

博士論文

凍結防止剤が高速道路沿線の農地及び銅の
腐食度へ与える影響に関する実証的研究

平成 29 年 9 月

佐々木 薫

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 研究の背景と目的	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 既往の研究	7
1.1.2.1 凍結防止剤が道路周辺に及ぼす影響についての研究	7
1.1.3 本研究の目的	9
1.2 本研究の構成	10
第1章の参考文献	15
第2章 凍結防止剤と調査地の現状	16
2.1 はじめに	16
2.2 高速道路の冬期路面管理	16
2.2.1 冬期の路面管理	16
2.2.2 凍結防止剤の種類	17
2.2.3 凍結防止効果	18
2.2.4 凍結防止剤の成分	19
2.2.5 凍結防止剤の散布作業	19
2.2.6 調査地の凍結防止剤の散布量	20
2.2.7 凍結防止剤の環境への影響	21
2.3 調査地の地形・地質・土地利用状況	24
2.4 調査地の影響把握調査	26
2.4.1 はじめに	26
2.4.2 アンケート調査の方法	26

2.4.3 アンケート調査結果	28
2.4.3.1 アンケート回収率	28
2.4.3.2 井戸の使用状況【項目 1】	28
2.4.3.3 飲料水に関する質問【項目 2】	30
2.4.3.4 モーターポンプに関する質問【項目 3】	30
2.4.3.5 温水器ヒーターに関する質問【項目 4】	30
2.4.3.6 調査協力についての質問【項目 5】	33
2.4.3.7 全体の不具合	35
2.4.4 ヒアリング調査の方法	35
2.4.5 ヒアリング調査結果	35
2.4.5.1 ポンプの不具合	35
2.4.5.2 温水器の不具合	35
2.4.5.3 その他の不具合	36
2.4.5.4 全体の不具合	36
2.4.6 水質調査	38
2.4.7 水質調査結果	38
2.5 考察	39
2.5.1 不具合と塩化物イオン濃度の関係	39
2.5.2 アンケート回収率	41
2.5.3 井戸深度と塩化物イオン濃度の関係	42
2.5.4 味覚と腐食の関係	42
2.6 まとめ	43
第 2 章の参考文献	45

第3章 水質調査と地下浸透経路	46
3.1 はじめに	46
3.2 水質調査	46
3.2.1 水質調査項目と内容	46
3.2.2 主な水質調査結果と高速道路との因果関係	49
3.2.2.1 塩化物イオン	49
3.2.2.2 ナトリウム	51
3.2.2.3 カルシウム	53
3.2.2.4 カリウム	53
3.2.2.5 マグネシウム	55
3.2.2.6 電気伝導度 (EC)	56
3.2.2.7 一般細菌	57
3.2.2.8 pH (25°C)	58
3.2.2.9 硫酸イオン	59
3.2.2.10 酸消費量 (pH4.8)	60
3.2.2.11 全硬度及びカルシウム硬度	61
3.2.2.12 味・臭気	62
3.2.2.13 イオン状シリカ	64
3.2.2.14 その他水質調査結果	64
3.2.3 水質調査結果のまとめ	64
3.3 凍結防止剤の地下浸透経路の推定	65
3.3.1 水質調査とその結果	65
3.3.2 凍結防止剤の地下浸透経路の調査と結果	65
3.3.3 井戸の塩化物イオン濃度と道路構造の関係	67

3.3.4	まとめ	70
3.4	凍結防止剤の路外への飛散	72
3.4.1	凍結防止剤の路外飛散に関する既往調査	72
3.4.2	調査地の凍結防止剤の飛散調査	74
3.4.3	凍結防止剤の飛散調査結果	76
3.5	塩化ナトリウムの地下浸透による地下水質のイオン交換	77
3.5.1	はじめに	77
3.5.2	ヘキサダイアグラムにおける水質解析	78
3.5.3	岩質によるナトリウムイオンとカルシウムイオンの関係	81
3.5.4	ナトリウムとカルシウムのイオン交換	82
3.5.5	安山岩と花崗岩の陽イオン交換量	84
3.6	まとめ	86
	第3章の参考文献	88
	第4章 凍結防止剤散布による農地土壌環境への影響	89
4.1	はじめに	89
4.2	調査方法	90
4.2.1	飛散した凍結防止剤量と土壌に対する影響の調査方法	90
4.2.2	農業用水に対する影響の調査方法	93
4.3	調査結果	94
4.3.1	凍結防止剤の散布量と降水量	94
4.3.2	土壌の塩素濃度の推移	95
4.3.3	土壌の交換性ナトリウム含量の推移	95
4.3.4	河川の塩素濃度の推移	98

4.4 考察	100
4.4.1 土壌中の塩素濃度と交換性ナトリウム含量の分布	100
4.4.1.1 塩素濃度の分布	100
4.4.1.2 ESP の分布	101
4.4.2 農業用水への影響	102
4.5 まとめ	102
第4章の参考文献	104
第5章 凍結防止剤飛散による近接農地の塩化物イオン濃度の簡易推定手法	106
5.1 はじめに	106
5.2 農地の塩分調査	106
5.2.1 調査手法の概要	106
5.2.2 土壌塩化物イオン濃度調査結果	108
5.2.2.1 土壌の塩化物イオン濃度調査結果	108
5.2.2.2 塩化物イオンの農地への飛散	111
5.2.2.3 塩化物イオンのリーチング速度の推定	111
5.3 塩化物イオンの飛散浸透の簡易推定手法	112
5.3.1 簡易推定手法の考え方と算定方法	112
5.3.2 簡易推定手法の計算方法に用いる諸定数	114
5.4 簡易推定結果	116
5.5 まとめ	118
第5章の参考文献	119
第6章 凍結防止剤の地下浸透による金属の腐食	120

6.1	はじめに	120
6.2	電熱ヒーターの不具合原因	123
6.3	試験方法	124
6.3.1	腐食促進試験の考え方	124
6.3.2	銅板等による食促進試験方法	126
6.3.2.1	試験方法	126
6.3.2.2	試験条件	128
6.3.2.3	試験体	128
6.3.3	電熱ヒーターの高温水による腐食促進試験	130
6.4	試験結果	131
6.4.1	腐食促進試験結果	131
6.4.2	高温水による腐食促進試験結果	134
6.5	考察	135
6.5.1	銅の塩化物イオンによる腐食度と耐用年数	135
6.5.2	鉄と銅の腐食度の差	137
6.5.3	高温水による促進試験結果の解析	138
6.5.4	塩化物イオン濃度と耐用年数の関係	140
6.6	まとめ	141
	第6章の参考文献	142
	第7章 結論	143
7.1	本研究のまとめ	143
7.2	今後の課題と展望	152
7.2.1	今後の課題	152

7.2.2 今後の展望	152
第7章の参考文献	160
謝辞	161

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 はじめに

冬期の高速道路では、安全で快適な路面を確保するため、除雪や路面の凍結を防止する目的で凍結防止剤散布等の雪氷対策作業（写真-1.1）が実施されている¹⁾。

冬期の路面は、気温や路面温度の低下により路面凍結（路面温度が0℃以下に冷却され、その路面上に水分がある場合にそれが凍結する現象）や降雪による路面への着雪や積雪による凍結等が生じて、走行車両のスリップによる事故が発生する。これを防止するために凍結防止剤が使用される。この凍結防止剤は、路面水分の凍結温度（結氷点）を低下させる目的で塩化物が用いられている。



写真-1.1 高速道路の雪氷管理

第1章 序章

国内の高速道路は、11,520kmのネットワーク計画のもとに、2013年度末において、8,402km（全体の89%）を供用^{※-1}している。図-1.1に高速道路の雪氷対策費と供用延長の推移を示し、表-1.1に2012年度末の高速道路3社の積雪深別供用延長を示す。この図表から2012年度末の新直轄区間を除く高速自動車国道の高速道路延長は、8,035kmが供用し、このうち雪寒地域（10年間平均最大積雪深が30cm以上の地域）を通過する高速道路が、約3,622kmの約45.1%に達し、積雪深1m以上の豪雪地帯を通過する延長は約2,932kmの36.5%となっている。最大積雪深が30cm以下の地域でも年に数回の降雪があることから、ほとんどの高速道路で積雪や路面凍結防止のための雪氷対策が必要となっている。これらの雪氷対策費は、2012年度末で242億円/年に達している²⁾。

※-1：供用とは、路線の指定または認定および区域の決定を経て、外形上も一般交通の用に供すること。

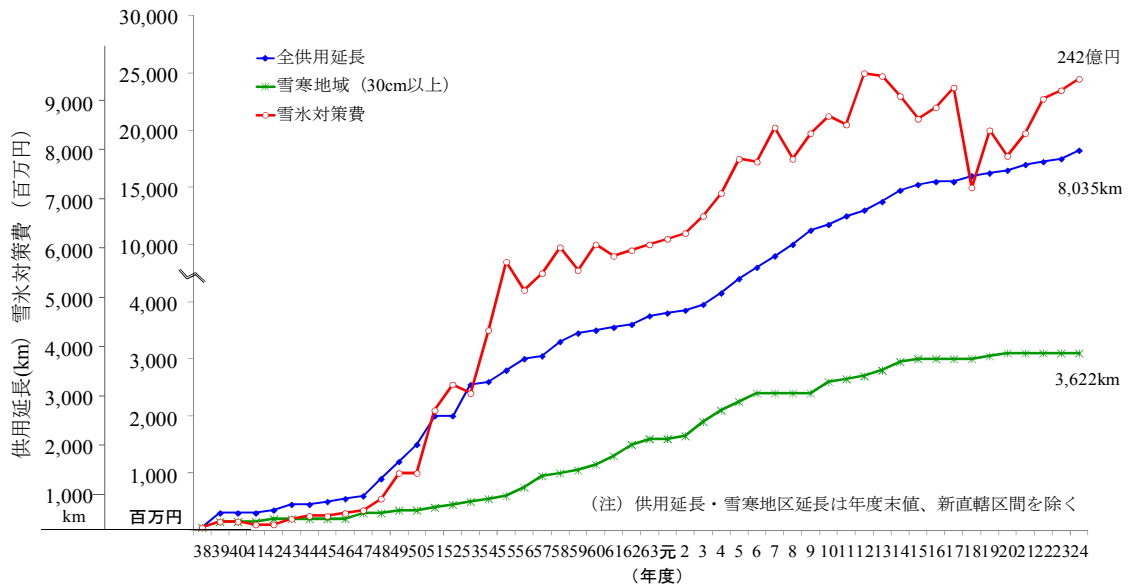


図-1.1 雪氷対策費と供用延長の推移²⁾

表-1.1 会社別の積雪深別供用延長 (km) (平成24年度末現在)²⁾

積雪深	NEXCO 東	NEXCO 中	NEXCO 西	合計	比率
0.3m未満	659	1,205	2,550	4,414	54.9%
0.3m～1.0m未満	186	377	126	689	8.6%
1.0m以上	2,457	170	305	2,932	36.5%
計	3,303	1,751	2,981	8,035	100.0%

(注) 深直轄区間を除く (端数処理の関係により合計が一致しない場合がある.)

国内の高速道路で使用している凍結防止剤は、主に塩化ナトリウムである。図-1.2に1989～2012年度までの高速道路の積雪寒冷地（10年間平均最大積雪深が30cm以上の地域）の延長と凍結防止剤の使用量を示す。この図から凍結防止剤の使用量は、高速道路の供用延長と共に増加する傾向にあることがいえる。また、1992年に「スパイクタイヤ粉塵の発生防止に関する法律」が成立し、翌年4月の罰則規定の施行以後、冬期路面を走行する車のほとんどが普通タイヤにチェーンまたはスタッドレスタイヤを装着することとなった。このため、冬道に不慣れなドライバーによるスリップ事故が急増したため、冬期路面の強化を図る必要性から凍結防止剤の散布量を増大させた。凍結防止剤の平均散布量は、1989～1992年度に約33ton/kmであったが、スパイクタイヤ廃止により1993～2012年度に53ton/kmと1.6倍に急増した³⁾。

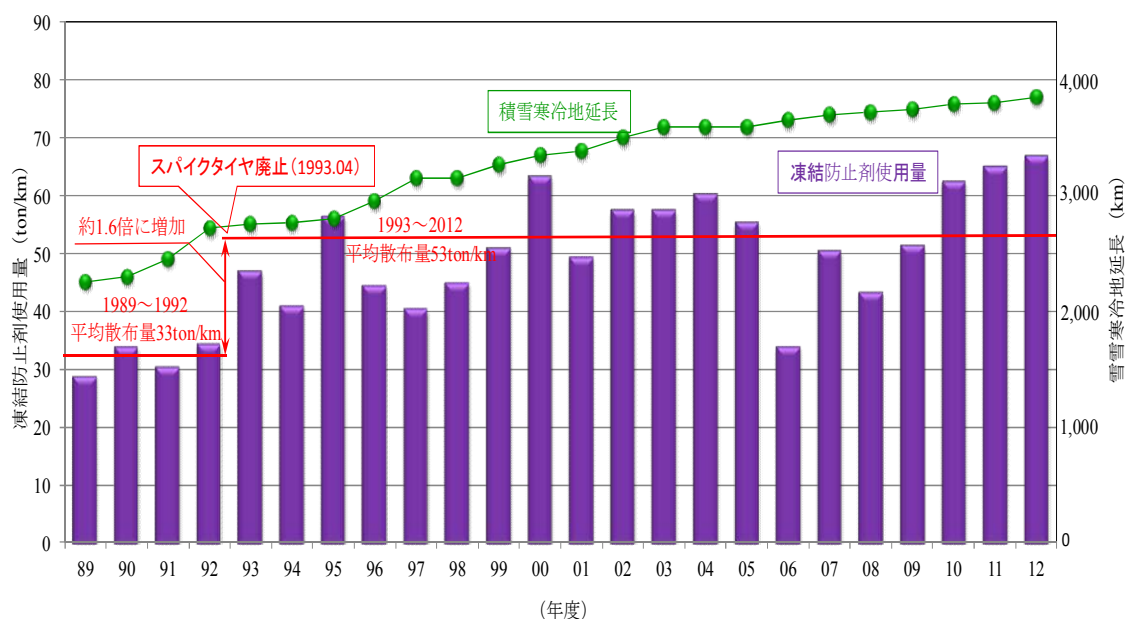


図-1.2 積雪寒冷地延長と凍結防止剤使用量³⁾

図-1.3は、全国各地の高速道路の管理事務所単位に管理延長1km当たりの凍結防止剤の使用量を円の大きさに換算して表示し、縦軸は冬日日数(最低気温が0°C以下の日)を表し、この値が多ければ多いほど寒い地域となる。横軸は、累計降雪量を表し、この値が多ければ多いほど多雪地域を示す。図から分かることは、寒さや降雪量には比例せず、個別の理由によるところに依存している。名神高速道路は、彦根の関が原地区に雪が降ることが多く、通過車両のほとんどは冬用タイヤを装着しておらず、雪氷路面に不慣れなドライバーが多く、重要な高速道路の動脈となる路線であることから凍結防止剤

第1章 序章

の散布量が多くなっている。寒冷地である北海道や東北北部の高速道路では、使用量が少ない。これは、多雪地帯では除雪作業が主体となることより薬剤の使用量が比較的少ないからである。中国道などでは、降雪量も少なく、気温もさほど低くないのに凍結防止剤の散布量はそれほど少なくない。これは、路肩残雪などの凍み出しによる凍結防止のために事前の散布などが行われることによるものである⁴⁾。

高速道路における凍結防止剤の累積散布量が、1,000ton/km を超える対象路線³⁾を図-1.5 に示す。凍結防止剤の累積散布量が 1,000ton/km を超える対象路線のほとんどは、中山間地域に位置し供用経過年数が 30 年を越えている。

凍結防止剤の散布作業は、主に粉砕塩を湿塩散布機により、通常は風などによる飛散を減らすため塩水と混合して湿らせた状態で路面に散布される。1 回あたり路面 1 m² 当たり 20g が散布される。山間部の降雪地域で冬期 1 シーズン（11 月中旬～3 月下旬）の散布量は、道路延長 1km 当たり 30～50t 程度の散布量となる⁵⁾。通常、路面へ散布された凍結防止剤は、水に溶けやすく路面へ散布後、降雨や降雪融解水等と混ざって用排水路を通じて近傍の河川へ流出し、河川水と混ざって低濃度に希釈され海へ流下していく。凍結防止剤は、貯蔵運搬や散布が容易であること、価格が安く安定していること、自然環境への副次的な影響が少ないことより、主に自然由来の塩化ナトリウムが多用されている。

近年、高速道路では、この凍結防止剤に起因して、色々な弊害が生じ始めている。高速道路の構造物は、老朽化や大型車両の過積載などによる劣化損傷はもとより、内在塩分や凍結防止剤の浸透に起因する鉄筋の錆膨張によるコンクリート構造物の劣化損傷、橋梁の桁端部は、凍結防止剤の伸縮装置などからの漏水や飛散による腐食劣化、標識柱や防護柵など鋼製の道路付属物は、金属腐食による劣化損傷が著しくなっている。特に図-1.5 に示す凍結防止剤の累積散布量が 1,000ton/km を超える対象路線にあっては、橋梁の床版の 46%において変状グレードⅢ～Ⅴと大きい値を占め、床版は、図-1.6 に示すとおり塩害により劣化損傷を起こしている。このように凍結防止剤散布量と橋梁の変状は、大きく影響している。このため高速道路 3 社においては、床版取替えなどの大規模更新事業が開始されてきている³⁾。

また、凍結防止剤の累積散布量が 1,000ton/km を超える一部の中山間地域においては、道路構造物以外で凍結防止剤が水路を経ないで地下へ浸透して、地下水環境への影響を与えるという事象が発生してきている⁶⁾。なお、凍結防止剤による高速道路沿線の環境への影響に関する調査事例も少なく、その実態が明らかにされていない現状にある。

第1章 序章

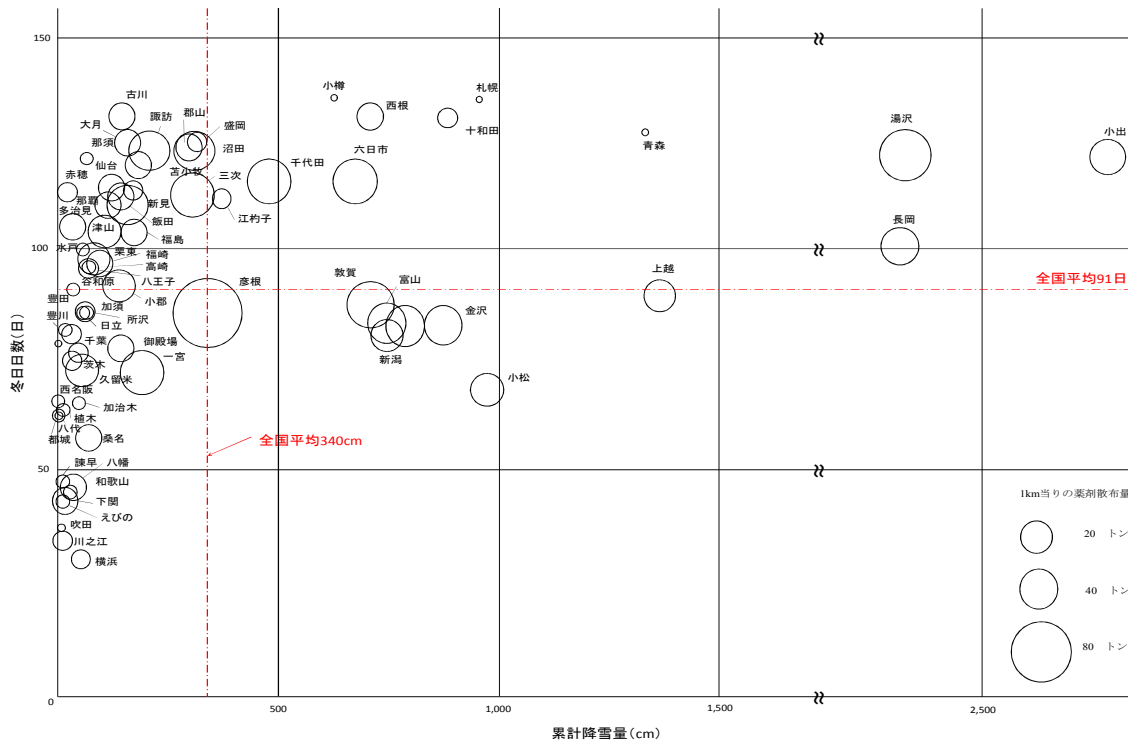


図-1.3 管理事務所の管理延長当たりの薬剤散布量と冬日日数・累計降雪量の関係 (1985) (日本道路公団で管理する高速道路) ⁴⁾

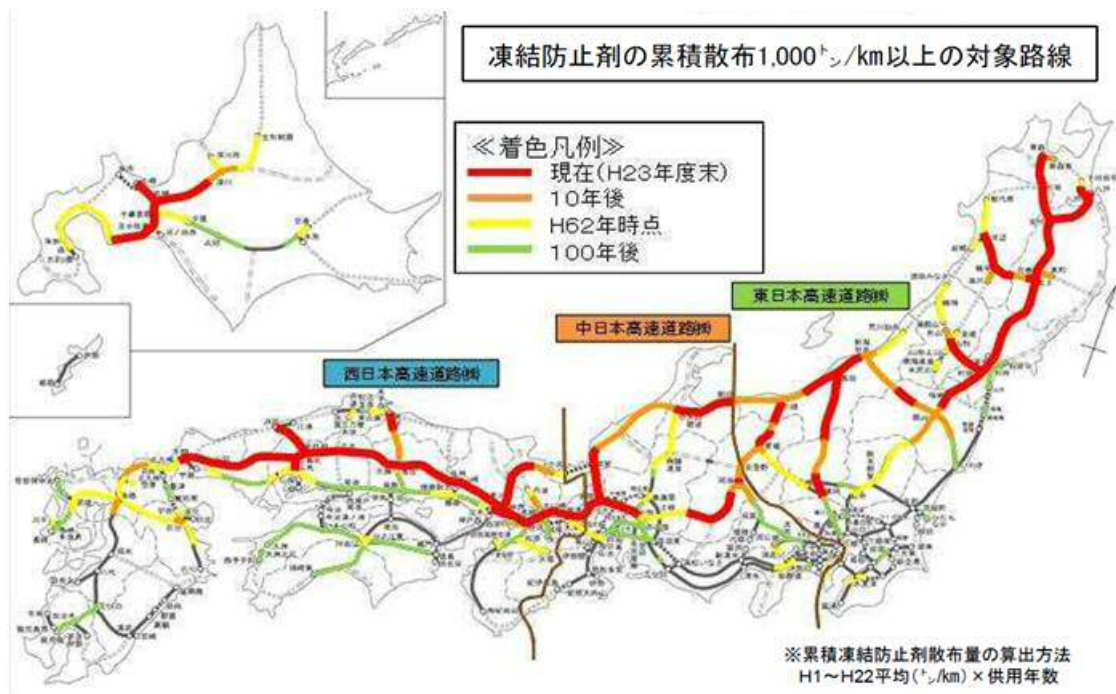


図-1.4 凍結防止剤の累積散布量 1,000ton/km 以上の対象路線 ³⁾

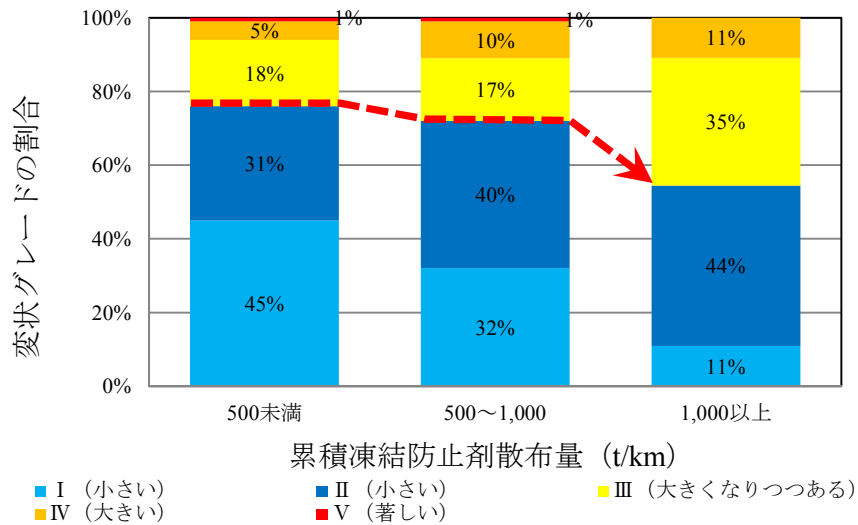


図-1.5 床版の変状グレードの分布 (鋼床版を除く) ³)



図-1.6 鉄筋コンクリート床版の主な変状 ³)

本研究は、このような高速道路で散布された凍結防止剤が沿道環境に及ぼす影響を背景として、既往の文献資料を整理し、凍結防止剤による課題を抽出し、現状を評価することを目的としたものである。

高速道路の沿道環境に関する調査項目として、地下水への影響、沿線の農地土壌及び農業用水への影響、凍結防止剤を含む生活水に起因する金属の腐食に関する影響について評価を行った。

1.1.2 既往の研究

既往研究の整理にあたっては、冬期の路面管理で散布される凍結防止剤による地下水や農地土壌、農業用水などへの影響調査研究に関する既往事例について国内外における現状を把握する目的で行った。

1.1.2.1 凍結防止剤が道路周辺環境に及ぼす影響についての研究

凍結防止剤を取り扱った研究では、木村ら⁷⁾が2007年に北海道、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が報告されている。また、凍結防止剤の飛散についての影響を調査した結果は、飛散が1~5mの範囲で見られ、飛散量が散布量の数%であった。全国42地点で実施した沿道土壌調査では、冬期に凍結防止剤の成分物質濃度が道路近傍で上昇する傾向が見られたものの、一時的な増加であり、食物（農作物）の成長を阻害するレベルに達することはほとんど無い結果であった。

また、長野県の技術情報⁸⁾によれば、凍結防止剤による植物の被害としては、道路に隣接した樹木の塩化カルシウムによる被害は1944年アメリカで最初に報告された。内容は、街路樹の異常な葉焼け小枝の枯れや枯死であったが、このときの塩化カルシウムは、凍結防止剤として散布されたのではなく、夏に無舗装道路のほこり緩和剤として散布されたものであった。そして1959年に凍結防止剤（塩化ナトリウムと塩化カルシウム）による街路樹の被害が初めて発表された。その後、ヨーロッパをはじめ各地で凍結防止剤による樹木の衰退が報告されはじめた。植物枯損のメカニズムとしては、植物体内中に過剰の塩分が供給されることによる細胞の壊死などが原因で、供給原因としては、①土壌への過剰な塩分供給により植物の根から吸収される場合、②道路を通過する自動車によってまきあげられた塩分を多量に含んだ霧が枝葉へ付着、吸収される場合が考えられる。この後者の例は高速道路近辺でよく現れ、風向きにもより、被害は車道から100m程の範囲まではっきり現れたという例もある。凍結防止剤による被害の報告は、欧米諸国では50年ほど前からなされていたが、日本では最近になってからである。こ

第1章 序章

これは自動車社会の発達の違いによるものと思われるが、国内でも最近、特にスパイクタイヤの使用が禁止されてから、凍結防止剤によると思われる植物の減退の例が多くなってきている。実際に長野県内でも道路端の樹木が所々枯れているのが見られ、この原因を自動車から排出される汚染物質によるものと、凍結防止剤によるものに区別するのは難しく、樹木の枯損が路面側、しかも地上から1~2mの道路からの水しぶきをうけそうな部分、さらにガードレール等によって道路側からの水しぶきが遮られている部分の枯損が余り進んでいない時には、凍結防止剤による枯損と考えられている。

つぎに、高速道路については、吉江ら⁹⁾が凍結防止剤に関する調査を行っているが、JH(旧日本道路公団)に寄せられた凍結防止剤による苦情で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ことから、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、農地土壌へ与える影響については、冬期の2~3月に植物の育成阻害が生じる400mg/kg(土壌の乾燥重量kg当たりの塩化物イオン量mg)以下を超えるが、4月以降の梅雨などの降雨により徐々に減少し土壌に与える影響は小さいものと考えられる。しかし、このことは通常より多く散布した場所や降水量が少ない時期には、土壌塩分が希釈されない可能性もあり看過できないものとして注意する必要があることを示している。このため、標準散布量を1994年から欧州で一般的に行われている湿塩散布方式により一回の散布量を30g/m²から20g/m²に減らし飛散の抑制(20~30%減)を図っている。また、高機能舗装(排水性舗装)の導入により路面上の水分を減らしミスト状になる水しぶきの飛散を抑制するなどの対策が講じられている。

一方、海外での凍結防止剤による環境被害については、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の2倍を超える濃度505mg/Lが検出され、その対策が図られている¹⁰⁾。

また、米国レイク・タホ地区においては、凍結防止剤による環境被害が生じ、道路沿線の何千本もの樹木が枯れて切り倒されている。この樹木枯れの原因は長年蓄積された塩の付着や塩水の吸収が原因といわれている¹¹⁾。

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、かつ地下水の水質や農地土壌など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の水質や植物被害も報告されている。このことから、我が国においても、地形・地質・気象、道路施設の老朽化、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。また、道路沿線の動植物等への影響についても海外と比べてあまり大きな被害が生じるに至っていないが、影響を及ぼす可能性があることが懸念され、その影響についても定量的に研究された事例が少ない状況にある。

したがって、凍結防止剤の地下浸透や飛散などによる環境への影響が払拭されていない現状であり、影響が懸念されるような地域での調査・研究は、極めて意義のあるものと考えられる。

1.1.3 本研究の目的

本研究は、塩化ナトリウムを主成分とする凍結防止剤が頻繁に散布される中山間地域の高速道路沿線における地下水の水質や農地土壌、農業用水などを調査して環境への影響に関して評価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気象や地形・地質的に類似性のある他の地域での環境調査・対策のための基礎的資料の一助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、凍結防止剤の成分、性能を把握したうえで、研究対象地域の水質の実態把握を行った。調査は、中山間地域を通過する供用後30年以上が経過し老朽化が進んでいる高速道路の沿道の井戸、河川、湧水などの水質を対象として行うこととし、調査に先立ち、井戸水等使用の実態を把握するため、調査地167世帯についてアンケート調査やヒアリング調査を行った。その結果、「井戸水が塩辛い」「電気温水器などの故障頻度が高い」などの実態を把握した。水質検査は、代表する井戸など87箇所において、非雪氷期と雪氷期に採水し検査を行った。その結果は、高速道路の谷側下方流域で、凍結防止剤の地下浸透による影響で地下水の塩化物イオン濃度が上昇していることを明らかにした。合わせて凍結防止剤の地下への浸透経路も明らかにした。また、ナトリウムは、安山岩、花崗岩の地質の相違によってカルシウムなどの他の陽イオンと交換されるイオン交換を確認し、地質の相違によって交換されるイオン交換率を推計した。

つぎに、第2ステップでは、凍結防止剤が飛散する農地の土壌や農業用水への流入による用水の水質の実態把握を行った。土壌の調査地は、高速道路沿線の最も近接した農地において、非雪氷期と雪氷期に土壌採取して塩分検査を実施した。高速道路の路肩周辺で雪氷期において高い濃度を検出したが、農作物への影響を与える濃度は検出されな

第1章 序章

かった。また、農繁期においては、塩化物イオン濃度は降雨によるリーチング作用によって低い値となることが確認された。なお、凍結防止剤の日々の散布量や降水量から土壌の塩化物イオン濃度を簡易的に推測できる推定方法を試みた。また、農業用水については、かんがい用水となる河川の水質の実態把握を行った。塩化物イオン濃度は、農閑期である雪氷期において高い値を示したが、農業に影響を与える値ではないことを確認した。

第3ステップにおいては、凍結防止剤の井戸水流入に起因したと思われる銅金属の腐食が発生したことより、塩化物イオン濃度と銅の腐食に関して簡易な腐食促進試験を実施し、腐食速度と塩化物イオン濃度の関係を定量的に推定する手法を試みた。

本研究の成果は、老朽化の進んだ高速道路の沿線で凍結防止剤が30年以上散布され続け、累計1,000ton/kmを超えた中山間地域で、上水道が完備されていない地域における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く、希少な研究成果と考える。他の地域での環境調査・対策の基礎的な資料の一助として、今後活用されることを期待するものである。

1.2 本論文の構成

本論文は、7つの章で構成する。第1章は、高速道路における雪氷対策作業などの現状について、第2章は、凍結防止剤の成分特性と研究対象地域の現状について、第3章は、道路沿線での水質調査とその評価について、第4章は、農地土壌と農業用水への影響について、第5章は、凍結防止剤飛散量から農地土壌の塩化物イオン濃度の簡易推定方法について、第6章は、簡易な腐食促進試験による塩化物イオン濃度と銅の腐食速度について、第7章は、第2～6章を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

冬期の高速道路においては、道路交通の安全確保のため、路面の凍結や積雪を防止する目的で雪氷対策作業が実施される。雪氷対策作業は、路面の凍結を防止するため塩化ナトリウムを主成分とする凍結防止剤が散布される。凍結防止剤の散布量は、1シーズン、高速道路の延長1kmあたり約50t散布され、中山間地域においては、累積で1,000t/km以上となる箇所もあり、高速道路のコンクリート構造物は老朽化やこの凍結防止剤によ

第1章 序章

ってコンクリートが劣化損傷し大規模な補修が余儀なくされている。海外においては、凍結防止剤に起因する地下水の塩水化、樹木の枯損被害が発生しているが、我が国においては、凍結防止剤による高速道路沿線の環境への影響に関する研究報告事例は少なく、この研究報告事例では、際立った環境への影響はない。しかしながら、近年、国内の中山間地域の高速道路沿線において凍結防止剤に起因する地下水の塩水化が発生した。

本章では、凍結防止剤が高速道路周辺の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、第2章以降に記載する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 凍結防止剤と調査地の現状

本章では、高速道路における冬期の路面管理の現状と路面の凍結を防止するための凍結防止剤についてまとめると共に、これによる環境への影響を整理した。また、凍結防止剤が中山間地の高速道路周辺の井戸水に影響を与えたと思われる事象が発生した。このことにより、周辺家屋への影響度合いを把握するため、地形や地質などを整理し、アンケートやヒアリング調査を実施してその状況を整理した。その結果、「井戸水が塩辛い」「ポンプや温水器等が短期間で故障する」といった不具合が発生していることが分かった。また、次章で行った水質調査より高速道路より標高の低い谷側方向では高速道路に近い井戸ほど塩化物イオン濃度が高いことが分かった。以上のことから、高速道路に散布される凍結防止剤の周辺環境への影響は無視できないことが明らかになった。

第3章 水質調査と地下浸透経路

水質調査は、高速道路周辺の井戸 87 箇所で行った。水質調査から高速道路より標高の低い谷側方向では高速道路に近い井戸ほど塩化物イオン濃度が高いことが分かった。そのため凍結防止剤の井戸への浸透経路を確認するため、散水調査などを実施し浸透流出経路と凍結防止剤の散布量に対する流出収支について検討した。その結果は、路面に散布された凍結防止剤のうち 25%が路面のクラック等から地下に浸透、26%が水路目地の切れ目から地下に浸透、39%が地表水に混じって直接河川へ流出し、10%は路外等へ飛散していることを推計した。なお、舗装路面のクラックなどから切土部の地下へ浸透した凍結防止剤は、舗装の切込砕石の路盤内を経由して、透水係数の高い盛土付近で地下へ浸透していることを推定した。また、凍結防止剤に含まれるナトリウムは、地

下の土壌通過時にカルシウムなどの他の陽イオンと交換されるイオン交換が確認された。このイオン交換は、安山岩と花崗岩の地質の相違によって交換される量が異なり、そのイオン交換率を推計した。

第4章 凍結防止剤の飛散などによる農地土壌と農業用水への影響

凍結防止剤は、車両等によって道路沿線に飛散し、その濃度に応じて植物への生育阻害をもたらす恐れがある。本章では、この塩化ナトリウムが農作物や農地土壌及び農業用水へ影響を与える閾値を整理すると共に、高速道路沿線の農地土壌への塩化ナトリウムの飛散浸透量や農業用水への流入量を調査し、農地土壌や農業用水に与える影響を評価した。その結果、道路端 1.5m 畦部において塩素濃度が 90mg/kg と閾値 400mg/kg の 23%、交換性ナトリウム飽和度が 16.3%と閾値 20%の 81.5%であった。また、農業用水は、農繁期で電気伝導度が 0.15dS/m と閾値 0.3dS/m の 50%であった。いずれも、閾値以下であり農地土壌や農業用水への影響は、極めて小さいことが明らかになった。

第5章 凍結防止剤の飛散による近接農地における塩化物イオン濃度の簡易推定手法

本章では、凍結防止剤散布量と降水量から農地土壌中の塩化物イオン濃度を簡単に評価するための簡易推定手法を提案した。本手法によって計算された推定値は、農地土壌中の塩化物イオン濃度の調査結果と比較することにより、その推定精度を検証した。その結果は、本研究で示した簡易推定手法によって農地における塩化物イオン濃度が精度よく推定できることがわかった。さらに、本推定結果より、凍結防止剤散布期間中における塩化物イオン濃度の最大値は、農作物の生育に影響を及ぼす閾値よりも小さいことが明らかとなった。

第6章 凍結防止剤に起因する高温多湿状態の銅の腐食速度

中国地方の中山間地域の地下水から高い塩化物イオン濃度が検出され、この地下水を使用した電気温水器等が錆等により短期間で故障した。電気温水器は、一般に耐久性に優れている銅等が用いられているが、この故障原因と塩化物イオンとの関係は、高いものと考えられた。本章では、地下水に含まれる塩化物イオンと電気温水器の故障との因果関係を整理するとともに、簡易な腐食促進試験により塩化物イオン濃度に依存する銅の腐食度及び耐用年数との関係を求めた。その結果は、耐腐食性のある銅であっても高温多湿状態においては、低い塩化物イオン濃度（約 20mg/L）でも 10 年程度で腐食が生

じる可能性があることが分かった。

第7章 結論

本章では, 本研究成果の要約を総括した. なお, 海外と国内での影響の相違について, 降水量の違いによる考察も行った. また, 今後の課題としては, 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, 凍結防止剤の代替の検討や凍結防止剤の地下への浸透抑止対策を提案した. 浸透抑止対策としては, 舗装の補修方法や FRP 製板を加工して使用した水路目地の補修例などを紹介した. また, 本研究成果の活用としては, 簡易な調査手法の提案と類似する環境調査への一助としての調査手法とその対策方法について取りまとめた.

表-1.2 に本論文の構成を示す.

第1章 序章

表-1.2 本論文の構成

第1章 序論 研究の背景と課題，既往の研究，本研究の目的	
第2章 凍結防止剤と調査地の現状 凍結防止剤の成分と性状，調査地の地形地質，アンケートやヒアリング調査	※凍結防止剤による環境への現状把握
第3章 水質調査と地下浸透経路 生活水の水質調査とその結果，凍結防止剤の地下浸透量・河川流出量・路外飛散量の定量的把握，河川の水質変化，凍結防止剤の浸透流出経路と散布量に対する流出収支，陽イオンのイオン交換	※凍結防止剤の地下への浸透経路の推計，陽イオン交換量の推計
第4章 凍結防止剤の飛散などによる農地土壌と農業用水への影響 凍結防止剤の飛散による農地土壌への影響，凍結防止剤の河川流出による農業用水への影響	※凍結防止剤による農地土壌と農業用水への影響評価
第5章 凍結防止剤の飛散による近接農地における塩化物イオン濃度の簡易推定手法 簡易土壌塩分推計手法	※凍結防止剤の農地土壌への飛散浸透量の推計
第6章 銅の塩化物イオン濃度と腐食速度 凍結防止剤の濃度相違による銅の腐食促進試験	※塩化物イオン濃度による銅の腐食度の推計
第7章 結論 本研究成果まとめ，高速道路沿道周辺環境の保全に対する課題，今後の展望	

第1章の参考文献

- 1) 高速道路技術センター（編）（1994）：高速道路の雪氷管理（わかりやすい雪氷管理），社団法人高速道路技術センター，p42-44.
- 2) 全国高速道路建設協議会（編），（2013）：高速道路便覧2013，全国高速道路建設協議会，p43，p370.
- 3) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社（2014）（参照2017.4）：東・中・西日本高速道路の更新計画について，（オンライン）入手先 <<http://www.e-nexco.co.jp/koushin/pdfs/150116.pdf>>
- 4) 村国誠（1995）：冬期路面管理に使用する薬剤（1）薬剤の種類と物理・化学的性質，平成7年度雪氷関係助役研修資料，P4，
- 5) 吉江誠吾，斎藤辰哉，渡辺亨（2001）：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，38，p1-2.
- 6) 秦二郎・佐々木薫・諸泉利嗣（2015）：凍結防止剤の地下浸透量，河川流出量及び飛散量の定量化，地盤工学ジャーナル Vol.10，No.4，p461-471
- 7) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典（2007）：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，p.116-127.
- 8) 長野県（1994）：凍結防止剤による道路際の植物への影響，技術情報 NO.88，pp4-5.
- 9) 吉江誠吾，齊藤辰哉，渡辺亨（2001）：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，p.70-79.
- 10) Nandana Perera, Bahram Gharabaghi, Ken Howard (2013) : Groundwater chloride response in the Highland Creek watershed due to road salt application: A re-assessment after 20 years, Journal of Hydrology, 479, p159-168.
- 11) 高木秀隆（1993）：米国の冬期道路管理体制調査に参加して，北海道開発局開発土木研究所月報，485，p76-85.

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

2.1 はじめに

写真-2.1 に示す冬期の高速道路では、道路交通の安全確保のため、除雪や路面の凍結を防止する目的で凍結防止剤散布等の雪氷対策作業が実施されている¹⁾。

冬期の路面は、気温や路面温度の低下による路面凍結などを防止するために凍結防止剤として塩化物が使用されている。近年、この塩化物が、高速道路沿線の井戸へ浸透する事象が発生した。

本章では、この事象に伴い高速道路における冬期の路面管理の現状と路面の凍結を防止するための凍結防止剤についてまとめ、これによる高速道路沿線の環境への影響を整理した。また、この事象が、発生したことにより周辺家屋への影響度合いを把握するため、地形や地質などを整理し、アンケート調査や現地ヒアリング調査を実施し、生活環境への影響を整理した。



写真-2.1 冬の高速道路

2.2 高速道路の冬期路面管理

2.2.1 冬期の路面管理

冬期の高速道路では、路面の積雪による凹凸をなくすため、除雪車による積雪の除去や整形作業が行われる。必要に応じ路肩に堆積した積雪は、ロータリー除雪車やダンプトラックなどで本線外へ排出する作業が行われる。これらの作業においては、雪や気温

による温度低下によって路面が凍結するため、凍結防止のために凍結防止剤の散布が併用されている。

2.2.2 凍結防止剤の種類

冬期路面管理に使用する凍結防止剤の種類には、表-2.1、写真-2.2に示す塩化ナトリウム、塩化カルシウム、塩化マグネシウム、CMA（酢酸カルシウム・マグネシウム）などの薬剤がある²⁾。

高速道路で使用される凍結防止剤は、塩化ナトリウムが基本とされている。その理由として、貯蔵運搬が容易であること、水に溶解しやすいこと、価格が安くしかも安定し

表-2.1 各種凍結防止剤の特徴²⁾

凍結防止剤	特 徴
塩化ナトリウム	安価で散布効果が高いため、最も広く使用されている。固結して散布作業に支障がある場合があるので、低温域では固結防止に配慮が必要となる。
塩化カルシウム	塩化カルシウムは吸湿性が強いので固結防止に有効であるが、保管には注意が必要。塩化カルシウムの最大の長所は融氷効果の速効性にあるが、融氷効果と凍結防止効果は塩化ナトリウムの6割程度となる。
塩化マグネシウム	塩化マグネシウムは、塩田法によって塩化ナトリウムを生産する際の副産物として産出され、別名“にがり”とも呼ばれる。塩化マグネシウムの最終的な融氷効果と凍結防止効果は塩化ナトリウムの半分以下となる。
CMA (酢酸カルシウム・マグネシウム)	CMAはカルシウム・マグネシウム・アセテート(酢酸)の頭文字で、塩化物系の凍結防止剤の欠点である金属腐食の問題がなく、環境に優しい凍結防止剤である。塩化物系の凍結防止剤に比べて価格が高いため、構造物設置区間等部分的な散布が適当と考えられる。
酢酸ナトリウム・酢酸カリウムなど	酢酸ナトリウム・酢酸カリウムはCMA同様環境に優しい凍結防止剤である。酢酸カリウムの融氷効果・凍結防止効果は塩化カルシウムとよく似ている。酢酸ナトリウムは、通常は結晶中に水分を約40%含んでいるため、最終的な融氷効果と凍結防止効果は塩化ナトリウムの半分以下となる。



写真-2.2 凍結防止剤の写真²⁾

た供給が得られること、自然由来の原料であることから散布による道路周辺への環境への副次的な影響が少ないことなどから凍結防止剤として塩化ナトリウムが多用されている。

2.2.3 凍結防止効果

凍結防止剤は、水分を塩化ナトリウムなどの水溶液にすることで0℃では凍らず氷点（凝固点）が低下するため、凍結を防止する効果がある。図-2.1は、塩化ナトリウムと塩化カルシウムを溶解した濃度（%）とその溶液が凍り始める境界を表した曲線である。塩化ナトリウム溶液は、最大23.3%以上は溶解できないため氷点は、-21℃まで凍らず溶液として存在することができる³⁾。これ以上温度が下降した場合、水溶液は、氷と塩化ナトリウムに分離し凍結することとなる。塩化カルシウムは、溶解濃度が約32%までであるため約-51℃まで溶液として存在できることを示している³⁾。塩化ナトリウムと塩化カリウムの諸性質の比較を表-2.2に示す。高速道路では、経済性などから吸熱反応のある塩化ナトリウムが多用されている。

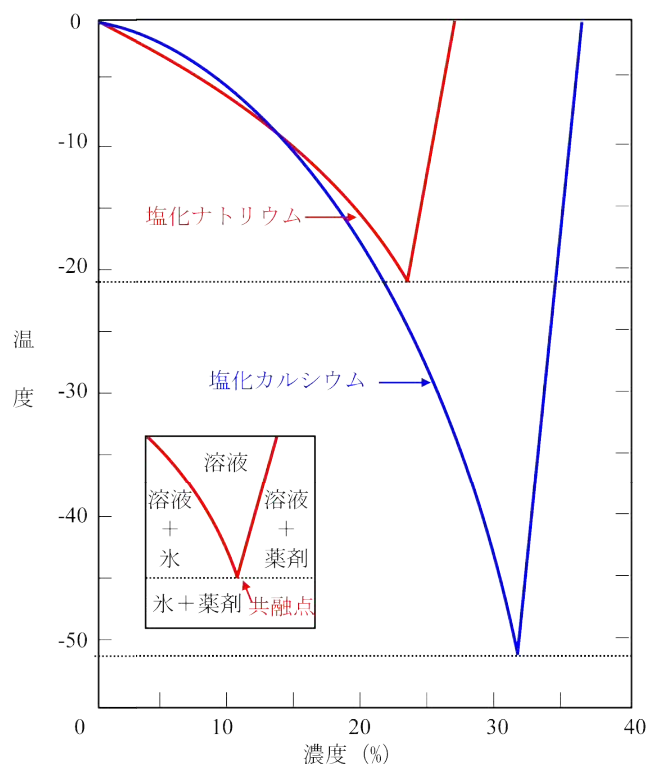


図-2.1 塩化ナトリウムと塩化カルシウムの凝固点曲線と溶解度曲線³⁾

表-2.2 塩化ナトリウムと塩化カルシウムの諸性質比較³⁾

項目	塩化ナトリウム	塩化カルシウム
共融点	約-21℃	約-51℃
溶解度	低い	高い
吸湿性	無い	有り
溶解熱	吸熱反応	発熱反応
残留溶液の状態変化	溶液状態で残る	再結晶する

2.2.4 凍結防止剤の成分

高速道路で特によく使用される凍結防止剤は、塩化ナトリウムを主成分とする国内塩もしくは副生塩などが使用される。表-2.3に凍結防止剤のFP法による推定定量分析結果を示す。凍結防止剤は、NaClが95～99%程度のものが使用される。

表-2.3 凍結防止剤の推定定量分析結果（単位：wt%）

成分	国産塩	副生塩
Na	35.700	36.100
Mg	0.390	0.000
Al	0.020	0.057
S	0.017	0.042
Cl	63.300	62.800
K	0.270	0.910
Ca	0.200	0.000
Br	0.092	0.090
SO ₄	0.000	0.000

2.2.5 凍結防止剤の散布作業

凍結防止剤の散布作業は、主に粉碎塩を湿塩散布機（図-2.2、写真-2.3）により、風などによる飛散を減らすため塩水と混合して湿らせた状態で路面に散布される。

凍結防止剤は、1回あたり路面1m²当たり20gが散布される。山間部の降雪地域で冬期1シーズンの散布量は、道路延長1km当たり30～50t程度の散布量となる。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/m² の量で路面に散布する。塩化ナトリウムの凍結防止剤の荷姿を写真-2.4 に示す。

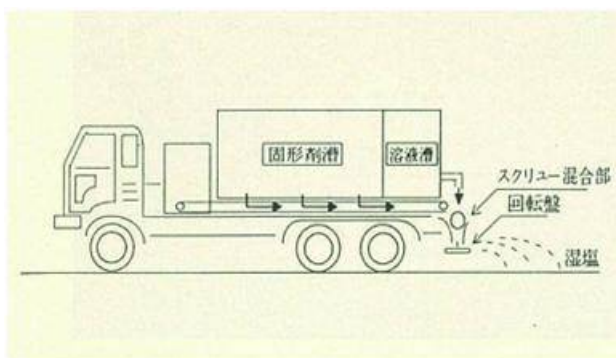


図-2.2 湿塩散布の模式図¹⁾



写真-2.3 凍結防止剤の散布状況写真¹⁾



写真-2.4 凍結防止剤（トンパック）の写真

2.2.6 調査地の凍結防止剤の散布量

研究対象地域（以下、調査地という。）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-2.3 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。調査地は、供用して 30 年以上に渡って雪氷対策を行っていることから、累計で 1,500t/km 以上が散布されていることとなる。

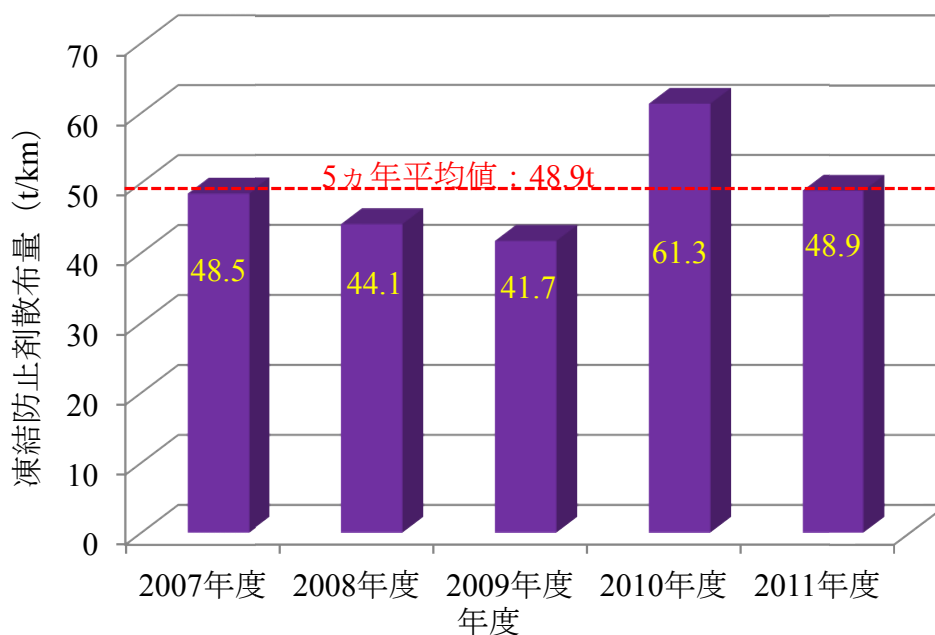


図-2.3 調査地の凍結防止剤散布量 (2007～2011 年度)

2.2.7 凍結防止剤の環境への影響

通常、路面へ散布された凍結防止剤は、水に溶けやすく、路面へ散布後、降雨や降雪融解水等と混ざって、用排水路を通じて近傍の河川へ流出し、河川水と混ざって低濃度に希釈され、海へ流下していく。凍結防止剤は、貯蔵運搬や散布が容易であること、価格が安く安定していること、自然環境への副次的な影響が少ないことより、高速道路では、主に塩化ナトリウムが用いられている。

凍結防止剤による環境への影響を取り扱った研究では、木村ら⁴⁾が2007年に北海道、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、融雪期に電気伝導度で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が報告されている。また、凍結防止剤の飛散についての影響を調査した結果、飛散は1～5mの範囲で見られ、飛散量は散布量の数%であった。全国42地点で実施した沿道の土壌調査では、冬期に凍結防止剤の成分物質濃度が道路近傍で上昇する傾向が見られたものの、一時的な増加であり、食物(農

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

作物)の成長を阻害するレベルに達することはほとんど無い結果であった。

また、長野県の技術情報⁵⁾によれば、凍結防止剤による植物の被害として、道路に隣接した樹木の塩化カルシウムによる被害については、1944年アメリカで最初に報告された。内容は、街路樹の異常な葉焼け、小枝の枯れや枯死であったが、このときの塩化カルシウムは凍結防止剤として散布されたのではなく、夏に無舗装道路のほこり緩和剤として散布されたものであった。そして1959年に凍結防止剤(塩化ナトリウムと塩化カルシウム)による街路樹の被害が初めて発表された。その後、ヨーロッパをはじめ各地で凍結防止剤による樹木の衰退が報告されはじめた。植物枯損のメカニズムとしては、植物体内中に過剰の塩分が供給されることによる細胞の壊死などが原因で、供給原因としては、①土壌への過剰な塩分供給により植物の根から吸収される場合、②道路を通過する自動車によってまきあげられた塩分を多量に含んだ霧が枝葉へ付着、吸収される場合が考えられる。この後者の例は高速道路近辺でよく現れ、風向きにもより、被害は車道から100m程の範囲まではっきり現れたという例もある。凍結防止剤による被害の報告は、欧米諸国では50年ほど前からなされていたが、日本では最近になってからである。これは自動車社会の発達の違いによるものと思われるが、国内でも最近、特にスパイクタイヤの使用が禁止されてから、凍結防止剤によると思われる植物の減退の例が多くなってきている。実際に長野県内でも道路端の樹木が所々枯れているのがみられ、この原因を自動車から排出される汚染物質によるものと、凍結防止剤によるものに区別するのは難しい。樹木の枯損が路面側しかも地上から1~2mの道路からの水しぶきをうけそうな部分、さらにガードレール等によって道路側からの水しぶきが遮られている部分の枯損が余り進んでいない時には、凍結防止剤による枯損と考えられている。

つぎに、高速道路については、吉江ら⁶⁾が調査を行っているが、JH(旧日本道路公団)に寄せられた凍結防止剤による苦情で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ことから、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、農地土壌へ与える影響については、冬期の2~3月に植物の育成阻害が生じる400mg/kg(土壌の乾燥重量kg当たりの塩化物イオン量mg)以下を超えるが4月以降の梅雨などの降雨により徐々に減少し土壌に与える影響は小さいものと考えられるが、通常より多く散布した場所や降水量が少ない時期には、土壌塩分が希釈されない可能性もあり看過できないものとして注意する必要があると示している。このため、標準散布量を1994年から欧州で一般的に行われている湿塩散布方式により一回の散布量を30g/m²から20g/m²に減らし飛散の抑制(20

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

～30%減)を図ってきている。また、高機能舗装(排水性舗装)の導入により路面上の水分を減らしミスト状になる水しぶきの飛散を抑制するなどの対策が講じられている。

一方、海外での凍結防止剤による環境被害については、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 の2倍を超える濃度 505mg/L が検出され、その対策が図られている⁷⁾。

また、米国レイク・タホ地区においては、凍結防止剤による環境被害が生じ、道路沿線の何千本もの樹木が枯れて切り倒されている。この樹木の枯れた原因は長年蓄積された塩の付着や塩水の吸収が原因といわれている⁸⁾。

以上に示すように、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、道路施設の老朽化、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。また、道路沿線の動植物等への影響についても海外と比べてあまり大きな被害が生じるに至ってはいないが、影響を及ぼす可能性のあることが懸念される。

このような現状のなか国内においては、平成22年の冬から平成23年の春にかけて、上水道が完備されていないため、飲料水や生活用水として井戸水を使用している中山間地の高速道路周辺に位置する本調査地の住民7世帯から「井戸水が塩辛い」あるいは「井戸用ポンプや電気温水器等が錆等により短期間で故障する」等の苦情や問い合わせが寄せられた。これは、高速道路の路面へ散布された凍結防止剤が、水路から排出されず、土壌へ浸透し地下水を通じて道路周辺の井戸に入り込み、生活用水へ悪影響を及ぼしている可能性が考えられた。

このことより、本研究は、調査地において、高速道路で散布された凍結防止剤と生活用水として使用される井戸水などの水質との因果関係を調査整理して、その原因を明らかにすることを目的として、現状の状況を把握したうえで、水質環境や土壌環境などの調査研究を行うこととした。

2.3 調査地の地形地質・土地利用状況

問題の発生した調査地（図-2.4）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、河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。

高速道路の供用開始は、1978 年で供用 30 年以上となる。本調査地域の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-2.5）。高速道路は、斜面の中腹を切土と盛土構造（橋梁 1 箇所：延長 0.1km、遮音壁 1 箇所：高さ 3m 延長 0.1km）で通過し、家屋はほぼ中腹斜面下方に位置している。

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。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、その周辺には、畑や栗の木等の雑種地が配置され、河川周辺には、圃場整備された水田が営まれている。山林は、一部スギ・ヒノキ等の植林が育成されているが、ほとんどは、クリ・クヌギ等広葉樹の雑木が密生している。

当地区の気象は、過去 5 年間の年平均気温の平均値が 13.0℃、年積算降水量の平均値が 1,654mm、日平均降水量が 4.5mm である⁹⁾。

図-2.5 に地形地質概要図¹⁰⁾を示す。本調査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（Ad：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（Gr：粗粒黒雲母花崗岩）が分布し、山裾にはそれらを新生代第四紀の主に砂礫層から形成される崖錐堆積物（dt）、河川沿いには段丘堆積物（tr）や沖積層（al）が被覆する。岩塩を含有することのある堆積岩類の分布は認められない地質となっている。高速道路は、この崖錐堆積物と基盤岩の境界付近を通過している。



図-2.4 調査地の地形概念図



写真-2.5 調査地域の現況

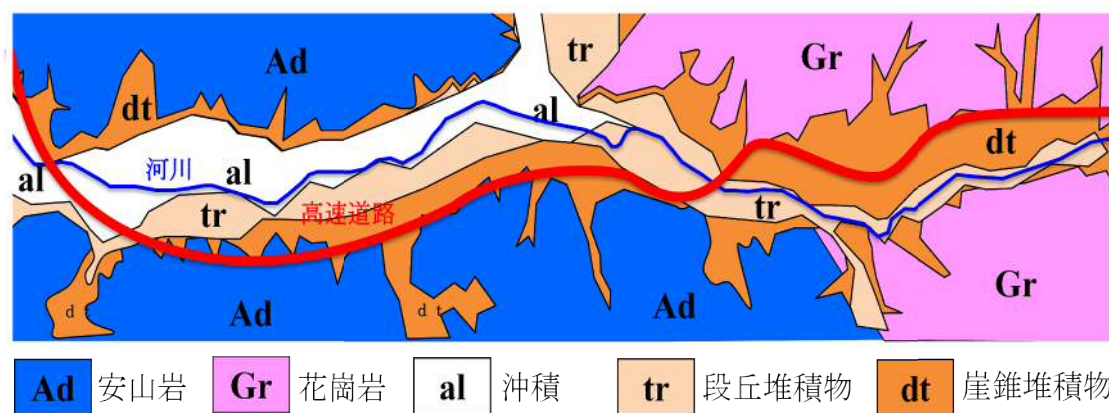


図-2.5 地質概略平面図¹⁰⁾を加筆修正

2.4 調査地の影響把握調査

2.4.1 はじめに

本調査地では、平成22年の冬から平成23年の春にかけて、上水道が完備されていないため飲料水や生活用水として井戸水を使用している中山間地の高速道路周辺に位置する住民7世帯から「井戸水が塩辛い」あるいは「井戸用ポンプや電気温水器等が錆等により短期間で故障する」等の苦情や問い合わせが寄せられ、高速道路の路面へ散布された凍結防止剤が、水路から排出されず、土壌へ浸透し地下水を通じて道路周辺の井戸に入り込み、生活用水へ悪影響を及ぼしている可能性が考えられた。

このため、冬季の高速道路に散布された凍結防止剤と高速道路周辺の生活用地下水で検出された塩化物イオンとの因果関係を究明することを目的としアンケート調査や現地ヒアリング調査を実施することとした。

調査地で申し出があった7世帯の家屋以外にも影響があると考えられるため、上水道が完備されていない調査地の高速道路周辺167世帯に対して、井戸水に関するアンケート調査、ヒアリング調査、および井戸の水質調査を実施し、それらの調査結果に基づき、高速道路の凍結防止剤散布による地下水環境への関与や影響範囲及びその度合いを定量的に把握することとした。

調査地の生活水は、上水道が未整備であることより井戸水・沢水・湧水等を主水源として使用している。井戸は、高速道路の建設時に遮断された沢水・湧水の代替として、手掘りの井戸（深さ2～20m）が設置され、1995年頃から近年にかけて、機械ボーリングによる井戸（深さ10～267m）も設置されてきている。

2.4.2 アンケート調査の方法

アンケート調査は、凍結防止剤の影響度合いを把握するため、高速道路との位置関係から、**図-2.6**、**図-2.7** および**表-2.4** に示すようにA、B、CおよびDの4つの地区に分類して行った。なお、7世帯の苦情が寄せられた地区は、高速道路と河川の間に位置するB地区に該当する。

アンケート調査の質問内容を**表-2.5** に示す。質問内容は、井戸の使用状況、飲料水に関する質問、モーターポンプに関する質問、温水器ヒーターに関する質問、調査協力

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

に関する質問等の5項目について行った。アンケート調査実施にあたっては、市販の住宅地図を基に調査地の市役所や区長等からの聞き取りにより、住所や氏名を整理確認するとともに、関係住民へのアンケート調査に関する事前説明会を行った上、調査用紙と返信用封筒を同封した封書を郵送する方法で、2011年8～9月に調査を実施した。

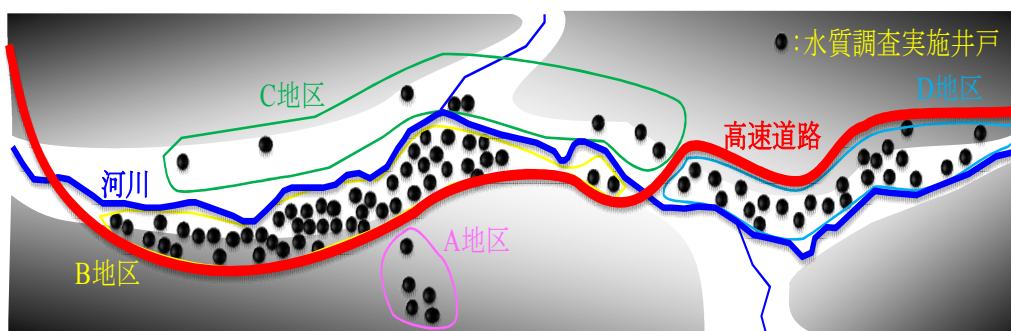


図-2.6 調査地の地形と高速道路

表-2.4 調査地区の区分と世帯数

地区名	区分	世帯数
A 地区	高速道路より標高の高い山側に位置する世帯	8
B 地区	高速道路より標高が低い谷側で、河川との間に位置する世帯 (安山岩地帯)	53
C 地区	高速道路から見て対岸側に位置する世帯	75
D 地区	高速道路より標高の低い谷側で、河川との間に位置する世帯 (花崗岩地帯)	31

表-2.5 アンケート調査項目

項目	アンケート調査の質問内容
1	井戸の使用状況 ◆井戸深さと直径 ◆掘削時期 ◆掘削方法 ◆井戸水の用途
2	飲料水に関する質問 ◆塩辛いと感じるか。(頻度・時期・現在の利用状況)
3	モーターポンプに関する質問 ◆錆による故障状況。(頻度・時期・現在の利用状況)
4	温水器に関する質問 ◆井戸水使用可否 ◆温水器の種類 ◆錆による故障状況。(設置時期・交換時期・交換回数)
5	調査協力に対する質問・その他意見 ◆調査協力の可否(調査希望の有無) ◆その他

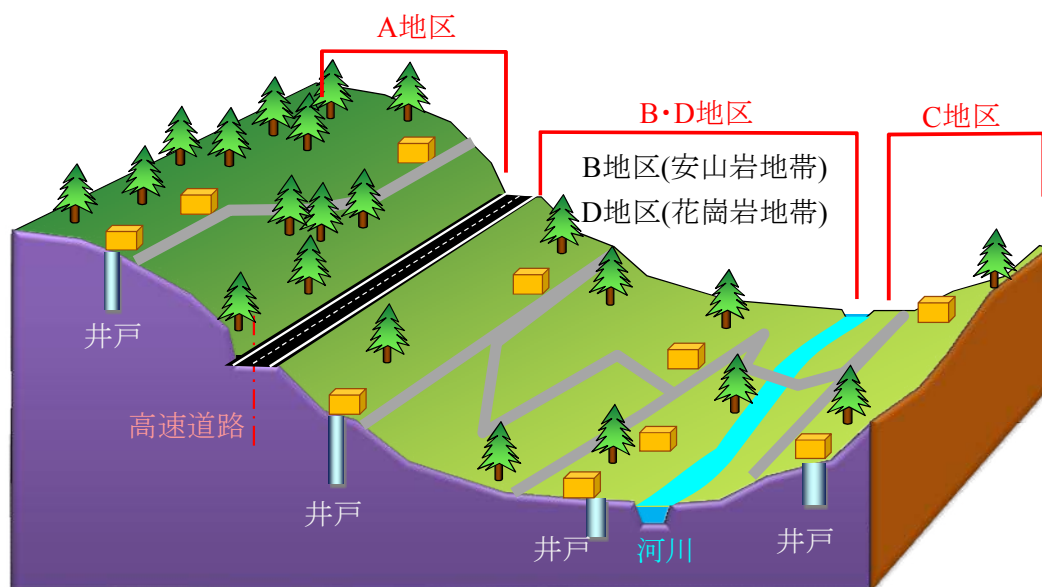


図-2.7 アンケート調査地域区分図

2.4.3 アンケート調査結果

2.4.3.1 アンケート回収率

アンケート回収率（図-2.8）は、全体で102世帯/167世帯（61%）であった。回収率の高い地区は、高速道路より標高の低い谷側で河川との間に位置するB地区（79%）とD地区（71%）であった。高速道路から見て対岸側に位置するC地区の回収率は44%と比較的低い値であった。

2.4.3.2 井戸の使用状況【項目1】

井戸の深さ、掘削方法等の井戸構造（図-2.9及び表-2.6）は、回答のあった80世帯のうち51世帯（64%）が機械ボーリングによる井戸で、その平均深さは72.8mであった。手掘り井戸は29世帯（36%）で、その平均深さは10.7mであった。機械ボーリング井戸は、高速道路より標高の高い山側に位置するA地区で平均深さ158mと深く、地下水位が深層に位置しているものと推測される。他のB、C、D地区の平均深さ55～86mであった。

手掘り井戸は、地質的に崖錐堆積物のあるB地区が46%、D地区が40%と比較的多い割合にあり、手掘り井戸の深さの全体平均は10.7mであり、A地区、B地区の平均深さは、それぞれ12.0m、13.5mであり、全体平均より深い。これにより、崖錐層が厚く、

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

地下水位が深い位置にあることが伺える。C地区の手掘り井戸は、平均深さが6.7mと浅く、河川周辺の沖積層（深さ7~10m程度）にある地下水（河川伏流水）を利用しているものと推測される。D地区の手掘り井戸の平均深さは、5.7mと最も浅く、花崗岩の薄い風化帯や崖錐堆積物の層より集水しているものと推測される。

井戸水の利用状況は、雑用水や農業用水としても使用されているが、そのほとんど89世帯/92世帯（97%）が飲料水として使用している。他の3世帯にあっては、市販の飲料水等を使用している。

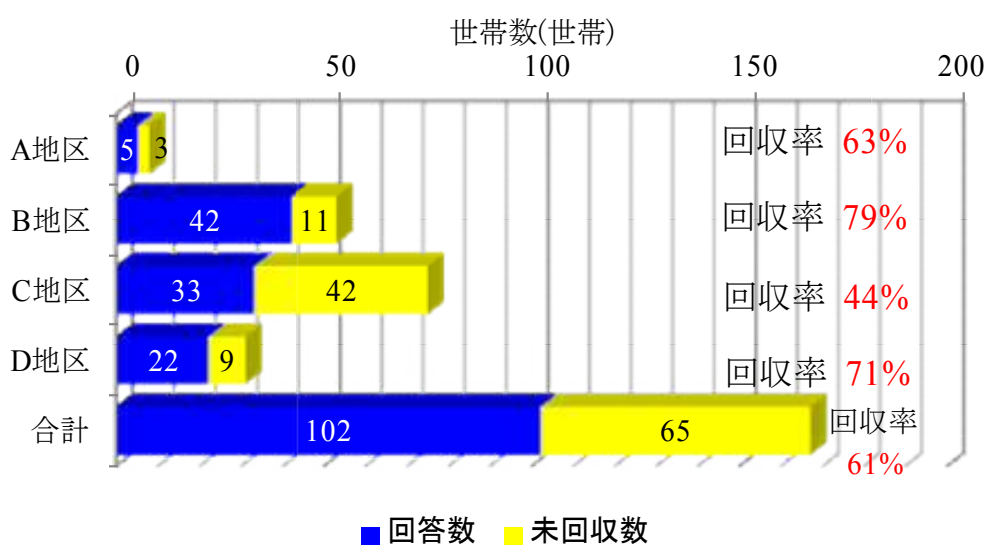


図-2.8 地区別のアンケート回収状況

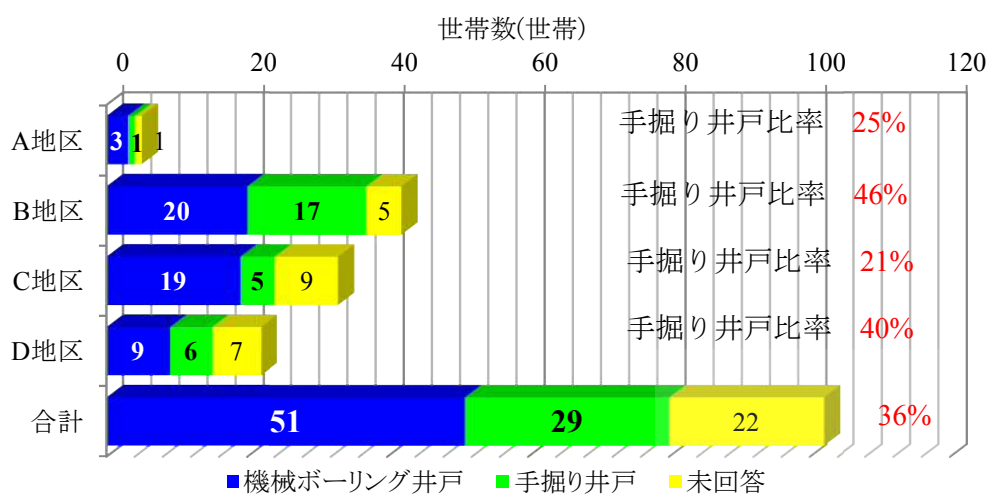


図-2.9 地区別の井戸構造

表-2.6 地区別の井戸構造諸元

地区名	機械ボーリング井戸		手掘り井戸		計
	井戸本数	平均深さ (m)	井戸本数	平均深さ (m)	井戸本数
A 地区	3	158.0	1	12.0	4
B 地区	20	55.3	17	13.5	37
C 地区	19	71.6	5	6.7	24
D 地区	9	85.8	6	5.7	15
合計	51	72.8	29	10.7	80

2.4.3.3 飲料水に関する質問【項目2】

飲料水の味覚(図-2.10)については、回答のあった102世帯に対して13世帯(13%)が「塩辛いと感じたことがある」という回答であった。この13世帯は、高速道路より標高の低い谷側で河川との間に位置するB、D地区であった。また、「塩辛く感じる時」は、毎日または、時々が12世帯(92%)と多く、設問にある「冬場のみ」との回答は皆無であった。

2.4.3.4 モーターポンプに関する質問【項目3】

井戸に使用するモーターポンプの錆による故障交換(図-2.11)については、回答のあった81世帯に対して、33世帯(41%)が交換したことがあるとの回答であった。

交換したことのある井戸のほとんどは、高速道路より標高の低い谷側で河川との間に位置するB地区(23世帯)とD地区(6世帯)に集中していた。また、A地区(1世帯)とC地区(3世帯)においても交換歴があり、反面高速道路に近いB、D地区には交換したことの無い井戸が27世帯であった。

なお、このモーターポンプ交換の回答データは、モーターポンプの設置や交換時期、交換回数などの記入がほとんど無かったことより、「交換あり」のみの回答に対して集計を行ったもので、耐用年数を超えた老朽化的な交換なども含まれており、ヒアリング調査で補完することとした。

2.4.3.5 温水器ヒーターに関する質問【項目4】

温水器に使用する水は、回答のあった102世帯に対して74世帯(73%)が、井戸水を使用しているとの回答であった。井戸水を使用した温水器74世帯の種別(図-2.12)

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

は、電気温水器が43世帯（58%）、ガスを使用した給湯器が10世帯（14%）、自然冷媒ヒートポンプ給湯機が9世帯（12%）、灯油等による温水器が7世帯（9%）、太陽熱ヒーターが3世帯（4%）であった。調査地の温水器種別は、電気温水器が半数以上を占めていた。

井戸水を使用する温水器の錆による故障交換（図-2.13）については、井戸水を使用する温水器74世帯に対して、26世帯（35%）が交換したことがあるとの回答であった。なお、井戸水を使用していない世帯での温水器の故障や部品交換は皆無であった。

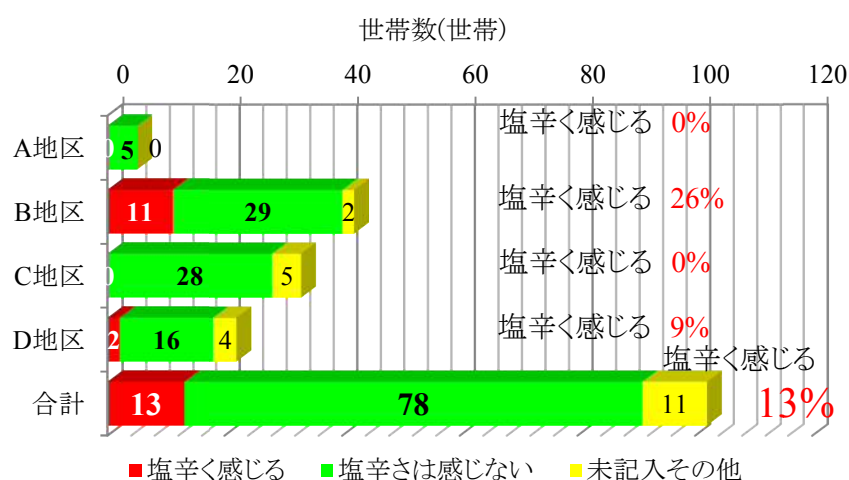


図-2.10 地区別の井戸水の味覚

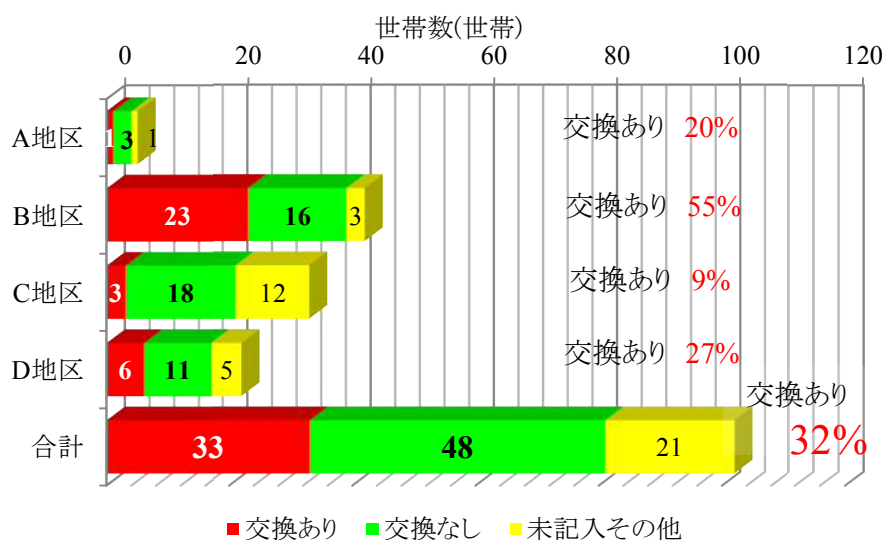


図-2.11 地区別のモーターポンプの錆による故障交換

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

交換したことのある井戸のほとんどは、高速道路より標高の低い谷側で河川との間に位置する B 地区（19 世帯）に集中している。一方、高速道路より標高の高い山側に位置する A 地区（1 世帯）と高速道路から見て対岸側に位置する C 地区（3 世帯）にあっても交換歴があり、反面 B、D 地区には交換したことの無い井戸が 26 世帯あった。

井戸水を使用して錆による故障交換した温水器の種別（図-2.14）は、電気温水器が 20 世帯（77%）、ガスを使用した給湯器が 3 世帯（11%）、自然冷媒ヒートポンプ給湯機が 2 世帯（8%）、灯油等による温水器が 1 世帯（4%）と、電気温水器の錆による故障交換が大半を占めている。機種別の井戸水を使用した錆による故障交換率は、電気温水器が 20/43 世帯（47%）、ガスを使用した温水器が 3/10 世帯（30%）、自然冷媒ヒートポンプ給湯機が 2/9 世帯（22%）、灯油等による温水器が 1/7 世帯（14%）、太陽熱ヒーターが 0/3 世帯（0%）で、電気温水器の約半分は、井戸水を使用することにより故障交換が発生していた。

なお、この温水器の錆による故障交換の回答データは、温水器の設置や交換時期、交換回数などの記入がほとんど無かったことより、「交換あり」のみの回答に対して集計を行ったもので、モーターポンプ交換の場合と同じように耐用年数を超えた老朽化的な交換なども含まれており、ヒアリング調査で補完することとした。

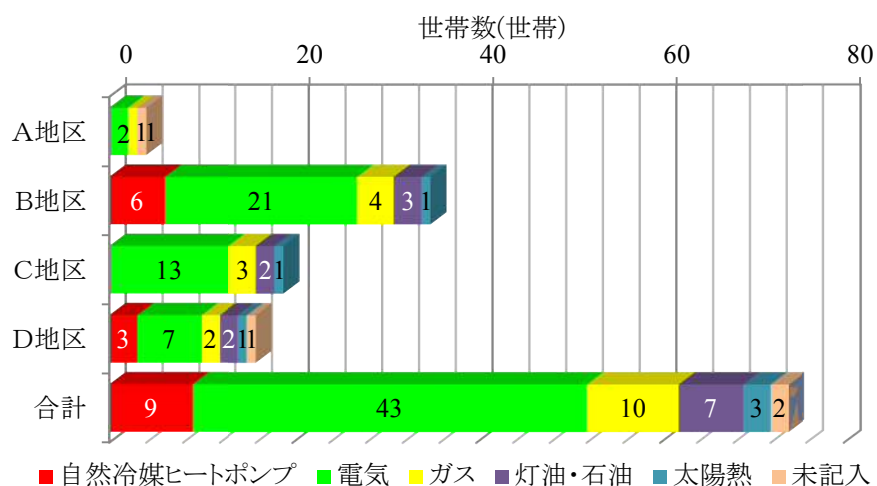


図-2.12 地区別の井戸水利用の温水器種別

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

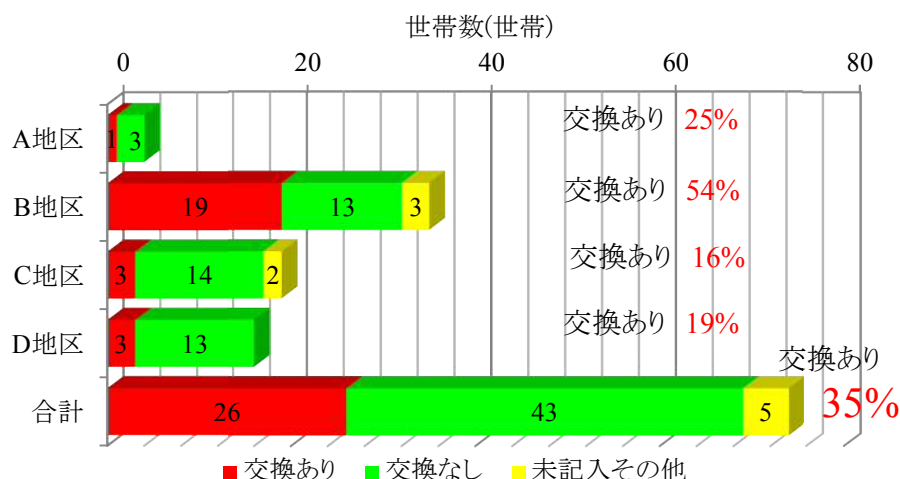


図-2.13 地区別の温水器の錆による故障交換

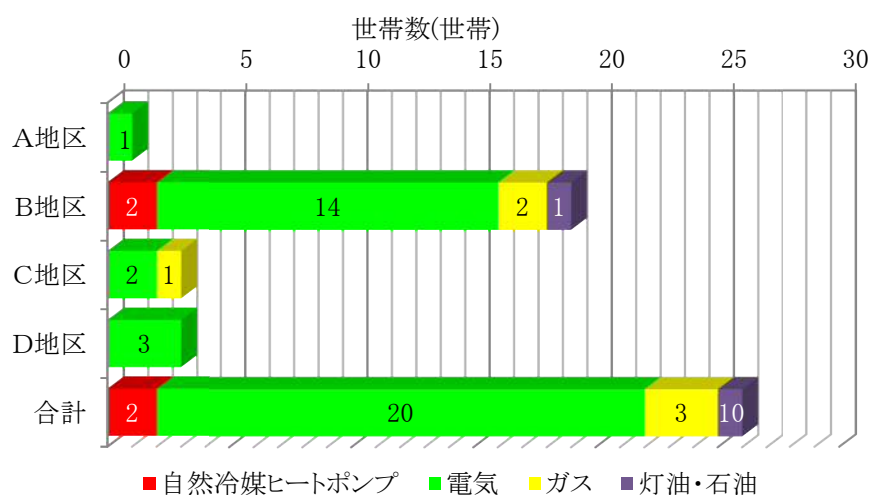


図-2.14 地区別の交換故障した温水器種別

2.4.3.6 調査協力について【項目5】

今後の調査協力の可否に対しては、回答のあった102世帯のうち93世帯(91%)で調査への協力が可能であるとの回答であった。残りの9世帯(9%)は未記入であり、調査への協力をしないと回答した世帯は皆無であった。また、調査協力にあたっては、「凍結防止剤の影響を明らかにして欲しい」や「井戸の水質を確認して欲しい」等の意見もあり、調査協力に対する調査地の凍結防止剤散布による影響への関心度が高いことが感じられる。

2.4.3.7 全体の不具合

「飲料水が塩辛い（13世帯）」や「温水器（33世帯）やポンプ（31世帯）の機器類が短期間で錆びる」という不具合発生数（図-2.15）は、アンケート回収世帯102世帯に対して49世帯（48%）となり、約半数の世帯でいずれかの不具合が発生していることが分かった。

地区別に見ると、不具合の発生率の高い地区は、高速道路より標高の低い谷側で河川の間位置するB地区（79%）であった。高速道路より標高の高い山側に位置するA地区（20%）や高速道路から見て対岸側に位置するC地区（15%）の不具合の発生率は低い値であった。B地区では、苦情の寄せられていた7世帯に加え、他の世帯でも同様の不具合事象が多くみられ、D地区でも、B地区と同様に錆や塩辛いといった事象が多くみられることがわかった。

不具合を感じる49世帯の内訳は、「飲料水が塩辛い」と感じている世帯は、13世帯（13%）で、「ポンプ機器が錆びる」は、33世帯（32%）であり、「温水器機器が錆びる」等は、31世帯（30%）で、「塩辛く」かつ「ポンプと温水器ともに錆びる」すべての影響を受けている世帯が5世帯（5%）あり、「塩辛く」、かつ「ポンプか温水器いずれかが錆びる」とした世帯は6世帯（6%）であった。

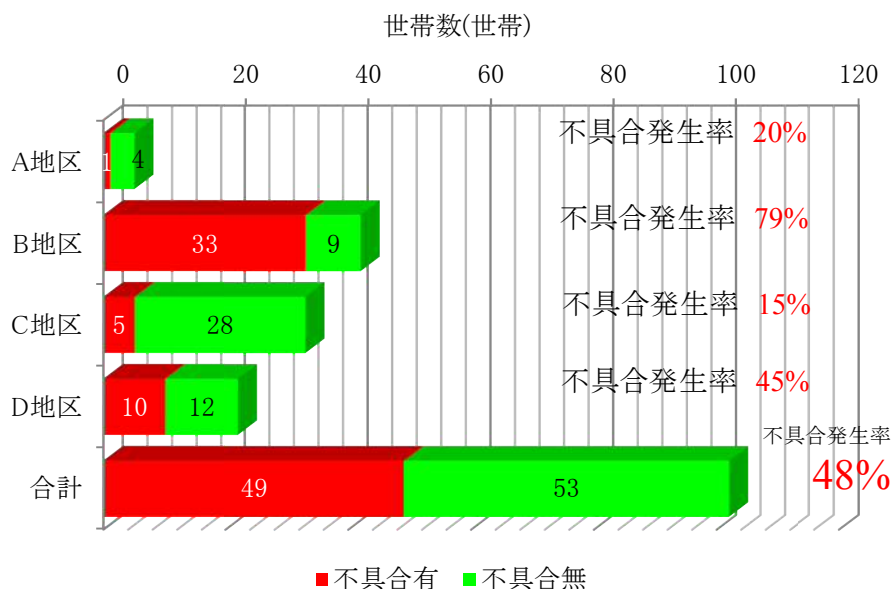



図-2.15 地区別の不具合発生数

2.4.4 ヒアリング調査の方法

ヒアリング調査は、アンケート調査結果をもとに、飲料水が塩辛い、錆等で故障する等の不具合が発生している世帯とその周辺の井戸（B, D 地区）及び A, C 地区での井戸構造や高速道路との離隔距離等を考慮して抽出し、地元説明会を経て調査希望のある世帯も含めた 87 井戸（83 世帯、に示す水質調査井戸）について、2011 年 9 ～ 10 月に実施した。


調査内容は、アンケート調査を補完する目的で、井戸構造・井戸水の利用状況（飲料水、灌漑用水、生活用水等）・不具合の具体的状況（機器類の製造年月日、機種メーカー、錆等不具合の発生状況、本体または部品交換頻度等）を各世帯から直接聞き取る方法により行った。

また、ポンプや温水器の不具合の度合いは、メーカーへの聞き取りにより耐用年数を 10 年と設定し、本ヒアリング調査では 10 年以内に故障や部品交換等が生じた場合を不具合と判定した。


2.4.5 ヒアリング調査結果

ヒアリング調査により、モーターポンプ、温水器等の不具合発生の状況等を確認した。

2.4.5.1 ポンプの不具合

井戸用ポンプの不具合は、ステンレス製のスクリー部への砂などの流入による磨耗（）によるモーターへの過剰負荷による故障、金属部品の摩耗や腐食による揚水能力低下等の不具合が主な故障原因であった。

2.4.5.2 温水器の不具合

電気温水器の不具合は、電熱棒の腐食・漏電による交換（）、温水器の給排水配管からの水漏れによる配管の交換等が主な不具合であった。

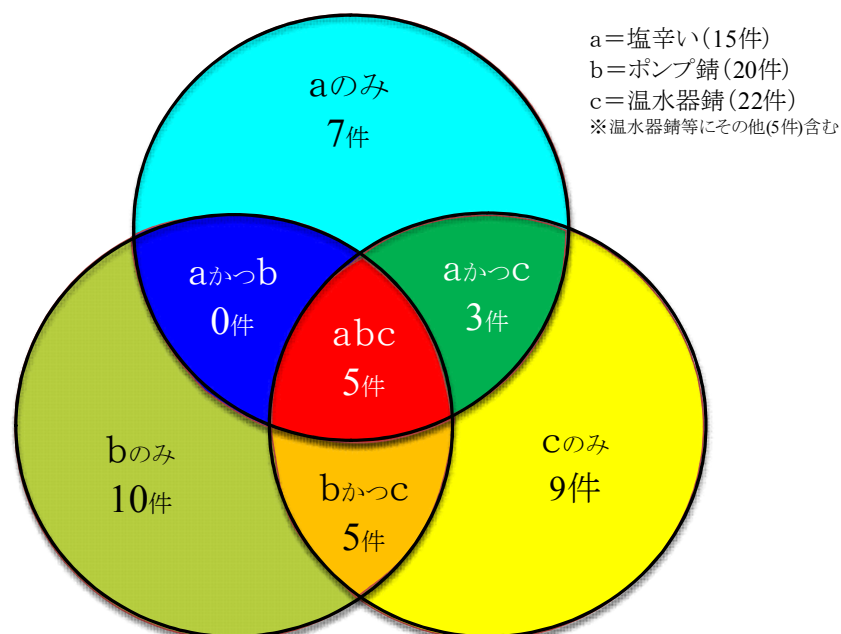
自然冷媒ヒートポンプ給湯機・ガス・石油温水器の不具合は、配管の漏水や漏水による電気機器類の腐食が主な不具合であった。

2.4.5.3 その他の不具合

その他の不具合は、給水用の金属配管内の腐食、水道の蛇口からの緑青水(写真-2.8)、アルミ製のヤカン底部の穴あき、電気湯沸かし器水槽部への白い粉の付着や故障等の不具合であった。

2.4.5.4 全体の不具合

ヒアリング調査結果、不具合を感じる世帯の内訳は、図-2.16及び表-2.7に示す通りで、「塩辛いと感じる」世帯が15世帯(アンケート調査時より2世帯増加)、ポンプや温水器の不具合(腐食等により設置後10年以内で故障や部品交換等を行った場合は、井戸ポンプで20世帯(同13世帯減少)、温水器で22世帯(同4世帯減少)、その他5世帯(同10世帯減少)であった。また、地区別の不具合は、高速道路より標高の高い山側に位置するA地区が0世帯(アンケート調査より1世帯の減少)、高速道から見て対岸側に位置するC地区が1世帯(同4世帯の減少)、高速道路より標高の低い谷側で河川の上に位置するB地区が29世帯(同4世帯の減少)、D地区が9世帯(同1世帯の減)、全体で39世帯(同10世帯減少)であった。



全体=102件 不具合あり=39件(38%) 不具合なし=63件(62%)

図-2.16 不具合発生事象別の発生世帯数

表-2.7 ヒアリング調査による地区別不具合

地区名	ヒアリング調査による不具合（世帯数） （ ）内は、アンケート調査時							
	飲料水		ポンプ		温水器		その他	
A 地区	0	(0)	0	(1)	0	(1)	0	(0)
B 地区	13	(11)	13	(23)	17	(19)	4	(13)
C 地区	0	(0)	1	(3)	1	(3)	1	(1)
D 地区	2	(2)	6	(6)	4	(3)	0	(1)
計	15	(13)	20	(33)	22	(26)	5	(15)



写真-2.6 モーターポンプの腐食



写真-2.7 電気温水器の電熱棒腐食



写真-2.8 水道蛇口の緑青

表-2.8 地区別の塩化物イオン濃度

地区名	井戸数	雪氷期前 (mg/L)	雪氷期 (mg/L)	最大値 (mg/L)
A 地区	5	7.6	8.3	16.0
B 地区	51	129.0	167.1	670.0
C 地区	8	9.1	9.5	20.0
D 地区	23	75.7	108.6	620.0

2.4.6 水質調査

水質調査は、ヒアリング調査をもとに地元への説明会を経て、調査への協力を得たうえで、ヒアリング調査を実施した世帯（87井戸）について行った。水質調査の詳細については、第3章に取りまとめ記述する。

本章では、アンケートやヒアリング調査結果と井戸水等の塩化物イオン濃度の関係について整理する。

2.4.7 水質調査結果

表-2.8に、井戸水の水質調査結果（塩化物イオン濃度の各地区の平均値）を示す。

各地区とも雪氷期前（10～11月）より雪氷期（12～3月）が高い値であった。B、D地区の雪氷期の平均濃度は100 mg/Lを上回る値で、最大濃度がそれぞれ670 mg/L、620 mg/Lであった。一方、A、C地区の雪氷期の平均濃度はそれぞれ8.3 mg/L、9.5 mg/Lと

比較的低い値で、最大濃度もそれぞれ 16.0 mg/L, 20.0 mg/L であった。

2.5 考察

考察は、以下にアンケート調査、ヒアリング調査及び水質調査（塩化物イオン濃度）の結果に基づき行う。

2.5.1 不具合と塩化物イオン濃度の関係

図-2.17 は、塩化物イオン濃度（各井戸水の測定期間最大値（mg/L））と高速道路の路肩端部から井戸までの離隔距離（m）の関係を表し、ヒアリング調査による不具合の有無との関係も示したものである。横軸の高速道路からの離隔距離におけるマイナスは高速道路より標高の高い山側に位置する A 地区を示し、プラスは、高速道路より標高の低い谷側で河川との間に位置する B, D 地区、高速道路から見て対岸側に位置する C 地区を示したものである。凡例は、「水が塩辛い」「ポンプや温水器が 10 年以内で故障する」等いずれかの不具合の有るもの（赤色●印）、設置後 10 年以上故障が無いものは不具合無（緑色●印）、設置後 10 年未満で不具合の無いものは判断不可（黄色▲印）とした。

不具合のある世帯は、高速道路より標高の低い谷側の方向に路肩端部から約 300m の範囲で発生し、その塩化物イオン濃度は 20mg/L 以上の範囲で発生していた。また、水道法で定められた塩化物イオン濃度の飲料水基準¹²⁾である 200 mg/L を超える範囲は、高速道路の路肩端から約 150m の範囲であった。塩化物イオン濃度の分布は、高速道路より標高の低い谷側で高速道路に近いほど高い塩化物イオン濃度が検出されたことにより、調査地の不具合の発生は、高速道路で散布した凍結防止剤による影響を無視できないものと考えられる。また、高速道路から見て対岸側に位置する C 地区の河川近傍では、塩化物イオン濃度が 20mg/L の値で、錆による不具合が生じていた。ポンプや温水器に対する塩化物イオン濃度の水質基準は、メーカーへのヒアリング調査を行った結果、特に定められたものが無いため、冷凍空調機器用水質ガイドライン¹¹⁾の定める高位中温水系循環水の塩化物イオン濃度の基準 30mg/L 以下を参考値として適用した。このことから、C 地区の不具合は、塩化物イオン以外による不具合や水質調査期間外で 30mg/L を超えることも考えられる。

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

なお、高速道路より標高の高い位置にある A 地区や河川対岸の C 地区（河川沿いを除く地区）においては、塩化物イオン濃度が 10mg/L 程度と低い値であった。図-2.18、表-2.9 は調査地以外的高速道路の影響を受けない地下水の水質調査データ（近隣の関係行政で 1995～2010 年に行った井戸調査データをヒアリングにより地質別にとりまとめたもの）の塩化物イオン濃度の平均は花崗岩地帯で 8.8 mg/L，安山岩地帯で 7.8 mg/L で全体平均が 10.1mg/L であった。表-2.8 に示す不具合等の影響のない A 地区 8.3 mg/L や河川近傍以外の C 地区 8.6 mg/L の塩化物イオン濃度と非常に近い値であった。このことから A 地区や河川沿いを除く C 地区では、凍結防止剤による影響はないものと推察できる。

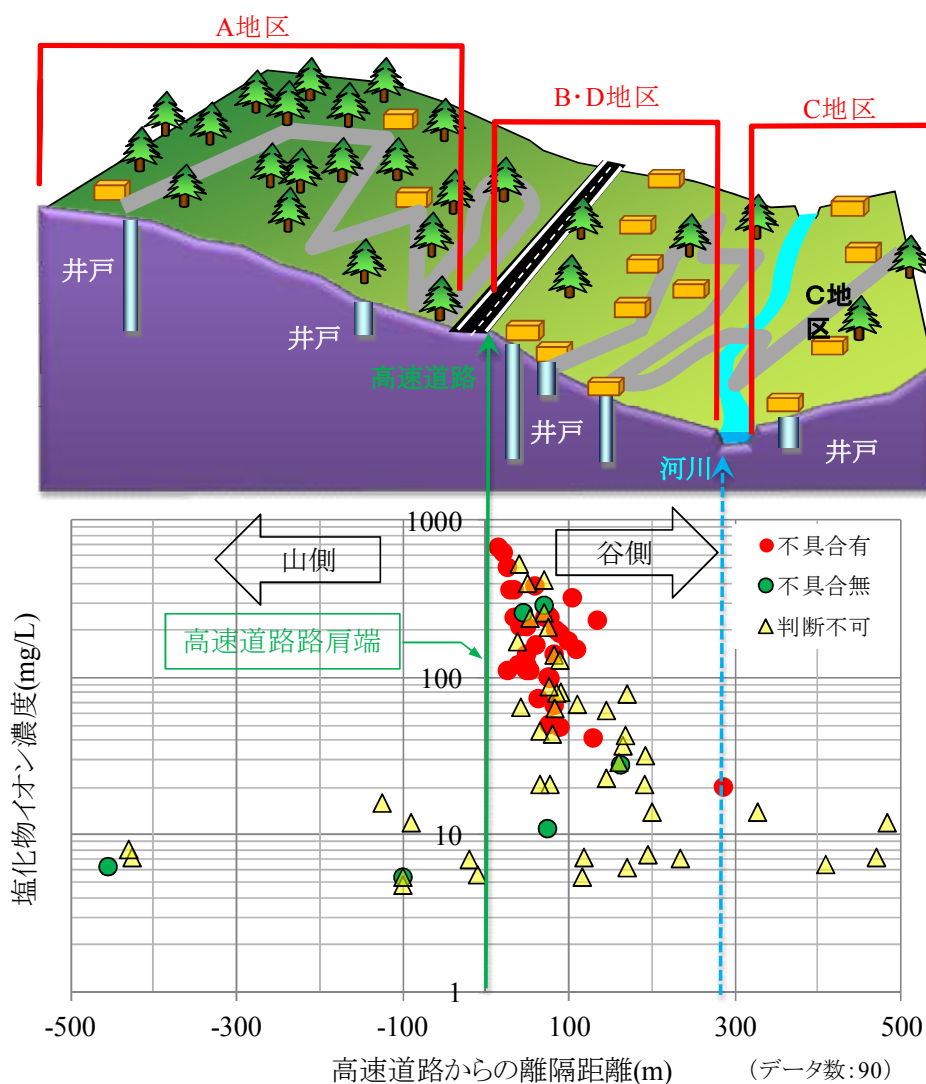


図-2.17 高速道路からの離隔距離と塩化物イオン濃度の関係

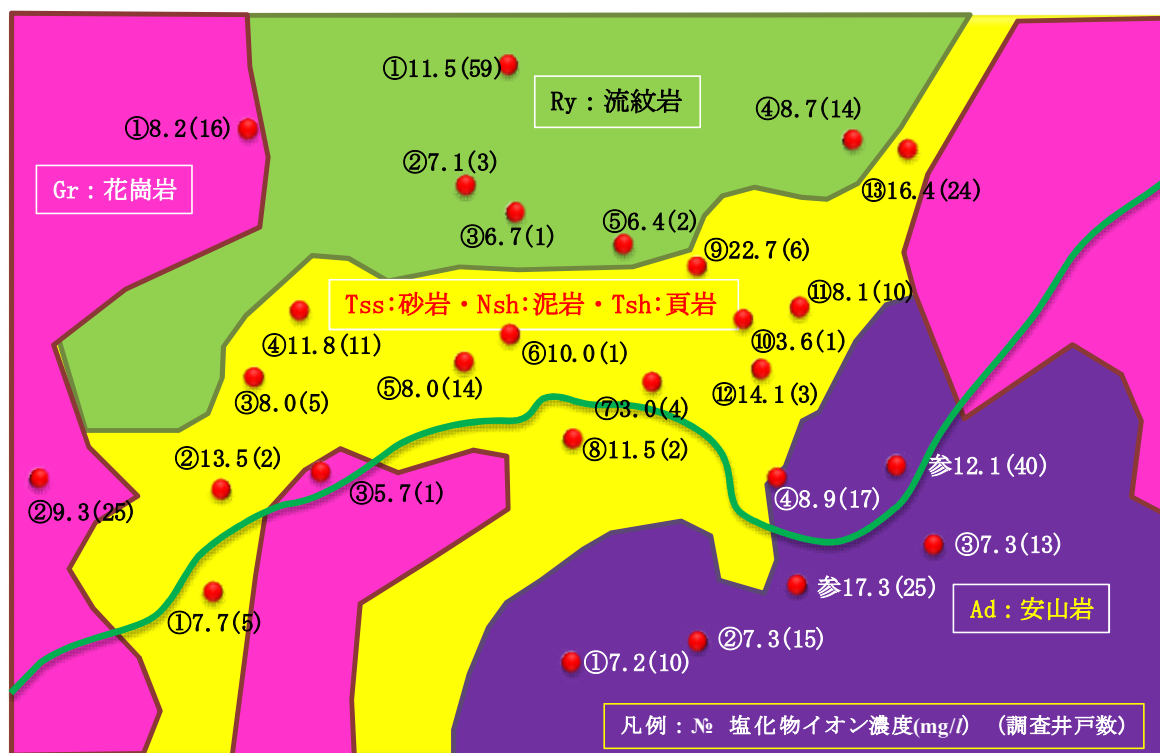


図-2.18 地質と塩化物イオン濃度の分布図

表-2.9 地質別の塩化物イオン濃度

地質	平均塩化物イオン濃度		高速道路からの平均 離隔距離(km)	備考
	データ数(個)	平均値(mg/L)		
花崗岩	42	8.8	3.5	
安山岩	55	7.8	1.5	
砂岩・泥岩	88	11.9	1.7	
流紋岩	79	10.5	3.6	
全データ	264	10.1	2.5	

2.5.2 アンケート回収率

直接各世帯に伺って行ったヒアリング調査や水質調査を通じて、A、B、D地区の方は、近隣に高速道路があることより回収率（63～79%）が示すとおり凍結防止剤への強い影響への懸念や関心があることが伺えた。一方、C地区の世帯の方は、回収率（44%）が示すように「高速道路から遠く離れている」ことから凍結防止剤の影響への懸念や関心があまりなかった。

2.5.3 井戸深度と塩化物イオン濃度の関係

一般的に手掘り井戸は、比較的柔らかい土砂部を掘削して浅い層の地下水を集水する。機械ボーリングは、比較的硬い岩盤を掘削して深い層の地下水を集水している。このことから、浅い井戸より深い井戸の方が表面水の影響を受けにくい。このように調査地の平均塩化物イオン濃度（井戸の最大値）は、機械ボーリング井戸で 93 mg/L、手掘り井戸で 198mg/L と機械ボーリング井戸の方が低い濃度であった。しかし、図-2.19 の井戸深さと塩化物イオン濃度との関係に示すとおり、機械ボーリングで掘った 50~200m の深い井戸でも高い塩化物イオン濃度 670~48mg/L の値であった。この原因は、塩化物イオンを含む地表水が深層部へ浸透したものと考えられ、岩盤部の亀裂や破碎帯等の高い透水性の地層を通じて浸透したもの、あるいは井戸構造が表層水も併せて集水する構造となっている等が考えられるが、調査地では凍結防止剤が岩盤部まで影響しているものと考えられる。

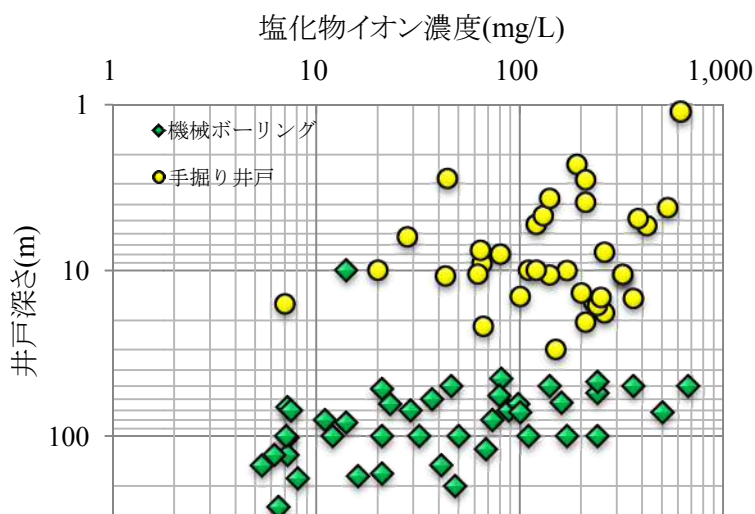


図-2.19 井戸深さと塩化物イオン濃度（最大値）の関係

2.5.4 味覚と腐食の関係

飲料水の味覚が「塩辛いと感じたことがある」世帯は、高速道路より標高の低い谷側で河川の上に位置する B、D 地区で、水質調査結果も塩化物イオン濃度が高い地区であったこと、塩化物イオン濃度の低い高速道路より標高の高い山側に位置する A 地区や、

高速道路から見て対岸側に位置するC地区においては「塩辛いと感じたこと」が無かったことから、高速道路からの凍結防止剤との高い因果関係が考えられる。

また、井戸水は塩辛く感じる時が凍結防止剤を散布する冬場のみではなかった。表-2.8に示す雪氷期前の塩化物イオンの平均濃度がA, C地区(7.6, 9.1 mg/L)と比べてB, D地区(129.0, 75.7 mg/L)が高い値であったことから、高速道路より標高の低い谷側部において、散布された凍結防止剤が地下へ蓄積あるいは滞留している可能性が考えられる。

なお、味覚と腐食との関係については、塩辛いと感じる世帯(15世帯)の塩化物イオン濃度が100~500mg/L、錆等による機器の不具合の有る世帯(32世帯)は20~670mg/Lの値で、「塩辛いが錆等が生じない世帯(7世帯)」「錆等が生じるが塩辛くない世帯(24世帯)」や「飲料水基準200mg/Lを超える濃度でも不具合が無い世帯(8世帯)」が存在していた。

味覚に過敏な人は、塩化物イオン濃度が100mg/Lで塩辛く感じ、過敏でない人は、高濃度(670mg/L)でも塩辛さを感じない結果であった。また、たまに帰省する子供が「塩辛く感じる」と言っている世帯もあった。実際に100~670mg/Lの井戸水を著者自身で飲料したが、何れも塩辛さは感じられなかった。調査地の塩化物イオン濃度における塩辛さは、年齢や生活環境等によって個人差が生じるものと考えられる。

また、腐食に関しては、塩化物イオン濃度のみが腐食等の要因ではなく、pH、電気伝導率、硫酸イオン、酸消費量、全硬度、カルシウム硬度、イオン状シリカ、水温、流速、酸素、湿度等が複雑に関係する¹¹⁾ものであるため、塩化物イオン濃度が高いから腐食するとは限らないと考えられる。

2.6 まとめ

本章では、高速道路における冬期の路面管理の現状と路面の凍結を防止するための凍結防止剤についてまとめると共に、これによる環境への影響を整理した。また、凍結防止剤が中山間地の高速道路周辺の井戸水に影響(塩水化)を与えたと考えられる事象が発生したことにより、調査地周辺家屋への影響度合いを把握するため、地形や地質などを整理しアンケートやヒアリング調査を実施しものを整理した結果を以下に記す。

- 1) 調査地では、凍結防止剤に自然由来の塩化ナトリウムが使用され年間約50t/kmが散布されている。

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

- 2) 調査地の井戸のほとんどは、高速道路より低い位置にあり、上水道が整備されていないことより飲料水などの生活用水として使用されている。
- 3) 調査地の地質は、火成岩である花崗岩と安山岩を基盤とするもので、岩塩などを有する堆積岩類は認められない。
- 4) 167世帯に井戸水に関するアンケート調査の結果、「井戸水が塩辛い」、「ポンプや温水器等が短期間で故障する」といった不具合が高速道路のより谷側で比較的多く発生していることが分かった。アンケートの主な内訳を以下に示す。
 - ・アンケート回収率61% (102/167世帯)。
 - ・井戸種別は、機械ボーリング井戸61% (51/80世帯)、手掘り井戸39%。
 - ・塩辛く感じる13% (13/102世帯)。
 - ・井戸用モーターポンプの交換32% (33/102世帯)。
 - ・温水器等の交換35% (26/74世帯)、そのうち電気温水器77% (20/26世帯)。
- 5) アンケート結果を基に87井戸(83世帯)についてヒアリング調査を実施した結果、塩辛く感じる世帯15世帯、井戸用ポンプの交換20件、温水器の交換など27件で、重複する件数を除いた場合の不具合は47% (39/83世帯)に及んだ。いずれも、高速道路より谷側下方に位置する世帯であった。
- 6) 不具合の発生した井戸とその水質調査結果を比較した場合、塩化物イオン濃度100mg/L以上で、高速道路路肩端からの離隔距離がおおむね100mの谷側下方で不具合が発生していた。
- 7) 調査地以外の井戸の自然由来と考えられる塩化物イオン濃度は、花崗岩地帯で8.8mg/L、安山岩地帯で7.8mg/L、砂岩・泥岩等堆積岩地帯で11.9 mg/L、流紋岩類地帯で10.5mg/L、全体平均で11.0mg/Lであった。
- 8) 機械ボーリング井戸(深さ50~200m)は、深層部の地下水を汲み上げるものであるが、48~680mg/Lと高い塩化物イオン濃度であり、地下まで塩水化の影響を受けている可能性が考えられる。

以上から、高速道路に散布される凍結防止剤の周辺環境への影響は無視できないことが明らかになった。

次章以降においては、アンケートやヒアリング調査を行った井戸などの水質調査結果を取りまとめると共に、凍結防止剤の地下水への侵入経路や浸透量、道路周辺の農地に与える影響、凍結防止剤と金属腐食の関係を明らかにする。

第2章の参考文献

- 1) 高速道路技術センター（編）（1994）：高速道路の雪氷管理（わかりやすい雪氷管理），社団法人高速道路技術センター，p42-44.
- 2) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路研究チーム（参照2017.6.5）：凍結防止剤とすべり止め材について，（オンライン）入手先<<http://www2.ceri.go.jp/jpn/news/koutsu/panf/touketubousi.pdf#search>>
- 3) 村国誠（1995）：冬期路面管理に使用する薬剤（1）薬剤の種類と物理・化学的性質，平成7年度 雪氷関係助役研修資料，p7-8.
- 4) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典（2007）：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, p116-127.
- 5) 長野県（1994）：凍結防止剤による道路際の植物への影響，技術情報 NO.88，p4-5.
- 6) 吉江誠吾，齊藤辰哉，渡辺 亨（2001）：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，p70-79.
- 7) Nandana Perera, Bahram Gharabaghi, Ken Howard (2013) : Groundwater chloride response in the Highland Creek watershed due to road salt application: A re-assessment after 20 years, Journal of Hydrology, 479, p159-168.
- 8) 高木秀隆（1993）：米国の冬期道路管理体制調査に参加して，北海道開発局開発土木研究所月報，485，p76-85.
- 9) 気象庁（2016）（参照2016.3.15）：過去の気象データ，（オンライン），入手先<<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>>
- 10) 国土交通省（2014）（参照2014.10.5）：国土調査土地分類基本調査データ，（オンライン）入手先<<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification>>
- 11) 厚生労働省（2014）（参照2015.2.2）：水道法関連法規等，（オンライン）入手先<<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000045850.pdf>>
- 12) 日本冷凍空調工業会（編）（1994），冷凍空調機器用水質ガイドラインJRA-GL02:1994，社団法人日本冷凍空調工業会，p12-13.

第3章 水質調査と地下浸透経路

3.1 はじめに

本章では、水質調査と凍結防止剤の地下への浸透経路などについて、以下のとおり研究を取りまとめるものである。

水質調査は、第2章で記載したアンケート調査やヒアリング調査をもとに地元への説明会を経て、調査への協力を得たうえで、87井戸について実施した。この調査結果から高速道路との因果関係について整理を行った。

凍結防止剤の地下への浸透経路は、高速道路に近接した井戸において、高い塩化物イオン濃度が検出されたことにより、凍結防止剤がどのように地下水へ流入したのか、その浸透した経路について路面への散水試験などにより、散布した凍結防止剤の流出先の収支を解明した。

また、井戸水からは、塩化ナトリウムの成分である塩化物イオン濃度に相当するナトリウムイオン濃度が少なく、カルシウムイオン濃度が多くが検出された。これは地下水の土壌や岩盤通過時における陽イオンの交換が考えられ、その交換量を定量的に推計した。

3.2 水質調査

3.2.1 水質調査項目と内容

水質調査項目は、表-3.1に示す井戸水の塩化物イオン濃度等、水道法第4条の規定に基づく飲料水水質基準の基本的項目（一般細菌、大腸菌、有機物、塩化物イオン、pH、濁度等の10項目）を同法の定める試験方法「水質基準に関する省令の規定に基づき厚生労働大臣が定める方法（平成15年厚生労働省告示第261号）」¹⁾により行った。なお、地下水の水質区分を把握するため、表-3.2に示すナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウム、炭酸水素イオンも合わせて検査項目とした。

また、腐食に関する水質基準として表-3.3に示す冷凍空調機器用水質ガイドライン（JRA-GL02:1994）温水・補給水の水質基準²⁾に定める検査項目も合わせて実施した。検査方法は、JIS K 0094工業用水・工場排水の試料採取方法、JIS K 0100工業用水腐食性

第3章 水質調査と地下浸透経路

試験方法, JIS K 0101工業用水試験方法に基づき実施した.

表-3.1 飲料水水質基準

検 査 項 目		水 質 基 準
一般細菌	個/mL	100 以下
大腸菌 (定性)	—	検出されないこと
硝酸態・亜硝酸態窒素	mg/L	10 以下
塩化物イオン	mg/L	200 以下
有機物(TOG)	mg/L	3 以下
pH 値	—	5.8~8.6
味	—	異常でないこと
臭気	—	異常でないこと
色度	度	5 以下
濁度	度	2 以下

表-3.2 地下水水質判別のための水質調査項目

検 査 項 目		水質基準 (飲料水)
ナトリウム	mg/L	200 以下
カリウム	mg/L	—
カルシウム	mg/L	300 以下
マグネシウム	mg/L	300 以下
炭酸水素イオン	mg/L	—

表-3.3 腐食に関する水質基準

検 査 項 目			水質基準 (高位中温水系・循環水 60~90℃)
基準項目	pH (25℃)	—	7~8
	電気伝導率 (25℃)	μS/cm	300 以下
	塩化物イオン	mg/L	30 以下
	硫酸イオン	mg/L	30 以下
	酸消費量 (pH4.8)	mg/L	50 以下
	全硬度	mg/L	70 以下
	カルシウム硬度	mg/L	50 以下
	イオン状シリカ	mg/L	30 以下
参考項目	鉄	mg/L	1.0 以下
	銅	mg/L	1.0 以下
	硫化物イオン	mg/L	検出されないこと
	アンモニウムイオン	mg/L	0.1 以下
	残留塩素	mg/L	0.1 以下
	遊離炭酸	mg/L	0.4 以下
	安定度指数	—	—

第3章 水質調査と地下浸透経路

採水位置は、世帯の方の了解を得て井戸から直接あるいは水道の蛇口位置から採水を行った。採水状況を写真-3.1, 写真-3.2に示す。

調査期間は、凍結防止剤散布前から散布完了までの期間(2011年10月～2012年3月)に実施した。調査頻度は、1～3回/月(厳冬期1月～3月には3回/月)の調査を行った。



写真-3.1 井戸の水質調査状況



写真-3.2 河川の水質調査状況

3.2.2 主な水質調査結果と高速道路の因果関係

本項は、各水質調査項目の概要、健康への影響、基準値などを整理し、水質調査の結果と高速道路で散布する凍結防止剤との因果関係について記載する。

3.2.2.1 塩化物イオン

塩化物は、凍結防止剤の塩化ナトリウムに含まれる主成分である。塩化物イオンは、水中に溶存している塩化物中の塩素で、自然水は常に多少の塩化物イオンを含んでいる。これの多くは、地質に由来するもので特に海岸地方では海水の浸透、風送塩の影響によることが大きい。しかし、塩化物イオンは、下水・家庭排水・工場排水・糞尿、及びならびにこれらが処理された水の混入によって増加することが少なくない。この意味で塩化物イオンは汚染の一指標となる。塩化物イオンは、量の多少よりも相対的変動、例えば突如増加するほうが汚染を示す可能性が高い。また、健康への影響は、1日に約600mgの塩化物が、食塩を含まない食品から摂取される。しかし、食品に食塩を添加することにより、塩化物の一日の摂取量は約6gとなるが、多い場合には12gとなる。一方、飲料水から摂取される塩化物の平均は、1日当たり約100mgである。塩化物の消失は、90～95%が尿と共に、4～8%が大便と共に、約2%が汗と共に排出される。一方、塩化物の体内消費量は約530mg/日である。塩化物イオンは、4,000mg/L以上で心臓病、腎臓病患者に有害といわれる。基準の設定は、汚染のない塩化物イオン、または十分に消毒された後の塩化物イオンは、味の感じない程度であれば差し支えない。水質基準は、この意味から200mg/L以下となっている³⁾。

塩化物イオン濃度の水質調査結果を図-3.1に示す。この図は、高速道路の路肩端部からの井戸の距離と調査時の各井戸における塩化物イオン濃度（データ数：815個）を表したものである。高速道路路肩端部から最も近い16mの箇所、最大の値を示した。この値は、水道法に基づく飲料水基準の塩化物イオン濃度200mg/Lに対して670mg/Lと3倍以上の高濃度であった。また、200mg/Lを越える濃度の範囲は、高速道路路の路肩端部から135mの範囲に集中している。塩化物イオン濃度と高速道路との関係は、高速道路より低い谷側に向かって高い濃度が認められ、高速道路に近いほど高い濃度となっている。このことから高速道路より低い谷側は、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンの影響が認められる。なお、高速道路の路肩端部に近くても高速道路の影響を受けない10mg/L以下の濃度の井戸（深さ：80～200m）もあり、井戸の深さや地下水の浸透経

路などによる影響が考えられる。

また、図-3.2に塩化物イオン濃度が200mg/L以上となる主な井戸の月別の濃度変動を表す。この変動は、凍結防止剤散布前の10, 11月の値と凍結防止剤散布時期の値が、散布前から高く散布後にさらに上昇するものや、ほとんど上昇しないものもあるが、そのほとんどは、あまり変動していない。また、図-3.3に示す凍結防止剤の散布量との相関関係も認められない。これは、凍結防止剤以外の原因、凍結防止剤散布から井戸への到達時間差による影響や凍結防止剤が地中で蓄積され徐々に一定量で流出していることなども考えられる。この原因究明については、次項で明らかにしていきたい。

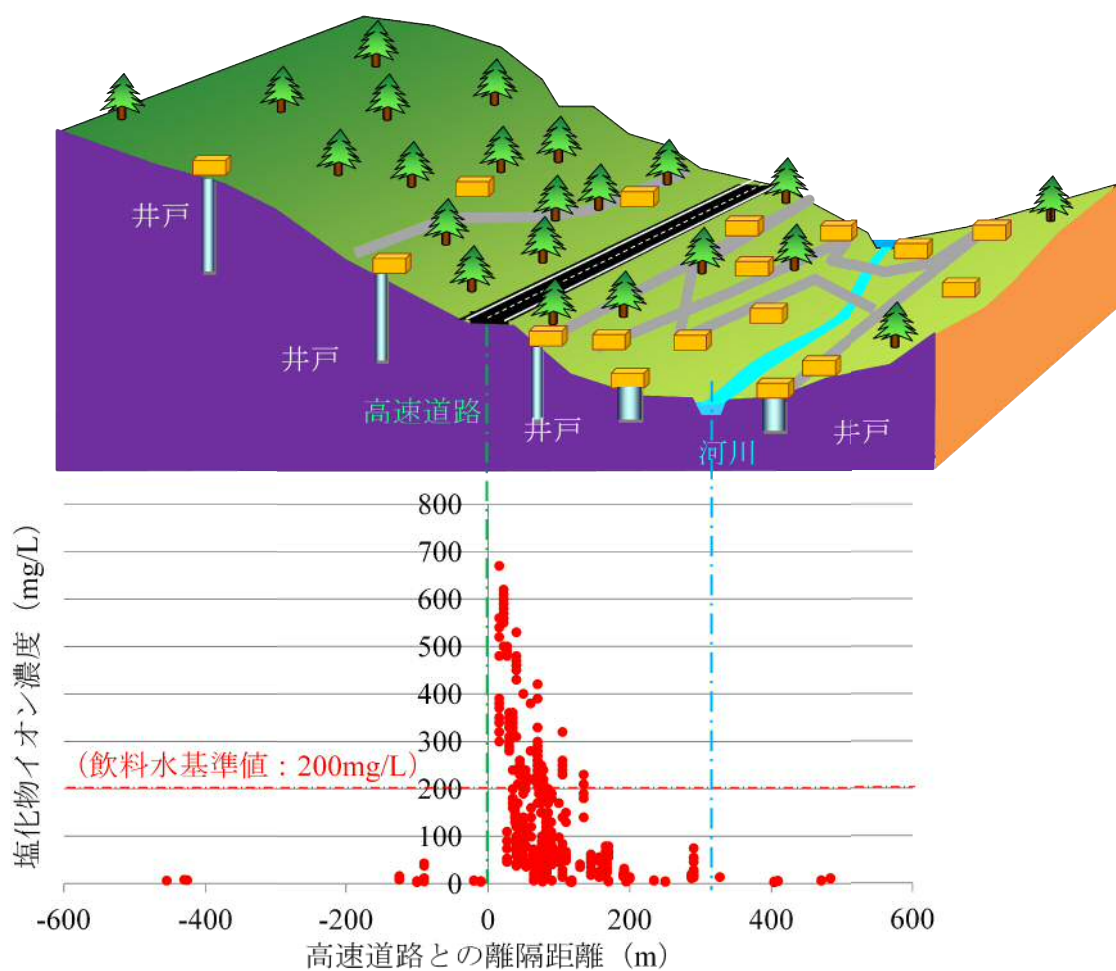


図-3.1 高速道路の離隔距離と塩化物イオン濃度の関係

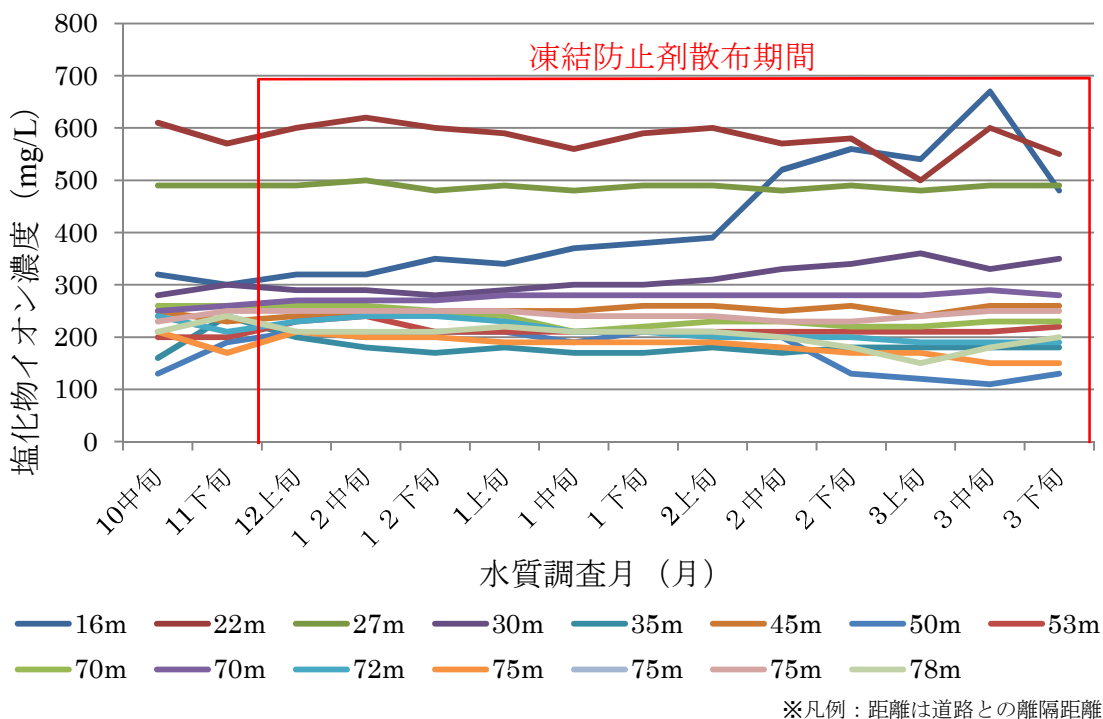


図-3.2 調査月別の塩化物イオン濃度の変動

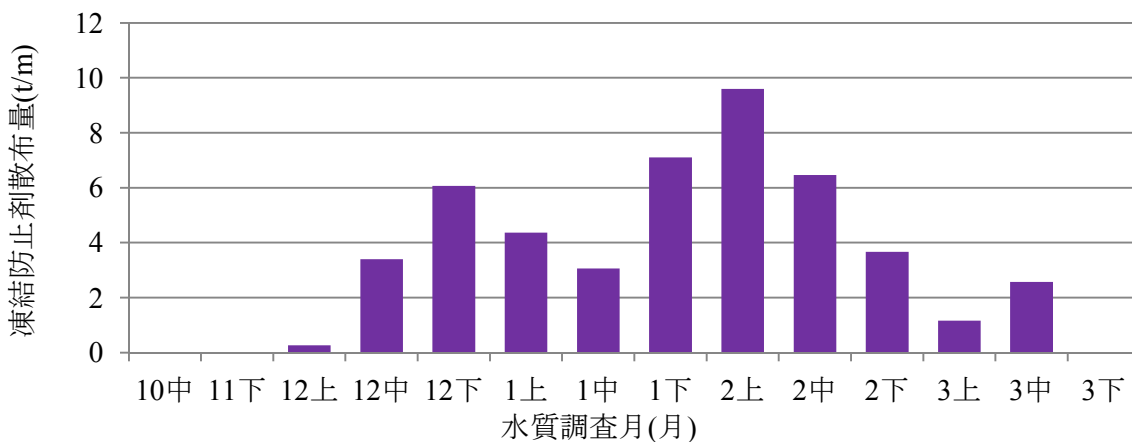


図-3.3 凍結防止剤の散布量

3.2.2.2 ナトリウム

ナトリウムは、地球上ではカルシウムについて6番目に多く存在している。色々な鉱物として地殻中に広く分布するほか、炭酸塩、硫酸塩、ホウ酸塩として各地に産する。海水では、塩化ナトリウムとしてその約3%を占めている。自然環境中には広く分布するので、水道の原水や井戸水には自然由来のナトリウムが含まれている。このほか、ナ

トリウムを含む工場排水に由来するものもある。さらに、水道水では、急速ろ過方式の浄水場で凝集剤により下がった pH を調整するために用いる水酸化ナトリウムや、消毒用の次亜塩素酸ナトリウム由来のものも含まれる。健康への影響は、ナトリウム含有量の高い食物の摂取は、遺伝的な感受性が高い人では高血圧症を進行させる。動物体内のナトリウムは、ほとんどが細胞外液（血液，組織間液）にあって、陽イオンの 90% を占めている。ナトリウムは腸管から速やかに吸収される。逆に、水と共に尿や汗として失われる。過剰に摂取しても腎臓がすぐに排出するので、血中濃度が上がり過ぎることはまれである。しかし、腎疾患などで体内に貯留したときには、水分を伴って浮腫としてあらわれる。ナトリウムの代謝は水分，カリウム，塩素と密接な関係がある。飲料水基準の設定は、味覚の観点から 200mg/L 以下と設定されている³⁾。

ナトリウムの水質調査結果を図-3.4 に示す。ナトリウムイオン濃度と高速道路との関係（データ数：815 個）は、塩化物イオン濃度と同じく高速道路より低い谷側に向かって高い濃度が認められ、高速道路に近いほど高い濃度となっていることから凍結防止剤に含まれるナトリウムイオンの影響が認められる。最も高い濃度は、水道法に基づく飲料水基準のナトリウムイオン濃度 200mg/L に対して 320mg/L と 1.5 倍以上の高濃度であった。また、200mg/L を越える濃度の範囲は、高速道路の路肩端部からおおむね 70m の範囲に集中している。

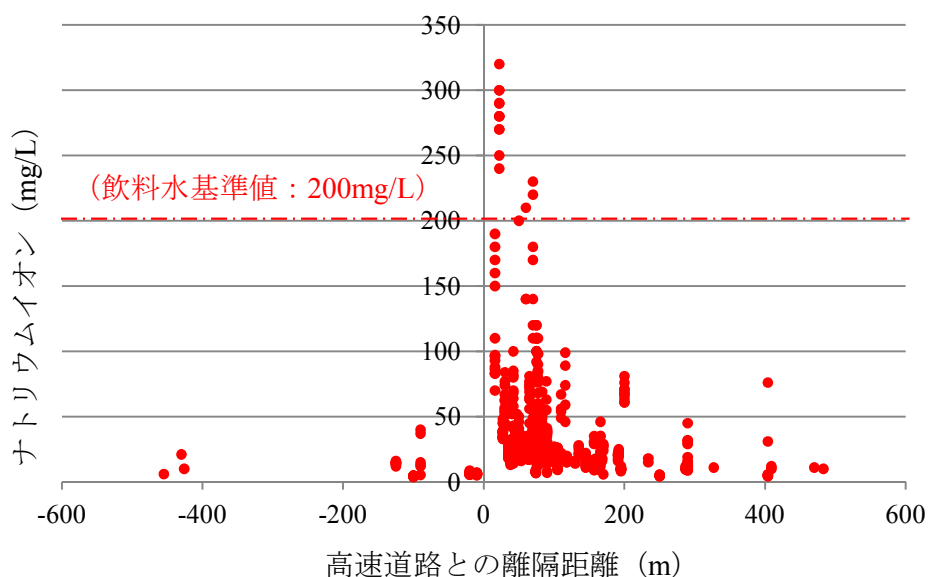


図-3.4 高速道路の離隔距離とナトリウムイオン濃度の関係

3.2.2.3 カルシウム

カルシウムは、アルカリ土類金属の一つで、展性・延性がある。自然界には遊離状態で産出されず、炭酸塩およびケイ酸塩として広く多量に存在する。水中ではカルシウムイオン (Ca^{2+}) として存在し、硬度の主体をなしている。その起源は地質によるものが主であるが、他にコンクリート構造物からの溶出、海水、工場排水および温泉などの混入に由来するものがある⁴⁾。ヒトを含む動物や植物の代表的なミネラル（必須元素）であり、成人1人当たり平均0.7g/日必要とされている³⁾。飲料水基準は、300mg/L以下と設定されている。

カルシウムの水質調査結果を図-3.5に示す。カルシウムイオン濃度と高速道路との関係（データ数：815個）は、塩化物イオン濃度と同じく高速道路より低い谷側に向かって高い濃度が認められ、高速道路に近いほど高い濃度となっている。このことから高速道路より低い谷側においては、凍結防止剤に含まれる陽イオンであるナトリウムイオンとのイオン交換の影響が考えられる。最も高い濃度は、水道法に基づく飲料水基準のカルシウムイオン濃度300mg/Lに対して250mg/Lと0.8倍の低い濃度で飲料水の水質に関しては問題のない濃度であった。

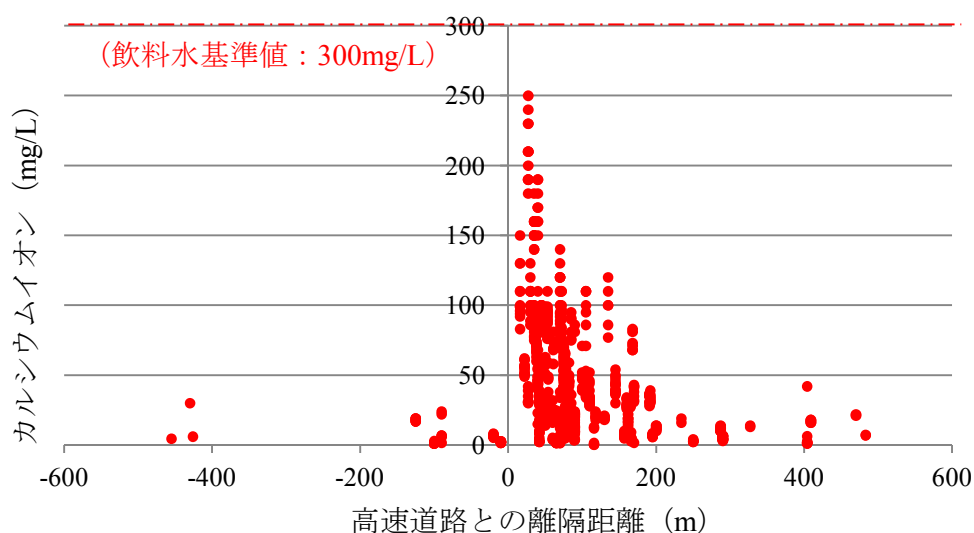


図-3.5 高速道路の離隔距離とカルシウムイオン濃度の関係

3.2.2.4 カリウム

カリウムは、アルカリ金属元素のひとつで、体内においては、細胞内の体液である細胞内液中に主に存在し、ミネラルの一種としても知られている。ちなみに、体内に存在

するカリウムの量は、約 3,500mEq で、この内、9 割が細胞内液、1 割が細胞外液に分布する。摂取したカリウムのうち 9 割は尿から排出されてしまうのが特徴である。カリウムは、細胞外液に多いナトリウムと一緒に、血圧や細胞の浸透圧を調整する。浸透圧とは、半透膜で隔てられた濃度の低い液体が、濃度の高い液体の方へ移動し、濃度を均一にしようとする力のことをいう。カリウムは血圧が高くなるのをおさえたり、老廃物の排出を助けたり、筋肉の収縮を促す働きを担ったりと、人体に欠かせない役割を果たしている。成人で体重 60kg の場合、カリウムは 240g、ナトリウムは 120g ほど体内に存在しているのが正常で、そのため、カリウムはナトリウムよりも多く摂取する必要がある。カリウムが不足すると、脱力感や吐き気のほか、食欲不振などを引き起こすことがある。さらに精神面では、無関心、不安感、イライラの要因になり、精神的に不安定になりやすくなる。カリウムの過剰摂取は、通常は問題無いが、特に腎機能に障害がある場合影響を及ぼしてしまう恐れがある。なお、飲料水基準においては、水質調査項目として記載されていない⁵⁾。

カリウムの水質調査結果を図-3.6 に示す。カリウムイオン濃度と高速道路との関係（データ数：168 個）は、塩化物イオン濃度と同じく高速道路より低い谷側に向かって高い濃度が認められ、高速道路に近いほど高い濃度となっていることから凍結防止剤に含まれる陽イオンであるナトリウムイオンとのイオン交換の影響が考えられる。最も高い濃度は、30mg/L と低い濃度であった。

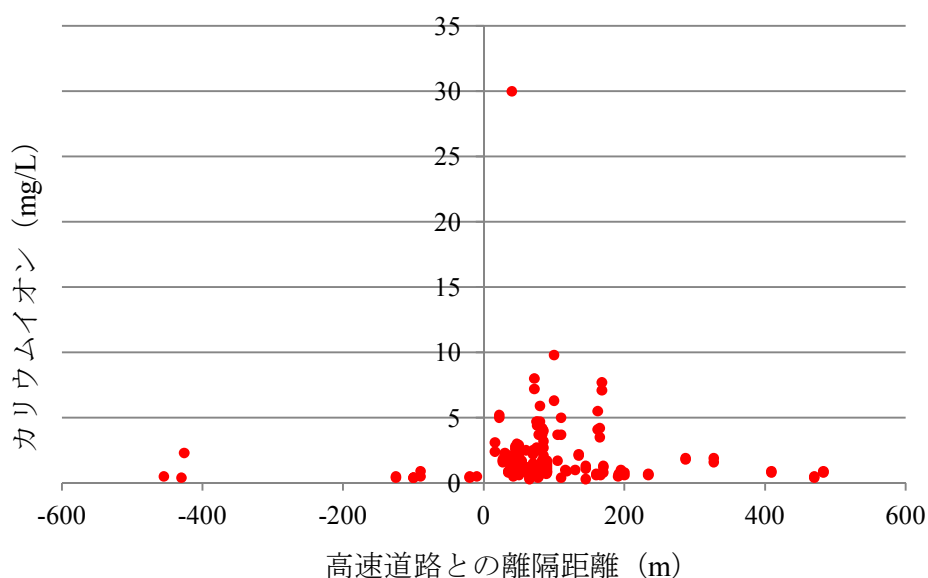


図-3.6 高速道路の離隔距離とカリウムイオン濃度の関係

3.2.2.5 マグネシウム

マグネシウムは、骨や歯の形成に必要な栄養素で、大人の体内には、20～28gほど含まれ、カルシウムやリンとともに骨を作るミネラルである。「にがり」は、塩化マグネシウムが主な成分である。カルシウムのそのほとんどは骨が貯蔵庫の役割を果たしていることが知られているが、マグネシウムも50～60%が骨に含まれていて、不足すると骨から遊離して、神経の興奮を抑えたり、エネルギーを作る助けとなったり、血圧の維持などの重要な働きに利用される。マグネシウムは、長期に渡って摂取量が減少すると、骨粗しょう症、心疾患、糖尿病といった生活習慣病のリスクが高まる可能性が示されている。一方、マグネシウムは、通常の食品からは取りすぎる心配は少ないが、健康食品やサプリメントなどから取り過ぎた場合には下痢になる可能性があるため、適切な利用法には注意が必要である⁶⁾。飲料水基準は、300mg/L以下と設定されている。

マグネシウムの水質調査結果を図-3.7に示す。マグネシウムイオン濃度と高速道路との関係（データ数：168個）は、塩化物イオン濃度と同じく高速道路より低い谷側に向かって高い濃度が認められ、高速道路に近いほど高い濃度となっていることから凍結防止剤に含まれる陽イオンであるナトリウムイオンとのイオン交換の影響が考えられる。最も高い濃度は、飲料水基準の300mg/Lに対して41mg/Lと低い濃度であった。

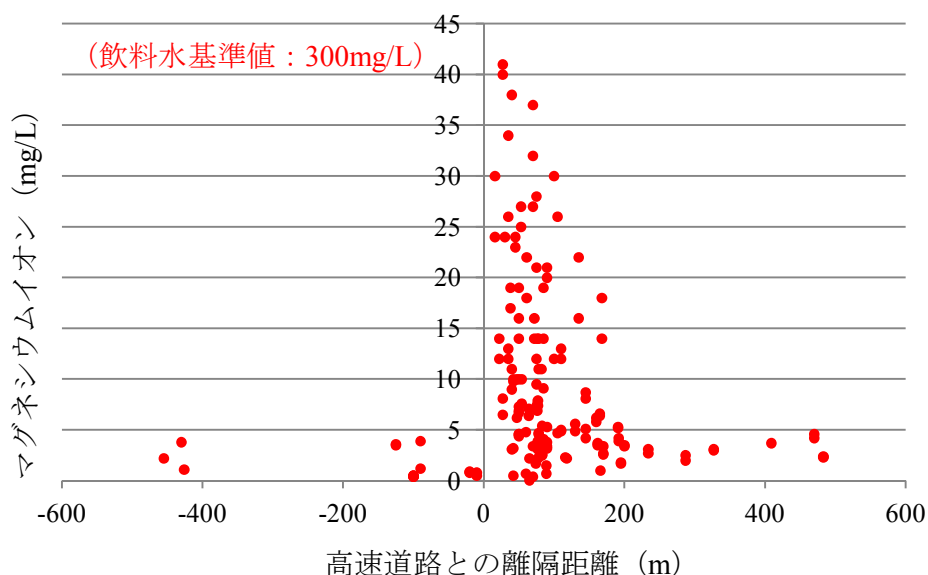


図-3.7 高速道路の離隔距離とマグネシウムイオン濃度の関係

3.2.2.6 電気伝導度 (EC)

電気伝導率は河川水などの環境水、飲料水および産業で使用される水溶液など、様々な分野で測定される。この電気伝導率 (EC) は、水中での電気の通しやすさを表す指標で、溶液の電気抵抗の逆数で表され導電率ともいう。その値は、電気が通りやすいほど大きく、電気が通りにくいほど小さくなる。純粋な水は、ほとんど電気を通さないため、EC は非常に小さい値となる (25°Cで約 0.0055mS/m)。水に溶けたときに陽イオンと陰イオンに分かれる物質 (電解質) の量が多いほど、EC は大きくなる。電気伝導率と塩分濃度は大まかには比例関係にあり、精度を必要としない場合には簡便な塩分濃度計としても利用されることがある⁷⁾。図-3.8に電気伝導率と水質の目安を示す。

電気伝導率の水質調査結果を図-3.9に示す。電気伝導率と高速道路との関係 (データ数: 815 個) は、塩化物イオン濃度と同じく高速道路より低い谷側に向かって高い電気伝導率が認められ、高速道路に近いほど高い電気伝導率となっていることから凍結防止剤による影響が認められる。最も高い電気伝導率は、 $2,000 \mu\text{S/cm}$ (200mS/m) と高い電気伝導率であった。

図-3.10に電気伝導率と塩化物イオン濃度の関係を示す。電気伝導率と塩化物イオン濃度の相関関係は、 $R^2=0.9612$ と高い。塩化物イオン濃度の水質基準 200mg/L に相当する電気伝導度は、図-3.10より $764 \mu\text{S/cm}$ となり、塩化物イオン濃度と同じく高速道路の路肩端部から約 135m 以内の位置にある。

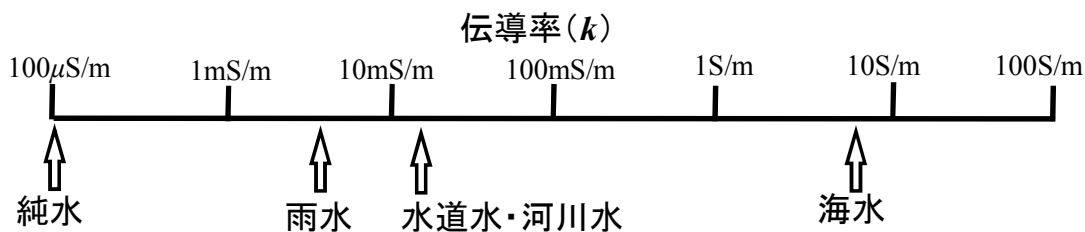


図-3.8 電気伝導率と水質の目安⁷⁾

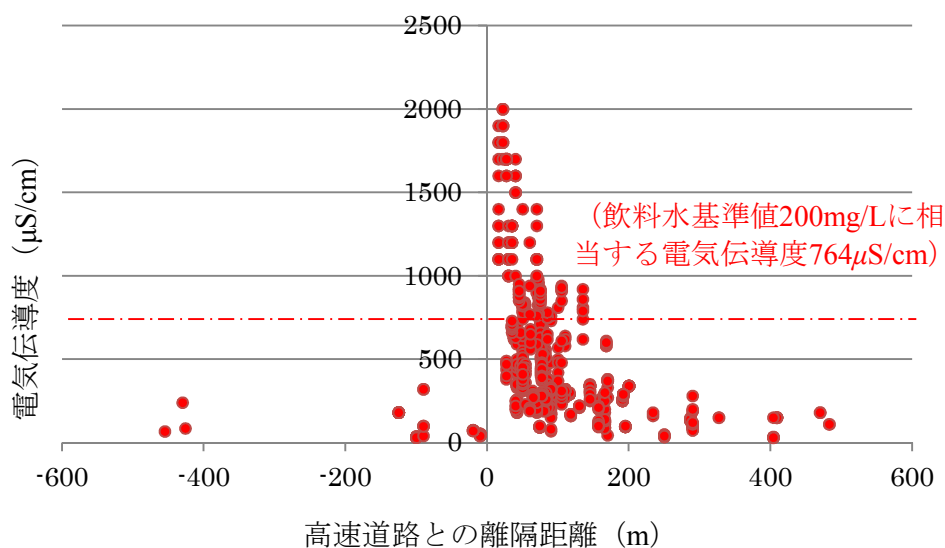


図-3.9 高速道路の離隔距離と電気伝導率の関係

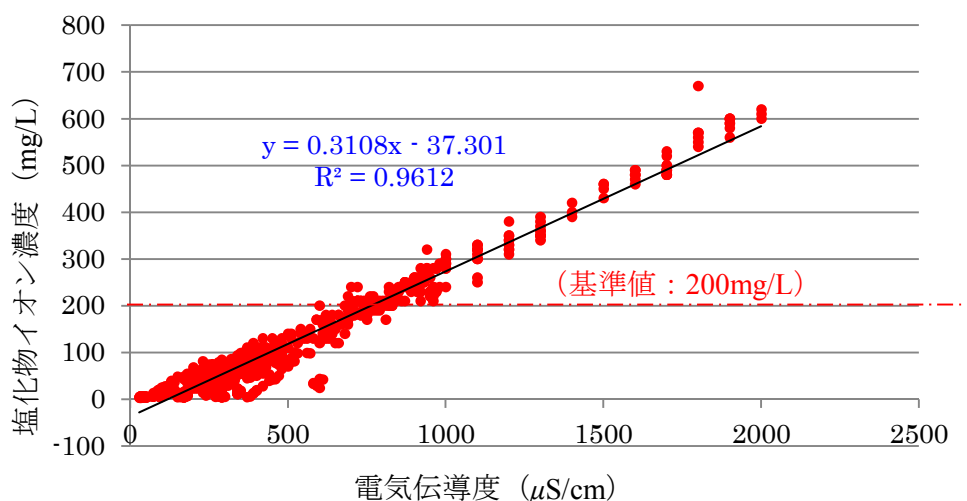


図-3.10 電気伝導率と塩化物イオン濃度の関係

3.2.2.7 一般細菌

一般細菌は、尿尿、雑排水のほか、河川、地下水、土壌、食品、さらには空気中まで広く存在する。表流水や井戸水では、水質や降雨の影響を受けるが深井戸の場合変動は少ないといわれている。全国的に見た水道原水では、50万個/mLを超える結果が出る一方で、0個/mLの場合も少なくない。原水が地下水である場合大半の検査結果が0～10個/mLの範囲である。一方、原水が表流水やダム・湖沼の場合は検査の最高値が500から5000個/mLくらいになる場合が多い。飲料水の水質基準は、1mL当たりの検水

で形成される集落数が100個以下であることとなっている³⁾。図-3.11は、高速道路との離隔距離と一般細菌の関係を示す。高速道路周辺では、基準100個/mLを超える高い値となっているが、図-3.12に示す基準を超える井戸の深さは、10m程度の浅井戸が比較的多く、表流水の影響を受けているものと考えられ凍結防止剤の影響は認められない。

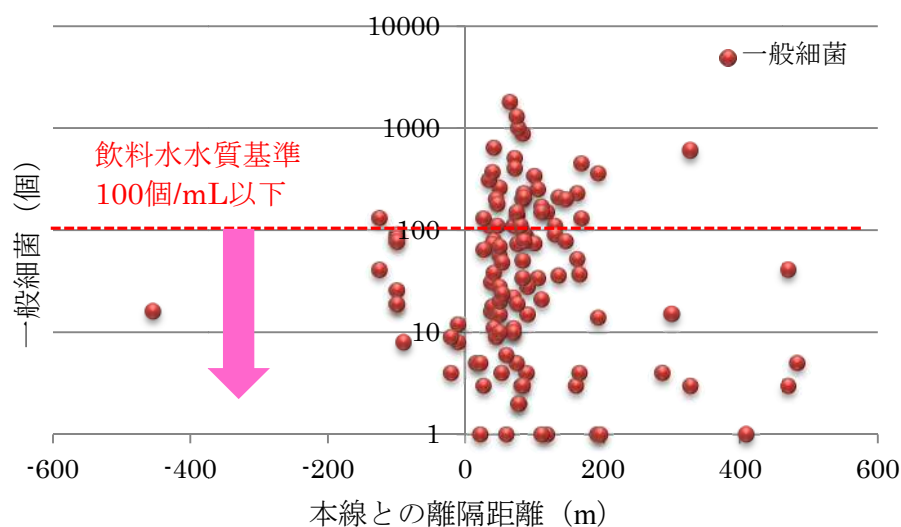


図-3.11 本線離隔距離と一般細菌の関係

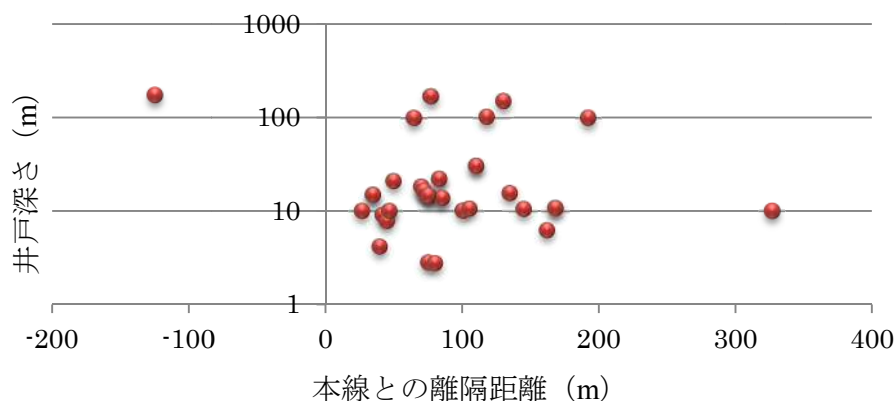


図-3.12 一般細菌100以上の本線離隔距離と井戸の深さの関係

3.2.2.8 pH (25°C)

pHは、水中の水素イオン濃度 H^+ (単位 mol/L) の逆数の対数で定義され、塩類、遊離炭酸などの割合で変化する。強酸・強アルカリの場合飲用により粘膜への影響が生じ、

弱酸、弱アルカリでも味が悪化する。また、スケール折出や材料の腐食の傾向を判定する基本的な水質因子の1つとなっている²⁾。水質基準は、金属の腐食を防止する観点から、5.8～8.6を水質基準値に設定しているのに対し、より高いレベルの水道水を目指す目標として7.5程度を水質管理目標値としている³⁾。

水質基準は、5.8～8.6，腐食基準は7.0～8.0の値である。今回の水質調査結果（図-3.13）からは、高速道路との相関関係は認められない。塩化ナトリウムは中性（pH=7）であり地下水のpHへの影響はほとんどないものと考えられる。なお、国内の降雨のpHは、年平均4.7～4.8（H18～27年）⁸⁾と酸性値の高いものであり、地下水のpHの低い要因の一つとなっているものと考えられる。

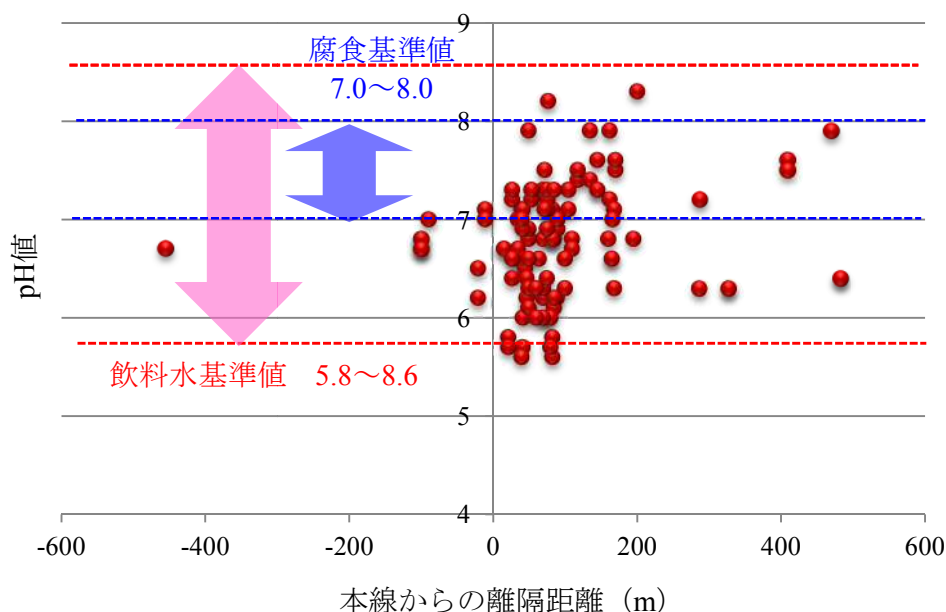


図-3.13 本線離隔距離とpHの関係

3.2.2.9 硫酸イオン

硫酸イオンは、水に溶存する硫酸塩をいい、水の腐食性を高める因子である。今回の水質調査結果（図-3.14）からは、硫酸イオン濃度は全体的に10mg/L以下に分布しており、高速道路との相関関係は、認められない。なお、腐食の水質基準を超える98mg/Lの濃度は、高速道路より168m離隔しており凍結防止剤の要因とは考えられないことから、他の要因と考えられる。

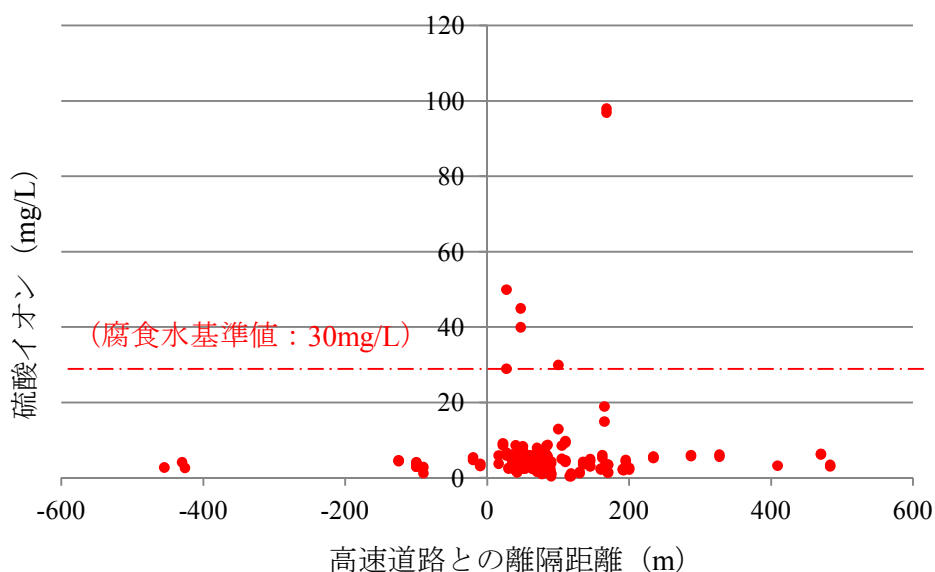


図-3.14 高速道路の離隔距離と硫酸イオン濃度の関係

3.2.2.10 酸消費量(pH4.8) (CaCO₃)

酸消費量(pH4.8)は、水中に含まれる炭酸水素塩、炭酸塩又は水酸化物等のアルカリ分の量をこれに対応する炭酸カルシウム (CaCO₃) の濃度で表したもので、試料水が酸を中和する能力の指標となり、pH4.8 までの酸消費量を総アルカリ度 (T アルカリ度又は M アルカリ度) と呼ばれている。自然水のアルカリ度は、炭酸塩又は炭酸水素塩が主体をなすことが多く、雨水中に溶けている CO₂ や土壌中の生物の呼吸作用、地下水が石灰岩のような堆積岩 (炭酸塩) を通過するとき、炭酸水素塩として Ca, Mg 等を溶出してくることに起因するものといわれ、地下水はアルカリ度が高く 30~80mg/L で、表流水は通常 20~40mg/L、河川水は一般に上流は低く、下流に行くほど少しずつ増加するといわれている。酸消費量の値が大きい水は、腐食を抑制する側面、スケール障害を起こりやすくする側面もある²⁾。

今回の水質調査結果 (図-3.15) から、高速道路との相関関係は、若干ではあるが高速道路の谷側に基準値を超える高い値の酸消費量値が認められ、高速道路からの凍結防止剤の関与により、スケール障害への傾向を与えていると考えられる。

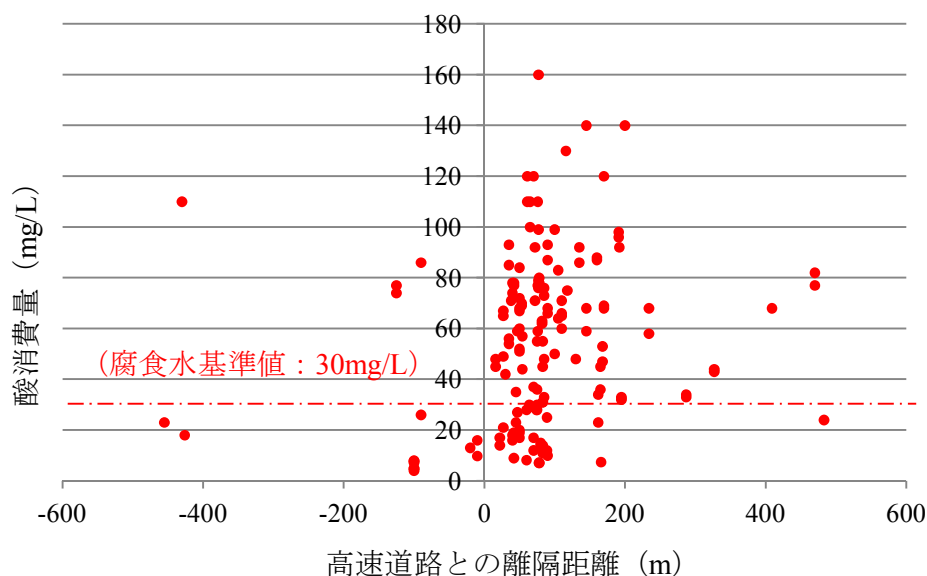


図-3.15 高速道路の離隔距離と酸消費量の関係

3.2.2.11 全硬度及びカルシウム硬度

全硬度（総硬度）は、科学的には、水中のカルシウムイオン及びマグネシウムイオンの量を、これに対応する炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の mg/L に換算して表したものである。また、カルシウムイオンによる硬度をカルシウム硬度という。カルシウム、マグネシウムは生体必須元素であるが、硬度（主にマグネシウム）が高いと胃腸障害による下痢を起こす場合があり、硬度のかなり高い水を引用すると尿石症になり易いといわれている。硬度が高い場合、炭酸カルシウムを主成分とするスケール障害が発生する²⁾。

今回の水質調査結果（図-3.16、図-3.17）から、高速道路との相関関係は、塩化物イオン濃度と酷似し、高速道路の谷側に高い値の全硬度及びカルシウム硬度の値が認められ、高速道路からの凍結防止剤の影響が認められる。

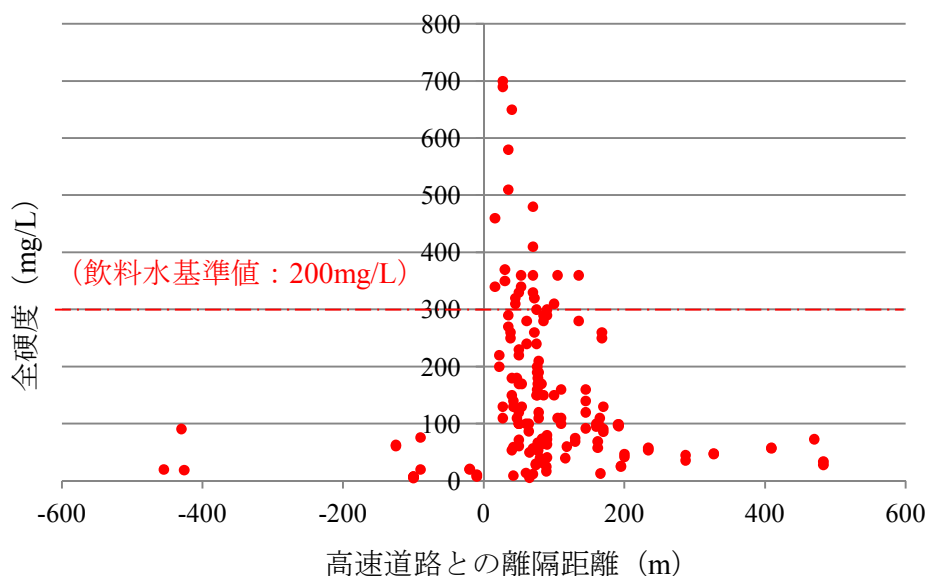


図-3.16 高速道路の離隔距離と全硬度の関係

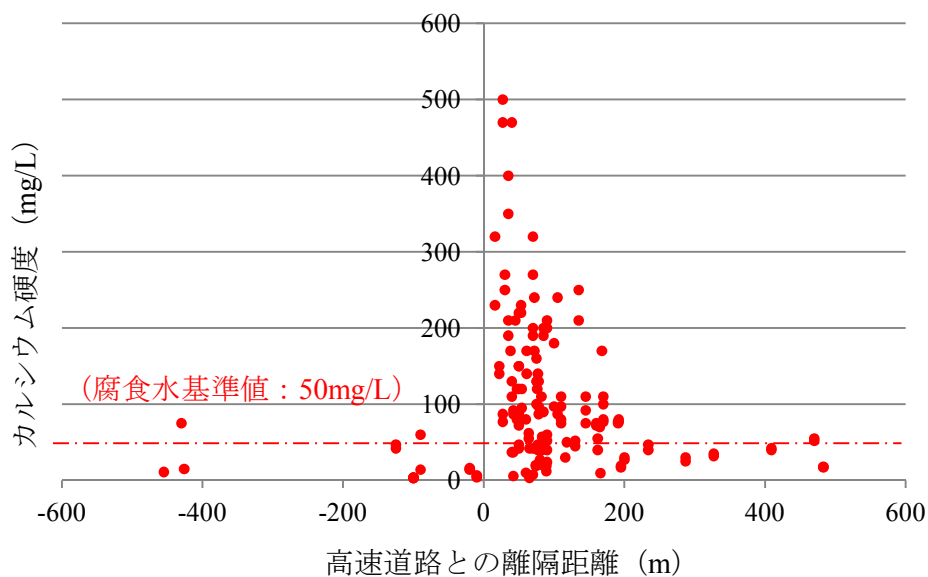


図-3.17 高速道路の離隔距離とカルシウム硬度の関係

3.2.2.12 味, 臭気

水の臭気と味は、密接な関係があり異味臭があることは水道原水では、藻類の発生によるにおい物質・工場排水・化学薬品の混入，地下水の場合は硫化水素や鉄に起因することや海水の混入によること，また，吸水施設では，汚染物質，家庭排水，尿尿等の混入・配管の腐食などが原因となることがあるように，不純物の存在や微生物の発生の指標となる。つまり，異味臭があるということは，その水に「何らかの異常があった」と

いうことの危険信号となるわけである。水質基準では「異常がないこと」としている⁴⁾。

今回の水質調査結果（**図-3.18**、**図-3.19**）から、味については、凍結防止剤の味である塩味が高速道路との相関関係の高い位置で検出された。臭気については、高速道路や凍結防止剤との影響は認められない。

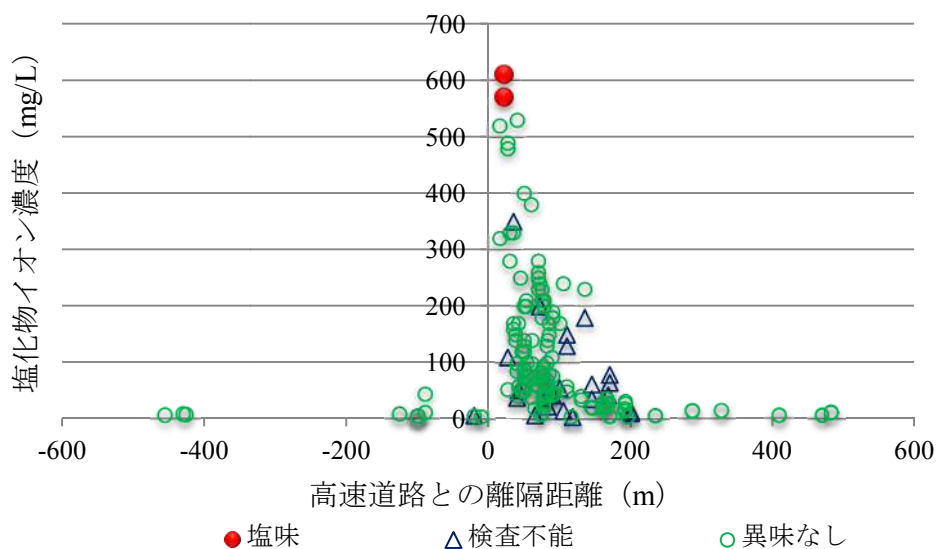


図-3.18 高速道路の離隔距離と味及び塩化物イオン濃度の関係

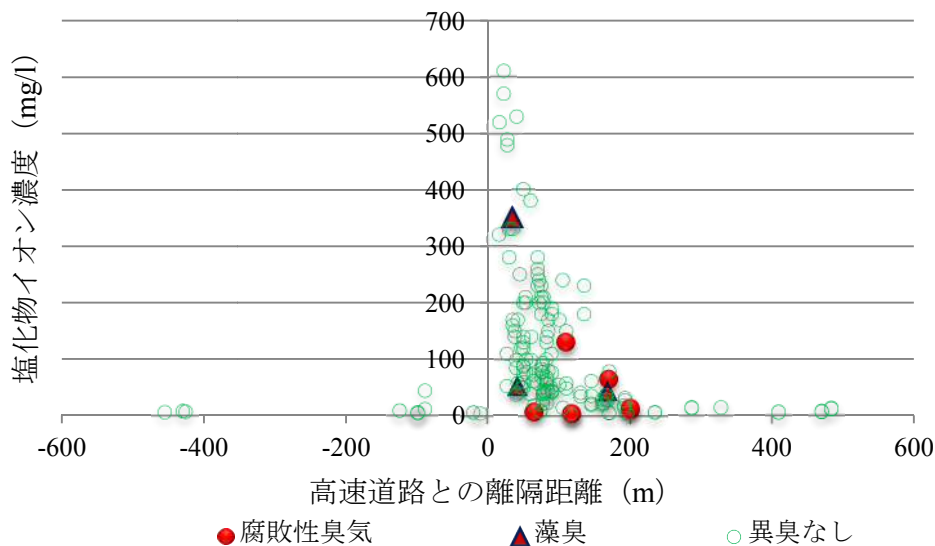


図-3.19 高速道路の離隔距離と臭気及び塩化物イオン濃度の関係

3.2.2.13 イオン状シリカ (SiO₂)

イオン状シリカは、水中に溶けているシリカ (Si) のことで、固形状シリカ及びコロイド状で水中に浮遊しているシリカは含まれない。溶解量が高いと、シリカスケール折出等の障害が発生し易い²⁾。

今回の水質調査結果 (図-3.20) から、高速道路との相関関係は、若干ではあるが高速道路の谷側に高い値のイオン状シリカが認められ、高速道路からの凍結防止剤の影響が考えられる。

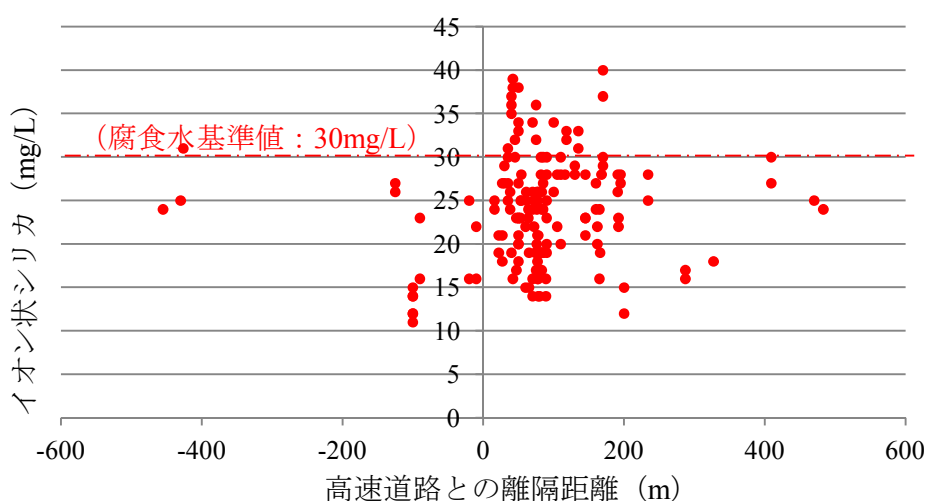


図-3.20 高速道路の離隔距離とイオン状シリカの関係

3.2.2.14 その他水質調査結果

大腸菌、硝酸性窒素・亜硝酸性窒素、有機物、色度、濁度、重炭酸イオン、溶存酸素、鉄、銅、硫化物イオン、アンモニウム、遊離炭酸、安定度指数、フッ素については、凍結防止剤や高速道路との相関関係は認められなかった。

3.2.3 水質調査結果のまとめ

水質調査の結果は、凍結防止剤に含まれる塩化物イオン、ナトリウムイオンが高速道路より谷側で高速道路に近いところに位置する井戸から水道水基準を超える高い濃度が検出されたことより、凍結防止剤が地下へ浸透し、周辺井戸に混入していることが明らかになった。なお、凍結防止剤に含まれないカルシウムイオン等の陽イオンが高速道路の近辺で検出された。この原因は、土壌での陽イオン交換が考えられる。

3.3 凍結防止剤の地下浸透経路の推定

以下に記載する凍結防止剤の地下浸透経路の推定にあたっては、秦ら（2015）⁹⁾の論文を一部引用した。

3.3.1 水質調査とその結果

水質調査は、道路周辺の井戸において水道法に基づく水質検査法により塩化物イオン、ナトリウムイオンなどの水質について調査した。図-3.1 に示す塩化物イオン濃度の水質調査の結果からは、高速道路の下方谷側で高速道路に近いほど高濃度の値となっている。また、高速道路より上方山側や河川を挟んだ対岸にあつては、10mg/L 程度と低い濃度であった。このことから周辺井戸の塩化物イオンは、凍結防止剤に起因するものと推測された¹⁰⁾。

しかし、高速道路の谷川下方周辺の井戸水のすべてが、一様に高い値となっておらずバラツキが生じている。この原因を究明する目的で、以下に凍結防止剤が地下へ浸透する経路に関する調査を行った。

3.3.2 凍結防止剤の地下浸透経路の調査と結果

調査は、高速道路に散布された凍結防止剤の地下水への浸透経路を確認するため、凍結防止剤散布量、降水量、三角堰による路面からの排水量と塩化物イオン濃度の測定、河川流量と塩化物イオン濃度の測定のほか、写真-3.3～写真-3.5 に示す路面散水試験による排水路への流出量、舗装路面のクラックからの地下浸透量の測定などを行った⁹⁾。

調査の推計結果を図-3.21 に示す。調査の結果は、散布された凍結防止剤の39%が排水路を通じて河川へ流下、26%が排水路の目地切れ部から地下へ浸透、25%が舗装路面から地下へ浸透、10%が路外への飛散及びその他損失と推計した⁹⁾。

当該箇所の舗装路盤は、切込碎石による粒状路盤の構造であり、路面のクラック下層部に透水性のよい材料を使用していたことにより25%の浸透量であったものと考えられる。また、浸透水は、写真-3.5 に示すよう散水試験ヤードから縦断勾配3.3%の2km下流にある舗装目地部から溢れ出ていた。これは、散水試験に使用した水が地下へ浸透しないで透水性の良い路盤内を道路縦断方向に流下したのと考えられる。

第3章 水質調査と地下浸透経路



写真-3.3 散水試験による路面散水状況⁹⁾



写真-3.4 舗装路面のクラックへの浸透量調査状況⁹⁾



写真-3.5 散水試験による排水路への流出量調査⁹⁾



図-3.21 凍結防止剤の地下水への浸透経路図⁹⁾



写真-3.5 散水試験による道路下流部での溢出状況

3.3.3 井戸の塩化物イオン濃度と道路構造の関係

舗装路面から地下へ浸透した塩化物イオンは、道路に対して谷川方向に移動しないで道路縦断方向へ移動することにより、図-3.1 に示す道路との離隔距離と塩化物イオン濃度の関係は、高速道路の近くにおいても低濃度である場合もあり一様でないことの原

因として考えられる。

図-3.22 に本調査地の一例を示す。この図は、高速道路の道路構造と調査した井戸との位置関係と井戸で測定された最大の塩化物イオン濃度を表示し、その塩化物イオン濃度の分布状態を等高線により平面的に表した。この図から塩化物イオン濃度の等高線は、切土部の下流側の切土と盛土の境界付近から谷川に向かって比較的当分布で拡散している。このことから、道路路面に散布された凍結防止剤は、路面のクラックから舗装内の透水係数の高い粒状路盤内に浸透し、縦断勾配方向へ流下し、透水性の高い盛土部あるいは、カルバートボックスの横断構造物で遮断され、その裏込め材に浸透して地下水に混ざって井戸に流入したものと推測される。

図-3.23 は、放射線状にある井戸について高速道路路肩端と切土流出部からの離隔距離で塩化物イオン濃度を示した。高速道路路肩端部からの離隔距離における塩化物イオン濃度の関係には若干のバラツキがあるが、推定した発生源からの離隔距離に対しては高い相関性が得られた。このことから、この付近の塩化物イオンの地下浸透経路は切土と盛土境界付近と推察される。

また、通常は、塩化物イオンの新たな供給がない場合は、降水などが地下へ浸透することにより希釈され、リーチング作用によって下流の河川に徐々に流出するものと考えられるが、井戸の塩化物イオン濃度は、凍結防止剤を散布する時期以外の春から秋にかけても比較的高い濃度で推移し、降雨時に希釈されないで上昇する場合もあった。この原因は、粒状路盤や盛土材などの骨材に高い濃度の塩化物イオンを含む浸透水が、図-3.24 に示すように毛細管現象などにより乾燥した骨材へ吸水吸着され、冬期以外においても井戸への供給源として、アスファルトで覆われた舗装下面の切込碎石の骨材内に貯留されていることが一要因として考えられる。

なお、水路沿いにある井戸は近隣の井戸と比べて比較的低い値となっていることから、水路沿いを流れる伏流水などにより希釈されていると考えられる。

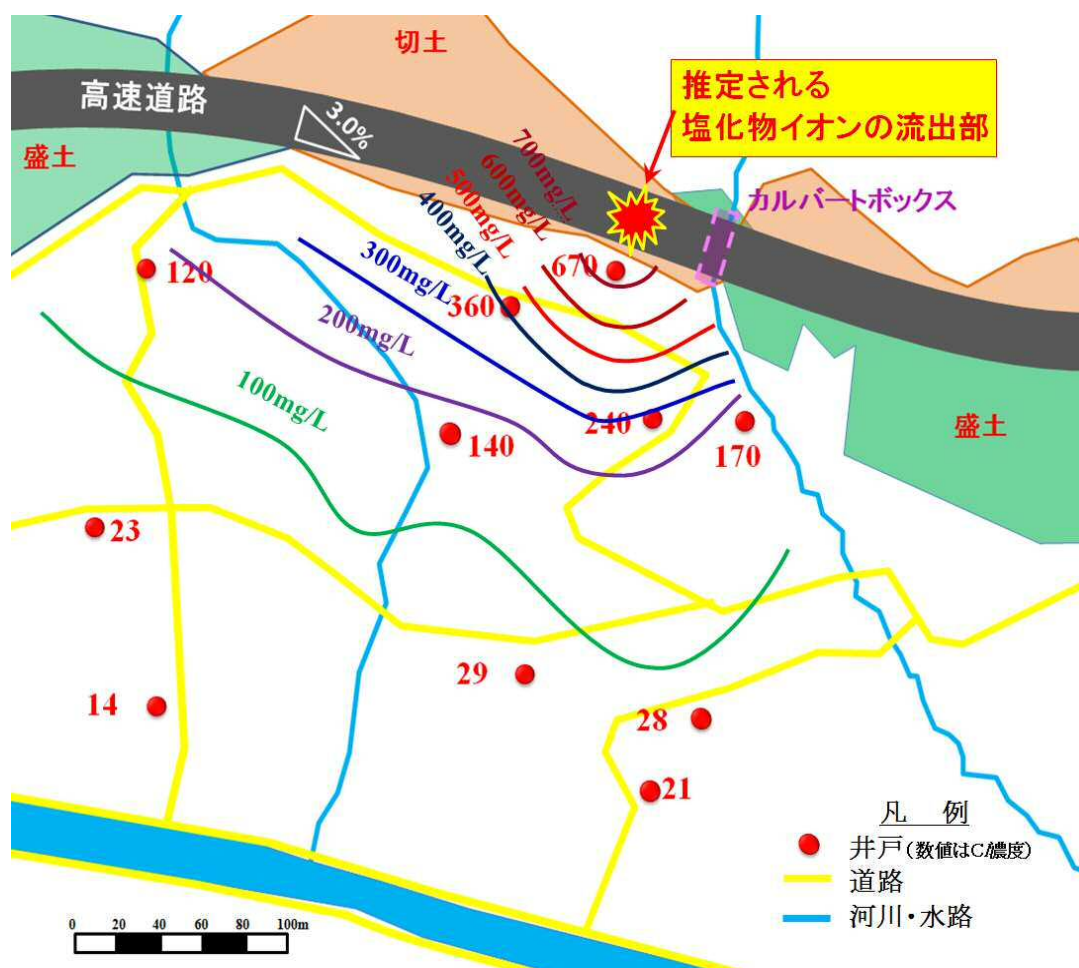


図-3.22 道路と井戸水の塩化物イオン濃度分布

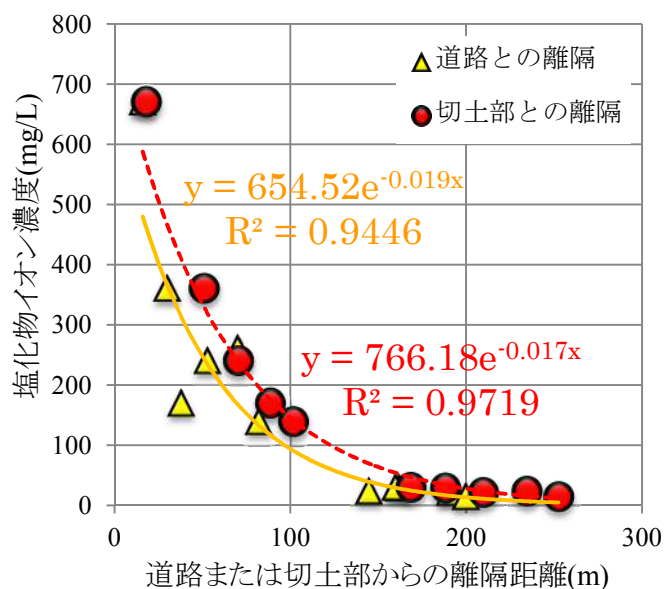


図-3.23 塩化物イオン濃度と道路または切土部との離隔距離の関係

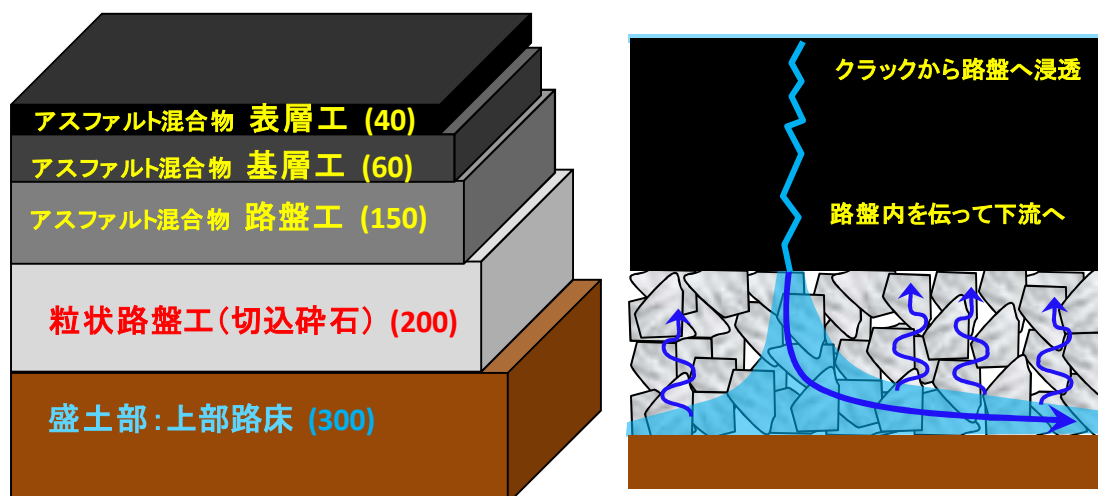


図-3.24 舗装構成と粒状路盤内の塩化物の移動

3.3.4 まとめ

高速道路で散布される凍結防止剤の25%は、図-3.25に示すよう舗装のクラックを通じて、舗装路盤内を経て近隣の井戸に浸透し塩化物イオンによる影響を与えていると考えられる。また、舗装路盤にあっては、塩化物イオンを含む溶液を骨材が吸水し塩化物イオンを貯留して年間を通して少しずつ恒常的に地下へ浸透させているものと考えられる。

なお、当地区の凍結防止剤の地下への浸透対策としては、舗装路面の打ち換えや水路の目地切れ対策としてFRP水路への取替えなどの対策が行われている。また、NEXCOにおいては、舗装のたわみ破壊の原因となる粒状路盤を廃止し、堅固なセメント安定処理路盤を基本とし、また、水路は継目部をソケットタイプに替えてきており本論文の事象は、今後発生しにくくなるものと考えられる。

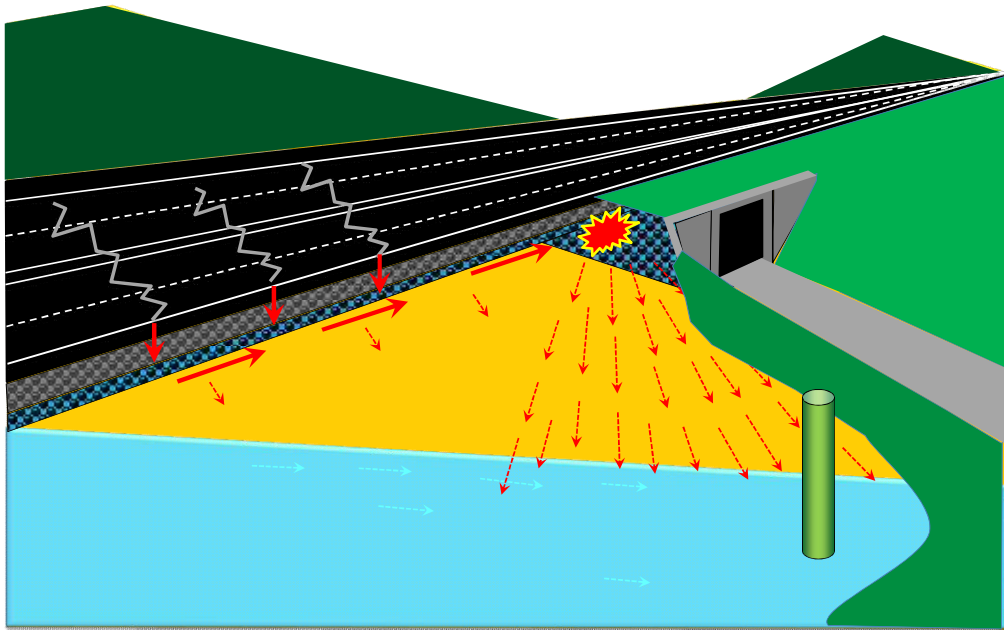


図-3.25 凍結防止剤の地下浸透経路概念図

3.4 凍結防止剤の路外への飛散

3.4.1 凍結防止剤の路外飛散による既往調査

路面に散布された凍結防止剤は、散布直後の散乱・飛散や一般車両による巻き上げなどにより霧状あるいは水滴となって空中に飛散し風などの影響もあって道路の外へ飛散する。

国土交通省の行った路外の飛散量を図-3.26、表-3.4、図-3.27に示す。この図は、調査期間中の凍結防止剤の飛散落下量を塩化物イオン換算値で表したものである。この飛散量は、路肩から離れるにつれ塩素イオン量の減衰が見られ、路肩端部から0～3mまでで落下全体の約72.5%を占める結果であった。また、散布塩分量のうち道路外に飛散する塩分量は、路肩端から1～5mの範囲で7.4%以下であった。

飛散塩分量と各種条件の相関関係は、順風率との間に相関が見られ、散布量との関係では遠方地点より近傍地点でやや高い相関率が見られた¹¹⁾。

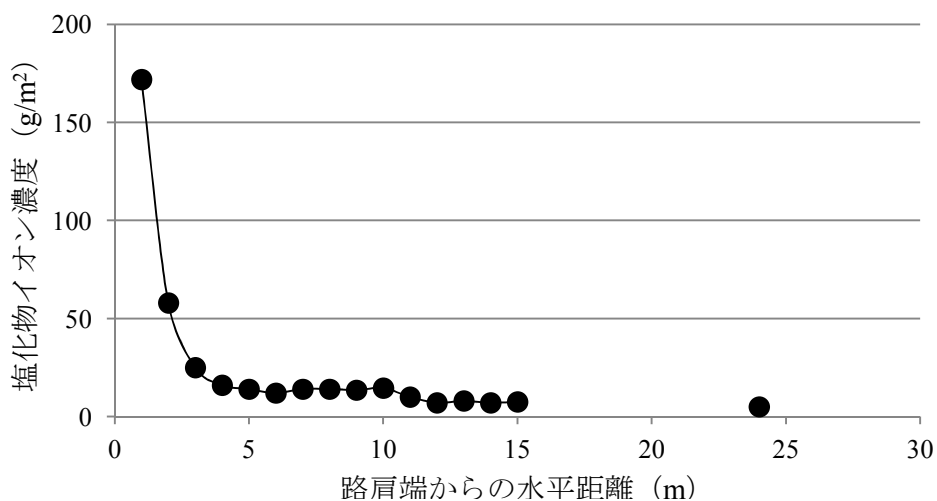


図-3.26 飛散落下の調査結果¹¹⁾

旧日本道路公団で行った凍結防止剤の飛散影響調査を図-3.28に示す。飛散量は、路肩からの距離が10m以上離れるとほとんどなくなる。風などで運ばれる飛散塩分は、路肩からの距離が40mから70mになってもあまり減衰しないので、風に直接さらされる高速道路に面した果樹や建物などには注意を要する。飛散した塩が土壌に与える影響については、土壌含有塩化物イオン量および植物成長試験結果から、小さいものと考え

第3章 水質調査と地下浸透経路

られるが、冬期の気候により通常より多くの塩を散布した場所や降水量が少ない時期などには、土壌塩分量は希釈されない可能性があり注意を要する。また、飛散量の削減に当たっては、湿塩散布方式が有効的であり、舗装は、密粒舗装にくらべ高機能舗装が路面から飛散する塩の発生量自体を半分に縮減できて非常に有効となる。遮蔽ネットや遮

表-3.4 調査期間中の採取された飛散塩分量¹¹⁾

		H12青葉区	H12寺泊	H14苫小牧			H14仙台	H14新潟	H15新潟
		全期間	全期間	No.1地点 全期間	No.2地点 全期間	No.3地点 全期間	全期間	全期間	全期間
路幅 (m) ①		3.70	6.00	10.25	6.75	6.75	3.78	3.00	3.00
散布塩分量 (g/m ²)	NaCl散布量 (g/m ²)	1,842	1,200	1,494.41			247.9	1,760	1,200
散布塩分量 (g/m)	NaCl散布量 (g/m ²) × 路幅	6,815	7,200	15,317.71	10,087.28	10,087.28	936	5,280	3,600
路肩からの距離(m)に対する 飛散塩分量(塩化ナトリウム) (g/m ²)	1m	169.0	133.9	62.32	61.34	39.35	42.740	189.07	93.80
	2m	113.4	74.7	34.74	70.68	30.65	10.304	59.61	40.10
	3m	85.0	50.7	31.27	21.94	32.28	7.382	38.58	24.80
	4m	80.1	32.1	16.88	15.72	25.22	4.932	26.30	20.20
	5m	54.8	25.0	9.27	17.26	26.47	3.832	17.97	16.60
	6m	41.1	19.6	9.27	17.26	26.47	3.329	17.97	20.10
	7m	32.8	21.8	9.27	17.26	26.47	3.329	17.97	19.90
	7.5m			6.74	3.22	5.03	3.329	17.97	
	8m	27.3	21.0	6.74	3.22	5.03	3.329	17.97	19.10
	9m	26.1	18.2	6.74	3.22	5.03	3.329	17.97	20.80
	10m	24.0	18.3	2.99	3.22	1.99	2.260	10.34	14.20
	11m	23.2	19.9	2.99	3.22	1.99	2.260	10.34	10.00
	12m	22.4	18.9	2.99	3.22	1.99	2.260	10.34	10.90
	13m	22.1	16.8	2.99	3.22	1.99	2.260	10.34	8.20
	14m	21.1	15.9	2.99	3.22	1.99	2.260	10.34	9.60
	15m	20.4	16.8	1.15	3.22	1.16	2.260	10.34	9.60
	16m	19.3	15.9	1.15	3.22	1.16	2.260	10.34	9.60
	17m	18.6	17.7	1.15	3.22	1.16	2.260	10.34	9.60
	18m	17.7	17.7	1.15	3.22	1.16	2.260	10.34	9.60
	19m	17.2	17.7	1.15	3.22	1.16	2.260	10.34	9.60
20m	15.0	17.7	0.85	3.22	1.16	2.260	10.34	9.60	
22m							10.23		
30m		9.1	9.7						
1～5mまでの飛散量集計(g/m ²)	合計値	502.3	316.4	154.5	186.9	154.0	69.2	331.5	195.5
6～10mまでの飛散量集計(g/m ²)	合計値	151.3	98.9	35.0	44.2	65.0	15.6	82.2	94.1
11～15mまでの飛散量集計(g/m ²)	合計値	109.2	88.3	13.1	16.1	9.1	11.3	51.7	48.3
16～20mまでの飛散量集計(g/m ²)	合計値	87.8	86.7	5.5	16.1	5.8	11.3	51.7	48.0
21～30mまでの飛散量集計(g/m ²)	合計値	9.1	9.7	0.0	0.0	0.0	0.0	10.2	0.0
30mまでの飛散量集計(g/m ²)	合計値	859.7	600.0	208.1	263.3	233.9	107.4	527.4	385.9
散布塩分量に対する割合(%)	30mまで	12.6	8.3	1.4	2.6	2.3	11.5	10.0	10.7
散布塩分量に対する割合(%)	5mまで	7.4%	4.4%	1.0%	1.9%	1.5%	7.4%	6.3%	5.4%

注)：路幅は片側車線の道路幅

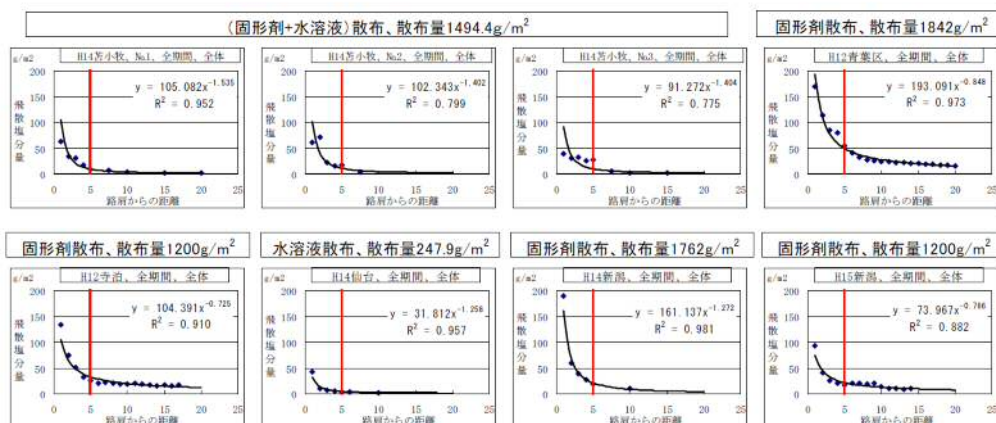


図-3.27 飛散塩分量と距離との関係¹¹⁾

音壁などの遮蔽物は、設置した高さまでの飛散抑制効果があり、塩の飛散対策が必要な箇所では、路肩に遮蔽用のネットなどを設置することが有効な対策であると考え¹²⁾。

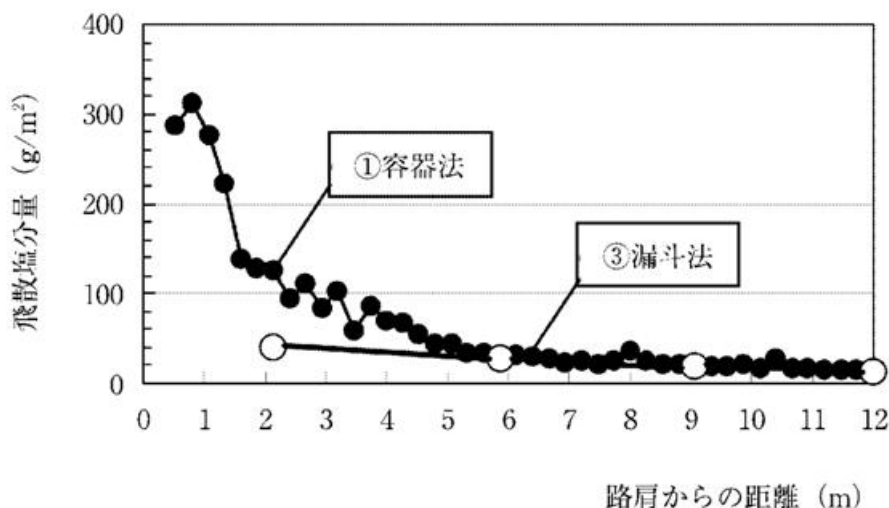


図-3.28 捕集塩分量の比較 (①容器法—③漏斗法)¹²⁾

3.4.2 調査地周辺の凍結防止剤の飛散調査

高速道路に散布する凍結防止剤が、沿道にどの程度飛来し影響を与えているかを把握する目的で、図-3.29 に示す調査地周辺で2015.11～2016.4 かけて高速道路周辺の飛散塩分量の調査を実施した。

凍結防止剤の飛散量調査は、凍結防止剤の飛散状況を把握するため、高速道路沿道で散布される凍結防止剤を捕集する容器(写真-3.6 に示すデポジットゲージ)を設置し、2カ月に1回程度(平成28年1月上旬～, 平成28年4月上旬)の頻度で捕集した試料を回収し分析した。なお、回収した試料より表-3.5 に示す塩化物イオン及びナトリウムイオンについて分析した。

デポジットゲージは、写真-3.6 に示す20Lのボトルに漏斗φ21cmのものを使用した。1m²当たりの飛散塩分量算出は、ボトル内にたまった塩化ナトリウム量(mg/L)を測定し、この量にボトル内の溶液量(L)を乗じて、漏斗の集水面積(0.0346m²)で除して求めた。

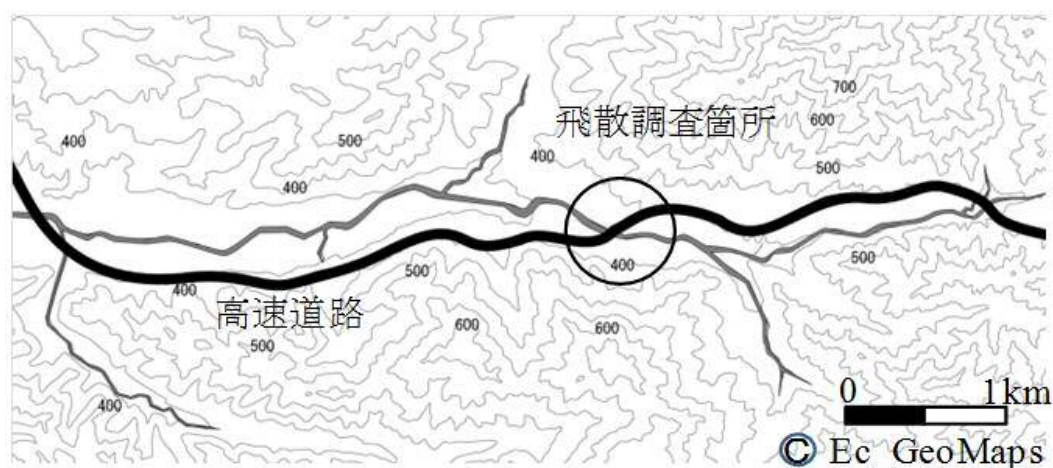


図-3.29 飛散塩分の調査箇所



写真-3.6 飛散塩分捕集器 (デポジットゲージ)

表-3.5 分析項目及び分析方法

分析項目	単位	分析方法
ナトリウムイオン (デポジットゲージ法)	mg	JISK0102 (2008) 48-3
塩化物イオン (デポジットゲージ法)	mg	JISK0102 (2008) 35-3

調査期間 (2015.10~2016.4) の降雨量は、620.5mm で、凍結防止剤の散布は、道路延長当たり 33.1t/km であった。風向風速は、河川の方に卓越し平均風速が 0~2m 程度であった。

3.4.3 調査地周辺の凍結防止剤の飛散調査結果

凍結防止剤の散布期間（11/6～4/14（161日間））の調査の結果を、**図-3.30**に示す。凍結防止剤散布期間の飛散塩分量は、高速道路路肩端からの離隔距離2m付近では、12.5～45.7g/m²であった。離隔距離10m付近では、3.0～4.2g/m²であった。離隔距離10mを超える範囲では、1.4～2.5g/m²であった。

この10mを超える範囲の塩分濃度は、海塩由来の森林流入量¹¹⁾7g/m²に対して20.0～35.7%の値であり、凍結防止剤の飛散影響は、高速道路からの離隔距離10mを超えた場合、拡散してほとんど影響しない値と考えられる。これは、塩化ナトリウム水溶液を多量に含む飛沫状のものは空気抵抗や風の影響を受けにくく重力の影響で遠くには飛散しない。逆にミスト状となった塩化ナトリウムを含む溶液は、重力の影響よりも風の影響を大きく受け遠方へ拡散しながら飛散することによるものと考えられる。

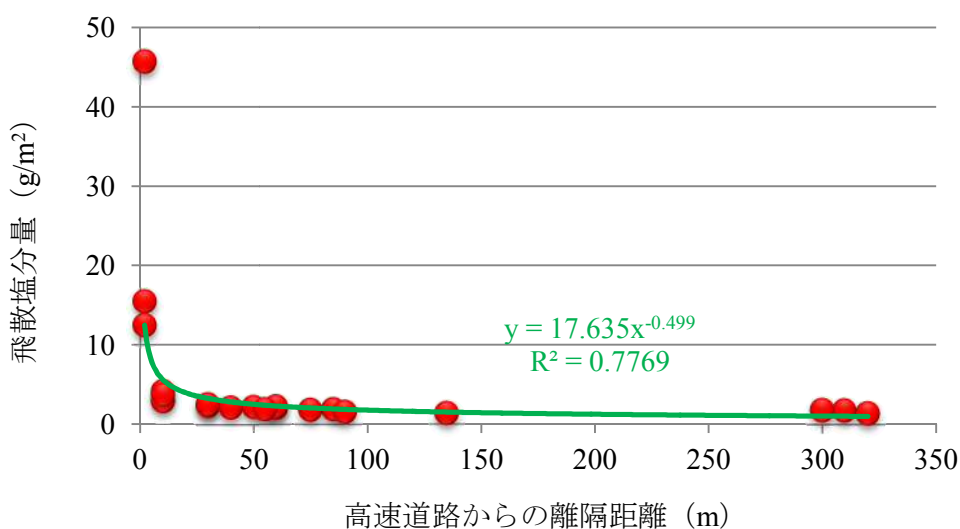


図-3.30 高速道路からの離隔距離と飛散塩分量の関係

3.5 塩化ナトリウムの地下浸透による地下水水質のイオン交換

3.5.1 塩化ナトリウムの地下浸透によるイオン交換

中山間地の上水道が整備されていない高速道路沿線においては、井戸水から水道法に規定される水質基準 200mg/L を超える塩化物イオン濃度が検出された。原因としては、高速道路の冬期路面管理で使用する凍結防止剤（塩化ナトリウム）による影響が懸念されることから道路沿線の水質調査を実施した。水質調査の結果からは、高速道路の下方谷側において 670mg/L と高い塩化物イオン濃度が検出された。しかしながら、図-3.31 に示すとおり、ナトリウムの検出量は、塩化ナトリウムのモル重量比 1:0.649 と比べ 1:0.250 と約 40%の少ない濃度であった。一方、カルシウムの濃度は、塩化物イオン濃度と比例して多く検出された。これは、陽イオンであるナトリウムが地下へ浸透し土壌内において他の陽イオンと入れ替わるイオン交換がなされているものと推測されることより、イオン交換を定量的に推測することとした。

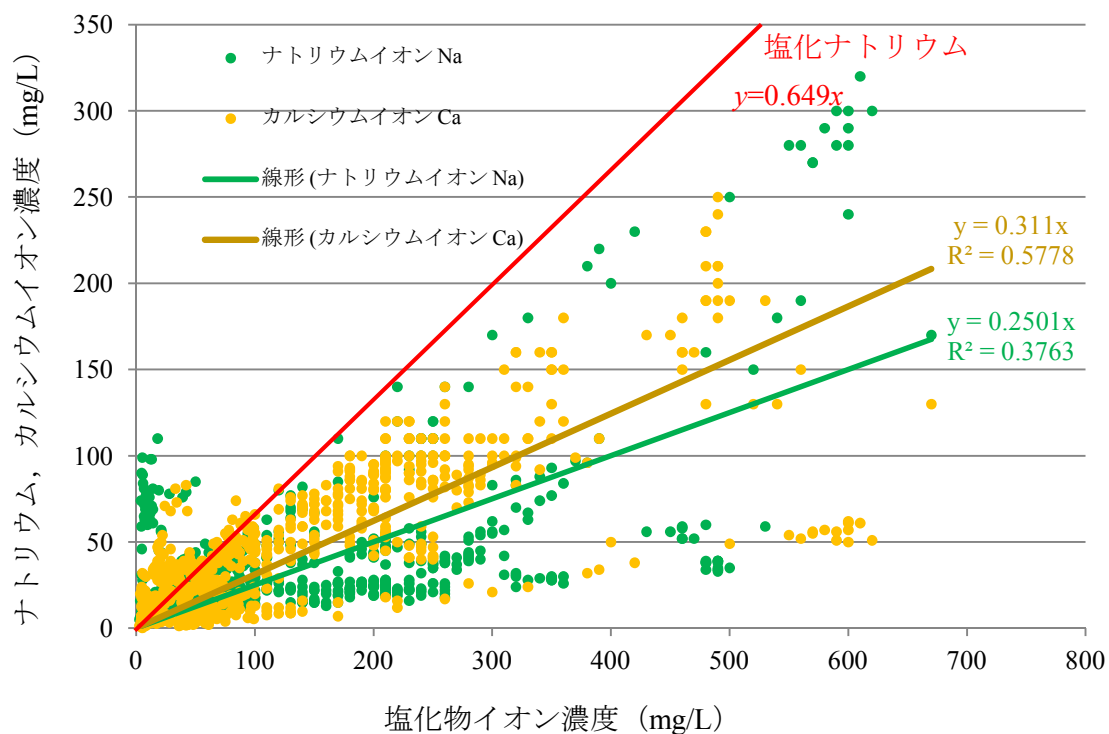


図-3.31 塩化物イオン濃度とナトリウム、カルシウムイオン濃度の関係

3.5.2 ヘキサダイアグラムにおける水質解析

水質の解析にあたっては、塩化物イオン、ナトリウムイオン、カルシウムイオンなどの成分を形状で表せて可視化できるヘキサダイアグラムを採用した。

ヘキサダイアグラムは、ある流域を対象として地下水流動や水質形成の要因、水質形成進化などについて明らかにする場合、単純に各溶存成分の濃度(mg/L)を比較するよりも、これらの値を図示して示したほうがわかりやすくなる。水質をあらわす図として、**図-3.32**、**図-3.33**、**表-3.6**に示すヘキサダイアグラム (hexa-diagram) が良く使われる。ヘキサダイアグラムは、主要溶存成分である Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- の8成分の濃度を陰イオンと陽イオンに分けて、それぞれの濃度を当量値(meq/Lあるいはme/L)として示し、図示したもので、作成した図が六角形を示すことから、ギリシャ語で「6」を意味する「ヘキサ」のことばが使われている。スティッフダイアグラム (Stiff diagram) と呼ぶこともある。

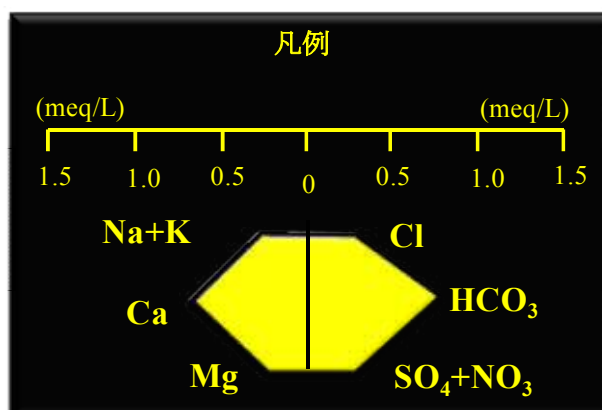


図-3.32 ヘキサダイアグラムの凡例

図の読み方は、中央に引いた直線を0とし、直線の左側は陽イオン (Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})、右側は陰イオン (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)をそれぞれ示し、左側の upper には $\text{Na}^+\text{+K}^+$ 、中央には Ca^{2+} 、下には Mg^{2+} を、右側の upper には Cl^- 、中央には HCO_3^- 、下には $\text{SO}_4^{2-}\text{+NO}_3^-$ を示す。この図上に計算によって求めた当量値をそれぞれプロットする。なお、 NO_3^- は他の成分と区別するために色を付けて表示することが多くなっている。プロットした6点を結ぶと六角形 (ヘキサダイアグラム) が作成され、この形から水質組成を知ることができる。地図上に採水地点と共にヘキサダイアグラムを貼り付けることで、一帯の地下

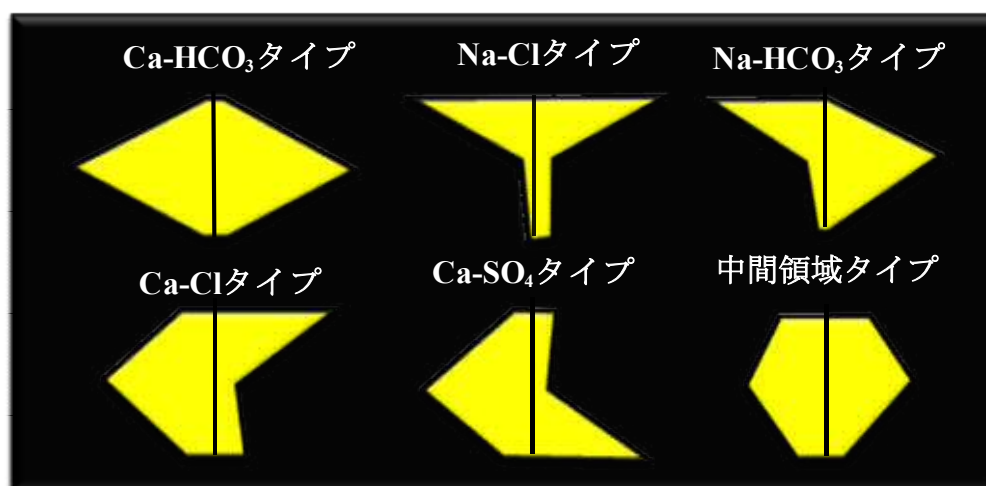


図-3.33 ヘキサダイアグラムによる水質区分図

表-3.6 ヘキサダイアグラムによる水質区分図

タイプ	内容
Ca-HCO ₃ タイプ (重炭酸カルシウム型)	Ca(HCO ₃) ² /Mg(HCO ₃) ² タイプの水質組成で、日本の循環性地下水の大半がこのパターンに該当する。石灰岩地域の地下水が典型例である。
Ca-SO ₄ ,Ca-Cl タイプ (非重炭酸カルシウム型)	CaSO ₄ または CaCl ₂ タイプの水質組成で温泉水や鉱泉水及び化石塩水等に該当する。一般的な河川水や地下水では特殊なケースであり、温泉水や工業排水等特殊な水の混入が考えられる。
Na-Cl,Na-SO ₄ タイプ (非重炭酸ナトリウム型)	NaCl または NaSO ₄ タイプの水質組成で海水、海水が混入した地下水、温泉水が該当する。
Na-HCO ₃ タイプ (重炭酸ナトリウム型)	NaHCO ₃ タイプの水質組成で停滞的環境にある地下水のパターンに該当する。地表から比較的浅い位置にある地下水といえる。
中間領域タイプ	各タイプの中間的なパターンで、河川水、伏流水、循環性地下水の多くがこのパターン。

水等の水質区分が一目でわかり、また一列に並べることで時間的な水質組成の変化などを容易に把握することができる。ヘキサダイアグラムでは、各成分濃度は中央の線からの距離（辺の長さ）で示しているため、厳密に言えば六角形の面積の大小＝濃度の高低にはならないが、おおよその成分量の多少を把握することができる。ヘキサダイアグラムを作成することにより一目で水質組成を把握することができるため、数値だけでは判断しにくい水の流れや温泉水や河川水などの地下水への混入の有無などを知る手がかりとなり、非常に有効な方法となっている¹³⁾。

第3章 水質調査と地下浸透経路

調査地は、標高約 350～500m の中山間地に位置し、高速道路は、比較的緩やかな斜面の中腹を通過し、家屋は、ほぼ中腹斜面の下方谷側に位置している。調査地の地質は、火成岩の安山岩、花崗岩を基岩とするもので、河川沿いには沖積層や段丘堆積物が堆積し、山裾には安山岩や花崗岩の風化した崖錐堆積物が点在している。高速道路は崖錐堆積物と基岩の境界付近を通過している。また、岩塩類が含まれる堆積岩類の分布は認められない地質となっている。

ナトリウムとイオン交換されたカルシウムは、基岩に含まれるカルシウムの含有量による影響等が考えられることから、安山岩と花崗岩の地質が相違する井戸水の成分をそれぞれの水質調査データを基にしてヘキサダイアグラムを作成した。

ヘキサダイアグラムは、その地質の相違により図-3.34 に示すとおり次のタイプに分別することができた。

塩化物イオン濃度の高い高速道路谷側の水質において、花崗岩地帯では、凍結防止剤を散布する前後とも Na が比較的多く、Ca が少ない Na-Cl タイプであったが、安山岩地帯においては、凍結防止剤を散布する前が Ca, HCO₃ を多く含む中間領域タイプで、凍結防止剤を散布した後は Na が少なく、Ca が多い Ca-Cl タイプであった。これは、安山岩地帯において、塩化ナトリウム (NaCl) を主成分とする凍結防止剤以外による原因や Ca を多く含む地層の影響も考えられるため更なる検討を行った。

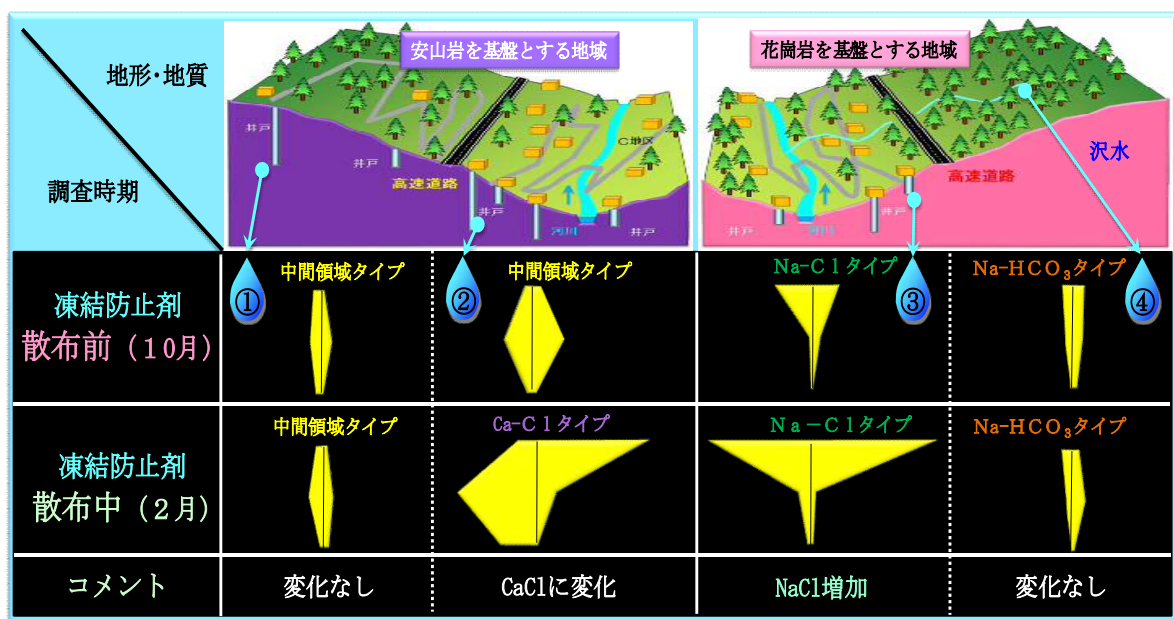


図-3.34 地下水の地質と水質の相違 (ヘキサダイアグラム)

3.5.3 岩質によるナトリウムイオンとカルシウムイオンとの関係

安山岩を基盤とする地域は、Ca-Cl タイプの水質となることから、石灰岩などの Ca を多く含む鉱物の地質¹⁴⁾ による影響等が考えられたことから、安山岩と花崗岩の成分を調査した。

図-3.35 に火成岩の造岩鉱物組成と化学組成の関係を示す。安山岩と花崗岩(写真-3.7) の化学組成は質量比率で比較した場合、安山岩の造岩鉱物は、斜長石(アノーサイト) 及び斜長石が変質した粘土鉱物(Ca 型スメクタイト) が主成分であることより、花崗岩に比べて Ca^{2+} イオンを多く有している。逆に Na^+ は、花崗岩に比べて含有量が少ない鉱物であるといえる。



写真-3.7 安山岩(左)と花崗岩(右)

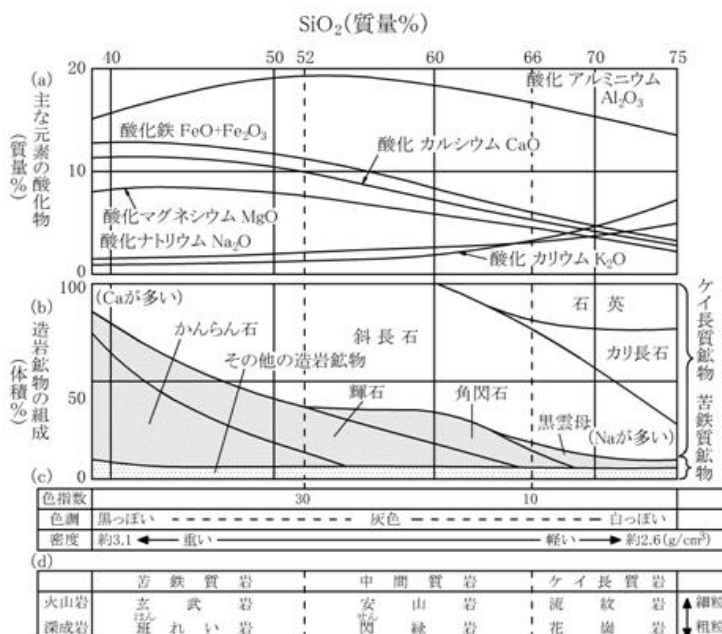


図-3.35 火成岩の造岩鉱物組成と化学組成¹⁴⁾

3.5.4 ナトリウムとカルシウムのイオン交換

土壌の粒子は、陽イオンを吸着する性質を有している。これは、土の粒子が電氣的に（-）であり、（+）の電気を持っている陽イオン（ Na^+ ・ Ca^{2+} ・ Mg^{2+} ・ K^+ 等）を吸着している。個々の土壌には、陽イオンを吸着できる容量（イオン交換容量）が限定されることより、新たな陽イオンの進入によって土壌へ付着するイオンが入れ換わる現象「イオン交換」が行われる。

今回の現象は、図-3.36 に示すとおり、凍結防止剤である塩化ナトリウム溶液が、塩化物イオンとナトリウムイオンとなって、地下へ浸透したとき粘土鉱物である土粒子に吸着しているカルシウムイオンなどの陽イオンと入れ替って、カルシウムイオンが地下水へ流出したものと考えられる。なお、マイナスイオンである塩化物イオンは、逆に土壌粒子と反発しあって離れた陽イオンと共に地下水と混ざって流下するものと考えられる。これは、津波などの塩害を受けた土地の除塩に大量の水を注入するリーチング方法に由来しているものである。

以上から、安山岩と花崗岩のイオン交換を整理すると、図-3.37 に示すとおりと考えられる。

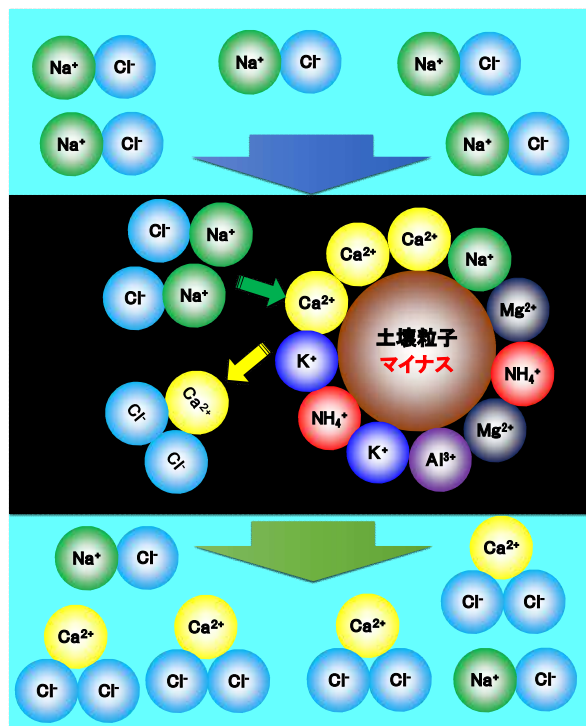


図-3.36 土壌のイオン交換イメージ図

第3章 水質調査と地下浸透経路

イオン交換のメカニズムは、土壤に塩水が流入すると粘土鉱物に吸着していたCaイオンがNaイオンに追い出される。安山岩には、Caイオンが多量に含まれているためNaイオンと交換され地下水へ流出しCa-Clタイプの水質となる。花崗岩は、Caイオンが少ないため、イオン交換量は少ないことからNa-Clタイプの水質となる。

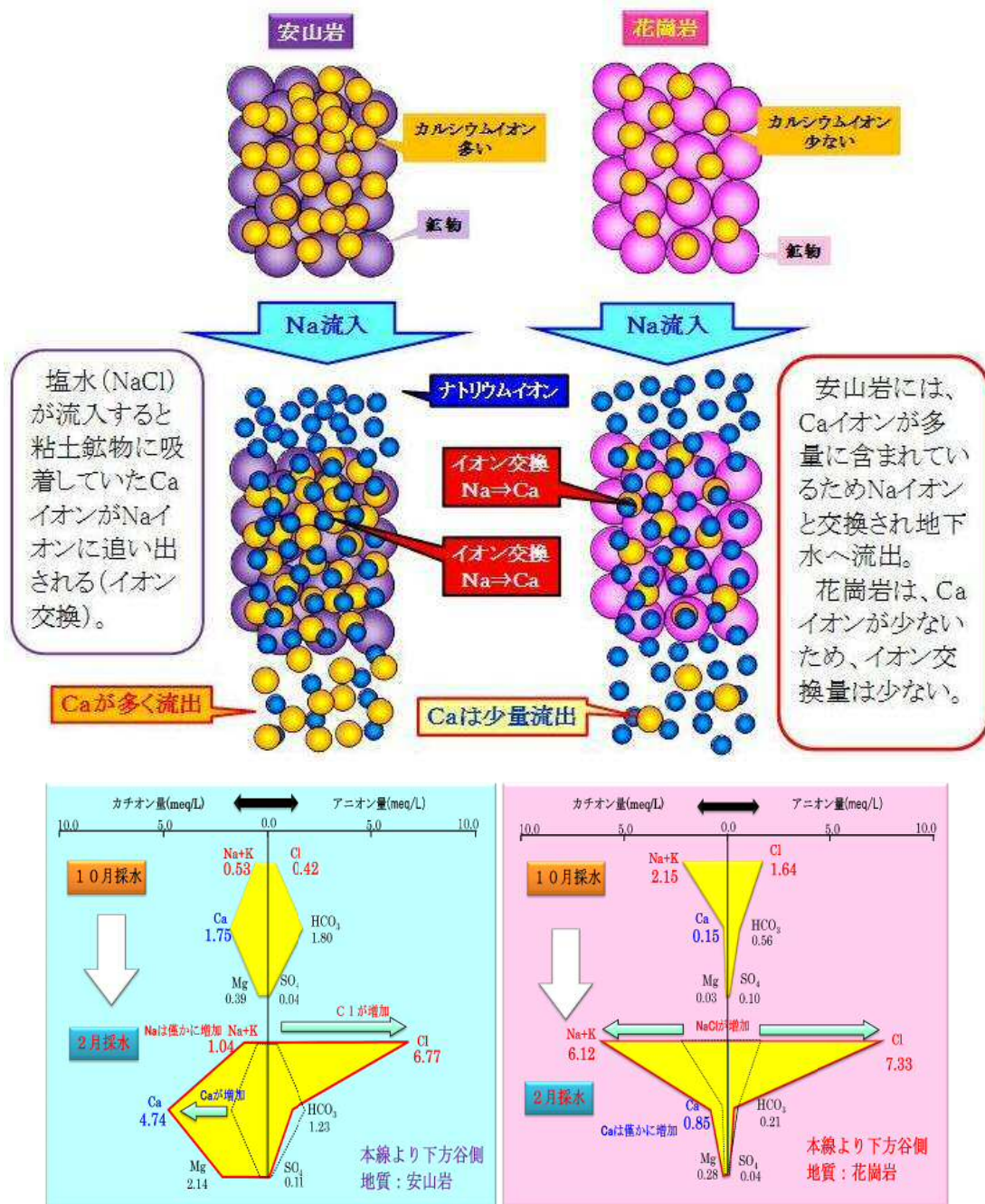


図-3.37 安山岩と花崗岩のイオン交換イメージ図

3.5.5 花崗岩と安山岩の陽イオン交換量

花崗岩と安山岩の岩質別の塩化物イオンとナトリウムイオンやカルシウムイオンの関係について図-3.38, 図-3.39, 図-3.40に示す。

塩化ナトリウムのmol比が, 0.6485 ($\text{Na}/\text{Cl}=22.99/35.45$) であることから, 塩化物イオンとナトリウムイオンの相関 (図-3.38) から花崗岩地帯では, 塩化化合物の約73.0% ($0.4735/0.6485$) がNaClから形成され, 安山岩地帯では, 約26.3% ($0.1703/0.6485$) がNaClから形成されていると推測される。

塩化カルシウムのmol比が, 0.5653 ($\text{Ca}/\text{Cl}_2=40.08/(35.45 \times 2)$) であることから, 塩化物イオンとカルシウムイオンの相関 (図-3.39) から, 安山岩地帯の塩化化合物の約67.3% ($0.3806/0.5653$) が, CaCl_2 から形成され, 花崗岩地帯では, 約20.3% ($0.1150/0.5653$) が CaCl_2 から形成されていると推測される。

以上から, 地質によるおけるカルシウムイオンのイオン交換比率は, 図-3.40に示すとおり, 安山岩で67.3%, 花崗岩で20.3%がナトリウムと交換されたものと推測される。

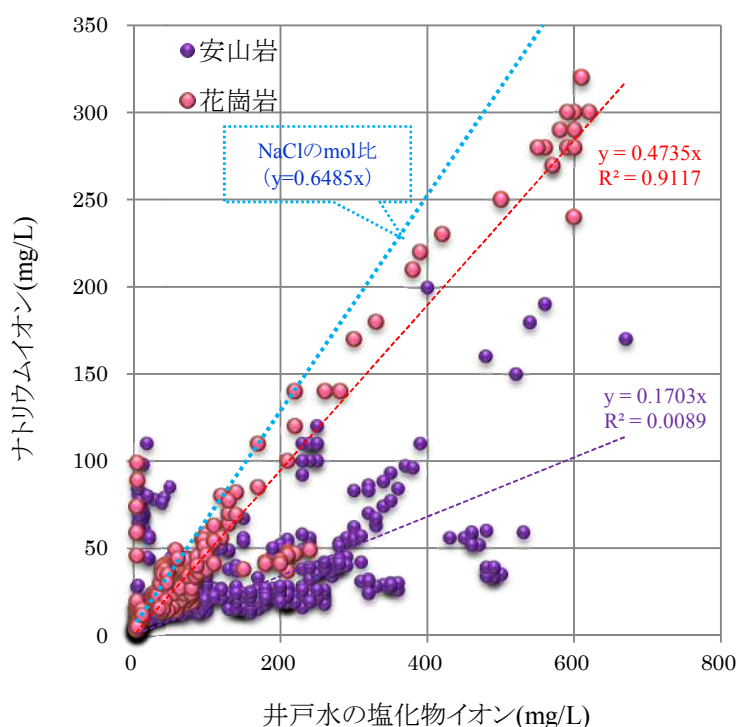


図-3.38 井戸水の岩質別の塩化物イオン濃度とナトリウムイオンとの関係

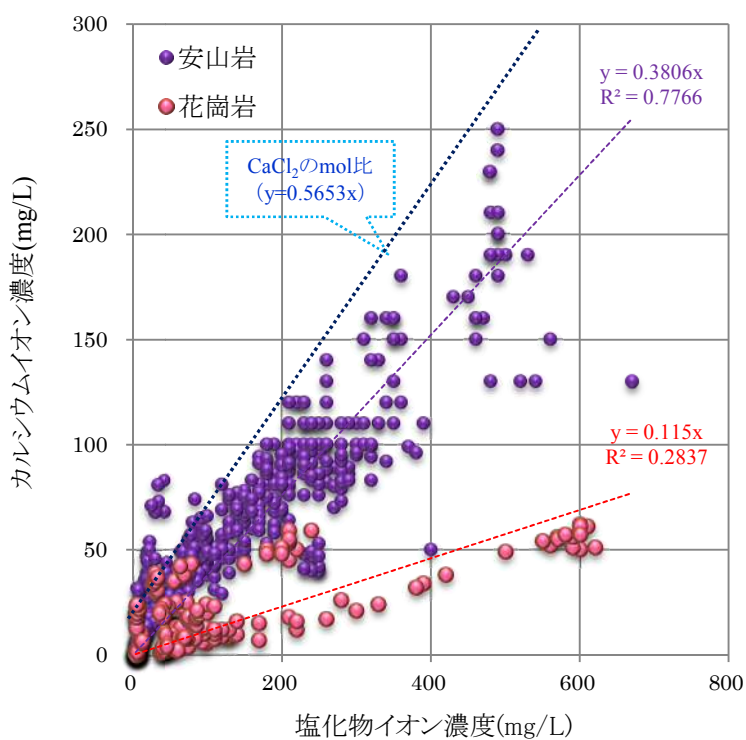


図-3.39 井戸水の岩質別の塩化物イオン濃度とカルシウムイオンとの関係

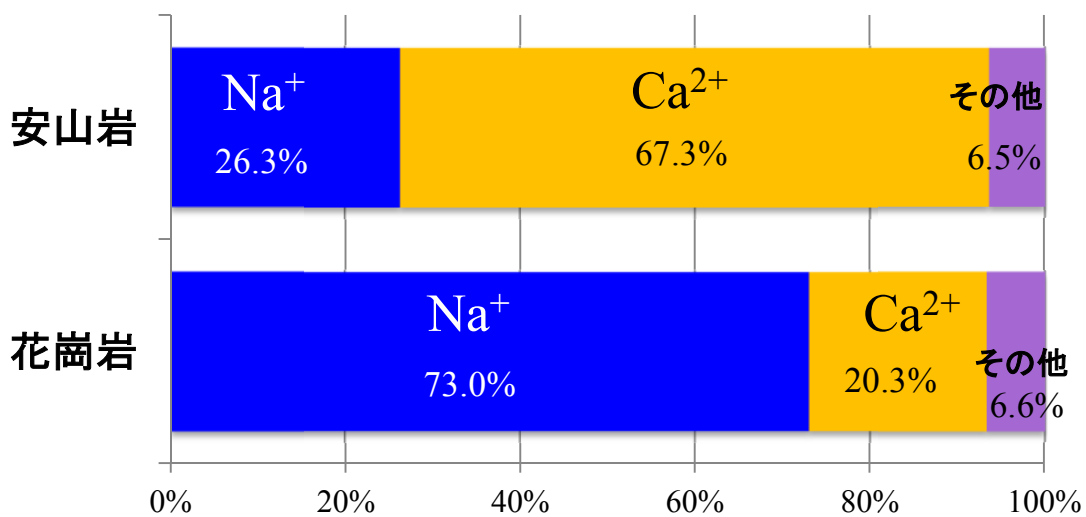


図-3.40 井戸水の地質別のイオン交換比率

3.6 まとめ

高速道路周辺の井戸の水質調査の結果は、高速道路より標高の低い谷側方向では高速道路に近い井戸ほど塩化物イオン濃度が高いことなどが分かった。以下に水質調査の結果を整理する。

- 1) 塩化物イオン濃度は、高速道路より谷側下方において道路に近いほど高い塩化物イオン濃度を検出し、調査における最大の濃度は、水道水の飲料水基準200mg/Lを超える670mg/Lと高い濃度であった。
- 2) ナトリウムイオン濃度は、高速道路より谷側下方において道路に近いほど高い濃度を検出し、その調査における最大の濃度は、水道水の飲料水基準200mg/Lを超える320mg/Lと高い濃度であった。
- 3) 凍結防止剤の主成分ではないカルシウム、マグネシウム、カリウムのイオン濃度も、高速道路より谷側下方において道路に近いほど高い濃度を検出し、その調査における最大の濃度は、カルシウムイオン濃度で250mg/L（水道水基準300mg/L）と高い濃度であった。また、マグネシウムイオン濃度で41mg/L（水道水基準300mg/L）、カリウムイオン濃度は30mg/Lといずれも相対的にやや高い濃度であった。
- 4) 凍結防止剤の主成分ではないカルシウム、マグネシウム、カリウムの陽イオン濃度は、土壤に含まれる陽イオンがナトリウムイオンの浸透により入れ替わるイオン交換によるものと考えられた。
- 5) 酸消費量：CaCO₃（pH4.8）、全硬度、カルシウム硬度、イオン状シリカ（SiO₂）は、カルシウムなどの陽イオンを含んでおり、ナトリウムイオン同様に高速道路より谷側下方において道路に近いほど高い値を検出した。
- 6) 電気伝導率の最大値は、高速道路より谷側下方において道路に近いほど高い値を検出した。その最大値は、純水（1μS/cm）と比べて約2,000倍の2,000μS/cmであった。
- 7) 電気伝導度（μS/cm）は、塩化物イオン濃度（mg/L）との相関（R²=0.9612）が高く、塩化物イオン濃度（y）と電気伝導率（x）との相関関係は、 $y=0.3108x-37.301$ であった。
- 8) 一般細菌、pH（25℃）、硫酸イオン、その他の項目の水質調査結果は、高速道路や凍結防止剤との相関関係は認められなかった。

凍結防止剤の井戸への浸透経路を確認するため、散水調査などを実施し浸透流出経路

第3章 水質調査と地下浸透経路

と凍結防止剤の散布量に対する流出収支について検討した。その結果を以下に記す。

- 1) 散水試験などにより、路面に散布された凍結防止剤のうち25%が路面のクラック等から地下に浸透、26%が水路目地の切れ目から地下に浸透、39%が地表水に混じって直接河川へ流出し、10%は路外等へ飛散していることを推計した。
- 2) 舗装路面のクラックなどから切土部の地下へ浸透した凍結防止剤は、舗装の切込砕石の路盤内を經由して、透水係数の高い盛土付近で地下へ浸透していることを推定した。
- 3) 路外への飛散範囲は、高速道路の路肩端部からおおむね10m以内に留まり、10m以上の飛散量は 2.5g/m^2 以下の値であった。
- 4) イオン交換は、基盤となる岩質の成分により異なり、安山岩は、花崗岩と比べてCaを多く含有しており、凍結防止剤に含まれるNaは、安山岩の地盤内通過により約67.3%、花崗岩で20.3%がCaとイオン交換されていることが推計された。

第3章の参考文献

- 1) 厚生労働省 (2014) : 水質基準に関する省令の規定に基づき厚生労働大臣が定める方法(平成15年厚生労働省告示第261号), (オンライン), 入手先<<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000045881.pdf>>
- 2) 日本冷凍空調工業会 (1994) : 冷凍空調機器用水質ガイドライン (JRA-GL02:1994), 社団法人日本冷凍空調工業会, p12-13.
- 3) 日本環境管理学会編(2009) : 改訂4版水道水質基準ガイドブック, 丸善株, p.114-115, p.109-110, p.22-24, p193, p136-137.
- 4) 日本水道協会 (2017) (参照 2017.6.8) : 水質基準項目, 快適水質項目等の解説 (オンライン) 入手先<www.jwwa.or.jp/mizu/pdf/2002-kaisetsu.pdf>
- 5) 奥平智之 (2016) (参照 2017.6) : カリウムはどのようなもの, (オンライン) 入手先<<http://www.skincare-univ.com/article/017315/>>
- 6) グリコ (2017) (参照 2017.6) : 栄養成分百科, (オンライン) 入手先<http://www.glico.co.jp/navi/dic/dic_08.html>
- 7) 日本分析機器工業会 (2013) (参考2017.6.7) : 電気伝導率計の原理と応用, (オンライン) 入手先<<https://www.jaima.or.jp/jp/analytical/basic/electrochem/ec/>>
- 8) 広島県 (2017) (参照 2017.6.7) : 酸性雨の状況について, (オンライン) 入手先<<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/site/eco/f-f2-sanseiu-joukyou.html>>
- 9) 秦二郎・佐々木薫・諸泉利嗣 (2015) : 凍結防止剤の地下浸透量・河川流出量及び飛散量の定量化, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, p461-471.
- 10) 佐々木薫・秦二郎・諸泉利嗣 (2016) : 塩化ナトリウム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, No.0155.
- 11) 木村恵子, 曾根真理, 並河良治, 桑原正明, 角湯克典 (2007) : 凍結防止剤散布と沿道環境, 国土交通省国土技術政策総合事務所資料, No.412, p35-52.
- 12) 吉江誠吾, 齋藤辰哉, 渡辺 亨 (2001) : 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, 38, p70-79.
- 13) 日本地下水学会 (2017) (2017.6.8参照) : 水質に関する説明, (オンライン) 入手先<<http://www.jagh.jp/content/shimin/images/wakimizu/20111002/suishitu.pdf>>
- 14) 古米弘明, 山本晃一, 佐藤和明 (2012) : ケイ酸その由来と行方, 技報堂出版, p27-36.

第4章 高速道路沿線の農地土壌環境への影響

4.1 はじめに

冬期の高速道路では、安全で快適な路面を確保するため、除雪や路面の凍結を防止する目的で凍結防止剤散布等の雪氷対策作業が実施されている¹⁾。凍結防止剤は、路面水分の凍結温度の結氷点を低下させる目的で使用される。凍結防止剤の散布作業は、主に粉碎塩を湿塩散布機により、風などによる飛散を減らす目的で塩水と混合して路面に散布される。その冬期1シーズンの使用量は、山間部の降雪地域で高速道路延長1km当たり50t程度である。通常、この凍結防止剤は、水に溶けやすく路面へ散布された後、降雨や降雪融解水等に混ざって用排水路を通じて近傍の河川へ流出し、河川水と混ざって低濃度に希釈され、海へ流下していく。この凍結防止剤は、安価であり、人体への影響が少ないことから、塩化ナトリウムが多用されている。

しかし、路面へ散布された凍結防止剤は、すべてが水路から排出されるわけではなく、車両の通行による水しぶきなどで飛散するため、道路沿線周辺の農地への影響が懸念される。飛散塩分量は、国土交通省の調査によれば、道路路肩端から1~5mの範囲に集中し、散布量の7.4%以下となっている。このため自然生態系への影響の可能性は、路肩から5m以内と考えられる²⁾。この飛散量は、交通量や気象条件等による相違はあるが、高速道路で散布され飛散する塩分量は、冬期1シーズンの高速道路延長1km当たり3.7t程度見込まれる。この量は、比較的多く高速道路沿線の農地土壌に影響を与える恐れがあることから調査の必要性があった。また、当地区の農業用水は、凍結防止剤を散布しない春から秋にかけての使用ではあるが、残留塩分などによる農業用水への影響についても調査する必要性があった。

なお、高速道路の保護路肩端に積もった雪の塩分量を調査した結果は、8.1~20.8g/m²の塩素濃度が検出されている³⁾。凍結防止剤を植物の枝葉に直接散布した場合は、25g/m²以上散布で育成被害の程度が大きく、特に塩化ナトリウムのナトリウムが被害の主要因と報告されている⁴⁾。また、国外の米国レイク・タホ地区においては、凍結防止剤による環境被害が生じ、道路沿線の何千本もの樹木が枯れて切り倒されている。この樹木の枯れた原因は、長年蓄積された塩の付着や塩水の吸収が原因と指摘されている⁵⁾ことから凍結防止剤による高速道路の沿道に位置する農地などへの影響が懸念される。

本章では、このような環境被害を背景に、高速道路で散布飛散する凍結防止剤に含まれる塩素とナトリウム（以下、交換性ナトリウムとする。）について高速道路沿線の農地土壌や農業用水への飛散状況を調査し、既存の知見を参考に、凍結防止剤による農地土壌や農業用水への影響を明らかにした。

4.2 調査方法

4.2.1 飛散した凍結防止剤量と土壌に対する影響の調査方法

土壌塩分調査の対象地を図-4.1に示す。対象地は、供用30年以上経過した高速道路に最も近接し高低差の少ない畑地を選定した。当地区の高速道路周辺の地質は、安山岩を基岩とし、河川沿いには、沖積層や段丘堆積物が堆積する。山裾には、安山岩の風化した崖錐堆積物が点在している。高速道路は、この崖錐堆積物と基岩の境界付近を通過している。

道路は切土部に位置する全幅20.5mの4車線道路で縦断勾配4%、横断勾配5%、曲率半径600mの幾何構造で、年平均日交通量は2010年調査で約6千台である。家屋は、斜面中腹や河川沿いの平地部へ点在している。その周辺には畑や栗の木等の雑種地がある。河川周辺には、この河川水を農業用水とした圃場整備された水田が営まれている。

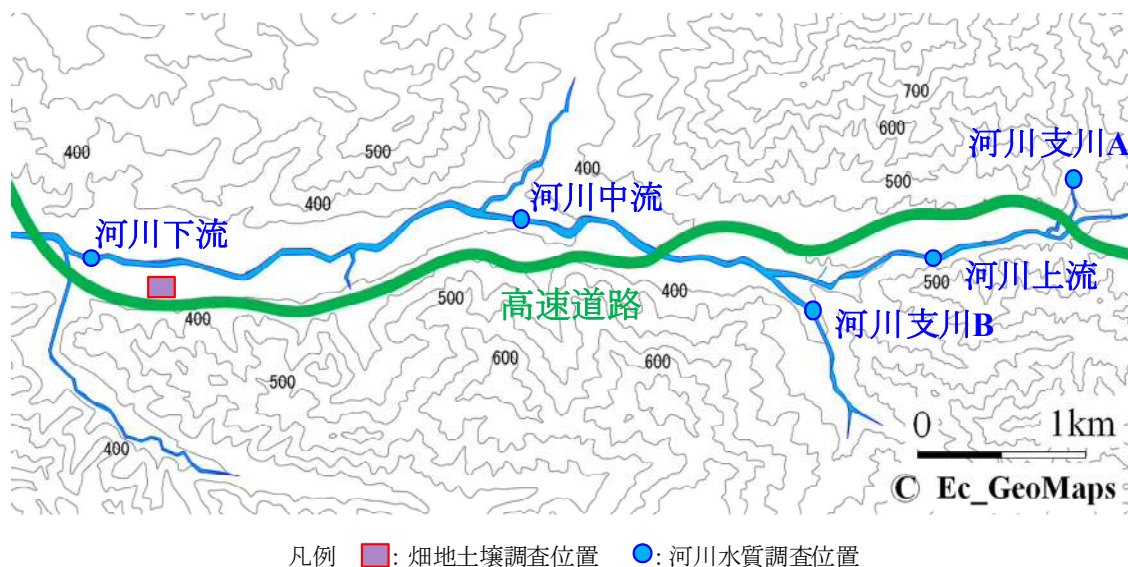


図-4.1 畑地土壌と農業用水調査位置

山林は、一部がスギ、ヒノキ等の植林が育成されているが、ほとんどは、栗・クヌギ等の広葉樹の雑木が密生している。なお、当地区の気象は、過去5年間の日平均気温が13.0℃、年平均降水量が1,654mmで、日平均降水量は4.5mmである⁶⁾。

土壌の調査は、凍結防止剤を散布する前後の時期を含めた2012年11月～2013年4月に実施した。調査回数は、凍結防止剤を散布する前の11月初旬、凍結防止剤散布期間の1月中旬、3月中旬、散布後の4月中旬の4回とした。

また、その他の調査としては、土壌調査期間における当地区での凍結防止剤の散布量、降水量を合わせて調査集計した。なお、降水量は、調査地点から約10km離れたNEXCO気象観測局のデータを使用した。

凍結防止剤の飛散影響調査の範囲は、高速道路路肩端から10mまでとした。これは、凍結防止剤の地表へ落下する飛散塩分量は、路肩からの距離が10m以上になるとほとんどなくなり、沿道環境への影響は無視できるものと見受けられる⁷⁾ことによる。

土壌の個々の調査箇所を、写真-4.1、図-4.2に示す。調査断面は、雑種地A列の1断面と畑地B、C列の2断面として、それぞれの本線路肩端からの離隔距離が1.5mの高速道路の敷地内の畦部、5.0mと10.0mの雑種地と畑地部とし、調査場所の番号は、列記号に加えて枝番号を離隔距離が1.5mの位置を1、5mの位置を2、10mの位置を3と付した。

土壌の調査深度は、畑の根域となる有効土層の40cmとした。特に耕土である表土は、10cmとして10cm範囲を2層5cm単位で分析を行うこととした。表土以下の10～40cmの深度については、10cm単位で分析を行うこととした。土壌試料の採取は、表土0～10cmをシャベルで、10～40cmをライナー採土器DIK-110Cにより行った。

土壌調査項目は、農地土壌に対する凍結防止剤の主成分である塩化ナトリウムによる影響を調査する必要性から、土壌中の塩素濃度と交換性ナトリウム含量とした。なお、土壌中の交換性ナトリウムについては、塩害の指標として交換性ナトリウム飽和度(Exchangeable Sodium Percentage; ESP(以下、ESPとする。))が使用されている。ESPは、土壌の陽イオン交換容量(Cation Exchange Capacity; CEC(以下、CECとする。))のうち交換性ナトリウム含量が占める割合を表し、この割合により農地の状態を把握し土壌の改良の目安とされている⁸⁾ことから、ESPとCECを合わせて調査項目とした。

土壌の分析方法は、採取した試料を風乾・砕土して、塩素濃度は、地盤工学会基準JGS0241-2000⁹⁾により分析した。これは、風乾土試料の1:10浸出液を、JISK0102工

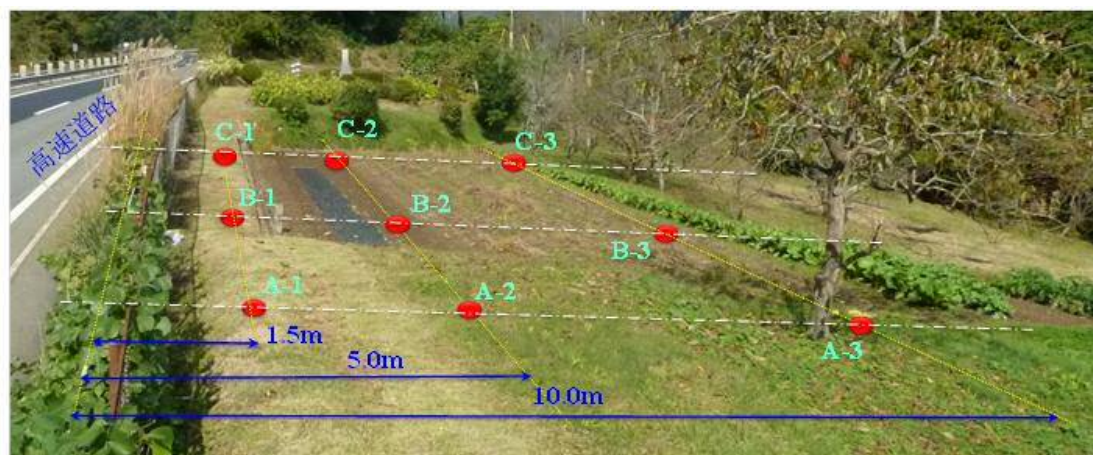


写真-4.1 畑地土壤調査箇所

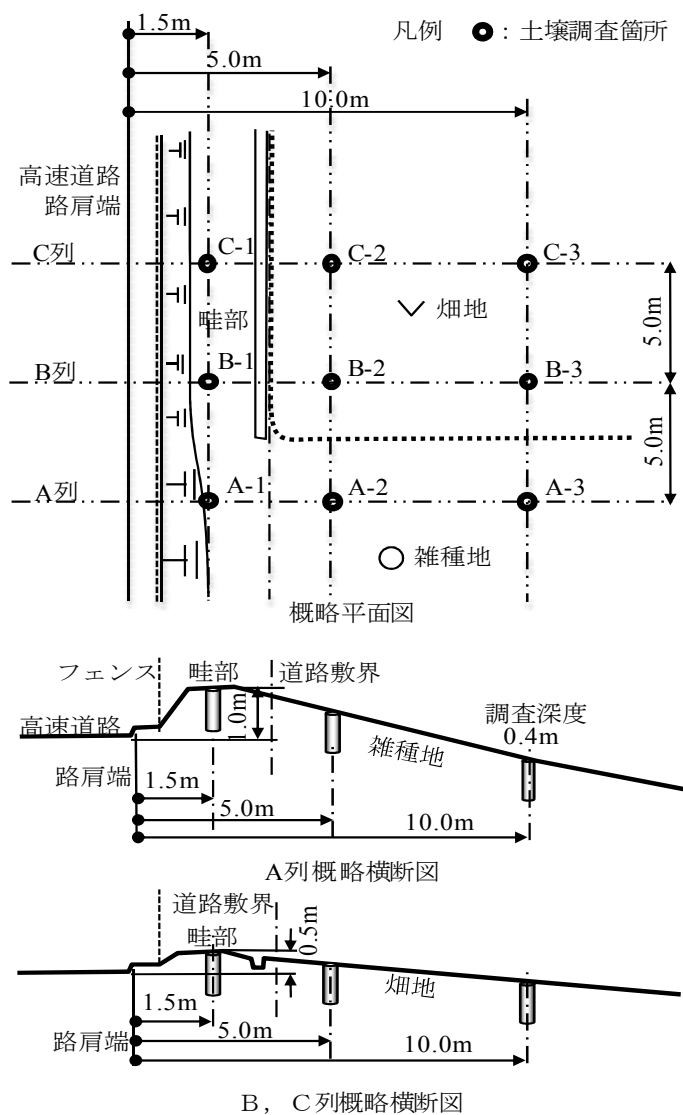


図-4.2 土壤調査箇所の平面図と横断面図

場排水試験方法に規定されているイオンクロマトグラフ法を用いて測定した。イオンクロマトグラフはTOSOH IC-2001を使用した。交換性ナトリウム含量とCECの分析方法は、土壌養分分析法のナトリウムの置換性ナトリウムと塩基置換容量のセミマイクロSchollenberger法¹⁰⁾により、原子吸光光度法を用いて測定した。なお、ESPは、分析結果から交換性ナトリウム含量(mg/kg)をmmol当量に換算しCEC(mmol/kg)で除して算出した。

4.2.2 農業用水に対する影響の調査方法

当地区の農業用水は、**図-4.1**に示す高速道路とほぼ平行して流れる河川の水が使用され、凍結防止剤はこの河川へ降雨や融雪水と混ざって混入する。このため、水田や畑地灌漑への影響は、農業用水として使用されるこの河川の水質を調査して評価することとした。

水質調査項目は、河川水の塩素濃度とした。なお、農業用水の塩素濃度の目安としての指標として、電気伝導度(EC)(以下、ECとする。)が定められている¹¹⁾ことから、ECも合わせて調査した。

塩素濃度は、水道法に基づく試験方法、水質基準に関する省令の規定に基づき厚生労働大臣が定める方法(平成15年厚生労働省告示第261号)¹²⁾の水質検査項目塩化物イオンの分析方法のイオンクロマトグラフ法を用いて測定した。イオンクロマトグラフは、DIO-NEX製DX-320を使用した。ECは、河川水質試験方法(案)に基づく日本水道協会の上水試験方法2001¹³⁾による導電率の試験方法を用いて測定した。EC計測器には、TOADKK CM-60Gを使用した。

採水位置を**図-4.1**に示す。採水位置は、流域に高速道路がある河川の上中下流の3箇所と流域に高速道路がない河川の支川A、Bの2箇所で行った。採取方法は、精製水で洗浄したポリエチレン瓶を使用して河川から直接採水した。

調査は、凍結防止剤散布前から散布完了後までの期間2011年10月～2012年3月及び2012年11月に実施した。採水頻度は、10～11月は月に1回、12～3月は月に3回行った。なお、河川の支川A、Bにおいては、厳冬期の1月下旬から3月の下旬の間に6回実施した。

4.3 調査結果

4.3.1 凍結防止剤の散布量と降水量

土壌の調査期間中 2012 年 11 月～2013 年 4 月の調査箇所における凍結防止剤の日散布量と日降水量を図-4.3 に示す。凍結防止剤の散布作業日は 71 日、散布回数は 157 回であった。散布日 1 日当たりの散布量は、高速道路延長当たり 280～1,400g/m で、冬期 1 シーズンの凍結防止剤の合計散布量は 43,960g/m であった。また、凍結防止剤に含まれる塩化ナトリウムの純度が 95%であることより、塩素量は、合計 25,333g/m で、散布日 1 日当たり平均は 357g/m であった。交換性ナトリウム量は、16,429g/m で、散布日 1 日当たり平均は 232g/m であった。

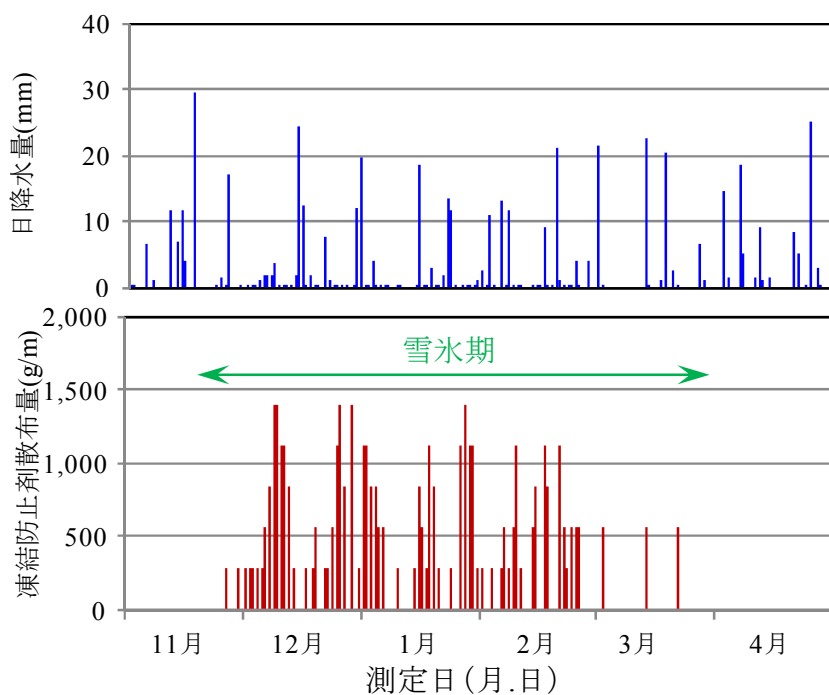


図-4.3 日別の凍結防止剤散布量と日降水量

なお、当地区周辺の凍結防止剤の流出収支は、路面クラックなどからの地下浸透が約 25%、道路からの路肩外への飛散その他が約 10%、残り 65%が排水路に流出し、このうち 26%が水路の施工目地などから地下へ浸透し、河川へ流出するものは 39%であった³⁾。凍結防止剤の飛散その他が約 10%であったことより、冬期 1 シーズンの道路片側の

路肩外への飛散量は、塩素量で約 1,266g/m、交換性ナトリウム量で約 821g/m 以下と推計される。

降水量を図-4.3 に示す。調査期間中の 11～4 月の 182 日間の総降水量は、510mm で各月平均的に降水があった。雪氷期の 11 月中旬～3 月下旬の 137 日間においては 327mm で、日平均 2.4mm の降水量で年平均の日降水量と比較した場合 53%の降水量になる。なお、降雪量は降水量に換算して示した。

4.3.2 土壌の塩素濃度の推移

土壌中の塩素濃度の調査結果を図-4.4 に示す。土壌の塩素濃度の推移は、凍結防止剤散布前の 11 月においては、高速道路路肩端からの離隔距離 1.5～10m の各層とも土壌の乾燥質量当たり 0～50mg/kg で、概ね低値であった。ただし、C-2 の畑地部の深度 30～40cm においては、50mg/kg の比較的高い値であった。これは同地点で交換性ナトリウムも高い時期であることから、塩素が下方移動の途中であると考えられた。

雪氷期間の 1～3 月は高速道路路肩端からの離隔距離 1.5m において 10～90mg/kg の値で表層部の濃度が高い値であった。5～10m の位置においては 0～30mg/kg と深度に関係なく比較的低く推移した。雪氷期後の 4 月においては、C-1 の畦部を除いて 0～20mg/kg と比較的低い値であった。C-1 部は、20～60mg/kg と下層部方向に濃度が上昇していた。また、A-1 の畦部は、11～1 月には大きな変化はなく、3 月に表層部 0～10cm で 50～60mg/kg の値であった。これは、図-4.2 の概略断面図に示すとおり本線との高低差が、畑地 B、C 断面と比べ雑種地 A 断面が約 50cm 高い位置にあることにより、凍結防止剤が飛散しにくく、風向風速等の気象条件によるばらつきなどが原因と考えられる。

4.3.3 土壌の交換性ナトリウム含量の推移

土壌中の交換性ナトリウム含量の推移を図-4.5 に示す。交換性ナトリウム含量は、高速道路から離隔 1.5m 地点の畦部で土壌の乾燥質量当たりで 30～450mg/kg と比較的高い値で、高速道路から離隔 5～10m 地点の畑地で最大 150mg/kg、雑種地で 50mg/kg と比較的低い値であった。

C-1 の畦部では、凍結防止剤の散布以前に 110～210mg/kg であったものが散布期間中には、徐々に増加し、散布後の 4 月時点でも 3 月時点の含量と同程度となっていた。

A-1 の畦部では、1月に比較的低い値を示しているが、3月から4月にかけて若干ではあるが徐々に増加している傾向がある。畦部では、表土より深部の含量が比較的に低く、畑地、雑種地では、深部の含量が比較的に高くなっている。C-1部を除き塩素濃度の推移と比べて全体的には、時期別に対して大きな変化が少なく概ね一定した含量の分布となっている。これは、ナトリウムが陽イオンであり土壌に吸着して移動しにくいことによるものと考えられる。

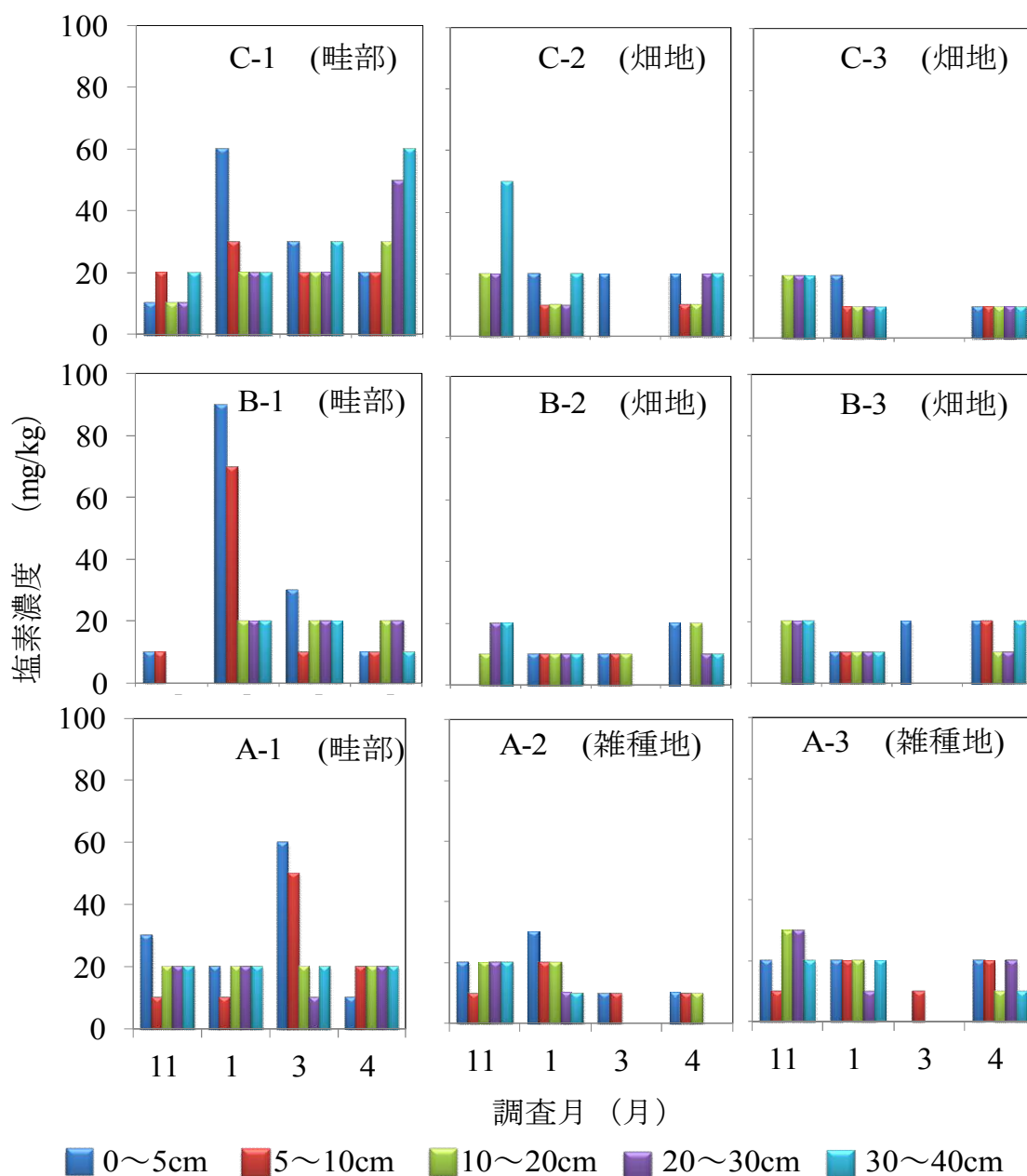


図-4.4 土壌中の塩素濃度の変化

第4章 高速道路沿線の農地土壌環境への影響

CEC の調査結果を表-4.1 に示す。また、CEC と交換性ナトリウム含量の調査結果を用いて算出した ESP の値を図-4.6 に示す。

ESP は、高速道路から離隔距離 1.5m の畦部においては、全期間を通じて 1.1～16.3% で平均 6.4% と高い値であったが、下層部になるほど緩やかに減少している。離隔距離 5m では 0.2～5.4% で平均 1.1%、離隔 10m では 0～1.1% で平均 0.5% となり、高速道路から離れるほど減少している。この畑地や雑種地では、畦部とは異なり下層部になるほど緩やかに上昇している箇所がある (図-4.6, C-2)。ESP は道路付近で通常より高い値であるが、道路から 10m ほど離れると表層の ESP は非常に低く推移し、ナトリウムの影響は極めて低いと考えられる。

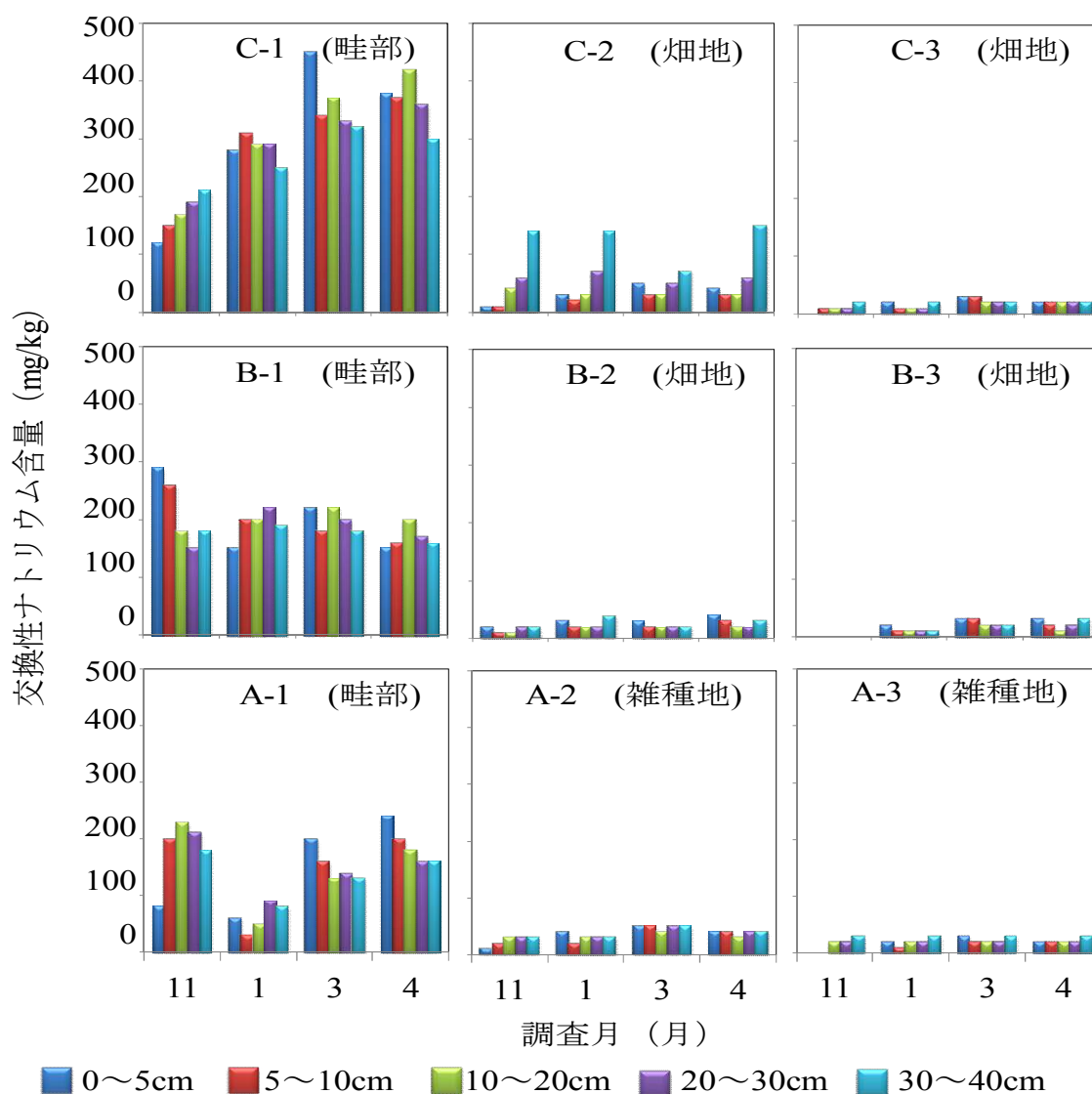


図-4.5 土壌中の交換性ナトリウム含量の変化

表-4.1 農地土壌の陽イオン交換容量 (CEC)

土壌深度 (cm)	陽イオン交換容量 (CEC) (mmol/100g)		
	畑地	雑種地	畦部
0~20	23	23	12
20~40	12	12	21

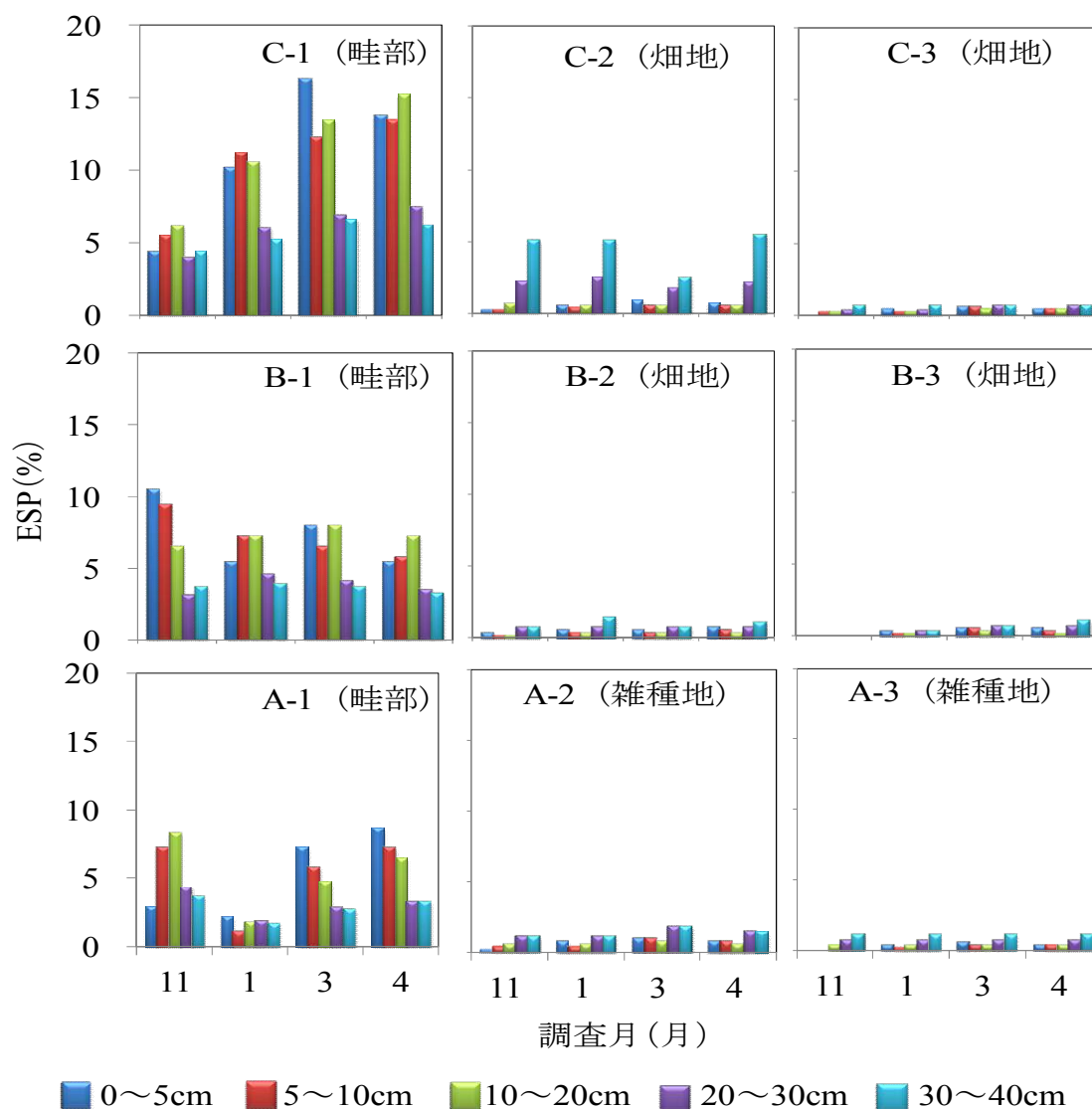


図-4.6 土壌中の交換性ナトリウム飽和度 (ESP) の変化

4.3.4 河川の塩素濃度の推移

高速道路周辺の河川における塩素濃度と EC の調査結果を図-4.7 に示す. 高速道路の影響を受けない流域の河川支川 A, B は, 凍結防止剤散布期間中のみでの調査結果では

あるが、塩素濃度が2.9~5.2mg/Lで、平均4.2 mg/Lであった。ECが0.03~0.05dS/mと凍結防止剤の散布期に関わらずほぼ一定で非常に低い値であった。これは、当地区の自然由来の塩素濃度やECと考えられる。

一方、高速道路の影響を受ける流域にある河川の凍結防止剤散布期外の10~11月においては、塩素濃度が14~28mg/L、ECが0.08~0.15dS/mであり、河川支川A、Bに比べると高い値であったが、後述する散布期間中よりは低い値であった。凍結防止剤が散布される雪氷期の12~3月においては、塩素濃度が13~79mg/L、ECが0.07~0.30dS/mであり、河川支川A、B及び散布期間外の何れよりも高い値であった。凍結防止剤の散布によって一時的に高い値となる時期があるといえる。しかし、凍結防止剤の散布が終了すると速やかに低下した。

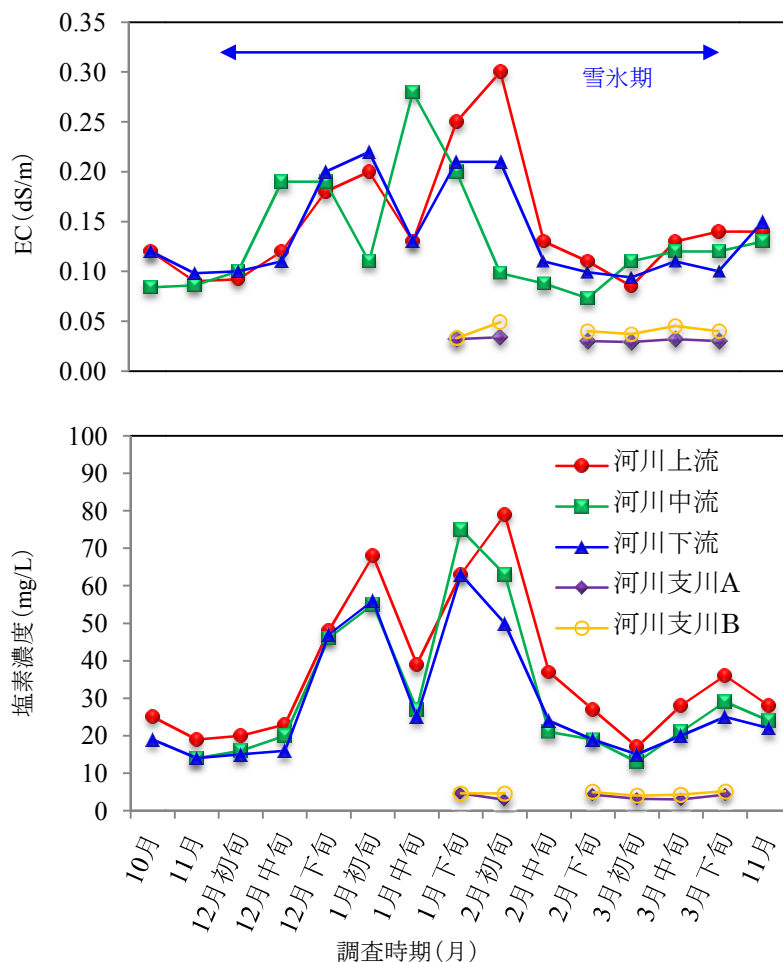


図-4.7 河川の電気伝導度 (EC) と塩素濃度の変化

4.4 考察

4.4.1 土壌中の塩素濃度と交換性ナトリウム含量の分布

4.4.1.1 塩素濃度の分布

塩分による土壌への影響としては、土壌中に海水や海底の土砂等が浸入し塩分濃度が上昇すると、植物における浸透圧ストレスやイオンストレスが高まり、収量や品質に悪影響をもたらす¹⁴⁾。また、塩化ナトリウムに含まれる塩素は、主に植物の水分保持力を阻害し立ち枯れをおこさせる²⁾など、耐塩性を超える作物栽培限界域の塩分濃度は、作物に育成障害が生じるとされ、水稻にあつては、土の炉乾燥質量当たりの塩素濃度が1,000mg/kgで、農作物のレタス、ニンジンにあつては、500mg/kgとされている¹⁴⁾。また、キュウリのような耐塩性の低い作物の場合には、土の炉乾燥質量当たりの塩素濃度は400mg/kg以下といわれている²⁾。以上から、本報では畑土壌の作物栽培限界域の塩素濃度は400mg/kg以下を閾値とした。

塩素濃度の水平方向の分布は、**図-4.4**より高速道路から離れるに従って相対的に減少している。調査期間中の最大塩素濃度は、1月の離隔距離1.5mの畦部の表土0~5cmにおいて90mg/kgであった。この濃度は、農作物の生育障害が発生する閾値400mg/kgに対して23%と低い濃度である。さらに離れた畑地や雑種地の冬期の調査最大塩素濃度は30mg/kgと閾値に対して8%の低濃度である。これらのことから、供用から30年以上にわたり凍結防止剤の散布が繰り返された高速道路に隣接する農地土壌の塩素濃度は低い値であり、環境への影響はないものと考えられる。

なお、**図-4.4**のC-1断面は、凍結防止剤の散布前11月は比較的低濃度であったが、凍結防止剤散布時期1月には表土0~5cmの位置で60mg/kgの塩素濃度が検出され、その後4月には、表土から30~40cmの位置で60mg/kgの塩素濃度が検出された。この表層より深部の塩素濃度が高くなって行くのは、89日で32.5cmの鉛直方向への移動が考えられ、約11cm/monthの速度で地下へ浸透していると推測される。これは、畑地土壌の塩素が、降雨によるリーチング作用によって土壌地下方向へ浸透流下したのと考えられる。また、本調査期間は、雨の少ない渇水時期であり、雨の多い春から梅雨時期には、さらに速い速度で地下へ浸透するものと考えられ、春から秋にかけての農繁期にはほとんど影響を与えないと考えられる。

4.4.1.2 ESPの分布

交換性ナトリウムは、土壌中の交換性塩基間のバランスが崩れると拮抗作用により養分の吸収能力が低下し、作物の生理障害が発生しやすくなる¹⁵⁾。肥料3要素のひとつのカリウムは、交換性ナトリウムと拮抗し、作物によるカリウム吸収は、培地の交換性ナトリウムの濃度が高くなるほど阻害されやすい¹⁶⁾。また、交換性ナトリウムは、土壌の単粒化や固結化など、土壌の物理性が悪化するために作物の生育障害を引き起こす¹⁴⁾などの影響がある。この土壌中の交換性ナトリウムについては、国際稲研究所 (IRRI) において、交換性ナトリウムに関する塩害の指標として、ESPを示している。ESPは5%未満が通常の農地の状態で、20%以上が改良の目安とされている⁸⁾ことから、交換性ナトリウム含量については、ESPの20%を閾値とする。

ESPの水平方向の分布は、図-4.6より高速道路から離れるに従って相対的に減少している。土壌のESPの最も大きい箇所は、本線からの離隔が1.5m畦部のC-1断面で16.3%であった。改良を必要とする閾値の20%を超える箇所はなかった。畑地、雑種地における最大値は、本線からの離隔が5.0m畑地のC-2断面で深さ30~40cmの位置で5.4%と閾値以下の低い値であった。

このことより、凍結防止剤に起因するナトリウムによる農地土壌への影響は、限定的と考えられる。

なお、交換性ナトリウム含量の推移は、凍結防止剤を継続的に散布して30年以上経過した土壌における各調査地点の雪氷期前後の変化が、塩素濃度の推移と比べ大きな変化がなく比較的一定している。このから、この農地土壌に含まれる交換性ナトリウム含量は、長期間のナトリウムの一定供給により安定的な状態で推移しているものと考えられる。

塩化ナトリウムの塩素とナトリウムのmol当量比は、1:0.649の比率であるが、図-4.4、図-4.5に示す雪氷期の濃度分布が顕著なC-1のそれぞれの平均値は、塩素濃度が30mg/kg、交換性ナトリウム含量が337mg/kgであり、この地点のmol当量比率は1:11.2の比率となる。この交換性ナトリウム含量は、塩化ナトリウムmol当量比率の約17倍相当のナトリウムが土壌に蓄積されていることになる。これは、土壌粘土鉱物が負の荷電を持っているため、陽イオンであるナトリウムが土壌に吸着し、下方への移動速度が遅く、逆に塩素はナトリウムより速い速度で下方浸透するためと考えられる。

なお、農地土壌の交換性ナトリウム含量は、高速道路の畦部1.5mにおいて比較的高い値であったが、一般的な高速道路では、路肩端から保護路肩や環境施設帯として3m

以上の離隔距離が確保されており、隣接する農地土壌に対する影響はないものと考えられる。

4.4.2 農業用水への影響

水稻の農業用水の水質については、水稻の正常な育成のために望ましい農業用水の指標として、ECが0.3dS/m以下が定められている¹⁷⁾。また、和歌山県土壌肥料対策指針の参考資料では、稲の育成に対する水質で塩素が500~700mg/L以下とされ、畑地灌漑水の水質基準については、明確なものはないが、例としてカルフォルニア州のガイドラインにおいて塩素濃度142mg/Lの水質基準が示されている¹¹⁾。岡山県の土壌診断基準では、水田のECの目標上限値を0.5dS/mとしている¹⁸⁾ことから、農業用水における塩素濃度は142mg/L以下、ECが0.3dS/m以下を閾値として評価する。

水田や畑地農業用水として使用される河川水の水質調査最大値が凍結防止剤散布期で、塩素濃度で79mg/Lで、ECで0.30dS/mであった。また、凍結防止剤を散布しない雪氷期前後の最大値は、塩素濃度で28mg/Lで、ECで0.15dS/mであった。

閾値は塩素濃度で142mg/L、ECで0.3dS/mであることから、凍結防止剤散布時期である冬期農閑期には、ECが基準を上回る可能性はあるが、農繁期においては、何れも閾値以下の値であった。このことから、農業用水については、農閑期には農業面での問題はないが、冬期の水利用には留意が必要である。

なお、高速道路を流域としない支川と流域とする本流の凍結防止剤を散布しない10~11月の平均値の濃度差は、塩素濃度で16.5mg/L、ECで0.07dS/mである。これは散布した凍結防止剤が地下に浸透し、塩素を含む地下水がゆっくりと恒常的に河川へ流出しているものと考えられる。

4.5 まとめ

本章では、供用30年以上の高速道路における凍結防止剤の散布による道路近傍の農地土壌及び農業用水源の河川の水質について、以下の結論を得た。

- 1) 高速道路近傍の畑土壌では、凍結防止剤の飛散に起因する塩素とナトリウムの混入が確認された。
- 2) 飛散した土壌中の塩素濃度と交換性ナトリウム含量は、高速道路の路肩端では塩素

濃度が90mg/kg, 交換性ナトリウム含量が450mg/kgと比較的高い値ではあったが, それぞれの閾値に対しては23%, 82%の値であった. また, 塩素濃度と交換性ナトリウム含量は, 道路から離れるに従って低下し10m離れた農地では塩素濃度30mg/kg以下と交換性ナトリウム含量も30mg/kg以下と極めて低値であった.

- 3) ナトリウムの土壌深部への浸透速度は, 塩素の浸透速度11cm/monthと比べ, 土壌中の陽イオン吸着による遅延特性が確認された.
- 4) 農業用水には, 冬期間だけでなく年間を通じ地下水により凍結防止剤の影響を受けていることが確認されたが, 農繁期においては, 塩素濃度28mg/L, ECで0.15dS/mと, それぞれの閾値の20%, 50%の値であり問題のない濃度であった.

以上から, 凍結防止剤による高速道路沿いの農地土壌や農業用水の水源への影響は限定的で, 農業面の問題はないと考えられた.

なお, 今回の土壌調査は, 冬期を挟む4回のデータを基に考察したものである. 土壌環境は, 凍結防止剤の日散布量や日降水量などによりその値は変化するものであり, 散布量と気象データなどにより土壌中の塩素濃度の日々の変化を簡易的に推定できる算定手法を次章で検討する.

第4章の参考文献

- 1) 高速道路技術センター（1994）：高速道路の雪氷管理（わかりやすい雪氷管理），高速道路技術センター，p42-44.
- 2) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典（2007）：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，国土交通省国土技術政策総合研究所，**412**，p.52，p56-57.
- 3) 秦 二朗，佐々木 薫，諸泉利嗣（2015）：凍結防止剤の地下浸透量，河川流出量及び飛散量の定量化，地盤工学ジャーナル，**10**(4)，p461-471.
- 4) 春木雅寛，上野義晴（2000）：道路凍結防止剤の植物への影響，日本林学会北海道支部論文集，**48**，p151-153.
- 5) 高木秀貴（1993）：米国の冬期道路管理体制調査に参加して，北海道開発局開発土木研究所月報，**485**，p76-85.
- 6) 気象庁（2016）（参照2016.3.15）：過去の気象データ，（オンライン），入手先<<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>>
- 7) 吉江誠吾，齋藤辰哉，渡辺 亨（2001）：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，**38**，p70-79.
- 8) 瑞慶村知佳，北川 巖，友正達美，坂田 賢（2013）：平成23年東北地方太平洋沖地震による津波被災農地の1年経過後の除塩の進行状況，農工研技報，**214**，p 9-16.
- 9) 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会（2006）：土質試験の方法と解説（第一回改訂版），地盤工学会，p 172-184.
- 10) 土壌養分測定法委員会（2002）：土壌養分分析法，養賢堂，33-39，p 404-407.
- 11) 農林水産省（2000）（参照2016.3.22）：和歌山県土壌肥料対策指針，（オンライン），入手先<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/wak02.html>
- 12) 厚生労働省（2015）（参照2015.10.25）：水質基準に関する省令の規定に基づき厚生労働大臣が定める方法（平成15年厚生労働省告示第261号），（オンライン），入手先<<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-10900000-Kenkoukyoku/0000045881.pdf>>
- 13) 国土交通省（2009）（参照2016.3.22）：河川水質試験方法（案），国土交通省水質連絡会，（オンライン），入手先<http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/houhou.html>

第4章 高速道路沿線の農地土壌環境への影響

- 14) 農林水産省（2011）（参照2015.4.6）：農地の除塩マニュアル，農林水産省農村振興局，（オンライン），入手先<<http://www.maff.go.jp/j/press/nousin/sekkei/pdf/110624-01.pdf>>
- 15) 日本土壌協会（2012）：土壌診断と作物生育改善・土壌医検定〈2級用〉参考書，p.41.
- 16) 下瀬 昇（1963）：作物の塩害生理に関する研究（第1報），日本土壌肥料学雑誌，**34**(4)，p 107-110.
- 17) 渡邊紹裕，堀野治彦，中村公人（2017）：シリーズ〈地域環境工学〉地域環境水文学，朝倉書店，p.139.
- 18) 岡山県（2015）（参照2016.3.25）：岡山県における土壌診断基準値の一覧，（オンライン），入手先<<http://www.pref.okayama.jp /site/22/423636.html>>

第 5 章 凍結防止剤飛散による近接農地の塩化物イオン濃度の簡易推定手法

5.1 はじめに

冬季の高速道路では、路面の凍結を防止するために安全対策として凍結防止剤が散布される。散布された凍結防止剤は、車両の通行による水しぶきなどで道路沿線に飛散する。

凍結防止剤が沿道の農地へ飛散した場合は、塩害などによる農作物への影響が懸念されるため、凍結防止剤は、どのように農地へ飛散し、土壌へ浸透し、農作物へどのような影響を与えるかを明らかにする必要がある。また、凍結防止剤は、日々の散布量が異なり、飛散する量も一定でなく、降水量も日々変化する中で、凍結防止剤が土壌へ浸透し降雨により希釈され地下へ浸透し土壌中の塩化物イオン濃度は日々変化をする。このことから日々の変動を評価することは、非常に重要である。

本章では、凍結防止剤散布量と降水量から農地土壌中の塩化物イオン濃度を簡単に評価するための簡易推定手法を提案するとともに、本手法によって計算された推定値を農地土壌中の塩化物イオン濃度の調査結果と比較することにより、その推定精度を検証した。

5.2 農地の塩分調査

本章では、提案する簡易推定手法の妥当性を検証するために、高速道路沿線の農地で測定された塩化物イオン濃度の実測値を用いている。本節では、塩化物イオン濃度の実測値を求めるために実施した調査手法と調査結果の概要について述べる。

5.2.1 調査手法の概要

土壌塩分調査の対象地（写真-5.1）は、高速道路に最も近接し高低差の少ない畑地を選定した。調査箇所（写真-5.1，図-5.1）は、雑種地 A 断面と畑地 B，C 断面の合計 3 断面であった。本線路肩端からの離隔距離 1.5m（A・B・C-1），5.0m（A・B・C-2），10.0m（A・B・C-3）の位置で調査を行った。調査深度は、畑の耕土範囲の 40cm として、特に

第5章 凍結防止剤飛散による近隣農地の塩化物イオン濃度の簡易推定手法

発芽育成に重要な表土 10cm 範囲を 2 層 5cm 単位とし、表土以下 10~40cm の深度については 10cm 単位で、土壌採取器等を使用して採取した。

調査頻度は、凍結防止剤を散布する前の 2012 年 11 月初旬、凍結防止剤散布期間の 2013 年 1 月中旬と 3 月中旬、散布後の 4 月中旬の 4 回とした。

土壌調査項目は、塩化物イオン濃度は、地盤工学会基準 JGS0241-2000¹⁾ により分析を行った。

調査期間中の 2012 年 11 月~2013 年 4 月における調査箇所での降水量と凍結防止剤の散布量についても調査した。降水量は、調査箇所近傍の約 10km 離れた NEXCO 気象観測局のデータを使用した。降水量と日散布量の測定結果を図-5.2、図-5.3 にそれぞれ示す。

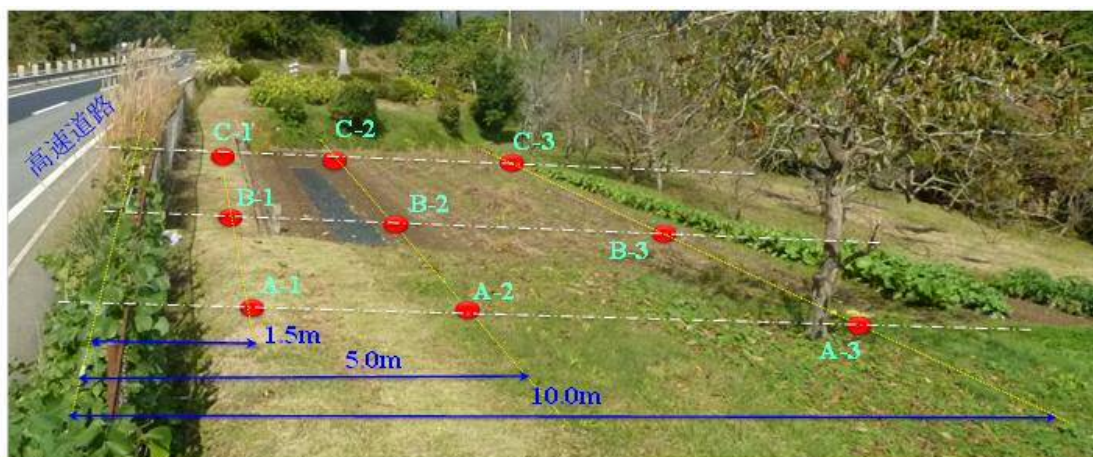


写真-5.1 農地土壌の飛散塩分の調査箇所³⁾

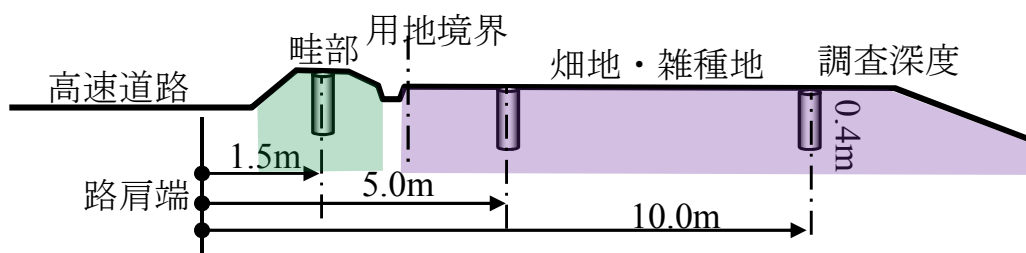


図-5.1 農地土壌の飛散塩分の調査概略断面図³⁾

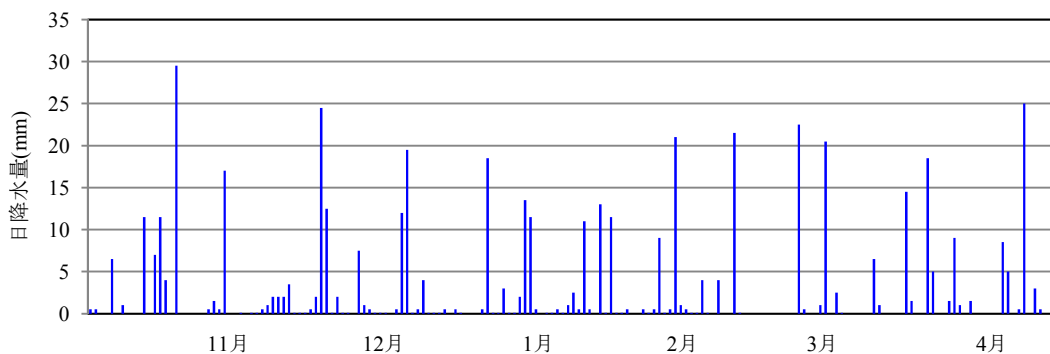


図-5.2 日別の降水量

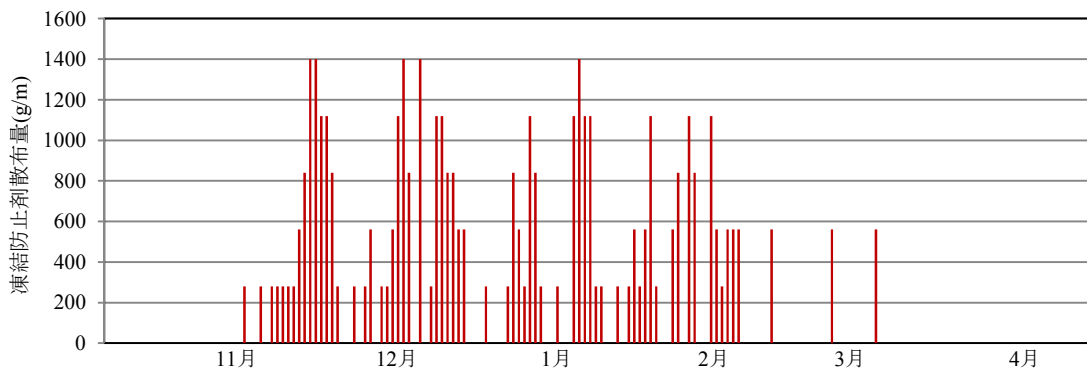


図-5.3 日別の凍結防止剤散布量

5.2.2 土壌塩化物イオン濃度調査結果

5.2.2.1 土壌の塩化物イオン濃度の調査結果

土壌中の塩化物のイオン濃度の調査結果³⁾を図-5.4に示す。路肩から5m, 10mの位置については雪氷期前と雪氷期においては、塩化物イオン濃度は0~30mg/kg(土壌の乾燥質量当たり)の値であり、大きな変化はなかった。B断面の畦部の路肩から1.5mの位置においては、1月に深度0~5cmで本調査での最大値である90mg/kgの値で、深度5~10cmで70mg/kgと比較的大きな値であった。深度10~40cmでは20mg/kgと比較的低い値であった。C-1(畦部)にあってもB-1(畦部)と同様に表層部は比較的高い値であった。A-1(畦部)は、1月には変化なく、3月に表層部で60mg/kgの最大値であった。A-1(畦部)は、高速道路との高低差が、B-1(畦部)とC-1(畦部)と比べ約50cm高い所に位置していることから、凍結防止剤が高い位置へ飛散しにくかったことが原因と考えられる。また、3月の調査時においては風向風速等気象条件によって高い位置へ飛散する等が原因と考えられる。

図-5.5 は、図-5.4 の塩化物イオン濃度から調査期間ごとに高速道路からの離隔距離と土壌の深度による塩化物イオン濃度を断面分布で表したものである。ただし、各調査日毎の土中の塩化物イオン濃度は、A, B, C 断面の各調査深度から最大の値を用いた。凍結防止剤の散布前 11 月は比較的低濃度であったが、凍結防止剤散布時期 1 月には表土 0~5cm の位置で 90 mg/kg の塩化物イオン濃度が検出され、その後 3 月、4 月にかけて徐々に地下へリーチングにより浸透しているものと考えられる。

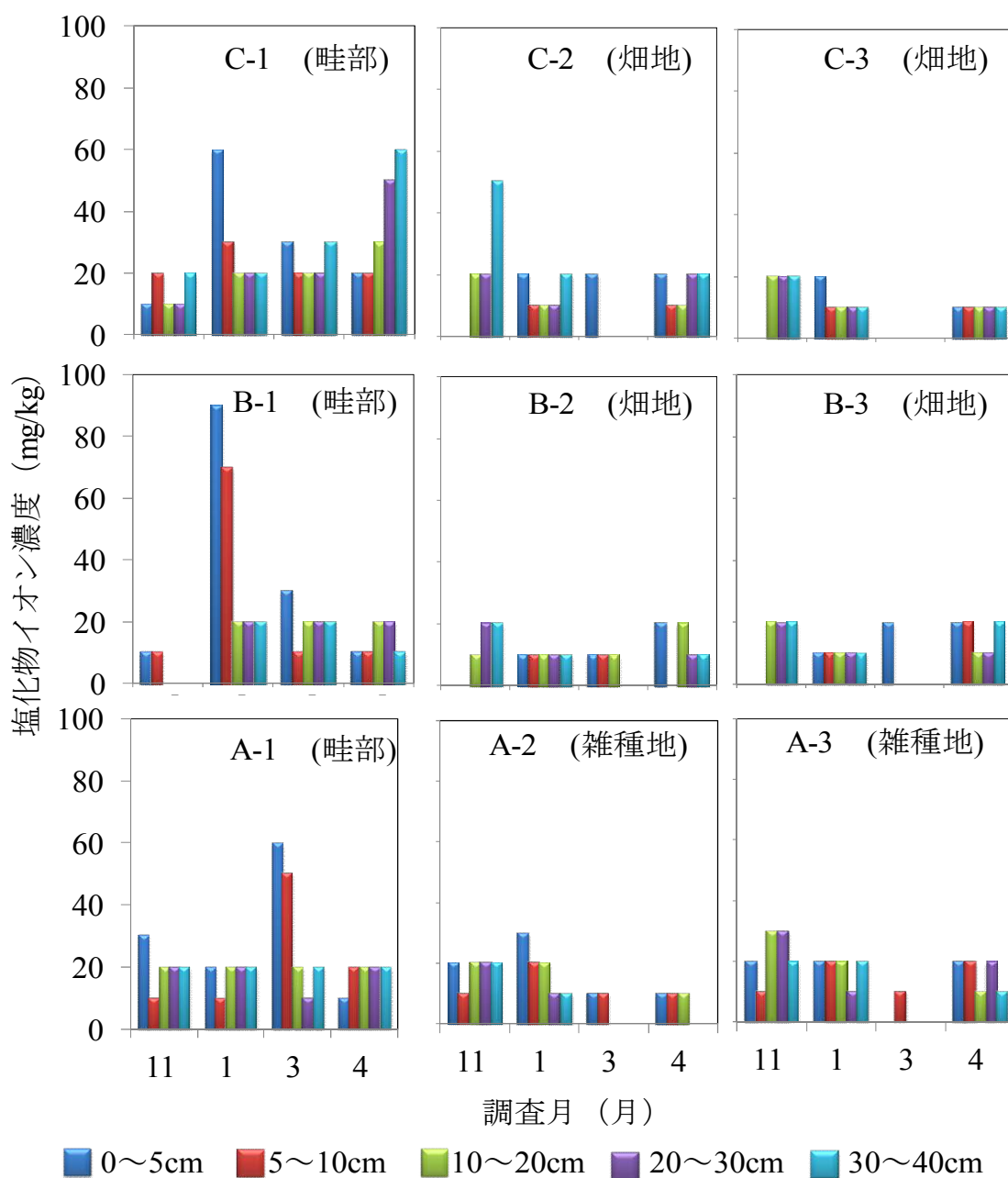


図-5.4 土壌中の塩化物イオン濃度の変化³⁾

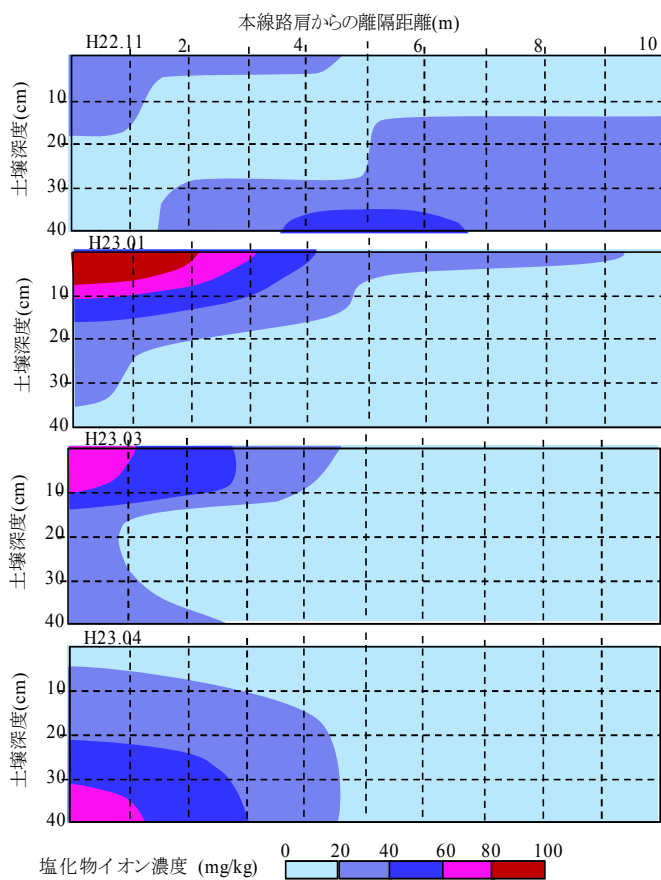


図-5.5 土壤中の塩化物イオン濃度の分布

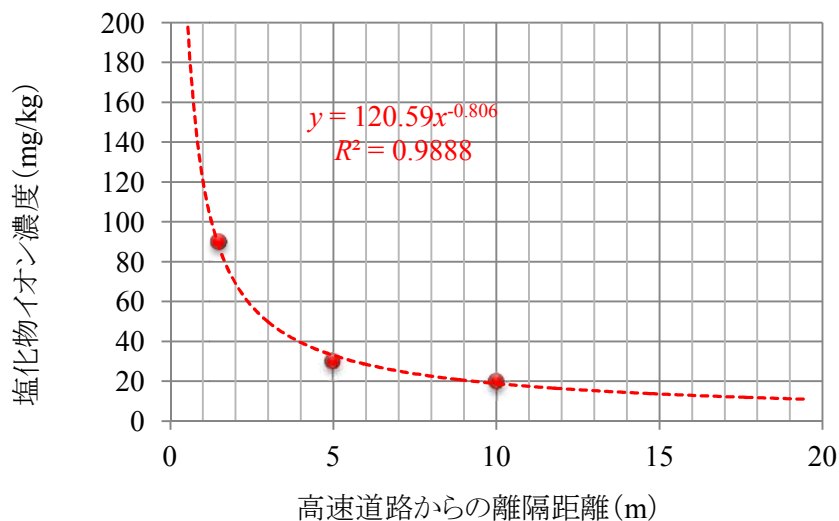


図-5.6 道路との離隔距離と塩化物イオン濃度の関係

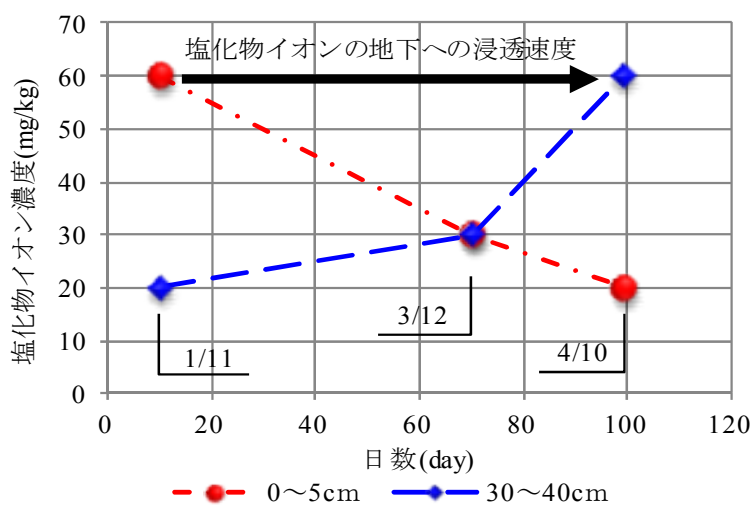


図-5.7 土壌深度別の塩化物イオン濃度の変化

5.2.2.2 塩化物イオンの農地への飛散

雪氷期の高速道路路肩端からの各離隔距離と農地土壌の深度0~5cmの最大イオン濃度の関係を図-5.6に示す。この関係は、次式で表せる。

$$Y=120.59X^{0.806} \quad (1)$$

ただし、 Y は、各離隔距離の最大の塩化物イオン濃度 (mg/kg)、 X は、本線からの離隔距離 (m) を表す。

畑地土壌の塩化物イオン濃度は、本線から離れるに従って-0.806のべき乗で減衰していく。ほとんどの高速道路用地は、道路の路肩から保護路肩や環境施設帯として3m以上確保されており、この3mの位置の濃度は、式(1)より約50 mg/kgとなり、畑作へ影響を与える濃度400 mg/kgの12.5%程度と低い濃度となる。この濃度は、降水等により土壌地下へ浸透するリーチング作用により、さらに希釈され低濃度となり、春から秋にかけての農繁期にはほとんど影響を与えることが無い濃度となるものと考えられる。

5.2.2.3 塩化物イオンのリーチング速度の推定

図-5.7は、調査箇所の中で比較的濃度が高かった畦部(C-1)における土壌深度別の塩化物イオン濃度の日変化を表したものである。土壌表層部(0~5cm)は、1月11日60 mg/kgを示し、下層部(30~40cm)は4月10日に60 mg/kgを示していることより、

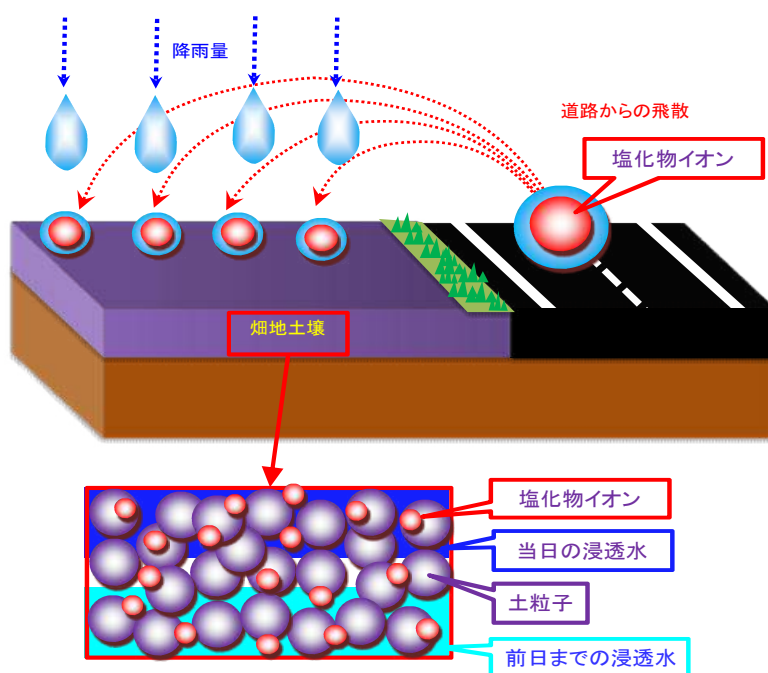


図-5.8 飛散塩化物イオンの土壤浸透イメージ図

約 11cm/月 (32.5cm/89 日×30 日/月) の速度で地下へ浸透していると推測される。

5.3 塩化物イオン飛散浸透の簡易推定手法

5.3.1 簡易推定手法の考え方と算定方法

土壤の塩化物イオン濃度の簡易な推定手法の考え方は、図-5.8 に示す飛散塩化物イオンの土壤浸透イメージにより推定する。高速道路で散布された凍結防止剤（塩化物イオン）が、交通車両などにより隣接する畑地へ飛散し降水と混ざって畑地の土壤中へ浸透する。浸透した塩化物イオンは、土壤水や地下水と混ざって地下へ浸透していく。このとき土壤中では、既存の塩化物イオンに飛散した新たな塩化物イオンが混ざり一定の濃度になると仮定する。そのとき、一定深さの土壤中の水量に含まれる塩化物イオン量を一定深さの土壤乾燥重量で除すれば単位重量当たりの塩化物イオン濃度が求められる。

以上の考え方から簡易推定手法の計算方法は、以下により算定する。対象とする農地の土壤面 1m^2 に、土壤深さ 0.05m を乗じた対象土壤容積 0.05 m^3 当たりの塩化物イオン量 C (mg) は、次式で表せる。

$$C = (C_1 + C_2) \cdot (W_1 + W_2 - W_3) / (W_1 + W_2) \quad (2)$$

ただし、 C_1 は、対象土壌容積内に含まれる塩化物イオン量 (mg)、 C_2 は、対象土壌面に飛散した塩化物イオン量 (mg)、 W_1 は、対象土壌容積内に含まれる水量 (mg)、 W_2 は、対象土壌面に浸透する降水水量 (mg)、 W_3 は、対象土壌容積内から下層へ流下する水量や蒸発水量 (mg) とし、その概念図を図-5.9 に示す。なお、対象土壌の塩化物イオン濃度は、対象土壌容積内の土粒子の乾燥重量 (D) 当たりに対する濃度で表わす。

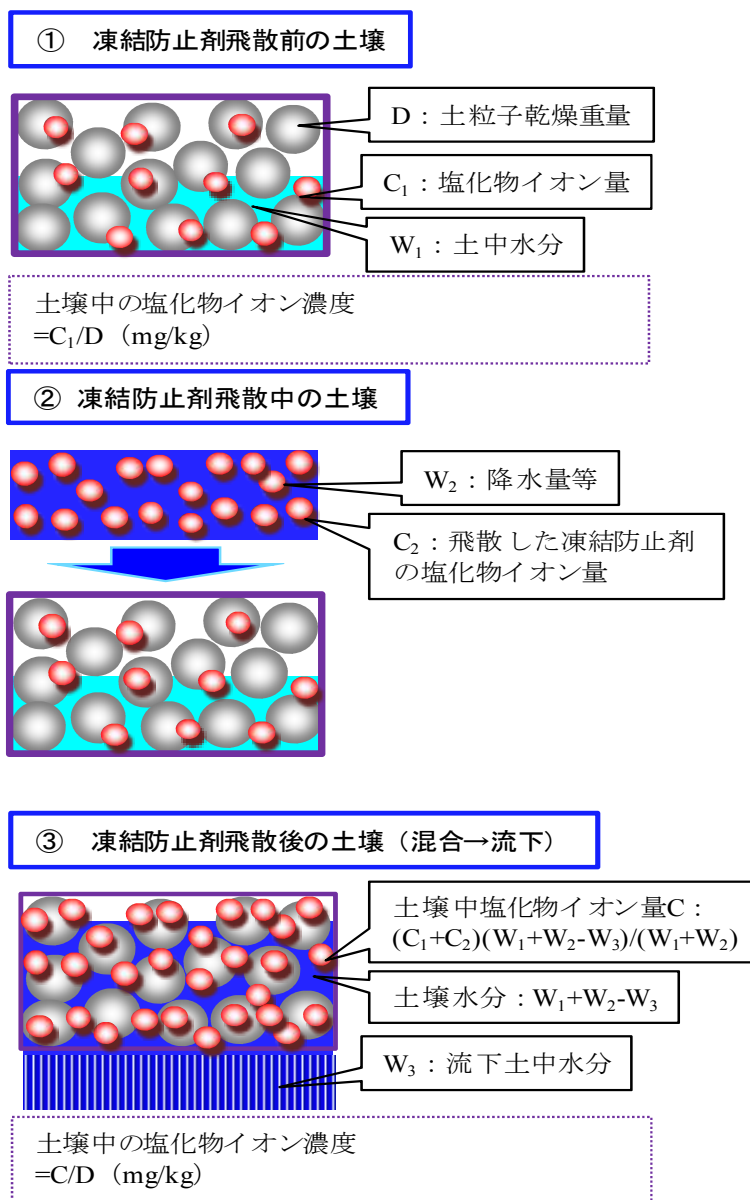


図-5.9 飛散塩化物イオンの土壌浸透図

5.3.2 簡易推定手法の計算方法に用いる諸定数

土壌中の塩化物イオン濃度の簡易推定手法による算定にあたっては、畑地の土壌調査の結果、最も高い値 (90mg/kg) であった路肩から 1.5m の表層部 0~5cm について雪氷期間の土壌の塩化物イオン濃度の推移を算定するものとする。推定対象となる農地の土壌の土質の諸元については、土壌の調査時に得た値とそれを基に推計した値を用いるものとして、簡易な推定に使用する値を表-5.1 に示す。

凍結防止剤の散布量は、図-5.3 に示す調査期間 2012 年 11 月~2013 年 4 月における当地区での凍結防止剤の散布量を用い簡易推定を行った。なお、凍結防止剤の散布は、風などで飛散しないよう湿塩状態で散布されるため、路外への飛散は水しぶきとなって飛散するものとする。この水しぶきの濃度は、凍結防止剤の塩化ナトリウムの飽和限界濃度が重量比率で 23.3% である。このことより 23.3% 濃度となる水量 (mg) は、飛散する塩化物イオン量 (mg) の 3.077 倍となるので、これを降雨量 W_2 に加算するものとする。また、凍結防止剤に含まれる塩化物イオン量は、凍結防止剤の塩化ナトリウムの純度 (95%) に塩化ナトリウムにおける塩化物イオンの mol 比 $35.45/(35.45+22.99)=0.607$ を乗じて算出した。

また、路肩 1.5m に飛散する凍結防止剤は、片側 2 車線道路の凍結防止剤の飛散量と路肩への飛散量²⁾より、図-5.10 に示す道路路肩端 1.5m の凍結防止剤の飛散率を求めた。当地区の 1 シーズン当たりの凍結防止剤の散布量は、図-5.3 から道路片側の散布量が 21.98 (kg/m) であることより図-5.10 より飛散率 0.21% を算出した。農地への飛散量は、凍結防止剤の散布量にこの飛散率を乗じた値が飛散するものとして推計した。降水量 (W_2) は、図-5.2 に示した量を与えた。

表土 5cm に留まる水分は、最大 23.85l/m^2 (飽和水量) として、飽和状態になった場合、減水深を超える降水量は、表流水となって土壌へは浸透しないものとし、減水深は、表-5.2 より透水係数 10^{-6}m/sec の場合の減水深⁴⁾ 86.4mm/day とする。ただし、土壌へ飛散した塩化物イオンは、すべて土壌へ浸透するものとした。

表土 5cm の層より下方へ流下する水分 (W_3) は (W_1+W_2 -自然含水比 ($W_e=17.00\text{l/m}^2$)) /2 と仮定した。これは、土壌中が絶えず飽和状態にある場合は、減水深が土砂の場合 8.6cm/日程度であり 1 日に約 86.4mm の水量が通過することとなるが、冬期は降水量が少なく、不飽和の状態での地下への浸透となるため、推定計算の便宜上自然含水比を上回る水量の 1/2 が空隙中に残存し、残りの 1/2 が 5cm 以下の下流へ流出するものと仮定

した。

降水が積雪の場合、土壌へ浸透する水分は、融雪を考慮し5日間で均等に土壌へ浸透するものと仮定した。これは、当地区の積雪深が5cm以上あった場合、3～7日で融解することより便宜上平均値の5日間で仮定した。

蒸発散量はHamon式で算出される蒸発能 e に小葉竹が示した補正係数0.636を乗じて推計した⁵⁾。その推計結果を表-5.3に示す。推定に使用する蒸発散量は、12月から3月の平均値の約0.41mm/dayとし、土壌深さ5cm以下への流下土中水分量(W_3)に加算した。なお、土壌塩化物イオン濃度の初期値は、凍結防止剤散布前後の塩化物イオン濃度20~30 mg/kgの平均値である25 mg/kgとした。

表-5.1 土壌土質の諸元 (1m³当たり)

項目	体積 (m ³)	重量 (kg)	比重
空気	0.137	0	0.0
水	0.340	340	1.0
土	0.523	1,360	2.6
合計	1,000	1,700	1.7

※自然含水比 25%, 透水係数 10⁻⁶m/s

表-5.2 透水係数と減水深 (三好)⁴⁾

透水係数 (m/s)	減水深 (mm/day)
1×10 ⁻⁹	0.1
1×10 ⁻⁸	0.9
1×10 ⁻⁷	8.6
1×10 ⁻⁶	86.4

表-5.3 蒸発量の推計

月	降水量 (mm)	蒸発散量	
		(mm)(%)	(mm/day)
12月	73.5	10.8(14.7)	0.35
1月	58.5	9.7(16.5)	0.31
2月	99	10.4(10.5)	0.37
3月	127	18.3(14.4)	0.59
合計	358	49.2(13.7)	0.41

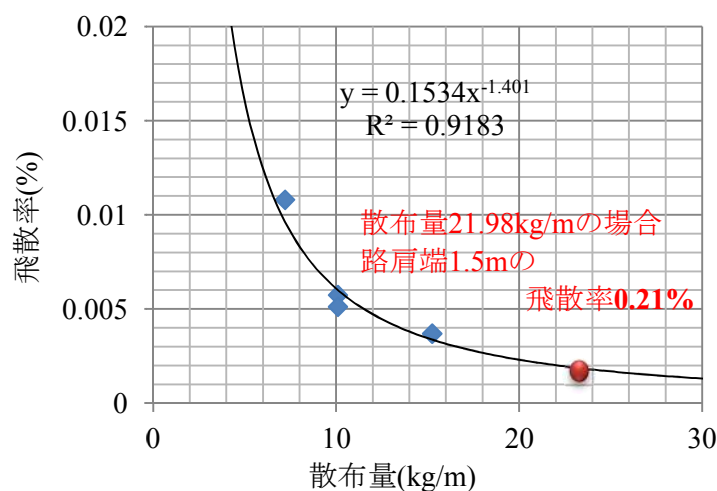


図-5.10 散布量と路肩端 1.5m の飛散比率の関係

5.4 簡易推定結果

上記の簡易推定手法によって推定された塩化物イオン濃度の経時変化を図-5.11 に、推定値と実測値の関係を図-5.12 にそれぞれ示す。図-5.12 に示すとおり推定値と実測値の実線で示す関係式の傾きは、0.983 となり、破線で示す 1:1 の直線の傾きである 1.0 とほぼ等しくなった。このことから、本研究で提案した簡易推定手法によって求めた塩化物イオン濃度は、精度よく推定できたことがわかる。

図-5.11 より、12月12日に土壌の塩化物イオン濃度は、凍結防止剤散布期間中の最高濃度である 158mg/kg と推定されたが、この推定値は、畑地の閾値となる 400 mg/kg⁶⁾ の濃度を下回っており、また、畦部（高速道路用地内）であることより畑の土壌環境への影響は極めて少ないものと考えられる。

また、リーチング速度については、凍結防止剤を最後に散布した3月21日より14日後に 30 mg/kg 以下の値に減少したことより、表土 5cm におけるリーチング速度は 10.7cm/月と推計され、本章 5.2.2.1 で述べたように調査データをもとに推定した 11cm/月と同程度の値になった。このことから本簡易推定手法の妥当性がわかる。

第5章 凍結防止剤飛散による近隣農地の塩化物イオン濃度の簡易推定手法

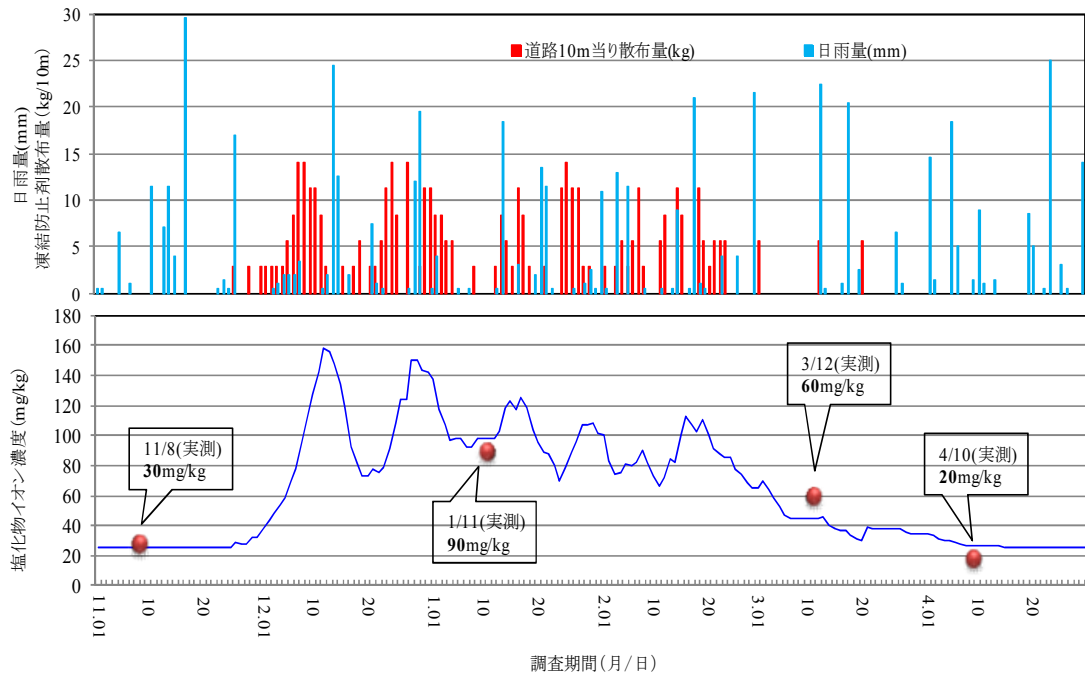


図-5.11 簡易手法によって推定した土壌の塩化物イオン濃度の経時変化

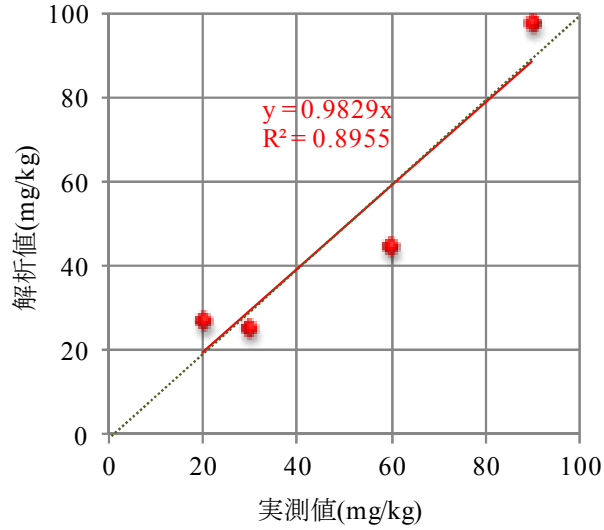


図-5.12 土壌塩化物イオン濃度の実測値と推定値の比較

5.5 まとめ

冬季の高速道路では、路面の凍結を防止するために凍結防止剤が散布されるが、凍結防止剤は、車両の通行等によって道路沿線の農地に飛散する。本章では、この飛散した凍結防止剤中に含まれる塩化物イオンの農地土壌中での濃度を、凍結防止剤の散布量と降水量から簡単に推定可能な簡易推定手法を提案した。その結果、本手法による塩化物イオン濃度の推定値は、現地調査によって求めた実測値とよく一致した。また、凍結防止剤散布期間中の推定値の最大値は 158mg/kg であったが、この値は畑地の閾値となる 400 mg/kg の濃度を下回っていることから、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが農作物に与える影響は極めて少ないことが明らかとなった。

なお、この実測値は、高速道路用地内に位置する畦部の値であり、畑地では、さらに低下するものである。また、この値は、凍結防止剤を散布する期間の値であり、非散布期となる春から秋にかけての農繁期においては、塩化物を含まない降雨により畑地土壌中の塩化物イオン濃度は、リーチング作用により、さらに希釈され低濃度となることから畑への影響は極めて少ないものとなる。これらより凍結防止剤散布による道路外への飛散は、道路沿線での農地土壌への影響はないものと明確に推察できる。

第5章の参考文献

- 1) 地盤工学会（編）（2006）：土質試験の方法と解説（第一回改訂版），丸善，p172-184.
- 2) 秦二郎，佐々木薫，諸泉利嗣（2015）：凍結防止剤の地下浸透量，河川流出量及び飛散量の定量化，地盤工学ジャーナル，**Vol.10**，p461-471.
- 3) 佐々木薫，秦二郎，諸泉利嗣（2015）：道路の凍結防止剤による農地土壌への影響に関する調査研究，第70回農業農村工学会中国四国支部講演会公演要旨集，p75-77.
- 4) 青森県（2008）：健康な土づくり技術マニュアル，p16.
- 5) 小葉竹重機（2007）：簡易式による蒸発散量の推定，京都大学防災研究所年報，**32B-2**，p309-317.
- 6) 木村恵子，曾根真理，並河良治，桑原正明，角湯克典（2007）：凍結防止剤散布と沿道環境，国土技術総合研究所資料，国土交通省国土技術政策総合研究所，**412**，p42-52.

第6章 凍結防止剤の地下浸透による金属の腐食

6.1 はじめに

高速道路沿線の中山間地域の調査地において、地下水から高い塩化物イオン濃度が検出された。当地区は、上水道が完備されていないことから飲料水や生活用水として地下水である井戸水が使用されていた。この地下水を使用した電気温水器の電熱ヒーターが、錆等により短期間で故障した¹⁾。

電気温水器に使用される電熱ヒーターは、通電によりタンク内の水を加熱するための部品で、銅管の中に電熱線を入れ、その周囲に熱伝導性及び電気絶縁性の良い絶縁材料（酸化マグネシア）を充填し、圧縮・成型したものである。電熱線は、空気や水と遮断されており、化学変化がなく長期間の耐久性を保持して使用できるものである。この高温多湿状態のタンク内で長期間の耐久性を有する電気温水器の電熱ヒーターが、短期間で腐食し絶縁した。その腐食状態を写真-6.1に示す。



写真-6.1 電熱ヒーターの腐食状態（右）（左：新品）

一般的に電気温水器は、地下水などを直接使用したとき、配管の腐食や本体の故障（以下「不具合」と記す。）の原因となることから、電気温水器の取扱説明書において井戸水などの地下水は使用不可となっている。写真-6.1に示すこの不具合は、手掘りやボーリング井戸の地下水をくみ上げた水を使用したことが主因と考えられることから、地下水の水質調査を行った。その結果、高い濃度の塩化物やカルシウム硬度などを検出したことより、不具合はこの影響によるものと推測された。

電気温水器に使用される電熱ヒーターの故障原因（腐食因子）として定められた水質基準はないが、機器の故障は、JRA-GL 冷凍空調器用水質ガイドライン²⁾（以下、JRAとする。）によれば、腐食障害、スケール障害等が原因であるといわれている。

腐食とは、化学・生物的作用により外見や機能が損なわれた状態をいい、金属の腐食とは、周囲の環境（隣接している金属・気体など）と化学反応を起こし、溶けたり、錆を生成することを指す。銅の腐食にあつては、緑青（ろくしょう）と言われる、銅が酸化されることで生成する青緑色の錆が発生する。

スケール障害は、酸化鉄や炭酸カルシウム等が金属の表面に付着した湯あか（スケール）による障害として、流量の低下や伝熱阻害を引きおこし機器の故障や多大なエネルギー損失につながる。通常の河川水や地下水は、多くのカルシウム、マグネシウムを含んでおり、水の硬さの原因になっている。これらの溶解塩類は、濃縮され水中に溶け込むことが出来なくなると炭酸カルシウム、炭酸マグネシウム等の固体が折出される。これらは、一般的にカルシウムスケール²⁾と呼ばれる。

表-6.1 に、銅、青銅、黄銅、鉄及びステンレス鋼における腐食障害とスケール障害の要因となる水質項目を示す。腐食を引き起こす傾向にある水質は、pH・電気伝導率・塩化物イオン・硫酸イオンが設定されており、銅の腐食は、60°Cを超えると、温度が高いほど孔食が生じやすく低流速でも潰食が生じやすくなるといわれ、塩化物イオンの水質基準は、30 mg/L 以下の設定となっている。

また、塩化物イオンは、水による腐食性を高める重要因子の一つであり、水中での安定性が高いとされている。スケール生成による障害は、pH・電気伝導率・酸消費量（pH4.8）・全硬度・カルシウム硬度・イオン状シリカが原因といわれている²⁾。

表-6.1 腐食とスケール障害の要因となる水質項目²⁾

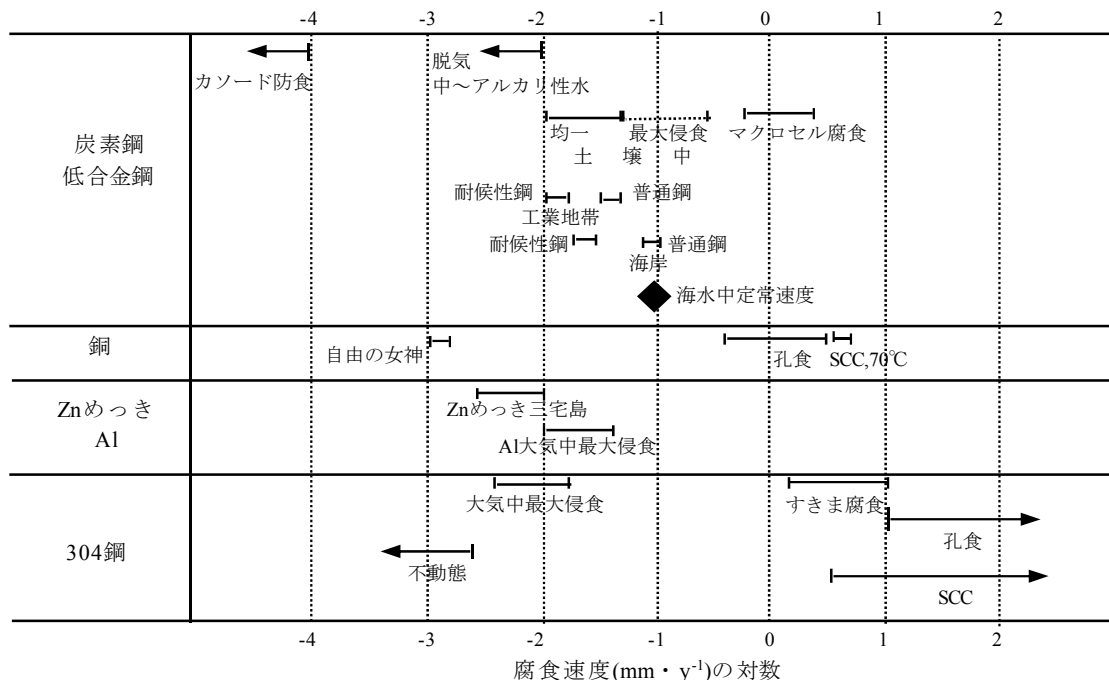
項目	JRA 基準値	傾向	
	高位中温水系 60~90°C	腐食	スケール
pH(25°C)	7.0~8.0	○	○
電気伝導率	30(mS/m)以下	○	○
塩化物イオン	30(mg/L)以下	○	
硫酸イオン	30(mg/L)以下	○	
酸消費量 (pH4.8)	50(mg/L)以下		○
全硬度	70(mg/L)以下		○
カルシウム硬度	50(mg/L)以下		○
イオン状シリカ	30(mg/L)以下		○

国内の銅の腐食の種類には、青水・潰食・孔食Ⅰ型・孔食Ⅱ型・マウンドレス型孔食があり、これら孔食の判定指数としてMWPI・CWPIが考案³⁾されている。この判定指数は、「pHが低くかつHCO₃⁻が少なく、SO₄²⁻、Cl⁻が多い水質」において銅の局部腐食が発生する度合いを表すものである。孔食とは、金属材料の表面に生じる局所的な腐食で、耐腐食に強い金属である銅やステンレス鋼やアルミニウムなどに見られる。

表-6.2に金属の代表的腐食速度⁴⁾を示す。各金属の腐食速度は、普通鋼で0.1mm/year程度で、銅や304鋼（ステンレス鋼）においては、1μm/year以下と低く、銅は耐腐食に対して効果的な材料といえるが、局部的に生じる孔食は、1mm/year程度以上の速さで発生しうることを表している。

本章は、上記のとおり腐食に対して強い電熱ヒーターの主成分である銅について、地下水に含まれる塩化物やカルシウム等が銅の腐食に関与する因果関係を整理し、銅等の腐食促進試験を行い塩化物イオン濃度と腐食度、腐食度と耐用年数の関係について検討した。

表-6.2 代表的腐食速度⁴⁾



6.2 電熱ヒーターの不具合原因

写真-6.1 に示した不具合発生の原因と考えられる地下水の水質を表-6.3 に示す。腐食要因となる JRA 基準値を上回るものは、電気伝導率、塩化物イオン、全硬度、カルシウム硬度であり、腐食とスケール両者の不具合の形態が推測された。

表-6.3 地下水の水質調査結果

項目	水質	JRA 基準値との比
pH(25°C)	6.8	—
電気伝導率 (mS/m)	190	633%
塩化物イオン (mg/L)	670	2,233%
硫酸イオン (mg/L)	6	20%
酸消費量 (pH4.8)	48	96%
全硬度 (mg/L)	460	657%
カルシウム硬度 (mg/L)	320	640%
イオン状シリカ (mg/L)	25	83%

電熱ヒーターの不具合の原因究明は、EPMA マッピング分析⁵⁾により行った(図-6.1)。この分析は、電熱ヒーターの腐食部分の構成元素を電子線の照射によって特性 X 線を検出して物質に含まれる元素を特定したもので、腐食部周辺の付着物に相当する部分での主要な元素は、Cu (銅)、O (酸素)、Cl (塩素) が検出された。特に Cl は、孔食底部へ付着(図-6.1 下段)しており、その関与が確認された。また、スケールの要因となる酸消費量 (pH4.8)、全硬度、カルシウム硬度に含まれる Ca やイオン状シリカの Si は、ほとんど検出されなかった。

このことから、電熱ヒーターの不具合は、スケールによるものでなく、塩化物イオンが関与した「孔食」や「腐食生成物による熱伝導率の低下及び材質の劣化」が原因と考えられた。

この不具合が発生した電熱ヒーターは、使用した地下水の塩化物イオン濃度が 670mg/L で、聞き取りにより交換頻度が 0.5 年であった。また、他の井戸水においては、塩化物イオン濃度 20~620mg/L の地下水を使用したものにも 1~10 年程度で不具合が発生するものもあった。このことより、電熱ヒーターの不具合の発生は、塩化物イオン濃度と深い関係にあると考えられ、塩化物イオン濃度と電熱ヒーターの交換頻度との関

係を明らかにする必要がある。なお、塩化物イオン濃度の水質基準は、水道法では、200mg/L 以下で、JRA 基準値では、30mg/L 以下であり、この値以下の 20mg/L でも不具合が発生していたこととなる。

このため、電熱ヒーターの主成分となる銅の腐食促進試験を行い、塩化物イオン濃度と銅の腐食度の関係を明らかにするため、以下の試験を行うこととした。

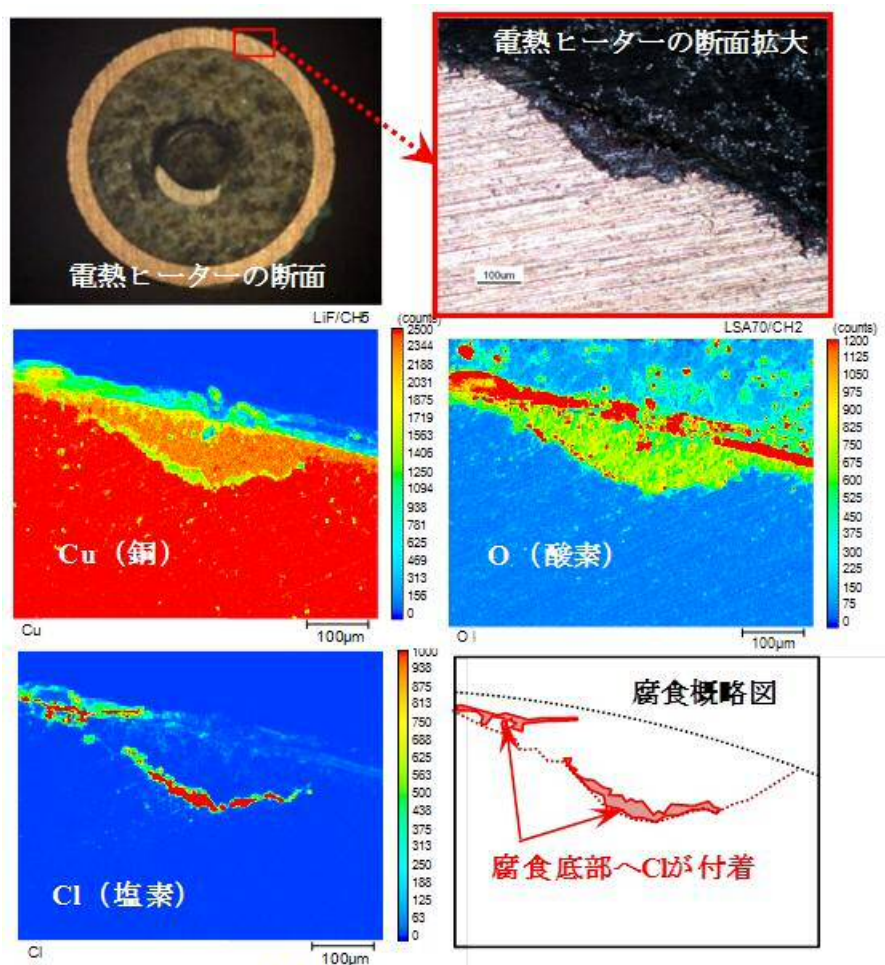


図-6.1 EPMA マッピング分析結果

6.3 試験方法

6.3.1 腐食促進試験の考え方

腐食促進試験は、電気温水器の電熱ヒーターの不具合原因を与える塩化物イオンの濃度とその濃度に起因する耐用年数を推定するため、異なる任意の塩化物イオン濃度にお

ける銅の腐食度（一定期間内での平均進行量をいい、単位面積当たりの腐食による質量の減少である腐食減量で表す。）を求め、塩化物イオン濃度と腐食度の相関関係を求める。そして、電熱ヒーターが最も短期間（0.5年）で腐食した使用水の塩化物イオン濃度670mg/Lにおける腐食度を電熱ヒーターが0.5年で腐食する限界の腐食度として、任意の塩化物イオン濃度における腐食速度と限界の腐食度の比率からその濃度における耐用年数を推計することとした。前提条件として、電気温水器ヒーターの耐用年数は、メーカーへの聞き取りにより、通常の水道水では、約10年は故障しないものとのことより、電気温水器の電熱ヒーターの通常の利用に耐え得る年数を10年と仮定した。なお、減価償却資産の電気冷蔵庫、電気洗濯機その他これらに類する電気・ガス機器の耐用年数は6年⁶⁾となっているが、一般的な耐用年数10年を仮定値として採用することとした。

また、電熱ヒーターの主成分である銅の腐食度は、同一条件下において、時間に直線的に比例するものと仮定する。これは、鉄や亜鉛部材の腐食度が、同一環境化において年数に直線比例の関係にあるとされている⁷⁾ことから、銅も同じく直線の比例関係にあるものと仮定した。

これらから、塩化物イオン濃度から腐食による耐用年数を算定する方法は、塩化物イオン濃度と腐食度、腐食度と耐用年数の関係から算定するものとして、その考え方を図-6.2に示す。

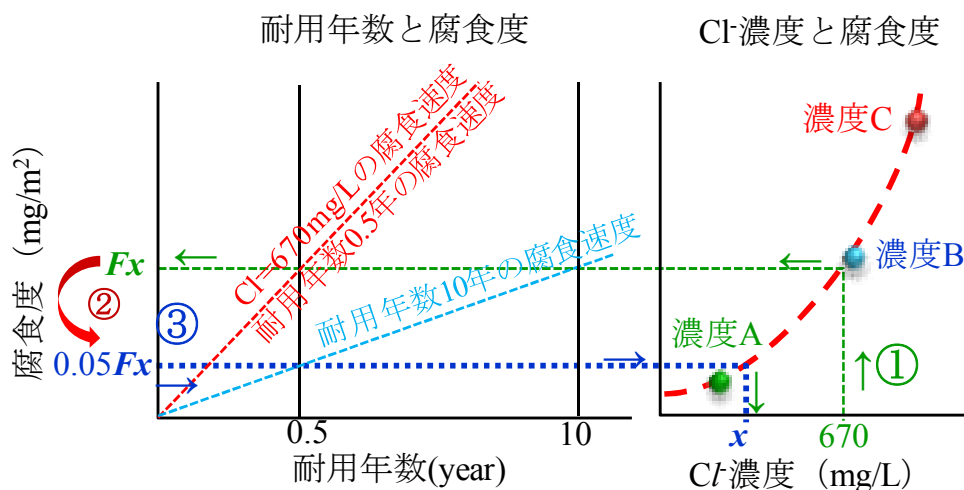


図-6.2 塩化物イオン濃度と腐食度の関係

この算定方法は、腐食促進試験により異なる塩化物イオン濃度 A, B, C における銅の腐食度を求め、塩化物イオン濃度と腐食度の相関関係を得る。この相関関係から①塩化物イオン濃度 670mg/L (耐用年数 0.5 年) の腐食度 F_x を求め、②腐食度 F_x から耐用年数 10 年とした場合の 0.5 年時の腐食度 $0.05F_x$ ($F_x \cdot (0.5 \text{ 年}/10 \text{ 年})$) を求め、③塩化物イオン濃度と腐食度の相関から、腐食度 $0.05F_x$ となる塩化物イオン濃度 x を求める。この x を 10 年で不具合の生じる可能性のある塩化物イオン濃度とする。

これらの銅における塩化物イオン濃度の違いによる腐食度の関係は、以下に記す試験方法を立案し推計する。

6.3.2 銅板等による腐食促進試験方法

6.3.2.1 試験方法

試験の方法は、湿潤と乾燥を繰り返して行う連続曝露試験とした。腐食促進試験に使用する試験片は、銅板、鉄板、ゴムパッキン、電気温水器の電熱ヒーターを使用する。

腐食促進試験は、これら試験片の塩化物イオン濃度による腐食度を求めるために、3種類の濃度の塩化ナトリウム (NaCl) 溶液の噴霧と大気中での曝露を繰り返す塩水噴霧による試験方法 JISZ2371 を採用する。塩水噴霧の腐食促進試験の試験方法には、表-6.4 に示すように JISZ2371 塩水噴霧試験方法 (中性塩水噴霧試験)、JISH8502 めっきの耐食性試験方法 (中性塩水噴霧サイクル試験)、JISK5621 一般用さび止めペイント等の試験方法がある⁸⁾。本試験は、耐腐食性のある銅であることから、この中で最も腐食が促進される試験方法を採用する。図-6.3 は、試験方法の相違による鉄板の腐食度を表したもので⁸⁾、JASO 法 (JISH8502: めっきの耐食性試験方法) による試験方法が最も腐食度が高い値を示していることより、本試験方法は、この試験方法を準用することとした。

試験サイクルは、JASO 法を基準として、①塩水噴霧 (35°C・2 時間) ② 乾燥 (60°C・25%RH・4 時間) ③湿潤 (50°C・98%RH・6 時間 (本試験は、手動で行うことから作業時間を考慮して JISH8502 の 2 時間を 6 時間として、1 サイクル 12 時間になるように調整した。)) の 1 サイクルを 12 時間として、①②③を基本に、12 サイクルを 12 時間の 144 時間 (6 日) 繰り返し行った。

なお、サイクル①の塩水噴霧 (35°C・2 時間) は、試験室 (恒温室) を使用して 35°C に保温した。サイクル②の乾燥 (60°C・25%RH・4 時間) は、塩水噴霧後、同室内の

温度を 60°C、湿度 25%に設定し 4 時間放置した。サイクル③の湿潤（50°C・98%RH・6 時間）は、50°Cに設定した恒温炉に湿度 98%になるように加湿器を 2 台接続して 6 時間湿潤状態とした。

表-6.4 腐食促進試験の試験方法⁸⁾

規格番号	規格名称	試験時間	試験条件		
			噴射溶液	PH	サイクル条件
JISZ2371	塩水噴霧試験方法 (中性塩水噴霧試験)	96h	5%NaCl	7	連続塩水噴霧 (35°C, 100%RH)
JISH8502	めっきの耐食性試験方法 (中性塩水噴霧サイクル試験)	96h	5%NaCl	7	①塩水噴霧 (35°C, 2h) ↓ ②乾燥 (60°C, 25%RH, 4h) ↓ ③湿潤 (50°C, 98%RH, 2h)
JISK5621	一般用錆止めペイント	96h	5%NaCl	7	①塩水噴霧 (30°C, 0.5h) ↓ ②湿潤 (30°C, 98%RH, 4h) ↓ ③乾燥 (50°C, 25%RH, 2h) ↓ ④乾燥 (30°C, 25%RH, 2h)

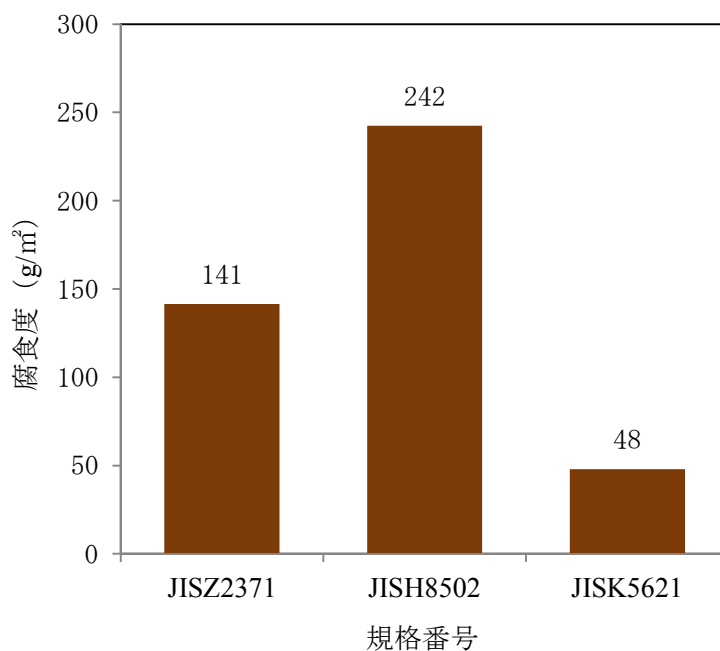


図-6.3 試験方法の相違による腐食度⁸⁾

6.3.2.2 試験条件

試験条件として、試験溶液は、塩化ナトリウム（純度 95.25%）を蒸留水に溶解して使用した。試験に使用する水は、金属の腐食に対して pH が関与することや、塩化物イオンに特化した腐食速度を求める必要性から、蒸留水製造装置より抽出した不純物のないものを使用した。

噴霧に使用する溶液の NaCl の濃度は、表-6.5 に示す A, B, C の 3 種類で行った。溶液 A は、電気温水器が故障した最小濃度の地下水の塩化物イオン濃度である約 20mg/L, 溶液 B は、電気温水器のヒーター交換頻度が 0.5 年となっている地下水の塩化物イオン濃度 670mg/L を目安とした約 700mg/L, 溶液 C は、JASO 法に基づく塩化ナトリウム濃度 5%に相当する塩化物イオン濃度の約 30,000mg/L とした。

表-6.5 腐食促進試験に使用する溶液一覧

溶液種別	NaCl		Cl ⁻	粉碎塩
	(%)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
A	0.00003	33	20	35
B	0.12000	1,154	700	1,212
C	5.00000	49,456	30,000	51,922

6.3.2.3 試験体

試験に使用する試験片は、フラットシート（150×100×1.0 mm）の銅板（JIS C1020）と鉄板（JIS SS330）各 9 枚とした。鉄板は、銅との腐食相関を見るために併せて促進試験を行った。また、電熱ヒーターの試験片は、温水器に使用される新品のヒーターを約 70mm の長さにカットして、中空部には止水のためのシリコン樹脂を注入し防錆処理を行ったもの 9 試験体を使用した。また、温水器の故障原因には配管の漏水による故障もあり、ゴム製パッキンも塩化物イオンの混入により劣化が促進される可能性も考慮し、温水器の接続部に漏水防止のため使用されるゴム製パッキン 9 試験体も併せて試験を行った。なお、試験片は、実験の開始前に汚れ等除去のためにエタノール溶剤で二度拭きして試験片の重量（mg）を計測記録した上で使用した。試験片は、写真-6.2 に示すとおり、角度を 20±5° として、長方形の木組枠に吊り下げる構造の木製フレームを製作し試験体を配置し、塩水噴霧時は、写真-6.3 に示すよう試験片に均等に散布できるような配置とし、噴霧が他の試験片と交差しないよう発泡スチールでの仕切り板を設けた。なお、試験体を取り付ける作業は手袋を着用した。

第6章 凍結防止剤の地下浸透による金属の腐食

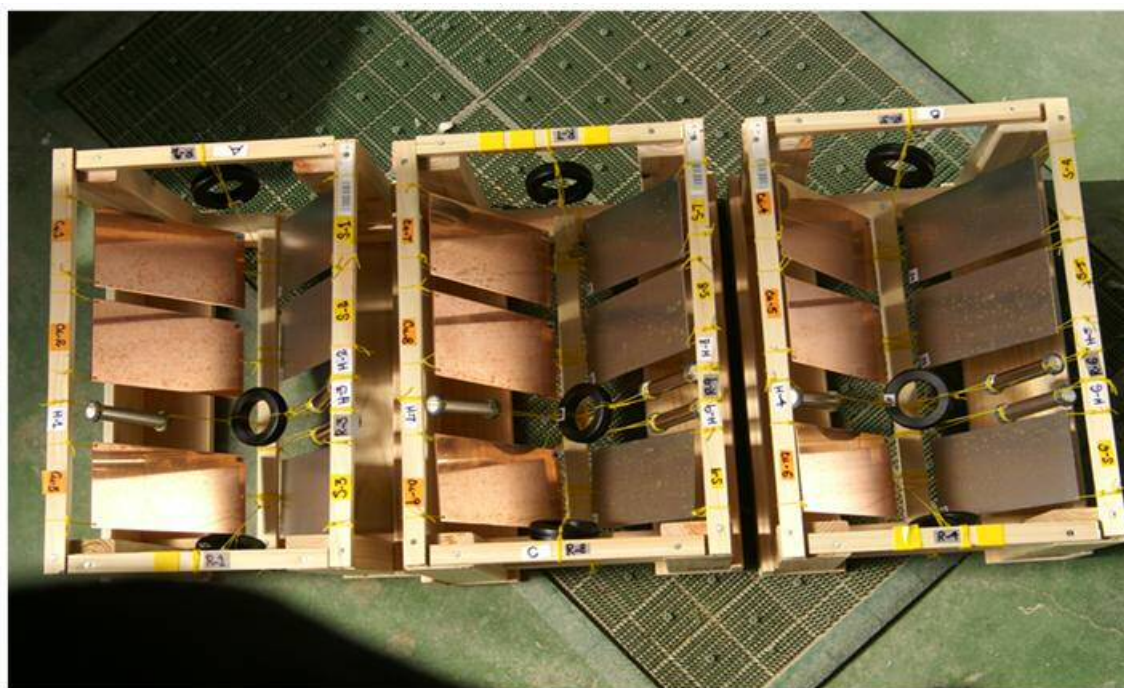


写真-6.2 試験片の木組み枠内の配置状況



写真-6.3 塩水噴霧試験の状況

6.3.3 電熱ヒーターの高温水による腐食促進試験

電気温水器内は、絶えず高温水に満たされ、湿潤と乾燥を繰り返さない特殊な条件下にある。高温水による腐食促進試験は、高温水中と空気中での腐食度合いの差を得る目的で、前項の腐食促進試験と並行して、電気温水器の貯湯槽内と同様な条件下での電熱ヒーターの腐食試験を実施した。

試験の方法を図-6.4、写真-6.4に示す。試験方法は、80℃にセットした温水器の中に、表-6.5の溶液A、B、Cと試験片を三角フラスコに入れて湯煎した。試験片は、新品の電熱ヒーターを約70mmの長さにカットし、中空部に止水のためのシリコン樹脂を注入し防水と防錆のための処理を行い、それぞれの重量（mg）を計測記録した。なお、試験時間は、20日間継続して行った。

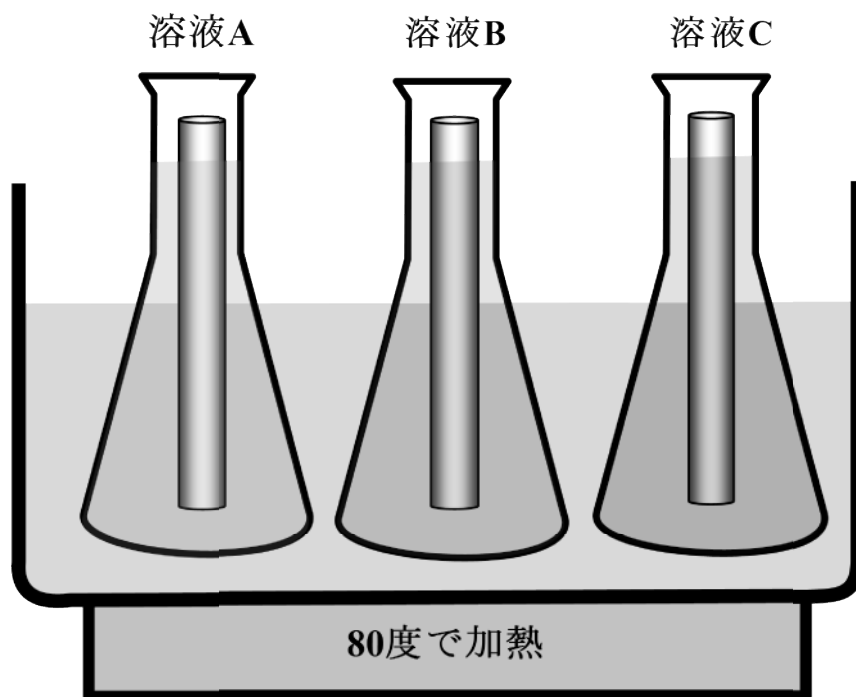


図-6.4 高温水による腐食促進試験装置



写真-6.4 高温水による腐食促進試験の器具と試験片

6.4 試験結果

6.4.1 腐食促進試験結果

鉄板、銅板の腐食促進試験の12サイクル実施の結果の腐食状態を写真-6.5、写真-6.6に示す。いずれも塩化物イオン濃度に比例して赤錆などの腐食が発生していた。各試験体の腐食度を測定するため、腐食錆をサンドペーパーやワイヤーブラシを使用しケレンした後にmg単位で計量して、腐食による減量を試験体面積で除して、鉄板と銅板それぞれの腐食度を測定した。その結果を表-6.6に示す。この測定値には、バラツキが発生していた。特に鉄板の溶液Bにおいて、 188g/m^2 (1.97g/枚)のバラツキが生じていた。これは、塩水噴霧試験装置の噴霧のムラや錆のケレンの精度によるものと考えられる。なお、電熱ヒーターについては、コーキングしたウレタン樹脂の流失や管内部の腐食等により腐食度が求められなかった。また、ゴム製パッキンについても、水分や塩分等の付着により試験前より清掃後の重量が増加し腐食度は求められなかった。

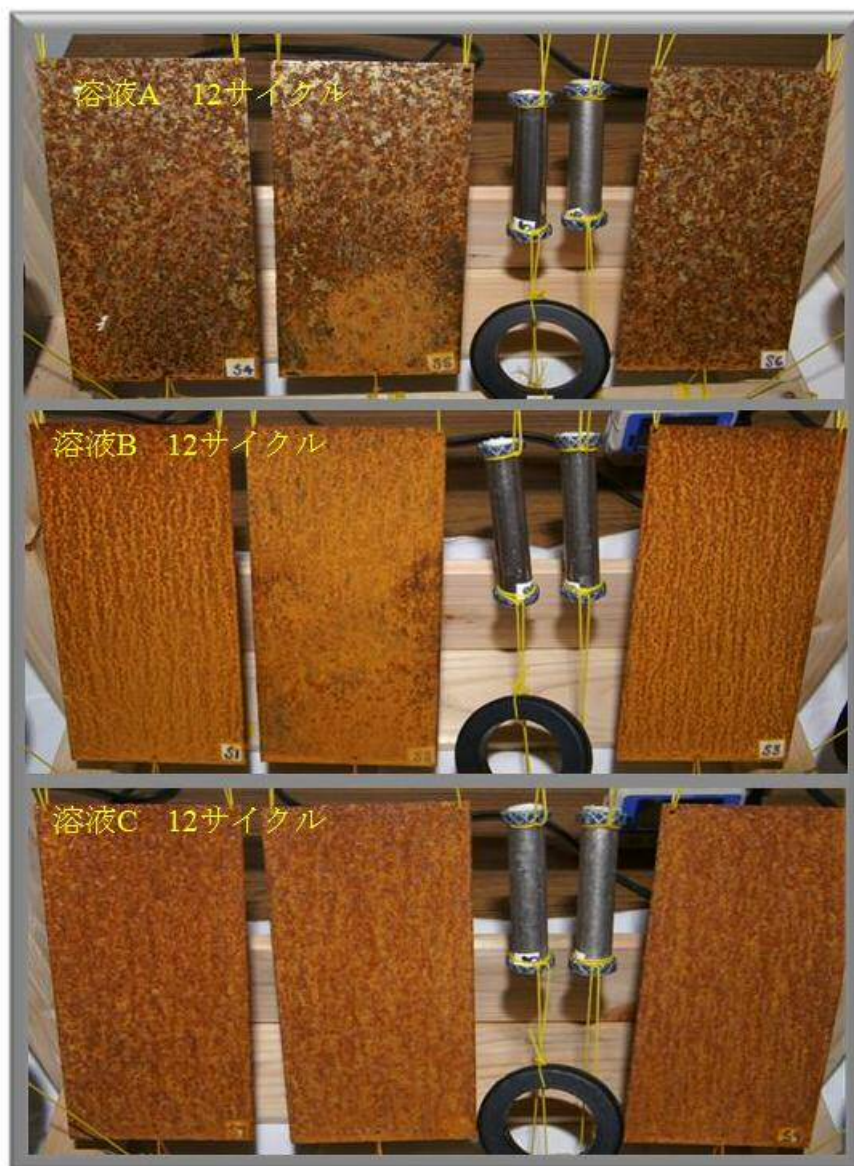


写真-6.5 鉄板の腐食促進試験結果（12 サイクル）

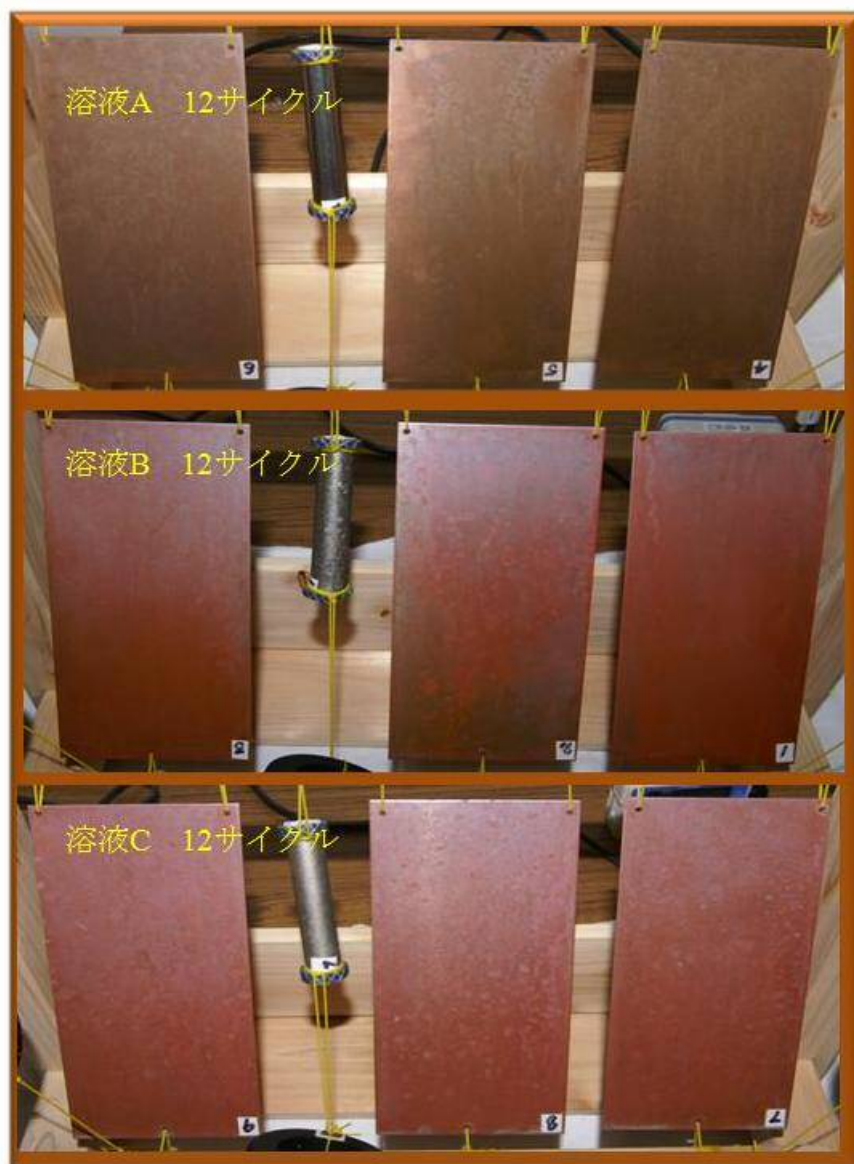


写真-6.6 銅板の腐食促進試験結果 (12 サイクル)

表-6.6 鉄板及び銅板の腐食度 (12 サイクル)

溶液種別	鉄板腐食度 (mg/m ²)	銅板腐食度 (mg/m ²)
溶液 A	48,667	95
	82,857	190
	24,857	381
溶液 B	146,667	19,810
	278,381	5,238
	90,571	8,381
溶液 C	633,619	88,667
	678,857	71,048
	626,667	110,190

6.4.2 高温水による腐食促進試験結果

高温水による促進試験による試験体を写真-6.7 に示す。電熱ヒーターの試験体は、前項の腐食促進試験の試験体と同じく、コーキングしたウレタン樹脂の流失や管内部の腐食等により腐食度を求めることができなかった。

しかし、肉眼において、塩化物イオン濃度差による腐食の度合いが、緑青の錆の発生状況等から観察することができたため、表面の腐食状況を顕微鏡撮影（100 倍，撮影範囲約 1.0×0.7mm）で行った。その表面の画像を写真-6.8 に示す。試験体の状態は、溶液 A，B，C の順で、塩化物イオン濃度が高いほど腐食範囲が大きくなっていった。



写真-6.7 電熱ヒーターの腐食状況

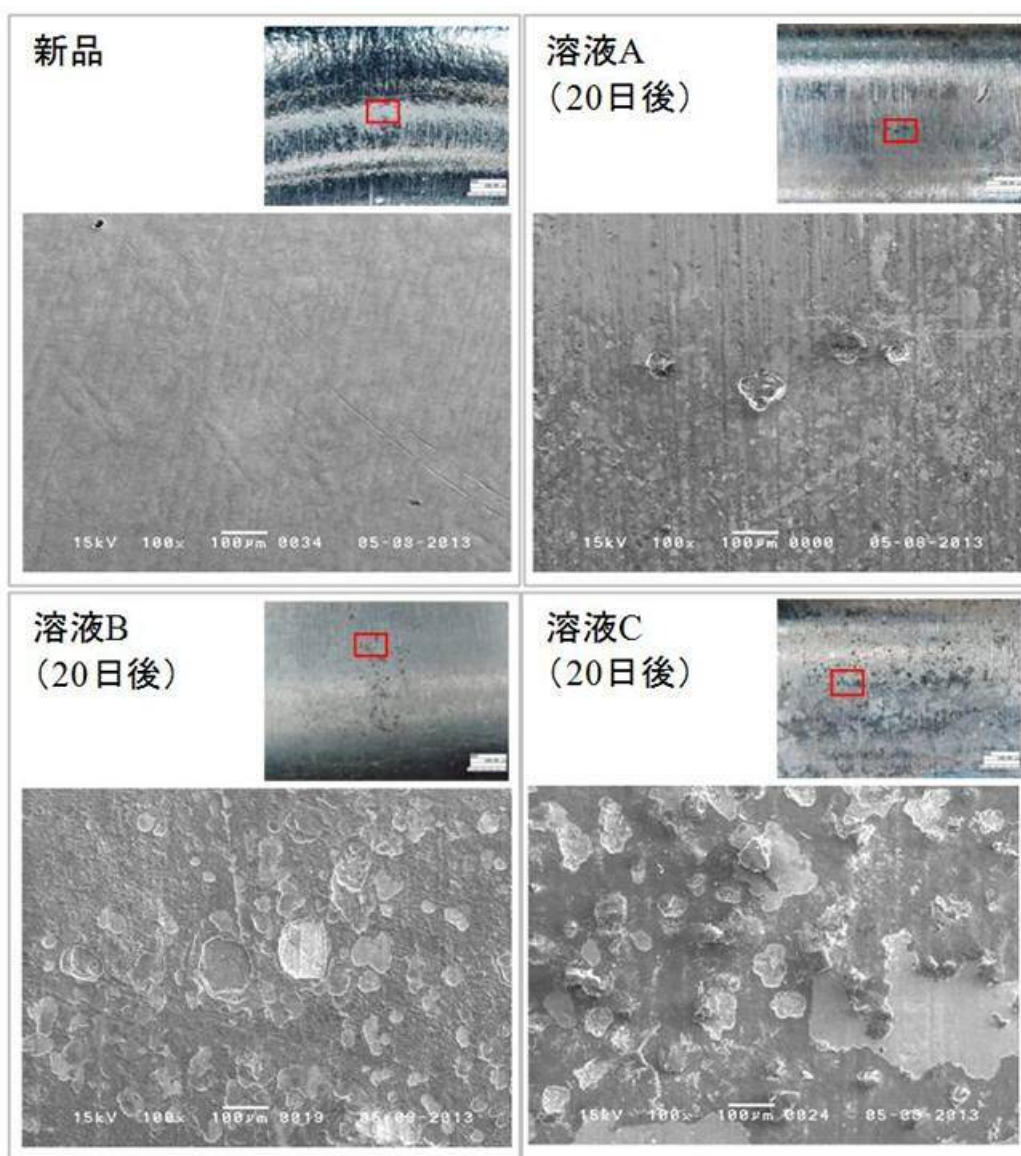


写真-6.8 電熱ヒーターの腐食状況の顕微鏡写真

6.5 考察

6.5.1 銅の塩化物イオンによる腐食度と耐用年数

銅板の腐食促進試験結果から求めた塩化物イオン濃度と腐食度の関係式は、図-6.5から、

$$y_c = 21.257x^{0.8377} \quad (1)$$

となる。ただし、 y_c は、銅の腐食度 (mg/m^2)、 x は、塩化物イオン濃度 (mg/L) を表す。

0.5 年で腐食したときの塩化物イオン濃度 $x=670\text{mg}/\text{L}$ における腐食度は、式 (1) より $Fx=4,953\text{g}/\text{m}^2$ を算出する。これは、塩化物イオン濃度 $670\text{mg}/\text{L}$ のときに 0.5 年で腐食する腐食度であるため、耐用年数 10 年とした場合の 0.5 年における腐食度は、 $0.05Fx=0.05 \times 4,953=248 \text{mg}/\text{m}^2$ となる。腐食度 $y_c=248 \text{mg}/\text{m}^2$ となる塩化物イオン濃度は、式 (1) の逆算から求めると $18.7\text{mg}/\text{L}$ となる (図-6.6)。

このことから塩化物イオン濃度が、 $18.7\text{mg}/\text{L}$ を上回ると 10 年で温水器等銅の腐食による故障等不具合が発生する可能性のあることが予測できる。

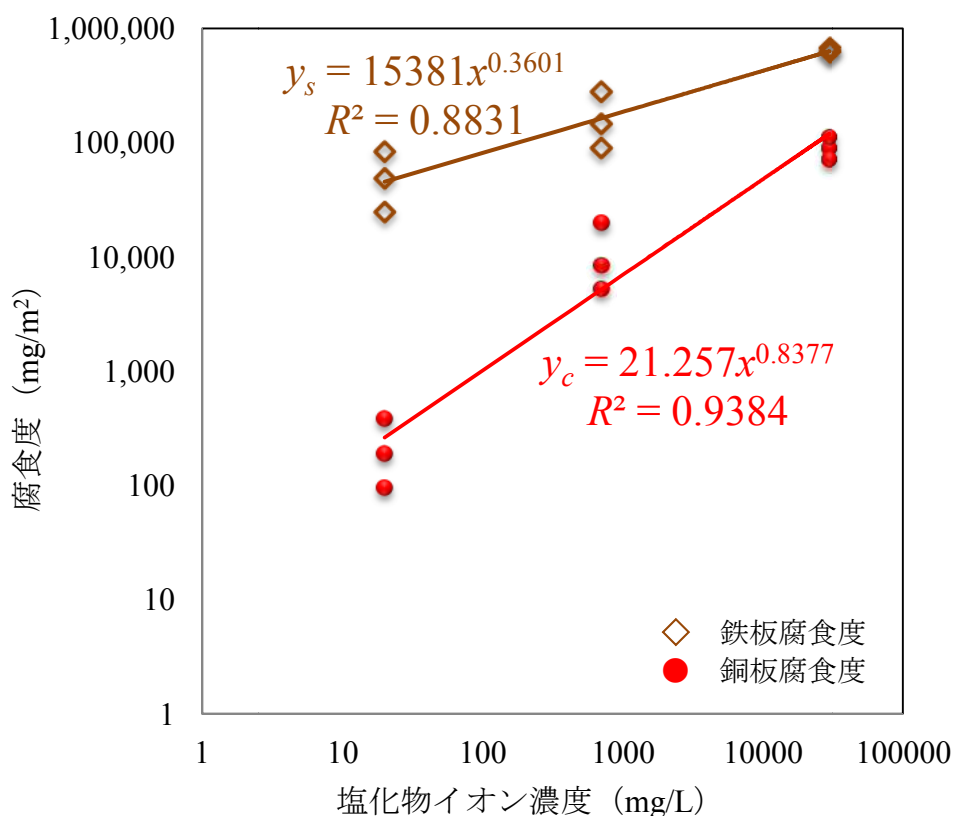


図-6.5 鉄及び銅板の塩化物イオン濃度と腐食度の関係

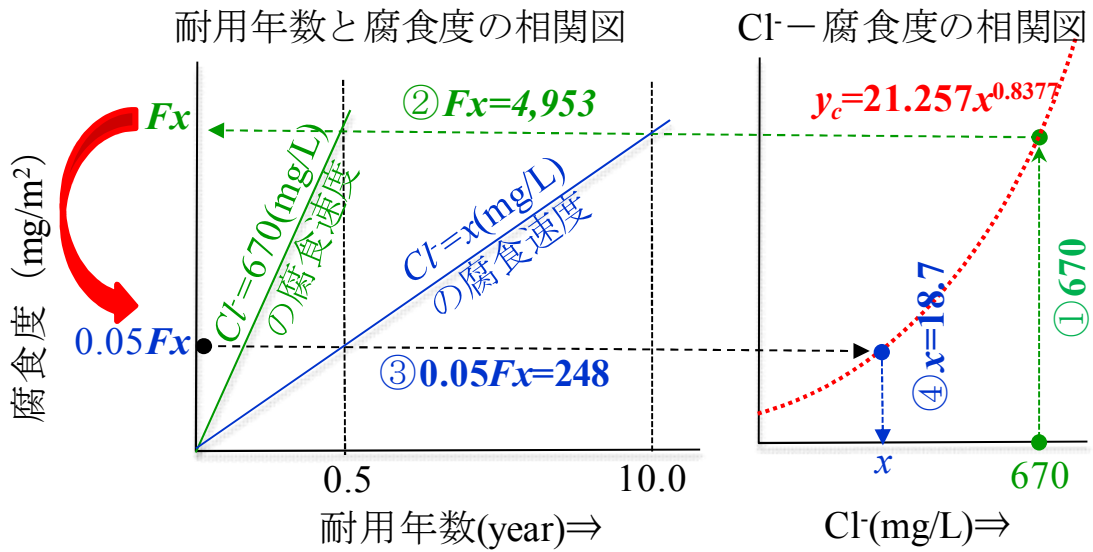


図-6.6 銅板の塩化物イオン濃度と腐食度との関係

6.5.2 鉄と銅の腐食度の差

鉄板の腐食促進試験結果から求めた塩化物イオン濃度と腐食度の関係式は、図-6.5から、

$$y_s = 15,381x^{0.3601} \quad (2)$$

となる。ただし、 y_s は鉄の腐食度 (mg/m^2)、 x は塩化物イオン濃度 (mg/L) を表す。鉄と銅の腐食速度の比は、式 (2) を式 (1) で除したもので、

$$y_r = 723.57x^{-0.478} \quad (3)$$

となる。ただし、 y_r は鉄と銅の腐食度比 (倍率)、 x は塩化物イオン濃度 (mg/L) を表す。

式 (3) から鉄と銅では塩化物イオン濃度によって腐食する速度は大きく違うが、塩化物イオン濃度が $20\text{mg}/\text{L}$ のとき約 173 倍、 $700\text{mg}/\text{L}$ のとき約 32 倍、 $30,000\text{mg}/\text{L}$ のとき約 5 倍の腐食速度差がある。塩化物イオン濃度が高濃度になるに従って、鉄と銅との腐食度の差は減少し大差がないものと推察できる。

6.5.3 高温水による腐食促進試験結果の解析

高温水による腐食促進試験結果からは、試験体の腐食による減量から腐食度を求めることができなかった。そのため、腐食度の代わりに顕微鏡撮影画像から各塩化物イオン濃度による腐食面積(A : mm²)を求め、図-6.2 に示した考え方と同様にして塩化物イオン濃度から耐用年数を推定した。ここで、腐食面積(A)は、試験体の約7×4mmの中にある顕微鏡撮影画像サイズ(約0.8×0.5mm)の腐食箇所数(a) (図-6.7 左側赤と黄色の枠)に顕微鏡撮影画像約0.8×0.5mm (図-6.7 中央部)の腐食面積(b)を乗じたものである。腐食面積(b)は、11×7に分割(図-6.7 中央部)したメッシュ約0.1×0.1mm内の腐食割合(%)を目視により算出(図-6.7 右側)し、顕微鏡画像全体(約0.8×0.5mm)の腐食割合を算出して、顕微鏡撮影画像約0.8×0.5mmの面積0.40mm²を乗じたものである。

試験片区分	試験片サイズ:7.0×4.0(mm)=28.0mm ²	試験片サイズ:0.8×0.5(mm)=0.40mm ²	腐食面積比率(11×7メッシュ平均腐食面積率)																					
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11											
溶液A 腐食面積(A) A=(a)×(b) 0.020 mm²			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
腐食箇所数(a) 2箇所	腐食面積(b)=0.40*(C) 0.010 mm ²	腐食面積比率(C) 2.468 %																						
溶液B 腐食面積(A) A=(a)×(b) 0.964 mm²			0	0	25	10	40	25	70	90	100	40	30	0	0	0	10	30	50	20	90	70	10	30
腐食箇所数(a) 5箇所	腐食面積(b)=0.40*(C) 0.193 mm ²	腐食面積比率(C) 48.182 %	5	10	20	30	40	60	90	70	30	30	5	20	80	70	70	100	100	100	70	50	30	30
溶液C 腐食面積(A) A=(a)×(b) 7.996 mm²			60	70	60	30	60	70	90	60	80	60	70	80	80	80	60	40	70	50	90	100	100	100
腐食箇所数(a) 32箇所	腐食面積(b)=0.40*(C) 0.250 mm ²	腐食面積比率(C) 62.468 %	40	40	30	50	50	100	70	70	40	30	40	30	50	40	60	80	80	80	70	40	80	50
			60	90	60	30	60	70	90	60	80	60	70	80	80	80	60	70	50	30	30	30	50	50

図-6.7 塩化物イオン濃度による腐食面積の算出図

その算定結果を表-6.7 に示す。これにより求めた各塩化物イオン濃度と腐食面積の関係を図-6.8 に示す。この関係式は、

$$y_e = 0.0024x^{0.8168} \quad (4)$$

となる。ただし、 y_e は、電熱ヒーターの腐食面積 (mm^2)、 x は、塩化物イオン濃度 (mg/L) を表す。0.5 年で腐食する塩化物イオン濃度 $x = 670 \text{mg/L}$ のときの腐食面積は、式 (4) より $Fx = 0.488$ (mm^2) を算出する。これは、0.5 年で腐食する腐食面積であるため、耐用年数 10 年とした場合の 0.5 年に相当する腐食面積は、 $0.488 \times 0.05 = 0.024$ (mm^2) となる。腐食面積 $y_e = 0.025$ (mm^2) となる塩化物イオン濃度は、式 (4) の逆算により求めると 17.1mg/L となる (図-6.9)。なお、腐食面積に対応する腐食速度は、腐食度と同じく供用年数と比例するものとする。これは、試験結果から電熱ヒーターの腐食厚は、いずれも薄く 1 層程度のメッキ層の剥がれであったことより腐食による減量は面積に比例するものとした。

表-6.7 電熱ヒーターの腐食面積

溶液種別	腐食箇所数(a) (箇所)	腐食面積(b) (mm^2)	腐食面積 ($A = a \times b$) (mm^2)
溶液 A	2	0.010	0.020
溶液 B	5	0.193	0.964
溶液 C	32	0.250	7.996

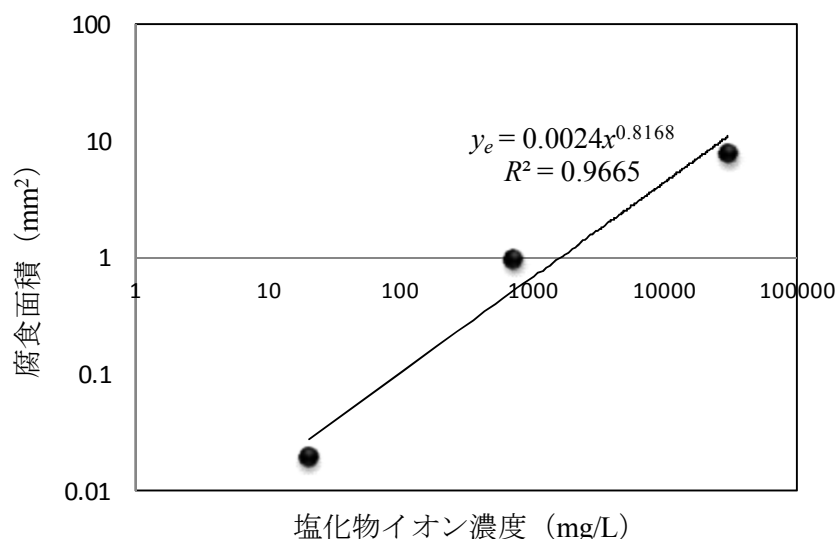


図-6.8 電熱ヒーターにおける塩化物イオン濃度と腐食面積の関係

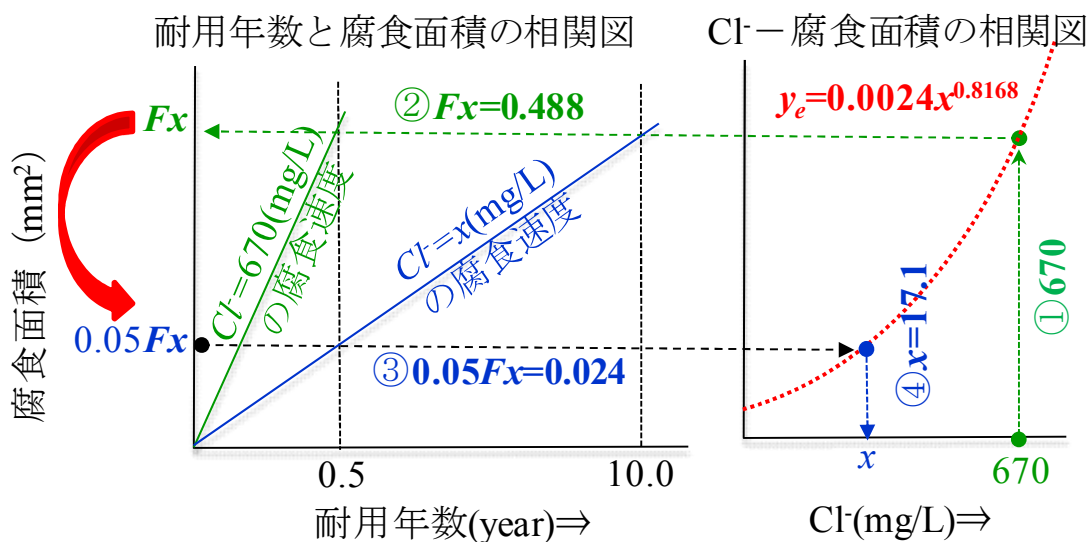


図-6.9 電熱ヒーターの塩化物イオン濃度と耐用年数の関係

以上から塩化物イオン量は、17.1mg/L の濃度を上回ると 10 年で温水器の電熱ヒーターに故障等不具合が発生する可能性のあることが予測できる。

6.5.4 塩化物イオン濃度と耐用年数の関係

図-6.10 は、噴霧と高温水試験によるそれぞれの腐食促進試験結果より求めた塩化物イオン濃度に対する銅と電熱ヒーターの耐用年数の関係を示す。なお、耐用年数は、塩化物イオン濃度 670 mg/L における腐食度と腐食面積を 0.5 年として算出した。

塩化物イオン濃度による腐食度と腐食面積により求めた耐用年数の相関は、同様な傾向を示しており、銅と電熱ヒーターは、同様な腐食速度を有しているものと考えられる。なお、両者の試験結果から、塩化物イオン濃度が約 20 mg/L の低濃度の場合においても耐用年数 10 年で腐食する可能性がある。

今回実施した腐食促進試験結果から、塩化物イオンの濃度と銅の腐食度においては、相関関係が認められ、試験方法の相違による耐用年数と塩化物イオン濃度の関係も高い相関関係が認められた。

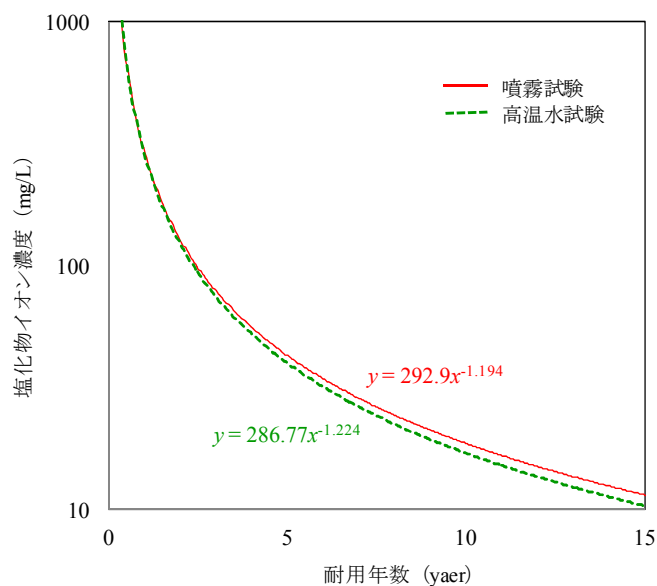


図-6.10 銅板（噴霧試験）と電熱ヒーター（温水試験）における耐用年数と塩化物イオン濃度の関係

6.6 まとめ

高い塩化物イオン濃度が、中山間地域の地下水から検出された。この地下水を使用した電気温水器等は、鍍等により短期間で故障する事象が発生した。このことにより、本章では、腐食促進試験によって電気温水器に使用される電熱ヒーターの銅に対して塩化物イオン濃度と腐食速度の相関関係を明らかにした。高い温度の水の中では、銅など耐腐食性に優れた金属でも、塩化物イオン濃度が、おおむね 20mg/L の場合、10 年以内で腐食する可能性のあることが分かった。

なお、銅の腐食は、塩化物イオン濃度のみでなく、硫酸イオン、pH、製品自体の傷の有無などにも左右され、安易に塩化物イオン濃度のみでは判断できないところもあるので、実用に当っては総合的な判断が必要と考えられる。

第6章の参考文献

- 1) 佐々木薫・秦二郎・下登新一・諸泉利嗣（2014）：中山間地における高速道路の凍結防止剤散布と地下水環境への影響に関するアンケート. 第69回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, p67-69.
- 2) 日本冷凍空調工業会（1994）：冷凍空調機器用水質ガイドラインJRA-GL02:1994. 社団法人日本冷凍空調工業会, p 12-13.
- 3) 中島博志（2010）：銅の腐食と水質. 腐食センターニュース No. 054 , p 15-39.
- 4) 腐食防食学会（1993）：材料環境学入門. 丸善, p273.
- 5) 笠田 洋文（2016）（参照2016.3.22）：EPMAのしくみと資料分析例,（オンライン）, 入手先<http://akebia.jim.tottori-u.ac.jp/~www_tec/epma/epma.html. >
- 6) 国税庁（2016）（参照2016.3.6）：主な減価償却資産の耐用年数.（オンライン）, 入手先<https://www.keisan.nta.go.jp/survey/publish/34255/faq/34311/faq_34353.php. >
- 7) 亜鉛めっき構造物研究会（2016）（参照2016.6.6）：亜鉛めっきの耐食性,（オンライン）, 入手先<<http://www.jlzda.gr.jp/mekki/pdf/youyuu.pdf>. >
- 8) ウエザリングテストセンター（2009）：促進暴露試験ハンドブック〔Ⅱ〕促進腐食試験.財団法人ウエザリングテストセンター, p 3-4.

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

冬の高速道路では、安全で快適な路面を確保する目的で凍結防止剤が散布されている。この凍結防止剤は、主に自然由来の海水をろ過した塩化ナトリウムが用いられ、水に溶けやすく路面へ散布後降雪融解水等と混ざって、用排水路を通じて近傍の河川へ流出し、河川水と混ざって低濃度に希釈され海へ流下していく。この凍結防止剤は、価格が安く安定し自然環境への副次的な影響が少ないことから塩化ナトリウムが多用されている。

中山間地域においては、高速道路の供用経過年数が30年を超える路線もあり、凍結防止剤も累積で道路延長1km当たり1,000tを超える区間もある。高速道路においては、老朽化とこの凍結防止剤に起因する塩害により橋梁など高速道路施設の大規模更新事業が行われてきている。一方、この凍結防止剤による高速道路沿線への環境の影響が懸念される。

本研究は、上水道が整備されていない中山間地の高速道路沿線での井戸の塩水化の懸念がある地域において、地下水の水質や土壌などの環境への影響について調査を行い評価したものである。

調査は、調査地において、井戸施設などの現況を把握した上で、井戸の水質、農地土壌の塩分、農業用水の水質、塩分濃度による金属の腐食速度などについて、凍結防止剤との因果関係を調査してそれぞれについて評価を行った。

本論文は、第1章では高速道路での凍結防止剤の散布量、国内および国外での凍結防止剤に起因する環境への影響に関する現状を整理した。第2章では、凍結防止剤の成分や散布作業などを整理し、アンケートや現地ヒアリング調査により調査地域の現状の把握を行った。第3章では、井戸の水質調査による評価、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を行った。第4章では、農地土壌や農業用水における土壌中の塩素濃度などを調査して、その評価を行った。第5章では、雨量と凍結防止剤散布量から簡易推定手法による農地土壌の塩化物イオン量の推計を行った。第6章では、塩水化した井戸水の影響と思われる金属の腐食に対して、簡易腐食促進試験による塩分濃度による耐用年数の推計を行った。以上の7つの章で本論文を構成した。

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

本章では、冬期の高速道路において道路交通の安全確保のため凍結防止剤の散布は必要不可欠なものである。凍結防止剤の散布量は、高速道路の延長 1km あたり 1 シーズンに約 50t 散布され、中山間地域においては、累積で 1,000t/km 以上となる箇所もある。高速道路のコンクリート構造物は、老朽化やこの凍結防止剤による金属腐食により劣化損傷し、大規模な補修が余儀なくされている。また、海外では凍結防止剤に起因した地下水の塩水化、樹木の枯損被害が発生している。一方、我が国においては、凍結防止剤による高速道路沿線の環境への影響に関する研究報告事例は少なく、この研究報告事例では、際立った環境への影響はないものであった。しかしながら、近年、国内の中山間地域の高速道路沿線において凍結防止剤に起因する地下水の塩水化と思われる事象が発生した。本章では、この塩水化発生事象を発端とした既往の文献資料を整理し、凍結防止剤による影響について調査して評価することを本研究の目的としたものである。沿道環境に関する調査項目は、地下水への水質への影響、沿線の農地土壌及び農業用水への影響、凍結防止剤を含む生活水に起因する金属の腐食に関する影響について研究を行った。第2章以降は、解決すべき課題を抽出して調査と評価を行い本研究の背景と目的を明確にした。

第2章 凍結防止剤と調査地の現状

本章では、高速道路における冬期の路面管理の現状と路面の凍結を防止するための凍結防止剤の性状についてまとめると共に、これによる環境への影響を整理した。また、凍結防止剤が、中山間地の高速道路周辺の井戸水に影響（塩水化）を与えたと思われる事象が発生したことにより、調査地周辺家屋への影響度合いを把握するため、地形や地質などの調査、アンケートやヒアリング調査などを実施した。その結果について以下に整理する。

- 1) 調査地では、凍結防止剤に塩化ナトリウムが使用され年間約50t/kmが散布されている。
- 2) 調査地の井戸のほとんどは、高速道路より谷側の低い位置にあり、上水道が整備されていないことより飲料水などの生活用水として使用されている。
- 3) 調査地の地質は、火成岩である花崗岩と安山岩を基盤とするもので、岩塩などを有する堆積岩類は認められないこと。

- 4) 高速道路周辺167世帯に井戸水に関するアンケート調査を行った結果、「井戸水が塩辛い」、「ポンプや温水器等が短期間で故障する」といった不具合が高速道路の谷側下方で比較的多く発生していることが分かった。アンケートの主な内訳を以下に示す。
 - ・アンケート回収率61% (102/167世帯)。
 - ・井戸種別は、機械ボーリング井戸61% (51/80世帯)、手掘り井戸39%。
 - ・塩辛く感じる13% (13/102世帯)。
 - ・井戸用モーターポンプの交換32% (33/102世帯)。
 - ・温水器等の交換35% (26/102世帯)、そのうち電気温水器77% (20/26世帯)。
- 5) ヒアリング調査は、アンケート結果を基に87井戸 (83世帯) について実施した。その結果は、塩辛く感じる世帯15世帯、井戸用ポンプの交換20件、温水器の交換22件で、重複する件数を除いた場合の不具合は38% (39/102世帯) に及んだ。いずれも、高速道路より谷側下方に位置する世帯であった。
- 6) 井戸とその水質調査の結果は、井戸水の塩化物イオン濃度が20mg/L以上で、高速道路路肩端からの離隔距離がおおむね300mの谷側下方で不具合が発生していた。
- 7) 調査地以外の周辺井戸の自然由来と考えられる塩化物イオン濃度は、花崗岩地帯で8.8mg/L、安山岩地帯で7.8mg/L、砂岩・泥岩地帯で11.9 mg/L、流紋岩類地帯で10.5mg/L、全体平均で10.1mg/Lであった。
- 8) 機械ボーリング井戸 (深さ50~200m) は、深層部の自然由来の地下水を汲み上げるものであるが、48~680mg/Lと高い塩化物イオン濃度であり、地下深部まで塩水化の影響を受けている可能性が考えられる。

以上から、高速道路に散布される凍結防止剤の周辺環境への影響は無視できないことが明らかになった。

第3章 水質調査と地下浸透経路

水質調査は、高速道路周辺の87井戸で実施した。水質調査の結果は、高速道路より標高の低い谷側方向では高速道路に近い井戸ほど塩化物イオン濃度が高いことなどが分かった。以下に水質調査の結果を整理する。

- 1) 塩化物イオン濃度は、高速道路より谷側下方において道路に近い井戸ほど高い濃度を検出した。調査における最大の塩化物イオン濃度は、高速道路から16m離れた井戸で、水道水の飲料水基準200mg/Lを超える670mg/Lと高い濃度であった。

第7章 結論

- 2) ナトリウムイオン濃度は、高速道路より谷側下方において道路に近い井戸ほど高い濃度を検出した。その調査における最大の濃度は、水道水の飲料水基準200mg/Lを超える320mg/Lと高い濃度であった。
- 3) 凍結防止剤の主成分ではないカルシウム、マグネシウム、カリウムのイオン濃度も、高速道路より谷側下方において道路に近い井戸ほど高い濃度を検出した。その調査における最大の濃度は、カルシウムイオン濃度で250mg/L（水道水基準300mg/L）と高い濃度であった。また、マグネシウムイオン濃度で41mg/L（水道水基準300mg/L）、カリウムイオン濃度は30mg/Lといずれも相対的にやや高い濃度であった。
- 4) 凍結防止剤の主成分ではないカルシウム、マグネシウム、カリウムの陽イオン濃度は、土壌に含まれる陽イオンがナトリウムイオンの浸透により入れ替わるイオン交換によるものと考えられた。
- 5) 酸消費量：CaCO₃ (pH4.8)、全硬度、カルシウム硬度、イオン状シリカ (SiO₂) は、カルシウムなどの陽イオンを含んでおり、ナトリウムイオン同様に高速道路より谷側下方において道路に近い井戸ほど高い値を検出した。
- 6) 電気伝導度は、高速道路より谷側下方において道路に近い井戸ほど高い値を検出した。その最大値は、純水 (1 μ S/cm) と比べて約2,000倍の2,000 μ S/cmであった。
- 7) 電気伝導度 (μ S/cm) は、塩化物イオン濃度 (mg/L) との相関 (R²=0.9612) が高く、塩化物イオン濃度 (y) と電気伝導率 (x) との相関関係は、 $y=0.3108x^{-37.301}$ であった。
- 8) 一般細菌、pH (25°C)、硫酸イオン、その他の項目の水質調査結果は、高速道路や凍結防止剤との相関関係は認められなかった。

凍結防止剤の井戸への流入は、散水調査などを実施し浸透流出経路や凍結防止剤の散布量に対する流出収支を求めた。また、ナトリウムイオンのイオン交換について検討した。これらの結果を以下に記す。

- 1) 路面に散布された凍結防止剤は、25%が路面のクラック等から地下に浸透、26%が水路目地の切れ目から地下に浸透、39%が地表水に混じって直接河川へ流出し、10%は路外等へ飛散していることを推計した。
- 2) 舗装路面のクラックなどから切土部の地下へ浸透した凍結防止剤は、舗装の切込砕石の路盤内を経由して、透水係数の高い盛土付近で地下へ浸透していることを推定

した。

- 3) 路外への飛散範囲は、高速道路の路肩端部からおおむね10m以内に留まり、10m以上の飛散量は 2.5g/m^2 以下の値であった。
- 4) イオン交換量は、基盤となる岩質の成分により異なり、安山岩は、花崗岩と比べてCaを多く含有しており、凍結防止剤に含まれるNaは、安山岩の地盤内通過により約67.3%、花崗岩で20.3%がCaとイオン交換されていることを推計した。

第4章 凍結防止剤の飛散などによる農地土壌と農業用水への影響

凍結防止剤は、車両等によって道路沿線に飛散し、その濃度に応じて植物への生育阻害をもたらす恐れがあり、塩化ナトリウムが農作物や農地土壌及び農業用水へ影響を与える閾値を整理し、高速道路沿線の農地土壌への塩化ナトリウムの飛散浸透量や農業用水への流入量を調査し、農地土壌や農業用水に与える影響を評価した。その結果を以下に記す。

- 1) 農地土壌の最も高い塩素濃度は、道路路肩端から1.5mの畦部（高速道路敷地内）で 90mg/kg （土壌の炉乾燥重量当たり）と閾値 400mg/kg の23%で問題のない値であった。また、農繁期には降雨によるリーチング作用によりさらに低濃度となり問題は無いものと考えられる。
- 2) 農地土壌のリーチングによる地下への浸透速度は、 11cm/月 程度であると推測できた。
- 3) 農地土壌の最も高い交換性ナトリウム飽和度は、道路路肩端から1.5mの畦部（高速道路敷地内）で16.3%と閾値20%の81.5%であり問題のない値であった。また、高速道路供用開始から凍結防止剤を散布し続けて30年以上経過しているにも関わらず、閾値以下の濃度であることより蓄積等による問題は無いものと考えられる。
- 4) 農地土壌の塩分濃度の高い箇所は、いずれも高速道路用地内の道路路肩端から1.5mの位置である。高速道路では環境施設帯として道路路肩端から3m以上の用地を確保してあることから、3m以上の離隔を有する農地土壌への影響は極めて少ないものと考えられる。
- 5) 農業用水に使われる河川の水質は、農繁期で電気伝導度が 0.15dS/m と閾値 0.3dS/m の50%であり問題は無いものと考えられる。ただし、凍結防止剤散布期においては、電気伝導度は、閾値 0.3dS/m を超えることも考えられ冬期における農業用水の利用は注意する必要がある。

以上より、農地土壌や農業用水については、いずれも、凍結防止剤の飛散などによる影響は、閾値以下であり、影響はきわめて少ないことを明らかにした。

第5章 凍結防止剤の飛散による近接農地における塩化物イオン濃度の簡易推定手法

凍結防止剤散布量と降水量から農地土壌中の塩化物イオン濃度を簡単に評価するための簡易推定手法を提案した。本手法によって計算された推定値を農地土壌中の塩化物イオン濃度の調査結果と比較することにより、その推定精度を検証した。その結果を以下に記す。

- 1) 本研究で示した簡易推定手法によって農地における塩化物イオン濃度の定時的変化の推定は、解析値と実測値での誤差が1.71%と精度よく推定できることができた。
- 2) 簡易推定により、表土5cmにおけるリーチング速度は10.7cm/月と推計され、第4章で推定した11cm/月と同程度の値になった。
- 3) 簡易推定結果から凍結防止剤散布期間中における塩素濃度の最大値は、158mg/kgと閾値400mg/kgを下回る39.5%の濃度であった。このことより農作物の生育への影響は極めて少ないことが明らかとなった。

第6章 凍結防止剤に起因する高温多湿状態の銅の腐食速度

中山間地域の井戸から高い塩化物イオン濃度が検出された。この地下水を使用した電気温水器等は、鍍等により短期間で故障した。電気温水器は、一般に耐久性に優れている銅等が用いられているが、この故障原因と凍結防止剤の塩化物イオンとの関係は、高いものと考えられた。本章では、地下水に含まれる塩化物イオンと電気温水器の故障との因果関係を整理するとともに、簡易な腐食促進試験により塩化物イオン濃度に依存する銅の腐食度及び耐用年数との関係を簡易的に求めた。その結果を以下に記す。

- 1) 電気温水器に使用される電熱ヒーターの腐食は、凍結防止剤の塩化物イオンが関与した「孔食」や「腐食生成物による熱伝導率の低下及び材質の劣化」が原因と考えられた。
- 2) 金属の腐食は、塩化物イオン濃度との相関が高いため、この濃度と腐食速度との関係を簡易的な腐食促進試験によってその関係を明らかにした。試験は、塩水噴霧と高温水（塩水）湯煎による方法で行い、いずれも近似的な相関関係にあった。
- 3) 耐腐食性のある電熱ヒーターなどの銅であっても、高温多湿状態においては、低い塩化物イオン濃度（約20mg/L）によっても10年程度で腐食が生じる可能性があるこ

とが分かった。

以上より銅の腐食は、塩化物イオン濃度と腐食速度との相関があり低濃度でも10年程度で腐食する可能性があることが分かった。しかしながら、金属の腐食は塩化物イオン濃度のみではなく、硫酸イオン、pH、製品自体の傷の有無などにも左右され、安易に塩化物イオン濃度のみでは判断できないところもあるので、実用に当っては総合的な判断が必要と考えられる。

(参考：海外における凍結防止剤による環境被害の一考察)

海外での凍結防止剤による環境被害については、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の2倍を超える濃度505mg/Lが検出され、その対策が図られている。また、米国レイク・タホ地区においては、凍結防止剤による道路沿線の何千本もの樹木が枯れて切り倒されている。この樹木枯れの原因は長年蓄積された塩の付着や塩水の吸収が原因といわれている。

このように、海外における凍結防止剤の環境被害にあっては、本研究の結果などから以下の原因が考えられる。

我が国と海外との相違の一要因として降水量の相違が考えられる。

図-7.1¹⁾、図-7.2²⁾に海外と日本の降水量を示す。日本(東京)の年間降水量は、1,406mm(本調査地は、1,654mm)と比較的高い降雨量であるのに対して、塩水化の問題が発生しているカナダ(ハイランドクリーク流域：トロント)の年間降水量は、406mmと日本の29%程度、樹木の枯損が発生しているアメリカ合衆国(レイク・タホ地域：リノ)の年間降水量は、192mmと日本の14%程度と非常に少ない降水量である。

海外と比べて我が国では、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが多量の降雨によって希釈され、リーチングによって地下から河川などに流出する。また、樹木などへ付着した塩分は雨で洗い流され影響を与える濃度になりにくいことにより、周辺環境への影響を低減しているものと考えられる。

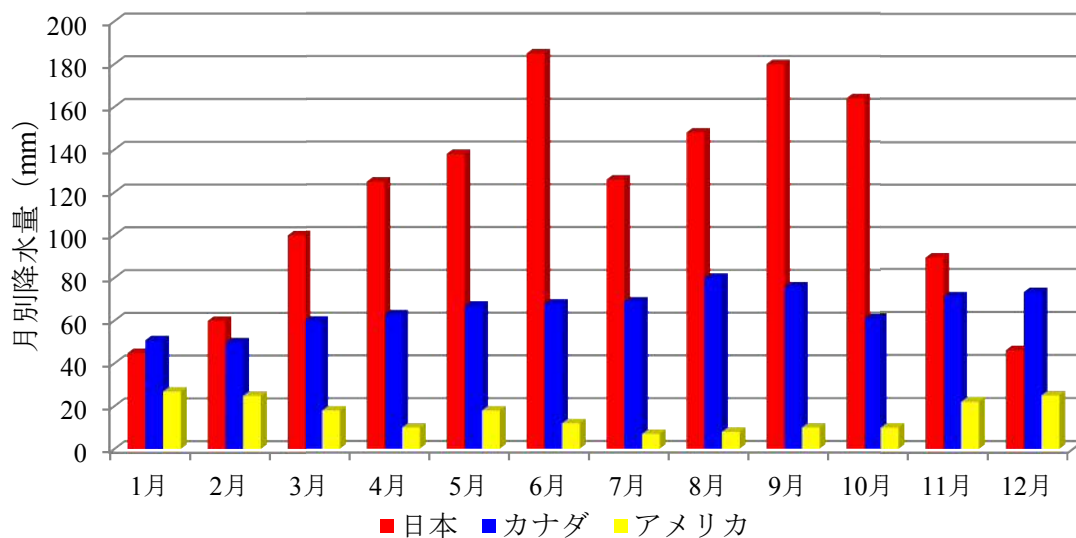


図-7.1 各地区の月別降水量¹⁾

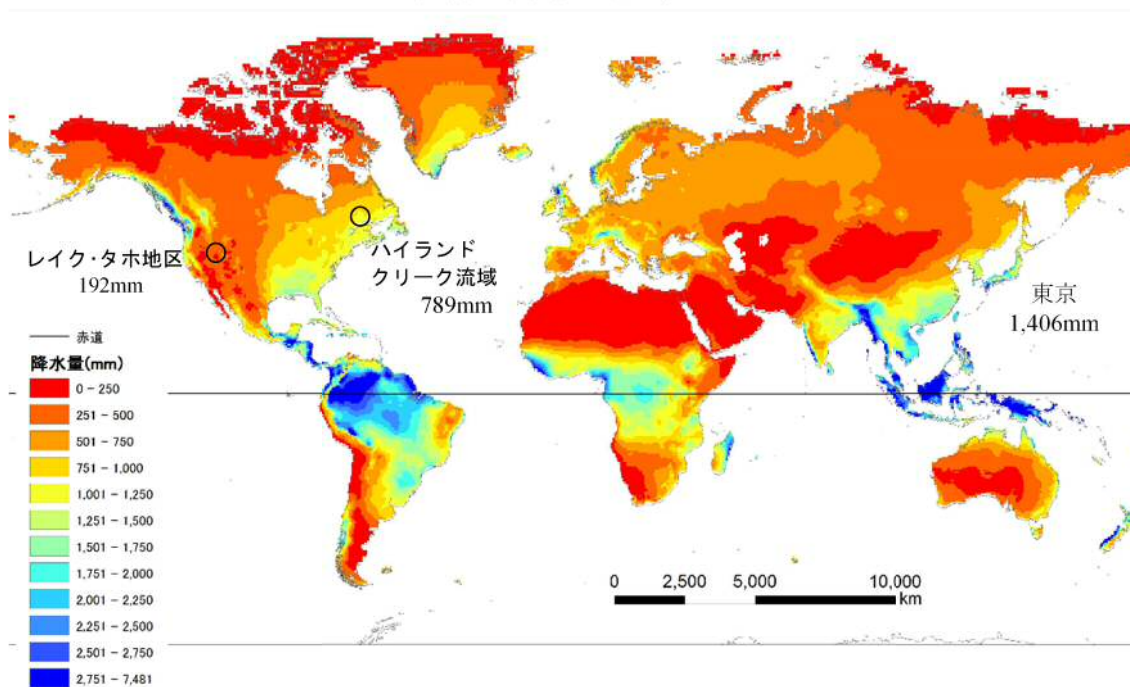


図-7.2 世界の降水量分布図²⁾

第7章 結論

これまでの本研究の成果を要約すると以下ようになる。

今まで我が国において、高速道路で散布される凍結防止剤による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、道路の路面や水路の劣化や老朽化などにより地下へ浸透し沿道周辺の地下水環境に影響を与えている研究結果であった。

塩化物イオンを含む生活水は、高速道路近傍で飲料水基準を超える高い濃度であった。また、電気温水器などの銅金属腐食への影響を与える可能性を示した。

そして、その地下水への侵入経路や浸透メカニズムを明らかにすることができた。

なお、凍結防止剤の飛散や流出による農地土壌や農業用水への影響は、極めて少ないものであった。

なお、本研究調査地の凍結防止剤によって影響を与えた地下水環境の対策については、簡易上水道の整備により対応が図れているところである。

7.2 今後の課題と展望

本研究では、高速道路での凍結防止剤の散布による道路沿道の地下水や農地土壌などへの影響を調査研究し、生活水及び農作物などへの影響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。

7.2.1 今後の課題

(1) 道路及び沿道周辺の環境保全に対する課題

日本の高速道路は、11,520kmのネットワーク計画のもとに、2013年度末において8,402km（全体の89%）を供用し、冬期の交通安全のためほとんどの道路で凍結防止剤が散布されている。その散布量は、年平均で53t/kmと多く、累積では1,000t/kmを超えるところも増加してきている。道路は、経過年数の増加による老朽化や塩害による構造物の金属腐食により劣化損傷が著しくなっている。

そのため、道路の本体と地下水を含めた沿道環境への対策が大きな課題と考えられる。

(2) 調査手法の課題

本研究では、約3年に渡って約90箇所及び井戸の30項目を超える水質調査を約12回/年実施して、今回の結論を得ることができた。これには、現地での試料採取、水質の分析、整理解析などに多大の時間と費用を費やしている。

そのため、簡易で周辺環境を把握できる調査手法が一つの課題として取り上げられる。

7.2.2 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) 道路及び沿道周辺の環境保全に対する課題

道路の本体と地下水を含めた沿道環境への対策として、以下を提案する。

1) 凍結防止剤の環境への負荷低減

凍結防止剤は、冬期の交通安全を確保する上では欠かせないものである。しか

し、凍結防止剤として多用される塩化物は、道路本体の金属腐食、地下水の塩水化などに悪影響を与えるものでもあることから、代替の材料を選定する必要がある。

塩害の発生要因である塩化物を含まない凍結防止剤で塩害抑制効果のある凍結防止剤は、酢酸系、CAM（酢酸カルシウム、マグネシウム）、ギ酸ナトリウム・尿素系のものがある。また、塩害の発生要因である塩化物を含むが、原塩よりは塩害の発生が小さい凍結防止剤として、塩化物混合系（塩化ナトリウム+塩化カルシウム）、塩カルシウム、塩化物混合系（塩化ナトリウム+塩化マグネシウム）、塩化マグネシウム・塩化物混合系（塩化ナトリウム+酢酸化合物）などがある。文献等を参考とし市場にある凍結防止剤を整理すると表-7.1のとおりとなる。性能、使用のしやすさ、散布による副次的なマイナス影響の整理結果を総評すると①融氷性能では、「塩化カルシウム」や「塩化ナトリウム（原塩）」が気温条件-5℃でも-10℃でも安定した性能を発揮している。②使用しやすさでは、「塩化ナトリウム（原塩）」が圧倒的に安価であり、各地の港等に大量なストックを持つての早急な供給体制を可能としている。③散布による副次的なマイナス影響では、金属腐食量だけを考えれば、酢酸系やギ酸ナトリウム等が有効な結果であったが、スケーリング劣化では、マグネシウム系の凍結防止剤が優れており、酢酸系があまり良くないという結果も出ている。万能に飛び抜けて効果を発揮している凍結防止剤はなかった。

以上より、塩化ナトリウム（原塩）の評価が全体的に安定しており、現場で使用しやすい凍結防止剤と考えられている³⁾。

このことから、現時点では塩化ナトリウムを主成分とする凍結防止剤が理にかなった材料といえる。

なお、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⁴⁾ やトウモロコシ原料糖蜜を使用した研究⁵⁾ もあり、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。

また、地下へ浸透した凍結防止剤は、収支計算の結果、約60t/km以上が累積していると試算されている⁶⁾。また、浸透流-移流分散解析により仮に凍結防止剤を散布しなかった場合、元の状態になるまでには30~40年の年数を要すると推計されてはいる⁷⁾が塩化物イオンによる影響をさらに悪化させないためにも現時点

では新たな凍結防止剤より地下水への侵入を抑止する対策が重要と考えられる。

表-7.1 凍結防止剤の基本的な性質²⁾

区分	種別	水への 溶けやすさ	水溶熱 (cal/g)	最低融 点温度 (°C)	最低融点の 溶液の飽和 濃度(%)	価格 (円/kg)
基準	塩化ナトリウム	△	-20.7	-21	23.8	19.5
塩化物 を含ま ない凍 結防止 剤	CMA (酢酸カルシウム・マ グネシウム)	×	44.3	-25	33	300
	ギ酸ナトリウム系	—	—	-23	—	288
	尿素	○	-55.9	-12	32	120
	尿素系	—	—	-12	—	150
塩化物 を含む 凍結防 止剤	塩化カルシウム	◎	68	-55	39.6	51
	塩化マグネシウム	◎	14.5	-33	44	46
	塩化物混合系 (塩化ナトリ ウム・塩化カルシウム)	—	—	-22.9	—	35
	塩化物混合系 (塩化ナトリ ウム・塩化マグネシウム)	—	—	-20.2	—	—
	塩化カリウム	△	-59.6	-11	19.5	—
	塩化カルシウム溶液	—	—	-55	—	—

2) 舗装路面における浸透抑止対策

本研究では、舗装のひび割れから下層路盤の粒状路盤を通じて地下への浸透率が25%を占めていることより、舗装路面の浸透対策は効果的な対策と考える。

対策としては、ひび割れた表層基層部の打換えやクラック注入などの対策が考えられる。以下にその具体例を記載する。

- 表層は、アスファルト材に高粘度バインダーを用いた高機能舗装（排水性機能を有するポーラスな舗装）により、舗装の耐久性の向上によるクラック発生抑制を図ることができる。また、排水性機能から水しぶきの低減が図れることにより沿道への飛散も合わせて抑制できる。
- 基層や中間層は、不透水性の高い碎石マスチック舗装や流し込みによるグーアスファルト舗装を施すことにより、舗装体の耐久性向上と地下への浸透対策が図れる。
- 浸透水の通り道となっている粒状路盤は、セメント安定処理路盤⁸⁾などの透水係数の低い路盤材の使用により、浸透量の削減、セメントの剛性によるクラックの発生抑制が図れる。
- 新東名高速道路では、土工区間において、下層に連続鉄筋コンクリート版

を有する高機能舗装を敷設したコンポジット構造⁸⁾が主体となっている。このコンポジット構造も剛性による舗装体の耐久性の向上と地下水への浸透の抑止対策として有効なものと考えられる。

以上の舗装路面の補修改良により、25%の凍結防止剤の地下への浸透を削減できるものと考えられる。

なお、本調査地においては、高機能舗装による舗装改良がなされ地下への浸透を抑止する対策がなされている。また、NEXCOにおいては、舗装路盤を粒状路盤から剛性の高いセメント安定処理路盤構造に移行してきており、本調査地のような地下への浸透が抑制されるものと考えられる。

3) 水路における浸透対策

プレキャストコンクリート排水路(Pu)の施工目地は、モルタルやセメントペーストで接着接続しており、経年変化で劣化してきている(写真-7.1)。冬期は降水や融雪水の量は少なくほんのわずかな目地切れでも、そのほとんどが目地から地下へ浸透していくものと考えられる。本研究結果では、この目地の切れた箇所から地下への浸透率が26%を占めていることより、水路目地部からの地下への浸透抑止対策は、効果的なものであると考える。

対策として、目地部の再補修やソケットとゴムパッキン付のプレキャスト水路PULへの改良が考えられるが、本調査地においては、軽量で強度が大きく耐久性に優れたFRPで製作した水路を使用して水路の補修を行っている(写真-7.2)。また、FRP製のものが使用できない屈曲部などでは、樹脂系の防水塗装を塗布した防水対策がなされている。なお、NEXCOにおいては、水路構造は目地のあるPuタイプからソケット付きのPULタイプに移行してきており新しい路線にあっては、目地部からの漏水は抑止できるものと考えられる。



写真-7.1 水路の目地損傷箇所



写真-7.2 FRPを使用した水路目地補修対策

(2) 調査手法の課題

塩化物イオン濃度の推定にあつては、本研究により電気伝導度と高い相関関係を確認した(図-7.3)。当調査地の電気伝導度と塩化物イオン濃度の関係は、次式(1)で表わすことができる。

$$y=0.3108x-37.292 \quad (1)$$

ただし、 y は、塩化物イオン濃度(mg/L)、 x は、電気伝導度(μ S/cm)とする。

さらに簡素化するため、電気伝導度から塩化物イオン濃度の概略値を得る方法としては、電気伝導度を約0.3倍とした場合、図-7.4に示すよう約7.8%の誤差で推計することができる。また、塩化物イオン濃度が水道水基準の200mg/Lを越えるものにあつては、誤差がさらに縮小されている。写真-7.3に、電気伝導度計で水質を測定している状況写真を記す。

以上から、水質調査において概略的な塩化物イオン濃度(mg/L)の推定に電気伝導度(μ S/cm)を0.3倍(EC計測単位mS/mの場合は3倍)とする測定方法を提案するものである。

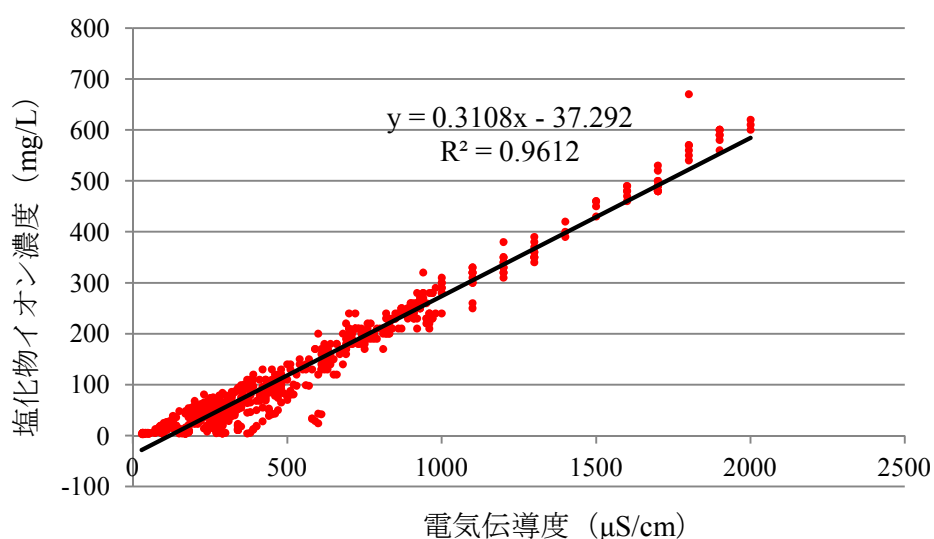


図-7.3 電気伝導度と塩化物イオン濃度の関係

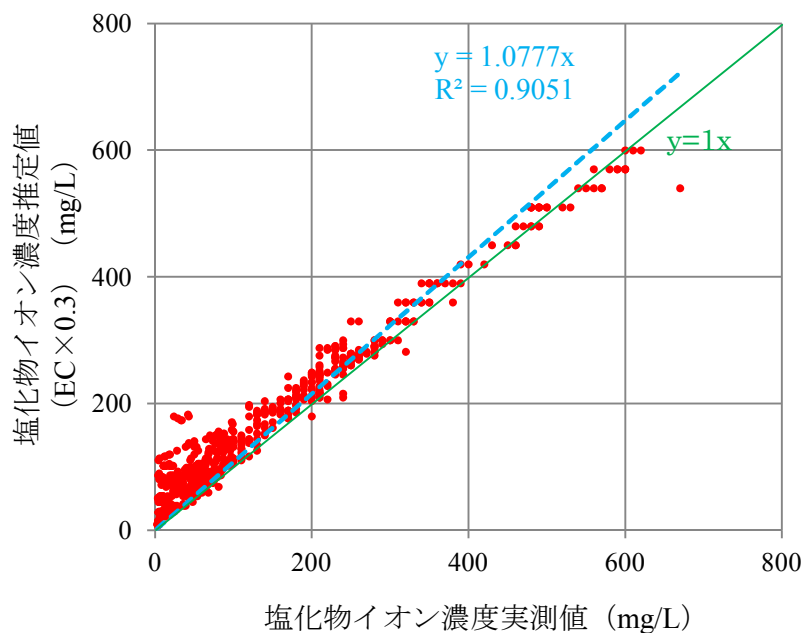


図-7.4 塩化物イオン濃度の実測値と推定値の関係



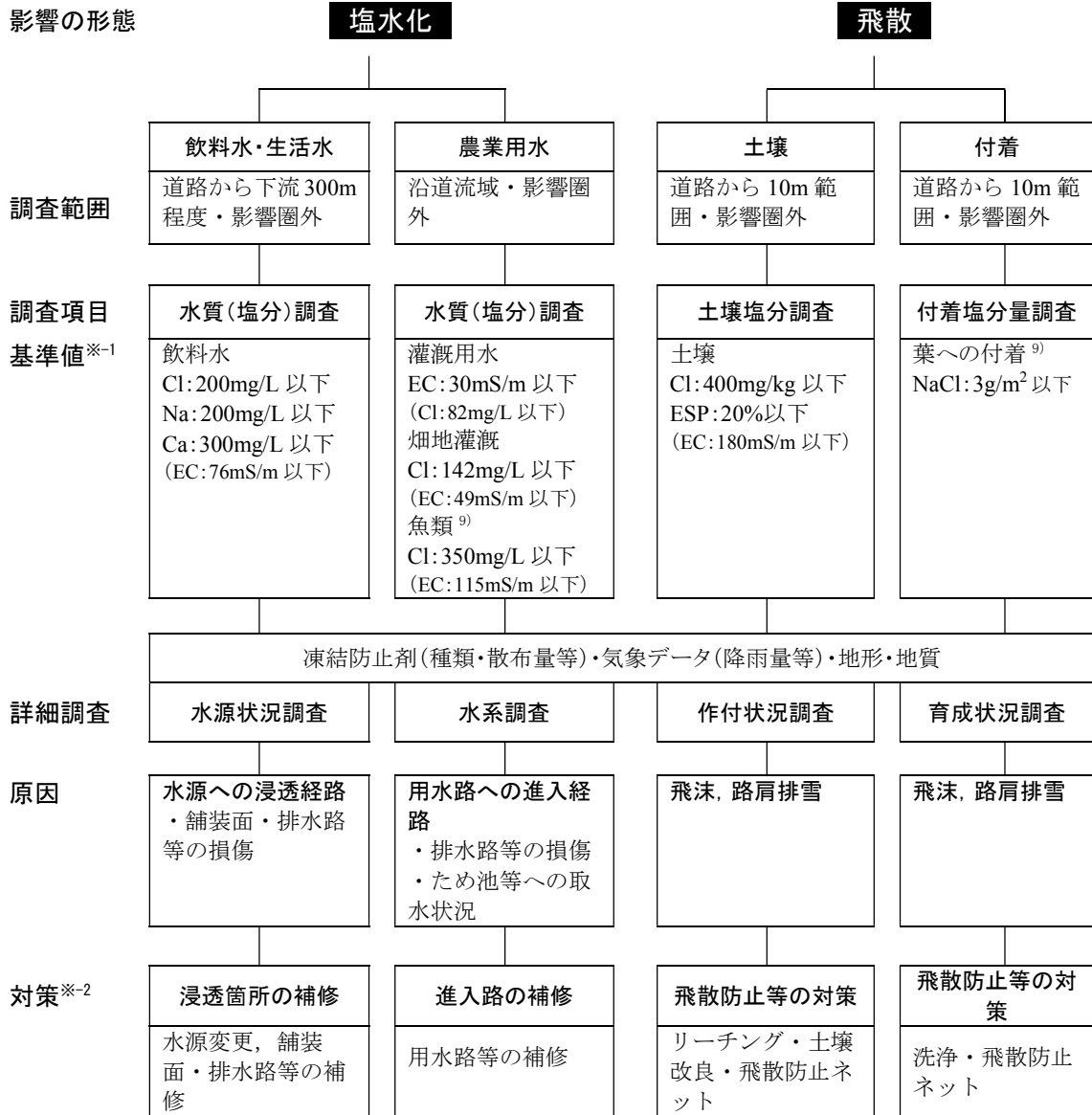
写真-7.3 電気伝導計での測定状況

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。

なお、今後の他の地域で類似した凍結防止剤に起因する環境調査研究のための一助と

して、本研究により知り得た手法や対策方法について、知見も加えた概略的な手順を表-7.2に記載する。

表-7.2 凍結防止剤に起因する環境調査の手法と対策手順



※-1 基準値の()内の表記は、本調査地におけるECとClとの相関値から求めた概略値を記載した。

※-2 道路本体の対応として、ロードヒーヒーティング、地下水の散布による凍結防止対策などがある。

最後に、本研究成果が、他の地域での環境の調査・研究・対策の基礎的な資料の一助として、今後、活用されることを期待するものである。

第7章の参考文献

- 1) 旅行.info (参照2017.8.22) : 世界の気温と降水量, (オンライン) 入手先<
<http://www.ryoko.info/Temperature/Temperature.htm>>
- 2) 大阪教育大学 (参照2017.8.22) : 世界の年降水量の分布を表す地図 (オンライン)
入手先<<http://osaka-kyoiku.ac.jp/>>
- 3) 長谷川 崇 (2017) (参照2017.6) : 凍結防止剤の性能等の取りまとめ調査について
(オンライン) 入手先<
<http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h27/E/E18.pdf#search>>
- 4) 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 (2016) : 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, 753, p34-38.
- 5) 佐藤賢治, 藤本明宏, 切石亮, 徳永ロベルト, 高橋尚人, 石田樹 (2014) : 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.
- 6) 秦二郎・佐々木薫・諸泉利嗣 (2015) : 凍結防止剤の地下浸透量, 河川流出量及び
飛散量の定量化, 地盤工学ジャーナルVol.10 (No.4), p461-471.
- 7) 秦二郎・佐々木薫・諸泉利嗣・西垣誠 : 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, 地盤工学ジャーナルVol.11(2016).No.3
pp.269-282.
- 8) 西日本高速道路 (2017) : 設計要領第1集舗装保全編, p3-8, p4-1.
- 9) 木村恵子, 曾根真理, 並河良治, 桑原正明, 角湯克典 (2007) : 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, p.参-6, P58-59.

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、金属の腐食促進試験方法に関して、事細かくご指導を賜りました。また、赤江剛夫教授には、農地土壌の調査方法や結果のとりまとめで事細かく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西村伸一教授と森也寸志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、井戸の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約6年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、秋山隆之氏、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、三吉雅美氏には彼等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。金属の腐食に関しては、岡山大学大学院の留学生シャハバ・アクハタル（Dr. M. SHAHBAZ AKHTAR）氏に協力して頂きました。

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。

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つたと思います。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、佐々木芳文顧問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。橘高武調査役、廣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、今後の業務を通して会社の発展に貢献してまいりたい所存でございます。

秦二郎氏とともに諸泉教授のもとで、いつも一緒に切磋琢磨しながら研究活動に努めた年月は、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、挫けそうな時、子供や孫の笑顔に励まされ、そして私の背中を力強く押してくれた妻、これらがなによりの支えでした。そんな家族に改めて深く感謝します。