

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560493

研究課題名（和文） 地盤中の気液混相流に関する研究

研究課題名（英文） Research on air-liquid mixed flow in soil

研究代表者

藤縄 克之（FUJINAWA KATSUYUKI）

信州大学・工学部・教授

研究者番号：00219031

研究成果の概要（和文）：土壌水と土壌空気の流れに関する現象を土壌カラムを用いた実験により研究した。まず、土壌水の吸引圧と空気圧を測定するためのセンサーを独自に開発した。次に、これらのセンサーを埋め込んだ土壌カラムに5種類の試料を充填し、土壌水分ヒステリシスの影響下で水を浸透させ、間隙水圧と間隙空気圧を測定した。実験の結果、土壌水の流れは緩やかであったが、土壌空気の流れは極めて速く、異なる深度に埋設したすべてのセンサーはほぼ同一の空気圧を示した。一方、土壌水分ヒステリシスは土壌水および土壌空気の移動に極めて重要な役割を果たしていることが明らかになった。これらの知見を最終的に土壌中の水物質同時輸送および水-熱同時輸送の数学モデルに組み込んだ。

研究成果の概要（英文）：Phenomena related to simultaneous flow of soil water and air were experimentally investigated by using soil columns. New sensors for measuring soil water suction and soil air pressure were originally developed. The soil column equipped with these sensors was filled with 5 different soil samples and water was infiltrated under the influence of soil water hysteresis while measuring soil water suction and soil air pressure. It was revealed that the flow of soil air is so quick that all the sensors located at different depths showed almost the same value whilst the response of water flow is slow and that the soil water hysteresis plays important role on soil water and air movement. These findings were finally incorporated into mathematical models dealing with coupled water-mass and water-heat transport in soils.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤環境工学・気液混相流・カラム実験・水分特性曲線・乾湿履歴

1. 研究開始当初の背景

地表水の不飽和浸透時に間隙空気と間隙

水がスムーズに置換されないと、間隙空気圧が増大して、土構造物の崩壊を誘発すること

がある。また、急激な降雨に伴う浸透時に土中の封入空気の影響で地盤の透水性が減少すると、洪水流出が発生しやすくなる。このほか圧気シールド工事などでも、地盤内における水と空気の流動機構を解明することは非常に重要である。

一方、水質汚濁防止法により、有害物質を含む水の地下への浸透が禁止され、また、土壤汚染の状況把握と人の健康被害の防止を目的に土壤汚染対策法が施行されているが、地下水汚染は後を絶たず、再開発中の工場跡地などで重金属や揮発性有機化合物などによる土壤汚染が相次いで発見されている。

また、廃棄物の大規模不法投棄による環境問題も大きな社会問題となっている。特に、最終処分場や不法投棄現場は、メタンガスや硫化水素ガスが発生しやすい状況にあり、建設廃材が不法投棄されたある現場では、広い範囲でメタンガスが爆発限界の 35,000mg/L を超え、硫化水素も同様に広い範囲で呼吸停止に至る濃度である 500mg/L を超えていた。

このような自然現象や土木工事に関連した災害や事故の防止のためには、気液混相流のメカニズムの解明がきわめて重要である。また、土壤汚染や地下水汚染の修復に関連して、多くのサイトで、数億円から数百億円という莫大な社会的負担が発生しており、このような社会負担を軽減するためにも汚染水や汚染ガスによる地盤汚染のメカニズムを解明し、処理の効率化を図る必要がある。

2. 研究の目的

土壤への不飽和浸透や地下水汚染に関する研究は内外で飛躍的に発展しているが、問題が広範囲な研究分野に跨っているため、まだ手つかずの研究も多い。

特に、土壤水の浸透過程では、乾湿履歴により浸透流が大きな影響を受けるが、いまだに乾湿履歴を考慮しない設計や解析が大部分である。本研究では、豊浦標準砂、珪砂、ガラスビーズなどの試料を充填した土壤カラムを用いて、乾湿履歴が浸透流に与える影響を実験的に解明し、数値解析に反映させる。

また、通気体中で揮発した有機塩素化合物や微生物分解などにより発生したガスが、どのようなメカニズムで拡散するか十分な知見が集積されていない上、土壤ガス吸引などの修復手法を適用する場合の有効範囲の割り出しや修復効率などについても定量的に評価する手法がなかった。そこで、研究ではさらに通気体中の気体と地中水の同時移動（混相流）のメカニズムを室内基礎実験により明らかにする。

まず、最初に、カラムを用いた実験装置を製作するとともに、計測装置のキャリブレーションを実施し、気液混相流のメカニズムを解明するための準備を行う。ひき続いて行う

本実験では、土壤カラムに標準砂などのさまざまな試料を充填し、深度別飽和度を様々に調整した後、カラム上端に空気圧をかけることにより、カラム内の気体の圧力および水の吸引圧が経時的にどのように挙動するかを解明する。

3. 研究の方法

実験装置の製作および実験による具体的な検討項目は下記の通りである。

(1) 小型テンシオメーターを用いた供試体内サククション測定装置の作製

図1に示す小型テンシオメーターを製作した。ポーラスカップ部は超小型で、直径 3.0mm、長さ 8.0mm のセラミック製マイクロカップであり、直径 3.2mm のステンレス接続管を経て圧力センサー、指示器に接続される。製作した小型テンシオメーターは、脱気水で満たされた管路を圧力変換器に接続し、サククションを測定して計器のキャリブレーションを行った。

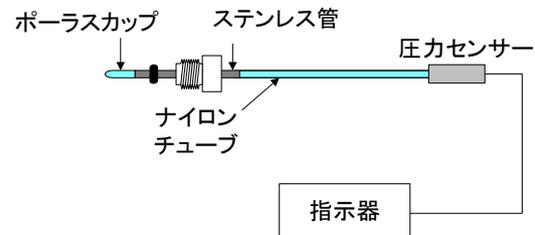


図1 小型テンシオメーター概念図

(2) 供試体内の間隙空気圧を測定するためのセンサーの作製

間隙空気圧を測定する装置は市販されておらず、間隙空気圧の非定常挙動はいまだ十分解明されていない。そこで、本研究では独自に間隙空気圧計を製作し、その性能を検定した。以前使用したことのある空気圧測定用疎水膜は、水が浸入しやすく、低い空気圧にしかな適用できなかったため、数 10kPa の高い圧力でも水が浸入せず、かつ長時間使用可能な疎水性のメンブランフィルター（東洋濾紙（株）製品、サポーテッド PTFE タイプメ

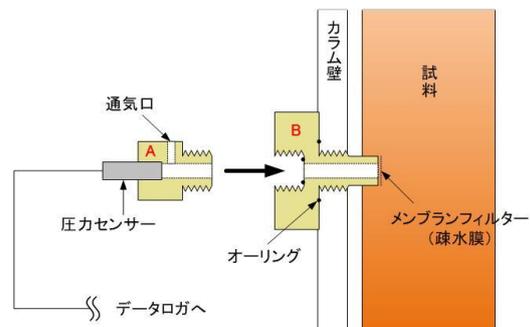


図2 間隙空気圧計の製作

ンブランフィルター、孔径 $0.1\mu\text{m}$ 、厚さ $130\mu\text{m}$) を用いて図 2 に示す間隙空気圧測定用センサーを作製した。

製作したセンサーを検定し、間隙空気圧測定装置は空気圧が正確に測定でき、圧力変換器も容易に取り外しが可能で、強度が強く、何回も試験に供することができることが確認された。

(3) 小型カラムを用いた供試体内のサククションおよび間隙空気圧の特性試験の実施

直径 50mm、肉厚 20mm の小型カラムを用いた試験装置を製作し、小型テンシオメーターおよび間隙空気圧計を接続し、一定の空気圧を送って各時間における間隙空気圧、サククション、排水量を連続測定し、排水過程および吸水過程時の保水特性を調べた。

(4) 大型カラム試験装置の製作と本実験の実施

図 3 に示すような本実験に使用する直径 50mm、高さ 900mm の大型カラムを製作し、サククション測定用小型テンシオメーターおよび間隙空気圧測定用センサーを各 5 個ずつ接続した。ついで、乾燥、完全飽和、あるいは部分飽和状態とした後、カラム上端を閉鎖あるいは大気に開放して底面からの水の浸透に伴うカラム内における深度別の間隙空気圧、サククションの経時変化をモニターするとともに、電子天秤により排水量を連続測定することにより、排水過程あるいは湿潤過程におけるサククションと空気圧の変化を調べた。

なお、カラムには豊浦標準砂 ($d_{50}=0.17\text{mm}$)、ガラスビーズ (0.1mm および 1.0mm)、珪砂 9 号 ($d_{50}=0.03\text{mm}$)、および珪砂 4 号 ($d_{50}=0.85\text{mm}$) の 5 種類の供試体を充填して実験を実施した。各試料に対する実験は、カラム上端を大気に開放したケースと閉鎖したケースの計 10 種

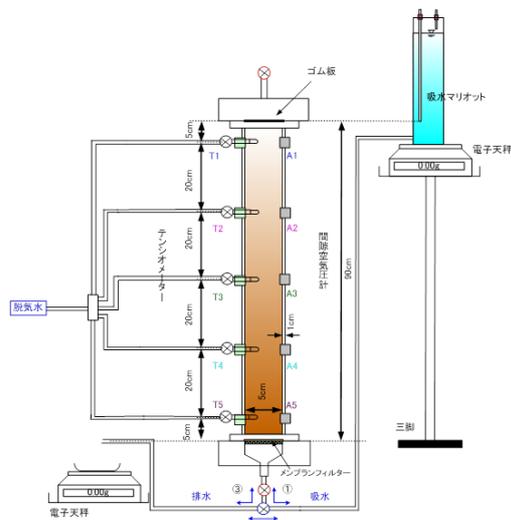


図 3 気液混相流実験の概念図

類の実験を各 2 セットずつ実施した。

(5) 大型カラム試験装置による乾湿履歴が水分特性曲線、相対透過度に及ぼす影響に関する実施

気液混相流では、水が潤す流体、空気が潤さない流体となり、排水と吸水が繰り返される過程で各流体の履歴により流れが左右される。そこで、図 4 に示すようなカラム実験を行い、乾湿履歴が飽和カラムからの排水量に及ぼす影響を調べた。

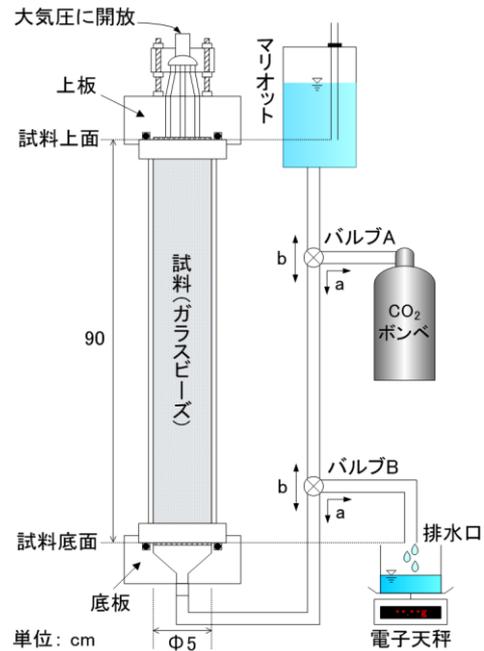


図 4 乾湿履歴の影響を調べる実験概念図

(6) 数値解析コードの開発

乾湿履歴を考慮した飽和・不飽和浸透流の基礎方程式を用いた数学モデルを構築する。ついで、有限要素法を用いて数学モデルを解析する数値解析コードを開発し、実験結果を用いて数学モデルおよび数値モデルを検定する。そして、最終的に土壌中の水-物質同時輸送および水-熱同時輸送の数学モデルに組み込んだ。

4. 研究成果

(1) 乾湿履歴が水分特性曲線、相対透過度に及ぼす影響

図 5 は排水量の経時変化を示したもので、完全飽和からの排水に対して、気相が島状飽和で残留した水飽和からの排水量が約 1 割弱少なくなることがわかった。

次に、ガラスビーズ充填槽の境界水位を段階的に変えることにより、履歴が飽和・不飽和浸透流に及ぼす影響を調べる実験を行い、実験と同一条件で履歴を考慮した飽和・不飽和浸透流の数値解析を行って流速ベクトル

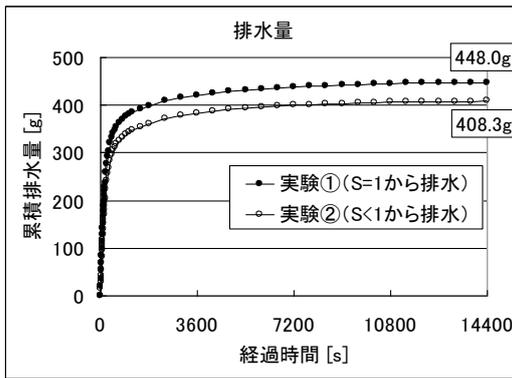


図5 乾湿履歴が排水量に与える影響

や流跡線を計算し、履歴の影響を定量的に評価した。

ついで、ガラスビーズ、豊浦標準砂、および珪砂を小型カラムに充填し、様々な空気圧で試料内の間隙空気圧、サクシオンを連続測定し、各試料の排水過程から吸水過程移行時の、そして吸水過程から排水過程への移行時の土壌水分特性を求めた。図6は吸水過程から排水過程移行時の水分特性データであり、乾湿履歴により保水特性が大きく影響されることが確認された。なお、各試料の各過程における水分特性データはバン・グヌーチェン曲線で近似できることから、パウエルの共役傾斜法を用いて理論式へのフィッティングを行い係数を求めた。これらの係数は、不飽和相対透過度の計算に利用できる。図7は得られた係数を用いて豊浦標準砂の相対透過度を計算したもので、乾湿履歴が相対透過度に与える影響が明らかになった。

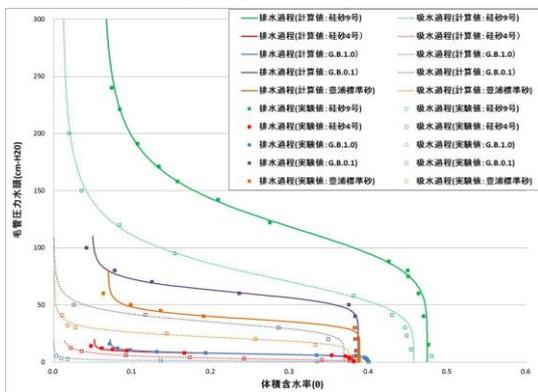


図6 土壌水分特性曲線(吸水過程→排水過程)

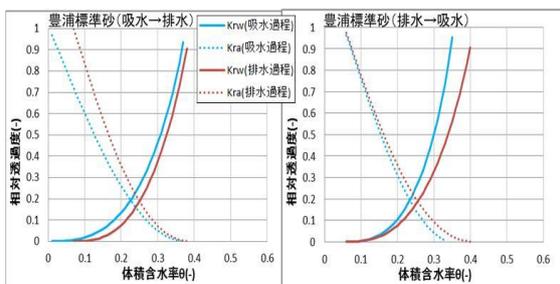


図7 豊浦標準砂の相対透過度

(2) 大型カラムによる気液混相流の実験結果

図8に上端を密閉した豊浦標準砂充填カラムによる吸水試験時の間隙空気圧の変化を示す。本実験より、土壌内の空気圧の伝搬はきわめて早く、間隙空気圧は土層深度によらずほぼ同一値となることが判明した。

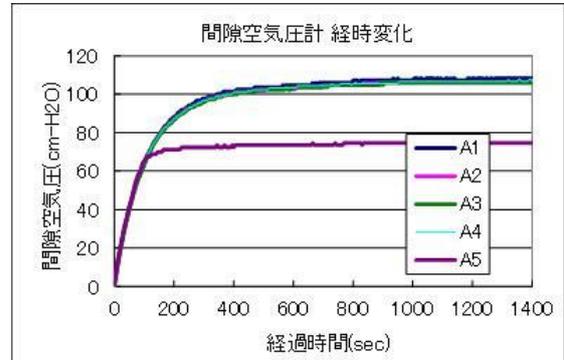


図8 閉塞時の間隙空気圧の変化(豊浦標準砂)

どの試料も空気圧が土層深度によらずほぼ同一値を示すことから、図9に試料別の平均間隙空気圧の経時変化を示す。粒径が小さくなるほど毛管力が大きくなるため、気相が圧縮されて間隙空気圧が大きくなることが判明した。なお、カラムへの吸水量の時間変化も計測しているが、図9と同様の結果が得られた。

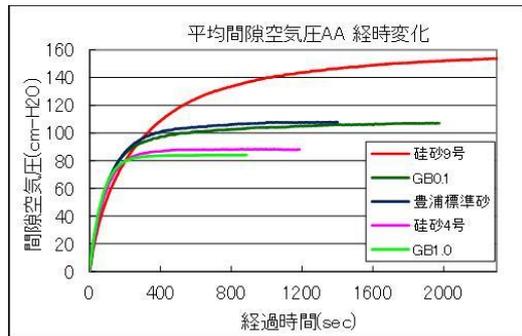


図9 閉塞時の試料別間隙空気圧の変化

閉塞実験時の吸水量から求めた豊浦標準砂の毛管上昇高は9.34cmであった。図10は小型テンシオメータにより計測されたT5地点の間隙水圧の経時変化で、T1~T4は乾燥状態のため計測不能であった。

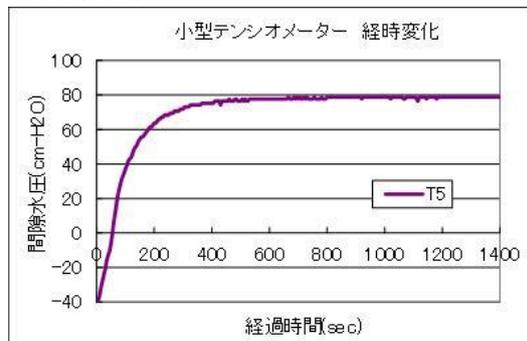


図10 閉塞時の間隙水圧の変化(豊浦標準砂)

図11に上端を大気に開放した豊浦標準砂充填カラムによる吸水試験時の間隙空気圧の変化を示す。毛管上昇に伴う浸潤前線未到達部の間隙空気圧は土層深度によらずほぼ大気圧に等しく、浸潤前線が到達した土層下部では間隙空気圧はセンサー水没に伴う空気圧の履歴を示していることが分かった。

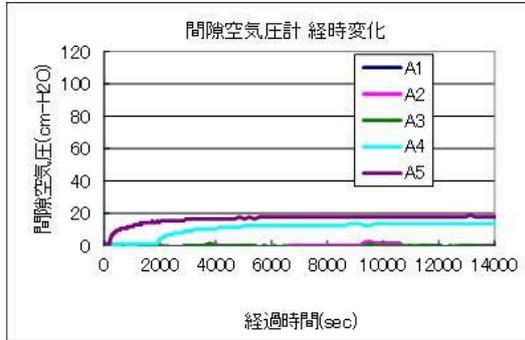


図 11 開放時の間隙空気圧変化(豊浦標準砂)

開放実験時の吸水量から求めた豊浦標準砂の毛管上昇高は32.3cmであった。図12は小型テンシオメータにより計測されたT5～T3地点の間隙水圧の経時変化で、T1～T2は乾燥状態のため計測不能であった。

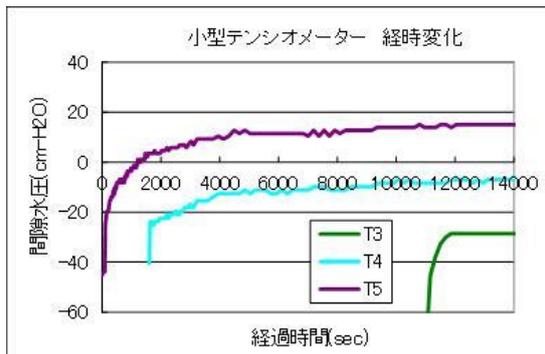


図 12 開放時の間隙水圧の変化 (豊浦標準砂)

以上の一連の実験により、粒径や材質の違いによって間隙空気圧、間隙水圧の分布が大きく異なることが明らかになった。また、間隙水圧は土層深度によって大きく異なるものの、間隙空気圧の土層深度による違いは小さく、混相流における空気の流れが土壌水の流れに比べて極めて早いことも明らかになった。

以上の気液混相流の実験結果を踏まえて、土壌水分特性曲線に乾湿履歴を反映させた水・物質移動連成解析コードおよび水・熱移動連成解析コードを開発し、2孔式塩水トレーサ試験と3次元数値モデルの逆解析による帯水層定数の同定およびケルビンの線源関数の高精度漸近解とパウエル共役傾斜法を用いた熱応答試験関連パラメータの逆解

析法とその適用へ応用することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 富樫聡、藤縄克之、2孔式塩水トレーサ試験と3次元数値モデルの逆解析による帯水層定数の同定、土木学会論文集、査読有、掲載確定
- ② 上原健人、藤縄克之、ケルビンの線源関数の高精度漸近解とパウエル共役傾斜法を用いた熱応答試験関連パラメータの逆解析法とその適用、地下水学会誌、査読有、掲載確定
- ③ 長谷川純也、藤縄克之、江澤静一郎、豊田富晴、渡辺紹裕、土壌水分ヒステリシスが飽和・不飽和浸透流に及ぼす影響、地下水学会誌、査読有、53巻、2011、25-39

[学会発表] (計4件)

- ① 梶田明宏、上原健人、藤縄克之、石原貴之、豊田富晴、石田広祐、濱野太宏、長谷川純也、乾湿履歴が土壌中の気液分布に与える影響—地盤内気液2相流に関する実験的研究—、土木学会中部支部研究発表会、2013.3.8、名古屋市
- ② 濱野太宏、藤縄克之、地盤環境が熱応答試験結果に与える影響に関する実験的研究、土木学会中部支部研究発表会、2013.3.8、名古屋市
- ③ 富樫聡、石原貴之、上原健人、梶田明宏、藤縄克之、片桐憲一、秩父俊一、帯水層中の物質移動パラメータ同定のためのトレーサ試験と適用結果、日本地下水学会秋季講演会、2011.10.20、広島市
- ④ 富樫聡、松田拓巳、豊田富春、藤縄克之、多孔体中の気液混相流に関する実験的研究、日本地下水学会秋季講演会、2010.11.11、和歌山市

[図書] (計1件)

- ① Katsuyuki Fujinawa, Springer, Sustainable Land Management, 2011, pp. 311-332

[その他]

ホームページ等

<http://wwweng.cs.shinshu-u.ac.jp/CIVIL/ARCH/fujinawa.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤縄 克之 (FUJINAWA KATSUYUKI)

信州大学・工学部・教授

研究者番号：00219031