

第4章 北浦における湖岸植生帯の変遷とその地点間変動要因

4.1 方法

4.1.1 湖岸植生帯の分布

ここでは、第3章と同様に湖岸植生帯の規模の指標として「植生帯幅」を用いた。

植生帯幅は、1949、1967、1982、1997年の空中写真あるいは植生図より測定した(表4-1)。

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252地点)とした。ただし、1949年以降の干拓で新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25地点であった。

また、植生帯幅の測定は、第3章と同様に沈水植物帯、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。1982年の植生図では、植生帯幅10m以上の場合、1997年では5m以上の場合のみ、植生の分布を記載している。また、1949年、1967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4-1 北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
1967	空中写真	約 1/10000	建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所 (1968)
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)

4.1.2 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4-2)。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 4-2 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	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

湖岸堤の築造は、在来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)。これにしたがい、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 4-1)。

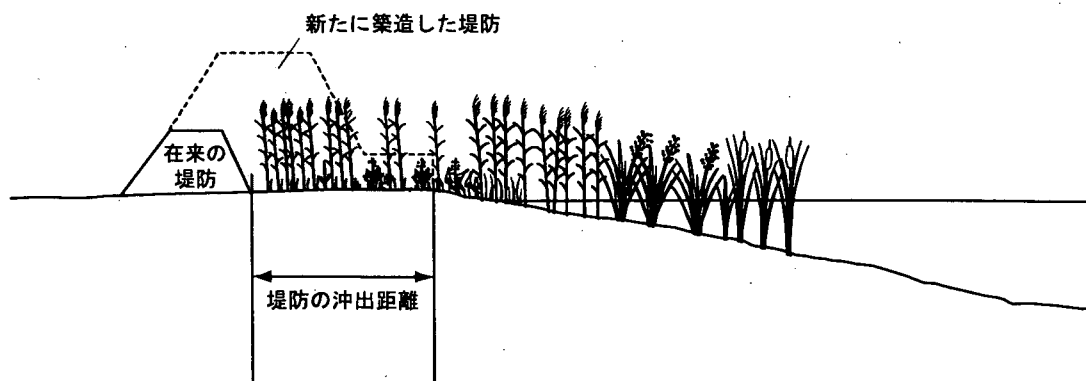
a) 在来堤防があった区間

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 4-1 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 4-1 b)

a) 在来堤防があった区間



b) 堤防のなかった区間

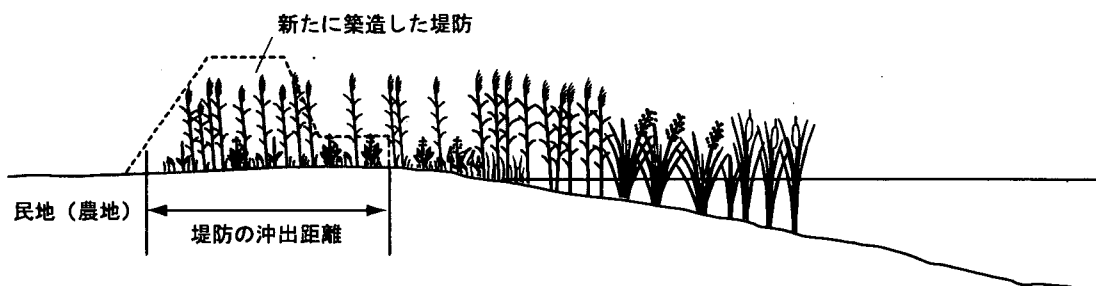


図 4-1 「堤防の沖出距離」の定義

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、この推算値より中村ほか(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/s²)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。なお、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 4-2)。

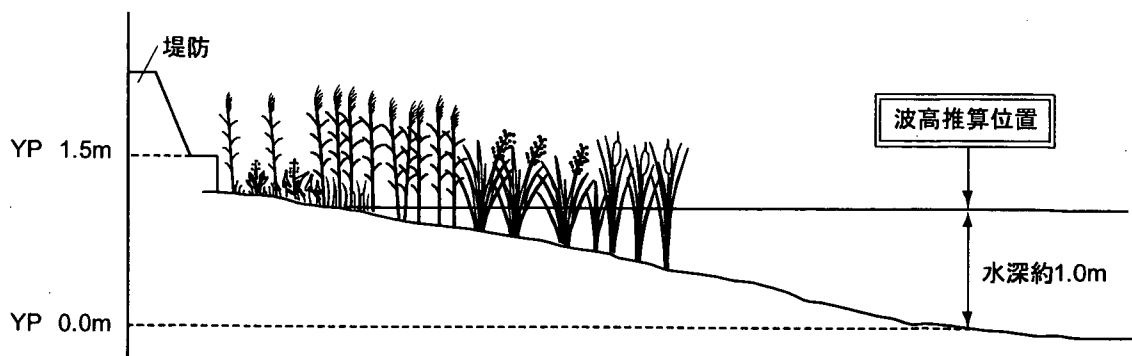


図 4-2 波高推算位置

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 4-3)。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。

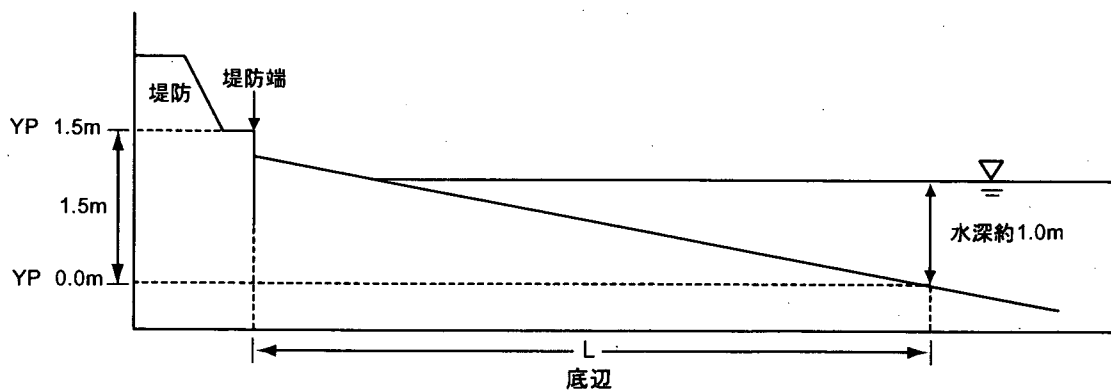


図 4-3 湖岸勾配の定義

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 23 河川である。

4.1.3 解析

1) 空間的自己相関

植生帯分布の空間的スケールを把握するために、各変数について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。この計算は The R package (Casgrain & Legendre 2001)を用いて行った。 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)。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 1967~1982 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、沈水植物帯および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

植生帯幅減少率は次のように定義した。

例:1967~1982 年の期間の抽水植物帯幅減少率の場合

$$Re_{1967_1982} = (e_{1967} - e_{1982}) / e_{1967}$$

ここで、 Re_{1967_1982} は 1967~1982 年の期間の抽水植物帯幅減少率、 e_y は y 年の抽水植物帯幅とする。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および植生帯幅が極端に大きな値を持つ地点(100m 以上)は解析から除外した。

ステップワイズ重回帰分析を行う際には、表 4-2 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、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するため、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。

4.2 結果

4.2.1 北浦湖岸植生帯の変遷

北浦の沈水植物帯は、1982年時点で全測定点の10%に分布していたが、1997年にはすべてを消失した(図4-4)。

浮葉植物帯は、1982年においては全測定点の7%で確認されたが、これらは入江部に局所的な分布を示していた。1997年には、浮葉植物帯の確認された測定点は2%に減少した(図4-5、表4-3)。

抽水植物帯は、1949年時点では測定点の69%に分布していた(図4-6)。これが、1967年には68%とほとんど変化がなかったものの、その後抽水植物帯の分布地点数は、1982年には全測定点の33%、1997年には10%へと減少した。また、1997年において抽水植物帯幅が20m以上の地点は入江部に分布が限られ、その地点数も12地点のみであった。

4.2.2 植生帯幅の空間的自己相関

1967年、1982年、1997年の抽水植物帯幅の空間的自己相関と測定地点間距離の関係を分析した。沈水植物帯および浮葉植物帯については確認地点数が少なかったため、この解析を行わなかった。解析の結果、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以上を示し、統計的にも有意な正の空間的自己相関が認められた(図4-7)。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。

4.2.3 北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。この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、統計的有意性の推定に影響を与える可能性がある(Legendre 1993、Legendre & Legendre 1998)。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(252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(60地点)のみを用いた。

1) 変数間の相関

“抽水植物帯幅 1967~82年の減少率”は、1967、1982、1997年の抽水植物帯幅以外の変数との間に統計的に有意な相関は認められなかった(表4-4)。“抽水植物帯幅 1982~97年の減少率”には、“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。また、“抽水植物帯幅 1997年”との間に負の相関が認められた。

湖岸の物理条件等の変数間では、底質粒径に関して最大粒径と60%粒径の間で正の相関が認められた(表4-5)。また、“波高”と“底質(60%粒径)”との間に統計的に有意な正の相関が、“波高”と“湖岸勾配”の間に有意な負の相関が認められた。

2) 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”、“流入河川からの距離”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”、“湖岸勾配”、“底質(60%粒径)”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”、“湖岸勾配”であった(表4-6)。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。

3) 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、目的変数を“1967~82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。説明変数の候補には、“波高”、“湖岸勾配”、“底質(最大粒径)”、“底質(60%粒径)”、“堤防の沖出距離”、“流入河川からの距離”を用いた。

ステップワイズ重回帰分析の結果、1967~82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“流入河川からの距離”のみであったが、この標準偏回帰係数は統計的には有意でなかった(表4-7)。また、得られた重回帰モデルの説明力も低かった($R^2=0.03$)。

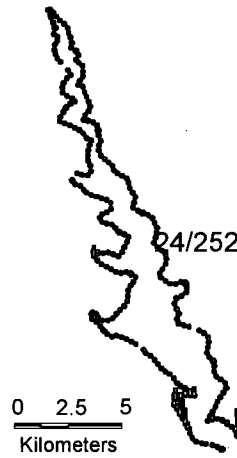
また、1982~97年の抽水植物帯減少率を目的変数とした場合、重回帰モデルに取り込まれた説明変数は“湖岸勾配”、“底質(最大粒径)”、“流入河川までの距離”であり、これらのうち“湖岸勾配”の標準偏回帰係数のみが有意な効果をもっていた。また、これらの標準偏回帰係数の値は、いずれも正の値を示した。

図 4-4 北浦における
沈水植物帯の分布

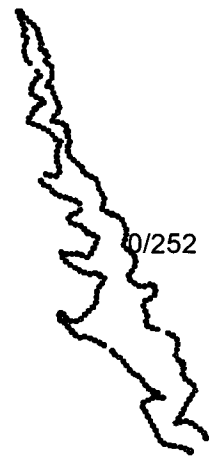
霞ヶ浦(北浦)における 1982 年、
1997 年の沈水植物帯の分布を示
した。

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 4-1
を参照。

凡例
|—100m
|—0



1982年



1997年

図 4-5 北浦における
浮葉植物帯の分布(右)

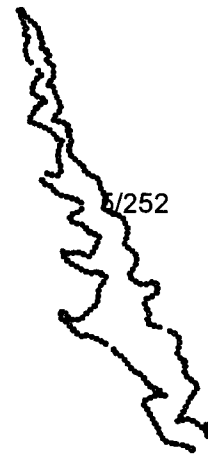
霞ヶ浦(北浦)における 1982 年、
1997 年の浮葉植物帯の分布を示
した。

出典は表 4-1 を参照。

凡例
|—100m
|—0



1982年



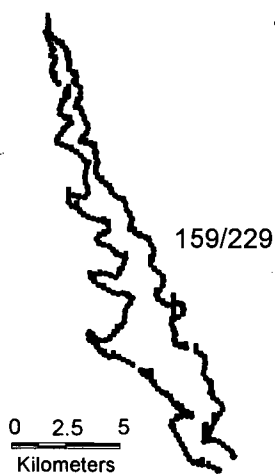
1997年

図 4-6 北浦における
抽水植物帯の分布(下)

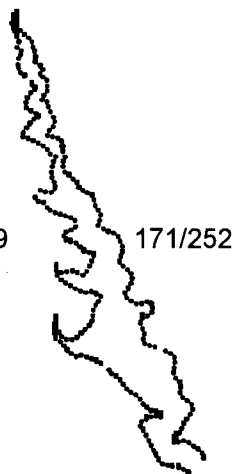
霞ヶ浦(北浦)における 1949 年、
1967 年、1982 年、1997 年の抽
水植物帯の分布を示した。

出典は表 4-1 を参照。

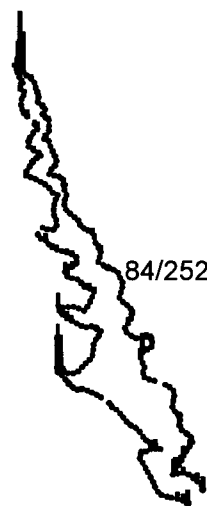
凡例
|—100m
|—0



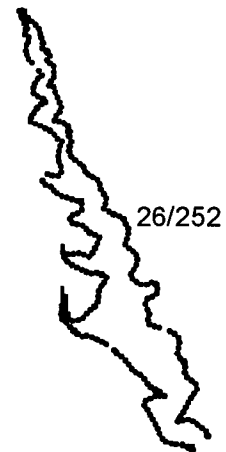
1949年



1967年



1982年



1997年

表 4-3 北浦の植生帯幅の範囲と平均値

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	1982年	131	39(24)
	1997年	7	0(0)
浮葉植物帯幅	1982年	55	22(17)
	1997年	40	23(5)
抽水植物帯幅	1967年	174	27(171)
	1982年	271	39(84)
	1997年	125	30(26)

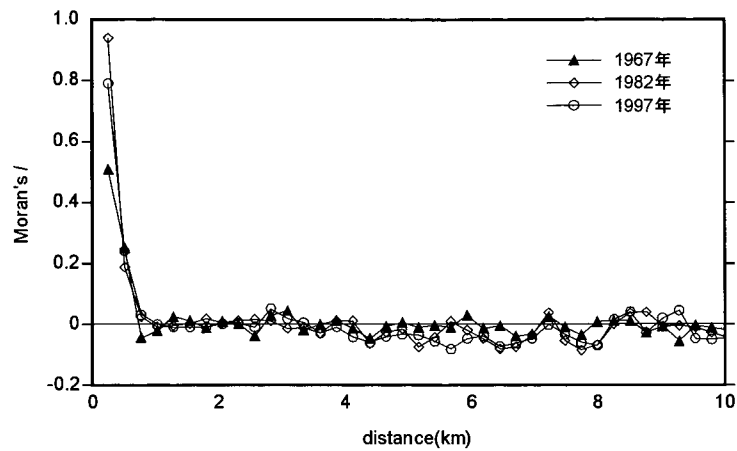


図 4-7 北浦抽水植物帯幅のコレログラム

約 250m 間隔で測定した抽水植物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。

表 4-4 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 1967~82 年	抽水植物帯幅減少率 1982~97 年
抽水植物帯幅 1967 年	-0.43 ***	-0.13
抽水植物帯幅 1982 年	-0.94 ***	0.02
抽水植物帯幅 1997 年	-0.59 ***	0.44 **
沈水植物帯幅 1982 年	0.13	0.17
湖岸勾配	-0.11	0.52 **
波高(年間平均有義波高)	0.11	0.06
底質(粒径最大)	-0.04	0.24
底質(粒径 60%)	-0.04	0.20
堤防の沖出距離(1972~82 年)	-0.02	0.03
堤防の沖出距離(1982~97 年)	-0.18	0.02
堤防の沖出距離(1972~97 年)	-0.12	0.05
流入河川までの距離	0.21	0.32

*:p<0.1、**:p<0.05、***:p<0.01

表 4-5 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。

	抽水植物帯幅 1967年	抽水植物帯幅 1982年	抽水植物帯幅 1997年	抽水植物帯幅 1982年	湖岸勾配	波高 (年間平均有 義波高)	底質粒径 (最大)	底質粒径 (60%)	堤防の沖出 距離 (1972~82年)(1982~97年)	堤防の沖出 距離 (1972~97年)
抽水植物帯幅 1967年										
抽水植物帯幅 1982年	0.36***									
抽水植物帯幅 1997年	0.29**	0.51***								
抽水植物帯幅 1982年	0.02	0.07	-0.08							
湖岸勾配	-0.09	-0.26**	-0.40***	-0.05						
波高(年間平均有義波高)	-0.11	-0.16	-0.18	-0.12	-0.29**					
底質粒径(最大)	0.08	0.06	-0.09	-0.09	-0.19	0.14				
底質粒径(60%)	0.06	-0.07	-0.25*	-0.23*	-0.04	0.28**	0.51***			
堤防の沖出距離(1972~82年)	0.61***	-0.04	-0.01	-0.05	0.15	-0.11	0.15	0.28**		
堤防の沖出距離(1982~97年)	0.15	0.08	-0.02	-0.08	0.13	0.08	-0.25*	-0.28**	-0.31**	
堤防の沖出距離(1972~97年)	0.71***	0.00	-0.02	-0.09	0.22*	-0.08	0.03	0.16	0.88***	0.17
流入河川までの距離	-0.07	-0.18	-0.12	0.01	-0.15	0.40***	0.13	0.19	0.08	0.08

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

表 4-6 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=60)
波高(年間平均有義波高)	-0.34***
湖岸勾配	-0.49***
底質(最大粒径)	-
底質(60%粒径)	-0.18
堤防の沖出距離	-
流入河川までの距離	-
R^2	0.31

*, $p<0.1$ 、**, $p<0.05$ 、***, $p<0.01$

表 4-7 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 減少率	
	1967~82 年 (n=40)	1982 年~97 年 (n=22)
波高(年間平均有義波高)	-	-
湖岸勾配	-	0.44**
底質(最大粒径)	-	0.24
底質(60%粒径)	-	-
堤防の沖出距離	-	-
流入河川までの距離	0.24	0.28
R^2	0.03	0.37

*, $p<0.1$ 、**, $p<0.05$ 、***, $p<0.01$

4.3 考察

4.3.1 北浦湖岸植生帯の変遷

北浦の湖岸植生帯は、過去 20~30 年の間に衰退していることが本研究より確認された。沈水植物帯は、1982 年には、24 地点で確認されていたものの、1997 年には北浦からほぼ消失した(図 4-4)。北浦における沈水植物帯の消失は、これらが担っていた機能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、1982 年から 1997 年の間に確認地点数が 1/3 以下に減少した(図 4-5)。1997 年に残っていた浮葉植物帯はいずれも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、北浦の浮葉植物帯も、沈水植物帯と同様に消失するおそれがある。

抽水植物帯は、1997 年においても 252 地点中 26 地点で確認されているが、これは 1967 年の確認地点数 171 地点の 15%にすぎない。

4.3.2 北浦植生帯幅およびその減少率の地点間変動要因

本研究では、北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。この点は、「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」において述べているとおりである。

分析の結果、北浦における抽水植物帯幅は、波高および湖岸勾配から有意な負の影響を受けていた。また、減少率についてみると、1982~97 年の間では湖岸勾配が大きいほど減少率が大きいという正の有意な効果がみられた。

これより、北浦においては湖岸の勾配が、湖岸植生の維持に影響を持つ重要な環境要因であることが明らかになった。