

揚水による塩水化現象の変化に関する解析

尾 島 勝*

1. ま え が き

沿岸部低平地における水需要の増大は、工業・農業・水産業等の産業構造の変革ならびに生活様式の近代化とともに、表流水のみならず地下水にその供給源を求める傾向を一層高め、ひいては地下水の過剰揚水に伴う地盤沈下ならびに地下水の高塩分化等の社会問題を各地でひき起すことになった。

このような沿岸部低平地の塩水化域の拡大の多くは無計画な地下水揚水によってひき起されたものであり、今後は揚水に伴う海岸地下水の流動特性、水理機構をさらに詳細に解明し、淡塩界面の挙動ならびに地下水の塩分濃度変化に及ぼす影響要因を定量的に把握し、安全揚水量を厳しく規制して地下水利用の長期的展望に立った適正化を図る必要がある。

すなわち、上記の課題はわが国の水資源および環境問題と関連して極めて重要なものとなりつつある。地下密度流現象の基礎概念や解析手法については、近年、土木工学のみならず地球物理、採油工学などの分野とも関連して活発な発展的討議が共通の場でなされるようになってきた。たとえば、1969年には Haifa (Israel), 1971年 Calgary (Canada), 1972年 Guelph (Canada) で多孔体媒質流に関する国際シンポジウムが開かれ、1969年京都で行われた国際水理学会における地下水に関する全52編の論文中12編が地下密度流に関するものであった¹⁾。また、1975年東京で行われた流域の水循環とその変化に関する国際シンポジウムにおいても人間活動による水量・環境の変化という課題に対して地下密度流の問題がいくつかみられた²⁾。

本研究は、上記のような課題に対して、まず現地観測調査による実態把握を行い、ついで揚水に伴う塩水化現象の水理機構を模型実験により考察し、最後にこれら現象の理論的解析を試みたものである。

2. 現地観測調査

徳島県那賀川下流域は、地下水の利用が近年とくに多くなり、塩水の内陸侵入が危惧されている。著者らは当地域の実態把握と将来予測のための地下水調査ならびに解析を行い、地下水揚水量・揚水地点と塩水化との関係

について検討した。調査・解析の結果は既に報告されている³⁾が、ここにその概要を改めて簡単に示す。

図—1 に示した那賀川下流域の地下水調査および水理解析として、1) 地質構造調査（ボーリングおよび電気探査）、2) 試験井による揚水試験結果の解析、3) 地下水揚水による地下水位低下量の推定、4) 地下水の塩分濃度測定および経年変化の調査と解析、5) 地下水揚水と塩分侵入との関係の解析等を行った。



図—1 地下水調査地域

当該地域の地質構造は、60 m 以深の砂岩、頁岩の基盤上に河口堆積の沖積層がのり、河口先端北岸は潮流によって運ばれた漂砂の堆積した砂洲地形を呈している。瀬戸内沿岸沖積層は、その成因より一般に A 層（上部砂礫層）、B 層（上部粘土層）、C 層（下部砂礫層）、D 層（下部粘土層）、E 層（中期洪積層）となっているといわれ、当該地域では A 層の層厚は 10 m 程度、C 層の層厚は 25 m 程度であり、層厚 10~20 m の B 層の存在によりそれぞれ不圧滞水層、被圧滞水層となっている。

当該地域は昭和 43 年から継続的に被圧地下水および不圧地下水について約 100 個の井戸の塩分濃度調査が行われているが、昭和 44 年~45 年頃から急激に塩水化が進行し始め、現在も極めて危険な状態である。今回（昭和 50 年 3 月）の塩分濃度測定結果を示せば 図—2 のようである。

結論的に述べれば、被圧地下水の塩水化は現在も進行中であり、侵入速度も加速されつつある。この原因としては、当該地域の滞水層の透水性が非常に良く ($k=1\sim 5\text{ cm/sec}$)、したがって比較的簡単に多量の揚水量を得ることができるため、明らかに過剰揚水となっていることであると結論される。

* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部土木工学科

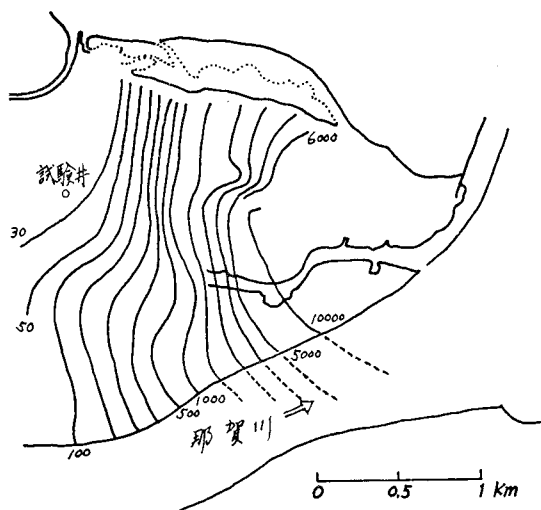


図-2 被圧滞水層の塩分濃度測定結果

そこで、揚水試験にもとづく安全揚水量と地下水位の季節的な変動結果より、揚水地点と揚水方法の推定を行い、対策について若干の示唆を与えたが、広範囲にわたる現象解析のための基礎資料の数および精度の問題、用いるべき基礎式の選択の問題など、今後さらに検討していく必要があると考える。

3. 揚水に伴う塩水化現象の変化に関する実験

現地観測調査結果をふまえて、地下水揚水が塩水化現象にどのような影響を与えるかを解明し、その侵入防止策を見出すことを目的として、揚水量、揚水地点および揚水口深さを影響パラメータとしてとり、淡塩界面形状の変化および滞水層内の塩分濃度変化の両面から実験的考察を行った。

(1) 実験装置および実験方法

実験水槽本体は、長さ 300 cm、幅 40 cm、高さ 60 cm の前面 アクリライト張りの鋼製水槽であり、両端より 50 cm の位置にあるフィルターメッシュの内幅 200 cm に高さ 50 cm まで粒径 2.5 mm 以下の洗い砂を敷いて滞水層とした。その砂層中心線上 20 cm 間隔に集水孔

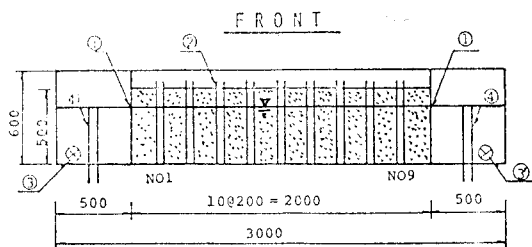


図-3 実験モデルとその諸元

を切った内径 5 cm の塩化ビニールパイプ 9 本を打設して揚水井および観測井とした。中詰め砂の有効径は 0.5 mm、均等係数 1.92、透水係数は 0.29 cm/sec である。実験モデルの諸元を図-3 に示す。塩水(密度 $\rho_2=1.04$) および淡水を ③、③' のバルブより供給し、④の水頭可変余水吐によって塩水槽水深(h_2)および淡水槽水深(h_1)をそれぞれ 30 cm, 31 cm に保つ。表-1 に実験タイプを示したが、揚水の有無、揚水地点(井戸番号)、ストレーナ位置(上部, 下部)、揚水量($Q_1=600$ cc/min, $Q_2=800$ cc/min)によってタイプ分けをしている。

測定量は、1) 淡塩界面(楔形状)、2) 観測井内塩分濃度(5 cm 間隔 6 測点)、3) 揚水の量と塩分濃度、の 3 項目である。計測時間間隔は 5 分とし、各実験とも定常状態に達するまで続ける。塩分濃度の測定器機としては東亜電波製の CM-5B 電導度計(感知部セル 10 mm, 3 個)と東邦電探製 EST-3 型電気水質計(感知部極間隔 20 cm)を用い、測定された電気伝導度から塩分濃度に換算する。

(2) 淡塩界面の挙動に関する考察

無揚水の A-1 における塩水楔の侵入状況をアクリライト面に現われた界面のスケッチにより 10 分ごとに示したのが図-4 である。破線は透水係数 0.19 cm/sec、粒径 2.5~0.25 mm、均等係数 2.46 の中詰め砂を用いた昨年度の実験⁴⁾における定常界面である。

準一次元地下密度流の仮定を用いれば、定常理論による楔の侵入長は近似的に次式で表わされる。

$$L = \frac{k}{2|QL|} \frac{1+\varepsilon}{\varepsilon} (dh)^2 \dots\dots\dots (1)$$

表-1 実験タイプ

A-1; Nothing
A-2; Nothing, No.2, Over, Q1
A-3; Nothing, No.4, Over, Q1
B-1; No.2, Under, Q1
B-2; No.2, Over, Q1
B-3; No.2, Under, Q2
B-4; No.2, Over, Q2
C-1; No.4, Under, Q1
C-2; No.4, Over, Q1
C-3; No.4, Under, Q2
C-4; No.4, Over, Q2
D-1; No.6, Under, Q2
E-1; No.8, Under, Q2

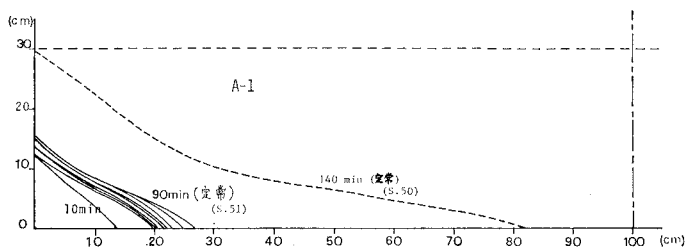
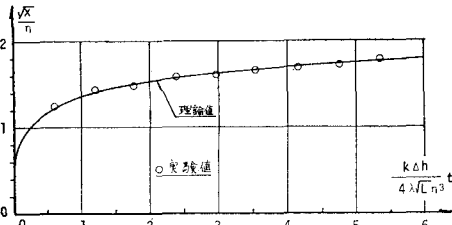


図-4 塩水楔の侵入状況 (A-1)

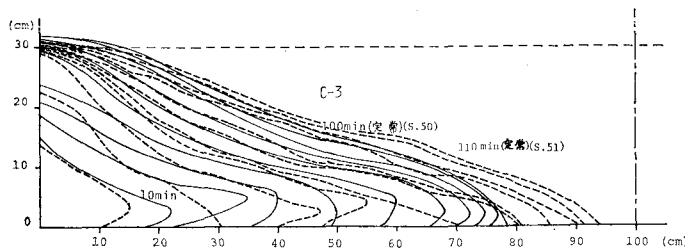
ここに、 Q_L : 単位幅当りの淡水流量, k : 透水係数,
 $\varepsilon = \Delta\rho/\rho_1$, Δh : 淡・塩水槽の水位差である。

昨年度の実験データ $Q_L=1/24 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $k=0.19 \text{ cm}/\text{sec}$ を用いて L を求めれば約 71 cm となり, 実験で得られた界面とほぼ一致している。一方, 今回の実験データ $Q_L=1/12 \text{ cm}^2/\text{sec}$, $k=0.29 \text{ cm}/\text{sec}$ を用いて L を求めれば 54 cm となり, 実験で視覚的にとらえた侵入長 27 cm とは一致していない。この原因について検討しておく。

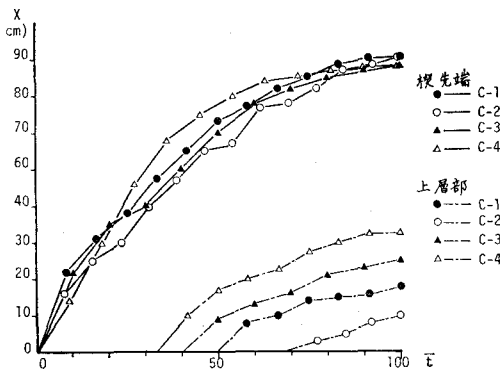
非定常理論による塩水楔の先端の位置と時間との関係



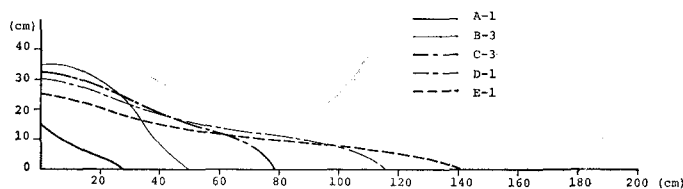
図—5 塩水楔先端の侵入状況



図—6 塩水楔の侵入状況 (C-3)



図—7 楔の侵入時間と侵入長の関係



図—8 定常時における界面形状の比較

は次式のように表わされる⁵⁾。

$$\frac{k\Delta h}{4\lambda\sqrt{L}\eta^3}t = -\frac{1}{3}\left(\frac{\sqrt{x_t}}{\eta}-1\right)^3 - 2\left(\frac{\sqrt{x_t}}{\eta}-1\right) - 8\log\left(2-\frac{\sqrt{x_t}}{\eta}\right) + 0.212 \dots (2)$$

ここに、 $\eta = \varepsilon h_2 \sqrt{L}/2\Delta h$, h_2 : 塩水槽水深である。

本実験におけるデータは、 $\Delta h=1 \text{ cm}$, $L=27 \text{ cm}$, $k=0.29 \text{ cm}/\text{sec}$, $h_2=30 \text{ cm}$, $\lambda=0.40$ であるから、 $\eta=2.6$, $k\Delta h/4\lambda\sqrt{L}\eta^3=0.00198$ となる。 $\sqrt{x_t}/\eta$, $k\Delta h/4\lambda\sqrt{L}\eta^3$ を計算して、式 (2) にもとづく理論値と実験値とを比較して示せば 図—5 のようになる。すなわち、無次元表示した楔先端の時間的变化は理論値と極めてよく一致している。この結果より、塩水を過マンガン酸カリで着色し視覚的にとらえた淡塩界面が過小であったとしても、侵入現象そのものは正しくとらえているということができよう。逆に言えば、侵入長を視覚的に計測して定量的考察を行うことは、着色の程度の差異、砂層条件の相違などによる誤差の介入によりかなり不正確であり、したがって塩分濃度の精密な測定が必要であるといえよう。ち

なみに、今回の実験において視覚的にとらえた淡塩界面は塩分濃度 10 000 ppm 程度に相当していた。

すなわち、淡塩界面の挙動の解析には非定常理論の適用が望ましく、しかも定量的に評価するためには、密度差 (塩分濃度), 水位差, 透水係数, 間げき率等の計測量の精度の高い測定が必須であるといえる。

図—6 には、揚水を行った場合の淡塩界面の挙動の一例 (C-3) を示した。実線が本年度、破線が昨年度の結果である。

図—7 は楔の侵入時間と侵入長の関係を、また 図—8 は定常状態での界面形状の比較を示した一例である。

揚水に伴い界面は無揚水時の侵入位置よりさらに内部へと侵入しているが、侵入速度, 侵入長に影響を及ぼす要因は複雑であって、これらを数理モデル化することは今後の課題である。しかし、定性的には、揚水量が多いほど、ストレーナの位置が深いほど、透水係数が高いほど侵入速度, 侵入長が大であるといえよう。

(3) 塩分濃度変化に関する考察

観測井内の塩分濃度を測定し、その時間的変化, 場所的变化から揚水と塩分侵入の関係について考察する。

各観測井内の鉛直方向6測点($z=2, 7, 12, 17, 22, 27$ cm)における塩分濃度の時間変化を無揚水の A-1 と比較するために示した一例が図-9である。No. 4 の井戸($x=80$ cm)で $Q_1=600$ cc/min の揚水を行った C-1 の方が A-1 よりも各測点における濃度の変化速度が速く、定常時の限界濃度も高くなる事が明確である。また、各井戸における濃度変化曲線(実線, 破線, 一点鎖線)は互いに同一の様相を呈しておらず、したがって濃度浸透(拡散)に場所的な相違が生じていると判断される。

このことをさらに詳細に調べるために、 $z=0, 12, 22$ cm の3断面における 20 000, 15 000, 10 000, 5 000 ppm の各等濃度線の 時間的移動の様子を示したのが図-10である。図の縦軸はモデル砂層の塩水槽端からそれぞれの等濃度線までの距離を表す。

このような特性図から次のような考察ができる。

1) 下層部においては 20 000 ppm と 5 000 ppm の等濃度線間隔がせまく、中層部, 上層部においてはそれが広くなる傾向にある。このことは、下層部ほど密度こう配が大きく混合域がほとんどないと判断され、一方、その間隔が広くなることは混合域が広くなることを意味しており、上層部ほど拡散効果が大きいと考えられる。

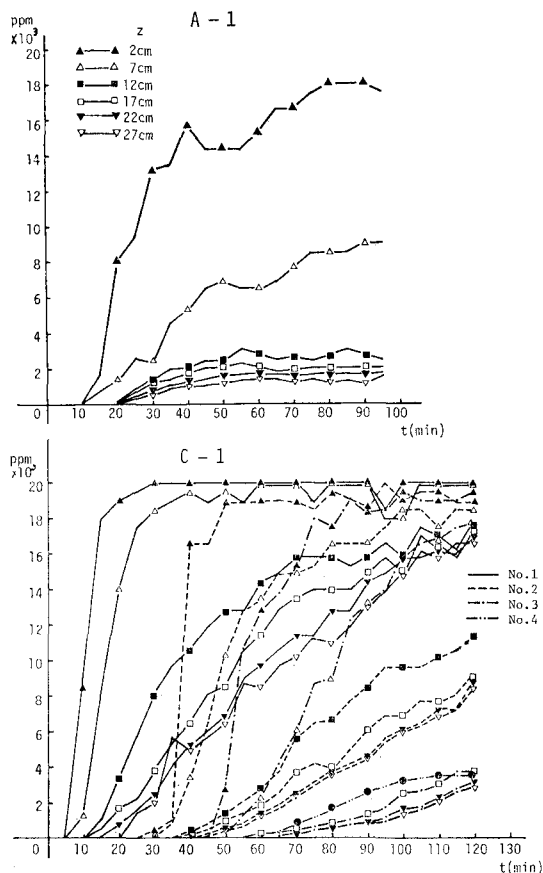


図-9 各測点における塩分濃度の時間変化

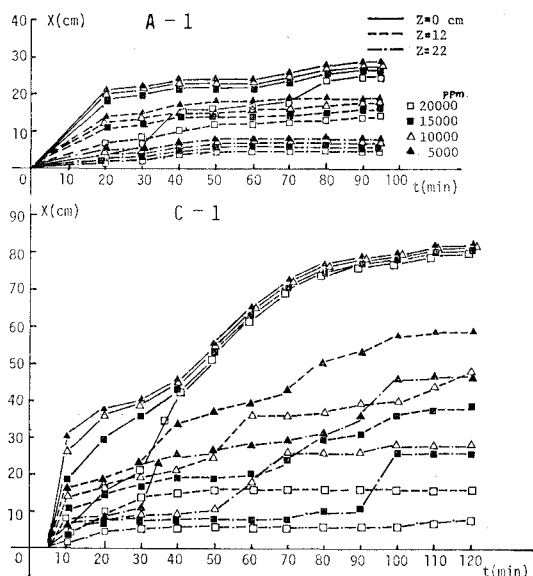


図-10 等濃度線の変化

2) 各等濃度線の変化の様相が直線的であるということは侵入速度が一定であると判断され、密度効果のみによる侵入現象と考えられる。しかし、実際の変化の様相はむしろ上に凸な2次曲線の変化を示しており、密度効果のうえに拡散効果が累加されていると考えられる。

3) 各等濃度線間隔が時間の経過にかかわらず等しい状態で塩分侵入が進行している場合は、密度効果が強く拡散効果は弱いと考えられる。したがってその間隔の時間的変化率が大きいほど拡散の度合いも大きいと考えられる。

4) 等濃度線の侵入長が鉛直方向3断面において等しくなればその地点は断面一様濃度に達したということである。

以上のような考察を各実験タイプ別に行い、揚水地点の違い、揚水量の違い、ストレーナの位置の違いによる比較を行って、それら影響要因の定量的評価を試みた。しかし、今回の実験では明確な影響度の評価を得るには至っていない。この原因の一つとして揚水量が淡水流量($Q_T=200$ cc/min)に比して過大すぎたのではないかと反省している、今後さらにこれらのことを検討し、詳細な計測を行いたい。

図-9 および 図-10 に示したような特性図の比較から得られた結果をまとめれば次のようである。

揚水を伴う場合は、無揚水の場合に比べて各測点における濃度変化速度が速く、定常時の限界濃度も高い。しかも、各観測井における濃度変化曲線は同一の様相を呈さず、上層ほど拡散の効果が強く、下層部はいわゆる密度効果によって塩分の侵入が生じている。このことは、揚水によって滞水層上部にまで拡散域が広がり、高濃度

化の傾向を助長することを示すものであり、防災対策上十分の配慮が必要である。

4. 理論的検討

現象を塩水楔として扱うか、塩分拡散として扱うかによってその前提条件および解析手法もおおのずと異なってくる。従来の研究を概観しても、近年とくに地下密度流に関する理論的解法が数多く提案されている。たとえば、外国では Rumer & Harleman⁶⁾, Bear & Dagan⁷⁾, Carlson & Enger⁸⁾ などが挙げられるが、わが国においても嶋・玉井⁹⁾, 岩佐¹⁰⁾, 福尾¹¹⁾ らの活発な研究がある。しかし、揚水を伴う密度流現象の解析例は少なく、なかでも非定常現象はまだ解析されていないようであり、上記の研究の中では Carlson や福尾の研究がその解析の方向を示唆しているように思われる。

現象を塩水楔として扱う淡塩界面形状および侵入長に関する理論的検討については、福尾の示した非定常理論の拡張を試みているが、現在計算中であり、結果が得られれば講演時に発表する。

次に、現象をマクロにとらえて一次元拡散として考察すべく、濃度測定値の多い C タイプについて拡散係数の推定を試みた。

基本式は、

$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2 \dots\dots\dots (3)$$

である。これを $\Delta x = 20$ cm, $\Delta t = 5$ 分で差分近似し、鉛直断面内 6 測点の濃度から断面平均濃度を求め、 $D_{ij} = \frac{1}{\Delta t} (C_i^{j+1} - C_i^j) / \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} (C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j) \right)$ より、その変化を検討した。図—11 にその結果を示している。この結果から、揚水した場合の拡散係数は初期には増加し、限界濃度に達したとみられる頃ピークとなり、以後わずかに減少しているようにみえる。しかし、平均的にみれば $0.2 \sim 0.4$ (cm²/sec) 程度の値である。ただ、今回の実験ではデータ数も、実験ケースも少ないため、さらに細い検討はできない。今後さらにこのような方向からの考察を続ける必要がある。

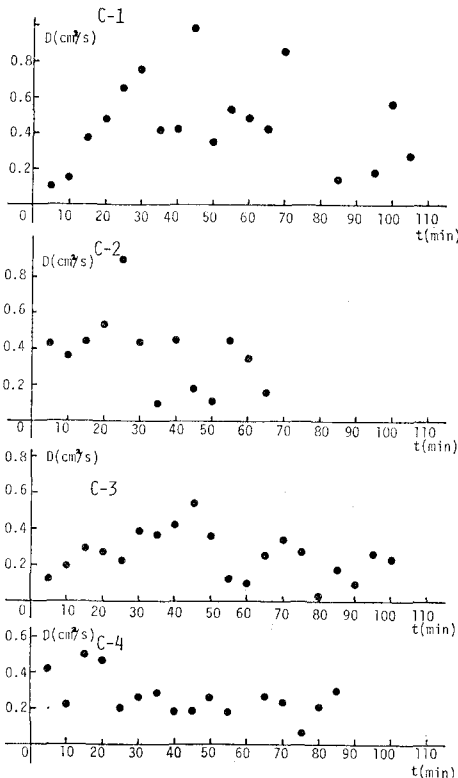
5. あとがき

本研究では、結果的には揚水に伴う塩水化現象の変化を実験結果より定性的に把握するにとどまった。しかし、実験方法の改良、問題点のとらえ方などに若干の進展があったと考える。なお、本研究は文部省科学研究費試験研究 (1) (代表、埼玉大学佐藤邦明) の補助を得て行ったものである。

最後に実験および解析に協力願った大学院生垂水陽一君、学部学生増田、渡辺の諸兄に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Hydrodynamics of flow in porous media (Subject D), Proc. 13th Cong. IAHR, Vol. 4, 485 p., 1969.
- 2) Kimura, S., M. Asano and T. Komae: Utilization of the Radon-222 in water for analysis of changes in hydrological cycle as influenced by man's activities, The hydrological characteristics of river basins symposium, IAHS, pp. 533, 1975.
- 3) 防災研究協会: 那賀川下流地下水調査報告書 (水理解析), 43 p., 1975.
- 4) 尾島 勝・垂水陽一: 沿岸部自由地下水における塩水楔の挙動に関する実験, 第31回年講, II-126, 1976.
- 5) N. Tamai, S. Shima: Salt-water wedge in unconfined coastal aquifers, 土木学会論文集, No. 139, 1967.
- 6) R. R. Rumer, D. R. F. Harleman: Introduced salt-water wedge in porous media, Proc. ASCE, Vol. 89, HY6, 1963.
- 7) J. Bear, G. Dagan: Moving interface in coastal aquifers, Proc. ASCE, Vol. 90, HY4, 1964.
- 8) E. J. Carlson, P. F. Enger: Removal of saline water from aquifers, Proc. 13th Cong. IAHR, Vol. 4, pp. 121~134, 1969.
- 9) 前出 5)。
- 10) 岩佐義朗: 非定常な地下密度流のシミュレーション, 昭和50年度関西支部年講。
- 11) 福尾義昭: 地下水の塩水化について (II), 第11回災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp. 305~308, 1974.



図—11 拡散係数算定結果