



古典を読む

L.E. Allison 著

「長期浸透における微生物が土壌の透水性に及ぼす影響」

関 勝寿¹

Reviewing classical studies in soil physics

“Effect of microorganisms on permeability of soil under prolonged submergence”

by L.E. Allison, *Soil Sci.*, 63(6): 439–450 (1947).

Katsutoshi SEKI¹

1. はじめに

土に長期間連続的に水が浸透すると透水性が著しく低下する。その原因として、土壌微生物が重要な働きをしていることを突き止めたのが、本稿で紹介する Allison の論文 (Allison, 1947) である。すなわち、土壌微生物とその代謝生成物質が土壌の間隙を目詰まりするクロッキング現象、あるいはバイオクロッキング現象と呼ばれる現象の初期の研究である。

まずは、Allison が書いている当時の研究の背景について説明する。カリフォルニアのサンホアキン平野において、灌漑のために地下水をくみ上げるため地下水位が低下するという問題が生じていた。そこで川の流量が多い時に透水性の高い土壌に散水して地下水涵養をするというプロジェクトが立ち上がった。そのために試験池で散水実験をしたところ、透水性は最初は急激に次第にゆっくりと低下して、やがて事実上まったく浸透しなくなってしまい、散水の効果がなくなってしまうという問題が明らかになった。そこでその透水性低下の原因を調べるために、研究プロジェクトが開始された。Allison の論文は、透水性が著しく低下をする原因が微生物の活動であることを突き止めたものである。

その後も米国において、下水処理水を散水して土壌の水質浄化能力によって水質を浄化させるプロジェクトが実施されている。その時に、過剰に散水すると土壌間隙が目詰まりして浄化能力が低下することがあると de Vries (1972) が報告している。

日本においても、集中豪雨時の水害を軽減し、地下水位の低下を抑制して地盤沈下を防止し、良好な水循環を

維持するために、地下水涵養の取り組みがなされている。地下水涵養対策としての降雨の地下浸透（人工涵養）の手法には、井戸から直接帯水層に注入する方法、人工涵養池や地下浸透ダムを設置する方法、休耕田や非灌漑期の水田を湛水する方法（嶋田, 2012）、雨水浸透ますや雨水浸透管（浸透トレンチ）のような雨水浸透施設を設置する方法（Seki et al., 2004）、透水性舗装を利用する方法がある（東京地下水研究会, 2003）。いずれの方法でも、長期間連続的に浸透させるとバイオクロッキングにより透水性が低下して涵養能力が低下するため、注意が必要である。

このような長期間の浸透による透水性の低下は、地下水涵養以外にも、畜産排水の貯留池（Davis et al., 1973）、水田（Talsma and van der Lelij, 1976）、浄化槽の砂濾過装置（Kristiansen, 1981）、井戸（van Beek and van der Kooij, 1982）、灌漑水路の浸透抑制技術（Ragusa et al., 1994）、廃棄物処分場における遮水物質として用いられるクレイライナー（Kamon et al., 2002）などで報告されている。石油回収の技術で、微生物によって透水性の小さい部位を作るために使われることもある（Lappin-Scott et al., 1988; Yen, 1989）。Seki et al. (2006) は、地下水汚染の浄化手法の 1 つである透過反応壁において、微生物活動を活性化させるために栄養源を注入する注入井の近辺でバイオクロッキング現象が起きると、不均一流が発生することによる滞留時間の減少が起きる可能性があることを、室内モデル実験で示した。

このように、バイオクロッキング現象は今日までに様々な現場で観察されているが、微生物の影響をはじめて明確に示したのが Allison の論文である。

Allison は、イリノイ州農業試験所の研究助手からパデュー大学のアシスタントプロフェッサーを経て米国農務省塩類研究所の准土壌技師としてこの論文を執筆している。地下水涵養の実験プロジェクトは、塩類研究所の

¹Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan. Corresponding author: 関 勝寿, 東洋大学自然科学研究室, 2015 年 8 月 13 日受稿 2015 年 10 月 15 日受理

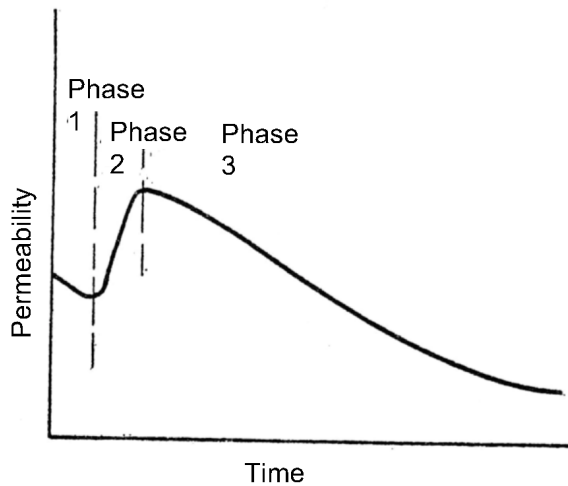


Fig. 1 長期浸水における土壌の透水性変化。
Change in permeability of soils during long submergence.
(Allison, 1947, Fig. 1)

Christiansen (灌漑排水工学・土壌物理学者) と Martin (微生物学者) が初期の実験を開始し、途中から Allison が研究に参画したようである。当時の塩類研究所の土壌物理分野は、Richards が中心となり塩類土壌、ソーダ質土壌の改良に関する研究が実施されていた。塩類研究所が 1947 年にまとめた塩類土壌とソーダ質土壌の改良に関する本 (Richards et al., 1947) は、Allison も著者の 1 人となっていて、透水性に影響を与える要因には、分散、塩基の状態、封入空気、そして微生物による目詰まりがあると書かれている。当時の塩類研究所、そして土壌物理学の研究分野では、ナトリウム化に伴う透水性の低下について精力的に研究が進められ、上記の本は 1954 年に改訂版が出版された。そのような研究の流れの中で、透水性低下には物理的要因だけではなく微生物が影響していることを実証した Allison の研究は、土壌物理の分野に新しい視点を与えた貴重な研究成果である。

本稿では、バイオクロッキング研究の古典である Allison の論文を読み、どのようにして微生物の活動がその原因であるかが突き止められたかを解説した上で、バイオクロッキングのメカニズムをより詳細に解明するための今日までの研究の発展について、著者自身の研究成果とともに紹介する。

2. 透水性の 3 段階変化

Allison の研究は、土に長期間浸透させた時に透水性変化の 3 段階 (S 字型曲線) があることを示したことで有名である。そこで、まずはその箇所について読み進める。実はこの箇所はこの論文の新たな実験結果ではなく、「はじめに」で紹介した研究プロジェクトの一環として、塩類研究所で Allison とともに研究をしていた Christiansen の論文 (Christiansen, 1944; Christiansen, 1947) を Allison が引用したものであり、この論文の中では序論としての位置付けである。しかしながら、その

透水性変化の S 字型曲線の図 (Fig. 1) と 3 段階変化の解説が秀逸なので、その後の研究でも、Allison の論文が透水性の 3 段階変化を示したものとして特筆して引用されることとなる (Baveye et al., 1998)。この図は、Christiansen らの 43 個の不攪乱土壌試料を長期間浸水したときの透水性変化の測定から、全体的な傾向を示したものである。ここでは Allison の説明をそのまま翻訳する (引用文献は省略)。

第 1 段階：現場あるいは実験室で実験を開始すると、透水性は極小値に向かって低下する。透水性が高い土壌ではこの初期の透水性低下は少ないかまったく存在しないが、比較的透水性が低い土壌では透水性の低下が認められ、10 日から 20 日程度継続してから第 2 段階の透水性上昇が見られる。この透水性の低下は、乾燥した土壌が濡れることによる膨潤と分散、そして土壌溶液中の電解質濃度が低下することによる分散によって生じる構造変化がおそらく原因であろう。

第 2 段階：土壌が表面から下へ浸潤すると、間隙にかなりの量の空気が封入される。封入空気が浸透水中に溶解して除去されるにつれて透水性は次第に上昇し、すべての、あるいはほとんどすべての封入空気が除去された時に最大となる。透水性の極小値は 2 つの相反する現象の結果であろう。すなわち、第 1 段階に示したような浸透開始から透水性を低下させる要因、透水性を増加させる封入空気の除去による要因である。

第 3 段階：透水性が最大値に到達してから透水性は時間とともに低下する。透水性は最初はやや速く低下し、その後はもっとゆっくり低下を続け、2 週間から 4 週間後には、通常、低下速度は初期の値と比べてかなり小さくなる。室内実験ではしばしば最大の透水性は封入空気が完全に除去される前に観察されてきた。このことは、透水性の最大値がやはり 2 つの相反する現象の結果であること示唆している。第 3 段階におけるゆっくりとした透水性の低下は、次の要因が考えられる。

1. 長期浸水によるゆっくりとした団粒の物理的な分散。
2. 微生物の細胞とスライム (粘性物質) あるいは多糖類のような代謝生成物質による土壌間隙の微生物的目詰まり (biological clogging)。
3. 微生物が土壌を団粒に結びつける有機物を攻撃することによる分散。
4. 以上の要因の重ね合わせ。(翻訳はここまで)

その後のバイオクロッキングの研究ではこの 3 段階変化が明確に観察されていることは少なく、Okubo and Matsumoto (1979), Okubo and Matsumoto (1983), Seki et al. (1998) がその数少ない例である。これはバイオクロッキングの実験をする時の様々な条件が異なるためである。第 2 段階の空気溶解過程は、初期条件で封入空気が少ない状態では観察されにくい。また、封入空気が均一に存在するときに封入空気の総量はカラムの高さに比例するため、単位体積の浸透水中への封入空気の溶解量

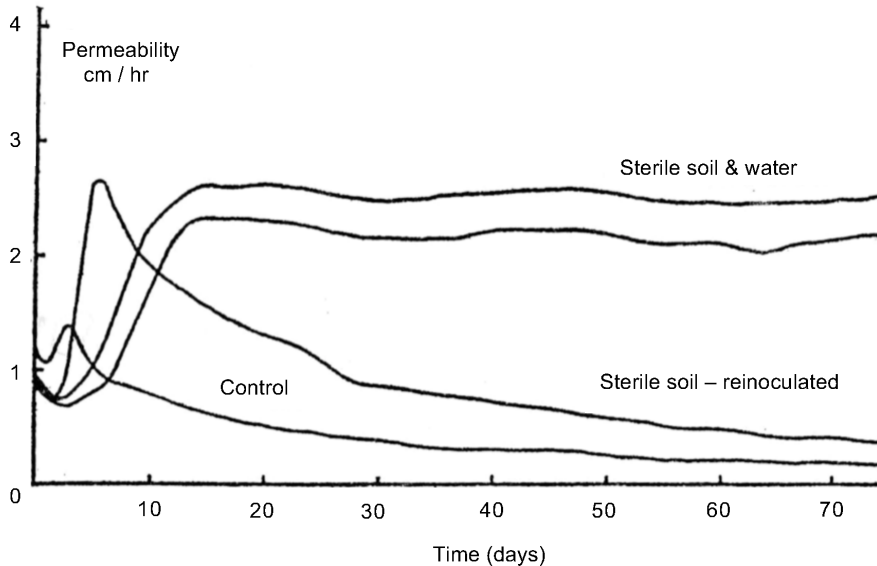


Fig. 2 Hanford loam の長期浸透における透水性の時間変化曲線。
Permeability-time curves for Hanford loam under prolonged submergence. (Allison, 1947, Fig. 5)

が一定であれば封入空気が溶解する速度はカラムの高さに反比例する。したがって、短いカラムを使うとすぐに溶解が終わるため、第1段階が観察されにくい (Seki et al., 1998)。

3. 滅菌条件下での浸透実験

Allison の論文のオリジナルな研究成果は、長期間の浸水による透水性の低下が微生物の活動であることを示した滅菌条件下での浸透実験から、微生物活動による影響を明らかにしたことである。すなわち、透水性変化の第3段階では3つの要因は微生物の活動とは無関係な物理的要因（団粒の分散）と微生物の活動による影響とがあげられている。この中で微生物の活動による影響の寄与を調べるために、Allison は微生物が活動していない滅菌状態での実験をして比較をした。

まずはいくつかの消毒薬（塩化水銀、フェノール、ホルムアルデヒド、トルエン、二硫化炭素、他17種類の物質）を浸透水に溶解して実験をした結果が紹介されている。最も効果があったのはフェノールとホルムアルデヒドであり、かなりの長期間透水性が低下しなかったが、それでも最終的には透水性が低下したため物理的要因による透水性の低下の可能性を完全には否定できなかった。そこでこの論文では、完全なる滅菌状態での透水実験をして、第3段階における透水性の低下が物理的要因によるものなのか微生物の活動によるものなのか、その両方があるのかをはっきりさせようとした。

供試土壌は、Hanford loam と Exeter sandy loam と Hesperia sandy loam の3種類で、それぞれを風乾、2 mm 篩通過後にガラスのチューブに現場の密度で充填し、エチレンオキシドガスによって滅菌した。エチレンオキシドによる滅菌は、通常の蒸気による滅菌と比べて土壌の物理化学特性を変化させないため適しているとしてい

る。水道水には微生物や有機物が含まれているため、蒸留水に水道水の陽イオン構成を模した量の塩化カルシウム、塩化マグネシウム、塩化ナトリウムを加えた水溶液を浸透水に用いた。蒸留水を用いると、土壌溶液中の電解質濃度低下による物理的分散の影響が強くなる可能性がある。浸透水には塩化水銀を 10 ppm 加えて、菌の繁殖を防いだ。滅菌した土壌と浸透水の滅菌状態は培地で培養することで確かめられた。

まずは、実験に使用する器具をすべてオートクレーブで滅菌して無菌操作で接続した。浸透水保管瓶から滅菌用フィルタを通して滅菌水保管容器に水が保管される。ここで、滅菌水保管容器で吸引圧をかけて浸透水保管瓶の水を吸引し、その時に滅菌用フィルタを通して滅菌される。滅菌水保管容器から給水瓶へチューブで水を補給し、浸透実験時には給水瓶からチューブを切り離れた。滅菌水保管容器と給水瓶が外気と接する所には滅菌コットンフィルタを使用して外気中の菌が入らないようにした。給水瓶と滅菌土壌の入った浸透装置は無菌操作で接続した。浸透実験による排水を5回採取し、また実験終了後に土壌を採取して、それぞれに対して培養実験で微生物の存在を確認したところ、すべての実験で微生物は確認されなかった。このように徹底した無菌状態の管理をして、微生物の影響を排除した状態における透水性変化を調べた。

Fig. 2 は Hanford loam における透水性実験の結果である。土壌と浸透水を滅菌した時には、第1段階の透水性の低下と第2段階の透水性の上昇が観察された後、透水性がほとんど変化しなかった。一方、滅菌を全くしていない対照実験と滅菌した土壌に滅菌していない水を浸透した実験では、透水性変化の3段階が観察されている。このことから、第3段階の透水性の低下は微生物の活動がその要因であることが突き止められた。このことが Allison の論文の最も重要な結論である。

Table 1 微生物活動による透水性低下の要因となる目詰まり物質.
Clogging materials related to microbial activity which cause permeability reduction.

物質	備考
微生物細胞	細菌・糸状菌等
代謝生成物質	微生物細胞とともに、バイオフィームやマイクロコロニーを形成
ガス	微生物が生成する窒素・メタン等
鉄の沈殿	微生物活動により土壌中の鉄が還元され、水酸化鉄として沈殿する

ここで滅菌していない水を流した2つの実験を比較すると、自然土壌を使った実験の方が第2段階から第3段階に移行する時の透水性の最大値が小さい。これは自然土壌では微生物の活動が活発であり、実験開始時からすでに微生物活動による透水性の低下は始まっているため、封入空気が完全に除去される前に微生物の効果が封入空気溶解の効果を上まってしまったためだ、と Allison は説明した。他の2つの土壌試料についても定性的には同様の結果が得られた。第2段階の期間が Hanford loam では他の土壌と比べて短いのは、Hanford loam は有機物が豊富で微生物の活動が非常に活発であるためであるとした。

このように、土壌の透水性が著しく低下する原因が微生物の活動であることがこの実験ではっきりと示されたものの、それが微生物のどのような活動であるかという正確なメカニズムは、まだ議論の余地があるとして、微生物の代謝生成物質による目詰まりや、微生物が土壌を団粒に結びつける有機物を攻撃することによる分散の影響などについて Allison は考察している。そして、主要な要因は微生物の活動によって生成された物質による土壌間隙の目詰まりであろうとしている。

4. 微生物による透水性低下に関する その後の研究

このように Allison の論文では、長期間の浸透によって透水性が著しく低下する現象に微生物が影響していることが示された。そこで、微生物の影響とは何かということが次の疑問となる。Allison は、微生物の影響とは、微生物の細胞と微生物が生成した代謝生成物質による間隙の目詰まり（バイオフィーム）であるとした。その後の研究で、Table 1 に示したように間隙を目詰まりさせる物質には微生物が発生するガス等、それ以外の物質があることが分かってきた。

微生物細胞によるバイオフィームについては、Gupta and Swartzendruber (1964) が細菌の細胞数が 1.3×10^6 CFU g^{-1} を越えると透水性が100分の1に低下することを示した。その後も多くの研究者が細菌の細胞数や体積、代謝生成物質と透水性の低下の関係について研究している (Frankenberger et al., 1979; Cunningham et al., 1991; Vandevivere and Baveye, 1992; Seki and Miyazaki, 2001)。

Gupta and Swartzendruber (1964) の石英砂を用いた

実験では、バイオフィームによって透水性が低下してもガスの量は増えていないことを測定で示し、ガスが透水性の低下に与えるという説を否定した。一方、Poulovassilis (1972) はバイオフィームによって透水性が低下した粘土試料に対して真空中でガスを除去すると、透水性が急激に上昇してほぼ元の値に復活することを示した。このことから、透水性の低下は微生物が発生したガスによるものであるとした。

また、鉄の沈殿にも微生物が関与しているため、バイオフィームの1つであるとされている (Baveye et al., 1998)。すなわち、微生物活動によって土壌中の3価鉄が還元されて2価鉄となり、土壌溶液中に溶解する。そのような2価鉄が酸化して3価鉄として沈殿し透水性を低下させる。

このように、微生物活動による影響には Allison が取り上げた微生物の細胞と代謝生成物質によるバイオフィームだけではなく、いくつかの要因が考えられる。Allison が透水性低下の要因を微生物由来のものと微生物に由来しないものに分けて実験をすることで要因を分離することができたように、微生物由来の透水性低下についても複数の要因を実験的に分離して議論できるであろうか。この発想が、次に紹介する著者自身のバイオフィームの研究において、Allison から強く影響を受けているところである。

Seki et al. (1996) は、宮崎ら (1991) の実験結果によってバイオフィームによる透水性の著しい低下が見られた水田の耕盤層を含む層からサンプリングした土壌を、高さ12cmのアクリルカラムに充填して30℃の恒温条件下で栄養水(グルコース50ppm)と殺菌水(アジ化ナトリウム50ppm)による浸透実験をした。そして、カラムの層ごとの透水性変化を測定するとともに、微生物の活動状態を知るために酸化還元電位とグルコース濃度の分布を調べ、実験終了後には希釈平板法によって細菌と糸状菌の数を調べた。殺菌水を流した時には、初期の透水性の上昇後はほぼ透水性が一定であった。一方、栄養水を流した時には流入口であるカラム上部1cmの透水性が Allison が示したように3段階の変化をして、118日間で飽和透水性が100分の1のオーダーに低下した。グルコース濃度はカラム上層1cmで大きく低下し、酸化還元電位は全層でメタンが発生する条件である-150mV以下に低下した。その後、殺菌水に切り替えたところ透水性が上昇した。浸透期間18日間のカラムで実験終了後に土壌の微生物数を希釈平板法によって調べたところ、エッグアルブミン寒天培地で生育する好気

性細菌数は実験開始時と比べて表層では変化せず、下層では 10 分の 1 から 100 分の 1 に低下した。一方、ローズベンガル寒天培地で生育する糸状菌数は下層では変化せず、透水性が低下した上層では 10 倍から 100 倍に増加した。このことから糸状菌の菌糸によるバイオクロッキング現象が起きているとした。

次に, Seki et al. (1998) の実験ではクロッキング物質として細菌, 糸状菌およびメタンガスのそれぞれの寄与を示すことを目的とした。透水性が低下する層は 1 cm 以内であるため, 高さ 1 cm のカラムを使って透水実験をして, カラムの質量を測定することで封入空気の時間変化を測定した。細菌と糸状菌については, 栄養水に細菌の増殖を抑制するクロラムフェニコールと糸状菌の増殖を抑制するシクロヘキシミドを, それぞれ添加した実験をして比較した。その結果, 栄養水のみを使った実験で気相率が浸透開始後 40 日から 100 日にかけて著しく増加し, 30% にまで到達した。このことから, 微生物が発生したガスがクロッキングの原因となっていることがはっきりと確かめられた。一方で, ガスの増加が始まる 40 日以前にもかなり透水性が低下していたこと, 気相率がそれほど上昇しなかったクロラムフェニコールやシクロヘキシミドを添加した実験でも透水性低下が観察されたことから, ガスのバイオクロッキングがなくても透水性は十分に低下することが分かった。なおこの研究では気相率を連続的に測定したため, Allison の第 2 段階における封入空気の溶解過程が気相率の低下にもなる透水係数の低下としてはっきりと測定された。一方, カラムが短いことで封入空気の溶解が急速に進行したため, Allison の第 1 段階である透水性の低下は観察されなかった。また, 細菌の増殖を抑制しても糸状菌の増殖を抑制しても, いずれもバイオクロッキングは同様に進行することから, 細菌, 糸状菌ともにクロッキング物質として働いていることが確かめられた。

このように糸状菌によるバイオクロッキングは重要であるが, 細菌によるバイオクロッキングに着目した研究が多く, 糸状菌のバイオクロッキングについては著者の研究 (Seki et al., 1996; 1998; 2002; 関ら, 2005) 以外では見当たらない。

5. おわりに

バイオクロッキング現象の解明には土壌物理学と微生物学が必要である。Allison の研究は, 土壌物理学者である Allison と Christiansen と微生物学者である Martin との共同研究として始まった。異なる専門分野の専門家が協力して 1 つの事象を解明した好例である。1947 年に発表された Allison の論文で, 長期間連続浸透による透水性の低下が微生物の影響であることが解明され, その詳細なメカニズムについてはその後の研究によって次第に明らかにされてきた。現在でも, たとえば糸状菌によるバイオクロッキングのメカニズムについては研究例が少なく十分に分かっているとは言えない。より詳細に解

明するためには, Allison の研究がそうであったように, 土壌物理学者と微生物学者の有機的な連携が必要とされよう。また, バイオクロッキングの研究に限らず, 土壌圏の物質循環を解明するためには土壌物理学の知見と微生物学の知見が必要とされ, 分野間の連携は今日ますます重要性を増している。そのような分野間の連携が実施されていたという点において, Allison の研究は 1940 年代当時としては非常に先進的であったと言える。

謝辞

取出伸夫博士と匿名の読者から貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Allison, L.E. (1947): Effect of microorganisms on permeability of soil under prolonged submergence. *Soil Sci.*, 63: 439–450.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B.L., DeLeo, P.C. and de Lozada, D.S. (1998): Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Crit. Rev. Env. Sci. Tech.*, 28: 123–191.
- Christiansen, J.E. (1944): Effect of entrapped air on the permeability of soils. *Soil Sci.*, 58: 355–365.
- Christiansen, J.E. (1947): Some permeability characteristics of saline and alkali soils. *Agr. Engin.*, 28: 147–150.
- Cunningham, A.B., Characklis, W.G., Abedeen, F. and Crawford, D. (1991): Influence of biofilm accumulation on porous media hydrodynamics. *Environ. Sci. Technol.*, 25: 1305–1311.
- Davis, S., Fairbank, W. and Weisheit, H. (1973): Dairy waste ponds effectively self-sealing. *Trans. ASAE*, 16(1): 69–71.
- de Vries, J. (1972): Soil filtration of wastewater effluent and the mechanism of pore clogging. *J. Water Poll. Cont. Fed.*, 44(4): 565–573.
- Frankenberger, W.T., Troeh, F.R. and Dumenil, L.C. (1979): Bacterial effects on hydraulic conductivity of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 333–338.
- Gupta, R.P. and Swartzendruber, D. (1964): Entrapped air content and hydraulic conductivity of quartz sand during prolonged liquid flow. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28: 9–12.
- Kamon, M., Zhang, H.Y., Katsumi, T. and Sama, N. (2002): Redox effect on the hydraulic conductivity of clay liner, *Soils Found.*, 42: 79–91.
- Kristiansen, R. (1981): Sand-filter trenches for purification of septic tank effluent: The clogging mechanism and the soil physical environment. *J. Env. Qual.*, 10(3): 353–357.
- Lappin-Scott, H.M., Cusack, F. and Costerton, J.W. (1988): Nutrient resuscitation and growth of starved cells in sandstone cores: a novel approach to enhanced oil recovery. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54(6): 1373–1382.
- 宮崎 毅, 中野政詩, 塩沢 昌, 井本博美 (1991): 土壌微生物が土の透水係数に及ぼす影響について. *農土論集*, 174: 41–48.

- Okubo, T. and Matsumoto, J. (1979): Effect of infiltration rate on biological clogging and water quality changes during artificial recharge. *Water Res. Res.*, 15: 1536–1542.
- Okubo, T. and Matsumoto, J. (1983): Biological clogging of sand and changes of organic constituents during artificial recharge. *Water Res.*, 17: 813–821.
- Poulovassilis, A. (1972): The changeability of the hydraulic conductivity of saturated soil samples. *Soil Sci.*, 113: 81–87.
- Ragusa, S.R., de Zoysa, D.S. and Rengasamy, P. (1994): The effect of microorganisms, salinity and turbidity on hydraulic conductivity of irrigation channel soil. *Irrig. Sci.*, 15: 159–166.
- Richards, L.A., Allison, L.E., Ayers, A.D., Bower, C.A., Fireman, M., Hayward, H.E., Reeve, R.C. and Wadleigh, C.H. (1947): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. Department of Agriculture Regional Salinity Laboratory, Riverside, California.
- Seki, K., Miyazaki, T. and Nakano, M. (1996): Reduction of hydraulic conductivity due to microbial effects. *農土論集*, 181: 137–144.
- Seki, K., Miyazaki, T. and Nakano, M. (1998): Effects of microorganisms on hydraulic conductivity decrease in infiltration. *Eur. J. Soil Sci.*, 49: 231–236.
- Seki, K. and Miyazaki, T. (2001): A mathematical model for biological clogging of uniform porous media. *Water Res. Res.*, 37: 2995–2999.
- Seki, K., Suko, T. and Miyazaki, T. (2002): Bioclogging of glass beads by bacteria and fungi. *Trans. World Cong. Soil Sci.*, 1244-1–1244-8.
- Seki, K., Miyazaki, T., Mizoguchi, M., Imoto, H., Nakaya, K. and Miyazawa, H. (2004): A simple estimation of excess rainwater percolation from a buried container into a vadose zone. *土壌の物理性*, 97: 25–30.
- 関 勝寿, 神谷 準一, 宮崎 毅 (2005): 湛水浸透条件下における細菌・糸状菌による飽和透水係数の低下およびその温度依存性について. *農土論集*, 237: 13–19.
- Seki, K., Thullner, M., Hanada, J. and Miyazaki, T. (2006): Moderate bioclogging leading to preferential flow paths in biobarriers. *Ground Water Mon. Rem.*, 26: 68–76.
- 嶋田 純 (2012): モンスーンアジア地域における可能地下水涵養量を考慮した地下水資源管理. *日本水文科学会誌*, 42(2): 33–42.
- Talsma, T. and van der Lelij, A. (1976): Infiltration and water movement in an in situ swelling soil during prolonged ponding. *Aus. J. Soil Res.*, 14(3): 337–349.
- 東京地下水研究会編 (2003): 水循環における地下水・湧水の保全. 信山社サイテック, 東京.
- van Beek, C.G.E.M. and van der Kooij, D. (1982): Sulfate-reducing bacteria in ground water from clogging and non-clogging shallow wells in the Netherlands river region. *Ground Water*, 20(3): 298–302.
- Vandevivere, P. and Baveye, P. (1992): Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56(1): 1–13.
- Yen, T.F. (1989): *Microbial enhanced oil recovery*. CRC Press, Boca Raton, Florida.

要 旨

土壌に水が長期間浸透する時に、微生物細胞および微生物が生成する代謝生成物質による間隙の目詰まりによって透水性が低下するバイオクロッキング現象について、丹念な実験で検証した Allison (1947) の論文を紹介した。透水性低下には様々な要因が考えられる中で、滅菌条件下の実験で、微生物の活動が透水性低下の原因であることを特定した。その後の研究の展開により、Allison が指摘した微生物細胞と代謝生成物質による目詰まりだけでなく、微生物が発生するガスによっても透水性が低下することが示された。また、細菌だけでなく、糸状菌の増殖が、バイオクロッキング現象において重要な働きをしていることが分かってきた。

キーワード：微生物，クロッキング，透水性，地下水涵養