

乾貨物船の損傷時復原性計算プログラムについて

関根 隆*・木村 敏通*・田中 清隆*・酒田伸一郎**

1. まえがき

1992年2月1日より建造される船の長さ L_s (従来の船の長さのとり方と異なる) が 100 m 以上の国際航海に従事する乾貨物船については、SOLAS による損傷時復原性要件として、浸水計算が要求される。この要件は、本年(1990年)9月に開催された IMO の第58回 MSC において採択された Resolution MSC.19(58)で、1974年 SOLAS の改正として第Ⅱ-1章B部「区画及び復原性」に、規則25-1から25-10として新たに取入れられることになっている。以下、“(本)規則”と称する。

SOLAS は船の種類について、旅客船と貨物船に大別し、次に貨物船の中にタンカーを定義しているが、乾貨物船という定義は見当たらない。本規則では最初に適用対象船を明確にしている。すなわち、本規則適用船は次に掲げる条約又は IMO コード等を適用した船以外の貨物船である。本稿では、本規則適用対象船を乾貨物船と呼ぶことにする。

- (1) MARPOL 73/78 付属書 1.
- (2) IBC, IGC, BCH, GC の各種 IMO コード
- (3) Offshore Supply Vessels の設計及び構造のための指針 (IMO Resolution A.469 (XII))
- (4) 特殊目的船コード
(IMO Resolution A.534 (13))
- (5) 1966年国際満載喫水線条約の第27規則適用のB-60/B-100の乾舷を適用のバルクキャリアー

以上のように、乾貨物船が初めて浸水計算の対象となったわけであるが、本規則は技術面において従来のものと大きな違いがあるといえる。それは損傷時の復原性の評価に関し、Resolution A.265 (VIII) (60 SOLAS の第2章B部の同等物としての旅客船の区画及び復原性に関する規則)と同様に確率論的手法を採用した点にある。従来の浸水計算(上述(1)~(5))は決定論的手法によるも

のであった。

本稿では、IMO Res. MSC.19 (58) 及び Explanatory Notes SLF 33/12, SLF 34/WP.9 に基づき確率論的手法による浸水計算の概要を説明し、船体部で開発した損傷時復原性計算プログラム“DS KARGO”を紹介する。

2. 決定論と確率論的手法による浸水計算

浸水計算とは、船のある区画に破口が生じ海水が侵入した場合、船が転覆/沈没してしまうのか、あるいは、浸水後もある復原力をもつ平衡状態が存在するのかを計算することである。平衡状態とは、浸水後の船の重力と浮力が釣り合っている状態をいい、船の重力と浮力の大きさが等しく、かつ二つの力が同一鉛直線上に正反対の方向に働くことである。浸水計算には浮力消失法と重量附加法の二つの方法があり、計算の結果得られる平衡状態は、どちらの方法でも同じになるが、浸水開始から平衡状態に至る途中の状態は重量附加法によってのみ計算されることは周知のとおりである。

以上に述べた浸水計算は、決定論、確率論の両手法とも同様に実行され、両手法とも差異はない。決定論的手法とは、規則によって、1区画又は2区画浸水の計算を行い、全ての浸水計算のケースが規則に定める基準の復原力以上の平衡状態を有するかどうかを判定するものである。前章に述べた(1)~(5)の規則で要求される浸水計算は、全て決定論的手法によるものである。

これに対し、確率論的手法による浸水計算の概念は、

- (1) 損傷統計を基に、船のある位置における区画の浸水する確率(破口が発生する確率)を与える。
- (2) 損傷した区画の浸水計算の結果を、基準の復原力以上の平衡状態が得られた場合を1、復原力がそれより小さい場合は1より小さくなり、転覆/沈没をもって0とすることにより、浸水区画に対する生存確率を与える。
- (3) (1)と(2)の積を、船の全長にわたり積分することにより、船全体の生存確率を算出する。

そして、船全体の生存確率が規則要求値を満たす必要がある。

* 船体部

** コンピュータ室

したがって、決定論的手法による浸水計算の規則は、一つの区画でも転覆／沈没してはならないが、確率論的手法による浸水計算の規則では、ある区画において転覆／沈没という計算結果であっても、船全体としての生存確率が基準以上であればよい。

決定論的手法による浸水計算において、1区画浸水のみを要求する規定に合格しても、例えば、横置隔壁を越えて破口が発生した場合、この船は沈没するかも知れないという危惧が残る。2区画浸水の要求規定に合格していても同様の危惧がある。この点について、確率論的手法による浸水計算の規則では、浸水後の生存確率を0から1の間の数値で示すことにより、定性的な危惧を定量的に扱えるという利点がある。

3. 確率論的手法による浸水計算

確率論的手法による浸水計算を取り入れた本規則 (Res. MSC.19(58)) では、最終的に船全体の生存確率 **A** (到達区画指数) を求め、これが要求区画指数 **R** 未満であってはならないとしている。本章では、この最終判定に至るまでの経過を追って、規則の主旨及び規則中の算式の根拠を説明する。

確率論的手法による浸水計算の手順を次に示す。

- (1) 船の損傷前の状態として、夏期満載喫水 d_F の状態と、夏期満載喫水と軽荷喫水の差の60%に軽荷喫水を加えた部分積載喫水 d_P の状態を設定する。
- (2) 各区画の縦通隔壁の影響 r を考慮した浸水確率 P_i を算出する。水平隔壁があれば、 d_F 、 d_P それぞれに対応する水平隔壁の影響 v を考慮する。(3.1にて説明)
- (3) d_F 、 d_P それぞれの喫水に対応する各区画の浸水計算を行い、それぞれの生存確率 s_i を算出する。 s_i は各区画の浸水が想定される全てのタンク等の組合について浸水計算し、その結果得られる最小のものとする。(3.2.1にて説明)
- (4) d_F 、 d_P それぞれに対応する $1/2 \times \sum P_i \cdot s_i$ を計算し、それらを合計したものが船全体の生存確率 **A** であり、規則では到達区画指数 (Attained subdivision index) と称する。(3.2.2にて説明)
- (5) 規則にある要求区画指数 (Required subdivision index) **R** と **A** を比較し、 $A \geq R$ でなければならない。

3.1 区画の浸水確率 P_i

衝突により破口が船体に生じた場合、浸水する区画は、破口の船の長さ方向における位置と大きさによって決まる。破口の大きさは図1のように船の長さ方向にお

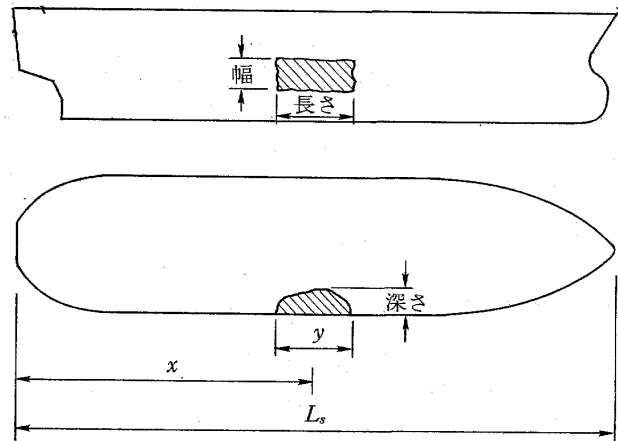


図1 破口の大きさ

ける“長さ”，船の垂直方向における“幅”，並びに船の幅方向における“深さ”で表される。破口の船の長さ方向における位置，長さ，幅，深さに関する損傷資料を数多く収集し，これを統計処理することにより，船体のある位置におけるある大きさをもつ破口の発生確率が表される。本節では，ある位置におけるある長さをもった破口が発生する確率を表す式を導く。次に破口の深さ，幅に関する影響を確率的に評価し，船体のある区画が浸水した場合，その区画が浸水するのは船全体に対してどの程度の確率になるかを解説する。

3.1.1 特性三角形

破口の大きさを表す量のうち，ここでは破口の長さだけを考慮し，破口の深さ，幅を無視する。すなわち，縦通隔壁，水平隔壁のない，横置隔壁だけで仕切られた簡単な船を想定する。図2は，船の長さ L_s を底辺及び高さとする二等辺三角形で，その中に，横置隔壁で仕切られた各区画及び2区画，3区画等と合成された各区画の長さを底辺，高さとする二等辺三角形が描かれており，これらを特性三角形と呼ぶ。

図のように，破口の長さを y とし，船尾から破口の長さの中央までの距離を x とすると，3番目の区画において長さ y をもつ破口は，三角形3の○印の位置に示され，また区画の長さ l_3 と同じ長さの破口は，三角形3の頂点の位置に示される。すなわち，この三角形3は，3番目の区画において発生しうる破口の長さが0から l_3 までの全ての損傷を表している。同様に，平行四辺形234については，234の区画において，破口の長さが3つの区画にまたがる l_3 から $l_2+l_3+l_4$ までの全ての損傷を表している。このように，図に示された三角形，平行四辺形によって，各区画における全ての予想される損傷が表示される。

3.1.2 破口の長さや船の長さ方向の位置の考察

船の長さ方向のある位置で、ある長さをもつ破口の発生確率は損傷統計を解析することにより得られる。規則

にある浸水確率 P_i の算式決定の根拠/過程を説明する。尚、本節において使用される符号を次のように整理しておく。

L : 船の長さ (規則に示される L_s)

y : 破口の長さ

x : 船尾から破口の中央までの距離

y/L : 船の長さに対する破口の長さの無次元量 (無次元損傷長さと呼ぶ)

x/L : 船の長さに対する船尾から破口の中央までの距離の無次元量 (無次元損傷位置と呼ぶ)

J : 船の長さに対するある区画の長さの無次元量

$J_{\max}$: 船の長さに対する規則で定める最大破口の長さの無次元量

x_1 : 船尾から当該区画の後端までの距離

x_2 : 船尾から当該区画の前端までの距離

(1) 破口の長さの分布

296 隻の破口の長さの統計を解析しており、図 3 は無次元損傷長さの分布関数、図 4 は無次元損傷長さの密度分布を表している。中心極限定理によると、無次元損傷長さ y/L は対数正規分布となる。

図 5 は $L \leq 200\text{m}$ の船における、 L に対する y/L の回帰を表している。回帰線は多少とも右下がりの傾向にあるが、微少なため回帰線を水平と見なす。言い換えれば、発生する無次元損傷長さは船の大きさに依存しないと想定している。 $L \leq 200\text{m}$ の船については、図 4 の無次元損傷長さの密度分布で表されていることになる。ま

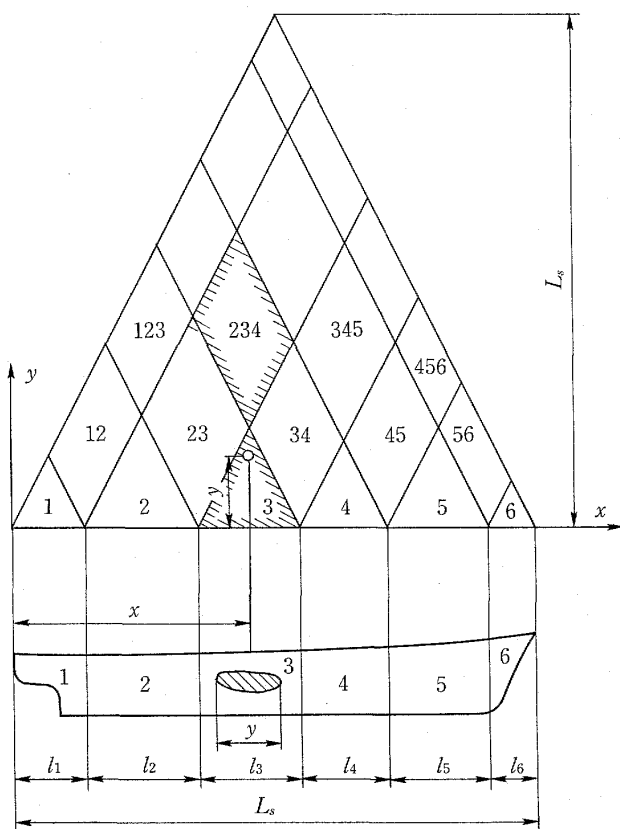


図 2 特性三角形

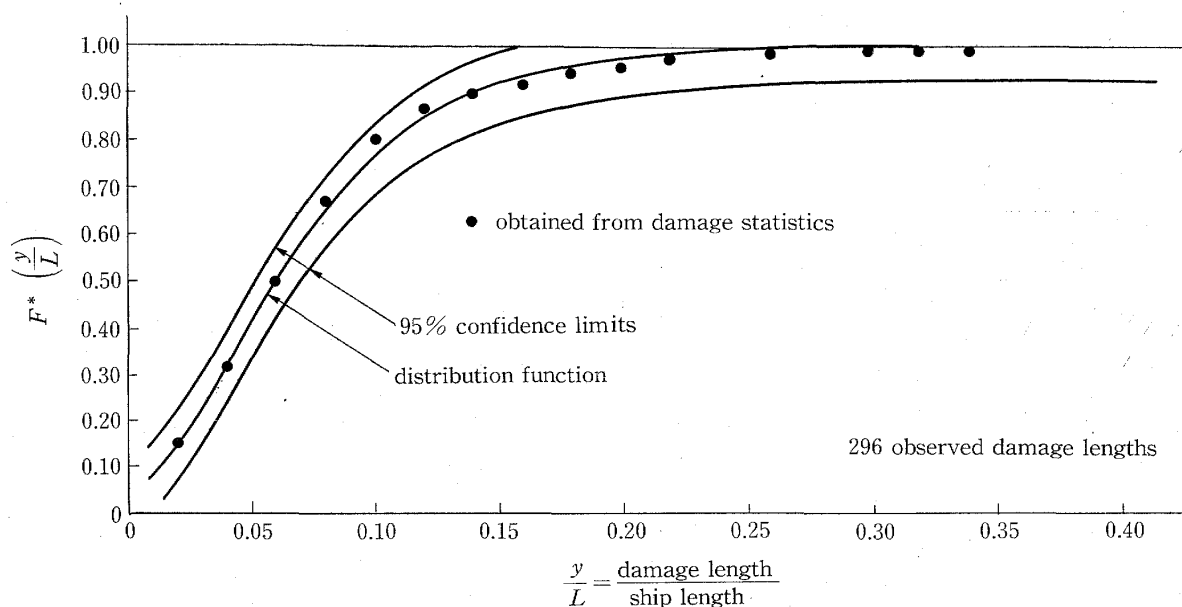


図 3 Distribution function of non-dimensional damage length

た、図6で x/L に対する y/L の回帰が示されているが、回帰線を水平と見なし、 x/L と y/L は互いに独立であると想定している。

$L \leq 200\text{m}$ の船において、図4の無次元損傷長さ y/L の密度分布曲線を、面積が等しくなるように図中破線で示す直線で置換え、確率密度関数の簡略化を行う。

$L > 200\text{m}$ の船についても同様である。いま、規則に

あるように、船の長さに対する最大破口長さの無次元量 $J_{\max}$ は、 $L \leq 200\text{m}$ の船で 0.24, $L > 200\text{m}$ の船で $48/L_s$ とする。これにより、確率密度関数は次式で表され、平面として扱うことができる。

$$f(x, y) = C \left(1 - \frac{y}{J_{\max}} \right) \quad \dots\dots(1)$$

3.1.1で述べた特性三角形を底面とすることにより、

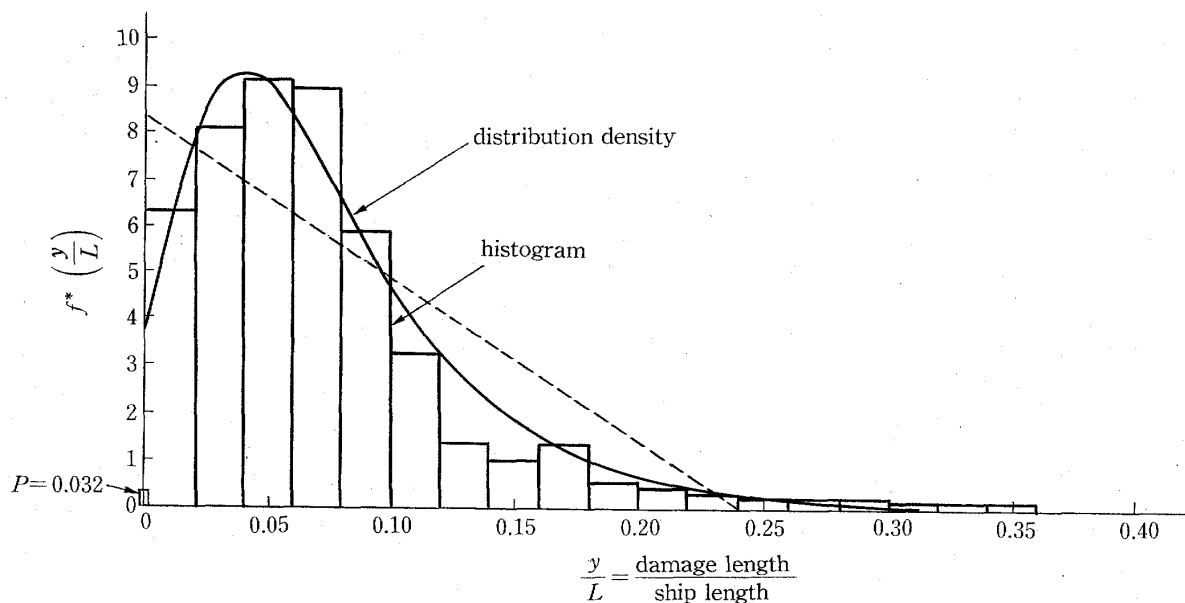


図4 Distribution density of non-dimensional damage length

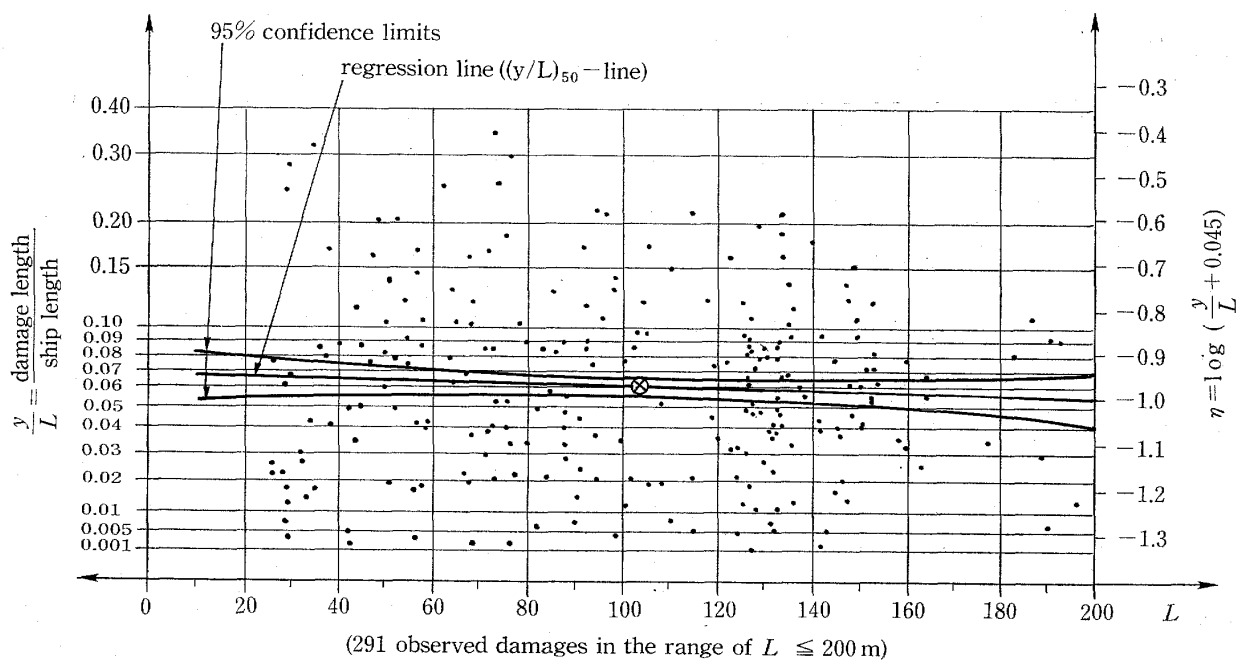


図5 Regression of non-dimensional damage length on ship length

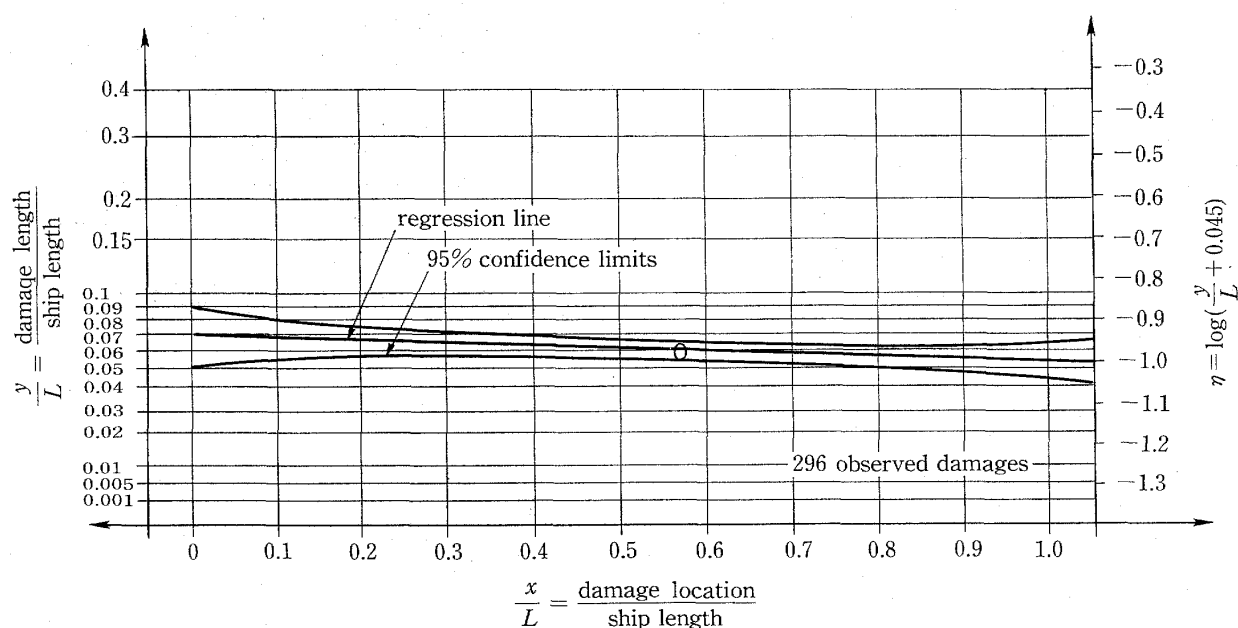


図6 Regression of non-dimensional damage length on non-dimensional damage location

$f(x, y)$ は C を 1 とした場合, 図7のように描かれる。
 $x-y$ 面と $f(x, y)$ の面で囲まれた体積は, 予想される
 全ての破口発生確率(浸水確率)を示すので 1 である。

$$\iint G C \left(1 - \frac{y}{J_{\max}}\right) dx dy = 1 \quad \text{.....(2)}$$

これにより,

$$C = \frac{6}{J_{\max} \cdot (3 - J_{\max})} \quad \text{.....(3)}$$

ある区画の中で全ての長さの破口の発生する確率(ある
 区画の浸水確率)は

$$P_i = \iint G_i C \left(1 - \frac{y}{J_{\max}}\right) dx dy \quad \text{.....(4)}$$

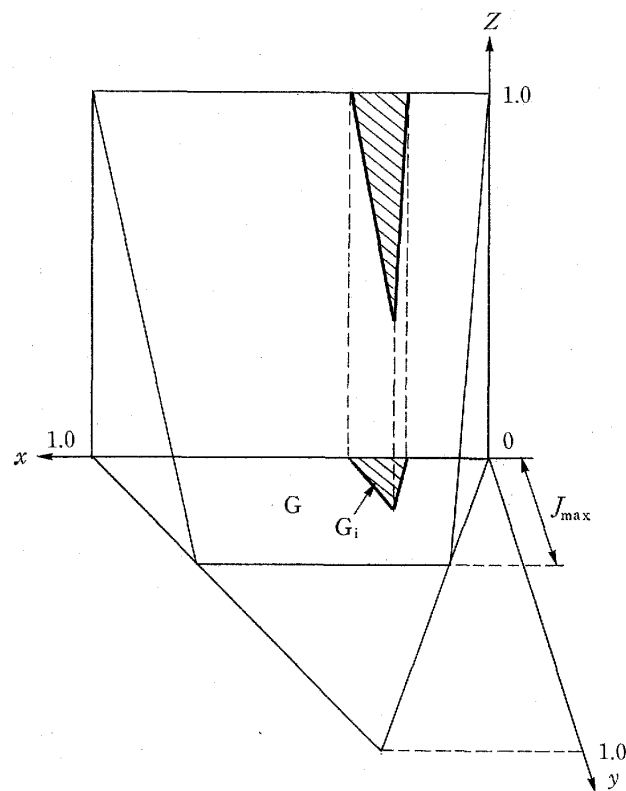
で与えられ, 区画の長さを J とすると, 次式が求まる。

$$P_i = \frac{C}{2} \left(J^2 - \frac{J^3}{3J_{\max}} \right) \quad J \leq J_{\max} \text{ のとき} \quad \text{.....(5)}$$

$$P_i = \frac{C}{2} J_{\max} \left(J - \frac{1}{3} J_{\max} \right) \quad J > J_{\max} \text{ のとき} \quad \text{.....(6)}$$

ここで, $J/J_{\max} = y$ とおき整理すると, (5), (6) 式は次のようになる。(ここでの y は, 前述の符号の定義にある「破口の長さ」ではないことに注意。)

$$P_i = \frac{3}{3 - J_{\max}} J_{\max} \left(y^2 - \frac{y^3}{3} \right) \quad y \leq 1 \text{ のとき} \quad \text{.....(7)}$$

図7 apの説明図 ($a=1$)

$$P_i = \frac{3}{3 - J_{\max}} J_{\max} \left(y - \frac{1}{3} \right) \quad y > 1 \text{ のとき} \quad \text{.....(8)}$$

規則では $P = F_i \cdot J_{\max}$ として与えており, (7) 式及び (8)

式で, $3/(3-J_{\max})=1$ としたものと全く同じである。

(2) 破口の船の長さ方向の位置の分布

(1)で求めた P_i は, ある区画の中で全ての長さの破口の発生する確率(ある区画の浸水確率)であったが, 船の長さ方向における区画の位置による破口の発生頻度について考察する。

図8は, 無次元損傷位置 x/L の頻度分布図で, 船の前半分が後半分より損傷頻度が高いことを示している。

無次元損傷長さ y/L がある値を取るという条件で, x/L の条件分布になると想定すると図中の曲線で示される周辺分布密度が得られる。(規則では, これを a として, 図12に示すように簡略化している。) 図8に対応する確率分布関数は図9に示される。規則ではこの分布関数を F , $1-F$ として与えており, これらを図12に示す。

(3) 規則の浸水確率 P_i

船の長さ方向における区画の浸水確率 P_i は, 区画の

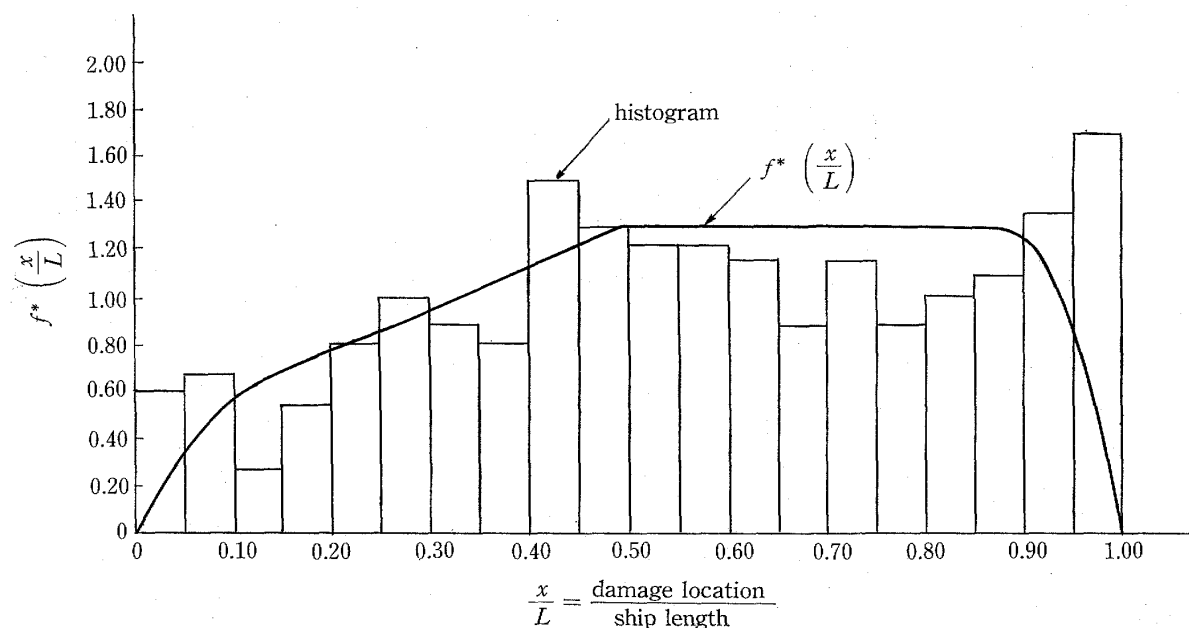


図8. Distribution density of non-dimensional damage location

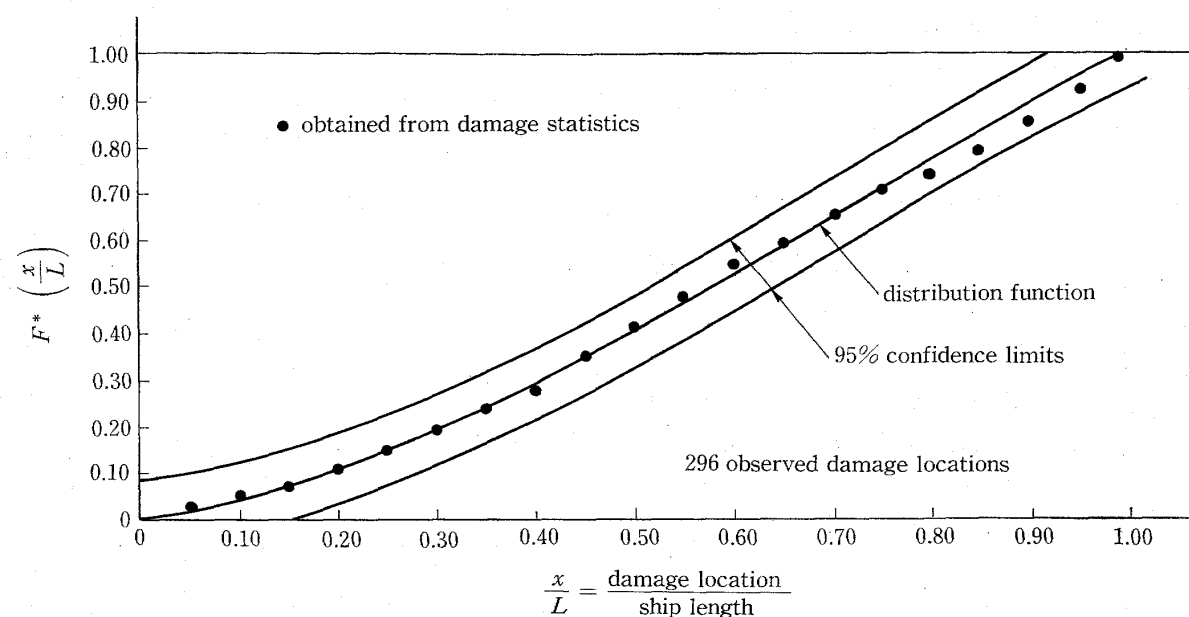


図9. Distribution function of non-dimensional damage location

長さや船体の位置において、次のように与えられている。算式の各項の数値を図11、12並びに13に示す。

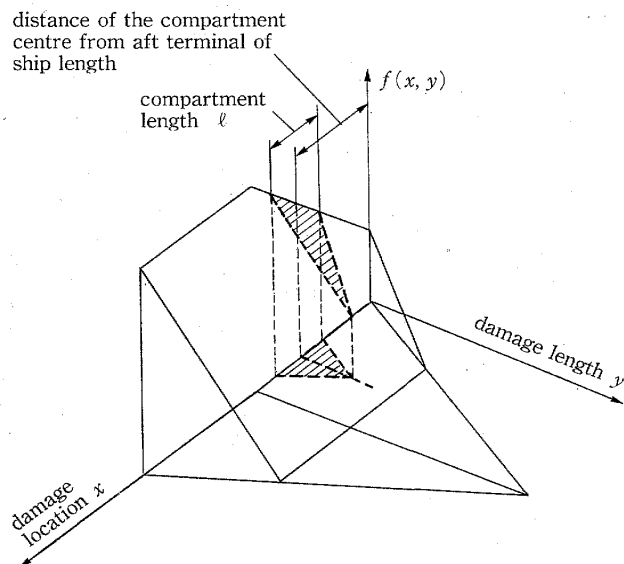


図10 apの説明図

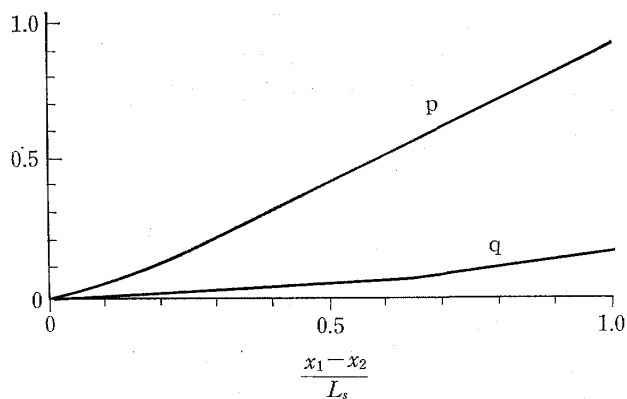


図11 p, q

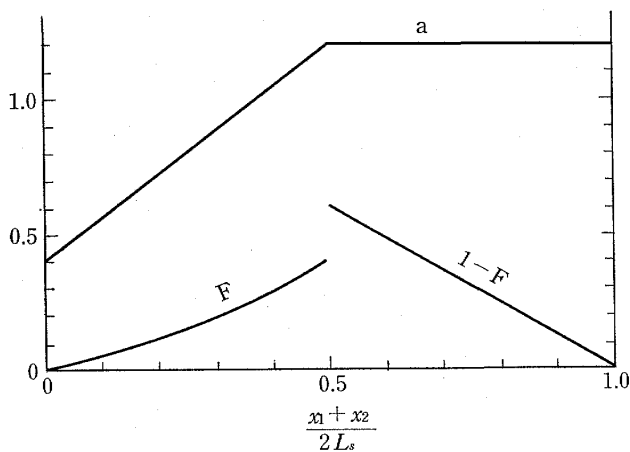


図12 a, F, 1-F

(a) 区画の長さが L_s と等しい場合

$$P_i = 1$$

(b) 区画の後端が船尾端に一致している場合

$$P_i = F + 0.5ap + q$$

(c) 区画の前端が船首端に一致している場合

$$P_i = 1 - F + 0.5ap$$

(d) 区画の後端、前端がいずれも船尾端及び船首端の内側にある場合（上述(a), (b), (c)のいずれでもない場合）

$$P_i = ap$$

(e) 区画の後端、前端の間に船の中央が位置する場合は、上述の(b), (c), (d)の P_i の算式から q' を減ずること。

上式において、 $P_i = ap$ は、前述(1)で求めたある長さをもつ区画の浸水する確率 p に、その区画が船の長さ方向のある位置にあることにより変化する損傷の発生頻度を a として乗じたものである。図10は、すでに a を含んだ確率密度関数 $f(x, y)$ として立体が表されている。この立体で、 $x-y$ 面の三角形と $f(x, y)$ 間の体積

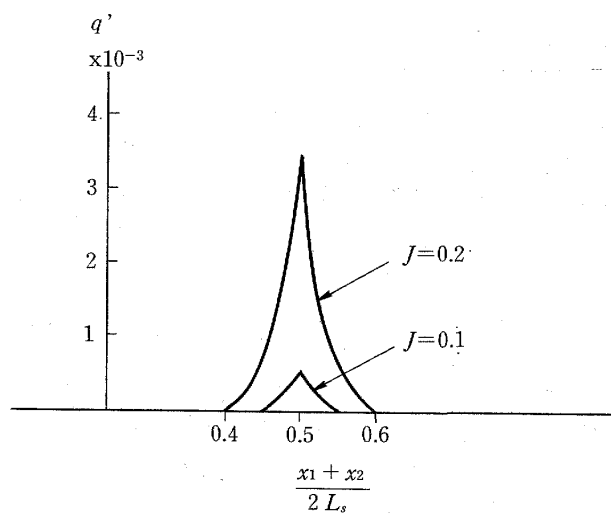
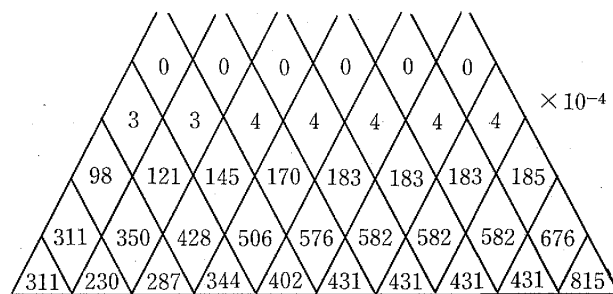


図13 q'

図14 P_i の例

(x-y 面で表される区画が浸水する確率)は、計算の結果、 ap の値と大差がないことが確認された。

船尾端に区画の後端が一致する場合の算式における q は、修正量を示す。これは、 a が傾斜をもつ範囲内で、区画の中央における F の値と $0.5ap$ を加えることによる必要な修正である。同様に、区画の後端、前端の間に船の中央が位置することによる修正量 q' も、 a に傾斜があることに起因している。

次に参考のため、 L_s を 10 等分した区画をもつ $L_s \leq 200\text{m}$ の船の一区画、二区画……等の浸水確率 P_i を図 14 に示しておく。尚、二区画、三区画の P_i は図 15 によって次のように計算される。

$$\text{二区画} \quad P = P_{12} - P_1 - P_2$$

$$\text{三区画} \quad P = P_{123} - P_{12} - P_{23} + P_2$$

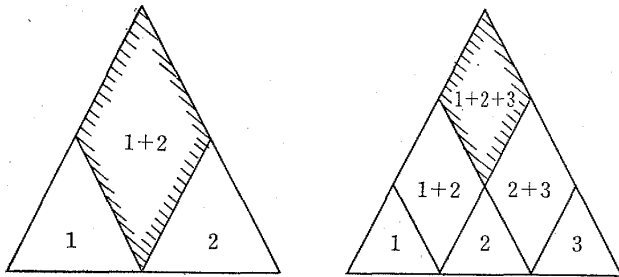


図 15 区画の合成

3.1.3 破口の深さ（船の幅方向）の考察

縦通隔壁をもつ船では、衝突による破口の深さにより、船側の区画のみ浸水する場合と、内側の区画まで浸水する 2 通りが起こりうる。船側の区画のみ浸水する確率を r とすると、縦通隔壁が破れ、船側と内側の区画が浸水する確率は $(1-r)$ と表せる。

Explanatory Notes SLF 33/12 では、破口の深さに関するの損傷統計が解析されている。これによると、破口の深さは、船の幅 B には独立であるが、船の長さ方向の破口の長さ y とは強い相関関係があるとしている。その結果、規則に定める r は、 b/B (b : 夏期満載喫水における船側外板から縦通隔壁までの水平距離) と、 J (船の長さに対する区画の長さの無次元量) をパラメータとする算式で与えられている。図 16 に係数 r を示す。

縦通隔壁をもつ船の船側の区画の浸水確率は、3.1.2 (3) に述べたある長さの区画の浸水確率 P_i に r を乗じたものである。また、船側及びその内側の区画に浸水する確率は、 P_i に $(1-r)$ を乗じたものとなる。

3.1.4 破口の幅（船の垂直方向）の考察

喫水 d の上方に水平隔壁をもつ船では、衝突による垂

垂直方向の破口の大きさ(幅)により、水平隔壁の下の区画のみ浸水する場合と、上下の両区画が浸水する場合が考えられる。規則では、下の区画だけが浸水する確率は v 、上下の両区画が浸水する確率は $(1-v)$ と表される。

図 17 は、 v の値を示すもので、横軸の喫水 d の位置で $v=0$ とし、 $H_{\max}$ の位置で $v=1$ とし直線で結ばれている。喫水 d から $H_{\max}$ の間に水平隔壁がある場合、一次補間により v の値が求まる。ただし、最上層水平隔壁が $H_{\max}$ より下に位置する場合、その位置における v は 1 となる。

$H_{\max}$ は 1966 年国際満載喫水線条約第 39 規則に定める最小の船首高さを与える算式に準拠したもので、次式に示す。

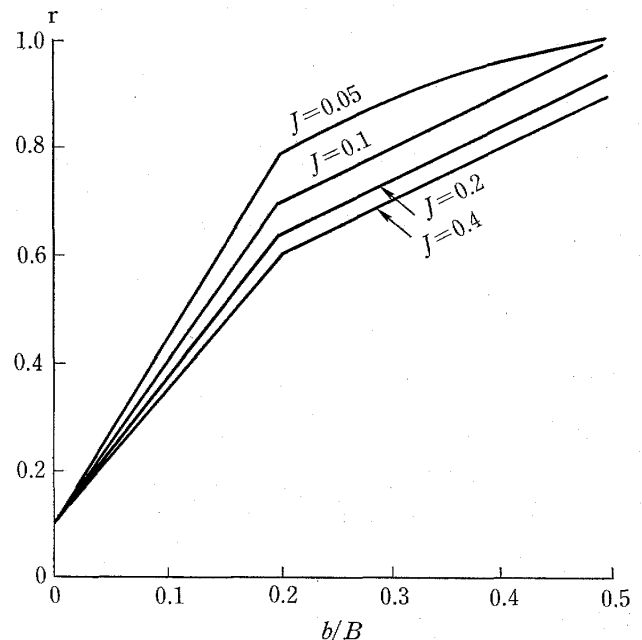


図 16 縦通隔壁による係数 r

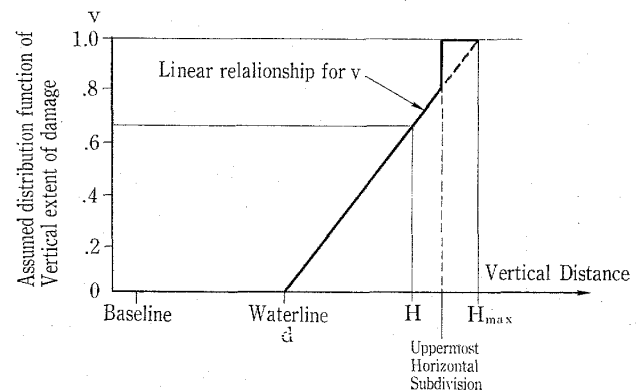


図 17 水平隔壁による係数 v

$$H_{\max} = d + 0.056L_s \left(1 - \frac{L_s}{500}\right) \quad \dots\dots(9)$$

ただし、 $d+7m$ を越える必要はない。

喫水よりも上方に水平隔壁を有する船において、この隔壁より下の区画が浸水する確率は、3.1.2(3)に示したある長さの区画の P_i に v を乗じたものである。また、上下の両区画の浸水する確率は、 P_i に $(1-v)$ を乗じたものとなる。

以上により横置隔壁で仕切られる区画の浸水確率 P_i は、図18のように縦通隔壁、水平隔壁があった場合、 r 、 v によって次式のように考慮される。

$$(i) \quad P_i \cdot r \cdot v \quad \dots\dots(10)$$

(図18中、区画①が浸水)

$$(ii) \quad P_i \cdot (1-r) \cdot v \quad \dots\dots(11)$$

(図18中、区画①、②が浸水)

$$(iii) \quad P_i \cdot r \cdot (1-v) \quad \dots\dots(12)$$

(図18中、区画①、③が浸水)

$$(iv) \quad P_i \cdot (1-r) \cdot (1-v) \quad \dots\dots(13)$$

(図18中、区画①、②、③、④が浸水)

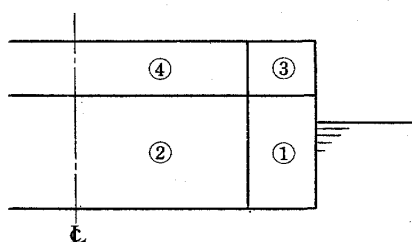


図18 浸水区画の区分

3.2 船全体の生存確率

3.1では、縦通隔壁、水平隔壁の影響を考慮した区画の浸水確率について述べた。本節では、それら区画が浸水した場合の船の生存に関する評価について解説し、その結果を非損傷時の許容 GoM 曲線に反映する方法を示す。

3.2.1 生存確率 s_i

生存確率 s_i とは、ある区画が浸水した場合、船が波浪中において転覆／沈没せずに生存しうる確率をいう。 s_i は夏期満載喫水 d_F 及び、60%部分積載喫水 d_P の各々の状態で、ある区画の浸水計算をすることにより得られる。ある区画の中に複数のタンク等が含まれる場合、これらタンク等の組合せを考慮し、想定される全損傷ケースのうち最も厳しいものとする。

規則では、浸水計算における最終平衡状態の水線が、水密 (watertight) を保つことのできない空気管、倉口

などの閉鎖装置に至った場合は、沈没とみなし $s_i=0$ となる。ただし、このような場合でも水密でない閉鎖装置につながった区画を引続き浸水させ、新たな平衡状態が得られれば $s_i=0$ とする必要はない。損傷時の残存復原力について、規則では14式に示すように $0 \leq s_i \leq 1$ で評価している。IMO へのソ連提案 SLF 32/3/11 によると、この基準は波浪中の損傷モデル船の実験結果をふまえ、損傷時の海象状況も確率的に考慮されているといえる。

$$s_i = C \sqrt{0.5(GZ_{\max})(\text{Range})} \quad \dots\dots(14)$$

$$C = 1 \quad \dots\dots \theta_e \leq 25^\circ$$

$$C = 0 \quad \dots\dots \theta_e > 30^\circ$$

$$C = \sqrt{\frac{30 - \theta_e}{5}} \quad \dots\dots 25^\circ < \theta_e \leq 30^\circ$$

ここで、 θ_e は浸水後の最終平衡角である。Range は θ_e から海水流入角 θ_f までの正の復原力範囲であり、 20° を越える場合は 20° とする。 $GZ_{\max}$ は、その Range の中で最大の復原挺をいい、 $0.1m$ を越える場合は $0.1m$ とする。図19に、これらの関係を示す。尚、海水流入角 θ_f とは、風雨密 (weathertight) を保てない開口が没水する角度である。

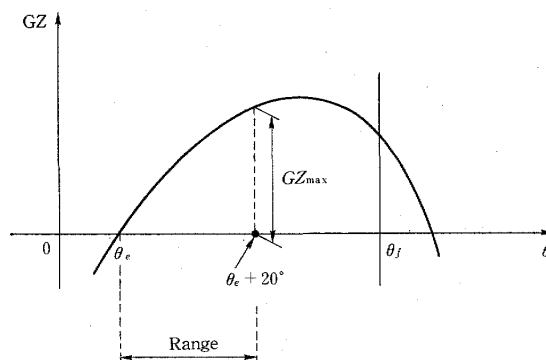


図19 GZ-curve

3.2.2 到達区画指数A

ある区画の浸水確率 P_i と、その区画に対応する生存確率 s_i の積を全長にわたり積分することにより、船全体の生存確率Aが得られる。すなわち、生存確率Aは次の算式で示される。

$$A = \sum P_i \times s_i$$

規則では、夏期満載喫水 d_F と60%部分積載喫水 d_P それぞれに対応する船全体の生存確率 A_F 、 A_P を算出し、 A_F と A_P の平均を船全体の生存確率とし、到達区画指数 (Attained Subdivision Index) と称している。

評価された到達区画指数Aに対し、船の長さ L_s をパ

ラメータとする要求区画指数 R を設定し、 $A \geq R$ の場合を合格としている。ここで R は次式で与えられる。

$$R = (0.002 + 0.0009L_s)^{1/3}$$

IMO Res. MSC 19(58) に適合した場合、非損傷時復原性基準による許容 GoM 曲線図(図 20)の中に、適合した初期状態の喫水 d_F , d_P 及び各々に対する GoM (=TKM-KGo) をプロットし、 d_F , d_P を直線で結び、 d_P から図のように垂線を下す。これにより、非損傷時及び損傷時の復原性基準を満たす GoM は、船の様々な喫水(排水量)に対し、ハッチした部分より右側に表されることになる。このことは、船の就航中は、ハ

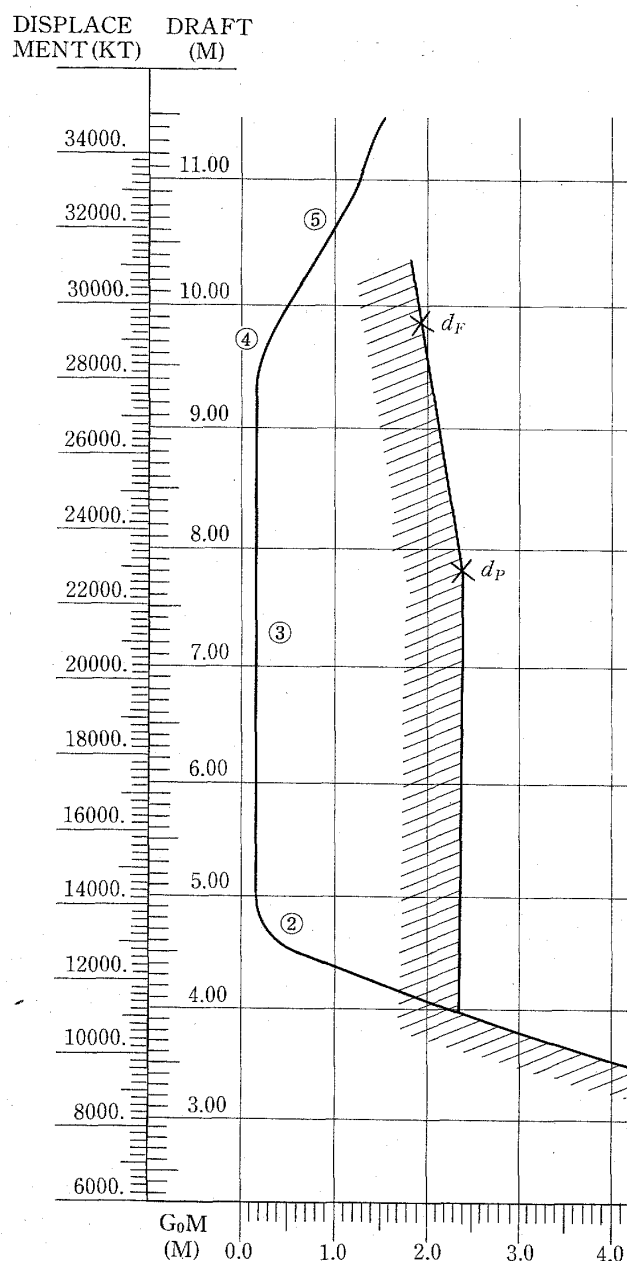


図 20 許容 GoM 曲線

ッチした部分より右側に GoM がくるよう積付けをする必要があることを意味する。

4. 乾貨物船の損傷時復原性計算プログラム

—DS KARGO—

先に述べた、IMO Res. MSC 19(58) に基づいて乾貨物船の損傷時復原性を計算するプログラムを開発したのでここに紹介する。

4.1 計算手順

図 21 に本計算のフローチャートを示す。このプログラムで行う処理は、浸水計算と確率論に基づいた生存確

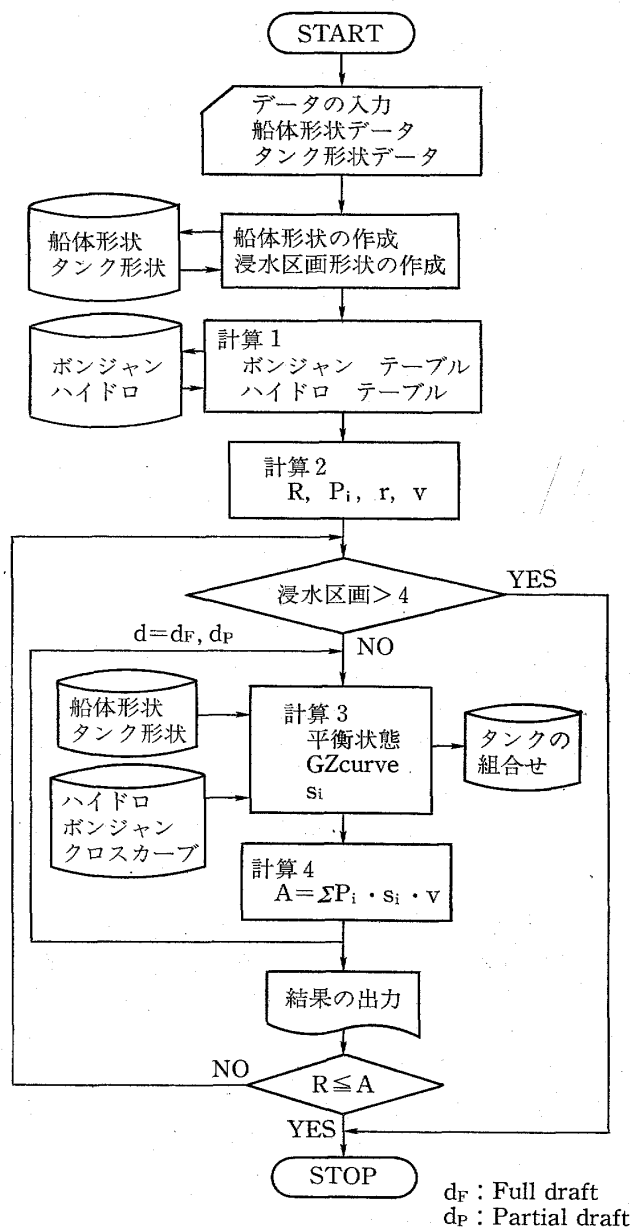


図 21 自動計算プログラムのフローチャート

率を求める計算とに分かれる。さらに、浸水計算は初期段階を重量附加法、平衡状態を浮力消失法により行っている。

規則の Required Subdivision Index **R** と Attained Subdivision Index **A** との比較において、

$$R \leq A$$

を満足するまで浸水区画を順次拡げ繰り返して計算し、満足した場合には計算を終了する。尚、計算は最大4区画浸水まで実行する。

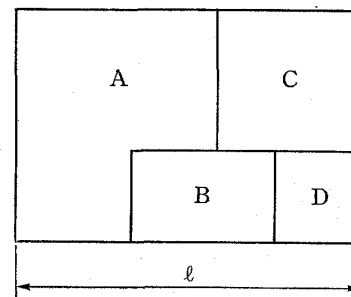
(1) 浸水タンクの選定

規則中の浸水後の生存確率 s_i は、一の区画において損傷の起こり得るタンク等の全ての組合せから、最小の値が選択されなければならない。たとえば、図22のような区画については、13通りの浸水タンクの組合せがある。本プログラムでは、自動的に最小の s_i が計算出来る。一方、直接入力によっても s_i を計算することが可能となっている。あらかじめ s_i が最小であると考えられるタンク等の組合せを入力すると、先の自動計算を実行せずに設計者が希望する区画の“ s_i ”が求められる。

s_i の計算に使われたタンクの組み合わせは記憶され、後に同じ組合せがあれば、その結果を利用し計算の繰り返しを避けている。

(2) 海水流入口、流出口

Air Pipe, Ventilator 等の海水流入口が最終平衡状態の水面下に没すると、その点から海水が流れ込み、想定浸水区画以外の区画へ浸水が拡がることになる。また、これとは逆に、ある区画内に非水密閉鎖装置のついた出入口などの開口部があって、その開口部が水面下に没す



A, A+B, A+C, A+B+C, A+B+D, A+B+C+D, B, B+C, B+D, B+C+D, C, C+D, D (以上13通り)
注) A+D, A+C+Dはあり得ない組合せなので s_i は計算されない。

図22 タンクの組合せ

表1 計算入力データ

タイトル	内 容	タイトル	内 容	タイトル	内 容
GENERAL		ST. OFF SET		ME	計算状態
GA	主要寸法表	SA	縮尺等	MF	
GB		SB (SH)	ステーションの位置	MG	
GC		SC (SJ)	UPP. DK SL の半幅	MH	
GD	中央横断面形状	SE (SL)	フラットボトムの半幅	MI	Extent No.
GE	フレームスペース	SF (SM)	各ステーションにおけるウォーター	MJ	Flag. Compt.
GF	テーブル	SG (SN)		YC	海水流出点
		SP (SG)	ラインのオフセット	XC	海水流入点
SHEER ETC		DIVISION		MK	F'cle の予備浮力指定
HD	上甲板のシャー形状	DA	液体の比重及び積載量	ML	Bridge の予備浮力指定
HE		DB		MM	Poop の予備浮力指定
HF		DC	HATCH/TRUNK の大きさと位置	MN	Set-in の予備浮力指定
HG		DD		MO	単純附加物の予備浮力指定
HH		DE	MAP	MP	複雑附加物の予備浮力指定
HI		DF	MAPLIST	MZ	浸水区画の組合せの指定
HJ		DG	国の定義	XB	チェックプリント
HK		DH	区画タンク	XD	単純附加物
HL	キャンバーの形状			AX	複雑附加物
HM		UH	タイトル	AY	
HN		MA	主要寸法	EI	F'cle の浸水区画形状データ
HQ		MB	関連隔壁甲板	EH	Poopの浸水区画形状データ
HW	船首尾形状	MC			
		MD			

ると、その開口から海水が流出し他の区画へも浸水する。DS KARGO ではこのような海水流入及び流出を考慮している。

(3) GZ-curve

規則では、考慮する GZ curve の範囲は平衡状態から 20 度の傾斜角、或るいは船外開口端が没水する角度までの正側となっている。DS KARGO においても同様に規則でいう GZ の範囲で計算を終了して計算時間の短縮を計っている。

4.2 入力データ

本プログラムの計算は先にも述べたように、浸水計算を行わなければならないので、従来の浸水計算と同程度の入力が必要となっている。その他、表 1 に示すようなデータが必要である。

4.3 計算結果の出力

ある船の計算結果の一例を表 2、3 及び 4 に示す。

各区画毎に計算の途中結果 P 及び B を出力したものが表 2 である。表中、X 1、X 2 は区画の後端及び前端位置である。また、P は 3.1.2(3) で述べられている。縦通隔壁があるとき、P (wing) は舷側区画が、P (inboard) は舷側及びその内側区画が同時に損傷、浸水する確率である。縦通隔壁がない場合の P は P (wing) に表示される。B は夏期満載喫水線面における船側外板から縦通隔壁までの水平距離である。

表 3 は図 18 における ① が損傷した場合の一区画浸水に対する総括表である。例えば、第三番目の区画 (Frame No. 37 から Frame No. 71) については次のことを意味

する。60%部分積載喫水の状態において、浸水計算後の平衡状態は、喫水 6.94m、トリム 0.29m、傾斜角 4.98 度である。また、この時の最大の GZ は 1.178m であり、求められた “A” ($P_i(w) \times s_i$) は 0.0064 ということがある。さらに、同じ区画において夏期満載喫水の状態で浸水計算された結果、平衡状態がなく沈没 ($s_i=0$) することを示している。

表 3 の例では、一区画浸水、船側区画損傷を仮定した場合に “A” が 0.2829 となりまだ要求される “R” に至らず、計算は次の区画の浸水計算を実行している。

(10)式から(13)式に示した P_i に対応する各々の計算値を示したものが表 4 である。

5. 区画配置と限界 GoM

従来は、比較的自由に船舶の区画配置が設計されてきたが、今後 Res. MSC 19(58) の発効により、船舶の損傷時の安全性向上のため、規則要件を満足する区画配置をする必要がある。本規則では、要求区画指数 R 以上の到達区画指数 A を要求する。A は船舶の GoM (または, KGo) により変化するので、 $A \geq R$ を満たす最も小さな GoM、すなわち限界 GoM (限界 KGo) が得られれば、船舶の積付に関する自由度が増すことになる。

IMO の TEST SHIP (SIMPLE TYPE) をもとに、区画配置を変更することによって、本規則の要件を満たす限界 GoM を求め、考察を加えた。

5.1 限界 GoM の求め方

到達区画指数 A は、夏期満載喫水 d_f と 60%部分積載

表 2 計算出力例①

PROCESS OF CALCULATION

1-COMPARTMENT GROUPS					P	P(WING)	P(INBOARD)	B
NO	X1	(FR.)	X2	(FR.)				
1	0.000	-8.2	11.100	10.0	0.0193	0.0193	0.0000	0.000
2	11.100	10.0	29.500	33.0	0.0283	0.0283	0.0000	0.000
3	32.700	37.0	59.900	71.0	0.0804	0.0347	0.0457	3.000
4	59.900	71.0	88.700	107.0	0.1165	0.0500	0.0665	3.000
5	88.700	107.0	117.500	143.0	0.1227	0.1227	0.0000	0.000
6	117.500	143.0	119.900	146.0	0.0011	0.0011	0.0000	7.300
7	119.900	146.0	146.300	179.0	0.1060	0.1060	0.0000	0.000
8	146.300	179.0	159.091	200.0	0.0626	0.0626	0.0000	0.000
SUM 1-COMPARTMENT GROUPS					0.5368	0.4245	0.1123	
2-COMPARTMENT GROUPS					P	P(WING)	P(INBOARD)	B
NO	X1	(FR.)	X2	(FR.)				
1	0.000	-8.2	29.500	33.0	0.0284	0.0284	0.0000	0.000
2	11.100	10.0	59.900	71.0	0.0630	0.0230	0.0400	3.000
3	32.700	37.0	88.700	107.0	0.0772	0.0268	0.0504	3.000
4	59.900	71.0	117.500	143.0	0.0931	0.0323	0.0608	3.000
5	88.700	107.0	119.900	146.0	0.0162	0.0109	0.0053	7.300
6	117.500	143.0	146.300	179.0	0.0156	0.0105	0.0050	7.300
7	119.900	146.0	159.091	200.0	0.0791	0.0791	0.0000	0.000
SUM 2-COMPARTMENT GROUPS					0.3725	0.2109	0.1615	

表3 計算出力例②

*** SUMMARY OF RESULT

< 1 - COMPARTMENT FLOODING 1/4 >

INITIAL CONDITION BEFORE FLOODED

	D(M)	LCG(M)	KG(M)	TRIM(M)
60 % LOAD	6.760	-3.425	8.030	0.000
FULL LOAD	9.830	-2.278	8.110	0.000

FRM	DRAFT	TRIM	HEEL	GZ	GZ	(1)	(2)	(3)	A	
TO	(C)	EQV	EQV	MAX	RANGE	P(W)	S	V		
	(M)	(M)	(DEG)	(M)	(DEG)					
	P	7.23	2.80	0.00	0.938	SUF		1.0000	1.0000	0.0096
						0.0193				
10.0	F	10.67	5.13	0.34	0.582	SUF		1.0000	1.0000	0.0096
10.0	P	7.23	2.80	0.00	0.939	SUF		1.0000	1.0000	0.0141
						0.0283				
33.0	F	10.56	4.28	0.21	0.618	SUF		1.0000	1.0000	0.0141
37.0	P	6.94	0.29	4.98	1.178	SUF		1.0000	0.3688	0.0064
						0.0347				
71.0	F	*								
71.0	P	6.94	0.29	4.98	1.178	SUF		1.0000	0.3688	0.0092
						0.0500				
107.0	F	*								
107.0	P	6.87	-0.29	3.17	1.078	SUF		1.0000	0.3688	0.0226
						0.1227				
143.0	F	11.76	-4.81	9.49	0.368	SUF		1.0000	1.0000	0.0613
143.0	P	7.63	-5.34	0.00	0.970	SUF		1.0000	0.3688	0.0002
						0.0011				
146.0	F	11.49	-8.75	1.58	0.451	SUF		1.0000	1.0000	0.0005
146.0	P	7.63	-5.34	0.00	0.970	SUF		1.0000	0.3688	0.0195
						0.1060				
179.0	F	11.49	-8.75	1.58	0.451	SUF		1.0000	1.0000	0.0530
179.0	P	6.89	-1.06	0.00	0.965	SUF		1.0000	1.0000	0.0313
						0.0626				
	F	10.02	-1.26	0.00	0.751	SUF		1.0000	1.0000	0.0313

---SUBDIVISION INDEX---
 REQUIRED ATTAINED
 (R) (A)
 0.5256 > 0.2829

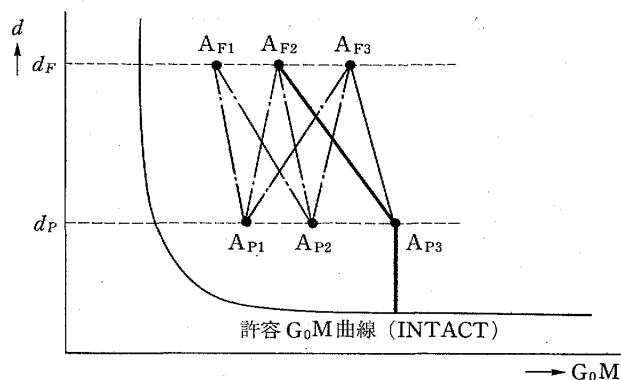
< NOTE >

FRM TO : FLOODING EXTENT FRAME NO.
 (FROM & TO)
 C : F=FULL LOAD CONDITION
 P=60% PARTIAL LOAD CONDITION
 * MARK : CAPSIZED
 A : $1/2 \times (1) \times (2) \times (3)$
 GZ MAX : MAX.GZ WITHIN THE SPECIFIED RANGE

喫水 d_F それぞれに対応する 到達区画指数 A_F , A_P の平均であり, 次式で表される.

$$A = \frac{1}{2}(A_F + A_P)$$

$A \geq R$ を満たす A_F , A_P の組合せを求めるには, d_F , d_P における初期状態の GoM を変化させ複数ケースの浸水計算を行う必要がある. 図23では, d_F , d_P の喫水で, GoM をそれぞれ3通り変え浸水計算を行い, A_F , A_P を求めている. 一点鎖線で結ばれた A_F と A_P の組合せによる A は R より小さいことを示し, 実線で結ばれた組合せの場合は A が R 以上であることを示す. ここでは A_{F3} と A_{P3} の組合せによる A よりも, A_{F2} と A_{P3} の組合せによる A の方が小さいが, GoM が小さい方で R 以上であるといえる. このような A_{F2} と A_{P3} を直線

図23 限界 GoM の求め方

で結び A_{P3} から図のように垂線を下した許容 GoM 曲線の交点までを限界 GoM (limiting GoM) と称す. 船舶は運航時, 規則によりこの限界 GoM よりも常に大

表4 計算出力例③

SUMMARY OF RESULT

ONE COMPARTMENT FLOODING

FLOODING EXTENT FR.NO.	1/2 * P * S * V				FULL LOAD			
	60% DRAFT P(W) *V	P(I) *V	P(W) *(1-V)	P(I) *(1-V)	P(W) *V	P(I) *V	P(W) *(1-V)	P(I) *(1-V)
- 10.0	0.0096	0.0000	0.0000	0.0000	0.0096	0.0000	0.0000	0.0000
10.0- 33.0	0.0141	0.0000	0.0000	0.0000	0.0141	0.0000	0.0000	0.0000
37.0- 71.0	0.0064	0.0084	0.0110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
71.0-107.0	0.0092	0.0123	0.0158	0.0137	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
107.0-143.0	0.0226	0.0000	0.0387	0.0000	0.0613	0.0000	0.0000	0.0000
143.0-146.0	0.0002	0.0000	0.0003	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000
146.0-179.0	0.0195	0.0000	0.0334	0.0000	0.0530	0.0000	0.0000	0.0000
179.0-	0.0313	0.0000	0.0000	0.0000	0.0313	0.0000	0.0000	0.0000
TOTAL				0.4166				

(NOTE) P(W) : P(WING)
P(I) : P(INBOARD)

きい GoM に保つことを要求される。

5.2 計算対象船舶

IMO の TEST SHIP (SIMPLE TYPE) の船型を変えず区画配置を10ケースにわたり変更した MODEL SHIP を作り、これらを浸水計算対象船舶とした。図24に区画配置の特徴を示す。

5.3 MODEL SHIP の限界 GoM の比較

5.2で述べた10の MODEL SHIP について、IMO の TEST SHIP (SIMPLE TYPE) の夏期満載喫水 d_F 、60%部分積載喫水 d_P を使い、限界 GoM を求めた。結果を図25に示すが、この図より概略、次のようなことがいえる。尚、IMO の TEST SHIP (SIMPLE TYPE) の “Trim & Stability Calculation” による GoM は、 d_F で1.931m、 d_P で2.484mである。

(1) MODEL-11, -12 の比較

MODEL-11 は3つの Cargo Hold をもち、MODEL-12 は4つの Cargo Hold をもった船である。

また、MODEL-12 は、IMO の TEST SHIP (SIMPLE TYPE) である。横置隔壁が多い船 (MODEL-12) の方が限界 GoM が小さく、船舶の積付に関する自由度が増すことになる。

(2) MODEL-13

MODEL-13 は2つの Cargo Hold をもつ船である。浸水計算前の初期状態の GoM を最大にしても $R > A$ であった。したがって、規則要求を満たす限界 GoM は存在しない。

(3) MODEL-14, -15 の比較

MODEL-13 の No.2 Cargo Hold に縦通隔壁を入れウイングタンクを設けたのが MODEL-14, -15 である。b/B の小さい船 (MODEL-14) の方が限界 GoM が小さい。すなわち、縦通隔壁と船側の距離を大きくとることにより、3.1.3 で述べた係数 r を大きくしても効果がないといえる。これはウイングタンクの浸水率が0.95であるのに対し、Cargo Hold のそれは0.70で計算されるためである。

(4) MODEL-23, -24, -25 の比較

MODEL-14, 15 の縦通隔壁を2つに仕切ったものが MODEL -24, -25 であるが、かなり限界 GoM は小さくなるといえる。MODEL-23, -24, -25 を比較すると、限界 GoM が最も小さいのは $b/B=0.14$ のものである。このことは、ある船に関して、限界 GoM を最小にする縦通隔壁と船側の距離を求めようとする場合、様々な b/B をとり計算する必要があるといえる。

(5) MODEL-34, -35 の比較

ウイングタンクをもつ、1 Hold の船である。この場合、 b/B の大きい方 (MODEL-35) で限界 GoM が小さいという結果が得られた。

以上で検討を終えるが、これら MODEL 船の二重底タンクは、センターガーダを水密として完全に左右両舷に分けた。そのため浸水計算上過大な横傾斜を伴う最終平衡状態が得られ、その損傷区画の生存確率が“0”になり、到達区画指数 A に寄与しない計算例もあった。このような場合、センターガーダの水密性を無くし、左右両舷のタンクを一つにする方法が考えられる。しかし

MODEL-12 IMO TEST SHIP (SIMPLE TYPE)

$$L_{PP} \times B \times D \times d = 150 \times 24.6 \times 13.6 \times 9.830 \text{ m}$$

$$L_S = 159.091 \text{ m}$$

$$\text{夏期満載喫水 } d_F = 9.830 \text{ m}$$

$$60\% \text{ 部分積載喫水 } d_P = 6.760 \text{ m}$$

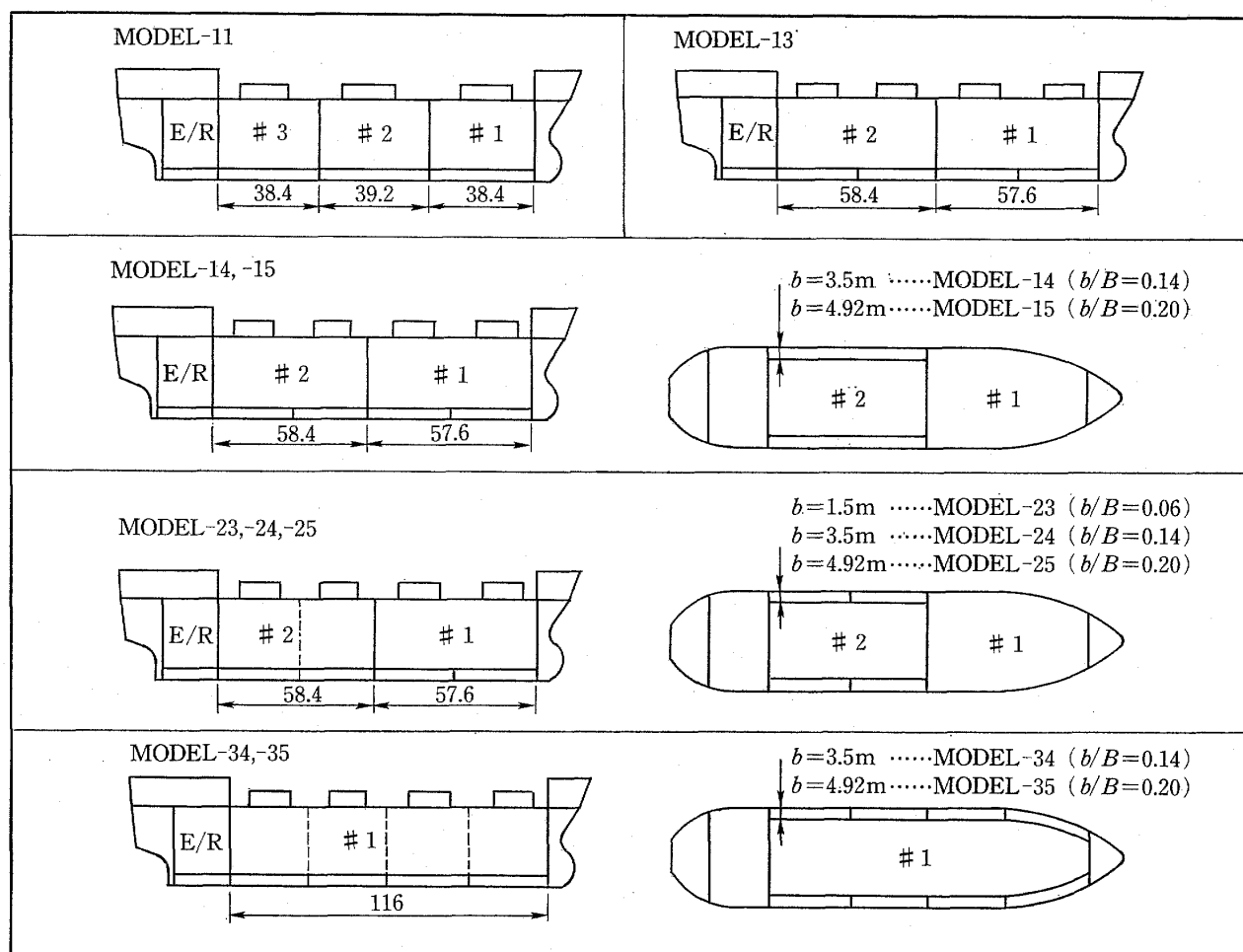
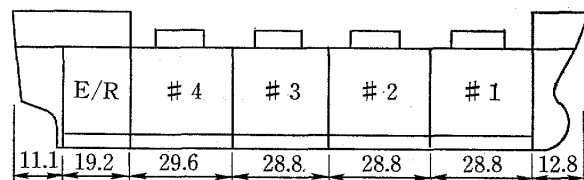


図 24 MODEL SHIP の区画配置及び寸法表

ながら、このような方法で損傷時復原性規則を満足したとしても、非損傷時の復原性が悪くなることは事実である。非損傷時の復原性に対する十分な配慮をした上で損傷時復原性規則を満たすことが望まれる。

謝 辞

本稿で紹介したプログラム“DS KARGO”の開発にあたり、㈱富士総合研究所加藤国男次長には多大なる御尽力を賜り、又、船体部・堀 善彰技師、久保洋子主事

補には並々ならぬ御苦勞をおかけしました。ここに改めて感謝の意を表します。

参考文献

IMO Res. MSC 19(58)

Explanatory Notes SLF 33/12, SLF 34/WP.9

Probabilistic method submitted by the USSR

(SLF 32/3/11)

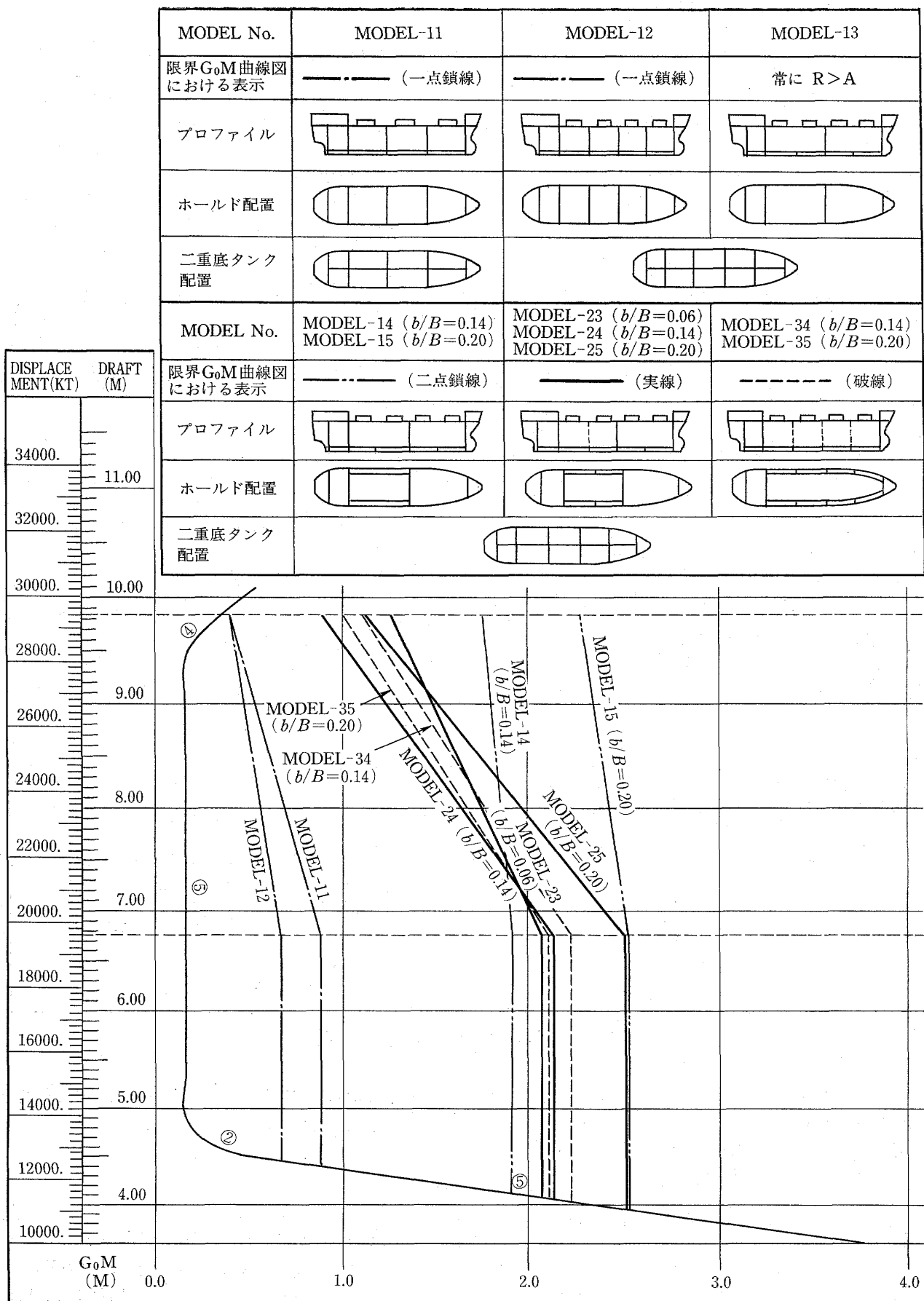


図 25 限界 GoM