

研究計画・目的

環境中（特に、土壌と接地大気）における物質（水蒸気、汚染物質など）とエネルギー（熱）移動を把握するために様々な測定法が考案されてきている。本在外研究では、土壌の熱的性質（熱伝導率、体積熱容量、熱拡散係数）の新しい測定法を開発することを目的とした。さらに、原位置における飽和透水係数の測定法に関するレビュー論文原稿を執筆する。

研究活動

到着後 12 月 5 日から帰国時まで月曜日から金曜日まで、研究室で文献調査、論文執筆・校閲・査読、データ整理を行なった。週末と荒天時はアパートの自室で文献調査、論文執筆・校閲・査読、データ整理を行なった。毎週金曜日の昼休みには研究室に関係する学生と教員が一同に会して、1 週間の研究進捗状況を報告し、問題があれば全員で共有して解決策を話し合った。2 月下旬からは大学院生及び教育助教の研究に対して助言を与えた。

毎朝研究室に到着後、執筆中と執筆計画中の論文および学部生卒論と修士課程学生の修論に関連する文献調査とこれら卒論と修論の校閲を行った。また、論文執筆については、登尾が筆頭のものとして博士後期課程学生が筆頭のものに対して執筆活動と校閲を行った。査読は、様々な学術雑誌から依頼を受けた投稿中原稿に対して行った。データ整理は、これまで実施した実験で収集した様々なデータを整理し、学会発表用の投稿原稿に使った。大学院生の研究補助では、学内の実験施設に出かけて、実験装置の構想を聞き、助言を与えた。後日、ホートン教授も同行し実験内容の再確認をした。

1 月 18 日から毎週月・水・金曜日の 2 時限目に受入教員である Horton 教授担当の土壌物理学が始まったので帰国時まで受講した。受講中は Horton 教授や受講学生からの質問に答えた。新たな教授法を得られたので秋学期の担当授業（土壌物理学）から使う予定である。土壌水の駆動力となるマトリックポテンシャルと重力ポテンシャルに対する説明を、水を含ませた 2 個のスポンジを使って受講生の眼前でリアルタイム現象として行った Horton 教授のデモンストレーションは参考になった。これまでの明治大学での授業でも 1 個のスポンジに水を含ませた動画を撮って授業中に見せたことはあったが、複数のスポンジを使った眼前でのデモンストレーションの方が圧倒的に学生の理解度が高まると感じた。さらに、圧力ポテンシャルの説明では、穴の開いたペットボトルに水を入れて、水が穴から飛び出しているペットボトルを落下させると穴からの水の飛び出しが止まる現象をデモンストレーションした。確かにペットボトルの落下中は微小重力となるので静水圧が掛からなくなり、穴から水が飛び出さないはずである。

2 月 22 日午後には土壌学セミナーで「Pore Water Behavior in Space and Radiocesium Fallout in Fukushima, Japan」と題して口頭発表をした。当初は対面での発表予定であったが、暴風雪警報が昼頃に発令されたせいで、zoom によるリモート発表に変更となった。研究室に出ていたが、警報が発令されると学内放送があり、セミナーはリモートにするとの連絡があったので、急ぎアパートに戻り、自室からのリモート発表を行った。研究者から微小重力下の水分移動に関する質問がいくつかあった。セミナー発表用のスライドをまとめている段階で、研究成果の取りまとめ方の方向性が見えたように感じたので、微小重力下における多孔質体中の水分移動に対して新たな視界が開けた。また、福島県に降下した放射性セシウムに関する研究に関する取りまとめの方向も幾分視界が開けた気がする。

2 月 26 日から 3 月 2 日までアリゾナ州グランドキャニオンからユタ州モニュメントバレー

にかけて地質調査を実施した。この地帯はコロラド高原の南西部に位置しており、太古には海底にあった場所が、500 万年程前までに隆起して現地形の元になった陸地が出現したと考えられている。関東地方のように火山灰が堆積して形成された土壌では、天然の放射線量が極めて低い特異な土地が形成されるが、コロラド高原のような火成岩が風化して堆積した場所では放射線量が高くなる傾向にあることを再確認した。関東地方の生田での空間線量は、 $0.008 \mu\text{Sv/h}$ 程度であるのに対し、グランドキャニオンでは $0.025 \mu\text{Sv/h}$ 程度、モニュメントバレーでは $0.068\text{-}0.096 \mu\text{Sv/h}$ 程度、さらにアイオワ州立大学で研究室前の廊下では $0.047\text{-}0.063 \mu\text{Sv/h}$ 程度であった。線源となっている物質は恐らくトリウムとカリウム、あるいはラドンガスであろうと推察される。

エイムスに到着以来、データ整理を行っていたのが 2022 年に新潟県の水田転換畑でオクラを栽培した際に採取した深さごとの土壌水分量と気象データであった。水田転換畑で栽培する畑作物への適切な灌漑のタイミングを提示できる簡易な方法を探索することが本研究の目的である。計画ではボーエン比法により測定した蒸発散量と深さごとに測定した土壌水分量の比較からオクラの水分消費量を推定して比較する予定であったが、オクラ畑ではボーエン比測定に使用した温湿度計の分解能の限界以下の温湿度差しか発生しなかったため蒸発散量の測定が不可能であることが判明した。過年に実施した同種の温湿度計を使った水田での実験ではボーエン比の測定が可能であったが、オクラ畑の蒸発散量が水田に比較して極めて低いことがボーエン比の測定ができなかったことに起因したと考えられた。そこで、精度は落ちるが、気温と純放射量のみで蒸発散量を推定するプリーストリー・テラー法を使うことにした。深さごとの土壌水分量の時間変化から計算した土壌水分損失量とプリーストリー・テラー法の蒸発散量が近ければ、損失分の土壌水分は全て蒸発散に使われたと考えられる。両者の推定結果がまずまず一致したので、プリーストリー・テラー法を使って作物の水消費量を推定できるのではないかと結論づけられる。解析結果は 2023 年 8 月に開催される農業農村工学会講演会で発表予定である。

研究目的であった新たな測定法の開発については、以前に実施して測定結果が別の測定法と一致しなかったシリンダーを使った熱的性質の測定法に関して、ホートン教授と何度かの会合を持った。シリンダー法は湿潤土壌をアルミニウム製円筒内に重点し、円筒の中心と円筒の外側に熱電対温度計を設置した後、一定温度の温水に円筒全体を浸して、中心温度の変化を測定することで土壌の熱的性質（熱伝導率、体積熱容量、熱拡散係数）を測定する方法である。特殊なセンサー等が不要で、比較的簡易な装置のみで測定できるため学生実験用として、農学科の学生実験でも使用している方法である。ところが、中心温度を測定するだけの単純なシリンダー法では、熱拡散係数しか測定することができないので、円筒に流入する熱フラックスを測定することで体積熱容量を同時に測定出来るのではないかと考えて、市販のフレキブル熱流板を円筒に巻き付けて流入熱フラックスと中心温度の変化を測定した。測定結果は、別の測定法と比較したときに熱拡散係数を 10 倍程度、体積熱容量を 2 倍程度過小評価した。この原因として理論式が間違っていることを疑って、シリンダー法による測定に関するコンピュータシミュレーションを実施したところ、理論式に間違いがないことを確認した。そこで、ホートン教授と一緒に測定データに間違いがないかを点検した。シミュレーション結果と測定結果を比較したところ、測定結果の初期値を測定するタイミングが遅いことが判明した。シミュレーショ

ンによると温水に浸した直後の 1/100 秒から大きな熱フラックスが円筒内部に向けて発生していることが分かった。実際の実験では温水に浸した 1 秒後からのデータしか取っていなかったため、最初の 1 秒未満の熱フラックス測定が極めて重要なことが判明した。そこで、ホートン教授が提案した改良実験法は、①温水とシリンダー内土壌の温度勾配を小さくして、初期熱フラックスを小さくする、②データ収集間隔を 0.1 秒未満に設定することであった。そして、現有のデータに対する解析法改良では、1 秒から数十秒のデータを使って、測定開始 1/100 秒後の熱フラックスを外挿することを提案してくれた。改良実験法は、学部 4 年生の卒業研究として実施することにした。当該学生にこの実験の話をしたところ、非常に興味を持ち、大学院に進学しても熱的性質に関する研究を継続したいとの希望を話してくれた。現有データを使った改良解析法は、今年 10 月下旬に米国セントルイス市で開催予定のアメリカ土壤科学会年時大会で登尾がポスター発表することにした。

ペルチェ素子を使った純放射量測定センサと簡易な発振回路を使った土壤水分センサに関する投稿論文の執筆を開始した。この投稿論文では、以前に研究室に所属して卒論研究と修論研究として実施した実験結果をまとめて投稿することにした。両センサともに、学生実験の教材として利用することを主目的としてまとめた。ペルチェ素子を使ったセンサは、これまでの卒論、修論、博論研究での利用実績がある。また、土壤水分センサは、これまで大学院博士前期課程の演習科目でプリント基盤の作成から、電子部品の取り付けまで行った実績がある。

「原位置における飽和透水係数の測定法に関するレビュー論文原稿を執筆する」に関しては、計画通りには進捗せず、文献を集めるところまでで時間切れとなった。

研究成果

2023 年度農業農村工学会講演会で、口頭発表することになった。データ解析と発表要旨の執筆は在外研究中に実施した。また、2023 年 Soil Science Society of America の年次大会で、ホートン教授との共著でポスター発表をすることになった。在外研究中にホートン教授との会合によって新たなデータ解析法を開発した成果である。Sensors (査読付き学術雑誌) に「Simple net radiation and soil moisture sensors for education」と題した論文を投稿した。この投稿論文のデータ解析と論文骨子作成は在外研究に実施した。さらに、在外研究中に実施したホートン教授との会合によって得られた新たな熱的性質測定法を使って学部 4 年生の卒業研究で実際に測定することになった。

今後の展望

学会で発表することになった研究成果を投稿用論文としてまとめる。また、新たな測定法を使った研究成果を学生が学会で発表できるように指導したい。ホートン教授との共著として、在外研究中の研究成果と今後の発展的研究成果を学術論文に投稿することを考えている。

教育への効果等

在外研究で得られた研究アイデアを卒論、修論等を担当する学生にも共有することで彼らの新たな研究の方向性を見出すために効果が上がると期待される。また、ホートン教授との今後の交流は、学生の外国への視野を広げる際の良い足がかりになると期待する。