平成２２年度

SWAT モデルを用いた河川流域の物質流出特性評価について（第 2 報）

独）土木研究所寒地土木研究所　寒地河川チーム　○村上　泰啓
独）土木研究所寒地土木研究所　水環境保全チーム　水垣　滋
Natural Resources Research　三島　啓雄

積雪寒冷地である北海道では、年間降水量の大半が降雪である河川も少なくない。こうした中、気候変動が世界的懸案となっており、水資源、治水・利水、河川生態系、農業の問題を考えていく上で，河川流域全体の水資源、栄養塩、SS などの物質循環を予測し、対策を講じていく必要がある。流域物質循環モデルは多くの研究者が開発しており、共通プラットホーム開発も欧州、米国、日本で進められ、個々に開発された要素モデルの統合化が進められつつある。ここでは、1980 年代から米国農務省で開発が進められてきたスタンドアロン型の SWAT(Soil and Water Assessment Tool)モデルを採用し、前回の報告では不十分であった水文データセットを拡充し、日流量の再現性を向上させた結果を報告する。

キーワード：流域物質循環、SWAT モデル、GIS、土壌、気象

１．はじめに

積雪寒冷地である北海道では，融雪水が貴重な水資源となっているため、気候変動による水資源への影響や土地利用の変化による水質への影響を検討するためには、流域全体の水文プロセスや点源、面源からの栄養塩などの流出を考える必要がある。こうした目的を検討するため、流域物質循環モデルが有償・無償含めて多くが開発され、公開されている。どのモデルにも共通しているのは、実際にモデルを走らせる際に地形、土地利用、地被、土壌、気象(降雨、日照、湿度、気温)など多くのデータセットを準備しなければならないという点である。ここでは米国農務省で開発され無料で公開されている SWAT モデルを例に、データセットの具体的な構築方法と、パラメータの最適化方法を紹介し、不完全な結果しか得られなかった前報に引き続き、改善された計算結果を報告する。

２．SWAT モデル用のデータセット作成方法

これまでわが国では様々な GIS 情報が整備・公開されている。例えば国土地理院の WEB サイトでは地形データや土地利用の GIS データが公開され、国土交通省土地・水資源局国土調査課の WEB サイトでは土壌分布データが公開されている。ArcSWAT モデルは ESRI 社製の GIS である ArcMAP で稼働する SWAT モデルであり、既存の GIS 情報や土壌、気象情報を用いて流域の水・物質循環を評価できる。評価ステップは日単位である。ここではまず、沙流川流域を対象に、ArcSWAT モデルを利用する為の具体的なデータセットの作成方法について解説する。基本的に ArcSWAT は緯経度ではなく平面直角座標系で稼働するため、沙流川流域付近を対象とすると、世界測地系 JGD2000 の UTM54 系(ユニバーサル横メカルトル)か、平面直角座標系 JGD2000 の 12 系を用いる必要がある。また、ArcSWAT モデルが米国で開発された関係で、データを参照するフォルダに全角文字を認識できないため、パソコンの言語設定を英語にする設定が必要である。以降、ArcMAP に Spatial Analyst と ArcSWAT がインストールされているという前提で説明を進める。

(1) 流域データの設定

ArcSWAT には Spatial Analyst(空間解析)の機能を利用し、標高データを利用して計算に利用する流域分割を自動的に処理する機能が付帯している。ここでは国土地理院で整備した 50ｍメッシュ標高データを利用して沙流川流域近傍の地形データを利用して流域データを設定する方法を順に説明する。なお、以下の丸数字は**図-1** 中の丸数字に対応している。

① ArcSWAT のメニューから Automatic Watershed Delineation(自動流域設定)を選択すると**図-1** のウィンドウが表示される。枠内左上①の DEM Setup において、流域をカバーする地形データ(ラスター形式)のファイルを指定する。
② DEM Projection Setup(投影設定)のマークをクリックし、標高の単位を指定する Z unit においてメートルを指定する。
③ Stream Definition(流路定義)において、DEM-based を選択し、格子マークをクリックする。
④ Stream network(流路ネットワーク)において、マー

Yasuhiro Murakami,Shigeru Mizugaki,Yoshio Mishima

クをクリックすると、自動的に河道網が発生し、画面上に表示される。

⑤ **図-1** 右中段の Whole watershed outlet をクリックし、流域末端のポイントを画面上のマウスで指定する。

⑥ Delineate Watershed(流域描画) のマークをクリックすると、流域が小流域に分割され、画面に表示される。

⑦ Calculate Subbasin parameters のマークをクリックすると、分割小流域毎の 諸元が設定される。

⑧ 最後に EXIT キーをクリックして流域設定を終了する。

(2) 土地利用・土壌データの入手と読み込み

国土数値情報ダウンロードサービスから土地利用細分メッシュ(JPGIS 準拠)をダウンロードする。沙流川、鵡川を含む領域は一次メッシュコード 6341、6342、6441、6442 であり、関連ファイルを選択してダウンロードし指定したフォルダ(例えば c:¥data¥)に解凍する。国土地理院サイトより変換ツール(KsjTool)を入手し ArcMAP で判読可能な shp ファイルに変換した後、ArcMAP に読み込み、座標系を直角平面座標系に修正しておく。

国土交通省土地・水資源局国土調査課 WEB サイトで公開されている表層土壌の shp ファイルを入手する。縮尺 1/20 万と 1/50 万のデータが存在するが、利用目的に応じどちらを採用するかを決める必要がある。ここでは 1/20 万を採用し、土壌名称の英語化や座標系の修正など若干の加工を行ったものを利用した。

(3) 土地利用の設定

①SWAT メニューの HRU Analysis(水文流出単位解析)をクリックすると、Land Use/Soils/Slope Definition ウィンドゥ(**図-2**)が開く。Land Use Data タブの Land Use Grid において、前述の座標変換済みの土地利用の shp ファイルを指定する。

②Choose Grid Field において、VALUE を選択し、OK をクリック。

③Look Up Table(参照表)ボタンをクリック

④**図-2** 右上の Land Cover Lookup Table において、User Table を選択し OK をクリック。

⑤**図-4** の内容が記述されたテキストファイルを選択し、select キーをクリック。

⑥Reclassify をクリックし、土地利用設定を終了。

(4) 土壌データの設定

図-3 左のウィンドゥ上で Soil Data(土壌データ)タブをクリックする。

①前述の表層土壌の shp ファイルを選定する。

②Choose Grid Field において VALUE を選択し、OK をクリック。

③Options において、Name を選択する。Stmuid や S5id といった名称はプリインストールされた米国の土

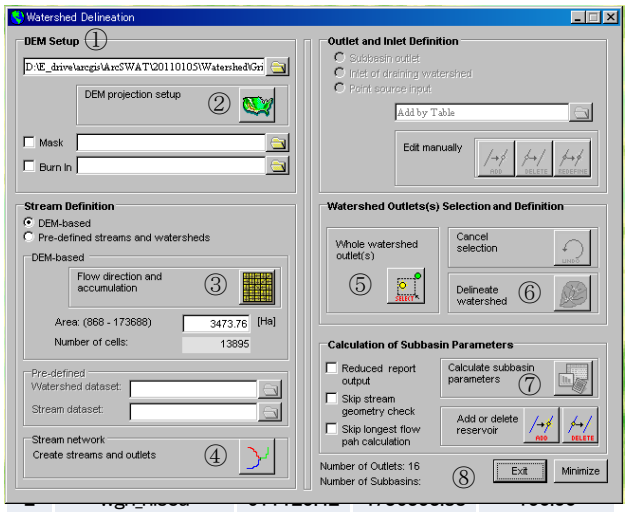

図-1 流域設定の画面(Watershed Delineation)

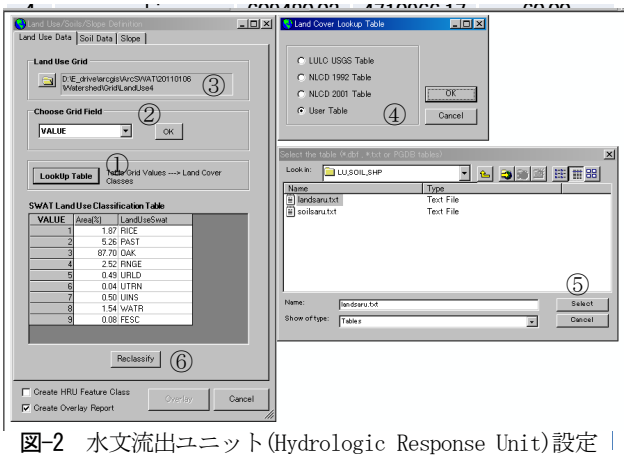

図-2 水文流出ユニット(Hydrologic Response Unit)設定画面における土地利用データの設定

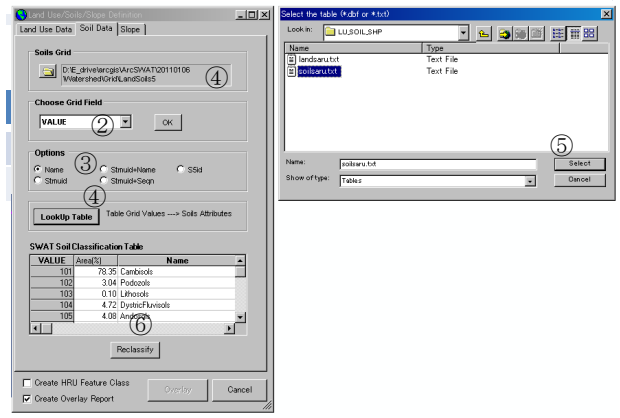

図-3 水文流出ユニット(Hydrologic Response Unit)設定画面における土壌データの設定

"VALUE","NAME"
1, RICE
2, PAST
3, OAK
4, RNGE
5, URLD
6, UTRN
7, UINS
8, WATR
9, FESC
10, WATR
11, FESC

図-4 土地利用データの参照用テキストファイル

"VALUE","NAME"
101, Cambisols
102, Podozols
103, Lithosols
104, DystricFluvisols
105, Andosols
106, Histosols
107, FluvicGleysols
108, OchricGleysols
109, Rhegosols
110, Latosols

図-5 土壌データの参照用テキストファイル

壌データベースを指しており、日本では利用できない。このため後ほど別途用いる新たな土壌名を参照するため、Option 枠の Name を選択する。

④LookUp Table ボタンをクリック。

⑤Select the Table ウィンドウ(**図-3**)において、土壌名の入力されているファイル(**図-5**)を指定し、select ボタンをクリック。

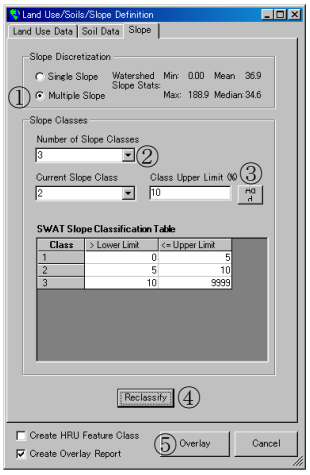

図-6 斜面条件の設定

⑥Reclassify をクリックし、土壌設定を終了。

(5) 斜面条件の設定

①**図-6**slope タブの Slope Discretization(斜面分割)枠において、複数斜面の Multiple slope を選択。

②Slope Classes 枠において、例えば斜面勾配を３つに分類する場合、slope classes の値をプルダウンより３を選択。

③Current Slope class において、例えば 1 番目の斜面の勾配を 0～5%以下と仮定した場合、slope class を 1、Class Upper limit を 5 と入力し、Add キーをクリック。同様に 2 番目の斜面の値を 10 と入力すると、SWAT Slope Classification Table にクラス分けされた斜面の諸元が表示される。

④最後に Reclassify(再分類)をクリック。

⑤土地利用、土壌、斜面の設定が終了すると、Overlay キーがアクティブになるので、クリックする。

以上で HRU の設定が終了する。

(6) 気象データの入力

気象データで必要になるのは次の 6 種。

・主要な気象観測点名称と位置座標
・日気温観測地点名と位置座標
・相対湿度観測地点名と位置座標
・日射量観測地点名と位置座標
・日雨量観測地点名と位置座標
・日平均風速観測地面名と位置座標

①SWAT メニューの Write Input Tables をクリックする。ここで User Weather Station をクリックすると、**図-7** の Weather Generator Data タブが最初に表示される。

②同 タブにおいて、Custom Database を選択する。

③代表気象観測点の名前、位置情報が格納されているファイル名を指定し、最後に OK をクリックする。wgn_locate.dbf ファイルには**表-1** の内容が記述

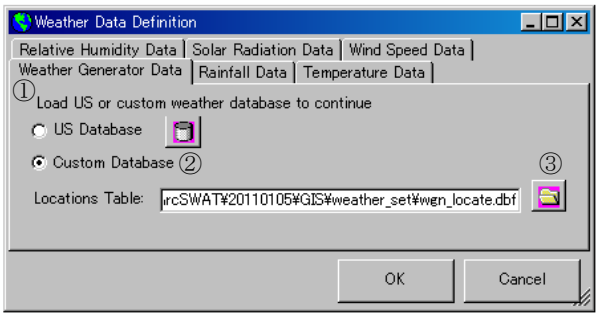

図-7 Weather Data Definition(気象データ設定)

表-1 wgn_locate.dbf の内容

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	wgn_asahi	614251.36	4720484.11	245.00
2	wgn_niseu	611125.42	4736353.88	150.00
3	wgn_hidaka	617743.57	4748127.02	280.00
4	wgn_shinwa	609480.03	4710966.17	60.00
5	wgn_ura90_nibu97	646768.70	4669253.80	32.00

※NAME の欄のファイル名は拡張子 dbf が省略されている

表-2 pcp_locate.dbf の内容

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	pcp_asahi	614251.36	4720484.11	245.00

表-3 rhd_locate.dbf の内容

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	rhd_ura90_nibu97	594433.95	4720247.69	50.00

表-4 slr_locate.dbf の内容

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	slr_hidaka	617743.57	4748127.02	280.00
2	slr_shinwa	609480.03	4710966.17	60.00

Fertilizers

表-5 ws_locate.dbf の内容

ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
1	ws_hidaka	617743.57	4748127.02	280.00
2	ws_shinwa	609480.03	4710966.17	60.00

図-8 SWAT Database の編集画面

されている。dbf 形式のファイルを作成するには、例えば OpenOffice.org の Calc などの表計算ソフト上で編集し、dbf 形式で保存すれば比較的容易に dbf ファイルが作成可能である。

④**図-7** の Rainfall data タブにおいて、雨量地点名の入力された pcp_locate.dbf(**表-2**)を指定する。

⑤同図の Temperature Data タブにおいて、日気温の観測地点名が入力された tmp_locate.dbf(**表-3**)を指定する。

⑥同図の Relative Humidity Data タブにおいて、相対湿度の観測地点名が入力された hrd_locate.dbf(**表-6** の相対湿度)を指定する。

⑦同図の Solar Radiation data タブにおいて、日射量の観測地点名が入力された slr_locate.dbf(**表-6** の全天日射量)を指定する。

表-6　気象データの入力例

日雨量(mm)

DATE	PCP
1/1/1990	0
1/2/1990	0
1/3/1990	0
1/4/1990	0
1/5/1990	0
1/6/1990	5
1/7/1990	1
1/8/1990	1

相対湿度(%)

DATE	HMD
1/1/1990	65.00
1/2/1990	63.00
1/3/1990	82.00
1/4/1990	65.00
1/5/1990	54.00
1/6/1990	79.00
1/7/1990	73.00
1/8/1990	63.00

全天日射量(MJ 換算)

DATE	SLR
1/1/1986	3.20
1/2/1986	6.79
1/3/1986	7.79
1/4/1986	3.40
1/5/1986	3.72
1/6/1986	3.89
1/7/1986	7.17
1/8/1986	7.98

日気温データ(摂氏)

DATE	MAX	MIN
1/1/1986	-2.70	-15.40
1/2/1986	-4.70	-13.70
1/3/1986	-6.30	-18.00
1/4/1986	6.00	-17.80
1/5/1986	0.80	-8.80
1/6/1986	-7.90	-10.00
1/7/1986	-3.00	-14.90
1/8/1986	-0.60	-17.40

日平均風速(m/s)

DATE	WND
1/1/1986	0.50
1/2/1986	1.20
1/3/1986	1.40
1/4/1986	1.90
1/5/1986	2.00
1/6/1986	2.50
1/7/1986	2.00
1/8/1986	0.60

※ここでは数日分しか表示していないが、データは 10 年分以上の時系列で整理されたものを使用する。

⑧　同図の Wind Speed Data タブにおいて、日平均風速観測地点名が入力された ws_locate.dbf(**表-5**)を指定する。

最後に SWAT メニューの Write Input Tables をプルダウンし、Write All をクリックする。以上で気象データの入力は完了する。参考まで、**表-6** に実際の気象データの例を示す。これらのデータも全て dbf 形式で作成しておく必要がある。

(7) SWAT database の気象データ統計値編集

SWAT メニューから Edit SWAT Input をプルダウンし、Database をクリックすると**図-8** の SWAT DATABASE 画面が表示される。ここで気象データの統計情報や土壌の透水係数などの物理性、作物の種別、施肥の内容・時期、農薬種別などを入力・設定が可能である。ここでは日流量の再現を目的としていたため、③の農業系のデータベース部分における設定はほとんど行っていない。

①　気象統計値の入力

SWAT モデルでは気象データの欠測を補完するため、気象統計値の入力が求められる。全てのデータセットが揃っていれば問題無いはずなのだが、ここを入力しないと処理が先に進まない。日単位の資料とはいえ、10 年以上のデータを統計的に処理する場合、観測地点が多くなると作業は膨大になる。このため、テキサス大学の WEB サイトから入手可能な *pcpstat. exe* と呼ばれる実行形式のアプリケーションを利用し、**表-7** に示す各種統計値の主なものを求め、**図-9** の画面において

表-7　User Weather Station Edit で入力する統計値

TMPMX	日気温最大値の月別平均値
TMPMN	日気温最小値の月別平均値
TMPSTDMX	日気温最大値の月別標準偏差
TMPSTDMN	日気温最小値の月別標準偏差
PCPMM	日雨量の月別平均値
PCPSTD	日雨量の月別標準偏差
PCPSKW	日雨量歪度の月別値
PR_W1	無降雨日に続く降雨日の月別確率
PR_W2	降雨日に続く降雨日の月別確率
PCPD	月別降雨日数の平均値
RAINHHMX	最大 0.5 時間雨量最大値の月別平均値
SOLARAV	日射量の月別平均値
DEWPT	露点温度の月別平均値
WNDAV	日平均風速の月別平均値

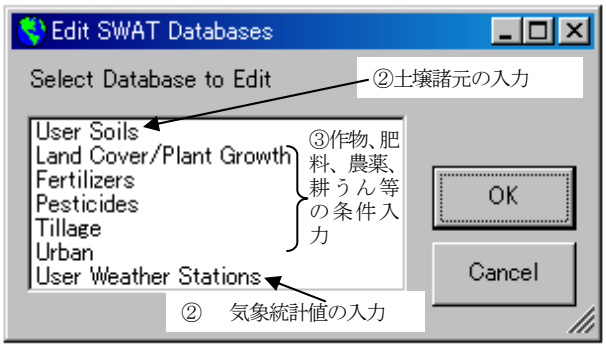

図-8　SWAT Database の編集画面

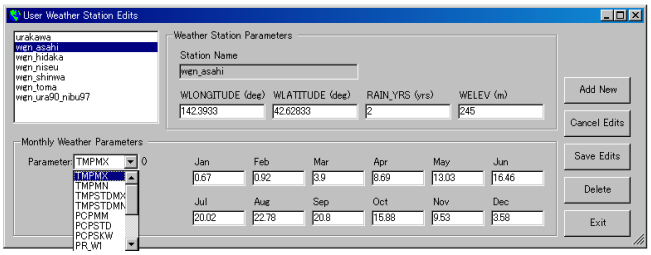

図-9　User Weather Station Edits の画面の例

入力した。pcpstat.exe で処理可能な項目は限定されているが、処理時間の大幅な節約が可能になる。

(8)SWAT Database の土壌物理諸元の編集

これまでの処理において、土壌名の入力は行っているが、土壌の厚さや透水係数などの物理性の登録を以下で行う。**図-8** の画面上で UserSoils をクリックすると、**図-10** のユーザー土壌設定画面が表示される。この画面では SWAT に組み込まれた米国の土壌のデータベースも確認できるが、わが国では利用できないため、新規に土壌名を追加して行く必要がある。

①　**図-10** の土壌設定画面において、新規に土壌名を追加するため、Add New をクリックする。

②　新規の土壌名を入力する。この土壌名は**図-5** において指定した土壌名と一致させておく必要がある。

③　NLAYERS:土壌が何層に区分されるかを入力する。

④　HYDGRP：土壌の透水性に応じて A から D を設定する必要がある。

⑤ SOL_ZMX: 土壌の最大深さであり、ここでは現地調査結果の表層から最深部までの値を入力した。

⑥ ANION_EXCL: 土壌中のアニオン排除能と呼ばれる数値であり、デフォルトで 0.5 を設定する。

⑦ SOL_CRK：土壌の空隙率

⑧ TEXTURE：土層の土性を表層から順に示したものであり、例えば SL-S-SIL は砂壌土-砂土-シルトの順に土層が形成されていることを示す。

⑨ Soil_Layer 何層目の土壌の物性を入力するかを数値で指定。

⑩ SOL_Z:n 層目の土壌厚さを入力する。

⑪ SOL_BD:n 層目の 土壌の容積湿潤密度

⑫ SOL_AWC:n 層目の充填可能水量

⑬ SOL_CBN:n 層目の有機炭素量重量%

⑭ SOL_K:n 層目の飽和透水係数

⑮ CLAY：n 層目の土壌の粘土率

⑯ SILT：n 層目の土壌のシルト率

⑰ SAND: n 層目の土壌の砂率

⑱ ROCK：n 層目の土壌の岩石率

⑲ SOL_ALB:湿潤アルベド

⑳ USLE_K：USLE の K ファクター

21 SOL_EC：電気伝導度

22 土壌各層の編集が終了したら、必ず Save Edits をクリックする。1 つの土壌名に関して何層かある土層の各々についての物性を入力していき、追加する土壌がある場合はまた①から入力を進める。

23 土壌の編集を終了したら、最後に Exit ボタンをクリックして終了。

(8) SWAT の実行

SWAT メニューの SWAT Simulation をクリックし、計算開始・終了日時や降雨分布、出力時間間隔などを指定し、SETUP SWAT RUN をクリックすると、Finished SWAT SETUP と表示され、Run SWAT キーがアクティブになるので、それをクリックすると、SWAT モデルが実行される。

3. 日流量の再現

一級河川沙流川流域の支川、額平川(A=384km^2)を対象に、前述の(1)から(8)までに示した方法でデータを構築し、各種パラメータは SWAT モデルで用意されたデフォルト値を適用して流出量の予測を行った。1990-1991 年の 2 年間をパラメータ調整の準備期間として設定し、1992 年から 1999 年までの 8 年で流出量予測を実施した。得られた結果を**図-11** に示す。実測の流量値と比較すると、降水イベント時のピーク流量が過大に、冬季および渇水期の流量が過小に評価されている。これは前報で発生した問題と同様の傾向であり、次にパラメータの調整を行うため、以下の検討を行った。

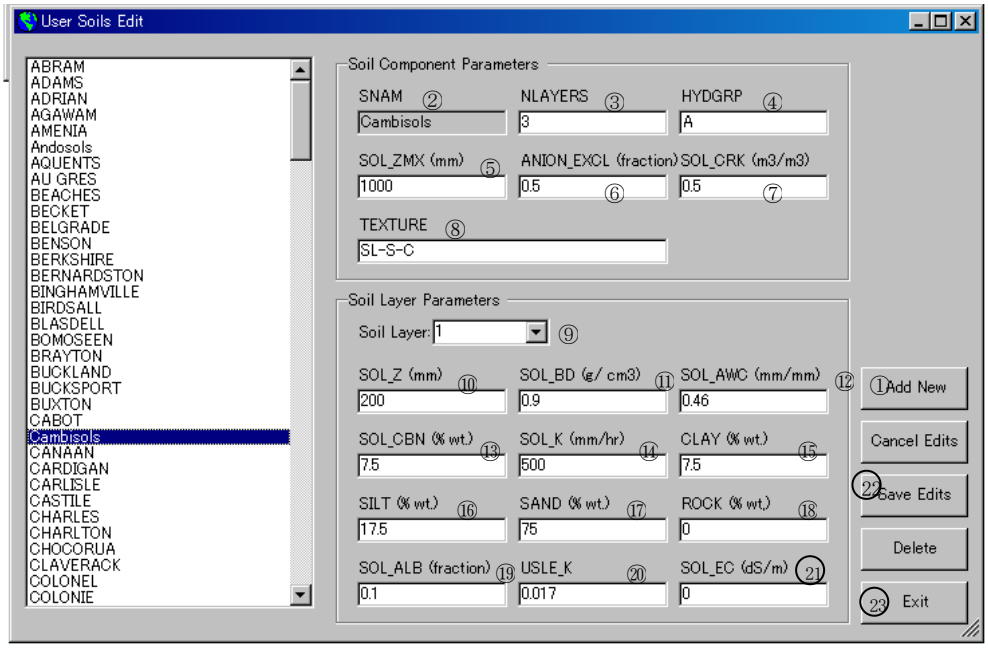

図-10 ユーザー土壌設定画面の例

(1) ピーク流量の調整

流出量グラフ(**図-11**)に示されるように、降雨が表面流(Lateral Flow) としてすぐ流出し、降雨の土壌内滞留時間がほとんど無いことが判明した。そこで、Lateral Flow の滞留時間(LAT_TIME)の調整を Edit Subbasin Inputs のメニューの Edit HRU parameters で実施した。また、蒸発散量の算出において北海道の森林の代表的な林床植生であるササの影響を評価するため、酒井 [1]が算出したクマイザサの LAI(Leaf Area Index) 1.71 を初期条件に取り入れた。この LAI の入力は前述の Edit Subbasin Inputs メニューの Edit Management Parameters で入力が可能である。

(2) 積雪および融雪期の流量調整

積雪および融雪を決定する気温の閾値を SWAT のデフォルト値である積雪=1.0℃, 融雪=0.5℃から、菅谷 [2]が求めた積雪/融雪気温の閾値を参考に、積雪=2.5℃ 融雪=2.0℃に修正した。さらに、標高による気温の低減率を考慮し融雪期のズレを再現するために、額平川流域内を標高 200m 間隔で 7 つの標高帯(elevation band)に分類し気温の調整を実施した。

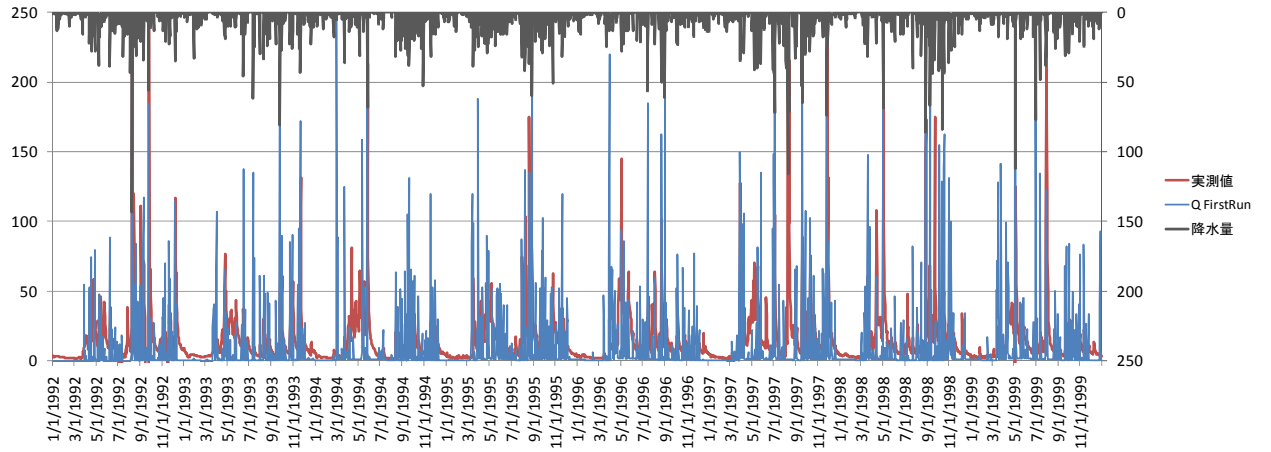

図-11　初回の流出量計算結果(パラメータの最適化を行っていない)

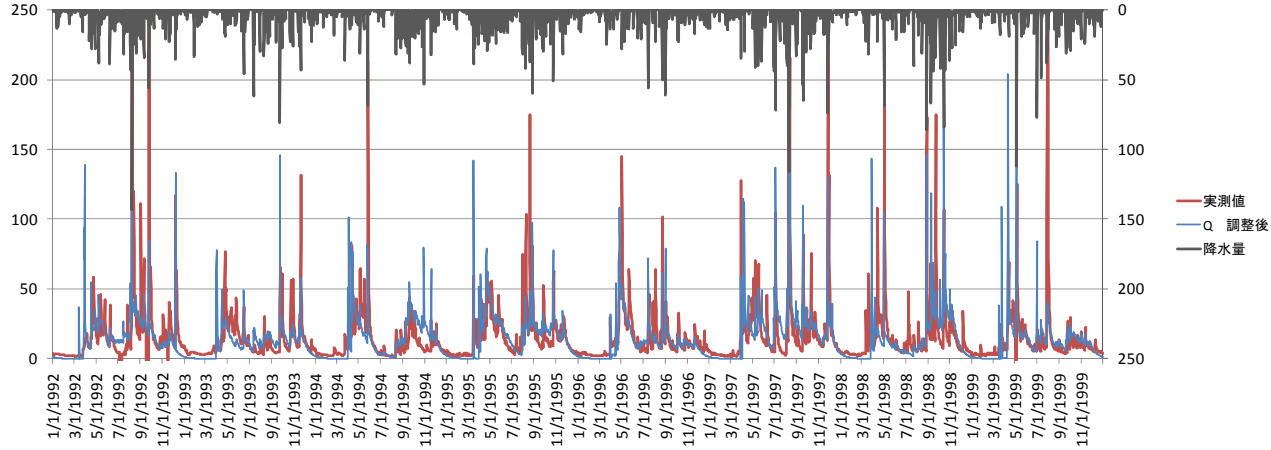

図-12　パラメータ最適化後の流出量計算結果

(3) 自動キャリブレーション

SWAT に付与されている自動キャリブレーション機能を用いて河川流出量算出に関連するパラメータの自動キャリブレーションを行った。これは地下水の滞留時間や降雨から直接流出までのタイムラグ等の直接計測し難いパラメータを、実測の流量値にフィットするように自動調整する機能である。

上記のパラメータ調整実施後の予測流出量を図-12に示す。降水イベント時のピーク流量および冬季および渇水期の流量が図-11 の結果と比較して改善されたことが読み取れる。

6．おわりに

SWATモデルにより10年程度の水文・気象資料を条件に流域からの流出量の推定を行った。前報よりも日流量の再現性が向上したものの、夏季出水のピーク流量の再現性など課題が残った。計算精度を向上する上で今後、地被、土壌、降水量、気象などの条件、SWATモデルを構成する水文モデルのソースコードの吟味も行っていく必要がある。SWATモデルに代表されるGISベースの流域物質循環モデルは地形、地被や土地利用などのこれまで国内瀬整備されてきたデータ資産をGISというプラットホームで継承できる点でメリットが大きい。わが国でもSWATモデルを用いた研究事例が増えつつあるが、データセットの構築は初心者にはハードルが高く、筆者らも苦慮したため、本報告ではその点に重点を置いて執筆した。紙面の関係でパラメータの最適化や図化に関する説明を割愛したが、別の機会に報告することとしたい。

謝辞：島根大学の宗村先生にはSWATの関するデータの提供及び設定方法について解説頂いた。北電総合設計株式会社の中村興一氏にはダム管理所の気象データをエクセルVBAにより抽出する手法を提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1）　酒井徹・貢書剛・川村健介・秋山侃(2002). 携帯型分光反射計を用いた林床植生(クマイザサ, *Sasa senanensis*)の地上部バイオマスおよび葉面積指数分布の推定. 写真測量とリモートセンシング. 41(2), pp27-35.

2）　菅谷博, 暖地積雪面の微細気象的特性とそれに基づく積雪質量推定モデル, 北陸農試報 32, pp43-64, 1990.