

琉球大学 理工学部 正員 刃野二夫
 沖縄県南部農林土木事務所 新里勝男
 沖縄県島尻郡仲里村役場 仲村昌清

1. まえがき.

久米島は沖縄本島から西側に約80km隔たった地奥にある。(図-1.1).

図-1.2に示す様に久米島と奥武島との間と海中道路で連結する計画がなされているため、着者は図-1.2の(A)(B)(C)地奥において、今年1月23日(予備調査)と、4月26日(満月)の2回にわたり潮流や水質の調査を実施した。本論文はその調査結果の一部(主に、海中道路と建設したことによる水路の潮流)について検討した結果が示してある。

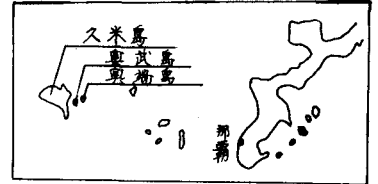


図1-1: 沖縄本島と久米島.

2. 潮位と流速の実測結果.

図-2で(A), (B), (C)の各断面は中が各々約360^m, 800^m, 570^m (養殖場の巾が約150^m)であり、海底は、(B), (C)断面がほとんどflat (平均潮位面下約1^m) である。また、(A)断面は中央部に最深箇所 (平均潮位面下約5^m, 巾90^m) があるが、他の箇所は (B), (C)断面と同様である。(A)断面と(C)断面上に潮位観測のための標尺を設置し潮位と測定した結果が図2-1に示してある。また、(A), (B), (C)の各断面での測流の結果を図2-2に示した。計測は備船と固定し、流速計として、CM. 2型 (東邦電機) 発電型等を使用した。

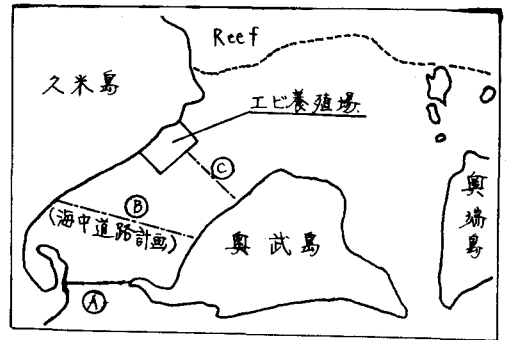


図1-2: 海中道路計画地奥

3. 理論的考察.

図3-1のように、海中道路(図-2の(B)断面)の巾員とし道路に直交した水路(流通断面積A, 水深R, 流速U, 平均水面(M, W, L))

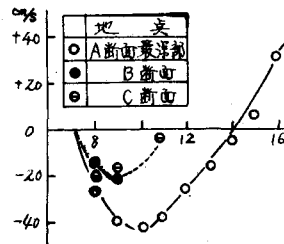


図2-2: 潮流 (4月26日)

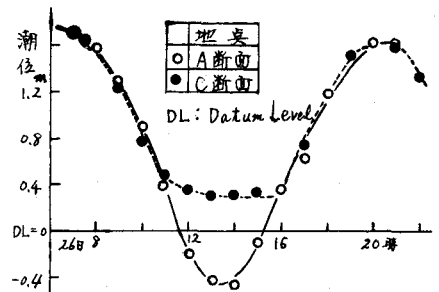


図2-1: 潮位 (4月26日)

上の水位変動を u と考えると、運動方程式と連続の方程式は次式になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + R \cdot u \cdot |u| &= 0 \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot A)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} (3.1)$$

この式で n : manning の粗度係数, g : 重力の加速度, f_e : 水路の流入損失係数である。潮汐の緩慢性から連続の方程式

$$\left. \begin{aligned} uA &= Q_A - F_A \cdot d\eta_A/dt \\ uA &= F_B d\eta_B/dt - Q_H \end{aligned} \right\} (3.2)$$

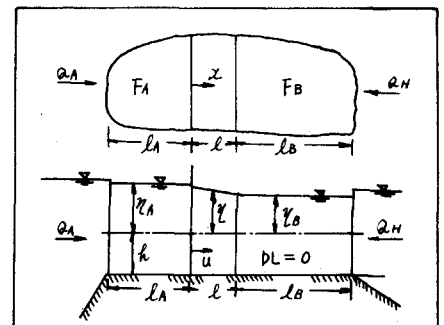


図3-1: 水路(B断面)の略図.

運動方程式では, $\frac{\partial \eta}{\partial x} \doteq (\eta_A - \eta_B) / l$, $u \frac{\partial u}{\partial x} \ll 1$ と見做すと, (3.1)式は次の様になる.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{g}{l}(\eta_B - \eta_A) + Ku|u| &= 0 \\ R &= \frac{1 + f_e}{2l} + \frac{\pi^2}{K^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

図3.2は, A断面とB断面の流量の連続式 $Q_B/Q_A = 1 - (F_A/Q_A) d\eta_A/dt$ について, 実測値 (Q_A, Q_B) と計算値 (右辺の値) と比較したものである。B断面付近の水面変動や流速変動は, 図2-1, 図2-2により概略図3-3, 図3-4に示す変動として置く。

次に海中道路の水路部分の流速 (U) やその西側の水面変動 η_A は フーリエ級数展開により, (3.4) 式になる。

$$\begin{aligned} \eta_A = h + \eta_A &= \frac{\eta_0}{\pi} + \frac{3h}{4} + \left(\frac{\eta_0}{2} + \frac{u}{\pi} \right) \sin \omega t - \frac{2\eta_0}{3\pi} \cos 2\omega t + \frac{h}{3\pi} \sin 3\omega t \cdots \\ |U| &= \frac{4U_0}{3\pi} \cdot u + \frac{2U_0^2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{7U_0^2}{24\pi} \cos 3\omega t + \cdots \end{aligned} \quad (3.4)$$

なお, (3.4)式の積分条件は

$$\left. \begin{aligned} +\eta_A \text{ for } 0 < \omega t < \pi, \quad -\eta_A \text{ for } \pi < \omega t < 2\pi, \quad \eta_A = \eta_0 \sin \omega t \\ +u^2 \text{ for } 0 < \omega t < \frac{\pi}{2}, \quad -u^2 \text{ for } \frac{\pi}{2} < \omega t < \pi, \quad u = 0 \text{ for } \pi < \omega t < 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

図2-2より u の近似値として, $u = U_0 \cos \omega t$ と仮定した。

定数 R は, $\bar{R} = (B\bar{\eta}_A) / (B + 2\bar{\eta}_A)$, $\bar{\eta}_A = (\eta_0/\pi) \int_0^{2\pi} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} \eta_0$, と仮定すると, u や η_0 に対する方程式が (3.6) の様に得られる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{u} + K_1 \dot{u} + \frac{2A^2}{lF_B} u - K_3 \cos \omega t - K_4 \sin 2\omega t &\doteq 0 \\ \ddot{\eta}_B + K_1 \dot{\eta}_B + \frac{2A^2}{lF_B} \eta_B - K_5 \cos \omega t + K_6 \sin \omega t \\ - K_7 \cos 2\omega t - K_8 \sin 2\omega t &\doteq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{4U_0}{3\pi} K, \quad K_2 = \frac{1}{2} K_1, \quad K_3 = \frac{g\omega}{l} \left\{ 1 - \frac{F_B}{F_A} \right\} \left\{ \frac{\eta_0}{2} + \frac{h}{\pi} \right\} - \frac{g}{lF_B} (Q_{A,H} - Q_{H,H}), \\ K_4 &= 2\omega K_2 + \frac{4g\eta_0\omega}{3\pi l} \left(1 - \frac{F_A}{F_B} \right), \\ K_5 &= \frac{FA}{F_B} K_1 \omega \left(\frac{\eta_0}{2} + \frac{h}{\pi} \right) + \frac{K_1}{F_B} (Q_{H,H} - Q_{A,H}), \\ K_6 &= \left\{ \frac{FA}{F_B} \omega^2 - \frac{2A^2}{F_B l} \right\} \left\{ \frac{\eta_0}{2} + \frac{h}{\pi} \right\} + \frac{\omega}{F_B} (Q_{H,H} - Q_{A,H}), \\ K_7 &= \frac{8\omega^2 \eta_0}{3\pi} \frac{FA}{F_B} - \frac{2A}{F_B} \left\{ K_2 + \frac{2\eta_0 g}{3\pi l} \right\}, \quad K_8 = \frac{4\eta_0 K_1}{3\pi} \frac{FA}{F_B} \omega. \end{aligned}$$

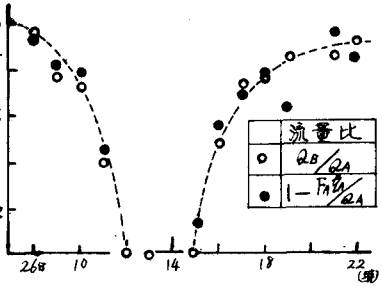


図3-2: 流量の連続性 (4月26日)

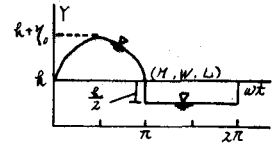


図3-3: 水面変動

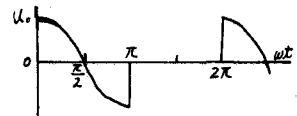


図3-4: 流速変動

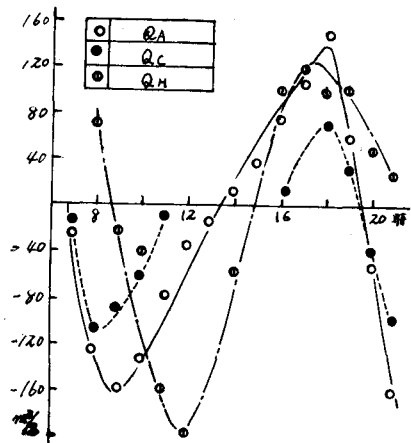


図3-5: 流入流出量の関係 (4月26日)

ただし, $Q_A = Q_{A,H} \cos \omega t$, $Q_H = Q_{H,H} \cos (\omega t + \delta) \neq 0$ とし, $Q_{H,H}$ は (3.2) の連続式により,

$Q_H \doteq (F_B + F_A) \dot{\eta}_A - Q_A$ とし, A断面の水理量から計算した, その結果が, 図3.5に示してある。

又, h や η_0 は A断面の潮汐の最高値と最低値を $\eta_{A,max}$, $\eta_{A,min}$ とすると, $h = (\eta_{A,max} + \eta_{A,min}) / 2$.

$\eta_0 = (\eta_{A,max} - \eta_{A,min}) / 2$ となる。

(3.6) 式の解は次のようになる。

$$u = \frac{K_3/\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{K_1}{\omega} \right)^2 + \left(\frac{2A^2}{lF_B \omega^2} - 1 \right)^2}} \sin (\omega t + \alpha_1) + \frac{K_4/4\omega^2}{\sqrt{\left\{ \frac{A^2}{2lF_B \omega^2} - 1 \right\}^2 + \left\{ \frac{K_1}{2\omega} \right\}^2}} \sin (2\omega t + \alpha_2) \quad (3.7)$$

$$(3.7) \text{ 式の各項の比較より1次近似とし, } (U)^2 = (U_0)^2 = \left[\sqrt{1 + \left(\frac{8kK_3}{3\pi w^2} \right)^2} - 1 \right] / 2 \left(\frac{4k}{3\pi w} \right)^2 \quad (3.8)$$

$$\eta_B = \left(\frac{\eta_0}{\pi} - \frac{k}{4} \right) + \frac{\sqrt{\left(\frac{K_4}{w^2} \right)^2 + \left(\frac{K_5}{w^2} \right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{2A_2}{F_B l w^2} - 1 \right)^2 + \left(\frac{K_1}{w} \right)^2}} \sin(\omega t + \beta_1) + \frac{\sqrt{\left(\frac{K_7}{4w^2} \right)^2 + \left(\frac{K_8}{4w^2} \right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{A_2}{2w^2 l F_0} - 1 \right)^2 + \left(\frac{K_1}{2w} \right)^2}} \sin(2\omega t + \beta_2) \quad (3.9)$$

1次近似値はUと同様にし.

$$\eta_B = \left(\frac{\eta_0}{\pi} - \frac{k}{4} \right) + \frac{FA}{F_B} \left(\frac{\eta_0}{2} + \frac{k}{\pi} \right) \sin(\omega + \beta'_1) + \frac{2\eta_0}{3\pi} \frac{FA}{F_B} \sin(2\omega t + \beta'_2) \quad (3.10)$$

$$\left. \begin{aligned} \tan \alpha_1 &= \frac{1 - \frac{2A_2}{F_B l w^2}}{K_1/w}, & \tan \alpha_2 &= \frac{K_1/2w}{1 - \frac{A_2}{2w^2 l F_0}} \\ \tan \beta'_1 &= \left\{ \left(\frac{K_1}{w} \right)^2 - 1 \right\} / 2 \left(\frac{K_1}{w} \right), & \tan \beta'_2 &= K_1/(2w) \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

4. 計算手順

- ①, $w = \frac{\pi}{6}$, $n \div 0.03$, $F_A = 2.8 \times 10^5 \text{ m}^2$, $F_B = 1.3 \times 10^5 \text{ m}^2$, $f_e = 0.5$ Q_{HH} , Q_{HA} と調べる.
- ②, $\bar{R}$, η_0 , k , K_1 , K_3 と計算する. ③, (3.8)より U_0 を求める. ④, K_2 , K_4 , K_1 (③の U_0 と用いる) の計算. ⑤, $\tan \alpha_1$, $\tan \alpha_2$, $\tan \beta'_1$, $\tan \beta'_2$ と (3.11) 式で計算する. ⑥ 以上の値と, (3.7) 式 或は (3.10) 式に代入し, U や η_B と計算する.

5. 応用例

昭和50年1月23日の資料

B (水路中) = 10m, $l = 5\text{m}$ $n = 0.03$ と仮定する. $\bar{Y}_A = 0.48\text{m}$, $\eta_0 = 0.75\text{m}$, $k = 0.35\text{m}$
 $\bar{R} = 0.44$, $k = 0.176$, $F_A/F_0 = 0.215$, $K_3 = 0.3707$, $Q_{AH} \div Q_{HH}$, $\frac{2A_2}{F_B l w^2} \ll 1$ とすると,
 $U_0^2 = 1.94$ $U_0 = 1.39\text{ m/s}$ (1次近似)

$K_1 = 0.104$, $K_2 = 0.052$, $K_3 = 0.4$, $K_4 = 0.33$, $K_1 = 1.37$, $\alpha_2 = 0.05$, $\beta'_1 = 1.96$, $\beta'_2 = 0.1$

$U_0 = U_{\max} \omega t = 0.2 = 1.57 \text{ m/sec}$ (2次近似)

$\eta_A - \eta_B \omega t = 0.2 = 0.84 - 0.604 \div 0.24\text{m}$ (1次近似)

昭和50年4月26日の資料

$B = 10\text{m}$, $l = 5\text{m}$, $n = 0.03$ と仮定する. $\bar{Y}_A = 0.67\text{m}$, $\bar{R} = 0.59$, $\eta_0 = 1.05\text{m}$, $k = 0.168$,
 $k = 0.65$, $K_3 = 0.59$, $U_0 = 2.03 \text{ m/s}$ (1次近似)

$K_1 = 0.144$, $K_2 = 0.072$, $K_3 = 0.59$, $K_4 = 0.435$, $\alpha_1 = 1.3$, $\alpha_2 = 0.14$, $\beta'_1 = 2.1$, $\beta'_2 = 0.14$

$U_0 = U_{\max} \omega t \div \pi/2 = 2.23 \text{ m/s}$ (2次近似)

$\eta_A - \eta_B \omega t = \pi/2 = 0.84 - 0.79 = 0.05\text{m}$ (1次近似)

6. 結び

以上の如く, 海中道路と設置することによる水路の流速に関する問題と検討した. その他の問題と例えば, 海水交換, 水質などもあるが, ページ数の制限のため本論文では省略した. たい, 水温は4月26日の実測では最底 25°C から最高 29°C (8時~20時) に変化し, 比重は水深方向にも, 時間的にも, 場所的にもほとんど一様で 1.04 となる.