

(続紙 1)

京都大学	博士（地球環境学）	氏名	Giancarlo Augusto Flores Barrón
論文題目	A Simplified Image Analysis Method To Evaluate LNAPL Saturation Under Fluctuating Groundwater Conditions		
(論文内容の要旨)			
本論文は、地盤中に汚染物質として存在する石油系炭化水素の非水溶性流体（Light Non-Aqueous Phase Liquid; LNAPL）の挙動を評価するための画像解析手法を開発し、その適用性を評価したものである。石油系炭化水素の大部分は地盤中で水とは独立した液体すなわち非水溶性流体（LNAPL）として存在することから、汚染対策を適切に実施するにあたってはLNAPLの挙動のメカニズムの解明が急務の課題であり、中でも地下水位が変動した場合のLNAPLの挙動には未解明の課題が多く残されている。このような地下水位変動に伴うLNAPLの挙動を実験で評価するにあたっては、対象領域全体におけるLNAPLの飽和度を経時的に評価することが必要であるが、本論文では簡便化した画像解析手法の適用によってLNAPLの飽和度を把握する手法を開発し、LNAPL挙動の評価を行っている。論文は6章からなっており、以下に各章の内容を説明する。 第1章は序論であり、土壌・地下水汚染の概要ならびに石油系炭化水素の地盤中の挙動についての研究の現状を述べ、地下水位変動条件下におけるLNAPLの挙動の評価が重要であることを示し、本論文の意義を示している。地盤中の石油系炭化水素は様々な挙動を示すが、中でも原液として存在するLNAPLは地下水面上に浮遊して存在し、地下水位変動に伴う汚染の拡散が危惧されており、その挙動の解明が重要な課題であることを論じている。 第2章では、地盤中のLNAPLの挙動に関する基本的事項を従来の研究に基づいてとりまとめている。LNAPLの挙動の評価にあたっては、飽和度、液圧ならびに透過性の把握が重要で、これらのパラメーターを取得するための既往の手法とその特徴を整理している。中でも、地下水位変動条件下でのLNAPLの挙動を評価するにあたっては、その飽和度を経時的に実験領域全体で把握することが重要で、電気伝導率による飽和度プローブなどを活用する既存の手法には限界があり、画像解析手法の適用が期待されうることを論じている。 第3章は、NAPL（Non-Aqueous Phase Liquid）の画像解析に関する手法の原理をとりまとめ、モデル実験に必要なキャリブレーションを実施し、画像解析手法の適用性を示している。その原理は、バンドパスフィルターを装着したデジタルカメラによって特定の波長の反射波の光学密度を取得し、地盤中の間隙流体の飽和度を導き出すものである。水とLNAPLそれぞれについて飽和度を求める必要があるため、2種類のバンドパスフィルターを用いてこれらの飽和度を求める原理を説明し、要素試験とカラム試験を実施して、光学密度および飽和度の測定精度を改良することによりそれらの線形関係を導出した。			

第4章では、従来の画像解析手法ならびに第3章で示した手法の問題点を克服するために、簡便化した画像解析手法を提案している。第3章で示した手法は、地盤模型の各領域によってバンドパスフィルターへの入射角が異なるため微小領域ごとにキャリブレーションを行う必要があり、地下水位が変動するような動的条件下での飽和度の面的かつ定量評価には適用が難しい。本章では、第3章で得られた飽和度と光学密度の明瞭な線形関係を利用することによって、LNAPLあるいは水の飽和度がそれぞれ0%あるいは100%の極端な3ケースのみによるキャリブレーションが可能となり、そうでなければ微小領域それぞれについて間隙流体の飽和度を様々に変えた条件でキャリブレーションを行うという膨大な作業を要するところを、その労力を大幅に軽減できたことを示した。その結果、LNAPL挙動に関する地盤模型実験の自由度を上げることが可能となり、地盤中の水位を変化させた場合のLNAPLの飽和度変化の評価に成功した。

第5章は、第4章で示した手法を用いて、カラム試験と二次元土槽試験の結果と考察を示したものである。空気－水系および空気－水－LNAPL系のカラム試験、空気－水－LNAPL系の二次元土槽試験を実施しており、カラム試験ではLNAPLとして粘性の異なる2種類のパラフィンを用いている。それぞれの実験では水位を変動させて地下水位変動条件を模擬し、実験終了後はマスバランスを確認して、提案する画像解析手法によって求めた飽和度との整合性を議論している。実験の結果、いずれの実験条件であっても画像解析手法によって水とLNAPLの飽和度を経時的に実験領域全体にわたって評価することが可能であり、その精度は定量評価を行うに十分なレベルであることが示された。また、カラム試験では、従来は一次元を目論んでの試験であるにも関わらず二次元的な挙動がみられ、従来用いられてきた飽和度プローブなど点での測定手法は、このような動的環境下での実験に適用するには限界があることが示された。

第6章は結論であり、論文を総括するとともに今後の課題を示している。

(論文審査の結果の要旨)

土壌・地下水汚染の挙動の解明は、地球上の様々な国・地域における重要な環境課題であり、汚染物質の挙動を評価予測し、合理的な対策の実施に反映することが求められている。本論文では、石油系炭化水素の汚染に着目し、地下水位変動条件下におけるその非水溶性流体 (Light Non-Aqueous Phase Liquid; LNAPL) の挙動を実験的に解明するための画像解析手法を開発し、その適用性を評価したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、実験領域全体の地盤中の間隙流体の飽和度を経時的に測定しうる画像

(続紙 3)

解析手法を開発し、その適用性を示した。2種類の異なる波長のバンドパスフィルターを装着したデジタルカメラによって反射波の特定の波長の光学密度を取得し、地盤中の水とLNAPLの飽和度を求める方法を開発した。さらに、画像解析システムに改良を加えて要素試験やカラム試験を実施し、光学密度と飽和度の線形関係を利用して、LNAPLの挙動に関する地盤模型実験の自由度を向上させた。すなわち、LNAPLあるいは水の飽和度がそれぞれ0%あるいは100%の極端な3ケースのみによるキャリブレーションが可能となり、そうでなければ微小領域それぞれについて間隙流体の飽和度を様々に変えた条件でキャリブレーションを行うという膨大な作業を要するところを、その労力を大幅に軽減できた。その結果として、模型実験の自由度を上げることが可能となった。

第二に、第一に示した画像解析手法の適用により、LNAPL挙動の実験に関して従来の実験手法の問題点と提案する画像解析システムの優位性を示した。一次元を目的としたカラム試験であっても、水位変動条件下でのLNAPLの飽和度は一次的に挙動せず、飽和度プローブなど点での測定には限界があることが示され、実験領域全体にわたって経時的な飽和度評価が可能な、本論文で提案する画像解析の手法の適用性を示した。このように、本論文で提案された画像解析手法は地盤中の物質挙動の解明に寄与し、地盤環境工学の成果として学術的意義が高い。

第三に、カラム試験と二次元土槽試験を実施し、提案した画像解析手法によって水とLNAPLの飽和度を経時的に実験領域全体にわたって十分な精度で定量できることを示し、LNAPLの挙動の評価を行った。水位変動や粘性の影響を議論した結果、水位変動条件下でのLNAPLおよび水の挙動として選択的な流れが存在することを明らかにし、実現場におけるLNAPL存在形態の複雑さとその把握のために調査すべき事項を明らかにした。これらの成果は地球環境学の発展に貢献するとともに、土壌・地下水汚染対策の実務に寄与するもので、社会的意義も高い。

以上の成果により、本論文は地球環境学の発展に大きく寄与した。よって本論文は博士（地球環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年2月8日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降