HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	直鎖状アニオン界面活性剤（SDS）の黒ボク土中における移動とそれに伴う透水性変化
Author(s)	石黒, 宗秀; 鳥越, 崇宏; 亀岡, 喜史 他
Citation	農業農村工学会論文集, 2008(258), 7(485)-13(491),a1 https://doi.org/10.11408/jsidre2007.2008.485
Issue Date	2008
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70688
Rights	© 社団法人 農業農村工学会
Type	journal article
File Information	2008_485.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

農業農村工学会論文集
Trans. of JSIDRE
No. 258, pp. 7 ～ 13 (2008.12)

研究論文

直鎖状アニオン界面活性剤(SDS)の黒ボク土中における移動とそれに伴う透水性変化

石黒宗秀*　鳥越崇宏**　亀岡喜史***　赤江剛夫*

* 岡山大学大学院環境学研究科，〒700-8530　岡山市津島中 3-1-1
** 鳥越農場，〒839-1213　久留米市田主丸町益生田 1485
*** 気象庁福江測候所，〒853-0033　五島市木場町 991

要　旨

洗剤の主成分として用いられ，多量に環境中へ放出されるアニオン界面活性剤は，有機物で汚染された土壌の洗浄剤としても利用が検討される反面，細胞膜を破壊する作用があるため，環境汚染物質としても注視されている．しかし，土壌中におけるその挙動は解明されていない．ここでは，腐植物質を多量に含む黒ボク土中における直鎖状アニオン界面活性剤ドデシル硫酸ナトリウム（SDS）の吸着移動現象を明らかにするため，溶質移動実験と吸着実験を行った．それらの結果は，単純なイオンの吸着移動とは異なる特徴的な現象を示し，SDS が黒ボク土の腐植成分に協同吸着することを示唆した．臨界ミセル濃度以下において，SDS の流出濃度曲線の濃度と透水係数の低下がほぼ一致し，SDS 吸着が透水性低下に影響することがわかった．

キーワード：アニオン界面活性剤，黒ボク土，吸着，溶質移動，直鎖状炭素鎖，協同現象，透水係数

1. はじめに

界面活性剤は，その界面の物理化学性を改質する能力により（Koopal et al., 1999），洗剤・シャンプー・リンス・歯磨き粉などの生活用品に利用されるとともに，塗料・食品・化粧品・印刷・農薬・水処理等種々の産業に利用されている（荻野，1998；石黒，2003）．特に洗剤は，多量に消費され，多量に水環境中に放出されている．合成界面活性剤は，細胞膜を破壊する作用があるため，環境汚染物質としても注視されている（日本消費者連盟，1991；石黒，2005a）．下水処理場の普及により，家庭雑排水に含まれる界面活性剤は分解されるが，下水処理が不十分な地域においては現在も水質環境を悪化させている．一方，界面活性剤は，その強力な洗浄作用により，有機汚染物質で汚染された土壌の洗浄剤としても利用が検討されている（Mulligan et al., 2001；Reddy and Ala, 2006）．界面活性剤が水浸潤に影響を及ぼすことが明らかにされ（石黒・藤井，2004；石黒ら，2005b；Ishiguro and Fujii, 2008），カチオン界面活性剤と腐植物質の結合に関する研究が開始されている（Yee et al., 2006a, 2006b; Ishiguro et al., 2007）．腐植物質は負荷電を持つため，カチオン界面活性剤とは静電気力と疎水性相互作用で強く結合するが，同符号の荷電を持つアニオン界面活性剤と腐植酸は結合しない（Koopal et al., 2004）ことが報告されている．しかし，界面活性剤の土壌中における吸着移動現象は，十分に解明されていない．界面活性剤で汚染された水を，土壌を用いて浄化する技術や，有機汚染土壌の浄化技術を確立する上で，土壌中における界面活性剤の吸着移動メカニズムを明らかにすることは重要である．

本研究では，界面活性剤の土壌中における吸着移動メカニズムを明らかにするため，溶液浸透実験と吸着実験を行った．界面活性剤は，家庭用洗剤として良く利用される炭素鎖が直鎖状のアニオン界面活性剤を対象とした．土壌は，界面活性剤の炭素鎖と疎水性相互作用で吸着すると考えられる腐植物質を多量に含む黒ボク土を用いた．

2. 土壌試料と実験方法

2.1 土壌試料と界面活性剤見出し

土壌試料は，鳥取県大山放牧場の表層土を用いた．土壌分類は多腐植質厚層非アロフェン質黒ボク土，全炭素含量 13.8%（管状炉燃焼赤外吸収法；島津 VRC-2S による），砂含量 43.6%，シルト含量 31.8%，粘土含量 24.6% を含む埴壌土（ピペット法による）で，CEC 12.3mmol$_c$/kg（1 mmol/L の K 溶液），AEC 0 mmol$_c$/kg であった．実験には，2 mm 篩を通過した生土を用いた．実験における pH は，pH6.5 から pH7 の範囲であった．

アニオン界面活性剤として，疎水基が直鎖状のドデシル硫酸ナトリウム（$CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$；SDS）を用いた．臨界ミセル濃度（critical micelle concentration, CMC）は，

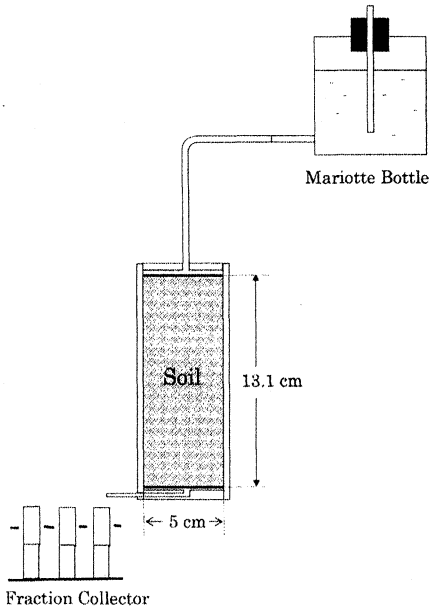

Fig.1 界面活性剤溶液浸透実験装置
Schematic representation of apparatus for surfactant transport

25℃において 8.2 mmol/L である．

2.2 実験方法

2.2.1 吸着実験

バッチ法により，種々濃度の界面活性剤溶液 30 mL を乾土あたり約 2.5 g の土壌試料に添加して所定時間（8 時間，18 時間，26 時間）良く振とうした後，遠心分離して上澄み液の界面活性剤濃度を測定し，初期添加量と溶液中の界面活性剤量の差から界面活性剤の吸着量を求めた．実験は 25±1℃の温度条件で行った．土壌試料は，あらかじめ 100 mmol/L NaCl 溶液で十分洗浄した後，1 mmol/L NaCl 溶液で平衡させた試料を用いた．腐植物質が吸着に及ぼす影響を明らかにするため，過酸化水素水を用いて腐植を分解した土壌試料についても，同様の試験をした．界面活性剤濃度の測定には，界面活性剤イオン選択電極法（Fukui et al., 2003; Ishiguro et al., 2007）を用いた．

2.2.2 溶液浸透実験

界面活性剤溶液浸透実験は，内径 5cm，長さ 13.1cm のアクリルカラムに，試料土を乾燥密度 0.54 g/cm^3 となるように均質に充填して行った．土壌カラムを 100 mmol/L NaCl 溶液で十分に飽和浸透させた後，1 mmol/L NaCl 溶液で十分に飽和浸透した．その後，種々濃度の界面活性剤溶液を飽和浸透させ，流出液の界面活性剤濃度を測定した．実験は 25±1℃の温度条件で行った．界面活性剤濃度の測定には，エチルバイオレット吸光光度法（本水法 JISK0101）を用いた．また，流出液にその 1/100 容積量の 10w/V%水酸化ナトリウムを加えた試料に，400 nm 可視光を用いてその吸光度を測定した（米林，1989）．400 nm 吸光度は，腐植酸等土壌コロイド物質の相対濃度に対応すると考えられる．

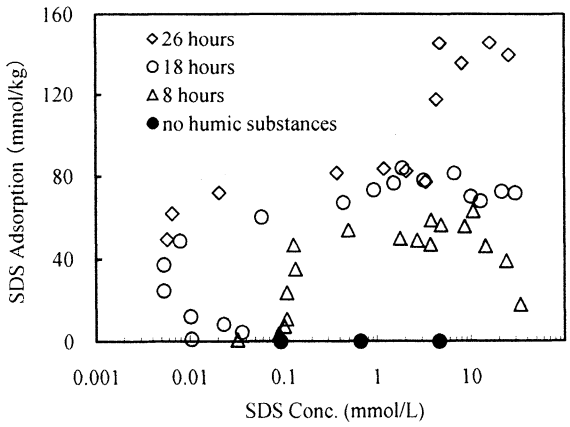

Fig.2 SDS 吸着等温線
凡例の時間は，SDS と土壌試料混合後の経過時間を示す．
SDS adsorption isotherm
Numbers in the figure denote elapsed time after mixing SDS and soil sample.

流出液量と経過時間から，飽和透水係数を計算した．溶液の浸透中は，動水勾配を 3 とした．実験装置の概要を **Fig.1** に示す．

3. 実験結果と考察

3.1 吸着実験

Fig.2 に，SDS の吸着実験結果を示す．腐植を分解処理した土壌には，本測定法では SDS 吸着は認められなかった．SDS は，負荷電を持つため，負荷電のみを持つ黒ボク土には電気的な反発力が働く．従って，腐植を分解した土壌には分子間引力よりも静電気反発力が勝り，吸着が観測されなかったと考えられる．一方，腐植の存在する土壌には SDS が吸着している．水溶性中性高分子とアニオン界面活性剤が，疎水性相互作用で結合する（Arai et.al, 1971; Shirahama, 1998）ことから，土壌の腐植と界面活性剤の間に疎水性相互作用が働いたため吸着したと考えられる．腐植が存在する試料土においては，振とう時間が長くなるほど，吸着が増加することがわかる．何れの時間においても，低濃度側で濃度上昇に伴う吸着量の急激な増加が認められる．全ての吸着サイトが同じ吸着エネルギーで吸着する場合，ラングミュア型の吸着となり，このような急な吸着量増加は認められない．従って，高分子と界面活性剤の結合でよく見られる，協同吸着現象(e.g., Arai et.al, 1971; Satake and Yang, 1976; Shirahama et. al, 1981; 早川・Kwak, 1985; 大井ら, 2000ab, 大井, 2003)が生じているものと考えられる．これは，界面活性剤が物質に吸着し始めると，界面活性剤の疎水基同士が引き合って吸着が急速に進行する現象である．界面活性剤は，高分子表面にミセル様の集団を形成して結合することがよく知られている（高木ら，1976；

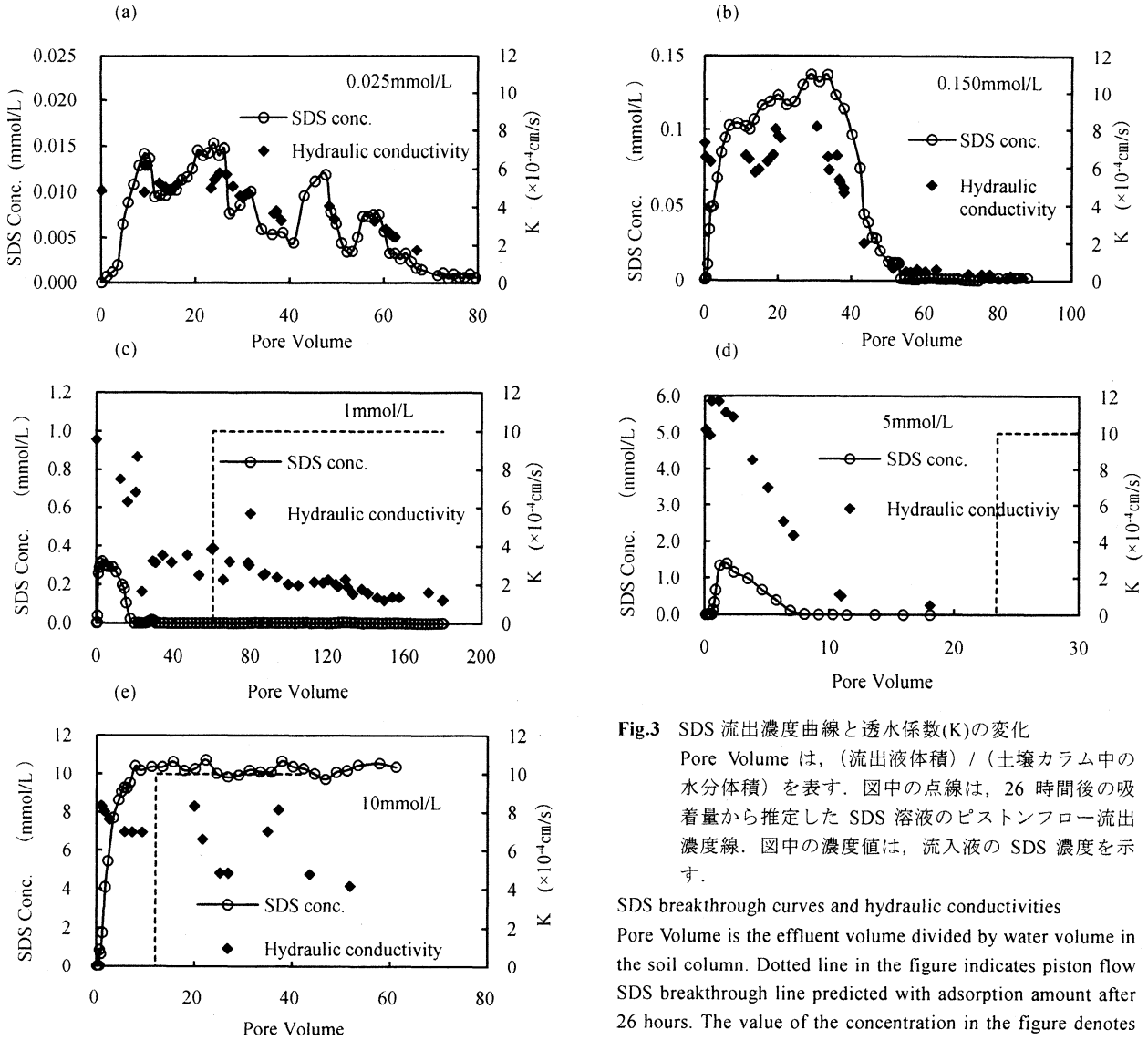

Fig.3 SDS 流出濃度曲線と透水係数(K)の変化
Pore Volume は，（流出液体積）/（土壌カラム中の水分体積）を表す．図中の点線は，26 時間後の吸着量から推定した SDS 溶液のピストンフロー流出濃度線．図中の濃度値は，流入液の SDS 濃度を示す．

SDS breakthrough curves and hydraulic conductivities
Pore Volume is the effluent volume divided by water volume in the soil column. Dotted line in the figure indicates piston flow SDS breakthrough line predicted with adsorption amount after 26 hours. The value of the concentration in the figure denotes the influent SDS concentration.

Shirahama, 1998)．ここでも，界面活性剤は，土壌表面にミセル様の集団を形成していると考えられる．このような集団的な吸着は，一種の相変化現象と捉えることが出来る．これは，吸着量の急激な増大に対応している．相変化による協同吸着においては，理論的に吸着等温線が単調増加でなく，吸着量の増加とともに平衡濃度が再び低下した後また上昇する特異な曲線を示す(大井ら，2000b)場合がある．18 時間振とう後の吸着等温線は，この形を示しており，これは，SDS の吸着が，典型的な相変化の協同吸着挙動を取ることを示唆している．

界面活性剤の疎水基同士が引き合い，集合してミセルを形成し始める CMC（＝8.2 mmol/L）以上では，8 時間後の吸着量は CMC よりも低濃度のそれより小さくなり，18 時間後の吸着量はほぼ横ばい，26 時間後では最も高くなり，CMC 以下の濃度よりも時間的な変動が激しい．これは，ミセルが形成されていると，ミセル表面が負荷電の親水基で覆われるため，同じ負荷電を持つ土壌との間に電気的反発力が働き，初期の時間において吸着が妨げられたためと考えられる．最終的には，ミセルが形成されていても，高濃度において吸着が進行し，CMC 近傍で最大の吸着量となっている．全般的に，時間とともに SDS 吸着量が増加して行ったのは，吸着初期に静電反発力が吸着を妨げ，直鎖状の疎水基が時間とともに土壌腐植の疎水基部分へ吸着し，最も安定な配置へ移行しつつ，溶液中の界面活性剤が，吸着している界面活性剤に協同吸着して行ったためと考えられる．

3.2 SDS 溶液浸透実験

3.2.1 流出濃度曲線

Fig.3 に，SDS 溶液浸透実験の結果を示す．SDS の流出濃度曲線は，CMC（=8.2 mmol/L）以上の流入液濃度とそれ以下の流入液濃度で，全く異なる結果となっている．CMC 以下の濃度の流出濃度曲線は，流出初期に濃度のピークがあり，その後濃度低下しほとんど流出しなくなった（**Fig.3**(a)～(d)）．一方，CMC より高濃度の 10 mmol/L SDS 溶液を浸透させた場合，早期に濃度上昇し，その後は流出液濃度が流入液濃度と同じになった（**Fig.3**(e)）．

吸着量の流出濃度曲線に及ぼす影響を明らかにするた

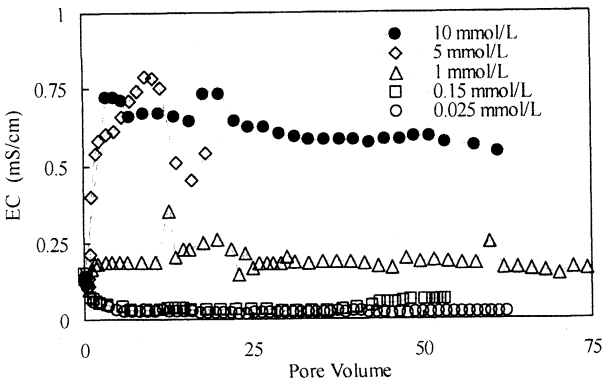

Fig.4 溶液浸透実験における流出液の電気伝導度（EC）
各流入溶液の濃度と EC の関係は，SDS 溶液 0.025 mmol/L = 0.003 mS/cm, 0.15 mmol/L = 0.012mS/cm, 1 mmol/L = 0.072mS/cm, 5 mmol/L = 0.33 mS/cm, 10 mmol/L = 0.59mS/cm, NaCl 溶液 1 mmol/L = 0.126mS/cm.
Effluent electric conductivity (EC) during breakthrough experiment

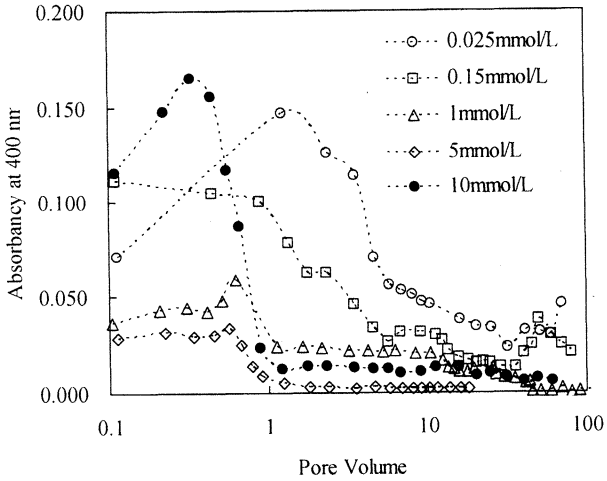

Fig.5 溶液浸透実験における流出液の 400nm 吸光度
Effluent absorbancy at 400 nm during breakthrough experiment

め，最も単純な次の条件を考えることとする．土壌カラムに浸透した SDS が，移動先端の前後で濃度が 0 から流入液濃度までステップ状の濃度分布を維持して吸着相と溶液相の SDS が平衡しつつ移動すると仮定した場合，SDS が土壌カラム中から流出し始めるのに要する流出液量 J（pore volume）は，次式で求められる．

$$J = \frac{qm}{CV} + 1 \tag{1}$$

ここで，q は SDS 吸着量（mmol/kg），m は土壌カラムの乾土質量（kg），C は流入液の SDS 濃度（mmol/L），V は土壌カラムの水分体積（L）である．吸着実験で得た 26 時間振とう後の吸着量を用いて計算した SDS 流出液量 J は，0.025 mmol/LSDS 溶液で 2230 pore volume，0.15 mmol/L SDS 溶液で 396 pore volume，1 mmol/L SDS 溶液で 60.5 pore volume，5 mmol/L SDS 溶液で 23.4 pore volume, 10 mmol/L SDS 溶液で 12.1 pore volume であった．これらの流出液量を超えるまで溶液浸透実験を行ったのは，1 mmol/L SDS 溶液と 10 mmol/L SDS 溶液の 2 条件だけであった．(1)式から予測した流出濃度線を **Fig.3** に点線で示す．

CMC 以下の流入溶液濃度では，流出濃度曲線は，SDS 溶液の流入溶液濃度が高くなるほど，初期流出のピーク相対濃度（流出液濃度÷流入液濃度）とその幅が小さくなり，ピーク位置が左側に移動して SDS の流出が流出初期のわずかな間のみになっている．これは，初期に吸着した SDS に，溶液中の SDS が協同吸着し，吸着が急激に進行したためと考えられる．SDS 吸着実験で明らかになったように，ある程度濃度が高くなると，SDS 同士が引力を及ぼし合い，吸着が急速に進行したと考えられる．初期の流出は，SDS がアニオン性で，土壌の負荷電と反発するため，吸着の進行が遅れた結果であろう．その後，流入液の浸透に伴い濃度が上昇し，協同吸着現象により SDS が流出しなくなったと考えられる．この変化は，SDS 吸着等温線の時間変化に対応している．

同じアニオン性の硝酸イオンの場合，流出濃度曲線は全く異なる結果となることが，Ishiguro et al. (2003)により報告されている．用いた黒ボク土は，負荷電を持ち正荷電を持たないため，硝酸イオンを吸着しない．その流出濃度曲線は，アニオン排除効果により 1 pore volume より若干早く流出し，流出液濃度が流入液濃度の値に達するまで単調増加し，その後一定値となる．一方，CMC 以下の流入液の SDS 流出濃度曲線は，初期のピークを持った流出は認められるが，硝酸イオンのように明瞭なアニオン排除効果による早期の流出は認められず，疎水性相互作用による吸着の影響と考えられる流出抑制効果が大きいことが特徴である．

1 mmol/L SDS 溶液の浸透実験における，終了時の積算溶液流出量は，180 pore volume と大量であったが，流出液中の SDS 濃度は 0 mmol/L であった．26 時間後の吸着量から推定すると，60.5 pore volume 前後で SDS が流出することになるが，SDS の流出は認められなかった（**Fig.3**(c)）．実験開始から終了まで 30 日経過しており，SDS の分解反応がその間に起こっていると考えられる．

一方，臨界ミセル濃度（CMC）より高濃度の 10 mmol/L SDS 溶液を浸透させた場合，硝酸イオンの場合のような強いアニオン排除効果は起こっていないが，吸着による遅延を伴いつつも早期に濃度上昇した（**Fig.3**(e)）．26 時間後の吸着量から推定すると，12 pore volume 前後で流出が始まることになるが，0.7 pore volume から既に流出が始まり，約 7 pore volume で流出液濃度は流入液濃度と同じになった．これは，ミセルの形成により吸着がかなりの程度抑制されたためと考えられる．先述のように，ミセルは外側に負荷電を向けており，負荷電表面を持つ土壌から電気的反発力を受けるため，吸着しにくく土壌間隙中を流れやすいと考えられる．CMC 以上の濃度において，吸着量は初期の 8 時間で小さく，時間の経過とと

もに徐々に増大した吸着実験結果（**Fig.2**）からも，そのことが示唆される．ただし，吸着実験は，土壌試料よりも多量の溶液を加えた状態で土壌構造を崩して振とうさせているため，溶液浸透実験よりも吸着が起こりやすい条件になっていると考えられる．流出濃度曲線は，ミセル形成によるイオン排除効果を良く表している．

3.2.2 透水係数と電気伝導度・流出土壌コロイドの変化

溶液浸透実験における飽和透水係数の変化を流出濃度曲線の図 **Fig.3** に載せた．CMC 以下の濃度の流入液の場合，透水係数が流出濃度曲線の濃度低下に対応して低下していることがわかる．これは，アニオン界面活性剤が土壌に吸着して土壌の負荷電が増加し，土壌が分散・膨潤しやすい条件になったために透水係数が低下したのではないかと考えられる．CMC 以上の 10 mmol/L 溶液の場合，流出濃度曲線の濃度は上昇した後低下しておらず，透水係数も他で見られたような大きな低下は認められない．

Fig.4 に，溶液浸透実験における流出液の電気伝導度の変化を示す．10 mmol/L 溶液の場合，ほぼ SDS 濃度の上昇に伴い電気伝導度も上昇している．5 mmol/L 溶液の場合も類似であるが，SDS 濃度が完全に低くなった後もある程度高い値を維持している．それらより低い濃度の場合も，初期に土壌カラムに存在する 1 mmol/L NaCl 溶液と SDS 浸透溶液との交換に伴う電気伝導度の変化が認められるが，その後の SDS 濃度低下後においても電気伝導度はほとんど低下していない．この結果から，界面活性剤以外のイオンが流出していることがわかる．分散・膨潤は，一般に濃度が低い条件で生じやすい．しかし，イオン濃度に対応する電気伝導度の低い順に透水係数が低くなってはおらず，5 mmol/L の溶液条件においても透水係数の低下が生じており，この条件においても十分に分散・膨潤効果が生じているものと考えられる．透水係数低下の最も大きな原因は，界面活性剤吸着に伴う負荷電の増加と推測されるが，今後の検討を要する．

Fig.5 に流出液中の腐植酸等土壌コロイド物質の相対濃度に対応する 400 nm 吸光度の溶液浸透実験における変化を示す．土壌コロイドは，間隙の目詰まりを起こして透水係数を低下させる場合があるが，透水係数の変化と 400 nm 吸光度は対応していない．SDS の流出濃度変化とも明瞭な対応は認められない．CMC 以下の流入溶液濃度においては，濃度が低くなるほど初期の 400 nm 吸光度が高くなる傾向にある．これは，イオン濃度が低い方が土壌コロイドが分散して流出しやすくなったためと考えられる．一方，CMC 以上の 10 mmol/L 溶液の場合，400 nm 吸光度が初期に最も高い値を示している．ミセルが土壌コロイドの洗い流しに寄与したものと思われる．しかし，1 pore volume 以降は 400 nm 吸光度は低い値で推移している．電気伝導度も上昇していることから，イオン濃度上昇に伴って土壌コロイドが分散しにくくなり，流出濃度が低下したものと考えられる．

4. 結論

腐植を多量に含み，正荷電が無く負荷電を有する黒ボク土を用いて，直鎖状疎水基を持つアニオン界面活性剤 SDS の土壌中における吸着移動現象を実験的に明らかにした．吸着実験を行い，次の結果を得た．

1. 腐植を分解した土壌試料には，SDS の吸着が認められなかった．SDS は，土壌に疎水性相互作用で吸着していると考えられる．
2. 吸着等温線は，時間とともに吸着量が増大した．
3. 協同的吸着現象に特有の濃度上昇に伴う急激な吸着量の増大が認められた．
4. 吸着量の時間変化は，初期の静電反発力による吸着の抑制と，その後の協同的吸着の進行に起因すると考えられる．

SDS 溶液浸透実験を行い，次の結果を得た．

1. CMC 以下の流入溶液では，SDS 流出濃度曲線は初期にピークを持ち，その後 SDS が流出しなくなった．濃度が高くなるに従ってピークが早くなり，ピークの相対濃度（流出液濃度÷流入液濃度）は低くなった．
2. 初期の流出は SDS と土壌表面の間で働く静電反発力によって吸着が抑制されたためと考えられる．その後吸着が始まると協同的現象により，吸着している SDS の近傍に速やかに吸着し，SDS 流出が抑制されたと考えられる．
3. CMC 以上の流入溶液では，流出濃度曲線は初期に濃度上昇し，そのまま流入液濃度と同じ濃度に達して一定濃度で推移した．界面活性剤がミセルを形成し，負荷電で覆われるため，アニオン排除効果により吸着が抑制され早期に流出したと考えられる．
4. CMC 以下の流入溶液においては，SDS 溶液の浸透に伴う透水係数の低下が認められ，それは流出濃度曲線の濃度低下に対応した．一方，CMC 以上の流入溶液においては，顕著な透水係数の低下は認められなかった．
5. 流出液中の土壌コロイドは，CMC 以下の流入溶液では濃度が低いほど初期に流出が多い傾向を示した．これは，イオン濃度が低く土壌コロイドが分散し易いためと考えられる．CMC 以上の流入溶液は，初期の流出土壌コロイド量が最も多くなった．これは，界面活性剤ミセルによる洗浄効果のためと考えられる．

アニオン界面活性剤は，腐植酸と結合しないと報告されている（Koopal et al., 2004）が，本研究では，アニオン界面活性剤が土壌腐植に吸着することを明らかにした．

腐植に富む黒ボク土は，多量の SDS を吸着保持し，長期間においては生分解反応も生じるため，SDS と類似の直鎖状界面活性剤を含む水を，黒ボク土層で浄化することが可能である．また，有機物質で汚染された土壌の浄化に際しては，CMC 以上の溶液で洗浄すれば，吸着による SDS 移動の遅延は大きくなく，また透水係数も急低下

しないため，迅速に洗浄処理できることがわかった．

謝辞：界面活性剤イオン選択電極法に関して，白浜啓四郎佐賀大学名誉教授より貴重なご指導をいただいた．界面活性剤イオン選択膜作成に必要な材料 Elvaroy 742 をデュポン（株）から提供いただいた．本研究は，ウエスコ学術振興財団の研究助成を受けて行った．ここに謝意を表します．

引用文献

Arai, H., Murata, M. and Shinoda, K. (1971) : The interaction between polymer and surfactant: The composition of the complex between polyvinylpyrrolidone and sodium alkyl sulfate as revealed by surface tension, dialysis, and solubilization, *J. Colloid Interface Sci.*, **37**, 223-227.

Fukui, H., Kaminaga, A., Maeda, T. and Hayakawa, K. (2003) : Preparation of surfactant anion-selective electrodes with different selectivity coefficients and a trial to determine each component in binary surfactant mixtures, *Analytica Chimica Acta*, **481**, 221-228

早川勝光，Kwak, J. C. T. (1985)：協同結合—高分子電解質によるイオン性界面活性剤の結合，表面，**23**(3), 169-186.

Ishiguro, M., Manabe, Y., Seo, S. and Akae, T. (2003) : Nitrate transport in volcanic ash soil of A and B horizons affected by sulfate, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**, 249-254.

石黒宗秀（2003）：界面活性剤とその作用，足立泰久，岩田進午編，土のコロイド現象，学会出版センター，384-399.

石黒宗秀，藤井知和（2004）：有機及び無機土壌・多孔質体中への毛管上昇浸潤と高濃度アニオン界面活性剤溶液の作用，農土論集，**230**, 85-90.

石黒宗秀（2005a）：環境における界面活性現象と環境保全への応用技術，本多健一編，表面・界面工学大系下巻，248-251.

石黒宗秀，藤井知和，赤江剛夫（2005b）：土・多孔質体中の毛管上昇浸潤に及ぼすアニオン界面活性剤溶液濃度の影響，農土論集，**236**, 53-59.

Ishiguro, M., Tan, W. and Koopal, L. K. (2007) : Binding of cationic surfactants to humic substances, *Colloids Surfs. A* **306**, 29-39.

Ishiguro, M. and Fujii, T. (2008) : Upward infiltration into porous media as affected by wettability and anionic surfactants, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **72**(3), 741-749.

Koopal, L.K., Goloub, T.P., de Keizer, A. and Sidorova, M.P. (1999) : The effect of cationic surfactants on wetting, colloid stability and flotation of silica, *Colloids Surf. A*. **151**, 15-25.

Koopal, L.K., Goloub, T.P., Davis T.A. (2004) : Binding of ionic surfactants to purified humic acid, *J. Colloid Interface Sci.*, **275**, 360-367.

Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, B.F. (2001) : Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil; a review, *Engineering Geology*, **60**, 371-380.

日本消費者連盟（1991）：合成洗剤の話，三一書房.

荻野圭三（1998）：表面の世界，裳華房，p. 88.

大井節男，足立泰久，原口暢朗，ルーク・コパル（2000a）：土のコロイド現象の基礎と応用（その 17）吸着現象の物理的基礎，農土誌，**68**(4), 351-361.

大井節男，足立泰久，原口暢朗，ルーク・コパル（2000b）：土のコロイド現象の基礎と応用（その 18）吸着理論の発展，農土誌，**68**(5), 479-486.

大井節男（2003）：吸着現象の基礎理論，足立泰久，岩田進午編，土のコロイド現象，学会出版センター，323-360.

Reddy, K.R. and Ala, P.R. (2006): Electrokinetic remediation of contaminated dredged sediment, *J. ASTM International*, **3**(6), 254-269.

Satake, I. and Yang, J. T. (1976): Interaction of sodium decyl sulfate with poly(L-ornithine) and poly(L-lysine) in aqueous solution, *Biopolymers*, **15**, 2263-2275.

Shirahama, K., Yuasa, H. And Sugimoto, S. (1981) : Binding of sodium decyl sulphate to a cationic polymer, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **54**, 375-377.

Shirahama, K. (1998) : *Polymer-surfactant systems*; Kwak, J. C. T., Ed.; Marcel Dekker: New York,; Surfactant Science Series Vol. 77, p 143-191.

高木俊夫，白浜啓四郎，辻井　薫，久保兼信（1976）：SDS-蛋白質ポリペプチド複合体—SDS-ポリアクリルアミドゲル電気泳動法と関連して—，蛋白質　核酸　酵素，**21**(10), 811-829.

Yee, M.M., Miyajima, T. and Takisawa, N. (2006a) : Evaluation of amphiphilic properties of fulvic acid and humic acid by alkylpyridinium binding study, *Colloids Surfs. A*, **272**, 182-188.

Yee, M.M., Kodama, H., Miyajima, T. and Takisawa, N. (2006b) : On the dodecylpiridinium binding to humic acids and fulvic acids from different origins, *Humic Substances Research*, **2**, 27-34.

米林甲陽（1989）：腐植物質研究法Ⅱ，ペドロジスト，**33**(1), 37-48.

〔2008．5．12.受稿，2008．10．6.閲読了〕
〔この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内，農業農村工学会論文集編集委員会あて)は，2009年6月24日まで受付けます．〕

Linear Anionic Surfactant (SDS) Transport in High Humic Volcanic Ash Soil and its Permeability

ISHIGURO Munehide*, TORIGOE Takahiro**, KAMEOKA Yoshihumi*** and AKAE Takeo*

* *Graduate School of Environmental Science, Okayama University*, 3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530, JAPAN

** *Torigoe Farm*, Itidashumaruchyo, Kurume 839-1213, JAPAN

*** *Hukue Meteorological Station*, Kibacho, Goto 853-0033, JAPAN

Abstract

An anionic surfactant is used in detergents. It has also been tested as a cleaner for soils contaminated with hazardous organic compounds. However, surfactants contaminate aquatic environments because they can destroy cell membranes. Surfactant movements and reactions in soils are not well understood. In this study, we performed surfactant transport and adsorption experiments in soil in order to clarify these phenomena. A linear anionic surfactant, sodium dodecyl sulfate (SDS), and a highly humic volcanic ash soil were used. SDS transport and adsorption showed characteristic phenomena, with the results indicating that SDS is adsorbed cooperatively by the humic substances in the soil. These results were completely different from those for simple anions such as nitrate and chloride. Under a critical micelle concentration, the decrease in the SDS breakthrough curve coincided with the decrease in hydraulic conductivity, demonstrating that SDS adsorption generates a decrease in hydraulic conductivity.

Key words : *Anionic surfactant, High-humic soil, Adsorption, Solute transport, Linear carbon chain, Cooperative phenomenon, Hydraulic conductivity*

農業農村工学会論文集　第258号　内容紹介

（研究論文）

水路側岸に水没した植生群を有する開水路流れの一次元解析モデル

安瀬地一作・木ノ瀬紘一・島田　正志・田中　忠次

側岸部に繁茂した植生群が洪水などで水没した場合の一次元解析モデルを構築した．水没した植生群の影響をManning粗度係数として表すことで三次元的な流れを二次元流と見なし，その上で各領域におけるエネルギーのつりあい式を考えることで，各領域平均流速の関数として断面平均エネルギー損失をモデル化した．各領域平均流速は領域間流速比と連続条件により算出した．一次元水面形計算にはエネルギー保存則による逐次水面追跡法を用い，エネルギー損失に新たなモデルを組み込んだ．得られた解析結果を水理実験および従来のモデルとの比較検討を行った結果，従来のモデルに比べて精度よく実測値を再現できることを確認した．

キーワード　植生群を有する流れ，一次元解析，エネルギー損失，Manning粗度係数

（農業農村工学会論文集　258，1～6）

（研究論文）

拡張ベイズ法を用いたニューラルネットワークの学習アルゴリズム
－地盤工学的な問題に基づく検証－

小林　範之・吉武　美孝・武田　圭介・前川　恵子

ニューラルネットワーク（ANN）における学習法の最も代表的な手法は誤差逆伝播法であるが，学習データごとに算出される教師信号と出力層からの出力信号の差である誤差関数を逐次最小化するため，極値付近での学習の非効率化や振動といった問題が発生することがある．本研究では，すべての学習データに対する誤差関数を一括して最小化することを目的に，拡張ベイズ法によるANNの一括学習アルゴリズムを提案した．また，学習および一般化能力に大きく影響する中間層ユニット数L_mを決定するため，赤池ベイズ情報量基準ABICを用いた拡張ベイズ法の調整パラメータλ^2とL_mの同時最適化手法を提案した．

キーワード　ニューラルネットワーク，拡張ベイズ法，学習アルゴリズム，赤池ベイズ情報量基準

（農業農村工学会論文集　258，15～21）

（研究報文）

赤土流出防止のための沈砂池の排水と堆積土自然乾燥技術

藤森　新作・原口　暢朗・塩野　隆弘・若杉　晃介・中　達雄

沖縄県で顕在化している赤土の流出対策として，沈砂池で堆積管理されている赤土の再流出を防止するための堆積土の循環再利用技術の開発が必要である．本報では，沖縄本島の試験地を対象に，循環再利用の前提となる沈砂池の強制排水方法ならびに堆積土の乾燥条件について，現地試験および計算により検討した．沈砂池内の暗渠を経由した排水試験では，地区外へ高濃度の濁水を流出することなく排水が可能であった．また，再利用を考慮すると，日蒸発量が3～7mmのときの排水後の堆積深10cmまでの層の乾燥期間は，2.5～6日と試算された．さらに，堆積土の排水・乾燥時期は気象条件および作業環境等を考慮すれば，10～11月の期間が好適と考えられた．

キーワード　赤土流出，暗渠排水，畑地，堆積土乾燥，浸透性沈砂池

（農業農村工学会論文集　258，29～36）

（研究論文）

直鎖状アニオン界面活性剤（SDS）の黒ボク土中における移動とそれに伴う透水性変化

石黒　宗秀・鳥越　崇宏・亀岡　喜史・赤江　剛夫

洗剤の主成分として用いられるアニオン界面活性剤は，汚染土壌の洗浄剤としても利用が検討される反面，環境汚染物質としても注視されている．しかし，土壌中におけるその挙動は解明されていない．ここでは，腐植物質を多量に含む黒ボク土中における直鎖状アニオン界面活性剤ドデシル硫酸ナトリウム（SDS）の吸着移動現象を明らかにするため，溶質移動実験と吸着実験を行った．それらの結果は，単純なイオンの吸着移動とは異なる特徴的な現象を示し，SDSが黒ボク土の腐植成分に協同吸着することを示唆した．臨界ミセル濃度以下において，SDSの流出濃度曲線の濃度と透水係数の低下がほぼ一致し，SDS吸着が透水性低下に影響することがわかった．

キーワード　アニオン界面活性剤，黒ボク土，吸着，溶質移動，直鎖状炭素鎖，協同現象，透水係数

（農業農村工学会論文集　258，7～13）

（研究論文）

摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法

中矢　哲郎・渡嘉敷　勝・森　充広・森　丈久

摩耗により骨材の露出したコンクリートを模擬した水路の粗度係数を水理模型実験により測定し，表層の凹凸形状から粗度係数を推定できる表面粗さパラメータを算定した．水理模型実験の結果，粗度係数nは0.013であり，コンクリート水路の設計基準値以内となった．模擬摩耗コンクリートの表層形状を，凹凸の高さ分布の偏りを示すスキューネスにより特徴付けた．マニングの粗度係数と表面粗さを関係付けるための模擬摩耗コンクリート水路の相当粗度k_sは，算術平均粗さR_aが0.5mm（±0.12mm），凹凸の最大高さR_zが4mm（±1.43mm）の範囲では，$k_s=2\times R_a$，または$k_s=0.26\times R_z$で表せることを示した．

キーワード　摩耗，コンクリート水路，マニング式，粗度係数，相当粗度，粗さ曲線，粗さパラメータ

（農業農村工学会論文集　258，23～28）

（研究報文）

屋上緑化の灌漑計画における植物を含めた有効水分量の評価

田中　　聡・山本　太平・森谷　慈宙・井上　光弘

本研究では人工気象室内で，生育に適正な温度および高温条件下におけるセダム（常緑キリンソウ）の蒸散量を測定し，植物体内水分量を含めた新しい有効水分量について検討を行った．その結果，以下のことが明らかとなった．①蒸散比は，適正温度では高温条件下よりも高く，両温度条件下でも暗期における蒸散活動が認められた．②積算日蒸散比と時間との関係は，2次および対数関数で近似することができた．③土壌中の水分はpF4.2以上でも蒸散活動があり，葉内水分が寄与されるものと考えられた．④植物体内水分を考慮した総有効水分量は，従来の成長有効水分量よりも1.5～2.4倍多く，有効雨量の増加および補給灌漑水量の節約が可能となった．

キーワード　セダム（常緑キリンソウ），有効水分量，人工土壌，蒸散比，葉内水分

（農業農村工学会論文集　258，37～44）