

## 中海における塩分変動について

長谷川紘一\*・田中宏平\*\*

昭和57年7月31日受付

### On the Characteristics of the Salinity Fluctuation in Lake Nakaumi

Kōichi HASEGAWA\* and Kōhei TANAKA\*\*

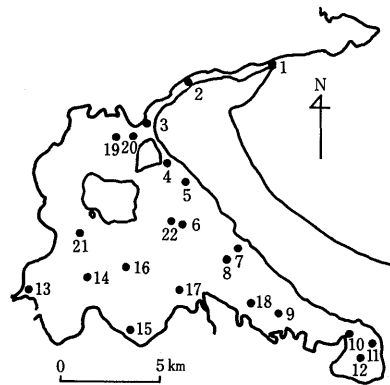
This paper deals with the characteristics of the salinity fluctuation in Lake Nakaumi. A long term observation has been carried out in order to protect Lake Nakaumi from water pollution. The results are summarized as follows.

- 1) A weak correlation was observed between total annual rainfall and mean annual salinity.
- 2) Vertical transport of dissolved materials is obstructed by the presence of a salinity spring layer.
- 3) From the salinity data at Nakaura Gate, wind has a strong affect on the salinity diffusion in Lake Nakaumi.
- 4) In Yonago Bay, because of small tidal flushing, water pollution has gradually increased.

#### ま え が き

汽水湖中海は鳥取、島根両県にまたがり、境水道によって日本海とつながっており、水面積97.5km<sup>2</sup>、平均水深5.4mで、現在農林水産省により淡水化事業が実施中である。淡水化が完了すると、水面積66.3km<sup>2</sup>、貯水容量3.0×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>の淡水湖が造成されることになる。

この水域においては第1図に示す各測点で、昭和46年度から水質汚濁防止法第16条に基づく水質測定が行政諸官庁により実施されている。また農林水産省においては、淡水化事業の一環として中浦水門の上、下流に水質測定用の観測塔を設置し、昭和56年4月より測定を開始している。ここではこれらのデータを用いて、中海の塩分変動について考察を行ってみた。



第1図 測点位置図

\* 鳥取大学農学部農業工学科農業水利学研究室  
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University

\*\* 九州大学農学部農業工学科排水干拓工学研究室  
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Kyushu University

### 中海の水質現況について

湖沼はその水質より大別して次の4つの型に分類される。<sup>7)</sup>

- 1) 貧栄養型
- 2) 富栄養型
- 3) 中栄養型
- 4) 酸栄養型

貧栄養湖とは、水に溶けている栄養塩類が少ないので、プランクトンをはじめとする水生の生物が生息しにくい湖である。水は藍色または濃緑色をしており、透明度も10~30m程度のもが多い。水に有機物が少ないので、水中の酸素もあまり消費されることもなく、水底までほとんど飽和状態である。この型に属する湖としては、摩周湖、十和田湖、田沢湖、中禅寺湖、琵琶湖などがある。

富栄養湖とは、水に多量の栄養塩類が溶け込んでおり、プランクトンをはじめ多数の水生の生物が生息している湖である。水は緑色または黄緑色をしており、透明度は1~3mと低い。夏になると水中の有機物が分解するた

めに、水中の酸素が消費され、中層から深層にかけて水中の酸素がなくなり、湖底では無酸素に近い状態になる。この型の湖としては、霞が浦、諏訪湖、山中湖、手賀沼、湖山池などがある。

中栄養湖とは、貧栄養湖と富栄養湖の中間の湖であり、例えばサロマ湖、阿寒湖、十三湖、河口湖、池田湖などがこれに属する。

酸栄養湖とは、火山地方にあって、硫酸や塩酸などの無機酸がたくさん溶けているので酸性の強い湖である。この型の湖は活火山や温泉の多い東北地方に多く存在し、西日本では霧島山系の不動池があるのみである。水は濃藍色から青色に白い絵具を流したようなものまでである。例えば屈斜路湖、恐山湖、毘沙門沼、猪苗代湖、不動池などがこの型である。

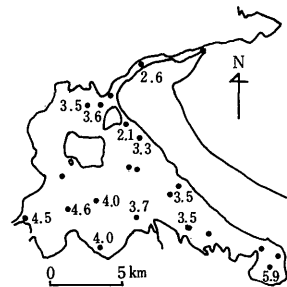
理科年表<sup>8)</sup>によると中海は富栄養型に属している。中海の中央部に位置する測点 No. 16 (第1図参照)における、昭和55年度の水質の周年変化<sup>6)</sup>を第1表に示すが、やはり富栄養型の水質を呈している。

第1表 水質の周年変化 (No.16の上層)

項目	55年									56年		
	4.24	5.20	6.23	7.24	8.26	9.26	10.29	11.27	12.16	1.21	2.19	3.11
気温 (°C)	16.0	22.2	26.7	29.5	27.0	22.0	14.5	11.9	6.2	5.5	7.3	7.5
水温 (°C)	15.0	19.4	24.5	28.5	25.0	21.4	14.2	12.8	6.0	3.6	6.8	7.2
PH	8.9	8.5	8.4	8.4	9.0	8.9	7.9	8.4	7.8	8.1	7.7	8.1
DO (ppm)	10	8.6	8.7	7.9	8.4	9.3	8.9	10	8.5	12	11	11
COD (ppm)	3.6	5.9	4.4	4.1	5.4	4.0	3.9	4.3	4.1	2.2	2.9	2.6
BOD (ppm)	4.3	3.8	3.9	2.6	4.6	3.2	2.2	4.1	1.7	3.2	3.4	3.4
SS (ppm)	10	8	9	5	10	6	9	9	7	5	7	6
T-P (ppm)	0.041	0.060	0.053	0.061	0.044	0.047	0.084	0.051	0.037	0.035	0.040	0.040
Cl- (ppm)	8,000	9,600	8,800	6,100	4,800	4,600	10,000	8,400	9,800	9,900	8,700	8,000

注) データは 昭和55年度 島根県資料による

第2図は昭和55年度の水質調査結果のうち、代表値として水質汚濁度の指標となるCOD(化学的酸素要求量)をとり、その年間平均値の水平的分布を示したものである。これによると、最も水質汚濁の進んでいるのは米子湾中央部のNo. 12であり、年平均値が5.9ppmとなっている(最小値3.0ppmから最大値11.0ppmと変動も激しい)。汚濁度の最も小さいのは渡地先のNo. 4の年平均値2.1ppmである。米子湾の水質汚濁が進んでいるのは、新加茂川、旧加茂川などにより米子市街地の都市下水が集められて、米子湾に流入する結果と思われる。それに中海



第2図 COD分布図(単位ppm)

の湾奥部に位置しているの、海水による水質浄化作用が小さいことも原因として考えられる。

また伊達等の研究<sup>1)</sup>によると、淡水と塩水の混合する水域である汽水湖中海では、水深2.0~4.5mに塩分躍層が存在するため、溶存物質の鉛直輸送が阻害されている。それに底層では夏期  $PO_4-P$  が著しい増加をするが、これは夏期高温による水中での有機物質の分解無機化と、底質(ヘドロ)からの溶出によって生じると報告されている。

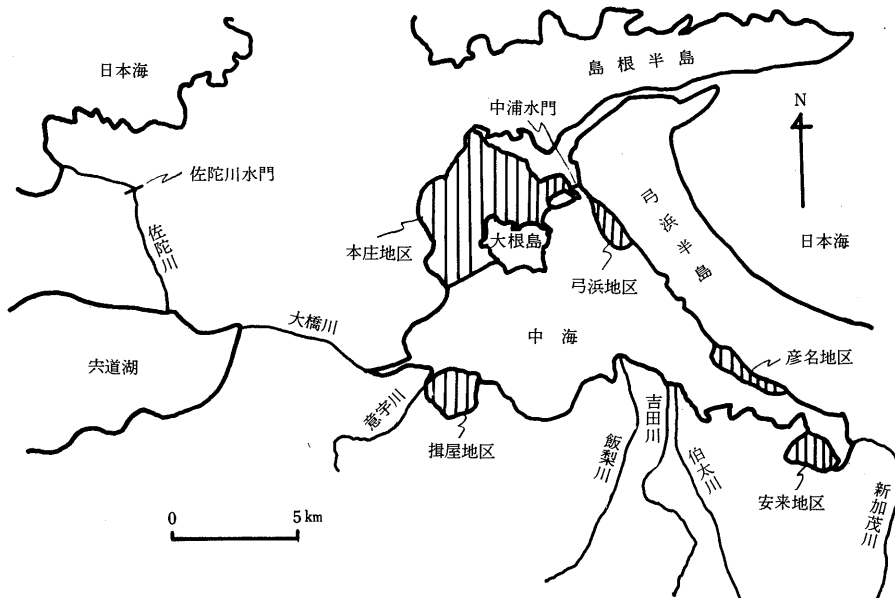
### 淡水化計画について

中海・宍道湖の淡水化が叫ばれるようになったのは、昭和初年大橋川の浚渫によって塩水が宍道湖へ逆流するようになり、宍道湖沿岸の既耕地が用水源を失ったときに始まる。それ以来、早ばつのたびに開発計画が立案されてきたが、治水、漁業、観光その他の理由で実現するに至らなかった。その後昭和29年に、島根県はより高度な産業構造への発展を期して、中海・宍道湖の大規模干拓並びに淡水化と斐伊川の治水対策を結びつけた、斐伊川・宍道湖・中海総合開発計画を、また鳥取県は中海の埋立、弓浜半島の農業開発、日野川の多目的開発を目的とした地域の総合開発計画を、それぞれ策定して調査を開始した。

一方農林水産省においても、昭和32年から中海・宍道湖地区の調査に着手し、昭和43年12月より本格的工事を開始し、現在のところ中浦水門(延長414m)、森山堤(延長2,890m)、大海崎堤(延長2,061m)など主要工事はほぼ完了している。

事業計画<sup>4)</sup>では、中海を中浦水門と森山堤により締切り、本庄、揖屋、安来、彦名、弓浜の5地区計2,542haの大規模干拓を行う。干拓による湖面の縮小に対しては、中海の洪水調節能力が現況よりも減少しないように、境水道の現況平均断面 $2,100m^2$ を $2,600m^2$ (境水道底標高T.P.-7.0~-10.0m)に浚渫し、さらに中浦水道を400~500m(中浦水道底標高T.P.-15.0~-7.0m)に拡張することにより、境水道の疏通能力の増大をはかり、設計洪水量を $3,900m^3/s$ としている(3日連続降水量で80年確率)。

次に中浦水道(渡一江島間)及び佐陀川に防潮水門を建設して、中海・宍道湖の残水域 $14,742ha$ を淡水化して、中海 $3.0億m^3$ 、宍道湖 $3.7億m^3$ 計 $6.7億m^3$ の巨大な淡水湖が造成される。このうち農業用水として約 $8,000万m^3$ が取水され、干拓農地 $1,962ha$ と沿岸既耕地 $7,300ha$ に供給される予定になっている。第3図は計画平面図を示す。



第3図 淡水化計画平面図

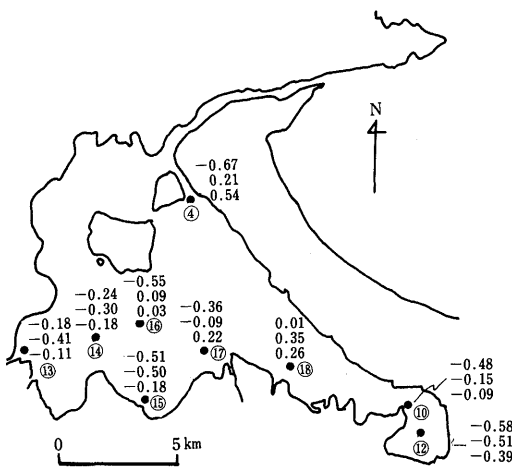
第2表は中海の代表的な測点における塩素イオン濃度の最近6年間の測定結果<sup>9)</sup>である。湾奥部の米子湾に位置する測点No.12, 大橋川河口沖のNo.13, 14において、平均塩素イオン濃度が小さくなっている。経年的には降水量の増減と逆の傾向で変化している。No.4において昭和54, 55年度の値が大きくなっているのは、森山堤, 大海崎堤などの完成により湖水の流れが変化し、従来本庄一大根島間を流下していた主流が、中浦水道に集中するようになったためと考えられる。

第2表 塩素イオン濃度の経年変化

測点番号 年度	4	6	10	12	13	14	16	21	降水量 (mm)
50	10.6	12.5	9.5	9.4	—	—	—	—	1,745
51	10.7	12.4	10.0	9.5	—	8.3	11.8	12.3	1,935
52	10.4	12.7	10.9	12.5	8.6	10.7	11.3	11.7	1,790
53	11.9	13.0	11.5	11.4	10.2	10.8	11.9	—	1,426
54	14.3	12.0	9.9	10.2	9.6	9.9	11.2	9.9	1,732
55	13.0	11.4	8.1	7.3	7.3	7.6	10.9	10.5	2,123

注) データは鳥取, 島根両県の資料による (—欠測)

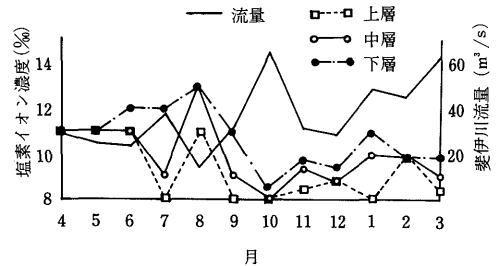
第4図は昭和54年度の測定データから塩素イオン濃度と降水量との相関の有無を各測点ごとに示したもので、数字は上から上・中・下層に対する相関係数を表している。塩素イオン濃度の測定は月に1回(測点によっては2回)なので、降水量は測定日前1カ月間の降水量(松



第4図 降水量と塩素イオン濃度との相関係数

江地方气象台)を用いた。これによるとNo.4(中浦水道), No.10(米子湾), No.16(中海中央)の上層及びNo.12(米子湾), No.15(意東川河口地先)の上層と中層に若干の相関が認められるが、それ以外はほとんど無相関に等しい。

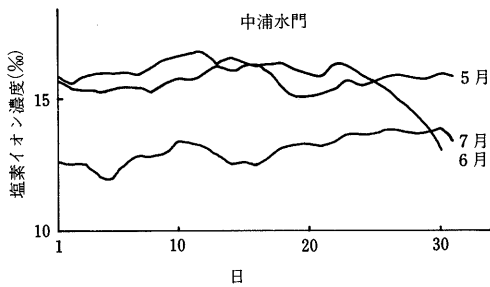
中海の流域面積は、直接流域が742km<sup>2</sup>, 間接流域(宍道湖)が1,308km<sup>2</sup>の合計2,050km<sup>2</sup>である。また主要な流入河川は大橋川, 意宇川, 飯梨川, 伯太川, 新加茂川などであるが、大橋川は感潮河川であり、他は中小河川のため、中海への流入量データが得られない。そこで中海, 宍道湖流域において、最大の流域面積をもち流量データも完備している河川, 斐伊川(流域面積は大津地点で911.4km<sup>2</sup>)の流量と塩素イオン濃度との関係を示したのが第5図である。この図はNo.13(大橋川河口沖)における、層別の塩素イオン濃度と斐伊川(大津地点)の月平均流量の昭和54年度の周年変化を示したものである。上層, 中層の塩素イオン濃度は、ほぼ流量の変動と逆の傾向で変化している。つまり中海の塩素イオン濃度は、淡水流入量に大きく影響され、流入量を正確に把握できれば、各測点がどの河川の影響を受けているのかが明らかになる。



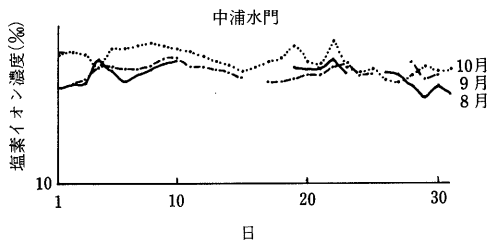
第5図 斐伊川流量と塩素イオン濃度 (54年4月~55年3月)

農林水産省では、中浦水門の上流部535m, 下流部310mの位置に左右両岸に各2カ所、淡水化後の湖水の水質監視を目的とした水質測定用の観測塔を設置し、現在上流部は左岸側のみ、下流部は左岸, 右岸の3カ所で測定を開始している。測定項目は水位と塩素イオン濃度の2つで、塩素イオン濃度の鉛直変化率を計算して、塩分躍層位置が算定できるようになっている。測定水深は上流部は1m間隔で15mまで、下流部は同様に7mまでである。測定は2分間隔で行われ、測定データは全て電子計算機により処理されている。

第6, 7図は中浦水門上流部観測塔での昭和56年5月～10月における、水深的にも時間的にも平均した塩素イオン濃度の経日変化であるが、6月下旬の濃度の低下が著しい。これは5月～7月の月降水量(松江)が、それぞれ128.5, 493.0, 299.5mmで、特に6月下旬は降水量が371.5mmと非常に大であったためと考えられる。その後8月～10月はほとんど変化なしである。図は省略しているが、56年11月以降57年の2月までは漸減の傾向を示している。



第6図 塩素イオン濃度の経日変化 (56年5月～7月)

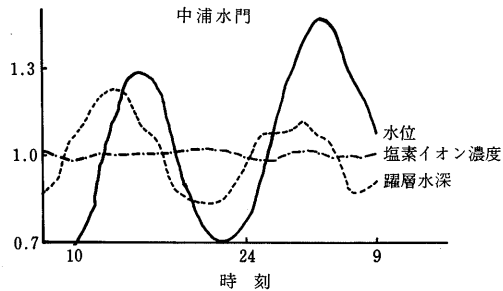


第7図 塩素イオン濃度の経日変化 (56年8月～10月)

第8図は昭和56年9月29日10時～30日9時の中浦水門上流部での、無次元化した塩素イオン濃度、躍層水深、水位の経時変化を示した。無次元化は測定値を平均値で除算することにより行った。これによると、塩素イオン濃度が平均値のまわりにわずかしき変動していないのに対して、躍層水深の変化が大である。塩分躍層というのは、塩分濃度の垂直変化が特に激しい層をいい、汽水湖においては、躍層を境にして上層が淡水層、下層が塩水層と二層に大別できる。

中海の塩素イオン濃度の平均値は上層で約8,000ppm、中層で約10,000ppm、下層で約15,00ppmとなっており、

淡水と塩水の二層流ではなく、上層から下層まで濃度が連続的に変化する多層流の形態で、湖水は流動しているものと考えられる。



第8図 無次元化した塩素イオン濃度、水位、躍層水深の経時変化 (56年9月29日10時～30日9時)

考 察

降水一流出現象は非定常非線形であるので、降水量と塩素イオン濃度との間に強い負の相関は得られなかったが、巨視的には、年降水量と中海の年平均塩素イオン濃度との間には負の相関があると思われる。

中海への淡水流入量の正確な把握は、淡水化の計算を行う上でも是非必要である。一般に淡水化の微分方程式は次式で表わされる。

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{V} (\text{Sin} \cdot \text{Qin} - \text{Sout} \cdot \text{Qout}) \dots\dots (1)$$

- S : 塩素イオン濃度
- t : 時間
- V : 貯水容量
- Sin : 流入水の塩素イオン濃度
- Sout : 流出水の塩素イオン濃度
- Qin : 流入量
- Qout : 流出量

奥田<sup>5)</sup>は(1)式の解として次式を提案した。

$$\frac{S}{S_0} = \frac{1}{|(1-\gamma_0) + \gamma_0 \cdot \exp \frac{ngt}{V}|^{1/n}} \dots\dots (2)$$

- S : 淡水化後時間 t における平均塩素イオン濃度
- S<sub>0</sub> : t = 0 における平均塩素イオン濃度
- γ<sub>0</sub> : 淡水湖内の混合作用の程度を示すパラメータ

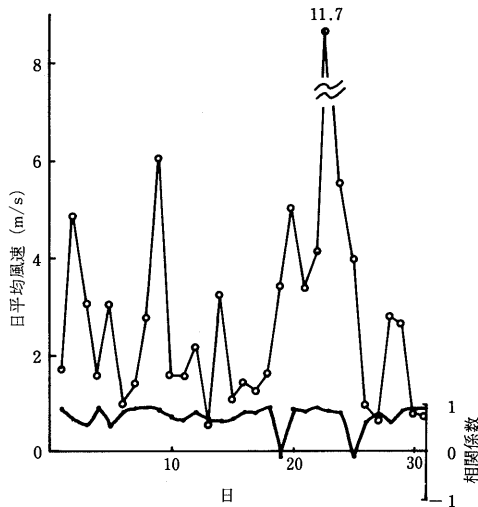
- n : 常数  
 Q : 流入量 (= 流出量)  
 t : 淡水化経過時間  
 V : 貯水容量

奥田は児島湖において、 $\gamma_0=0.04$ 、 $n=1$ とされているので、中海においても同じ値をとるものと仮定すれば、(2)式においてQの値を決定することにより、淡水化所要日数が算定可能となる。

南<sup>3)</sup>は実験的に中海の淡水化所要日数を約400日と推定している。

中海の現況の塩分変動、水質変動において特徴的なことは、塩素イオン濃度が春から夏にかけて高くなり、秋から冬にかけて低くなるということである。また夏期においては、塩分躍層に温度躍層が重なるため、溶存物質の鉛直輸送が阻害されている。例えば昭和55年7月24日No.16においては、上、下層の塩素イオン濃度差が12,000ppm、水温差が4.5℃であり、上層のDO(溶存酸素)7.9ppmに対して下層は5.4ppm、CO<sub>2</sub>は同様に4.1ppmと0.6ppmとなっている。これに対して冬期は、温度躍層は認められず、塩分躍層もさほど顕著ではないので、溶存物質の上、下層差は小さくなっている。

第9図は中浦水門上流部観測塔での昭和56年10月における、水位と塩素イオン濃度の毎時測定データ(1日で各24個)を用いて、水位と濃度との相関係数と日平均風速(松江)の経日変化を示したものである。境港にお



第9図 風速と相関係数の経日変化  
(56年10月)

る既往最高潮差は0.45mと小さいが、それでも中浦水門上流部では水位と濃度との間に強い正の相関が認められた。第9図において、日平均風速のピークのあとに、相関係数の急激な低下が見られる。このことは湖水の混合拡散に風の影響の大きいことを示していると考えられる。

斐伊川・宍道湖・中海水域は境界水道という細長い出口を持った閉塞性水域であるため、特に中海の水質汚濁が最近問題になっている。建設省の調査結果<sup>2)</sup>によると、中海への流入負荷量は、CODが11.66t/日、T-N(全窒素)が3.42t/日、T-P(全りん)が0.39t/日となっている。

中海のなかで最も汚濁が進行している水域は米子湾である。湾奥部に位置しているため、海水交流による浄化作用のききにくい場所であり、さらに米子市街地からの都市下水が集中しているためと考えられる。

最近、水質汚濁に対する懸念から、「中海の淡水化反対」という声が聞かれるが、淡水化を中止しても中海の水質汚濁は解決しない。

淡水化を行うことは、汽水湖から淡水湖へと約400日で急激に変化し、生物相の環境条件も全く変化することになる。その他の要因も含めてこれらが水質にどのように影響するかを推測することは非常に困難な問題である。そこで実験的に淡水化を行い、中海の水質変化を綿密に追跡し、もし水質汚濁の急激な進行が検知されたら、直ちに実験を中止し、水質浄化対策に最大限の努力を払うという条件付の淡水化の試行を提案する。

## 総 括

ここでは中海水域における水質の測定データをもとに、中海における塩分変動の現況について考察を行った。結果を要約すると次のようになる。

- 1) 巨視的には、年降水量と中海の年平均塩素イオン濃度とは負の相関がある。
- 2) 水深2.0~4.5mに塩分躍層が存在するため、溶存物質の鉛直輸送が阻害されている。
- 3) 中浦水門上流部観測塔のデータによると、湖内の塩分拡散に対する風の影響が大である。
- 4) 湾奥部にある米子湾では、海水交流の影響が小さく、水質汚濁が進んでいる。

## 謝 辞

この研究を行うにあたり、貴重な資料の提供を受けた鳥取、島根両県の実環境保全課、農林水産省中海東部干拓建設事業所、建設省中国地方建設局河川部、松江地方気象台の関係各位に厚く御礼申し上げます。またこの研究は

昭和56年度文部省科研費（一般C）の一部として行われたものである。

文 献

- 1) 伊達善夫・大竹久夫・近藤邦男・清家 泰・中根純夫：中海およびその周辺的环境とリモートセンシング(1)．第35回農業土木学会中国四国支部講演要旨，62-64 (1980)
- 2) 建設省中国地方建設局：昭和54年度河川関係調査成果報告書．(1980) p. 320
- 3) 南 勲：宍道湖—中海淡水化水理模型実験結果の解析的考察(I)．京都大学農学部水利工学研究室，(1968) pp. 112-114
- 4) 三本武津雄・西川克彦・笹沼昭司：中海干拓事業淡水湖化計画について．水と土，39 15-16 (1979)
- 5) 奥田節男：内湾締切後における淡塩水の交換．日本海洋学会誌，16 (1) 7-14 (1960)
- 6) 島根県：昭和55年度公共用水域水質測定結果報告書．(1981) pp. 172-175
- 7) 鈴木静夫：日本の湖沼．内田老鶴圃新社，東京 (1973) pp. 54-59
- 8) 東京天文台：理科年表．丸善，東京 (1981) pp. 653-654
- 9) 鳥取県：昭和50年度～昭和55年度水質測定結果．(1976-1981)