

新シリーズ「水文環境図」の紹介

内田 洋平¹⁾・林 武司¹⁾・石井 武政¹⁾

1. はじめに

平野部の第四紀堆積層は、わが国では主要な地下水賦存層を構成している。また、平野部は多くの人間の生活・生産活動の中心でもあることから、水資源としての地下水の開発・利用が盛んに行われている。このような開発に伴い、揚水の過剰な地域では地盤沈下が起こり、臨海部では地下水の塩水化が問題となっている。これらの諸問題の発生を予防し、地下水資源を適切に管理・利用していくためには、地下水の賦存形態のみならず流動系を把握することが重要である。

地質調査総合センターの前身である地質調査所では、主に地下水の賦存量を表現した計41地域の「日本水理地質図」シリーズが刊行されてきた。この内容を見直し、地下水を含む水文環境を流動や質に重点を置いて新たに編集・出版することになったのが「水文環境図」シリーズである。

従来の地下水流動に関する研究では、地下水中

の溶存成分、環境同位体、温度などがトレーサーとして用いられてきた。しかし、各トレーサーはそれぞれ異なる特性を有するので、それらのトレーサーを個別に使用するよりも複合的に用いたほうが、より高精度の調査・研究が可能になる。筆者らは、これを「マルチトレーサー」手法と呼び、水文環境図の取りまとめに活かしている。水文環境図はCD-ROMの形式で提供され、地下水位、一般水質、酸素・水素安定同位体比、地下の温度分布などの様々なデータが収録されている。

2. データの収集および分析方法

地下水試料の収集および温度測定については、各地方自治体などが管理する地盤沈下対策用観測井を主に利用した。これらの井戸の多くは、地下水の揚水に伴う水位の低下を計測する目的で設置されたものである。中には、地盤の沈下量も計測できる機能を備えたものもある(写真1)。また、地下水試料については、上記の観測井に加えて、上水道・工業・個人用揚水井、湧水、ならびに河川においても採水を行った。

地下水試料については、深度の異なる帯水層から地下水を採取し、深度の違いに伴う地下水の水質(酸素・水素安定同位体比を含む)変化を把握するよう試みた。1地点に観測深度の異なる井戸が複数設置されている場合には、各井戸より地下水を採取した。各観測井での採水深度はスクリーンの構造や井戸内の状況を基に決定し、地下水試料の採取にはアクリル樹脂製の採水器を用いた(写真2)。採取した試料は現地にて水温、pH、および電気伝導度(以下、EC)を測定した後、ポリビンに

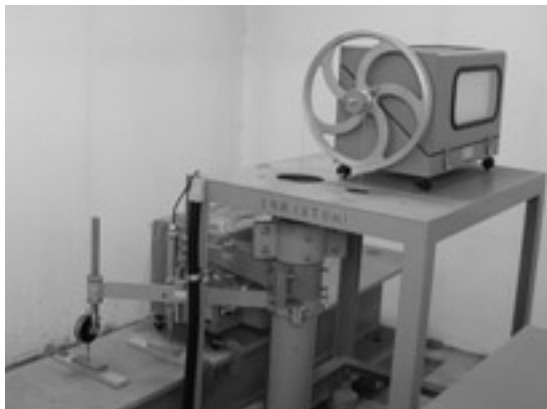


写真1 地盤沈下対策用観測井の一例。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 水文環境図, 地下水流動, トレーサー, 水質, 環境同位体, 地下温度分布



写真2 採水器。アクリル樹脂製の採水器を観測井内に入れようとしているところ。

詰めて実験室に持ち帰り、目的別の分析を実施した。主要溶存成分は、 $0.2\ \mu\text{m}$ のメンブレンフィルタで濾過した後にイオンクロマトグラフ(ダイオネクス社製Dx-320)にて測定した。酸素・水素安定同位体比は、質量分析計にて測定した(三菱マテリアル中央研究所に依頼、マイクロマス社製OPTIMA)。

地下温度の測定については、観測井の構造上測定が不可能であったり、土砂で埋没している観測井などもあり、温度データを得ることができなかった地点もいくつかある。温度測定には、観測井内においてデジタル・サーミスタ温度計(テクノセブン社製、分解能 $0.01\ ^\circ\text{C}$ 、深度600mまで測定可)を使用し、2m毎に地下水温を計測した(写真3)。なお、観測井内の各深度の水温をその深度の地中温度として取り扱うためには、観測井内の水柱の温度安定性、つまり観測井内における対流発生の有無を検討する必要がある。これに関して、Krige (1939)は井戸の口径、水の物理定数等から、理論的に対流が発生する臨界値を求める式を提示している。これに基づくと、半径10cm程度以内の井戸口径においては自由対流があるとしてもその影響は小さいという指摘がなされている(谷口, 1987)。また、大部分の観測井のスクリーンは、1個所(シングルスクリーン)であるため、複数のスクリーンが存



写真3 デジタルサーミスタ温度計。ケーブルは長さ600m、2m間隔にマークが付いている。

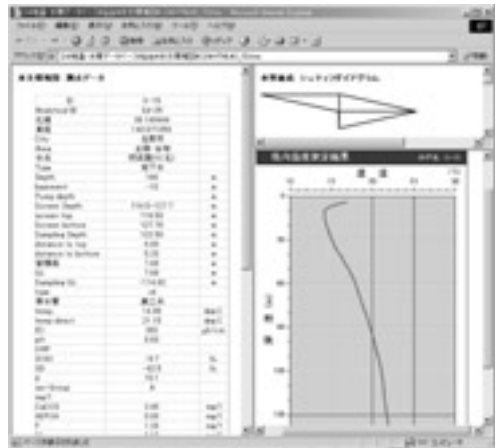
在する場合に発生する可能性がある自然対流も問題とはならない。そこで、本研究においても観測井内の各深度の水温を周辺の地中温度とみなすことにした。

3. 水文環境図「仙台平野」の概要

水文環境図の第1号は、「仙台平野」である。本図には、20万分の1地質図「仙台」(地質調査所, 1987)をベースマップとして、広域の地下水流動系を把握することを目的とした水文に関するデータを収録している。データの収録範囲は、日本水理地質図No.16「仙台湾臨海地域水理地質図」(地質調査所, 1962)と比較すると、より広範囲になっている。これは、地下水の入り口である“涵養域”から出口である“流出域”までのデータを編集したためである。現地調査は、県および市町村が管理する地盤沈下対策用観測井(18地点)、上水道・工業・個人用揚水井(31地点)、湧水(8地点)、ならびに河川(6地点)の合計63地点を対象とし、2000年から2003年にかけて実施された。1地点に観測深度の異なる井戸が複数設置されている場合には、各井戸より地下水を採取し、計78の水試料を得た。また、地下水と雨水の同位体比との関係を調べるため、2003年5月から7月にかけて降雨採水器を3地点に設置した。巻末には参考データとして、仙台平野周辺の名水と温泉に関する資料も紹介している。



第1図 水文環境図のメイン画面.

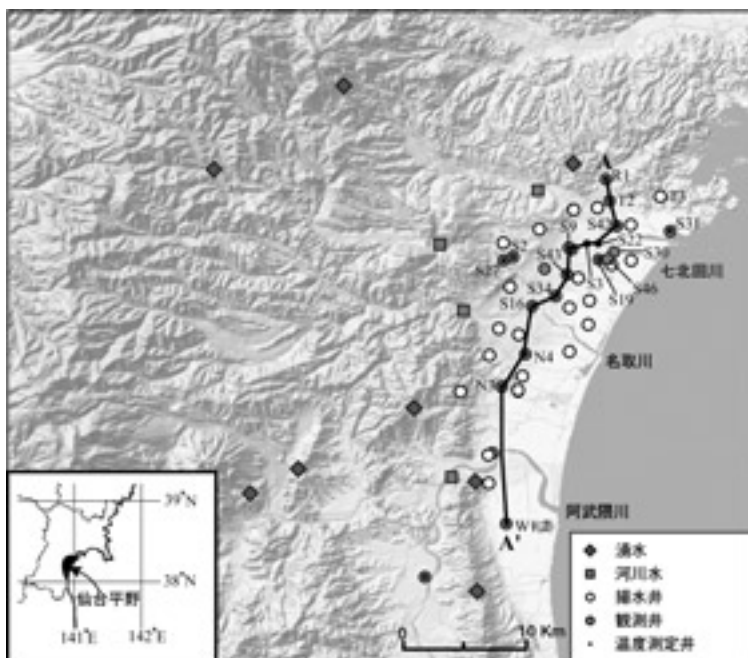


第2図 測点データの表示例.

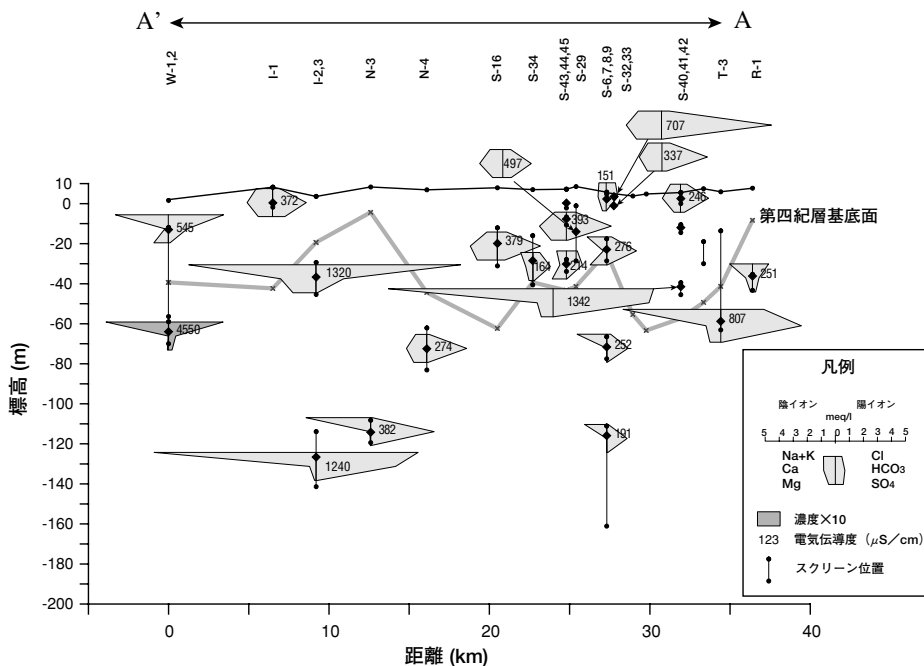
第1図に表示例を示す. メイン画面は2フレームの構成となっており, 左フレームで地図の縮尺, 観測点, 表示するデータなどを選択する. 右フレームには, 地質図上に観測点がプロットされており, 各観測点をクリックすると第2図のように測点データが表示される. また, 説明書には付図が掲載されており, 地質図上では表現できない水文データについて解説している.

4. 仙台平野の水文環境

第3図に, 仙台平野の調査地域を表す. 本図の仙台平野は, 宮城県南東部, 阿武隈川下流から名取川および七北田川下流にかけて展開する海岸平野である. 平野は南北に細長く分布しており, 海岸線から後背山地・丘陵地までの距離が約10kmであるのに対して, 海岸線長は約40kmである. 本地



第3図 仙台平野の調査地域.



第4図 A-A'断面におけるstiffダイアグラム。

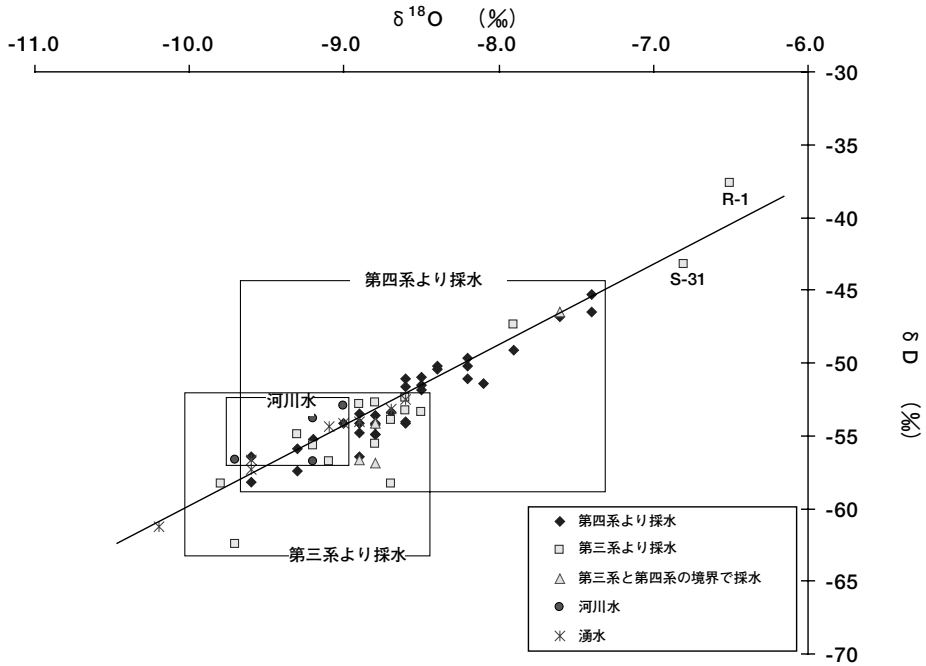
域は東北日本の太平洋沿岸域にあっては比較的広大な平野面積を有しており、仙台港を中心とする港湾施設の建設とともに、産業・工業都市として開発が進められてきた。しかし、開発に伴う大量の地下水揚水は、内陸部では地盤沈下を、臨海部では地下水の塩水化をもたらした。現在では揚水は規制されており、地盤沈下は沈静化しつつある。地下水は、第四紀層のほか第三紀層からも採取されている。

水質分析結果をstiffダイアグラムで表示し、平野を縦断するA-A'断面でのstiffダイアグラムを表したものが第4図である。地表水および地下水試料の多くは、重炭酸カルシウム型の水質組成を呈している。一方、地下水試料の一部は海水型、重炭酸ナトリウム型および両者の中間型の水質組成を呈した。重炭酸カルシウム型の水質組成を呈する試料は、主に地表水および地下浅部の第四紀堆積層中より採取されたものである。平野内各地の深度10m以浅より採取された試料は、いずれも重炭酸カルシウム型の水質組成を呈した。また仙台市内では、深度10～50mより採取された試料も主にこの型に属した。一方、重炭酸ナトリウム型の水質組成を呈する試料は、1サンプルを除いて第三紀

層中より採取されたものである。

水を構成する環境同位体でトレーサーとして利用されているものには、H, D (²H), T (³H), および¹⁶O, ¹⁸O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。近年、地下水流動解析でトレーサーとして利用されている安定同位体には、H, D (²H), および¹⁶O, ¹⁸Oがある。通常、HとDの比率をδD, ¹⁶Oと¹⁸Oの比率をδ¹⁸Oと表している(単位は‰)。地下水の安定同位体比は、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)。

仙台平野におけるδ¹⁸OとδDの関係を第5図に示す。仙台平野で採取された地下水および地表水の同位体比は、直線上の集合帯を成しており、湧水と地下水の同位体比分布が河川水の同位体比分布とほぼ同じ直線上に乗ることから、仙台平野



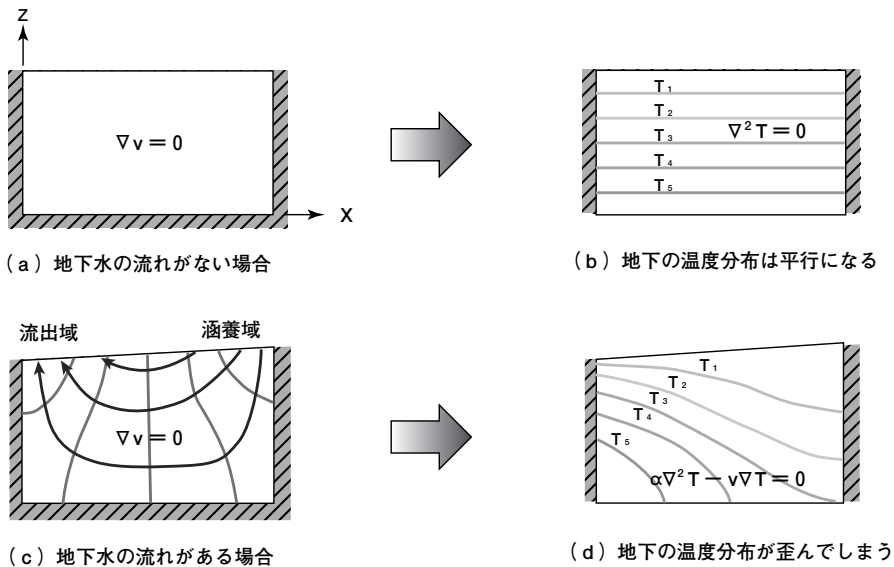
第5図 $\delta^{18}\text{O}$ と δD の関係.

内の湧水と地下水は天水起源であることが分かる。また、同位体比をカテゴリー別に見ると、その同位体比の分布域は、

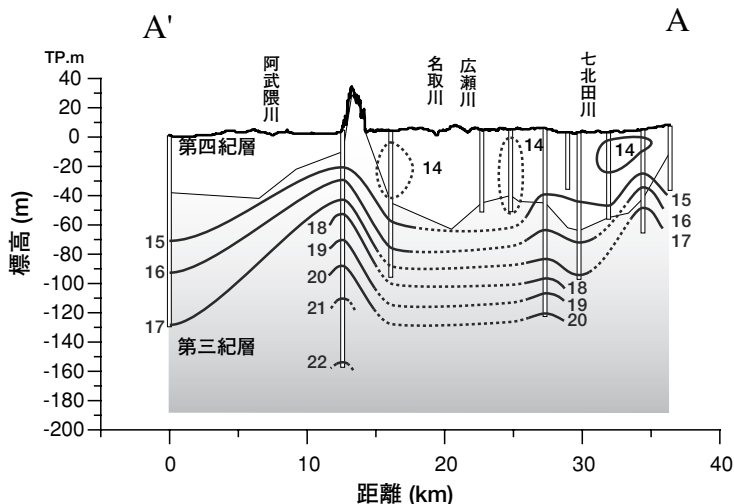
第三系地下水・湧水 < 河川水 < 第四系地下水

となる。このように採水された地下水は、深度に対して分類が可能であり、第三系内の地下水は第四系内の地下水よりも同位体比が低く、涵養域の標高が高いことを示唆している。

地下温度分布の形成要因は、熱の伝導だけでは



第6図 地下水流動系と地下温度構造の関係。vは地下水の速度，Tは温度， α は熱伝導率。原図はDomenico and Palciauskas (1973)。



第7図 A-A'断面における地下温度分布.

なく、地下水の流動に伴う熱の移流が大きな役割を持っている。地下水の流れが存在しない静水圧状態の温度分布は、熱伝導のみに支配され一様な温度勾配をもつ。地下水流動が生ずる場合の温度分布は、地下水の涵養域と流出域で地下温度分布に熱伝導のみで形成された温度からのずれが生じる。地下水の循環速度が速くなるほどその差異が大きくなり、地下水の流れがないときの温度勾配一定に対して、地下水涵養域では下に凸、流出域では上に凸の温度分布が現れ、同一深度の地下温度は涵養域でより低温、流出域でより高温となる(第6図)。一般に堆積盆地や堆積平野の地下温度分布は地下水の流動の影響を受けており、地下水の涵養域と流出域とでは温度に違いが認められる。しかしながら、仙台平野における平面地下温度分布には明瞭な温度差を確認できなかった。仙台平野の地下の温度は地域的に多少の違いはあるが、標高-50mではおおよそ14℃から16℃であった。そこで、A-A'断面における地下温度分布を第7図に示す。第四系内の地下温度は約14℃で、温度勾配が非常に小さいことが特徴である。一方、第三系内では温度勾配にしたがって深度と共に地下温度が上昇する。

5. 将来方向

水文環境図は、従来の水理地質図が持っていた“量”の視点から“質”と“流動系”の視点へと主眼を

変えた。これは、地下水を資源としてのみ捉えるのではなく、環境を構成する重要な要素と位置づけており、一つの流域における水文環境の全体像を呈示することを目的としているからである。このような観点から、仙台平野に引き続いて、秋田平野、関東平野、濃尾平野の各水文環境図を2005年2月に出版した。今後は、調査地域を増やし、国内各地域の水文環境図を更に出版していく予定である。

参考文献

地質調査所(1962): 仙台湾臨海地域水理地質図. 地質調査所.
 地質調査所(1987): 20万分の1地質図「仙台」. 地質調査所.
 Domenico, P. A. and Palciauskas, V. V. (1973): Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. Geol. Soc. Amer. Bull., 84: 3803-3814.
 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, 513, 20-25.
 Krige, L. J. (1939): Borehole temperature in the Transvaal and Orange Free State. Proc. Roy. Soc. Amer., 173, 450-474.
 谷口真人(1987): 長岡平野における地下水温の形成機構. 地理学評論, 60, 725-738.

UCHIDA Youhei, HAYASHI Takeshi and ISHII Takemasa (2005): Introduction of the water environment map.

<受付: 2005年1月12日>