

第3章 サンゴ群集成長過程における環境因子の 影響の解析

3-1 はじめに

サンゴ群集の成長過程に関する研究は、ハワイ、グアム、グレートバリアリーフ等の自然地形(サンゴ礁)において行われているが(Grigg and Maragos, 1974; Colgan, 1987; Connell, 1978; Connellら, 1997)、国内における研究事例は少ない。また、サンゴ群集の成長過程に関する研究の多くは、遷移の過程で生じた嵐などの影響による減少の後の回復過程を調査したもので、サンゴ群集にとって新たな着生基盤としての人工構造物上での長期間にわたる定量的観測データ解析の事例はほとんどない。

一方、沖縄県に位置する那覇港では図 3-1 に示すように防波堤などの人工構造物の異形ブロック(テトラポッド)上にサンゴ群集が着生していることが確認された(森田ら, 1992)。このため、那覇港内におけるサンゴ群集の着生状況を把握するため 1994 年に防波堤等人工構造物上における 157 地区の同一水深帯においてサンゴ群集の被度分布調査を実施した(岩上ら, 1995)。人工構造物は施工した年が明らかなため、1 回の調査で構造物施工後の経過年数とサンゴ群集の成長過程を整理することができる。調査対象区域には 1 年前から 18 年前までに施工された構造物があり、経過年数に対応するサンゴ群集の被度のデータが得られている。

1994 年に得られたデータをもとにサンゴ群集の成長過程と環境因子の関係

を統計解析した。標準的な成長過程と環境因子との関係に関する知見は、サンゴ群集が優占する沿岸域の環境修復事業における長期的目標設定や実行計画立案に際してきわめて重要なものと考えられる。

以下においては、那覇港における現地調査結果をもとにサンゴ群集の成長過程を統計的に解析し、成長過程における環境因子の影響について解析した結果を示す。

3-2 方法

3-2-1 人工構造物におけるサンゴ群集の調査

1994年に那覇港の人工構造物を対象として、図 3-2 に示す 157 調査地区でサンゴ群集の被度分布調査を実施した(岩上ら, 1995)。サンゴ群集の被度は、図 3-3 に示すように異形ブロック上と直立壁面上における D.L.-1m から -2m の水深帯をベルトトランセクト法によって潜水目視観察で求めた。D.L.とは設計用基準面(design level)のことで概ね低潮水位に相当し、那覇港では平均水位よりも約 1m 低い。調査区域の人工構造物の構造形式、施工時期は施工履歴をもとに整理した。

3-2-2 サンゴ群集の成長過程における環境因子の影響の解析

a)環境因子

サンゴ群集の成長過程に直接的に影響を及ぼす環境因子は、流速、光量、セディメンテーション、水質(水温、塩分、有機物量・無機物量)、捕食生物、競合生物、サンゴ同士の競合である(図 2-2)。本研究では各環境因子に以下のような指標値を用いた。

流速の指標値は、構造物直近の流速が主に波浪流の影響を受けると想定し、設計波(50年確率波)を波浪変形して求めた構造物前面波高(以下、堤前波高)とした。これは、小笹ら(1994)、Murakamiら(2001)が付着生物の分布状況と波浪条件との関係を解析する際に用いた手法である。

光量の指標値は、透明度、対面方向(北向きを 0° とし、東を 90° 、南を

180°、西を 270°)、基盤の傾度(異形ブロックは 0°、直立壁面は 90°)とした。

セディメンテーションの指標値は、基盤の傾度を考慮することとした。基盤傾度が大きいほどセディメンテーションの影響が小さく、基盤傾度が小さいほどセディメンテーションの影響が大きいことを考慮した。

水質の指標値は水温(平均水温、最高水温)、塩分、化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、全リン(T-P)、浮遊物質(SS)とした。

捕食生物、競合生物、サンゴ同士の競合等に関する生物間の因子については、本研究では環境修復技術の提案・開発を目的としていることから、対象とする環境因子の指標は主に工学的な配慮が可能な物理化学的因子を選定することを考慮し、対象としなかった。

これらの環境因子に関する情報は、対象地区周辺で沖縄総合事務局那覇港工事事務所が 1986 年から 1994 に実施した調査結果をもとに地点ごとの値を線形補間して各調査地区の値とした。

対象地区の主な環境因子の平均値(標準偏差)を以下に示す。堤前波高は 7.1m(4.1m)、透明度は 12.5m(4.3m)、平均水温は 24.4°C(0.1°C)、最高水温は 29.7°C(0.2°C)、塩分は 34.68(0.14)、COD は 0.9mg/l(0.1mg/l)、T-N は 0.17mg/l(0.06mg/l)、T-P は 0.014mg/l(0.010mg/l)、SS は 1.3mg/l(0.9mg/l)である。

b) 解析の方法

サンゴ群集の成長過程における環境因子の影響の解析は、図 3-4 に示すよ

うにサンゴ群集の被度に関する全調査データ(n=157)を経過年数ごとに区間推計してサンゴ群集が成長可能な条件と成長不可能な条件に区分した。さらに、サンゴ群集が成長可能な条件については着生基盤として異形ブロック上と直立壁面上に区分し、それぞれのパターンにおける成長過程と環境因子の関係を解析した。

i) サンゴ群集が成長できる環境条件の解析

人工構造物上のサンゴ群集の調査結果には被度がきわめて低い地区が存在する。サンゴ群集の被度は構造物の施工時期から求められる経過年数と共に変化するため、経過年数ごとに区間推計し、95%信頼区間を下回る被度の地区についてはサンゴ群集の成長に適さない環境因子が存在すると判断した。95%信頼区間を下回る被度の地区とその他の地区との環境因子の違いを t 検定により検証し、那覇港においてサンゴ群集が成長できる環境因子の目安を求めた。

ii) サンゴ群集の成長過程の解析

サンゴ群集が成長できる環境因子を有する地区のサンゴ群集の被度を対象に、異形ブロック上と直立壁面上でサンゴ群集の成長過程に違いがあるとの仮説を立て t 検定で検証し、それぞれについてサンゴ群集の成長過程をYamaguchi(1983)がハナヤサイサンゴ(*Pocillopora Damicornis*)の成長解析に用いたロジスティック曲線で近似した。

iii) サンゴ群集成長過程における環境因子の影響の解析

サンゴ群集の成長過程を初期成長期とその後の安定成長期に分け、初期成長期については指数関数近似して異形ブロック上と直立壁面上およびその他の事例を対象に比較検討した。安定成長期のサンゴ群集の被度についても同様に平均値の比較を行うとともに、異形ブロック上と直立壁面上での各種環境因子とサンゴ群集の被度の関係を解析した。

3-3 結果および考察

3-3-1 サンゴ群集が成長できる環境条件

人工構造物の施工時期から求められる経過年数とサンゴ群集の被度の関係(n=157)を図 3-5 に示す。概略的なサンゴ群集の被度の経年変化過程は確認できるものの、全体的に経年的な変動と年ごとの被度の分散が大きい。これは各年の調査地区にサンゴ群集の成長に適さない地区が含まれていることと、構造基盤が大きく異なるデータが混在しているためと考えられる。

そこで、構造物施工後の経過年数ごとにサンゴ群集の被度の区間推計を行ない、95%信頼区間を下回る値についてはサンゴ群集の成長に適さない地区(n=45)としてサンゴ群集の成長が可能な地区(n=112)と区分した。各区分における環境因子の母平均の差をt検定により検証した結果、堤前波高、塩分、透明度、SS、COD、T-N、T-P に有意な差が認められた。サンゴ群集の成長に適さない地区(n=45)とサンゴ群集の成長が可能な地区(n=112)ごとに、これらの環境因子の平均値と標準偏差を整理して表 3-1 に示す。サンゴ群集の成長に適さない地区の 90%以上は那覇埠頭と新港第一防波堤の港内側の地区である。これらの地区では流速の指標値である堤前波高が低く、河川(国場川)からの淡水や栄養物質の供給とそれにとまなう透明度の低下がサンゴ群集の成長を阻害する要因となっているものと考えられる。サンゴ群集の成長に適した環境条件の目安として、堤前波高(8.4m)、塩分(34.7)、透明度(13.7m)、SS(1.2mg/l)、COD(0.8mg/l)、T-N(0.15mg/l)、T-P(0.012mg/l)が得られた。環境修復計画における適地選定の際にはこのような条件を考慮して対象区域を選定すること

や、環境条件の改変目標とすることが望ましい。

3-3-2 サンゴ群集の成長過程

サンゴ群集が成長できる地区について、異形ブロック上と直立壁面上のサンゴ群集の被度を t 検定により検証した結果、有意な差が認められ、それぞれについてサンゴ群集の成長過程の解析を行った。サンゴ群集の成長過程はロジスティック曲線で近似した。ロジスティック曲線は限界のある条件での成長過程を表す方程式である。本報ではロジスティック曲線として式 3-1 に示す Gompertz の成長曲線 (Gulland, 1969) を用いた。これは、Yamaguchi (1983) がハナヤサイサンゴ (*Pocillopora Damicornis*) の成長解析に用いたものである。Gompertz の成長曲線への近似に際しては、図 3-6 に示すように年間成長率と前年被度の関係を求め、それをもとに近似式を算出した。近似式を式 3-2、3-3 に示すとともに異形ブロック上と直立壁面上でのサンゴ群集の成長過程に関する実測値の変動と近似曲線を図 3-7 に示す。

$$\ln S_t = \ln S_\infty (1 - b \exp(-Kt)) \quad (\text{式 3-1})$$

S_t は t 年後の被度、 S_∞ は最終的な被度、 K は成長係数、 b は初期サイズで決まる変異定数である。

< 異形ブロック上の平均成長曲線 >

$$\ln S_t = 4.01(1 - 2.14 \exp(-0.55t)) \quad (r^2=0.82, n=17) \quad (\text{式 3-2})$$

<直立壁面上の平均成長曲線>

$$\ln S_t = 2.75(1 - 2.67 \exp(-0.57t)) \quad (r^2=0.22, n=17) \quad (\text{式 3-3})$$

これによると、サンゴ群集の成長過程は6年目から8年目までの初期成長期とその後安定成長期に分けて考えることができる。成長係数(K)は異形ブロック上と直立壁面上ではほぼ同じ値になっているが、直立壁面上では相関が低い。最終的な被度(S_∞)が異なるのは、安定成長期のサンゴ群集の平均的な被度が異形ブロック上では50.9%と高く、直立壁面上では22.9%と低いことによるものである。Yamaguchi(1983)が Stephenson and Stephenson (1933)の観察結果をもとに求めたハナヤサイサンゴ(*Pocillopora Damicornis*)の成長曲線を式 3-4 に示す。これはハナヤサイサンゴ1群体の面積を指標とした成長過程を示すものであるため、最終的な被度(S_∞)の値は異なるが、成長係数(K)はほぼ同程度である。

$$\ln S_t = 7.03(1 - 1.43 \exp(-0.51t)) \quad (\text{式 3-4})$$

このように、成長モデルにおける成長係数は、単一種のサンゴ群体だけでなく、実海域の複数種から構成されるサンゴの成長を解析する指標として有効であることが明らかになった。また、異形ブロックと直立壁面におけるサンゴ群集の標準的な成長過程は、今後の環境修復計画における時間・空間的な目標設定に際しての根拠となりうるものである。

3-3-3 サンゴ群集の成長過程と環境因子

a) 初期成長期

サンゴ群集の被度は、初期成長期には指数関数的に増加する。初期成長期について1年目から6年目のデータを指数関数 ($y = a \exp(mt)$); y は t 年後の被度、 a は初期値、 m は増加率)に近似して式 3-5、3-6 に示すとともに近似曲線を図 3-8 に示す。

<異形ブロック上の初期成長曲線(水深 1m)>

$$y = 0.0034 \exp(1.78t) \quad (r^2 = 0.89, n=18) \quad (\text{式 3-5})$$

<直立壁面上の初期成長曲線(水深 1m)>

$$y = 1.1277 \exp(0.51t) \quad (r^2 = 0.73, n=20) \quad (\text{式 3-6})$$

初期のサンゴ群集の成長過程はロジスティック曲線よりも高い相関で近似できており、異形ブロック上では直立壁面上と比較して増加率が3倍以上大きい。異形ブロック上と直立壁面上では基盤の傾度が異なり、それによって基盤面上の光量が異なる。那覇港内12箇所における構造物前面の水深 D.L.-1mでの実測値は、図 3-9 に示すように水中での相対照度が傾度 0° の面に対して 90° の面では27%に減少することが観測されている。Kinzie and Hunter (1987)、Kuhl ら (1995)は、光量が増加するとサンゴに共生する褐虫藻の光合成量が増加することを示しており、異形ブロック上と比較して直立壁面上ではサンゴと共生している褐虫藻の光合成量が低下してサンゴの被度の増加率が抑

制されているものと考えられる。

なお、ここで観測されている照度は緑色光を基準とした照度である。水中では水深とともに波長分布が変化し、サンゴと共生している褐虫藻の光合成は波長によって異なることやサンゴの組織での吸収の程度が波長によって異なること (Kinzie and Hunter, 1987; Kuhlら, 1995) から考えると、光強度とサンゴ群集の関係をさらに定量的に評価するためには水深変化に伴う波長別の減衰を考慮することが望ましい。

次に、Yamamoto ら(2002)における那覇港内同一地点のサンゴ群集連続観察結果での6年目までの被度変化の指数関数近似式を求め式 3-7、3-8 に示す。これによると、増加率は傾度 10° では 1.25 であり、傾度 90° では 0.24 で、それぞれ異形ブロック上の 1.78 と直立壁面上の 0.51 と類似した傾向を示している。

<水深 1m 傾度 10° での初期成長曲線>

$$y = 0.0227 \exp(1.25t) \quad (r^2 = 0.69, n=9) \quad (\text{式 3-7})$$

<水深 1m 傾度 90° での初期成長曲線>

$$y = 1.6927 \exp(0.24t) \quad (r^2 = 0.28, n=9) \quad (\text{式 3-8})$$

また、Connell ら(1997)におけるオーストラリアのヘロン島での自然基盤上のサンゴ群集回復過程の調査事例から増加率を求めた。対象地点は那覇港における人工構造物上と類似した環境を有すると考えられる外洋に面した礁斜

面の水深 0.5m 地点とし、サンゴ群集の被度の変化をグラフから読み取り、指数関数近似して式 3-9 に示す。これによると、オーストラリアにおけるサンゴ群集の回復過程における増加率は 1.10 であり、那覇港における異形ブロック上におけるサンゴ群集の成長過程と類似している。

＜ヘロン島での回復過程の成長曲線＞

$$y = 0.0261\exp(1.10t) \quad (r^2 = 0.95, n=4) \quad (\text{式 3-9})$$

各地区におけるサンゴ群集の初期成長過程の比較を図 3-10 に示す。これによると、那覇港の異形ブロック上におけるサンゴ群集の初期成長(式 3-5、式 3-7)は、オーストラリアのヘロン島の天然礁における回復過程(式 3-9)や那覇港の直立壁面上の初期成長過程(式 3-6、式 3-8)と比較してきわめて速いことを示している。

b) 安定成長期

各地区におけるサンゴ群集の安定成長期の比較を図 3-11 に示す。6 年目以降の安定成長期におけるサンゴ群集の被度の平均値と標準偏差は、異形ブロック上では 50.9%と 19.7%(n=44)であり、直立壁面上では 22.9%と 13.9%(n=35)である。Yamamoto ら(2002)における那覇港内の異形ブロック上のサンゴ群集定点連続観察結果から 6 年目から 11 年目までの被度の平均値と標準偏差を求めると、傾度 10° の地点で 48.9%と 14.1%(n=18)であり、傾度 90° の地点で 11.5%と 5.7%(n=18)である。それぞれの値が本調査結果と同レベ

ルの値となっており、基盤の傾度が安定成長期におけるサンゴ群集の被度に影響を及ぼしていることを示している。また、Connell ら (1997)におけるオーストラリアのヘロン島における外洋に面した礁斜面の水深 0.5m 地点でのサンゴ群集の被度の安定成長期における値を図から読んで求めた平均値と標準偏差は 65%と 13.7%(n=9)である。これは異形ブロック上におけるサンゴ群集の安定成長期の被度がオーストラリアにおける天然礁での安定成長期の被度より低いもののほぼ同じレベルであることを示している。

サンゴ群集の各調査地区における被度の違いは各地区の環境条件の影響を受けていると考えられるため、主な環境因子の指標値とサンゴ群集の被度の相関を n 次曲線で近似して求め、便宜的に $r^2 > 0.1$ となったものを抽出して表 3-2 に示す。

これによると、サンゴ群集の成長に影響を及ぼしている環境因子は異形ブロック上と直立壁面上では異なっている。異形ブロック上でのサンゴ群集の成長に影響を及ぼす主な環境因子は、流速の指標値である堤前波高で、6m から 10m の範囲で被度が最大になり、それよりも高くても低くても被度が小さくなる。これは、流速が小さいとサンゴおよびサンゴに共生している褐虫藻に十分な酸素や栄養分が供給されないためであり(Thomas and Atkinson, 1997; Kuhlら, 1995; Atkinson ら, 2001)、大きな波浪による流速はサンゴ群集を破壊する(Massel and Done, 1993)ことによるものと考えられる。同様の傾向は、日本の温帯域における付着動植物の現存量と堤前波高の関係についてもみられ、種類に応じて現存量が最大になる領域があることが示されている(Murakami ら, 2001)。サンゴ群集の場合には基盤への付着力が強いため、温帯域の付着動

植物よりも大きな波浪条件に適応している。

直立壁面上でのサンゴ群集の成長に影響を及ぼす主な環境因子は、光量の指標値である透明度と対面方位で、光量が大きい環境条件（透明度が高く対面方位が南向き）であるほど被度が高い。直立壁面上では傾度が大きいことによって当初から光量が制限されているため、さらに光量の指標値の影響が大きくなるものと考えられる。光量が十分でないと、サンゴに共生する褐虫藻の光合成量が減少し(Kinzie and Hunter, 1987; Kuhlら, 1995)、共生する褐虫藻の光合成産物に依存しているサンゴ群集の成長が抑制されることによるものと考えられる。

以上より、サンゴ群集の成長過程に影響を及ぼす主な環境因子としては、異形ブロック上では流速、直立壁面上では光量があげられる。

なお、本研究では環境修復技術の提案・開発を目的としていることから、対象とする環境因子の指標は、主に工学的な配慮が可能な物理化学的因子を選定した。より詳細な検討を行うためには、捕食生物、競合生物、サンゴ同士の競合等による生物間の相互作用の影響を考慮する必要がある。

3-4 まとめ

人工構造物のような完全な裸地からのサンゴ群集の成長過程に関する解析事例はほとんどなく、本研究がはじめての事例である。

- 1) サンゴ群集の成長に適した環境条件の解析からは、構造物施工後の経過年数ごとにみたサンゴ群集の被度の区間推計結果から、サンゴ群集の成長が可能な環境条件の目安となる値が得られた。
- 2) サンゴ群集の成長過程解析では、サンゴ群集の成長が異形ブロック上と直立壁面上で異なり、それぞれをロジスティック曲線で近似することができた。これによりサンゴ群集の回復過程や新たな構造物を施工した後の成長過程が概ね予測可能になった。
- 3) サンゴ群集の成長過程と環境因子に関する解析からは、安定成長期のサンゴ群集の被度に影響を及ぼす主な環境因子は、異形ブロック上では流速、直立壁面上では光量、水質であることが判明した。光量・流速等の環境条件が十分な場所では、サンゴに共生する褐虫藻の光合成にとって良好な条件が形成されること等によりサンゴ群集の成長が速いと考えられる。
- 4) 以上の成果は、サンゴ群集が優占する海域の環境修復事業において構造タイプ別に計画の適地を選定する場合、時系列的な実行計画を立案する場合およびその際に配慮すべき環境因子について検討する場合にきわめて重要な知見と考えられる。

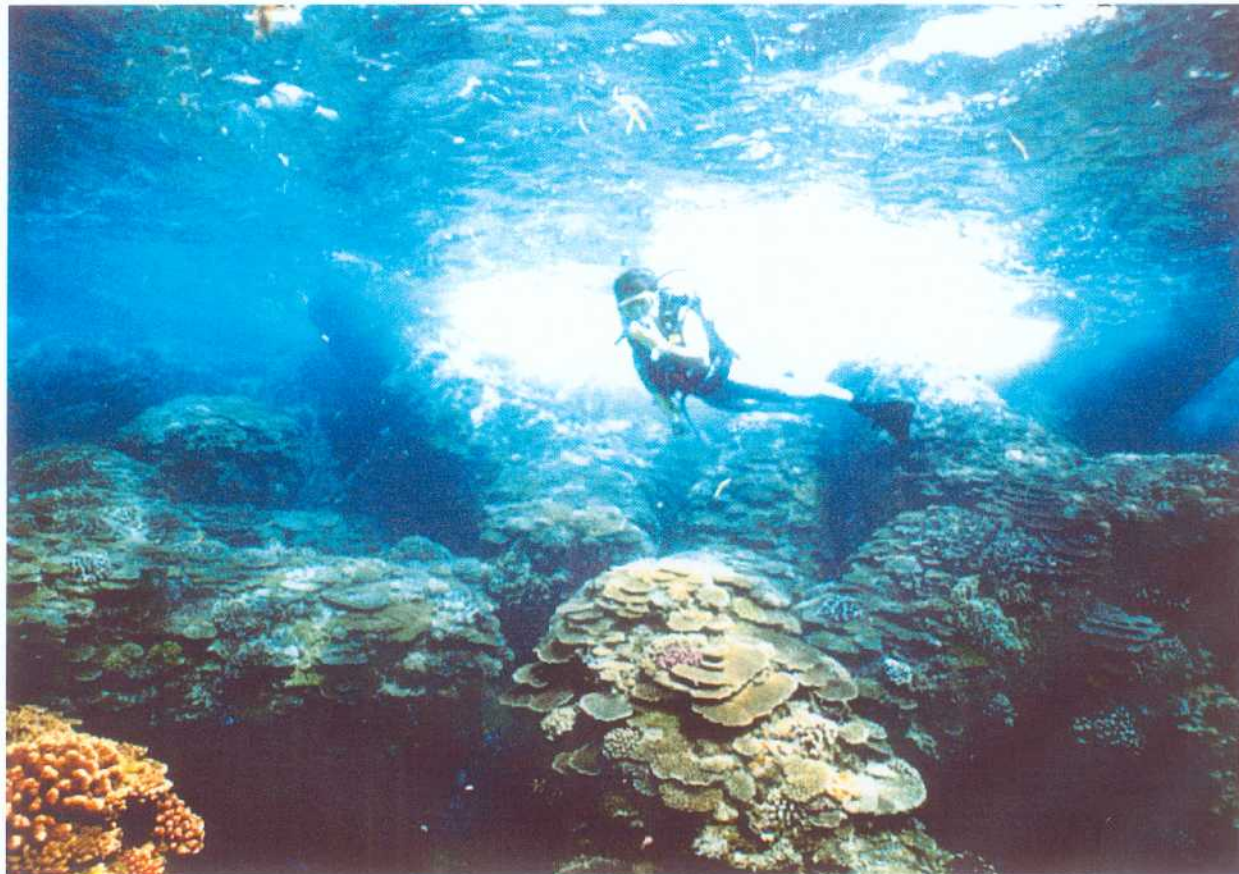
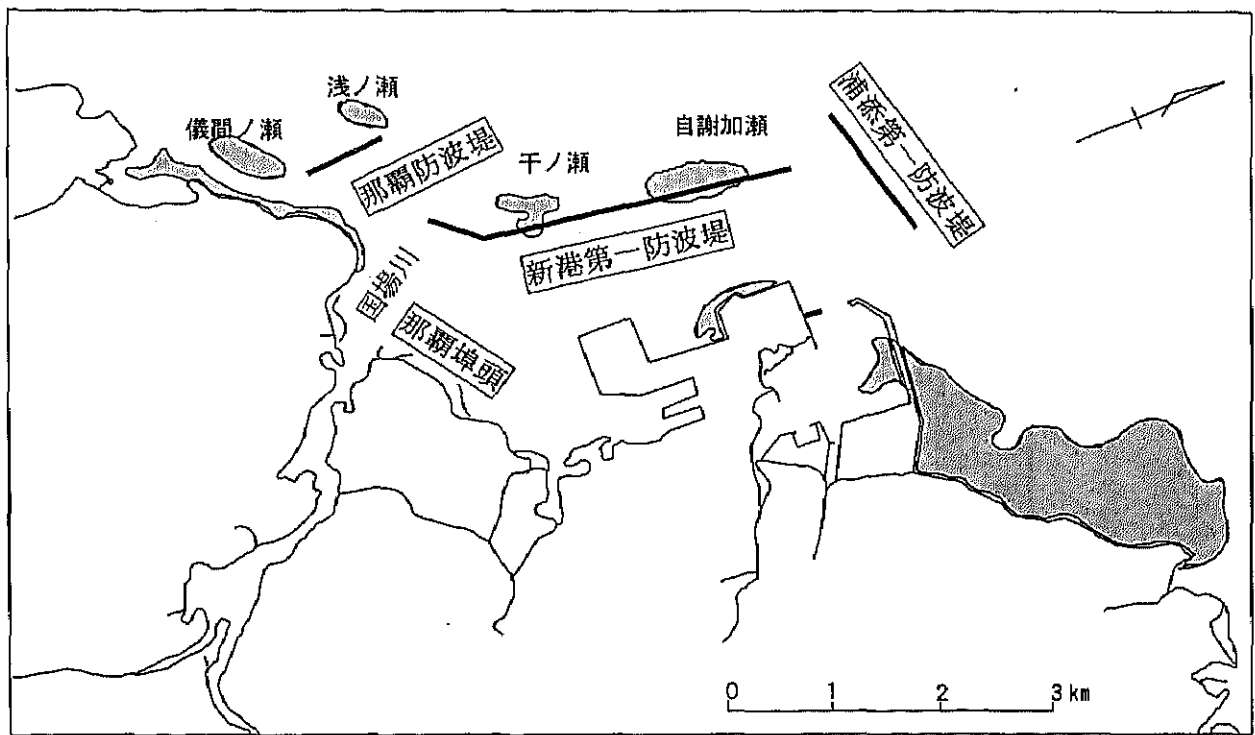


図 3-1 人工構造物へのサンゴ群集の着生状況

注:那覇港沖防波堤の異形ブロック(テトラポッド)に着生したサンゴ群集



(調査対象とした人工構造物ごとの調査地点数)

人工構造物	異形ブロック	直立壁
浦添第一防波堤	25	24
新港第一防波堤	25	41
那覇防波堤	10	11
那覇埠頭	18	3

図 3-2 調査対象とした人工構造物と各構造物における調査地点数

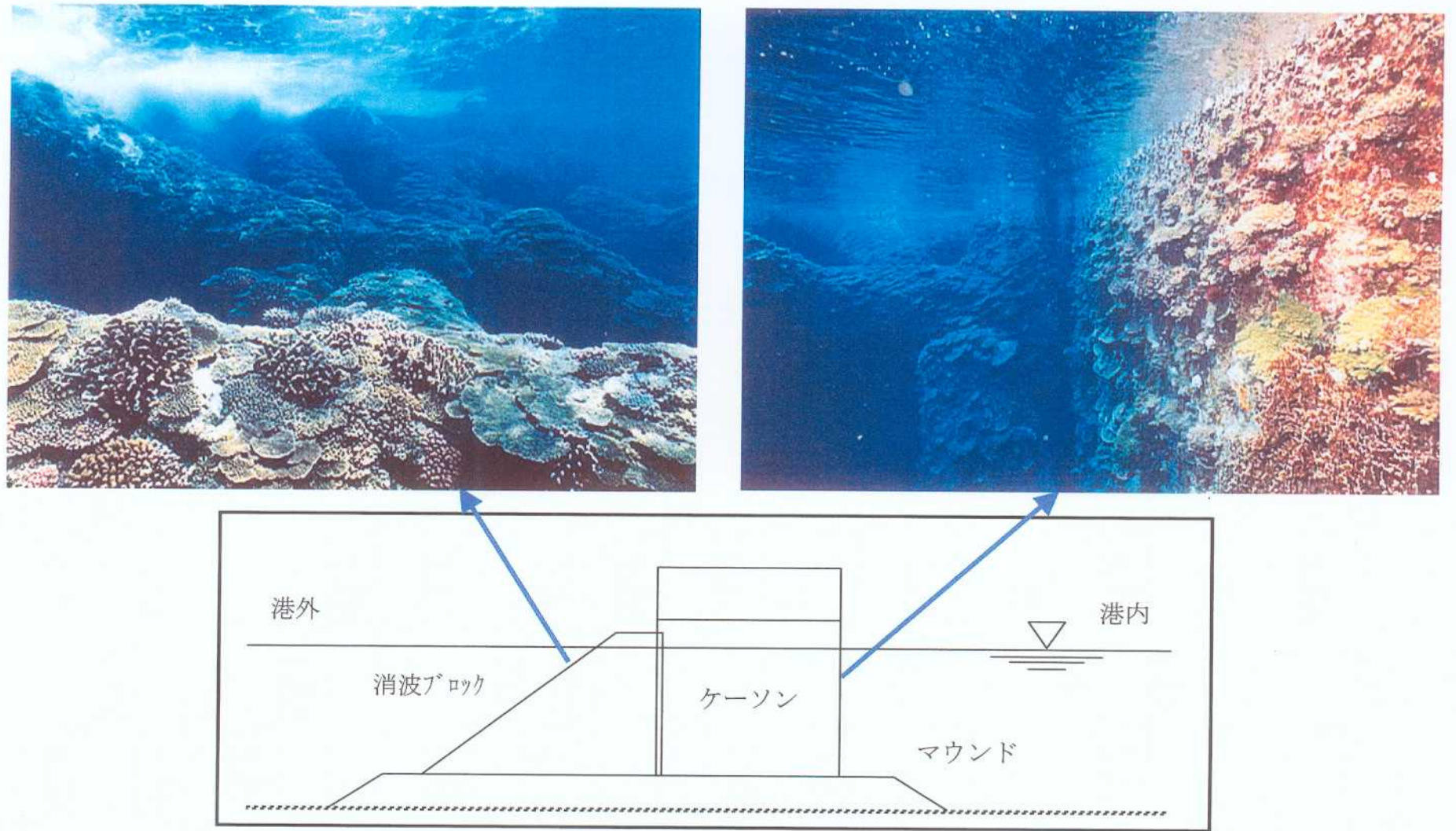


図 3-3 異形ブロック上と直立壁面上におけるサンゴ群集の着生状況

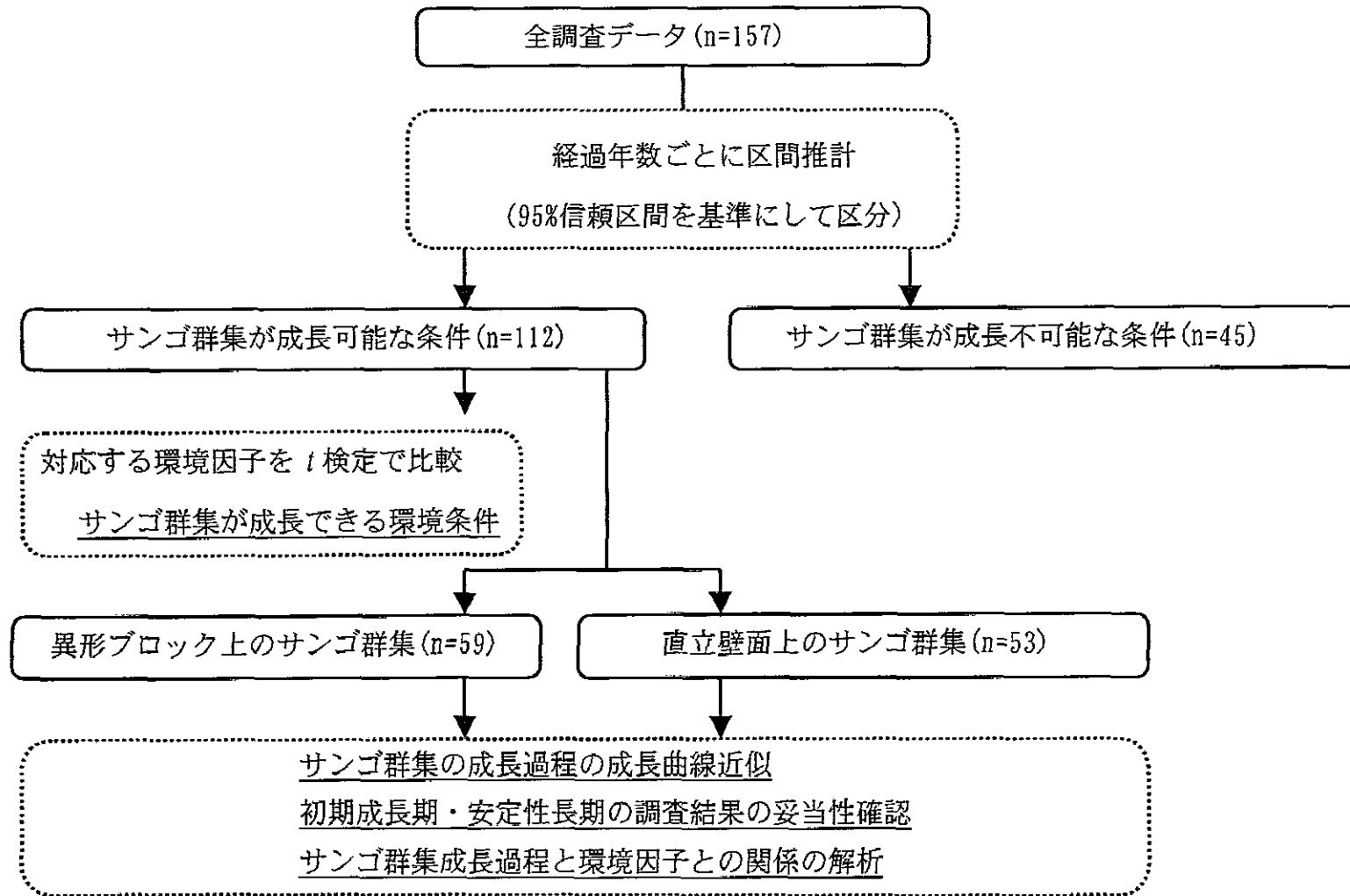


図 3-4 解析の手順

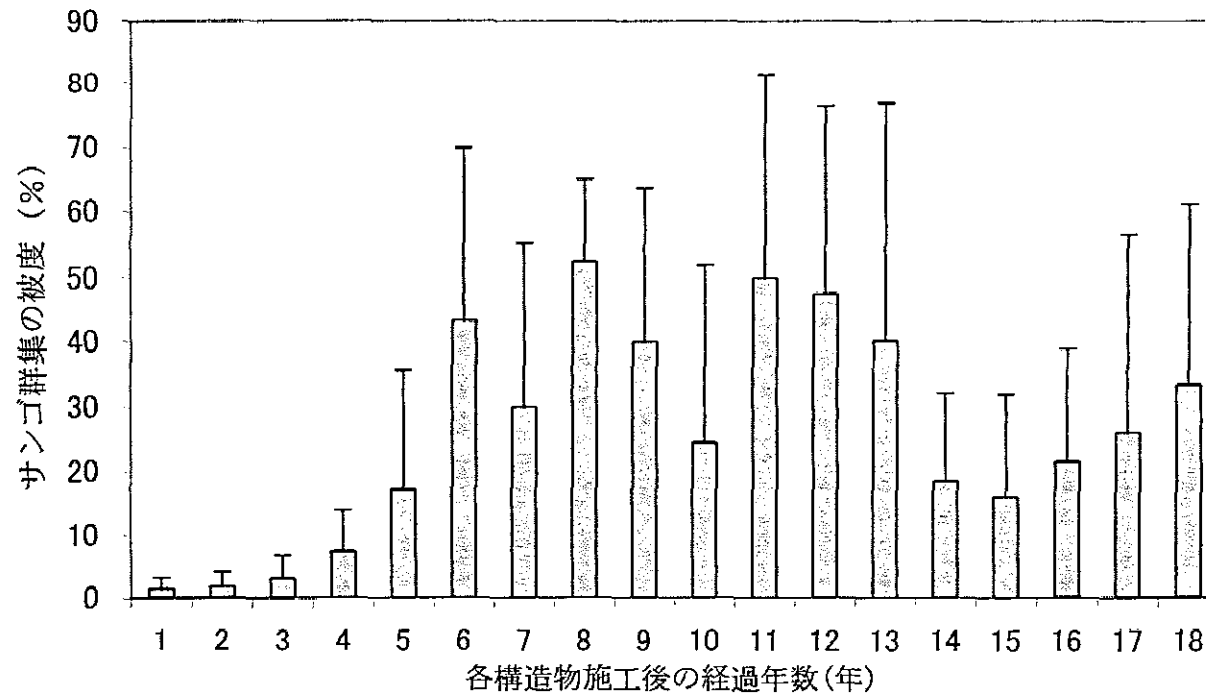


図 3-5 サンゴ群集の被度と各構造物施工後の経過年数

表 3-1 那覇港でのサンゴ群集の成長に影響を及ぼす環境条件

環境因子	サンゴ群集が成長可能な地区 (n=112)		サンゴ群集の成長に適さない地区 (n=45)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
堤前波高 (m)	8.4	3.4	4.0	2.9
塩分	34.7	0.1	34.5	0.4
透明度 (m)	13.7	3.5	9.5	4.8
SS (mg/l)	1.2	0.5	1.8	1.4
COD (mg/l)	0.8	0.1	0.9	0.2
T-N (mg/l)	0.15	0.04	0.20	0.09
T-P (mg/l)	0.012	0.005	0.020	0.016

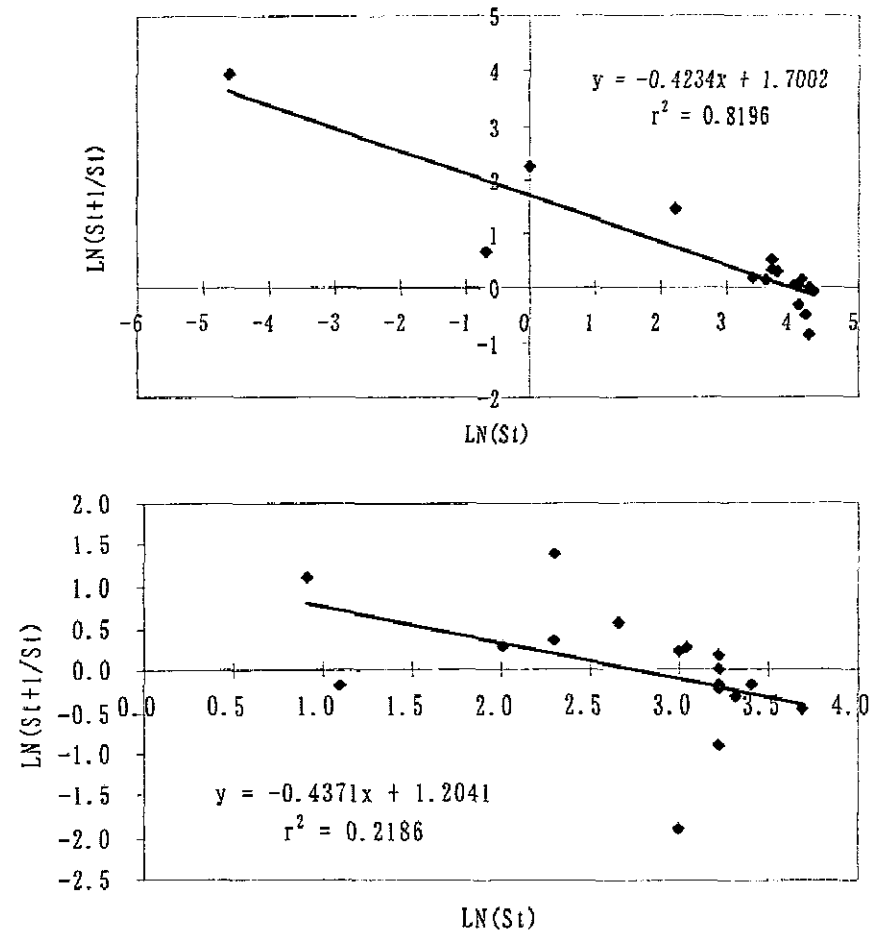


図 3-6 年間成長率と前年被度の関係

注：上段が異形ブロック上、下段が直立壁面上、 S_{t+1}/S_t は年成長率、 S_t は前年被度

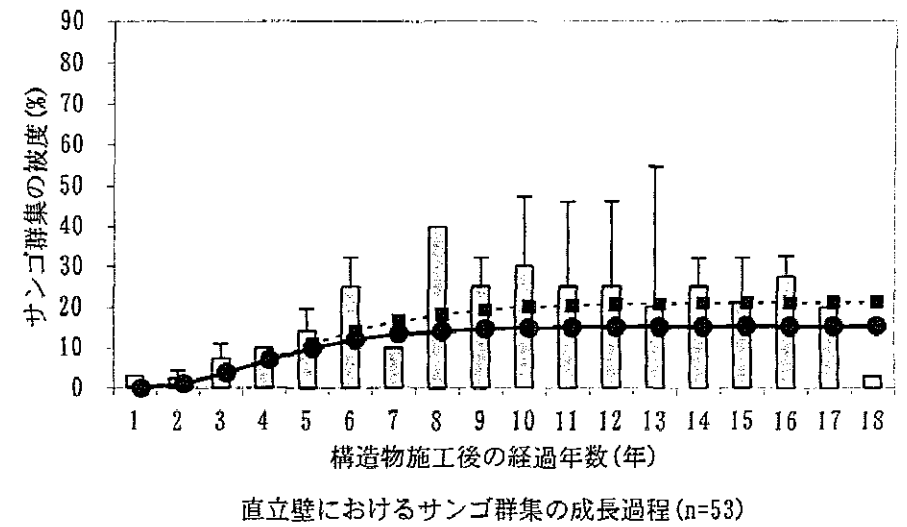
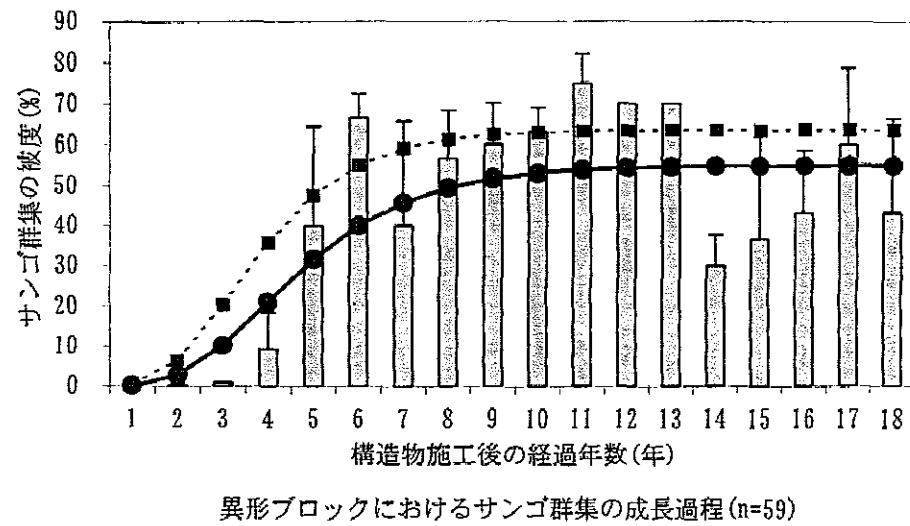


図 3-7 人工構造物上でのサンゴ群集の成長過程

注：棒グラフは実測値, 実線は理論式から求めた平均成長曲線,
破線は最適成長曲線 (平均値 + 標準偏差)

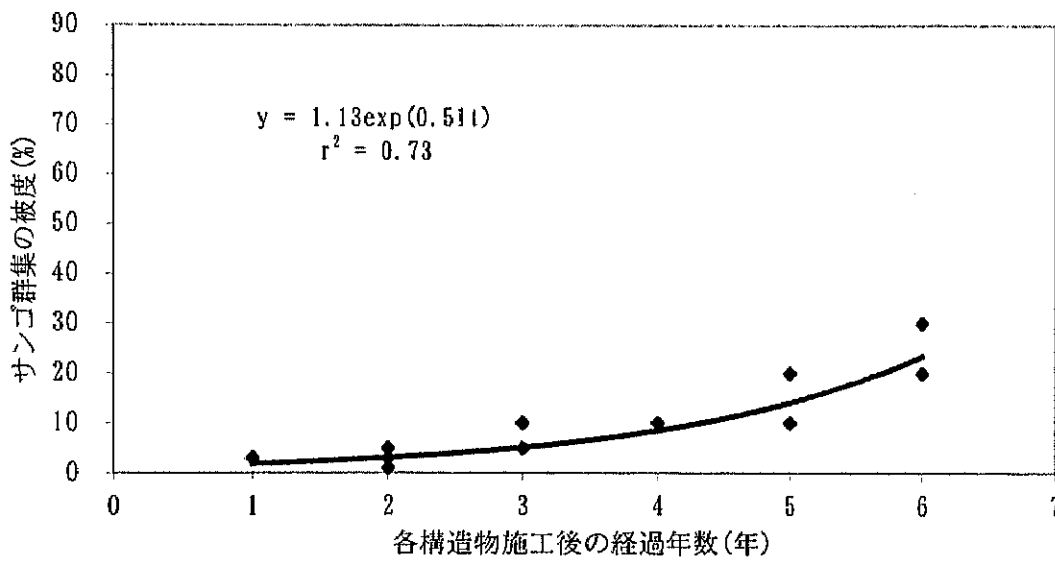
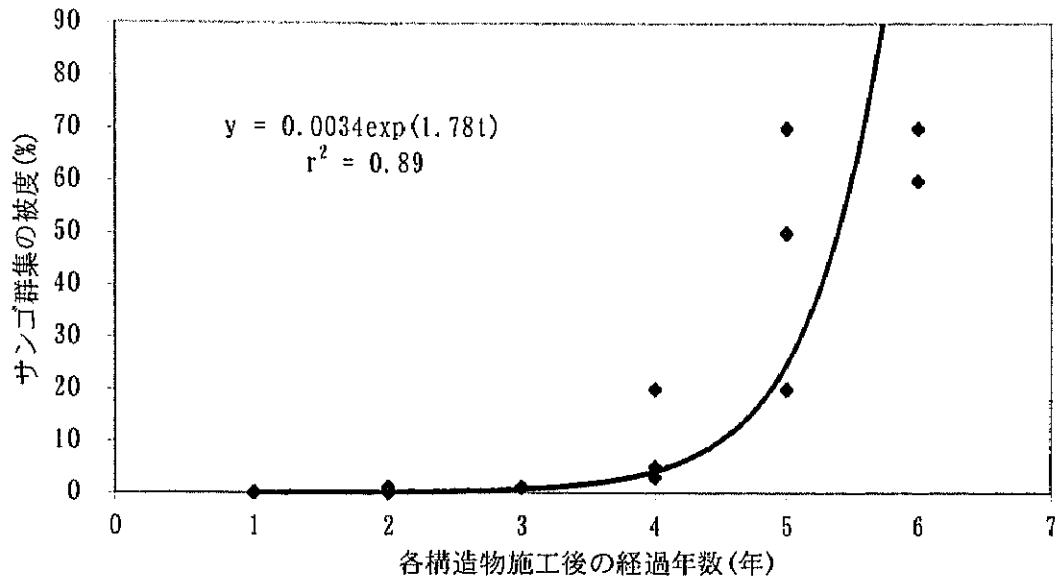


図 3-8 初期成長過程の指数関数曲線近似

注: 上段が異形ブロック上(n=18)、下段が直立壁面上(n=20)

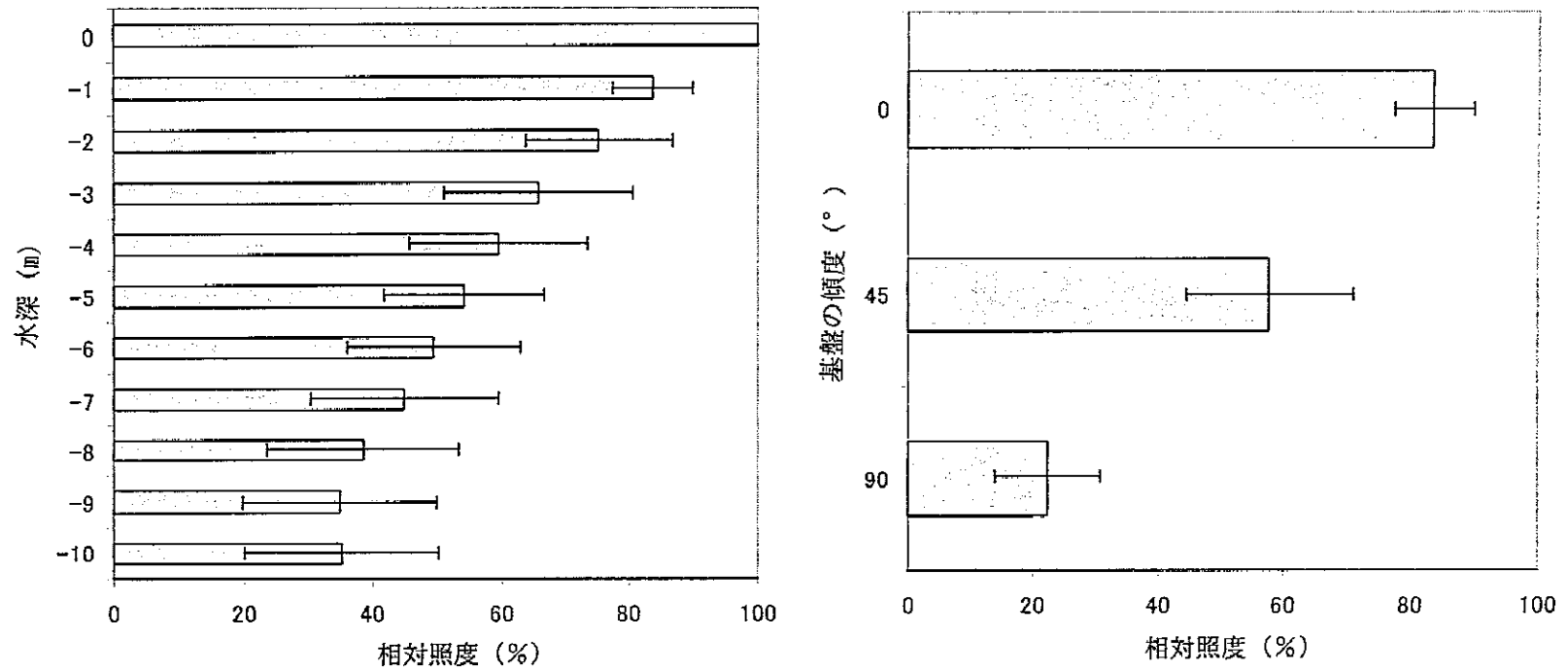


図 3-9 水中での相対照度:左;水深と相対照度の関係, 右;水深 D.L.-1m における傾度と相対照度の関係
 注;那覇港内 12 地点における D.L.0m の照度を 100%とした場合の相対照度を示す。調査は 1995 年 9 月に実施した。平均値と標準偏差を示す。ここで観測されている照度は緑色光を基準とした照度で水深変化による波長特性の変化は考慮していない。

< 凡例 >

式	調査地区
■ $y=3.4 \times 10^{-3} \exp(1.78t)$	那覇港 異形ブロック上 (平面分布調査)
□ $y=1.12 \exp(0.51t)$	那覇港 直立壁面上 (平面分布調査)
▲ $y=2.27 \times 10^{-2} \exp(1.25t)$	那覇港 異形ブロック上定点連続調査 (水深1m傾度10°)
△ $y=1.69 \exp(0.24t)$	那覇港 異形ブロック上定点連続調査 (水深1m傾度90°)
◆ $y=2.61 \times 10^{-2} \exp(1.10t)$	ヘロン島 自然地形 (天然礁)

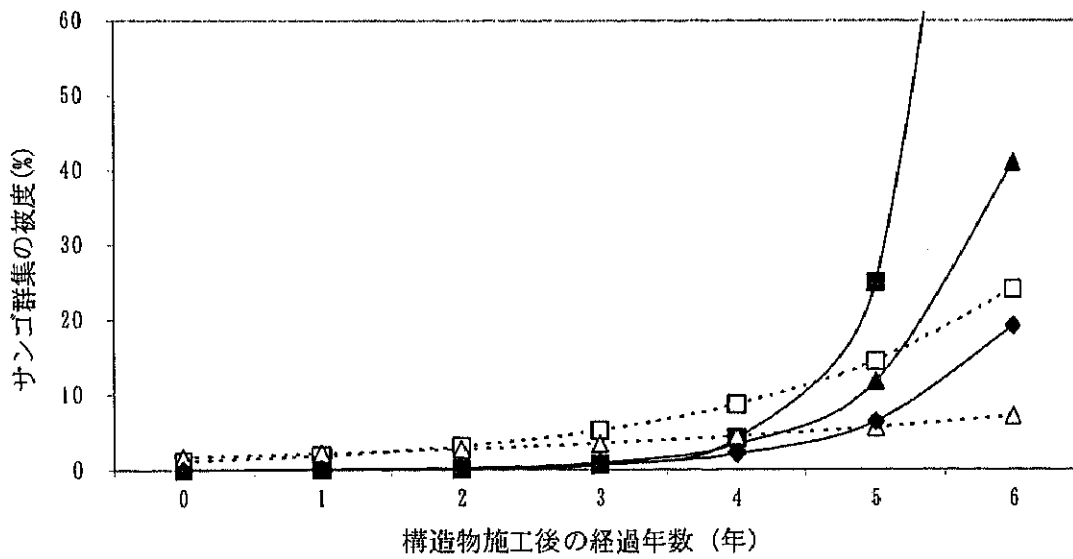


図 3-10 サンゴ群集の初期成長過程の比較

〈 凡 例 〉

調査地区	サンゴ群集の被度	
	平均	標準偏差
① 那覇港：異形ブロック上（平面分布調査）	50.9	19.7
② 那覇港：直立壁面上（平面分布調査）	22.9	13.9
③ 那覇港：異形ブロック上定点連続調査（水深1m傾度10°）	48.9	14.1
④ 那覇港：異形ブロック上定点連続調査（水深1m傾度90°）	11.5	5.7
⑤ ヘロン島：自然地形（天然礁）	65	13.7

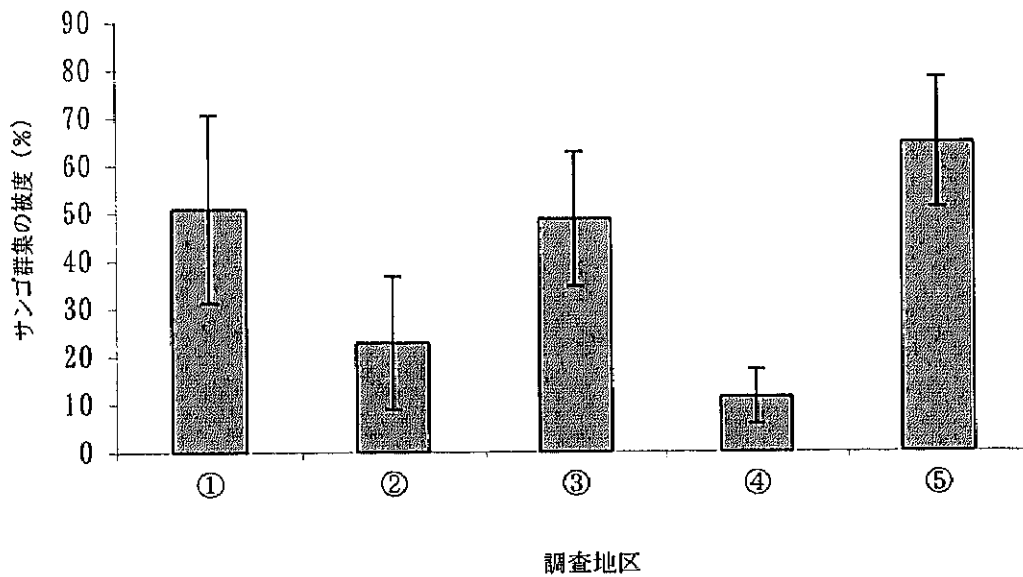
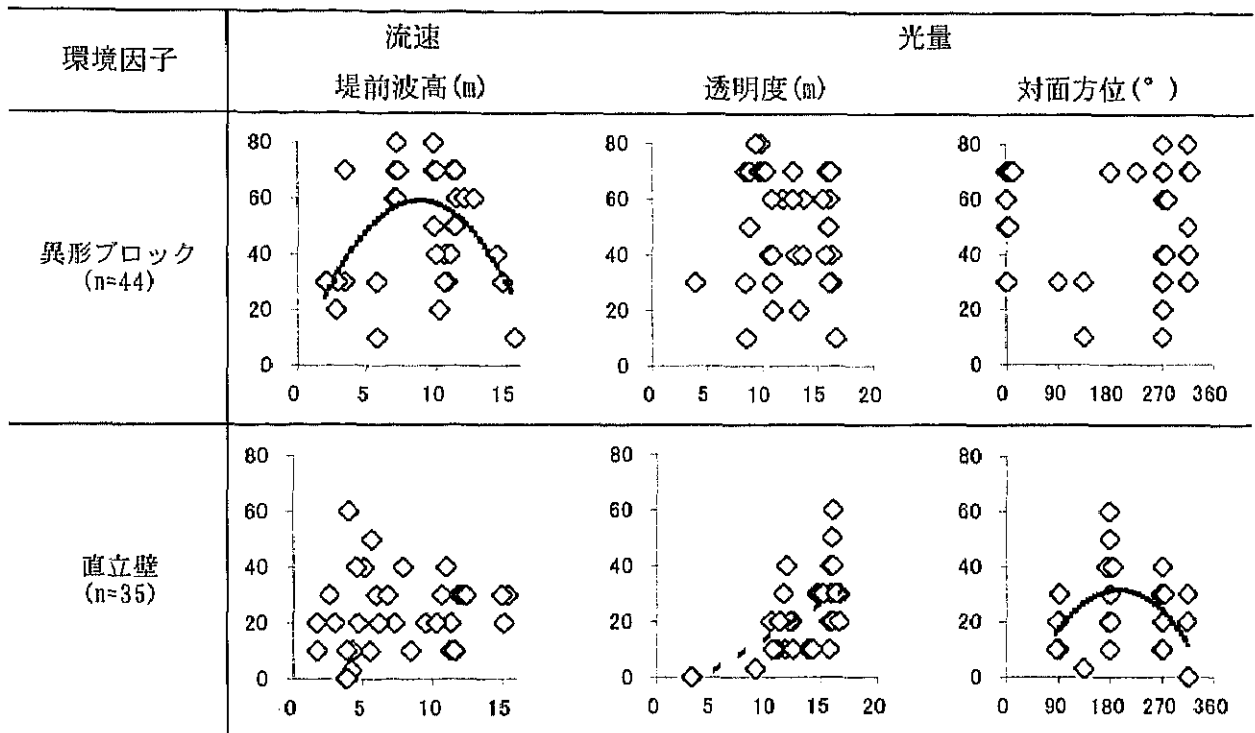


図 3-11 サンゴ群集の安定成長過程の比較

表 3-2 異形ブロックと直立壁におけるサンゴ群集の被度と環境因子との関係



注 1 : 縦軸はサンゴ群集の被度(%)、横軸は各環境因子の指標値を示す。

注 2 : 対面方位は北向きを0°、東向きを90°、南向きを180°、西向きを270°として示す。

注 3 : 曲線はn次曲線で近似して $r^2 > 0.1$ となったものについて示す。