

鹿児島湾奥に流入する河川の浮遊砂量とその拡散

長 勝史・河原田禮次郎・田中博文

(生産環境工学講座)

平成2年8月10日 受理

Sediment Load of Rivers Flowing into Kagoshima Inner Bay and Its Diffusion

Katsusi CHO, Reijiro KAWAHARADA and Hirofumi TANAKA
(Laboratory of Water Control and Reclamation Engineering)

結 言

閉鎖性内湾においては、河川から流入した浮遊砂が、長期的に堆積して海域の利用、河口閉鎖や背後農地の排水阻害などをもたらすことにもなる。土砂堆積の原因は河川から流入する浮遊砂の絶対量であることから、河川流量と浮遊砂の濃度（以下SS濃度と呼ぶ）とは密接な関係にあるとされている。したがってSS濃度と河川流量の相関を求めることによって、湾内への平均的な総流入土砂量を推測することができよう。この際、浮遊砂の生産は河川流域における裸地傾斜の侵食や溪岸堆積物の流水による侵食・崩壊などによるため、浮遊砂の絶対量には河川流域の土性などの特性が大きく関わりを持つことになろう。また河川流域の流出特性に左右される部分もあろう。ここでは、シラス地帯を流下して鹿児島湾奥に流入する河川の浮遊砂量と河川流量との関係を解明し、これを基に湾内への土砂流入量を推測する。

また河川から湾内に流入する浮遊砂の動向や堆積も問題である。その現状を把握するには湾内水の動態をつかむことが肝要となるがここでは、まず2次元数理モデルによって鹿児島湾奥の潮流解析を行い、境界に設けた潮汐によって湾奥の潮流がいかなる様相を呈するかをシミュレートし、これをもとにして湾内に流入する土砂がどのように拡散され、外海と交流されていくのかについての移流分散の解析を行い、鹿児島湾奥内での浮遊砂の動向および堆積機構を推測する。

シラス地帯河川における浮遊砂量

1. 河川流量とSS濃度

ここではシラス地帯を流下し、鹿児島湾奥に流入する河川の浮遊砂濃度と河川流量との関係を明らかにする。鹿児島湾奥内に流入する主な河川の流域特性をTable 1 (Fig. 4 参照) に示す。河川のある地

Table. 1 Major rivers flowing into Kagoshima Inner Bay

Name of river	Area of river basin (km ²)	Length of river (km)
Kenkou R.	60.9	9.8
Amori R.	411.8	207.3
Amikake R.	74.0	43.4
Beppu R.	176.0	60.9
Omoi R.	60.2	26.5
Inari R.	33.1	17.2
Koutsuki R.	107.5	55.1
Nagata R.	37.5	15.0

点における浮遊砂SS濃度C(ppm)あるいは浮遊砂量SL (ton)と河川流量Q (m³/sec)の間には密接な相関があるとされている。これらの関係式は流域からの負荷流出量モデルに用いられる式

$$C = \alpha Q^n \cdot \dots \cdot (1)$$

で表示される。一般にはnは1.0に近い値であるとされている⁵⁾。αは流域の土砂生産条件により場所ごとに、また時季的にも変化する係数であろう。

ここでは流域の大半がシラス地帯を流下する甲突川 (Table 1, Fig. 4 参照) において、1989年に平水時および出水時など種々な河川流量におけるSS濃度を観測し、その相関を求めた。その結果をFig. 1 に示す。相関を(1)式の形式で表すと

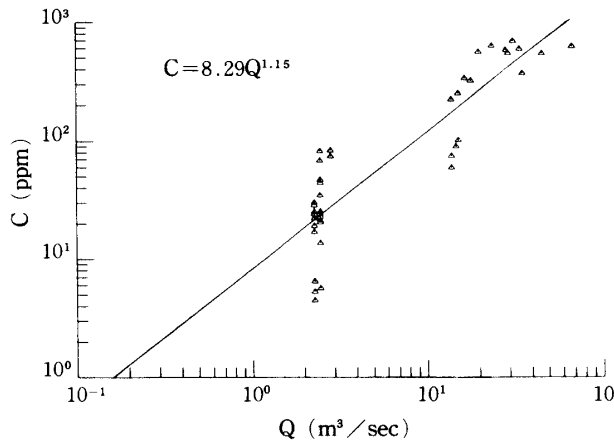


Fig. 1. Relation between discharge of river (Q) and sediment concentration (C) at the Koutsuki river (1989).

$$C = 8.29Q^{1.15} \dots \dots \dots (2)$$

となる。相関係数も $r = 0.89$ とまずまずの値を示している。ただ同じような河川流量であってもSS濃度にはかなりの差異が見られる。これらはSS濃度は単に河川流量のみに左右されるのではなく、気象要素、特に降雨前の条件に左右される部分が多いであろう。すなわち同一降雨条件や同一流量であっても先行無降雨日数の程度によって、SS濃度が大きく変化することが考えられる。細かく降雨条件と対比した結果、やはり先行無降雨日数に左右される部分が多いことが明らかになった。すなわち数日間無降雨日が続いた後に降雨があった場合のSS濃度は極めて大きな値を示した。さらに、一つの出水時においても、流量の上昇期と下降期とで、同一流量であっても浮遊砂量はかなり異なることなどの問題が残されている。

シラス地帯を流下する河川は浮遊砂量の絶対値、すなわち(1)式の α の値が他の地区に比べ、やや大きいようである。測定された浮遊砂の大半はガラス質のシラスで、粒径はおおよそ $d = 0.03 \sim 0.15\text{mm}$ であった。シラスは比重が2.4程度と通常の砂質土と比較して小さく、粒子が扁平で流水に浮遊し易い物性を持っている。さらにシラスは水に侵食され易い特性も有している。これらの総合的な要因によってシラス地帯を流下する河川の浮遊砂量は、一般の流域の河川に比べて大きくなるものと推測される。

2. 浮遊砂総量

鹿児島湾奥に流入する河川の一例として甲突川を選び、同河川からの浮遊砂量の年間総量を推測する。浮遊砂量SLは(1)式から

$$SL = \alpha Q^{n+1} \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここで1988年の甲突川河川実測日流量を(3)式に代入して、日浮遊砂量を求めたものをFig. 2に示す。Rは日降水量である。これによると年間の総浮

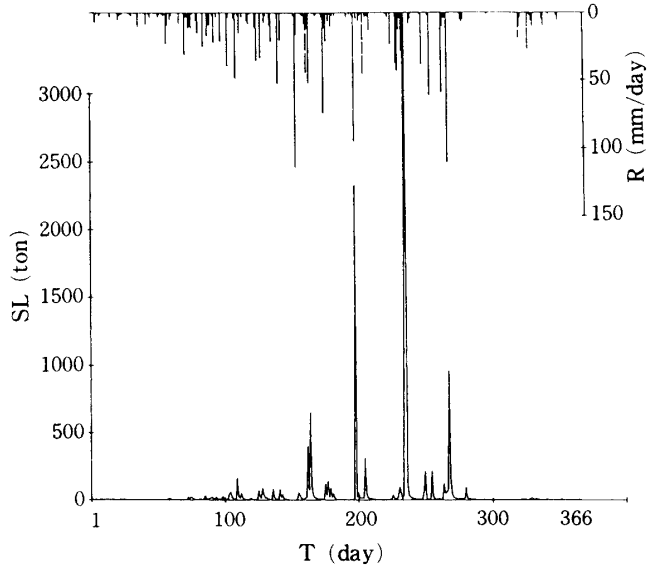


Fig. 2. Variations of sediment load per diem at the Koutsuki river (1988)

遊砂量は $TSL = 16,370\text{ton}$ 程度と推測された。図から明らかなように、出水時の浮遊砂量が総浮遊砂量の大半を占め、 $Q = 40\text{m}^3/\text{sec}$ を越える出水時のわずか3日間で年間全流入砂量の50%以上を占めている。一方、シラス地帯を流下する河川の流出はかなり特徴的傾向がある⁴⁾。すなわち同流域では地層が台地状で透水性の高い火山灰層から成っているため、雨水が地中に浸入し易く、一般の河川に比べて直接流出、なかでも表面流出成分が少なく、地下水流出成分が大きくなる流出特性を有する。したがって、浮遊砂量の絶対値を左右する表面流の割合が少ない特性を有しているが、結果的にはシラス土壌固有の特性による浮遊砂の増加の方が卓越して、多量の浮遊砂量となる。

湾奥に流入する他の河川についても甲突川と同様な河川流出特性および浮遊砂量特性を持つと仮定するならば、1988年の一年間に主な8河川 (Table. 1参照) から鹿児島湾奥に流入した年間総浮遊砂量は、おおよそ13.7万ton程度と推測される。

浮遊砂拡散の数値解析

河川から湾奥内に流入した浮遊砂の動向や堆積も問題である。その現状を把握するには湾内水の動態

をつかむことが肝要となる。鹿児島湾奥はFig. 3に示すように、始良カルデラによる特有な地形構造であることから、湾奥では他の海湾に類を見ないほど

急深（最深では200m）である一方、桜島水道の狭窄部では水深20~40mと浅くかつ狭い。このような地形条件が固有の潮流を形成している。

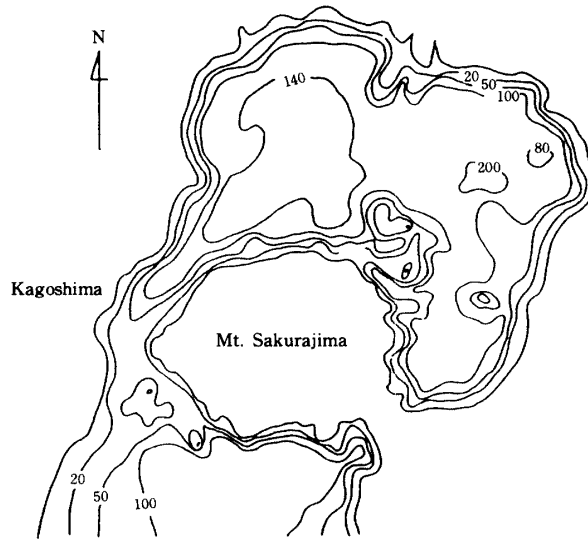


Fig. 3. Topography of Kagoshima Inner Bay (The numbers denote depths in meter).

ここでは、まず2次元数値モデルによって湾奥内の潮流解析を行い、境界に設けた潮汐によって、湾奥の潮流がいかなる様相を呈するかをシミュレートし、海水の動向を探った。その解析方法と結果については前報³⁾に詳細に記述したのでここでは省略する。この結果をもとにして鹿児島湾奥内に河川から流入

した浮遊砂が潮流にのって、どのような拡散するかをシミュレーションによって推測する。一般に沿岸海域における汚濁物質の拡散現象には2次元移流分散方程式が適用される。ここではこの2次元移流分散方程式に移動子法を適用して数値解析を行う。

1. 基礎方程式

移動分散方程式は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \{C(h+\eta)\} &= \frac{\partial}{\partial t} \{(C(h+\eta))\} + U \frac{\partial}{\partial x} \{(C(h+\eta))\} \\ &+ V \frac{\partial}{\partial y} \{(C(h+\eta))\} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \{(h+\eta)K_x \frac{\partial C}{\partial x}\} + \frac{\partial}{\partial y} \{(h+\eta)K_y \frac{\partial C}{\partial y}\} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ここで、U：X（N-S）方向の平均水平流速成分=q_x / (h+η)

V：Y（E-W）方向の平均水平流速成分=q_y / (h+η)

C：平均物質濃度，K_x，K_y：拡散係数

(4)式に移動子法²⁾を適用して差分化し、境界条件を与えて数値計算を行なう。

2. 計算条件

計算はFig. 4に示すようにN-S方向を400m間隔に63個，E-W方向を同じく400m間隔に71個分割して解析した。潮位の境界条件は、鹿児島湾付近の潮汐の振幅H=1.00m（ほぼ同地点での大潮時の潮差に等しい）とした正弦波を与えた。潮位の周期は12.5時間とした。粗度係数は一律にn=0.03とした。ま

た計算時間間隔は10secで行った。なお湾奥内へ流入する主な8河川の流量は画一的に各河川の平水流量を想定した。なお湾内での恒流は考慮していない。

鹿児島湾の拡散係数は、計算対象領域全域で、K_x=K_y=100m²/secとした。また外洋境界にはSS=1ppmのDirichlet型の境界条件を与えた。なお、潮流速の計算では外洋境界では水位のみを与えており、流速

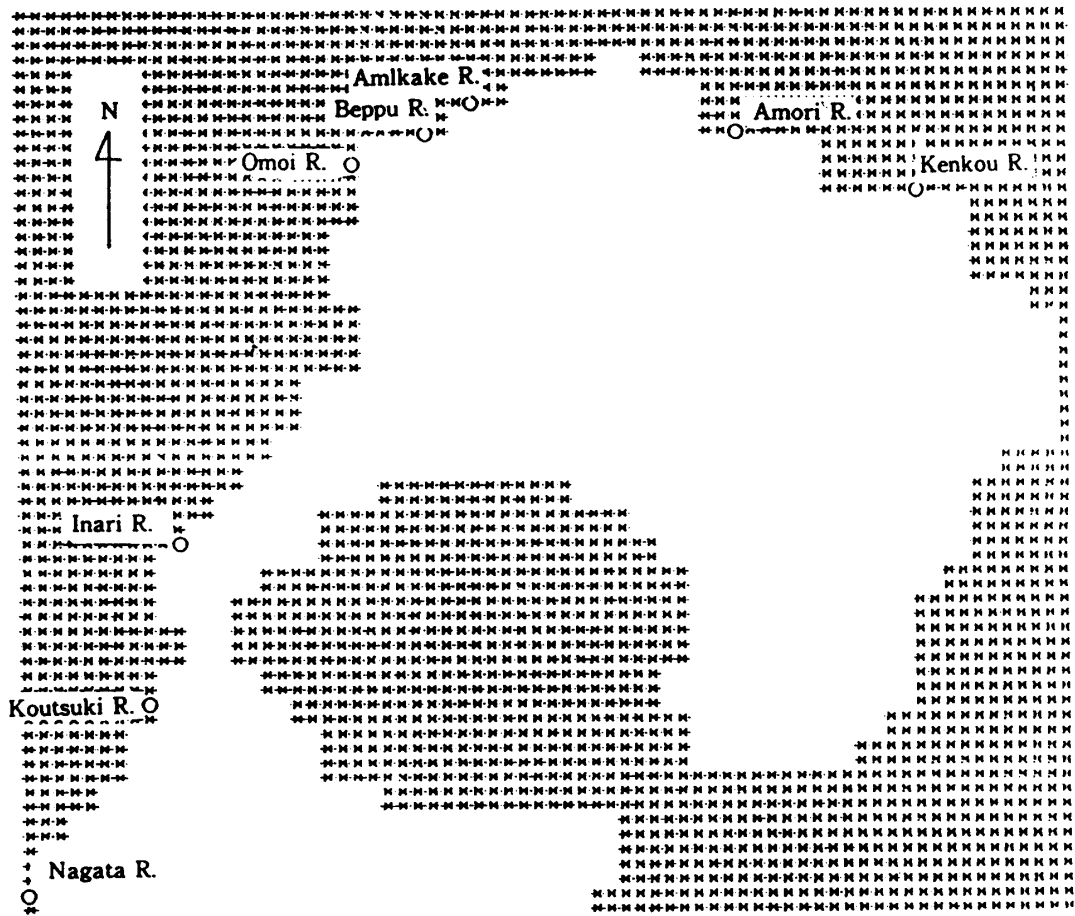


Fig. 4. Division of Kagoshima Inner Bay into two dimensional elements calculated.

はゼロであるが、ここでは外洋境界より2格子内側の流速を境界および境界の1格子内側に強制的に与えた。また固定境界では $SS = 0$ ppmのDirichlet型の境界条件とした。潮流の計算時間は38時間分行い、浮遊砂の拡散の検討には後半の12.5時間（1潮汐）を用いた。

3. 適用結果

(1) 天降川1点、1時間注入の場合

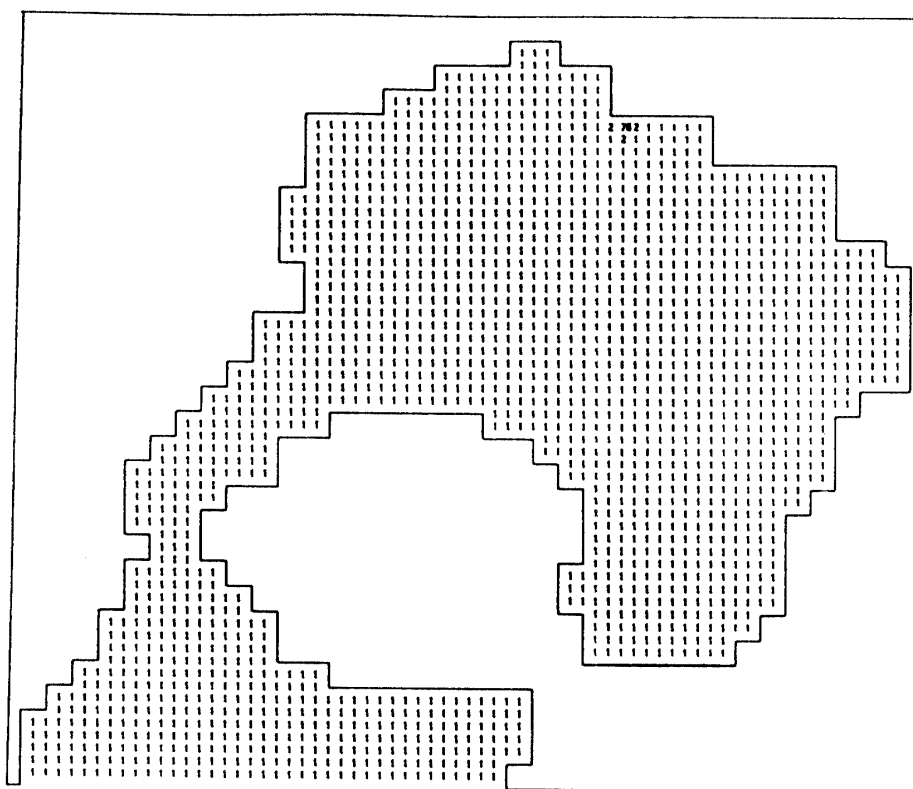
鹿児島湾奥に流入する河川の中で最も流量の多い天降川河口を汚染源（ここでは浮遊砂）にして $C = 77$ ppmの浮遊砂濃度（河川流量が平水流量のおよそ5倍の河川流量時の浮遊砂濃度）を1時間流入した場合の拡散を経時的に示したのがFig. 5 (a)~(f)である。投入後1時間すると1.6~2.0kmまでその影響が及ぶだけでなく、17km程離れた桜島水道付近までわずかな影響が現れはじめ、汚染源からの流入を中止した2時間後には2~2.5kmまで、そして桜島水道を中心として3.2~4kmまで、さらに3時間後からは、範囲はあまり変わらなくても、拡散の濃度が天

降川河口から遠くに波及していく。5時間後からは天降川河口の付近は段々と濃度が薄くなっていき、狭窄された桜島水道の方に、集積されていくようになり、10時間後にはもとの汚染源付近は完全に元に戻って、ほとんどが桜島水道に集まっている。

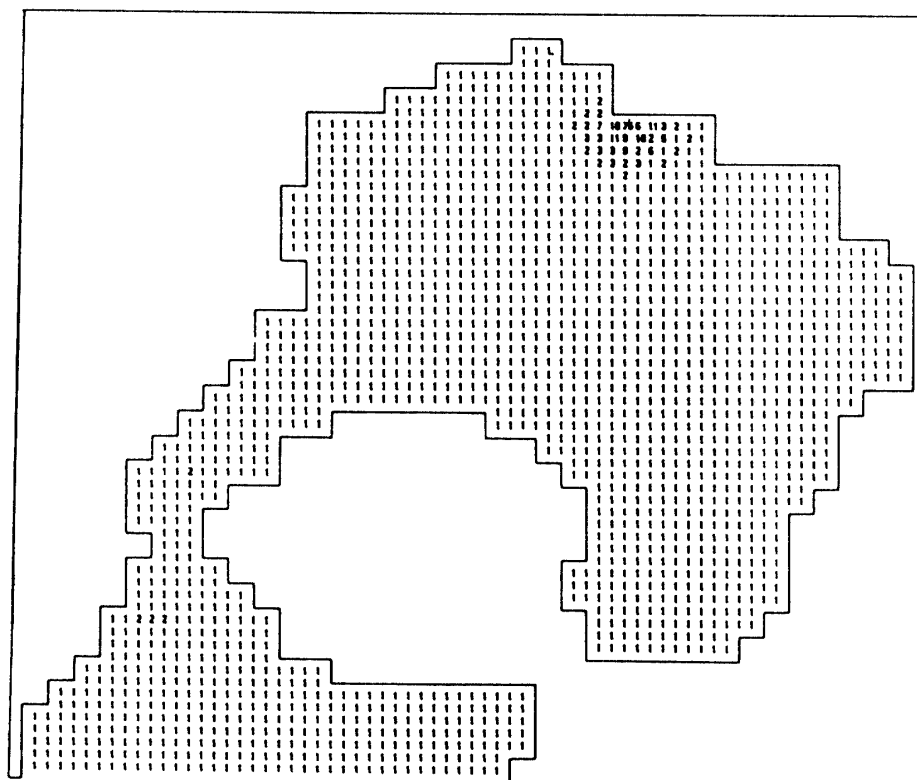
この間、これ以外の湾奥等には何の傾向も現れない。これらは、水深の違いによるもので湾奥の水深の大きいところでは平均的な濃度としては図示できるものにならないのと、最奥部の牛根麓の方には行き止まりのため流れがないためと思われる。

(2) 8河川、1時間注入の場合

Fig. 6 (a)~(b)はFig. 5と同様な条件で鹿児島湾奥の8河川（Fig. 4参照）を汚染源として場合の拡散の経時変化を示す。前項の天降川のみの場合と同様のことが8河川全部でおこるわけで、これらの相乗作用によってより加算されることが当然予測されるが、その間の時間的経過は前項の場合とほぼ同じと見ることが出来る。すなわち10時間後には汚染源付近は完全に元に戻ってほとんど桜島水道に集まって

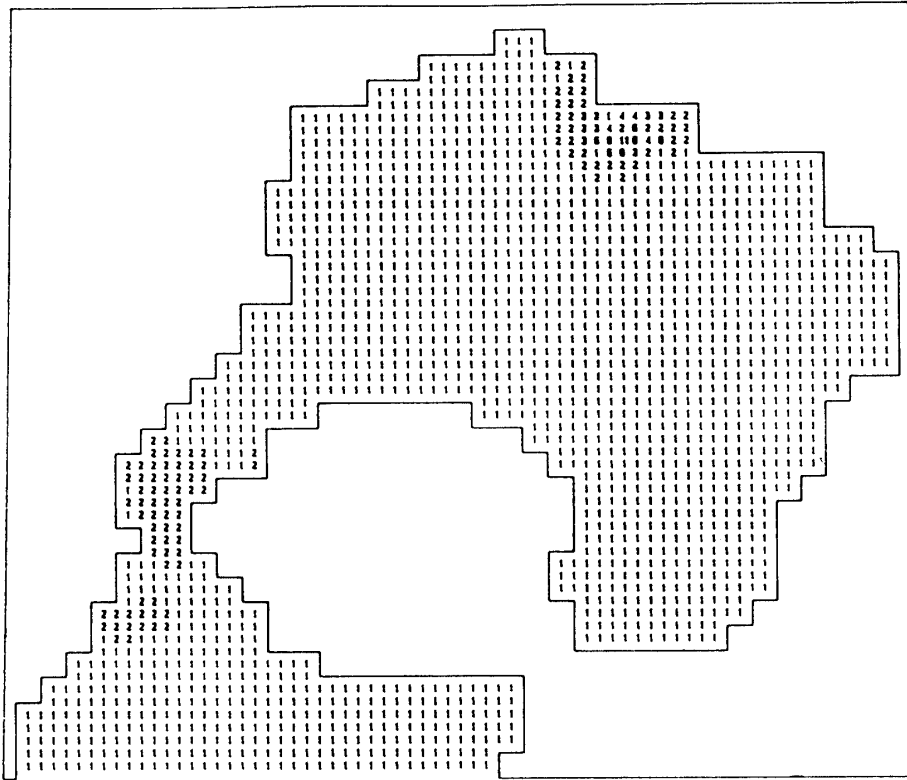


(a) Just after influx

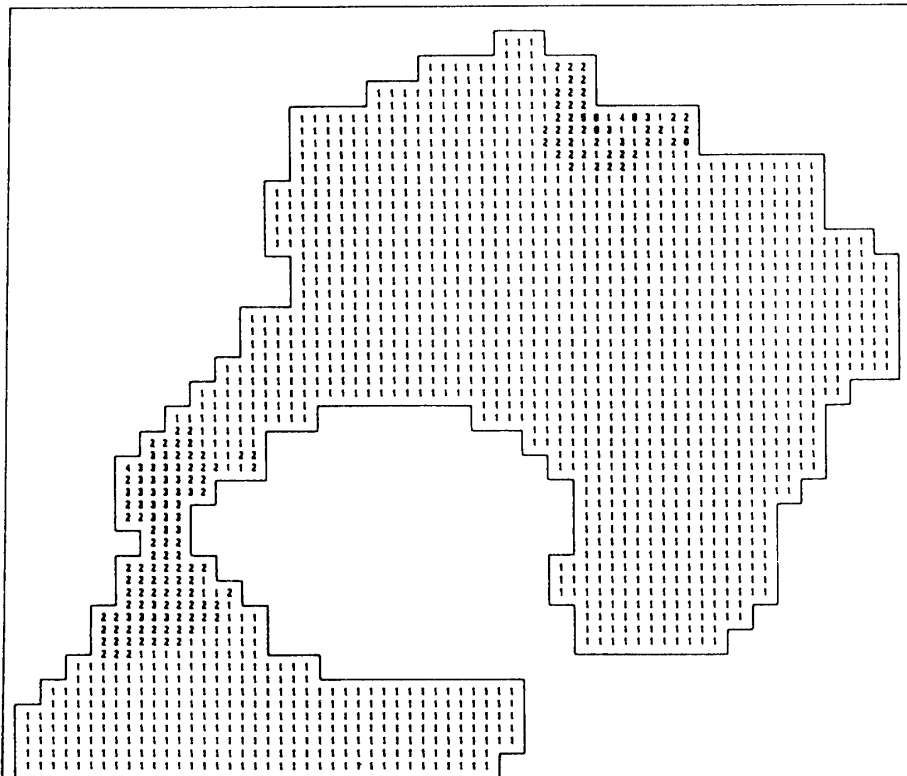


(b) The lapse of 1 hour

Fig. 5. Concentration distribution (ppm) in case of influx from the Amori river for an hour.

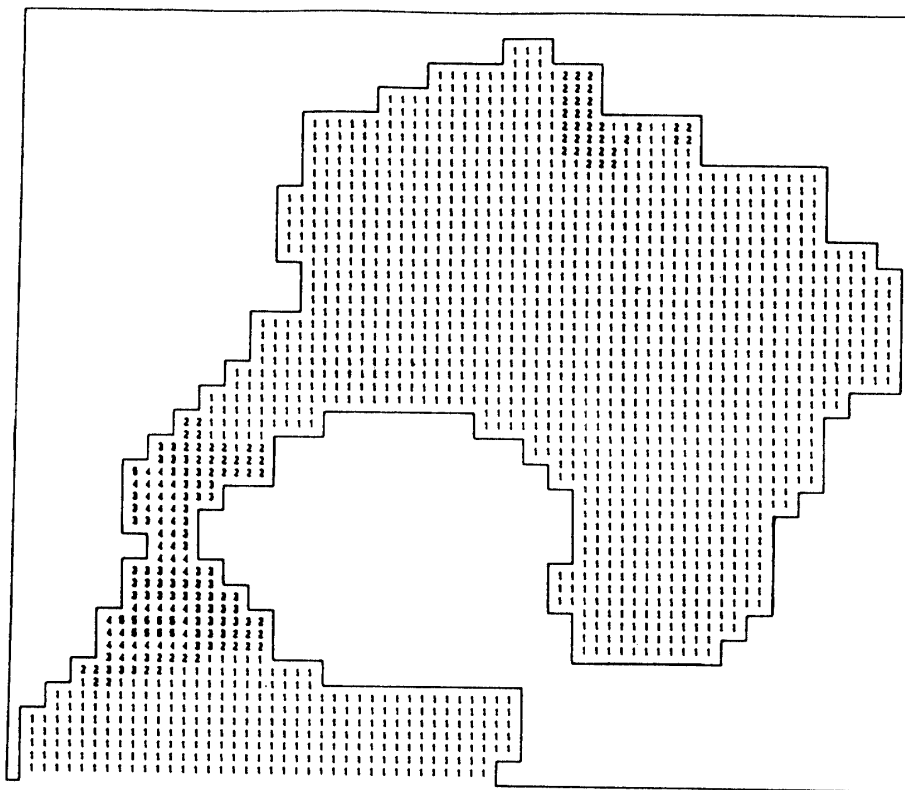


(c) The lapse of 2 hours

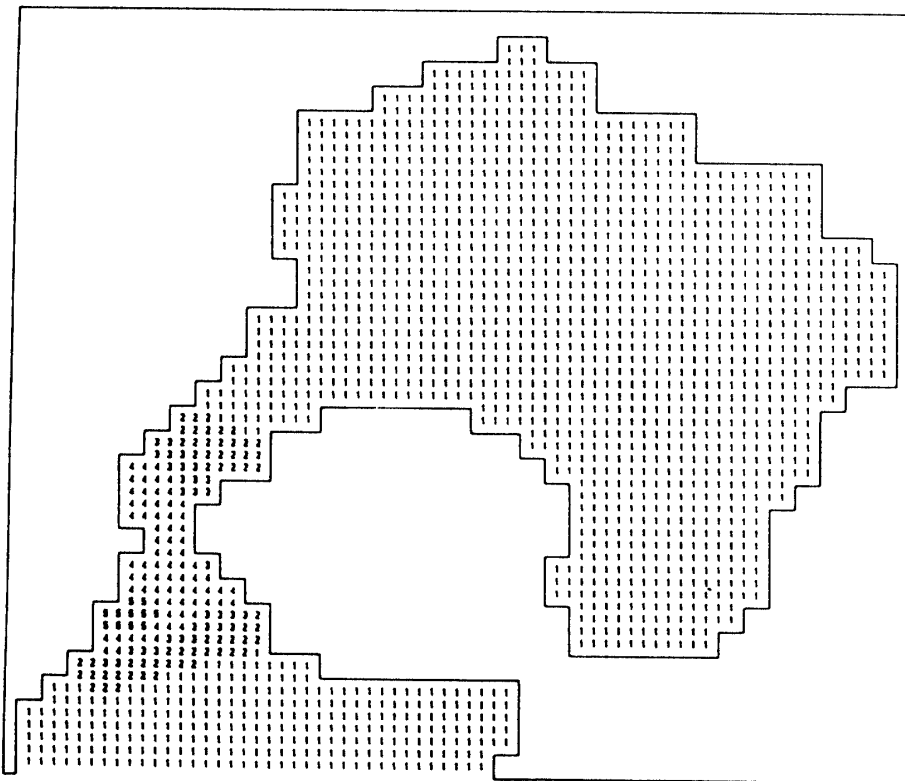


(d) The lapse of 3 hours

Fig. 5. (Continued)

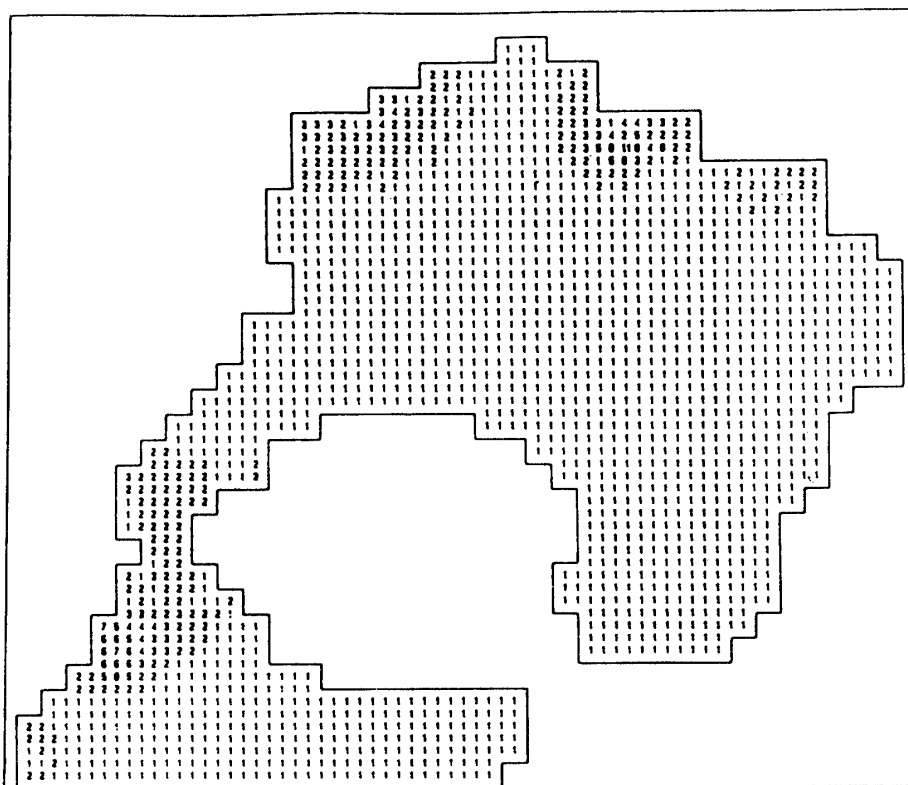


(e) The lapse of 5 hours

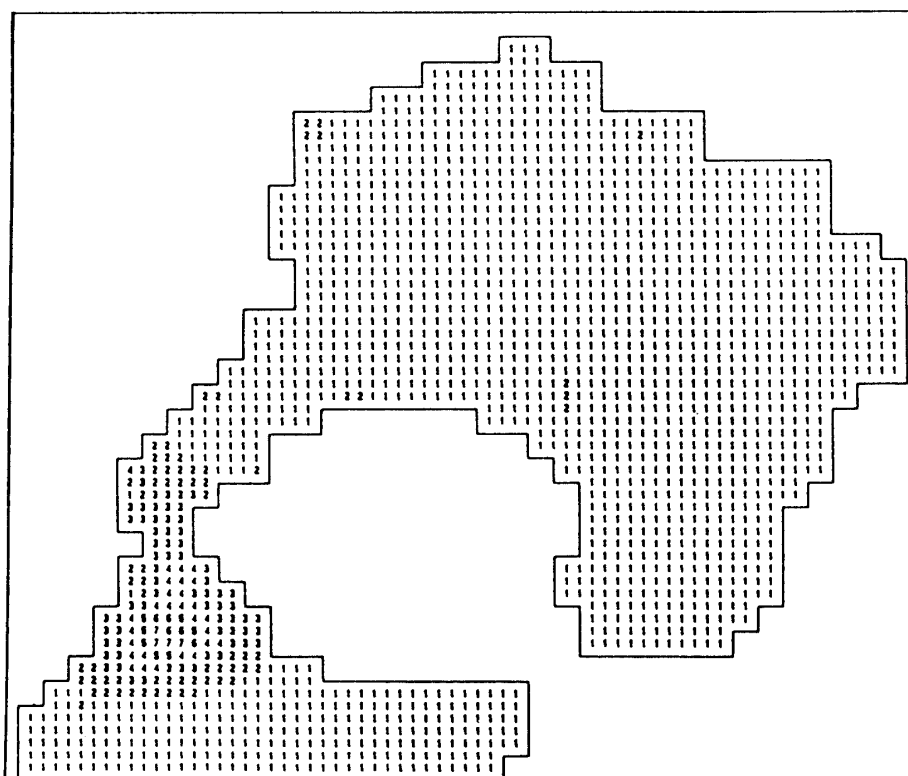


(f) The lapse of 10 hours

Fig. 5. (Continued)

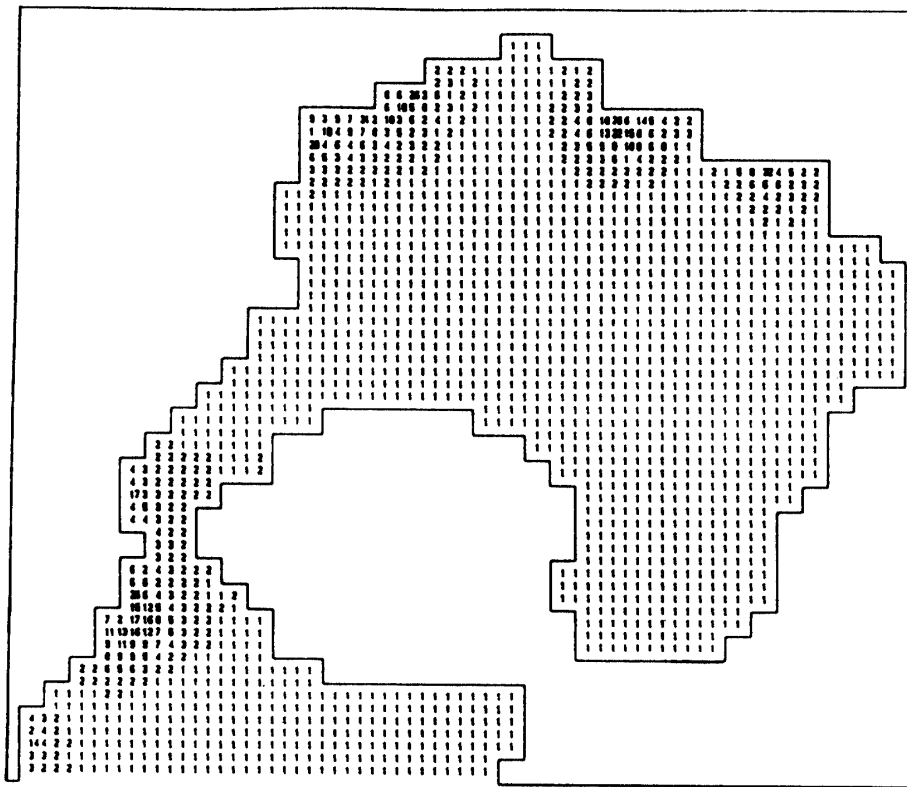


(a) The lapse of 2 hours

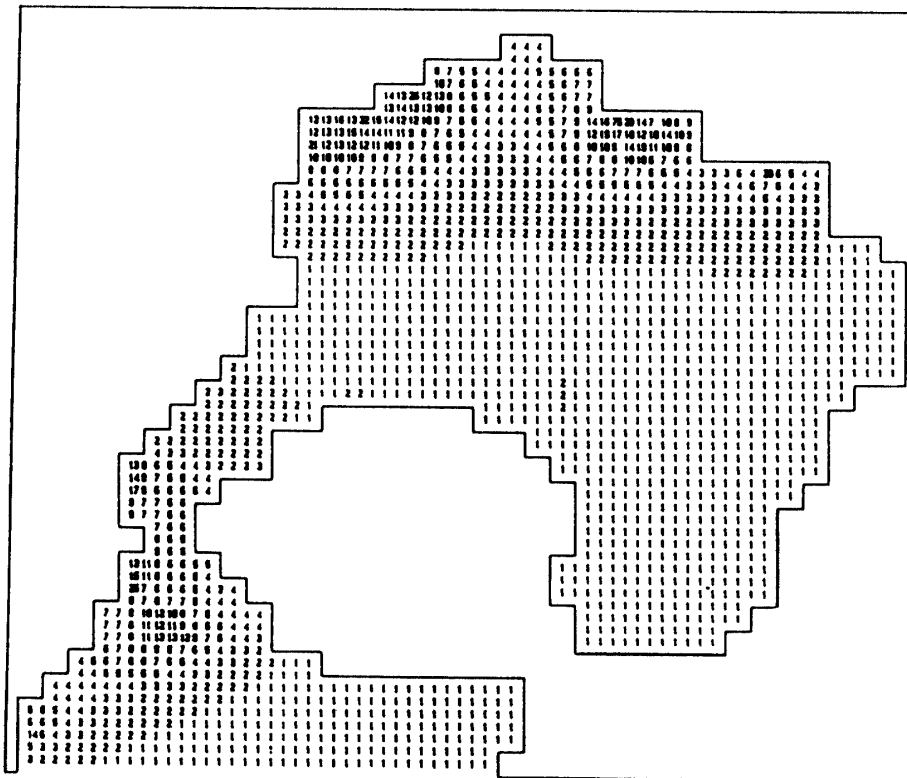


(b) The lapse of 10 hours

Fig. 6. Concentration distribution (ppm) in case of influx from 8 rivers for an hour.



(a) The lapse of 2 hours



(b) The lapse of 10 hours

Fig. 7. Concentration distribution(ppm) in case of influx from 8 rivers Continuously.

いる。

(3) 8 河川，連続注入の場合

Fig. 7 (a)~(b)は8 河川から連続的に注入された場合である。前項までは1 時間で注入を停止しているのに比べ，連続的であるので上記の1 時間注入の場合よりもさらに相乗されて汚染の集積が加速されるが，桜島の北部から東部，さらに最奥部にかけてはその連行が遅い。

なお，拡散係数 K を $50\text{m}^2/\text{sec}$ とした場合についても計算を行ったが，大局的な差は見られなかった。

このように，鹿児島湾奥部での潮流の動きは極めて緩慢であるために，河川からの浮遊砂の大半は湾内に堆積するものと考えられる。

(4) 文献¹⁾でみられる鹿児島湾奥での底質の粒度

鹿児島湾奥部は水深も大きく湾内でも最も流れが停滞しているところであるため，底質の粒度も細粒（中央粒径 $0.062\sim 0.0079\text{mm}$ ，平均 0.028mm ）のものが多く，なかでも湾奥部の東部から南東部にかけては粘土質シルトで泥質含有率も高く，最も細粒のものとなっている。それに比べ桜島水道部分では流れが早いため湾内でも最も粗い堆積物の砂（中央粒径 0.42mm ）が分布しており，含有率も高い。

要 約

河川より閉鎖性湾内に流入した浮遊砂土は，海域の利用や河口閉鎖などの弊害をもたらす。ここではシラス地帯を流下して鹿児島湾奥に流入するある河川を選定し，その河川浮遊砂量と河川流量変化との

関係を観測し，河川のSS濃度と河川流量との関係式を求めた。これをもとに湾奥内への年間浮遊砂流入量を推測した。

河川から湾奥内に流入した浮遊砂は潮流によって拡散される。この浮遊砂の拡散状況を解明するために，2次元数値モデルによって数値解析を行った。結果は以下のように要約される。

1. シラス地帯を流下する河川のSS濃度と河川流量との関係は(2)式で表されその相関も高かった。またシラスの物性のためかなり多量の浮遊砂が鹿児島湾に流入しているものと推察されるが，その大半は出水時に発生するものと考えられる。

2. 湾奥内に流入した浮遊砂は数時間の間に桜島水道に達し，湾奥の東部への影響は微小であるが，換言すれば一旦その場所に流入した浮遊砂はなかなか湾奥外に移動することはないことを意味している。

文 献

- 1) 早坂祥三・大木公彦・大塚裕之・東川勢二：鹿児島湾奥部の海底地形と底質(鹿児島湾の地質学的研究-III)，鹿大理学部紀要，No. 9，pp.53-73，(1976)
- 2) 平松和昭・戸原義男・四ヶ所四男美：移動子を用いた特性曲線法による浅海域移流分散の数値解析，昭和63年度農業土木学会九州支部大会講演要旨集，pp.157-160 (1988)
- 3) 河原田礼次郎・長勝史：内湾海水の動態についての水理学的研究，鹿大農学部報告，No. 40，pp.207-213 (1990)
- 4) 河原田礼次郎・長勝史：シラス地帯河川の水質と流出，鹿大農学部報告，No.35，pp.221-228 (1985)
- 5) 吉川秀夫：流砂の水理学，丸善，pp.141-144 (1985)

Summary

Sediment-load of rivers flowing closingly into the inner bay, induces obstructions in using the sea-area, river-mouth-closing, and so on. As model cases, some rivers flowing through *Shirasu* region, and then into the Kagoshima Inner Bay, were chosen. Then a certain river was selected, and sediment concentration was observed at the time of various river discharges. Using the data, an equation concerning the relation between the river discharge and sediment concentration was formed.

Making use of the results, total sediment-load flowing into Kagoshima Inner Bay in a year was presumed.

The sediment flowing into the inner bay is to be diffused due to the tidal current. In order to clarify the diffusion in the bay, numerical simulation was investigated by two dimensional numerical model. The following conclusions were obtained.

1. The relationship between the river discharge and the sediment concentration was formed by the equation (2), the interrelation being high. The total sediment-load in a year flowing into Kagoshima Inner Bay was presumed fairly abundant owing to the physical characteristics of *Shirasu*. And the major part of the quantity was presumed to have occurred at the time when high-water discharge was happening.

2. Sediment-load flowing into Kagoshima Inner Bay, is to arrive at the Sakurajima Channel only in a short time. And the diffusion to the Eastern part of the inner bay is to be of small quantity. In other words, those matters mean that sediment-load diffused to the part is not to be diffused farther out of the inner bay.