

博 士 論 文

中山間地域の水質環境に及ぼす高速道路における  
凍結防止剤の影響に関する研究

平成29年3月

秦 二郎

岡山大学大学院  
環境生命科学研究科

## 目 次

第1章 序論 .....	1
1.1 本研究の背景と課題 .....	1
1.2 既往の研究 .....	3
1.2.1 中山間地域の地下水および河川水の水質の研究 .....	3
1.2.2 路面排水が周辺環境に及ぼす影響についての研究 .....	5
1.3 本研究の目的 .....	6
1.4 本論文の構成 .....	7
第1章の参考文献 .....	10
第2章 調査地の水質特性 .....	12
2.1 はじめに .....	12
2.2 地形・地質・気象状況・土地利用の特徴 .....	13
2.3 採水と分析 .....	15
2.4 調査結果および考察 .....	16
2.4.1 地質別の水質特性 .....	16
2.4.2 地質・風化状況が水質に及ぼす影響 .....	21
2.4.3 高速道路路面排水が水質に及ぼす影響 .....	23
2.5 まとめ .....	29
第2章の参考文献 .....	30
第3章 凍結防止剤の地下浸透量，河川流出量および飛散量の定量化 .....	31
3.1 はじめに .....	31
3.2 雪氷対策の概要 .....	32
3.3 凍結防止剤の地下浸透経路調査 .....	33
3.3.1 調査地の概要 .....	33
3.3.2 調査および試験方法 .....	34
3.4 調査結果 .....	40
3.4.1 縦排水溝への排出量 .....	40
3.4.2 路面からの浸透率 .....	43
3.4.3 のり面への排雪・飛散による浸透量 .....	45
3.4.4 排水路の目地開きからの浸透状況 .....	46
3.4.5 河川の水質 .....	48
3.5 考察 .....	49
3.5.1 凍結防止剤の散布量と浸透量・排出量（収支）関係の推計 .....	49
3.5.2 凍結防止剤（塩分）の地下貯留量の推計 .....	52

3.6	まとめ	53
第3章	の参考文献	54
第4章	浸透流—移流分散解析に基づく凍結防止剤の地下浸透に関する検討と将来予測	55
4.1	はじめに	55
4.2	調査・観測・解析位置	56
4.3	現地調査手法	58
4.3.1	既設井戸の水質調査	58
4.3.2	調査ボーリングおよび原位置試験	58
4.4	凍結防止剤の地下浸透流解析	60
4.4.1	支配方程式	60
4.4.2	解析条件	62
4.5	調査解析結果	66
4.5.1	既設井戸の観測値（塩化物イオン濃度）の変動特性	66
4.5.2	解析結果の再現性の検証	67
4.5.3	供用開始時からの濃度の時間変化	72
4.5.4	現在の濃度の特徴	73
4.6	考察	74
4.6.1	2次元モデル，解析パラメータが解析結果に与える影響について	74
4.6.2	凍結防止剤浸透メカニズム	75
4.6.3	凍結防止剤散布を中止した場合の今後の予測	78
4.6.4	流末水路目地補修，高速道路舗装補修の及ぼす影響について	80
4.7	まとめ	81
第4章	の参考文献	82
第5章	結論	83
5.1	本研究のまとめ	83
5.2	今後の課題と展望	86
5.2.1	今後の課題	86
5.2.2	今後の展望	87
第5章	の参考文献	90
謝辞		91

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景と課題

水は我々の健康で文化的な生活の維持および持続的な生産活動にとって不可欠なものである。我が国の水道の普及率は平成26年度で実に97.8%<sup>1)</sup>に達しており、我々は日常生活において良質な水質の水を自由に使える恩恵を授かっている。平成26年度版日本の水資源<sup>2)</sup>によると、我が国は世界でも有数の多雨地帯であるモンスーンアジアの東端に位置し、年平均降水量は1,690mmで、世界（陸域）の年平均降水量約810mmの約2倍となっている。しかし、一人当たりの年降水総量をみると、我が国は約5,000m<sup>3</sup>/人・年となり、世界の一人当たり年降水総量約16,000m<sup>3</sup>/人・年の3分の1程度となっている（図-1.1）。つぎに、一人当たり水資源賦存量を海外と比較してみても、世界平均である約8,000m<sup>3</sup>/人・年に対して我が国は約3,400m<sup>3</sup>/人・年と2分の1以下である（図-1.1）。さらに、渇水年の水資源賦存量は平均水資源賦存量の約67%となることが報告されている。

このように我が国の水資源を取り巻く環境は厳しいものがあり、その保全は重要な課題である。

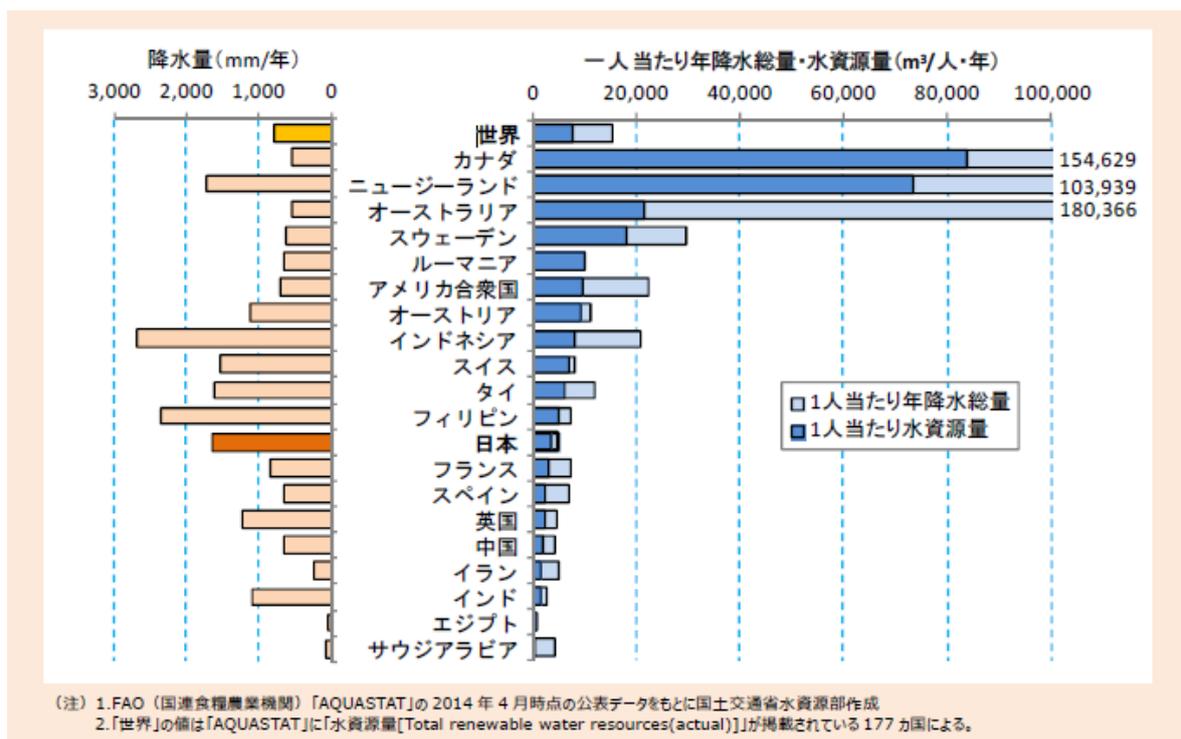


図-1.1 世界各国の降水量等<sup>2)</sup>

中山間地域は、平野の外縁部から山間地を指し、山地の多い我が国では国土面積の約7割を占めている。また、河川流域の上流部に位置することから、中山間地域の森林や農業・農村が持つ水源涵養力は、その地域の住民のみならず、下流域の都市住民にとっても貴重な水資

源となっている。したがって、中山間地域の地下水・河川水の水質を定期的にモニタリングしていくことは水資源の保全の観点から重要なことと考えられる。

一方、高速道路を含む高規格幹線道路は、工場地帯や農業地帯などの生産圏と都市圏、あるいは都市圏同士を結ぶために、中山間地域を通過してネットワーク状に全国に張り巡らされている（図-1.2）。平成27年度までの全国の高速度道路の供用延長距離は8,427.7kmに及ぶ<sup>3)</sup>。

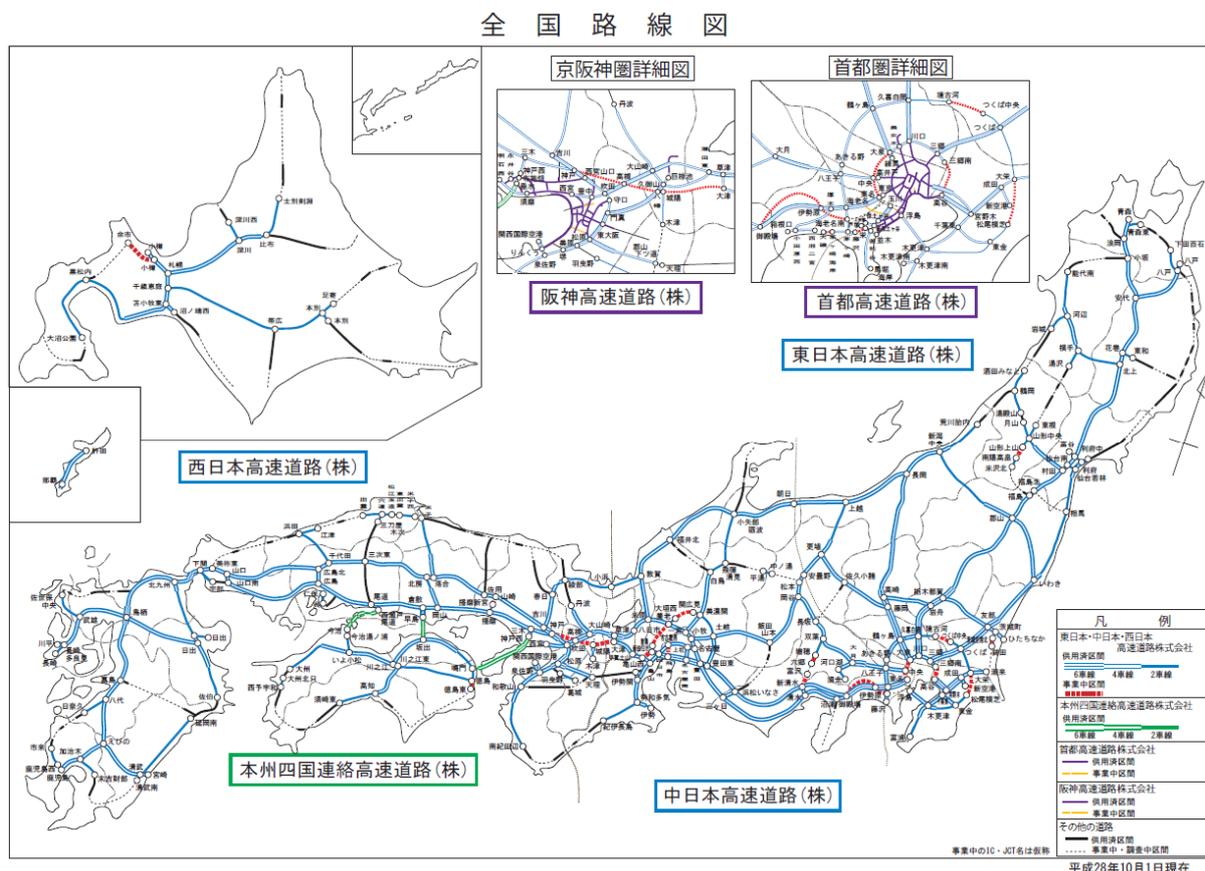


図-1.2 高規格幹線道路の全国路線図<sup>4)</sup>

これらの道路建設工事が周辺の水文環境に及ぼす影響については、法律<sup>5)</sup>に基づき建設時等に水文調査や井戸調査等を行っている。しかし、土壌汚染・地下水汚染等の懸念のない通常地域で、供用後の長期にわたる道路運用が周辺の水環境に及ぼす影響については、そのモニタリングを義務付けるための法律等の整備は行われていない。今後、さらに増える高速道路の供用延長と長期にわたる道路運用、そして道路施設の老朽化を勘案すると高速道路の路面排水が沿道周辺の水質に及ぼす影響を検討することは、水資源の保全観点から重要な課題と考えられる。

本研究では、中山間地域で長期にわたり路面排水の影響を受けている水源が研究の対象である。そこで、供用後30年以上が経過している高速道路でその路面排水の影響を受け易い井戸等の水源が数多く分布する沿道を研究対象地域とした。

## 1.2 既往の研究

既往研究の整理にあたっては、2つの視点から研究資料の分類・整理を行った。1つは主に自然状態での水質に関するもので、中山間地域では河川水および地下水の水質は、その帯水層を構成する地質・土質の成分の影響を強く受けるため、我が国の降水起源の陸水についての研究の取り組みとその水質特性を調べるためである。もう1つは路面排水等の人為的な作用が水質に及んだ場合の既往事例の研究で、より応用的な側面を持っており、後述するように海外の研究についても取り上げている。

### 1.2.1 中山間地域の地下水および河川水の水質の研究

中山間地域で数多くの既往研究が行われているのは、六甲山地域に代表される花崗岩地域である。北野ら<sup>6)7)</sup>は六甲山系の住吉川および芦屋川流域において、砂防工学的な立場から災害をもたらす原因である岩石の深層風化の度合はその岩石を通ってきた天然水中のカルシウムイオンあるいは重炭酸イオン含有量から推定できることを示した。笠間ら<sup>8)</sup>は六甲山地のトンネル湧水について、3年間にわたる水質観測を行い、水資源開発の観点から断層破砕帯のそれぞれで湧水量の多少がある原因を追究することが必要であると述べている。黒田ら<sup>9)</sup>は断層破砕帯に遭遇した新幹線六甲トンネル、神戸トンネルおよび中央道恵那山トンネルの抗内湧水を採水・分析した結果、断層破砕帯の初期湧水には鉱泉水の影響を受けているものと、影響を受けていないものの2通りがあることを報告している。一方、六甲山系の河川水については、日下ら<sup>10)</sup>が六甲山系を源とするすべての主要14河川とその他に6小河川で水質調査を行っており、河川水中の主要溶存成分含有量は地質の影響が顕著にあらわれていること、花崗岩地域における河川水中の主要溶存成分の平均濃度は日本の河川水の平均値とほぼ一致することなどを報告している。吉岡<sup>11)</sup>は上で述べた六甲山系の水質に関する既往の研究結果を応用地質学的・水理地質学および地球化学的視点から紹介している。

他の地域では、竹村<sup>12)</sup>は長野県下伊那西地区における河川の水質について、地質条件を考慮しながら化学分析値に基づき水質の成因と分類を試み、同地区の河川の水質を4群に分類している。また、桜井ら<sup>13)</sup>も長野県内の山地（北アルプス東麓）の河川水について、地質環境が河川水質に与える影響を明らかにするために、花崗岩地帯と堆積岩地帯を流下する複数の山地溪流に定点を設け、約3年にわたって河川水中の主要イオン濃度・組成を測定している。その結果、各河川について地質図に対応するような水質図を作成することが可能であると結論を得ている。このように、長野県下で水質研究が行われる背景は、人為的な影響を捨象できるような自然環境であること、すなわち地形的要因によるものと考えられる。一方、人為的な影響を考慮した研究としては中島ら<sup>14)</sup>が佐賀県の地下水の水質について行っている。これによると、シュティフダイアグラムとトリリニアダイアグラムを基に、地質や周辺の環境を考慮しながら分類することで、水質の傾向や、汚染されている可能性のある地点を明らかにしている。

全国の水質傾向がわかる既往の研究としては、藪崎ら<sup>15)</sup>が平成の名水百選の水質特性を調

べている。平成20年に全国の地下水、河川水、湧水などから新たに100地点が名水として選ばれたものを調査したもので、水質組成としては、Ca-HCO<sub>3</sub>型が卓越しているが、Na-Cl型のようには海水や風送塩の影響を受けている地点やCa-SO<sub>4</sub>型のように火山などの影響があらわれていると考えられる地点が認められている。

地質別の水質に関する既往の研究では、佐々木<sup>16)</sup>が日本および北欧・北米の楯状地の花崗岩中に賦存する地下水の基本的な性状を文献調査により整理し、花崗岩中の降水起源の地下水は低塩濃度 (<1g/L) であり、浅部では弱酸性-中性、酸化的、Ca・Na-HCO<sub>3</sub>型の水質であるが、深部では弱アルカリ性 (pH<10)、還元的、Na-HCO<sub>3</sub>型の水質となることを報告している。穴澤ら<sup>17)</sup>は我が国の火山地域における天然陸水の水質形成機構に、火山岩の主要構成物であるケイ酸塩鉱物の溶解反応が重要な役割を果たしていることを明らかにしている。一方、非火山地域については、尾山ら<sup>18)</sup>が約5200点の深層地下水データを4つのタイプの地質（堆積岩類、付加コンプレックス、火山岩類、深成岩類）を基に分類し、各地質における深層地下水の水温、pH、主要イオン濃度の比較を行っている。この結果、それぞれの地質で有意な差があることを示している。

砂防地質的には地すべり地の水質特性についても幾つかの研究がある。吉岡ら<sup>19)</sup>は第三紀層地すべり地と破碎帯地すべり地について全国12箇所を調査し、その水質の比較検討を行っている。また、渡部ら<sup>20)</sup>は新潟県松之山地すべり地域の地下水の水質について研究を行っており、同じ地すべり地内でも酸性凝灰岩と泥岩の違いにより、水質のタイプが異なることを明らかにしている。

特定の水質項目としては、古米ら<sup>21)</sup>はケイ酸について取り扱っている。その内容は、ケイ酸の起源や流出・動態に関する事象やケイ酸に関わる研究事例の紹介で、ケイ酸など無機溶解物質の河川におけるモニタリングの必要性を説いている。

上で述べた既往の研究は、地域的な偏りがあるものの、中山間地域の降水起源の水質データとして貴重な資料と評価される。これらの研究成果は、本研究地域の水質が現在どのような状態であるかを検討する上で重要な指標となるものと考えられる。

## 1.2.2 路面排水が周辺環境に及ぼす影響についての研究

道路の路面排水が周辺の水質環境に及ぼす影響についての既往の研究は、路面排水に含まれる化学物質を取り扱った研究と凍結防止剤を取り扱った研究に大きく区分できる。

まず、化学物質を取り扱った代表的な研究としては、曾根ら<sup>22)</sup>が既往の研究11編についての概要整理、関係機関へのヒアリング、53種類の化学物質（塩化物イオンを除く）について実道路における路面排水の調査を行っている。首都圏の実道路での亜鉛・鉛の濃度分布調査結果より、両者の濃度はほとんどの地点で低濃度であり、排水基準等との比較から環境や健康等への影響は問題ないレベルと評価している。また、鉛の由来は降下煤塵によるもの、亜鉛は路面粉塵に含まれる自動車タイヤ屑が原因の一つとなっている可能性が高いと述べている。

一方、凍結防止剤を取り扱った研究では、木村ら<sup>23)</sup>が北海道、東北地方、北陸地方の一般国道3路線の沿道で観測井による地下水調査を行っている。それによると我が国で使用している凍結防止剤のほとんどは塩化物系で、全体の70%以上がNaClである。しかし、凍結防止剤の地下水への影響はほとんど無いものと考えられ、地下水の塩化物イオン濃度は水道法による水道基準200mg/L以下を大きく下回る値で、融雪期に電気伝導率で10~15mS/m程度（塩化物イオン濃度換算で約8~22mg/L）の増加は認められたが、極めて低い値であることを報告している。

つぎに、高速道路については、吉江ら<sup>24)</sup>が調査を行っているが、JH（旧道路公団）に寄せられた塩による苦情の内、何らかの対策を実施したものの中には井戸水・地下水の塩水化はあげられていない。よって、実態調査からは、我が国では凍結防止剤が地下水に与える影響は極めて少ないものと考えられている。

また、室内実験では、田湯ら<sup>25)</sup>が路面舗装の状態と凍結防止剤の移動現象についての研究を行っており、粗面系舗装と密粒度舗装上に散水して凍結路面を作製し、凍結防止剤散布後に一定数の車輪走行があった場合の、凍結防止剤および融解水の貯留と流出などの移動現象を定量的に示している。

海外の既往研究では、カナダのハイランドクリーク流域において、20年後の環境アセスメント調査で、凍結防止剤が地下水へ浸透し、カナダ環境省の塩化物イオン濃度の飲料水基準250mg/Lを超える濃度が検出され、その対策が図られている事例がある<sup>26)</sup>。

以上で示されるように、我が国においては、凍結防止剤が沿道環境に及ぼす影響についての研究事例が少なく、かつ地下水の水質に及ぼす影響は小さいように扱われている。一方、海外ではその国の環境基準を超える濃度も報告されている。このことから、我が国においても、地形・地質・気象、排水施設の老朽化、凍結防止剤の散布方法・散布量などの諸条件が重なった場合には、凍結防止剤が沿道の地下水水質に影響を及ぼす可能性のあることが懸念される。

したがって、凍結防止剤の地下浸透が懸念されるような地域での研究調査は、極めて意義のある研究と考えられる。

### 1.3 本研究の目的

本研究は、中山間地域の地下水や河川の水質に及ぼす高速道路の路面排水（特に凍結防止剤）の影響を検討することを目的としている。また、この成果は、道路構造的あるいは地形・地質的に類似性のある他地域での環境調査・対策の基礎資料として活用されることを目指している。

研究の進め方は、大きく3つのステップで進めた。まず第1ステップは研究対象地域の水質の実態把握である。調査地は、中山間地域を通過する供用後30年以上が経過する高速道路の沿道で、道路の排水施設は老朽化が進んでいる。84箇所の調査地点について、10月の非雪氷期と2月の雪氷期に採水および水質検査を実施した。高速道路の路面排水の影響範囲内で、凍結防止剤を含む路面排水が、地下水の塩化物イオン濃度を上昇させていることを明らかにした。

つぎに、第2ステップでは凍結防止剤の実際の地下浸透・河川流出および路外飛散状況の定量的な把握を目的として、高速道路の路面や水路およびその周辺において現地調査、また河川の水質変化について経時的な観測を行った。調査結果から実際に路面排水が路面クラックや流末水路目地から地下に浸透している状況を確認し、凍結防止剤の地下浸透量・河川流出量および路外飛散量等を定量的に推計した。

第3ステップにおいて、凍結防止剤の地下浸透経路および浸透範囲等を定量的に把握する目的で2次元浸透流－移流分散解析を実施した。さらに、凍結防止剤の地下浸透に調査地の特異な地質構造が関与していることを明らかにするとともに、散布を中止した場合の将来の予測を試みた。

本研究の成果は、排水施設の老朽化の進んだ供用年数の長い高速道路でのケーススタディーである。しかしながら、このような研究事例や業務事例の報告は少ないため、希少な研究成果と考える。他地域での環境調査・対策の基礎資料として、今後活用されることを期待したい。

## 1.4 本論文の構成

本論文は5章で構成される。第2章は研究対象地域の水質特性について、第3章は凍結防止剤の地下浸透や河川流出量等を定量化するために実施した現地調査と検討について、第4章は浸透流－移流分散解析により凍結防止剤の地下浸透経路と現在の水質状況の推定、凍結防止剤の散布を中止した場合の水質の将来予測についてまとめたものである。各章の概要は、以下のとおりである。

### 第1章 序論

山地の多い我が国では、中山間地域が国土の約7割を占めている。中山間地域は流域の上流部に位置するため、地域住民のみならず、下流域の都市住民の安全・安心な水資源を守っていくためにも、その水質環境を保全していく必要がある。一方、高速道路を含む高規格幹線道路網は、中山間地域を通過して全国に張りめぐっているが、凍結防止剤を含む路面排水等が沿道水質環境に及ぼす影響については、我が国での研究報告事例は少ない。

本章では、我が国の中山間地域の水質と高速道路の路面排水が周辺環境に与える影響について、先行研究の事例をまとめるとともに、解決すべき課題を抽出して本研究の背景と目的を明確にした。

また、本研究の流れを明確にするために、論文の構成の概要を示した。

### 第2章 調査地の水質特性

中山間地域の供用後30年以上を経過する高速道路沿道の環境調査の一環として、研究対象地域（調査地）において84箇所の井戸水・湧水・沢水について水質調査を実施した。

調査地の水質の特徴としては電気伝導度が我が国の一般的な地下水と比較すると極めて高く、電解質分を高濃度に含むことがわかった。また、安山岩地域と花崗岩地域では水質が異なり、陽イオンは安山岩地域の水質のほうが $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ に富んでいた。一方、陰イオンでは我が国の一般的な地下水と比較して、安山岩地域・花崗岩地域ともに $\text{Cl}^-$ に富んでいることを確認した。陽イオンについては帯水層の地質の違いが反映されており、陰イオンについては高速道路からの路面排水が強く影響していることを明らかにした。

### 第3章 凍結防止剤の地下浸透量、河川流出量および飛散量の定量化

高速道路の雪氷対策に用いる凍結防止剤の散布が沿道の地下水の塩水化に及ぼす影響を明らかにするために、供用後30年以上経過する高速道路沿道の中山間地域において、凍結防止剤の地下浸透・河川流出、路外飛散状況の定量的把握および河川の経時的な水質変化を観測し、浸透流出経路と収支について検討した。

その結果、路面に散布された凍結防止剤のうち65%が流末水路に流出、25%が路面のクラック等から地下に浸透、残り10%は路外等へ飛散していることがわかった。つぎに、雪氷期の河川への凍結防止剤流出量の割合は、散布量の39%が地表水に混じって流出し、17%が地下水に混じって流出していることを推計した。また、散布量と流出量の収支関係より44%が地下

に貯留していることを明らかにした。

#### 第4章 浸透流—移流分散解析に基づく凍結防止剤の地下浸透に関する検討と将来予測

高速道路に散布された凍結防止剤の地下浸透経路や浸透範囲等を定量的に検討するために、中山間地域の高速道路（供用後30年以上）の沿道を対象に2次元浸透流—移流分散解析を実施し、解析値と観測値の対比より両者は概ね一致しているかを検証した。

その結果、凍結防止剤は高速道路から河川までの約300mの間を約15年かけて浸透し、観測地点での塩分濃度は上昇速度を減じながらも現在も緩やかに上昇していることが推定された。つぎに、地下浸透のメカニズムについて検討した結果、凍結防止剤の浸透経路および浸透範囲には、相対的に透水性の高い破砕帯（地質構造）が大きく関与していることを明らかにした。また、凍結防止剤の散布を中止した場合、地下水の水質が元にもどるには既設井戸で約30年、河川近傍で約40年かかることを予測した。

#### 第5章 結論

本章では、本研究成果の要約を総括した。また、高速道路における沿道周辺環境の保全に対する課題と環境調査・解析の課題について整理した。さらに、今後の展望として、環境保全対策では塩化物系凍結防止剤の散布量低減の取り組みやFRP製板を加工・使用した水路目地の補修例を紹介し、調査・解析手法では電気探査や電磁探査についてその概要と応用性を示した。

図-1.3に本論文の構成を示す。

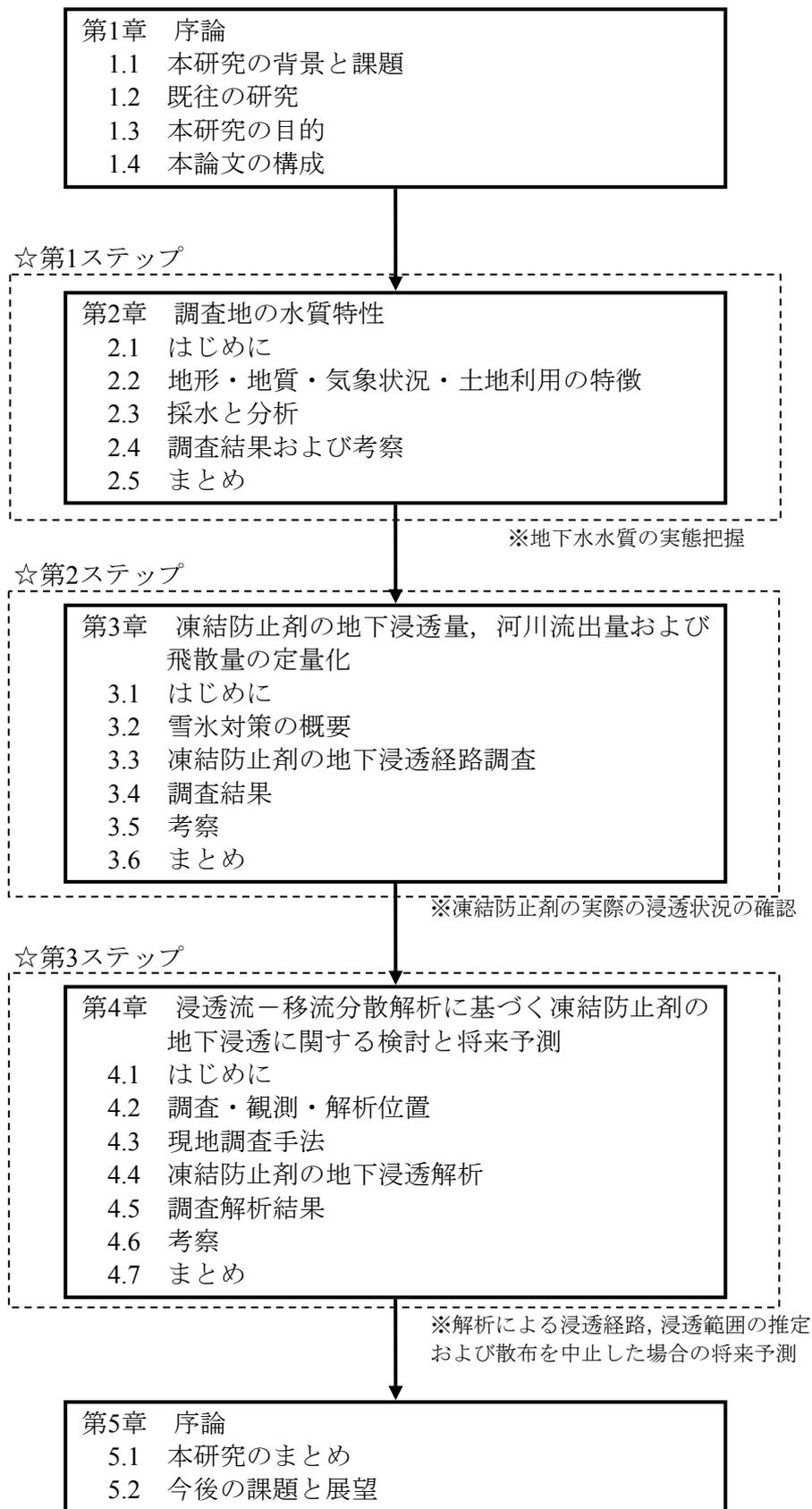


図-1.3 本論文の構成

## 第1章の参考文献

- 1) 厚生労働省：平成26年度給水人口と水道普及率，（参照2016年11月3日），  
<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000124438.pdf>
- 2) 国土交通省：平成26年度版日本の水資源，（参照2016年11月3日），  
<http://www.mlit.go.jp/common/001049554.pdf>
- 3) 国土交通省：道路統計年報2015，表5，（参照2016年11月3日），  
[http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2015/pdf/d\\_genkyou05.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2015/pdf/d_genkyou05.pdf)
- 4) 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構：全国路線図，（参照2016年11月3日），  
<http://www.jehdra.go.jp/pdf/1173.pdf>
- 5) 国土交通省：公共事業に係る工事の施工に起因する水枯渇等により生じる損害等に係る事務処置要領の制定について，国土交通省国総国調第48号，2003.
- 6) 北野康：六甲山系，住吉川および芦屋川流域砂防調査報告書（第一回），建設省近畿地方建設局，PP.125-159, 1959.
- 7) 北野康，加藤喜久雄，金森悟，金森暢子，吉岡龍馬：水質調査による岩石崩壊の予知の可能性，京大防災研究所年報，第10号A，pp.557-587, 1967.
- 8) 笠間太郎，鶴巻道二：六甲山地のトンネル湧水状況とその水質，応用地質，第12巻，第1号，pp.16-28, 1972.
- 9) 黒田和男，坂巻幸雄，望月常一，小尾五明：断層帯を伴う花崗岩に付随する地下水・湧水の水質について，応答地質，第22巻，第1号，pp.118-131, 1981.
- 10) 日下讓，佐川直史：六甲山系河川の水質，日本化学会誌，1974, No.12, pp.2322-2327, 1974.
- 11) 吉岡龍馬：六甲山系の地下水の水質特性について，日本地下水学会会誌，第26巻，第4号，pp.147-166, 1984.
- 12) 竹村元志：水-岩石相互作用を通して見た長野県下伊那西部地区における河川の水質—Case Studyとして—，陸水雑，46, 2, pp.128-134, 1985.
- 13) 桜井哲郎，福島和夫，山田哲雄：北アルプス東麓河川水の水質特性と地質環境，陸水雑，59, pp.87-100, 1998.
- 14) 中島玲，原口智和，田中明：佐賀県の地下水の水質による分類，佐賀大農彙，97, pp.27-35, 2012.
- 15) 藪崎志穂，島野安雄：平成の名水百選の水質特性，地下水学会誌，第51巻，第2号，pp.127-139, 2009.
- 16) 佐々木宗建：花崗岩地域の地下水の地化学的特徴，地質調査研究報告，第55巻，第11/12号，pp.439-446, 2004.
- 17) Anazawa, K., Sakamoto, H. and Tomiyasu, T. (2007) : Influence of ignimbrite on the chemistry of

river water in Shirasu plateau, Japan. *Hydrogeology Journal*, 15, pp.409-417.

- 18) 尾山洋一, 高橋正明, 塚本齊, 風早康平, 安原正也, 高橋浩, 森川徳敏, 大和田道子, 芝原暁彦, 稲村明彦: 日本列島の非火山地域における深層地下水水質と地質との関係について, 原子力バックエンド研究, Vol.18, No.1, pp.25-34. 2011.
- 19) 吉岡龍馬, 古谷尊彦: 地質的環境のことなる地すべり地の水質特性について, 京大防災研究所年報, 第 16 号 B, pp.127-139, 1973.
- 20) 渡部直喜, 鷺津史也, 大木靖衛, 佐藤修: 新潟県松之山地すべり地域の地下水の水質について, 地すべり, 第 32 巻, 第 3 号, pp.32-40, 1995.
- 21) 古米弘明, 山本晃一, 佐藤和明: ケイ酸その由来と行方, 技報堂出版, pp.1-176, 2012.
- 22) 曾根真理, 瀧本真理, 木村恵子, 小柴剛, 井上隆司, 並河良治: 路面排水の水質に関する報告, 国土技術政策総合研究所資料, No.596 May 2010, p.7-1, 2010.
- 23) 木村恵子, 曾根真理, 並河良治, 桑原正明, 角湯克典: 凍結防止剤散布と沿道環境, 国土技術政策総合研究所資料, No.412 July 2007, pp.116-126, 2007.
- 24) 吉江誠吾, 齊藤辰哉, 渡辺 亨: 凍結防止剤散布の環境影響最小化に関する研究, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.38(2001-11), pp.70-79, 2001.
- 25) 田湯文将, 武市靖, 高橋尚人, 田中俊輔, 藤本明宏: 粗面系舗装における凍結防止剤散布後の塩分および融解水の移動現象に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3 (舗装工学論文集第 18 巻), pp.I\_67-I\_74, 2013.
- 26) Nandana Perera, Bahram Gharabaghi, Ken Howard: Groundwater chloride response in the Highland Creek watershed due to road salt application: A re-assessment after 20 years, *Journal of Hydrology*, 479, 159-168, 2013.

## 第2章 調査地の水質特性

### 2.1 はじめに

地下水の水質は帯水層の地質（鉱物）の種類，風化の程度，接触時間などにより，一次的に決定される。さらに，人々の生産活動などが及ぶ地域では人為的な影響が二次的に水質に作用するようになる。経済成長および国土開発により高度土地利用が進む中で，安全安心な水資源の確保は我々にとって重要な課題である。なかでも中山間地域は，現在においても地下水は生活用水として重宝されているとともに，その面積が我が国の国土面積の約7割を占めていること，さらに河川流域の上流部に位置することから，中山間地域の森林や農業・農村が持つ水源涵養機能は，その地域の住民のみならず，人口の集中する下流域の都市住民にとっても貴重な水資源となっている。したがって，中山間地域での地下水や河川水の水質を管理・保全していくことは喫緊の課題であり，その水質を定期的にモニタリングしていくことは重要なこと考えられる。

本研究は，中山間地域の供用後30年以上を経過する高速道路沿道の環境調査の一環として，84箇所の井戸水・湧水・沢水について水質調査を実施したものである。内容は帯水層の地質別に地下水の水質特性を整理し，既往の研究で報告されている我が国の一般的な地下水の水質と比較を行い，高速道路の路面排水等が地下水に及ぼす影響について検討した。

## 2.2 地形・地質・気象状況・土地利用の特徴

調査地域は、標高約350～500mの中山間地に位置する。地形は北東から南西方向に延びる狭長な谷地形を呈している。谷幅は約200～400mで、谷底はA川が南西方向に流下し、河川沿いに平坦地や段丘地形を形成している。平坦地は主に水田として土地利用されている。また、多くの集落は河川沿いの平坦地や段丘およびそれに続く山麓斜面に分布しており、その周辺で畑作が行われている。気象庁のWebサイト<sup>1)</sup>より入手したデータを基に計算すると1976～2013年の年平均気温の平均値は12.3℃、年積算降水量の平均値は1,465.3mmである。また、対象地域のあるB市より入手した資料を基に、1995～2010年の間に掘削した329井戸の塩化物イオン濃度の平均値を求めると11.0mg/Lになる。

図-2.1に地形地質概要図を示す。本地域の地質の構成は、基盤岩として中生代白亜紀の安山岩類（高マグネシウム安山岩溶岩・同質火砕岩等）とそれらに貫入する白亜紀の花崗岩類（粗粒黒雲母花崗岩）が分布し、それらを新生代第四紀の主に砂礫層からなる崖錐堆積物、段丘堆積物、沖積層が被覆する。

高速道路の供用開始は1978年で供用30年以上となる。道路の通過延長は約7.8kmで、谷に沿うような形状で多くの集落よりも山側を通っている（写真-2.1）。なお、現在使用されている多くの井戸は、高速道路よりも谷側に掘られたものである。

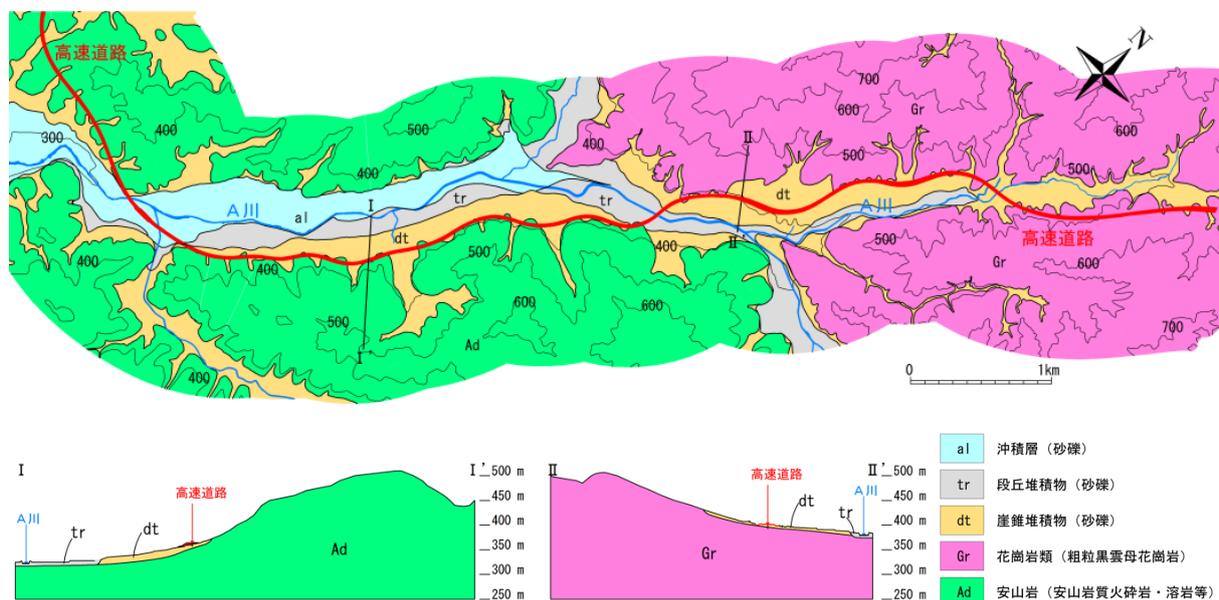


図-2.1 地形地質概要図



写真-2.1 調査地域の現況

### 2.3 採水と分析

本調査地域で水質分析した地点は図-2.2に示す84地点であり、その内訳としては井戸水が77地点、湧水が2地点、沢水5地点である。このうち高速道路よりも山側が8地点で、谷側が76地点である（表-2.1）。採水是非雪氷期の2011年10月11日～13日と雪氷期の2012年2月15日～17日の二回実施した。

水質分析の検体の採水方法は、井戸水の場合は、所定の蛇口を使用して水温が一定になるまで揚水した後、専用ビンで採水した。一方、湧水と沢水は水源にて専用ビンに直接採水した。水質分析は11項目で、その項目と分析方法を表-2.2に示す。なお、本論文では主に2月に採水した検体の試験結果について考察を行った。

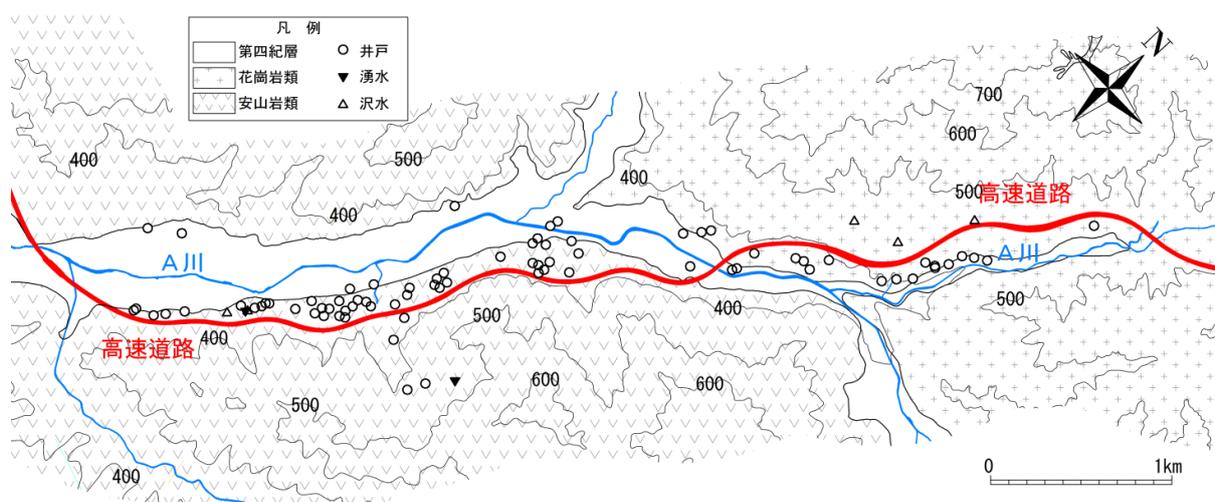


図-2.2 水質分析の採水地点

表-2.1 採水地点の内訳

	高速道路より山側	高速道路より谷側	合計
井戸水	4 地点	73 地点	77 地点
湧水	1 地点	1 地点	2 地点
沢水	3 地点	2 地点	5 地点
合計	8 地点	76 地点	84 地点

表-2.2 水質分析項目と方法

分析項目	分析方法
塩化物イオンCl <sup>-</sup> (mg/L)	平成15.7.22 厚生労働省告示第261号
pH (25°C)	JIS K0101
ナトリウムイオンNa <sup>+</sup> (mg/L)	JIS K0101
カルシウムイオンCa <sup>2+</sup> (mg/L)	JIS K0101
マグネシウムイオンMg <sup>2+</sup> (mg/L)	JIS K0101
カリウムイオンK <sup>+</sup> (mg/L)	JIS K0101
炭酸水素イオンHCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	衛生試験法注解
硫酸イオンSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	JIS K0101
イオン状シリカSiO <sub>2</sub> (mg/L)	JIS K0101
電気伝導率EC (μS/cm)	上水試験法
遊離炭酸CO <sub>2</sub> (mg/L)	平成15.10.10 健水発第1010001号

## 2.4 調査結果および考察

### 2.4.1 地質別の水質特性

#### (1) 電解質と電気伝導度

今回分析した項目のうちの水の電解質 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) について、その特徴を述べる。図-2.3は電解質の全当量濃度Tc(meq/L)と電気伝導度EC( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )の関係を示したものである。図より、安山岩地域の地下水と花崗岩地域の地下水は類似傾向を示しており、全当量濃度Tcと電気伝導度ECには $R^2 > 0.99$ の高い相関が認められる。また、 $\text{EC} \approx 56\text{Tc}$ の関係式が成り立ち、渡部ら<sup>2)</sup>の研究でも同様の関係が報告されている。

日本の他の地域の地下水の電気伝導度をみると、藪崎ら<sup>3)</sup>が昭和と平成の名水百選を調べており、昭和の名水百選の平均値が $208.3\mu\text{S}/\text{cm}$ 、平成の名水百選の平均値が $196.8\mu\text{S}/\text{cm}$ と報告している。したがって、調査地の地下水の電気伝導度は(2)で述べるように、日本の他地域の地下水と比較してかなり高い値を示しているものも含まれている。

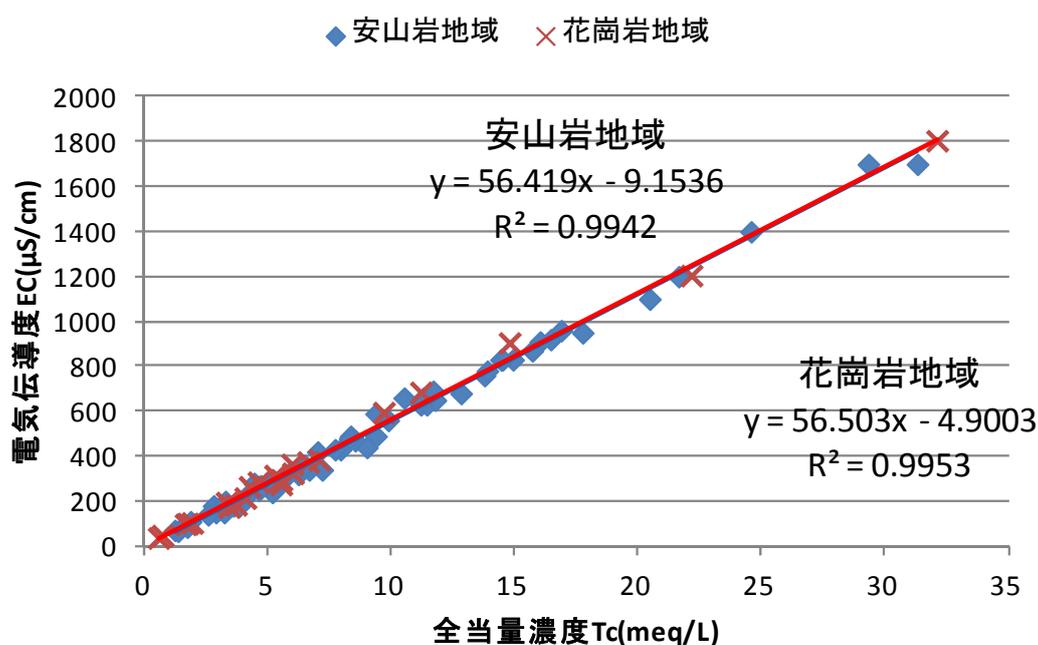


図-2.3 全当量濃度Tcと電気伝導度ECの関係 (2月採水)

#### (2) トリリニアダイアグラムによる水質分類と水質特性

安山岩地域の地下水と花崗岩地域の地下水をトリリニアダイアグラムを用いて水質分類を行った (図-2.4)。陽イオンに着目すると地質別の明瞭な違いが認められ、安山岩地域の地下水のほうが $\text{Ca}^{2+}$ と $\text{Mg}^{2+}$ に富んでいる。一方、陰イオンは地質別の差が認められず、ともに $\text{Cl}^-$ の陰イオンに占める割合が5~97%までの広い範囲に認められる。

つぎに、図-2.4を用いて水質分類を行い地質別に整理したものを図-2.5に示す。安山岩地域の水質は中間混合型、Ca-Cl型、Ca- $\text{HCO}_3$ 型の順で割合が多い。一方、花崗岩地域の水質は

Na-Cl型, Ca-HCO<sub>3</sub>型, 中間混合型の順で割合が多い。安山岩地域, 花崗岩地域の水質はともにCl型が多く, 日本国内の地下水はCa-HCO<sub>3</sub>型が卓越している<sup>3)</sup>ことを考えると, 本調査地域の水質は特異な水質といえる。

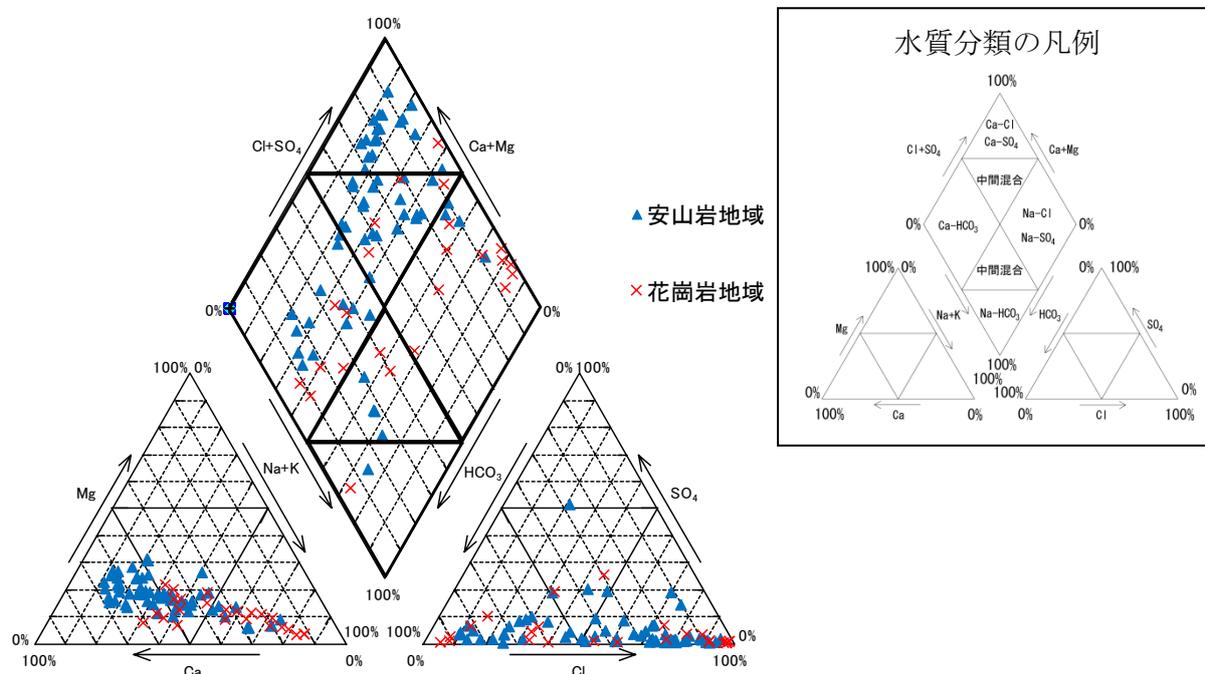


図-2.4 トリリニアダイアグラムによる分類 (2月採水)

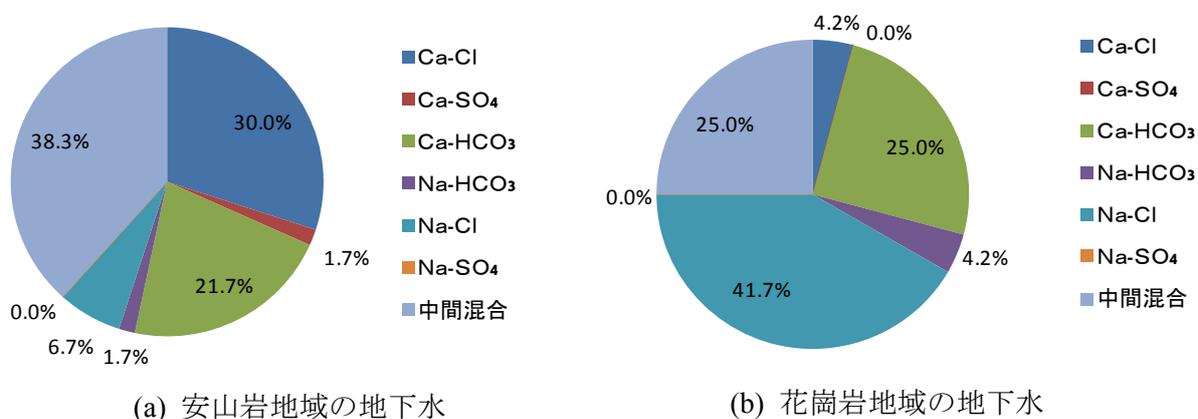


図-2.5 安山岩地域と花崗岩地域に占める各タイプの水質の割合 (2月採水)

水質分類ごとに, 電気伝導度の頻度分布を図-2.6に, また最低値, 平均値, 最高値および標準偏差を表-2.3に示す。電気伝導度の季節変動も比較できるように, 表中の()内に10月に採水した検体の試験結果も示した。水質分類ごとに電気伝導度は異なった特徴を有している。Ca-HCO<sub>3</sub>型は最低値67μS/cm, 平均値195μS/cm, 最高値340μS/cm, 標準偏差78μS/cmで平均値, 最高値および標準偏差は4タイプの中で最も低い。平均値は上で述べた昭和と平成の名水百選と同じような値を示し, 値のばらつきも比較的小さい。特徴としては, 日本国内の一般的な

水質といえる。Ca-Cl型は最低値430 $\mu$ S/cm, 平均値889 $\mu$ S/cm, 最高値1700 $\mu$ S/cm, 標準偏差347 $\mu$ S/cmで最低値と平均値は4タイプの中で最も高い。最低値が上述したCa-HCO<sub>3</sub>型の最高値より大きく, 全体的に電気伝導度が高い。すなわち, 高濃度のイオンを含む水質と考えられる。Na-Cl型は最低値32 $\mu$ S/cm, 平均値639 $\mu$ S/cm, 最高値1800 $\mu$ S/cm, 標準偏差527 $\mu$ S/cmで最高値と標準偏差は4タイプの中で最も高いが, 最低値も4タイプの中で最も低い。したがって, 電気伝導度のばらつきの大きい水質である。中間混合型は最低値71 $\mu$ S/cm, 平均値354 $\mu$ S/cm, 最高値780 $\mu$ S/cm, 標準偏差178 $\mu$ S/cmで上述したCa-HCO<sub>3</sub>型とCa-Cl型の間間的な値を示している。また, 10月採水の試験結果も概ね同様の傾向を示しており, 顕著な季節変動は認められない。

表-2.3 水質分類ごとの電気伝導度の特徴

水質分類	電気伝導度 ( $\mu$ S/cm)			
	最低値	平均値	最高値	標準偏差
Ca-HCO <sub>3</sub>	67 (72)	195 (219)	340 (500)	78 (105)
Ca-Cl	430 (470)	889 (914)	1700 (1700)	347 (318)
Na-Cl	32 (36)	639 (483)	1800 (2000)	527 (583)
中間混合	71 (54)	354 (366)	780 (640)	178 (139)

注) ( )内の値は10月採水の結果

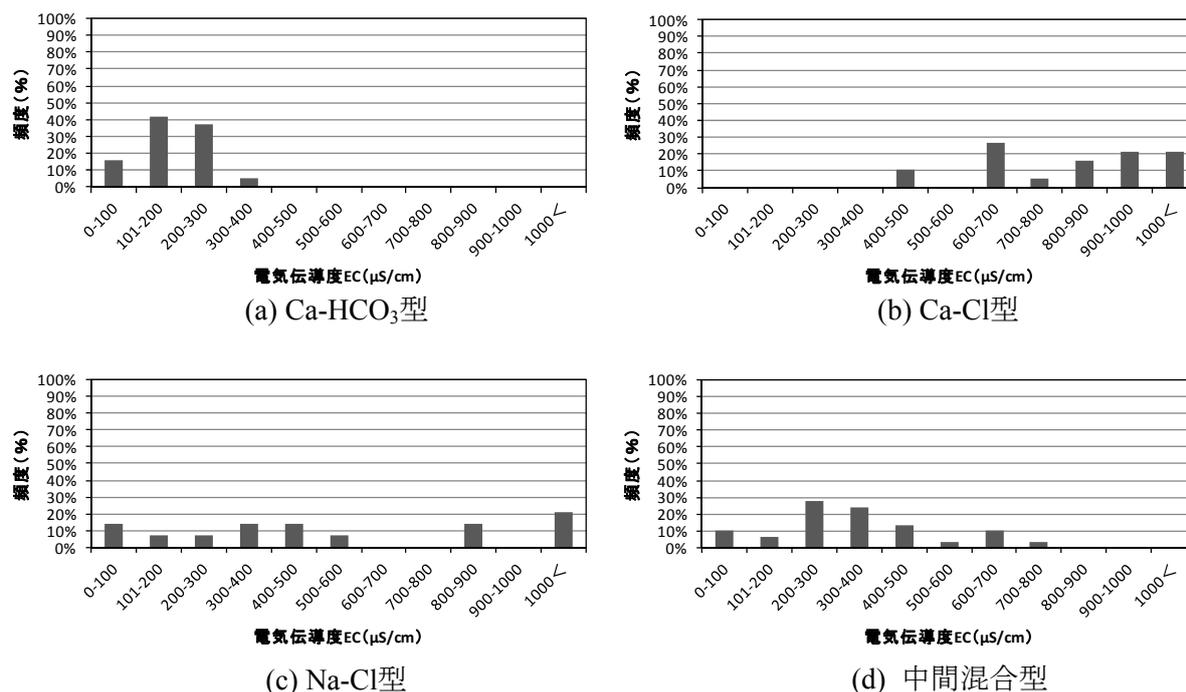


図-2.6 水質分類ごとの電気伝導度の頻度分布 (2月採水)

### (3) イオン状シリカ

シリカと酸素の結びついたケイ酸 (SiO<sub>2</sub>) は, 地殻全体の約60%を占めている。ケイ酸は造岩鉱物の化学的風化の進行過程で生成され, 地下水中に溶出する。ただし, 岩石の種類や風化の程度の違いにより, 溶存態ケイ酸濃度が異なることが報告されている<sup>4)</sup>。

図-2.7に地質別のSiO<sub>2</sub>濃度の頻度分布を示す。安山岩地域, 花崗岩地域ともに, SiO<sub>2</sub>の濃

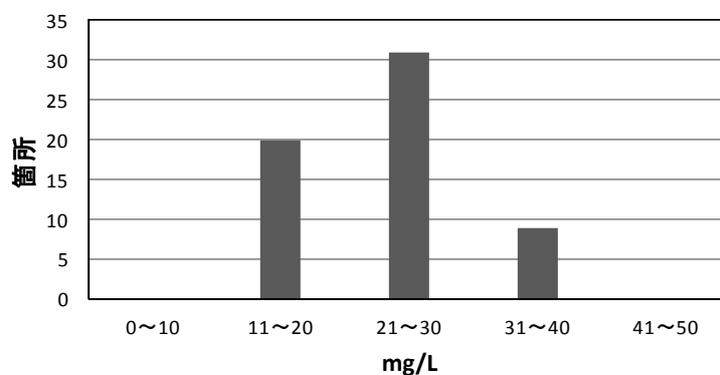
度は10~40mg/Lの範囲にある。安山岩地域のSiO<sub>2</sub>の最頻値は21~30mg/Lにあるのに対して、花崗岩地域のSiO<sub>2</sub>の最頻値は11~20mg/Lであり、安山岩地域のほうがやや高い傾向を示す。平均値も安山岩地域が24.4 mg/L、花崗岩地域が21.0mg/Lで安山岩地域のほうが僅かに高いが、大差は認められない(表-2.4)。日本の地下水のケイ酸濃度の平均値は約40mg/L程度であり<sup>5)</sup>、調査地域のケイ酸濃度はやや低い値を示している。

古米ら<sup>6)</sup>は、ケイ酸が河川等へ流出するしやすさは岩石や堆積物などの地質(地盤の構成物)の影響で決まると考え、ケイ酸溶出ポテンシャルと定義しており、ケイ酸溶出ポテンシャル指数の値が大きいほどケイ酸が溶出しやすい地質としている。そして、全国について地質区分とケイ酸溶出ポテンシャル指数の対比表を示している。

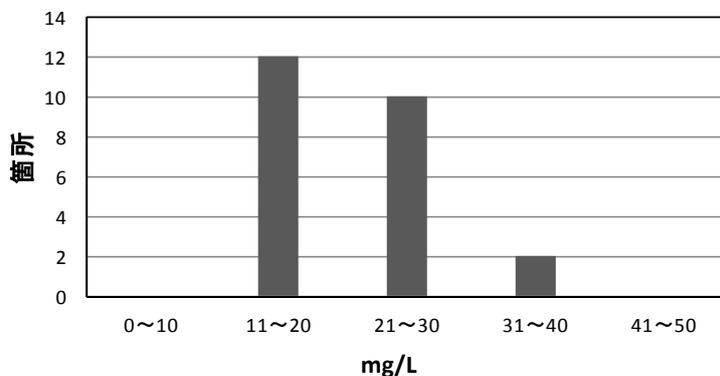
この対比表に照らし合せると、調査地の安山岩類は第四紀以前非アルカリ苦鉄質火山岩で山地の起伏量は小起伏であり、ケイ酸溶出ポテンシャル指数が3になる。一方、花崗岩類は珪長質深成岩で山地の起伏量は小起伏であり、ケイ酸溶出ポテンシャル指数は3となる。調査結果で安山岩地域と花崗岩地域のSiO<sub>2</sub>濃度の値に大きな差が認められないのは、ケイ酸溶出ポテンシャルが同等なためと考えられる。

表-2.4 安山岩と花崗岩のイオン状シリカ (2月採水)

地 質	SiO <sub>2</sub> (mg/L)			
	最低値	平均値	最高値	標準偏差
安山岩	15.0	24.4	38.0	6.0
花崗岩	11.0	21.0	40.0	7.1



(a) 安山岩地域



(b) 花崗岩地域

図-2.7 地質別のSiO<sub>2</sub>の頻度分布 (2月採水)

(4) 水質成分間の相関関係

水質成分間の相関関係を表-2.5および表-2.6に示す。相関係数 $R>0.7$ を強い相関がある、 $R>0.5$ を相関があるとして、地質区分ごとの水質成分間の相関について以下に述べる。安山岩地域で強い相関が認められるものは、2種 ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) の陽イオン相互間、2種 ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) の陽イオンと $\text{Cl}^-$ 間、3種類 ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) のイオンとEC間があげられる。また、相関が認められるものとしては、 $\text{Na}^+$ と $\text{Cl}^-$ 間、 $\text{K}^+$ と $\text{SO}_4^{2-}$ 間のイオン間、 $\text{HCO}_3^-$ とpH間、 $\text{Na}^+$ とEC間があげられる。さらに、 $\text{CO}_2$ とpH間では負の相関が認められる。

一方、花崗岩地域で強い相関が認められるものとしては2種 ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) の陽イオンと $\text{Mg}^{2+}$ 間、2種 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) の陽イオンと $\text{Cl}^-$ 間、 $\text{HCO}_3^-$ と $\text{SiO}_2$ 間、 $\text{HCO}_3^-$ とpH間、3種類 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) のイオンとEC間があげられる。また、相関が認められるものとしては、3種 ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) の陽イオンと $\text{Na}^+$ 間、2種 ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) の陽イオン相互間、2種 ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) の陽イオンと $\text{Cl}^-$ 間、 $\text{K}^+$ と $\text{SO}_4^{2-}$ 間のイオン間、 $\text{K}^+$ と $\text{CO}_2$ 間、 $\text{SiO}_2$ とpH間、2種 ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) の陽イオンとEC間があげられる。さらに、3種 ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ) の成分とpH間では負の相関が認められる。

本調査地域の水質の大きな特徴としては、安山岩地域、花崗岩地域の共通のものとしてECと陽イオン間および $\text{Cl}^-$ 間に相関が認められること、また、花崗岩地域でpHと $\text{HCO}_3^-$ および $\text{SiO}_2$ 間に相関が認められることがあげられる。

表-2.5 安山岩地域の水質成分の相関関係 (2月採水)

成分	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SiO}_2$	$\text{CO}_2$	pH	EC
$\text{Na}^+$		0.08	0.23	0.23	0.60	0.00	-0.05	-0.10	-0.02	0.02	0.61
$\text{K}^+$			0.13	0.16	0.14	0.54	-0.26	-0.02	0.35	-0.36	0.18
$\text{Ca}^{2+}$				0.94	0.87	0.04	0.16	0.41	-0.06	-0.02	0.90
$\text{Mg}^{2+}$					0.86	0.03	0.08	0.48	0.01	-0.12	0.88
$\text{Cl}^-$						-0.07	-0.06	0.30	0.02	-0.11	0.98
$\text{SO}_4^{2-}$							-0.21	-0.06	0.12	-0.17	0.04
$\text{HCO}_3^-$								-0.02	-0.18	0.63	0.05
$\text{SiO}_2$									-0.08	-0.24	0.31
$\text{CO}_2$										-0.52	-0.02
pH											-0.05
EC											

注)   強い相関がある   相関がある

表-2.6 花崗岩地域の水質成分の相関関係 (2月採水)

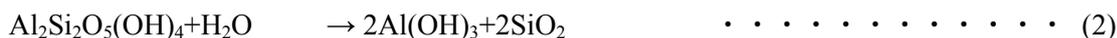
成分	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SiO}_2$	$\text{CO}_2$	pH	EC
$\text{Na}^+$		0.56	0.53	0.59	0.96	0.49	-0.27	-0.15	0.20	-0.47	0.97
$\text{K}^+$			0.57	0.74	0.67	0.57	-0.32	-0.24	0.59	-0.56	0.65
$\text{Ca}^{2+}$				0.84	0.63	0.19	0.15	0.26	0.12	-0.09	0.69
$\text{Mg}^{2+}$					0.74	0.29	-0.17	-0.06	0.27	-0.43	0.75
$\text{Cl}^-$						0.49	-0.41	-0.26	0.26	-0.60	0.99
$\text{SO}_4^{2-}$							-0.33	-0.15	0.32	-0.37	0.45
$\text{HCO}_3^-$								0.78	-0.32	0.87	-0.26
$\text{SiO}_2$									-0.28	0.68	-0.14
$\text{CO}_2$										-0.60	0.23
pH											-0.50
EC											

注)   強い相関がある   相関がある

2.4.2 地質・風化状況が水質に及ぼす影響

安山岩地域の水質と花崗岩地域の水質との大きな違いとしては、安山岩地域の水質のほうがCa<sup>2+</sup>とMg<sup>2+</sup>の陽イオンに富むことがあげられる。図-2.8に火成岩の造岩鉱物組成と化学組成を示す。図より、安山岩と花崗岩の造岩鉱物組成を比較すると安山岩は輝石、角閃石、Caに富む斜長石（灰長石）に富み、花崗岩は黒雲母、Naに富む斜長石（曹長石）、カリ長石（正長石）に富んでいることが判る。また、酸化カルシウム（CaO）や酸化マグネシウム（MgO）も安山岩のほうが富む傾向にある。

これらの造岩鉱物が直接的に、あるいは粘土鉱物となった後に地下水に溶解込みその地域固有の水質を形成することとなる。風化による造岩鉱物の分解反応の例を図-2.9に示す。また、安山岩に多いCa長石（灰長石）と灰長石の風化作用から生じるカオリナイト（粘土）の分解反応の例を式（1）と式（2）に示す<sup>4</sup>。



したがって、図-2.8より、安山岩およびその粘土鉱物は、多量のCa<sup>2+</sup>やMg<sup>2+</sup>を地下水に溶出することのできるポテンシャルを持っていると考えられる。また、式（1）と式（2）より、安山岩地域の水質にCa<sup>2+</sup>が多いこととイオン状シリカ（SiO<sub>2</sub>）が含まれている理由も説明することができる。

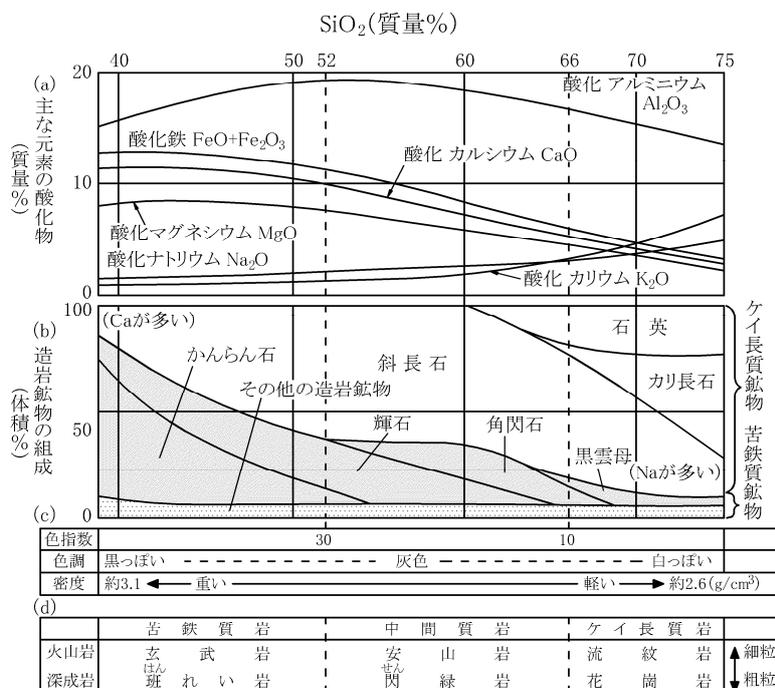


図-2.8 火成岩の造岩鉱物組成と化学組成<sup>4</sup>

**珪長質鉱物の分解**

正長石 + 水 + 炭酸 → カオリナイト(粘) + ケイ酸 + 炭酸カリウム  
曹長石 + 水 + 炭酸 → カオリナイト(粘) + ケイ酸 + 炭酸ナトリウム  
灰長石 + 水 + 炭酸 → カオリナイト(粘) + 炭酸水素カルシウム

**鉄苦土質鉱物の分解**

黒雲母 + 水 + 炭酸 + 酸素 + 炭酸水素カルシウム →  
パーミュキュライト(粘) + 水酸化第二鉄 + ケイ酸 + 炭酸カリウム  
角閃石 + 水 + 炭酸 → (緑泥石)(粘) + 炭酸水素カルシウム + ケイ酸  
輝石 + 水 → 蛇紋石(粘) + 滑石(粘)  
かんらん石 + 水 → 蛇紋石(粘) + 水滑石(粘) または緑泥石(粘)

**火山ガラスの分解**

火山ガラス + 水 + 炭酸 → アロフェン(粘) + ケイ酸 + アルカリ金属炭酸塩

図-2.9 化学的風化による造岩鉱物の反応の例<sup>4)</sup>

### 2.4.3 高速道路路面排水が水質に及ぼす影響

#### (1) 電気伝導度と塩化物イオン、陽イオンについて

調査地の水質は安山岩地域、花崗岩地域とも電気伝導度が日本の一般的な地下水の値<sup>3)</sup>と比較して極めて大きい、すなわちイオン成分に富むことが明らかとなった。また、電気伝導度とCl<sup>-</sup>濃度は完全な相関 (R=0.98~0.99) が認められており、水質分類でCa-Cl型およびNa-Cl型の占める割合が多いこととも関連付けられる。Cl<sup>-</sup>濃度の高い水質の要因としては、温泉や鉱泉の混入などの自然要因と、生活排水や産業排水などの人為的な要因が考えられる。しかし、調査地域周辺では既設の温泉や鉱泉は認められず、生活排水や産業排水の影響を受けない位置および構造の水源であった。

図-2.10に高速道路からの離隔とCl<sup>-</sup>濃度の関係を示す。調査地の位置するA市の井戸水のCl<sup>-</sup>の平均濃度は11.0mg/Lである。この値を周辺地域の地下水のCl<sup>-</sup>濃度のバックグラウンド値とすると、地質に関係なく高速道路より谷側ではその近傍で高い値を示す地点があり、ばらつきは認められるものの高速道路からの離隔が大きくなるに従って減少する傾向が認められる。一方、高速道路よりも山側は全てバックグラウンドと同程度の低い値を示している(図-2.10)。また、同様な傾向が安山岩地域では3種 (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) の陽イオンに、花崗岩地域では4種 (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) の陽イオンにも認められる(図-2.11)。

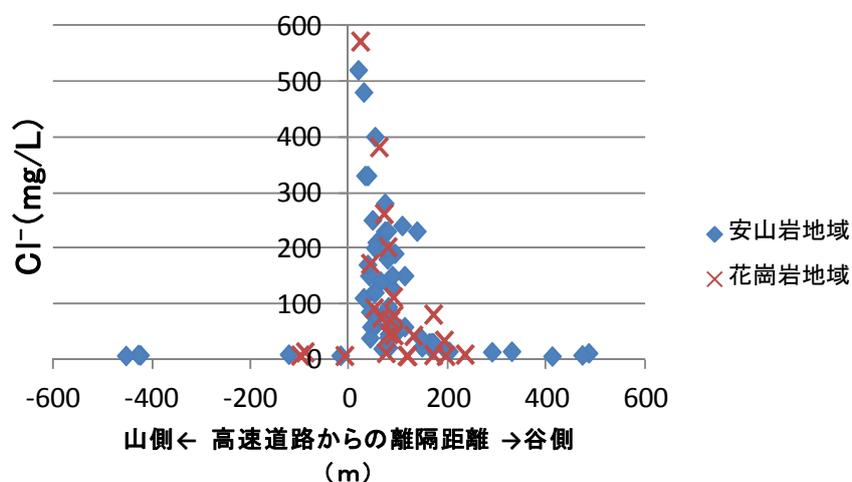
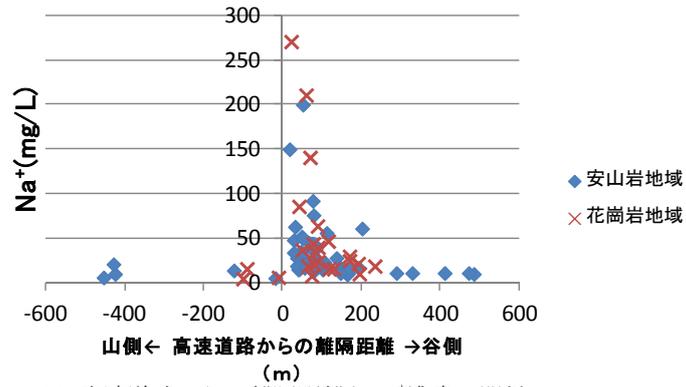
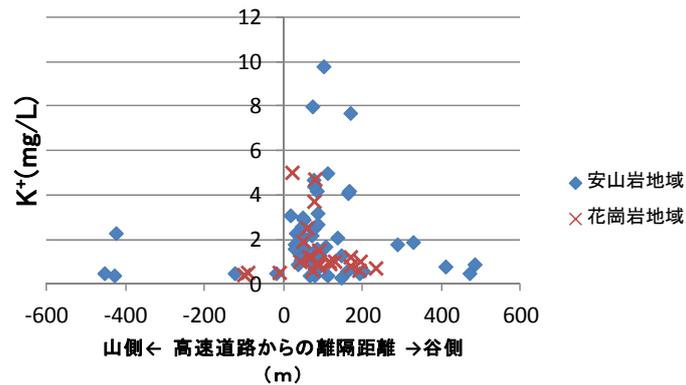


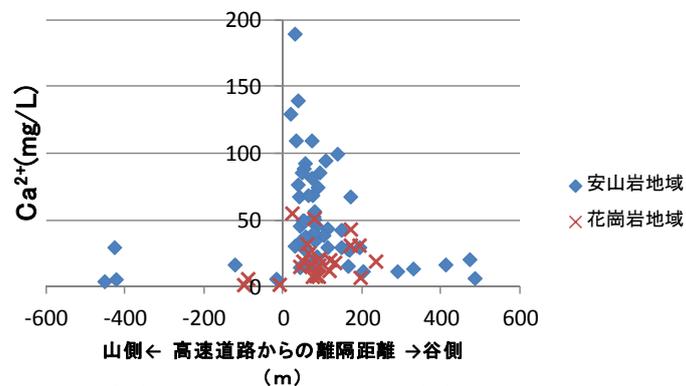
図-2.10 高速道路からの離隔距離とCl<sup>-</sup>濃度の関係 (2月採水)



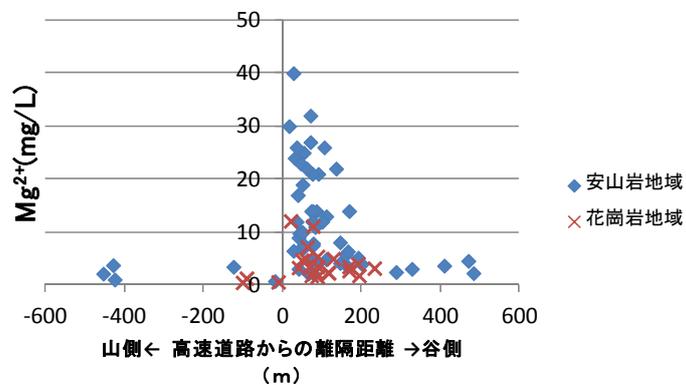
(a) 高速道路からの離隔距離と $\text{Na}^+$ 濃度の関係



(b) 高速道路からの離隔距離と $\text{K}^+$ 濃度の関係



(c) 高速道路からの離隔距離と $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の関係



(d) 高速道路からの離隔距離と $\text{Mg}^{2+}$ 濃度の関係

図-2.11 高速道路からの離隔距離と陽イオン濃度の関係 (2月採水)

図-2.12に平面分布状況として、調査位置とその水質分類および電気伝導度、また図-2.13に調査位置とその水質分類およびCl濃度を示す。図-2.12より、高速道路沿いの谷側の調査箇所は安山岩地域ではCa-Cl型、花崗岩地域ではNa-Cl型が多く、それらの電気伝導度も極めて高い値を示している。一方、高速道路よりも山側および離隔距離の大きな水源では、Ca-HCO<sub>3</sub>型の水質が多く電気伝導度も低くなる傾向が認められる。また、Cl濃度でも電気伝導度と同様の傾向が認められ、高速道路沿いの谷側の調査箇所は極めて高い値を示しているが、高速道路よりも山側および離隔距離の大きな水源では低くなる傾向が認められる（図-2.13）。

調査地域では、本論文の第3章で述べるように冬期に雪氷対策として過去5カ年の平均で48.9t/kmの凍結防止剤を散布している。このことを考慮すると、高速道路近傍の水質は凍結防止剤（NaCl）を含んだ高速道路路面排水の影響をうけていることが推定される。

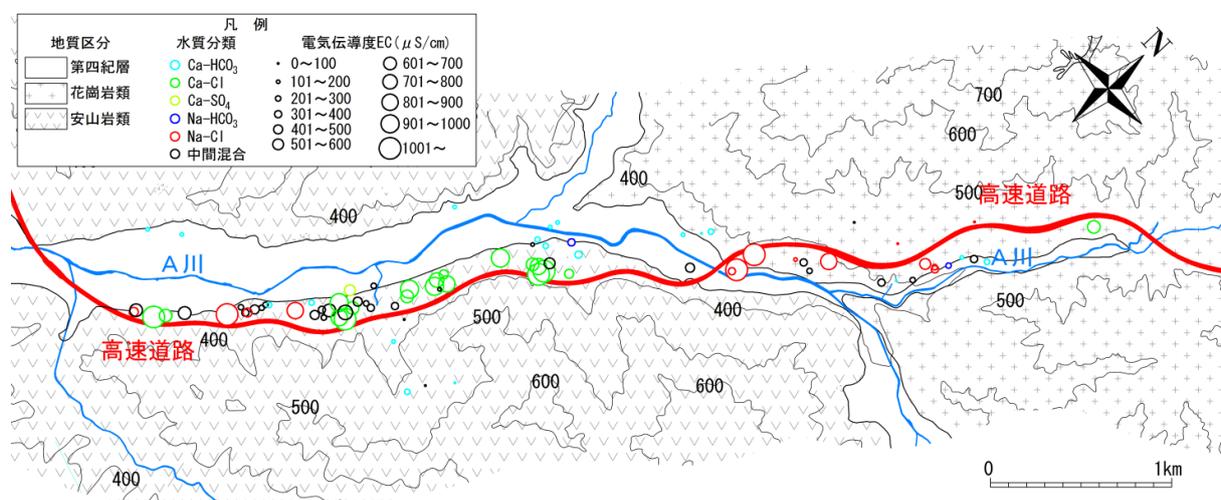


図-2.12 調査位置とその水質および電気伝導度（2月採水）

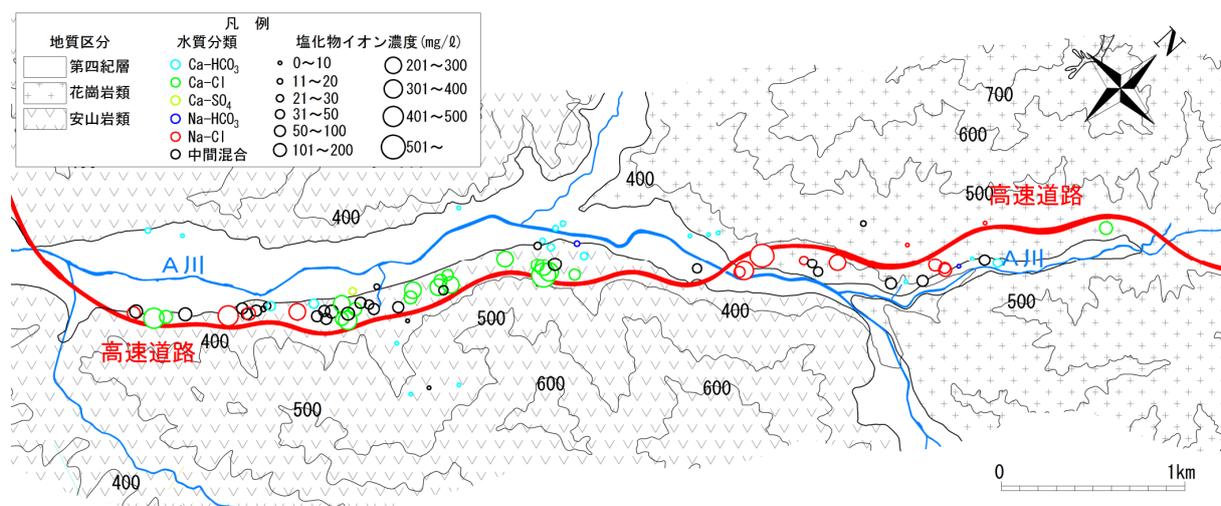


図-2.13 調査位置とその水質およびCl濃度（2月採水）

花崗岩地域では、 $\text{Cl}^-$ 濃度の高い水質はNa-Cl型がほとんどであり、凍結防止剤の主要成分(NaCl)と概ね一致する。一方、安山岩地域では、 $\text{Cl}^-$ 濃度の高い水質はCa-Cl型が多く、凍結防止剤の主要成分と一致しない。この現象については高濃度の凍結防止剤を含んだ路面排水が地中に浸透したときに、安山岩中の造岩鉱物および粘土鉱物に付着している $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ が凍結防止剤の $\text{Na}^+$ とイオン交換を行い、地下水中に溶出したものと考えられる。陽イオンの吸着力は2価の $\text{Ca}^{2+}$ が $\text{Na}^+$ より強いので、通常では水中の $\text{Ca}^{2+}$ がNa型粘土に吸着してCa型粘土になり $\text{Na}^+$ を水中に放出するパターンが多い。ただし、水中の $\text{Na}^+$ が高濃度の場合は逆の交換が発生する。このような現象は、塩水(海水)の浸水した土壌調査で報告されており<sup>7)</sup>、塩水を用いた実験結果のデータからも読み取れる<sup>8)</sup>。

なお、佐々木ら<sup>9)</sup>は凍結防止剤に含まれるNaは安山岩で約67.3%、花崗岩では約20.3%がCaとイオン交換することを推定している。花崗岩ではイオン交換の量が少ないため、Na-Cl型が多いと考えられる。

つぎに、10月採水の試験結果で電気伝導度が2月と同じように高かったことから、10月採水時の塩化物イオン、陽イオンも同様の傾向と予想されるので、10月採水のイオン濃度と高速道路からの離隔距離の関係を図-2.14と図-2.15に示す。

$\text{Cl}^-$ 濃度、陽イオンの $\text{Ca}^{2+}$ 濃度と $\text{Mg}^{2+}$ 濃度は雪氷期の2月と同じように、高速道路より谷側の近傍で高い値を示す地点があり、ばらつきは認められるものの高速道路からの離隔が大きくなるに従って減少する傾向が認められる。一方、陽イオンのうちの $\text{Na}^+$ 濃度は、高速道路より谷側の近傍地点で高い値を示すものも認められるが、2月と比較すると値は明らかに低い傾向である。この要因としては、前年度の雪氷期に散布した凍結防止剤の $\text{Na}^+$ が帯水層(地質)と長時間接触したことにより、 $\text{Ca}^{2+}$ 等とのイオン交換が促進して $\text{Na}^+$ が減少したためと推察される。

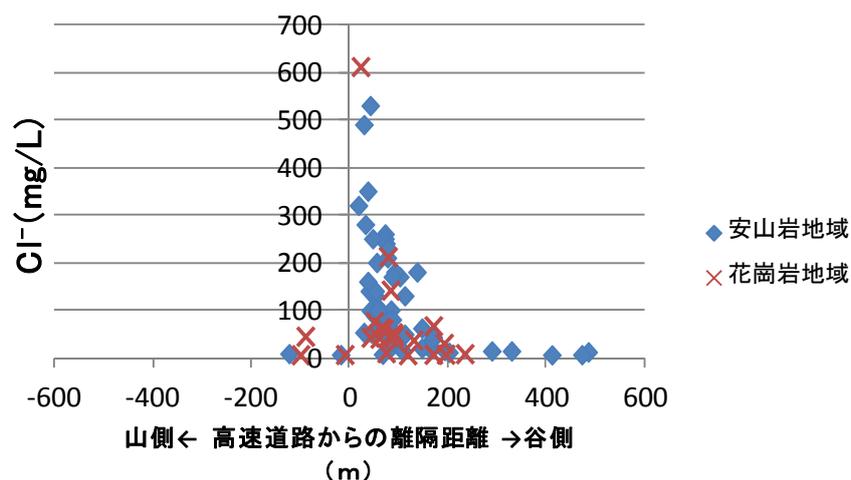
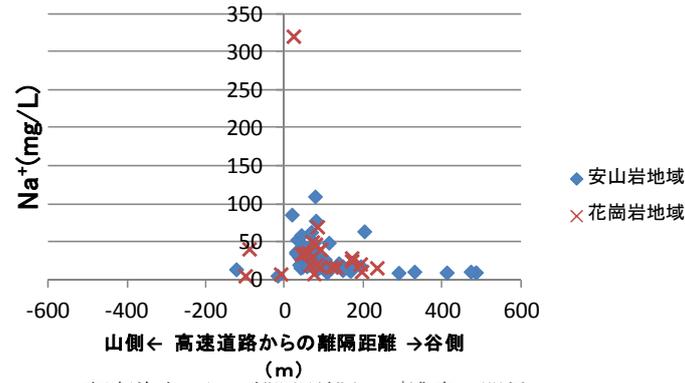
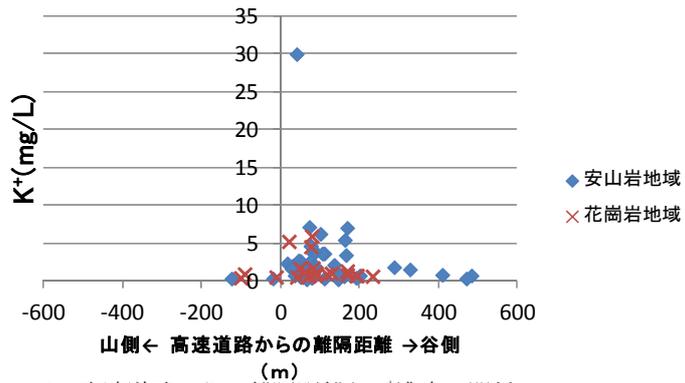


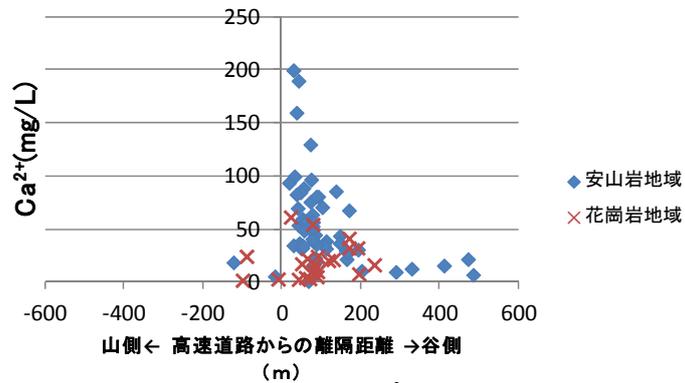
図-2.14 高速道路からの離隔距離と $\text{Cl}^-$ 濃度の関係(10月採水)



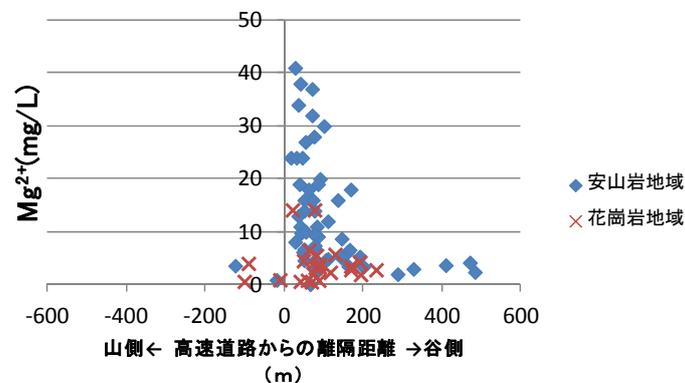
(a) 高速道路からの離隔距離と $\text{Na}^+$ 濃度の関係



(b) 高速道路からの離隔距離と $\text{K}^+$ 濃度の関係



(c) 高速道路からの離隔距離と $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の関係



(d) 高速道路からの離隔距離と $\text{Mg}^{2+}$ 濃度の関係

図-2.15 高速道路からの離隔距離と陽イオン濃度の関係 (10月採水)

(2) その他の成分について

他の水質成分で高速道路からの離隔距離との関係において着目されるものとしては、花崗岩地域での $\text{SiO}_2$ と $\text{HCO}_3^-$ が離隔距離との間で正の相関があげられる(図-2.16, 図-2.17)。花崗岩地域の水質で認められるpHと $\text{SiO}_2$ および $\text{HCO}_3^-$ の関係は、母材風化に伴う $\text{SiO}_2$ の溶出と $\text{H}^+$ の消費および $\text{HCO}_3^-$ の生成という現象を反映しているものと考えられる<sup>10)</sup>。しかし、高速道路からの離隔距離と $\text{SiO}_2$ および $\text{HCO}_3^-$ の関係についてその原因は不明である。

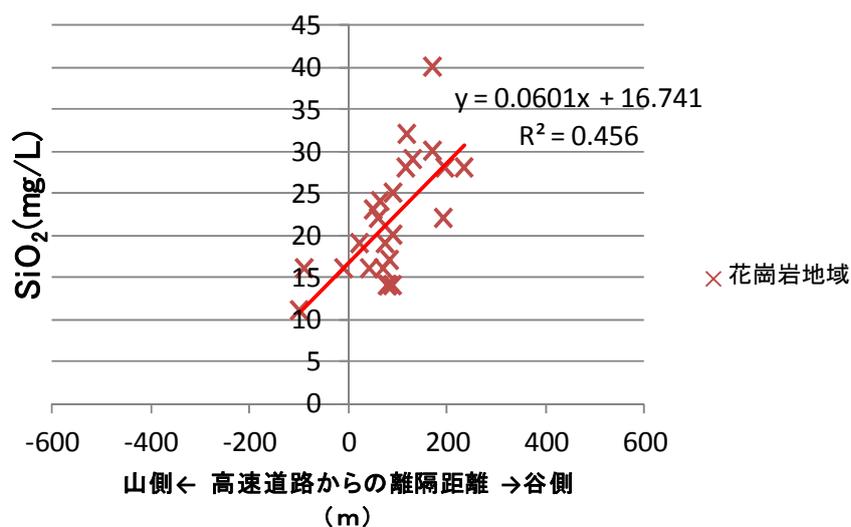


図-2.16 高速道路からの離隔距離と $\text{SiO}_2$ 濃度の関係 (2月採水)

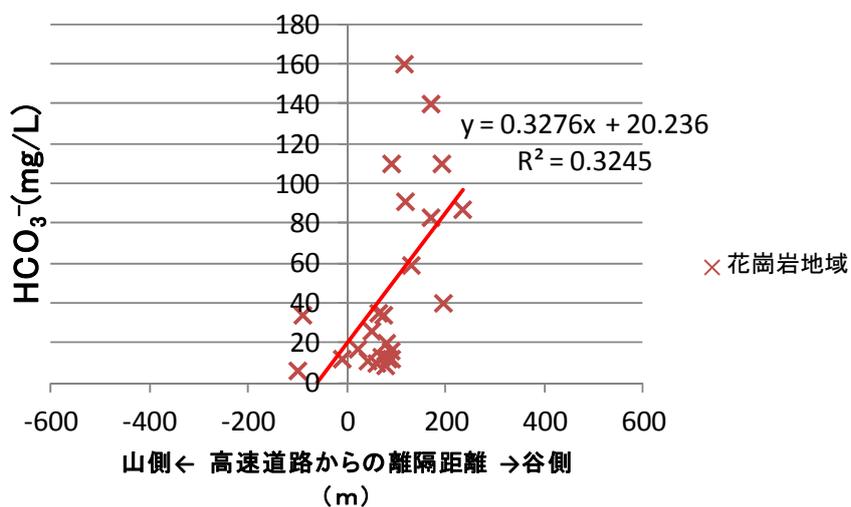


図-2.17 高速道路からの離隔距離と $\text{HCO}_3^-$ 濃度の関係 (2月採水)

## 2.5 まとめ

本研究では中山間地域の供用後30年以上の高速道路の沿道を対象として、その周辺に分布する井戸・湧水・沢水について、水質調査を行い、地質別の水質特性とその成因を検討した。本研究で得られた検討結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 調査地の水質は安山岩地域、花崗岩地域とも電気伝導度が日本の一般的な地下水（昭和と平成の名水百選）の値と比較して極めて大きく、また季節変化に伴う顕著な変動も認められない。すなわちイオン成分に富むことが明らかとなった。
- (2) 安山岩地域はCa-Cl型、花崗岩地域はNa-Cl型が占める割合が多いことも特徴の一つである。
- (3) 安山岩地域と花崗岩地域の水質を比較すると、安山岩地域水質のほうが $\text{Ca}^{2+}$ と $\text{Mg}^{2+}$ に富んでいる。造岩鉱物や粘土鉱物の化学組成より、安山岩地域は多量の $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ を溶出することのできるポテンシャルを持っていると考えられる。
- (4) イオン状シリカの濃度は、安山岩地域のほうが花崗岩地域よりもやや高い傾向を示すが、値に大きな違いは認められなかった。地質のケイ酸溶出ポテンシャル指数はともに3である。
- (5) Cl濃度は、地質に関係なく高速道路より谷側ではその近傍で高い値を示す地点があり、ばらつきは認められるものの高速道路からの離隔が大きくなるに従って減少する傾向が認められる。また、陽イオンも同様な傾向を示す。
- (6) Cl濃度と高速道路との関係は、10月採水の試験結果でも2月の試験結果と同様の傾向が認められる。
- (7) Cl濃度が高い要因としては、冬期に凍結防止剤（NaCl）を含む高速道路路面排水が地中に浸透して地下水に影響を与えていると考えられる。
- (8) 花崗岩地域では、高速道路の離隔距離と $\text{HCO}_3^-$ 間および $\text{SiO}_2$ 間に正の相関傾向が認められる。

## 第2章の参考文献

- 1) 気象庁:過去の気象データ検索, (参照2014年5月25日),  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>
- 2) 渡部直喜, 鷺津史也, 大木靖衛, 佐藤修:新潟県松之山地すべり地域の地下水の水質について, 地すべり, 第32巻, 第3号, pp.32-40, 1995.
- 3) 藪崎志穂, 島野安雄:平成の名水百選の水質特性, 地下水学会誌, 第51巻, 第2号, pp.127-139, 2009.
- 4) 古米弘明, 山本晃一, 佐藤和明:ケイ酸その由来と行方, 技報堂出版, pp.27-36, 2012.
- 5) 古米弘明, 山本晃一, 佐藤和明:ケイ酸その由来と行方, 技報堂出版, p.68, 2012.
- 6) 古米弘明, 山本晃一, 佐藤和明:ケイ酸その由来と行方, 技報堂出版, pp.115-126, 2012.
- 7) 田崎和江, 田村正純, 馬場奈緒子:能登半島地震による水田の塩害被害, 地球科学, 61巻, pp.389-400, 2007.
- 8) 吉田稔, 中館興一:海水と接触した土壌の置換性塩基, 日本土壌肥科学雑誌, 第34巻, 第12号, pp.457-460, 1963.
- 9) 佐々木薫, 秦二郎, 諸泉利嗣:塩化物イオンの地下浸透による地下水水質のイオン交換, 第51回地盤工学研究発表会DVD-ROM版講演集, pp.309-310. 2016.
- 10) 大類清和, 生原喜久雄, 相場芳憲:森林集水域での土壌から溪流への水質変化, 日林誌, 75(5), pp.389-397, 1993.

### 第3章 凍結防止剤の地下浸透量，河川流出量および飛散量の定量化

#### 3.1 はじめに

日本の高速道路は現在供用中の路線のうち約50%は積雪寒冷地域（10年平均最大積雪深30cm以上）を通過している。積雪寒冷地域以外の地域でも年数回の降雪があることから、ほとんどすべての高速道路で雪氷対策が必要である。日本の高速道路で使用している凍結防止剤は主に塩（NaCl）であり、塩は水に溶けやすく、特殊な化学物質に比べて環境への影響は少ないものと考えているが、海外における凍結防止剤の沿道環境へ与える影響についてみると、カナダのハイランドクリーク流域において、凍結防止剤が地下水へ浸透し、カナダ環境省の塩化物イオン濃度の飲料水基準250mg/Lを超える濃度が検出され、その対策が図られている事例がある<sup>1)</sup>。また、図-3.1に示されるように塩の使用量は高速道路の供用延長に比例して増えることに加え、1993年からはスパイクタイヤの使用禁止も重なり、使用量が増加する傾向にある。

2000年度の塩の使用量は年間約20万tにのぼり、全国的高速道路の延長で割ると1km当たり約30tの使用量になる<sup>2)</sup>。

第2章で述べたように、高速道路に散布した凍結防止剤を含む路面排水が地中に浸透して、沿道周辺の地下水の水質に影響を与えていることが考えられるため、本研究では調査地域において沿道周辺の環境調査を実施した。現地観測結果および原位置試験結果等を基に、高速道路路面上に散布された凍結防止剤の路面排水路への排出量，路面から地下への浸透量を明らかにした。つぎに、近隣地域の観測結果および既往の研究結果等を基に、凍結防止剤の飛散量を推定した。さらに、近隣の気象観測所の観測結果および河川の水質試験結果等を基に、雪氷対策期における凍結防止剤の河川への直接流出量を算出した。これらの調査結果を基に、研究対象地域全体についての凍結防止剤の散布量と浸透量・排出量の収支関係について検討を行い、凍結防止剤が現在どの程度地下貯留しているかその割合を求めた。

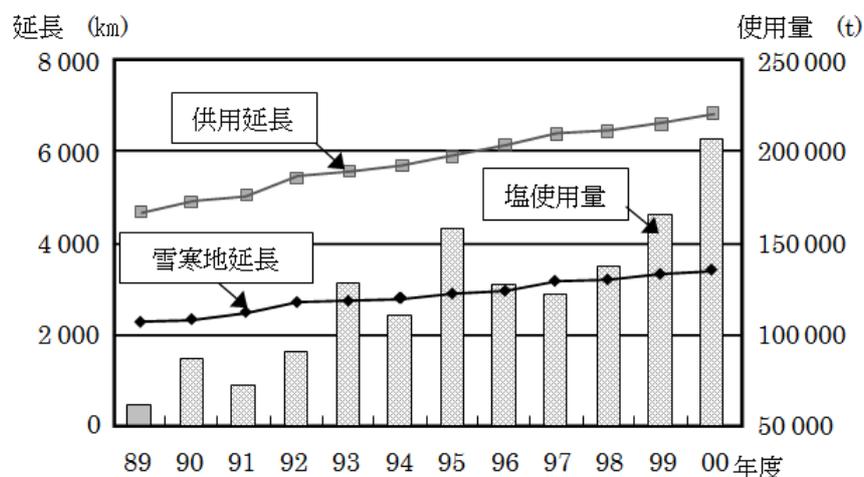


図-3.1 高速道路の延長と塩使用量（1989～2000）<sup>2)</sup>

### 3.2 雪氷対策の概要

高速道路では凍結防止剤として、主に塩化ナトリウムが使用されている。塩化ナトリウムが使用される理由としては、安価であり、供給量が多く容易に入手できること、貯蔵・運搬・取扱が容易なこと、さらに資源の循環に寄与し環境に優しい材料として認知されていることなどがあげられる。散布方法は湿塩散布方式で、通常2.5（固形剤）：1（溶液）の重量比で混合し20g/m<sup>2</sup>の量で散布する。

研究対象地域を含むインターチェンジ間の2007～2011年度までの凍結防止剤の散布量を図-3.2に、12月～3月の冬季降水量と冬季平均気温を図-3.3に示す。凍結防止剤の散布量は1km当たり41.7t～61.3tを推移しており、年平均では48.9tになる（図-3.2）。また、凍結防止剤の散布量と冬季気象条件の関係をみると、冬季平均気温と散布量との間に負の相関傾向が認められる（図-3.3）。

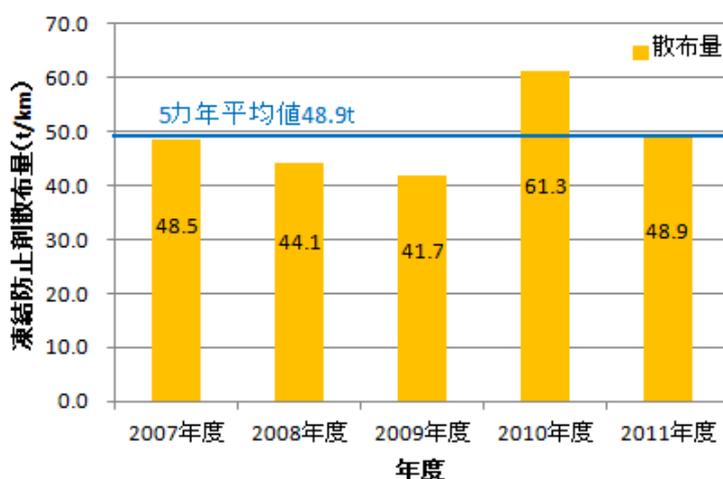


図-3.2 凍結防止剤散布量（2007～2011）

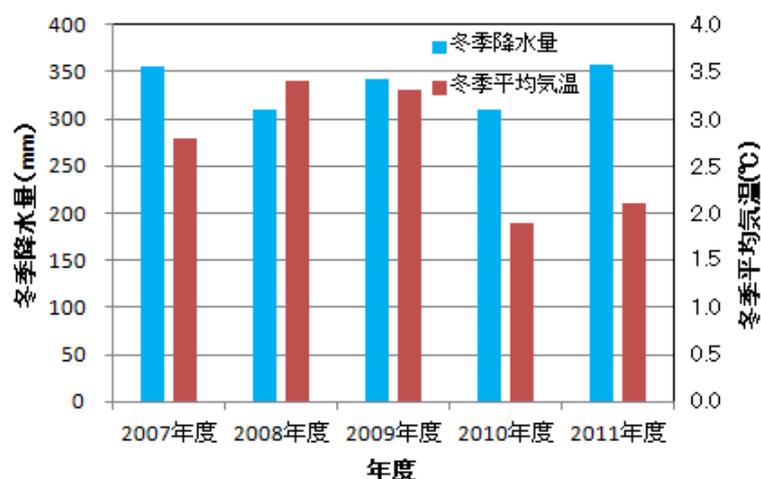


図-3.3 冬季降水量と冬季平均気温（2007～2011）<sup>3)</sup>

### 3.3 凍結防止剤の地下浸透経路調査

#### 3.3.1 調査地の概要

路面上に散布された凍結防止剤が，路面・排水路等の道路構造によってどのような形態と割合で地下水へ浸透するのか，除雪や車両による水しぶき等によって路肩やのり面等へどのような形態と割合で飛散しているのかを調べるために，調査および試験を行った。

対象地域の中で路面排水の流域が明確であり，かつ路面水以外の表流水が水路に入らない構造を有する箇所を調査地に選定した。

調査地は盛土構造で延長は172m，路面上の集水面積が3,500m<sup>2</sup>あり，集水域全てが密粒舗装である。路面排水は2箇所の盛土のり面の縦排水溝があり，その流末に観測機器を設置した(図-3.4)。

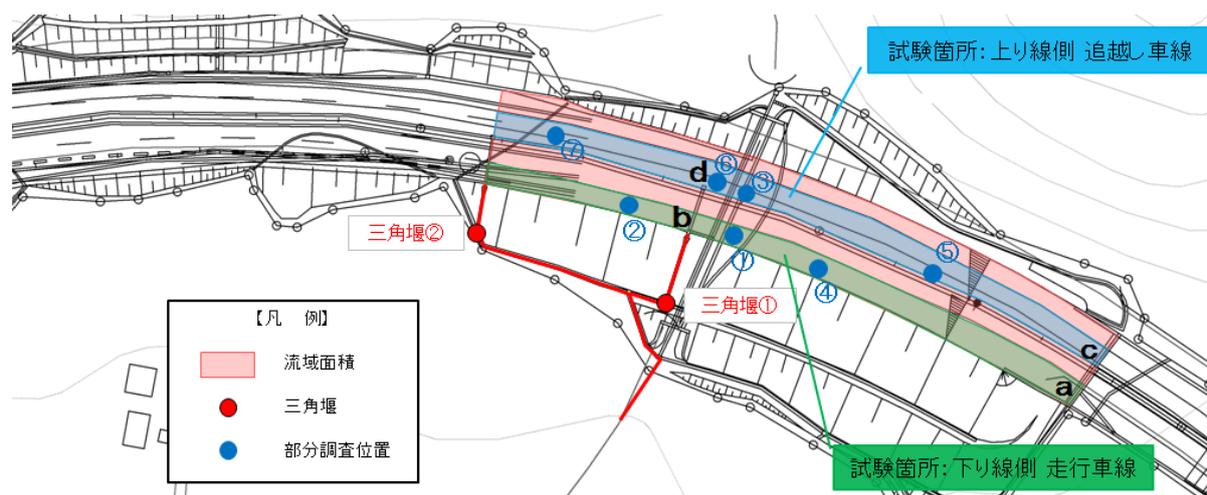


図-3.4 試験位置図

### 3.3.2 調査および試験方法

現地で調査した項目は表-3.1に示す5項目である。また，調査場所のイメージを図-3.5に示す。表-3.1に示す①～⑤の調査項目は，図-3.5の①～⑤に該当する場所で行った。

表-3.1 調査項目と調査目的

調査項目	調査目的
① 路外流出量の調査	流末水路への排出量
② 散水試験 全体試験	流末水路への排出量 路面クラック等からの浸透量
② 散水試験 部分試験	路面クラック等からの浸透量
③ 除雪・飛散量の調査	のり面等路外への除雪・飛散量
④ 流末水路目地部の調査	流末水路目地からの地下浸透の確認
⑤ 河川の水質調査	河川の水質（塩化物イオン濃度）のモニタリング

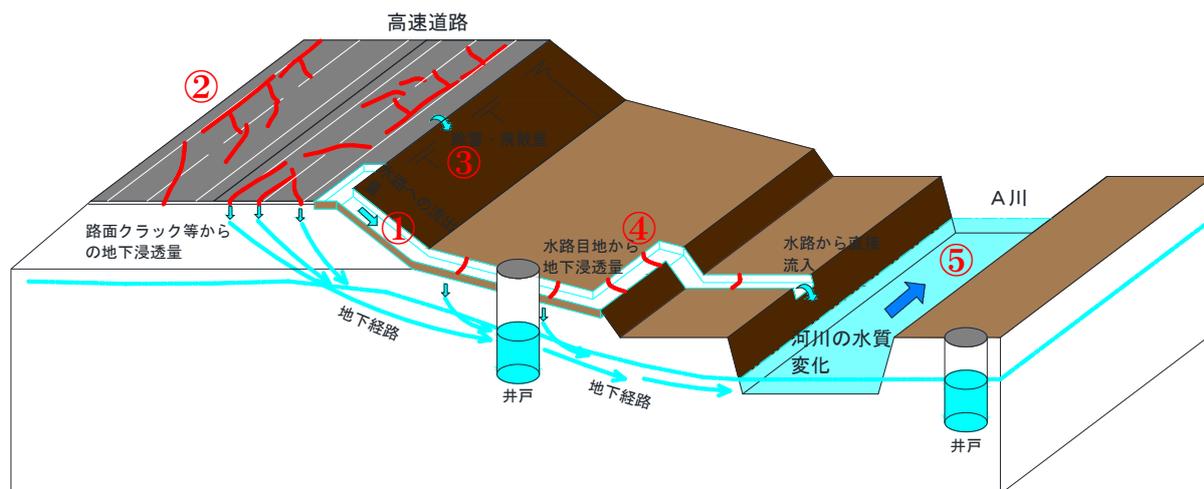


図-3.5 凍結防止剤の浸透流出経路模式図と調査場所

(1) 路外流出量の調査

路面から排水される凍結防止剤を含む塩水を集水し，水量と塩分濃度を測定するために，2箇所<sup>2</sup>の盛土のり面の縦排水溝の流末に三角堰を設置した（写真-3.1）。三角堰には水量の測定に水位計（株式会社オサシ・テクノス製水位計DS-3）と塩分測定に水質計（東亜ディーケーケー株式会社製ポータブル多項目水質計WQC-24）を設置した。

観測期間は2012年12月11日から2013年4月25日までの135日間で，水位計と水質計のデータサンプリング間隔は1時間とした。なお，観測期間中の累積降水量は376.5mm，平均気温は3.9°Cであった<sup>3</sup>。



写真-3.1 三角堰の設置状況

## (2) 散水試験

路外流出量の調査結果を検証するために，2013年4月25日に散水車を用いて路面上にて散水試験を行った。試験は，流末水路で路面排出流量を調査する全面調査（写真-3.2）と路面のひび割れや目地等からの浸透量を調査する部分調査（写真-3.3）である。

### 1) 全面試験

試験は下り線側走行車線と上り線側追越し車線を規制して，規制内で散水車にて散水を行った（図-3.4）。三角堰①の計測範囲は図-3.4中のaからbまでとcからdまでであり，三角堰②の計測範囲はbから最下流までとdから最下流までである。

散水量は4.0～5.1mm/m<sup>2</sup>で，まず下り線走行車線規制内において，図-3.4のaおよびbの地点からそれぞれ散水し，三角堰①および三角堰②で水量を計測した。つぎに，上り線追越し車線規制内において，図-3.4のcおよびdの地点からそれぞれ散水し，三角堰①および三角堰②で水量を計測した。また，散水方法は散水用タンク1.5tをトラックに乗せ，散布速度23～44 L/minで試験範囲全面に均一に水が流れるようにトラックを移動させながら行った（写真-3.2）。



写真-3.2 散水試験状況（全面調査）

三角堰による流量計測は1分間隔で行い，細かい流量の変化に対応できるようにした。また，計量容器により実際に三角堰より排出される流量の確認を併せて行った。

なお，本試験は舗装面に散布した凍結防止剤が地表水に溶解して流末水路へ流出する量をチェックすることが目的であり，凍結防止剤の移動は地表水の動きに支配されていると考えて，実際の試験では凍結防止剤は混入しないで水だけを使用し，その回収率と凍結防止剤の回収率を同じと仮定した。

### 2) 部分試験

調査内容は図-3.4中の①から③までの路面ひび割れ部からの浸透量調査，④の舗装切削目

地からの浸透量調査，⑤から⑦までのロードガッター（中央排水溝）部目地からの浸透量調査である。

調査はまず規制内において，路面のひび割れ状況やロードガッターの目地等について位置・長さ・幅をスケッチにより記録し，凍結防止剤が浸透するおそれのある箇所を把握した。

つぎに，クラック幅別（5mm未満・10mm以上・亀甲状）の代表クラックで3箇所，切削目地部（幅5～10mm未満）で1箇所，ロードガッター部で3箇所の計8カ所について，水を5L散水し，ひび割れ等に浸透しない水はビニール袋で回収し，散水量と回収量の差より浸透量を求めた。具体的には，写真-3.3に示すように，クラック長0.5mに粘土で導水路を設け，流末の集水用ビニール袋（路面接着）へ向けて，5Lの水を上流より2回流し，2回目の集水量を試験結果とした。



写真-3.3 散水試験状況（部分調査）

### (3) 除雪・飛散量の調査

除雪行為，走行車両の跳ね上げおよび風の影響によるのり面への凍結防止剤の飛散量を把握するために，路肩残雪のサンプリングによる飛散量の調査を行った（写真-3.4）。調査方法は路肩から1m付近の残雪を方形（縦横0.33～0.45m，深さ0.13～0.15m）にサンプリングし，面積，平均積雪深，体積，重量，融雪後の電気伝導率等を測定した。排雪・残雪中の塩分濃度は融雪後の電気伝導率より算出した。

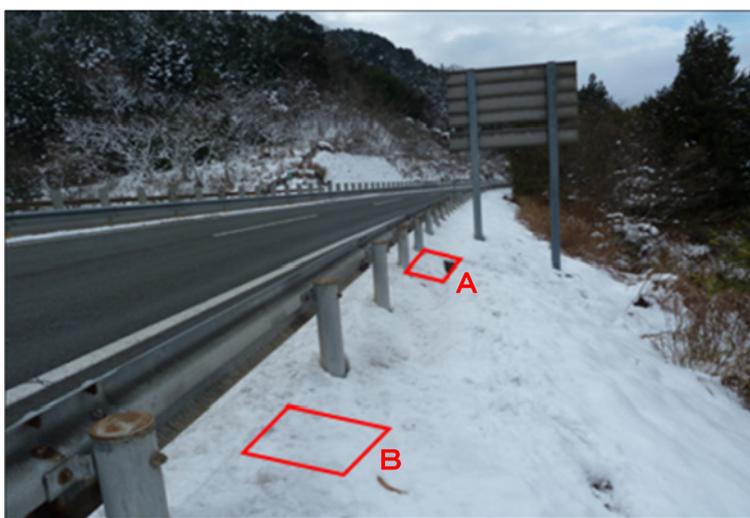


写真-3.4 飛散量調査サンプリング地点

### (4) 流末水路目地部の調査

長さ数百mに及ぶ流末排水路において，開口目地を通して地下への浸透量を精度良く調べることは困難である。そこで本調査では，流末排水路目地部の土壤塩分を測定して，目地から地下に浸透している状況の確認を行った。流末排水路の目地の開口部と健全部において土壤をサンプリングし，それぞれの塩化物イオン濃度を測定した（図-3.6，写真-3.5）。

サンプリング箇所は高速道路からの離隔が約5m，約90m，約180mの3箇所である。試験数量は1箇所あたり3深度について，3時期（雪氷初期・雪氷中期・雪氷後期）の合計27試料である。サンプリングした土壤の塩化物イオン濃度の測定方法は地盤工学会基準（JGS 0241-2009）<sup>4)</sup>に従った。

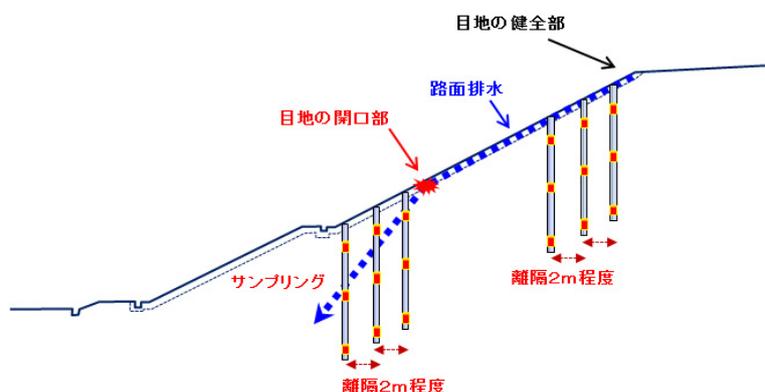


図-3.6 土壤採取のイメージ



写真-3.5 土壌サンプリング状況

(5) 河川の水質調査

高速道路に散布した凍結防止剤がA川にどのような影響を及ぼしているかを把握するために，河川の水質調査を行った。水質試験項目は塩化物イオン濃度で，高速道路の路面排水の影響を受けていると考えられる観測点と影響を受けないと考えられる観測点について（図-3.7），雪氷期と非雪氷期の水質を観測した。

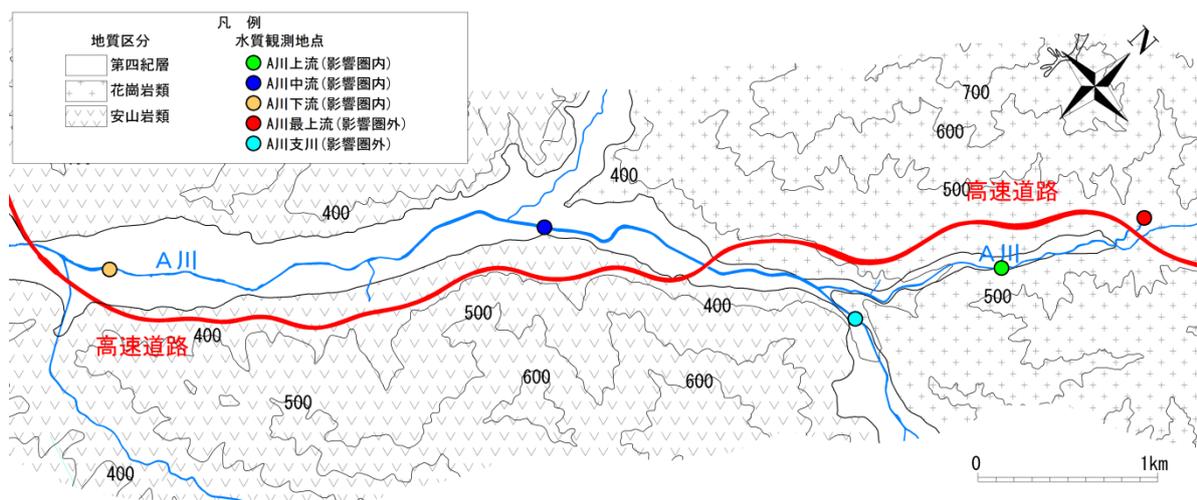


図-3.7 河川の水質調査地点

### 3.4 調査結果

#### 3.4.1 縦排水溝への排出量

観測期間中の2012年12月11日から2013年4月25日までの調査地に散布された凍結防止剤の散布量，盛土縦排水溝の三角堰で回収された塩分量の量，および回収率（三角堰で回収された塩分量／凍結防止剤の散布量）を図-3.8に示す。凍結防止剤は期間前半の12月11日から2月24日までに，全散布量の93.6%にあたる4.85tを散布しており，それ以降の散布量は僅かであり4月20日に散布を終了した。総散布量は5.18tであった。一方，三角堰で回収された塩分量も散布量に比例しており，期間後半の回収量は僅かな量であった。なお，散布終了から5日後の4月25日の時点で水質計の塩分濃度は0.1%以下まで下がっていたこと，既往文献<sup>5)</sup>でも散布後2週間目には回収塩分がほとんど無いことより，路面上には残留塩分はほとんど無いと判断して調査を終了した。最終的に回収した塩分量は3.42tで，回収率は66.0%であった。また，観測期間中の降水量から計算される路面からの累積排水量は1272.8tで，三角堰で計測された累積流量は799.8tであり，回収率（三角堰で計測した累積流量／路面からの累積排水量）は62.8%であった（図-3.9）。

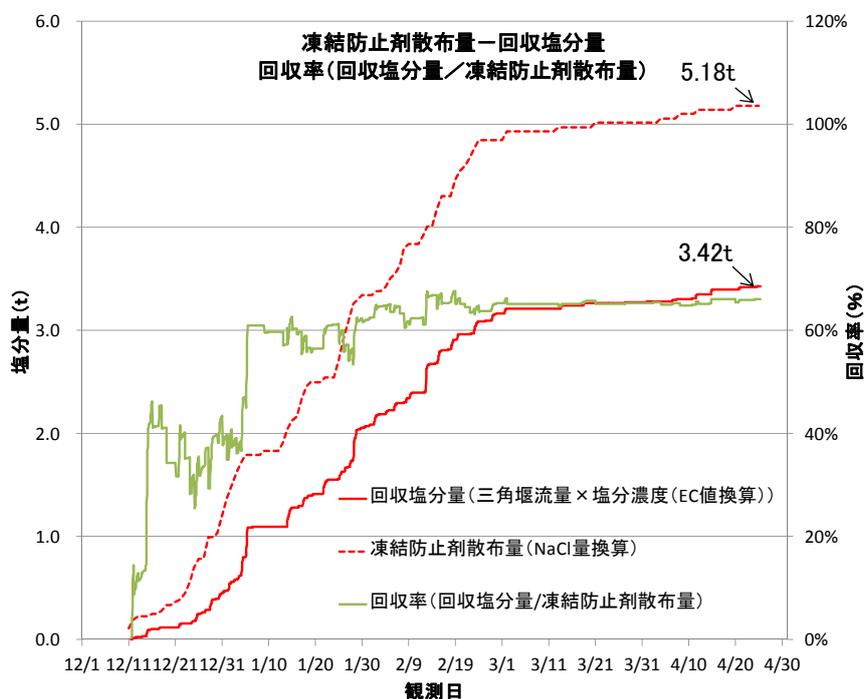


図-3.8 路外排出塩分量(2012.12.11～2013.4.25)

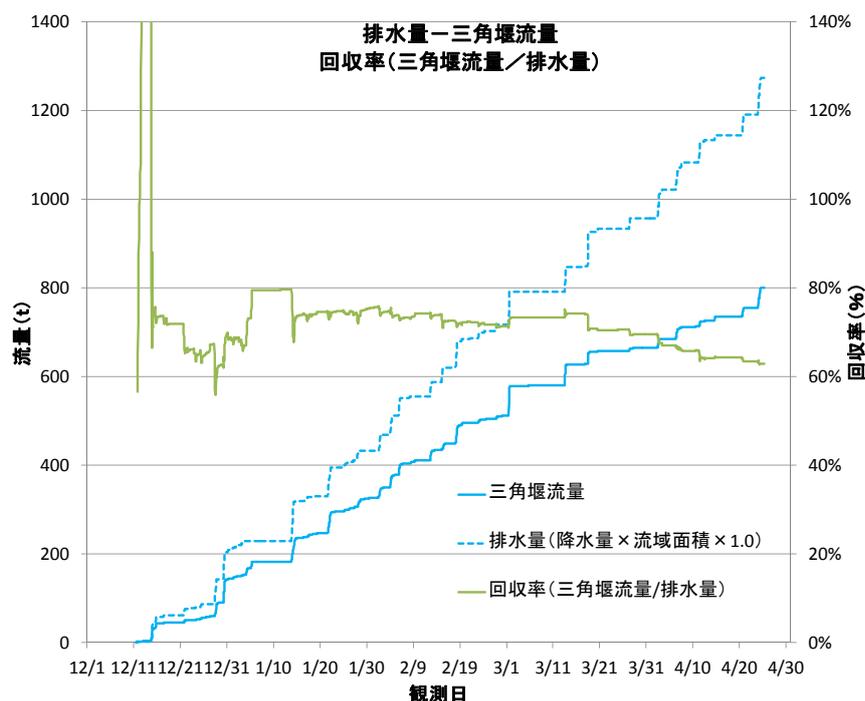
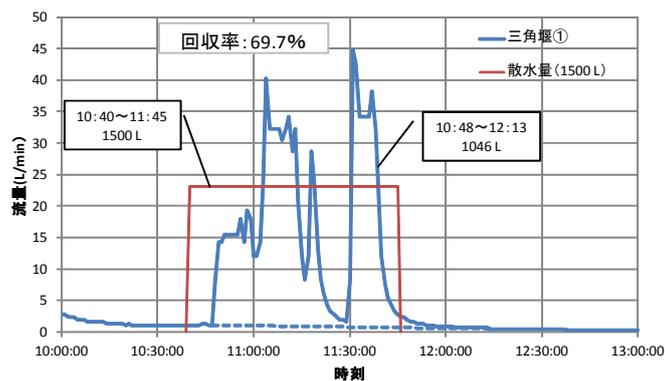


図-3.9 路外排出流量(2012.12.11～2013.4.25)

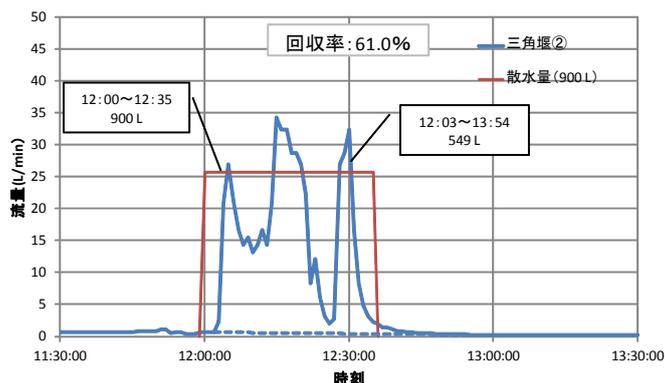
つぎに，散水試験結果を図-3.10に示す。図中の赤線は路面への散水量であり，散水量の経時変化を記録していなかったため，平均流量で表現した。一方，青線は三角堰で計測した流量であり，1分間隔で測定しているため細かな流量変化が観測されている。また，散水時間と三角堰流量の関係をみると，下り走行車線では散水終了時の三角堰流量は全回収量の約99%を回収している。一方，上り追越車線では，散水終了時の三角堰流量は全回収量の約80～85%に止まっている。これは散水位置と三角堰との距離の違い，あるいは散水速度の違いによるものと考えられる。総散水量4.500tに対して三角堰で測定した累積流量は2.926tであり，回収率（三角堰で計測した累積流量／路面への散水量）は65.0%であった。表-3.2にそれぞれの結果を整理する。表-3.2に示されるように，それぞれの調査対象物質や調査条件は異なるものの，回収率は概ね63%～67%であり，この結果より路面に散布した凍結防止剤のうち約65%が水路に流出することが明らかとなった。

表-3.2 縦排水溝への排出量

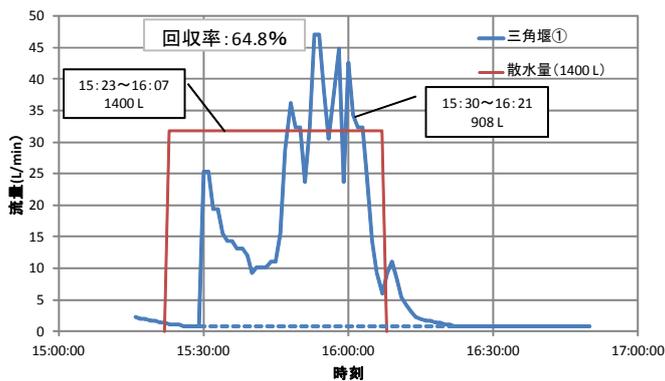
調査項目	回収量(t)	散布量等(t)	回収率(%)
路外排出量調査 (塩分量)	3.42	5.18	66.0
路外排出量調査 (流量)	799.8	1272.8	62.8
散水試験 (流量)	2.926	4.500	65.0



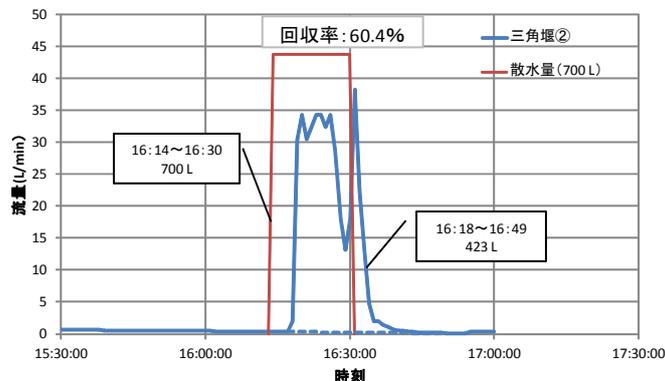
(a) 三角堰① 下り走行車線



(b) 三角堰② 下り走行車線



(c) 三角堰① 上り走行車線



(d) 三角堰② 上り走行車線

図-3.10 散水試験結果

### 3.4.2 路面からの浸透率

アスファルトで舗装された路面は，完全に密閉されていて地表水が地下に浸透することは無いように思われるが，実際には様々な形状や開口幅のクラックが路面上に認められる（写真-3.6）。



写真-3.6 舗装路面上の様々なクラック

部分試験から求められた各クラック幅，亀甲状クラック，ロードガッター一部における，散水量に対する回収水量(L)，回収率(%)，浸透率(%)を表-3.3に示す。表より，クラック幅が大きくなるに従って浸透率が大きくなる傾向が認められる。また，複数のクラックからなる亀甲状クラックの浸透率は69.4%で最も浸透率の大きいことも明らかとなった。

試験範囲全体での回収率および浸透率の算出は以下のようにした。まず，表-3.3の結果をもとにそれぞれのクラックやロードガッター部での回収率(%)を設定する。つぎに図-3.11に示すようにそれぞれのクラックの影響範囲と回収率を図化する。クラックの影響範囲では路面上の流水量(単位散水量×集水面積)はクラックでの浸透により回収率を乗じた量に減少することになる。よって，試験範囲全体の流水に及ぼすクラック等の影響も，それぞれのクラックの影響範囲の回収率と集水面積から低減面積を求め，試験範囲全流域面積と低減面積の比から求めることができる。このようにして，試験範囲全流域面積と低減面積から，回収率と損失率を算出した(表-3.4)。その結果，試験範囲における回収率は約75%，損失率(路面からの浸透率)は約25%となった。

表-3.3 部分試験結果

クラック長(m)	クラック幅	散水量(L)	回収水量(L)	回収率(%)	浸透率(%)	備考
0.5	10mm	4.99	3.53	70.7	29.3	路面クラック
0.5	5mm上~10mm未満	5.00	4.12	82.4	17.6	舗装切削目地
0.5	2mm	5.00	4.75	95.0	5.0	路面クラック
0.5	10mm×2	5.00	1.53	30.6	69.4	亀甲状クラック
0.5	—	5.00	4.49	89.8	10.2	ロードガッター草部

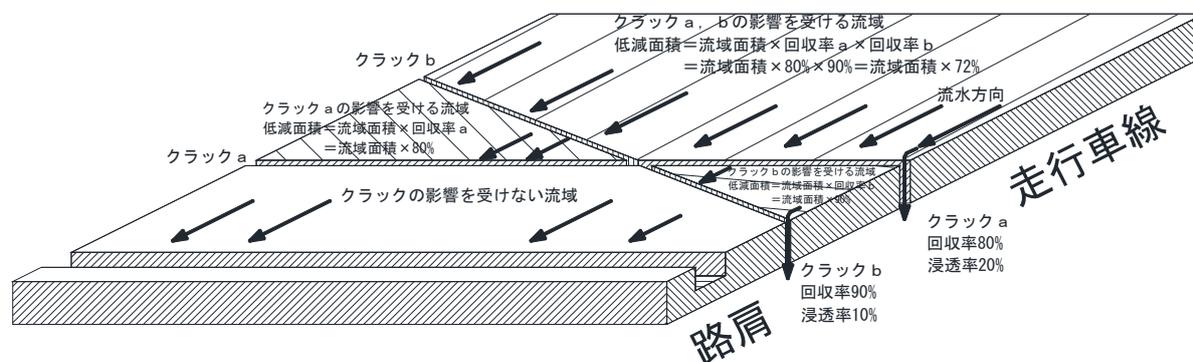


図-3.11 クラックによる回収流量の低減量の考え方

表-3.4 路面全体での回収率と浸透率

試験範囲全流域面積(m <sup>2</sup> )	低減面積(m <sup>2</sup> )	回収率(%)	浸透率(%)
1195.0	899.3	75.3	24.7

### 3.4.3 のり面への排雪・飛散による浸透量

今回の調査では写真-3.4に示すように2箇所でサンプリングした。サンプリング時の路面は乾きから半乾き状態で，路肩残雪は圧雪状態のものが主体であり，通行車両および除雪作業により飛散したものと推察される。なお，試料数が少ないので，調査場所は異なるが（但し，同じ路線）2011～2012年に実施したのり肩での飛散量調査結果も合わせて示す（表-3.5）。のり肩から5mまでの凍結防止剤散布量に対する飛散の割合を算出すると1.2～16.1%であった。

一般的に，飛散量は道路からの距離により減衰が顕著に見られ，5mまでは飛散量が多く，6m以上の飛散量は5mまでの飛散量の半分以下になるといわれている。一般国道の調査も含む凍結防止剤散布量に対する飛散の割合は，路肩から5mまでが1.0～7.4%，路肩から30mまでが1.4～12.6%の範囲にある<sup>6)</sup>。

飛散量は調査方法の違いにより，結果が異なることが指摘されているが<sup>2)</sup>，本地域の飛散量は，一般的傾向よりもやや大きい傾向であった。一方，散水試験結果より散水量から水路への排出量（65%）と路面からの浸透量（25%）を差し引いた10%が飛散・路面に残留・蒸発したものと推計される（図-3.12）。したがって，のり面への排雪・飛散による浸透量は10%程度と考えられる。

表-3.5 のり面への飛散率

試料名	採取日	面積 (m <sup>2</sup> )	重量 (kg)	電気伝導度 EC (μS/cm)	*換算塩化物イオン濃度 (mg/L)	測定塩分量 (mg)	単位塩分量 (g/m <sup>2</sup> )	5m飛散量 (g/m)	凍結防止剤散布量 (g/m)	5m飛散率	備考
A	2012.12.10	0.1090	5.27	1496	431		34.33	171.65	1064.00	16.1%	路肩から約1mで採取
B	2012.12.11	0.2030	4.76	1267	345		13.33	66.65	1064.00	6.3%	路肩から約1mで採取
C	2011.12.28 ～2012.2.24	0.0346				1038	30.00	150.00	12103.00	1.2%	別地域 漏斗法
D	2012.2.6 ～2012.2.24	0.0855				1200	14.04	70.20	2394.00	2.9%	別地域 容器法

\*換算塩化物イオン濃度 =  $7 \times 10^{-5} \times EC^2 + 0.1835 \times EC$

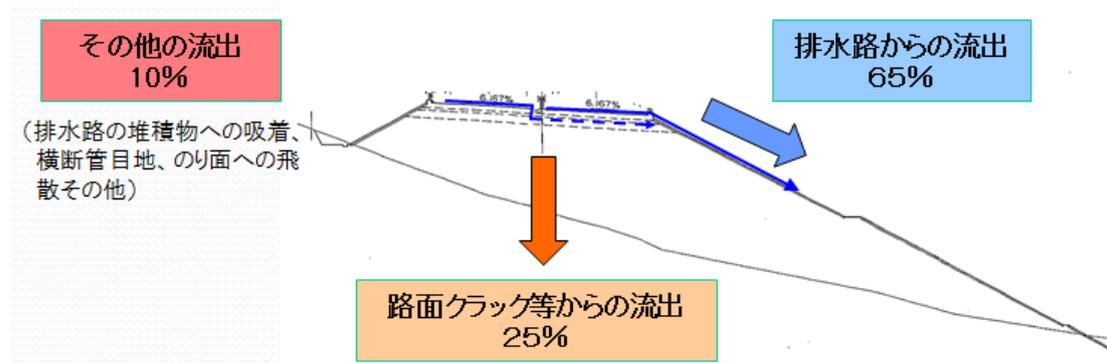


図-3.12 凍結防止剤の路面から流出割合

### 3.4.4 排水路の目地開きからの浸透状況

調査地の排水路は老朽化が進み，いたるところに開口した目地や目地周辺が毀損したものが認められる。なかには水路底面の毀損により開口幅が10cm以上あるものもや，目地を開口部を使って地下に排水が浸透しているものも認められる（写真-3.7）。

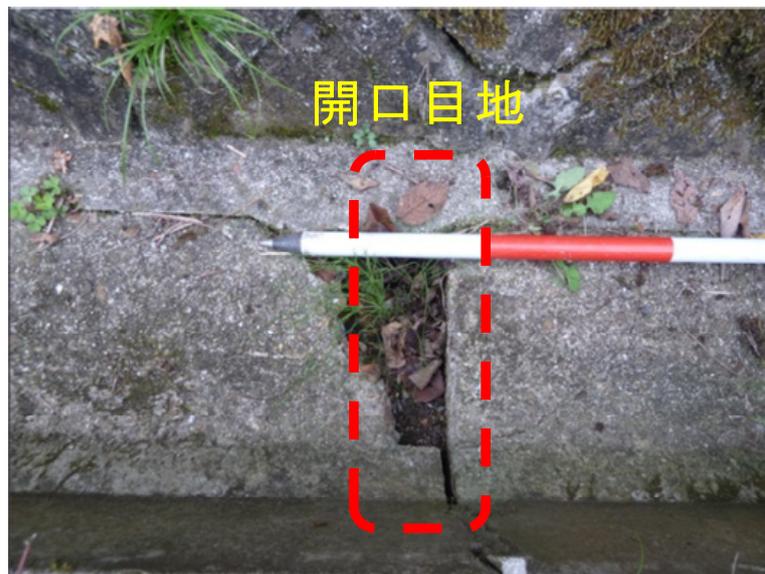


写真-3.7 老朽化した排水路に認められる開口目地

調査結果を図-3.13に示す。図より土壤中の塩化物イオン量は，高速道路から離れるに従って減少する傾向と，目地開口部は健全部よりも高い傾向が認められた。さらに，図-3.13(a)では土壌採取深度が深くなるに従って，塩化物イオン量が増加する傾向が認められた。上記した状況より流末排水路の目地開口部より地下へ凍結防止剤（塩水）が浸透していると考えられる。

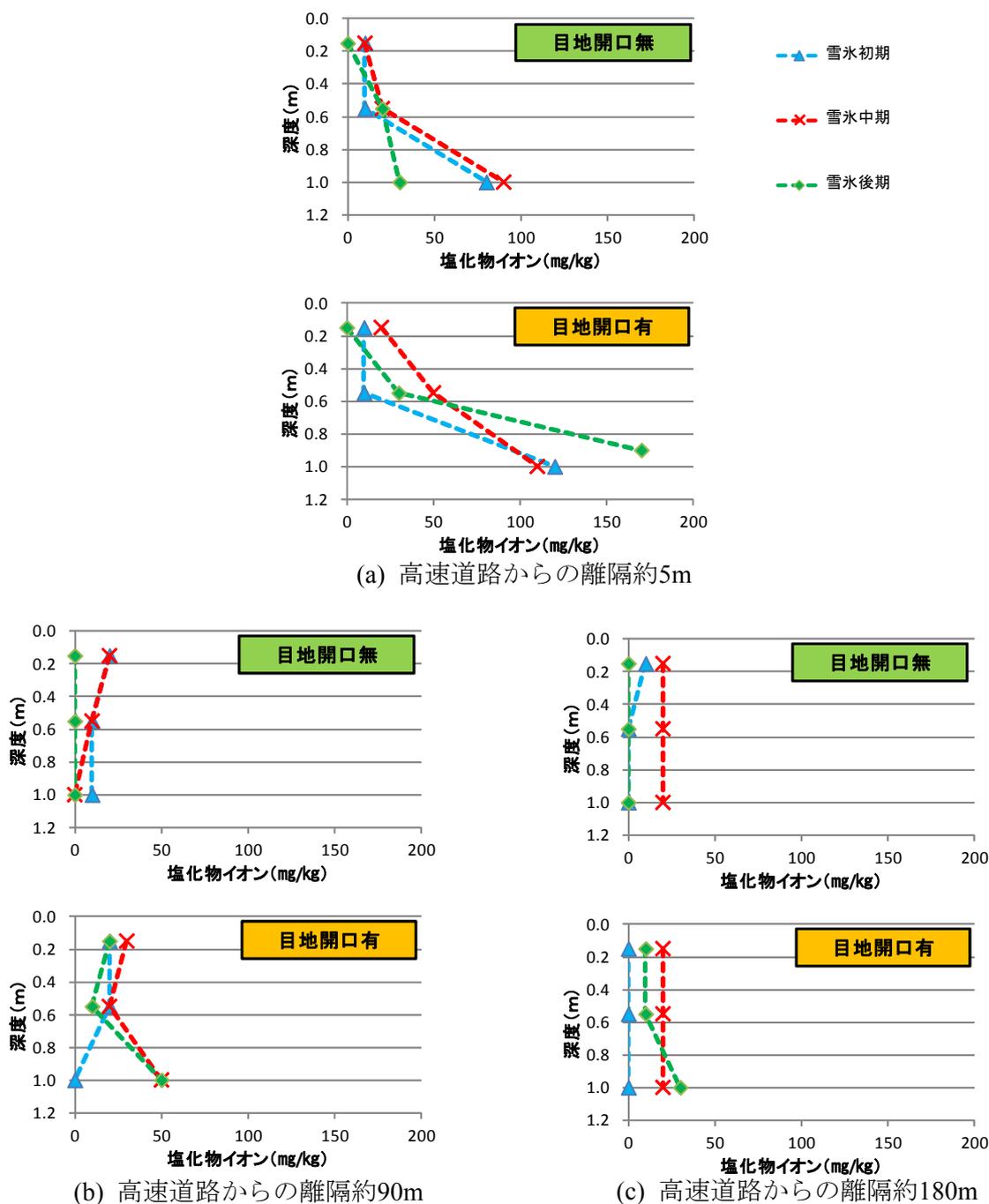


図-3.13 排水路目地部の土壌塩分調査結果

### 3.4.5 河川の水質

河川水中の塩化物イオン濃度の変化を図-3.14に示す。図より高速道路の路面排水の影響を受ける観測点（影響圏内）では，雪氷期の塩化物イオン濃度が13～79mg/L（平均35.1mg/L）であったのに対し，非雪氷期では14～25mg/L（平均18.2mg/L）となり，雪氷期に塩化物イオン濃度は高くなり凍結防止剤の散布量の推移と塩化物イオン濃度の推移には相関が認められた。一方，凍結防止剤の影響を受けない観測点（影響圏外）では，雪氷期のデータではあるが塩化物イオン濃度は2.9～5.2mg/L（平均4.2mg/L）で，高速道路の路面排水の影響を受ける観測点と比較して明らかに小さい値であった。凍結防止剤の影響を受けない観測点で確認された塩化物イオン濃度をバックグラウンドに近い値とすると，高速道路の路面排水の影響を受ける観測点の塩化物イオン濃度が非雪氷期でも高いのは，長年にわたって地下に浸透した凍結防止剤（塩分）が蓄積し，地下水に混じって河川へ流出しているからと考えられる。

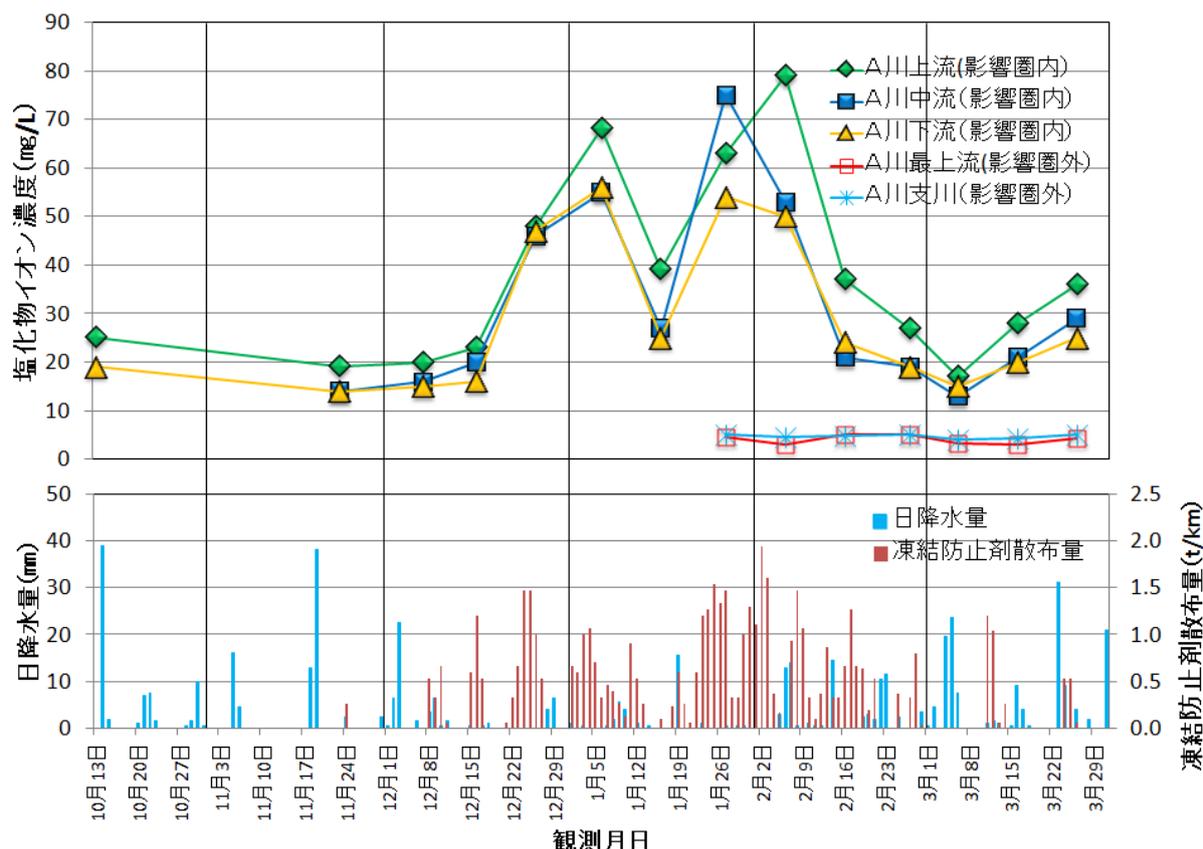


図-3.14 A川の塩化物イオン濃度変化と日降水量・凍結防止剤散布量の関係

### 3.5 考察

#### 3.5.1 凍結防止剤の散布量と浸透量・排出量（収支）関係の推計

本地域の高速道路に散布した凍結防止剤は，路面水に含まれて流末排水路からA川に流入する経路と，路面のクラック，流末水路開口目地およびのり面（裸地）等から浸透して地下水に含まれてA川に流入する経路が考えられる。

##### (1) 観測期間中のA川への凍結防止剤の流出量

A川へ直接流入する地表水中の凍結防止剤量と，地下へ浸透して地下水として流入する凍結防止剤量の比率をA川の塩化物イオン濃度より推定する。本地域全体について検討するため，流域全体の水質をモニタリングしているA川の下流観測地点の観測データを検討に用いるものとする。まずA川への塩化物イオンの流入源を，バックグラウンド・地下水・地表水に区分する。バックグラウンド値は本地域を含むB市の329井戸の塩化物イオン濃度の平均値である11.0mg/Lとし，地下水に含まれる濃度は観測地点の10～11月の平均値からバックグラウンド値を差し引いた値とする。

地表水に含まれる月別塩化物イオン濃度は(3)式で算出した。

$$C = D - (A + B) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに， $C$ ：地表水に含まれる月別塩化物イオン濃度(mg/L)， $D$ ：12～3月までの観測値， $A$ ：10～11月の地下水に含まれる平均塩化物イオン濃度(mg/L)， $B$ ：バックグラウンド値(mg/L)である。計算結果を図-3.14にA川の流入源別の塩化物イオン濃度として示す。図より，観測期間中の流入源別の月別塩化物イオン濃度はバックグラウンド濃度が11.0mg/L，地下水の濃度が5.5mg/L，地表水の濃度が3.5～31.5mg/Lとなる。

つぎに，観測期間中のA川への塩分の流出量は，上で求めた流入源別塩化物イオン濃度と月別河川流量より推定する。河川流量は，流出量（降水量から蒸発散量を引いた値）に流域面積を乗じた(4)式で算出した。

$$Q = 0.001 \times (r - c \times e) \times a \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに， $Q$ ：月別河川流量(m<sup>3</sup>)， $r$ ：月別降水量(mm)<sup>3</sup>)， $c$ ：補正係数( $c=0.636$ )<sup>7</sup>)， $e$ ：蒸発散能(mm)<sup>8</sup>)， $a$ ：流域面積(m<sup>2</sup>)である。なお，蒸発散量はHamon式で算出される蒸発散能 $e$ に小葉竹<sup>7</sup>)が示した補正係数0.636を乗じて求めた。

凍結防止剤流出量は塩化物イオン濃度に河川流量を乗じた値を凍結防止剤の質量に換算して，対象の高速道路延長で除した(5)式で算出した。

$$E = (A + C) \times Q / (F \times G \times H) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに， $E$ ：月別凍結防止剤流出量(t/km)， $F$ ：塩素と塩化ナトリウムの質量比( $F=35.45/(22.99+35.45)=0.6066$ )， $G$ ：凍結防止剤に含まれる塩化ナトリウムの純度(95%)<sup>9</sup>)， $H$ ：

対象の高速道路延長(km)である。

計算結果を表-3.6に示す。表中の降水量，流域面積，流入原別塩化物イオン濃度の元データとなるA川の塩化物イオン濃度および対象の高速道路延長は実測値あるいは図面計測したもので，その他の項目は上述した計算式等により推計したものである。表より，観測期間中の凍結防止剤の総流入量は27.3t/kmで，内訳は地表水からの流入量が18.9t/km，地下水からの流入量が8.4t/kmと算出される。

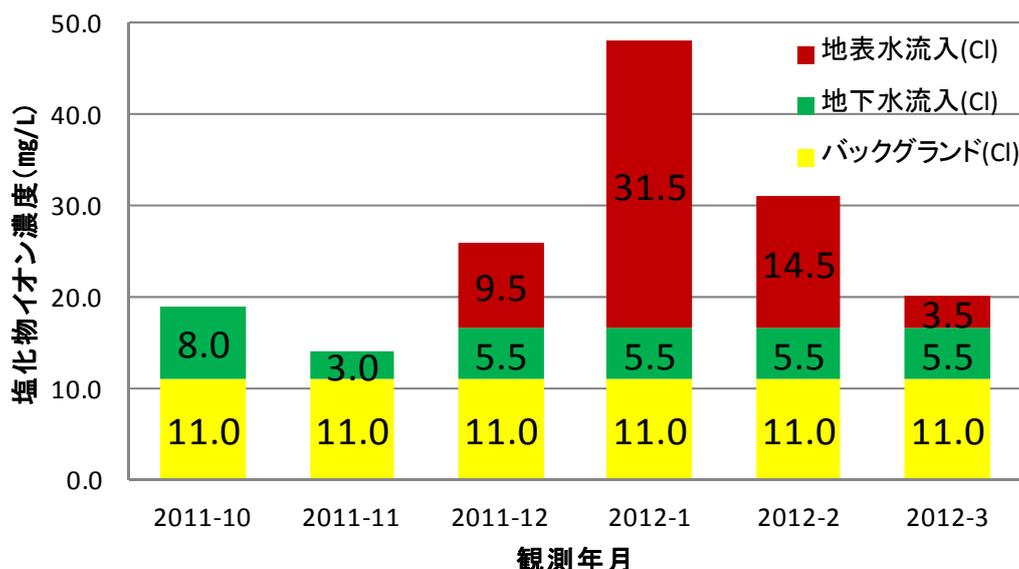


図-3.14 流入源別の塩化物イオン濃度

表-3.6 観測期間中のA川への凍結防止剤の流入量

月	降水量 (mm)	蒸発散量 (mm)	流域面積 (m <sup>2</sup> )	流量 (m <sup>3</sup> )	流入原別塩化物イオン濃度 (mg/L)			対象の高速道路延長 (km)	凍結防止剤流出量(t/km)		
					地表水	地下水	バックグラウンド		地表水	地下水	合計
12月	73.5	10.8	22,260,000	1,396,000	9.5	5.5	11.0	7.8	3.0	1.7	4.7
1月	58.5	9.7	22,260,000	1,086,000	31.5	5.5	11.0	7.8	7.6	1.3	8.9
2月	99.0	10.4	22,260,000	1,972,000	14.5	5.5	11.0	7.8	6.4	2.4	8.8
3月	127.0	18.3	22,260,000	2,420,000	3.5	5.5	11.0	7.8	1.9	3.0	4.9
合計	358.0	49.2		6,874,000					18.9	8.4	27.3

(2) 観測期間中の凍結防止剤の散布量と浸透量・排出量（収支）関係

観測期間中の1km当たりの凍結防止剤の散布量は48.9t/kmであった。凍結防止剤の散布量うち，A川に流入する総量は27.3t/km(56%)で地表水に含まれる量が18.9t/km(39%)，地下水に含まれる量が8.4t/km(17%)となる。また散布量と流出量の収支計算より，地下への浸透量は30.0t/km(61%)で，21.6t/km(44%)が地下に滞留していると推計される。

凍結防止剤の推定経路を図-3.15に示す。凍結防止剤の散布量(100%)うち、65%は路面から排水路に流入し、このうち39%が地表水に含まれてA川に直接流入する。一方、地下への総浸透量は散布量の61%と推計され、その内訳は、上述の流末水路目地開口部からの浸透量26%、舗装クラック等から地下への浸透量の25%、のり面への飛散その他からの浸透量の10%である。また、この散布量の61%には地下水に含まれてA川に流入する凍結防止剤の17%が含まれていると推計されるため、最終的には散布量の44%の凍結防止剤が地下に貯留されると考えられる。

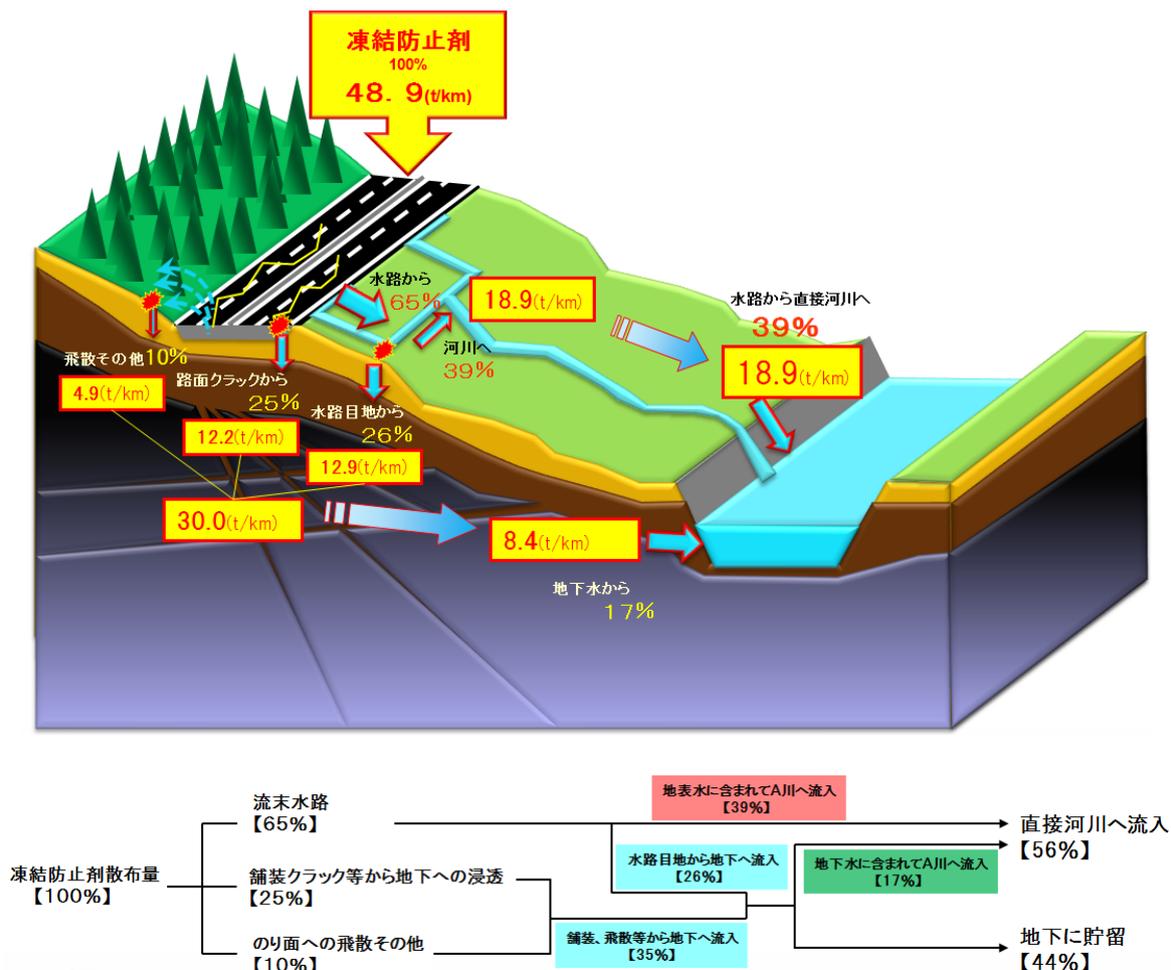


図-3.15 凍結防止剤の地下浸透経路・浸透量および河川流出量

### 3.5.2 凍結防止剤（塩分）の地下貯留量の推計

雪氷期の凍結防止剤の収支関係より，凍結防止剤の散布期間中は散布量のうちの44%が地下に滞留していることが明らかとなった。この滞留した凍結防止剤は，地下水に混じって非雪氷対策期にも少しずつA川に流出しているため，10～11月の塩化物イオン濃度がバックグラウンドよりも高くなっていると考えられる。

一方，高速道路は供用開始後30年以上が経過しており，この間凍結防止剤の散布量や地下への浸透状況に大きな変化がなかったとした場合，地下には相当量の凍結防止剤由来の塩分が貯留していることが懸念される。そこで，地下に貯留している凍結防止剤を推計する。

#### (1) 塩分の年間蓄積量の推定

非雪氷期（4～11月）に地下水としてA川へ流出する塩分量を，4～11月までのA川の塩化物イオン濃度を図-3.14に示す10～11月の河川の塩化物イオン濃度の平均値16.5mg/Lとし，これからバックグラウンド値の11.0mg/Lを差し引いた5.5mg/Lが凍結防止剤由来の塩化物イオン濃度と仮定し，同時期の降水量を1160mmとして河川流量を算出して求めると20.2t/km（約20t/km）となる。一方，雪氷期（12～3月）に地下へ約22t/kmの塩分が貯留しているので，差し引き年間約2t/kmの塩分が貯留することになる。

#### (2) 過去からの凍結防止剤（塩分）の累積貯留量の推計

高速道路供用開始後30年間に，凍結防止剤の散布量や地下への浸透状況に大きな変化がなかったと仮定した場合，地下に累積している塩分量は60t/km以上と推計される。

### 3.6 まとめ

本研究では供用30年以上経過する高速道路沿道の中山間地域を対象とし，現地観測および原位置試験より，雪氷期に散布された凍結防止剤の流出・浸透経路や地下への貯留等について検討を行った。

まず，対象地域の特徴としては以下に示す3つがあげられる。

- (1) 路面排水が集落側の地下水に対して影響を与えやすい道路構造および地形である。
- (2) 供用後30年以上経過しており流末水路等施設の老朽化が進んでいる。
- (3) 過去5カ年の平均散布量が48.9t/kmで全国平均散布量の約30t/kmを大きく上回っている。

つぎに，本研究で得られた検討結果をまとめると以下のようになる。

- (4) 路面に散布された凍結防止剤のうち65%が流末水路に流出することが観測された。つぎに散水試験により25%が路面のクラック等から地下に浸透することが明らかとなった。残り10%についてはのり面等路外への飛散・除雪と考えられ，観測結果もばらつきが認められるものの概ね10%であった。また，流末水路の開口目地部が，凍結防止剤の地下浸透に関与していることもわかった。
- (5) 水質試験結果よりA川の塩化物イオンの流入源をバックグラウンド・地下水・地表水に3区分して，雪氷期のA川への凍結防止剤流出量の割合を算出すると，散布量の39%が地表水に混じって流出し，17%が地下水に混じって流出していることを推計した。また，散布量と流出量の収支関係より44%が地下に貯留していることを推計した。年間での凍結防止剤の収支を検討した結果，供用開始から60t/km以上が地下に累積していることを算出した。

なお，課題としては地下へ浸透した凍結防止剤の移動・拡散・滞留状況について，本研究の結果を踏まえて詳細な地質調査および地下水位・水質の観測をもとに，数値解析モデルを作成して地下水シミュレーション（移流分散シミュレーション）を行い，地下水の塩化物イオン濃度上昇等の定量的な検討を加えていくとともに，対象地域の水理地質特性・地下構造についても解明していく必要があると考える。

### 第3章の参考文献

- 1) Nandana Perera, Bahram Gharabaghi, Ken Howard: Groundwater chloride response in the Highland Creek watershed due to road salt application: A re-assessment after 20 years, *Journal of Hydrology*, 479, 159-168, 2013.
- 2) 吉江誠吾，齊藤辰哉，渡辺 亨：凍結防止剤散布の環境影響最小化に関する研究，日本道路公団試験研究所報告， Vol.38(2001-11), pp.70-79, 2001.
- 3) 気象庁:過去の気象データ検索，(参照2014年5月25日)，  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>
- 4) 地盤工学会(編):地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-, 地盤工学会, pp.321-335, 2010.
- 5) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典：凍結防止剤散布と沿道環境，国土技術政策総合研究所資料， No.412 July 2007, pp.33-41, 2007.
- 6) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典：凍結防止剤散布と沿道環境，国土技術政策総合研究所資料， No.412 July 2007, pp.42-49, 2007.
- 7) 小葉竹重機：簡易式による蒸発散量の推定，京都大学防災研究所年報 第32号 B-2 平1.4, No.32 B-2, p.316, 1989.
- 8) 土木学会(編):水理公式集[平成11年版]，土木学会, p.18, 1999.
- 9) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典：凍結防止剤散布と沿道環境，国土技術政策総合研究所資料， No.412 July 2007, pp.19-26, 2007.

## 第4章 浸透流－移流分散解析に基づく凍結防止剤の地下浸透に関する検討と将来予測

### 4.1 はじめに

冬期の高速道路では、安全な路面状況を確保するために凍結防止剤を散布している。凍結防止剤が周辺の地下水へ及ぼす影響については、木村ら<sup>1)</sup>が調査しており、それによると地下水への影響はほとんど無いものと考えられ、地下水の塩化物イオン濃度は水道法による水道基準200mg/L以下を大きく下回る値で、融雪期に電気伝導率で10～15mS/m程度（塩化物イオン濃度換算で約8～22mg/L）の増加は認められたが、極めて低い値であった。また、吉江ら<sup>2)</sup>の報告でも、JH（旧道路公団）に寄せられた塩による苦情の内、何らかの対策を実施したものの中には井戸水・地下水の塩水化はあげられていなかった。よって、我が国では凍結防止剤が地下水に与える影響は極めて少ないものと考えられていた。

しかし、本論文での第2章、第3章で述べたように中山間地域の高速道路周辺の環境調査を実施し、凍結防止剤の地下浸透・河川流出、路外飛散状況を定量的に把握した結果、高速道路に散布された凍結防止剤のうち、路面から25%と流末水路目地から36%がそれぞれ地下へ浸透している可能性を示した。

本研究では、上述した中山間地域にて、ボーリング調査、現場透水試験、既設井戸および観測井の水質観測を行い、それらの結果に基づき2次元浸透流－移流分散シミュレーション解析を実施して、凍結防止剤の地下浸透経路、浸透範囲、濃度変化を推定した。また、凍結防止剤の散布を中止した場合の地下水の水質変化の将来予測、および環境対策の一環で行った舗装補修・流末水路補修の効果について検討した。さらに、浸透メカニズムの考察より対象地域の特徴的な水理地質構造が凍結防止剤の地下浸透に大きく関与していることを明らかにした。

## 4.2 調査・観測・解析位置

今回シミュレーションを行った B-B'断面の解析断面位置と既設井戸（観測井），既往ボーリングおよび本研究で実施した調査ボーリングの配置を図-4.1に示す。図で明らかなように解析位置は，高速道路に対して直交する方向で，南東側の山麓部を高速道路が通っている。なお，解析位置は，高速道路からの離隔距離の異なる井戸が直線状に分布する場所を選定した。

図-4.2に B-B'断面の地質断面図を示す。地形の特徴として，沖積層の分布する A 川周辺は最も標高が低く平坦であり，山地の勾配は高速道路側の方がやや緩い，わずかに非対称な地形面を呈している。地質は基盤岩が安山岩で，高速道路付近では層厚 3～7m 程度の安山岩の風化土が分布する。山麓部には層厚 7～20m 程度の崖錐堆積物が厚く分布し，A 川周辺の低地には層厚 4～10m 程度の段丘堆積物や沖積層が分布する。

既設井戸は B-B'断面付近に 5 箇所あり，その井戸諸元を表-4.1に示す。既設井戸は深さ 10～15m 程度の掘り抜き井戸である。また，地質構成の把握，水理地盤定数を求めるための原位置試験を目的として，新たに調査ボーリングを A 川周辺では 3 箇所，B-B'断面では 2 箇所掘削した。これら調査ボーリングの諸元を表-4.2に示す。B-B'断面で実施した調査ボーリングでは深さ 50m までの帯水層の地質構成や透水係数を把握できるように削孔した。

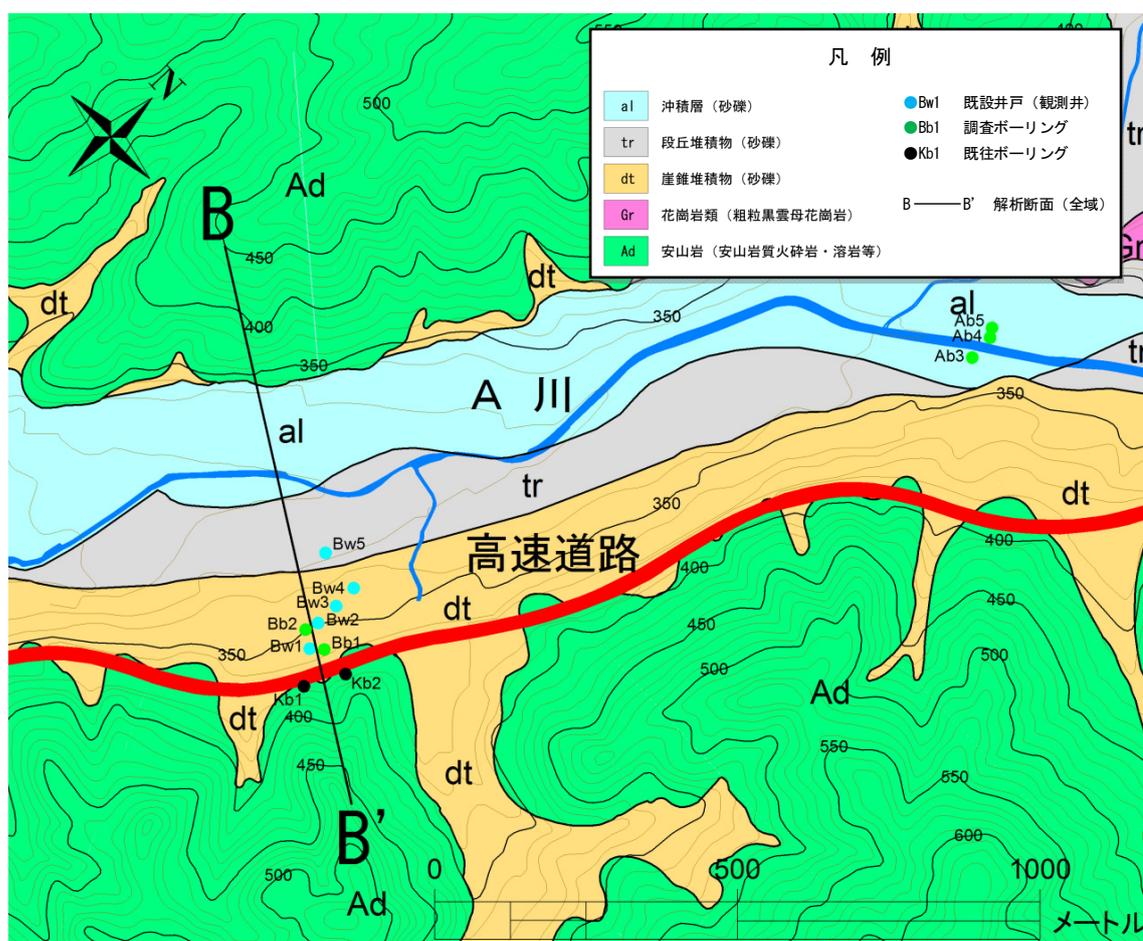


図-4.1 地形地質と解析断面周辺の状況

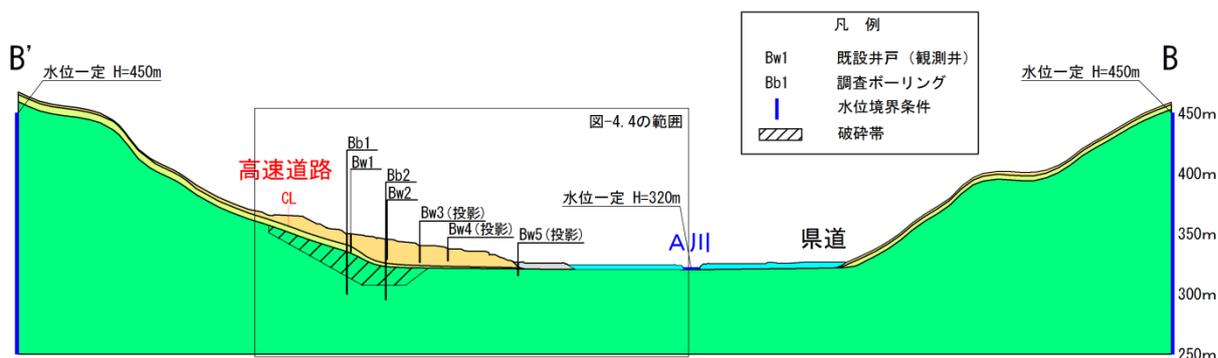


図-4.2 地質断面図

表-4.1 既設井戸の諸元

位置	井戸番号	高速道路からの離隔(m)	井戸深さ(m)	井戸構造
B-B'断面	Bw1	40	14.8	掘り抜き井戸
	Bw2	70	16.3	掘り抜き井戸
	Bw3	97	13.7	掘り抜き井戸
	Bw4	120	10.1	掘り抜き井戸
	Bw5	178	10.9	掘り抜き井戸

表-4.2 調査ボーリングの諸元

位置	ボーリング番号	高速道路からの離隔(m)	削孔長(m)	観測対象地層
A川周辺	Ab3	245	10.0	沖積層～安山岩
	Ab4	287	7.0	沖積層～安山岩
	Ab5	300	7.0	沖積層～安山岩
B-B'断面	Bb1	37	50.0	崖錐堆積物～ 風化土,安山岩
	Bb2	69	50.0	崖錐堆積物～ 風化土,安山岩

### 4.3 現地調査手法

#### 4.3.1 既設井戸の水質調査

水質試験の検体の採水方法は、所定の蛇口を使用して水温が一定になるまで揚水した後、専用ビンで採水した。水質試験の項目は、塩化物イオンと電気伝導率であり、塩化物イオンの試験方法は厚生労働省告示第261号<sup>3)</sup>に、電気伝導率は上水試験方法<sup>4)</sup>にしたがって実施した。

#### 4.3.2 調査ボーリングおよび原位置試験

##### (1) 機械ボーリング

地質構成および地盤の水理定数の把握を目的として機械ボーリングを実施した。掘削方法はロータリー式ボーリングで、試料観察のためにスリーブ内蔵二重管サンプラー<sup>5)</sup>を使用してボーリングコアを採取した。

##### (2) 現場透水試験

現場透水試験<sup>6)</sup>は、以下に示す3通りの試験方法で実施した(表-4.3)。単孔を利用した透水試験方法の非定常法(図-4.3a)は、ボーリング孔を利用して所定の深度に裸孔状態あるいはストレーナーパイプにて試験区間を設けて、孔内の水を汲み上げて水位の回復を時間とともに記録する方法(以降、回復法と称する)と、孔内に水を投入し水位の降下を時間とともに記録する方法(以降、降下法と称する)である。

単孔を利用した透水試験方法の定常法(図-4.3b)は、ポンプにより地下水を揚水して孔内の水位変化を経時的に測定し、水位が一定になった時の揚水量を測定する方法(以降、揚水法と称する)である。

孔内水位回復法による岩盤の透水試験方法(図-4.3c)は、孔内にエアパッカとトリップバルブを先端に取り付けた水位測定管を入れて試験区間を区切り、トリップバルブを開放して水位測定管内の水位を回復させ、水位の回復と時間の関係より透水係数と平衡水位を求める非定常法の透水試験である(以降、JFT法と称する)。

表-4.3 現場透水試験方法

JGS基準番号	基準名称	試験方法
1314	単孔を利用した透水試験方法	非定常法
1314	単孔を利用した透水試験方法	定常法
1321	孔内水位回復法による岩盤の透水試験方法	非定常法

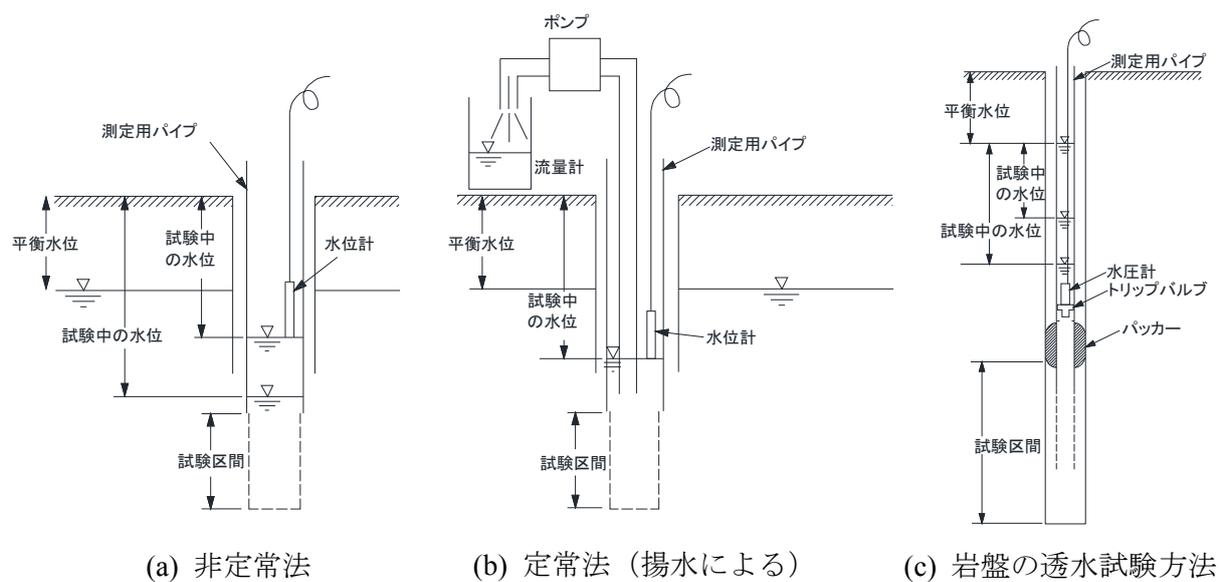


図-4.3 現場透水試験方法

### (3) 水質測定

調査ボーリング作業中は、原位置での地下水の電気伝導度を把握する目的で水温電気伝導度計（株式会社東建エンジニアリング製水温電気伝導度計 RT530-E）により電気伝導度を測定した。

#### 4.4 凍結防止剤の地下浸透流解析

##### 4.4.1 支配方程式

高速道路の路面に散布された凍結防止剤は、降水浸透により路面のクラック等から不飽和帯を通過して、地下水中に溶け込んだ後に地下水流によって移流分散すると考え、雪氷期および非雪氷期の水質データ（塩化物イオン濃度や電気伝導率）をもとに、その再現解析と今後の変化を推定する目的でモデルを構築した。

浸透の支配方程式は密度依存を考慮した飽和・不飽和浸透方程式で、質量保存測とダルシーの方程式から次式で示される<sup>7)8)</sup>。

$$\rho_f \theta \gamma \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta S_s + C_s(\theta) \} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho K_{ij}^S K_r(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \rho K_{i2}^S K_r(\theta) \rho_r \right\} \cdots (6)$$

$i, j = 1, 2, (1:x, 2:z)$

ここで、 $\varphi$ ：圧力水頭、 $\theta$ ：体積含水率、 $S_s$ ：比貯留係数、 $C_s(\theta)$ ：比水分容量、 $K_{ij}^S$ ：飽和透水テンソル、 $K_r(\theta)$ ：比透水係数、 $c$ ：濃度 ( $0 \leq c \leq 1$ , 飽和濃度を1として正規化)、 $t$ ：時間、 $\rho_f$ ：溶媒の密度、 $\rho$ ：流体の密度、 $\rho_r$ ：溶媒の密度に対する流体の密度比 ( $\rho/\rho_f$ )、 $\beta=1$ ：飽和領域、 $0$ ：不飽和領域、 $\gamma$ ：溶質の密度比（一般に海水で $\gamma=0.025$ ）である。

移流分散の支配方程式は次式で示される<sup>7)8)</sup>。

$$R\theta\rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta\rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta\rho V_i c) - \theta\rho\lambda R c - Q_c \cdots (7)$$

ここで、 $R$ ：遅延係数、 $D_{ij}$ ：分散係数テンソル、 $V_i$ ：実流速、 $Q_c$ ：源泉項、 $\lambda$ ：減衰定数である。このうち、遅延係数 $R$ は土中での吸着による遅れを表す係数であり、実流速 $V_i$ は帯水層中の不規則な空隙内を通る水の流速のことで、ダルシー流速を間隙率で除することによって求めることができる。また源泉項 $Q_c$ とは解析領域内における湧き出し・注水あるいは吸い出し・揚水などを表し、湧き出し・注水は正の値、吸い出し・揚水は負の値とする。減衰定数 $\lambda$ は化学反応や微生物による分解、気相への揮発などによる濃度低下の係数である。

分散係数テンソル $D_{ij}$ は式(8)で表される<sup>7)</sup>。

$$D_{ij} = \alpha_T \|V\| \delta_{ij} + (\alpha_L + \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|V\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij} \cdots (8)$$

ここで、 $\alpha_T$ ：横分散長、 $\alpha_L$ ：縦分散長、 $V_i, V_j$ ：実流速ベクトル、 $\|V\|$ ：実流速のノルム、 $\alpha_m$ ：分子拡散係数、 $\tau$ ：屈曲率、 $\delta_{ij}$ ：クロネッカのデルタである。

密度依存を考慮した移流分散解析では、濃度が変化することにより密度も変化する。そのため、式(6)、式(7)に示すように圧力水頭と濃度の2変数を取り扱う必要がある。解析には2変数をそれぞれの支配方程式により、2段階に分けて求め、繰り返し計算により、連成させる2

段階解析法を用いる。まず初期の圧力水頭と濃度を既知として式(6)よりダルシー流速を求める。次にダルシー流速を既知として式(7)より濃度を求める。この求められた濃度を既知条件として浸透流解析に戻る（反復計算を行う）。

一方、濃度変化による密度変化が生じないとすると、浸透流と移流分散は別々の問題として取り扱うことが可能となり、まず式(6)により、定常もしくは非定常浸透解析を行い、流速分布などを求め、この値を用いて移流分散解析のみを実施することになる。

なお、式(6)では解析領域内の流出流入量は境界条件で与えられているので、式(7)に示すような源泉項は考慮されていない。

使用した解析コードは、Dtransu-2D・EL<sup>7)</sup>を用いた。同解析コードは、オイリアン・ラグランジアン法による2次元飽和・不飽和浸透流-移流・分散解析プログラムで、その特徴は移流卓越問題に有効なラグランジュの方法（特性曲線法）と分散卓越問題に有効なオイラーの方法（差分法、有限要素法）の両方法を併用しており、移流項を特性曲線法で求め、分散項を有限要素法によって求める手法である。式(7)を移流項と分散項を分離すると移流項は式(9)、分散項は式(10)となる。

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = -\lambda c \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$R\theta\rho\left(\frac{dc}{dt} - \frac{d\bar{c}}{dt}\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta\rho D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_j}\right) - \theta\rho\lambda R(c - \bar{c}) - Q_c \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 $\bar{c}$ ：移流に関する濃度。

#### 4.4.2 解析条件

##### (1) 解析領域のモデル化

モデル化した範囲は、**図-4.1**に示すようにA川を中心にして高速道路横断方向のB-B'断面で、延長920mで標高250～465mの範囲である。

このモデルの計算領域は地形面および標高250mまでの範囲とした。モデルに使用した地形面データは高速道路から県道までの範囲は光波測距儀にて測量した実測値を用いた。それ以外の範囲は森林基本図の標高データを用いた。B-B'断面の節点数は8342で要素数は16141で、代表的な要素の大きさは高さ約3m、幅約5mである。

##### (2) モデルの地層区分と地盤の水力定数

モデルに用いた地質区分は、調査ボーリング結果、高速道路建設時の既往ボーリング結果および**図-4.2**に示した地質断面図より作成した。

地層区分は沖積層・段丘堆積物、崖錐、風化土（強風化安山岩）、安山岩（新鮮な安山岩）、破碎帯（安山岩）の5つに区分した（**写真-4.1**）。**図-4.4**に今回作成したモデルの地質区分の分布を示し、各地質区分の水力定数を**表-4.4**に示す。

表中の飽和透水係数は、**4.3.2**に示す方法を用いた現場透水試験の結果より設定した（**図-4.5**）。同図に示すように、固結度の低い沖積層および段丘堆積物では、地下水は土粒子間の間隙を流れるマトリックス流（ダルシー式に従い巨視的に見て水平方向に均一とみなせる流れ）が卓越していると想定される。よって、現場透水試験結果は試験対象地層の透水性を反映していると考えられるので、試験値の平均値を解析用の透水係数に採用した。一方、半固結から固結状態の崖錐堆積物や風化土、岩盤中の亀裂を水みちとする安山岩および破碎帯ではパイプ流が卓越すると想定して、現場透水試験もボーリングコアの亀裂の多い区間で実施している。したがって、地層の大半の部分が試験区間よりも透水係数が小さいと考えられるので、試験値の小さいほうが地層全体の透水性を反映していると判断し、最小値を採用した。

分散長は輸送距離に依存し、経験的に基づく指標として、縦分散長は輸送距離の約0.1であり、縦方向と横方向の分散長の比率は普通10～100の範囲であることが示されている<sup>9)</sup>。そこで、本論文では高速道路から200～300m程度離れたところに分布し、帯水層厚が薄く水平方向の地下水流が主体と考えられる沖積層や段丘堆積物は縦分散長30m、横分散長0.3mとし、他の地層については移動距離が主に100m程度で鉛直方向の地下水流を伴うと考えられるので縦分散長10m、横分散長1mとした。

間隙率については、沖積層・段丘堆積物は主に砂礫からなるので、岡山地下水研究会<sup>10)</sup>が示している砂礫の間隙率を参考に設定した。崖錐、風化土、安山岩、破碎帯は火山岩（玄武岩）の間隙率<sup>11)</sup>を参考に設定した。

比貯留係数、分子拡散係数、屈曲率、遅延係数は既往文献<sup>10) 12)</sup>が示している物性代表値を参考に今までの経験により設定した。

減衰係数は化学的に安定している塩化物イオンを対象物質と考えているので、0とした。モデルの特徴としては、最も透水性の低い飽和透水係数 $1.00 \times 10^{-3} \text{m/day}$ の安山岩が深部に分布

しており、山地および山麓部では飽和透水係数 $4.00 \times 10^{-3} \text{m/day}$ の崖錐堆積物および風化土が覆っている。一方、A川沿いの低地には最も透水性の高い飽和透水係数 $3.48 \text{m/day}$ の沖積層および段丘堆積物が分布している。また、高速道路近傍では比較的透水性の高い飽和透水係数 $1.46 \times 10^{-1} \text{m/day}$ の破砕帯が分布している。

### (3) 境界条件および初期条件

浸透に関する境界条件については、側面を全水頭値 $450 \text{m}$ 、河川部分を全水頭値 $320 \text{m}$ で水位固定を行い、地表面については降水を考慮した。降水の値は、経過年数36年目までは1978年から2014年までの降水量を与えた。37年目以降の降水量については、2010年～2014年までの5年間の平均日降水量 $0.00429 \text{m/day}$ を与えた。底面は不透水境界とした。濃度境界については、高速道路部分に濃度一定条件を与えた。濃度一定条件は、経過年数36年目までは雪氷期と非雪氷期を考慮して12月から3月までは濃度 $=1.0$ を与え、4月から11月までは濃度 $=0.0$ を与えた。

凍結防止剤散布を中止した場合の濃度変化を予測するために、経過年数37年目以降は、雪氷期、非雪氷期ともに濃度 $=0.0$ とした。

初期水頭は、調査ボーリングおよび水位観測の可能な既設井戸の実測水位を参考に、全水頭を推定し入力した。また、初期濃度は0とした。



沖積層



段丘堆積物



風化土 (安山岩)



破碎帯 (安山岩)



安山岩

写真-4.1 代表的なボーリングコア

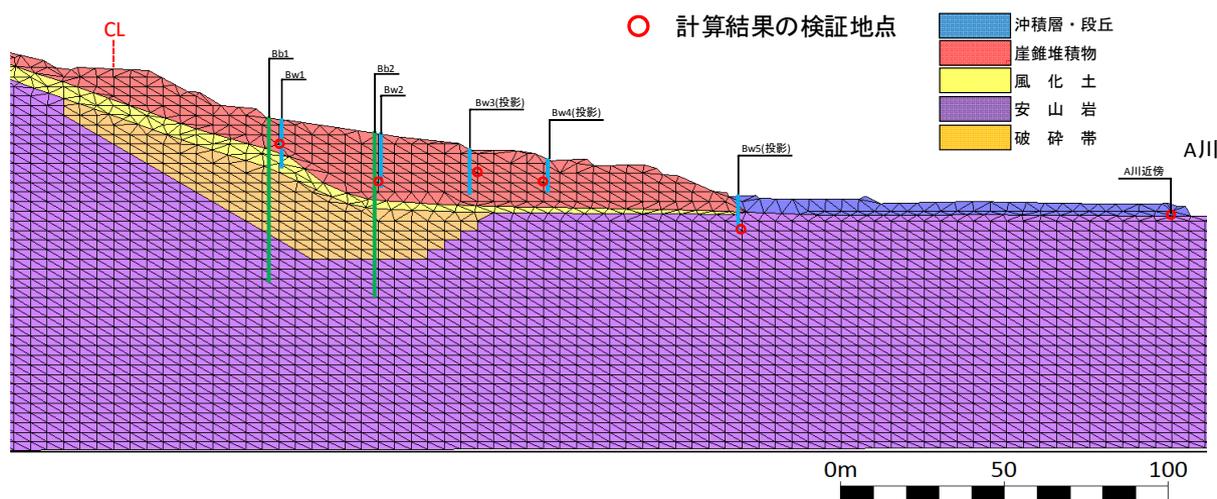


図-4.4 B-B'断面の地質区分図

表-4.4 B-B'解析に使用した地盤の水利定数

	飽和 透水係数 (m/day)	縦分散長 (m)	横分散長 (m)	間隙率	比貯留係数 (1/m)	分子拡散係数× 屈曲率 (m <sup>2</sup> /day)	遅延係数	減衰係数 (1/day)
沖積層・段丘堆積物	3.48E-00	30.0	0.3	0.28	3.00E-04	1.73E-04	1.0	0.0
崖錐堆積物	4.00E-03	10.0	1.0	0.20	1.00E-07	1.73E-04	1.0	0.0
風化土	4.00E-03	10.0	1.0	0.20	1.00E-07	1.73E-04	1.0	0.0
安山岩	1.00E-03	10.0	1.0	0.10	1.00E-07	1.73E-04	1.0	0.0
破碎帯	1.46E-01	10.0	1.0	0.15	1.00E-07	1.73E-04	1.0	0.0

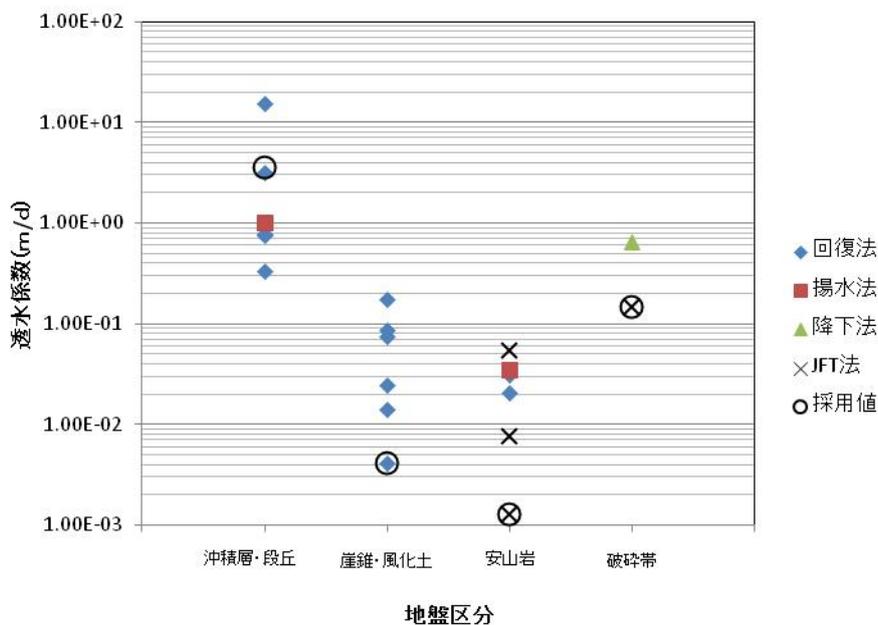


図-4.5 現場透水試験結果と解析に用いた飽和透水係数の関係

## 4.5 調査解析結果

### 4.5.1 既設井戸の観測値（塩化物イオン濃度）の変動特性

B-B'断面沿いに分布する既設井戸の塩化物イオン濃度の観測値を図-4.6に示す。観測期間は2011年10月から2014年10月までの約3年間である。塩化物イオン濃度と高速道路との離隔距離の位置をみると、塩化物イオン濃度は高速道路から離れるに従って低くなる傾向が認められる。つぎに、塩化物イオン濃度の経時変化では、2013年3月までは全ての井戸で、雪氷期間中の3月よりも非雪氷期間の10月あるいは11月のほうが高い傾向が認められる。一方、2013年4月以降は逆にBw2, Bw3, Bw4では10月よりも3月のほうが高くなる傾向にある。この変化の一因としては、環境対策の一環として2012年12月から2013年3月に流末水路の補修と2013年9月に高速道路の舗装補修を行っているため、その影響が考えられる。

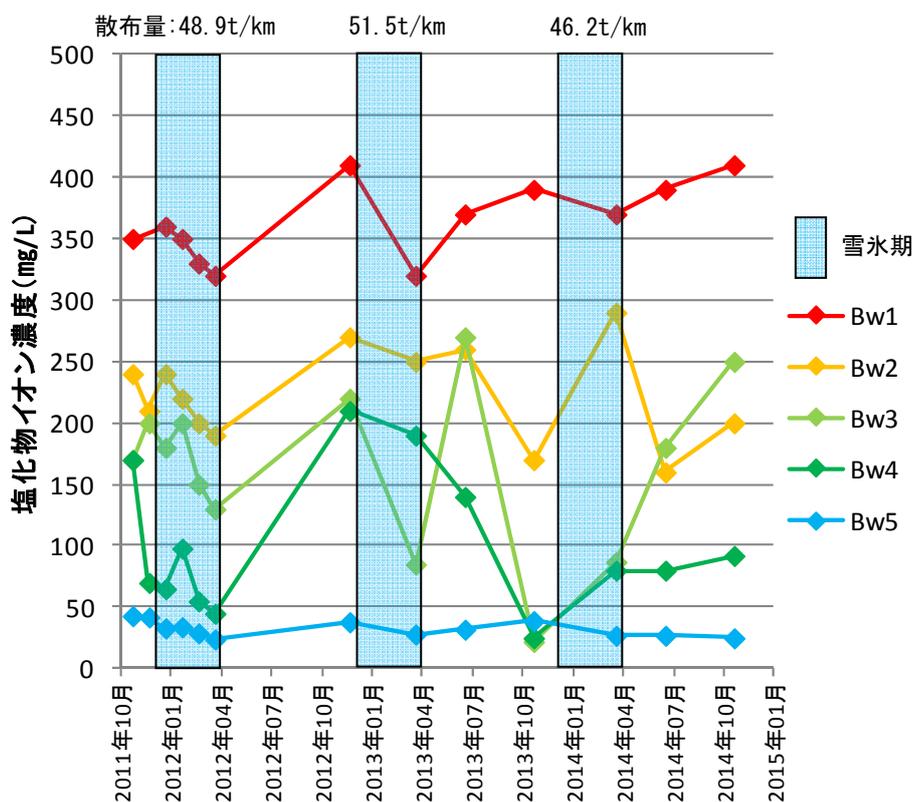


図-4.6 既設井戸の塩化物イオン濃度の推移

## 4.5.2 解析結果の再現性の検証

### (1) 経時変化の検証

図-4.4に既設井戸と調査ボーリングの位置、および計算結果の検証地点を示す。検証地点は既設井戸位置にて井戸深さをカバーする複数深度の計算地点の中から抽出した。観測結果と解析計算結果の経時変化を図-4.7に示す。なお、塩化物イオン濃度の観測値を相対濃度に換算するには、第3章での雪氷期間中に流末三角堰で実測した平均塩分濃度0.428%（塩化物イオン2600mg/L相当）を凍結防止剤の相対濃度1.0として、観測値を2600mg/Lで除して求めた。

検証期間は2011年10月から2014年10月までの約3年間で、シミュレーション結果の全体的な特徴としては、高速道路からの離隔距離の近いBw1, Bw2, Bw3, Bw4, Bw5の順に高い濃度を示している。また、濃度の年間変動周期をみるとBw1で8月、Bw2およびBw3で9月、Bw4で12月～1月に最高値を示す。一方、最低値はBw1とBw2で3月、Bw3で4月、Bw4で7月を示している。したがって、雪氷期に散布した凍結防止剤は近い地点で4月以降、遠い地点では7月以降に到達が始まり、8月から翌年の1月にかけて到達のピークを向えることが考えられる。なお、最も遠いBw5は年間を通して濃度はほぼ一定で変動周期は認められない。

個々の井戸について計算値と観測値を比較すると、Bw1は全期間を通して比較的良好な再現性が認められる。Bw2については2013年6月頃までは、計算値が観測値よりもやや大きい傾向があるが、再現性が認められる。一方、Bw3では2013年3月頃までは、計算値がやや小さい傾向となったが、Bw2と同様に再現性が認められる。Bw4とBw5は、どちらも計算値の再現性が悪く、Bw4では平均的な濃度はほぼ同じであるが、変動傾向は再現できていない。Bw5は計算値が観測値よりも全体的に大きな値を示している。

Bw2およびBw3で2013年6月以降から再現性が悪くなった一因としては、上述したように流末水路の補修や高速道路の舗装の補修により凍結防止剤の地下への浸透環境が変化した可能性が考えられる。また、Bw4およびBw5の再現性が悪い原因としては、高速道路からの離隔距離が大きくなるため、亀裂などの地質の不均一性や3次元的な拡散などが影響したものと推察される。

なお、補修工事の影響を受けていないと考えられる2013年3月までの全井戸の観測値と計算値の関係を整理すると、1:1ライン上にほぼプロットされ決定係数 $R^2 > 0.82$ となり良好な再現性が確認された（図-4.8）。

つぎに、Bb1での観測水位（観測期間：2013年2月～2014年1月）と近傍の計算地点Bw1の計算値の全水頭を比較する（図-4.9）。図より、計算値の全水頭のほうが観測水位より0.5m程高い値を示すが、2013年2月～2013年9月頃までは計算値と観測値に良好な相関が認められる。

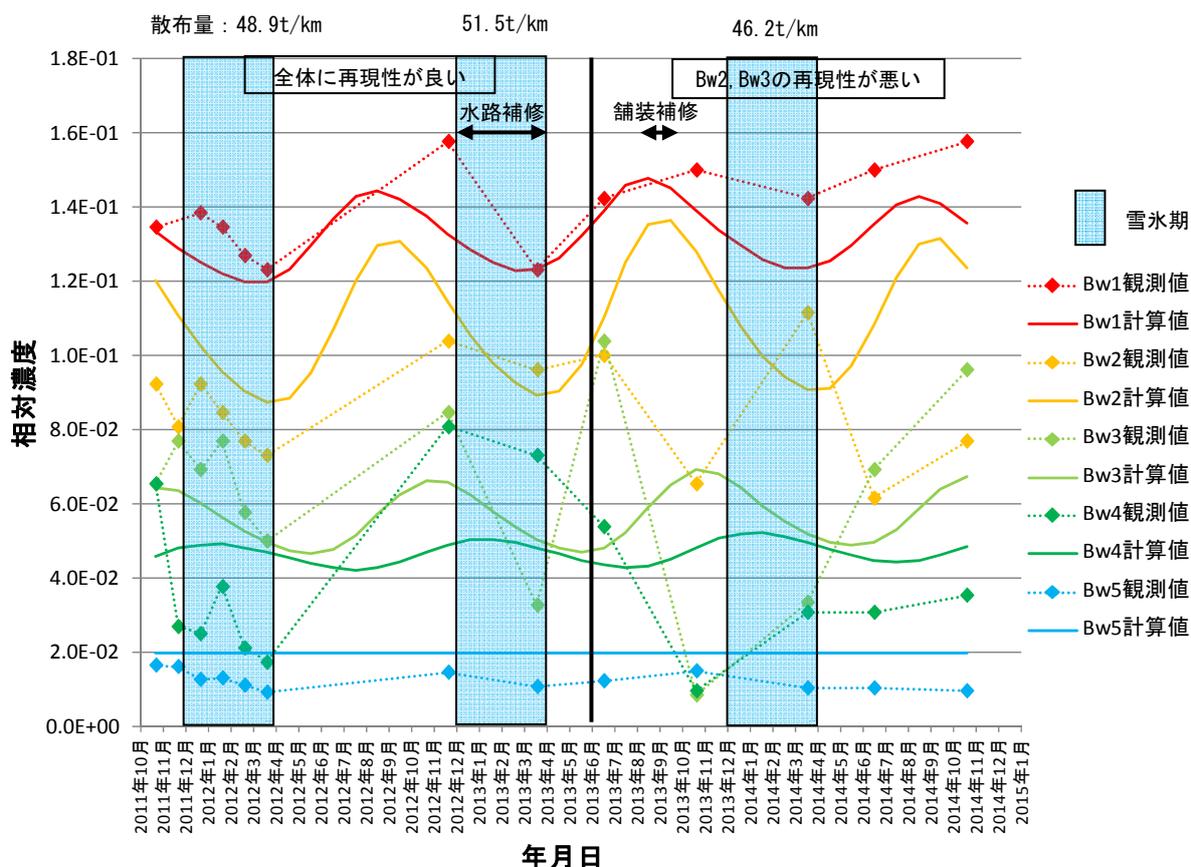


図-4.7 観測値と計算値の経時変化

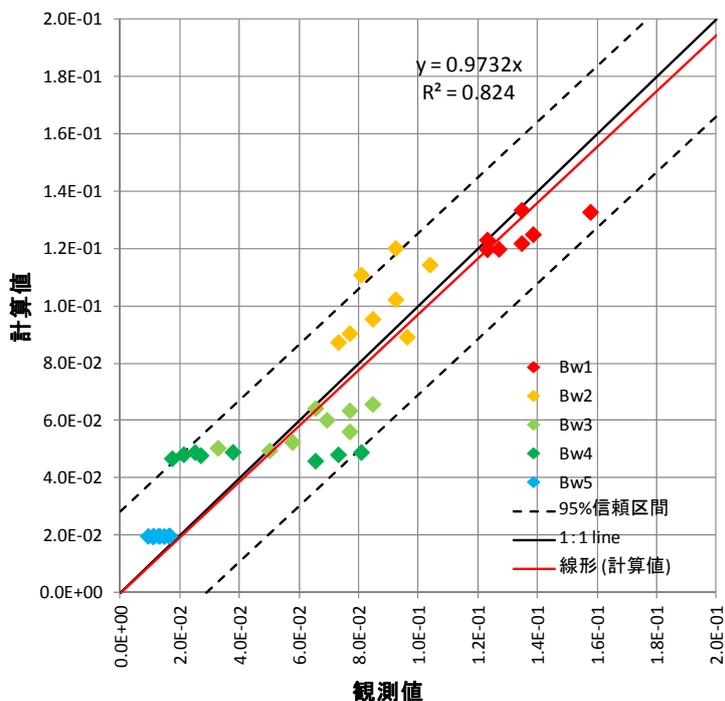


図-4.8 観測値と計算値の相対濃度の関係 (2011年10月～2013年3月まで)

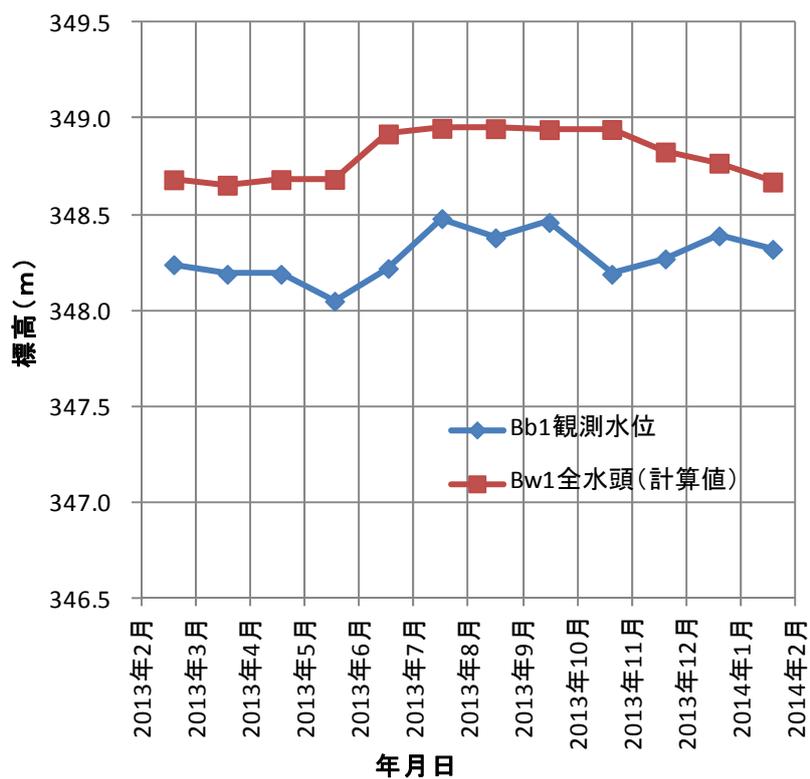


図-4.9 水位観測値と全水頭（計算値）の関係（2013年2月～2014年1月まで）

## (2) 深度方向の検証

調査ボーリングで、調査時に観測したボーリング孔内水の深度別電気伝導率と計算値を図-4.10に示す。なお、観測値の電気伝導率を相対濃度に変換するために、解析断面周辺の23箇所の井戸から採水した検体の電気伝導率EC( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )と塩化物イオン濃度Cl( $\text{mg}/\text{L}$ )との回帰式( $\text{Cl}=3.0406\text{EC}-42.05$ )より塩化物イオン濃度を求め、その値を2600 $\text{mg}/\text{L}$ で除して観測値を相対濃度に変換した。

観測値と計算値を比較すると、Bb1では崖錐堆積物と風化土での計算値は測定値の93～82%でほぼ同じ濃度を示すが、破砕帯と安山岩での計算値は観測値の62～18%と低くなり、特に深部での再現性が悪くなる。

同様に、Bb2でも崖錐堆積物での計算値は測定値の129～98%とやや高い濃度を示すが、風化土、破砕帯および安山岩での計算値は観測値の63～9%と低くなり、特に深部での再現性が悪くなる。

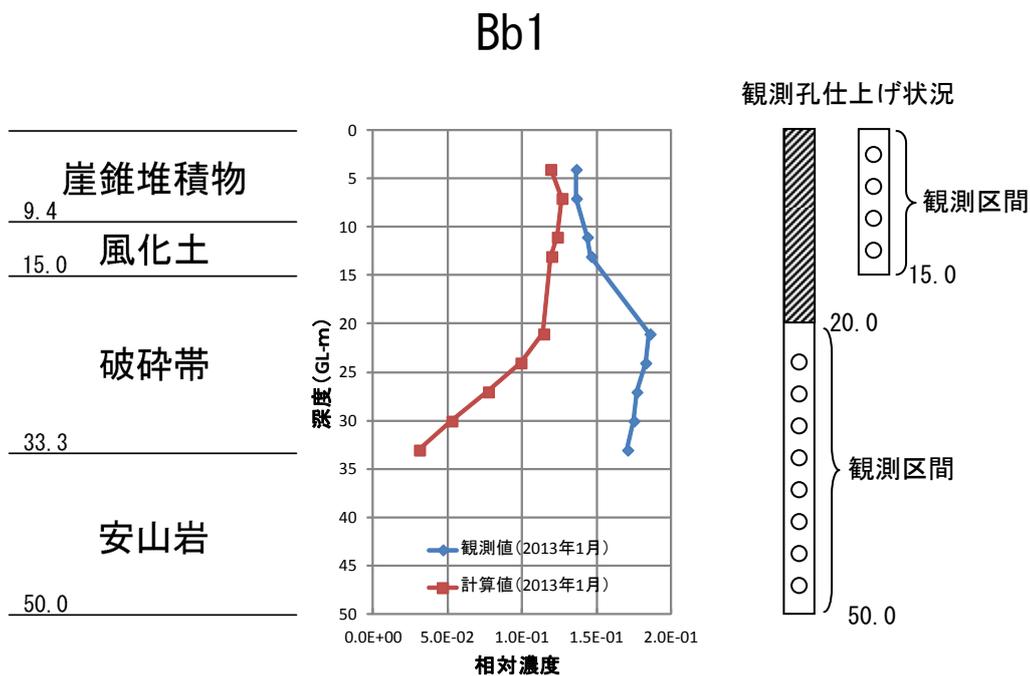
観測値の深度分布状況をみると浅い区間の観測孔では、深度が深くなるに従って、濃度が少しずつ上昇していく傾向が認められる。また、深い区間でも測定値に顕著な上昇は認められないが、濃度に大きな変化は無く、同じような値を示している。

観測孔は、図-4.10に示すように浅い区間の水質と深い区間の水質を分けて観測できるように仕上げてある。ただし、それぞれの観測区間は15～30mと比較的長い区間を取っているため、地下水の流速が遅い部分では、観測孔内に流入した密度の大きい塩水は孔底のほうに沈降していくことが懸念される。

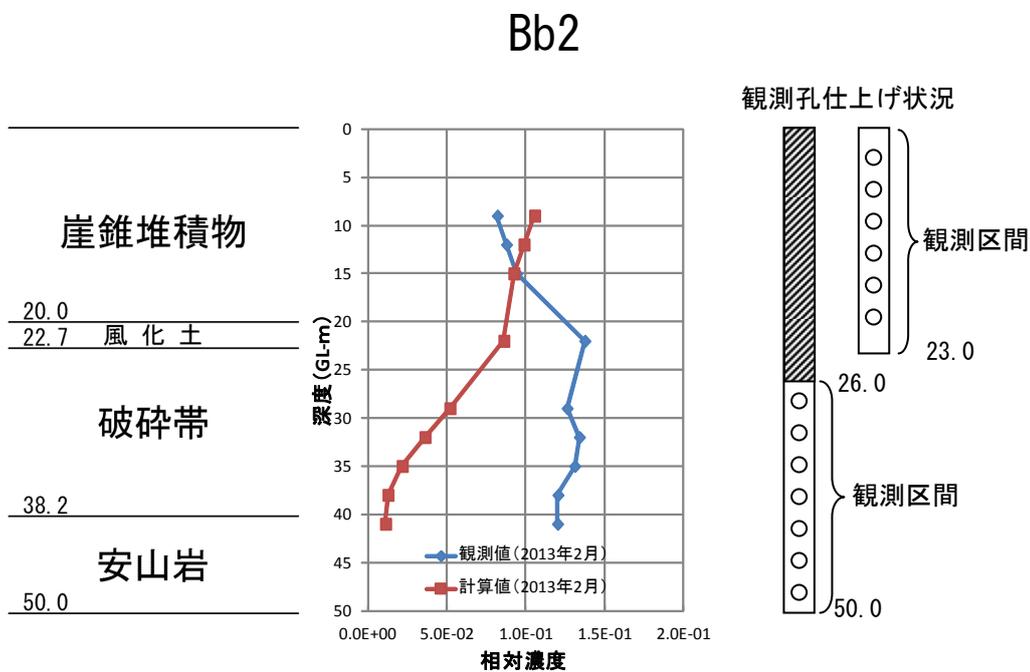
特に深い区間では、透水性の高い破砕帯の下位に透水性の低い安山岩が分布しているため、破砕帯を通過してきた高濃度の塩水が孔内に流入した後、透水性の低い（横からの流入量の少ない）安山岩の分布する孔底のほうに沈降している状況が推定される。

一方、解析結果（計算値）では、観測孔内での塩水の沈降を考慮していないため、観測値と大きな違いが生じたものと考えられる。

したがって、Bb1とBb2はともに既設井戸深さと同程度の約GL-15mまでの再現性は良好と判断される。一方、破砕帯下部や安山岩部主体とする深い深度では再現性は悪くなり、計算値は観測値を大きく下回っているが、この結果は観測孔の仕上げ方の影響を強く受けているため、計算値と実際の濃度には観測値ほどの大きな乖離はないと推定される。



(a) Bb1の観測値と計算値



(b) Bb2の観測値と計算値

図-4.10 深さ方向の観測値と計算値の関係

### 4.5.3 供用開始時からの濃度の時間変化

既設井戸およびA川近傍の解析濃度について供用開始時からの時間変化を図-4.11に示す。Bw1, Bw2, Bw3およびBw4の濃度変化は放物線状に推移しており、3年目までは濃度上昇勾配が大きいが次第に勾配が小さくなる。ただし、Bw1は現在も上昇傾向が続いている。また、上述したように1年間のサイクルの中で小刻みな上昇と下降を繰り返している。Bw5とA川近傍では5年目以降に明瞭な濃度上昇が始まり、相対濃度が0.01以上になるまで10～13年を要する。濃度変化は放物線状であり30年以降はほぼ一定の濃度となる。また、1年間を通して濃度変化は小さい。

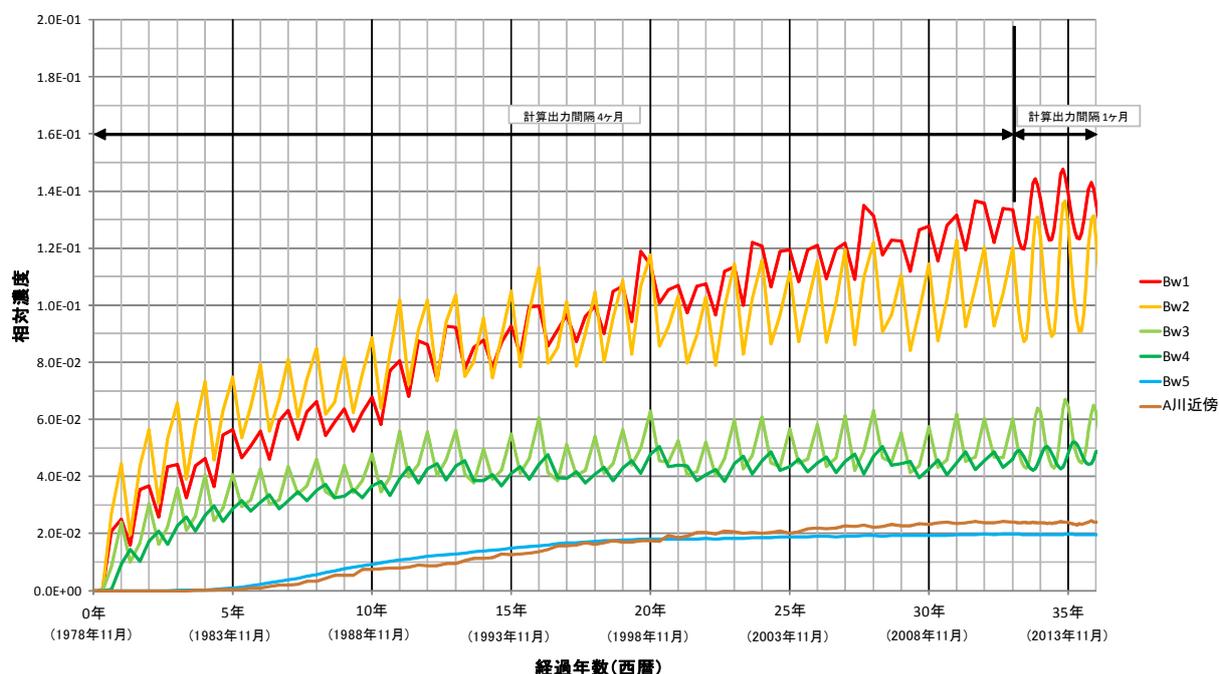


図-4.11 各計算地点の濃度の時間変化

#### 4.5.4 現在の濃度の特徴

図-4.12 および図-4.13 に既設井戸水質観測期間中の非雪氷期と雪氷期の代表的な解析結果を示す。非雪氷期の凍結防止剤の浸透範囲は、高速道路周辺で濃度が高く、移流分散により濃度を低下させながら下流側に広がり A 川まで達する。また、浸透範囲は安山岩深部にもおよぶ Bw4 付近では A 川河床よりも深い GL-50m 付近まで広がっている (図-4.12)。

雪氷期間中では浸透範囲には大きな変化は無いが、凍結防止剤を散布する高速道路近傍で極めて高い濃度を示す。高濃度部は透水性の高い破碎帯部沿いに分布し、Bb1 付近では GL-20m 付近が最も高濃度である。一方、Bw2 および Bw3 付近では非雪氷期よりも濃度が低下している部分も認められる (図-4.13)。

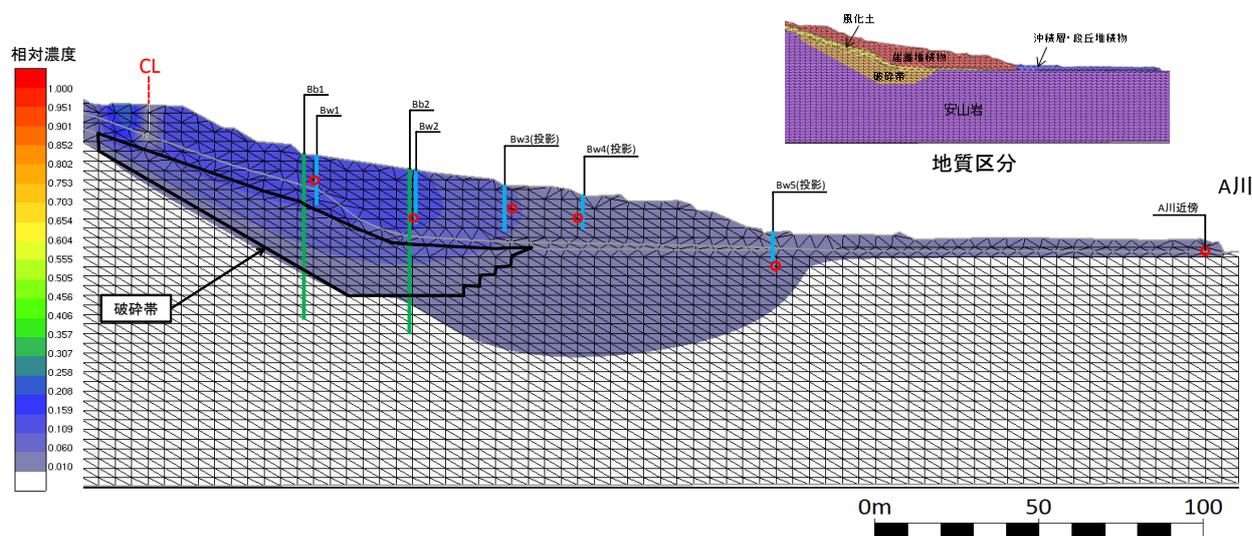


図-4.12 相対濃度解析結果 (2011年10月)

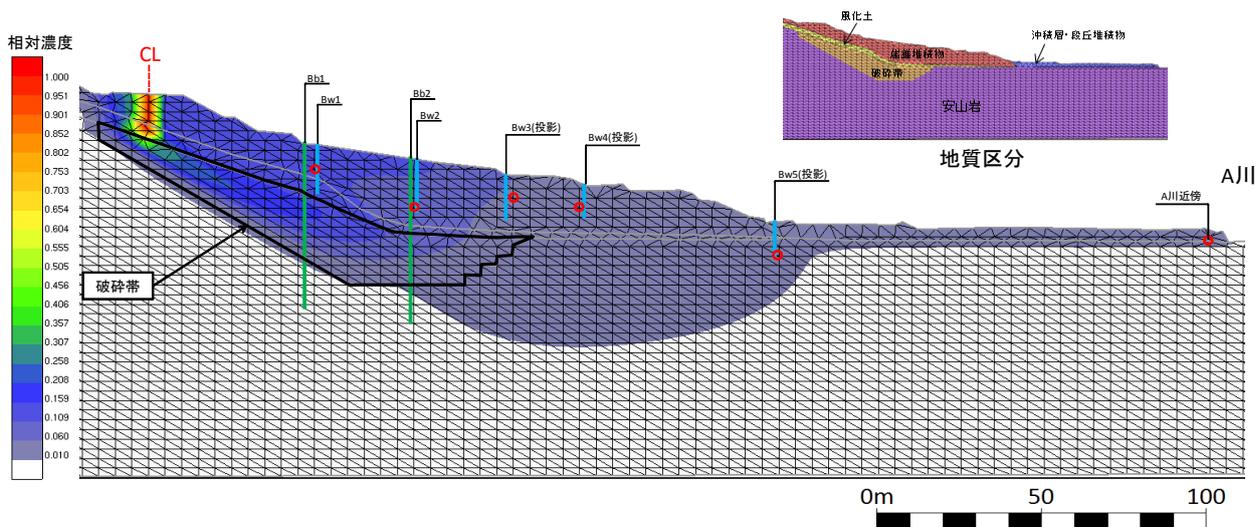


図-4.13 相対濃度解析結果 (2012年3月)

## 4.6 考察

### 4.6.1 2次元モデル、解析パラメータが解析結果に与える影響について

解析に3次元モデルを使うことは自然状態に近く理想的であるが、実際の地層は多様でありその分布も複雑なため、精度の高い3次元モデルを構築するためには数多くの調査ボーリングを必要とし、パラメータ設定も困難になると考える。そこで、本解析ではモデルを簡略化して鉛直2次元で実施した。モデルを2次元に簡略化したことによる解析結果への影響としては、4.5.2で示したように、高速道路からの離隔距離が大きくなると、解析結果の再現性が悪くなる傾向が認められる。特に、Bw5では計算値がつねに観測値を上回っており、凍結防止剤の拡散状況を過大評価した結果になっている。このような拡散状況の過大評価については、第3番目の次元方向（水平方向）の分散を無視していることによる影響として指摘している文献もある<sup>13)</sup>。したがって、2次元モデルが解析結果に与える影響として、高速道路からの離隔距離の大きい地点では濃度分布を過大評価していることが考えられる。ただし、その影響度を定量的に表すことは困難なため、以下の考察では解析結果で求められた結果をそのまま使用して考察を行うものとする。

つぎに、移流・分散のパラメータは、現地試験の実施例や報告が少なく、文献に示されているパラメータの数値も数オーダーに及ぶほど広い範囲のものもある。特にパイプ流的な流れに支配される帯水層はその傾向が顕著であるために<sup>10)12)</sup>、パラメータを地質ごとに細かく設定する作業は困難といえる。そこで、本論文では、崖錐堆積物、風化土、安山岩および破碎帯などのパイプ流的な流れに支配される帯水層の比貯留係数、分子拡散係数、屈曲率、遅延係数を同じ値に設定して解析を行った。その結果、高速道路近傍のBw1、Bw2、Bw3では計算値と観測値の間に高い再現性が認められた。したがって、今回の結果からは、解析パラメータのうちの地層ごとに差をつけた透水係数と間隙率が解析結果に強く関与していることが考えられる。すなわち、実流速の変化とそれに伴う分散係数テンソルの変化が解析結果に影響を及ぼしていることが想定される。ただし、他の地域でも今回と同様の傾向を示すか否か断定することは難しいと考える。

## 4.6.2 凍結防止剤浸透メカニズム

### (1) 凍結防止剤の浸透経路の推定

図-4.14 に供用後 4 ヶ月目～15 年目までの凍結防止剤の浸透進行状況を示す。まず、高速道路上に散布した凍結防止剤は破砕帯に沿って移流分散する。その後、凍結防止剤は浸透した破砕帯沿いから透水性の低い崖錐堆積物、風化土および安山岩内にゆっくりと移流分散し約 10 年で山麓部まで広がる。約 15 年目に浸透範囲は A 川付近に到達し、その後は浸透範囲に大きな変化はない。

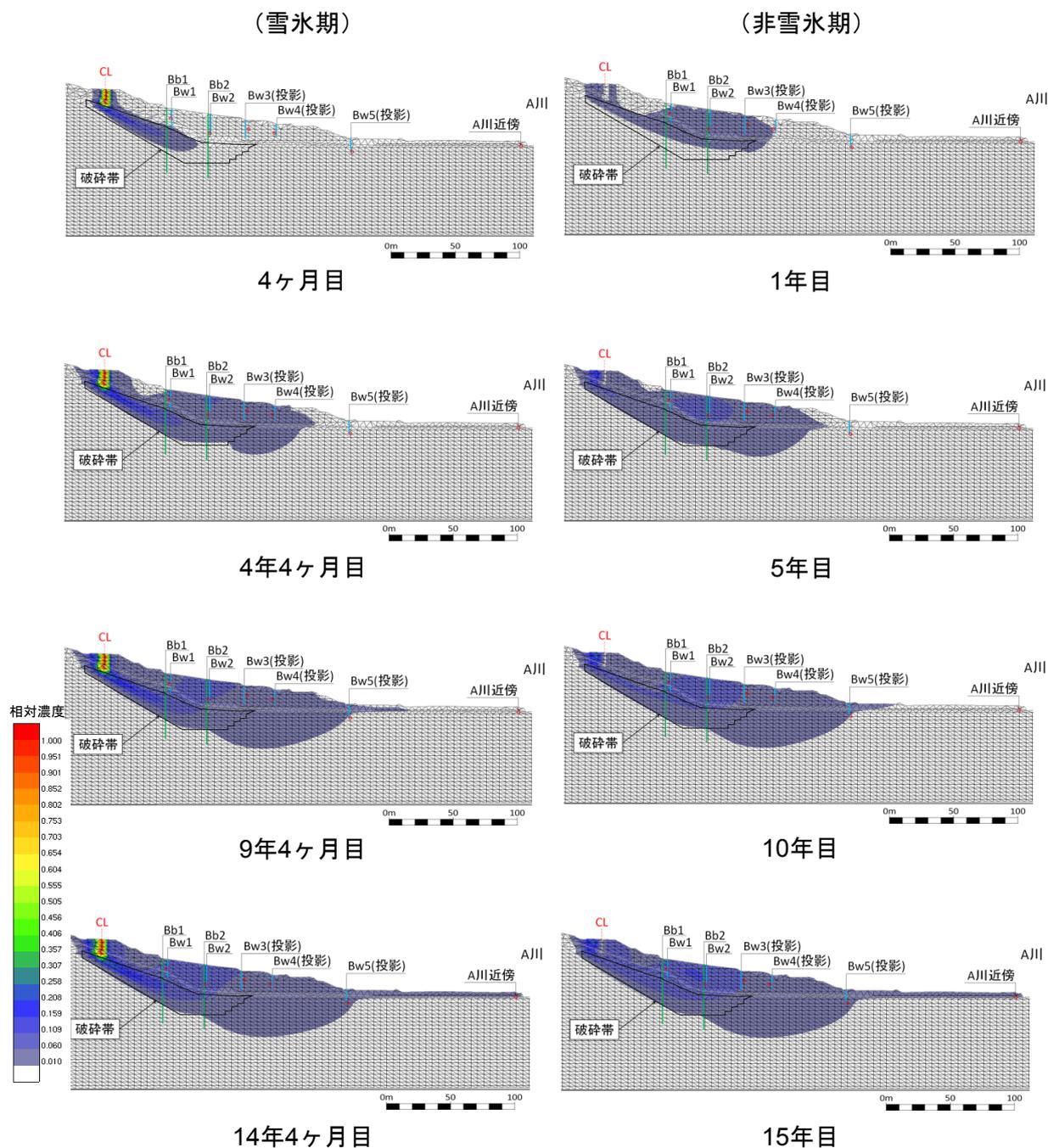


図-4.14 凍結防止剤の浸透状況

(2) 水理地質特性が浸透に及ぼす影響

B-B'断面の水理地質構造の特徴は、周辺地盤よりも透水性の高い安山岩中の破砕帯が高速道路から Bw1 および Bw2 にかけて分布していることである(図-4.4)。前章で述べたように、高速道路舗装面および水路目地等から地下に浸透した凍結防止剤は、まず破砕帯沿いに浸透した後に、周辺の地盤にゆっくりと広がって行き(図-4.14)、浸透範囲が広域(幅約 300m, 最大深さ約 50m)に及んだと考えられる(図-4.12, 図-4.13)。

そこで、破砕帯が浸透メカニズムに及ぼす影響を考察する目的で、破砕帯の水理定数を安山岩と同じにした場合についてシミュレーションを行った。

図-4.15にシミュレーション結果を示す。破砕帯の水理定数を安山岩と同じにした場合は、凍結防止剤は崖錐から風化土に留まり、供用後33年目でも浸透範囲はA川沿岸や地下深部までは浸透しない結果となった。このことは、破砕帯が浸透に強く関与していることを示している。

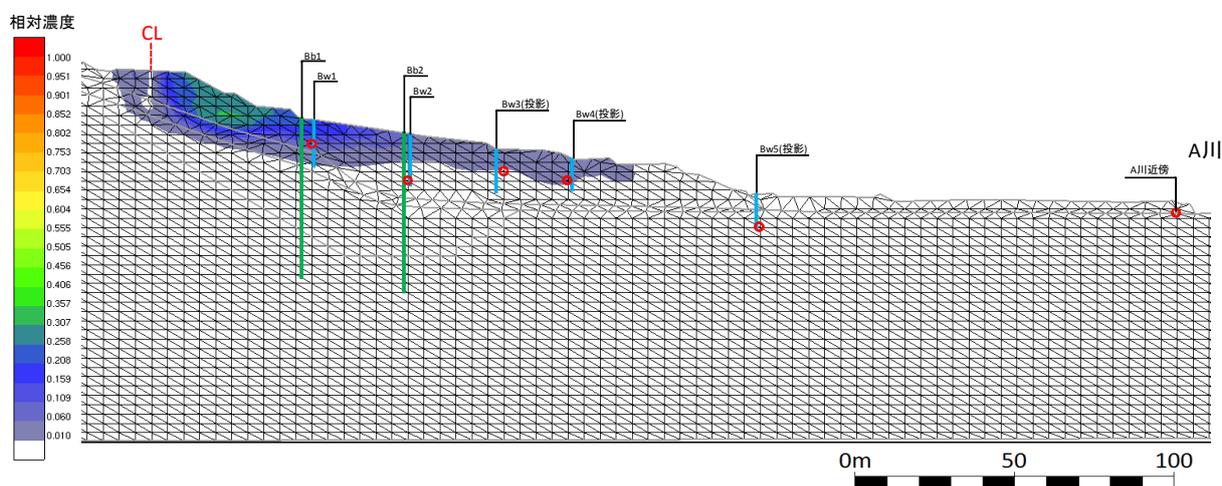


図-4.15 破砕帯の水理定数を安山岩と同じにして解析した結果 (2011年10月)

(3) 凍結防止剤の地下への年間蓄積量の推定

図-4.16は2011年10月の相対濃度から2006年10月の相対濃度を引いた5年間の相対濃度の差を示したコンター図である。図に示すように5年間で0.001~0.030と僅かであるが相対濃度が増加している範囲が認められる。図に示される濃度別の面積を求め、式(11)より5年間で蓄積した塩分量を試算した。

$$A = 1000 \times B \times C \times D \times E \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここに、A:蓄積増加塩分量(t/km), B:相対濃度1.0あたりの塩分濃度 (B=0.00428), C:平均相対濃度, D:地層の間隙比, E:相対濃度別の面積(m<sup>2</sup>)である。計算結果を表-4.6に示す。この結果を年間蓄積量にすると2.76 t/kmと推計される。この計算結果は第3章で示した水収支から求めた1年間の蓄積量の約2 t/kmよりやや大きい値を示す。それぞれの計算は、対象範囲の広さや検討手法が異なるものの、求めた値が2~3t/kmに収まっていることから、ともに

妥当な計算結果と考える。

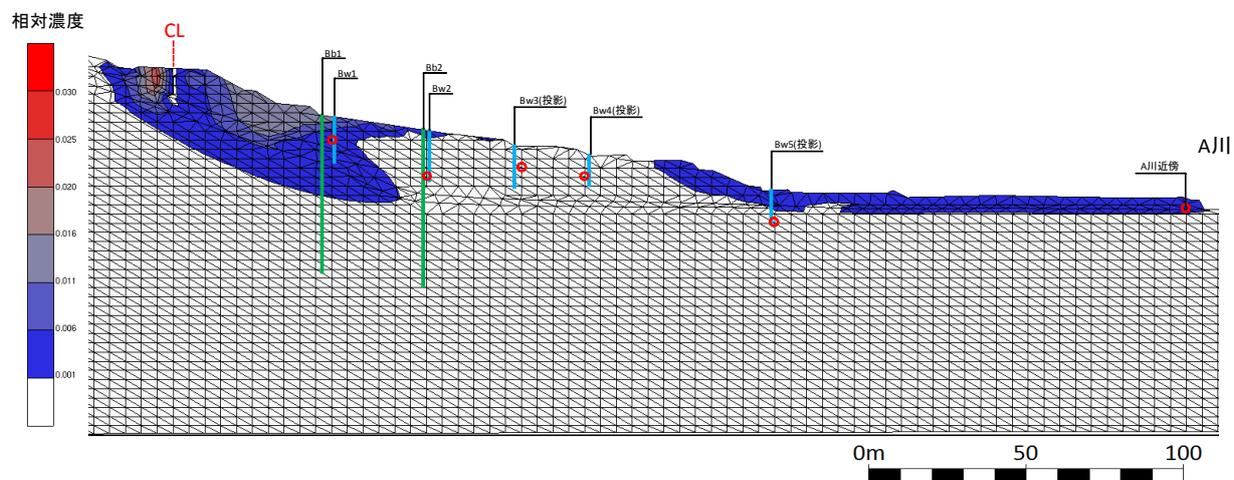


図-4.16 2011年10月と2006年10月の相対濃度の差分結果

表-4.6 5年間の増加塩分量

地層区分	濃度範囲	平均濃度	間隙率	面積 (m <sup>2</sup> )	増加塩分量 (t/km)
沖積層・段丘堆積物	0.001~0.006	0.0035	0.28	545.95	2.29
崖錐堆積物・風化土	0.020~0.025	0.0225	0.20	14.73	0.28
	0.016~0.020	0.0180	0.20	28.78	0.44
	0.011~0.016	0.0135	0.20	316.90	3.66
	0.006~0.011	0.0085	0.20	339.53	2.47
	0.001~0.006	0.0035	0.20	864.40	2.59
安山岩	0.001~0.006	0.0035	0.10	186.53	0.28
破碎帯	0.006~0.011	0.0085	0.15	34.90	0.19
	0.001~0.006	0.0035	0.15	705.42	1.59
合計				3037.14	13.79

### 4.6.3 凍結防止剤散布を中止した場合の今後の予測

図-4.17 に凍結防止剤散布を中止した場合の各計算地点の濃度変化の推移を示す。既設井戸では Bw1, Bw2, Bw3, Bw4 は散布中止直後から急激に濃度が低下する。Bw5 は散布中止約 5 年後から緩やかに濃度の低下が始まる。既設井戸の全観測地点の濃度が元の水質近くまで低下するには 30 年程度かかることが予測される。一方、A 川近傍では、濃度の低下は極めて緩やかであり、元の水質近くまで低下するには 40 年以上かかることが予測される。

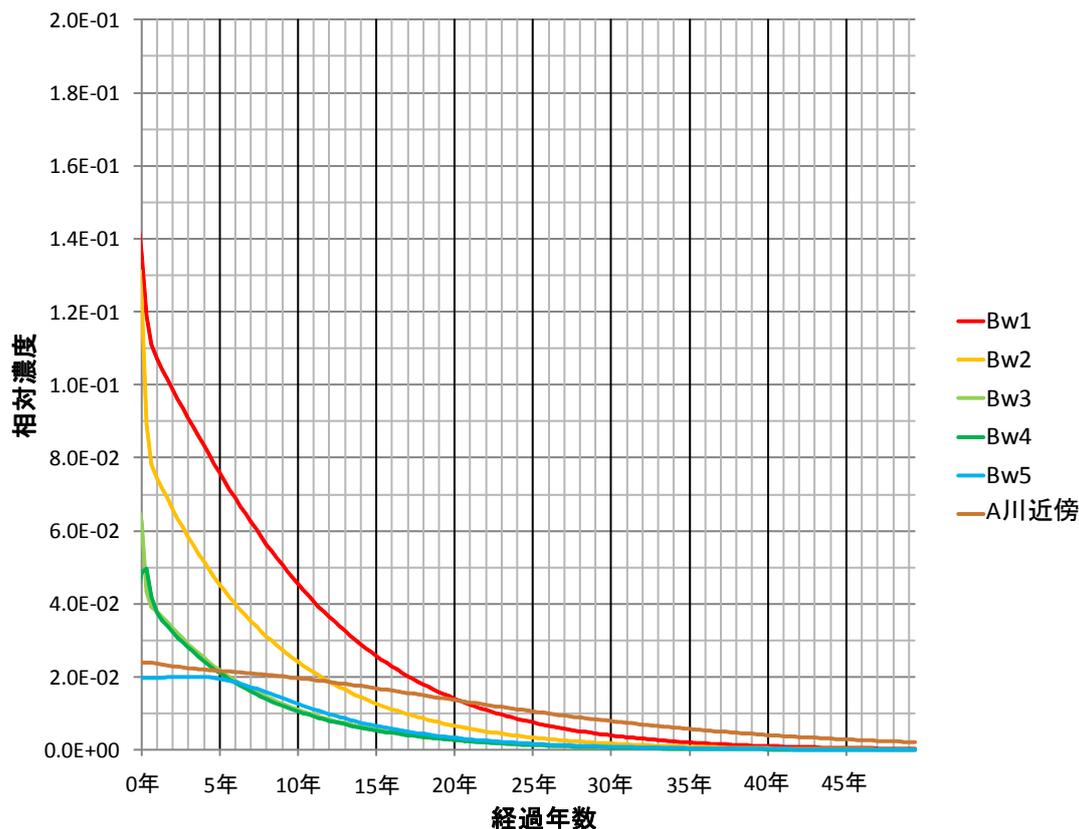


図-4.17 凍結防止剤散布を中止した場合の各計算地点の濃度の時間変化

上で述べた濃度変化の解析断面図を図-4.18 に示す。図-4.14 と比較すると 1 年後は Bw1, Bw2 周辺の濃度はやや低下するが、分布範囲には大きな変化は見られない。5 年後は Bw1, Bw2 周辺の濃度はさらに低下し、また Bw2, Bw3 周辺では破碎帯の底部付近の濃度低下が認められる。10 年後には、破碎帯の底部付近の広い範囲で、濃度低下が認められるようになる。さらに、15~25 年後にかけては、相対濃度 0.01 以上の範囲は Bw1, Bw2 周辺と Bw5 周辺から A 川まで 2 地域に分断され、分布範囲を狭めていく様子が認められる。そして 30 年後では、相対濃度 0.01 以上は認められなくなる。

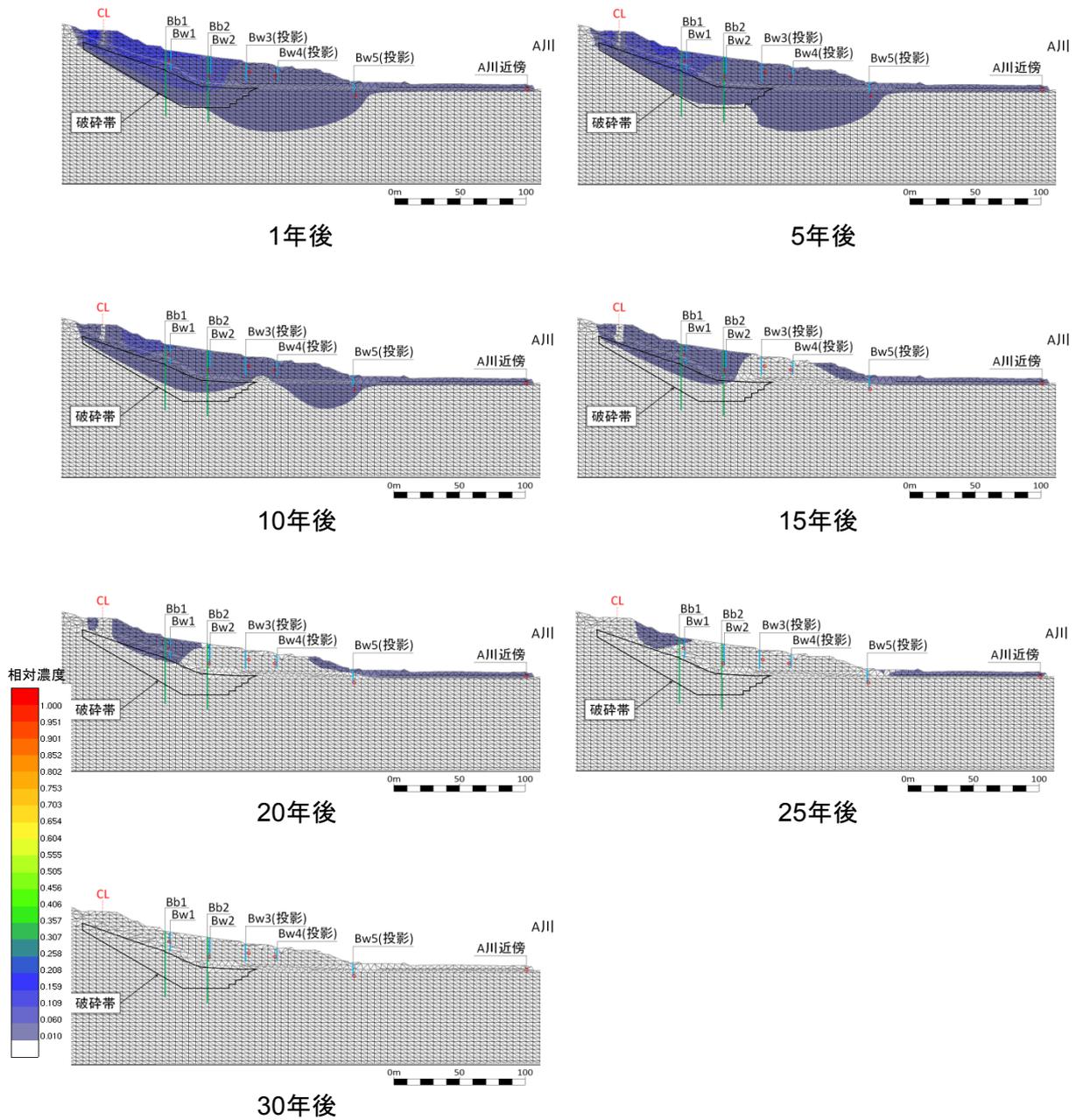


図-4.18 散布を中止した場合の凍結防止剤の濃度変化の状況

#### 4.6.4 流末水路目地補修，高速道路舗装補修の及ぼす影響について

図-4.7に示されるように Bw2 と Bw3 の観測値は2013年6月頃より計算値と大きく乖離しており，また変動幅が大きくなる傾向がみられる。この期間の凍結防止剤の散布量は2011年度が48.9t/km，2012年度が51.5t/km，2013年度が46.2t/kmで2011年度を基準にすると5%程度の違いであり，それほど大きな差はないと考えられる。

したがって，観測値の変化の最も大きな原因としては，環境対策の一環として2012年12月から2013年3月にかけて実施した流末水路目地補修や，2013年9月に実施した高速道路舗装補修が考えられる。

補修が周辺環境に及ぼす影響としては，路面クラックや水路目地等からの凍結防止剤の浸透量の減少が考えられるが，観測値の変動幅が大きくなったことや観測値の上昇・下降時期が変化したことは凍結防止剤の浸透量の減少だけでは説明できない。その他の原因としては，路面クラックや水路目地等からの表流水浸透の減少に伴うリーチング速度の低下，凍結防止剤や地表水の浸透箇所の移動，地下の水みちの変化などの複数の要因があげられる。このような複数の要因による環境変化では，環境が安定するまでに数年要することも考えられる。

よって，今までの観測結果からは明瞭な低下傾向は認められないが，Bw2で2014年6月，Bw3とBw4で2013年10月に最低値を観測しており，今後新しい環境の下で観測値が安定してくれば，低下傾向が認められることも考えられる。

## 4.7 まとめ

本研究では中山間地域の供用30年以上が経過している高速道路の沿道を対象として、凍結防止剤の地下浸透経路や浸透範囲等を定量的に検討するために2次元浸透流—移流分散解析を実施した。解析結果と現地観測地点の観測値との比較検証を行った結果、計算値と観測値は概ね一致した。

本研究で得られた検討結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 2次元解析モデルでは、高速道路からの離隔距離（輸送距離）が大きくなると濃度分布を過大評価する傾向が認められた。
- (2) 凍結防止剤は高速道路からA川までの約300m間を約15年かけて浸透し、観測地点での塩分濃度は上昇速度を減じながらも現在も緩やかに上昇していることが推定された。また、1年間のサイクルの中で小刻みな上昇と下降を繰り返していることを示した。
- (3) 観測井での塩化物イオン濃度の観測値は、2011年10月から2013年3月まで期間では、全ての観測井で、雪氷期間中の3月よりも非雪氷期間の10月あるいは11月のほうが高い傾向が認められた。また、シミュレーションでも同様の傾向が認められた。
- (4) 現在（供用33年後）の浸透範囲は、非雪氷期、雪氷期とも高速道路からA川までの幅約300m、最大深さは約50mで安山岩の分布範囲まで及んでいる。
- (5) 凍結防止剤の散布を中止した場合、地下水の水質は既設井戸観測地点では相対濃度がほぼ元にもどるには約30年、A川近傍では約40年かかることを予測した。
- (6) 相対的に透水性の高い破碎帯を他の地盤材料に置き換えて解析した結果、凍結防止剤の浸透範囲が著しく小さくなったことから、凍結防止剤の浸透経路および浸透範囲には、破碎帯が大きく関与していることが明らかとなった。すなわち、高透水性の破碎帯の存在が本地域の地質構造の特徴といえる。
- (7) 環境対策の一環として実施した流末水路目地補修および高速道路舗装補修後に、観測値に変化がみられ計算値との間に大きな乖離が生じている。この現象は対策の効果の現れとも考えられるので、今後も水質モニタリングを継続して補修効果の確認を行う必要がある。

本研究では、2次元浸透流—移流分散解析を用いて凍結防止剤の地下浸透のメカニズムを概ね説明することができたものと考えている。ただし、本研究の事例は対象地域の特徴的な地質構造（透水性の比較的高い破碎帯）が関与しており、極めてまれなケースともいえる。

したがって、他地域でも同様の事例が発生した場合に、現場の特殊性も踏まえて本研究の成果を、調査範囲・調査方法の計画、対策方法の計画、代替水源位置の計画などの各段階において、活用できるように整理しておくことが今後の課題としてあげられる。

## 第4章の参考文献

- 1) 木村恵子, 曾根真理, 並河良治, 桑原正明, 角湯克典: 凍結防止剤散布と沿道環境, 国土技術政策総合研究所資料, No.412 July 2007, pp.116-126, 2007.
- 2) 吉江誠吾, 齊藤辰哉, 渡辺 亨: 凍結防止剤散布の環境影響最小化に関する研究, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.38(2001-11), pp.70-79, 2001.
- 3) 厚生労働省: 厚生労働省告示第261号, (参照2016年6月26日), <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/dl/koku030722-1.pdf>
- 4) 日本水道協会: 上水試験方法 2011年版, II.理化学編(無機物部会), pp.86-89, 2011.
- 5) 地盤工学会(編): 地盤調査の方法と解説-二分冊の1-, 地盤工学会, pp.240-253, 2013.
- 6) 地盤工学会(編): 地盤調査の方法と解説-二分冊の1-, 地盤工学会, pp.512-614, 2013.
- 7) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: 飽和・不飽和領域における物質移動に伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.136-137, 1995.3.
- 8) 菱谷智幸, 西垣誠, 橋本学: 物質移動に伴う密度依存地下水流の3次元数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.59-60, 1999.12.
- 9) 岡山地下水研究会: 実務者のための地下水環境モデリング, 技報堂出版, pp.57-59, 2003. (原著: K. Spitz and J. Moreno (2003): A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, John Wiley and Sons.)
- 10) 岡山地下水研究会: 実務者のための地下水環境モデリング, 技報堂出版, pp.292-303, 2003. (原著: K. Spitz and J. Moreno (2003): A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, John Wiley and Sons.)
- 11) 小鯛桂一: 岩盤透水性のグラフ表示, 地質調査所月報, 第35巻 第9号, pp.419-434, 1984.
- 12) 地盤工学会 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策編集委員会: 地盤工学・実務シリーズ15 土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 地盤工学会, pp.219-222, 2002.
- 13) 岡山地下水研究会: 実務者のための地下水環境モデリング, 技報堂出版, pp.156-159, 2003. (原著: K. Spitz and J. Moreno (2003): A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling, John Wiley and Sons.)

## 第5章 結論

### 5.1 本研究のまとめ

本研究は、中山間地域の地下水や河川の水質に及ぼす高速道路の路面排水（特に凍結防止剤）の影響を検討することを目的としている。また、この成果は、道路構造的あるいは地形・地質的に類似性のある他地域での環境調査・対策の基礎資料として活用されることを目指している。研究対象地域は、供用後30年以上を経過する高速道路沿道の中山間地域で、冬期に散布される凍結防止剤も多いところである。論文は、第2章での調査地域の現状の水質特性の把握、第3章での凍結防止剤の実際の地下浸透・河川流出および路外飛散状況の把握、第4章での2次元浸透流－移流分散解析による凍結防止剤の地下浸透経路・範囲の把握および将来予測の3つの章を中心に構成されている。

以下に、本研究の成果を各章ごとに取りまとめる。

**第1章 序論**では、我が国の中山間地域の水質と高速道路の路面排水が周辺環境に与える影響について、先行研究の事例をまとめるとともに、解決すべき課題を抽出して本研究の背景と目的を明確にした。

山地の多い我が国では、中山間地域が国土の約7割を占めている。中山間地域は流域の上流部に位置するため、地域住民のみならず、下流域の都市住民の安全・安心な水資源を守っていくためにも、その水質環境を保全していく必要がある。一方、高速道路を含む高規格幹線道路網は、中山間地域を通過して全国に張りめぐっているが、凍結防止剤を含む路面排水等が沿道水質環境に及ぼす影響については、我が国での研究報告事例は少ない。

**第2章 調査地の水質特性**では、中山間地域の供用後30年以上を経過する高速道路沿道の環境調査の一環として、研究対象地域（調査地）において84箇所の井戸水・湧水・沢水について行った水質調査について整理・検討した。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 調査地の水質は安山岩地域、花崗岩地域とも電気伝導度が日本の一般的な地下水（昭和と平成の名水百選）の値と比較して極めて大きく、また季節変化に伴う顕著な変動も認められない。すなわちイオン成分に富むことが明らかとなった。
- (2) 安山岩地域はCa-Cl型、花崗岩地域はNa-Cl型が占める割合が多いことも特徴の一つである。
- (3) 安山岩地域と花崗岩地域の水質を比較すると、安山岩地域水質のほうが $\text{Ca}^{2+}$ と $\text{Mg}^{2+}$ に富んでいる。造岩鉱物や粘土鉱物の化学組成より、安山岩地域は多量の $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{Mg}^{2+}$ を溶出することのできるポテンシャルを持っていると考えられる。
- (4) イオン状シリカの濃度は、安山岩地域のほうが花崗岩地域よりもやや高い傾向を示すが、値に大きな違いは認められなかった。地質のケイ酸溶出ポテンシャル指数はともに3である。

- (5) Cl濃度は、地質に関係なく高速道路より谷側ではその近傍で高い値を示す地点があり、ばらつきは認められるものの高速道路からの離隔が大きくなるに従って減少する傾向が認められる。また、陽イオンも同様な傾向を示す。
- (6) Cl濃度と高速道路との関係は、10月採水の試験結果でも2月の試験結果と同様の傾向が認められる。
- (7) Cl濃度が高い要因としては、冬期に凍結防止剤を含む高速道路路面排水が地中に浸透して地下水に影響を与えていると考えられる。
- (8) 花崗岩地域では、高速道路の離隔距離と  $\text{HCO}_3^-$ 間および  $\text{SiO}_2$  間に正の相関傾向が認められる。

**第3章 凍結防止剤の地下浸透量、河川流出量および飛散量の定量化**では、高速道路の雪氷対策に用いる凍結防止剤の散布が沿道の地下水の塩水化に及ぼす影響を明らかにするために、供用後30年以上経過する高速道路沿道の中山間地域において、凍結防止剤の地下浸透・河川流出、路外飛散状況の定量的把握および河川の経時的な水質変化を観測し、浸透流出経路と収支について検討した。結果をまとめると以下のようなになる。

まず、対象地域の特徴としては以下に示す3つがあげられる。

- (1) 路面排水が集落側の地下水に対して影響を与えやすい道路構造および地形である。
  - (2) 供用後30年以上経過しており流末水路等施設の老朽化が進んでいる。
  - (3) 過去5カ年の平均散布量が48.9t/kmで全国平均散布量の約30t/kmを大きく上回っている。
- つぎに、本研究で得られた検討結果をまとめると以下のようなになる。
- (4) 路面に散布された凍結防止剤のうち65%が流末水路に流出することが観測された。つぎに散水試験により25%が路面のクラック等から地下に浸透することが明らかとなった。残り10%についてはのり面等路外への飛散・除雪と考えられ、観測結果もばらつきが認められるものの概ね10%であった。また、流末水路の開口目地部が、凍結防止剤の地下浸透に関与していることもわかった。
  - (5) 水質試験結果よりA川の塩化物イオンの流入源をバックグラウンド・地下水・地表水に3区分して、雪氷期のA川への凍結防止剤流出量の割合を算出すると、散布量の39%が地表水に混じって流出し、17%が地下水に混じって流出していることを推計した。また、散布量と流出量の収支関係より44%が地下に貯留していることを推計した。年間での凍結防止剤の収支を検討した結果、供用開始から60t/km以上が地下に累積していることを算出した。

なお、課題としては地下へ浸透した凍結防止剤の移動・拡散・滞留状況について、本研究の結果を踏まえて詳細な地質調査および地下水位・水質の観測をもとに、数値解析モデルを作成して地下水シミュレーション（移流分散シミュレーション）を行い、地下水の塩化物イオン濃度上昇等の定量的な検討を加えていくとともに、対象地域の水理地質特性・地下構造についても解明していく必要があると考える。

**第4章 浸透流—移流分散解析に基づく凍結防止剤の地下浸透に関する検討と将来予測**では、高速道路に散布された凍結防止剤の地下浸透経路や浸透範囲等を定量的に検討するため

に、中山間地域の高速道路（供用後30年以上）の沿道を対象に2次元浸透流—移流分散解析を実施し、解析値と観測値の対比より両者は概ね一致しているかを検証した。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 2次元解析モデルでは、高速道路からの離隔距離（輸送距離）が大きくなると濃度分布を過大評価する傾向が認められた。
- (2) 凍結防止剤は高速道路からA川までの約300m間を約15年かけて浸透し、観測地点での塩分濃度は上昇速度を減じながらも現在も緩やかに上昇していることが推定された。また、1年間のサイクルの中で小刻みな上昇と下降を繰り返していることを示した。
- (3) 観測井での塩化物イオン濃度の観測値は、2011年10月から2013年3月まで期間では、全ての観測井で、雪氷期間中の3月よりも非雪氷期間の10月あるいは11月のほうが高い傾向が認められた。また、シミュレーションでも同様の傾向が認められた。
- (4) 現在（供用33年後）の浸透範囲は、非雪氷期、雪氷期とも高速道路からA川までの幅約300m、最大深さは約50mで安山岩の分布範囲まで及んでいる。
- (5) 凍結防止剤の散布を中止した場合、地下水の水質は既設井戸観測地点では相対濃度がほぼ元にもどるには約30年、A川近傍では約40年かかることを予測した。
- (6) 相対的に透水性の高い破碎帯を他の地盤材料に置き換えて解析した結果、凍結防止剤の浸透範囲が著しく小さくなったことから、凍結防止剤の浸透経路および浸透範囲には、破碎帯が大きく関与していることが明らかとなった。すなわち、高透水性の破碎帯の存在が本地域の地質構造の特徴といえる。
- (7) 環境対策の一環として実施した流末水路目地補修および高速道路舗装補修後に、観測値に変化がみられ計算値との間に大きな乖離が生じている。この現象は対策の効果の現れとも考えられるので、今後も水質モニタリングを継続して補修効果の確認を行うことが必要である。

本研究では、2次元浸透流—移流分散解析を用いて凍結防止剤の地下浸透のメカニズムを概ね説明することが出来たものと考えている。ただし、本研究の事例は対象地域の特徴的な地質構造（透水性の比較的高い破碎帯）が関与しており、極めてまれなケースともいえる。

したがって、他地域でも同様の事例が発生した場合に、現場の特殊性も踏まえて本研究の成果を、調査範囲・調査方法の計画、対策方法の計画、代替水源位置の計画などの各段階において、活用できるように整理しておくことが今後の課題としてあげられる。

以上より、本研究の成果を要約すれば、今まで我が国において、凍結防止剤を含む高速道路の路面排水が沿道周辺の水質環境に著しい影響を与えている事例は報告されていなかったが、本研究では路面排水が沿道周辺の地下水環境に影響を与えている観測結果を示し、地下への浸透量や浸透経路・浸透範囲などの浸透メカニズムを明らかにすることができたことである。

## 5.2 今後の課題と展望

本研究では、我が国における凍結防止剤を含む高速道路の路面排水が沿道周辺の地下水水質に影響を及ぼしている事例を報告し、その地下浸透のメカニズムを明らかにすることができた。この結果を踏まえ、中山間地域の水質環境の保全と道路施設の保全の観点から、今後の課題について以下に述べる。

### 5.2.1 今後の課題

#### (1) 沿道周辺環境の保全に対する課題

高速道路の将来の供用延長は、さらに延びて11,520kmになるように計画されている<sup>1)</sup>。このように供用延長が延びていく中で、排水施設等の老朽化が進み、凍結防止剤も散布し続けていると、路面排水により水質環境の悪化する地域の増えることが懸念される。また、凍結防止剤は地下水などの水質環境だけではなく、RC床版などの道路構造物の塩害劣化でも問題になっている<sup>2)</sup>。

したがって、凍結防止剤の影響の懸念される地域での水質のモニタリングと、周辺環境に優しい雪氷対策（凍結防止剤の散布）を行うことが課題としてあげられる。

#### (2) 調査・解析手法の課題

本研究で見えてきた調査（モニタリングを含む）および解析の課題を以下に示す。

水質調査は、路面排水の影響範囲と影響の無い範囲の両方で実施する必要がある。また、塩化物イオン濃度は、1年通して高い地点と雪氷期に濃度が高くなる地点など、色々なパターンが予想されるため、観測期間は2～3年程度は必要である。したがって、調査は道路敷地以外の地点で長期間にわたって行うため、地元住民の協力が不可欠である。

水質試験の項目については、本研究では地下水（井戸水）を帯水層（地質）に関連してグルーピングする目的で、主に陽イオン・陰イオンを分析したが、上で述べたように構造物の塩害劣化も問題になっているので、陽イオン・陰イオンに加えて健康や構造物・機械関係の水質基準も考慮した試験項目が必要である。

2次元浸透流－移流分散解析では、高速道路からの離隔距離（輸送距離）が大きくなると濃度分布を過大評価する傾向が認められたため、広域をシミュレーションする場合は、3次元解析のほうが望ましい。このためには、広域地質調査が不可欠であるが、調査ボーリングは調査用地・コスト面で問題があり、数多く実施することが難しいので、物理探査などを併用した地質調査が必要になる。

## 5.2.2 今後の展望

上述した課題に対しての展望を以下に述べる。

### (1) 沿道周辺環境の保全対策について

周辺環境に対して負荷の少ない雪氷対策が望まれる。塩化物系凍結防止剤の散布量低減の取り組みとして幾つかの開発・試行が既に始まっている。まず、新しいすべり止め材として精糖過程で発生する残渣（ライムケーキ）の活用があげられる。従来使用していたすべり止め材（焼き砂・砕石7号等）は、排水性舗装では排水機能を低下させることから散布は望ましくないとの報告がある<sup>3)</sup>。ライムケーキは、散布後に破碎して融雪水とともに路外に流出することから着目されている<sup>4)</sup>。

また、塩化ナトリウムに新しい非塩化物系凍結防止剤を混ぜて、散布量を低減する方法として、プロピオン酸ナトリウムを使用した研究<sup>5)</sup>やトウモロコシ原料糖蜜を使用した研究<sup>6)</sup>もある。これらの工法の有効性や環境に対する安全性が確認されて、早い段階で実用化されることが望まれる。

一方、凍結防止剤の地下への浸透防止対策としては、早急に対応可能な流末水路目地の補修対策がある。本調査地域では、軽量で強度が大きく耐久性に優れたFRP製板を加工・使用した水路目地の補修を行っている（写真-5.1）。観測期間中は明瞭な対策効果を確認することはできなかったが、施工性は優れているので、本調査地域のように凍結防止剤の地下浸透が懸念されるような地域での施工が望まれる。



写真-5.1 FRPを使用した水路目地補修対策

(2) 調査・解析手法について

調査ボーリングや地表踏査から得られる調査地の地質情報は限定的であり，地下水の流れをより詳しく知るためには，塩化物イオンの浸透・移流経路を把握できる方法が必要である。このような浸透・移流経路の把握には物理探査と調査ボーリングの併用が有効であると考えられる。

物理探査とは，地盤の物理的あるいは化学的性質を観測し，地盤の状態や状況を解明する技術であり，利用する物理現象によって弾性波探査，電気探査，電磁探査，重力探査などに分類される<sup>7)</sup>。

このうち，地下水調査などによく用いられるのは電気探査（比抵抗法2次元探査・比抵抗法3次元探査）である。比抵抗法は地層に含まれる鉱物の種類，鉱物粒子間の間隙および間隙中の水の量，イオン濃度および温度などによって地層が異なった比抵抗を示す性質を利用して，地盤の比抵抗構造を求める手法である<sup>8)</sup>。なお，観測には電極の設置を必要とする。図-5.1に3次元探査の成果例を示す，このように地中内部の構造を視覚的に把握できる。

電気探査と同じような物理探査に電磁探査がある。電磁探査では地盤中の電気伝導率（比抵抗の逆数）の分布を求めることができる。また，電極の設置を必要とせず，測定装置を持って測線上に移動することで，電位分布や電気伝導率を求めるものである。観測は電気探査と比べて容易であるが，送電線などから発生する電磁のノイズには電気探査よりも弱い面がある。これらの物理探査と調査ボーリングを併用することにより，広域的かつ精度高い地質調査成果が期待される。

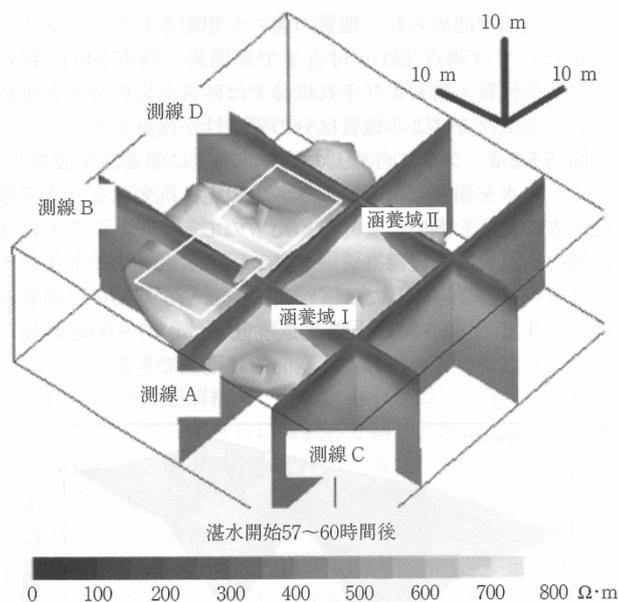


図-5.1 電気探査の成果例<sup>8)</sup>

また，上で示した物理探査を併用した調査技術は解析モデルの精度の向上だけではなく，解析を行っていない場所での浸透状況の把握や評価等にも有効な技術と考えられる。

広域をシミュレーションするには3次元解析や複数の断面での2次元解析が望ましいが，

そのためには多大な時間と労力を要するため、調査地全域をくまなく解析することは困難といえる。したがって、浸透流—移流分散解析結果等から求められる凍結防止剤の浸透経路・浸透範囲と電気探査から求められる比抵抗構造図等を対比することによって、浸透範囲と比抵抗値の関係を整理することができれば、解析を行っていない断面や場所でも、探査から浸透状況の概略を把握することも可能になると考えられる。

今後は、本章で示した課題と展望を踏まえて、本研究の成果が一般道路沿道も含む他地域での環境調査・対策の有意な基礎資料として活用できることを目指していきたいと考える。

## 第5章の参考文献

- 1) 全国高速道路建設協議会：高速道路便覧2013（平成25年度），p.61, 2013.
- 2) 本荘清司，藤原規雄，葛目和宏，牧博則：凍結防止剤による鋼橋RC床版の塩害劣化メカニズムに関する考察，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第14巻，pp.235-242, 2014.
- 3) 田中俊輔，安部隆二，高橋尚人，武市靖，木村孝司：すべり止め材散布が粗面系舗装の性能に与える影響と散布効果に関する研究，寒地土木技術研究，第755号，pp.10-18, 2016.
- 4) 大日向昭彦，徳永ロベルト，河端淳一：精糖残渣（ライムケーキ）を活用した冬期路面対策について，第53回（平成21年度）北海道開発局技術研究発表会発表論文集，2010.
- 5) 佐藤賢治，藤本明宏，切石亮，徳永ロベルト，高橋尚人，中島範行：新しい非塩化物系凍結防止剤の環境性能と路面すべり抵抗改善効果について，寒地土木研究所月報，第753，pp.34-38, 2016.
- 6) 佐藤賢治，藤本明宏，切石亮，徳永ロベルト，高橋尚人，石田樹：トウモロコシ原料糖蜜の湿式剤としての利用可能性に関する研究，雪氷研究大会(2014・八戸) 講演要旨集，2014.
- 7) 物理探査学会：新版物理探査用語辞典，愛智出版，p.161, 2005.
- 8) 地盤工学会（編）：地盤調査の方法と解説-二分冊の1-，地盤工学会，pp.120-126, 2013.

## 謝辞

岡山大学大学院環境生命科学研究科の諸泉利嗣教授には、指導教官として論文作成の指導からスケジュール管理までして頂き、厚いご指導を賜りました。西垣誠教授には、浸透流-移流分散解析では各種パラメータの決め方から破碎帯の分布範囲についてまで、事細かくご指導を賜りました。また、赤江剛夫教授には、調査結果のとりまとめでご指導を賜りました。そして、本論文の審査をお引き受け下さった三浦健志教授と西村伸一教授をはじめとする環境生命科学研究科のスタッフの方々には、研究活動全般にわたり大変お世話になりました。深く感謝いたします。

そもそも本研究の発端は、西日本高速道路株式会社の環境調査であり、2011年の秋から現地踏査、井戸水水質観測等を開始したものでした。それから本研究の成果に至るまでには足掛け5年数ヶ月の歳月をかけることになりました。

この期間、西日本高速道路株式会社の下登新一氏、村中正浩氏、村上貴行氏、金尾剣一氏（現；西日本高速道路エンジニアリング中国）、根井靖彦氏、竹本将氏には調査の計画から結果の解釈・整理にいたるまで数多くの貴重なご意見を頂きました。

また、西日本高速道路エンジニアリング中国株式会社の柳迫新吾氏、村上豊和氏（現；西日本高速道路株式会社）、濱沖俊史氏には調査チームのなかで中心的な役割を果たして頂きました。沖咲良氏、金坂知宙氏、田原和貴氏、三吉雅美氏にはかれらを補助して頂きました。橋森勝氏、下田薫所長には、井戸・水質調査等の現地調査でお手伝いして頂きました。土中や水中に含まれるイオンの化学的な性質について小澤徹三上級主幹より助言を頂きました。下野宗彦調査設計部部長には学位取得に対する貴重な経験談と論文の骨子構成について助言を頂きました。

浸透流-移流分散解析の具体的作業では、有限会社アイジオルの今井紀和氏に協力して頂きました。この書面ではご紹介することができませんが、他にも多くの方々に現地調査や分析でお世話になりました。上に挙げさせていただいたの方々のご支援がなければ、本研究をまとめることはできなかったと思います。ここに各位に対し深く感謝いたします。

学位取得の貴重なチャンスを与えて下さった岸洋正社長、石橋彰常務、佐々木芳文相談役をはじめとする会社の皆様には、この上ない恩義を感じております。橋高武上席上級主幹、広本輝夫道路ソリューション事業部部長は筆者に学位取得を勧めてください、数々の後押しをしてくださいました。深く感謝しております。研究成果およびこの貴重な体験を活かし、今後の業務や会社の発展に貢献してまいる所存でございます。

佐々木薫氏とともに諸泉教授のもとで研究活動に努めた歳月は、生涯忘れることのできない貴重な体験となりました。楽しく研究活動を行うことができたのは偏に同氏のおかげです。心よりお礼を申し上げます。

最後に、私の背中を力強く押してくれた妻、父親に無関心な長男の少し誇らしげな表情、日ごろ便りの無い長女からの激励の電話、これらがなよりの支えでありました。そんな家族に改めて深く感謝します。