

トリマランの復原性について

－復原力曲線と強風下の復原性－

はじめに

SRC News No.65に、トリマラン型高速船の復原性の特徴に、片舷副船体の復原力喪失状態があり、この状態でも全体として復原力をプラスに維持する条件で、主要目や配置を設定し、更に推進性能を推定して通常高速船と比較した例を紹介しました。本稿では、その特徴を具体的に復原力曲線で示し、強風下特性を評価してみます。

1. 復原性について

復原性とは、ある傾斜した状態から元の釣り合い状態に戻る能力を言い、静的復原力と動復原力に分類されます。前者は傾斜の状態から元へ戻るモーメントで、 $W \times GZ$ で表され、後者は釣り合い状態からある角度まで傾斜するのに要する仕事で、モーメント×角度の積分で表されます。傾斜角が微小範囲の初期復原力は、排水量 $W \times$ 復原艇 GZ がメタセンター高さ GM と傾斜角 θ により $W \times GM \times \sin \theta$ となりますが、傾斜が大きいと、水線面形状や水中形状が変化し、 $W \times GZ$ は初期復原力の式では表せなくなります。

2. 風による傾斜

傾斜角0で静止している状態で、真横から突風を受けた場合、まず、船の動的復原力と風の傾斜モーメントによる仕事が釣り合う最大傾斜まで傾き、風が継続すれば、静的復原力が釣り合う定常釣り合い角 θ_1 に戻ります。図-1に船体の静的復原力曲線と風による傾斜モーメント曲線を示します。ハッチング部分の上下面積が同じとなる角度が最大傾斜角度 θ_2 です。船舶復原性規則には、風圧モーメント式、諸係数、海域毎の標準風速を与え、船舶が満たす条件を規定しています。図-2にC係数基準(乙規定)の概略を記します。ここで、 D_w は定常風による傾斜偶力矩、 θ_1 は定常風による定傾斜角、 θ_0 は不規則波中同調横揺角、 θ_f は

海水流入角であり、ハッチング部分の上下の面積比をC係数と呼んでいます。

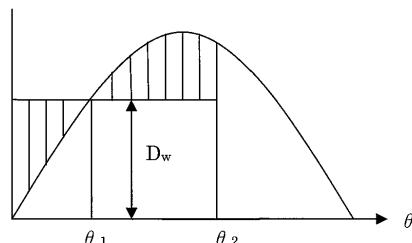


図-1 突風による最大傾斜角

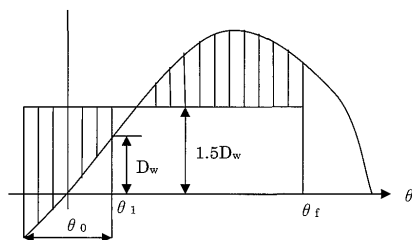


図-2 C係数基準

なお、定常風による傾斜偶力矩は $D_w = kAH/W$ で計算され、 k は近海区域以上の船については風速26m/s、沿海区域の船については19m/s、限定沿海の船については15m/sの定常風を考えた係数です。また、不規則波中同調横揺角は $\theta_0 = \sqrt{138rs/N}$ で計算されます。ここで横揺減衰係数 $N=0.02$ を用い、有効波傾斜係数 $r=0.73+0.60G/d$ で、 OG は水面から重心までの垂直距離、波岨度 $s=p-qT$ 、 $0.1 \geq s \geq 0.035$ で計算されます。

3. 復原性について

SRC News No.65で紹介した通常船型とトリマラン型的高速船から、載貨重量の同じケースを選定し、復原力曲線を求め、強風下復原性能を検討してみました。表-1に主要目、重量・重心、静的復原性等、計算条件を、図-3に念のために作成した通常船型及びトリマラン型高速船の中央断面形状を記します。船体形状はSRC News No.65記載の数式表示、即ち、無次元表示形式及び係数を採用します。

$$f(x) = 1 - |x|^2, \quad n = 2$$

$$g(z) = z^{1/m}, \quad m = 4$$

$$y(x, z) = f(x) \cdot g(z)$$

としています。

なお、 $x = X/(L/2)$ 、 $-1 < x < 1$ 、

$$y(x, z) = Y(X, Z)/(B/2)$$

$$z = Z/d$$

ここで $0 < z < 1$ では $g(z)$ は上記の式ですが、 $z > 1$ では $g(z)=1$ とします。

表-1 主要目・重量・重心、静的復原性等、計算条件

	通常船型	トリマラン	主船体	副船体
L[m]	110.0	165.0	165.0	45.0
B[m]	20.0	32.0	16.5	3.0
D[m]	10.0	13.0	13.0	10.0
d[m]	5.0	6.0	6.0	3.0
Δ [t]	6013	9371	8929	2×221
DW[t]	2440	3004		
A[m ²]	1210	2145		
KG[m]	6.50	8.45		
GM[m]	1.99	2.19		

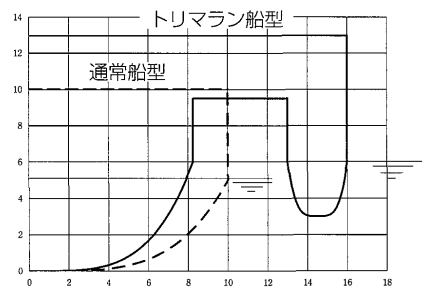


図-3 中央断面形状
(通常船型、トリマラン船型)

図-4に側面形状を示します。いずれも、上甲板上に高さ3mの2層の上部構造を想定しています。

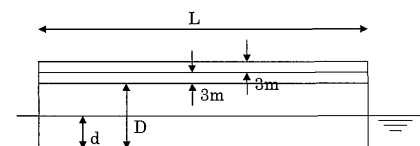


図-4 側面形状

4. 復原力曲線(通常船型)

図-5に通常船型の復原力計算結果を示します。復原力は傾斜角とともに増して水面が上甲板端付近に達する角度で最大となり、減少に転じる典型的な特徴です。また、沿海域就航を条件での横風下の復原力評価を図中に併記してきます

が、評価指数C係数は2.38と安全側です。

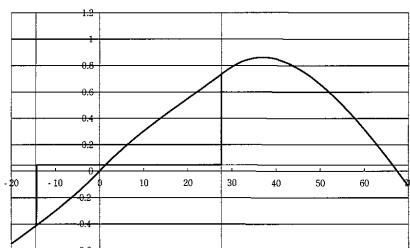


図-5 復原力計算結果（通常船型）

5. 復原力曲線（トリマラン型高速船）

図-6にトリマラン型高速船（トリマランA）の復原力計算結果を示します。傾斜角が微小範囲では、通常型と同様に傾斜角と共に復原力は増加しますが、片舷の副船体船底が水面を離れて復原力を失う状態から水面が連結構造下部に接するまでの間は全体の復原力が若干減少する現象が見られ、次に上甲板端付近に水面が達するまで増加し、減少に転じます。なお、主副船体間連結の高さを3.5mとしています。初期復原力が小さいと、片舷副船体復原力喪失状態で、マイナス復原力となる場合もあります。この復原力が低い範囲では、かなり不安定になりますが、更に傾斜すれば復原力が増して安定になります。横から突風を受けると一挙に大きな最大傾斜角に達し、比較的大きな定常傾斜角に落ち着くと思われます。

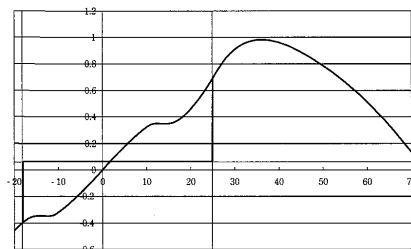


図-6 復原力計算結果（トリマランA）

図-7に主副連結構造下部形状を傾斜時に浸水面積が増す様に配慮した形状を実線で示します（トリマランB）。図-8にそれらの復原力曲線を実線で示します。連結構造下部接水開始が早まり、接水面積が増すことから、復原力喪失範囲の

縮小効果が見られます。

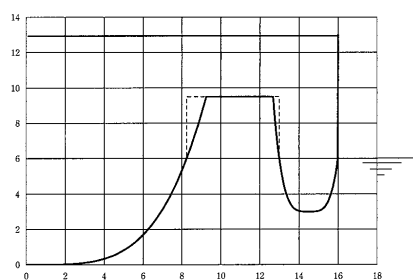


図-7 中央断面形状（トリマランB）

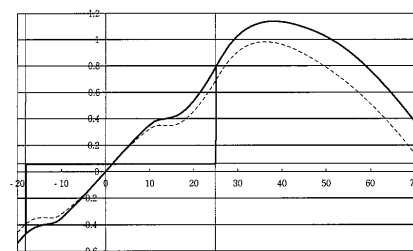


図-8 復原力計算結果（トリマランB）

6. トリマラン船型の横揺周期について

沿海域就航を条件に船舶安全規則に従って横風下の復原力評価をC係数を使って行います。前述したようにC係数を求めるために横揺周期Tを与える必要がありますが、通常船型の場合は、 $T = 2\pi \cdot \kappa / \sqrt{g \cdot GM}$ 、環動半径 $\kappa = cB$ 、 $c = 0.4$ で求めることにします。しかしながら、トリマラン船型の場合cが分かりません。そこで、トリマラン船型の環動半径を簡易的に求める方法について考察を加えます。

まず、準備として副船体は主船体と幾何学的に相似（相似比 γ ）であると仮定し、主副船体中心間距離 b とすると、以下の様な値になります。

$$\gamma = \sqrt[3]{\Delta_m / \Delta_s} = 0.29$$

$$b = (B - B_s) / 2 = 14.5$$

次に、船体全体の質量慣性モーメントを I とすると、

$$I = I_m + 2I_s$$

$$\Leftrightarrow$$

$$I = I_m + 2\{I_m \times \gamma^5 + b^2(m_m \times \gamma^3)\}$$

となります。ここで、 I_m 、 I_s は主船体、副船体の質量慣性モーメントで、副船体の質量 m_s は主船体の質量 m_m を用いて

$m_s = m_m \times \gamma^3$ と表しています。

また、上式を環動半径 K を用いて表すと、

$$m\kappa^2 = m_m\kappa_m^2 + 2\{m_m\kappa_m^2\gamma^5 + b^2m_m\gamma^3\}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\kappa^2 = \frac{m_m}{m}(\kappa_m^2 + 2\kappa_m^2\gamma^5 + 2b^2\gamma^3)$$

となります。ここで、 m は船体全体の質量、 K_m は主船体の環動半径です。

最後に、副船体一つ分の上下運動に対する付加質量 δm を考慮すると、

$$\kappa^2 = \frac{m_m}{m} \left\{ \kappa_m^2 + 2\kappa_m^2\gamma^5 + 2b^2 \left(1 + \frac{\delta m}{m_m} \right) \gamma^3 \right\}$$

となります。

結局、 $K_m = 0.4B_m = 6.6m$ を用いて、 $\delta m / m_m = 0.02$ とすると $c = 0.224$ となりました。

7. 復原性評価

復原性評価結果を図-5、6、7、表-2、3に示します。図-6、7、表-2はトリマラン船型に対してだけ $c = 0.224$ を用いたもので、表-3は全ての船型に対して $c = 0.4$ を用いたものです。また、海水流入角 θ_f は中央断面の上甲板の端に開口部があると仮定して計算し、復原力消失角を θ_e としました。表-2、3ともに、通常船型よりは低いC係数になっていますが、トリマラン船型間の比較では初期復原力及び主副連結構造下部形状による影響が分かります。

表-2 C係数（ $c = 0.224$ ）

	C係数	θ 0[deg]	T[s]	θ_f [deg]	θ_e [deg]
通常船型	2.38	15.65	11.4	27.6	66.4
トリマランA	1.15	19.41	9.7	24.9	71.8
トリマランB	1.25	19.41	9.7	25.1	76.7

表-3 C係数（ $c = 0.4$ ）

	C係数	θ 0[deg]	T[s]	θ_f [deg]	θ_e [deg]
通常船型	2.38	15.65	11.4	27.6	66.4
トリマランA	1.63	15.34	17.4	24.9	71.8
トリマランB	1.82	15.34	17.4	25.1	76.7

まとめ

トリマラン型高速船の復原性能特性を復原力曲線と船舶安全規則を用いて評価しました。片舷副船体の復原力喪失時に不安定にはなり、傾斜角が大きくなりますが、十分な初期復原力と主副船体連結構造下部高さや形状を適切に設定することによって、安全上問題とはならない設計ができることを確認しました。