

生物指標を利用した猪鼻湖湖心部の舌状浅瀬における 海水浄化機能の現地観測

宇多高明*・入江光一郎**・大堀裕子***

1. ま え が き

閉鎖性水域における水質の悪化は、全国的問題として各地で発生している。特に、河川などからの流入負荷が大きい一方、潮汐に起因する入退潮流による混合が弱い汽水湖などでの水質悪化は著しい。こうした湖などでは、流入負荷量の減少を図ることが水質改善にとって本質的に重要なことは言うまでもないが、最近ではこれとともに湖底の堆積ヘドロの除去や導水による流入水量の増加なども各地で試みられている。一方、広い水面を持つ湖などでは、風の作用によりかなり高い風波が発生し、風の作用時、同時に生じる吹送流もまた海水交換を促すと考えられる。もしこれらが成立するとすれば、風波や吹送流は天然のエネルギーにより起こるものであるがゆえに、その利用はエネルギー効率から見ても非常に有効である。ここではこのような視点より、浜名湖の奥に広がる閉鎖性の湖である猪鼻湖を実例として、湖内にある舌状浅瀬周辺での波の作用下で海水浄化機能が働いていることを現地観測で調べるものである。この場合、特に新しい試みとして、湖内の微弱な流速測定に変わって海生生物が有効な観測指標となることを明らかにする。

2. 猪鼻湖の概況

猪鼻湖は、静岡県の浜名湖の北端にあり、浜名湖と狭い水路でつながった汽水湖である(図-1)。その面積は約5.4 km²、湖口部を除く湖の最大水深は約7 mであって、東西約2.5 km、南北約3.5 kmの規模を有している。猪鼻湖は猪鼻瀬戸でのみ浜名湖とつながった閉鎖性水域であり、また流域では生活雑排水や田畑からの流入負荷が大きいと、近年水質の悪化が著しい。

猪鼻湖の気象データとして湖に隣接する静岡県柑橘試験場での1993年の気象観測データを風配図としてまとめると図-2となる。風配図の作成においては、日平均風速を対象として風速5 m/s、10 m/sを限界値として、これ以上の風速の各方向別の出現日数(N)を示すととも

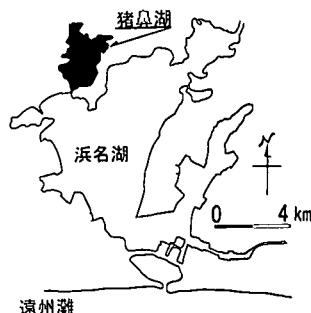


図-1 猪鼻湖の位置

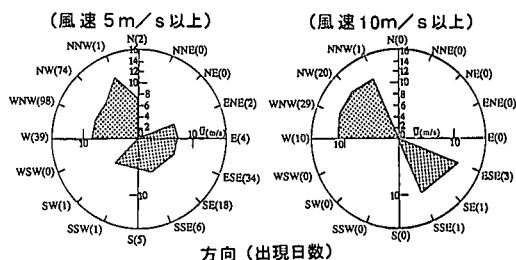


図-2 風配図

に、それぞれの方向別に平均風速を算出した。まず、5 m/s以上の風については、WNW, NWが高頻度であり、WおよびESEも卓越している。また、10 m/s以上の強風で見ると、WNWおよびNWが著しく卓越している。なお、浜名湖と接続する猪鼻瀬戸での潮位偏差は約60 cmである。

図-3には、1994年3月における猪鼻湖の湖底地形を示す。湖の南端にあって浜名湖と猪鼻湖とを分ける猪鼻瀬戸は、幅が約100 mの狭い水道である。その最深部は16 mと深い、狭窄部となっているため湖水の交換はよくない。また、図中のA-A'～D-D'は底質調査の測線を、P1～P6は水質、底質調査の測点を、拡大図に示す測点①～④は、水質・底生生物調査の測点である。

3. 猪鼻湖における潮流・水質観測

猪鼻湖での潮流観測は、1993年9月12日～28日に実施した。図-4にSt. 1～4で示す4測点にインベラー式

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長

** 正会員 三洋テクノマリン(株)コンサルタント部

*** 三洋テクノマリン(株)コンサルタント部

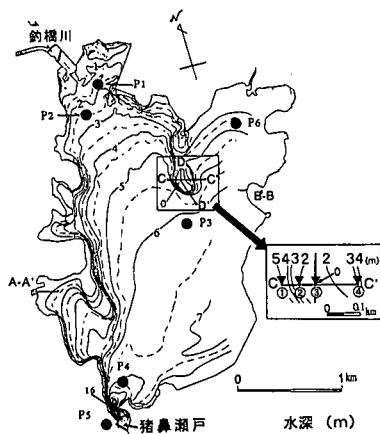


図-3 猪鼻湖の湖底地形と観測点配置図

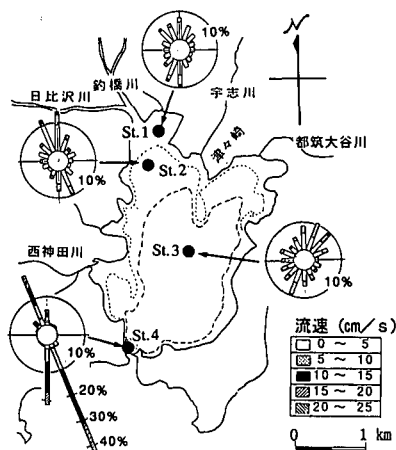


図-4 猪鼻湖における流向・流速出現頻度

自記式流向流速計を設置し、流向流速を10分間隔で15昼夜連続観測した。流速計はSt. 1, 2, 3では湖面下1mに、またSt. 4では湖面下1mと6mの2層に設置した。観測結果のうち、図-4には、上層における流向・流速の出現頻度分布を示す。この結果、猪鼻瀬戸のSt. 4では入退潮流による明瞭な周期変動が見られ、スカラー平均流速は11.2 cm/s (上層)であった。なお、下層については、7.9 cm/sであった。湖の中央部のSt. 3でも周期変動が見られたが、流速は高々10 cm/s以下であった。湖奥のSt. 2やSt. 1では流速はさらに低下する。潮流データの調和分解によると、主要4分潮の流速は湖内では3.1 cm/s以下と小さく、狭口水路周辺を除く湖の大部分では湖底地形変化に及ぼす潮流の効果は無視できることが分かった。1994年には、冬季(3月9日)と夏季(9月21日)に水質調査を実施した。調査測点は、図-3にP1~P6で示す6測点である。採水は、満潮時と干潮時の2回、バンドン式採水器により上層(水面下0.5 m)と下層(湖底面上1 m)で行った。塩分濃度は冬季には上下層とも平均30で成層は見られず鉛直混合が盛んであった。一方、夏季には上層の塩分濃度は平均14であるのに対し、下層では平均27と明らかに成層化していた。図-5には各測点ごとのCOD, DOの季節変化を示す。CODについては、冬季調査では1.6~2.0 mg/l (平均1.8 mg/l)で環境基準値(海域B類型: 3 mg/l)以下であるが、夏季調査では3.7~5.9 mg/l (平均4.9 mg/l)と環境基準を大きく越えている。また測点間の差は見られず、ほぼ一様な分布を示す。生物の生息に大きく関与するDOは、冬季調査では9.6~11.7 mg/l (平均10.4 mg/l)と上下層とも環境基準値(海域B類型: 5 mg/l)を満足していた。夏季調査では、0.5以下~9.0 mg/l (平均5.0 mg/l)であって、上層は平均7.8 mg/lであるが、下層は平均1.7 mg/lと貧酸素状態であり、生物が生息できる環境にはない。

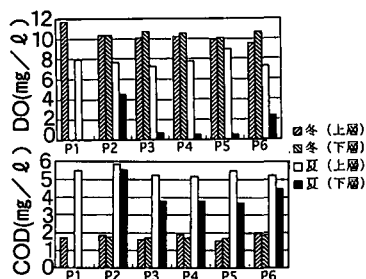


図-5 猪鼻湖におけるCODとDOの季節的变化

次に、P1~P6における底質の粒径加積曲線によれば、6測点の粒径は大半が0.1 mm以下のシルト・粘土で構成され、砂分はほとんど見られなかった。またその分布形は非常によく似ていたが、このことは、猪鼻湖では湖岸近傍を除く沖合部での堆積環境がほぼ同一であって、流入河川より供給されたシルト・粘土がゆるやかに堆積する環境にあると言える。

4. 猪鼻湖の舌状浅瀬周辺の底質特性

舌状浅瀬周辺の底質特性を調べるために、1994年の7月と11月に湖底表層の底質サンプリングを実施した。底質採取測線を図-3に示す。測線は全体で4本あり、これらのうち2本は比較用として湖岸近傍に、残り2測線は舌状浅瀬に設定した。東西の湖岸、入江の奥と岬の先端では波の作用状況がそれぞれ異なると考えられるので、測線A-A'は西岸の入江の奥に、一方、B-B'は東岸の岬状地形の頂部付近に設定した。測線C-C', D-D'は湖中央部の浅瀬上に位置するが、C-C'は浅瀬をほぼ東西方向に、またD-D'は南北方向に横断する測線である。

A-A'測線の底質粒度組成を図-6に示す。図には採取測線に沿う水平距離と水深を併せて示す。粒径についてはJISの分類に従い、礫は粒径が2 mm以上、砂は

0.075~2 mm, シルトは 0.005~0.075 mm, そして 0.005 mm 以下を粘土分とした。これによると, A-A' 測線では汀線近くは砂礫が 90% 以上を占めているが, 水深の増加とともにシルト・粘土の割合が急速に増し, 水深 0.6 m 以深では浅水域と逆に, シルト・粘土がほぼ 80% 以上を占め, 水深 1.7 m ではシルト・粘土が 95% にも達している。猪鼻湖での作用外力のうち, 流向・流速は, 湖口を除き高々 3.1 cm/s 以下と弱く, また風波フェッチが短いため波高は数十 cm 以下である。このため波浪作用は水深の大きな所まで及ばず, 波の作用が及ばない所では河川などから流入した浮遊性の物質が沈澱する条件にある。このため図-6 に示す底質粒度組成が得られたと考えられる。

同様に東岸の B-B' 測線の底質粒度組成を図-7 に示す。B-B' 測線では海底勾配が急であり, 沖合 100 m で水深 3.3 m となる。B-B' 測線でも 0.6 m 以浅では砂礫が 90% 以上を占め, シルト・粘土の含有率は非常に低い。一方, 水深 2.5 m 以深ではシルト・粘土の含有率が 95% 以上となって全く逆転する。以上のように, A-A', B-B' 測線の水深 0.6 m 以浅では砂礫が湖底面を覆っているのに対し, 0.6 m 以深ではシルト・粘土で覆われていることが分かる。底質が砂礫よりシルト・粘土へと変化する水深約 0.6 m は, 同様な規模を持つ湖である茨城県の酒沼の新沢島周辺での限界水深 (宇多ら, 1992) とほぼ同一であって, しかも湖岸線に沿ってそのような区域が帯状に広がることから, 主として波による底質淘汰作用により上述の結果が得られたと考えられる。この場合帯状区域の幅は図-6, 7 より判断して, 湖岸線より沖向きに高々幅 20 m と非常に狭いことから, 猪鼻湖の湖底のほとんどはシルト・粘土によって覆われている。

猪鼻湖の中央部沖にある舌状浅瀬の水深は約 1.3 m であって, 砂礫からシルト・粘土へと底質が変化する限

界の水深 0.6 m よりはるかに深い。従って上述の議論からすればここもシルト・粘土で覆われていてよい。このような推定のもとで底質サンプリングを行った。浅瀬を東西方向に横断する C-C' 測線に沿う粒度組成を図-8 に示す。C-C' 測線では点 C より約 140 m 離れた測点で最も浅く, 水深は約 1.3 m である。また断面形を調べると, 卓越方向である西側の方が急勾配であり, 0~100 m 間で 1/25 勾配で落ち込んでいる。断面内の粒度組成を調べると, 水深 1.3~3.5 m の間では, 砂礫の占める割合がほぼ 80% 以上と非常に高い。A-A', B-B' 測線での調査結果より判断すると, 通常では波の作用の及ぶことのない非常に深い所まで砂礫に覆われており, 水深 4 m 以深になってはじめてシルト・粘土がほとんど全部を占めるようになる。また, 砂礫の分布を見ると, 多少のばらつきはあるものの, 浅瀬の中心部より端部方向へ増大し, そこを過ぎるとシルト・粘土に激変する位置で極大値が表れている。この浅瀬周辺は猪鼻湖内でも最後まで優良な漁場とされていた場所であって, 比較的近年まで豊か

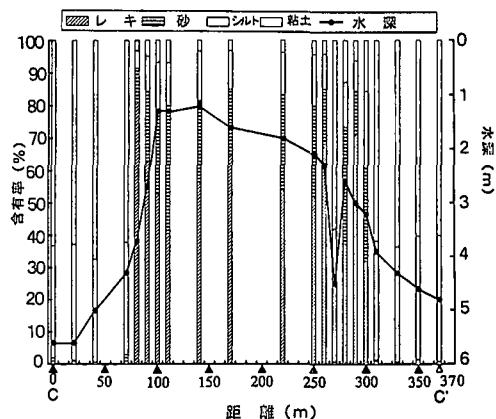


図-8 底質粒径含有率と水深の場所的分布

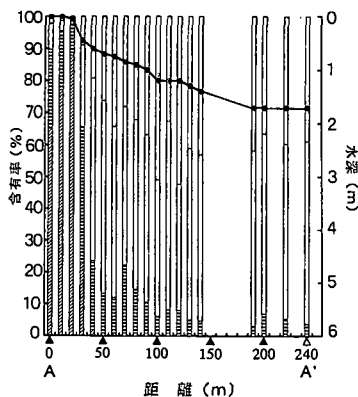


図-6

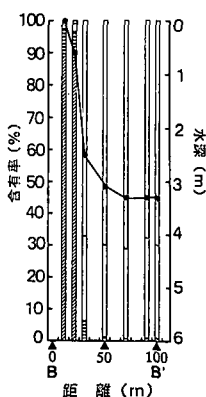


図-7

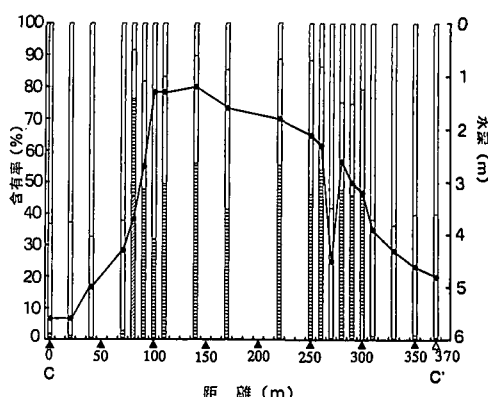


図-9

な生態系が残されており、カキやムラサキガイなどの繁殖も著しかった。このことは、逆に図-8の砂礫にはカキやムラサキガイ等の殻が多く含まれており、それが底質組成に影響した可能性が大きい。カキ殻等も JIS の分類では砂礫に分類されることから、粒度分析自体に誤差があったのではなく、その質が問題となる。そこで同じデータよりカキ殻等を除いて粒度分析を再度行い、図-9の結果を得た。これによると、水深 3.5 m 以浅の水域ではほとんどの測線で礫分はなくなり、約 50% を砂が、残りをシルト・粘土が占める。このことは、舌状の浅瀬に見られた礫はそのほとんどがカキ殻等であったことになる。この場合、砂礫の含有率が浅瀬の中心部ではなく、その外縁部が高かった点は、カキ等の生息もまたこの部分で良好であったことを意味している。結局、浅瀬の外縁部を中心としてカキ殻が密に分布していることから、その外縁部でカキやムラサキガイ等の生育が盛んであったと考えられる。生息・死滅したカキ・ムラサキガイかどうかは不明であるが、大量のカキ殻等の存在は少なくともごく最近までこの区域の湖底表層でカキ等の生育が盛んであったことを示す。

5. 舌状浅瀬での底生生物調査

前節で述べたように、舌状浅瀬の周辺では他の湖岸域と比較して生物活動が盛んことが推定された。そこで 1996 年 6 月 20 日、舌状浅瀬において底生生物調査を実施した。表-1 には各測点における水深、DO、塩分の測定結果を、また図-10 には底質粒度加積曲線を示す。測点①の水深 4 m (下層) では、DO が 1.5 mg/l であって、明らかに貧酸素状態にある。また水深 0.5 m (上層) においても他の測点と比較して DO は低い。湖底は、シルト粘土質からなっており、硫黄臭を呈し、生物の生息には適した状態ではない。このような環境を反映し、確認された底生生物は表-2 に示すように、汽水域の汚泥に生息し、汚濁に強い種である環形動物のイトエラスピオのみ 1 種であった。

水深 3.5 m の測点②では、上層と下層で DO はほぼ同量であり、貧酸素層は形成されてない。湖底は、カキ殻が多い砂泥である。底生生物としては 6 動物門 21 種が確認された。ここでの優占種は、軟体動物のホトトギスガイである(総出現個体数の約 87%)。この種は内湾の富栄養化水域に比較的多い種でありマット状に群生するため、貝と貝の間には環形動物や節足動物が多数生息する。当測点でも環形動物の *Polydora* sp., アシナガゴカイなどや、節足動物の *Corophium* sp. などが多数出現した。

水深約 1 m の測点③では、測点②と同様にカキ殻が多い砂泥で覆われている。底生生物は、合計 6 動物門 26 種が確認された。優占種は、測点②と同様に、軟体動物の

表-1 測点①~④における DO と塩分の観測値

測点	水深 (m)	DO (mg/l)	塩分
①	5	6.8	21.87
		1.5	29.48
②	3.5	8.8	21.35
		8.0	23.01
③	1	8.4	20.87
④	2.5	8.9	20.96
		8.0	21.79

(上段：水面下 0.5 m)
(下段：湖底上 1 m)

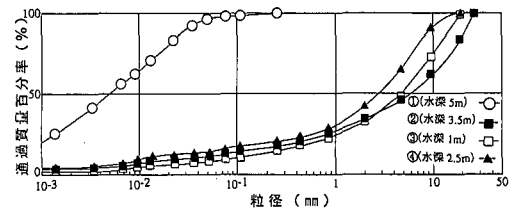


図-10 舌状浅瀬周辺における底質の粒径加積曲線

ホトトギスガイで、総出現個体数の約 58% を占めていた。またホトトギスガイの個体間に環形動物のマダラウロコムシ、モグリオトヒメ、アシナガゴカイなどや節足動物の *Corophium* sp., *Ampithoe* sp. などが多数出現した。水深 2.5 m の測点④は、表層と湖底の DO がほぼ同じであり、貧酸素層は形成されていない。湖底は泥質である。底生生物は合計 6 動物門 18 種が確認された。優占種は、測点②と同様に、軟体動物のホトトギスガイで、総出現個体数の約 77% を占めていた。またホトトギスガイの個体間に環形動物のマダラウロコムシ、アシナガゴカイなどや節足動物の *Corophium* sp. などが多数出現した。以上の 4 測点のうち測点①は他の 3 測点と大きく異なった環境条件を呈しており、上層・下層の塩分に差が見られたほか、下層の溶存酸素量が低く、貧酸素層を形成していた。また、底生生物もイトエラスピオが出現したのみであり、生物相は貧弱であった。測点②~④については、水深が 1~3.5 m の範囲にあるが、環境条件はほぼ似ており、DO にも大きな差は見られなかった。また、底生生物は各点 18~26 種の出現種が確認され、優占種は 3 測点ともホトトギスガイであった。ホトトギスガイの足糸や個体間の空隙には環形動物のマダラウロコムシやモグリオトヒメ、アシナガゴカイ、*Polydora* sp. などが多数生息しており、生物相はかなり豊富であった。また、測点②では、浜名湖の水産有用種であるアサリが 4 個体確認された。

6. 考 察

鈴木 (1963) は、湖内での吹送流の循環流パターンを非成層・成層期に分けて図-11 のように示した。非成層期には 1 つの、成層期には躍層を境に 2 つの循環流が生

表-2 測点①~④における底生生物分析結果

総重量: g +0.01 g未満		単位: 個体数, g/(0.5 m×0.5 m)							
No.	動物門	科	種名	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)
1	腔腸		イソギンチャク目 sp.		107	4.25	9	1.26	2
2	植物		樹形動物門 sp.				4	0.13	
3	同形	ウロコムシ	マダラウロコムシ		92	4.28	217	8.93	140
4		サシバゴカイ	マダラサシバ		8	0.02	16	0.02	33
5			アケノサシバ				16	1.43	
6		オトヒメゴカイ	モグリオトヒメ		24	0.52	307	3.31	19
7		カギゴカイ	ハナオカカギゴカイ		8	0.01			73
8		ゴカイ	ツルヒメゴカイ				1	0.05	2
9			アサナゴカイ		170	4.26	146	12.94	369
10		スピオ	<i>Polychora</i> sp.		469	1.87	53	0.15	46
11			ヤマトスピオ		24	0.04	12	0.01	
12			イトエラスピオ	133	0.67				
13		ミズヒメゴカイ	<i>Cirratulus</i> sp.		1	0.19	3	0.43	
14		イトゴカイ	<i>Capitella capitata</i>				76	0.10	
15		ケサリ	<i>Cirratulus</i> sp.				1	0.02	2
16		カンザシゴカイ	ミヅカサネカンザシ						5
17	陸生	ホウキムシ	<i>Phanous</i> sp.		22	0.07			144
18	軟体	タマガイ	ブドウガイ				4	0.71	
19		フネガイ	サルボウ		4	4.12			2
20		イガイ	ムラサキイガイ		2	0.16	194	83.12	7
21			コウエンカワヒバリガイ				12	6.97	
22			ホトギスガイ		21,760	535.90	9,028	2,015.47	6,703
23		イタボガキ	マガキ				1	5.96	2
24		マルスダレガイ	アサリ		4	0.18			
25		ニッコウガイ	ヒメシラトリ		2	0.06	1	0.11	
26	節足	フジツボ	タテジマフジツボ				4	3.43	
27			アメリカフジツボ		1	2.92	1	0.47	2
28		コノハエビ	コノハエビ		1	+	7	0.02	
29		ヒザナゴコエビ	<i>Amphithoe</i> sp.				343	0.35	
30		ドロクダムシ	<i>Corophium</i> sp.		2,254	0.96	4,977	2.18	1,206
31		ワレカラ	<i>Caprellia</i> sp.		8	0.02	8	0.01	0.69
32	原索	キオナ	カタクイイボヤ		9	28.71	11	12.33	
33		スナエラ	シロボヤ		17	97.91			1
個体数, 総重量合計				133	0.67	24,897	687.08	15,457	2,159.91
出現頻度合計				1	21	27	18	8,758	832.18

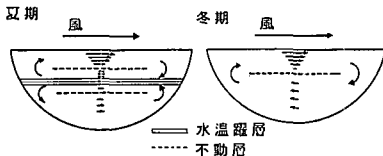


図-11 吹送流の鉛直循環パターン

じる。津田 (1974) も Mond 湖を例として西風によって起こる鉛直断面内での環流の模式図を示した。猪鼻湖では図-2 に示したように, WNW, NW, W および ESE 方向の風が高頻度で吹くから, それぞれの方向より風が吹くたびに図-11 のいずれかのパターンで吹送流が発達してよい。ところで, 舌状浅瀬の平均水深 1.3 m に対して, 浅瀬基部の水深は約 4 m であって鉛直方向に大きく突出しており, しかも浅瀬は少なくとも 100 m の広さを有するので, 表層付近で風の吹送方向と同じ向きに発達する吹送流を阻止し, 鉛直下方への潜り込みを促進すると考えられる。一方, 夏季, 猪鼻湖では水深約 4 m に躍層が生じる。従って非成層・成層期に係わらず, 吹送流さえ起こればその鉛直循環に伴い浅瀬周辺の水深約 4 m 以浅では表層付近の酸素を多く含んだ水が湖底へと供給されると推定される。このような吹送流の鉛直循環が浅瀬の周辺に存在すれば, 浅瀬の外縁部はサンゴ礁におけるリーフエッジと同様, 絶えず曝気された海水の交換が行われ, 生物の生息環境は浅瀬の中より良い。このため浅瀬の外縁部においてカキやムラサキイガイの生育が助長されたと考えられる。また, 以上の点は, サンゴの生息がリーフエッジ周辺で盛んであって, そこでサンゴ礁の発達が著しこと (高橋, 1988) とよいアナロジーが

成立する。

本研究では, 礁の周辺での吹送流を直接的に測定してはいないが, この礁の周辺では他の湖岸域と比較してはるかに深い場所まで生物活動が盛んになることが生物調査から明らかになった。これらの底生生物は, 酸素の供給が途絶えれば直ちに死滅することから海水交換の存在を間接的に測定したことと同意義と考えられる。このことは, 微弱な流速を測る代わりに, 生物指標を生物調査で調べれば海水交換特性を間接的に測定することが可能であることになる。また, 本研究によれば, 湖底地形が急変して浅くなる場所では吹送流の鉛直下方への潜り込みが生じ, それに応じて上層の酸素を多く含む水が下層へ供給され, それが水質改善効果を発揮する可能性が見いだされた。このことは, 将来的に, 湖底の形を工夫する

ることによる, このメカニズムの応用が考えられる。これが可能となれば, 風波や吹送流は天然エネルギーにより起こるものであるがゆえに, 高い合理性を有すると考える。

7. ま と め

猪鼻湖では北部より湖内へ突き出している舌状浅瀬の周辺部で生物の生息が活発であり, その原因が風の作用と同時に生じる吹送流の鉛直下方への潜り込みにもなう湖水交換と関係すると推定された。この浅瀬以外の湖の縁部では, 水深ほぼ 0.6 m 以浅でのみカキ殻を含む砂礫が現れ, それ以深ではシルト・粘土からなっていた事実, あるいは水質調査によれば深部では貧酸素状態となって生物の生息が不可能な状態にあるにもかかわらず, 舌状浅瀬の周辺では水深 3.5 m 付近まで活発な生物活動が見られる事実, さらに舌状浅瀬の外側ほどカキ等の生息密度が高かった事実などは, 上述の推定の合理性を裏付けていると考えられる。

最後に, 本研究を遂行するに当たり多大なご協力を頂いた浜名漁業協同組合二橋恒夫氏, 三ヶ日町役場都市計画課の皆様へ深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇多高明・山本幸次・畑中達也 (1992): 湖沼北岸親沢砂嘴の 1993 年～1990 年における変形特性, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 386-390.
- 鈴木静夫 (1963): 日本の湖沼, 内田老鶴圃, 244 p.
- 高橋達郎 (1988): サンゴ礁, 古今書院, 258 p.
- 津田松苗 (1974): 陸水生態学, 共立出版 (株), 180 p.