

維持・管理を考慮した地下水環境の評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：倉橋稔幸、矢島良紀、田本修一

【要旨】

本報告では、東日本の国道等の既設トンネルにおける恒常湧水や排水を対象に水質調査、イオンクロマトグラフ分析、ICP 発光分析、地下水環境データベースの構築を行い、土木構造物及び周辺自然環境へ与える影響を評価した。その結果、Eh-pH ダイアグラムと $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 濃度比からトンネル湧水や排水の地質起源を明らかにした。また、ICP 発光分析から湧水や排水中に溶けている Ca 濃度や Fe 濃度を定量し、酸性水によるトンネル坑壁の化学的腐食量を評価したほか、ヒ素やセレン等の重金属類を周辺環境に溶出させているものがあることを明らかにした。最後に、これまでの成果をとりまとめ、「酸性地下水環境評価マニュアル（案）」を作成した。

キーワード：地下水、トンネル排水、維持・管理、水質調査、化学分析

1. はじめに

土木工事において地下水は貴重な資源と施工上の課題という両方の側面を有している。近年は特に地下水の環境という観点から注目されつつある。

例えば、日本国内の温泉や地下水には酸性からアルカリ性を示すものがある。そのため、トンネルの掘削工事で酸性やアルカリ性の湧水として遭遇することがあり¹⁾²⁾³⁾など、その汚濁水対策として汚濁水処理設備による浄化および中和処理がなされ、水質汚濁防止法の法令に定められた排水基準を満足するように排水されている。しかしながら、完成後の維持管理では、地下水はトンネル内へ湧水として恒常的に流入し坑口から排水されている。大島・藤原(1998)⁴⁾は特に酸性水が施設管理のうえで支障を生じさせる可能性があることを指摘している。しかし、水質調査もなされることが少ない現状では、排水が排水基準を超える液性であるのかも定かではない。また、自然由来重金属については溶出量基準が超過する地盤であっても地下水では排水基準を超えないことがあるなど、地下水環境の実態が把握されておらず、リスク評価における点でも課題となっている。トンネルでは施工のための地下水対策は行われるが、完成後の維持・管理において体系立てた地下水環境の評価手法が確立されていない。

そこで、本報告では、維持・管理におけるトンネルの地下水環境評価手法を確立することを目的として、東日本の国道等の既設トンネルにおける恒常湧

水や排水を対象に水質分析、イオンクロマトグラフ、ICP 発光分析を行い、湧水の地質起源を考察し土木構造物及び周辺自然環境へ与える影響を評価したほか、地下水環境データベースの構築や地下水環境評価マニュアルの作成を行った。

2. 研究方法

2. 1 トンネル工事が地下水環境に与える影響の実態調査

2. 1. 1 水質調査と試料採取

平成 24 年 5 月から平成 25 年 12 月にかけて東日本の既存の国道等の 47 トンネルにおける恒常湧水や排水から 69 試料を採水し水質調査を行った。

まず、水質調査については、坑口排水の集水枡や排水口に採水カップを設置するなどして流水させた状態で米国 In-situ 社製の Troll9000 を用いて、水温、pH、電気伝導度(EC)、酸化還元電位(Eh)を計測した(図-1)。ただし、一部の試料については実験室で計測した。まず、pH 値については、排水基準に定められた pH 値 5.8～8.6 の液性を中性とし、酸性・中性・アルカリ性に区分した。また、Eh 値については、1atm、25℃における標準水素電極の値に換算して互いの数値と比較できるように換算した。同様に EC 値についても 25℃における値に換算した。

それらの pH 値と EC 値を Baas Becking(1960)⁵⁾の Eh-pH ダイアグラムにプロットし、トンネル排水や湧水の地質起源を考察した。Baas Becking(1960)は世

界中で計測された約 6,200 組の pH 値と Eh 値の組み合わせの分布から天水、地熱起源の水、浅部地下水、化石水、鉱山排水等の主な起源の水の分布領域を Eh-pH ダイアグラムに示した。特に酸性水の起源として地熱環境起源と黄鉄鉱起源の二つが挙げられる。黄鉄鉱の酸化を起源としている水は切羽の掘削等が終了した後に覆工で覆われることで維持・管理では酸化せず酸性水を発生させないと思われるが、地熱起源の地下水は起源を火山ガスとしているため恒常的に排水されている可能性がある。そのため、酸性水の地質起源を明らかにする必要がある。そこで本報告では、計測値を Baas Becking et al.(10960)の領域と比較し、酸性試料を対象に地熱環境と黄鉄鉱の各起源の水を区分した。

また、実験室で化学分析を行うために、試料を採水した。採水後直ちにろ紙によりろ過し 1 μ m 以下の浮遊粒子を取り除いた。それをあらかじめ酸洗浄した 500ml のポリプロピレン製のボトルに詰め、元素が溶出しないように 100ml 当たり 1ml の濃硝酸を加え酸性に保ち、実験室へ持ち帰った。ただし、一部の酸性試料については、塩化物イオンや硫酸イオン等のアニオンの分析も行うために、濃硝酸を加えずに別に 500ml のボトルに詰めた。



図-1 水質調査の様子

2. 1. 2 化学分析

イオンクロマトグラフと ICP 発光分析とにより湧水や排水に含まれる元素を分析した。

まず、3 トンネル 10 試料の酸性水を対象にイオンクロマトグラフ (Dionex 社製 DX320J) を用いて塩化物イオン(Cl⁻)と硫酸イオン(SO₄²⁻)のアニオンを定量し、両イオンの量比や濃度から地下水の成因を考察した。酸性水の成因として硫化鉄(FeS₂)の酸化や

火山性起源が考えられている。前者は岩石中に含まれる黄鉄鉱(FeS₂)が酸化し硫酸を発生させ、後者は地下深部のマグマからの火山ガスに含まれた HCl や SO₂ が塩酸や硫酸を発生させる。後者は例えば玉川温泉や川原毛温泉のような酸性泉に代表され、高温の火山ガスが浅層の地下水と混合して生成されたと考えられている⁶⁾ (図-2)。そのうち HCl は地表では生成されず、地下深部の火山ガスに含まれることから、火山性ガスの痕跡を示す。また、塩酸は硫酸よりも電離度が高く同じ濃度でも酸化力が強いことから、コンクリートに与える影響が大きい⁷⁾。ゆえに、酸性湧水の塩化物イオン(Cl⁻)と硫酸イオン(SO₄²⁻)の構成比を明らかにすることが必要である。

次に、Ca、Fe、As、Cd、Cr、Pb、Se の 7 元素を ICP 発光分析装置(ICP-AES; 日立ハイテクノロジー社製 P-4010)で分析した。このうち、Ca、Fe はコンクリートや鋼製支保等のトンネルの主要部材を構成する元素である。各水素イオン濃度における両元素の濃度を定量し、反応式から推定される最大溶出量の濃度と対比することにより、酸性水によるトンネル坑壁等の土木構造物への化学的腐食の影響を評価した。一方、Mg、As、Cd、Cr、Pb、Se については、重金属等の有害元素を「水質汚濁防止法に関わる排水基準」(以下、排水基準と略す)に定められた値と対比し、周辺自然環境への影響の有無を評価した。また、施工時における重金属の溶出試験値と分析値を比較し地下水環境への影響を評価した。

最後に、試料採取から分析、評価までの一連の方法を「酸性地下水環境評価マニュアル(案)」を作成した。

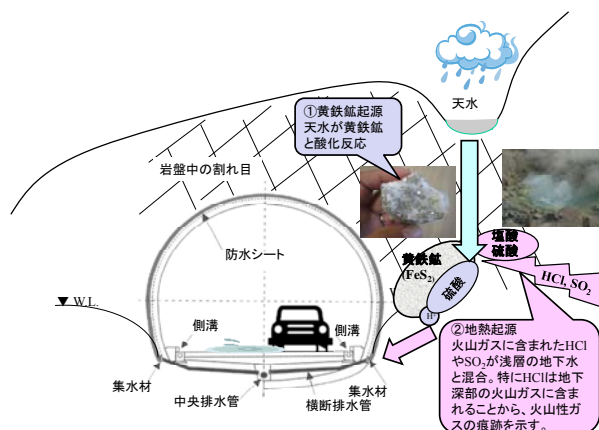


図-2 酸性水発生メカニズム

2. 2 地下水環境データベースの設計と入力

ボーリング調査で記録されている地下水位を検索・表示できるように、リレーション形式の地下水環境データベースを構築した。データベースを地下水情報テーブル、諸元情報テーブル、柱状図テーブルの3つのテーブルから構成させ、延べ103項目について入力できるように設計した(表-1)。情報テーブルを3つに分割することで、データベースの冗長性を回避したほか、PHP言語でプログラミングし3つの情報テーブルをクロス結合させWEB上で複数の地下水位を検索・閲覧できるようにした。

一方、データ入力については、国土情報検索サイトで公開されているボーリングデータ、北海道開発局の地質調査報告書や受託報告書のXML書式のボーリング交換用データ3,178本を収集し、データベースへ入力した。その他、寒地土木研究所が所蔵する2,192冊の北海道開発局の地質調査報告書のマイクロフィルムを電子化し、柱状図から地下水や位置情報に関する情報読み取り、データベースへ入力した。

表-1 データベースのテーブル構造と入力項目

テーブル	入力項目
地下水情報 テーブル	id, XMLファイル名, 番号, 孔内水位の測定年月日・掘削状況・水位・種別
諸元情報 テーブル	id, XMLファイル名, 緯度, 経度, 標高, 事業名, 調査名, 事業者名, 施工業者及び技術者名等の90項目
柱状図 テーブル	id, XMLファイル名, 報告書名, 柱状図表示ファイル名

3. 研究結果

3. 1 土木工事が地下水環境に与える影響の実態調査結果

3. 1. 1 水質調査結果

水質調査結果を表-2に示す。pH値は3.2から9.4までの範囲の値を示した。また、酸化還元電位(Eh)の値は0.150Vから0.740Vまでを示したほか、電気伝導度(EC)の値は58から2,885 μ S/cmを示した。

pH値から液性は、5トンネル18試料が酸性に、39トンネル48試料で中性に、3トンネル3試料がアルカリ性に区分された(図-3)。ただし、#AV、#AW、#AZのトンネルでは施工や施工時の溶出試験により黄鉄鉱等の硫化鉱物の酸化による酸性水が確認されていたものでも、竣工から20年以上が経過した計測時にはpH値は6.5~8.3を示し、いずれも中性であ

った。一方、方解石の溶解によるアルカリ性の水の発生が確認されていた#AYのトンネルでも竣工時に9.3であったpH値は8.3まで減少した⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。しかし、これはトンネルが覆工されたことにより黄鉄鉱の酸化や方解石の溶解が抑制されたことを示唆している。

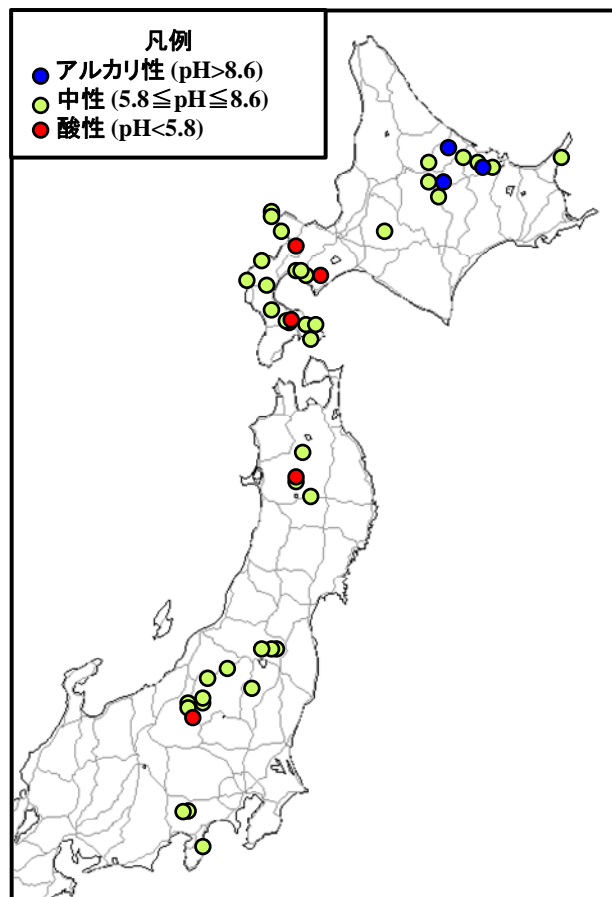


図-3 試料採取トンネルの液性分布図

Eh値とpH値の結果を、Eh-pHダイアグラムにプロットし、Baas Becking et al.(1960)の天水、浅部地下水、化石水、地熱環境、鉱山排水の各起源の領域と比較した。酸性の試料で酸化還元電位が高く、アルカリ性の試料で酸化還元電位が低く、全体として負の相関が認められた(図-4)。5試料が天水の領域に、9試料が浅部地下水の領域に、12試料が天水と地熱環境の領域に、38試料が浅部地下水と地熱環境の重なる領域に、5試料が浅部地下水・地熱環境・天水の重なる領域にプロットされた。しかし、6試料は領域外にプロットされた。それらはアルカリ性の試料に多く、#Qや#AYのトンネルでは方解石の溶解を起源としている³⁾¹¹⁾など、ダイアグラムに示された領域以外の起源により生成されたと考えられてい

る。

さらに酸性の 18 試料について、Baas Becking et al.(1960)における酸性水である地熱環境と鉱山排水の領域と比較した(図-5)。なお、後者の酸化した鉱山排水は酸化した黄鉄鉱起源の水に相当する。その結果 3 試料は酸化した鉱山排水の領域にプロットされ、残りの 15 試料は地熱環境と鉱山排水の両者にま

たがる領域にプロットされた。ここでも分布が重複し地質起源を明確に区分するに至らなかった。ただし、酸性を示す#G、#J、#AD のトンネルは北海道駒ヶ岳、倶多楽、草津白根山の活火山近傍にあり、火山の影響も考えられる¹²⁾。

そこで、次項で Cl と SO₄²⁻をイオンクロマトグラフ分析で定量することにより地質起源を考察した。

表-2 トンネル湧水・排水の水質分析結果および化学分析結果一覧表

*室内で水質測定を実施した。また、不等号は検出限界を示す。

試料番号	トンネル名	産状	試料採取日	温度(°C)	pH	Eh(V)	EC(uS/cm)	H ⁺ (mol/L)	Cl ⁻ (mol/L)	SO ₄ ²⁻ (mol/L)	Cl+SO ₄ ²⁻ (mol/L)	Cl/SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺ (mol/L)	Fe(mol/L)	As(mg/L)	Cd(mg/L)	Cr(mg/L)	Pb(mg/L)	Se(mg/L)
#1*	#B	排水	2012/7/11	29.0	7.0	0.411	402	1.10E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#2*	#C	排水	2012/7/11	29.0	7.9	0.362	270	1.35E-08	-	-	-	-	<2.5E-09	<1.7E-08	0.067	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#3*	#D	排水	2012/7/11	29.0	7.2	0.435	393	6.03E-08	-	-	-	-	<2.5E-09	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.039
#4*	#E	排水	2012/7/4	28.8	7.6	0.419	160	2.45E-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#5	#G	排水	2013/12/3	7.6	3.3	0.740	412	5.13E-04	2.71E-04	1.19E-03	1.46E-03	0.229	1.90E-04	2.38E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#6	#G	排水	2013/12/3	9.8	3.3	0.681	393	4.79E-04	4.55E-04	1.20E-03	1.65E-03	0.379	1.76E-04	4.03E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.200
#7	#I	排水	2012/11/22	7.5	7.2	0.430	306	6.17E-08	-	-	-	-	2.70E-04	7.86E-07	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#8	#J	排水	2013/11/22	5.0	5.2	0.640	68	6.61E-06	7.49E-05	3.51E-04	4.26E-04	0.213	1.86E-04	1.96E-07	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#9*	#K	排水	2012/6/19	25.0	8.2	0.425	280	6.03E-09	-	-	-	-	2.98E-04	4.11E-07	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#10*	#L	排水	2012/6/19	25.4	8.3	0.412	255	5.13E-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#11*	#M	排水	2012/5/10	25.5	8.2	0.399	628	5.89E-09	-	-	-	-	2.51E-04	<1.7E-08	0.146	<0.001	0.007	<0.01	0.035
#12*	#N	排水	2012/5/10	26.1	8.2	0.359	430	5.89E-09	-	-	-	-	2.53E-04	3.39E-07	<0.04	<0.001	0.010	<0.01	0.057
#13	#O	排水	2012/9/25	6.8	7.2	0.420	72	7.08E-08	-	-	-	-	8.18E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.060
#14	#Q	排水	2012/9/24	8.4	9.4	0.150	372	3.98E-10	-	-	-	-	2.94E-04	5.54E-07	0.219	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#15	#R	排水	2012/9/24	13.2	7.8	0.320	151	1.70E-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#16	#S	排水	2012/9/24	11.4	6.5	0.417	106	3.09E-07	-	-	-	-	8.48E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#17	#T	排水	2012/10/2	11.0	6.8	0.312	79	1.55E-07	-	-	-	-	7.13E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	0.002	<0.01	0.034
#18	#U	排水	2012/10/3	14.6	6.7	0.336	150	1.86E-07	-	-	-	-	1.81E-04	<1.7E-08	0.048	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#19	#V	排水	2012/10/3	13.7	8.7	0.238	232	2.09E-09	-	-	-	-	1.03E-04	7.14E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.052
#20*	#W	排水	2012/8/28	28.1	5.8	0.461	134	1.45E-06	-	-	-	-	1.73E-04	<1.7E-08	<0.04	<0.001	0.009	<0.01	0.083
#21*	#W	排水	2012/8/28	28.2	5.6	0.470	127	2.34E-06	-	-	-	-	1.68E-04	<1.7E-08	0.298	<0.001	0.010	<0.01	0.097
#22*	#X	排水	2012/8/28	28.7	6.4	0.456	723	4.37E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#23	#Y	排水	2012/10/4	10.1	6.6	0.319	80	2.34E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#24	#Z	排水	2012/10/4	14.0	8.9	0.238	152	1.20E-09	-	-	-	-	4.63E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.103
#25	#AB	排水	2012/10/4	14.6	8.1	0.335	413	8.32E-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#26	#AC	排水	2012/11/22	6.7	7.8	0.421	935	1.74E-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#27	#AD	排水	2012/11/5	10.3	3.6	0.698	182	2.82E-04	-	-	-	-	1.14E-04	2.67E-05	0.131	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#28	#AD	排水	2013/12/18	6.8	3.7	0.683	235	2.14E-04	3.20E-04	5.40E-04	8.60E-04	0.593	1.04E-04	2.38E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#29	#AD	排水	2012/11/5	9.7	3.5	0.698	208	3.55E-04	-	-	-	-	1.43E-04	4.96E-05	0.135	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#30	#AD	排水	2013/12/18	6.6	3.5	0.718	321	3.31E-04	5.83E-04	5.98E-04	1.18E-03	0.974	1.13E-04	4.06E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.072
#31	#AD	湧水	2013/12/17	4.7	6.8	0.425	132	1.48E-07	-	-	-	-	1.90E-04	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#32	#AD	湧水	2013/11/13	5.9	4.3	0.501	127	5.13E-05	-	-	-	-	6.40E-05	1.64E-05	<0.04	0.003	0.010	0.023	0.129
#33	#AD	湧水	2013/12/17	6.3	4.2	0.626	136	6.17E-05	3.25E-05	3.92E-04	4.25E-04	0.083	4.91E-05	3.16E-06	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#34	#AD	湧水	2013/12/17	6.4	5.2	0.448	96	6.61E-06	3.04E-05	3.03E-04	3.33E-04	0.101	7.17E-05	1.71E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#35	#AD	湧水	2013/11/13	6.9	4.0	0.550	126	1.12E-04	-	-	-	-	2.80E-05	8.57E-07	0.110	0.003	0.011	<0.01	0.036
#36*	#AD	湧水	2013/11/13	18.5	7.3	0.381	1,031	4.57E-08	-	-	-	-	1.67E-04	1.96E-06	<0.04	0.003	0.005	0.021	0.051
#37	#AD	湧水	2013/12/17	4.4	4.3	0.590	121	5.25E-05	3.16E-05	3.72E-04	4.04E-04	0.085	7.26E-05	2.37E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#38	#AD	湧水	2013/12/17	7.5	3.2	0.623	360	6.03E-04	3.54E-05	8.60E-04	8.96E-04	0.041	4.08E-05	3.99E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.210
#39*	#AD	湧水	2013/11/13	19.0	6.6	0.420	2,885	2.40E-07	-	-	-	-	1.08E-04	<1.7E-08	0.224	0.003	0.002	<0.01	0.072
#40	#AD	湧水	2013/11/13	7.7	3.3	0.670	413	5.01E-04	-	-	-	-	7.38E-05	3.22E-05	<0.04	0.003	0.012	0.027	<0.03
#41	#AD	湧水	2013/12/17	6.8	4.4	0.502	181	4.27E-05	3.66E-05	6.51E-04	6.88E-04	0.056	1.61E-04	9.52E-06	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#42	#AD	湧水	2013/12/17	5.7	5.9	0.400	212	1.32E-06	3.68E-05	8.30E-04	8.67E-04	0.044	1.89E-04	3.03E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.042
#43	#AD	湧水	2013/12/17	7.6	4.1	0.410	148	7.94E-05	-	-	-	-	1.68E-04	1.66E-05	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#44*	#AD	湧水	2013/11/13	19.0	7.2	0.390	1,293	7.08E-08	-	-	-	-	1.07E-04	8.57E-07	<0.04	0.003	0.004	<0.01	0.061
#45	#AD	湧水	2013/12/17	6.0	4.7	0.480	107	2.14E-05	3.77E-05	3.53E-04	3.90E-04	0.107	1.44E-04	8.32E-06	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#46*	#AD	湧水	2013/11/13	18.5	6.9	0.371	655	1.23E-07	-	-	-	-	1.05E-04	1.96E-06	<0.04	0.003	0.004	<0.01	<0.03
#47*	#AE	湧水	2012/10/1	20.0	7.2	0.275	605	7.08E-08	-	-	-	-	3.28E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.182
#48	#AE	排水	2012/11/4	12.6	6.9	0.306	461	1.23E-07	-	-	-	-	2.18E-04	8.93E-08	0.256	<0.001	<0.001	<0.01	0.098
#49	#AF	排水	2012/11/6	14.1	6.9	0.424	66	1.38E-07	-	-	-	-	9.40E-05	<1.7E-08	0.100	<0.001	<0.001	<0.01	0.050
#50	#AG	排水	2012/11/6	15.5	7.3	0.413	76	5.37E-08	-	-	-	-	8.50E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	0.053
#51*	#AH	排水	2012/5/10	24.3	7.0	0.410	428	1.07E-07	-	-	-	-	5.00E-04	1.07E-07	0.015	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#52	#AI	排水	2012/11/8	11.4	7.1	0.367	353	7.41E-08	-	-	-	-	4.94E-04	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#53	#AJ	排水	2012/11/4	10.1	6.9	0.438	58	1.17E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#54	#AK	湧水	2012/11/8	10.8	5.2	0.457	82	6.76E-06	-	-	-	-	1.24E-04	1.46E-06	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#55	#AL	排水	2012/11/6	10.8	6.9	0.547	99	1.15E-07	-	-	-	-	2.95E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#56	#AM	排水	2012/11/4	12.0	7.4	0.436	92	3.98E-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#57	#AN	排水	2012/12/14	6.7	6.9	0.290	360	1.32E-07	-	-	-	-	3.81E-04	1.07E-07	<0.04	<0.001	0.008	<0.01	<0.03
#58	#AO	排水	2012/11/3	14.9	7.1	0.424	94	7.94E-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#59	#AP	排水	2012/12/13	4.1	7.2	0.313	224	6.31E-08	-	-	-	-	6.00E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	0.010	<0.01	<0.03
#60	#AQ	排水	2012/12/14	6.0	6.8	0.261	203	1.51E-07	-	-	-	-	2.57E-04	6.71E-06	0.129	<0.001	0.011	<0.01	<0.03
#61	#AR	排水	2012/11/6	11.1	6.7	0.577	281	2.19E-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
#62	#AS	排水	2012/11/8	10.8	6.4	0.427	114	3.63E-07	-	-	-	-	8.35E-05	<1.7E-08	<0.04	<0.001	<0.001	<0.01	<0.03
#63	#AT	排水	2012/11/4	10.7	7.2	0.427	140	5.75E-08	-	-	-	-	2.32E-04	<1.7E-08	<0.04	<0.001	0.002	<0.01	<0.03
#64	#AU	排水	2012/11/3	15.0	7.3	0.424	189	4.79E-08	-	-	-	-	1.47E-						

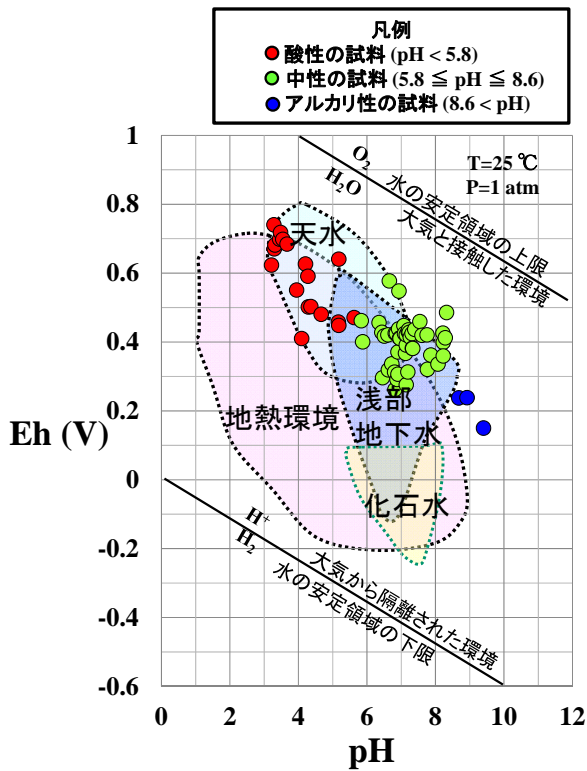


図-4 主な起源の水の領域を示した Eh-pH ダイアグラム (Baas Becking et al. (1960) に加筆)

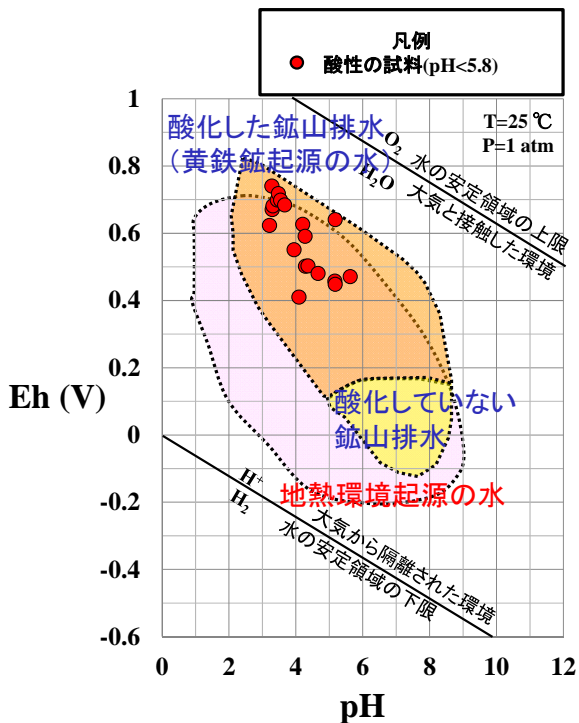


図-5 酸性水起源の領域を示した Eh-pH ダイアグラム (Baas Becking et al. (1960) に加筆)

3. 1. 2 化学分析結果

(1)イオンクロマトグラフ分析

酸性水のイオンクロマトグラフ分析の結果、塩化物イオン(Cl⁻)の濃度は $3.04 \times 10^{-5} \sim 5.83 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ であった。一方、硫酸イオン(SO₄²⁻)の濃度は $2.67 \times 10^{-4} \sim 1.20 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ であった (表-2)。

まず、図-6 に水素イオン(H⁺)濃度と Cl⁻+SO₄²⁻濃度との関係を示す。水素イオン濃度が増加するのに伴い、Cl⁻+SO₄²⁻濃度は $9.32 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ から $1.65 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ まで増加した。試料の Cl⁻+SO₄²⁻濃度は玉川温泉等の分析値⁶⁾と比較して総じて低いが、水素イオン濃度と概ね正の相関を示す。ただし、Cl⁻イオンは海水や NaCl 型の泉源でも含まれることがあるが、あらかじめ Na⁺濃度と Cl⁻濃度には相関が認められないことを確認した¹³⁾。ゆえに、これら酸性水の試料は塩酸と硫酸の混酸であることが分かる。塩酸は火山ガスにしか含まれていないことから、これらの酸性水の試料は火山に由来した地熱環境起源である可能性が高い。

Cl⁻+SO₄²⁻ (mol/L)

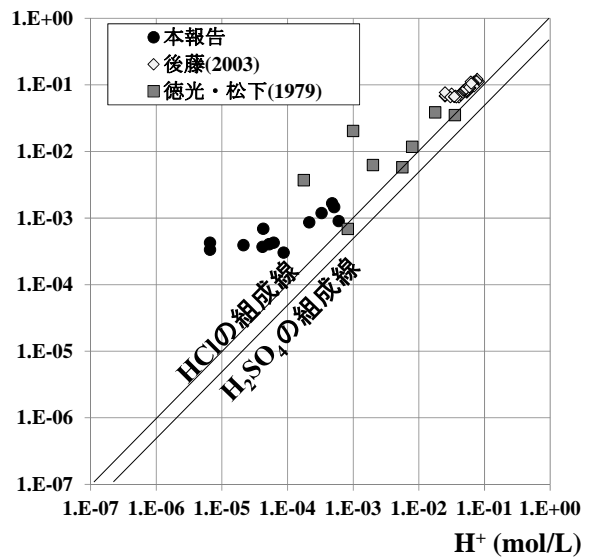
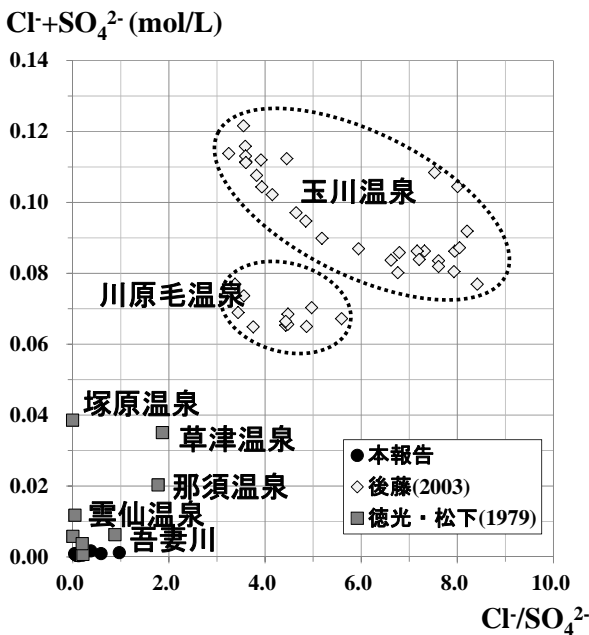


図-6 水素イオン濃度と Cl⁻+SO₄²⁻濃度との相関

次に、Cl⁻/SO₄²⁻濃度比は#AD トンネルで 0.044~0.974、#G トンネルでは 0.229~0.379、#J トンネルで 0.213 であり、いずれも 1 を下回った (表-2)。これら試料には硫酸イオンが相対的に多く含まれ、酸性から弱酸性の硫酸塩泉として特徴づけられる。図-7 に Cl⁻/SO₄²⁻濃度比と Cl⁻+SO₄²⁻濃度との相関を示し、文献の分析値⁶⁾¹⁴⁾と比較した。後藤(2003)⁶⁾の玉川温

泉や川原毛温泉等の強酸性泉の分析値に比べると極めて小さい。(図-7(a))。一方、徳光・松下(1979)¹⁴⁾ 島温泉や明礬温泉等の弱酸性泉の分析値と同程度である(図-7(b))。ただし、このうち、#AD トンネルの Cl^-/SO_4^{2-} 濃度比は 0.083~0.974 を示し、同一のトンネルでも試料の採取位置により塩酸の占める割合が異なる。例えば試料#30 は 0.974 を示し、同じトンネルの他所の試料と比べて際立って高い値を示した。

(a) 強酸性泉の分析値⁶⁾との比較



(b) 弱酸性泉の分析値¹⁴⁾との比較

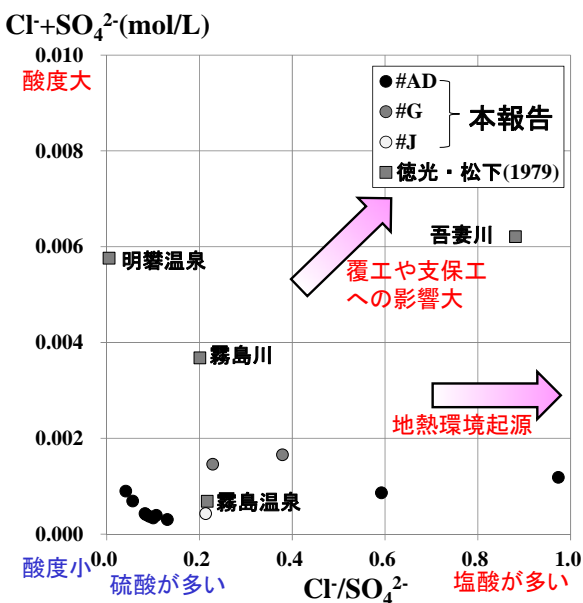


図-7 Cl^-/SO_4^{2-} 濃度比と $Cl^-+SO_4^{2-}$ 濃度との相関



図-8 黄鉄鉱の産状

同試料には塩酸と硫酸がほぼ 1:1 で含まれ、他所の湧水に比べて塩酸が相対的に多く含まれている。同トンネルでは地山の新第三紀層泥岩中に黄鉄鉱を脈状に含むことから(図-8)、この黄鉄鉱が酸化し硫酸を発生すると考えられていたが、このように塩酸を多く含む湧水もあることから、場所により地熱起源の地下水と混合していると推定される。

なお、塩酸は硫酸よりも酸化力が強くコンクリートに与える影響が大きいことから⁷⁾、#AD トンネルは他の #G や #J トンネルに比べて覆工コンクリートや支保工の鋼材に最も酸性湧水の影響が及んでいると推定される。そこで、次項でコンクリートや鋼製支保工等の主要部材の元素である Ca 濃度と Fe 濃度を ICP 発光分析により定量した。

(2) ICP 発光分析結果

ICP 発光分析結果を表-2 に示す。Ca 濃度は $2.80 \times 10^{-5} \sim 5.00 \times 10^{-4} \text{mg/L}$ であった。一方、Fe 濃度は $7.14 \times 10^{-8} \sim 4.96 \times 10^{-5} \text{mg/L}$ であった。

そのうち、#G、#J、#W、#AD、#AK、#AS の 6 トンネルにおける酸性水における Ca 濃度と Fe 濃度は以下のとおりである。Fe 濃度は $1.96 \times 10^{-7} \sim 1.64 \times 10^{-5}$ を示した。図-9 に Fe 濃度と水素イオン濃度との相関を示す。水素イオン濃度が增大するにつれ、Fe 濃度は総じて増加し、 H^+ との反応式から推定される組成線よりも下回る値を示した。Fe 濃度の増加は周辺岩盤や鋼製支保からの溶出によると考えられる。一方、Ca 濃度は $2.80 \times 10^{-5} \sim 1.90 \times 10^{-4}$ を示した。図-10 に Ca 濃度と水素イオン濃度との相関を示す。酸性水でも多くはばらつき、必ずしも水素イオン濃度との相関は認められなかった。しかし、図-11 や

図-12 に示すように、坑壁では化学的侵食が認められたほか、坑壁背後のコアが溶食されている箇所も認められた。ゆえに、これらの Ca 濃度は坑壁コンクリートからの溶出による寄与が高いと考えられる。

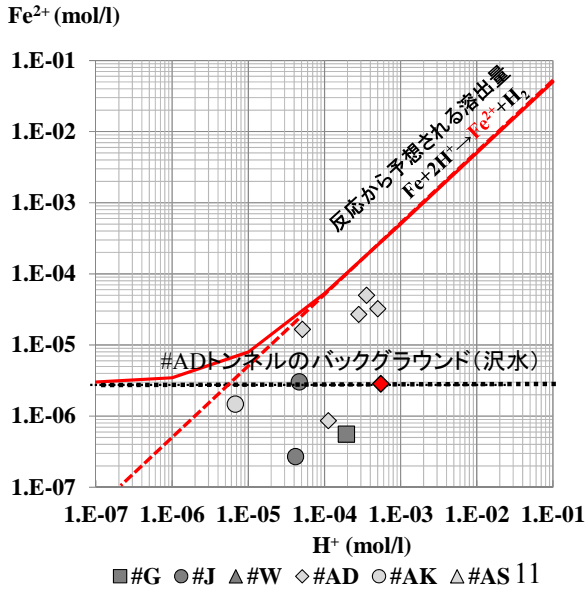


図-9 Fe 濃度と水素イオン濃度との相関

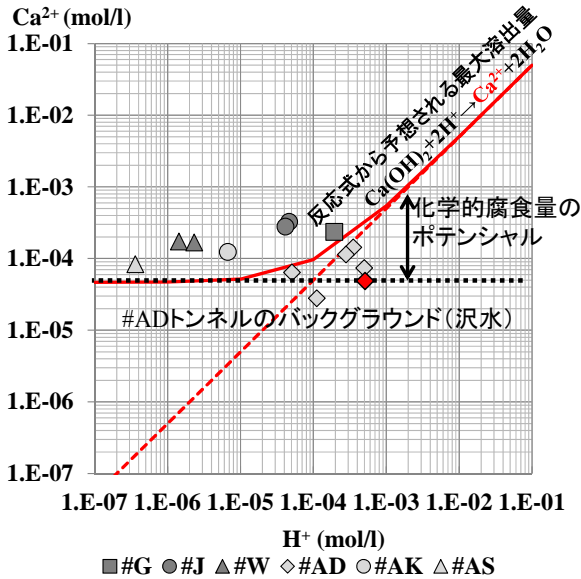


図-10 Ca 濃度と水素イオン濃度との相関



図-11 坑壁の溶食



図-12 坑壁背部のコアの溶食

一方、As、Cd、Cr、Pb、Se の重金属類の分析結果を表-2 に示す。As 濃度は 0.015~0.98mg/L、Cd 濃度は 0.003mg/L、Cr 濃度は 0.002~0.012mg/L、Pb 濃度は 0.021~0.027mg/L、Se 濃度は 0.034~0.210mg/L であった。このうち、「水質汚濁防止法に関わる排水基準」(以下、排水基準と略す) に定められた値を超過したのは、As 濃度において 6 トンネル 9 試料で、Se 濃度において 3 トンネル 4 試料であった(図-13)。まず、As 濃度は酸性からアルカリ性の幅広い pH で溶出していた。また、Se 濃度も同様に酸性からアルカリ性の幅広い液性で溶出していた。

ただし、掘削時に重金属類の溶出が懸念されていたトンネルで必ずしも重金属が高い訳ではなかった。例えば#AV トンネルは金、銀、銅、鉛、亜鉛を産した黒鉱鉱床の鉱山跡に掘削されたトンネルで、工事

における溶出試験では pH、銅、鉛、鉄が基準値を超えていた¹⁰⁾。しかし、竣工から 19 年経過した計測時点では試料#65 に示すように pH は 7.3 で、重金属類の濃度も排出基準を超えていない。同様に#C、#K トンネルでも工事中に重金属の溶出が確認されていた¹⁵⁾¹⁶⁾が、竣工からそれぞれ 6 年、9 年が経過した計測時ではいずれも排出基準を超えなかった。しかしながら、#AE トンネルでは As 濃度や Se 濃度の一部の濃度で基準値を超えた。また、#Z トンネルでは施工時にモニタリングしていた As 濃度ではなく、Se 濃度で基準値を超えていた。その他、#W や#AD のトンネルのように酸性水が排出されている箇所でも重金属の溶出が認められた。

以上から、多くのトンネルでは施工の終了とともに岩盤が坑壁で覆われ、硫化鉱物の酸化を防ぎ、時間経過に伴い pH 値が上昇し重金属類の溶出も認められなくなる。ただし、長期的には岩種や酸性水によっては、周囲の岩盤を溶かす際に併せて重金属類も溶出させるなどして重金属類を排出していると考えられる。

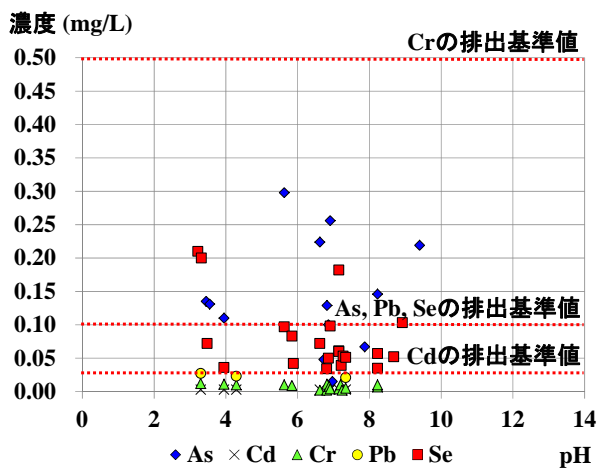


図-13 重金属類元素濃度と pH との関係

(3) 地下水環境評価マニュアルの作成

これまでの調査結果をまとめて、「酸性地下水環境評価マニュアル(案)」を作成した。本マニュアルでは、試料採取、水質調査、化学分析、評価までの一連の方法をとりまとめ、それぞれにおける留意点を述べた。その目次構成を図-14 に示す。

目次

1. 総則
 - 1.1 目的と適用範囲
 - 1.2 トンネル掘削工事が地下水に及ぼす影響
 - 1.3 地下水が周辺環境に与える影響
 - 1.4 北海道における地下水の現状と課題
 - 1.5 用語の定義
2. 地下水調査の計画
 - 2.1 地下水調査の基本的考え方
 - 2.2 地下水調査のフロー
3. 地下水調査
 - 3.1 文献調査
 - 3.2 関連法規の調査
 - 3.3 現地調査
4. 分析
 - 4.1 試料調整
 - 4.2 水質調査
 - 4.3 微量元素の分析
5. 評価
 - 5.1 地下水起源の評価
 - 5.2 土木構造物への影響評価
 - 5.3 周辺環境への影響評価

引用文献

図-14 マニュアル(案)の目次

3.2 地下水環境データベースの構築

図-15 に地下水環境データベースの表示例を示す。WEB 上のブラウザで 6,121 件の地下水位を事業名等で検索し閲覧できるようにした。また、関連情報をクリックすることで、地下水情報に関連する報告書の全文や柱状図を PDF や XML で閲覧できるようにした。

4. まとめと今後の課題

本研究の成果は、以下のようにまとめられる。

- 1) Eh-pH ダイアグラムと $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 濃度比からトンネル湧水や排水の地質起源を明らかにした。
- 2) ICP 発光分析を実施し地下水中に溶解している Ca や Fe の主要部材を構成する元素を定量し、水素イオン濃度に応じたトンネル坑壁の化学的腐食量を評価した。また、As、Cd、Cr、Pb、Se の重金属類の元素濃度を定量し周辺環境への影響の有無を評価した。
- 3) 水質調査をはじめ、化学分析、評価までの一連の流れをとりまとめ、「酸性地下水環境評価マニュアル(案)」を作成した。
- 4) 地下水環境データベースを構築し、6,121 件の地下水位情報を WEB 上で検索・閲覧できるようにした。

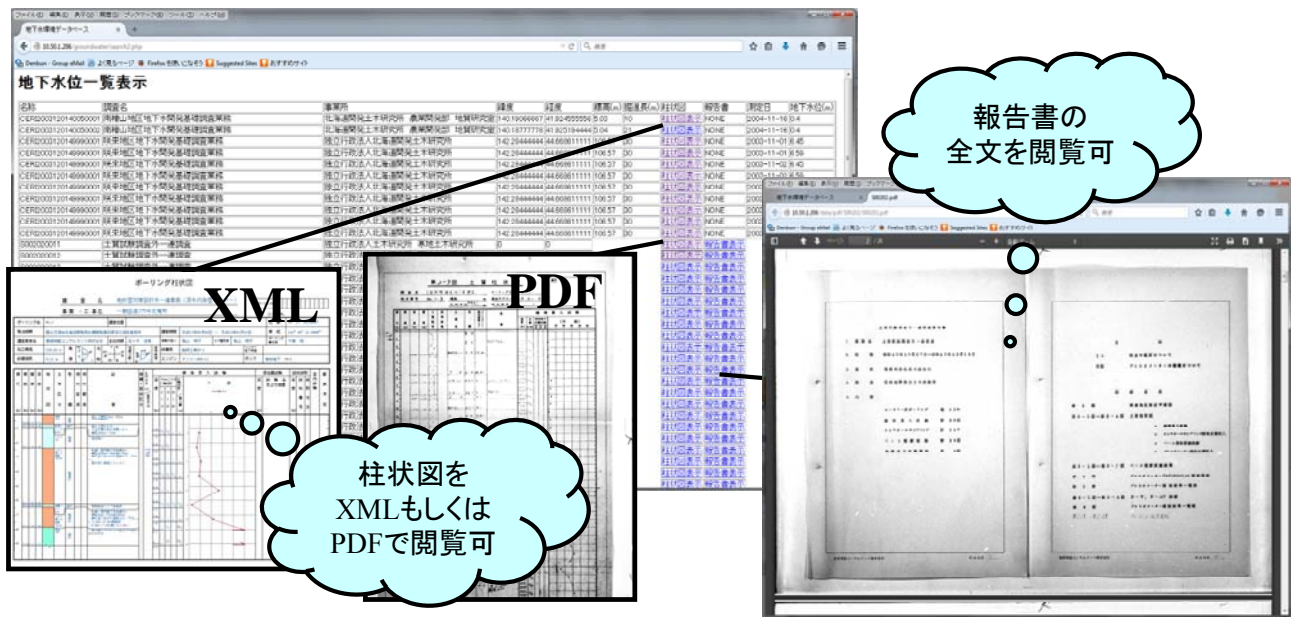


図-15 地下水環境データベースの表示例

参考文献

- 1) 鈴木道雄, 諏訪義雄: 三国トンネルにおける巻き立てコンクリートの侵食とその対策, 道路とコンクリート, No.13, pp.15-22, 1971.
- 2) 原田勇雄: 北海道における主要プロジェクトに関する土質・基礎の話題, 5.オロフレトンネルの設計施工—鉱化変質帯のトンネル施工例, 土と基礎, Vol.37, No.9, pp.101-104, 1989.
- 3) 青木卓也, 五十嵐敏文, 飯尾佳浩: アルカリ性トンネル排水の性状と自然浄化作用による中和過程, 応用地質, Vol.50, No.5, pp.273-279, 2009.
- 4) 大島洋志, 藤原幹之: トンネル掘削に伴う地下水への影響評価, 地下水技術, Vol.40, No.8, pp.1-13, 1998.
- 5) Baas Beking, L. G. M., Kapkan, I. R. and Moore D.: Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation-reduction potentials, Geology, vol. 68, no.3, pp.243-283, 1960.
- 6) 後藤達夫: 世界的にみて最も大規模な火山性強塩酸性泉の玉川温泉の水質特徴ならびに玉川の水質改善効果について(1), 水, Vol.45, No.13, pp.61-68, 2003.
- 7) 蒔田 実, 坂本浩行: コンクリートの耐酸性について, 第27回建設技術研究会報告, pp.115-121, 1972.
- 8) 峯本 守: 新宇佐美トンネル(温泉余土)のNATMの施工, 建設の機械化, 1980年9月号, pp.10-18, 1980.
- 9) 鈴木達己・池田兵十郎・村田省三・依田忠雄: 函館新道新大沼トンネル工事における鉱化変質作用地質対策について, 北海道開発局技術研究発表会論文集, pp.121-126, 1988.
- 10) 佐々木祐三, 田中 栄: 旧鉱山地域におけるトンネル工事について—東北自動車道 亀田山トンネル—, 日本道路公団技術情報, No.77, pp.80-85, 1985.
- 11) 関 修: 落差を利用した簡易中和プラントの提案(若彦トンネルから), 建設技術講習会レポート, 山梨県建設技術協会, pp.1-6, 2008.
- 12) 浅森浩一・石丸恒存・岩月輝希: 日本列島における火山周辺の酸性地下水分布, サイクル機構技報, No.15, pp.103-111, 2009.
- 13) 倉橋稔幸, 岡崎健治, 田本修一, 伊東佳彦: 既設トンネルの酸性恒常湧水における微量元素の定量分析について, 日本地下水学会秋季講演会講演要旨, pp.254-257, 2013.
- 14) 徳光善治, 松下博通: 温泉地帯とコンクリート, コンクリート工学, Vol.17, No.11, pp.31-35, 1979.
- 15) 新谷義行: 一般国道230号三豊トンネル工事技術報告—施工上の取り組みについて—, トンネル研究委員会会報, 北海道土木技術会, No.36, pp.1-6, 2003.

A STUDY ON EVALUATION OF TUNNEL DRAINAGE IN THE MAINTENANCE STAGE

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Cold Region Construction

Engineering Research Group

(Geological Hazards Research

Team)

Author : KURAHASHI Toshiyuki

YAJIMA Yoshinori

TAMOTO Shuichi

Abstract :

This paper describes the results of water quality measurements, ICP spectrochemical analysis and ion chromatography to evaluate the chemical variation of the drainage water and the seepage water. We collected 69 samples of drainage water and seepage water from 47 tunnels during maintenance in eastern Japan, and determined the quantities of nine elements (Ca, Fe, As, Cd, Cr, Pb, Se, Cl⁻ and SO₄²⁻) by either ICP spectrochemical analysis or ion chromatography. We determined groundwater origin, and evaluated the degree of chemical attack to the concrete wall due to acid drainage and seepage. We also built a database of groundwater tables, and wrote a manual of acid groundwater evaluation.

Key words : groundwater, tunnel drainage, maintenance stage, water quality measurement, chemical analysis