船体に作用する波浪断面力に関する研究

正員 秋 田 好 雄* 正員 田 代 新 吉*

正員 日 笠 則 明*

A Study of Wave induced Forces and Moments acting on the Ship Hull

by Yoshio Akita, *Member* Shinkichi Tashiro, *Member*
Noriaki Hikasa, *Member*

Summary

Recently, a conception of "Total System" has become popular, which is a very useful technique to predict extreme values of ship motion, bending moment or other items of seaworthiness in confused seas. The system generally consists of two processes, one is to analyze ship motion and get response functions of items of seaworthiness among regular waves, and another is to perform statistical analysis on given response functions, and get short term and long term predictions in confused seas.

We developed "Total System of Analysis on the Longitudinal Strength of Ships" as one of such systems, and have devoted our efforts on investigating about ship's longitudinal strength using this system.

In this paper, we report these results examined on the six components of forces and moments induced by waves such as wave shearing force, wave bending moment and so on, based on the calculation performed on a number of existing ships. And for the convenience of initial desing of ship's longitudinal strength, we give brief expressions about six components of forces and moments induced by waves.

1 緒 言

船体の縦強度を考察する場合、従来はトロコイドのような規則波の中で、静的に釣り合っている状態を仮定し、これから剪断力、曲げモーメントを計算していた。

近年になって、規則波中の船体運動解析理論が精密化され、流体力、慣性力等を考慮した波浪断面力が計算できるようになった。また、当初不規則波中の船体運動解析のために提案された線形重ね合わせ法を、波浪断面力の場合にも応用することにより、不規則波中の波浪断面力の異常値を予測することができるようになった。このように、規則波中において船体の耐航性諸要素の応答関数を計算し、これを統計処理して異常値を推定する手法を一般にトータルシステムと呼んでおり、初期計画時における構造強度の設計に際して有効な手段となっている。

著者らは先にこのようなトータルシステムを開発し、シリーズ計算の結果を報告したが、今回はさらに計算対象船の範囲を広げ、小型船から巨大船までを含む各種

船型船種・32 隻について波浪断面力、すなわち垂直剪断力、垂直曲げモーメント、水平剪断力、水平曲げモーメント、軸力、振りモーメントの 6 成分の期待値を計算した。これらの計算に基づいて、載荷状態、肥瘠度などによる波浪断面力の変化を調査した。また主要船級協会規則による値と比較し、さらに初期設計時の便をはかるため、この結果をとりまとめて波浪断面力 6 成分についての略算式を求めた。

2 解 析 方 法²⁾

規則波中における船体運動解析には、通常行なわれているように、上下揺、縦揺を連成させた縦運動系、左右揺、船首揺、横揺を連成させた横運動系、前後揺のみの非連成運動の 3 つの運動系に分け、それぞれにストリップ法を用いた。この理論の説明は他の文献に譲る^{3), 4)}。船体運動が求まれば、その解を用いて波浪断面力を計算することができる。

次に統計解析には、先に求めた波浪断面力の応答関数を、線形重ね合わせ法により処理し、異常値の短期、長期予測を行なう。今回の計算では、不規則波の波浪スペクトルとして ISSC-1970 のものを用い、長期の波浪発

* (財)日本海事協会

現頻度データとして Walden の冬季北大西洋の観測データを用いた。

3 解析対象船

解析を行なった船は、表 1 に示すように一般貨物船 7 隻、コンテナ船 4 隻、バルクキャリア 8 隻、タンカー 11 隻、鉱石運搬船 2 隻の計 32 隻にわたっている。また載荷状態としては、すべての船で満載状態およびバラスト状態の 2 ケースを考え、船によってはそれ以外の載荷状態も考慮した。

4 解析結果

4.1 波浪断面力に及ぼす載荷状態の影響

船の就航中に想定される種々の載荷状態について波浪断面力を計算したが、波浪断面力成分のうちには必ずしも満載状態で最大とならず、バラスト状態において最大となるものがあったので、載荷状態が波浪断面力に与える影響について調査した。船の載荷状態には、全積載量および偏積という 2 つの要因があるので、これらをできるだけ独立に扱えるように、次のような調査方法をとった。

まず全積載量による変化を見るためには、貨物倉に均等載荷 (homogeneous loading) した。積載量の変化は結果的には吃水差となるから、吃水の変化に応じて波浪断面力成分がどのように変化するかについて調べたうちの一部を図 1、図 2 に示す。吃水による変化の傾向は成

表 1 解析対象船主要目

No.	Type of Ship	L (m)	B (m)	D (m)	d_f (m)	Displacement (ton)	C_b	C_w	V(knot)
1	Gen. Cargo	43.000	7.600	3.800	3.411	822	0.7052	0.8705	11.07
2	Gen. Cargo	85.000	15.000	8.700	6.015	5727	0.7254	0.8514	12.50
3	Tanker	88.000	14.200	7.100	4.462	5942	0.7375	0.8751	12.90
4	Gen. Cargo	100.000	15.300	7.900	6.480	7552	0.7325	0.8580	12.25
5	Gen. Cargo	134.600	19.000	11.750	8.811	14665	0.7215	0.8194	14.75
6	Gen. Cargo	137.500	19.200	11.200	8.287	16834	0.7489	0.8615	14.00
7	Gen. Cargo	140.260	20.800	12.000	9.120	17977	0.6576	0.7724	16.56
8	Gen. Cargo	145.000	21.800	10.600	9.021	17226	0.5851	0.7205	18.60
9	Ore Carrier	160.000	23.500	13.500	9.322	28948	0.8050	0.8644	15.00
10	Bulk Carrier	165.000	25.000	14.000	10.423	33744	0.7632	0.8630	14.80
11	Bulk Carrier	170.000	28.400	15.150	12.957	42673	0.7842	0.8675	14.70
12	Container	175.000	25.200	15.300	10.724	26967	0.5832	0.7282	21.60
13	Bulk Carrier	184.000	29.500	16.700	11.025	50025	0.8135	0.8759	14.60
14	Container	200.000	30.000	16.300	10.526	34171	0.5642	0.7034	22.50
15	Bulk Carrier	200.000	32.200	18.200	12.526	67578	0.8154	0.8825	14.80
16	Bulk Carrier	213.000	31.700	17.300	11.528	65724	0.8227	0.8825	16.05
17	Tanker	213.000	32.000	16.900	12.993	73024	0.8040	0.8727	15.50
18	Bulk Carrier	220.000	32.200	18.500	12.455	74689	0.8219	0.8899	15.10
19	Tanker	230.000	35.300	18.000	12.489	85920	0.8122	0.8717	15.30
20	Tanker	230.000	40.000	19.800	14.929	112699	0.8055	0.8770	15.40
21	Bulk Carrier	236.220	31.582	18.750	11.930	77174	0.8203	0.8974	16.50
22	Container	245.000	32.200	21.500	12.031	58058	0.5922	0.7800	26.40
23	Tanker	246.000	40.200	21.800	15.101	121110	0.7971	0.8750	15.57
24	Ore Carrier	247.000	40.600	23.000	16.031	123271	0.8185	0.8738	14.80
25	Bulk Carrier	250.000	42.000	22.800	16.164	143375	0.8185	0.8880	15.25
26	Container	252.000	32.200	20.920	12.031	59311	0.5930	0.7743	27.48
27	Tanker	270.000	44.000	25.000	17.833	179950	0.8274	0.8926	14.80
28	Tanker	281.000	46.200	25.000	17.034	183139	0.8160	0.8776	16.10
29	Tanker	302.000	50.400	24.300	18.436	236250	0.8137	0.8882	16.10
30	Tanker	314.000	54.800	26.400	20.530	297959	0.8234	0.8931	15.80
31	Tanker	326.000	49.800	23.200	17.685	241882	0.8280	0.8868	16.50
32	Tanker	330.000	54.500	35.300	27.074	425674	0.8509	0.9248	15.00

図1 波浪断面力に及ぼす吃水差の影響 (No. 21 船)

図2 波浪断面力に及ぼす吃水差の影響 (No. 26 船)

分により異なるが、今回計算した 32 隻については、水平剪断力、水平曲げモーメントおよび軸力はすべての船が満載状態で最大を示し、垂直剪断力、垂直曲げモーメントは大部分の船が図1のようにバラスト状態で最大になったが、数隻は図2のように満載状態で最大になった。また振りモーメントについては、船によって異なり、ある定まった傾向のようなものは見られなかった。

次に貨物の偏積による変化を見るために、表1のNo.

21 船について全積載量を変えずに、均等载荷の状態から前後部貨物倉、または中央部貨物倉に偏積させた。この時の波浪断面力成分の変化を図3に示す。図3では左方に移るほど中央部に偏積が強くなっている。図中 C_{MS} および α は、 W を排水量として次式によるものである。

$$C_{MS} = \text{最大静水中縦曲げモーメント} / WL \quad (1)$$

$$\alpha = \text{縦方向の重量慣性二次モーメント} / WL^2 \quad (2)$$

この図から、軸力がおおむね一定である他は、各成分

図3 波浪断面力に及ぼす貨物偏積の影響(No. 21 船)

とも中央に偏積するに従いその値が増加する傾向があることがわかる。

4.2 波浪断面力におよぼす船形の肥瘠度の影響

船形の肥瘠による波浪断面力の変化を調べるために、表1のNo.7 船を Type ship として一定の方法で船型を肥瘠させた。それらについて波浪断面力を計算したところ、船が full になるに従い、振りモーメントは減少し、その他の成分はおおむね増加する傾向があった。

4.3 波浪断面力に及ぼす船速の影響

船速による波浪断面力の変化を調べるため、表1のNo. 7, 21, 26, 32 船の4隻について船速を種々変化させて波浪断面力を計算したが、結果からは特に定まった傾向は見出せなかった。この中で No. 26 船はコンテナ船であるが、船速が増加すると振りモーメントが急激に増加している。これは横揺ダンピングの船速影響にもよると考えられるが、他の No. 7, 21, 32 船ではこのような現象は現われていないことから、4.2 とも関連して船型の影響にもよるものと思われる。

4.4 船級協会規則値との比較

NK の船体縦強度解析に関するトータルシステムにより計算した波浪断面力の成分のうちの、垂直剪断力と垂直曲げモーメントについて、 10^8 回の繰り返しに対する最大期待値と、各船級協会規則による値とを比較した。

参照した規則は、NK は昭和 51 年度版、LR と AB は 1976 年度版、NV と BV は 1975 年度版のものである。これらの比較を図 4, 図 5 に示す。

図中、FY および MX の後の文字は船級協会名を、最後に S または H が記されているものはそれぞれサギングおよびホギングを示す。また FYTS および MXTS はトータルシステムによる計算値である。

これらの図から、FYTS および MXTS の値が 10^8 回に対するものであるから、これをよりどころとして各船級協会の長期予測における回数を推定すると、垂直剪断力に対し $10^8 \sim 10^9$ 回、垂直曲げモーメントに対し $10^4 \sim 10^6$ 回程度であることがわかる。

4.5 波浪断面力の最大値

波浪断面力の最大値を表わすモデル構造式を

$$F = C \cdot X_1^{a_1} \cdot X_2^{a_2} \cdots X_k^{a_k} \cdot U \quad (3)$$

と仮定した。ただし $X_1, X_2, \dots, X_k$ は波浪断面力の値に影響を及ぼす L, B などのパラメータ、 U は誤差項である。このモデル構造式に対し、対数線形回帰分析を行ない、 $C, a_1, a_2, \dots, a_k$ を決定した。 $X_1, X_2, \dots, X_k$ に相当するパラメータとしては $L, B, D, d_f, C_b, C_w, V$ を考慮し、指数 $a_1, a_2, \dots, a_k$ については絶対値の小さいものは省略し、小数点以下の端数は計算しやすいように丸めた。さらに、各船級協会規則の算式や、剪断力と曲げモーメントとの積分関係を考慮して、波浪断面力の最大値を表わす近似式の形をそれぞれ次のように決定した。

(1) 水平剪断力 F_X について

$$C_{FX} \cdot L \cdot d_f \cdot (C_b + 0.05) \cdot f_{(L)} \quad (4)$$

ただし

$$f_{(L)} = \begin{cases} 10.75 - \left(\frac{300-L}{100} \right)^{3/2} & ; L \leq 300 \\ 10.75 & ; L > 300 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 垂直剪断力 F_Y について

$$C_{FY} \cdot L \cdot B \cdot (C_b + 0.7) \cdot f_{(L)} \quad (6)$$

(3) 軸力 F_Z について

$$C_{FZ} \cdot B \cdot d_f \quad (7)$$

(4) 垂直曲げモーメント M_X について

$$C_{MX} \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_b + 0.7) \cdot f_{(L)} \quad (8)$$

(5) 水平曲げモーメント M_Y について

$$C_{MY} \cdot L^2 \cdot d_f \cdot (C_b + 0.05) \cdot f_{(L)} \quad (9)$$

(6) 振りモーメント M_Z について

$$C_{MZ} \cdot L \cdot B^3 \cdot f_{(Cw)} \quad (10)$$

ただし

$$f_{(Cw)} = \begin{cases} 1.43 C_w & ; \text{コンテナ船以外} \\ 7.0 C_w - 3.7 & ; \text{コンテナ船} \\ \text{最小を 1.0 とする} \end{cases} \quad (11)$$

ここで、式 (4), (6), (8), (9) に含まれている

$f_{(L)}$ は, IACS の船体縦強度の minimum Z に関する統一規則に採用されている船長の影響を表わす算式と同一である。しかし今回の調査結果からは, 垂直剪断力および垂直曲げモーメントの場合には式 (6), (8) の代わりに $f_{(L)}$ を省略して

$$C'_{FY} \cdot L \cdot B \cdot (C_b + 0.7) \quad (12)$$

$$C'_{MX} \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_b + 0.7) \quad (13)$$

とした方が良好な傾向を示している。

次に係数 C_{FX} , C_{FY} , C_{FZ} , C_{MX} , C_{MY} , C_{MZ} については, 先に述べた回帰分析結果の他, 次のような点を考慮した。まず発現頻度レベルでは, トータルシステムの計算では 10^8 回レベルとしたが, 4.4 で述べたように, これまで比較的研究され, 実績のある垂直曲げモーメントが 10^8 回程度を考慮しているようなので, これに合わせることにした。次に表 1 に示したすべての船に関して式 (4) ないし式 (11) の係数を逆算し, これらの大きい方から $1/3$ までの値をとって平均し, この 20% 増の値を採用することとし, 係数 C_{FX} , C_{FY} , C_{FZ} , C_{MX} , C_{MY} , C_{MZ} に対しそれぞれ 0.2, 0.069, 21, 0.017, 0.044, 0.003 を得た。ただし振りモーメントの係数 C_{MZ} では, L が 100m より小さい範囲で他から離れる傾向があったが, このような小型船では振りモーメントが強度上問題になることはあまりないので, この範囲を除いて係数を

計算してある。また, 式 (12), (13) の係数 C'_{FY} , C'_{MX} はそれぞれ 0.59, 0.15 であった。

図 6 ないし図 13 には, 各波浪断面力成分の 10^6 回の繰返しに対する最大期待値から逆算した係数の分布を示した。

4.6 波浪断面力の船長方向分布

4.4 および 4.5 では波浪断面力の最大値のみを取り扱ってきたので, ここではその船長方向分布について述べる。

表 1 に示したすべての船について波浪断面力の船長方向分布を求め, それぞれについて最大値が 1.0 となるよ

図 8 軸力の係数

図 6 垂直剪断力の係数

図 9 垂直曲げモーメントの係数

図 7 水平剪断力の係数

図 10 水平曲げモーメントの係数

図 11 振りモーメントの係数

図 13 垂直曲げモーメントの係数 (式 (13) による)

図 12 垂直剪断力の係数 (式 (12) による)

うに縮尺して作図した。その一例を図 14, 図 15 に示す。次にこれらの包絡線を求めて計算しやすい形に修正し、船長方向分布関数をそれぞれの波浪断面力成分に対して決定した。これを表 2~7 に示す。この分布関数において square station の中間における値は直線補間によるものとする。また、 $g_{FX}(X/L)$ と $g_{MZ}(X/L)$ とでは F.P. で 0 になっていないが、これは船体の F.P. より前にある部分の影響や船首部の形状の影響で、いくつかの場合の分布が、F.P. 部分で急峻になっていたためである。

ここに、任意の船の任意の断面に働く波浪断面力の期待値は、式 (4)~(13) で与えられる最大値と、表 2~7 で与えられる分布関数との積として求められる。

5 結 言

本報告では、海洋波中において船体に生ずる波浪断面力の 6 成分の長期予測値について、32 隻の各種船型の船について計算を行ない調査した。その結果、次のようなことが得られた。

(1) 均等載荷状態で、貨物の載荷量が増加した場合、水平剪断力、水平曲げモーメントおよび軸力は常に積載量の増加、したがって吃水の増加とともに増加するが、垂直剪断力、垂直曲げモーメント、振りモーメントは必ずしも満載状態で最大を示さず、パラスト状態で最大となる船が多い。しかし今回計算したコンテナ船の例では、これら 6 成分とも吃水の増加とともに増加し、他の船種の船とは異なった傾向を示した。これは船型が fine であることによるものと想定されるが、今後さらに調査の必要がある。

(2) 貨物を偏積した場合は、均等載荷時に比べ、波浪断面力の値はバラつくが、船体中央部に偏積した場合

図 14 垂直剪断力の船長方向分布

図 15 垂直曲げモーメントの船長方向分布

表 2 水平剪断力 F_X の船長方向分布

S. S.	$g_{FX}\left(\frac{X}{L}\right)$
A P	0.0
$2^{1/2}$	1.0
$7^{1/2}$	1.0
F P	0.5

表 3 垂直剪断力 F_Y の船長方向分布

S. S.	$g_{FY}\left(\frac{X}{L}\right)$	S. S.	$g_{FY}\left(\frac{X}{L}\right)$
A P	0.0	$5^{1/2}$	0.8
2	1.0	$6^{1/2}$	1.0
$3^{1/2}$	1.0	9	1.0
$4^{1/2}$	0.8	F P	0.0

表 4 軸力 F_Z の船長方向分布

S. S.	$g_{FZ}\left(\frac{X}{L}\right)$
A P	0.0
$2^{1/2}$	1.0
9	1.0
F P	0.0

表 5 垂直曲げモーメント M_X の船長方向分布

S. S.	$g_{MX}\left(\frac{X}{L}\right)$
A P	0.0
4	1.0
$6^{1/2}$	1.0
F P	0.0

表 6 水平曲げモーメント M_Y の船長方向分布

S. S.	$g_{MY}\left(\frac{X}{L}\right)$
A P	0.0
4	1.0
7	1.0
F P	0.0

表 7 振りモーメント M_Z の船長方向分布

S. S.	$g_{MZ}\left(\frac{X}{L}\right)$
A P	0.0
$2^{1/2}$	1.0
$7^{1/2}$	1.0
F P	0.5

は、各成分とも増加する傾向がある。

(3) 波浪断面力におよぼす船型の影響については、船型が full になるに従い、振りモーメントは減少するが、その他の成分は増加の傾向がある。

(4) 船速の影響は成分によりまた船により傾向が一定しない。この中で、コンテナ船の振りモーメントが高速で急激に増加しているのは注意する必要がある。

(5) 今回の計算結果から、波浪断面力の各成分ごとの略算式を以下のように導いた。この場合、各船級協会規則との比較考察から長期予測の発現確率レベルを 10^{-6} とした。

(i) 水平剪断力 F_X について

$$F_X = 0.2 L d_f (C_b + 0.05) f_{(L)} g_{FX} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ ton} \quad (14)$$

ただし

$$f_{(L)} = \begin{cases} 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{3/2} & ; L \leq 300 \\ 10.75 & ; L > 300 \end{cases}$$

$g_{FX}(X/L)$ は表 2 による。

(ii) 垂直剪断力 F_Y について

$$F_Y = 0.069 L B (C_b + 0.7) f_{(L)} g_{FY} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ ton} \quad (15)$$

ただし $g_{FY}(X/L)$ は表 3 による。

(iii) 軸力 F_Z について

$$F_Z = 21 B d_f g_{FZ} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ ton} \quad (16)$$

ただし $g_{FZ}(X/L)$ は表 4 による。

(iv) 垂直曲げモーメント M_X について

$$M_X = 0.017 L^2 B (C_b + 0.7) f_{(L)} g_{MX} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ton-m} \quad (17)$$

ただし $g_{MX}(X/L)$ は表5による。

(v) 水平曲げモーメント M_Y について

$$M_Y = 0.044 L^2 d_f (C_b + 0.05) f_{(L)} g_{MY} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ton-m} \quad (18)$$

ただし $g_{MY}(X/L)$ は表6による。

(vi) 振りモーメント M_Z について

$$M_Z = 0.003 L B^3 f_{(C_w)} g_{MZ} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ton-m} \quad (19)$$

ただし

$$f_{(C_w)} = \begin{cases} 1.43 C_w; \text{コンテナ船以外} \\ 7.0 C_w - 3.7; \text{コンテナ船} \\ \text{最小を1.0とする} \end{cases}$$

$g_{MZ}(X/L)$ は表7による。

ここで式 (15), (17) については $f_{(L)}$ を省略して

$$F_Y = 0.59 L B (C_b + 0.7) g_{FY} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ton} \quad (20)$$

$$M_X = 0.15 L^2 B (C_b + 0.7) g_{MX} \left(\frac{X}{L} \right) \text{ton-m} \quad (21)$$

とした方がより良好な傾向であったが、この $f_{(L)}$ につい

ては縦強度理論のこれまでの経緯もあり、即座に変更することにも問題があるので、今回はこの点を指摘するに留める。

おわりに、本研究の実施にあたり終始有益な御討論をしていただいた日本造船研究協会第134部会委員の方々、日本海事協会 D.P. 委員会の方々、また重要な御指摘をいただいた九州大学 福田教授、データの作成と計算実施に全面的に協力していただいた日本海事協会コンピュータ室の船木福己、高田 均両君に対しあつく御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 秋田好雄他：船体縦強度解析に関するトータルシステム，日本造船学会論文集，第135号，(昭49)。
- 2) 日高正孝他：NK の船体縦強度解析トータルシステム，日本海事協会会誌，No. 149, October 1974.
- 3) 元良誠三：Gravity Dynamometer による波浪中抵抗試験及び Surging について，造船協会論文集，第94号，(昭28)。
- 4) 福田淳一他：波浪中の船体運動と船体表面に働く変動水圧及び横強度に関する理論計算，日本造船学会論文集，第129号，(昭46)。