

湾水振動の非線形数値モデルの開発と 形状による港湾の応答特性変化について

Asur Baris DERUN*・柿沼太郎**・磯部雅彦***

種々の港湾形状が湾水振動に与える影響について検討するための数値解析モデルを提案する。対象領域を領域分割して ADI 法を適用することにより、基礎方程式である非線形緩勾配方程式を解く。線境界入射法、スポンジ・レイヤ及び Sommerfeld の放射条件を組み合わせ、効果的な無反射入射波境界を開発した。規則波、または、不規則波を造波し、非線形干渉によって生じた長周期波が港湾内で選択的に増幅され、更に、港外に出て造波境界で吸収される現象をシミュレートした。I 型、L 型、F 型、T 型、そして、Y 型の各形状を有する港湾を対象として、水面変動の周波数スペクトルの比の平方根によって定義した港内の増幅率を算出し、比較・検討を行なった。

1. 序 論

湾水振動は、船舶の停泊や荷役に対して非常に重要な問題であり、港湾の計画・設計に際し、発生する反射波や長周期波の特性を予測しておく必要がある。ところが、湾水振動は、“harbor paradox” (Miles・Munk, 1961) といった複雑さを呈し、また、実際の港湾は、様々な形状を有するため、港湾内の各場所でその特性が異なる。更に、発生外力においても波の非線形干渉を含む複雑なメカニズムが存在し、従って、湾内の埋立・浚渫や干潟の干拓等による水域の形状変化が、共振作用等の長周期波に対する応答特性に影響を及ぼす可能性がある。

こうした湾水振動について、様々な研究がなされてきた。例えば、複数の港湾が結合された場合の湾水振動を実験と理論によって扱ったのは、Raichlen・Ippen (1965) であった。そして、任意の形状を有する港湾に対する解析法が、Hwang・Tuck (1970)、Lee (1971)、Lee・Raichlen (1972) や佐藤ら (1988) によって開発された。また、湾水振動において重要な波の非線形性は、Bowers (1977)、Mei・Agnon (1989) や喜岡ら (1988) によって扱われ、短周期波群の入射による港湾内での長周期自由波・拘束波の発生機構等に関して非線形性の効果が議論されている。更に、木村ら (1997) は、任意のスペクトルを持つ入射波に適用可能な解析法を提案し、不規則入射波に伴う湾水振動特性を調べた。現地港内の解析は、金山ら (1995) や喜岡ら (1996) により、Boussinesq 方程式に基づいて行なわれている。

本研究では、湾水振動の特性を定量的に検討するために、主港湾と幾つかの副港湾からなる様々な形状を有する港湾に適用可能な、無反射入射波境界を有する非線形数値解析モデルを開発する。そして、港湾外から入射する風波の非線形干渉波によって生成される湾水振動の数

値シミュレーションを行ない、種々の形状の港湾に対する結果を比較・検討する。

2. 基礎方程式と境界条件

(1) 基礎方程式

式 (1) 及び (2) に示す非線形緩勾配方程式 (磯部, 1994) を基礎方程式とし、波の非線形性を考慮する。

$$Z_a^{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla (A_{aa} \nabla f_a) - B_{aa} f_a + (C_{aa} - C_{aa}) \nabla f_a \nabla h + \frac{\partial Z_a^{\eta}}{\partial h} Z_a^{\eta} f_a \nabla \eta \nabla h = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$g\eta + Z_a^{\eta} \frac{\partial f_a}{\partial t} + \frac{1}{2} Z_a^{\eta} Z_a^{\eta} \nabla f_a \nabla f_a + \frac{1}{2} \frac{\partial Z_a^{\eta}}{\partial z} \frac{\partial Z_a^{\eta}}{\partial z} f_a f_a + \frac{\partial Z_a^{\eta}}{\partial h} Z_a^{\eta} f_a \nabla f_a \nabla h = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Z_a 及び f_a は、それぞれ、鉛直分布関数及びその重み係数である。また、 η 、 h 及び g は、それぞれ、水面変動、静水深及び重力加速度であり、 A_{aa} 、 B_{aa} 及び C_{aa} は、それぞれ、鉛直分布関数の関数形を与えたときに定まる係数である。

(2) 無反射入射波境界

波の入射は、線境界入射法 (石井ら, 1993) を用いて行なう。これに、入射境界で反射波が発生しないよう、スポンジ・レイヤ (Larsen・Dancy, 1983) 及び Sommerfeld の放射条件を組み合わせ、効果的な無反射入射波境界を開発した。

このうち、スポンジ・レイヤでは、次式のパラメタ $\mu(x)$ によって、波と流れを分離する。

$$\mu(x) = \exp\{(2 - bx/dx - 2^{-bx/dx}) \ln a\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 x_s は、スポンジ・レイヤ長であり、 a は、差分格子の格子数に依存する定数である。また、 b は、本研究で導入した係数であり、これによりスポンジ・レイヤ長を短くするといった効率化を図る。

一方、Sommerfeld の放射条件は、波の位相速度を C とすると、次式で表される。

博(工) 東京大学助手大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻

** 正 会 員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部

*** フェロー 工 博 東京大学教授大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{C} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial f_a}{\partial x} + \frac{1}{C} \frac{\partial f_a}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

(3) 入射波の造波

規則波は、次式によって造波する。

$$\phi = \sum_{a=1}^N Z_a f_a \equiv Z_a f_a \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Z_a = \left(1 + \frac{z}{h}\right)^{2(a-1)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$f_a = \frac{gH}{2\sigma} \frac{(kh)^{2(a-1)}}{2(a-1)! \cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ϕ 、 H 、 k 及び σ は、それぞれ、速度ポテンシャル、波高、波数及び角周波数である。 N は、用いる鉛直分布関数の個数である。

他方、不規則波の造波では、次式で表される Bretschneider・光易スペクトルを用いる。

$$S(f) = 0.257 (H_{1/3})^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \cdot \exp\{-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 f は、周波数である。 $f^{(1)}$ と δ を与えて、 $f^{(i+1)} = \delta f^{(i)} (i=1, 2, \dots)$ によって順に選ばれる各周波数に対応する周波数帯のスペクトルより振幅を算出し、式(5)～(8)によって造波を行なう。

3. 種々の港湾形状に対応する数値解析モデル

(1) I型港湾

幾つかの矩形の計算領域を組み合わせることによって、様々な港湾形状を表現する。図-1に矩形港湾を示す。図-1の右図において、2の領域(1.5m×0.3mの部分)が矩形港湾であり、1の領域が外海である。1の領域内に、入射のための線境界及びスポンジ・レイヤがある。スポンジ・レイヤの長さは、12mとする。この矩形港湾が港湾形状の基本形であり、これを“I”型港湾と呼ぶ。

基礎方程式系は、ADI法を用いて解く。その際、 x -sweepでは、図-1の左図のように、1→2→3と領域を3分割して差分方程式を順に解き、 y -sweepでは、図-1

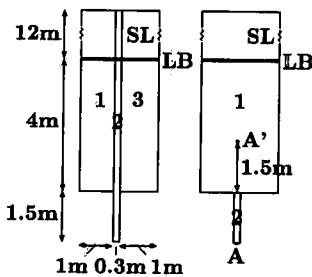


図-1 I型港湾

の右図のように、1→2と2分割して解く。

(2) L型、F型、T型及びY型港湾

次に、I型港湾を主港湾とし、副港湾となる0.5m×0.5mの大きさの正方形港湾を組み合わせ、 “L”型、“F”型、そして、“T”型港湾を作成する。これらを図-2～4に示す。また、図-5(a)、(b)及び(c)は、副港湾の寸法が異なる“Y”型港湾であり、 x -sweepで領域を6分割し、 y -sweepで7分割してADI法を適用する。

4. 無反射入射波境界の検証

造波境界において反射が発生していないことを確かめるために、計算格子の岸側端点における水面変動の検証を行なう。図-6に、港湾がない場合、すなわち、図-1右図の1の領域における、波高 5.0×10^{-3} m、周期1sの入射波に対する検証結果を示す。静水深は、0.23 mで一定とする。図-6に示した0～0.5の大きさをとるプロットの値は、完全反射と仮定した岸側境界における波高の

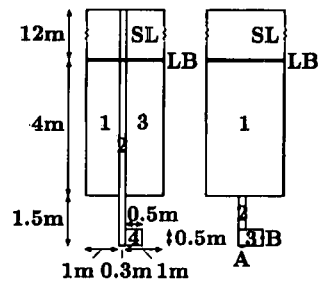


図-2 L型港湾

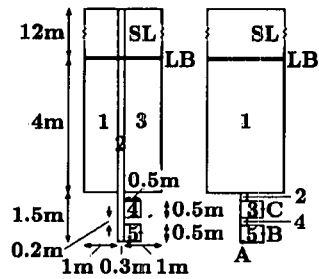


図-3 F型港湾

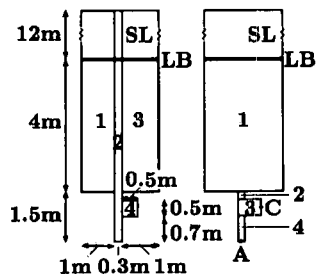


図-4 T型港湾

計算値と入射波高の2倍の比について、 $t=12\sim 24$ (s)の計算時間内の2s間隔の時刻における値を抽出して算出した標準偏差である。この場合、スポンジ・レイヤ(SL)の x 方向の長さを12mとすることにより、入射境界に

おいて反射がほとんど生じないことがわかる。

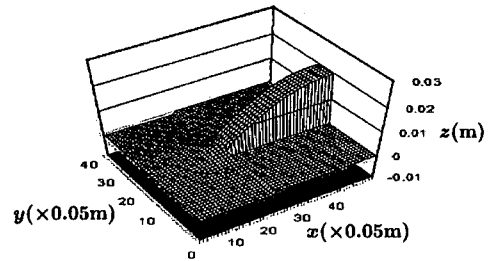
5. 湾水振動の数値計算

(1) 入射波が規則波である場合の湾水振動

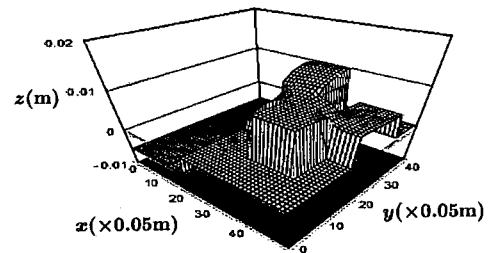
図一1～5の各港湾に対し、規則波を入射して数値計算を行なった。その際に、静水深を全領域で一定値1.24mとし、初期条件として静水状態を与えた。壁面では、完全反射の条件、すなわち、 $\partial\eta/\partial n=0$ かつ $\partial f_a/\partial n=0$ を与えた。格子幅は、 $\Delta x=\Delta y=5.0\times 10^{-2}$ mとし、計算時間間隔は、 x -sweepと y -sweepを併せて $\Delta t=5.0\times 10^{-3}$ sとした。また、入射波高を 5.0×10^{-3} mとし、各定数を $a=2.0$ 、 $b=0.1$ 及び $N=2$ とした。

図一7に、図一1のI型港湾に対して周期 $T=2.4$ sの波を入射したときの時刻 $t=30$ sにおける水面形を示す。また、図一8、9は、図一5(b)のY型港湾における水面形である。Y型港湾やF型港湾では、主港湾の振動の軸に直交する方向の振動が副港湾内に発生する。

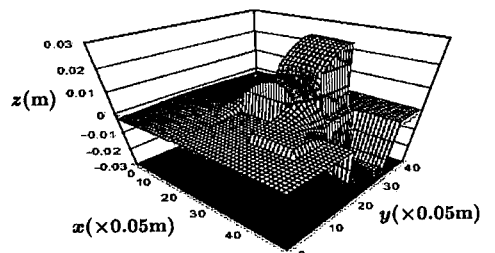
いま、増幅率 AF (amplification factor)を次式によっ



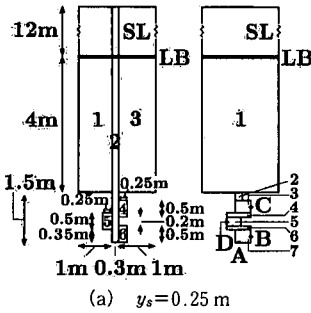
図一7 I型港湾における水面形 ($T=2.4$ s, $t=30$ s)



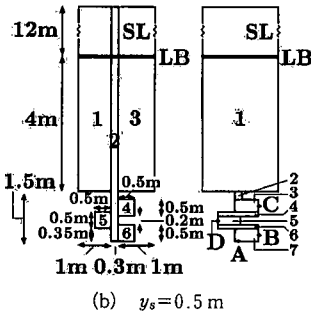
図一8 Y型港湾 (b) における水面形 ($T=3.8$ s, $t=75$ s)



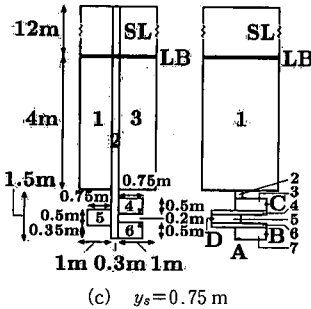
図一9 Y型港湾 (b) における水面形 ($T=1.55$ s, $t=30$ s)



(a) $y_s=0.25$ m

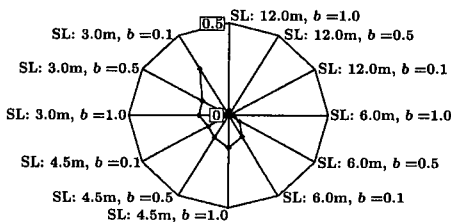


(b) $y_s=0.5$ m



(c) $y_s=0.75$ m

図一5 副港湾の y 軸方向の長さ y_s が異なる3種類のY型港湾



図一6 無反射入射波境界の検証(岸側境界における波高の計算値と入射波高の2倍の比の標準偏差; $H=5.0\times 10^{-3}$ m, $T=1.0$ s, $\Delta x=\Delta y=5.0\times 10^{-2}$ m, $\Delta t=5.0\times 10^{-3}$ s, $a=2.0$)

て定義する。

$$AF = \sqrt{S_1/S_2} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 S_1 及び S_2 は、それぞれ、港湾内部における波の周波数スペクトルのピーク値及び港湾外部における入射波の周波数スペクトルのピーク値である。図-1～5の各港湾に対する数値計算結果より、増幅率 AF を算出した結果を図-10～14に示す。地点別に、線種や○等の印によって AF 曲線を区別している。ここで、 l は、主港湾の港湾長である。スペクトル解析には、FFT を用いた。

Y 型港湾のように複雑な形状を有する港湾では、第1ピークの値がI型港湾やL型港湾よりもずっと小さい。これは、主振動軸と直行する副港湾内の振動の寄与による。また、異なる大きさの副港湾を有する Y 型港湾の AF 値を比較すると、副港湾が y 方向に長いほど、波の散乱効果が高まり、増幅率が減少して、基本モードの振動の周期が長くなる。このように港湾形状がより複雑であるほど、 AF 曲線の覆う面積(曲線より下の部分)が小さくなるが、これは、全体的に増幅率が減少し、長周期波も抑制されることを意味する。なお、渦粘性や海底摩擦を無視しているから、実際増幅率は、ここで示した計算値より、特に高周波数振動に対して小さくなるであら

う。

また、L 型港湾や T 型港湾において、副港湾の取り付け位置が港奥に近いほど、基本モードの振動が大きくなる。逆に、副港湾の取り付け位置が港口に近いほど、第2モードの振動が大きくなる。

Y 型港湾内の AF 値を見ると、基本モードの振動は、A 点及び B 点で大きい。これに対して、第2モードの大きな振動は、B 点及び C 点に現れる。D 点では、第2モードの影響を最も受けない。このように、港湾内の各場所で振動の特性が異なるから、津波計測等の目的のために水位計を設置する際には、適切な設置位置を選択しなければならない。

(2) 入射波が不規則波である場合の湾水振動

次に、図-1のI型港湾に対し、不規則波を入射して数値計算を行なった。有義波高及び有義波周期をそれぞれ $3.3 \times 10^{-2} \text{ m}$ 及び 1.25 s とし、静水深を 0.23 m で一定とする。入射波のスペクトルを図-15に、また、A 点における波のスペクトルの計算結果を図-16に示す。A 点及び A' 点において得られた波のスペクトルをそれぞれ S_1 及び S_2 とすると、式(10)と同様にして $AF = \sqrt{S_1/S_2}$ より増幅率が求まるが、ここでは、フィルタリングを施す。

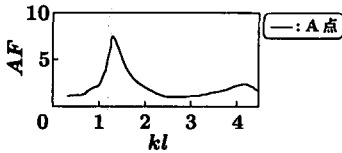


図-10 I型港湾における増幅率

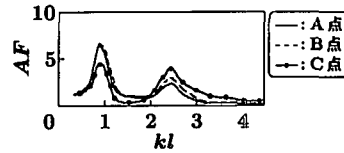


図-12 F型港湾における増幅率

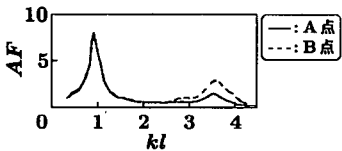


図-11 L型港湾における増幅率

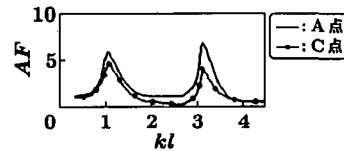


図-13 T型港湾における増幅率

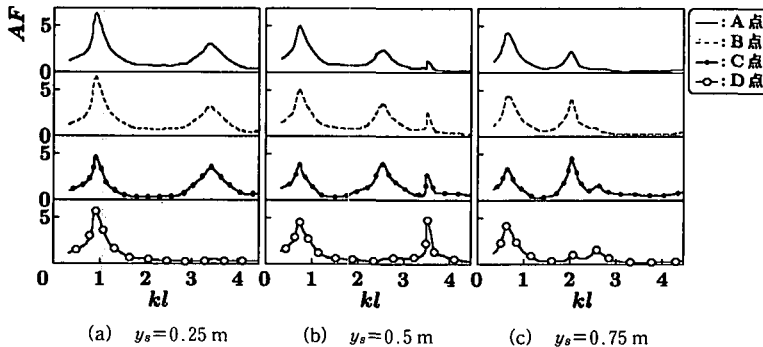


図-14 副港湾の y 軸方向の長さ y_s が異なる3種類の Y 型港湾における増幅率

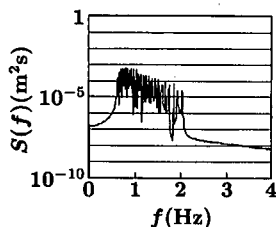


図-15 不規則波の入射波のスペクトル

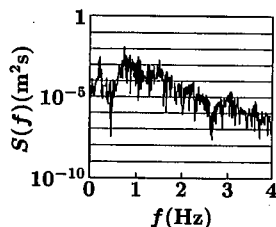


図-16 I型港湾内のA点におけるスペクトル

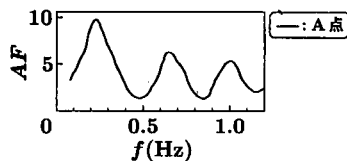


図-17 不規則波を入射したときのI型港湾における増幅率

る、4) 港湾内で最大の振動が現れる位置は、基本モードと第2モードで異なる、5) 不規則短周期波の非線形干渉によって、港湾内に長周期波が生成される、等の現象が再現された。

今後は、水理実験を行なうとともに、本モデルを用いて湾水振動に対する波の非線形性の影響についての考察を深め、長周期波の発生を抑える港湾形状を系統的に見出す手法を開発したい。

参考文献

- 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 31-35.
- 磯部雅彦 (1994): 波浪変形解析のための波動方程式の比較研究, 土木学会論文集, No. 491/II-27, pp. 1-14.
- 金山 進・田口 智・清水琢三・長松 徹・植木一浩・中原和彦 (1995): プシネスク方程式による港内長周期水位変動の数値計算, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 291-295.
- 喜岡 渉・飯田耕三・石田 昭 (1988): 非線形長周期波の湾水振動, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 242-246.
- 喜岡 渉・柏原謙爾・相川久紀・田中正博 (1996): 多方向不規則波による港内副振動の予測モデルとその適用性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 196-200.
- 木村 晃・喜田昌裕・山崎樹実也 (1997): 不規則波による湾水の長周期振動について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 251-255.
- 佐藤典之・磯部雅彦・泉宮尊司 (1988): 任意形状港湾に対する不規則波の港内波高分布計算法の改良, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
- Bowers, E. C. (1977): Harbour resonance due to set-down beneath wave groups, J. Fluid Mech., Vol. 79, pp. 71-92.
- Hwang, L-S. and E. O. Tuck (1970): On the oscillations of harbours of arbitrary shape, J. Fluid Mech., Vol. 42, pp. 447-464.
- Larsen, J. and H. Dancy (1983): Open boundaries in short wave simulations—A new approach, Coastal Eng., Vol. 7, pp. 285-297.
- Lee, J-J. (1971): Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, J. Fluid Mech. Vol. 45, pp. 375-394.
- Lee, J-J. and F. Raichlen (1972): Oscillations in harbors with connected basins, J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Division, ASCE, Vol. 98, No. WW3, pp. 311-332.
- Mei, C. C. and Y. Agnon (1989): Long-period oscillations in a harbour induced by incident short waves, J. Fluid Mech. Vol. 208, pp. 595-608.
- Miles, J. and W. Munk (1961): Harbor paradox, J. Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 87, No. WW3, pp. 111-130.
- Raichlen, F. and A. T. Ippen (1965): Wave induced oscillations in harbors, J. Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91, No. HY2, pp. 1-26.

6. 結 論

種々の形状を有する港湾の港内・外における波の場を対象とする非線形数値解析モデルを開発した。入射境界で反射波が発生しないよう、線境界入射法、スポンジ・レイヤ及び Sommerfeld の放射条件を組み合わせ、無反射入射波境界を作成した。本モデルを用いて、規則波、または、不規則波を造波し、非線形干渉によって生じた長周期波が港湾内で選択的に増幅され、更に、港外に出て造波境界で吸収される現象をシミュレートし、本モデルの湾水振動予測に対する有効性を確認した。そして、水面変動の周波数スペクトルの比の平方根によって定義した港内の増幅率を算出し、増幅率曲線を比較することによって、港湾形状が湾水振動に与える影響について検討した。

その結果、1) Y型港湾やF型港湾では、主港湾内の主振動軸と直行する振動が副港湾内に発生するため、増幅率が減少し、湾水振動が抑制される、2) Y型港湾では、副港湾が沿岸方向に長いほど増幅率が減少する、3) L型港湾及びT型港湾では、副港湾が主港湾の港奥近くにあるとき、基本モードの振動が増大し、逆に、副港湾が主港湾の港口近くにあるとき、第2モードの振動が増大す