

淡水化湖の逆流海水貯留槽内の密度流

竹 山 光 一[※]

Kouichi TAKEYAMA
Density Currents in the Concave Basement
That Stores the Backward Flow of Salt Water
of Freshening Reservoir

緒 言

水需要の増大は、需要地付近の水源地として、河口湖の淡水化を要求するようになった。この淡水化湖はこのため水量制御と同時に塩分などの水質の制御が求められている。ここで問題となるのが、淡水化湖における通船時の開門操作に伴う多量の海水逆流の存在である。

現在計画中のN湖では、これを海水貯留部に貯留し、淡水化湖の全面に拡がるのを抑制する、このため除塩暗渠により下層部から選択的に外海に排除する、内外水位差が不足する場合には除塩ポンプを運転し、逆流海水貯留槽内の海水を強制的に排除する機能をもっている¹⁾。

ここでは、この貯留槽の規模決定の検討と、貯留槽内の淡水・海水の2層密度流の挙動と塩分拡散について、

水理模型実験を行った。

本研究をすすめるにあたり、京都大学農学部舞鶴淡水湖化実験場の施設を利用させていただいた。御教示をいただいた同学、南教授、ならびに実験に協力された本学の51年度専攻生、山田哲史・川越幸雄・玉置信夫各君に対し、記して深謝の意を表します。

実験方法

図1のような現在計画中の淡水化湖について、以下の縮尺でもって図2のような模型を作製した。

水平縮尺	1 : 300
鉛直縮尺	1 : 20
ひずみ	1 : 15
塩分濃度	1 : 1

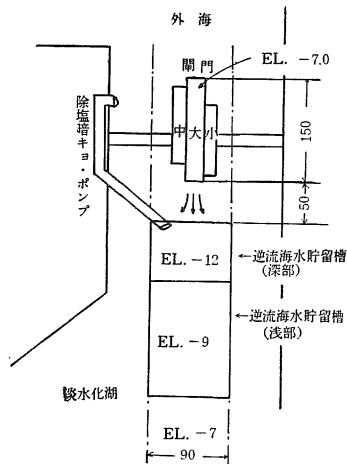


図1 淡水化湖開門付近の概要 (m)

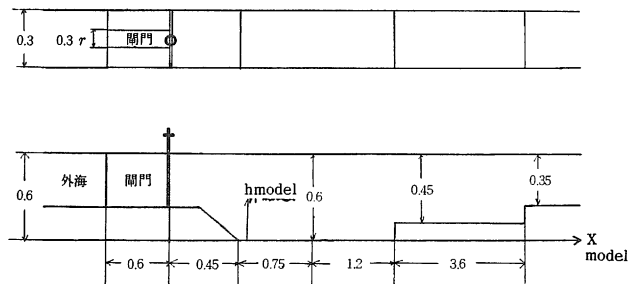


図2 実験水路の概要 (上は平面図, 下は断面図) (単位m)

※ 農業水工学研究室

閘門長 1 : 300
 流速 1 : $\sqrt{20}$
 時間 1 : $300/\sqrt{20}$
 閘門幅：水路幅 (r) 1 : 1, 2 : 3, 1 : 3,
 1 : 5

閘門側の海水にメチレンブルーを溶かし、ゲートを2分間全開し、その後の海水の貯留槽内の密度流を、5秒間隔で写真撮影した。塩分濃度は電気電導度計で測定したものより換算した。

また貯留槽内の残留海水の有・無の場合についてそれぞれ実験を行った。

逆流海水貯留槽内の密度流

槽内に発生する密度流的挙動は次の4種に大別する²⁾。

1. 内部サージ

図3のように淡・海水を隔離した平板を引き上げると内部サージが発生する。上方淡水，下方塩水の伝播速度については、(1), (2), (3)がある。

$$v_0 = \sqrt{2gy(\Delta\rho/\rho_1 - \Delta h/h)} \quad (1)$$

$$\bar{v}_0 = \frac{2}{3} \frac{h}{a} \sqrt{2\alpha} \sqrt{g'h} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{a}{b} \right)^{3/2} \right\} \quad (2)$$

$$g' = g(\Delta\rho/\rho_1 - \Delta h/h), \Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$$

瞬間的にゲートを開放した場合の密度流の初期進行速度は(3)の C と簡略化される。

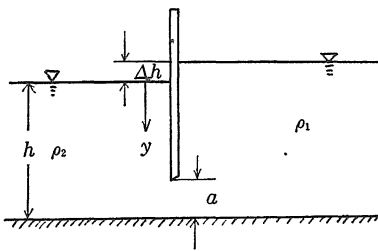


図3 ゲート点での内部サージ

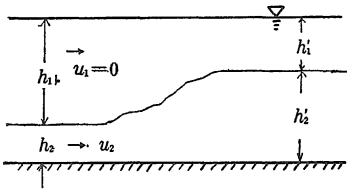


図4 内部跳水

$$C = K\sqrt{\varepsilon gh} \quad (3)$$

$$K = 0.57 \text{ (Keulegan)}$$

2. 内部跳水

貯留槽最深部において、図4のような内部跳水がみられることがある。この運動量方程式は(4)となる。

$$\frac{h_1^2}{h_1} (F_1^2)^2 - (1 + \varepsilon) \left(\frac{h_2^2}{h_2} \right) (F_2^2)^2 + \frac{1}{2} (h_2 + h_2') = 0 \quad (4)$$

ここに

$$F_1^2 = u_1^2 / (\varepsilon gh_1), F_2^2 = u_2^2 / (\varepsilon gh_2)$$

$$\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$$

一方この跳水による損失エネルギー ΔE は(5)となる。

$$\Delta E = \rho_1 \varepsilon gh_2 (q - 1) \left[\left\{ \frac{(1 + \varepsilon)}{2} (F_2^2)^2 \left(\frac{1 + q}{q^2} \right) - 1 \right\} Q_2 - \frac{1}{2} (F_1^2)^2 \frac{1 + p}{p^2} Q_1 \right] \quad (5)$$

ここに

$$p = h_1'/h_1, q = h_2'/h_2$$

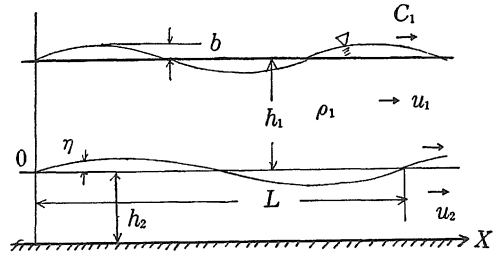


図5 平行2層流の振動波

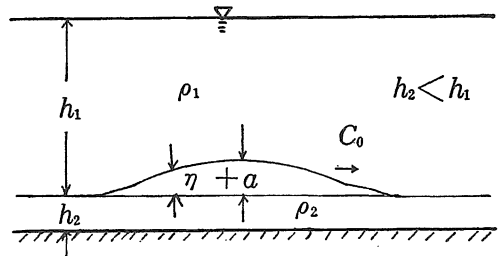


図6 内部孤立波

Q_1 : 上層 (単位幅) 流量, Q_2 : 下層 (単位幅) 流量
 ここで, ゲートを閉じたあと, $u_1 = 0, u_2 \neq 0$ とする, (4)は, (6)となる.

$$\frac{h'_2}{h_2} = \frac{1}{2} (\sqrt{1+8(1+\varepsilon)(F'_2)^2} - 1) \quad (6)$$

このとき

$$\Delta E = \frac{\rho_2 \varepsilon g (h'_2 - h_2)^3}{4h_2 h'_2} Q_2 \quad (7)$$

これによって失われるエネルギーの程度とジャンプ高さ ($h'_2 - h_2$) を波高と考えた内部長波のエネルギー伝達率とは, $h'_2/h_2 \sim 1.6$ くらいまでは, 相似した値であり, h'_2/h_2 がさらに増大するに伴い, 内部跳水の損失エネルギーがはるかに大きくなっていくことが指摘されている。⁴⁾

3. 2層流の内部振動数

図5のような相対運動状態にある2層の平行流が示されるとき, 振動波が内部境界面と上層の自由水面との両者にあり, 内部波の進行速度は(8)の C_2 となる.

$$C_2 = \frac{Ru_2 + Tu_1}{R+T} \pm \sqrt{\frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{K(R+T)} - \frac{RT}{(R+T)^2} (u_2 - u_1)^2} \quad (8)$$

ここに

- L : 波長
- $K = 2\pi/L$
- $R = \rho_2 \coth Kh_2$
- $T = \rho_1 [\coth Kh_1 - b/a * (\sinh Kh_1)]$
- b : 自由水面波の振幅

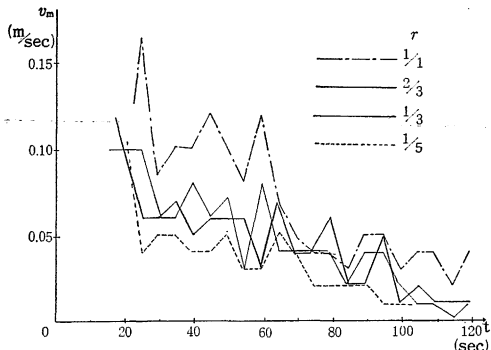


図7 貯留槽内内部サージの伝播速度

a : 内部波の振幅

ここで平行流が無いとき ($u_1 = u_2 = 0$)

$$C_2^2 = \frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{K(R+T)} \quad (9)$$

$$\frac{a}{b} = \cosh Kh_1 - g \frac{\sinh Kh_1}{KC_2^2} \quad (10)$$

4. 内部孤立波

振動波に対して, 1つの有限高を持って1方向に進行する図6の孤立波がある. これは(11)となる.

$$C_0^2 = C_2^2 \left(1 + \frac{h_1 - h_2}{h_1 h_2} a \right) \quad (11)$$

ここで C_2^2 は

$$C_2^2 = \frac{gh_2 h_1 (\rho_2 - \rho_1)}{(h_1 + h_2) \rho_2} \quad (12)$$

内部波が存在するためには, (13)をみたす必要がある.

$$(u_2 - u_1)^2 \leq g(h_1 + h_2) \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2} \quad (13)$$

ここで波形は(14)となる.

$$\eta = a \operatorname{sech}^2 \beta \frac{X}{h^2} \quad (14)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot \frac{a}{h_1}} \quad (15)$$

内部境界面の安定性と塩分の拡散

前述した(8)の根号内が負になると, 内部波は波形を保つことが不可能となり, 波頂が砕けて塩水が淡水中に混入し, 2層境界面が不明瞭となる. 内部波の振幅が大きいときも同様である.

さらに下層に層流状態の塩水があり, 上流に乱流状態

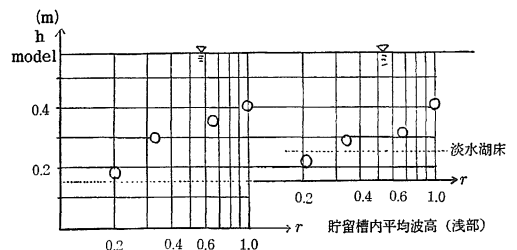


図8 貯留槽内平均波高 (深部)

での淡水が流れているところでは、下層の塩水が上層淡水層中に混入する、⁵⁾ entrainment が発生する。

これらの安定性を(6)の Keulegan 数でもって検討する。

$$\theta = \frac{(\nu_2 \varepsilon g)^{1/3}}{|u_2 - u_1|} \quad (16)$$

これは $\theta < 0.178$ ($Re > 450$), $\theta < \frac{1}{\sqrt{Re}}$ ($Re < 450$) で不安となり混合が発達することが認められている。

$$Re = |u_2 - u_1| h_2 / \nu_2$$

ν_2 : 海水の動粘性係数

ただし模型での Keulegan 数 θ_m , 原型 θ_p (以下 p, m をつけて区別する) において、流速の縮尺 $1/n_1$, 密度無次元数の縮尺 $1/n_2$ として、(7)がなりたつと

$$\left. \begin{aligned} \theta_p &= \frac{(\nu_{2p} \varepsilon_p g_p)^{1/3}}{|u_{2p} - u_{1p}|} = \frac{(\nu_{2m} n_2 \varepsilon_m g_m)^{1/3}}{n_1 |u_{2m} - u_{1m}|} \\ &= \frac{n_2^{1/3}}{n_1} \cdot \theta_m \end{aligned} \right\} (17)$$

ただし

$$u_p = n_1 u_m, \quad \frac{\Delta \rho_p}{\rho_p} = n_2 \frac{\Delta \rho_m}{\rho_m}$$

結果および考察

逆流海水の密度流的挙動

ゲート開放直後より発生する内部サージは、内部射流であり、 $r = 2/3 \sim 1/1$ では貯留槽内に内部波状跳水がみられ、このときの損失エネルギーは塩分を著しく拡散させる。この上流側への伝播速度は図7のようにしだいに衰えていく。貯留槽内における内部サージ、振動波の平均的波高は図8となる。

$r = 1/3 \sim 1/5$ では貯留槽内に固有の周期を持った長波がみられ、減衰型振幅でもって振動する。わずかな量ではあるが、これから供給された塩分をもつ内部サージや孤立波は、上流側に伝播し、ついには塩水楔として定着する。

したがって淡水化湖への塩分拡散を阻止するためには、逆流海水の密度流を貯留槽内で安定な2層振動波の

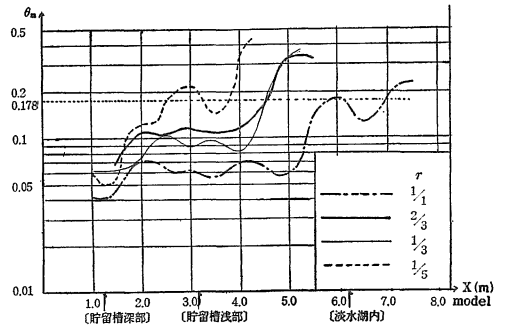


図9 貯留槽内の各条件下における Keulegan 数

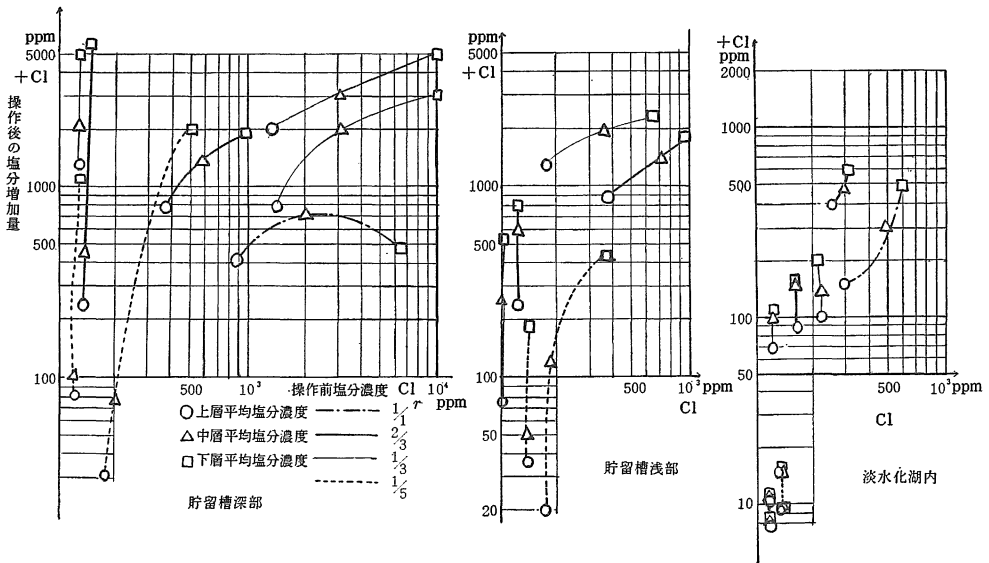


図10 各測定点における塩分の拡散状況

形で閉じこめ、これにより上流側への伝播を防ぐことが肝要である。

2 層境界面の不安定性と塩分拡散

Keulegan 数は内部波の安定性に粘性を考慮している。ここで(9)をみたま(3)、(9)で表わされる内部サージ波の速度を上下2層の相対速度と仮定し、最も不安定な側についての値を求めた結果、図9のようになった。これによると r 値により槽内全般にわたって不安定な領域とその程度が大きく異なること、貯留槽内深部・浅部・淡水湖内へと安定化が進むのがわかる。

原型については(9)の補正により θ_p を求めることができる。実際は、淡水湖に密度流が伝播し拡がるときは流線が平面的に放物あるいは指数関数的拡がりとなる⁷⁾ことが予想されるので、計画案の $r = \frac{1}{3}$ においては淡水湖内の境界面は、これよりかなりの安定性を示すと考えられる。

貯留槽内の振動型の密度流は、時間の経過とともに弱混合～緩混合型2層を形成する。

開門操作直前の塩分濃度を C_1 、操作後の塩分濃度を C_1' 、増加分 ($C_1' - C_1$) を $+C_1$ として、各 r と測定地点ごとに、上・中・下層の平均塩分濃度について示したものは図10となる。これによると $r > \frac{1}{3}$ と $r = \frac{1}{3}$ とは拡散に顕著な違いがあり、前者では貯留槽内深・浅部で 1500 ppm 以上の塩分濃度を記録し、これが淡水化湖内へ拡散し、そこでは 300~400 ppm 以上の濃度となるが、後者では貯留槽内浅部で 200~300 ppm となり、淡水化湖においては $+C_1$ は極めて小さく、 C_1' も 200 ppm 弱となる。

摘 要

河口湖の淡水化を進めるにあたり、通船時の開門操作に伴う海水の逆流は、これを阻害する要因となる。

本研究はこの逆流海水を貯留槽にとどめ、これを速やかに外海に排除しようとするとき、逆流海水により貯留槽内に発生する2層密度流の挙動と塩分の拡散状況について、あわせて貯留槽の規模決定についての検討を、水理模型実験でもって行ったものである。

その結果、開門幅：貯留槽幅 1 : 5、開門長：貯留槽長約 1 : 10 にあっては、逆流海水を貯留槽内に、減衰型振幅をもつ波長の長い振動波としてとじこめることが可能となり、淡水湖内への塩分拡散を著しく減少させることができた。このときの塩分濃度は、約 200 ppm となった。

引用文献

1. 南勲：淡水湖化研究 3 : 63-89, 1975.
2. 南勲：淡水湖化研究 4 : 33-57, 1976.
3. 廣沢佑嘯, 玉井信行：土木学会年講 29 (2) : 427-428, 1969.
4. 浜田徳一：海岸工学講演会講演集 : 7-11, 1958.
5. 南勲：水理講演会講演集 17 : 67-72, 1973.
6. 柏村正和：水工学シリーズ, 65 (20), 1965.
7. 柏村正和, 吉田静男：海岸工学講演会講演集 14 : 222-225, 1967.

Summary

The operation of navigation lock causes much backward flow of salt water, which prevents the freshening reservoir from its replacement of salt water by fresh water. Here, some behavior of density currents in the concave basement that stores the backward flow of salt water, the diffusion of salinity in the concave basement, and the instability of two layer flow were investigated by hydraulic model experiments with width ratios of 0.2, 0.33, 0.66, and 1.0, and a length ratio of 0.1 between the lock and the concave basement.

The results obtained are as follows :

A width ratio of 0.2 made it possible to restrain most of the density currents in the concave basement, and then some swinging internal waves with decreasing velocity and amplitude were observed. Then, the salinity transported into the freshening reservoir was very little, and after operation the salinity recorded was satisfactorily low (below 200 ppm.).