

# 地下水調査における“マルチトレーサー”の試み

内田 洋平<sup>1)</sup>・林 武司<sup>2)</sup>・宮越 昭暢<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

地下水の循環は、その流域の地形・地質に大きく支配されている。さらに、揚水や土地改変などの人為的な影響も受けており、地下水の流れは非常に複雑である。最近の地下水の研究では一般溶存成分の他に、水を構成する環境同位体をトレーサーとして利用するようになってきた。トレーサーとして利用されているものには、H, D (<sup>2</sup>H), T (<sup>3</sup>H), および<sup>16</sup>O, <sup>18</sup>Oがある。これらのうち、T (トリチウム)は放射性同位体であり、地下水などの年代測定に用いられる。他は安定同位体であり、蒸発や凝縮などの相変化や化学反応によって同位体の分配の仕方に違いを生じるため、天然の水なども様々な同位体比を持つことになる。地下水の安定同位体組成は、その起源、涵養時の蒸発や流動経路などの影響を受けており、それらの影響を個別にうまく分離することができれば、地下水の涵養源・浸透率・蒸発率・流動経路などの水文学的情報を得ることができる(風早, 1997)。また、地下水流動による熱輸送によって地下の温度分布に歪みが生じていることが最近の調査でわかってきた。この温度分布の歪みを利用して地下水流動系を推定する試みも行われている(内田・佐倉, 1999; 宮越・内田, 2001)。従来の地下水流動の研究では、比較的狭い範囲で単体のトレーサーを用いた例が多い。しかしながら、それぞれのトレーサーは地下水流動に関する固有の情報を持っており、従って単体で使用しても広域的な流動システムを再現するには限界がある。広域的な流域規模における地下水流動システムを解明するためには、個々の特性を持つトレーサーを複数組み合わせる“マルチトレーサー手法”を確立し、涵養場所、流動経路、滞留時

間などの情報を精度良く得る必要がある。

筆者らは複数のトレーサーを用いて、関東平野における広域的な地下水流動系の解明を試みている。本稿では、これまでに得られた結果を報告する。

## 2. 研究方法

### 2.1 研究地の概要

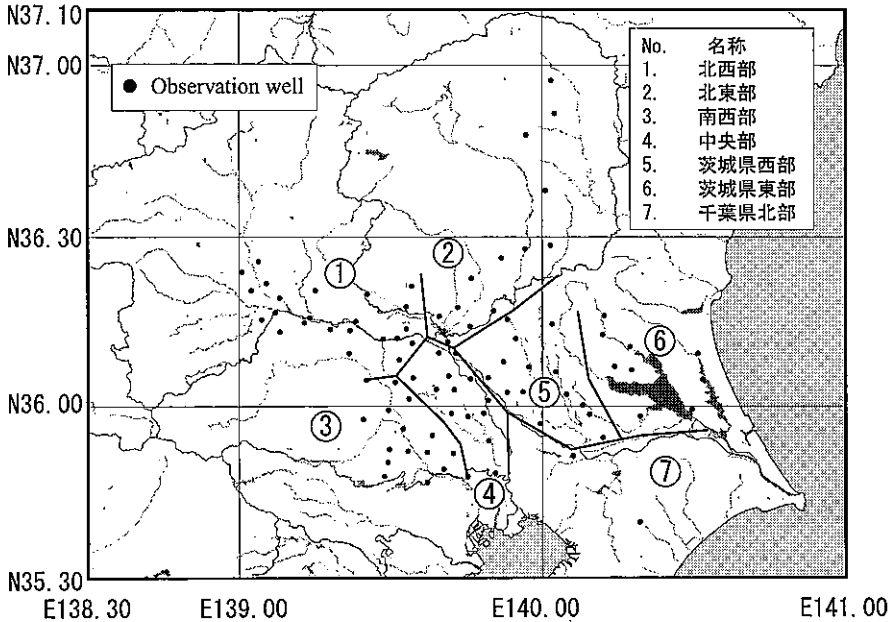
関東平野は日本列島最大の平野であり、周囲を丹沢山地、関東山地、足尾山地、八溝山地に囲まれている。関東平野の地形は、平野周辺部の丘陵、中央部の広い台地、これらを開析した低地にわけられる。丘陵を構成する地層はおもに下部更新統の海成層や湖成層・扇状地礫層などで、高位段丘の扇状地礫層がこれを覆い、丘陵斜面を形成する。台地の大部分は最終間氷期の高海面(下末吉海進)期に形成された海成層や河成の扇状地堆積物からなる中位段丘で、一部には最終間氷期以降の河川の下刻により形成された低位段丘もふくまれる。これらの台地を構成する地層を関東ローム層が覆う。低地は、平野を流れる諸河川の自然堤防や後背湿地を含む氾濫原と、沿岸の海岸平野などからなる。低地を構成する地層は沖積層で、河川の下流域はこの大部分は更新世末期の七号地海進期、および完新世カ有楽町海進期の海成層からなっている。沖積層の基底は起伏のある谷地形をなすことが多く、低位段丘が沖積層下に埋没していることもある。これらの埋没地形は、最終氷期の低海面期に形成されたものと考えられる。

関東周縁部の被圧地下水と密接な関係を持つのは、下総層群相当層であると考えられている(木野, 1970)。鈴木(1996)は、上総層群および下総層群の基底深度を示しているが、これらの境界につ

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

2) 千葉大学大学院

キーワード: 地下水調査, 水質, 環境同位体, 地下温度分布, 関東平野



第1図 関東平野における調査地点。図中の区分は、地下水の水質特性や地形面分布、水理水頭分布などを考慮して決定した(林ほか, 2001)。

いては地質的に類似するため識別が困難であるとしている。上総層群の基底深度分布は下位の三浦層群の基底深度分布とは異なり、東京湾北部や房総北部を中心とする東西に長い盆状の比較的単純な構造を持っており、現在の関東平野の輪郭にほぼ沿う形で形成されている。最深部は東京湾北部沿岸の千葉市付近にあると推定されている。下総層群基底深度は、東京湾沿いの千葉県沿岸部で最も深く深度は400m以上である。堆積盆の形状は、北西-南東に長い楕円状を呈しており、房総側では急激にその深度を減じているが、北東側の深さの変化は緩やかである。下総層群の堆積盆の中心は上総層群に比べてより北側に位置しており、三浦層群以降の堆積中心の北側移動が継続している。また、堆積盆の延長方向も上総層群とは異なっている。下総層群の構成物は上位層ほど粗粒になる傾向を示し、下総層群の上部層では海成から河成あるいは湖沼成の堆積物に移行する。

## 2.2 測定方法

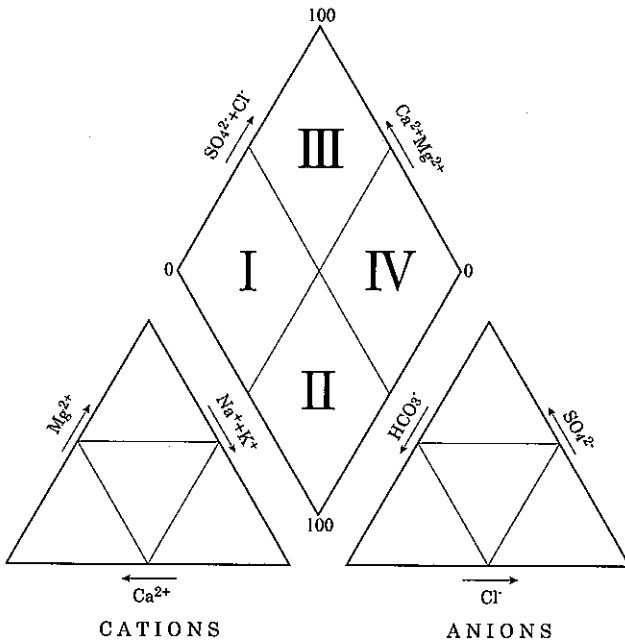
現地調査は1999年10月から2000年11月にかけて実施した。関東平野の群馬県、栃木県、埼玉県、茨城県および千葉県北部内の地下水観測井から、

その分布とスクリーン深度を考慮して88地点を選出した。観測地点によっては深度の異なる複数の観測井が設置されており、各観測井の深度は30mから600mの範囲にある。これらの観測井において、1999年10月から2000年11月にかけて地下水位と地下水温鉛直プロファイルの測定、および水質分析のための採水を行った(第1図)。地下水温鉛直プロファイルは、観測井内においてデジタル・サーミスタ温度計(株式会社テクノ・セブン社製、分解能0.01℃)を使用し、地表面から深度300mまでは2m間隔で、深度300mから深度600mまでは5m間隔で計測した。また、地下水のサンプルに関しては、上記の地下水観測井のほかに水源井においても行い、合計139試料を採水した。採取した試料は、主要溶存成分および酸素・水素安定同位体比を測定した。

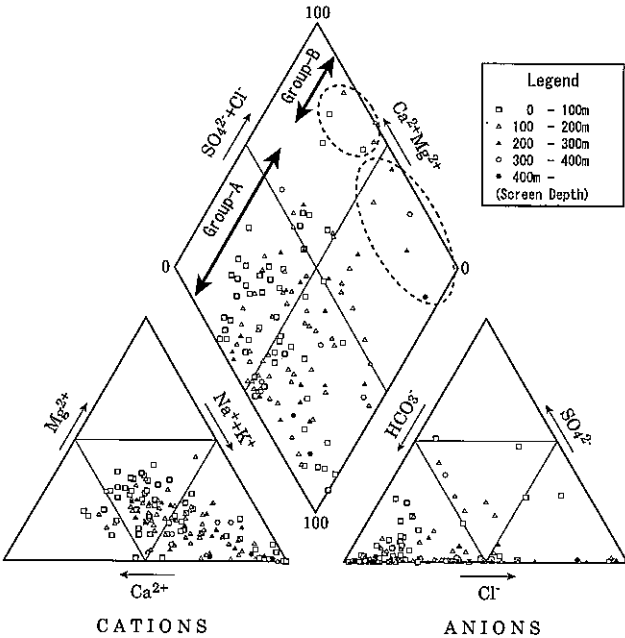
## 3. 観測結果

### 3.1 主要溶存成分

主要溶存成分の表示方法としては、トリリニア・ダイアグラムがよく利用されている。これは、陰・陽イオンをそれぞれ2成分系としてプロットする菱形



第2図 トリリニア・ダイアグラム。



第3図 トリリニア・ダイアグラムで表した主要溶存成分の測定結果 (林ほか, 2001)。

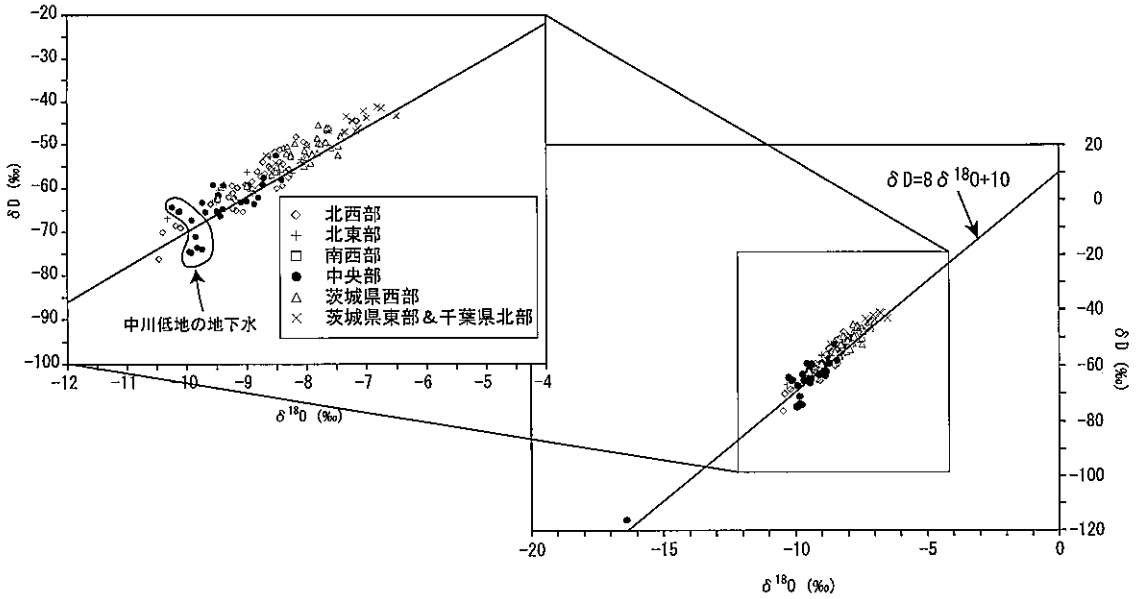
性の被圧地下水、領域ⅢはCaSO<sub>4</sub>、CaCl<sub>2</sub>型、領域ⅣはNa<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaCl型：海水、化石塩水、温泉水などの水質を表す。塩水と無関係の地下水は、滞留時間が長くなるにつれてSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は還元により減少して、それに代わってHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>が増え、塩基置換作用によってCa<sup>2+</sup><Na<sup>+</sup>となる傾向がある。この変化は領域Ⅲ→領域Ⅰ→領域Ⅱの変化に相当する。

第3図に主要溶存成分の測定結果を、トリリニア・ダイアグラムとして示す。本研究で得られた地下水試料は主に重炭酸カルシウム型および重炭酸ナトリウム型を示し(グループA)、一部は非炭酸カルシウム型あるいは海水型を示した(グループB)。グループAに属する試料は天水を起源とする循環性の地下水であり、広範囲・広深度に分布した。また、領域Ⅰに属する地下水は第1図①②③⑤の地域に多く認められ、領域Ⅱに属する地下水は平野中央部④の地域に認められた。これは、地下水の流動に伴って水質がⅠ型からⅡ型へ移行したと推定される。これに対し、グループBに属する地下水は特定の地域・深度のみで見られ、非炭酸カルシウム型は茨城県土浦市および北浦周辺(第1図⑥)に、海水型は平野中央部の地下200m～400m付近に分布している。海水型を示す地下水では、現海水の浸入ではなく、化石海水の影響を受けていると考えられる。ただしこの型の地下水の電気伝導度は約800～1,500μS/cmと海水のそれと比較してはるかに小さく、化石海水の混入率は1～3%程度と見積もられた。

### 3.2 酸素・水素安定同位体比

酸素・水素安定同位体比は、それぞれ-6.4‰～-10.5‰、-41.1‰～-76.2‰と幅広い値を示した。δダイアグラムを第4図に示す。各試料は天水線(δD=8δ<sup>18</sup>O+10)に沿って分布し、d値は4.1から17.7であった。また両同位体比の平面分布には内陸効果に基づく地域性が見られ、平野全体としては、千葉県と茨城県内で重く、群馬県、埼玉県内で軽い傾向を示した。また、平野中央部の中川低地において、その周辺地域よりも軽い同位体比を示す地域が認め

座標図と、3成分系としてプロットする2つの三角座標図からなっている(第2図)。この図の内部を50%の線で区分すると、領域ⅠはCa(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>型：河川水や浅い地下水、領域ⅡはNaHCO<sub>3</sub>型：淡水



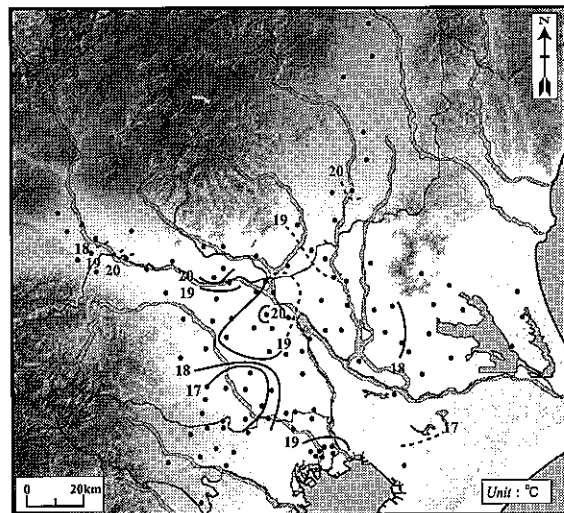
第4図 δダイアグラム(林ほか, 2001に一部加筆).

られた。この低地部の同位体比は平野北西部(第1図①)や北東部(同②)の同位体比とほぼ同じである。

### 3.3 地下温度分布

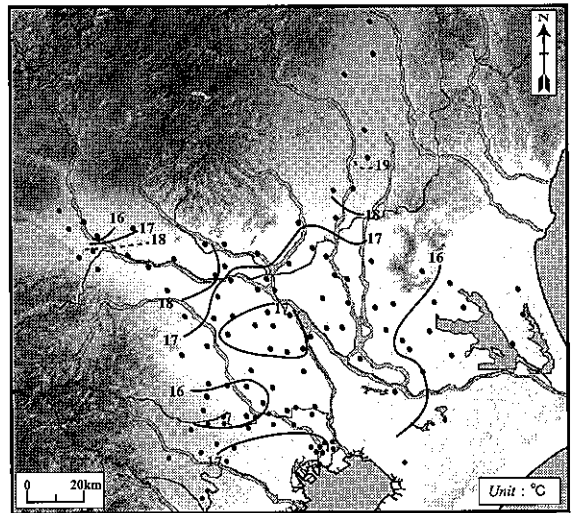
第5a図に標高-50mにおける平面地下温度分布を示す。温度の比較的高い地域は、低地に位置する群馬県利根川沿い(18℃前後)、栃木県鬼怒川沿い(18℃前後)、および平野中央部(17.0～

(a)



17.5℃)である。また、温度の比較的低い地域は、埼玉県丘陵部(15.5～16.4℃)と茨城県台地部(15.1～16.0℃)である。第5b図に標高-150mにおける平面地下温度分布を示す。地下温度の高い地域と低い地域の分布傾向は標高-50mのと類似する。地下温度の比較的高い地域は、群馬県利根川沿い(20.1～22.9℃)、および関東平野中央部(19.2～20.3℃)である。一方、地下温度の低い地域は埼玉県丘陵部(16.1～16.4℃)である。標高

(b)



第5図 平面地下温度分布図(宮越・内田, 2001). (a) 標高-50m, (b) 標高-150m.

-50mと標高-150mの平面地下温度分布を比較すると、高温域・低温域の分布傾向は一致するが、特に標高-150mでは、関東平野中央部の高温域がより広範囲に分布する。また、足利、明和西、栃木、藤岡、太田、および館林では局地的に地温が高くなり、標高-50mで18℃前後、標高-150mで22℃より高い値を示す。

#### 4. 考察

トリリニア・ダイアグラム(第3図)は、平野中央部(第1図④)の地下水が平野周辺のものよりも滞留時間が長いことを示している。これは、平野内の地下水が周辺部から中央部向かって流動しているか、または、中央部の地下水が長期間にわたって停滞しているかである。酸素・水素安定同位体比の分布からは次の2点が考えられる。一つは、関東平野の北西部・北東部で涵養された地下水が深部地下水として流動し、平野中央部付近において上昇してくることである。もう一つは、平野中央部には準化石水帯が存在していることから、地下水涵養源としての降水の同位体比が軽い時代(現在よりも気温の低い時代)に涵養された地下水が化石氷的に存在していることが考えられる。地下の温度分布からは、関東平野周縁部の台地および丘陵地で涵養され、平野中心部に流出する広域的な流動系の存在が推定される。関東平野は周囲を山地と丘陵に囲まれており、地形・地質も盆地構造を呈している。このような地形・地質条件に支配された広域流動系によって、平野の中心部に高温域が形成されたと考えられる。また、局地的に地温が高くなっている地域の水質を見ると、栃木の藤岡では顕著な重碳酸ナトリウム型の水質組成を示し、館林、明和西では顕著なNa-Cl型、そして太田、館林、明和西ではいずれも溶存成分が多い傾向を示していることから、これらの地域の地下水は滞留時間が長く、かつ深部からの上昇流の存在が推察される。

水質、安定同位体比および地下温度分布の3種類のトレーサーを併せて考えると、関東平野の地下水は平野周縁部で涵養された天水が長い時間をか

けて地下深部まで流動し、そして平野中央部付近において上昇してくることが明らかになってくる。

#### 5. まとめ

本研究により、地下水の主要溶存成分、酸素・水素安定同位体組成および地下温度分布は地域ごとに異なる特性を有することが明らかになった。これらの分布特性は、主要溶存成分では地下水の流動過程における地層との化学的な反応を反映し、酸素・水素安定同位体組成は涵養時の状態を反映し、地下温度分布は地下水流動に伴う物理的な熱輸送を反映しているといえる。

今後は、放射性同位体を用いた地下水の年代測定と、地下水流動と物質・熱輸送のシミュレーションを用いることによって、より詳細な地下環境の解析を進めていく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり現地調査において、関東農政局計画部資源課、茨城県企画部水・土地計画課、群馬県環境生活部環境保全課、埼玉県環境生活部大気水質課、栃木県企画部水資源対策室にご協力を賜った。以上の方々に深くお礼申し上げます。

#### 引用文献

- 林 武司・佐倉保夫・丸井敦尚・安原正也・内田洋平(2001)：関東平野における地下水の水質特性。日本水文科学会学術大会発表要旨集, 15, 10-11。  
 風早康平(1997)：地下水の涵養源と流動：同位体水文学的手法。地質ニュース, no.513, 20-25。  
 木野義人(1970)：関東平野中央部における被圧地下水の水理地質学的研究。地質調査所報告, no.238, 39p。  
 宮越昭暢・内田洋平(2001)：関東平野における地下温度分布と地下水流動系。地質調査所月報, 52, 253-290。  
 鈴木宏芳(1996)：江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造。防災科学技術研究所研究報告, 56, 77-123。  
 内田洋平・佐倉保夫(1999)：濃尾平野における地下温度プロファイル。地質調査所月報, 50, 635-659。

UCHIDA Youhei, HAYASHI Takeshi and MIYAKOSHI Akinobu (2002) : Try of "Multi tracer" in Groundwater investigation.

<受付：2002年2月15日>