波浪中での非線形船体運動及び波浪荷重推定プログラム NMRIW

小川 剛孝*

A Program for the Computation of Nonlinear Ship Motion and Wave Loads NMRIW

by

Yoshitaka OGAWA

Abstract

The number of large unconventional vessel has been increasing in recent years. Such a large vessel induces nonlinear ship motions and nonlinear wave loads. Therefore, it is considered that further investigation of structural strength of such an unconventional vessel is important by taking account of its unique feature of structural response. For this purpose, it is very important to evaluate loads acting on such larger vessels accurately because they are very dominant on the evaluation of strength.

Based on this background, our institute intensively focused on the evaluation of loads and special response of a larger vessel. The practical evaluation tool, which can evaluate not only wave vertical bending moment but also wave torsional moment, was developed based on nonlinear strip method approach.

Through the extensive comparison with a series of experiments, it is confirmed that the present method taking account of time-varying sectional hydrodynamic forces gives favorable agreement with experiments for nonlinear ship motion and wave loads in severe sea condition.

Furthermore, the graphic user interface was also developed for the easy utilization of this program in the design stage. Preprocessor for data inputting and postprocessor for overview of computed results are demonstrated.

 ^{*} 構造安全評価系 基準開発グループ
原稿受付 平成28年2月1日
審査日 平成28年2月23日

目 次

1.	まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
2.	波浪荷重推定プログラム NMRIW · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	29
	2.1 基本的理論	29
	2.2 計算手順	30
3.	NMRIW による解析事例とグラフィックユーザーインターフェース (GUI) ·····	32
	3.1 データ入力	32
	3.2 解析事例と結果表示・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
4.	まとめ ・・・・・	34
参	·考文献·····	34

記号

ω:波の周波数[rad/s]

H:波高[m]

- ρ:水の密度[kg/m³]
- g: 重力加速度[m/s²]
- *x*:出会い方位[deg.]
- U:船の前進速度 [m/s]
- ζ:前後摇[m]
- η:左右摇[m]
- $\zeta: 上下揺[m]$
- $\theta:$ 縦揺 [rad]
- ψ:船首摇[rad]

1. まえがき

経験則にもとづく構造基準や設計要件の設定が容易でない大型船や新形式船の出現,国際海事機関(IMO)にお ける目標指向型構造基準(GBS)の発効等により,構造基準及びその設計荷重ならびに許容応力に対する一層の 説明責任が増している.

このような大型船や新形式船を設計・建造するためには、板厚の増加あるいは鋼材の高強度化の検討は避けら れないと考えられる.このような使用実績の無い板厚及び鋼材について、鋼材強度の確保、荷重と構造強度評価 から工作の問題まで極めて包括的な検討を行った上で構造設計を行うことが必要になってくると考えられる.な かでも、強度評価の入力となる荷重の精度は重要となる.

例えば、大型コンテナ船について波浪荷重を考えた場合、下記の課題が一層顕在化すると考えられる.

- ・非線形荷重が縦強度に及ぼす影響の評価
- ・捩り荷重が全体強度に及ぼす影響の評価
- ・スプリンギング及びホイッピングの評価
- ・船首船尾におけるスラミングの評価
- ・ラッシング荷重の評価 等

一方,現行基準で想定する荷重は,操船の影響等も考慮した上で半ば経験則的に設定されている.従来であれば,これらの差異を運航実績(損傷事例)との整合性を図ることにより,取り扱うことができた.しかしながら, 今後,運航実績も殆ど無く,なおかつ非線形影響や船体弾性応答による影響が一層顕在化するような船舶の波浪 荷重を従来通りの方法で評価することは、事故の未然防止や不必要な構造部材の板厚増加といった安全性及び経済性の両方の観点から合理的でない.また、波浪荷重の推定精度は、構造部材毎の材質及び寸法に大きく影響を 及ぼす.既存の線形理論による推定法を用いて荷重を解析すると、船種によっては基準で想定する荷重の倍程度 になる場合があることが知られている.

これらの問題を適切に解決する上で,船舶の一生涯で出会う最大荷重あるいは最大応力及び応力振幅の確率分 布のさらなる推定精度向上が必要となると考えられる.

このためには、波の非線形影響や船体弾性応答を適切に考慮した統計値を得る必要があるため、なるべく現実 に近い海象を入力とする非線形シミュレーションを活用することが重要になると考えられる. さらに、このよう なシミュレーションを構造強度評価に活用するためには、莫大な計算時間を要することなく合理的な推定を行う 手法であることが不可欠である.

これらの事を背景に,強度評価の入力として,波浪荷重推定プログラム NMRIW (Nonlinear ship Motion in Regular and Irregular Waves) の開発を行った.本報告では,本手法の理論的背景と計算フローについて概説する.また,本手法にもとづくプログラムを設計現場で簡易に取り扱うためのプレ・ポストシステムを整備したのでこれについても説明する.

2. 波浪荷重推定プログラム NMRIW

波の非線形影響や操船影響を適切に考慮した統計値を得るためには、なるべく現実に近い海象を入力とする時 系列ベースの非線形シミュレーションを活用する必要があると考えられる.

このため本研究では、非線形ストリップ法¹⁾ベースの推定手法を開発した.非線形ストリップ法の考え方は、 よく知られており、数多くのプログラムが開発されて実用に供されている¹²⁾³⁾.しかしながら、この種の計算法 は、主に正面向波及び真追波での計算に限られていた.一方で、先にも述べたとおり、コンテナ船では捩り荷重 が問題になる等、斜波中での応答についても詳細な検討が求められている.

このため、従来非線形ストリップ法があまり適用されてこなかった斜波中でも計算できる6自由度の時系列計 算法を開発した⁴.以下に、座標系の定義とプログラムのフローについて概説する.

2.1 基本的理論

図1に示すように、空間固定座標系 O-XYZ の X 軸の正方向に波周波数 ω (波長 λ),波高 H (波振幅 a=H/2) で進行する規則波を χ の方向から受けつつ平均船速 U で前進する船舶の運動方程式を定義する.また、この船の 中心に原点を持ち静水面が XY 平面と一致する船体並進座標 o-xyz 及び船体の重心を原点とした船体固定座標 G -x'y'z'を同様に定義する.直線運動と弾性変形は座標軸と同じ方向を正、回転運動については図 1 で定義する方向を正とする.また、縦曲げモーメントはホギングを正とする.

本手法では、船体にはたらく力として以下を取り扱う.

1) 重力

2) 船体自身の慣性力

3) 浮力

4) 船体運動によるラディエイション流体力(変動する流体圧力に基づく動的な流体力)

5) 波強制力(撹乱を受けないとした入射波の変動圧力に基づく波強制力をフルードクリロフカ,船体で反射した散乱波の変動圧力に基づく波強制力をディフラクション流体力という.)

6) 粘性流体力(ここでは、横揺れ減衰力以外は、相対的に微小であるとして無視する.)



図1 NMRIW の座標系

2.2 計算手順

具体的な計算方法の概要は以下のとおりである.図2には計算のフローチャートを示す.

(1) データの入力

入力データの読み込み:船型データ及び計算パラメタの読み込み

o船型データ:

主要目,オフセット,重量分布,剛性分布,構造減衰率等

o計算パラメタ:

船速,波高,波長船長比,出会い方位,横揺れ減衰係数,変動水圧の計算位置,加速度の計算位置

(2) 初期化及び前処理

ここでは時間ステップ毎の計算に先立って、初期設定を行う.

計算に用いる喫水線における排水量,浮心位置および船体重量,重心位置,慣動半径の計算を行い,船が静水 中で平衡であるかチェックを行う.

また、船体縦曲げ振動のモード関数の計算及び計算に必要な諸関数の定義を行う.

不規則波中での計算を実施する場合,不規則波の各成分波の振幅と位相を予め計算する.位相は,乱数を発生して決定する.このため,同じ有義波高及び平均波周期の計算であっても,計算ごとに位相の組み合わせは異なる.

(3) 流体力テーブルの計算

以降の計算はパラメタ(波との出会い方位,フルード数,波高,波長船長比)毎に行う.

はじめに、付加質量と減衰力係数の計算を行う.既に計算した流体力テーブルがある場合は、既作成のテーブル を読み込んで用いることができる.ここでは、出会い周波数無限大の場合の流体力(剛体モードの流体力)及び 波との出会い周波数での流体力について計算する.



図2 NMRIW のフローチャート

(4) 時間刻み毎の計算

本手法では、時間刻み毎に計算する.総 Step 数は(1 出会い周期の分割数)×(出会い周期の回数)である. (4-1)時間ステップ毎の2次元断面における流体力の計算

はじめに、各断面における波と船体との相対喫水を計算する.これから、各断面における平均喫水を求める. すなわち、左右舷における波面との交差点を求めて、これを平均する.平均喫水を求める際に、各2次元断面に おけるフルードクリロフカ+浮力及び波強制力も計算する.(計算した流体力テーブルがある場合)この平均喫水 と横揺れ角に相当する2次元断面毎の流体力を流体力テーブルから求める.

(4-2) 運動方程式中の成分マトリックス(質量及び付加質量,減衰力,復原力)の計算

運動方程式の係数を計算する.全船での流体力は,各2次元断面における流体力の数値積分(台形則)により求 める.慣性力及び重力のように,水線の位置に関係なく作用する力は,常に船体全体にわたり積分する.一方, 時間ステップ毎の浸水部のみに作用する浮力,波強制力,流体力(付加質量,減衰力,復原力),衝撃力について は,時間ステップ毎の浸水部に対して積分する.

(4-3) 運動方程式を解く

ルンゲ・クッタ・ギル法により時間積分することで、次の時間ステップでの運動変位と速度を計算する.

(4-4)加速度(上下,水平)の計算

求めた変位,速度から加速度を計算する.

(4-5) 波浪荷重(水平剪断力,縦剪断力,捩りモーメント,縦曲げモーメント,水平曲げモーメント)と変動水 圧を計算する.

(5) 応答関数の計算(規則波計算の場合)

時系列計算が完了後,時系列のフーリエ解析(規則波)あるいはスペクトル解析(不規則波)によって,応答 関数あるいは船体応答のスペクトルを計算する.

3. NMRIW による解析事例とグラフィックユーザーインターフェース(GUI)

3.1 データ入力

NMRIW を簡便かつ荷重-構造一貫解析に活用できるようにするために、プレ・ポストシステムの開発も行った.はじめに、船型データと計算条件の入力を簡易に行えるようにプレシステムを開発した.図3には、計算条件の入力画面の一例を示す.さらに、Body Plan 表示や3D 表示による船型データの入力確認、重量分布や重心位置計算による入力データの整合性確認も出来るようにした.図4には、船型データや重量分布の入力を確認するための表示画面の例を示す.



図3 計算条件の入力画面



図4 船型データや重量分布の入力確認画面

3.2 解析事例と GUI

大型化にともないスプリンギングやホイッピングといった振動応力が顕著となり、これが疲労設計等に影響を 及ぼすとも言われている⁴⁾.このため、近年では水槽試験や理論計算をもとにこれらの曲げ振動が構造強度に及 ぼす影響を評価しようという研究がさかんに行われている.図5には NMRIW によるポストパナマックスコンテ ナ船 (Lpp=283m) についての時系列計算例を示す.例示したような厳しい海象で船速や方位一定で航行した場合は,このコンテナ船の2節固有周期で頻繁にホイッピング振動が発生していることが分かる.

一方,実際の操船においては、ホイッピングが発生するような厳しい海象では、これを避けるべく適切に操船 (減速や変針)する.しかしながら、水槽試験や理論計算では、このような操船の影響は考慮せずに、船速や出 会い方位を一定として実験や計算が行われるので、一般的には波浪荷重の評価を過大評価していると懸念される.

NMRIW を用いることにより,直接時系列計算を通じて波浪荷重の統計値を評価が可能となり,これらの減速 や変針が曲げ振動を含む波浪荷重の統計値に及ぼす影響を調べることができる.

変針及び減速した場合の曲げモーメントの超過確率の変化をそれぞれ図6に示す.変針や減速しない場合に比べて減速した場合の計算結果は、相対的に縦曲げ振動が抑えられた.このため、サギングモーメントの超過確率が相対的に小さくなった.このように、荷重の統計値を評価する上で、操船の影響を考慮する必要がある事が分かる.このようにNMRIWによる直接時系列計算により、従来以上に詳細な解析が行えるようになった.

さらに、周波数応答関数及び荷重分布ならびに船体表面水圧分布の表示を行えるポストシステムも開発した. 図7に、船体表面水圧分布の表示例を示す.この船体表面水圧分布は、時系列の全計算ステップについて表示可 能である.同じく、図7に示すとおり計算結果を直ぐ可視化できるようにアニメーション機能も開発した.これ らの機能により解析が終了すると直ちに可視化ができるため、結果の確認を効率よく行うことができる.



図5 不規則波中における縦曲げモーメントの計算例(左)と拡大図(右) (正面向波,平均波周期15秒,有義波高10m,フルード数0.182)



図6 変針(左)及び船速低下(右)が縦曲げモーメントに及ぼす影響 (正面向波,平均波周期15秒,有義波高10m,フルード数0.182)



図7 船体表面水圧分布(左)及びアニメーション(右)の表示例

4. まとめ

波浪荷重推定プログラム NMRIW (Nonlinear ship Motion in Regular and Irregular Waves)を開発するとともに, これを簡便に扱うためのプレ・ポストシステムの整備も行った. 今後,新形式船のように実績と損傷事例が少な い船種については,直接解析による評価がますます重要となってくる. 既にこれらのソフトは造船会社等との共 同研究を通じて実用に供されており,さらに実船計測データや水槽試験結果との比較による更なる検証を通じて 知見を蓄積している最中である.

参考文献

- Yamamoto, Y., Fujino, M. and Fukasawa, T., Motion and longitudinal strength of a ship in head seas and the effects of nonlinearities. Naval Architects and Ocean Engineering, Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol.18, 1980, pp.91-100.
- Fujino, M, and Chiu, F., Vertical motions of high-speed boats in head sea and wave load. Journal of Society of Naval Architects, Japan, 1983, 154, 151–163.
- 3) Mikami, T., and Kashiwagi, M., Time-domain strip method with memory-effect function considering the body nonlinearity of ships in large waves (second report), Journal of Marine Science and Technology, 2009, pp.185-199.
- 4) Ogawa, Y. : A Study on Nonlinear Wave Loads of a Large Container Carrier in Rough Seas, Proceedings of the 10th International Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures (PRADS2007), 2007, pp.132-140.