

移植サンゴの生育と環境条件の関係について

本多 牧生^{*1}

サンゴの生育は水温、塩分、光、透明度等に制約され、その成長度は海水環境に大きく左右される。サンゴの生育と環境条件の相関関係を明らかにするため移植サンゴの生育状況とともにサンゴ礁造園モデル海域において気象・海水環境状況について観測した。

移植サンゴの生存率は1年後で80%以上であり概ね順調に生育していたが人工ノル下段上の移植サンゴの死亡が比較的多かった。

環境状況の観測の結果、冬季に見られた水温の低下、及び大気中での光強度の低下がサンゴの生育に影響を与えたと考えられる。さらに流速、波高の増加に伴う濁度の増加が海水中の光透過特性を悪化させ人工ノル各基盤上のサンゴの生育度に差を生じさせたことが推定された。

キーワード：サンゴ生育と環境、水温、光環境、濁度

The Effect of Environmental Conditions on the Growth of Transplanted Corals

Makio HONDA^{*2}

The growth of coral depends on environmental factors such as water temperature, salinity, light condition, and transparency. In order to recognize the relation between the growth of coral and environmental factors, the natural environmental condition has been investigated in the model area of the CORAL REEF PROJECT by observing the growth of transplanted corals on the artificial knoll.

Most of transplanted corals have grown well and the survival rate has been more after 80% after 1 year. But relatively more coral died on the lower base.

As a result of the investigation of the environment, it was conjectured that the fall of water temperature and light intensity in winter had a bad effect on the growth of transplanted corals. Furthermore the increase of the turbidity caused by the increase of wave height and current velocity perhaps made the light condition underwater worse and brought about the difference in the growth rate on each base of the artificial knoll.

* 1 海洋開発研究部

* 2 Marine Research and Development Department

Key word : growth of coral and environmental condition, water temperature, light condition, turbidity

1 はじめに

地球環境汚染が世界的に進行しつつある現在、人々は汚染物質の抑制技術の確立、代替エネルギー技術の研究開発に着手し始めた。一方では破壊されつつある自然環境の保全・保護にも本格的に力を注ぎだした。その中でもサンゴ礁は多くの人々にとって親しまれてきた海域であり、またその崩壊が顕著であったため以前から保全・保護を行うべき重点海域として注目されてきた。日本では世界的にも貴重とされている沖縄のサンゴ礁が、1972年の本土復帰以降の陸内・沿岸部の乱開発、及び同時期のオニヒトデの大発生により大きく攪乱され一時は壊滅状態となった。

サンゴ礁は観光資源、漁業資源として重要なだけでなく生きた防波堤として陸地を台風や荒波による海岸侵食から守る役割を果たしている。さらに熱帯・亜熱帯海域に位置しているにもかかわらず高い基礎生産力を有し、また地球上で最も活発な炭酸塩固定が行われているため、地球環境における海洋の果たす役割についての研究を行う上で重要な海域と位置づけられている。

サンゴ礁は対内に共生藻をもつ造礁サンゴの骨格形成活動により歴史的時間をかけて構築された生きた沿岸構造物である。そのため一度崩壊したサンゴ礁が元の状態に自然に回復するためには数十年、数百年の歳月が必要となる。従って崩壊し

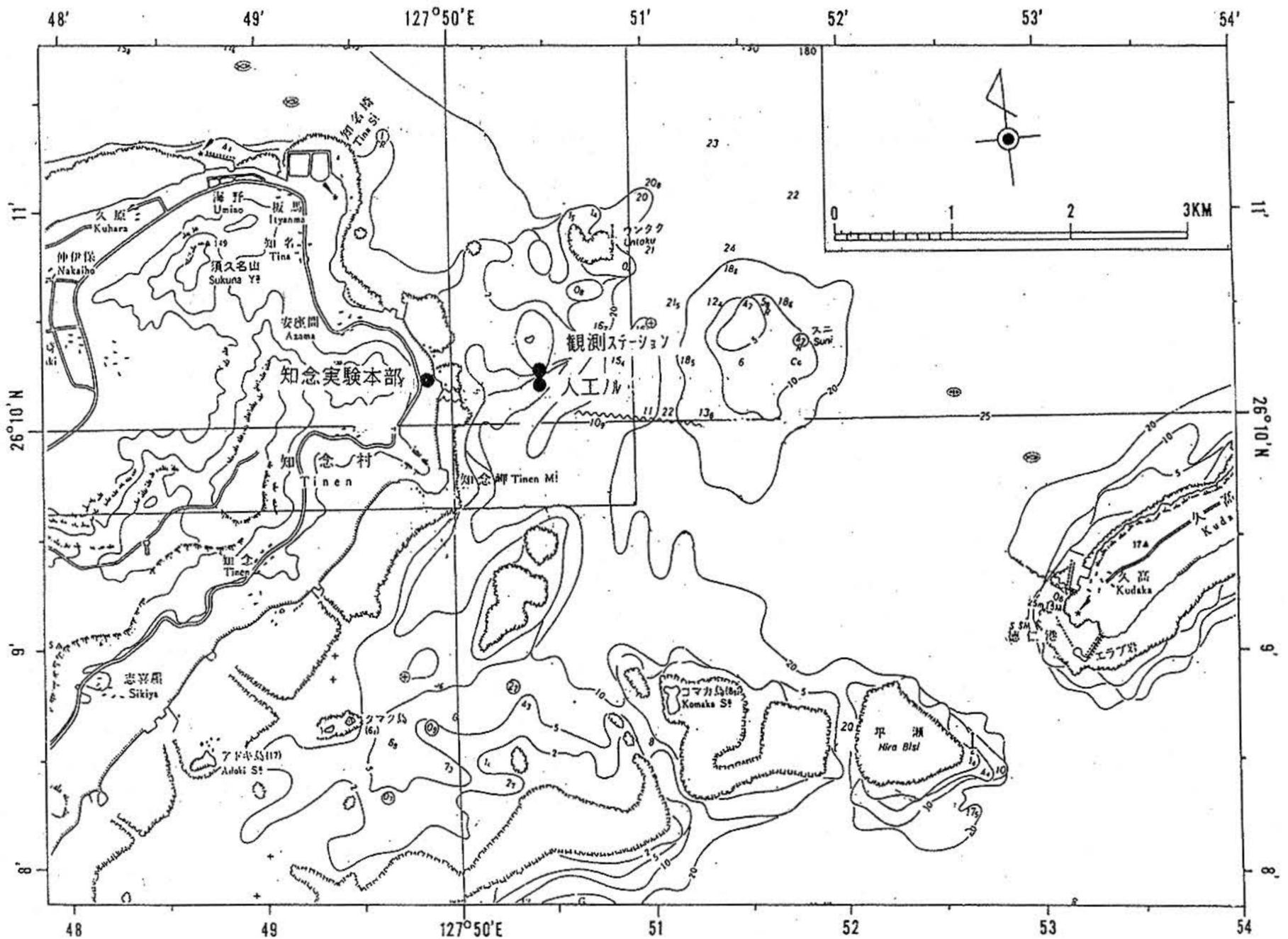


図1 サンゴ礁造園モデル海域

Fig. 1 Model area of coral reef project

たサンゴ礁を比較的速く、かつ確実に復元するためにはサンゴの自然の回復力を保護しながら人工的にサンゴ礁の回復力を促進させ修復する技術の研究開発が重要となる。

当センターが沖縄県と共同で実施中の「サンゴ礁造園技術の研究開発」は、サンゴの持つ無性生殖能力を活かし¹⁾ 海域の環境を整備しながら、サンゴ礁を復元・造園するための移植技術の研究開発とその効果の調査研究を行うものである。昭和63年に沖縄本島周辺におけるサンゴ礁現況調査が行われ²⁾、平成元年にはモデル海域である沖縄本島南東部の知念村沖(図1)に移植基盤となる人工ノル、及び自然環境を観測調査する起点となる観測ステーションが設置され実証研究が開始された^{3) 4)}。

サンゴ礁を構成する造礁サンゴは非常に繊細な動物でありこの成長速度は生息する海水環境に大きく左右される。そのため移植しサンゴ、及び天然のサンゴ、及び天然のサンゴ礁の生息度を調査し、今後の変遷を予測するためには生息海域の海水環境の調査が重要不可欠となる。本報告ではサンゴの移植場所である人工ノル周辺で約1年にわ

たり実施した自然環境の調査結果についてまとめサンゴ生息にとっての海水環境条件について考察を行った。

2 移植サンゴの生息度

サンゴの移植基盤である人工ノルへのサンゴの移植は平成元年の7~8月に行われた。移植された約600片のサンゴをダイバーにより不定期に観察し、その死亡数を調査した。移植サンゴは概ね順調に成長し約一年後の生存率は80%以上であった⁵⁾。これは他の国で行われている移植実験の結果に比べても引けを取らないものである⁶⁾。

図2 は移植サンゴの死亡率(死亡数/実移植数)の変遷を示したものである。移植後4ヶ月経過した12月の調査では人工ノル下段のサンゴが2個体死亡したのみでほとんどのサンゴは生存していた。しかし、3月の調査時点では人工ノル上段、中段にも死亡したサンゴが観察され全体の死亡率が7%を越えた。特に下段のサンゴの死亡率が10%を越えており全体の死亡率を引き上げている(調査の結果死んだサンゴ属はほとんどがハナヤサイサンゴであった)。7月の調査時点では全体

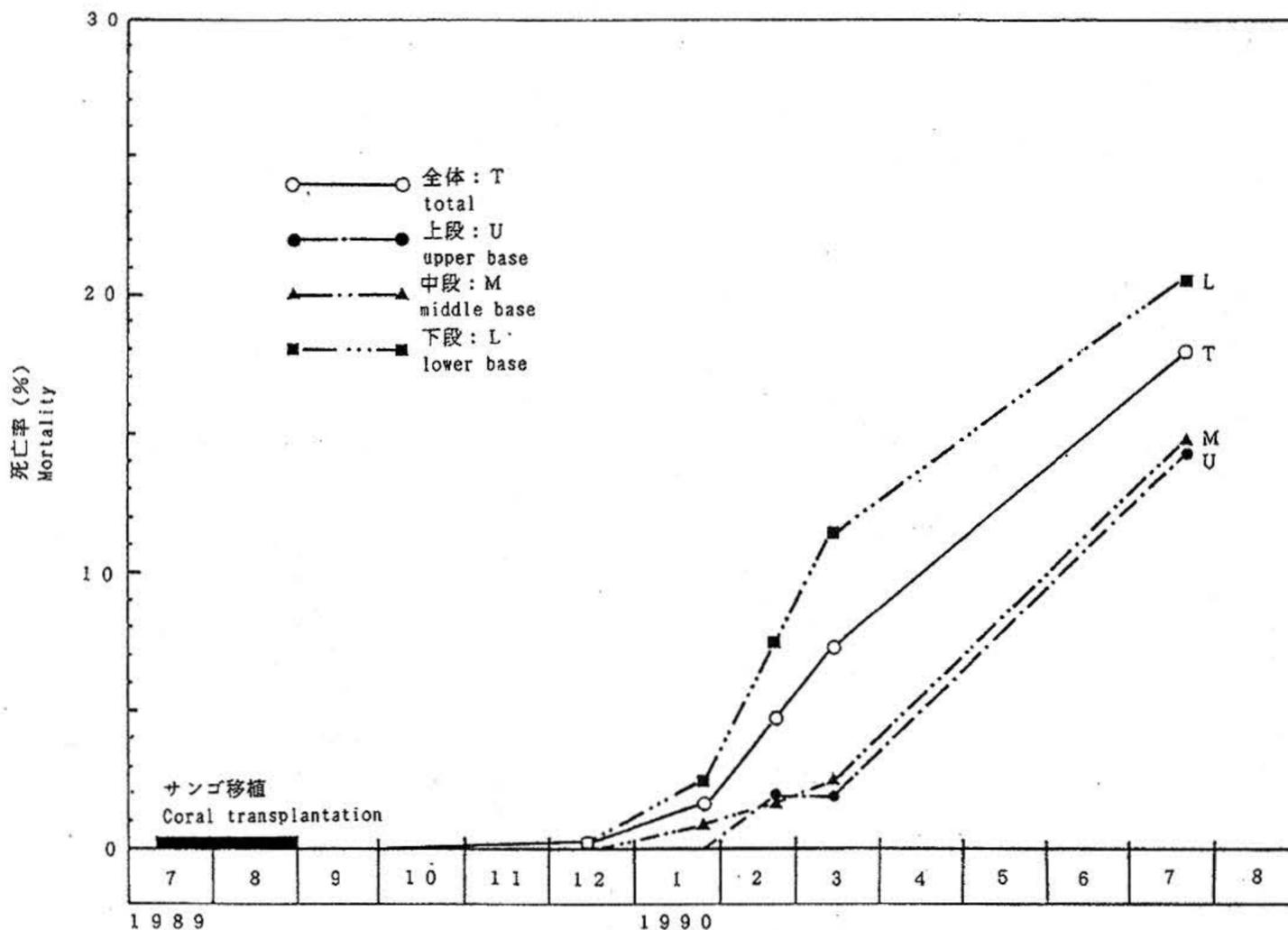


図2 移植サンゴ死亡率(死亡数/実移植数)

Fig 2 The mortality of transplanted corals
(number of deaths/total of transplanted corals)

の死亡率は18%となった。下段の死亡率は20%を上回った。この期間下段の移植サンゴの死亡速度は（単位期間あたりのサンゴの死亡率増加度）は低下したものの上段、中段のサンゴ死亡速度がやや増加している（尚、中段で見られたオニヒトデによる死亡サンゴは今回の計算からは除外している）。

これら移植サンゴの死亡は人工ノル周辺の海洋環境条件が悪化したためと考えられる。サンゴの死亡が各期間のどのような環境変化により発生し

たのかを同期間に調査・観測された人工ノル周辺の自然環境状況から以下に考察していく。

3 人工ノル周辺の環境状況

3.1 海底状況

図3は人工ノル南側の海底地形、及び底質の粒度分析結果を示したものである。底質の平均粒径は人工ノルと観測ステーションの周辺の海底ではBポイントを除くと各地点とも $\Phi 0$ 以下（直径

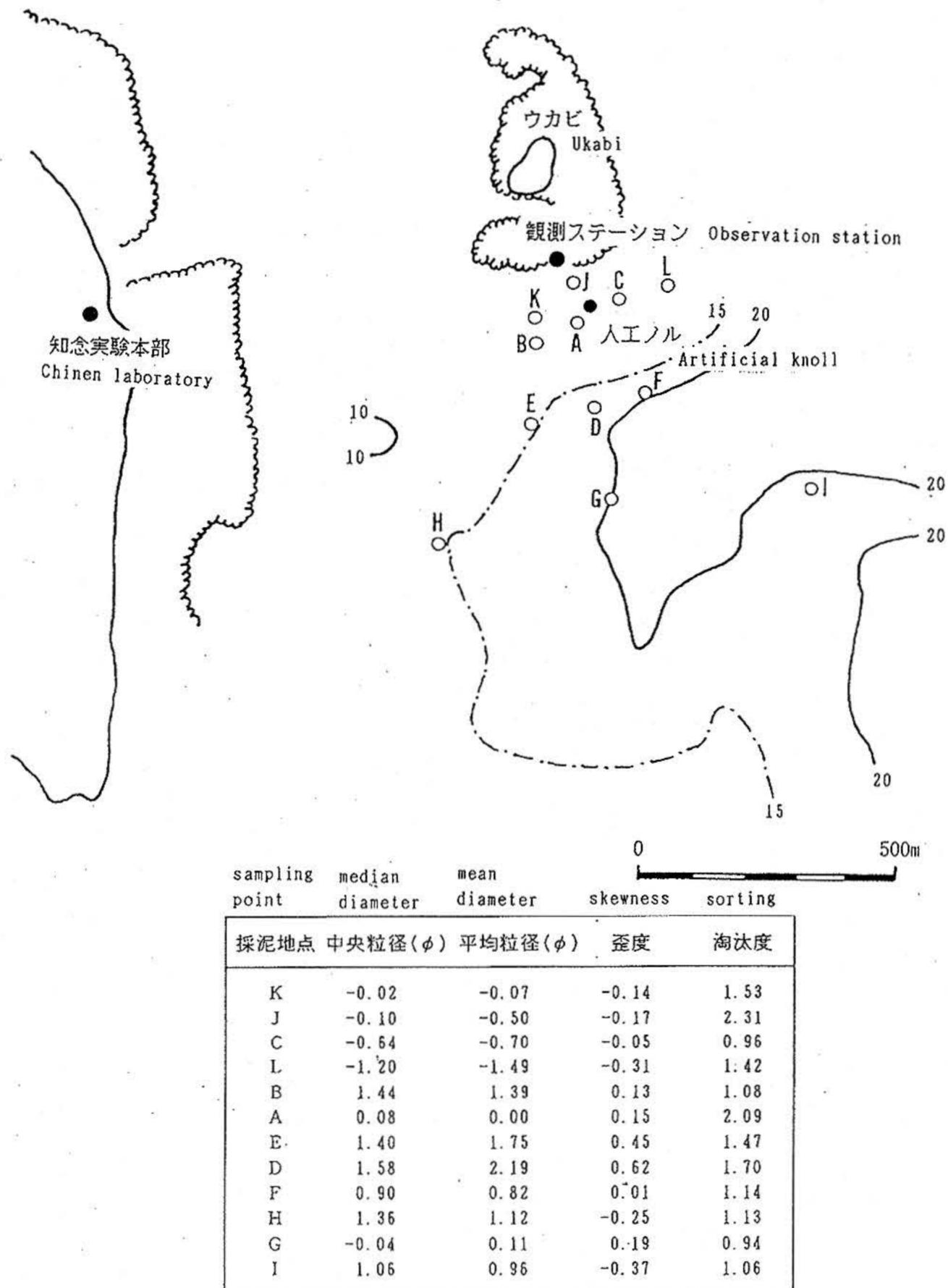


図3 人工ノル周辺の水深及び底質組成

Fig. 3 The water depth and the composition of the sediment around the artificial knoll

2 mm以上) となり, 日本水路部式の基準に基づけばこの海域の底質が粗粒砂~細礫で構成されていることが明らかとなった(実際底質サンプルには, 直径2 mm以上の多くのサンゴ破片が見られた)。一方, 水深が15m以上となる人工ノル南側海域では底質はやや細くなり中粒砂であった。

歪度を計算したところ全てのポイントで-0.5~-0.5の値を示し粒径分布はほぼ対称に近いという結果となった。

淘汰度は各ポイントで0.9以上を示し, 淘汰度は低い(分級が悪い)と評価された。特にA, Jといった人工ノル近辺の海底では淘汰度は2以上となり分級がかなり悪い状況にあることが明らかとなった。

以上の結果から, 人工ノル近辺の底質は粗粒砂からサンプル破片を含む細礫で構成されている。また淘汰度の悪い状況は, この海域の流れが弱く不規則であり流れの変化に応じて様々な粒径の底質が堆積することを示している。従って人工ノル周辺の底質は海水の流れにより攪乱されやすく, サンゴ幼生のプラヌラが固着し, 成長していく基盤としては不適當であるといえる。

3.2 気象環境

人工ノルの設置されたサンゴ礁造園モデル海域の気象環境を調査するため, 観測ステーション上

に気象観測用の計測センサーを設置し長期間連続して自動計測を行った。

3.2.1 気温, 気圧, 湿度

これらの計測はアーンデラー社製の自動気象ステーション(AWS・2700)システムにより行った。図4は平成元年11月から平成2年6月までの気温, 気圧, 及び湿度の経時変化である。同図には那覇气象台で観測された過去30年間の各月の統計平均値も合わせ示している。観測された気温, 気圧は過去の統計平均値と傾向, 及び絶対値がほぼ一致しておりこの期間の気温, 気圧はほぼ平年並であったことが明らかとなった。気温は1月に最も低くなっており観測期間中最低の12°Cを記録した。1月~3月にはしばしば一日の最低気温が15°C以下となる日があった。後で述べるようにこれらの気温低下は同時期の水温低下を招いている。

湿度は統計平均値に見られるように12月, 1月頃低く5, 6月に高い傾向を示した。しかしその絶対値は統計平均値より全体的に10~20%高い。これは那覇气象台での観測が内陸部で行われているのに対し, 今回の観測が海上で行われたためであると考えられる。しかしセンサーの感度試験のため他の湿度計を用いて海上で測定した結果, 陸上の値とそれほど大きな差はなかった, 従って湿度の高い値はセンサーの基準値のシフト, 及び海

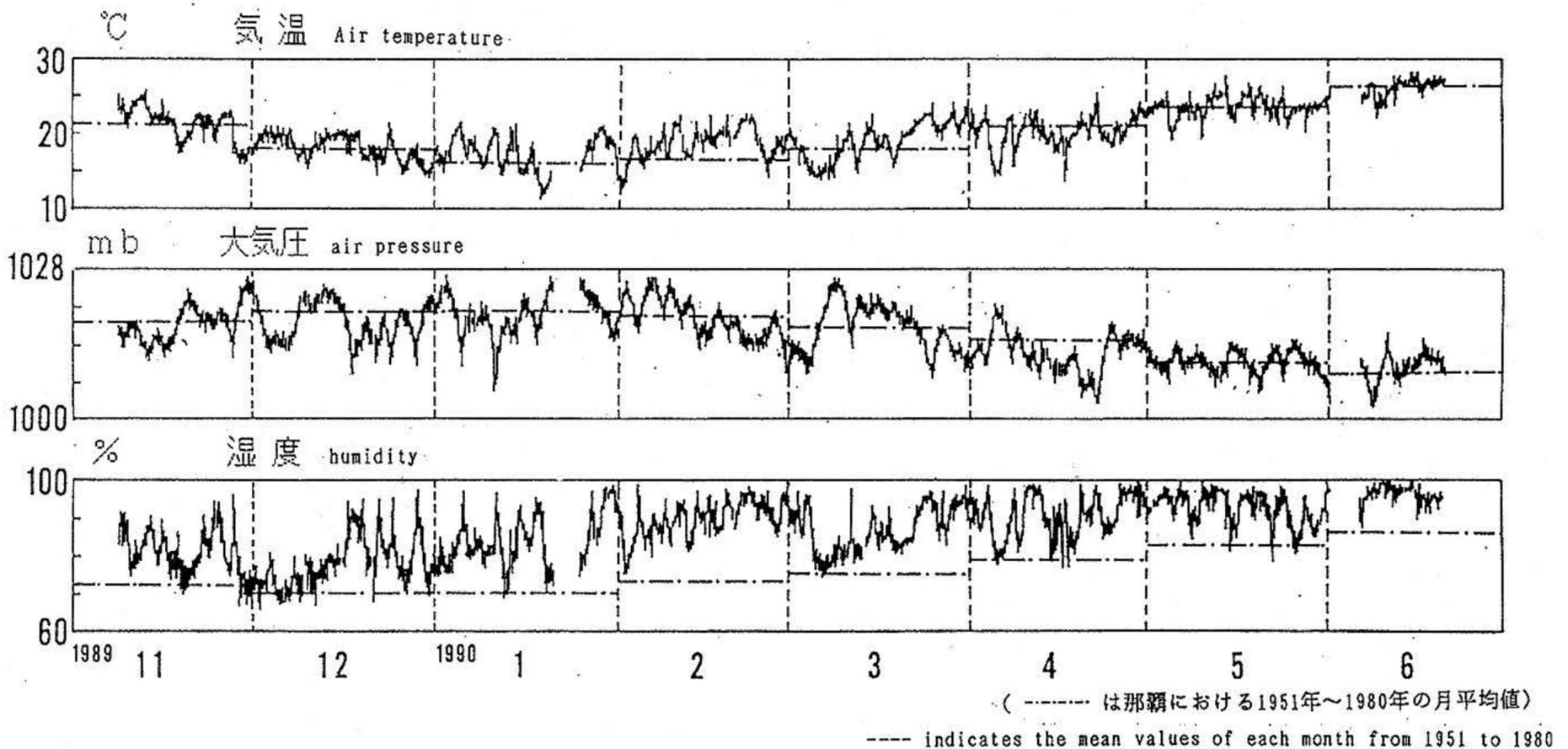


図4 モデル海域における気温, 気圧, 及び湿度

Fig.4 Air temperature, air pressure, and humidity in the model area

水の飛沫等によるセンサーの汚損の可能性がある。

3.2.2 風向風速

風向風速は海上電機社製の超音波式風向風速計

(WA200)を使用し計測した。図5に各月における風配図を示す。この図より夏季には南西～南東の風が卓越しているが秋季には風向が東から北東に変化し12月～3月にかけては北風となり風向が半

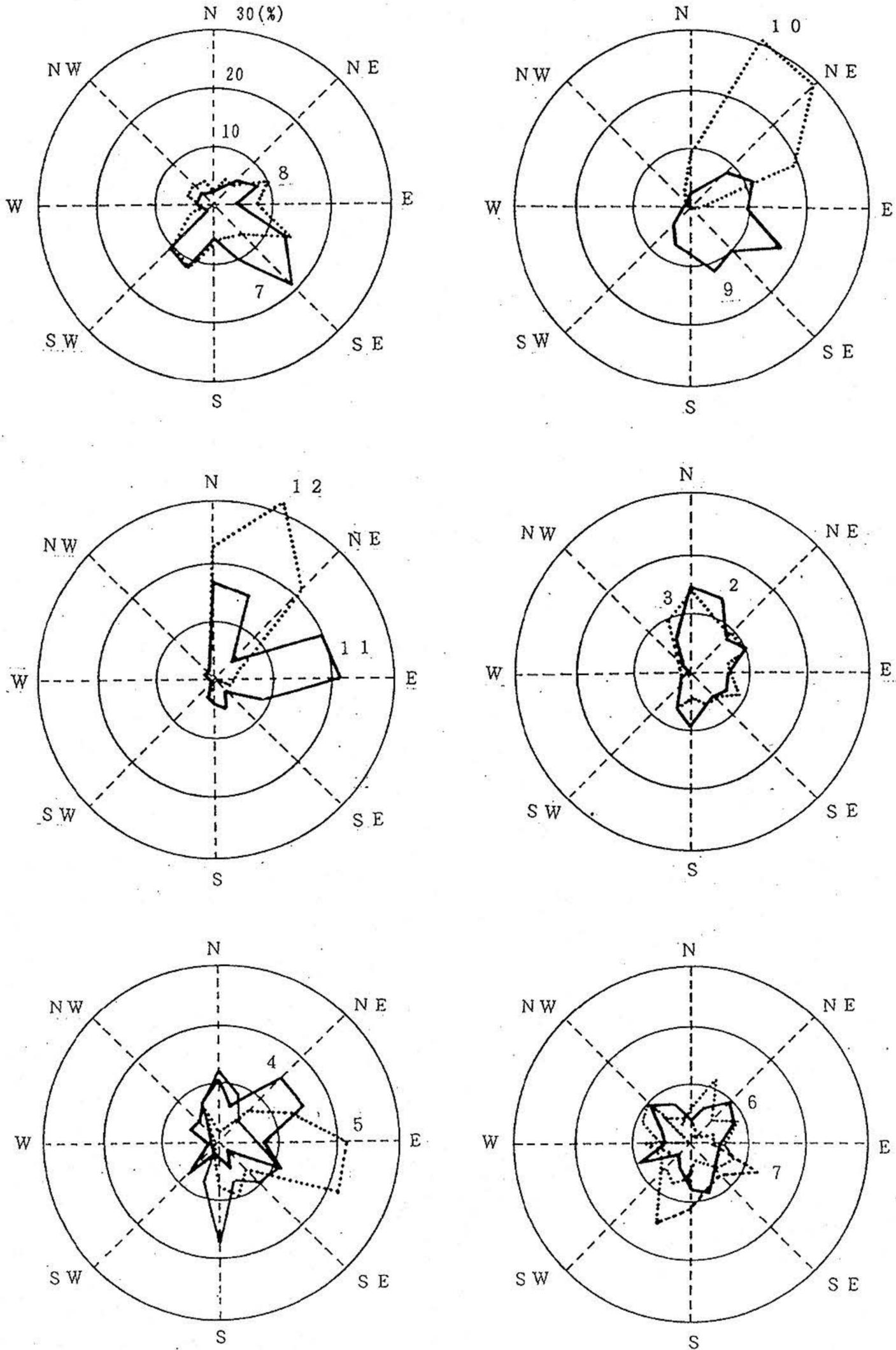


図5 モデル海域における風向

Fig.5 Wind direction of each month in the model area

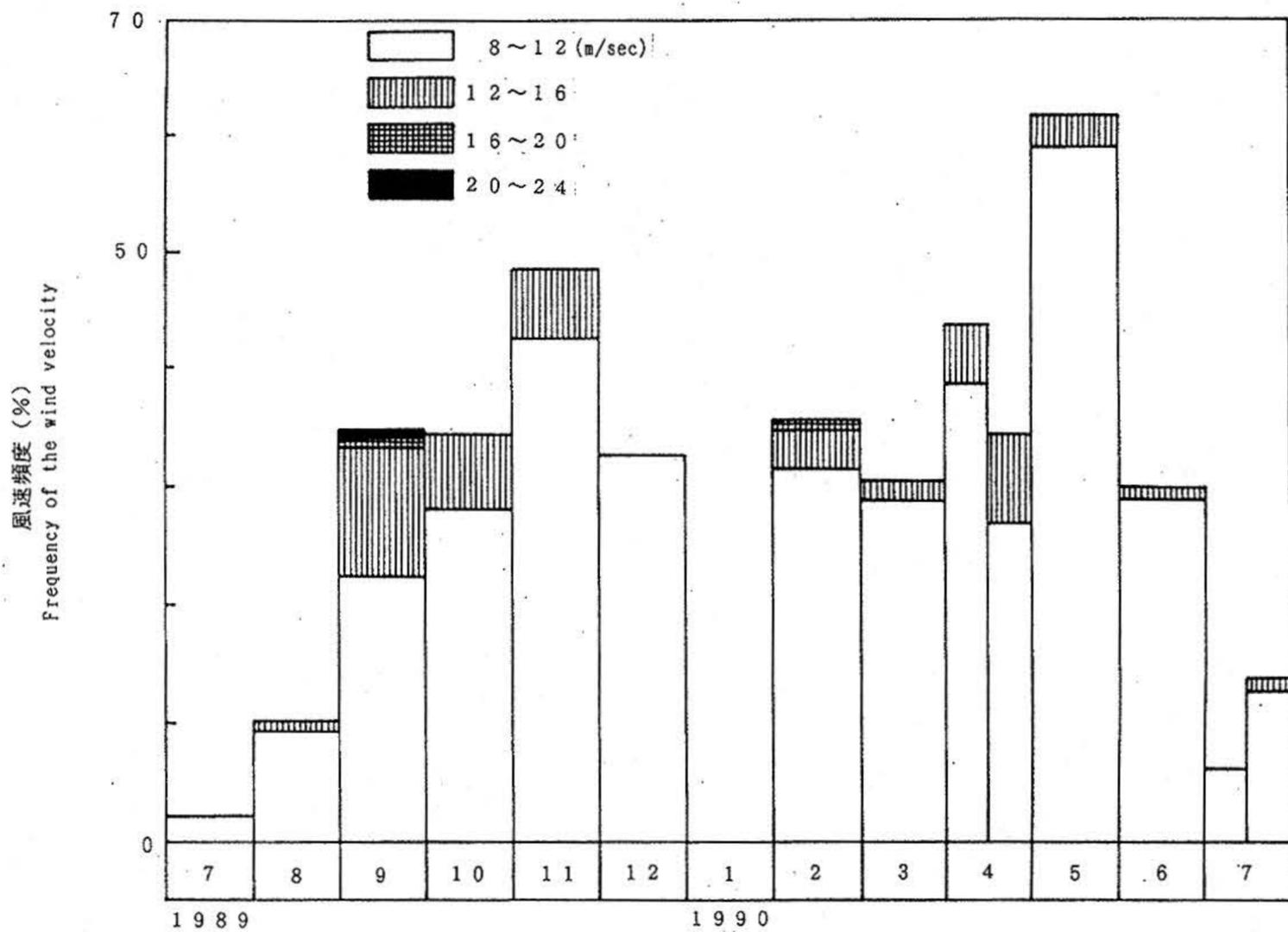


図6 各月における8 m/sec以上の風速頻度

Fig. 6 Frequency of the wind velocity over 8m/sec in each month

時計周りに推移している様子が見られる。平成2年の4月以降になると今度は時計周りに風向が北東から南方向へ推移した（4月、7月はサンプリング間隔の異なる観測期間があるためそれぞれの観測期間別に統計処理した）。これらの変化は過去に観測された風向の変化にほぼ一致している⁷⁾。

図6は月別の8 m/sec以上の風速頻度を示したものである。8 m/sec以上の風速頻度は平成2年5月に最も多く観測期間中の60%を占めた。12m/sec以上の風速となると平成元年9月が最も多く同月には全観測期間中の最大値20m/secを記録した。これは台風19号の接近にともなうものであった。夏季（7月、8月）は8 m/sec以上の風速頻度は15%以下であり比較的穏やかであったといえる。一方冬季（12月、2月）は他のデータから予想したほど風速は強く無かった。

3.2.3 光環境

造礁サンゴの成育に関する三大制限因子は水温、塩分、光とされている。このうち光は造礁サンゴに共生する褐虫藻の光合成活動に必要な因子であるが、褐虫藻はサンゴの成長にとって極めて重要な働きをする⁸⁾。そのためサンゴの成長にとって

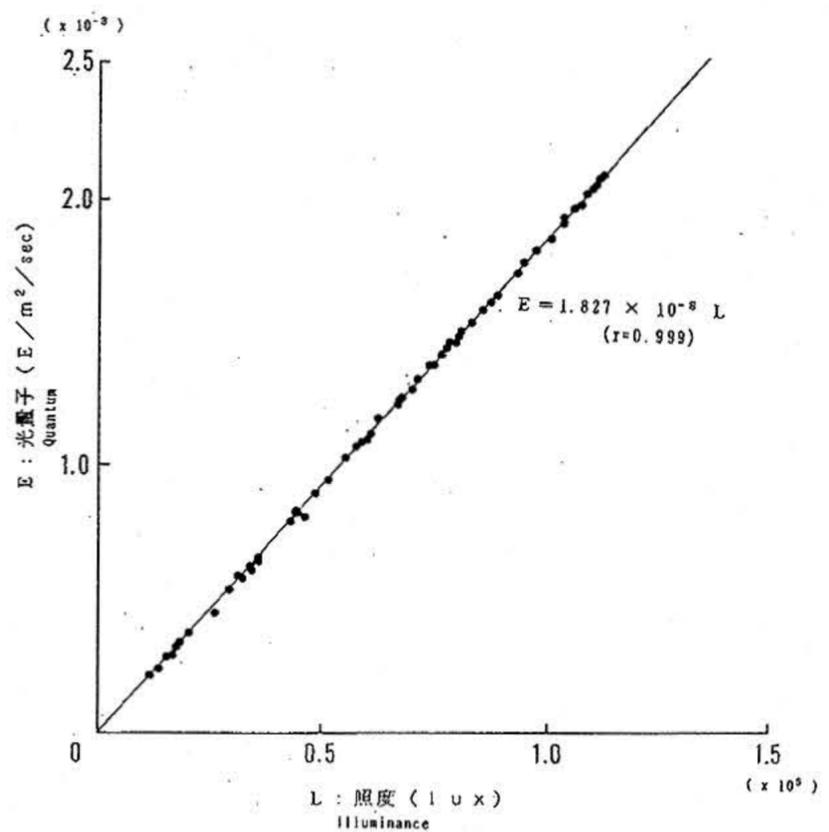


図7 照度と光量子（平成元年6月3日）

Fig. 7 Illuminance versus quantum

光は重要不可欠な環境因子となる。水中の光環境は空中での光強度と海水面状況、及び海水の濁度等により決定される。この中で最も基本的な空中での光強度について把握するため観測ステーション屋上に光センサーを設置し、照度、放射熱、及

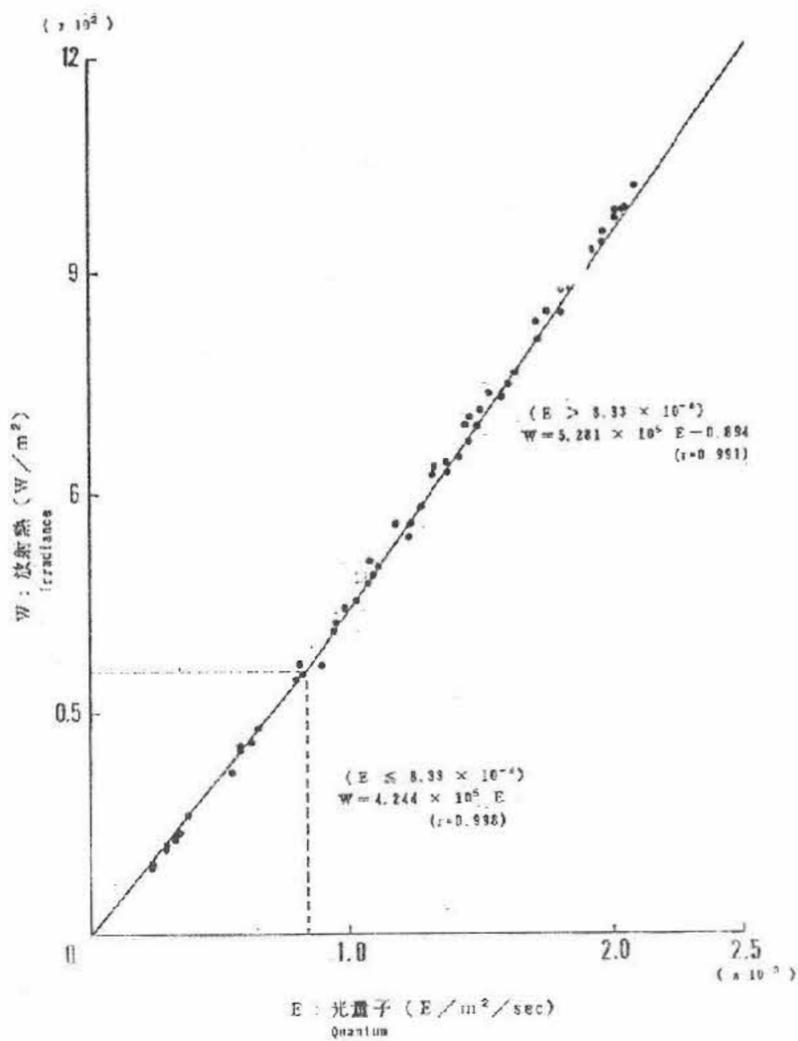


図8 光量子と放射熱(平成元年6月3日)
Fig. 8 Quantum versus irradiance

び季節変化を観測した。図7は照度と光量子、図8に光量子と放射熱の関係を示したものである(両図は平成元年6月3日の観測データを元に作成した)。計算の結果、両者とも高い相関性を持ち、それぞれのデータを一次近似により他のデータより算出することが可能であることが分かった。

図9は月別に平均して求めた各月における照度の日変化である。同図より8月には日中の最大照度が月平均で80,000lux程度になる(個々のデータには日中最大照度が100,000luxを越えるものもある)こと、1月には南中時でも日中最大照度は35,000luxに低下すること、及び5月が比較的高い照度になっていることが伺える。

図10は各月における一日当りの総放射熱量の平均値をヒストグラムで示したものである。この中で平成元年11月9日~平成2年4月20日のデータは光量子のデータを図8の関係式を用い放射熱に換算している。また同図の折線は那覇、東京における過去30年間の統計値を示している。計測値

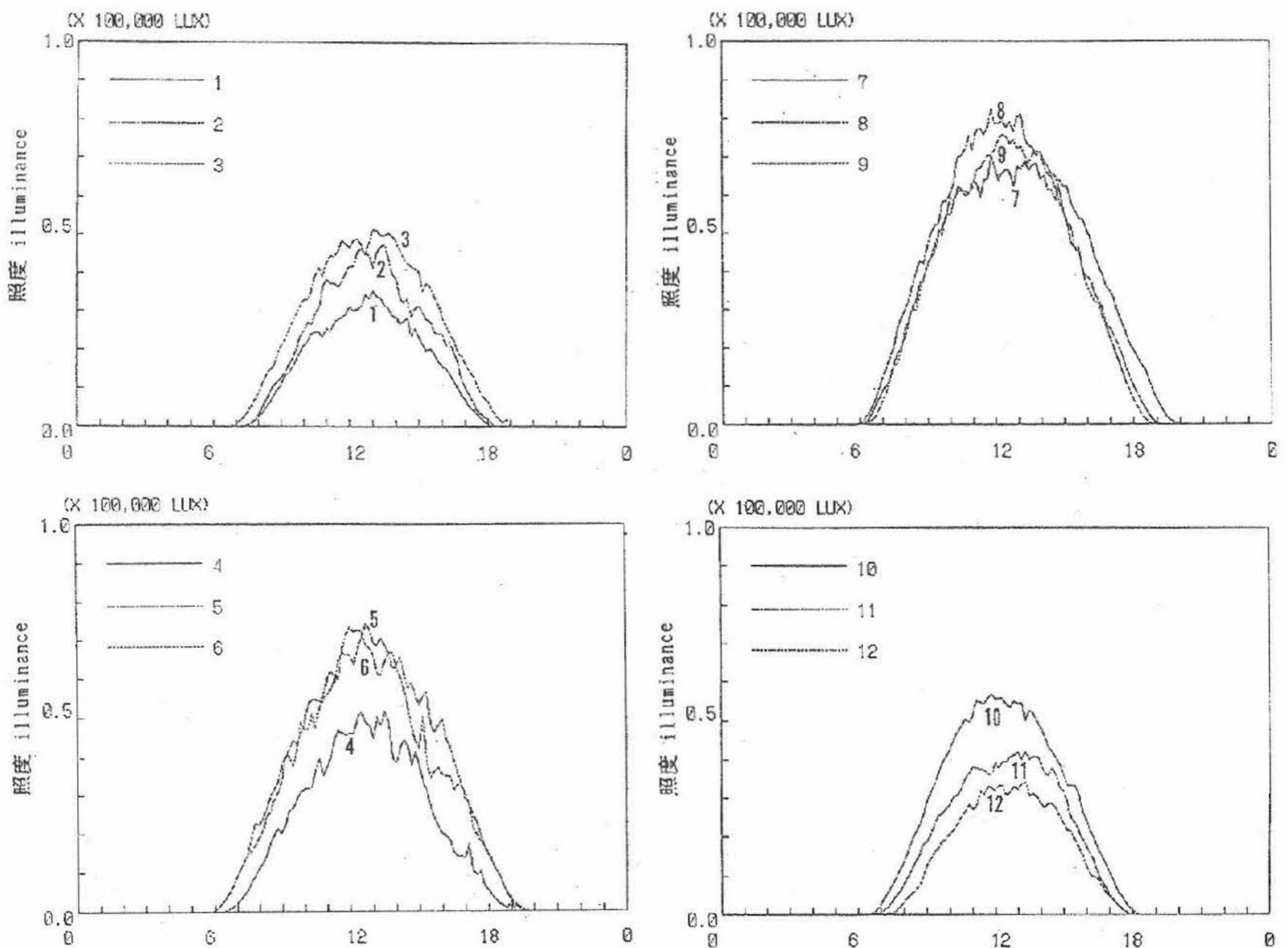


図9 各月における照度日変化
Fig. 9 Daily change of the illuminance in each month

は統計値とほぼ一致しており1年間の観測期間中光環境においてもほぼ平年並であったことがわかる。また統計値から、一日当りの総放射熱量は1月には7月の40%程度に減衰することが明らかとなったデータは少ないものの3月の総放射熱量も1月並に低くなっている。このことから12月～3月初旬にかけての空中の光強度の低下は水中の光環境を悪化させサンゴの成長を大きく阻害したと考えられる。

3.3 海水環境

人工ノルの海水環境は人工ノル上、及びその周辺海域に各計測機器を設置し観測を行った。

3.3.1 水温

水温は、現場設置型でデータを設定サンプリング時間毎に計測・収録する離合社製のRMT水温計を使用した。

図11に人工ノルの下段上(平均水深4.3m)及び周辺海域の水深5mで観測された水温の経時変化

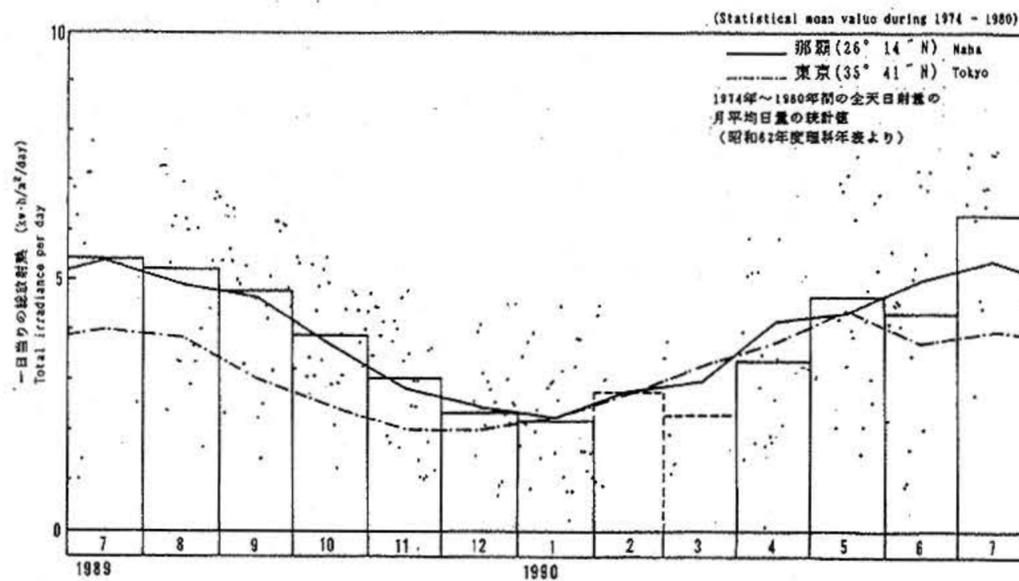


図10 一日当りの総放射熱の月平均値
(平成元年11月9日～平成2年4月20日の値は光量子からの換算値)
Fig. 10 Monthly mean value of the total irradiance per day
(Total quantum per day are converted into total irradiance per day during 1989. 11. 9. -1990. 4. 20.)

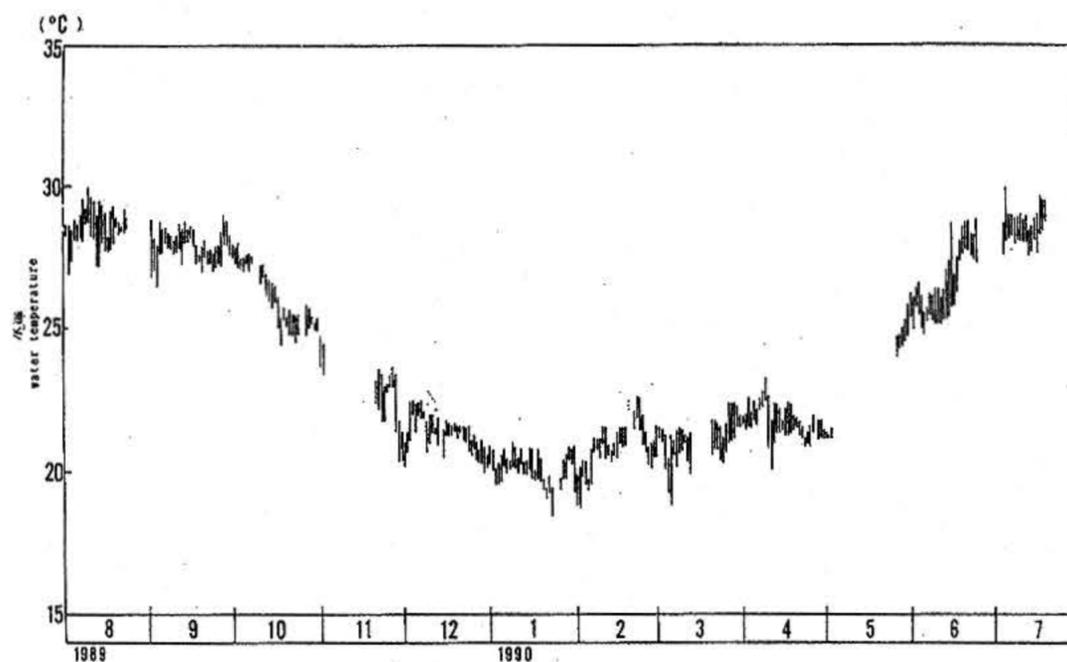


図11 人工ノルにおける水温経時変化
(人工ノル下段上及び人工ノル近傍水深5mにて計測)
Fig. 11 The change of water temperature at the artificial knoll
(Water temperature are observed on the lower base of artificial knoll or at 5m water depth near the artificial knoll.)

を示す。図は観測日毎の最大値と最小値を結んだ線で示されている。観測結果から水温は1月～3月にかけて20℃程度となり1月の下旬、2月の初旬、及び3月の初旬には20℃を下回り、造礁サンゴの成育限界とされている⁹⁾18℃に近づいた。こ

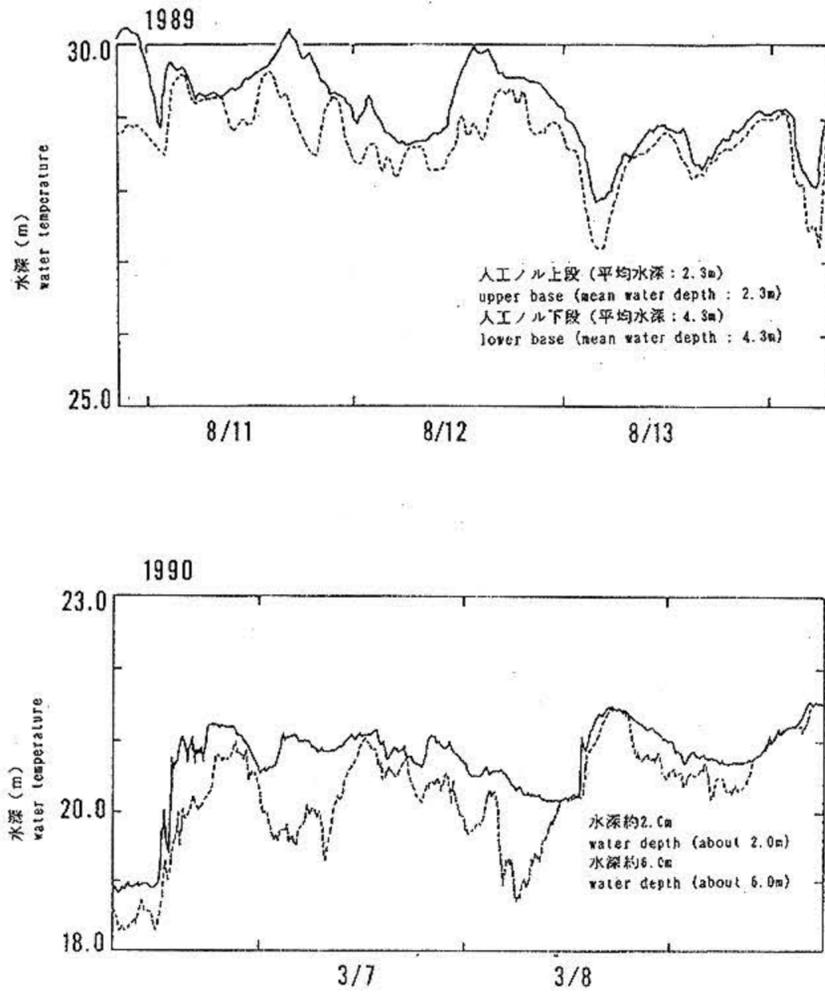


図12 人工ノル周辺の深度別水温変化
Fig. 12 The change of water temperature at the different depth near the artificial knoll

れらは同時期に観測された 気温低下によるものと考えられる。この冬季間の水温低下もサンゴの成長に影響を与えたと推察される。

図12には水温が最も高くなった平成元年・8月11日～13日における人工ノル上段と下段の水温変化、及び水温の最も低くなった変化2年3月6日～9日における人工ノル近傍の水深約2.0mでの水温変化である。これらの図から水深による水温の差は最大で1.5℃程度でありそれほど大きくはない。このことから人工ノルにおける各段のサンゴの成長度の違いは水温の差に起因するものとは考えにくい。

3.3.2 塩分

塩分の観測は電気伝導度センサーを使用した現場設置型の水温塩分計UCT-16.000（ユニオンエンジニアリング社製）で行った。図13は人工ノル上、及び周辺海域の水深10m以浅で観測された塩分の日平均値の時系列である。同図には観測ステーションである観測された雨量（一日の総量）を合わせ示している。

塩分は6月を除いては34.2～34.8という値を示した。雨量と比較すると観測期間中パルス状に塩分が低下するのは降雨による影響と考えられる。6月には塩分が急激に低下し34.0を下回った。この期間の塩分と降水量との関係をより詳細にグラフに示したのが図14である。同図より明らかに降雨による塩分の低下が見られる。また一度降雨に

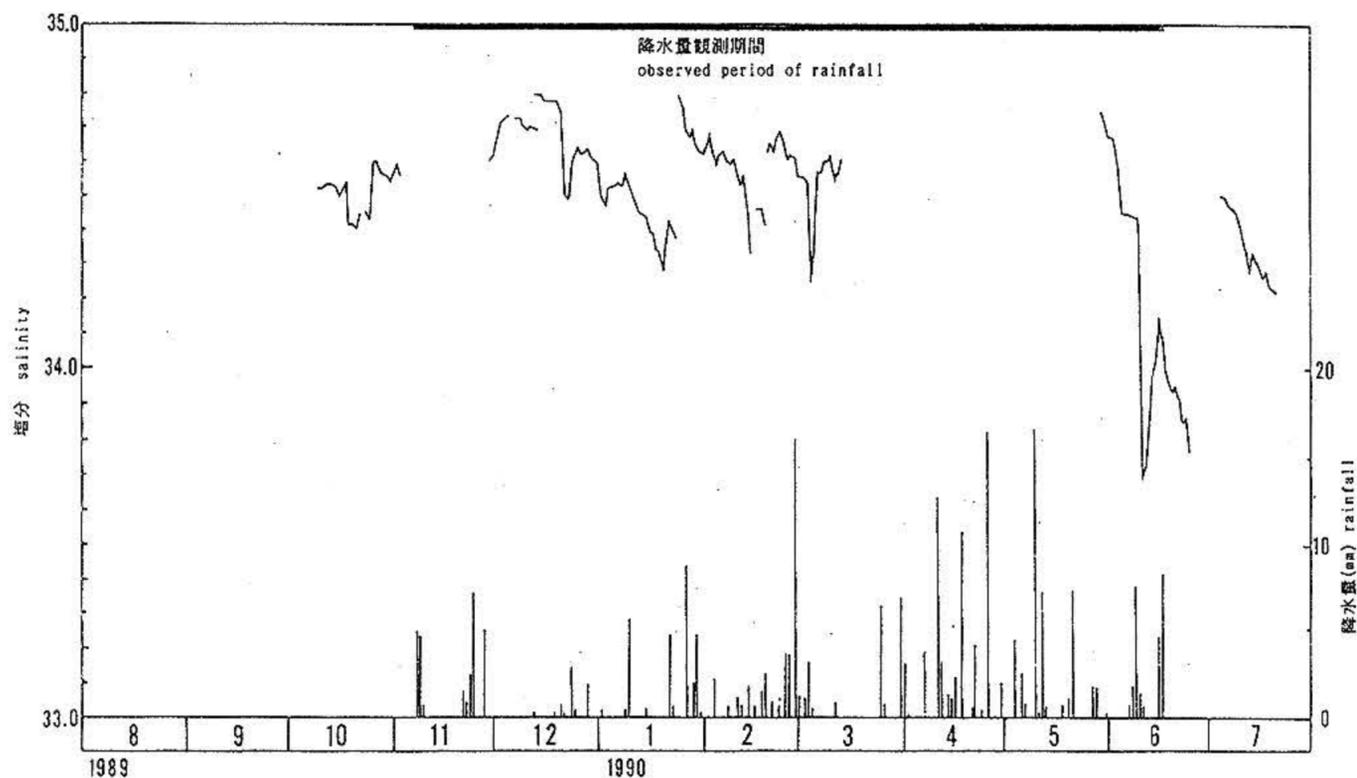


図13 人工ノル周辺における塩分経時変化及び降水量
Fig. 13 The change of salinity and rainfall near the artificial knoll

より低下した塩分は迅速には元に戻らず不安定な状態となり変動しながら徐々に上昇していくことがわかる。以上のように塩分は降雨により低下する傾向がある。しかし今回観測された塩分値は全て32.0以上でありサンゴの成育を阻害する低塩分化現象は見られなかった。人工ノルを設置している場所は沿岸から約1Km離れており、また沿岸には大きな河川も存在しないため人工ノルは降雨時に増加すると考えられる陸水の影響は受けていないと考えられる。従って人工ノルに移植したサンゴにとって塩分は成長制限因子にはなっていないと判断される。

3.3.3 水中光環境

水中の光環境は平成元年10月から不定期に行っ

た濁度計測、及び平成2年5月からの水中光計測により調査した。

(1) 濁度

濁度は現場設置型・自己記録式の濁度計（アレック電子社製）を用いて計測を行った。図15に昨年10月からの濁度の時系列を示す。12月の下旬から1月中旬にかけて、及び6月下旬に濁度は30ppmを越える高い値を示した。これらの濁度増加は波高、及び流速の増加に伴い海底堆積物が巻き上がり海水中に懸濁したために生じたと考えられる。

しかし10月、12月初旬の観測期間を除くと各計測期間において徐々に濁度が増加している傾向が見られる。また12月中旬～1月下旬に行われた観測では1月初旬から濁度の日平均は50ppmを越え、

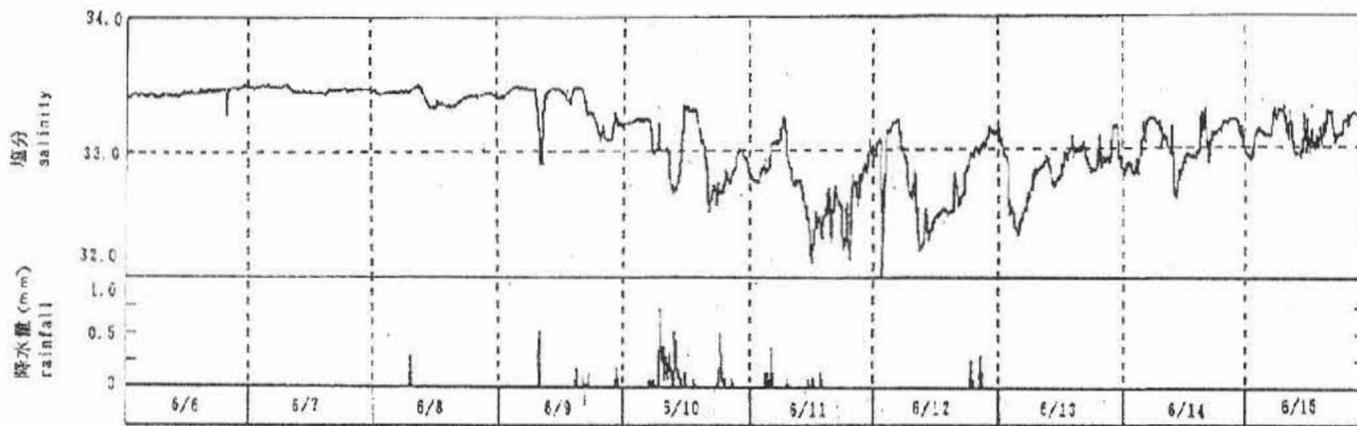


図14 塩分変化及び降水量（平成2年6月6日～6月15日）

Fig. 14 The change of salinity and rainfall (1990.6/66/15)

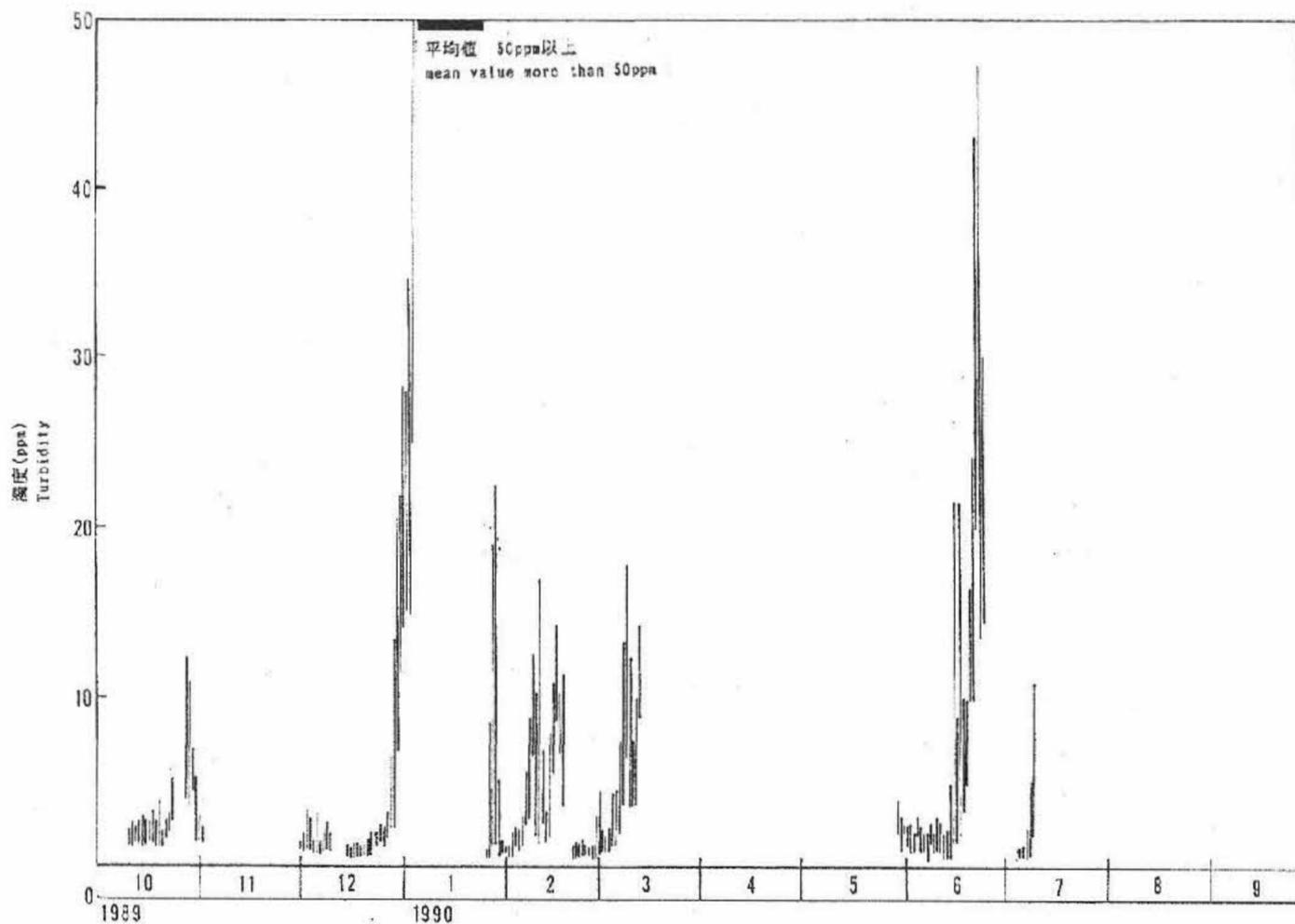


図15 人工ノル周辺における濁度

Fig. 15 Turbidity near the artificial knoll

中旬には濁度計の測定限界の400ppmを上回ってしまった。

これらは濁度計のセンサーである受光部が海水中に設置されている間に次第に汚損されてしまった可能性が高い。従って後で述べるように海水流動の増加（波浪・流れの増加）に伴い濁度も高くなる傾向は見られるものの測定されたデータの絶対値については再考する必要がある。

(2) 水中光量子

水中光量子は人工ノル中段、及び下段上の台座に取り付けられた。それぞれの平均水深は中段の光量子計は約3.8m、下段の光量子計は約4.8mである。計測データは人工ノルの計測器収納ボックス内のデータロガーに収録し定期的にデータの回収を行っている。図16に水中、及び空中光量子の一日当たりの総量の時系列を示す。7月10日まで水中光量子は空中の光量子とほぼ同じように変動しているが7月11日以降は必ずしも一致していないことがわかる。

水中と空中の光量子の関係をより詳細に把握するため（水中光量子（中段）／空中光量子）の比、（水中光量子（下段）／水中光量子（中段））の比について求めたのが図17である（同図には同期間に観測された濁度の日平均値も合わせ示している）。7月8日まで前者は0.5、後者は0.76でほぼ安定であったが7月10日にはそれぞれ0.3、後者は0.63に減少し水中の光透過性が低下している。これは7月6日～7月10日にかけて人工ノル周辺の

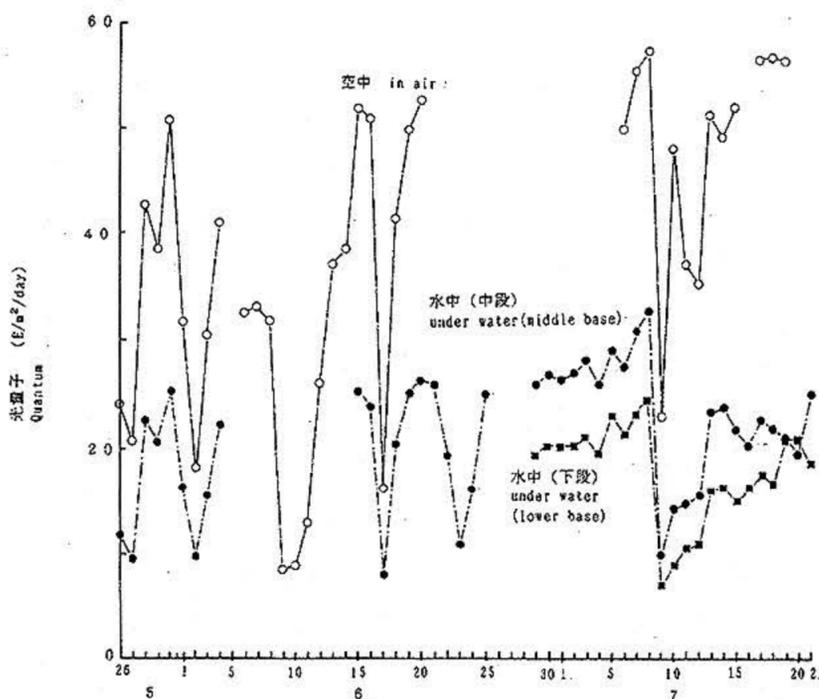


図16 空中光量子と水中光量子
Fig. 16 Quantum in air and under water

波が高くなり濁度が1ppmから5ppmに増加している現象によく対応している。7月14日には（水中光量子（中段）／空中光量子）比は以前の0.5程度に回復しているが（水中光量子（下段）／水中光量子（中段））比は多少上昇したが元の値には復帰していない。これは水深3.8m（水中光量子（中段）の設置水深）以深では濁度が低下したが以深では引き続き濁度が高い状態が残存していたためと考えられる。また7月20日には中段と下段の水中光量子の値が逆転している。これは中段の水中光量子計のセンサー部が7月17日から20日にかけて汚損されたためではないかと推察される。

図18は 水深と水中の光強度を示している。同図は各水深における一日当りの空中光量子総量に対する水中光量子総量の比をプロットしたものである（同期間の6時～19時までの平均水深はほぼ5.3mであったので中段の水中光量子計の値は3.8m、下段の水中光量子計の値は4.3mでの水中光量子としている）。水深と水中光強度の関係は一般的に以下の式で表される。

$$I_d = I_0 e^{-kd}$$

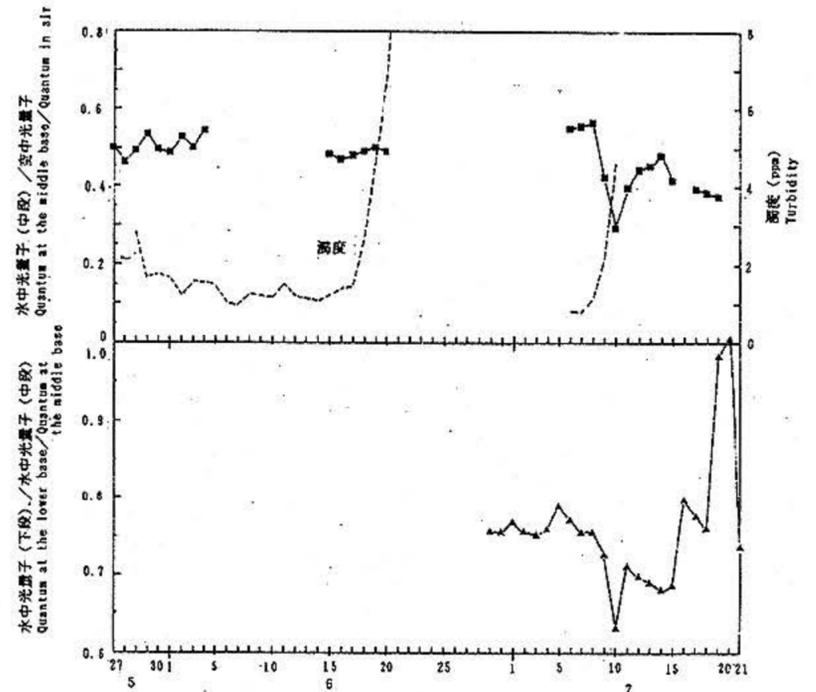


図17 空中光量子に対する水中光量子（下段）及び水中光量子（中段）に対する水中光量子（下段）

Fig. 17 The ratio of the quantum at the middle base to the one in air, and the ratio of the quantum at the lower base to the one at the middle base

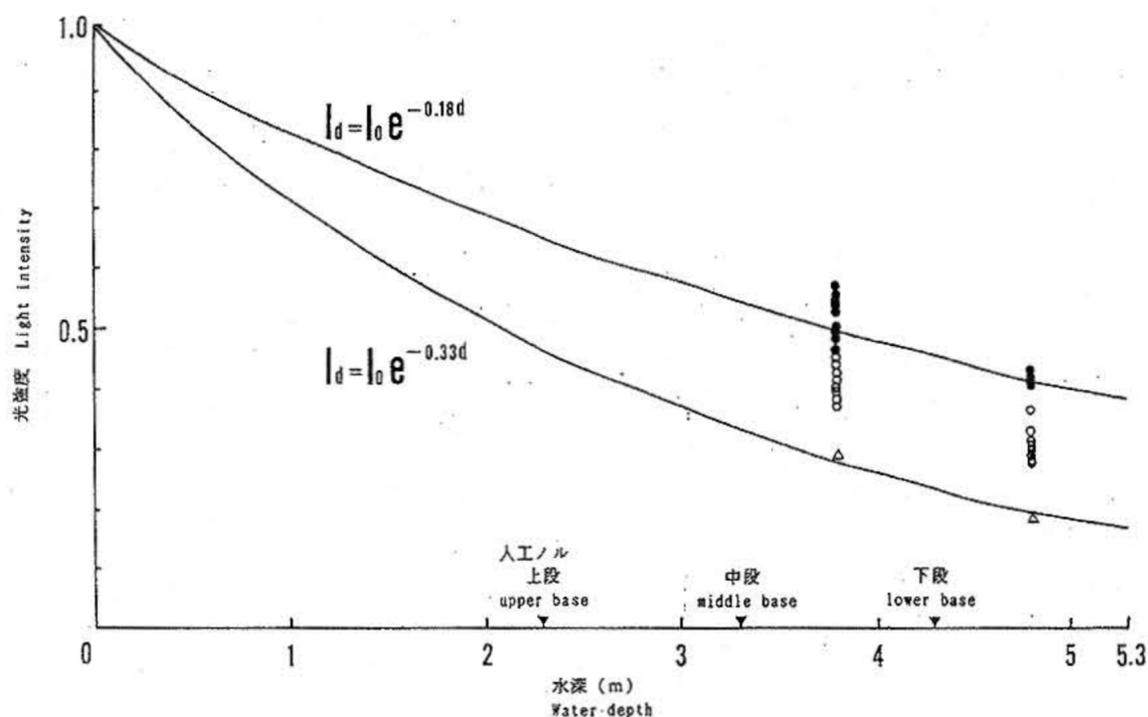


図18 各水深における相対光強度

Fig. 18 Relative light intensity at different depths

表1 人工ノル各段における相対光強度

Table 1 Relative light intensity on each of the artificial knoll

光透過係数	相対光強度 Relative light intensity		
	上段 (水深: 2.3m) upper base (2.3m)	中段 (水深: 3.3m) middle base (3.3m)	下段 (水深: 4.3m) lower base (4.3m)
-0.18	0.661 (1.000)	0.552 (0.835)	0.461 (0.697)
-0.33	0.468 (1.000)	0.337 (0.719)	0.241 (0.516)
-0.50	0.316 (1.000)	0.192 (0.608)	0.116 (0.367)

() : 各段の光強度 / 上段の光強度

The ratio of the light intensity on each base to the light intensity on the upper base

但し I_d , I_0 は水深 d (m), 0 (m) における光強度

観測されたデータのうち比較的 (水中光量子量 (中段) / 空中光量子) が安定であった7月9日までの値 (図中●) を用いて各水深と光透過量の関係を求めると

$$I_d = I_0 e^{-0.18d} \quad (r=0.98)$$

が得られた。一方水中の光透過率が最も低下したと考えられる7月10日 (図17参照) の値 (図中△) を用いて計算すると

$$I_d = I_0 e^{-0.33d}$$

という関係が得られた。一般に外洋水では k の値 (ここでは "光透過係数" とする) が $-0.01 \sim -0.2$, 沿岸水で $-0.3 \sim -0.5$ とされている。従って7月9日までは光透過性に関して人工ノル周辺の海水は外洋水の特徴を呈していたが, 7月10日のように濁度が増加した時には沿岸水的な特徴を持つことが分かる。

以上の結果から人工ノルの各段における光透過率 (空中光量子の比) をまとめた (表1)。表には光透過係数が -0.5 について試算した結果につ

いても合わせ示した。光透過係数が-0.18の時は人工ノル上段には空中光量子量の約70%が到達し下段では到達量が約50%であることがわかる。下段と上段を比較すると下段は上段の約70%の光量子量となっている。光透過係数が-0.33になると上段に到達する光量子量は空中の50%に減衰する。この時下段では光到達量が約25%にまで低下し、上段での到達量の半分となる。さらに光透過係数が-0.5になると下段では空中の光量子量のわずかに10%となり、上段での光到達量との差は大きくなることわかる。

図19は1987年Stromgerが実験的に求めた水中日最大放射熱とミドリイシサンゴ成長速度の関係である¹⁰⁾。同図には渦鞭毛藻類(サンゴに共生する褐虫藻はこの類に含まれる)の光-光合成曲線(Ryter, 1956)¹¹⁾も合わせ示した。同図からサンゴの成長速度は、約400W/m²(約40,000lux)でほぼ最大に達し、250W/m²(約25,000lux)では相対成長速度は0.9(これは4日間この環境で飼育した場合で、7日間の飼育だと0.7となる)となり、水中日最大放射熱がそれ以下だと成長速度が急激

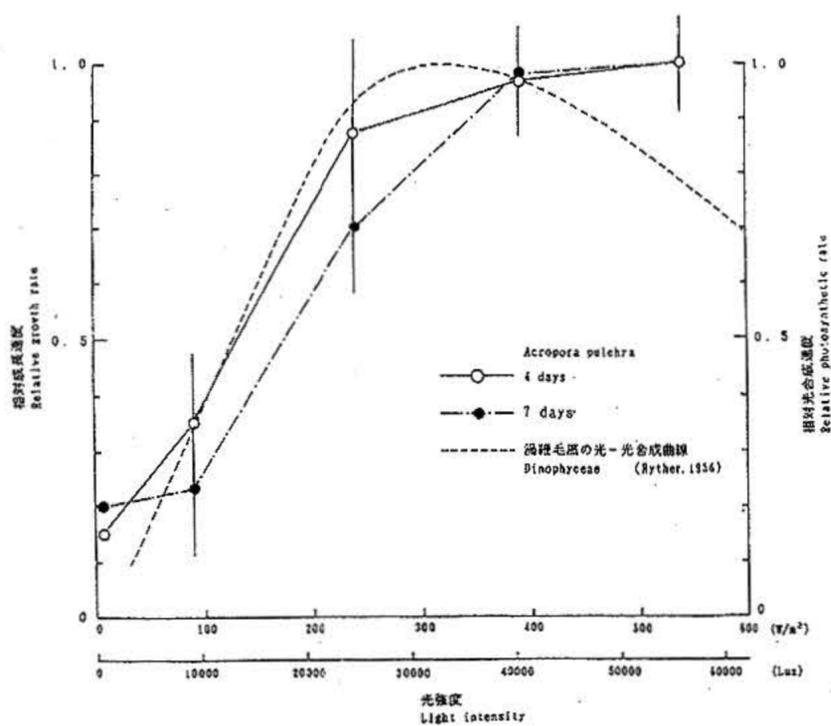


図19 各光強度下におけるミドリイシの成長速度(540W/m²における成長速度に対する相対成長速度)(Stromger, 1987)

Fig. 19 Relative growth rates to growth rate at 540W/m² of *Acropora pulchra* exposed to different irradiance for 4 and 7 days (Stromger, 1987)

に低下することがわかる。ここで水中光環境の値(表1)から、人工ノルの上段、下段におけるサンゴの成長速度についてのこの図を用い考察してみる。例えば夏季の空中照度が日最大で75,000lux, 水中の光透過係数が-0.18とした時人工ノル上段では照度が約52,500luxとなる。この場合上段、下段上の移植サンゴの最大成長速度に対する成長速度は共に0.90以上であり両者の成長速度の差は小さい。一方、冬季の空中日最大照度を約35,000lux, 水中の光透過係数を-0.18とすると人工ノルの上段での日最大照度は24,500lux, 下段ではわずか17,500luxに低下する。この場合には上段のサンゴ相対成長速度は0.87, 下段のサンゴ成長速度は約0.63となり両者の成長速度に違いが生じる。さらに光透過係数を-0.33とした場合(空中最大照度:35,000lux), 上段でのサンゴの相対成長速度は0.63(最大日照度:17,500lux), 下段での相対成長速度は0.32(最大日照度:8,750lux)となり、下段の移植サンゴの成長速度は上段の移植サンゴの成長速度の約50%にまで低下することになる。以上のように水中の光透過性は海洋環境により大きく変化する。冬季間は荒天時が多く水中の濁度が一般的に高いため水中の光透過性は低下すると考えられる。さらに空中での光強度も夏季の約40%にまで低下することが空中光環境の観測で明らかとなっている。これらのことは冬季間には水中の光環境が悪化し、サンゴの成長度を大きく阻害させたとともに、深度に伴う光減衰率も高くなるので人工ノルの各段における移植サンゴの成長度に差を生じさせたと考えられる。

3.3.4 海水流動特性

人工ノル周辺の海水流動は以下のような点で移植サンゴの成長に影響を与えると考えられる。

- ① 移植サンゴに物理的な力を加える(移植サンゴの破損, 人工ノルからの離脱)
- ② 海水を交換する(海水の浄化, 水温・塩分・海水化学成分の変化)
- ③ 海底堆積物を攪乱する(濁度の増加, サンゴへの底質の堆積)

これらの点について考察するため人工ノル周辺において流向流速, 及び波高の観測をおこなった。

(1) 流向流速

流向流速はローター式流向流速計を用い計測

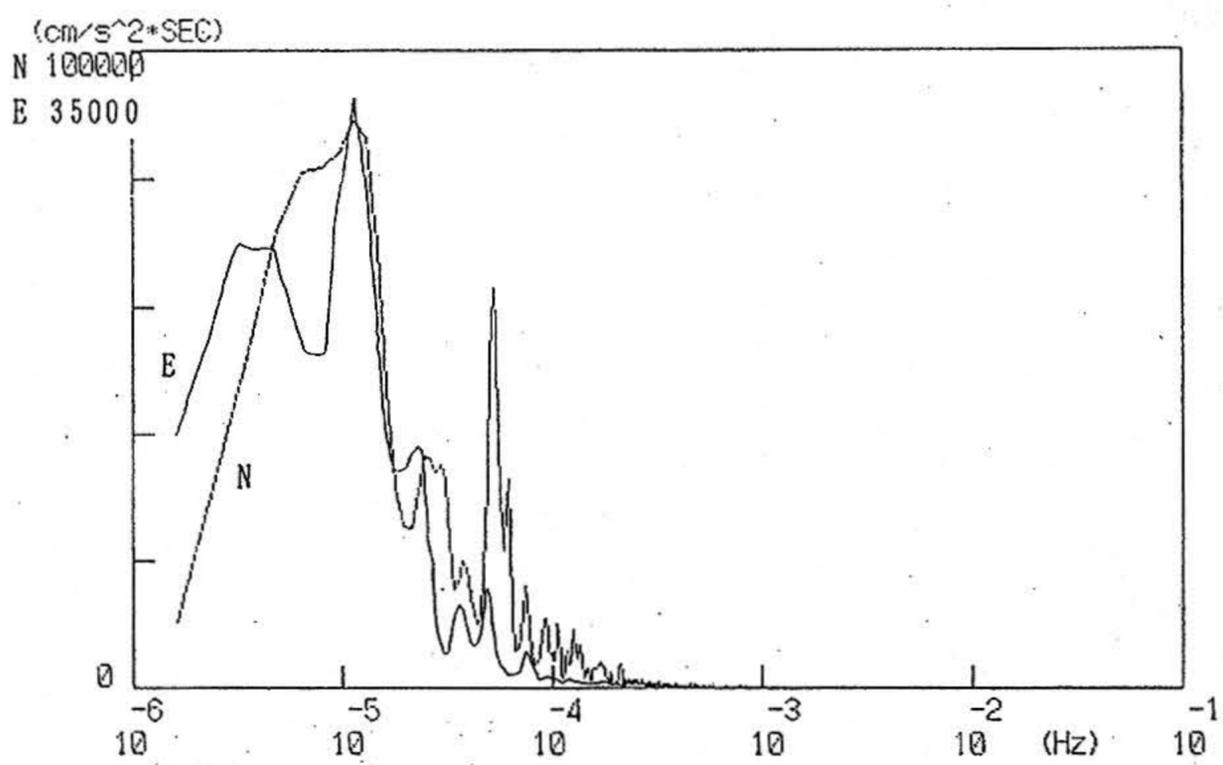
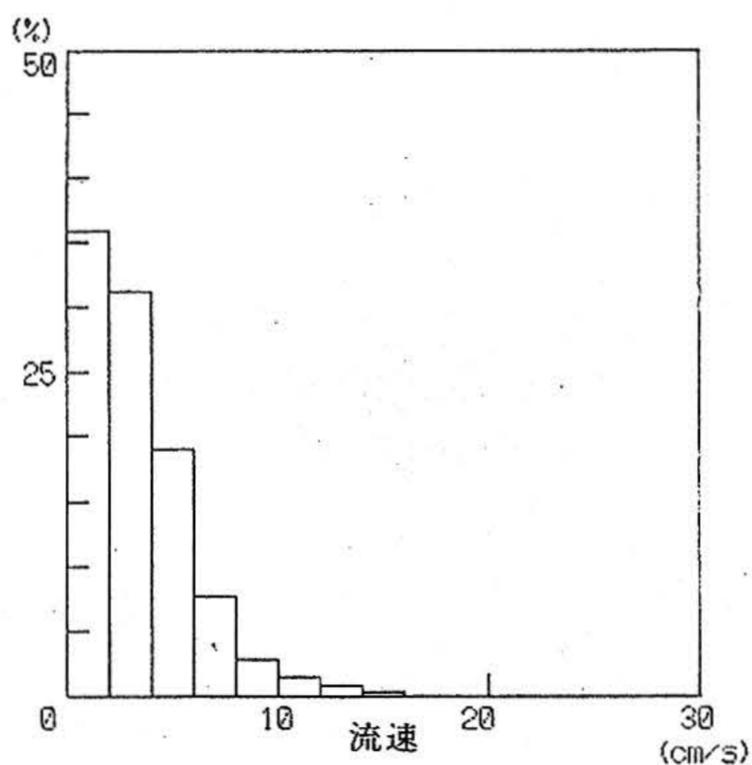
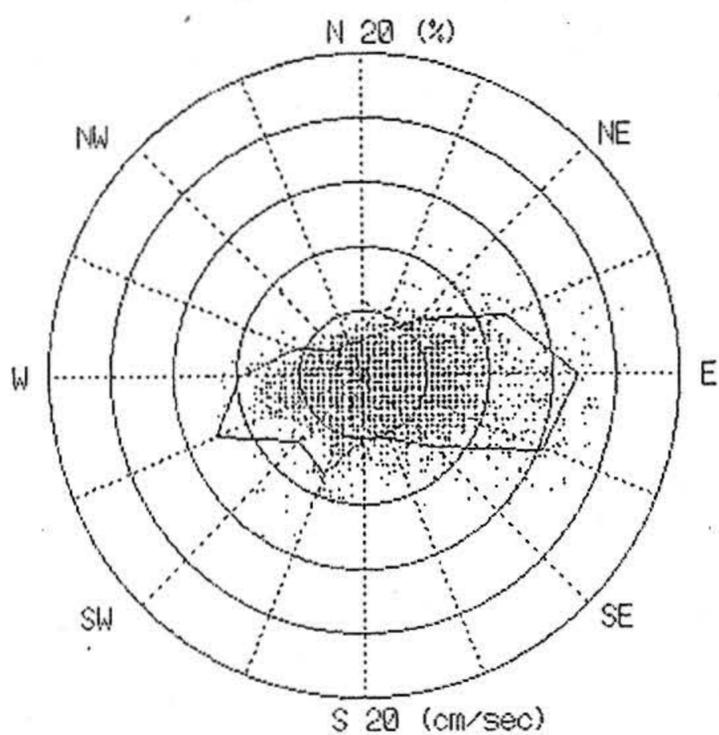
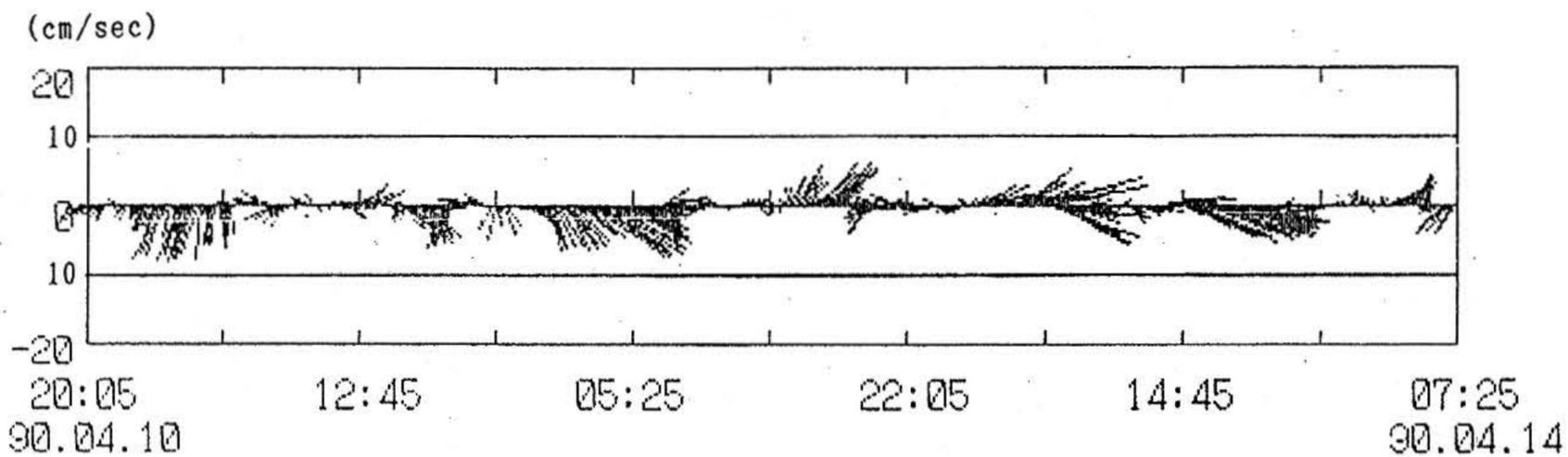


図20(a) 流向流速 (春季:平成2年3月21日~4月23日)
 Fig. 20(a) Current direction and velocity (Spring:1990.3/214/23)

した。
 図20(a)~(d)に各季節の流向流速の統計解析結果

例を示す。流速は夏季(図20(b))と秋季(図20(c))ではほぼ10cm/sec以下であったが春季(図

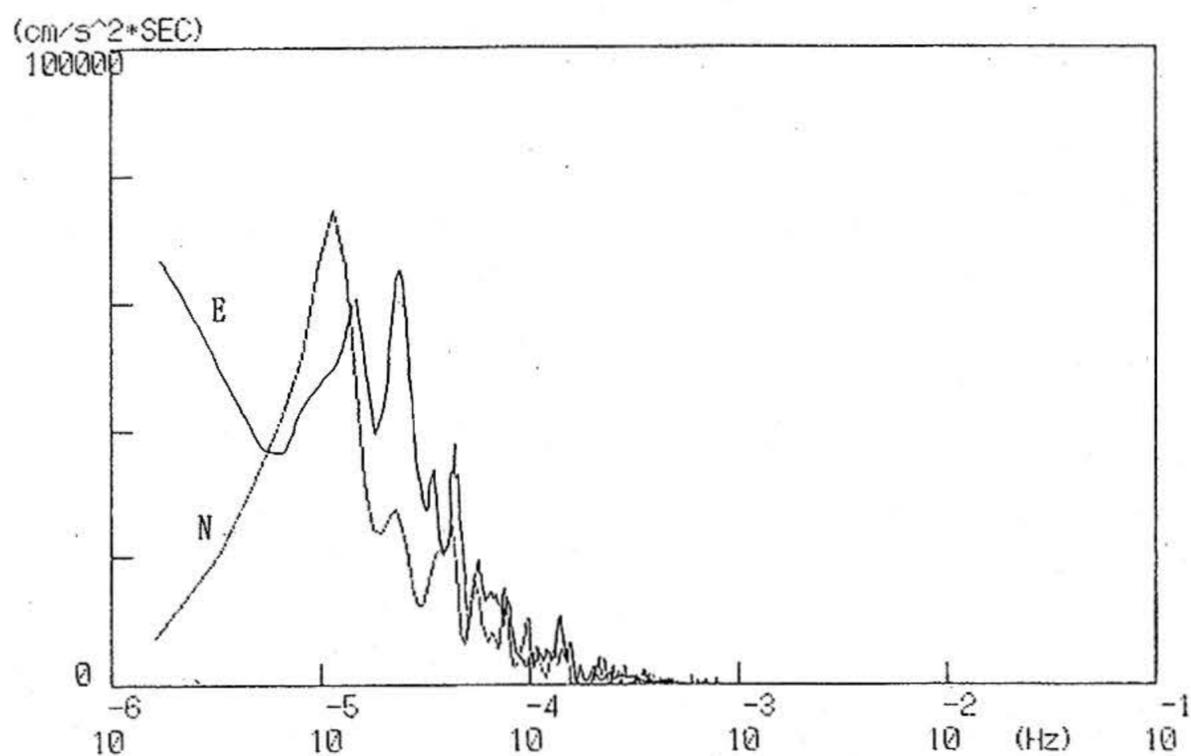
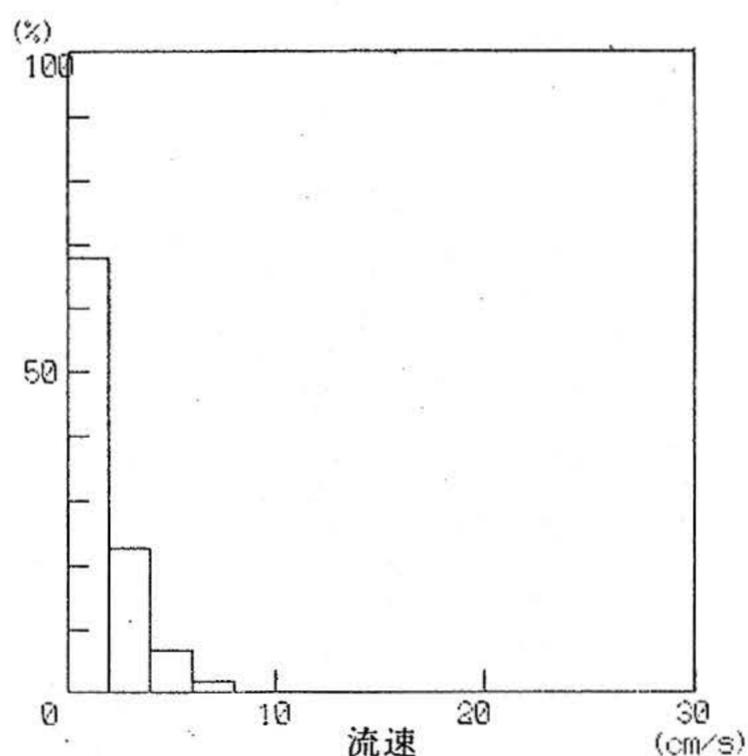
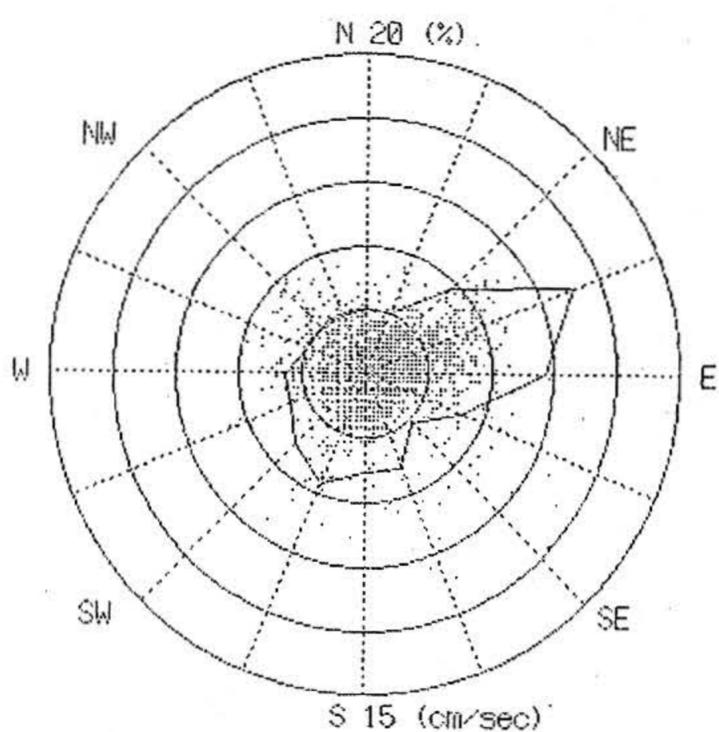
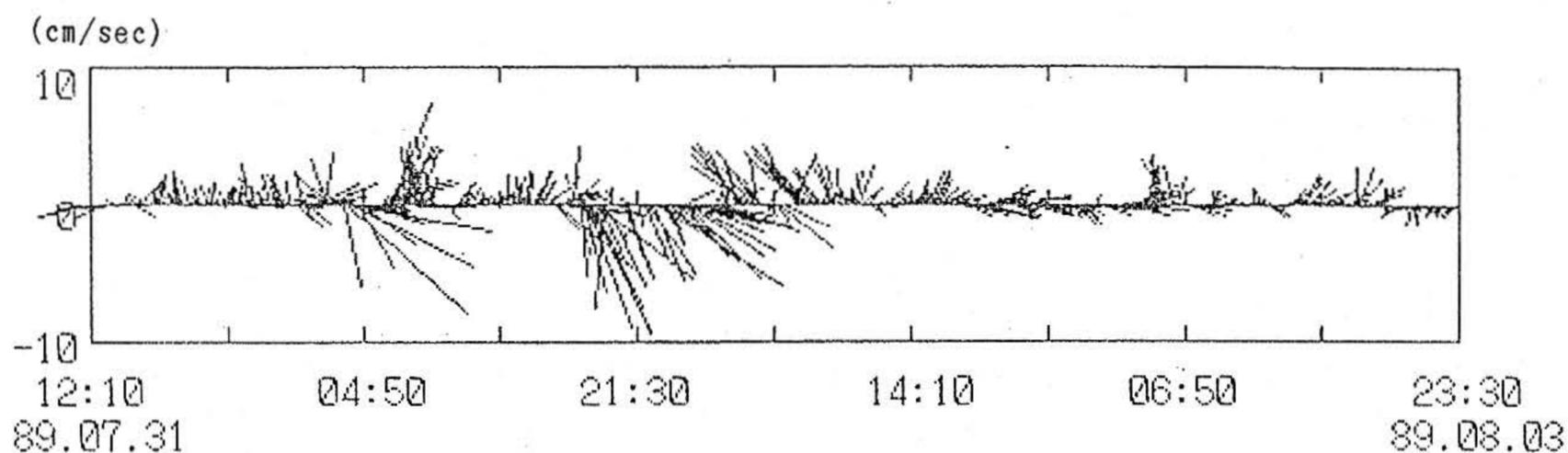


図20 (b) 流向流速(夏季:平成元年7月31日~8月23日)

Fig. 20 (b) Current direction and velocity (Summer:1989.7/218/23)

20(a) と冬季 (図20 (b)) には10cm/sec以上の流速が観測された。流向は春季には東-西方向の成分が卓越し秋季には北東-南西方向が卓越して

いるが冬季には流れの強い方向性は見られなかった。周波数スペクトル解析の結果全ての季節において6時間, 12時間, 24時間という潮汐に関係す

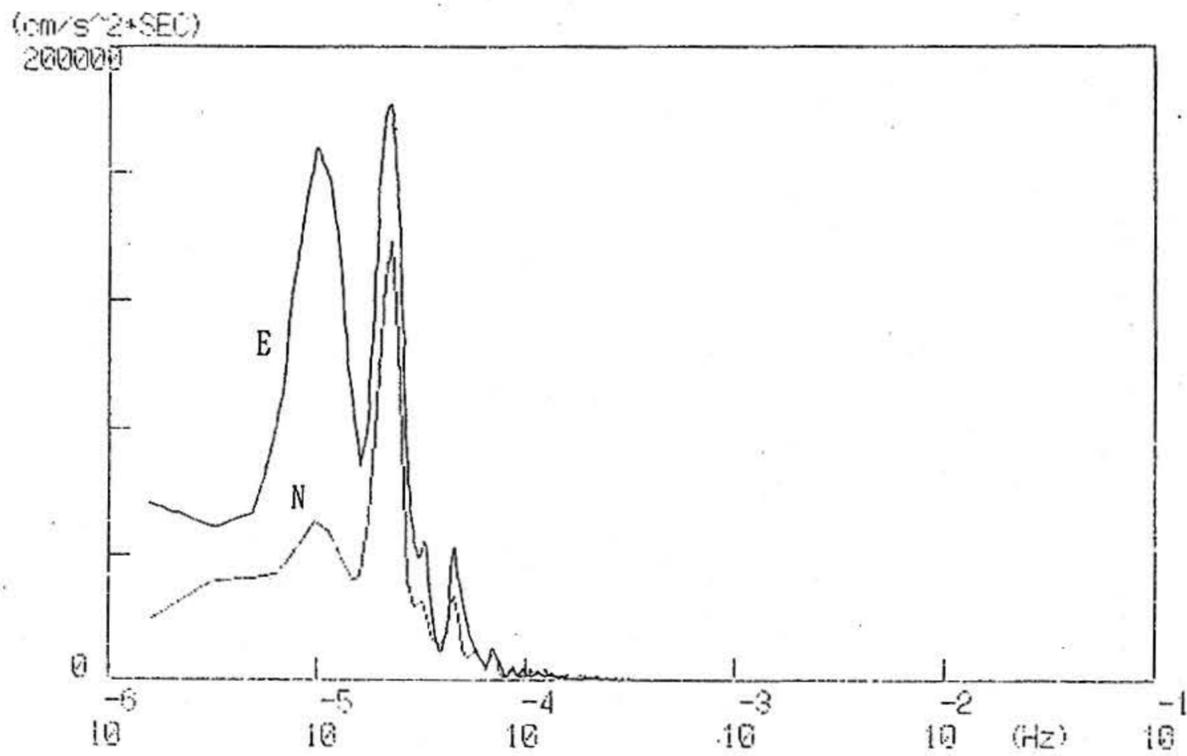
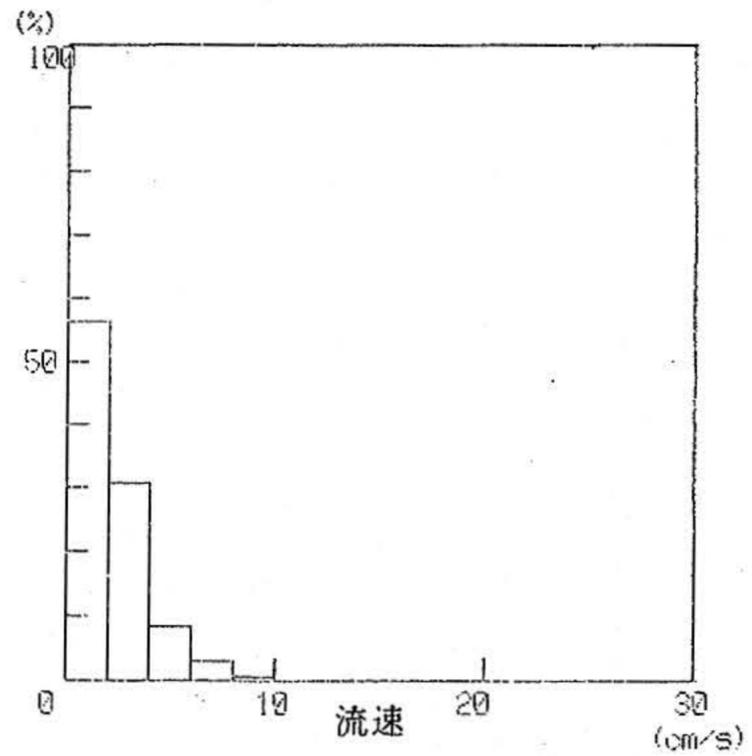
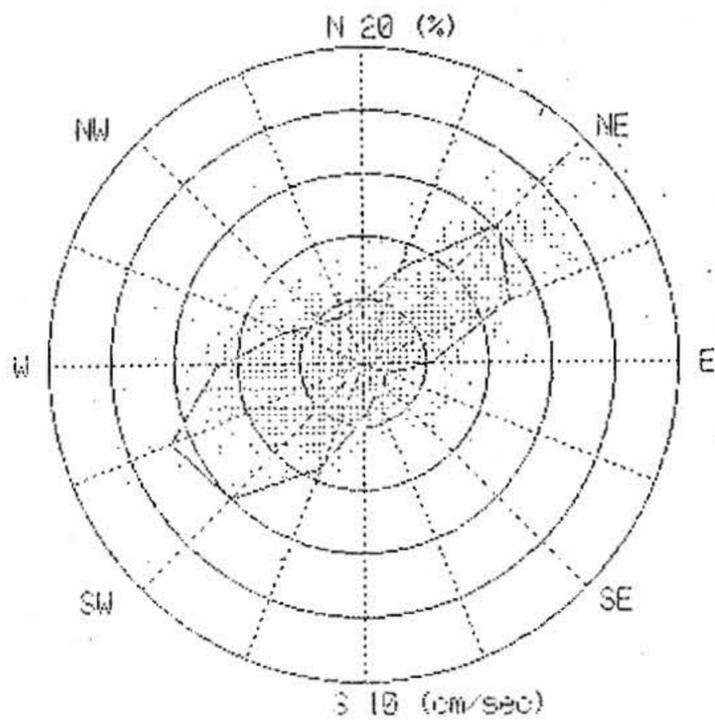
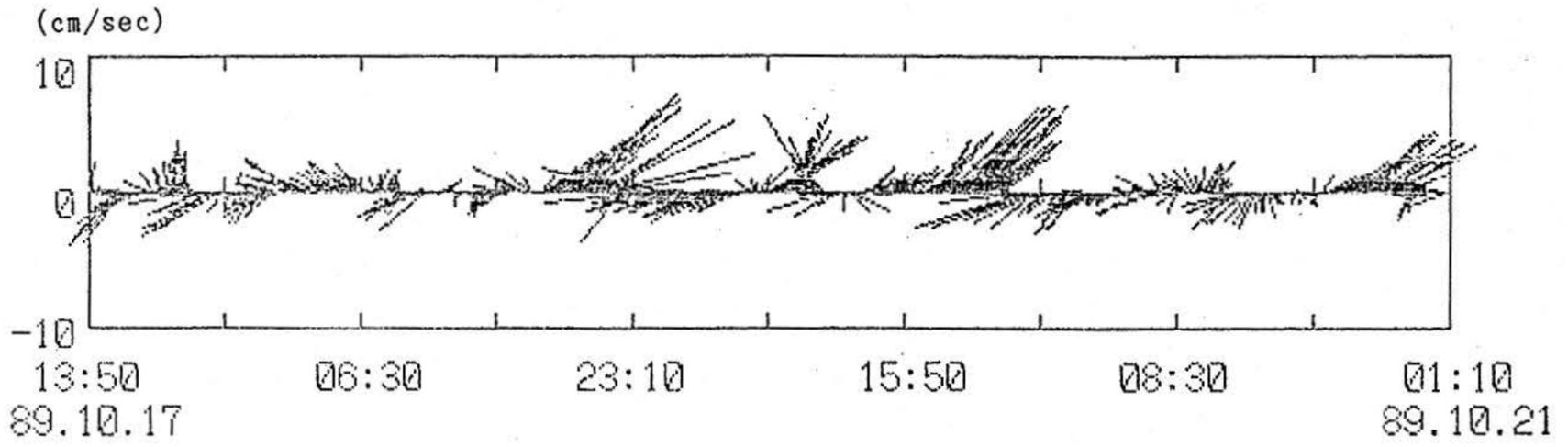


図20(c) 流向流速 (秋季:平成元年10月10日~10月25日)
 Fig. (c) Current direction and velocity (Autumn:1989. 10/1010/25)

る周波数成分にピークが見られるが、冬季のスペクトルはより低周波に多くのピークが見られた。これは波浪や吹送流等の影響で短い周期での海水

流動変化がこの期間卓越していた結果であることが推察される。

図21は人工ノル周辺における流向流速

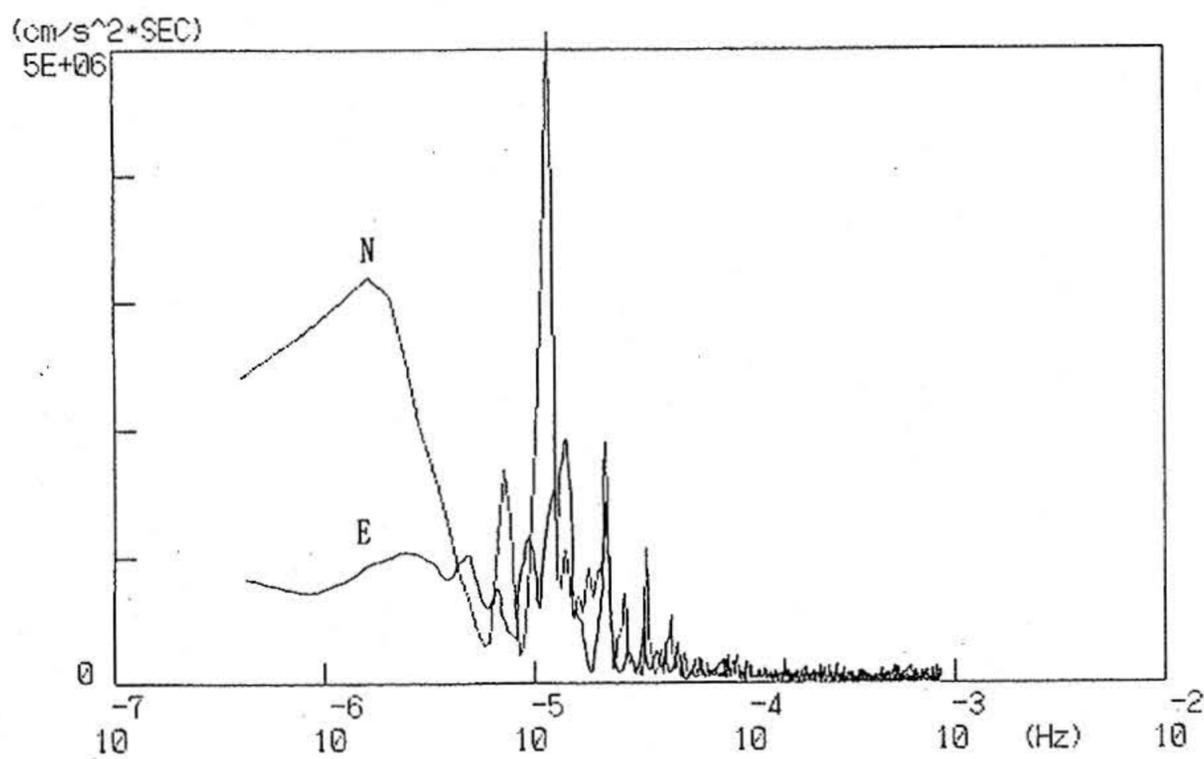
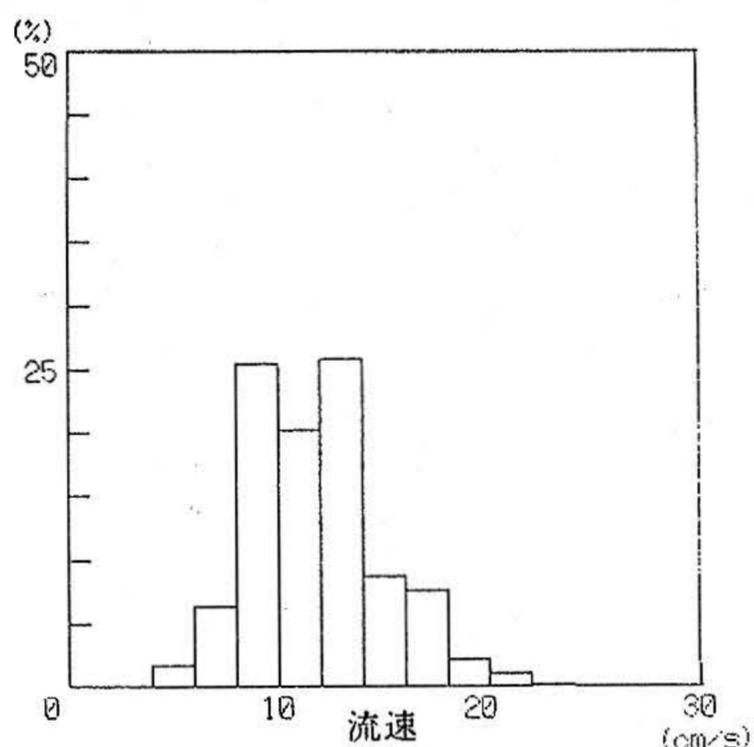
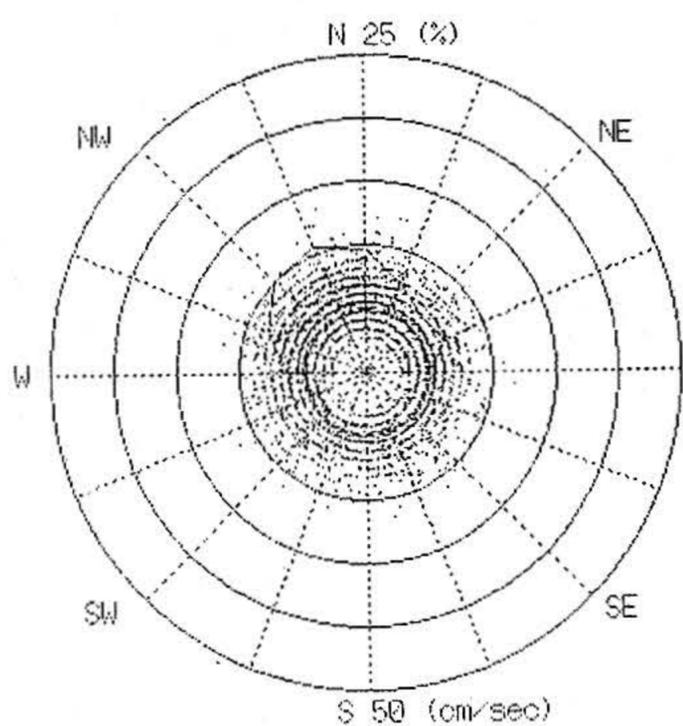
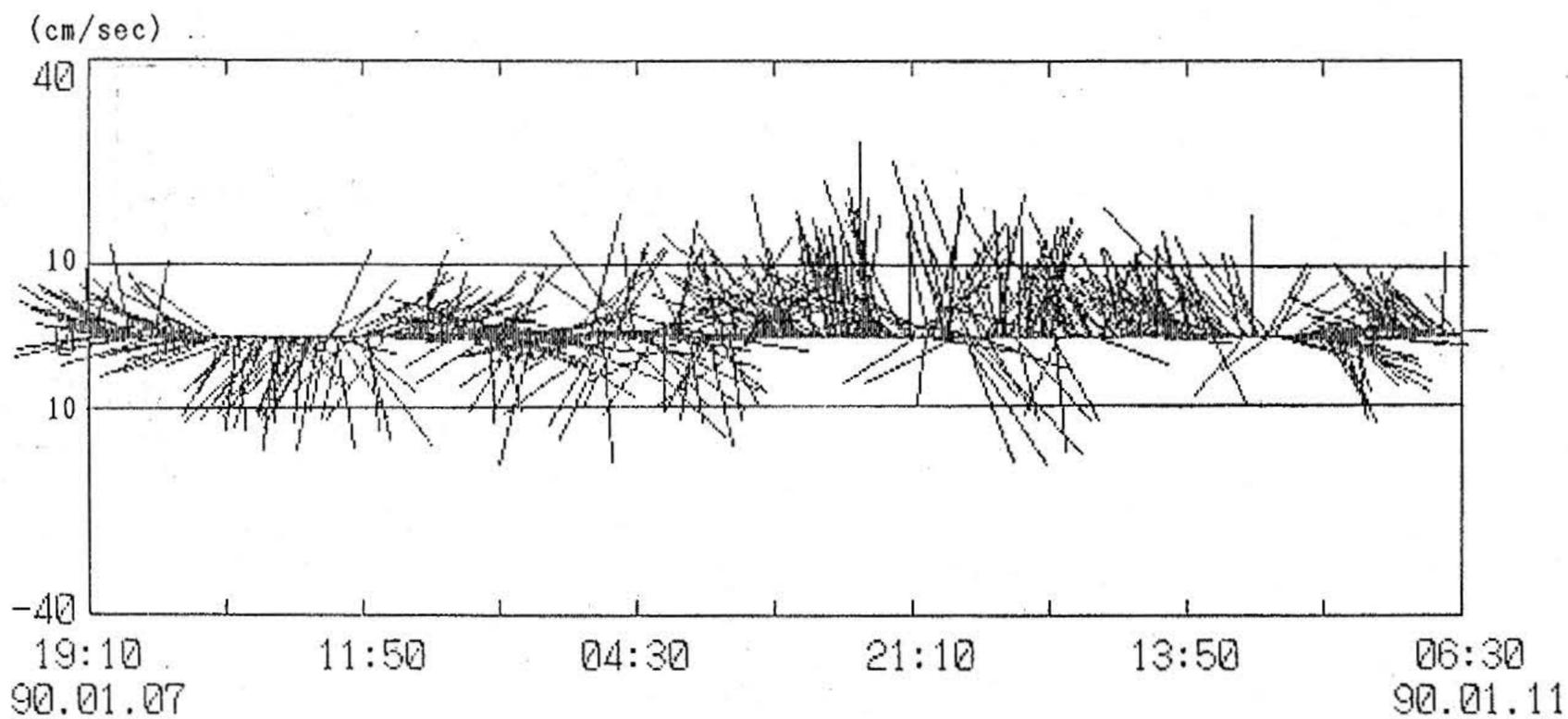


图20(d) 流向流速(冬季:平成元年12月~平成2年1月18日)

Fig. (d) Current direction and velocity (Winter:1989.12/141990.1/18)

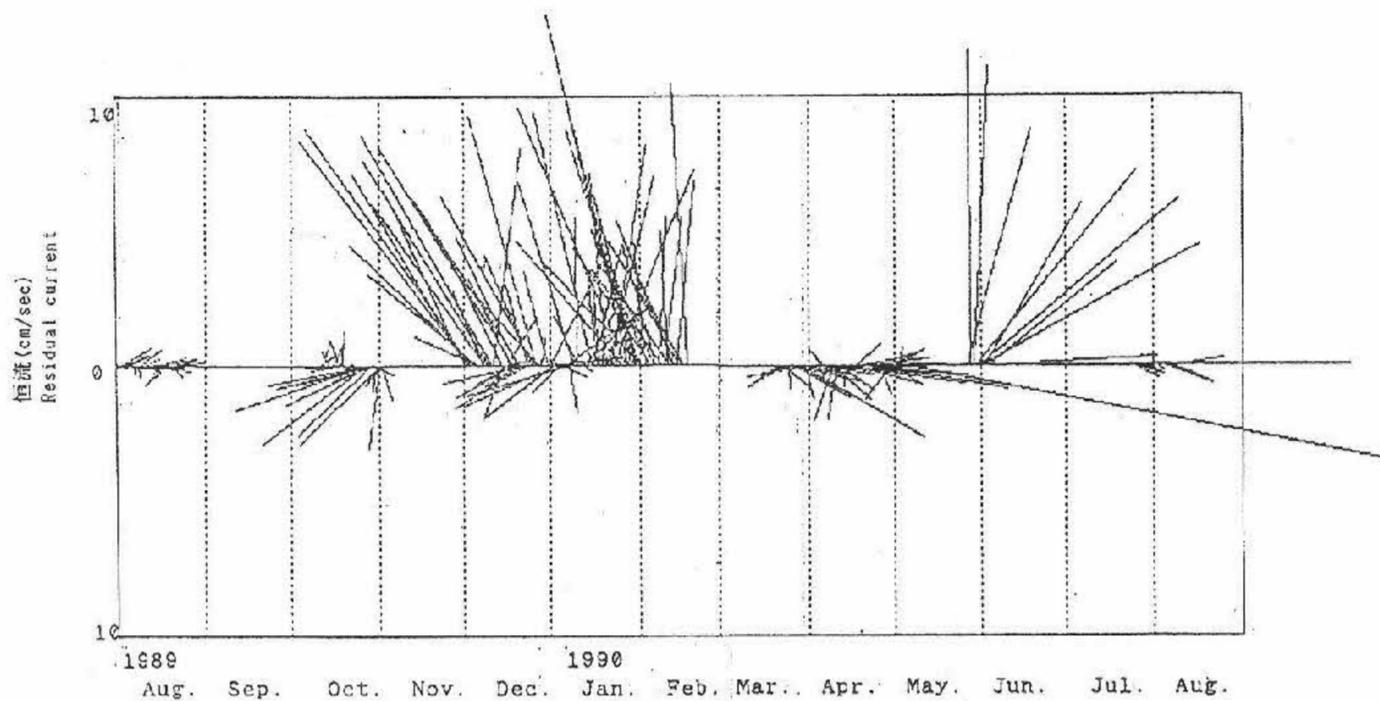


図21 人工ノル周辺恒流

Fig. 21 Residual current around the artificial knoll

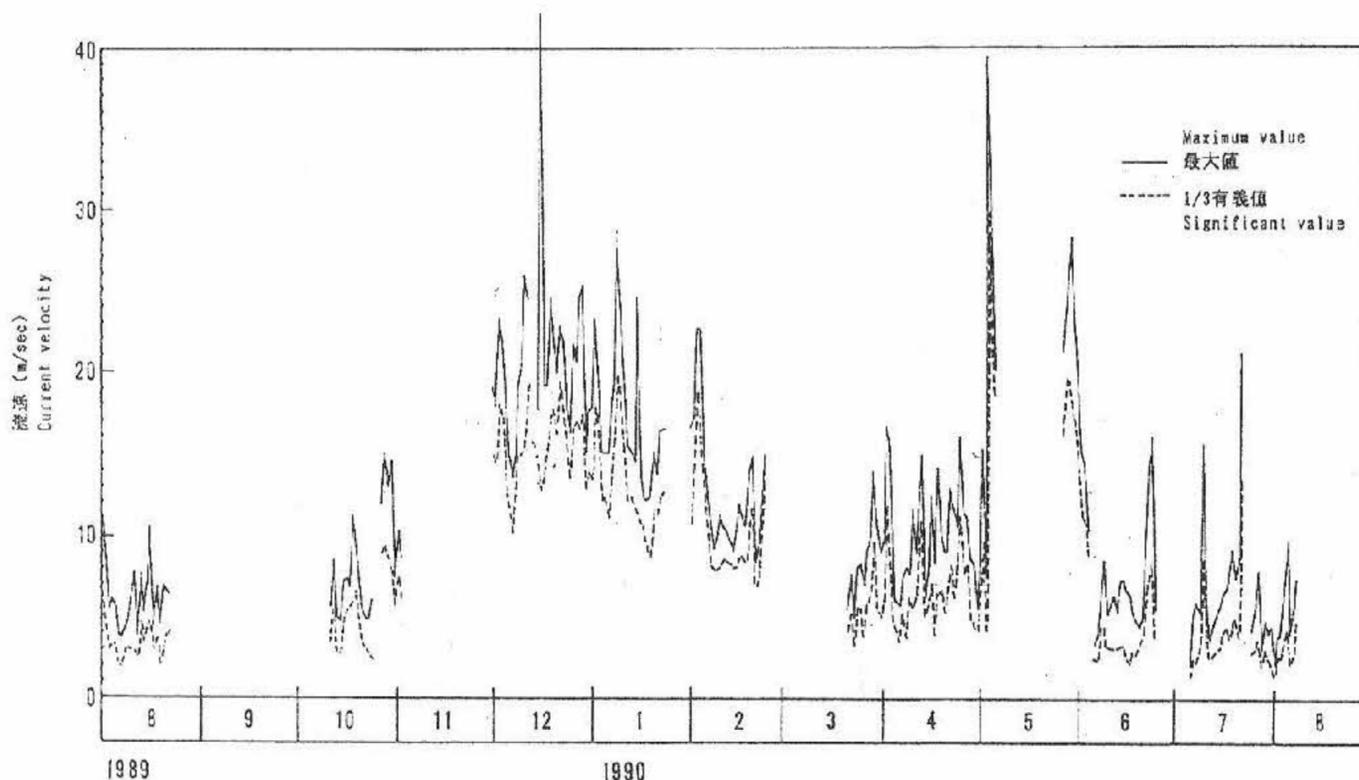


図22 人工ノル周辺における流速の日最大値及び1/3有義値

Fig. 22 Maximum and significant values of current velocity around the artificial knoll

データを日単位で積算し潮汐成分を除いた流れ(恒流)のスティックダイヤグラムである。この図より12月から2月にかけては北向きの流れが卓越していることがわかるが流速は10cm/sec程度であって。

図22は平成元年8月の流向流速の日最大値及び日1/3有義値の時系列変化である。5月の初旬、及び下旬に流速の速い日が観測されているが、12月～1月にかけての冬季間平均的に流速が高いことが明らかとなった。

(2) 波高

波高は水圧式波高計により平成2年5月下旬に

観測を開始した。

図23は最大波高と1/3有義波高の時系列である。同図には各計測時(20分毎)の平均水深を合わせ示しておりこれらのデータは潮汐変化に相当する。観測期間中有義波高で1mを越える時はなかった。その中で比較的波高が高くなった(有義波高0.5m以上)のは5月29日～5月31日、6月21日、及び7月8日～7月9日であった。これらの期間流速も高い傾向が見られる(図22)。

(3) 海水流動と濁度

観測された海水流動特性が移植サンゴに対してどのような影響を与えるか先に3項目挙げた。そ

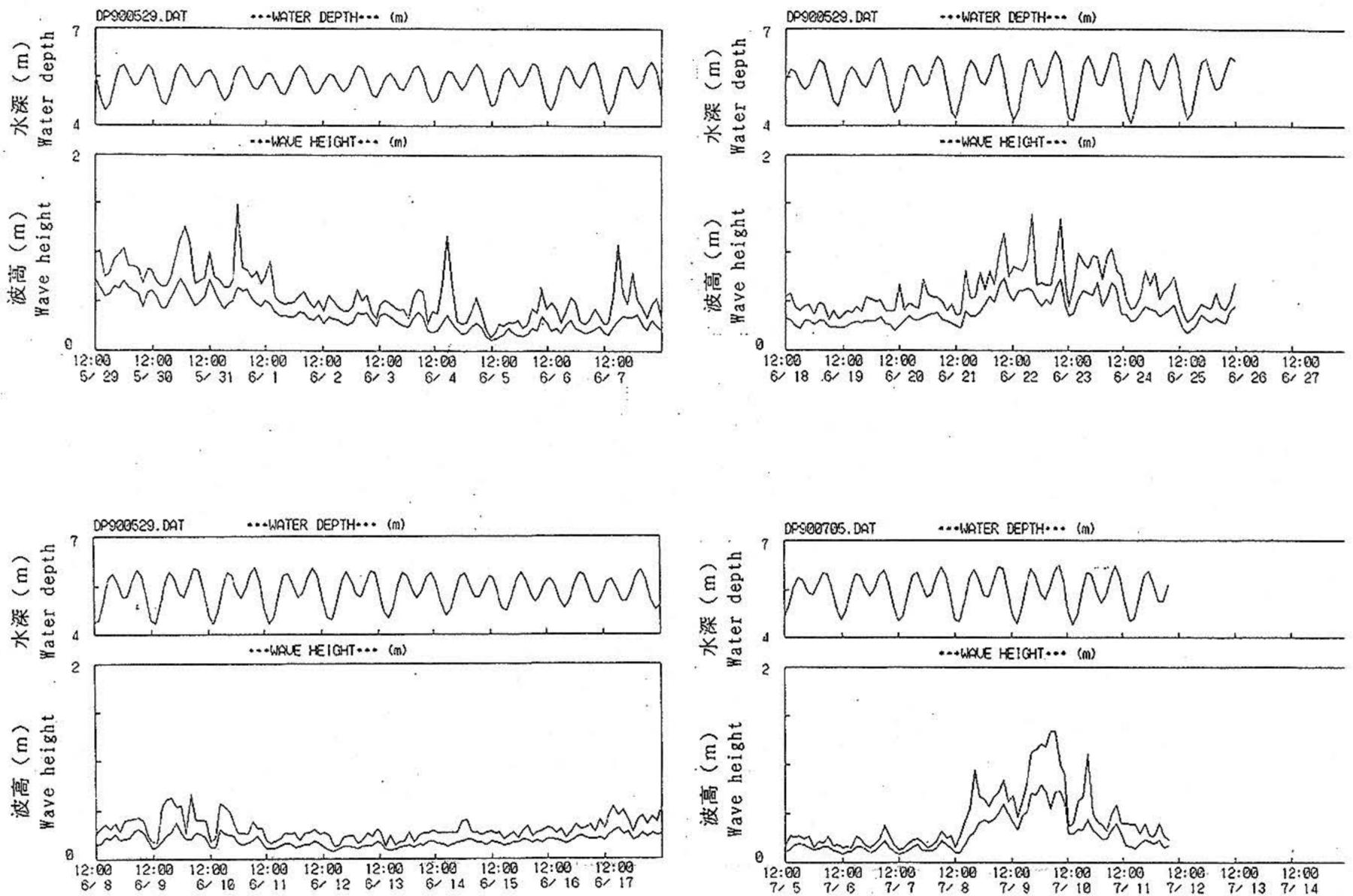


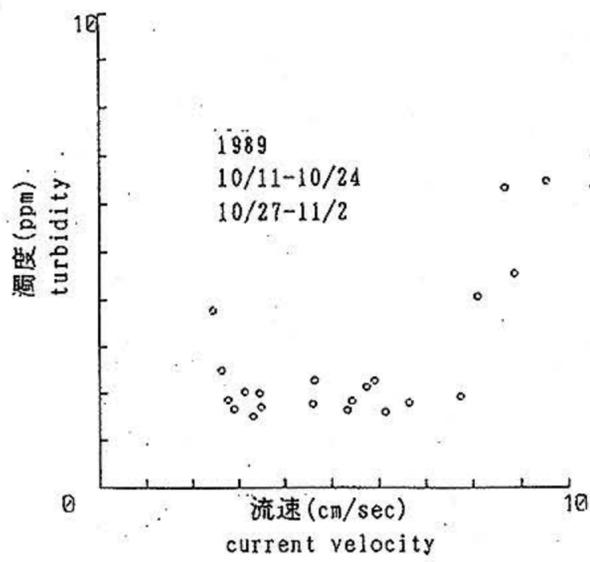
図23 人工ノル周辺における波高の日最大値及び1/3有義値

Fig. 23 Maximum and significant values of wave height around the artificial knoll

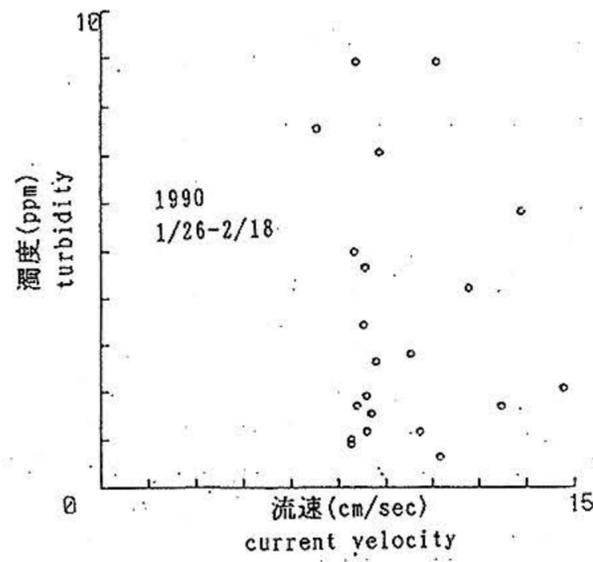
の中の①物理的影響については移植サンゴの離脱・破壊はほとんど見られなかった。移植サンゴの元の生息地であったヒラビシはリーフ縁であり波の砕波帯となっており、移植サンゴは波当り及び速い流れに対しては比較的強いと考えられる。従ってこの点についての影響はなかったと考えられる。次に②の海水の交換については元の生息地の西に位置するヒラビシ水路では潮汐により最大で30cm/sec~80cm/secという流れが存在しておりヒラビシ上の海水は活発に外洋水と交換されていると考えられる。従って元の生息地に比べると人工ノルにおける海水の交換量は少なく移植サンゴの成長に影響を与えた可能性がある。W. C. Dennison et al. (1985) は海水の交換速度が減少すると共生藻の光合成活動が低下し、サンゴの成長速度も低下することを実験的に証明し海水交換の重要性について示した^{1,2)}。しかしどの程度影響したかは水質調査、及びサンゴ成長速度の定量的計測を行っていない今回の観測では定量的に議論できなかった。

③の濁度の増加については濁度計の値が必ずしも正確ではないが海水流動特性（流速、波高）の変化により濁度も変化する傾向が見られる。図15の濁度経時変化と図21の流速の経時変化を比べると平成元年10月、平成2年1月下旬~2月中旬、平成2年6月、平成2年7月の濁度変化と流速変化の傾向が似通っている。また図22の波高経時変化と濁度の値を比較した場合、7月の波高変化が濁度変化と対応している。そこで各期間ごとに流速と濁度、及び波高と濁度の相関を求めた。

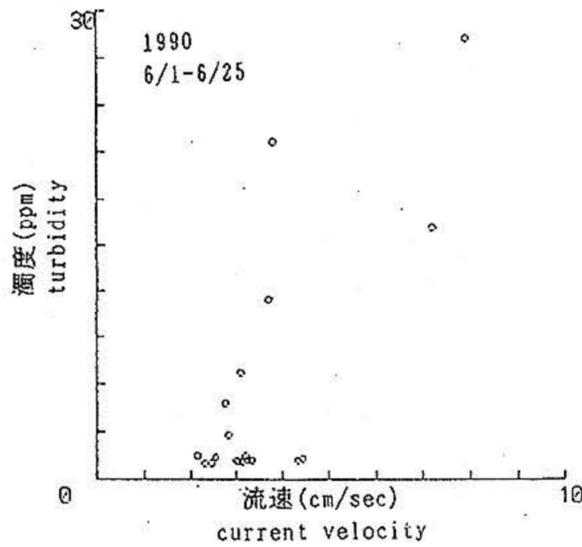
図24 (a)~(d) は流速の一日当りの1/3有義値と濁度の平均値をプロットしたものである。10月(図24 (a))、1月下旬~2月中旬(図24 (b))の各観測期間には流速と濁度の間に関係性は見られなかった。1月下旬~2月中旬の場合、平均的に流速が高いものの濁度値はそれほど高くなっていない。これは流れが速くても定常的なものと海底の堆積物が不規則に攪乱されることが少なく、また海水交換が活発となり濁度の高い海水を常に置換し逆に海水の清浄化作用が働くためにで



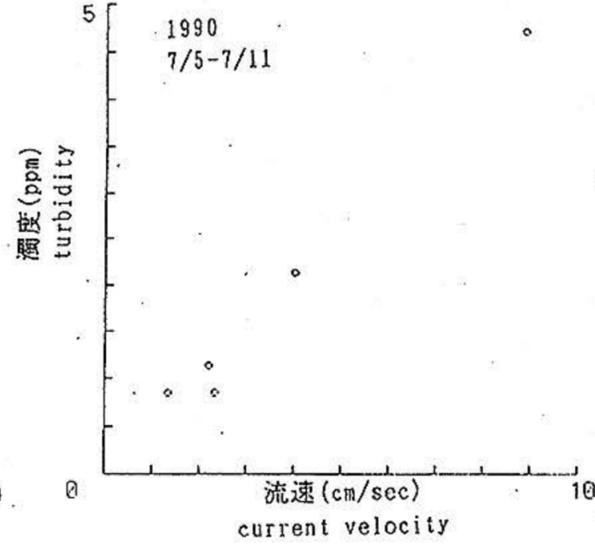
(a)



(b)



(c)



(d)

図24 流速有義値と濁度平均値

Fig. 24 Significant value of current velocity versus mean values of turbidity

はないかと推察される。一方、6月と7月の各観測期間には比較的強い相関が見られた。図25は7月の観測期間の流速と濁度を全てプロット（7月5日～7月11日：10分毎の観測データ）したものである。この観測期間には流速の増加に伴い直線的に濁度が増加している。図26は同期間の波高と濁度の関係を示したものである（7月5日～7月11日：2時間毎の観測データ）。波高と濁度の間にも相関性が見られ、図26(b)のように波高と2時間後の濁度の間にも最も強い指数関数的な正の相関が見られた。

以上のように海水流動の変化が海水中の濁度を変化させる傾向が確認された。しかしより精度よく、かつ定量的に海水流動と濁度の関係を明らかにするためには信頼性の高い濁度データを取得することが必要である。

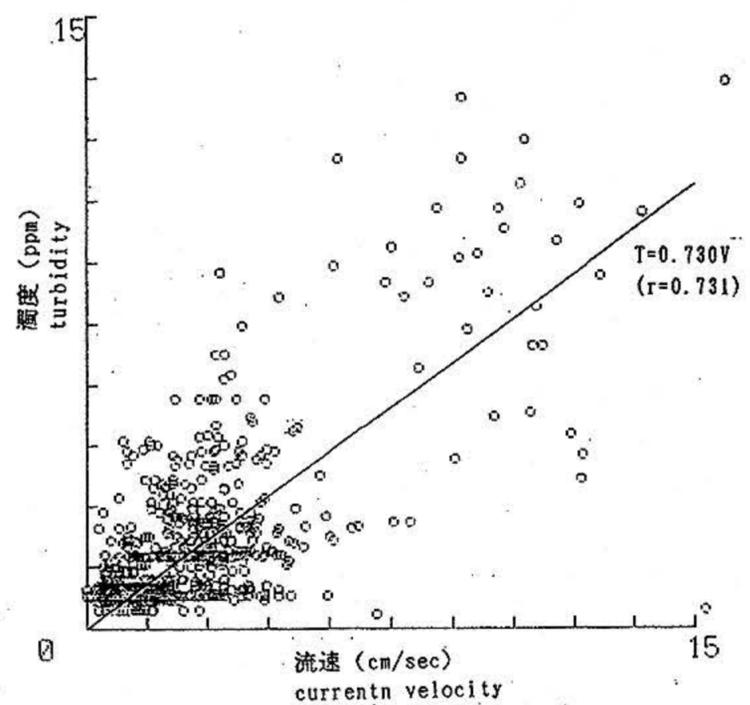


図25 流速と濁度

(平成2年7月5日～7月11日)

Fig. 25 Current velocity versus turbidity

(1990.7/5-7/11)

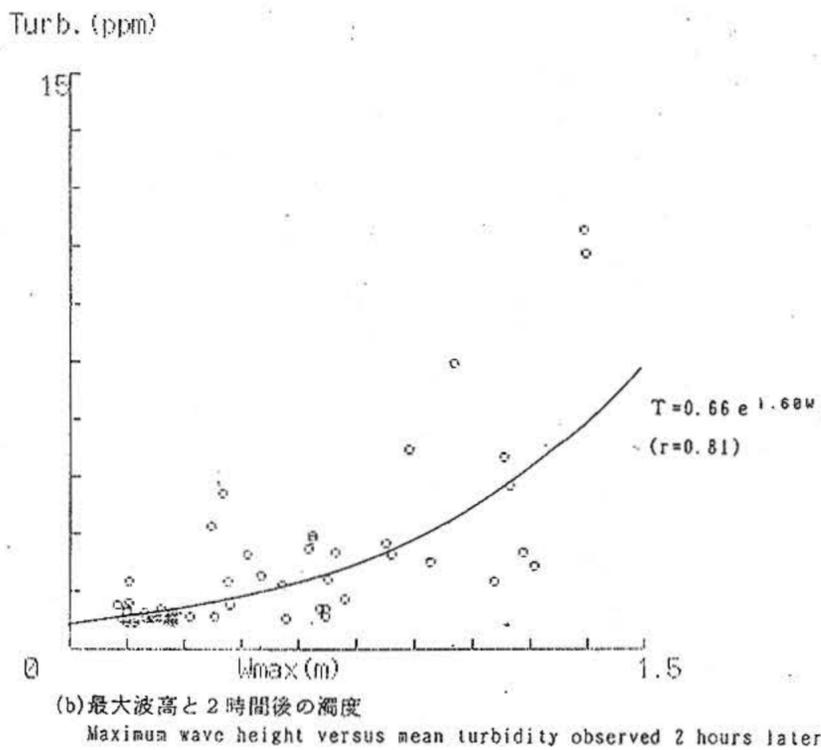
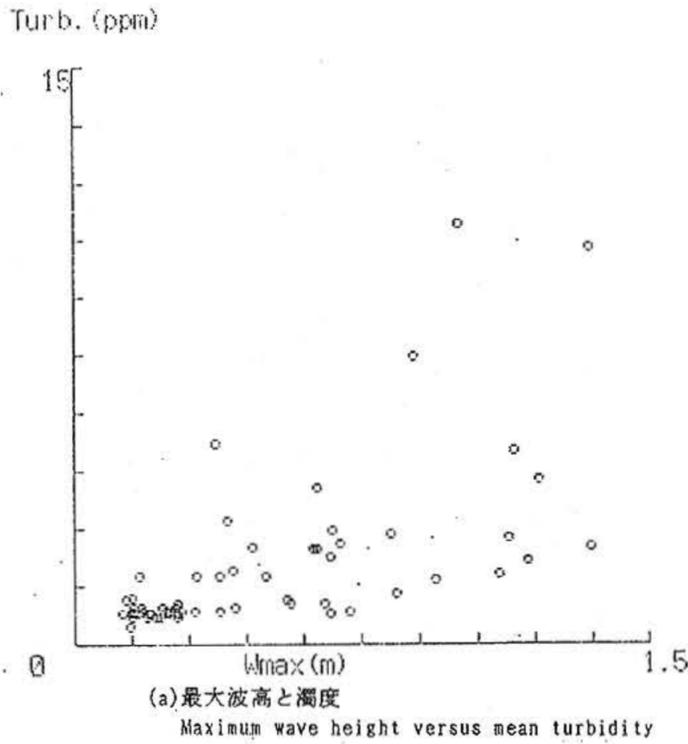


図26 波高最大値と濁度平均値

Fig. 26 Maximum values of wave height versus mean values of turbidity

5 結論

人工ノル上の移植サンゴの成長度と周囲の環境との関係を明らかにするためにサンゴの成長とともに大気環境、海水環境について調査・観測を行い、以下の結論が得られた。

(1) 大気環境

気温、気圧は過去30年間の統計平均値とほぼ一致し、約一年間の観測期間が平年並の気象環境であったことが確認された。大気中の光環境もほぼ平年並であり、大気中の光強度は冬季は夏季の約40%にまで減衰することが確認された。

(2) 海水環境

1) 水温

人工ノル周辺の水温は冬季には造礁サンゴの成育限界といわれる18°C近くまで低下していることがわかった。この水温の低下は移植サンゴの成長を阻害し冬季間の死亡数を増加させたと推察される。しかし表層5 m程度までは水深による水温の差は小さく、人工ノルの各段における移植サンゴの成長度に違いを生じさせたと考えにくい。

2) 塩分

塩分は降雨により低下する傾向が見られ、特に6月の塩分の低下が顕著であった。しかし塩分値は全て32.0以上であり海水の低塩分化現象は見られなかった。従って塩分は移植サンゴの成長制限因子にはなっていないことが推察される。

サンゴの成長制限因子である水中光環境については濁度、及び水中光量子を測定した。

3) 水中光環境

① 濁度

濁度は12月～1月、及び6月に一日平均値で30 ppmを越えた。しかし12月～1月の値は温度計の検出限界を越えてしまっており、6月の塩分は水中の光量子の変化と対応していない。さらに、各観測期間中濁度の値が徐々に増加する傾向が見られることから濁度計センサー部の汚損が充分考えられる。従って波浪の影響があり、かつ生物活動度の高い浅海域で光学式の計測器を使用する場合はセンサー部の汚損防止が重要であると考えられる。

② 水中光量子

水中光量子は平成2年5月から観測を始めたためデータは十分な量ではないが、得られたデータから水中光透過度の変化について求めた。光透過係数の算出より人工ノル上では周囲の海洋環境により、(比較的透過性の高い)外洋水的性質から(透過性の低い)沿岸水的性質に変化することが明らかとなった。人工ノル各段上における光強度は海水の透過性が低下するとその差が大きくなる。この差が各段上におけるサンゴの成長速度に差を生じさせると予想される。従って冬季間のように空中光環境が悪化し、さらに海水の透過性が低下した場合にはサンゴの生育に大きく影響し、さらに各段におけるサンゴの成長速度に差を生じさせることが推察された。

4) 海水流動特性

人工ノルにおける海水流動特性を把握するため、流向流速、及び波高を観測した。流速に関しては平均的に冬季間高いこと、また冬季間には北向きの恒流が存在することを観測した。波高は5月以降有義波高で1 mを越えることはなかった。これらの海水流動特性と濁度を比較した結果、流速・波高に伴う濁度の増加傾向が見られた。しかし全ての観測期間において流速・波高と濁度に相関が見られるわけではなかった。定量的にこれらの相関性について明らかにすることが今後の課題である。

サンゴの成長と自然環境の関係を把握し、今後の変遷を予想したり、また積極的にサンゴ生育の好環境を形成するためには今回の観測をより詳細に、かつ精度よく継続していくとともにサンゴの成長速度の定量的調査、および海水の化学的環境調査等を行っていくことが重要であると考えられた。

6 謝辞

観測結果に関して御助言頂いた琉球大学理学部氏家宏教授他サンゴ造園研究委員会の方々、計測機器の設置回収、データ回収および移植サンゴの観察のために使用した船を操船して下さった知念海洋レジャーセンターの職員の方々、照喜名朝金氏、移植サンゴの生育度を調査して下さいったSTAFFフェローM. Claereboudt氏、及び計測機器の設置・回収、計測データの整理に御協力頂いた海洋科学技術センター知念実験本部東恩納栄子氏、琉球大学理学部藤井知康氏他学生の方々、並びにデータ観測システムの構築、データ解析・整理に協力頂いた当センター海洋開発研究部工藤君明副主幹、及び河野健研究員に謝意を表します。

参考文献

- 1) 續辰之介, 工藤君明: 無性生殖の応用によるサンゴ群集の復元方法, JAMSTEC TR., vol. 21, pp. 109-120, (1989)
- 2) 工藤君明, 本多牧生: 沖縄本島周辺サンゴ礁の現況調査, JAMSTEC TR., vol. 21, pp. 121-142, (1989)
- 3) 工藤君明, 大西毅, 本多牧生: サンゴ移植・観測システムについて, JAMSTEC R., vol. 23,

pp. 345-369, (1990)

- 4) 海洋科学技術センター編: サンゴ礁造園技術の研究開発平成元年度調査研究報告書, (1990)
- 5) 工藤君明, 本多牧生, 河野健: サンゴの移植実験について, 海洋科学センター平成2年度(第16回)研究報告会要旨集, pp. 118-120 (1990)
- 6) Harriott, V. J. and D. A. Fisk: Coral transplantaion as a reef manegement option Proceeding of the 6th. International Coral Reef Symposium 1988, vol. 2, pp. 375-379, (1988)
- 7) 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, P. 1077, (1985)
- 8) 山里清: イシサンゴにおける石灰化, 海洋科学, 11月号, pp. 56-61 (1974)
- 9) 海洋科学技術センター: サンゴ礁造園技術の研究開発調査研究報告書「沖縄のサンゴ礁」, (1988)
- 10) Stromger: T. The effect of light on the growth rate of intertidal *Acroporapulchra* (Brook) from Phuket, Thailand, Iat. 8° N, Coral Reef, vol. 6, pp. 43-47, (1987)
- 11) 宮地重遠, 村田吉男編: 光合成と物質生産, 理工学社, p. 535, (1980)
- 12) Dennison. W. C. and D. J. Barnes: Effect of water motion on coral P hotosynthesis and calcification, J. Exp. Mar. Biol. Ecol., vol. 115, pp. 67-77, (1987)

(原稿受理: 1990年11月6日)