

閉鎖性内湾の海水交換について

—日向湖の水質改善—

中村 充*・乃万俊文**・萩野 静也***・吉沢 裕**

1. 結 言

海域の環境保全，環境改善による漁場生産力の維持，増大は非常に重大な今日的命題となっている。漁場における水質環境，底質環境を支配する最も大きな条件は，海水の実質交換である。筆者らは，この問題を取り上げ一連の研究を開始した。今回は閉鎖性内湾の海水交換について，問題提起を含め福井県日向湖における実例を報告する。その研究内容の大略を示せば次のようである。

- (1) 日向湖における生物による DO 収支と物理的 DO 収支機構
- (2) 日向湖における水深別 DO 消費特性
- (3) 希釈過程における，DO と COD の収支機構
- (4) 湾口密度流
- (5) 選択取水問題
- (6) 海水交流，交換量の算定
- (7) 上記による日向湖改善工法の検討である。

本研究に多くのご協力を頂いた福井県水産課および水産試験場の各位にお礼申し上げます。

2. 日向湖の水質特性

日向湖は福井県三方五湖の一つで 図-1 に示すように，面積 0.95 km²，最深部 -40 m のカルデラ湖で日向水道を通じて日向湾につながり，また嵯峨隧道を通じて水月湖につながっている。

日向湖は高カン低温の下層水が上層水と分かれ，上層水はさらに水月湖からの淡水流入の影響を強く受ける湖奥水と外海の影響を直接受ける湖口水に分けられる。下層水はほぼ水深 15 m 層以下に存在し，温度変化による対流圏の下にあり，上層水流動による混合拡散域の外にある。したがってこの層は無酸素で有機汚染，硫化物汚染の進行した水層である。この水層の影響が季節的あるいは気象条件によって消長し，時として表層に達し水産被害をもたらす。このような水層の形成は 図-2 に示すようなスリ鉢状の地形と水月湖からの淡水流入が大きな影響をもっている。このことは，日向湖が嵯峨隧道改修後大きな影響を受けていることから判断される。日向湖は夏季水温および淡水によって安定した成層を行ない，これが夏から秋季にかけて気温の降下に伴って上層水温が降下し密度を増加して反転する。このとき降下反転する水層は表層水の塩分濃度に関係し，嵯峨隧道改修後において無酸素層が 10 m 程度浅くなっているのは，同隧道改修によって淡水流入が多くなり反転深が浅くなったことが影響しているよう。また，日向水道では外海水と湖内水との密度差による湖内への流入は潜流，あるいは噴

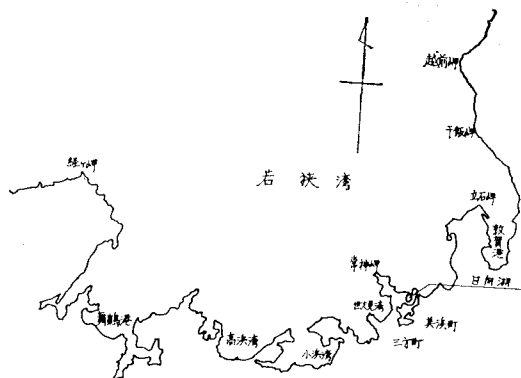


図-1 日向湖位置図

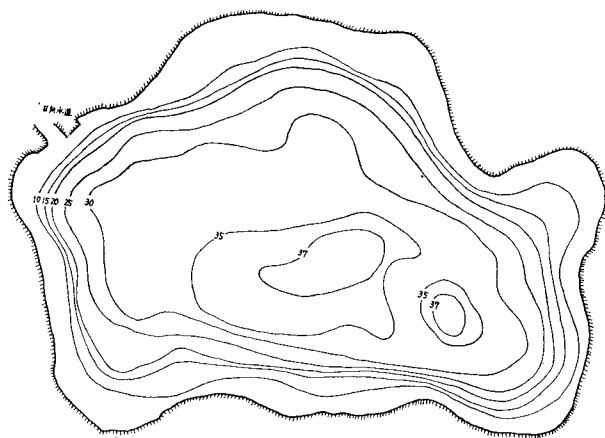


図-2 日向湖深浅図

害をもたらす。このような水層の形成は 図-2 に示すようなスリ鉢状の地形と水月湖からの淡水流入が大きな影響をもっている。このことは，日向湖が嵯峨隧道改修後大きな影響を受けていることから判断される。日向湖は夏季水温および淡水によって安定した成層を行ない，これが夏から秋季にかけて気温の降下に伴って上層水温が降下し密度を増加して反転する。このとき降下反転する水層は表層水の塩分濃度に関係し，嵯峨隧道改修後において無酸素層が 10 m 程度浅くなっているのは，同隧道改修によって淡水流入が多くなり反転深が浅くなったことが影響しているよう。また，日向水道では外海水と湖内水との密度差による湖内への流入は潜流，あるいは噴

* 正会員 農博 農林省農業土木試験場水産土木部

** 正会員 農林省農業土木試験場水産土木部

*** 農林省農業土木試験場水産土木部

流となり、海水交換に影響する。このように日向湖の水質問題は密度流に大きく支配されることが考えられ、その改善策も密度流現象を十分に把握したうえで検討されることが必要である。

3. 溶存酸素の収支機構

(1) 溶存酸素の日変化

日向湖漁場の水質環境改善工法を検討するには、夏季から秋季にかけて発達する無酸素水塊の変動と日向湖の基礎生産力¹⁾の特性を知らなければならない。そこで昭和46年9月に湖内中央部で溶存酸素量の測定調査を行ない、その結果について検討した。

昭和46年9月15日午前6時から17日14時まで日向湖中央部において、上ぶたのついた直径50cmの不透明および透明なビニールの筒を水深30mまで垂下し、その筒の中の溶存酸素量の変化を4時間おきに観測した。すなわち不透明な筒は植物プランクトンの呼吸量を知るために、流れ、光および空気を完全に遮断した(以下これをDテストと呼ぶ)。透明な筒は植物プランクトンの同化量と呼吸量の差を知るために流れおよび空気を遮断

した(以下これをLテストと呼ぶ)。この他に特別の条件を与えないそのままの状態では溶存酸素量を測定した(以下これをUテストと呼ぶ)。これらの測定と同時に塩素量、水温、クロロフィルaの測定も行なった。

Uテストで測定した溶存酸素量の時間的変化を図-3に、各測定時刻ごとのU、L、Dテストの鉛直分布を図-4に示す。まず図-3より日向湖における溶存酸素量の時間的変化は水深3mまでは大きく変化するが、水深5m以深では変動量は小さいことがわかる。そして水深3mまでは溶存酸素量の日変化が顕著に認められる。

図-4の鉛直分布から水深約2~3m層に溶存酸素の躍層があるということが明瞭に認められる。またL、Dテストの値はほぼ一致していて、しかも時間の経過に伴って溶存酸素量は減少していく。これから日向湖における基礎生産力は小さいであろうということが推定される。

次に日向湖の基礎生産の状態を知るためにUテストの溶存酸素の変化を考える。平面的移流・拡散も定常的周期現象と考え、この現象下での鉛直拡散を問題とする。さらに鉛直移流項は拡散係数 K_z に含めて議論する。そうすると次式のような拡散モデルとなる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q$$

上式で $\partial c / \partial z \sim \partial^2 c / \partial z^2$, $\partial K_z / \partial z \times 10^2 \sim K_z$ であるから式(1)のように表わされる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + Q \quad (1)$$

ここに、 C : 溶存酸素量, K_z : 鉛直拡散係数, Q : 溶存酸素の供給と消費量。

式(1)を日単位で時間平均をとる。

$$\overline{\frac{\partial c}{\partial t}} = K_z \frac{\partial^2 \overline{c}}{\partial z^2} + \overline{Q}$$

ここで、 $\overline{Q}$ の日変動は周期的であるとして濃度変化率において $\overline{Q} = 0$

よって、

$$K_z = \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2)$$

式(2)によって各時刻、各水深別の拡散係数を求めると表-1のようになる。表中 K_z に負のものがあるが、これは平面的移流・拡散の完全周期性の仮定などによるバラツキと考えられるので K_z としてこれらの代数平均をとる。この結果より1日当りの平均鉛直拡散係数を計算すれば約 $0.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。この値を逆に式(1)に代入して溶存酸素の供給と消費の日変動を計算すると表-2のようになる。

この表より昼は溶存酸素が供給され、夜は溶存酸素が

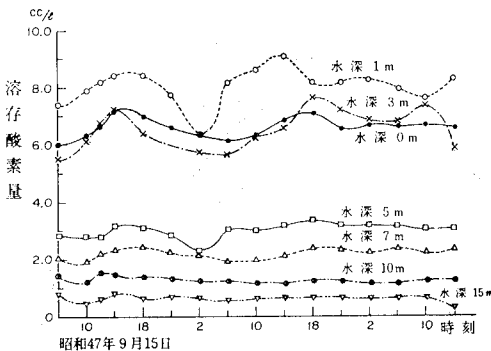


図-3 溶存酸素量の時間的変化

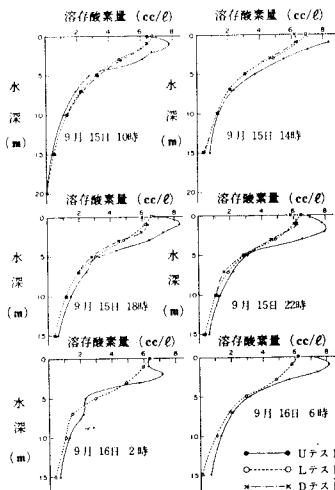


図-4 溶存酸素量の鉛直分布

表-1 溶存酸素の鉛直拡散係数

水深	時刻	10	14	18	22	2	6	10
1 m	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	3.65	1.74	-2.08	-7.29	1.22	7.81	3.13
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	-27.5	-19.5	-21.0	-11.00	0.9	-31.5	-36.0
	K	-0.13	-0.09	0.1	0.66	0.14	-0.25	-0.09
2	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	3.47	3.82	0.69	-2.26	-2.78	0.0	3.65
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	-4.0	-9.5	-0.98	-15.0	-22.5	-3.0	-0.5
	K	-0.87	-0.4	-0.08	0.15	0.12	0.0	-7.3
3	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	2.08	4.17	1.56	-1.91	-2.6	-0.17	2.78
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	1.5	-2.0	-7.5	-11.0	-11.5	0.0	0.5
	K	1.39	-2.09	-0.21	0.17	0.23	—	5.56
4	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	1.04	1.39	-0.69	-2.95	1.39	3.82	1.22
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	6.5	7.0	12.0	15.5	16.5	1.0	2.0
	K	0.16	0.2	-0.06	-0.19	0.08	3.82	0.61
5	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	0.52	0.52	0.0	-2.43	0.35	2.78	1.04
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	3.0	7.5	6.0	4.0	6.0	5.0	5.0
	K	0.17	0.07	0.0	-0.61	0.06	0.56	0.21
6	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	1.22	0.69	-0.52	-1.91	-0.35	1.39	1.22
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	1.0	0.5	1.5	1.5	0.5	2.5	2.5
	K	1.22	1.58	-0.35	1.27	-0.7	0.56	0.49
7	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	1.22	1.04	-0.69	-1.74	-0.69	0.69	0.69
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	0.5	0.5	1.0	1.0	2.0	1.5	1.5
	K	2.44	2.08	1.38	-1.74	-0.69	0.35	0.46
8	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	1.04	1.39	-0.69	-1.39	-0.69	0.17	0.17
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	1.0	0.0	0.0	0.5	0.5	1.0	0.5
	K	1.04	—	—	-2.78	1.38	0.17	0.34
9	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	0.52	1.39	-0.52	-1.22	-0.52	0.0	-0.17
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	0.0	0.5	0.0	1.0	0.5	0.0	1.0
	K	—	2.78	—	-1.22	-1.04	—	-0.17
10	$\frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2}$	0.17	1.39	-0.17	-0.87	-0.69	0.0	-0.17
	$\frac{\partial c_m}{\partial z}$	1.0	1.0	0.0	-0.5	-0.0	0.5	0.0
	K	0.17	1.39	—	1.74	—	0.0	—

平均拡散係数 $K=0.14$

表-2 プランクトンによる溶存酸素の生産と消費

水深	時刻	10	14	18	22	2	6	10
1 m		6.4	3.69	0.02	-6.19	1.13	10.96	6.73
2		3.87	4.77	0.78	-0.76	-0.53	0.3	3.7
3		1.93	4.37	2.31	-0.81	-1.45	-0.17	2.73
4		0.39	0.69	-1.89	-4.5	-0.26	3.72	1.02
5		0.22	-0.23	-0.6	-2.83	-0.25	2.28	0.54
6		1.12	0.64	-0.67	-2.06	-0.40	1.14	0.97
7		1.17	0.99	-0.74	-1.84	-0.79	0.49	0.54
8		0.94	1.39	-0.69	-1.44	-0.64	0.07	0.12
9		0.52	1.34	-0.52	-1.12	-0.57	0.0	-0.27
10		0.07	1.29	-0.17	-0.82	-0.69	-0.05	-0.17

消費されるという傾向が顕著に認められる。また、式(1)における鉛直拡散項の order は 10^{-5} であり、これは Q と同じ程度であることがわかる。

(2) 溶存酸素の月別変化

次に月別の溶存酸素の変動について考察する。用いた資料は昭和44年～46年に水試において調査したものである。この主なものをあげたものが図-5である。

図-5は水温、塩素量、溶存酸素の月別変化を示す。左側は表層における変動幅に対する各層の変動幅の比を求めたものである。溶存酸素の変動幅は5m深が最も大きい。これらのデータから対流などの物理的变化の生じている10月を除いて、月別に日向湖に供給消費がどのように起こっているかを調べる。解析は日変動にならって

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} = K_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} + Q_m \quad (3)$$

ただし、 t は月単位程度の長さで考える。経年的に考えれば定常と考えられるから年間を通しての平均を

$$\left\langle \frac{\partial c_m}{\partial t} \right\rangle = \left\langle K_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} \right\rangle + 0 \quad (4)$$

$$\overline{K_m} = \left\langle \frac{\partial c_m}{\partial t} \right\rangle \quad (4)$$

この値を温度 T 、塩素量 Cl 、溶存酸素 DO について求めたのが図-6である。これを用いて式(4)から $\overline{K_m}$ を

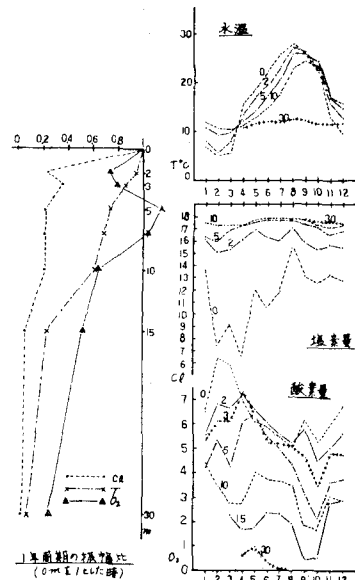
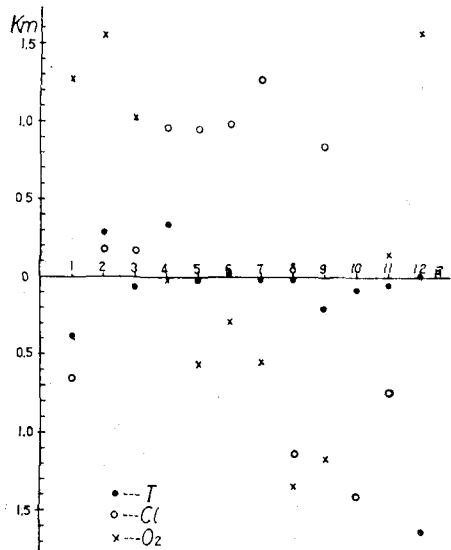
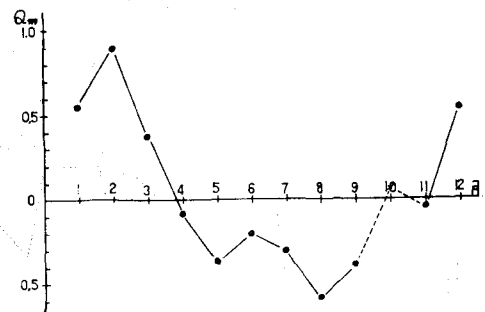
図-5 T, Cl, DO 月変化図図-6 T, Cl, O_2 見かけの鉛直拡散係数

図-7 溶存酸素月別供給消費図

計算する。なお10月には対流期に当たるので、この月を除いて平均すると $\overline{K_m} = 0.157$ となる。この値と式(3)を用いて月別の供給、消費を求めたのが図-7である。図中10月の点は年間消費供給が平衡しているものとして定めた。この図から冬季12月～3月は溶存酸素の供給が大きく4月～11月は消費が卓越する。10月は対流により上下層の反転が起こっている。

(3) 溶存酸素消費特性

湖内水の溶存酸素の収支機構を解明する一方法として、日向湖固有の DO 消費特性を県水試昭和44年度の調査結果より求めた。

昭和44年8月5日～12日の台風7号により、湖内15m以浅は完全に混合されたことが図-8によりわかる。8月12日の観測において各層の DO は飽和し、その後日向湖固有な水深ごとの DO 消費によって消費され、各層は安定した DO を保った。

DO 消費が安定するのは、約40日ぐらいであるが図-9に見られるように σ_t の比較的安定し移流拡散効果の受与されていない時をとる。

$$\text{現象の式} \quad \frac{dO_2}{dt} = KO_2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{消費係数は} \quad K = \frac{1}{t} \ln \frac{O_2}{O_f} \dots\dots\dots (6)$$

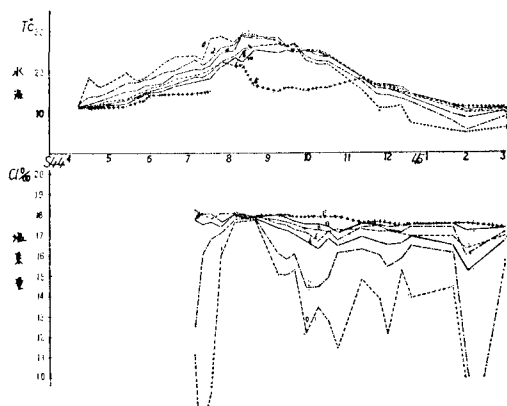


図-8 昭和44年度 T, Cl 観測図

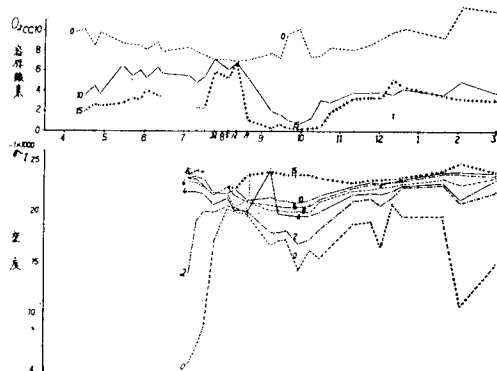


図-9 昭和44年度 DO の観測図

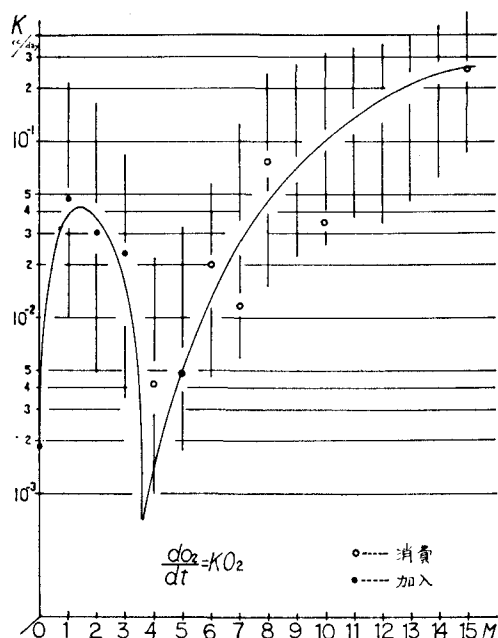


図-10 水深別 DO 変化特性曲線

で表わすことができる。

ここに、 K : COD を含む消費係数(1/day)

O_f : 初期の DO (cc/l)

O_2 : 時刻 t の DO (cc/l)

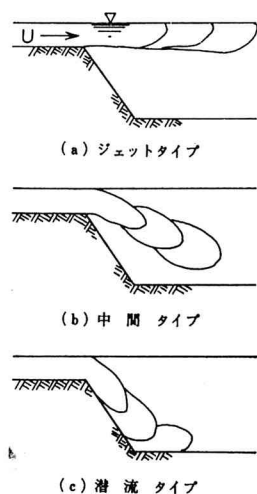
t : 経過時間 (day)

図-10 は水深による DO 変化特性曲線図である。

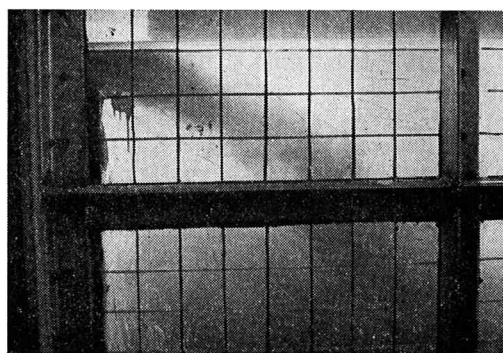
4. 湾口密度流^{2),3)}

日向湖漁場に流入する外海水は、湖内表層水より密度が大きい。このような流入水の流れのパターンは湖口における水理条件によって図-11 に見るように、ジェットタイプとして表層をすべる場合、潜流タイプとして底層をほう場合、およびこれらの中間タイプとに分けられる。これらタイプの類型化は、海水交換と交換率の評価、すなわち実質交換率を求めるに重要である。たとえば、ジェットタイプであれば慣性力によって湖奥にまで外海水を到達させるが、大きな湾口流速流量を要する。潜流タイプの場合、海水が密度境界層に入り込み、流出時にはポテンシャル流として表層水の流出が多くなり、交換率は密度差のない場合に比し大きくなるであろう。このような流入タイプにおける海水交換については現在研究中である。ここではまず、湾口水理特性⁴⁾と流れのパターンを実験的に求め類型化する。

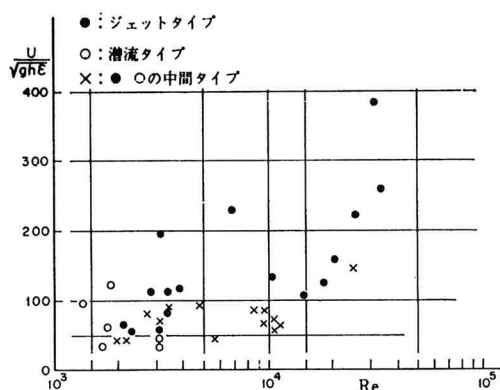
実験は、長さ 22 m、幅 1.8 m、深さ 2 m の水路に湾口模型を設置し、ローダミンで着色した水を流し、そのプリュームの時間的変化を調べた。外海水に相当する染料水は、内湾水にみたと淡水より $10^{-7} \sim 3 \times 10^{-7}$ 程度密



図—11 湾口密度流入タイプ



写真—1 中間タイプ



図—12 湾口密度流類型化

度を重くした。実験結果は 図—12 のようであり、図中縦軸は内部フルード数 F_r 、横軸はレイノルズ数 R_e である。

ここに、

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{\varepsilon g h}}, \quad R_e = \frac{U h}{\nu} \dots \dots \dots (7)$$

U : 湾口流速, h : 湾口水深,

g : 重力の加速度, ν : 水の動粘性係数,

$\varepsilon : \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$, ρ_1 : 淡水の密度,

ρ_2 : 染料水の密度.

本地区の流入のタイプは、昭和47年10月の観測値より

$$h = 200 \text{ cm}$$

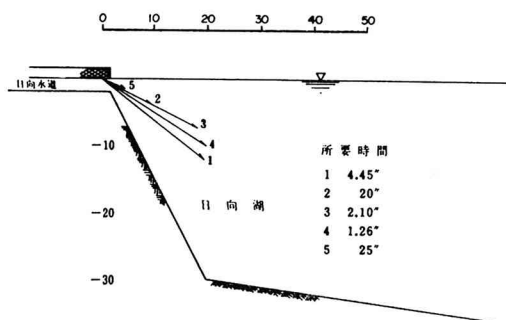
$$U = 80 \text{ cm/sec}$$

$$\nu = 0.0092 \text{ ポアズ}$$

$$\varepsilon = 0.00648$$

よって式(7)より、 $R_e = 2.2 \times 10^6$, $F_r = 0.28$.

図—12 より本地区の流入タイプは、潜流タイプとなることがわかる。このことは、昭和47年11月26日のフロートの流向流速観測の結果(図—13 湖口流向流速図参照)から裏付けられる。



図—13 湖口流向流速図

日向湖の場合、ジェットタイプとして外海水を湖奥まで到達させるほど湖口流速を速くすることはできない。よって海水の交換を考えると外海水を潜入させ、徐々に湖奥まで進ませ、流出水は湖口で流入下層水を連行しないように流出させれば、交換率は非常によくなることがわかる。

5. 日向湖における水質改善の諸問題

日向湖水質改良のための諸工法は、日向水道を改修して日向湾との交流交換を改善する。日向湖に淡水流入をもたらす嵯峨隧道を遮断する。底層汚水をポンプで排除する。底層水を表層に湧昇させて曝気を促進するなどがある。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 日向水道の改善案

日向水道を浚渫し、水深あるいは水道幅の増大によって海水の交流、交換量を増大する計画については、交流量⁵⁾の立場から現況(水深2m)で大潮時 $3.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、小潮時 $1.89 \times 10^5 \text{ m}^3$ の交流量があり、水深を4mに増大しても1%程度の増加に止まる。また海水交換の立場から見ると湖口を拡大すると、現況大潮時平均流速29.9 cm/sec が水深4mに改造後15.1 cm/sec となり流速が小となる。このため、外海水の湖内到達距離は短くなる。

他方、湖内水と外海水の密度条件から湖口流入海水は潜流となり、水質躍層に供給されるので、流出時表層水を流出させることによって交換量の増大がはかられる。表層流のみを流出させるための限界流速⁷⁾は、現況条件で 31 cm/sec であり、現況流速 30 cm/sec に対し最適条件に近い。水深 4 m に改造すれば限界流速は 9 cm/sec となり、流入外海水が次の落潮で流出することになり、海水交換率を悪くする。以上の検討から水質改善の立場からは、現況日向水道の改造は望ましくない。

(2) 底層水排除による水質改善

高カン、低温で高密度のため、天然の条件では改善されることのない底層汚水をポンプによって改善する工法である⁷⁾。日向湖の漁場としての利用水深を 10 m とし、この層の最小 DO を 4.0 cc/l 以上に保つための水理条件は、10 m より上層水の旬別 DO 曲線と 図-10 の DO 消費特性から、ポンプ容量 0.62 m³/sec、吸込口は口径 60 cm、100 cm 程度のとき設置水深を 11.5 m 以下とすれば、底層汚水のみを排除して利用水深を 10 m にできる。

(3) 上下層の混合による水質改良

底層汚水を表層にポンプアップして表層曝気を促進し、水質を改善する方法は、COD と DO の関係として基礎実験を行なったが、硫化物の折出その他多くの問題があり実用化のためにはまだ問題が残される。

(4) 淡水遮断

嵯峨水道を遮断して淡水流入を防止することは、密度成層を緩和するので有効であるが、これは水月湖の洪水排除に関する行政問題であり、ここではふれない。

6. 結 語

以上、日向湖の水質改善についての検討を行なった。具体的に数量化して結論を得たもの、まだ定性的傾向の把握に止まり検討の余地を残したものがあるが、本調査研究によって多くの重要な問題の摘出と検討が行なわれた。閉鎖型湾における水質改善の重要な問題の一つとして湾口密度流がある。今回はその類型化に止めたが今後、流入、流出時の希釈混合問題および、これに基づく海水交換の解析を行なう予定である。

参 考 文 献

- 1) David A. Bella: "Dissolved oxygen variation in stratified lakes", Proc. A. S. C. E., Vol. 96, SA 5, 1970.
- 2) Harleman, D.F.: "Stratified flow," Handbook of Fluid Dynamics, New York, McGraw-Hill, p. 26.2-26.21, 1961.
- 3) 岡田光世: 水月・日向両湖における海水の潜入と水月湖における硫化水素の発生.
- 4) Henry Stommel and Harlow G. Farmer: "Control of Salinity in an Estuary by a Transition", Journal of Marine Research, p. 13-20, 1953.
- 5) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 海水交流の一解析法, 第12回海岸工学講演会講演集, 1965.
- 6) Gariel, P.: "Experimental research on the flow of non-homogeneous fluids", La Houille Blanche, Jan. Feb, p. 56-64, 1949.
- 7) 中村 充・乃万俊文・不破政一: 底層水の選択取水に関する研究, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973.