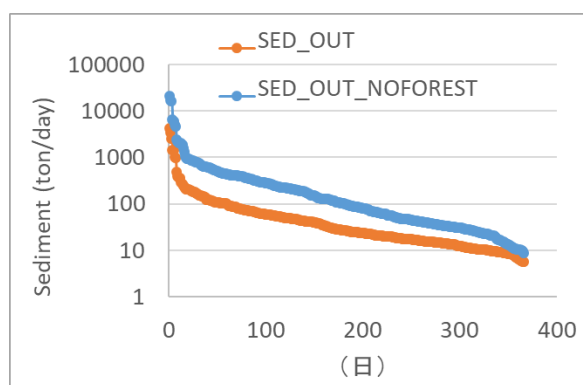


VII. 過去モデルの構築と推定結果

1. 過去モデルの構築

(1) 過去モデルの概要と解析の流れ

平成 30（2018）年度調査においては、森林から他の土地利用（以降、非森林地）に転換した場合の土砂量の変化についてシナリオ解析を行った。図VII-1 のグラフは、シナリオのシミュレーション結果のうち、2008 年の 365 日を土砂流出量（日単位）の多い順に X 軸に並べた、土砂流出量の流況曲線である。青線で示される非森林地に比べ、オレンジ線で示される森林地では流出が少なく、特に流出量の多い日は少ない日と比べて、より流出を抑制していることが分かる。

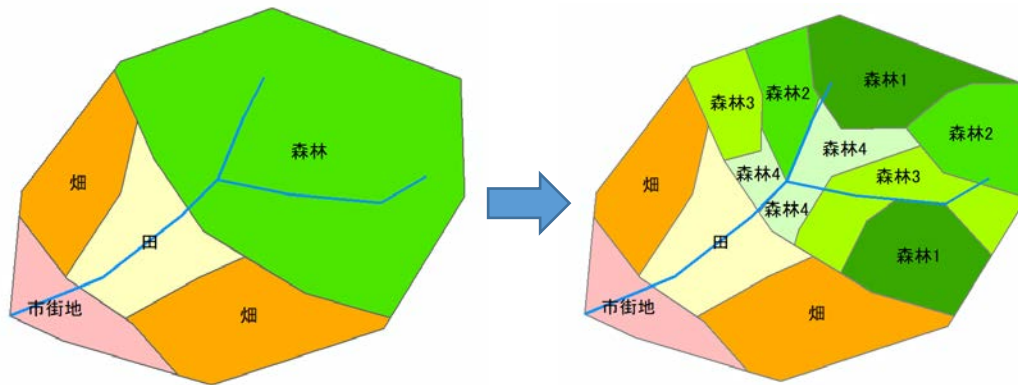


図VII-1 シナリオ解析結果（H30 年度）：森林から他の土地利用に転換した場合の土砂量の変化

このように、平成 30（2018）年度調査においては、森林の水源かん養機能、流出平準化機能が定量的に示されたものの、これは森林と他の土地利用を比較した場合のシナリオであり、森林そのものの成長や増減にともなう変化が流出に及ぼす影響については検証が十分とは言えなかった。そこで、今年度は過去モデルと現在モデルのシミュレーション結果を比較することにより、「土地利用と流出量」の関係だけでなく、「森林の時系列的な変化と流出量」の関係についても明らかにすることとした。

具体的には、前年度までに構築した菊池川全流域モデルを 2010 年代（現在）モデルとし、その時点より約 40 年遡る 1970 年代（過去）モデルを追加で構築し、シミュレーション結果より、森林の成長や増減にともなう変化が流出に及ぼす影響について比較・検証することとした。

各モデルにおいて、森林の成長による変化を細かく捉える必要があるため、2010 年代モデル、1970 年代モデルともに、土地利用タイプが「森林」となっている土地については、樹種や林齢に基づき、細分化することとした。「森林」細分化のイメージを図VII-2 に示す。

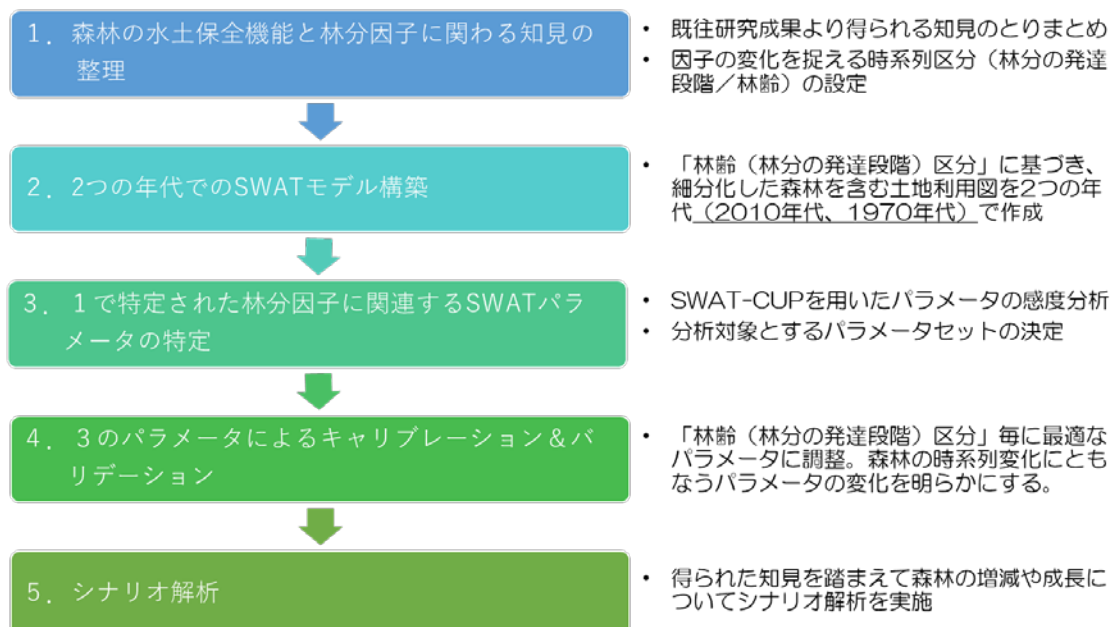


全流域モデルの土地利用図（H30 年度作成済み） 1970 年代、2010 年代モデル用土地利用図

図VII-2 土地利用タイプ「森林」の細分化イメージ

この過去モデル解析を通して、森林の成長や増減の変化が流出に及ぼす影響を定量的に示すことにより、有明海を含む閉鎖性海域への負の影響を回避・軽減させるための適切な森林管理・計画立案などに有効活用されることが期待される。

図VII-3 には、過去モデル解析全体の流れを示す。手順 1～4 に従い、2010 年代および 1970 年代モデルを構築し、最適なパラメータ値を設定後、当該モデルを使用したシミュレーションにより、手順 5 のシナリオ解析を行う。



図VII-3 過去モデル解析の流れ

(2) 過去モデルの構築方法

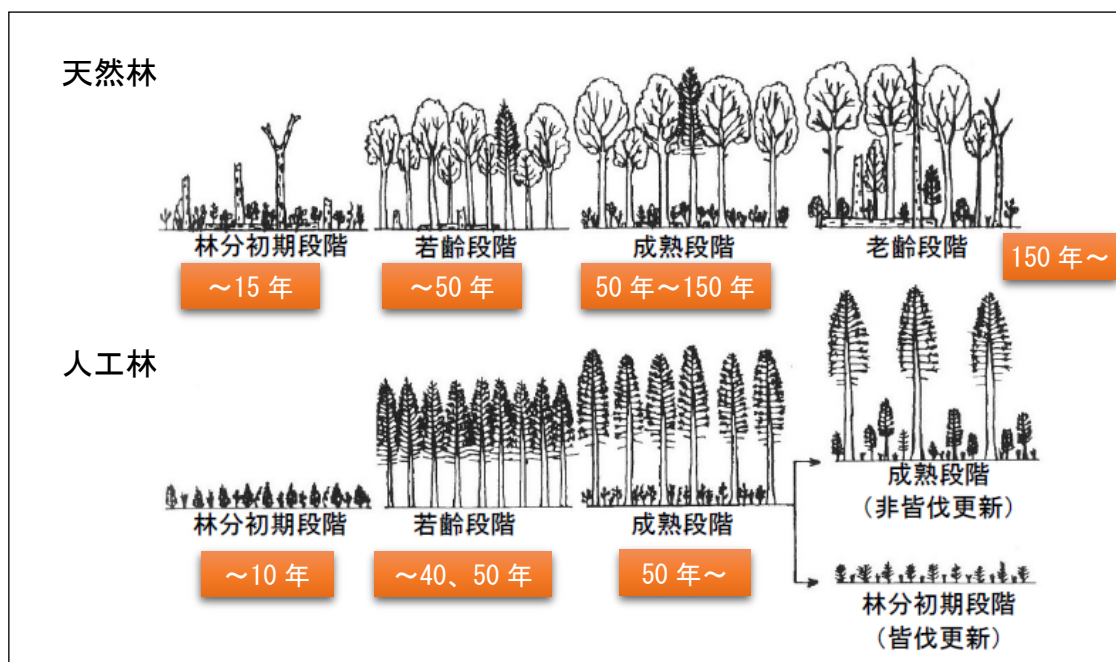
以下に、図Ⅶ-3 に示した過去モデル解析の手順 1～4 について詳細を述べる。

手順 1 森林の水土保持機能と林分因子に関わる知見の整理

森林の水源かん養機能や土砂災害防止機能・土壌保全機能（以下、水土保持機能）は、森林の成長にともない変化すると考えられている。SWAT モデルにおいて、土地利用「森林」を成長の段階によって細分化し、森林タイプ毎の水文反応の違いをパラメータとして反映していくためには、森林に関わる林分因子や、それらの影響の時間的な変化について予め把握しておく必要がある。ここでは、林種（人工林・天然林）、樹種（針葉樹・広葉樹）、林齢、樹冠疎密度、林床植被率といった林分因子と水土保持機能との関わりについて、既往研究成果をもとに知見の整理を行う。

■ 林分の発達段階と水土保持機能の関係

ここでは、森林の発達段階において、水土保持機能がどのように変化するかを概念的に表した事例を紹介する。図Ⅶ-4 は、天然林と人工林における林分の発達段階の模式図である。これは、大規模攪乱後、長期にわたって大規模又は中規模の攪乱がない状態が続いた場合の温帯林におけるモデルである。



図Ⅶ-4 林分の発達段階の模式図（藤森 1997）¹¹

以下に、各林分の発達段階の特徴について述べる。

¹¹ 藤森隆郎（1997）新たな森林管理エコシステムマネジメント．森林科学 21: 45-49.

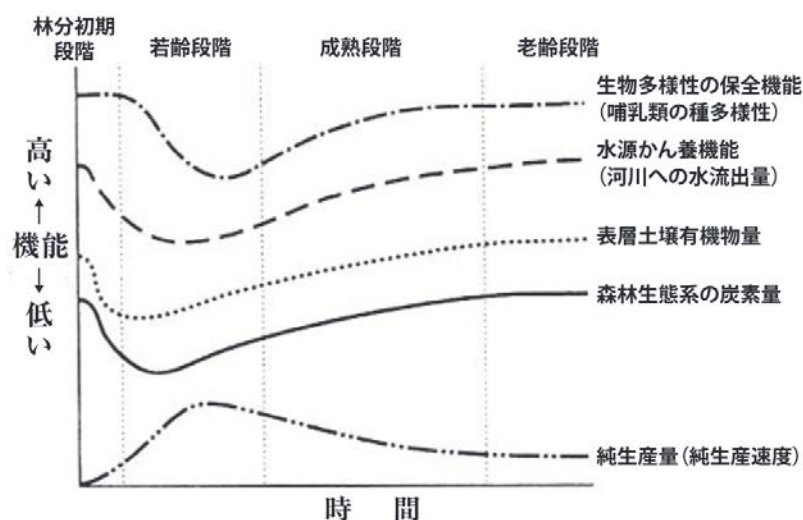
「初期段階」は、天然林では攪乱の後 15 年くらいまで、人工林では皆伐、植栽をしてから 10 年くらいまでに相当し、草本類と木本類が激しく競争している段階である。

その後、高木性の樹種が優占して林冠が閉鎖し、個体間の競争が強くなり、下層植生が目立って少なくなる時期を「若齢段階」と呼ぶ。この段階では、葉の量も増え、森林としての生産速度が最も高くなる。

50 年生を越えると、樹冠同士の間隙に隙間もでき、林内が少し明るくなり、下層植生が徐々に豊かになってくる。この段階を「成熟段階」と呼び、個々の樹木個体はサイズを増やし、表土の保全や生物の生息環境としての機能が徐々に増大する。

やがて優占する高木の中にも衰退木、立ち枯れ木、倒木などが生じ、森林は「老齢段階」に達する。枯死木が開けたギャップ内に更新した稚樹が成長を始め、森林の中で部分的な破壊と再生のプロセスが進行し、森林構造は水平的にも垂直的にも多様性を増す。他方、物質生産の面からみると、森林全体の現存量はほとんど増えず、定常状態に近い状態になる。

藤森 (2003)¹²は、各発達段階に応じた各種機能の変化について示している (図VII-5)。



図VII-5 林分の発達段階に応じた各種機能の変化 (藤森 2003)

原典：生物多様性は FRANKLIN and SplEs(1991), 水源かん養は WATsoN et al. (1999), 表層有機物土壌は CovINGToN(1981), 純生産量は KIRA and SHIDEI(1967), BoRMANN and LIKENs(1979), KuRz and Apps(1999), 蜂屋ら(1989)など。

一番下に示される純生産量以外のラインは天然林の資料に基づくものであるが、その傾向は、既往研究成果と照らし合わせてみても、人工林においてもほぼ当てはまるものと思われる。一番下の線は純生産速度であり、下から二番目と三番目の線は、表層土壌有機物量と森林生態系の炭素量の積算値である。速度の変化と積算値の変化のパターンがこのような違いを示すことにより、生物多様性の保全機能と水源かん養機能(河川流量)は、

¹² 藤森隆郎 (2003) 新たな森林管理持続可能な社会に向けて。全国林業改良普及協会。

純生産量よりも表層土壌有機物量や森林生態系の炭素量に強く支配されていることがわかる。また、図VII-5 から、一つの林分において、純生産量の最大の時期とその他の機能の最大の時期を一致させることはできないということがわかる。これは、森林の管理を行う際に重要な意味を持つ。

木材生産機能だけを考慮する場合、若齢段階の後半から成熟段階にかけて収穫するのが最適という考えも成り立つが、多くの機能は、皆伐後の林分初期段階から若齢段階にかけて一旦低下し、森林構造の発達とともに緩やかに増加していく。水源かん養機能に着目してみると、若齢段階の人工林では、成長の旺盛な樹木による蒸発散量の増加、それともなう河川流量の減少、下層植生や表層土壌の有機物量の低下による表面流の増加が顕著となり、その機能は低下することが示唆される（藤森,2006¹³）。

■ 森林タイプの定義づけ

SWAT モデルにおいては、上記に述べた発達段階における森林機能の違いをパラメータとして反映し、森林の成長と水文反応の変化について検証することが可能である。

ここでは、上記の概念を踏まえ、森林を発達段階（初期、若齢、成熟）および樹種（針葉樹、広葉樹）により 4 つのタイプに区分することとした。各森林タイプの定義や特徴について、表VII-1 に整理した。

表VII-1 各森林タイプの定義および特徴

発達段階および樹種区分	定義	特徴
初期	0～10 年生以下の針葉樹、広葉樹。タケ、未立木地を含む	木本類が草本類を超え、林冠を形成し始めるまでの段階。
若齢（針葉樹林）	11～30 年生以下の針葉樹	高木性の樹種が林冠を閉鎖。下層植生に乏しい。
成熟（針葉樹林）	31 年生以上の針葉樹	光環境の多様化により下層木が成長、水平・垂直方向の構造にバランスが取れている段階。
成熟（広葉樹林）	11 年生以上の広葉樹	

下層植生に乏しいと定義された「若齢段階」は、必然的に水や土砂の流出が起こりやすい土地利用区分と設定されることを意味するが、現実的には、適切な森林施業がなされ、下層植生が適度に発達している林分も存在する。一方で、構造的にバランスが取れているとされる「成熟段階」において、実際には施業が行き届かず、過密となっている林分も存在することが考えられる。しかしながら、それらの林分を一つずつ特定し、SWAT モデルに反映することは、菊池川流域全体の規模からしても困難であるため、ここでは、上記を留意事項として認識しつつも、表VII-1 の基準に従うこととした。

SWAT モデルはもともと広域シミュレーションを得意とした流出モデルでもあり、い

¹³ 藤森隆郎（2006）森林生態学持続可能な管理の基礎。全国林業改良普及協会。

くつかのパラメータ設定値の確度が不十分であったとしても、モデルキャリブレーションを通じて、最終的なアウトプットの精度を高めることができるという利点があり、今回は効率的なモデル構築を行うべく、その利点を生かす形とした。

■ 発達段階の区分方法

発達段階を区分する方法としては、当初、林野庁が実施している森林生態系多様性基礎調査で収集されている「林分発達段階」のデータの活用も検討したが、当該データは、調査実施地点の空間的な出現頻度が低く（4km 四方に 1 点）、実態を十分に反映しづらいことや、1970 年代のデータは存在しないことから、今回は検証のみとし、実際の区分にあたっては、森林簿に含まれる林齢情報をベースに行った（以後、「林齢区分」とする）。

手順 2 2 つの年代における SWAT モデル構築

SWAT モデルを構築する際の基本入力データとしては、気象データのほか、地形（傾斜）、土地利用区分、土壌、地質に関するデータが必要となる。モデルは、1970 年代と 2010 年代でそれぞれ構築するが、土地利用区分以外の入力データ（地形、土壌、地質）については、年代間で不変とし、2010 年代モデル（元々は H30 年度に作成した全流域モデル）で使用したデータと同じものを 1970 年代モデルでも使用することとした。

土地利用図については、1)で定めた森林タイプ区分に基づき、森林について細分化した土地利用図を作成した。以下に、土地利用図を作成した手順について述べる。

① データの入手および整理

III-3 章で入手した各データの使用先をモデル年代別に整理した（表 VII-2）。

表 VII-2 入手データの使途

データの種類	2010 年代 (基準年 2016 年)	1970 年代 (基準年 1976 年)
国土数値情報 土地利用細分メッシュ	2014 (H26) 年	1976 (S51) 年
森林簿 (国有林)	2016 (H28) 年	2009 (H21) 年 ※林班界情報しか含まれなかったため、樹種および林齢情報は 2016 年森林簿より引き継いだ。林齢は基準年まで逆算。
森林簿 (民有林)	2016 (H28) 年	2007 (H19) 年 ※林齢は基準年まで逆算
現存植生図 (5 万分の 1)	-	第 2、3 回調査 1983～1986 (S58～61) 年
現存植生図 (2 万 5 千分の 1)	第 6、7 回調査 1999～2004 (H11～16) 年、 2005 (H17) 年	-

② 各森林タイプの SWAT コード定義づけ

SWAT では、土地利用タイプを識別するための 4 文字の土地利用コードを設定し、データベースに登録する必要がある。ここでは、共通の森林コード (A) を「500」として、林齢コード (B)、針広コード (C) を設け、それらを足し合わせたものを土地利用図上のコード (A+B+C) とし、さらに、「表Ⅶ-1：各森林タイプの定義および特徴」に従い、それらを 4 つに区分し、それぞれに SWAT 土地利用コード (FRYG、FRCY、FRCA、FRBL)¹⁴を付与することとした。

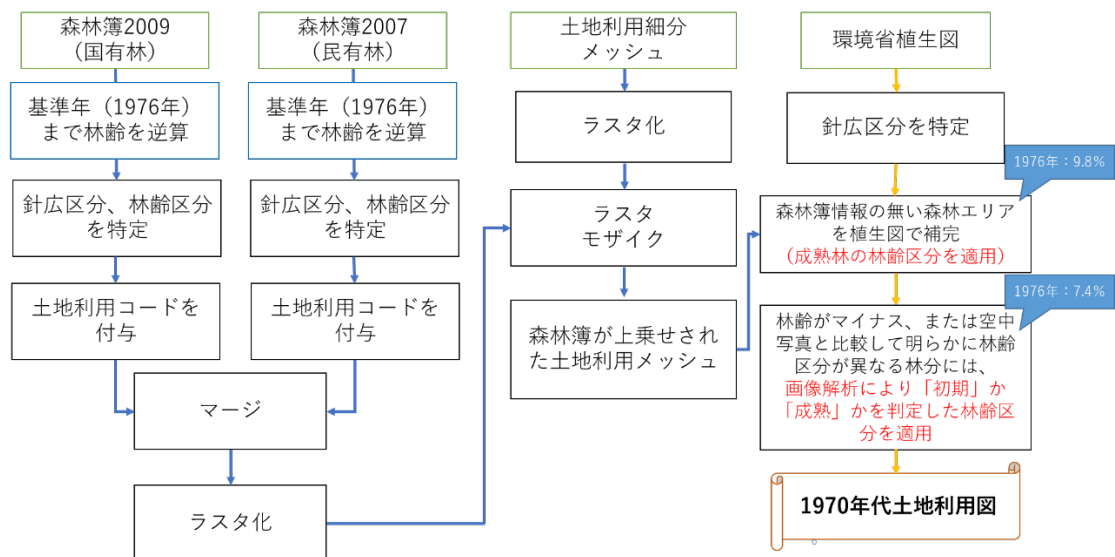
表Ⅶ-3 SWAT 土地利用コードの生成方法

		A	B	C	A+B+C	
森林タイプ	林齢区分	森林コード	林齢コード	針広コード	土地利用コード	SWAT 土地利用コード
針葉樹	0~10年生以下	500	10	1	511	FRYG
広葉樹		500	10	2	512	
タケ		500	10	3	513	
未立木地		500	10	8	518	
針葉樹	11~30年生以下	500	20	1	521	FRCY
針葉樹	31年生以上	500	30	1	531	FRCA
広葉樹	11年生以上	500	40	2	542	FRBL
更新困難地	—	500	0	9	509	BSVG

③ 土地利用図の作成

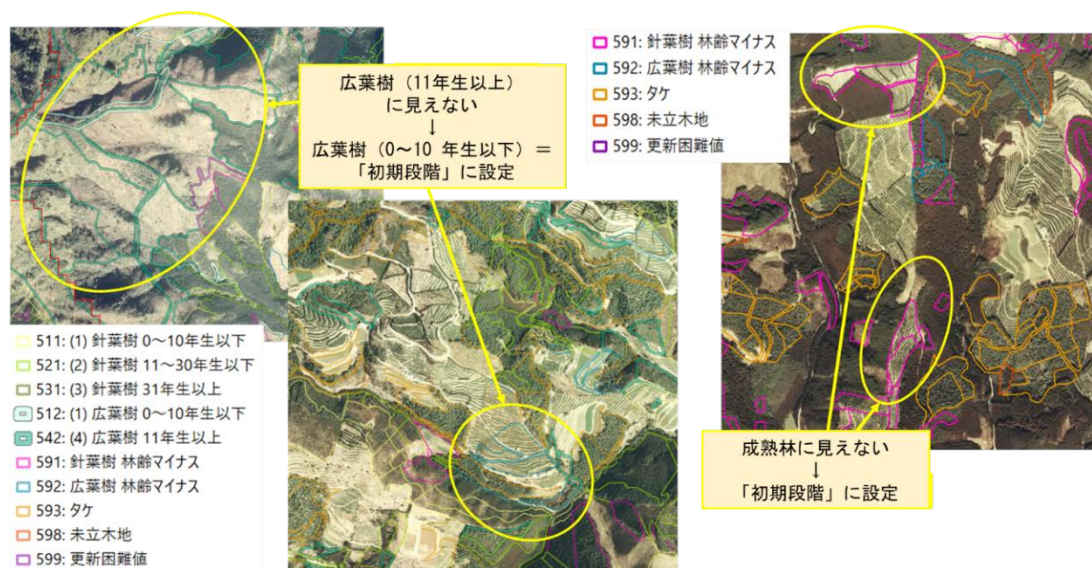
①、②の定義に従い、1970 年代と 2010 年代の土地利用図を作成した。作成フローを図Ⅶ-6 に示す。

¹⁴ FRYG: Forest Young, FRCY: Forest Conifer Young, FRCA: Forest Conifer Aged, FRBL: Forest Broad Leaf



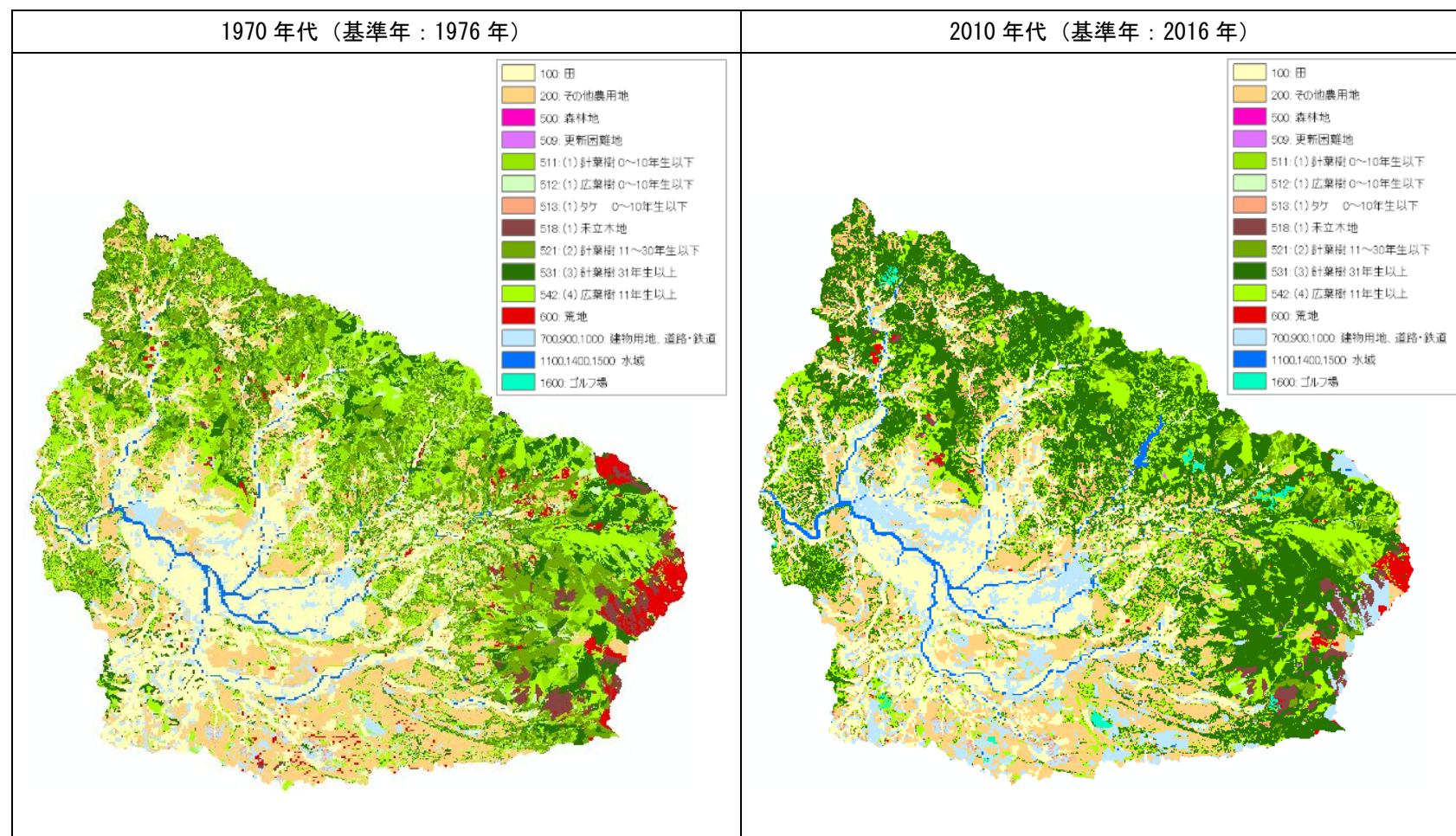
図VII-6 土地利用図の作成手順（1976年代土地利用図の例）

土地利用細分メッシュでは「森林」となっているにも関わらず、森林簿でカバーされなかったエリア（9.8%）については、環境省の植生図によって補完した。その際、林齢区分は一律に「成熟段階」とした。また、森林簿から基準年まで林齢を逆算した際に、林齢がマイナスとなる林分、あるいは1970年代の空中写真と比べて明らかに林齢区分が異なると思われる林分については、空中写真の画像解析により「初期段階」か「成熟段階」のいずれかに判別し、その林齢区分を適用することとした（図VII-7）。その理由として、「初期段階」と「成熟段階」は画像の色調などから比較的特定がしやすいものの、それらの間にある「若齢段階」は、林相によって見え方が異なり、根拠をもって範囲を特定することが困難であると判断したためである。

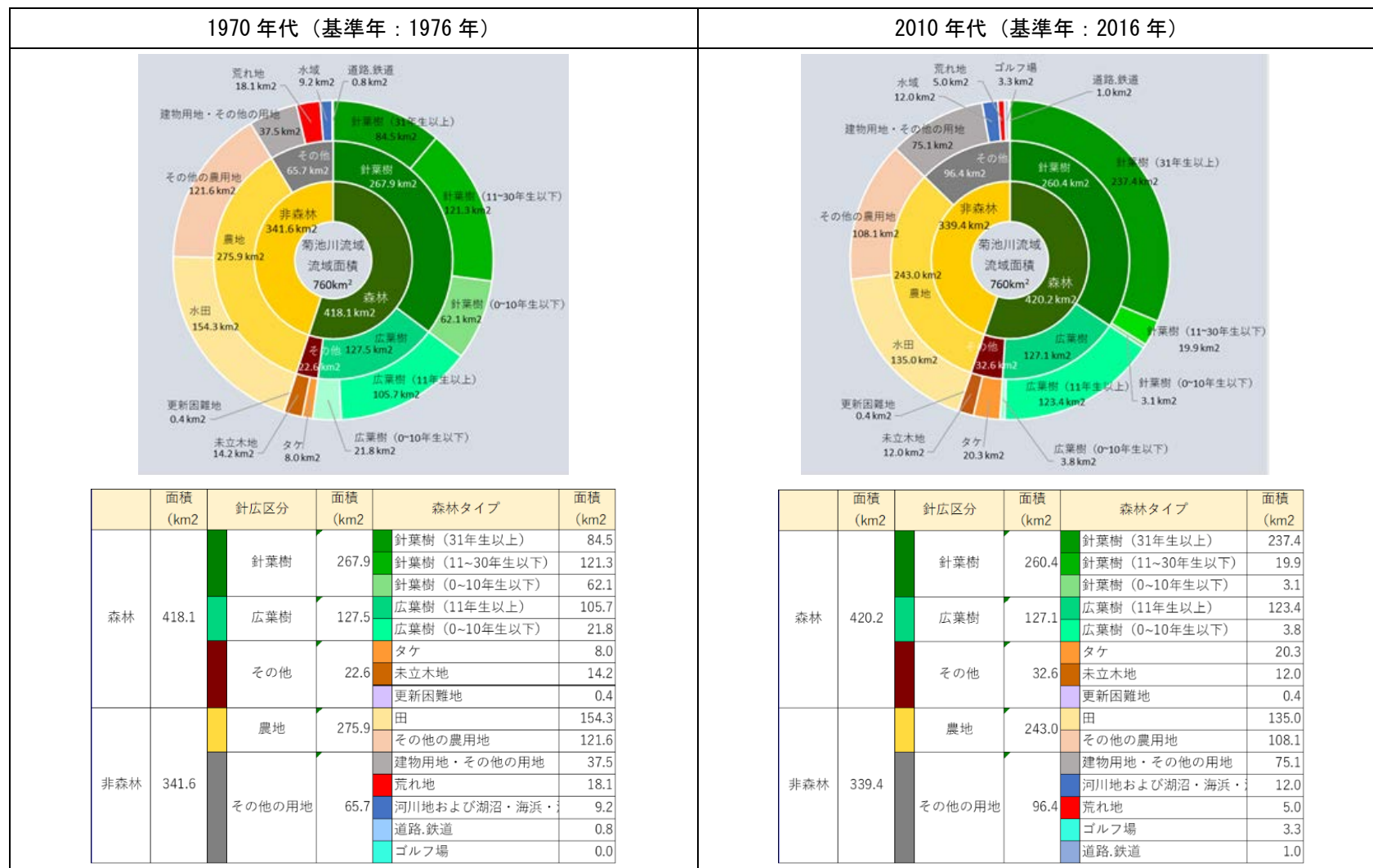


図VII-7 1970年代空中写真による林齢区分の精度チェックおよびマイナス林齢の補完

上記に沿って作成した 1970 年代および 2010 年代の土地利用図を図Ⅶ-8 に、各土地利用面積および面積割合を図Ⅶ-9 に示す。

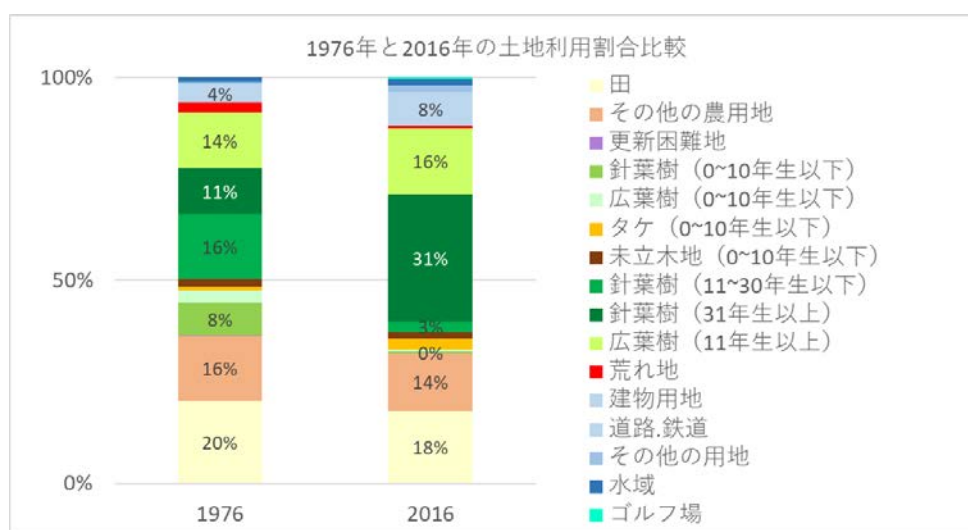


図Ⅶ-8 SWAT モデルへの入力データとなる土地利用図（左：1970 年代モデル用／右：2010 年代モデル用）



図Ⅶ-9 年代別、土地利用別面積（左：1970 年代モデル用／右：2010 年代モデル用）

また、各年代における土地利用割合を比較したグラフを図Ⅶ-10 に示す。



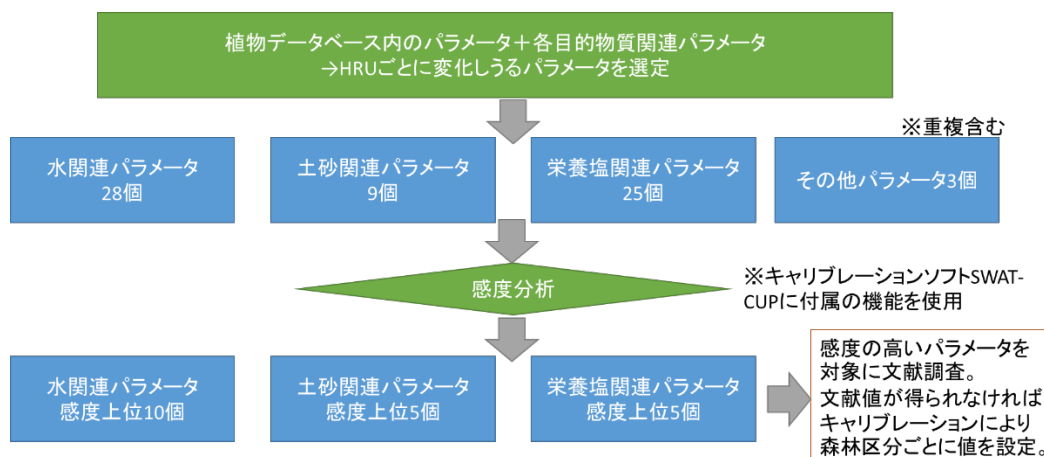
図Ⅶ-10 土地利用割合の変化（1970年代と2010年代）

森林については、1970年代では、「針葉樹（31年生以上）」、「針葉樹（11～30年生）」、「広葉樹（11年生以上）」がそれぞれ11%、16%、14%とほぼ同じくらいの割合で存在しているのに対し、2010年代では31%、3%、16%となっており、「広葉樹（11年生以上）」の割合に大きな変化はないが、「針葉樹（31年生以上）」が大幅に増加、「針葉樹（11～30年生）」が大幅に減少しており、この菊地川流域の森林の多くが成熟期に達し、再造林が進んでいない状況が読み取れる。

森林以外の土地では、1970年代に比べ、2010年代では畑や水田がやや減少しており、その分、建物用地などが増えるなど、都市化が進んだことが伺える。

手順3 キャリブレーション対象パラメータの選定

1)において、森林の成長や増減で変化すると思われる因子を特定し、それに基づき4つの森林区分を設定した。ここでは、実際に森林区分に基づきそれぞれのパラメータに違いを反映させていく上で、どのパラメータを対象とするか選定を行った。パラメータ選定の流れを図Ⅶ-11に示す。



図Ⅶ-11 キャリブレーション対象パラメータ選定の流れ

まず、選定の対象として、これまでに SWAT モデルを構築する際にキャリブレーション対象としてきたパラメータ群に加え、SWAT データベースにおいて植物ごとのパラメータを扱っている植物データベース (.crop) に含まれるパラメータを対象とすることとした。その結果、水関連パラメータで 28 個、土砂関連パラメータで 9 個、栄養塩関連パラメータで 25 個、その他関連性が不明なパラメータが 3 個選定された(重複を含む)。

次に、キャリブレーション専用ソフトである SWAT-CUP に付属の機能を用いて、それぞれのパラメータの感度分析を行った。感度分析は、既存の全流域モデルを用いて、目的物質(水、土砂、栄養塩)ごとにシミュレーションを 200 回繰り返し、パラメータの変化に対して推定値がどの程度変化したかを評価した。ただし、ソフトの仕様上、シミュレーションごとに対象パラメータの全てが同時に変化する設定となっているため、あくまで相対的な感度であり、試行ごとに結果は変化しうることに留意が必要である。

感度の指標として、パラメータの変化に対して実測値に対する適合度を評価する指数の変化が有意かどうかについて t 検定により検定した際の p 値を利用することとした。なお、統計解析の詳細は Abbaspour (2013)¹⁵を参照のこと。

感度分析の結果を元に、感度が高いパラメータとして水関連パラメータ上位 10 個、土砂関連パラメータ上位 5 個、栄養塩関連パラメータ上位 5 個を選定した。

次に、選定したパラメータを対象に文献調査を行った。主な参考文献として、林野庁の作成した「森林の多面的機能に関する Q&A」¹⁶の水源かん養機能に関する情報を用いた。特に、森林の種類や林齢に応じた違いに関する記述を収集し、それらの情報を踏まえてキャリブレーション時の閾値を設定した。また、文献調査の結果、感度分析では上位になかったものの森林の区分に大きく影響すると考えられるパラメータについても別途キャリブレーション対象に追加した。さらに、感度分析結果では比較的上位であるものの、文献調査から情報を得られないようなパラメータについては、適切に森林区分別に分けられないと考えられるためキャリブレーション対象から除外することとした。

感度分析の対象パラメータ、文献調査結果、およびキャリブレーション結果については巻末資料「過去モデル キャリブレーション対象パラメータ一覧」に整理した。

手順4 パラメータの調整

感度分析結果および文献調査結果を踏まえて、SWAT-CUP を用いてパラメータのキャリブレーションを行った。

手順1でレビューした通り、森林の水土保持機能は、林分の発達段階に応じて変化する。その機能レベルは、樹冠疎密度、立木密度、林床被覆率(下層植生)といった因子と深く関わりがあると考えられることから、SWAT モデルの森林関連パラメータ値の閾値設定においても同様に考慮するため、これら3つの因子について、発達段階ごとの相対的な大小関係を整理した(表Ⅶ-4)。

¹⁵ Abbaspour, Karim C. "SWAT-CUP 2012." *SWAT Calibration and uncertainty program—a user manual* (2013).

¹⁶ https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/tamenteki/con_9.html

表Ⅶ-4 各森林タイプの相対的な大小関係

森林タイプ (発達段階・樹種)	樹冠疎密度	立木密度	林床被覆率 (下層植生)
初期林	疎	疎	少なめ
若齢林（針葉樹）	密	密	少ない
成熟林（針葉樹）	適度	適度	多い
成熟林（広葉樹）	適度	適度	多い

ここで、表Ⅶ-4における初期林と若齢林の林床被覆率（下層植生）の表記（それぞれ「少なめ」、「少ない」）の違いについて補足する。成熟林と比べると、両者ともに相対的に林床被覆は少ないと考えられるが、若齢林の下層植生は、表Ⅶ-1「各森林タイプの定義および特徴」に基づき、「少ない」と設定することが妥当である一方、初期林は、裸地から若齢林に近い林相まで幅広く含むため、若齢林よりも林床被覆（下層植生）が豊かである可能性が考えられる。そのため、同じ「少ない」でも、相対的な大小に若干の差をつけたい観点から、微妙な表現の違いをもたせている。

一方で、「成熟林（針葉樹）」と「成熟林（広葉樹）」については、成熟林の林床被覆率は豊かであることが一般的にも知られている通り、両者ともに「多い」という設定となっているが、これは、針葉樹林と広葉樹林における林床被覆の違いは、既存文献でもはっきりと明らかにされているわけではないためである。針葉樹林・広葉樹林間で比較・検証を行っている調査、文献は多数あるものの、それぞれ調査対象地や林分条件が異なり、結果もまちまちであることから、一概に大小をつけることは難しいといえる。

このように、樹冠疎密度、立木密度、林床被覆率の因子に関わる針葉樹、広葉樹間の違いについて、文献などで明らかにされており、且つ相対的な大小の判断に適用できると判断した場合は適用し、そうでない場合は、両者の大小レベルは同等とみなすこととした。

次に、表Ⅶ-4の概念に基づく、SWATパラメータの調整方法について述べる。

SWATモデルにおける森林関連パラメータは、巻末資料「過去モデル キャリブレーション対象パラメータ一覧」に示す通りである。例えば、このうちの一つ「OV_N」は、表面流の速度に関わる因子（地表面におけるマンニングのN（粗度係数））であるが、この因子と植生状態との関係については、次のような文献情報がある。

- ・ 植物残渣なしで 0.09 程度、草原や放牧地で 0.4-0.6 程度（SWAT input/output Documentation¹⁷⁾）
- ・ 林道や植栽直後の農地などの裸地 0.01～0.02, 放牧草地 0.08, 人工林 0.15～0.7, 天然林 0.3～0.6（北原ほか 1994¹⁸⁾）

上記の情報と、表Ⅶ-4の概念を照らし合わせると、地表面におけるマンニングのNは、裸地や草地など、林床被覆（下層植生）が少ないところでは低く、人工林、天然林と大きくなっていくことがわかる。よって、「OV_V」の森林タイプ別パラメータ値は、相対的に以下のような大小関係になることを想定し、キャリブレーションを行った。

¹⁷⁾ Arnold, J. G., et al. SWAT 2012 input/output documentation. Texas Water Resources Institute, 2013.

¹⁸⁾ 北原曜. “中国黄土高原における森林の侵食防止機能の水理学的解明（II）地被量と粗度係数の関係.” 日林論 105 (1994): 587-590.

初期 < 若齢（針葉樹林） < 成熟（針葉樹林） < 成熟（広葉樹林）

なお、文献調査からある程度情報は得られたものの、根拠を持って森林タイプ別に値を変化させるほど情報が充実していないパラメータについては、各タイプ、同一の値を適用することとした。

2. 過去モデルの推定結果

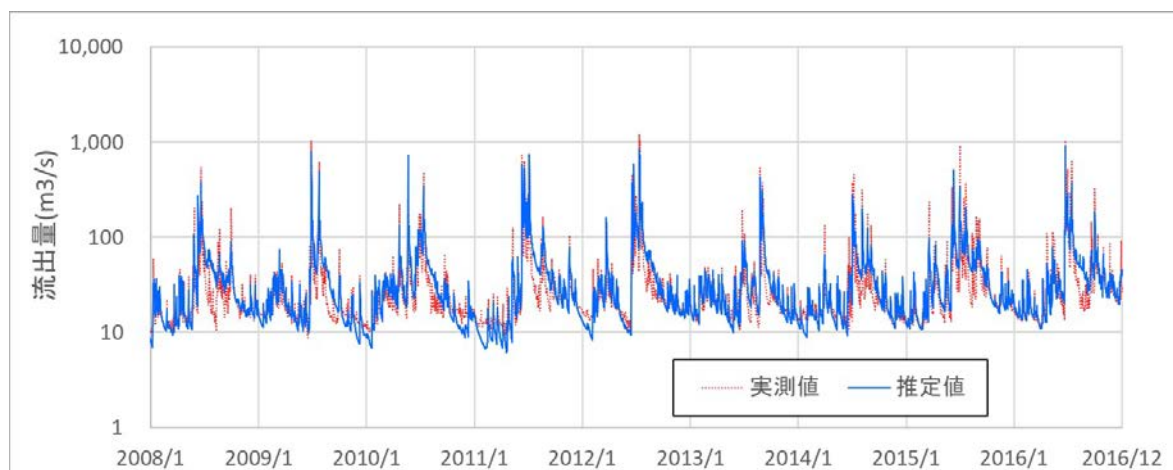
(1) 2010 年代モデルにおける全流域モデルパラメータのバリデーション

Ⅶ-1-(4) で検討した森林タイプ毎のパラメータ（森林の成長と関連するパラメータ）について、2010 年代モデルでキャリブレーションを行う前に、まずは、第Ⅴ章において、窒素収支を含め、全体的に再調整を行った全流域モデルのパラメータ（森林の成長と直接的な関連のないパラメータも含む）が過去モデルに対して汎用性があるかどうかバリデーション（検証）を行う必要がある。

Ⅶ-1-(2) で土地利用区分「森林」を林齢および樹種により 4 つの森林タイプに細分化した 2010 年代モデルを構築したが、本バリデーションの目的は全流域モデルで調整したパラメータの総合的な汎用性の確認であるため、ここでは森林タイプに応じたパラメータの調整は行わず、「森林」にはすべて全流域モデルと同一の値を設定した。また、本設定でシミュレーションを行い、河川流出量と土砂流出量の推定精度を確認した。

1) 河川流量

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、菰田観測地点における河川流量推定結果を図Ⅶ-12 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-5 に示す。シミュレーション期間は 2008 年 1 月から 2016 年 12 月とした。



図Ⅶ-12 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河川流出量の推定結果

表Ⅶ-5：2010 年代モデルの河川流量推定精度

	2008～2016 年
RSR	0.46(vg)
NSE	0.78 (vg)
PBIAS	-0.0018(vg)

河川流出量の推定値は、実測値に比べ、ピーク時はやや過小、それ以外のタイミングでは過大・過小いずれの推定結果もみられるが、全体的な流出パターンは再現されている。また、指標による評価はすべて「Very Good」であったことから、全流域モデルのパラメータを適用した 2010 年代モデルによる河川流量は高い精度で推定されたといえる。