

## 関東平野における地下水システムの研究

### A study on groundwater system in the Kanto Plain, central Japan.

安原正也<sup>1\*</sup>・稲村明彦<sup>1</sup>・森川徳敏<sup>1</sup>・高橋 浩<sup>1</sup>・宮越昭暢<sup>2</sup>・牧野雅彦<sup>1</sup>・塚本 齊<sup>1</sup>・戸崎裕貴<sup>1</sup>・水野清秀<sup>1</sup>・Stephen B. Gingerich<sup>3</sup>・林 武司<sup>4</sup>・鈴木秀和<sup>5</sup>・宮下雄次<sup>5</sup>・藪崎志穂<sup>6</sup>・鈴木裕一<sup>6</sup>  
Masaya Yasuhara<sup>1\*</sup>, Akihiko Inamura<sup>1</sup>, Noritoshi Morikawa<sup>1</sup>, Hiroshi Takahashi<sup>1</sup>, Akinobu Miyakoshi<sup>2</sup>, Masahiko Makino<sup>1</sup>, Hitoshi Tsukamoto<sup>1</sup>, Yuki Tosaki<sup>1</sup>, Kiyohide Mizuno<sup>1</sup>, Stephen B. Gingerich<sup>3</sup>, Takeshi Hayashi<sup>4</sup>, Hidekazu Suzuki<sup>5</sup>, Yuji Miyashita<sup>5</sup>, Shiho Yabusaki<sup>6</sup> and Yuichi Suzuki<sup>6</sup>

**Abstract:** In the Kanto plain, central Japan, there are three regions in which artesian groundwater is characterized by a high Cl<sup>-</sup> concentration up to a couple of 100mg/l: 1) central Kanto plain (eastern parts of Saitama Prefecture), 2) lower reaches of Tone River (southern parts of Ibaraki Prefecture and northwestern parts of Chiba Prefecture), and 3) northwestern Kanto plain (southeastern parts of Gunma Prefecture and southern parts of Tochigi Prefecture). A geochemical study based on water chemistry,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^4\text{He}$  and  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ , has been in progress to elucidate the groundwater system of the respective regions with special reference to origins and residence times of both water and Cl<sup>-</sup>. For the fiscal year 2010, as a part of the preliminary study, eighty water samples from the lower reaches of Tone River and the northwestern Kanto plain were analyzed to have a clear grasp of the geochemical status quo of groundwater in both regions. As a result, uneven distribution of water chemistry and isotope analyses was strongly in evidence, indicating water and Cl<sup>-</sup> has a wide range of origins and residence times within the region as well as between the regions. The results from the above-mentioned three Cl<sup>-</sup>-rich groundwater regions will be put together in the future to help an overall understanding of the long-term groundwater system development in the whole Kanto plain in the last 500,000 yrs.

**キーワード:** 関東平野, 被圧地下水, 地下水システム, 水質, マルチアイソトープ手法, 滞留時間, 水と Cl の起源

**Keywords:** Kanto plain, artesian groundwater, groundwater system, water chemistry, multi-isotope study, residence time, origins of water and Cl<sup>-</sup>

#### 1. はじめに

本研究は、「関東平野地下地質調査手法開発」の1サブテーマとして、関東平野における地下水システムの解明を目的として実施したものである。昨年度までの研究により、埼玉県東部を中心とする関東平野中央部の被圧地下水について、その起源ならびに地層堆積時から現在に至るまでの時間軸を組み入れた地球化学

的進化プロセスを解明することができた (Yasuhara et al., 2007; 安原ほか, 2010)。また、地下水システム解明の過程で、各種同位体とならんで塩化物イオン (Cl) が重要なパラメータになることが明らかとなった。今年度は、関東平野中央部と同様に高 Cl 濃度の地下水の分布が確認されている利根川下流東部地域 (茨城県南部・千葉県北部) ならびに関東平野北西部地域 (群馬県南東部・栃木県南部) を対象に現地調査

\* Correspondence

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)

<sup>3</sup> アメリカ合衆国地質調査所 (U.S. Geological Survey, Hawaii)

<sup>4</sup> 秋田大学教育文化学部 (Akita University, Faculty of Education and Human Studies)

<sup>5</sup> 神奈川県温泉地学研究所 (Hot Spring Research Institute of Kanagawa Prefecture)

<sup>6</sup> 立正大学地球環境科学部 (Rissho University, Faculty of Geo-Environmental Science)

を実施し、両地域における地下水の地球化学的特性の把握と地下水システムの解明に向けて予察を行った。

## 2. 利根川下流地域

茨城県南部と千葉県北部の利根川周辺地域において地下水試料採取を行った水源井 22 本の位置と、その一般水質の Stiff ダイアグラムを第 1 図に示す。図中括弧内の数字は井戸深度である。また、Piper ダイアグラムを第 2 図に示した。利根川低地と周辺の洪積台地では地下水の水質が明らかに異なることがわかる。利根川左岸低地に位置する河内町の地下水（地点 529；深度 30–40m 程度）の Cl 濃度は 768mg/l と非常に高く（第 1 図）、海水のそれと極めて類似した Na-Cl 型の水質組成を呈する（第 2 図）。利根町の地点 530, 531, 532（深度 80–150m）においても Cl 濃度は 62–173mg/l と一般的な地下水に比べてかなり高濃度であり、水質組成も Na-HCO<sub>3</sub>・Cl 型である。これら利根川低地の地下水は SO<sub>4</sub> 濃度が極めて低いという特徴も有する。対照的に、洪積台地の地下水（深度 63–290m）の Cl 濃度は 5–15mg/l と低い。また、水質組成は Ca・Mg-HCO<sub>3</sub> 型であり、利根川低地のそれと比較して SO<sub>4</sub> と Mg に富む傾向が認められる。

利根町から河内町にかけての利根川低地の沖積層の厚さは、既存文献（遠藤ほか、1983）では左岸地域でおよそ 40m 前後とされている。利根川低地の詳細な地下地質構造については来年度以降に予定される本プロジェクトによる調査の結果を待ちたいが、仮にここで沖積層厚約 40m という上述の文献値に基づくと、地点 529 では有楽町層相当層あるいは七号地層相当層中に賦存する埋没谷内の地下水を、一方地点 530, 531, 532 では埋没谷より下位の下総層群中の地下水を対象としているものと考えられる。

酸素同位体比でみると、前者（地点 529：-7.4‰）と後者（地点 530, 531, 532：-9.9～-9.5‰）の地下水の間には 2.1～2.5‰の差が認められる（第 3 図）。また、周辺の洪積台地の地下水と比較しても、地点 530, 531, 532 の地下水の酸素同位体比は 2.2～2.7‰程度軽い（第 3 図）。一般に平均気温の低下に伴い涵養される地下水の酸素同位体比が軽くなる。したがって、利根川低地の埋没谷下位の下総層群中には、現在より平均気温が低かった時代に涵養された地下水塊がポケット状に残存しているとみなすことが可能である。

地点 531 の地下水の放射性炭素に基づく <sup>14</sup>C 年代

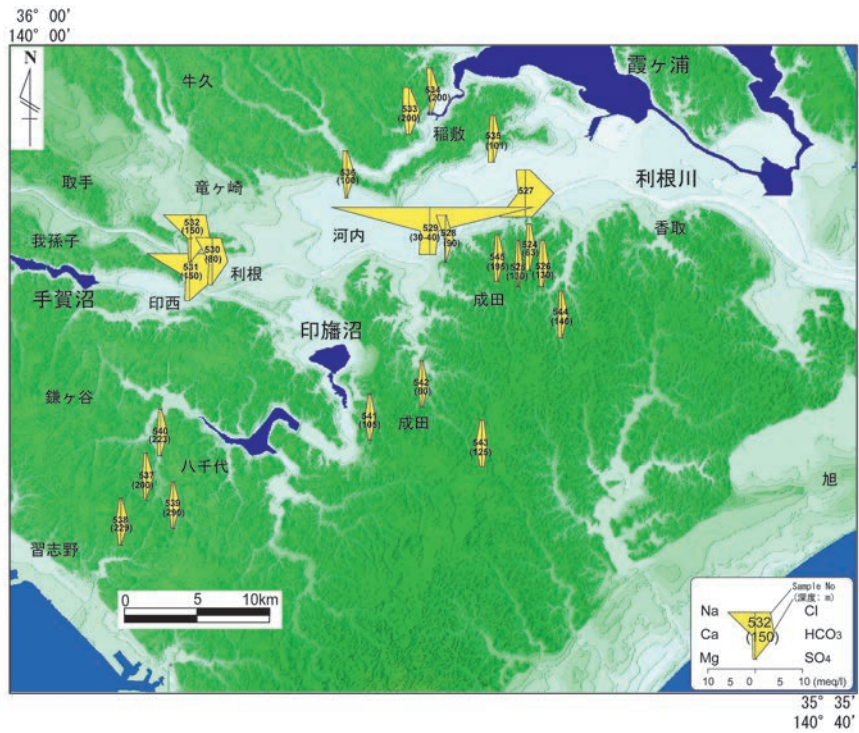
値（未補正值）は約 10,000 年（29pMC）であった。ただし、0.9TU とトリチウムも同時に検出されることから、最近の降水によって涵養された新しい地下水が混入していることは明らかである。このことから、新しい地下水と混合する前の地点 531 の“真”の地下水年代は 10,000 年よりさらに古く、最終氷期末期の比較的寒冷な気候環境下における降水に起源があるものと推定される。一方、洪積台地上の地点 533, 539, 544 ではそれぞれ約 4,000 年（60pMC）、7,000 年（42pMC）、1,000 年（89pMC）と、現在により近い温暖期における涵養を示す新しい <sup>14</sup>C 年代値が得られている。過去数万年の気温変動を考慮すると、このような <sup>14</sup>C の結果は酸素同位体比のそれと整合的といえる。

地下水中の Cl の起源について、<sup>36</sup>Cl/Cl 比に基づく検討を試みた。地点 529 の沖積層中の地下水（Cl 濃度：768mg/l）は非常に低い <sup>36</sup>Cl/Cl 比（ $8 \times 10^{-16}$ ）を示し（第 4 図）、a）最近の表層水（5mg/l 程度の低い Cl 濃度と宇宙線起源の非常に高い <sup>36</sup>Cl/Cl 比を有する）と b）現海水あるいは地層中に取り込まれて間もない海水との混合線付近にプロットされている。この沖積層中の地下水に比べ、埋没谷下位の下総層群中の地下水（地点 531, 532）は  $6.8 \times 10^{-15}$  という相対的に高い <sup>36</sup>Cl/Cl 比を有する。これら地点 531 と地点 532 については、混合過程における高 Cl 側の端成分として、地層中にとりこまれてからそれなりの時間が経過した海水（永続平衡値に向かって <sup>36</sup>Cl/Cl 比がある程度増加した海水、すなわち、より古い時代の海水）を考える必要があるかもしれない。利根川とその周辺における地下水中の Cl の起源については、今後さらに多くの地点で <sup>36</sup>Cl/Cl 比を測定することにより明らかにし得るものと考えられる。

利根川流域では、上流の取手市や竜ヶ崎市においても最高で 1,000mg/l に達する高 Cl 濃度を有する地下水の存在が指摘されている（高瀬、1971）。来年度は調査範囲をこれらの上流域にまで広げ、今回の予察的な研究によって明らかとなった洪積台地と沖積低地の地下水の地球化学的な性状や起源、滞留時間の相違についてさらに詳細な検討を進める予定である。

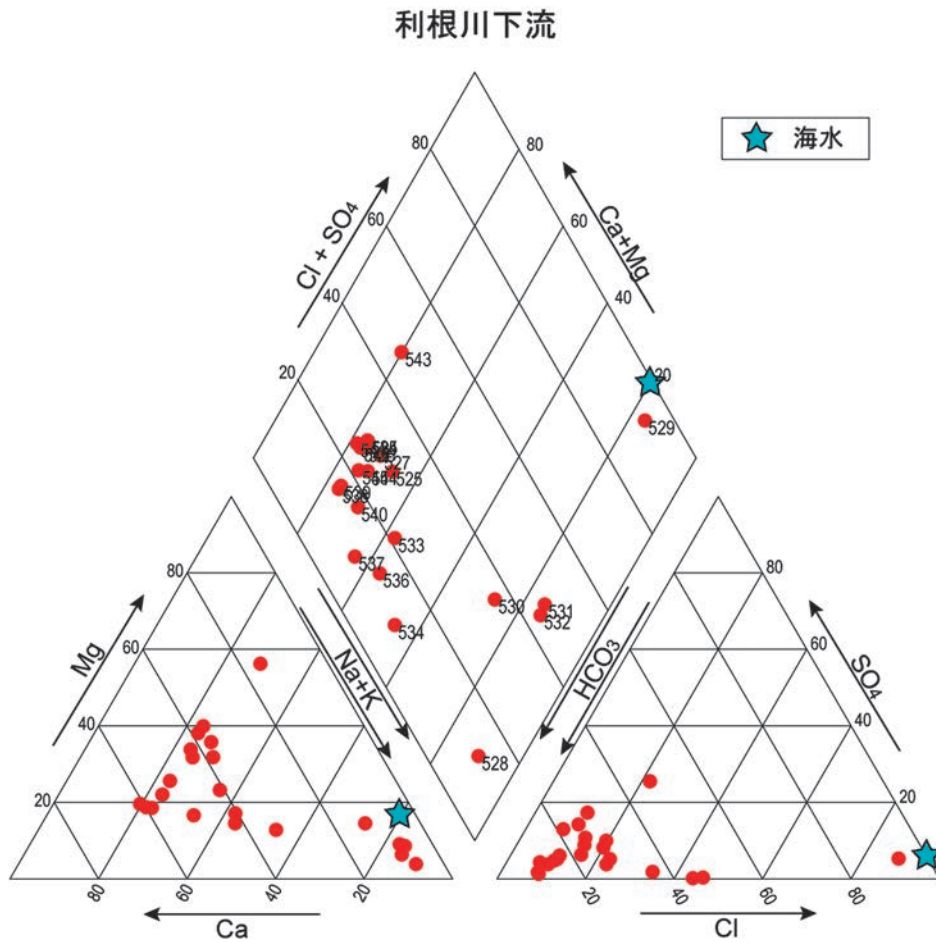
## 3. 関東平野北西部地域

伊勢崎市から館林市にかけての群馬県南東部と小山市から真岡市にかけての栃木県南部において、合計 58 本の水位観測井（深度 30–450m）から地下水試



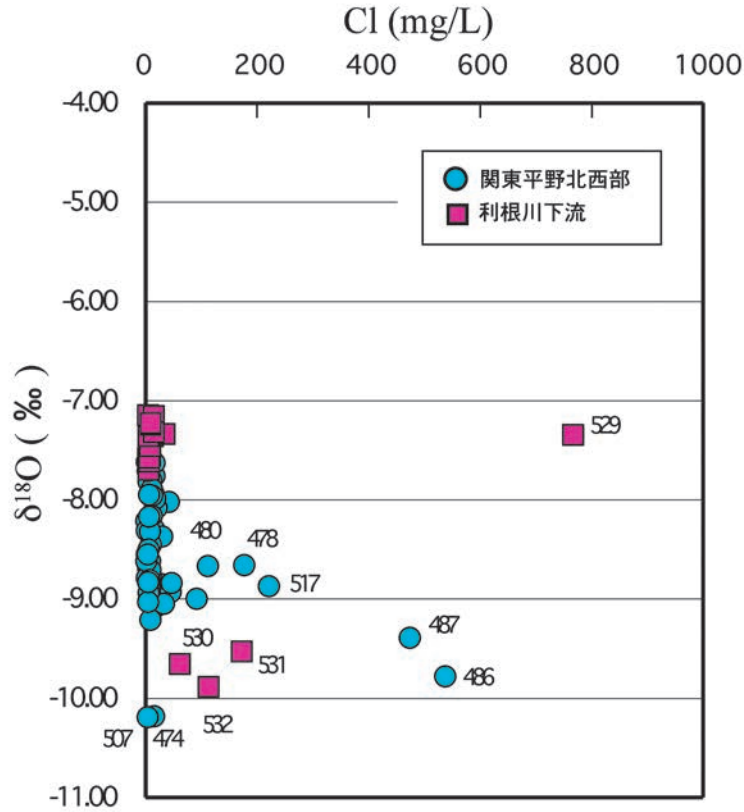
第 1 図 利根川下流地域の地下水試料採取地点と水質の Stiff ダイアグラム.

Fig.1 Location of sampled boreholes and Stiff diagram illustrating groundwater chemistry in the lower reaches of Tone River. Figures in parentheses are borehole depths in meter.



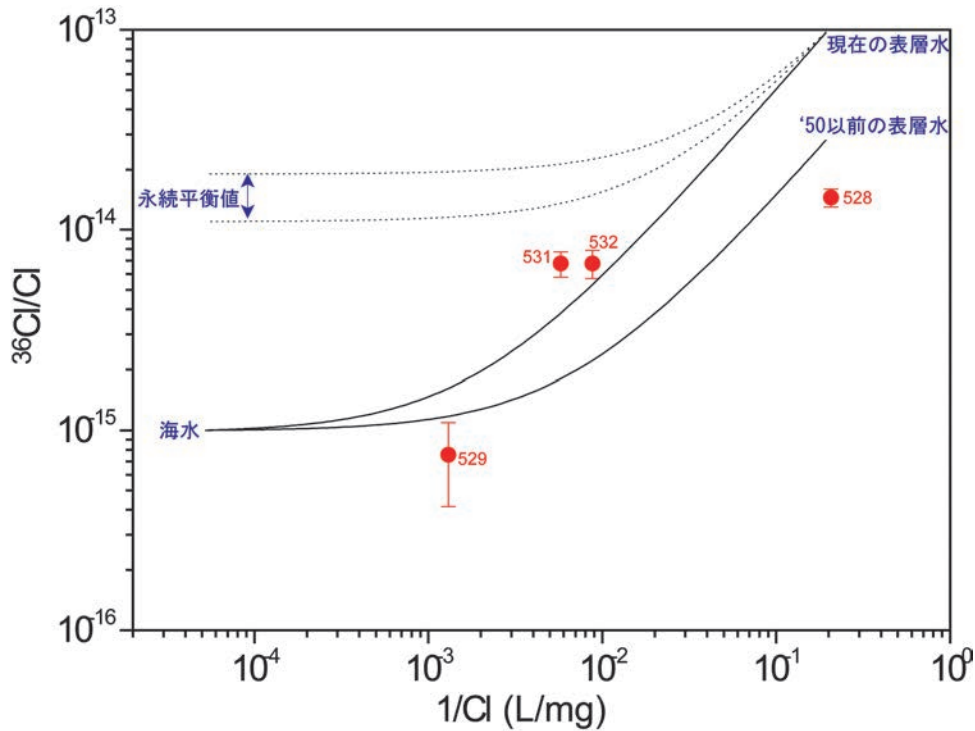
第 2 図 利根川下流地域の地下水水質の Piper ダイアグラム. ポイント脇の数字は調査地点番号 (第 1 図参照).

Fig.2 Piper diagram illustrating groundwater chemistry in the lower reaches of Tone River. Numbers beside the points correspond to those in Fig.1.



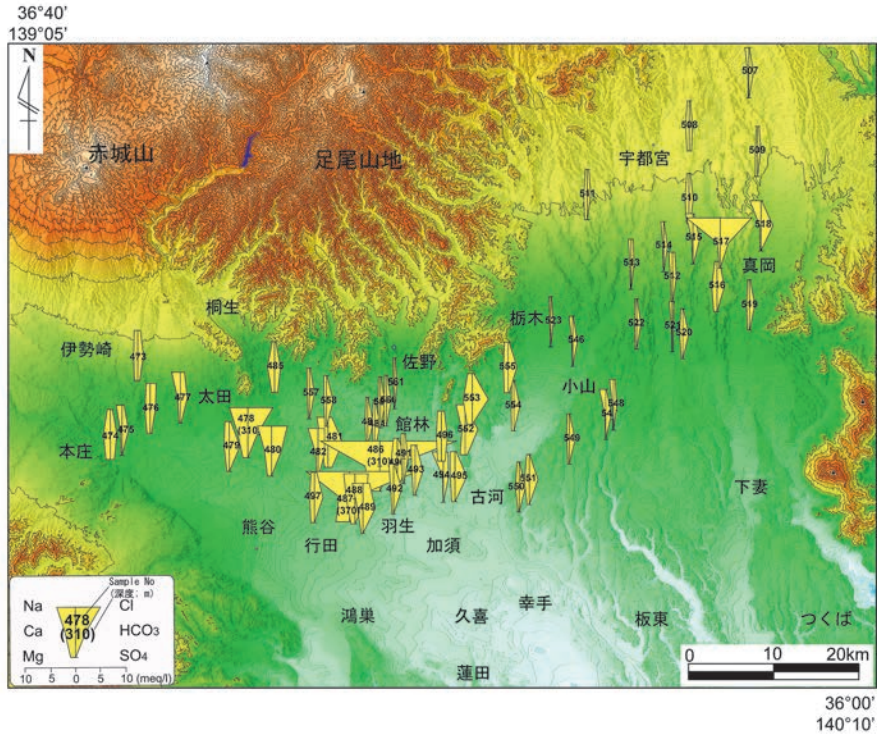
第 3 図 利根川下流地域と関東平野北西部地域の地下水の酸素同位体比と Cl 濃度の関係。ポイント脇の数字は調査地点番号（第 1 図ならびに第 5 図参照）。

Fig.3 Oxygen isotopic ratio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in ‰ as a function of Cl concentration (mg/l) for groundwater samples in the lower reaches of Tone River and the northwestern Kanto Plain. Numbers beside the points correspond to those in Figs.1 and 5.



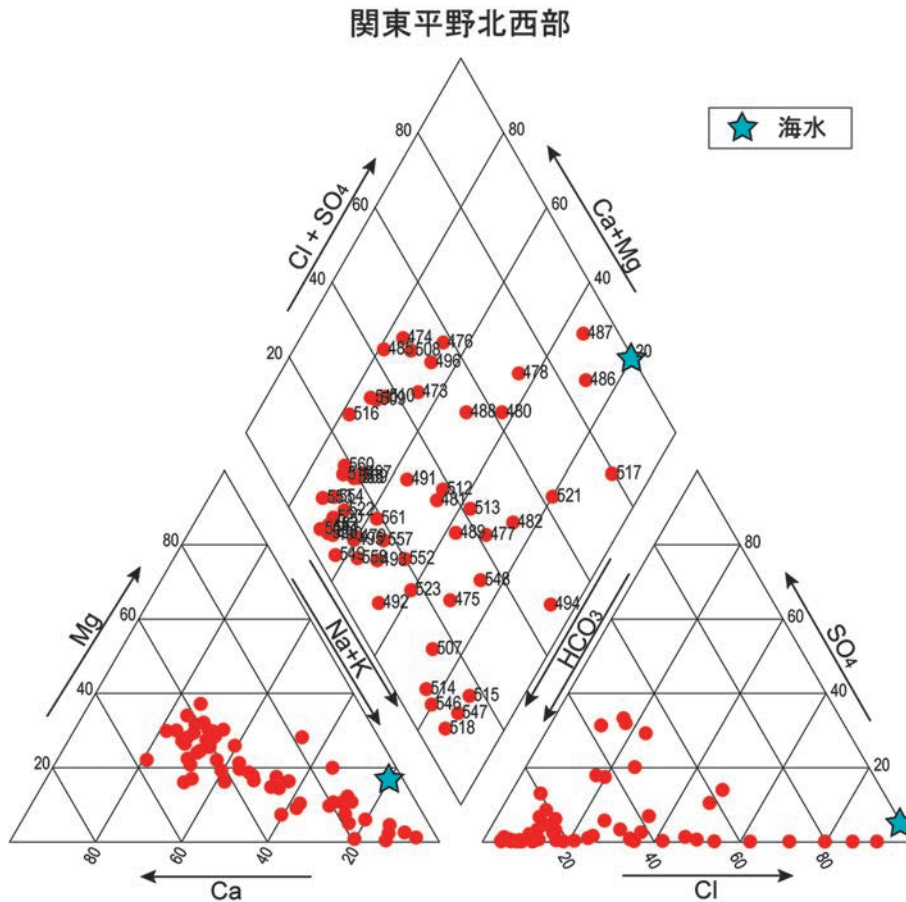
第 4 図 利根川下流地域の地下水の  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  と Cl 濃度の逆数の関係。永続平衡値は埼玉県旧菖蒲町におけるコア（山口ほか，2009）を用いて決定された上総層群上部～中部の値。

Fig.4 Plot of  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  vs. reciprocal Cl concentrations for groundwaters in the lower reaches of Tone River. Equilibrium values of  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  for seawater trapped in aquifers are obtained on the basis of sediment core samples provided by Yamaguchi et al. (2009) from upper and middle parts of the Kazusa Formation in Shobu Town, Saitama Prefecture.



第 5 図 関東平野北西部地域の地下水試料採取地点と水質の Stiff ダイアグラム.

Fig.5 Location of sampled boreholes and Stiff diagram illustrating groundwater chemistry in the northwestern Kanto Plain. Figures in parentheses are borehole depths in meter.



第 6 図 関東平野北西部地域の地下水水質の Piper ダイアグラム. ポイント脇の数字は調査地点番号(第 5 図参照).

Fig.6 Piper diagram illustrating groundwater chemistry in the northwestern Kanto Plain. Numbers beside the points correspond to those in Fig.5.

料の採取を行った。調査地点分布と水質の Stiff ダイアグラムを第 5 図に、また Piper ダイアグラムを第 6 図に示す。すでに池田 (1984) や村下 (1988) によって指摘されている通り、今回の調査でも太田市、邑楽町、明和町、館林市において 100mg/l を超える高い Cl 濃度を有する Na-Cl 型の地下水の存在が確認された。深度 150m より浅いところに高 Cl 濃度地下水が存在する利根川東部下流域と異なり、群馬県南東部では高 Cl 濃度の地下水は深度 200m 以深に分布することが特徴的である。ちなみに、Cl 濃度の最高値は館林市の地点 486 (深度 310m) における 540mg/l であった。一方、栃木県でも 220mg/l という高 Cl 濃度を有する Na-Cl 型の地下水が真岡市の地点 517 (深度 208m) において認められた。 $\delta^{13}\text{C}$  分布をみると、Cl 濃度が高い太田市から館林市付近で -8.5~0.3 ‰ と比較的值が高く、また真岡市付近でも -7.3~2.0 ‰ と高い値を示した。

酸素同位体比と Cl 濃度の関係 (第 3 図) から、地点 474 と 507 を除いて、関東平野北西部地域においては Cl 濃度の増加に伴い酸素同位体比が小さくなる傾向が明らかである。第 3 図と同じ傾向は、利根川を挟んで同地域の南東側に位置する関東平野中央部でも認められる (Yasuhara et al., 1997)。この関東平野中央部の上総層群上部から中部の地下水については、1) 年平均気温が現在より 4~5℃ 低い時代に涵養され (酸素同位体比が軽く)、Cl 濃度が高く滞留時間が長い停滞性の端成分と、2) 酸素同位体比が重く、低 Cl 濃度で滞留時間が短い流動性の端成分の 2 成分混合によって形成されるものと推定されている (安原ほか, 2010)。今回の関東平野北西部地域においても、Cl 濃度が最も高い地点 486 の地下水の  $^{14}\text{C}$  年代値が 19,000 年 (9pMC) と最大であり、続いて地点 487 (Cl 濃度; 488mg/l)、地点 478 (同 177mg/l)、地点 480 (同 112mg/l) と Cl 濃度の低下と共に  $^{14}\text{C}$  年代値も 16,000 年 (13pMC) から 10,000 年 (28pMC) 前後へと次第に若くなる。さらに、Cl 濃度が 33mg/l の地点 494 では  $^{14}\text{C}$  年代値は約 4,000 年 (63pMC) とさらに小さい値を示す。このことから、関東平野中央部と同様に、関東平野北西部地域の地下水についても、Cl 濃度、酸素同位体比さらには滞留時間が異なる上述した 1) と 2) のような 2 端成分の混合による水質形成・進化プロセスが卓越しているものと推定される。なお、関東平野北西部地域の地下水はその Cl 濃度が関東平野中央部の 2 倍以上と高濃

度であるにもかかわらず、 $^{14}\text{C}$  年代値は関東平野中央部の 25,000~30,000 年 (安原ほか, 2010) と比べてかなり小さい。現時点ではその理由は不明である。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比に基づく Cl の起源の解明も含め、来年度以降の課題としたい。また、地点 474 (伊勢崎市; 深度 400m) と地点 507 (高根沢町; 深度 100m) の地下水は、低 Cl 濃度 (前者で 16mg/l; 後者で 4mg/l) にもかかわらず酸素同位体比は -10‰ 以下と極めて軽い特異な値を示す (第 3 図)。前者では利根川からの河川伏没水、また後者では周辺の高標高山地帯を起源とする地下水による涵養の可能性が考えられるが、これらについては水文地質学的な妥当性の検討が今後の課題となる。

#### 4. おわりに

利根川下流域と関東平野北西部地域における予察調査の結果、両地域ともその地下水の地球化学的特性分布には著しい不均質性・地域性が認められた。また、関東平野中央部も含め、これら三地域では高 Cl 濃度地下水の賦存深度がそれぞれ異なることも明らかとなった。地域の水文地質学的構造、特に上総層群や下総層群の堆積環境についての情報を加味しながら、来年度以降も各種水質とマルチアイソトープ手法に基づき、両地域さらには関東平野全域における地下水システムの解明に向けて研究を継続させる予定である。

#### 文献

- 遠藤邦彦・関本勝久・高野 司・鈴木正章・平井幸弘 (1983) 関東平野の《沖積層》。アーバンクボタ, 21, 26-43.
- 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, 14, 36-49.
- 村下敏夫 (1988) 群馬県太田および館林における基盤岩層の水と基底礫層の水の関係。工業用水, 363, 5-8.
- 高瀬一男 (1971) 地下水の地球化学的研究 (第 2 報) - 利根川流域の竜ヶ崎・取手市付近に分布する地下水の化学的性格について -。茨城大学教育学部紀要, 21, 159-171.
- 山口正秋・水野清秀・納谷友規・本郷美佐緒・中里裕臣・中澤 努 (2009) 関東平野中央部, 埼玉県菖蒲町で掘削された 350m ボーリングコア (GS-SB-1) の層相と堆積物物性。地質調査研究報告, 60, 147-197.

Yasuhara M., Inamura A., Takahashi M., Hayashi T., Takahashi H., Makino M., Handa H., and Nakamura T. (2007) Groundwater system compartmentalized by a tectonic zone in the Kanto plain, central Japan. IAH Selected Papers, 10, 281-288.

安原正也・稲村明彦・高橋 浩・森川徳敏・高橋正明・大和田道子・風早康平・宮越昭暢・塚本 斉・戸崎裕貴・Stephen B. Gingerich・林 武司・鈴木秀和・宮下雄次・藪崎志穂・鈴木裕一(2010) 関東平野中央部の被圧地下水—水と塩化物イオンの起源—。日本水文科学会 2010 年度学術大会発表要旨集 25, 56-57.