福山大学工学部紀要
第14号　1992年３月

塩水侵入による地下水汚染に関する研究の総括

尾島　勝*

Generalization of Studies on Ground Water Pollution Caused by Salt-water Intrusion

Masaru OJIMA

ABSTRACT

The latest subjects on groundwater pollution have been diversified because the pollutant sources were on increase. Especially, the quality of groundwater in many coastal lowlands is going to become from bad to worse with the increase of the use of groundwater.

Therefore, it is one of the urgent problems to prevent from the salt-water intrusion into the groundwater aquifers.

In this paper, it was tried to generalize on the latest studies with reference to phenomena of the salt-water intrusion.

The contents were explained such that 1) actual conditions of the saline areas in Japan, 2) examples of the field research work and 3) analytical methods for the phenomena of salt-water intrusion into coastal aquifers.

1　はじめに

周知のとおり地下水は一般には水量も豊かで、水質も良好、水温も安定しているということから、全地球的にみても極めて主要な水質源として利用されてきた。河川や湖沼からの取水が主流であるわが国においても、地下水利用量は全使用水量の約15％に当る140億m^3（昭和63年）と推定され、都市用水については年間使用量の約30％に当る90億m^3と推定されている。[1)]

しかし、地下水はいわゆる水循環のかん養、流動、流出の過程において、そのバランスが崩れると地下水位低下、井戸の枯渇、地下水の塩水化、地盤沈下などの障害をひき起こすことになる。この水文的循環のバランスを失する原因としては、上流域の開発や土地利用形態の変化、河川改修等による地下水かん養量の減少、揚水量の増大による流動条件の変化などが考えられるが、将来は危惧されている地球温暖化に伴う海面上昇による影響も検討されることとなろう。[2)]

とくに地下水の塩水化については、長い海岸線と数多くの感潮河川をもつわが国においては、すでに地下水揚水規則や用水転換、河口堰・潮止め堰等によってその防止対策を講じてきたが、将来においてもなお十分にその対策を考えていかねばならない。

最近の地下水汚染問題は、汚染源が多種多様化したこと、さらに健康阻害の恐れから、当研究所の本シリーズで取りあげている有機塩素化合物による地下水汚染[3)]や、農薬による地下水汚染[4)]が社会的にクローズアップされているようである。しかしながら、わが国のように海岸部沖積地帯に過密な人口集中と都市化をきたしているところでは、生活用水・工業用水の水量の不足と水質の劣化、農業生産性・養殖漁業生産性の低下などが地下水の塩水化と関連する大きな社会問題として存在している。

本稿では、わが国における地下水塩水化の実態や調査例を概観的に紹介し、さらに塩分侵入現象の解析法や塩水化防止対策等についてやさしくふれてみる。

*土木工学科　教授

2　わが国における塩水化の実態

通商産業省工業技術院地質調査所の村下によるわが国における地下水の塩水化域についての報告書[5]には、塩水化域や塩水層の存在する80地区が示され、その概要と原因や防止対策等について簡潔に説明されている。その地区を図－1に示した。村下は、塩水化の原因を次のように5大別しており、それぞれの原因による地区名を示している。

1)地下水動水勾配の減少・逆転による：

主として被圧地下水の過剰揚水に起因し、塩水化域も大きなものが多く、わが国ではこの事例が最も多い。

工業用水……釧路、函館、八戸、東京、富士、富山、高岡、姫路、徳島

養殖用水……吉田、竜洋、浜松、徳島、那賀川

2)不透水層の破壊による：

新港、掘込水路の建設……八戸、鹿島、富山、和歌山、

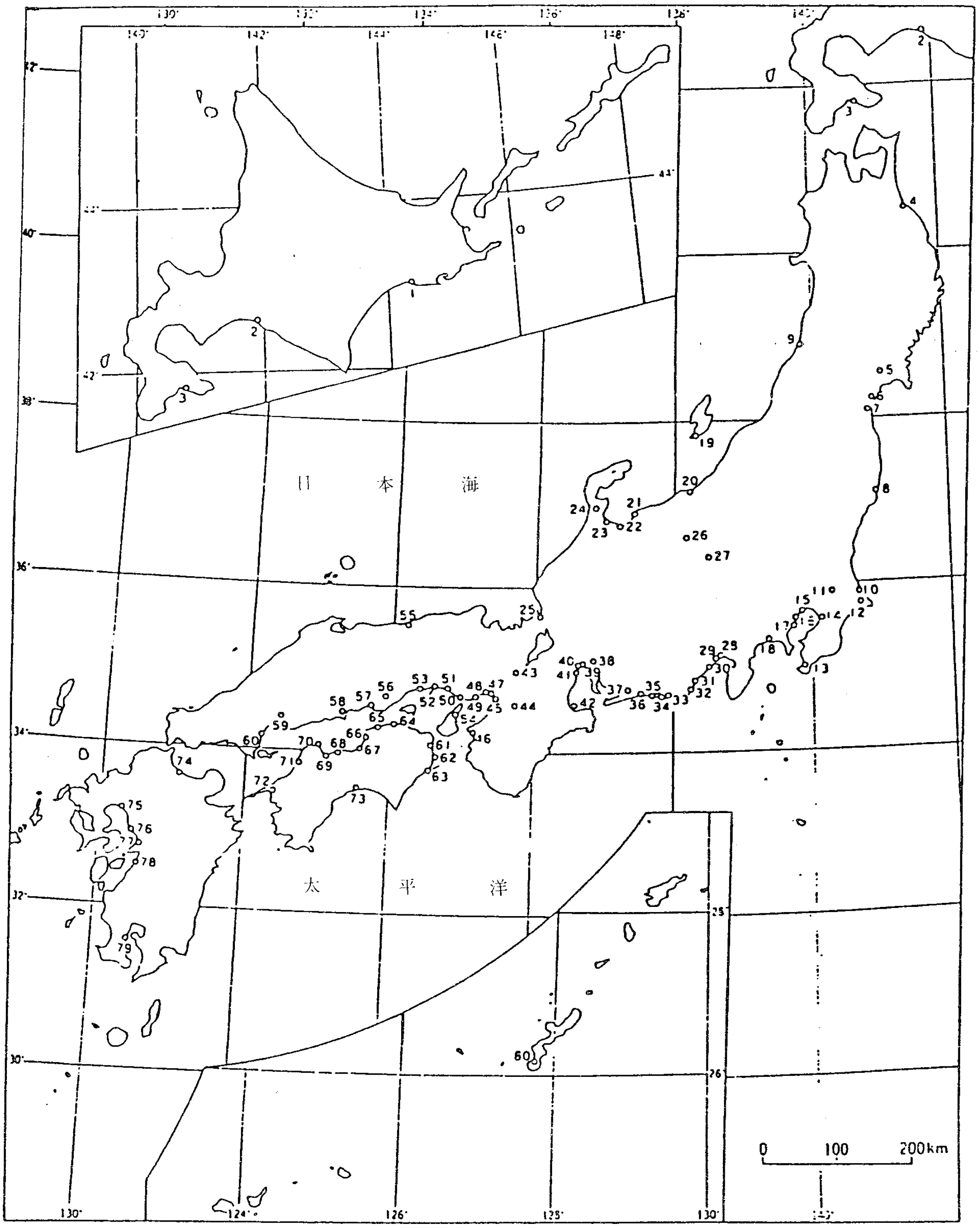

Fig.1　Saline areas in Japan(by Murashita,1982)

姫路、新居浜

井戸新設……千葉、豊橋

3)淡水と塩水の置換による：

川砂利の採取、上流ダムの築造、河川改修に伴う河床低下による海水の河道内遡上……釧路、八戸、浜松、富山、倉敷、海田、徳島、阿南、日和佐、今治、高知

4)塩水層の開発に起因：

5)廃井処理の欠陥に起因：

これらの塩水化域におけるその後の防止・軽減対策は鋭意進められており、まずは対策協議会をもち自主規制をはかり、工業用水道への転換、工業用水法の適用による地下水採取規制へと展開される。工業用水法の適用地は臨海部の要水型工業地帯に多く、仙台、千葉、東京、名古屋、四日市、大阪、尼崎、西宮などであり、その他の地区も昭和50年代からは地下水の適正揚水をめざし、自主規制や用水の転換策を強化してきた。柏木による[6]最新の報告によれば、現在、地下水の塩水化が認められる地域は、図－2に示したように20都道府県33地区である。したがって、村下が示した1982年の時点に比べて塩水化地区はやや少なくなっていると判断できるが、塩水化の程度が厳しい地区ではなお一層の防止対策を講じる必要がある。

塩害の安全基準としては、塩素イオン濃度で水道水は200mg/ℓ以下、工業用水は20mg/ℓ以下、農業用水は500mg/ℓ以下とされており、塩分に比較的強い稲でも1000mg/ℓ程度で障害が発生する。また浅層の自由地下水の塩水化は土壌の高塩分化を招き、将来の土地利用にも大きな制約を与えることになる。

Fig.2 Saline areas in coastal aquifers[6]

3　調査事例

前節でも述べたように、わが国の塩水化域は、関東、東海、中部、近畿、四国、九州の沿岸部に広く分布しており、とくに臨海工業地帯で顕著である。したがって、地下水塩分調査の事例は枚挙にいとまがないが、著者が関心をもつもの、経験したものを若干紹介しておく。

1)木曽三川下流部の塩害調査[7]

木曽三川下流部は、感潮区域が約30kmにも及び塩水の遡上も高須輪中の南端部（15～16km）にまで及んでいる。現在、河川改修計画の一環として長良川河口堰が

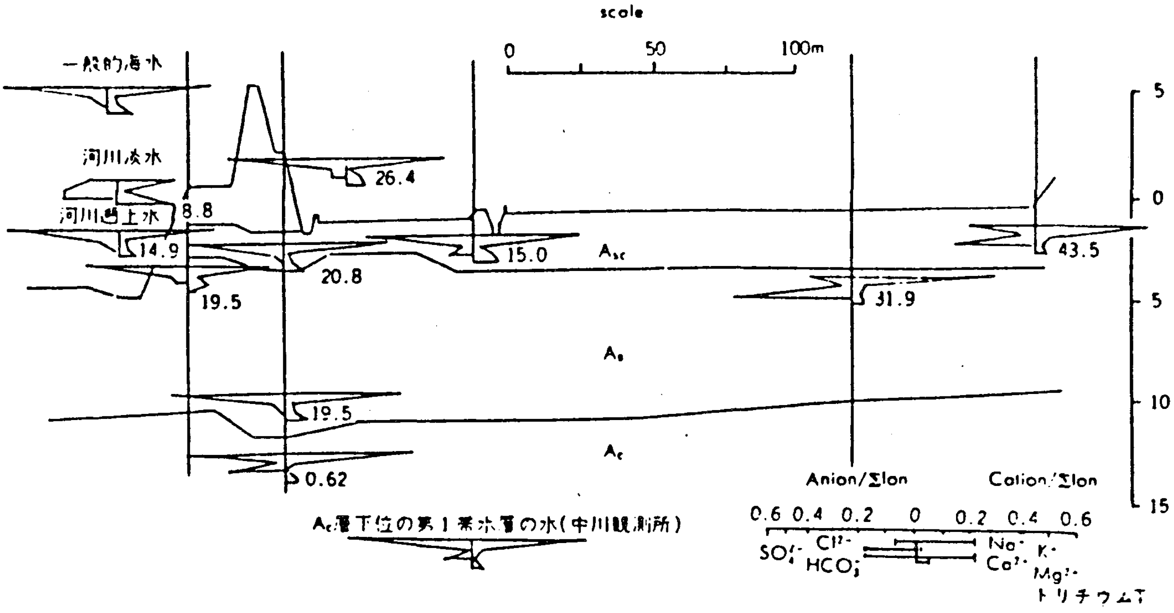

Fig.3 Investigation example of chemical composition of water in estuary basin[7)]

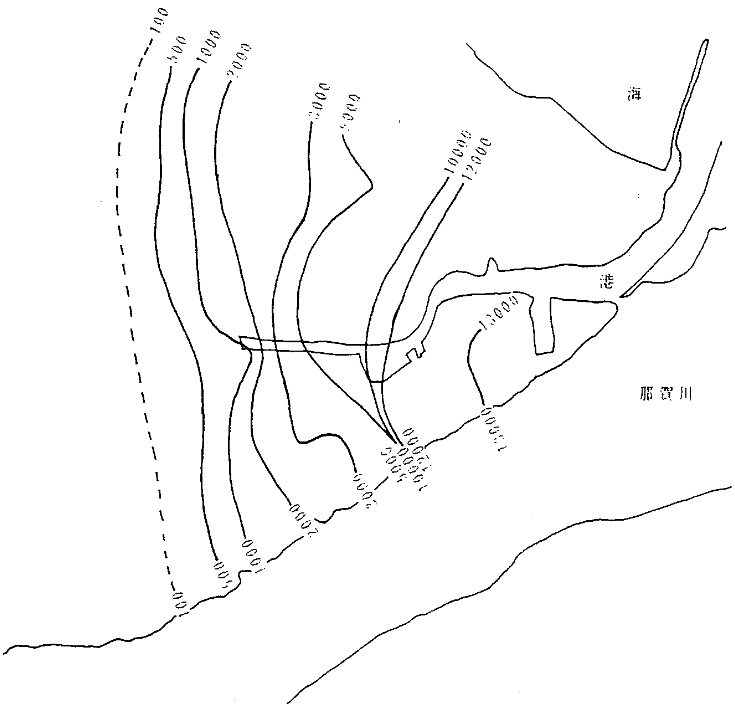

Fig.4 Plane distribution of saline concentration[8)]

建設中であるが、この調査はこの河川改修にかかわる当該地区の一連の塩害調査の初期のものであり、堤内地への塩分侵入の実態を解明したものである。

河川水、地下水の化学組成を調べ、陽イオン（Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}）と陰イオン（Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{2-}）を定量分析し濃度ダイヤグラムを示している。図－3に示される分析結果から、堤内地地下水の塩分の主たる供給源は河川を遡上してくる海水であることを明らかにしている。

2)那賀川（徳島県）下流地下水調査[8)]

昭和40年代半ば頃から、河口域の地下水が鮎養殖用、養鰻用として大量に取水され、同時に工業用水の取水量も増大したことおよび河床低下による塩水の河道内遡上

に起因して、海岸部の地下水が急速に塩水化した。60mの深井戸と20mの浅井戸を現地に掘削し、揚水試験や塩分濃度計測を実施し、地区の既設井戸の水位、塩分濃度の計測も行い、実態把握をするとともに安全揚水量を算出した。当該地区の実測データに基づく等塩分濃度線の変化を示したものが図－4である。

3)富岡港（徳島県）改修に伴う地下水調査[9]

河口部港湾の港内浚渫が周辺地下水の塩水化現象の変化に及ぼす影響を明らかにすることを目的としたものである。対象域は図－5に示した那賀川河口右岸にある富岡港周辺の約10km^{2}の地域であり、平均的には年間2000mm～2200mmの降雨量があり、表流水、地下水を含めて利水容量は大きい。図中の○印番号は観測用に選定した既設井戸の位置を示し、No.付の番号はNo.1～No.7が本調査用に新設した井戸でありNo.8～No.12は河道内測点である。既設の浅井戸の塩分濃度は図－6に示すようにまだ低濃度ではあるが昭和54年頃から上昇傾向にある。

新設の浅井戸No.1と深井戸No.6の塩分濃度は、図－7に示すとおり深部の地下水はすでに海水塩分に近い程度にまで塩水化していることがわかる。

4)日和佐川（徳島県）河口域の地下水調査[10]

河床低下に伴う海水の河道内遡上と過剰揚水に起因すると考えられる塩分の侵入の実態を調査したものである。対象域は図－8に示したが、山間の谷を急勾配で流下し、海に開いている小河川であり、対象域の平地部面積はたかだか2km^{2}程度である。図－9は対象域内の上流に位置する浅井戸の塩分濃度と水温の鉛直分布を示し、図－10には深井戸の計測結果を示している。観測日は昭和56年10月28日の大潮満潮時におけるものであり、F－2は塩水化の障害に見舞われた上水道水源井戸であり、F－6の位置に移設することになった。

5)吉野川（徳島県）下流部の地下水調査[11]

観測調査対象域は図－11に示したが、吉野川河口部（感潮区間）本川沿いの面積約40km^{2}の地域である。当該地域の被圧地下水はすでにかなり高濃度の塩分を含んでいるが、浅層の自由地下水の塩水化の進行が危惧されて、その挙動調査をおよそ2年間にわたって行ったものである。図－12には既塩水化井戸についての平均塩分濃度値、井戸水位、観測日前日までの1ケ月雨量の時間的変化を示している。昭和58年の夏季に一時的に塩分濃度が上昇したが、その後は観測開始頭初の濃度まで低下しており、経年的に著るしい塩水化傾向は認められない。しかし、降雨量が少なくなる冬季には、塩分濃度が若干高くなる傾向にある。

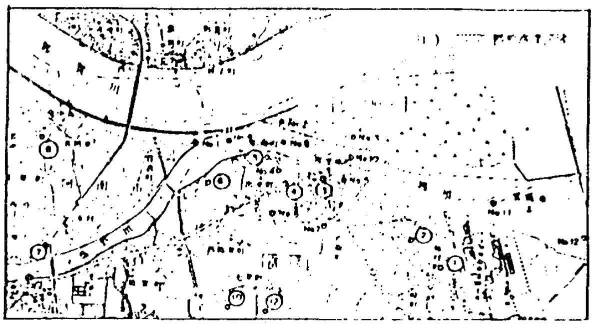

Fig.5 Objective basin (Tomioka)[9]

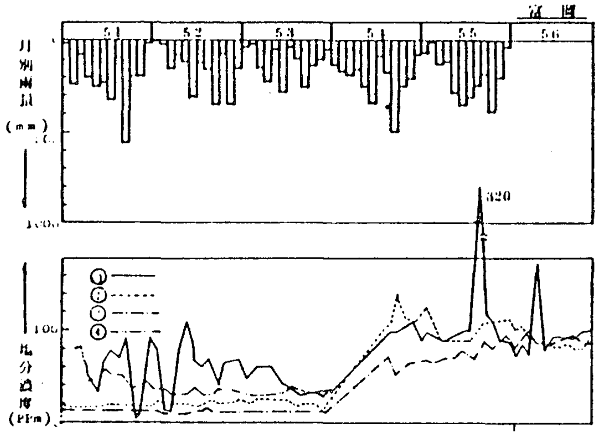

Fig.6 Annual changes of salinity in observation wells.

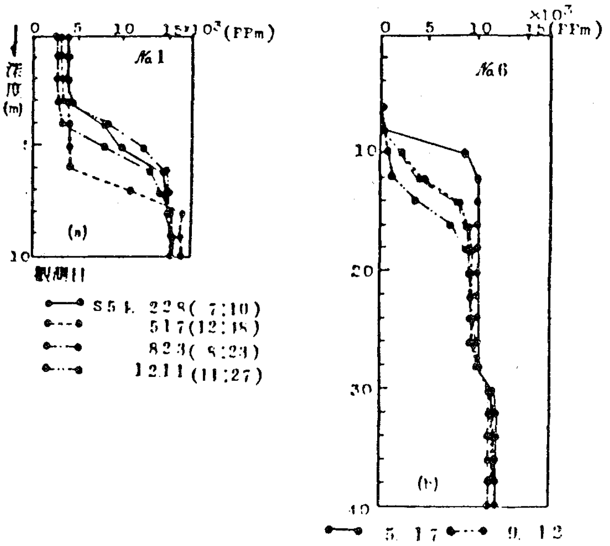

Fig.7 Vertical distribution of saline concentration

4 塩分侵入現象の解析法

地下水の塩水化は、第2節で述べたような種々の原因により、淡水地下水帯中へ塩分が侵入してくる現象である。この地下水汚染の問題を解明しようとするとき、①密度流、②移流、③分散、④吸脱着の各要素を考慮する必要がある。

地下水の塩水化に関する研究は、感潮河口域の河道水理と同様に、密度の異なる塩水（海水）と淡水（地下水）を非混合と仮定する2層流としての解析法と両者を混合可能な流体とする解析法とに分けられる。

前者の非混合と仮定する解析法は、地下水帯中の浸透流速が一般的には十分小さく、分散の効果がそれほど大きくならない限りでは十分に有用であり、圧力平衡式にもとずく塩水楔形状や侵入長を定常問題としてとらえる実験的研究や解析的研究が数多くなされている。[12)]

さらには、差分法や有限要素法などを用いた数値解析手法による研究へと発展し、定常問題から非定常問題へと拡張されている。[13)14)]

後者の解析法は、揚水や注・排水など人為的付加条件によって、流動流速や分散効果が変化するような現象に対して適用されねばならない。Pinder, Lee, Segol等に始まった解析的研究は、近年その解析の必要性から主流となっており、移流分散現象としての実験的研究[15)]や数値シミュレーション[16)]による研究も多い。さらに、塩水化に伴うNa^+の吸脱着現象が移流分散現象をさらに複雑にしていることが指摘され、この吸脱着現象を考慮した解析手法も提示されている。[17)]

以下にそれぞれの解析法の要点と解析例を簡潔に説明しておく。

(1) 塩水楔

海岸付近の地下水では、特別な場合を除いて水平流速に比べて鉛直流速を無視することができ、準一様流としての取り扱いがなされる。塩水くさびが平衡状態にある場合は、塩水と淡水の密度差をεとして有名なヘルツベルグの条件式、$\eta = \varepsilon h_1$が導びかれる。ここにη, h_1はそれぞれ海水面を基準線として測った地下水面までの深さ、淡塩界面までの深さである。また、このときの淡塩界面形状は次式のように表わされる。

$$\frac{\varepsilon k}{|q_L|} \quad h_1 = \left(\frac{2\varepsilon k x}{|q_L|}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

ここに、xは地下水帯の下流端（海岸線）を原点とし、内陸向きにとった水平座標であり、kは透水係数、q_Lは淡水の単位幅流量を表わす。

式(1)ではx＝0で、淡水流出流速が無限大となる不合理が生じるため、玉井・嶋[18)]はこれを修正し、下流端での淡水流出水深h_{10}（$\fallingdotseq |q_L| / \sqrt{2}\,\varepsilon k$）を導入して、

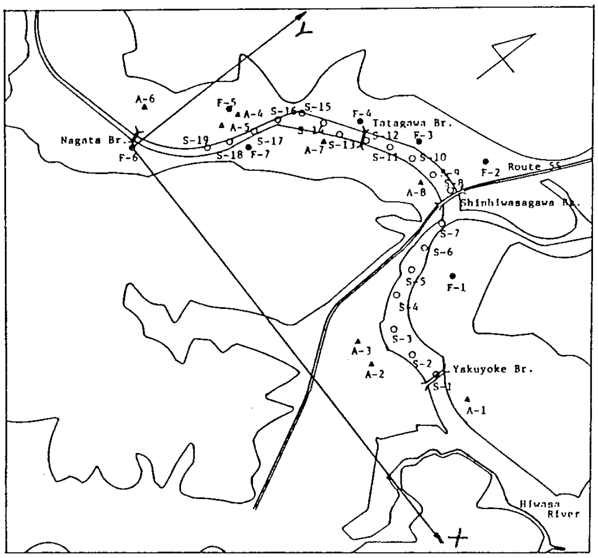

Fig.8 Objective basin(Hiwasa)[10)]

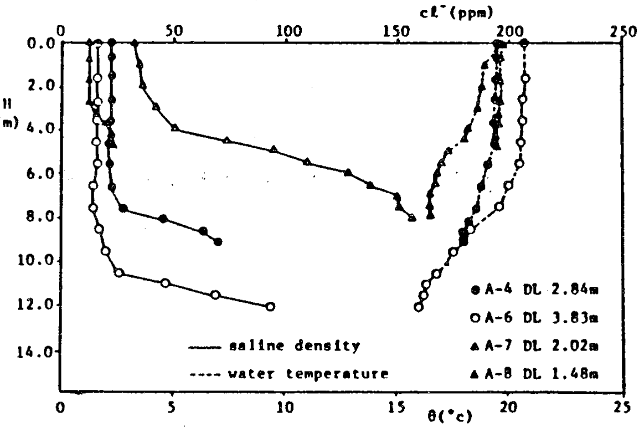

Fig.9 Vertical distribution of salinity and temperature in shallow wells (Spring tide)

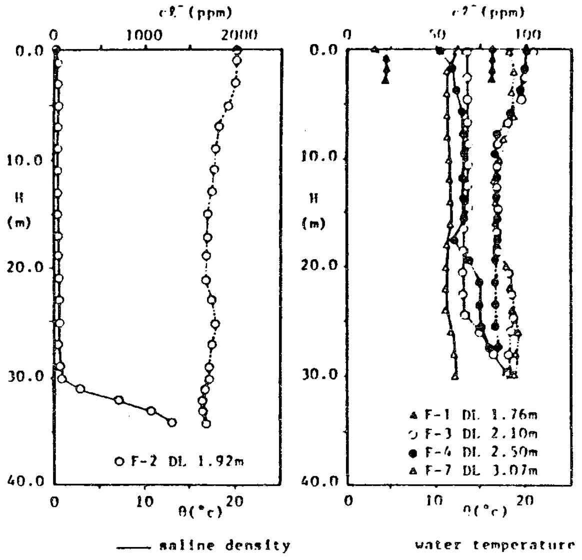

Fig.10 Vertical distribution of salinity and temperature in deep wells

界面形状を次式のように表わした。

$$\frac{\varepsilon k}{|q_L|} h_1 = \left(\frac{2\varepsilon K}{|q_L|} x + 0.5\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

そして、種々の室内模型実験により式（2)の適応性を検証している。（図−13）。

被圧帯水層の場合にはHenryの厳密解[18]やRumer・Harlemanの近似解[20]があるが、これらと式(2) とはほとんど同一の結果を与えることも玉井が示している。[21]

(2)　移流分散現象

地下水中における分散に関しては、1950年代から主に塩分侵入や薬品汚染問題を対象として論じられてきた。[22]

その特徴は、間隙流路の分散性と微流速によるものであり、移流と分子拡散、機械的分散現象で構成される。

理論的構築について簡単に説明する。

帯水層間隙内の実質流速Uは、断面平均浸透流速（ダルシー流速）$\underline{U}_D$を間隙率λで除した値であるが、この実質流速Uと溶質濃度Cをコントロールボリュームに対する平均値とそれからの偏差で示すと次式のようになる。

$$u = \underline{U} + \hat{u}, \quad c = C + \hat{c} \qquad (3)$$

したがって、いま考えている領域（コントロールボリュム）に流入する溶質の時間平均量は、次式となる。

$$\overline{uc} = \underline{U}C + \overline{\hat{u}\hat{c}} \qquad (4)$$

式(4) の右辺第1項が移流による輸送量であり、第2項が間隙流路の分散性によって生じる溶質輸送量である。またこの分散項はTaylorやElderをはじめとして、

$$\overline{\hat{u}\hat{c}} = -K_0 \,\mathrm{grad}\, C \quad (K_0：分散係数) \qquad (5)$$

とFick則と類似形で定義されている。[23]

浸透流速の主流方向をX軸にとり、濃度C(x,y,t)に関する2次元移流分散方程式は、次式のように示される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \underline{U}\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_L\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_T\frac{\partial C}{\partial y}\right) \qquad (6)$$

ここにK_Lは主流方向の分散係数であり、縦分散係数といい、K_Tは主流に直角方向の値であり横（方向）分散係数と呼ばれる。

分散現象を解明しようとするとき、式(6)中に含まれる分散係数の値が最も重要となるが、これが浸透場の土質や粒度などの構造と流況に左右されるために、普遍的な表示式や数値を与えることが極めて難しい。現在では、分散係数はペクレ数に依存することが知られており、Pfannkuchによれば図−14のように5つの領域に分けて分数機構の特性が示されている。[24]

ペクレ数が、300＜Pe＜2×10^{5}の領域④では、分散が卓越するとされ、分散係数は浸透流速と間隙径の関数として与えられる。したがって、K_L、K_T, は次式のように表現される。

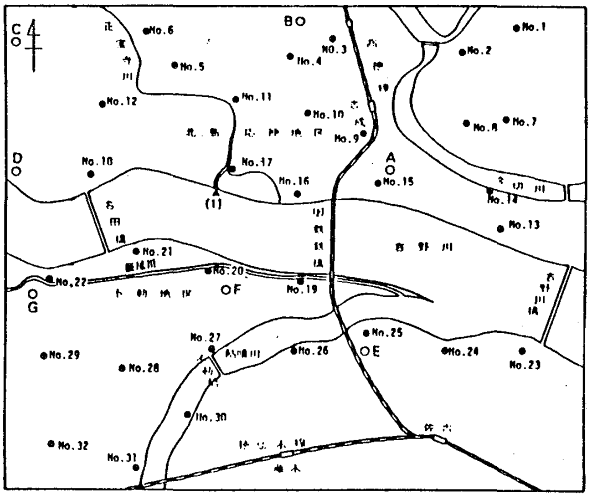

Fig.11 Objective basin (Yoshino River)[11]

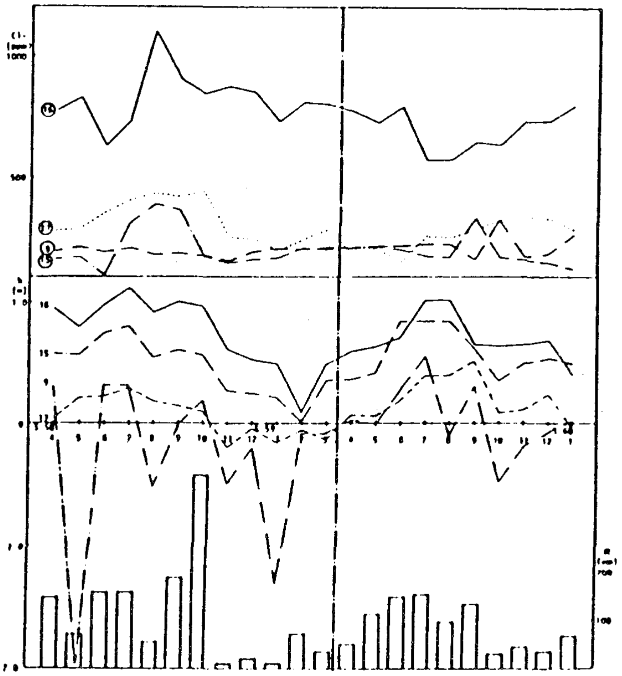

Fig.12 Monthly change of salinity, groundwater level and rainfall

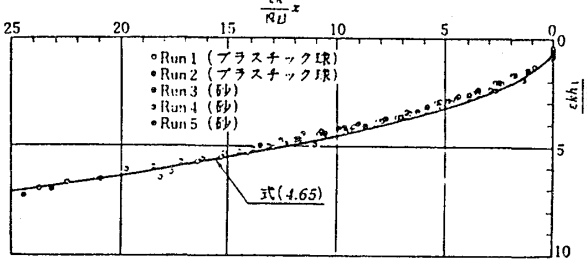

Fig.13 Salt-water wedge[18]

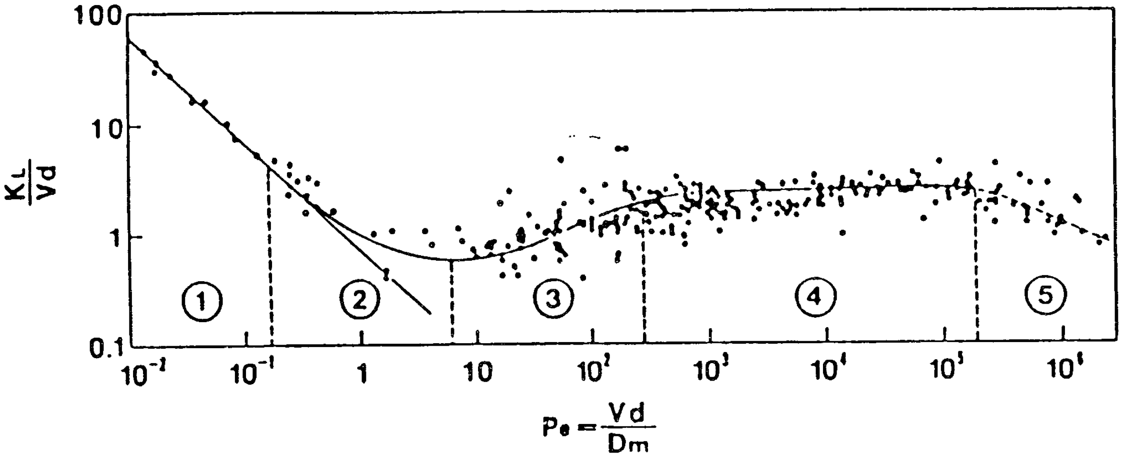

Fig.14 Partition of dispersion characteristics by Pfannkuch[24)]

$K_L=\alpha_L|U|$, $K_T=\alpha_T|U|$ (7)

ここに、α_L, α_T は長さの次元をもち、分散長（分散率）と呼ばれる。したがってα_L, α_Tを推定する必要があるが、現地実測では地層構造の不均質によって数mのオーダとなること[25)]、α_Tはα_Lの1/5～1/100の値となることなどが示されている。[26)]

藤間[27)]によれば、K_Lと浸透流速との関係が、実験結果より

$K_L=0.139U^{1.025}$(cm²/sec)：(0.01＜U＜1.0cm/sec) (8)

と与えられている。

このようにK_L, K_Tが決定できれば、適当な初期条件、境界条件のもとに種々の数学的手法により式(6)を解くことができる。[28)29)]数値計算結果と実験結果を比較した例として図－15を示した。

(3) 吸着現象

2つの物質の一方が固相で、他方が気相あるいは液相であって、両者が接触した結果気相または液相の成分濃度が接触面付近と相内部とでは異った状態で平衡しているとき、その状態を吸着と呼ぶ。[30)]したがって、土壌粒子と各種溶液中の化学物質との間で生じる化学変化や反応がこれに当たり、塩水化現象においてもこのような吸着現象を分析の中に考慮する研究もみられる。[31)]総括的な説

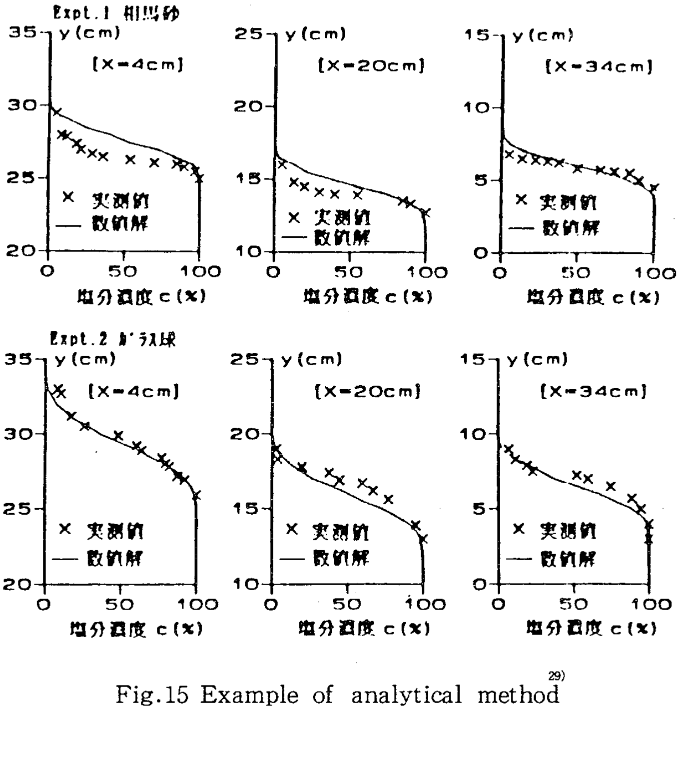

Fig.15 Example of analytical method[29)]

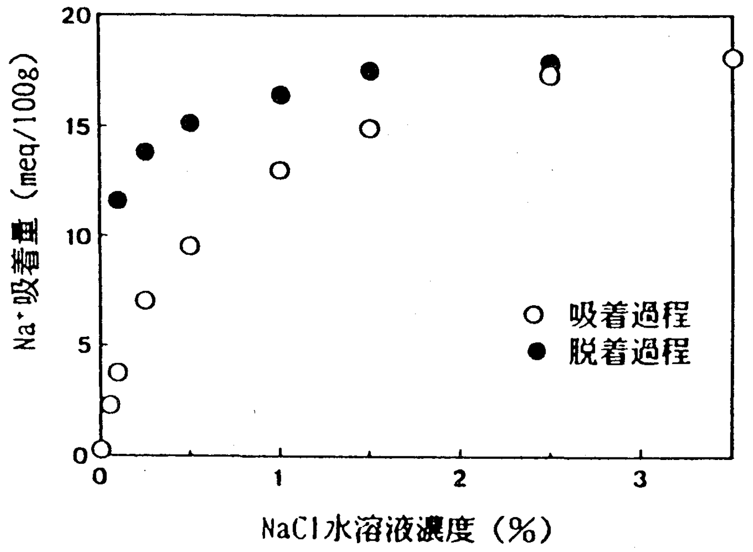

Fig.16 Experimental results of adsorption[33)]

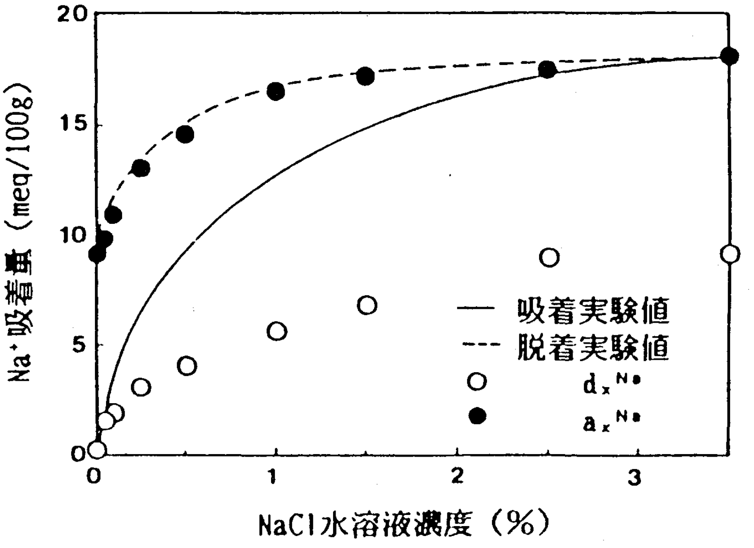

Fig.17 Adsorption considered ion-exchanging[33)]

明は神野による1990年度の水工学に関する夏期研修会講義集[32)]に詳しいが、ここでは青木[33)]による解析結果を紹介しておく。

塩水化に伴う吸脱着特性を考察するために、豊浦砂、琴引砂、三方砂と琵琶湖粘土（LL＝122％,PL＝46％, PI＝76）を吸着材とし、吸着質としてNaCl水溶液、$CaCl_2$水溶液を用い、振とう実験法によっている。実験結果の一例を図－16に示したが、これらの結果より、琵琶湖粘土の吸着容量が最も大きく、三方砂、琴引砂、豊浦砂の順に吸着容量は小さくなっていること、また、吸着過程と脱着過程とは明らかに異なり、化学ヒステリシスが存在することがわかった。

この化学ヒステリシスの発生原因を説明するために、①イオン交換径路の違いにより吸着状態は変化しない、②吸着過程と脱着過程とは反応が異なる、という２つの仮説の下に実験的に検討して、化学ヒステリシスが電解質濃度の変化に伴う吸着量の変化に起因していることを明らかにした（図－17）。

このような土粒子への吸着と揚水を考慮した移流分散方程式は、次式のようになる。

$$\frac{\partial(\lambda C)}{\partial t}+\mathrm{div}(CV-D\ \mathrm{grad}\ C)-WC+\rho_b\frac{\partial q}{\partial t}=0 \quad (9)$$

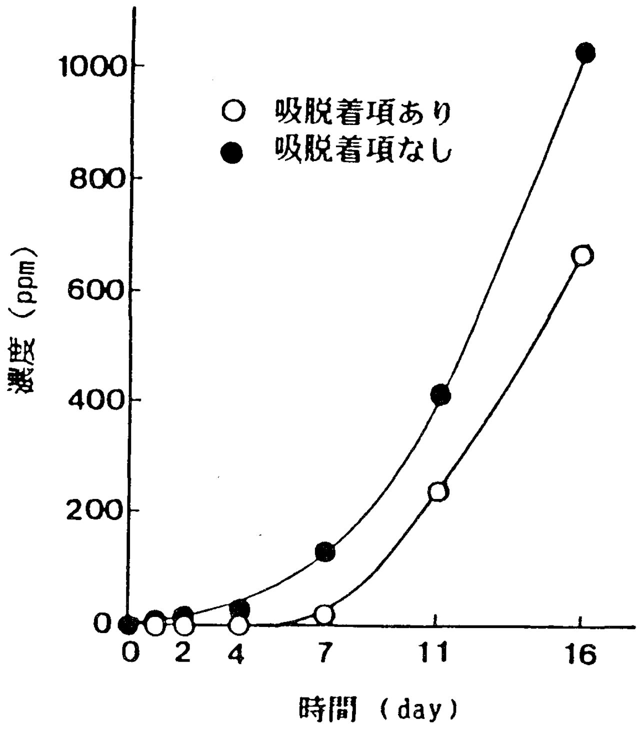

Fig.18 Change of adsorption in dispersion process[33]

ここに、C:溶質濃度、V:浸透流速、W:揚水量、q:吸脱着量、λ:間隙率、ρ_b:湿潤密度、D:分散係数、である。

吸脱着項は、吸着過程では$\partial q/\partial t>0$、脱着過程では$\partial q/\partial t<0$であり、qが溶質濃度Cの関数として与えられるため、$\rho_b \cdot \partial q/\partial C \cdot \partial C/\partial t$と変形できる。さらに吸着等温式としてFreundlich[34]式を用いて、

$$\frac{\partial q}{\partial c}=frC^{r-1}(r,f:\text{Freundlich定数}) \qquad (10)$$

となる。したがって、吸脱着現象が移流分散特性に与える影響因子はこの定数r,fということになる。

一つの解析モデルの条件下で式(9)に基づく解析結果の一例を図−18に示した。これらから明らかなように、吸着過程では、吸着の影響が顕著に表われ、移流分散現象の時間的遅れがかなり大きくなること、脱着過程では濃度減衰が緩慢であり、塩水化の回復が遅れることがわかる。

5 あとがき

本稿では、わが国における塩水侵入による地下水汚染の実態の概観と塩分侵入現象の解析法の要点を概説した。本来なら、さらに塩水化防止対策についても節をもうけてふれるべきであろうが、筆者の力不足のゆえにまとめることができなかった。

地下水への塩分侵入は、海水に囲まれた陸地の端の部分では常に起こっている現象であり、これがいわゆる地下水汚染、地下水障害として顕在化することは、その地区の環境の変化に起因するものである。したがって顕在化した地下水障害を取り除くことや未然に障害を防止することが地下水保全対策である。塩水化に限ってみれば、地下水流動量の増大、地下水水圧の回復、地下水取水量の規制、地下水水質の向上をはかることであり、その方法としては、地下ダム・遮水壁の建設、表流水・雨水の人工かん養の効率化、揚水の最適化などが考えられる。

すでにこのような地下水保全対策は数多く実施されているが、その効果が十分に発揮され、将来に継続されるようになるためには、なお一層の技術的向上をはかる必要があろう。

参考文献

1)柏木才助(1992):地下水を巡る最近の動向について、地下水技術、34−1,6−19.

2)土木学会全国大会研究討論会資料(1991):海面上昇への適切な対応,p.9.

3)村岡浩爾(1986):合成有機化合物による地下水汚染機構の解明に関する基礎的研究、「環境科学」研究報告集、B293−R12−14,p.112.

4)丹保憲仁(1991):〔特集〕水道における農薬汚染問題、水質汚濁研究、14−8,1−33.

5)村下敏夫(1983)：わが国における地下水の塩水化域、地下水と井戸とポンプ，5〜17.

6)文献1)と同じ,

7)石崎勝義・井戸康雄・矢沢聖一(1983)：堤内地への塩分侵入の実態と機構について、建設省技術研究会報告，Vol,36,783-789.

8)那賀川下流地下水調査報告書（水理解析）(1975)：防災研究協会，p.43.

9)尾島勝・天羽誠二(1982)：感潮河川内浚渫による地下水塩水化の変化予測，海岸工学講演会論文集,29,530-534.

10)尾島勝・西内剛三(1983)：日和佐川河口域における地下水塩水化に関する調査研究、徳島大学工学部研究報告，28,1-9.

11)尾島勝(1986)：吉野川下流部低平地自由地下水中の塩分挙動に関する調査・解析(II),徳島大学工学部研究報告、31,23-33.

12)玉井信行(1980)：密度流の水理、新体系土木工学、22,技報堂,p.260.

13)Kawatani,T.(1975)：Numerical analysis of the groundwater mound and fresh-salt water interface in a coastal aquifer, Proc. of JSCE, No.238, 89-98.

14)河野伊一郎(1981)：非定常浸透流における境界面問題の有限要素法解析とその実験的検証，土木学会論文報告集，313,65-73.

15)尾島勝・李圭太(1989)：海岸部自由地下水帯への塩分侵入阻止と塩分分散に関する実験的考察（第五報），水理講演会論文集,33,187-192.

16)神野健二・上田年比古(1978)：粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討，土木学会論文報告集，271,45-53.

17)青木一男・嘉門雅史(1986)：地下水の塩水化に伴う吸脱着現象について、土木学会論文集、370,133-141.

18)Tamai, N.and S.Shima(1967):Salt－water wedge in unconfined coastal aquifers, Trans.JSCE, No.139,31-38.

19)Henry,H.R. (1959) : Salt intrusion into fresh-water aquifers, J.Geophys. Res. Vol.64 1911-1919.

20)Rumer,R.R.,Jr. and D.R.F.Harleman (1963) : Intruded salt-water wedge in porous media, J.Hy.Proc. ASCE, Vol.89, 193-220.

21)文献12)に同じ

22)Cooper,H.H.,Jr (1959):A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer, J.Geophys. Res. Vol.64, 461-467.

23)Elder,J.W.(1959): The dispersion of marked fluid in turbulent shear, J.Fluide Mech.

24)Pfannkuch, H.O.(1963): Contribution a l'etude des d'eplacements de fluides miscibles dans un milieu poveux, Revue, de l'Institute Fransais du P'etrole, Vol.18,215-270.

25)Pickens,J.F. and G.E.Grisak (1981) : scale-depend dispersion in a stratified granular, Water Resour.Res. Vol.17,No.4,1191-1211.

26)Marsily,G.(1986):de Quantitative Hydrogeology, Academic Press, p.238.

27)藤間聡・馬場一孝(1984):多孔体の分散係数の最適同定について、室蘭工業大学研究報告,34,17-24.

28)河野伊一郎・西垣誠・田中慎一(1983):飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象の有限要素法解析，土木学会論文報告集，331,133-141.

29)細川土佐男・籾井和朗・神野健二・上田年比古・伊藤敏朗(1989):被圧帯水層における塩水混合域の分散特性に関する実験及び数値解析による検討、水理講演会論文集，33,193-198.

30)八幡敏雄(1975):土壌の物理、東京大学出版会、p.23.

31)Valocchi,A.J.(1984): Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach, Water Resour.Res., Vol.20,No.4, 499-503.

32)神野健二(1990)：地下水汚染の解析とモニタリングの方法、水工学に関する夏期研修会講義集，A-6,

33)青木一男(1988):過剰揚水に伴う塩水化問題と地下水保全のための地下ダムの有効性の評価に関する研究、京都大学工学博士学位論文，p.147.