塩水—淡水境界に関わる地下水流動研究

丸井 敦尚*・安原 正也*

Studies on Groundwater Flow System with
Saltwater - Freshwater Interface

Atsunao MARUI* and Masaya YASUHARA*

Abstract

Saltwater - freshwater interface is well known as a keyword of groundwater development at coastal area. Problems of groundwater salification has been expanded to the deep zone as years go by. The history of saltwater - freshwater interface study is shown from the viewpoints of theoretical research and practical research in this paper. Due to the groundwater flow, the up-end of the interface is squeezed to the offshore and makes a submarine groundwater discharge, in usual. The evidence of groundwater discharge is found even in the deep sea floor, and the groundwater flow is thought to be formed along the interface, in the recent studies. The form of saltwater - freshwater interface and groundwater flow along the interface have been made clear by the submarine groundwater discharge research and the progress of groundwater flow simulation.

Key words : Saltwater-freshwater interface, Groundwater flow,
Submarine groundwater discharge

キーワード : 塩水—淡水境界、地下水流動、海底湧出地下水

I. はじめに

臨海部では人間活動が集中しやすく、地下水の需要も高まる。過剰な地下水の利用は、常に塩水化問題を発生させると言っても過言ではない。問題が浅層のごく一部にとどまるか否かは地下水の利用形態によるが、時代とともに問題は平面的な広がりをもち、さらに深層地下水をも考慮しなければならない状況に発展してきた傾向にある。本来、日本は温帯多雨気候下に位置するため、年間の平均降水量も1600~1800 mmの地域が多く、天水の恩恵をふんだんに享受している風光明媚な楽天地のはずである。しかし、本邦は周囲を海洋に囲まれた島国であり、地下水の塩水化問題は至るところで発生の可能性を有している。本報では、

地下水流動系の端末を決定する塩水・淡水の境界面の形状と動向についてまとめてみたい。

榎根 (1980) によれば、一般に地球上の全陸域では総降水量の約66%が蒸発し、約30%程度が地表面からの流出によって失われる、残りの水だけが地下水を涵養し流域を潤しながら流下する。このうち、ごく一部だけが深部地下へ浸透すると考えられているが、この深部地下への浸透水も含めてほとんどの天水がいずれは海洋に流出している。Church (1996) は、世界的に見て海洋の水質形成に無視できない程の多量の地下水が海底湧出水として海洋にそそぎ込まれていると報じた。これらの地下水は真水 (淡水) かあるいはそれに極めて近い状態で海底に湧出しているが、この陸水系地下水が流出する海底斜面の地下には、常に淡水

* 地質調査所環境地質部 (Geological Survey of Japan)

Fig. 1 Image outline of saltwater-fresh-water interface and groundwater flow

と塩水の境界が存在する。言い換えれば、陸水起源の淡水系地下水と海洋起源の塩水（汽水）系地下水とが沿岸海洋の地下において塩淡水境界面（注1）を形成し、これに沿って深部淡水系地下水が海底に流出している（Fig.1）。勿論この淡水系地下水の流れに沿って移動する海洋の下塩水系地下水の循環もあり、海底に湧出する地下水の流れは単純ではない。この流出パターンについては丸井（1997）が詳しい（Fig.2）。

1960年代の後半から、ヨーロッパ諸国を中心とする水文学の先進国で、地下水の揚水や埋め立ての影響評価などを考慮した海岸部の地下水流動と地下水の塩水化の研究が盛んに行われてきた。ここで常に問題視されてきたのが塩淡水境界の位置と地下水流動の関係であり、研究が進むにつれ塩淡水境界の形状や深部地下水の流動までもが考慮の対象となってきた。これまでの水文学研究においては、デイティングを含め地下水流動速度の実測範囲が限られていたため、超深層の地下水流動解明には実証的な研究が伴わずにいた。しかし、近年になって、掘削・採水技術の進歩とともに深層の地下水が乱されことなく採水されるようになったこと、デイティングの新技术が数々開発されたこと（Deming *et al.*, 1992やMoore, 1996など）などから、深部地下水の流動過程が次第に研究対象となってきた。

1a

1b

1c

Fig. 2 Pattern diagrams of groundwater discharge to the marine bottom (after Marui, 1997)

II. 塩淡水境界の位置と形状

一般に塩淡水境界と言ってもいろいろ種類に大別される。一つは海岸部の流動する地下水によって形成される動的な塩淡水境界であり、もう一つは地層中に取残された化石塩水と周囲の淡水地下水によって形成される地質に依存した塩淡水境界である。

この化石塩水と周囲の淡水に関する水文学的研究はDuphorn(1984)に代表されるように大陸先

Fig. 3 Ghyben-Herzberg relation (Freeze and Cherry, 1979)

進国での研究が盛んである。話は少々それるが、ドイツではアルプス造山運動によってかつての海洋砂が地中に封印され岩塩層を形成している場所が多い。Duphorn(1984)の研究対象地域となったゴルレーベンもその一つであり、現在では高レベル核廃棄物の処分場建設候補地とされている。ゴルレーベン付近の塩淡水境界は地層の褶曲と一致しており、この天然バリアを用いて地下500~800m付近に核廃棄物処理する計画がある。

本論の主な対象は海岸部の塩淡水境界である。スウェーデンのエスポボやイギリスのシェラフィールドなどは、この海岸塩淡水境界を考慮に入れた高レベル核廃棄物処分場の建設が話題となったことでも有名である。一般的に海岸部の塩淡水境界の形状や移動の有無はその地域の水文地質に大きく左右されるが、均質な地層やあるいは一つの地層の中での塩淡水境界については、ガイベン-ヘルツベルグの法則に代表されるように、古くから論じられてきた。Freeze and Cherry (1979)やBouwer (1978)は、ガイベン-ヘルツベルグの法則により、塩淡水境界が地表付近の地下水面形状に左右されること、また塩淡水境界の上端部は、地下水が後背地の高い水理ポテンシャルを受けて流動しているために、沖合の海底に位置していることを論じている (Fig. 3 淡水地下水の流動がない場合は左図のようになる)。これは塩淡水境界面上では上向きの地下水流動が発生し、地下水の海底湧出を形成し、淡水 (地下水) が海水中に湧き出すことを示して

Fig. 4 Saltwater-freshwater interface in the multi-layered aquifers (Reilly and Goodman, 1985)

いる。この様子をFig.2に示す。

塩淡水境界の研究についてまとめた代表的なものにReilly and Goodman (1985)のレビューが挙げられる。1950年代から、この論文が出版される1980年代の半ばまでは、水文学の分野では塩淡水境界の研究が盛んに行われた時期であり、同論文はその集大成とも言えるもので、269編の論文・書物をカバーしている。この論文では1930年以前にはガイベン-ヘルツベルグの理論どおりに塩淡水境界が汀線付近に存在していたと考えられたが、その後の地下水流動の研究が進み、地下水のポテンシャルが高い所では淡水地下水が沖合の海底で湧き出すことや、層状に堆積した海岸域ではより下位の層順の塩淡水境界の方が、沖側にせり出していること (Fig.4) など、塩淡水境界の位置や形状に

Fig. 5 Intrusion of saltwater wedges in Long Island, N. Y.
(Lasczynski and Swarzenski, 1966)

関して理論的かつ実証的な研究事例が報告されている。中でもニューヨーク・ロングアイランドでのLasczynski and Swarzenski (1966)による研究は、層状に堆積した海岸域で塩分濃度の高い地下水くさびが何層にも入り込んでいる様子が示されており (Fig.5), 塩水くさびの侵入が透水係数などの地層の物理性によって複雑に入り組んでいることを示している。さらに、Reilly and Goodman (1985)の研究では、塩淡境界を形成する地下水流動の量的な研究についても言及されており、背後の地下水流動の変動によって海側にせり出した塩淡境界がその位置を変化させていく研究が紹介されている。

しかし、塩淡境界の位置を決定することにはいくつかの問題点が含まれている。その一つが観測井自身の問題である。井戸掘削後の試験も含めた揚水によって下位に存在する塩淡境界が上昇してくることがReilly and Goodman (1987)で紹介されているほか、掘削中も含めた淡水の注入によって塩淡境界が井戸の周囲で乱されることがRubin and Pistiner (1986)によって報告されている。すなわち、観測井内部の塩分濃度測定だけでは塩淡境界が的確に捉えられていない可能性がある。塩水が近隣にある地域や井戸が塩淡境界をこえて

掘削されている場合には、井戸管理の上で塩淡境界の位置や動向を十分に考慮しなければならない。前者に対してはHunt (1985a)が、後者に対してはKipp (1985), Sageev (1986)が詳しい。また、複数の帯水層から地下水が流入する井戸の管理に関してはHunt (1985b)が有効である。

もう一つの問題は塩分濃度にある。通常塩淡境界と言った場合、その境目となる塩分の濃度は塩分比重に換算して1.003~1.015 (通常の海水は1.025~1.030)程度であり (Henry, 1964; Kohout, 1964), 一般的には汽水といえる範疇に属す (Figs.6,7)。この程度の希釈された海水起源の地下水でも通常は塩害が発生するため、塩化地下水と言われている。しかし、塩淡境界をこの様に汽水の部分に設定すると、淡水地下水の流動に合わせて、塩化地下水も塩淡境界に沿って上昇流を有することになり、先に述べた孔井掘削時の影響を考慮すると、現場での塩淡境界の位置決定ならびに移動の観測が非常に困難になる。現状においては、塩淡境界の位置・形状の判断ならびに移動に関して確実な知見を得るためには、Deming *et al.* (1992)の研究に見られるような広域的に長期の観測を行うとか、後述するようなシミュレーション研究に頼らざるを得ない。その場合特に注意しなくてはな

Fig. 6 Observation of saltwater wedge intrusion at Miami (Kohout, 1964)

らないのが、分散による塩分移動の評価である。通常のシミュレーションと比較して対象となる時間が極めて長いため、時と場合によっては、分散が移流を越えて塩分を輸送する可能性が生じる。詳しくは後述するが、現状では塩淡水境界に関する地下水流動解析の専用コードは市販されていない。

Ⅲ. 塩淡水境界に関する研究の流れ（理論的な研究、実証的な研究から海底湧出地下水研究へ）

1980年代をむかえと、シミュレーション技術の向上にともない塩淡水境界に関する理論的な研究も盛んになる。それまでは塩淡水境界の上端が沖合の海底に位置する程度のことしか論じられておらず、塩淡水境界形状はガイベン-ヘルツベルグの式に頼っていた。しかし分散を考慮し、有限要素法を駆使したPolo and Ramis (1983)の研究や、塩水が陸域のどこまで入り込むかという現象に対して議論したBear *et al.* (1985)の研究が現れ、塩淡水境界の形状がシミュレーションによって明ら

Fig. 7 Distribution of salt concentration along the saltwater - freshwater interface (Henry, 1964)

かにされるようになってきた。さらに1987年にはHuyakorn *et al.* (1987)が同様に有限要素法を用いた塩淡水境界の形状解析専用モデルを発表し、単純な地質条件下ではシミュレーションによって塩淡水境界の形状が比較的精度良く判定できるまでに至った。

しかし、これらの研究で開発されたシミュレータを用いて塩淡水境界を判定する場合、いずれも淡水地下水の流動が把握できているという前提条件が必要である。換言すれば、地下水と地質のモデ

ルの向上が塩淡境界の正確な把握につながると言える。その意味でも、高度化された3次元水理地質データベースの開発が急がれるようになった。より高精度な水理地質モデルを作成するための研究も行われている。Hemond *et al.* (1984)は塩水地域(塩化された湿地帯)への淡水の浸透理論を開発し、その理論を現地観測に適用した。また、Steinhorn (1991)は淡水地域と塩水(汽水)地域からの蒸発散モデルを提唱した。これら代表される研究によって、浸透-蒸発-地下水流動と言った一連の水の流れが明らかになり、この時代にシミュレーション技術は著しく向上した。

塩淡境界に関するシミュレーションモデルを作成する際に最も注意しなくてはならないことの一つに密度データの取り扱いがある。通常の地下水流動の解析にはダルシー則と連続の式を用いて実施されるが、密度・温度・濃度など塩淡境界シミュレーションには特有な要素の取り扱いが要求される。各要素の取り扱いはシミュレータ個々の特性があるためにそれぞれ異なるが、最終的には温度・濃度などのパラメータを密度に換算して地下水流動を計算するものが多い。先にも述べたように塩淡境界面上の地下水流動を論じるには数値解析に頼らざるを得ない場合が多いため、高精度な解析を実施するためには、密度データを備えるかまたは密度データに換算できるデータセットを保有するデータベースを整えておくことが必要となる(注2)。さらに、塩淡境界の形状およびそれに起因する地下水流動を計算する場合、非常に長期間におよぶ計算結果が要求される。クーラン数(注3)を考慮して計算のタイム・ステップを小刻みにした場合、収束した解を得るまでに時間がかかりすぎるなどの弊害があるため、実際の数値解析を実施する前に塩淡境界位置の概略を把握しておく必要がある。この意味でも、既存の地下水台帳に塩分濃度や水温・密度などを付加したデータベースを構築する必要がある。

一方、塩淡境界は現地観測によってその形状をとらえることが難しいことから、実証的な研究はほとんどなされてこなかった。1980年代半ばまで

は、Gupta and Yapa (1982)の研究に代表されるような、過剰揚水による地下水の塩水化を中心課題とする研究が多く、200 mg/l程度を塩水侵入のフロントとして現地観測が実施されている。従って、これらの研究からは、特定深度の塩分濃度だけで塩淡境界が判断され、しかも塩水くさびの侵入範囲が過大評価されがちであった。実際に塩淡境界の断面形状を観測した例としては、Iribar *et al.* (1997)によるスペイン東部の海岸デルタの例や、Kohout (1964)のマイアミの観測例が挙げられる。この観測でも、塩淡境界は希濃度部分に設定されているため、ガイベン-ヘルツベルグ線はゼロ-ホリゾンタル線よりも上位かつ陸側に位置しており、塩淡境界に沿った地下水の上向き流が塩淡境界の陸側と海側の両方で発生していることが示唆されている。

この上向き流れによって形成されるのが、海底湧出地下水である。詳細な地質データが得られない場合、先にも述べたように塩淡境界の末端位置(海底湧出地下水の位置)が分かれば後はシミュレーションによって塩淡境界の形状等が判定できる。従って近年の水文学研究ではこの海底湧出地下水の位置と流出プロセス(モデル)とを焦点とした研究が多い。地下水が海底に湧出する形態の研究としては、Church (1996)やStringfield and LeGrand (1969), Fairbridge (1966)が代表的である(Fig.2)。これらの研究ではいずれもが海底に湧出する地下水のプロセスモデルを提唱し、塩淡境界位置を示唆している。Church (1996)のモデルは堆積岩地域の地下水の大流動系を考慮しており、Stringfield and LeGrand (1969)のモデルは一般的な淡水レンズを、Fairbridge (1966)は地熱地域の地下水流動をそれぞれ考慮したモデルになっている。海底に湧出する地下水はパイプや亀裂から流出して海中にブリューム(淡水々柱)が形成されている場合には判定しやすいが、シート状に漏出する場合には判定が困難である。過去に報告されている海底湧出地下水の事例は、そのほとんどが火山地域やカルスト地域からのそれであり(Paull *et al.* 1984)、浅層部に流出するも

Fig. 8 Result of sea floor observation, the canyons are thought to be made by groundwater discharge to the marine (Pratson and Coakley, 1996)

の場合、海上から湧出位置が観測できるものも少なくなかった (Bogle and Loy, 1995 など)。シート状に漏出する海底湧出地下水の研究も近年盛んに実施されている。これらの研究には海中の塩分濃度測定による方法 (Brooks, 1961; Burdon, 1964; Vanek and Lee, 1991 など) や同位体を用いた方法 (Moore, 1996; Tsunogai *et al.*, 1996) などによって行われている。また、近年では、リモートセンシングを用いた方法も、塩淡水境界の位置決定に有効となりつつある。熱赤外映像によって地下水流出位置の確認を行った Banks *et al.* (1996) によるチェサピーク湾での研究事例をはじめ、Bogle and Loy (1995) によるテネシー州での観測、Roxburg (1985) によるイギリスでの観測などいずれもが広範囲にわたる地下水流出位置の特定を実施している。これらの結果から得られる海底湧出位置と陸域での地下水観測から塩淡水境界は間接的に同定できるようになってきた。

Ⅳ. 深海底からの地下水湧出

深海底においてはサイドスキャンソナーを用いた海底地形の解析から海底湧出地下水位置を推定する研究も実施されている。ニュージャージー沖の大陸棚 (水深 500~1,500 m) においては、Pratson and Coakley (1996) が海底地形の調査を実施し、海底湧出地下水によって形成される谷地形を発見した (Fig. 8)。Robb (1984) も同海域において海底地形調査を実施しており、かつては大陸棚の下を流下した地下水が大量に湧出することで谷地形を形成したと報告している。この流出プロセスは Church (1996) の提案したものであり、塩淡水境界が深部にまで達していることを示している。同様に Tobin *et al.* (1993) はオレゴン沖で水深 1,500 m 以深の断層から地下水が湧出していること (Fig. 9)、Manheim (1982) や Manheim and Paull (1981), Paull *et al.* (1984) はフロリダ沖 200~3,000 m の深海での海底湧出地下水を

報告している。しかもフロリダ半島においては、Schmoker and Helley (1982) が 5,500 m のボーリング結果から 1,700 m 以深で地下水水分量が増大すること（活発な地下水流動が可能）など超深層ボーリングに基づく水理地質を報告している。現在のところ、塩淡水境界を 3 次元的に把握することは難しく、何らかの観測事例とシミュレーションの両面から塩淡水境界を推定することがなんとか可能な状況である。特に近年は海底に湧出する地下水の位置を正確にとらえられるようになったため、陸域での地下水の情報が揃えば塩淡水境界は高精度に推定できる状況になってきた。しかし、観測機器の発達とともに大陸の沿岸部では 3,000 m にもおよぶ深海からの地下水流出も報告されており、これらの塩淡水境界を推定するためには、陸域においてもそれ相当の深度の地下水情報を得る必要がある。

地表の水域へ流出していることを報じている。特に、アラスカにおけるDeming *et al.*(1992)の研究は水平方向に数百km、垂直方向に5,000 m以上の範囲を研究対象として地下水流速を0.1 m/yr程度と推定している。いずれの研究もが、深部地下水ほどより大きな範囲からの地下水を浅層部より小さな速度で輸送し、海底ないし地表の水域に流出しているという教科書的な地下水流動を指示する結果となっている。しかしながら、塩淡水境界に沿った地下水の流動速度を実測した研究は見あたらない。

— 8 —

深い。Brooks (1961)はこの方法を用いてフロリダ沖で観測を行い深度38 mからの地下水流出量が $42 \text{ m}^3/\text{s}$ に達すると見積もった。近年では種々の同位体を用いた手法が開発されている。Tsunogai *et al.* (1996)は「しんかい2000」を用いて相模湾沖の1,000 m付近の海底崖から湧出地下水を採取しRn-Ra法による分析を行い34~54℃の地下水が $310\sim 500 \text{ m}^3/\text{day}$ の範囲で流出していることを、またMoore (1996)による研究は、ノースカロライナ沖において同様の方法で沿岸100 kmまでの範囲において、海底湧出地下水量が陸上水系からの海洋への流入量の40%にもおよんでいることを報告している。いずれの研究も地下水の海底への湧出量はこれまで考えられてきたよりも大きいと報告しており、塩淡水境界上を流動する地下水流速の実測とあわせて今後の重要な研究課題となるであろう。

この様に海底に湧出する地下水の位置ならびに湧出量を正確に把握することができれば、塩淡水境界上を上昇する地下水流動量が把握できることにつながる。今後の研究課題として最も重要なことは、陸側に伸長する塩淡水境界の形状を正確にとらえることと、塩淡水境界面に沿って上昇する地下水流動速度(量)を正確に把握することである。いずれも現場観測を通して実測値を提示することが好ましいが、現時点では限られた深層ボーリングデータや海底湧出地下水の位置・質・量に関するデータ、浅層部の豊富な地下水データ、水理地質に関するデータなどからシミュレーションを行わざるを得ない状況にある。

V. おわりに

塩淡水境界に関する研究には次のような弊害が存在している。(1)孔井を用いた観測によって推定される結果の信頼性に問題があること、(2)移動・形状などを正確に把握するためには(都市化していることが多い)海岸部で数多くの観測井を必要とすること、(3)海底湧出地下水の位置および地

下水流動量(湧出量)を正確に把握することが困難であること、などである。それが原因となって実証的な研究に遅れが見られた。従って、近年における水文学的研究は、その焦点を塩淡水境界から海底湧出地下水に移行しつつあると言っても過言ではない。

今後の塩淡水境界研究に関しては、これまでの水文学的研究で正確に定義されることの無かった塩分濃度と塩淡水境界との関係を明確にし、さらに、塩淡水境界を乱さずに観測する方法(例えば常に複数の観測井を設けて孔井間の比抵抗トモグラフィなどによる連続観測を行い不攪乱状態の塩淡水境界を観測するなど)を開発し、より高精度な観測をすることが求められる。この場合、現段階ではシミュレーションに頼らざるを得ない塩淡水境界の正確な形状や、塩淡水境界に沿って上向きに流動する地下水の流速を実測することが必要不可欠である。

一方、現時点での塩淡水境界把握のための努力も忘れてはならない。繰り返しになるが、現在の水文学においては塩淡水境界を判断する場合、シミュレーションに頼らざるを得ない。従って、既存の観測井の情報をいかに正確に収集することができるかが重要となってくる。地下水および地質に関するデータベースの精度向上がシミュレーション精度の向上につながり、ひいては塩淡水境界の正確な把握を導く。これらの積み重ねによって、最終的には深部からの浅部への地下水流動系が解明されていくことになると考えられる。

脚 注

注1 日本語においては、かつて淡塩境界という表現が定着したこともある。しかし、この分野に関しては圧倒的に英語で書かれた論文が多いことから、塩淡水境界という表現が近年主流となってきた。

注2 現在のところ、塩淡水境界研究に対応できる(塩素イオン濃度、温度等のデータを有する)データベースとしては、地質調査所版全国井戸・地下水DB「いどじびき」(丸井, 1998)が代

表例として挙げられる。

注3 クーラン数とは、流速に対する時間の離散化の指標であり、むやみにタイムステップを大きく取り計算を簡略化することでの弊害を避けるためのものである。また、同様に空間離散化の指標としてはペクレ数がある。

文 献

- 梶根 勇(1980):「水文学」. 大明堂, 東京, 272p.
- 丸井敦尚(1997): 海底湧出地下水 —新たな資源としての可能性—. 日本水文科学会誌, 27, 85-94.
- 丸井敦尚(1998): 地質調査所版全国井戸・水文データベースの概要と新版「いどじびき」について. 地質ニュース, 522, 32-36.
- Banks, W. S. L., R. L. Paylor and W. B. Hughes (1996): Using Thermal-Infrared Imagery to Delineate Ground-Water Discharge. *Ground water*, 34, 434-443.
- Bear, J., U. Shamir, A. Gamliel and A. M. Shapiro (1985): Motion of the Seawater Interface in A Coastal Aquifer by the Method of Successive Steady States. *J. Hydrol.*, 76, 119-132.
- Bogle, F. R. and K. Loy (1995): The Application of Thermal Infrared Thermography in the Identification of Submerged Springs in Chickamauga Reservoir, Hamilton County, Tennessee. *Karst Geohazards*, 1995, 415-424.
- Bouwer, H. (1978): *Groundwater Hydrology*. McGrawhill, New York, 480p.
- Brooks, H. K. (1961): The Submarine Spring off Crescent Beach, Florida. *Quart. J. Florida Acad. Sciences*, 24(2), 122-134.
- Burdon, D. J. (1964): *Karst Groundwater Investigations, Greece*. Food and Agric. Org. United Nations, FAO/SF: 2/Gre., 99p.
- Church, T. M. (1996): An Underground Route for the Water Cycle. *Nature*, 380, 579-614.
- Deming, D., J. H. Sass, A. H. Lachenbruch and R. F. De Rito (1992): Heat Flow and Subsurface Temperature as Evidence for Basin-Scale Ground-Water Flow, North Slope of Alaska. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 528-542.
- Duphorn, K. (1984): *Quartargeologische Ergebnisse und Probleme bei der Endlagerforschung Gorleben*. PhD Thesis of Univ. Kiel.
- Fairbridge, R. W. (1966): Submarine Springs. IN: *The Encyclopedia of Oceanography*, Reinhold, New York, 878-883.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979): *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliff, 604p.
- Gupta, A. D. and P. N. D. D. Yapa (1982): Saltwater Encroachment in an Aquifer, A Case Study. *Water Resour. Res.*, 18, 546-556.
- Hemond, H. F., W. K. Nuttle, R. W. Burke and K. D. Stolzenbach (1984): Surface Infiltration in Salt Marshes, Theory, Measurement and Biogeochemical Implications. *Water Resour. Res.*, 20, 591-600.
- Henry, H. R. (1964): Effects of Dispersion on Salt Encroachment in Coastal Aquifers. IN: *Sea Water in Coastal Aquifers*. U. S. G. S. Water-supply Pap. 1613-C, 70-84.
- Hunt, B. (1985a): Some Analytical Solutions for Seawater Intrusion Control with Recharge Wells. *J. Hydrol.*, 80, 9-18.
- Hunt, B. (1985b): Flow to a Well in a Multiaquifer System. *Water Resour. Res.*, 21, 1637-1641.
- Huyakorn, P. S., P. F. Andersen, J. W. Mercer and H. O. White. Jr. (1987): Saltwater Intrusion in Aquifers, Development and Testing of a Three-Dimensional Finite Element model. *Water Resour. Res.*, 23, 293-312.
- Iribar, V., J. Carrera, E. Custodio and A. Medina (1997): Inverse Modelling of Seawater Intrusion in the Llobregat Delta deep Aquifer.

- J. Hydrol.*, 198, 226-244.
- Kipp, Jr, K. L. (1985): Type Curve Analysis of Inertial Effects in the Response of a Well to a Slug Test. *Water Resour. Res.*, 21, 1397-1408.
- Kohout, F. A. (1964): Submarine Springs. IN: *Encyclopedia of Oceanography*, Reinhold, New York, N.Y., 878-883.
- Lasczynski, N. J. and W. V. Swarzenski (1966): Salt-water encroachment in southern Nassau and southeastern Queens counties Long Island, N. Y.. *USGS Water Supply Pap.* 1613-F, 76p.
- Manheim, F. T. (1982): Evidence for Submarine Discharge of Water on the Atlantic Continental Slope of the Southern United States, and Suggestions for Further Search. *Transactions New York Academy of Sciences*, 839-853.
- Manheim, F. T. and C. K. Paull (1981): Patterns of Groundwater Salinity Changes in a Deep Continental-Oceanic Transect off the Southeastern Atlantic Coast of the U.S.A.. *J. Hydrol.*, 54, 95-105.
- Moore, W. S. (1996): Large Groundwater Inputs to Coastal Waters Revealed by ^{226}Ra enrichments. *Nature*, 380, 612-614.
- Paull, C. K., B. Hecker, R. Commeau, R. P. Freeman-Lynde, C. Neumann, W. P. Corso, S. Golubic, J. E. Hook, E. Sikes and J. Curray (1984): Biological Communities at the Florida Escarpment Resemble Hydrothermal Vent Taxa. *Science*, 226, 965-967.
- Polo, J. F. and F. J. Ramis (1983): Simulation of Salt Water-Fresh Water Interface Motion. *Water Resour. Res.*, 19, 61-68.
- Pratson, L. F. and B. J. Coakley (1996): A Model for the Headward Erosion of Submarine Canyons Induced by Downslope-Eroding Sediment Flows. *Geological Society of America Bulletin*, 108, 225-234.
- Reilly, T. E. and A. S. Goodman (1985): Quantitative Analysis of Saltwater-Freshwater Relationships in Groundwater Systems. A Historical Perspective. *J. Hydrol.*, 80, 125-160.
- Reilly, T. E. and A. S. Goodman (1987): Analysis of Saltwater Upconing Beneath a Pumping Well. *J. Hydrol.*, 89, 169-204.
- Robb, J. M. (1984): Spring Sapping on the Lower Continental Slope, Offshore New Jersey. *Geology*, 12, 278-282.
- Roxburgh, I. S. (1985): Thermal Infrared Detection of Submarine Springs Associated with the Plymouth Limestone. *Hydrol. Sciences*, 30, 185-196.
- Rubin, H. and A. Pistiner (1986): Modelling Fresh Water Injection into a Partially Saline Partially Fresh (PASPAF) Aquifer. *J. Hydrol.*, 87, 351-378.
- Sageev, A. (1986): Slug Test Analysis. *Water Resour. Res.*, 22, 1323-1333.
- Schmoker, J. W. and R. B. Halley (1982): Carbonate Porosity Versus Depth, A Predictable Relation for South Florida. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66, 2561-2570.
- Shedlock, R. J., D. A. Wilcox, T. A. Thompson and D. A. Cohen (1993): Interactions Between Ground Water and Wetlands, Southern Shore of Lake Michigan, USA. *J. Hydrol.*, 141, 127-155.
- Steinhorn, I. (1991): On the Concept of Evaporation From Fresh and Saline Water Bodies. *Water Resour. Res.*, 27, 645-648.
- Stringfield, V. T. and H. E. LeGrand (1969): Relation of Sea Water to Fresh Water in Carbonate Rocks in Coastal Areas, with Special Reference to Florida, U.S.A., and Cephalonia (Kephallinia), Greece. *J. Hydrol.*, 9, 387-404.
- Tobin, H. J., J. C. Moore, M. E. Mackay, D. L. Orange and L. D. Kulm (1993): Fluid

- Flow Along A Strike-Slip Fault at the Toe of the Oregon Accretionary Prism, Implications for the Geometry of Frontal Accretion. *Geological Society of America Bulletin*, 105, 569-582.
- Tsunogai, U., J. Ishibashi, H. Wakita, T. Gamo, T. Masuzawa, T. Nakatsuka, Y. Nojiri and T. Nakamura (1996): Fresh Water Seepage and Pore Water Recycling on the Seafloor, Sagami Trough Subduction Zone, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 138, 157-168.
- Vanek, V. (1993): Groundwater Regime of A Tidally Influenced Coastal Pond. *J. Hydrol.*, 151, 317-342.
- Vanek, V. and D. R. Lee (1991): Mapping Submarine Groundwater Discharge Areas, An Example From Laholm Bay, Southwest Sweden. *Limnology and Oceanography*, 36, 1250-1262.
- (受付 : 1998年 9 月27日)
(受理 : 1999年 1 月13日)
-

この論文に対する「討論」を1999年 8 月31日まで受付けます。