

# 港湾技術資料

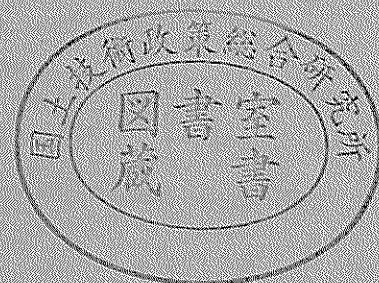
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 739      Sept. 1992

那覇港の水質とサンゴ礁保全に関する数値計算

細川 恭史

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 那覇港の水質と造礁サンゴ生息の現況	5
2.1 水質現況	5
2.2 造礁サンゴ生息現況	5
3. 数値計算の方法	7
3.1 数値計算モデル	7
3.2 計算ケース	8
3.3 入力条件	9
4. 計算結果	12
4.1 流れの計算	12
4.2 見かけの海水交換の計算	14
4.3 サンゴ幼生に見立てたマーカーの漂流追跡計算	17
4.4 濁りの広がりや沈積の計算	19
5. 解 析	24
5.1 濁り分布の傾向	24
5.2 造礁サンゴ礁保全に関する定性的評価	24
5.3 海域の特徴付けと今後の課題	25
6. おわりに	25
参考文献	26
付録.A 降雨時の河川からの濁り流出の推定	27

# Numerical Simulation for Water Quality and Coral Reef Conservation in Naha Port

Yasushi HOSOKAWA\*

## Synopsis

Numerical simulation was conducted for coral reef conservation in port area from the hydraulic point of view. Naha Port in south western part of Japan was selected as an example. Coral reef is said to be sensitive to turbidity of fine silt, water salinity and temperature, activity of predators (such as starfish) and so on. For the maintenance of the ecological activity of reefs and the reef-zoning, larvae support from mother reefs is important. Coastal hydraulics mainly affect the following environmental elements; a). diffusion and settling of the turbidity (particle) load from the land area, and b). drifting routes of the released eggs/larvae from mother coral reefs.

Calculations on coastal flow, water exchange, drifting path of larvae and diffusion of turbidity were tried by numerical simulation models. For the calculation of drifting, larva markers were released from the main active reef area and drifting points at each calculation time-step are traced as their paths. For the calculation of turbidity diffusion, particle load and diameter fractions were estimated, using the observation data of each river discharge, its turbidity and its distribution of particle diameter during a strong rain fall.

The standard critical values of turbidity nor settling rate are not yet established officially for coastal reef conservation. Comparing the observation example for a damaged coral reef of another island, river mouth in this port is partially not suitable for coral transplantation. Outer slope of the existing reefs, which is protected by breakwater lines from the inflow turbidity load, is expected to have the high potential as mother coral groups to northern and southern neighbor reefs.

**Key Words :** coral reef, SS wash-load at rain fall, turbidity diffusion, numerical simulation of larvae drifting, characterization and zoning of coastal water

---

\*Chief, Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 那覇港の水質とサンゴ礁保全に関する数値計算

細川 恭史\*

## 要 旨

那覇港を例に選び、サンゴ礁の保全に関する水理的な面からの検討を実施した。サンゴ礁を含む海域について環境上からの特徴付けを試み、区分分けを試みた。水理現象に大きく左右される主要な環境因子としては、①流入濁りの拡散と粒子の沈積、②既存サンゴ礁からの放出幼生の漂流経路等が考えられた。

数値モデルにより、海水の流れ・海水交換・サンゴ幼生の漂流経路予測・懸濁態浮遊物質(SS)濃度および懸濁態浮遊物質沈積量の湾内分布を検討した。港内での海水の滞留日数についての計算は、港内にマーカーをいれ、一定時間潮汐流により漂流させた後、港内残留マーカー数を数えることにより行った。また、港内の主要なサンゴ礁にマーカーを置き、マーカーの動きを追跡することによりサンゴの幼生が流れる方向を推定した。河川より流入するSS粒子の港内での拡散分布、および港内での堆積速度分布を予測した。降雨時の濁水については、流入負荷や懸濁粒子の粒径分布の実測値を参照した。

濁りに対する生息限界水質が設定されれば、シミュレーション結果と比較し、造礁サンゴ保全や移植の容易な水域範囲を知ることができる。石垣島での測定例を参考にすると、那覇港南部の河口周辺でやや不適の傾向が推察された。河川からの流入物質は港内に薄く広がるものの、周辺防波堤に遮られ、沖合いには開口部から出てゆくことが分かった。計算した流れ場の中では、放出された幼生は数km沖合いを岸沿いに南北に移動するようであった。沖合いの外礁は、元来生息サンゴの被度や活性が高いが、周辺の南北礁域との連結上も重要であることが推察された。

キーワード：サンゴ礁、降雨時流入SS負荷、濁り拡散計算、幼生の漂流計算、水域の特徴付けと区分け

\*海洋水理部海水浄化研究室長

## 1. はじめに

サンゴは、自らは光合成を行わない動物で、刺胞動物門に属し、良くみられるものは主に花虫綱六放サンゴ亜綱イシサンゴ目に属する。石灰質の骨格を有するサンゴを、硬質サンゴと呼ぶ。単一の個虫が独立して生息するものを単体性と称し、多数の個虫が融合しあって集団を作るものを群体性と呼ぶ。群体性のサンゴは、1個の受精卵から生じた個虫から、出芽・分裂等の無性生殖により増殖し、分離することなく集団を作る。単体性であれ群体性であれ、共生する褐虫藻を持ち成長速度の大きなものを造礁サンゴという。サンゴ礁<sup>サンゴ</sup>は、サンゴの石灰質骨格が堆積してできた浅い岩礁である。作用波浪に抗した強度と成長速度を有するサンゴ群集が礁の枠組みを作り、間隙を小サンゴ片等が埋め、石灰藻のセメント作用等により岩礁が形成される。サンゴ群集は、自らが形成した石灰質の礁 (reef) の上に生息するようになる。イシサンゴ目以外にも礁を形成するサンゴはある。

造礁サンゴの地理的な分布を左右する最も大きな環境要因は表面海水温度であるとされ<sup>2,3,4</sup>、赤道付近の低緯度温暖海域を中心に観察される。温度の中でも、生殖の最低温度が特に重要であり、冬場の水温がある程度以上必要である。太平洋におけるサンゴ礁の分布と深く関係している。わが国では、黒潮沿いの房総半島館山を北限に伊豆半島・紀伊半島・高知県沖でもサンゴ群体は観察されるものの、地形としてのサンゴ礁は琉球列島を中心に見られる。固着底質の性状や波当りの強さなどに応じて、各種のサンゴが樹枝状・葉状・塊状・平板状の群体を作る。

サンゴ礁の形状では、①海岸線に接するか浅い礁湖をへだてて発達する裾礁、②海岸線から深い礁湖をへだてて沖合に発達する堡礁、③大洋の中に中央島を欠き環状に礁が発達する環礁、の3つが主要なものである。サンゴ礁地形は造礁サンゴの成長と関連深いため、各地のサンゴ礁地形の平面形や断面形とその構造は、環境勾配に従って系統的な変化を示しながら、相互に似ている点がある。風上側と風下側で形状にやや違う地域もある。海岸線から外洋に向っての裾礁断面地形は概ね次のようである。

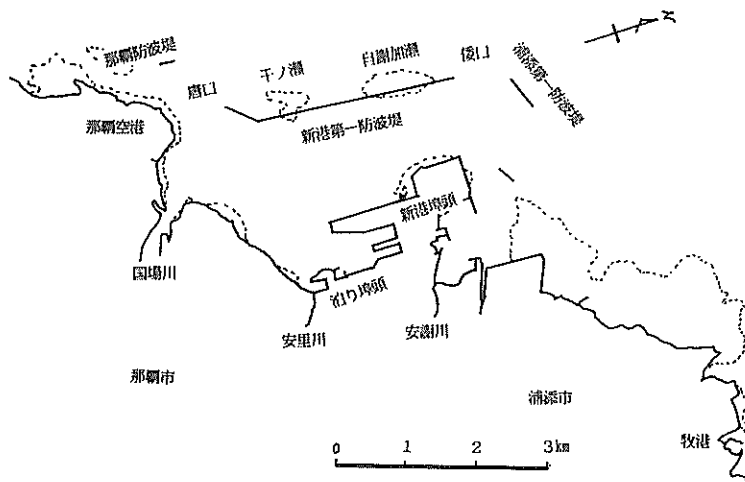
まず、礁原と呼ばれる平坦で浅い瀬が広がる。礁原の端部を礁縁と呼び、風当たりや波の作用が強い場所となる。貿易風帯のサンゴ礁では、風上側に石灰藻嶺が形成される。礁縁を越えると外洋に向かって急に深くなり、このスロープを礁斜面と呼ぶ。礁斜面は、サンゴの生息被度が高く、成長の最も活発な部分であることが多い。

外洋側の礁斜面は急深であるため、少し離れると水深が深くなり十分な光が得られず、サンゴの生息や成長も急減する。礁縁に守られた広い礁原内は、水深が浅く静穏であり、底質の粒度が細かく、水温・塩分の変動や分布変化も大きい傾向がある。岸から沖に向っての環境条件の変化・礁斜面に沿っての水深増加による環境条件の変化等により、生息サンゴ種や生息量の帯状の分布が説明される。

サンゴの生活史の中では、出芽・分裂といった無性生殖のほか、有性生殖の時期もある。雌雄同体もしくは異体の両ケースがあるが、成熟した親ポリープは卵と精子を作り、受精卵は発生を進め、やがて幼生になる。幼生は潮に流されながら浮遊し、適切な底質を見つけると口に相当する部分を上に向けて着底する。着底した子ポリープは、無性生殖によりポリープを増やし群体を作る。海域には、卵と精子とが放出されるものもあれば、受精後の幼生を放出するものもある。卵の大きさは300~500  $\mu\text{m}$ 程度である。地域にもよるが、生殖時期には年周性や月周性がある。

細胞間に共生する藻類のおかげで、サンゴ礁生態系は、非常に高い生産力を有している。地形的な特徴からサンゴ礁内は多くの動物の隠れ場所にもなり、微小有機粒子やサンゴ破片もトラップされ易い。潮間帯には、多種の貝類が見られる。サンゴ礁の保全には、造礁サンゴの生息に適する環境条件の維持が必要になる。造礁サンゴの地理的生態的分布に対する影響因子は、光・粒子堆積・塩分・水温・作用波浪・共存動物などである。共生藻の生息が阻害されると造礁サンゴも活性を失う。また、オニヒトデをはじめとして、造礁サンゴを捕食する生物もいる。

ここでは、沖縄県那覇港周辺海域を対象に選び、造礁サンゴの保全に関し、水理学的な手法の適用を試みてみた。港周辺の海域の内、サンゴ保全や移植に適した海域を選定し評価するための基礎資料の一部としようとするものである。まず、対象海域の水質及び造礁サンゴ分布を概観し、次いで港周辺の海水の流れ・海水交換・および河川からの流入懸濁懸浮遊物質の拡散の様子を計算してみた。また、主要なサンゴ生息域から放流したマーカ一の軌跡を追跡し、放卵放精後の幼生の行方を推測してみた。検討は水理的な検討を中心になされており、生物学的・生態学的な考察・配慮は不十分であると思われる。実際の計画策定などに際しては、更に専門的な検討が多角的になされることが必要であろう。



図一1 検討対象域周辺図

## 2. 那覇港の水質と造礁サンゴ生息の現況

### 2.1 水質現況

那覇港は、北緯26度・東経128度付近の那覇市西岸に位置し、西に向って外海に開いている。港湾区域は岸沿いに南北に延びており、港内の静穏度の確保のために防波堤により囲まれている。図一1に那覇港周辺の様子を示す。主な流入河川は、国場川・安謝川等であり、国場川を除いてはいずれも流量の小さな都市河川である。港の南端部に流入する国場川は、河口から北西向きに沖合いの開口部（唐口）を望んでいる。唐口から北へ延長3km程の新港第一防波堤が延び、北側の開口部（後口）に至っている。後口をはさんで、北に浦添第一防波堤が配されている。

港内水質に関しては、沖縄県が公共用水域の水質測定計画に基づく調査を毎年実施している。この結果<sup>3)</sup>によれば、那覇港内のうち、国場川河口（測点33那覇港内）・安里川河口（測点35 泊港内）でややCOD・大腸菌群数が大きく、それぞれ年平均で2mg/lと $5 \times 10^4$ MPN/100ml程度である。主な負荷源は、河川を経由して流出する都市排水と思われる。港内の他の水域では、おおむねCODが1mg/l前後であり、有機物濃度は低い。また、那覇市等の水質調査によれば、港内～浦添市地先海域にかけてのSSは、概ね1mg/l以下程度で、河口部や浅瀬部を除いて極めて澄んでいる。

港内の水質分布は、港内の海水の流れと港内への汚濁負荷とによって影響されている。一般に港内の流れは、沖合いの黒潮などの海流、潮汐による潮汐流、季節風などの風の吹送、流入河川の淡水流入量などに影響される。

昭和63年那覇港港湾計画資料（その2）<sup>4)</sup>によれば、那覇港港内の流れは①沖合いの北上する恒流と、②半日周潮の潮流との合成で再現されている。沖合いの流れは、昭和57・59年調査によれば上下層とも流向がほぼ同じであり、流速値もあまり変わらない。水質分布からは、港内の流れは比較的良好で大きな流み域などはないように思われる。河口部近傍の水質分布は、河川流入負荷に大きく左右されているようである。

流入河川の水質は、同じく公共用水域水質測定結果によれば、年平均SS濃度は国場川河口で20mg/l、（国場川那覇大橋S59 SS：5-110mg/l 平均：20mg/l）安里川河口で10mg/l程度である。河口水質の変動は、SS等の濁り関連指標で大きい。一年間に観測されたSS濃度の最大値と最小値の比は、10～15倍ないし20倍に達することもあり、天候により大きく影響されていると思われる。ただし、港内流入各河川からの濁り負荷量と天候との関係については不明である。

### 2.2 造礁サンゴ生息現況

琉球列島は北緯24度～30度程に位置する。サンゴ生息の北限に近い緯度ではあるが、黒潮のおかげで、熱帯や豪州のグレート・バリア・リーフに匹敵する多様性のある生息地域となっている。いくつかの島ではサンゴ礁の分布や生態の研究が進んでおり、沖縄本島でも東側中城湾の調査<sup>3,5)</sup>が有名である。

琉球列島など太平洋の緑の島では、裾礁や堡礁が発達する。一般に、大洋の堡礁では岸と沖合い礁との間に水深数十メートルの礁湖が発達するが、沖縄では、沖合い裾礁外縁との間にある水面は浅い。礁縁が不明瞭な浅い海域には小さな離礁が散在する。岸側にも礁が発達する

ことがあり、これを内礁とよび沖合い側の外礁と対比している。外礁は比較的平坦な礁原と、内礁側・外洋側の両礁斜面を有している。内礁も平坦な礁原と礁斜面を有し、広い礁原上には岸近くに小規模な窪み（礁池）があることもある。裾礁は、内礁のみが岸に接して発達してきた地形である。内礁の礁原には、小型の海藻が絡み合って混生した海藻ターフも見かけられる。

沖縄のサンゴの生殖時期についてはいくつかの知見が得られている。ハナヤサイサンゴは、冬の4ヶ月を除く時期に、新月から上弦の月に幼生を放出する。ショウガサンゴは、満月から下弦の月に幼生を放出する。ミドリイシサンゴなどの放卵放精は、夏期の満月からの約1週間の期間に集中する。産卵は日没後に起こり、沖縄では上げ潮期に同調しているという<sup>3)</sup>。

昭和59年度に沖縄総合事務局の実施したサンゴ被度調査によれば、那覇港周辺では図-2aに示すA~Lの礁がみられる。この内、C（干ノ瀬）、E（自謝加瀬・堤外）、F（自謝加瀬・堤内）、G（那覇新港・南西護岸）

で生息サンゴの被度が高く、その主要な種はイシサンゴの1種であるミドリイシサンゴであった。C・E・F等の沖側の礁には、卓状のミドリイシサンゴも見られた。港内側の礁には、比較的濁りに強いといわれているハナヤサイサンゴ等も見られる。新港埠頭と自謝加瀬とを結ぶ東西の断面を、海図よりプロットして図-2bに示す。埠頭脇より礁原が延び、やや深くなった海域をはさみ再び自謝加瀬のサンゴ礁部で浅くなっている。自謝加瀬の外洋側の礁斜面は徐々に深くなり、瀬の2~3km沖では水深60m程度になっている。この海域の岸沿いに張り出した各礁も、岸側浅瀬（平坦な礁原部）での生息サンゴは少なく、海水とよく接している急深な沖側端で生息サンゴ被度が大きい傾向がある。沖合いに瀬をなしている礁でも瀬の端部肩で生息サンゴ被度が大きい傾向がある。南北に延びる新港第一防波堤は、自謝加瀬・干ノ瀬の礁原にはほぼ沿って整備されている。

この海域のサンゴ生息にとっての環境上の問題点は、陸からの流出土による被覆・濁りによる水中照度の不

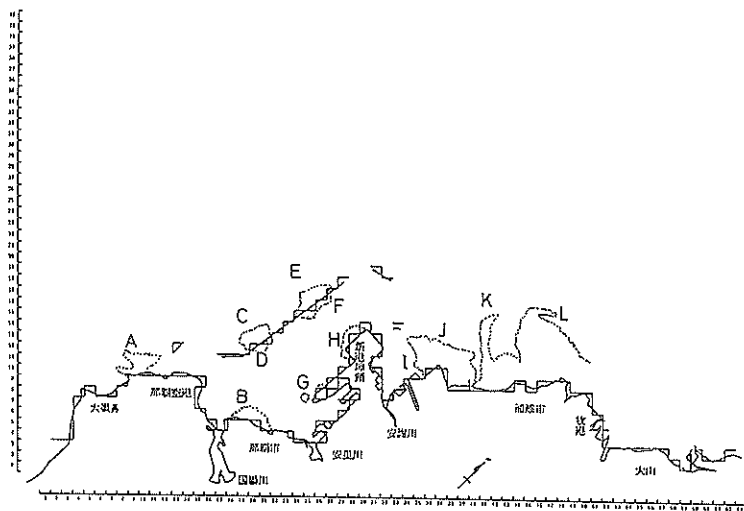


図-2a サンゴ礁の位置区分（A~L）那覇港工事事務所調べによる

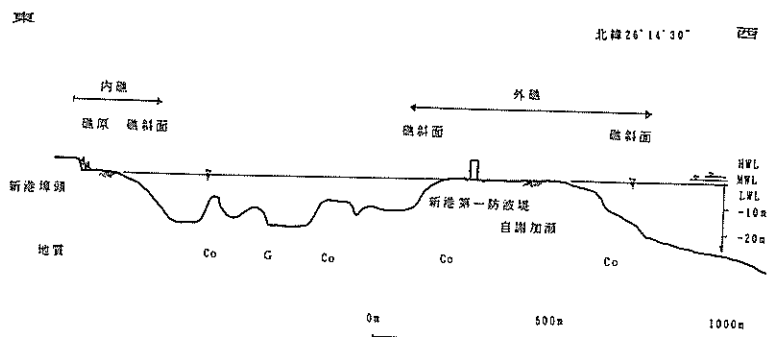


図-2b サンゴ礁域の断面 新港埠頭から新港第一防波堤を経て外海側まで

表一1 主要な検討課題

項目	対応策	解析方法	評価基準
濁り濃度	流入負荷削減 希釈・拡散	濁りの拡散計算 海水交換率比較	濃度低いほど良い
濁りの沈積	流入負荷削減 海水交換促進 サンゴ礁域への 流れ込み防止	濁りの拡散計算 海水交換率比較	沈積少ないほど良い 交換大きいほど良い サンゴ礁域で沈積が 少ないほど良い
オニヒトデ	オニヒトデ発生の抑制	不明	少ないほど良い
サンゴの 増殖維持	増殖基盤の維持 卵放出能の維持 礁域のゾーニング 移植・礁の造成 共生生態系の維持	不明  (追跡計算例)	(浅い水深に基盤) (母礁の活性維持) (礁間の結び付き) (着礁増殖の向上) (水質・水温維持)

足・陸からのその他の汚濁物質や低塩分水による影響・オニヒトデによる食害などが考えられる<sup>2,3)</sup>。環境上の配慮事項を表一1にまとめる。

岸沿いには、濁りに比較的強い種が生息するようであり、堆積粒子の種類や量によっても造礁サンゴの粒子排除能力も異なるとされている<sup>3)</sup>。流出土の堆積速度と生息率との関係や濁り濃度と生息率との関係などについては、実験室での結果が天然のサンゴの振る舞いにまでは適用できないといわれ<sup>3)</sup>、不明点が多い。シルト分以下の微細な濁りの影響が大きいとされている。石垣島東海岸の裾礁を調査した例では、赤土堆積量 $0.06\sim 0.1\text{g}/\text{cm}^2$ 以下での海域では生息生物が比較的健全であったとされている<sup>3)</sup>。サンゴは外洋性であり、生息に適した塩分は34~35プロミルといわれている。那覇港内の塩分は、河口付近の浅い水深部を除いては、通常この値の範囲内にある。現在のサンゴ生息を維持する為の環境上の目標や基準値は、確定されていない。また、オニヒトデは、外礁に良く生息するミドリイシサンゴを好み、外洋側の礁斜面・礁原・岸側礁斜面の順に食い進むようである<sup>2,3)</sup>。どのような水質環境条件下でよく発生するのか等、オニヒトデの駆除や食害防護方法に関連する特性は十分には判っていないようである。

### 3. 数値計算の方法

#### 3. 1 数値計算モデル

数値モデルにより、海水の流れ・海水交換・サンゴ幼生の漂流経路予測・懸濁態浮遊物質拡散のシミュレーションを行う。各モデルによる計算方法を次に示す。

#### (1) 流れの計算

非圧縮粘性流体の運動方程式および連続方程式を基本とし、水深方向に平均化した単層の差分法(ADI法)<sup>9,10)</sup>に依っている。海域での密度の効果、波による浅瀬での流れ効果、風による効果等はここでは無視している。以下の計算を考慮し、一辺250mの格子間隔としている。島や堤防端部での渦流の効果は再現していない。

#### (2) 海水交換および漂流経路追跡計算

##### a) マーカー追跡モデル

上記流れの計算結果を用い、流れ場の中にマーカーを投入し、流れによる漂流位置を時々刻々追跡するモデルを用いた。マーカーの位置は、海水の流れ、乱れやシア一による分散、海水とマーカー粒子自身の比重差による浮上もしくは沈降、の3つの作用により変化する。海水の流れとしては(1)の単層計算結果を用いる。水塊の密度差や地形に起因した、物質の収束や分散効果についてはここでは考慮していない。同じ位置にマーカーを同時に多数投入すると、計算時間が進むに連れて、分散の効果で水平方向・鉛直方向に広がりを持つようになってくる。ここでは、その広がり代表点(厳密な意味では分布の重心ではないが)に相当する位置の移動を追跡していることになる。マーカー粒子自身の沈降速度はゼロとする。

差分法による流れ場の計算結果は、時間的・平面的に飛び飛びの格子位置での値を与えている。マーカーの移動先は必ずしも格子点にならず、マーカー位置での流速値について何らかの推定が必要となる。ここでは、平面的には、近傍4格子点からの距離の二乗(面積)に逆比例させた重み付き平均による内挿法に依った。また、時



間的な制約を少なくするため、各格子点での一潮汐分の流速計算値をフーリエ展開し、振幅と遅れ角から任意の時間刻みで流速を推定できるようにした。簡便のため、展開は、定常流、6時間周期流、12時間周期流の3項までとした。(1)での計算の数倍程度の時間刻みで追跡したところ、スムーズな流跡が描けることを確認した。なお、この計算では、陸地もしくは開境界にたどり着いたマーカーはその場にとどまり、沖側もしくは計算区域内へ流れ戻ったときには再び漂流を始めることとした。

#### b) 計算の実施

このマーカー追跡モデルを用いて、海水交換率の算定およびサンゴ幼生の漂流経路の算定を行った。海水交換の計算では、当初港内の格子点に格子点毎に1個ずつ一様にマーカーを投入し、港内に残留しているマーカー数の減少率より比較した。水深の浅い格子点にも深い格子点にも同じように1個のマーカーを置いている。このため、水理模型実験でよく用いられる港内水質平均濃度の減少率に比べ、浅い水深での海水交換効果がより大きな影響を与える傾向がある。

幼生追跡計算では、幼生の遊泳能力や沈降速度の知見がない現状なので、浮遊能力も沈降速度もゼロとして、卵もしくは幼生に見立てたマーカーの流れる方向を比較することとした。流れの急変部を通過した後や長期の漂流後には、マーカー位置は幼生群分布の代表位置(分布の重心)から大きくずれてくる可能性がある。

#### (3) 浮遊けん濁物拡散計算

ADI法による単層拡散計算モデル<sup>9,10)</sup>を基本に、濁り粒子の沈降による堆積を考慮する。後述のように、流入濁り粒子の粒径が微細であることから、対象海域内での濁り粒子の鉛直分布はほぼ一様とみなせる。単層モデルでも浮遊拡散状況の概要把握は可能と思われる。そこで、粒子は水柱中に一様濃度で分布しているとした。濁り粒子の代表沈降速度を与え、時間ステップ毎に粒子を沈降させている。濁りは、水深に対する時間ステップ期間中の沈降距離の比だけ水塊から除去され、底面に堆積するとした。底面に堆積した量を除き、粒子は再び水柱に一様濃度で分布する。

### 3. 2 計算ケース

#### (1) 流れ計算

流れの計算は以下のケースについて実施し、変化を比較した。水質の悪化時期・サンゴの放卵時期を勘案し、夏期の流れを再現しようとしているが、この海域での「平均的な夏期の流れ」についての知見は少ない。この季節は、穏やかな東～南風が卓越するものの、しばしば台風が襲来する季節でもある。

地形条件：

1. 現況地形 (1988年時点の地形を基本とした)
2. 港湾計画に基づく将来地形
3. 将来地形の那覇防波堤900mのうち北側500mを透過堤(透過率20%)とした場合

河川流量：

1. 晴天常時の条件として平均流量
2. 降雨時の条件として、降雨観測より推定した特定の降雨時の流量

潮汐：

沖合い海流による北上流に加えて、

1. 大潮 (M2+S2)
2. 平均潮 (M2)
3. 小潮 (M2-S2)。

計算は、地形条件3ケースにつき、常時の河川流量で潮汐3ケースずつ計9ケース行った。さらに、降雨時の条件では平均潮に対し地形条件3ケースについて行った。結局、表-2に示す通り総計12ケースとなる。

表-2 流れ計算ケース

ケース番号	地形条件	潮汐条件	河川流量条件
1	現況地形	平均潮 M2	通常時
2	現況地形	大潮 M2+S2	通常時
3	現況地形	小潮 M2-S2	通常時
4	現況地形	平均潮 M2	降雨時
5	将来地形	平均潮 M2	通常時
6	将来地形	大潮 M2+S2	通常時
7	将来地形	小潮 M2-S2	通常時
8	将来地形	平均潮 M2	降雨時
9	将来地形透過堤	平均潮 M2	通常時
10	将来地形透過堤	大潮 M2+S2	通常時
11	将来地形透過堤	小潮 M2-S2	通常時
12	将来地形透過堤	平均潮 M2	降雨時

#### (2) 海水交換計算

上記の流れの12ケースについて、マーカーを港内に一様投入する。投入の潮時は、満潮潮止り時(以下満潮時と称する)、干潮潮止り時(以下干潮時と称する)の2ケースとし、別々に独立して計算する。

#### (3) 漂流計算

上記の流れの12ケースについて、代表的なサンゴ礁位置4箇所からマーカーを投入する。サンゴの放卵放精・幼生の遊泳の開始時期については、満潮時、上げ潮時、干潮時、下げ潮時、の4時刻に各々投入してみた。つまり、各流れについて、投入潮時を変えて4個ずつ計16個のマーカーを個別に追跡計算した。

#### (4) 濁り計算

表-3 濁り計算ケース

ケース番号	地形条件	潮汐条件	河川流入条件	代表沈降速度 m/s (代表径 $\mu$ m)
1	現況地形	平均潮 M2	通常時	$6.4 \times 10^{-5}$ (9)
2	現況地形	平均潮 M2	降雨時	$2.5 \times 10^{-5}$ (5)
3	現況地形	平均潮 M2	降雨時	$40. \times 10^{-5}$ (20)
2 + 3	現況地形	平均潮 M2	降雨時	(2と3のケースの合成)
4	現況地形	平均潮 M2	降雨時	$0.0 \times 10^{-5}$ (無沈降)
5	将来地形	平均潮 M2	通常時	$6.4 \times 10^{-5}$ (9)
6	将来地形	平均潮 M2	降雨時	$2.5 \times 10^{-5}$ (5)
7	将来地形	平均潮 M2	降雨時	$40. \times 10^{-5}$ (20)
6 + 7	将来地形	平均潮 M2	降雨時	(6と7のケースの合成)
8	将来地形	平均潮 M2	降雨時	$0.0 \times 10^{-5}$ (無沈降)

上記流れのうち、平均潮のケースについて、常時と降雨時とを比較する。地形条件としては現況地形と将来地形の2ケース、河川流量としては常時と降雨時の2ケース、計4ケースの流れを対象とする。

降雨時の流入濁り負荷は、粒径分布の実測をもとに、沈降速度の大きめのグループと小さめのグループとの2グループに分画し、各々の粒子の拡散沈降を計算する。また、比較のため、沈降速度をゼロとしたときの濁り濃度の分布も計算する。つまり、降雨時に対しては異なる沈降速度3ケース分の計算を実施する。ただし、常時の濁り負荷量はごく僅かであるため、沈降速度の分画をせず、一つの代表沈降速度を与えて拡散沈降計算を行う。常時の計算は、この沈降速度のみの1ケースとした。計算ケースを表-3にまとめた。

### 3.3 入力条件

#### (1) 計算範囲

対象海域の流れが、潮汐作用と沖合い海流の作用とで再現されるので、沖合い海流を考慮しやや沖合いまでを計算対象範囲とする。また、マーカー追跡や拡散分布がスムーズに計算できること、地形変化が表現できることなどを考慮し、格子間隔を小さめにとることとする。そこで、計算範囲を沖合い10kmまで含む $10\text{km} \times 15\text{km}$ の範囲とし、格子間隔を250mとした。総格子点数は $40 \times 60$ 程度であるが、陸域を除く計算範囲の格子点数は約2000である。

対象海域内の最大水深はほぼ200mであり、安定条件からADI法の期間刻み( $\Delta t$ )は最大40秒程度となる。ここでは、30秒とした。

#### (2) 地形条件

現況地形(1988年)と水深を図-3に、港湾計画に基づく将来地形と水深を図-4に示す。図中の矢印は、陸からの淡水流入点を示す。河川以外は、下水の終末処理場な

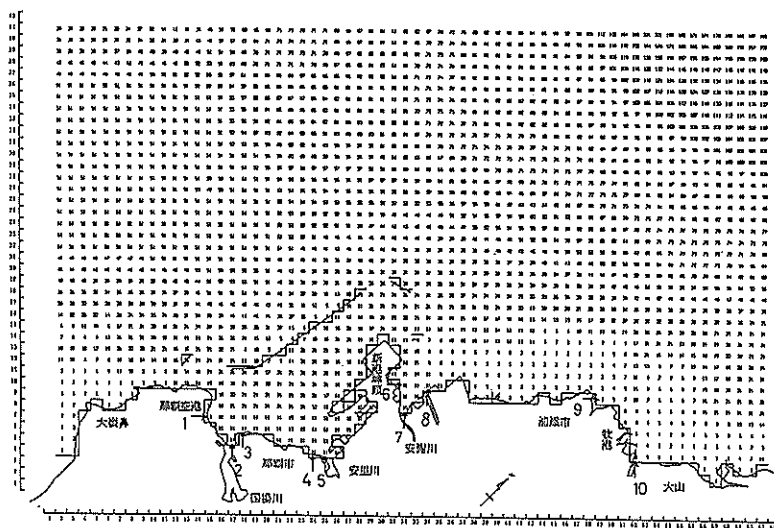


図-3 現況地形と水深(単位:m) 河川等流入点位置を矢印(1~10)で示す

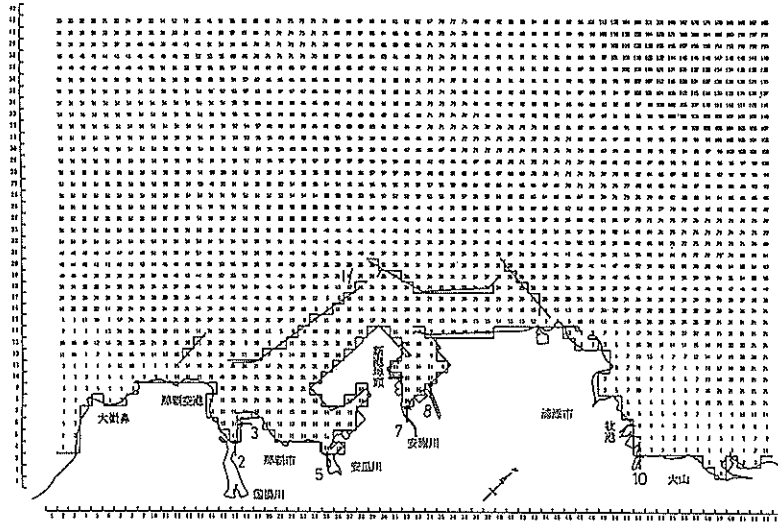


図-4 将来地形と水深(単位:m) 河川等流入点位置を矢印(1~10)で示す

どである。図-4中には、那覇防波堤の延伸、浦添第一防波堤の延伸、および浦添第二防波堤の設置などの様子がみられる。図-4の将来地形のうち、那覇空港地先の那覇防波堤のうち、北側500m分を20%透過とし、将来地形透過堤ケースの地形とする。

(3) 流れ計算の入力条件・境界条件, 河川流量

潮汐流と恒流とを起こすための水位を沖合いで与え、流れを再現する。潮汐流は半日周潮(M2, S2)に対応させ、12時間周期の水位変化を与えることで再現する。図-5のA~B間, C~D間に異なる位相で同じ水位振幅を与え、B~C間は内挿した水位をあたえている。水位振幅は、大潮時はM2分潮の振幅とS2分潮の振幅の和、小潮時は差、平均潮時はM2のみ、をそれぞれ与える。那覇港

表-4 河川等淡水流入量(単位:m<sup>3</sup>/日)

ユニット 番号	現況地形		将来地形	
	通常時	降雨時	通常時	降雨時
1	48	48	0	0
2(国場川系)	292,000	699,000	293,000	699,000
3	82,300	82,300	239,000	239,000
4	380	380	0	0
5(安里川系)	29,100	152,000	22,700	145,000
6	140	140	0	0
7(安謝川系)	17,300	108,000	11,200	103,000
8(小湾川系)	7,300	46,200	4,700	43,600
9	190	190	0	0
10(牧港川系)	13,000	82,700	8,700	78,300

ユニット番号は、図-3.4の流入位置の番号に対応する。

国場川系は国場川とノ波川など、牧港川系は牧港川と比屋良川などから構成される。

の潮位の調和常数から、この海域でのM2, S2の振幅はそれぞれ58.0cm, 24.0cmとした。恒流は、図-6に示す一定水位を境界に与えて起こしている。

対象海域に流入する淡水流入量は僅かである。主要な河川、下水放流口等に付き平均流量を常時の流量として

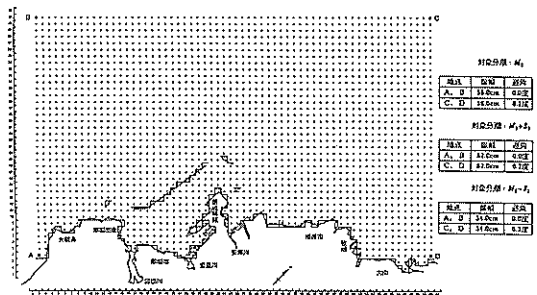


図-5 潮汐流再現のため境界条件を与える位置と振幅・遅れ角

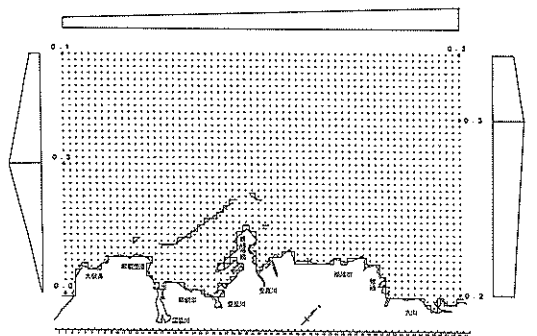


図-6 沖合い海流再現のため境界条件を与える位置と水位分布(単位:cm)

与えている。平均流量は、昭和59年現況(港湾計画資料<sup>9)</sup>)等を参照にして表-4のように与える。降雨時の流量は、沖縄総合事務局那覇港工事事務所による平成2年2月14日の降雨時測定値をもとにした。この時の降雨は、7時間継続し、降雨量42mm/日に達した。那覇地方では、降雨量30mm/日を越える日数は、夏期には2~3日/月であり、年間を通して22日/年程度<sup>11)</sup>である。一定降雨強度のまま12時間継続する降雨として表-4のように推定し、与えた。推定法は本論文末の付録.Aを参照にされたい。河川・下水放出口等により淡水の流入がある位置を、図-3, 4に矢印で示してある。図中の番号は、表-4のユニット番号に一致している。

流れが安定するまでの計算継続時間は36時間、海底摩擦計数( $\gamma_b^2$ )は0.0026、水平渦動粘性係数は $1 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ とした。入力条件をまとめて、表-5に示す。

表-5 流れ計算入力条件

パラメータ諸元	入力値
計算領域	10km×15km 約2000格子
格子間隔	250m
時間刻み	30秒
計算時間	3 潮汐分 (36時間)
海底摩擦係数	$\gamma_b^2=0.0026$
水平渦動粘性係数	$A = 1 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$
境界条件	潮汐流と恒流の合成(図-5.6参照)

#### (4) マーカーの投入位置

港内の格子点に一樣に投入する。投入位置を図-7, 8に示す。図-7は現況地形、図-8は将来地形に対する位置である。類似の海面での海水交換を比較するため、できるだけ同じ位置に投入するようにしている。将来地形では埋め立てられた部分もあり、マーカー数(157個)は現況地形ケース(176個)よりもやや少ない。追跡計算の時間刻みは60秒とした。

#### (5) サンゴ幼生の投入位置

サンゴ生息分布調査結果を考慮し、図-9に示すA~Dの4箇所の位置(A:自謝加ノ瀬・港内, B:自謝加ノ瀬・港外, C:西3丁目地先, D:浦添米軍施設地先)から幼生を投入する。幼生の浮遊期間は、一日から長い場合は一ヶ月程度と言われている<sup>12), 13)</sup>。計算対象範囲の大きさなども考慮し、漂流位置の追跡期間は48時間とする。追跡計算の時間刻みは、やはり60秒とした。

#### (6) 濁りの負荷量と粒径分布・代表沈降速度

この地域で降雨時の河川からの流入濁りについては、平成2年の那覇港工事事務所観測以外に知見が見あたら

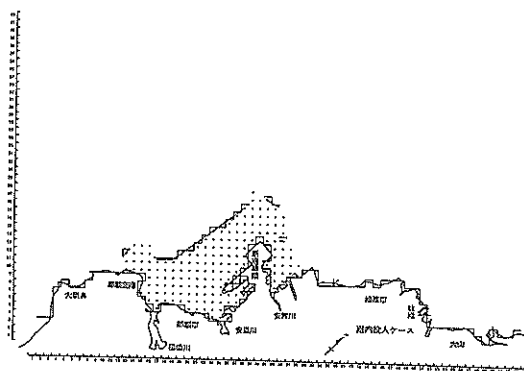


図-7 現地地形 海水交換算定用のマーカー投入位置

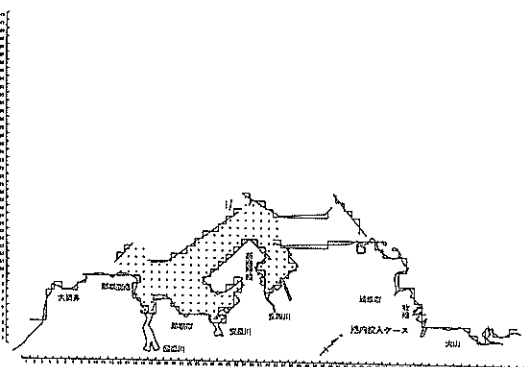


図-8 将来地形 海水交換算定用のマーカー投入位置

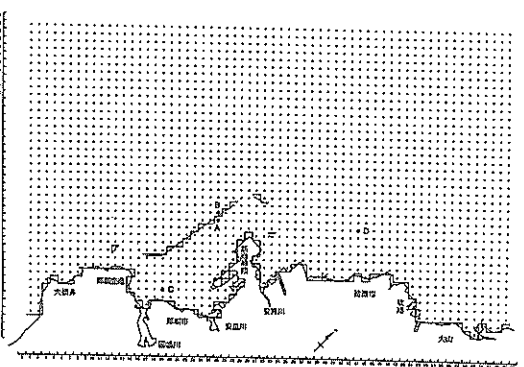


図-9 漂流幼生投入位置 (現況地形・将来地形とも投入座標は同じ)

ない。文末の付録.Aの推定に基づき、12時間当りのSS負荷量を表-6のように与える。粒径分布に関する観測結果より、各流入ユニット毎に濁りのフラクションを次のように与えた。常時の負荷では代表粒径を $9 \mu\text{m}$ とし、一律に $6.4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ の沈降速度としている。一方降雨時では、 $10 \mu\text{m}$ 以下の微細粒子と $10 \mu\text{m}$ 以上の粒子にと分画し、2成分で粒径分布を代表させる。 $10 \mu\text{m}$ 以下の径粒子

表一六 濁り流入負荷量, 各分画割合, 分画代表沈降速度

(12時間当たりの負荷)

ユニット 番号	現況地形		将来地形		代表沈降速度 $\times 10^{-5} \text{m/s}$ (代表径 $\mu\text{m}$ )
	通常時負荷	降雨時負荷	通常時負荷	降雨時負荷	
1	0.0002t/12h		0t/12h	0t/12h	6.4 (9)
2 (国場川径)	1.46		1.47		2.5 (5)
		0.0002t/12h		0t/12h	6.4 (9)
3	0.411	171.2(35%)	1.20	171.4(35%)	2.5 (5)
		318.0(65%)		318.2(65%)	40.0 (20)
4	0.002		0		6.4 (9)
		0.002		0	2.5 (5)
5 (安里川径)	0.146		0.144		6.4 (9)
		0.911(20%)		0.873(20%)	2.5 (5)
6	0.001	3.644(80%)	0	3.491(80%)	40.0 (20)
		0.001		0	6.4 (9)
7 (安謝川系)	0.087	1.302(20%)	0.056	1.230(20%)	2.5 (5)
		5.210(80%)		4.920(80%)	40.0 (20)
8 (小湾川系)	0.033		0.024		6.4 (9)
		0.554(20%)		0.523(20%)	2.5 (5)
9	0.001	2.217(80%)	0	2.092(80%)	40.0 (20)
		0.001		0	6.4 (9)
10 (牧港川系)	0.066		0.044		2.5 (5)
		0.992(20%)		0.940(20%)	6.4 (9)
		3.968(80%)		3.760(80%)	40.0 (20)

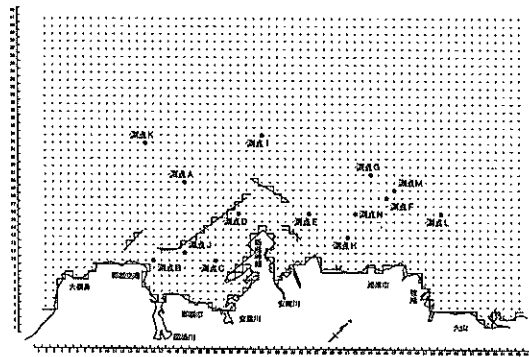
割合も表一六の中に掲げる。10 $\mu\text{m}$ 以下の微細粒子のグループは、代表粒径5 $\mu\text{m}$ とし代表沈降速度として2.5 $\times 10^{-5}\text{m/s}$ を与える。もう一方のグループには、代表沈降速度として20 $\mu\text{m}$ 粒子の速度40 $\times 10^{-5}\text{m/s}$ を与える。

#### 4. 計算結果

##### 4.1 流れの計算

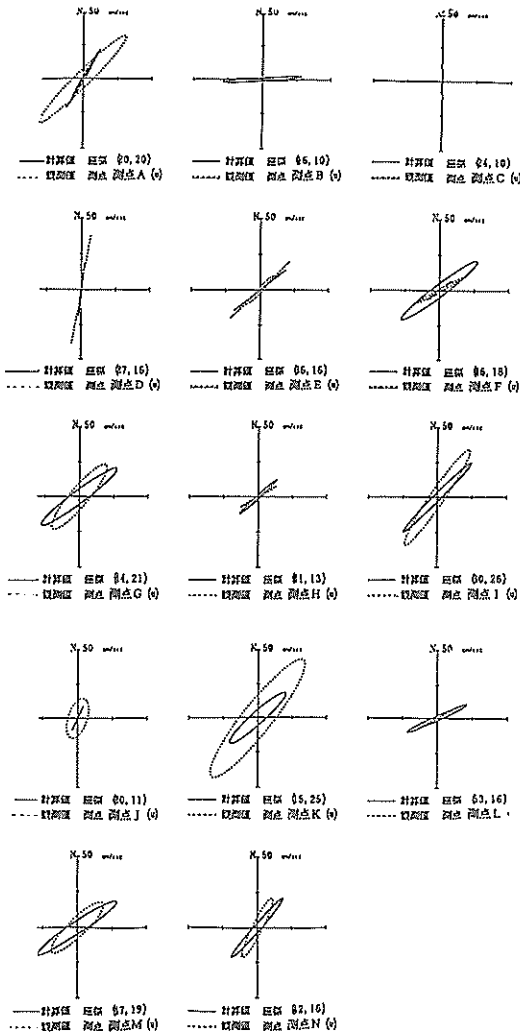
###### (1) 再現性

現況地形, M2潮+恒流, 常時の河川流量ケースに対する流れの計算結果を, 海域での実測値と比較する。図一10に潮流実測点の位置を示す。図一11に潮流楕円の实測との比較を示す。潮流楕円はほぼ再現できている。また, この計算結果の一潮汐分をベクトル合成した潮汐残差流を, 実測恒流成分と比較する。流速値が小さく見づらいが, 図一12のようになる。開境界に近い場所は境界条件の影響を大きく受けており, 再現性を期待できない。図一6で与えた開境界の水位条件の影響を受け, 計算結果



図一10 流況実測位置

による沖合いの残差流分布は複雑である。沖合い海域では潮汐流れが大きく潮流楕円が大きくなると共に, その時々海流や風によって恒流実測値も影響される。このため, 沖合い海域では残差流成分を実測恒流値と合せることは容易ではなかった。

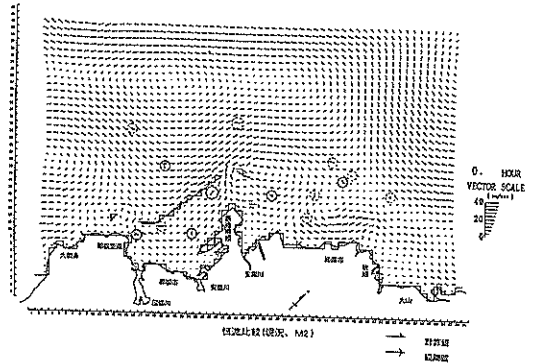


図一11 潮流楕円の計算結果と実測値との比較 (現況・平均潮・通常時河川流量)

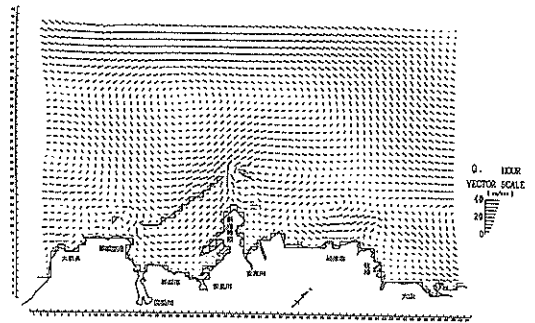
沖合いを除き港湾区域から地先沿岸部にかけては、現況の流れがほぼ再現できていると言える。しかし、陸域から5~6km以遠の沖合い、及び南北の開境界付近では残差流の再現ができていない。長期にわたる物質輸送は、残差流によって主に影響を受けているといわれている。残差流成分による長期物質輸送等の検討は、この区域では不正確なものとなる。また、陸に近い海域についても、こうした流れが形成されたとしたときの、種々の特性の検討であることに留意する必要がある。

(2) 残差流の主な成因

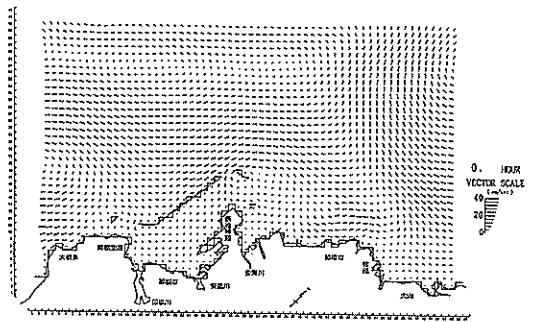
残差流の成因を見つめる。図一12によれば、新港第一防波堤に沿った北上流がみられ、港内でも那覇空港側から新港埠頭側への北上流がみられる。同じ地形・河川流量で潮汐振幅のみを変えたケースを図一13, 14に示す。



図一12 残差流の計算結果と実測値との比較 (現況・平均潮・通常時河川流量)



図一13 残差流分布 (現況・大潮・通常時河川流量)



図一14 残差流分布 (現況・小潮・通常時河川流量)

大潮時では図一13のように流向は同じで流速値が増加している。一方、小潮時には、図一14のように流速値が小さくなる。残差流は、恒流条件を与えた効果と潮汐自身の効果との合成として表されるが、沿岸・港内残差流には潮汐の効果も大きいことがわかる。また、ここでは結果を示さないが、同じ地形・潮汐条件での降雨時の残差流を晴天時と比較した。河口部直近でも、ほとんど変化がみられなかった。ピークを持つ流出曲線を平均流量として与えているためもあり、密度の効果を無視しているためもあり、この程度の降雨は海域の残差流計算結果に影響がほとんど無い。

### (3) 沿岸残差流の方向

現況・平均潮ケースの残差流を例に、流れのパターンを見る。沿岸では、岸に沿って概ね東→北向きの流れとなっている。安里川河口から新港埠頭にかけての岸沿い海域、安謝川河口部海域、牧港から大山にかけての海域、等部分的に流れの弱い海域がある。浦添米軍施設地先から新港埠頭北側の海域では、残差流は弱く南に向かう。新港第一防波堤沿いに北上してきた流れと合流後、北側開口部の倭口から沖に出、更に北に向かうことになる。

### (4) 地形による変化

地形の影響を比較する。平均潮時・将来地形での残差流を、図一15に示す。浦添市沖の浦添第一防波堤、北川の浦添第二防波堤に囲まれた海域での流れが弱まり、第二防波堤外では堤に沿う西向流がみられる。新港第一防波堤に沿う堤外の北向き流れは、浦添第一防波堤のはね出し部に当たり倭口から一旦沖合いに流れを変えるが、浦添第一防波堤沖前面に戻る傾向がある。さらに岸に近い水域では、国場川・安里川・安謝川の川口部で流れが

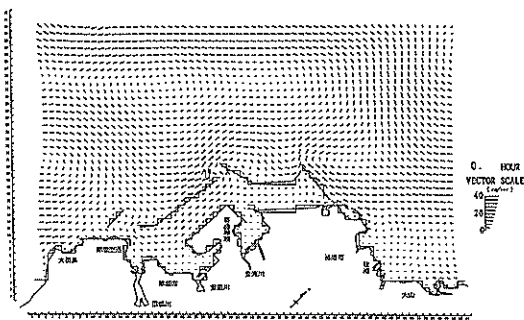
弱まり、牧港前面でもやや流速が落ちている。

将来地形で那覇防波堤の北側を透過堤にした時の残差流を図一16に示す。将来地形のケースと港内分布にほとんど変化が無い。透過堤近隣でも、開口部を回り込む流れが強くなり、残差流に対する透過の効果は明らかではない。

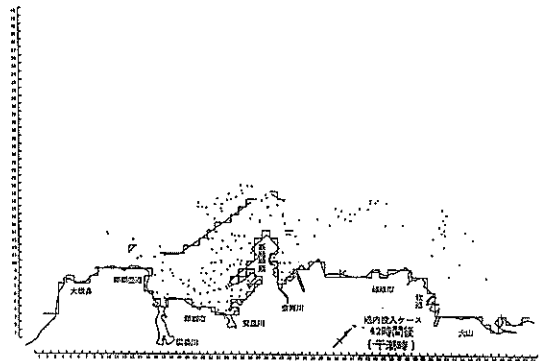
## 4. 2 見かけの海水交換の計算

### (1) 港内海水交換用マーカーの移動

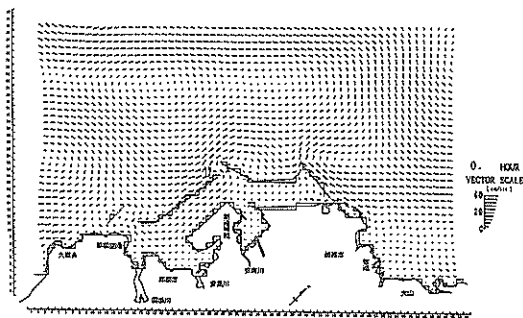
現況地形・平均潮(M2)での流れの場で、満潮時に港内に投入されたマーカーの4潮汐目の干潮時(投入後42時間経過時)位置を図一17に、4潮汐目の満潮時(48時間経過時)位置を図一18に示す。マーカー群は岸沿いに南北10km以上に延びて分布し、いずれも、マーカーが北→北東に流れ出ていることがわかる。また、図一17から図一18への沖合いマーカーの位置へ変化を比べると、上げ潮時には潮流に乗って大きく北東方向へ運ばれることもわかる。ここには図示しないが、干潮時に投入されたマーカーの42時間後(満潮時)と48時間後(干潮時)の位置を、満潮時投入と比べてみると、干潮時投入のマ



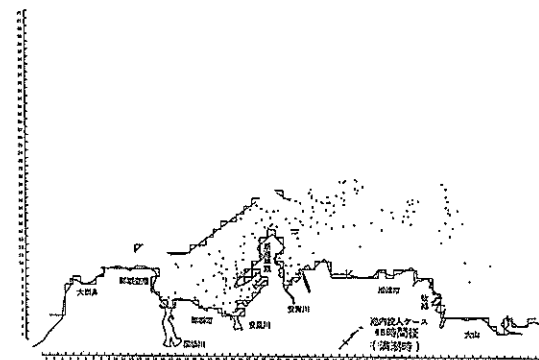
図一15 残差流分布 (将来・平均潮・通常時河川流量)



図一17 マーカー漂流位置 (現況・平均潮・通常時河川流量・満潮時投入42時間後)



図一16 残差流分布 (将来透過堤・平均潮・通常時河川流量)



図一18 マーカー漂流位置 (現況・平均潮・通常時河川流量・満潮時投入48時間後)

一カーは、投入後引き続き上げ潮に乗って北～東に流れるため倭口より港外に出やすく、港内残留数は図一17、18よりも少なくなった。

同じ地形条件・投入条件で、潮汐の大きさによる移動の位置の差を比較する。投入48時間後の大潮時のマーカの分布(図一19)、及び小潮時のマーカの分布(図一20)を示す。図一18と比べると、大潮時には沿岸沿いに大きく北東に流され、小潮時には移動距離は僅かである。いずれの潮でも、①安里川河口から新港埠頭にかけての海域、②安謝川河口海域など、流れの弱い水域のマーカは港内に留まる傾向が解る。国場川河口前面海域は、同じく流れの弱い海域ではあるが、安里川・安謝川の河口に比べとマーカが流されやすい。

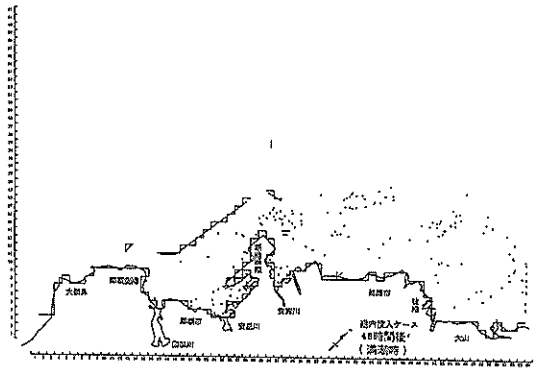
同じ地形条件で、河川流量の差異の影響を比較する。平均潮で降雨時のマーカの分布を、投入48時間後について示したのが図一21である。通常時河川流入量のケース(図一18)とほとんど同じ位置にある。この程度の降雨時河川流量では、マーカの移動にもあまり影響を与えていない。

## (2) 地形変化による移動状況の変化

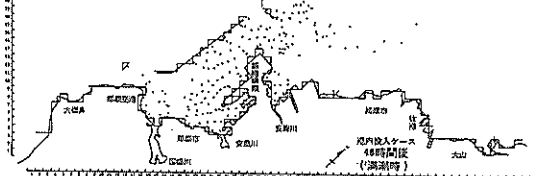
将来地形での分布を図一22に示す。満潮時に投入し、投入後48時間目の分布位置を示す。マーカの分布雲の広がり距離は、現況地形ケースよりも短くなっている。北側の浦添第一・第二防波堤で囲まれた海域は流れが遅くマーカの動きも緩やかである。港内のマーカは倭口から港外に運ばれるものが多く、沖側を第二防波堤沖側前面へと回り込むものが多い。しかし、現況地形ケースほどには大山・牧港沿岸には戻ってこず、沖合いを流れるようである。那覇防波堤の一部を透過堤にしたケース(図一23)では、将来地形ケース(図一22)とほとんど変わらないマーカ分布となる。

表一7 港内投入マーカの港内残留率

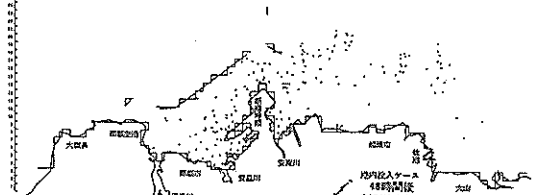
流れの # ケース	満潮時投入マーカ			干潮時投入マーカ		
	24h後	36h後	48h後	24h後	36h後	48h後
1 現況M2	0.72	0.64	0.55	0.76	0.69	0.58
2 大潮	0.62	0.51	0.39	0.60	0.53	0.45
3 小潮	0.88	0.84	0.75	0.89	0.85	0.80
4 降雨	0.73	0.65	0.55	0.76	0.67	0.56
5 将来M2	0.80	0.67	0.60	0.77	0.68	0.62
6 大潮	0.64	0.53	0.52	0.67	0.59	0.52
7 小潮	0.92	0.87	0.83	0.92	0.87	0.85
8 降雨	0.79	0.66	0.60	0.77	0.68	0.62
9 透過M2	0.78	0.66	0.59	0.77	0.69	0.63
10 大潮	0.64	0.52	0.52	0.67	0.57	0.50
11 小潮	0.92	0.89	0.84	0.90	0.87	0.85
12 降雨	0.78	0.68	0.59	0.76	0.69	0.62



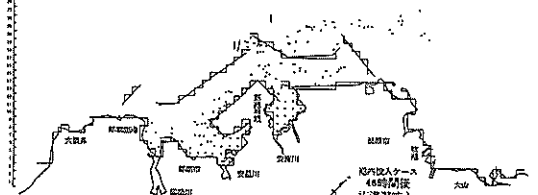
図一19 マーカ漂流位置(現況・大潮・通常時河川流量・満潮時投入48時間後)



図一20 マーカ漂流位置(現況・小潮・通常時河川流量・満潮時投入48時間後)



図一21 マーカ漂流位置(現況・平均潮・降雨時河川流量・満潮時投入48時間後)



図一22 マーカ漂流位置(将来・平均潮・通常時河川流量・満潮時投入48時間後)



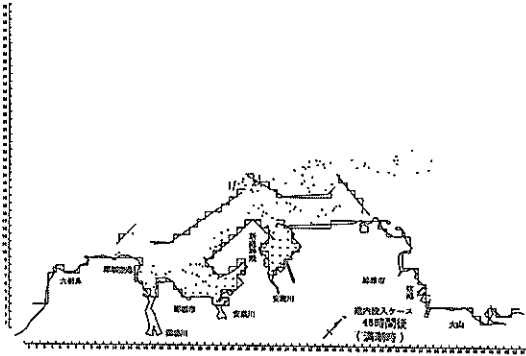


図-23 マーカー漂流位置 (将来透過堤・平均潮・通常時 河川流量・満潮時投入48時間後)

(3) 見かけの対流時間と見かけの海水交換率の算定

各ケースの投入後の港内残留率を計算すると、表-7のようになる。ここで港内残留率とは、投入格子点群のカバーする海域内に残っているマーカー数を当初投入したマーカー数で除した値である。残留率は、同じ地形条件では、小潮、平均潮、大潮の順に減少している。また、将来地形条件では、現況地形条件とほとんど同じ値となる。ほとんどのケースでは、満潮時投入に比べて干潮時投入では、僅かであるが残留率が小さくなる。上記4.2 (1), (2)で見てきた移動の様子をよく表現している。

港内残留率を投入後の時間に対してプロットすると、図-24, 25等のように指数的な減衰傾向が認められる。ただし、大潮のケースでは、残留マーカーが淀みにはまってしまうと、以後時間の経過があっても港外に抜けにくくなることもあり、残留率が36時間目以降やや減り難くなっているケースも見られる。片対数グラフでの減少の傾き (単位: 1/時間) を求め、一日当りの見かけの海水交換率と称し、値を算定してみる。小潮時には概ね0.1/日、平均潮時には0.2~0.3/日、大潮時には0.4~0.5/日と言った値となる。小潮時には、一日 (2 潮汐) につき港内投入マーカーの約1割ずつが外海へ逃げて行くこと

表-8 港内投入マーカーの滞留時間 (単位: 日)

潮汐	地形/投入時	現況	
		満潮時	干潮時
平均潮	M2	3.1	3.6
平均潮	M2降雨時	3.1	3.7
大潮	M2+S2	2.1	2.0
小潮	M2-S2	7.5	8.3

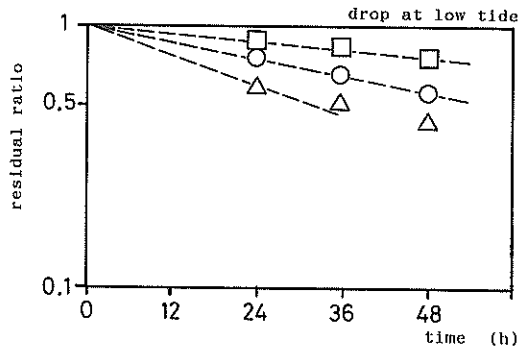
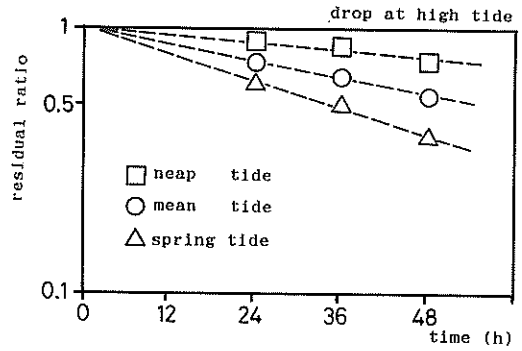


図-24 マーカー港内残留率が時間と共に減少する様子 (現況地形) 上段・満潮時投入, 下段・干潮時投入

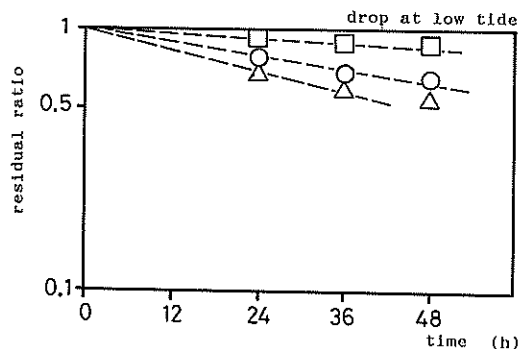
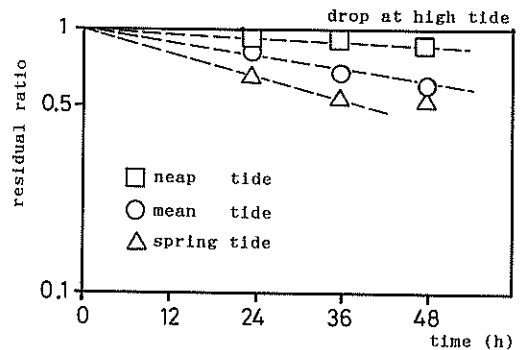
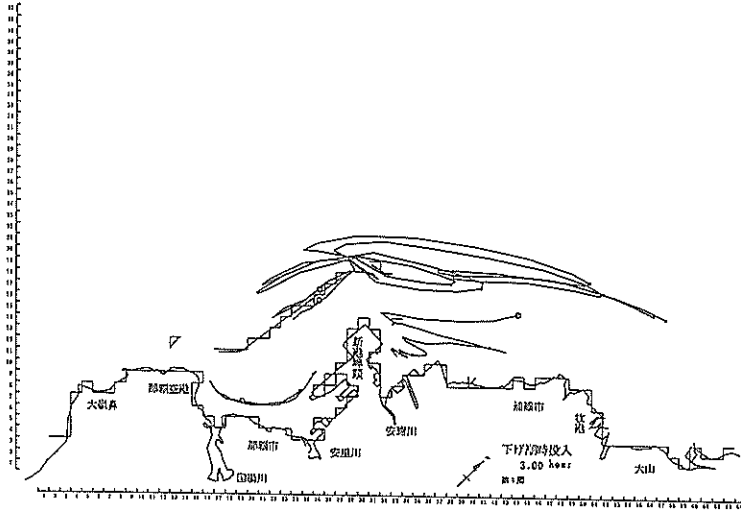
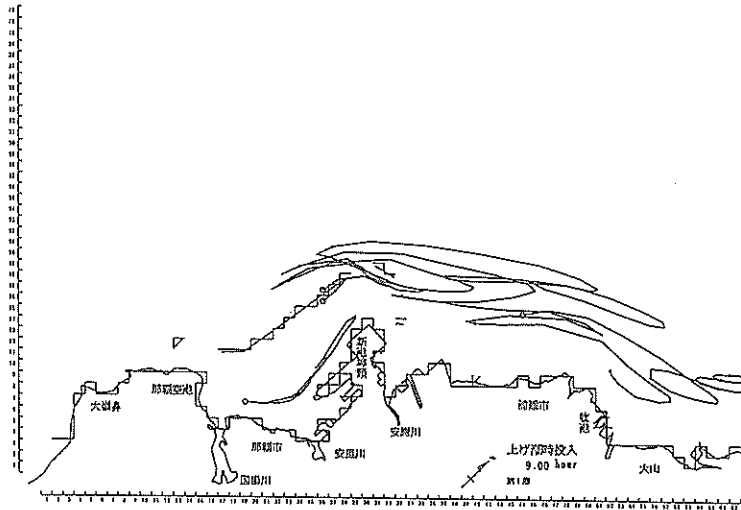


図-25 マーカー港内残留率が時間と共に減少する様子 (将来地形) 上段・満潮時投入, 下段・干潮時投入



図一26 幼生の浮遊追跡図（現況・平均潮・通常時河川流量・下げ潮時投入）



図一27 幼生の浮遊追跡図（現況・平均潮・通常時河川流量・上げ潮時投入）

になる。見かけの海水交換率の逆数を見かけの滞留時間と称すると、現況地形ケースでの見かけの滞留時間は表一8のようになる。平均潮で、3～5日の見かけの滞留時間となる。閉鎖性内湾などでの滞留時間値との直接の比較は難しいものの、この港はかなり海水の交換が良いことがうかがえる。

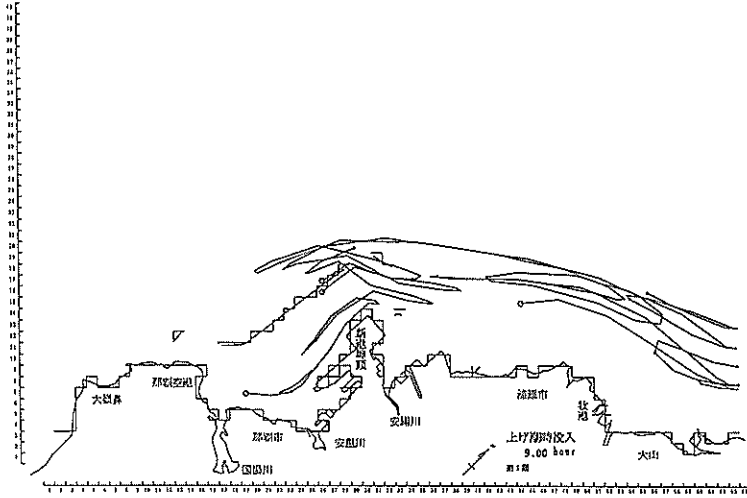
#### 4. 3 サンゴ幼生に見立てたマーカーの漂流追跡計算

##### (1) 現地地形での漂流の様子

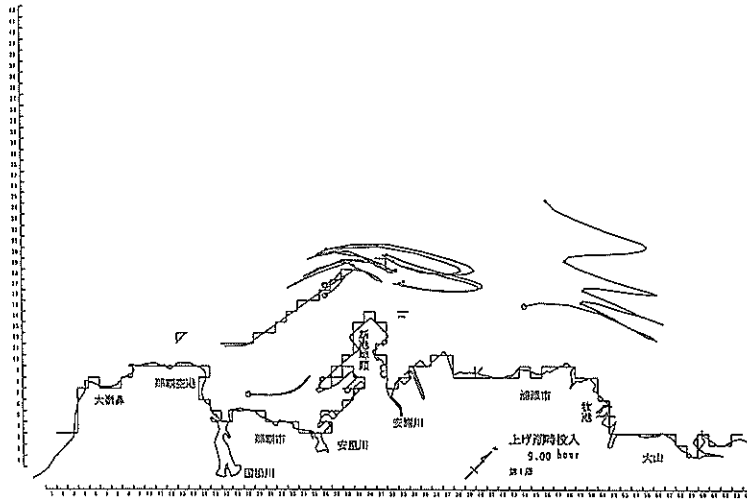
現地地形・平均潮（M2）ケースでの位置追跡図を、図一26, 27に示す。この図は、1時間毎の浮遊位置を48時間

を黒丸で示している。開境界に達した幼生マーカーは、計算の処理上、その場に留まり計算区域に向かう流れを受ければ再び漂流することとしている。

図一26は下げ潮時に投入したケースの結果である。投入A地点（自謝加瀬・港内）、B地点（自謝加瀬・港外）からの幼生は、岸から3km程沖合いを下げ潮～上げ潮に乗り南西～北東方向に行き来している。一潮汐間で往復移動する距離は、3～6km程度である。12時間毎（一潮汐経過毎）の位置を見ると、残差流に乗り岸沿いに北東へ移動することが多い。上げ潮時投入の場合には、図一27のように牧港・大山地先に回り込むことがある。A地点からの幼生のほうが、B地点からのものよりもやや岸



図一28 幼生の浮遊追跡図（現況・大潮・通常時河川流量・上げ潮時投入）



図一29 幼生の浮遊追跡図（現況・小潮・通常時河川流量・上げ潮時投入）

近くを流れるが、その差は大きくない。

港内南部C地点（西3丁目地先）からの幼生マーカーは、国場川～新港埠頭間の流れの遅い区域にトラップされており、区域内を移動はしているものの港外へは出づら。

北部D地点（浦添米軍施設地先）からの幼生マーカーは、岸沿いに大山の地先を経て更に北東へと流されるが、潮時によっては、安謝川河口の淀み域に捕捉されほとんど移動しなくなることもある。

大潮時の上げ潮時投入の計算結果を図一28に、小潮時を図一29に示す。大潮時には図一27に比べて移動距離も大きくなり、A、B、Dからの幼生マーカーは、計算領域を超えて更に北東に流されていく。港内C点からの幼

生マーカーも、倭口から沖合いに出ることもある。一方、小潮時には、周辺2～4kmの範囲を行き来しながら僅かに北東に移動する。Dからの幼生マーカーは、岸から離れて沖合いへと流れ出る傾向がある。

現況地形・平均潮の降雨時の計算結果は、常時の結果とほとんど同じであった。

## (2) 地形変化による漂流経路の変化

将来地形での計算結果のうち、上げ潮時投入について常時の河川流入量のケースを図一30に示す。

沖合いA・B地点からの幼生マーカーは、倭口を経て、浦添第一防波堤前面から第二防波堤前面を経、北から北東にむかう。現況地形時よりもやや沖を漂流する。

港内C地点からの幼生マーカーは、大潮でも港外に出

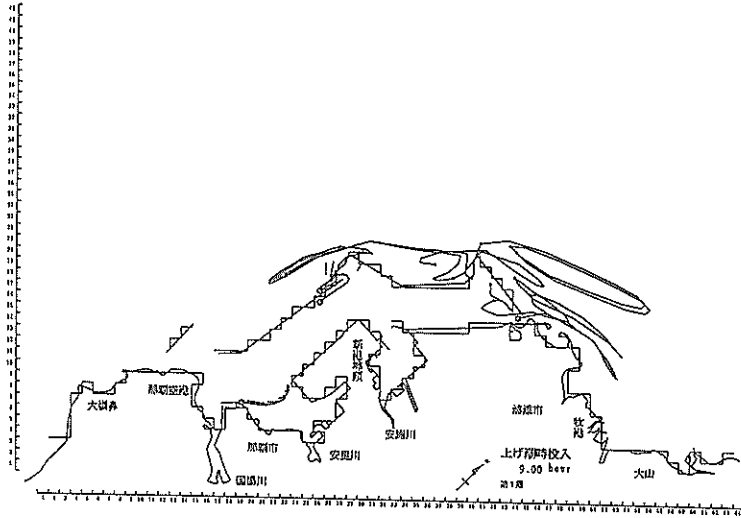


図-30 幼生の浮遊道跡図 (将来・平均潮・通常時河川流量・上げ潮時投入)

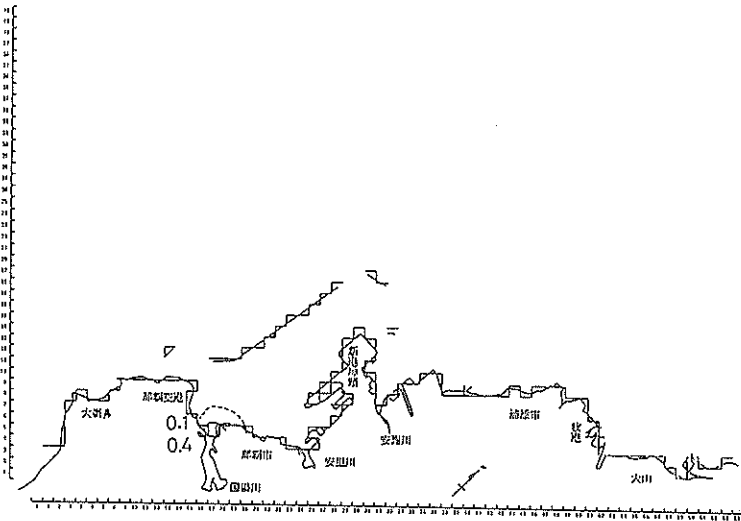


図-31 濁り濃度の分布 (現況・平均潮・通常時河川負荷) (単位: mg/l)

なくなる。

北側D地点からは、潮時により大山方面に流れたり、浦添第二防波堤に沿って流れたりする。この地点からの幼生の移動距離は、現況地形に比べて小さくなる傾向があった。

透過堤ケースでは、将来地形ケースとほぼ同じ軌跡であった。

#### 4. 4 濁りの広がり と沈積の計算

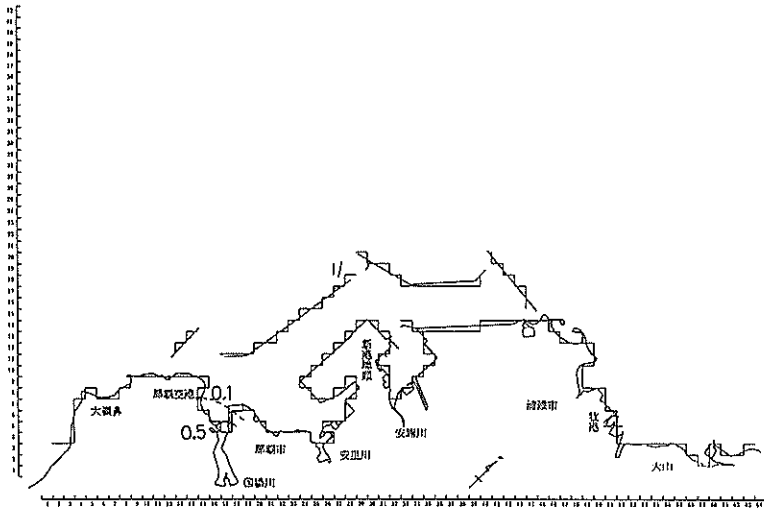
##### (1) 晴天時の河川流入負荷の場合

現況地形条件・将来地形条件とも平均潮 (M2) について晴天時の濁りの拡散分布を計算している。結果を図-31, 32に示す。いずれも、計算開始後4潮目までの分布であるが、これ以後濃度値や分布形は変わらず、ほぼ平衡に

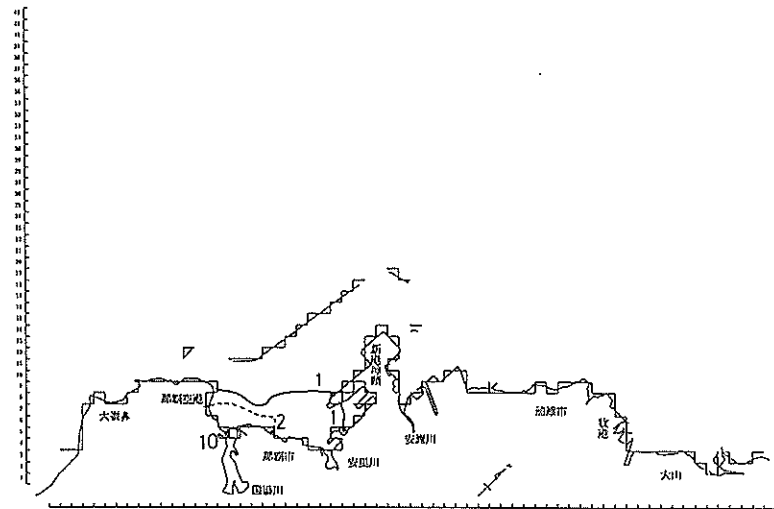
達した分布とみなせる。国崎川河口部で僅かの濃度上昇 (SS ~0.2mg/l) が生ずるが、ほとんど海域では晴天時流入負荷の影響は無い。この状態が6日間継続したときの6日間での累積堆積量を示すと、図-33, 34のようになる。沿岸の淀みがちな海域で1~2g/m<sup>2</sup>程度の粒子の沈降堆積がみられる。

##### (2) 降雨時の拡散計算 (無沈降の場合の濃度分布)

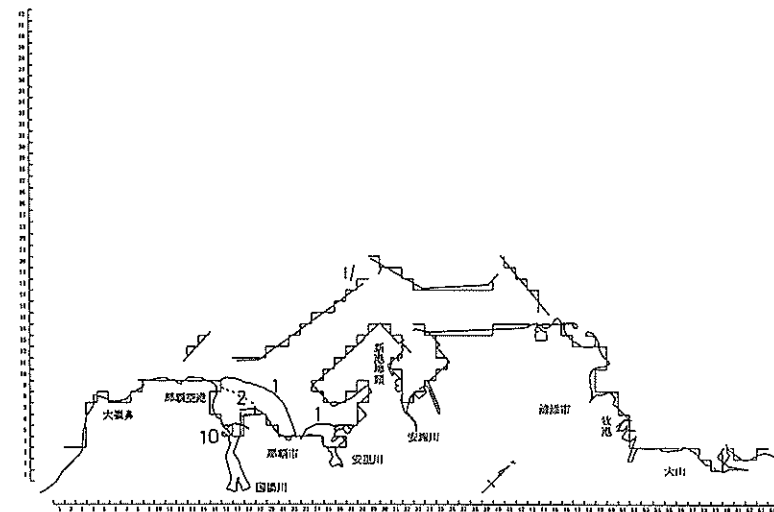
濁りの拡散状況を降雨時負荷で計算している。海域内で沈降による清澄化が無いとして、最大濁り濃度を求めてみる。上げ潮時より12時間継続して一定の降雨時負荷を与え、その後晴天になったとして常時の負荷を与える。降雨終了時 (降雨開始から12時間後) より一潮汐間に互り3時間毎の濃度コンターを図示すると、図-35、



図—32 濁り濃度の分布 (将来・平均潮・通常時河川負荷) (単位: mg/l)



図—33 濁り堆積量分布 (現況・平均潮・通常時河川負荷6日後) (単位: g/m<sup>2</sup>)



図—34 濁り堆積量分布 (将来・平均潮・通常時河川負荷6日後) (単位: g/m<sup>2</sup>)

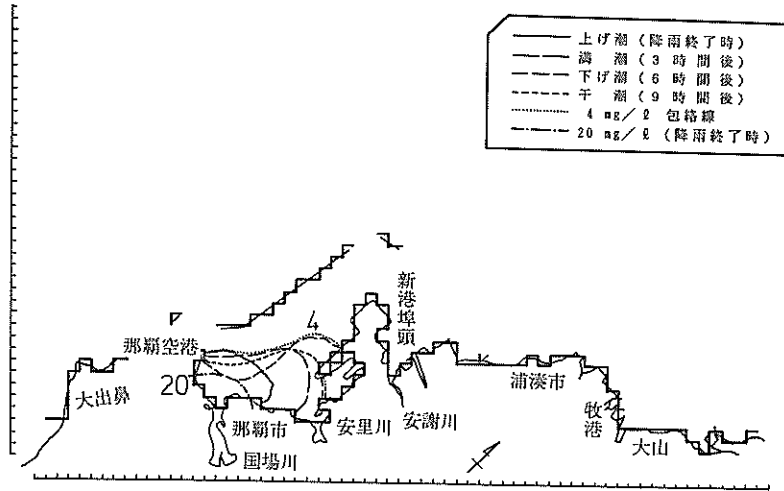


図-35 濁り濃度の分布 (現況・平均潮・降雨時負荷・無沈降) (単位: mg/l)  
降雨終了後の各潮時の4mg/l コンターの変化

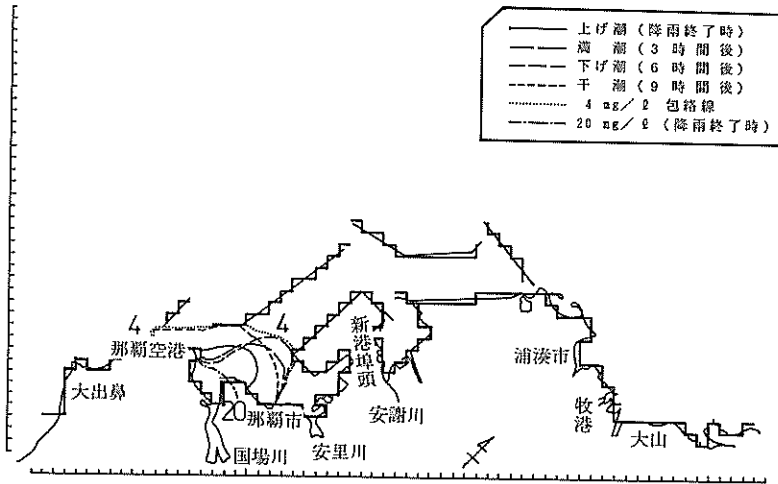


図-36 濁り濃度の分布 (将来・平均潮・降雨時負荷・無沈降) (単位: mg/l)

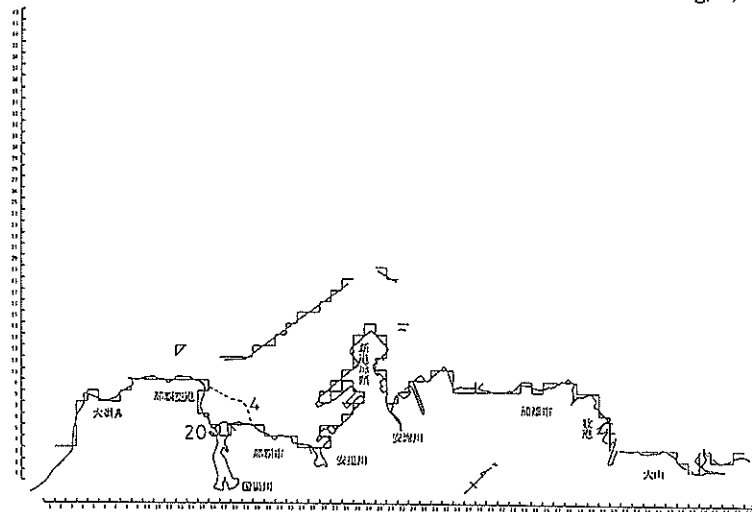
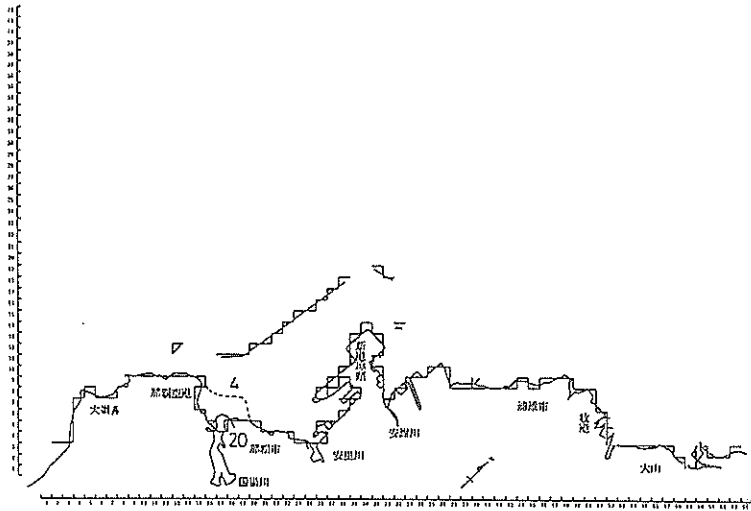
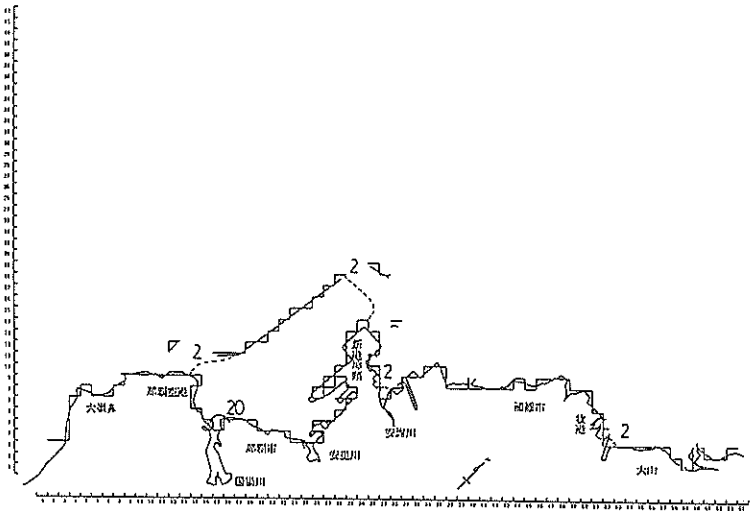


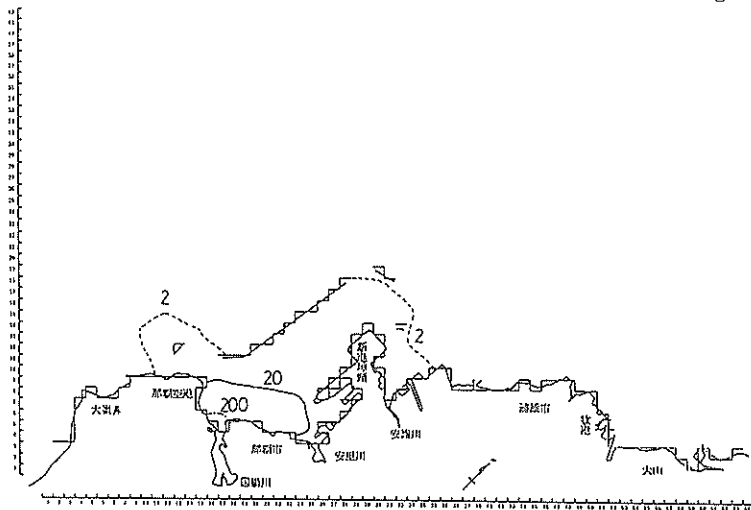
図-37 濁り濃度の分布 (現況・平均潮・降雨時負荷・10 µm 以下) (単位: mg/l)



図一38 濁り濃度の分布 (現況・平均潮・降雨時負荷・ $10\mu\text{m}$ 以上) (単位:  $\text{mg}/\ell$ )



図一39 濁り堆積量分布 (現況・平均潮・降雨時負荷・ $10\mu\text{m}$ 以下) (単位:  $\text{g}/\text{m}^2$ )



図一40 濁り堆積量分布 (現況・平均潮・降雨時負荷・ $10\mu\text{m}$ 以上) (単位:  $\text{g}/\text{m}^2$ )

36となる。図-35は現況時、図-36は将来時の結果である。泊埠頭地区前面海域を4 mg/lの濃度の雲が行き来している。国場川河口部には、降雨終了直後に20mg/lの高濃度が出現するが、やがて濃度は拡散により低下する。濁りの雲は、現況時に比べ将来時では、北東への伸びが小さく、逆に沖側から南西方向・空港前面へと張り出すようになる。唐口からの港内への流れがわずかに変化したためと思われる。

(3) 降雨時の拡散と堆積状況

上記(2)と同様、「12時間の降雨とその後の晴天」の条件で計算している。現況時の拡散状況を図-37, 38に示す。図-37は $10\mu\text{m}$ 以下の粒子、図-38は $10\mu\text{m}$ 以上の粒子分画を示す。何れも降雨終了直後（降雨開始12時間後）

の高濃度時分布である。国場川の地先の狭い範囲で4 mg/l程度の濁りがみられる。

降雨終了後十分な時間が経過した後の堆積量分布を、図-39, 40に示す。何れの粒径分画でも港内を広く覆って堆積している。河口周辺では、構成比の大きい $10\mu\text{m}$ 以上の粒子が多く堆積し、極めて狭い範囲ではあるが $200\text{g}/\text{m}^2$ に達している区域も見られる。沖合いにやや離れた新港第一防波堤や新港埠頭岸では、両分画とも同じ程度ずつ堆積している。両分画を合計した堆積量分布を、図-41に示す。倭口から港内・那覇防波堤にかけて $4\text{g}/\text{m}^2$  ( $0.0004\text{g}/\text{cm}^2$ )以上の堆積となっている。また、泊埠頭前面では $20\text{g}/\text{m}^2$ 程度となる。この $20\text{g}/\text{m}^2$ コンター線は、図-33の $1\text{g}/\text{m}^2$ コンター線とよく似た位置にある。泊埠

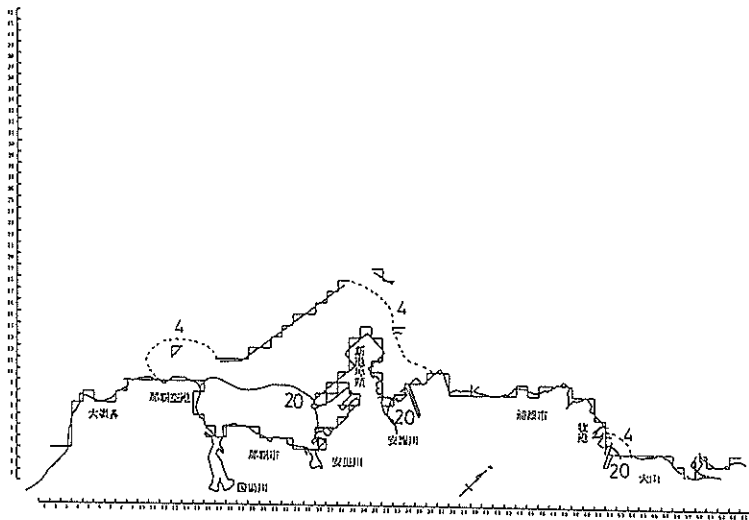


図-41 濁り堆積量分布 (現況・平均潮・降雨時負荷・全粒径分) (単位:  $\text{g}/\text{m}^2$ )

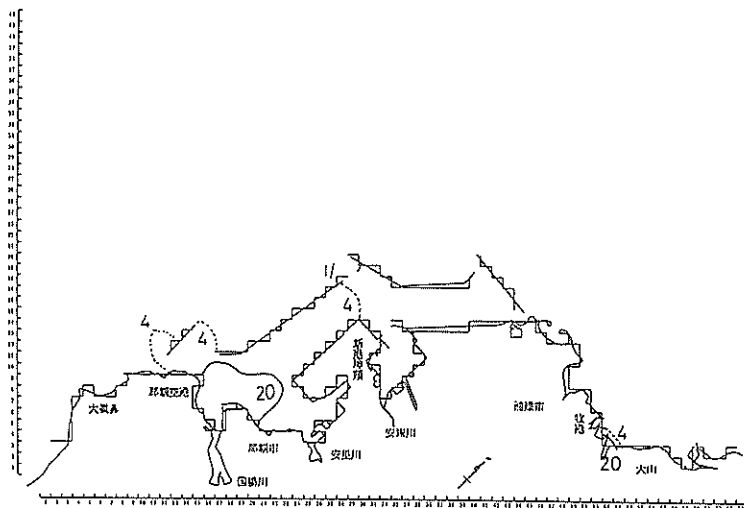


図-42 濁り堆積量分布 (将来・平均潮・降雨時負荷・全粒径分) (単位:  $\text{g}/\text{m}^2$ )



頭前面海域では、この降雨による堆積量は、晴天時6日間の堆積量の約20倍(晴天時のほぼ120日分)に相当することがわかる。

同じ計算で、将来地形時についての全分画の合計堆積量分布を図-42に示す。降雨終了時の高濃度域は、現況時と同じく国場川前面に現れた。ここには示していないが、 $10\mu\text{m}$ 以下径の堆積量の分布は、現況時(図-39)より少し広い範囲に広がっていた。両分画の堆積量を合計した堆積量分布(図-42)では、現況時(図-41)より北東への広がりが減る。国場川前面に堆積が進むためと思われる。

## 5. 解析

### 5.1 濁り分布の傾向

算定した流れ場では、港内には唐口から流入し倭口にぬける北上する残差流がみられた。この流れは、潮汐振幅の影響が大きく現れた。一方、流入河川水の影響はほとんど見られなかった。こうした流れの特性を受けて、見かけの海水交換率も潮汐振幅に大きく左右される。濁りの広がりも、懸濁が数潮汐間継続するようであれば残差流の影響を大きく受ける。最も主要な負荷源である国場川からの流入濁りは、河口沖で大きく広がりながらもやや北向きに延びてゆく傾向があった。

晴天時の濁り負荷は極めて小さい。実測した42mm/日の降雨時では、国場川で晴天時の約160倍の負荷が推定された。この程度の降雨の時、国場川河口から新港埠頭にかけて港内はSS4mg/lのにごりとなった。しかし、防波堤に遮られ、開口部からの張り出しを除いて、濁りは港内に押しとどまっている。

将来地形では、北側の浦添防波堤が配置され、倭口からの流出傾向は同じものの、唐口からの流入はやや弱まるようである。新港第一防波堤背後の港内水面の、見かけの海水交換率は、やや下がる。水域が多少異なるため、現地地形での値との差が有意なものかどうかは不明である。ここで算定した交換率が必ずしも外海水との交換率そのものを表していないとの議論もあり、水質影響の定量的評価には直接当てはめにくい面もある。現況と類似の濁り負荷を与えて将来地形での濁り濃度を算定すると、河口部を除き現況とあまり変化がみられなかった。国場川河口部での濁りの張り出しは、現況地形時のやや北向きに比べ、やや南西へと延びている。

### 5.2 造礁サンゴ保全に関する定性的評価

#### (1) 濁りからみた港内の海域の区分け

サンゴ生息や移植にとって適地となるための条件は色々あるが、水質基準濃度や、その他の環境上の要請基

準については現在不明である。濁り分布や堆積量分布から造礁サンゴ生息にととの適地・不適地の相対的色分けをあえて考えてみる。

濁り分布からは、現地地形・将来地形双方とも河川河口部周辺で条件が相対的に悪い。また、泊埠頭前面もやや条件が悪い。沖合い防波堤は、流入濁りの沖合いの礁への直接的な伝播を遮っている。しかし、防波堤が存在しない場合の濁りの広がり計算を実施していないので、外側礁斜面への濁りの遮蔽にとって、防波堤が不可欠であったかどうかについては不明である。

堆積量分布からは、現地地形では港内全体に細かい粒子が薄く広がって堆積する様子が判る。石垣島での堆積量を参考にすると、 $0.6\sim 1.0\text{g}/\text{cm}^2$ 以下の堆積であれば問題ないことになる。波や流れによる堆積粒子の移動・排除がないとして、1年間に累積する堆積量がこの値以上になる地域を類推する。1年間に、ここで扱った降雨程度の降雨が25回(2週に1回)あったとしても、上記の堆積量となるためには、1回の降雨で $0.024\sim 0.04\text{g}/\text{cm}^2$ ( $240\sim 400\text{g}/\text{m}^2$ )以上の堆積が必要であろう。こうした堆積量がみられる地域は、あったとしても国場川河口内部に限られる。港内では、この程度の降雨では堆積厚に関する問題はほとんど生じないことになる。ただし、岸沿いの浅瀬や安里川河口等は、窪み域や淀み域が微細な地形条件で生ずるならば、粒子堆積が局所的に集中する可能性もあり注意が必要であろう。将来地形でも、粒子は港内全体に広がって堆積する。国場川河口部から安里川河口にかけて岸沿いで注意がいる可能性がある。

海域内に流入した微細粒子の沈降・堆積・細浮遊・運搬などの挙動と、浅い瀬でこうした挙動を引き起こす水理的な外力の評価とが今後必要であろう。

#### (2) 幼生の浮遊経路からみた区分け

豪州東岸のグレード・バリア・リーフでは、住民アンケートなどに基づきリーフの地域分けを行い、利用の制限を加えている<sup>19)</sup>。Jamesら<sup>19)</sup>は、この地域沿岸を対象に幼生の漂流計算を実施し、リーフ相互の連結性・孤立性を検討している。相互に強く連結しているサンゴ礁群は、ひとつのゾーンに含めることが妥当であると想定され、ゾーニングの判定基準として参照しようとしたものである。彼等の計算とは時間・空間のスケールが著しく異なり小さいが、4.3に示した幼生マーカーの漂流計算からこの地域の礁の連結性を考えてみる。

この地域の自謝加瀬・千ノ瀬等と言った外礁から幼生が放出されれば、算定流れ場では、岸沿いに南北に移動しながら徐々に北上し、浦添地区から牧港にかけての裾礁に到着できる可能性が高い。また将来地形でも、これ

ら外礁からの幼生は、浦添防波堤前面の消波ブロックやより北側の浅瀬へと運ばれる可能性が高い。一方、港内の礁から放出された幼生マーカーは、港外の下流側（浦添方面）へと到達する場合もあるが港内にとどまる可能性が高い。より南側の空港前面等の礁から放出された幼生が、那覇港内に届くかどうか検討できなかった。従って、限られた知見からではあるが、この地域では、沖防波堤の載っている外礁は、北～北東の下手側礁との連結性が高いことが予想される。

造礁サンゴの有性生殖の仕組みが研究され始めたのは、比較的新しい<sup>12)</sup>。幼生のサンゴ群生発生に対する役割については、不明点も多い。また、幼生の運搬には、密度の効果や潮目の考慮が必要という意見<sup>14,15)</sup>や、局所的な渦流の効果<sup>14,17,18,20)</sup>、風波などによる混合作用<sup>16)</sup>など、水理的な影響についても定説がない。おかれた流れの様子や、地形の特徴、対象とするスケール等の場所の条件とともに、卵や幼生の遊泳や着床時の挙動等の生物側の生態特性についての観察も重ねる必要があろう。

### 5. 3 海域の特徴付けと今後の課題

図一2のサンゴ礁分布図と、上記5.2の分けけとを比較してみる。元来サンゴの生息被度や成長は礁斜面で高いとされている。礁のへりの部分が保全上重要である。特に、この海域では、外礁の自謝加瀬（図一2のC）、内礁のA・B・H・Jの礁斜面で、サンゴ生息が確認されている。

一方、5.2(1)で示されたように、降雨時の240ないし400 g/m<sup>2</sup>以上の堆積域は、国場川河口に限られる。河口内には礁はないようであるが、空港から新港埠頭を結ぶ堆積量20g/m<sup>2</sup>ラインの内側には内礁B・離礁Gがある。また、5.2(2)で示された、下手側との連結性の高い礁は2つの外礁（図一2のC・E・F）である。このことより、サンゴの生息条件からこの区域を分類し特徴づけると、①国場川・安里川の河口部、②国場川から新港埠頭にかけての裾礁を含む沿岸部、③防波堤に囲まれた港内水域、④防波堤の載った外礁やその外側の礁斜面、といった具合に大別できる。①の区域では造礁サンゴの生息・移植はかなり困難と予想される。②の区域では、流入濁りや有機物汚染・淡水による低塩分画などの影響に注意しておくことが望ましい。③の区域では、ゆっくりとした濁りの堆積の効果等に配慮が望ましい。④の区域では、生息しているサンゴ群体を守り育てることが周辺の礁にも良い影響が期待できそうな地域。ということになろう。

ただし、ここで示した計算手法、解析方法などについては、開発途上の手法であることを考慮し、結果の適用

に際しては十分注意する必要がある。より定量的な評価のためには、今後ともデータの蓄積と計算法の改良を含めた、手法の検討とを継続する必要がある。また、ここで検討した水理的な特性に加え、造礁サンゴ生態や生息に関し、さらに専門家研究者等による多角的総合的な検討が必要である。

水理的検討に限ってみても、今後の課題として次のようなものが指摘できる。

1. 恒流の再現性向上
2. 誤差の評価と結果のより定量的な評価
3. マーカー分布の物理的意味の解明（交換率との関係）  
計算法の改良（追跡計算法）/多層モデルによる物性を有したマーカーの追跡・分散効果の導入/防波堤角などの局所渦の効果のモデル化<sup>20)</sup>
4. 濁りの降雨時の（非定常）流出計算法
5. 造礁サンゴの生態の解明と要望環境値の明確化

### 6. おわりに

限られた知見の中で、少々大胆な割り切りや検討を進めている。今後詳細なつめが必要ではあるが、これまでに得られた主要な成果は次の通り。

- ① 港内には、現況地形でも将来地形でも、唐口から入り倭口に抜ける残差流が見られた。
- ② 自謝加瀬・千ノ瀬から放出された造礁サンゴの幼生は、北東方向の流れに乗り北東沿岸部に広がる傾向がある。この広がり、将来地形でも概ね似ている。
- ③ 港内に流入する濁りは、降雨時に大きくなる。沿岸の流れの影響を受け、河口部を中心に濁りが広がる。河口部周辺では濁りの堆積も大きい。微細な濁りは、港内に薄く広く広がる。
- ④ 限られた知見からではあるが、造礁サンゴ生息上の条件から区域区分を試みた。生息サンゴ保全上の留意点を区域毎に示した。

那覇港工事事務所からは、調査検討に必要な参考資料や降雨時の流出調査報告書など各種の資料の提供を受けた。ここに記して深く感謝すると共に、地道な調査の蓄積に敬意を表す次第です。科学技術庁科学技術振興調査費による豪州海洋科学研究所（AIMS）との交流は、本研究の解析作業に対し刺激となり有益であった。交流に御尽力頂いた関係者に深く感謝いたします。

サンゴ礁地形に関し、東京都立大学理学部堀信行助教授より貴重なコメントをいただいた。記して深く感謝いたします。

(1992年5月1日受付)

### 参考文献

- 1) 山里清：サンゴの生物学，東京大学出版会，1991，150p.
- 2) 高橋達郎：サンゴ礁，古今書院，1988，258p.
- 3) 山里清：1.3さんご礁生態系，山本護太郎編「海洋学講座9 海洋生態学」，東京大学出版会，1973に収録，pp.37-49
- 4) 森 啓：サンゴ，築地書館，1989，197p.
- 5) 那覇港港湾管理者：那覇港港湾計画資料（その2）——改訂——，1985
- 6) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会。
- 7) 工藤君明，本多牧生：沖縄本島周辺サンゴ礁の現況調査，海洋科学技術センター試験研究報告 JAM-STECTR 21，1989，pp.121-142
- 8) 渡久山章：サンゴ礁の保護と沿岸域汚染，用水と廃水，Vol. 33 No.1，1991，pp.43-52
- 9) 堀江毅：海上工事に伴う濁り予測モデルと濁り監視への適用性について，港湾技術研究所報告Vol.26，No.3，1987，pp.253-295
- 11) 西内光・桑田晃：日本気候環境図表，保育社，1987，pp.162-163
- 12) C.C.Wallance et. al.: Sex on the Reef: Mass Spawning of Corals, *Oceanus*, Vol. 29 No.2 1986, pp. 38-42
- 13) James, M.K. et. al.: Application of larval dispersal models to zoning of the Great Barrier Reef Marine Park. *PACON* 90, 1990, pp. 140-145
- 14) Wolanski, E. et. al.: Currents and Coral Reefs, *Oceanus*, 1986, Vol. 29 No.2, pp.83-89
- 15) Wolanski, E. et. al.: Trapping and dispersion of coral eggs around Bowden reef, great Barrier Reef, following mass coral spawning, *Continental Shelf Research*, 1989, Vol. 9, No5, pp. 479-496
- 16) 鳥羽良明：第5章 大局的にみた沿岸海域，堀部純男編「環境科学としての海洋学2」，東京大学出版会，1978のうち，pp.65-73
- 17) 杉本隆成：浮遊卵稚仔の輸送拡散と沿岸海洋構造，水産土木，12号，1975，pp.1-8
- 18) Takeuchi, T.; Environmental considerations and design technology of artificial reefs, *Proc. of JAPAN-U.S. Symposium on Artificial Habitats for Fisheries*, 1991, pp.97-102
- 19) Great Barirrer Reef Marine Park Aututhority: Cairns Section Zoning Plan for Public Review, 1989
- 20) 細川恭史・古川恵太：離散渦法による構造物周りの流れのシュミレーション，港湾技術研究所報告，Vol. 30, No.2, 1991, pp.155-209
- 21) 杉本隆成編：水産海洋環境編，恒星社構成閣，1987のうち中田英昭ら，3-1 資源変動にかかわる輸送環境の研究，pp.136-147
- 22) 村上和男・白井正生：密度流を考慮した海水交換に関する水理模型実験，港湾技研資料No.625，1998，29p.
- 23) 堀信行：日本のサンゴ礁，科学，50巻，2号，1980，pp.111-122

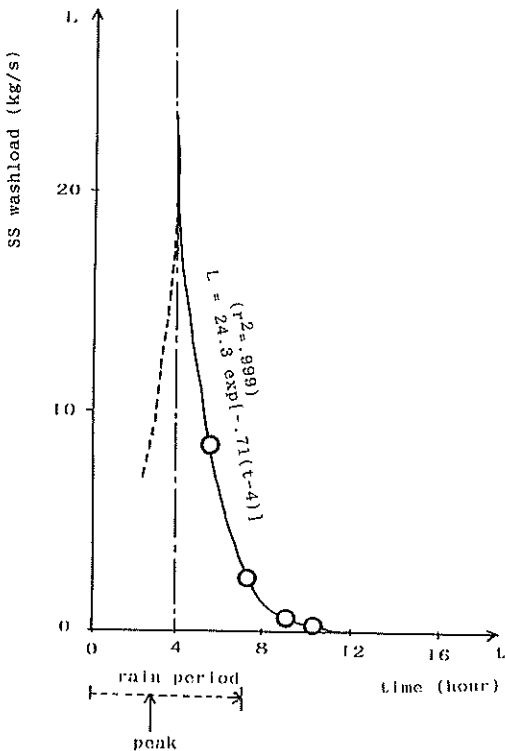
付録.A 降雨時河川流出の解析

(1) 観測状況

平成2年2月14日の降雨について、主要河川の流出観測およびSS濃度観測を那覇港工事事務所が実施している。降雨時のSS負荷・流出濃度・粒径分布などについての知見がないので、この観測結果を援用した。降雨は朝7時から7時間継続し、日間の降雨量は42mm、ピーク降雨強度は時間当たり21.5mm(14日10時)であった。流出観測は、11時から18時にかけて、国場川・ノ波川・安里川・安謝川の4河川下流部で実施されている。4河川につき、時刻をずらして4回ずつ実施している。

(2) 河川水流出

降雨開始時から流量ピーク時付近までのデータが欠落しているものの、既往水文データなどを参考に流出曲線(降雨開始時からの時間に対し、各時間の河川流量をプロットしたもの)が同工事事務所にて推定されている。国場川では、降雨時流量は通常、ピーク降雨後1時間で最大流量に達し、その後8~15時間ほどで常時の流量に戻っているようである。今回の降雨についても、最大流量に



図一A.1 国場川のポリユートグラフ

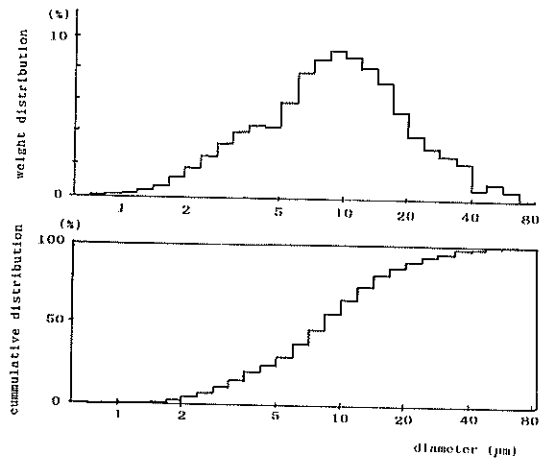
表一A.1 河川からの降雨流出量積算値と流出率

河川名	降雨流出量積算値	流出率
国場川	385×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	0.49
ノ波川	518 (292)	0.9 (0.5)
安里川	144	0.46
安謝川	101	0.48
小湾川	(43)	-----
牧港川等	(76)	-----

( )の値は、推定値。

表一A.2 河川からの濁りの流出量積算値と平均SS濃度

河川名	濁りの流出量積算値	平均SS濃度
国場川	240~300ton	620~770mg/ℓ
安里川	6.	40
安謝川	7.	70



図一A.2 国場川の降雨時粒度分布測定結果

達した後の流量の減衰は、観測結果より指数式で表示されている。そこで、降雨開始時から最大流量時までの流量増加を、単調な増加(三角形分布)と仮定し、降雨による流出量を時間積分すると、表一A1のようになる。表の値は、この降雨(ひと雨)による総流出量に相当する。観測点より上流の流域面積と降雨量とから流域への降水量を求め、流出率を推定する。算定値も表に掲げてある。ノ波川で極めて大きな値となっている。流域は、市街地及び山林などで占められている。

(3) 濁り流出負荷

流量観測と同時にSS濃度が測定されている。各時刻のSS濃度と流量との積はSSの単位時間当りの流出量(流出負荷)をあらわす。流出曲線にならってポリユートグ

ラフ（降雨開始時からの時間に対し、各時間のSS流出負荷量をプロットしたグラフ）を書くことができる。国場川については図-A1のようになる。水の流出曲線より更に急なピークが認められる。減衰期間に対しやはり指数式を当てはめ、最小自乗法にてパラメーターを決めることができる。立ち上がり期間も類似の式を仮定し、総流出SS量を積算する。この総量を、上述の水の総流出量で割れば、平均SS濃度が見積れる。ノ波川を除く3河川について、この雨によるSS流出量と平均SS濃度の算定値とを表-A2に示す。

#### (4) 濁り粒子の粒径分布

また、観測時のいくつかのサンプルについて、各河川毎にSS粒子の粒度分布を測定してある。国場川で平均SS濃度に近い濁りについて調べた結果を図-A2に示す。74 $\mu\text{m}$ 以下の微細粒子が主であり、平均粒径は、かなり、澄んだ濁りで20 $\mu\text{m}$ 程度、濁ったときで9 $\mu\text{m}$ 程度である。

#### (5) 降雨による海域への負荷の推定

この雨で、海域にどれだけの負荷があったのか推定してみる。この海域への流入する河川は、観測対象の4河川の外、小湾川・牧港川・比屋良川と言った小河川がある。観測点から流下したノ波川は、すぐに国場川に合流し・満潮干潟を経、那覇大橋・明治橋を経て港内に注ぐ。

淡水の流出量を考える。ノ波川の流出率を他の河川並の0.5とし、観測点での流出量を推定すると $292 \times 10^3 \text{m}^3$ となる。合流後の国場川流量は、 $677 \times 10^3 \text{m}^3$ となる。観測点下流に、流域面積10 $\text{km}^2$ 程の流域があるが、ここへの降雨は総て下水に流れ込み河川には出てこないとし、ま

た満潮干潟などでの流量の損失はないとする。すると、国場川水系から河川水は、 $677 \times 10^3 \text{m}^3$ の流出となる。安里川、安謝川の流出は測得値のとおりとする。他の小河川は、条件の似ている安謝川での比に各河川の低水量を掛けて求める。

SSの負荷は、表-A2の平均SS濃度を参照にする。観測点下流で、流速の減衰とSSの沈降促進も考えられることから、国場川で700 $\text{mg}/\ell$ 、安里川で30 $\text{mg}/\ell$ 、他の河川で60 $\text{mg}/\ell$ の濃度とした。常時のSS濃度は、年平均濃度値や安謝川や安里川の濃度の回復状況から、全ての河川で10 $\text{mg}/\ell$ とした。

流入粒子の粒度分布は、もっとも負荷の大きい国場川・ノ波川での分布を基本にした。平均粒径を参照に、10 $\mu\text{m}$ 以下と以上との2グループに分画した。10 $\mu\text{m}$ 以下の微細粒子割合を、国場川水系で35%、その他河川で20%とした。国場川水系での微細粒子割合は、国場川とノ波川とがSS負荷量比1:5で合流混合するとして、国場川での10 $\mu\text{m}$ 以下の粒子割合55%とノ波川の32%とを加重平均して求めたものである。常時の平均粒径は、9 $\mu\text{m}$ とした。

ここでの推定値は、淡水流入量では国場川水系で少な目、晴天通常時のSS負荷では国場川水系で少な目、降雨時SS負荷量では安謝川等小河川でやや少な目、粒径分布では国場川水系で微細粒子割合が少な目、常時の微細粒子割合が大きめになっている恐れがある。詳しくはさらに流出観測を積み重ねる必要がある。

港湾技研資料 No. 739

1992. 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 昭和工業写真印刷所

Published by Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1992) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。