

II - 387

密度分布が波動内部流速場に与える影響

新潟大学 正員 泉宮尊司
新潟県 中川考平

1. はじめに

最近になって、海浜保全や設計波浪観測の目的で、数多くの波浪観測が行われるようになってきている。波浪観測装置も、従来の電磁流速計や圧力式波高計だけでなく、超音波ドップラー流速計やプロファイラー(ADCP)が開発され、多地点の流速が同時に計測可能となっている。これらの観測装置のデータを用いて方向スペクトルを計算する際には、微小振幅波理論が一般的に用いられるが、河口付近や水深がある程度大きな海域では海水の密度分布が存在するため、一様密度場と仮定した微小振幅波理論が適用できるかどうか、確かめる必要がある。そこで本研究では、密度成層中を進行する表面波による内部流速場の変化や密度躍層が存在する時の内部波のモード波形について調べることにした。

2. 密度成層中の波動方程式

内部波の運動が非圧縮性であると仮定すると、線形化された波動方程式は次式となる(例えば、富永, 1976)。

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\nabla^2 \psi - \frac{N^2}{g} \psi_z \right) + N^2 \psi_{xx} = 0, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ψ は流れ関数、 N はバイサラ振動数、 ρ_0 は平均密度分布、 g は重力加速度である。ここで、進行性の波動 $\psi = 1/\sqrt{\rho_0} Z(z) \exp[i(kx - \sigma t)]$ を仮定すると、鉛直固有関数 $Z(z)$ に関して次式が得られる。

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} - k^2 \left(1 - \frac{N^2}{\sigma^2} \right) Z = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k は波数、 σ は角周波数である。上式において、密度分布を考慮しない場合と比べて、鉛直分布に関する波数が N^2/σ^2 分だけ変化することになる。通常の中海では、 $N = 4 \times 10^{-2} s^{-1}$ のオーダーでかなり小さいが、波の周期によって影響度が変化することを意味している。

(1) 表面波の内部流速場の変化

表面波の内部流速場の変化を求めるために、水表面で水粒子が飛び出さない条件、圧力が0の条件、および水底で鉛直流速が0の条件を用いて、式(1)を解くと、水平流速 u 、鉛直流速 w および分散関係式は、次式となる。

$$u = \frac{\lambda H}{2} C [\sinh \lambda z + \coth \lambda h \cosh \lambda z] \cos(kx - \sigma t), \quad w = \frac{k H}{2} C [\cosh \lambda z + \coth \lambda h \sinh \lambda z] \sin(kx - \sigma t) \quad (3)$$

$$\sigma^2 = gk(1 - N^2/\sigma^2)^{1/2} \tanh[kh(1 - N^2/\sigma^2)^{1/2}], \quad \lambda = k(1 - N^2/\sigma^2)^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

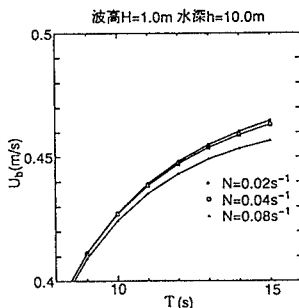


図1 バイサラ振動数による底面流速の変化

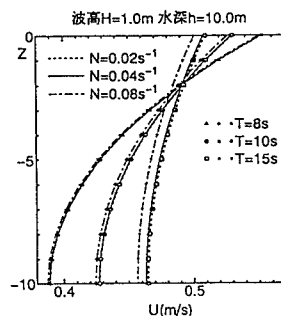


図2 水平流速の鉛直分布

図-1は、バイサラ振動数が鉛直方向に一定であるとした場合の底面流速の変化を示している。この計算は、波高が1m、水深が10mとして、バイサラ振動数を0.02から0.08 s^{-1} まで変化させて行っている。風波性の波(周期が8sから15s)では、高々1cm/s程度の変化(約2%)しかなく、密度変化の影響はかなり小さいと言える。図-2は、水平流速の鉛直分布の変化を調べたものであるが、同様にその変化の絶対値は小さい。

3. 密度分布による内部波のモード波形

次に密度成層中の内部波のモード波形について考察する。一般に海中の密度変化は、温度躍層などの存在によって複雑であり、ここでは指数分布および密度躍層がある場合について検討する。水底および水面で固定境界条件を用いると、式(2)を離散化した関係式は固有値問題となり、固有ベクトルを求めることによりモード波形が得られる。図-3は、密度分布が $\rho_o(z) = \Delta\rho_m(1 - \exp \alpha z) + \bar{\rho}$, $\bar{\rho} = 1.02478$, $\Delta\rho_m = 0.00175$, $\alpha = 0.01$

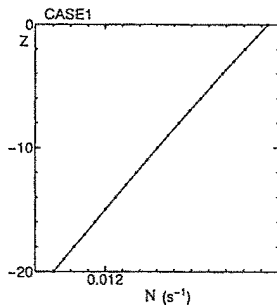


図3 バイサラ振動数の鉛直分布

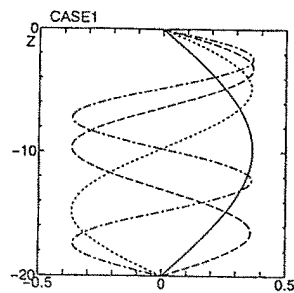


図4 指数密度分布の場合のモード波形

で与えられる場合のバイサラ振動数の鉛直分布を示したものである。このような密度分布の場合、水平波長70mの内部波のモード波形は、図-4に示すようにやや水面側に片寄っているが、ほぼ正弦波形に近い。しかしながら、密度躍層が存在する場合には(図-5)、密度躍層付近に腹や節が集中した分布となることが分かる。固有周期は、数分から数十分であり、波の周期と比べて比較的長い。平均流速(海浜流流速)を算定する場合には、数分程度で平均値をとることがあるので十分に注意を払わなければならない。

4. 結論

密度分布が表面波や内部波の流速に与える影響を調べた結果、以下の事柄が明かとなった。(1) 表面波の内部流速に与える密度分布の影響は、通常の波浪に対しては十分に小さく、高々数%である。(2) 密度躍層が存在する場合には、その領域に節、腹を持ったモードの内部波が発生する。(3) 内部波の周期は、数分から数十分であり、内部波が発生すれば平均流速に影響を与える可能性がある。

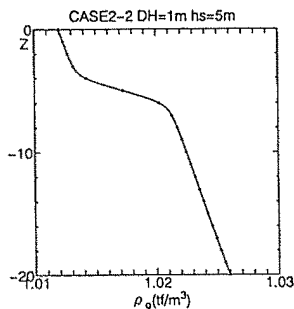


図5 密度躍層がある場合の密度分布

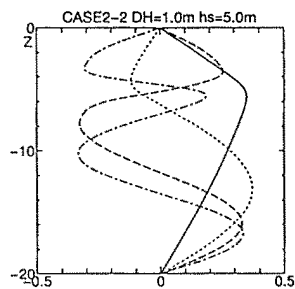


図6 密度躍層がある場合のモード波形

参考文献

- 1) 富永政英: 海洋波動, 共立出版, pp.528-569, 1976.