

揚水を伴う自由地下水帯における塩分挙動

尾島 勝*

Experimental Study on Salt Intrusion in Unconfined Groundwater with Pumping

Masaru OJIMA

ABSTRACT

An analysis of movement of intruded saltwater in coastal aquifers is of great importance to the groundwater use and management. Especially, in the unconfined aquifer with pumping well, the behavior of interface flow is very complicated under various influences.

An analytic technique for solving three-dimensional interface problems in coastal aquifers was proposed by O. D. L. Strack in 1976. In this study, in order to investigate the application of his discharge potential to actual conditions, the sand model experiments are made under several hydraulic conditions. Profiles of actual free-surface and interface are examined in comparison with the calculated results.

Key words : Unconfined groundwater, Discharge potential, saltwater intrusion, Sand-model experiment, .

キーワード ; 自由地下水, 流量ポテンシャル, 塩水侵入, 砂層モデル実験

1. まえがき

地下水は、古くから水量の安定性、水質の清浄性ならびに取水の容易さのゆえに貴重な水資源として利用されてきた。主水源としては地表水に頼るわが国でも、現在では年間約138億 m^3 (依存率約16%)¹⁾の地下水が各種の用途に利用されている。ところが近年、過剰取水に起因する地下水位低下、地盤沈下および海岸部地下水の塩水化など的人為的地下水障害が、各地で深刻な社会問題になりつつあり、その解決と積極的な防止対策の実施が急務とされている。²⁾

本研究は、海岸部地下水の塩水化の防止・軽減を目的とした、適正な地下水管理方法を見出すための基礎的な研究成果を得ようとするものである。すなわち、所定の揚水条件ならびに地下水流動条件を付加した砂層モデルを用いて塩分侵入実験を行い、その実験結果を準一様流

の仮定のもとに導かれた流量ポテンシャル理論による解析結果と比較考察する。また、揚水の吸引作用に対する侵入塩水楔の安定性についても検討する。

海岸部の自由地下水帯への塩分侵入現象は、その解析の目的に応じて成層密度流 (塩水楔)³⁾あるいは濃度分散現象⁴⁾としての理論的取り扱いがなされてきたが、ここに示す流量ポテンシャルは前者に属する。これは、1976年にStrack⁵⁾によって提唱されたものであり、わが国では神野らの井戸による最適取水の問題への実際的アプローチがある。⁶⁾

2. 流量ポテンシャル理論に基づく解析

2.1 基礎方程式

Fig.1に示すように、一定水位の海岸境界 (水深 H_s) と内陸側の水位境界 (水深 H_o) の間に存在する自由地

* 土木工学科

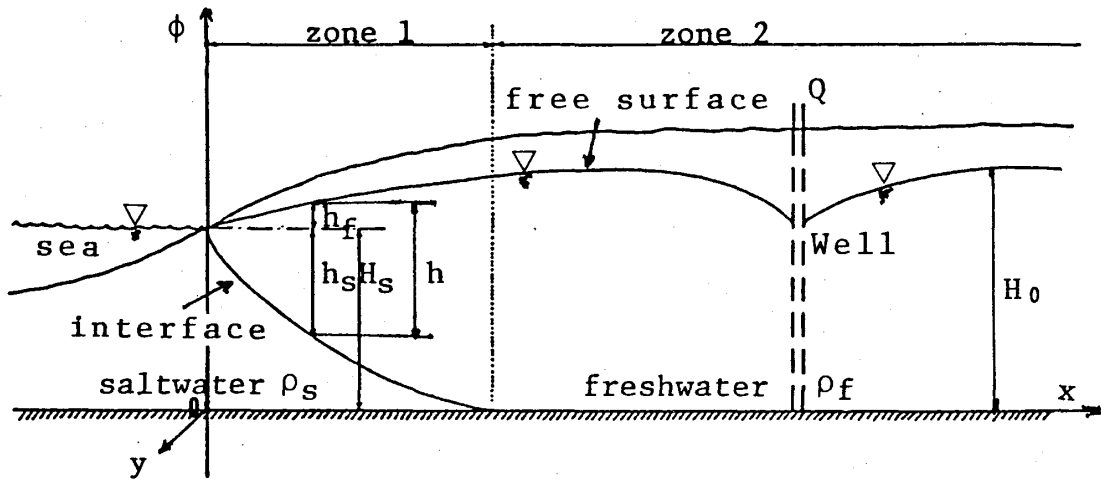


Fig.1 Interface flow in shallow coastal aquifer with pumping well

下水帯において、塩水楔の先端よりも内陸側に井戸がある場合を考えて、次の仮定のもとに解析する。

1) 不圧帯水層（自由地下水帯）は水平な不透水基盤上にあり、その透水係数は場所的・時間的に一定である。また、帯水層内の流れはダルシー則に従う。

2) 鉛直方向の流速成分は、水平方向のそれに比して小さいとしてこれを無視し、流れを準一様流として取り扱う。

3) 侵入塩水領域内の塩分濃度は一様で、海水濃度に等しい。また、淡塩境界面での塩分の分散は無視できるほど小さく、したがって、淡塩境界面は明瞭である。

図に示すように空間座標を定める。また、図中に示した水理量はそれぞれ次のようである。

ρ_f , ρ_s : 淡水および塩水の密度, h : 淡水流動層厚, h_f : 海水位面から自由表面までの厚さ, h_s : 海水位面から淡塩境界面までの厚さ, ϕ : 不透水基盤から測った淡水水頭,

浸透流れはダルシー則に従い、デュピイの準一様流の仮定が成立つとすれば、透水係数を k として x , y 方向の単位幅流量 Q_x , Q_y は

$$Q_x = -kh(\partial\phi/\partial x), \quad Q_y = -kh(\partial\phi/\partial y) \quad (1)$$

となる。また、ヘルツベルグの圧力平衡式は、

$$h_s = h_f[\rho_f/(\rho_s - \rho_f)] = h_f 1/\varepsilon \quad (2)$$

であるから、塩水侵入域（領域 I）では、

$$h = [\rho_s/(\rho_s - \rho_f)]\phi - [\rho_s/(\rho_s - \rho_f)]H_s \quad (3)$$

となり、一方塩水非侵入域（領域 II）では $h = \phi$ であることは自明である。したがって、 h と ϕ の関係は両領域ともに次のように同一形式で表現できる。

$$h = \alpha\phi + \beta, \quad \alpha = \rho_s/(\rho_s - \rho_f),$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= [\rho_s/(\rho_s - \rho_f)]H_s & (\text{領域 1}) \\ \alpha &= 1, \beta = 0 & (\text{領域 2}) \end{aligned} \right\} (4)$$

そこで、式(4)の関係を式(1)に代入すれば、 $Q_x = -\partial\Phi/\partial x$, $Q_y = -\partial\Phi/\partial y$, ここに

$$\Phi = k\left(\frac{\rho}{\alpha}\right)\left\{\phi + \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\right\}^2 + C \quad (5)$$

となるから、この Φ は流量ポテンシャルと呼ぶことができる。すなわち、領域 I および II における流量ポテンシャルは、

$$\Phi_1 = \frac{1}{2}k\{\rho_s/(\rho_s - \rho_f)\}\{\phi - H_s\}^2 + C_1 \quad (6)$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{2}k\phi^2 + C_2 \quad (7)$$

と表わされる。ここに C_1 , C_2 はそれぞれの領域における定数であり、塩水楔の先端位置での Φ_1 , と Φ_2 の接続条件式より、

$$C_1 - C_2 = \frac{1}{2}\rho_s/\rho_f H_s^2 \quad (8)$$

となる。いま、 $C_1 = 0$ (定数) と与えると $C_2 = -\frac{1}{2}\rho_s/\rho_f H_s^2$ となり、式(6), 式(7)はそれぞれ次のように決定される

$$\Phi_1 = \frac{1}{2}k\{\rho_s/(\rho_s - \rho_f)\}\{\phi - H_s\}^2 = \frac{1}{2}k\{(1+\varepsilon)/\varepsilon\}(\phi - H_s)^2 \quad (6')$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{2}k\{\phi^2 - (\rho_s/\rho_f)H_s^2\} = \frac{1}{2}k\{\phi^2 - (1+\varepsilon)H_s^2\} \quad (7')$$

また、塩水楔先端位置における流量ポテンシャル Φ_c は、

$$\begin{aligned} \Phi_c &= \frac{1}{2}k(\rho_s/\rho_f)\{(\rho_s - \rho_f)/\rho_f\}H_s^2 \\ &= \frac{1}{2}k\varepsilon(1+\varepsilon)H_s^2 \end{aligned} \quad (9)$$

と表わすことができる。

2.2 揚水場における流量ポテンシャル

Fig.1に示した海岸地下水領域における下流端境界条

件は次式のようになる。

$$\phi = H_s; \quad x=0, \quad -\infty < y < +\infty \quad (10)$$

$$\Phi = 0; \quad x=0, \quad -\infty < y < +\infty \quad (11)$$

境界条件(11)を満足し、陸側から海へ向う流れのポテンシャルは、 Q_{x_0} を無揚水定常状態における単位幅当りの淡水流量として $\Phi = Q_{x_0}x$ と与えられ、揚水井戸の存在は、鏡像の原理によって簡潔に説明され、 $x=x_w, y=0$ 位置における単位揚水量 Q の揚水井戸があるときは、その流量ポテンシャルは次式のように表わされる。

$$\Phi = Q_{x_0}x + \frac{Q}{2\pi} \ln \left[\frac{(x-x_w)^2 + y^2}{(x+x_w)^2 + y^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

したがって、塩水楔の先端位置においては式(9)と式(12)が等しくなるから、

$$\frac{1}{2}k \frac{\rho_s}{\rho_f} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} H_s^2 = Q_{x_0}x + \frac{Q}{2\pi} \ln \left[\frac{(x-x_w)^2 + y^2}{(x+x_w)^2 + y^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

と書ける。

2.3 井戸への塩分侵入の防止

Fig.1のような状態からさらに揚水量が増大すれば、塩水楔は漸次内陸部へと侵入していき、いずれはFig.2に示すような状態に至る。このように塩水が揚水井戸に吸引される状態になれば、図に示したように塩水楔の内部においても井戸に向う定常速度が存在するために、式(12)を適用することはできない。

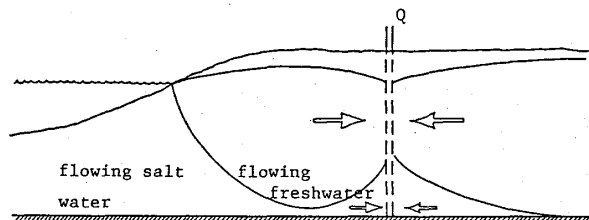


Fig.2 Flow condition capturing brackish water in the well

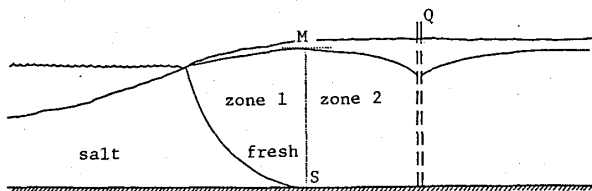


Fig.3 Instability of the interface at point S

Fig.3に示すような内部境界面条件にある場合には、塩水楔が静止している状態であっても、揚水量のわずかな増大によって塩水の内陸部侵入が引き起こされる。

図中のM-S線はよどみ点を結ぶ線であり、M-S線

を横切る流れは生じない。すなわち、 x 軸上におけるよどみ点と塩水楔先端位置の座標が一致するような状態は、式(13)を満足しうる限界の状態であり、楔の先端がこれより少しでも内陸側に侵入するならば、塩水は井戸に向かって急速に吸引されることになる。この限界状態における流れの様相をFig.4に示した。

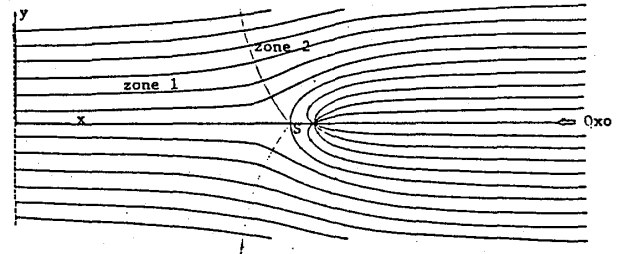


Fig.4 Critical situation in plan view

ところで、流量ベクトルの x および y 方向成分、すなわち単位幅流量 Q_x, Q_y は、式(12)で示される流量ポテンシャルより、次のように求められる。

$$Q_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -Q_{x_0} - \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{x-x_w}{(x-x_w)^2 + y^2} - \frac{x+x_w}{(x+x_w)^2 + y^2} \right]$$

$$Q_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{Q}{2\pi} \left[\frac{y}{(x-x_w)^2 + y^2} - \frac{y}{(x+x_w)^2 + y^2} \right] \quad (14)$$

そこで、よどみ点の座標 (x_s, y_s) は、式(14)で示した Q_x, Q_y が零に等しいこと、さらには $x_s \neq x_w, x_s > 0$ でなければならないことから、次式のように決定される。

$$(x_s, y_s) = (x_w(1 - \frac{Q}{\pi Q_{x_0} x_w})^{\frac{1}{2}}, 0) \quad (15)$$

ここに、よどみ点が海岸線より内陸部にあたるためには、 x_s は実数かつ正でなければならない。したがって、揚水条件が次のような場合に限られる。

$$\frac{Q}{Q_{x_0} x_w} < \pi \quad (16)$$

3. 塩水侵入に関する砂層実験

3.1 実験モデル

Fig.5に示した実験水槽(長さ399cm, 幅43cm, 高さ60cm)の中央部分(長さ207cm)に、Fig.6およびTable 1に示した物理特性をもつフルイ砂を高さ45cmまで均質になるよう注意深く成形して砂層モデルとした。

Fig.5に示した説明図において、①は内径5cm, ストレーナー開孔率約30%の全断面貫入の井戸モデルであり、下流側塩水槽(④: 塩水供給バルブ)端から12.5cm間隔で砂層モデルの中央線上に配置されており、下流端から100cmの位置にある井戸No.8で揚水を行い、その他のNo.1~No.7の井戸では所定の位置に設けられた計測プロ

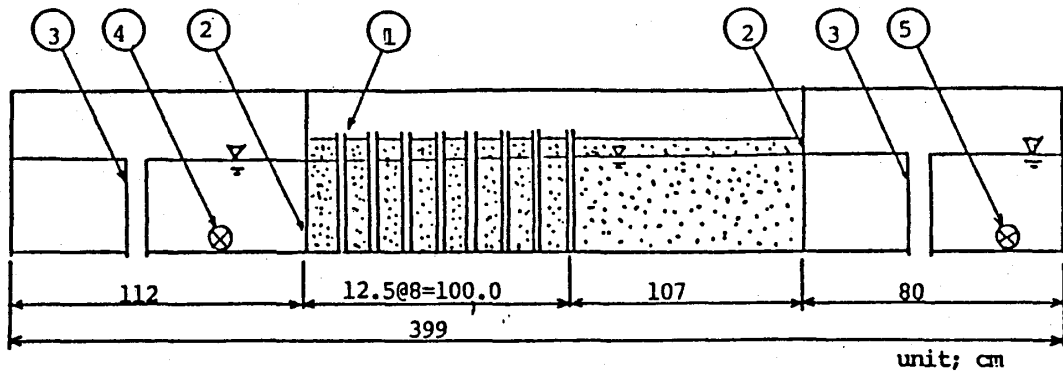


Fig.5 Experimental flume

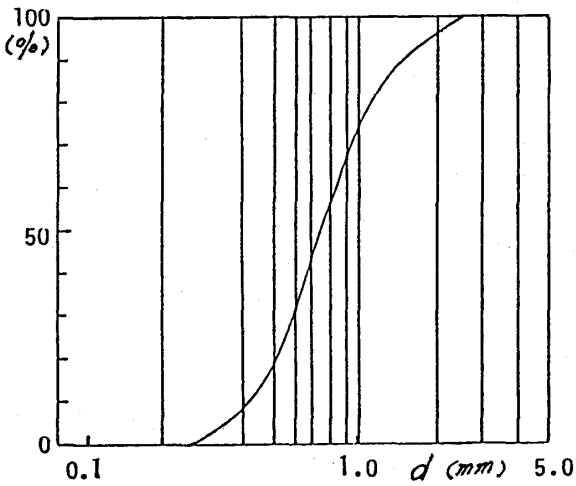


Fig.6 Grain-size distribution of the used sands

プにより侵入塩分の濃度測定を行う。⑤は上流側淡水槽の淡水供給バルブであり、③は定水位設定用の可変水頭余水吐である。②は砂止め用のステンレス製フィルターメッシュ (100号) である。

3.2 実験ケースおよび実験方法

実験ケースは、初期動水勾配 (水位差 Δh) および揚水量 (Q_p) の相違による10ケースであり、その水理条件はTable 2に示すとおりである。ケースAは無揚水実験を、Bは初期定常淡水流量 (Q_f) の約0.5倍の揚水量とする過少揚水実験を、Cは初期定常淡水流量にはほぼ等しい揚水条件の平衡揚水を、Dは約1.5倍の過剰揚水実験を表わしている。

実験時の計測量は、次に示す4項である。

- 1) 各観測井戸の各測点における電気伝導度 (塩分濃度)
- 2) 揚水量とその電気伝導度 (塩分濃度)

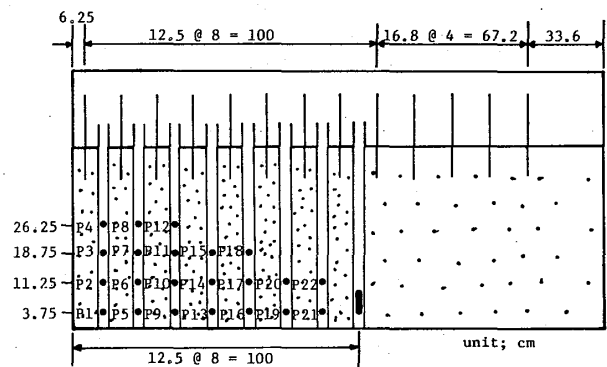


Fig.7 Sketch of the inside of experimental sand model

Table 1 Physical characteristics of the used sand

specific gravity	Gs	2.60
effective size (mm)	D ₁₀	0.41
uniformity coeff.	Uc	1.80
permeability coeff. (cm/sec)	K	0.094
porosity	λ	0.44

3) 淡水水槽余水吐からの越流流量

4) 砂層の所定測点における水位

塩分濃度測定用プローブ (東亜電波工業製, GS-201 PL) および水位測定用マンメータならびに揚水用サイフォンの設置位置はFig.7に示すとおりである。

塩水侵入実験に先だち、所定の水位差で淡水定常流れをつくり、上流側淡水水槽への供給流量と余水吐からの越流流量ならびに下流側水槽からの流出流量を測定して、Table 2に示した透水係数を算出しておく。その後、下流側水槽の砂層モデル下流端近傍に止水板を挿入して、水槽内の淡水を抜き、過マンガン酸カリウムで赤色に着

Table 2 Condition of experiments

Ex. Case	Δh	Q_f	Q_p	ρs	K
A-1	1.00	70	-	1.023	0.163
B-1	1.00	74	37	1.024	0.173
C-1	0.96	72	72	1.025	0.168
D-1	0.96	76	114	1.024	0.184
A-2	2.05	140	-	1.024	0.155
C-2	1.89	146	146	1.024	0.178
A-3	3.02	210	-	1.023	0.157
B-3	2.89	210	105	1.024	0.164
C-3	3.01	210	210	1.022	0.158
D-3	3.01	226	339	1.024	0.170

色した塩水 (C_l 濃度:18300ppm) に置き換えて準備を完了する。

止水板を取り除き塩水が砂層内に侵入し、淡水が流下し始める時刻を実験開始時刻として、最初の1時間は5分間隔で、以後1時間経過するたびに計測時間間隔を5分毎延ばして、10分、15分、20分とし、4時間経過後は30分間隔として、上記の計測諸量の測定を行った。

4. 実験結果と理論の比較

ここでは、各実験ケースでの塩分侵入現象を第2章に示した流量ポテンシャル理論に基づいて3次元的に解析し、その適用性に関して考察する。

4.1 等ポテンシャル線 (等水位線) および流線

解析の手順は次のとおりである。

i) 各実験ケースの水位条件に対し、式(7)'の ϕ 、 H_s に砂層上・下流端の水深を与えて流量ポテンシャル値を求める。さらに $\Phi = Q_{x_0} x$ の関係式から、無揚水時の最終定常淡水流量 Q_{x_0} を算出する。

ii) 式(13)により塩水楔先端位置の座標(x , y)を求める。

iii) 塩水侵入域に対しては式(6)', 非侵入域に対しては式(7)'を用い、これと式(12)を等置し、砂層中央断面(x , 0)における ϕ 、すなわち水面形を求める。

iv) 次に、上記のようにして求めた ϕ に対し、流水幅($-21.5 \leq y \leq 21.5$)の適当な座標値に対し、式(12)を用いて x 座標を求めて等ポテンシャル線(等水位線)を定める。なお、流線は等ポテンシャル線に直交することより描ける。

v) 式(2)より、砂層中央断面における内部淡塩境界面を算出する。

4.2 塩水楔先端の安定性の検討

ここでは、B-1、C-2およびD-3の3ケースに解析結果によって検討する。

Table 3は、これら3つの実験ケースに対する解析結果である。Fig.8~Fig10に等ポテンシャル線と流線を示した。ここで等ポテンシャル線を求める y 座標は $y=0$ より3cm間隔とした。なお、図中の細い点線は、式(13)より計算される塩水楔先端の理論上の侵入限界位置であり、1点鎖線は実験水面形から式(2)に基づいて計算された塩水楔先端での等ポテンシャル線を示している。

Fig.8に示したB-1は、過少揚水条件であるにもかかわらず、塩水楔の先端は、よどみ点($x_s=94.0$ cm)、揚水井戸位置($x_w=100$ cm)をはるかに越えて154.8cmに達しており、塩水がすでに揚水井戸内に侵入し、揚水されている状態である。したがって、流量ポテンシャルは式(12)のように表わせないことになる。

Fig.9に示したC-2の場合には、塩水楔の先端位置($x_c=76.5$ cm)は安定限界のよどみ点位置($x_s=90.7$ cm)よりも下流側にあるものの、楔先端の形状は内陸側に向って凸の状態を示し始めており、仮りにさらに揚水量が増せば、よどみ点位置は下流側に移動し、同時に楔の先端は井戸側に移動することになる。すなわち、現状では安定であるが、わずかな揚水量の増加によって塩水が井戸にまで侵入する状態にあるといえる。

Fig.10(ケースD-3)では、塩水楔先端($x_c=46.9$ cm)はよどみ点位置($x_s=86.5$ cm)よりもまだかなり下流側にある。したがって、本理論に基づけば十分安定な状態にあると判定される。

しかしながら、実際の現象は揚水に伴う吸引の影響によって侵入塩分の分散が強められることが予想される。したがって、砂層内の塩分濃度分布からの考察が必要である。

Table 3 Analytical results for 3 experimental cases

X	Calculated Water-Level (cm)													X_s (cm)	W_{1s} (cm)	X_c (cm)	W_{1c} (cm)	Q_{x_0} (cm^3/min)	Q_p (cm^3/min)
	6.25	18.75	31.25	43.75	56.25	68.75	81.25	93.75	106.25	123.04	139.83	156.63	173.42						
B-1	34.05	34.17	34.25	34.31	34.37	34.41	34.45	34.47	34.52	34.60	34.66	34.72	34.77	94.01	34.47	154.81	34.71	43.56	37
C-2	34.19	34.37	34.49	34.59	34.67	34.78	34.79	34.81	34.89	35.09	35.23	35.37	35.49	90.68	34.83	76.47	34.78	112.48	146
D-3	34.27	34.50	34.65	34.77	34.87	34.95	35.02	34.99	35.13	35.51	35.78	36.02	36.24	86.47	35.25	46.90	34.79	183.92	339

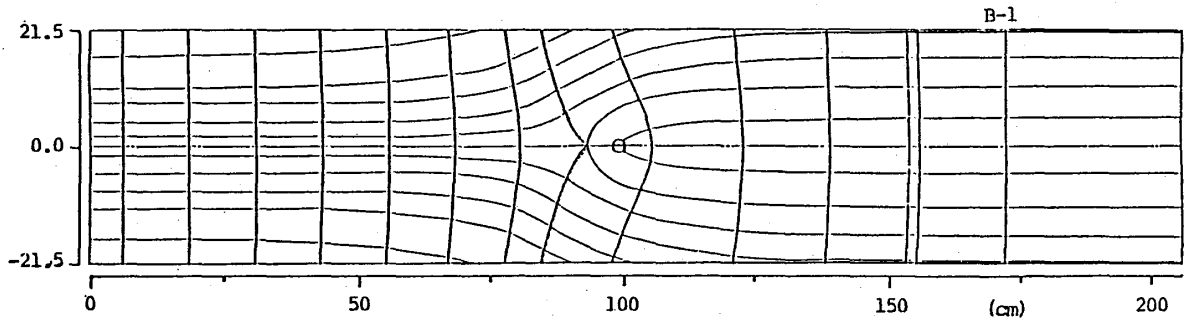


Fig. 8 Profiles of the equi-potential lines and Stream lines(Case B-1)

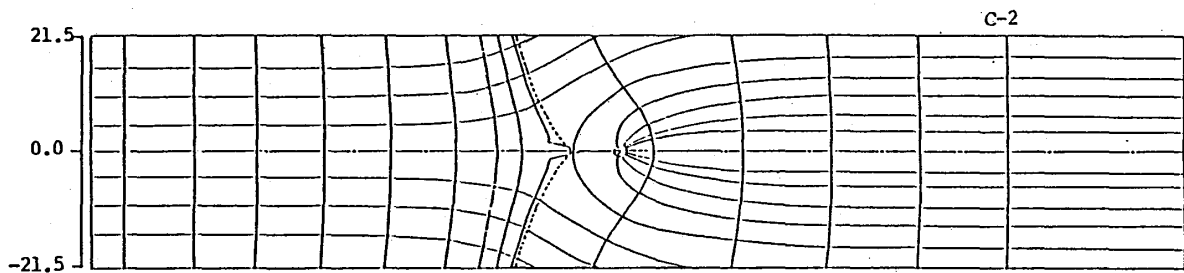


Fig. 9 Profiles of the equi-potential lines and Stream lines (Case D-2)

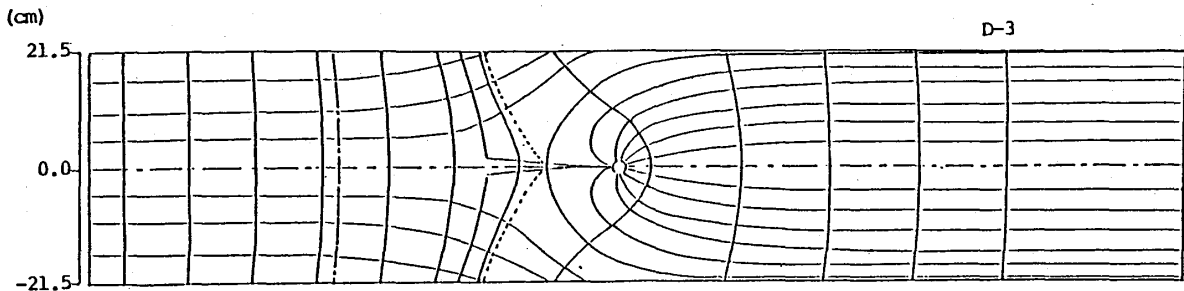


Fig. 10 Profiles of the equi-potential lines and Stream lines (Case D-3)

4. 3 内部淡塩境界面と砂層内塩分濃度分布

まず、解析の手順を簡単に示せば次のようになる。

i) 式(2)のヘルツベルグの条件式を用い、各実験で計測された最終常水面形①に対応する内部淡塩境界面①を求める。

ii) 各実験の水位条件に対し、本章4.1で示した解析手順より得られた無揚水時の最終定常淡水流量 Q_{x_0} に基づく理論水面形②を求め、これに対応する内部界面②を算出する。

iii) 水面形②は上流淡水水槽の実験水位と完全には一致しないから、これを一致させるような修正淡水流量 Q'_{x_0} を求め、これに基づく修正理論水面形③を求める。そしてこれに対応する内部界面を式(2)より求める。

iv) 無揚水実験(A-1, A-2, A-3)の3ケースについては、下流端開口部での鉛直方向流速の影響を組

み込んだ嶋・玉井の式⁹⁾に基づく内部界面④を算出する。

v) 砂層内の各測点における塩分濃度測定結果より、塩水槽の一定濃度($C_0=18300\text{ppm}$)に対する相対濃度値(C/C_0)の1.0, 0.75, 0.5, 0.25の4本の等塩分濃度線を求める。

以上のような方法によって得られた結果をFig.11~Fig.20に示した。なお、図において水面形①とそれに対応する内部界面①を実線、水面形②とその対応界面②を1点鎖線、修正理論水面形③とその対応界面③を2点鎖線、嶋・玉井の式による界面④を点線で示した。また、実験から得た最終定常時の相対濃度は、Table 4に示すとおりであり、これより算出した等濃度線は黒丸印付の実線で示している。図の縦縮尺は、水面形に対しては実スケールの2倍、内部界面および等濃度線に対しては1/3倍としている。

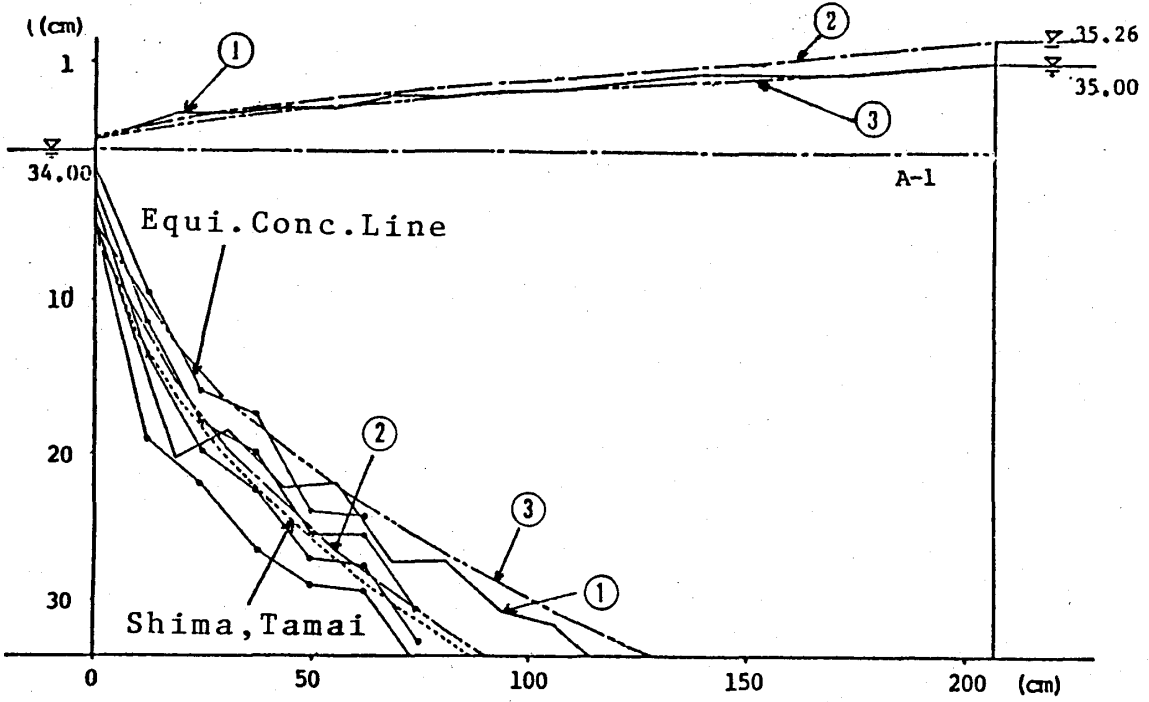


Fig. 11

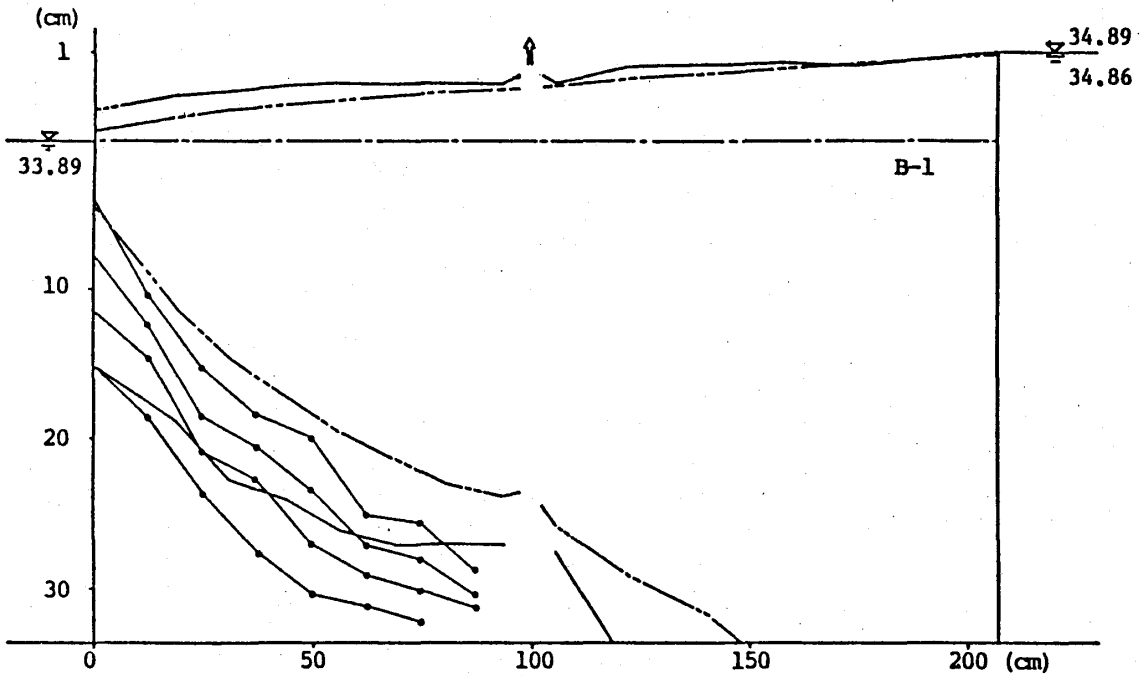


Fig. 12

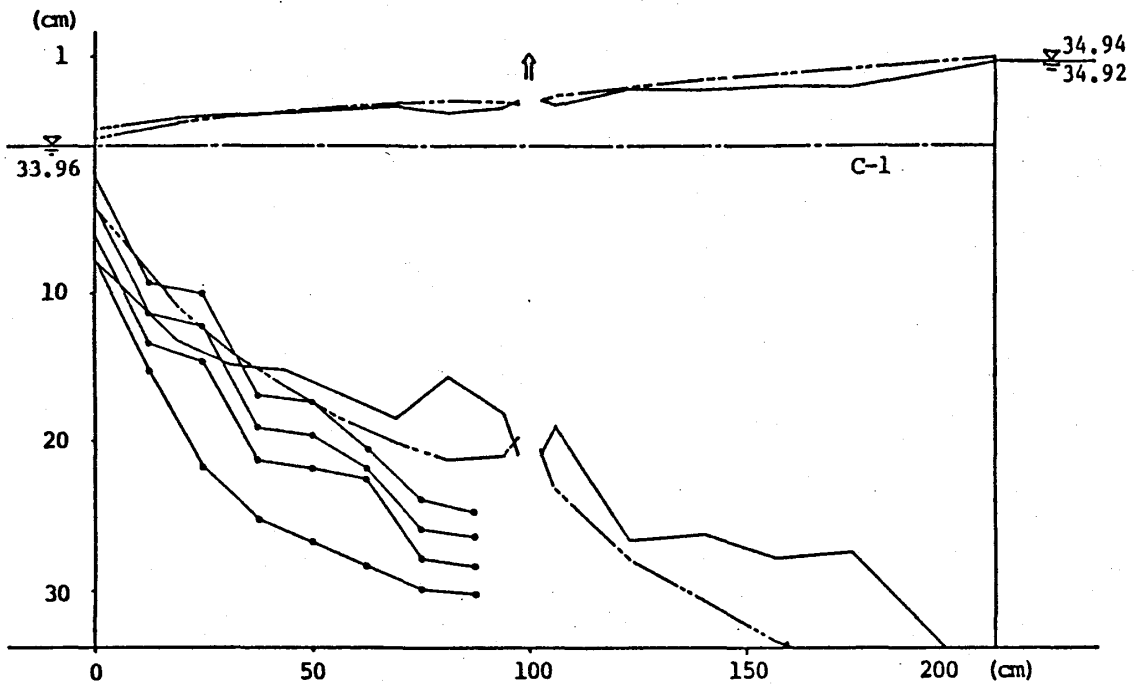


Fig. 13

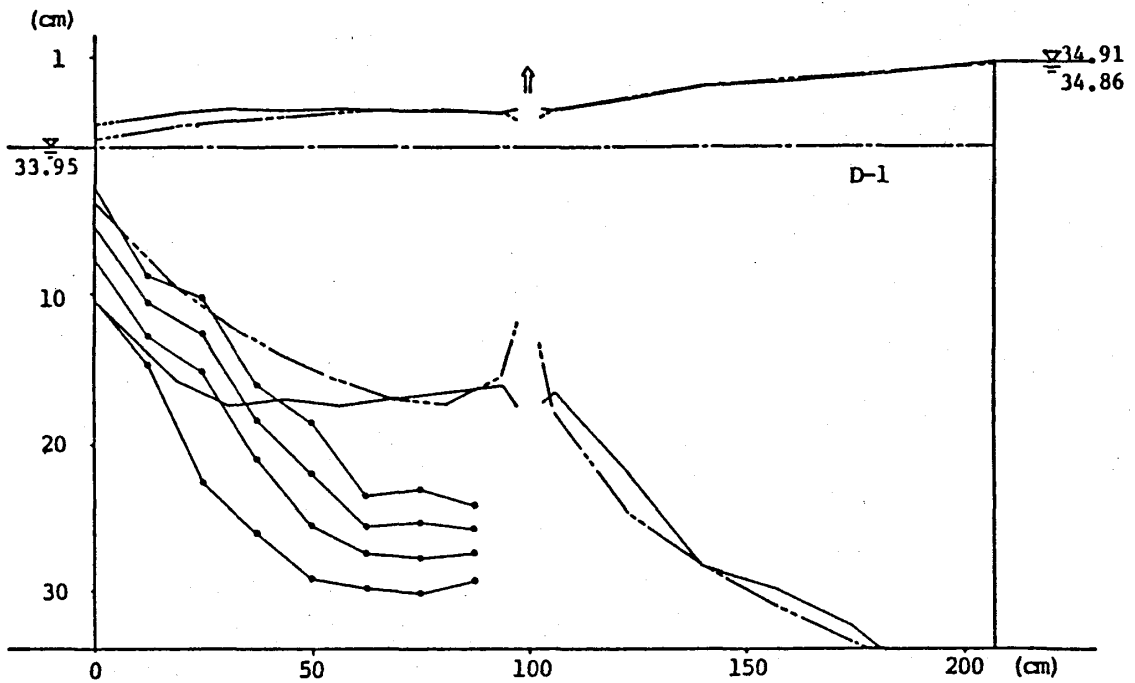


Fig. 14

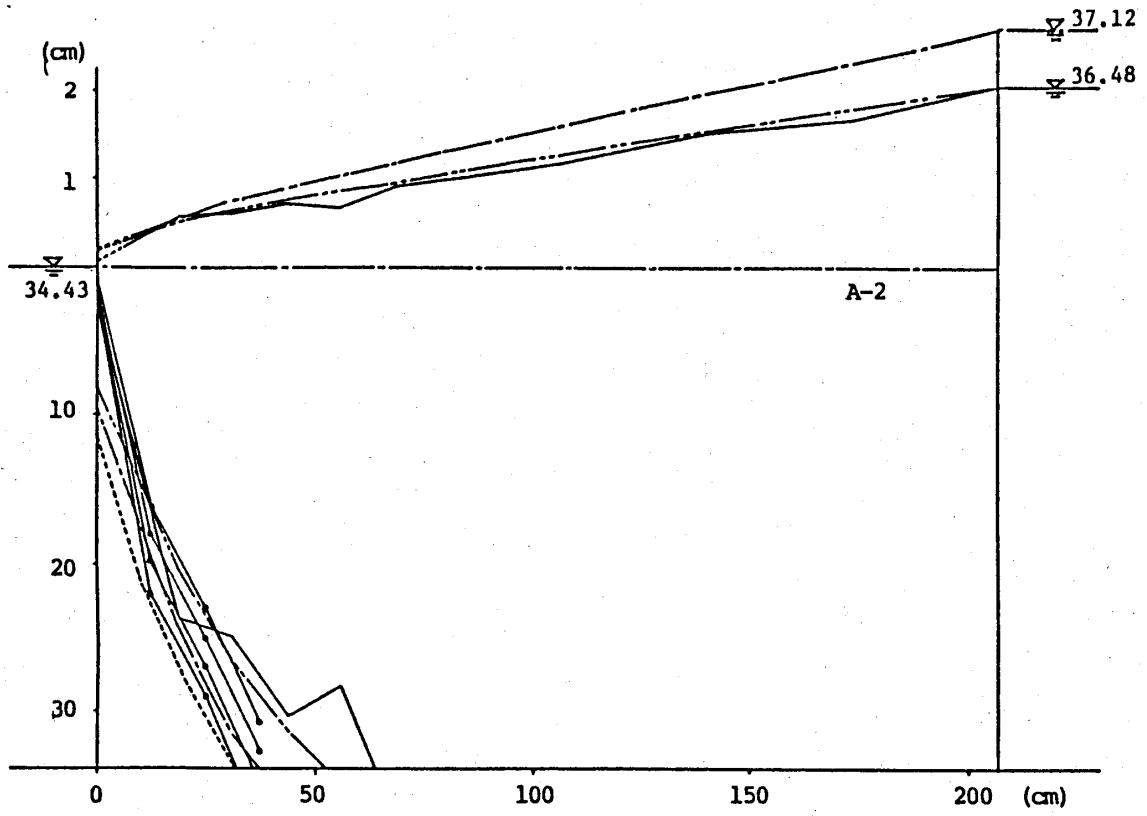


Fig. 15

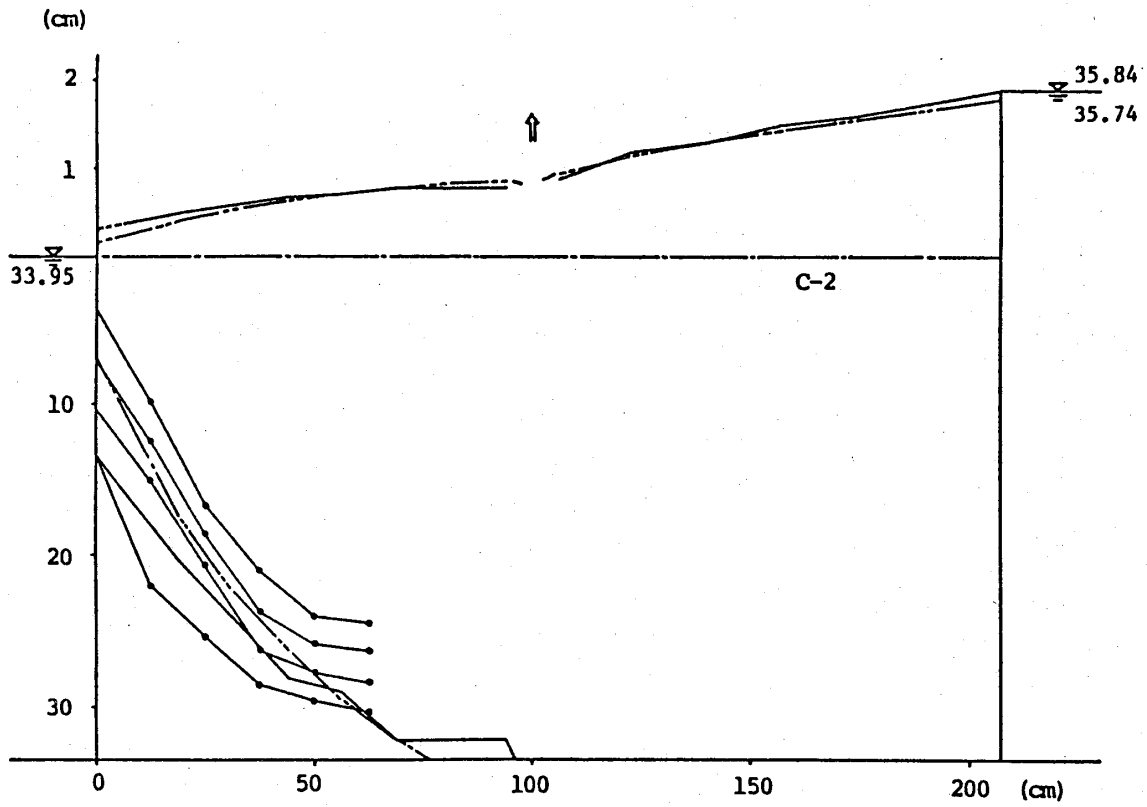


Fig. 16

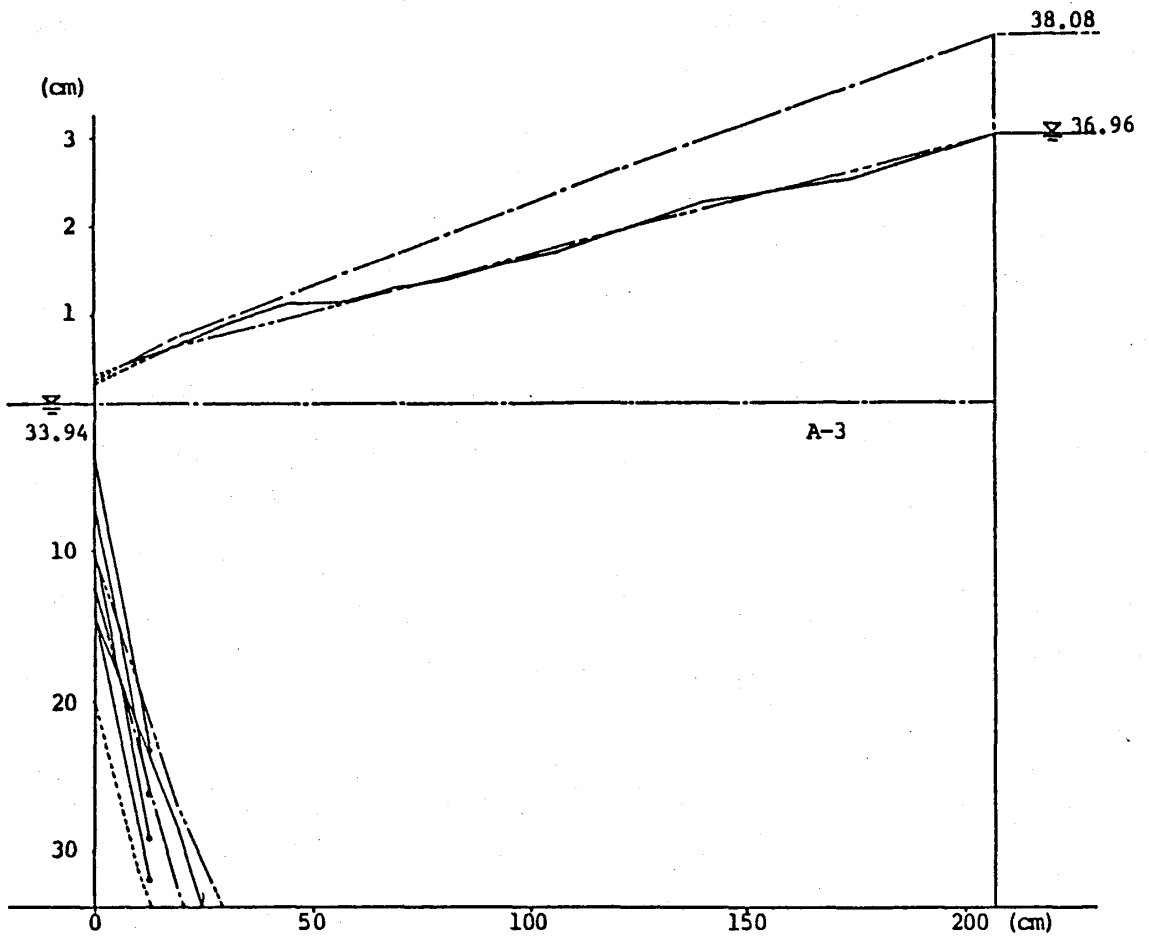


Fig. 17

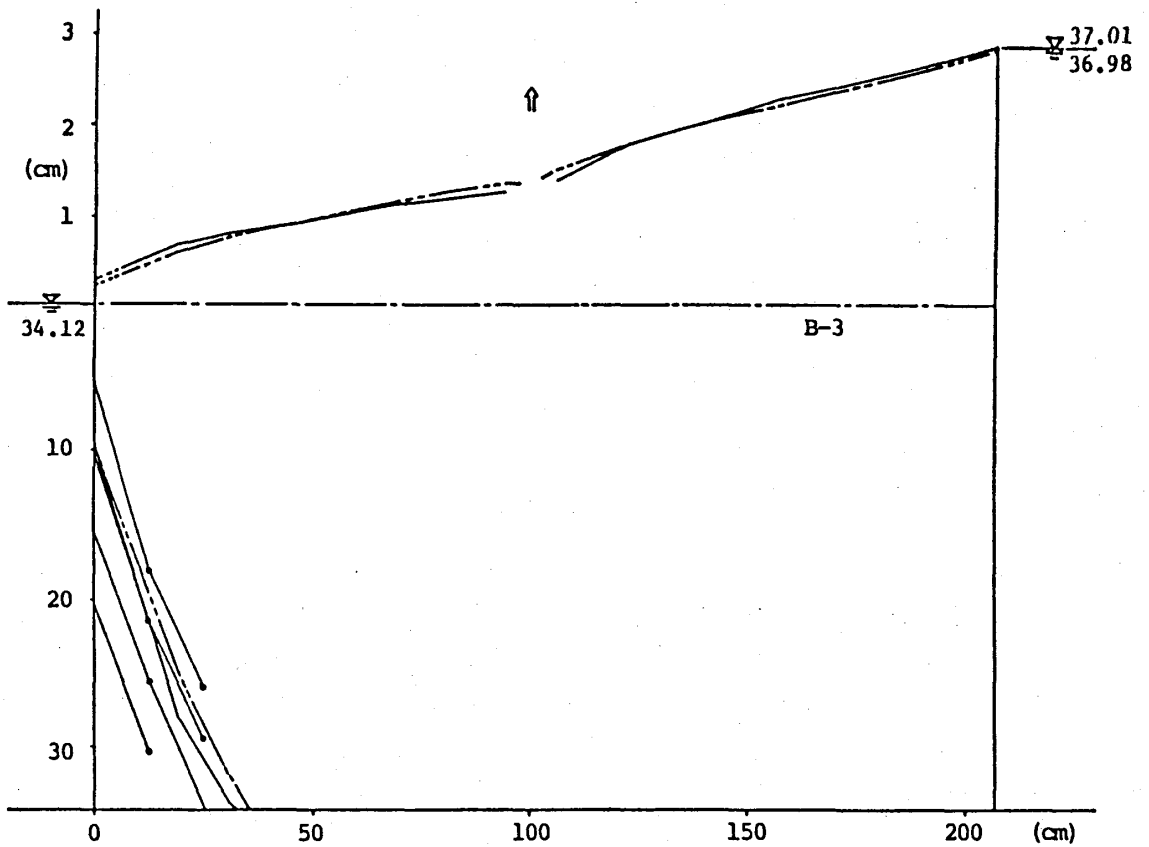


Fig. 18

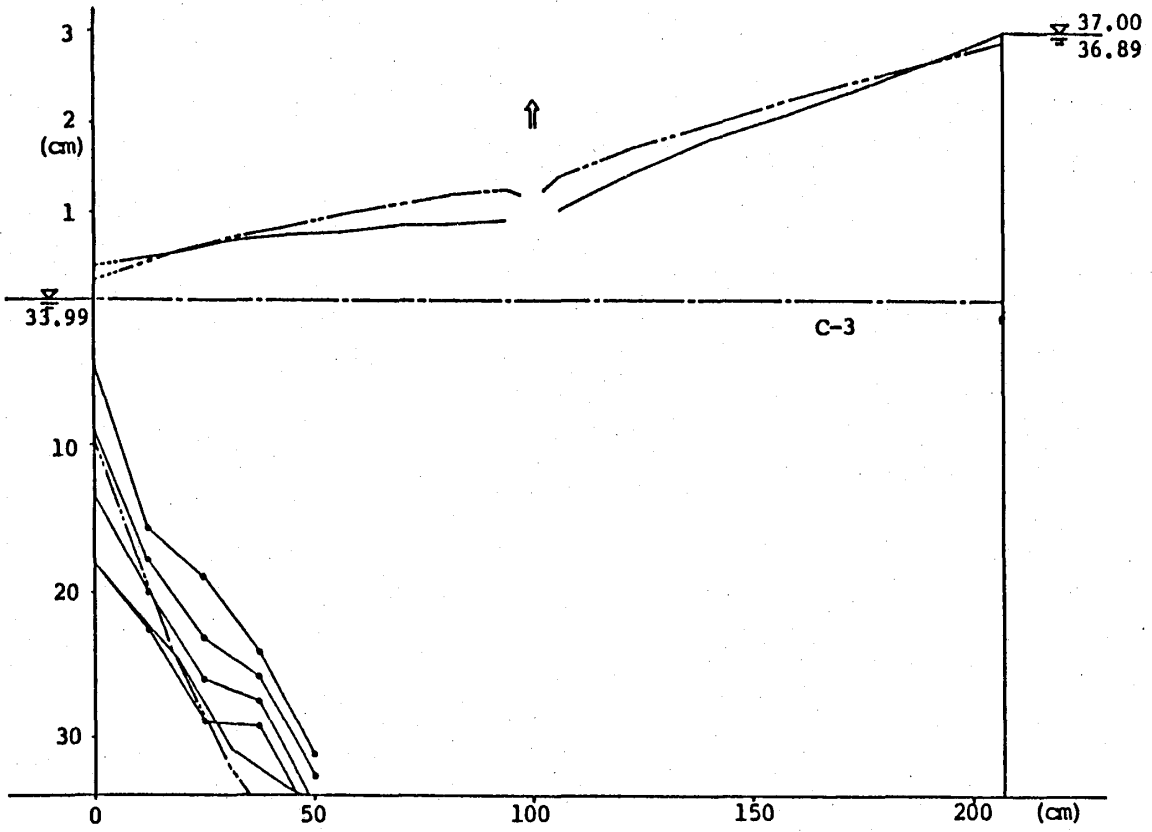


Fig.19

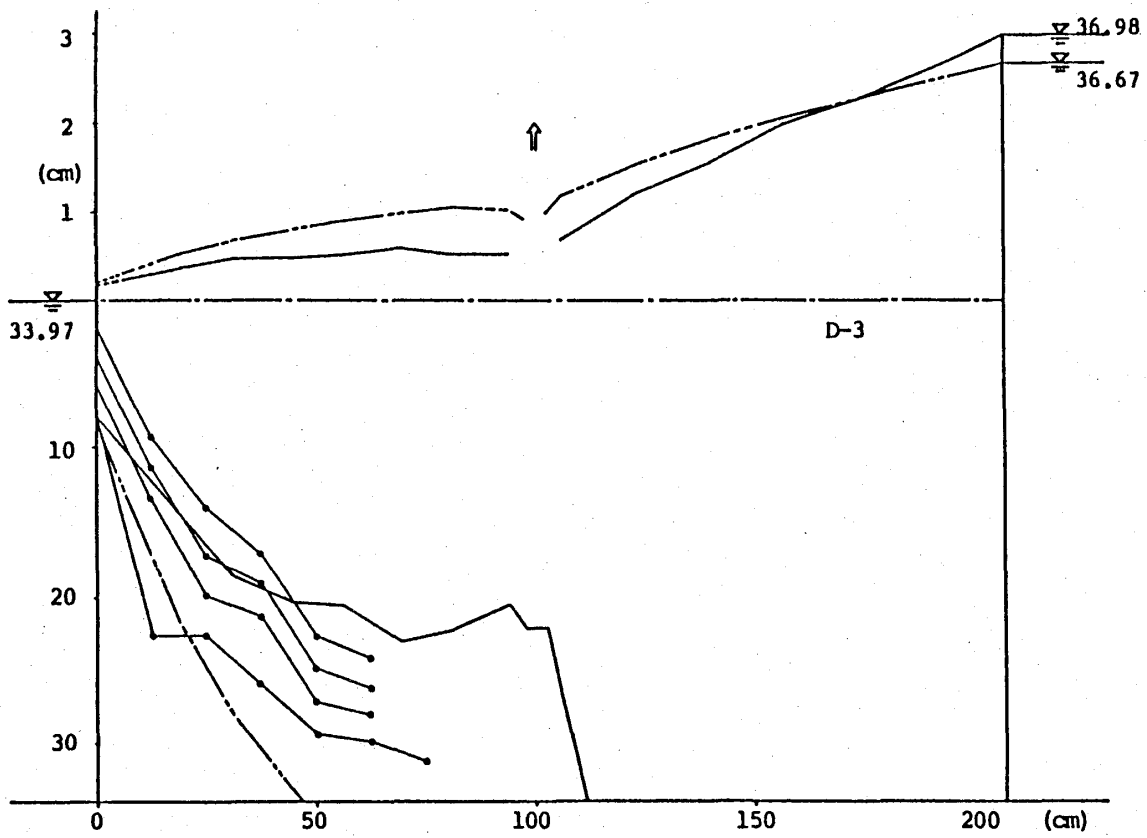


Fig.11~Fig.20 Calculated profiles of the free-surface, interface and equi-concentration lines

Table 4 Experimental results of saline concentration

Ex. Case	Probe Number																						pump well
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
A-1	1.07	1.06	0.92	0.04	1.09	1.06	0.15	0.01	1.21	0.75	0.01	0.00	0.81	0.05	0.00	1.11	0.01	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	-
B-1	1.05	1.05	0.98	0.04	1.05	1.04	0.29	0.01	1.11	0.90	0.02	0.00	0.76	0.53	0.01	1.04	0.07	0.00	0.91	0.01	0.81	0.00	0.01
C-1	1.04	1.04	1.02	0.03	1.04	1.03	0.81	0.01	1.16	0.92	0.06	0.00	0.77	1.01	0.01	1.07	0.79	0.00	1.04	0.11	1.17	0.03	0.09
D-1	0.92	1.04	1.06	0.11	1.02	1.00	0.74	0.01	1.11	0.91	0.17	0.01	0.74	1.07	0.02	1.04	0.14	0.00	1.01	0.20	1.15	0.02	0.11
A-2	1.13	1.08	0.13	0.02	1.13	0.17	0.01	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
C-2	1.00	1.01	0.75	0.04	1.03	0.98	0.05	0.00	1.12	0.36	0.00	0.00	0.75	0.01	0.00	0.94	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
A-3	0.83	0.17	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
B-3	1.00	0.61	0.07	0.01	0.57	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C-3	1.06	1.03	0.22	0.04	1.11	0.45	0.02	0.00	1.14	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D-3	1.02	1.00	0.97	0.06	1.04	1.01	0.30	0.01	1.12	0.91	0.02	0.00	0.76	0.24	0.00	1.05	0.03	0.00	0.88	0.00	0.22	0.00	0.03

1) 水面形に関する比較考察

塩水槽端 ($x=0$) の水位計測を行っていないので、ここでは第1測点 ($x=6.25\text{cm}$) と第2測点 ($x=18.75\text{cm}$) の水位を直線的に延長し、 y 軸の交点座標値を淡水水位と仮定している。

まず、無揚水条件のA-1, A-2およびA-3について考察する。これら3ケースの初期定常淡水流量はTable 2に示しているように70, 140, 210cc/minと水位差 (Δh) に比例して増大しているが、塩水の侵入が終了した最終定常時の淡水流量は62, 158, 266cc/minと計測されている。しかし、これらの定常流量に対応する理論水面形は1点鎖線で示したようにA-2, A-3では実測水面形とは全くかけはなれてしまう。したがって、A-2, A-3では流量計測に何らかの誤りがあったものと判断した。そこで、2点鎖線で示したような修正理論水面形に対応する流量を逆に求めれば、A-1, A-2, A-3に対してそれぞれ43, 6, 112.5, 183, 9cc/minとなる。この値が以後のすべての実験ケースの解析の基本となる淡水流量 Q'_x である。

揚水が付加された実験の修正理論水面形は、 $\Delta h=1\text{cm}$ で揚水条件の異なるB-1, C-1, D-1のいずれにおいても、揚水井戸より下流側では実測水面よりも低くなる傾向がみられ、とくに砂層端近傍でその差が大きくなっている。

次に、 $\Delta h=3\text{cm}$ で揚水条件の異なるB-3, C-3, D-3についてみれば、いずれのケースでも上流淡水槽水位が実際の水位よりも低く算出されている。この段差は、B-3, C-3, D-3に対しそれぞれ0.03, 0.12, 0.31cmと揚水量の増加とともに増大しており、これは揚水の吸引作用にともなう淡水侵入流速の増大にともなう砂層上流端におけるエネルギー損失であると考えてよい。

また、揚水量の増大にともない、揚水井戸近傍で理論水面形は実測水面形から高く離れる傾向が示されている。すなわち、ここで示した流量ポテンシャル理論に基づく解析の適用性は、揚水量の増大とともに悪くなるといえる。

2) 内部境界面の挙動に関する比較考察

まず、無揚水条件のA-1, A-2およびA-3について考察する。いずれの実験においても2点鎖線で示した修正理論水面に対応する内部界面は、実測濃度の $C/C_0=0.25$ の等濃度線とよい一致を示しており、点線で示した界面④は $C/C_0=1.0\sim 0.75$ の線とよい符号を示している。すなわち、揚水量の増大とともに塩水侵入域は減少し、界面③による塩水楔長は、129.0, 52.4, 30cmと急激に縮小することになる。

しかしながら、揚水の吸引の影響を含まない密度流現象であるにもかかわらず、実際の塩水化域内の濃度分布の幅はかなり大きいことがわかる。すなわち、実際の塩水化域 ($C/C_0 \geq 0.01$) は、濃度分散を無視して得た不理論に基づく界面③よりもかなり大きいものとなる。

次に、平衡揚水条件を付加したC-1, C-2およびC-3について考察する。C-3については1)の水面形の考察で述べた理由により、内部界面の信頼性も疑わしい。したがって、ここではC-1とC-2について比較する。まず塩水侵入域についてみれば、水面勾配の大きいC-2の方が小さく、界面③による塩水楔長は、C-1の160.6cmに対して76.4cmに縮小している。しかしながら、等塩分濃度線からみれば、塩水化域内の濃度分布には大きな相違があることがわかる。すなわち、絶対揚水量の小さいC-1ではNo.5井戸 ($x=62.5\text{cm}$) より下流側では界面③は $C/C_0=0.25$ にほぼ一致しており、No.6井戸より上流の塩水域はさらに低濃度値に対応しているといえる。一方、揚水量の大きいC-2では、No.4井戸 ($x=50\text{cm}$) より下流側では界面③は $C/C_0=0.50\sim 0.75$ の間にあり、それよりも上流の塩水域に対しては $C/C_0=1.0$ に符号している。このことは、揚水による吸引の影響がC-1よりもC-2において強いことを示しており、C-2の塩水化域は濃度分散によって2点鎖線で示した界面よりもさらに内陸部まで広がっているといえる。

次に、揚水量の相違による内部界面の挙動をA-1, B-1, C-1およびD-1の4ケースについて比較考察する。揚水量が増加するにつれて、揚水井戸より下流側では

修正理論水面がしだいに低下しており、したがって内部界面③砂層の上部へと移動し、塩水化域が砂層上部へ広がることを示している。また、楔の入長を求めれば揚水量の増加とともに129.0, 154.8, 160.6, 177.8cmと延びており、塩分は揚水による吸引の作用を受けながらもなお揚水井戸よりも内陸側へと侵入することになる。また、2点鎖線で示した界面の形状ならびに等塩分濃度線図を比較すれば、揚水井戸に向かって塩水が吸引されていわゆるコーンアップ現象が揚水量の増大とともに明確に現われていることがわかる。

以上の考察結果より、揚水量が多くなるほど淡水と塩水の非混合・非濃度分散を前提とするこの理論界面と実際の塩水化域との合致度が悪くなるといえる。

5. あとがき

本研究は、揚水井戸をもつ自由地下水帯における塩分挙動を明らかにすることを目的として、砂層モデルを用いた実験結果を流量ポテンシャル理論に基づく解析結果と比較考察し、この理論の適用性について検討したものである。

本研究で得た結果を簡単にまとめれば次のようである。

1) 流量ポテンシャル理論に基づく修正定常淡水流量 Q'_x を用いて算出した水面形は、初期動水勾配、揚水量ともに大きいC-3, D-3ケースを除けば、実測水面をよく再現しており、定常流れの解析は可能であることが確認できた。

2) 揚水による吸引の影響が強いC-3, D-3では、砂層上流端において淡水侵入速の増大に伴うエネルギー損失が発生し、揚水量の増大とともに水頭損失高も増大する。しかしこの水位段差は上流淡水槽水深の0.3~0.9%である。

3) 揚水を伴わない塩分侵入実験(A-1, A-2, A-3)の結果から、理論内部界面は $C/C_0=0.25$ の等濃度線とはほぼ一致していることが示された。したがって、実際の塩水化域($C/C_0 \geq 0.01$)は、この理論界面で示される領域よりもかなり大きくなるといえる。

4) 揚水が付加されれば、本解析で得られる界面よりもさらに内陸側へ塩分は侵入していき、揚水にとりもなり吸引の効果は濃度分散域の拡大として表われる。

5) 当然のことではあるが、揚水量が多くなるほど本理論の適用性は悪くなる。今後はその適用限界をさらに詳しく定めることが課題となる。

参考文献

- 1) 国土庁水資源局：長期水需給計画，1978
- 2) 尾島 勝：日本の水資源と地下水障害，日中地下水セミナー講演要旨集，地下水学術交流訪中団，

pp.41~45, 1987.7.

- 3) 佐藤邦明・渡辺邦夫：成層帯水層における地下塩水楔の挙動，第19回水理講演会論文集，pp.127~132, 1975.2.
- 4) 尾島 勝・石川稔彦：海岸部自由地下水帯への塩分侵入阻止効果と塩分分散に関する解析，第31回水理講演会論文集，pp.575~580, 1987.2.
- 5) Strack, O.D.L. : A Single-Potential Solution for Regional Interface Problems in Coastal Aquifers, Water Resour. Res., Vol. 12, No6, pp. 1165~1174, December, 1976.
- 6) 上田年比古・神野健二：準一様流を仮定できる定常3次元地下密度流の数値解と最適井戸取水について，土木学会論文報告集，第301号，pp.83~92, 1980.4.
- 7) 前出5)に同じ
- 8) 例えば，椿東一郎：基礎土木工学全集7，水理学II，森北出版，pp.64, 1974.
- 9) Tamai, N and S.Shima : Salt-water wedge in unconfined coastal aquifers, Trans. Japan. Soc. Civil Eng., No139, pp. 31~38, 1967.3