

### 第3章 西浦における湖岸植生帯の変遷とその地点間変動要因

#### 3.1 方法

##### 3.1.1 湖岸植生帯の分布

本研究では、湖岸植生帯の規模の指標として「植生帯幅」を用いた。ここでは「植生帯幅」を、湖岸に対して垂直方向の植生の幅と定義した(図3-1)。霞ヶ浦において、この植生帯幅は、植生帯面積との間に強い直線的関係があり(図3-2)、植生規模の指標として有効である。

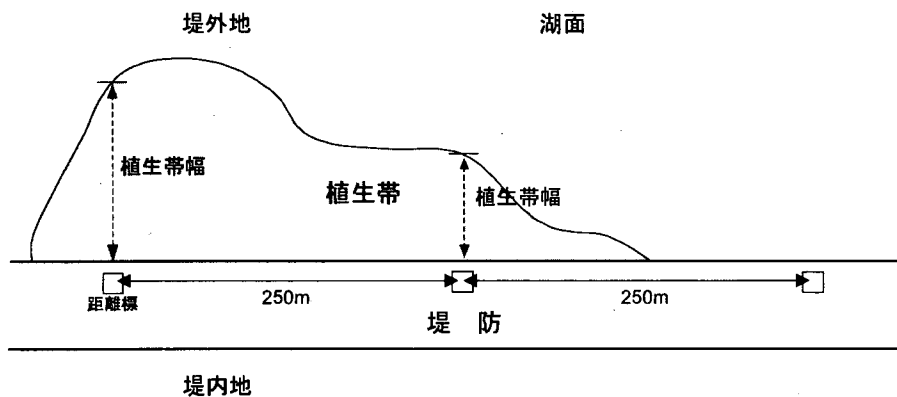


図3-1 植生帯幅の定義

植生帯幅は、1949、1972、1982、1997年の4期について空中写真(1949年)、植生図(1972、1982、1997年)より測定した(表3-1)。なお、1949年の空中写真は不鮮明な箇所が多かったため参考データとして扱い、詳細な解析においては対象から除外した。

植生帯幅の測定位置は、各年とも湖岸沿いの250m毎の距離標設置地点(全481地点)とした。ただし、1949年以降の干拓であらたに生じた陸地に位置する測定点は、1949年の植生帯幅を欠損値とした。また、航空写真が不鮮明な場合も同様に欠損値とした。1949年の植生帯幅のデータ欠損は合計92地点であった。

また、植生帯幅の測定は、沈水植物帯、浮葉植物帯、抽水植物帯の3つの植生帯タイプ別に行った。ただし、ここでいう沈水植物帯、浮葉植物帯、抽水植物帯とは、それぞれ優占する植物の生活型が沈水、浮葉、抽水～陸上である領域を指す(図3

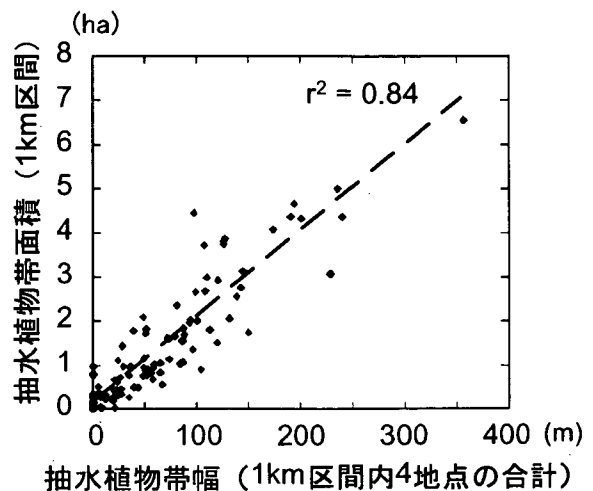


図3-2 植生帯幅と面積の関係(抽水植物)

植生帯の幅および面積は、建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所(1998)に基づく。面積は湖岸沿いの1km区間毎の面積、幅は同区間内の4地点(0,250,500,750m)の合計。

3)。なお、1949年については、抽水植物帯のみ測定し、沈水植物帯および浮葉植物帯の測定を行わなかった。この理由は、用いた空中写真では、抽水植物帯以外の植物帯は判読できなかったためである。

1972年及び1982年の植生図では、植生幅10m以上の場合、1997年の植生図では5m以上の場合のみ、植生の分布を記載している。また、1949年の写真判読は植生帯幅5m以上のものについて行った。そこで本研究においては、植生帯幅10m以上を“植生あり”、植生帯幅10m未満は“植生なし”として扱った。

表 3-1 西浦植生帯幅の測定対象とした資料

調査・撮影年	資料名	縮尺	出典等
1949	空中写真	約 1/16000	米軍撮影
1972	植生図	1/10000	桜井ほか (1973)
1982	植生図	1/10000	建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所 (1983)
1997	植生図	1/5000	建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所 (1998)

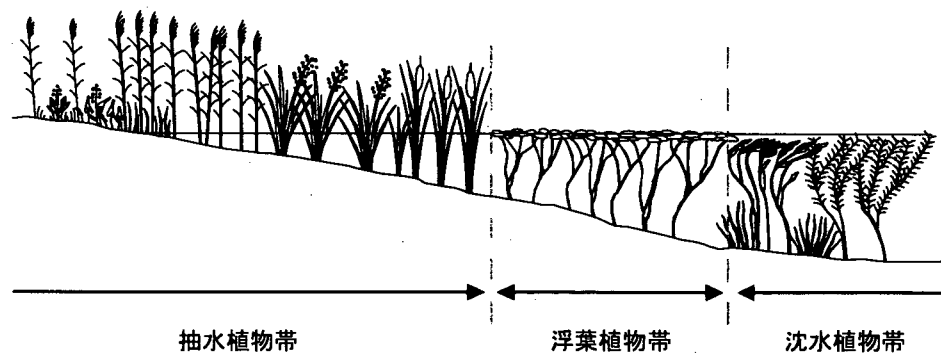


図 3-3 本研究における湖岸植生帯の分類

### 3.1.2 湖岸植生帯減少率の地点間変動要因の候補

湖岸植生帯減少の地点間の差異に影響を与える可能性のある物理条件等として、堤防の沖出距離、波高、湖岸勾配、底質粒径、流入河川までの距離について、既存の資料から測定あるいは推定を行った(表 3-2)。これらの値は、全植生帯幅測定地点のうち 1km 間隔毎に求めた。

表 3-2 解析に用いた物理条件等データの定義

物理条件等		定義	データの出典等
堤防の沖出距離および築堤年度		築堤時に堤防が湖側に移動した距離および築堤の年度。	水資源開発公団霞ヶ浦開発総合管理所より提供された資料より測定
湖岸勾配		湖岸堤端から YP -1.0m 地点までの勾配。値が大きいほど、勾配が急であることを示す。	国土交通省霞ヶ浦工事事務所作成の平面図(1982年)より測定
波高	年間平均有義波高 平均波高、最大波高 ・春期(3、4、5月) ・夏期(6、7、8月) ・秋期(9、10、11月) ・冬期(12、1、2月) ・年間	毎時の風向・風速より、SMB法に基づく推算式(宇多ほか 1987)を用いて求めた波高。 推算位置は、各測点から湖心に向かって伸ばした直線上の水深 1.0m の地点。	国土交通省霞ヶ浦工事事務所より提供された風速・風向データ(1995~97年)より推算
底質	最大粒径 60%粒径	汀線付近で採取した底質の粒径。	水資源開発公団霞ヶ浦開発総合管理所より提供(1980年測定)
流入河川までの距離		各地点の最も近い流入河川河口部中心までの直線距離	国土交通省霞ヶ浦工事事務所作成の平面図(1982年)より測定

## 1) 堤防の沖出距離および築堤年度

霞ヶ浦開発事業で行われた湖岸堤の築造は、それ以前から堤防のあった区間においては、湖岸植生があった側(湖側)に拡築するもの、堤防のない区間においては、植生のあった箇所に堤防を築くものであった(富田 1999)ため、堤防が沖に出た分、植生帯幅が減少するものであった。本研究では「堤防の沖出距離」を次のように定義し、測定した。各測定点における湖岸堤の築堤年度は、水資源開発公団霞ヶ浦開発総合管理所(2001)に記載されている築堤年度の値を用いた。また堤防の沖出距離を、水資源開発公団(1993)より測定した(図 3-4)。

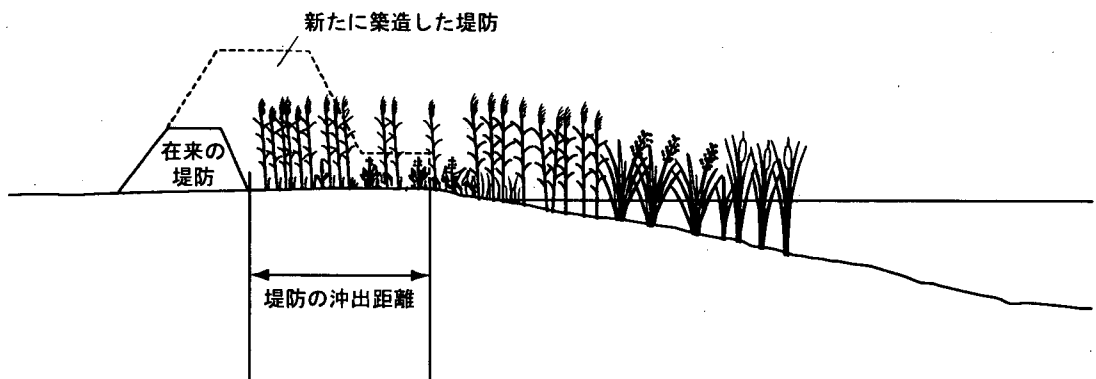
### a) 在来堤防があった区間

在来堤防の堤外地側(湖側)の堤端から、新たに築造した堤防の堤外地側堤端までの距離(図 3-4 a)

### b) 堤防のなかった区間

民地(農地)の湖岸側端から、築造した堤防の堤外地側堤端までの距離(図 3-4 b)

#### a) 在来堤防があった区間



#### b) 堤防のなかった区間

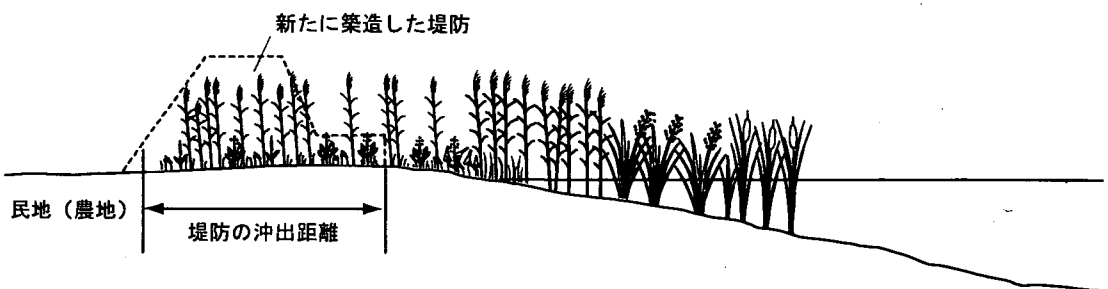


図 3-4 「堤防の沖出距離」の定義

## 2) 波高

湖岸における波浪の大きさの指標として、各測定点の沖側水深 1m 地点における毎時の有義波高を推算した。有義波高とは、観測される不規則な波群を波高の高い方から数えて上位 1/3 の数について、波高を平均したものである(合田 1998)。この推算値より、年間および季節別(春期:3、4、5

月、夏期:6、7、8月、秋期:9、10、11月、冬期:12、1、2月)について、平均値および最大値を求めた。さらに、中村ほか(1999)の方法により年間有義波高の平均値(年間平均有義波高)を算出した。有義波高の推算には、宇多ほか(1987)による次の波高推算式を用いた。

$$gH_{1/3}/U^2=2.47 \times 10^{-3}(gFe/U^2)^{0.427}$$

ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高(m)、 $U$ は風速(m/s)、 $Fe$ は有効吹送距離(m)、 $g$ は重力加速度(m/s<sup>2</sup>)を示す。この推算式は、SMB法による波高推算式を、霞ヶ浦の湖心観測所における波高の実測値によって係数を補正したものである(宇多ほか 1987)。

波高推算において、有効吹送距離は同時刻に観測された風向と同じ方向の値を用いた。また、風速・風向データは、霞ヶ浦の湖心観測所における1995年1月～1997年12月の観測結果を用いた。有効吹送距離は、各測定点について16方向別に算出した。各測定点の波高推算位置は各測定点から沖側の水深1m(約YP 0m)の位置とした(図3-5)。なお、YPとはYedogawa Peilの略であり、東京湾中等潮位(TP)より0.8402m低い。

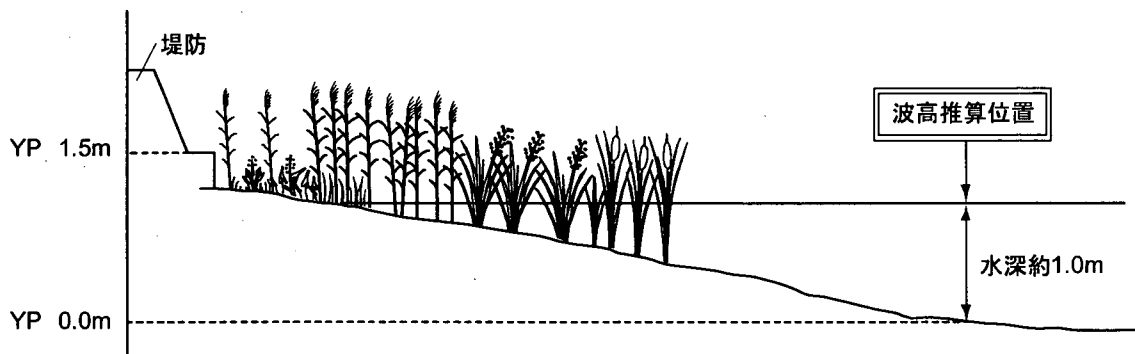


図3-5 波高推算位置

### 3) 湖岸勾配

ここでは湖岸勾配を、堤防端から水深1m(約YP 0m)地点までの水平距離を“底辺”、堤防端における高さ1.5mの垂線を“垂辺”とする直角三角形の正接と定義した(図3-6)。堤防端から水深1m地点までの距離は、国土交通省霞ヶ浦工事事務所作成の1/5000平面図(平成6年(1994年)修正版)上で測定した。

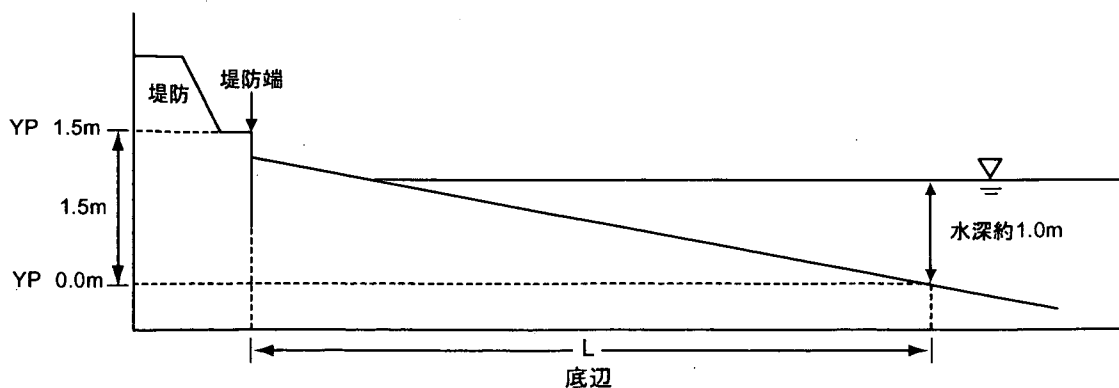


図3-6 湖岸勾配の定義

#### 4) 底質粒径

底質粒径の指標として、各測定点の汀線付近で採取した底質の最大粒径および60%粒径を用いた。このデータは、1982年に水資源開発公団が行った調査の結果(水資源開発公団霞ヶ浦開発総合管理所 2001)を用いた。

#### 5) 流入河川までの距離

流入河川からの底質土砂供給量の指標として、各測定点とそれぞれの最近隣の流入河川河口中心地点との距離を用いた。流入河川の河口中心地点の位置は、1/5000平面図より求めた。なお、ここで流入河川としたのは、国土交通省が定めた29河川である。

### 3.1.3 解析

#### 1) 空間的自己相関

各測定値における空間的自己相関は、相関分析や重回帰分析のような、測定値の“独立性”を前提とする統計手法において、統計的有意性の検定に影響を与える可能性がある(Cliff & Ord 1981、Legendre 1993、Legendre & Legendre 1998)。そこで、植生帯分布の空間的スケールを把握し、相関および重回帰分析に用いるデータの間隔を検討するために、空間的コレログラム spatial autocorrelograms(Sokal & Oden 1978 a,b)を作成した。この分析では、空間的自己相関の指標を Moran の  $I$  (Cliff & Ord 1981)とした。 $I$ は相関係数と同様に、[-1,+1]の範囲の値をとり、その絶対値が1に近いほど強い相関を示す(Cliff & Ord 1981)。この計算は The R package (Casgrain & Legendre 2001)を用いて行った。なお、各植生タイプ別の植生帯幅のヒストグラムは、いずれも右に長く裾を引く分布を持っていたため、この分析には各植生帯幅の値に対して対数変換を行った値を用いた。

#### 2) 植生帯幅・植生帯幅減少率と物理条件等との関係

植生帯幅と物理条件等の変動の関係を調べるために、各変数間で Pearson の積率相関係数を算出した。

また、植生帯幅・植生帯幅減少率の地点間変動に対する物理条件等の相対的な重要性を明らかにするために、前進ステップワイズ法による変数選択を用いた重回帰分析(Sokal & Rohlf 1995)を行った。本解析においては、1997年の植生帯幅および、以下に述べる1972~1982年、1982~1997年の植生帯幅減少率を目的変数に、植生帯の成立あるいは減少に影響を及ぼすと考えられる物理条件等を説明変数の候補とした。なお、浮葉植物帯については、分布地点数が少なかったため解析の対象から除外した。

植生帯幅減少率は「沈水植物帯」および「抽水植物帯」に分けて、次のように定義した。

例:1972~1982年の期間の沈水植物帯幅減少率の場合

$$Rs_{1972\_1982} = (s_{1972} - s_{1982}) / s_{1972}$$

ここで、 $Rs_{1972\_1982}$  は 1972～1982 年の期間の沈水植物帯幅減少率、 $s_y$  は  $y$  年の沈水植物帯幅とする。この減少率が正の絶対値の大きい値をとるほど、減少の程度が大きいことを意味する。

なお、減少率が負の値をとる測定点、すなわち植生帯幅が増えた測定点は、いずれも多自然型護岸を造成した場所など、人為が加えられた場合のみであった。ここでは植生帯の減少要因に着目した解析を行うため、減少率が負の値をとる測定点は解析から除外した。また、植生帯幅が極端に大きな値を持つ地点(100m 以上)も解析から除外した。

ステップワイズ重回帰分析を行う際には、表 3-2 のすべての変数を重回帰モデルにおける説明変数の候補とした。なお、予備的な解析において、波高に関する変数間での相関が高いことが認められていた。そのため、ステップワイズ重回帰分析において波高に関する変数は、1 つずつ説明変数の候補として用いて解析を行った。結果には、各目的変数において、最も決定係数が高くなったモデルのみを示した。

以上の解析に際して、各変数が著しく正規分布からずれている場合、それぞれ必要に応じて、事前に変数変換を行った。なお、植生帯幅の値に対しては対数変換を、湖岸勾配、底質粒径、流入河川までの距離の値については、平方根変換を行った。

本解析においては、統計的検定における有意水準を一般に用いられる 0.05 より大きい値である 0.1 に設定した。これは“第 2 種の過誤”をおかす確率を下げるため、すなわち湖岸植生帯の維持・減少に影響を与える可能性のある要因をできるだけこの解析より抽出するためである。

## 3.2 結果

### 3.2.1 西浦湖岸植生帯の変遷

西浦の沈水植物帯は、1972年時点で全測定点の58%に分布していたが、1982年には左岸中流部と右岸の一部を除き消失した(図3-7)。1997年には残りの地点からも消失し、西浦における沈水植物帯は全域で消失した(図3-7、表3-3)。

浮葉植物帯は、1972年は18地点、1982年は45地点と、局所的な分布を示していた。1997年には、浮葉植物帯の分布地点は減少し、植生帯幅も減少した(図3-8、表3-3)。

抽水植物帯は、1949年時点では全測定点の52%に分布していた(図3-9)。1972年には73%まで増加した。その後、抽水植物帯の分布地点数は、1982年には全測定点の60%、1997年には43%に減少した。1972年から1982年の期間の抽水植物帯の消失は、中岸の多くの地点で認められた(図3-9)。また、1997年には、特に左岸で抽水植物帯の消失地点が多くみられた。

### 3.2.2 植生帯幅の空間的自己相関

空間的自己相関と測定地点間距離の関係を分析した結果、沈水植物帯幅および抽水植物帯幅については、測定地点間隔距離約250mでは、ほとんどの年代において $I$ の値が0.5以上であり、測定地点間隔が1~2kmになるまで統計的に有意な正の空間的自己相関が認められた(図3-10)。これに対して測定地点間隔が約1kmになるように間引いたデータで $I$ の値を求めたところ、すべての場合において、最近接測定点間(この場合は約1km)であっても、空間的自己相関は統計的に有意な水準を下回った。



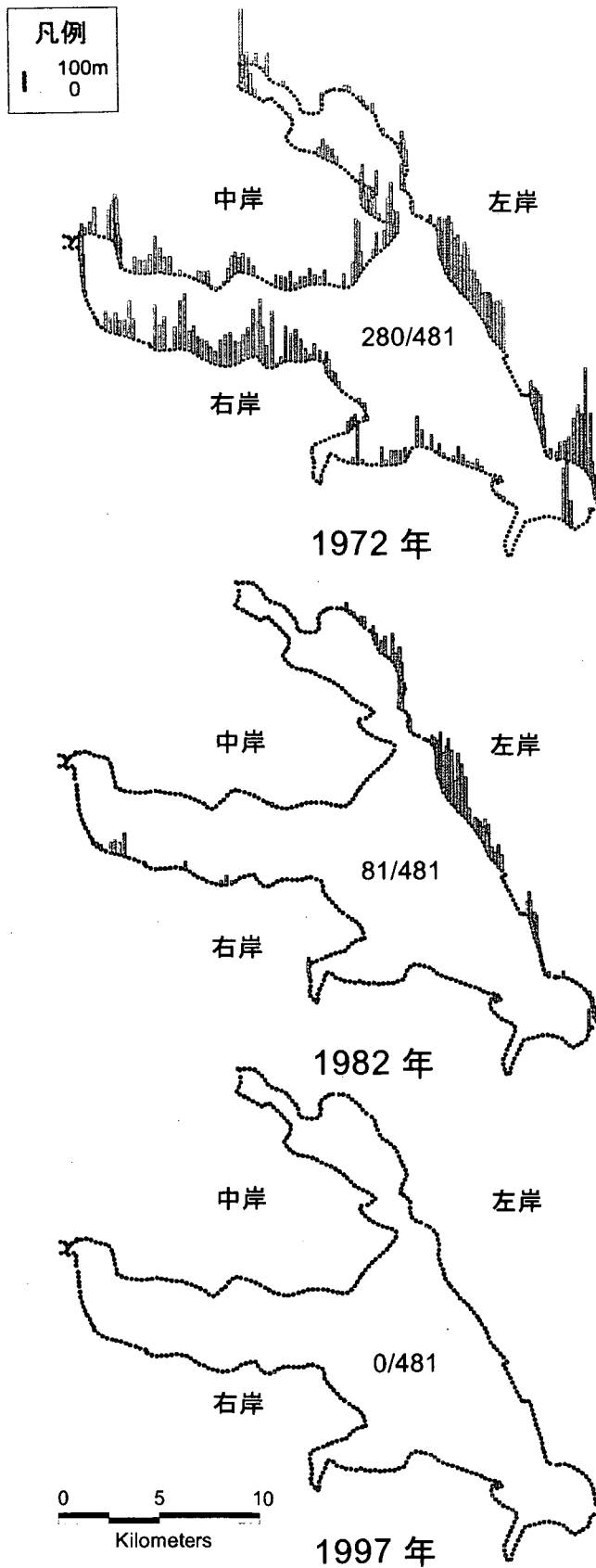


図 3-7 西浦における沈水植物帯の分布

霞ヶ浦(西浦)における 1972 年、1982 年、1997 年の沈水植物帯の分布を示した。  
 図中のシンボルの位置は、湖岸に約 250m 間隔で設置されている距離標の位置に対応する。  
 各シンボルの大きさは植生帯幅を反映している。  
 図中の分数の分母は全測定地点数、分子は植生帯分布地点数を示す。出典は表 3-1 を参照。

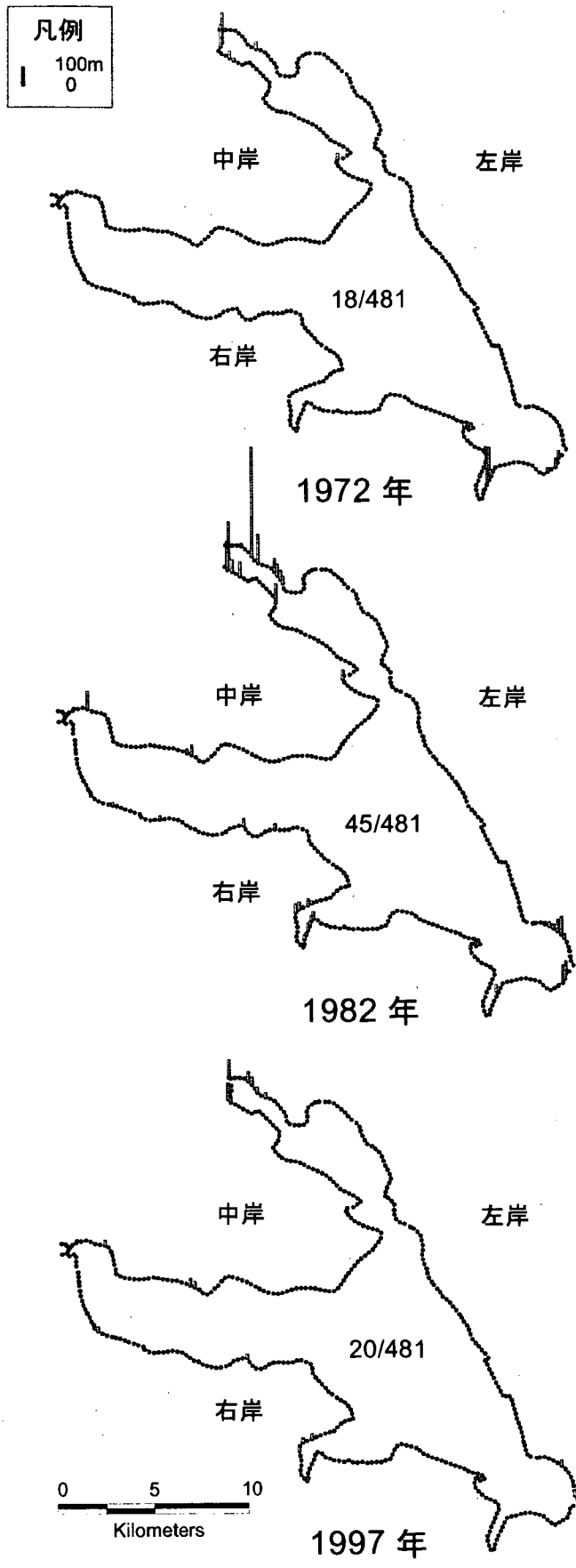
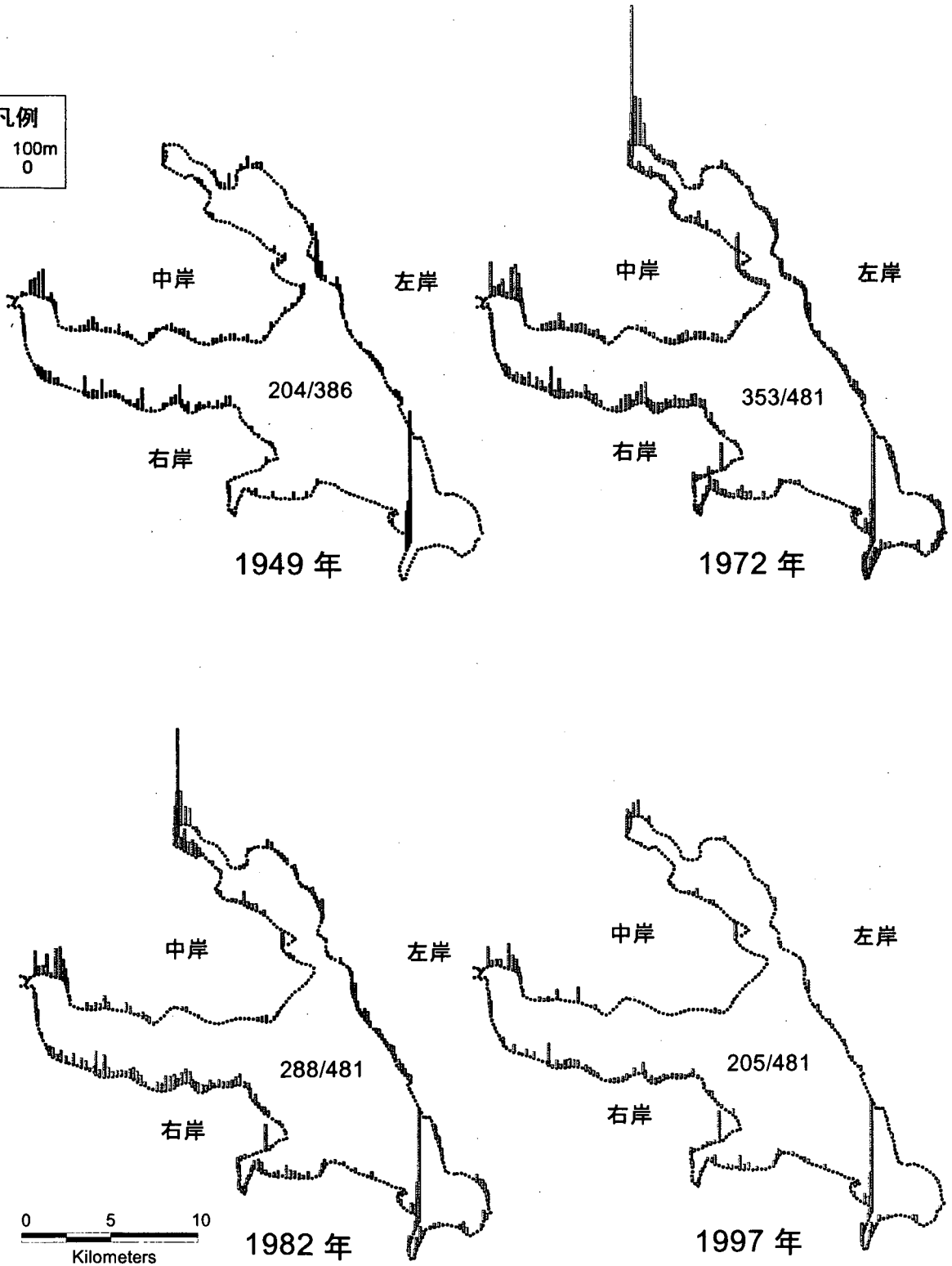


図 3-8 西浦における浮葉植物帯の分布  
霞ヶ浦(西浦)における 1972 年、1982 年、1997 年の浮葉植物帯の分布を示した。  
出典は表 3-1 を参照。

凡例  
 100m  
 0



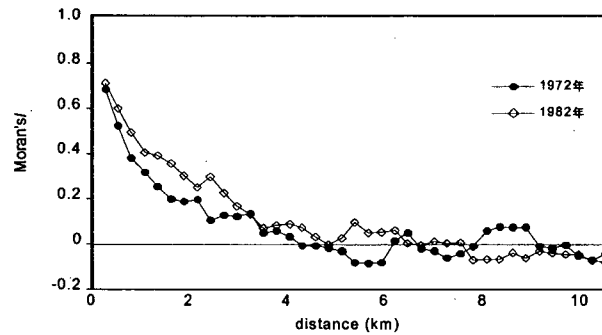
**図 3-9 西浦における抽水植物帯の分布**  
 霞ヶ浦(西浦)における 1949 年、1972 年、1982 年、1997 年の抽水植物帯の分布を示した。  
 出典は表 3-1 を参照。

表 3-3 西浦の植生帯幅の最大値と平均値

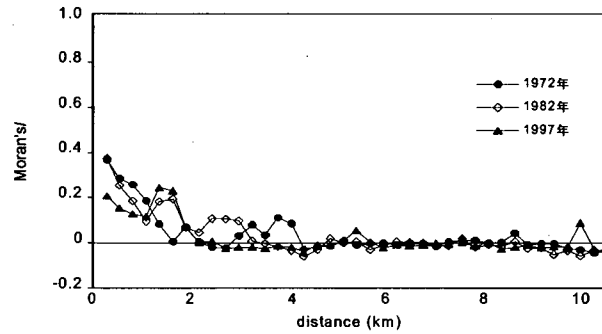
各年代の植生帯タイプ別の最大値および平均値を示した。なお、平均値は、植生帯が確認された地点のみで算出した。それぞれの植生帯確認地点数は平均値のうしろの括弧内に示した。

変数		最大値(m)	平均値(m)
沈水植物帯幅	1972年	540	105(280)
	1982年	326	91(81)
	1997年	0	0(0)
浮葉植物帯幅	1972年	187	60(18)
	1982年	596	66(45)
	1997年	102	36(20)
抽水植物帯幅	1949年	785	45(204)
	1972年	874	51(353)
	1982年	675	50(288)
	1997年	676	36(205)

a) 沈水植物帯



b) 浮葉植物帯



c) 抽水植物帯

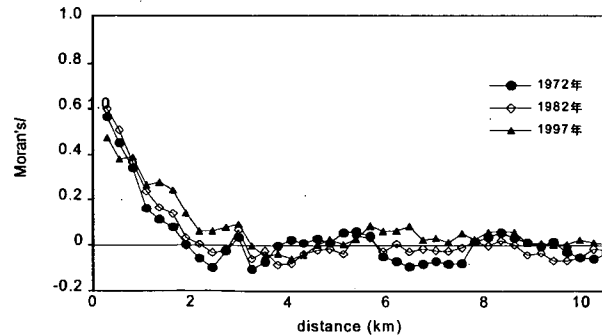


図 3-10 西浦湖岸植生帯幅のコレログラム

約 250m 間隔で測定した植生帯幅の空間的自己相関と測定地点間の距離の関係を示した。縦軸は空間的自己相関の指標である Moran's I であり、この絶対値が 0 に近いほど空間的自己相関が弱いことを示す。横軸の距離は測定地点間の距離を示している。

### 3.2.3 西浦湖岸植生帯減少率と湖岸物理条件等に関わる変数の関係

前項の分析により、抽水植物帯幅および沈水植物帯幅に関して、測定地点の間隔が約 1km 程度になるまで、統計的に有意な空間的自己相関が認められた。

そこで、相関に関する分析および重回帰分析においては、測定値間の空間的な依存性を除去するため、全地点(481 地点)データのうち、統計的に有意な空間的自己相関が認められなくなる測定地点間隔、すなわち湖岸沿いの 1km 間隔のデータ(122 地点)のみを用いた。

#### 1) 変数間の相関

1972～82 年の沈水植物帯幅減少率は、“波高”との間に統計的に有意な負の相関が認められた(表 3-4)。“1972～82 年の抽水植物帯幅減少率”は、“1972 年の沈水植物帯幅”および“波高(秋期最大)”との間に統計的に有意な負の相関が認められたとともに、“1972～82 年の堤防の沖出距離”および“湖岸勾配”との間に統計的に有意な正の相関が認められた。“抽水植物帯 1982～97 年の減少率”は、“湖岸勾配”、“波高(春期および夏期の最大波高、夏期の平均波高)”および“1982～97 年の堤防の沖出距離”との間に、統計的に有意な正の相関が認められた。

湖岸の物理条件等の変数間では、波高に関する変数間ではすべての組み合わせで、強い正の相関が認められた(表 3-5)。また、底質に関しても、最大粒径と 60%粒径の間で正の相関が認められた。

表 3-4 植生帯幅減少率とその他の変数間の相関  
変数間で算出した Pearson の積率相関係数を示した。

	抽水植物帯幅減少率 1972~82 年	抽水植物帯幅減少率 1982~97 年	沈水植物帯幅減少率 1972~82 年
抽水植物帯幅 1972 年	-0.51 ***	-0.30 **	0.17
抽水植物帯幅 1982 年	-0.84 ***	-0.22	0.10
抽水植物帯幅 1997 年	-0.55 ***	-0.79 ***	0.24 *
沈水植物帯幅 1972 年	-0.27 *	0.05	-0.34 **
沈水植物帯幅 1982 年	-0.10	0.28 **	-0.93 ***
湖岸勾配	0.39 ***	0.55 ***	-0.08
波高(年間平均有義波高)	-0.16	0.10	-0.35 ***
波高(冬期最大)	-0.14	0.09	-0.38 ***
波高(春期最大)	-0.03	0.30 **	-0.44 ***
波高(夏期最大)	-0.03	0.25 *	-0.34 **
波高(秋期最大)	-0.34 **	-0.07	-0.11
波高(年間最大)	-0.24	0.06	-0.29 **
波高(冬期平均)	-0.15	0.18	-0.52 ***
波高(春期平均)	-0.13	0.22	-0.38 ***
波高(夏期平均)	-0.16	0.29 **	-0.41 ***
波高(秋期平均)	-0.22	0.02	-0.22
波高(年間平均)	-0.15	0.21	-0.42 ***
底質(最大粒径)	0.04	-0.17	-0.00
底質(60%粒径)	0.06	-0.05	0.01
堤防の沖出距離(1972~82 年)	0.67 ***	-0.09	0.14
堤防の沖出距離(1982~97 年)	—	0.39 ***	—
堤防の沖出距離(1972~97 年)	—	—	—
流入河川までの距離	-0.23	-0.07	0.11
抽水植物帯幅減少率 1972~82 年	—	0.31	0.02
抽水植物帯幅減少率 1982~97 年	0.31	—	-0.27
沈水植物帯幅減少率 1972~82 年	0.02	-0.27	—

\*:p<0.1、\*\*:p<0.05、\*\*\*:p<0.01

表 3-5 変数間の相関係数  
各変数間で算出した Pearson の積率相関係数を示した。

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	
抽水植物帯幅 1972 年	X1																						
抽水植物帯幅 1982 年	X2	0.78***																					
抽水植物帯幅 1997 年	X3	0.66***	0.65***																				
沈水植物帯幅 1972 年	X4	0.11	0.21*	0.04																			
沈水植物帯幅 1982 年	X5	-0.07	-0.01	-0.13	0.43***																		
湖岸勾配	X6	-0.56***	-0.45***	-0.55***	-0.16	-0.12																	
波高(年間平均有義波高)	X7	-0.02	-0.09	-0.17	0.30***	0.30***	-0.08																
波高(冬期最大)	X8	-0.04	-0.10	-0.18*	0.31***	0.27**	0.06	0.86***															
波高(春期最大)	X9	-0.03	-0.12	-0.24**	0.24**	0.46***	-0.01	0.79***	0.73***														
波高(夏期最大)	X10	-0.06	-0.13	-0.23**	0.22**	0.35***	-0.04	0.73***	0.54***	0.89***													
波高(秋期最大)	X11	0.08	0.06	0.04	0.19*	0.15	-0.21*	0.80***	0.69***	0.50***	0.44***												
波高(年間最大)	X12	0.02	-0.03	-0.10	0.22**	0.28***	-0.11	0.91***	0.79***	0.77***	0.74***	0.91***											
波高(冬期平均)	X13	-0.02	-0.05	-0.21*	0.33***	0.44***	0.00	0.86***	0.90***	0.77***	0.62***	0.65***	0.78***										
波高(春期平均)	X14	-0.01	-0.08	-0.22**	0.30***	0.39***	-0.15	0.93***	0.72***	0.85***	0.72***	0.88***	0.82***	0.82***									
波高(夏期平均)	X15	0.04	-0.01	-0.17	0.27**	0.45***	-0.18*	0.80***	0.54***	0.84***	0.88***	0.61***	0.80***	0.70***	0.95***								
波高(秋期平均)	X16	0.00	-0.04	-0.12	0.27***	0.20*	-0.17	0.93***	0.76***	0.60***	0.57***	0.89***	0.79***	0.88***	0.74***	0.74***							
波高(年間平均)	X17	-0.01	-0.07	-0.21**	0.32***	0.41***	-0.12	0.95***	0.79***	0.85***	0.81***	0.74***	0.89***	0.89***	0.99***	0.91***	0.90***						
底質粒径(最大)	X18	-0.22**	-0.27***	-0.07	-0.14	-0.05	0.29***	-0.06	0.03	-0.10	-0.10	-0.08	-0.05	-0.01	-0.14	-0.19*	-0.08	-0.11					
底質粒径(60%)	X19	-0.10	-0.13	-0.04	-0.10	-0.07	0.20*	-0.09	0.00	-0.12	-0.11	-0.14	-0.12	-0.02	-0.13	-0.17	-0.10	-0.12	0.65***				
堤防の沖出距離(1972~82年)	X20	0.10	-0.31***	-0.17	-0.09	-0.12	-0.02	-0.01	0.05	0.12	0.10	-0.06	0.03	-0.03	-0.01	-0.04	-0.09	-0.03	0.02	0.04			
堤防の沖出距離(1982~97年)	X21	0.23**	0.27**	-0.01	0.08	0.00	-0.06	-0.07	-0.03	0.04	0.01	-0.10	-0.07	0.08	0.01	0.07	-0.07	0.03	-0.10	0.09	-0.18*		
流入河川までの距離	X22	-0.07	-0.06	-0.05	0.07	-0.08	-0.16	0.27***	0.31***	-0.03	-0.10	0.37***	0.23**	0.27**	0.18*	0.02	0.39***	0.21**	0.11	0.13	-0.09	0.11	

\*:p<0.1, \*\*:p<0.05, \*\*\*:p<0.01

## 2) 沈水植物帯幅の減少率を目的変数とした重回帰分析

目的変数を“沈水植物帯幅 1972～82 年減少率”とし、説明変数の候補を“波高”、“湖岸勾配”、“底質(最大粒径)”、“底質(60%粒径)”、“堤防の沖出距離”としたステップワイズ重回帰分析の結果、最終的に重回帰モデルに取り込まれた説明変数は“波高”、“湖岸勾配”、“流入河川までの距離”であった。“波高”が高い場所ほど減少率が小さいという効果がみられたが、モデル自体の説明力は小さかった( $R^2=0.21$ 、表 3-7)。

## 3) 抽水植物帯幅を目的変数とした重回帰分析

目的変数を“抽水植物帯幅 1997 年”とし、説明変数の候補を“波高”、“湖岸勾配”、“底質(最大粒径)”、“底質(60%粒径)”、“堤防の沖出距離”、“流入河川までの距離”として、ステップワイズ重回帰分析をおこなった。分析の結果、重回帰モデルに取り込まれた説明変数は、“波高(春期平均)”、“湖岸勾配”、“底質(60%粒径)”、“堤防の沖出距離”、“流入河川までの距離”であった。これらのうち、標準偏回帰係数が統計的に有意だったのは、“波高(春期平均)”、“湖岸勾配”、“堤防の沖出距離”であった(表 3-6)。また、統計的に有意だった標準偏回帰係数はいずれも負の値を示した。

## 4) 抽水植物帯幅の減少率を目的変数とした重回帰分析

抽水植物帯の減少率の場合は、目的変数“1972～82 年の減少率”、“1982～97 年の減少率”としてステップワイズ重回帰分析をおこなった。説明変数は、“波高”、“湖岸勾配”、“底質(最大粒径)”、“底質(60%粒径)”、“堤防の沖出距離”、“流入河川までの距離”のほかに“1972 年の沈水植物帯幅”を加えた。ただし、“1982～97 年の減少率”の場合は、この期間の後半の 1990 年頃以降沈水植物帯はほぼ消失していたため、“沈水植物帯幅”を説明変数の候補より外した。

ステップワイズ重回帰分析の結果、1972～82 年の抽水植物帯幅減少率を目的変数とした場合、重回帰モデルに取り込まれた説明変数は、“沈水植物帯幅”、“湖岸勾配”、“堤防の沖出距離”、“流入河川までの距離”であった(表 3-7)。これらのうち標準偏回帰係数が統計的に有意だったのは、“沈水植物帯幅 1972 年”、“湖岸勾配”、“堤防の沖出距離”であった。この時、“沈水植物帯幅 1972 年”の標準偏回帰係数は負の値を示し、“湖岸勾配”および“堤防の沖出距離”は正の値を示した。

また、1982～97 年の抽水植物帯減少率を目的変数とした場合、重回帰モデルに取り込まれた説明変数は、“波高”、“湖岸勾配”、“底質(最大粒径)”、“堤防の沖出距離”であり、これらの標準偏回帰係数のいずれもが統計的に有意であった。また、これらの標準偏回帰係数の値は、“底質(最大粒径)”では負の値を示したが、他の変数では正の値を示した。



表 3-6 1997 年の抽水植物帯幅を目的変数とした重回帰分析の結果

ステップワイズ法による変数選択の結果、重回帰モデルに取り込まれた説明変数の標準偏回帰係数および各重回帰モデルの決定係数( $R^2$ )を示した。標準偏回帰係数の絶対値が大きいくほど、目的変数と説明変数の関係が強いことを表す。また、 $R^2$ は値が大きく、1.0に近いほどモデルのあてはまりがよいことを表す。表中の“-”は、前進ステップワイズ法による変数選択の結果、その変数が重回帰モデルに取り込まれなかったことを示す。

説明変数	目的変数
	抽水植物帯幅 1997年 (n=87)
波高(春期平均)	-0.28***
湖岸勾配	-0.64***
底質(最大粒径)	-
底質(60%粒径)	0.09
堤防の沖出距離	-0.18**
流入河川までの距離	-0.11
$R^2$	0.43

\*:p<0.1、\*\*:p<0.05、\*\*\*:p<0.01

表 3-7 植生帯幅減少率を目的変数とした重回帰分析の結果

ステップワイズ法による変数選択の結果、重回帰モデルに取り込まれた説明変数の標準偏回帰係数および各重回帰モデルの決定係数( $R^2$ )を示した。標準偏回帰係数の絶対値が大きいくほど、目的変数と説明変数の関係が強いことを表す。また、 $R^2$ は値が大きく、1.0に近いほどモデルのあてはまりがよいことを表す。表中の“-”は、前進ステップワイズ法による変数選択の結果、その変数が重回帰モデルに取り込まれなかったことを示す。また、表中の空欄は、その変数を解析には用いてないことを示す。

説明変数	目的変数		
	沈水植物帯幅 減少率	抽水植物帯幅 減少率	
	1972~82年 (n=55)	1972~82年 (n=43)	1982年~97年 (n=52)
沈水植物帯幅 1972年		-0.19	
波高(春期平均)	-0.46***	-	0.26**
湖岸勾配	-0.17	0.27**	0.56***
底質(最大粒径)	-	-	-0.21
底質(60%粒径)	-	-	-
堤防の沖出距離	-	0.60***	0.34***
流入河川までの距離	0.18	-0.13	-
$R^2$	0.21	0.56	0.52

\*:p<0.1、\*\*:p<0.05、\*\*\*:p<0.01

### 3.3 考察

#### 3.3.1 西浦湖岸植生帯の変遷

西浦の湖岸植生帯の衰退は、すでいくつかの文献で指摘されている(例えば Sakurai 1990、西廣・藤原 2000 など)。本研究においても、1972年から1997年の期間に沈水植物帯、浮葉植物帯、抽水植物帯のいずれの植生タイプについても、西浦のほぼ全域での植生帯幅減少が確認された。

このような霞ヶ浦における植生帯減少には複数の原因が関連していると考えられるが、西廣・藤原(2000)は主なものとして次の3つを挙げている。

- 1) 築堤による植生帯の直接的破壊
- 2) 垂直護岸設置に伴う反射波増大による湖底地形の洗掘
- 3) 1970年代以降の流域人口増加に伴う水質の悪化

沈水植物帯は1972年には西浦において広く分布していたものの、1990年頃にはすでに西浦からほぼ消失しており(Sakurai 1990)、1997年でも同様の状況が続いている。西浦における沈水植物帯の消失は、これが担っていた機能の効果が失われたことも意味する。例えば、沈水植物帯が持つ、底質の巻き上げを抑制する効果(Jackson & Starrett 1959)や、沿岸帯の底質流失を抑制し堆積を促進する効果(James & Barko 1990)などが失われたということになる。

浮葉植物帯については、1972年から1982年の間を比較すると確認地点数が増加しているが、その後1997年までに確認地点数および植生帯幅ともに減少した(図3-8)。1997年に残っていた浮葉植物帯の大部分は、絶滅危惧種であるアサザの群落であった(建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所 1998)。このアサザの群落はその後急速に衰退している(西廣ほか 2001)ため、浮葉植物帯も沈水植物帯と同様に消失するおそれがあると考えられる。

抽水植物帯は、1997年においても481地点中205地点で確認されているが、これは1972年の確認地点数353地点の約6割である。また、抽水植物帯が残っている場所においても、その植生帯幅が減少していた(表3-3)。このことから、1970年頃以降西浦において抽水植物帯の分断化が進行し(中村ほか 2000)、湖岸堤沿いに抽水植物帯の分布する場所が減少したとともに、植生帯幅も減少したことが明らかになった。

植生帯幅変遷の空間的パターンは植生タイプによって異なっていた(図3-7、図3-8、図3-9)。また、1972~1982年の抽水植物帯減少率と沈水植物帯減少率との間にも相関が認められなかった(表3-4)。これらの結果は、植生タイプ間でその衰退要因が必ずしも同一ではない可能性を示唆している。

#### 3.3.2 西浦植生帯幅およびその減少率の地点間変動要因

湖岸植生帯の有無を規定する要因としては、一般に湖岸勾配(Håkanson 1977、Duarte & Kalff 1986、宇多・西島 1998、林ほか 1998)、底質の粒径(Spence 1967、Spence 1982、Anderson & Kalff 1988、宇多・西島 1998)、波浪(Jupp & Spence 1977、Spence 1982、Keddy 1985、Chambers 1987、宇多・西島 1998、中村ほか 1999)、築堤等による人為的な植生の破壊(平井 1995、西廣・藤原 2000)

などが挙げられる。また、沈水植物については、水中での光が定着を制限する主要因であると考えられている(Chambers & Kalff 1985、van Dijk & van Vierssen 1991、van Dijk et al. 1992)。これらの湖岸植生帯の分布に影響を与える要因の相対的な重要性は、個々の湖沼あるいは湖沼内の地点によって異なってくる可能性がある。本研究では、西浦における湖岸植生帯幅とその減少率の地点間変動要因について、既存の資料から得られた湖岸の物理条件等に関する変数を対象に探索的な解析を行った。ただし、解析の対象とした湖岸植生帯幅減少の地点間変動要因の候補は限られており、考慮することができなかった要因の候補もある。例えば、水質に関わる項目(透明度など)、アオコの吹き寄せ、湖岸植生帯の構成種といった因子は今回の解析では考慮していない。今回の湖岸植生帯の地点間変動要因に関する解析により説明できなかった部分は、これらの考慮していない因子による可能性がある。

西浦における 1972~82 年の沈水植物帯幅は、波高が高いほど、減少率が大きいという、正の効果が見られた(表 3-7、図 3-11)。一方、底質の粒径や堤防の沖出距離は、沈水植物帯減少の地点間のバラツキに与えた影響が小さい可能性が示唆された。さらに、この重回帰モデルの説明力が低いことから(表 3-7)、西浦における沈水植物帯幅の減少率への地点間変動要因としては、今回の解析で用いていない他の要因(例えば、水質に関わる変数)についても考慮すべきであることが示唆された。

一方、西浦における抽水植物帯の植生帯幅およびその減少率の地点間変動要因については、湖岸の物理条件等との関連が示唆された(表 3-6、表 3-7)。1997 年の抽水植物帯幅を目的変数とし、湖岸の物理条件等の変数を説明変数の候補としたステップワイズ重回帰分析を行った結果、1997 年の抽水植物帯幅は、湖岸勾配が急であるほど、波高(春期)が高いほど、堤防の沖出距離が大きいほど、幅が小さいという負の効果が認められた(表 3-6、図 3-12)。

また、1972~82 年の抽水植物帯幅に関しては、沈水植物帯幅が狭いほど、堤防の沖出距離が大きいほど、湖岸勾配が急であるほど、減少率が大きいという効果がみられた(表 3-7、図 3-13)。これに対して 1982~97 年の抽水植物帯幅減少率は、波高が高いほど、堤防の沖出距離が大きいほど、湖岸勾配が急であるほど、大きいという効果がみられた(表 3-7、図 3-14)。

沈水植物帯は、他の湖沼においても底質の巻き上げを抑制する効果(例えば、Jackson & Starrett 1959)を持つことや、沿岸帯の底質流失を抑制し堆積を促進する効果が認められている(James & Barko 1990)。また、沈水植物帯内では水流の速度が減少することも観測されている(Madsen & Warncke 1983)。このような沈水植物帯の湖岸における特性は、沈水植物帯が波浪エネルギーを減衰させる効果を持っていることを示唆している。また、沈水植物帯が上述のような機能を通じて、抽水植物帯の減少抑制の効果を持っていたことを示唆している。

したがって、西浦湖岸に沈水植物帯が広範囲に分布した 1972~82 年においては抽水植物帯幅減少率の地点間変動への波浪の影響を認めることができなかったものの、1990 年以降西浦において沈水植物帯はほとんど消失し(Sakurai 1990)、抽水植物帯の減少を抑制する効果も失われたことで波浪による影響が認められるようになった可能性がある。

さらに、湖岸勾配が、抽水植物帯幅とその減少率のいずれに対しても地点間変動要因となってい

ることが明らかになった。すなわち、湖岸勾配が緩やかな場所ほど抽水植物帯幅の減少率が低く、残されている抽水植物帯幅も広い傾向がみられた。この理由としては、湖岸勾配が緩やかな場所は勾配が急な場所と比較して、抽水植物帯が成立できる範囲が相対的に広くなること、加えて湖岸の勾配が緩やかな場合、抽水植物帯にあたる波浪が緩和される(林ほか 1998、1999)ことが考えられる。

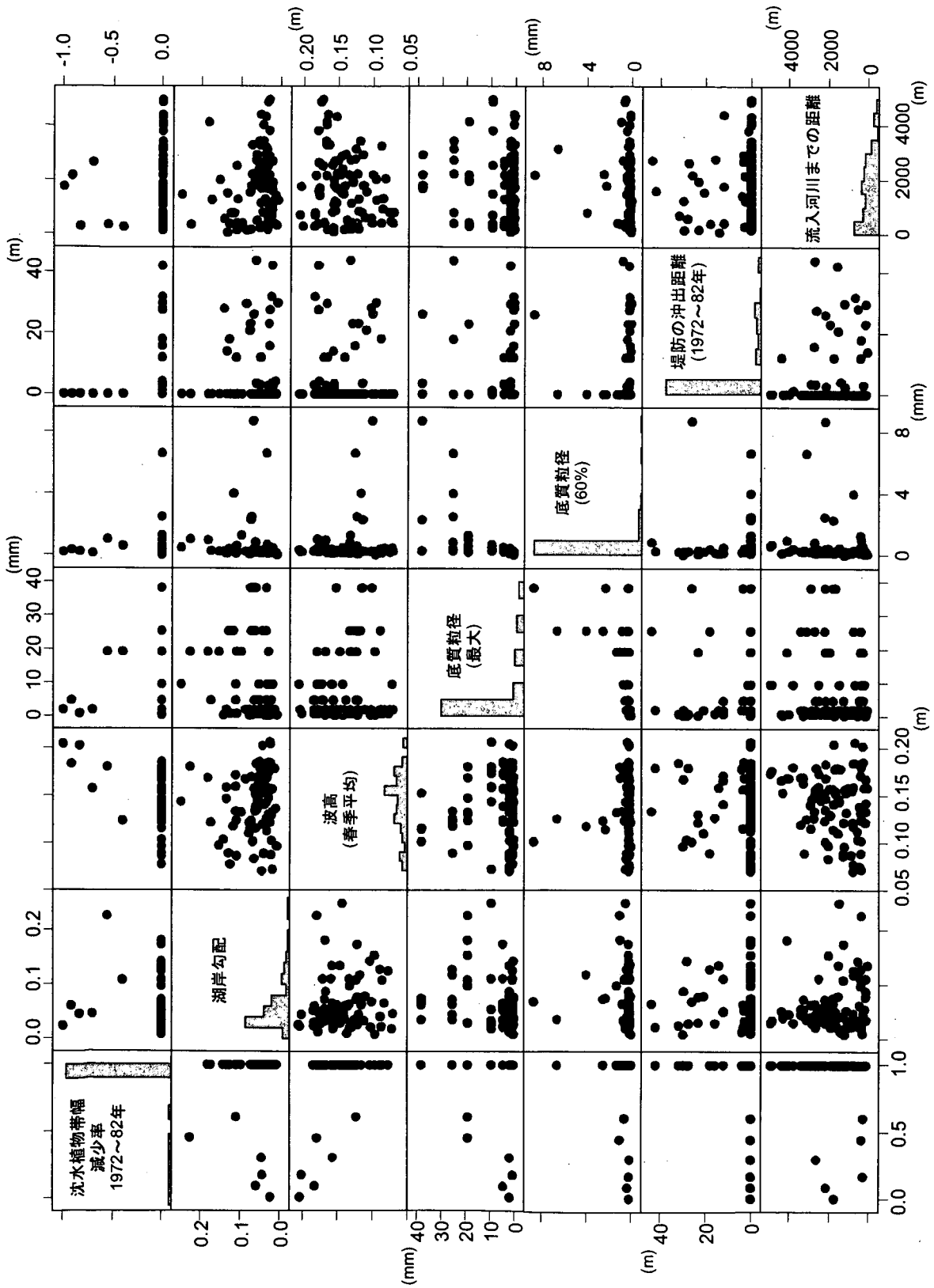


図 3-11 1972~82 年の沈水植物帯幅減少率と湖岸条件変数の頻度分布および散布図行列

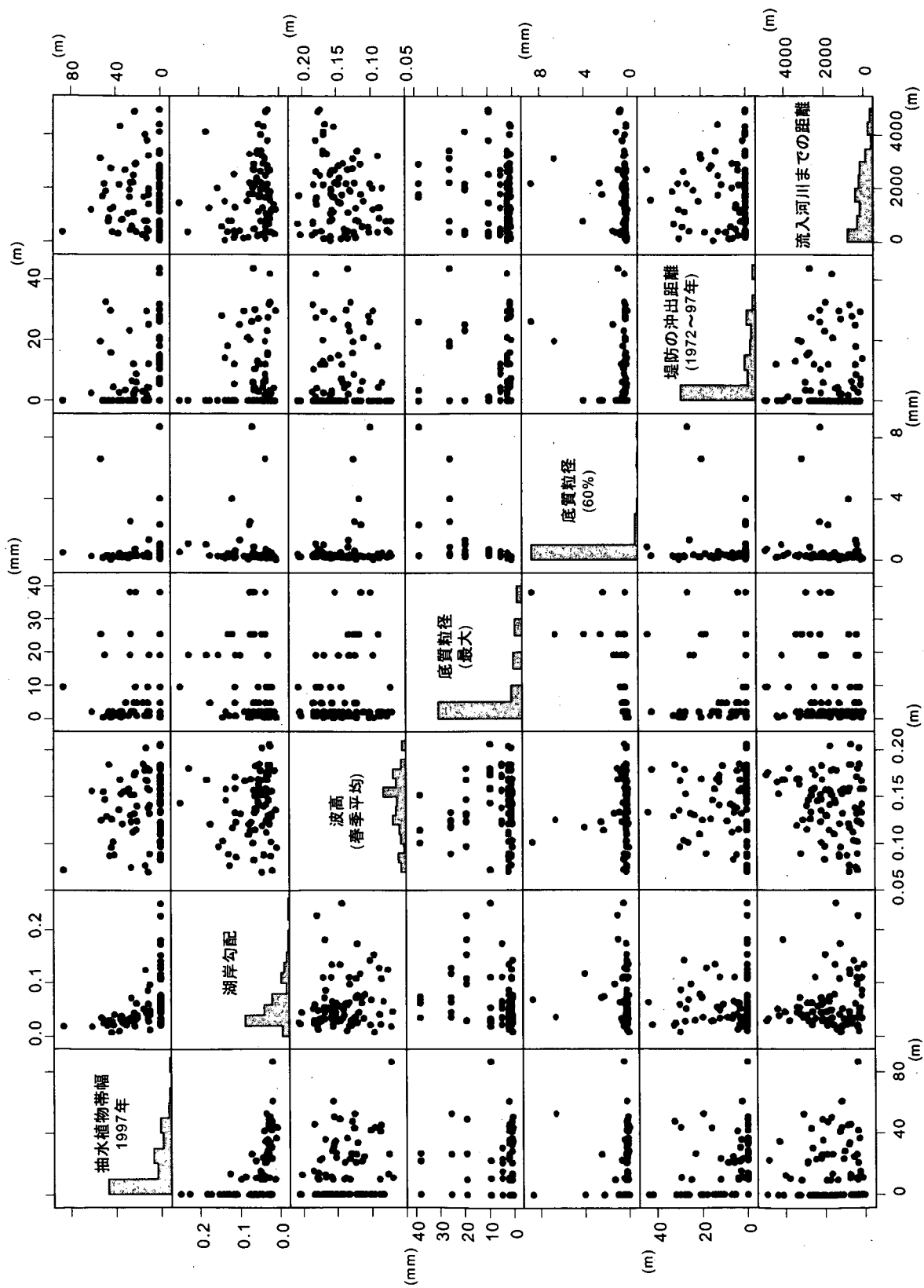


図 3-12 1997 年の抽水植物帯幅と湖岸条件変数の頻度分布および散布図行列

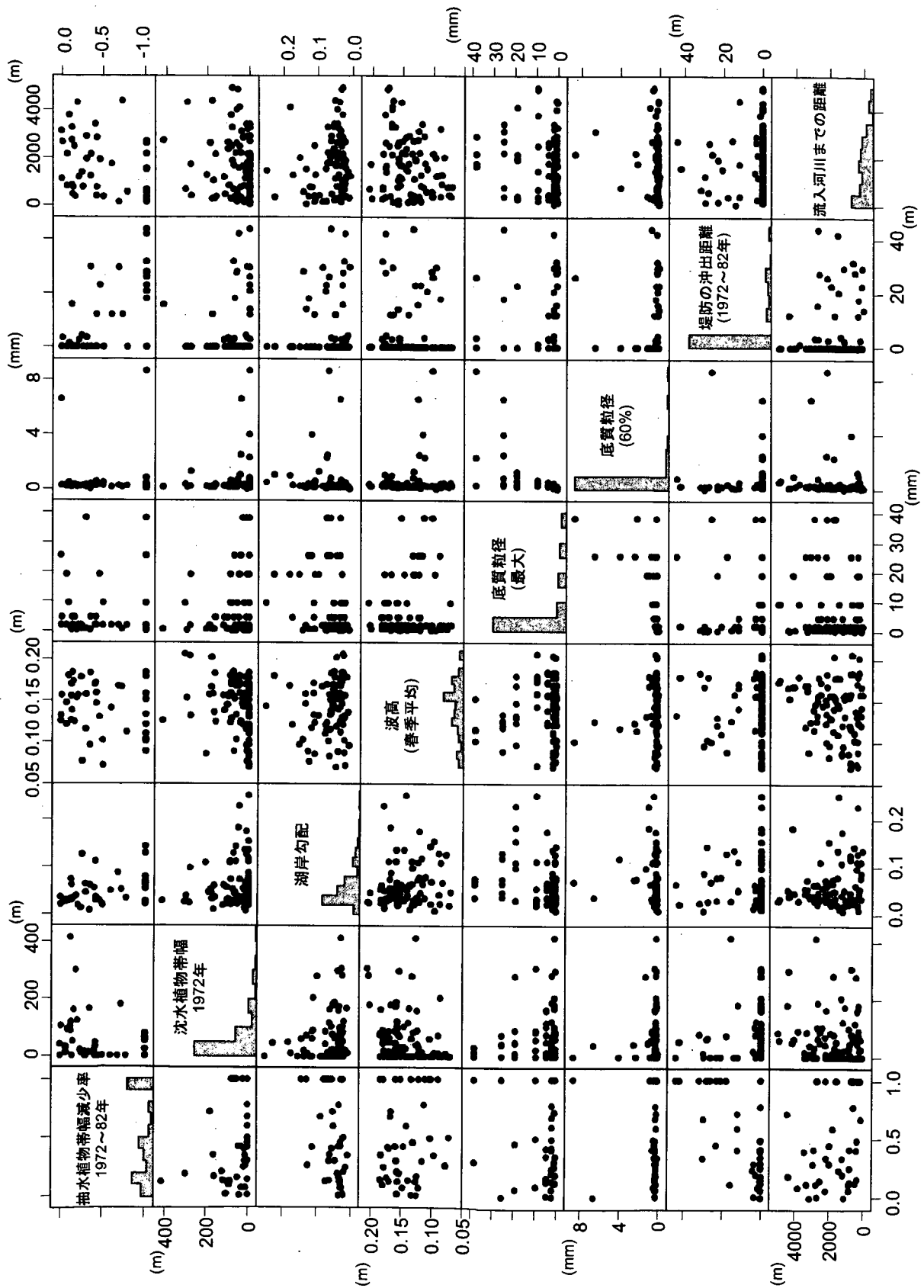


図3-13 1972~82年の抽水植物帯幅減少率と湖岸条件変数の頻度分布および散布図行列

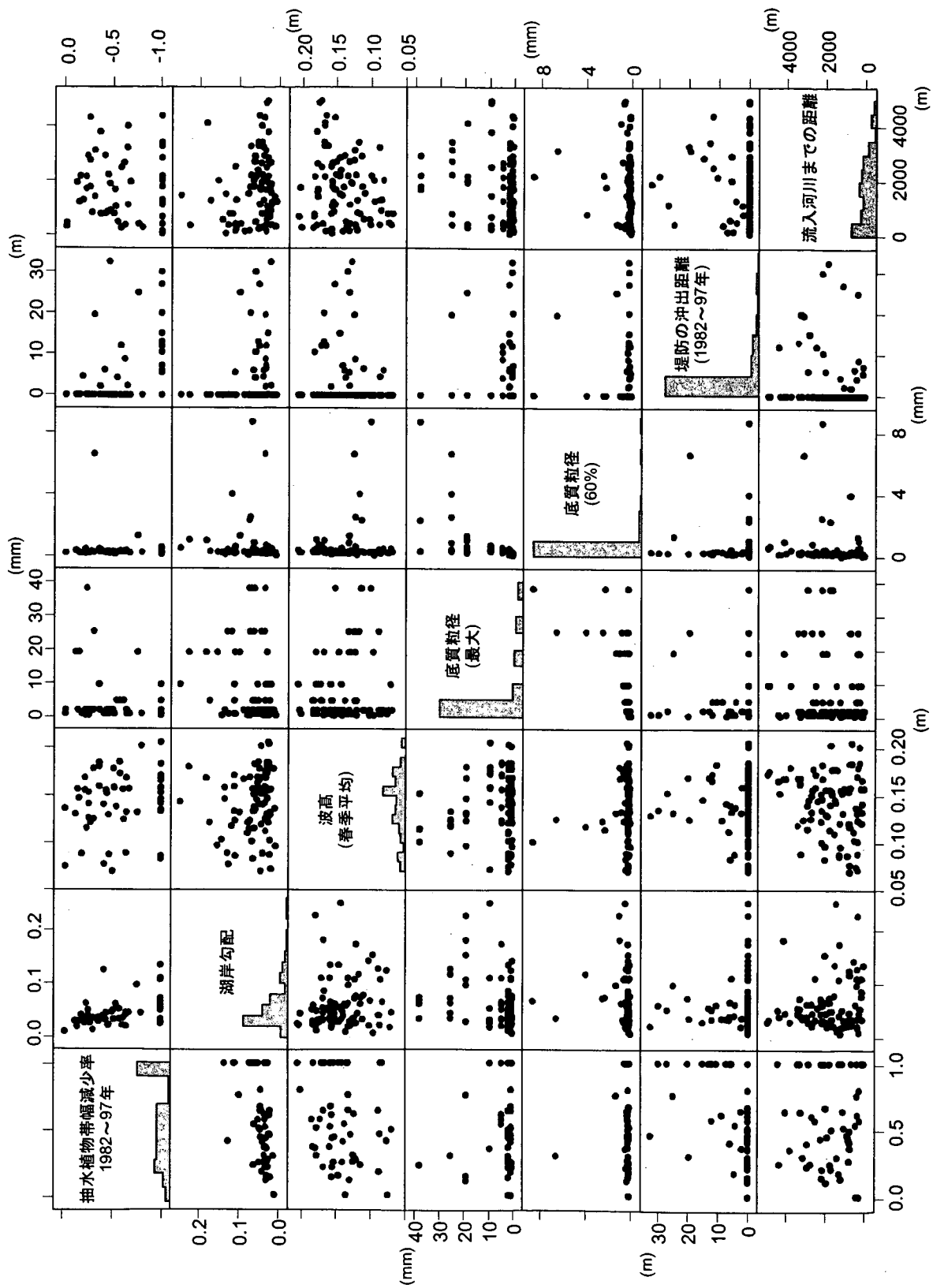


図 3-14 1982~97 年の抽水植物帯幅減少率と湖岸条件変数の頻度分布および散布図行列