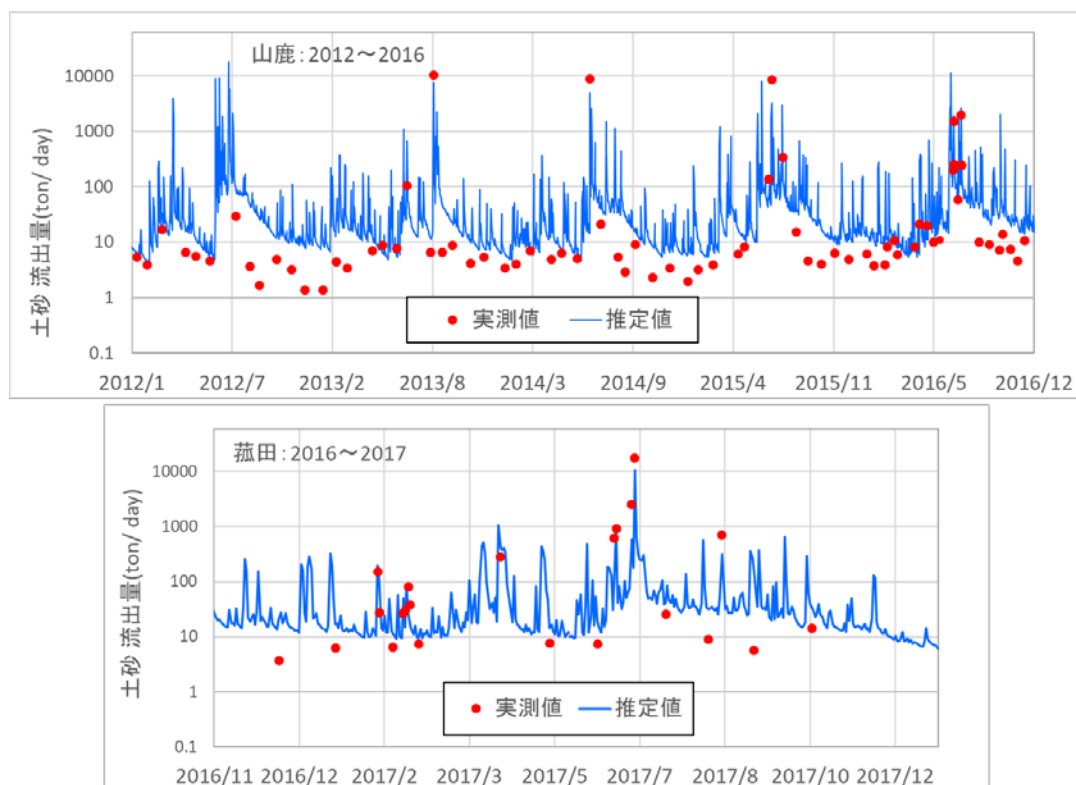


2) 土砂流出量

同様に、土砂流出量の推定も行った。全流域モデルのパラメータを適用した 2010 年代モデルによる、山鹿および菰田観測地点における土砂流出量の推定結果を図Ⅶ-13 に、その推定精度について、RSR、NSE、PBIAS の指標を用いて評価した結果を表Ⅶ-6 に示す。バリデーション用データの入手状況を考慮し、シミュレーション期間は、山鹿観測地点と菰田観測地点で、それぞれ 2012 年 1 月から 2016 年 12 月、2016 年 11 月から 2017 年 10 月とした。



図Ⅶ-13 全流域モデルのパラメータを適用した 2010 年代モデルにおける土砂流出量の推定結果（上：山鹿観測地点、下：菰田観測地点）

表VII-6 2010年代モデルの土砂量推定精度

	2012～2016 (山鹿)	2016～2017 (菰田)
RSR	0.47 (vg)	0.42 (vg)
NSE	0.78 (vg)	0.83 (vg)
PBIAS	27.89 (g)	40.35 (s)

平水時は全体的に過大評価、ピーク時は過小評価の傾向もみられるが、指標による評価では概ね「Very Good」が得られた。

河川流出量、土砂量のいずれも高い精度が得られたため、全流域モデルのパラメータは過去モデルに対しても汎用性があることが確認できた。

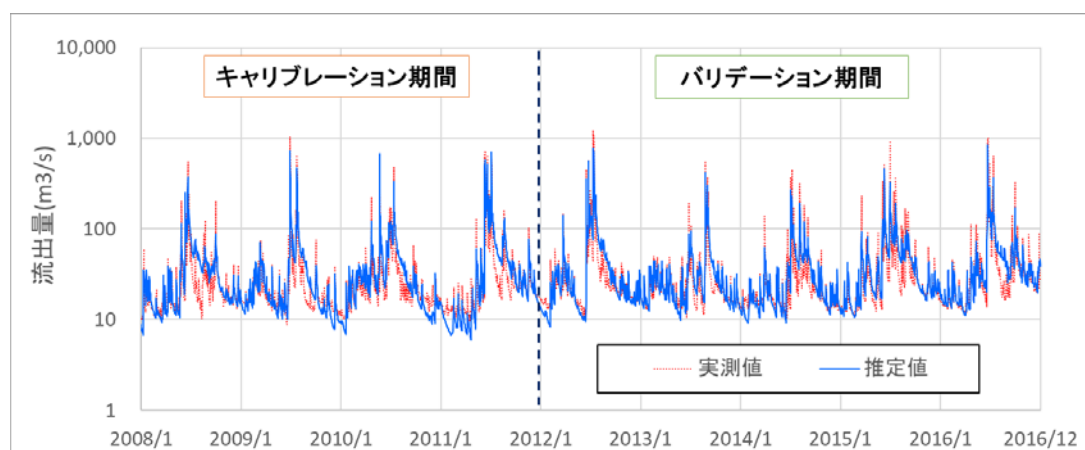
次に、2010年代モデルにおける森林関連パラメータについてキャリブレーションを行い、その推定結果について示す。

(2) 2010年代モデルにおける森林関連パラメータのキャリブレーション

(1) では、全流域モデルで調整され、2010年代モデルに適用されたパラメータの汎用性が確認された。次のステップとして、この時点まで同一の値が設定されている森林関連パラメータについて、森林タイプ毎に最適なパラメータ値に置き換えた上で高い推定精度が保たれるよう、キャリブレーションを実施する必要がある。キャリブレーション対象パラメータは、Ⅶ-1-(3)で検討を行ったものとする。

1) 河川流量

森林関連パラメータのキャリブレーション実施後の2010年代モデルにおける河川流量推定結果を図Ⅶ-14に示す。キャリブレーション期間は2008年1月から2011年12月、バリデーション期間は2012年1月から2016年12月までとした。



図Ⅶ-14 2010年代モデルにおける河川流出量推定結果（キャリブレーション後）

また、RSR、NSE、PBIASの評価指標を用いた河川流量の推定精度を表Ⅶ-7に示す。

表Ⅶ-7 2010年代モデルの流量推定精度（キャリブレーション後）

	キャリブレーション 期間	バリデーション 期間
RSR	0.44 (vg)	0.48 (vg)
NSE	0.81 (vg)	0.77 (vg)
PBIAS	-9.87 (g)	-2.96 (vg)

キャリブレーション期間の PBIAS による評価で「Good」が一つあった他は、すべて「Very Good」となり、全流域モデルのパラメータ適用直後の結果と同様、高い精度が得られた。

2) 土砂流出量

キャリブレーション後の 2010 年代モデルによる土砂量推定結果を図 VII-15 に、土砂量の実測値と推定値を 1 対 1 ライン上に表し、比較したグラフを図 VII-16 に示す。

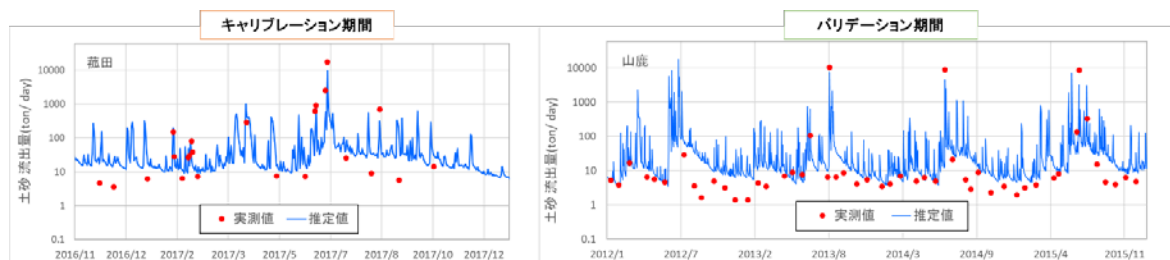


図 VII-15 2010 年代モデルにおける土砂量推定結果（キャリブレーション後）

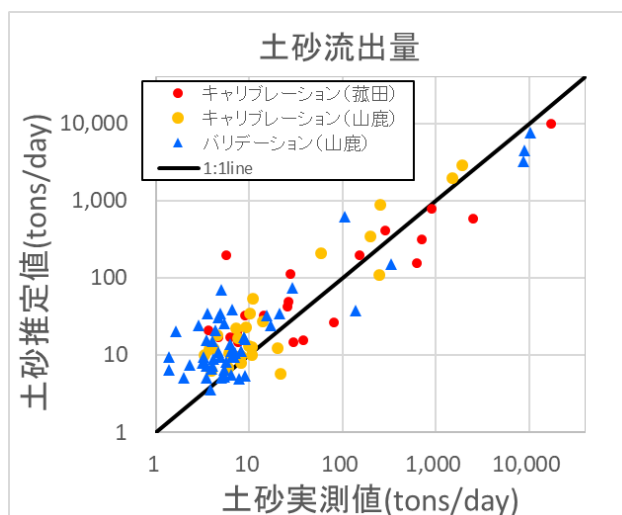


図 VII-16 2010 年代モデルにおける土砂量実測値と推定値の比較（1 対 1 ライン）

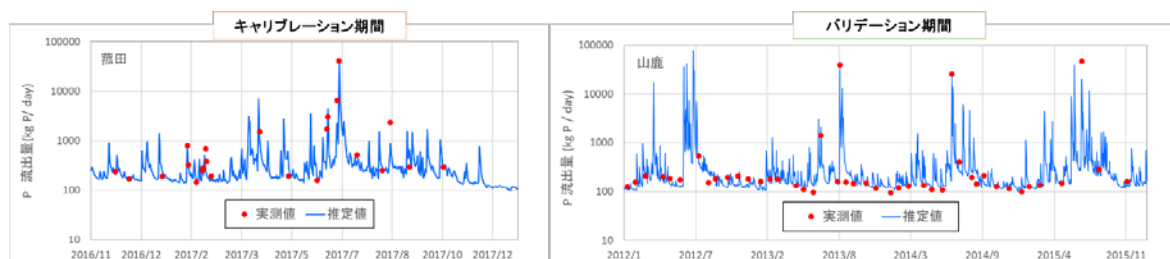
図 VII-16 の土砂量の実測値と推定値の比較では、平水時の推定値が過大となっている傾向がみられ、表 VII-8 の PBIAS の評価にも表れているが、全体的には「Satisfactory」から「Very Good」の範囲に収まっており、一定程度の精度が保たれたといえる。

表 VII-8 2010 年代モデルの土砂量推定精度（キャリブレーション後）

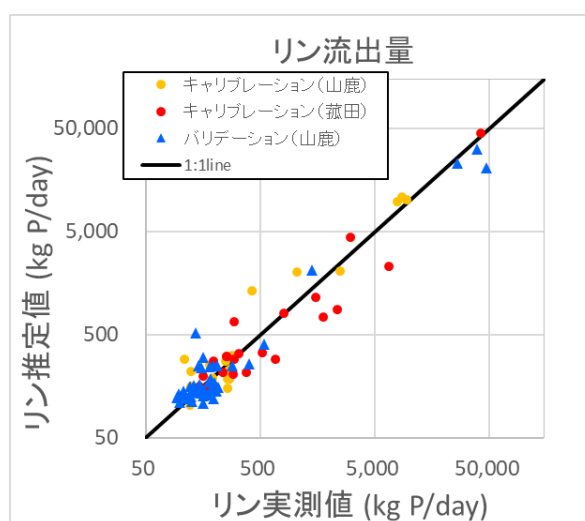
	キャリブレーション 期間		バリデー ション期間
	菰田	山鹿	山鹿
RSR	0.46 (vg)	0.54 (g)	0.48 (vg)
NSE	0.79 (vg)	0.71 (g)	0.77 (vg)
PBIAS	43.44 (s)	-53.42 (s)	41.66 (s)

3) リン流出量

キャリブレーション後の 2010 年代モデルによるリン流出量推定結果を図VII-17 に、リン流出量の実測値と推定値を 1 対 1 ライン上に表し、比較したグラフを図VII-18 に示す。



図VII-17 2010 年代モデルにおけるリン流出量推定結果（キャリブレーション後）



図VII-18 2010 年代モデルにおけるリン流出量実測値と推定値の比較（1 対 1 ライン）

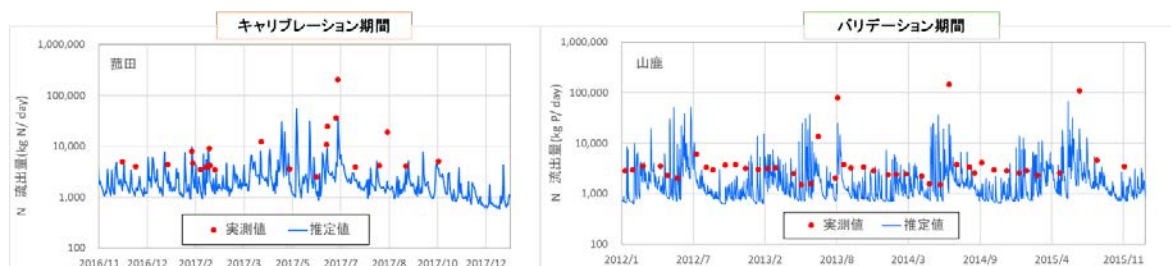
図VII-18 の通り、リン流出量については、実測値と推定値が 1 対 1 ラインに限りなく近い位置にプロットされているほか、指標による評価も概ね「Very Good」であるなど、高い精度で推定された（表VII-9）。

表VII-9 2010 年代モデルのリン流出量推定精度（キャリブレーション後）

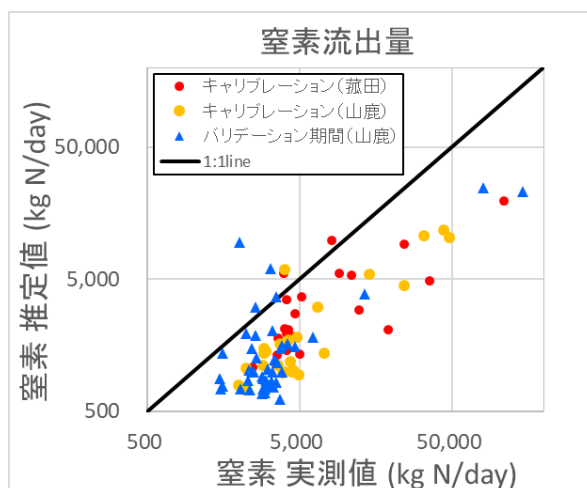
	キャリブレーション 期間		バリデーション 期間
	菰田	山鹿	山鹿
RSR	0.14 (vg)	0.23 (vg)	0.43 (vg)
NSE	0.98 (vg)	0.95 (vg)	0.81 (s)
PBIAS	4.76 (vg)	18.86 (vg)	30.34 (g)

4) 窒素流出量

キャリブレーション後の 2010 年代モデルによる窒素流出量推定結果を図VII-19 に、窒素流出量の実測値と推定値を 1 対 1 ライン上に表し、比較したグラフを図VII-20 に示す。



図VII-19 2010 年代モデルにおける窒素流出量推定結果（キャリブレーション後）



図VII-20 2010 年代モデルにおける窒素流出量実測値と推定値の比較（1 対 1 ライン）

図VII-20 の窒素流出量の実測値と推定値の比較では、平水時から出水時に渡って、全体的に値が 1 対 1 ラインよりも下方、つまり過小推計していることが分かる。指標による評価においても「Unsatisfactory」が大半であった（表VII-10）。

表VII-10 2010 年代モデルの窒素量推定精度（キャリブレーション後）

	キャリブレーション 期間		バリデーション 期間
	菰田	山鹿	山鹿
RSR	0.87 (us)	0.93(us)	0.87(us)
NSE	0.24(us)	0.14(us)	0.25 (s)
PBIAS	70.90 (us)	69.78(s)	71.57(us)

2010 年代モデルは、窒素流出量の推定には改良の余地があるものの、河川、土砂、リンの各流出量については、多くが「Good」から「VeryGood」の範囲に収まるなど、一定以上の推定精度が得られた。このため、2010 年代モデルにおける森林関連パラメータの値は妥当な範囲で設定されたと考えられる。本作業により、バリデートされた 2010 年代モデルパラメータの一覧は、巻末資料に含める。

（3）1970 年代モデルにおける森林関連パラメータのバリデーション

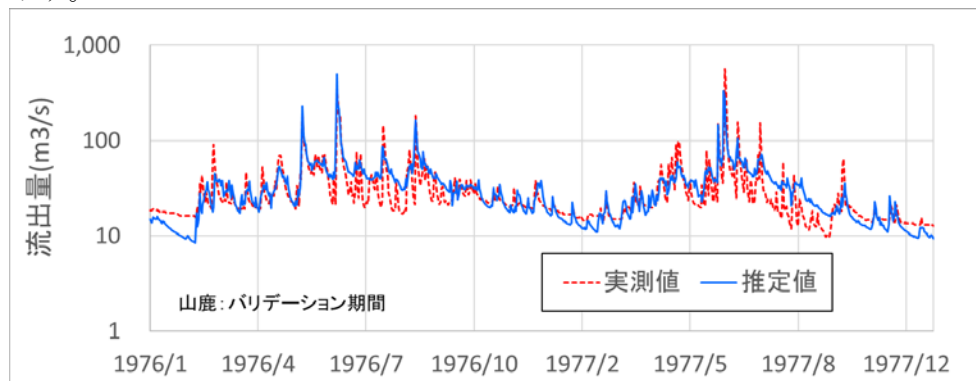
次に、2010 年代モデルで調整した森林関連パラメータを含むすべてのパラメータについて、土地利用の状態や気象条件に変化があっても有効かどうかを検証するため、全パラメータをそのまま 1970 年代モデルへ適用した。

1970 年代の入手可能な実測データの事情により、1970 年代モデルのバリデーション

は、山鹿観測地点における河川流量についてのみ行った。バリデーション期間は 1976 年 1 月～1977 年 12 月の 2 年間とした。

1) 河川流量

2010 年代モデルのパラメータ適用後の 1970 年代モデルにおける流量推定結果を図 VII-21 に示す。



図VII-21 1970 年代モデルにおける河川流出量推定結果

全体的な流出パターンは再現されたが、1976 年、1977 年ともに夏季期間に推定値がやや過大となっている。モデルの計算方法が一定であるのに対し、一部期間においてのみ実測値と推定値が乖離する要因として、1970 年代の気象データ、あるいは流量実測値データの精度に問題があった点が可能性として考えられるが、確認手段はないことから詳細は明らかにしていない。

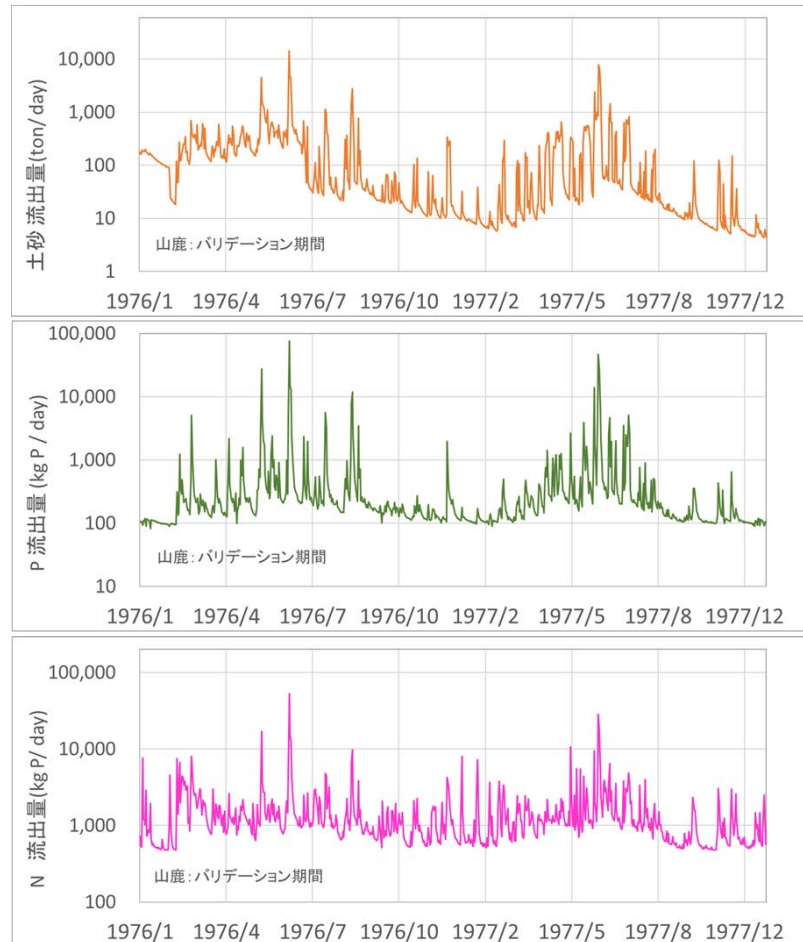
RSR、NSE、PBIAS の評価指標は、「Satisfactory」から「VeryGood」の範囲に収まり、一定の推定精度が得られた（表VII-10）。

表VII-11 1970 年代モデルの河川流量推定精度

バリデーション期間（山鹿）	
RSR	0.68 (s)
NSE	0.53 (s)
PBIAS	-6.99 (vg)

2) 土砂、リン、窒素流出量

土砂、リン、窒素の流出量については、バリデーション用の実測値がないため、推定結果のみを図VII-22 に示す。



図VII-22 1970年代モデルにおける流量推定結果
(上：土砂流出量、中：リン流出量、下：窒素流出量)

(4) 2010年代モデルと1970年代モデルにおける推定結果比較

(1) から (3) の解析を通じて、森林関連パラメータを含む、キャリブレーション対象としたすべてのパラメータの汎用性が確認され、2010年代モデルと1970年代モデルにおける有効性が確認された。

窒素関連のパラメータ調整に一部、改善の余地を残すものもあるものの、全体的に一定以上の精度が得られたことから、ここでは2010年代モデルと1970年代モデルのシミュレーション結果を「正」と考え、以下に2010年代モデルと1970年代モデルの結果について比較し、森林の変化が流出に及ぼす影響について考察を行う。

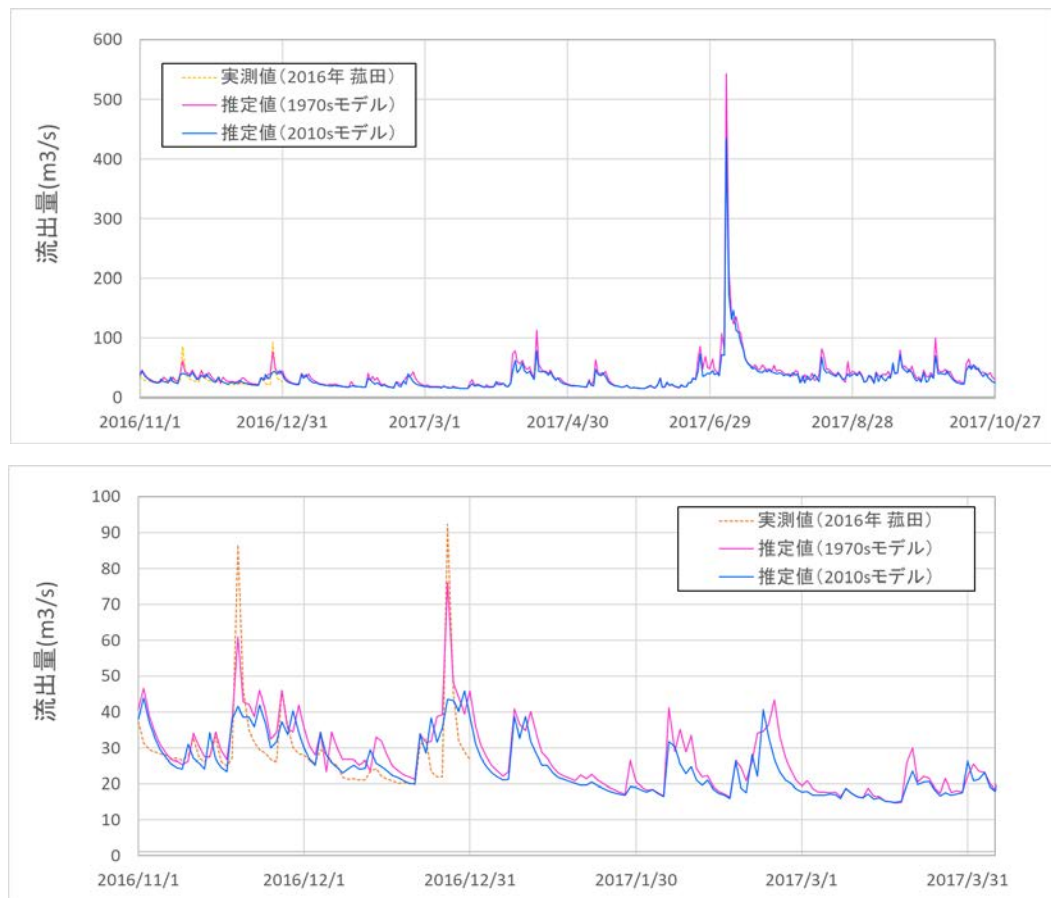
なお、(3) で実施した1970年代モデルのバリデーションでは、1976年と1977年の気象データを使用した但、2010年代モデルで使用した気象条件と異なると、結果を単純に比較することができなくなることから、次の解析にあたっては、1970年代モデルのパラメータはそのままに、2010年代モデルと同一の気象データを適用し直すこととした。

また、本事業の過年度調査において収集した土砂、栄養塩の実測値と合わせて参照できるようにするため、本解析の比較期間は2016年11月から2017年10月までの1年間とした。

1) 河川流量

図VII-23 (上) は、2017年7月北部豪雨による大出水時の河川流量推定結果を含めたグラフ、図VII-23 (下) は、期間を前半5か月間に絞り込み、平水時の推定結果をより見やすくしたグラフである。

参考として、同期間の流量実測値をオレンジ色の点線で追加した。



図Ⅶ-23 1970年代モデルと2010年代モデルの河川流量の推定結果比較
(上：2017年出水時を含む、下：平水時に着目)

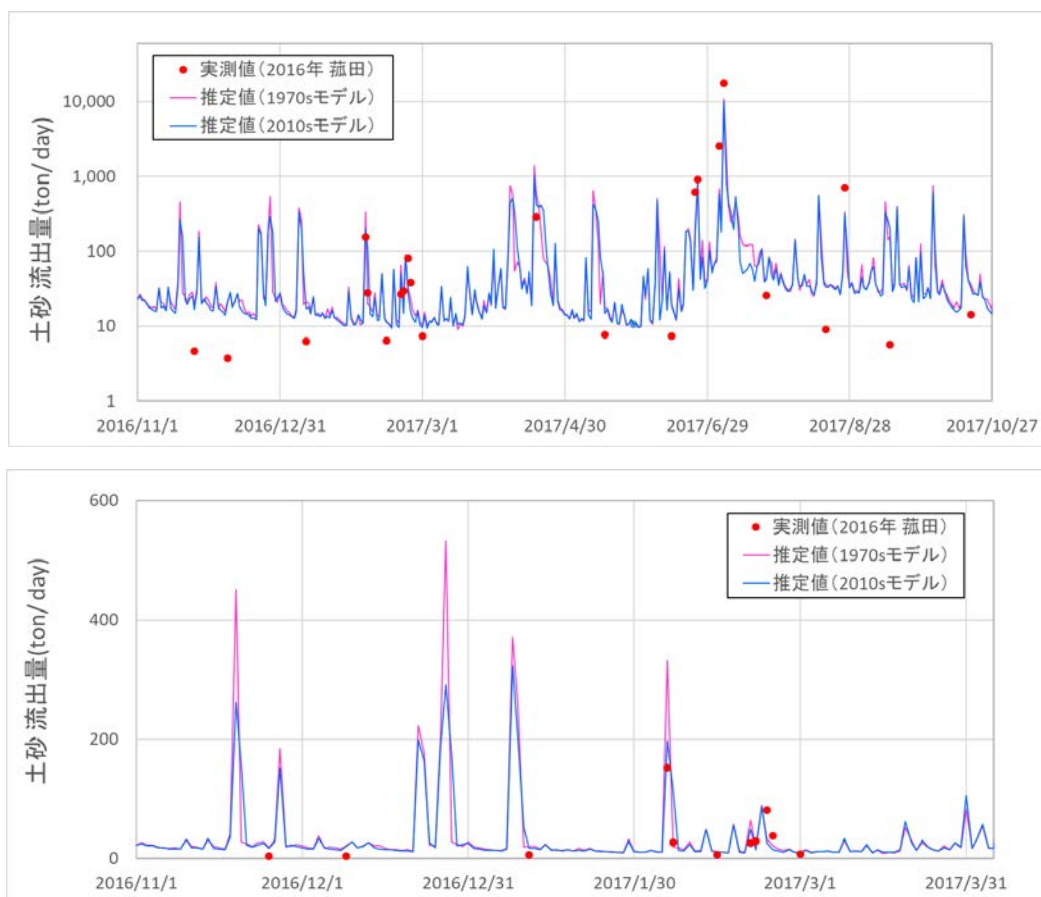
推定結果をモデル間で比較すると、1970年代モデルによる河川流量の推定値の方が全体的に若干高く、同一の気象条件下においては、1970年代の菊池川流域の土地利用形態の方が流出しやすい傾向が伺えるが、流量 $50\text{m}^3/\text{日}$ 以下では、極端に大きな相違は見られなかった。一方で、豪雨時を含む出水時に着目してみると、1970年代の方が2010年代よりも多く流出しており、ピークがはっきりしている。

図Ⅶ-9で示した通り、土地利用の形態を「森林・非森林」に大別すると、その面積割合は、1970年代、2010年代ともに55%、45%となり、年代間における変化はほとんどない。しかしながら、面積に変化がなくとも、森林地では森林の成長や増減にともなう上物の変化があり、また、森林以外の土地利用について細かくみると、1970年代では「水田」、2010年代では「その他用地」の面積がやや多いなど、内訳は微妙に変化しており、こうした違いが流量に表れていると思われる。

2010年代モデルでは、ピーク流量が抑えられ、1970年代よりも流出抑制機能が高まっていることが示唆される点については、1970年代においては、初期や若齢の割合が多かった森林が成長し、2010年代で成熟林が優占したことが主な要因と考えられる。ただし、本分析は、菊池川流域全体を対象としており、森林タイプの違いや成長に因る部分の河川流量への影響を確認することが困難であるため、森林域からの流出については、本項の5)でさらに細かく検証を行う。

2) 土砂流出量

図Ⅶ-24（上）は、2017年7月北部豪雨による大出水時の土砂量推定結果を含めた、Y軸を対数表示としたグラフ、図Ⅶ-24（下）は、期間を前半5か月間に絞り、平水時の土砂量推定結果をより見やすくしたグラフである。

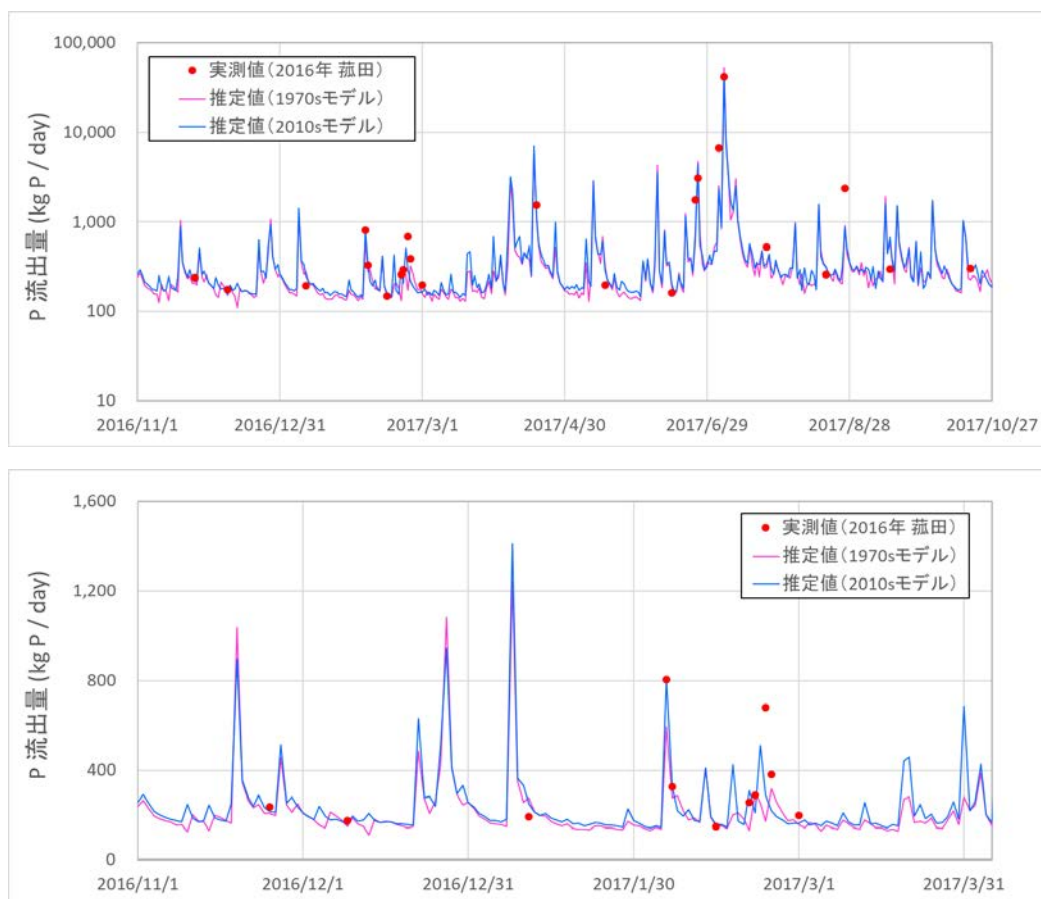


図Ⅶ-23 1970年代モデルと2010年代モデルの土砂量の推定結果比較
（上：2017年出水時を含む、下：平水時に着目）

図Ⅶ-24に示される通り、菊池川流域全体における土砂量は、1970年代モデル、2010年代モデルともに、平水時はほぼ同じ推定値となっており、土地利用変化の影響はほぼみられない。ただし、ピーク時の流量は2010年代の方が抑えられており、河川流量と同様、成熟林の増加が要因となっている可能性が示唆される。

3) リン流出量

図Ⅶ-25（上）は、2017年7月北部豪雨による大出水時のリン流出量推定結果を含めた、Y軸を対数表示としたグラフ、図Ⅶ-25（下）は、期間を前半5か月間に絞り込み、平水時のリン流出量推定結果をより見やすくしたグラフである。

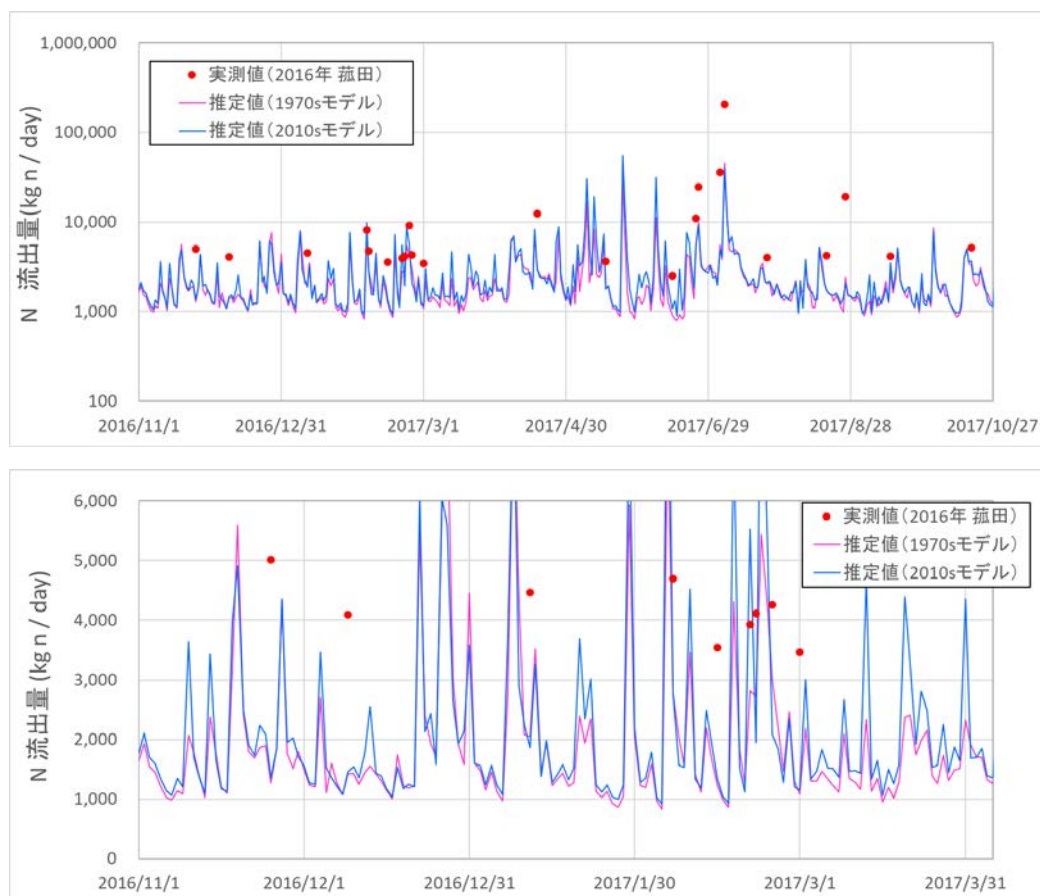


図Ⅶ-24 1970年代モデルと2010年代モデルの土砂量の推定結果比較
(上：2017年出水時を含む、下：平水時に着目)

菊池川流域全体におけるリン流出量は、平水時、ピーク時ともに、1970年代モデルと2010年代モデルの結果に極端に大きな変化はなかった。大スケールでは土地利用の変化による影響は少ないことが示唆されるが、森林域での挙動を確認する必要があるため、本項の5)でさらに検証を行う。

4) 窒素流出量

図Ⅶ-26 (上) は、2017年7月北部豪雨による大出水時の窒素流出量推定結果を含めた、Y軸を対数表示としたグラフ、図Ⅶ-26 (下) は、期間を前半5か月間に絞り、平水時の窒素流出量推定結果をより見やすくしたグラフである。



図Ⅶ-25：1970年代モデルと2010年代モデルの土砂量の推定結果比較
(上：2017年出水時を含む、下：平水時に着目)

窒素が出水時の影響をほとんど受けないことは過年度調査においても明らかにされていたが、本分析においても、1970年代、2010年代ともに、出水に伴って窒素流出量が極端に増加することはなく、土砂やリンのような突出したピークも現れず、平時からややばらつきをもって流出する傾向がみられた。

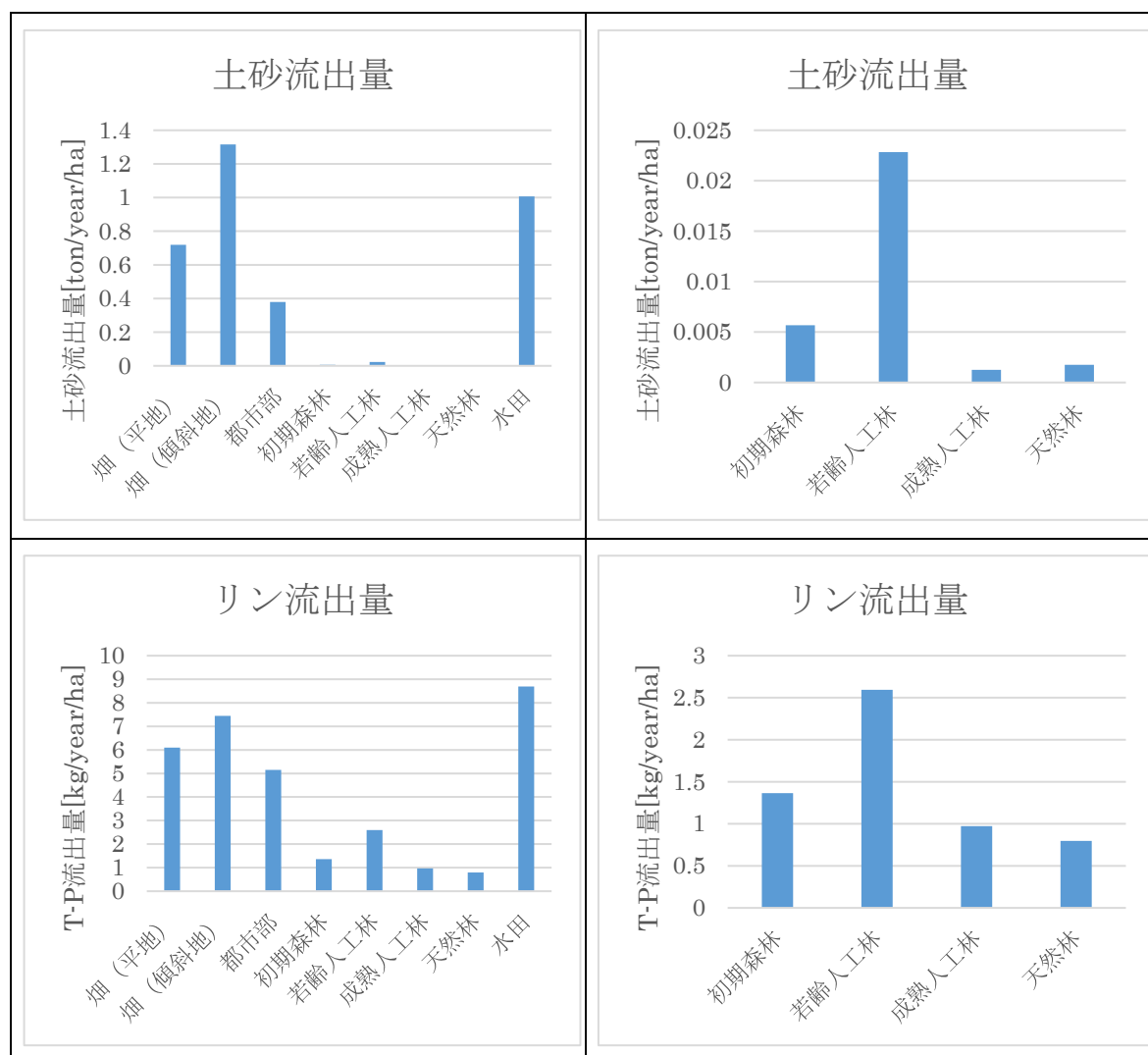
5) 土地利用別比較

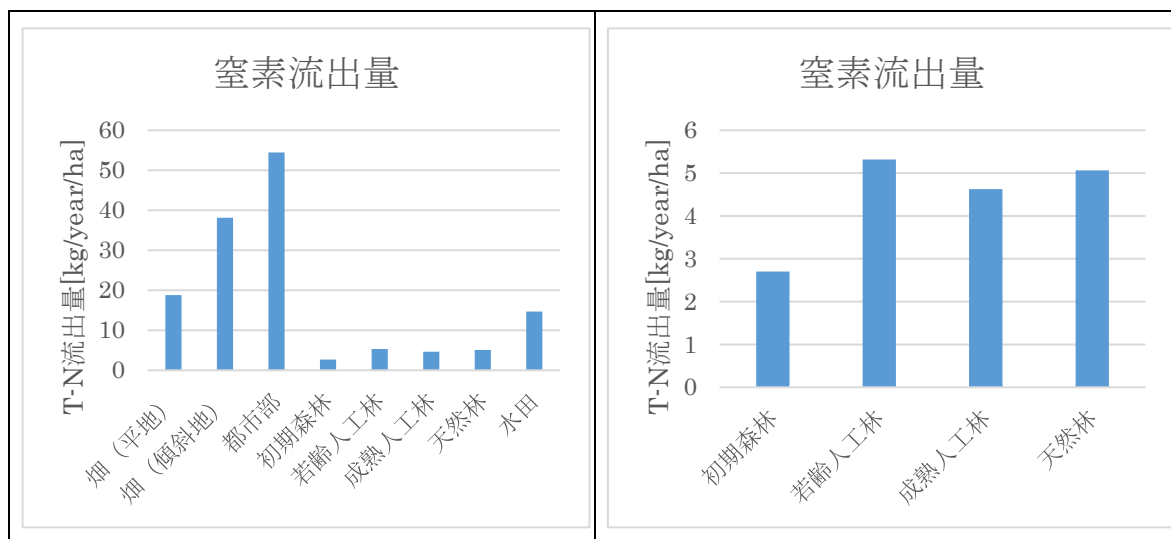
図Ⅶ-26 に、2010 年代モデルにおける、主要土地利用別および森林区分別の土砂・栄養塩流出量を整理した。

土砂流出量では、森林からの流出は概してかなり少なく、ほとんどが他の土地利用からの流出であることがわかる。森林区分別では、若齢人工林からの流出が最も多い。

リン流出量では、土砂と同じく森林からの流出は少ない。森林区分別では、若齢人工林および初期森林からの流出が比較的多い。

窒素流出量も同様に森林からの流出が少ないが、森林区分別では初期森林からの流出が少なく、他の区分では概ね同程度の流出となっている。





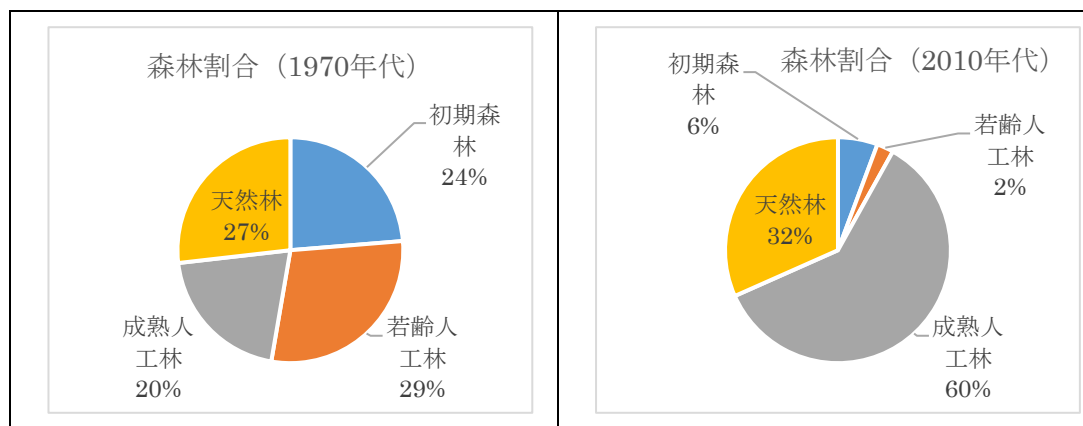
図VII-26 2010年代モデルにおける土地利用別流出量（左：主要土地利用別、右：森林区分別）

図VII-27 に各年代における森林区分の面積割合を示した。また、各森林区分の面積に応じて流出量を補正し、森林全体として再集計した時の、森林区分別の土砂・栄養塩流出割合を図VII-28 に示した。もし森林区分別に流出の傾向が変わらなければ、流出量の割合も各森林区分の面積に応じた割合となるはずである。

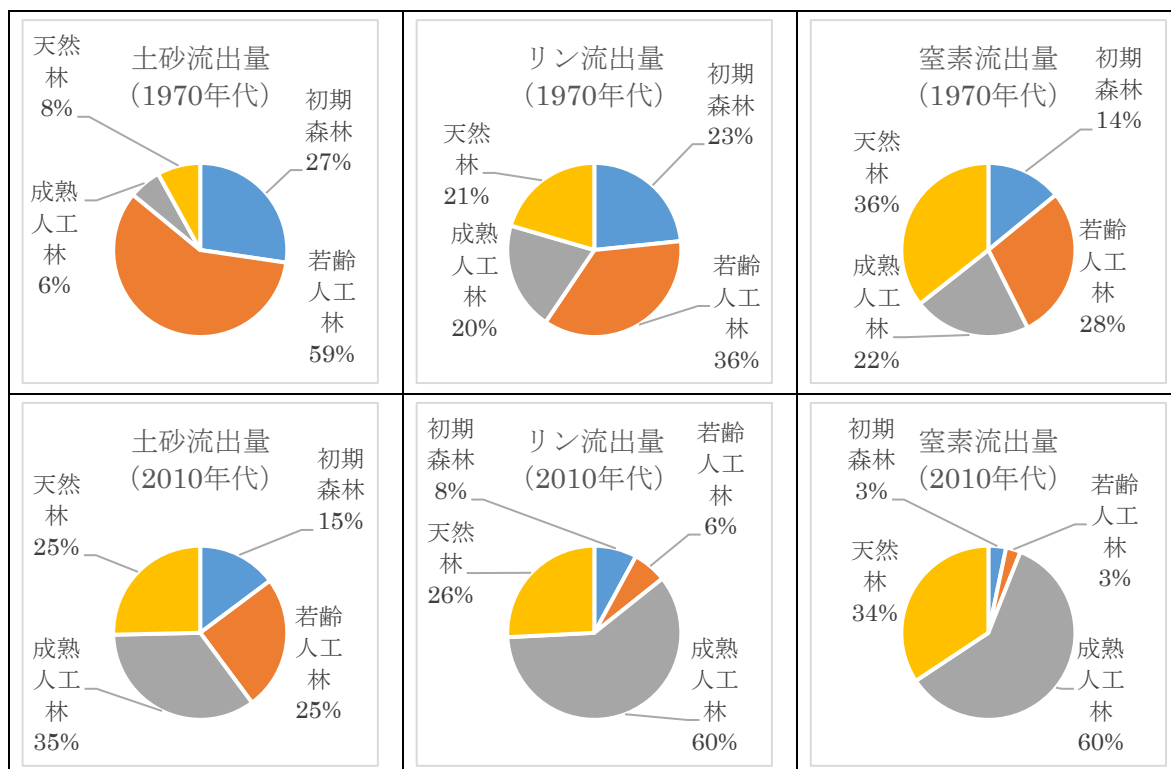
土砂流出量は、1970年代、2010年代ともに森林区分別の流出の傾向が面積割合とは大きく異なっており、面積割合と比べ初期森林・若齢人工林からの流出割合が増えている。このことから、初期・若齢人工林からは土砂が流出しやすい特性があり、面積割合以上の土砂が流出したということがわかる。これは上記の図VII-26 で得られた結果と整合する。

リン流出量では概ね森林区分別の面積割合に応じているが、若齢人工林からの流出割合がやや高い結果となった。

窒素流出量では、リンと同様概ね森林区分別の面積割合に応じているが、初期森林からの流出が面積割合よりもやや少ない割合となっている。



図VII-27 1970年代モデル・2010年代モデルにおける森林区分の面積割合



図VII-28 1970年代モデル・2010年代モデルにおける土砂・リン・窒素流出量の割合

表VII-11には、森林区分別の結果を、面積に応じて補正し、森林全体として集計した時の流出量と他の土地利用とを比較した。

土地利用別の面積は1970年代と2010年代で大きな違いはない。森林からの流量は、1970年代では2010年代よりもやや少なく、土砂流出量は1970年代の方がやや多い。リンの森林からの流出量は、1970年代の方がやや多く、窒素は同じ量となった。

表VII-11 1970年代モデル・2010年代モデルにおける土地利用別のhaあたり流出量

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]	
	1970	2010	1970	2010	1970	2010	1970	2010	1970	2010
畑（平地）	114.0	95.1	932	930	0.69	0.72	5.85	6.10	17.9	18.8
畑（傾斜地）	20.3	19.3	1326	1291	1.43	1.32	7.84	7.44	38.5	38.1
森林	420.4	422.0	1192	1217	0.007	0.002	1.07	0.98	4.7	4.7
水田	137.0	145.1	1077	1069	1.09	1.01	8.58	8.69	14.2	14.7
全体	760.0	759.6	1112	1145	0.40	0.35	3.76	3.66	11.6	14.0

今回比較した2010年代モデルと1970年代モデルとは、インプットするデータのうち土地利用のみが異なっている。2010年代と1970年代で土地利用別の面積には大きな違いがなく、森林区分の割合が大きく変わっていることを考慮すると、1970年代では初期・若齢人工林が多い状況から、2010年代にかけて成熟林が多くなり、森林の成長の影響が現れていると考えられる。

図VII-26および図VII-28で示したように、初期・若齢人工林では土砂流出が多く、成熟人工林・天然林では流出が少ないという結果と照らし合わせると、森林が成長すると、土砂の流出を抑制する働きが強くなる、と解釈できる。

また、土砂に比べると影響は明瞭でないが、リンでも同様に成長により流出が抑えられ、窒素では成長による流出量への影響は小さい、と考えられる。

ただし、土地利用が異なると HRU も異なってくるため、他の土地利用でも微妙な変化が生じている可能性のあることに留意が必要である。

3. 過去モデルを用いたシナリオ解析

前項までに、2010 年代モデルを元に森林区分ごとにキャリブレーションを実施した結果、一定以上の精度を保ちつつ森林区分ごとの違いを反映することができ、バリデーションとして 1970 年代の流量も一定の精度で再現できていることがわかった。

森林区分ごとに反映させたパラメータが適切かどうかは今後も検討していく必要があるが、現時点での成果を活用すると、試行的に森林区分ごとに条件を変えて様々なシナリオ解析を実施することが可能である。

ここでは、解析可能なシナリオの 1 つの例として、「成熟針葉樹林（FRCA）の一部は間伐遅れのため下層植生が発達していない」、としたシナリオで従来の結果と比較し、結果にどのような違いが出るか検討した。

【方法】

具体的なシナリオの設定として、急傾斜地の森林は間伐が遅れやすい、と仮定し、傾斜 20 度以上の成熟針葉樹林（FRCA）を対象に、USLE_C（土砂流出における植生の影響に関するパラメータ）の値を、間伐されていないと想定されている若齢針葉樹林（FRCY）と同じ値に設定することとした（表Ⅶ-12）。

その他のパラメータは同じとして、2010 年代モデルをベースにシミュレーションを行った。

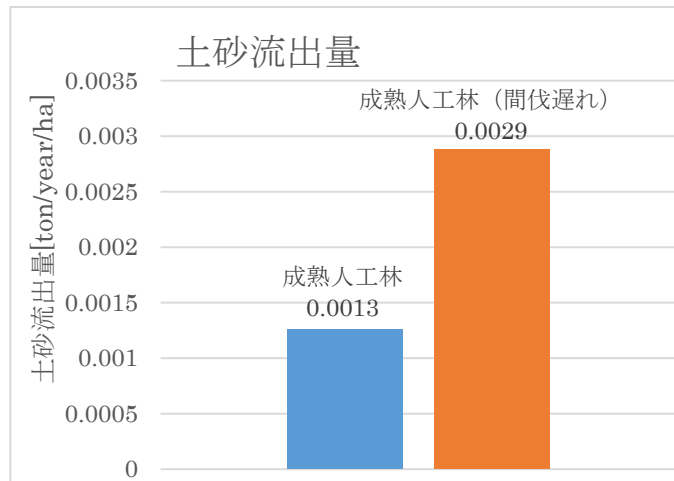
表Ⅶ-12 成熟林間伐遅れシナリオにおける USLE_C の設定値

森林タイプ		USLE_C
初期		0.0145
若齢（針葉樹林）		0.00892
成熟（針葉樹林）	傾斜 0－20 度	0.00458
	傾斜 20 度以上	0.00892
成熟（広葉樹林）		0.00782

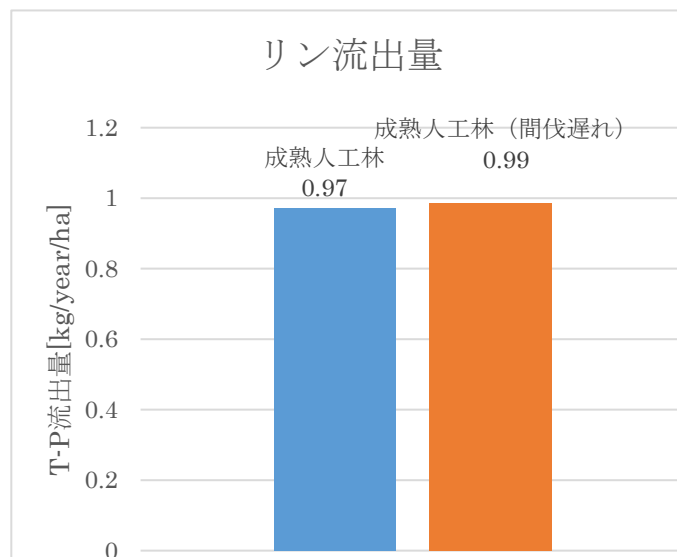
【結果】

今回のシナリオでパラメータ変更の対象となる、傾斜 20 度以上で土地利用が FRCA（成熟針葉樹林）である HRU は 48 個、面積は 36.74km²（FRCA 全体の 28%）であった。

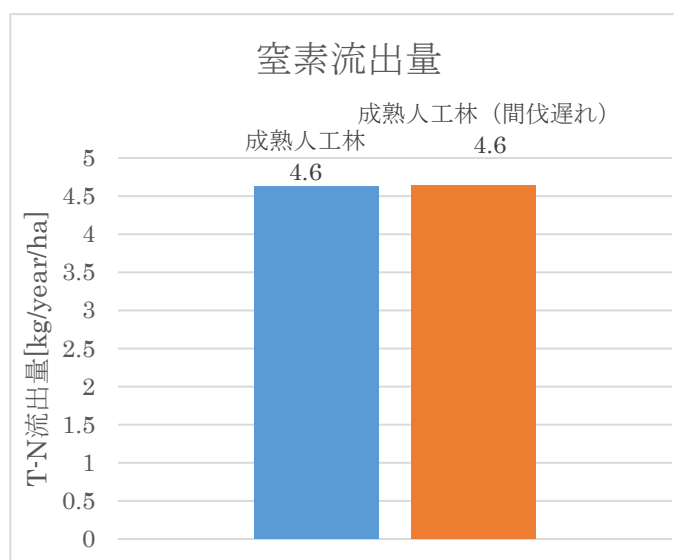
FRCA からの土砂、リン、窒素流出量をシナリオ解析前後で比較すると、図Ⅶ-29～図Ⅶ-31 のようになった。土砂流出量は、間伐遅れシナリオでは 2.3 倍となった。リン流出量、窒素流出量にはほぼ影響がなかった。他の森林区分の土砂流出量と比較した図Ⅶ-32 を見ると、今回の USLE_C 値の変更による差はかなり小さいことがわかる。流域全体の土砂流出量は、従来は 0.3538 [ton/year/ha]であるのに対し、間伐遅れシナリオでは 0.3544 [ton/year/ha]であり、間伐遅れによってやや土砂流出量が増加したものの、全体に与える影響はほとんどないと言える。



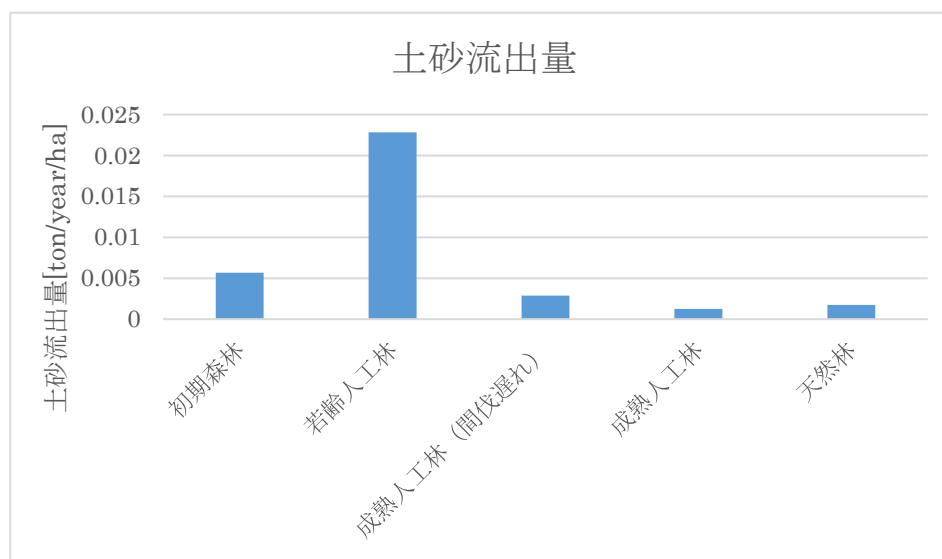
図Ⅶ-29 シナリオ解析による成熟人工林からの土砂流出量の比較（左：従来シナリオ、右：間伐遅れシナリオ）



図Ⅶ-30 シナリオ解析による成熟人工林からのリン流出量の比較（左：従来シナリオ、右：間伐遅れシナリオ）



図Ⅶ-31 シナリオ解析による成熟人工林からの窒素流出量の比較（左：従来シナリオ、右：間伐遅れシナリオ）



図Ⅶ-32 森林区分ごとの土砂流出量（シナリオ解析結果を含む）

【シナリオ解析の課題】

今回のシナリオ解析は、条件を非常に単純化しており、変更するパラメータも USLE_C のみとした。実際には、適切な成熟針葉樹林と間伐遅れの林分とで USLE_C 以外に大きく異なるパラメータがある可能性があるため、結果の解釈や活用の仕方には注意が必要である。

また、今回の解析は試みに行うものであったため USLE_C 値はキャリブレーション結果から設定したものであり、根拠のある数字とまでは言いがたいため、実際にシナリオ解析を活用していく段階では、既往文献等から根拠のある数字を引用してシナリオを設定していく必要がある。

さらに、間伐遅れの林分がどの辺りにどれくらい存在するかについても具体的に検討し、現実的な設定となるよう留意する必要がある。

4. まとめと今後の課題

森林タイプ別にパラメータ調整を行ったモデルを過去モデルへ適用した結果、水流出量において「Good～Very Good」の高い精度で再現された。このことから、森林タイプ別に設定したパラメータ値について、一定程度の妥当性が確認できたことから、シナリオ解析の基盤が構築できたと言える。

（流出量について）

土地利用別の比較では、森林の成長に伴い、初期・若齢人工林から成熟人工林・天然林が増加すると、土砂流出が抑制される効果が示唆された。

シナリオ解析では、条件の変更（森林の下層植生の状況）が物質流出に及ぼす影響の度合いを示すことができた。

上記の知見は、今後、SWAT モデルを他流域で適用する際の効率化やシナリオ解析結果の信頼性の確保に寄与するものである。

ただし、今回の解析で得られた結果はあくまでも現段階まで調整を行った全流域モデルを元にした過去モデルによる「推定量」であり、今後の設定の調整によっては変動する可能性がある。

今回は2010年代の土地利用をベースにパラメータのキャリブレーションを行ったが、2010年代は初期・若齢人工林が少ないということもあり、パラメータ設定には不確実性が残る。今後も引き続き、感度の高いパラメータやパラメータの適切な値の範囲などについての検証、および既往文献による根拠のあるパラメータ値の設定等が必要である。

また、土地利用別の比較の際には、降雨量等の気象条件を揃えるだけでなく、傾斜等の地形的な条件を揃えて比較することも重要と思われる。森林の立地条件によって生育する樹種や林分の状態も変化すると考えられることから、森林をさらに「傾斜地」、「緩傾斜地」で分けて設定することも一案であるが、HRUが増大してしまうことおよび根拠のあるパラメータ設定が可能かどうかを考慮する必要がある。

来年度以降に実施を検討するシナリオとして、「老齢林」に関するシナリオや、シミュレーションの対象期間の途中で施業を実施した場合のシナリオが挙げられている。

老齢林では、成長が鈍化しており、特に窒素吸収量はほぼ平衡状態となっているため、他の発達段階の森林と比べると窒素流出量が多いと考えられる。このことから、一定割合の成熟人工林を老齢林と仮定し、そこからの各種流出量を比較することは興味深い結果となると考えられる。

また、森林の施業が各種流出量に与える影響は重要であり、検討の意義が大きいですが、施業に伴ってどのパラメータ（下層植生だけでなく、樹冠貯留量や窒素吸収量など）がどの程度変化し、どれくらい持続するかについて不明な点が多いため、慎重な検討が必要になる。