

(58) サンゴ礁沿岸での海域ゾーニングの試み

APPLICATION OF NUMERICAL CALCULATION TO ZONING OF COASTAL CORAL REEF

細川恭史*

Yasushi HOSOKAWA*

ABSTRACT; 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 sensitive to turbidity of fine silt, water salinity and temperature, activity of predators and so on. For the maintenance of the ecological activity and the reef-zoning, larvae support from mother reef is important. Coastal hydraulics mainly affect a). diffusion and settling of the turbidity load from the land area, and b). drifting route 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 are released from the main active reef area and drifting paths traced. For the calculation of turbidity diffusion, particle load and diameter fractions were estimated, using the observation data during a strong rain fall.

The critical values of turbidity nor settling rate are not yet established officially for coastal reef conservation. Comparing a damaged reef of another island, river mouth area in this port is relatively not suitable for coral transplantation. Outside fringes of the existing reefs, protected by breakwater from the inflow turbidity load, are expected to have the high potential as mother coral to north and south neighbor reefs. These results give useful information for the comprehensive planning of coastal water surface zoning at coral sea.

KEYWORDS; coral reef, numerical simulation, turbidity diffusion, larvae drifting, zoning

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、わが国で良く見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¹⁾。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温度であるとされ^{2, 3, 4)}、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。サンゴ礁は琉球列島を中心に見られる。サンゴ礁の形状では、①海岸線に接して発達する裾礁、②海岸線から離れて沖合いに発達する堡礁、③大洋の中に環状にもしくは島の回りを環状に取り囲んだ環礁、の3つが主要なものである。サンゴ礁の形作られ方はサンゴの成長と関

* 運輸省港湾技術研究所 Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport

連深いため、各地のサンゴ礁の断面地形や構造は、相互に良く似ている点がある。

サンゴ礁の保全に関し、豪州Great Barrier Reef Marine Park Authorityは水域区分計画を実施している。約2000km程にわたる礁域を一般利用区から保全区までの区域に分け、それぞれの区分に応じて利用の仕方を特定していこうという仕組みである⁹⁾。区域分けは住民アンケートなどに基づいて行われてきた。Jamesら⁹⁾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。

ここでは、沖縄県那覇港周辺海域を対象に選び、サンゴ礁の保全に関し、水理学的な手法の適用を試みた。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態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ーの軌跡を追跡し、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・配慮は十分ではない。更に専門的な検討が多角的になされる事が必要であろう。

2. 那覇港の水質とサンゴ生息の現況

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、西に向か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-1に那覇港周辺の様子を示す。主な流入河川は、国場川・安里川・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。国場川河口前面の開口部（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（倭口）に至っている。

公共用水域の水質測定の結果⁷⁾によれば、那覇港内のうち、国場川河口・安里川河口でややCOD・大腸菌群数が大きく、それ

ぞれ年平均で 2mg/l と $5 \times 10^4 \text{ MPN/100ml}$ 程度である。主な負荷源は、都市排水と思われる。港内の他の水域では、概ね $\text{COD } 1\text{mg/l}$ 前後であり、清澄である。また、那覇市等の調査によれば、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、河口部を除いて極めて澄んでいる。

昭和63年那覇港港湾計画資料（その2）⁷⁾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半日周潮の潮汐流との合成で再現されている。沖合いの流れは、上下層とも流向がほぼ同じであり、流速値も余り変わらない。水質分布からは、港内の流れは比較的良好で大きな淀み域などはない。

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： $5\sim 110\text{mg/l}$ 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等濁り関連指標で大きい。天候により大きく影響されていると思われる。但し、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 サンゴ生息現況

琉球列島など太平洋の縁の島では、裾礁や堡礁が発達する。沖縄では、沖合い礁との間に水面はあってもそれほど深くはない。この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事があり、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、内礁側・外洋側の両礁斜面を有している。礁斜面は、サ

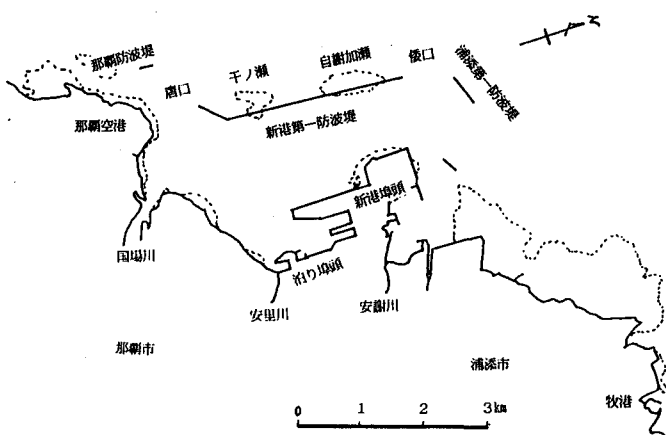


図-1 対象海域周辺地形図

ンゴの生息被度が高く、成長の最も活発な部分である事が多い。外洋側のスロープは急深であるため、少し離れると水深が深くなり充分な光が得られず、サンゴの生息や成長も急減する。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）がある事もある。岸から沖に向か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

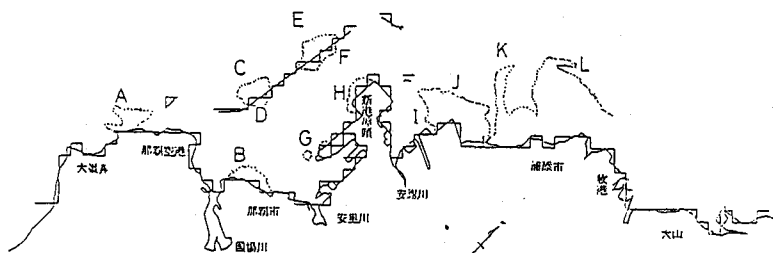


図-2 サンゴ礁の位置区分 (A～L)

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。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。潮干帯には、多種の貝類がみられる。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。

サンゴの生活史の中では、有性生殖の時期もある。成熟した親ポリープは卵と精子を作り、受精卵はやがて幼生になる。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むけて着底する。着底したポリープは、出芽・分裂等の無性生殖により群体を作る。海域には、卵と精子とが放出されるものも有れば、受精後の幼生を放出するものもある。卵の大きさは $300\sim 500\mu\text{m}$ 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。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³⁾。

昭和59年度のサンゴ被度調査によれば、那覇港周辺では図-2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）の4箇所主に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。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。自謝加瀬の外海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。此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。南北に延びる新港第一防波堤は、自謝加瀬・干ノ瀬の礁にはほぼ沿って整備されている。

サンゴ礁の保全には、サンゴの生息に適する環境条件の維持が必要になる。サンゴの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・共存生物などである。此の海域のサンゴ生息にとっての環境上の問題点は、陸からの流出粒子による被覆・濁りによる水中照度の不足・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^{2, 3)}。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、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³⁾。

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、夏期の海水の流れ・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)^{9, 10)} に依っている。

2) 海水交換および漂流経路追跡計算

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。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の何らかの推定が必要となる。

ここでは、平面的には、近傍4格子点からの面積による重み付き平均による内挿法に依った。なお、此の計算では、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事としている。

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グ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様に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。

3) 浮遊物拡散計算

ADI法による単層拡散計算モデルを基本に、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、海域内での濁り粒子の鉛直分布はほぼ一様と見なせる。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。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 計算条件

1) 流れ計算

夏季の流れを再現しようとしているが、この海域での「平均的な夏季の流れ」についての知見は少ない。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。沖合い海流を考慮しやや沖合い迄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などを考慮し、格子間隔を250mとし、時間刻みは30秒とした。

地形条件 (1988年現在) と水深を図-3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どである。河川流量としては、①常時の平均流量、②降雨時の条件として平成2年2月14日の降雨時観測より推定した降雨時流量をそれぞれ表-1のように与えている。対象海域に流入する淡水流入量は僅かである。平均流量は、昭和59年現況¹⁾等を参照にした。降雨時の流量は、測定値をもとに、12時間継続する平均降雨量として与える。観測時の降雨は6時間継続し、降雨量42mm/日に達し

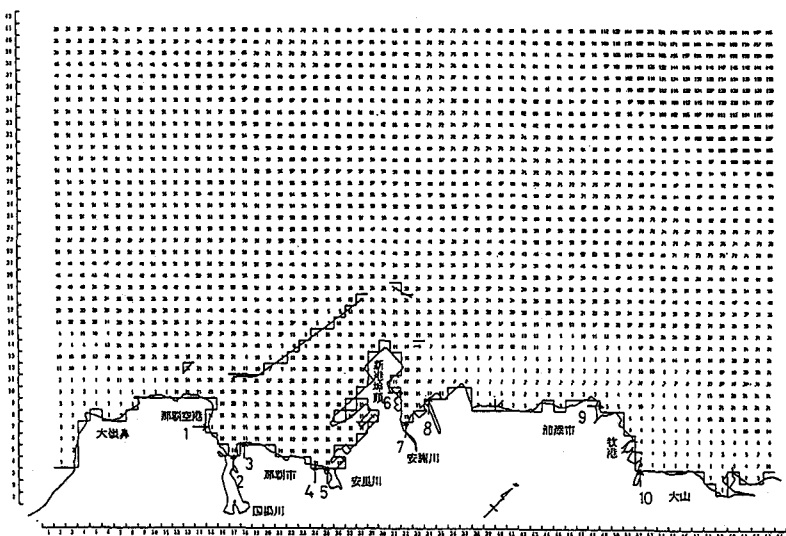


図-3 現況地形と水深 (単位: m)

表-1 淡水流入量

(単位: $\text{m}^3/\text{日}$)

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

ユニット番号は、図-9の流入位置番号に対応。
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。

表-2 濁り流入負荷・粒径分画・沈降速度

(12時間当りの負荷)

ユニット 番号	濁り負荷 $\text{t}/12\text{h}$	代表沈降速度 $\times 10^{-6} \text{ m/s}$ (代表径 μm)
1	0.0002	6.4 (9) 2.5 (5)
2 (国場川系)	1.46 171.2(35%) 318.0(65%)	6.4 (9) 2.5 (5) 40.0 (20)
3	0.411	6.4 (9) 2.5 (5)
4	0.002	6.4 (9) 2.5 (5)
5 (安里川系)	0.146 0.911(20%) 3.644(80%)	6.4 (9) 2.5 (5) 40.0 (20)
6	0.001	6.4 (9) 2.5 (5)
7 (安謝川系)	0.087 1.302(20%) 5.210(80%)	6.4 (9) 2.5 (5) 40.0 (20)
8 (小湾川系)	0.033 0.554(20%) 2.217(80%)	6.4 (9) 2.5 (5) 40.0 (20)
9	0.001	6.4 (9) 2.5 (5)
10 (牧港川系)	0.066 0.992(20%) 3.968(80%)	6.4 (9) 2.5 (5) 40.0 (20)

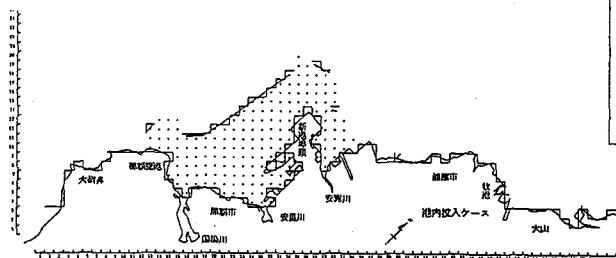


図-4 海水交換用マーカー投入位置

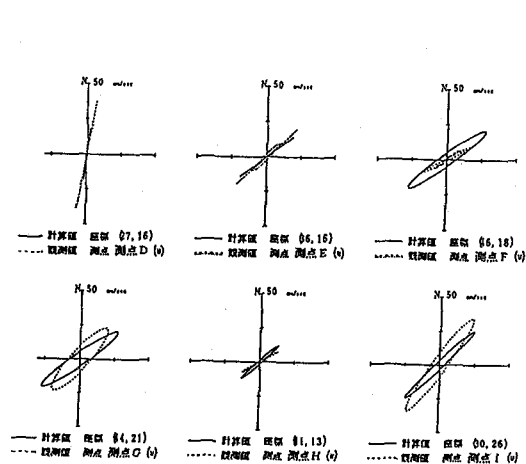


図-5 潮流楕円の比較

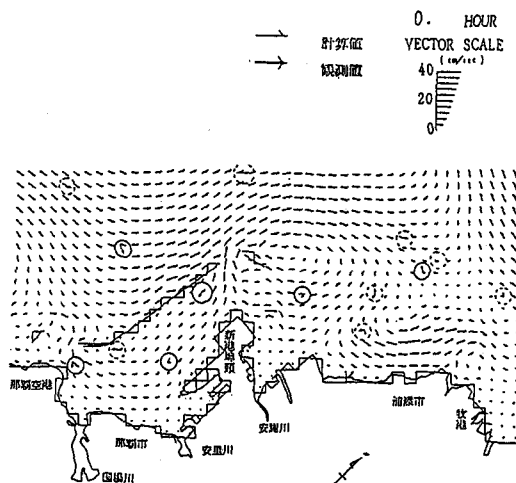


図-6 沿岸恒流の比較

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¹¹⁾である。図-3中の番号は、表-1のユニット番号に一致している。

更に、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)の3種の潮汐条件を与えている。那覇港の潮位の調和常数から、此の海域でのM2、S2の振幅はそれぞれ58.0cm、24.0cmとした。恒流は、一定水位を境界に与えて起こしている。

γ_s は0.0026、水平渦動粘性係数は $1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。

2) 海水交換計算 マーカー投入の潮時は、満潮時・干潮時の2ケースとし、独立して計算する。投入位置を図-4に示す。マーカー数は、176個とやや少ない。時間刻みは60秒とした。

3) 漂流計算 上げ潮時、下げ潮時の2時刻に投入してみた。サンゴ生息分布調査結果を考慮し、図-2に示すA-Dの4箇所の位置から幼生を投入する。幼生の浮遊期間は、一日から一ヶ月程度と言われている^{12,13)}。計算対象範囲の大きさも考慮し、追跡期間は48時間とする。時間刻みは60秒とした。

4) 濁り計算 平均潮のケースについて、常時と降雨時とを比較する。降雨時の河川からの流入濁りについては、平成2年の観測以外に知見が見あたらなかった。ポリユートグラフを推定し、12時間当りのSS負荷量を表-2の様に与える。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粒径分画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 m/s の沈降速度としている。降雨時には、 $10 \mu\text{m}$ 以下の微細粒子と $10 \mu\text{m}$ 以上の粒子とに分画し、2成分で分布を代表させる。 $10 \mu\text{m}$ 以下の粒子割合も表-6の中に掲げる。 $10 \mu\text{m}$ 以下の微細粒子分画は、代表粒径 $5 \mu\text{m}$ とし代表沈降速度 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ を与えた。もう一方の分画には、代表沈降速度として $20 \mu\text{m}$ 粒子の速度 $40 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ を与えた。

4. 計算結果

4.1 流れの計算

1) 再現性 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-5に潮流楕円の実測との比較例を示す。潮流楕円はほぼ再現できている。また、此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-6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。沖合いを除き港湾区域から地先5～6kmの沿岸部にかけでは、現況の流れがほぼ再現できていると言える。沖合い区域では、残差流成分が主に作用する長期の物質輸送等の検討は、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事に留意する必要がある。

2) 残差流の様子 図-6によれば、新港第一防波堤に添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。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となる。ここでは結果を示さないが、大潮時では流向は同じで流速値が増加している。一方、小潮時には流速値が小さくなる。沿岸・港内残差流には潮汐の効果が大きいことがわかった。また、降雨時の残差流を晴天時と比較したところ、河口部直近でも殆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、此の程度の降雨はこの海域の残差流計算結果に影響が殆ど無い。

4.2 見かけの海水交換の計算

1) 港内マーカーの移動 平均潮での流れ場で、満潮時に港内に投入されたマーカーの投入後42時間経過時を図-7に、48時間経過時を図-8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、マーカーが北～北東に流れ出ていることがわかる。また、図-7から8へのマーカーの位置を比べると、上げ潮時には潮汐流に乗って大きく北東方向へ運ばれることもわかる。干潮時投入のマーカーは、投入直後の上げ潮に乗って北～東に流れるため港外に出易く、港内残留数は図-7、8よりも少なくなった。

大潮時には沿岸沿いに大きく北西に流され、小潮時には移動距離は僅かである。何れの潮でも、安里川や

安謝川の河口などで、マーカーが動きにくくなっている。また、与えた降雨時河川流量では、マーカーの移動にも影響を与えていない。

2) 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し、投入後の時間に対してプロットすると、図-9の様に指数的な減衰傾向が認められる。残留率は、小潮、平均潮、大潮の順に減少している。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1)で見てきた移動の様子をよく表現している。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/日となる。閉鎖性内湾で良く言われている値(0.01/日のオーダー)よりも交換はよい事が分かる。

4. 3 サンゴ幼生に見立てたマーカーの漂流の様子

平均潮での上げ潮時投入後の位置追跡図を図-10に示す。此の図は、1時間毎の浮遊位置を48時間にわたって順に結んでいったもので、12時間目毎の位置を小黒丸で示している。投入A、B地点からの幼生は、岸から3 km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。一潮汐間での往復移動距離は、3~6 km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。港内南部C地点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入ると港外へは出づらい。北部D地点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、投入時の潮時によっては安謝川河口域に捕捉されることもある。

大潮時の上げ潮時投入の計算結果を図-11に示す。大潮時には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行く。

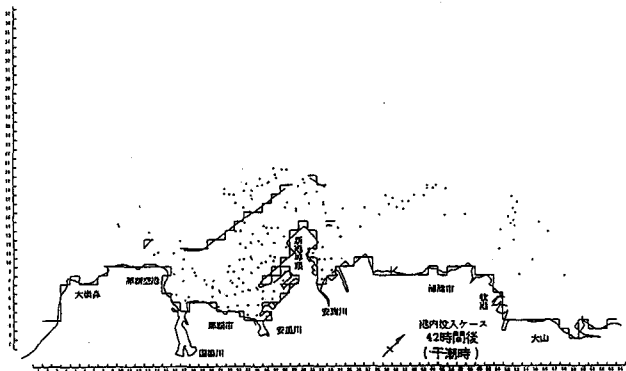


図-7 満潮時投入マーカーの位置(42時間経過後)

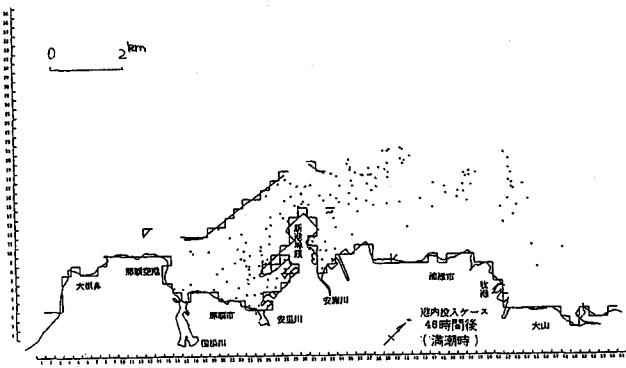


図-8 満潮時投入マーカーの位置(48時間経過後)

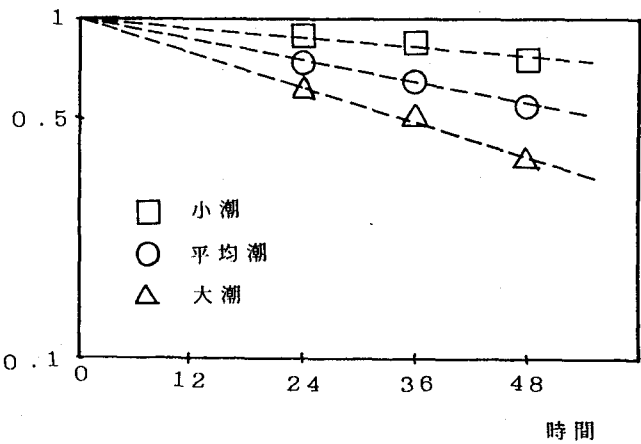


図-9 港内残存率の時間変化(満潮時投入ケース)

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。

4. 4 濁りの広がりや沈積の計算

1) 晴天時の河川流入負荷の場合

平均潮について晴天時の濁りの拡散分布を計算している。結果は示さないが、国場川河口部で僅かの濃度上昇 ($SS \sim 0.2 \text{ mg/l}$) が生じるのみで、殆どの海域では流入負荷の影響は無い。此の状態が6日間続いたときの6日間での累積堆積量を示すと、図-12の様になる。沿岸の淀みがちな海域で $1 \sim 2 \text{ g/m}^2$ 程度の粒子の沈降堆積がみられる。

2) 降雨時の拡散と堆積状況

「上げ潮時より開始した12時間の降雨とその後の晴天」の条件で計算している。拡散状況を図-13、14に示す。図-13は $10 \mu\text{m}$ 以下の粒子、図-14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。

降雨終了後充分な時間が経過した後の堆積量分布を計算している。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 g/m^2 に達している区域も見られる。沖合いの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-15に示す。倭口から港内・那覇防波堤に掛けて 4 g/m^2 (0.0004 g/cm^2) 以上の堆積となっている。また、泊り埠頭前面では 20 g/m^2 程度となる。この 20 g/m^2 のコンター線は、図-12の 1 g/m^2 コンター線とよく似た位置にある。泊り埠頭前面海域では、此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。12時間降雨によるSS負荷は、表-2に示す様に晴天時(24時間分)の約160倍と推定している。

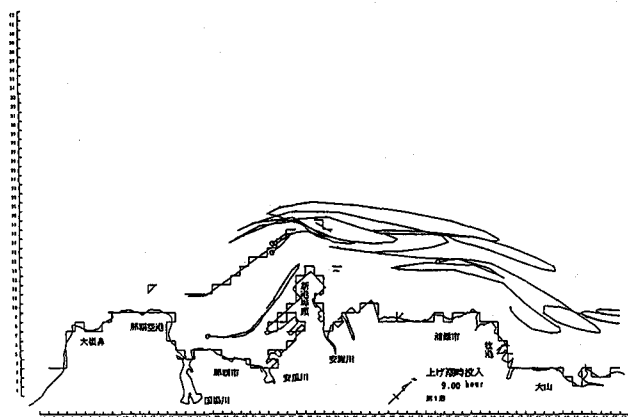


図-10 上げ潮時投入幼生の位置追跡図(平均潮)

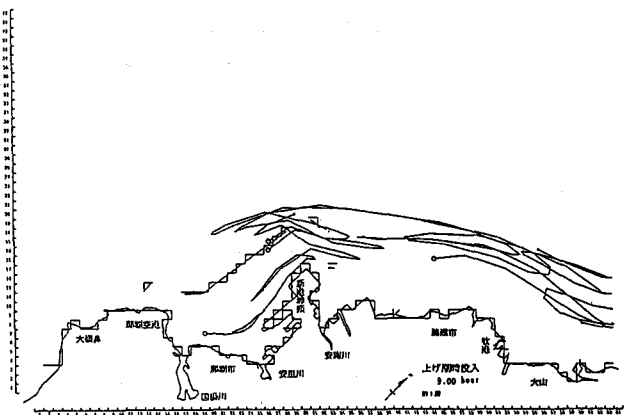


図-11 上げ潮時投入幼生の位置追跡図(大潮)

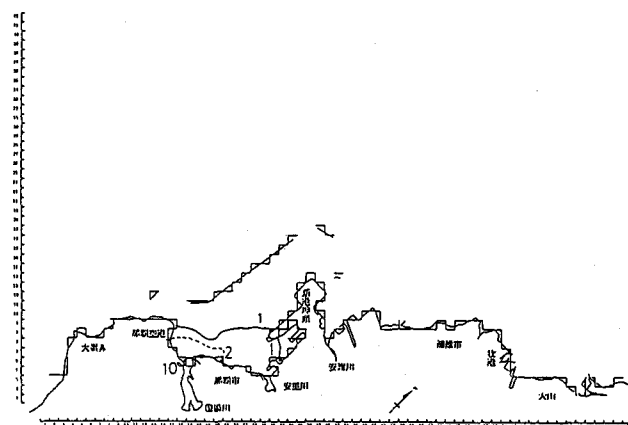


図-12 晴天時6日間の堆積量分布(単位: g/m^2)

5. 解析

5. 1 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

サンゴ移植に対する水質基準濃度や、その他の環境上の要請基準については不明である。濁り分布や堆積量分布から適地・不適地の相対的色分をあえて考えてみる。

濁り分布からは、河川河口部周辺で条件が相対的に悪い。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、外礁の外側礁斜面への濁りの遮蔽によって、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、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とすると、 $0.6 \sim 1.0 \text{ g/cm}^2$ 以下の堆積であれば問題ない事になる。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 $0.024 \sim 0.04 \text{ g/cm}^2$ ($240 \sim 400 \text{ g/m}^2$) 以上の堆積が必要である。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殆ど生じない事になる。ただし、岸沿いの浅瀬や小河川河口等は、淀み域が微細な地形条件で生ずるならば、粒子堆積が集中する可能性もあり注意が必要であろう。海域内に流入した微細粒子の沈降・堆積・再浮遊・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(波・流れによる作用を含め)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

Jamesらの計算とは時間・空間のスケールが著しく異なり小さいが、幼生マーカーの

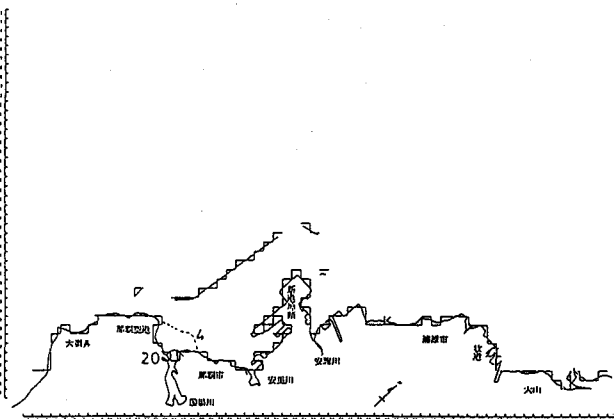


図-1 3 降雨直後の濁りの拡散 ($10 \mu\text{m}$ 以下粒子)

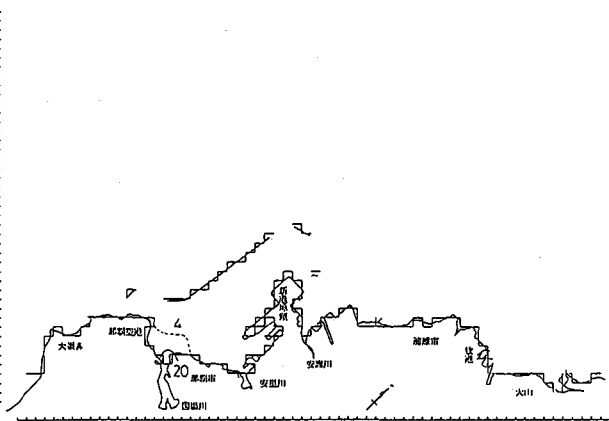


図-1 4 降雨直後の濁りの拡散 ($10 \mu\text{m}$ 以上粒子)

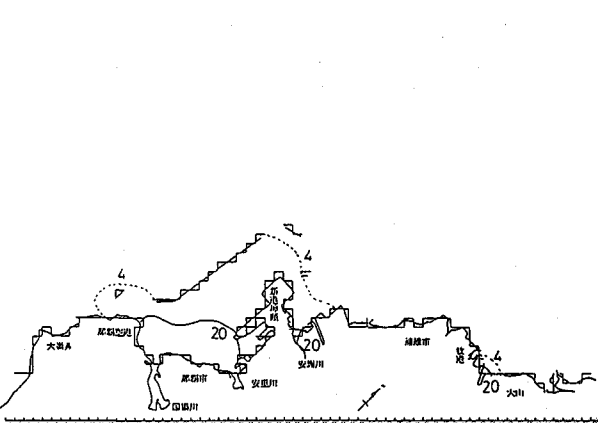


図-1 5 降雨後の堆積量分布(全粒径加算値)

漂流計算からこの地域の礁の幼生の供給性を考えてみる。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。一方、港内の礁から放出された幼生マーカーは、大潮時などでは港外の下流側へと到達するが、港内にとどまる可能性も高い。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礁は、下手側礁との連結性が高い事が予想される。

サンゴの有性生殖の仕組みの研究は、比較的新しい¹²⁾。幼生のサンゴ群体発生に対する役割については、未だ不明点も多い。また、幼生の運搬には、密度の効果や潮目の考慮^{13, 14)}、局所的な渦流の効果^{13, 15)}、風波の作用など、水理的な影響についても定説が定まっていない。流れの様子や、地形の特徴、対象スケール等の場所の条件の検討とともに、遊泳時や着床時の挙動等生物側の生態特性の観察を重ねる必要がる。

5. 3 海域の特徴付けと今後の課題

この区域を分類し特徴づけるとすると、①国場川・安里川の河口部、②国場川から新港埠頭にかけた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、といった具合に大別できる。①の区域ではサンゴの移植や増殖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などの影響を注意しておく事が望ましい。③の区域では、ゆっくりとした濁りの堆積の効果等への配慮が望ましい。④の区域は、守り育てる事が周辺の礁にも良い影響が期待できそうな地域。という事になるろう。

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充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、水理的な特性に加え、サンゴ生態や生息に関し、さらに専門家による多角的総合的な検討が必要である。

水理的検討に関する今後の課題では、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と計算法の改良、密度効果や局所渦の効果のモデル化。④濁りの降雨時の（非定常）流出計算法の検討、⑤サンゴ生態の解明と要望環境値の明確化。

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) Great Barrier Reef Marine Park Authority: Cairns Section Zoning Plan for Public Review 1989
- 6) James M.K. et.al.: Application of larval dispersal models to zoning of the Great Barrier Reef Marine Park, PACON90, pp. 140-145, (1990)
- 7) 那覇港湾管理者：那覇港湾計画資料（その2）——改訂——、1985
- 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：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究、港湾技研資料No. 360, 1980, 222p.
- 10) 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第26巻第3号、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. Wallace et.al.: Sex on the Reef: Mass Spawning of Corals, Oceanus, Vol. 29 No. 2, pp. 38-42, 1986
- 13) Wolanski, E. et.al.: Currents and Coral Reefs, Oceanus, Vol. 29 No. 2, pp. 83-89, 1986
- 14) Wolanski, E. et.al.: Trapping and dispersion of coral eggs around Bowden reef, Great Barrier Reef, following mass coral spawning, Continental Shelf Research, Vol. 9, No. 5, pp. 479-496 (1989)
- 15) 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ミュレーション、港湾技術研究所報告、第30巻第1号、1991、印刷中
- 16) 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、pp. 1-8