

9.3 筑後川の土砂・栄養塩流出量

(1) 流出パターン及び再現精度

筑後川モデルにおける土砂・栄養塩（リン・窒素）の実測値と推定値の比較を時系列の対数グラフで示したものを図 V-49 に、実測値と推定値の比較した散布図を図 V-50 に、再現精度を表 V-75 示す。

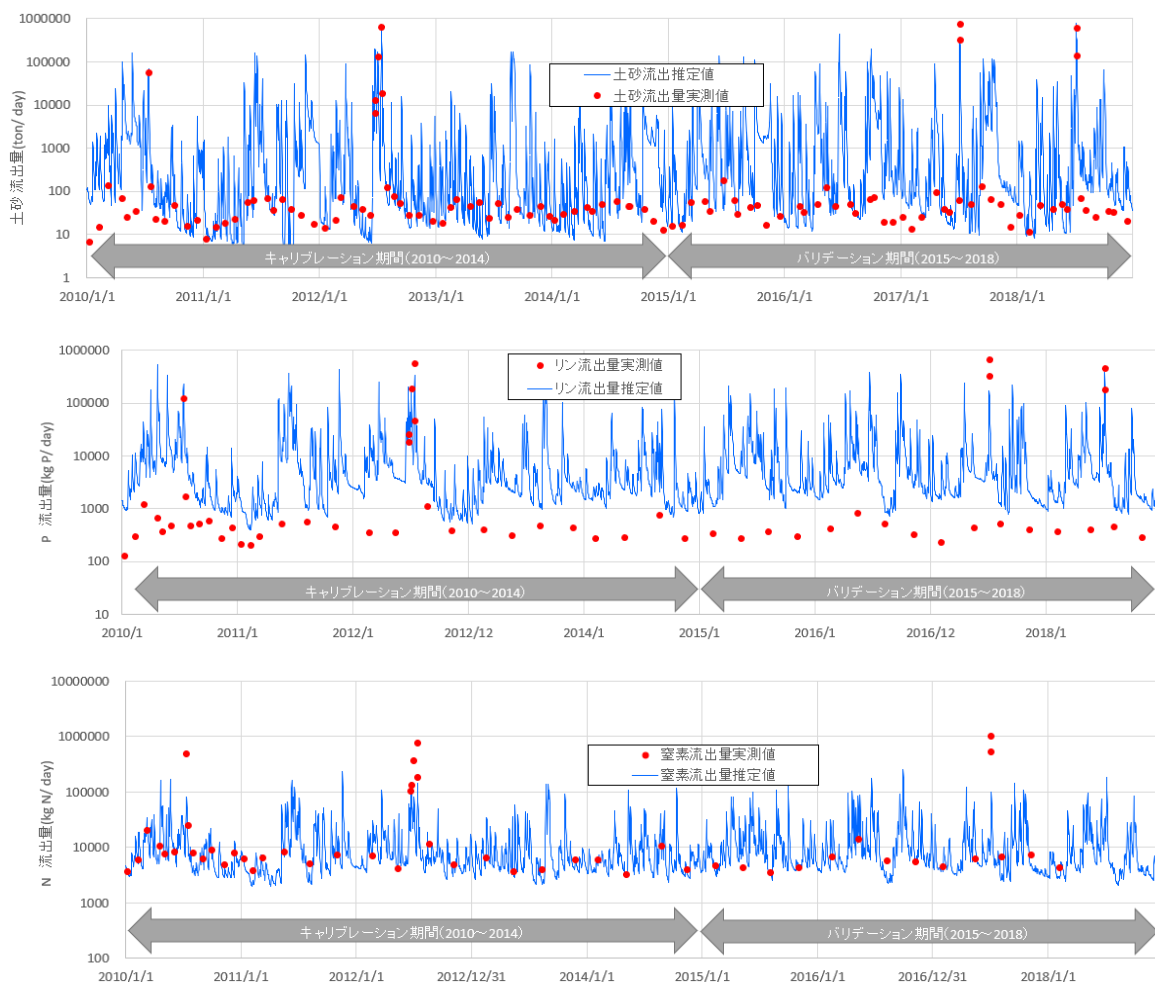


図 V-49 筑後川モデルの土砂・リン・窒素の推定値と実測値の比較（時系列）

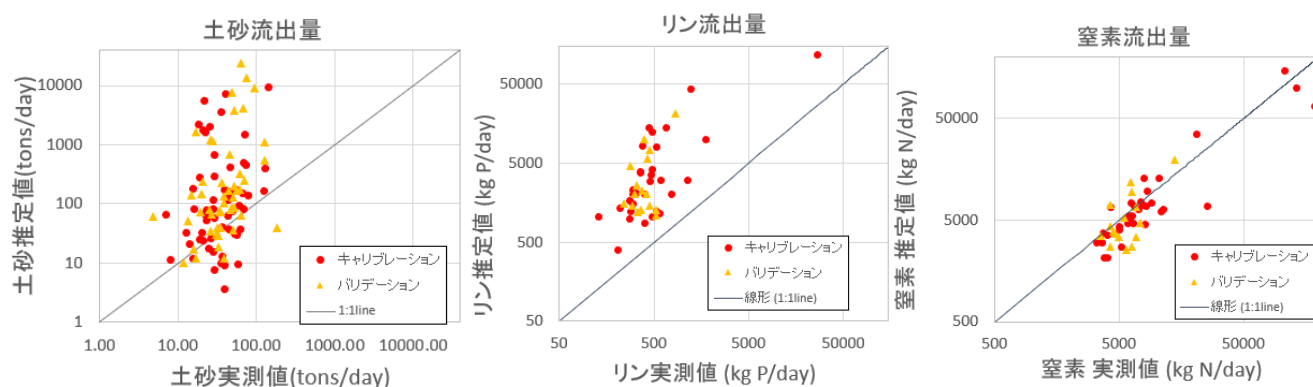


図 V-50 筑後川モデルの土砂・リン・窒素の推定値と実測値の比較（散布図）

表 V-75 筑後川モデルの土砂・リン・窒素の再現精度

指標	土砂		リン		窒素	
	キャリブレーション	バリデーション	キャリブレーション	バリデーション	キャリブレーション	バリデーション
RSR	0.61 (s)	0.82 (us)	0.58 (g)	0.77 (us)	0.86 (us)	0.93 (us)
NSE	0.63 (s)	0.34 (us)	0.66 (g)	0.41 (us)	0.27 (us)	0.14 (us)
PBIAS	-71.04 (us)	5.56 (vg)	-36.13 (g)	43.83 (s)	63.72 (s)	74.69 (us)

土砂は、キャリブレーション期間において RSR、NSE の指標が **satisfactory** となったものの、全期間を通して推定値が実測値を大きく上回る傾向が見られた。リンも同様に、キャリブレーション期間において 3 つの指標が **good** となったものの、全期間を通して推定値が実測値を上回る傾向が見られた。一方、窒素はキャリブレーション期間、バリデーション期間のほとんどの指標で **unsatisfactory** を示しているが、散布図を見ると推定値と実測値の対応は悪くないように見える。現時点では原因は不明であるが、これらの再現精度を高めるには、感度の高いパラメータを中心に複数回精度検証を重ねて、各パラメータの設定値と推定値の挙動を把握しながら、実測値と比較していく作業が必要だと考えられる。また、今回の解析ではピークの適合性を見る NSE の指標が良くなるようにキャリブレーションの設定を行っているため、例えば PBIAS のように全体のばらつきを考慮する指標が良くなるように設定を行い、感度分析・キャリブレーションを行う等の方法も考えられる。

(2) 土地利用別 土砂・栄養塩流出量

筑後川流域における土地利用別の土砂・栄養塩流出量の推定結果を表 V-76 に、また参考として過年度業務における菊池川流域の土地利用別の土砂・栄養塩流出量の推定結果を表 V-77 に示す。

表 V-76 土地利用別の土砂・栄養塩流出量（筑後川）

土地利用	面積 [km ²]	流量 [mm/year]	土砂流出量 [ton/year/ha]	リン流出量 [kg/year/ha]	窒素流出量 [kg/year/ha]
都市部	169.2	1,285	0.5	5.0	27.9
森林	1,600.2	1,357	36.2	25.7	19.6
水田	301.1	2,906	8.6	22.6	16.3
農地	139.4	3,542	12.6	59.2	60.4
全体（平均）	2,285.4	1,682	27.3	25.0	21.9

表 V-77 土地利用別の土砂・栄養塩流出量（過年度業務：菊池川）

土地利用	面積 [km ²]	流量 [mm/year]	土砂流出量 [ton/year/ha]	リン流出量 [kg/year/ha]	窒素流出量 [kg/year/ha]
農地（平地）	91.4	932	0.67	5.92	19.3

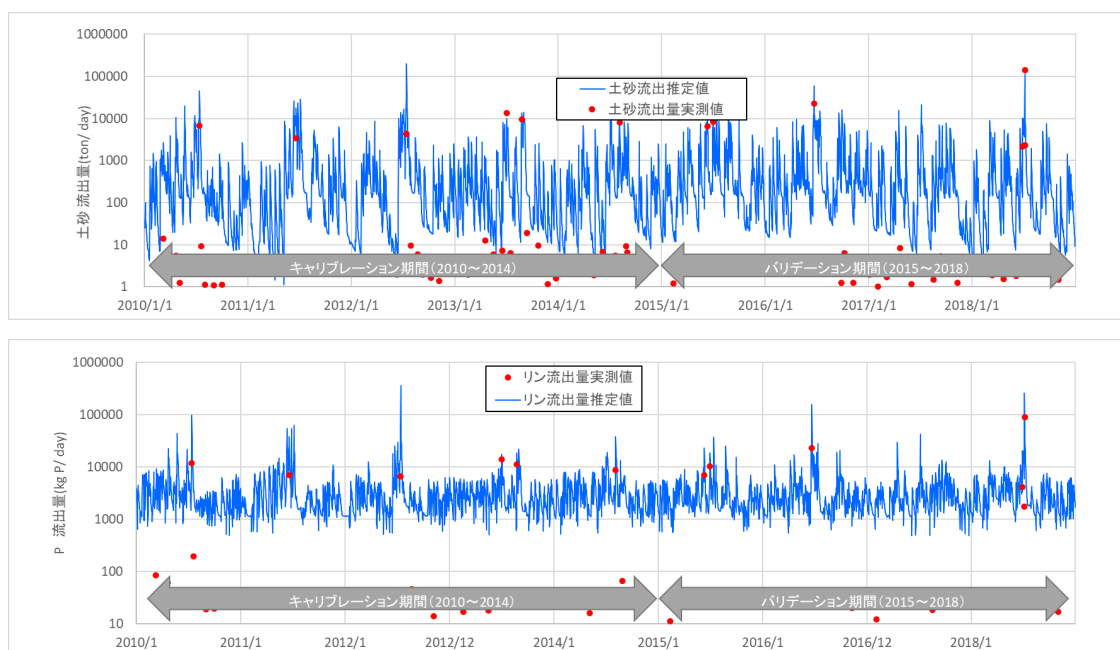
農地（傾斜地）	21.6	1,326	0.70	4.05	31.87
森林	430.0	1,192	0.010	0.90	5.51
水田	131.1	1,077	1.10	9.08	15.43
全体（平均）	754.6	1,112	0.32	3.33	11.6

筑後川と過年度の菊池川の流出量に係る推定結果を比較すると、全体として筑後川では土砂とリンの流出量が多い。その中で土砂については森林からの流出量が非常に大きな値をしめており、菊池川においては森林からの流出量が他の土地利用に比べて小さな値であったことを踏まえると、パラメータの見直しが必要だと考えられる。また、今回筑後川流域では農地は一括りにして結果を推定したが、農地は傾斜によって土砂・栄養塩の流出傾向が異なるため、まずは筑後川流域の農地を傾斜別に分け、傾斜ごとに適切な土砂流出量となるよう調整することでより信頼性のある流出量を推定することにつながると考えられる。

9.4 矢部川の土砂・栄養塩流出量

（１） 流出パターン及び再現精度

矢部川モデルにおける土砂・栄養塩（リン・窒素）の実測値と推定値の比較を時系列の対数グラフで示したものを図 V-49 に、実測値と推測値の比較をした散布図を図 V-50 に、再現精度を表 V-75 に示す。



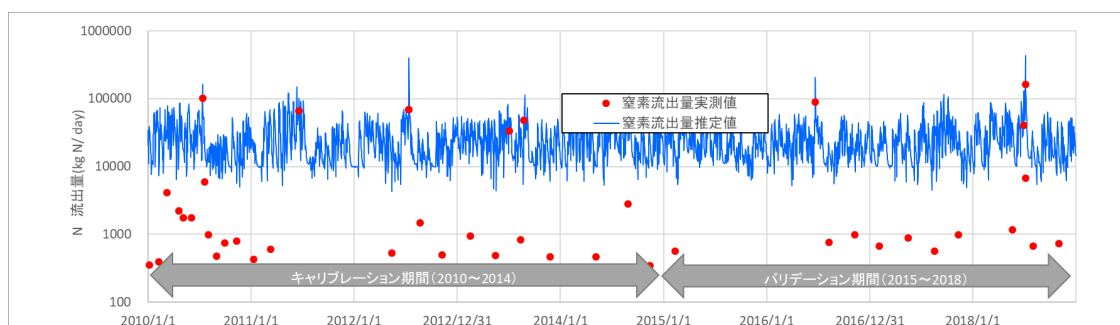


図 V-51 矢部川モデルの土砂・リン・窒素の推定値と実測値の比較（時系列）

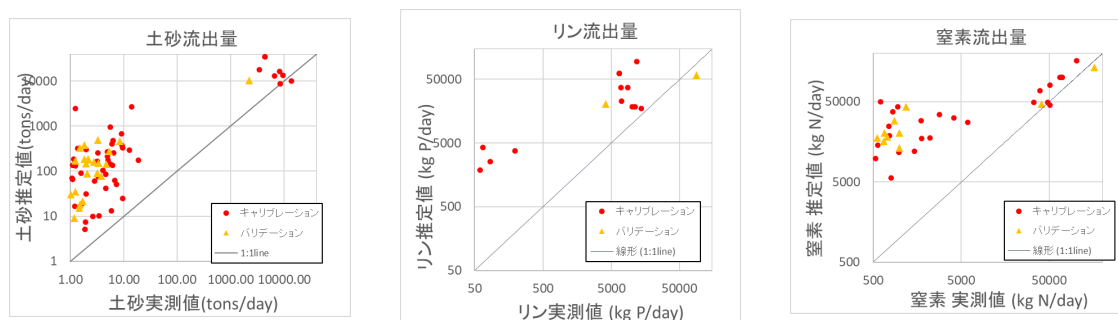


図 V-52 矢部川モデルの土砂・リン・窒素の推定値と実測値の比較（散布図）

表 V-78 矢部川モデルの土砂・リン・窒素の再現精度

指標	土砂		リン		窒素	
	キャリブレーション	バリデーション	キャリブレーション	バリデーション	キャリブレーション	バリデーション
RSR	2.22 (us)	1.15 (us)	5.16 (us)	0.35 (vg)	1.10 (us)	0.18 (vg)
NSE	-3.94 (us)	-0.33 (us)	-25.65 (us)	0.88 (vg)	-0.21 (us)	0.97 (vg)
PBIAS	-208.53 (g)	-5.96 (vg)	-341.41 (us)	31.63 (g)	-107.33 (us)	12.64 (vg)

土砂は、全期間を通じて推定値が実測値を大きく上回る傾向が見られ、RSR、NSE の指標が **Unsatisfactory** となった。リンも同様に、全期間を通じて推定値が実測値を上回る傾向が見られ、3 つの指標が **Unsatisfactory** となった。一方、窒素はキャリブレーション期間でいずれの指標も **Unsatisfactory** を示しているが、散布図を見ると出水時の対応は悪くないように見える。現時点では原因は不明であるが、これらの再現精度を高めるには、感度の高いパラメータを中心に複数回精度検証を重ねて、各パラメータの設定値と推定値の挙動を把握しながら、実測値と比較していく作業が必要だと考えられる。また、今回の解析ではピークの適合性を見る NSE の指標が良くなるように設定してキャリブレーションを行っているため、例えば PBIAS のように全体のばらつきを考慮する指標が良くなるように設定を行い、感度分析・キャリブレーションを行う等の方法も考えられる。

VI. 菊池川モデルの再調整

1. 菊池川モデル構築の経緯

本事業では、平成 28 年度の菊池川試行モデルから始まり、現在までに様々なスケールやテーマのモデル構築および検証を進めてきた。図 VI-1 に、これまでに構築してきた菊池川モデルの種類、表 VI-1 に、各菊池川モデルのテーマを示す。

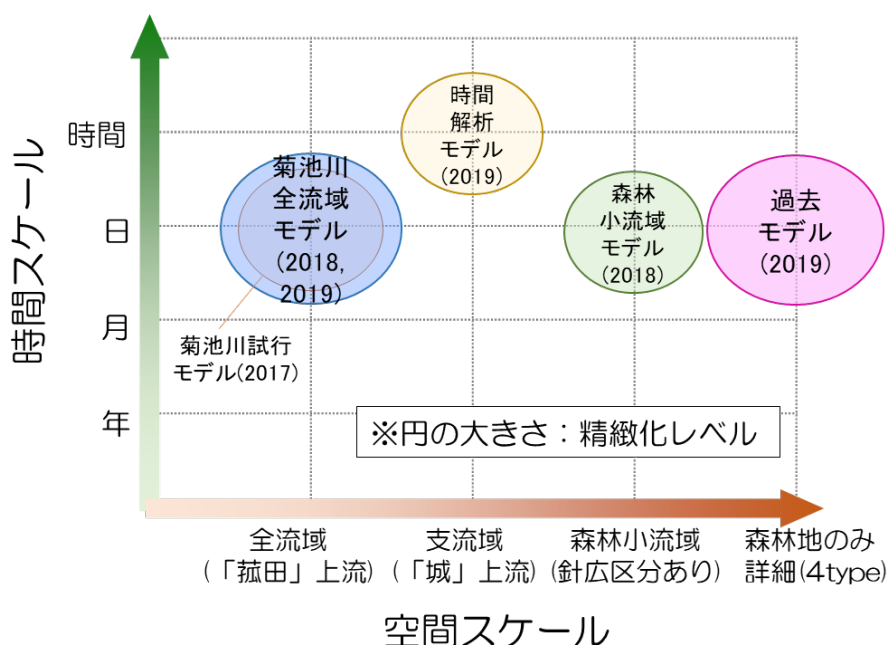


図 VI-1 菊池川流域を対象に構築したモデルの種類

表 VI-1 菊池川モデルのタイプ別テーマ

モデル タイプ	テーマ
菊池川試行モデル（2017）	菊池川全流域を対象に試行的に構築
菊池川全流域モデル（2018、2019）	菊池川全流域を対象。パラメータを精緻化
森林小流域モデル（2018）	「城」観測所上流の森林小流域を対象に林種（針広）と流出の関係性を検証
現代・過去モデル（2019）	森林の成長等による変化と流出の関係性を検証（森林地以外は菊池川全流域モデルと同等）
時間解析モデル（2019）	ピーク流量の推定精度向上への取り組み

令和元（2019）年に構築した「現代・過去モデル」は、森林を樹種や林齢、発達段階で細分化した土地利用図をインプットとして用いたモデルであり、両モデルの精度が十分に担保された場合に、シナリオ解析により、森林の成長や変化が流出特性に及ぼす影響を評価可能とするものであった。しかしながら、同モデルは「現代」および「過去」の2時点の土地利用インプットを用意する必要があるため、高度な GIS 処理技術や作業時間を要するといったデメリットもあった。

上記を踏まえ、本事業では「森林が海域に及ぼす影響を広域的に把握する」ことに重きを置いていることから、当面、新規構築する菊池川以外の流域モデルにおいては、「現代・過去モデル」のような森林を細分化した詳細な解析よりも「菊池川全流域モデル」、即ち、

森林は単一の土地利用タイプとみなすモデルタイプを残る 8 河川に展開することを優先することとする。

2. 残存課題および対応方針

2.1 窒素流出量の過小推計

図 VI-2 や表 VI-2 に示すとおり、令和元（2019）年までに構築した菊池川全流域モデルにおいては、窒素流出が過少に推計されているという課題があった。

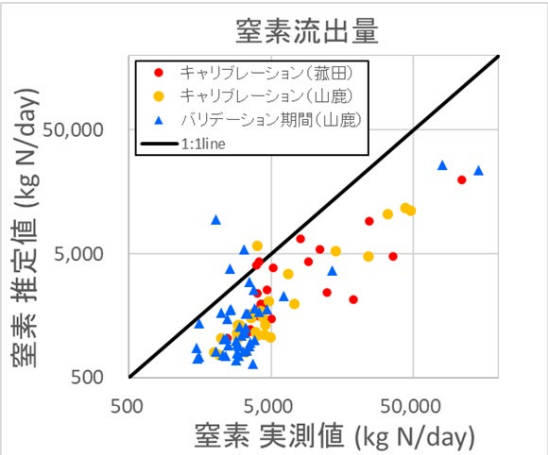


図 VI-2 令和元（2019）年度に再調整を行った菊池川全流域モデルによる窒素流出量の実測値および推定値の比較

表 VI-2 再調整済みの全流域モデルにおける窒素流出量の再現精度

期間	観測地点	RSR	NSE	PBIAS
キャリブレーション	菰田	0.86 (us)	0.26 (us)	69.90 (s)
	山鹿	0.94 (us)	0.11 (us)	66.73 (s)
バリデーション	山鹿	0.87 (us)	0.24 (us)	72.69 (us)

これまで本事業では、森林が海域に果たすポジティブな役割の一つとして、森林のストック機能、すなわち、森林にインプットされる様々な物質が一時貯留され、急速な流出を制御し、時間をかけて下流に流れることにより海域に安定的に栄養塩や有機物を供給するとされる機能の評価等を試みてきた。

既往の知見では、森林では窒素流入負荷量よりも窒素流出負荷量のほうが小さく、森林は窒素のストック源となることが知られているが、平成 30（2018）年度の本事業における窒素収支はそれに反する結果となっており、脱窒量が現実には即していない可能性が示唆されたほか、2019 年度においても、モデルの各種設定を見直し、窒素収支の再調整を図ったものの、過少傾向は依然として解消されていない。

2.2 水田と農地におけるリン流出量のバランス

表 VI-3 に、令和元（2019）年度までに再調整された菊池川モデルの水収支の結果を示

す。表中の列タイトルにある「全流域」は、「菊池川全流域モデル」、「現代」は、「現代・過去モデル解析」に用いた「菊池川現代（2010年代）モデル」である。両者の違いは、森林が細分化されているかどうかであり、つまり全体の HRU 数に違いはあるものの、どちらも 2010 年代のインプットデータが入力された菊池川全流域を対象としたモデルである。

表 VI-3 菊池川全流域 2019 モデルによる 2008 年の水収支結果

土地利用	面積 [km ²]	流量 [mm/year]		土砂流出量 [ton/year/ha]		リン流出量 [kg/year/ha]		窒素流出量 [kg/year/ha]	
		全流域	現代	全流域	現代	全流域	現代	全流域	現代
農地（平地）	95.1	932	930	0.67	0.72	5.92	6.10	19.3	18.8
農地（傾斜地）	19.3	1,326	1,291	0.70	1.32	4.05	7.44	31.87	38.1
森林	422.0	1,192	1,217	0.010	0.002	0.90	0.98	5.51	4.7
水田	145.1	1,077	1,069	1.10	1.01	9.08	8.69	15.43	14.7
全体（平均）	759.6	1,112	1,145	0.32	0.35	3.33	3.66	11.6	14.0

水田のリン流出量の方が農地より多い

表 VI-3 の結果によると、本事業では、水田からのリン流出量の方が農地からの流出よりも多い結果となっている。しかしながら、有明海・八代海等総合調査評価委員会環境再生方策検討作業小委員会有明小委員会（令和 2 年 12 月）にて、当該委員会の委員である農業専門家から受けた指摘によると、リンの流出量は、一般的に水田よりも農地の方が大きいとのことである。さらに、通常、水田からのリン流出量は、窒素流出量の 2～5 割（実測ベース）程度とのことであった。このため、農地や水田域におけるリン流出量の見直しを図る必要がある。

3. モデル再調整にかかる準備

QSWAT のバージョンを ver.1.9 (rev.670) から最新の ver.3 1.1.1 (rev.681) に更新した。これにより、昨年度までに構築してきた「菊池川全流域モデル」を「菊池川 2019 モデル」とし、今回バージョンアップを行ったモデルを「菊池川 2019 新モデル」とする。

次に、実測の流量データの準備について述べる。水文水質 DB には出水時の土砂、栄養塩量データがほとんど存在しないため、これまでも国交省九州局の HP で提供されている年 2～4 回程度の出水時時間データ（菰田および山鹿地点）を日流量データへ変換することで活用してきたが、2017 年までのデータしか収集できていなかったため、あらたに 2018 年の出水時時間流量データについても追加して、同様の処理を行った。

また、菊池川においては、現地実測にて収集した土砂、栄養塩データをキャリブレーションに使用してきた経緯があり、今年度構築した筑後川モデルや矢部川モデルと異なるキャリブレーション、バリデーション期間の設定となっている。今後、モデル間のシミュレーション結果の比較を可能とするためにも、当該期間は同一であることが望ましく、表 VI-4 に記載のとおり、キャリブレーション、バリデーション期間を一致させた「菊池川 2020

モデル」構築にむけて、実測データの追加・調整を図っているところであるため、今年度は、「菊池川 2019 新モデル」でシミュレーションを行った結果を次項より示す。

表 VI-4 菊池川モデル別キャリブレーション・バリデーション期間

モデル	流出物	キャリブレーション期間	バリデーション期間
菊池川 2019 モデル	水	2008/1/1～2011/12/31	2012/1/1～2016/12/31
菊池川 2019 新 モデル	土砂・栄養塩	2016/1/1～ 2017/12/31	2012/1/1～2015/12/31
菊池川 2020 モデル	すべて	2010/1/1～2014/12/31	2015/1/1～2018/12/31

4. モデル再調整の結果

(1) 水流出パターン及び再現精度

図 VI-3 に菊池川モデル シミュレーションにより得られた流出パターンを示す。対数グラフで示すことにより、低水時の流量がやや過少に推定されていることが明瞭となった。

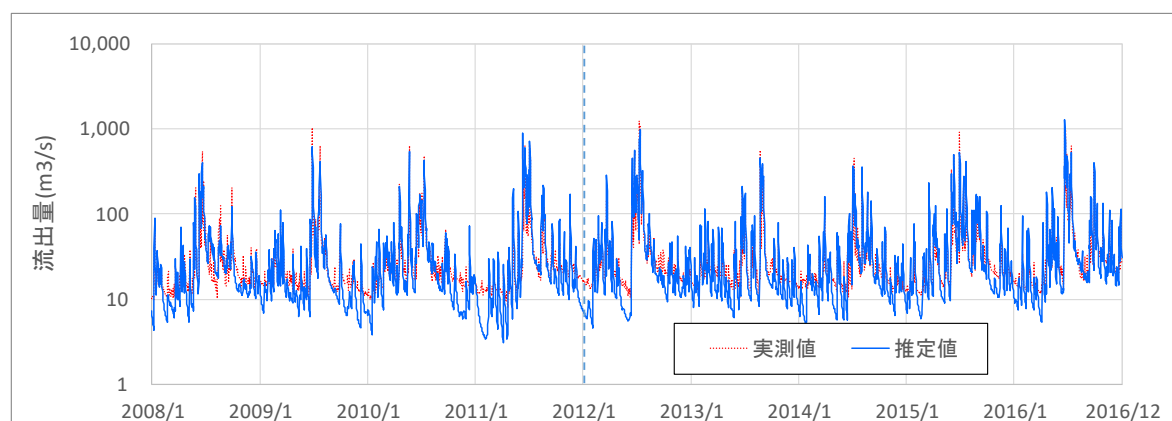


図 VI-3 菊池川モデルの流出パターン

図 VI-4 には、流量実測値と推定値を比較した散布図、表VI-5 には本シミュレーション結果の精度評価結果を示す。

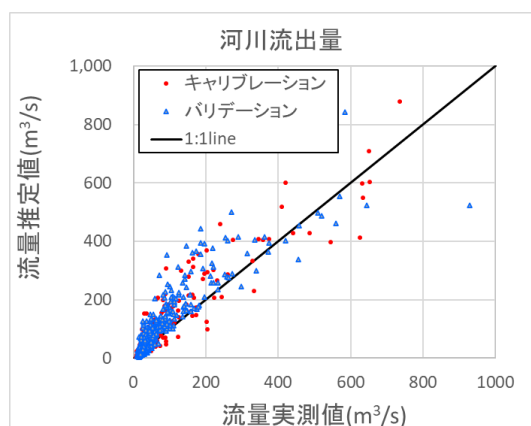


図 VI-4 流量実測値と推定値の比較

表 VI-5 再現精度

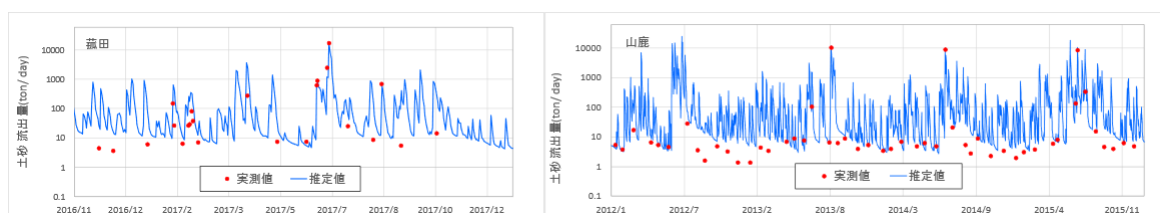
	キャリブレーション	バリデーション
	菰田	山鹿
RSR	0.43 (vg)	0.48 (vg)
NSE	0.81 (vg)	0.77 (vg)
PBIAS	-10.63 (g)	-18.45 (s)

推定精度は、RSR と NSE の評価指標により Very Good が得られており、今回、バージョンアップを行ったモデルでも過年度と同レベルの推定精度が確保されたが、低水時の流量が過少という前述の課題があるため、水収支についての全体的な見直しが必要である。

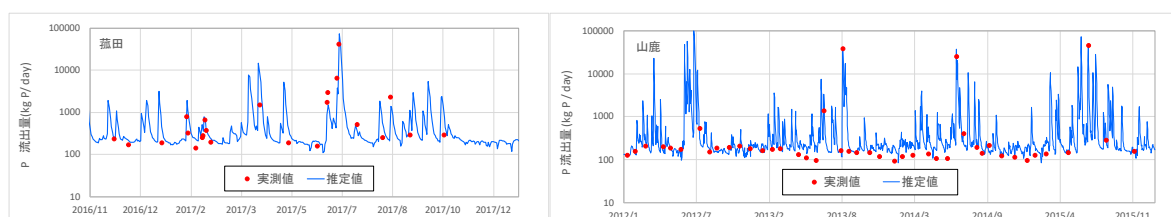
(2) 土砂・栄養塩の流出パターン及び再現精度

図 VI-5 には、菊池川モデル シミュレーションにより得られた土砂、リン、窒素の流出パターンを示す。

【土砂】



【リン】



【窒素】

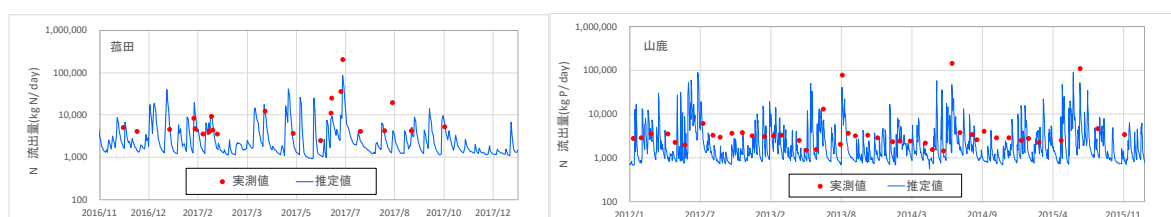


図 VI-5 菊池川モデルの流出パターン（上：土砂、中：リン、下：窒素）

次に、図 VI-6～図 VI-8 には、土砂、リン、窒素の実測値と推定値を比較した散布図、表 VI-6～表 VI-8 には各シミュレーション結果の再現精度を示す。

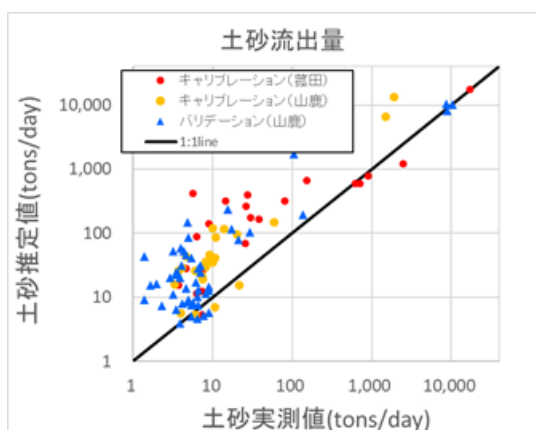


図 VI-6 土砂流出量実測値と推定値の比較

表 VI-6 土砂流出量の再現精度

	キャリブレーション		バリデーション
	菰田	山鹿	山鹿
RSR	0.15(vg)	4.91(us)	0.29(vg)
NSE	0.98(vg)	-23.08(us)	0.91(vg)
PBIAS	-13.84(vg)	-531.57(us)	-32.26(s)

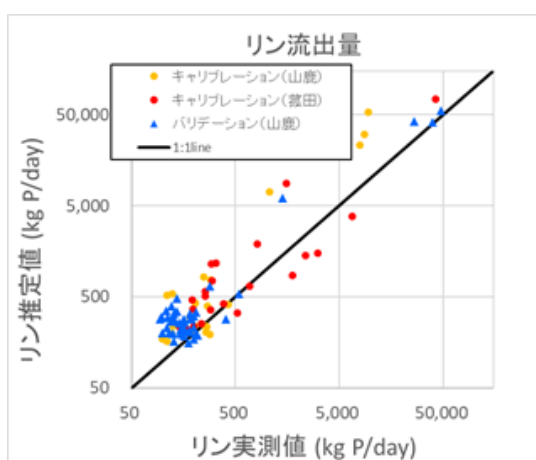


図 VI-7 リン流出量実測値と推定値の比較

表 VI-7 リンの再現精度

	キャリブレーション		バリデーション
	菰田	山鹿	山鹿
RSR	0.83(us)	2.1(us)	0.18(vg)
NSE	0.32(us)	-3.4(us)	0.97(s)
PBIAS	-60.71(s)	-116.92(us)	-10.92(vg)

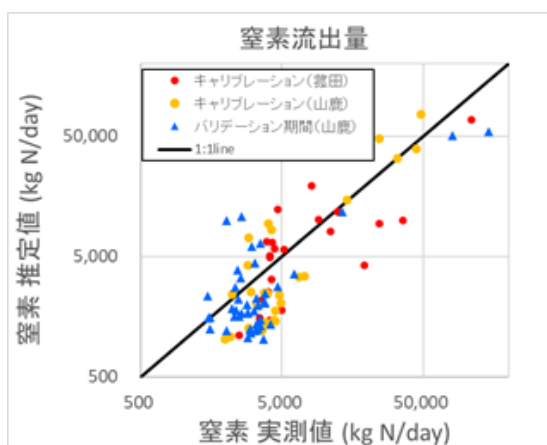


図 VI-8 窒素流出量実測値と推定値の比較

表 VI-8 窒素の再現精度

	キャリブレーション		バリデーション
	菰田	山鹿	山鹿
RSR	0.63(s)	0.44(vg)	0.65(s)
NSE	0.61(s)	0.81(vg)	0.58(s)
PBIAS	42.29(s)	35.64(g)	53.39(s)

土砂、リン、窒素の流出量についても、過年度までに構築した菊池川全流域モデルの精度と同程度の再現精度であったものの、今回バージョンアップしたモデルでは土砂、リン、窒素の流出量が全体的に増加したことから、これまで課題であった「窒素の過少傾向」が自動的に改善した傾向にあり、指標による精度も向上している。次に、QSWAT バージョンアップの影響について述べる。

5. QSWAT バージョンアップの影響

「菊池川 2019 モデル（菊池川全流域モデル）」と今回構築した「菊池川 2019 新モデル」の流出量の比較結果を表 VI-9 に示す。ただし、「菊池川 2019 モデル」の結果は 2008 年のシミュレーション結果、「菊池川 2019 新モデル」の結果は全シミュレーション期間（2008～2018 年）の結果を平均化したものであり、集計の範囲には若干相違があるという点に留意されたい。

この結果をみると、「菊池川 2019 新モデル」においては、農地（平地）以外の土地利用における各種流出量が増加している。特に赤字で示した流出項目については大幅な増加となっている。

流出量が全体的に増加した原因として、バージョンアップ時に HRU が変化した（数は減少、組み合わせも変化している）こと、またバージョンアップにより SWAT 内部のプロセスや計算式が改良され、計算結果に違いがでたこと、それにも関わらず、今回構築した「菊池川 2019 新モデル」には、旧バージョンモデルのキャリブレーションで得られたベストパラメータ値を適用しており、それが新モデルには適合していないこと等が想定される。

これについては、新モデル、つまり更新された計算式に適合するように、あらためてキャリブレーションを行い、新たなベスト値を探ることで流出量の適正化が図れるものと思われる、次なる対策として検討したい。

表 VI-9 「菊池川 2019 モデル（菊池川全流域モデル）」と
「菊池川 2019 新モデル」の流出量の比較結果

土地利用	面積 [km ²]	流量 [mm/year]		土砂流出量 [ton/year/ha]		リン流出量 [kg/year/ha]		窒素流出量 [kg/year/ha]	
		2019	2019 新	2019	2019 新	2019	2019 新	2019	2019 新
農地（平地）	91.4	932	851	0.67	0.58	5.92	5.05	19.3	14.99
農地（傾斜地）	21.6	1,326	1,468	0.70	4.04	4.05	18.33	31.87	48.77
森林	430.0	1,192	1,580	0.010	2.82	0.90	10.51	5.51	22.92
水田	131.1	1,077	1,127	1.10	3.02	9.08	11.21	15.43	17.98
全体（平均）	754.6	1,112	1,266	0.32	2.22	3.33	20.21	11.6	31.51

6. 残存課題への対応

上記のとおり、バージョンアップの影響などもあり、当初からの課題であった栄養塩（リン・窒素）収支の改善について、引き続き検証を行っている段階である。菊池川モデルに残存する課題への対応方針については、VII.3.（3）に後述する。

VII. 3 流域モデルの結果比較及びまとめ

1. 3 流域モデルの結果比較

1.1 流域別にみたパラメータ感度の比較

今年度事業においては、筑後川、矢部川の2流域のモデルを新たに構築し、また過年度までに精緻化を進めてきた菊池川モデルにおいては、新規モデルと同一バージョンにバージョンアップし、3流域のSWATモデルを整えることができた。表VII-1には、モデル毎に実施した感度分析の結果、感度の高さが上位10位までに入ったパラメータを比較し、流域別にパラメータの感度に相違がみられるかどうかについて検証を行った。

表 VII-1 流域別パラメータ感度の比較

順位	筑後川	矢部川	菊池川
1	ALPHA_BF	ALPHA_BF	ALPHA_BF
2	CH_K2	CH_K2	CH_K2
3	OV_N	OV_N	ESCO
4	CH_N2	SOL_K	CH_N2
5	SOL_K	EPCO	CN2
6	EPCO	CH_N2	BLAI
7	CANMX	VPDFR	SOL_K
8	T_BASE	BLAI	SOL_AWC
9	SURLAG	FRGRW2	REVAPMN
10	BLAI	CN2	EPCO

最も感度の高いパラメータは、3流域とも、ALPHA_BF(地下水流出量の決定ファクター)、次いでCH_K2(Main Channel Alluviumの飽和透水係数)であったほか、上位には共通のパラメータが多くみられた。流域の規模や土地利用により、パラメータ感度に相違が生じることも想定されたが、3流域の結果からのみでは明確な違いを読み取ることはできず、他流域への展開を進める中で再度検証してみる価値があると思われる。

表VII-2には、3流域の中でも共通して感度の高かったパラメータについて、感度分析時に設定した値の幅(基本的に各パラメータで設定できる最小値と最大値)と最も高い精度が得られた際のパラメータ値(ベストパラメータ値)を示す。

3流域の感度分析結果のみでは、パラメータ値の妥当性について言及することは難しいが、例えば、設定可能な最小値、最大値に幅のあるCH_K2(最小:-0.01、最大:500)では、感度分析の結果、ベストパラメータが20から80程度に落ちている等、一定の傾向が出ており、今後構築予定の評価モデルのキャリブレーションを効率的に行うために有用な情報が蓄積されたと言える。

表 VII-2 感度分析時のパラメータ設定幅およびベストパラメータ値

感度上位 パラメータ	設定幅		感度分析におけるベストパラメータ値		
	Min	Max	筑後川	矢部川	菊池川
ALPHA_BF	0.01	1.0	0.7245	0.7806	0.0315
CH_K2	-0.01	500	37.4907	80.825	20.8238
CH_N2	-0.01	0.3	0.05522	1.0385	0.28598
SOL_K	r -0.5	r 0.5	r -0.495	r -0.172	r 0.0850
OV_N	0.01	30	8.6571	1.460	16.054
BLAI	0.5	10	1.9725	2.5108	2.5425
ESCO	0.01	1.0	0.0579	0.0414	0.3285
EPCO	0.01	1.0	0.189	0.5727	0.2592
CN2	r -0.1	r 0.1	r -0.0083	r -0.0997	r -0.0877
SOL_AWC	r -1.0	r 1.0	r 0.07	r -0.2167	r -0.0167

※「r」は、パラメータ値を置換え（Replace）ではなく相対変化（Relative）させたもの

1.2.3 流域における豊水年、渇水年別の水収支比較

3 流域における豊水年、渇水年別水収支の相違について検証を行うため、まずは降雨の特性について整理を行った。図 VII-1 は、SWAT モデルによって、気象（雨量）インプットデータより支流域ごとに計算された、モデルシミュレーション期間（2008 年から 2018 年）中の年平均降水量の空間分布を示したものである。

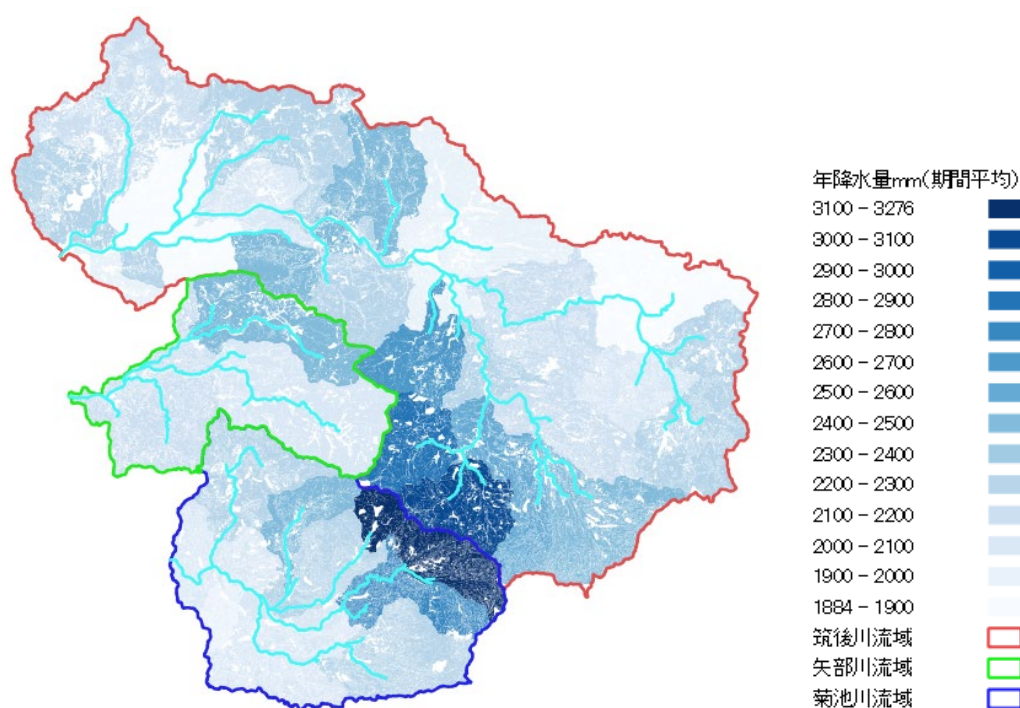


図 VII-1 シミュレーション期間中の年平均降水量（支流域別）の空間分布

これによると、降水量は、筑後川の上流側、南東部と菊池川の上流側、北東部における降水量が年 3,000mm を超えるなど極めて高いことが分かる。

次に、モデルシミュレーション期間における流域別年降水量（流域内の代表的な観測地