

設計不規則波を用いた最大応答推定法

— 第 2 報：コンテナ船の局部応力の推定 —

正員 深 沢 塔 一* 金 平 裕 次**
正員 宮 崎 智***

Maximum Response Estimation by means of Design Irregular Wave
- 2nd Report : Estimation of Local Stress of a Container Ship -

by Toichi Fukasawa, *Member* Yuji Kanchira
Satoshi Miyazaki, *Member*

Summary

A methodology to apply the Design Irregular Wave and the Direct Loading Analysis Method to estimate a maximum local stress in ship structural design was studied in the present paper. The Design Irregular Wave is an irregular wave train which is comprised of intentionally superposed regular waves to realize a maximum of a certain ship response in a given short-term sea state. On the other hand, the Direct Loading Analysis Method is a calculation method of time-varying stress in a whole ship structure by using FEM.

Example calculations were performed on the local stress of a 6,200 TEU over Panamax container ship. Stress transfer functions were calculated using the Direct Loading Analysis Method firstly, and the maximum local stress was estimated by means of the Design Irregular Wave with the use of the stress transfer function. An alternative method to estimate the maximum stress was investigated with the use of load transfer function, instead of the stress transfer function. Significant wave height and the mean wave period in design short-term sea state, the ship encounter angle to wave, and the phase information of the Design Irregular Wave were discussed based on the calculated maximum stress.

1. 緒 言

現在、船体構造設計においては、等価規則波による「設計規則波」を導入し、ある部材に発生する最大応力を少ない計算工数で求めようとする方法がしばしば用いられる。「設計規則波」は簡便であり、応答の非線形性も考慮できるというメリットがあるものの、実際の波浪は規則波ではないため精度的に限界があり、より実際の波浪に近い不規則波を用いた設計波を求める試みがなされている。このような状況下、著者の一人は「設計不規則波」を提案し、設計不規則波を用いることによって、与えられた短期海象中での縦曲げモーメントの最大値を、荷重の非線形性と同時性を考慮しわずかな計算工数で求めることができることを示した¹⁾。さらに、設計不規則波に最大幅度の制限を設けることにより、ある程度有義波高の高い短期海象中で、船長 175m のコンテナ船の縦曲

げモーメントの最大値は、IACS による縦強度基準値を若干超える程度の値でほぼ一定となり、腐食・衰耗のない健全な船が縦強度上の問題を起こした例は無いという現実とよく合致することを示した。

「設計不規則波」は、その中ででの応答が最大となるように、不規則波を構成する各素成波の位相を線形計算により得られる応答の位相の逆符号として与えるため、その生成にあたっては最大値を求めようとする応答の応答関数の位相情報が必要となる。したがって、船体の局部応力の最大値を推定する場合など、位相情報を含めた応答関数が得られていない場合、またはそれを得るために膨大な FEM 解析が必要であるような場合は設計不規則波の位相を簡単に決定できないという問題があった。一方、近年、船体構造解析において「直接荷重解析法」という方法が実用化され、荷重の時系列データを直接 FEM 全船モデルに負荷する手法が開発されてきた^{2) 3)}。この方法には、船体全体に作用する荷重を時系列として入力することができ、それぞれの時刻において全体変形や応力分布を出力することができるというメリットがある。本研究では、この「直接荷重解析法」と「設計不規則波」を統合的に利用し、大型コンテナ船の局部応力の最大値を推定す

* 金沢工業大学 機械系

** (株) 日平トヤマ、研究当時金沢工業大学大学院工学研究科

*** 三菱重工業 (株) 長崎造船所

原稿受理 平成 18 年 9 月 13 日

る手法について検討を行い、局部応力を対象とした設計短期海象について考察することとする。

2. 直接荷重解析法 (Direct Loading Analysis Method)

船体構造に発生する局部応力を検討するにはFEMによる船体構造解析が不可欠となる。船体構造解析には、通常、船体の一部をモデル化した部分構造モデルが用いられるが、波浪中の船体応答と直接結び付けて応力を評価するには船全体の構造モデルを用いた全船解析が望ましい。船体構造解析における全船解析法としては、これまでに離散化荷重を用いたDISAMが提案されているが⁴⁾、この方法は非線形荷重にも対応できるメリットがあるものの、物理的な荷重のイメージがつかみにくく、また、船体全体の变形や応力分布を表示させたり、応力評価点を後から追加したりするような場合には対応しにくい。

これを受けて、近年、直接荷重解析法 (Direct Loading Analysis Method : DILAM) が提案された^{2,3)}。直接荷重解析法は、船体運動計算結果から時系列の荷重データを作成し、それを直接 FEM モデルの各節点に作用させるもので、DISAM に比べて計算機に与える負担は大きくなるものの、より厳密な解析を行う事が可能である。また、DILAM は DISAM と異なり設計波的手法に対応しているため、不規則波を含む任意の時系列の設計波中での非線形応答解析が可能で、特に極限状態を想定した解析に威力を発揮する。したがって、設計不規則波と組み合わせることによって、より現実に近い最大応力に対する応答解析が期待できる。

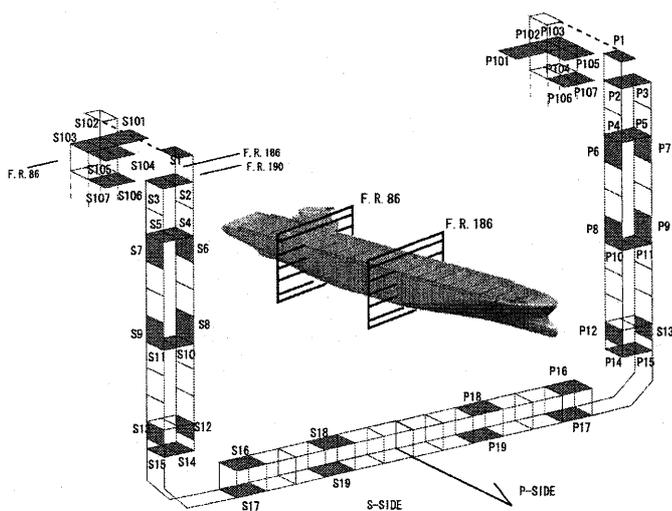


Fig.1 Evaluation points of stress

3. 解析対象船と計算海象条件

解析対象船は 6,200 TEU Over Panamax コンテナ船 ($L \times B$

$\times D-d = 287.0\text{m} \times 40.0\text{m} \times 23.9\text{m} - 13.0\text{m}$) で、船速は 23knot とした。対象とした応力点は、Fig.1 に示すように、midship よりやや前方の断面 (frame 186) の左右舷それぞれ 19 点と、船橋直前の断面 (frame 86) の左右舷それぞれ 7 点であり、各点での船長方向 (x 方向) 応力と船幅方向 (y 方向) または上下方向 (z 方向) 応力について検討を行う。

一方、対象とした短期海象は、Walden の北大西洋の波浪頻度表に対応させて、有義波高 H は 0.25m から 15.25m までを 1m おきに、平均波周期 T は 4s から 18s までを 2s おきにとり、それぞれの組み合わせについて検討した。また、船と波との出合角 χ は、0deg (追波), 30deg, 60deg, 90deg, 120deg, 150deg, 180deg (正面波) とした。

4. 応力の応答関数を用いた最大応力の推定

4.1. 応力応答関数と設計不規則波

最初に、応力の応答関数を基に設計不規則波を設定し、最大応力を推定することとする。設計不規則波を設定するためには、まず短期海象 (有義波高と平均波周期) を定め、その海象中での応答スペクトルを基に応答に有意となる素成波を抽出し、それぞれの素成波の位相を応答の位相の逆符号として重ね合わせることになる。前報では縦曲げモーメントを対象として設計不規則波を設定したが¹⁾、局部応力を対象とした場合でも考え方は同じである。

局部応力の応答関数を求めるために、まず線形ストリップ法 (STFM 法) を用いて船体運動・波浪変動圧の計算を行い、それぞれの応答関数を求めた。この応答関数より 6 自由度の運動と加速度、および各圧力点での変動圧の時系列を計算して DILAM の時系列入力データとし、時系列全船 FEM 解析を行った。これより各応力点での応力の時系列が得られるので、これを正弦補間して応力振幅と位相を算出し、応力応答関数を求めた。次に、短期海象の有義波高と平均波周期、船と波との出合角を前述のように定め、応力の応答関数と波スペクトルより長波頂不規則波を仮定して応力応答スペクトルを求めた。この応答スペクトルより応答が有意となる周波数範囲を選び、その周波数範囲の波スペクトルから素成波を抽出して設計不規則波の各素成波振幅を定め、これらを応力応答関数の位相を基に重ねあわせ、設計不規則波を作成した。

4.2. 設計不規則波中での応答シミュレーション

設計不規則波法では具体的な入射波形が与えられるため、非線形性を考慮した時系列応答シミュレーションが可能である。設計不規則波は対象とする応答が最大となるように定められたものであるため、相対的に波高が高くなり、応答の非線形性が重要となる。一方、DILAM は運動や荷重の時系

列データの入力が可能であるので、設計不規則波中で荷重の非線形性を考慮した応答シミュレーションを行って運動応答と荷重応答を求めれば非線形性を考慮した応力応答を求めることができる。しかしながら、どのような短期海象でどの程度の最大応力が発生するかを系統的に検討するには、さまざまな非線形性がいろいろな形で表れてくると結果の見通しが悪くなる。そこで、ここでは、船体の全体強度については縦曲げモーメントが支配的であると考え、縦曲げモーメントの線形・非線形計算より非線形影響係数を求め、これを線形計算値に乗じることによって、簡易的に非線形影響を表すこととする。

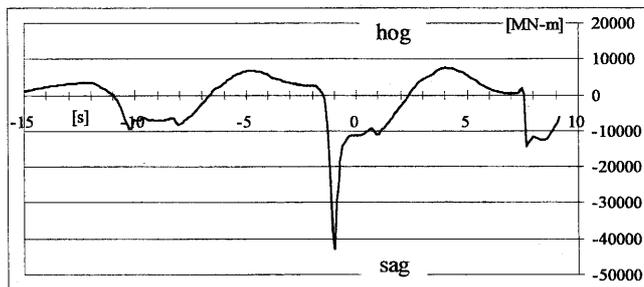


Fig.2 Time history of VBM at midship (nonlinear calculation)
(Rigid body, $F_n=0.2231$, $T=12s$, $H=14.5m$)

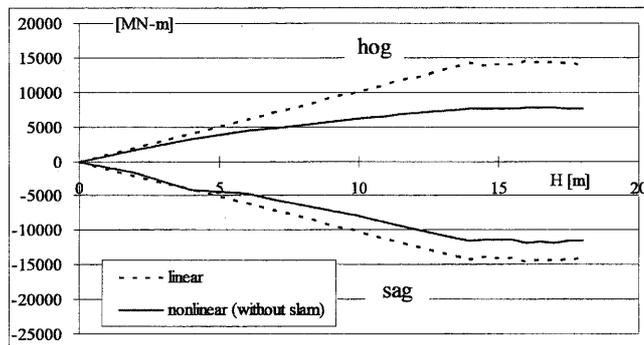


Fig.3 Max/Min values of VBM in short-term sea condition
(Rigid body, $F_n=0.2231$, $T=12s$)

Fig.2に、平均波周期 $T=12s$ 、有義波高 $H=14.5m$ の短期海象における設計不規則波中で非線形計算より得られた midship 縦曲げモーメントの時系列を示す。用いた計算コードは TSLAM で、船体は剛体と仮定した⁵⁾。これを見ると、スラミングの発生によりサギングに鋭いピークが生じているが、このピーク大きさは局所的な出会い波形や船速に大きく依存する。またスラミング衝撃により whipping 振動が誘起されるが、その大きさも船体剛性に大きく依存する。本論文では短期海象と最大応力の関係を系統的に調べるため、このような衝撃荷重による影響は今後の検討とする。すなわち、応力の波浪変動成分のみの最大値を対象として明らかなスラミングによるピーク値は対象外とする。Fig.3に、平均波周期 $T=12s$ について有義波高 H を変化させた場合の、設

計不規則波中で縦曲げモーメントの波浪変動成分のホギング・サギングの最大値を示す。設計短期海象として重要となるのは有義波高 10-15m 程度であるので、この波高を中心に非線形計算値の線形計算値に対する比の平均を求めたところ、ほぼ 0.7 であったので、以下ではこれを非線形影響係数として線形計算により得られた応力値に乗ずることとする。

4.3. 設計不規則波による最大応力値

設計不規則波中で線形応答シミュレーションでは、各素成波の振幅をその波周波数での応答関数値に乗じて重ね合わせることによって、最大応答を求めることができる。このようにして各短期海象中での各出合角における応力の最大値を求め、すべての中での最大値を各応力点での最大応力として整理した。得られた結果を Figs.4, 5 に示す。図の横軸は応力方向・点番号を表している。なお、応力点は両舷にあるが、そのうちの大きい方の値が発生する短期海象と出合角をまとめたものを Table 1 に示す。ここで、入射波は右舷から来るものとし、太字・網掛けで表しているものは右舷(波上)側の応力点を示す。

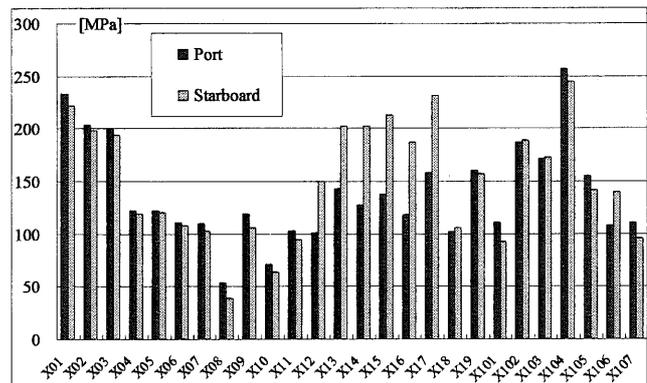


Fig.4 Maximum longitudinal stress

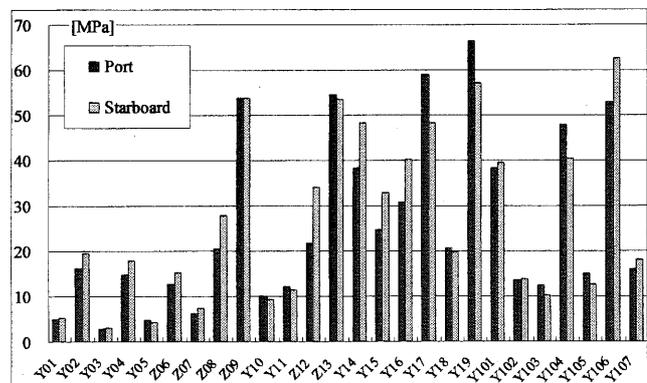


Fig.5 Maximum transverse / vertical stress

Figs.4, 5 と Table 1 を比較して見ると、有義波高が 15.25m と観測される最大値程度に高くなっても最大応力値は現行の設計値を大きく逸脱しておらず、このような値を合理的かつ簡便に求めることができる設計不規則波の妥当性が示さ

れていると考える。なお、船長方向以外の応力（船幅方向：y、上下方向：z）については、有義波高がかなり高くなって最大応力値はそれほど大きくはなっていない。

Table 1 Short-term sea state and heading angle of ship for maximum stress

	T[s]	H[m]	χ [deg]		T[s]	H[m]	χ [deg]
X01	16	15.25	180	Y01	18	15.25	150
X02	16	15.25	180	Y02	12	13.25	60
X03	16	15.25	180	Y03	12	13.25	60
X04	16	15.25	180	Y04	12	13.25	60
X05	16	15.25	180	Y05	16	15.25	180
X06	16	15.25	180	Z06	14	15.25	30
X07	18	15.25	150	Z07	14	15.25	30
X08	12	13.25	60	Z08	16	15.25	60
X09	14	15.25	60	Z09	14	15.25	60
X10	12	15.25	60	Y10	14	15.25	60
X11	14	15.25	60	Y11	14	15.25	60
X12	12	13.25	60	Z12	14	15.25	30
X13	14	15.25	60	Z13	14	15.25	30
X14	14	15.25	60	Y14	14	15.25	60
X15	14	15.25	60	Y15	14	15.25	60
X16	16	15.25	30	Y16	14	15.25	30
X17	16	15.25	30	Y17	14	15.25	30
X18	12	13.25	60	Y18	8	15.25	30
X19	16	15.25	180	Y19	14	15.25	30
X101	14	15.25	60	Y101	14	14.25	60
X102	16	14.25	150	Y102	14	14.25	60
X103	16	15.25	180	Y103	14	15.25	60
X104	14	15.25	60	Y104	14	15.25	60
X105	16	15.25	180	Y105	14	15.25	60
X106	14	15.25	180	Y106	12	15.25	60
X107	12	14.25	150	Y107	12	15.25	60

Table 1 より、最大応力が発生する短期海象の平均波周期 T はほぼ 12s~16s であり、有義波高 H はほとんどが有義波高 15.25m となっている。まずこの平均波周期について考察する。Figs.6, 7 に縦曲げモーメント (VBM) とねじりモーメント (TM) の短期パラメータの平均波周期に対する変化を示すが、それぞれを最大にする波周期は VBM が 12s ($\chi=180\text{deg}$)、

TM が 8s ($\chi=60\text{deg}$) と、Table 1 に現れている波周期よりも短い。これは、設計不規則波の生成にあつては碎波が生じないという制限条件を用いているが、このため、より短い平均波周期の海域では最大波高がそれほど大きくなり得ない。したがって、平均波周期が長くなると最大波高はより大きくなり得るため、平均波周期が比較的長い短期海象で最大応力値が出現しやすくなるためである。一方、有義波高については、ほとんどが計算に用いた最大値となっており、平均波周期とあわせて考えると、確率・統計的な議論を別にすれば、応答に有意な周期の素成波を含み、その素成波の波高が高くなり得る海象が最大応力に対して重要であることになる。

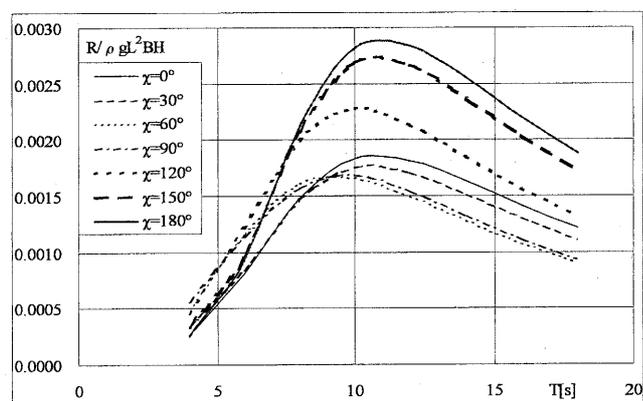


Fig.6 Standard deviation of VBM at midship (long crested wave)

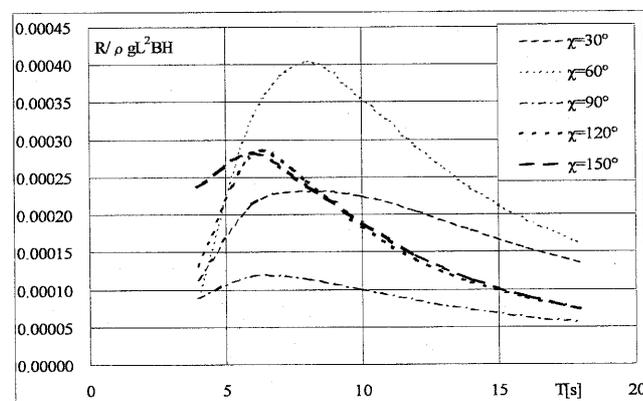


Fig.7 Standard deviation of TM at midship (long crested wave)

また、Table 1 より、船と波との出合角については、180deg、60deg、30deg という特定の波向きが重要であることがわかる。Figs.8-10 に縦曲げモーメント (VBM)、ねじりモーメント (TM)、波浪変動水圧 (midship 波上側静止喫水線) の応答関数を示すが、Figs.6, 8 より、 $\chi=180\text{deg}$ は縦曲げモーメントの短期パラメータや応答関数が有意となる場合であり、Figs.7, 9 より、 $\chi=60\text{deg}$ はねじりモーメントの短期パラメータや応答関数が有意となる場合である。また Fig.10 より、 $\chi=30\text{deg}$ は変動水圧の影響を大きく受ける条件であることがわかる。このように、各荷重の応答関数の特徴を利用して設計条件における船と波との出合角を定めることができる

ことがわかった。

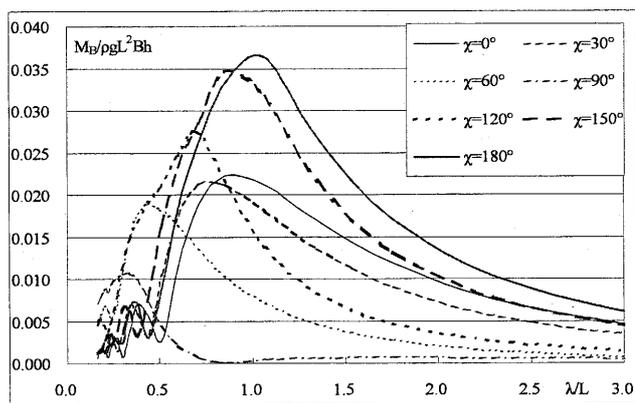


Fig. 8 Nondimensional VBM at midship

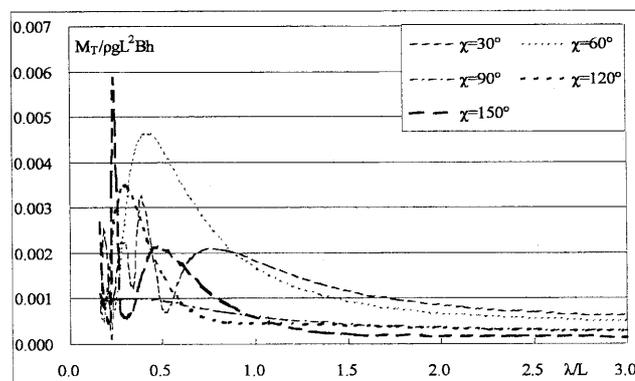


Fig. 9 Nondimensional TM at midship

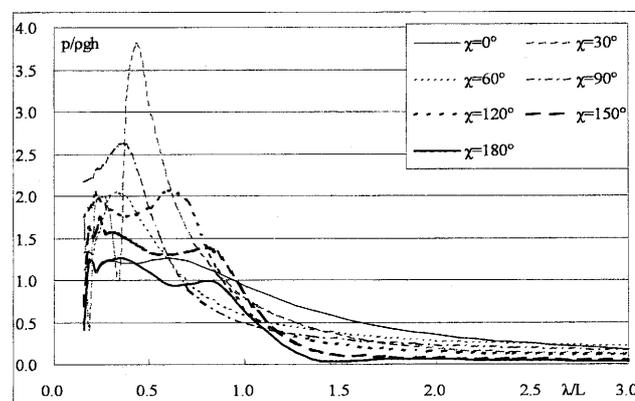


Fig. 10 Nondimensional pressure at midship

(Weather Side, Water Line)

4.4. 設計短期海象に関する考察

これまでの検討結果より、最大応力を与える条件は平均波周期 T=12s~16s、有義波高 H=15.25m、船と波との出合角 $\chi=180\text{deg}$, 60deg , 30deg であることがわかった。しかしながら、最大応力程度の応力値は Table 1 で表された海象においてのみ現れるわけではなく、別な海象条件でも得られている。これは、Fig.3 からわかるように、設計不規則波における砕波の制限条件により、有義波高が高くなっても応答値が頭打ちになるためである。前報では設計短期海象の平均波周期

として縦曲げモーメントの短期パラメータが最大になる波周期を選んだが¹⁾、今回もこれと同様に T=12s とし、また有義波高については、前報¹⁾の討論回答に述べられているように砕波の影響は平均波周期と同じ数字の波高程度から現れることがわかっているため、H=12.25m と設定してみる。

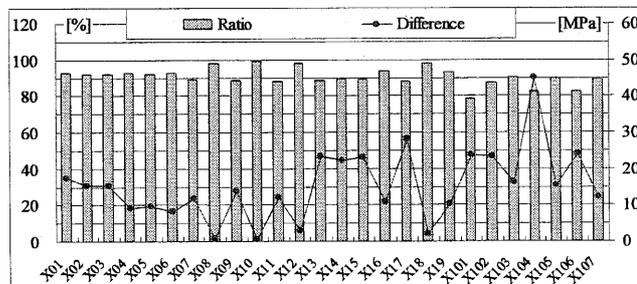


Fig. 11 Proportion of maximum stress to that in Fig.4 and the difference (Longitudinal stress, T=12s, H=12.5m)

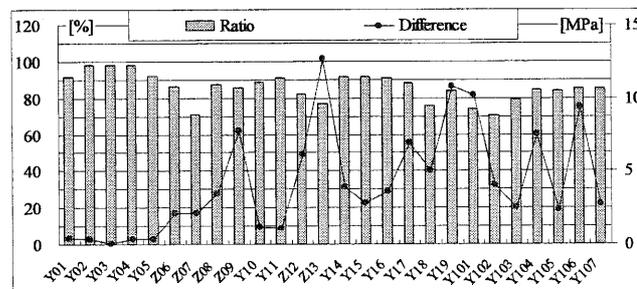


Fig. 12 Proportion of maximum stress to that in Fig.5 and the difference (Transverse/vertical stress, T=12s, H=12.5m)

Table 2 Heading angle and the stress point for maximum stress in short-term sea state of T=12s, H=12.5m

Encounter Angle [deg]	x-direction		y- or z-direction	
	starboard	port	starboard	port
180	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 19, 102, 103, 104, 105, 106, 107		1, 5	
60	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 101	8, 9, 10, 11	2, 3, 4, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 102, 103, 104, 105, 106, 107	10, 11
30	—	—	6, 12, 19, 101	9, 17, 18

この短期海象条件で船と波との出合角を 180deg, 60deg, 30deg としてその中の最大応力値を求めた結果を Figs.11, 12 に示す。図は、棒グラフがこの海象で得られた最大応力値の Table 1 の条件での最大応力に対する比率 [%]、折れ線がそれらの最大応力の差 [MPa]である。また、これらの最大応力値が発生する船と波との出合角とその発生する舷を Table 2 にまとめた。これらを見ると、平均波周期 T=12s、有義波高 H=12.25m という Table 1 に比べてそれほど厳しくない海象でも Table 1 の海象条件で発生する最大応力の 90%程度の応力が発生することがわかる。なお、この海象条件では、船

長方向応力の最大値は出合角 180deg と 60deg のみで発生し、最大値の生ずる舷は 1 から 19 までは Table 1 と同じであるが、101 から 107 については、左右舷が入れ替わっているケースがある。一方、船幅/上下方向応力の最大値は主に出合角 60deg と 30deg で発生し、最大値の生ずる舷は Table 1 の場合と左右舷が入れ替わっているケースがある。これは、midship 近傍の断面 (frame 186) では船長方向応力に縦曲げモーメントが支配的になるのに対して、船幅/上下方向応力や船橋近傍の断面の船長方向応力 (frame 86) では縦曲げモーメント・ねじりモーメント・変動水圧による応力値への寄与がほぼ同程度となるためである。なお、Fig.11 の船長方向応力のみ注目すると、縦曲げモーメントの寄与が大きい midship 近傍の断面 (frame 186) では Table 1 の条件で発生する最大値との応力差は高々 30MPa である。このように、有義波高がある程度高い短期海象中では、設計不規則波の碎波の制限条件により最大応力値はあまり大きく変動しない。

5. 荷重の応答関数を援用した最大応力の推定

これまでは、まず応力の応答関数を求め、これを用いて設計不規則波を生成し、その中で発生する応力の最大値を求めてきた。しかしながら、応力の応答関数を作成するには多数の波周波数について構造解析を行わなければならないため、これに膨大な工数が必要となり、設計不規則波を用いて解析工数を減らす意味がなくなってしまう。そこで、ここでは、局部応力そのものの応答関数ではなく、計算が比較的簡単である荷重の応答関数の情報を援用して設計不規則波を設定することを検討する。しかしながら、どの局部応力についての荷重の応答関数情報を援用すればよいかは明らかではないので、以下のような検討を行う。すなわち、それぞれの短期海象において、数種類の荷重の応答関数情報を元に設計不規則波を作成し、その中で最大応力を求める。これらのすべての結果より、応力の最大値を与える条件を整理し、どのような荷重の応答関数を用いた場合にどの程度最大応力が推定できるかを検討する。

ここで、設計不規則波の作成において援用する荷重の応答関数は、midship での縦曲げモーメント (VBM) とねじりモーメント (TM)、および Fig.13 に示す midship 断面における 5 点の変動水圧 (PP1, PP7, PP11, PP18, PP22) である。なお、船長方向以外の応力 (船幅方向: y 、上下方向: z) は船長方向応力に比べて値が小さく、疲労強度等には重要になるものの本論文で検討対象としている最大応力に対してはさほど重要ではないため、ここでは応力値の高い船長方向応力のみについての結果を示す。

前述の荷重の応答関数情報を基に設計不規則波を設定し

て最大応力を求めた結果、各応力点に最大値を生ずる出合角と設計波に用いる位相は、平均波周期 $T=12s$ 、有義波高 $H=12.25m$ の短期海象について、Table 3 のようにまとめられることがわかった。また、この場合の最大値を、同じ設計海象中で応力応答関数を用いて得られた最大応力値に対する比とそれらの差として、Fig.14 に示す。ここで、応力の比が 100% を超えている (応力の差がマイナスの値となっている) ものが現れるのは以下の理由による。すなわち、設計不規則波を作成する場合、素成波を発生させる波スペクトルの周波数範囲を応答スペクトルより定めているが、応力の応答関数と荷重の応答関数とでこの周波数範囲が異なり、応力の応答関数を用いた場合と荷重の応答関数を用いた場合で必ずしも同じ素成波とはならないため、このような結果となったが、この差はかなり小さいものである (10MPa 程度)。

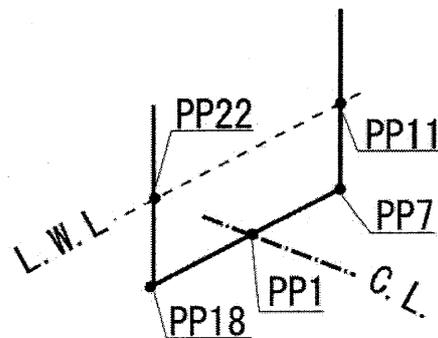


Fig.13 Pressure evaluation points

Fig.14 より、荷重の応答関数 (LTF) を援用しても応力の応答関数 (STF) を用いて得られた最大応力の 80% 程度以上の応力が得られ、その差は高々 30MPa 程度であることがわかる。一方、最大値が発生する船と波との出合角については、Table 3 より 0deg と 60deg の 2 種類であり、位相情報は PP1 (船底中心線)、PP22 (波上側静止喫水線)、PP11 (波下側静止喫水線) の変動水圧となった。ただし、前出の応力応答関数を用いた検討結果では出合角 0deg はなく 180deg であった。そこで、midship 近傍断面 (frame 186) について出合角 180deg、位相情報 VBM として Fig.14 と同様に最大応力をまとめたものを Fig.15 に示す。Fig.15 を見ると、出合角 180deg、位相情報 VBM とした場合でも比較的高い応力が得られており、共に縦曲げモーメントが大きくなるケースを表しているものと考えられる。これより、縦曲げモーメントの応答関数の位相を援用しても、midship 近傍断面では最大応力の 80% 程度以上の応力が得られ、最大値との差は一番大きい場合で 45MPa 程度であることがわかる。

このように、設計不規則波の生成に応力の応答関数ではなく荷重の応答関数を援用することにより、最大応力がある程度推定できることがわかった。これにより、FEM 解析工数

を大幅に減らすことができるが、推定精度を高めるためには、援用すべき適切な荷重の応答関数について、より詳細な検討が必要と思われる。

Table 3 Design wave condition at each stress point using Load Transfer Function ($T=12s$, $H=12.25m$)

CASE	Encounter Angle [deg]	Phase Information	Stress Point No.
A	0	PP1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 19, 103, 105, 107
B	60	PP22	12, 13, 14, 15, 16, 17, 18
C	60	PP11	7, 8, 9, 10, 11, 101, 102, 104, 106

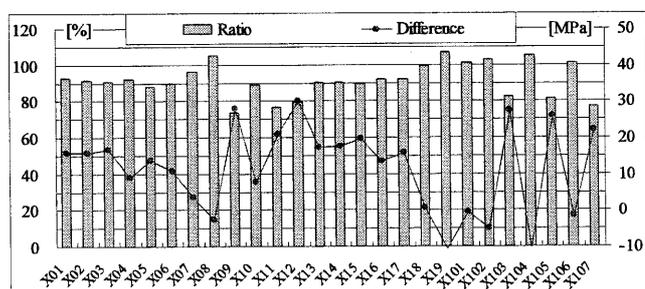


Fig.14 Proportion of maximum stress estimated by using LTF to that using STF ($T=12s$, $H=12.25m$)

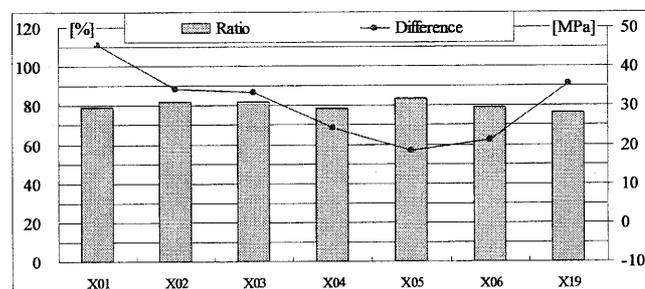


Fig.15 Proportion of maximum stress estimated by using LTF to that using STF ($T=12s$, $H=12.25m$, $\chi=180^\circ$, phase: VBM)

6. 結 言

設計不規則波と直接荷重解析法を用いて大型コンテナ船の局部応力の最大値を推定する手法について検討を行い、得られた最大応力を基に設計短期海象について考察した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 有義波高がある程度高い海象において、衝撃荷重の影響を除外して得られた最大応力は有義波高によって大きく変動せず、波浪頻度表に現れるどのような海象においても設計上妥当な値となった。
- 2) この最大応力を発生させる短期海象の平均波周期は、縦曲げモーメントやねじりモーメントの短期パラメータ

を最大とする波周期よりもより長周期となった。

- 3) 本コンテナ船の最大応力発生に重要となる船と波との出合角は、縦曲げモーメントが有意となる 180deg (正面波) とねじりモーメントが有意となる 60deg であった。
- 4) 平均波周期 $T=12s$ (縦曲げモーメントの短期パラメータを最大とする波周期)、有義波高 $H=12.25m$ (砕波発生の限界波高) とした海象中で推定された船長方向最大応力値は、すべての海象を考慮した最大応力値の 90% 程度となった。
- 5) 設計不規則波の生成に、対象とする局部応力の応答関数ではなく、荷重の応答関数の位相情報を援用することによって、計算工数を大幅に減らすことができる。ただし、推定精度を上げるためには、適切な応答関数の情報を用いる必要がある。

なお、DILAM による全船 FEM 解析では、非線形応答計算も可能であるため、将来的には荷重/応答の厳密な非線形を考慮した設計短期海象を検討する予定である。また、本研究は金沢工業大学と三菱重工業 (株) との共同研究であり、その遂行には日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (B) 「船体強度設計における実用的な設計荷重設定法に関する研究」の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 深沢塔一：設計不規則波を用いた最大応答推定法 (第 1 報：縦曲げモーメントの推定)、日本船舶海洋工学会論文集 第 2 号、(2005)、pp.123-129.
- 2) S. Inoue, K. Sato and H. Otsuka : DILAM- Latest technology for full spectral ship structural analysis, 12th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Conference Proceedings, Vol.1, 2005, pp.265-274.
- 3) 佐藤宏一：荷重構造一貫解析システム「MHI-DILAM」の紹介、日本船舶海洋工学会誌 KANRIN (咸臨) 第 6 号 (2006)、pp.22-27.
- 4) 倉本美男、戸沢秀、白木原浩、井上俊司、伏見彬：波浪中の船体局部応力のシミュレーション手法に関する研究、日本造船学会論文集 第 170 号、(1991)、pp.425-436.
- 5) Y. Yamamoto, M. Fujino and T. Fukasawa : Motion and Longitudinal Strength of a Ship in Head Sea and the Effects of Non-Linearities, Naval Architecture and Ocean Engineering, SNAJ, Vol.18, (1980), pp.91-100.