

地下水位の変動に伴う水分 と塩素イオンの挙動

Behaviors of Water and Chloride under Fluctuations of Water Table

田瀬 則雄*・藤井 一正**

Norio TASE and Kazumasa FUJII

I はじめに

地下水の汚染, 施肥の効率などを考える際には, 土壌水帯および地下水帯での物質の挙動が明らかにされなければならない。不飽和帯と飽和帯の境界付近, あるいは毛管水帯での物質の挙動, 特に地下水面が変動する場合の物質の挙動は大変重要な問題であると考えられるが, 現在まであまり研究は行われていないようである。

唐・新藤(1985), 新藤・唐(1987)は砂層コラムを使った室内実験により, 地下水面を変動させたときに毛管帯に注入した塩素イオンと色素の挙動を解析し, 水位の上昇時と下降時でその挙動が異なる(ヒステリシスが存在する)こと, pF-比容水量関係が大きな意味を持つことを示した。

なお, 地下水汚染と関連して Schuille (1984) や平田・村岡(1986)が有機物の境界面での挙動に触れているが, 定量的な解析は行っていない。

本研究では, 地下水位の変動に注目して, 地中での溶存物質の挙動を明らかにすることを目的とした。特に, 今回は揚水により人工的に水位を低下させ, 地中水の挙動と水質の変化を観測した。

溶存物質としては, 塩素イオンを取り上げた。一般に塩素イオンは土壌に吸着し難く, 地中水と共に

輸送されると言われ, 室内実験でもよく使用されている。しかし, 出島台地でのこれまでの調査(田瀬・藤井, 1985; Tase *et al.*, 1986)では, 塩素イオンが地中水と共に, 特にシルトや粘土層で, 移動していないと考えられる点がいくつかある。また, 地下水面付近で, あるいはシルトや粘土層において塩素イオンの濃度プロファイルに往々にしてピークが見られるなど(Tase and Kurata, 1983), 塩素イオンの地中での挙動は必ずしも単純でなさそうである。

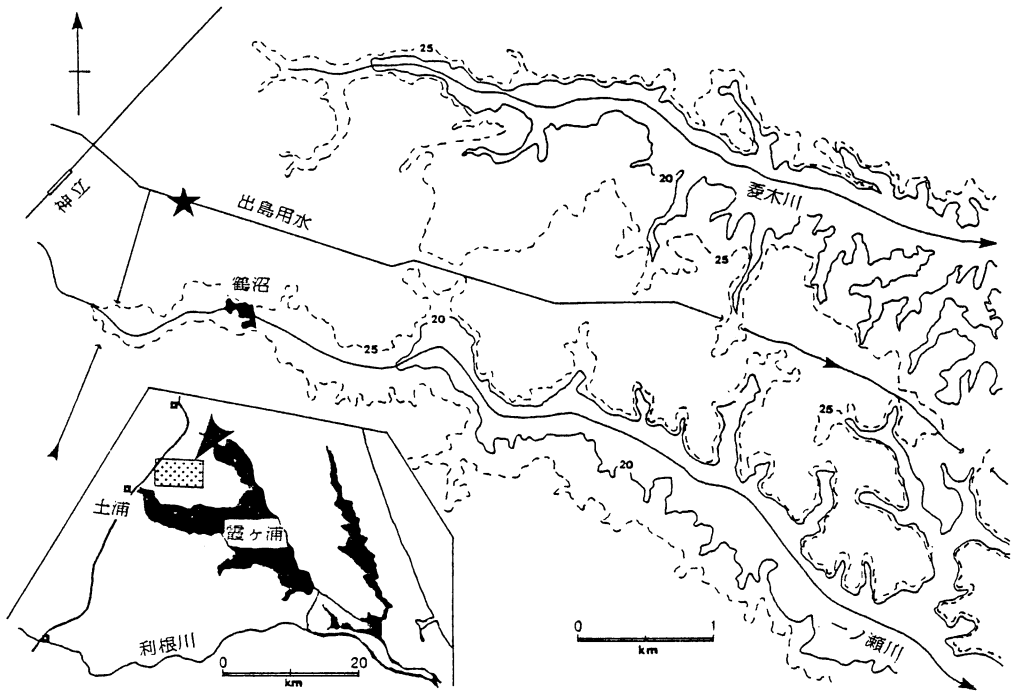
II 研究方法

2.1 試験地の概要

出島台地は, 茨城県霞ヶ浦の北西部に半島状に突き出た台地である(第1図)。台地は南関東の下末吉面に相当する洪積台地であると考えられている。台地面の高度は西方に高く, 東方に低い。台地の周辺部では解析が進み, 谷が樹枝状に発達している。しかし, 台地内部では平坦な地形面の原形がよく保存されている(新藤・田瀬, 1981)。

台地は一様に新期の関東ロームが覆い, その厚さは2~5mである。その下位には, 常総粘土層(1m前後), 竜ヶ崎砂礫層(2~5m), さらに成田層へと続く。

* 筑波大学地球科学系 ** 筑波大学・院・環境科学研究科(現 水戸短期大学附属水戸高等学校)



第1図 研究対象地域 (★印が試験地)

台地中央の高所を農業用水である出島用水の幹線水路が走っている。土地利用は、この出島用水に沿って水田(陸田)が分布しており、その周辺では畑地が広く分布し、台地の縁近くでは果樹園も存在している。台地の縁は林地となっている。また、畜産農家が出島用水沿いを中心に点在していることも特徴である(倉田ほか, 1984)。

今回、試験地としたのは第1図に示したように、一ノ瀬川と菱木川に挟まれた出島用水沿いの一地点である。この付近には用水沿いに畜産農家が多数存在し、水田も広い面積を占めている。地下水面は浅く、灌漑期で1m前後、非灌漑期で2.5m前後である。

試験地は、1983年12月まで乳牛を日中放牧しておく土地として利用されていた。現在は、土地所有者の除草作業により地表にはほとんど植生がないが、周辺の竹の根系が地表付近の浅いところで発達している。施肥などによる物質のインプットはないが、土壌には過去の糞尿起源と考えられる物質が存

在している。

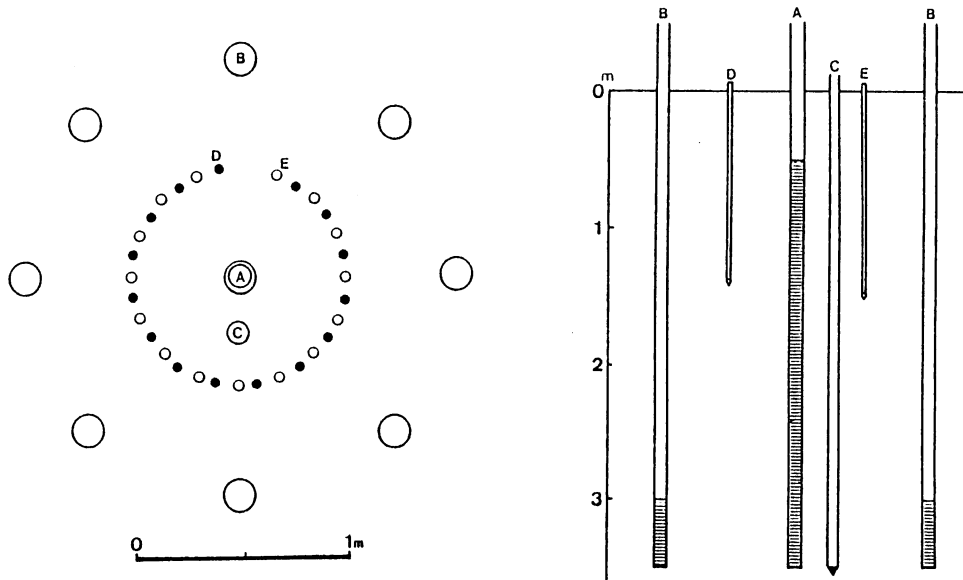
試験地の地質は地表から80cmまでが関東ロームで、80cm以深が常総粘土層および竜ヶ崎砂礫層最上部と考えられるシルトであった。深さ120~170cmのシルトは、若干白色がかっていた。

2.2 観測および実験の方法

地中水の挙動と水質の変化を追跡するために、以下の観測、試験を行った。

テンシオメータによって圧力水頭を、中性子水分計により体積含水率を、自記水位計により地下水位を測定した。また、真空ポンプを用いて土壌溶液を採水し、塩素イオン濃度を電気化学計器製イオンメータ モデル IOC-10 を使ってイオン電極法により、測定した。

実験装置の配置を第2図に示した。観測井を中心として、半径50cmの円周上にテンシオメータと土壌水採取装置を、半径1mの円周上に揚水井を配置した。また、観測井の近くには中性子水分計を挿入するためのアクセスチューブを埋設した。観測



第2図 実験装置の配置 (A:観測井, B:揚水井, C:中性子水分計用アクセスチューブ, D:テンシオメータ, E:土壌水採取装置, 右図の横線部はスクリーン)

井は深さ 50 cm から 350 cm までの全層にわたってスクリーンを切り、揚水井は深さ 300 cm から 350 cm までスクリーンを切った。体積含水率は、深さ 30 cm から 20 cm 間隔で 290 cm まで測定した。テンシオメータは深さ 20 cm から 20 cm 間隔で 300 cm まで、土壌採取装置は深さ 10 cm から 20 cm 間隔で 290 cm まで埋設した。テンシオメータと土壌採取装置は互いに干渉しないように、隣合うものの深さが 70 cm 以上ずれるようにした。

以上の配置により、揚水井から水中ポンプで地下水を汲み上げ、地下水位を人工的に低下させた。実験を行った時期は、9月から12月の非灌漑期で、一般的な傾向として地下水位は低下している。

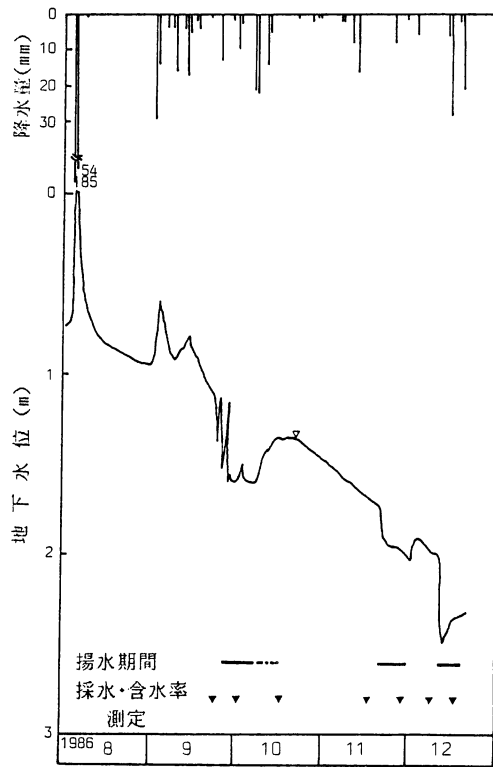
III 観測結果

3.1 地下水位の変動による地中水の挙動

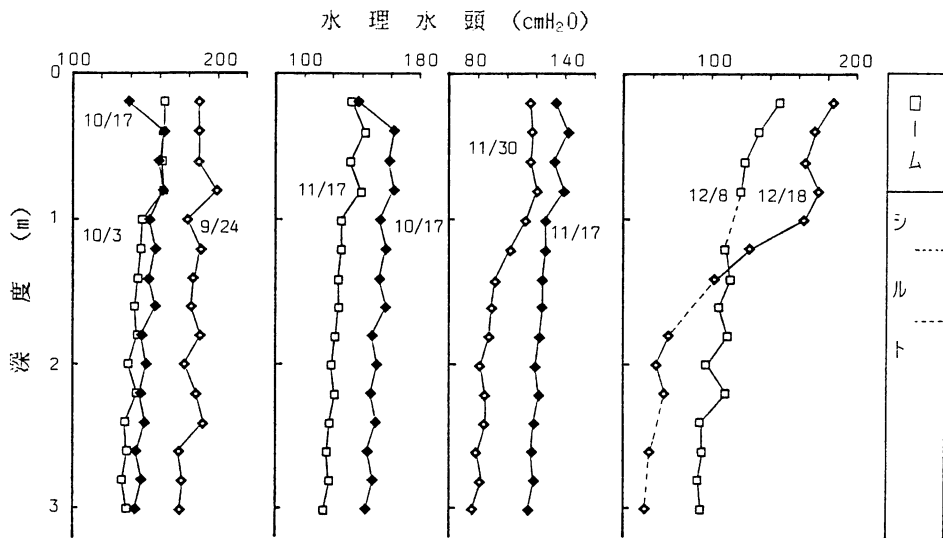
揚水は、1986年9月27日～10月17日、11月21～30日、12月12～19日の3回行った。ただし、第1回目の揚水では10月10日以降、水中ポンプが加熱により故障し、揚水量が低下してしまい、水位

の回復が起こった。第1回目と第2回目の間の1ヶ月余りは自然低下を記録した。実験期間における降水量、地下水位、揚水期間、採水・(水分量)観測日を第3図に、水理水頭の変化を第4図に、また体積含水率の変化を第5図にそれぞれ示した。なお、高水分期の体積含水率として6月16日の観測結果を参考とした。

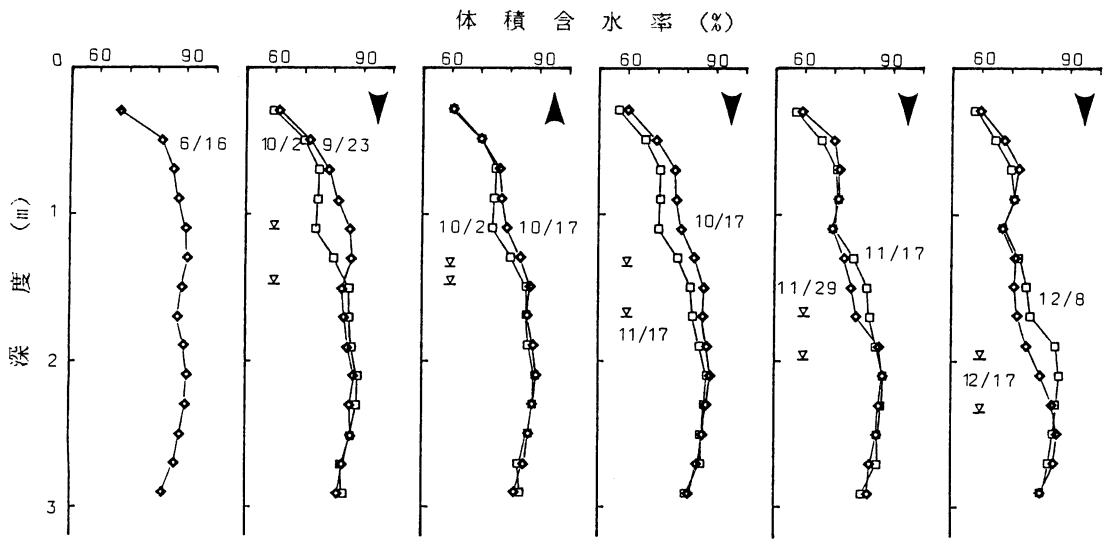
第1回揚水実験では、9月27日に開始した毎分約25ℓの揚水によって、地表から116cmの深さであった地下水位は、28日には162cmとなり、46cmの低下をした。なお、24～25日および26日の地下水位の低下は試験的揚水によるものである。28日に地下水位が上昇しているのは、25～26日に降った17mmの降雨の影響と考えられるが、揚水期間中は装置全体をシートで覆っていたのでこの影響は周辺の地下水位が上昇したことによる間接的影響である。テンシオメータによって測定した圧力水頭に、地表面下300cmを基準面とした重力水頭を加えて求めた水理水頭プロファイルの経時変化(第4図)を見ると、9月27日の揚水開始によって全層



第3図 実験期間中の降水量，地下水位，採水・体積含水率測定日



第4図 水理水頭の変化と地質柱状図



第5図 体積含水率の変化（図中の矢印は水位の変化方向を示す）

の水利水頭の値が、特に1 m以深で大きく低下している。深さが1 mより浅いところでは水利水頭が約20 cmH₂O低下したのに対し、1 m以深では約40 cmH₂O低下した。このことは、土壌水体と地下水体での水の挙動の違いを示している。土壌水体と地下水体での水利水頭の差は時間と共に減少した。

体積含水率の測定は、採水と同時に9月23日、10月2・17日に行った。10月17日の地下水位は136 cmで、26 cm程回復したことになる。これは前述のように水中ポンプの故障と降雨による間接的影響によるものである。第5図に水分プロファイルと比較したが、揚水により、当然のことながら低下後の地下水位よりも上で水分量の減少が大きい。特に、揚水前の地下水位付近では11~12%の減少を示した。低下後の地下水位より下では、わずかに増加傾向を示したがほとんど変化しなかった。回復過程では、減少が最も大きかった110 cm付近での回復量が大きい、90~150 cm深で全体的に増加している。

10月17日から11月17日までの1ヶ月間は地下水位が136 cmから170 cmと自然状況下で低下した期間である。この間のまとまった降雨は11月9

日の8 mmと11日の16 mmの2回であった。この間の水分量の変化を第5図に示したが、地下水面下までかなり一様に低下している。ただ110 cm付近での減少量が大いようである。自然状況下での低下と強制的な低下での水分量の変化の差が現れていると考えられる。

第2回の揚水実験では、11月21日に開始した毎分約15 lの揚水によって、地下水位は地表から175 cmの深さだったものが、22日には191 cmになった。体積含水率の変化は水位低下量が小さいこともあり、余り大きくなく、浅層部では降雨の影響を受けて増加傾向にある（第5図）。

第3回目の揚水実験では、12月12日に開始した毎分約23 lの揚水により、地下水位は地表下200 cmから13日には249 cmと49 cmの低下を示した。12月8日と12月17日の体積含水率のプロファイルと比較すると、第1回目の実験と同様の变化を示し、揚水開始前の地下水面付近の水分減少が顕著である。なお、浅層部で水分量が増加しているのは、シートで装置を覆っていなかったための降雨による影響である。

3.2 地下水位の変動による溶存物質の挙動

第1回目の揚水実験開始前後の塩素イオンの溶存

量 (mg/1,000 cm³-soil) プロファイルを示した。揚水前後ともピークを持ったプロファイルの形は変わらないが、揚水すなわち地下水位の低下により全層で溶存量が低下しているのが特徴である。その後の水位回復により塩素イオンの溶存量も回復傾向にあるが、揚水開始前までにはならなかった。また、ピーク付近ではプロファイルの形が変化し、若干下方へ移動したようにもみられる。自然状況下で地下水位が低下した10月17日から11月17日までの1ヶ月間での塩素イオン溶存量の変化は、130~200 cm 層で溶存量(濃度も)が低下し、200

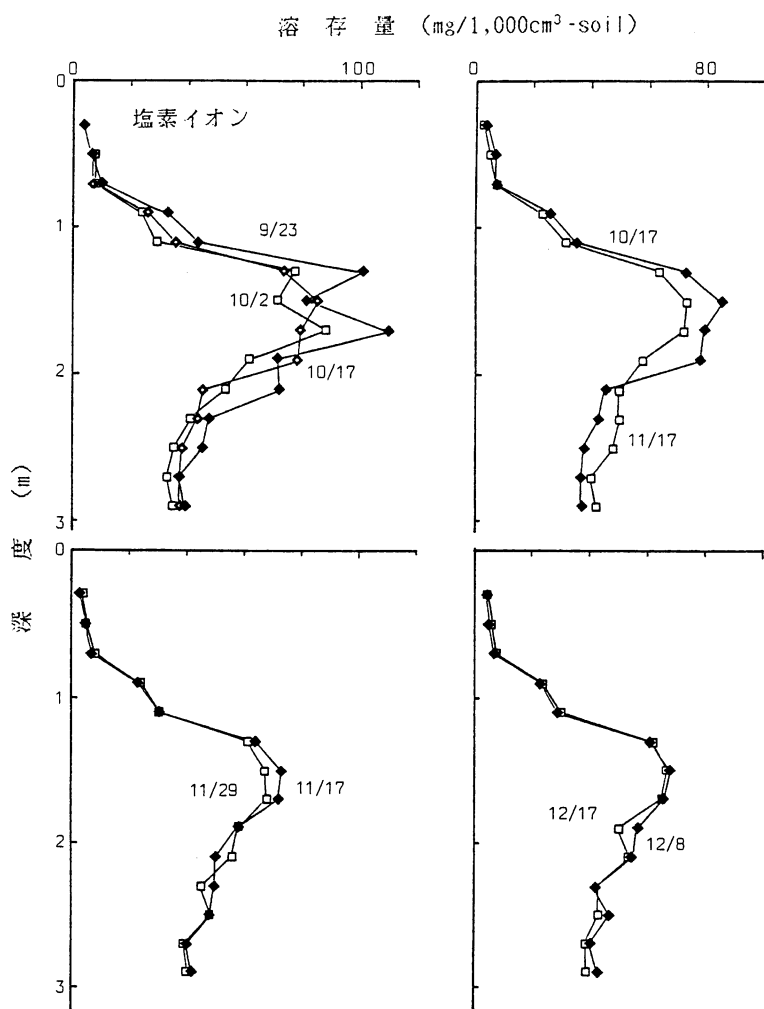
cm 以深で増加している。

第2回目の揚水実験では、揚水前後で塩素イオンの溶存量プロファイルはほとんど変化しなかった。

第3回目の揚水実験での塩素イオンの溶存量プロファイルと比較すると、170 cm 以浅では溶存量が高くなったが、250 cm 以深では溶存量が低下した。

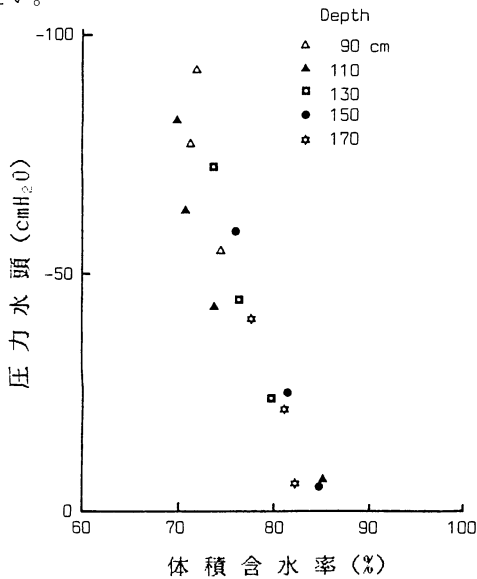
3.3 水分特性と溶存物質濃度

観測を行った約3ヶ月は、主に灌漑終了後の水位低下期である。なお、第5図に灌漑期(6月16日)の体積含水率のプロファイルを示してあるが、飽和含水率は観測期間中のもより高い傾向にある。



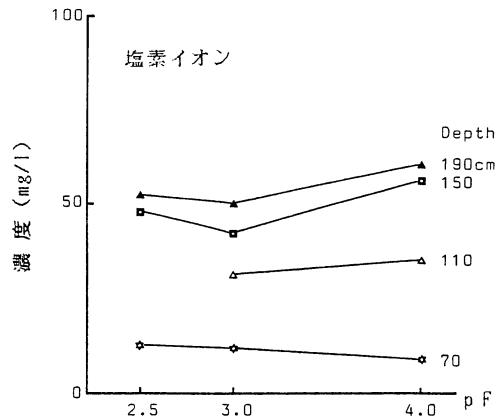
体積含水率とテンションを同時に測定したので、フィールドでの水分特性曲線を得ることが出来た(第7図)。シルト層の飽和含水率は80~90%で、飽和している不圧帯水層の地下水面を低下させることによって排水できる水の占めている間隙、すなわち排水可能間隙率は10~15%程度であった。この値は田中(1980)や開発ほか(1981)の関東ロームのものより若干大きい。水分量の変化の様子(第5図)から、毛管水帯は60~80 cmと考えられる。

第7図ではサンプル数が少ないので断定は出来ないが、110 cmで排水可能間隙が大きいようで、特に圧力水頭が-30~40 cmのあたりで比容水量が大きい。130 cm以深では排水可能間隙率は比較的小さい。



第7図 水分特性曲線(排水過程)

地下水位が低下すれば、採取される水のpFが変化するので、実験地で採取した土壌から遠心分離法により、pF 2.5、2.5~3.0、3.0~4.0に分けて土壌水を採集した。塩素イオン濃度はpFによって10 mg/l以上変化するものもあった(第8図)。傾向としては、pF 2.5~3.0で塩素イオン濃度が最低となった。この傾向は、対象濃度にかかなりの差があるが、雷・田瀬(1986)による粘性土のものとは一致している。



第8図 土壌中の塩素イオンとpFの関係

IV 考 察

3回の揚水による水位低下、その間の回復や自然低下に伴う水分量、水質の変化はそれぞれ特徴を持っている。これらのことを第3~6図を比較しながら考察してみる。水理水頭のプロファイルを見ると、若干の凹凸はあるものの、表層部を除いて常に下方への流れが存在している。比較的降水量も少なく、自然状況にあった11月17日のプロファイルは、乱れもなく毛管帯から様な水理勾配を呈している。また、全体に共通しているのは、ローム層とシルト層の境界である80 cm深で吸引圧が小さくなっていることである。

体積含水率のプロファイルと比較すると、急激に水位を低下させた場合と自然状況下でゆっくりと低下した場合は、プロファイルの変化の仕方が異なることが分かる。すなわち、急激に低下させた場合は、揚水前の地下水面付近の水分量が大きく(10%以上)減少するが、毛管帯よりも上部ではほとんど水分の減少はみられない。一方、10月17日から11月17日までの1カ月間の変化は、非常に穏やかで、不飽和帯全層にわたってほぼ一様に減少している。このことは急激な水分の移動は重力水あるいはpFの小さい毛管水によりもたらされ、それよりpFの高い水はほとんど動かないものと考えられる。この点は、急激な上昇においても同様であると推察され

る。水位低下時において共通してみられる現象として、シルト層の質が変わる 110 cm 深で極小をとる傾向がある。当然のことながら、地質の変換点で水の挙動が影響を受けていると言える。

これら水頭、水分の変化にともなって、水質も当然変化する。

第 1 回目の揚水の結果、全層において容容量の減少が起こった。ここでの最大の特徴は飽和帯でもかなりの減少が認められることである。

第 1 回目の揚水実験の後、10 月 17 日から 11 月 17 日までは自然状態で水位低下が起こっており、この間での容容量プロファイルの変化は塩素イオンが下方へ輸送されていることを示している。このとき不飽和帯ばかりでなく、地下水帯の上部でも減少している。この過程の中で 150 cm 深にあるピークの位置は変化していない。

第 2 回目の実験では、揚水による水位低下は余り大きくなかったこともあり、ピーク付近で若干の容容量の減少が認められたが、110 cm 以浅ではほとんど変動がなかった。

第 3 回目の実験では、水位低下量、水分減少量などは第 1 回目の実験とほぼ匹敵しているが、毛管帯下部でのわずかな変化以外はほとんど変化していない。

これらのことは、地下水面の位置、地下水面が上昇しているのか低下しているのか、その時の塩素イオンの濃度プロファイルのピークの位置あるいは地層やその境界の位置なども容存物質の挙動を考える上で重要であることを示唆している。特に、9 月 23 日と 10 月 2 日を除いて、150 cm 深にピークが存在し、下方へ移動しないのは地質の役割が大きいと考えられ、このピーク付近を地下水面が通過するときに、濃度、容容量の変化が大きい傾向がある。そして水位低下の時は濃度、容容量は減少し、水位上昇の時は増加する。すなわち、150 cm 付近の地層は塩素イオンに関し方向性を持ったフィルターの機能を持ち、この機能は基本的には水の移動様式に依存すると考えられる。これらのことは、Tase and Kurata (1984) が示した灌漑初期に地下水位の浅い地域で塩素イオン濃度が上昇する点、また非灌漑

期でも大雨の後、急に水位が上昇したときにも塩素イオン濃度が上昇する点などとも矛盾しない。この機能が pF、比容水量あるいは間隙構造などに関係する物理的なものなのか、吸脱着などに関係する化学的なものなのか、今後さらに検討する必要がある。また、これらの点を追求するためには地中水のサンプリング法も検討する必要があるかもしれない。

今回の実験のような急激な水位低下は、自然状況下ではあまり起こらないと考えられるが、大雨により急激に上昇した地下水位が降雨後急速に低下する場合はこれに近いと思われる。急激な水位の上昇は、大雨時や灌漑開始期など一般にみられる現象である。ゆっくりした降下は灌漑終了後にみられる。従って、急激な降下や上昇が水分の分布や移動に与える影響は大きく、その影響を受ける水質の形成を考える上でも重要である。もちろん、ここで土質の役割を無視することは出来ない。

V おわりに

今回の実験では、興味ある現象が観測され、若干の考察を行ったが、これらの現象に関与するであろうと考えられる要因が多々あり、現象のメカニズムにまで必ずしも迫ることが出来なかった。しかし、塩素イオンが必ずしも水と共に挙動しないことは、少なくともシルトなどの粘性土では確かである。不飽和帯と飽和帯の境界付近での水と物質の挙動は、本研究からも特異であることは明かであり、水分量、そのときの pF 値（ヒステリシス現象を含み）、水分の移動方向や速度、あるいは地質の連続性や成層状況とそれらの土質などの要因を一つ一つ検討して行く必要もありそうである。

謝 辞

本研究は昭和 60・61 年度文部省科学研究費一般研究 C「地中水中の物質移動における毛管水帯の役割に関する研究」（課題番号：60580197、代表者：田瀬則雄）の成果の一部である。貴重な御意見を頂きました新藤静夫教授（現千葉大学理学部）に深謝いたします。筑波大学水理実験センターには工作等

において便宜をはかって頂いた。また、実験地を提供して下さいました大平政徳氏にお礼申し上げます。

文 献

- 開発一郎・田中 正・岡橋生幸 (1980) : 関東ロームの水分特性. 地理評, **54**, 265-271.
- 倉田 文・田瀬則雄・榎根 勇 (1984) : 出島台地における地下水水質の年変化パターン. 筑波大学水理実験センター報告, **8**, 119-127.
- 新藤静夫・田瀬則雄 (1981) : 出島台地の地形・地質・地下水. 霞ヶ浦地域研究報告, **3**, 68-79.
- 新藤静夫・唐 常源 (1987) : 地下水位の変化に伴う不飽和帯における物質の挙動. 文部省科学研究費一般研究C「地中水中の物質移動における毛管水帯の役割に関する研究」報告書, 9-27.
- 田瀬則雄・藤井一正 (1985) : 茨城県出島台地における土壌水の動きと水質. 「環境科学」研究報告集 **B262-R12-2**, 37-48.
- 田中 正 (1980) : 今市扇状地における関東ロームの水分特性と比産出率. 地理評, **53**, 646-665.
- 唐 常源・新藤静夫 (1985) : 地下水位の変化にともなう毛管帯における物質の挙動. 筑波大学水理実験センター報告, **9**, 67-72.
- 平田健正・村岡浩爾 (1986) : 多孔体における有機塩素化合物の鉛直浸透について. 「環境科学」研究報告集 **B293-R12-14**, 65-70.
- 雷 沛豊・田瀬則雄 (1986) : 粘質土における塩素イオンの移動について. 日本地下水学会会誌, **28**, 63-71.
- Schwille, F. (1984) : Migration of organic fluids immiscible with water in the unsaturated zone. Yaron *et al.* ed : *Pollutants in Porous Media*, Springer-Verlag, 27-48.
- Tase, N. and Kurata, F. (1983) : Depth profiles of soil water quality in the Dejima area. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **9**, 36-38.
- Tase, N. and Kurata, F. (1984) : Impact of land use on groundwater quality in the Dejima area. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **10**, 40-43.
- Tase, N., Fujii, K., and Mayila, F. (1986) : Behaviors of water and chloride in the unsaturated-saturated zones. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **12**, 31-34.