



Bioclogging/ja

Katsutoshi Seki^{1*}

Abstract

バイオクロッキング (bioclogging) は、土壌の間隙に微生物のバイオマス (微生物そのものと微生物が分泌する細胞外高分子物質のような物質) が目詰まりをする現象である。微生物のバイオマスは土壌間隙の水の通り道をブロックして、土壌中に一定の厚さの難透水層を形成し、水の浸透速度を著しく低下させる。生物学的目詰まり (biological clogging) とも言う。

バイオクロッキングは、水が浸透する様々な現場で観察される。たとえば、ため池、浸透トレンチ、灌漑水路、下水処理場、人工湿地、廃棄物処分場における遮水ライナー、川床や土壌のような自然環境などである。また、透過反応壁 (PRB) や微生物利用石油増進回収法 (MEOR) などにおいて、帯水層における地下水の流れにも影響を及ぼす。適度な水の浸透速度を保つことが必要とされるような現場では、バイオクロッキングが問題となり、定期的に水を抜くなどの対策が取られることがある。一方で、たとえば、難透水層を作って浸透速度を低下させたり、地盤工学的性質を改善させたりするなど、バイオクロッキングが有効に活用されることもある。

現象の説明

透水性の時間変化

バイオクロッキングは、浸透速度の低下として観察される。地下水を涵養する池や農地への散水において、浸透速度が時間とともに低下する現象が1940年代に観察された。Allisonは、土壌を連続的に水が浸透するとき、飽和透水係数の次のような3段階の変化が生じると説明した[1][2]。

野外試験や室内試験を開始した後、透水性は最小限にまで減少する。高い透水性を持つ土壌では、この初期の減少はわずかであるか、あるいは全く存在しないが、比較的透水性の低い土壌では、透水性は10日から20日間減少する可能性がある。こ

れはおそらく土壌の構造における物理的変化によるものである。

土壌間隙中の封入空気が浸透水中に溶解することによる透水性の上昇。

団粒の分散と、微生物の細胞と微生物が生産する粘性多糖類のような物質による生物学的目詰まりによる2週間から4週間の透水性の低下。

この説明は、当時行われた実験にもとづいているが、バイオクロッキングの実際のプロセスは、栄養素や電子受容体の利用可能性、微生物バイオフィルムの形成傾向、初期条件などに依存する。そのため、バイオクロッキングの現場では、必ずしもこの3段階が明確に区別されるわけではない。2段階目が明瞭ではないときには、透水性はずっと低下を続ける。

クロッキングの種類

透水性の時間変化は様々な現場で観察される。これには物理的な原因 (浮遊物質による物理的目詰まり、団粒構造の破壊など)、化学的な原因 (粘土粒子の分散と膨潤)、そして以下に示すような生物学的な原因が含まれる[3]。通常、バイオクロッキングは以下の最初のを意味し、広義のバイオクロッキングは以下の全てを意味する。

¹ Toyo University

*Author correspondence: seki_k@toyo.jp

ORCID: [0000-0002-5707-0283]

Supplementary material: commons.wikimedia.org/location

Licensed under: [CC-BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Received 13-02-2023; accepted 14-02-2024



微生物の細胞（たとえば細菌[4][5][6][7]、藻類[8]、糸状菌[9][10][11]）と、微生物が分泌する細胞外高分子物質[12]のような物質が、土粒子表面にバイオフィーム[13][14][15]あるいはマイクロコロニー[16]を形成する。これが、透水係数低下の直接的な原因となる。

メタン菌が生成するメタンのような気体が気泡となって土壌間隙を目詰まりさせることも、透水係数低下の原因となる[17]。これも微生物による生成物なので、バイオクロッキングである。

鉄バクテリアが水酸化鉄の沈殿を促進し、土壌間隙を目詰まりさせることがある[18]。これは微生物による透水係数低下への間接的な影響である。

バイオクロッキングは主に飽和条件下で観察されるが、不飽和条件下でのバイオクロッキングも研究されている[19]。

現場での観察

現場での問題と対策

バイオクロッキングは、様々な自然および人工の水環境において重要な問題となっている。ここでは、バイオクロッキングに関連するいくつかの具体的な現場の問題と、その対策について述べる。

バイオクロッキングは、地下水涵養のためのため池[20]や浸透トレンチ (percolation trench)[21]のような湛水条件下での連続的な浸透で観察されている。浸透水が流入する土壌表層で微生物が増殖することによって進行するバイオクロッキングによる浸透速度の低下は、そのようなシステムの効率を低下させる。バイオクロッキングの影響を少なくするためには、あらかじめ浸透水の浮遊物質、栄養源、有機物を除去したり、定期的に水を抜いたり、目詰まりした層を取り除いたり、といったような対策が有効となる。

浄化槽の排水地 (septic drain field) でも、栄養が豊富な汚水が連続的に流れ込むため、バイオクロッキングが起きやすい[22][23][24]。浄化槽を目詰まりさせる物質は、しばしばバイオマットと呼ばれる[25]。水をろ過によって前処理するか、流入負荷量を低減することで、バイオクロッキングを遅らせることができる。緩速濾過でもバイオクロッキングが起きる[26]。1)に記した対策に加えて、定期的に砂層表面を削り取る作業をすること[27]、あるいは砂の洗浄や水の逆流 (backwashing) によってバイオフィームを除去して、砂の透水性を回復させることがある。

川のバイオクロッキングは、特に湧水が生じる乾燥地において地下水涵養に影響を与える[28]。バイオクロッキングは、河川水系における表流水と地下水のつながりに影響を与える。バイオフィームによる目詰まり層が形成されると、水の流れが途切れて、河川と帯水層間の水流パターンが変化する[29]。

バイオクロッキングは、井戸を使って帯水層から地下水を採取するときに観察されることがある[30]。何ヶ月そして何年間と連続して井戸を使っていると、バイオクロッキングあるいは他の要因による目詰まりによって透水性が低下する[31]。バイオクロッキングは、地中熱ヒートポンプの運転を持続させることにも影響を与えることがある[32]。それに対する一般的な対策には、鉄細菌のバイオフィームにとって重要な栄養素であるリン酸塩を利用することや、細菌の問題に対処するために塩素や殺菌剤を使用することなどがある。水の逆流は、バイオクロッキングを含む目詰まり一般に対処するための方法である[32]。

バイオクロッキングの利点

特定の環境下では、バイオクロッキングは良い効果をもたらすこともある。以下にいくつかの例を挙げる。

畜産污水处理の酸化池（安定化池）では、バイオクロッキングによって効果的に池の底からの漏水が防がれる[33]。また、灌漑水路の浸透制御のために、藻類や細菌を植え付けることもできる[34]。

廃棄物の最終処分場の底を遮水するために使われる遮水ライナー (landfill liner) の一種である粘土ライナーでも、バイオクロッキングが有利に働く。粘土ライナーは、処分場において汚染水の土壌環境への浸出を低減するために敷かれるものである。粘土ライナーの透水係数は、浸出水中の微生物による粘土間隙のバイオクロッキングによって初期の値よりも小さくなる[35][36]。

バイオクロッキングは、様々な汚染水を処理するために設計された人工湿地[37]でよく発生する現象である。特に、水平流れを持つ湿地では、透水性が低下した部分を避ける選択流が生じることでシステムの処理効率を向上させることがある[38]。

生物分解性が高い汚染された地下水を浄化するときに、バイオフィームを利用するバイオレメディエーションが有効である[39]。透過反応壁



(PRB)[40]によって、地下水をバイオクロッキングで遮断して閉じ込めるとともに、微生物によって汚染を分解することができる[41]。バイオクロッキングによって透過反応壁内に選択流が生じて浄化効率が低下する可能性があるため、汚染水の流れを注意深く解析する必要がある[42]。

油田からの石油の回収量を増やすための様々な技術を石油増進回収法 (EOR) と言う。注入井戸から注入された水が、貯留層に溜まっている石油と置換して、回収井戸から石油が回収される。貯留層の透水性は均一ではないため、注入された水は貯留層内の透水性の高い場所を通過し、透水性の高い場所での石油が回収されつくしてしまった後に、石油が残っている透水性の低い場所を通過しなくなってしまう。このような状況では、透水性の高い場所に細菌を注入してバイオクロッキングを起こさせて水の流れ道を変える細菌プロファイル変更技術が適用可能である[43]。これは微生物利用石油増進回収法 (MEOR) の一種である。

現在、バイオクロッキングを地盤工学に応用するための研究がされている[44]。これには、土壌を建設や環境分野の利用へと最適化するために、間隙率や透水係数を低減すること、そしてバイオセメンテーションによってせん断強度を高めるといった戦略が含まれる[45]。

参考文献

- Allison, L.E. (1947). "Effect of microorganisms on permeability of soil under prolonged submergence". *Soil Science* **63** (6): 439–450. doi:10.1097/00010694-194706000-00003.
- 関勝寿 (2015). "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". *土壌の物理性* **131**: 45–50.
- Baveye, P.; Vandevivere, P.; Hoyle, B.L.; DeLeo, P.C.; de Lozada, D.S. (2006). "Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials" (PDF). *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **28** (2): 123–191. doi:10.1080/10643389891254197.
- Gupta, R.P.; Swartzendruber, D. (1962). "Flow-associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand". *Soil Science Society of America Journal* **26** (1): 6–10. doi:10.2136/sssaj1962.03615995002600010003x.
- Frankenberger, W.T.; Troeh, F.R.; Dumenil, L.C. (1979). "Bacterial effects on hydraulic conductivity of soils". *Soil Science Society of America Journal* **43** (2): 333–338. doi:10.2136/sssaj1979.03615995004300020019x.
- Vandevivere, P.; Baveye, P. (1992). "Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns." (PDF). *Soil Science Society of America Journal* **56** (1): 1–13. doi:10.2136/sssaj1992.03615995005600010001x.
- Xia, L.; Zheng, X.; Shao, H.; Xin, J.; Sun, Z.; Wang, L. (2016). "Effects of bacterial cells and two types of extracellular polymers on bioclogging of sand columns". *Journal of Hydrology* **535**: 293–300. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.075.
- Gette-Bouvarot, M.; Mermillod-Blondin, F.; Angulo-Jaramillo, R.; Delolme, C.; Lemoine, D.; Lassabatere, L.; Loizeau, S.; Volatier, L. (2014). "Coupling hydraulic and biological measurements highlights the key influence of algal biofilm on infiltration basin performance" (PDF). *Ecohydrology* **7** (3): 950–964. doi:10.1002/eco.1421.
- Seki, K.; Miyazaki, T.; Nakano, M. (1996). "Reduction of hydraulic conductivity due to microbial effects." (PDF). *Transactions of Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering* **181**: 137–144. doi:10.11408/jsidre1965.1996.137.
- Seki, K.; Miyazaki, T.; Nakano, M. (1998). "Effect of microorganisms on hydraulic conductivity decrease in infiltration". *European Journal of Soil Science* **49** (2): 231–236. doi:10.1046/j.1365-2389.1998.00152.x.
- 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". *農業土木学会論文集* **237**: 13–19. doi:10.11408/jsidre1965.2005.213.
- Jiang, Y.; Matsumoto, S. (1995). "Change in microstructure of clogged soil in soil wastewater treatment under prolonged submergence". *Soil Science and Plant Nutrition* **41** (2): 207–213. doi:10.1080/00380768.1995.10419577.
- Taylor, S.W.; Milly, P.C.D.; Jaffé, P.R. (1990). "Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium: 2. Permeability". *Water Resources Research* **26** (9): 2161–2169. doi:10.1029/WR026i009p02161.
- Zhao, L.; Zhu, W.; Tong, W. (2009). "Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands" (PDF). *Journal of Environmental Sciences* **21** (6): 750–757. doi:10.1016/S1001-0742(08)62336-0. PMID 19803078.
- Kim, J.; Choi, H.; Pachepsky, Y.A. (2010). "Biofilm morphology as related to the porous media clogging" (PDF). *Water Research* **44** (4): 1193–1201.



- doi:10.1016/j.watres.2009.05.049.
PMID 19604533.
16. Seki, K.; Miyazaki, T. (2001). "A mathematical model for biological clogging of uniform porous media". *Water Resources Research* **37** (12): 2995–2999. doi:10.1029/2001WR000395.
 17. Reynolds, W.D.; Brown, D.A.; Mathur, S.P.; Overend, R.P. (1992). "Effect of in-situ gas accumulation on the hydraulic conductivity of peat". *Soil Science* **153** (5): 397–408. doi:10.1097/00010694-199205000-00007.
 18. Houot, S.; Berthelin, J. (1992). "Submicroscopic studies of iron deposits occurring in field drains: Formation and evolution". *Geoderma* **52** (3–4): 209–222. doi:10.1016/0016-7061(92)90037-8.
 19. Volk, E.; Iden, S.C.; Furman, A.; Durner, W.; Rosenzweig, R. (2016). "Biofilm effect on soil hydraulic properties: Experimental investigation using soil-grown real biofilm". *Water Resources Research* **52** (8): 5813–5828. doi:10.1002/2016WR018866.
 20. Bouwer, H. (2002). "Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering". *Hydrogeology Journal* **10** (1): 121–142. doi:10.1007/s10040-001-0182-4.
 21. Furumai, H.; Jinadasa, H.K.P.K.; Murakami, M.; Nakajima, F.; Aryal, R.K. (2005). "Model description of storage and infiltration functions of infiltration facilities for urban runoff analysis by a distributed model" (PDF). *Water Science and Technology* **52** (5): 53–60. doi:10.2166/wst.2005.0108. PMID 16248180.
 22. Kristiansen, R. (1981). "Sand-filter trenches for purification of septic tank effluent: I. The clogging mechanism and soil physical environment". *Journal of Environmental Quality* **10** (3): 353–357. doi:10.2134/jeq1981.00472425001000030020x.
 23. Nieć, J.; Spychała, M.; Zawadzki, P. (2016). "New approach to modelling of sand filter clogging by septic tank effluent". *Journal of Ecological Engineering* **17** (2): 97–107. doi:10.12911/22998993/62296.
 24. 川西琢也; 川島博之; 茅原一之; 鈴木基之 (1990). "土集浄化法における目詰まりの機構と浸透不良を防ぐための排水供給量" (PDF). *水質汚濁研究* **13** (3): 180–188. doi:10.2965/jswe1978.13.180.
 25. "Septic Biomat: defined, properties". *InspectAPedia*. Retrieved March 22, 2017.
 26. Mauclair, L.; Schürmann, A.; Thullner, M.; Gammeter, S.; Zeyer, J. (2004). "Slow sand filtration in a water treatment plant: biological parameters responsible for clogging". *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* **53** (2): 93–108. doi:10.2166/aqua.2004.0009.
 27. "緩速ろ過". 東京都水道局. Retrieved May 17, 2022.
 28. Newcomer, M.E.; Hubbard, S.S.; Fleckenstein, J.H.; Maier, U.; Schmidt, C.; Thullner, M.; Ulrich, C.; Iipo, N. *et al.* (2016). "Simulating bioclogging effects on dynamic riverbed permeability and infiltration". *Water Resources Research* **52** (4): 2883–2900. doi:10.1002/2015WR018351.
 29. Xian, Y.; Jin, M.; Zhan, H.; Liu, Y. (2019). "Reactive transport of nutrients and bioclogging during dynamic disconnection process of stream and groundwater". *Water Resources Research* **55** (5): 3882–3903. doi:10.1029/2019WR024826.
 30. van Beek, C.G.E.M.; 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. doi:10.1111/j.1745-6584.1982.tb01350.x.
 31. "Well remediation and rehabilitation". *Groundwater Engineering Limited*. Archived from the original on March 22, 2017. Retrieved March 22, 2017.
 32. Song, W.; Liu, X.; Zheng, T.; Yang, J. (2020). "A review of recharge and clogging in sandstone aquifer". *Geothermics* **87**: 101857. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101857.
 33. Davis, S.; Fairbanks, W.; Weisheit, H. (1973). "Dairy waste ponds effectively self-sealing". *Transactions of the ASAE* **16** (1): 69–71. doi:10.13031/2013.37447.
 34. Ragusa, S.R.; de Zoysa, D.S.; Rengasamy, P. (1994). "The effect of microorganisms, salinity and turbidity on hydraulic conductivity of irrigation channel soil". *Irrigation Science* **15** (4): 159–166. doi:10.1007/BF00193683.
 35. Kamon, M.; Zhang, H.; Katsumi, T. (2002). "Redox effect on the hydraulic conductivity of clay liner" (PDF). *Soils and Foundations* **42** (6): 79–91. doi:10.3208/sandf.42.6_79.
 36. Tang, Q.; Wang, H.Y.; Chen, H.; Li, P.; Tang, X.W.; Katsumi, T. (2015). "Long-term hydraulic conductivity of compacted clay permeated with landfill leachates" (PDF). *Japanese Geotechnical Society Special Publication* **2** (53): 1845–1848. doi:10.3208/jgssp.CHN-52.
 37. Moreira, F.D.; Dias, E.H.O. (2020). "Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review". *Environmental Research* **190**: 110016. doi:10.1016/j.envres.2020.110016.
 38. Suliman, F.; French, H.K.; Haugen, L.E.; Søvik, A.K. (2006). "Change in flow and transport patterns in horizontal subsurface flow constructed wetlands as a result of biological growth". *Ecological Engineering* **27** (2): 124–133. doi:10.1016/j.ecoleng.2005.12.007.
 39. Lee, M.D.; Thomas, J.M.; Borden, R.C.; Bedient, P.B.; Ward, C.H.; Wilson, J.T. (1998). "Bioremediation of aquifers contaminated with organic compounds" (PDF). *Critical Review*



- in *Environmental Control* **18** (1): 29–89. doi:[10.1080/10643388809388342](https://doi.org/10.1080/10643388809388342).
40. Naftz, D.; Morrison, S.J.; Fuller, C.C.; Davis, J.A. (2002). *Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers: applications to radionuclides, trace Metals, and nutrients*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press. ISBN 978-0125135634.
 41. Komlos, J.; Cunningham, A.B; Camper, A.K.; Sharp, R.R. (2004). "Biofilm barriers to contain and degrade dissolved trichloroethylene". *Environmental Progress* **23** (1): 69–77. doi:[10.1002/ep.10003](https://doi.org/10.1002/ep.10003).
 42. Seki, K.; Thullner, M.; Hanada, J.; Miyazaki, T. (2006). "Moderate bioclogging leading to preferential flow paths in biobarriers". *Ground Water Monitoring & Remediation* **26** (3): 68–76. doi:[10.1111/j.1745-6592.2006.00086.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2006.00086.x).
 43. Lappan, R.E.; Fogler, H.S. (1996). "Reduction of porous media permeability from in situ *leuconostoc mesenteroides* growth and dextran production". *Biotechnology and Bioengineering* **50** (1): 6–15. doi:[10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19960405\)50:1<6::AID-BIT2>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19960405)50:1<6::AID-BIT2>3.0.CO;2-L). PMID 18626894.
 44. Ivanov, V.; Stabnikov, V. (2017). "Bioclogging and biogrouts". *Construction biotechnology: bio-geochemistry, microbiology and biotechnology of construction materials and processes*. New York: Springer. pp. 139–178. doi:[10.1007/978-981-10-1445-1_8](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1445-1_8). ISBN 978-9811014444.
 45. Ivanov, V.; Chu, J. (2008). "Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ". *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* **7**: 139–153. doi:[10.1007/s11157-007-9126-3](https://doi.org/10.1007/s11157-007-9126-3).