



地下水の水質や特徴を調べる際に、ヘキサダイアグラムという言葉をよく目にしますが、どのようなものですか？



地下水は、水の特徴の一つである溶解性により流動に伴い様々な物質が溶けこみ、水循環系の特徴を反映した水質を示します。

ヘキサダイアグラムとは、主要な溶存成分を陽イオンと陰イオンに分けた六角形で表示する方法で、水質の特徴を形で表現し、視覚的に水質組成を評価できます。さらに水質組成をひし形・三角ダイアグラムで表示したトリリニアダイアグラムを併用することで、より明確な特徴を知ることができます。

1. 地下水の主要な水質成分について

地下水の化学成分のうち、1~40 mg/L の含有量をもつ成分を主要成分、同 1 mg/L 未満を微量成分と便宜上、区分しています¹⁾。また、主要成分には陽イオン 4 項目 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) と陰イオン 3 項目 (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-})、非電解質の SiO_2 があり、これらに農耕地の浅層地下水で濃度が高くなる陰イオンの NO_3^- を加えた 9 項目が地下水の主要成分分析としてよく実施されます (表-1)。

地下水の溶存成分の検討にあたっては反応物のあいだの量的関係を示すため、モル当量単位* (meq/L) を使用します。モル等量単位の溶存成分の総量は電気伝導度と比例関係がありますので、現地で電気伝導度を測定することで、地下水の溶存成分の総量を概略的に把握することができます (電気伝導度については「環-4 水の電気伝導度を測る意義」をご参考ください)。また、pH が中性付近の通常の地下水は、モル等量単位の陰イオンと陽イオンの合計が概ね一致します。

表-1 地下水の化学成分：() 内は等量¹⁾

| |
|--|
| 主要成分 |
| 陽イオン Na^+ (23.00)、 K^+ (39.10)、 Ca^{2+} (20.04)、 Mg^{2+} (12.16) |
| 陰イオン HCO_3^- (61.01)、 Cl^- (35.45)、 SO_4^{2-} (48.03) (SiO_2) * |
| 微量成分および非解離成分 |
| CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 F^- 、 NH_4^+ 、 $\text{Fe}(\text{Fe}^{2+})$ 、 $\text{Mn}(\text{Mn}^{2+})$ 、Al、有機物 |
| 溶存ガス |
| N_2 、 O_2 、Ar、 CO_2 、 CH_4 、 H_2S |

* 中性付近ではほとんど非解離の状態で存在する。

*モル等量単位

モル等量単位は単位容積中の原子数をモル数で表したものです。

原子量 1 の物質の 1g の原子数は 6.02×10^{23} 個 (アボガドロ数) であり、それを 1 モル等量 (1eq) といいます。例えば Na^+ は原子量 23 で、1eq は 23g です。水 1L に Na^+ が重量単位で 4.42 mg/L 溶存する場合、モル等量単位に換算するには、23 で除して 0.19 meq/L となります (m は 1/1,000 の接頭辞)。

2. ヘキサダイアグラムの作成方法と留意点²⁾

表-2にヘキサダイアグラムおよび後述のトリリニアダイアグラムの図化に必要な値の計算例を示します。

ヘキサダイアグラムは、横方向のモル等量軸をもとに、左側に陽イオン、右側に陰イオンのモル等量を示した六角形として図化します。このとき、陽イオンの Na^+ と K^+ は合計し、陰イオンの微量成分 NO_3^- は SO_4^{2-} に黒塗りで加えます。また、非電解質のシリカは重量単位の軸で表記します。

なお、濃度のスケールや項目の配置等は文献により異なるので、読み取りには注意が必要で、作成の際には必ず凡例を明示しましょう。

表-2 地下水主要成分図化の計算例

| 区分 | 溶存成分 | モル等量 A | 溶存量分析値 重量単位 mg/L B | ヘキサダイアグラム | | トリリニアダイアグラム | | | | | | | |
|------|----------------------------|-----------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|------|----|------|----|
| | | | | 等量単位 meq/L C(=B/A) | 等量単位計 meq/L D | キアダイアグラム | | 陽・陰イオン内訳 | | | | | |
| | | | | | | 等量単位 meq/L E(Cを集計) | 割合 % F(=E/D*100) | 等量単位 meq/L G(Cを集計) | 割合 % H(=G/D*100) | | | | |
| 陽イオン | ナトリウムイオン Na^+ | 23.00 | 4.37 | 0.19 | 1.97 | 0.25 | 13 | 0.25 | 13 | | | | |
| | カリウムイオン K^+ | 39.10 | 2.35 | 0.06 | | | | | | | | | |
| | カルシウムイオン Ca^{2+} | 20.04 | 25.45 | 1.27 | 1.72 | 87 | 1.27 | 64 | | | | | |
| | マグネシウムイオン Mg^{2+} | 12.16 | 5.47 | 0.45 | | | | | | | | | |
| 陰イオン | 塩化物イオン Cl^- | 36.46 | 4.38 | 0.12 | 1.84 | 0.46 | 25 | 0.12 | 7 | | | | |
| | 硫酸イオン SO_4^{2-} | 48.03 | 16.33 | 0.34 | | | | | | | | | |
| | 重炭酸イオン HCO_3^- | 61.02 | 84.21 | 1.38 | | | | | | 1.38 | 75 | 1.38 | 75 |
| | 硝酸イオン NO_3^- | 62.01 | 7.44 | 0.12 | | | | | | | | | |
| 非電解質 | シリカ SiO_2 | - | 10.90 | - | - | - | - | - | - | | | | |

図に表現される値：

ヘキサダイアグラム

トリリニアダイアグラム

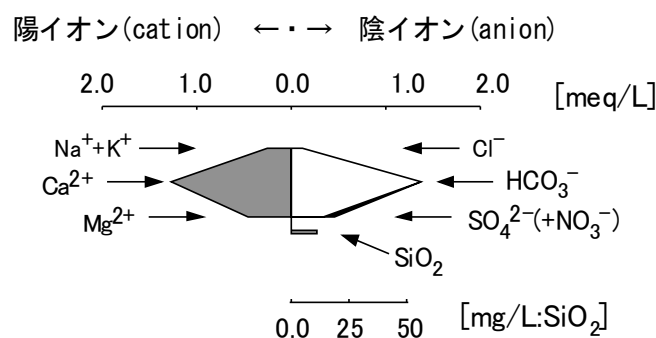


図-1 ヘキサダイアグラムの図化例

3. トリリニアダイアグラムとヘキサダイアグラムの関係¹⁾²⁾

トリリニアダイアグラムは、ひし形のキーダイアグラムと陽イオン・陰イオンの内訳を示す三角形の軸にプロットします(図-2)。キーダイアグラムでは、地下水を領域Ⅰ～Ⅴに概略的に分類できます。

例えば、陽イオンの中で Ca^{2+} と Mg^{2+} 、陰イオンの中で HCO_3^- の割合が多い場合、キーダイアグラムの左側にプロットされ領域Ⅰに分類されます。また、領域Ⅰで Ca^{2+} の割合が大きくなると、ヘキサダイアグラムの中段が大きくなる亀の甲型になるなど、キーダイアグラムの位置とヘキサダイアグラムの形状パターンは対応関係があり、水質特性を定量的に評価できます。

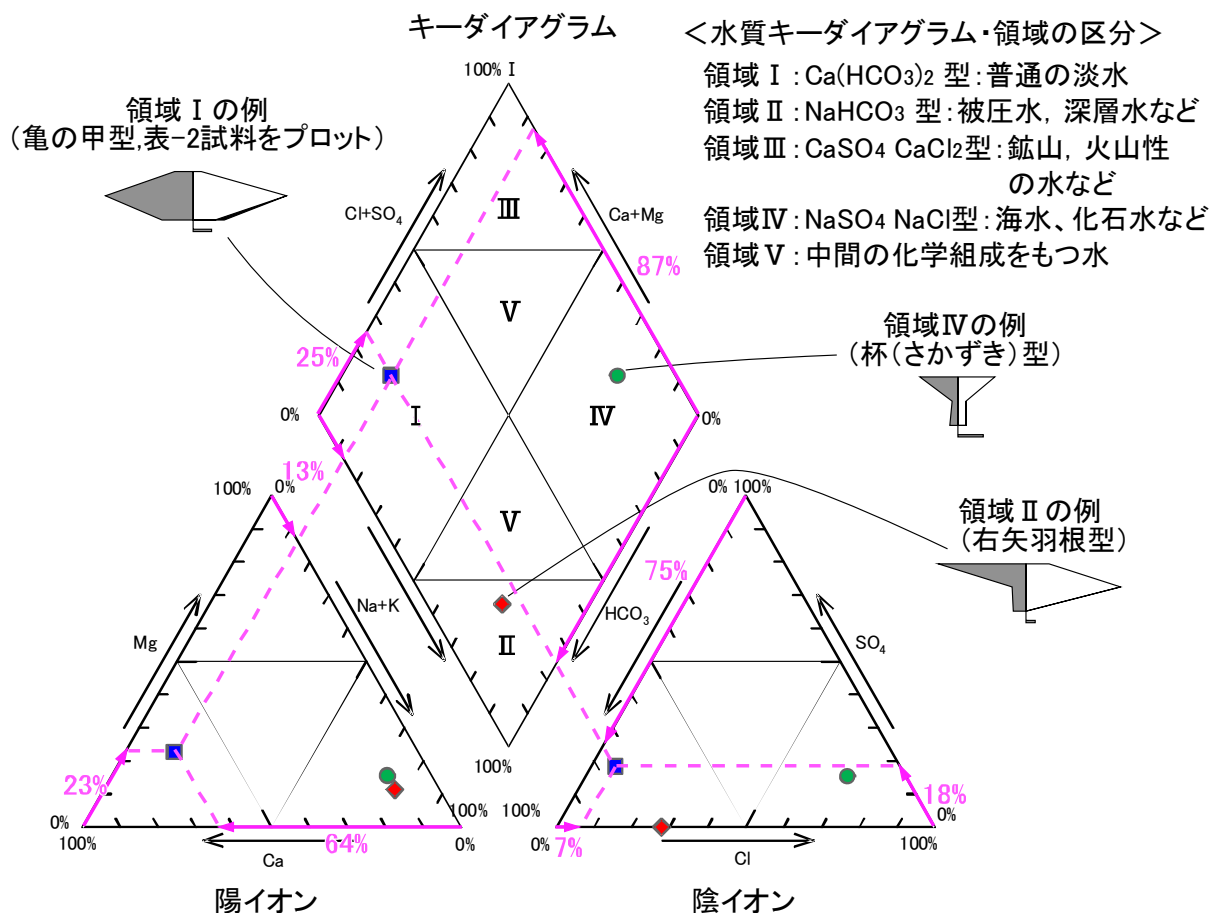


図-2 トリリニアダイアグラムの図化例とヘキサダイアグラムとの対比

キーダイアグラムの領域Ⅰは、雨水に炭酸塩鉱物・苦灰石等が溶解して Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- の濃度が高い領域で、河川水・伏流水・浅層地下水などが考えられます。領域Ⅱは塩水化と関係がない深層地下水がプロットされることが多く、領域Ⅰなどの水が陽イオン交換反応(Na^+ の増加)と硫酸還元(SO_4^{2-} の減少)の両反応の進行によって変化したものと考えられます。また、領域Ⅳは海水、塩水化や風送塩の影響を受けた地下水と温泉の一部が多く、領域Ⅲは通常の地下水ではまれです。領域Ⅴは、中間的な水質組成をもつ水で領域Ⅰに準じ浅層地下水等が考えられます。

地下水への鉱物の溶解、陽イオンの交換反応、鉄の酸化・還元反応、アンモニウム(肥料)の硝化反応などの化学反応については、引用文献1)をご参考ください。

4. 水質分析による堤防湧水の評価事例

図-3 の調査地では大雨の際に右岸堤防法尻から湧水（湧水 1, 2, 3）が生じており、当初は河川水が漏水したのと考えていました。しかし、ヘキサダイアグラムを用いると、河川水は平水・大雨時とも SO_4^{2-} 濃度が高い特徴がある一方で、湧水や観測孔の地下水は Ca^{2+} 、 HCO_3^- が多く、河川水とは水質の特徴が異なります。また、水位観測結果より、観測孔の地下水位が河川水位の変化に連動しないことから、湧水は河川水の漏水ではなく浅層地下水の流出である可能性が高いと考えられます。

なお、ヘキサダイアグラム（水質分析）の活用にあたっては、水位や地形、帯水層の特性等を総合的に評価することが重要で、水文地質的解釈が必要です。

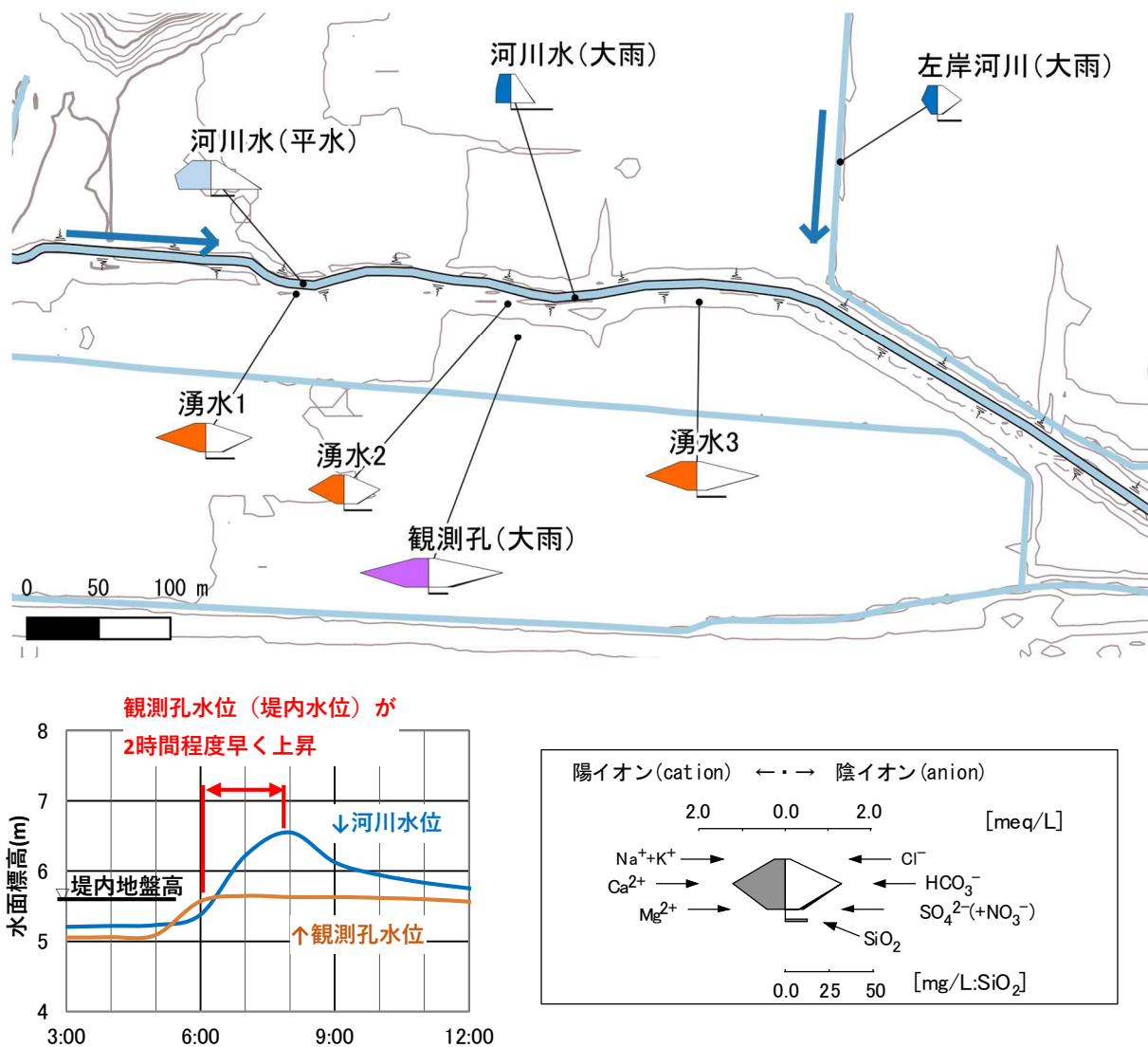


図-3 河川水と堤内地下水のヘキサダイアグラム・大雨時の水位変動

【引用文献】

- 1) 改定地下水ハンドブック(1998), (株)建設産業調査会, pp. 131-146, 368-382.
- 2) 地盤調査の方法と解説(2013), (公社)地盤工学会, pp. 639-642.

(回答者: 大矢基弘)