地下水の地球化学調査に関わるデータ品質評価手法の提案*

水野 崇**・Richard METCALFE ***・岩月輝希**・彌榮英樹****

Proposal for quality assessment method of groundwater chemistry for hydrochemical investigation *

Takashi MIZUNO **, Richard METCALFE ***,
Teruki IWATSUKI ** and Hideki MIE ****

Abstract

Hydrochemical studies are generally conducted based on chemical data of groundwater samples. Various methodologies exist for obtaining samples and for assessing the quality of the collected sample. This study is aimed at establishing a methodology for quality assessment of chemical data obtained from groundwater samples using a method known as Evidence Support Logic. In this study, pH data of groundwater obtained from several boreholes were assessed using this method. The results showed that 23 out of 63 samples satisfied the applied quality criteria. When plotted, the data from the 23 samples show a constant value from top to bottom of investigation area when compared to a plot using data from all samples. These results indicate that the quality assessment method demonstrated by this study is applicable to groundwater studies and that by considering the sample quality it will be possible to develop a clearer interpretation of the deep underground geochemical environment.

Key Words: groundwater, hydrochemical study, quality assessment, Evidence Support Logic

要 旨

本稿では、地下水データの品質を定量的に評価するための品質評価手法を確立することを目的とし、Evidence Support Logic に基づいた品質評価手法を提案した。当該手法を用いてボーリング孔から取得した pH データの品質評価を行った結果、全データを深度に対してプロットした場合には、pH が 8～11 の広い範囲で分布したのに対し、一定の品質を満たしたデータでは 8～9 のより狭い範囲に分布した。このことから、一定の品質を示したデータは、より正確に各深度の pH を表していると考えられ、本稿で提案した品質評価手法の有効性を示すことができた。

キーワード：地下水、地球化学研究、品質評価、Evidence Support Logic

* 本論文は2006年地球惑星科学関連学会合同大会（2006年5月）にて発表

** 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門（ ）

Japan Atomic Energy Agency, Geological Isolation Research and Development Directorate

*** 株式会社 クインテッサジャパン

Quintessa Japan Ltd.

**** 東電設計株式会社

Tokyo Electrical Power Services Co., Ltd.

1. はじめに

近年、水資源開発や放射性廃棄物の地層処分研究といった分野において、地下深部の地下水の地球化学的研究が活発になりつつある（例えば、地下水水質の基礎、2000；小宮ほか、2003；Gascoyne, 2004）。これらの調査研究では、様々な調査研究機関の研究者が井戸や湧水、ボーリング孔などから異なった方法で地下水試料を採取している。また、調査技術の進歩によって、過去に得られたデータと新規に得られたデータにおける調査方法の違いが、得られたデータの信頼度（品質）に直接反映されることになる。その結果、個々の研究者がこのような品質の異なるデータに基づいて解析を行うこととなり、異なった解釈や結論に至る危険性を生じさせることになる。これらの地下水データを用いた研究の信頼性を高めるためには、品質の違いを踏まえて解析を行う必要があり、取得したデータの品質の違いが解析結果やその再現性に与える影響を明確にするためには、追跡性を確保することが不可欠である。各研究機関による深部地下水の地球化学的研究は発展期にあり、この段階で様々な研究分野、機関の研究者が共有できるデータの品質評価手法を構築しておくことで、今後の調査研究の品質を共通化し、客観的に深部地下水の地球化学特性を評価することが可能になると考えられる。本稿では、地球化学データの品質評価手法を提案するとともに、これまでに著者らが岐阜県東濃地域において様々な条件下で取得した地球化学データを対象とした品質評価と、その評価手法の実用性について述べる。

2. 品質評価手法の提案

様々な条件下で得られた地下水試料の品質を評価し、比較した例として、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）がスウェーデンとフィンランドの地下水を対象として行った品質評価例がある（Laaksoharju et al., 1993）。SKBの例では、水質の品質評価に係わる項目を定量的に判断できる項目と専門家の判断に依存する項目に区分し、それぞれの結果から地下水試料の品質を客観的に表現する手法を用いている。ただし、この手法で

は地下水試料そのものの品質に焦点が当てられており、そこから得られた化学成分濃度等の各データについての品質を評価することはできない。実際には、品質が低いと判断された地下水試料においても、そこから得られる幾つかのデータ項目においては十分な品質を保っている可能性がある。例えば、地下水採取時に嫌気条件を保てなかった場合、酸化還元状態やpHは変化すると考えられるが、主要化学成分の変化は少なく、有効なデータとして使用することができる可能性が高い。したがって、この方法では、特定のデータの品質を否定することで、使用可能なデータが抹消されるといった欠点もある。地下水試料そのものの品質評価は重要であるが、その試料から得られた各データがどのような品質にあるかを詳細に知ることができれば、研究テーマによっては、より多くのデータに基づいて高い精度で解析が可能になると考えられる。本研究では、複数の根拠から設定した仮説の真偽を定量的に評価する Evidence Support Logic (ESL) (Cui and Blockley, 1990; Foley et al., 1997; Hall et al., 1998; Blockley and Godfrey, 2000; Davis and Hall, 2003) に基づいた品質評価手法の構築を試みた。

2.1 ESLに基づく品質評価手法

ESLの基本的な考え方は論理演算に類似しているが、論理演算中で用いられる真偽の他に、「不確実性」を加えた3つの要素が用いられる。ESLにおける不確実性とは、評価する命題が真とも偽とも判断できない確率を示す。この不確実性を評価結果に導入することが従来の評価手法とは大きく異なる点であり、ESLが有効と考えられる点である。実際の地下水データの品質を評価する際には多くの考えられる指標（品質評価指標；掘削水による汚染率、脱ガスの有無、物理化学パラメータの測定方法など）が存在する。しかし、一般的な調査の過程において、それら全ての品質評価指標に関する情報を取得するのは困難である。品質評価を行う際に、品質評価のための情報が無い場合、そのデータの品質は低いのではなく、不明と判断されることが必要である。このような評価手法を採用することにより、データの品質に含まれる不確実性の原因を抽出し、データの不確実性を

低減させることができる可能性がある。そのため、本研究では、従来行われているようなスコアリング方式や、画一的な基準を設ける品質評価手法ではなく、ESLを用いた品質評価手法を試みた。

ESLによる品質評価を行うための最初のステップは、設定した仮説を証明するための根拠を抽出し、関連項目によって分類し、階層構造（プロセスモデル）を構築することである。プロセスモデルを構築する各プロセスは、それぞれの品質評価指標およびそこから計算された結果としての真偽および不確実性の割合を示す。各プロセスにおいては、これら3つの要素の確率が示され、3つの要素の和は1（=100%）となり、真および偽は0から1の間の値を示す。不確実性は1から真と偽の和を引いた数値となる。実際の各プロセスはFig. 1の様に示され、この場合にはそのプロセスに設定した仮説において、真の確率が22%、偽の確率が34%、不確実性が44%であることを示している。Fig. 2にプロセスモデルの例を示す。Fig. 2のプロセスモデルでは、仮説となるプロセスPの真偽および不確実性を、プロセスI1とI2の異なる2つの項目から計算している。このI1とI2は、それぞれに関連するE1およびE2、E3およびE4のそれぞれ2つの根拠に基づき計算される。

Fig. 3の例では、2つの根拠から仮説を検討した場合を示している。結果における真偽および不確実性の確率は、品質評価指標1と品質評価指標2に示されたそれぞれの確率から計算されており、下位のプロセスである品質評価指標1と品質評価指標2では、定性的な情報や数値データ等により、真偽および不確実性のそれぞれの値を決定する。

ESLではプロセス間の計算を行うために、プロセスに示された真偽および不確実性以外に2つの係数を用いている。それらは依存度と充足度と呼

図1 ESL理論におけるプロセス中の真偽および不確実性の確率の表示方法

Fig. 1 Format to indicate the ratio of "Evidence For", "Evidence Against" and "Uncertainty" in ESL logic.

ばれる (Fig. 3)。依存度は上位のプロセスが複数の下位のプロセスにより算出される場合に、下位のプロセスが示す真偽および不確実性が重複している割合を示しており、計算過程におけるダブルカウントの影響を排除する目的で用いられる。依存度は0から1の間で表され、0の場合は独立、1の場合は完全に重複していることを示す。他方、充足度は根拠となる下位のプロセスの重要度

図2 模式的なプロセスモデル

Fig. 2 Schematic diagram of process model

図3 プロセス間の計算に用いられるパラメータ

Fig. 3 Parameters to calculate upper process

を示しており、0から1の間もしくはALLおよびANYで表される。ALLの場合には下位のプロセスの中の最も小さい値が上位のプロセスの値となり、反対にANYの場合には最も大きな値が採用される (Fig. 4)。Fig. 4において、左側の場合には真の充足度にALLが指定されており、値の小さい品質評価指標2の値が結果に採用される。右側の場合には、真の充足度にANYが指定されていることから、より大きな値である品質評価指標1の値が結果に採用される。これらの場合の偽の値については、それぞれに設定された充足度(0.5)に基づき計算する。プロセス間の計算は、それぞれの係数を用いて以下のように行う。

$$p_0 = w_1 p_1 + w_2 p_2 - \rho_{12} \text{Min}(w_1 p_1, w_2 p_2) \quad (1)$$

$$q_0 = w_1 q_1 + w_2 q_2 - \rho_{12} \text{Min}(w_1 q_1, w_2 q_2) \quad (2)$$

ここで、 p_0 および q_0 は上位プロセスの真および偽、 p_1 、 q_1 および p_2 、 q_2 はそれぞれ下位プロセスの真および偽である。また、 w_1 および w_2 は下位プロセスにおけるそれぞれの充足度である。 $\text{Min}(X, Y)$ では、XおよびYの中で最小値が選択される。依存度を結果へ反映させるための係数である ρ_{12} は、プロセス間の依存度である D_{12} を用いて以下のように求められる。

$$\rho_{12} = \frac{(1 - D_{12})(w_1 p_1 w_2 p_2)}{\text{Min}(w_1 p_1, w_2 p_2)} + D_{12} \quad (3)$$

また、これら以外にNecessityと呼ばれる計算方法を指定することができる。Necessityでは、

真または偽のいずれかにしきい値を設定し、その値を超えた下位のプロセスの値を強制的に上位へ反映させる。具体的な計算方法を Fig. 5に示す。Fig. 5では「偽>0.5」というしきい値を設定した場合を示しており、品質評価指標2がそれに該当するため、結果には品質評価指標2の値が採用される。

2.2 プロセスモデルの構築

プロセスモデルは品質評価過程を明示するだけでなく、品質に係わる要因を網羅的に抽出することで、品質が低い場合にはその原因を特定し、次の調査に反映させるためにも重要である。本研究では以下の手順でプロセスモデルを構築し、品質評価を行った。

- ①元素の溶解、化学形態、吸着/収着に影響を与える地球化学データの把握
- ②地下水に汚染と化学的擾乱を起こす要因の抽出
- ③他の考慮すべき要因の抽出
- ④プロセスモデルの構築
- ⑤それぞれの要因における適・不適の基準の設定

①については、著者らが行っている高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する基盤研究において、放射性元素の挙動に影響を与える要因となるデータ項目の品質を評価するための手法を開発する必要があるため、pHや酸化還元電位およびそれらに影響を与える項目を品質評価対象とした。これらのデータ項目についてはそれぞれのプロセスモデルを構築し、品質を評価する必要がある。

図4 依存度に“ALL”もしくは“ANY”を用いた場合の計算方法

Fig. 4 Calculation method in the case of using “ALL” or “ANY” in dependency

②では原位置の地下水に対して直接的に影響を与える要因を抽出し、品質評価指標として設定した。このような指標としては、ボーリング掘削時に使用する掘削水の試料への混入による汚染や、試料採取区間以外からの地下水の流入による化学特性の変化、試料採取時の脱ガスや酸化、採水過程における掘削ズリや採水に用いられる機材との反応、微生物の影響が挙げられる。③では、②で抽出した品質評価指標以外の、間接的ではあるがデータに影響を与える、もしくは品質評価指標となる可能性のある要因を抽出し、品質評価指標として設定した。このような要因としては、目視による試料の確認結果や水理学的な要因などが挙げられる。④では②および③で抽出した品質評価指標を関連項目によって分類し、プロセスモデルを構築した。この際に、抽出した品質評価指標を更に細分化できる項目については細分化し、採水調査の過程で取得した品質評価指標に係わるデータと関連づけられるようにした。例えば、掘削水の混入に関する項目では混入率を把握する指標を、人為的に添加したトレーサーと、天然のトレーサーとなるトリチウムに細分し、それぞれのデータから掘削水の混入を評価することが可能となるようにした。⑤では、④で構築したプロセスモデルの最も下位のプロセスへの入力値を決定するための基準とそれに伴う入力値を設定した。それぞれの基準に基づき各プロセスに入力する真および偽の値は、1もしくは0とし（真が1の場合は全

く正しいことを意味する。この場合、偽および不確実性の値は0となる。）、基準を細分化できる場合については0.5を入力できるように設定した。この基準の設定については後述する。

2.3 計算に用いる係数の決定

ESLに基づいて品質評価を行う場合には、プロセス間の計算の際に用いられる係数である充足度と依存度を決定する必要がある。これらの係数は先に抽出した各品質評価指標の重要度を決定することとなり、品質評価の上では重要である。ただし、研究内容によって、重要となる品質評価指標は異なると考えられる。例えば、地下水のpHの品質を評価する際に、その反映先が採水調査手法の開発に係わる研究であった場合、品質評価指標の中でも調査手法に関わる品質評価項目である地下水の汚染率を把握する方法や採水方法、採水区間の設定に関する項目が重要となる。一方、反映先が酸化還元に関する研究であった場合、酸化還元と関連する炭酸濃度やアルカリ度とpHの整合性などが重要となると考えられる。また、あまりにも厳正に品質評価を行うことによって、全てのデータの品質が一様に低くなるようでは品質を評価したとは言えない。そのため、本研究では、プロセスモデルを構築した後に、各係数を厳しい条件として任意に設定し、品質が高いと想定できる試料を参照して、全データを合理的に評価できるように係数を調整した。本研究でのプロセスモデルについて、依存度は全ての品質評価指標が独立であると考え、全ての項目について0とした。また、充足度については、以下の3つの基本的な考え方に則り決定した。

- ① pHの品質に対して重要度や与える影響が類似していると考えられる場合には同じ充足度を用いる。
- ② 厳しい条件とするために、偽の充足度にはできるだけANYを用いる。
- ③ ALLを使用することで厳しい条件設定とすることができるが、多用することにより不確実性が増大し、品質のよいデータと悪いデータの区別が困難になる可能性があるため、より上位のプロセスでのみ用いる。

①については、抽出した品質評価指標におい

図5 プロセス間の計算に“Necessary”を指定した場合の計算方法

Fig. 5 Calculation method of “Necessary” case

て、何を重要とするかという、品質評価者の主観によるものであることは否めない。ここでは、筆者らがこれまでの東濃地域を対象とした調査研究で得られた経験や知見に基づき、掘削水による汚染が pH に与える影響として最も大きいと考え、充足度は ALL を除いた場合に最大の 1 とした。②については、重要度が低い項目または通常の採水調査で情報を取得しない項目については、ANY 以外の値を設定した。③については、最終的な計算過程の他、重要と思われる測定機器の校正についてのみ適用した。

3. 東濃地域の地下水を対象とした品質評価事例

著者らは、岐阜県東濃地域において、深度 1,000m 付近までの地下水を研究対象として、地球化学環境を調査・解析・評価する手法および技術の開発を行っている。地下水試料は、主に地表から掘削するボーリング孔の掘削途中もしくは掘削後に行われる調査を通して採水しており、これまでに300点以上の試料を採取している (Furue et al., 2003)。

3.1 地下水調査における品質管理

採水調査時の品質管理については、古江ほか (2005) にまとめられており、品質の高い地下水試料を採取するために重要な要素として、ボーリング孔の掘削に使用する掘削水による汚染の評価や被圧不活性状態での物理化学パラメータの測定などが挙げられている。また、これらに対応する手法として、掘削水による汚染についてはトレーサの添加に基づく混入率の把握、物理化学パラメータの測定については、原位置での測定、もしくは地上にフローセルを設置しての嫌気環境下での測定が挙げられている。これらの技術開発では、採水装置の開発や採水方法の改善など、主に調査現場において地下水試料の品質を低下させることなく採取するための手法開発に焦点が当てられており、様々な条件下で得られた地下水データの品質評価手法は確立されていなかった。

実際にこれまでに行われてきた調査においては、調査の考え方や技術の進歩により、地下水に対する主な汚染源となるボーリング孔掘削時に用

いられる掘削水 (掘削用原水ならびに掘削循環水) の管理方法や、物理化学パラメータの測定条件の違いなど、地下水の地球化学データの品質に影響を与える要因も一様に管理されてきたわけではなく、取得されたデータの品質にも差がある。

本研究では、調査時期や採水方法の異なる 9 本のボーリング孔 (DH-2、7、12号孔、MSB-2、4号孔、KNA-6号孔、MIZ-1号孔、MIU-4号孔) から取得した63試料を対象として、試行的に品質評価を行った。

3.2 地下水の pH に関わる品質評価事例

これまでに示した品質評価方法に沿って、地下水の pH について品質評価を行った例を示す。63 試料について、採取方法と pH の測定方法についての概要を Table 1 に示す。試料の採取と pH の測定は、岩月ほか (1998) に示された方法で行った。Fig. 6 に pH の品質評価のためのプロセスモデルを、Table 2 にはそれぞれの品質評価指標に対する入力値とその基準を示す。これらの基準では、その値を定量的に算出することができる項目と、一般的な知見や経験的な判断から定性的に決定する項目とに区分できる。例えば、Table 2 の項目番号 3 に示した、掘削水による汚染が十分に少ないと判断する基準である 5 % という値は、pH の変化が放射性元素の溶解度に与える影響に基づき決定した。これまでの研究では、pH の値に 0.1 以上の変化があった場合に放射性元素の溶解度が変化するという結果が得られている (Metcalf et al., 2004)。この結果に対し、東濃地域での地下水とこれまでに使用した掘削水の代表的な値から pH に 0.1 以上の変化を与える汚染率を 5 % と算出し、判断の基準とした。ただし、Table 2 の項目番号 38 に示した採水区間長に関する基準は、調査対象となるボーリング孔の地質環境に依存するために一定の値を設定することができない。このような場合には、各試料について、設定した品質評価指標を満たしているか否かの判断が必要となる。また、本研究においては、各品質評価指標に対する入力値を 1、0 および 0.5 として設定している。不確実性を評価する ESL の特徴を勘案すると、入力値は今回のような画一的な数値ではなく、各品質評価指標の内容を定量的に評価し、より具体

表1 品質評価に用いたデータの概要と品質評価結果

(Sed: 堆積岩, Gr: 花崗岩, PS: パッカーサンプラー, 1000PT: 1000m 対応水理試験装置, MP: MP システム, 1000GS: 1000m 対応地下水調査機器, HMS: 地下水モニタリング装置, PM: ポータブルメーター, DCP: 孔内用地球化学プローブ)

Table 1 Overview of the data for quality assessment and the result (Sed: Sedimentary rocks, Gr: Granite, PS: Packer Sampler, 1000PT: 1000m Pumping Tester, MP: MPsystem, 1000GS: 1000m Groundwater Sampler, HMS: Hydrochemical Monitoring System, PM: Portable Meter, DCP: Down-hole Chemical Probe)

サンプル 番号	孔名	採取深度 (masl)	地質	採取方法	pHの測定方法	pH	真/偽	不確実性	
1	KNA-6	136.0	Sed.+Gr.	PS	HMS	9.2	71	0.29	
2	KNA-6	136.0	Sed.+Gr.	PS	HMS	9.4	71	0.29	
3	KNA-6	143.0	Sed.	PS	HMS	9.5	71	0.29	
4	KNA-6	121.0	Gr.	PS	HMS	8.2	0.67	-0.67	
5	KNA-6	121.0	Gr.	PS	HMS	8.5	0.66	-0.66	
6	MIU-4	145.5	140.2	Sed.	1,000PT	HMS	9.4	34	0.66
7	MIU-4	134.7	100.5	Gr.	1,000PT	HMS	9.2	0.11	-0.11
8	MIU-4	-55.8	-57.5	Gr.	1,000PT	HMS	9.4	0.46	0.27
9	MIU-4	-288.8	-343.4	Gr.	1,000PT	HMS	9.2	0.11	-0.11
10	MIU-4	-436.2	-422.3	Gr.	1,000PT	HMS	9.2	0.18	-0.18
11	MSB-2	119.5	115.5	Gr.	1,000PT	HMS	9.1	0.2	-0.2
12	MSB-2	66.5	44.5	Sed.	1,000PT	HMS	8.8	0.2	0.4
13	MSB-2	27.0	23.0	Gr.	1,000PT	HMS	8.6	0.62	0.19
14	MSB-4	198.7	188.8	Sed.	MP	HMS	7.5	0.52	0.24
15	MSB-4	198.7	188.8	Sed.	MP	HMS	7.3	0.52	0.24
16	MSB-4	188.0	180.6	Sed.	MP	HMS	8.1	0.5	0.25
17	MSB-4	179.7	152.3	Sed.	MP	HMS	7.9	0.2	-0.2
18	MSB-4	179.7	152.3	Sed.	MP	HMS	7.9	0.2	-0.2
19	MSB-4	119.0	115.5	Gr.	1,000PT	HMS	8.8	0.54	0.23
20	MIZ-1	-8.3	-19.0	Gr.	1,000PT	HMS	8.9	0.1	-0.1
21	MIZ-1	-374.1	-390.4	Gr.	1,000PT	HMS	8.9	0.01	0
22	MIZ-1	-442.3	-519.3	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	0.01	0
23	DH-2	-13.9	-15.9	Gr.	1,000PT	HMS	8.5	0.02	0.5
24	DH-2	-34.9	-43.4	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	1	1
25	DH-2	-109.1	-111.1	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	1	1
26	DH-2	-111.9	-113.9	Gr.	1,000PT	HMS	8.8	1	1
27	DH-2	-116.1	-118.1	Gr.	1,000PT	HMS	8.8	0.02	0.5
28	DH-2	-119.4	-121.4	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	1	1
29	DH-2	-127.3	-134.8	Gr.	1,000PT	HMS	8.6	1	1
30	DH-2	-154.2	-156.2	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	1	1
31	DH-2	-171.9	-173.9	Gr.	1,000PT	HMS	8.8	1	1
32	DH-2	-245.9	-254.4	Gr.	1,000PT	HMS	8.8	1	1
33	DH-2	-257.6	-266.1	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	1	1
34	DH-7	-97.8	-104.3	Gr.	MP	PM	8.9	0.02	0.5
35	DH-7	-138.8	-145.3	Gr.	MP	PM	10.3	0.02	0.5
36	DH-7	-138.8	-145.3	Gr.	MP	PM	9.9	0.02	0.5
37	DH-7	-220.3	-226.8	Gr.	MP	PM	10.4	0.02	0.5
38	DH-7	-220.3	-226.8	Gr.	MP	PM	10.1	0.02	0.5
39	DH-7	-257.8	-264.3	Gr.	MP	PM	10.8	0.02	0.5
40	DH-7	-257.8	-264.3	Gr.	MP	PM	10.8	0.02	0.5
41	DH-7	-319.8	-326.3	Gr.	MP	PM	10.1	0.02	0.5
42	DH-7	-319.8	-326.3	Gr.	MP	PM	9.6	0.02	0.5
43	DH-7	-395.3	-401.8	Gr.	MP	PM	11.1	0.02	0.5
44	DH-7	-395.3	-401.8	Gr.	MP	PM	11.2	0.02	0.5
45	DH-7	-493.3	-499.8	Gr.	MP	PM	10.7	0.02	0.5
46	DH-7	-539.8	-546.3	Gr.	MP	PM	10.5	0.02	0.5
47	DH-7	-539.8	-546.3	Gr.	MP	PM	10.7	0.02	0.5
48	DH-12	-20.1	-26.7	Sed.	1,000PT	HMS	9.7	0.54	0.23
49	DH-12	-34.4	-142.8	Gr.	Seepage	HMS	9.3	0.16	-0.16
50	DH-12	-142.0	-207.3	Gr.	Seepage	HMS	9.2	0.09	-0.09
51	DH-12	-208.5	-249.8	Gr.	Seepage	HMS	8.9	0.1	-0.1
52	DH-12	-251.5	-292.3	Gr.	Seepage	HMS	8.9	0.16	-0.16
53	DH-12	-294.0	-335.1	Gr.	Seepage	HMS	9.2	0.09	-0.09
54	DH-15	150.2	140.7	Sed.	1,000PT	HMS	8.8	0.76	0.12
55	DH-15	128.7	115.7	Sed.	1,000PT	HMS	9.1	0.48	0.26
56	DH-15	110.5	79.5	Sed.	1,000PT	HMS	10.0	0.01	0
57	DH-15	61.1	-3.2	Sed.	1,000PT	HMS	9.4	0.24	-0.24
58	DH-15	-20.3	-26.8	Gr.	1,000PT	HMS	8.9	0.7	0.15
59	DH-15	-224.4	-248.9	Gr.	1,000PT	HMS	8.7	0.01	0
60	DH-15	-362.3	-386.8	Gr.	1,000PT	HMS	8.2	0.01	0
61	DH-15	-551.8	-568.3	Gr.	1,000PT	HMS	8.4	0.01	0
62	DH-15	-723.8	-740.3	Gr.	1,000PT	HMS	8.1	0.01	0
63	DH-15	-773.8	-790.3	Gr.	1,000PT	HMS	8.5	0.24	-0.24

図6 pHの品質を評価するためのプロセスモデル
Fig. 6 Process model for quality assessment of pH

表2 pHの品質評価のための品質評価指標と入力値の基準

Table 2 Indicators for quality assessment of pH and their criteria of input value

項目番号	品質評価内容	入力値	入力値を決定するための基準
3	人為的に添加したトレーサー(蛍光染料等)によって示される掘削水による汚染率	真=1 偽=1	汚染率が5%未満 その他の場合
4	天然のトレーサー(トリチウムなど)によって示される掘削水による汚染率	真=1 偽=1	天然のトレーサーが検出できない程度の汚染であり、そのトレーサーが掘削水による汚染率の適切な指標となることが分かっている場合 天然のトレーサーが検出できる程度の汚染
10	標準物質の測定	真=1 偽=1	標準物質の測定結果が測定機器で定められた許容範囲内の場合 その他の場合
11	校正方法	真=1 偽=1	校正方法が測定する地下水に対して適したものである場合 その他の場合
12	標準物質の繰り返し測定	真=1 偽=1	同じ標準物質に対する繰り返し測定の結果が許容できる範囲に含まれている場合 その他の場合
14	地下水の分析結果におけるチャージバランス	真=1 偽=1	チャージバランスが5%以内の場合 その他の場合
15	測定したpHと全無機炭素濃度およびアルカリ度との整合性	真=1 偽=1	アルカリ度とpHについて理論的に算出した結果(pHと全無機炭酸濃度、アルカリ度を用いて1つの項目を他の2つの項目から算出)と実測値の差が3%以内の場合 その他の場合
16	測定中のpHの値の安定性	真=1 偽=1	測定中に測定値が系統的な変化を示さないもしくは変化が測定機器の誤差範囲内にある場合 その他の場合
17	測定中の物理化学パラメータの安定性	真=1 偽=1	測定中に他の物理化学パラメータが系統的な変化を示さないもしくは変化が測定機器の誤差範囲内にある場合 その他の場合
18	試料保存時の化学的な処理	真=1 偽=1	実験室で測定され化学的な保存処理がpHに影響を与えていない場合 フローセルで測定され化学的な保存処理が行われていない場合 保存剤が添加されてpHに影響を与えている場合
21	目視による脱ガスの確認	真=1 偽=1	目視で脱ガスが認められない場合 脱ガスが認められる場合
22	ガスの分析結果の評価	真=1 偽=1	脱ガスしたガスの分析が行われてCO ₂ が含まれている場合 CO ₂ が含まれている場合
23	二酸化炭素分圧の算出	真=1 偽=1	大気の数と大きく違う場合 大気の数と同じ場合
24	炭酸塩鉱物の飽和度	真=1 偽=1	炭酸塩鉱物の飽和度が±0.2の範囲内にある場合 その他の場合
26	pHに重要な影響を与える採水区間以外からの地下水の流入による汚染	真=1 偽=0.5 偽=1	他の区間からの地下水の流入がpHに影響を与えていない(pHが0.1以上変化していない)場合 他の区間からの地下水の流入がpHに影響を与えている可能性がある場合 他の区間からの地下水の流入がpHに影響を与えている場合
29	試料の変色	真=1 偽=1	試料が変色していない場合 その他の場合
30	試料中の沈殿物	真=1 偽=1	沈殿物が存在していない場合 その他の場合
31	試料中の微粒子	真=1 偽=1	微粒子が存在しない場合 その他の場合
32	試料中のバイオマスの増加	真=1 偽=1	バイオマスが存在しない場合 その他の場合
33	掘削水の化学的な安定性	真=1 偽=0.5 偽=1	掘削水の化学組成が安定しており掘削水による汚染の結果が単純な2成分の混合である場合 掘削水の化学組成が安定していない可能性がある場合 掘削水の化学組成が安定でない場合
34	ろ過処理の影響	真=1 偽=0.5 偽=1	地下水試料のろ過がpHに0.1以上の変化を与えない場合 pHをフローセルなどで測定することによってろ過が必要となる場合 ろ過によってpHが0.1以上の変化を受けている可能性がある場合 ろ過によってpHが0.1以上の変化を受けている場合
37	予備排水量	真=1 偽=0.5 偽=1	予備排水量が採水区間以外から地下水の流入をおこさない量の場合 予備排水量が他の区間からの地下水流入を引き起こす可能性がある量の場合 他の区間からの地下水の流入を引き起こしていると考えられる場合
38	採水区間長	真=1 偽=0.5 偽=1	採水区間長が短く化学的特性の異なる地下水の流入を引き起こすことがない場合 採水区間長が長く化学的特性の異なる地下水の流入を引き起こす可能性がある場合 採水区間長が長く化学的特性の異なる地下水の流入を引き起こす場合
39	揚水速度	真=1 偽=0.5 偽=1	揚水速度が適切であり化学的特性の異なる地下水による混合が起きない場合 揚水速度が速く化学的特性の異なる地下水が混入する可能性がある場合 揚水速度が速く化学的特性の異なる地下水が混入する場合
40	パッカーバイパスの有無	真=1 偽=1	区間圧力の反応からパッカーバイパスがない場合 その他の場合
41	掘削水の逸水	真=1 偽=0.5 偽=1	掘削中の逸水量が少なく原位置の地下水への混入が起こらない場合 逸水量が大きく原位置の地下水の化学特性に影響を与える可能性がある場合 逸水量が大きく原位置の地下水の化学特性に影響を与える場合

表2 続き

Table 2 Continued

項目番号	品質評価内容	入力値	入力値を決定するための基準
42	掘削リターン水の量が示す他区間からの地下水の流入	真=1	掘削リターン水の量によってボーリング孔内に流入した地下水が異なる深度の地下水に化学的な影響を与えていない場合
		偽=0.5	掘削リターン水の量によってボーリング孔内に流入した地下水が異なる深度の地下水に化学的な影響を与えている可能性がある場合
		偽=1	掘削リターン水の量によってボーリング孔内に流入した地下水が異なる深度の地下水に化学的な影響を与えている場合
46	ボーリング孔の状態(セメンティングの有無)	真=1	セメントがpHに影響を与えていないもしくはセメントを使用していない場合
		偽=0.5	セメントがpHに影響を与えている可能性がある場合
		偽=1	セメントがpHに影響を与えている場合
47	掘削に用いる機器の影響	真=1	掘削に用いる機器と地下水の反応による影響がpHにない場合
		偽=0.5	掘削に用いる機器と地下水の反応によりpHが変化する可能性がある場合
		偽=1	掘削に用いる機器と地下水の反応によりpHが変化している場合
48	逸水防止剤の影響	真=1	逸水防止剤を使用していないもしくは使用してもpHに影響を与えない場合
		偽=0.5	逸水防止剤が地下水と反応してpHに影響を与える可能性がある場合
		偽=1	逸水防止剤が地下水と反応してpHに影響を与える場合
49	孔内洗浄の影響	真=1	孔内洗浄が行われていないもしくは孔内洗浄によりpHが影響を受けていない場合
		偽=0.5	孔内洗浄によりpHが変化する可能性がある場合
		偽=1	孔内洗浄によりpHが変化する場合
50	サンプリング時の容器やチューブによる影響	真=1	採水時の容器やチューブが地下水と反応しない場合
		偽=1	その他の場合
52	採水容器の防水性・気密性	真=1	採水容器が防水および気密を保てるものである場合
		偽=1	その他の場合
53	試料の移動中の防水性・気密性	真=1	試料の移動中にも防水・気密を保てる場合
		偽=1	その他の場合
54	フローセルの気密性	真=1	フローセルの気密が保たれている場合もしくはフローセルを使用していない場合
		偽=1	フローセルの気密が保たれていない場合
56	掘削方法の妥当性	真=1	掘削方法が適切であり原位置の地下水に化学的な変化を起こさないまたは地下水の分布を空間的に乱さない場合
		偽=0.5	掘削方法が適切でなく原位置の地下水に化学的な変化を起こしているまたは地下水の分布を空間的に乱している可能性がある場合
		偽=1	掘削方法が適切でなく原位置の地下水に化学的な変化を起こしているまたは地下水の分布を空間的に乱している場合
58	採水箇所の妥当性	真=1	孔内で採水した場合、pHを孔内で測定した場合、地表でpHを測定して値が長い時間で安定だった場合
		偽=0.5	pHの測定は地表で行っているがpHの変化を防ぐような方法で測定を行った場合およびフローセルで測定を行っているが測定の長期的な安定性を確認していない場合
		偽=1	採水箇所でのような影響がpHにあるか不明な場合
59	採水容器が十分に密閉性	真=1	採水容器が十分に密閉されており空気が入ったり試料が蒸発することがない場合
		偽=1	その他の場合
60	試料の運搬方法の妥当性	真=1	試料の運搬中に漏洩等がない場合
		偽=1	その他の場合
62	保存容器の妥当性	真=1	容器の状態が試料に化学的な影響を与えないものである場合
		偽=0.5	容器の状態が試料に化学的な影響を与える可能性がある場合
		偽=1	容器の状態が試料に化学的な影響を与える場合
63	保存容器が十分に密閉性	真=1	保存容器が十分に密閉されており漏洩がない場合
		偽=0.5	漏洩する可能性がある保存容器の場合
		偽=1	漏洩する保存容器の場合
64	試料の運搬方法の妥当性	真=1	試料の運搬中に漏洩がない場合
		偽=0.5	試料の運搬中に漏洩の可能性がある場合
		偽=1	試料の運搬中に漏洩する場合
65	測定方法の妥当性	真=1	測定方法および使用機器が適切である場合
		偽=0.5	測定方法および使用機器が適切でない可能性がある場合
		偽=1	測定方法および使用機器が適切でない場合
66	データの転記	真=1	データの転記についてチェックが行われている場合
		偽=1	その他の場合

的に決定することが望ましい。ただし、各品質評価指標への入力値を定量的に評価するためには、現場での確認作業や分析項目が増加し、調査期間やコストが増大する可能性がある。また、過去に取得したデータについて品質評価を行う場合に

は、品質評価に関する情報を取得するのは困難である。そのため、本研究では各品質評価指標において従来の調査手法で得られた情報に基づき、確実に品質評価指標を満たすもしくは満たさないとする基準を設定し、入力値を決定した。また、該

図7 pHの品質評価結果を示した相関プロット

Fig. 7 Correlation plots showing the result of quality assessment of pH

当する品質評価指標に関する情報が欠損している場合には、不確実性を1として設定した。

各試料の概要および品質評価結果を Table 1 に示す。また、品質評価結果の相関プロットを Fig. 7 に示す。この相関プロットは、真/偽比を Y 軸に、不確実性を X 軸にしている。Y 軸は対数表示である。本稿ではこの相関プロットを真偽の割合に基づいて区分し、便宜的に、品質の高い順から I、II、III、IV とした (Fig. 7)。ボーリング孔ごとに結果をみると、DH-7 号孔における pH の測定値は、全てのデータで同じ値を示し、品質が低い結果となった。DH-7 号孔では蛍光染料の添加などによる掘削水の管理が正確に行われておらず、掘削水による汚染の程度が把握できないことがこの品質が低い原因となった。また、DH-2 号孔の結果についても DH-7 号孔と同様に掘削水の管理が十分でなかったため、不確実性が 100% となる結果となった。その他、MIU-4、DH-12、DH-15、MIZ-1、MSB-2 号孔および MSB-4 号孔のそれぞれにおいて、掘削水による汚染や掘削水の管理方法については十分な品質を示したものの、pH データの品質についてはばらついた結果を示した。これらのボーリング孔から取得されたデータにおいて、低い品質を示す結果となったデータに共通する項目として、採水の区間長が長いことおよび採水の前行う予備排水の量が適切でないことが挙げられる。採水区間の区間長が地下水の品質に与える影響については SKB が検討した事例があり (Laaksoharju, 2004)、区間長が長い場合には区間以外からの地下水の流入が起きる可能性が高いという結果を示している。また、予備排水の量については、少なすぎる場合には掘削水が十分に排除できないが、多すぎる場合には他の区間から地下水を流入させることとなり、新たな汚染が生じる可能性がある。これらの点については、採水区間の区間長をより短く設定することや、トレーサーによる掘削水の汚染率を把握した上での予備排水量の管理などにより、適切な方法によって採水を行う必要がある。また、これら以外の品質を低下させている要因として、pH の値が溶存無機炭素、アルカリ度と整合的でないことや、pH の測定中に値が安定していないこと、脱ガスが認められることなどがある。これらについ

ては、物理化学パラメータを被圧、不活性状態で測定することや、採水現場で測定するだけでなく、分析を行う実験室でも再度測定し、分析結果との整合性を確認するなどの改善をすることで、より品質の高いデータを得られる可能性がある。

品質評価結果に基づいた pH の深度分布を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) には全てのデータがプロットしてあり、Fig. 8(b) には相関プロットにおいて I および II に分類されたデータのみをプロットした。II と IV の境界にプロットされたデータについては、それぞれ II のデータとして取り扱った。ただし DH-2 および DH-7 のデータについては除外した。Fig. 8 のどちらの場合においても、標高約 100m までは、pH が 7 から 10 の間で深度とともに増加する傾向が認められる。ただし、標高約 100m 以深において、Fig. 8(a) のプロットでは pH が 8 から 12 の範囲に分布し、深度との相関は認められなかった。これに対し、Fig. 8(b) では、pH は概ね 8 から 9 のより狭い範囲に分布し、各深度でほぼ一定の値を示した。この結果から、地下水データの品質を評価し、一定の基準以上のデータを用いることによって、より正確に地下深部までの環境を把握できるようになると考えられる。

また、pH 以外の項目、酸化還元電位や塩化物イオン濃度などについても、品質評価指標の変更や各パラメータを適切に設定することで、pH と同様にその品質を評価できると考えられる。ただし、本稿で例示した品質評価指標やそれらの基準、各パラメータなどは、東濃地域で用いている調査方法や東濃地域の地質および水質を前提として決められている。そのため、他の方法、他の地域で同様に品質評価を行う場合には、プロセスモデルを研究地域の条件を考慮した上で再構築し、品質評価を行う必要がある。

4. まとめ

本研究の品質評価手法に基づき調査を評価し、結果を研究に反映させることで、より正確に地下深部における地球化学環境を把握できることが示された。本手法においては、品質評価のための係数の選択や、それぞれの係数の重み付けなどに検

図8 pHの深度分布 ((a) 全データ、(b) 一定以上の品質のデータ) (masl = meters above sea level)

Fig. 8 Depth profile of pH ((a) all data, (b) classified high-quality data) (masl = meters above sea level)

討課題は残るものの、品質評価手法としては有効であると考えられる。

謝 辞

本報告を作成するにあたり、貴重なご意見を賜りました匿名の査読者に感謝致します。

参考文献

岩月輝希・豊嶋賢治・吉田英一 (1998) : 深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状. 原子力バックエンド研究、**4**、73~81

小宮洋行・中屋眞司・益田晴恵・日下部実 (2003) : 酸素および水素の安定同位体比と水質から見た長野県松本盆地中・南部地域の広域地下水流動系. 日本地下水学会誌、**45**、145~168

日本地下水学会 (2000) : 『地下水水質の基礎－名水から地下水汚染まで』 理工図書

古江良治、岩月輝希、濱 克宏 (2005) : 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対する試み、応用地質、**46**、232~236

Blockley D.I., and Godfrey P. (2000): Doing it differently – system for rethinking construction, Thomas Telford, London

Cui W. and Blockley D.I. (1990): Interval probability theory for evidential support, *Inter. Jour. Intelli. Sys.*, **5**, 183~192

Davis J.P. and Hall J.W. (2003): A software-supported process for assembling evidence and handling uncertainty in decision-making, *Decision Support System*, **35**, 415~433

Foley L., Ball L., Hurst A., Davis J. and Blockley D. (1997): Fuzziness, incompleteness and randomness: Classification of uncertainty in reservoir appraisal, *Petroleum Geoscience*, **3**, 203~209

Furue R., Iwatsuki T., Mizuno T., Mie H. (2003); Data book on groundwater chemistry in the Tono area,

JNC TN7450 2003-001

Gascoyne, M. (2004): Hydrogeochemistry, groundwater age and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, Southeastern Manitoba. *Appl. Geochem.* **19**, 519~560

Hall J.W., Blockley D.I., and Davis J.P. (1998): Uncertain inference using interval probability theory, *Inter. Jour. Approx. Appli. Reason.*, **19**, 247~264

Laaksoharju M., Smellie J., Ruotsalainen P., Snellman M. (1993): An approach to quality classification of

deep groundwaters in Sweden and Finland, *SKB Tech. Rep.*, 93~27

Laaksoharju M., (2004); Hydrogeochemical evaluation for Simpevarp model version 1.2. Preliminary site description of the Simpevarp area, SKB Report R-04-74

Metcalfe R., Savage D., Bath A.H. and Walker C., (2004): 核種の溶解度評価に関する地下水の地球化学パラメータの感度解析、JNC TJ7400 2004-013

(受付：2006年7月26日、受理：2007年3月30日)