

水田地帯における水管理支援のための
流域モデル SWAT の改良

2014. 9

東京農工大学大学院
連合農学研究科
農業環境工学専攻

坂口 敦

学 位 論 文 要 旨

水田地帯における水管理支援のための流域モデル SWAT の改良

Improvement of a watershed model SWAT to support water management in paddy fields

農業環境工学専攻 農業環境工学大講座

坂口 敦

流域モデルの用途は様々であるが、その用途が土壌流亡対策や肥培管理の評価であっても、流域モデルは第一に流域および流域を構成する各地帯の流出特性を表現できていなければならない。本研究では、任意の土地利用シナリオが流域の水、懸濁物質、栄養塩等に与える影響の評価ツールとして世界的に活用されている SWAT (Soil & Water Assessment Tool) モデルを元に、水田地帯における流出特性や人為的な水管理を考慮しうよう改良することを検討した。SWAT モデルでは流出過程が簡素化されており、畑地帯に比べて複雑な流出過程を有する水田地帯では、流域レベルでの評価はされてきたが、より詳細なレベルとなる水田単位でのモデル評価は行われてこなかった。そこで、モデル内の水田地帯の水収支を吟味したところ、水田地帯の水管理を反映できていない事が確認された。以上から、水田地帯に対応できるように SWAT モデルの改良を試み、水田地帯の水管理を含めた評価および流域管理計画の支援が可能なツールとする事に成功した。

第 1 章では本論文の研究背景、既往研究、そして研究目的について述べた。第 2 章では水田地帯を有する流域へ SWAT モデルを適用し、流域での河川流量と水田地帯の水収支の 2 視点でモデルを評価した。水田地帯の表現方法については、既往研究で用いられてきた Curve Number 法と窪地モデル (Pothole module) の活用を 2 手法を用いた。水田地帯の出力値から、窪地モデルでは湛水下での田面水の連続的な浸透を表現できない事、そして Curve Number 法では湛水の影響を反映できない事、灌漑の影響を反映できない事、湛落

水管理を反映できない事を把握した。また、窪地モデルを用いた場合は流域レベルでのモデル効率が著しく低くなる事を確認した。第3章では前章の結果を参考にして、SWATモデル内に水田地帯の水収支をより現実的に出力する水田モジュールを構築した。特に、水田地帯の浸透プロセスにおいては可能最大浸透量というパラメータを新設し、その最適値を河川流量観測値に対するモデル効率から推定するというアイデアを試みた。更に、構築した水田モジュールを有する改良版SWATモデルを流域へと適用し、水田地帯の湛水期と非湛水期の降雨流出反応の違いへの対応、水田地帯レベルでの水収支の傾向、および河川流量推定値から流域レベルでのモデル効率を確認した。また、SWATモデルでは全ての懸濁物質の流出プロセスはMUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) を用いて計算されるが、水田モジュールに湛水田での観測結果から作成された懸濁物質の流出式を試験的に追加し、今後の水田モジュールの発展可能性を示した。さらに、SWATモデル内で考慮していない降雨流出時の土壌の封入不飽和現象が河川流量推定値に与える影響と、SWATモデルにおいて栄養塩の推定値の適合性が低くなる一因と考えられる栄養塩の浸透プロセスの地域間差異について検討し、モデルのキャリブレーション工程内に、このような現象が含まれることを指摘した。第4章では本研究を総括し、また末尾に構築した水田モジュールの使用方法を解説し、更なる改良を期して本研究にて書き換えたコードを記した。

水田地帯での水・物質移動プロセスがモデル内に存在しなかった点で、今までのSWATモデルは水田地帯を含む流域を対象とする場合には十分なプロセスモデルでは無かったと言える。よって、既往研究では不十分な水田地帯の流出プロセスをキャリブレートしていた事になり、計算結果の再現性は別にしてその結果に基づくモデル評価はブラックボックスモデルによる評価と大きく変わらないと考えられる。本研究によりSWATモデルに水田地帯の流出プロセスが加わり、また水田地帯の水管理、即ち湛落水管理、水田灌漑、田面水の浸透、田面水位を流域管理案の検討項目に加えられるようになり、SWATモデルの水田モジュールの原型を示す事ができた。これにより、水田水管理が流域に及ぼす影響について評価が可能となった。今後は目指すべき水田モジュールのデザインについて本研究で示された原型を基に、より一層の改良を行う予定である。具体的には本研究内で試験的に追加した懸濁物質の流出プロセスに加え、溶存態および浮遊物質に吸着された栄養塩の流出プロセスも含めた水環境管理のための水田モジュールに発展させていくことを目指す。

目次

1	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既往研究	2
1.3	研究目的	3
2	水田地帯を有する流域への SWAT モデルの適用	4
2.1	水田地帯での適合性を検討する必要性	4
2.2	SWAT モデルの概要	4
2.2.1	モデルの特徴	4
2.2.2	水文サブモデル	4
2.2.3	土壌流亡サブモデル	10
2.2.4	懸濁物質輸送サブモデル	11
2.2.5	キャリブレーションと評価	12
2.3	研究対象流域の概要	13
2.3.1	位置	13
2.3.2	土地利用	13
2.3.3	土壌分布	14
2.3.4	地形・地質	15
2.3.5	灌漑システム	16
2.3.6	河川および池の状況	18
2.3.7	河川水量・水質実測値	19
2.4	研究対象流域への適用	20
2.5	水田地帯の降雨流出の計算方法	32
2.6	キャリブレーション	36
2.7	流域における河川流量の検証	39
2.8	水田地帯の水収支の出力値	41
2.9	既往研究との比較	46
2.10	より良いシミュレーションに向けた提案	47
3	水田モジュールの開発	48
3.1	水田モジュール開発の概要	48
3.2	水収支の計算方法	49
3.2.1	飽和浸透機能	49
3.2.2	貯水体形状	50
3.2.3	灌漑停止機能	50
3.2.4	非湛水期の水収支機能	51
3.2.5	湛水面からの蒸発機能	52

3.3	水田モジュールを有する SWAT モデルの適用.....	53
3.3.1	阿羅田川流域への適用.....	53
3.3.2	真瀬地区の水田への適用.....	54
3.4	水田地帯の水収支の計算結果.....	54
3.4.1	阿羅田川流域の水田の浸透能の推定結果.....	54
3.4.2	真瀬地区の水田における水収支の検証.....	55
3.4.3	阿羅田川流域の水田地帯における水収支の推定値.....	57
3.4.4	灌漑停止機能と非湛水期の水収支機能の検証.....	59
3.5	流域における河川流量の検証.....	60
3.6	開発された水収支機能についての考察.....	63
3.7	懸濁物質負荷の計算方法.....	63
3.7.1	湛水田での降雨流出による懸濁物質負荷推定式.....	63
3.7.2	降雨流出による懸濁物質負荷機能.....	64
3.7.3	代掻きによる懸濁物質負荷機能.....	64
3.8	懸濁物質負荷機能の動作の確認.....	65
3.9	開発された懸濁物質負荷機能についての考察.....	71
3.10	封入不飽和現象が河川流量に与える影響.....	72
3.11	硝酸態窒素への展開.....	74
4	まとめ.....	76
4.1	研究の成果.....	76
4.2	今後の課題.....	77
	引用文献.....	78
	改良版 SWAT モデルの使用方法.....	85
	改良版 SWAT モデルのコード.....	87
	pothole.f.....	87
	apply.f.....	91
	etact.f.....	91
	subbasin.f.....	95
	irrrsub.f.....	102

1 序論

1.1 研究背景

農地管理が流域に与える影響を予測する事は困難であるが、流域単位での何かしらの問題点を解決するために農地管理手法を変更する、または予定されている農地管理手法の変遷が流域に及ぼす影響を検討する際には、困難である影響予測を行って意思決定をしなければならない。影響予測の困難さは流域での水・物質移動の複雑さに起因するが、本邦の殆どの流域にはこの複雑さを更に助長する水田という土地利用形態が存在する。本邦の農地の54%は湛水田であり（農林水産省, 2013）、本邦における水利用の3分の2は主に湛水田を主体とした農業部門で占められている。水田では稲作期に人為的湛水が行われるため、水田地帯で起きている水文学的現象や水田地帯が流域に及ぼす影響および果たしている機能は畑地帯に比べて非常に複雑である。水田地帯が流域に与える影響としては洪水緩和機能（志村, 1982）、地下水涵養機能（Iwasaki et al., 2013）、水質浄化機能（尾崎ら, 1992）のような好影響から、畑地帯と同様に懸濁物質や栄養塩の面源としての悪影響まで報告されているが、水田一筆から水田地帯、そして流域に至る好影響および悪影響の機構は、現場観測では解明が難しい。

水田地帯を有する流域という複雑な機構を対象として意思決定を行うには、任意の農地管理手法が流域に与える影響を定量的に評価するための手段が必要である。その手段の一つとして分布型流出モデルの利用が挙げられる。分布型流出モデルの利点は、流域内の任意地点での水・物質移動量を経時的に推定できる点である。更に、内在する各流出工程が物理的に計算されていれば、農地管理手法の変化などの流域の計算条件の変化に対応した推定値を出力する事ができる。タンクモデルなどにより概念的に流出工程を計算する手法では実測値の再現は可能であるが、特定の流出過程が変化した場合の影響予測を行う事はできず、意思決定には活用できない。しかしながら、流域に内在する全流出過程を物理的に計算する事は現時点では恐らく無理であり、合理的にモデルをキャリブレートする必要もある。物理的な計算とキャリブレーションのコンビネーションが求められる。

土地利用管理手法が多様な土壌、土地利用、管理形態を有する流域の水、懸濁物質、化学物質動態に与える影響を予測する事を目的に米国農務省農業研究局とテキサス A&M 大学で開発された SWAT (Soil and Water Assessment Tool) モデルは (Arnold et al., 1998)、オートキャリブレーション機能を有する分布型流出モデルである。SWAT モデルは欧米で幅広く利用され (Gassman et al., 2007)、最近アジアにおける利用も増加傾向にある。アジアの多くの流域には欧米の一般的な流域とは異なり水田地帯が存在し、上述の通り水田地帯での水・物質移動は畑地帯に比して複雑である。SWAT モデルは流域内の農地管理手法を検討する上でのツールとしては有用であると考えられるが、水田地帯を有する流域においても SWAT モデルが農地管理手法の検討に資するツールであるかは不明である。

1.2 既往研究

SWAT モデルは営農が流域の水質に与える影響を評価する目的で使われてきた。具体的には、任意の保全型農業や最適管理手法 (Best Management Practice) を実施した場合に河川の水質が欧州の水質基準を満たせるか、または気候変動の影響により水・物質の流出状況が変化した場合に河川の水質が河川の生態系を健全に保てる水準を維持できるかを判断する際に使用された事例などがある (Gassman et al., 2014)。既往研究は、モデル内のパラメータセットにまずは初期値を想定して仮の予測値を出力し、次に河川での実測値と仮の予測値を用いてパラメータセットをキャリブレートし、そしてキャリブレーションに使用したのとは別の期間の実測値を用いてキャリブレーション後のパラメータセットの検証を行うというルーチンで行われてきた。検証は一般的に河川流量や水質の予測値と実測値の間の差異を指標として行われている。Refsgaard et al. (2010) は SWAT モデルのパラメータの多さから、非現実的なキャリブレーションが行われている可能性を指摘している。水田地帯を有する流域における SWAT モデルの適用結果 (Tripathi et al., 2005; Behera and Panda, 2006; Ouyang et al., 2008; Somura et al., 2009) も河川流量を用いて流域レベルの差異を指標として検証されており、非現実的なキャリブレーションが為されている可能性がある。現在の所、流域に内在する水田地帯レベルでの検証は為されておらず (Sakaguchi et al., 2014a)、水田地帯を有する流域における SWAT モデルの適合性は不明である。非現実的なキャリブレーションはモデルの不確実性を高めるが、既往研究に対して不確実性分析の必要性が十分に考慮されていなかったとの指摘がある (Gassman et al., 2014)。

既往研究における SWAT モデル内での水田地帯の扱いは、主に 2 手法がある (Watanabe et al., 2013)。第一はカーブナンバー (curve number) を用いる手法であり (Tripathi et al., 2005; Behera and Panda, 2006; Ouyang et al., 2008; Somura et al., 2009)、土壌保全局カーブナンバー法 (National Resources Conservation Service (NRCS), 2004) によって水田地帯に指定された HRU の降雨流出量を計算する手法である。即ち、降雨流出量は降雨日当日の降雨量、降雨前 5 日間の降雨量、および地表のカーブナンバー値から決定される (Im et al., 2007; Jung et al., 2012)。特に、Behera and Panda (2006) は本手法によって水田地帯が流域に与える影響を評価した。しかしながら、本手法には湛水過程が内在されておらず、水田地帯に対して利用する事の妥当性が疑問である。第二は水田地帯に指定された HRU の土層部上、即ち地表で水を湛水する手法である (Kang et al., 2006; Xie and Cui, 2011)。SWAT モデルに内在する窪地 (Pothole) モジュールは水田のように HRU を湛水させる事が可能であり、本手法に利用できると考えられている。窪地モジュールは本来は米国コーンベルト地帯で頻繁に見られるポットホール地形用開発されたものであるが (Du et al., 2005)、本モジュールを水田地帯のシミュレーションに利用する事が SWAT theoretical documentation (Neitsch et al., 2002) において推奨されている。また、Xie and Cui (2011)

は窪地モジュールに改造を加え、窪地の湛水位が閾値よりも低下したら満水まで灌水する事を繰り返すアルゴリズムで水田灌漑の再現を試みた。しかしながら、水田地帯での利用をも意図して開発されたモジュールではないので、水田地帯に対して利用する事の妥当性は SWAT theoretical documentation には記されていない。カーブナンバーを用いる手法(以下、カーブナンバー手法)の利点は水田地帯に本手法を適用した論文の数の多さであり、一方で窪地モジュールを用いる手法(以下、窪地手法)の利点は窪地モジュールに湛水過程が内在している事である。

SWAT モデルでは流域内の流出過程が簡素化されているため、必要に応じて改良して使用されるべきと考えられている (Gassman et al., 2007)。その為に、SWAT モデルのコードは公開されている。実際に、低山地帯向けの SWAT-G (Eckhardt et al., 2002)、森林地帯向けの SWAT-BF (Watson et al., 2008)、モンスーン気候下などの降雨流出をカーブナンバー法では再現しにくい地域向けの SWAT-WB (White et al., 2011) など、目的に応じた改良版が開発されている。

1.3 研究目的

本研究では、水田地帯の流出工程に既往研究と同じ手法を適用し、既往研究と同じく河川流量実測値を用いてモデル内のパラメータセットをキャリブレートし、そして既往研究とは異なり水田地帯レベルでのモデル予測値を用いて水田地帯での適合性を検証する。使用する SWAT モデルのバージョンは SWAT 2009 ver. 488 である。今までは流域レベルでの検証しか行われていなかったため、水田地帯レベルでの検証は初の試みとなる。また、水田地帯を対象とした計画支援を行う場合には水田地帯部分を精緻化した改良版が必要であると考えられる。現実をモデル化している以上、不確実性をゼロにする事は出来ないが、不確実性の高いモデルでは計画支援ツールとしては使用できない。よって、不確実性の幅を狭めるべく、本研究では SWAT モデルのコードを書き換えて水田地帯に応じた改良版を開発する。具体的には湛水と落水機能を備え、湛水状態では降雨と灌水により田面水位が上昇し、水面からの蒸発と稲からの蒸散および土壌への浸透により田面水位が下降し、田面水位が水尻の高さを超えた場合に越流が生じ、落水状態では畑地帯と同様にカーブナンバー法などにより降雨流出が計算される水田モジュールを SWAT モデル内に作成する。特に湛水状態での浸透工程については可能最大浸透能というパラメータを新設し、河川流量の実測値から水田地帯の浸透量を逆推定できるようにする。更に、水田モジュールに湛水田からの懸濁物質流出機能も持たせる。以上により、水田地帯における水管理計画を支援する事を目的として、SWAT モデルの改良を行う。

2 水田地帯を有する流域への SWAT モデルの適用

2.1 水田地帯での適合性を検討する必要性

水田地帯を有する流域における SWAT モデルの適用結果は、河川流量実測値とモデル推定値との差異を指標として流域レベルで検証されており、現在の所、流域に内在する水田地帯レベルでの検証は為されていない。既往研究における SWAT モデル内での水田地帯の扱い方は、カーブナンバー手法と窪地手法の 2 手法がある。カーブナンバー手法については水田地帯が流域に与える影響の評価にも使用されているが、本手法には湛水過程が内在されておらず、水田地帯に対して利用する事の妥当性が疑問である。窪地手法については、窪地モジュールは水田地帯での利用を意図して開発されたモジュールではないので、水田地帯に対して利用する事の妥当性は確認されていない。

よって、両手法について水田地帯レベルでの検証を行い、水田地帯を有する流域における SWAT モデルの適合性を明らかにする必要がある。

2.2 SWAT モデルの概要

2.2.1 モデルの特徴

SWAT モデルは、土地利用管理手法が多様な土壌、土地利用、管理形態を有する流域の水、懸濁物質、化学物質動態に与える影響を予測する事を目的に開発された。巨視的には分布型流出モデルであるが、対象流域を更に小流域に分割しており、小流域内は集中型モデルとなっている。流出過程は陸地での流出工程と水路での流出工程に分けられてシミュレートされ、両工程は対象とする過程ごとに作成されたサブモデルから構成されている。農地管理に重点が置かれており、土壌データベースや農地管理データベースを備えている。

2.2.2 水文サブモデル

SWAT モデルは流域 (Watershed) を河川の分岐点を指標として再分割した小流域 (Sub-Basin) において小流域の流出量を計算し、測定点よりも上流側にある各小流域の河川区間の流出量から河道追跡法を用いて測定点での河川流量を求めるルーチンで流域全体の流出量を計算する構造になっている。小流域における流出量は、小流域内で同一の土壌区分・土地利用区分・勾配区分を有し同一の水文学的特徴を有すると想定される領域ごとに計算された流出量を合計する事で算出する構造となっている。この領域を SWAT モデルでは HRU (Hydrological Response Unit) と命名している。SWAT モデルに ArcGIS (Environmental Systems Research Institute, 2006) によるインターフェイスを設けた ArcSWAT (Olivera et al., 2006) には Watershed Delineator という機能があり、この機能を利用すると GIS の DEM (Digital Elevation Model) レイヤのメッシュ間流向を集積し、

集積されたメッシュの面積が、使用者が指定した閾値に達した所で Digital Stream が形成される。Digital Stream は地形上の谷に相当するポリラインであり、必ずしも Digital Stream の全区間が現実世界の流水が見られる河川区間に対応する訳ではない。Watershed Delineator が形成した Digital Stream の分岐点、もしくは使用者が指定した河川ポリラインレイヤの分岐点、または使用者が指定した分岐点位置が流域を小流域に分割する際の河川分岐点の指標となる。HRU は小流域内に想定された仮想上の領域であり、地理的に連続したポリゴンレイヤではない。使用者が土壌区分・土地利用区分・勾配区分をどの様に指定するかによって、任意の小流域を形成する HRU の数、任意の HRU の面積が決定される。

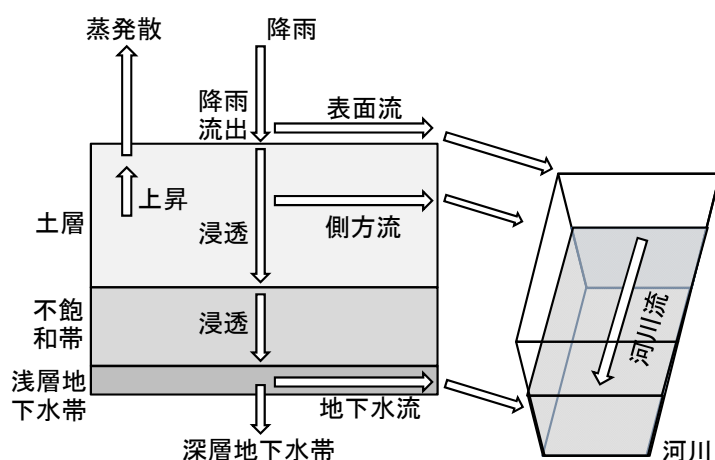


図 2.1 HRU における水移動工程

HRU における水移動工程を図 2.1 に示す。HRU は土層、土層から浅層地下水面までの不飽和帯、浅層地下水帯、深層地下水帯、小流域内の河川区間から構成される。HRU における水移動工程は降雨から始まり、降雨流出反応の計算方法である Curve Number 法 (National Resources Conservation Service (NRCS), 2004) もしくは Green-Ampt 法 (Mein et al., 1973) によって表面流出水と浸透水に分けられる。使用者がどちらの降雨流出反応式を採用するかを選択する。以下に双方の計算式を示す。

Curve Number 法 :

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad \text{式 2.1}$$

$$S = 25.4 (1000 / CN - 10) \quad \text{式 2.2}$$

Q: 表面流出量(mm)、 P: 降雨量(mm)、 S: 最大貯留量(mm)、 CN: カーブナンバー値

Green-Ampt 法 :

$$f_{inf} = K_e (1 + \Psi_{wf} \Delta\theta_v / F_{inf}) \quad \text{式 2.3}$$

f_{inf} : 時刻 t における浸透能(mm h^{-1})、 K_e : 土壌の有効透水係数(mm h^{-1})、 Ψ_{wf} : 浸潤前線のマトリックポテンシャル(mm)、 $\Delta\theta_v$: 浸潤前線の通過による体積含水率の変化率(mm / mm)、 F_{inf} : 時刻 t における積算浸透量(mm)

双方の降雨流出反応式を比較すると、Curve Number 法は日単位の降雨データの利用に適している一方でGreen-Ampt 法は時間降雨量や10分単位降雨量などの日内単位の降雨データの利用に適している。降雨量の内、Curve Number 法もしくはGreen-Ampt 法によって表面流出分とされた水量は、次の表面流出時間式にて算出された時間差をもってHRUが属する小流域内の河川区間の河川流量に加算される。尚、表面流出時間式はKinematic wave model (Lighthill and Whitham, 1955) を基に作られたものであり、前項では地表面での表面流、後項では地表面の谷部分での表面流(河川流ではない)の流下時間を求めている。

$$t_{conc} = L_{slp}^{0.6} n_{ov}^{0.6} / 18slp^{0.3} + 0.62L n_{ov}^{0.75} / (\text{Area}^{0.125} slp_{ch}^{0.375}) \quad \text{式 2.4}$$

t_{conc} : 降雨の開始から小流域内の全表面流が河川流に加わるまでの時間(h) (最遠隔地の表面流が河川流に加わるまでの時間)、 L_{slp} : 小流域の斜面長(m)、 n_{ov} : 地表面のマニングの粗度係数、 slp : 小流域の平均勾配(m m^{-1})、 L : 地表面の谷部分の長さ(m)、 Area : 小流域の面積(km^2)、 slp_{ch} : 地表面の谷部分の勾配(m m^{-1})

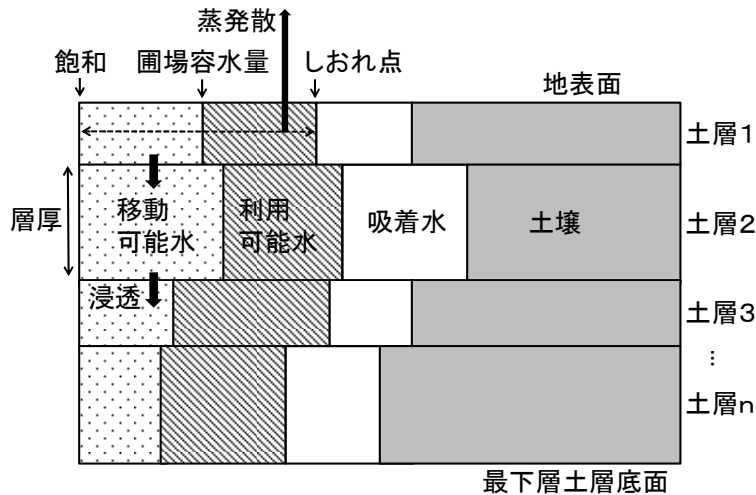


図 2.2 土層の構成

降雨量の内、Curve Number 法もしくはGreen-Ampt 法によって浸透水分とされた水量は、図 2.2 に示す土層内を浸透する。土層は任意数の土層の集積により構成されており、最上層土層の表面が地表面、最下層土層の底面が図 2.1 に示した不飽和帯と土層の境界面となっている。各土層には飽和時点、圃場容水量時点、しおれ点時点での土壌水分量が設定されており、各時点での土層の土壌水分量は以下の式で定義されている。

飽和：

$$SAT = (1 - \rho_b / 2.65) Z \quad \text{式 2.5}$$

圃場容水量：

$$FC = AWC Z + WP \quad \text{式 2.6}$$

しおれ点：

$$WP = (0.4 \rho_b m_c / 100) Z \quad \text{式 2.7}$$

SAT： 飽和時の土層の土壌水分量(mm)、 ρ_b ： 土壌の仮比重($Mg\ m^{-3}$)、 Z： 土層の層厚(mm)、 FC： 圃場容水量時の土層の土壌水分量(mm)、 AWC： 利用可能水容量($mm\ mm^{-1}$)、 WP： しおれ点時の土層の土壌水分量(mm)、 m_c ： 土壌の粘土含有率(%)

尚、利用可能水容量 (AWC) は土壌の水分特性に基づいて設定する必要があり、SWAT モデルでは次の式で定義されている。

$$AWC = FC' - WP' \quad \text{式 2.8}$$

FC'： 33kPa の吸引圧を掛けた時の土壌水容量($mm\ mm^{-1}$)、 WP'： 1500kPa の吸引圧を掛けた時の土壌水容量($mm\ mm^{-1}$)

SWAT モデルでは飽和時点から圃場容水量時点までの土壌水分を移動可能水、圃場容水量時点からしおれ点時点までの土壌水分を利用可能水、しおれ点時点より少ない土壌水分を吸着水と区分しており、移動可能水のみが浸透可能であり、また移動可能水と利用可能水が蒸発散可能と想定している。以下に、移動可能水が下方浸透する際の水フラックスの計算式を示す。

$$W_{perc} = (SW - FC) (1 - \exp(-\Delta t / TT_{perc})) \quad \text{式 2.9}$$

$$TT_{perc} = (SAT - FC) / K_s \quad \text{式 2.10}$$

W_{perc} ： 任意日に下層に浸透する水量(mm)、 SW： 任意日の土層の土壌水分量(mm)、 Δt ： 時間間隔の長さ(h)、 TT_{perc} ： 浸透に要する時間(h)、 K_s ： 土壌の飽和透水係数($mm\ h^{-1}$)

土層中の土壌水分の一部は側方流として河川に流出するものと想定されており、Kinematic storage モデル (Sloan et al., 1983) によって側方流量 (式 2.11) が算出され、土壌中を側方移動するのに要する時間差を含んだ当日の側方流出量 (式 2.15) が小流域内の河川区間の河川流量に加算される。

側方流量：

$$Q'_{lat} = 0.024 (2 SW_{ly,excess} K_s \tan(\alpha)) / (\varphi_d L_{hill}) \quad \text{式 2.11}$$

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{式 2.12}$$

$$\varphi_d = \varphi_{soil} + \varphi_{fc} \quad \text{式 2.13}$$

当日の側方流出量：

$$Q_{lat} = (Q'_{lat} + Q_{lat,stor,j-1}) (1 - \exp(-1 / TT_{lag})) \quad \text{式 2.14}$$

$$TT_{lag} = 10.4 L_{hill} / K_{s,max} \quad \text{式 2.15}$$

Q'_{lat} ： 土層内の側方流量(mm)、 $SW_{ly,excess}$ ： 土層の排水可能水量(mm)、 K_s ： 飽和透水係数(mm h⁻¹)、 α ： 傾斜角度、 φ_d ： 排水可能な間隙率(mm mm⁻¹)、 L_{hill} ： 斜面長(m)、 SW_{ly} ： 土層の土壌水分量(mm)、 FC_{ly} ： 圃場容水量時の土層の土壌水分量(mm)、 φ_{soil} ： 土層の全間隙率(mm mm⁻¹)、 φ_{fc} ： 圃場容水量時の間隙率(mm mm⁻¹)、 Q_{lat} ： 当日の河川への側方流出量(mm)、 $Q_{lat,stor,j-1}$ ： 前日の河川への側方流出量では流出しきれなかった前日の土層内の側方流量の残余(mm)、 TT_{lag} ： 側方流出に要する時間(d)、 $K_{s,max}$ ： 土層内の最も透水係数が高い層の飽和透水係数(mm h⁻¹)

最下層土層の底面から不飽和帯に浸透した土壌水は、降雨－地下水反応モデル (Venetis, 1969) に従った時間差をもって浅層地下水帯に達する。以下に降雨－地下水反応モデルを示す。

$$W_{rchrg,i} = (1 - \exp(-1 / \delta_{gw})) W_{seep} + \exp(-1 / \delta_{gw}) W_{rchrg,i-1} \quad \text{式 2.16}$$

$W_{rchrg,j}$ ： 当日に浅層地下水帯に流入する浸透水量(mm)、 δ_{gw} ： 遅延日数(d)、 W_{seep} ： 当日に最下層土層の底面に存在する土壌水分量(mm)、 $W_{rchrg,i-1}$ ： 前日に浅層地下水帯に流入した浸透水量(mm)

遅延日数 (δ_{gw}) は実測値によって設定する事ができないパラメータであり、仮定の遅延日数と地下水位変動実測値の関係から推定する。SWAT モデルにおいては、地下水流が基底流を形成している河川流量からキャリブレーションにより遅延日数を推定する。

浅層地下水帯に達した浸透水の一部は、浅層地下水帯の水量が設定された閾値を超えると式 2.17 に従って地下水流として河川に流入する。また、一部は式 2.18 に従って深層地下水帯に浸透する。

$$Q_{qw,i} = Q_{gw,i-1} \exp(-\alpha_{gw} \Delta t) + W_{rchrg} (1 - \exp(-\alpha_{gw} \Delta t)) \quad \text{式 2.17}$$

$$W_{deep,mx} = \beta_{deep} W_{rchrg} \quad \text{式 2.18}$$

$Q_{qw,i}$ ： 当日の地下水流の河川流入量(mm)、 $Q_{gw,i-1}$ ： 前日の地下水流の河川流入量(mm)、 α_{gw} ： 基底流の減衰定数、 Δt ： 単位時間 (常に 1 日)、 $W_{deep,mx}$ ： 当日の深層地下水帯への最大浸透量(mm)、 β_{deep} ： 深層地下水帯への浸透係数

SWAT モデルでは先に述べた遅延日数 (δ_{gw}) の他、減衰定数 (α_{gw}) および浸透係数 (β_{deep}) も河川流量実測値からキャリブレーションによって決定するパラメータとなっている。流域レベルで地下水流の動きを実測したり、地下水帯の透水性を測定したりする事は非常に大変な作業である。式 2.16 から式 2.18 に示したように、SWAT モデルでは地下水流は殆どキャリブレーションにより決定されている。

土層中の土壤水分の蒸発散量は、Penman-Monteith 法 (Monteith, 1965)、Hargreaves 法 (Hargreaves et al., 1985)、Priestley-Taylor 法 (Priestley and Taylor, 1972) の内、使用者が指定した何れかの方法で推定された可能最大蒸発散量を基に算出される。何れの方法においても可能最大蒸発散量は使用者が設定する気象データに基づいて推定される。可能最大蒸発散量から実蒸発量および実蒸散量を算出する工程では、気象データとは別に土層の土壤水分量と作物の葉面積指数 (LAI) が使用される。SWAT モデルにおいて、葉面積指数は図 2.3 に示すように作物が生育を開始してからの積算温度の増加に伴って作物毎に設定された葉面積指数最大値まで増大し、作物毎に設定された成熟日までの積算温度に達する手前に設定された葉面積の減衰開始期を以て減少を開始するとの想定に従って算出される。

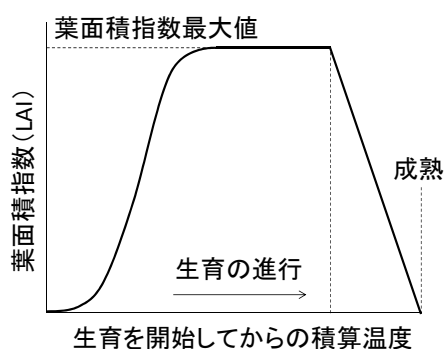


図 2.3 積算温度の増加に伴う葉面積指数の変化

HRU で発生した表面流、側方流、および地下水流は HRU が属する小流域の河川区間の河川流量となる。更に上流側の小流域から流入した河川流量が加算される。この小流域の河川区間の河川流量は、Variable storage routine method (Williams, 1969) もしくは Muskingum river routing method (McCarthy, 1938) に従い下流側の小流域に流下する。双方とも Kinematic wave model を変形したモデルであり、使用者がどちらのモデルを利用するかを選択する。

Variable storage routine method :

$$V_{out} = SC (V_{in} + V_{stored}) \quad \text{式 2.19}$$

V_{out} : 小流域内の河川区間から下流側の小流域への流出量(m^3)、 SC : 貯留係数、 V_{in} : 上流側の小流域から小流域内の河川区間への流入量(m^3)、 V_{stored} : 小流域内の河川区間での貯留水量(m^3)

Muskingum river routing method :

$$V_{stored} = K (X q_{in} + (1 - X) q_{out}) \quad \text{式 2.20}$$

q_{in} : 上流側の小流域から小流域内の河川区間への流入速度($m^3 s^{-1}$)、 q_{out} : 小流域内の河川区間から下流側の小流域への流出速度($m^3 s^{-1}$)、 K : 貯留時間係数(s)、 X : 重み付け定数

2.2.3 土壌流亡サブモデル

SWAT モデルでは、全ての地表面からの土壌流亡量が水文サブモデルで算出された降雨時の表面流出量を基に、MUSLE 式 (Williams and Berndt, 1977) によって HRU 単位で計算される。MUSLE 式では、USLE 式 (Wischmeier and Smith, 1978) において降雨量から求められる降雨係数項を降雨流出量から求めているため、水文サブモデルの出力値である表面流出量を土壌流亡量の算出に使用する事ができる。以下に MUSLE 式を示す。

$$A = 11.8 (Q_{usle} q_p)^{0.56} K_{usle} L_{usle} S_{usle} C_{usle} P_{usle} \quad \text{式 2.21}$$

A : 降雨イベント時の土壌流亡量 (Mg)、 Q_{usle} : 降雨イベント時の表面流出水量 (m^3)、
 q_p : ピーク時の表面流出速度 ($m^3 s^{-1}$)、 K_{usle} : 土壌係数、 L_{usle} : 斜面長係数、
 S_{usle} : 傾斜係数、 C_{usle} : 作物係数、 P_{usle} : 保全係数

SWAT モデルでは斜面長係数 (L_{usle}) および傾斜係数 (S_{usle}) を DEM レイヤから HRU 単位で算出する。SWAT モデル内の MUSLE 式の注意点として、作物係数 (C_{usle}) は通常の USLE 式もしくは MUSLE 式とは異なり最小値で設定する必要がある。これは、作物の成長に伴い作物係数が変化する想定となっているためである。SWAT モデル内には多くの畑作物および植生 (草地や林地など) を対象とした作物係数の最小値のデータベースが内在している。HRU で発生した土壌流亡は、HRU が属する小流域の河川に流入する。尚、SWAT モデルでは栄養塩などの土粒子に吸着した状態で圃場等から河川に流出する物質の流出量も土壌流亡量を基に算出されるため、SWAT モデルにおいて MUSLE 式は土壌流亡量のみならず栄養塩などの吸着態の物質全般の動態予測に使用されている。

2.2.4 懸濁物質輸送サブモデル

水文サブモデルで算出された小流域内の河川流量と土壌流亡サブモデルで算出され河川に流入した土壌流亡量を基に、図 2.4 に示すように小流域の河川内での懸濁物質の沈着量 (式 2.23)、舞い上がり量 (式 2.24)、そして下流側の小流域の河川への懸濁物質の流出量 (式 2.26) が算出される。尚、土壌流亡サブモデルで算出された土壌流亡量は、河川に流入すると懸濁物質として扱われる。沈着するか舞い上がるかは、現在の河川の流速から求められた河川水中に維持可能な懸濁物質の最大濃度を、現在の河川水中の懸濁物質濃度が上回っているか下回っているかで決定される。

河川水中に維持可能な懸濁物質の最大濃度：

$$\text{Conc}_{\text{sed,ch,mx}} = C_{\text{sp}} V_{\text{ch,pk}}^{\text{spexp}} \quad \text{式 2.22}$$

$\text{Conc}_{\text{sed,ch,mx}}$ ： 河川水中に維持可能な懸濁物質の最大濃度(Mg m^{-3})、 C_{sp} ： 沈着した懸濁物質の再浮遊係数、 $V_{\text{ch,pk}}$ ： 河川流のピーク流速(m s^{-1})、 spexp ： 沈着した懸濁物質の再浮遊指数

懸濁物質の沈着量・舞い上がり量：

$$\text{sed}_{\text{dep}} = (\text{conc}_{\text{sed,ch,i}} - \text{conc}_{\text{sed,ch,mx}}) V_{\text{ch}} \quad \text{If } \text{conc}_{\text{sed,ch,i}} > \text{conc}_{\text{sed,ch,mx}} \quad \text{式 2.23}$$

$$\text{sed}_{\text{deg}} = (\text{conc}_{\text{sed,ch,mx}} - \text{conc}_{\text{sed,ch,i}}) V_{\text{ch}} K_{\text{ch}} C_{\text{ch}} \quad \text{If } \text{conc}_{\text{sed,ch,i}} < \text{conc}_{\text{sed,ch,mx}} \quad \text{式 2.24}$$

sed_{dep} ： 懸濁物質の沈着量(Mg)、 sed_{deg} ： 懸濁物質の舞い上がり量(Mg)、 $\text{conc}_{\text{sed,ch,i}}$ ： 上流側の河川からの懸濁物質流入量を含む河川水中の懸濁物質の初期濃度(Mg m^{-3})、 V_{ch} ： 河川流量(m^3)、 K_{ch} ： 河川浸食係数($\text{cm h}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)、 C_{ch} ： 河川被覆係数

下流側の小流域の河川への懸濁物質の流出量：

$$\text{sed}_{\text{ch}} = \text{sed}_{\text{ch,i}} - \text{sed}_{\text{dep}} + \text{sed}_{\text{deg}} \quad \text{式 2.25}$$

$$\text{sed}_{\text{out}} = \text{sed}_{\text{ch}} V_{\text{out}} / V_{\text{ch}} \quad \text{式 2.26}$$

sed_{ch} ： 河川水中の懸濁物質質量(Mg)、 $\text{sed}_{\text{ch,i}}$ ： 河川水中の懸濁物質の初期量(Mg)、 sed_{out} ： 下流側の小流域の河川への懸濁物質の流出量(Mg)、 V_{out} ： 下流側の小流域の河川への流出水量(m^3)

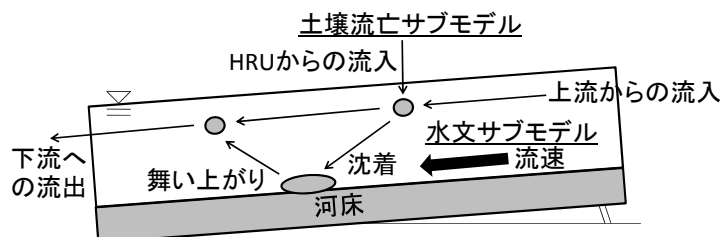


図 2.4 河川内での懸濁物質の輸送

2.2.5 キャリブレーションと評価

SWAT モデルはモデル内に物理的な諸式を内在したモデルではあるが、完全に物理法則に則って全工程を計算している訳ではない。一例を挙げると、WEPP モデル (Flanagan and Nearing, 1995) の方がより物理的なモデルである。SWAT モデルの特徴はキャリブレーションにある。流域レベルでの水・物質循環は非常に複雑であり、流域に内在する全ての過程を物理法則によってモデル化する事は困難であると考えられる。そこで、SWAT モデルは達成が困難と思われる物理法則の追及を回避して、河川流量や河川水の溶質の濃度の経時的実測値を用いてモデル内のパラメータをキャリブレートし、現実的な予測値を出力するという方針をとっている。そして、任意の期間の実測値を用いてキャリブレートしたパラメータの値が他の期間（以降、バリデーション期間）を対象とした場合でも通用する事を、キャリブレーション期間の実測値を用いて決定したパラメータ値により算出した予測値とバリデーション期間の実測値を比較する事で検証している。

パラメータのキャリブレーションおよびバリデーション期間の予測値の検証には、キャリブレーション結果および検証結果の良し悪しを評価するための指標が必要である。SWAT モデルでは、指標として流域モデルのモデル効率の評価指標である Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) を採用している。

$$NSE = 1 - \frac{\sum [i=1..n](M_i - O_i)^2}{\sum [i=1..n](O_i - O_{avg})^2} \quad \text{式 2.27}$$

n : 観測回数、 M_i : タイムステップ(i)における予測値、 O_i : タイムステップ(i)における実測値、 O_{avg} : 実測値の平均値

NSE の値は $-\infty$ から 1 の間をとる。NSE が 1 の場合はモデルが完全に対象河川の実測値を予測した事を意味し、NSE が負の値の場合はモデル予測値よりも実測値の対象期間内の平均値の方が経時的実測値に近い事を意味する (Immerzeel et al., 2008)。通常、NSE が高ければモデル予測値と実測値の総量の差異は小さくなるが、SWAT モデルを用いた研究ではモデル予測値と実測値の総量の差異の評価に PBIAS という指標も併用している。

$$PBIAS = 100 \frac{\sum [i=1..n](O_i - M_i)}{\sum [i=1..n](O_i)} \quad \text{式 2.28}$$

PBIAS は評価対象のデータの偏りを百分率で示す。PBIAS が 0%の場合はモデル予測値に偏りが無い事を意味する。PBIAS が正の値の場合はモデルの過小予測を意味し、負の値の場合はモデルの過大予測を意味する (Gupta et al., 1999)。

2.3 研究対象流域の概要

2.3.1 位置

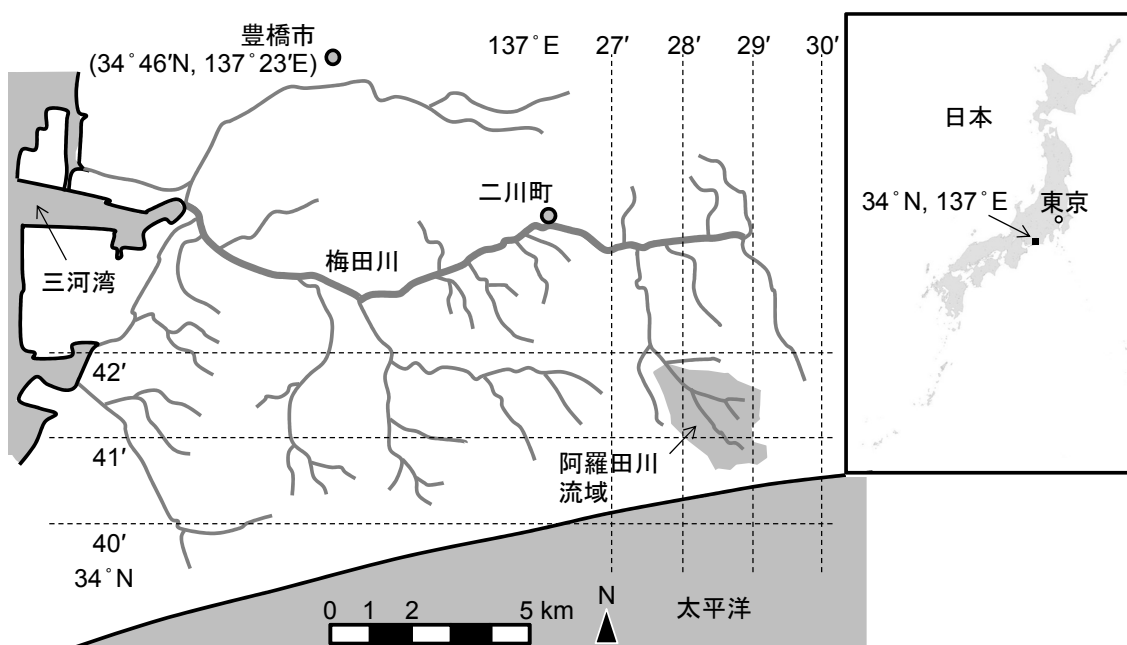


図 2.5 対象流域の位置

本研究の対象流域は愛知県豊橋市に位置する阿羅田川流域であり、阿羅田川は三河湾に流出する二級河川である梅田川の支流である。対象流域は北緯 34 度 40 分から 34 度 42 分、東経 137 度 27 分から 137 度 30 分の範囲内に位置し、流域面積は 3km² である。阿羅田川流域から約 21km 東方に位置する浜松特別地域気象観測所での気象観測値によると、年平均降水量は 1809.1mm、年平均最高気温は 20.5 度、年平均最低気温は 12.8 度、年平均相対湿度は 76%、年平均風速は 3.4 m s⁻¹、年平均日射量は 13.5 MJ m⁻² である。

2.3.2 土地利用

2002 年版 25,000 分の 1 土地利用図(国土地理院, 2002)に基づく対象流域内の土地利用を図 2.6 に示す。流域面積の 56.4%が畑地に占められており、ついで 18.0%が水田に占められている。全体的な傾向として、台地は畑地として、谷地は水田として利用されている。畑地の作目としては、夏季はタバコの他多様な作目や裸地が見受けられるが、冬季はほぼキャベツのみとなる。JA 豊橋によると、水田での主要な作付け品種は「あいちのかおり SBL」である。水田に暗渠排水は見受けられない。果樹園では主にブドウと梨が栽培されている。林地は照葉樹林が占めている。

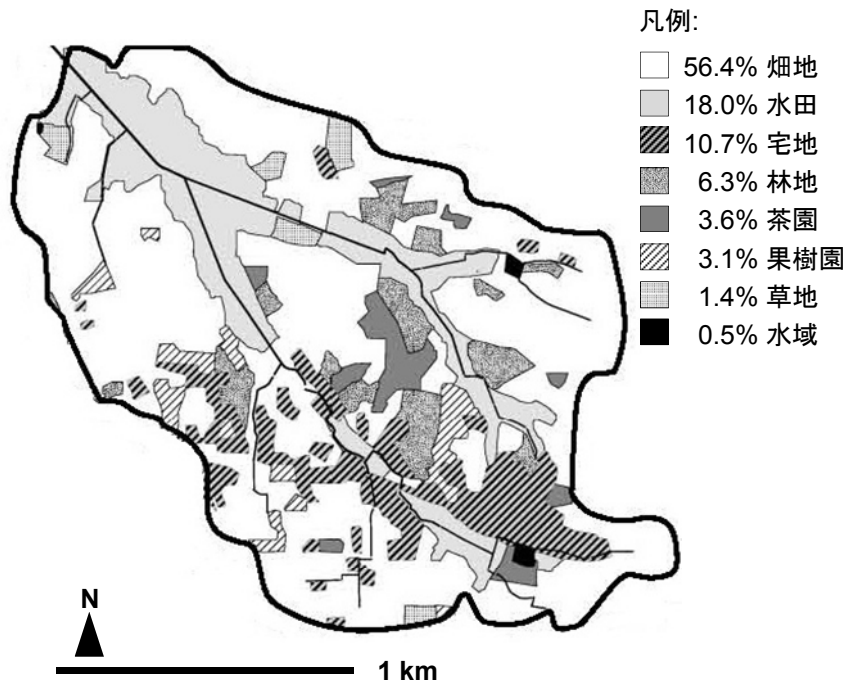


図 2.6 対象流域の土地利用図

2.3.3 土壌分布

1992年版の農耕地土壌分類(高田ら, 2009)に基づく対象流域内の土壌図を図 2.7 に示す。流域面積の 61.8%が細粒黄色土、33.8%が中粗粒グライ台地土に分類され、この 2 種で流域面積の 95.6%を占める。全体的な傾向として、細粒黄色土圃場は畑地として、中粗粒グライ台地土圃場は水田として利用されている。

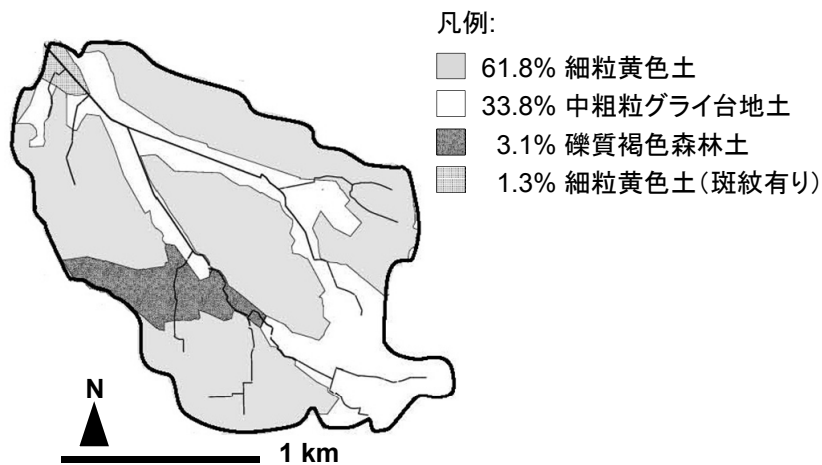


図 2.7 対象流域の土壌図

2.3.4 地形・地質

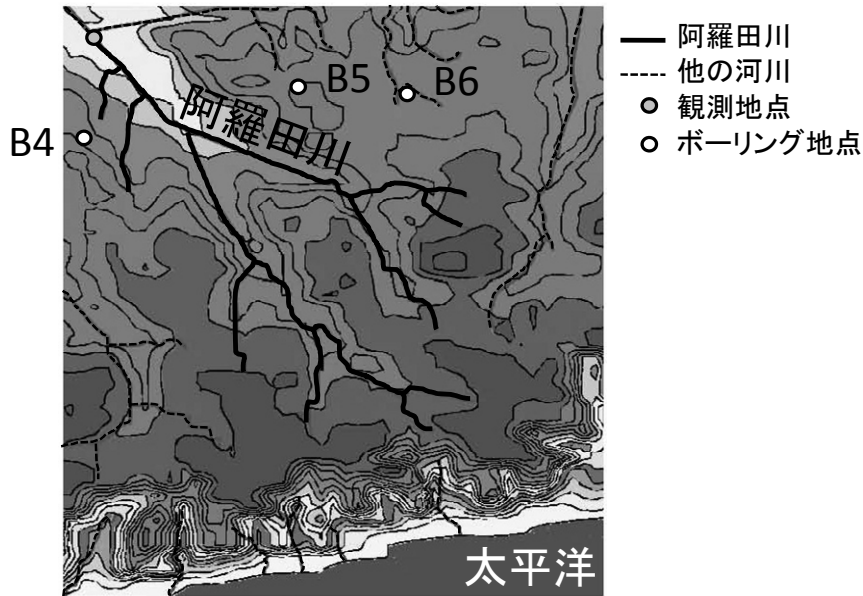


図 2.8 対象流域の地形図

対象流域は最下流域である北部の海拔 35m 地点から最上流域である南部の海拔 75m 地点に広がり (図 2.8)、図 2.9 の模式図で示したように分水嶺の外側は太平洋へ向かう急勾配の崖となっている。よって、対象流域には更にその上流にあたる地域が無く、上流の山岳域から流入する地下水を考慮する必要が無いものと考えられ、対象流域に流入する水は流域内に降った降雨と後述する豊川用水のみであると考えられる。

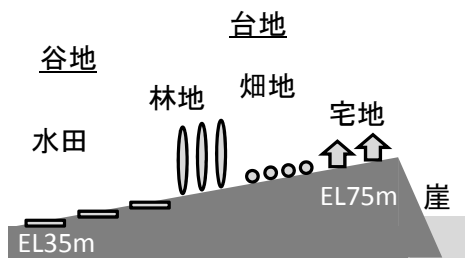


図 2.9 対象流域の模式図

KuniJiban (土木研究所, 2008) に掲載されている図 2.8 の B4、B5、B6 地点の柱状図を図 2.10 に示す。柱状図から分かるように、対象流域の下層土は砂や礫などから構成されている。5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査・表層地質図 (国土交通省, 2011) によると、対

象流域内の下層土は谷底では現河床堆積物、緩斜面から台地上の浅い谷では渥美層、上位段丘面では天伯原礫層である。

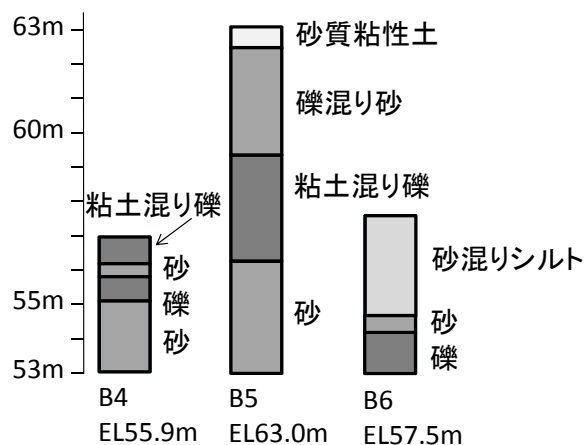


図 2.10 B4、B5、B6 地点の土柱図

2.3.5 灌漑システム

阿羅田川流域は豊川用水と呼ばれる大規模な灌漑システムの受益地の中の一流域である。豊川用水は豊川上流域の宇連ダム等を水源とし、豊川下流域から渥美半島に至る地域に灌漑用水を供給している。小規模な灌漑システムでは水源が流域内の有限な水資源である為、水田灌漑が河川の年間流量に与える影響は小さい。しかし、大規模な灌漑システムでは灌漑用水が流域外から供給される為、水田灌漑の結果として生じる大量の浸透水や地表排水が河川流量を大幅に増加させる。図 2.11 に示すように、豊川用水は阿羅田川流域を横断しており、流域内で 4 本の支線水路を介して流域内の全水田および一部の畑地に灌漑水を供給している。流域内での水田灌漑を模式的に表すと図 2.12 のようになり、流域外に端を発する豊川用水の灌漑水は支線水路を通して流域内の水田に配分され、その後水田から排水されると排水路を通して直接河川に流出する。また、流域内において河川からは取水されず、流域内で灌漑水が再利用される事は無い。豊川用水によって流域外から供給される灌漑水量は、阿羅田川の年間流量の 29%、また水田灌漑期に限ると 37%に相当する。

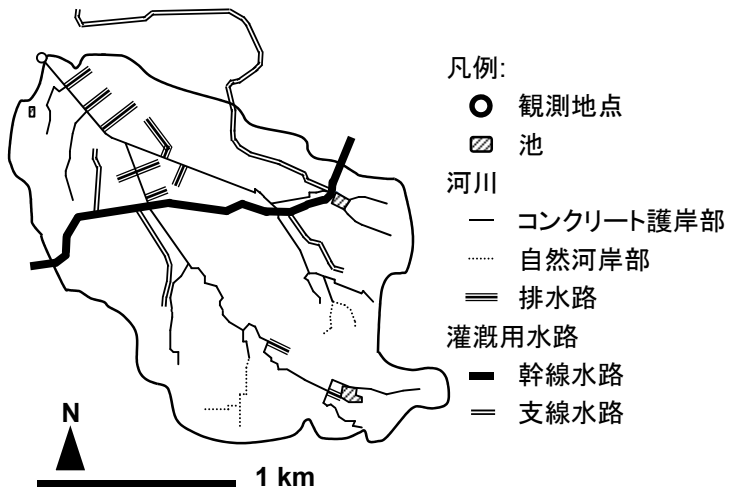


図 2.11 対象流域の水文図

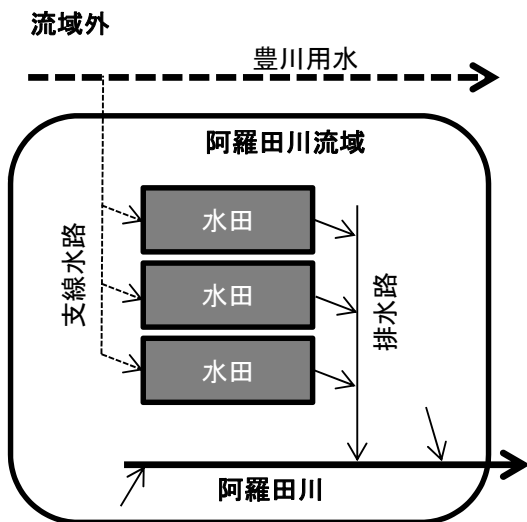


図 2.12 対象流域内での水田灌漑の模式図

2.3.6 河川および池の状況

2011年6月28日に現地の河川および池の状況を調査した。調査結果を図2.13に示す。尚、●は当日に流水の見られた地点、○は当日に流水の見られなかった地点、Cはコンクリート三面張り、UはU字工、Eは自然河川、Zは河岸から河床までの深さ(m)、Bは川幅(m)、Hは当日の水深(m)。



図 2.13 2011年6月28日の河川および池の状況

2.3.7 河川水量・水質実測値

図 2.13 にて流量水質観測地点と示された地点にて 2004 年 10 月から 2006 年 9 月まで 10 分単位で計測された河川流量の日平均値を図 2.14 に示す。同様に 10 分単位で計測された懸濁物質濃度の日平均値、および 10 分単位流量と 10 分単位濃度を掛け合わせた後に日平均化した負荷量を図 2.15 に示す。流量観測および採水は感圧式水位計付き自動採水器（ISCO 社製, model6712）を用いて行われた。流量は水位計が計測した 10 分間隔の水位から、HQ 式（式 2.29）によって算出された。採水は降水量が 0.2 mm h^{-1} で起動して 2 時間間隔で採水するプログラムと、降水量が 5.0 mm h^{-1} 以上の場合は 30 分間隔で採水するプログラムの組み合わせで行われた。降雨後も河川水位が降雨前の水位に低下するまでの間、数時間おきに採水された。サンプルは吸入口の下端を河床から 15mm の高さにセットしたチューブから 500mL ずつ採水された。自動採水器のサンプル内の懸濁物質を実験室にてガラス繊維ろ紙（Whatman GF/F）に捕集し、乾燥および恒量後に重量を測定して懸濁物質濃度が求められた。2004 年 10 月から 2006 年 9 月までの間に採水されたサンプル数は 1860 サンプルである。

$$Q_{\text{flow}} = 17.97 H^{1.987} \quad (R^2 = 0.973) \quad \text{式 2.29}$$

Q_{flow} : 流量($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)、 H : 水位(m)

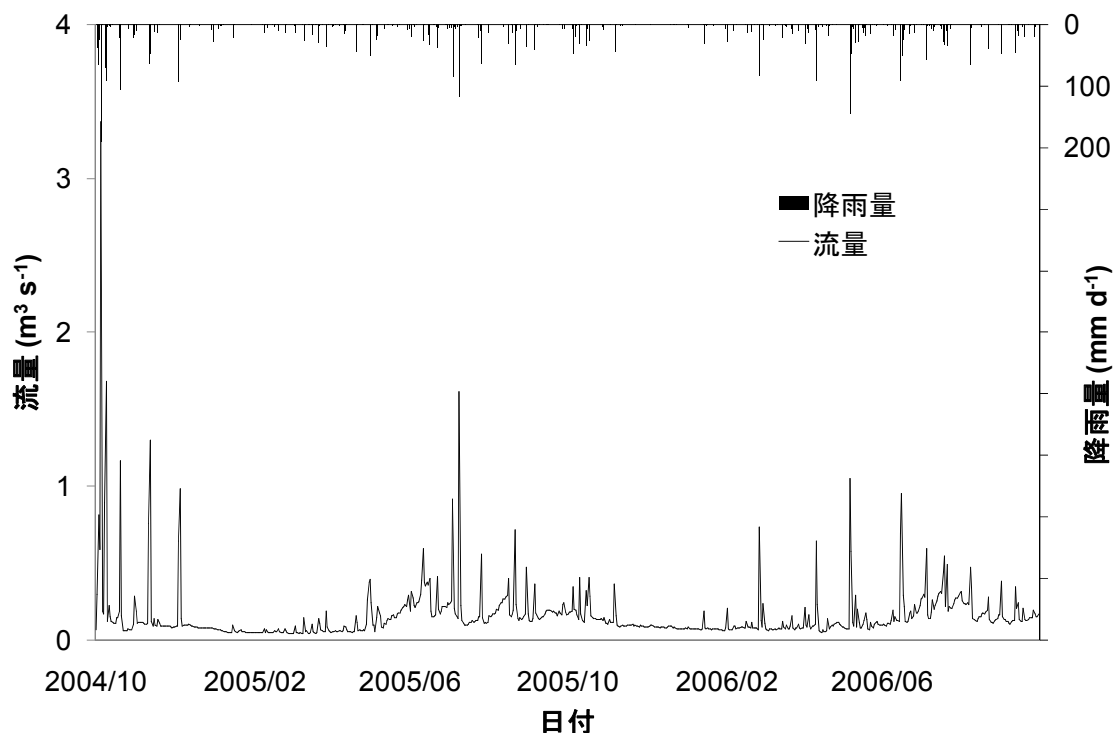


図 2.14 河川の日平均流量および降雨量

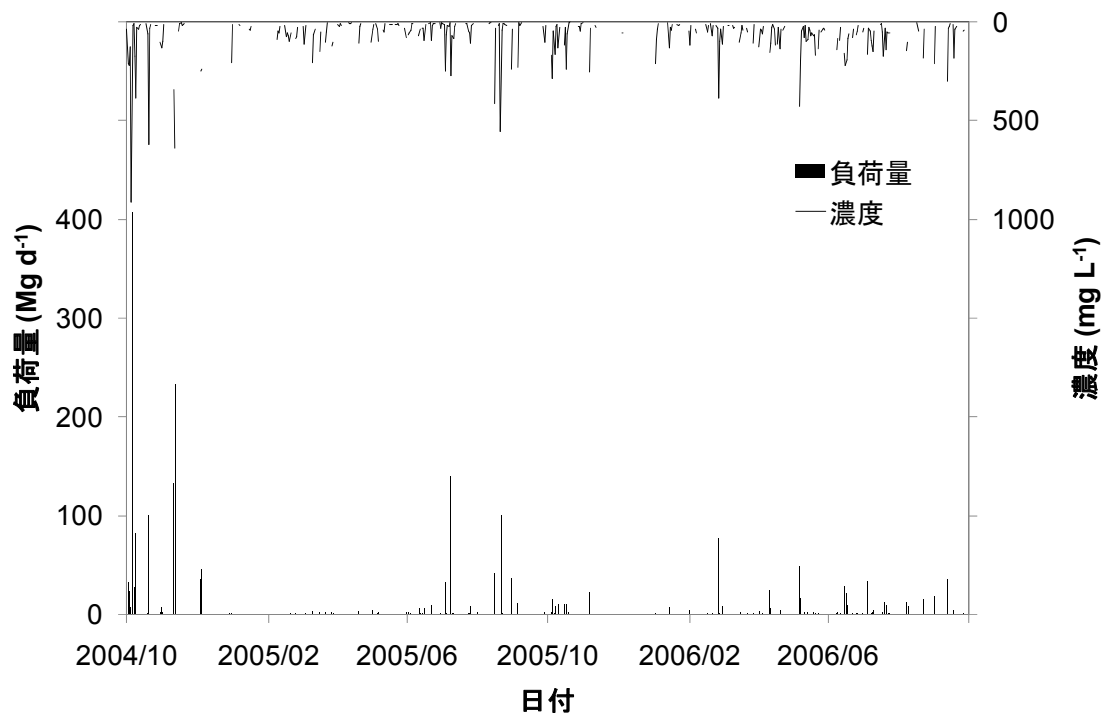


図 2.15 懸濁物質の日平均濃度および負荷量

2.4 研究対象流域への適用

水田地帯を有する流域への SWAT モデルの適用事例は数多く存在するが、水田 HRU の設定が不明瞭であり、また水田 HRU レベルでの出力値の検証も行われていない。そこで、水田 HRU を明確に設定した上で、カーブナンバー手法を用いた場合と窪地手法を用いた場合の双方について、SWAT モデルの出力値を水田 HRU レベルおよび流域レベルで検証した。使用された SWAT モデルのバージョンは、SWAT 2009 rev. 488 である。

SWAT モデルの適用は次の手順で行われた。まず、阿羅田川流域の GIS レイヤ、気象データ、灌漑データ、作物生育パラメータ、水文パラメータを SWAT モデルに設定した。次に、モデルの初期化を行った。続いてモデル内の各パラメータのキャリブレーションを行い、キャリブレーション後のパラメータを用いてシミュレーションを行った。

GIS レイヤ：

対象流域の DEM(Digital Elevation Model)レイヤとしては、10m メッシュの Digital Japan Web System (国土地理院, 2010)を用いた。また、ArcSWAT により DEM レイヤの各メッシュの標高に基づいて作成される Digital Stream の位置を実際の河川位置に補正する為に、Digital Japan Web System のポリライン形式の 2500 分の 1 河川マップを Burned

In用レイヤとして用いた(図 2.11)。2500分の1河川マップには灌漑水路および水田排水路もポリラインとして表記されているが、灌漑水路は勿論、排水路も流向と地形が一致していないので Burned In 時に Digital Stream を誤った位置に誘導してしまうため、灌漑水路と排水路は Burned In を行う前にポリライン内から削除した。土壌レイヤとしては、ポリゴン形式の1992年版農耕地土壌分類土壌図(高田ら, 2009)を用いた(図 2.7)。1992年版を用いたのは、宅地化による空白域(非農耕地)の拡大の影響を最小限に留める為である。1992年当時に既に宅地であった地域と林地は、地形を指標として内挿補間した。土地利用レイヤとしては、2002年版25,000分の1土地利用図(国土地理院, 2002)を基にポリゴン形式レイヤを作成し、これを用いた(図 2.6)。

気象データ：

気象データの内、最高気温、最低気温、相対湿度、風速は阿羅田川流域から約21 km 東方に位置する浜松特別地域気象観測所の AMeDAS データ(気象庁, 2011)が用いられた。日射量は阿羅田川流域から約74 km 北西に位置する名古屋地方気象台の AMeDAS データが用いられた。降水量は図 2.13 にて流量水質観測地点と示された地点にて、転倒ます型雨量計(ISCO 社製, model6712)を用いて10分単位で計測された。気象データの期間は2004年10月から2006年9月までであり、降水量は10分単位で、降水量以外は日単位で入力された。図 2.16 に各入力値を示す。但し、降水量は図 2.17 に阿羅田川として表示し、また入力値とは異なり日単位で表示する。

阿羅田川流域にて計測した降水量に計測中のアクシデントや機器のキャリブレーションミスが無いかを確認する為、浜松特別地域気象観測所の AMeDAS データの降水量との比較を行った。図 2.17 に示した通り、日降水量に差は見られるものの全降水日が同一日である事から、計測中のアクシデントは無いものと考えられる。また、2年間の降水量の年平均値は阿羅田川流域での計測値が 1956 mm y^{-1} であったのに対して AMeDAS データでは 1890 mm y^{-1} であり、機器のキャリブレーションも適切であったものと考えられる。

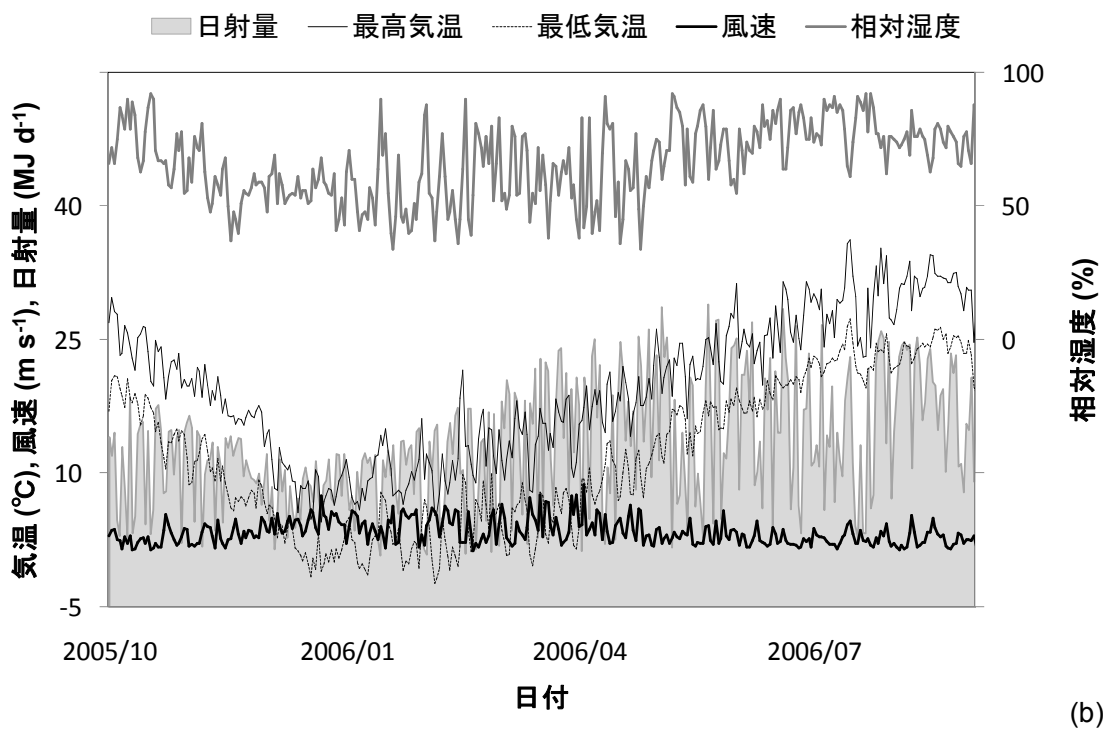
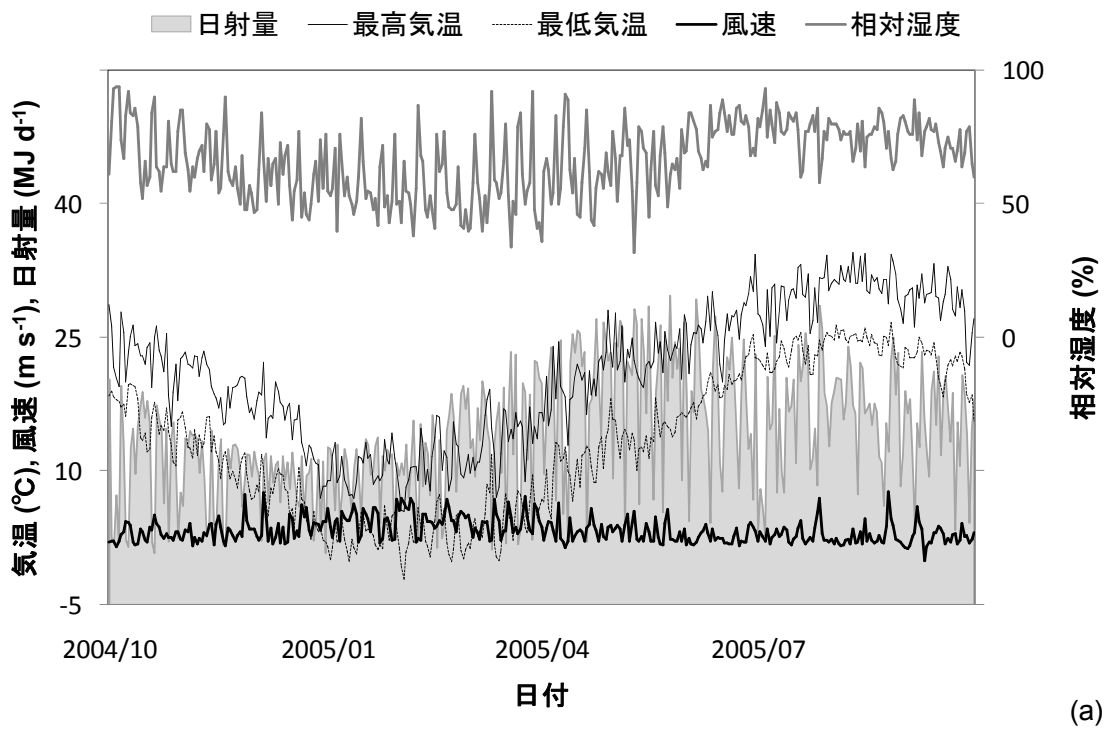


図 2.16 気象データ（降水量を除く）

(a) 2004年10月1日から2005年9月30日 (b) 2005年10月1日から2006年9月30日

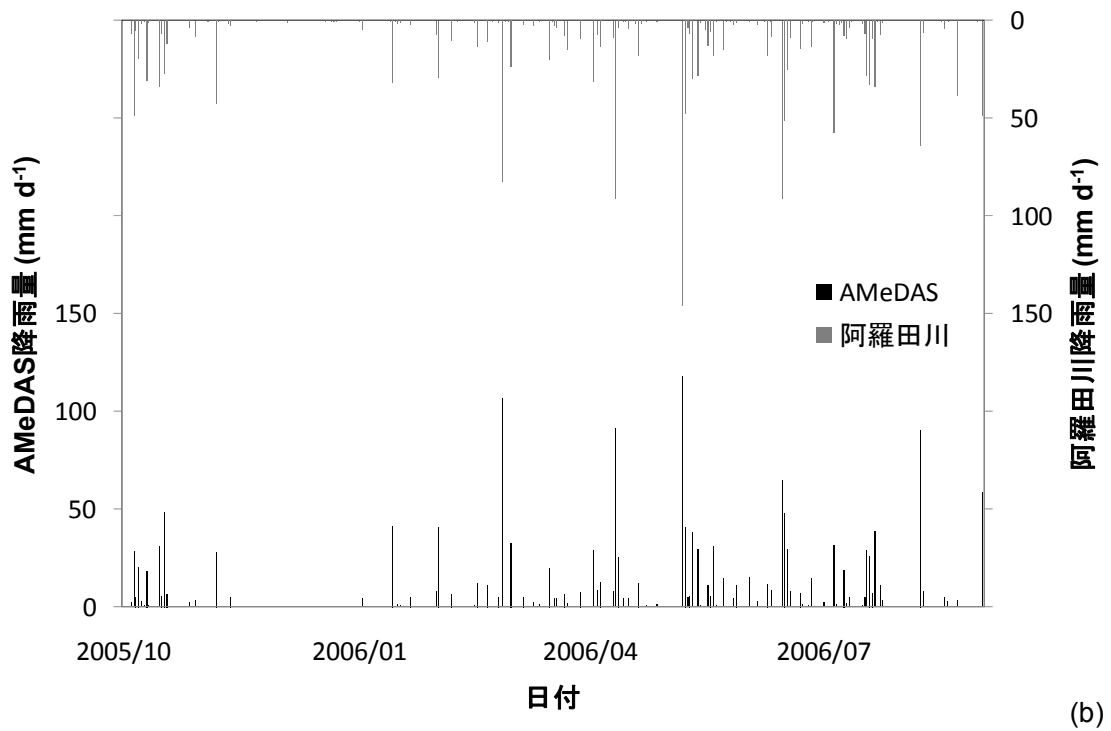
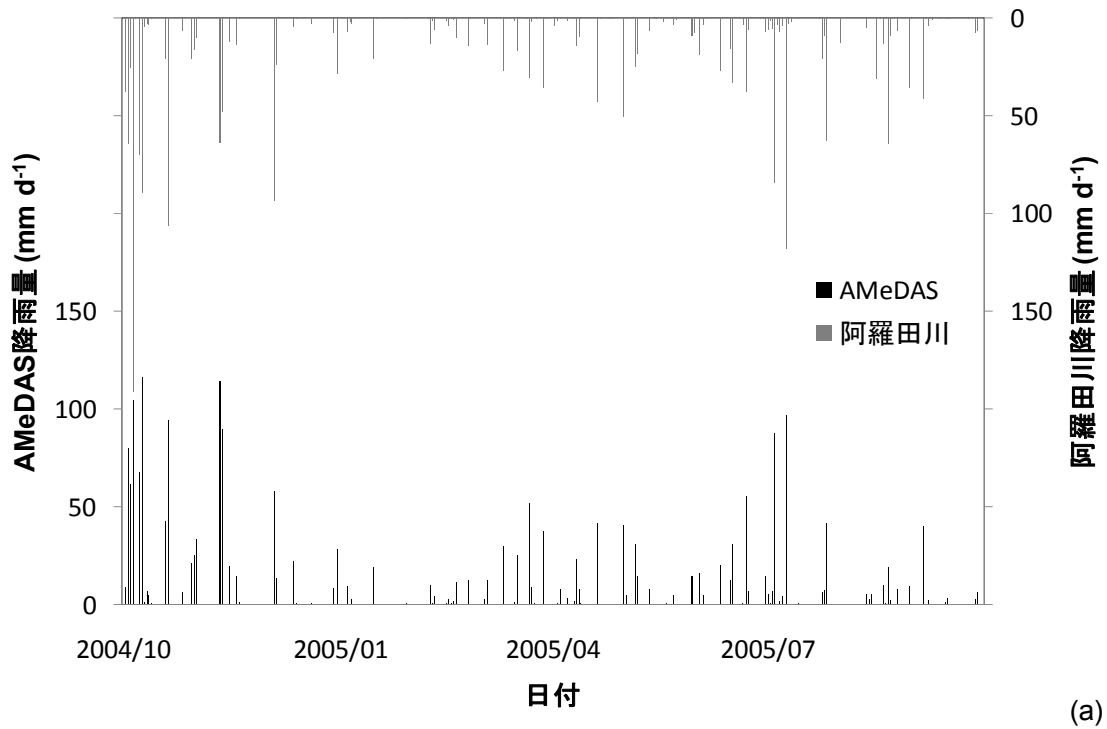


図 2.17 阿羅田川流域での降雨量観測値と浜松気象観測所 AMeDAS データの比較
 (a) 2004 年 10 月 1 日から 2005 年 9 月 30 日 (b) 2005 年 10 月 1 日から 2006 年 9 月 30 日

灌漑用水量：

図 2.11 に示された豊川用水の阿羅田川流域内の 4 支線の内、1 支線は阿羅田川流域外にも配水している。この支線は弥栄第二用水路と名付けられている。そこで、水資源機構豊川事務所の資料（資料名：独立行政法人水資源機構施設等管理延長（支線番号：東 39、東 40、東 41、東 42））より 4 支線の受益面積の合計を求め、次に阿羅田川流域の農地の合計面積を差し引く事で、弥栄第二用水路の阿羅田川流域外受益面積を求めた。この流域外受益面積と弥栄第二用水路の全受益面積の比から、弥栄第二用水路の配水量の内、54.49%が阿羅田川流域内に配水されているものと推定した。4 支線の日配水量は、水資源機構豊川事務所の資料（資料名：支線別日別分水量実績表）から得られた。上記の推定に従って、弥栄第二用水路の配水量の 54.49%と残りの 3 支線の配水量の 100%が阿羅田川流域に配水されているものとした。

各支線の受益地には畑地、茶園、果樹園、水田が混在しているため、畑地、茶園、果樹園への灌漑水量は水田灌漑水量と比べると非常に少ないものの、阿羅田川流域への豊川用水の分水量を畑地 HRU、茶園 HRU、果樹園 HRU、水田 HRU に経時的に分配する必要がある。そこで、畑地、茶園、果樹園の日灌漑水量を Food and Agriculture Organization (FAO) (1998a)の Chapt. 8. ETc under soil water stress conditions を参考に推定し、畑地、茶園、果樹園に使われなかった豊川用水分水量を水田の日灌漑水量と想定した。畑地、茶園、果樹園の日灌漑水量の推定は以下の工程で行われた。まず、Readily Available Water（生育制限を与えずに栽培する場合の土壌の有効水分量）を表 2.4 で示した対象流域の土壌の物理性、キャベツ、タバコ、茶、ブドウの根の深さ、各作物の Soil Water Depletion Fraction for No Stress（土壌の有効水分量に対する、水ストレスが生じる前に根圏で消費される水分量の割合の平均値）から推定した。次に、図 2.16 で示した気象データから Penman-Monteith 法 (Monteith, 1965)を使用して推定した基準蒸発散量と、キャベツ、タバコ、茶、ブドウの作物係数から日単位の蒸発散量を推定した。更に図 2.17 で示した阿羅田川流域の日降雨量と前日の根圏の土壌水分量から蒸発散量を差し引いて、当日の根圏の土壌水分量を推定した。そして、根圏の土壌水分量で賄えない分の蒸発散量を当日の潜在的灌漑水量とした。以降は独自のアイデアであり確立した手法では無いものの、流域内の各圃場の灌漑日はある程度分散すると考えられるため、上記の潜在的灌漑水量に一定率のバッファを与えた。更に通常は作物が水ストレスを受ける前に灌水が為される為、潜在的灌漑水量に一定率のタイムラグも与えた。これらのバッファとタイムラグの率を調整し、畑地、茶園、果樹園への日灌漑水量の合計値が豊川用水の日分水量以下になるようにした。調整後の畑地、茶園、果樹園への日灌漑水量を図 2.18 に畑地帯灌漑水量推定値として示す。

推定された畑地帯灌漑水量は 131 mm y^{-1} であったが、山田ら(2003)によると対象地域での一般的な畑地灌漑水量は $150 \sim 200 \text{ mm y}^{-1}$ である。また、畑地等に使われなかった豊川用水分水量を水田の日灌漑水量と想定したが、想定された灌漑期の水田灌漑水量は 1608 mm y^{-1} であった。豊川用水技術史（水資源機構, 1968）によると、阿羅田川流域を含む地

域の水田計画用水量は 1304 mm y^{-1} である。山田ら(2003)および水資源機構(1968)との比較から推定された灌漑水量は概ね正しいものと判断し、畑地 HRU、茶園 HRU、果樹園 HRU、水田 HRU に日単位で経時的に設定した。尚、10 月から 4 月の非灌漑期の水田灌漑水量は河川維持水であり、水田では消費されていないものと考えた。

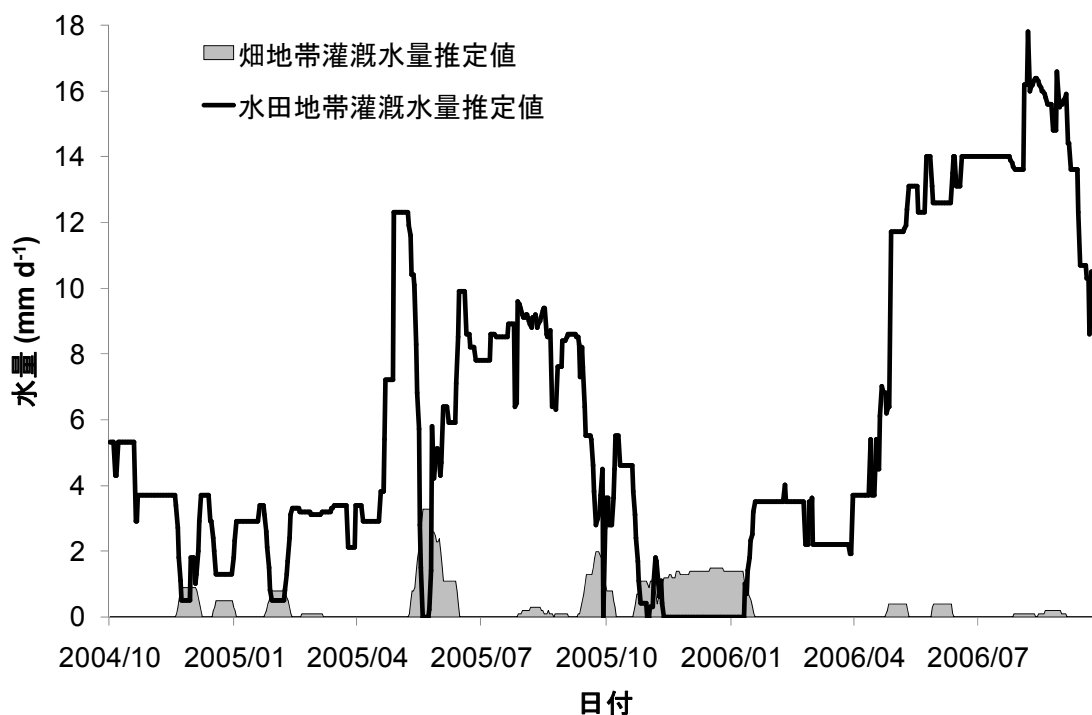


図 2.18 阿羅田川流域での畑地帯灌漑水量推定値と水田地帯灌漑水量推定値

作物生育パラメータ：

SWAT モデルにおいて作物生育パラメータの設定は積算温度制、または日付制で行われるが、本研究では対象地域の水田暦に記されている作業時期の日付を活かすため、日付制を選択した。

水稻は本研究にて着目している水田 HRU の水収支に影響を与えうる作物である。SWAT モデル内の Plant Growth Database の稲の生育パラメータは直播栽培を対象とした値であるが、対象流域では移植が一般的である。そこで、移植栽培を想定した対象流域での水稻の生育パラメータを表 2.1 に示すように想定した。まず、移植日および収穫日は対象地域の水田暦に記されている日付を採用した。成熟日までの積算温度は、対象地域の水田暦に記されている移植日から成熟日までの期間を対象として図 2.16 に示された対象流域の気温データを積算して設定した。移植時の LAI (葉面積指数) および乾燥重量は Horie (1995) より引用した。また、Plant Growth Database における稲の LAI 最大値は 5.0 であり、一般的な日本の稲と比べて小さい為、栗原ら (1998a) から引用した。他のパラメータは Plant

Growth Database における値を用いている。尚、対象流域において水田の裏作は行われていない。

畑地では冬期にはキャベツ、夏期にはタバコ等が栽培されているが、双方ともに移植栽培であるため、水稻同様に Plant Growth Database 内のキャベツおよびタバコの成熟日までの積算温度を、移植日から成熟日までの期間を対象として対象流域の気温データを積算し、設定した。タバコの LAI 最大値は北之園 (1971) から引用した。他のパラメータは Plant Growth Database における値を用いている。対象流域内では茶も栽培されているが、Plant Growth Database 内には茶の生育パラメータは存在しない。そこで、茶の生育パラメータは栗原ら (1998b) を参考に作成した。ブドウ、草、樹木の生育パラメータは Plant Growth Database を変更せずに利用した。

更に、検討対象は水収支のみであるため、全ての作物の生育パラメータにおいて Crop is fertilized を選択し、作物が栄養塩不足による生育障害を受けて蒸散量が過小評価される事が無いようにした。

表 2.1 水稻の生育パラメータ設定値

生育段階	パラメータ	設定値
移植	日付	6月1日
	成熟日までの積算温度	1965度
	LAI	0.1
	乾燥重量	20 kg ha ⁻¹
生育	LAI 最大値	7.0
収穫	日付	10月10日

水文パラメータ：

ArcSWAT の Watershed Delineation 機能により、対象流域は 17 の小流域に分割された。また、対象流域内には 3 か所の池が存在する。尚、対象流域内の池とは豊川用水の分配の為に設けられている貯水池ではなく、人為的な流量管理が行われていない池である。図 2.19 に各小流域の河口位置と各池の位置を示す。河岸と河床は殆どの区間がコンクリートであり、コンクリート区間の河床は部分的に堆砂と水草で覆われている。表 2.2 に各小流域の河川の川幅、河岸から河床までの深さ、粗度係数、飽和透水係数、および各池の小流域に占める集水面積の比率、池の面積、深さ、飽和透水係数の設定値を示す。尚、コンクリート区間と自然河川区間の粗度係数および飽和透水係数は、それぞれ Chow (1959) および Lane (1983) を基に初期値として仮定された。

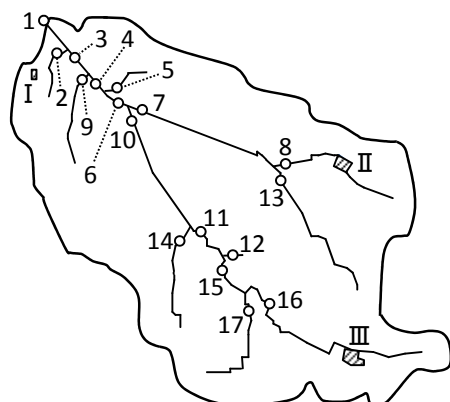


図 2.19 対象域内に設定された小流域の河口位置（アラビア数字）および池の位置（ローマ数字）

表 2.2 各小流域の河川および各池の設定値

河川	川幅 (m)	河床の深さ (m)	粗度係数	飽和透水係数 (mm h ⁻¹)
1	5.00	1.3	0.014	0.025
2	0.15	0.2	0.014	0.025
3	5.00	1.3	0.014	0.025
4	3.50	2.0	0.014	0.025
5	0.15	0.2	0.014	0.025
6	3.50	2.0	0.014	0.025
7	1.50	1.5	0.014	0.025
8	1.50	1.5	0.014	0.025
9	0.15	0.2	0.014	0.025
10	2.00	1.5	0.014	0.025
11	2.00	1.0	0.014	0.025
12	0.15	0.2	0.014	0.025
13	0.70	1.0	0.014	0.025
14	0.10	0.5	0.014	0.025
15	2.00	1.0	0.014	0.025
16	1.50	1.0	0.014	0.025
17	0.10	0.1	0.030	56.200
池	集水面積率 (%)	池の面積 (ha)	深さ (m)	飽和透水係数 (mm h ⁻¹)
I	5	0.1	1.0	0.004
II	50	1.0	1.0	0.004
III	40	1.0	1.0	0.004

各地目の表面流出水の粗度係数は、角屋（1980）を基に表 2.3 に示す通りに設定された。

表 2.3 各地目の表面流出水の粗度係数の設定値

地目	畑地*1	水田域	草地	林地	宅地
粗度係数	0.40	2.50	0.40	0.90	0.03

*1： 茶園と果樹園を含む

土壌レイヤ（図 2.7）にて指定された各土壌の物理性は、SolphyJ (Eguchi et al., 2011) を基に設定された。SolphyJ では、日本の土壌の特性が土壌統群、土層、地目（水田、畑地、樹園地、草地、施設園芸）ごとに分類されている。また、SolphyJ における土壌統群は土壌レイヤに用いた農耕地土壌分類における土壌統群と同一である。SolphyJ では土性が国際土壌分類系の土粒子径で区分されているが、SWAT モデルでは米国農務省系の区分を採用しているため、土性を Minasny and McBratney (2001) が作成した経験式（式 2.30）により米国農務省系区分に変換した。

$$P_{2-50} = -18.3914 + 2.0971 (P_{2-20}) + 0.6726 (P_{20-2000}) - 0.0142 (P_{2-20})^2 - 0.0049 (P_{20-2000})^2$$

$$\text{If } P_{2-50} < 0 \text{ then } P_{2-50} = 0.8289 (P_{2-20}) + 0.0198 (P_{20-2000}) \quad \text{式 2.30}$$

P_{2-50} ： 粒子径 2-50 μm の土粒子、即ち米国農務省系区分におけるシルトの割合(%)、

P_{2-20} ： 粒子径 2-20 μm の土粒子、即ち国際土壌分類系区分におけるシルトの割合 (%)、

$P_{20-2000}$ ： 粒子径 20-2000 μm の土粒子、即ち国際土壌分類系区分における砂の割合 (%)

有効水分量は SolphyJ における 0, -3, -49, -1,569, -31,380 kPa の負圧下での含水量を van Genuchten 式 (van Genuchten, 1980) (式 2.31) にフィットし、-33 kPa 時の含水量から -1,500kPa 時の含水量を差し引くことで求めた。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + |\alpha h|^n)^{m'} \quad \text{式 2.31}$$

θ ： 体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 θ_r ： 残余体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、 θ_s ： 飽和体積含水率 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)、

α ： フィッティングパラメータ (m^{-1})、 h ： マトリックポテンシャル (m)、

n, m' ： フィッティングパラメータ（無次元）（ただし、 $m' = 1 - 1/n$ ）

θ_s および θ_r の値はそれぞれ 0 および -31,380 kPa の負圧下での体積含水率とした。SolphyJ を用いた理由は、土壌特性が土層および地目ごとに区分されており、本研究の主要テーマである水田地帯の水収支に強く影響する水田の耕盤層の物理性の設定が可能である為である。一方で、SWAT モデルの Soil Database には水田土層・土壌は無い。設定した各土壌の物理性を表 2.4 に示す。

表 2.4 対象流域内に分布する土壌の物理性の設定値

細粒黄色土（畑地）

土層	深さ	乾燥密度	有効水分	C^{*1}	K_s^{*2}	土性 (%)		
	mm					Mg m ⁻³	mm mm ⁻¹	%
1	168	1.11	0.09	1.66	421.2	20.7	38.9	40.4
2	365	1.31	0.11	1.03	56.2	28.8	43.5	27.7
3	591	1.28	0.07	0.85	19.8	26.0	41.7	32.3
4	933	1.45	0.07	0.48	292.7	16.8	25.3	57.9

中粗粒グライ台地土（水田）

土層	深さ	乾燥密度	有効水分	C^{*1}	K_s^{*2}	土性 (%)		
	mm					Mg m ⁻³	mm mm ⁻¹	%
1	164	0.98	0.14	3.90	482.4	25.8	47.5	26.7
2	370	1.31	0.09	1.94	1.4	16.0	38.4	45.6
3	540	1.52	0.05	0.55	1.0	15.1	36.6	48.3

礫質褐色森林土（畑地）

土層	深さ	乾燥密度	有効水分	C^{*1}	K_s^{*2}	土性 (%)		
	mm					Mg m ⁻³	mm mm ⁻¹	%
1	170	1.08	0.14	2.52	1,166.4	22.1	48.7	29.2
2	392	1.27	0.12	1.42	381.6	25.5	50.9	23.6
3	669	1.25	0.12	1.28	21.2	26.7	51.6	21.7
4	749	1.26	0.10	1.95	21.2	26.7	51.6	21.7

細粒黄色土・斑紋有り（水田）

土層	深さ	乾燥密度	有効水分	C^{*1}	K_s^{*2}	土性 (%)		
	mm					Mg m ⁻³	mm mm ⁻¹	%
1	148	1.04	0.22	2.44	99.0	26.4	49.4	24.2
2	294	1.29	0.14	1.50	12.2	28.4	50.8	20.8
3	501	1.28	0.12	1.09	1.8	32.6	48.4	19.0
4	678	1.34	0.18	1.15	22.7	29.4	43.2	27.4

*1 C : 有機体炭素含量

*2 K_s : 飽和透水係数

水田 HRU の適切な斜面長 (L_{hill}) は不明である。SWAT モデルにおいて、斜面長は浸透水が側方流として流出する水量を左右する。模式図 2.20 に示すように水田 HRU には多数の排水路が存在する為に側方流量が畑地 HRU に比べて多いものと予測されるが、デフォルト設定では畑地 HRU と同様に斜面長が設定されてしまう。SWAT input output file documentation (Neitsch et al. 2009) の 19.2 章 Topographic characteristics によると、広間隔のテラス畑 HRU の平均斜面長はテラス畑中央部からテラス側面の排水路までの水平距離に等しいとされている。そこで、広間隔のテラス畑と水田の形状が似ている事から、水田 HRU の斜面長を水田一筆の水平距離の半分と考えた。対象流域における水田一筆の排水路方向の標準的な長さは 70m であるため、斜面長を 35m と設定した。

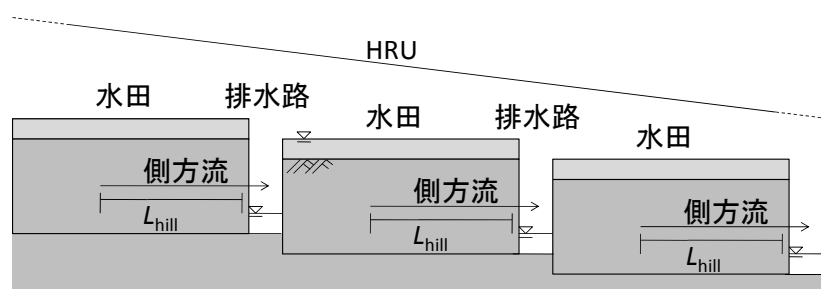


図 2.20 水田 HRU の模式図

初期化：

阿羅田川流域を対象とした SWAT モデルの初期化に要する時間を検討する為に、浜松特別地域気象観測所の AMeDAS 気象データ平年値を用いて 30 年間のシミュレーションを実施した。その結果、阿羅田川河口地点の河川流量の年変動は 3 年間以内に収束した為（図 2.21）、初期化期間を 3 年間と定めた。従って、シミュレーションの対象期間（2004 年 10 月～2006 年 9 月）の前に 2001 年 10 月から 2004 年 9 月まで浜松特別地域気象観測所の AMeDAS 気象データを用いたシミュレートを行い、モデルを初期化した。営農活動も初期化期間の水収支に影響を与える為、灌漑用水量の入力および作物生育の設定を初期化期間に対しても行った。

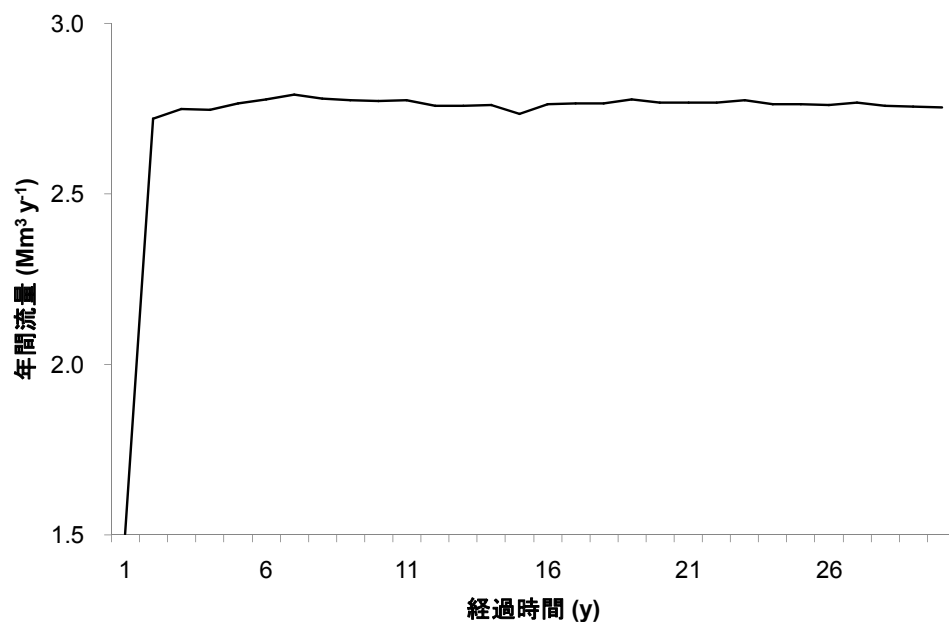


図 2.21 気象データ平年値を用いた阿羅田川流量の年変動

2.5 水田地帯の降雨流出の計算方法

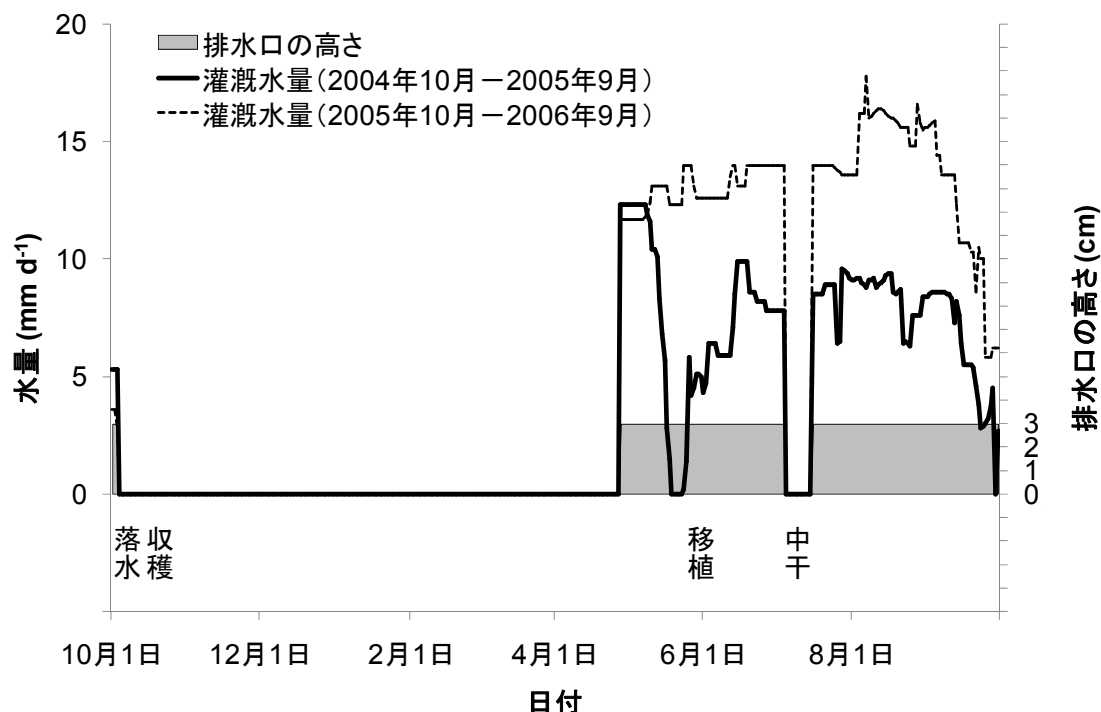


図 2.22 水田管理シナリオ

水田 HRU の降雨流出をカーブナンバー手法および窪地手法で計算するにあたり、両手法で共通して用いる対象流域の水田管理シナリオを図 2.22 に示す。灌漑水量は 2.4 章で示された日灌漑水量に基づいている。灌水時期は現地の水田暦（JA 豊橋, 2010）と水資源機構二川事務所から提供頂いた日灌漑水量データを参考にして 4 月 28 日から 10 月 3 日と想定し、10 月 4 日から 4 月 27 日までの期間および中干し期とされる 7 月 5 日から 15 日までの期間は灌漑水の表面流出率 (IRR_SQ) を 100% と設定する事で灌漑水が水田 HRU に供給される事無く河川に直接流出するようにした。窪地手法においては湛水時期に排水口の高さを設定した（カーブナンバー手法では排水口の高さを設定する事ができない）。更に、水田暦を参考にして水田 HRU での水稲の生育開始日を 6 月 1 日、収穫日を 10 月 10 日と設定した。この生育開始日とは 2.4 章で示した通り、水稲の生育パラメータを移植用に修正したため、移植日である。

水田 HRU の降雨流出は、図 2.23 に示すように、小流域内の水田地帯を平均した仮想の巨大水田一筆と想定して計算する。水田 HRU は図 2.19 に示した対象流域を分割した小流域毎の一つ存在するが、空間情報は有していない。水田 HRU は空間情報を有する任意の小流域内に占める割合としてモデル内に存在する。表 2.5 に小流域毎の水田 HRU の割合と面積を示す。

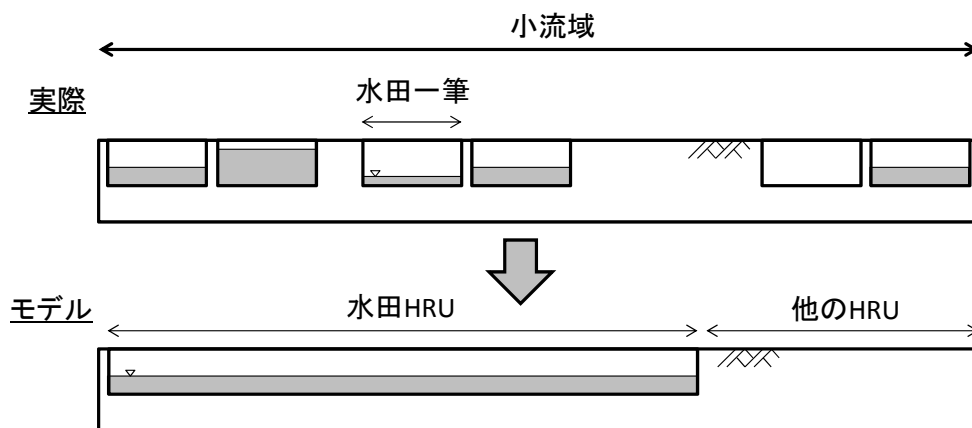


図 2.23 小流域内における実際の水田とモデルの水田 HRU の関係

表 2.5 小流域毎の水田 HRU の割合と面積（小流域の位置は図 2.19 に対応）

小流域	水田 HRU の割合(%)	水田 HRU の面積(ha)
1	85.7	2.40
2	12.5	1.25
3	46.2	4.80
4	75.0	3.60
5	19.2	2.00
6	60.0	1.20
7	27.3	10.90
8	11.5	2.94
9	6.9	2.11
10	30.6	9.04
11	0.0	0.00
12	10.5	0.80
13	22.2	7.20
14	0.0	0.00
15	10.0	0.80
16	14.8	5.73
17	0.0	0.00

水田 HRU にカーブナンバー手法を用いる場合および窪地手法を用いる場合の双方において、水田以外の HRU の降雨流出量はカーブナンバー法によって計算された。水田以外の HRU の平均条件のカーブナンバー (CN II) 初期値は Soil Conservation Service (SCS) (1986) から表 2.6 に示した通りに設定され、後述するキャリブレーション工程において適値に修正された。

表 2.6 各 HRU のカーブナンバー初期値

HRU 区分	畑地	宅地	林地	茶園	果樹園	草地
初期値	75	75	55	58	58	61

カーブナンバー手法：

水田 HRU の降雨流出をカーブナンバー手法にて計算する場合の、本研究での設定を以下に記す。

水田 HRU の平均条件のカーブナンバー値 (CN II) は、Im et al. (2007)を引用して 82 とした。カーブナンバー手法では降雨の表面流出量が以下の式で計算される。

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad \text{式 2.1}$$

Q： 表面流出量(mm)、 P： 降雨量(mm)、 S： 最大貯留量(mm)

また、最大貯留量 (S) とカーブナンバー値 (CN) の関係は以下の式の通りである。

$$S = 25.4 (1000 / CN - 10) \quad \text{式 2.2}$$

カーブナンバー値は無次元の指標であり、降雨日前 5 日間の降雨量に応じて CN I、CN II、CN III の 3 グループに区分されている (Soil Conservation Service (SCS), 1972)。CN I は乾燥条件、CN II は平均条件、CN III は湿潤条件に対応している。水田地帯のカーブナンバー値は検討が行われてこなかった為、Im et al. (2007)は水田の降雨流出反応実測値と水田の湛水深データから水田地帯のカーブナンバー値を決定した。彼らの研究手法において、水田の湛水深データは正規分布し、また最大貯留量 (S) は降雨量よりも湛水深と高い相関関係にあると想定され、CN I、CN II、CN III の 3 グループは降雨日前 5 日間の降雨量ではなく水田の湛水深によって区分されている。この想定に基づいて、カーブナンバー値は Hjelmfelt (1980, 1991)によって提案された工程に従って決定されている。

窪地手法：

続いて、水田 HRU の降雨流出を窪地手法にて計算する場合の、本研究での設定を以下に記す。

全水田 HRU を窪地モジュールに指定し、HRU に占める窪地の集水域の割合(POT_FR)を 100%に設定した。SWAT 2009 では小流域あたりに窪地として指定可能な HRU の数は 1 個である。その為、全水田 HRU を窪地モジュールに指定する為に SWAT モデルの HRU 形成機能において土壌種の閾値を 50%と定義し、小流域内に複数の水田 HRU が形成されないようにした。また、窪地モジュールは任意の HRU 内に局所的に存在する窪地を想定して開発されたため、通常は窪地の集水域は 100%未満となる。しかし、本研究における窪地手法では水田を想定しているために、HRU 全体が水田、即ち窪地と仮定された。

貯水状態に設定された窪地モジュールにおいては、灌漑水と降雨の全てはまず窪地内に流入して貯水となり、その後に土壌断面に浸透、河川へ表面流出、水面から蒸発、もしくは窪地内に貯水として留まる。SWAT theoretical documentation (Neitsch et al., 2002)の 27.3 章 Depressions/Potholes によると、これらの工程における水の動きは以下の式にて計算される。

土壌断面への浸透工程：

$$V_{\text{seep}} = 240 K_S SA \quad \text{if } SW < 0.5 FC \quad \text{式 2.32}$$

$$V_{\text{seep}} = 240 (1 - SW / FC) K_S SA \quad \text{if } 0.5 FC \leq SW < FC \quad \text{式 2.33}$$

$$V_{\text{seep}} = 0 \quad \text{if } SW \geq FC \quad \text{式 2.34}$$

表面流出工程：

$$V_{\text{flowout}} = V - V_{\text{pot, mx}} \quad \text{if } V > V_{\text{pot, mx}} \quad \text{式 2.35}$$

蒸発工程：

$$V_{\text{evap}} = 10 (1 - LAI / LAI_{\text{evap}}) E_0 SA \quad \text{if } LAI < LAI_{\text{evap}} \quad \text{式 2.36}$$

$$V_{\text{evap}} = 0 \quad \text{if } LAI \geq LAI_{\text{evap}} \quad \text{式 2.37}$$

V_{seep} ： 窪地内から土層へと浸透する水量 (m^3)、 K_S ： 最表層土層の飽和透水係数(mm h^{-1})、 SA ： 窪地内貯水の水面の面積 (ha)、 SW ： 任意日の土壌断面全体の土壌水分量 (mm)、 FC ： 土壌断面全体の圃場容水量 (mm)、 V_{flowout} ： 任意日中に窪地内から表面流出する水量 (m^3)、 V ： 窪地内貯水量 (m^3)、 $V_{\text{pot, mx}}$ ： 窪地内貯水量の上限値 (m^3)、 V_{evap} ： 窪地内からの蒸発水量 (m^3)、 LAI ： 窪地内の作物の葉面積指数、 LAI_{evap} ： 窪地内の水面からの蒸発が停止に至る窪地内の作物の葉面積指数、 E_0 ： 任意日の可能最大蒸発散量 (mm)

湛水期の上限湛水深 ($V_{\text{pot, mx}}$) は水田暦に基づいて 30mm と設定された。水面からの蒸発が停止に至る窪地内の作物の葉面積指数 (LAI_{evap}) は、宮崎ら (2005) の水稻の葉面積指数が

3.5 から 4.0 に達した時点で水田の蒸発散量の 90%を水稻の蒸散が占めたとの報告に基づいて、4.0 に設定された。

また、窪地モジュールには貯水状態の他に落水状態という設定もある。落水状態に設定されていると、降雨はカーブナンバー法によって表面流出水と浸透水に分けられる。窪地モジュールは湛水期には貯水状態に、非湛水期には落水状態に設定された。

2.6 キャリブレーション

通常、SWAT モデルでは河川のピーク流は降雨イベント時の表面流出によって形成され、基底流は地下水の流出によって形成される。一方で、水田地帯を有する現実の流域では、基底流は灌漑水の表面排水、水田地帯からの大量の地下水の流出、および水田地帯以外からの地下水の流出によって形成されるものと考えられる。本研究では、カーブナンバー手法においても窪地手法においても水田地帯からの表面排水課程と特異的な地下水の流出過程が合理的に計算されているとの想定の上で、モデル内の各パラメータのキャリブレーションを行った。まず、各パラメータがモデルの出力値に与える影響、即ち感受性を Latin hypercube one-at-a-time method (van Griensven et al. 2006) を用いて分析した。次に、各パラメータの最適値を shuffled complex evolution algorithm (Duan et al. 1992)を用いて決定した。尚、SWAT モデルでは本工程をオートキャリブレーションと名付けている。本キャリブレーション工程では図 2.13 にて流量水質観測地点と示された地点にて 2005 年 10 月から 2006 年 9 月まで計測された河川流量の日平均値が使用された。

本研究では感受性の分析と最適値の決定が、カーブナンバー手法を用いた場合と窪地手法を用いた場合のモデルに対してそれぞれ行われた。感受性が上位 10 位までのパラメータについて、結果を表 2.7 に示す。

表 2.7 各パラメータの感受性および最適値

カーブナンバー手法の場合

感受性順位	パラメータ	パラメータの説明	方法*1	下限値	上限値	最適値
1	Cn2	平均条件 (CNII) の カーブナンバー値	3	-25%	+25%	35-82*2
2	Gwqmn	地下水流の生じる浅 層地下水量の閾値 (mm)	1	0	5000	1820.6
3	Esco	蒸発量の補償係数	1	0.01	1.0	0.964
4	Gw_Revap	地下水の毛管上昇係 数	1	0.02	0.2	0.039
5	Slope	平均勾配 (m m ⁻¹)	3	-25%	+25%	0.017- 0.056*2
6	Sol_Z	最表層土層の厚さ (mm)	3	-25%	+25%	149- 171*2
7	Gw_Delay	地下水流の遅延日数 (d)	1	0	500	170.9
8	Sol_K	最表層土層の飽和透 水係数(mm h ⁻¹)	3	-25%	+25%	82-963*2
9	Sol_Awc	最表層土層の有効水 分量(mm mm ⁻¹)	3	-25%	+25%	0.09- 0.21*2
10	Revapmn	毛管上昇の生じる浅 層地下水量の閾値 (mm)	1	0	500	267.0

窪地手法の場合

感受性順位	パラメータ	パラメータの説明	方法*1	下限値	上限値	最適値
1	Gwqmn	地下水流の生じる浅層地下水量の閾値 (mm)	1	0	5000	63.0
2	Esco	蒸発量の補償係数	1	0.01	1.0	0.851
3	Gw_Revap	地下水の毛管上昇係数	1	0.02	0.2	0.152
4	Gw_Delay	地下水流の遅延日数 (d)	1	0	500	283.6
5	Sol_Z	最表層土層の厚さ (mm)	3	-25	25	150-172*2
6	Sol_Awc	最表層土層の有効水分量(mm mm ⁻¹)	3	-25%	+25%	0.09-0.22*2
7	Epc0	吸水量の補償係数	1	0.01	1.0	0.442
8	Sol_K	最表層土層の飽和透水係数(mm h ⁻¹)	3	-25	25	109-1279*2
9	Cn2	平均条件 (CNI) のカーブナンバー値	3	-25%	+25%	62-92*2
10	Slope	平均勾配 (m m ⁻¹)	3	-25%	+25%	0.016-0.051*2

*1: オートキャリブレーションの方法を意味し、1 は初期値を上限から下限の範囲内の他の値に変更する方法、3 は初期値に上限から下限の範囲内の係数を掛ける方法を意味する。

*2: 値は土壌区分、土地利用区分、作物種により異なる。

2.7 流域における河川流量の検証

表 2.7 で示された各パラメータの最適値を用いてシミュレートされた阿羅田川河口での河川流量推定値を、カーブナンバー手法の場合と窪地手法の場合についてそれぞれ図 2.24 に示す。尚、2004 年 9 月以前に対象流域で観測した降雨データおよび灌漑データが存在しない為、キャリブレーションをより正確に行う事を目的としてキャリブレーション期間を後半に配置してバリデーション期間を前半に配置した。

カーブナンバー手法の場合、推定値と阿羅田川河口での実測河川流量との間の NSE は、実測河川流量をキャリブレーションに用いた期間（2005 年 10 月から 2006 年 9 月、以降キャリブレーション期間とする）では 0.58 であった。両者の関係は R² 値では 0.66、RMSE（二乗平均平方根誤差）では 4.88 mm d⁻¹ であった。キャリブレーション期間の河川流量実測値から決定されたパラメータ値を用いて推定した 2004 年 10 月から 2005 年 9 月（以降バリデーション期間とする）の河川流量推定値と実測値の間の NSE は、0.65 であった。R² 値でも 0.65、RMSE では 7.14 mm d⁻¹ であった。推定値と実測値の間の PBIAS はキャリブレーション期間で 16%、バリデーション期間で 0% であった。総降雨量に対する実測河川流量の割合はキャリブレーション期間で 54%、バリデーション期間で 64% であったが、一方で総降雨量に対する推定河川流量の割合はキャリブレーション期間で 41%、バリデーション期間で 63% であった。これらの降雨量の流出率は、灌漑水は流域外から供給されている為に、河川流量から灌漑用水量が差し引かれた上で計算された。

窪地手法の場合、推定値と阿羅田川河口での実測河川流量との間の NSE は、キャリブレーション期間で -4.02 であった。R² 値では 0.57、RMSE では 10.50 mm d⁻¹ であった。バリデーション期間の NSE は -0.13、R² 値では 0.55、RMSE では 12.17 mm d⁻¹ であった。PBIAS はキャリブレーション期間で 7%、バリデーション期間で 10% であった。総降雨量に対する推定河川流量の割合はキャリブレーション期間で 49%、バリデーション期間で 55% であった。NSE が負の値の場合はモデル予測値よりも実測値の対象期間内の平均値の方が経時的実測値に近い事を意味する（Immerzeel et al., 2008）ため、窪地手法の場合は対象流域の流出過程を再現できていない可能性が高いものと推測される。

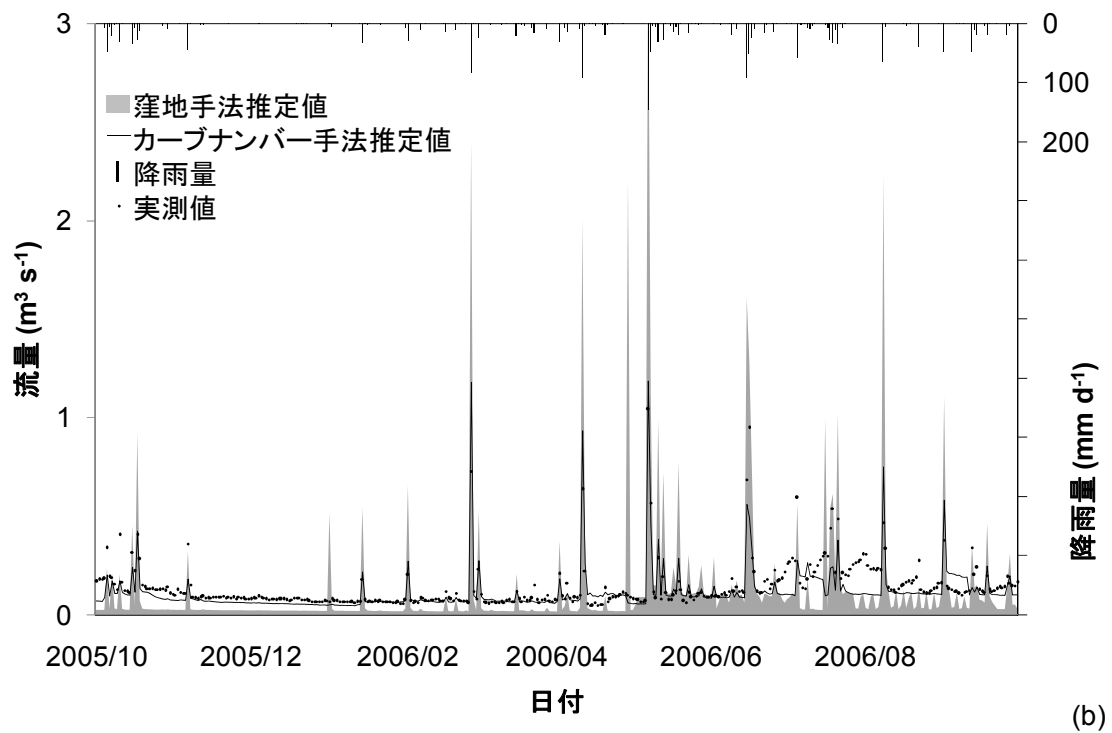
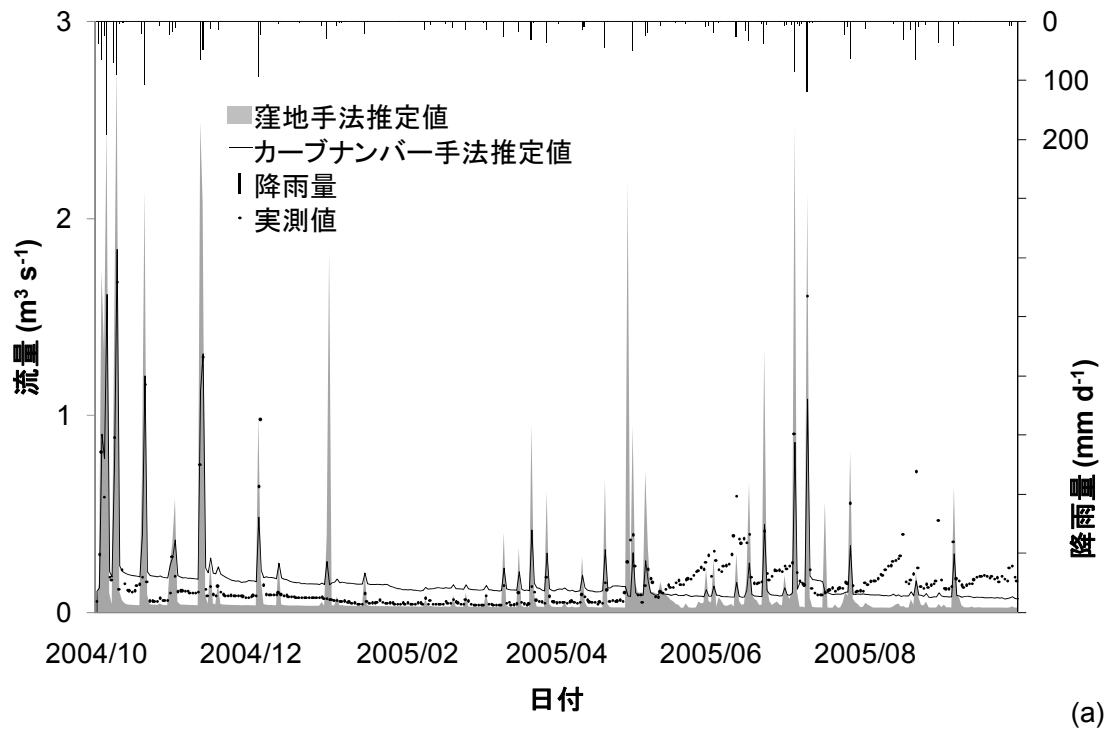


図 2.24 阿羅田川河口における河川流量推定値と実測値
 (a) バリデーション期 (b) キャリブレーション期

2.8 水田地帯の水収支の出力値

カーブナンバー手法の場合：

カーブナンバー手法で推定された水田 HRU の水収支を図 2.25 に示す。最下層土層から下方への浸透水量は 0 mm d^{-1} から 15 mm d^{-1} の範囲で変化している。稲作期間中（5月27日から10月10日の137日間）の下方浸透水量および側方浸透水量の合計は 969 mm である。一方で、阿羅田川河口近傍の水田で間接的に観測された稲作期間中の浸透水量は $1,480 \text{ mm}$ であった。この河口近傍の水田での浸透水量は、灌漑水量実測値、表面排水量実測値、浜松特別地域気象観測所の降雨量実測値、同気象観測所の気象データから Penman-Monteith 法と Food and Agriculture Organization (1998b) の作物係数を用いて推定した蒸発散量を用いて求められ、更に河口近傍の水田では稲作期間が 128 日間であった為に、水田 HRU での浸透水量との比較を目的として 1.07 倍された値である。よって、水田 HRU の推定浸透水量は河口近傍の水田での浸透水量実測値の 65% でしかない事が分かる。

この過小推定の原因は、カーブナンバー法では連続的な飽和浸透が想定されていないためであると考えられる。カーブナンバー法では、日降雨量から当日の表面流出水量を差し引いた水量が土壌に浸透する。よって、浸透水が生じるのは降雨日のみである。本研究における稲作期間の内、降雨日は 38% に過ぎないが、対象流域の水田地帯は晴天日であっても湛水されており、田面水が浸透し続けている。一方で、SWAT モデルの灌漑工程は晴天日であっても HRU の土層部に灌漑水を供給する事は可能なものの、浸透水を生じさせる事はできない。その理由は、SWAT theoretical documentation の 21.1 章灌漑に記されているように灌漑工程は土層部の水分量が圃場容水量に達した時点で停止し、更に 8.2 章浸透で記されているように土層部の浸透可能水量は次の式で算出され、浸透可能水量は土層部の水分量が圃場容水量以下だと 0 mm になるためである。即ち、土層部の水分量を圃場容水量以上にする事が出来ない灌漑工程によって、浸透可能水が生じる事は無い。

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{if } SW_{ly} > FC_{ly} \quad \text{式 2.38}$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{if } SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad \text{式 2.39}$$

$SW_{ly,excess}$: 任意日の土層内の浸透可能水量 (mm)、 SW_{ly} : 任意日の土層内の水分量 (mm)、 FC_{ly} : 土層の圃場容水量 (mm)

この晴天日の浸透水の欠如が、推定浸透水量と浸透水量実測値の大差の主要因であると考えられる。この晴天日の浸透水の欠如はパラメータの値に起因するものではなくモデルの構造に起因するものなので、オートキャリブレーション工程ではこの HRU レベルでの水収支の違いを調整する事はできない。

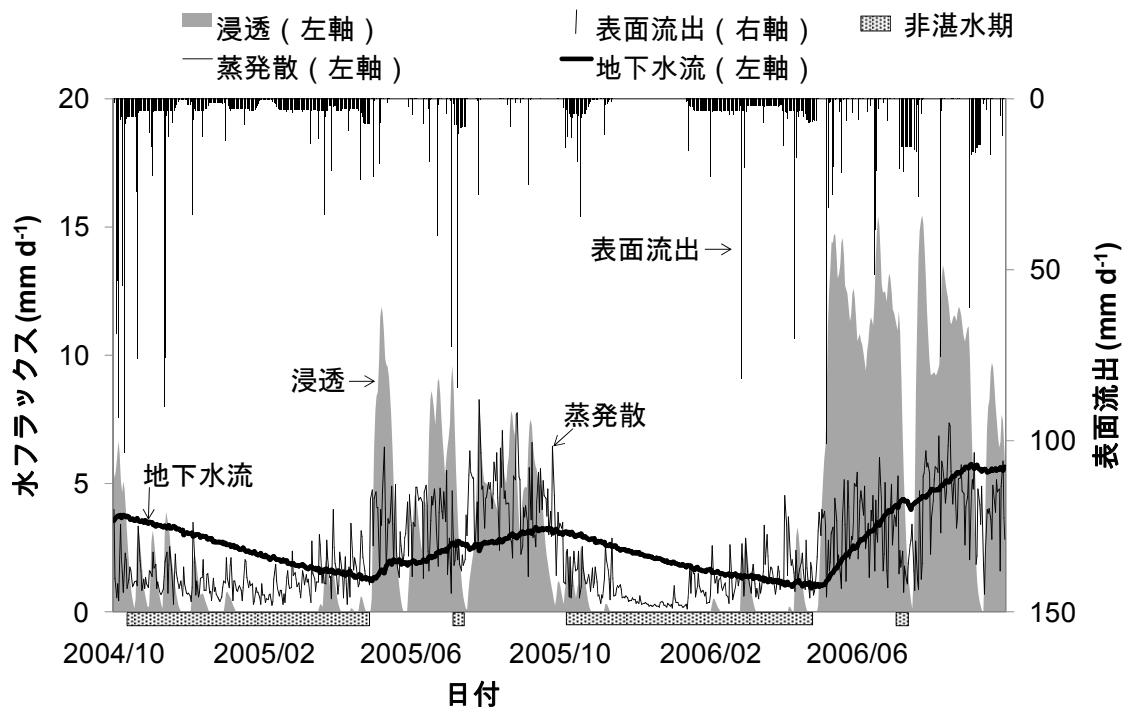


図 2.25 カーブナンバー手法で推定した水田 HRU の水収支

窪地手法の場合：

窪地手法で推定された水田 HRU の水収支を図 2.26 に示す。窪地内から土層への浸透は 0 mm d^{-1} から 30 mm d^{-1} の範囲で間断的に起きている。水収支を詳しく見ると、表 2.8 に示すように、窪地内が満水でなければ生じない表面流出が多くの日で見受けられるにも関わらず、浸透水量は殆どの日で 0 mm d^{-1} である。また、2006 年 6 月 28 日や同年 7 月 4 日に浸透が突発的に生じている。この間断的かつ殆どの日で 0 mm d^{-1} を示した推定浸透量は、湛水条件では常に浸透し続けている実際の田面水の浸透状況と大きく異なる。この非現実的な推定浸透量が生じる原因は、窪地モジュールのアルゴリズム内に見受けられる。式 2.34 に示されている通り、窪地内から土層への浸透工程は土層部の水分量が圃場容水量に達した時点で停止する。更に、土層内の浸透可能水量は式 2.38 および式 2.39 で算出されるため、土層部の水分量が圃場容水量以下だと 0 mm になり、土層内の浸透工程が土層部の水分量を圃場容水量以下に減らす事はできない。よって、窪地内から土層への浸透工程は殆どの日で停止する事になる。田面水の浸透による浅層地下水の涵養は水田地帯の水文の特性であり (Iwasaki et al., 2013)、この窪地モジュールでは水田地帯の水文を再現する事はできない。この問題は、窪地モジュールを窪地が局所的に存在するポットホール地形に対して使用するには生じない。なぜならば、HRU 全体が窪地となる水田 HRU と局所的に HRU 内の一部が窪地となるポットホール地形では、HRU に占める窪地の集水域の割合 (POT_FR) が異なるからである。水田 HRU では、田面水が HRU 全体を覆う事ができるように窪地の割合を 100% としている。一方で、ポットホール地形では窪地の割合が 100% 未満であるために、HRU の土層部は窪地に指定されていない面で生じる蒸発工程によって圃場容水量以下に乾く事が出来る。その為に、ポットホール地形では窪地内から土層へ浸透し続ける事ができる。

非湛水期においては、非湛水期にも降雨が見受けられるにも関わらず、1 月 1 日を除いて浸透も表面流出も蒸発散も生じていない。この推定値における降雨浸透および降雨流出の欠如は、モデルの不適切さに起因すると考えられる。更に、1 月 1 日にのみ降雨浸透および降雨流出が生じているが、当日には降雨は無く水田灌漑もなされておらず、双方ともに生じるべきではないものである。この非湛水期に水移動が停止する原因は、窪地モジュールと HRU のアルゴリズム内に見受けられる。SWAT theoretical documentation には窪地モジュールの湛水機能が開放条件に設定されると窪地内の貯水は全て排水されると書かれているものの、窪地モジュールのコードを見ると湛水条件から開放条件に設定が変更されても窪地内の貯水は存在し続ける構造になっている。一方で HRU のコードを見ると、窪地内に貯水が存在する場合は浸透や表面流出の元となる降雨流出工程をスキップする構造になっている。同様に、窪地内に貯水が存在する場合は蒸発工程もスキップする構造になっている。従って、開放条件に設定されている非湛水期には浸透も表面流出も蒸発散も出力され得ない。

表 2.8 の 2006 年 5 月 7 日、9 日、10 日に見られるように、当日には表面流出が生じており窪地内は満水状態であるにも関わらず、蒸発散量が非現実的に過小推定されている。この蒸発散量の過小推定の原因は、窪地モジュールのアルゴリズム内に見受けられる。窪地モジュールのコードを見ると、当日の窪地内の貯水量が極僅かであっても当日の貯水量が蒸発量の上限值になる構造になっている。更に、窪地内に貯水が僅かでも存在する場合は土層からの蒸発工程がスキップされる構造になっている。作物による蒸散工程はスキップされないものの、作付け前や生育初期の蒸散量は 0 mm もしくは極僅かである。よって、蒸発散量が過小推定されてしまう。

図 2.26 の 2005 年 4 月 29 日および 2006 年 4 月 29 日に見られるように、湛水期の初日に大量の表面流出水が生じている。それぞれ、水量は 332 mm d⁻¹ および 336 mm d⁻¹ である。しかし、両日ともに降雨量はなく、灌漑水量も 2005 年 4 月 29 日は 12.3 mm d⁻¹、2006 年 4 月 29 日は 11.7 mm d⁻¹ であり、生じるべきでない量の表面流出水である。これらの湛水期初日の大量の表面流出水はバグであると考えられ、毎年 1 月 1 日に落水条件設定を挿入する事で回避する事ができた。

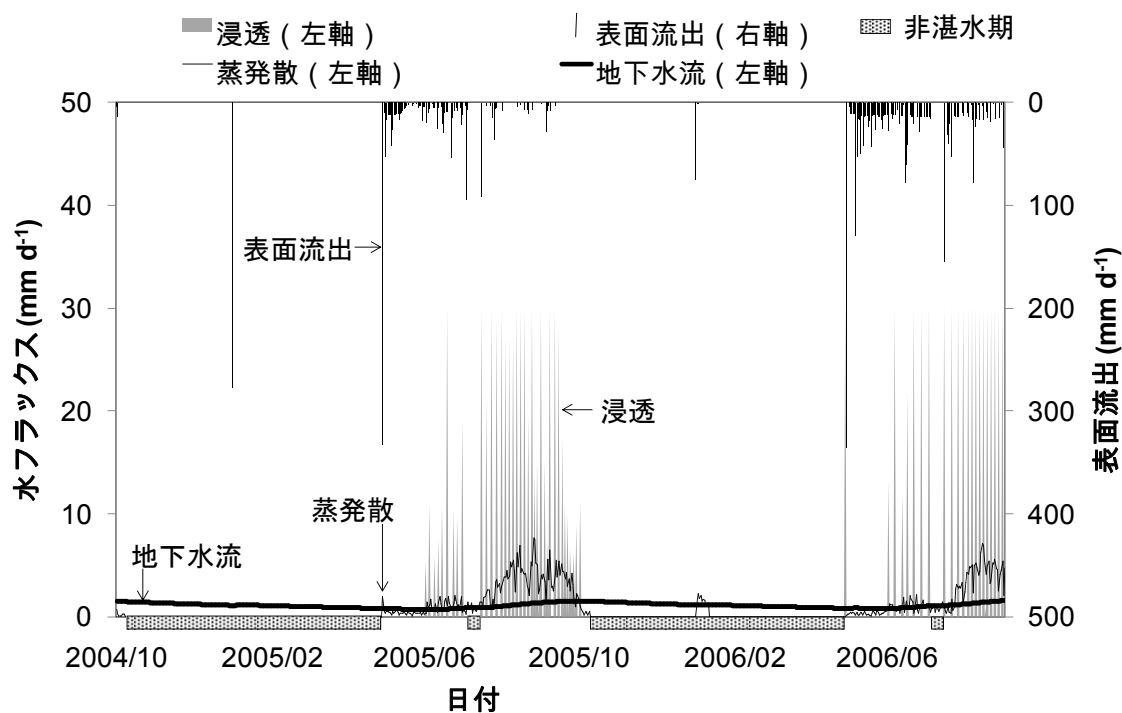


図 2.26 窪地手法で推定した水田 HRU の水収支

表 2.8 窪地手法で推定した水田 HRU の水収支

日付	蒸発散 (mm)	表面流出 (mm)	浸透 (mm)
2006/5/7	0.12	129.39	0.00
2006/5/8	0.38	52.58	0.00
2006/5/9	0.14	15.92	0.00
2006/5/10	0.17	17.26	0.00
2006/6/23	0.76	0.00	0.00
2006/6/24	2.18	0.00	0.00
2006/6/25	0.60	14.07	0.00
2006/6/26	0.31	28.37	0.00
2006/6/27	1.14	13.91	0.00
2006/6/28	1.02	13.69	30.00
2006/6/29	1.63	0.00	0.00
2006/6/30	0.99	0.00	0.00
2006/7/1	0.98	14.13	0.00
2006/7/2	1.07	13.66	0.00
2006/7/3	0.90	13.68	0.00
2006/7/4	1.26	13.72	30.00

2.9 既往研究との比較

水田 HRU にカーブナンバー手法および窪地手法を含む湛水手法を適用した既往研究の NSE および流域の概要を表 2.9 に示す。Kang et al. (2006) および Xie and Cui (2011) は湛水手法を用いている。Kang et al.(2006)は自身で開発した一定値の浸透水量を有する湛水手法を用いている為、彼らのシミュレーションにおいては本研究の窪地手法が出力した非現実的な浸透は起きていないと考えられる。本研究と同じ窪地手法を用いた Xie and Cui (2011)のシミュレーションにおいては、本研究と同じく非現実的な浸透が起きていた可能性がある。Tripathi et al. (2005)と Somura et al. (2009)のシミュレーションは本研究でのカーブナンバー手法よりも NSE が高くなったが、これは阿羅田川流域(3 km²)との流域面積の差によるものと推測される。なぜならば、流域面積が広い方が河川流量実測値の変化はより一般的になり、一般的な水の動きを模式化したモデルの出力値に近づくと考えられる為である。

本研究において、カーブナンバー手法は窪地手法よりも高い NSE を得たが、カーブナンバー手法には灌漑水田に特有の湛水過程が含まれていない。カーブナンバー手法では、降雨流出量は 5 日間以内の降雨量の関数である最大貯留量 (S)と当日の降雨量から算出される。しかし、Im et al. (2007)は灌漑水田においては最大貯留量 (S) と 5 日間以内の降雨量の間に関係が殆ど無い事を水田での降雨流出観測から解明した。彼らはその原因が水田の特徴、即ち灌漑にあると結論付け、そして灌漑水田の降雨流出量をより正確に推定する為にはカーブナンバー法の事前降雨量の基準を灌漑水田用に作り直す必要がある事を提案した。既往研究の多くでカーブナンバー手法が用いられており、そして流域レベルで高い NSE が得られている。しかし、それらの研究において水田 HRU の水収支は吟味されていない。水田 HRU の推定水収支の過不足を補うように水田以外の HRU のパラメータがキャリブレートされれば高い NSE を得る事は可能なので、既往研究の NSE が高くとも、水田 HRU レベルで合理的なシミュレーションがなされた保証はない。

表 2.9 カーブナンバー手法および湛水手法を用いた既往研究の NSE

	NSE	水田率	流域面積	所在地	水田水文
Xie and Cui (2011)	0.83	41%	1129 km ²	フーベイ県、中国	湛水手法
Kang et al. (2006)	0.87	19%	4 km ²	キュンギ県、韓国	湛水手法
Somura et al. (2009)	0.54-0.71	10%	920 km ²	島根県、日本	カーブナンバー手法
Tripathi et al. (2005)	0.87	15%	90 km ²	ハザリバグ区、インド	カーブナンバー手法

2.10 より良いシミュレーションに向けた提案

結果として、既往研究にて水田地帯に適用されてきた 2 手法、即ち窪地手法およびカーブナンバー手法について、既往研究では流域レベルで高い NSE が得られてきたものの、窪地手法は水田地帯のシミュレーションに使用できない事と、カーブナンバー手法の浸透工程の問題点が明らかとなった。更に SWAT モデルで採用されており、本研究におけるカーブナンバー手法でも使用されている通常のカーブナンバー法について、Im et al.(2007)は灌漑水田の降雨流出量とカーブナンバーの区分（乾燥条件、平均条件、湿潤条件）に用いられる降雨日前 5 日間の降雨量の間に関連が見られなかった事を報告し、灌漑水田用にカーブナンバー法を改良する必要がある事を提案している。また、湛落水管理により降雨流出反応が著しく変化する水田に一定のカーブナンバー値を想定することは無理であると考えられる。一方で窪地手法については、窪地手法が水田地帯の水収支を再現できない事が、本手法を用いた場合の流域レベルの NSE の低さの原因となっていると推測される。窪地手法が水田地帯の水収支を再現できないのは、窪地モジュールのアルゴリズムが水田での水の動きと著しく異なる事が原因である。

これらの問題点に対処する為には、水田地帯のシミュレーションを目的とした水田モジュールを開発する事が必要であると考えられる。現在、灌漑水田用にカーブナンバー区分を再定義する (Im et al., 2007)、HRU を湛水させた上で土壌名から想定される水田の日浸透量を田面水から差し引く (Kang et al., 2006)、HRU を湛水させた上で湛水深の増減サイクルにより水田灌漑の影響を再現する (Xie and Cui, 2011) という改善案がある。水文だけでなく水質も含めた SWAT モデルの活用を目指す場合、物理的な湛水工程を有しないカーブナンバー手法よりも湛水工程を有する湛水手法の方が水田地帯のシミュレーションに適していると考えられる。なぜならば、水田における水の流れ、土粒子や化学物質の移動、化学物質の変化は非常に複雑であり、湛水過程がその複雑さの根底にあると思われるためである。例えば、USLE 式 (Wischmeier and Smith, 1978) は水田からの土壌流出量の推定には適しておらず、湛水工程も含めた水田の水収支モデルと何らかの土粒子生産モデルを結合させたモデルの必要性が提唱されている (松井ら, 2009)。また、水田の水収支は脱窒現象や化学物質の溶脱にも影響していると考えられる。SWAT モデルは物理ベースモデルなので、基幹となる工程は物理的に設計されるべきであると思われる。

水田モジュールを開発する場合、窪地モジュールを改造する方針が有望だと考えられるが、それは湛落水管理機能、灌漑機能および作付け機能が既に備わっており、それらの機能を水田管理に活用する事ができるためである。物理的に設計された水田 HRU が加わる事で、SWAT モデルを水田地帯も含めた様々な地目を有する流域の土地管理手法の影響予測に活用できるようになる。よって、湛水工程を有する窪地モジュールの改造も含めて、水田地帯のシミュレーションが可能な湛水手法の開発が望まれる。

3 水田モジュールの開発

3.1 水田モジュール開発の概要

水田モジュールには湛水工程が含まれるべきなので、米国のポットホール地形の窪地用に SWAT モデル内に組み込まれている窪地モジュールを改造し、また窪地モジュール以外のモデル内の関連する機能も改造して、水田モジュールの開発を試みた。水田モジュールの開発において、図 3.1 に示した浸透工程、貯水体形状、灌漑機能、非湛水期の水収支、湛水面からの蒸発の 5 点が改造された。改造に用いられた SWAT モデルのバージョンは、SWAT 2009 rev. 488 である。水田モジュールの開発後、水田モジュールを有する SWAT モデルは阿羅田川流域に適用され、水田 HRU レベルの水収支と流域レベルの河川流量の検証が為された。その際に、水田からの蒸発散量の検証には蒸発散量の実測値が必要であるが、阿羅田川流域内の水田では蒸発散量が測られていないため、渦相関法で蒸発散量を測定している茨城県真瀬地区の水田にも SWAT モデルを適用し、検証を行った。更に、水田モジュールを水質分野で発展させていく為の第一歩として、懸濁物質の負荷機能を追加した。

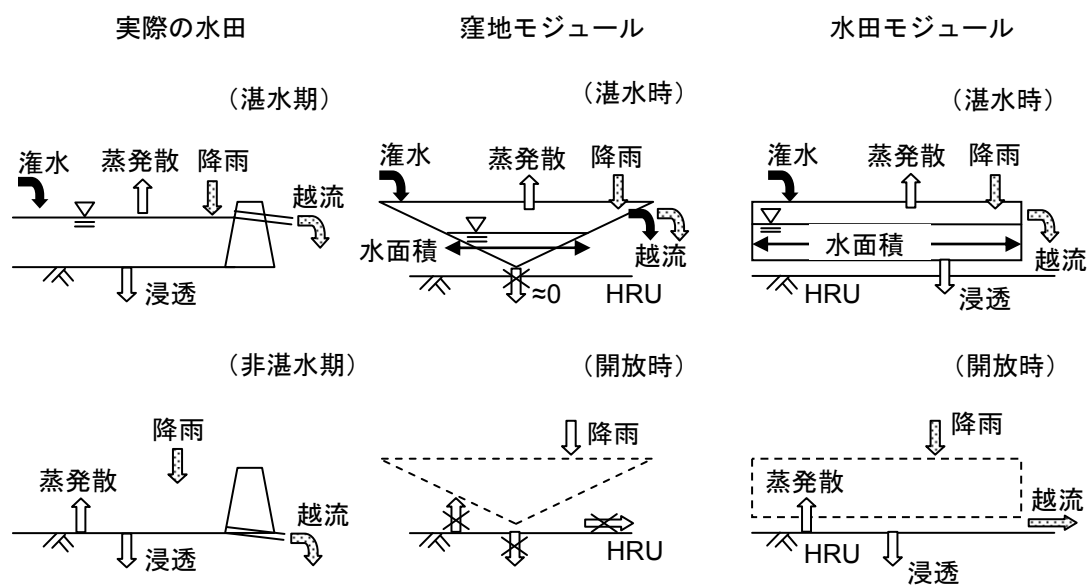


図 3.1 湛水期および非湛水期の実際の水田、窪地モジュール、水田モジュールの水収支の模式図

3.2 水収支の計算方法

3.2.1 飽和浸透機能

2.8章で説明したように、水田 HRU を窪地モジュールに指定した場合、窪地内から土層への浸透工程は土層の水分量が圃場容水量に達してしまうために殆どの日において停止してしまう。一方で、実際の水田においては、土層が飽和していても田面水は浸透する。そこで、実際の水田で起きている湛水条件下での飽和浸透をモデルに加えるべく、水田の可能最大浸透能という新しいパラメータを SWAT モデルに導入した。本パラメータは水田の水収支を近似するためのフィッティングパラメータであり、パラメータの値はキャリブレーション工程によって推定されるものとする。この新パラメータを用いて、窪地モジュールの窪地内から土層への浸透工程の式は以下のように変更された。

$$V_{\text{seep}} = 10 P_p SA \quad \text{if } V_{\text{stored}} > 10 P_p SA \quad \text{式 3.1}$$

$$V_{\text{seep}} = V_{\text{stored}} \quad \text{if } V_{\text{stored}} \leq 10 P_p SA \quad \text{式 3.2}$$

V_{seep} ： 窪地内から土層へと浸透する水量 (m^3)、 P_p ： 湛水下の水田での可能最大浸透能 (mm d^{-1})、 SA ： 水面積 (ha)、 V_{stored} ： 任意日の開始時点での窪地内の貯水量(m^3)
流域内の水田地帯における可能最大浸透能を推定するために、 0 mm d^{-1} から 30 mm d^{-1} までの浸透能を有する 7 シナリオが想定された。そして、全シナリオに対して 2.6 章に示されたキャリブレーション方法によって河川流量実測値を用いて感受性の分析と最適値の決定を行った。河川流量実測値は水田を含む全地目からの流出水から構成されるため、キャリブレーション後のモデル出力値が河川流量実測値に対して最も高い NSE を示したシナリオの可能最大浸透能が阿羅田川流域の水田地帯の可能最大浸透能として最適であると仮定し、可能最大浸透能を推定した。この可能最大浸透能には、図 3.2 に示す通り耕盤層以深に浸透する鉛直浸透、耕盤層上の横浸透、そして畔からの漏水が含まれる。これらの浸透は湛水日には飽和流となるが、間断灌漑期には不飽和流となる。よって、可能最大浸透能を用いた水田の水収支の近似には、間断灌漑期の不飽和流も含まれる。

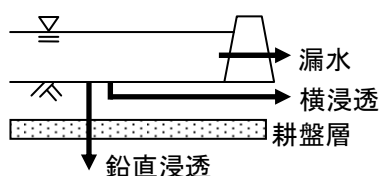


図 3.2 可能最大浸透能に含まれる水田からの浸透

3.2.2 貯水体形状

窪地モジュールにおける窪地の形状は円錐形であり、窪地内の貯水量が減ると水面積も減る仕組みとなっている。一方で、水田は直方体に近く、貯水量の増減に関わらず水面積は一定であるものと考えられる。よって、窪地モジュール内の水面積の式は以下のように変更された。また、この変更を図 3.3 に図示する。

$$SA = \text{area}_{\text{hru}} \quad \text{式 3.3}$$

area_{hru} : HRU の面積 (ha)

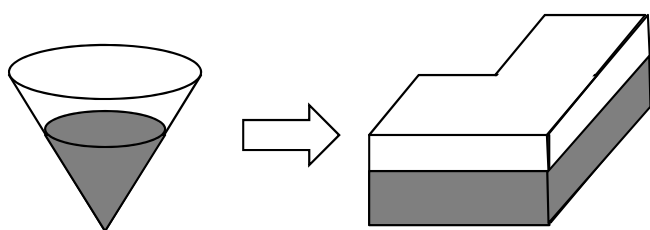


図 3.3 窪地型から水田型への貯水体形状の変更

3.2.3 灌漑停止機能

通常、水田地帯への灌漑用水の供給量は、蒸発散損失および浸透損失に相当する水田の水需要量よりも多い。一方で、実際に用水路から水田に取水される灌漑の総量は、各農家の灌漑管理に左右される。この各農家レベルでの灌漑管理および日取水量を流域内の全農家について把握するのは困難であるため、本研究では用水路の日流量から水田の日灌漑水量を推定している。しかし、この推定では用水路を流れてはいるものの水田に取水されない水量が考慮されていない。結果として、灌漑により窪地モジュールの貯水量が上限を超えて越流が生じる日が見受けられた。この実際の水田では通常は見受けられない灌漑水の越流を防止するために、灌漑機能は以下のように変更された。

$$\text{irr}_{\text{pot}} = V_{\text{pot, mx}} - V_{\text{stored}} \quad \text{if } V_{\text{stored}} + \text{irr} > V_{\text{pot, mx}} \quad \text{式 3.4}$$

$$\text{irr}_{\text{pot}} = \text{irr} \quad \text{if } V_{\text{stored}} + \text{irr} \leq V_{\text{pot, mx}} \quad \text{式 3.5}$$

irr_{pot} : 任意日に貯水槽に加えられる水量 (m^3)、 $V_{\text{pot, mx}}$: 貯水槽が貯水可能な上限水量 (m^3)、 irr : 任意日に用水路から配水される水量 (m^3)

更に、取水されなかった灌漑用水量を直接河川に排水させるために、以下の式を追加した。

$$Q_{\text{surf}} = Q_{\text{surf,normal}} + (V_{\text{stored}} + \text{irr} - V_{\text{pot, mx}}) / (10 \text{ area}_{\text{hru}}) \quad \text{if } V_{\text{stored}} + \text{irr} > V_{\text{pot, mx}}$$

式 3.6

$$Q_{\text{surf}} = Q_{\text{surf,normal}} \quad \text{if } V_{\text{stored}} + \text{irr} \leq V_{\text{pot, mx}}$$

式 3.7

Q_{surf} : 用水路からの直接排水を含む、任意日に HRU から河川に排水される総水量 (mm)、
 $Q_{\text{surf,normal}}$: 灌漑水の越流を含まない、任意日に HRU から河川に排水される水量(mm)
 これらの変更点を合わせると、図 3.4 に示されたように水田が満水に達するまでは灌漑用水は水田へ配水され、水田が満水に達すると水田への灌漑は停止し、残りの灌漑用水は河川へ直接排水される仕組みとなる。

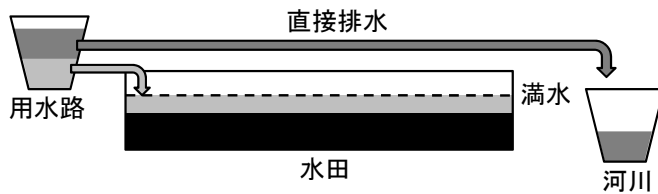


図 3.4 灌漑停止機能

3.2.4 非湛水期の水収支機能

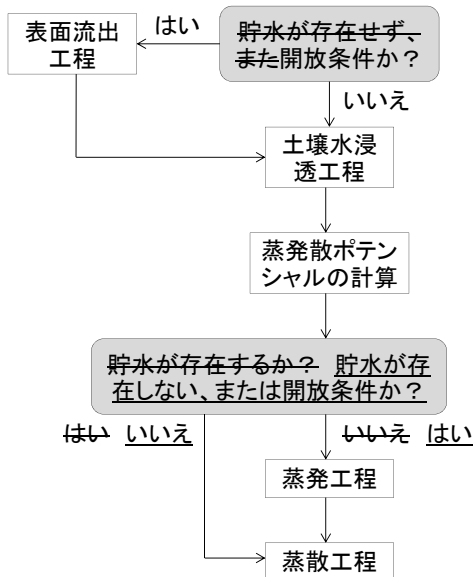


図 3.5 HRU アルゴリズムの変更点 (原図は Xie and Cui (2011) より引用)

実際の水田では、水尻を開放すると田面水は一日以内に排水される。田面水が排水された後は、畑地と同様に降雨は浸透し、表面流出し、また蒸発する。しかし現在の HRU アルゴリズムでは、2.8 章で説明されたように窪地モジュールの湛水機能が開放条件に設定されても浸透も表面流出も蒸発散も起こらない。この問題に対処する為、HRU アルゴリズムは非湛水期に降雨浸透、流出、蒸発散工程が働くように変更された。図 3.5 に HRU アルゴリズムのフローチャートを示し、変更前に消し線、変更後に下線を付す。

3.2.5 湛水面からの蒸発機能

2.8 章で説明されたように、窪地モジュールでは当日の貯水量が非常に僅かだとしても当日の貯水量が水面からの蒸発量の上限值となり、蒸発量が過小評価されてしまう。この問題に対処する為、図 3.6 に示すように当日の貯水量が当日の水面からの蒸発量の可能最大値よりも少ない場合は、蒸発工程は窪地モジュール内の水面からの蒸発量計算ルーチンから HRU アルゴリズム内の地表面からの蒸発量計算ルーチンに切り替わるように変更された。また、HRU アルゴリズム内の地表面からの蒸発量計算ルーチンは貯水が存在すると機能しないため、貯水が存在しても機能するように HRU アルゴリズムが変更された。尚、水面からの蒸発量計算ルーチンが使用された場合でも地表面からの蒸発量計算ルーチンが使用された場合でも、貯水体内で生育している植物の蒸散はその葉面積指数に応じて常に生じ続ける。

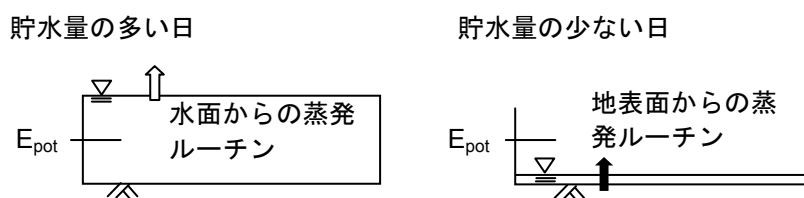


図 3.6 貯水量の変化に伴う蒸発ルーチンの切り替え

E_{pot} は水面からの蒸発量の可能最大値

次に、水面からの蒸発量推定値を田面水からの蒸発量実測値に近づけるために、以下のように窪地モジュールの蒸発量推定式に蒸発係数 (η) が加えられた。この係数は SWAT モデル内の池モジュールおよび貯水池モジュールから引用したものである。

$$V_{evap} = \eta 10 (1 - LAI / LAI_{evap}) E_0 SA \quad \text{if } LAI < LAI_{evap} \quad \text{式 3.8}$$

$$V_{evap} = 0 \quad \text{if } LAI \geq LAI_{evap} \quad \text{式 3.9}$$

蒸発係数 (η) の値は池モジュールおよび貯水池モジュールと同じく、0.6 とした。

3.3 水田モジュールを有する SWAT モデルの適用

3.3.1 阿羅田川流域への適用

新規に開発された水田モジュールを有する改良版 SWAT モデルは、水田地帯を有する阿羅田川流域でテスト使用された。データは 2.4 章と同じく設定され、また同じく初期化された。また、2.5 章にて全水田 HRU を窪地モジュールに指定したのと同じ手法で全水田 HRU を水田モジュールに指定し、湛水および落水期間、上限湛水深、日灌水量、灌漑水の表面流出率、水稻の生育が設定された。湛水田以外の HRU の降雨流出量は、SWAT モデル内の Green-Ampt Mein-Larson 式 (Mein et al., 1973) を用いて降雨量の内の浸透不能量を推定する手法である Green-Ampt infiltration method によって計算された。また、3.2.1 章で述べたとおり可能最大浸透能を 0 mm d⁻¹ から 30 mm d⁻¹ までの範囲で 7 シナリオ想定し、全シナリオに対して 2.6 章と同じ手法でモデル内のパラメータのキャリブレーションを行った。可能最大浸透能を 20 mm d⁻¹ と想定したシナリオについて、キャリブレーション結果を表 3.1 に示す。

表 3.1 可能最大浸透能を 20 mm d⁻¹ と想定したシナリオの各パラメータの感受性および最適値

感受性順位	パラメータ	パラメータの説明	方法*1	下限値	上限値	最適値
1	Esco	蒸発量の補償係数	1	0.01	1.0	0.994
2	Gwqmn	地下水流の生じる浅層地下水量の閾値 (mm)	1	0	2000	347.5
3	Canmx	樹冠貯水量最大値 (mm)	3	-25%	+25%	0.87
4	Sol_Awc	最表層土層の有効水分量(mm mm ⁻¹)	3	-25%	+25%	0.10-0.25*2
5	Alpha_Bf	基底流 α 係数	1	0.1	1.0	0.669
6	Gw_Revap	地下水の毛管上昇係数	1	0.02	0.2	0.035
7	Cn2	平均条件 (CNII) のカーブナンバー値	3	-25%	+25%	26-60*2
8	Sol_Z	最表層土層の厚さ (mm)	3	-25%	+25%	137-158*2
9	Slope	平均勾配 (m m ⁻¹)	3	-25%	+25%	0.021-0.070*2

10	Sol_K	最表層土層の飽和透 水係数(mm h ⁻¹)	3	-25%	+25%	119- 1403*2
11	Ch_K2	河床の飽和透水係数 (mm h ⁻¹)	1	0	150	15.1
12	Revapmn	毛管上昇の生じる浅 層地下水量の閾値 (mm)	1	0	500	416.5
13	Gw_Delay	地下水流の遅延日数 (d)	1	50	250	221.0
14	Ch_N2	河川の粗度係数	1	0.01	0.1	0.022
15	Epc0	吸水量の補償係数	1	0.01	1.0	0.907
16	Sol_Alb	地表のアルベド	3	-25%	+25%	0.15
17	Slsbbasin	斜面長 (m)	3	-25%	+25%	53-80*2

*1: オートキャリブレーションの方法を意味し、1 は初期値を上限から下限の範囲内の他の値に変更する方法、3 は初期値に上限から下限の範囲内の係数を掛ける方法を意味する。

*2: 値は土壌区分、土地利用区分、作物種により異なる。

3.3.2 真瀬地区の水田への適用

阿羅田川流域の水田では蒸発散量が Penman-Monteith 法と作物係数から推定されているため、蒸発散量を渦相関法で推定した茨城県つくば市真瀬地区の水田を対象にして改良版 SWAT モデルを使用し、水田 HRU レベルでの水収出力値の検証を行った。真瀬地区は北緯 36 度 2 分、東経 140 度 2 分に位置し、年平均降水量は 1282.9mm、年平均最高気温は 19.1 度、年平均最低気温は 8.8 度、年平均相対湿度は 75 %、年平均風速は 2.4 m s⁻¹、年平均日射量は 13.1 MJ m⁻² である。対象水田では気象値、灌水量、地表排水量、蒸発散量が 2002 年 4 月から 2002 年 8 月まで観測された。これらの気象値および灌水量の実測値、水尻の高さ(50mm)、そして可能最大浸透能(3 mm d⁻¹)を水田モジュールに設定し、水田 HRU の水収出力値を得た。尚、可能最大浸透量は 5 月から 8 月の期間の入水量実測値（灌水量および降雨量）と出水量実測値（地表排水量および蒸発散量）の差から設定された。4 月の実測値は代掻きの影響を受けている為に、対象期間から外された。

3.4 水田地帯の水収支の計算結果

3.4.1 阿羅田川流域の水田の浸透能の推定結果

図 3.7 に各可能最大浸透能仮定値を有するモデルをキャリブレートした後の NSE 値を示す。NSE 値のピークは可能最大浸透能を 20 mm d⁻¹ と仮定したシナリオで現れたため、阿

羅田川流域の水田地帯の可能最大浸透能の最適値は 20 mm d^{-1} であると考えられる。2.3.4 章で述べたとおり、対象流域は比較的上流域に位置し、また対象流域の下層土は砂や礫などから構成されているため、対象流域の水田の浸透能は比較的高めであると考えられる。可能最大浸透能は水田の鉛直浸透量を示す値では無く、水田の包括的な浸透量を近似する為のフィッティングパラメータに過ぎない。そのため、水田の浸透量実測値との比較には適さないが、参考までに可能最大浸透能を 20 mm d^{-1} と仮定したシナリオにおいて稲作期に水田 HRU から浸透した水量を対象流域の水田の稲作期の浸透水量実測値と比較した。2.8 章で述べたとおり、この水田の稲作期の浸透水量実測値は稲作期間の日数調整を含めると $1,480 \text{ mm}$ であった。一方で、可能最大浸透能を 20 mm d^{-1} と仮定したシナリオの稲作期の浸透水量推定値は $1,559 \text{ mm}$ であった。推定値の方が実測値よりも 5.3% 過大に見積もっているが、 20 mm d^{-1} と仮定したシナリオの推定値は他のシナリオよりも実測値に近い結果となった。

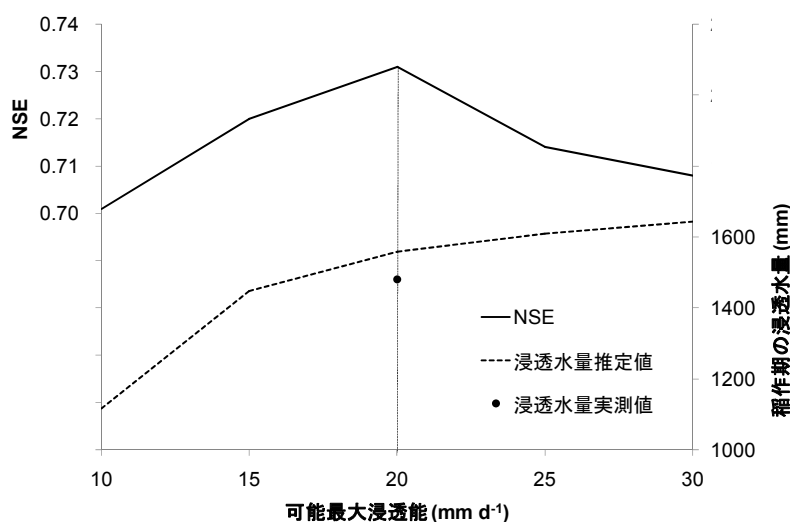


図 3.7 各可能最大浸透能仮定値に対するキャリブレーション後の NSE および稲作期の浸透水量

3.4.2 真瀬地区の水田における水収支の検証

図 3.8 に真瀬地区の水田で実測された水尻からの地表排水量と、改良版 SWAT が真瀬地区の水田の気象データおよび灌漑管理データから推定した水田 HRU の表面流出量の比較を示す。また、図 3.9 に真瀬地区の水田で実測値から渦相関法にて推定された蒸発散量と、改良版 SWAT が真瀬地区の水田の気象データおよび灌漑管理データから推定した水田 HRU の蒸発散量の比較を示す。それぞれの実測値（渦相関法による推定値を含む）と推定値の相関性を、D index (Willmott, 1981)で評価する。ここで、D index とは NSE と似た指

標ではあるが、キャリブレーションを要するモデルの評価には NSE の方が適しているものの、キャリブレーションを要しないモデルの評価には NSE よりも適している(Ahuja and Ma, 2011)。水田モジュール内で表面流出量と蒸発散量はキャリブレーションをせずに論理式のみで推定されるため、NSE ではなく D index が使用された。D index は以下の式で求められる。

$$D = 1 - \frac{\sum [i=1..n](M_i - O_i)^2}{\sum [i=1..n](|M_i - O_{avg}| + |O_i - O_{avg}|)^2} \quad \text{式 3.10}$$

n : 全観測回数、 M_i : 時間ステップ i におけるモデル予測値、 O_i : 時間ステップ i における実測値、 O_{avg} : 実測値の平均値

D index は 0 から 1 の範囲をとり、1 の場合はモデルの予測が完璧であることを意味する。算出された D index は、表面流出量については 0.86、蒸発散量については 0.94 であった。高い相関性が D index により示されたため、改良版 SWAT 内の水田モジュールは水田の水収支を適正に推定できるものと判断された。

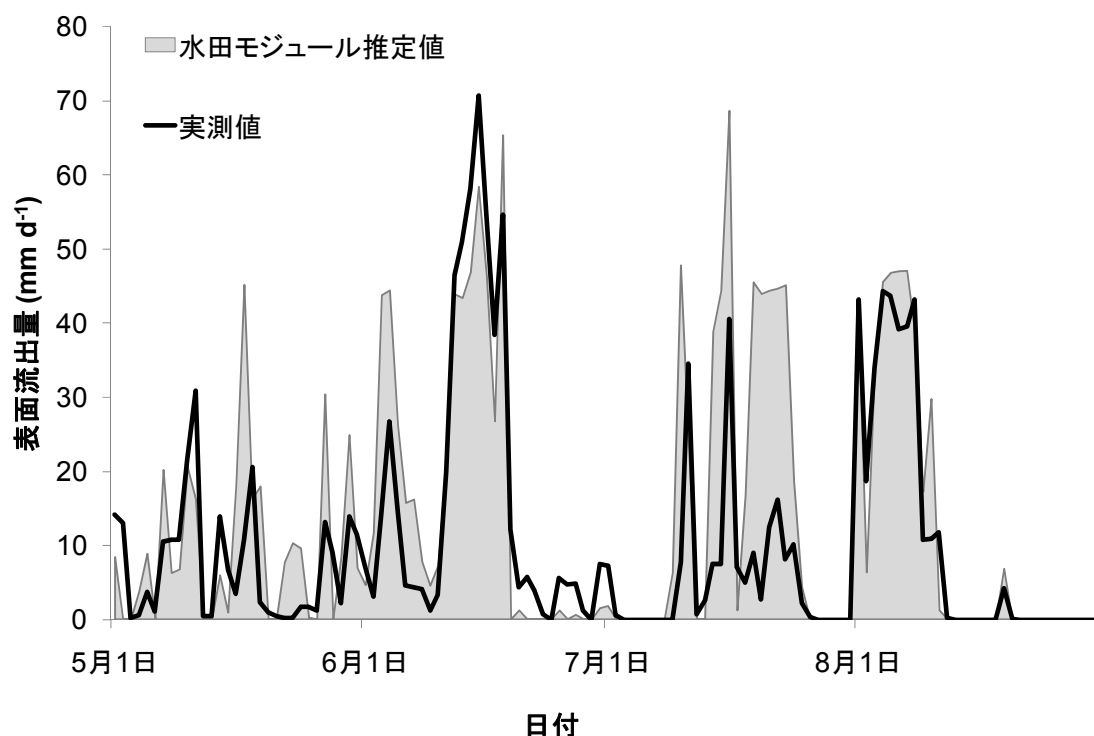


図 3.8 表面流出量の水田モジュール推定値と観測値の比較

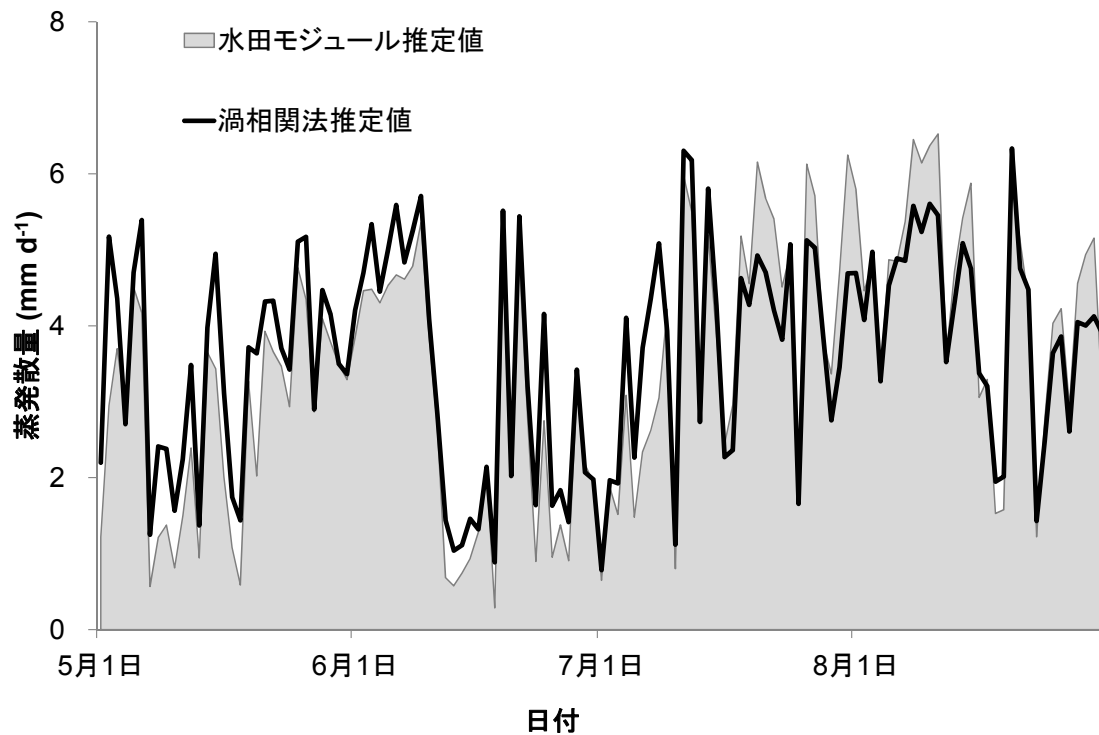
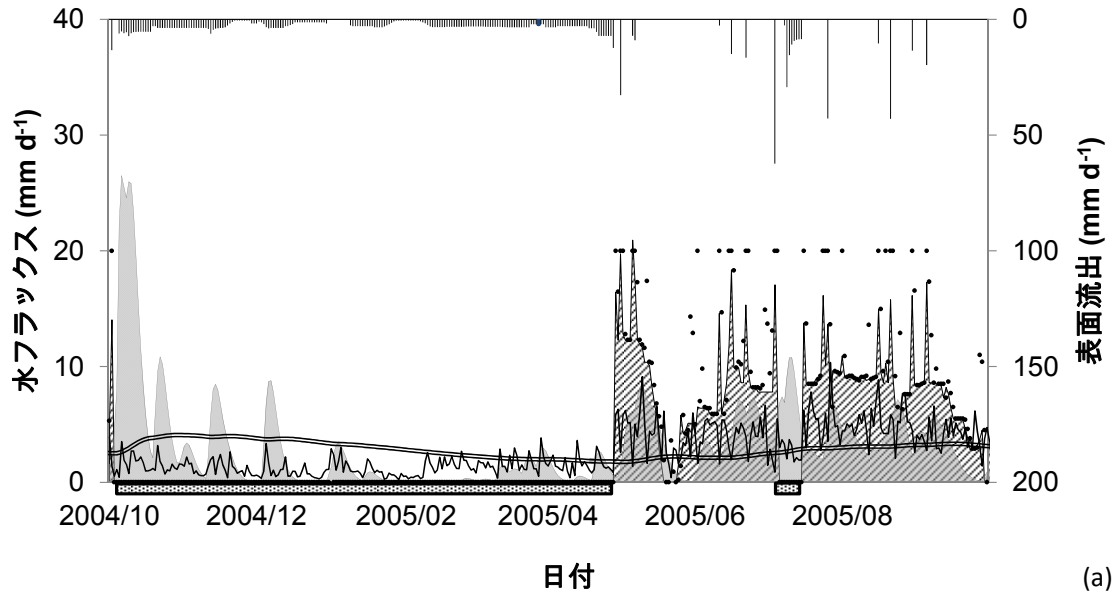


図 3.9 蒸発散量の水田モジュール推定値と渦相関法推定値の比較

3.4.3 阿羅田川流域の水田地帯における水収支の推定値

改良版 SWAT が推定した、可能最大浸透能を 20 mm d^{-1} と想定したシナリオの阿羅田川流域の水田 HRU の水収支を図 3.10 に示す。また、稲作期（5月27日から10月10日）の水収支の要約を表 3.2 に示す。湛水期には、湛水から土層への浸透量は 0 mm d^{-1} から 20 mm d^{-1} の範囲で変動している。最大浸透量(20 mm d^{-1})は、このシナリオでの可能最大浸透能と一致している。7月の非灌漑期（中干し期）には湛水位は 0 mm になり、少し遅れて土層から土層下（Vadose zone）への浸透量が急減している。また、湛水期と非湛水期では土層から土層下への浸透傾向に大きな違いが見られ、湛水期には恒常的に高い浸透量を維持しているが、非湛水期には浸透量が大きく変動している。これらの傾向は実際の灌漑水田の状況を想像すると、非常に理にかなっている。湛水期の表面流出量（湛水の越流）は最大で 127.3 mm d^{-1} に達し、非湛水期の表面流出量は最大で 7.3 mm d^{-1} に留まっている。湛水期の蒸発散量は 0.8 から 10.4 mm d^{-1} の範囲で変動し、非湛水期の蒸発散量は 0.2 から 3.5 mm d^{-1} の範囲で変動している。水田 HRU から河川への地下水流出量は 1.5 から 5.4 mm d^{-1} の範囲で変動し、湛水期の終盤で最大値となり、非湛水期の終盤で最小値となっている。

▨ 湛水深 (左軸) ▨ 土層下への浸透 (左軸) ■ 非湛水期
 ■ 表面流出 (右軸) — 蒸発散 (左軸)
 — 地下水流 (左軸) ・ 湛水から土層への浸透 (左軸)



▨ 湛水深 (左軸) ▨ 土層下への浸透 (左軸) ■ 非湛水期
 ■ 表面流出 (右軸) — 蒸発散 (左軸)
 — 地下水流 (左軸) ・ 湛水から土層への浸透 (左軸)

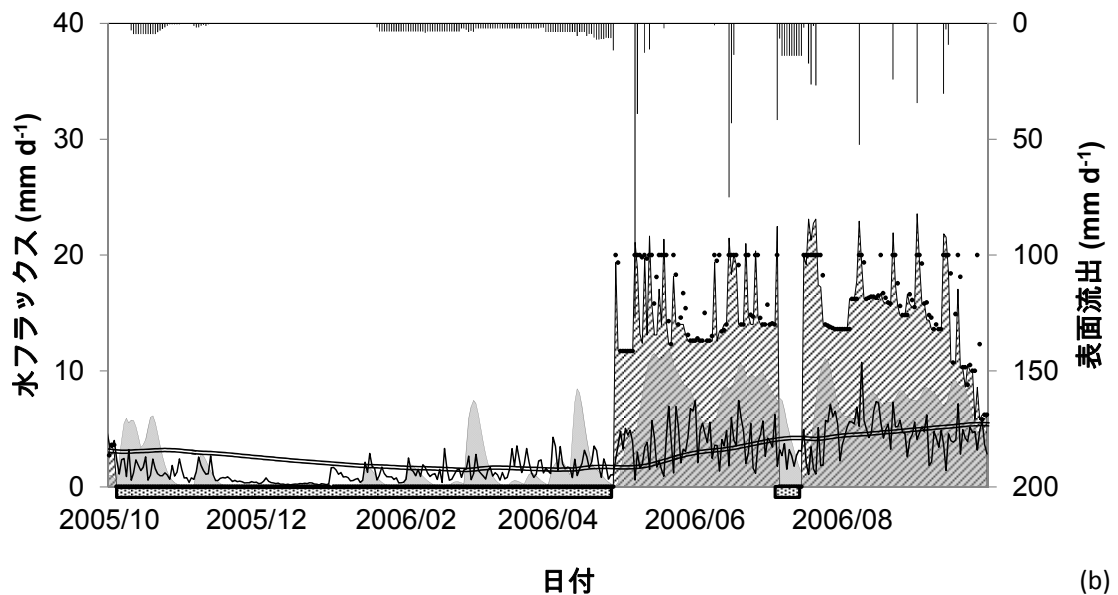


図 3.10 水田モジュールで推定した水田 HRU の水収支
 (a) バリデーシヨン期 (b) キャリブレシヨン期

表 3.2 稲作期の水田 HRU の水収支

入水量 (mm)		出水量 (mm)		
降雨量	灌水量	浸透水量	蒸発散量	表面流出量
1038.9	1226.3	1558.0	568.7	452.7

同シナリオの水田 HRU の降雨流出反応を図 3.11 に示す。湛水期と非湛水期とでは水田 HRU の降雨流出反応は大きく異なり、湛水期の流出率は平均で 73%であったが、非湛水期の流出率は平均で 5%であった。更に、湛水期の水田 HRU の降雨流出反応は当日の降水量の影響を大きく受けており、降雨量が 30 mm d⁻¹ 未満の日には流出率は平均で 24%と低く、また流出率は当日の湛水位の影響を強く受けて非定常であったが(R² = 0.42)、降雨量が 30 mm d⁻¹ 以上の日には定常的(R² = 0.83)に平均で 94%と高い流出率を示した。

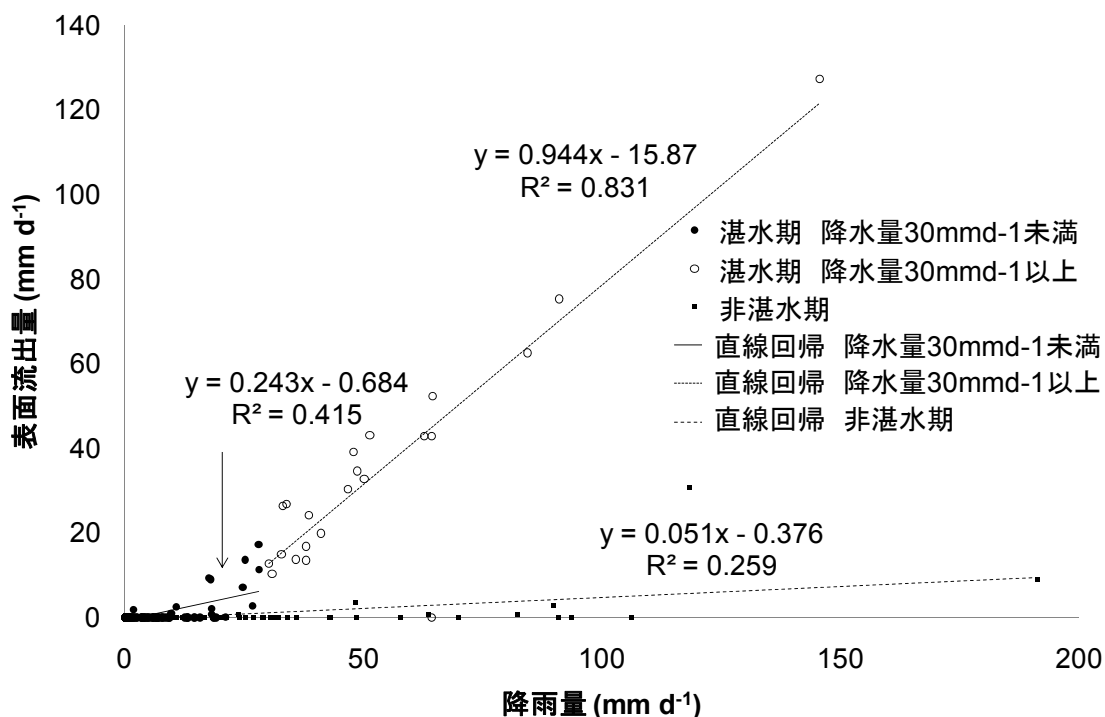


図 3.11 水田モジュールで推定した水田 HRU の降雨流出反応

3.4.4 灌漑停止機能と非湛水期の水収支機能の検証

水田モジュールの貯水槽からの越流はまず水田 HRU に流入し、次に水田 HRU から河川へと流出する。水田 HRU から河川への流出水の水源は貯水槽からの越流水以外には無いので、窪地モジュールと同じく全ての灌漑水が貯水槽に配水される場合は、貯水槽から水田 HRU への越流量と水田 HRU から河川への流出水量は常に同一量になる。図 3.12 に斜線

模様で示された領域は水田 HRU から河川への流出水量と貯水槽から水田 HRU への越流水量の差分であり、水田 HRU からの流出水量の方が貯水槽からの越流量よりも大きい事が分かる。この差分領域は、貯水槽に配水されなかった灌漑水が水田 HRU から河川への流出水に加えられた水量である。よって、灌漑停止機能、即ち貯水槽（田面）が満水になった場合には灌漑水を貯水槽（田面）に配水せずに直接河川に排水する仕組みが設計通りに働いている事が伺える。

図 3.10 の非湛水期には、土層下への浸透水と蒸発散が見受けられる。この期間の降雨の殆どは土層に浸透したが、図 3.10 の一部を拡大した図 3.12 では非湛水期に格子模様で示された降雨流出が見受けられる。よって、非湛水期の水収支機能、即ち水田モジュールが開放されている状態で雨が降った場合には、一部は表面流出し、残りは土層に浸透し、また土層から蒸発するという仕組みが設計通りに働いている事が伺える。

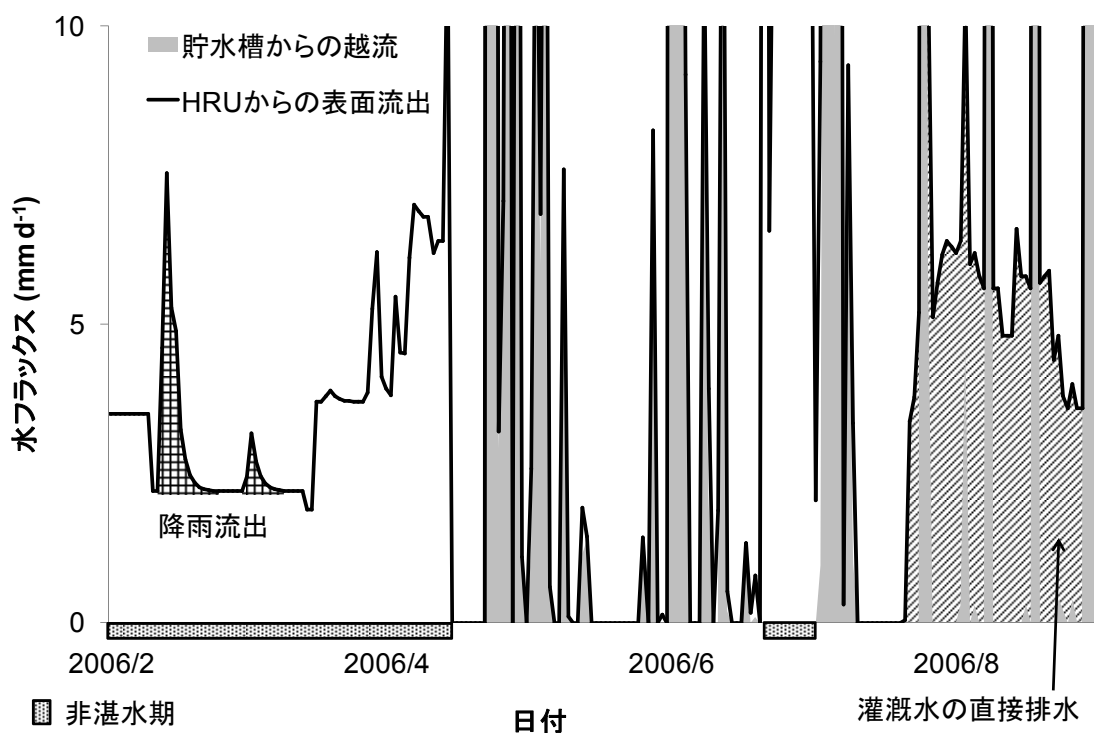


図 3.12 使用されなかった灌漑水の河川への直接排水と非湛水期の降雨流出

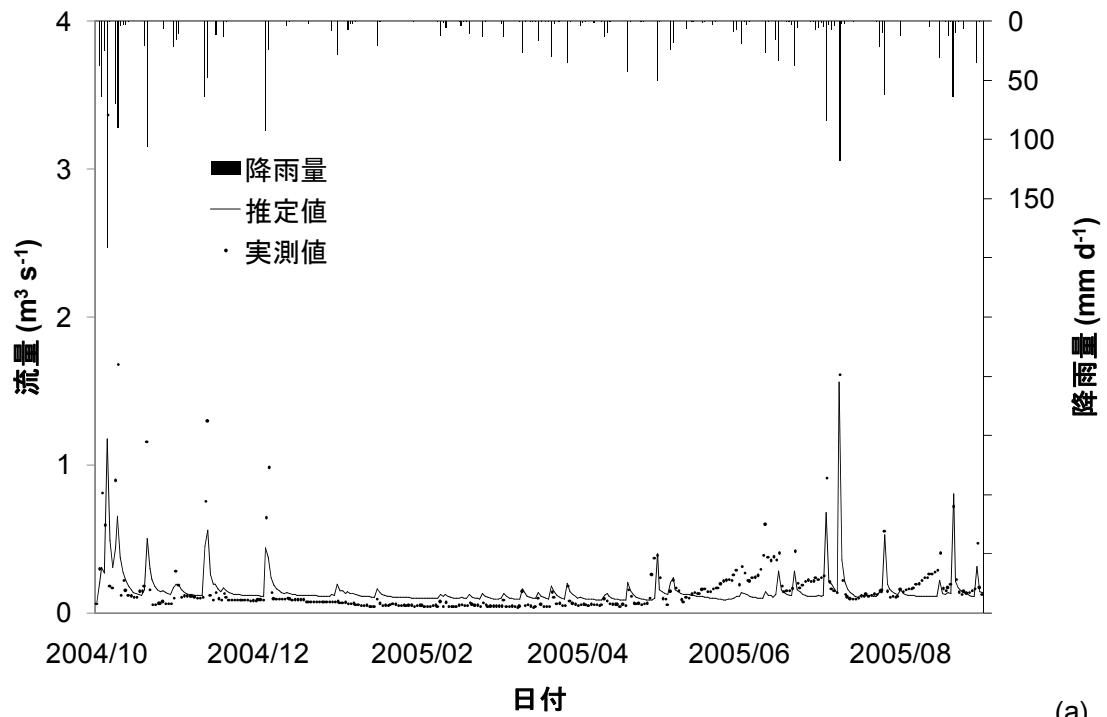
3.5 流域における河川流量の検証

表 3.1 で示された可能最大浸透能を 20 mm d^{-1} と想定したシナリオの各パラメータの最適値を用いてシミュレートされた阿羅田川河口での河川流量推定値を、図 3.13 に示す。

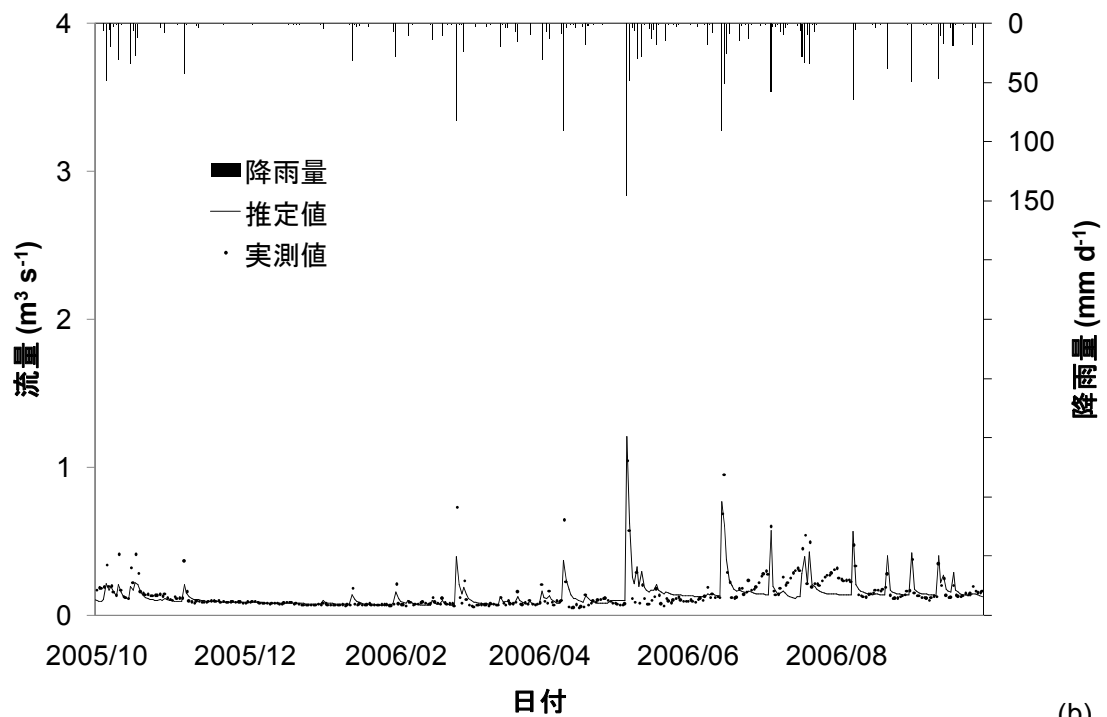
推定値と阿羅田川河口での実測河川流量との間の NSE は、実測河川流量をキャリブレーションに用いた期間(2005 年 10 月から 2006 年 9 月、以降キャリブレーション期間とする)

では 0.73 であった。両者の関係は R^2 値では 0.74、RMSE（二乗平均平方根誤差）では 4.84 mm d⁻¹ であった。キャリブレーション期間の河川流量実測値から決定されたパラメータ値を用いて推定した 2004 年 10 月から 2005 年 9 月（以降バリデーション期間とする）の河川流量推定値と実測値の間の NSE は、0.56 であった。 R^2 値でも 0.66、RMSE では 5.57 mm d⁻¹ であった。推定値と実測値の間の PBIAS はキャリブレーション期間で 6%、バリデーション期間で 11% であった。総降雨量に対する実測河川流量の割合はキャリブレーション期間で 54%、バリデーション期間で 64% であったが、一方で総降雨量に対する推定河川流量の割合はキャリブレーション期間で 49%、バリデーション期間で 54% であった。これらの降雨量の流出率は、灌漑水は流域外から供給されている為に、河川流量から灌漑用水量が差し引かれた上で計算された。

Moriasi et al. (2007) は SWAT モデルの多くの流域への適用結果を集計し、NSE が 0.65 以上の場合は良好、0.50 以上の場合は適切との判断基準を示した。同様に、PBIAS が ±10% 以内の場合は非常に良好、±15% 以内の場合は良好との判断基準を示した。これらの NSE および PBIAS の判断基準から、改良版 SWAT は水田地帯を有する流域の流出過程を正確にシミュレートする事ができると判断された。



(a)



(b)

図 3.13 阿羅田川河口における河川流量推定値と実測値
 (a) バリデーション期 (b) キャリブレーション期

3.6 開発された水収支機能についての考察

本研究において開発された水田モジュールを有する改良版 SWAT を用いた流域の流出過程のシミュレーションは成功した。水田を有する流域での使用を目的とした他の改良版 SWAT と比べて、本研究にて開発された改良版 SWAT には以下の利点がある。まず、対象流域の水田地帯の包括的な浸透能を推定する事が出来る。Kang et al. (2006) により開発された改良版 SWAT では、土壌の種類に応じて適当な浸透能を想定する必要がある。しかしながら、水田の浸透能は土壌の種類以外にも、地下水位、排水路の水位、水田間での湛水位の差異といった地域的な排水性、および耕盤層と畔の状態にも影響される。次に、灌漑水路の日流量記録を使用する事が出来る。Xie and Cui (2011) により開発された改良版 SWAT では、水田の灌水量と灌漑水路の流量が無関係である。大規模な水田灌漑システムでは、灌漑水が流域外から取水されるために水田灌漑は河川流量を大幅に増加させる。本研究における対象流域では、流域外から流入し灌漑水路を介して流域内の水田地帯に配分された灌漑水量は、湛水期の河川流量の 37%に相当する。よって、大規模な水田灌漑システムに属する流域では実際の灌漑水路の流量をシミュレーションに反映する事が望まれる。更に、SWAT モデルにおいて降雨流出反応の推定に一般的に用いられるカーブナンバー法では水田地帯の湛水期と非湛水期の降雨流出反応の違いを考慮していないが、本研究で開発された水田モジュールは湛水期と非湛水期の双方に適用可能である。

本研究では可能最大浸透能の適正值はその他のパラメータのオートキャリブレーションを繰り返す事で推定されたが、もし可能最大浸透能をオートキャリブレーションの対象パラメータに加える事が出来たら可能最大浸透能の推定作業は非常に簡単になると考えられる。可能最大浸透能という新パラメータを SWAT モデルに導入するアイデア、また可能最大浸透能を用いたシミュレーションの信頼性を高めるためには、流域レベルとその流域内の水田地帯レベルの双方で同時に流量観測を行う必要があると考えられる。

3.7 懸濁物質負荷の計算方法

3.7.1 湛水田での降雨流出による懸濁物質負荷推定式

一般的に、水田での土壌流亡は畑地での土壌流亡に比べて関心が少ない。しかしながら、水田からの土壌流亡量の推定は土壌保全の観点よりも、土粒子が栄養塩、農薬、放射性セシウムなどを吸着して運搬するために、化学物質の移動のシミュレーションの観点で重要である。樺元 (2009) や Chen et al. (2012) は水田地帯からの土壌流亡量を USLE 式 (Wischmeier and Smith, 1978) を用いて推定しているが、彼らの目的は棚田地帯の斜面部からの土壌流亡量を評価する事である。USLE 式はこの目的には適しているが、水田内からの化学物質を吸着した土粒子の流出は USLE 式の適用可能範囲を超えている。また松井ら (2009) は、USLE 式は水田からの土壌流亡量の推定には適しておらず、湛水工程も含め

た水田の水収支モデルと何らかの土粒子生産モデルを結合させたモデルが必要であると指摘している。SWAT モデルでは、MUSLE 式 (Williams and Berndt, 1977) で推定された土壌流亡量が懸濁物質負荷の根源となっている。MUSLE 式は畑地に対しては理にかなっているが、人為的に湛水されている水田の懸濁物質負荷の推定には別の推定手法を用いる必要があると考えられる。そこで、本研究にて開発された水田モジュール、即ち松井らの提唱の中の湛水工程も含めた水田の水収支モデルに、水田の懸濁物質負荷の推定式が組み込まれた。水田の懸濁物質負荷の推定式は松井・須永 (2013) によって作成された。彼らは水田からの表面排水の流速が増すとともに排水中の懸濁物質の濃度も増す傾向を観測し、観測値に基づき両者の関係を次の式で表した。

$$SSL = a Q_p^b \quad \text{式 3.11}$$

SSL: 水田からの懸濁物質負荷量 ($\text{g s}^{-1} \text{ha}^{-1}$)、 Q_p : 水田からの表面排水の流速 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{ha}^{-1}$)、 a および b : フィッティングパラメータ

水田からの懸濁物質の流出メカニズムは、まだ十分には解明されていない。水田は水尻からの越流が起こるまで懸濁物質を流出しないので、USLE 式の駆動力である降雨と懸濁物質負荷の相関は高くはない。一方で、水尻からの越流によって生じた表面排水と懸濁物質負荷の関係であれば、降雨との関係に比べて合理的である。現在の所、式 3.11 は水田からの懸濁物質負荷のシミュレーションに使用可能な唯一の式である。

3.7.2 降雨流出による懸濁物質負荷機能

水田モジュールに式 3.11 を組み込むにあたり、式 3.11 を以下の通りに変形した。

$$sed = 10^{-2} \text{areahr} a' (10^{-1} V_{\text{out}} \text{areahr}^{-1}) b' \quad \text{式 3.12}$$

sed: 任意日の HRU の懸濁物質負荷量 (Mg)、 V_{out} : 任意日に HRU から河川に排水される総水量 (m^3)、 a' および b' : フィッティングパラメータ、 10^{-2} および 10^{-1} : 単位換算係数

任意日に HRU から河川に排水される総水量は、水田モジュールにおいて日灌水量、降雨量、蒸発量、浸透量、越流量、貯水量から推定された排水量である。

3.7.3 代掻きによる懸濁物質負荷機能

降雨時の表面排水の他に水田稲作における代掻き行為も水田からの懸濁物質負荷の源となっているが、現行の SWAT モデルでは代掻きは想定されていない。代掻きによって発生

する懸濁物質負荷をモデル内に入力するために、SWAT モデルの **Scheduled Management Operations** モジュール内に新機能を構築した。各農家が代掻きを実施する日付は対象流域の水田暦に記された標準の代掻き日を中心とした正規分布になるものと想定した。よって、この新機能は地域的な代掻き時期に発生する懸濁物質負荷が正規分布に従って各日に配分されるように、以下のように設計された。

$$\text{sed}' = (2 \pi \sigma^2)^{-0.5} \exp(-D^2 / 2 \sigma^2) T_{\text{SS}} \text{ area}_{\text{hru}} \quad \text{式 3.13}$$

sed: 任意日の代掻き負荷配分量 (Mg)、 6σ : 地域的な代掻き時期の日数 (days)、 D : 水田暦に記された標準の代掻き日から任意日までの日数 (days)、 T_{SS} : 地域的な代掻き時期に発生する総代掻き負荷量 (Mg ha^{-1})

更に、水田モジュール内の任意日の HRU の懸濁物質負荷量の定義を修正し、式 3.12 で算出された任意日の降雨の表面排水に伴う懸濁物質負荷量と式 3.13 で算出された地域的な代掻き時期に発生する総代掻き負荷量の任意日への配分量の合計を、任意日の HRU の懸濁物質負荷量と定義した。

3.8 懸濁物質負荷機能の動作の確認

開発した懸濁物質負荷機能が水田 HRU レベルおよび流域レベルで意図通りに働くかを確かめるために、改良版 SWAT モデルを阿羅田川流域に適用した。SWAT モデルの GIS レイヤ設定、気象データ設定、初期化設定、灌漑水量設定、湛落水管理設定、作物栽培設定、および水文関係の各パラメータの値は 3.3.1 章で述べたとおりである。可能最大浸透能も 20 mm d^{-1} と設定した。よって、水収支については河川流量の NSE が 0.73 となった時のデータセットおよびパラメータセットを維持した状態で、懸濁物質負荷機能の動作確認を行った。

標準の代掻き日は対象地域の水田暦から 5 月 28 日と設定した。他の懸濁物質負荷に関する設定は機能の動作確認の為に仮定した値であり、阿羅田川流域の水田地帯に対して適当な値であるかは不明である。地域的な代掻き時期に発生する総代掻き負荷量は代掻き負荷量観測値 (表 3.3) の平均値から 0.17 Mg ha^{-1} と仮定した。地域的な代掻き時期の日数は、各農家への代掻き実施日についてのアンケート調査結果および河川で観測された河川水の懸濁物質濃度の高濃度期間 (小木田ら, 2004; 岡村・幡野, 2005; 細井, 2008) から、14 日間と仮定した。降雨の表面排水に伴う懸濁物質負荷式のフィッティングパラメータである a' および b' は、それぞれ 0.04 および 1.35 と仮定した。阿羅田川流域の水田地帯からの降雨の表面排水に伴う懸濁物質負荷は不明であるが、 a' および b' をそれぞれ 0.04 および 1.35 と仮定すると稲作期間の降雨の表面排水に伴う懸濁物質負荷量は 0.57 Mg ha^{-1} となり、上述の代掻き負荷量平均値を加えると稲作期間の負荷量の合計は 0.74 Mg ha^{-1} となる。稲作期間

の負荷量観測値（表 3.4）の平均値（ 0.65 Mg ha^{-1} ）と大きくは異ならず、動作確認の為の仮定値としては適当な値であると判断した。尚、式 3.11 を変換して下記の濃度式（式 3.14）とし、 a および b をそれぞれ 0.04 および 1.35 と仮定した場合の表面排水の懸濁物質の濃度変化傾向を図 3.14 に示す。

$$C_{SS} = 10^3 a Q' b^{-1} \quad \text{式 3.14}$$

C_{SS} : 表面流出水の懸濁物質の日平均濃度 (mg L^{-1})、 Q' : 表面流出水量 (mm d^{-1})、 10^3 : 単位換算係数

水田以外の HRU の懸濁物質負荷は、オリジナルの SWAT モデルのまま、MUSLE 式を用いて降雨流出量から算出された。MUSLE 式は USLE 式の改良版であり、USLE 式における降雨ファクターが表面流出ファクターに置き換えられている。以下に MUSLE 式を示す。

$$A = 11.8 (Q_{usle} q_p)^{0.56} K_{usle} L_{usle} S_{usle} C_{usle} P_{usle} \quad \text{式 3.15}$$

A : 降雨イベント時の土壌流亡量 (Mg)、 Q_{usle} : 降雨イベント時の表面流出水量 (m^3)、 q_p : ピーク時の表面流出速度 ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)、 K_{usle} : 土壌係数、 L_{usle} : 斜面長係数、 S_{usle} : 傾斜係数、 C_{usle} : 作物係数、 P_{usle} : 保全係数

SWAT モデルにおいては、 Q_{usle} と q_p は降雨流出反応から、 L_{usle} と S_{usle} は GIS レイヤの地形情報から算出される。各土壌の K_{usle} の値は、国内の 1,855 地点で行われた国土調査により作成された日本の土壌データベース（今井・石渡, 2006）から表 3.5 に示すように引用された。尚、土壌データベースは SI 単位で表記されているため、SWAT モデルで用いるには K_{usle} の値を 7.6 倍する必要がある。 C_{usle} と P_{usle} の値は SWAT モデルに付随しているデータベースから引用された。

モデルのキャリブレーションについて、水収支に関わるパラメータは 3.3.1 章で示されたキャリブレーション後の値を用いているが、懸濁物質に関わるパラメータは湛水期における阿羅田川河口での懸濁物質負荷の経時変化データを用いて 2.6 章と同じ手法でキャリブレートされた。懸濁物質負荷の経時変化データは、阿羅田川河口における 10 分単位の流量観測値と 10 分単位の懸濁物質濃度観測値を掛け合わせた後に日平均化して作成した。キャリブレーション結果を表 3.6 に示す。尚、 $Usle_P$ は林地、草地、宅地については USLE 式の想定上 1.0 でなければならず、また水田については改良版 SWAT モデルにおいては適用不能であるため、 $Usle_P$ は畑地 HRU、茶園 HRU、樹園地 HRU のみを対象としてキャリブレートされた。SWAT モデルでは、懸濁物質は負荷量 (Mg) でも濃度 (mg L^{-1}) でもキャリブレーション可能である。本研究では負荷量 (Mg) を用いた。平水時には懸濁物質濃度

は長い間隔で観測されたため、欠測日の負荷量は SWAT モデルにおいて欠測を意味する「-99」として入力された。

図 3.15 に水田 HRU における湛水期の懸濁物質負荷量の出力値を示す。湛水期の初期に、開発された代掻き機能により出力された弓なりの懸濁物質負荷が見受けられる。降雨による懸濁物質負荷は降雨が表面流出水を生じた日にのみ見受けられ、降雨日でも表面流出水が生じなければ懸濁物質負荷も生じていない。懸濁物質負荷量と表面流出水量は比例関係では無く、表面流出水量の増加は表面流出水中の懸濁物質濃度を上昇させるため、懸濁物質負荷量は表面流出水量の増加に伴って加速度的に増えている。以上から、懸濁物質負荷機能は改良版 SWAT において水田 HRU レベルで意図通りに動作していると言える。

図 3.16 に各パラメータの最適値を用いてシミュレートされた湛水期の阿羅田川河口での懸濁物質負荷量推定値と実測値を、キャリブレーション期およびバリデーション期についてそれぞれ示す。キャリブレーション期の推定値と実測値の間の NSE は 0.59、PBIAS は -14%、バリデーション期の NSE は 0.60、PBIAS は +9% となった。この出力値は代掻き時期に発生する総代掻き負荷量、および降雨の表面排水に伴う懸濁物質負荷式のフィッティングパラメータである a' と b' に仮定値を用いた場合の結果であり、阿羅田川流域の懸濁物質動態としては意味が無い。しかし、NSE が 0.50 以上となり適切と判断される基準を超えたことから (Moriassi et al., 2007)、改良版 SWAT は流域レベルでの使用に耐えうると推測される。

表 3.3 代掻き負荷量観測値

代掻き負荷量 (Mg ha ⁻¹)	観測地	引用文献
0.021	秋田県秋田市	三浦ら, 1983*1
0.092	富山県	農研機構, 2005
0.110	滋賀県彦根市	山田ら, 2006
0.178	鳥取県鳥取市	細井, 2008
0.270	滋賀県彦根市	金木ら, 2000
0.367	滋賀県彦根市	山田ら, 2006

*1 引用文献を基に推定

表 3.4 稲作期間の負荷量観測値

稲作期負荷量 (Mg ha ⁻¹)	観測地	引用文献
0.146	滋賀県五個荘町	小林ら, 2005
0.449	滋賀県竜王町	園田ら, 1997*1
0.626	鳥取県鳥取市	細井, 2008
0.876	秋田県	農研機構, 1998
1.169	滋賀県彦根市	大久保, 2005*2

*1 1993 年は掛け流しなので除き、1994 年と 1995 年を平均

*2 大久保による推定値

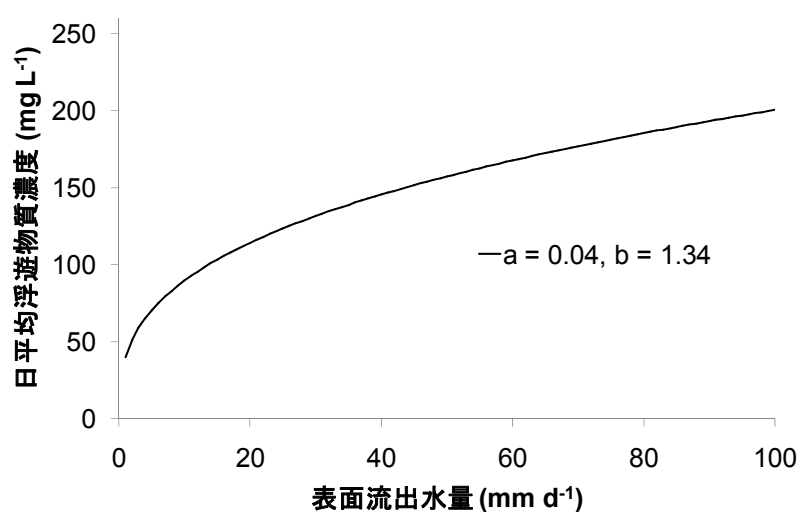


図 3.14 仮定値 (a=0.04, b=1.35) の場合の表面排水の懸濁物質の濃度変化傾向

表 3.5 阿羅田川流域の各土壌の土壌係数 (K_{usle}) の値

土壌名	K_{usle} の値
細粒黄色土	0.29
中粗粒グライ台地土	0.18
礫質褐色森林土	0.18
細粒黄色土 (斑紋有り)	0.32

表 3.6 懸濁物質関係パラメータの感受性および最適値

感受性順位	パラメータ	パラメータの説明	方法*1	下限値	上限値	最適値
1	Usle_P	USLE 保全係数 *2	1	0.0	1.0	0.130
2	Ch_Cov	水路の被覆係数	1	0.0	1.0	0.250
3	Spcon	沈着した懸濁物質の再浮遊係数	1	0.0001	0.1	0.080
4	Usle_C	USLE 作物係数最小値	3	-25%	+25%	0.005 - 0.277 *3
5	Spexp	沈着した懸濁物質の再浮遊指数	1	1.0	2.5	2.267
6	Ch_Erod	水路の浸食性係数	1	0.0	1.0	0.433

*1: オートキャリブレーションの方法を意味し、1 は初期値を上限から下限の範囲内の他の値に変更する方法、3 は初期値に上限から下限の範囲内の係数を掛ける方法を意味する。

*2: 畑地 HRU、茶園 HRU、樹園地 HRU のみが対象

*3: 値は作物種により異なる。

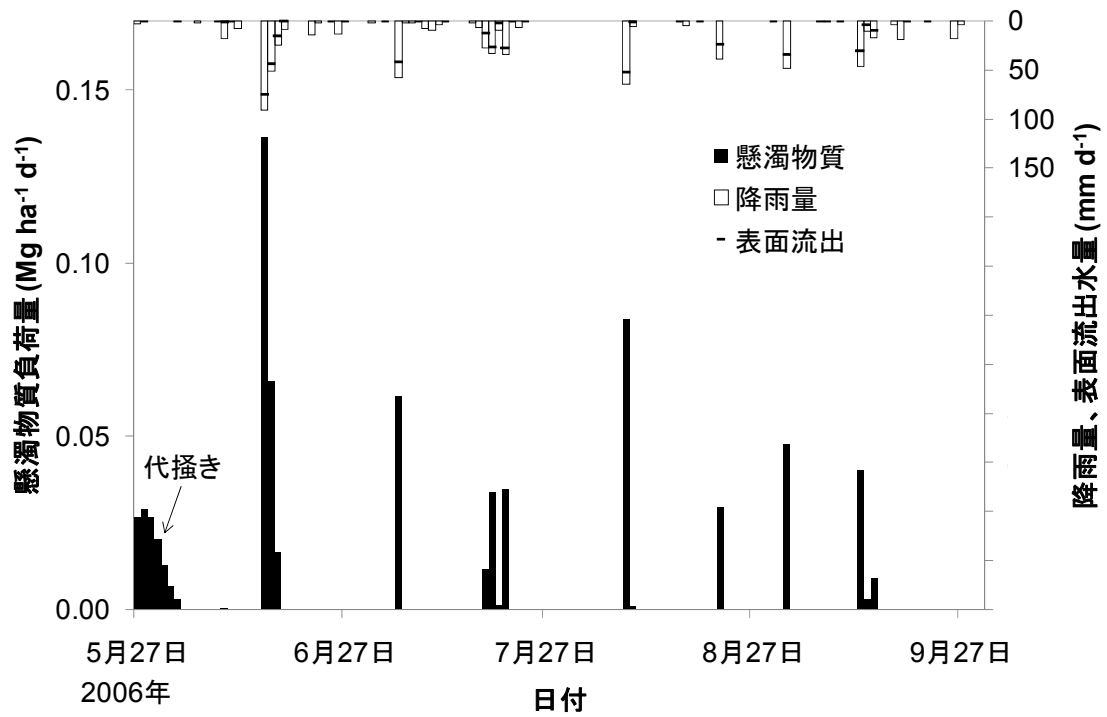


図 3.15 水田 HRU における湛水期の懸濁物質負荷量の出力値

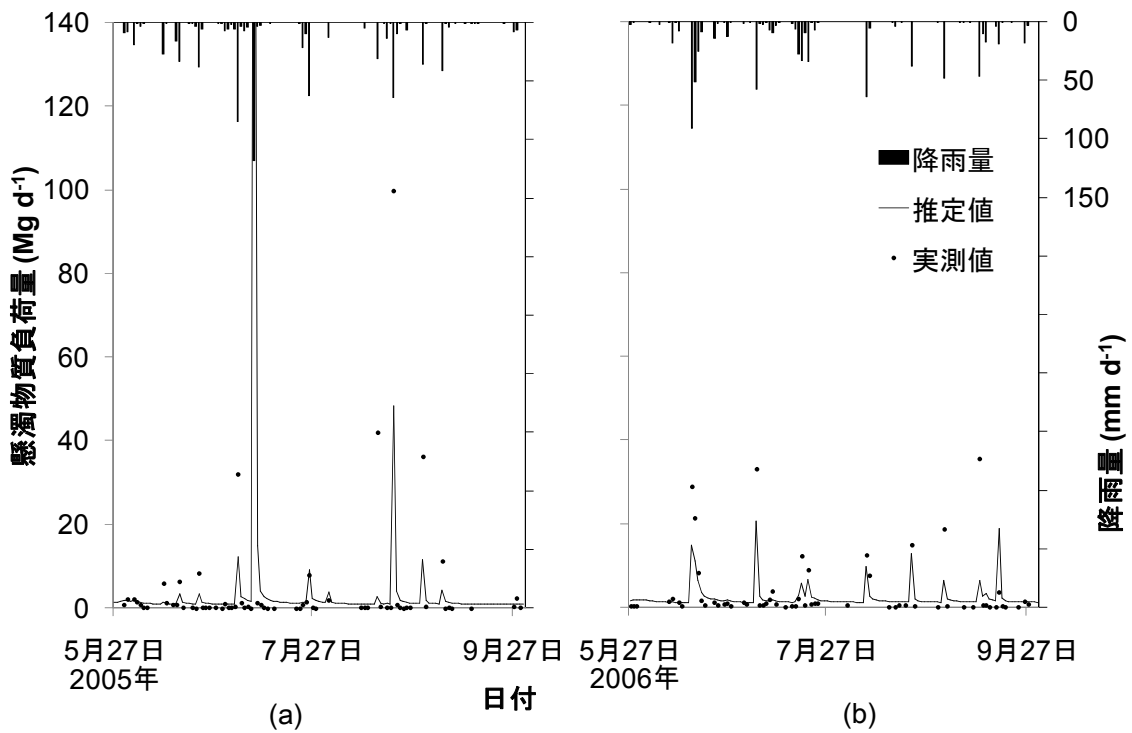


図 3.16 阿羅田川河口における懸濁物質負荷量推定値と実測値

(a) バリデーシヨン期の湛水期 (b) キャリブレーション期の湛水期

3.9 開発された懸濁物質負荷機能についての考察

懸濁物質負荷機能の動作は確認されたが、阿羅田川流域で実用する為には阿羅田川流域の代掻き時期に発生する負荷量、および降雨の表面排水に伴う懸濁物質負荷式のパラメータ a' と b' の値を求める必要がある。これらの値を推定する方法としては、SWAT モデルのオートキャリブレーション機能の対象パラメータに代掻き負荷量および懸濁物質負荷式のパラメータ a' と b' を加えて、河川における懸濁物質負荷量の経時的実測値の再現に最も適した代掻き負荷量、 a' 値、 b' 値を逆解析により決定する方法が考えられる。逆解析による推定方法を検証するために、対象流域の主要な水田排水路で代掻き期間の懸濁物質負荷量および降雨時の懸濁物質負荷量を観測し、代掻き負荷量観測値および降雨時の懸濁物質観測値を式 3.11 にフィットして a 値と b 値を求め、逆解析による推定値と同程度となればオートキャリブレーション機能により推定可能と判断できる。同時に観測により把握しなければならない事項として、懸濁物質負荷傾向を同一とみなせる水田地帯の範囲がある。この範囲は、流域内の各水田排水路の代掻き負荷量観測値および a 値と b 値のばらつきを調べる事で把握可能であると考えられる。オートキャリブレーションによる推定方法の問題点としては、各パラメータがとり得る上限値から下限値までの幅が把握されていない点が挙げられる。この問題点に対処する為には日本各地の水田地帯で懸濁物質の観測を行い代掻き期間の負荷量および a 値と b 値を求め、統計的データを作成する必要がある。HRU レベルでの観測を伴わずに容易に使えるという SWAT モデルの利点を維持するには、オートキャリブレーションによる推定方法の開発が望まれる。

パラメータを決定する方法が今後の課題ではあるが、初めて SWAT モデルを湛水田の懸濁物質を対象に使用するためのアルゴリズムが構築された。しかし、湛水期よりも期間が長い冬季の非湛水期の水田の懸濁物質負荷量の推定方法が更なる検討課題として残っている。吸着態の化学物質の動態を予測するには、水田内部の平坦部からの懸濁物質負荷量を推定しなければならない。地表面が湛水していない点は MUSLE 式を適用する上で好都合であるが、平坦な地表面に MUSLE 式を適用して良いのか、またその場合の適当な USLE 保全係数 (P_{usle}) はどの程度かを検討する必要がある。

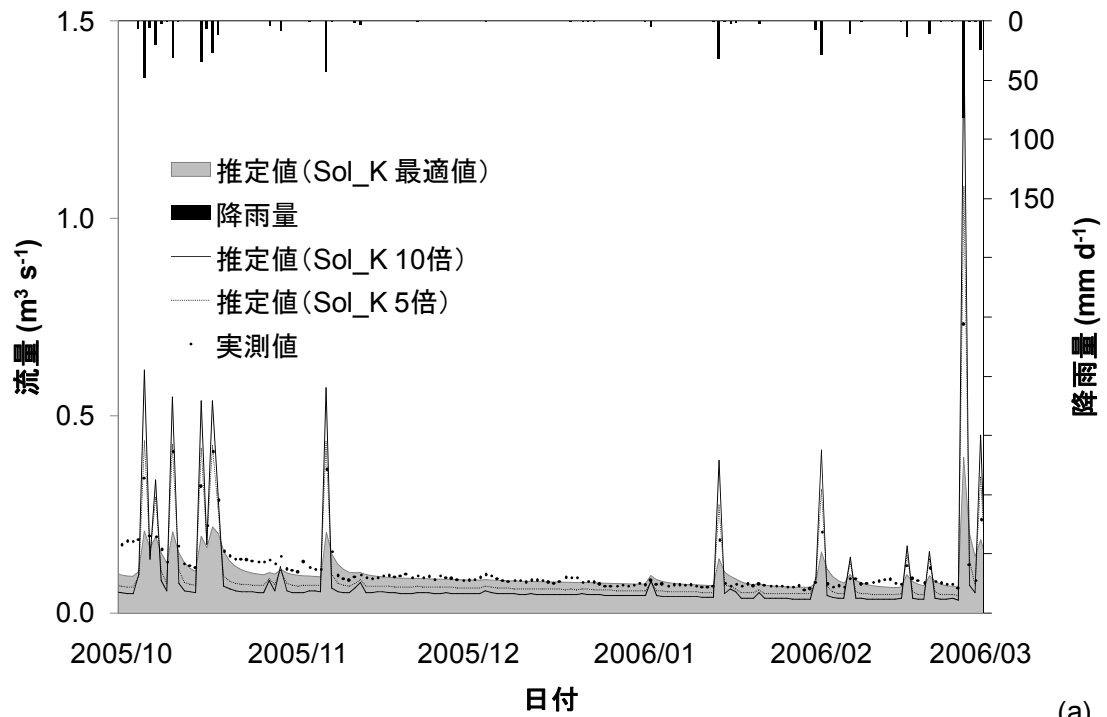
3.10 封入不飽和現象が河川流量に与える影響

土壌中の空隙が大気と連続している一般的な不飽和状態に対し、空隙が大気とは不連続な気泡として存在している状態は封入不飽和と呼ばれている。また、その気泡は封入空気と呼ばれている (Youngs and Peck, 1964; Luckner et al., 1989)。実験により封入不飽和状態では透水係数は封入空気量の増加と共に低下し、乾燥密度 1.52 g cm^{-3} のマサ土では最大で飽和透水係数の 7%、乾燥密度 0.82 g cm^{-3} の黒ボク土では最大で飽和透水係数の 6%にまで低下することを確認した (Sakaguchi et al., 2005)。降雨時には土壌表層は封入不飽和状態にあると考えられるが、SWAT モデルにおいて降雨浸潤工程は飽和透水係数に基づいて計算され、封入不飽和状態は計算工程内において直接的には考慮されていない。しかし、河川流量実測値が封入不飽和状態の土壌からの流出水によって構成されているのであれば、河川流量実測値を用いたキャリブレーション工程により最適化されたパラメータ Sol_K (最表層土層の飽和透水係数) の値は、封入不飽和透水係数であると考えられる。そこで、封入不飽和現象が河川流量に与える影響を推定するために、3.3.1 章のキャリブレーション工程によって得られたパラメータ Sol_K の最適値を封入不飽和透水係数と想定して、その値から封入空気の影響を無くすべくパラメータ Sol_K の最適値を増加させ、パラメータ Sol_K の値の増加が河川流量に与える影響を吟味した。尚、任意の降雨強度および降雨時間の降雨時に任意の土性の土壌に封入される空気の量を予測する事は現時点ではできないため、降雨時の封入空気による透水係数の低下率を 1/2 倍、1/5 倍および 1/10 倍と仮定し、パラメータ Sol_K の最適値を 2 倍、5 倍および 10 倍にした場合の阿羅田川の河川流量の推定値を出力した。

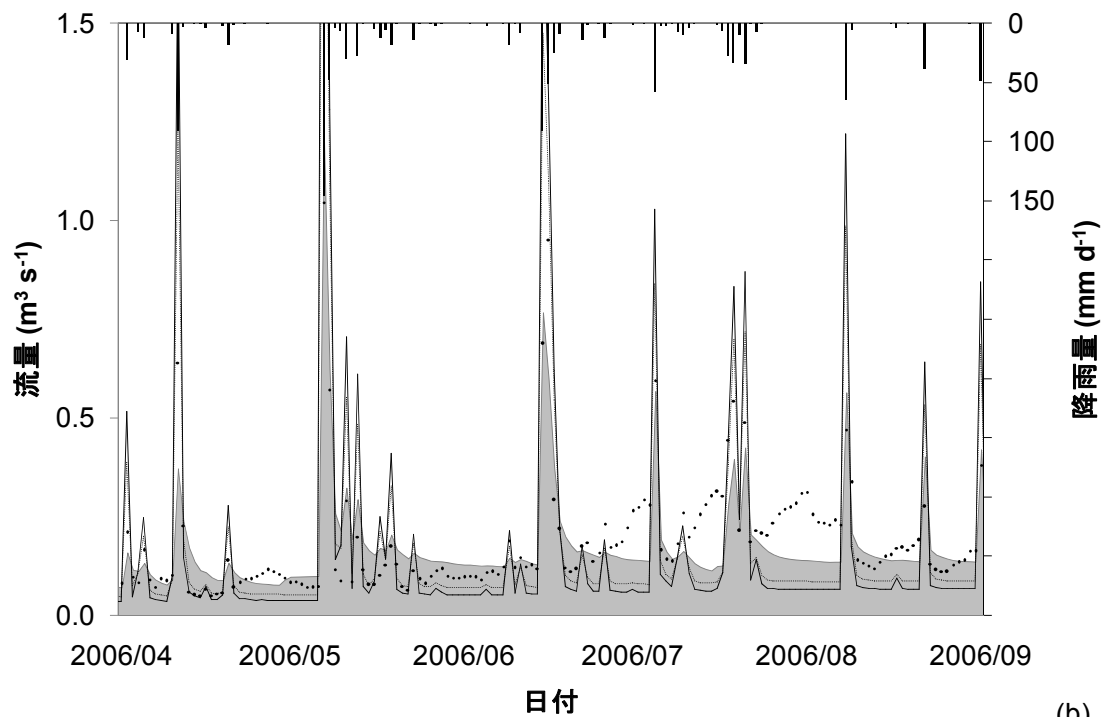
キャリブレーション工程の対象期間 (2005 年 10 月から 2006 年 9 月) における出力結果を図 3.17 に示す。図から、パラメータ Sol_K の値を増加させるとピーク流量は増加し、ベース流量は減少する傾向がうかがえる。表 3.7 にパラメータ Sol_K の最適値を 1 倍 (最適値のまま)、2 倍、5 倍、10 倍にした場合で出力した河川流量推定値と実測値の間の NSE と、キャリブレーション期間内の河川の合計流量を示す。NSE の値から、封入空気がパラメータ Sol_K に影響を及ぼすと考えられる範囲内のパラメータ Sol_K の値の変化は、阿羅田川の河川流量推定値に対して十分にセンシティブであると考えられるが、期間内の河川の合計流量はピーク流量の増加とベース流量の減少が拮抗して、合計流量としての一定の傾向は見られなかった。

表 3.7 パラメータ Sol_K のキャリブレーション最適値からの変化と河川流量の関係

Sol_K	1 倍	2 倍	5 倍	10 倍
NSE	0.731	0.663	-0.256	-1.775
合計流量 (1000 m ³)	4249	3995	4085	4153



(a)



(b)

図 3.17 阿羅田川河口における河川流量推定値と実測値（推定値はパラメータ Sol_K のキャリブレーション最適値、最適値の 5 倍、最適値の 10 倍の場合）

(a) 2005 年 10 月から 2006 年 3 月 (b) 2006 年 4 月から 2006 年 9 月

3.11 硝酸態窒素への展開

水および懸濁物質の次のシミュレーション対象としては、硝酸態窒素を想定している。本研究にて開発した水田モジュールには栄養塩の計算機能がまだ実装されていないので、今後の水田モジュールの栄養塩分野での開発作業の参考とすべく、現行版の SWAT モデルを用いて阿羅田川流域を対象に硝酸態窒素のシミュレーションを試行した。阿羅田川河口における硝酸態窒素濃度は、懸濁物質と同じく 2.3.7 章に示された手法でサンプリングされ、イオンクロマトグラフ（株）横河電機製、IC-7000）で計測された。硝酸態窒素に関わるパラメータは、硝酸態窒素負荷の経時変化データを用いて 2.6 章と同じ手法でキャリブレーションされた。硝酸態窒素負荷の経時変化データは、阿羅田川河口における 10 分単位の流量観測値と 10 分単位の硝酸態窒素濃度観測値を掛け合わせた後に日平均化して作成した。SWAT モデルでは硝酸態窒素は負荷量 (Kg) でも濃度 (mg L⁻¹) でもキャリブレーション可能であるが、本研究では負荷量 (Kg) を用いた。平水時には濃度は長い間隔で観測されたため、欠測日の負荷量は SWAT モデルにおいて欠測を意味する「-99」として入力された。

阿羅田川河口での硝酸態窒素負荷量推定値を、図 3.18 に示す。推定値と阿羅田川河口での実測値との間の NSE は、実測値をキャリブレーションに用いた期間（2005 年 10 月から 2006 年 9 月、以降キャリブレーション期間とする）では -1.65 であった。両者の関係は R² 値では 0.08、PBIAS では 14% であった。キャリブレーション期間の実測値から決定されたパラメータ値を用いて推定した 2004 年 10 月から 2005 年 9 月（以降バリデーション期間とする）の推定値と実測値の間の NSE は、-1.13 であった。R² 値では 0.09、PBIAS では 2% であった。

モデルの適合性が著しく低くなった一因として、対象流域の 18% は水田地帯であり、水田地帯の脱窒過程は畑地帯に比べて特異的である事が知られているものの、現行版の SWAT モデルは畑地帯を想定して開発した脱窒工程を全農地に適用している点が想定される。また、水田地帯を有しない流域における SWAT モデルの適用においても硝酸態窒素を対象とした場合の NSE は一般的に低く、日単位のシミュレーションにおけるキャリブレーション期間の NSE は、-0.41 から -0.37 (Du et al., 2006)、0.04 (Saleh et al., 2004)、0.24 (Grizzetti et al., 2005) と報告されている。水田地帯の有無に関わらずモデルの適合性が低い一因としては、SWAT モデルではキャリブレーション工程で用いる河川水質の実測地点よりも上流側の流域内の硝酸態窒素の地下浸透工程を面的に均一としている点が想定される。その詳細を記すと、SWAT モデルでは地表水の流向に基づいて対象流域内が複数の小流域に分割される。そして、任意の河川流量・水質の観測地点よりも上流側に含まれる全小流域の地下での水および溶存態の物質の動態に関わるパラメータが、その任意の地点で実測された河川流量・水質を用いてキャリブレーションされる。従って、河川の合流地点など、地表水の流路を基に決められた河川水の観測地点により、地下での水および溶存態の物質の動態に関わるパラメータが均一と想定される範囲が決定される。一方で、利根川流域内の台地

上の農地を対象として地表の硝酸イオンが地下水帯に達するまでの浸透時間を面的に予測した所、浸透時間は20年程度の地域間差異を有するとの予測結果を得た(坂口ら, 2013)。地域間差異が生ずる理由としては、土層構成の違いによる遅延係数(土層中の土壌が硝酸イオンの浸透を遅延させる効果)の差異がある。このような想定条件と現実との差異はモデルの不確実性を増大させ、不確実性が大きすぎるモデルは計画支援ツールとしては利用できない。SWAT-MODFLOW(Kim et al., 2008)という地下水流工程をより物理的に計算する試みも見受けられるが、現行のSWATモデルを運用してゆく場合はキャリブレーション時に同一条件とみなす面的範囲の設定方法が問題点となる。一案としては、流域内に複数配置する流量および水質の観測地点の位置を土層構成が大きく変わる境界と対応させて、土層構成を指標としてキャリブレーション対象域を設定する方法が考えられる。

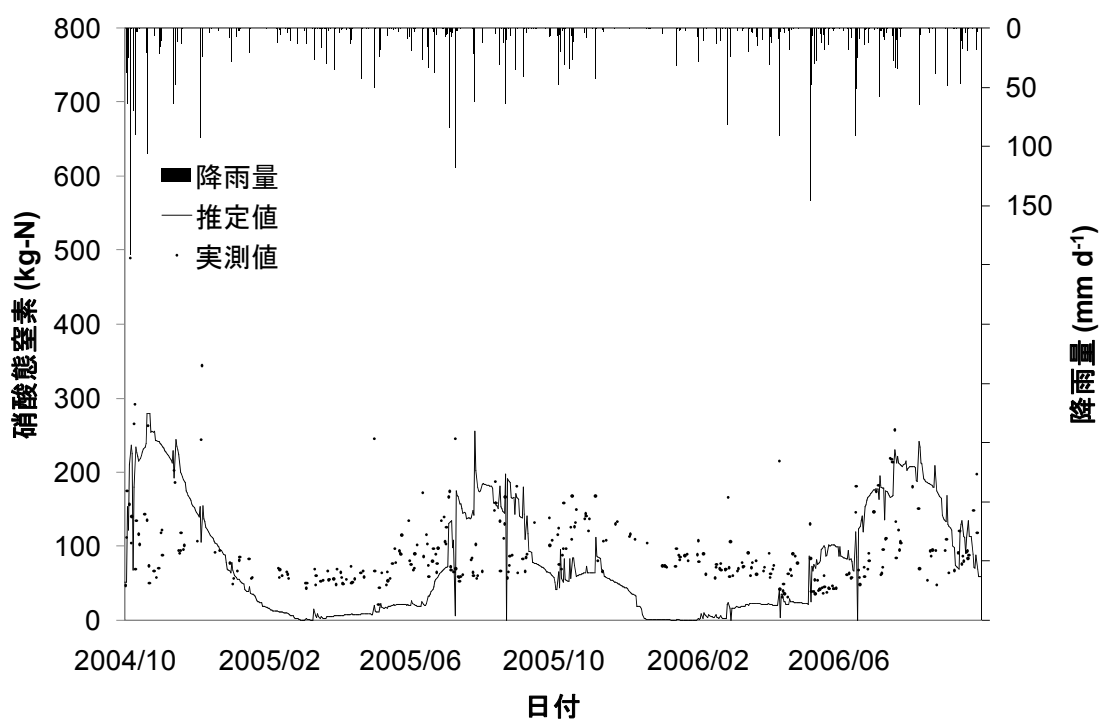


図 3.18 阿羅田川河口における硝酸態窒素負荷量推定値と実測値

4 まとめ

4.1 研究の成果

今まで SWAT モデルはアジア各地の水田地帯を有する流域を対象に利用されてきたが、2章において既往研究にて水田地帯に適用されてきた 2 手法、即ち SWAT モデルに内在している窪地モジュールを利用する手法とカーブナンバー法を水田地帯に適用する手法の双方が、水田地帯の水収支のシミュレーションには使用できないと判断された。懸濁物質の収支は水収支の計算結果を基に計算され、また栄養塩の収支は水収支と懸濁物質の収支を基に計算されるため、水収支の再現性が悪いと懸濁物質や栄養塩の再現性は更に悪くなる。既往研究では河口地点における NSE を指標としてモデルの検証が行われてきたが、水田地帯という SWAT モデルにおいて当初は想定されていなかった土地利用を対象とする場合、キャリブレーション後の河口地点における NSE が高くてもモデルが HRU において水・物質収支の適正值を出力しているとは限らない。そして、HRU での出力値が適正でないと、SWAT モデルの理念として謳われているような土地利用や施肥量などの変化の影響を評価したり、最適管理手法を判断したりするツールとしては活用できない。

2 章で示された SWAT モデルの問題点に対処する為に、3 章において SWAT モデル内に水田モジュールが開発された。水田モジュールが SWAT モデルに実装された事により、SWAT モデルは水田地帯の水管理手法を最適管理手法の検討項目の一つとして扱えるようになった。この事が本研究の最大の成果であり、またこれにより水田地帯における水管理計画支援のための SWAT モデルの改良は達成されたと言える。例えば、水田地帯から河川への地下水流出量が湛水期の終盤で最大値となり、非湛水期の終盤で最小値となった点は、水田地帯の水管理手法の特徴である水田灌漑がモデルに反映された結果である。しかし、この成果の対象は水動態のみの検討で完結する事象に限られ、流域環境を保全する上で水動態の次に重要な要素である懸濁物質の動態についてはモデル化のための基本構造が出来上がったに過ぎない。懸濁物質動態のモデル化とシミュレーションの難しさの原因として、水田における懸濁物質負荷の研究が代掻き時期に偏重しており、降雨越流時の懸濁物質負荷に関する観測データが不十分である点が挙げられる。SWAT モデルの使用目的が栄養塩動態の評価であったとしても、栄養塩の一部は懸濁物質に吸着した状態で移動するため、懸濁物質動態のモデル化は避けては通れないステップである。

3 章で開発された水田モジュールを任意の流域に適用する為には、新設されたパラメータのキャリブレーションが必須となる。2 章での検討結果から、既往研究における SWAT モデル利用はキャリブレーション機能に頼り過ぎ、キャリブレーション結果についての熟考を怠っていたのではないかと推測される。よって、水田モジュールを使用する上では水田 HRU 単位での観測値を用いてモデルを検証し、キャリブレーション結果を盲目的に信用しないようにすべきであると考えられる。

4.2 今後の課題

3章においては SWAT モデルが水田地帯を有する流域用に改良されたが、その際に水田地帯の可能最大浸透量、代掻き時期の水田地帯の懸濁物質の負荷量、降雨越流時の水田地帯の懸濁物質流出式パラメータ 2種の全4種のパラメータが新規にモデル内に追加された。今後はこれらの新パラメータをオートキャリブレーションに追加し、SWAT モデル内の他のパラメータと同時に最適化を図る必要がある。適切なキャリブレーションの為にはパラメータ値の上限値および下限値の範囲を適切に設定する必要があるが、代掻き時期および降雨越流時の水田地帯の懸濁物質負荷については統計的なデータが存在しない。水田を対象とした研究は長年行われてきたが、モデル化を意識していなかったものと推測される。今後は水田での観測活動も、モデル化を意識して体系的に行われるべきだと考えられる。その為には、どのような水田モデルを開発すべきかについて、学会等での議論やシンポジウムを通してコンセンサスを形成する必要がある。

本研究において開発された水田モジュールの改良を進める場合、次に行うべき作業は栄養塩動態のシミュレーションを可能とすべく、SWAT モデルの陸域サブモデル、河道サブモデルおよび貯水池サブモデル内に既に存在する吸着態および溶存態の栄養塩のパラメータを、水田モジュール内に導入する事である。そして、水田地帯では硝化脱窒作用が重要視される為、栄養塩パラメータの導入に合わせて硝化サブモデルと脱窒サブモデルを構築する必要がある。更に、硝化脱窒作用による田面での灌漑水の浄化機能を評価すべく、現在は水と懸濁物質のみしか配分できない灌漑機能にも、栄養塩パラメータを導入する必要がある（尚、水と懸濁物質を配分できるのは取水源が河川の場合であり、取水源が貯水池の場合は水のみしか配分できない）。また、水動態、懸濁物質動態、そして栄養塩動態の全てに関わる事であるが、現在の水田モジュールは田面水位を小流域内の水田地帯の平均値として扱っている。水田地帯内での水田毎の田面水位のバラつきをシミュレーションに反映するために、田面水位を正規分布で扱う必要がある。湛水開始、落水、中干し、田植え、収穫などの農作業も全水田で同一日に実施される想定となっているため、実施日に正規分布を導入して、地域的なバッファを反映する必要もある。

引用文献

- Ahuja LR, Ma L 2011: A protocol for parameterization and calibration of RZWQM2 in field research. In *Methods of introducing system models into agricultural research*, p.24. Madison, WI: American Society of Agronomy, Inc.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR 1998: Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Res. Assoc.* 34, 73-89.
- Behera S, Panda RK 2006: Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. *Agric. Ecosyst. Environ.* 113, 62-72.
- Bond WJ, Collis-George N 1981: Pondered infiltration into simple soil systems. 1. The saturation and transition zones in the moisture content profiles. *Soil Sci.* 131, 202-209.
- Chen SK, Liu CW, Chen YR 2012: Assessing soil erosion in a terraced paddy field using experimental measurements and universal soil loss equation. *CATENA* 95, 131-141.
- Chow VT 1959: *Open-Channel Hydraulics*. Columbus, OH: McGraw-Hill Higher Education.
- 土木研究所 2008: KuniJiban. つくば: 独立行政法人土木研究所. Available at <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/en/index.html>. Accessed May 2011.
- Du B, Arnold JG, Saleh A, Jaynes DB 2005: Development and application of SWAT to landscapes with tiles and potholes. *Trans. ASAE* 48, 1121-1133.
- Du B, Saleh A, Jaynes DB, Arnold JG 2006: Evaluation of SWAT in simulating nitrate nitrogen and atrazine fates in a watershed with tiles and potholes. *Trans. ASABE* 49, 949-959.
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta V 1992: Effect and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 28, 1015-1031.
- Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, Frede HG 2002: SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. *Phys. Chem. Earth* 27, 641-644.
- Eguchi S, Aoki K, Kohyama K 2011: Development of agricultural soil-profile physical properties database, Japan: SolphyJ. In: *Proc. ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings (CD-ROM)*, 16-19 Oct. 2011, San Antonio, TX.
- Environmental Systems Research Institute 2006: *Using ArcGIS Desktop*. Redlands, CA: ESRI.

- Flanagan DC, Nearing MA, 1995: USDA - Water erosion prediction project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. West Lafayette, IN: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Food and Agriculture Organization (FAO) 1998a: Chapt. 8. ETc under soil water stress conditions. In: FAO irrigation and drainage paper No. 56: Crop evapotranspiration, 161-181. Rome, Italy: FAO.
- Food and Agriculture Organization (FAO) 1998b: Chapt. 6. ETc single crop coefficient. In: FAO irrigation and drainage paper No. 56: Crop evapotranspiration, 103-134. Rome, Italy: FAO.
- Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG 2007: The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Trans. ASABE 50, 1211-1250.
- Gassman PW, Sadeghi AM, Srinivasan R 2014: Application of the SWAT model special section: overview and insights. J. Environ. Qual. 43, 1-8.
- Grizzetti B, Bouraoui F, Marsily GD 2005: Modelling nitrogen pressure in river basins: A comparison between a statistical approach and the physically - based SWAT model. Phys. Chem. Earth 30, 508-517.
- Gupta RP, Swartzendruber D 1964: Entrapped air content and hydraulic conductivity of quartz sand during prolonged liquid flow. Soil Sci. Soc. Am. J. 28, 9-12.
- Gupta HV, Sorooshian S, Yapo PO 1999: Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. J. Hydrologic Eng. 4, 135-143.
- Hjelmfelt AT 1980: Empirical investigation of curve number technique. J. Hydr. Div. 106, 1471-1476.
- Hjelmfelt AT 1991: Investigation of curve number procedure. J. Hydraul. Eng. 117, 725-737.
- Horie T, Nakagawa H, Centeno HGS, Kropff MJ 1995: The rice crop simulation model SIMRIW and its testing. In: Matthews RB, Kropf MJ, Bachelet D (eds) Modeling the impact of climate change on rice production in Asia, 51-66. Oxon U.K.: CAB International and IRRI.
- 細井由彦 2008: 流域農業地域の耕作放棄や田面管理が河川環境に及ぼす影響. 助成番号: 20-1211-027. 東京: 河川整備基金.
- Im SJ, Park SW, Jang TI 2007: Application of SCS curve number method for irrigated paddy field. KSCE J. Civ. Eng. 11, 51-56.
- 今井啓, 石渡輝夫 2006: 統計資料等を用いて整理した北海道における土壌侵食因子の地域性について. 寒地土木研究所月報, No.640, 40-45. 札幌: 寒地土木研究所.

- Immerzeel WW, Gaur A, Zwart SJ 2008: Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agric. Water Manage.* 95, 11–24.
- Iwasaki Y, Ozaki M, Nakamura K, Horino H, Kawashima S 2013: Relationship between increment of groundwater level at the beginning of irrigation period and paddy filed area in the Tedoru River Alluvial Fan Area, Japan. *Paddy Water Environ.* 11, 551-558.
- JA 豊橋 2010: あいちのかおり SBL 水田暦, 豊橋: JA 豊橋.
- Jung JW, Yoon KS, Choi DH, Lim SS, Choi WJ, Choi SM, Lim BJ 2012: Water management practices and SCS curve numbers of paddy fields equipped with surface drainage pipes. *Agric. Water Manage.* 110, 78-83.
- 樺元淳一 2009: 棚田水田の土壌侵食防止機能の定量評価について. *圃場と土壌.* 41(7), 24-28.
- 角屋睦 1980: 流出解析手法 (その 6) . *農業土木学会誌* 第 48 卷, 37-43.
- 金木亮一, 久馬一剛, 稲垣ちずる, 小谷廣通, 須戸幹 2000: 無代かきおよび育苗箱全量施肥栽培水田における流出負荷量の削減. *日本土壌肥料学雑誌* 第 71 卷, 502-511.
- Kang MS, Park SW, Lee JJ, Yoo KH 2006: Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agric. Water Manage.* 79, 72-92.
- Kim NW, Chung IM, Won YS, Arnold JG 2008: Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *J. Hydrol.* 356, 1–16.
- 気象庁 2011: AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System). 東京: 気象庁. Available at: <http://www.jma.go.jp/en/amedas/index.html>. Accessed May 2011.
- 古賀潔 1987: 透水による封入空気の減少と透水係数の変動. *農業土木学会論文集* 第 131 卷, 69-77.
- 小木田有紀子, 山本忠男, 井上京, 長澤徹明, 2004: 石狩低平地水田ブロックにおける代かき期の SS 流出特性. *農業農村工学会全国大会講演要旨集* 460-461.
- 国土地理院 2002: 2 万 5 千分 1 地形図. 筑波: 国土地理院.
- 国土地理院 2010: Digital Japan Web System. 筑波: 国土地理院. Available at http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page_e30233.html. Accessed May 2011.
- 国土交通省 2011: 5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査・表層地質図. 東京: 国土交通省. http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_5-1.html. Accessed May 2011.
- 栗原浩, 蓬原雄三, 津野幸人 1998a: 作物. p.147. 東京: 農山漁村文化協会.
- 栗原浩, 蓬原雄三, 津野幸人 1998b: 作物. p.307-317. 東京: 農山漁村文化協会.
- Lane LJ 1983: Hydrology Section 4, Transmission losses. In *National Engineering Handbook*. Washington DC: United States Department of Agriculture.

- Lighthill MJ, Whitham GB 1955: On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. *Proceedings of the Royal Society* 229(4), 281-316.
- Luckner L, van Genuchten MTh, Nielsen DR 1989: A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface. *Water Resour. Res.* 25, 2187-2193.
- 松井宏之, 福永隆二, 清水智, 乃田啓吾 2009: 降雨出水時の水田からの浮遊土砂流出と USLE の適用可能性, *水工学論文集*, 第 53 巻, 673-678.
- 松井宏之, 須永吉昭 2013: 石垣島・水田地帯からの浮遊土砂流出量の長期観測および L-Q 式の適用. *土木学会論文集 B1 (水工学)* 69, 955-960.
- McCarthy, GT 1938: The unit hydrograph and flood routing. Unpublished Paper. Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, New London, CT. US Engineering Office, Providence RI.
- Mein RG, Larson CL 1973: Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour. Res.* 9 (2), 384-394.
- Minasny B, McBratney AB 2001: A comparison of the Australian and USDA/FAO soil particle-size classification systems. *Aust. J. Soil Res.* 39, 1443-1451.
- 三浦竹治郎, 湯川幸朗, 片野登, 大友久利, 大橋猛, 小玉幹生 1983: 八郎潟調整池の富栄養化について 第 6 報 代掻き時における田面水質の挙動について. *秋田県環境技術センター年報* 第 9 号, 86-100.
- 宮崎成生, 亀和田國彦, 岩崎慎也 2005: 水田を通過する農業用水の水質変化の実態. *栃木農試研報* No55, 45-55.
- 水資源機構 1968: 豊川用水技術史. p.39. 埼玉: 水資源機構.
- Monteith JL 1965: Evaporation and environment. In: G. F. Fogg ed. *The State and Movement of Water in Living Organisms*, 205-234. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press.
- Moriasi DN, Arnold JG, van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL 2007: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50 (3), 885-900.
- Nash JE, Sutcliffe JV 1970: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- National Resources Conservation Service (NRCS) 2004: *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology*. Washington, DC: USDA.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR, King KW 2002: *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000*. TR-191. College Station, TX: Texas Water Resources Institute.

- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, Williams JR 2009: Soil and Water Assessment Tool Input Output file Documentation Version 2000. TR-365. College Station, TX: Texas Water Resources Institute.
- 農研機構 1998: 水田流域における河川の水質変化と水田から流出する汚濁負荷量. 平成 10 年度研究成果情報. つくば市: 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構.
- 農研機構 2005: ケイ酸石灰施用による代かき濁水由来の水質汚濁の低減. 平成 17 年度研究成果情報 No.15-4. つくば市: 独立行政法人農業食品産業技術総合研究機構.
- 農林水産省 2013: 第 87 次農林水産省統計表 (平成 23~24 年). 東京: 農林水産省大臣官房統計部管理課.
- 岡村貴司, 幡野真隆 2005: 農業排水モニタリング調査. 平成 17 年度滋賀県水産試験場事業報告 p70. 彦根市: 滋賀県水産試験場.
- Olivera F, Valenzuela M, Srinivasan R, Choi J, Cho H, Koka S, Agrawal A 2006: ArcGIS - SWAT: A geodata model and GIS interface for SWAT. *J. American Water Resour. Assoc.* 42(2), 295-309.
- Ouyang W, Hao FH, Wang X 2008: Nonpoint source pollution responses simulation for conversion cropland to forest in mountains by SWAT in China. *Environ. Manage.* 41, 79-89.
- 尾崎保夫, 関矢博幸, 木方展治, 阿部薫 1992: 水田の水質浄化容量 (1) 水田土壌 (灰色低地土) における肥料成分の年間収支. *地下水学会誌*, 第 34 巻, 第 3 号, 195-204.
- Refsgaard JC, Storm B, Clausen T 2010: Systeme Hydrologique Europeen (SHE): review and perspectives after 30 years development in distributed physically-based hydrological modelling. *Hydrol. Res.* 41(5), 355-377.
- Sakaguchi A, Nishimura T, Kato M 2005: The effect of entrapped air on the quasi-saturated soil hydraulic conductivity and comparison with the unsaturated hydraulic conductivity. *Vadose Zone Journal.* 4, 139-144.
- Sakaguchi A, Eguchi S, Kasuya M. 2014a: Examination of the water balance of irrigated paddy fields in SWAT 2009 using the curve number procedure and the pothole module. *Soil Science and Plant Nutrition.* doi: 10.1080/00380768.2014.919834, (in press).
- Sakaguchi A, Eguchi S, Kato T, Kasuya M, Ono K, Miyata A, Tase N 2014b: Development and evaluation of a paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. *Agric. Water Manage.* 137, 116-122.
- 坂口敦, 加藤英孝, 家田浩之, 中野恵子. 2013: 土壌特性・土層構成に基づく利根川流域内農耕地における硝酸イオンの地下水到達時間の面的推定. *日本土壌肥科学雑誌.* 84 巻 2 号, 90-99.
- Saleh A, Du B 2004: Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the upper North Bosque River watershed in central Texas. *Trans. ASAE* 47, 1039-1049.

- 志村博康 1982: 水田・畑の治水機能評価-国土に必要な治水容量の農地・ダム・森林による分担. 農業土木学会誌 50(1), 25-29.
- Sloan PG, Morre ID, Coltharp GB, Eigel JD 1983: Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Inst. Report 142. Lexington, KY: Univ. Kentucky
- Soil Conservation Service (SCS) 1972: National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. Washington, DC: United States Department of Agriculture.
- Soil Conservation Service (SCS) 1986: Urban hydrology for small watersheds. Technical release 55. Washington, DC : United States Department of Agriculture.
- Somura H, Arnold J, Hoffman D, Takeda I, Mori Y, Di Luzio M 2009: Impact of climate change on the Hii River basin and salinity in Lake Shinji: a case study using the SWAT model and a regression curve. Hydrol. Process. 23, 1887-1900.
- 高田裕介, 中井信, 小原洋 2009: 1992年の農耕地分布に基づくデジタル農耕地土壌図の作成. 日本土壌肥料学雑誌 80, 502-505.
- Tripathi MP, Panda RK, Raghuwanshi NS 2005: Development of effective management plan for critical subwatersheds using SWAT model. Hydrol. Processes 19, 809-826.
- van Genuchten MTh 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- van Griensven A, Meixner T, Grunwald S, Bishop T, Diluzio M, Srinivasan R 2006: A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. J. Hydrol. 324, 10-23.
- Venetis C 1969: A study of the recession of unconfined aquifers. Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol. 14(4), 119-125.
- Wang Z, Feyen J, van Genuchten MT, Nielsen DR 1998: Air entrapped effects on infiltration rate and flow instability. Water Resour. Res. 34, 212-222.
- Watanabe H, Boulange J, Eguchi S, Kato T, Sakaguchi A, Gassman PW 2013: Rice paddy module development in SWAT (Discussion session). Handout received in 3rd SWAT-SEEA conference, 18-19 Jun. 2013, Bogor, Indonesia.
- Watson BM, McKeown RA, Putz G, MacDonald JD 2008: Modification of SWAT for modelling streamflow from forested watersheds on the Canadian Boreal Plain. J. Environ. Eng. Sci. 7(1), 145-159.
- White ED, Easton ZM, Fuka DR, Collick AS, Adgo E, McCartney M, Awulachew SB, Selassie YG, Steenhuis TS 2011: Development and application of a physically based landscape water balance in the SWAT model. Hydrol. Process. 25, 915-925.
- Williams JR 1969: Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Trans. ASAE 12(1), 100-103.

- Williams JR, Berndt HD 1977: Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 20, 1100-1104.
- Wischmeier WH, Smith DD 1978: Predicting rainfall-erosion losses. Agricultural Handbook No. 537. Washington, DC: United States Department of Agriculture.
- Xie X, Cui Y 2011: Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice. J. Hydrol. 396, 61-71.
- 山田良三 白井一則 荻野和明 2003: キャピラリーライシメータを利用した赤黄色土露地野菜畑における窒素収支. 愛知県農業総合試験場研究報告 35, 85-90.
- 山田佳裕, 井桁明丈, 中島沙知, 三戸勇吾, 小笠原貴子, 和田彩香, 大野智彦, 上田篤史, 兵藤不二夫, 今田美穂, 谷内茂雄, 陀安一郎, 福原昭一, 田中拓弥, 和田英太郎 2006: しろかき期の強制落水による懸濁物, 窒素とリンの流出. 陸水学雑誌 67, 105-112.
- Youngs EG, Peck AJ 1964: Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded porous bodies. Soil Sci. 98, 290-294.

改良版 SWAT モデルの使用方法

3 章にて SWAT モデル内に開発した水田モジュールのパラメータを、ArcSWAT のインターフェイスから入力する方法を以下に記す。

Edit HRU Parameters ウィンドウを開く (図 6.1)。POT_TILE に可能最大浸透量(mm d⁻¹)、POT_VOLX に水尻の高さ(mm) (即ち最大湛水深)、 POT_VOL に初期湛水深(mm) (湛水開始時の湛水深なので通常は 0mm)、POT_NSED に降雨に伴う湛水田からの懸濁物質流出式の b パラメータ値、POT_NO3L に降雨に伴う湛水田からの懸濁物質流出式の a パラメータ値を入力する。

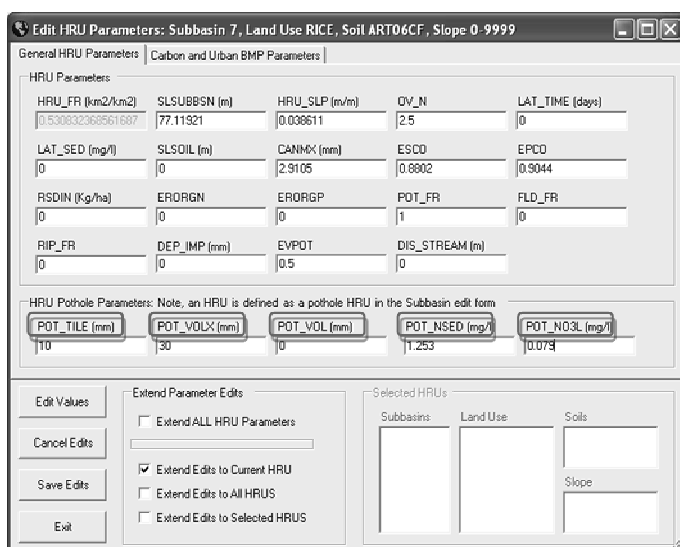


図 6.1 Edit HRU Parameters ウィンドウ

Management Parameters ウィンドウの Operations タブを開く (図 6.2)。Pesticide operation を選択し、Year Month Day に代掻き実施日、PST_KG に代掻きによる懸濁物質流出量(Mg ha⁻¹)を入力する。Release/Impound operation を選択し、Year Month Day に湛水開始日と IMP_TRIG に Impound、または Year Month Day に落水日と IMP_TRIG に Release を入力する。Irrigation operation を選択し、Year Month Day に灌水日、IRR_AMT に日灌水量(mm)を入力する (全灌水日について入力する必要がある)。また、用水路内を灌水が流れてはいるが水田に取り入れられずに直接河川に排水されている時期 (非稲作期など) は、IRR_SQ に 1 を入力する。

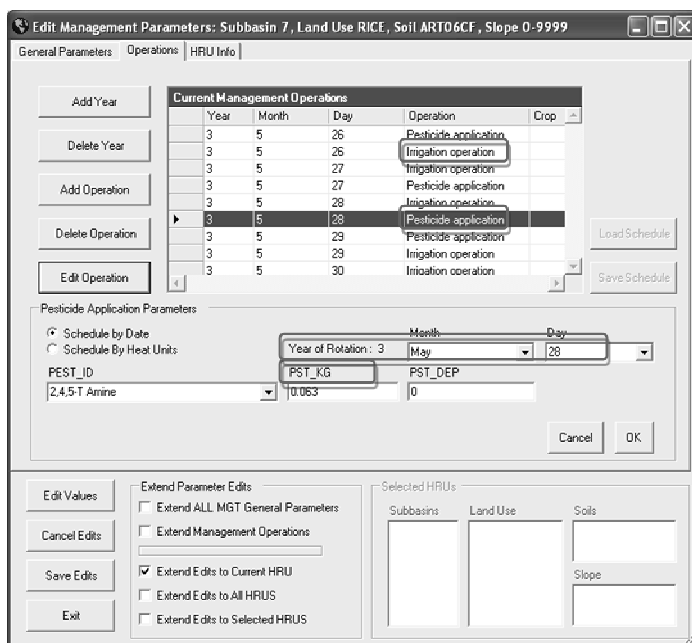


図 6.2 Management Parameters ウィンドウ Operations タブ

次に、ArcSWAT による改良版 SWAT の実行方法を以下に記す。

C ドライブの ArcSWAT フォルダ内に改良版 SWAT の executable file を置き、ファイル名を「swat2009User」とする。ArcSWAT から Run SWAT を選択し、Setup and Run SWAT Model Simulation ウィンドウで実行ファイルに Custum を指定して実行する。

改良版 SWAT モデルのコード

水田モジュール用にコードを書き換えた部分に下線と、コードの修正行に対応するのが 3 章のどこであるのかを記す。

pothole.f

```
use parm
real, parameter :: pi = 3.1416
integer :: j, ly
real :: potsep, sumo, potev, cnv, potpcp, spillo
real :: sedloss, no3loss, dg, excess, stmax, sedsetl
real :: sanloss, silloss, claloss, sagloss, lagloss
real :: potmm
j = 0
j = ihru
potev = 0.
spillo = 0.
potpcp = 0.
potsep = 0.
sumo = 0.
cnv = 0.
cnv = 10. * hru_ha(j)
if (imp_trig(nro(j),nrelease(j),ipot(j)) == 0) then
  if (ipot(j) == ihru) then
    pot_vol(j) = pot_vol(j) + precipday * cnv
    potflwi(j) = potflwi(j) + precipday * cnv
  else
    pot_vol(ipot(j)) = pot_vol(ipot(j)) + qday * Abs(pot_fr(j)) * cnv
    potflwi(ipot(j)) = potflwi(ipot(j)) + qday * Abs(pot_fr(j)) * cnv
    qday = qday * (1. - Abs(pot_fr(j)))
```

ここから 2 行分あった窪地内の懸濁物質量のバジェットモデルは水田からの懸濁物質流出量の計算式としては不適當なので削除

ここから 16 行分あった作成途中で機能していない未定義変数の計算式を削除

ここから 2 行分あった作成途中で機能していない窪地内からの硝酸イオン流出量の計算式を削除

```

end if
if (pot_vol(j) > 0.) then
  potsa(j) = hru_ha(j) * Abs(pot_fr(j))

```

3.2.2 章の式 3.3、potsa(j)が SA、hru_ha(j)が $area_{hru}$ 、pot_fr(j)は式 3.3 内にはないが貯水体が HRU に占める割合でありデフォルトでは「1.0」、j は HRU の番号

```

if (pot_vol(j) > pot_volx(j)) then
  spillo = 0.
  sedloss = 0.

```

ここから 6 行分あった窪地内の硝酸イオン量および未定義変数の初期化を削除

```

  spillo = pot_vol(j) - pot_volx(j)
  sumo = sumo + spillo
  pot_vol(j) = pot_volx(j)
  qday = qday + spillo / cnv
  sedloss = spillo * int(1.e3 * pot_no3l(j) * (1.e-1 * spillo / potsa(j)) **
    (pot_nsed(j) - 1.) / 1.e6

```

3.7.2 章の式 3.12、sedloss が sed、spillo が V_{out} 、pot_no3l(j)が懸濁物質パラメータ a、potsa(j)が $area_{hru}$ 、pot_nsed(j)が懸濁物質パラメータ b、j は HRU の番号

```

  potsedo = potsedo + sedloss
  sedyld(j) = sedyld(j) + sedloss

```

ここから 29 行分あった作成途中で機能していない窪地内からの硝酸イオン流出量および未定義変数の計算式を削除

```

endif
  potsep = pot_tile(j)

```

3.2.1 章の式 3.1、potsep が V_{seep} 、pot_tile(j)が 10 Pp SA、j は HRU の番号

```

  potsep = Min(potsep, pot_vol(j))

```

3.2.1 章の式 3.2、potsep が V_{seep} 、pot_vol(j)が V_{stored} 、j は HRU の番号

```

  pot_vol(j) = pot_vol(j) - potsep
  sol_st(1,j) = sol_st(1,j) + potsep / cnv
  do ly = 1, sol_nly(j)
    dg = 0.
    stmax = 0.
    excess = 0.
    if (ly == 1) then
      dg = sol_z(ly,j)
    else
      dg = sol_z(ly,j) - sol_z(ly-1,j)

```

```

end if
stmax = sol_por(ly,j) * dg
if (sol_st(ly,j) <= stmax) exit
excess = sol_st(ly,j) - stmax
sol_st(ly,j) = stmax
if (ly + 1 <= sol_nly(j)) then
  sol_st(ly+1,j) = sol_st(ly+1,j) + excess
end if
end do
sol_sw(j) = 0.
do ly = 1, sol_nly(j)
  sol_sw(j) = sol_sw(j) + sol_st(ly,j)
end do

```

If (laiday(j) < evlai) then

3.2.5 章の式 3.8 の IF 文、laiday(j)が LAI、 evlai が LAI_{evap}、 j は HRU の番号

potev = 6. * pet_day * potsa(j) * (1. - laiday(j) / evlai)

3.2.5 章の式 3.8、 potev が V_{evap}、 6 が η、 pet_day が E₀、 potsa(j)が SA、 laiday(j)が LAI、 evlai が LAI_{evap}、 j は HRU の番号

If (potev < pot_vol(j)) then

3.2.5 章の図 3.6 の「貯水量が当日の水面からの蒸発量の可能最大値よりも多い日」、 potev は水面からの蒸発量の可能最大値、 pot_vol(j)は貯水量、 j は HRU の番号

pot_vol(j) = pot_vol(j) - potev

es_day = 0.

else

3.2.5 章の図 3.6 の「貯水量が当日の水面からの蒸発量の可能最大値よりも少ない日」

potev = 0.

If (es_day < 1.e-3) then

3.2.5 章の地表面からの蒸発量計算ルーチンへの切り替え、 es_day は地表面からの蒸発散量

call etact

endif

endif

else

es_day = 0.

potev = 0.

3.2.5 章の式 3.9、 potev が V_{evap}

endif

```

if (iida == irelease(nro(j),nrelease(j),j) .and. imp_trig(nro(j),nrelease(j),j)
== 1) then
  qday = qday + pot_vol(j) / cnv
  sumo = sumo + pot_vol(j)
  pot_vol(j) = 0.

```

ここから 3 行分あった窪地内の懸濁物質のバジェットモデルは削除

ここから 2 行分あった窪地内からの硝酸イオン流出量の計算式は削除

ここから 15 行分あった未定義変数の計算式は削除

```

else
  tileo = 0.
  sumo = sumo + tileo
  pot_vol(j) = pot_vol(j) * tileo
  qday = qday + tileo / cnv

```

ここから 43 行分あった未定義変数の計算式は削除

```

endif
endif

```

ここから 43 行分あった未定義変数の計算式は削除

```

endif
  potpcpmm = potpcp / cnv
  potevmm = potev / cnv
  potsepmm = potsep / cnv
  potflwo = sumo / cnv
if (curyr > nyskip) then
  potmm = 0.
  potmm = pot_vol(j) / cnv
  spadyo = spadyo + potflwo * hru_dafr(j)
  spadyev = spadyev + potevmm * hru_dafr(j)
  spadysp = spadysp + potsepmm * hru_dafr(j)
  spadyrfv = spadyrfv + potpcpmm * hru_dafr(j)
end if
return

```

1000 format (1x,i4,2x,9(f8.2,2x))

```

end

```

apply.f

```
use parm
integer :: j
j = 0
j = ihru


$\text{potsedo} = \text{potsedo} + \text{pst\_kg}(\text{nro}(\text{j}), \text{npest}(\text{j}, \text{j})) * \text{hru\_ha}(\text{j})$


```

3.7.3 章の式 3.13 で配分された代掻き時の懸濁物質負荷量を式 3.12 で計算された貯水体の懸濁物質負荷量に加算、potsedo は貯水体の懸濁物質負荷量、pst_kg(nro(j),npest(j),j)は式 3.13 の sed'、nro(j)はスケジュールの年、npest(j)はスケジュールの日、j は HRU の番号、hru_ha(j)は HRU の面積

```


$\text{sedyld}(\text{j}) = \text{sedyld}(\text{j}) + \text{pst\_kg}(\text{nro}(\text{j}), \text{npest}(\text{j}, \text{j})) * \text{hru\_ha}(\text{j})$


```

3.7.3 章の式 3.13 で配分された代掻き時の懸濁物質負荷量を式 3.12 で計算された HRU の懸濁物質負荷量に加算、sedyld(j)は HRU の懸濁物質負荷量、pst_kg(nro(j),npest(j),j)は式 3.13 の sed'、nro(j)はスケジュールの年、npest(j)はスケジュールの日、j は HRU の番号、hru_ha(j)は HRU の面積

```
npest(j) = npest(j) + 1
return
end
```

etact.f

```
use parm
integer :: j, ib, ly
real :: esd, etco, effnup
real :: no3up, es_max, eos1, xx, cej, eaj, pet, esleft
real :: sumsnoeb, evzp, eosl, dep, evz, sev
j = 0
j = ihru
pet = 0.
pet = pet_day
  esd = 500.
  etco = 0.80
  effnup = 0.1
pet = pet - canstor(j)
if (pet < 0.) then
```



```

canstor(j) = -pet
canev = pet_day
pet = 0.
ep_max = 0.
es_max = 0.
else
  canev = canstor(j)
  canstor(j) = 0.
endif
if (pet > 1.0e-6) then
  if (ipet /= 1) then
    if (laiday(j) <= 3.0) then
      ep_max = laiday(j) * pet / 3.
    else
      ep_max = pet
    end if
    if (ep_max < 0.) ep_max = 0.
  end if
  cej = -5.e-5
  eaj = 0.
  es_max = 0.
  eos1 = 0.
  if (sno_hru(j) >= 0.5) then
    eaj = 0.5
  else
    eaj = Exp(cej * (sol_cov(j) + 0.1))
  end if
  es_max = pet * eaj
  eos1 = pet / (es_max + ep_max + 1.e-10)
  eos1 = es_max * eos1
  es_max = Min(es_max, eos1)
  es_max = Max(es_max, 0.)

```

この行にあった `pot_vol(j)` が 0 以上の時は蒸発量上限値を 0 にする指示を、3.2.4 章の図 3.5 の「貯水が存在するか？」の削除に従い、および 3.2.5 章で述べた「貯水が存在しても機能するようにアルゴリズムを変更」に従い削除

```

if (pet_day < es_max + ep_max) then

```

```

    es_max = pet_day - ep_max
    if (pet < es_max + ep_max) then
        es_max = pet * es_max / (es_max + ep_max)
        ep_max = pet * ep_max / (es_max + ep_max)
    end if
end if
esleft = 0.
esleft = es_max
if (elevb_fr(1,hru_sub(j)) <= 0.) then
    if (tmpav(j) > 0.) then
        if (sno_hru(j) >= esleft) then
            sno_hru(j) = sno_hru(j) - esleft
            snoev = snoev + esleft
            esleft = 0.
        else
            esleft = esleft - sno_hru(j)
            snoev = snoev + sno_hru(j)
            sno_hru(j) = 0.
        endif
    endif
endif
else
    sumsnoeb = 0.
do ib = 1, 10
    if (elevb_fr(ib,hru_sub(j)) <= 0.) exit
    if (tavband(ib,j) > 0.) then
        sumsnoeb = sumsnoeb + snoeb(ib,j) * elevb_fr(ib,hru_sub(j))
    end if
end do
if (sumsnoeb >= esleft .and. sumsnoeb > 0.01) then
do ib = 1, 10
    if (elevb_fr(ib,hru_sub(j)) <= 0.) exit
    if (tavband(ib,j) > 0.) then
        snoev = snoev + snoeb(ib,j) * (esleft / sumsnoeb) *
            elevb_fr(ib,hru_sub(j))
        snoeb(ib,j) = snoeb(ib,j) - snoeb(ib,j) * (esleft / sumsnoeb)
    end if
endif

```

```

        end do
    else
        do ib = 1, 10
            if (elevb_fr(ib,hru_sub(j)) <= 0.) exit
            if (tavband(ib,j) > 0.) then
                snoev = snoev + snoeb(ib,j) * elevb_fr(ib,hru_sub(j))
                snoeb(ib,j) = 0.
            end if
        end do
    end if
    esleft = esleft - snoev
    sno_hru(j) = sno_hru(j) - snoev
endif
evzp = 0.
eosl = 0.
eosl = esleft
do ly = 1, sol_nly(j)
    dep = 0.
    if (ly == 1) then
        dep = sol_z(1,j)
    else
        dep = sol_z(ly-1,j)
    endif
    if (dep < esd) then
        evz = 0.
        sev = 0.
        xx = 0.
        evz = eosl * sol_z(ly,j) / (sol_z(ly,j) + Exp(2.374 - .00713 * sol_z(ly,j)))
        sev = evz - evzp * esco(j)
        evzp = evz
        if (sol_st(ly,j) < sol_fc(ly,j)) then
            xx = 2.5 * (sol_st(ly,j) - sol_fc(ly,j)) / sol_fc(ly,j)
            sev = sev * Expo(xx)
        end if
        sev = Min(sev, sol_st(ly,j) * etco)
        if (sev < 0.) sev = 0.
    end if
end do

```

```

    if (sev > esleft) sev = esleft
      if (sol_st(ly,j) > sev) then
        esleft = esleft - sev
        sol_st(ly,j) = Max(1.e-6, sol_st(ly,j) - sev)
      else
        esleft = esleft - sol_st(ly,j)
        sol_st(ly,j) = 0.
      endif
    endif
  endif
  if (ly == 2) then
    no3up = 0.
    no3up = effnup * sev * sol_no3(2,j) / (sol_st(2,j) + 1.e-6)
    no3up = Min(no3up, sol_no3(2,j))
    sno3up = sno3up + no3up * hru_daf(r(j))
    sol_no3(2,j) = sol_no3(2,j) - no3up
    sol_no3(1,j) = sol_no3(1,j) + no3up
  endif
end do
sol_sw(j) = 0.
do ly = 1, sol_nly(j)
  sol_sw(j) = sol_sw(j) + sol_st(ly,j)
end do
es_day = es_max - esleft
if (es_day < 0.) es_day = 0.
end if
return
end

```

subbasin.f

```

use parm
integer :: j
real :: tmpk, d, gma, ho, pet_alpha, aphu, phuop
ihru = 0
ihru = hru1(inum1)
do iihr = 1, hrutot(inum1)

```

```

j = 0
j = ihru
call varinit
if (bio_e(idplt(1,1,j)) <= 1.e-6 .and. nrot(j) > 0) then
  tmpk = 0.
  d = 0.
  gma = 0.
  ho = 0.
  albdays = .08
  pet_alpha = 1.28
  tmpk = tmpav(j) + 273.15
  d = Exp(21.255 - 5304. / tmpk) * 5304. / tmpk ** 2
  gma = d / (d + .68)
  ho = hru_ra(j) * (1. - albdays) / 2.44
  pet_day = pet_alpha * ho * gma
  etday = .7 * pet_day
else
  if (tmpav(j) > 0. .and. phutot(hru_sub(j)) > 0.01) then
    phubase(j) = phubase(j) + tmpav(j) / phutot(hru_sub(j))
  end if
  if (iida == iairr(nro(j),nair(j),j)) nair(j) = nair(j) + 1
  if (phuacc(j) > phuai(nro(j),nair(j),j)) nair(j) = nair(j) + 1
  if (iida == iafer(nro(j),nafert(j),j)) nafert(j) = nafert(j) + 1
  if (phuacc(j) > phuaf(nro(j),nafert(j),j)) then
    nafert(j) = nafert(j) + 1
  endif
  call schedule_ops
  call albedo
  call solt
  if (imp_trig(nro(j),nrelease(j),j)==1) then

```

3.2.4 章の図 3.5 の「貯水が存在せず、また」の削除に従い、上記の IF 文内にあった「.and. pot_vol(j) < 1.e-3」を削除、imp_trig(nro(j),nrelease(j),j)は貯水体の湛水・開放変数であり「0」が湛水条件で「1」が開放条件、nro(j)はスケジュールの年、nrelease(j)はスケジュールの日、jはHRUの番号

```

  call surface
  inflpcp = Max(0.,precipday - surfq(j))

```

```

end if
call percmain
call etpot
if (pot_vol(j) < 1.e-6 .or. imp_trig(nro(j),nrelease(j),j)==1) call etact

```

3.2.4 章の図 3.5 の「貯水が存在するか」の削除および「貯水が存在しない、または開放条件か？」の挿入、ならびに「はい/いいえ」の変更に従い、上記の IF 文内を「`pot_vol(j) < 1.e-6 .or. imp_trig(nro(j),nrelease(j),j)`」に変更、`pot_vol(j)` は貯水量、`imp_trig(nro(j),nrelease(j),j)` は貯水体の湛水・開放変数であり「0」が湛水条件で「1」が開放条件、`nro(j)` はスケジュールの年、`nrelease(j)` はスケジュールの日、`j` は HRU の番号、`etact` は実蒸発散量計算ルーチン

```

call wattable
if (icn == 1) then
sci(j) = sci(j) + pet_day*exp(-cncoef_sub(hru_sub(j))*sci(j)/ smx(j)) - precipday
+ qday
else if (icn == 2) then
sci(j) = sci(j) + pet_day*exp(-cncoef_sub(hru_sub(j))*sci(j)/ smx(j)) - precipday
+ qday + latq(j) + sepbtm(j) + qtile
sci(j) = amin1(sci(j),smxco * smx(j))
end if
do while (iida == ifert(nro(j),nfert(j),j))
call fert
if (imgt == 1) then
write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, " FERT APP"
end if
end do
if (igro(j) == 0) then
aphu = phubase(j)
phuop = phun_nocrop(nro(j),nfert(j),j)
else
aphu = phuacc(j)
phuop = phun(nro(j),nfert(j),j)
endif
do while (phuop>0. .and. aphu > phuop)
call fert
if (imgt == 1) then
write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, " FERT APP"

```

```

        end if
    if (igro(j) == 0) then
        aphu = phubase(j)
        phuop = phun_nocrop(nro(j),nfert(j),j)
    else
        aphu = phuacc(j)
        phuop = phun(nro(j),nfert(j),j)
    endif
end do
if (iburn(nro(j),i_burn(j)+1,j) > 0) then
    if (iida == iburn(nro(j),i_burn(j)+1,j)) call burnop
endif
if (igro(j) == 0) then
    if (phubase(j) > phub(nro(j),i_burn(j)+1,j)) call burnop
else
    if(phuacc(j) > phub(nro(j),i_burn(j)+1,j)) call burnop
end if
call confert
call conapply
call graze
do while (iida == ipst(nro(j),npest(j),j))
    call apply
        if (imgt == 1) then
            write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, "  PEST APP"
        end if
    end do
if (igro(j) == 0) then
    aphu = phubase(j)
    phuop = phupst_nocrop(nro(j),npest(j),j)
else
    aphu = phuacc(j)
    phuop = phupst(nro(j),npest(j),j)
end if
do while (phuop>0. .and. aphu > phuop)
    call apply
        if (imgt == 1) then

```

```

        write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, "  PEST APP"
    end if
if (igro(j) == 0) then
    aphu = phubase(j)
    phuop = phupst_nocrop(nro(j),npest(j),j)
else
    aphu = phuacc(j)
    phuop = phupst(nro(j),npest(j),j)
end if
end do
call plantmod
if (cswat == 0) then
    call nminrl
    else
        call carbon
    end if
call nitvol
call pminrl
    if (isep_opt(j)/=0.and.iyr>=isep_iyr(j)) then
        if (sol_tmp(i_sep(j),j) > 0.) call biozone
    endif
call gwmod
if (precipday >= 2.54) call washp
call decay
call pestlch
if (surfq(j) > 0. .and. peakr > 1.e-6) then
    if (precipday > 0.) then
        call enrsb(0)
        if (sedyld(j) > 0.) call pesty(0)
            if (cswat == 0) then
                call orgn(0)
            else
                call orgncswat(0)
            end if
        call psed(0)
    end if
end if

```



```

end if
call nrain
call nlch
call solp
call subwq
call bacteria
if (iurban(j) > 0) call urban
if (pot_fr(j) > 0.) call pothole
if (iida == irelease(nro(j),nrelease(j),j)) then
  nrelease(j) = nrelease(j) + 1
  if (imgt == 1) then
    write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, "  RELEASE"
  end if
else if (igro(j) == 0) then
  aphu = phubase(j)
  phuop = phuimp_nocrop(nro(j),nrelease(j),j)
else
  aphu = phuacc(j)
  phuop = phuimp(nro(j),nrelease(j),j)
end if
if (phuop>0. .and. aphu > phuop) then
  nrelease(j) = nrelease(j) + 1
  if (imgt == 1) then
    write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, "  RELEASE"
  end if
end if
etday = ep_day + es_day + canev + potevmm
call latsed
call gwnutr
call gw_no3
call surfstor
call substor
if (vfsi(j) > 0.)then
  call filter
  if (filterw(j) > 0.) call buffer
end if

```

```

        if (vfsi(j) == 0. .and. filterw(j) > 0.) then
            call filtww
            call buffer
        end if
    if (grwat_i(j) == 1) then
        call grass_wway
    end if
    qdr(j) = qday + latq(j) + gw_q(j) + qtile
    if (qdr(j) < 0.) qdr(j) = 0.
    if (qdr(j) > 0.) then
        qdfr = qday / qdr(j)
    else
        qdfr = 0.
    end if
    call wetlan
    call hrupond
    xx = sed_con(j)+soln_con(j)+solp_con(j)+orgn_con(j)+orgp_con(j)
    if (xx > 1.e-6) then
        call urb_bmp
    end if
    irrsc(j) = irr_sc(nro(j),nirr(j),j)
    if (irrsc(j) > 2) then
        if (iir(nro(j),nirr(j),j) > 0) then
            if (iida == iir(nro(j),nirr(j),j)) then
                call irrsb
                if (imgt == 1) then
                    write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, "  IRRIGATE"
                end if
            end if
        else
            if (igro(j) == 0) then
                aphu = phubase(j)
                phuop = phuirr_nocrop(nro(j),nirr(j),j)
            else
                aphu = phuacc(j)
                phuop = phuirr(nro(j),nirr(j),j)
            end if
        end if
    end if

```

```

        end if
        if (phuop > 0. .and. aphu > phuop) then
            call irrsub
            if (imgt == 1) then
                write (143,1000) j, iyr, i_mo, iida, "  IRRIGATE"
            end if
        end if
    endif
endif
    call autoirr
    call watuse
    call watbal
endif
call sumv
call virtual
ihru = ihru + 1
end do
1000 format(4i10,a10)
return
end

```

irrsub.f

```

use parm
integer :: j, k, flag
real :: vmma, vmm, cnv, vmxi, vol, vmms, vmmd
j = 0
j = ihru
vmma = 0.
vmms = 0.
vmmd = 0.
vmm = 0.
irrsc(j) = irr_sc(nro(j),nirr(j),j)
irrno(j) = irr_no(nro(j),nirr(j),j)
select case (irrsc(j))
    case (3)

```

```

do k = 1, nhru
  if (hru_sub(k) == irrno(j)) then
    cnv = 0.
    cnv = hru_ha(k) * 10.
    if (shallst(k) < 1.e-6) shallst(k) = 0.0
    vmma = vmma + shallst(k) * cnv * irr_efm(nro(j),nirr(j),j)
  end if
end do
vmms = vmma
cnv = 0.
cnv = hru_ha(j) * 10.
vmma = vmma / cnv
vmm = Min(sol_sumfc(j), vmma)
case (4)
do k = 1, nhru
  if (hru_sub(k) == irrno(j)) then
    cnv = 0.
    cnv = hru_ha(k) * 10.
    vmma = vmma + deepst(k) * cnv * irr_efm(nro(j),nirr(j),j)
  end if
end do
vmmd = vmma
cnv = 0.
cnv = hru_ha(j) * 10.
vmma = vmma / cnv
vmm = Min(sol_sumfc(j), vmma)
case (5)
  vmm = sol_sumfc(j)
end select
if (vmm > 0.) then
  cnv = 0.
  cnv = hru_ha(j) * 10.
  vmxi = 0.
  vmxi = irr_amt(nro(j),nirr(j),j)
  if (vmxi < 1.e-6) vmxi = sol_sumfc(j)
  if (vmm > vmxi) vmm = vmxi

```

vol = 0.

vol = vmm * cnv

if (ipot(j) == j) then

if (pot_vol(j) + vol > pot_volx(j)) then

3.2.3 章の式 3.4 および式 3.6 の IF 文、pot_vol(j)は V_{stored} 、vol は irr、pot_volx(j)は $V_{\text{pot,mx}}$ 、j は HRU の番号、IF 文が非成立の場合は何も行われぬ為に式 3.7 となる

qday = qday + (pot_vol(j) + vol - pot_volx(j)) / cnv

3.2.3 章の式 3.6、前者の qday は Q_{surf} 、後者の qday は $Q_{\text{surf,normal}}$ 、pot_vol(j)は V_{stored} 、vol は irr、pot_volx(j)は $V_{\text{pot,mx}}$ 、cnv は $10 \text{ area}_{\text{hru}}$ 、j は HRU の番号

end if

pot_vol(j) = Min(pot_vol(j) + vol, pot_volx(j))

3.2.3 章の式 3.4 および式 3.5、pot_vol(j)は V_{stored} 、vol は irr、pot_volx(j)は $V_{\text{pot,mx}}$ 、j は HRU の番号、尚、式 3.4 および式 3.5 の irr_pot は仮想上の変数でありコード内に対応する変数は存在しない

else

sq_rto = irr_sq(nro(j),nirr(j),j)

if (auto_wstr(nro(j),nair(j),j) > 0.) then

sq_rto = irr_asq(nro(j),nair(j),j)

end if

call irrigate(j,vmm)

end if

if (ipot(j) /= j) then

vol = 0.

vol = aird(j) * cnv * irr_efm(nro(j),nirr(j),j)

end if

select case (irrcsc(j))

case (3)

do k = 1, nhru

if (hru_sub(k) == irrno(j)) then

cnv = 0.

vmma = 0.

cnv = hru_ha(k) * 10.

if (vmms > 0.01) vmma = vol * (shallst(k) * cnv / vmms)

vmma = vmma / cnv

shallst(k) = shallst(k) - vmma

if (shallst(k) < 0.) then

```

        vmma = vmma + shallst(k)
        shallst(k) = 0.
    end if
    shallirr(k) = shallirr(k) + vmma
end if
end do
case (4)
do k = 1, nhru
    if (hru_sub(k) == irrno(j)) then
        cnv = 0.
        vmma = 0.
        cnv = hru_ha(k) * 10.
        if (vmmd > 0.01) vmma = vol * (deepst(k) * cnv / vmmd)
        vmma = vmma / cnv
        deepst(k) = deepst(k) - vmma
        if (deepst(k) < 0.) then
            vmma = vmma + deepst(k)
            deepst(k) = 0.
        end if
        deepirr(k) = deepirr(k) + vmma
    end if
end do
end select
nirr(j) = nirr(j) + 1
endif
return
end

```