

## 1. はじめに

北陸地域は、中部山岳国立公園や白山国立公園等の四季で変わる景観と多様な自然環境を楽しむ国内有数の観光地を有する。一方、中国大陸から運ばれる硫酸等で土壌の酸性化や観光バス等の交通機関由来の汚染物質も周辺土壌に蓄積しており、植生への影響も懸念され、環境対策が必要になっている。

特に、長期間に生態系へ付加された人為起源の汚染物質の現状把握が重要であり、土壌環境と汚染の影響の検討は、北陸地域の自然環境を健全な状態で維持し管理するための基礎データとなる。しかし、汎用される地球化学調査は多大なる費用と時間がかかり、広範囲の能率良い調査は困難である。先行研究として行われた立山の調査では、観光ルート沿いの表層土壌の調査法として環境磁気学の手法の有効性が報告されている。環境磁気調査法は、非破壊で迅速という特徴があるが、表層土壌の調査では、土壌そのものに含まれる自然由来の磁性鉱物と人為起源の磁性鉱物の判定が困難である。そこで、土壌の影響を排除する方法として、雪の利用を考えた。雪を利用した環境磁気調査法は、国内外で殆ど報告例がなく、有効な調査手法は確立されていない。本研究では、雪を対象とした有効な調査手法の開発を行い、北陸地域での野外調査へと適用することを目的とした。本報告では、主に室内実験と中部山岳国立公園・立山の美女平周辺での調査結果を報告する。

## 2. 調査内容

積雪中の磁性鉱物の有効な調査法の確立を目的とし、室内実験を行った。また、室内実験で得られた結果の有効性を検討するため、立山の美女平周辺を中心に道路沿い積雪の環境磁気調査を行った。

## 3. 研究方法

### 3.1 室内実験

本研究は、水固結剤を用いることで試料内の物質を固着させ、迅速かつ対象試料中の全磁性鉱物を対象とした分析手法の確立を目指した。水固結剤として、丸石石膏社製鑑識用焼石膏（以下、焼石膏）と和光純薬工業社製高吸水性ポリマー（アクリル酸塩系）（以下、ポリマー）を用いた。これらの水固結剤を対象とした磁気研究は報告されていないため、これら固結剤の水固結度と磁氣的ノイズを測定するため、工業用マグネタイトを用いた室内実験を行った。用いたマグネタイトは、Sigma-Aldrich社製マグネタイト（粒径： $<5\ \mu\text{m}$ ）である。

## 3.2 野外調査

室内実験で得られた結果の有効性を検討するため、野外調査を中部山岳国立公園・立山の美女平周辺にて行った。調査対象とした立山黒部アルペンルートは立山における唯一の自動車道であり、許可車以外の通行は禁止されている。しかし、観光バスの排出ガスに含まれる窒素酸化物等が立山の植生等に影響を及ぼす可能性が指摘されており、本年度富山県では立山におけるバスの排出ガスの規制に関する条例を制定した。本研究では、先行研究で表層土壌の環境磁気調査が実施されている美女平周辺から6サイト設定し、積雪試料を採取した(図1)。また、弥陀ヶ原周辺において積雪壁面から2サイト設定し、積雪試料を採取した。採取した積雪試料は、富山大学岩石磁気研究室に持ち帰り、各種磁気分析を行った。

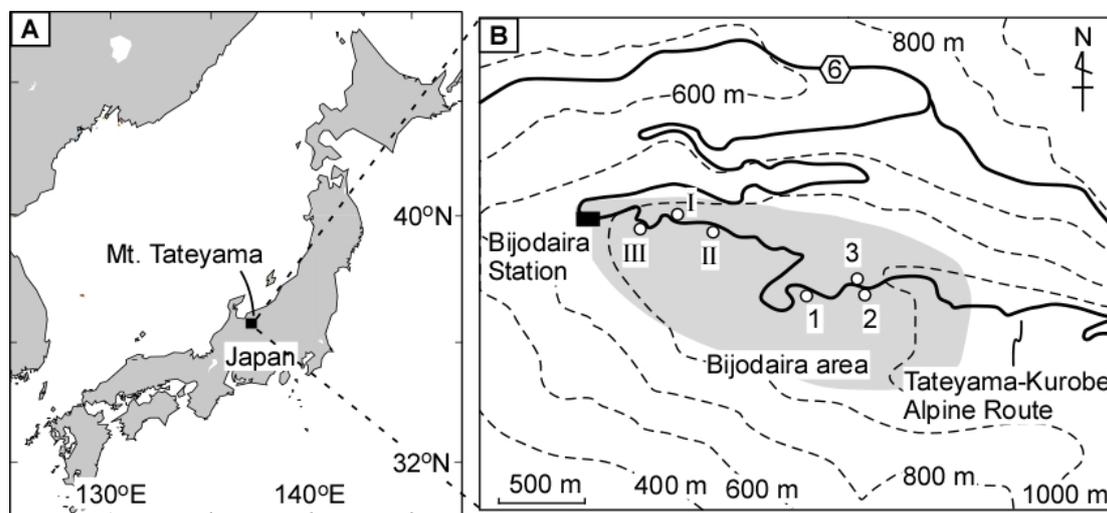


図1. 立山・美女平周辺の野外調査地点 (Kawasaki et al. 2015 を一部改変)

## 4. 結果と考察

### 4.1 室内実験

#### 4.1.1 帯磁率

用いた固結剤の帯磁率特性を検討するため、Bartington社製MS2-BとAgico社製Kappabridge KLY-3を用いて帯磁率を測定した。試料は7ccプラスチックキューブに蒸留水とそれぞれの固結剤を加え作成した。焼石膏試料の帯磁率は $\sim -1.3 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{kg)}$ 、ポリマー試料の帯磁率は $\sim -1.5 \times 10^{-6} \text{ (m}^3/\text{kg)}$ だった。両試料とも弱い負の帯磁率を示した。水の帯磁率は負であり、その影響だと考えられる。これらの結果より、焼石膏とポリマーの使用は、人為起源汚染物質を対象とした帯磁率測定において殆ど影響を与えないと考える。

#### 4.1.2 磁化獲得実験

用いた固結剤中に不純物として含まれる可能性のある磁性鉱物と磁気特性を明らかにするため、直流磁場を用いた飽和等温残留磁化 (SIRM) 獲得実験を行った。実験は MMPM9 パルス磁化器を用いて直流磁場を試料に印加し、残留磁化を測定した。直流磁場は、20, 40, 80, 140, 200, 300, 500, 800, 1200 (mT) の 9 段階である。

代表的な結果を図 2 に示す。SIRM 獲得実験後、全ての試料において磁化強度の増加が認められた。このことは、固結剤中に不純物として磁性鉱物が微量含まれていることを示す。また、140 (mT) の印加磁場でほぼ飽和しており、この結果より主な磁性鉱物は多軸のマグネタイトであると考えられる。焼石膏試料の印加前の自然残留磁化 (NRM) 強度は  $\sim 8.3 \times 10^{-7}$  ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ ) で、印加後は  $\sim 8.1 \times 10^{-6}$  ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ ) であった。ポリマー試料の印加前の NRM 磁化強度は  $\sim 1.1 \times 10^{-8}$  ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ ) で、印加後は  $\sim 5.3 \times 10^{-7}$  ( $\text{Am}^2/\text{kg}$ ) であった。ポリマー試料の SIRM 強度は、石膏試料の 1/10 以下であり、不純物として存在する磁性鉱物量が焼石膏に比べ少ないことを示す。

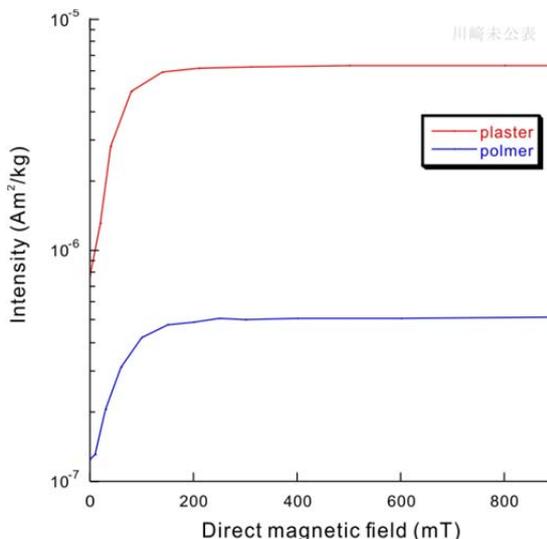


図 2. ポリマー試料(青)と焼石膏試料(赤)の SIRM 獲得曲線

#### 4.1.3 固結後の磁化測定の有効性の検討

水固結剤による環境磁気定の有効性を検討するため、工業用マグネタイトを微量 (<1 mg) 加えた焼石膏試料とポリマー試料を対象に SIRM 獲得実験を実施した。両試料ともに 140 (mT) でほぼ飽和する類似した獲得曲線を示した (図 3)。SIRM 強度は、焼石膏試料は  $3.3 \times 10^{-5}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )、ポリマー試料は  $6.3 \times 10^{-5}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) である。SIRM 強度の違いは、実験に用いたマグネタイト量の違いにより生じたと考えられる。SIRM 獲得実験の結果より、水中に浮遊していたマグネタイト粒子が固結剤の作用により完全に固着し、安定な残留磁化を獲

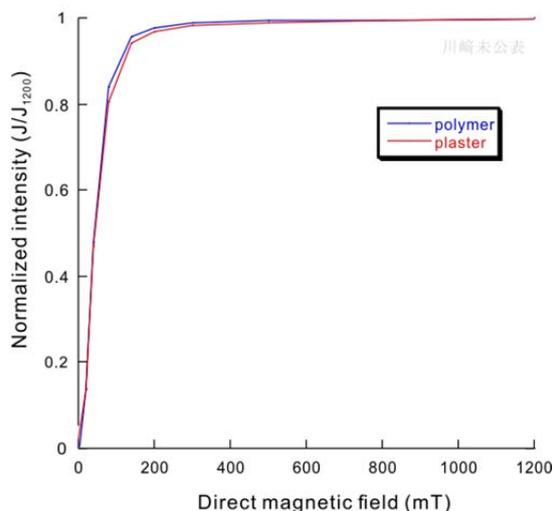


図 3. マグネタイト粉末を加えた SIRM 獲得曲線 (凡例は図 2 と同様)。

得したことが明らかになった。従って、試料中の磁性鉱物の固着目的には、焼石膏とポリマーに大きな差異はないと考える。

一方、固着剤の SIRM 獲得実験では、ポリマー試料は焼石膏資料より 1/10 以下の磁化強度を示した。また、ポリマーは 7 cc 程度の蒸留水を固結するために要する時間が 10 秒以下である一方、焼石膏は 1 時間以上の時間が必要となる。以上より、ポリマーが積雪試料の環境磁気調査により有効であると考えた。

## 4.2 野外調査

### 4.2.1 積雪試料の試料採取法

有効な積雪試料の採取法を検討するため、立山黒部アルペンルート沿いの積雪壁面にて調査を実施した。人為起源汚染物質は積雪表面に付着していると考えられ、積雪表面を対象にした有効な採取法を検討した。ハンドオーガヘラ、セラミックナイフ、セラミックスクレーパー、セラミックピーラーを用いて積雪表層の採取を試みた。その結果、スクレーパーが 5-10 cm 長かつ一定深度（約 2 mm）の積雪を採取するのに有効であることが判明した。

### 4.2.2 立山黒部アルペンルート沿い – 積雪表面

自動車由来の人為起源汚染物質空間分布調査としてのポリマーを用いた積雪磁気分析調査の有効性を検討するため、美女平周辺の立山黒部アルペンルート沿いにて環境磁気調査を行った。同領域の表層土壌の環境磁気調査の結果では、道路近傍で高い質量帯磁率が認められ、距離が離れるに従い減少すること、また亜鉛等の重金属と帯磁率が正の相関を示すことが報告されている (Kawasaki et al. 2015)。

積雪試料の採取法として、(1) 7 cc プラスチックキューブを積雪表面から手で押し込み、積雪試料を採取する手法 (3 サイト、道路から最大 3m まで)。 (2) セラミックスクレーパーを用いて、積雪表面 (深さ約 2 mm) をはぎ取る手法 (3 サイト、道路から最大 10 m まで)。 の 2 手法を検討した。硬く固結した積雪壁面とは異なり、積雪表層は容易にプラスチックキューブを押し込むことができる。プラスチックキューブを押し込む手法が有効であれば、より定量的かつ迅速に試料採取が実施できると考える。

採取試料は、質量を計測後、室温で融解し、ポリマーを加えた。試料は、2G Enterprises 社製 750R で NRM を測定後、MMPM9 パルス磁化器を用いて 1000 (mT) の印加磁場を加え、SIRM を獲得させた (図 4)。SIRM 強度は、(1) の手法では距離と共に減衰する磁化強度が認められたが、(2) の手法では顕著な傾向は認められなかった。この理由として、(2) の手法の SIRM 強度 (18 試料平均:  $1.7 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ) は、室内実験で行ったポリマー試料の磁化強度と比較すると

10倍以上の差がなく、ポリマー中の不純物の影響が大きいと考えられる。一方、(1)の手法で得られた結果は、表層土壌から得られた質量帯磁率分布と同様な傾向を示しており、積雪試料は、人為起源汚染物質の調査に有効であることを示唆する結果を得た。この結果は、秋季に堆積した積雪表面に沈着した汚染物質は、鉛直面内での移動は顕著ではなく、表面に留まり、雨や気温の上昇による融解により表面を流れる可能性を示唆する。

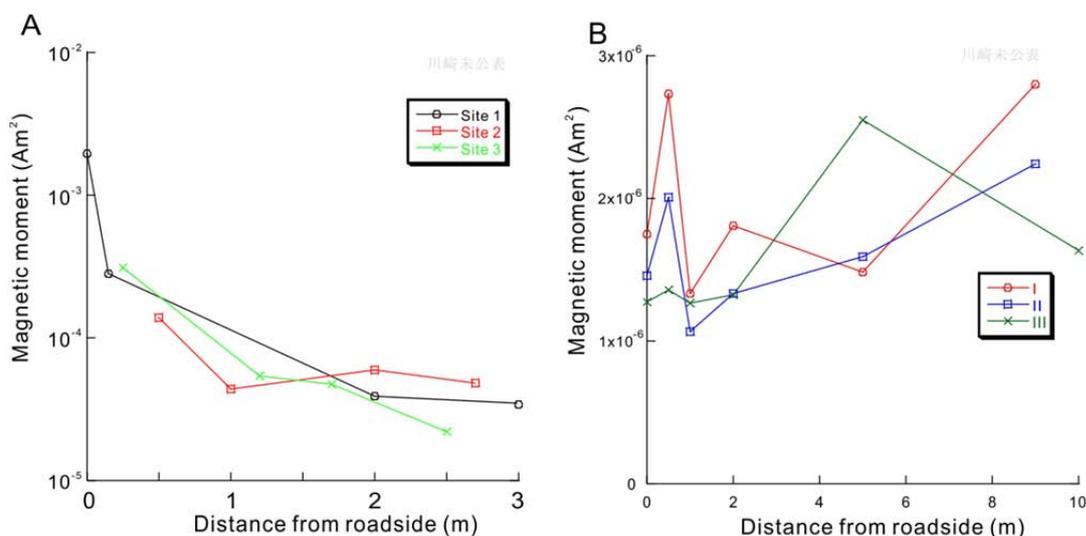


図 4. 道路からの距離と磁気モーメントの関係。(A) は積雪表面を剥ぎ取る手法、(B) は、プラスチックキューブを押し込む手法で採取した試料。

## まとめ

本研究は、雪試料の迅速かつ試料選別を伴わない新規の環境磁気研究の手法の開発を目的に実施した。試料を乾燥させるのではなく、新たな着眼点として水そのものを固結させる手法を検討し、その結果、高吸水性ポリマーが短時間かつ低磁気ノイズのため調査に有効であることが判明した。特に従来研究では約1ヵ月の時間を要した試料の準備に対し、10秒以内で準備が終了するため、多量の試料の迅速な測定が可能となる。

野外調査の結果から、積雪表面を剥ぎ取る手法が有効であるという新知見を得た。道路沿いの調査では、先行研究の表層土壌を対象に報告された結果と一致する結果が得られており、積雪を利用した環境磁気的手法による人為起源汚染物質の空間分布調査が有効であることを示した。表層土壌を対象とした研究では、土壌そのものに含まれる自然由来の磁性鉱物と人為起源の磁性鉱物の判定が困難である。積雪試料を使うことで、このような土壌の影響を低減させることができ、より確度の高い空間分布調査が可能になると考える。また、大気中

の汚染物質を雨粒より多く吸着することが知られている雪試料は、天然の大気汚染物質の吸着フィルターとして利用ができ、冬季に降雪がある北陸全域において調査が可能になると考えられる。今後の課題として、調査範囲を拡大し、北陸域の環境磁気調査マップの構築が期待される。