

川平湾周辺のサンゴ礁海域における物理・栄養塩環境

Physical and Nutrient Environments of Coral Reef Area around Kabira Bay

神野有生¹・鯉渕幸生²・磯部雅彦³

Ariyo KANNO, Yukio KOIBUCHI, Masahiko ISOBE

Kabira Bay with its adjacent fringing reef is the most important area for tourism and recreation in Ishigaki Island. In recent years, however, concerns on declining water quality and corals have been raised. To improve the aquatic environment, the physical and nutrient environments are studied through in-situ observation, remote sensing, and numerical simulation. As a result; the water exchange of the bay is influenced by a wind-driven, vertical circulation inside the bay and by a wave setup outside the bay; the corals tend to be distributed in high-velocity area outside the bay and in low-temperature area inside the bay; and the discharge of the sewage treatment plant located near the baymouth causes the moat eutrophication.

1. はじめに

石垣島北西部の川平湾周辺海域は、面積約 1.5 km² の内湾・川平湾と、湾外に発達した裾礁からなる海域である。湾内外にサンゴが分布し、遊覧船やスキューバダイビングによって、石垣島随一の観光地として賑わってきた。また一部が保護水面に指定されており、真珠の養殖も行われるなど、重要な漁場でもある。ところが陸域の開発が進んだ 1960 年代後半以降、赤土の堆積・水質の悪化・サンゴの減少が危惧されており(堀越編, 1979)、沖縄県議会でも環境改善策を求める意見がある。しかし、陸域負荷の輸送過程を支配する流動構造や、サンゴの生理にとって重要な水温・流速・栄養塩の分布等、基礎的な物理・栄養塩環境が十分に把握されていない。そこで本研究では、川平湾周辺海域の海水交換・栄養塩環境について、今後の水環境管理に資する知見を得ることを目的とする。

まず栄養塩に関して、1994 年以降のデータが乏しい。特に同年より、下水処理場である川平浄化センターが湾口付近で稼動し、処理水を場内地下浸透により放流しているが、その影響は未知である。そこで本研究では、現地観測による栄養塩環境の現状把握を試みた。

また図-1 のように、当海域は閉鎖性内湾と裾礁が隣接した地形を有し、湾内外は裾礁を貫く水路で接続されている。湾内には、水路と連続した深部(以下、滞筋)と、干潟、窪地等が存在し、起伏が大きい。そこで本研究では、このような複雑な地形における海水流動構造、水温・流速分布等の物理環境、それらとサンゴ分布の関

係を解明するため、碎波、礁嶺の干出、底面熱収支等サンゴ礁海域特有の現象を再現できる数値流動モデルによって、高解像度の解析を行った。

2. 現地観測

現地観測としては主に水質・水深・流速観測を行った。栄養塩はブラン・ルーベ社の AACS-III により硝酸態窒素(NO₃-N)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、リン酸態リン(PO₄-P)、ケイ酸態ケイ素(SiO₂-Si)について測定した。

図-2 は、2006 年 7 月 27 日午前 10 時～11 時に測定した、水路・滞筋沿い 5 点(図-1 の Sta. A～E)におけ

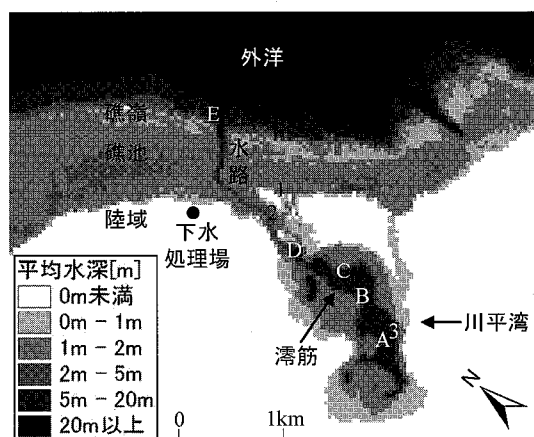


図-1 川平湾周辺の水深分布

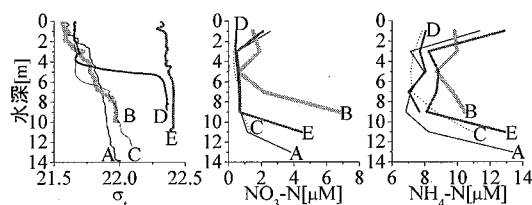


図-2 水路・滞筋沿い 5 点における鉛直水質分布

- | | |
|-------------|----------------------------------|
| 1 学生会員 修(環) | 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 |
| 2 正会員 博(工) | 東京大学講師東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 |
| 3 フェロー 工博 | 東京大学教授東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 |

表-1 Sta.B 付近における過去の栄養塩観測結果
(沖縄県水産試験場編 (1981, 1982) より引用)

年月日	深さ	水温	塩分	DO	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P
	m	℃	psu	mg/l	μM	μM	μM	μM
1979/8/30 15:00	0	28.9	33.9	5.49	1.45	0.07	0.1	0.72
	7.5	27.6	34.5	4.48	1.14	0.06	0.05	0.6
	15	27.3	34.4	4.87	1.89	0.14	0.1	1.4
1980/7/23 13:39	0	31.6	33.1	4.78	1.18	0.12	0.24	0.14
	7.5	30.4	34.2	4.06	0.27	0.05	0.29	0.07
	15	29.4	34.1	2.87	0.65	0.14	1.1	0.13

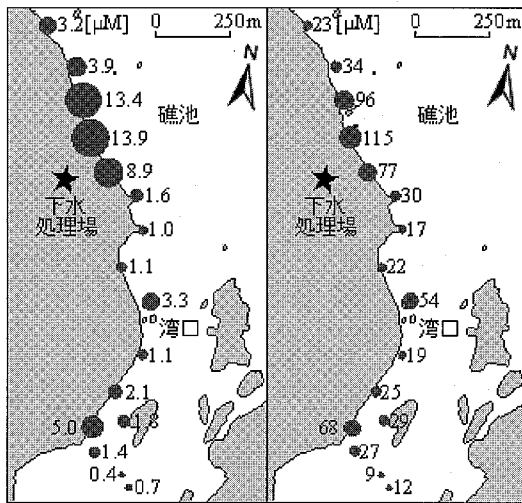


図-3 湾口周辺の平均 NO₃-N 分布
(a)現場実測濃度 (b)推定された陸起源水濃度

る鉛直水質分布である。ただし σ_t は 1 気圧での 1000 kg/m³ を基準とした海水密度を、単位 M は mol/l を表す。湾口の Sta.D では上層で外洋、下層で湾内に近い密度を示し、鉛直循環流の存在を示唆している。滞筋では弱成層のもと、底層で高濃度の NO₃-N、NH₄-N が観測された。表-1 に、沖縄県水産試験場編 (1981, 1982) より夏季弱成層時の Sta.B 付近における水質観測結果を引用する。この結果でも、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P が底層で相対的に高濃度であった。また同試験場編 (1985) の湾内底質調査結果では、滞筋において相対的にクロロフィル a 含有率が小さく、有機炭素・フェオ色素含有率が大きい。以上から、植物プランクトン由来の有機物が滞筋底質に堆積し、分解生成物の栄養塩が底層水に供給されていると考えられる。

図-3(a)は、湾口周辺 16 地点 (水深 0.2 m 以上) の表層において、下げ潮・最干潮・上げ潮時に観測した NO₃-N の平均値である。下田ら (1998) 等によれば、サンゴに適した NO₃-N は 1.4 μM 以下であるが、下水処理場近傍の礁池では下げ潮・最干潮時の NO₃-N が 10 μM を超えており、サンゴの生息に不適と判断される。

図-3(b)は、現場で採取した水サンプルを、NO₃-N が

0 の外洋水と塩分が 0 の陸起源水の混合物であると仮定し、次式で推定した陸起源水の NO₃-N である。

$$C_{land} = \frac{S_{ocean}}{S_{ocean} - S_{obs}} \cdot C_{obs} \quad (1)$$

ここに、 C_{land} 、 C_{obs} はそれぞれ陸起源水、水サンプルの NO₃-N であり、 S_{ocean} 、 S_{obs} はそれぞれ外洋水、水サンプルの塩分である。推定値には単純な仮定による誤差が含まれると考えられるが、現場の濃度と同様に、陸起源水濃度も処理場周辺で顕著に高い値を示す。以上は、下水処理場から地下浸透で放流された処理水が近接する礁池に滲出し、富栄養水塊を形成した結果と考えられる。

3. 数値流動モデルの開発

数値流動モデルは、静水圧近似とブシネスク近似を仮定した Navier-Stokes の式、連続式、水温・塩分の移流拡散方程式、海水の状態方程式を基礎方程式とする鯉測ら (2001) の σ 座標標準 3 次元流動モデルをベースとした。サンゴ礁海域に対応するため、時空間差分精度の改善の他、以下の開発を施した。

(1) 干出・冠水モデルの追加

潮位変動に伴う湾形状の変化や、礁嶺の干出による影響を再現するため、干出・冠水モデルを追加した。

(2) 波浪推算モデルとの結合

礁嶺における碎波の効果を再現するため、運動方程式に radiation 応力項を追加し、第 3 世代波浪推算モデル SWAN の計算結果を入力する 1 方向結合を行った。

(3) 底面鉛直熱収支モデルの追加

二瓶ら (2001) が示したように、浅く透明度の高いサンゴ礁の温熱環境では、底質の影響が無視できない。そこで、地中熱伝導および底面熱収支を解くモデルを構築・追加した。即ち各時間ステップにおいて、海底面から底層水への顕熱輸送量 H を、次の熱伝達式で評価する。

$$H = C \cdot (T_{sediment} - T_{water}) \quad (2)$$

ここに、 C ：熱伝達率、 $T_{sediment}$ ：底面温度、 T_{water} ：流動モデル最下層の水温である。次に、底面における次の熱収支式により、地中伝導熱 G (鉛直下向きが正) を評価する。

$$G = L - H \quad (3)$$

ここに、 L は底面における正味短波放射量であり、下向き日射量と上向き日射量の差として次式で与えられる。

$$L = S \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta) \cdot \exp(-k \cdot H) \cdot (1 - \gamma) \quad (4)$$

ここに、 S ：下向き日射量、 α ：水面アルベド、 β ：表面吸収率、 k ：吸収係数、 H ：全水深、 γ ：底面アルベドである。計算された地中伝導熱 G を境界条件として、地

中の鉛直 1 次元熱伝導方程式を解いて地中温度分布を求め、底面温度 T_{sediment} を、次の時間ステップにおける式 (2) に入力する。

4. 水温の再現計算

数値流動モデルの再現性を検証するため、川平湾内外 3 点 (図-1 の Sta.1 ~ 3) における、沖縄県水産海洋研究センター石垣支所による水温連続観測結果 (2005/5/25 ~ 2005/6/2; 6 時間間隔) の再現計算を行った。以下に計算条件と結果を示す。用いたパラメータは表-2 に示す。

(1) 地形条件

複数の水深データソースを GIS 上で重ね、TIN 補間により 34 m 解像度の格子水深データを作成した。外洋深部のソースには海上保安庁提供の J-BIRD、MGD-77 データを、礁斜面より陸側のソースは、同庁提供のレーザー測深データ、衛星画像 (ASTER センサ; 東京大学生産技術研究所安岡研究室提供) の重回帰分析結果等を用いた。図-1 が、作成した計算領域の格子水深データである。

(2) 気象条件

降水量は川平アメダスの観測値を、その他の気象項目は石垣地方気象台の観測値を用いた。

(3) 波浪条件

中村・工藤 (1996) は礁斜面における波高観測結果より、有義波高 $H_{1/3}$ [m] と礁嶺に垂直な風速成分 V_w [m/s] (陸の向きが正) との間に次の関係式を作成した。

$$\begin{cases} H_{1/3} = 0.221 & (V_w < 1.3) \\ H_{1/3} = 0.1892 V_w + 0.0545 & (V_w \geq 1.3) \end{cases} \dots\dots (5)$$

本研究では式 (5) より作成した有義波高と、石垣港の波浪観測データに基づく帰帰式で求めた平均波周期を、計算領域の上境界から y 軸負の向きに入力して SWAN の計算を行い、radiation 応力分布の時系列を作成した。

(4) 境界条件

左右の開境界は流速・水位・水温・塩分とも slip 壁条件を与えた。上開境界では、流速は勾配ゼロの条件、水位は石垣港における潮位、塩分は JODC の塩分統計による 5 月の平均値、水温は米軍の海洋モデル NLOM 1/16° による SST 計算結果を与えた。礁斜面で行った水圧の連続観測により、川平湾付近の外洋潮位と、石垣港の潮位との間に位相・振幅差がほぼないことを確認している。

次に陸境界の淡水流入条件について述べる。まず国土地理院数値地図 25000 の 50 m メッシュ標高データをもとに、計算対象領域を 52 の集水域に分割し、集水域ごとに沿岸の流出点を設定した。その後各集水域に貯留関数法を適用して、流出点の時系列流量を計算した。

(5) 初期条件

初期の水温・塩分分布は、全域において、JODC の水

温・塩分統計に基づく当該域の鉛直分布を与えた。地中温度は最下層水温を鉛直方向に均一に与えた。

(6) 再現計算結果

図-4 に、水温の観測値と計算値を示す。各点の水温レベルに加え、湾内に比べて日変動の大きい礁池の状況など、日ごとの日変動の大小やその地点間の差異を再現できており、本モデルの再現性が確認できた。

5. 数値実験

(1) 川平湾周辺海域の平均的な流動構造

当海域の平均的な流動構造を把握するため、3. で構築

表-2 計算に用いたモデルのパラメータ

流動計算	時間刻み幅 [s]	6
	w, y, σ 方向メッシュ数	151, 123, 10
	w, y 方向メッシュサイズ [m]	34
	底面摩擦係数	0.0026 (水深 $H \geq 2$)
		$g \cdot n^2 / H^{1.33}$ ($H < 2$) $n = 0.026$
	水平渦動粘性係数 [m^2/s]	0.05
鉛直熱輸送計算	水平渦拡散係数 [m^2/s]	0.05
	海表面アルベド	0.06
	海底面アルベド	0.25
	水中吸収係数 [$1/\text{m}$]	0.11
	地中空間解像度 [m]	0.10
	底面一下層水間熱伝達率 [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	3488
	地中深さ [m]	2
	地中熱拡散係数 [m^2/s]	5.9×10^{-7}
	地中熱容量 [$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$]	3.0×10^6
	周波数分割数	32
波浪計算	方向分割数	36
	y 軸に対する入射角 [deg.]	-180

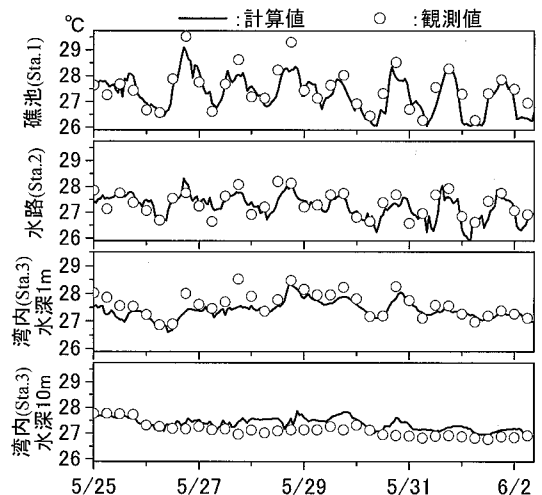


図-4 水温の計算値と観測値の比較

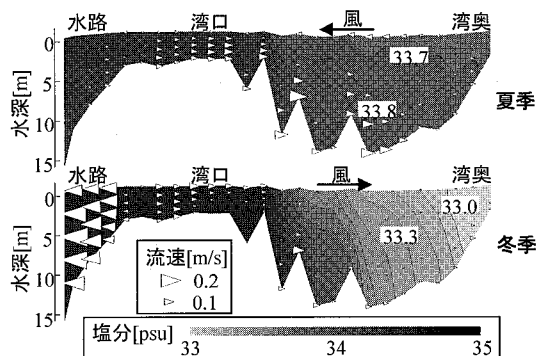


図-5 定常状態における流速・塩分の鉛直断面分布

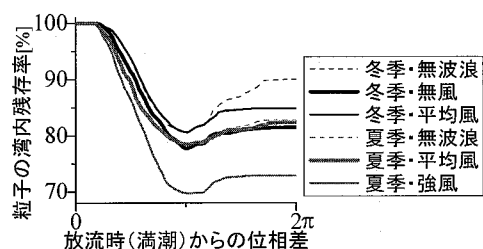


図-6 放流後1潮汐間の湾内残存率の変化

表-3 定常状態の計算条件

分類	項目	1月	7月
気象条件	気温[℃]	18.3	29.3
	風向	NNE	SSW
	風速[m/s]	4.9	4.9
	全日射量[J/m ² s]	103	259
	降水量[mm/h]	0.21	0.20
波浪条件	開境界有義波高[m]	0.66	0.22
	開境界平均波周期[s]	4.18	3.2
潮汐条件	開境界振幅 (M2分潮) [m]	0.438	0.438

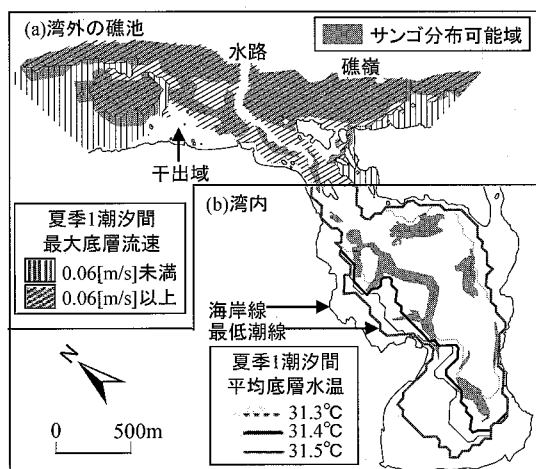


図-7 サンゴ分布可能域と物理環境の対応

した数値流動モデルに、夏季・冬季の平均的な気象・海象条件を入力し、定常状態を計算した。気象条件として夏季(7月)・冬季(1月)の石垣地方気象台における平年値を、開境界水位として石垣港におけるM2分潮を、開境界の水温・塩分値としてJODCの水温・塩分統計による当該月の平均値を用いた。ここで定常状態とは、水温・塩分・流動の変動がM2分潮の周期をもつ状態である。主な計算条件を表-3に示す。モデルのパラメータおよびその他の条件は4.と同一である。

水路から滞筋に至る鉛直断面における、満潮時の塩分・流速分布を図-5に示す。滞筋では、底層で湾奥、表層で湾口に流れる鉛直循環流が存在する。水平密度差は冬季が夏季より大きい。鉛直循環流は、表層の流向と風向が一致する夏季に強く、逆となる冬季に弱い。従って鉛直循環流の強弱は主に風に支配されると考えられる。

次に川平湾の海水交換特性を調べるため、定常状態の湾内に6270個の受動粒子を満ち、様々な条件下で満潮時に放流後、1潮汐間の移動を追跡した。図-6は、風速を平年値のそれぞれ0, 1.2倍とした「無風」「平均風」「強風」、および風速は平年値であるが波浪の効果を考慮しない「無波浪」の各ケースについて、湾内に残存している粒子の割合の時間変化を示したものである。下げ潮時における湾外への粒子排出率は、冬季は無風時に、夏季は強風時に大きく、平均風時は夏季が冬季より大きい。即ち、風が鉛直循環流を強めるほど、下げ潮時の排出率は大きくなり、結果的に1潮汐後の湾内残存率は小さくなる。以上から、風が鉛直循環流を介して、湾内の海水交換の大小を決定付けていることがわかる。

また、波高が夏季より大きい冬季には、無波浪時より平均風時に、上げ潮時の湾内残存率増加量が小さい。これは礁嶺におけるradiation応力勾配によって、外洋付近の水路で風速に抗する外洋向きの流れ(図-5下段)が生じ、周辺の粒子を外洋に輸送するため、下げ潮時に湾外に出た粒子が、上げ潮時に湾内に再流入しにくいのである。平均風時と無波浪時における1潮汐間粒子排出率の差によれば、拡散を無視した場合、湾外の波浪によって湾内水の排出が約52%増加している。

(2) 物理環境とサンゴ分布の関係

物理環境とサンゴ分布との関係を調べるため、湾外の礁池および湾内について、生死サンゴまたはその基盤岩がある領域(サンゴ分布可能域)を過去の調査結果および空中写真の判読により特定し、計算された水温・流速・水深と比較した。

湾外の礁池では、山野ら(1996)の調査結果等より、生物群集としてサンゴが卓越していると判断されるため、10 cm解像度空中写真画像から判読した暗色部をサンゴ分布可能域とした。サンゴ分布可能域と水温・水深分布

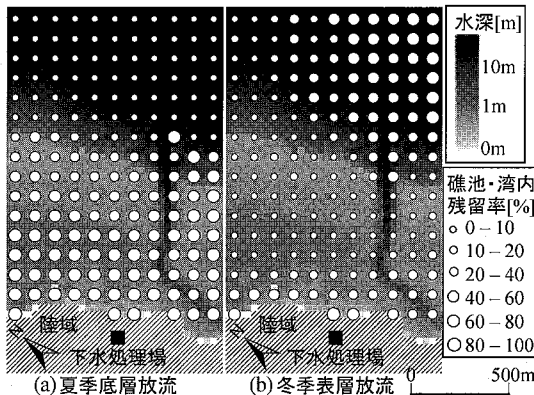


図-8 粒子放流点と半潮汐後の礁池・湾内残留率

の間に関係は認められなかったが、図-7(a)のように、夏季の1潮汐間最大底層流速が0.06[m/s]以上の領域が、サンゴ分布可能域にほぼ一致した。サンゴはシルト等の堆積物により衰弱するが、1潮汐間最大底層流速は定常状態におけるサンゴ体からの堆積物除去の可否を決める物理量であり、また夏季は冬季より流速レベルが低いことから、礁池では堆積物の有無がサンゴ生息分布の支配要因とみられる。

湾内に関しては、10 cm 解像度空中写真において、堀越(1979)がサンゴ分布調査を行った10測線に連続する暗色部を、サンゴ分布可能域とした。サンゴ分布可能域と流速・水深分布との間に関係は認められなかったが、図-7(b)のように、サンゴ分布可能域のほとんどは、夏季の平均底層水温が31.4℃未満の部分に属していた。

以上から、湾外では流速が、湾内では水温が、サンゴの分布を制限している可能性がある。この差異は、湾内外でのサンゴの種類の違いに帰着される。また湾内で低流速部にサンゴが分布していること、低水温部にも分布していない領域があることは、複数の環境因子が複合的にサンゴ分布可能性に寄与しているためと解釈できる。

(3) 下水処理水の放流位置の検討

2. で確認された富栄養の下水処理水は、礁池・湾内に生息するサンゴへの栄養塩負荷低減の観点から、速やかに外洋に排出されることが望ましい。この目的にかなう放流点を探すため、夏季・冬季の定常状態において、下水処理場近傍多点の表層・底層から1潮汐間に12回、受動粒子を放流し(計4ケース)、半潮汐・1潮汐後の礁池・湾内残留率を比較した。図-8には半潮汐後の例を示したが、放流点間の相対的な大小は1潮汐後も同様である。残留率は図-8(a)のように、礁池の放流点で大きく、礁嶺外の放流点で小さいことが予想される。しかし図-8(b)に示した冬季表層放流では、NNE風による吹送流によって水路沖合の粒子が礁池に輸送される一方、(1)で述べた海浜流によって礁池の粒子が水路から外

洋に輸送される結果、残留率は礁池で小さく、水路沖合で大きくなった。このように、吹送流・海浜流に依存して、各ケースで残留率の分布は異なったが、4ケースとも、残留率は現在の下水処理水滲出点に相当する汀線付近の放流点で大きく、水路から離れた礁嶺外の放流点で小さかった。すなわち、下水処理水の放流位置の変更によって、礁池・湾内に生息するサンゴへの栄養塩負荷を低減できる可能性がある。

6. ま と め

本研究で得られた主要な知見は以下の通りである。

- (1) 川平湾の海水交換の大小は、主に滞筋の鉛直循環流の強弱に依存し、循環流の強弱は風に支配されている。冬季には、礁嶺での砕波で生じる海浜流が、下げ潮時に湾外に出た湾内水の再流入を防ぎ、海水交換に寄与する。
- (2) 礁池では流速の大きな部分に、湾内では水温の低い部分にサンゴが分布する傾向がある。
- (3) 湾外礁池に滲出する下水処理水の影響で、礁池の一部がサンゴの生息できない富栄養環境となっている。この問題は、水路から離れた礁嶺外への放流位置変更で解決できる可能性がある。

謝辞：本研究では、海上保安庁海洋情報部から航空レーザー測量データを、沖縄県水産海洋研究センターから水温連続観測データを、東京大学生産技術研究所安岡研究室からASTER画像を提供頂いた。また観測にあたって琉球真珠(株)にご協力頂いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 沖縄県水産試験場編(1981): 昭和54年度沖縄県水産試験場事業報告書, p. 238.
- 沖縄県水産試験場編(1982): 昭和55年度沖縄県水産試験場事業報告書, p. 179.
- 沖縄県水産試験場編(1985): 昭和58年度沖縄県水産試験場事業報告書, pp. 219-236.
- 鯉淵幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2001): 東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1076-1080.
- 下田 徹・市川忠史・松川康夫(1998): 南西諸島のサンゴ礁における栄養環境とそのサンゴ生育への影響, 中央水産研究所研究報告, 12号, pp. 71-80.
- 中村 仁・工藤君明(1996): 川平サンゴ礁の海水流動におけるリーフによる流れのモデル化, 海洋科学技術センター試験研究報告, 33号, pp. 55-64.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水(2001): サンゴ礁海域の温熱環境特性に関する多面的観測と解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1146-1150.
- 堀越増典編(1979): 環境科学としての海洋学3, pp. 145-169.
- 山野博哉, 茅根 創, 松永恒雄, 工藤君明(1996): 石垣島川平サンゴ礁の帯状構造, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 312-313.