

浸水によるGM減少率について*1

正会員 佐久間 俊 *2, 正会員 西村 浩二 *2

A Study on the Index of GM Reduction Caused by Flooding

By Shun SAKUMA (Member) and Koji NISHIMURA (Member)

It is one of the important themes for hull form design to give the optimum initial stability. The most easy solution seems to be given by small GM, but there is a considerable difficulty to fix lower limit of GM. In case of warship design, damaged stability sometimes becomes key property to fix it. But the computation of damaged stability has some complexity because it requires detailed information such as the arrangement of watertight bulkheads, the flooding capacity of each compartment and so on.

This report deals with the reduction of GM caused by flooding using only hull lines. The result shows that the index of GM reduction is obtained numerically and we can estimate the reduction of GM easily by giving the length of flooding compartment. Therefore, it makes contribution to design of surface ships that have good damage control capability.

Keywords : GM Reduction, Flooding, Damaged Stability, Initial Design, Hull Form

1. 緒論

GM値は初期復原力だけでなく動揺特性や浸水後の姿勢等総合的に復原力を支配する量であるため、GMの適正な計画は船型計画中最も重要な事項とされてきた。最も安易な方法はタイプシップから経験的に下限を定める手法であり、実際そのようにして決まる場合が多いが、過大なGMは動揺周期を短くし乗り心地を悪化させるだけでなく、船内への浸水による大きな変動を誘起するため、必要量を見極めた上で極力小さく計画する事が求められる。

艦艇を設計する上で浸水後の姿勢を議論することは重要である。実際の設計作業においては、具体的に浸水区画を想定しバラストングも考慮した上で必要なGMを見積もっているが、この計算のためには船型や重量重心はもちろん、ある程度詳細な区画配置も必要であり、計算の結果を初期計画にフィードバックするには、かなりの労力を必要とする。

従って浸水に対する性能を初期線図作成段階に把握できれば便利であり、それに基づいて配置作業を進めれば、あらかじめ浸水に強い配置計画を実現できる可能性がある。本報における浸水によるGM減少率¹⁾(The Index of GM Reduction)という概念は、復原性能を評価する上でもっとも基本的な要素であるGMについて、浸水による変動特性を線図作成の前に検討し、船型、区画、配置の計画に反映させようとするものである。

2. 定式化

Fig.1に示す座標系において、船体の水線長をL、水線幅をB、喫水をt、半幅曲線を $\eta(x, z)$ とする。

x方向の断面積曲線は、

$$v(x) = 2 \int_0^t \eta(x, z) dz \quad (1)$$

x方向の浮心モーメント曲線は、

$$m(x) = 2 \int_0^t z \eta(x, z) dz \quad (2)$$

*1 平成12年11月16日造船三学会秋季連合大会において講演, 原稿受付 平成12年11月29日

*2 防衛庁技術研究本部

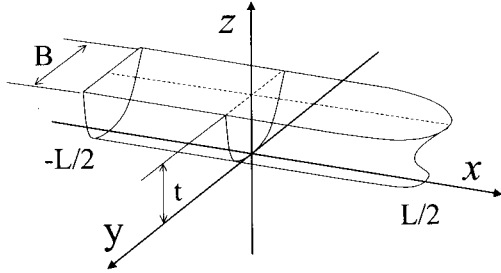


Fig. 1 Coordinate system.

排水容積は、

$$\nabla_s = \int_{-L/2}^{L/2} v(x) dx \quad (3)$$

船全体の浮心モーメントは、

$$K_s = \int_{-L/2}^{L/2} m(x) dx \quad (4)$$

水線面の 2 次モーメントは、

$$I_T = \frac{2}{3} \int_{-L/2}^{L/2} \eta^3(x, t) dx \quad (5)$$

したがって、横メタセンタ高さ KM_T は、

$$KB_s = \frac{K_s}{\nabla_s}, \quad BM_T = \frac{I_T}{\nabla_s}, \quad KM_T = KB_s + BM_T \quad (6)$$

ここで x 方向に微小範囲浸水した場合の KB 減少率、横 BM 減少率及び横 KM 減少率をそれぞれ $\Delta KB(x)$ 、 $\Delta BM_T(x)$ 、 $\Delta KM_T(x)$ と定義すると、

$$\begin{aligned} \Delta KB(x) &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\epsilon} \left[KB_s - \frac{K_s - \int_{x-\epsilon/2}^{x+\epsilon/2} m(x) dx}{\nabla_s - \int_{x-\epsilon/2}^{x+\epsilon/2} v(x) dx} \right] \\ &= \frac{1}{\nabla_s} [m(x) - KB_s v(x)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta BM_T(x) &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\epsilon} \left[BM_T - \frac{I_T - \frac{2}{3} \int_{x-\epsilon/2}^{x+\epsilon/2} \eta^3(x, t) dx}{\nabla_s - \int_{x-\epsilon/2}^{x+\epsilon/2} v(x) dx} \right] \\ &= \frac{1}{\nabla_s} \left[\frac{2}{3} \eta^3(x, t) - BM_T v(x) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta KM_T(x) = \Delta KB(x) + \Delta BM_T(x) \quad (9)$$

浸水後に重心高さ KG が変化しないとすると、横 GM 減少率は、

$$\Delta GM_T(x) = \Delta KM_T(x) \quad (10)$$

縦 GM 減少率 ΔGM_L についても、横 GM 減少率の場合と同様の方法で定義できる。

水線面の 2 次モーメントは、

$$I_L = 2 \int_{-L/2}^{L/2} x^2 \eta(x, t) dx \quad (11)$$

縦メタセンタ高さ KM_L は、

$$BM_L = \frac{I_L}{\nabla_s}, \quad KM_L = KB_s + BM_L \quad (12)$$

$\Delta GM_L(x)$ は、 $\Delta KM_L(x)$ に等しいとすれば、以下のように表現される。

$$\Delta BM_L(x) = \frac{1}{\nabla_s} [2\eta(x, t)x^2 - BM_L v(x)] \quad (13)$$

$$\Delta GM_L(x) = \Delta KB(x) + \Delta BM_L(x) \quad (14)$$

$\Delta KB(x)$ は横 GM 減少率を計算する場合と同じであるが、縦の場合は横の場合よりも BM の値が非常に大きいので BM 減少率が支配的になる。

さらに、定義から、

$$\int_{-L/2}^{L/2} \Gamma(x) dx = 0, \quad \Gamma = \Delta KB, \Delta BM_T, \Delta BM_L \quad (15)$$

3. 静水中の GM 減少率

3.1 数式船型を用いた近似計算法

浸水による GM 減少率を計算するにあたり、一般的な性質を把握する目的で数式船型による検討を行った。以降の計算では、 x 軸を半水線長で無次元化して ξ 軸とし、船首を 1、船尾を -1 で示す。また、 C_p カーブを $p(\xi)$ 、 C_w カーブを $w(\xi)$ 、方型係数、中央断面係数を C_b, C_m とし、細長比、幅喫水比は、

$$\lambda = \frac{B}{L}, \quad \beta = \frac{t}{B} \quad (16)$$

とする。半幅曲線 $\eta(\xi, z)$ は、以下のように定義した。

$$\eta(\xi, z) = \frac{B}{2} w(\xi) \left(\frac{z}{t} \right)^{\mu(\xi)} \quad (17)$$

$$\mu(\xi) = \frac{w(\xi)}{C_m p(\xi)} - 1 \quad (18)$$

排水容積 ∇_s , 浮心モーメント K_s , 水線面の横方向 2次モーメント I_T , 縦方向 2次モーメント I_L は容易に求まるので, (7), (8), (13) より,

$$\begin{aligned} \Delta KB(\xi) &= \frac{\lambda\beta}{C_b} \left[\frac{w(\xi)}{\mu(\xi)+2} - \frac{w(\xi)}{2C_b[\mu(\xi)+1]} \int_{-1}^1 \frac{w(\xi)}{\mu(\xi)+2} d\xi \right] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta BM_T(\xi) &= \frac{\lambda}{12\beta C_b} \left[w^3(\xi) - \frac{w(\xi)}{2C_b[\mu(\xi)+1]} \int_{-1}^1 w^3(\xi) d\xi \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta BM_L(\xi) &= \frac{1}{4\lambda\beta C_b} \left[\xi^2 w(\xi) - \frac{w(\xi)}{2C_b[\mu(\xi)+1]} \int_{-1}^1 \xi^2 w(\xi) d\xi \right] \end{aligned} \quad (21)$$

以上のように, すべての項が船体の主要目と $p(\xi)$, $w(\xi)$ のみで定義されているため, フレームラインを決める以前に縦横の GM 減少率を求める事ができる。

3.2 横 GM 減少率

C_p カーブ $p(\xi)$, C_w カーブ $w(\xi)$ を以下のとおり定義する。

$$p(\xi) = 1 - |\xi|^\mu \quad (22)$$

$$w(\xi) = 1 - |\xi|^{n(\xi)} \quad n(\xi) = \begin{cases} a & (\xi < 0) \\ f & (\xi > 0) \end{cases} \quad (23)$$

ここで $n(\xi)$ を前後独立の変数 a, f とすれば水線面の前後非対称性も表現できる。 $p(\xi)$ は前後対称であり, C_p 値が 0.600 になるよう μ の値を決めた。 ($\mu = 1.500$)

Fig.2 は a, f を変化させた場合の横 GM 減少率の計算結果である。 前後の非対称性は浮面心位置 LCF で表現しているが, GM 減少量を定量的に評価するため, すべての船型について I_T が一定になるよう a, f の値を決めた。 グラフの右側が船首, 左が船尾を表している。 グラフの正值をとる部分は GM 減少率が正, すなわち浸水により GM が減少する事を示し, 負値をとる場合はその逆で浸水により GM が増加する事を表す。 C_w カーブが前後対称の場合は, GM 減少率も前後対称であり, 正負のピークは最小となる。 客船, 艦艇等の中高速 2 軸船では後半部の水線幅が前半部より広い船型が多いが, 後半部を広げるほど正值のピークが大きくなり, 逆に幅の狭い前半部で負のピークが大きくなる結果が得られた。 船内への浸水を考えれば, GM 減少率が正の範囲に浸水した場合に復原力が減少する

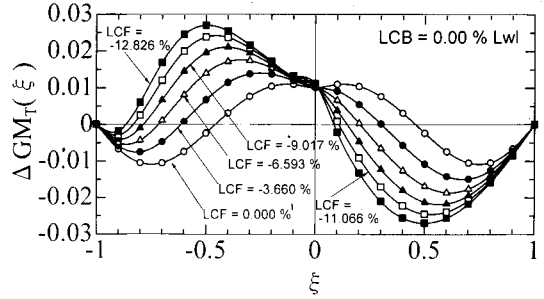


Fig. 2 The index of GM_T reduction of numerical hull form ($LCB = 0.00\% Lwl$).

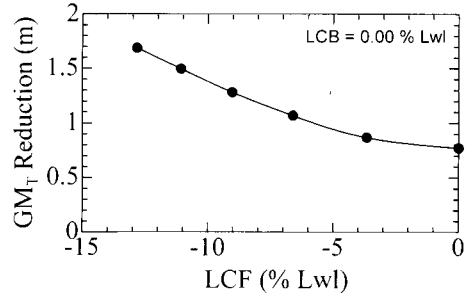


Fig. 3 GM_T reduction of numerical hull form ($LCB = 0.00\% Lwl$).

ため, この範囲の大きさが小さいほど浸水に強いと考えられるが, 図で正值の領域をとる範囲は断面積に対して水線幅が大きい領域, 逆に負値をとる範囲は排水量に対して水線幅が小さい領域であるので, 排水量を極力下方に持つ船型の方が浸水時の GM 減少量は少ないと考えられる。

GM 減少率を浸水区画長で積分すれば GM 減少量 (GM Reduction) を表すため, 浸水による GM 減少量は GM 減少率が正值をとる領域の積分値から評価される。 Fig.3 の横軸は浮面心位置 LCF を表し, 右端が前後対称船型である。 縦軸は正の領域すべての積分値, すなわち浸水による GM 減少量の最大値を表すが, 図から明らかなように水線面の非対称性が大きくなるほど横 GM 減少量は増加し, つまり浸水によるダメージを受けやすくなる性質が表れている。

本計算においては, 浸水前の GM_T 値はすべての船型で同等であるため, 前後対称の C_p カーブを与えられた場合は, 前後対称の C_w カーブが最も浸水に強いという結果が得られた。

試みに C_p カーブを前後非対称とした場合についても同様の検討を行った。 (22) 式の μ を前後独立の変数とし, 浮心の前後位置 LCB を $-7.0\% Lwl$ とした。 GM 減少率を Fig.4 に, GM 減少量の比較を Fig.5 に示す。

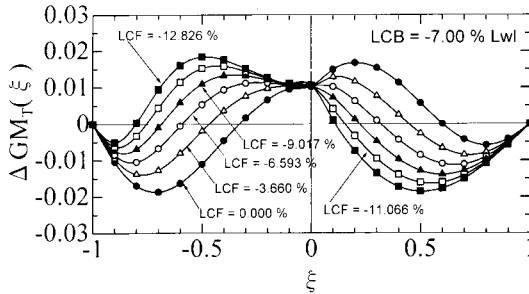


Fig. 4 The index of GM_T reduction of numerical hull form ($LCB = -7.00\% LWL$).

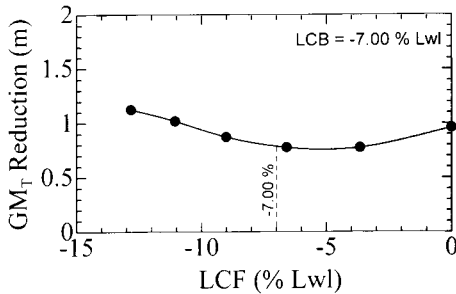


Fig. 5 GM_T reduction of numerical hull form ($LCB = -7.00\% LWL$).

GM減少量は LCF が-5%付近で最小となっている。これは、浸水時のスタビリティを考えた場合、 C_w カーブの計画は C_p カーブとの相関を考慮して行う必要があることを示している。

次に $p(\xi), w(\xi)$ とともに前後対称の船型について、 C_w 値の影響を比較する検討を行った。 C_p 値は0.600とし ($\mu = 1.500$)、 $n(\xi)$ のみを変化させた場合の横 GM 減少率を Fig.6 に示す。 C_w が小さくなり、船首尾の水線幅が狭くなるに従って船首尾の負値をとる領域が拡大するが、逆に中央部の正值のピークも大きくなる結果を得た。

正值領域の積分値を評価した結果を Fig.7 に示す。横 GM 減少量の極小値が存在する事が興味深い。

以上の検討より、 C_p カーブが前後対称の場合、 C_w カーブは前後対称が最も横 GM 減少量が少なく、 C_w 値についても最適な値を選ぶ事が浸水時に最も安定な船型を計画する近道であることが分かった。

3.3 縦 GM 減少率

C_p カーブ $p(\xi)$ は (22) 式、 C_w カーブ $w(\xi)$ は (23) 式で定義して、 LCF を変化させた場合の縦 GM 減少率を Fig.8 に示す。 $p(\xi)$ は前後対称であり C_p 値は0.600、すべての船型において Intact の水線面 2 次モーメント (y 軸回り) は一定である。 BM_L 値が一定であるため

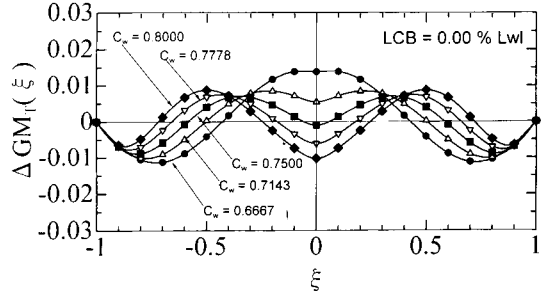


Fig. 6 The index of GM_T reduction of numerical hull form ($LCB = LCF = 0.00\% LWL$).

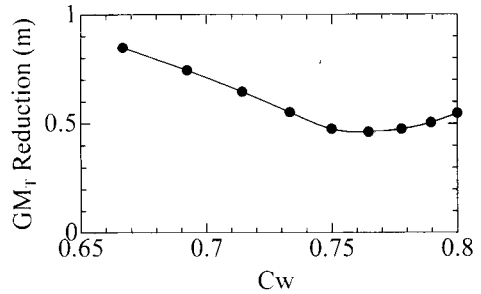


Fig. 7 GM_T reduction of numerical hull form ($LCB = LCF = 0.00\% LWL$).

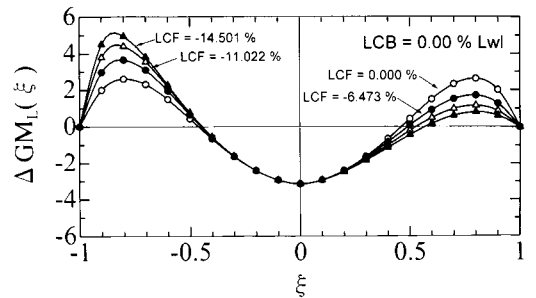


Fig. 8 The index of GM_L reduction of numerical hull form ($LCB = 0.00\% LWL$).

中央部付近ではほぼ同一値をとり、船首尾では水線幅が広いほど正值のピークが大きくなる傾向を示している。縦 GM 減少量を評価するため正值領域の積分値を比較した結果を Fig.9 に示す。横 GM 減少量の場合と同様に、前後対称の水線幅をもつ船型が最も浸水時のスタビリティ低下が少ない。

前後対称の C_p カーブをもつ船型 ($C_p = 0.600$) について、 C_w 値を変化させた場合の縦 GM 減少率の比較を Fig.10 に示す。 C_w 値が大きくなるほど正負のピーク、正值の積分値ともに大きくなり、 C_w が大きい

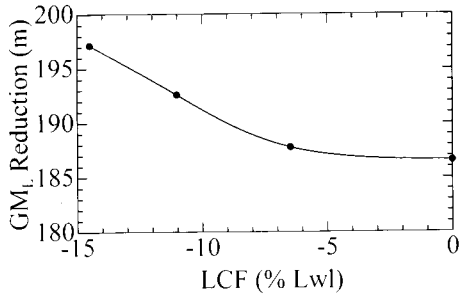


Fig. 9 GM_L reduction of numerical hull form ($LCB = 0.00\% LWL$).

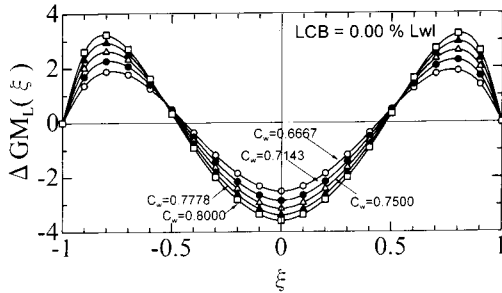


Fig. 10 The index of GM_L reduction of numerical hull form ($LCB = LCF = 0.00\% LWL$).

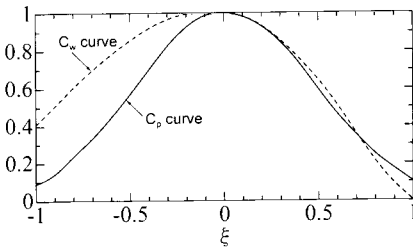


Fig. 11 C_p & C_w curves of a practical hull form.

方が浸水後のトリムが大きくなる。

3.4 実用船型の検討

実用船型について縦横の GM 減少率を計算して、浸水による復原力の変動特性を検討した。

計算対象とした実用船型のプリズマティックカーブを Fig.11 に示す。本船は設計フルード数 0.32 の排水量型単胴船であり、船型係数は C_b が 0.567, C_p が 0.582, C_w が 0.695 である。 C_p カーブはほぼ前後対称であるが、浮心はミッドシップより後方である。

横 GM 減少率の計算結果を Fig.12 に示す。図中の実線はオフセットデータより直接計算した結果、破線は C_p カーブ、及び C_w カーブを用いた近似計算結果を

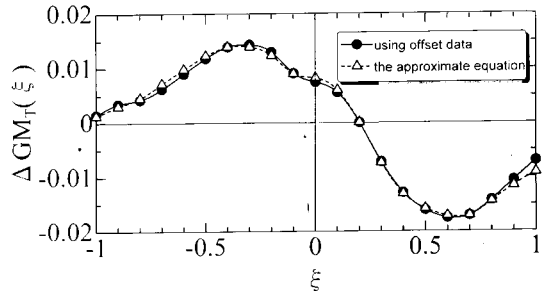


Fig. 12 The index of GM_T reduction of a practical hull form.

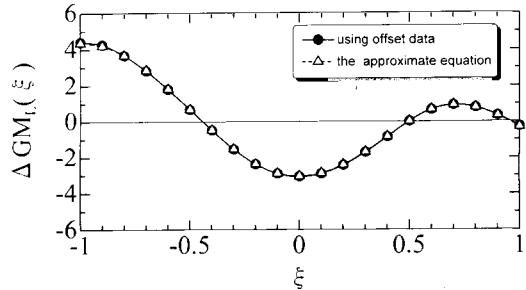


Fig. 13 The index of GM_L reduction of a practical hull form.

示している。図に示すとおり、直接計算と近似計算の結果にはほとんど差が無い。

先に横 GM 減少率の性質を検討したとおり、前後対称の C_p カーブに対し、水線幅の狭い船首側は負値、幅広の船尾側では正値をとる結果が得られた。本船型においては船尾側の浸水の方が横スタビリティの損失が大きいと考えられるため、この領域の区画配置には注意を要する。また、浸水により横安定が失われた場合、横 GM 減少率が負値をとる区画に注水する事で、これを回復できる可能性を示唆している。

同じ実用船型を用いて縦 GM 減少率を検討した。結果を Fig.13 に示す。ここでも直接計算の結果と近似計算の結果が良く一致している。

縦 GM 減少率は長手方向の浸水に対するスタビリティ変動特性を考えているため、浮心 LCB の前後位置の影響が横 GM 減少率に比べて著しく大きい。

微小区画への浸水によるミッドシップ回りの浮力モーメント減少率 $\Delta M_B(x)$ は、

$$\Delta M_B(x) = \rho g x v(x) \quad (24)$$

浮心 (LCB) 回りのトリムモーメント増加率 $\Delta M_T(x)$ は、

$$\Delta M_T(x) = \rho g (x - LCB) v(x) \quad (25)$$

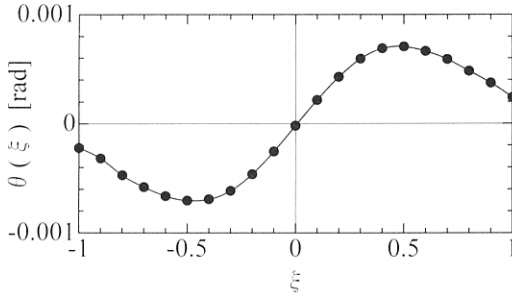


Fig. 14 The index of trim increase of a practical hull form.

さらに $\Delta GM_L(x)$ を用いて、単位長さに浸水した場合のトリム増加量分布 $\theta(x)$ を考えると、

$$\theta(x) = \frac{\Delta M_T(x) \cdot 1}{\rho g \nabla_s [GM_L - \Delta GM_L(x) \cdot 1]} \quad (26)$$

本船の計算結果を Fig.14 に示す。この値にさらに浮面心からのレバーを乗じればトリムに伴う喫水の上下を表し、初期の区画計画において隔壁の粗密を考慮の上で参考になる。

4. 縦波中の GM 減少率

喫水を x の関数と考えれば縦波中の GM 減少率を静的に計算することが出来る。

縦波の想定は、波高が波長の 1/20 であるトロコイド波とした。谷の位置を指定すると波下の排水容積を計算できるが、一般にその排水容積と浮心は船の重量、重心と一致しないため、収束計算を実施して釣り合うようなトリム、ライズを求めて水線面を決定した。¹⁾

波長が水線長と等しい縦波中で、船体に対する谷の相対位置 (Trough Position) を変化させて実用船型の横 GM 減少率を計算した。結果は Fig.15 に示すとおりであり、横 GM 減少率が谷の位置により大きく変化する様子が表れている。この計算結果における正值領域の積分値より、谷の位置ごとの横 GM 減少量を求めた結果を Fig.16 に Δ で示す。横軸は Trough Position を表す。また、縦波中においては Intact の GM 値も変化するので、この計算値を Fig.16 に \bullet で示した。この結果より浸水後の GM 値は \bullet から Δ の差になるので、負になる可能性があるのは図中のハッチングした範囲であり、本船型においては船体が波の山に位置する場合 GM 減少量が大きいことが分かった。

一例として Fig.17 に谷の位置が $\xi = 0.8$ の横 GM 減少率を静水中の結果と比較して示すが、静水中に比べ、正の領域が短い区画に集中しており、そのピークが非常に大きい。これは短い浸水区画に対して失うスタビリティが大きい事を示している。一般に従来の可浸長検討

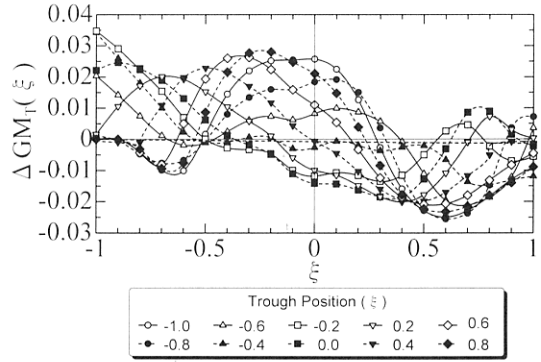


Fig. 15 The index of GM_T reduction in longitudinal waves.

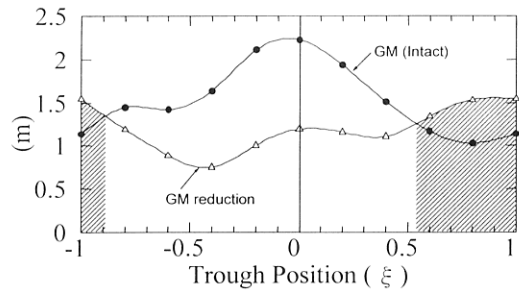


Fig. 16 GM_T and GM_T reduction in longitudinal waves.

のみから隔壁配置を決定する場合はミッドシップ付近は余裕があるため、機関室など比較的長大な区画を持つことが多い。しかし本検討においては、この領域の浸水による横 GM 減少量が大きいことが明らかとなり、縦通隔壁を含めた区画配置を慎重に行う必要がある。

一方、船首側にある GM 減少率が負の領域にバラストタンクを配置することで、浸水した場合のカウンターバラストの量を最小限度に抑える効率的な配置が可能になると思われる。このように、配置計画の前に GM 減少率を計算しておけば、船型と区画配置を結びつけて考える指標となりうる。

5. 結論

以上、浸水による GM 減少率を検討する中で得られた知見は以下のとおりである。

- GM 減少率の計算により、浸水区画長から GM の減少量を容易に見積もることができる。
- ある断面積曲線 (C_p カーブ) を与えた場合に、浸水による GM 減少量を最も小さくする水線幅曲線 (C_w カーブ) が存在する。
- Intact のスタビリティを重視して水線幅の拡大に

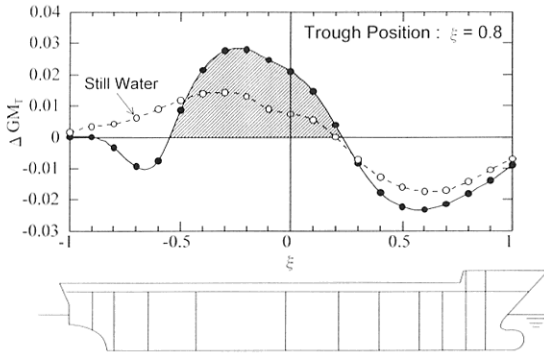


Fig. 17 The comparison of the index of GM_T reduction in waves and in still water.

より重心高化を許容する計画は、浸水時のスタビリティ低下が大きく危険である。

- GM 減少率は波浪中でも静的に計算することができ、船型によっては、波の谷の位置によって減少率が大きく増加するので注意を要する。

参 考 文 献

- 1) 佐久間俊：浸水による GM 減少率に関する一考察，防衛庁技術研究本部技報第 6719 号，2001.

[討論] (三井造船) 浅野 義彦

C_w と GM 減少率の関係を示された Fig.3 について、 $C_w = 0.75$ 付近で GM 減少率が極小値を持っていますが、この極小値についての見解をお願いします。

[回答]

C_p 曲線を与えた場合、浸水による GM 減少量を最小にする C_w 曲線が存在すると考えています。本論で $C_w = 0.75$ で GM 減少量が極小となったのは、 C_p 、 C_w 曲線を (22)、(23) 式のように定義し、また C_p 値が 0.60 であるという条件の下であり、一般論ではありません。

[討論] (マリンユナイテッド) 河内 俊一

排水量を極力下方に持つ船型や前後対象船型の方が横 GM 減少量が少なくなると記述されていますが、実船型において推進性能他の性能との関連も考慮してこれらの内容を反映する考えがあるかお聞かせ願います。

[回答]

GM 減少率と推進性能、運動性能とを同時に最適化することは今のところ考えていません。GM 減少率は C_w 曲線（肋骨線形状）と区画配置を区画浸水という観点で結びつけて考える指標として設計に応用できると考えています。