

第4章 サンゴ群集の成長過程モデル解析と評価

4-1 はじめに

亜熱帯から熱帯における沿岸域生態系の環境修復技術を考える際に、サンゴ群集の成長の基盤に人工的な配慮を加えることでサンゴ群集の成長を促進するという手順が考えられる。サンゴ群集の成長の基盤に影響を及ぼす環境因子は、流速、光量、水質（水温、塩分、有機物量・無機物量）、セディメンテーション、捕食生物、競合生物、サンゴ間の競合である。これらの環境因子の中でサンゴ群集の成長に対して影響の大きい環境因子を抽出し、改変するための環境修復技術を開発し現地に適用することが必要である。

サンゴ群集の成長過程について、那覇港の沖防波堤における異なった水深帯および3種類の傾度に合計30地点の定点を設定し、8年間にわたる調査を実施した。本研究ではこのデータを整理し、成長過程の解析を行った。サンゴ群集の成長には被度を指標とし、成長過程に及ぼす環境因子を重回帰分析で特定した。さらに、特定した環境因子とサンゴ群集の被度との関係についてニューラルネットワークを用いた成長予測を行った。環境因子と生物群集の応答に関するニューラルネットワークを用いた予測は陸水における環境因子と植物プランクトン等で知見があるが(Recknagelら, 1997; Karulら, 2000; Weiら, 2001)、海域における環境因子とサンゴ群集については実施されていない。本研究では、環境因子とサンゴ群集成長過程のモデル解析を行い高い予測精度のモデルを得ることができた。また、サンゴ群集の成長に影響を及ぼす環境因子の重みを感度解析により評価した。

サンゴ群集の成長過程と環境因子との関係に関するモデル解析的な知見は、サンゴ群集が優占する沿岸域の環境修復事業における具体的な技術開発に際して重要なものと考えられる。

以下においては、実海域における定点調査結果をもとにサンゴ群集の成長過程と環境因子との関係を重回帰モデルとニューラルネットワークを用いた成長予測モデルにより解析し、成長過程における環境因子の影響について評価した結果を示す。

4-2 方法

4-2-1 調査地点とデータ

調査地点は図 4-1 に示す那覇港の沖防波堤である。防波堤上の同一地点(30 地点)においてサンゴ群集の成長過程に関する調査を実施した(吉見ら,1998)。調査期間は1990年から1997年までの8年間で、年1回実施した。調査水深は、D.L.-1m、-3m、-5m、-7m、-9m、-12m の異形ブロックの上向き(傾度 0°)の面に50cm×50cmの永久コドラートを設定し、サンゴ群集の被度を水中目視観察により記録するとともに写真撮影した。水深はD.L.(design level:概ね低潮水位に相当し、平均水位よりも約1m低い)を基準にしており、各水深で3地点調査した。また、基盤の傾度によるサンゴ群集の成長過程を把握するため、水深D.L.-1m、と-9mでは3種類の傾度(上向きを 0° 、斜め上向きを 45° 、横向きを 90°)の基盤面上で調査を行った。調査時期とデータ数の一覧を表4-1に示す。サンゴ群集の被度調査に加えて、1995年9月に調査地点の水深と傾度ごとの水中照度と水温の観測を実施した。

被度については、調査時に撮影した図4-2に示すような水中写真のうち判別可能なものについてサンゴ群集の被度をプランニメーター(Tamaya digitizing area - line meter Planix5000;たまや計測システム(株)製)を用いて新たに計測して被度計測の精度を高めた。

サンゴ群集の成長過程に影響を及ぼす環境因子としては、流速、光量、水質(水温、塩分、有機物量・無機物量)、セディメンテーション、捕食生物、競合生物、サンゴ間の競合がある(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、運輸省が那覇港沖で観測している波浪観測資料(運輸省,1990-1999)をもとに、各年最大有義波、各年平均有義波に水深(Z)ごとの直立断面の基盤面上にかかる相対的な波圧比(p)を乗じて用いた。水深(Z)ごとの直立断面の基盤面上にかかる相対的な波圧比(p)は、合田(1990)、社団法人日本港湾協会(1999)を参考にして式 4-1 により求めた。

$$p = \frac{\cosh k(h+Z)}{\cosh kh} \quad (\text{式 4-1})$$

p : 水深 Z における波圧の比率(海面を 1、海底面を 0)

h : 対象海域の水深

Z : 対象とする水深(海面で 0、海底で h)

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

L : 水深 h において計算に用いる波長

光量の指標値は、気象庁の観測データ(財団法人日本気象協会,1999)による年間日照時間を用い、水深・傾度ごとに 1995 年 9 月に実測した相対照度を乗じて求めた。

水質の指標値としての水温、化学的酸素要求量(COD)は、沖縄県が那覇港沖表層で実施している水質測定結果(沖縄県環境保健部,1989-1996)を用い、最高水温は各年の表層水温を 1995 年 9 月に実測した水深別水温をもとに換算した。塩分は変動が小さいため考慮しなかった。

セディメンテーションの指標値は、基盤の傾きが大きいほどセディメンテーショ

ンの影響が小さいことを考慮して基盤の傾度とした。

サンゴ同士の競合の指標値は、サンゴの被度が高くなるほど競合が増すことを考慮して前年被度とした。

4-2-2 データ解析

a) 構成の概要

サンゴは多年生の生物であり、ポリプが分裂することによって占有面積をゆっくり拡大して成長する。その成長速度は高緯度地方では夏に速く冬に遅いことが知られている (Peirano ら, 1999; Harriott, 1999)。これは主に夏季の高い光量や水温によるものである。つまり、ある年におけるサンゴ群集の成長の結果としての被度は、前年の環境条件から予測できると考えられる。

本研究では、既に示したようにサンゴ群集の被度変化に直接的に関与する環境因子の指標値として、前年の年最大流速、年平均流速、年間日照量の水中での指標値、最高水温、平均水温、COD、基盤の傾度 (セディメンテーション)、前年被度 (サンゴ同士の競合) を用いた。これらを説明変数として翌年のサンゴ群集の被度を予測するモデルの検討を行った。モデルの検証のために、実際に観察した値 (n=240) をランダムに training data set (n=168) と testing data set (n=72) の 2 つのグループに区分した。さらに、各環境因子がサンゴ群集の成長に及ぼす影響の大きさを感度解析により評価した。

b) 重回帰分析

重回帰分析には SPSS 10.0J Base System (License, 6089617, SPSS, Inc.) を用いた。従属変数としてサンゴ群集の被度を用い、説明変数としてそれぞれ前年の年最大流速、年平均流速、年間日照量の水中での指標値、最高水温、平均水温、COD、基盤の傾度 (セディメンテーション)、前年被度 (サンゴ同士の競合) を用いた。

これらにより線形の回帰における変数減少法による重回帰計算を行い、式

4-2 に示す重回帰式を求めた。

$$y = Const. + \sum_{i=1}^n K_i X_i \quad (\text{式 4-2})$$

ここで、 y は従属変数としてのサンゴの被度であり、 K_i は説明変数 X_i の偏回帰係数である。次に説明変数 X_i ごとの標準化係数を式 4-3 により求めるとともに、それぞれの有意確率を求めることによって従属変数としてのサンゴの被度に影響力の大きい説明変数を特定した。

$$SDC(K_i) = K_i \sqrt{S_{ii} / S_{yy}} \quad (\text{式 4-3})$$

ここで、 S_{ii} は X_i の変数であり、 S_{yy} は X_i と y の共変量である。

c) ニューラルネットワークを用いた成長予測

階層型ニューラルネットワークは、各種環境因子と生物群集の動向との関係など非線型の現象の推定に適しており、科学技術のほとんどすべての複雑な問題を解くために用いられている。環境因子と生物群集との関係の解析にニューラルネットワークを用いた事例は陸水における環境因子と植物プランクトン等で知見があるが(Recknagelら, 1997; Karulら, 2000; Weiら, 2001)、海域における環境因子とサンゴ群集についてはみられない。ここでは総合的な環境条件とサンゴ群集成長過程のニューラルネットワークによる予測モデルの検討を行った。

4つの環境因子を入力層として、サンゴ群集の被度を出力層とし、中間層を含む三層構造の階層型ニューラルネットワークを構築した(図 4-3)。ニューラルネットワークの構築には Neural Network Toolbox in the MATLAB (License, 160908, Math Works, Inc., 1999)を用いた。

学習アルゴリズムは backpropagation algorithm(誤差逆伝播学習則)を用いた(Rumelhart ら, 1989)。このアルゴリズムでは、まず入力層から出力層に向かって式 4-4 に基づき値の伝播が行われる。ここで、 N_i 、 N_j はそれぞれ入力層側及び出力層側のニューロンの出力値を、 W_{ij} はそれら二つのニューロン間の重み、 θ はバイアスをあらわす。なお、 $f(x)$ はシグモイド関数を用いた。

$$N_j = f\left(\sum_i W_{ij} N_i + \theta\right) \quad (\text{式 4-4})$$

次に、出力層ニューロンの出力値 (O_i)と教師値 (T_i)より、出力層及び中間層ニューロンの出力値の誤差を式 4-5,4-6 に基づき求める。

$$\delta_{o_i} = (T_i - O_i) \quad (\text{式 4-5})$$

$$\delta_{h_i} = \sum_j \delta_{o_j} W_{ij} \quad (\text{式 4-6})$$

この誤差を用いて、式 4-7、4-8 によりニューロン間の結合の重みを変化させ、学習を行う。

$$W_{i+1} = W_i + \Delta W_{i+1} \quad (\text{式 4-7})$$

$$\Delta W_{i+1} = \eta \delta_i I_i + \alpha \Delta W_i \quad (\text{式 4-8})$$

なお、バイアス(θ)は、常に 1.0 を出力するバイアスニューロンを考え、その重みにより表現する。ここで、 W_t は t 時点の直前のニューロン(バイアスニューロンを含む)との重み、 ΔW_t は t 時点の学習による重みの変化量、 η は学習係数、 α は慣性係数、 δ_t は出力層ニューロンの時には δ_o を用い、中間層ニューロンの時には δ_H を用いる。 I_t は t 時点における重みを形成する直前のニューロン(バイアスニューロンを含む)の出力値である。初期値は一般的に用いられる学習係数 ($\eta=0.1$)、慣性係数($\alpha=0.9$)とした。また、中間層(20)、学習の回数(3,000)とした。

ネットワークの学習の程度は、 n 個からなる training data set の i 番目の実測値($R_{(i)}$)に対するネットワークの出力値($O_{(i)}$)の MSE (mean square error: 平均二乗誤差)で評価する。本実験において出力層ニューロンは1個のみであるため、 MSE を求める式は式 4-9 で示される。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (R_{(i)} - O_{(i)})^2 \quad (\text{式 4-9})$$

本実験では、3000回の学習後の MSE は 0.0026 であり、出力層の精度から考慮して妥当と判断した。

なお、入力データと教師データはいずれも 0.1 から 0.9 の間に式 4-10 により正規化した。

$$\bar{X} = 0.1 + 0.8 \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{式 4-10})$$

モデルの検証のために、実測値 (n=240) をランダムに training data set (n=168) と testing data set (n=72) の 2 つのグループに区分した。training data set で実測値と予測値の相関を求め、次に、testing data set をもとに環境因子から予測値を求め、それらを実測値と比較することでモデルの検証を行った。

検証されたモデルをもとに、それぞれの環境因子の値を 10% 増加させた場合と 30% 増加させた場合で予測値の計算を行い、環境因子ごとの被度の増加に関する感度を評価した。

4-3 結果および考察

4-3-1 サンゴ群集の被度の経年変化

従来の調査ではサンゴ群集の被度は水中における目視計測で求められている場合が多い。ここでは、サンゴ群集被度の精度を向上させるため、サンゴ群集の判別が可能な水中写真を拡大し、その面積をプランメーターで計測した。サンゴ群集の被度(%)は同一写真上に撮影されている一定のコドラート面積(50cm×50cm)との比率として求めた。

目視計測結果と写真計測結果の関係は、図 4-4 に示すように、 $Y=0.95X-0.21$ (Y; 目視計測値、X; 写真計測値)の式で直線近似でき、相関は $r^2=0.931$ (n=227) である。目視計測のほうが写真計測よりも5%程度低めに計測する傾向があるが、目視計測結果の精度は概ね良好であることが証明された。また、目視計測では精度上5%間隔での計測が限界であるが、写真計測ではより詳細な計測値の取得が可能であり、今後の計測においては可能な限り写真計測を併用することが望ましい。

写真計測の結果をもとにした水深別のサンゴ群集の経年的な成長過程を図 4-5、図 4-6 に示す。目視観察をした地点の基盤は1986年に施工された人工基盤であり1990年から調査を実施しているため、1990年の調査結果は基盤形成から4年目の値として表示した。サンゴ群集は、傾度0~10°について水深方向にみると、水深 D.L.-1m、-3m で成長速度が大きく、D.L.-5m 以深では小さい。水深 D.L.-3m 以浅では着生基盤形成後8年目(1994年)以降は横ばい傾向になっている。これは、サンゴ群集が一定の被度に達した場合に、特定の空間内におけるサンゴ群集内の競合や環境条件による抑制効果が作

用するものと考えられる。また、水深 D.L.-1m、-9m における傾度(基盤の傾き)の違いについては、傾度が高いとサンゴ群集の成長速度は小さい。水深 D.L.-1m では傾度が 42° で初期段階の成長速度は大きい、徐々に傾度の低い基盤上での成長速度が大きくなる。水深 D.L.-9m では傾度が 8° と 52° で 84° と比較して成長速度が大きい。

図 4-5 のデータをもとにしてサンゴ群集の1年間における被度の増加分(成長速度)を求め表 4-2 に示す。表 4-2 には、水深別に 1990 年から 1997 年までの年間成長速度と、平均年間成長速度を示す。水深 D.L.-1m では 8 年間の年平均成長速度は 6.3%/年、D.L.-3m では 4.9%/年、D.L.-5m では 2.5%/年、D.L.-7m では 0.7%/年、D.L.-9m では 0.9%/年、D.L.-12m では 2.4%/年である。サンゴ群集の成長速度は水深 D.L.-3m 以浅で大きく、D.L.-5m 以深で小さい。

水深 D.L.-3m 以浅に優占しているサンゴは、オヤユビミドリイシ(*Acropora gemmifera*)、クシハダミドリイシ(*Acropora hyacinthus*)、ハナガサミドリイシ(*Acropora nasuta*)等のミドリイシ属である。D.L.-5m、-7m、-9m 地点に優占しているサンゴはイボハダハナヤサイサンゴ(*Pocillopora verrucosa*)、チリメンハナヤサイサンゴ(*Pocillopora meandrina*)、ヘラジカハナヤサイサンゴ(*Pocillopora eydouxi*)等のハナヤサイサンゴ属である。水深 D.L.-12m に優占しているサンゴはフカアナハマサンゴ(*Porites lobata*)等のハマサンゴ属である。水深 D.L.-12m のサンゴ群集の成長速度が D.L.-7m、-9m 地点よりも大きいのは、被覆状に成長するハマサンゴ属が優占するため、立体的に成長するハナヤサイサンゴ属よりも成長速度が大きくなり、減少することなくほぼコンスタントに増加している。

水深 D.L.-1m と D.L.-3m においては既に示したように 1994 年以降横ばい状態となっているため、1990 年から 1993 年までの年平均成長速度を求めると、水深 D.L.-1m では 14.9%/年、D.L.-3m では 11.7%/年となっている。年平均成長速度に関するこれらの値は、Harriott(1999) にまとめられている他の海域におけるサンゴ群集の成長速度や、Connell (1997) にまとめられているサンゴ群集の被度変化の値と比較すると、高緯度地方(那覇港は北緯 26 度 14 分に位置する)のものとしては妥当な値であると考えられる。

このようなサンゴ群集の成長速度の経年的・鉛直的な変動は、各種環境因子の変動を反映したものと考えられる。環境因子としては、既に示したように流速、光量、水質(水温、塩分、有機物量・無機物量)、セディメンテーション、捕食生物、競合生物、サンゴ間の競合が想定される。観察地区の環境条件は以下のとおりである。

流速については、調査対象地区は外洋に直接面しており、台風期には強い波の影響を受ける。つまり、経時的には台風などの通過の有無によって波浪条件は大きく異なり、基盤面上の流速は波浪による影響を強く受ける。鉛直的には、波圧の影響は水深とともに減衰するため、水深が浅いほど流速は大きく、水深が深くなるほど流速は小さくなる。光量については、調査対象地区の透明度は高く、調査対象地区の最下層の D.L.-12m 程度である。日照量は年により変動する。特に鉛直的に光量が減衰するため、水深が浅いほど光量が大きく、水深が深いほど光量は小さい。基盤面の傾きによっても異なり、傾度が大きいほど基盤面上の光量は小さくなる。水質については、調査対象地区は亜熱帯圏に位置し、表層の平均水温は 25℃程度である。鉛直的には夏季の水温は上層で下層よりも 1℃程度高い。塩分や有機物量・無機物量については経

年的・鉛直的変動は小さい。セディメンテーションについては、経年的・鉛直的変動についてはデータがない。捕食生物については、調査対象地区ではオニヒトデによるサンゴの捕食は観察されていない。競合生物としてはサンゴ以外の付着動物や付着植物が想定されるが経年的・鉛直的変動についてのデータがない。サンゴ間の競合については、調査対象地区のコドラート内には複数種のサンゴが観察されており、サンゴ間の競合があるものと考えられる。

これらの環境因子がサンゴ群集に及ぼす影響を解析する手法として、以下において重回帰分析とニューラルネットワークを用いた成長予測との比較検討を行った。

4-3-2 サンゴ群集の成長パターン

サンゴ群集の成長過程と環境因子との関係をモデル化し、ニューラルネットワークを用いた成長予測と比較するために重回帰分析を実施した。

従属変数としてサンゴ群集の被度を用い、説明変数としてそれぞれ前年の最大流速の指標値、平均流速の指標値、年間日照量の水中での指標値、年最高月水温、年平均月水温、COD(水質)、基盤の傾度(セディメンテーション)、前年被度(サンゴ同士の競合)を用いた重回帰分析結果を表 4-3 に示す。

F値確率 0.10 で除去する変数減少法によってサンゴ群集の被度に影響を及ぼしている主な環境因子を抽出すると、前年の被度、年間日照量の水中での指標値、基盤の傾度、最大流速の指標値の 4 つの環境因子が得られた。平均流速の指標値、年最高月水温、年平均月水温、COD(水質)については有意には影響を及ぼしていない。

したがって、これら 4 つの環境因子をもとに重回帰分析を行った。結果を表 4-4 に示す。これによると、サンゴ群集の被度(Y)の変化は 4 種類の環境因子を説明変数とした式 4-11 によって予測することができる。

$$Y = 0.808 X_1 + 0.004 X_2 - 0.032 X_3 + 0.694 X_4 + 1.689 \quad (\text{式 4-11})$$

ここで、 X_1 は前年の被度、 X_2 は年間日照量の水中での指標値、 X_3 は基盤の傾度、 X_4 は最大流速の指標値である。サンゴ群集の成長過程に及ぼす環境因子の影響の大きさを標準化係数で見ると、前年被度 > 水中日照量 > 最大流速 > 基盤傾度の順である。これらの4つの重要な環境因子が、那覇港の

異形ブロック上の異なった水深帯におけるサンゴ群集の成長過程に影響を及ぼしていることが明らかになった。

4-3-3 サンゴ群集の成長過程と環境因子との関係のモデル化と検証

重回帰分析の結果、サンゴ群集の成長過程に前年の被度、年間日照量の水中での指標値、基盤の傾度、最大流速の指標値が大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。このため、サンゴ群集の被度とこれらの環境因子との関係を対象にニューラルネットワークを用いた成長予測を行いサンゴ群集の成長過程と環境因子との関係に関するモデルを構築した。

モデルの検証のために、実際に観察した値(n=240)をランダムに training data set(n=168)と testing data set (n=72)の2つのグループに区分した。図4-7に training data set における実測値と出力値の関係を示す。

さらに、ここで得られたモデルを用いて新たに testing data set (n=72)の環境因子の実測データを適用して得られた予測値と実測値との関係を求めた。その結果、以下のような高い相関を得ることができ、本モデルによって4つの環境因子をもとにサンゴ群集の成長過程を予測できることが検証された。

$$y = 0.73x + 4.62 \quad (r^2=0.83, n=72, P<0.001) \quad (\text{式 4-12})$$

また、testing data set (n=72)について前記の重回帰分析結果の式4-11にも同様の環境因子の実測データを適用して予測計算を行った結果、以下のような高い相関を得ることができ、重回帰式からも4つの環境因子をもとにサンゴ群集の成長過程をかなり正確に予測できることが検証された。

$$y = 0.69x + 7.17 \quad (r^2=0.80, n=72, P<0.001) \quad (\text{式 4-13})$$

環境因子の実測データをニューラルネットワークを用いた成長予測および重回帰分析に適用して得られた予測値と、実際に観察された値（実測値）を比較図にして図 4-8 に示す。ここで、データ番号は重回帰式およびニューラルネットワークを用いた成長予測の再現性を確認するために実測した全データ（n=240）から任意に抽出した testing data set（n=72）の属性を示す。値が小さいほど水深が浅い地点の値であり、大きいほど水深が深い地点の値である。

ニューラルネットワークを用いた成長予測及び重回帰分析による予測は、前年の被度、年間日照量の水中での指標値、基盤の傾度、最大流速の指標値を入力条件として用いた場合に翌年のサンゴの被度はかなり正確に予測できる。

なお、ニューラルネットワークを用いた成長予測及び重回帰分析による予測値は、実測値と予測値のデータごとのピークにおける対応関係は一致しているが、実測値が大きい場合には低めに予測され、実測値が小さい場合には大きめに予測される傾向がある。

4-3-4 感度解析による評価

サンゴ群集の成長過程と環境因子との関係に関するニューラルネットワークを用いた成長予測モデルを用いて、各環境因子がサンゴ群集の成長過程に及ぼす影響の大きさについて感度解析により評価した。前年の年間日照量の水中での指標値、被度、基盤の傾度、最大流速の指標値を入力条件とした場合における翌年のサンゴ群集の被度予測において、それぞれの input parameter を 10%増加させた場合と 30%増加させた場合で再計算し、環境因子の変化がサンゴ群集の被度変化に及ぼす影響を検討した。感度解析の結果を表 4-5 に示す。

これによると、サンゴ群集の成長過程にプラスの影響を及ぼす環境因子は、被度、流速、光量であり、マイナスの影響を及ぼす環境因子は基盤の傾度である。以下に、各環境因子がサンゴ群集の成長過程に及ぼす影響について考察した。

a)被度

前年被度が 10%増加すると翌年の被度は 6.0%増加し、30%増加すると 15.9%増加する。環境因子としての前年の被度は、サンゴ群集の成長に伴いサンゴ同士が空間をめぐる競争することでサンゴ群集が変化する (Lang, 1973)ことを想定したが、前年被度が大きくなるほど翌年のサンゴの被度は増加する傾向が得られた。サンゴ群集間の競争については本検討に用いたサンゴの被度のデータが着生基盤形成後 4 年目から 11 年目の初期遷移段階に相当するデータで、全体的に見てプラスの成長過程にあることから、想定したようなマイナスの影響はみられなかった。被度が安定した段階を対象にして

同様の検討すると、サンゴ同士の競合による被度変化傾向が得られることが考えられる。

b) 年間日照量の水中での指標値

年間日照量の水中での指標値は 10%増加すると被度が 0.5%増加し、30%増加すると 1.4%増加する。年間日照量の水中での指標値は、サンゴ群集の成長に影響を与える主要因である光量を、基盤面ごとの年間日照時間の比率として設定した。前年の年間日照量の水中での指標値が大きくなるほど翌年のサンゴの被度が高くなる傾向が得られた。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、その結果として褐虫藻の光合成産物に依存するサンゴ群集の成長が促進されるものと考えられる。

c) 基盤の傾度

傾度が 10%増加すると被度が 1.4%減少し、30%増加すると 4.1%減少する。傾度は着生基盤上のセディメンテーションの量に関係する要因として想定した。セディメンテーションの量が多いと初期着生におけるサンゴ幼生の着生に及ぼす堆積物の影響が知られており(Babcock and Davies, 1991)、傾度が小さいほどセディメンテーション量は増加しサンゴ群集の成長にはマイナスに作用する。一方、傾度が大きくなりすぎると光量が減少することからサンゴ群集の成長にはマイナスに作用する。本海域では傾度が増加するほど翌年のサンゴ群集の被度は減少する傾向が得られており、セディメンテーションの影響は小さいものと考えられる。これは、本検討で用いたサンゴの被度のデータが着生

基盤形成後 4 年目から 11 年目のものであり、基盤形成初期のサンゴ幼生の着生期においては影響が想定されるものの、着生後の成長期においては影響が小さいことを示しているものと考えられる。

d) 最大流速の指標値

最大流速の指標値については 10%増加すると翌年の被度は 2.9%増加し、30%増加すると 8.8%増加する。流速の影響については、Dennison and Barnes (1988)、Kuhl ら (1995)、Atkinson ら (2001)に示されているように、サンゴおよびサンゴに共生している褐虫藻に酸素や栄養分を供給するうえでサンゴ群集の成長にとってプラスに作用していることを示している。

e) サンゴ群集の成長過程と環境因子の関係

3章では人工構造物上におけるサンゴ群集の成長過程が主に流速、光量、水質の影響を受けていることを明らかにした。ここでは、サンゴ群集の着生状況を面的に広範囲にわたって解析しているため、水質に関する環境因子の影響を確認している。また、施工年度が明らかな人工構造物における一回の調査結果をもとにしているため、サンゴ同士の競合に関する指標としての前年被度の影響は考慮していない。

4章での知見を加えると、平面的・鉛直的に見た人工構造物上におけるサンゴ群集の成長過程に影響を及ぼす主な環境因子は、流速、光量、水質、前年の被度、基盤の傾度の 5 項目である。

ここに示す環境因子の指標の中で、人工構造物上でのサンゴ群集の環境修復技術開発のために対象とする指標値を抽出すると以下のとおりである。

サンゴ群集の前年の被度は、サンゴ群集の成長過程に関するモデル構築には有効で翌年のサンゴ群集の被度変化に大きな影響を及ぼすが、この指標自体が環境因子の影響を受けた結果として存在するため、サンゴ群集の環境修復技術開発の際に考慮する直接的な環境因子からは除外する。基盤の傾度も光量やセディメンテーション量の間接的な指標値として用いていることから除外する。水質は、対象海域を広範囲に見た場合にサンゴ群集の成長の可否を決定する環境因子の一つであると考えられる。光量と流速は、サンゴ群集が成長可能な海域においてサンゴ群集の成長に影響を及ぼす環境因子として重要であると考えられる。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。

したがって、人工構造物上においてサンゴ群集の成長を促進するために着目しなければならない直接的な環境因子としては、まず水質をもとにサンゴ群集の成長のための適地を検討し、その後、光量と流速を考慮して環境修復技術の適用について検討することが望ましい。

なお、那覇港では水深 D.L.-3m 以浅でサンゴ群集の成長速度が大きく、D.L.-5m 以深では小さい。これは、D.L.-3m 以浅に優占するオヤユビミドリイシ (*Acropora gemmifera*)、クシハダミドリイシ (*Acropora hyacinthus*)、ハナガサミドリイシ (*Acropora nasuta*) 等のミドリイシ属とそれらに共生する褐虫藻との相互関係において、成長を維持するために必要な光量と流速に関わる補償深度が D.L.-3m と D.L.-5m の間にあることを意味しているものと考えられる。今後の課題として、光量・流速等の環境因子がサンゴと褐虫藻に及ぼす生理生態学的な影響メカニズムの解明が必要である。

4-4 まとめ

サンゴ群集の成長過程と各種環境因子との関係に関するニューラルネットワークによるモデル解析については既往事例がなく、本研究がはじめての事例である。

- 1) 那覇港の定点における水深別のサンゴ群集の成長過程に関する調査結果の解析では、サンゴ群集の成長速度は水深 D.L.-1m、-3m で大きく、D.L.-5m 以深で小さいことが明らかとなった。
- 2) サンゴ群集の成長パターン解析では、このようなサンゴ群集の成長過程に関与する前年の環境因子の指標値について重回帰分析した結果、前年被度、水中での日照量、基盤の傾き、基盤面上の最高流速の4因子が翌年のサンゴ群集の被度を決定する上で重要であることが判明した。
- 3) これら4つの環境因子をもとに重回帰分析とニューラルネットワークを用いた成長予測によりサンゴ群集成長モデルを構築し検証した結果、データごとのピークにおける対応関係は一致し、予測可能なモデルを構築できた。
- 4) ニューラルネットワークを用いたサンゴ群集成長モデルによる感度解析の結果、前年の水中での日照量と被度および基盤面上の最高流速は、高くなるほど翌年の被度が大きくなるが、基盤の傾度は大きくなるほど翌年の被度が小さくなる傾向を示した。
- 5) 人工構造物上においてサンゴ群集の成長を促進するために着目しなければならない直接的な環境因子として、光量と流速が重要であることが

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。

- 6) サンゴ群集が優占する海域の環境修復事業において配慮すべき環境因子について具体的に検討する場合にきわめて重要な知見であると考えられる。さらに、各種環境因子とサンゴ群集の被度変化の関係を表現したサンゴ群集成長モデルは、今後の環境修復事業計画における定量的検討手法として有効な手段になりうるものと考えられる。

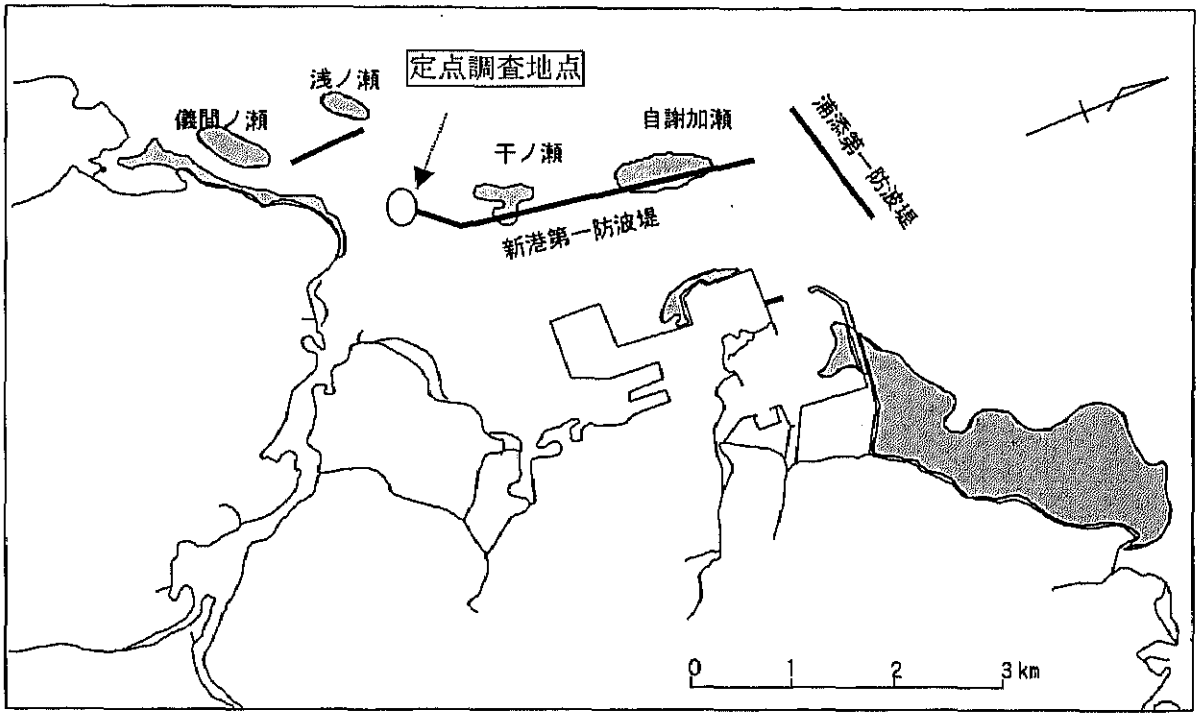


図 4-1 那覇港における定点調査位置図

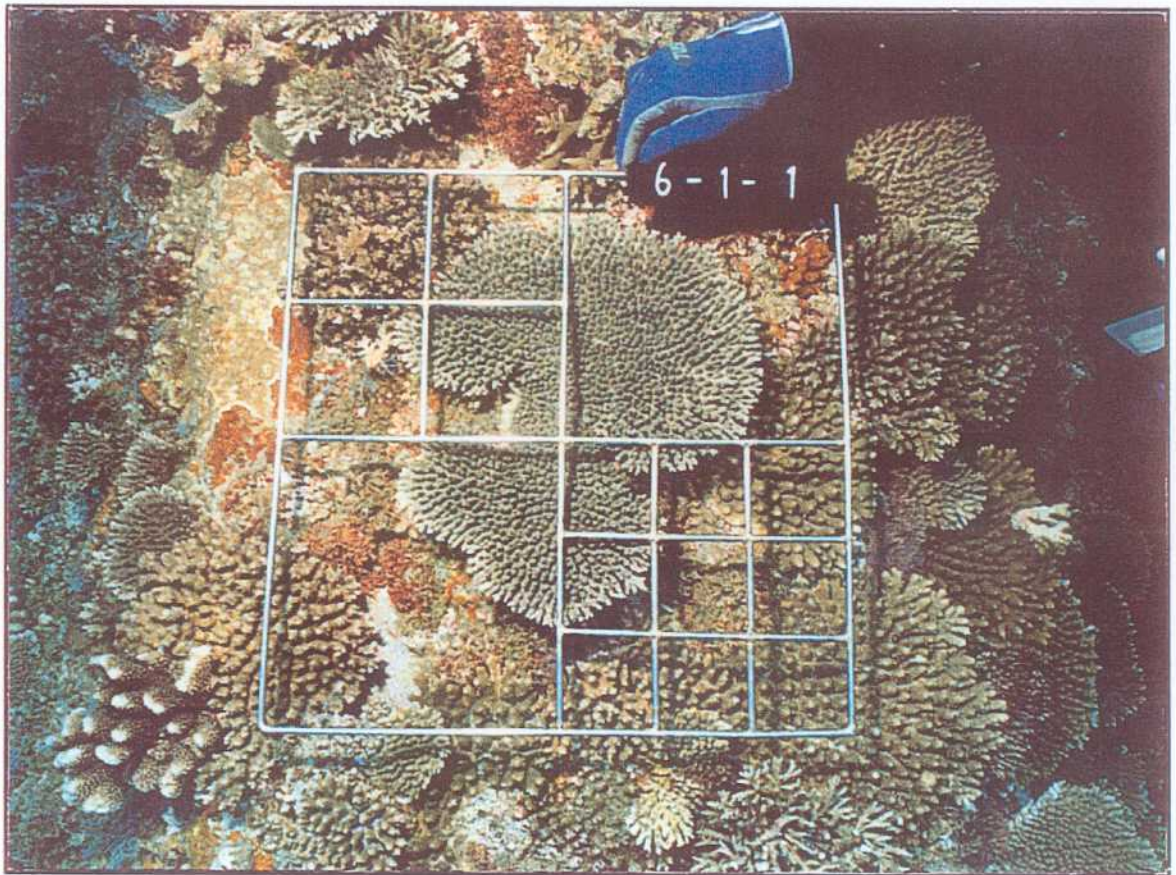


図 4-2 人工構造物上のサンゴ群集の撮影写真

注:コドラートのサイズは 50cm×50cm

(水深 D.L.-1m に生息するミドリイ属:施工後 9 年目)

表 4-1 解析に用いたデータの調査時期と位置と数量

調査時期		調査地点の水深と傾度														
年	月日	D.L. -1m			D.L. -3m			D.L. -5m			D.L. -7m		D.L. -9m		D.L. -12m	合計
		0-10°	40-45°	80-90°	0-10°	0-10°	0-10°	0-10°	0-10°	40-45°	80-90°	0-10°				
1990	7.30, 7.31	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
1991	8.1, 8.2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
1992	8.6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
1993	9.23, 9.24	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
1994	9.20, 9.21	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
1995	9.12, 9.13	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
1996	9.4, 9.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
1997	9.25	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	
合計		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	240	

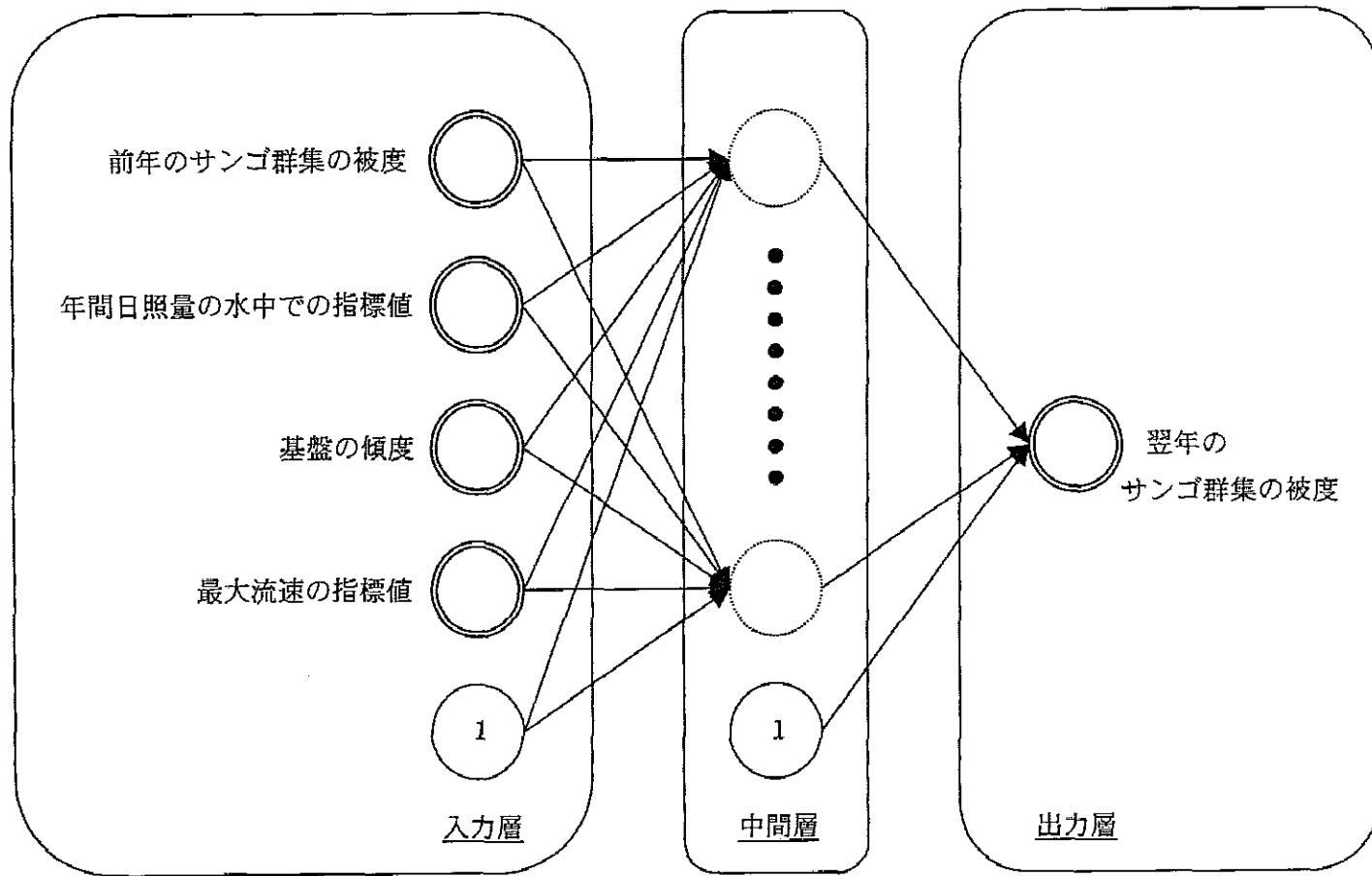


図 4-3 階層型ニューラルネットワークの概念図

注：入力層、中間層の①はバイアスニューロン

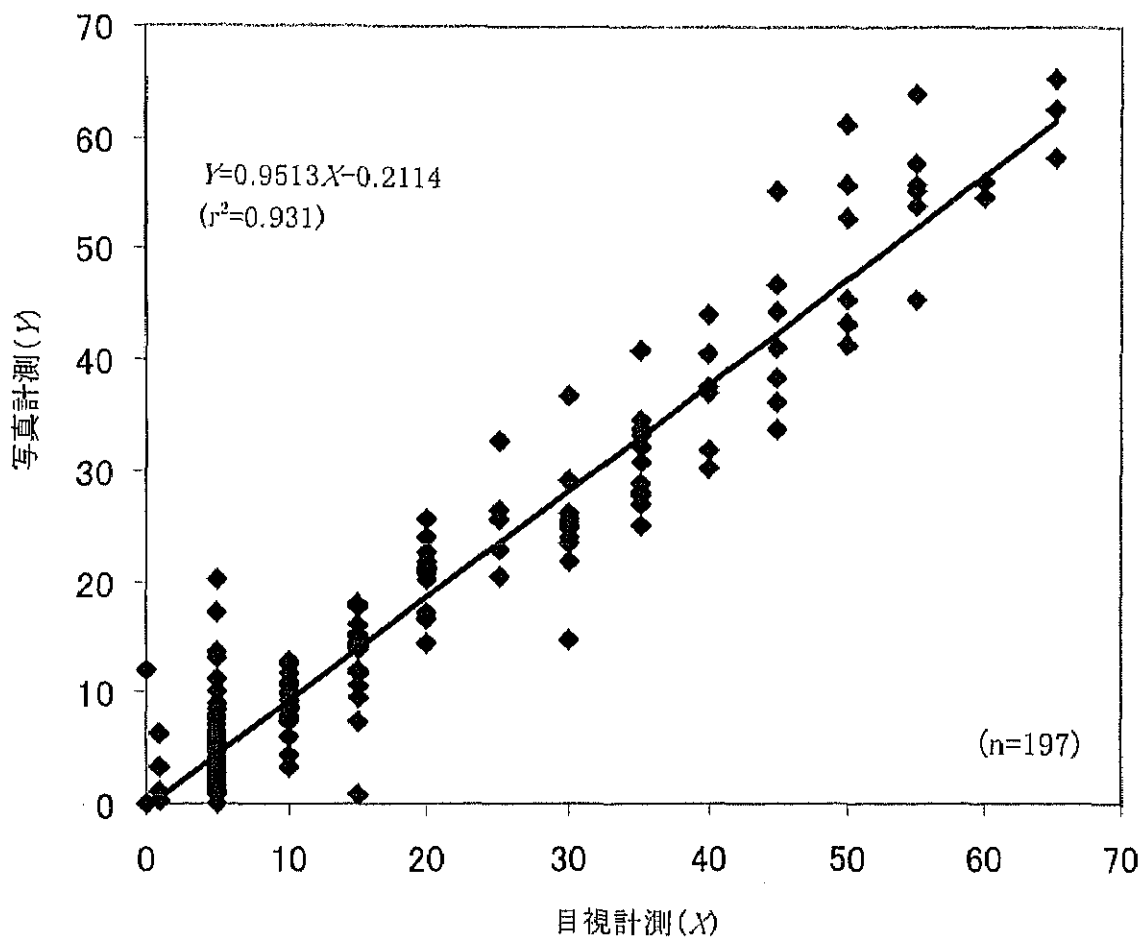


図 4-4 サンゴ群集の被度計測における目視観察結果と写真計測結果の関係

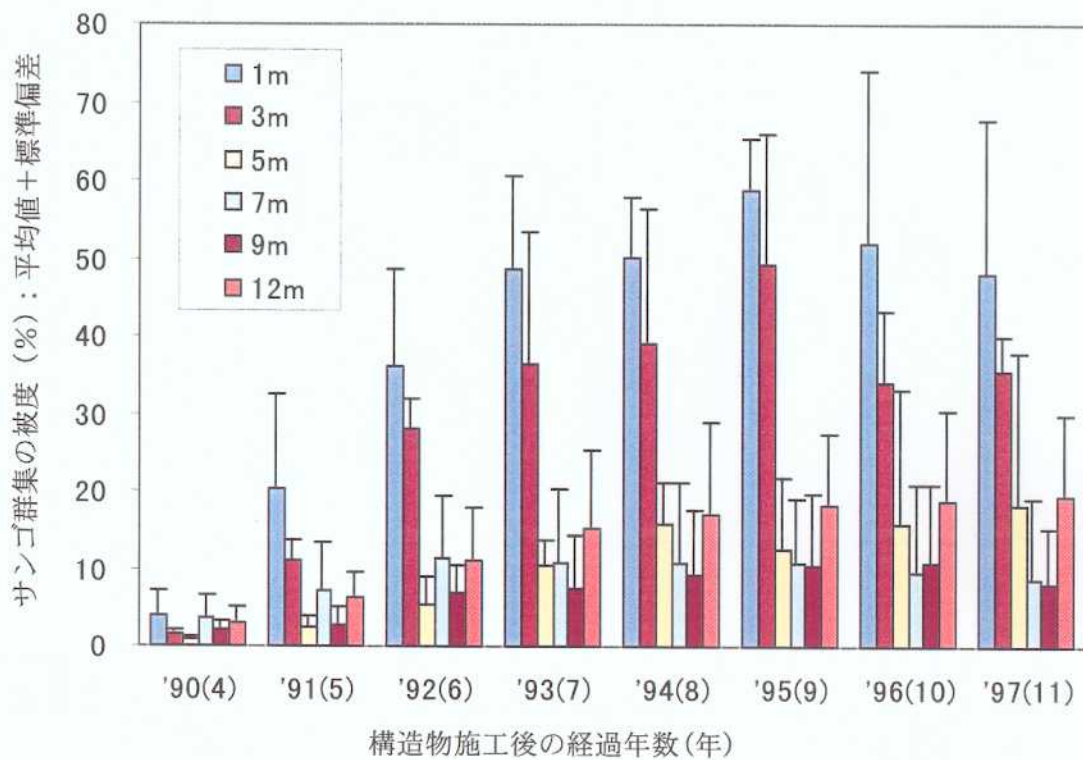


図 4-5 水深変化に伴うサンゴ群集の成長過程

注: 基盤傾度; 0° ~ 10°

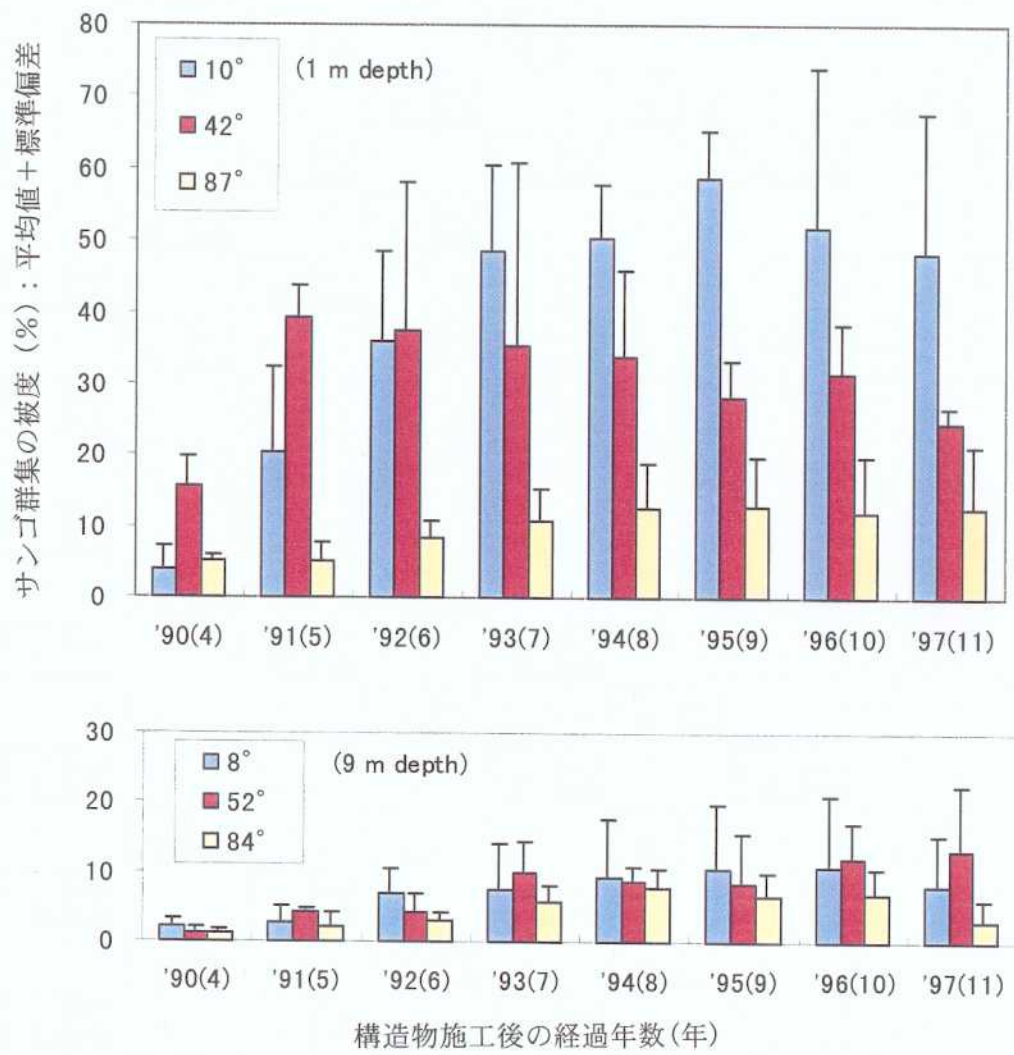


図 4-6 異なった基盤傾度におけるサンゴ群集の成長過程

注: 上の図は水深0m、下の図は水深9m

表 4-2 各水深におけるサンゴ群集の年間成長速度 (%/yr) (基盤傾度; 0° ~ 10°)

期間	水深											
	D.L. -1m		D.L. -3m		D.L. -5m		D.L. -7m		D.L. -9m		D.L. -12m	
1990-1991	16.5	± 4.9	9.5	± 3.1	1.4	± 0.9	3.9	± 3.6	0.5	± 2.5	3.2	± 1.3
1991-1992	15.7	± 11.2	16.9	± 1.3	3.0	± 0.6	4.0	± 0.1	4.3	± 2.6	4.9	± 2.1
1992-1993	12.5	± 13.5	8.5	± 7.8	5.1	± 1.8	-0.5	± 5.2	0.7	± 6.2	4.2	± 1.7
1993-1994	1.7	± 8.1	2.5	± 3.5	5.2	± 2.1	-0.1	± 10.0	1.8	± 1.4	1.7	± 2.3
1994-1995	8.6	± 16.7	10.2	± 15.9	3.3	± 11.1	-0.1	± 10.0	1.2	± 2.8	1.2	± 3.4
1995-1996	-6.9	± 19.7	15.1	± 9.3	3.3	± 0.1	-1.0	± 10.7	0.2	± 2.1	0.7	± 2.6
1996-1997	-3.8	± 1.5	1.6	± 6.9	2.4	± 1.9	-1.0	± 1.1	-2.5	± 5.9	0.6	± 0.1
1990-1997	6.3	± 9.4	4.9	± 10.2	2.5	± 2.9	0.7	± 2.2	0.9	± 2.0	2.4	± 1.8
1990-1993	14.9	± 2.1	11.7	± 4.6	3.2	± 1.9	2.5	± 2.6	1.8	± 2.2	4.1	± 0.9

注; 年間成長速度は1年間に増加した被度(%)を示す。

表 4-3 サンゴ群集の成長に関する全環境因子の重回帰分析結果

($r=0.899$, $P<0.001$, $n=168$)

	環境因子								(定数)
	前年被度	傾度	日照量の水中で の指標値	最大流速の 指標値	平均流速の 指標値	年平均月水 温	年最高月水 温	水質 (COD)	
偏回帰係数	0.799	-0.040	0.003	0.782	5.278	-0.760	1.323	2.822	-15.320
標準偏差	0.053	0.021	0.002	0.666	4.882	1.281	1.860	6.573	32.757
標準化係数	0.804	-0.076	0.076	0.076	0.068	-0.046	0.039	0.031	
有意確率	0.000	0.052	0.185	0.242	0.281	0.478	0.553	0.668	0.641

表 4-4 サンゴ群集の成長に関する主要な環境因子の重回帰分析結果

($r=0.898$, $P<0.001$, $n=168$)

	環境因子				(定数)
	前年被度	傾度	日照量の水 中の指標値	最大流速の 指標値	
偏回帰係数	0.808	0.032	0.004	0.694	1.689
標準偏差	0.044	0.019	0.002	0.381	0.899
標準化係数	0.813	-0.060	0.113	0.067	
有意確率	0.000	0.090	0.013	0.071	0.375

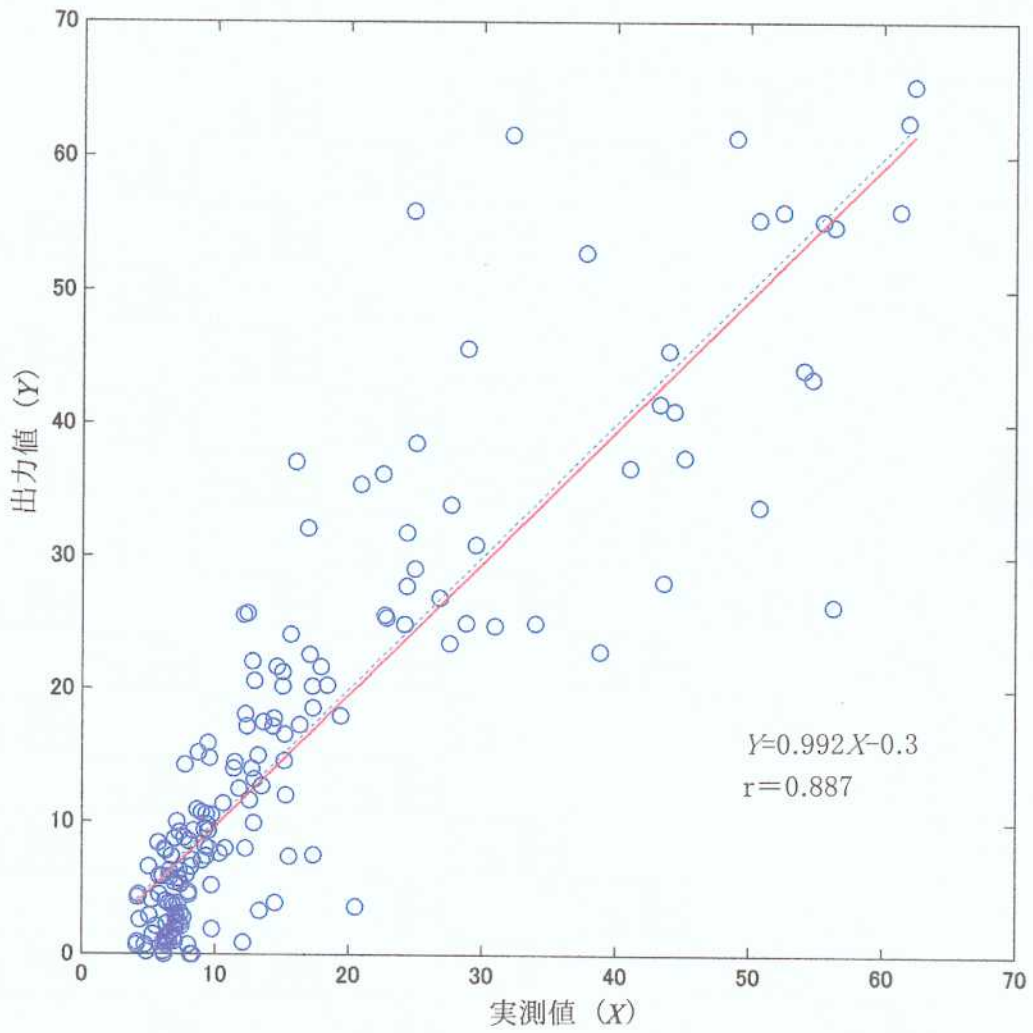


図 4-7 training data set(n=168) におけるサンゴ群集の実測値と出力値の関係

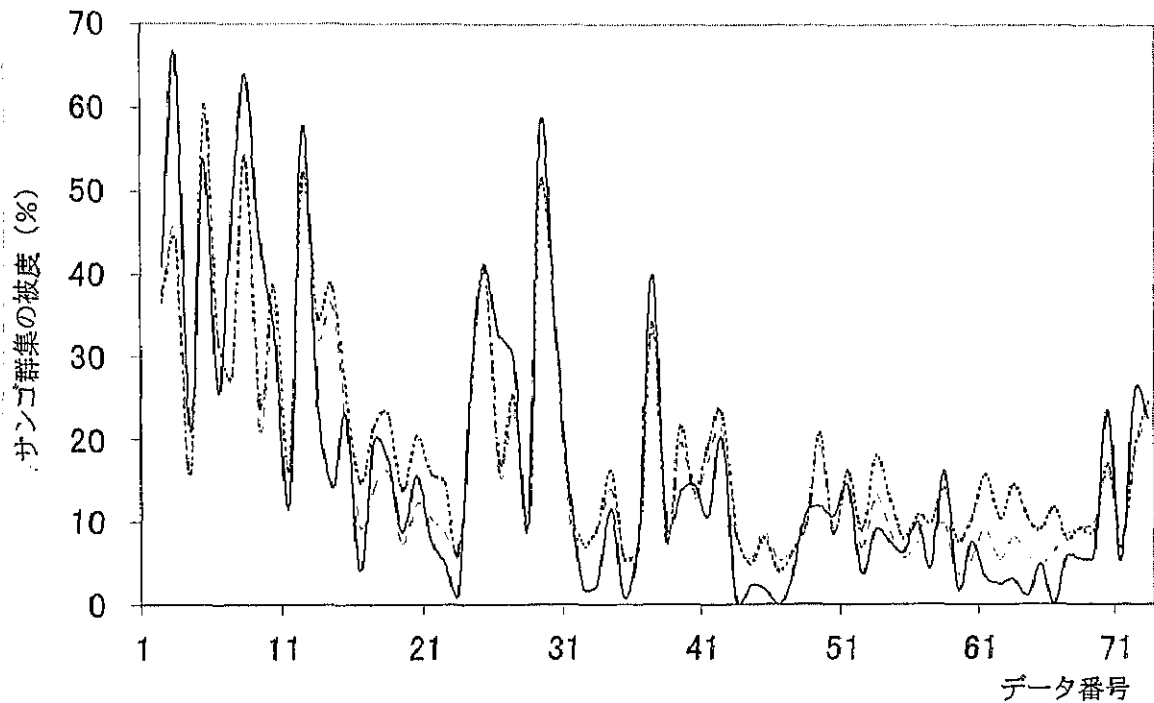


図 4-8 testing data set(n=72) におけるサンゴ群集の実測被度と予測被度の関係

注: 実線は実測値、点線は重回帰分析から求めた予測値、破線はニューラルネットワークを用いた成長予測値を示す。) データ番号は、全データ(n=240)からランダムに抽出した testing data set(n=72) を示す番号である。番号が小さいほど浅い水深帯から抽出したものであり、大きいほど深い水深帯から抽出したものである。

表 4-5 サンゴ群集の成長に関する各環境因子の感度解析結果

環境因子	10%up		30%up	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
傾度	-1.4%	-1.6%	-4.1%	-4.8%
日照量の水中での指標値	0.5%	0.7%	1.4%	2.1%
最大流速の指標値	2.9%	1.7%	8.8%	5.3%
前年被度	6.0%	6.3%	15.9%	9.1%