米須地下ダム貯水池における トレーサー試験による分散長推定について

名和規夫*・中尾 仁**・新城三雄***・
村上 玄****・宮崎憲二****・杉山 茂****

Estimation of dispersivity by in-situ tracer test in Komesu subsurface dam reservoir, Okinawa

Norio NAWA *, Jin NAKAO **, Mitsuo SHINJO ***,
Gen MURAKAMI ****, Kenji MIYAZAKI **** and Shigeru SUGIYAMA ****

Abstract

In-situ tracer tests were carried out in Komesu subsurface dam reservoir to obtain dispersivity of aquifer for simulation analysis of saline water intrusion in future dry years. Tracer, salt melted in sea water or rare-earth metal, was injected into an observation hole in a steady radial flow field made by pumping at a production well 8.1 to 52.6 m distant from the hole. Concentration of tracer in the pumped water was measured continuously. Eight breakthrough curves were obtained by six tests around four different wells. Longitudinal dispersivity was estimated to be about 0.8 to 6.5 m using matching method with the standard curves by Sauty(1980). Some breakthrough curves are different in shape from the standard ones, with stepped peaks or very low depletion rate, reflecting inhomogeneity of the aquifer, Ryukyu limestone.

Key Words: in-situ tracer test, radial flow, dispersivity, Ryukyu limestone

要 旨

沖縄県の米須地下ダム貯水池において、渇水年における塩水浸入解析に用いる分散長を取得するために、原位置のトレーサー試験を実施した。試験は、取水井で放射流の定常場を作り、取水井から8.1m～52.6m離れた観測孔に海水または希土類元素を投入して、揚水のトレーサー濃度の変化を測定した。4地点の取水井で6回の試験を行い8個の破過曲線を取得した。分散長の推定には Sauty

* 内閣府 沖縄総合事務局 土地改良総合事務所（元沖縄本島南部農業水利事業所）
Land Improvement General Office, Okinawa General Bureau, Cabinet Office
(Previous Position: National Irrigation Project Office of Okinawa Island Southern Region)

** 国土交通省 土地・水資源局水資源部 水資源計画課（元沖縄本島南部農業水利事業所）
Water Resources Planning Division, Water Resources Department, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and
tourism of Japan (Previous Position: ditto)

*** 上城技術情報株式会社 Jo-jo Technical Intelligence Inc.

**** 三祐コンサルタンツ（株） Sanyu Consultants Inc.

(1980)の標準曲線を使用し、おおよそ0.8m~6.5mの縦分散長を得た。ただし、破過曲線の形状は、地層(琉球石灰岩)の不均質性を反映し、標準曲線の形状とは異なった階段状のものやピーク後の濃度低下が著しく遅いものも見られた。

キーワード：原位置トレーサー試験、放射流、分散長、琉球石灰岩

1. はじめに

米須地下ダムは、沖縄開発庁が、沖縄本島南部地区農業水利事業として、糸満市の米須海岸沿いに設置した本邦初の本格的な塩水浸入阻止型地下ダムである。ダムおよび貯水池断面の概念図を図1に示す。地下水の貯留層は、琉球石灰岩である。地下ダム設置により貯水池への塩水の流動は大幅に抑制されるが、ダム完成後も塩水が基盤凹所に残留し、また、水利用の多い渇水年には貯水位が潮位を下回るため多少の塩水が浸入することは避け得ない。このため、残留あるいは浸入する塩水によって利用水の塩分濃度が許容値を上回るかどうかが、事前に予測を行う必要が生じた。予測の移流分散密度流計算を行うには、パラメータとして分散長が必須である。現場での試験による分散長の報告例は国内では乏しいが、パラメータの取得は現地で行うのが基本であることから、分

散長を求める基本的な試験法であるトレーサー試験を実施し、分散長の推定を試みた。ここでは、その試験結果について報告する。

2. 試験方法

2.1 試験位置及び孔配置

試験位置を図2に、孔配置の状況を図3に、また、試験孔の諸元を表1に示す。試験は既設の取水井と周辺の観測孔を用いた。観測孔にトレーサーを投入し、取水井で到達濃度を計測した。両者の距離は、8.1m~52.6mである。取水井は帯水層の下面までスクリーンが設置されているが、観測孔は帯水層の半ばまでのものが多いので、試験対象は帯水層の上半部が主体である。

2.2 帯水層の状況

試験地の琉球石灰岩は、ボーリングコアでは、全体に多孔質、不均質な層相で、土砂状~棒状を示し、石灰岩特有の大空隙もところどころ見られる。井戸掘削では数十cm大の岩塊が採取されるところがある。透水性は、表1に示すように非常に大きいため、揚水時の水位低下は小さく、取水井と観測孔の水位差は帯水層厚の1%~8%程度で、水深はほぼ一様とみなせる。

2.3 流れの場

試験時期において、米須貯水池は越流状態にあり概ね地下ダム方面へ地下水の流れがあると推定されたが、水面勾配が非常に小さく、試験の対象となるような数十mの範囲では正確にどちらの方向に地下水が流れているのか把握しがたい状況であった。そこで、図4のように、井戸で揚水を行なって強制的に流向の明瞭な流れの場を作り、近

図1 米須地下ダム貯水池概念図

Fig.1 Schematic profile of Komesu subsurface dam reservoir

図2 トレーサー試験位置図
Fig. 2 Location of tracer tests

傍観測孔から短時間にトレーサーを注入して、揚水中のトレーサー濃度を測定する試験を実施した。

2.4 トレーサー

トレーサーは、海水塩分または希土類元素 (Dy: ディスプロシウム、Sm: サマリウム) を使用した。希土類元素は、いわゆるアクチバブル・トレーサーであり、分析時に放射化することにより高感度に検出できるため、移流距離の長い試験に用いた。キレート物質と反応させ物理的・化学的に安定な物質として投入する。これらの希土類元素は中性子線を照射するまでは放射線を発せず、また、流下した元素の濃度は微小である。キレート物質は医学において放射性物質を体外に排出するために経口投与や静脈注射に使用されるものである。毒性や環境影響の問題はなく、使用例も多い。

図3 トレーサー試験孔配置概念図
Fig. 3 Schematic profile of tracer test holes arrangement

表1 トレーサー試験孔の諸元

Table 1 Specification of wells and holes used in tracer tests

項目	1号井地点		3号井地点		5号井地点		9号井地点			
	揚水井	孔1-1	揚水井	孔3-1	揚水井	孔5-1	揚水井	孔9-1	孔9-2	孔9-3
揚水井との距離 m	—	8.1	—	10.0	—	10.0	—	11.5	36.3	52.6
地盤高 EL., m	+8.6~+10.7									
試験前水位 EL., m	+4.3~+5.1									
スクリーン上端 EL., m	+2.9	+9.3	+0.5	+8.5	+2.9	+8.5	+2.9	+10.6	+10.9	+9.7
スクリーン下端 EL., m	-21.9	-22.9	-27.0	-12.2	-24.6	-13.5	-24.6	-12.3	-0.1	-16.3
基盤高 EL., m	-21.9	-22.9	-27.0	—	-24.6	—	-24.6	—	—	—
投入トレーサー	—	海水	—	海水	—	海水	—	海水	海水 Sm	Dy
トレーサー試験揚水量 m ³ /d	2,690	—	2,690	—	2,794	—	4,000	—	—	—
24時間連続揚水試験データ	揚水量 m ³ /d	2,016	—	2,006	—	2,019	—	1,987	—	—
	最大水位低下 m	0.135	0.02	1.01	0.09	0.045	0.03	0.795	0.33	0.09
	透水係数 cm/s	3.2E+00	—	5.8E-01	—	2.9E+00	—	2.8E-01	—	—
	貯留係数	—	—	—	—	—	—	0.07	—	—

注) 揚水井はφ400仕上げ、開口率20%の巻線スクリーン設置。投入孔は、φ50有孔塩ビ管仕上げ。

Sm: サマリウム、Dy: ディスプロシウム

1号井、3号井および5号井の貯留係数は、観測孔の水位低下量が小さく求まらない。

図4 揚水による放射流場のトレーサー試験概念図

Fig. 4 Tracer test with radial flow by pumping

2.5 トレーサーの投入方法

トレーサーの投入は、4時間から11時間の揚水を行なって投入孔や井戸の水位変化がほぼ安定した状態でを行った。

海水は、ホースを孔底近くまで挿入し、孔口から溢れないように調整しつつタンク車にて約3 m³の海水を約8～11分で注入した。

希土類元素のディスプロシウムは、5リットル中に500mgの元素を含有する水溶液を用意し、長さ約10mのホース(φ30mm)を投入孔に挿入して、ホースに取り付けた漏斗を使用して約30秒間で注入した。また、サマリウムは、10リットル中に800mgの元素を含有する水溶液を用意し、同様な方法で、約2分間で注入した。

2.6 トレーサー濃度の測定法および測定結果

海水は、揚水の電気伝導度を、自記電気伝導度計にて1分間隔で測定した。また、いくつかの試験では、クロスチェックのために、手ばかりの電気伝導度計にて5分毎の計測を行なった。

希土類元素は、揚水を10分間隔で採水し、密封、付番して検査機関に送付した。検査機関では、原子炉で中性子を照射して希土類元素を放射化し、放射線量を測定して定量した。定量限界は、ディスプロシウムが0.01 μg/l、サマリウムが1 μg/lである。試料は、まず粗い時間間隔で定量を行って時間-濃度曲線の概形を把握し、次いで標準曲線とのマッチングに重要なピーク付近のデータ数が密になるように予算内で可能な個数の定量を実施した。

4箇所の取水井付近において、6回の試験を実施し、8個の濃度-時間曲線を取得した。図5に得られた時間-濃度曲線を示す。観測された濃度ピークの出現時間は、試験孔間距離8 m～11.5mの場合、トレーサー投入後26分～103分であった。また、9号井の孔間距離36mでは656分、53mでは123.5分で、距離の大きい後の方が早いピーク時間を示した。

トレーサーの回収率を表2に示す。測定期間内の回収率は、1号井、3号井及び5号井では10%

図5 試験により得られた実時間－実濃度曲線

Fig.5 Real time - real concentration curves measured by tracer tests

表2 トレーサ－の回収率

Table 2 Recovery rate of tracer

揚水井	揚水量 (m ³ /d)	投入距離 (m)	測定時間 (分)	投入水溶液量 (m ³)	トレーサ－		
					種類	投入量 (kg)	回収量 (kg)
1号井	2690	8.1	219	2.7	海水塩分	94.5	4.8
3号井	2690	10.0	257	2.7	海水塩分	94.5	8.4
5号井	2794	10.0	329	2.7	海水塩分	94.5	3.3
9号井	4000	11.5	305	2.7	海水塩分	94.5	38.1
		36.6	3629	2.7	海水塩分	94.5	52.9
		36.6	900	0.01	サマリウム	0.800	0.227
		52.6	3450	0.005	ディスプロシウム	0.500	0.383

注) 海水塩分投入量は、塩分量35kg/m³で概算。海水塩分回収量は、電気伝導度から米須貯水池における塩分濃度換算式を使用し概算。

以下であるが、9号井では数十%以上である。9号井のディスプロシウムは、回収率は77%に達し、短期の観測期間における吸着の影響はほとんどないと考えられる。上記3孔の回収率が低い原因は、海水の投入量が大きいため投入孔の周りに注入による放射流が発生し、揚水井に向かはない

流れ成分が生じたものと考えられる。9号井で回収率が高いのは、この付近では透水性がやや小さく、大きな揚水量により井戸に向かう明瞭な放射流が形成されたためと考えられる。

3. 分散長の推定方法

3.1 標準曲線式

測定された時間－濃度曲線を、標準曲線と比較することにより、分散長を推定した。標準曲線式は下に示すとおりである (Sauty, 1980; 和文紹介－地下水問題研究会, 1991)。

$$\frac{C_a}{C_{a \max}} = \frac{K'}{t_R^{1.5}} \cdot \exp \left\{ -\frac{P_e}{4t_R} (1 - t_R)^2 \right\} \quad (1)$$

ここに、

$$t_R = \frac{Q}{V_\phi} \cdot t \quad (2)$$

$$V_\phi = n \cdot b \cdot \pi r^2 \quad (3)$$

$$P_e = r/\alpha_L \quad (4)$$

$$t_{R \max} = (1 + 9P_e^{-2})^{1/2} - 3P_e^{-1} \quad (5)$$

$$K' = t_{R \max}^{1.5} \cdot \exp \left\{ \frac{P_e}{4t_{R \max}} (1 - t_{R \max})^2 \right\} \quad (6)$$

$C_a/C_{a \max}$: 相対濃度 (観測最大濃度 $C_{a \max}$ に対する観測濃度 C_a の比)

t_R : 相対時間 (分散なしでの到達時間を1とする)

$t_{R \max}$: 観測濃度が最大となる相対時間 (同上; P_e

の値により異なる; 分散なし [$P_e \rightarrow \infty$] では、

$t_{R \max} = 1$)

Q : 揚水量

V_ϕ : 揚水孔から半径 r 内の流動空隙体積

n : 有効空隙率 b : 流動厚さ

r : 注入孔と揚水孔との距離

α_L : 分散長

P_e : ペクレ数 (以降、 Pe と表示; $Pe \geq 3$ で標準曲線として有効; 層長ペクレ数ともいう; 試験孔間距離と分散長の比;)

上式で作成した標準曲線を図6に示す。ただ

し、この図の相対時間 $t_R/t_{Rmax} [Pe \rightarrow \infty]$ は、有効間隙率と流動厚さが確定しないと求まらないので、曲線形状を直接に標準曲線と比較するために、観測の最大濃度時点が相対時間 1 となるようにピーク位置を揃えた相対時間 $t_R/t_{Rmax} [Pe]$ で描画した図 7 に示す標準曲線を作成し使用した。

3.2 標準曲線式の適用限界

放射流についての解析解はなく、上式は 1 次元の様な流速の場についての解である。今回のような放射流の試験に適用する場合は、図 8 の放射流の数値計算結果との比較から、ペクレ数が 3 以

上である場合に適用可能とされる。この図によれば、約ペクレ数 10 付近でのみ、標準曲線と放射流の数値解がほぼ一致しており、この値付近を境に、両者の濃度上昇低下の早遅の状況が異なる。ペクレ数が大きい場合は、放射流の方が濃度の上昇が早く低下が遅い。ペクレ数 10 以上では最高濃度到達時間や曲線形状の差異は小さく標準曲線は適用可能である。ペクレ数 3 以下の場合は両者の最高濃度到達時間の差が大きいので、図の曲線をデジタイジングしてピークを揃えて図 9 に示す。

図 6 トレーサー試験標準曲線 (タイプ 1) - 分散なしの場合の到達時間を相対時間 1 とした場合

Fig. 6 Standard curves of tracer test (type 1) - Relative time $T_R=1$ at an arrival time of tracer with no dispersion

図 7 トレーサー試験標準曲線 (タイプ 2) - ピークの到達時間を相対時間 1 とした場合

Fig. 7 Standard curves of tracer test (type 2) - Relative time $T_R=1$ at an arrival time of peak concentration

図 8 標準曲線 (一次元一様流解析解) と放射流数値計算結果の比較 (Sauty, 1980)

Fig. 8 Comparison of standard curves, analytical solutions in one-dimensional uniform flow field, with numerical solutions in radial flow field (Sauty, 1980)

図 9 ペクレ数が小さいときの標準曲線式と放射流数値計算値との比較 (Sauty の図を座標化してピークが同じとなるように変形)

Fig. 9 Comparison of standard curves for small Peclet numbers with numerical solutions in radial flow field (Pick-up from Sauty's figure by digitizing and deformed to match the peaks)

濃度上昇はいずれも放射流の場合の方が早い、濃度の低下状況はペクレ数や時間により早遅が異なる。ただし、両曲線にさほど大きな差異はなく、図7のピーク位置を揃えた標準曲線を使用すれば、 $Pe=2$ 程度までは適用できそうである。

ところで、上記の標準曲線式や比較数値計算は、分散長が一樣な場についてのものである。今回の試験対象層は不均質であり、トレーサーは、分散長や流速が異なる様々な経路を移動し、様々な時間遅れをもって井戸へ到達すると考えられる。このため、上記の放射流と一次元流の違いでみられるような、標準曲線と比較して濃度の上昇が早く、低下が遅い傾向は、場の不均一性によっても出現し、試験で得られる時間-濃度曲線はいわゆる巨視的分散（神野健二他、2001、pp. 47～71）についてのものとなる。巨視的分散についての時間-濃度曲線の形状が、一樣な分散長を仮定して予想されるものとどの程度異なるのかは、場の不均一性のスケールとトレーサー試験の観測スケールのバランスによると考えられる。このバランスによっては、標準曲線と形状が大きく異なることも考えられる。

なお、横分散長は、この試験法では推定ができ

ないため、縦分散長との一般的な比から推定し解析に用いた。

4. 解析結果

得られた測定結果を、図7に示す標準曲線と同じ座標系の時間-濃度曲線で表現し、図10に示す。時間-濃度曲線は、標準曲線のような全体になだらかな形状のものだけでなく、1号井や5号井のように階段状に変化する複合曲線状のものが見られる。5号井や9号井の36.3m孔では、ピーク後の濃度低下が非常に緩慢である。また、上述のように、9号井では、距離36.3m孔よりも距離52.6m孔のほうが、はるかに早く濃度ピークが出現した。

階段状の曲線は、トレーサーが異なる性状の層を通して到達したこと、また、濃度低下が非常に緩慢な曲線は、トレーサーが移動時間の異なる様々な経路を通して到達したことを暗示し、ともに場の不均質性を示すものと考えられる。

図11に標準曲線との比較を示す。標準曲線と試験で得られた曲線とを目視により比較した。両者が全時間帯で一致するものはなく、ピークの位置

図10 試験により得られた相対時間-相対濃度曲線

Fig. 10 Relative time - relative concentration curves measured by tracer tests

図11 標準曲線による分散長推定

Fig. 11 Estimation of dispersivity by standard curves

をどこに取るか、また、標準曲線との比較位置をピークの前とするか後とするかにより推定されるペクレ数が異なる。計測値の変動によりピーク位置が不明瞭な曲線については、頂部付近を三次多項式で近似してピーク位置を決定した。

曲線全体のピークについて推定された分散長は、表3に示すように、概ね0.8m～6.5mの範囲内にあり、1～2m、及び5m前後の値が多い。最も透水性の大きな層からの到達を意味すると考えられる曲線の立上り部から求めると、0.2m～0.5mの値が得られる。濃度の低下が緩慢な9号井の距離36.3m孔や5号井の距離10m孔の結果は、標準曲線の適用範囲をはずれ、分散長は、見かけ上、試験距離以上の非常に大きな値となる。推定された分散長は、主として観測距離の1/10 ($Pe=10$) 前後にあり、国外の既存試験データによる観測規模と分散長の関係 (たとえば土質工学会、2002、p. 107) に概ね整合する。

5. おわりに

既存の取水井と観測孔を利用してトレーサー試験を行ない、国内では報告例のほとんどない野外での分散長を求めた。今回の方法は、一般の揚水試験の井戸と観測孔を利用して実施できる方法である。得られた時間-濃度曲線と標準曲線との比較は、場の不均質性や標準曲線の適用性の限界か

ら困難なものもあったが、分散長のおおよその値を推定するためには有効な方法と考える。

なお、米須貯水池およびその塩水浸入予測・対策の概要については、参考文献 (名和他、2006、2008；本報告内容の一部を含む) を参照されたい。

謝 辞

試験計画およびとりまとめに際し御助言を頂いた、鹿児島大学農学部の舛井和朗教授、ならびに、懇切な御意見を頂いた査読者に御礼申し上げます。また、試験は外部委託によらず、本島南部農業水利事業所 (現在は事業終了により閉所) の職員が中心となり、真夏の酷暑の中、ときには昼夜三交代で試験を実施した。御助力頂いた職員一同に謝意を表する。

参考文献

- 神野健二編著 (2001)：地下水中の物質輸送数値解析、九州大学出版会、154p.
地下水問題研究会 (1991)：地下水汚染論-その基礎と応用、共立出版、340p.
土質工学会編 (2002)：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策、土質工学会、271p.
名和規夫・玉田真一・中尾 仁 (2006)：米須地下ダム

表3 トレーサー試験による分散長推定結果一覧表

Table 3 Summary of estimated dispersivity by tracer tests

曲線 番号	揚水井	投入孔距離 m	投入物質	測定法	判定値		備考
					ペクレ数	分散長 m	
①	1号井	8.1	海水	EC自記	10～5	0.8～1.6	濃度下降時；最終ピーク後 最初の濃度立上り
					40	0.2	
②	3号井	10.0	海水	EC自記	10	1.0	濃度上昇時 濃度下降時
					6～4	1.7～2.5	
③	5号井	10.0	海水	EC自記	20	0.5	最初の濃度立上り
④	9号井	11.5	海水	EC自記	8～7	1.4～1.6	三次多項式近似；濃度下降時
⑤		36.3	海水	EC手測り	8	4.5	
⑥		52.6	Dy	採水分析	10～8	5.3～6.5	
標準曲線適用範囲 (Pe>3) を外れる参考値							
③	5号井	10.0	海水	EC自記	2	5.0	濃度上昇時；最終ピークまで 濃度下降時
					1以下	10.0m以上	
⑦	9号井	36.3	Sm	採水分析	1以下	36.3m以上	三次多項式近似；濃度下降時
⑧			海水	EC自記	1以下	36.3m以上	

注) Dy：ディスポロシウム、Sm：サマリウム

- における塩水浸入予測解析と対策について, 水と土, 145, 20-30.
- 名和規夫・玉田真一・宮崎憲二・村上 玄 (2008): 米須地下ダム塩水浸入予測手法の検討と分散長の現地試験, 農業農村工学会誌, 76 (1), 21-24.
- 名和規夫・中尾 仁・宮崎憲二・杉山 茂 (2008): 米須地下ダムの塩水浸入予測解析について, 農業農村工学会誌, 76(3), 227-230.
- 名和規夫・玉田真一・宮崎憲二・杉山 茂 (2008): 米須地下ダムの塩水管理方法について, 農業農村工学会誌, 76 (4), 325-328.
- Sauty, J.P. (1980): An analysis of hydrodispersive transfer in aquifer, *Water Resources Research*, 16 (1), 145-158.
- (受付: 2008年10月27日、受理: 2009年4月8日)