

外海と連結された湖沼の水位変動

Variations of Water Level in Polyhaline Lakes Connected a Open Sea

松本治彦*・羽田野袈裟義**・斉藤隆***

By Haruhiko MATSUMOTO, Kesayoshi HATANO and Takashi SAITOU

This paper deals with the water exchange process in two connected lakes, one of which is connected to the open sea. The field observations are made in polyhaline lakes, Myojin-ike which are connected to the Japan Sea by a pipe. The result of the observations implies that there exist water exchange through porous media to the Japan Sea, besides the pipe flow. A simplified model to predict water level variations in two lakes is proposed considering these processes. The calculation shows a good agreement with the observation.

Keywords: water exchange, porous media, water level, polyhaline lake

1. はじめに

狭い水道や水路で外海と通じている内海、内湾や湖沼の海水交換に関する研究は、さかんに行われている。特にその水域が汚濁化している場合には、外の海水を効果的に取り入れるための方策が検討される¹⁾。

山口県萩市にある国の天然記念物“明神池”でも近年、水質が汚濁化し、夏季を中心に度々赤潮が発生してきた。そこで、各種調査結果をもとにして外海との水交換に関する改善策が検討された。しかし、際立った効果はなく汚濁化は進行しており、また各池内における水位変動に特異な現象がみられる。本研究では外海の潮位と同時に池内の水位変動を詳細に観測し、水交換の改善を行うのに不可欠な池水の動きと海水交換状態の解明を試みたものである。

* 宇部短期大学講師 (山口大学大学院)

(〒755 山口県宇部市文京町5-40)

** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

(〒755 山口県宇部市常盤台)

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

(〒755 山口県宇部市常盤台)

2. 明神池の概要

図-1 に示すように明神池は、大池 8,646㎡、中の池 1,553㎡、奥の池 321㎡の 3つの池からなり、平均水深は約 2.4 mである。この池は、池の西側にある笠山火山の噴火後に、笠山と本土との間に沿岸流の作用により土砂が運ばれて陸続きとなった際に、海の一部が堰き止められてできたものと言われている²⁾。記念物に指定された当時、池には周囲の岩塊の隙間を通じて外海水が入りし、池水は透明であった。しかし、港の護岸工事や道路等の池周辺の開発が進むにつれて、この海水の出入りは少なくなり、透明度が低下して水質汚濁の傾向が現れてきた。そこで 1960 年には、池水の交換を促進するために大池の南側に池と港を結ぶ通水路(underdrain)を設置したが、水質の汚濁化は一段と進んでいるのが現状である³⁾。

3. 観測結果

図-2 は明神池の 3 池と外海(夕なぎ港)で測定した水位変動である。この図から、大池と中の池の水位はその位相、振幅ともほとんど一致しており、水位変動においては、これら両池は一つの池とみなせる。

次に外海と池との水位を比較すると、通水路から一番遠くにある奥の池の位相が外海の位相に最も近く、振幅も他の 2 つの池よりも大きいことが注目される。潮時別に細かくみると、位相は満潮時には 3 池ともほぼ一致しているが、干潮時には奥の池の方が約 1.5 時間程度遅い。さらに振幅をみると、満潮時の高さは 3 池でほぼ一致しているが、干潮時には奥の池の方が他の池よりも 10 cm 程度低いレベルまで下がっている。

図-2 の水位変動から、池の水の動く方向について考察する。まず、大池と中の池の下げ潮時にあたる時間帯(例, 8/29 17:00 ~21:00)では、これら両池の水位は外海、奥の池の水位に比べて高い。したがって、この時間帯にはこれら両池から外海と奥の池へ水が流出していることになる。この時間帯での奥の池の水位は、中の池からの流入があるにもかかわらず急激に低下しており、通水路の水流以外に相当量の奥の池の水が周界に流出していることが判る。次に、大池と中の池の上げ潮時にあたる時間帯(例, 8/29 21:00~8/30

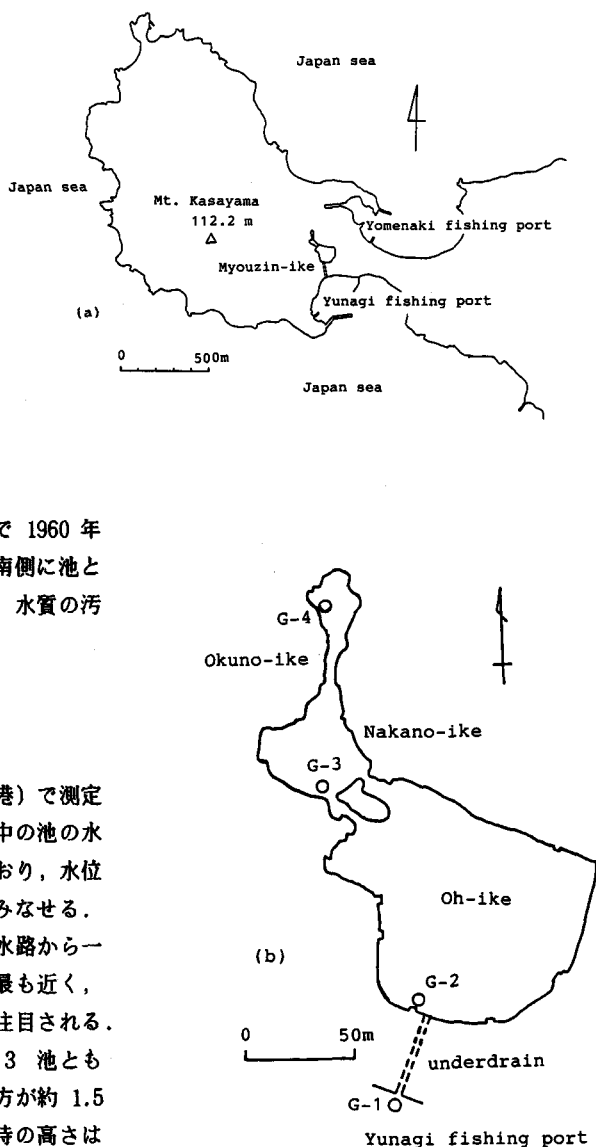


図-1 明神池の位置(a)と調査点(b)

1:30)では、外海の水位が3つの池の水位よりも高く、したがって通水路を通じて外海水が大池へ流入していることになる。また3つの池の水位を比較すると、奥の池の水位が他の2つの池の水位よりも高く、下げ潮時とは逆に通水路の水流以外に奥の池から中の池方向へも水が流動していることが判る。したがって、この時間帯には相当量の水が周界から奥の池へ流入していることが判る。

以上の結果から、上げ潮時、下げ潮時のいずれにおいても奥の池と外海を結ぶ地下水流が水位変動に大きな影響をもつことが明らかである。

4. 水位変動と流量との関係

4.1 水収支式

前述の結果にもとづき、水の動きを図-3のようにモデル化すると、池内水位を規定する方程式は次式となる。

$$S_a \frac{dZ_a}{dt} = Q_{ea} - Q_{ab} \tag{1}$$

$$S_b \frac{dZ_b}{dt} = Q_{ab} - Q_{bs} \tag{2}$$

ここで、 Z_a, Z_b は池 A, B の水位、 S_a と S_b は各々池 A と B の水表面積、 Q_{ea}, Q_{ab} および Q_{bs} は各々周界から池 A へ、池 A から池 B へ、池 B から外海への流量、 t は時間である。

4.2 流量の評価

各池の水位変化を予測するために、式(1)および(2)の右辺に現れる流量の評価を行う。 Q_{ab} は開水路流れであり、 Q_{bs} は開水路流れと管路流れの直列で評価し、 Q_{ea} は浸透流と考えるのが自然であろう。

まず、池 A から B への流量 Q_{ab} は次式で評価される。

$$Q_{ab} = \frac{1}{n_1} b_2 h_o^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

ここに b_2 は開水路の平均水路幅で $b_2 = 1 \text{ m}$ 、 n_1 は Manning の粗度係数、 $h_o = \frac{Z_a + Z_b}{2} - Z_h$

は平均水深、 Z_h は河床高さ、 $I = \frac{Z_a - Z_b}{L_2}$ は水面勾配、 L_2 は開水路区間の長さで $L_2 = 20 \text{ m}$ である。

次に、池 B から外海への流量 Q_{bs} を検討する。大池と外海を結ぶ水路は 約 70 m の開水路の暗渠(

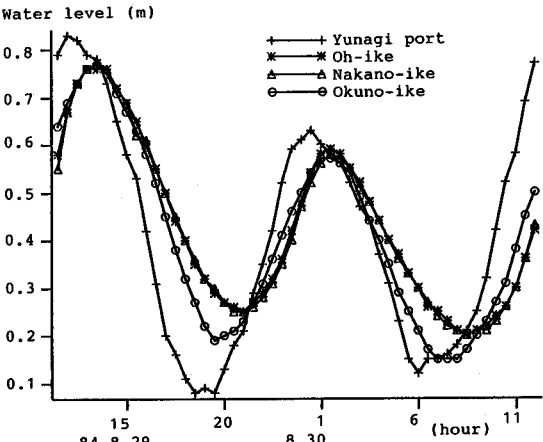


図-2 タナギ港(外海)の潮位と明神池の水位変化

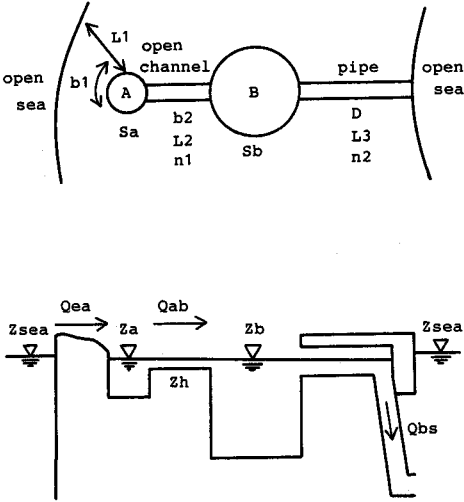


図-3 モデル池

幅 1.2 m, 深さ 1.0 m (L.W.L 時)) に続いて長さ 18 m の管路 (管径 0.8 m) でつながっている。管路にはカキやイガイなどが付着していて、実直径は 0.5 m 以下である。同じ流量において両水路における速度水頭を比較すると、開水路のそれは管水路の 3 % 程度であることから、開水路の損失水頭は無視することにし、池 B から外海への流量 Q_{bs} は次式で評価される。

$$Q_{bs} = \frac{\pi}{4} D^2 V$$

$$V = \left\{ \frac{2 g H}{\zeta_e + \zeta_o + f \frac{L_3}{D}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで H は水位差, ζ_e と ζ_o はそれぞれ入口, 出口の形状損失, f は摩擦損失係数, $f = 124.5 \frac{n_2^2}{D^{\frac{1}{3}}}$,

D は管径, n_2 は Manning の粗度係数, L_3 は管の長さである。ここでは $H = Z_b - Z_{sea}$, $\zeta_e = 0.5$, $\zeta_o = 1.0$ とする。ただし, 前述したように管径は 0.5 m とし, Z_{sea} は外海の潮位である。

最後に周界から池 A への流量 Q_{ea} を検討する。奥の池と外海との間にある浸透層は地形を考慮して奥の池の周長 b_1 は $b_1 = 60$ m, 平均浸透層区間 L_1 は $L_1 = 150$ m とする。浸透流は, 厳密には非定常流であるが, 擬似定常流れとして Darcy 則で与えることにし, Q_{ea} を次式で評価する。

$$Q_{ea} = k b_1 h \frac{Z_{sea} - Z_a}{L_1} \quad (5)$$

ただし, k は透水係数とする。浸透層厚さ (浸透水深) h は水位に伴って変化するが, ここでは簡単に一定厚さ $h = 1$ m とする。

次に式 (3) を使って水位観測データから Z_a , Z_b を与えて 2 つの時刻における Q_{ab} の平均値を計算し, その値を式 (1), (2) の差分形に代入して Q_{bs} , Q_{ea} の大略値を求めた。なお粗度係数 n_1 は現場の形状から自然流路の中でも, かなり大きい値と考えられるので⁴⁾, ここでは 0.045 とその 2 倍値である 0.09 の 2 通りについて求めた。その結果が表-1 である。この表は池 A, B および外海の水位が全て下げ潮時 (17:00 ~ 19:00) の時間帯 ($\Delta t = 2$ 時間) と, 逆にこの 3 地点の水位が全て上げ潮時 (22:30 ~ 24:00) の時間帯 ($\Delta t = 1.5$ 時間) における各区間の流量を表している。また ΔZ_a , ΔZ_b は下げ潮時の場合, 17:00 と 19:00 の 2 つの時刻におけるそれぞれ奥の池の水位差と大池の水位差, 上げ潮時の場合, 22:30 と 24:00 の 2 つの時刻において前記と同様な方法で求めた値を示している。両時間帯において, 池外より出入りする全流量に対する浸透流量の割合は, 百分率で表すと $n_1 = 0.045$ の場合には 36 ~ 45% 程度, $n_1 = 0.090$ の場合には 19 ~ 24% 程度であって, 池内水位変化における浸透流れの影響は無視出来ないことが明らかである。

表-1 Q_{ab} を仮定した場合の Q_{ea} , Q_{bs} の大略値

5. 計算式の検討

5.1 パラメータの決定

前節の各区間の流量評価で未定係数となっている k , n_1 , n_2 を各々変化させ, ルンゲクッタ法に

period	Δt (h)	ΔZ_a (m)	ΔZ_b (m)	n_1	$(Q_{ab} \times \Delta t)$ (m^3)	$(Q_{ea} \times \Delta t)$ (m^3)	$(Q_{bs} \times \Delta t)$ (m^3)	$\frac{ Q_{ea} }{ Q_{ea} + Q_{bs} }$
17:00	2.0	-0.24	-0.18	0.045	-775	-852	1061	0.445
~19:00				0.090	-388	-465	1448	0.243
22:30	1.5	0.14	0.16	0.045	559	604	-1073	0.360
~24:00				0.090	279	324	-1353	0.193

によって各池の水位変化を計算し, 各時刻における実測と計算の水位差の平均差を図示したものが 図-4 である。 n_1 , n_2 , k を系統的に変えた結果, $n_1 \approx n_2 \approx 0.09$ の場合が, また $k = 0.85 \sim 0.9$ m/sec が最も適合度が良いことが判る。 n_1 , n_2 とともにかなり大きい値であるが, n_1 については開水路が細かな石か

ら数十 cm の岩石などで構成されていること、 n_2 については前述したように管内が貝の群落で覆われていることから妥当と思われる (n_2 については次の節でも検討する)。また k についても大きな値であるが、周辺の地山が 数十 cm の岩塊から構成されていることや、池の付近に大きな空洞のあることも考えられることから妥当と思われる。なお 図-5 にこれらの値を使った場合の水位変動の計算値と実測値を示す。

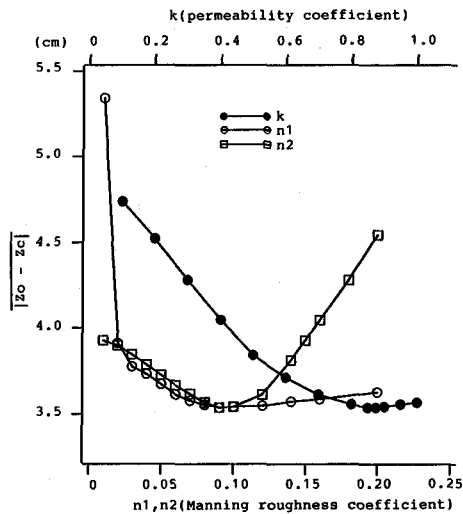


図-4 透水係数(k),Manning の粗度係数(n_1,n_2)と水位差の実測と計算の平均差 (Z_0 は水位の実測値, Z_c は水位の計算値)

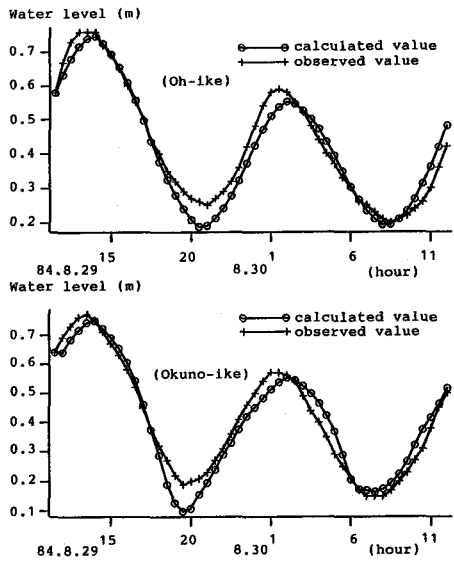


図-5 大池、奥の池の水位の実測値と計算値

5・2 水位・流量の比較

前節の計算において、管水路の Manning の粗度係数が $n_2 = 0.09$ と非常に大きな値をとる。そこで、別時期において管路に接続している開水路内で実測した流量と、同時期に測定した外海と大池の水位変化を用いて、前節のモデルで計算した流量とを比較した。その結果を図示したものが 図-6(b)である (図-6(a)は水位の実測値と計算値を表してる)。両者の一致は良く、5・1 節での検討結果がほぼ妥当なものであると考えられる。

なおこの時期の観測では、奥の池 (池A) の水位は測定していない。したがって、ルンゲクッタ法で必要な奥の池の水位の初期値を与えることができない。しかし水位の観測開始時には、大池 (池B) は満潮時 (水位は 0.44 m) に当たり、しかもこの時に外海の潮位と一致している。そこで 3節の結果と同様にこの時刻には 3 池とも振幅が一致すると考えて、奥の池の初期値として 0.44 m を与えて計算した。また各回

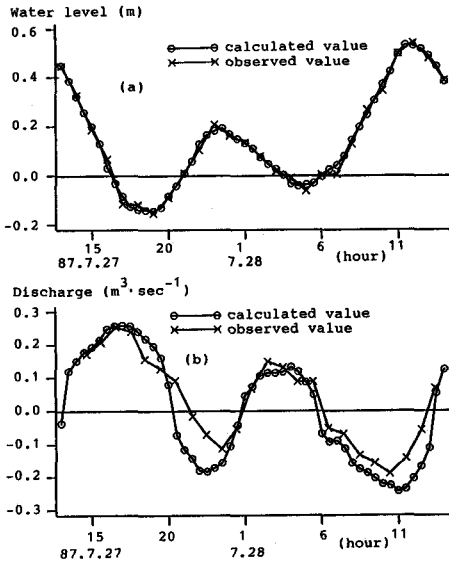


図-6 大池の水位変化(a)と暗渠内の流量(b)の実測値と計算値

($n_1 = n_2 = 0.09$, $k = 0.875$ の場合で、大池から外海に向かう方向を正としている)

の流量測定には 3分から18分の時間を要しているので、図でプロットしている観測時刻は各回の中央値である。

6. まとめ

今回の研究より、池に出入りする水は通水路の水流だけではなく、奥の池付近岩塊の隙間からも相当な量の水の出入りすることが定量的に裏付けされた。したがって汚濁化を防ぎ、池の水質を改善するには、今までに行われてきた大池と外海に関する水の出入りに加えて、奥の池から外海に通じている水に対しても対策を講ずる必要がある。しかし、奥の池を出入りする水は低塩分度高濃度の栄養塩を含む水であることから⁵⁾水質浄化に関する有効な改善策をたてるには今後、密度効果を考慮した流水機構を検討する必要がある。

7. 参考文献

- 1)中村・萩野・乃：潮流制御による水質改善工と瀬戸内海水質改善への適用，農土試報，14，p201-221，1976.
- 2)高橋：明神池と周辺の地形・地質，天然記念物明神池緊急調査報告書，萩市教育委員会，p1-5，1978.
- 3)合屋・松本・城田：塩水池「明神池」の富栄養化におよぼす地下水起源の低塩分水塊の影響，宇部短大環科研報告4，p33-48，1983.
- 4)土木学会編：水理公式集 昭和46年度改訂版，土木学会，p156.
- 5)松本：塩水池「明神池」の流動に関する研究 第2報，宇部短大環科研報告7，p1-18，1988.