

# 大波高波中 船体運動と波浪荷重の シミュレーション

運動性能部 \* 谷澤克治, 渡辺巖

## 1 まえがき

りばあ丸(1969年1月5日)、かりふおるにあ丸(1970年2月9日)、尾道丸(1980年12月30日)、そして最近では シア船ナホトカ号(1997年1月2日)。これらは日本近海で重大な船体折損事故を起こした船である。なかでも、ナホトカ号の事故は積載重油の流出を伴い、日本海沿岸区域に重大な環境被害をもたらしたため、大きな社会問題となった。これらの事故はいずれも冬季の日本近海で発生したもので、荒天中を向波に近い状態で航行していた時に大波に遭遇し、大きな波浪荷重を受けて船体を折損したものである。このような重大事故の原因究明には船体に作用する曲げモーメント等のマクロ的な波浪荷重を概算する必要があり、これには船体全体を弾性梁と見なし、船体の各断面に作用する時々刻々の波浪荷重を非線形計算することで船体運動と弾性応答を時間領域でシミュレートする計算法が有効である。そこで、本報の前半ではSRSLAM<sup>3)</sup>と呼ばれるマクロ的なシミュレーション法を紹介する。

一方、大波高波中を航走する船舶には、急激な船体折損に至らないまでも、局所的な凹損を生じたり、繰り返し大きな波浪荷重が作用することで金属疲労が加速され、強度部材にひび割れが発生することがある。このような故障の原因究明には船体表面の波圧分布や、VLCC等では波圧と槽内油圧との差圧分布などの圧力分布を局所的にも精度良く推定する必要がある。これは上記マクロ的な計算法との対比でミクロ的な計算法と云えよう。これには船体周りの3次元波動場で、流体運動と船体運動との非線形連成方程式を、時間領域できちんと解く手法が求められる。運動性能部ではこのような厳密な計算法を開発するための理論と数値解法の研究を実施し、連成運動方程式の時間領域での厳密な定式化を行なうと共に、2次元波動場の実用レベルのシミュレーションプログラムを完成させた<sup>7)</sup>。また、現在は3次元への拡張を目指して研究を継続している。ミクロ的なシミュレーション法は、少し前までは計算機の処理能力が不足、2次元問題であっても長時間の計算が困難であった

め、主に波浪衝撃現象等の短時間現象のシミュレーションに用いられて来た。しかし近年では計算機の処理能力が著しく向上したことで、実用化研究が進展している。そこで、本報の後半では波浪と浮体との非線形連成運動を時間領域で計算し、正確な波圧分布を与えるミクロ的なシミュレーション法を紹介する。

なお、これらは共にポテンシャル理論を基礎とした計算法で、理想流体を仮定している。

## 2 マクロ的なシミュレーション法

本報でマクロ的なシミュレーション法の代表として紹介するSRSLAMは、正面もしくは斜め向波中を航走する船舶の縦応答と縦荷重を総合的にシミュレートする計算プログラムである。船研が造研(SR194)と共同で開発したプログラムで、基本的なアルゴリズムは東大で開発されたTSLAMに準じている。SRSLAMは波の中における波浪と船体の時々刻々の位置関係を考慮に入れて流体力と慣性力が釣り合うように弾性体としての船体の運動方程式を解いていく計算法で、流体力はストリップ法的な考え方で取り入れ、浮力の他に、動的な流体力として附加質量項、造波減衰項、更にスラミング等による衝撃力を考慮できるようになっている。また、船体は弾性梁として扱い、固有振動モードによる振動表現を用いて弾性応答を求めている。SRSLAMは基本的には規則波中での船体応答を求める非線形シミュレーション法であるが、不規則波場合には剛体モードの流体力を中心周波数に対する流体力で代表させることで、実用的には狭帯域不規則波にも対応可能であることが確認されている。SRSLAMは理論的な観点からは改良の余地を多く残しているが、実用的な観点からは非常にロバストな計算法であり、高速で長時間のシミュレーション計算も可能で、入力データの作成も容易であることなど多くの魅力を備えており、ナホトカ号の事故原因究明にも実際に役立てられた。

Fig.1に計算例を示す。これはナホトカ号が有義波高8m、平均周期9secのISSCスペクトルをもつ長波長不規則波を真正面から受けて、船速3.5kt

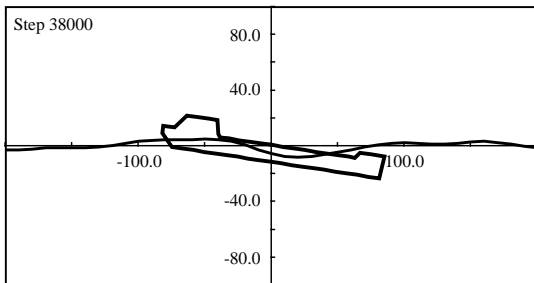
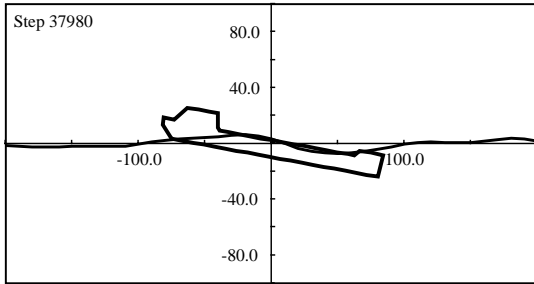
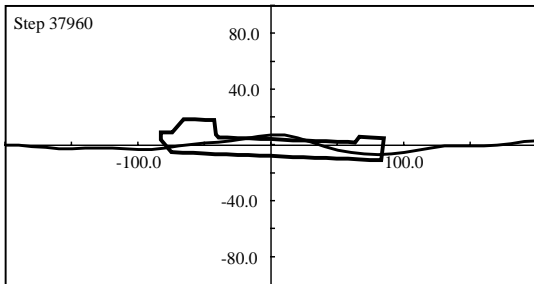
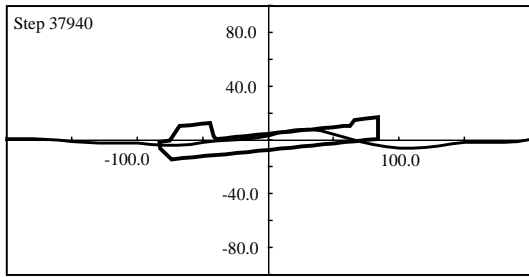


Fig.1 極端な出会波中での船体運動

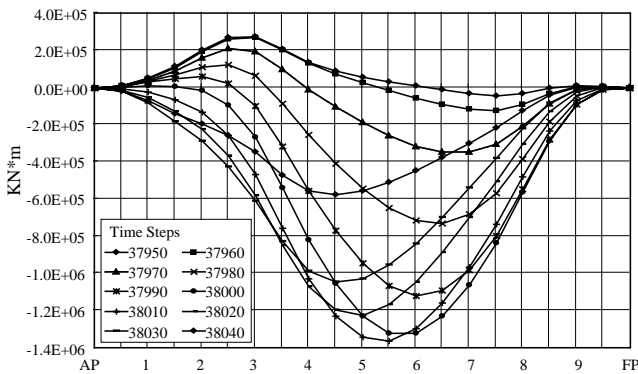


Fig.2 曲げモーメントの船長方向分布

で航走するシミュレーションを実時間で2時間実施し、その間に最も厳しい状況に陥った時の様子を示している。計算に用いた時間ステップは $\Delta t = 0.08\text{sec}$ であるので、Fig.1には6.8秒間の波浪と船体との運動が示されている。図からは露出した船首部船底が波面に突入し、さらに船首部全体が水面下にまで没水するに至る過程が読みとれ、波面と船体との間に大きな相対運動が生じていることが分かる。この時の最大瞬間波高は $15.3\text{m}$ で、船首部が水面下に突入し大きなサギングモーメントが発生した。この時の曲げモーメントの船長方向分布をFig.2に示す。SS6付近で最大となる非常に大きな曲げが作用し、船体の折損箇所であるSS6.9付近で $1,087,000\text{KNm}$ を超えるモーメントであった。長時間のシミュレーション計算から得られたこの最大値は、線形の確率論が与える最大値と比較して妥当な値である<sup>1)</sup>。

### 3 ミクロ的なシミュレーション法

次に船体断面内の2次元波動場で、流体運動と船体運動との非線形連成方程式をきちんと解いて、船体運動、自由表面運動、船体表面に働く波圧等を時間領域で精密に計算する、ミクロ的なシミュレーション法を概説する。本シミュレーション法は時々刻々の自由表面形状および浮体の姿勢を時間領域で追跡し、常にMaterial surfaceを境界形状として境界値問題を解く非線形計算法で、加速度ポテンシャルを用いた流体と浮体との連立運動方程式を構築法<sup>5)</sup>が開発されたことで力学的な整合性がとれ、数値的な安定性も向上したため、大波高・大振幅問題を取り扱うことが可能となった。2次元問題については実用計算法としても十分利用できる。

本シミュレーション法ではFig.3に示す速度ポテンシャル $\phi$ とその時間偏微分 $\phi_t$ に関する境界値問題を解く。Fig.4に示す速度場は $\phi$ に、加速度場は $\phi_t$ に対応しており、双方の境界値問題を解いて時々刻々の流体と船体との動的な力の釣合を保った時間発展を追跡する。境界条件の詳細な説明は省くが、船体表面の境界条件と計算領域両端の波の入射放射条件については、簡単に説明しておく。

速度場では船体表面の境界条件が陽に与えられるのに対し、加速度場では図中のループが示すように船体表面の境界条件は陽には与えられない。ループ中の $\phi_t$ を求めるのに、ループを解かずに安易に後退差分近似で計算する方法が用いられることがあるが、これは力学的に誤りで数値的にも不

安定であるため、推奨できない。このループを解くための最も簡単な方法は繰り返し計算法である。しかし、計算時間が掛かることから、最近ではモード分解法や、船体の運動方程式を組み込んだ陰境界条件を用いる方法が開発されている<sup>8)</sup>。本報で示す計算例では船体表面の境界条件に陰境界条件を用いている。

次に Fig.3 に示す計算領域の両端の自由表面には減衰領域を設けて、船体による攪乱波と放射波をほぼ完全に吸収するようにして放射条件を満足させている。この減衰領域は入射波は透過させるが、それ以外の波は減衰させる都合の良いもので<sup>4)</sup>、計算領域の両端では船体による攪乱放射の影響は無く、線形進行波やストークス波等の理論値を端部での入射波境界条件として与えることができる。

Fig.5 は大波を真左から受ける船体中央部の動揺計算の一例である。入射波はかなり急峻であり、船体運動も大振幅である。特に波上側の相対水位変動は船側外板を上から下まで洗うほど大きい。この例では船体内部に比重 0.8 の液体を積載している。計算では波浪、船体、槽内液体の連成運動が厳密に考慮されているため、各運動の位相関係も精度良く計算されており、船槽壁面に作用する波圧と載貨液体圧との差圧計算にも問題は無い。図中の等圧線は船体内外の変動圧  $\phi_t$  の分布を示している。波上側の波傾斜の強い箇所等圧線が密になっていることから、この部分での流体加速度が大きいことが分かる。

次にカオス横揺の計算例を紹介する。船舶が事故等で横不安定な状態に陥ると、復原力の非線形性により波浪中での横揺が非常に複雑になり、カオス的な振る舞いを示すことがある。これをカオス横揺と称する。そのモデルとして負の GM を有し  $\pm 4^\circ$  傾斜した状態が安定釣合となる船体中央断面形状浮体の規則波中でのカオス横揺の計算例を Fig.6 に示す。このような不安定浮体では 3 次の復原力が卓越しており、この復原力の非線形性により横揺固有周期は強い振幅依存性を示し、規則波に対する応答も波高によってがらりと様子を変える。

シミュレーション計算で得られた横揺の時系列波形を Fig.6 に示す。入射波は波長が船幅の約 13.5 倍と長波で、横軸は入射波周期  $T_w$  を単位とする無次元化時間で表してある。図では波高喫水比  $H_w/d$  を 0.04 から 1.2 まで変化させた時の横揺波形を上から順に示している。これらはすべて十分長時間の計算を行って過渡現象が減衰した後の波形で、さらに

長時間の計算を行っても波形の様子は変化しない。 $H_w/d = 0.04$  の場合は入射波と同じ周期で調和振動しているが、 $H_w/d = 0.2$  になると 2 倍周期と 7 倍周期の運動が重畳するようになり、 $H_w/d = 0.3$  では明確な周期性が失われてカオス横揺となる。さらに  $H_w/d = 0.3$  の時には間欠的に図中に Burst として示す大振幅のカオス横揺が発現し、この波高では小振幅と大振幅のカオス横揺が不規則に繰り返される。次に  $H_w/d = 0.4$  では  $\theta = 0^\circ$  の不安定釣合点を乗り越えて  $\theta = \pm 4^\circ$  の安定点を不規則に行ったり来たりする運動が現れる。これもやはりカオス横揺である。さらに波高を上げ  $H_w/d = 0.6$  になると、運動は周期性を取り戻すが、周期は  $2T_w$  で振幅も一気に大きくなっておりパラメータ横揺となる。このパラメータ横揺は安定で  $H_w/d = 0.8$  としても周期、振幅共に変化しない。しかし  $H_w/d = 1.2$  では周期と振幅が不規則となり再びカオス横揺が現れる。

以上に概説した数値計算法は汎用性が高く、大振幅動揺、波浪-浮体-液体貨物間の連成運動、非線形波浪荷重、係留浮体の長周期動揺、パラメータ横揺やカオス横揺など種々の現象に応用可能である。

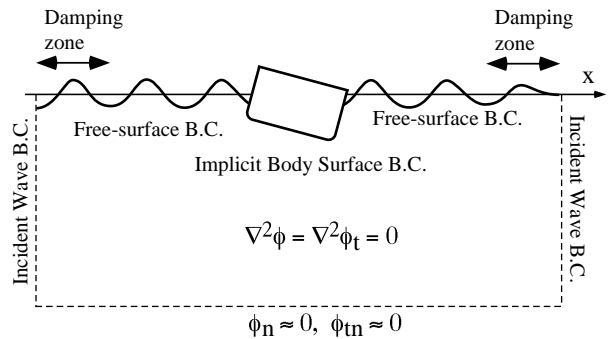


Fig.3 境界値問題

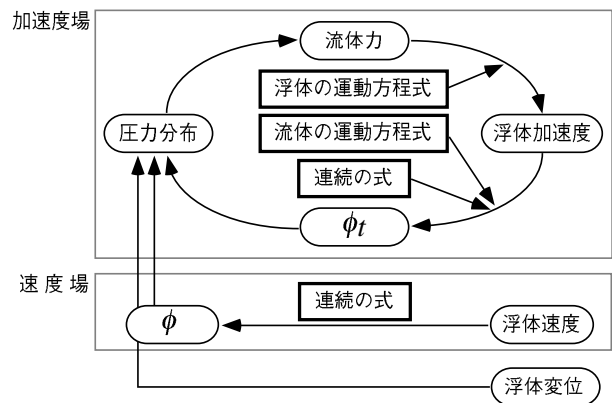


Fig.4 速度場と加速度場

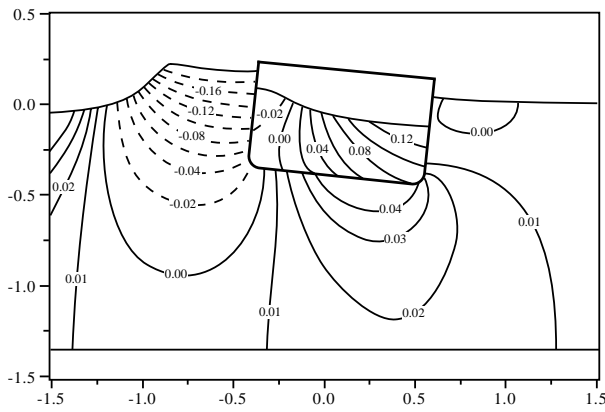


Fig.5 液体貨物を積載する浮体の大振幅動揺

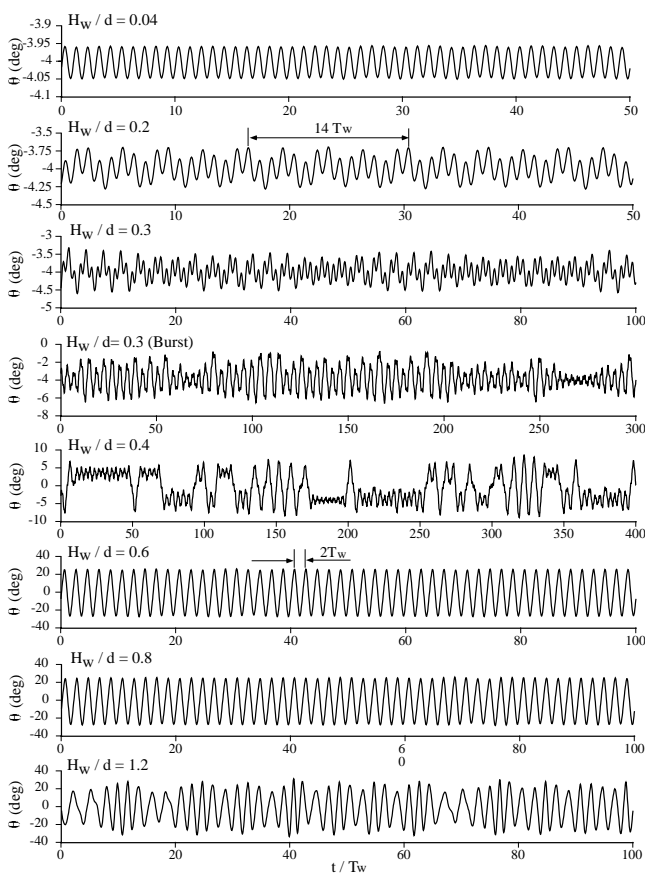


Fig.6 カオス横揺の計算例

#### 4 あとがき

以上に大波高波中の船体運動と波浪荷重のマクロ的およびミクロ的なシミュレーション法の概要を別々に紹介した。しかし、これらは別々のシミュレーション法と考えるのではなく、将来は互いの長短を活かして統合できると考えるべきであろう。すなわち、ミクロ的な方法を船体各断面内の計算に用

いることで、各断面内での船体と波浪との厳密な非線形連成問題を解き、それをマクロ的な方法に流体力として与える方法である。各断面間の波の相互干渉をミクロ的な計算法にどの様に取り入れるかが課題であるが、前進速度が速い場合は波は船体を前から後ろ方向にしか伝わらないと仮定して、Wigley 船型について向波状態での強制動揺問題で統合計算を試みた研究もあり、今後の発展を期待したい。さらに将来はミクロ的な計算法で直接3次元問題を解くことも可能になると考えられる。これには更に高速で大容量の計算機と、効率良くかつロバストな計算アルゴリズムの開発が必要であるが、海外では前進速度のない球や円柱の Radiation-Diffraction 問題をシミュレートした例もあり、今後の研究テーマとして挑戦し甲斐のあるものではなかろうか。

#### 参考文献

- 1) 渡辺巖,大坪英臣: ナホトカ号事故時の波浪外力の推定, 船論, vol.183, pp435-442, (1998)
- 2) 渡辺巖, 他: 二方向不規則波中の船体縦曲げモーメントに及ぼす弾性応答の影響, 船論, vol.159, pp435-442, (1985)
- 3) 日本造船研究協会第 194 部会: 波浪中船体応答に関する研究報告書, vol.375, (1983), Vol.368, (1984), vol.380, (1985)
- 4) Cointe, R., Geyer, P., King, B., Molin, B. and Tramon, M.: Nonlinear and linear motions of a rectangular barge in perfect fluid, *Proc. of the 18th Symp. on Naval Hydro.*, Ann Arbor, Michigan, pp85-98, (1990)
- 5) Tanizawa, K.: A nonlinear simulation method of 3-D body motions in waves, 日本造船学会論文集, 第 178 号, pp179-191, (1995)
- 6) Tanizawa, K.: Long time fully nonlinear simulation of floating body motions with artificial damping zone, 日本造船学会論文集, 第 180 号, pp311-319, (1996)
- 7) 谷澤克治: 加速度ポテンシャルによる波浪中浮体運動の非線形理論と数値解法の研究, 学位論文, 大阪大学, (1997)
- 8) 日本造船学会: 船体運動およびその制御と海象, 運動性能研究委員会第 13 回シンポジウム, pp97-117, (1997)