

水分特性曲線の回帰プログラム SWRC Fit (2) —プログラムの実行方法—

関 勝寿*

Program for fitting water retention curve SWRC Fit (2)

— Running the program —

Katsutoshi SEKI*

Abstract

Estimation of hydraulic parameters is important for describing water movement in soil. SWRC Fit (<http://purl.org/net/swrc/>) is a program for fitting soil hydraulic models to measured soil water retention data. As the theoretical background was fully discussed in the previous article of this series, in this article outline of the program is explained.

Keywords : Water retention curve, hydraulic model, parameter estimation

1. 序論

本稿の著者は、水分特性曲線を6種類の水分特性モデルによって同時に非線形回帰をして、モデルのパラメータを推定するプログラムSWRC Fitを開発し、フリーソフトウェアとして公開をしている (<http://purl.org/net/swrc/>)。

このプログラムは、Webで簡単に実行できる手軽さもあり多くの研究者によって使われ、このプログラムを公開した論文 (Sekii, 2007) は、Google Scholar Citationsによると被引用件数が伸びている (図1)。そこで、このプログラムについて日本語で解説シリーズを執筆している。

既報 (関, 2017) では、使用している6種類の水分特性モデルについて、それぞれのモデルの特徴に着目しながら、間隙モデルや水分移動解析に必要な透水モデルと関連づけて

*) 東洋大学自然科学研究室 112-8606 文京区白山5-28-20

Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20, Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo, 122-8606

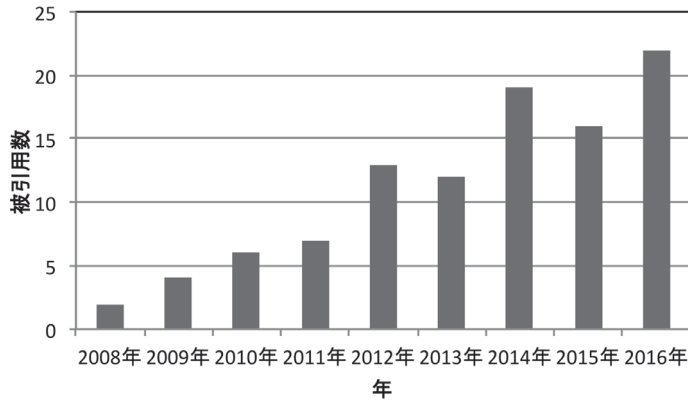


図1. SWRC Fit 発表論文 (Seki, 2007) の被引用件数推移

解説した。本稿では、プログラムの実行方法を解説する。

2. プログラム

2.1 土壌水分特性モデル

SWRC Fitは、実験的に求めたマトリックポテンシャル ψ と体積含水率 θ の関係、すなわち土壌水分特性曲線のデータを、指定した土壌水分モデル $\theta(\psi)$ に適合させて、最適モデルのパラメータを決定するプログラムである。ここで、マトリックポテンシャル ψ は負の値であるが、その絶対値であるマトリックサクション h を使う。また、有効水分 S_e を

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (1)$$

と定義することで、土壌水分モデルを $h(S_e)$ と記述することができる。土壌水分モデルについて詳しくは既報(関, 2017)に論じたので、ここでは表1にSWRC Fitで扱う土壌水分モデルをまとめる。

ここで、BC, VG, LNモデルの $S_e(h)$ 関数にはそれぞれ2個のパラメータがあり(VGモデルの m は n によって決まるので n によって代表させる)、FXモデルには3個のパラメータ($C(h)$ の h_{\max} と h_r は定数として与える)、DBとBLモデルにはそれぞれ5個のパラメータがある($w_1 + w_2 = 1$ より、 w_i は w_1 だけで決まる)。そして、 $S_e(h)$ 関数が決まれば $\theta(h)$ 関数は式(1)とあわせることで θ_r , θ_s のパラメータを加えた形で決まるため、パラメータ数が2個増える。このことから、それぞれのモデルのパラメータ数を表2にまとめる。

与えられた土壌水分特性のデータ $\theta(h)$ から、表1に示した6種類の土壌水分モデル

表 1. SWRC Fitで扱われる土壌水分モデル

略 称	式	文 献
BCモデル	$\begin{cases} S_e = (h/h_b)^{-\lambda} & \text{if } h > h_b \\ S_e = 1 & \text{if } h \leq h_b \end{cases}$	Brooks and Corey (1964)
VGモデル	$S_e = \left[\frac{1}{1+(\alpha h)^n} \right]^m, m=1-1/n$	van Genuchten (1980)
LNモデル	$S_e = Q \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right] \quad (\text{注1})$	Kosugi (1996)
FXモデル	$S_e = C(h) \left[\frac{1}{\ln[e+(h/a)^n]} \right]^m \quad (\text{注2})$	Fredlund and Xing (1994)
DBモデル	$S_e = \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1+(\alpha_i h)^{n_i}} \right]^{m_i}, k=2$	Durner (1994)
BLモデル	$S_e = \sum_{i=1}^k w_i Q \left[\frac{\ln(h/h_{m_i})}{\sigma_i} \right], k=2$	Seki (2007)

注) 1.
$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

2.
$$C(h) = 1 \quad \text{または} \quad C(h) = \frac{-\ln(1+h/h_r)}{\ln[1+(h_{\max}/h_r)]} + 1$$

表 2. SWRC Fitで推定するパラメータ

モデル	パラメータ	パラメータ数
BC モデル	$\theta_s, \theta_r, h_b, \lambda$	4
VG モデル	$\theta_s, \theta_r, \alpha, n$	4
LN モデル	$\theta_s, \theta_r, h, \sigma$	4
FX モデル	$\theta_s, \theta_r, \alpha, m, n$	5
DB モデル	$\theta_s, \theta_r, w_1, \alpha_1, n_1, \alpha_2, n_2$	7
BL モデル	$\theta_s, \theta_r, w_1, h_{m1}, \sigma_1, h_{m2}, \sigma_2$	7

に対してそれぞれ非線形回帰による表2のパラメータ最適化を実行し、推定されたパラメータとそれぞれのモデルとの適合度、回帰曲線のグラフを一覧表示するプログラムがSWRC Fitである。

ここで、パラメータの中で θ_s と θ_r はそれぞれ定数として与えることが可能となっている。定数として与えるときには推定するパラメータから外される。

2.2 オフラインバージョンとウェブバージョン

SWRC Fitには、オフラインバージョンとウェブバージョンがある(図2)。プログラムの本体はオフラインバージョンであり、数値計算言語GNU Octaveで記述されている

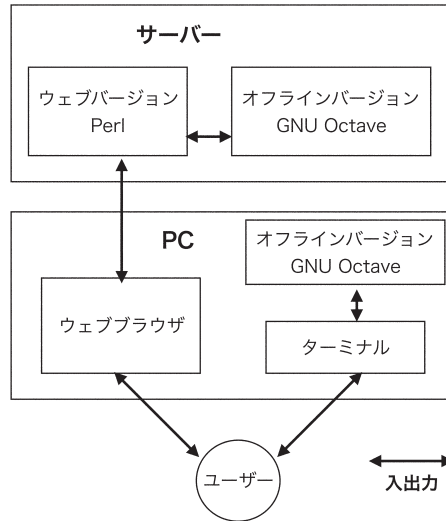


図 2. SWRC Fitのウェブバージョンとオフラインバージョン

(関, 2007)。オフラインバージョンは、独立したプログラムとしてGitHub (<https://github.com/sekika/swrcfit>) で公開され、ユーザーは各自のPCにインストールしてターミナルから実行することができる。ウェブバージョンはPerl言語で書かれたCGIプログラムであり、ウェブサーバー上に設置され、ウェブブラウザからアクセスして、直接実行することができる。そして、ウェブバージョンはサーバー内のGNU Octaveプログラムを呼び出すプログラムとなっている。なお、CGIプログラムはGitHubでソースコードが公開されている (<https://github.com/sekika/swrcfit-cgi>)。また、ウェブバージョンはユーザーがウェブブラウザから入力したパラメータをそのままサーバー上のGNU Octaveプログラムに渡して、その計算結果をウェブブラウザに出力する。

当初はオフラインバージョンのみを開発していたものの、ユーザーからGNU Octaveのインストールと設定が大変であるという意見を受けて、ウェブブラウザから簡単に実行ができるウェブバージョンを開発したところ、SWRC Fitは多くのユーザーに使われるようになった。その結果、図 1 で示したように論文の被引用数が伸びている。

2.3. オフラインバージョンの使い方

オフラインバージョンは、数値解析を目的とした高レベルプログラミング言語のGNU Octaveで記述されている。GNU Octaveは商用ソフトウェアのMATLABとの互換性を重視して開発されているフリーソフトウェアである。そこで、SWRC Fitを実行するためには、GNU Octaveのインストールと、Octave上の非線形回帰計算を実行するためのモジュールのインストールが必要となる。インストールの方法についてはSWRC Fitのホームページに解説されているが、ここには簡単に要点を記す。

Windowsへのインストールは、Bash on Windows 10を使う方法、cygwinを使う方法、

Octave for Windowsを使う方法があり、Windows 10の64ビットバージョンを使っているときには、Bash on Windows 10を使う方法が推奨される。画像ファイルを閲覧するためにはX Serverをインストールする必要があるが若干面倒であるが、画像ファイルを直接表示せずにファイルとして保存する設定であれば、比較的容易にインストールができる。macOSへのインストールは、Homebrewというパッケージ管理システムを使うことで容易にインストールができる。Linuxへのインストールについては、パッケージ管理システムでoctave, octave-forgeまたはoctave-optimとgnuplotをインストールしてから、swrcfitの最新バージョンをダウンロードしてインストールすれば良い。

インストールに成功すると、ターミナル（端末エミュレータ）からSWRC Fitを実行することができる（図3）。実行方法は

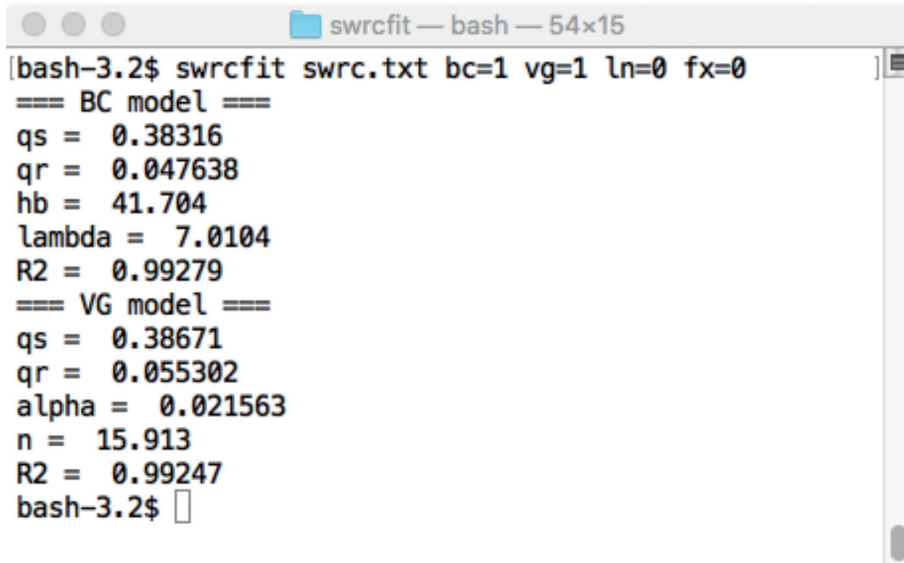
```
swrcfit Datafile [setting]
```

である。ここで、Datafileはデータファイルのファイル名で、settingは設定である。データファイルは、1行目にサクション、2行目に体積含水率を

```
0 0.2628
20 0.237
30 0.223
40 0.211
50 0.2035
70 0.1855
100 0.169
200 0.151
430 0.1399
640 0.131
1050 0.1159
```

のような形で入力したテキストファイルであり、Excelのような表計算ソフトに入力したデータをテキストエディタにコピーペーストすれば作成することができる。また、サクションの単位としてはcmの水頭を使う場合やkPaが使われる場合などがあるため、入力単位の制約はなく、入力単位に応じた単位で推定されたパラメータが表示されることとなる。

設定は、コマンドラインから「パラメータ=値」の式で指定することができる。また、設定ファイルを用意して指定することも可能である。設定ファイルを使う場合には、設定ファイルのファイル名をオプションで指定する。具体的には、どのモデルを使って回帰するか、たとえば式(1)の θ_s と θ_r をそれぞれ固定値とするか変数とするか、結果をどのように表示するか、決定係数、平均二乗誤差、赤池情報量規準、バイズ情報量規準などの統計量を表示するかどうか、グラフを表示するかどうか、どのようにグラフを表示するか、といったような設定をすることができる。



```

swrcfit — bash — 54x15
[bash-3.2$ swrcfit swrc.txt bc=1 vg=1 ln=0 fx=0]
=== BC model ===
qs = 0.38316
qr = 0.047638
hb = 41.704
lambda = 7.0104
R2 = 0.99279
=== VG model ===
qs = 0.38671
qr = 0.055302
alpha = 0.021563
n = 15.913
R2 = 0.99247
bash-3.2$

```

図3. ターミナル実行画面

3.3 ウェブバージョンの使い方

ウェブバージョンの基本的な使い方は、<http://seki.webmasters.gr.jp/swrc/index-ja.html>にアクセスして、図4のような入力画面にデータを入力して「計算する」ボタンを押すことで計算が実行される。データの入力形式はオフラインバージョンと同じで、1行目にサクション、2行目に体積含水率を入力する。サンプルのデータを選ぶこともできる。6つのモデルの中から計算を実行するモデルをチェックボックスで選択できる。そして「最良のモデル1つを表示」をチェックすることで、赤池情報量規準（AIC）が最小のモデルのみがグラフに表示され、チェックを外せばすべてのモデルが同時にグラフとして表示される。「さらにオプションを見る」をクリックすることで、オフラインバージョンで設定可能な多くの設定が利用できる。

入力画面から「計算する」ボタンによって計算を実行すると、計算結果が表示される。計算結果は、指定したモデルの名称、式、最適化されたパラメータ、決定係数、赤池情報量規準が一覧表として表示される。そして、入力データとモデルによる回帰曲線のグラフが図5のように表示される。ここでは「最良のモデル1つを表示」オプションを選択したため、選んだ4つのモデルの中で最も赤池情報量基準が最小のBCモデルのみがグラフとして表示されたが、このオプションを選択しなければ、すべてのモデルのグラフが同じグラフに表示されて比較することができる。

ここで、赤池情報量規準を使っているのは、パラメータ数が異なるモデルを比較するときには、決定係数や平均二乗誤差の比較では、モデルのパラメータ数が過剰になってしまう可能性があり、赤池情報量規準によってモデルの複雑さとデータの適合度とのバランス

SWRC Fit - 土壌水分特性曲線の非線形回帰プログラム

-

SWRC Fit は、[土壌水分特性（水分保持曲線）](#)のデータを、[いくつかのモデル](#)によって近似し、土壌水分特性パラメータを決定することができます。土壌水分特性のデータをテキストボックスに貼り付けて、「計算する」ボタンを押して下さい。プルダウンメニューからサンプルのデータを選んで、試すことができます。[詳しい説明を読む](#)。

説明 (NS: 不明)

土壌試料

土性

あなたの名前

モデル

Brooks and Corey

van Genuchten

Kosugi

Fredlund and Xing **[New!]**

Durner

Seki

グラフオプション

最良のモデル1つを表示

[さらにオプションを見る](#)

土壌水分特性曲線

3	0.518
7	0.517
21	0.516
29	0.515
33	0.513
40	0.442
44	0.401
46	0.38
47	0.367
51	0.34
54	0.315
59	0.291
66	0.263
72	0.249
87	0.212

図4. 入力画面

を取ってモデルの良さを評価できるためである。

4. おわりに

本報では、水分特性曲線の非線形回帰プログラムSWRC Fitの使い方について解説した。様々な土壌水分特性モデルがある中で、解析の目的に応じて自ら選択したモデルを使用することができるのみならず、いくつかのモデルを同時に回帰して決定係数や赤池情報量規準のような統計量、そしてそれぞれのモデルの回帰曲線を比較することで、より適切なモデルを選択することもできる。このように、簡単にモデルのパラメータを決めることが可能となったとはいいいながら、水分特性モデルを使う目的によってもどのモデルを選べば良いかが左右され、またそれぞれのモデルごとに適用する際に注意すべき点もある。そのため、前報（関，2017）で解説したようなそれぞれのモデルの理論についても熟知しておくことが望ましい。

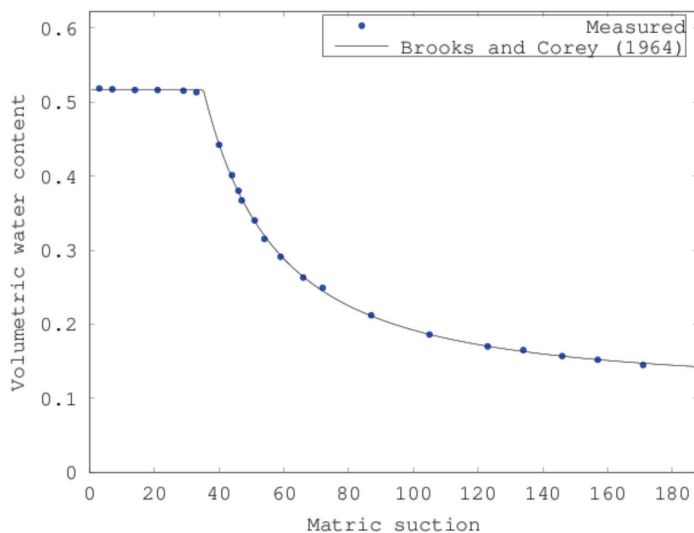


図5. 結果 (グラフ)

引用文献

- Brooks, R. H. and A. T. Corey (1964): Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Paper 3. Colorado State Univ., Fort Collins, CO, USA.
- Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.*, 30(2): 211-223. doi: 10.1029/93WR02676
- Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994): Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.*, 31: 521-532. doi: 10.1139/t94-061
- Kosugi, K. (1996): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 32: 2697-2703. doi: 10.1029/96WR01776
- van Genuchten, M. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Seki, K. (2007): SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4: 407-437. doi: 10.5194/hessd-4-407-2007
- 関勝寿 (2007) 数値計算言語Octaveによる土壌水分特性曲線の非線形回帰プログラム. *土壌の物理性*, 105, 2007.
- 関勝寿 (2017) 水分特性曲線の回帰プログラムSWRC Fit(1) —水分特性モデル—. *東洋大学紀要自然科学*, 61 : 41-6, 2017.