

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04376

研究課題名(和文) 表流水と周辺地盤との間の水分と物質移動に関する研究

研究課題名(英文) Porewater flow and associated mass transport in a soil induced by rainwater infiltration

研究代表者

東野 誠 (Higashino, Makoto)

大分工業高等専門学校・都市・環境工学科・准教授

研究者番号：90311117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：寒冷地において冬期に凍結防止剤として道路に散布されたNaClの地盤内での移動や物質変換過程、および地盤から地下水や表流水中へのこれらの物質の流出過程について、理論的・実験的検討を行った。それに際して、豊浦珪砂、真砂土、および黒ボク土で構成された地盤を想定した。解析では、従来の水・底泥境界面での物質移動、およびHyporheic exchangeに関する基礎研究を拡張して地盤表面から内部での飽和・不飽和浸透流と物質移動、および物質変換過程をモデル化するとともに、降水の量や期間を変化させて地盤内部の流れ場、およびNaClの挙動の再現を試みた。モデルが地盤内の物質移動を概ね再現することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

寒冷地において、冬期に凍結防止剤として使用されたNaClの環境中への流出については、アメリカ合衆国、環境保護庁(EPA)が1988年に塩素イオンに関するガイドラインを策定している。他方、環境中に凍結防止剤由来と推定されるNaClが検出され、本格的に研究が行われるようになったのは2000年以降である。最近の研究結果によると、冬期に使用されたNaClの70%以上が地盤内に残存し、長期間に亘って環境に影響を及ぼし続けることが示唆されている。なお、国内においては、当該の課題に対して、学術的視点から殆ど検討は行われていない。凍結防止剤は我が国においても全国的に使用されており、本研究の社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Road salts such as sodium chloride (NaCl) are used in cold climate regions to increase road safety. These chemicals accumulate in soils near roads where road salt has been applied, and have the potential to cause environmental problems. Increases in the salt concentration of freshwater can degrade water quality and ecosystems. Mass transport and residence time of saline water from road salt applications in soil columns composed of Toyoura sand, weathered granite sand, and Andisols were investigated by simulations and in laboratory experiments. The presented model was found to match the experimental results for Toyoura sand quite well. Whereas, the model had difficulties in describing neither the experimental time variation of NaCl concentrations in the effluent nor salt mass left in the soil column for weathered granite sand and Andisols. This suggests that chemical processes have a significant effect on salt mass transport in the soil, and need to be further explored.

研究分野：水工水理学

キーワード：浸透流 地盤内物質移動 地盤環境 雨量強度 塩分 地下水汚染 透水係数

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とする水田や畑地等への施肥に由来する硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)の地盤内への浸透について、例えば、上水道水源のほぼ全てを地下水に依存する熊本市では、長期間に亘って地下水質のモニタリングが行われている。それによると、降雨後に地下水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ が高濃度を呈することがしばしば観測されている。これは、農業生産に対して過剰に用いられた化学肥料に起因する $\text{NO}_3\text{-N}$ が地盤内を降水の浸透とともに下方へと移動し、地下水中へと流出したことによると考えられるが、その詳しい過程に関する検討は行われていない。

畑地等に用いられた化学肥料中に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ の水域への流出は、アメリカ合衆国においても大きな問題となっている。例えば、ミシシッピー川最上流のミネソタ州において、コーンや大豆畑に使用された化学肥料に由来する $\text{NO}_3\text{-N}$ が河川へと流出してミシシッピー川を流れ下り、4000km 以上離れたメキシコ湾において赤潮等の水質問題を引き起こしている。

一方、これとは別に、ミネソタ州のような寒冷地ではその地域特有の問題もある。それは、冬期に凍結防止剤として道路に散布された NaCl による地下水や河川水の汚染である。Stefan, H.G. ミネソタ大学教授の研究によると、冬期に散布された NaCl の約 77% がミシシッピー川へと流出することなく、ミネアポリス・セントポール市街地の地盤内に残存する。

上述のような水田や畑地への施肥、および寒冷地での凍結防止剤の散布による環境汚染は、単純に飽和・不飽和浸透流の問題として取り扱うことはできない。なぜならば、 $\text{NO}_3\text{-N}$ や NaCl は地盤表面、すなわち、空気や水と地盤との境界面近傍から降水の浸透等に伴い飽和・不飽和地盤内へと移動するが、これら地盤表面から内部への一連の移動過程は未解明である。加えて、地盤内でのこれらの物質の滞留時間を把握し、除去するには降雨、すなわち、水文条件をも考慮する必要がある、複数の専門分野にまたがる横断的な検討が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、寒冷地において冬期に凍結防止剤として道路に散布された NaCl の環境中への流出、周辺地盤への浸透、および地盤から地下水や表流水中への流出過程について検討を行う。その際、これら一連の過程と研究代表者がこれまで取り組んできた水・底泥境界面での物質移動や Hyporheic exchange との類似性に着目して、地盤表面から内部での飽和・不飽和浸透流と物質移動、および化学的・生物学的物質変換過程を定式化するとともに、水文条件、すなわち、降水の量や期間による地盤内部の流れ場の解析とリンクさせて、 NaCl の挙動、滞留時間、および地盤から地下水や表流水中への流出過

程をシミュレートするためのモデルを構築することを目的とする。

従来、水田や畑地から河川への $\text{NO}_3\text{-N}$ 等の流出に関しては、非特定(ノンポイント)汚染源からの汚濁負荷としてその定量化が試みられてきた。また、飽和・不飽和浸透流に関しても、様々な観点から検討が行われ、これらは日本地下水学会編「地下水シミュレーション」(技報堂出版)によく整理されている。しかしながら、現実的な問題である前述の熊本市における降雨後の地下水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の上昇、およびミネソタ州での凍結防止剤として使用された NaCl の地盤内での挙動や滞留時間に関しては未解明な点が多い。加えて、地盤からこれらの物質を除去するために必要な水量(降水量)を定量的に把握するための手法は、現時点で確立されていない。

飽和・不飽和浸透流を例に挙げれば、従来の研究の成果として、これを解析するためのプログラム "Hydrus" が開発され、種々の問題に対して適用されている。飽和・不飽和浸透流の解析は、地盤内部での流れ場を明らかにすることが主目的であり、降水の地盤内部への浸透等は境界条件として取り扱われる。一方、本研究で対象とする凍結防止剤として使用された NaCl の地盤への浸透では、飽和・不飽和浸透流とともに地盤表面の Hyporheic zone での NaCl の挙動をも併せて考慮しなければならない。すなわち、Hyporheic exchange と飽和・不飽和浸透流とを相互にリンクさせることが不可欠である。そこで、これまでの Hyporheic exchange に関する基礎研究と降水による飽和・不飽和浸透流に伴う物質移動とを対応させることにした。ここで、本研究では、地盤表面の薄い領域に滞留する NaCl が降雨等に起因して表層から内部へと移動することを Hyporheic exchange と定義し、地盤内部での飽和・不飽和浸透流による物質移動と区別する。以上のように、Hyporheic exchange、および 砂、礫、シルト、有機物質等が複雑に混じり合い、透水係数等の物性が深さ方向のみならず、同一平面内においても変化する実際の地盤を対象とするところが本研究の学術的独自性であり、創造的な点である。

3. 研究の方法

水田や畑地への施肥による $\text{NO}_3\text{-N}$ 、および冬期に路面へと散布された NaCl は、水に溶けて溶存態として地盤表面に滞留するが、降雨や雪融けによって地盤の水分が増加すれば、浸透水とともに内部・下方へと移動して地下水や表流水中へと流出する。溶存態 $\text{NO}_3\text{-N}$ や NaCl の地盤内での滞留時間はこれらの移動速度に依存するが、この物質移動速度は地盤の透水係数や飽和度に関係する。水田や畑地、あるいは草原等の未舗装地では、地盤の飽和度は降水によって大きく変化する。すなわち、降水の浸透によって地盤の表層から下層へと飽和度が上昇し、これによって地盤内での物質移動速度は大きくなる。一方、降水の供給が止めば、地盤の飽和度は表層から低下してゆき、これに伴い地盤内での溶質移動速度も小さくなる。一定期間降水が無ければ、 $\text{NO}_3\text{-N}$ や NaCl は地盤内に滞留するが、このような降水量やその期間と地盤表面、Hyporheic zone、および地盤

内部の飽和・不飽和浸透流と物質移動とを相互に関連付けた研究例は殆ど無い。

飽和・不飽和浸透流とそれによる物質移動をシミュレートするためのプログラムとして、"Hydrus"が開発され、広く用いられている。しかしながら、実際に地盤は砂、礫、シルト、有機物質等が複雑に混ざり合って構成されており、Hydrusが想定するものとは大きく異なること、数か月～1年に亘る水文条件の変化を取り扱う必要がある、

SWMM等の既存の水文・水質モデルと容易にリンクできること、を考慮して実験結果を基に独自のモデルを構築した。それにあたっては、従来の水・底泥境界面での物質移動、およびHyporheic exchangeに関する基礎研究を拡張して地盤表面から内部での飽和・不飽和浸透流と物質移動過程をモデル化した。次に、このモデルに降水量と期間によって地盤の飽和度と物質移動速度が変化する過程を組み込んだ。前述のように、地盤内でNO₃-NやNaClの滞留時間は個々の地域の水文条件、すなわち、降水量や継続時間に関係すると考えられるが、本モデルによってこのような地域性と地盤内での物質移動速度との関係を表現し得る。

構築したモデルの妥当性を、地盤材料として豊浦珪砂、真砂土、および黒ボク土を用いた実験によって検証した。

4. 研究結果

地盤内に蓄積している冬季に凍結防止剤として使用されたNaClやCaCl₂の降水の浸透による地盤からの除去について、豊浦珪砂、および真砂土で構成された地盤を対象として実験とシミュレーションによる検討を行った。まず、豊浦珪砂ではシミュレーションによる結果は実験値を概ね再現することを確認した。シミュレーションにあたっては各地盤毎に水分保持曲線を求めることが不可欠である。実験とシミュレーション結果より、豊浦珪砂で構成された地盤からの降水の浸透による塩分除去に要する時間はシミュレーションで概ね推定し得ることを示した。

次に、豊浦珪砂に不透水性材料であるベントナイトやカオリナイトが混合した場合について検討した。ベントナイト混合砂とカオリナイト混合砂では、混合割合が同一であれば、NaCl除去に要する時間はカオリナイト混合砂の方がベントナイト混合砂よりも短い。ベントナイト混合砂、およびカオリナイト混合砂においては、ベントナイト、あるいはカオリナイトの混合割合の増加とともにNaCl除去に要する時間は長くなる。ベントナイト混合砂において、ベントナイトの混合割合が2%以上では、ほぼ不透水性とみなせる。

真砂土地盤からの塩分除去特性、地盤厚と所要降水量、所要時間に関しては、実験を何度行っても結果にバラツキがみられることから、真砂土地盤の塩分除去のモデルの妥当性について、今後も様々な条件を変化させて実験を継続し、検討・考察していく必要がある。

地盤材料として、黒ボク土を用いた実験は9回実施した。実験毎にカラム流出水 NaCl 濃度の経時変化には差異が見られたが、これらは大きく2パターンに分けられる。まず、開始1000秒後には既に NaCl 濃度が急激に低下し、その後、濃度0に近いところで一定となった。他方は、初期 NaCl 濃度が低く、その後、濃度が上昇し、緩やかに低下する結果となった。NaCl 濃度の変化形態の差異は、初期含水比に起因すると考えられる。すなわち、初期含水比が 5.97~58.63%のグループと 111.05~147.93%のグループとでは、実験開始時の黒ぼく土の状態が大きく異なる。すなわち、より乾燥した状態の方が、カラム上端より純水注入後の濃度低下が顕著である。次に、シミュレーション結果と実験結果とを比較すると、実施した全てにおいてシミュレーションと実験値との間に明確な差異が見られた。この要因として、上部から精製水を注入し、下部より流出するまでの過程で、カラム内に充填した黒ぼく土の内部に水道が形成され、土中での水の流れが不均一となり、部分的に水の浸透具合に偏りが生じた可能性が考えられる。今後、黒ぼく土のシミュレーションモデルを構築するには、濃度の変化形態のパターンが異なる原因を把握する必要がある。

以上のように、地盤を構成する材料として豊浦珪砂、真砂土、および黒ボク土について実験とシミュレーションによる検討を行った。豊浦珪砂について、地盤からの塩分除去に関するシミュレーションと実験結果は概ね一致し、本研究で構築したモデルの妥当性が示された。一方、真砂土と黒ボク土に関して、実験結果の再現にあたっては、地盤内部での化学過程を詳細にモデル化し、これらを組み込むことの重要性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Higashino, M. Aso, D. and Stefan, H.G.	4. 巻 794
2. 論文標題 Acceleration of rises in the level of rivers induced by rising air temperatures in a cold climate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2021.148553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Higashino, M. and Stefan, H.G.	4. 巻 307
2. 論文標題 Sediment oxygen demand enhancement at the sediment/water interface of a shallow pond induced by pressure fluctuations from raindrop impact at the water surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural and Forest Meteorology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agrformet.2021.108545	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Higashino, M. Stefan, H.G. and Urakami, N.	4. 巻 9
2. 論文標題 Saline water removal from a soil column composed of Andisol by porewater flow due to rainwater infiltration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Chemical Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jece.2021.106610	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Higashino, M.	4. 巻 Vol. 59
2. 論文標題 Subsurface flow and associated oxygen transfer induced by turbulence in a gravel bed river	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Hydraulic Research	6. 最初と最後の頁 pp.437 - 447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00221686.2020.1780498	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Higashino,M., Aso,D., Kawano,H. and Yonemitsu,Y.	4. 巻 284
2. 論文標題 Is rice cultivation sink or source of nitrogen for a Japanese river?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 pp.1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2020.124779	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Higashino,M., Aso,D. and Stefan,H.G.	4. 巻 28
2. 論文標題 Effects of clay in a sandy soil on saturated/unsaturated pore water flow and dissolved chloride transport from road salt applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Science and Pollution Research	6. 最初と最後の頁 pp.693 - 704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11356-020-11730-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Higashino,M. and Stefan,H.G.	4. 巻 12(3)
2. 論文標題 Water resources and flooding risk in Kumamoto based on observed hydrologic data analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Water and Climate Change	6. 最初と最後の頁 pp.833 - 843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2166/wcc.2020.264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Higashino,M., Stefan,H.G. and Aso,D.	4. 巻 230:305
2. 論文標題 Removal of Saline Water due to Road Salt Applications from Columns of Two Types of Sand by Rainwater Infiltration: Laboratory Experiments and Model Simulations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Water, Air, and Soil Pollution	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11270-019-4337-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Higashino, M. and Stefan, H.G.	4. 巻 140
2. 論文標題 Trends and correlations in recent air temperature and precipitation observations across Japan (1906 - 2005)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Climatology	6. 最初と最後の頁 517-531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00704-020-03097-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Higashino, M.	4. 巻 123
2. 論文標題 Oxygen transfer at the sediment/water interface for sediment bed with rough surface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 3283-3292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JG004602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Higashino, M. and Stefan, H.G.	4. 巻 21
2. 論文標題 Variability and change of precipitation and flood discharge in a Japanese river basin	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology: Regional studies	6. 最初と最後の頁 68-79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ejrh.2018.12.00	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Higashino, M. and Stefan, H.G.	4. 巻 Vol.145, No.5
2. 論文標題 Rinsing of Saline Water after Frequent Road Salt Applications from an Unsaturated Sandy Soil by Rainwater Infiltration: Significance of Rainfall Duration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 東野 誠
2. 発表標題 大野川流域での硝酸性窒素収支における水田の役割
3. 学会等名 2019年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻生大樹
2. 発表標題 砂と粘土の混合地盤からの降水による塩分の除去
3. 学会等名 2019年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東野 誠
2. 発表標題 熊本での降水に及ぼすENSOの影響について
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻生大樹
2. 発表標題 砂質土で構成された地盤の降水による塩分の除去について
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東野 誠
2. 発表標題 底面粗度の影響を考慮した底泥による酸素消費のモデル化
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野洋輝
2. 発表標題 大分川・大野川流域での硝酸性窒素の収支について
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麻生大樹
2. 発表標題 真砂土で構成された不飽和地盤への雨水浸透と塩分の除去
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------