

気圧変動により生成される長周期波の推定式

鹿児島大学工学部 学生会員 松川弘幸
 鹿児島大学大学院理工学研究科 正会員 柿沼太郎
 鹿児島大学大学院理工学研究科 学生会員 吉川 諒

1. 研究の背景及び目的

湾水振動は、外洋より伝播した波列が湾内に入射し、長周期波成分が湾内で選択的に増幅されることによって発生する。こうした長周期波の一部は、外洋における海上の微気圧変動によって発生すると考えられている (e.g. Hibiya・Kajiura, 1982; 柿沼・柊田, 2011; Asano ら, 2012)。従って、こうした微気圧変動によって生成される長周期波の波高や波長等を外洋における気圧変動の情報に基づき予測することができれば、湾水振動による被害を回避する一助となるであろう。そこで、本研究では、様々な形態の気圧変動に起因する長周期波の波高及び波長が推定可能な推定式に関して考察する。

2. 気圧変動に伴い生成する長周期波の波高及び波長の推定式

2.1 気圧分布が一様な気圧変動に起因する長周期波

一様静水深が h である水域を対象とする。そして、この水域における長周期波の波速が $\sqrt{gh} = C$ であると仮定する。ここで、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ は、重力加速度である。また、気圧が周囲より 1 hPa 低い水域では、水位が周囲より 1 cm 高くなり、気圧が周囲より 1 hPa 高い水域では、水位が周囲より 1 cm 低くなると仮定する。

まず、水平距離が $x_0 \leq x < x_0 + L_p$ の水域上で、気圧分布 p が一様である気圧変動が生じる場合を考える。この領域内の気圧 p が、0 から P まで、一定の変化速度 r_p で変化すると仮定する。図-1 に、時刻 $t = \Delta t$ における気圧 p 及び水面変動 η を示す。ここで、赤色の破線は、位置エネルギーが 0 である面を表わし、これを零位置エネルギー面と呼ぶことにする。気圧の作用下において、水面が、零位置エネルギー面の位置に来るように、水の運動が生じる。そして、赤色の破線が水面位置 $z = \eta$ となる。従って、この場合、本領域外に伝播する長周期波の波高 H 及び波長 λ は、次式で表わされる。

$$H = \int_0^{P/r_p} k r_p dt = k P \quad (P/r_p \leq L_p/C), \quad H = \int_0^{L_p/C} k r_p dt = k r_p L_p / C \quad (P/r_p > L_p/C), \quad k = 1/20,000 \text{ m/Pa} \quad (1)$$

$$\lambda = L_p + \int_0^{P/r_p} C dt = L_p + (P/r_p) C \quad (2)$$

ここで、長さ及び気圧の単位をそれぞれ m 及び Pa とする。また、谷からなる波の波高は、負の値で定義する。

2.2 気圧の回復地点が接近する気圧変動に起因する長周期波

図-2 に示すような台形状の気圧分布が、初期時刻 $t = 0 \text{ s}$ において作用しており、定常状態であるとする。このとき、 $x_0 + D_p \leq x < x_0 + D_p + L_p$ における水面形は、 $\eta = -P/10,000 \text{ (m)}$ である。図-2 に示す線分 AB が、 x 軸の正の方向に移動速度 C_p で移動すると仮定する。これにより、線分 AB が存在する領域の気圧が回復していく。ここでは、生成される長周期波の波高が最大となる $C_p = C$ の場合を考える。時刻 $t = \Delta t$ において、点 A 及び点 B の水平位置 x は、 $C \Delta t = \Delta L$ として、それぞれ、 $x_0 + \Delta L$ 及び $x_0 + D_p + \Delta L$ である。

図-3 に、時刻 $t = 0$ 及び $t = \Delta t$ における水面形の一部を示す。ここで、点 E 及び点 F は、それぞれ、 $t = 0 \text{ s}$ における点 A 及び点 B の位置にあり、点 G 及び点 H は、それぞれ、 $t = \Delta t$ における点 A 及び点 B の位置にある。すなわち、零位置エネルギー面が、時刻 $t = 0 \text{ s}$ に EF の位置にあり、 $t = \Delta t$ に GH の位置に至る。そして、

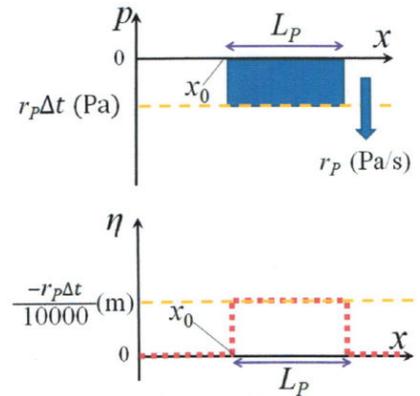


図-1 気圧 p 及び水面変動 η ($t = \Delta t$)

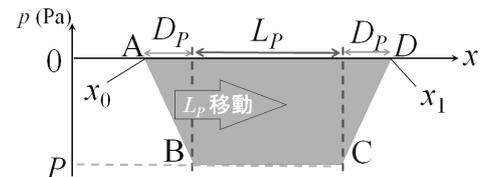


図-2 気圧 p の分布 ($t = 0$)

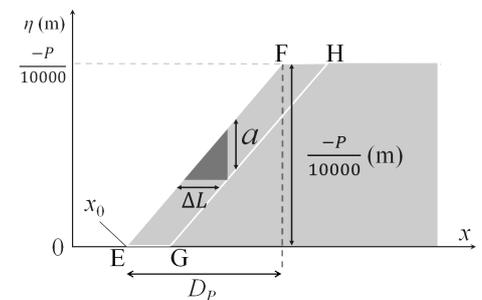


図-3 水面形 $z = \eta$ の一部 (EF 及び GH は、それぞれ、 $t = 0$ 及び $t = \Delta t$ における水面形の一部である。)

気圧により維持されていた EFHG は、時刻 $t = \Delta t$ に、気圧の拘束から解放され、その結果、長周期波が生成され伝播する。

従って、線分 AB の総移動距離が L_p である場合、気圧回復地点が接近する気圧変動によって生成される長周期波の波高 H 及び波長 λ の推定式は、各地点における気圧回復速度を r_p として、次式となる。

$$H = -kPL_p / D_p = k r_p L_p / C, \quad k = 1/20,000 \text{ m/Pa}; \quad \lambda = D_p = |P / r_p| C \quad (3)$$

2.3 気圧が周囲と異なる領域が接近する気圧変動に起因する長周期波

図-2 に示すような台形状の気圧分布が、初期時刻 $t = 0 \text{ s}$ において作用しており、定常状態であるとする。図-2 に示す線分 CD が、 x 軸の正の方向に移動速度 C で移動すると仮定する。これにより、線分 CD が存在する領域の気圧が変動する。線分 CD の移動距離が L_p であるとき、この場合の気圧変動によって生成される長周期波の波高 H 及び波長 λ の推定式は、各地点における気圧回復速度を r_p として、次式となる。

$$H = kPL_p / D_p = k r_p L_p / C, \quad k = 1/20,000 \text{ m/Pa}; \quad \lambda = D_p = |P / r_p| C \quad (4)$$

3. 長周期波の生成に対する気圧回復地点接近速度の影響

推定式(3) は、非線形浅水方程式に基づく数値解析結果との比較により検証され、気圧の回復地点が速度 C で接近する場合に、式(3) による波高及び波長の推定値は、高精度であることが確認されている(末次ら, 2014)。しかしながら、実現象では、気圧の回復地点の移動速度は、様々である。そこで、末次ら(2014)と同様に非線形浅水方程式に基づく数値解析を行ない、長周期波の生成に対する気圧の回復地点の移動速度 C_p の影響を調べる。図-2 において、 $h = 100 \text{ m}$, $D_p = 12.5 \text{ km}$, $L_p = 100 \text{ km}$ 及び $P = -400 \text{ Pa}$ の場合に生成される長周期波の波高 H 及び波長 λ と気圧回復地点の接近速度 C_p の関係を図-4 に示す。こうしたデータを蓄積しておけば、推定値を補正することが可能となる。

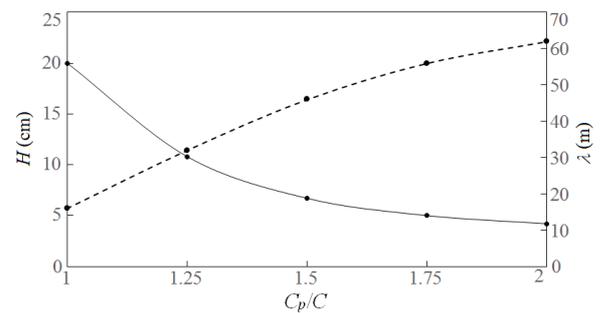


図-4 生成される長周期波の波高 H 及び波長 λ と気圧回復地点の接近速度 C_p の関係

4. 長周期波の伝播に対する海底地形の影響

気圧変動により生成された長周期波は、一般に、一様でない海底地形上を伝播する。そこで、東シナ海を対象とし、図-5 に示す北緯 $31^\circ 50'$ の海底地形上を長周期波が伝播する場合の、非線形浅水方程式に基づく数値解析を行なう。ここで、実地形は、 $x \geq 910 \text{ km}$ の領域であり、 $0 \leq x < 910 \text{ km}$ に、静水深 34 m の領域を付加している。後者の領域で、図-2 の諸量を $D_p = 12.5 \text{ km}$, $L_p = 100 \text{ km}$ 及び $P = 400 \text{ Pa}$ として長周期波を生成させる。側方境界は、透過境界とする。

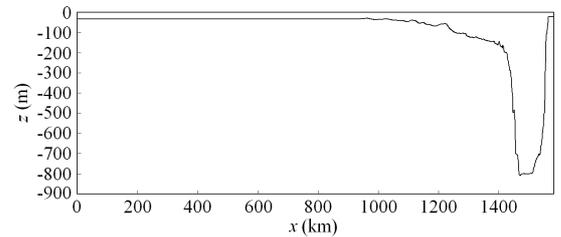


図-5 北緯 $31^\circ 50'$ における沖縄トラフを含む東シナ海の水深分布 ($x \geq 910 \text{ km}$)

図-6 に、 $x = 1572.1 \text{ km}$ の地点における水面変動を示す。破線が示す、静水深が 34 m で一様である場合の結果と比較して、九州西岸に伝播する長周期波の主波の谷のピークの絶対値は、波長と同様、ほぼ等しい。

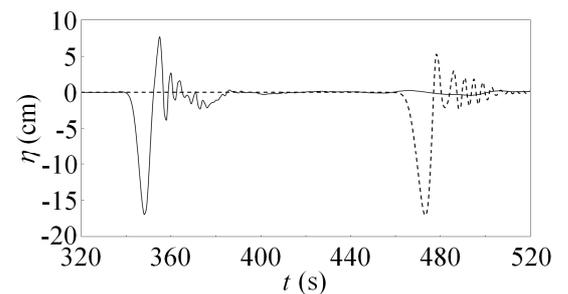


図-6 $x = 1572.1 \text{ km}$ の地点における水面変動 η (破線は、静水深が 34 m で一様な水域に対する結果であり、実線は、図-5 に示す水域に対する結果である。)

参考文献

- 柿沼太郎・終田幸助: 気圧変動に伴う長周期波の発生・伝播過程の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. 156-160, 2011.
- 末次佑気・山下 啓・柿沼太郎: 気圧変動に伴う長周期波の推定式の提案, 平成 25 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 263-264, 2014.
- Asano, T., T. Yamashiro, and N. Nishimura: Field observations of meteotsunami locally called “abiki” in Urauchi Bay, Kami-Koshiki Island, Japan, Natural Hazards, Vol. 64, pp. 1685-1706, 2012.
- Hibiya, T. and K. Kajiura: Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 38, pp. 172-182, 1982.