

関東平野中央部の高 Cl 濃度地下水に関する同位体的研究

安原正也¹⁾・高橋 浩¹⁾・稲村明彦¹⁾・高橋正明¹⁾・牧野雅彦¹⁾・
半田宙子¹⁾・林 武司²⁾・中村俊夫³⁾・太田友子³⁾

1) 産業技術総合研究所 2) 東京大学大学院新領域創成科学研究科
3) 名古屋大学年代測定総合研究センター

I. はじめに

関東平野中央部から東京湾岸にかけての範囲を対象として、水文地質学的・水文化化学的な手法に基づいて平野の広域地下水流動系の実態解明に関する研究を実施中である。地下水の水質特性、流動経路、起源、涵養域、涵養時期、流動速度、流動量、賦存量、滞留時間等の水文諸要素の正確な把握、ならびにプロセスの解明とその決定手法の高度化は、地質・気候の変化や人間活動に対する広域地下水流動系の応答特性の予測・定量化を通じて、将来にわたる平野部の地下水保全を考える上で不可欠なものとなる。

同地域におけるこれまでの研究によって、埼玉県を中心とする関東平野中央部には、高い塩化物イオン (Cl⁻) 濃度を有する地下水が広く分布することが指摘されている (池田, 1984; 林, 2003; 安原ほか, 2005)。同様な高 Cl 濃度地下水の存在は日本の他の平野 (新潟平野, 仙台平野, 山形平野, 大阪平野等) でも確認されており、その空間分布、Cl⁻の起源、さらには形成プロセスの解明は、長期的な時間軸を念頭に置いて進められるべき平野部の広域地下水流動系の研究に際して避けて通れない課題である。

本研究では、関東平野中央部の多数の井戸から地下水試料の採取を行い、一般水質、酸素・水素同位体比、炭素同位体組成を測定した。得られた高密度データに基づいて、高 Cl 濃度地下水のさらに詳細な性状の解明と地理的分布の把握を試みると同時に、断層等の水文地質構造との関連性の視点から、その形成プロセスについて予察的な検討を行った。これらの結果について報告する。

II. 試料採取と測定手法

2003 年度と 2004 年度に、関東平野の中央部に分布する合計 144 の井戸から地下水試料を採取した (Fig. 1)。調査井戸が分布する市町は Fig. 1 において枠付きで示した。調査井戸の深度は概ね 150m 以上であり、最も深いものは深さ 430m であった。これらの深度は中・上部更新統の下総層群 (河川～浅海成層) あるいは鮮新世末期～更新世中期の上総層群 (深海～浅海成層) に相当する。

試料採取の際に水温、pH、電気伝導度を測定した。採取試料は実験室に持ち帰り、水質・同位体組成を測定した。HCO₃⁻濃度は硫酸滴定法により pH4.8 アルカリ度を定量して算出した。その他の一般水質成分はイオンクロマトグラフ (Dionex DX-500) により定量した。水素安定同位体比 (δD) は金属亜鉛を用いた水-水素還元法、酸素安定同位体比 ($\delta^{18}O$) は二酸化炭素-水自動平衡法にそれぞれ基づき、質量分析計 (Finnigan-MAT Delta-S) により

測定した。炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) については、試料採取の際に 0.01N の NaOH 溶液を 1/10 量加えた試料を用い、実験室においてリン酸を添加して抽出した CO_2 を連続フロー型の質量分析計 (Finnigan-MAT Gas Bench II & Delta-Plus) により測定した。また溶存全炭酸の放射性炭素同位体 (^{14}C 濃度, % modern carbon; pmc) は、NaOH 溶液を添加した試料を用い、実験室内の CO_2 フリーのボックス内で SrCl_2 溶液を添加して得た SrCO_3 の沈殿をリン酸で反応させ、真空ラインを用いて CO_2 精製とグラファイト化をした後に、名古屋大学年代測定総合研究センターの加速器質量分析計にて測定を行った。添加した NaOH 溶液にはブランクとして少量の CO_2 が含まれているが、測定値に対する影響は、 $\delta^{13}\text{C}$ においては分析精度より数桁小さく、 ^{14}C においては本来 0pmc であった試料を仮定した場合でも、測定結果が 0.1pmc となる程度であり、問題とならない。

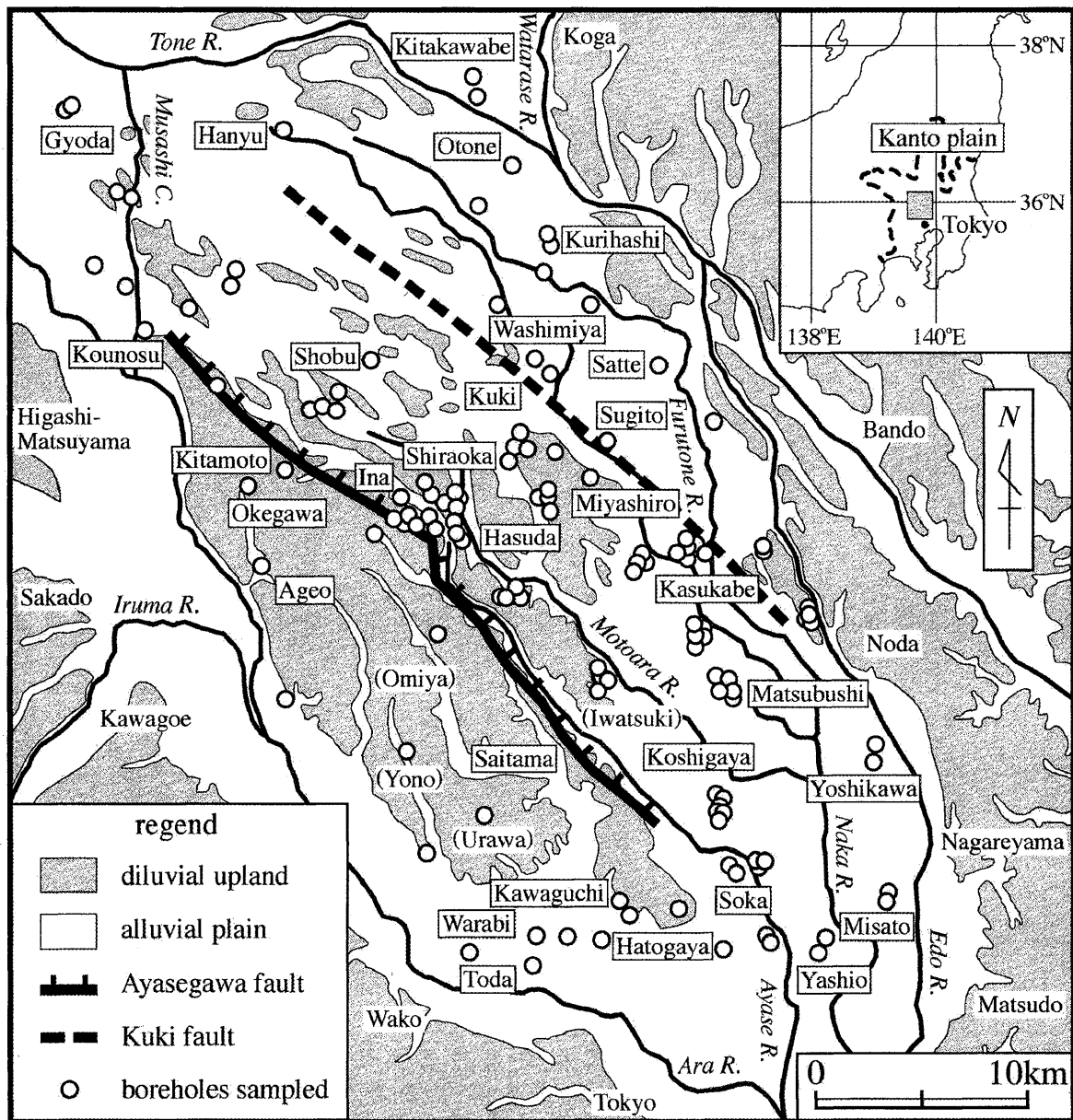


Fig. 1 The study area and location of sampled boreholes.

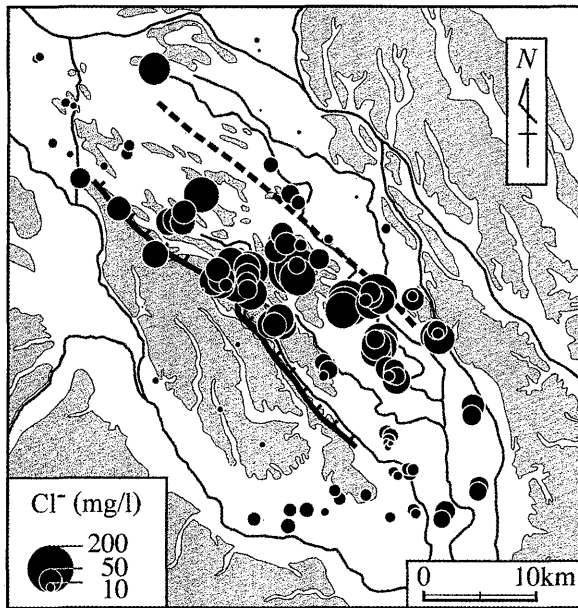


Fig. 2 Spatial variation of Cl⁻ conc.

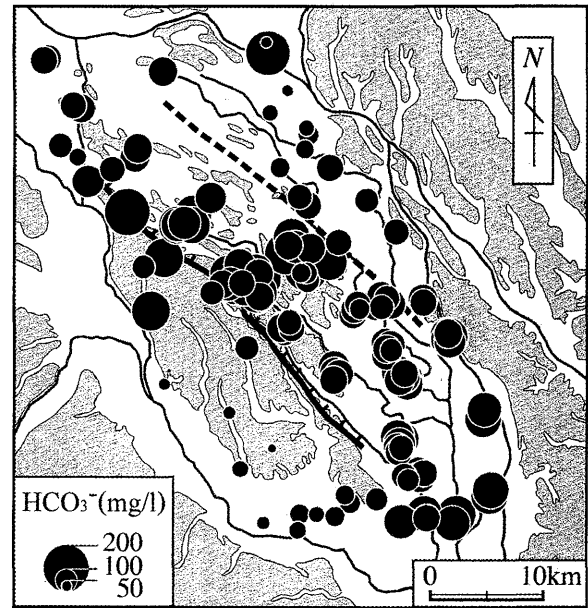


Fig. 3 Spatial variation of HCO₃⁻ conc.

III. 高 Cl 濃度地下水の空間分布

合計 144 試料の分析結果に基づき、Cl 濃度の分布図を作成した (Fig. 2). Cl 濃度は羽生市-菖蒲町, 対象地域中央部の伊奈町-白岡町-蓮田市そして春日部市で特に高く, これらの地区には 100mg/l 以上の高 Cl 濃度地下水が分布する. 最高濃度は白岡町の深度 310m 井において 216mg/l の値が得られた. この他に, 同じく白岡町の 310m 井 (184mg/l), 春日部市の深度 350m, 270m, 350m 井 (それぞれ 163mg/l, 160mg/l, 153mg/l) の合計 5 井において Cl 濃度が 150mg/l を越えていた. さらに, 蓮田市の 250m 井 (135mg/l), 白岡町の 300m 井 (129mg/l), 春日部市の 120m 井 (128mg/l), 菖蒲町の 350m 井 (124mg/l) などでも 120mg/l を越える地下水が分布していた. 今回確認された高 Cl 濃度地下水の平面的分布パターンには, 約 20 年前のそれ (池田, 1984) と比べて大きな違いは見られない. ただ, 当時は認められなかった 150mg/l を越える Cl 濃度を有する地下水の存在が新たに確認されたことは注目される.

一方, Cl 濃度の鉛直分布については, 井戸の多くがマルチスクリーンを有しており, 主帯水層の深度 (主たる採水深度) を現時点では確定できていないため, その分布を詳細に議論することはできない. しかし, 全体的に, 深度 300m を越える井戸から採取した地下水の方が Cl 濃度がより高い傾向が見られた (安原ほか, 2005). 従来の研究では, Cl 濃度が高い地下水は深度 150~250m 付近を中心に賦存しているものと考えられていたが (池田, 1984), 今回の調査の結果, より深い深度にさらに高い Cl 濃度を有する地下水が存在している可能性が示唆されたことになる. このことは, 最近, 行田市における深度 610m 井で 239mg/l の高 Cl 濃度地下水の存在が確認された報告例 (林, 2003) とも整合的である. 今後, 地下水中の Cl の起源を考えるうえでも重要な情報となろう.

他の一般水質成分, たとえば HCO₃⁻ 濃度の分布パターンは Cl 濃度のそれとは明らかに異なっている (Fig. 3). HCO₃⁻ の高濃度域は, Cl 濃度が高い菖蒲町-伊奈町-白岡町-蓮田市-

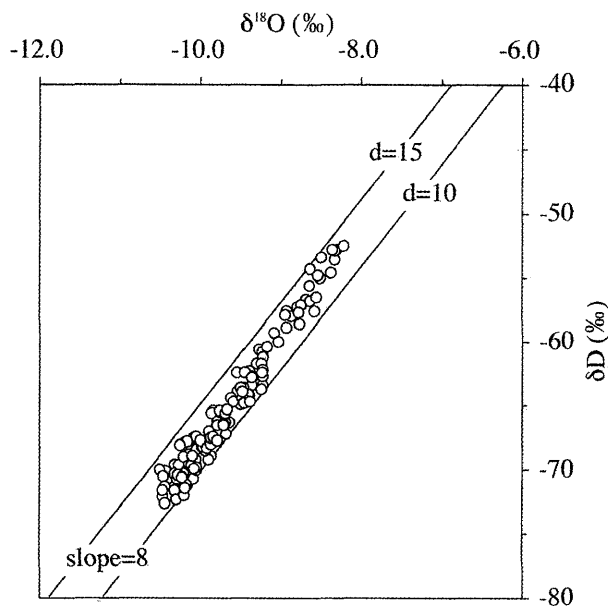


Fig. 4 $\delta^{18}\text{O}$ -dD diagram.

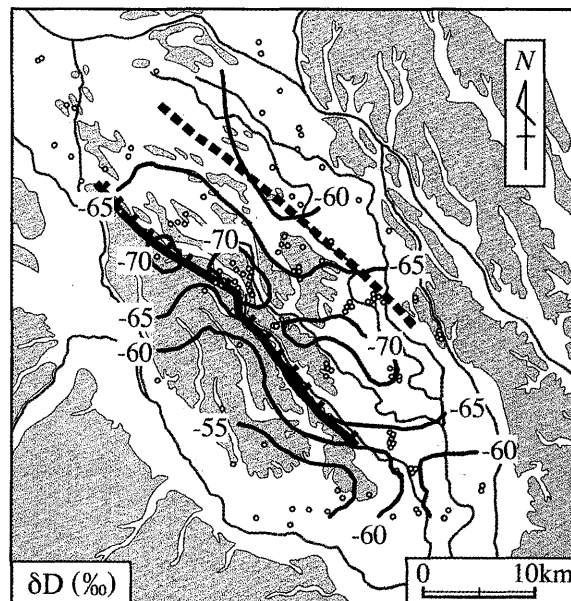


Fig. 5 Contour of δD values.

春日部市域とは一致せず、さらに南東の草加市－八潮市－三郷市域、また西北西の鴻巣市や北本市付近で認められる。HCO₃⁻濃度に関係する要因としては、地層中の炭素成分の溶解、硫酸イオン・硝酸イオンの還元、続成作用（粘土鉱物の生成）等による溶存炭酸の地下水へ付加、あるいは断層等を通じての地下深部からのCO₂の寄与などをその増加要因としてあげることができる。HCO₃⁻濃度分布を支配する要因の解明は、先の高Cl濃度地下水の成因の検討と併せて、関東平野における広域地下水流動系解明の際に重要な意味をもつものと考えられる。

IV. 同位体組成の空間分布

酸素・水素同位体比の測定結果を Fig. 4 (D-O プロット) に、また水素同位体比の空間分布を Fig. 5 に示す。40km×40km 程度の比較的狭い範囲から得られたにもかかわらず、地下水試料は δD ; -72‰~-53‰, $\delta^{18}\text{O}$; -10.5‰~-8.2‰ という広い範囲に分布していることが特徴的である (Fig. 4, Fig. 5)。また、d-value (= $\delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$) は 10.4~14.8 の範囲にあるが、同位体組成が重い試料ほど d-value が大きくなる傾向が明らかに認められる (Fig. 4)。

δD 分布図 (Fig. 5) からは、鴻巣市－さいたま市を結んだ北西～南東ラインを境にその両側で水素同位体比が明瞭に異なる（北東側でより低同位体比）ことが読み取れる。また、羽生市－久喜市－春日部市を結ぶ同じく北西～南東ラインの両側でも同様の傾向が顕著にみられる（南西側でより低同位体比）。すなわち、関東平野中央部においては、この両ラインに挟まれて、低い水素同位体比を有する地下水が北西～南東方向に約 35km にわたって分布していることになる。図 2 で示した高 Cl 濃度地下水帯の広がりと比較すると、鴻巣市近辺では両者の分布に多少の相違が認められるものの、この低水素同位体比地下水帯と高 Cl 濃度地下水帯の広がりとは巨視的には一致しているとみなすことができよう。低水素同位体比地下水帯に

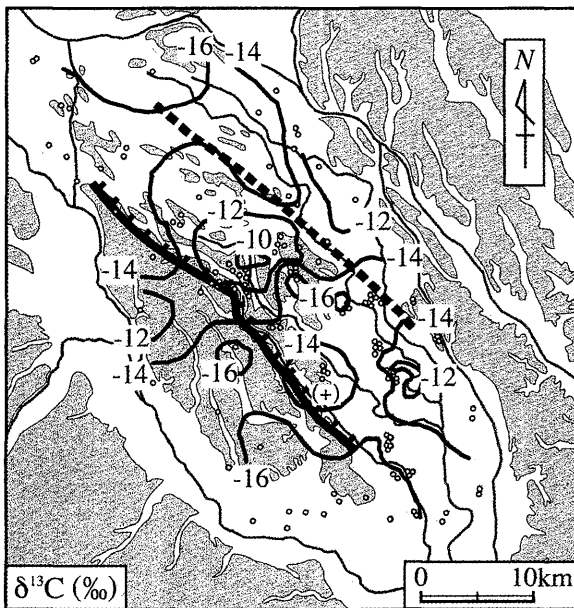


Fig. 6 Contour of $\delta^{13}\text{C}$ values.

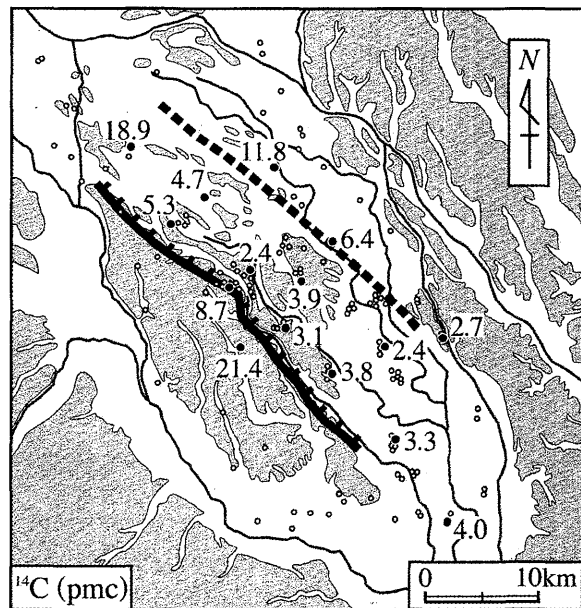


Fig. 7 Spatial variation of ^{14}C values (pmc).

においては、周辺域と比較して d-value が最大で 4 程度小さく、さらに、井戸深度と水素同位体比の関係を検討すると、同地下水帯では、井戸深度が大きくなるほど同位体比が小さくなるという傾向が弱いながらも認められている（安原ほか，2005）。

一方、 $\delta^{13}\text{C}$ の平面分布図（Fig. 6）からは、北西～南東方向に約 35km にわたって広がる高 Cl 濃度・低水素同位体比地下水帯においては、その $\delta^{13}\text{C}$ 値は -14～-10‰ が主体であり、周辺域と比べてより高い傾向があることがわかる。特に、蓮田市や伊奈町などには -8‰ 以上の重い $\delta^{13}\text{C}$ 値を有する地下水が賦存している。Fig. 7 に示した溶存全炭酸の ^{14}C 濃度 (pmc) も、Fig. 6 における $\delta^{13}\text{C}$ の結果と同様な分布である。すなわち、同地下水帯の試料が 2.4～5.3pmc の低い ^{14}C 濃度を有するのとは対照的に、その周辺域では 21.4pmc（南西側）と 11.8pmc（北東側）と明らかに高い値を示している。以上のように、高 Cl 濃度地下水帯の水は、同時に低水素同位体比、低 d-value さらには高い $\delta^{13}\text{C}$ 、低い ^{14}C 濃度によって特徴づけられていることが明らかとなった。

V. 地質構造と Cl 濃度・同位体組成分布の関係

Fig. 1～Fig. 3, Fig. 5～Fig. 7 中には綾瀬川断層の位置を太実線で記入してある。綾瀬川断層は特に北部の活動が活発な逆断層であり、その変位量は深度 100m 付近では 50m 程度であるが、深度 200m では約 100m、さらに深度 300m では 200m 程度と、深部になるほど変位量が大きくなる傾向がある（水野清秀；私信による）。第 IV 章で述べた高 Cl 濃度地下水帯の南西縁はこの綾瀬川断層の位置とよく一致している（Fig. 2）。すなわち、当断層の北部から中部では、断層東側の菖蒲町、伊奈町、白岡町、蓮田市を中心とした高 Cl 濃度地下水と、西側の上尾市や鴻巣市の低 Cl 濃度地下水が明瞭なコントラストを示している。また、断層の南部でも同様に、断層東側の春日部市とその周辺の高 Cl 濃度地下水と、西側のさいたま市周辺の低 Cl 濃度地下水が明瞭な濃度差を呈している。反対に、断層が認められない蕨市、

戸田市，川口市，鳩ヶ谷市，草加市，八潮市，三郷市の範囲では，地下水のCl⁻濃度分布には東西方向に顕著な差異は見られない（Fig. 2）．水素同位体比（Fig. 5）や炭素安定同位体組成（Fig. 6）の地域分布についてもほぼ同様である．これらの事実は，綾瀬川断層が難透水境界として働き，その両側の地下水の交流を妨げていることを強く示唆している．

さらに，前述の通り，利根川右岸地域においてもCl⁻濃度と水素同位体比が東西方向に急変する傾向（Fig. 2，Fig. 5）を読み取ることができるが，清水・堀口（1981）は，加須市－久喜市－春日部市にかけて綾瀬川断層とほぼ平行に久喜断層が存在しているものと推定している（Fig. 1～Fig. 3，Fig. 5～Fig. 7中の破線）．利根川右岸地域において認められるCl⁻濃度と水素同位体比の東西方向での急変（Fig. 6の炭素同位体組成についても同様）は，いわゆる元荒川構造帯（清水・堀口，1981）の北東端に相当するこの久喜断層の存在に強く規制されている可能性がある．言い換えれば，埼玉県東部の関東平野を北西～南東方向に延びる高Cl⁻濃度・低水素同位体比地下水帯は，約10km程度隔てて並行する綾瀬川断層と久喜断層に挟まれた元荒川構造帯の中に賦存しているとみなすことができよう．

この様に両側に難透水性の地質不連続線が存在するため，構造帯内の地下水は水文地質学的に周辺から孤立することになる．すなわち，元荒川構造帯内の地下水は，アクティブな埼玉県側（荒川方面）からの地下水流動系さらには茨城県側（古河市方面）からの地下水流動系から分断された状態下に置かれるため，Fig. 7の¹⁴C値からも推定される様に周辺域と比較して滞留時間が長くなる．その結果，地層との接触時間の長さも一要因となり，構造帯内部の地下水は周辺と異なる特殊な水質・同位体特性を有するようになったものと考えられることができる．断層等の地質不連続線が，平野部における地下水の賦存や性状，広域地下水流動系のあり方に決定的な影響を及ぼしている事例である可能性が高い．他の平野でも確認されている同様の高Cl⁻濃度地下水との比較も通じて，広域地下水流動系に及ぼす断層の影響に関するより詳細な検討が必要となるう．

VI. おわりに

元荒川構造帯内の地下水が呈する低水素同位体比については，（1）より気温の低い時期に涵養された地下水，あるいは（2）関東平野周辺部の高標高山地域で涵養された地下水・河川伏没水の構造帯北西方面（行田市－羽生市－鴻巣市域；Fig. 1）からの流入，などいくつかを原因として挙げることができるが，現時点ではそのいずれであるかを断定するまでには至っていない．地下水中に高濃度で含まれるCl⁻の起源については，浅海域～汽水域での地層堆積時における残留塩類によるという見方（たとえば，池田，1984）が従来から有力である．特に，関東平野中央部の様に揚水が長期間にわたって継続して行われてきた地域では，Cl⁻の量的な点からみて難帯水層である粘土層中の残留塩類の寄与がより重要であるとも考えられる．大量の地下水揚水とそれに伴う粘土層の圧密により，塩類が粘土層中から搾り出され継続的に地下水に付加されるというプロセスである．これについては今後，高Cl⁻濃度地下水帯とその周辺域において過去の揚水量・地盤沈下量と地下水のCl⁻濃度分布を比較・検討することで，一定の判断を下すことができるであろう．一方で，関東平野の地下深層部に存在するCl⁻濃度の高い水（たとえば，高瀬，1963；関ほか，2001）が綾瀬川断層，久喜断層，さらには関

東平野のより上流部に位置する（伏在）断層等を通じて浅部にもたらされ、浅層地下水で拡散している可能性も否定することはできない。現在、高 Cl 濃度地下水について He 濃度・同位体の測定を行っているので、その測定結果を待って当プロセスの存在の有無あるいは妥当性についての判断を下したい。

今回の調査の結果、関東平野中央部の高 Cl 濃度地下水は、同時に低水素同位体比、低 d-value 値、さらには高い炭素安定同位体比、低い ^{14}C 濃度といった同位体的特徴を合わせ持つことが明らかとなった。今後は Cl の起源や付加のプロセスの解明と並行して、地下水そのものの涵養源、滞留時間、流動経路を始めとする水文プロセス、さらには広域地下水流動系と断層の関係に関する検討を各種同位体測定結果に基づきながら進めてゆく予定である。

引用文献

- 池田喜代治（1984）：関東構造盆地中央部の被圧地下水の水質。ハイドロロジー，No.14，36-49.
- 清水康守・堀口萬吉（1981）：大宮台地北東部における元荒川構造帯（新称）について。地質学論集，No.20，95-102.
- 関 寿子・林 武司・丸井敦尚（2001）：関東平野における深層地下水の性状。日本水文科学会誌，31，102-115.
- 高瀬一男（1963）：八塩鉱泉と渡瀬地域の地下水の化学成分の関係について（その1）－北関東の水理地質学的研究（第1報）－。茨城大学教育学部紀要，No.13，129-142.
- 林 武司（2003）：関東平野中央部に見られる低酸素水素同位体比・高 Cl 濃度地下水帯の三次元的分布と成因。日本水文科学会誌，33，53-70.
- 安原正也・高橋正明・稲村明彦・林 武司・牧野雅彦・高橋 浩（2005）：関東平野中央部における高 Cl 濃度地下水について。日本水文科学会学術大会発表要旨集，No.20，47-50.

An isotopic study on the Cl-rich groundwater in central Kanto plain, Japan

Masaya YASUHARA¹⁾, Hiroshi A. TAKAHASHI¹⁾, Akihiko INAMURA¹⁾,
Masaaki TAKAHASHI¹⁾, Masahiko MAKINO¹⁾, Hiroko HANDA¹⁾,
Takeshi HAYASHI²⁾, Toshio NAKAMURA³⁾ and Tomoko OHTA³⁾

1) Geol. Surv. Japan, AIST, 2) Graduate School of Frontier Science, Univ. Tokyo,
3) Center for Chronological Research, Nagoya Univ.

Abstract

In the Kanto plain, the largest Quaternary groundwater basin in Japan, water samples were obtained from 144 water supply boreholes with pumps installed to characterize the groundwater system. The spatial variation in chloride (Cl⁻) concentration indicates that in its central part there exists groundwater with Cl⁻ concentrations of more than 100 mg/l (up to 216 mg/l) between 150 m and 430 m depth below ground surface. This 8 km wide, 35 km long Cl⁻-rich area, spreading from the northwest to the southeast, corresponds with the so-called Motoarakawa tectonic zone bounded by the faults on its long sides. We have found the Cl⁻-rich groundwater is also characterized by low δD , low $\delta^{18}O$, and high $\delta^{13}C$ values. Both the chemical and isotopic evidence strongly suggests the Motoarakawa tectonic zone divides the regional groundwater system in the Kanto plain into three distinct hydrologic subareas. Two faults bordering the Motoarakawa tectonic zone act as barriers to the southward and northeastward regional movements of groundwater. Radiocarbon (¹⁴C) data suggest that the retention time of groundwater in the tectonic zone is long in comparison with that outside the tectonic zone. In conclusion, the Motoarakawa tectonic zone groundwater is assumed to have been recharged by either precipitation under cooler climate condition than the present, or groundwater and/or river water originated from precipitation on high altitude areas around the Kanto plain. It had been put under an isolated hydrologic environment for a long period of time with respect to the regional groundwater system, resulting in highly-evolved water chemistry with an elevated Cl⁻ concentration. Contribution of pore water (formation water) squeezed out of the adjacent aquitards and/or deep-seated groundwater can not be ruled out as another possible source of water and Cl⁻ for the tectonic zone groundwater.

誌上発表

高橋 浩 (2006) 「生態系の機能をフラックスから探る：二酸化炭素の発生起源ごとの寄与」
地球環境と生態系—陸域生態系の科学, 武田博清・占部城太郎編, 共立出版, 209-217.

Yasuhara, M., Inamura, A., Takahashi, M., Hayashi, T., Takahashi, H. A., Makino, M.,
Handa, H. and Nakamura, T. (2006) Groundwater system compartmentalized by a
tectonic zone in Kanto plain, central Japan. Proceedings of the International
Symposium - Aquifers Systems Management -, IAH, 216-220.

学会発表

Yasuhara, M., Inamura, A., Takahashi, M., Hayashi, T., Takahashi, H. A., Makino, M.,
Handa, H. and Nakamura, T. (2006) Groundwater system compartmentalized by a
tectonic zone in Kanto plain, central Japan., International symposium - Aquifers
Systems Management -, IAH, Dijon, France, June 1, 2006.