

Ⅱ - 2

北日本太平洋沿岸の潮汐流の数値解析について

パシフィックコンサルタンツ(株) 正員 古屋 温 美
 北海道大学工学部 正員 浜中 建一郎
 北海道大学工学部 正員 佐伯 浩

1. まえがき

沿岸域での潮汐流の研究においては、差分による数値解析は有効な手段となる。その際問題となるのは、第1に外洋に設けられた仮想境界から計算領域に入射する潮汐波の実測データは皆無に等しいため、入射波を与えるに際しては種々の工夫がなされなければならないことである。本研究では試行錯誤により入射波を与え、各検潮所における調和定数と、計算結果の潮位ができるだけ一致するようにした。また第2の問題としては、外洋で設けた仮想境界で波を自由に通過させる開放境界の問題である。この開放境界に対しては種々のスキームが提案されているが、本研究においては日野(1987)、日野・仲座(1987, 1988)のスキームを用いた。

本研究では、図-1に示すように、その計算領域を、南北には房総半島先端の北緯35°付近から、知床半島つけ根の北緯44°付近まで、東西には北日本太平洋岸から東経150°付近までとし、東経150°線を入射境界としてM₂分潮波による潮汐流解析を行った。用いた差分スキームはLeap-Frog法の一つである荒川のスキームである。各々の開放境界では、その海域特性に応じたスキームを与えた。潮汐流に関する計算結果については、比較すべき実測データが少ないのだが、その中で、小田巻等(1984)による津軽海峡の実測データと比較した。

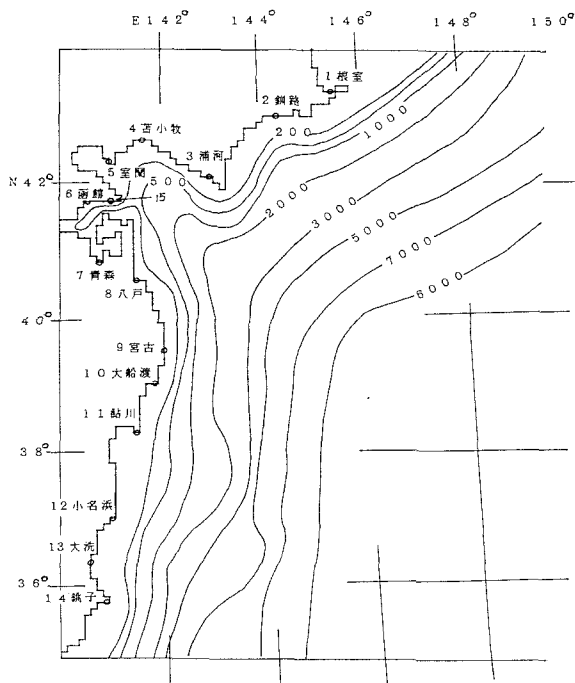


図-1 計算領域および検潮所位置(1~14)と流速観測地点(15)

2. 基本方程式

本研究の計算領域では、海水の密度は一樣であり、海水は非圧縮性であるとする。また鉛直方向の運動に伴う加速度は省略する。単位質量の海水に対する海流の運動方程式および連続の式は、 x, y, z 軸をそれぞれ東向き、南向き、鉛直下向きを正にとり、 x, y, z 方向の流速成分を u, v, w とおくと、次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = f \cdot v - g \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + Ae \cdot \nabla^2 \cdot u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = -f \cdot u - g \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + Ae \cdot \nabla^2 \cdot v \quad (2)$$

Numerical simulation of tidal flow of the north Japanese coast in Pacific Ocean by
 Atsumi FURUYA, Ken-ichiro HAMANAKA and Hiroshi SAEKI.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{---(3)}$$

ただし、 ξ : 水位、 f : コリオリパラメータ、 g : 重力加速度、
 ν : 鉛直渦粘性係数、 Ae : 水平渦粘性係数

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

(1) ~ (3) 式を海面から海底まで鉛直方向に積分すると以下ようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h+\xi) \cdot U^2 \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (h+\xi) \cdot U \cdot V \right\} &= f \cdot N - g \cdot (h+\xi) \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{\gamma^2 \sqrt{U^2 + V^2}}{h+\xi} \cdot M \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h+\xi) \cdot U \cdot V \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (h+\xi) \cdot V^2 \right\} &= -f \cdot M - g \cdot (h+\xi) \cdot \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\gamma^2 \sqrt{U^2 + V^2}}{h+\xi} \cdot N \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{---(4)}$$

ただし、 U, V : 鉛直方向の平均流速、 M, N : 流量、
 h : 運動がないときの水深、 γ^2 : 海底摩擦係数

以上、基礎方程式を積分する方法は上野 (1965) を参考にした。

次に、(4) の基礎方程式を数値的に解くために荒川のスキームを用いて差分形にする。計算のタイムステップ Δt 、格子間隔は x, y 方向とも Δs 、添字 (i, j) は x 方向の i 番目、 y 方向の j 番目の格子を表し、 t は時間を表すものとする、(4) 式の差分形は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{M_{i,j}^{t+\Delta t} - M_{i,j}^t}{\Delta t} &= \frac{1}{4 \cdot \Delta S} \left\{ (U_{i,j}^t + U_{i-1,j}^t) (M_{i,j}^t + M_{i-1,j}^t) - (U_{i+1,j}^t + U_{i,j}^t) (M_{i+1,j}^t + M_{i,j}^t) \right. \\ &\quad \left. + (V_{i,j}^t + V_{i,j+1}^t) (M_{i,j}^t + M_{i,j+1}^t) - (V_{i-1,j+1}^t + V_{i,j+1}^t) (M_{i-1,j+1}^t + M_{i,j+1}^t) \right\} \\ &\quad + \frac{1}{4} \cdot U \cdot Fj (N_{i-1,j+1}^t + N_{i-1,j}^t + N_{i,j}^t + N_{i,j+1}^t) \\ &\quad - \frac{1}{2} \cdot g (H_{i-1,j}^t + H_{i,j}^t) \cdot \frac{(\xi_{i,j}^t - \xi_{i-1,j}^t)}{\Delta S} \\ &\quad - \gamma_{i,j}^2 \cdot \frac{\left[\left\{ \frac{1}{4} (V_{i,j}^t + V_{i,j+1}^t + V_{i-1,j+1}^t + V_{i-1,j}^t) \right\}^2 + (U_{i,j}^t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot M_{i,j}^t}{\frac{1}{2} (H_{i,j}^t + H_{i-1,j}^t)} \end{aligned} \quad \text{---(5)}$$

$$\begin{aligned}
\frac{N_{i,j}^{t+1} - N_{i,j}^t}{\Delta t} = & \frac{1}{4 \cdot \Delta S} \left\{ (U_{i,j}^t + U_{i,j-1}^t) (N_{i,j}^t + N_{i,j-1}^t) - (U_{i+1,j}^t + U_{i,j}^t) (N_{i+1,j}^t + N_{i,j}^t) \right. \\
& + (V_{i,j}^t + V_{i,j-1}^t) (N_{i,j}^t + N_{i,j-1}^t) - (V_{i,j}^t + V_{i,j+1}^t) (N_{i,j}^t + N_{i,j+1}^t) \left. \right\} \\
& - \frac{1}{4} \cdot V \cdot Fj (M_{i,j}^t + M_{i,j-1}^t + M_{i+1,j-1}^t + M_{i+1,j}^t) \\
& - \frac{1}{2} \cdot g (H_{i,j-1}^t + H_{i,j}^t) \cdot \frac{(\xi_{i,j}^t - \xi_{i,j-1}^t)}{\Delta S} \\
& - \gamma_{i,j}^2 \cdot \frac{\left[\left\{ \frac{1}{4} (U_{i,j}^t + U_{i+1,j}^t + U_{i,j-1}^t + U_{i+1,j-1}^t) \right\}^2 + (V_{i,j}^t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot N_{i,j}^t}{\frac{1}{2} (H_{i,j}^t + H_{i,j-1}^t)} \quad \text{---(6)}
\end{aligned}$$

$$\frac{\xi_{i,j}^{t+1} - \xi_{i,j}^t}{\Delta t} + \frac{M_{i+1,j}^t - M_{i,j}^t + N_{i,j+1}^t - N_{i,j}^t}{\Delta S} = 0 \quad \text{---(7)}$$

3. 開放境界のスキーム

本研究で設定した開放境界は、南端辺、北端辺、津軽海峡西口および東端辺の入射境界である。各々に用いた計算スキームは、浜中、古屋 (1990a, b) による

$$\text{スキーム2-1 : } \xi_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot (M_{i-1,j}^n + N_{i,j-1}^n) + \xi_{i,j}^{n-1} \right\}$$

$$\text{スキーム2-2 : } \xi_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot \left\{ M_{i,j}^n + \frac{1}{2} (N_{i,j}^n - N_{i,j+1}^n) \right\} + \xi_{i,j}^{n-1} \right\}$$

より、南端辺および北端辺については、境界への入射角 $0 \sim \pi/2$ の通過波に対して有利なスキーム2-1を、また、津軽海峡西口および東端辺については境界への入射角 $-\pi/2 \sim \pi/2$ の通過波に対して有利なスキーム2-2を用いた。

4. 計算結果と考察

本研究において、その計算条件は、 $\Delta s = 5\text{km}$ 、 $\Delta t = 13\text{s}$ 、海底摩擦係数 $\gamma^2 = 2.6 \times 10^{-6}$ とし、コリオリパラメータ $f = 2 \cdot \omega \cdot \sin \psi$ (ω : 回転角速度、 ψ : 緯度) とした。

図-2の1~14は、図-1中の14の検潮点の水位であり、図-2の15は津軽海峡の小田巻による流速観測地点における流速変動の図である。図中縦の目盛は1~14では $\pm 50\text{cm}$ 、15では $\pm 5\text{cm/sec}$ である。14までの○印は気象庁の潮位表にある調和定数によるものである。15の○印は小田巻等 (1984) による流速観測値である。図-2から振幅は3周期目以降定常となり、点15を除く14ヵ所の検潮点において、計算結果と調和定数は良好な一致を示している。位相については宮古以南の地点で差異が見られ、これより入射波のパラメータ設定に関し、さらに試行を行う必要があると思われる。また潮汐流に関しては、津軽海峡の実測データと比較したのだが、流速の振幅、位相共にいまだ良好な一致は見られず、振幅については約 $1/4$ 、位相については $1/4$ 周期ずれている。この原因としてはいくつか考えられるが、計算では水深方向に平均した流速を用いているのに対し、観測ではごく表層の流速を測定していると思われること、又、津軽海峡の水路幅方向の流速分布の影響をうけているように思われるが、この点については計算メッシュを細かくすることによって

改善される可能性がある。さらに津軽海峡西口に開放境界を設けたが、これは日本海側に無限に広い静水域を設定したことを意味し、実際には日本海側にも太平洋側と位相の異なった潮汐が起こっており、その影響が無視しえないかもしれないこと、あるいは海底摩擦係数が不適当であった等があげられるが、今後さらに検討する必要があると思われる。

次に、図-3に計算を開始して10周期目の $T = 3/8\pi$, $7/8\pi$ 周期における流速ベクトル図を示した。これらの図より、開放境界近傍で特に変わった様子はなく、開放境界スキームによっていずれも波が良く通過しているのがわかる。

図-4のa)~h)は、津軽海峡付近の流速ベクトル図を示している。噴火湾の入口付近の流れは、津軽海峡の流れの影響を強くうけているようである。また、津軽海峡と噴火湾の潮汐流の位相が $\pi/4$ 周期ずれているのが分かる。従って、噴火湾の流れを調べるには、津軽海峡の流れもより正確に計算する必要がある。

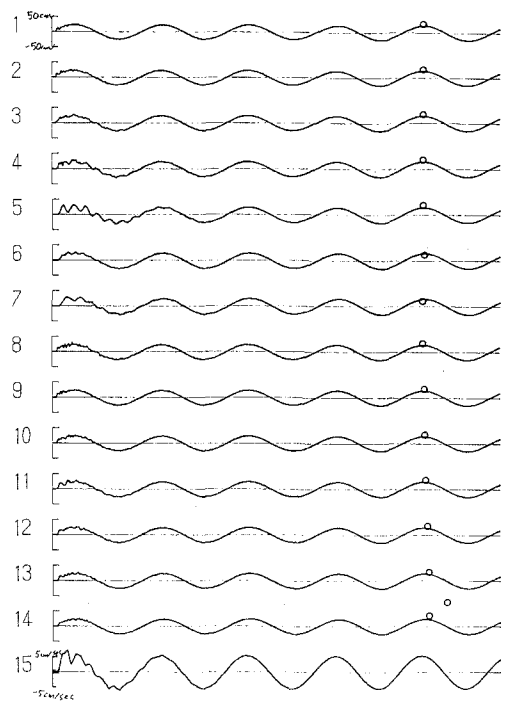


図-2 14 検潮点および流速観測地点における水位変動

参考文献

- 日野幹雄 (1987) : 開放境界における波の無反射透過条件の極めて簡単な計算スキームの提案
東工大土木工学科研究報告No.38。
- 日野幹雄、仲座栄三 (1987) : 水理計算における新しい“無反射境界”の数値的検討
東工大土木工学科研究報告No.38。
- 日野幹雄、仲座栄三 (1988) : 数値波動解析における新しい無反射境界スキームの平面二次元問題への適用
第35回海岸工学講演会論文集。
- 小田巻実 (1984) : 津軽海峡の潮汐・潮流について
沿岸海洋研究ノート第22巻第1号。
- 上野武夫 (1965) : 数値実験による来島海峡の潮流の研究
神戸海洋気象台彙報第40号。
- 浜中建一郎、古屋温美 (1990a) : 数値解析における開放境界での無反射スキームについて
土木学会北海道支部論文報告集46号。
- 浜中建一郎、古屋温美 (1990b) : 長波の数値解析における開放境界スキームの誤差について
土木学会第45回年次学術講演会講演概要集。

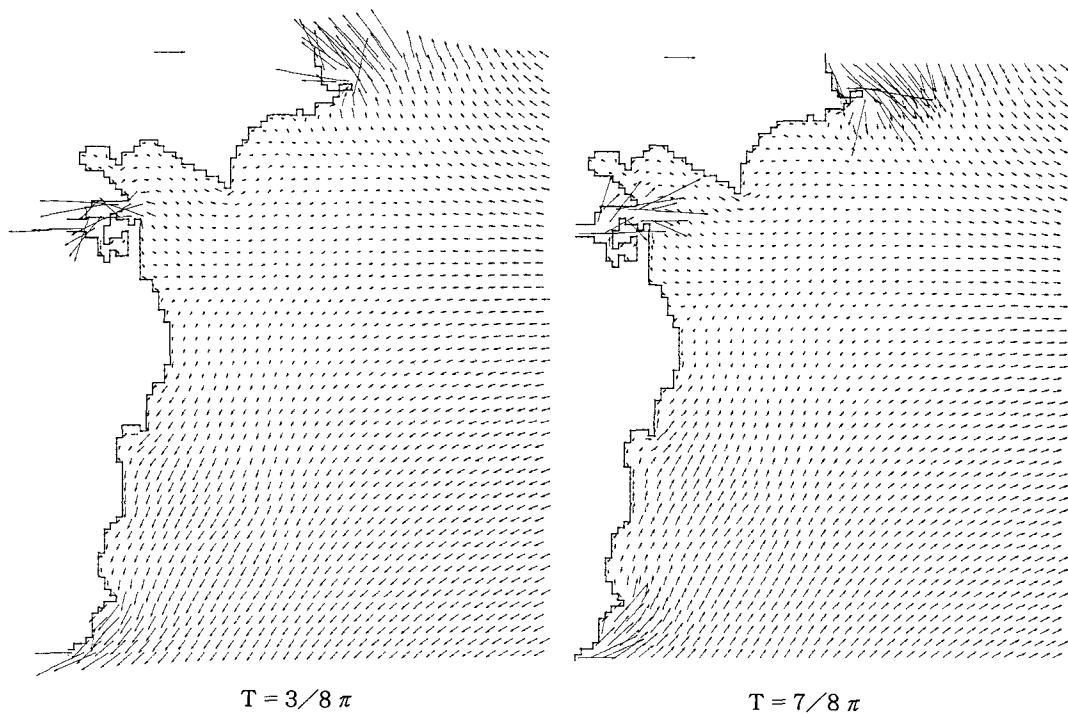
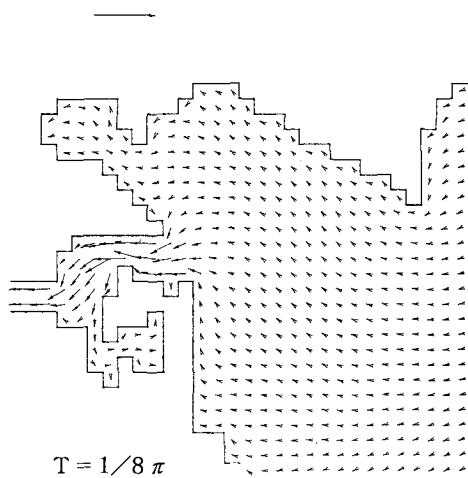
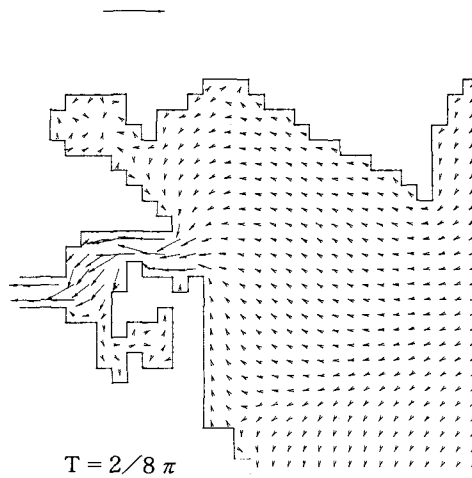


図-3 流速ベクトル図

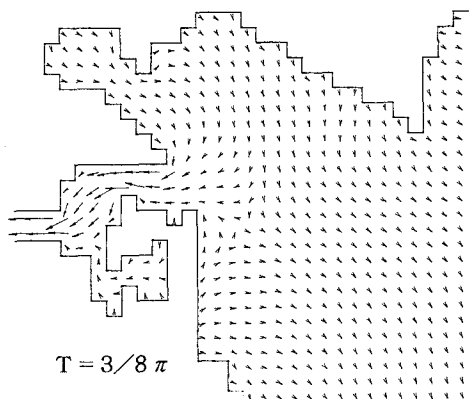
a)



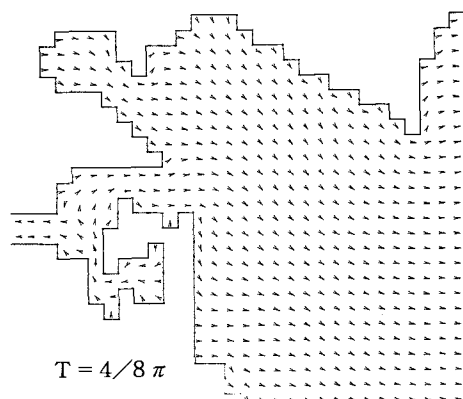
b)



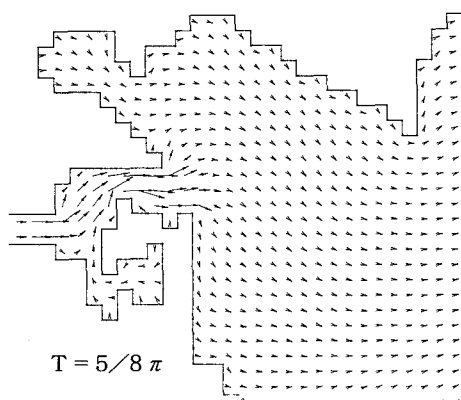
c)



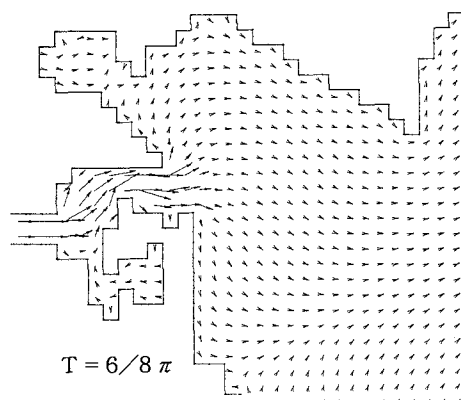
d)



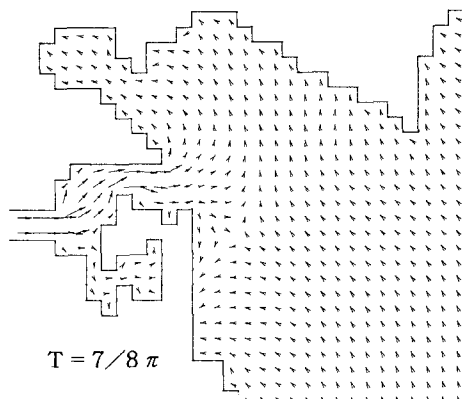
e)



f)



g)



h)

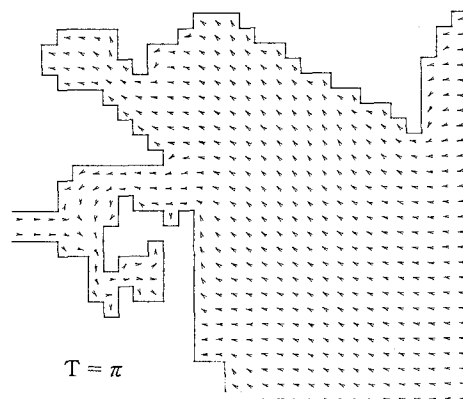


図-4 津軽海峡における流速ベクトル部分図