

HYDRUS-1D : 土中水分・熱・溶質移動予測プログラム

HYDRUS-1D: Software Package for Simulating Water, Heat, and Solutes in Variably-saturated Soils

齋藤 広隆[†] 坂井 勝^{††} 取出 伸夫^{††} シムネック ユッカ^{†††}
 (SAITO Hirotaka) (SAKAI Masaru) (TORIDE Nobuo) (ŠIMŮNEK Jirka)

I. はじめに

今日、水分不飽和帯 (vadose zone) および地下帯水層中の水分流れや溶質移動の予測や解析には、数値モデルが広く普及している。これまでに、欧米を中心にさまざまな数値モデルが開発されてきた。モデルの多くは、不飽和水分移動にはリチャーズ式、溶質移動には移流分散式を用いており、不飽和土中水分・溶質移動汎用プログラムとして公開されているものも多い。

なかでも、不飽和土中の一次元、二次元、三次元水分、熱、溶質移動モデルである HYDRUS-1D および HYDRUS (2D/3D) は、長年の開発と改良により、完成度が高められており、また、その汎用性の高さと計算の信頼性から、研究、教育、実務分野で幅広く利用されている¹⁾。

本報では、筆者らが開発、改良に参加している HYDRUS シリーズの中で、ソースコードの大半が公開されていて無償で利用できる HYDRUS-1D²⁾ を取り上げる。まず、プログラムの概要と現状を示し、そして、土中の水分・熱移動予測に用いた適用例を紹介する。

II. HYDRUS-1D について

1. 開発の歴史

HYDRUS-1D は、米国農務省 U.S. Salinity Laboratory (米国塩類研究所) において開発され、現在はカリフォルニア大学リバーサイド校の Dr. Šimůnek によって引き継がれている不飽和土中一次元水分・溶質・熱移動プログラムである。Harzing の Publish or Perish³⁾ によると、HYDRUS-1D はこれまでに 1,100 回以上引用され、過去 5 年間で査読付き国際誌に年平均 72 回引用されている。開発の歴史をたどると、70 年代から 80 年代にかけて Dr. van Genuchten らによる SUMATRA や WORM, Dr. Vogel らによる SWMI が統合され、SWMI_ST となって公開されたプログラムが起源となっている⁴⁾。Fortran で書かれ

ているプログラムは、MS-DOS 環境での利用を前提に開発されてきた。そのため、計算効率の向上のためにも多くの努力が払われてきた。しかし、テキスト形式の入出力ファイルであるため、とりわけ計算結果の表示などの後処理に手間を必要としていた。その後 Microsoft Windows の登場に合わせて、前処理や後処理が容易にできるユーザーインターフェース (GUI) が導入された HYDRUS-1D が 1998 年に公開された⁴⁾。その後も改良が続けられ、最新の ver.4 が 2007 年に公開されている。

さらに 2010 年には土中の水分移動や溶質移動について HYDRUS シリーズを通して学ぶことができるよう、Soil Physics with HYDRUS⁵⁾ が出版された。この本では、例題などを通して HYDRUS シリーズの使い方を学ぶことができるよう構成されている。

2. 基本機能

HYDRUS-1D は、リチャーズ式 ((1) 式)、熱移動式 ((2) 式)、移流分散式 ((3) 式) を基本とした移動方程式を連結した数値計算プログラムである。


$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial C_p(\theta)T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_w \frac{\partial qT}{\partial z} - C_w ST \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial (\rho_b s)}{\partial t} + \frac{\partial (\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D \frac{\partial c}{\partial z} - qc \right] - Sc \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 θ は体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 t は時間 (s)、 z は深さ (m)、 $K(h)$ は不飽和透水係数 (m s^{-1})、 h は圧力水頭 (m)、 S は植物根による吸水などの吸込み・湧出し項 (s^{-1})、 C_p は土の体積熱容量 ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)、 T は温度 (K)、 $\lambda(\theta)$ はみかけの熱伝導率 ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$)、 C_w は水の体積熱容量 ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)、 q は水分フラックス (m s^{-1})、 ρ_b は土の乾燥密度 (g m^{-3})、 s は吸着量 (g g^{-1})、 c は溶質濃度 (g m^{-3})、 D は溶質分散係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) である。ここでは簡略化した式を紹介しているが、必要に応じて (1) 式と (2) 式に水蒸気移動項や (3) 式に溶質分解項などが加えられる。土の水分移動特性であ

[†]東京農工大学大学院, ^{††}三重大学大学院,
^{†††}カリフォルニア大学リバーサイド校

 HYDRUS, 数値計算, リチャーズ式, 移流分散式, エネルギー収支式, 気象情報

る水分保持曲線と不飽和透水係数は、van GenuchtenモデルやBrooks & Coreyモデルなどが選択できる。一方、土性などから水分移動特性を推定するペドトランスファー関数も用意されている。熱伝導率の体積含水率依存性なども、汎用的な関数が用いられている。

また、実測の水分・溶質移動データから、水分移動・熱移動・溶質移動に関するパラメータ値をLevenberg-Marquardt法に基づき推定する逆解析機能を持つのも特徴である。次章で適用事例として、蒸発法を紹介する。さらに最新のHYDRUS-1Dで新たに追加された、地表面境界条件および水蒸気移動やそれに伴う潜熱の移動に加えて、植物根による吸水、コロイド移動、一次分解および連鎖反応について紹介する。HYDRUS-1Dにはそのほか、動相・不動相モデル、ヒステリシス、非線形吸着、動的吸着、イオン交換、などの機能があり、多様な問題に適用できるように開発されている¹⁾。

3. プログラムの入手方法

HYDRUS-1Dの最新バージョンのプログラムとマニュアルは、HYDRUSのホームページ⁶⁾から入手可能である。このホームページでは、そのほか関連文献や情報が示されている。また、ディスカッションフォーラムでは、自由に質問を行うことができ、HYDRUSの著者らが中心となって回答している。2013年9月現在、HYDRUS-1DとHYDRUS(2D/3D)に対してそれぞれ3千件近くの投稿が行われており、このフォーラムでの議論が、さらなるHYDRUSの改良へとつながっている。さらに、これまで論文などで発表された適用事例のプロジェクトファイルもホームページ上に多く公開されており、類似の問題への適用を検討しているユーザーにとって有益な情報である。

III. 適用事例

次にHYDRUS-1D ver.4を用いた適用事例を紹介する。ここでは、計算概略のみを示すので、詳細は引用文献を参考にいただきたい。

1. 逆解析

はじめに、蒸発法による水分移動特性の推定を示す⁷⁾。図-1(a)の白丸は熊本黒ボク土の蒸発実験における異なる深さでの土中水圧力変化、図-1(b)の白丸は水分保持曲線の実測値である。測定した蒸発速度を境界条件とした数値計算で逆解析を行い、これらのデータに適合することで、最適な水分保持曲線と不飽和透水係数を求めることができる(図-1(b))。ここでは、団粒構造を持つ黒ボク土の水分移動特性に対してDurnerモデルを用いている。

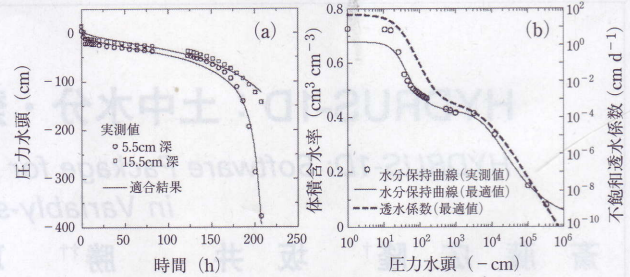


図-1 熊本黒ボク土を用いた蒸発実験における (a) 異なる深さでの土中水圧力変化と (b) 不飽和透水係数と水分保持曲線⁷⁾

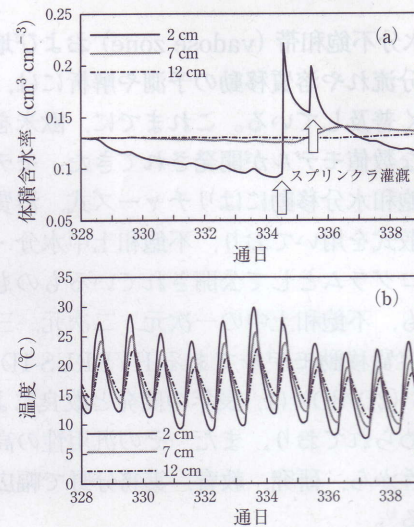


図-2 気象情報を用いてエネルギー収支式から境界条件を導き計算した、深さ2, 7, 12 cmでの (a) 体積含水率と (b) 地温の時間変化⁸⁾

2. 水・熱連成移動

次は、液状水・水蒸気・熱連成移動モデルの裸地における灌溉時の土中水分量と温度の予測への適用例である⁸⁾。この例では、気象情報(大気温、相対湿度、風速、放射量など)から地表面におけるエネルギー収支式を解き、地表面熱フラックスを求め、熱移動に関する地表面境界条件としている。図-2(a)は土中体積含水率の時間変化、図-2(b)は地温の時間変化の計算結果である。水分移動と熱移動に影響を与える水蒸気の移動を考慮することで、より詳細に土中の水分・温度変化を計算することができる。

3. 水蒸気凝縮

水蒸気移動を考慮すると、夜間に冷えた土表面への水蒸気凝縮を再現できる。図-3に示す砂丘砂の水蒸気凝縮実験⁹⁾では、カラムの上端は高湿度の大気開放され、下端は閉鎖系で低温に保たれている。そのため、地表面から水蒸気が浸入後、下層で凝縮し、時間の経過とともに水分量が下方から増加していく(図-3(a))。この実験に対し、液状水・水蒸気・熱連成移動モデルを適用すると、実測値をよく再現することがで

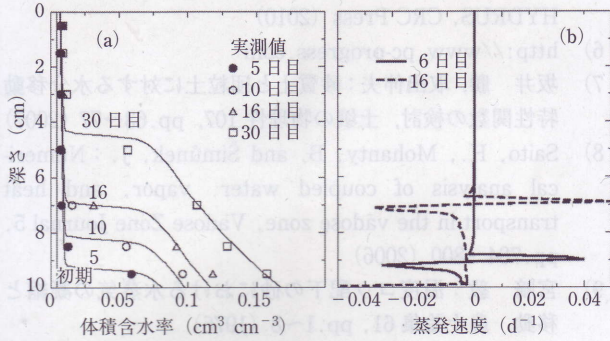


図-3 水蒸気凝縮実験時の (a) 体積含水率分布と (b) 蒸発速度分布^{9),10)}

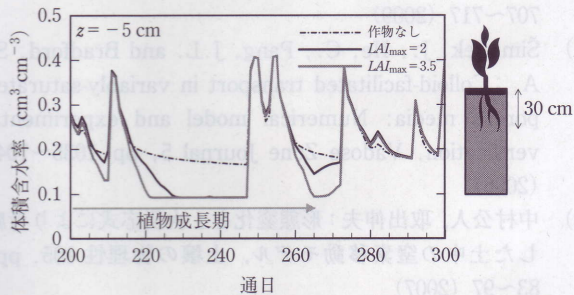


図-4 葉面積指数 (LAI) が土中水分量に与える影響

きる (図-3 (a) 実線)¹⁰⁾。さらに、計算で得られた水分分布や水分フラックス分布から、蒸発・凝縮 (負の蒸発) 速度分布が得られる (図-3 (b))。これにより、カラム内の水分は、液状水が多い領域での凝縮とその直上での蒸発を繰り返しながら、増加していく過程が明らかになった。

4. 植物根による吸水

土中の植物根による吸水は、(1) 式のリチャーズ式の吸込み項 S で考慮する。また、可能蒸散量は、葉面積指数 (LAI) の関数として与える²⁾。図-4 に、LAI が土中の水分量の変化に与える影響の計算結果を示す。根分布は、深さ 30 cm まで均一である。降雨による灌水直後は、水分量が上昇して根による吸水の影響は小さいが、灌水がない期間は、LAI によって水分量の減少は異なる。LAI が大きいほど蒸散量、すなわち根の吸水量が大きくなるためであり、生長終了後は差が小さくなる。このように、地上部の植物の生長具合を考慮した吸水モデルによる計算が可能である。

5. コロイド輸送

細菌などの土中のコロイド粒子は、土中の化学物質を吸着しその化学物質輸送の担い手となる。土中のコロイド移動は、固相への吸着・離脱、あるいは物理的な補足などを考慮した移流分散式を用いる。そして、土中を移動するコロイド粒子に吸着した化学物質の移動を計算する。図-5 は、一次元定常鉛直水流れの生じている土カラム上端から Br (トレーサー)

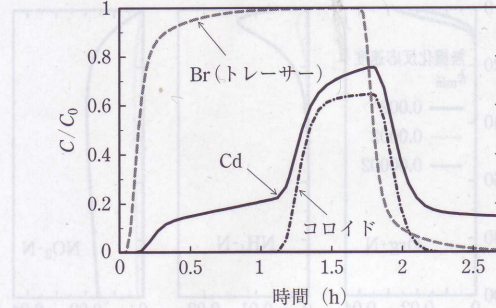


図-5 Br, コロイド, Cd の流出濃度曲線¹¹⁾

と Cd の溶液を一定時間流したのち、コロイド (ここでは細菌) を溶液に追加したときの流出濃度曲線 (BTC) の計算結果である¹¹⁾。固相へ吸着する Cd の場合、コロイド追加前は Br と比べて土粒子への吸着による遅延が生じている。一方、コロイドを追加すると、Cd がコロイドに吸着しコロイドの移動に伴って下端への移動が促進される。

6. 土中窒素移動

窒素は植物の成長に欠かせない構成元素のひとつであるが、農地における土中の窒素は、微生物活動を介してその形態を変化させる。有機態窒素の無機化、硝化、脱窒過程は、一次反応速度式による連鎖反応を組み込んだ (3) 式の移流分散式により表現できる。ここでは、一次元定常鉛直水流れの畑土に投入された有機態窒素 (Org-N) が、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) へ無機化、さらに硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) へ硝化される過程について、それぞれの一次反応係数を与えた計算例を示す。図-6 は無機化に関する一次反応係数 k_{\min} が、土中液相中濃度に与える影響を示す¹²⁾。 k_{\min} が大きくなるにつれて、無機化が進行し、上層部の $\text{NH}_4\text{-N}$ が増加する。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は硝化され下方に移動するため、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が高くなる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は土中の固相に吸着しないため、Org-N や $\text{NH}_4\text{-N}$ と比べて、先行して下方に移動し、土層全体に濃度が高くなる。

IV. まとめと今後の展開

ここでは、土中水分・熱・溶質移動汎用プログラムの HYDRUS-1D について、その開発の歴史や基本機能について紹介した。HYDRUS-1D が幅広く支持されているのは、プログラムの完成度の高さのみならず、その汎用性にある。土壌物理学や水文学の研究論文において、多くの不飽和土中水分・溶質移動プログラムが開発されてきたが、現実には開発者以外が利用できるプログラムは非常に少ない。Dr. van Genuchtenらが中心になって開発してきた HYDRUS は、公開することを前提に、土中の物質移動に関わる多様な問題に対応できる汎用性と信頼性を重視してき

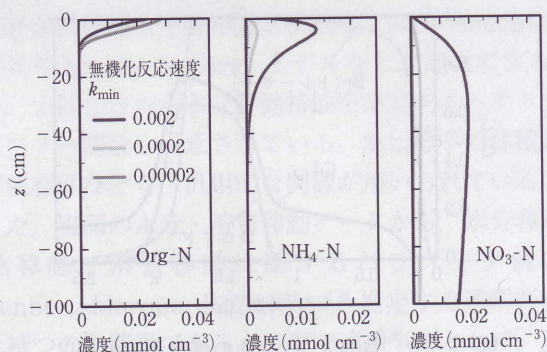


図-6 無機化反応速度を変化させたときの、702h後の溶液中窒素濃度分布¹²⁾

た。また、ディスカッションフォーラムなどを通して利用者の要請に応じて、継続的な修正や機能の追加を行っており、そのことも多くの利用者を引き付ける要因となっている。このようにHYDRUS-1Dの持つ可能性は非常に高く、わが国の農業農村工学分野においてもさらなる応用が期待される。

さらにHYDRUSは、より複雑な不飽和土中水分・溶質移動のために、地下水流動のMODFLOWや化学反応のPHREEQCなど、ほかのプログラムとの連結も行われている¹⁾。その一例として、不飽和流-生物地球化学反応連結モデルのHP-1¹³⁾がある。紙面の都合上詳細は割愛するが、PHREEQCが表現するさまざまな生物的・化学的反応を、HYDRUSの不飽和土中水分・溶質移動と合わせて表現できる。HYDRUSは、不飽和土中水分・溶質移動の標準ツールとして、さらなる発展が期待される。

引用文献

- 1) Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. and Šejna, M.: Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes, *Vadose Zone Journal* 7 (2), pp. 782~797 (2008)
- 2) Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M. Th.: The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 4.0, HYDRUS Software Series 3, Riverside CA, University of California, Department of Environmental Sciences (2008)
- 3) Harzing, A. W.: Publish or Perish, available from <http://www.harzing.com/pop.htm> (2007)
- 4) Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. and Šejna, M.: HYDRUS: Model use, calibration, and validation, *Transactions of the ASABE* 55 (4), pp. 1261~1274 (2012)
- 5) Radcliffe, D. E. and Šimůnek, J.: *Soil Physics with*

HYDRUS, CRC Press (2010)

- 6) <http://www.pc-progress.com>
- 7) 坂井 勝, 取出伸夫: 砂質土と団粒土に対する水分移動特性関数の検討, *土壤の物理性* 107, pp. 63~77 (2007)
- 8) Saito, H., Mohanty, B. and Šimůnek, J.: Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone, *Vadose Zone Journal* 5, pp. 784~800 (2006)
- 9) 宮崎 毅: 温度コウ配下の砂における水蒸気の凝縮と移動, *農土論集* 61, pp. 1~8 (1976)
- 10) Sakai, M., Toride, T. and Šimůnek, J.: Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, pp. 707~717 (2009)
- 11) Šimůnek, J., He, C., Pang, J. L. and Bradford, S. A.: Colloid-facilitated transport in variably-saturated porous media: Numerical model and experimental verification, *Vadose Zone Journal* 5, pp. 1035~1047 (2006)
- 12) 中村公人, 取出伸夫: 形態変化を1次反応式により考慮した土中の窒素移動モデル, *土壤の物理性* 105, pp. 83~97 (2007)
- 13) Jacques, D. and Šimůnek, J.: User Manual of the Multicomponent Variably-Saturated Flow and Transport Model HP1: Description, Verification, and Examples, Version 1.0, BLG-998, Waste and Disposal, SCK CEN (2005) [2013.9.24.受稿]

齋藤 広隆 (正会員)



2003年 ミシガン大学大学院修士
サンディア国立研究所
2005年 カリフォルニア大学リバーサイド校
2006年 日本学術振興会海外特別研究員
東京農工大学大学院農学研究院
現在に至る

略 歴

坂井 勝 (正会員)



2007年 三重大学大学院修士
カリフォルニア大学リバーサイド校
2009年 ユタ州立大学
2011年 三重大学大学院生物資源学研究所
現在に至る

取出 伸夫 (正会員)



1990年 東京大学農学系大学院修士
1991年 U.S. Salinity Laboratory
1995年 佐賀大学農学部
2004年 三重大学生物資源学部
2006年 三重大学大学院生物資源学研究所
現在に至る

シムネック ユッカ



1984年 チェコ工科大学修士課程修士
1990年 U.S. Salinity Laboratory
2003年 カリフォルニア大学リバーサイド校
現在に至る