

# ポテンシャル理論による浮体運動の非線形シミュレーション法

## NONLINEAR SIMULATION METHOD OF FLOATING BODY MOTIONS BASED ON POTENTIAL THEORY

谷澤克治  
Katsuji TANIZAWA

工博 海上技術安全研究所 耐航・復原性能研究グループ長 (〒181 東京都三鷹市新川6-38-1)

In the past 25 years, many researchers studied nonlinear time domain simulation methods of free surface and floating body motions based on the potential theory. These simulation methods are called as numerical wave tank (NWT). To solve the simultaneous equations of ideal fluid motion and floating body motion, rational NWT solves both the velocity field and the acceleration field. This review paper presents theoretical and technological state of NWT. The basic mathematical formulation of NWT for floating body simulation is firstly given. Then, the application of NWTs for two dimensional and three dimensional problems are presented and the strengths and limitations of NWT is explained. The direction of future development 3D-NWT is also discussed.

**Key Words :** Numerical wave tank, nonlinear time domain simulation, nonlinear floating body dynamics, acceleration potential, boundary element method

### 1. 緒言

本報ではポテンシャル理論にもとづく波浪中浮体運動の時間領域非線形シミュレーション法について解説する。このシミュレーション法は数値造波水槽(Numerical Wave Tank:NWT)と呼ばれる計算法の一つで、水波の非線形相互作用の研究や浮体の水波に対する非線形応答の研究等に用いられている。本報では以後、NWTと書くことにする。

NWTの研究はLonguet-Higgins & Cokelet<sup>1)</sup>による混合オイラーラグランジェ法(Mixed Eulerian and Lagrangian Method:MEL)の開発を契機に始められ、過去25年にわたって研究されて来た。そのキーポイントは流体と浮体との連成運動方程式を、時間領域で線形の仮定を外して構築する点にあったと言える。これには厳密には速度場だけではなく加速度場も解く必要がある。図-1に速度場と加速度場の関係を示す。周期運動を仮定しない時間領域の計算法では、速度場の解は質量保存を満たすのみで、運動量保存を満たす解は加速度場に構築した浮体と流体との連成運動方程式を解いて得られる。加速度場における連成運動方程式を初めて解いたのは Vinje & Brevig<sup>2)</sup>であった。Vinjeら以前の時間領域計算法では、浮体表面の変動圧(速度ポテンシャル

$\phi$  の時間偏微分,  $\partial\phi/\partial t \equiv \phi_t$ ) を速度ポテンシャルの後退差分で計算していたため、運動量保存則を精度良く満たす解が得られず、安定性の点でも問題があった。その後、加速度場において流体と浮体の連成運動を解く方法が種々研究され、現在では大別して次の3方法が知られている。

1. モード分解による方法
2. 陰境界条件を用いる方法
3. 繰り返し計算による方法

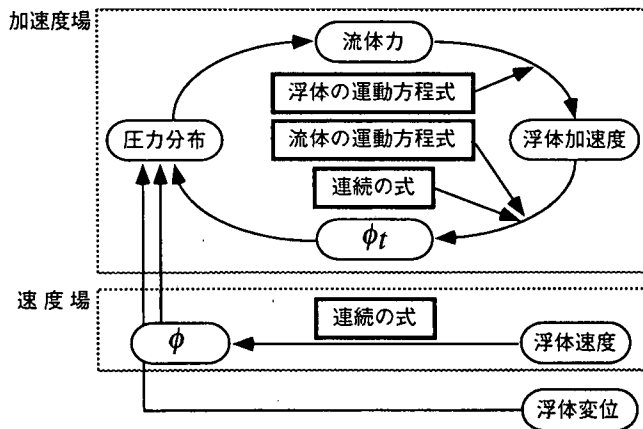


図-1 速度場と加速度場の関係

モード分解による方法は Vinje らが用いた方法である。Vinje らは複素ポテンシャルを用いた2次元浮体の運動計算で加速度場を上下揺、左右揺、横揺の単位加速度運動に対応する3モードと速度場から生じる求心加速度等の加速度の都合4モードに分解し、各モードについて境界値問題を解き、その解と浮体の運動方程式を連立させて上下揺、左右揺、横揺加速度を計算した。Vinje らの方法に基づき Cointe<sup>5)</sup> は2次元の時間領域の線形・非線形シミュレーションプログラムを開発し、線形解と非線形解の比較を行った。

陰境界条件を用いる方法は著者が開発した方法である<sup>4) 6)</sup>。著者は浮体の運動方程式を用いて加速度場における浮体表面の幾何学的境界条件式から浮体加速度を消去した陰境界条件式を導き、これを用いて加速度場をモード分解せずに解く方法を示した。また加速度ポテンシャルに関する境界値問題を定式化して加速度場における境界値問題の力学的な意味を明確にした。

繰り返し計算による方法は図-1に示す加速度場のループを収束するまで繰り返し計算で解く。この方法は計算プログラムの開発が容易であるが、計算時間の点で不利である。

これらの研究によりNWTを開発するための流体力学的な基礎が確立され、数値計算技術も向上した。本報では、最初にNWTの基礎として陰境界条件を用いた加速度場の解法を概説し、ついで2次元問題と3次元問題へのNWTの適用例をいくつか紹介し、最後にNWTの適用限界、問題点、今後の研究の方向等を示してまとめとする。

## 2. 速度場と加速度場の境界値問題概説

### (1) 境界値問題の定式化と境界条件

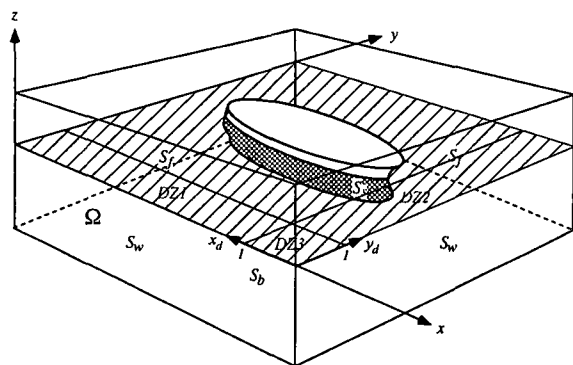


図-2 計算領域、境界、ならびに座標系

自由表面  $S_f$ 、水底  $S_b$ 、側面  $S_w$ 、浮体表面  $S_s$  で囲まれた流体領域  $\Omega$  を対象とし、速度場および加速度場の境界値問題の定式化を示す。ここでは流体は理想流体であり、その運動は速度ポテンシャル  $\phi$  とその時間微分  $\phi_t$  により記述されるものとする。座標系として静止時自由表面に沿う  $x, y$  軸と鉛直上向きの  $z$  軸から成る空間固定座標系  $o-xyz$  を用いる。また、以下で用いる諸量はすべて重力加速度  $g$ 、流体密度  $\rho$ 、浮体の代表寸法  $L$  を単位として無次元化された量とする。

領域  $\Omega$  では  $\phi$  および  $\phi_t$  はラプラスの式

$$\nabla^2 \phi = \nabla^2 \phi_t = 0 \quad (1)$$

を満足するので、グリーンの定理を適用して

$$c(Q) \begin{Bmatrix} \phi(Q) \\ \phi_t(Q) \end{Bmatrix} = \int_S \begin{Bmatrix} \phi(P) \\ \phi_t(P) \end{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) - G(P, Q) \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi(P)}{\partial n} \\ \frac{\partial \phi_t(P)}{\partial n} \end{Bmatrix} dS \quad (2)$$

の積分方程式が成り立つ。ここで  $P, Q$  は境界上の2点、 $c(Q)$  は境界の外角、 $G(P, Q)$  はグリーン関数で、 $P, Q$  間の距離を  $r$  とすると、2次元問題では  $G = \ln r$ 、3次元問題では  $G = 1/r$  である。

自由表面では力学的および幾何学的境界条件

$$\frac{D\phi}{Dt} = -z + \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 \quad (3)$$

$$\frac{Dx}{Dt} = \nabla\phi \quad (4)$$

が適用される。ここで  $x = (x, y, z)$  である。NWTでは自由表面の位置とポテンシャル値とを(3)、(4)式を時間積分して追跡するMEL法を用いる。そこで、自由表面ではDirichlet境界条件が課せられ、 $\phi$  は(3)式の時間積分から、また  $\phi_t$  は速度場の解を用いて  $-z - \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2$  で与えられる。

次に、運動が与えられている物体表面の  $\phi$  に関する幾何学的境界条件は

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = n \cdot (v_0 + \omega \times r) \quad (5)$$

と記述できる。ここで  $v_0, \omega$  は物体重心の速度と角速度、 $n$  は法線方向単位ベクトルである。 $\phi_t$  に関する物体表面での幾何学的境界条件は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_t}{\partial n} = & -k_n (\nabla\phi - v_0 - \omega \times r)^2 + n \cdot (\dot{v}_0 + \dot{\omega} \times r) \\ & + n \cdot \omega \times (\omega \times r) + n \cdot 2\omega \times (\nabla\phi - v_0 - \omega \times r) \\ & - \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

と書き表すことができる<sup>6)</sup>。ここで  $k_n$  は物体表面の曲率、 $\dot{v}_o, \dot{\omega}$  は物体重心の加速度および角加速度である。水底、側壁等の固定された平らな面で(5)、(6)式を評価すると  $\partial\phi/\partial n = \partial\phi_t/\partial n = 0$  となる。

浮体については  $\dot{v}_o, \dot{\omega}$  が未知数であるので(6)式を直接用いることができない。そこで、陰境界条件法では浮体の運動方程式を用いてこれらの未知数を消去する。浮体の慣性テンソルを  $\mathcal{M}$ 、浮体表面の一般化法線方向ベクトルを  $N = (n, n \times r)$  とし結果だけを記述すると、浮体表面の境界条件は

$$\begin{aligned} \frac{\partial\phi_t}{\partial n} = & N\mathcal{M}^{-1} \left\{ \int_{S_s} -\phi_t N ds \right\} \\ & + N\mathcal{M}^{-1} \left\{ \int_{S_s} \left( -z - \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 \right) N ds + F_g \right\} \\ & + q - \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 \right), \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで  $F_g$  は重力や係留力などの流体力以外の外力、 $q$  は速度場の解より陽に計算できる量で、

$$\begin{aligned} q = & -k_n (\nabla\phi - v_o - \omega \times r)^2 + n \cdot \omega \times (\omega \times r) \\ & + n \cdot 2\omega \times (\nabla\phi - v_o - \omega \times r) \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられる。境界条件式(7)は浮体表面における  $\phi_t$  と  $\partial\phi_t/\partial n$  の関係を与える陰境界条件式で、幾何学的境界条件であると同時に浮体と流体との連成条件を表す力学的境界条件でもある。この条件式は積分形であるので、境界要素を用いて離散化し、(2)式の離散化行列に組み込んで用いる。

以上(3)~(8)の境界条件の下に積分方程式(2)を数値的に解いて時間ステップ毎の速度場および加速度場の解を求め、これをRunge-Kutta法等で時間積分して流体と浮体の連成運動をシミュレートすることができる。

## (2) 開境界条件

開領域における浮体運動を計算するには側壁で開境界条件を満足させる必要がある。これにはSommerfeldの放射条件を用いる方法や波の減衰領域を用いる方法がある。放射条件を用いる方法は余分な計算領域を必要としない長所があるが、線形波に対する放射条件を用いるため波の非線形成分の反射が防げず、非線形計算には不向きである。一方、波の減衰領域を用いる方法は減衰領域を設けるために余分な計算領域を必要とするが、大振幅波の吸収特性が良好であり非線形計算には適した手法である。加えて入射波は全透過させ、反射波だけを減衰させることも可能であり、柔軟な開境

界を構成することができる。そこで著者はNWTに減衰領域を用いており、本法でもこの方法を解説する。

図-2に示す  $x_d, y_d$  は減衰領域をその奥行きで正規化した局所座標系で、これを用いると減衰領域の自由表面条件は

$$\frac{D\phi}{Dt} = -z + \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - \nu(x_d, y_d)(\phi - \phi_{ref}) \quad (9)$$

$$\frac{Dx}{dt} = \nabla\phi - \nu(x_d, y_d)(\zeta - \zeta_{ref}) \quad (10)$$

で与えられる。ここで  $\nu(x_d, y_d)$  は減衰係数、 $\phi_{ref}$  と  $\zeta_{ref}$  は速度ポテンシャルと自由表面形状の参照値であり、減衰領域は計算値と参照値の差を減衰させる。減衰領域を数値消波板として用いる場合は  $\phi_{ref} = 0, \zeta_{ref} = 0$  で良い。参照値に入射波のポテンシャルと自由表面形状を与えれば、入射波は全透過となり、浮体によるRadiation波やDiffraction波だけを吸収させることができる。微小波高の場合は線形進行波の解析解、有限振幅波ではStokes波の解やRieneckerら<sup>3)</sup>の解がよく参照値に用いられる。開境界を構成するには、側壁の境界条件にもこれらの解から導かれるNeumann条件を適用する。

ピストン造波機等の機械的な造波機を減衰領域とを組み合わせると吸収式造波機を構成するには、予め造波機単独の造波シミュレーションを行なって  $\phi_{ref}, \zeta_{ref}$  を求めておけばよい。しかし、ピストン造波機等、解析解が知られている造波機では実用的には参照値を解析解で代用することも可能である。

減衰係数は、減衰領域の入り口ではゼロで、奥に行くに従って距離の自乗に比例して増大するように設定する。図-2に示す減衰領域DZ1.DZ2.DZ3の減衰係数は、波周波数を  $\omega$  として

$$\nu(x_d, y_d) = \begin{cases} \alpha\omega\{1 - x_d\}^2, & \text{in DZ1} \\ \alpha\omega\{1 - y_d\}^2, & \text{in DZ2} \\ \alpha\omega\{1 - x_d y_d (x_d - 2)(y_d - 2)\}, & \text{in DZ3} \end{cases} \quad (11)$$

で与えられる。ここで、 $\alpha$  は減衰の強さを調節する無次元係数で最適値は1程度である。また減衰領域の奥行きは通常一波長分以上あれば十分である。

## 3. NWTの応用

NWTの研究開発は1980年頃から始められ、最初は2次元問題を対象に研究が進められてきた。その間の計算機の性能向上とも相俟って、現在では2次元NWT(2D-NWT)は実用段階に入っており、簡単な2次元浮体運動のシミュレーションであればパ

ソコンでも実行可能になっている。また、より高速な計算機であれば、実時間のシミュレーションも可能と思われる。一方、3次元NWT(3D-NWT)は研究開発が現在も進められており、実用技術として安易に使えるようになるまでには時間がかかると思われる。本節では2次元問題ならびに3次元問題へのNWTの応用例を以下に紹介する。

### (1) 2次元問題

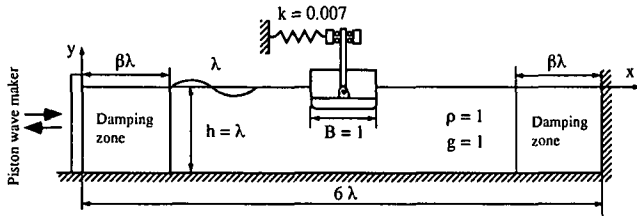


図-3 2D-NWTの典型例

図-3に2D-NWTの典型を示す。これは2次元水槽のシミュレータであり、水路、浮体、係留系、吸収式造波機、消波装置で構成されている。

#### a) 浮体運動の解析

2D-NWTの応用例としては、まず任意形状浮体の有限振幅動揺の解析が上げられる。NWTは時間領域の非線形計算法であるので、浮体運動の解析では入射波に対する線形応答から高次の非線形応答までを含んだ数値解が得られる。また、NWTは周期運動を仮定していないので、パラメータ横揺やカオス横揺の解析等、入射波とは周期の異なる運動の解析にも適用することができる。図-4に負の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示す。横軸は入射波周期 $T_w$ を単位とする無次元化時間で、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。 $H_w/d = 0.04$ の場合に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し現れる。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。NWTでは運動の相が波高によって大きく変化する様子がよくとらえられている。

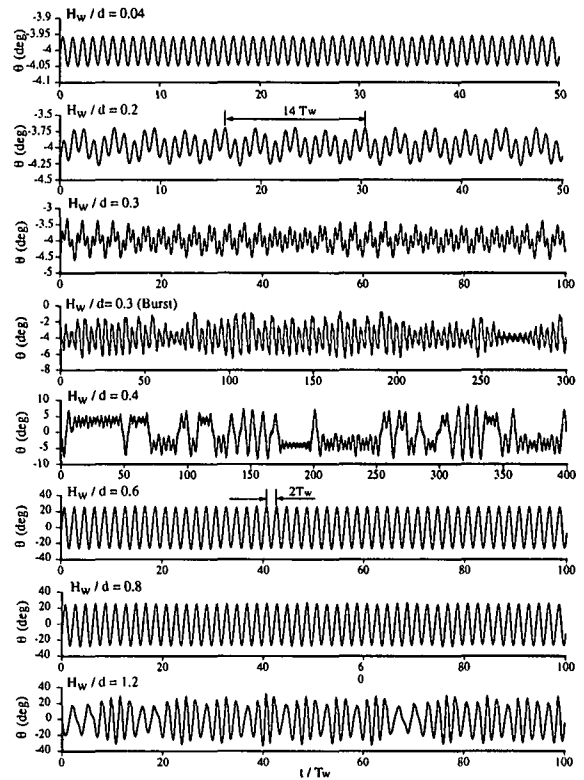


図-4 カオス横揺れの計算例

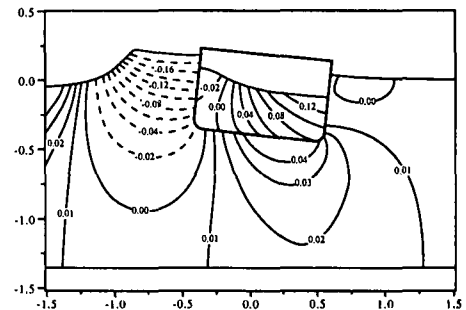


図-5 波浪・浮体・内部液体の連成運動の解析例

浮体内部に自由液面を有する場合でも、加速度場に波浪・浮体・内部液体の連成運動方程式を構築し、厳密に連成問題を解くことができる。図-5は船体中央横断面形状2次元浮体内に比重0.8の液体貨物が積載されている場合の過渡運動の計算例である。計算精度は良好で、質量、運動量、エネルギー保存則を高精度で満たす数値解が得られている<sup>7)</sup>。浮体内部の自由液体との連成動揺問題のより実用

的な課題として、著者は減揺水槽の設計への応用も試みている。

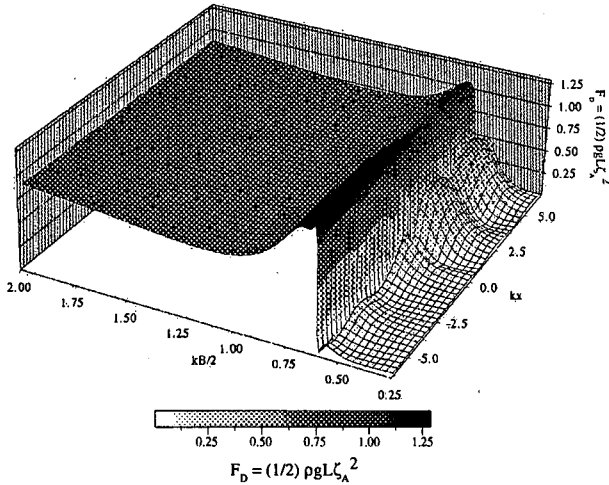


図-6 水底段差近傍での波漂流力の変化

### b) 水圧ならびに流体力の解析

NWTは浮体に作用する圧力や流体力の解析にも有用である。加速度場の境界値問題を解いて  $\phi_t$  を計算するため、圧力計算の精度が時間刻みに大きく影響されない長所があり、衝突等により衝撃的な加速度を生じた瞬間の圧力ならびに流体力の計算にも適用できる。また、自由表面近傍で流体から出入りする箇所での圧力計算にも柔軟に対応することができる。流体力の計算精度も良好であり、定量的な精度比較がISOPEのNWTグループで実施されたRadiation問題とDiffraction問題のベンチマーク結果として、以下のURLに報告されている。

<http://www.isoape.org/>

### c) 波漂流力の解析

NWTによる波漂流力の解析も興味深い応用の一つである。著者はNWTを用いて浅水域において浮体に働く波漂流力に対する水底形状の影響を解析した。沿岸海底地形の最も簡単な例としてステップ状に水深が浅くなっている箇所を取り上げ、その前後で漂流力がどのように変化するかをNWTで解析した結果を図-6に示す。この解析では浮体としてリスフォーム断面形状を有する2次元浮体を用いた。図では波漂流力を入射波の波数  $k_B/2$  と浮体と水底段差との相対位置  $k_x$  の関数として3次的に示している。この図からは長波長域、 $k_B/2 < 0.6$ 、でかつ浅い領域、 $x > 0$ 、で段差の影響が顕著であることが明確に読みとれる。この波長と領域では、波漂流力は振動し、いくつかのピークが現れるが、ピーク値自体はより短波長側に存在する最大値よりは小さい。浮体の相対位置に関わらず波漂流力が急激に大きくなっている波周波数

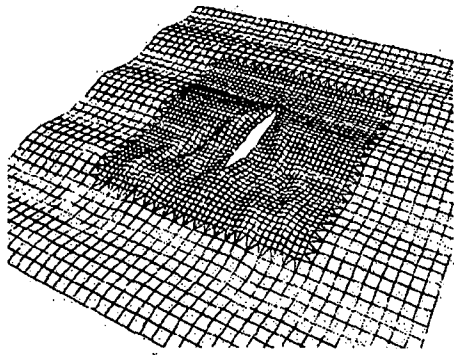
は、ロールの共振周波数にあたり、またこの計算ではヒープの共振周波数もほぼ同じ周波数である。この共振点から長波長側は急激な変化があるが、短波長側はなだらかな変化を示す。段差の影響は短波長側ではほとんど見られない。

以上、NWTの2次元問題への応用例を数例示したが、これら以外にも波の時間発展の解析、係留系の設計や造波機の設計にも応用可能で、海技研では400m長水槽の造波機の改修にあたり、NWTを用いて造波板の最適形状と駆動力を検討した。

## (2) 3次元問題

工学上の重要な問題の大半は3次元問題として取り扱う必要があるため、3D-NWTの開発が多くの研究者により進められている。3次元問題への応用は物体が固定されているDiffraction問題で比較的進んでおり、TLPのリングングの起振力として円筒コラムへ前面の入射波の駆け上がりと背面での深い谷の形成によって生じる横方向の強い流体力の解析等に用いられている<sup>11)</sup>。Diffraction問題では自由表面の時間発展だけを解けば良いので加速度場を解く必要はなく、自由表面パネルの再配置等も不要で、プログラミングがシンプルである。

一方、3次元浮体の運動解析への応用は試みられてまだ日が浅い。Berkvens<sup>8)</sup>は浮体運動を解析するための3D-NWTを開発し、球体の波浪中運動の計算を行った。また、白倉<sup>10)</sup>も同様の3D-NWTを開発し、やはり球体の波浪中運動の計算を行った。これらの3D-NWTは共にFully nonlinearな計算コードで、2節に示した陰境界条件を用いた定式化に基づいて浮体運動を計算している。より工学的に応用では池野<sup>13)</sup>が港湾内に係留された箱船の入射波に対する過渡応答を3D-NWTを用いて解析しているが、膨大な計算時間を要することから、計算は短時間の過渡運動を対象としている。航走する船舶の波浪中動揺の計算への応用では安川<sup>12)</sup>の研究がある。安川は3D-NWTによる長水槽を構築し、静止状態から造波、加速、波浪中の定常航走、減速の一連の水槽実験に相当する計算を実施した。著者も航走する船舶の運動を計算するための3D-NWTの開発を進めている。図-7に波長船長比1.0の向波中をフルード数0.2で航走する船体周りの波浪場の計算結果の一例を示す。この計算ではモード分解法で加速度場を解いて船体運動を計算しているが、まだ境界条件は線形であり、非線形問題への拡張が残されている。



$$\lambda / L = 1.0, X = 180, Fn = 0.2$$

図-7 自由航走する船体周りの波浪場

#### 4. 結言

NWTの実用ツールとしての完成度を高める上で克服すべき課題として、1)ロバストネスの向上と、2)計算時間の短縮が上げられる。2D-NWTは計算時間の点では実用上問題ないが、ロバストネスに欠けており計算が発散することが多々ある。このような場合の自由表面形状をプロットすると、波傾斜が大きな箇所では小規模な碎波現象が発生し、ここから数値計算全体が発散していることが分かる。ポテンシャル理論では境界が互いに交差することを許さないため小さな碎波でも容易に発散し、2D-NWT, 3D-NWT共にロバストネスに欠ける弱点がある。ロバストネスを持たせるため自由表面の平滑化等を行うこともあるが、高次流体力の計算結果への影響が憂慮される。ポテンシャル理論に基づく限り、ロバストネスの大幅な向上は望めないであろう。強引にロバストにして計算精度を犠牲にするよりも、計算可能な範囲内で高精度な解を追求する方が、NWTの適切な使い方ではないかと考える。

次に、計算時間の短縮は3D-NWTの開発上の最も重要な課題である。2D-NWTでは未知数が数百から千程度であるが、3D-NWTでは数千から数万になる。通常の境界要素法では未知数の数を  $N$  とすると計算量は  $O(N^3)$ 、記憶容量は  $O(N^2)$  であるため、3D-NWTでは計算時間と記憶容量の問題を克服しないと余程計算機の能力が向上しない限り実用的な規模の計算ができない。この問題を克服するには計算量が  $O(N \log N)$ 、記憶量が  $O(N)$  で済む多重極境界要素法を境界値問題のSolverに使う方法が有望であると思われる。宇都宮<sup>15)</sup>は水深が一様でない海域に置かれたVLFSのDiffraction/Radiation問題に多重極境界要素法を応用し、その効果を確認している。多重極境界要素法は今後3D-NWTの開発に不可欠は計算技術であると考

える。

NWTについてのより詳細な解説は参考文献<sup>9)</sup>を参照願いたい。

#### 参考文献

- 1) Longuet-Higgins, M.S. and Cokelet, E.: The deformation of steep surface waves on water, *Proc. Roy. Soc. ser. A* 350, 1976
- 2) Vinje, T. and Brevig, P.: Nonlinear Ship Motions, *Proc. of the 3rd. Int. Conf. on Num. Ship Hydro.*, 1981
- 3) Rienecker, M.M. and Fenton, J.D.: A Fourier approximation method for steady water waves, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.104, pp.119-137, 1981
- 4) 谷澤克治: 境界要素法による波浪中2次元浮体の非線形シミュレーション法について, 造船学会論文集, 第168号, 1990
- 5) Cointe, R., Geyer, P., King, B., Molin, B. and Tramon, M.: Nonlinear and linear motions of a rectangular barge in a perfect fluid, *Proc. 18th Symp. Naval Hydro.*, pp85-99, 1990
- 6) Tanizawa, K.: A Nonlinear Simulation Method of 3-D body Motions in Waves, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan vol.178*, 1995
- 7) Tanizawa, K.: Nonlinear simulation of floating body motions in waves, *Proc. of 6th ISOPE conference, Los Angeles, California*, 1996
- 8) Berkvens, P.J.F.: Floating bodies interacting with water waves, Development of a time-domain panel method, *Ph.D thesis, Twente Univ., The Netherland*, 1998
- 9) Tanizawa, K.: The state of the art on numerical wave tank, *Proc. 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships*, pp95-114, 2000
- 10) Shirakura, Y., Tanizawa, K. and Naito, S.: Development of 3-D Fully Nonlinear Numerical Wave Tank to Simulate Floating Bodies Interacting with Water Waves, *Proc. 10th ISOPE Conf. in Seattle*, pp254-262, 2000
- 11) Hong, S. Y. and Kim, M.H.: Nonlinear wave forces on a stationary vertical cylinder by HOBEM-NWT, *Proc. 10th ISOPE Conf. in Seattle*, pp214-250, 2000
- 12) Yasukawa, H.: Time domain analysis of ship motions in waves using BEM (1st and 2nd Report), *Trans. West-Japan Soc. Nav. Arch.* No.100, pp83-89, 2000, No101, pp27-36, 2001
- 13) 池野正明: 境界要素法を用いた浮体構造物の3次元有限振幅運動の解析法, 電力中央研究所報告, U00028, pp1-26, 2001
- 14) Tanizawa, K.: Development of a 3D-NWT for simulation of running ship motions in waves, *Proc. 16th Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Hiroshima*, 2001
- 15) Utsunomiya, T. and Watabe, E.: Accelerated higher order boundary element method for wave diffraction/radiation problems and its applications, *Proc. 12th ISOPE Conf. in Kitakyushu, Japan*, pp305-312, 2002