

# 船体構造強度の信頼性解析

新田 顕\*・荒井宏範\*・湯浅通史\*  
岡 吉則\*・熊野 厚\*

## Reliability Analysis on the Strength of Ship Structures

A. Nitta, H. Arai, M. Yuasa  
Y. Oka and A. Kumano

This report summarizes a general method of reliability analysis on the strength of ship structures based upon the demand-capability concept. Numerical calculations are then made on the failure probability of both the longitudinal strength members and the transverse members of an oil tanker, where considered are such failure modes as yielding of material, buckling and instability of deck or bottom plating, longitudinals and of transverse webs, as well as bending collapse of hull girder and of transverse ring frame structures.

### 1. 緒 言

船体構造の強度判定を行う場合の基本的な拠りどころとして、従来から行われていたように、同型船若しくは類似の構造についての一般損傷の有無に対する実績を参考にする、いわば経験的な方法と、一般的かつ合理的とみなされる理論解析並びにこれを裏づける実験結果などから強度を推定する方法の、二つが併用されている。前者の方法は、損傷の再発を防止する意味で確実性があるが、定量的な判断基準に乏しい。一方後者は、普遍的であり、特に新しい構造様式の船舶についての設計に対して有力と考えられるが、強度判定の基盤となる損傷予測の段階において、検討の対象を、現在の工学的知識で処理し得る問題のみに限定せざるを得ないため、まだ資料の不十分なテーマについては、今後の調査にまたねばならない。

しかしながら、現在までに既に得られている研究成果を基盤にして、船体構造強度の種々の損傷モードについての分析を試み、損傷形態の因果関係を明らかにして、その結果を設計に正しく反映させることは、極めて重要なことと考えられる。

文献 1) で提唱されているように、船体構造強度に関する直接設計法の基本概念は、対象としている船体構造について、その建造から就航を含めた一生を通じて発生

し得ると予想される可能な限りの事象を考慮して、現在までに開発された解析法、蓄積された実測結果並びに調査資料に基づく総合的な検討を行うことに基盤を置いている。

海洋波中を航行する船舶の船体運動、波浪外力、これにより発生する構造応答、更に構造部材の疲労強度、座屈強度並びに塑性崩壊最終強度などについては、十分実用に供し得る理論解析法が、既に研究開発され、設計への適用が確認されているものが少なくない。

また、建造中の船舶について、その構造部材の工作精度と初期不整量の調査、使用鋼材の寸法及び強度に関する統計資料の収集も行われており、これらの成果を設計に反映させることも可能となってきている。

更に、船舶の就航する海域における気象及び海象に関する観測資料に関しても、特定の海域については着々と整備が進められており、その統計的な利用が十分可能な段階にまで到達していると考えられる。また、就航中の船舶についての積荷状態に関する実績調査、並びに荒天時における操船状況などについての実態は握も試みられている。

そこで、本研究における一つの試みとして、船体構造の疲労強度に関する信頼性解析についてさきに報告した<sup>2)</sup>、引き続いて今回は、船体構造部材の降伏、座屈及び塑性崩壊等の損傷形式をとりあげ、一例として、在来の設計によるタンカーの縦強度及び横強度についての信頼性解析を行った。

\* 技術研究所

## 2. 損傷確率の解析法

船体構造強度の信頼性解析は、通常用いられている Demand 及び Capability の概念に基づく解析法により実施する。この場合、信頼性解析に先だつて行うシステムアナリシスについては、当会で既に開発した船体縦強度及び横強度に関するトータルシステム解析プログラム<sup>3),4)</sup>を用いて計算を行う。

### 2.1 損傷強度解析

上に述べた各種の損傷形式について、それぞれ構造強度解析を行い、構造部材に作用する外力あるいは構造部材に生ずる構造応答のうち、代表的とみなして選択した値を Demand  $D$  とする。一方、構造部材の保持する強度を代表する物理量を Capability  $C$  と定義して、損傷発生条件を、次のように定める。

$$D \geq C \quad (1)$$

一般に、Demand 及び Capability は、それぞれ、後述の例題でも示されるように、各損傷形式ごとに定まる幾つかの確率変数  $X_1, X_2, \dots$  及び  $Y_1, Y_2, \dots$  から成る確率分布量であり、それらの関数関係は、損傷形式ごとに、上記の構造強度解析から、解析的に若しくは数値的に求められる。

ここで、確率変数  $X_i$  及び  $Y_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ) は、互いに独立とみなす。

### 2.2 Demand

まず Demand については、これを構成する確率変数を  $X_i$  として、船体に作用する水圧、あるいは構造部材に生ずる応力若しくはその断面力（モーメント、軸力、せん断力）などを考える。そして、 $X_i$  の長期発生確率を、平均値  $\lambda_{X_i}$  の指数分布と仮定し、その超過確率が  $10^{-8}$  となる特性極値  $X_{i,ext} (= \log_e 10^{-8} \times \lambda_{X_i})$  の値を、前記トータルシステム解析プログラムにより算出する。

一般に、船体構造部材の降伏、座屈、崩壊などの損傷は、特定の船舶を対象とする場合、その就航年限内に発生する応答  $X_i$  の最大値  $X_{i,max}$  に支配されるとして、応答の極値分布<sup>5)</sup>を、次式で与えられる平均値  $\bar{X}_{i,max}$ 、標準偏差  $S_{X_{i,max}}$  の正規分布で近似する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_{i,max} &= X_{i,ext} + 0.5772\lambda_{X_i} \\ S_{X_{i,max}} &= \frac{\pi}{\sqrt{6}}\lambda_{X_i} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

次に、各種損傷モードのそれぞれについて、損傷の発生に直接関連するとみなして代表的に選択された構造応答（例えば船底パネルの座屈損傷の場合は、パネルに生ずる応力） $R$  を、上記応答  $X_i$ （同例ではパネルに作用する水圧、軸力など）の関数

$$R = R(X_1, X_2, \dots) \quad (3)$$

であるとし、構造応答の最大値  $R_{max}$  が、 $X_{i,max}$  ( $i=1, 2, \dots$ ) で同時に発生すると仮定して、 $R_{max}$  の確率分布を、次式で示す平均値及び標準偏差の正規分布で近似する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{max} &= R(\bar{X}_{i,max}) \\ S_{R_{max}} &= \left\{ \sum \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \right)^2 \cdot S_{X_{i,max}}^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

このようにして定められた構造応答の最大値  $R_{max}$  を Demand  $D$  として、その確率分布  $p_d(D)$  を決定する。

### 2.3 Capability

船体構造部材の Capability  $C$  は、部材の寸法及びこれに関連する量（初期たわみなど）と、材料強度のパラメータ（降伏応力など）を確率変数  $Y_i$  として、各種損傷モードごとに、それぞれ、これらの関数で与えられる。

$$C = C(Y_1, Y_2, \dots) \quad (5)$$

ここで、上記パラメータ  $Y_i$  の確率分布は正規分布とみなし、更に Capability  $C$  の確率分布  $p_c(C)$  も、正規分布するものと仮定する。

### 2.4 損傷確率

上記の方法で決定された Demand 及び Capability の確率分布  $p_d(D)$  及び  $p_c(C)$  は、図1に示すように表さ

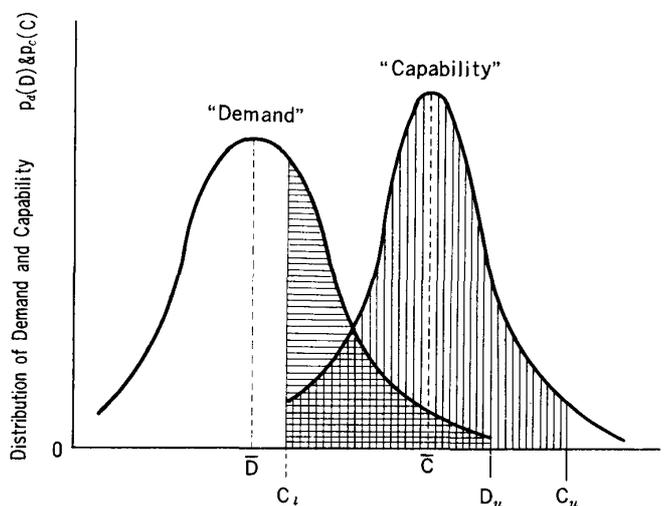


図1 Demand 及び Capability の確率分布

れ、これを用いて船の就航年限に発生する損傷確率  $P_f$  は、各種損傷モードについて、それぞれ次式により算出される。

$$P_f = \int_{C_l}^{C_u} \int_{C}^{D_u} p_d(D) \cdot p_c(C) \cdot dD \cdot dC \quad (6)$$

ただし、 $C_u$ 、 $C_l$  及び  $D_u$  は、それぞれ、Capability の上限、下限及び Demand の上限の値を示す。

### 3. タンカーの解析例

前章で述べた解析法に従って、下記の各種損傷モードに対するタンカーの就航期間（20年と仮定し、 $10^8$ 回の繰り返し変動荷重を受けるとする）における損傷確率の計算を行った。解析対象船は、在来の設計による載貨重量24万トンのタンカー（主要寸法  $304.0\text{m} \times 52.4\text{m} \times 19.8\text{m}$ ）で、その中央横断面構造を図2に、積荷状態及び解析対象位置を図3に示す。なお、波浪中の変動応答については、海洋不規則波中の短期分布として I.S.S.C.-1970 短波頂スペクトルを使用し、就航海域の波浪発生ひん度統計資料としては、縦強度解析に対しては、Walden の北大西洋における冬季観測値を、横強度解析に対して

は、年間観測値を用いた。

また、以下の各節の計算において用いた各確率変数の平均値、標準偏差（又は変動係数 C.O.V.）については、特に断わらない限り文献 6）から引用し、表1にそ

表 1 確率変数の平均値及び変動係数（又は標準偏差）

Variable		Mean Value	C.O.V. or Standard Deviation
Yield Stress	MS	28.86 kg/mm <sup>2</sup>	7.52%
	HT	37.39 kg/mm <sup>2</sup>	6.98%
Plate Thickness	Nominal Thickness		1.45%
Scantling	Designed Scantling		0.59 mm
Initial Deflection		1.02 mm	177%

これらの値を一括して示す。ただし、板厚については、同文献で板厚の違いによって C.O.V. が異なっているが、本論文では板厚による C.O.V. の差はないものとした。

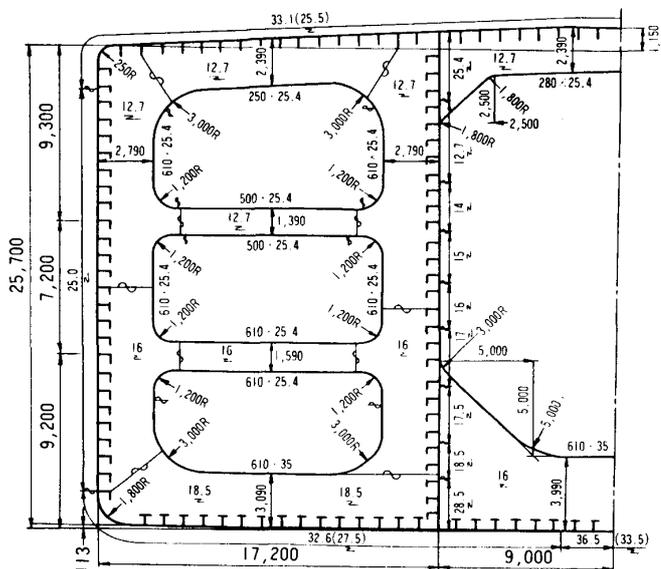
#### 3.1 縦強度

縦強度部材についての信頼性解析の適用例として、甲板及び船底の降伏、縦通材の横倒れ崩壊及びハルガーダの崩壊の3種類のモードについて計算を行った。

なお、対象船は図2に示すように、縦強度部材の一部においては、軟鋼と高張力鋼の二通りの設計がされているので、本論文ではそれぞれの場合について、部材に発生する応力を求め、損傷確率を計算した。

##### 3.1.1 甲板及び船底の降伏

図4に示される縦通隔壁又は船側外板と横桁とで囲まれる縦通材付き甲板及び船底パネルが、面内圧縮応力  $\sigma$



( )内の数値は高張力鋼を使用した場合の構造寸法  
図2 24万 DWT タンカーの中央断面

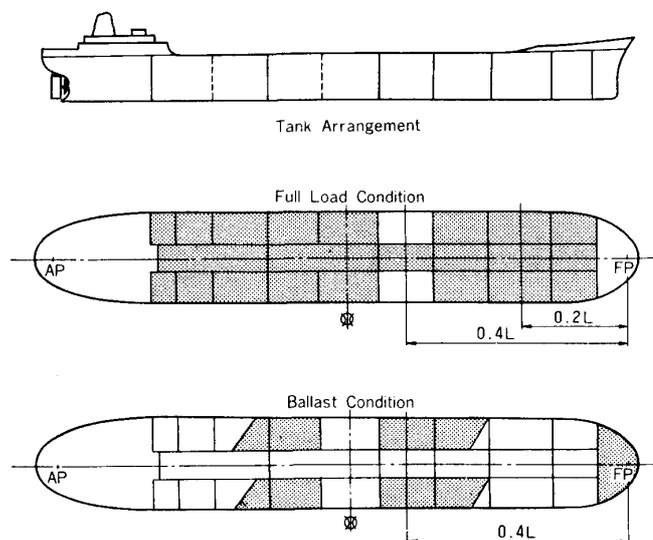


図3 積荷状態及び解析対象位置

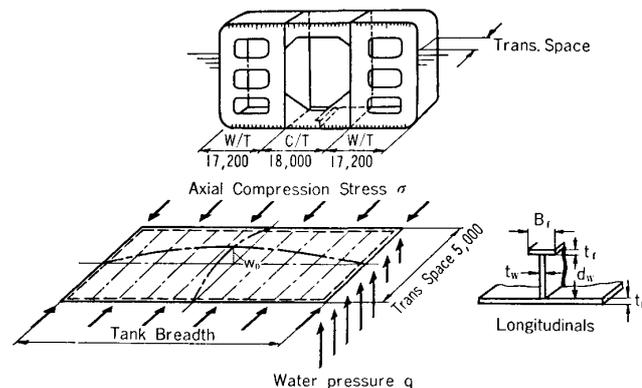


図4 甲板及び船底パネルの構造

(静水中縦曲げ応力  $\sigma_s$  と波浪変動応力  $\sigma_w$  との和) 及び水圧  $q$  (静水圧  $q_s$  と波浪による水圧  $q_w$  との和) を受けて局部降伏する場合を考える。

支持された直交異方性板とみなし、有限変形理論による解析<sup>7)</sup>を行った。

本解析においては、甲板及び船底パネルを周辺で単純

こうして、パネルに生ずる応力  $R$  (軸圧縮応力と付加曲げ応力との和) は、 $\sigma$  及び  $q$  のほかにパネルの初期

表 2 各確率の平均値及び標準偏差とそれらの Demand に及ぼす影響

Variable	Load Cond.	Full Load				Ballast			
		② ①		③ ④		② ①		③ ④	
		①	②	③	④	①	②	③	④
$\sigma$ kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_s$	0.92	0.88	-0.77	-0.77	-5.03	-4.85	4.21	4.24
	$\sigma_{w,ext}$	-12.65	-14.12	-12.43	-9.07	-13.33	-13.39	-10.77	-10.13
	$\bar{\sigma}_{max}$	-12.13	-13.68	-13.59	-10.13	-18.78	-18.65	-6.89	-6.18
	$S_\sigma$	0.88	0.98	0.87	0.63	0.93	0.93	0.75	0.70
	$\partial R/\partial \sigma$	-1.01	-1.01	-1.01	-1.00	-1.01	-1.01	-1.00	-1.01
$q$ m	$q_s$			21.48	-0.34			-16.81	10.25
	$q_{w,ext}$			4.81	3.77			6.12	2.90
	$\bar{q}_{max}$			26.44	3.55			-10.50	13.24
	$S_q$			0.33	0.26			0.43	0.20
	$\partial R/\partial q$			-0.170	-0.170			-0.170	-0.170
$W_o$ mm	$\bar{W}_o$	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
	$S_{W_o}$	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81
	$\partial R/\partial W_o$	$-6.9 \times 10^{-3}$	$-7.9 \times 10^{-2}$	$-2.8 \times 10^{-2}$	$-2.3 \times 10^{-2}$	$-1.1 \times 10^{-1}$	$-1.1 \times 10^{-1}$	$-1.4 \times 10^{-2}$	$-1.2 \times 10^{-2}$
$t_p$ mm	$\bar{t}_p$	33.1	33.1	32.6	32.6	33.1	33.1	32.6	32.6
	$S_{t_p}$	0.48	0.48	0.47	0.47	0.48	0.48	0.47	0.47
	$\partial R/\partial t_p$	$-1.7 \times 10^{-5}$	$-2.6 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-2}$	$-9.2 \times 10^{-5}$	$-4.6 \times 10^{-5}$	$4.2 \times 10^{-2}$	$5.3 \times 10^{-2}$
$d_w$ mm	$\bar{d}_w$	450	450	840	840	450	450	840	840
	$S_{d_w}$	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
	$\partial R/\partial d_w$	$1.8 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$5.8 \times 10^{-3}$	$7.9 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$2.8 \times 10^{-3}$
$t_w$ mm	$\bar{t}_w$	40	40	20	20	40	40	20	20
	$S_{t_w}$	0.58	0.58	0.29	0.29	0.58	0.58	0.29	0.29
	$\partial R/\partial t_w$	$-2.0 \times 10^{-4}$	$-2.1 \times 10^{-4}$	$6.6 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-4}$	$-2.7 \times 10^{-4}$	$-2.7 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$3.3 \times 10^{-3}$
$B_f$ mm	$\bar{B}_f$			200	200			200	200
	$S_{B_f}$			0.59	0.59			0.59	0.59
	$\partial R/\partial B_f$			$1.8 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-3}$			$7.2 \times 10^{-3}$	$9.0 \times 10^{-3}$
$t_f$ mm	$\bar{t}_f$			39	39			39	39
	$S_{t_f}$			0.57	0.57			0.57	0.57
	$\partial R/\partial t_f$			$3.2 \times 10^{-3}$	$4.2 \times 10^{-4}$			$1.2 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3}$
$D$ kg/mm <sup>2</sup>	$\bar{D}$	-12.20	-13.76	-18.14	-10.76	-18.89	-18.77	-8.69	-8.44
	$S_D$	0.90	1.00	0.88	0.64	0.96	0.96	0.76	0.71

たわみ  $w_0$ , 部材寸法等の確率変数の関数となる。

$$R=R(\sigma, q, \text{初期たわみ, 部材寸法}) \quad (7)$$

そこで, 船の就航期間における  $R$  の最大値を Demand と定義し, 一方, 鋼材の降伏応力  $\sigma_y$  を Capability として局所降伏確率  $P_f$  を計算した。

この計算に用いた各々の確率変数 ( $\sigma_{max}$ ,  $q_{max}$  etc.) の平均値, 標準偏差,  $\partial R/\partial x_i$  の値及び Demand の平均, 標準偏差を, 軟鋼を使用した場合について, 一括して表 2 に示す。同表から, 各々の確率変数が Demand の分布に及ぼす影響の大小が分かる。すなわち, 甲板では, Demand の平均及び標準偏差は, 面内圧縮応力のそれらにほぼ等しい。一方, 船底では, 水圧によって大きな付加曲げ応力が発生しているが, 標準偏差は面内圧縮力のそれにほぼ等しい。このように, 初期たわみ及び部材寸法が, Demand の分布に及ぼす影響は極めて小さい。なお, 本計算においては, 初期たわみの方向を, 甲板では縦通材が付いている側に, 船底では水圧によってたわむ方向に仮定した。また, 静水中縦曲げ応力  $\sigma_s$  及び水圧  $q_s$  は, 確定値とみなして本積荷状態における値を使用し, 甲板上の水圧は就航中も 0 と仮定した。

こうして求められた降伏確率  $P_f$  を表 3 に示す。満載

表 3 甲板及び船底パネルの降伏確率

Panel No.	Deck		Bottom		Notes
	①	②	③	④	
Full Load	MS	*	*	$2.3 \times 10^{-6}$	*
	HT	*	*	$1.9 \times 10^{-8}$	*
Ballast	MS	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$	*	*
	HT	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$	*	*

Notes : \* mark means that the failure probability is below  $10^{-4}$

状態において, ウィングタンクの船底パネルに比較的大きな損傷確率が発生しているが, これは, 船底水圧の影響であり, バラスト状態において, 甲板パネルのそれが大きいのは, 静水中縦曲げ応力が大きい圧縮応力となっているためである。

このように, 静水中縦曲げ応力の影響は大きく, またこの応力は船の積荷状態によって多少異なると考えられるので, 一例として, 軟鋼を使用した場合の満載状態について, 静水中縦曲げ応力の値を変化させて降伏確率を計算した。その結果を図 5 に示す。同図から, 静水中縦曲げ応力は, 降伏確率に大きな影響を与えることが分かる。

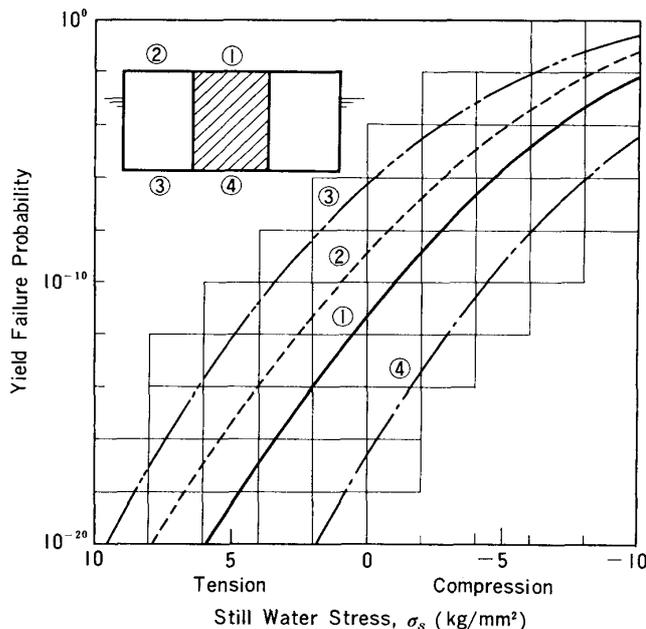


図 5 静水中応力  $\sigma_s$  が甲板及び船底パネルの降伏確率に及ぼす影響

### 3.1.2 縦通材の横倒れ崩壊

図 6 に示すように, 中央部貨物油倉の船底縦通材 (横桁心距  $l$ ) が, 船体縦曲げによる軸圧縮応力  $\sigma$  及び水圧  $q$  を受けて曲げねじれ変形を生じ, 横倒れ崩壊する場合を考える。縦通材の最終耐力モーメント  $M_{ult}$  は, 文献 8) により, 次式で表される。

$$M_{ult}=(\sigma_y-\sigma) \cdot K \cdot Z_p \quad (8)$$

ここで,  $K$  は, 縦通材に軸力が作用しない場合の最終耐力モーメントと塑性モーメントとの比を表す減少係数で, 数値計算プログラムにより求められている。

一方, 水圧  $q$  による外力モーメントは, 縦通材のス

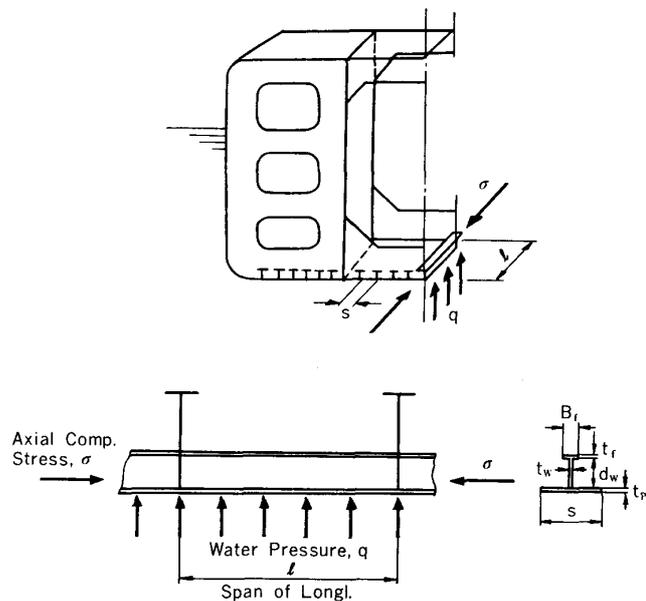


図 6 船底縦通材

パン  $l$  の両端で固定と考えれば、端部で最大となり

$$M = \frac{1}{12} qsl^2 \times 10^{-3} \quad (9)$$

で与えられる。ここに  $s$  は縦通材の間隔とする。また、座屈の相当スパンを  $0.2l$  と仮定する。

そこで、船の就航期間における水圧及び軸圧縮応力の最大値を、それぞれ  $q_{\max}$  及び  $\sigma_{\max}$  として、Demand  $D$  及び Capability  $C$  を次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} D &= \alpha \cdot q_{\max} + \sigma_{\max} \cdot K \\ C &= \sigma_y \cdot K \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ただし  $\alpha = \frac{sl^2}{12 \times 10^3 Z_p}$

いま、水圧  $q$  及び軸圧縮応力  $\sigma$  は、それぞれ静水中のもの  $q_s$  及び  $\sigma_s$ 、並びに波浪によるもの  $q_w$  及び  $\sigma_w$  の和と考え、静水中のものを確定値とみなして、それらの極値分布を平均値  $\bar{q}_{\max}$  及び  $\bar{\sigma}_{\max}$ 、標準偏差  $S_{q_{\max}}$  及び  $S_{\sigma_{\max}}$  の正規分布で近似する。

また、縦通材の横倒れ最終強度減少係数  $K$  は、その相当スパン、部材寸法及び初期たわみ（横たわみ）などをパラメータとして変化するが、これらのうち縦通材ウェブ及びフランジの板厚  $t_w, t_f$  並びに初期たわみ  $u_0$

を、それぞれ正規分布をする確率変数とみなして解析を行う。

すなわち、 $K$  をその平均値  $\bar{K}$ （上記パラメータの平均値に対する値）の回りの一次式で近似展開する。

$$K = \bar{K} \left\{ 1 + \frac{u_0 - \bar{u}_0}{\bar{u}_0} \beta_{u_0} + \frac{t_w - \bar{t}_w}{\bar{t}_w} \beta_{t_w} + \frac{t_f - \bar{t}_f}{\bar{t}_f} \beta_{t_f} \right\} \quad (11)$$

ここに  $\beta_{u_0}, \beta_{t_w}, \beta_{t_f}$  は影響係数で、前記プログラムを用いて、数値計算により求められる。これらの係数を用いれば、 $K$  の標準偏差  $S_K$  は次式で計算される。

$$S_K = \bar{K} \sqrt{\beta_{u_0}^2 \cdot V_{u_0}^2 + \beta_{t_w}^2 \cdot V_{t_w}^2 + \beta_{t_f}^2 \cdot V_{t_f}^2} \quad (12)$$

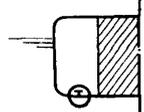
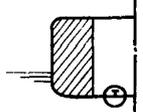
ただし、 $V_{u_0}, V_{t_w}, V_{t_f}$  は、それぞれ初期たわみ、ウェブ板厚及びフランジ板厚の変動係数を示す。

以上の関係から、Demand 及び Capability の平均及び標準偏差は次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{D} &= \alpha \cdot \bar{q}_{\max} + \bar{\sigma}_{\max} \cdot \bar{K} \\ S_D &= \sqrt{\alpha^2 \cdot S_{q_{\max}}^2 + \sigma_{\max}^2 \cdot S_K^2 + \bar{K}^2 \cdot S_{\sigma_{\max}}^2 + S_{\sigma_{\max}}^2 \cdot S_K^2} \\ \bar{C} &= \bar{\sigma}_y \cdot \bar{K} \\ S_C &= \sqrt{\sigma_y^2 \cdot S_K^2 + \bar{K}^2 \cdot S_{\sigma_y}^2 + S_{\sigma_y}^2 \cdot S_K^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

表 4 は、計算に用いた数値及び損傷確率を一括して示

表 4 船底縦通材の横倒れ損傷確率の計算

Load Conditions		Full Load		Ballast	
H.T. 840×200×17.5/30 M.S. 840×200×20/39		H. T.	M. S.	H. T.	M. S.
Influence Coefficient of Random Variables	$\beta_{u_0}$	-0.07			
	$\beta_{t_w}$	-0.20			
	$\beta_{t_f}$	0.30			
Coefficient of Variance of Random Variables	$V_{u_0}$	2.00		Ditto	
	$V_{t_w}$	0.0145			
	$V_{t_f}$	0.0145			
Reduction Factor of Plastic Modulus of Longitudinal	$\bar{K}$	0.8917	0.9548		
	$S_K$	0.1248	0.1337		
Yield Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_y$	37.39	28.86		
	$S_{\sigma_y}$	2.61	2.17		
Capability (kg/mm <sup>2</sup> )	$\bar{C}$	33.34	27.56	33.34	27.56
	$S_C$	5.23	4.39	5.23	4.39
Extreme Value of Water Pressure (m)	$\bar{q}_{\max}$	26.439	26.439	13.24	13.24
	$S_{q_{\max}}$	0.335	0.355	0.202	0.202
Extreme Value of Axial Compression Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_{\max}$	16.440	13.587	7.477	6.179
	$S_{\sigma_{\max}}$	1.047	0.865	0.8512	0.704
Demand (kg/mm <sup>2</sup> )	$\bar{D}$	19.385	16.836	9.033	7.835
	$S_D$	2.258	1.999	1.208	1.069
Failure Probability	$P_f$	$6.95 \times 10^{-3}$	$1.31 \times 10^{-2}$	$3.09 \times 10^{-6}$	$6.35 \times 10^{-6}$
Notes					

す。同表によれば、満載状態の場合、船首から 0.4L のウィングタンク船底縦通材の曲げねじり崩壊の確率は、 $1 \times 10^{-2}$  程度のかかなり高い値となる。

3.1.3 ハルガーダの崩壊 (Jackknifing)

この節では、タンカーのハルガーダとしての縦曲げによる塑性崩壊損傷について解析する。船体縦強度部材からなるハルガーダに、モーメント  $M$  が作用して船体横断面が全塑性状態で崩壊する場合、次式の損傷条件が成立する。

$$M \geq M_p \tag{14}$$

ここに、 $M$  は波浪によるモーメント  $M_w$  と静水中モーメント  $M_s$  との和を表し、 $M_p$  は全塑性モーメントである。

そこで、Capability  $C$  及び Demand  $D$  を次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} C &= M_p \\ &= \sigma_y \cdot Z_p \\ D &= M_{w, \max} + M_s \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

ここに、 $\sigma_y$ : 降伏応力,  $Z_p$ : 塑性断面係数

船体横断面にはモーメントと同時に軸力及びせん断力が働くので、それらによる全塑性モーメントの減少を 1) で扱う。また式 (15) は、全断面が塑性状態になるまで座屈崩壊は発生しないことを前提としているが、座屈が発生した場合の塑性モーメントに及ぼす影響を 2) で検討する。

1) 軸力及びせん断力の影響

軸力が塑性曲げモーメントに及ぼす影響は、次式で表される。<sup>9)</sup>

$$M_p(P) / (\sigma_y \cdot Z_p) = 1 - \alpha (P/P_y)^2 \tag{16}$$

ここに、 $P$ : 軸力,  $M_p(P)$ : 軸力  $P$  が働いているときの全塑性モーメント,  $P_y$ : 全塑性軸力,  $\alpha$ : 断面形状による係数

本船の例では、 $\alpha$  は 2.0 程度であり、軸力の  $10^{-8}$  特性値は、 $2.0 \text{ kg/mm}^2$  程度であるので、塑性曲げモーメントは約 1% 減少するに過ぎない。したがって、軸力影響は無視できるといえる。せん断力による塑性曲げモーメントの減少に及ぼす影響も、同様な理由で無視できる。

2) 座屈の影響

甲板あるいは船底が降伏する前に座屈崩壊する場合、式 (15) を修正した次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} C &= k \cdot \sigma_y \cdot Z_p \\ k &= Z_p' / Z_p \end{aligned} \right\} \tag{17}$$

ここに  $Z_p'$  は、甲板あるいは船底部分の座屈崩壊による有効断面積の減少を考慮して算出した塑性断面係数である。このとき、船側外板及び縦通隔壁の圧縮応力が作用

する部分についても、その有効面積の減少を考慮した<sup>10)</sup>。

船底座屈崩壊時の平均応力は次のようにして求めた。すなわち、船側と縦通隔壁間の船底パネルの座屈崩壊(縦通材の横倒れを考慮せず)及び船底縦通材の横倒れ崩壊の二つの崩壊形式について、有限要素法による弾塑性最終強度解析を行った結果、後者の崩壊が先行することが判明した。そこで、縦通材横倒れ崩壊時における軸力の値から船底部の座屈崩壊に対する有効断面積を算定した。

甲板パネルに関しても同様の解析を行った結果、本船の場合は、降伏荷重に達するまで座屈崩壊することはなく、甲板については全断面積を有効とみなした。

これらの結果を用いて、ハルガーダの崩壊確率を求め

表 5 ハルガーダの縦曲げモーメントの平均値及び標準偏差

Variables	Load Cond.	
	Full (kg·mm)	Ballast (kg·mm)
Still Water Moment $M_s$	$7.37 \times 10^{10}$	$-4.02 \times 10^{11}$
Characteristic Wave Moment $M_{ext}$	$8.88 \times 10^{11}$	$1.01 \times 10^{12}$
Max. Hogging Moment $\bar{D}_h$ $S_{Dh}$	$9.89 \times 10^{11}$	$6.02 \times 10^{11}$
	$6.18 \times 10^{10}$	$7.02 \times 10^{10}$
Max. Sagging Moment $D_s$ $S_{Ds}$	$-8.42 \times 10^{11}$	$-1.44 \times 10^{12}$
	$6.18 \times 10^{10}$	$7.02 \times 10^{10}$

Notes: (—) Sign means Sagging moment

表 6 ハルガーダの Capability の平均値及び標準偏差

Variables	MS	HT
Yield Stress (kg/mm <sup>2</sup> ) $\bar{\sigma}_y$ $S_{\sigma_y}$	28.86	37.39
	2.17	2.61
Plastic Section Modulus (mm <sup>3</sup> ) $Z_p$	$9.85 \times 10^{10}$	$7.83 \times 10^{10}$
Ultimate Stress of Bottom Panel (kg/mm <sup>2</sup> ) $\sigma_u$	20.3	27.2
Reduction Factor $k$	0.822	0.847
Ultimate Hogging Moment (kg·mm) $\bar{C}_h$ $S_{Ch}$	$2.33 \times 10^{12}$	$2.48 \times 10^{12}$
	$1.76 \times 10^{11}$	$1.73 \times 10^{11}$
Ultimate Sagging Moment (kg·mm) $\bar{C}_s$ $S_{Cs}$	$2.84 \times 10^{12}$	$2.93 \times 10^{12}$
	$2.14 \times 10^{11}$	$2.04 \times 10^{11}$

表 7 ハルガーダの Jackknifing 崩壊確率

Load Cond. / Collapse Mode	Full Full		Ballast	
	MS	HT	MS	HT
Hogging (Buckling Excluded)	$4.4 \times 10^{-17}$	$5.0 \times 10^{-20}$	*	*
Hogging (Buckling Included)	$2.4 \times 10^{-13}$	$2.2 \times 10^{-16}$	$2.4 \times 10^{-20}$	*
Sagging	$1.2 \times 10^{-19}$	*	$2.7 \times 10^{-10}$	$4.0 \times 10^{-11}$

た。それらの結果を表 5～表 7 に示す。表 7 において \* 印は、崩壊確率が  $10^{-20}$  以下であることを示す。

なお、この損傷確率計算の際、波浪によるモーメントと降伏応力を確率変数とし、静水中モーメント及び塑性断面係数は確定値とみなした。

表 7 に示されたとおり、ハルガーダの崩壊確率は、甲板及び船底の降伏確率並びに縦通材の横倒れ崩壊確率と比べて小さい。このうち、バラスト状態においては、静水中モーメント（サギング）が大きいいため、崩壊確率が大きく、一方、満載状態では、静水中においてホギングモーメントが大きく、崩壊確率が大きくなっている。

静水中モーメントに関しては、その統計資料が少ないため、本解析においてはその値を確定値としたが、静水中モーメントは載荷状態により変化するものであり、また、崩壊確率に及ぼす影響が大きいので、確率変数として取り扱う必要があると思われる。更に、本計算結果からも明らかのように、船底パネルの座屈崩壊による強度低下を無視すると、崩壊確率を著しく安全側に見積もることになるので注意を要する。

### 3.2 横強度（トランスリング）

横強度部材についての信頼性解析の適用例として、トランスリングを対象とし、桁の面材の降伏、桁の座屈による局部崩壊、トランスリングの塑性崩壊の 3 通りの損傷モードについて、計算を行った。

#### 3.2.1 桁の面材の降伏

タンカーの横強度に関する信頼性を定量的に検討するために、貨物油倉トランスリングの立桁、横桁及びストラット等の面材の降伏損傷の確率を計算した。

すなわち、面材に生ずる応力の最大値を Demand とし、一方、鋼材の降伏応力  $\sigma_y$ 、面材の幅  $B_f$  及び板厚  $t_f$  をそれぞれ確率変数とみなして Capability を  $\sigma_y \times (B_f/\bar{B}_f) \times (t_f/\bar{t}_f)$  と定め、平均値  $28.86 \text{ kg/mm}^2$ 、標準偏差  $2.21 \text{ kg/mm}^2$  として降伏損傷確率を求めた。その計算結果を図 7 (a)～(c) に示す。なお、本計算においては表 8 に示すように、桁の湾曲部における面材の有効幅

は一般に低下するので<sup>11)</sup>、面材の幅の中央部で応力が上昇することも考慮した。

損傷確率は、ガネル部及び上下ストラット基部（図 7 (a)）、ガネル部、上下ストラット基部及びウィングタンクの船底横桁三差部（図 7 (b)）、ガネル部及び上部ストラット基部（図 7 (c)）でそれぞれ高い値となっている。特に、ストラット基部では、面材有効率がかなり低いため、損傷確率が高くなっていると考えられる。

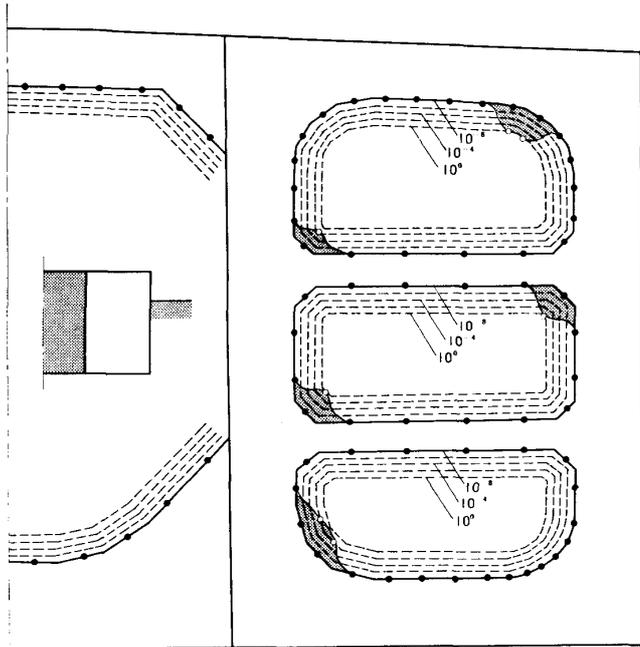
また、図 8 に静水中応力及び波浪変動応力の特性極値をパラメータとした、降伏損傷確率の計算図表を示す。

#### 3.2.2 桁の座屈による局部崩壊

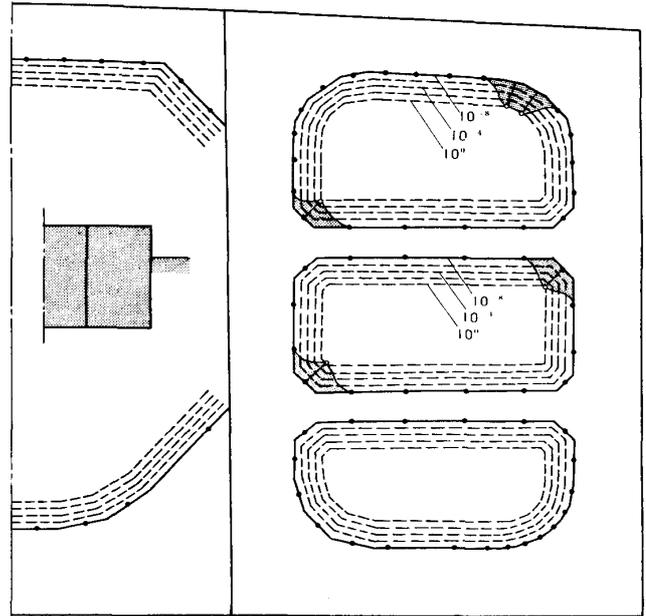
横強度上の損傷モードとして、トランスリングの桁部材について、防撓材を含んだウェブパネルの局部崩壊を考察する。

このような局部強度についての解析を行う場合には、トランスリングの各部分構造に対して、まずその座屈強度（固有値及び座屈モード）を把握して、崩壊強度の解析を行うべき構造部材を抽出するのが効率のよい方法であるが、実船の構造について、その種の解析を行った例は少なく、資料 12) を引用する。同資料では、今回信頼性解析を行った対象船とほぼ同寸法を有するタンカーのトランスリングについて、弾性座屈値及び座屈モードが得られており、その座屈モードの凹凸が図 9 に実線及び破線で表されている。座屈は比較的高応力の発生するパネルの部分にみられるが、これらの座屈限界値は、それぞれの場所によってもちろん異なる。それらの中で比較的低い値を示す個所の一例として、ウィングタンクの船底三差部を選び、その部分の局部崩壊について考察を行うこととする。

すなわち、同図の円内に示される部分について、有限要素法による最終強度解析<sup>13), 14)</sup>を行って、局部崩壊強度を求めた。最終崩壊時のモードは、同図中に示されたような防撓材を含んだせん断座屈波形となる。最終崩壊荷重と降伏応力、板厚及び初期たわみの関係を、矩形板に関する資料<sup>15)</sup>から引用して近似的に求め、これらのパラ

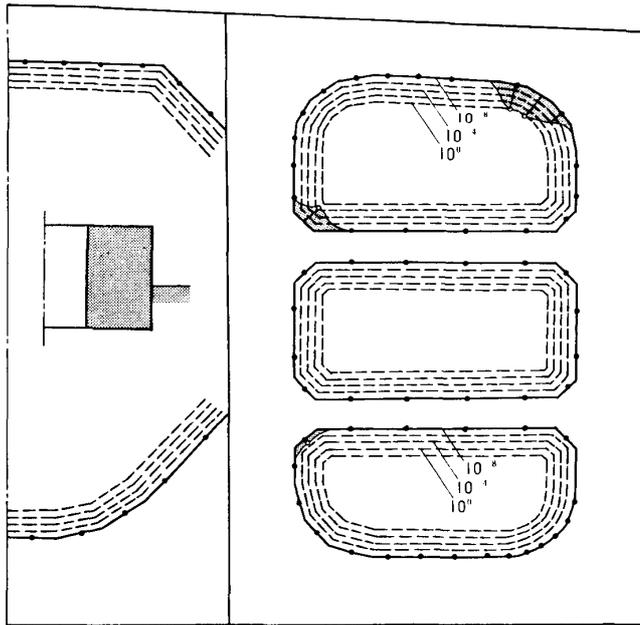


(a) 満載状態 (船首から 0.4L)



(c) 満載状態 (船首から 0.2L)

図 7-2



(b) バラスト状態 (船首から 0.4L)

図 7-1 トランスリングの面材の降伏損傷確率

表 8 面材の有効幅

	Effective Ratio	
①	0.630	
②	0.734	
③	0.630	
④	0.770	
⑤	0.410	

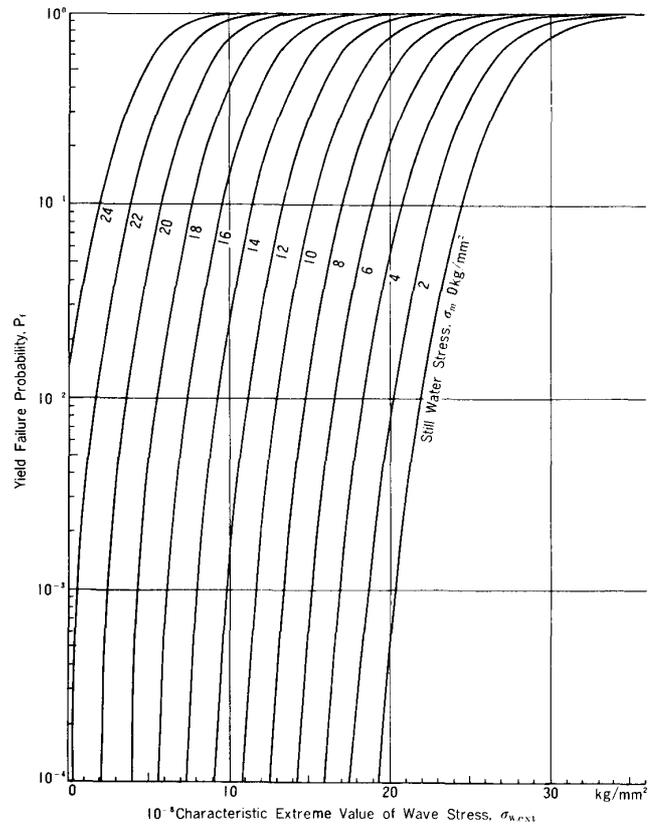


図 8 降伏損傷確率

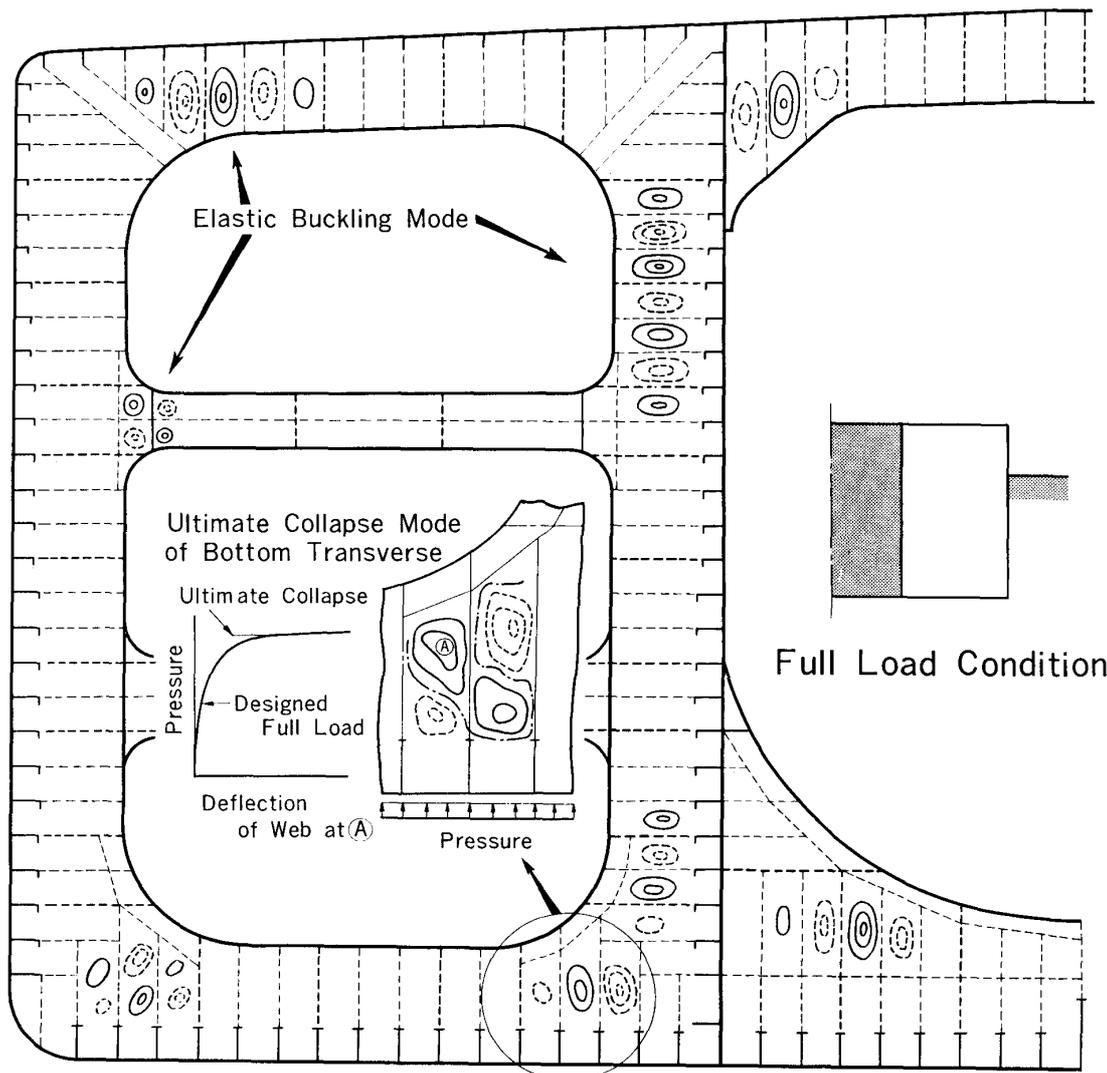


図9 トランスリングの桁材の弾性座屈モード及び船底三差部の局部崩壊解析結果

メータを確率変数として損傷確率を計算した。この際、降伏応力及び板厚の平均値及び標準偏差の値は前述の文献から引用し、初期たわみに関しては文献16)で与えられた平均値  $w_0/t=0.059$  及び標準偏差  $S_{w_0/t}=0.047$  を仮定して損傷確率を計算すると、 $P_f=1.5 \times 10^{-16}$  となった。しかし、この初期たわみの平均値及び標準偏差の値は、甲板パネルのような比較的厚い板についての初期たわみ分布から得られたものであり、桁のウェブのように板厚が薄い場合には、それぞれの値が大きくなることが考えられる。そこで、初期たわみの平均値と標準偏差の値を、それぞれ、文献の値の2倍と仮定すると損傷確率は  $1 \times 10^{-5}$ 、更に3倍と仮定すれば  $5 \times 10^{-3}$  と飛躍的に大きくなる。この計算例から明らかのように、桁の最終崩壊確率は、初期たわみの量によりかなり変化し、工作精度の及ぼす影響が極めて大きいことが判明した。

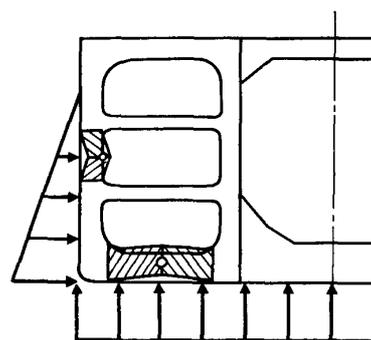


図10 トランスリング塑性崩壊形式

### 3.2.3 トランスリングの塑性崩壊

図10に示すように、トランスリングの船側立桁あるいは船底横桁が、塑性崩壊する損傷の確率を計算する。この場合損傷桁部材は、端部のコーナ部のウェブが既に前節で述べたようなせん断座屈を起こし、塑性関節を形成しているとみなして両端支持と仮定した。

桁部材に作用する水圧  $q$  は、静水圧と波浪変動圧との和で表され、損傷は船の就航期間中における水圧の最大値に支配されるから、水圧の最大値  $q_{max}$  を Demand とした。一方、トランスリングの塑性崩壊メカニズムに対して算出される桁の崩壊水圧  $q_c$  は、部材の降伏応力  $\sigma_y$ 、塑性断面係数  $Z_p$  及び桁のスパン  $l$  の関数で与えられ、降伏応力及び部材板厚を確率変数として解析を行った。

ここで、図 11 に示されるような板付き桁部材及びストラットの塑性断面係数  $Z_p$  は、近似的に次式で与えられる<sup>17)</sup>。

$$Z_p = a_1 t_w + a_2 t_f + a_3 \quad (18)$$

ここで、 $a_1, a_2, a_3$  は、表 9 に示される確定値  
トランスリングの塑性崩壊は

$$q_{max} \geq q_c \quad (19)$$

において発生する。

表 10 は、船体中央断面における各種塑性崩壊モードの代表例について行った損傷確率計算の結果を示す。本

表 9  $a_1, a_2$  及び  $a_3$  の値

	Girder	Strut
$a_1$	$h_w^2/2$	$h_w^2/4$
$a_2$	$B_f h_w$	$(B_f - t_w)(h_w - t_f)$
$a_3$	$(1 + 2\eta - \eta^2) \cdot B_{pt}^2 t_p / 4$ $\eta = (A_f + A_w) / A_p$	0

表 10 トランスリングの塑性崩壊損傷確率

Collapse Mode	Failure Probability	
	Full Load	Ballast
A	*	*
B	*	*
C	*	*
D	$7.6 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-3}$
E	*	$3.8 \times 10^{-6}$
F	$9.5 \times 10^{-1}$	1.0

Notes: \* mark means that the failure probability is below  $10^{-4}$

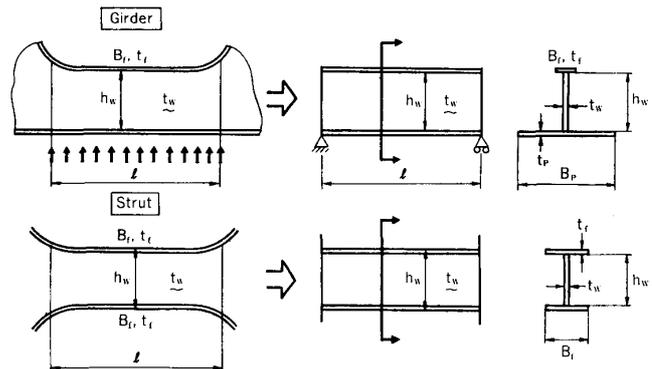


図 11 トランスリングの桁材

計算結果によれば船側あるいは船底における単一桁部材としての崩壊の確率は極めて小さいが、崩壊モード D の例のように、ウィングタンク全体のフレームメカニズム形式の崩壊確率はやや大きい（ただし、本計算では、船側外板及び横隔壁の支持効果を見逃している）。また、崩壊モード F のように、ストラットが既に有効に働かなくなった場合には、船側立桁の塑性崩壊確率ははなはだしく大きくなる。

なお、本解析においては、桁部材中央のウェブの局部座屈あるいは、面材ごとの横倒れ座屈などの影響は考慮されておらず、部材の Capability をかなり大きめに推定しているため、損傷確率の値は過小に算出されていることに注意すべきであろう。

#### 4. 結 論

上述のように、Walden の北大西洋波浪観測データを使用し、タンカーが 20 年間の就航期間中に  $10^8$  回の波浪変動に遭遇すると仮定して行ったタンカーの各種損傷確率の計算結果から、大要、下記の結論が得られた。

縦強度のうち、甲板及び船底の降伏及びハルガーダの崩壊の損傷確率は比較的小さいが、船底縦通材の横倒れ崩壊確率はかなり大きい。一方、横強度については、横桁端部及びストラット基部などの面材の降伏損傷確率は、局部的ではあるが、かなり大きい部分が見られる。また、トランスリングについては、ウェブの初期たわみが大きい場合、局部崩壊に対する損傷確率が比較的大きくなる。また、ストラットの座屈後、その有効性を失った場合は、桁の崩壊強度が著しく低下するために損傷確率が極めて大きいことが判明した。

今回の解析においては、Demand 及び Capability の確率分布をすべて正規分布と仮定したことによる誤差、応答の極値分布を推定するうえでの長期波浪データの不十分さ（船の就航年限に比べて波浪観測期間の長さ）などの問題点については触れなかった。

更に、積荷による応力の影響も重要と考えられ、載荷状態のひん度分布及び就航海域ごとの運航条件などについての調査資料も不十分であり、本研究で得られた損傷確率の絶対値には、まだ十二分の検討の余地がある。

また、信頼性解析に今回考慮していない問題、例えば、一つの損傷が他の損傷に影響を及ぼすこと、波浪衝撃荷重、振動、Whipping、熱応力、不完全工作、衰耗等の影響については、今後の研究と調査にまつところが大きい。

最後に、本研究に当たり、終始、有益な討論と助言をいただいた秋田好雄副会長はじめ、当会の Design Procedure 研究委員会の各位、コンピュータ室及び技術研究所の関係各位に厚くお礼申し上げる。

### 参 考 文 献

- 1) 秋田好雄, 山口勇男, 新田 顕, 荒井宏範: “信頼性解析に基づく船体構造設計について” 日本造船学会論文集 No. 140 (昭. 51-12)
- 2) Akira Nitta: “Reliability Analysis on the Fatigue Strength of Ship Structures” 日本海事協会誌 155 号 (昭. 51-4) p. 33
- 3) 秋田好雄, 枅田吉郎, 山口勇男, 田代新吉, 新田 顕, 日高正孝, 筒井康治, 湯浅通史, 日笠則明, 津村道夫: “船体縦強度に関するトータルシステム” 日本造船学会論文集 No. 135 (昭. 49-6)
- 4) 秋田好雄, 山口勇男, 田代新吉, 新田 顕, 日高正孝, 筒井康治, 湯浅通史, 日笠則明: “船体横強度のトータルシステムについて” 日本造船学会論文集 No. 139 (昭. 51-6)
- 5) E. J. Gumbel: “Statistics of Extremes” Columbia University Press, New York (1951)
- 6) “船体構造部材の許容応力に関する研究” 日本造船研究協会第 134 研究部会報告書, 研究資料 No. 237 (昭. 51-3)
- 7) A. Mansour: “Post-Buckling Behavior of Stiffened Plates with Initial Curvature under Combined Load” International Shipbuilding Progress, Vol. 18, No. 202 (1971)
- 8) A. Nitta: “Ultimate Strength of Structures (3rd Report)” Selected Papers from the Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 10 (1972)
- 9) 木原博監修: “塑性設計法” 森北出版社 (昭. 36-8)
- 10) J. B. Caldwell: “Ultimate Longitudinal Strength” Trans. RINA, Vol. 107 (1965)
- 11) 新田 顕, 湯浅通史: “湾曲部における桁の面材の有効幅” 日本造船学会誌 No. 553 (July, 1975)
- 12) “塑性設計資料 (その六)”, “板構造物の座屈と最終強度” 日本溶接協会塑性設計研究委員会板構造小委員会 (昭. 51-11)
- 13) 荒井宏範: “板構造の大変形解析 (その 1)” 日本造船学会論文集 No. 134 (昭. 48-12)
- 14) 藤田 讓, 吉田宏一郎, 高沢 誠: “不整量を有する構造物の強度について (その 2)” 日本造船学会論文集 No. 137 (昭. 50-6)
- 15) 大坪英臣: “平板の弾塑性大たわみ問題の一解法” 日本造船学会論文集 No. 130 (昭. 46-12)
- 16) “船殻部材歪量の船体強度に及ぼす影響に関する研究” 日本造船研究協会第 127 部会報告書, 研究資料 No. 212 (昭. 50-3)
- 17) “塑性設計資料集 (その一)”, “形鋼および板付形鋼の塑性断面係数” 日本溶接協会塑性設計研究委員会軸力小委員会 (昭. 37-12)