

## 地下水研究40年の進展と今後の課題

Development of Groundwater Research in Recent 40 years and its Subject

河野伊一郎 Ichiro Kono 岡山大学環境理工学部教授



地下水に関する研究は、この40年に急速な進展をみえてきた。わが国の経済発展に伴う水資源としての地下水需要の増大、地盤工事の大規模化と地下水障害などのバックグラウンドと共に、とくにコンピュータを利用した数値解析とその技術の開発に負うところが大きい。その地下水研究の進展の経緯を概観し、その中でも、広域地下水の考え方と意義、地下水シミュレーションの発達と成果、浸透流と地盤の安定とくにパイピング等、地下ダムのご構想とその現状、環境問題としての地下水汚染等についてトピックス的に論じ、併せてそれぞれの事項について今後の課題を示した。

キーワード：広域地下水、地下水シミュレーション、パイピング、地下ダム、地下水汚染

## 1. はしがき

私が、地下水と地盤に関心を持つようになったのは、子供の頃の二つの体験が強く影響したものと思っています。

一つは、水資源としての地下水に関するものであります。私の生まれ育った村（滋賀県野州郡中洲村）では、1950年代までは、すべての家に自噴井戸（俗称ドッコイショ）があり、1日24時間豊富な地下水が湧き出ておりました。上水道は布設されておらず、風呂水はバケツで運んで入れており、その役目は私の仕事で子供にとっては重労働でありました。そこで、ゴムホースを自噴井戸の竹筒ケーシングに連結して浴槽にまで引いて水を入れることに成功しました。それにしても当時は、自噴井戸の水が、夏冷たく冬暖かく、無限に供給されることが不思議でなりませんでした。その後、水源用の大きな井戸から揚水が行われるようになって、自噴井戸はすべて消滅いたしました。

もう一つの体験は、堤防の浸透性破壊であります。1963年9月、台風13号が全国に大水害をもたらしま

した。私の村は琵琶湖に注ぐ野州川（天井河川）の三角州に位置しており、その洪水で堤防が欠壊し、大被害を被りました。たまたま水防作業に参加していた私は、その欠壊の状況を直接目撃することになりました。オーバフローもしていない堤防で、堤内地斜面上の樹木が次々と倒れ、斜面がすべり破壊を起こしていき、いわゆる浸透性破壊が進行的に生じていったものであります。この二つの体験は、その後の私の地下水研究に少なからずエネルギーを与えてくれたものと感じております。

地下水研究は、この40年間に飛躍的な進歩発展をとげてきたといえます。しかし、事項によっては旧態依然として取り残されているものもあり、また新しい研究成果がさらに新しい課題を生み出していることも事実で、最近、社会的関心事となっている環境問題とも併せて、地下水研究の重要性はますます高まっていると考えています。

なお、本文は、紙数の関係もあって地下水研究のすべての領域について論述したのではなく、またそれ

それぞれの項目についても筆者の関心事のいくつかを選び出して記述しました。とくに、現地計測技術について触れることができなかつたことを御了承いただきたい。

## 2. 地下水研究40年の推移

1960年代から現在までを、地下水研究の立場から、あえて10年毎にその特徴をみるならば、1960年代は新しい地下水研究の萌芽期であり、1970年代は若き地下水研究者の増強期、1980年代は地下水研究・技術の進展期であり、1990年代は地下水研究の拡張と多様化期といえる。

1960年、学生であった私に対し、指導教授から与えられた研究テーマは「琵琶湖の水面が、現在より3.0m低下した場合、周辺の地下水への影響はどうか」というものであった。当時、建設省は「琵琶湖総合開発計画」を発表し、その中の重要な項目の一つに、琵琶湖の利用水深を拡大して、京阪神への水供給可能量を増大させようとするものであった。

まず、文献調査等から始めようとしたが、当時そうした研究調査書等は、皆無といってよい状況であった。運動式(Darcy則)と連続式から導かれる地下水関係式を複素関数論(Complex variable method)で解くこと、Theis, Thimの井戸理論、フローネット法などで、周知のように、それらは適用範囲に厳しい制限がある。すなわち解きうる問題は、境界条件が限定されたものであり、また非定常問題を取り扱うことができないなどである。

1960年代の前半から1970年代にかけて、コンピュータが普及し、そのために数値解析(FEM, FDM)が容易になり、とくに地下水研究に極めて大きな影響を与えることになった。筆者も、FEMやFDMによる数値モデル、数値解析に大いに取り組んだ時期でもあった。一方、その頃日本は、高度成長期に入り、各地で大規模の建設工事が行われ、また、東京・大阪などでは、地下水揚水による地盤沈下が社会問題となるなど地下水調査・研究に対する関心が高まるようになり、多くの若い研究者がこの分野に入ってくるようになった。

1980年代になると、有限要素解析を中心に、地下水解析の技術、精度、信頼性が高まり、それに伴ってインプットデータの精度の向上をめざして、地下水計測、地盤の帯水層定数の試験等も活発に行われるようにな

った。これらは、研究レベルにとどまらず、広く調査や施工の現場でも重視され始め、地下水の研究、調査の論文や報告が多数発表され、まさに地下水研究の進展期を迎えるに到った。

しかし、予想されたこととはいえ、地下水問題は、それほど単純なものではなく、こうした多くの研究にもかかわらず、メカニズムの解明や的確な挙動把握は極めて複雑多様なものであることが理解され、新しい研究が新しい課題を生み出すという状況を呈することになった。

1990年代に入って、いわゆる環境問題に社会の関心が強まり、地下水問題も環境保全という立場から、水位・水量はもちろんのこと、水質に関する調査、解析等の必要性が高まっている。1980年代の研究調査成果によって新たに提起された研究課題と合わせて、地下水研究の多様化期ともいえる状況だと考えられる。

これから21世紀に入って、地下水研究は、これまでの未解明の事項の究明、より精度の高い調査方法と解析方法の開発が期待される場所であるが、その中で願わくば、これまでの成果がある程度整理され、汎用性のある体系として組み立てられることが望まれる。

研究の成果は、現地実践に寄与することによって、技術として確立し、それが新たな進展につながると考えるからである。

## 3. 広域地下水と地下水シミュレーション

### 3.1 広域地下水

最近では、「広域地下水」という用語は、通常に用いられるようになったが、これは、筆者が1963年「びわ湖周辺の地下水位変動に関する研究」を始めた折に作ったものである<sup>1)</sup>。これ程に広い範囲を対象とした地下水挙動の調査となると、それまでの井戸理論や複素関数論にもとづく地下水理式ではとうてい対処できず、地下水の涵養-流動-流出という地下水の水文の循環を考慮しながら、調査、解析をする必要があると考えたからである。

地下水系全体から眺めると、降雨や地表水の地下浸透によって地下水が「涵養」され、それがポテンシャルを下げながら「流動」し、最終的に海洋や地表部へと「流出」する(図-1)。このサイクルを地下水の水文の循環と呼んでいる。地下水は、特殊な場合を除

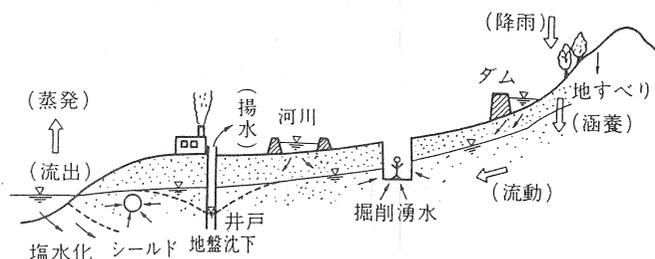


図-1 地下水の循環と建設工事

いて、水文の循環をなして存在するものであるから、広域地下水、局所地下水の区分は本質的なものではなく、対象としている問題の性格、とくに調査範囲によって決まるものである。たとえば、大量の地下水揚水や大規模な止水工事のように、地下水系に対する大きなインパクトが長期にわたると地下水の循環に影響を及ぼす可能性が高く、他方、小さく短期間のインパクトであれば地下水系の包容力（フレキシビリティ）がこれを吸収し得る。

後者のように問題が局所地下水であれば、比較的狭い範囲の「地点調査」で、かつ短時間の調査でよい場合が多いが、前者の広域地下水となると一般に広範囲の地下水観測と多様な解析と判断が要求される「地域調査」となる。地下水調査に関して、調査の範囲と観測の期間、およびその性格を決めるのは技術者の重要課題であるといわねばならない。

広域地下水の挙動、特に地下水位変動を調査・解析する場合、一般には帯水層の透水性の指標である透水係数  $k$  と透水層厚さ  $D$ （又は、その積である透水量係数  $T=kD$ ）が必要である。

しかし、広域に亘ってそれらを精度よく測定することは至難の業であることが多い。そこで、比較的測定し易く、また精度も信頼できる地下水位を測定して、それをインプットデータとして逆に透水量係数  $T$  を計算によって求めることが行われる。これがいわゆる「逆解析」である。

1960年代には、地下水解析の逆解析というものはなく、筆者は、びわ湖周辺地域の地下水調査において、地下水位分布のデータから地盤の透水性を計算によって求める透水性指標を考案し、それを「準深」（等価等水深）<sup>2)</sup>と呼ぶことにした。これは極めて単純な手法

ではあったが基本的に地下水問題の逆解析の考え方と意味を同じくするものであり、その後の逆解析へと発展して行ったものと考えている。

びわ湖の水面が3.0m低下させるという構想は取り止めとなり、残念乍ら筆者の作成した地下水位低下量の予測分布が妥当な値であったかどうか検証することは不可能となったが、こうした地下水シミュレーションはあくまで想定予測であり、願わくば現地計測によっていくつかの地点あるいは時点でチェックされるべきものである。

しかしその後、多くの地域で広域地下水としての調査が行われるようになり、その意義が認識されるようになった。

### 3.2 地下水シミュレーション

地下水シミュレーションは、実験モデルによるものと数値モデルによるものがある。前者の実験モデルは、砂モデル、Hele-Shawモデルなどがあり、後者の数値モデルは、FEM、FDMモデルで代表される。

#### (1) 実験モデル

砂モデル、Hele-Shawモデル、電気相似モデル等については、すでに40年以上前から存在し、そのほかに、ゴムモデル、光弾性モデルが考案されている。これらの実験モデルを広域地下水の研究に適用するには、それぞれに適用限界が厳しく、特別のケースを除いて、その有意性はあまり期待できないと考えている。ただし、浸透流と地盤の安定、とくにパイピングの研究等については、砂モデルによる実験が有用であることはいうまでもない。

1970年、筆者は従来の実験モデルの汎用性を高めるため、細管網モデル<sup>3)</sup>を考慮し、この細管網モデルを用

いて、後述の地下ダムの基礎的実験、海岸地下水の塩水化などの実験を行った。それらは、あくまで FEM モデルによるシミュレーション結果を検証することを目的とするものであった。

#### 〔細管網モデルとその特徴〕

細管網モデルは図-2(a)に示すように、細管を網目状に接続し、この細管ネットの中に粘性流（例えば CMC 溶液）を生じさせ、水位の分布、水流あるいは水量の測定結果を相似則によって解析するものである。

細管網モデルは次のような特徴を有している。

- a) モデル装置の製作が容易である。
- b) 細管網の径を部分的に、あるいは縦方向と横方向とで替えることにより、それぞれ不均質、異方性のモデルを容易に作ることができる。
- c) 非定常流としての解析が可能である。また、3次元地下水流のモデル化も細管網を立体的に組むことによって可能である。

図-2(b)は、細管網モデルによる地下ダムの実験の一例を示したものである。

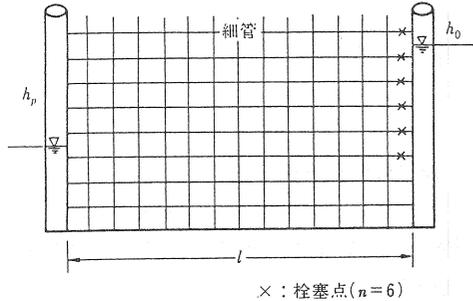


図-2(a) 細管網モデルの概要

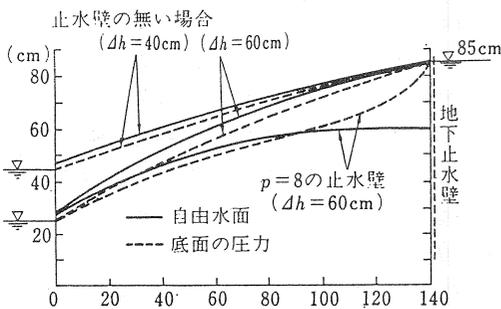


図-2(b) 細管網モデルによる実験例

## (2) 数値シミュレーション

地下水の数値モデルとシミュレーションについては、1970年代に飛躍的な発展をなし、広く普及し、また各種の新しい解析方法が提案されるに至った。

定常地下水流シミュレーションから非定常地下水流の解析<sup>4)</sup>へ、飽和浸透流シミュレーションから飽和-不飽和浸透流の解析<sup>5)</sup>へ、さらに地下水の塩水化、地下水の汚染問題の解明などへ応用が展開されてきた。これらの研究成果については、1980年代に入って極めて多くの論文や文献に示されており、現在の地下水解析の主流となっている。

地下水の調査はまず地下水の実態と挙動の把握に始まる。地下水の挙動を定量的に調べることは、帯水層の境界条件、内部条件が複雑であるために、なかなか困難な問題である。特に、広域地下水となると、地下水の涵養機構状態が不明瞭であるがために、従来の地下水理公式を駆使して解析するのでは信頼性に乏しいといわなければならない。

これらの課題に対してはコンピューターによる数値シミュレーションの手法は極めて有力なものと評価され、この手法が開発改良されて普及するに至って多様な地下水問題の解析や予測が大いに進歩したといえるであろう。特に帯水層等の条件が不均質な場合の解析や非定常解析が通常行われるようになり、さらに逆解析（例えば地下水位をインプットデータとして入力し、帯水層定数を求める、あるいは地下水涵養状態を推定するなど）の研究もすすんでいる。また地下水汚染問題に関連して、地下水中の溶存物質の移動変化、温度分布変化の解析へと発展しようとしている。地盤の透水性状は極めて複雑であり、貯留性状、地下水涵養性状などをモデル化して定量的把握に努めているが、精度すなわち信頼性の上でまだまだ残された課題は少なくないといわねばならない。

岩盤中の地下水についても、トンネル湧水とその環境アセスメント、水封式地下貯蔵タンクの設計などへ応用されている。ここでも岩盤中の透水性の把握とそのモデル化に研究課題が残されているといえよう。このように精度すなわち信頼性については、今後数多くの調査実績が日進月歩にそれを向上させるものと期待される。

数値モデルとそのシミュレーションの研究は、広域圏で多様な研究が行われ、多くの成果が発表されてい

るが、ここでは筆者が行った研究の一つを紹介することにする。

(3) 数値モデルにおける点水源の取扱い方<sup>6)</sup>

FEM、FDM モデルにおいて、井戸や掘削地をエレメント分割の一節点 (nodo) に近似して計算することがある。すなわち Point sink (または source) である。

このような取扱いをする場合に、節点に水位の値をインプットしたり、また節点からの揚水に対する水位が算出されたとき、その節点は井戸等を意味するもので、有限の面積を有しなければならない。たとえば、径が無限小ゼロの Point sink に有限の流入量が存在すれば、理論的にその点の地下水位はマイナス無限大でなければならないからである。この井戸の径 (等価半径) について以下のような解釈となる。図-3を参照して

$$r_e \approx 0.2 \Delta l \quad (1)$$

ここに、 $r_e$ : 等価半径、 $\Delta l$ : 差分あるいは有限要素エレメントの一辺の長さである。

以上の理論的根拠を次のように証明することができる。図-3に示すような、井戸または揚水地点に相当する節点Oを囲む4節点(1~4)内の領域について地下水収支に関する関係式は次のように表示される。

差分式 (または有限要素式) による表示

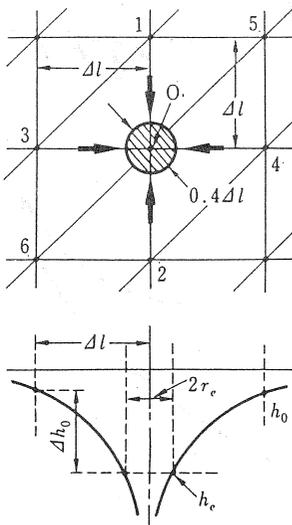


図-3 Point sink の等価半径

揚水節点Oに集まる地下水流量  $Q_0$  は

$$Q_0 = 4kD \cdot \Delta h_0 \quad (2)$$

微分式による表示

$$Q_0 = \frac{2\pi kD \cdot \Delta h_0}{\ln(\Delta l / r_0)} \quad (3)$$

ここに、 $r_0$ : 揚水地点を円としたときの半径である。

(2)、(3) 両式から、

$$\ln = \frac{\Delta l}{r_e} = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

となる。したがって、

$$\frac{r_e}{\Delta l} = e^{-\pi/2} \approx 0.2 \text{ または } r_e \approx 0.2 \Delta l \quad (5)$$

以上の考察から「1節点で取り扱われる Point sink の揚水面積は格子区分の一辺  $\Delta l$  の約 0.2 倍を半径とする円である」ことを理解することができる。

#### 4. 地下水浸透流と地盤の安定

土の力学、地盤工学において、土中水、地下水を考慮せずして、現実問題の解明、解決はあり得ないとも強調される。すなわち、地盤の安定に関して、いかに土中水、地下水の影響が大きいかを意味している。

##### 4.1 浸透力の意義

浸透流が存在するためには流れの方向にとった2点間に、水頭差 ( $\Delta h$ ) がなければならない。この水頭差に水の単位体積重量をかけ合わせたものが浸透水圧である。単位長さ当たりの浸透水圧が浸透力 ( $j$ ) である。

$$j = \gamma_w \cdot i \quad (6)$$

ここに、 $i$ : 水頭勾配である。

すなわち、浸透流のある地盤は、浸透流の方向に単位体積当たり ( $\gamma_w \cdot i$ ) の大きさの浸透力 (Seepage force) を受けることになる。この浸透力によって、地盤が安定性を失い、クイックサンド、パイピング、ま

たボイリングが発生する。

以前には、浸透水圧という概念がしばしば用いられていたが、浸透水圧はその適用にあたって解釈と取扱いが難しいことが多く、浸透力で理解する方が好ましい。とくに、浸透流のある地盤の応力-変形解析を有限要素モデルによって、解析することが多く、その場合、浸透力を物体力 (Body force) として単位重量と全く同様に取扱うことができるからである。また、浸透流のある地盤の各点での浸透力の大きさを矢印で図示することによって、どの位置で大きな内力 (浸透力) が作用しているかが一目瞭然となる。

しかし、地盤の浸透性破壊の多くは、進行性破壊の形態をとることが多く、その予測、解析、検証をすることが極めて難しい問題として残されている。その典型はパイピング現象にみることができる。

#### 4.2 パイピング

パイピングは、進行性破壊の形態をとる。河川堤防やアースダムにおいて、堤内地側の孔や排水溝、また地盤の弱体部分を発端にパイピングが進行して全体破壊に到ることがある。掘削現場では、土留め壁のわずかなすき間から湧水とともに土砂が流れ落ちてパイピングが進行する。図-4は、地下連続壁の施工不良による小孔からパイピングが進行し、大湧水をきたした事故を模式的に示している。

また、掘削底面に打たれた杭の周面やボーリング孔からパイピングが発生することがある。

パイピングを、個々の土粒子の移動と解して、パイピングが発生する限界水頭勾配を確かめた実験的報告がある。これは、土塊として求めた動水抵抗よりも小さな水頭勾配で、粒径の小さな土粒子が流動流出した結果、パイピングが発生するという考え方にもとづいている。

図-5は、粒径と限界実流速  $V_p$  ( $V_p = V/\beta$ ,  $V$ : 浸透流速,  $\beta$ : 面積間隙率,  $\beta = 1 - (1-n)^{2/3}$ ,  $n$ : 間隙率) の関係を示したものである。

##### (1) パイピングモデルの理論的-考察<sup>7)</sup>

筆者は、パイピングの浸透モデルについて一つの理論的考察を試みているのでこれを紹介する。

透水性の高い基盤上に造られたコンクリート構造物との境界面などではパイピング (ルーフィング) が発生する危険性がある。図-6について、パイピング発

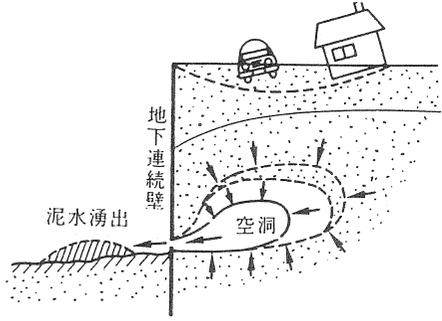


図-4 パイピングの事故例

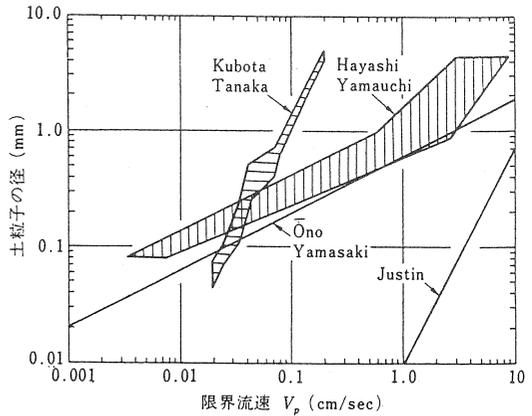


図-5 粒径と限界流速の関係

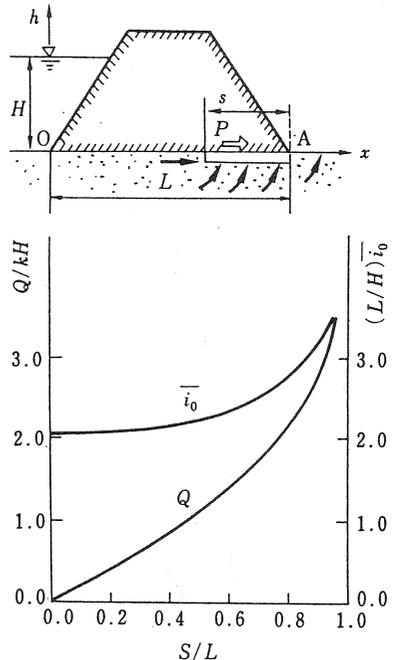


図-6 ルーフィングモデルと水頭勾配

生以前の OPA 面状の水平流速  $u$  と水頭勾配  $i$  は次式で示される。

$$u = \frac{Hk}{(L/2)^2 - (x-L/2)^2} \quad (7)$$

$$i = \frac{u}{k} = \frac{H}{(L/2)^2 - (x-L/2)^2} \quad (8)$$

$x=0, L$  で浸透力は無限大、 $x=L/2$  で最小となる。

いま、パイピングが P 点 ( $OP=S$ ) まで進んだとき、PA に流入する流量  $Q$  ならびに平均流速 ( $Q/S$ ) を求めると次式のようになる (図-6 (グラフ)参照)。

$$\frac{Q}{kH} \left[ \frac{L}{S} \right] = \frac{L}{H} i_0 = \frac{1}{S/L} \log \frac{1+S/L}{1-S/L} \quad (9)$$

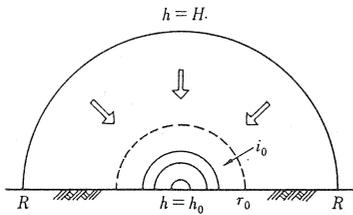


図-7(a) 浸食拡大モデル

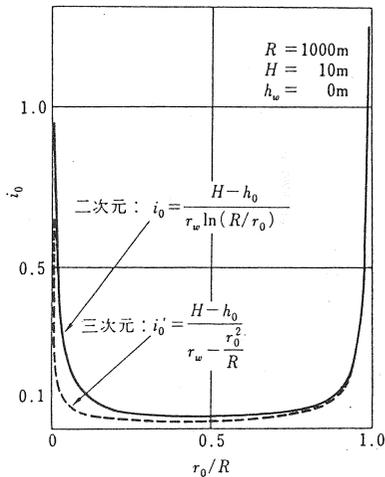


図-7(b) 破壊の進行に伴う水頭勾配の変化

図-6 (グラフ)により、 $(L/H) \bar{i}_0 = 2.0$ ,  $\bar{i}_0 = 1.0$  とおくとクリープ比  $(L/H)=2.0$  となる。

つぎに図-7 (a) に示すように半円形2次元浸透場を考えよう。浸出点が浸透力によって半円形に空洞が拡大していく場合を想定し、空洞表面の水頭勾配  $i_0$  を計算すると次式 (10)となる。

$$i_0 = (H-h_0) / \{r_0 \ln(R/r_0)\} \quad (10)$$

ここに、空洞表面で  $r=r_0$ ,  $h=h_0$ , 一方給水源で  $r=R$ ,  $h=H$  である。

また、半球形の3次元浸透場について同様な考え方をすると次式となる。

$$i_0 = (H-h_0) / (r_0 - r_0^2/R) \quad (11)$$

両式の間係を図示すると示せば図-7 (b) のようにな

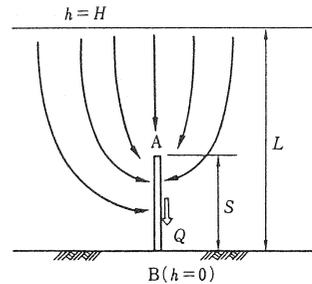


図-8(a) 二次浸透場のパイピングのモデル

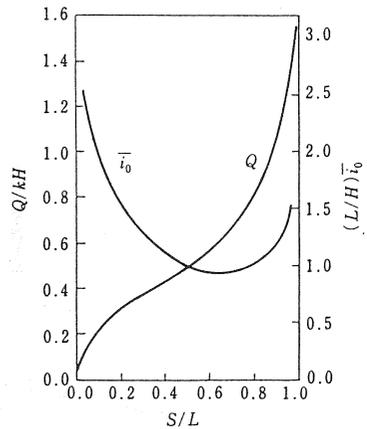


図-8(b)  $(S/L)$  と  $Q, \bar{i}_0$  との関係

る。

浸透力は  $i$  に比例するので、これらの図から次のような特性が示唆される。半円形、半球形浸透領域においてそれぞれ円形あるいは球形に土中浸食が拡大していく場合には、その初期に浸透力が大きく、浸食領域の拡大とともに次第に小さくなる。給水源との距離がほぼ中間付近まで浸食が進行したとき最小値となる。さらに浸食が進むと、浸透力は再び増大して、破壊に至る。

次に、図-8(a)に示すような2次元浸透場において、巾  $L$  の中に直線上パイピングが  $S$  (AB) まで進行したとき、その中に流入する流量  $Q$  ならびに AB の平均水頭勾配  $\bar{i}_0$  を求めると図-8(b)のような結果が得られる。この結果から、 $S$  が増大するとともに  $Q$  は大きくなるが、 $\bar{i}_0$  については初期に大きく、次第に減少し、 $L$  の中間部を超えると再び増大する性質を示している。この特性はパイピングは初期に進行が速く、次第に進行速度を緩める。途中で進行が停止することがあるが、もし停止することなく中間的を越えると、その後再び進行速度が大きくなって上流に達する性質を有することを意味している。

以上に述べた性質は、定量的な判断基礎とするには不十分であるが、定性的な示唆が提供されていると解されよう。

### 5. 地下水制御と地下ダムの構想<sup>8)</sup>

地盤の安定のための地下水、浸透流の規制工法として以前から、矢板締切り工法、注入工法、井戸揚水に

よる地下水低下工法などが採用されている。

これらの工法については、施工実績も多く、実績工事において多大の貢献をしてきたとあってよいであろう。これらの問題は、前章で述べた内容に連動して研究されている課題である。

これらの工法は、地下水から受ける好ましくない影響を除外する目的で、地下水規制を行っているものである。他方、1964年筆者は地下水をより高度に利用することを目的として「地下ダムの構想」を発表した(図-9)。その基本的な考え方について紹介しよう。

地下ダムの構想は、昭和18年可知によって那須野原水利計画論の中で湧水阻止壁として示され、また1964年には筆者らによって地下水貯留と地下水位制御を目的として発表され、その後研究検討が進められ、既に日本では長崎県の樺島、沖縄県の宮古島などで地下ダムが実現され、更にいくつかの地点で建造の検討が行われている。

地下ダムとは「地下水流のある帯水層中に不透水性の壁あるいはそれに準ずるものを造り、地下水流と地下水位を制御するもの」で、地下水流の無効放流を防ぎ、水需要の少ない時期にこれを地下貯留し、積極的な地下水利用を図ることを目的としている。

この考え方は従来の河川に造られたダムの地下水版といえる。河川ダムとの対比から、(i)水没地がない、(ii)安全である、(iii)建造費が小さい、その他いくつかの特徴が示されている。現在既に実現されているものは規模も小さく試験的な意味も含まれているが、こ

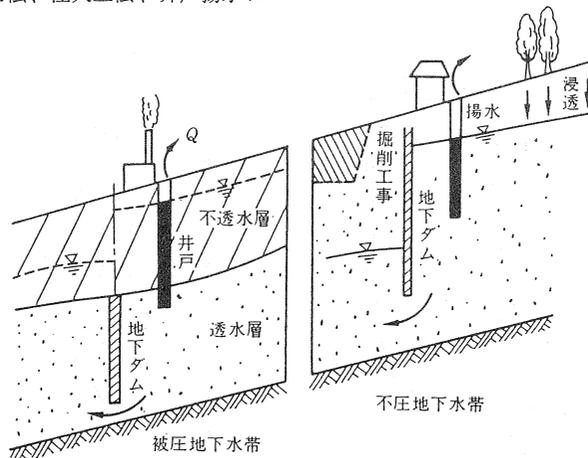


図-9 地下ダムによる地下水規制と地下水利用

ここで効果や影響について種々の観測調査が実施されており、これらの実績から改良が加えられ地下水開発ならびに保全技術としての確立、普及が期待されている。地下にいったん止水壁を築造して何らかの問題が発生したとき、止水壁を取り除くことができないという不便さに対して、エアーカーテンによる地下水流止水（エアーカーテン工法）のアイデアも示されているが実現には至っていない。

一方、地下ダム効率を高めること、さらに地下水位の回復を早めることを目的として地下水の人工涵養の必要性が高い。地下水開発の促進、また地下水保全を確保するためには、地下水の涵養促進は不可欠といってよい。地下水の涵養方法には大別して、貯水池等による自然流下方式と、井戸等を利用した強制涵養方式とがある。

前者は浸透速度が小さいため一般に透水性が大きい地盤で比較的広い面積を必要とする。河川からの涵養、水田からの浸透による涵養は前者に類する涵養方式である。河川の伏流水や水田の耕地面積の減少は地下水の涵養量の減少をもたらしている。都市における舗装による表面止水も同様である。飲料水の確保が問題のオランダでは、砂丘を利用して涵養貯水池を造り、また運河からの地下水涵養を図っている。

日本ではむしろ後者の強制涵養方法が適している場合が多く、その促進が期待される。既に注水式井戸による強制地下水涵養が行われているが、この井戸による注水に関して技術的な問題がないわけではない。一般に同じ井戸を使っても、注水可能量は揚水可能量の5～6割程度にとどまるものが多く、また井戸の目詰まりによる劣化も早い。目詰まりの原因については注水中の浮遊物質等によるもののほかにバクテリアや藻類の繁殖による目詰まりも指摘されている。

## 6. 地下水環境と地下水汚染

地下水環境問題を強烈に印象づけたのは、1950～1960年代に社会問題となった東京・大阪などでの広域に亘る地盤沈下である。これはいうまでもなく、地下水揚水による過度の地下水位低下に起因するものである。また、海岸平野では地下水の塩水化問題がある。さらに、最近では、トリクロロエタンなど化学物質による地下水汚染問題が生起している。

地下水は通常、涵養、流動、流出（揚水）の課程で循環している。いわゆる水文的循環であり、人工的なインパクト（揚水）を与えない限り、長期間保ってきた自然のバランスを保っている。一般に地下水系は、井戸からの少量の揚水（小さなインパクト）であれば、これによる悪い影響を吸収してしまう包容力（フレキシビリティ）をもっているが、ある限度以上の大きなインパクトは自然のバランスを崩す。すなわち、地下水涵養可能量あるいは流動可能量を超える大量揚水は長期間後には過度の地下水位低下と地下水の枯渇、それに伴う各種の障害をもたらすことになる。

海岸地下水における地下水位の低下は塩水化（水質問題）を引き起こす。また地下水賦存量（あるいは流動量）の減少は土中のイオンを溶出（例えばマンガンの溶出など）させ、水質が悪化することがある。

地下水保全という立場からみると、水量、水圧に比べて水質の問題についての関心が立ち遅れていたといわねばならない。海岸地下水の塩水化問題は地下水汚染の代表的問題であるが塩水化は北海道から沖縄までの全国にわたって発生しており、村下は国内80箇所の塩水化地域地点を掲げて問題の深刻さを提示している。

地下水の塩水化は水資源としての地下水の価値を失うばかりでなく、土壌には塩素イオンが吸着され植生に悪影響を及ぼす。塩素イオンが土粒子に吸着されるとその洗浄除去がよいも困難となり、長期間障害が継続することになる。

1982年環境庁は15都市井戸を対象に地下水の塩水化以外の地下水汚染について、特に有機塩素系の化学物質による汚染について実態調査を行った<sup>9)</sup>。その結果、自然界にはもともと存在し得ないトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンが検出され、WHOのガイドライン（案）を越える濃度が観測されている。これらの地下水汚染は、農薬、生活汚染物、そして産業廃棄物が地下水に侵入したものであるがこれら汚染の経過や機構についてはほとんど明らかにされていない。こうした汚染は長期間にゆっくりと、しかも着実に進行するものと予想され、いまなお技術的な対応策も未解決であるといわねばならない。

建設工事に関連したものとしては、トンネル湧水や深い掘削地からの湧水が周辺の地下水位を異常に低減させ、井戸の枯渇や地表水の減水深増大を招くケース

も少なくない。特殊なものとしてシールド工事等における酸欠問題も地下水位の低下がもたらす障害である。

また、水資源として地下水を利用する場合にはそれなりの水量が必要であるが、その開発量は基本的に涵養可能量を越えてはならない。このバランスが崩れると地下水位の大きな低減を招き井戸の枯渇にとどまらず地盤沈下等種々の障害を引き起こす。地下水障害の問題は、基本的に水量、水圧、水質の安全維持の問題である。これらは図-10 に示すように強い相関を有している。

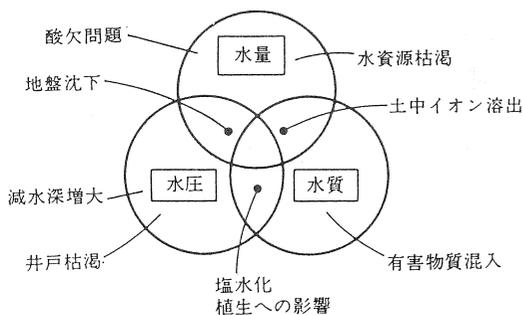


図-10 地下水変化と地下水障害

(1) アップコーニング現象の一解析例<sup>10)</sup>

地下水の淡水と塩水の境界面は、井戸の揚水によって井戸周辺の地下水位が低下すると図-11 に示すように山状に上昇する。この現象をアップコーニング

(Upconing) 現象と呼ぶ。境界面が井戸底部まで上昇すると井戸揚水が塩水となる。図-11 は有限要素解析によって求められた一解析例である。

(2) 地下水低下と酸欠事故例

1988 年、中国地方の中央山岳部の A ゴルフ場建設工事現場において酸欠事故が発生した<sup>11)</sup>。現地の状況は図-12 に示すように、谷部にある既設の井戸が盛土下に没するため、コンクリートピットを造って地下水揚水を行っていた。そのピット内に入った 4 名が次々と倒れ死傷事故となった。

その原因を調査したところ、地盤は古成層の三郡変成岩とその風化帯であり、地層内に含まれていた 2 価鉄  $Fe^{2+}$  が 3 価鉄  $Fe^{3+}$  になるときに間隙中の酸素を消費したことによって発生したことが判明した。ピット周辺に高盛土が行われ、地盤は圧縮され、酸欠状態となった間隙中の空気が井戸管の側面に沿って上昇しピット内に流れ込んだものであった。ピット内の空気の測定の結果、図-12 に示すように  $30m^3$  のピット内の空気は数十分で致死レベルの酸欠状態に到ることが判明した。

通常の空気には約 20% の酸素が含まれている。この酸素の割合が 16% に低下すれば人体に異常が発生し、10% になると死に到るといわれているが、その死因はショック死となる。

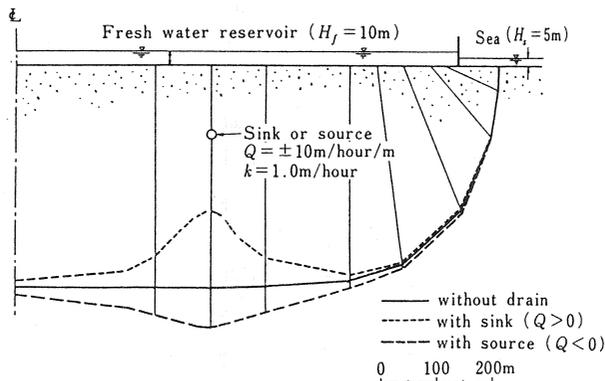
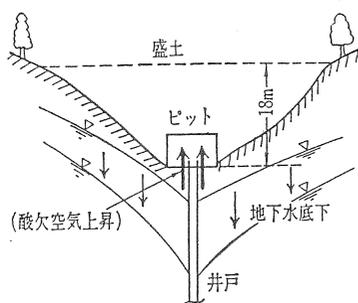
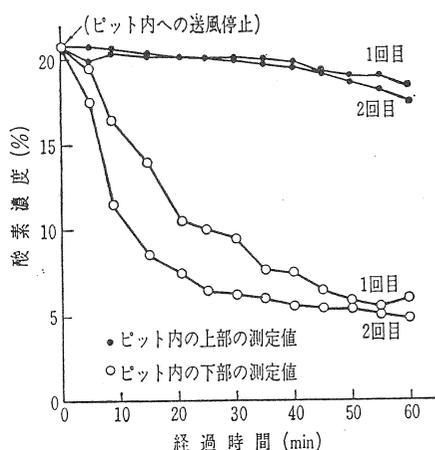


図-11 アップコーニング現象の解析例



(a) 地下水揚水と盛土の現地状況



(b) ピット内の酸素濃度の減少

図-12 建設現場における酸欠事故例

### 7. 今後の課題

これまで、地下水研究の進展、拡張は以下のような方向にあるべきと考えてきた。

- ①局所地下水から広域地下水へ
- ②定常解析から非定常解析へ
- ③飽和流から飽和・不飽和流へ
- ④水量解析から水質解析へ
- ⑤地下水理学から地下水工学（地下水・地盤工学）へ

多数の研究者もこれと同じ考え方であったと考えられる証しに、確かにその方向に研究が進展し、多くの成果が得られていると評価される。

しかし、それぞれに残された課題も少なくない。とくに①の広域地下水に関しては、帯水層定数の測定の精度の向上とともに、地下水涵養の把握は極めて困難な問題として残されていることとあってよいであろう。

また、②の非定常解析については、地下水かん養の把握以外にも、貯留係数の定量把握に関して、いかに精度を上げるかに課題が残っているといえよう。

上記の①、②の課題については、現段階では、地下水の逆解析の手法を用いて把握に務めることが多いが、願わくば、直接の現地計測、動態調査等によって明らかにし得る技術が望まれる。

③の飽和・不飽和解析に関しては、有限要素解析手法によって、相当の精度で、結果が得られることが期待できるが、降雨浸透などにおける地盤中の圧力を有するエアバブルやエアゾーンの挙動については、未解明の部分が多い。

④の水質解析に関しては、移流拡散、分子拡散現象における拡散係数の問題、さらに土粒子に付着する物質の定量把握の難しさなど多くの課題を残している。

⑤の地下水工学に関しては、浸透水と地盤の安定の問題であり、まだまだ残された問題の方が多いといわねばならない。とくにパイピング現象などの解明については、地盤の不均一性という難しさもあるが、境界条件や地盤特性自身が変化する進行性破壊であることから、理論的解析的な方法のみによる解明は難しく、さらなる実験等の積み重ねが必要であるといえよう。

このようにみても、40年の研究の進展は著しいものがあるが、残された課題も少なくなく、より精度の高い現地計測技術と高度のシミュレーション解析技術の開発、詳細な室内実験と現地実験、それらを組み合わせながら解明されるべきものである。

地下水・浸透問題は研究すればする程、多様複雑なものであり、難しい問題であることを認識させられる。そして亦、それらの問題は人間のみならず、すべての生物にとって極めて重要な要素であることを考えるとき、研究の意義が自から理解できる。

私は、1969-1970年に亘って、オランダのデルフト工科大学の招請を受けて、客員研究員として地下水研究に参加いたしました。その折の小さな出来事（会話）が強く印象に残ることになりました。

デルフト工科大学に到着して間もなく、De Josselin de Jong 教授、A.Verruijt 講師（現在は教授）らと研究の打合せを始めたときのことである。彼らは私に対して「オランダは、飲料水など用水確保に困っている。

オランダにおける地下水開発のあり方について、研究してほしい」と、私は「そのような難しい大きな問題は、成功する自信がない」と言うと、De Josselin de Jong 教授は、“ Every research has no guarantte ” (どんな研究でも、成功するという保証はないものだ) と発言しました。その後も、私はこの言葉を大切にしてきました。本来研究とは、未知の分野、領域に入ってこれを解明・解決しようとするものですから、失敗を恐れていれば独創性のある立派な研究ができるはずはない。チャレンジスピリットこそ研究者のエネルギーといって過言でないといえるでしょう。

[参考文献]

- 1) 河野伊一郎：地下水工学、鹿島出版会、p.2、1989
- 2) 河野伊一郎：地下水位低下工法、鹿島出版会、pp.223-229、1969
- 3) 松尾新一郎、河野伊一郎：地下止水壁による地下水規制の実験的研究、土木学会論文集 No.178, pp.53-61、1970
- 4) たとえば、Kono, I. : Finite Element Analysis of a Nonsteady Seepage Problem, 土と基礎 No.186, pp.13-20、1973
- 5) たとえば、赤井浩一、大西有三、西垣誠：有限要素法による不飽和浸透流の解析、土木学会論文集 No.264, pp.87-96、1977
- 6) Kono, I. : The Equivalent Radius of a Source in Numerical Models of Groundwater Flow, Proc. of 2nd International Conf. on Numerical Models of Geomechanics, pp.1145-1152、1976
- 7) Kono, I. : Levee Failure Caused by Seepage and Preventive Measures, National Disaster Science 9-2, pp.55-76、1987
- 8) 松尾新一郎、河野伊一郎：地下水規制のための地中ダムの構想、土木学会誌 Vol.53, No.3, pp.9-13、1968
- 9) 杉戸大作：地下水汚染、水道協会誌 No.228, pp.109-116、1974
- 10) Kono, I. : Finite Element Analysis of Interface Problem in Groundwater Flow, 土木学会論文報告集 No.228, pp.109-116、1974
- 11) 河野伊一郎：中国地方の土質力学、土と基礎 Vol.38, No.3, pp.3-8、1990