

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24780162

研究課題名(和文) 森林土壌中の粗大孔隙を流れる選択流の溶質移動特性と発現機構の解明

研究課題名(英文) Research on solute transport characteristic and emergent mechanism of a preferential flow in a forest soil

研究代表者

釣田 竜也 (Tsurita, Tatsuya)

独立行政法人森林総合研究所・九州支所・主任研究員

研究者番号：30353775

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：森林土壌中の溶存物質の移動における選択流の寄与を明らかにすることを目的として、森林土壌中の粗大孔隙を経由する選択流の中の溶質移動量と土壌マトリックスを経由するマトリックス流の溶質移動量を個別に観測し、比較した。

その結果、土壌が比較的湿潤な斜面下部地点では土壌マトリックス経由の溶質移動が、土壌が比較的乾燥した斜面上部地点では選択流経由の溶質移動が支配的であることが分かった。斜面上部では、落葉層を通過した水に比較的高濃度に含まれる溶存有機炭素やカリウム、カルシウムなどを高濃度のまま速やかに深部に輸送する経路として粗大孔隙の寄与が大きいことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the contribution of the preferential flow via macro-pore to solute transport through forest soil, the solute flux which goes via macro-pore, and the one which goes via soil matrix were measured individually.

As a result, the solute movement which goes via soil matrix was dominant at the lower slope site where soil condition was relatively wet. On the other hand, the solute movement which goes via macro-pore was dominant at the upper slope site where soil condition was relatively dry. In the upper part of a slope, macro-pore largely contribute to the transport of solutes such as dissolved organic carbon, potassium, and calcium which are contained litter layer leachate at high concentration.

研究分野：森林土壌学

キーワード：森林土壌 粗大孔隙 選択流 マトリックス流 溶存物質 移動量 テンションライシメータ ゼロテンションライシメータ

1. 研究開始当初の背景

森林土壌が溶存物質の保持や流出に果たす役割を定量的に評価するためには、土壌中での溶存物質の移動量の計測が必要不可欠である。

森林土壌中の水移動には土壌マトリックス中を比較的均一に下方浸透するマトリックス流のみでなく、土壌中の亀裂や粗大孔隙を経由する選択流も存在していることが近年の染色液を用いた雨水流動経路の観測実験から明らかになってきている。Marques et al. (1996) は森林土壌において、ゼロテンションライシメータでは滞留時間が比較的短く土壌中を主として重力移動する水を採水し、テンションライシメータでは滞留時間が比較的長く土壌との吸着程度が強いマトリックス流を採水していると報告している。しかし、採水手法間での水質の違いやその移動経路についての検討事例は少なく、森林土壌中での水質形成過程において選択流の果たす役割については未解明な点が多い。

2. 研究の目的

森林土壌中のマトリックス部分を経由する水(マトリックス流)の量と粗大孔隙を経由する水(選択流)の量を個別に測定し、またその溶存成分を分析することにより、森林土壌中の溶存物質の移動における選択流の寄与を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 調査地

熊本県北部の鹿北流域試験地 3 号沢内の森林斜面を調査地とした。植生は斜面下部ではスギ人工林(2014 年時点で 58 年生)、斜面上部ではヒノキ人工林(2014 年時点で 39-58 年生)が主体であり、一部にアラカシ、ツブラジイ、コナラ等の広葉樹(2014 年時点で 58 年生)が優先している。3 号沢の集水面積は 3.69 ha、標高は 160~250 m で、周辺の基盤地質は黒色片岩である。1992 年から 1999 年の期間の年平均降水量は 2166 mm、年平均流出水量は 1243 mm である。

調査地には主に褐色森林土が分布しており、乾性褐色森林土(BB 型)が頂部平坦面および頂部斜面に、適潤性褐色森林土偏乾亜型(BD(d)型)が上部谷壁斜面および谷頭斜面に、適潤性褐色森林土(BD 型)が谷頭凹地および下部谷壁斜面に分布している。

(2) 調査方法

調査地の源頭部斜面の上部地点(U 地点)と下部地点(L 地点)において土壌水を採取した。U 地点(ヒノキ林下)は傾斜 22 度、土壌型 BD(d)で上部谷壁斜面に、L 地点(スギ林下)は傾斜 43 度、土壌型 BD で下部谷壁斜面に位置する。各地点において、堆積有機物層(以下 A₀層)直下(深さ 0 cm)、A 層下部に相当する表層土壌(深さ 20 cm)、B 層下部に相当する下層土壌(U 地点は深さ 60 cm、

L 地点は深さ 40 cm)の土壌水を採取した。

A₀層直下には、チリトリ型(縦横が 5 cm×20 cm、高さが 0~2 cm)の受水部 2 つ(総受水面積 200 cm²)で集めた水(A₀層通過水)を重力でポリ容器に誘導するゼロテンションライシメータ(以下 ZTL(A₀))を設置した。表層土壌には、ゼロテンションライシメータ(以下 ZTL)とテンションライシメータ(以下 TL)を設置した。ZTL では塩ビパイプ(呼名 VP65)の先端を半分にはスライスし末端に栓をして作成した受水部(受水面積 132 cm²)を土壌断面から所定の深さに挿入し、集めた水を重力でポリ容器に誘導して採水した。TL では、専用オーガーを用いてポラスカップ(直径 1.8 cm、長さ 6 cm)の中心が所定の深さになるように埋設し、採水チューブを介して連結しているガラスピン内を初期吸引圧 50 kPa で減圧して約 1 週間後に採水した。なお ZTL は粗大孔隙を経由する選択流の採取を、TL は土壌マトリックスを経由するマトリックス流の採取を意図したものである。

また各地点の下層土壌にポラスプレート・テンションライシメータ(以下 PPTL)を設置し、土壌マトリックスを経由する水の移動量を測定した。試料は原則 2 週間に 1 回の頻度で採取し、各地点、各深度において選択流の溶質移動量とマトリックス流の溶質移動量をそれぞれ算出した。

土壌中での選択流の発現が渓流水質に及ぼす影響を検討するため、土壌水に加えて、雨水、地下水、湧水、渓流水を定期的に採取し、溶存物質濃度の季節変動特性を調べた。

(3) 水質分析

pH をガラス電極法で測定した。0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過した後、溶存無機イオン濃度をイオンクロマト法により、SiO₂濃度を ICP 発光分析法により測定した。また溶存有機炭素(DOC)濃度は、塩酸を加えて無機炭素を除去した後、全有機炭素計により測定した。

4. 研究成果

(1) 鹿北流域試験地の降雨特性と雨水水質の季節変動

2009~2013 年の 5 年間の年降水量は 2173~2690 mm で、平均値は 2437 mm であった。この値は同試験地の 1992~1999 年の年平均降水量(2166 mm; shimizu et al., 2003)より約 270 mm 多く、観測期間は比較的多雨年が続いた。採水期間毎の雨量(以下、期間雨量)をおおよそ月別に集計すると、夏期に一山型のピークを持つ規則的な分布を毎年示し(図 1)、6~9 月の 4 ヶ月間に年降水量の 5~7 割のまとまった雨が降った。雨水の pH は多くが 4~5 の間にあり、明瞭な季節変動や年々変動は認められなかった。夏期にスパイク状に pH が高い雨水が度々あったが、期間雨量との関係を見ると、全て期間雨量が

少なかった。また pH が低い雨水も期間雨量が少ない傾向にあり、期間雨量が増えると pH 5 程度に収束していた。

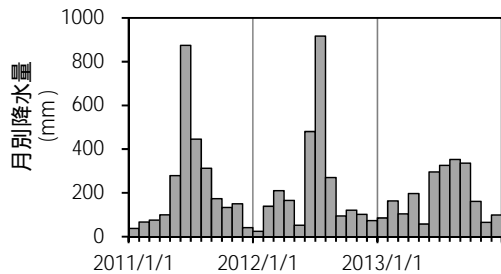


図1 試験地の月別降水量

(2) 選択流とマトリックス流の水質特性の違いと水移動経路。

SiO₂ は土壌起源の物質であり、土壌との接触時間が長くなるほど SiO₂ 濃度は高まると考えられる。SiO₂ 濃度は、雨水、A₀ 層通過水ではゼロに近い低濃度であり、土壌水で表層から下層にかけて増加し、地下水で大きく増加して湧水、渓流水でさらに微増した(図2)。土壌水について採水手法間の違いを見ると、U地点、L地点とも表層土壌ではZTLとTLで採水された土壌水の水質が異なり、TLよりZTLの方がA₀層通過水の水質をより強く反映して、SiO₂濃度が低かった。

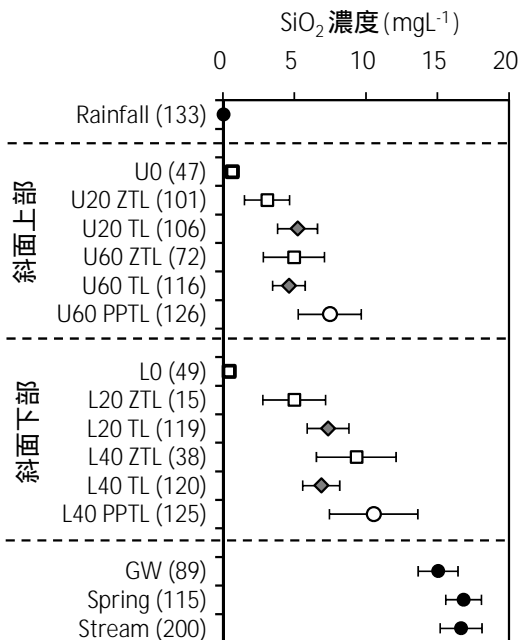


図2 観測期間中の Si 濃度の算出平均値 (±SD)

DOC は有機物起源の物質で、林内雨、A₀ 層通過水で高濃度であることが知られている。DOC 濃度は Si 濃度とは対照的に、A₀ 層通過水で最も高濃度であり、土壌水で表層から下層にかけて低下し、地下水、湧水では低濃度で推移し、渓流水でやや微増した(図3)。土壌水について採水手法間の違いを見ると、U地点、L地点とも表層土壌ではZTLとTLで採水された土壌水の水質が異なり、TLよりZTLの方がA₀層通過水の水質をより強く反映してDOC濃度が高かったが、その傾向は斜面上部地点の方がより顕著だった。

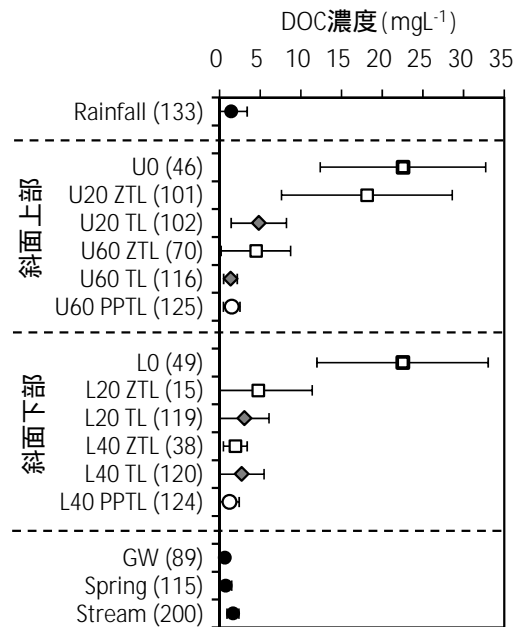


図3 観測期間中の DOC 濃度の算出平均値 (±SD)

このような表層土壌における採水手法間での濃度の違いは、ZTLでは通過時間が比較的短く土壌中を主に重力移動する水を採水し、TLでは通過時間が比較的長く土壌との吸着程度が強いマトリックス流を主に採水するという Marques et al. (1996) の結果を支持する結果である。また、篠宮・吉永 (2008) は四国太平洋岸地域の森林斜面における豪雨時のZTLでの水移動量の詳細な観測から、大規模降イベント時に粗大間隙を通じた深い土層への選択流が存在することを明らかにしている。本研究のZTLで採水された土壌水も、このような選択流を捕捉したと考えられ、土壌との反応が乏しいままA₀層通過水の水質を比較的保った状態で土壌中を重力移動する選択流の実態を水質の面から裏付けたと言える。また、本研究を行った九州地域と篠宮・吉永 (2008) が選択流を観測した四国太平洋岸地域は、ともに温暖多雨地域であり、本試験地は毎年夏期に一山型の分布で雨が集中的に降る条件であった(図1)。このような地域では、夏期の豪雨時に雨水の供

給速度が土壌マトリックスの吸水速度を上回る状況が度々発生することにより選択流が発現しやすいと考えられる。

深さ 20 cm の ZTL による選択流の採水回数（図 1、図 2 の地点名横の数字が採水回数を示す）は、U 地点（101 回）の方が L 地点（15 回）より約 7 倍多かった。これには U 地点と L 地点の表層土壌の撥水性強度の違いが影響したと推察される。本調査地では、U 地点のある Bd(d)型土壌の分布域の表層土壌の撥水性の方が L 地点のある BD 型土壌の分布域の撥水性より強い（小林, 2007）。U 地点ではこのような強い撥水性による表層土壌のマトリックスの吸水性の低下が、豪雨時の選択流の発生をさらに促進させたと考えられる。なお、土壌マトリックスの透水性がもともと U 地点と L 地点で異なる可能性もあり、今後さらに検討する必要がある。

一方下層土壌では、U 地点の TL と ZTL の SiO₂ 濃度の差はより不明瞭で、TL より ZTL の方が高濃度の場合が混在した。これらのことから、下層土壌中の ZTL で採水された土壌水は、A₀ 層通過水が直接到達したものというよりは、降雨時に表層土壌で発生した選択流に起因する下層土壌への素早い圧力伝播により、一時的に正圧状態になって下層土壌のマトリックスから押し出された水であると推察される。しかし、TL より ZTL の方 SiO₂ 濃度が低い場合も夏期に散見されることから、降雨条件や土壌の撥水性の発現状況によっては、A₀ 層通過水の性質を比較的保存した選択流が下層土壌に達する場合もあると考えられる。

これに対し L 地点の下層土壌の SiO₂ 濃度は採水されたほとんどの場合で TL より ZTL の値の方が大きかった（図 2）。また ZTL で採水された時期は多くが夏期の豪雨時であった。L 地点は斜面末端の下部谷壁斜面に位置し、土層と風化層の厚さは共に薄い。このような L 地点の斜面位置や土層構造を考慮すると、L 地点の下層土壌の ZTL で採水された水は、夏期の豪雨時に土壌 - 風化層境界付近に一時的に発生した飽和側方流であると推察される。斜面方向に移動する飽和側方流は鉛直移動する土壌水より土壌・風化層との接触時間が長く、SiO₂ 濃度が高く、DOC 濃度が低くなると考えられ、得られた結果が矛盾なく説明できる。また L 地点では、表層より下層土壌に設置した ZLT の採水回数が多かったが（図 1、図 2）これは土壌 - 風化層境界付近により近い下層土壌の ZTL のみが飽和側方流の影響下にあったためと考えられる（斜面位置や土層構造から飽和側方流が発生しないと考えられる U 地点では、下層より表層土壌に設置した ZLT の採水回数が多かった）。

（3）森林土壌中の溶質移動における選択流の寄与

地表付近で高濃度である DOC について、水移動量を乗じて年間移動量を算出した。その結果、斜面上部では選択流経由の DOC 移動量がマトリックス経由よりも支配的であり、選択流経由の DOC の年移動量は全体の 8 割（下層）～ 9 割（表層）を占めていた（表 1）。なお、斜面上部における選択流経由の年間水移動量は全体の 6 割（下層）～ 7 割（表層）であり、選択流の DOC 濃度がマトリックス流より高濃度であることを反映して、選択流の水量の寄与率よりも DOC 移動量の寄与率が大きくなっている。

一方斜面下部では、マトリックス経由の DOC 移動量が選択流経由よりも支配的であり、選択流経由の DOC の年移動量は全体の 0.1 割（表層）から 2 割（下層）を占めるにとどまった。なお、斜面下部における選択流

表1 マトリック流と選択流のDOC移動量と寄与率

	マトリック流 選択流		全体
	DOC移動量 kg ha ⁻¹ yr ⁻¹		
降水			2648
斜面上部			
A ₀ 層通過水			232
表層	13	139	153
(寄与率)	(0.09)	(0.91)	
下層	5.0	18.6	24
(寄与率)	(0.21)	(0.79)	
斜面下部			
A ₀ 層通過水			287
表層	13	0.1	13
(寄与率)	(0.99)	(0.01)	
下層	11.7	2.8	14
(寄与率)	(0.81)	(0.19)	

表2 マトリック流と選択流の水移動量と寄与率

	マトリック流 選択流		全体
	水移動量 mmyr ⁻¹		
降水			2648
斜面上部			
A ₀ 層通過水			1322
表層	419	1102	1521
(寄与率)	(0.28)	(0.72)	
下層	419	761	1180
(寄与率)	(0.36)	(0.64)	
斜面下部			
A ₀ 層通過水			1865
表層	774	1	775
(寄与率)	(1.00)	(0.00)	
下層	774	412	1186
(寄与率)	(0.65)	(0.35)	

経由の年間水移動量は全体の0割(表層)~4割(下層)であり、下部の下層では上部と対照的に、選択流のDOC濃度がマトリックス流より低濃度であることを反映して、選択流の水量の寄与率よりもDOC移動量の寄与率が小さくなっている。

これらのことから、斜面上部と下部では粗大孔隙が溶存物質を輸送する機能に違いがあり、斜面上部では表層付近で高いDOC濃度になる地表水を高濃度に保ったまま速やかに深部に輸送する経路として粗大孔隙の寄与が大きいたことが明らかになった。

(4) 小流域スケールの水移動に対する選択流の影響

選択流の発生は河道域から離れた斜面上部の比較的乾燥した土壌が多かった。また、本試験地では土壌層から地下水、湧水にいたる過程でSiO₂濃度が大きく増加し、TOC濃度は減少しており、選択流の湧水や渓流水水質への直接的影響は認められない。したがって、本流域では、地下水や渓流水の水質形成への選択流の寄与は小さいと推察された。

本研究を行った3号沢源頭部の地下水採水地点の直上の谷頭凹地の表層土層と風化層の合計厚は1.5~2mと比較的薄く、地下水のSiO₂濃度は、渓流水と同様に夏期の多雨期に低下する比較的大きな変動を示した。飽和帯付近の土壌・風化層が薄いと大きな飽和地下水帯が形成されにくく、降雨に伴うSiO₂濃度の低い土壌水の流入によって地下水帯のSiO₂濃度が希釈されやすいと考えられる。さらに本試験地では毎年夏期に一山型の分布で集中的に雨が供給されるため、この時期にSiO₂濃度の低い土壌水が大量に地下水帯に流入すると考えられる。このように比較的小さい飽和地下水帯と、夏期に集中的に供給される降雨条件が重なった結果、3号沢源頭部の地下水のSiO₂濃度は夏期に大きく低下する季節変動を示し、これを反映して渓流水のSiO₂濃度も夏期に低下する季節変動を示したと考えられる。以上から、本流域は勝山ほか(2000)のいう「飽和地下水からのマトリックス流が卓越する流域」で、その中でも「飽和帯が小さいため地下水の化学性が変化しやすく渓流水質にその変化が現れやすい流域」に位置付けられる。

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)

釣田竜也、大貫靖浩、壁谷直記、九州北部の森林小流域における土壌から溪流への水質変化、地形、査読有、2015(印刷中)
稲垣昌宏、釣田竜也、鹿北流域試験地のヒノキ林における可給態養分の季節変化、九州森林研究、査読有、68、2015、87-90

[学会発表](計 2件)

釣田竜也、大貫靖浩、壁谷直記、北部九州の森林土壌中における選択流の発現と水質特性、土壤物理学会大会、2014年10月25日~2014年10月26日、宮城大学太白校舎(宮城県仙台市)

釣田竜也、石塚成宏、北部九州のスギ・ヒノキ人工林小流域における溶存有機・無機炭素の動態、九州森林学会大会、2012年10月27日、熊本県立大学講義棟1号館(熊本県熊本市)

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

釣田 竜也 (Tsurita Tatsuya)
森林総合研究所・九州支所・主任研究員
研究者番号：30353775

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：