J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 149, p. 81～ 82 (2021)

書　評
Book review

# 環境保全のための地下水水質化学 地球化学，地下水および汚染 （上）・（下）

C.A.J. アペロ，D. ポストマ 著
中川 啓　監訳
神野健二，広城吉成，糸井龍一，和田信一郎　訳

九州大学出版会　2021 年 5 月 15 日発行　B5 版
（上）349 頁 ISBN978-4-7985-0307-3 定価本体 6,000 円（税別）
（下）339 頁 ISBN978-4-7985-0308-0 定価本体 6,000 円（税別）




本書は，C.A.J. Appelo and D. Postma が 2005 年に著した Geochemistry, groundwater and pollution（2nd edition）を翻訳したものである．上下巻に分かれており，章の構成は以下の通りである（括弧内は章内の主なキーワードになると思われるものを挙げた）．

上巻

1 章 地下水地球化学への入門
（地下水水質，濃度単位，サンプリング法，分析精度）

2 章 雨水から地下水になるまで
（水文循環，雨水の組成と安定同位体，乾性沈着と蒸発散，水質に関与する諸過程の概要）

3 章 流れと輸送
（不飽和・飽和流れ，遅延，吸着，拡散，分散）

4 章 鉱物と水
（質量作用の法則，溶解度積，イオン強度，生成自由エネルギー，固溶体，反応速度論）

5 章 炭酸塩と二酸化炭素
（炭酸塩鉱物の溶解平衡，土壌中の二酸化炭素，炭酸塩反応の速度論的溶解，炭素の同位体）

6 章 イオン交換
（CEC，交換反応式，陽イオン交換，拡散二重層）

下巻

7 章 微量元素の吸着
（重金属，吸着等温線，吸着の pH 依存性，表面錯形成モデル）

8 章 ケイ酸塩の風化
（ケイ酸塩鉱物の風化，土壌における酸性化と緩衝作用）

9 章 酸化還元過程
（酸化還元反応，pe-pH ダイアグラム，一連の酸化還元過程，パイライト（$FeS_2$）酸化，硝酸塩還元，鉄還元，硫酸塩還元，メタン生成）

10 章 有機化学物質汚染
（有機化学物質の揮発・移動・吸着・反応，重金属錯体の形成）

11 章 数値計算モデリング
（移流－反応－分散方程式，モデリングの事例）

土壌物理学分野の主題の一つである水・溶質・熱移動解析の 1 次元プログラムに HYDRUS-1D（Šimůnek et al., 2013）がある．会員諸氏も利用される機会が多いと思われるが，これに地球化学コード PHREEQC を結合させた HP1（Jacques and Šimůnek, 2005）が HYDRUS-1D としてダウンロードしたものには組み込まれており，溶質移動解析のオプションとして選択できる．2 次元解析用の HP2 も HYDRUS（2D/3D）の中に実装されている（Šimůnek et al., 2012）．

PHREEQC は自然環境における水の化学反応を計算するためのプログラムであり，多種多様な物質の化学反応

2021 年 11 月 22 日受稿　2021 年 11 月 22 日受理

系の情報がデータベースとして含まれている．著者のアペロ氏はその開発者の一人である．地下水汚染問題，放射性廃棄物貯留といった分野での長期にわたる実績を有するモデルである．PHREEQC 自体においても 1 次元の移流分散解析が可能であるが，PHREEQC を水 · 溶質移動解析を得意とする HYDRUS と連成させることによって，HP1 は不飽和帯と地下水帯での鉱物，ガス，交換体，吸着表面との相互作用を含む水中の幅広い生物地球化学的反応を熱力学的平衡反応，速度論的反応あるいはその複合によって表現しながら，複数の化学物質の移動現象を計算できるものとなっている．したがって，土壌中の複数の物質が複雑な反応を伴う場合を扱うための有効な解析ツールである．しかし，複雑さ故にこれを正しく理解した上で利用するにはこれまで高いハードルがあったと言わざるを得ず，HP1 のユーザーはわが国の土壌物理学の分野において決して多くないものと思われる．本書の原著は PHREEQC を運用するためのバイブルであるが，これが翻訳されたことは我々にとって非常に有益である．今後広く PHREEQC や HP1 が利用されることを通して，研究者や技術者がより深い理解に基づいて土壌や地下水中の化学物質の動態を解釈することができ，モデル化のさらなる発展 · 向上に大きく貢献することが期待できる．

本書で扱われるいくつかの具体的な場面を以下に紹介する．

1. 鉱物の溶解性の計算から地下水中の濃度を予測する．たとえば，ホタル石 $CaF_2$ の平衡状態が地下水組成を支配している状態や，これに石膏 $CaSO_4$ が加えられたときの水中のイオン組成を求める．
2. 炭酸塩鉱物（$CaCO_3$，$MgCO_3$ など）の溶解平衡から，ある pH のときの $H_2CO_3$，$HCO_3^-$，$CO_3^{2-}$ の活量を求める．また，$CO_2$ 分圧の上昇によるカルサイト $CaCO_3$ の溶解による水中の $Ca^{2+}$ 濃度の変化を求める．
3. 地下水の $Na^+$，$Mg^{2+}$，$Ca^{2+}$ 濃度が既知であるとき，それらと平衡状態にある土壌（陽イオン交換容量 CEC が既知）におけるそれぞれのイオンの吸着濃度を求める．
4. 海水と平衡にある地下水が淡水に置き換わったときの $Na^+$，$Mg^{2+}$，$Ca^{2+}$ 濃度の変化を求める．
5. 酸化水酸化鉄や有機物への $Cd^{2+}$ の分配係数を求める．
6. フェリハイドライト $Fe(OH)_3$ への $Pb^{2+}$ の速度論的吸着を計算する．
7. ギブサイト $Al(OH)_3$ と交換体（$Na^+$，$K^+$，$Cl^-$ など）と平衡にある帯水層への酸性水の下向き移動を計算する．
8. pe-pH ダイアグラムにより，任意の酸化還元電位と pH のときのヒ素，窒素，鉄などの様々な化学物質の存在形態を推定する．
9. 硝酸塩還元，硫酸塩還元，鉄還元，メタン生成の段階的な酸化還元過程を計算する．
10. 有機化学物質であるフェノールの分解をモデル化する．

上記は一部に過ぎないが，このような生物地球化学的現象とそのモデル化について，詳細な理論と豊富な具体例から理解することが可能である．

本文中には適宜内容の理解を促す例題と問題およびその解答が配置されていることに加えて，各章には章末問題があり，その解答も示されている．また，付録として，PHREEQC のプログラム 15 例が示されており，溶液，鉱物，気体，反応，混合，交換，表面錯形成，輸送，固溶体などの計算例として大いに参考になる．内容は比較的高度な知識を必要とし，難解な点があることは否めないが，丁寧に着実に取り組みたい良書である．

## 引用文献

Jacques, D. and Šimůnek, J. (2005): User manual of the multicomponent variably-saturated flow and transport model HP1, description, verification and examples, version 1.0, p. 79. SCK·CEN-BLG-998, Waste and Disposal, SCK·CEN, Mol, Belgium.

Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M.Th. (2013): The Hydrus-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.17, p. 342, HYDRUS software series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.

Šimůnek, J., Jacques, D., Šejna, M. and van Genuchten, M.Th. (2012) : The HP2 program for HYDRUS (2D/3D), A coupled code for simulating two-dimensional variably-saturated water flow, head transport, solute transport and biogeochemistry in porous media, (HYDRUS+PHREEQC+2D), version 1.0, p. 76, PC Progress, Prague, Czech Republic.

中村公人
（京都大学農学研究科）