pp,1961.
- (22) 神田 寛 他；高速艇における繰返し衝撃、振動の人間工学的評価法－I、日本航海学会論文集第63号、1～10pp, 1980.
- (23) 神田 寛 他；高速艇における繰返し衝撃、振動の人間工学的評価法－II、日本航海学会論文集第66号、163～171pp, 1982.
- (24) 神田 寛 他；高速艇における繰返し衝撃、振動の人間工学的評価法（最終報告）、日本航海学会論文集第67号、35～41pp, 1982.
- (25) 中原 寿喜太 他；回転刺激による重心動揺、一乗物酔いとの関係について－、日本航海学会論文集第73号、181～190pp, 1985.
- (26) 今枝 彬郎 他；船酔いの実船実測－I、日本航海学会論文集第74号、51～60pp,1986.
- (27) 今枝 彬郎 他；船酔いの実船実測－II、日本航海学会論文集第78号、221～229pp,1988.
- (28) 長田 治 他；イマーシヨンスーツの耐寒性能評価法
日本航海学会論文集第76号、133～147pp,1987.
- (29) 見上 隆克；ドラムウインチによる労働災害と巻き込まれ防止に関する研究、北海道大学学位論文、1～202pp, 1989.

- (30) Box, G.E.P and Jenkins, G.M; Time Series Analysis, Forecasting and Control, Holden-Day, San Francisco, USA, 1~553pp, 1970.
- (31) 赤池 弘次・中川 東一郎; ダイナミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社、東京、1~189pp, 1972.
- (32) 山内 保文 他; 不規則現象論、海文堂、東京、1~337pp, 1986.
- (33) 中村 正一; 多変量解析入門、日刊工業新聞社、東京、1979.
- (34) 北海道中小造船業及び造船関連工業活性化のための調査研究報告書、日本造船振興財団、1989.
- (35) 人間工学人体計測編集委員会; 人体計測値図表、日本出版サービス、東京、1~93pp, 1980.
- (36) 耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、1969.
- (37) 第2回耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、1977.
- (38) 元良 誠三 他; 船体と海洋構造物の運動学、成山堂書店、東京、39~225pp, 1982.
- (39) 高橋 生; Strip法による漁船の耐航性に関する船体運動論的考察、北海道大学学位論文、1~312pp, 1978.
- (40) 山越 康行 他; 漁船の波浪中の耐航性について(第一報) — 漁船の規則波解析におけるストリップ法の有効性について — 漁船研究技報、1~20pp, 1975.
- (41) 山越 康行・鈴木 四郎; 漁船の波浪中の耐航性について(第二報) — 漁船の波浪中縦運動 —、水工研技報、81~115pp, 1980.

- (42) M. Honkanen; Ein Beitrag zur rationellen Berechnung von Schiffsschwingungen im Seegang, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 67~79pp, 1976.
- (43) 北太平洋の風と波の統計表; 船舶技術研究所欧文報告別冊3、船舶技術研究所、1~123pp, 1980.
- (44) 天下井 清; 漁船の行動の限界について、日中航海学会学術交流会論文集、43~52pp, 1989.
- (45) 木村 賛 ; ヒトの歩行時の力と姿勢、姿勢シンポジウム論文集姿勢研究所、37~41pp, 1971.
- (46) 有本 卓 ; 二足歩行の数理と制御、数理科学、サイエンス社、SEPTEMBER Number 255, 47~54pp, 1984.
- (47) 山野 英記 他; 立位作業における転倒限界に関する一考察、産業安全研究所資料、1~15pp, 1976.
- (48) Nasa langley research center; 1975 RIDE QUALITY SYMPOSIUM, November, 1~644pp, 1975.
- (49) 大島 正光 他; 人間工学、コロナ社、東京、1~327pp, 1970.
- (50) K. Amagai & N. Kimura et al.; A PROPOSAL TO PREVENT OCCUPATIONAL ACCIDENTS IN SCALLOP BEAM TRAWLER, Safety and Working Conditions Aboard Fishing Vessels, Canada, 1989 (On printing).