

持続的社会構築に対する土壤凍結技術の利用を目指して

蛍光 X 線分光分析法を用いた凍結過程にあるガラス粉体中のカドミウム濃度分布の観察

(農業土木学会論文集 No.228, pp. 99~104, 中西健一と共著)

三重大学生物資源学部 渡 辺 晋 生

I. 改組・ココハドコ?

2000 年春、私の所属する三重大学生物資源学部では、改組に伴い「農業土木」等の名を冠するコース制が廃止された。このさいに、多くの研究室は旧コース制の色を濃く残す学科・講座を設立し、そこに身を寄せることになった。しかし、土壤物理を扱う私達の研究室にいたってはこの限りではなかった。

当学部には、現在「資源循環」という名の学科がある。この学科は、循環型社会の構築を目的に、生物の物質循環能力を高める生態学や生物工学と、経済レベルで物質循環を考える社会学が一体となり新しい学問・教育体系を創造するといった理念の下に作られた学科であり、旧来の各コースから異分野・他分野の研究室を選び集めてできた新学科である。土壤物理は生物の物質循環の基礎であるとの認識の下、私達の研究室もこの新学科に加わることとなった。

2002 年には、この学科の 1 回生が研究室に配属された。水理学や土質力学、構造力学などの講義を受けたことがなく、微生物学や食品工学、遺伝子工学や生態学に詳しい学生が主であり、物理学や数学にめまいを覚え、生物学に安らぎを感じる、そんな学生たちである。ここでどんな卒業研究を指導すればよいのか?何を研究室の看板テーマに掲げればよいのか?まずは、そこが問題だった。

II. テーマ・選択の余地

おりしも大学では、FD 活動が盛んになり、講義や研究室に対する学生の希望やアンケート結果を見る機会が急増している。そんな中、言葉の理解や意味の深淺は別として、学生の支持するキーワード上位に「環境・土壤汚染・修復」などの言葉がみられる。一種の流行語と言えるかも知れない。また、新学科に集まった研究室を見回してみると、遺伝子技術を駆使したファイトレメディエーション、微生物や菌根菌の力を応用したバイオレメディエーションなど土壤修復に興味を示している研究室が数多く見られる。社会においても、土壤汚染対策法の施行や FAO/WHO 食品規格委員会によるカドミウム汚



染土壤の基準設定の動きなど、土壤汚染や環境修復への関心が急激に高まっている。更に、地域のカドミウム汚染の実情を聞く機会も多々あった。扱うべきテーマはおのずと決まっていた。

III. 土壤の凍結・その変遷

土壤が凍結すると、土中の水が凍結面近傍に引き寄せられ氷の塊 (アイスレンズ) として析出することがある。こうしたアイスレンズの析出を伴う地盤の隆起を凍上現象と呼ぶ。凍上は、時に数十 cm 以上にも達することもあり、農地の灌漑排水系や構造物の基礎に深刻な影響を及ぼす。また凍上は、地盤の軟弱化や塩の集積、作物の抜根の原因となる。私はこれまで、こうした土壤の凍結や凍上メカニズムについて研究してきた^{1,2)}。

凍上に関する研究は、メカニズムの詳細について未だ不明瞭な部分を多く残しているが、凍上量の把握や凍上害の克服については概ね実用的な域に達している分野である。そこで私の興味も、広く実用的な対象から、より詳細なメカニズムの解明へと向かっていった。例えば、現象の観察は現場スケールから cm スケールへ、さらに数 mm, 1 μ m 以下へと微細化していった。これに伴う測定法の開発・改良に喜びを感じた。NMR, 顕微 Raman, エネルギー分散型粉末 X 線, イメージングプレート, ICP など借りられそうな高額機器を、持ち主に頼み込んで自前のアイスレンズ観察装置と組み合わせた。また、扱う試料も複雑な土壤より単純なガラス粉体を好んで使うようになった。これに伴い、論文の投稿先も一時農業土木系の雑誌から離れていった。このまま趣味的研究に走ってはいけない。大学にいる者として、社会に貢献する姿勢が弱いと焦りを感じた。

土壤が凍結すると、温度勾配、アイスレンズへの水分移動、氷からの吐きだしと不凍水への濃縮などにより土中の溶質が移動する。土中の氷の成長そのものについて何となくわかってくると、今度は氷の成長に伴う溶質移動を扱いたくなる。そこで手始めに試料に NaCl を混ぜ、アイスレンズの成長にともなう試料中の NaCl の濃度分布の変化を調べてみた³⁾。NaCl に引き続き、KCl, MgCl₂, 窒素化合物などを混入した試料を凍らしていると、次第

に重金属に目が向いてくるのも必然と言えるかもしれない。また、昨今の社会情勢に従い、研究室に換気設備などの安全機器を整備することが義務づけられた。学部から与えられ、納品されたばかりのピカピカのドラフトチャンバーが眼前で使用されるのを待っている。汚染物質を実際に扱う準備は整っていた。

実験を続け、データが集まってくると、凍結を利用した土壌中の溶質移動の制御、あるいは凍結による土壌浄化（クライオレメディエーション）の可能性が見えてきた。幸い、いくつかの企業がクライオレメディエーションに興味を示してくれ、また大学の重点経費を頂く機会にも恵まれた。更に、改組で同じ学科になった研究室の中に、蛍光 X 線を用いて各種生物情報を解析しているグループがあった。日頃、これを土壌中の重金属濃度の測定に借りられないかと夢想していた願いが叶う日が来た。後は体を動かすだけだった。こうした結果をまとめたのが、標記の論文である。

IV. 結果・温故知新？

標記論文の実験概要は次のようである：カドミウムで均一に汚染した試料に温度勾配を与え、一方向より凍結する。凍結面の進行にともなう試料中のアイスレンズの発生・成長過程を連続的に観察する。アイスレンズが十分に発達した後、蛍光 X 線分光分析により、アイスレンズ周辺の試料中のカドミウムの濃度分布を直接観察する。この結果、カドミウム濃度によるアイスレンズの成長量の変化、アイスレンズの成長に伴う成長面近傍のカドミウム分布の変化が明らかになった。

こうした結果は、環境に与える負荷の小さい新しい土壌浄化法と、抽出などの作業を伴わない簡便な土壌汚染の原位置評価法の可能性を示すものであり、現在の環境修復事業における二つの大きな開発テーマと合致している。事実、本論を紹介することにより学科学生の当研究室への興味は増した。また、新たなプロジェクト研究の足がかりもできた。しかし、上記の実験概要は、農業土木の分野で育まれてきた凍土・凍上に関する知見と、従来の凍結実験、他分野で先行していた観察法を組み合わせただけのものであり、結果も予想の範囲内だと換言できなくもない。これまでやってきたことが、新分野の扉を開く鍵の一つになりうる。そんなことなのかもしれない。

V. 終わらぬ課題

しかしながら、趣味から実用へ、顕微から現場への帰着を求めて始めた実験にもかかわらず、相も変わらず試料は、表面的性質が既知で粒径のそろった真球状のガラス粉体である。観察スケールも mm スケールから脱却してはいない。アイスレンズ近傍の溶質移動や分布傾向の一部は見えてきたものの、イオン種や土種の違い、pH 依存性、水和特性、吸着特性など、無視しているものは山ほどある。実際の土壌浄化技術開発への道のりは、まだまだ程遠いようである。また、凍結に伴う土中の物質移動は、その向きが凍結条件や試料により正反対にさなりうる。土の中の水の流れ、熱の流れ、氷の結晶成長、化学ポテンシャルの変化と不凍水の存在。大いに焦り、大きな目標をかかげ実験をしてみても、結局のところこうした基礎を固めることこそが重要なのだと痛感するばかりである。まだまだすべきことは多く、努力が足りないらしい。

旧コース制から離れ新学科・講座体制になった今、根圏での物質循環の制御や推定、解析、あるいはファイトレメディエーションやバイオレメディエーションといった生物的土壌浄化法とクライオレメディエーションを始めとする物理的浄化法の組み合わせや効率化などが周囲の研究室との調和への道の一つとして上げられる。JABEE への取り組み、法人化など周りの様子に落ち着く兆しはまだまだ見られない。こうした中、今後は農業土木や土壌物理の基礎をいっそう充実し、これを足がかりに上記のテーマを盛り込んだ研究をしていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 渡辺晋生・溝口 勝・石崎武志：凍結過程における土の凍結面近傍の微視的構造についての実験研究，農土論集 **191**，pp. 51～58 (1997)
- 2) 武藤由子・渡辺晋生・石崎武志・溝口 勝：ガラススปีズ中におけるアイスレンズ形成過程の顕微鏡観察，農土論集 **194**，pp. 97～103 (1998)
- 3) Watanabe, K., Muto, Y and Mizoguchi, M.: Water and solute distributions near an ice lens in a glass-powder medium saturated with sodium chloride solution under unidirectional freezing, *Crystal Growth and Design*, **1**, pp. 207～211 (2001)