

3次元領域分割法による流体力計算の精度

——特異点分布法と影本・Yueの方法との比較——

永田修一*・藤田 孝**・吉田尚史***

1. 緒 言

最近、海洋空間の利用を目的に、様々な大型の浮体式海洋構造物が提案されている。例えば、マリンプロート推進機構から提案された浮体式海上空港案(太田, 1994)は、防波堤の中の巨大な箱型浮体に関するものである。このような浮体式海洋構造物の流体力計算には、通常、3次元特異点分布法が用いられる。しかしながら、この方法では浮体没水表面をパネルに分割し、パネル上の吹き出し強さを連立方程式の解として求めるため、浮体が超大型になると分割パネル数も膨大となり、計算が非常に困難となる。メモリ影響を考慮した流体力を計算する場合、高周波数域の造波減衰係数が必要となるため、特に困難となる。このような理由から、より解析的な流体力計算法が望まれるところである。

著者らは、このような観点から、井島らによって提案された3次元領域分割法(井島, 1975)を用いて、防波堤内の係留浮体の運動を計算し、実験値と比較することによって、その有効性を示した(永田他, 1990, 1991, 1992)。この方法では、浮体形状は柱状体に限られるものの、3次元問題が平面2次元問題となる。また、浮体底部のポテンシャルに関する未知量を消去できるため、最終的な未知量を、浮体外部領域の進行散乱波と局所散乱波のポテンシャルにすることができる。このため、未知量は平面的な浮体境界線の分割個数の整数倍となるだけで、特異点分布法に比べると格段に少なくなる。このように、この方法では、浮体底面のポテンシャルが最終的な未知量にならないので、超大型浮体の流体力計算に非常に有利となる。また、流体力計算に、湾や防波堤などの地形の影響を含めることも容易である。前報では、線形の係留系を対象にしたため、流体力係数を求めず、未知量である浮体の運動と流体運動のポテンシャルを直接、連立することにより解いた。しかしながら、非線形係留問題を扱う場合は流体力係数を求めておく必要がある。その際、流体力係数ベースの計算精度を確認してお

く必要があるが、この方法による流体力計算の精度を詳細に検討した報告はないようである。そこで、本研究では、剛結された2個の半没水円柱浮体を対象に3次元領域分割法を用いて流体力計算を行い、流体力計算によく用いられる特異点分布法(杉浦, 1977)、影本・Yue法(1986)の結果と比較することにより、その精度を検討した。

2. 領域分割法による流体力計算法

図-1に示すような、一定水深 h の水域にある2個の半没水円柱に対するラディエーション問題、ディフラクション問題を領域分割法を用いて解く方法について述べる。

流体は非圧縮、非粘性の完全流体とすると、流体域ではラプラスの方程式を満足する速度ポテンシャルが存在する。流体運動を微小とし周期性を仮定すると、全ポテンシャル Φ は以下のように分離できる。

$$\Phi(x, y, z; t) = \phi_0(x, y, z) \cdot e^{-i\sigma t} + \phi_r(x, y, z) \cdot e^{-i\sigma t} + \sum_{i=1}^6 \phi_i(x, y, z) \cdot e^{-i\sigma t} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ϕ_0 は入射波のポテンシャル、 ϕ_r は反射波のポテンシャル、 ϕ_i はラディエーションポテンシャルを表す。 σ は角周波数、 i は虚数単位 ($\sqrt{-1}$)、 t は時間である。また、ラディエーション問題に対する浮体の変位を次式で表す。

$$\eta_i(t) = X_i \cdot e^{-i\sigma t} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 X_i は運動の複素振幅である。

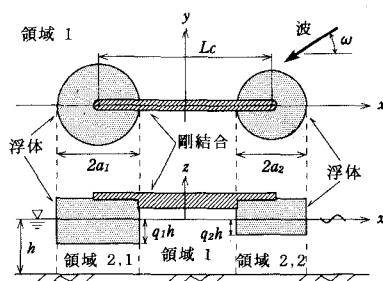


図-1 概念図

* 正会員 工博 日立造船(株) 技術研究所
 ** 正会員 工修 日立造船(株) 技術研究所
 *** 工博 日立造船(株) 技術研究所

流体運動の基礎式であるラプラスの式、水面条件式、水底条件、物体表面条件式に式(1)を代入すると、次のディフラクション問題、ラディエーション問題が定義できる。

(a) ディフラクション問題

$$\phi^{(D)} = \phi_0 + \phi_7 \text{ とおくと,}$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi^{(D)} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi^{(D)}}{\partial z} - \frac{\sigma^2}{g} \phi^{(D)} &= 0 & (z=0) \\ \frac{\partial \phi^{(D)}}{\partial z} &= 0 & (z=-h) \\ \frac{\partial \phi^{(D)}}{\partial n} &= 0 & (\text{浮体表面上}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

この他に ϕ_7 は無限遠方での放射条件を満足する。

(b) ラディエーション問題

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi^{(A)} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi^{(A)}}{\partial z} - \frac{\sigma^2}{g} \phi^{(A)} &= 0 & (z=0) \\ \frac{\partial \phi^{(A)}}{\partial z} &= 0 & (z=-h) \\ \frac{\partial \phi^{(A)}}{\partial n} &= -i\sigma \cdot n_i \cdot X_i & (\text{浮体表面上}) \\ [n_i]^T &= \{ \vec{n}, (\vec{x} - \vec{x}_0) \times \vec{n} \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

この他に $\phi^{(A)}$ は無限遠方での放射条件を満足する。ここで、 \vec{x}_0 は浮体重心の位置ベクトル、 \vec{x} , \vec{n} はそれぞれ浮体表面の位置ベクトルおよび単位法線ベクトルを示す。

流体域を図-1に示すように、領域1, 領域2, j ($j=1, 2$)に分け、各領域のポテンシャルをそれぞれ $\phi_1, \phi_{2,j}$ とおくと、ディフラクション問題に対しては各領域のポテンシャルが次のように表される。

$$\phi_1^{(D)}(x, y, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[\{f_0(x, y) + f_1(x, y)\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} f_2^{(m)}(x, y) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \right] \dots (7)$$

$$\phi_{2,j}^{(D)}(x, y, z) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left[\phi_{0,j}(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \phi_{s,j}(x, y) \cos \bar{S}_j(z+g_j h) \right] \dots (8)$$

同様に、ラディエーション問題に対しては各領域のポテンシャルが次のように表される。

$$\phi_1^{(A)}(x, y, z) = \frac{gX_i}{\sigma} \left[f_1(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} f_2^{(m)}(x, y) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \right] \dots (9)$$

$$\phi_{2,j}^{(D)}(x, y, z) = \frac{gX_i}{\sigma} \left[\phi_{0,j}(x, y) + \sum_{s=1}^{\infty} \phi_{s,j}(x, y) \cdot \cos \bar{S}_j(z+g_j h) + \frac{i}{2\bar{q}_j} \frac{\sigma^2 h}{g} \cdot \left\{ \left(-\frac{X_3}{X_i} + \frac{X_5 x}{X_i} - \frac{X_4 y}{X_i} \right) \left(1 + \frac{z}{h} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{2X_3}{X_i} - \frac{X_5 x}{X_i} + \frac{X_4 y}{X_i} \right) \left(\frac{x^2 + y^2}{h^2} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\bar{S}_j = s\pi/\bar{q}_j h$ (s は自然数)、 $\bar{q}_j = 1 - q_j$ である。上式で、 l モードに関して計算を行う場合は X_l に関する項のみが残り他は零になる。

なお、これ以降の領域分割法による計算法については、井島他(1975)、永田他(1990)を参照されたい。

3. 計算結果

2章に述べた領域分割法を用いて、ラディエーション問題、ディフラクション問題に関する流体力計算を、図-1に示す剛結された2個の半没水円柱浮体を対象に行った。また、同時に、流体力計算によく用いられる特異点分布法、影本・Yueの方法による計算も行い、3つの方法による結果を比較することにより、領域分割法の計算精度を調べた。

領域分割法では、2個の円柱と水面の交線により作られる境界をそれぞれ80個に分割し、局所散乱波の項を3項まで考慮した。したがって、ラディエーション問題、ディフラクション問題とも、解を求める時の最終的な未知量は640個である。

特異点分布法では、この浮体は平面的に2つの対称軸を持つので、浮体全体の1/4部分を4角形要素で分割して計算を行った。計算点は浮体の1/4領域を406個に分割したので、全体としては、1624個の分割をしたことになる。

影本・Yueの方法は、単独浮体のラディエーション特性、ディフラクション特性から複数浮体の相互干渉を計算する方法であるが、ここでは、単独浮体に関する計算を、円筒座標系に基づいた領域分割法で計算した。相互干渉の計算には、進行散乱波の干渉のみを考慮し、局所散乱波の干渉を無視した。

なお、以下の流体力係数の比較計算において、回転に関する係数については、領域分割法と特異点分布法による結果のみを示している。

計算条件は、図-1に示した記号を用いると以下のようである。

$$a_1/h = a_2/h = 2.8, \quad q_1/h = q_2/h = 0.32, \quad L_c/h = 25.0$$

図-2~図-12は、6自由度運動に関する付加質量係数と造波減衰係数の周波数特性を示している。 A_{ij}, D_{ij} は、 j 方向の単位振幅運動による i 方向の付加質量係数、

造波減衰係数を表している。ここで、 i, j はそれぞれ 1~6 で、順に、Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw 方向に対応する。また、無次元化に用いている ρ は流体密度、 ∇ は排水量、 L は円柱の半径である。

図-2, 図-3 は、それぞれ、Surge 方向の付加質量係数 A_{11} , 造波減衰係数 D_{11} の周波数特性に関して、3 種の方法による結果を示したものである。横軸は無次元周波数を、縦軸は各係数を無次元化した形で示している。両図とも、低周波数域において値が振動しているが、これは 2 個の浮体の干渉によるものである。1 個の浮体についてはこのような振動は現れない。

図-4 は、Surge と Pitch の干渉項である A_{31} の周波数特性を示している。

図-5, 図-6 は、Sway 方向の流体力係数 A_{22} , D_{22} の周波数特性を示している。ここには示していないが、これらの A_{22} と D_{22} の値は、この場合と同じ直径と喫水を持つ単一円柱浮体の A_{22} , D_{22} に関する無次元値とほぼ一致する。このことから Sway 方向については、2 つの浮体の相互干渉はほとんど無いといえる。

図-7 は、Sway と Roll の干渉項である A_{42} の周波数特性を示している。

図-8, 図-9 は、Heave 方向の流体力係数 A_{33} , D_{33} の周波数特性を示している。 A_{33} については、無次元周波数が 1.87 程度で、特異点分布法の値が他の方法に比べ大き

くなっているが、これは、イレギュラー周波数に対応しているものと思われる。領域分割法による A_{33} と D_{33} の計算値には、特異点分布法と同様に特定の周波数で計算

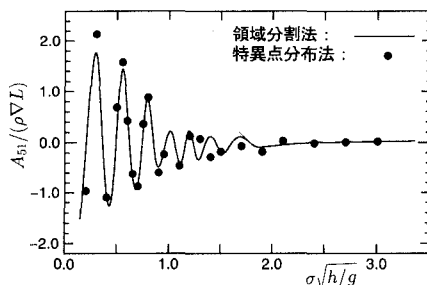


図-4 Pitch 方向の付加質量係数 (Surge 方向の単位振幅運動による)

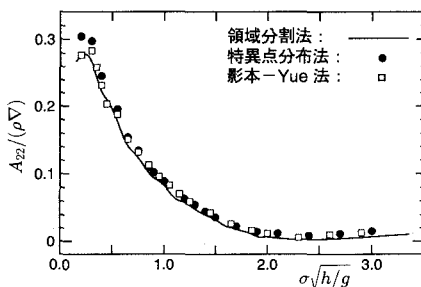


図-5 Sway 方向の付加質量係数 (Sway 方向の単位振幅運動による)

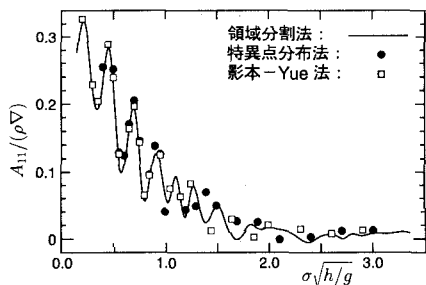


図-2 Surge 方向の付加質量係数の比較 (Surge 方向の単位振幅運動による)

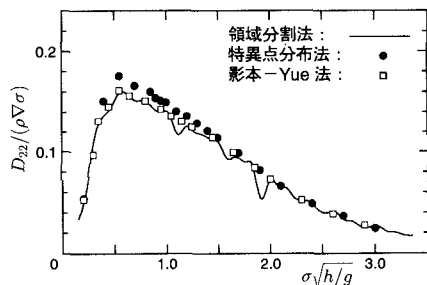


図-6 Sway 方向の造波減衰係数 (Sway 方向の単位振幅運動による)

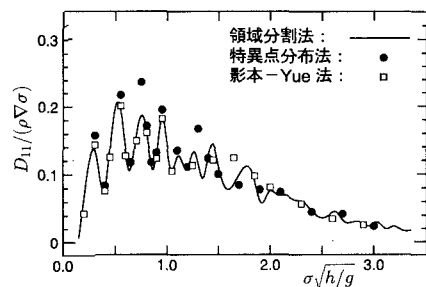


図-3 Surge 方向の造波減衰係数の比較 (Surge 方向の単位振幅運動による)

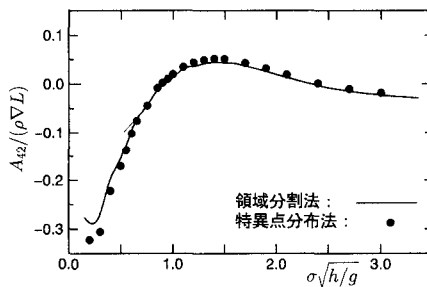


図-7 Roll 方向の付加質量係数 (Sway 方向の単位振幅運動による)

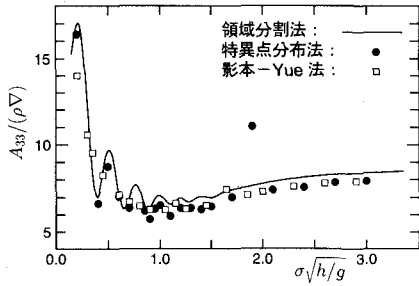


図-8 Heave 方向の付加質量係数
(Heave 方向の単位振幅運動による)

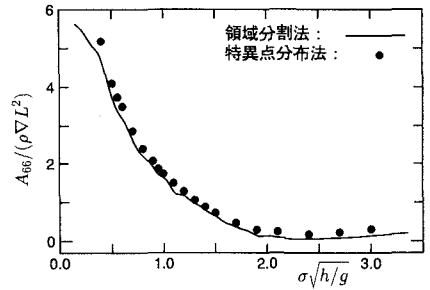


図-12 Yaw 方向の付加質量係数
(Yaw 方向の単位振幅運動による)

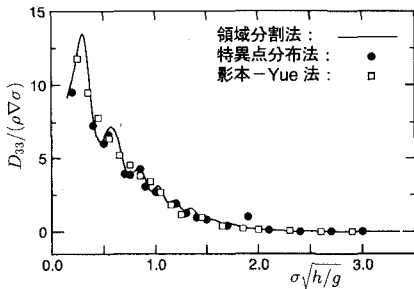


図-9 Heave 方向の造波減衰係数
(Heave 方向の単位振幅運動による)

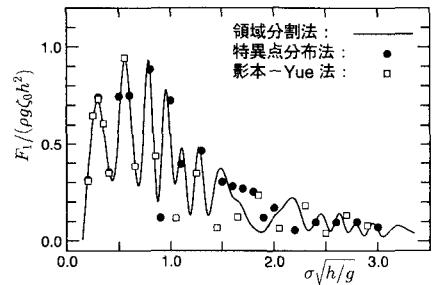


図-13 Surge 方向の波強制力

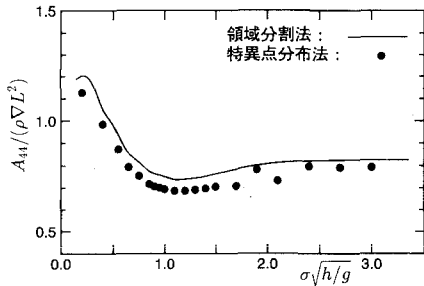


図-10 Roll 方向の付加質量係数
(Roll 方向の単位振幅運動による)

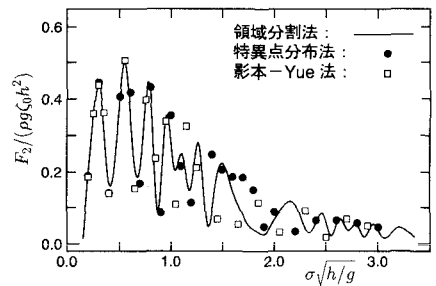


図-14 Sway 方向の波強制力

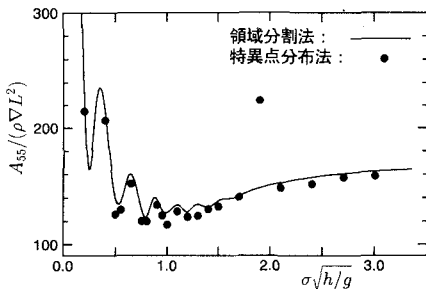


図-11 Pitch 方向の付加質量係数
(Pitch 方向の単位振幅運動による)

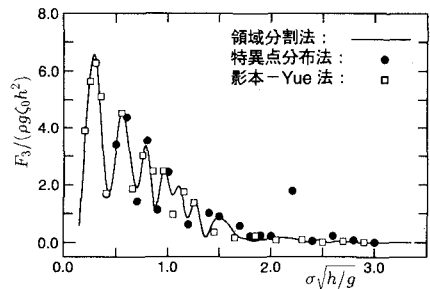


図-15 Heave 方向の波強制力

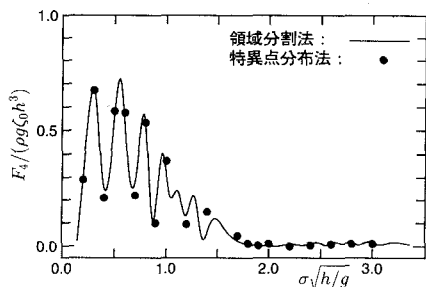


図-16 Roll 方向の波強制力

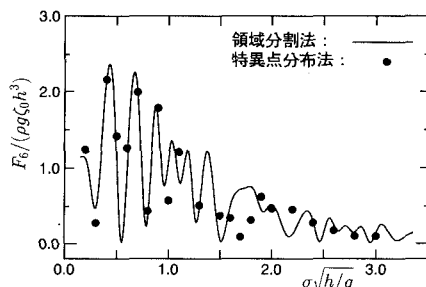


図-18 Yaw 方向の波強制力

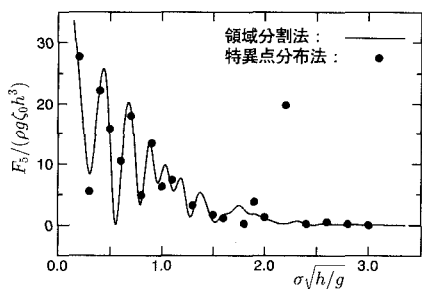


図-17 Pitch 方向の波強制力

値に不合理が生じる場合がある。図-8、図-9では、計算した周波数に、たまたまそのような周波数が含まれていなかったものと思われる。

図-10は、Roll 方向の流体力係数 A_{44} の周波数特性を示したものである。

図-11は、Pitch 方向の流体力係数 A_{55} の周波数特性を示している。両者の無次元値が非常に大きくなっているのは、無次元化に用いている L として浮体の半径を用いているからである。 A_{55} については、 A_{33} と同様に、無次元周波数 1.87 程度で、特異点分布法の値が領域分割法の値より非常に大きくなっている。

図-12は、Yaw 方向の流体力係数 A_{66} の周波数特性を示している。

図-13～図-18は、波向き $\omega=30^\circ$ とした時の波強制力の 6 成分の周波数応答関数を示したものである。3 種の計算法による結果を比較すると、大略一致しているといえるが、部分的に一致していない周波数もある。

以上の流体力係数の比較計算結果から、以下のようなことがいえる。

- 1) 領域分割法、特異点分布法、影本-Yue の方法による流体力係数計算結果は、特定の周波数を除くと良く一致する。このことから、領域分割法の計算精度は十分なものである。
- 2) 特異点分布法では、既に指摘されているようにイ

レギュラー周波数がある。領域分割法でも A_{33} 、 D_{33} において、計算値に不合理が生じる周波数がある。

3) 影本-Yue の方法は、非常に精度のよい相互干渉計算法である。ここでは、局所散乱波の干渉を無視したが、これを考慮するとさらに精度が良くなると考えられる。

4. 結 論

本研究では、3次元領域分割法の流体力計算精度を調べるために、剛結された 2 個の半没水円柱が剛体運動する場合の流体力係数を 3次元領域分割法を用いて計算し、特異点分布法、影本・Yue の方法による計算結果と比較した。その結果、3 種の方法による結果は、特定の周波数を除き、非常に良く一致した。このことから、3次元領域分割法による流体力計算精度は非常に良いことがわかった。

今後は、この 3次元領域分割法を用いて、防波堤で囲まれた水域に係留された大型浮体の運動計算を時間領域で行う予定である。

参 考 文 献

井島武士・吉田明徳・湯村やす (1975): 有限水域の波による楕円および矩形浮体の運動と波の変形, 土木学会論文報告集, 第 244 号, pp. 91-105.
 太田英美 (1994): 浮体式海上空港構想, 第 12 回海洋工学シンポジウム, pp. 75-81.
 杉浦正憲 (1977): 半潜水式浮遊構造物に働く流体力について, 日立造船技報, 第 38 巻, 第 3 号, pp. 40-48.
 永田修一・中川有紀・巻幡敏秋 (1990): 3次元領域分割法による浮体運動計算, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 699-703.
 永田修一・藤田 孝・三宅成司郎・巻幡敏秋・小田一紀 (1991): 有限長の防波堤と 3次元係留浮体の波による干渉, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 771-775.
 永田修一・藤田 孝・三宅成司郎・巻幡敏秋・小田一紀 (1992): 有限長の防波堤と複数係留浮体の波による干渉, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 811-815.
 Kagemoto, H. and Yue, D. K. P. (1986): Interactions among multiple three-dimensional bodies in water waves, J. Fluid Mech., Vol. 166, pp. 189-209.