

有明海の潮流解析について

大 西 亮 一*・白 石 英 彦**

1. 序 論

有明海は潮差が湾奥の住ノ江港で 6 m にもなり、我が国最大の潮汐を有する内湾として知られている。この潮汐に関する研究は長崎海洋気象台 (1954)¹⁾、高田・戸原 (1963)²⁾、戸原ら (1978)³⁾ による現地調査と水理模型実験による研究と、宇野木・磯崎 (1965)⁴⁾、加藤ら (1971)⁵⁾、海上保安庁 (1974)⁶⁾、白石ら (1976)⁷⁾、磯崎・北原 (1977)⁸⁾ による電子計算機を用いた平面流の数値解析による研究がある。本論文は電子計算機を用いた数値解析の結果をまとめたものである。数値解析を用いた解析方法は、これまでの研究でほぼ確立されたように思われるが、抵抗係数や横渦粘性係数などの値はどの程度であるか、メッシュのとりかたはどの程度でよいか、また、有明海の湾奥は干潮時に干上がるが、干潟の計算はどうすればよいかなどの問題が残されている。筆者らは満潮位、干潮位、平均潮位、最大潮流速に注目して、抵抗係数、横渦粘性係数、メッシュのとりかたの影響等を実際に解析した結果を用いて検討を加えた。また沿岸海域の物質移動に大きな影響を与えると考えられている恒流について残差流としての解析とラグランジュ的な水粒子の追跡の方法を比較検討したのでその結果を報告する。

2. 解析方法

2.1 基礎式

基礎式は水深方向に積分をした平面流の次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + hU \frac{\partial U}{\partial x} + hV \frac{\partial U}{\partial y} \\ = -g \cdot h \frac{\partial z_s}{\partial x} + \varepsilon_h \cdot h \cdot V^2 U \\ + \varepsilon_v \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_b - \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_s \right\} + f \cdot Q_y \\ \frac{\partial Q_y}{\partial t} + hU \frac{\partial V}{\partial x} + hV \frac{\partial V}{\partial y} \\ = -g \cdot h \frac{\partial z_s}{\partial y} + \varepsilon_h \cdot h \cdot U^2 V \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} + \varepsilon_v \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_b - \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_s \right\} - f \cdot Q_x \\ - \frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここに、 x, y, z : 座標軸、 t : 時間、 h : 水深、 u, v : x, y 方向の流速、 z_s : 水位、 ε_h : 横渦粘性係数、 ε_v : 鉛直渦粘性係数、 f : コリオリ力、 g : 重力加速度 ($=9.8 \text{ m/sec}^2$)

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{1}{h} \int_0^h u dz \\ V &= \frac{1}{h} \int_0^h v dz \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= h \cdot U \\ Q_y &= h \cdot V \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

である。表面と底面の抵抗係数は無風状態を考えて、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_s &= \varepsilon_v \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_s = 0 \\ \varepsilon_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_b &= \gamma_b^2 \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \\ \varepsilon_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_y &= \gamma_b^2 \cdot V \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

ここに γ_b^2 : 抵抗係数、添字 s, b は表面、底を示す。有明海が比較的浅く、しかも潮流が大きいので底面の抵抗にマニングの式を用いると次のようになる。

$$\gamma_b^2 = \frac{g \cdot n^2}{h^{1/3}}$$

ここに、 n : マニングの粗度係数である。

2.2 解析モデル

有明海は九州西部に位置し、長さ約 96 km、平均幅約 18 km の湾曲した細長い形状をした内湾で水面積は約 1,700 km² である。一般に有明海の潮流解析は有明海と八代海を結んで計算するが、三角瀬戸と柳瀬戸の流量が非常に小さいので、図-1 に示すように有明海のみを 2 km メッシュでモデル化する。外海は口ノ津の沖約 30 km で水位境界とする。2 km メッシュのモデルでは早崎瀬戸が、2 メッシュ程度となるので図-2 に示すように早崎瀬戸のみを 2/3 km メッシュとした解析も行ない比較する。一般には緯度を x 軸に経度を y 軸に合わせて

* 正会員 農林水産省農業土木試験場水利部

** 農博 農林水産省農業土木試験場水利部室長

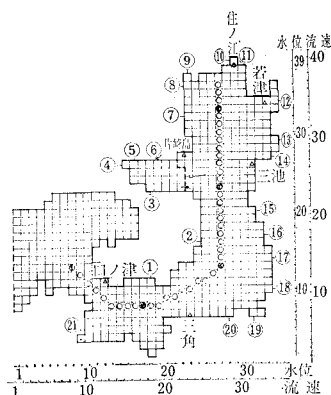


図-1 有明海の解析モデル (2km メッシュ)

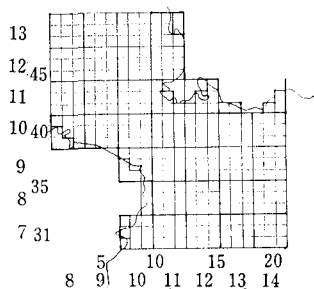


図-2 早崎瀬戸の部分モデル (2/3 km メッシュ)

モデル化するので、このモデルについても検討した。河川からの流入は図-1 に示す地点で与えた。

2.3 海岸及び干潟の取扱い

海岸における境界条件は、一般に海岸を流速点として流速を 0 m/sec とするのが多いが、海峡や入江などでは、流速を与える方が良く考えられている。そこで図-3 に示すような地形条件を考えて、A-1, B-1, C-1, D-2 は $U=0.0\text{ m/sec}$, $V=0.0\text{ m/sec}$ とする。A-2, B-2, C-2, D-1 は陸上になった水深点を用いなくて U, V を計算する。E-1, E-2 では、 $V=0.0\text{ m/sec}$, U は海中の水深点のみで計算する。F-1, F-2 では、 $U=0.0\text{ m/sec}$, V は海中の水深点のみで計算する。

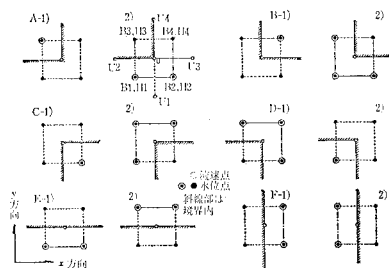


図-3 海岸境界点の種類

干潟は水深が 0.03 m 未満になれば陸地として取扱う。また、水深が 0.03 m 未満であれば格子内への流入は認めるが流出となる流速は 0 m/sec とする。水深が 0 m となれば計算上の問題が生ずるので干潟上では 0.01 m 以下の水深は 0.01 m とした。

2.4 外海の境界条件

外海での境界条件は水位境界とするが流速をどのように与えるかが問題となる。一般には潮流速が小さいので 0.0 m/sec とするが、水位境界の潮位を与える流速の条件を満足するように与えた。

3. 解析結果

3.1 計算結果

計算は最初水面は水平で流速は 0 m/sec としてスタートし3波目を用いてまとめた。周期は半日潮を考慮して12時間30分とした。計算結果の中で満潮位を図-4に示す。この結果から湾奥へ行くにしたがって満潮位が高く干潮位が低くなることがわかる。平均潮位は図-5に示す。この結果、早崎瀬戸で -15 cm が湾奥で約 $5\sim 8\text{ cm}$ となり、差は $20\sim 23\text{ cm}$ となることがわかる。最大潮流速は図-6に示すように早崎瀬戸で 2.2 m/sec となり湾奥に行くにしたがって小さくなる。また島原側が熊本側よりも潮流が大きくなる。1 潮汐の流跡線を図-7に示す。また、1 潮汐間の水粒子の移動を30波くりかえした流跡線を図-8に示す。この結果、湾内の大きな流れがわかる。1 潮汐間の平均流速を図-9に示す。この結果湾奥では安定しているが、湾口部で方向が不規則となる。

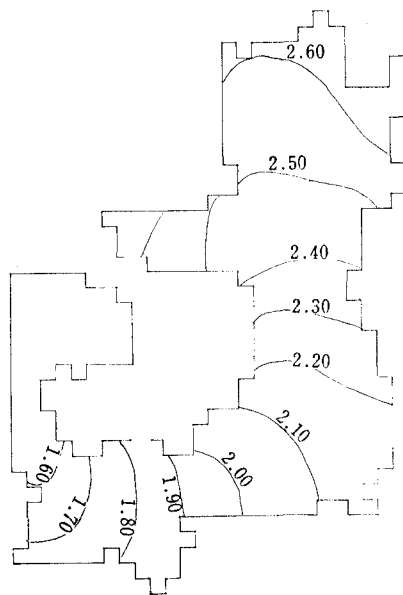


図-4 満潮位

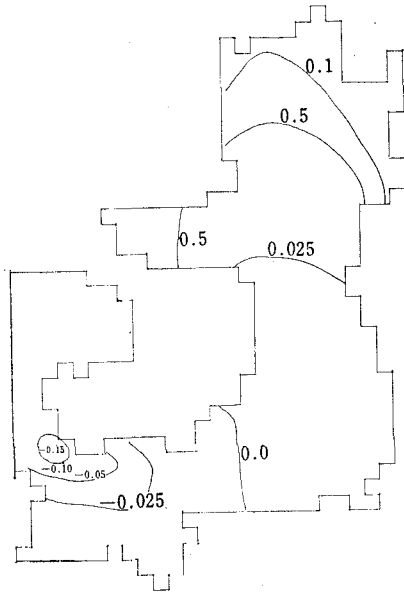


図-5 平均潮位

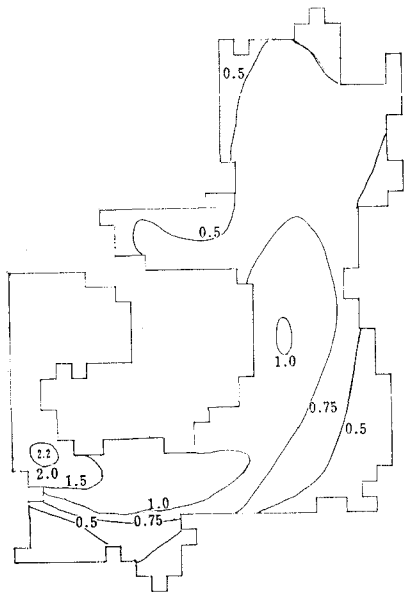


図-6 上潮最大潮流速

3.2 抵抗係数と横渦粘性係数の影響

有明海の潮汐に抵抗係数がどの程度影響を与えるかを見るために、抵抗係数を変化させた解析結果を図-10に示す。この結果から、潮差を説明する抵抗係数は $\gamma_0^2 = 2.6 \times 10^{-3}$, $n = 0.03$ 程度が良いことがわかる。

また、横渦粘性係数の影響は、図-11に示すように潮差にはあまり影響しない。しかし、図-12に示すように、平均潮位が湾奥へ行くにしたがって高くなることがわかる。潮流速については、図-13から抵抗係数の

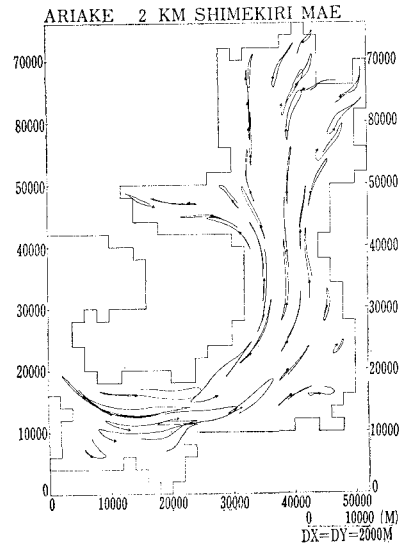


図-7 潮流による水粒子の移動 (1潮汐)

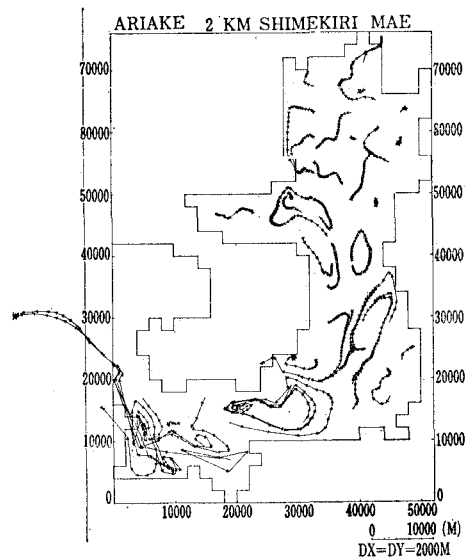


図-8 潮流による水流子の移動 (30波)

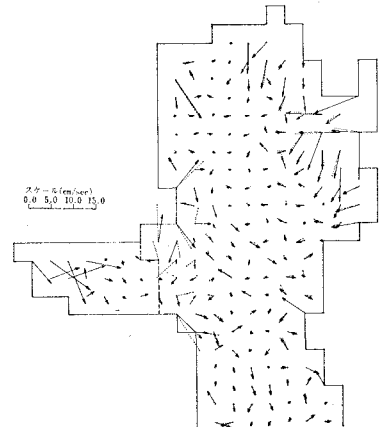


図-9 平均潮流速 (計算値)

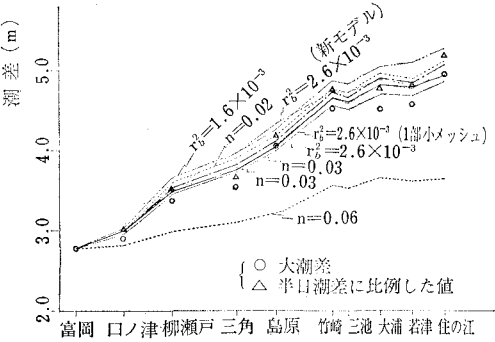


図-10

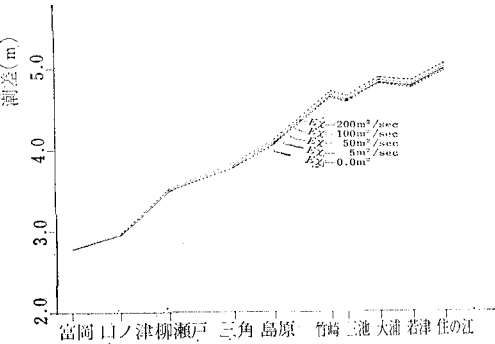


図-11 図潮位差に対する横渦粘性係数の影響

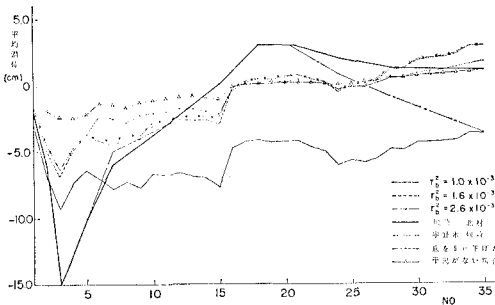


図-12 平均潮位

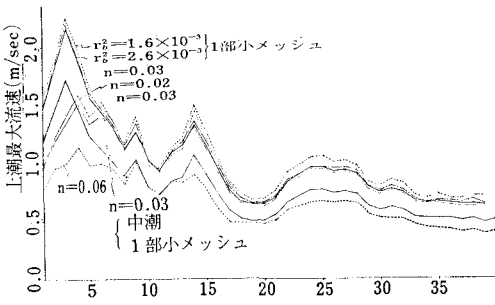


図-13 潮流に対するメッシュと抵抗の影響

影響は少しあるが、それほど大きいとは言えないことがわかる。

3.3 格子間隔の影響

数値モデルで解析する場合に、狭窄部は小メッシュに

しなければならないと言われているので、図-2 に示すように早崎瀬戸を 2/3 km メッシュとした。この結果、図-13 に示すように、潮差に少しの差があるがあまり大きいとは言えない。しかし、図-13 に示すように潮流は早崎瀬戸で大きくなり、実測に近くなることがわかる。

3.4 ハニングフィルターについて

数値解析では振動を防ぐために、ハニングフィルターが用いられるので次のようなハニングフィルターを用いた。

$$U_{m,n}^{j'} = \frac{1}{6} (U_{m+1,n}^j + U_{m-1,n}^j + U_{m,n+1}^j + U_{m,n-1}^j + 2U_{m,n}^j) \dots\dots\dots (6)$$

この結果を 図-14 に示す。この結果から、潮位が変動していることがわかる。そこで、ハニングフィルターの効果は横渦粘性の項と同様の働きを考えると考えられるので次のように検討した。まず、横渦粘性のみが作用した場合として次式を考える。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \epsilon_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

(7) 式を差分式で表わして、 $\Delta x = \Delta y$ として展開すると、

$$U_{m,n}^{j+1} = \frac{\Delta t \cdot \epsilon_x}{\Delta x^2} \left\{ U_{m+1,n}^j + U_{m-1,n}^j + U_{m,n+1}^j + U_{m,n-1}^j + \left(\frac{\Delta x^2}{\Delta t \cdot \epsilon_x} - 4 \right) U_{m,n}^j \right\} \dots\dots\dots (8)$$

(6), (8) 式から

$$\epsilon_x = \frac{\Delta x^2}{6 \cdot \Delta t} \dots\dots\dots (9)$$

となり、 $\Delta x = 2000 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 30 \text{ 秒}$ とすれば、 $\epsilon_x = 2.2 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{sec}$ となり有明海の約 10^3 倍の値となる。このため $\epsilon_x = 10^2 \text{ m}^2/\text{sec}$ では 220 回に 1 回程度となる。

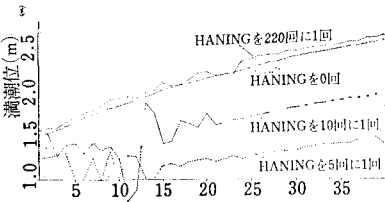


図-14 ハニングの影響

4. 考 察

4.1 計算結果について

有明海の潮汐は模型実験の結果や現地調査の結果から考えてほぼ満足のいくものである。しかし、図-10 に示す実測潮差は、大潮差は $M_2 + S_2$ となっており日潮の影響を入れて比較すると、湾奥での潮差が小さくなる。そこで M_2 潮を富岡の潮差に比例して拡大した結果と比較

すると満潮位をよく説明する。この原因は周期の影響が考えられる。

4.2 抵抗係数と横渦粘性係数の影響

抵抗係数は図-10 から $\gamma b^2 = 2.6 \times 10^{-3}$, $n = 0.03$ 程度となっている。この値は、これまでの一般的な値とほぼ等しい。また、横渦粘性係数の影響が少ないのは水平方向の運動量輸送による応力が、それほど大きくないことを示している。しかし平均潮位は宇野木・磯崎 (1965)⁴⁾、磯崎・北原 (1977)⁹⁾ の結果との差があり計算方法に差があるのではないかと考えられる。

4.3 平均潮位について

有明海の平均潮位は長崎海洋気象台 (1954)¹⁾ の調査結果から、図-15 に示すようになっている。筆者らは 1975 年の調査結果を、月ごとに整理すると図-16 のようになり、月変化が大きいがわかる。また、湾奥は長崎海洋気象台とほぼ同じである。しかし、計算では口ノ津と湾奥は約 20~23 cm の差となり、実測値とは少し差がある。

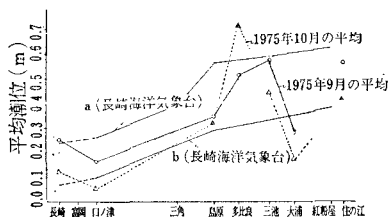


図-15 平均潮位

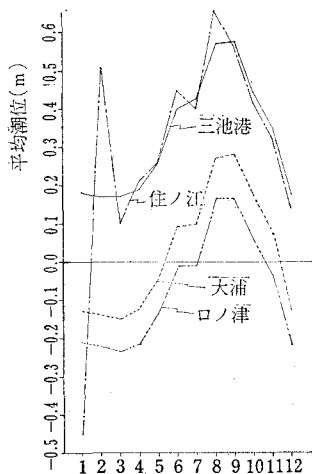


図-16 平均潮位

4.4 恒流について

有明海の恒流は図-8 に示すように、いたる所で恒流の渦が見られる。これまでは長崎海洋気象台 (1954)¹⁾ の調査結果から、反時計廻りの恒流が存在すると言われて

いた。また、戸原ら (1978)²⁾ は模型実験の結果から湾奥に一對の恒流の渦が存在することを指摘している。これらを考えると、図-8 の結果は、実状に近いのではないかと考える。

一方、図-9 に示すように残差流とするとわかりにくい。この原因は不明である。筆者らは図-8 の流跡線で考える方が良いのではないかと考えている。

5. 結 論

有明海の潮流解析を行って得た結果を要約すると次のようになる。

(1) 有明海の抵抗係数は $\gamma b^2 = 2.6 \times 10^{-3}$, $n = 0.03$ 程度となる。

(2) 横渦粘性係数はその大きさは明確にできないが計算の安定から $10 \sim 10^2 \text{ m}^2/\text{sec}$ が適当である。

(3) 有明海の恒流解析はラグランジュ的な流跡線を用いる方が良い。また、恒流の渦は図-10 に示すように、いたる所に存在すると予想される。

(4) 早崎瀬戸は小メッシュで解析する必要がある。その影響は最大潮流速にあらわれる。

(5) 干潟の解析は図-3 に示すような境界条件で解析できる。

(6) ハニングフィルターは平滑化に用いられるが流速の平滑化には、横渦粘性を用いた解析の方が望ましい。

謝 辞

本研究は農業土木学会 長崎南部 環境影響評価 委員会 (水象部会長 九州大学田中宏平教授) の一環として行っているもので、田中教授を始め各委員の御指導を賜った。また、理化学研究所 宇野木早苗博士と東京水産大学 加納敬助教授の御指導と討議をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長崎海洋気象台: 「有明海の総合開発に関連した海洋学的研究 (1)」 1954.
- 2) 高田雄之・戸原義男: 「有明海の水理模型実験について (2)」—潮せき伝播と締切進行にともなう内潮位変動の検討—第 10 回海工講, pp. 75~79, 1963.
- 3) 戸原義男・加藤 治・瀬口昌洋: 「有明海の潮流と拡散, 混合に関する研究 (1)」, 第 25 回海工講, pp. 556~560, 1978.
- 4) 宇野木早苗・磯崎一郎: 「湾内の水面傾斜とサーフビートの発生について」, 第 12 回海工講, pp. 7~13, 1965.
- 5) 加藤重一・乃万俊文・萩野静也: 「ノリ漁場の改良保全に関する調査研究」—有明海及び松川浦 (福島県) 地原について—農土試報告, pp. 207~278, 1971.
- 6) 海上保安庁: 「有明海, 八代海海象調査報告書」, 1974.
- 7) 白石英彦・大西亮一・加藤 敬: 「有明海の潮流解析」, 農土試技報, B 37, pp. 113~150, 1976.
- 8) 磯崎一郎・北原栄子: 「有明海と八代海潮汐」, Reprinted from the Oceanographical Magazine. Vol. 28, No. 1~2, pp. 1~32, 1977.