

中海淡水化過程における塩分拡散機構

第1報 中海塩分鉛直分布の風に対する安定性

福 間 順 (農業水利工学研究室)

Jun FUKUMA

Studies on the Mechanism of the Salinity Diffusion in Nakaumi Sea, Shimane Prefecture

(I) On the Stability of the Vertical Salinity Distribution in Nakaumi Sea for the Wind Effects

まえがき

中海干拓淡水化事業は中海狭控部を締切り排水樋門を設け、大規模干拓を行ない排水樋門の合理的操作によって中海、穴道湖を淡水化せしめ干拓地と沿岸既耕地の農業用水をはじめ工業、上水道等の各種用水の開発を基礎に周辺の地域産業の発展をはかるものである。わが国最初の淡水化事業として岡山県児島湖の例があるが、その後の調査、研究より淡水化を支配する因子はきわめて複雑であることが明らかにされている。とくに斐伊川—穴道湖—大橋川—中海—境水道—日本海と連なる水系は稀にみる複雑な水系であり、淡水化機構をより興味深いものにしていく。本研究は淡水化事業を通じて一連の調査、研究を行ない、淡水化機構の解明に資せんとするものである。

まず今回の調査では中海の塩分鉛直分布の実態を把握することに重点をおき、さらに塩分鉛直分布の風による攪乱に対する安定性の検討を試みた。これにより若干の見解を深めることが出来たので結果を報告する。しかしこの問題については今後さらに調査を続ける必要があり、続発する問題は後報にゆづる。

1. 観測および測定

1-1 観測地点

採水および測定は大根島北方約1km、水深約6mの地点で行なった。現在中海のミオ筋は大橋川河口から大根島西部を経て北部を通り境水道に至る経路をとっている。本地点は中海でもっとも季節風のよく吹き通る点である。また境水道の密度流による影響は今回は考慮する必要がないものと考えられ、全般的にみれば無難な地点といえる。この地点に波高観測のための量水標を設置した。

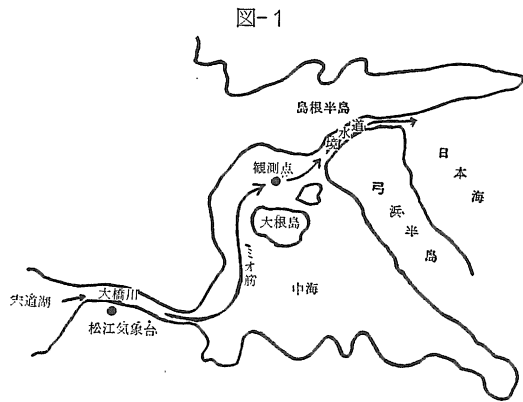


図-1

1-2 観測および測定方法

(1) 塩分鉛直分布 塩分濃度測定は小型発動機船による船上測定と室内測定とによった。吸水ポンプによって深度0.5m毎に採水を行ない同時に水温を測定した。波高は量水標によって目測した。室内測定ではボイメ比重計による比重測定を、東亜電波製のCM-3M型電導度計による電導度測定を深度毎に採水した海水について行なった。なお塩分濃度(ppm)と比重(ρ)および電導度($\mu\text{S}/\text{cm}$)はあらかじめキャリブレーションを行なってppm- ρ , ppm- $\mu\text{S}/\text{cm}$ グラフを作成した。これによって電導度計、比重計の両者による塩分濃度差を検定したが、両者の間には差異は認められなかった。以上の手順によってグラフ上に深度毎に塩分濃度をプロットし塩分分布図を作成した。

(2) 風速観測 風速観測資料は松江気象台の記録によった。同気象台の所在地と測定地点とは数キロ離れていて実際には相関性が問題になるが、両地点の風速の差異は無視して、今回の調査ではとりあげなかった。

1-3 観測期日および時刻

風による塩分濃度分布の攪乱がもっとも見受けられやすいことを目的に、山陰地方で季節風の強い昭和39年1月26日から2月26日までの1カ月間とし、観測時刻は観測船の危険度を考慮して午前中に終了するようにした。

2. 観測記録およびその特質

2-1 観測記録 表-1の通りである。

2-2 塩分鉛直分布の特質

観測資料のうち2,3の例を除いて図-2に示すように塩分鉛直分布がきわめて明白に確認出来る。

- (1) 上層, 下層の塩分濃度差が認められる。
- (2) 塩分濃度の急変部すなわち躍層が存在する。

(3) 風による躍層の上昇および攪乱が行なわれている。

3. 塩分鉛直分布の安定性

3-1 風が水面におよぼす摩擦力

風が連続して一定方向に吹くと水面上に表面摩擦力が発生する。

$$\tau_a = k \rho_a w^2 \quad \rho_a = 0.0013 \dots \dots \dots (1)$$

τ_a : 表面摩擦力

ρ_a : 空気密度

w : 風速

k : 水面の粗滑による定数

Munk は風速が6.6 m/secを境界として、水面が滑面

表-1 観 測 記 録

観 測 月 日	観 測 時 刻		全波高 (m)	全水深 (m)	躍層深 (m)	水 温 °C		比 重 計 に よ る 比 重		電 導 度 $\mu S/cm$		風 速 (m/s)		備考
	開 始	終 了				上 層	下 層	上 層	下 層	上 層	下 層	平均	最大	
Jan 26	10.00	10.30	0.15	5.0	3.0	0.5	6.0	1.015	1.019	18×10 ³	24×10 ³	1.5	5.3	
27	8.10	9.00	0.05	5.0	1.5	0.5	5.0	1.012	1.015	15	19	1.9	4.5	
28	9.30	11.30	0.40	4.8	3.0	0.5	4.8	1.012	1.016	15	18	4.1	9.0	
29	9.30	11.00	0.60	4.5	4.0	0.5	4.5	1.012	1.013	15.5	16	3.0	7.2	
30	8.30	10.30	0.40	4.5	2.0	0.5	4.5	1.012	1.014	15.5	16	1.8	4.7	
31	9.20	10.20	0.50	4.7	2.0	0.5	4.7	1.010	1.013	13	15	6.7	11.3	
Feb 1	8.30	10.00	0.40	4.5	2.0	0.5	4.5	1.012	1.014	15	16.5	6.1	11.7	
2	15.30	17.00	0.60	4.5	3.0	0.5	4.5	1.013	1.015	16.5	17.5	4.6	7.5	
3	8.30	10.00	0.15	4.5	4.0	0.5	4.5	1.013	1.017	16.5	20.5	1.6	5.3	
4	13.00	14.00	0.20	4.8	3.5	0.5	4.8	1.012	1.017	14.9	21	2.2	6.5	
5	8.00	9.30	0.15	4.5	4.0	0.5	4.5	1.012	1.014	15	16.5	1.3	5.0	
6	9.00	10.20	0.07	4.5	2.5	0.5	4.5	1.013	1.015	15.8	18	1.4	4.5	
7	8.30	10.00	0.02	4.5	4.0	0.5	4.5	1.012	1.014	14	17	0.6	2.5	
8	9.20	11.20	0.15	4.5	1.5	0.5	4.5	1.011	1.024	13	23	3.5	6.3	
9	10.10	11.30	0.05	4.5	—	0.5	4.5	1.011	1.011	14	14	3.8	6.2	
10	8.30	10.00	0.07	4.5	3.5	0.5	4.5	1.011	1.012	13.5	14	1.7	4.2	
11	10.00	11.30	0.15	4.5	2.5	0.5	4.5	1.008	1.014	9	18.5	6.6	14.7	
12	9.30	11.00	0.25	4.5	2.5	0.5	4.5	1.012	1.013	13	15	6.2	10.7	
13	9.30	11.00	0.20	4.5	4.0	0.5	4.5	1.011	1.012	12	13.5	2.8	6.3	
14	9.30	11.00	—	4.5	3.5	0.5	4.5	1.010	1.012	11.3	15	3.9	8.8	
15	9.00	11.00	0.02	4.5	3.5	0.5	4.5	1.010	1.013	11	15	0.8	2.8	
16	9.00	11.00	0.04	5.0	2.5	0.5	5.0	1.008	1.012	9.5	12.8	1.7	9.7	
17	13.30	15.30	0.07	4.5	4.0	0.5	4.5	1.009	1.014	10	17	3.4	9.7	
18	9.30	11.00	0.15	4.5	3.0	0.5	4.5	1.008	1.013	10	16	2.9	6.0	
19	9.30	11.00	0.05	4.5	2.0	0.5	4.5	1.012	1.013	10	11	1.4	6.7	
20	10.00	11.30	0.03	4.5	3.0	0.5	4.5	1.011	1.015	9.5	13	1.2	4.0	
21	9.30	11.00	0.07	4.5	3.5	0.5	4.5	1.008	1.012	9.7	18	2.8	7.5	
22	8.30	10.00	0.14	4.5	3.0	0.5	4.5	1.007	1.010	10	12	3.9	6.0	
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.3	6.2	欠測
24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.4	8.3	欠測
25	10.00	11.30	0.12	4.5	4.0	0.5	4.5	1.008	1.010	10	12	4.1	6.2	
26	14.00	15.30	0.07	4.5	3.0	0.5	4.5	1.008	1.013	10	11	2.0	5.5	

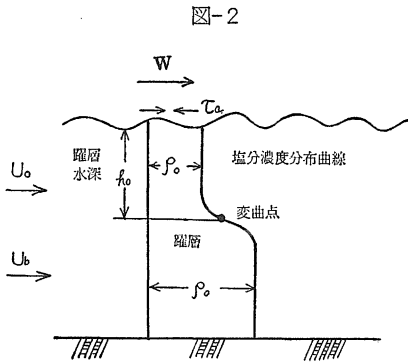


図-2

から粗面に転ずるとしてkに次の値を与えている。

$$\begin{aligned} \tau_a &= 0.8 \times 10^{-3} \rho_a w^2 & w < 6.6 \text{ m/sec} \\ \tau_a &= 2.6 \times 10^{-3} \rho_a w^2 & w > 6.6 \text{ m/sec} \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

3-2 躍層境界面の安定指数

塩分濃度差, すなわち密度差による境界面の混合拡散の安定性を示す無次元数として Richardson 数がある。

$$R_i = \frac{g \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad \begin{matrix} R_i > 1 & \text{拡散が発達しない} \\ R_i < 1 & \text{拡散が発達する} \end{matrix} \quad \dots\dots(3)$$

- R_i : Richardson 数
- U : 流れの水平速度
- ρ : 流体の密度
- z : 鉛直深度

Richardson 数は鉛直方向の密度変化率と流速分布の変化率すなわち剪断抵抗力との比であるが, (3)式を実際に適用するには次の点で問題がある。

$\frac{\partial \rho}{\partial z}, \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2$ の項は微分項であり流速分布を握しなくてはならないが, 流速測定自体煩雑であり(3)式の実際の適用は困難である。R_i 数を算出する場合, 流速分布を外面的な水理量たとえば, 躍層水深, 風による水面摩擦力, 境界面に発生する剪断応力, 密度差等によって等置換して R_i 数を変型することが考えられる。そこで,

$$\left. \begin{aligned} \Delta \rho &= \rho_b - \rho_o \\ \rho_m &= \frac{\rho_b + \rho_o}{2} \\ \Delta z &= h_o \\ \Delta U &= U_o - U_b \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

図-2 参照

(3), (4)より変型された R_i 数として R_{im} (Modified Richardson's Number) が得られる。

$$R_{im} = \frac{g}{\rho} \left(\frac{\rho_b - \rho_o}{h_o} \right) / \left(\frac{U_o - U_b}{h_o} \right)^2 \quad \dots\dots(5)$$

境界層に発生する剪断応力は次式で示される。

$$\tau_b = C_f (U_o - U_b)^2$$

C_f : 抵抗係数(6)

(5), (6)より

$$R_{im} = C_f g (\rho_b - \rho_o) h_o / \tau_b \rho_m \quad \dots\dots(7)$$

τ_a = τ_b, ρ_m ≐ 1としてその誤差をC_fに含ませると次のように簡素化した Richardson 数が誘導される。

$$R_{im} = C_f g (\rho_b - \rho_o) h_o / \tau_a \quad \dots\dots(8)$$

C_f は R_{im} によって変化するものであるが, 実用上は C_f に適当な値を恒数に設定する必要があり, この値は実測によって見出さねばならない。

4. 中海塩分鉛直分布の安定性の検討

4-1 抵抗係数C_fの算出および考察

C_fの算出には次のような考え方に基づいて行なう。観測当日の測定結果は前日の平均風速によって拡散され, 塩分の捲上げが行なわれ平衡状態に達した結果であり, 換言すれば観測前日の平均風速に対して R_{im} は1と考えられる。(8)より得た C_f は表-2に示す。

Δρ 別 C_fの間には反比例的な傾向がみられる。Δρ毎に分類された C_f のうちには極端に値の開いたものもあるが, 分類された C_f 群のうち最大, 最少の比が10以上になっている場合には両者あるいは一方を棄却して平均値的な \bar{C}_f を算出すると表-3のようである。

抵抗係数の実測値として北海道石狩川, 天塩川で観測されたものとして C_f = 10⁻³ ~ 10⁻⁴ が得られているが, 本調査の結果では総体的にオーダーが1~2桁下がっている。このことは Δρ ~ \bar{C}_f の反比例的な相関性とともな中海の特質を示すものとして興味深い。

4-2 Modified Richardson 数 R_{im} 算出および考察

4-1で得た C_f によって観測日の R_{im} を算出すると表-2のようになる。これより R_{im} の値は日によってかなり変動を示している。換言すれば中海における塩分濃度鉛直分布の風に対する安定性は低いと考えられる。したがって淡水化促進のための排水樋門の合理的な操作, 管理の面からもこの問題の追求される必要がある。

5. む す び

本調査の結果より次のことがいえる。

- (1) 中海の塩分濃度分布は風の影響による拡散がかなり顕著である。従来塩分拡散問題は河川流入量の増減, 湖汐による塩水楔の進入などが主ファクターとして考えられていたが, 中海においては風による影響も無視できないことを確認した。
- (2) 中海における湖流の抵抗係数 C_f は 10⁻⁴ ~ 10⁻⁶ の範

表-2 C_f , R_{im} 算出表

観測月日	観測前日 平均風速 (m/s)	τ_a (t/m ²)	$\rho_b - \rho_0$ (t/m ³)	h_0 (m)	C_f (c.g.s)	R_{im}
Jan	26	2.4	5.99	4	5.2	2.6
	27	1.5	2.34	3	5.4	0.6
	28	1.9	3.75	4	3.3	0.2
	29	4.1	17.48	1	4.0	0.2
	30	3.0	9.36	2	2.0	2.8
	31	1.8	3.37	3	2.0	5.8
Feb	1	6.7	151.73	2	2.0	394.9
	2	6.1	38.70	2	3.0	67.1
	3	4.6	22.01	4	4.0	14.3
	4	1.6	2.66	5	3.5	1.6
	5	2.2	5.03	2	4.0	6.8
	6	1.3	1.76	2	2.5	3.7
	7	1.4	2.04	2	4.0	2.7
	8	0.6	0.37	13	1.5	0.2
	9	3.5	12.74	0	—	—
	10	3.8	15.02	1	3.5	44.7
	11	1.7	3.01	6	2.5	2.1
	12	6.6	147.23	1	2.5	613.3
	13	6.2	39.98	1	4.0	104.1
	14	2.8	8.15	2	3.5	12.1
	15	3.9	15.82	3	3.5	11.0
	16	0.8	0.67	4	2.5	0.7
	17	1.7	3.01	5	4.0	1.5
	18	3.4	12.02	5	3.0	8.4
	19	2.9	8.75	1	2.0	45.5
	20	1.4	2.04	4	3.0	1.7
	21	1.2	1.50	4	3.5	1.1
	22	2.8	8.15	3	3.0	9.4
	23	3.9	15.82	—	—	—
	24	4.3	19.23	—	—	—
	25	4.4	20.13	2	4.0	26.1
	26	4.1	17.48	5	3.0	12.1

囲に存在することが推定される。これによって淡水化水理に一応の計算の基礎を置くことができる。

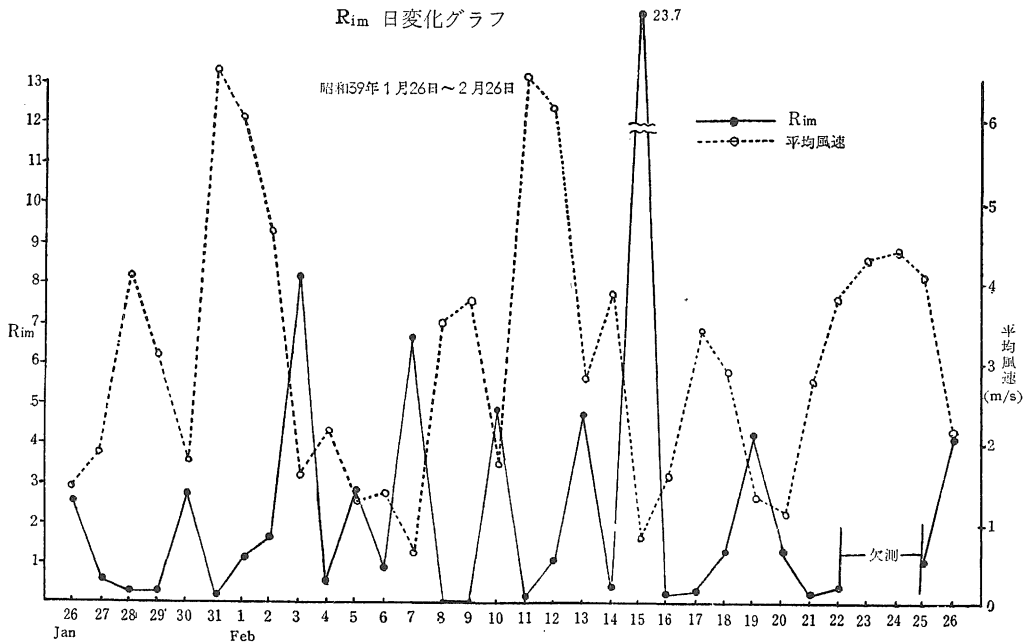
今回の限られた調査資料から正確な結果は期待出来ないが今後観測方法の改良、新規観測点の設置などを計り、調査の確実を期したい。本調査に終始懇切な助言を受けた京都大学南勲助教授ならびに観測に伴う諸作業に便宜を与えられた前農林省中海干拓事務所佐藤勇調査設計課長に謝意を表する。

表-3 C_f 分類表 単位 ($\times 10^{-6}$) * 棄却

順位	$\Delta\rho$						
	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.013
1	44.7	* 2.7	5.4	0.7	1.5	2.1	0.2
2	44.7	3.7	5.8	1.1	1.6		
3	45.5	6.8	9.4	1.7	8.4		
4	45.5	12.1	11.0	3.3	12.1		
5	104.1	24.3		4.3			
6	*613.3	26.1		5.2			
7		67.1					
8		*394.9					
\bar{C}_f	56.9	23.3	7.9	2.7	5.9(?)	2.1	0.2

図-3

R_{im} 日変化グラフ



6. 参 考 文 献

1. 日高孝次：海流 1955 東京
2. 石原藤次郎・本間 仁：応用水理学中Ⅱ 1958 東京
3. 農林省岡山農地事務局：中海干拓および淡水化事業
計画書 1960
4. Isao MINAMI：Coastal Engineering 1964
NEW YORK (分冊)
5. 本間 仁・安芸皎一：物部水理学 1962 東京
6. 推貝博美：密度流に関する研究 1961 東京大学工
学部
7. 土木学会：水理公式集 1963 東京

Summary

This paper deals with the results of the investigation on the stability of the vertical salinity distribution effected with the wind velocity in Nakaumi Sea. In order to carry out this investigation, the author observed continually the vertical salinity distribution in Nakaumi Sea for a month running from Jan. 26, 1964 to Feb. 26 and analyzed the data obtained. To clarify the stability of the boundary or the diffusion from the lower salt water, the author applied the modified Richerdson's number R_{im} to this problem. And from this investigation, the following results were obtained.

(1) The value of R_{im} calculated in each cases ranges from 0 to 23.7, i. e., the stability of the vertical salinity distribution in Nakaumi Sea is much more largely effected with the wind velocity than generally expected.

(2) The value of C_f , coefficient of the friction resistance caused on the internal boundary plane is presumed to exist in order $10^{-4} \sim 10^{-6}$ (c. g. s.) and to have an inclination to proportinate inversely $\Delta\rho$, the difference of the density between the upper fresh water and the lower salt water.