

有明海・八代海等総合調査評価委員会  
第5回海域環境再生方策検討作業小委員会

**「有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査」報告（中間）**

令和2年7月29日  
林野庁治山課

# (1) 調査の背景と経緯

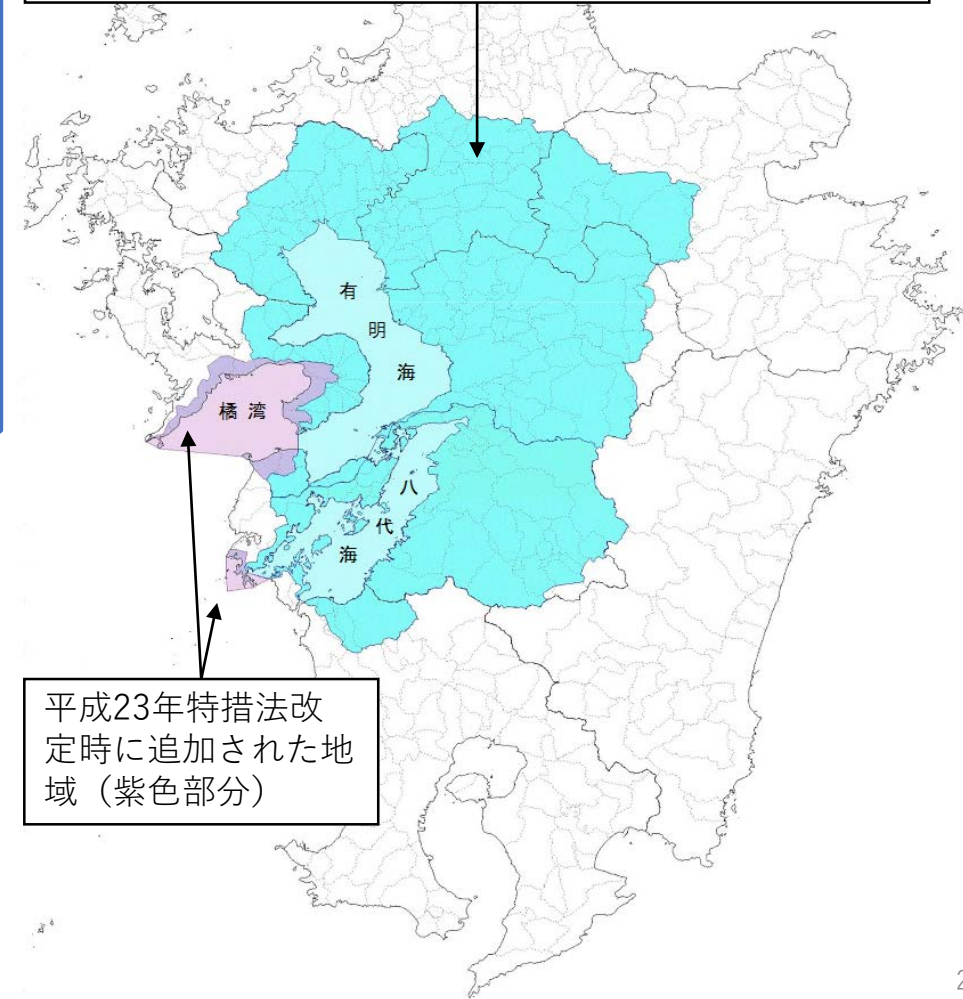
## i. 調査の背景と経緯

有明海及び八代海等を再生するための特別措置法（平成14年法律第120号）第18条において、有明海等の環境の保全及び再生のために国及び関係県は調査の実施とその結果の公表を行う旨が規定されている。

平成23年に同法が改正施行され、同条第5項において「有明海及び八代海等の海域に流入する河川の流域における森林と当該海域の環境との関係に関する調査」が調査項目の一つとして新たに規定された。

- これを受けて林野庁では、翌平成24年度から委託により、科学的知見の蓄積のため、河川を介した森林と海域との関係について、森林土壌（粒子）の挙動や水質への影響などに関する既往の調査・研究事例、論文等の収集・整理を開始。
- 平成27年度からは「**有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査**」を開始し、これまで菊池川流域を対象に、現地調査によるデータ収集、流出モデルを用いた水量、土砂量及び栄養塩量（窒素、リン）の解析により、**森林が海域に与えるポジティブな影響**について解析・評価を行ってきた。

有明海及び八代海等を再生するための特別措置に関する法律（平成14年法律第120号）第2条第6項の「指定地域」（水色部分）

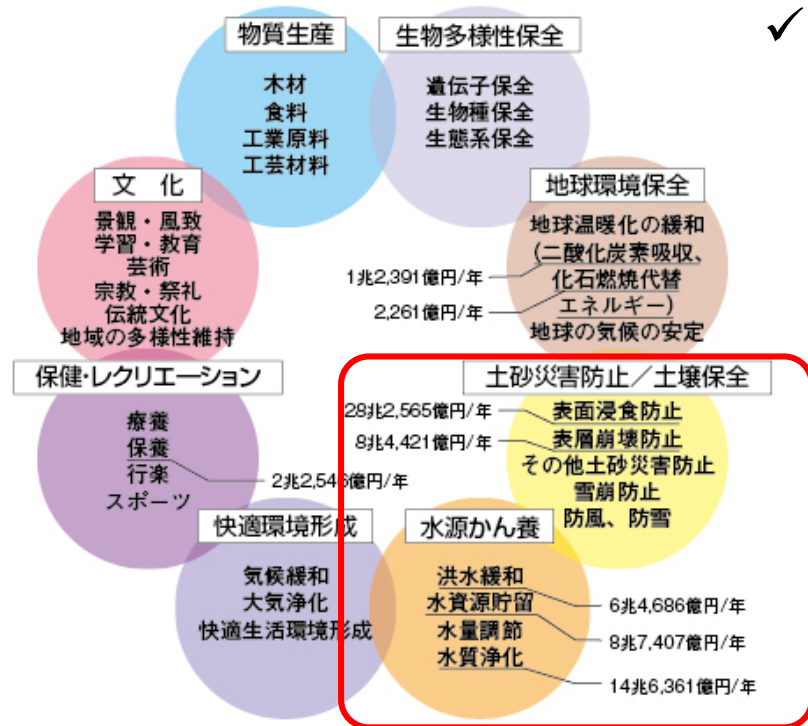


# (1) 調査の背景と経緯

## ii. 森林の有する公益的機能

▶ 我が国の森林は、国土の保全、水源の涵養、生物多様性の保全、地球温暖化防止、木材等の生産といった多面的機能の発揮を通じて、国民生活に様々な恩恵をもたらしている。

✓ とりわけ、次の機能の貨幣換算評価が高い。



### ■ 土砂災害防止機能/土壌保全機能

- 表面侵食防止 【28兆2,565億円】
- 表層崩壊防止 【8兆4,421億円】
- 土砂流出防止など

### ■ 水源涵養機能

- 洪水緩和 【6兆4,686億円】
- 水資源貯留 【8兆7,407億円】
- 水量調節
- 水質浄化 【14兆6,361億円】



参考資料：日本学術会議答申「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的機能の評価について」および同関連付属資料（平成13年11月）  
注：【】内の金額は、森林の多面的機能のうち、物理的な機能を中心に貨幣評価が可能な一部の機能について評価（年間）したもの。いずれの評価方法も、一定の仮定の範囲においての数字であり、その適用に当たっては注意が必要。

## (2) 調査の目的と概要

### i. 調査の目的

#### ➤ 森林が海域に与える影響を評価するという目的について

- ✓ 既存研究において、「森林が海域に与える影響」は、水の流出について一部定量化されてはいるものの、物質流出については未知の部分が多い。

→ 林野庁「有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査（平成27年度～）」では、「森林が海域に果たすポジティブな役割を科学的に明らかにする」ため、森林のもつ以下の機能について、当該域独自に定量化することとした。

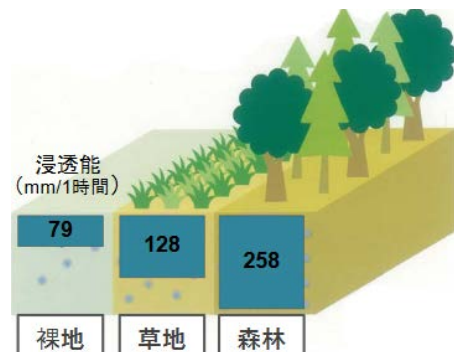
#### 【森林の水源涵養・土砂流出安定化機能】

- 森林の存在による**水量の安定化**が**河川流出の定常化**に寄与し、土砂を含む栄養塩類の安定的な供給につながっているか

#### 【森林のストック機能】

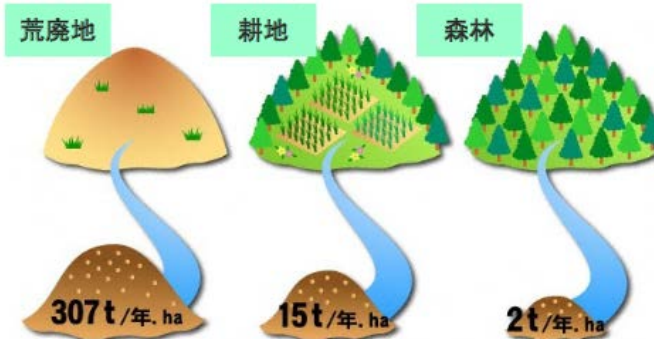
- **栄養塩類**、**有機物**がどのように貯留され、「いつ」「どのように」、下流に供給されるか

#### 【森林の水源涵養機能】



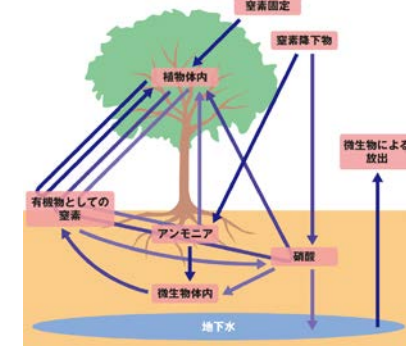
資料：村井宏・岩崎勇作「林地の水及び土壌保全機能に関する研究」（1975）

#### 【土砂流出安定化機能】



資料：丸山岩三「森林水文」実践林業大学

#### 【森林のストック機能】



資料：文一総合出版「エコロジー講座4 地球環境問題に挑む生態学（2011）」

## (2) 調査の目的と概要

### ii. 調査の概要

#### ➤ 調査手順

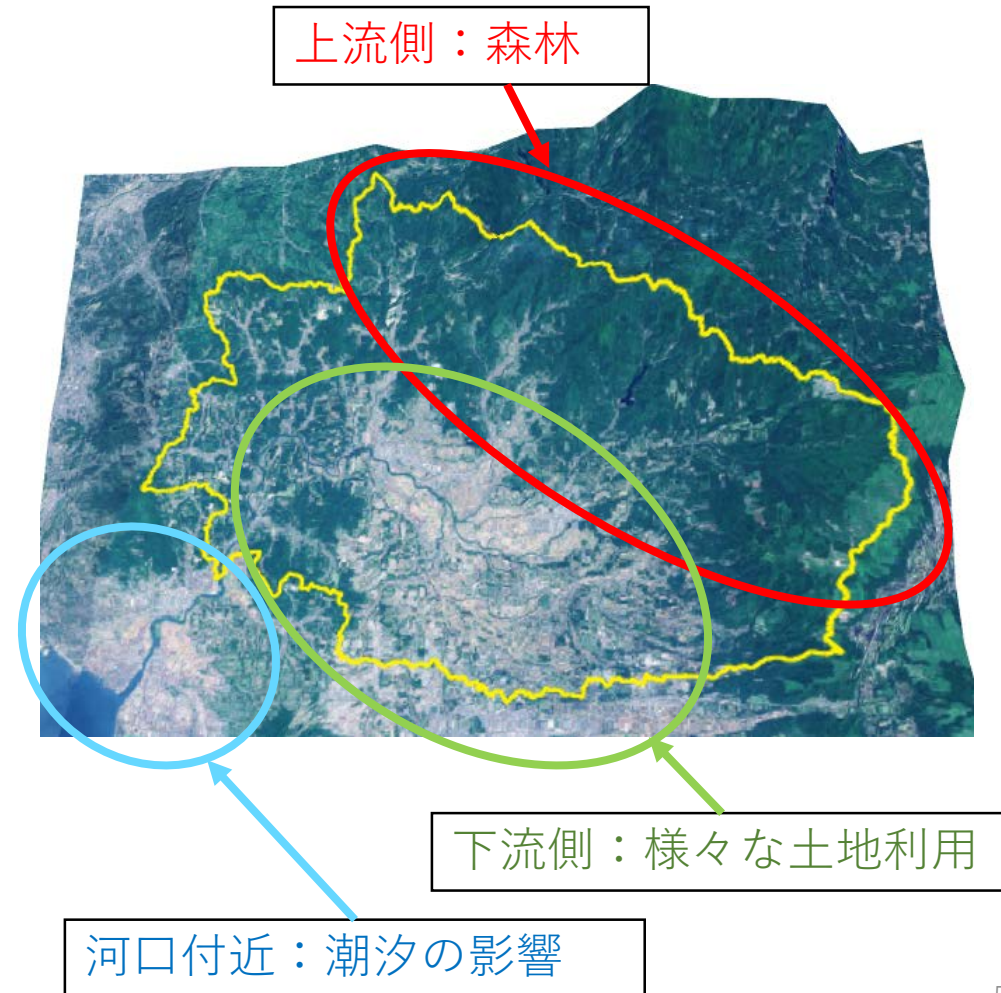
#### 1. アプローチ手法の検討

- ✓ 森林が流域を経て海域に及ぼす影響は、多面的、間接的な要素が多く絡んでおり、また、下流域における土地利用等他の要素が海域に与える影響も大きい。
- ✓ したがって、森林内の小流域での観測結果を積み重ねることによって明確になるという性格のものではなく、流域全体の流出を捉える中で森林の位置づけを評価することが有益であると判断。



ここでは、**大流域を対象**として、既往のデータや物理法則等に基づく「**流出モデル**」等の**数理モデル**を用いて、**マクロ的・演繹的**に森林の影響を見積もるアプローチが有効と考えた。

【流域によって森林が海域に及ぼす影響は異なる】



## (2) 調査の目的と概要

### ii. 調査の概要

#### 2. 対象流域の選定

✓有明海及び八代海へ流入する1級河川（全9河川）のうち、**森林が海域に及ぼす影響を効果的に評価できる流域**を選定するため、以下の視点を踏まえて対象流域の検討を行った。

- (1) 既往データの入手性  
→気象・水文データなどが豊富かつ効率的に収集可能
- (2) 森林面積、森林面積率の高さ  
→森林面積が500km<sup>2</sup>以上及び森林の面積率が50%以上
- (3) 農地等や流域における人為的活動の影響の少なさ  
→農地面積が300km<sup>2</sup>以下及び流域の人口が30万人以下
- (4) 流域全体としての適性  
→一級河川のうち流域面積が平均値に近い

**菊池川流域**を選定



指定地域における森林分布（緑色部分）

## (2) 調査の目的と概要

### ii. 調査の概要

#### 3. 対象物質の検討

- ✓ 「森・川・海をつながり重視した豊かな漁場海域環境創出方策検討調査（平成16年3月）※1」にて論点整理された内容を参考に、対象物質の検討を行った。

##### 【森林による水・土の流出制御について】

- (1) 森林の**水源涵養機能**による**水量**の安定化は、海域生態系の健全化に寄与するとの指摘あり。
- (2) 森林の有する**土砂流出防止機能**により、海域の濁りが抑制され、健全な海域生態系の維持、ひいては海域の生産に寄与している。

##### 【森林・河川からの物質供給について】

- (1) 植物プランクトンなど、藻類の増殖等と関係性が深い**リン**や**窒素**の濃度は、海域の生産に重要な役割を果たしている。
- (2) **ケイ酸**は、森林・河川域に比べ、海域流入後、珪藻類に摂取されることで濃度が低下する傾向があり、海域の生産に寄与していることが示唆される。

海域生産に寄与する **水量（流量）、土砂量、栄養塩（リン、窒素、ケイ素）量** を選定

## (2) 調査の目的と概要

### ii. 調査の概要

#### 4. 流出モデルの選定

✓ 以下の手順により、流出モデルの検討、選定を行った。

##### ①モデル選定条件の整理

- 菊池川流域における流出プロセスを流域スケールで明らかにするために必要な評価項目の検討
  - 流域スケール（マクロ的）での評価が可能
  - 窒素、リン、ケイ素\*の評価が可能
  - 浮遊物質（以下SS）、TOC\*の評価が可能
  - 表流水及び地下水を含めた水文プロセスの評価が可能
  - その他考慮事項
    - マニュアルやコードの無償公開
    - 森林への適用
    - 適切な時間間隔（日）での評価が可能等

\*ケイ素・TOCは、選定したモデルでは出力不可であったため、後に本調査の解析対象物質から除外

##### ②候補モデルに関する調査・評価

- 数多くある流出モデルを体系的・網羅的に整理したアメリカ合衆国環境保護庁による調査報告のうち、64の流出モデルの評価結果を、①で整理した評価項目と照らし合わせ、上位2つのモデル（**SWAT, BASINS**）を選定

##### ③有識者へのヒアリング

- 以下の情報を入手
  - ✓ 調査対象とした物質が解析可能
  - ✓ GISとの親和性が高い

**SWATモデル**を選定



## (2) 調査の目的と概要

### iii. 現地調査と解析のプロセスについて

#### ➤ SWAT (Soil and Water Assessment Tool)モデルの概要

- ✓ アメリカ農務省農業研究局およびテキサスA&M大学が開発したオープンソースの準分布型流出モデル
- ✓ 流域内の水収支（降水量、蒸発散量、河川流出量など）、土砂・物質の移動等を推定可能

#### 準分布型流出モデル

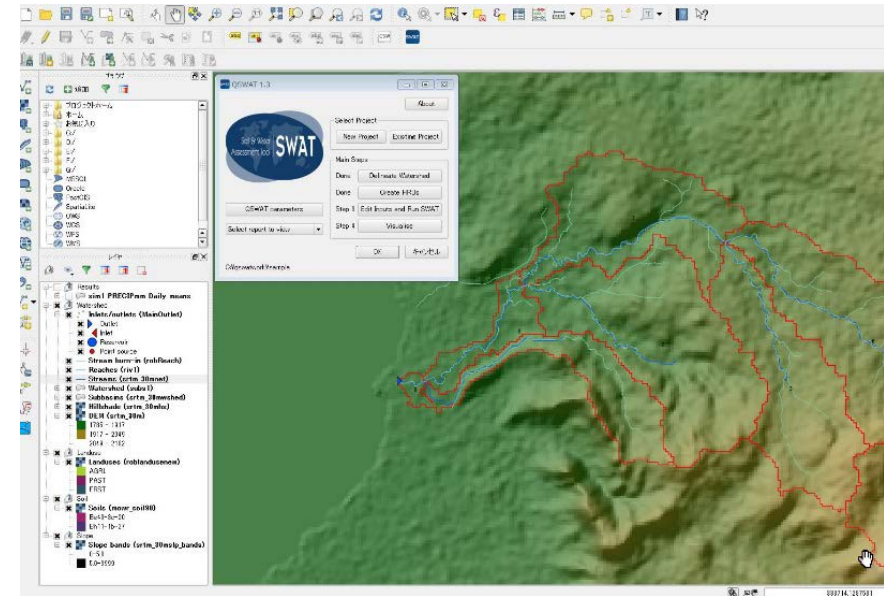
- 「土壌」、「土地利用」、「地形勾配」の組み合わせによって、Hydrological Response Unit (HRU) と呼ばれる細かく分類された水文応答単位によって流域を表現。
- 各水文応答単位において水収支や物質収支解析を行い河川へと流出するように計算。

#### SWATモデルの強み

- 無償のソフトであり、ソースコードが公開されている
- 実測データが無い流域でもビルトインDBのデータを活用して比較的短期間でのモデル構築が可能
- 長期的な予測、シナリオ解析が可能
- 物理法則にもとづいて各過程が計算される
- GISソフトとの親和性が高い
- 異なる土地利用の混在する流域に適用可能

#### SWATモデルの弱み

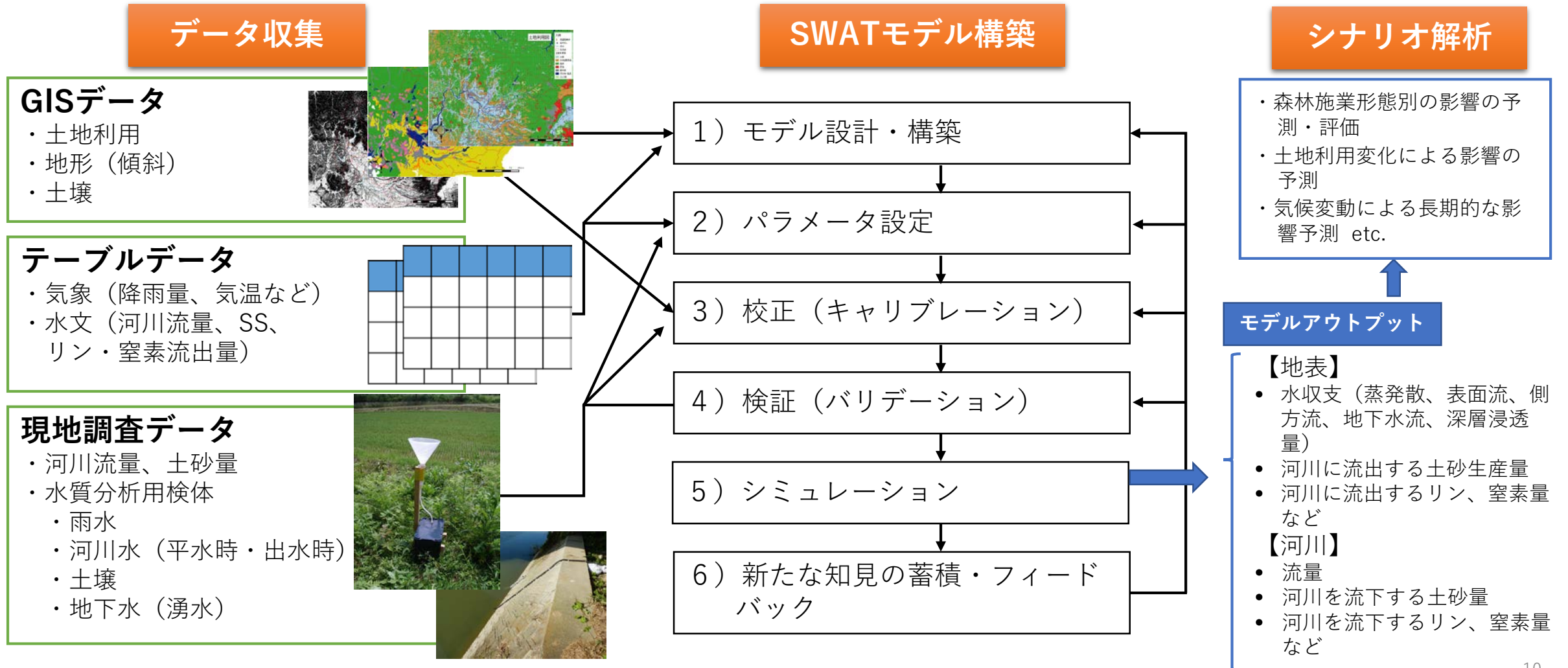
- 地下水評価についてはシンプルなモデルしか実装されていない（MODFLOWなど地下水解析ソフトとのカップリングで強化可能）
- 農業地域は得意だが都市域は困難
- 日本の森林域では知見が乏しい



## (2) 調査の目的と概要

### iii. 現地調査と解析のプロセスについて

#### ➤ SWATモデルによる解析手法



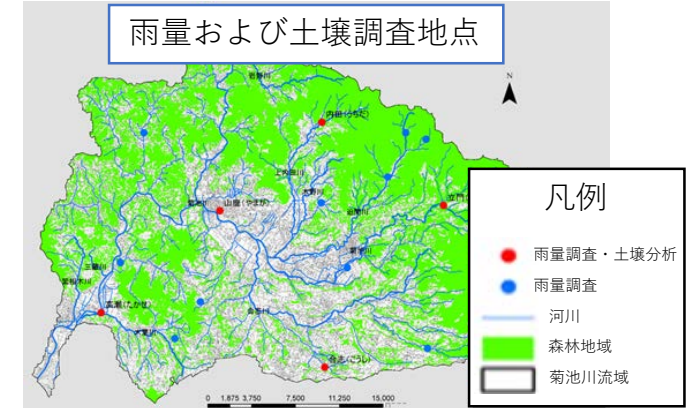
## (2) 調査の目的と概要

### iv. 現地調査について

#### ➤ モデル構築に必要な現地調査（平成28～R元年度）

流域	項目		調査手法	計測・分析項目	
菊池川流域	雨水	水質分析	簡易式雨水採取装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>窒素（有機態窒素、硝酸態窒素、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素）</li> <li>リン（有機態リン、無機態リン）</li> <li>SS</li> <li>濁度</li> </ul>	
	河川	水質分析	平時		採水・分析
			出水時		自動採水器設置
	土壌	土壌分析	ライナー付き土壌採取・分析		
地下水（湧水）	地下水分析	採取・分析			
森林小流域	雨水	雨量	雨量計設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>窒素（有機態窒素、硝酸態窒素、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素）</li> <li>リン（有機態リン、無機態リン）</li> <li>SS</li> <li>濁度</li> </ul>	
		水質分析	採水・分析		
	河川	水位	自動水位計設置		
		流量	流速計等による観測		
		水質分析	平時		採水/自動採水器設置・分析
			出水時		自動採水器設置
常時	自動記録式濁計				

- ✓ 雨水、土壌、地下水の調査は、菊池川流域内における雨量観測地点（国土交通省所管）及び湧水箇所で行った。
- ✓ 河川水の採水は、菊池川水系下流において潮汐の影響のない水位観測所（菰田や城水位観測所付近）、並びに上流部の小流域等にて実施した。

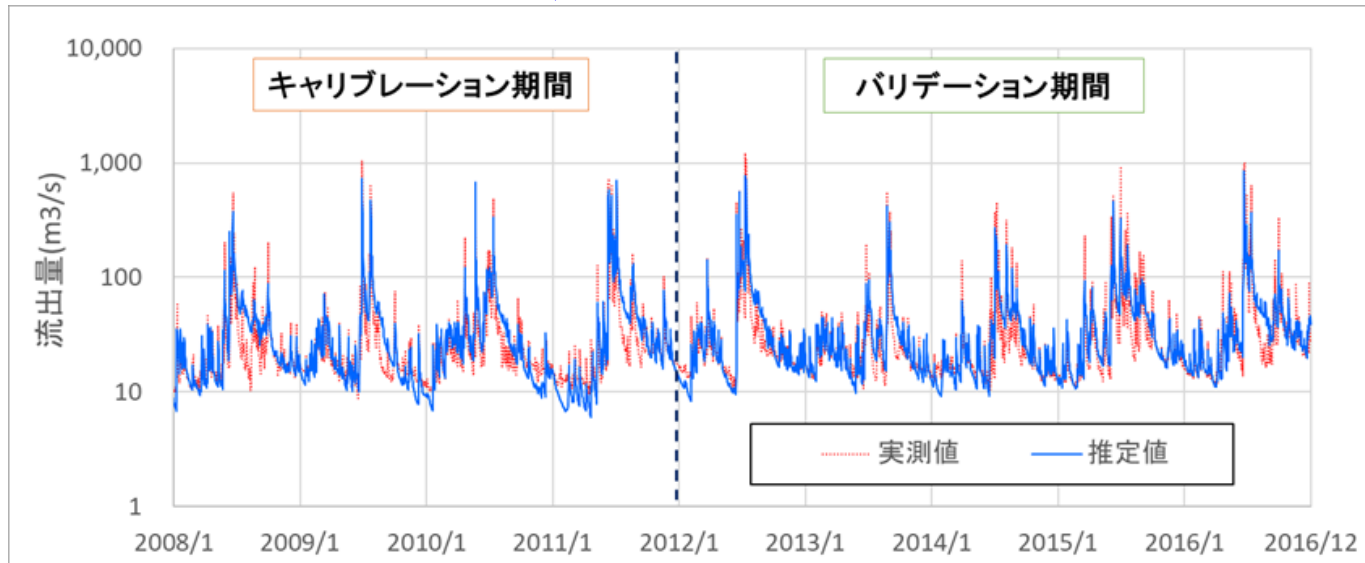


## (2) 調査の目的と概要

### v. モデルの構築

#### ➤ 水流出量

- ✓ RSR、NSE、PBIASという3つの評価指標※を用いてモデルの推定精度を評価した結果、いずれの指標についても、概ね「**Good**」から「**Very Good**」の評価が得られた。
- 菊池川流域における、降水量に応じた水の流出特性を捉えることができた。



流出モデルの評価指標と精度評価基準 (Moriassi et al. (2007)より引用)

評価レベル	RNR	NSE	PBIAS (%)		
			水	土砂	N, P
Very good	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 \leq PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 \leq PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$	$PBIAS \geq \pm 70$

#### ※ 3つの評価指標

**RSR** (RMSE-observations Standard deviation Ratio)

- 観測値と予測値のRMSE（二乗平均平方根誤差）を観測値の標準偏差で割ったもの。平水時と出水時のようなばらつきの大きい観測データを考慮した指標。

**NSE** (Nash-Sutcliffe効率係数)

- 流量のばらつきの大きさを考慮して流出モデルの精度を評価する指標。

**PBIAS**

- 評価したデータの偏りを100分率で示したものの。PBIASが0であれば偏りがなく、正であればモデルが過小評価、負であれば過大評価であることを示す。

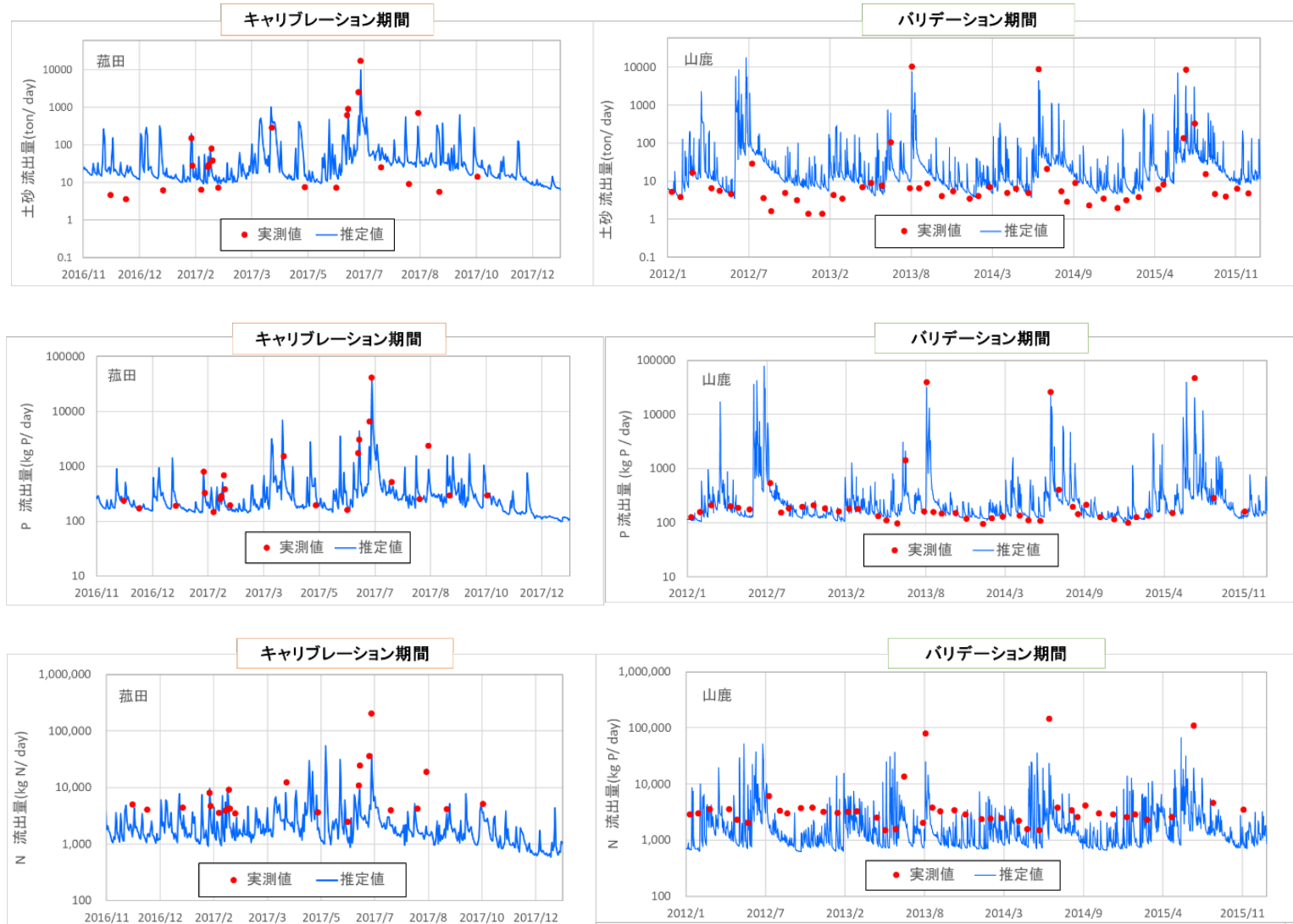
## (2) 調査の目的と概要

### v. モデルの構築

#### ➤ 土砂量・栄養塩量

- ✓ RSR、NSE、PBIASを用いた指標による評価で、土砂量とリンの推定結果は、概ね「Good」から「Very Good」と高い精度が確認できた。
- ✓ 窒素は過少推定の傾向となり、指標による評価の大半が「Unsatisfactory」であり、精度の高い推定結果が得られたとは言えない。
- ✓ ただし、後述の「森林のストック機能」において、森林における窒素収支には妥当な値が得られていることから、モデルにおいて、実測地点上流部の他の土地利用からの窒素流出量が過少に計算されている可能性がある。

→ 菊池川流域における、降水量に応じた土砂量・栄養塩量の流出特性を概ね捉えることができた。



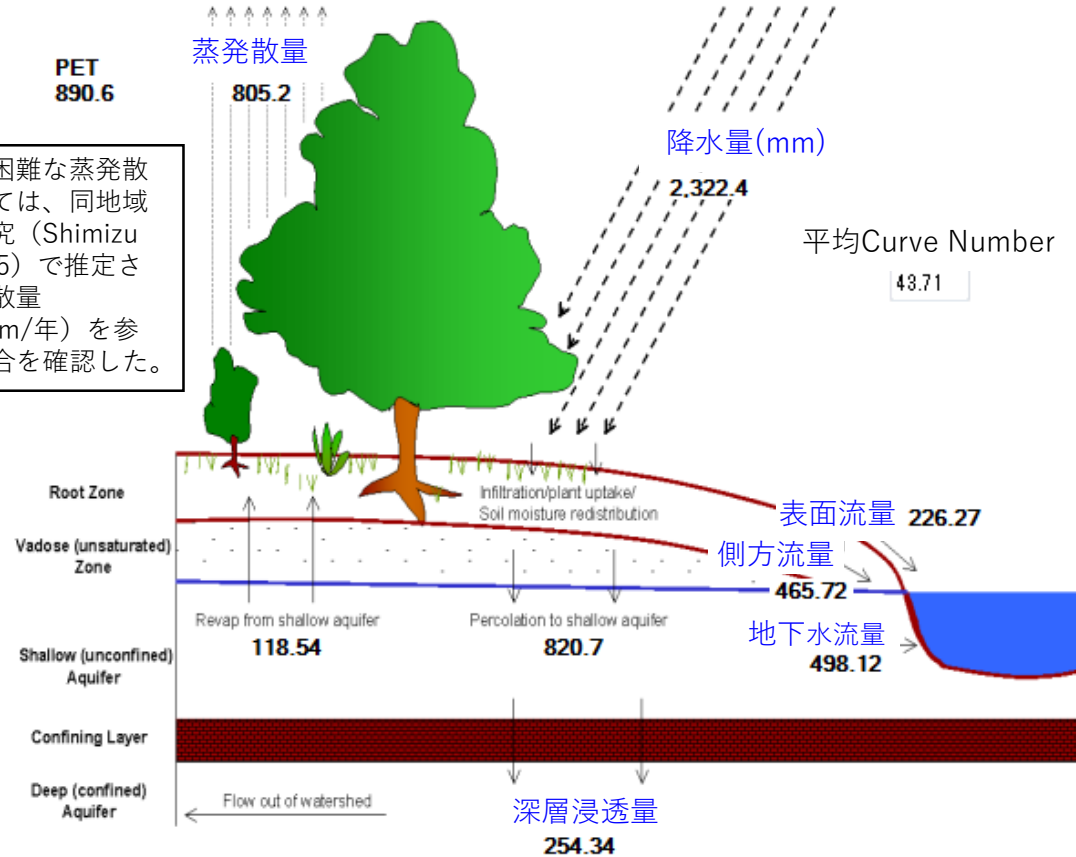
# (3) 解析の結果

## i. 水収支について

### ➤ 水収支 (流域全体)

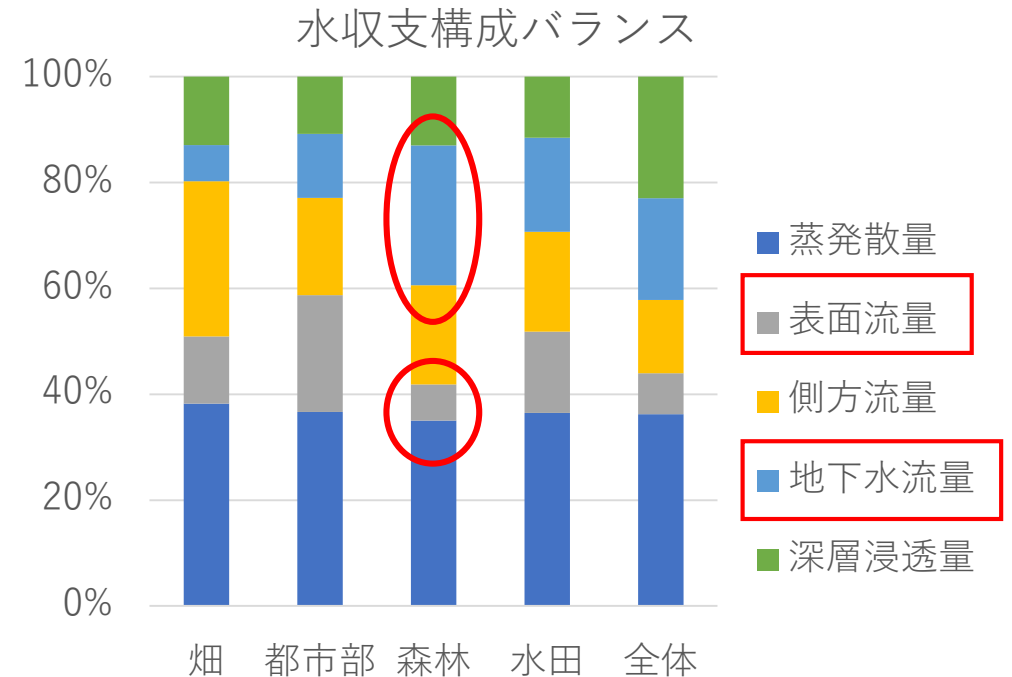
- ✓ 森林域に降った雨は、森林内の表層や地中から流域に注ぐものが**51%**、蒸発散\*により大気に戻るものが**35%**、地下に浸透するものが**11%**程度である。

※実測が困難な蒸発散量については、同地域の既往研究 (Shimizu et al. 2015) で推定された蒸発散量 (825.7mm/年) を参考に、整合を確認した。



### ➤ 水収支 (土地利用別)

- ✓ 森林は、他の土地利用と比べて表面流が少なく地下水流量が多い。  
→ 森林の水源涵養機能

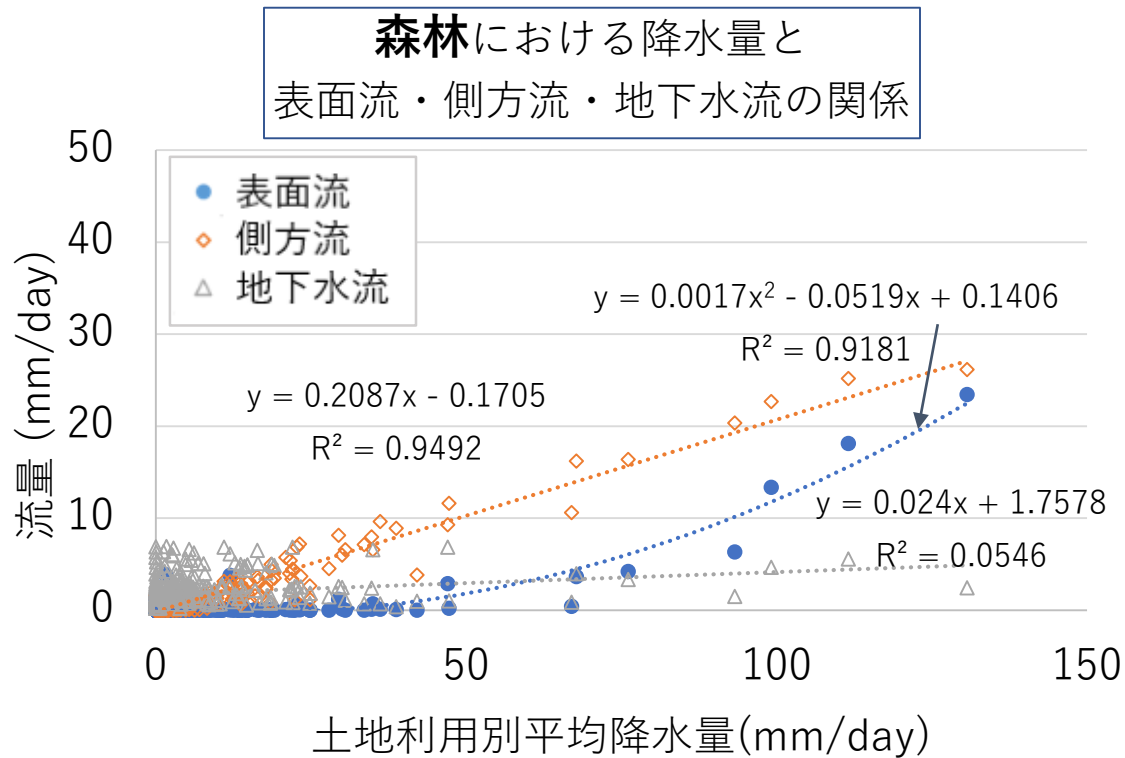


### (3) 解析の結果

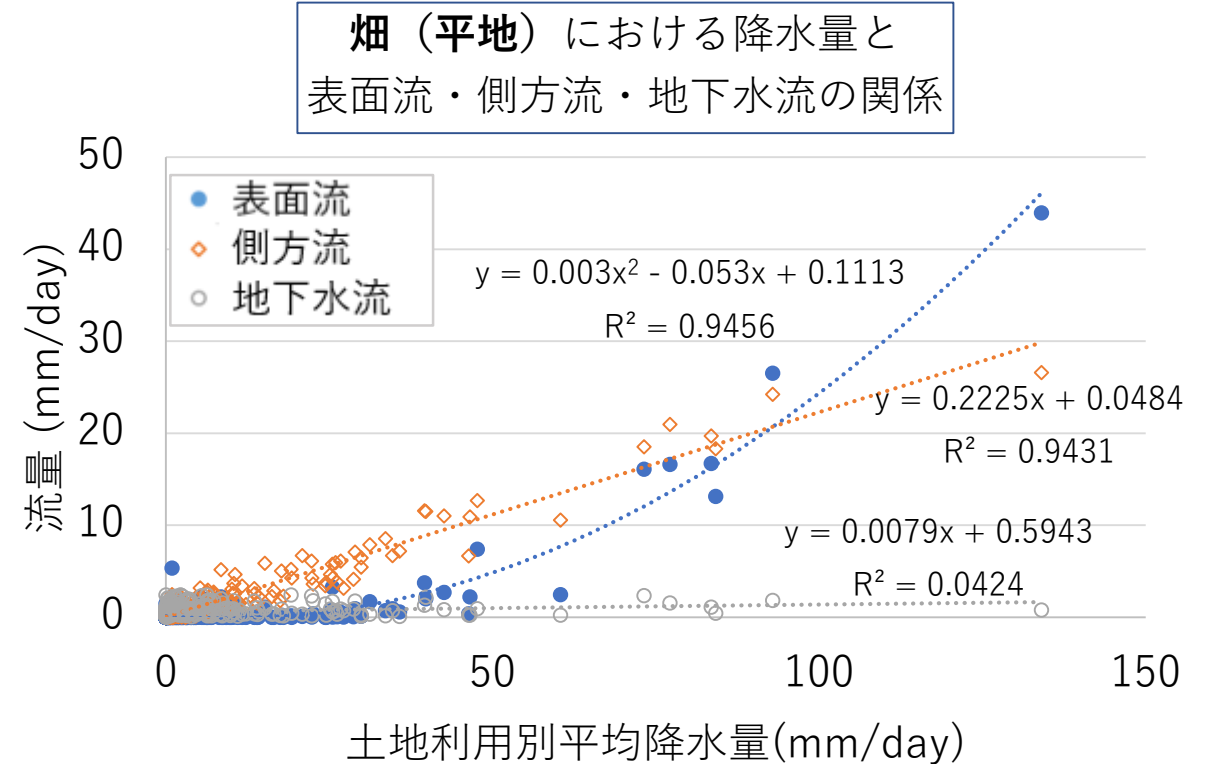
※2008年のシミュレーション  
結果値を集計

#### ii. 森林の水源涵養機能について

- ▶ 降水量に応じた水の流出量を表面流・側方流・地下水流に分けてプロットし、森林と畑（平地）とでその分布を比較した。



- 森林では、雨が強まっても表面流は側方流を上回らない。



- 畑では、雨が強まると表面流が側方流を上回り、森林に比べ表面流の最大値が大きくなる。

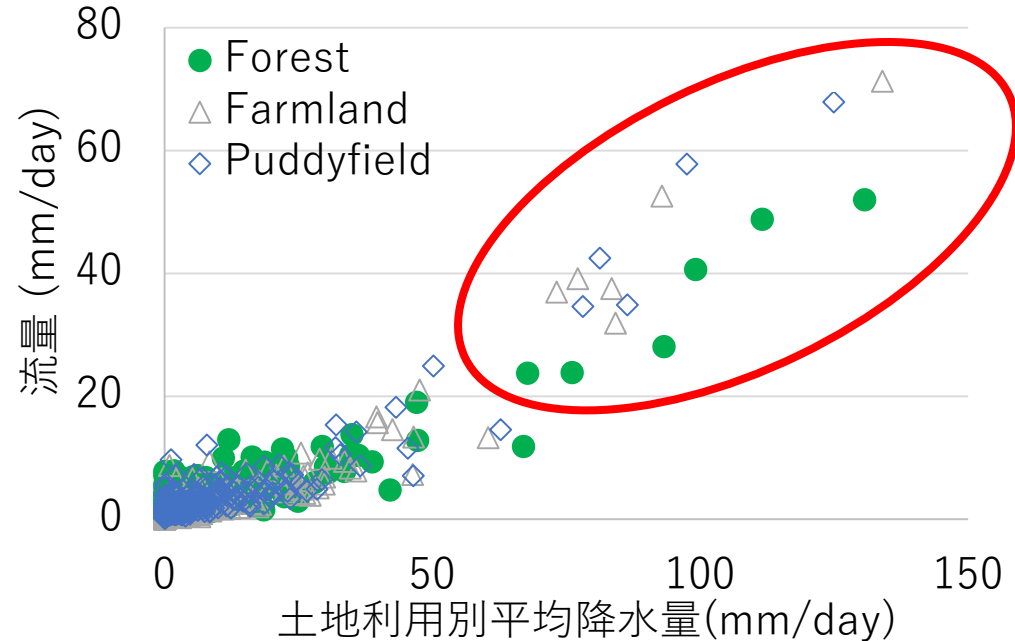
# (3) 解析の結果

## iii. 森林の水の流出平準化機能等について

※2008年のシミュレーション  
結果値を集計

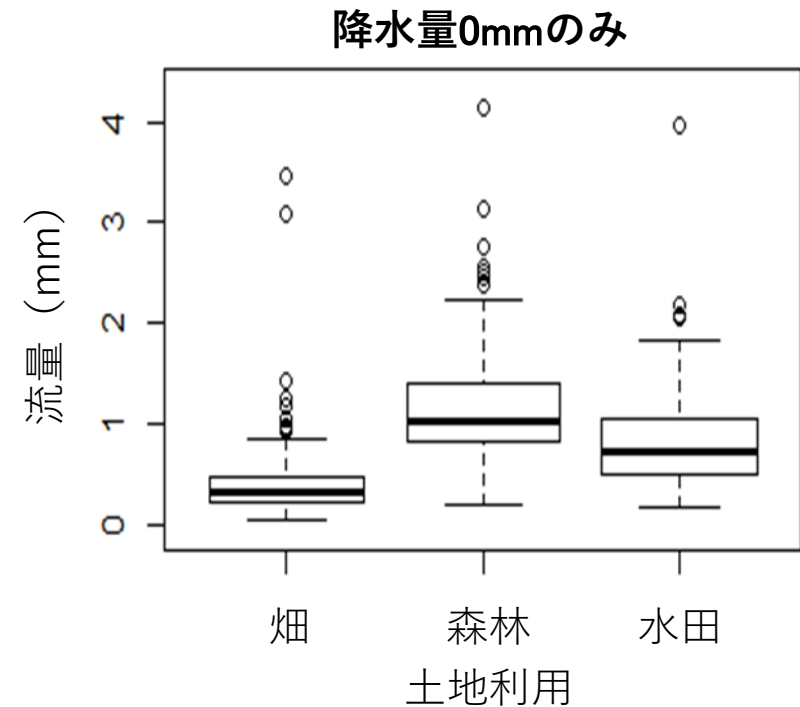
➤ 各土地利用における降水量に応じた流量の分布

水の流出（出水時）



- 森林では出水時の流出量が少ない  
→流出平準化機能（流出抑制機能）

水の流出（渇水時）



- 森林では渇水時の流出量が多い  
→流出平準化機能（流量安定化機能）

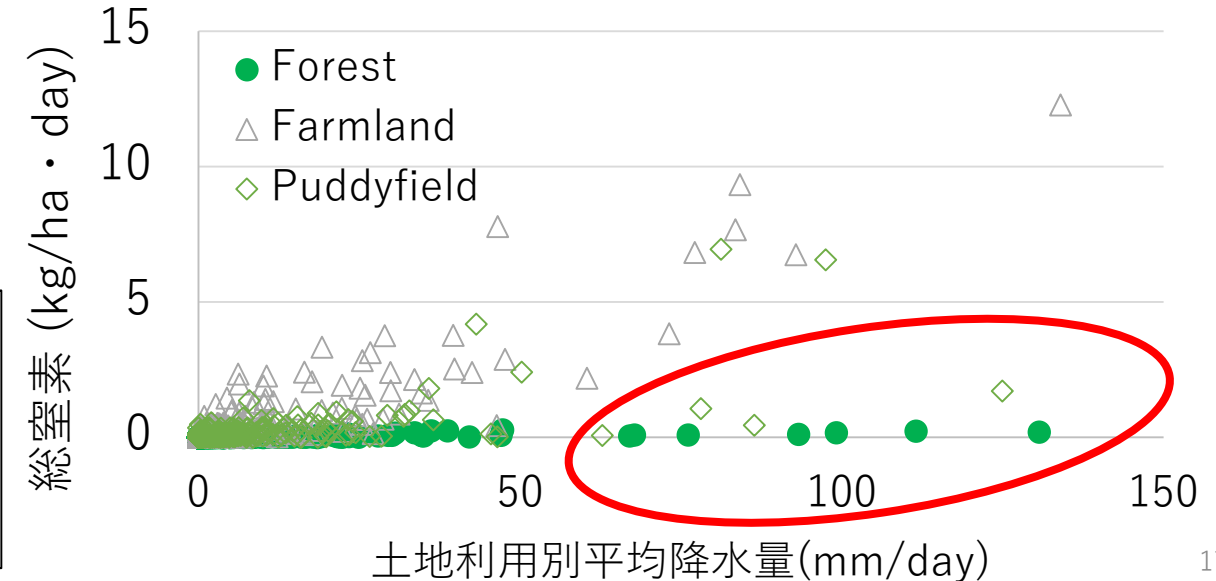
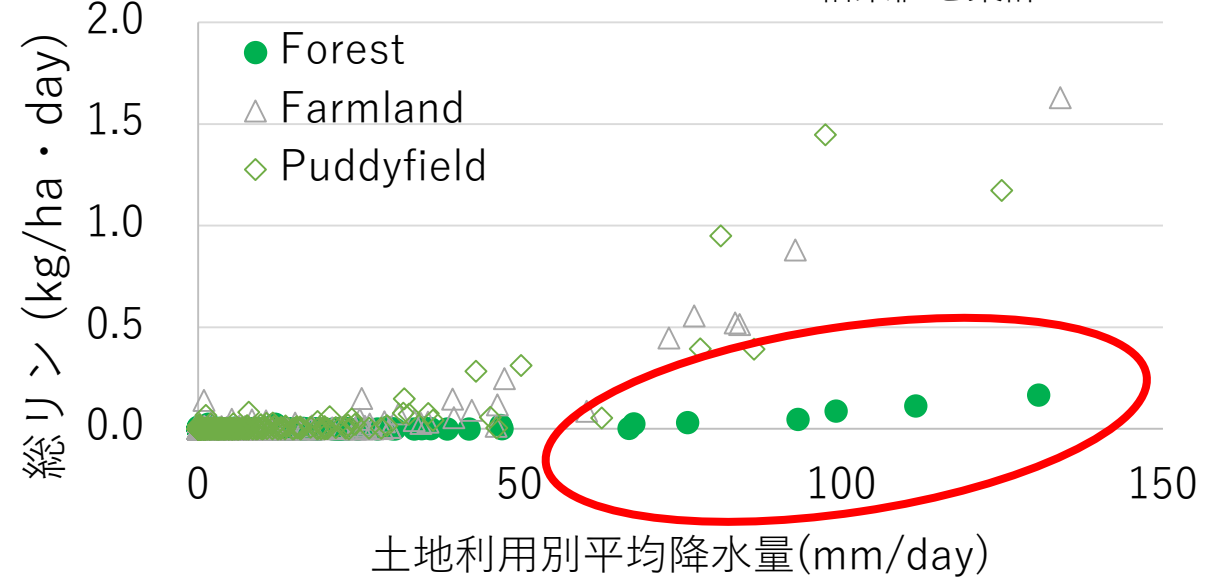
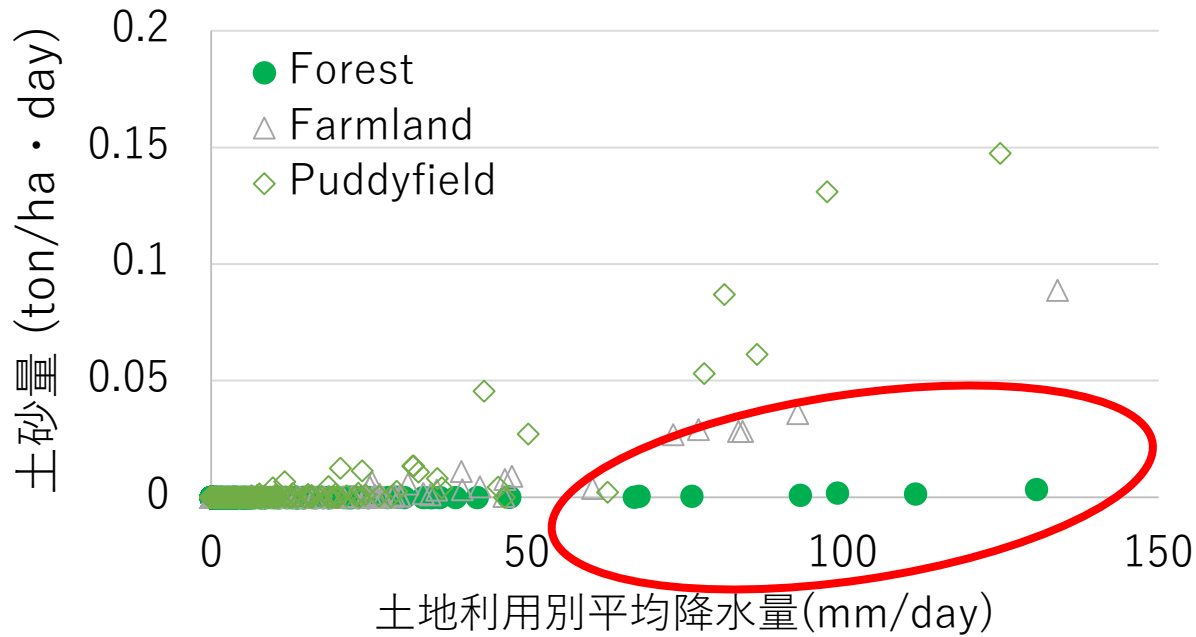


# (3) 解析の結果

## iv. 森林の物質の流出平準化機能等について

※2008年のシミュレーション結果値を集計

土砂・栄養塩（出水時）



- 土砂・栄養塩（リン、窒素）でも同様に、森林では出水時の流出量が少ない  
→流出平準化機能（流量安定化機能）
- 平水時の土砂、リンの流出量は、土地利用別に有意な差はなかった。

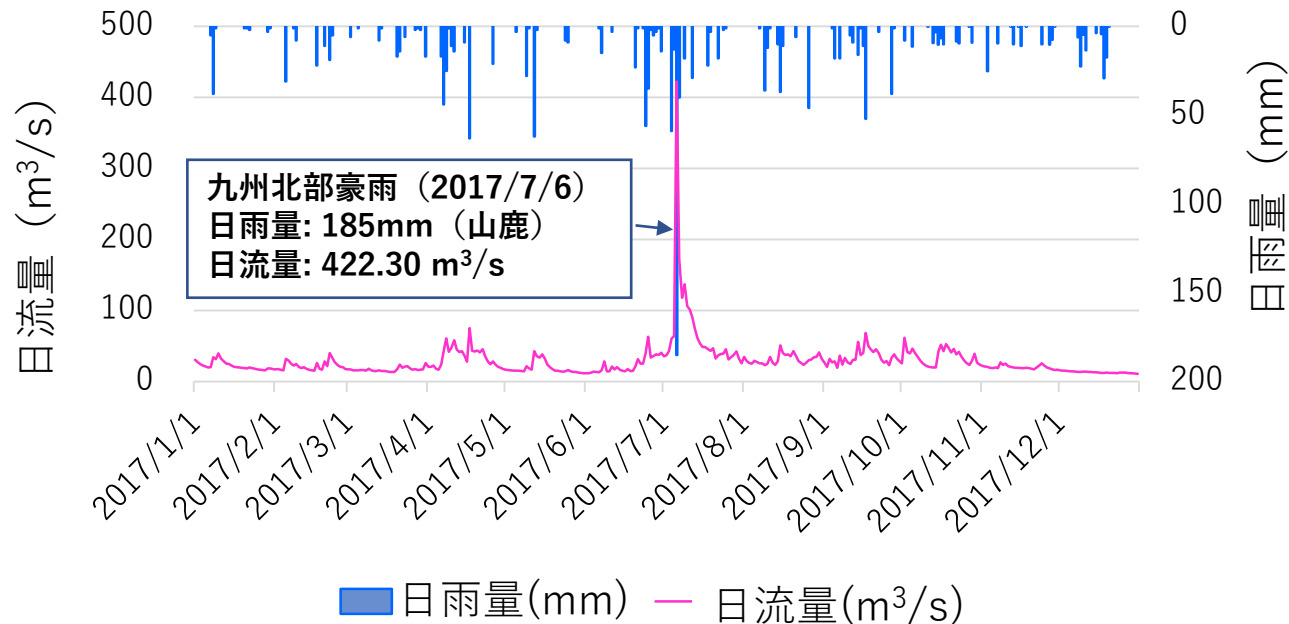
# (3) 解析の結果

## v. 森林の流出平準化機能等について

### 豪雨イベント時の各流出量への影響

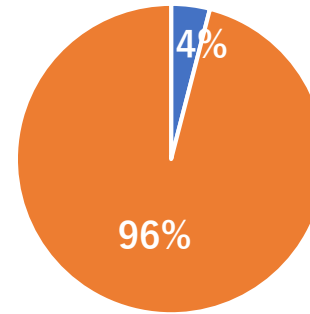
九州北部豪雨が発生した2017年の流量データ（SWATモデルによる推定値）を用い、年流出量全体に占める豪雨時（1イベント）とそれ以外の日の流出量の割合を算出した（右図）。

菊池川流域（菰田）における日流量（2017年）



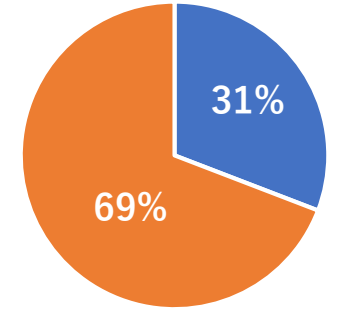
水流出量の割合

■ 豪雨時 ■ それ以外



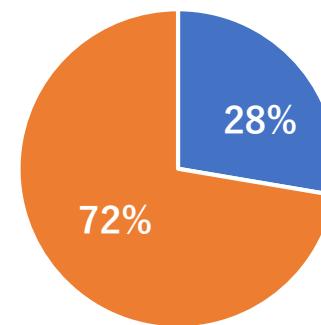
土砂流出量の割合

■ 豪雨時 ■ それ以外



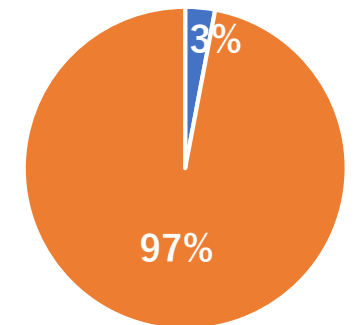
リン流出量の割合

■ 豪雨時 ■ それ以外



窒素流出量の割合

■ 豪雨時 ■ それ以外



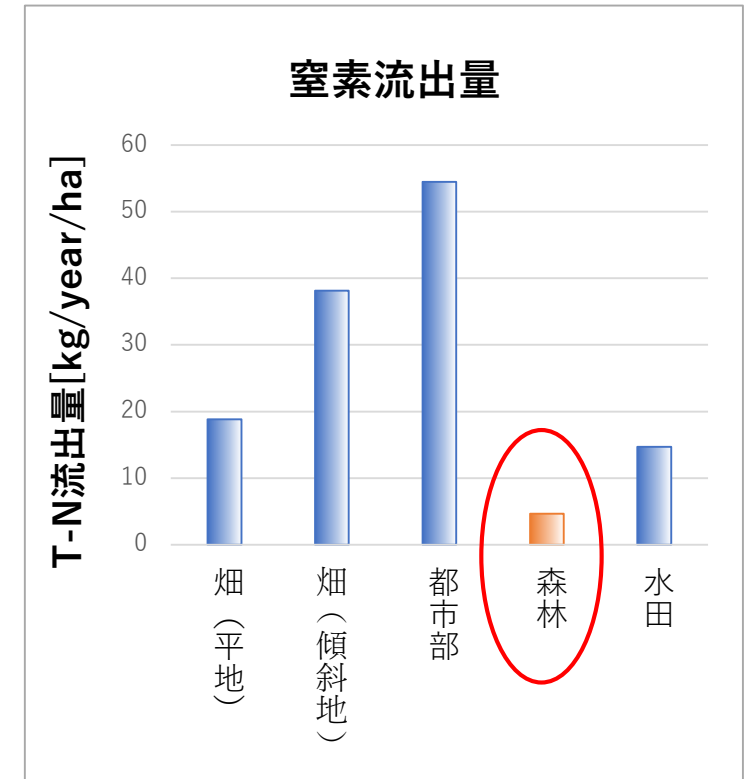
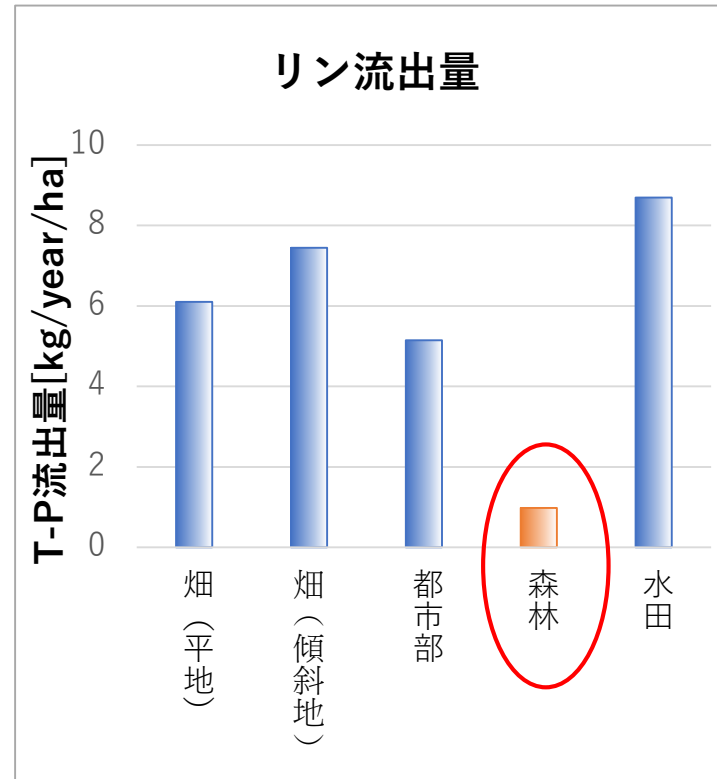
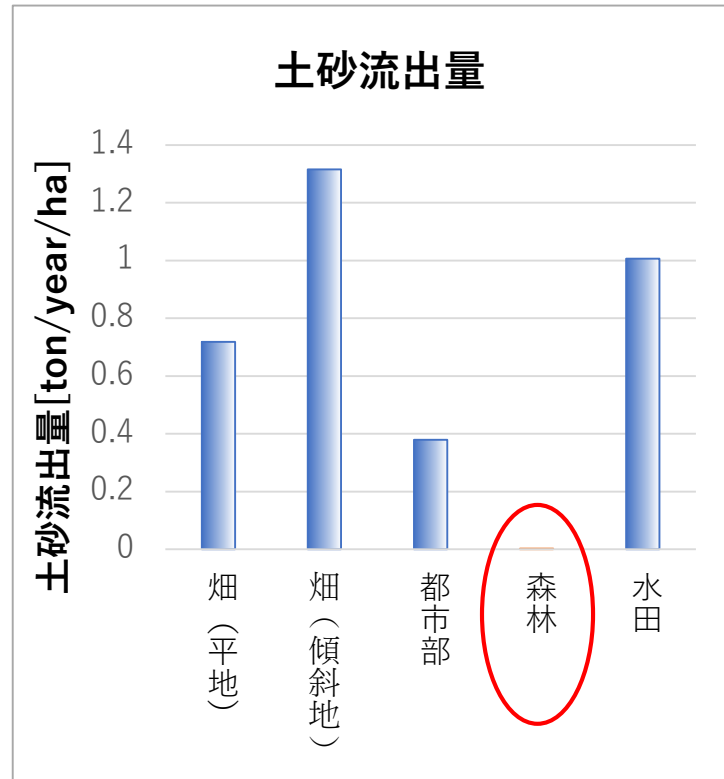
年流出量全体に対する九州北部豪雨時の流出量が年流出量全体に占める割合は、河川流量や窒素で3~4%だったのに対し、土砂、リンは30%程度と高い傾向にある。

→土砂、リンは豪雨時に多く流出する。ただし、前項の結果より、森林の存在が極端な流出を一定程度抑制していることが示唆される。

### (3) 解析の結果

#### vi. 菊池川全体の流出量との比較

➤ 主な土地利用別に土砂、リン、窒素の流出量を比較



- 森林地からの土砂、リン、窒素の流出量は他の土地利用に比べていずれも少ない。

# (3) 解析の結果

## vii. 森林のストック機能について

### ➤ 窒素 (N) インプットに対するストック機能

✓ 雨水に含まれる窒素をインプット、河川に流出する窒素及び脱窒量をアウトプットとして、森林の窒素ストック機能の評価を行った。

※SWATでは雨水中のリン (P) はインプットとして設定不可のため、ここでは窒素 (N) のストック機能の評価対象とした。

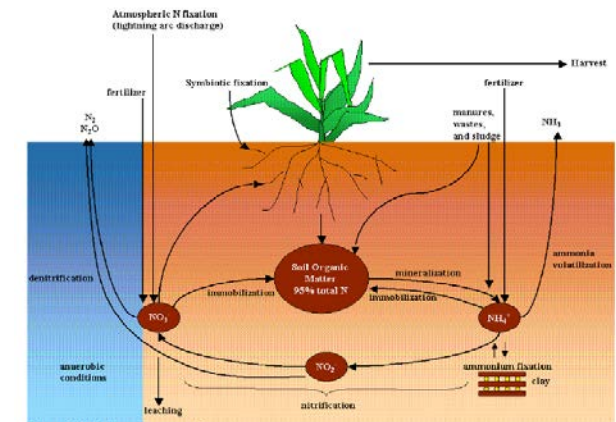
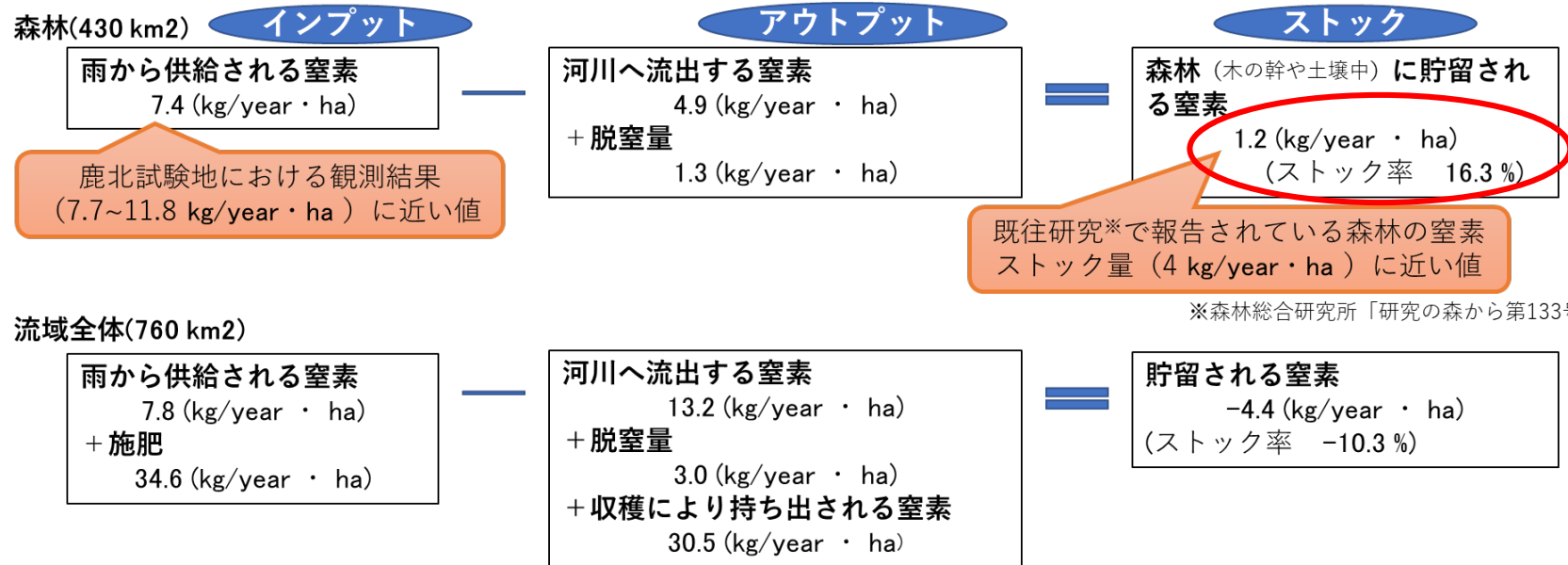


Figure 3-1-1: The nitrogen cycle

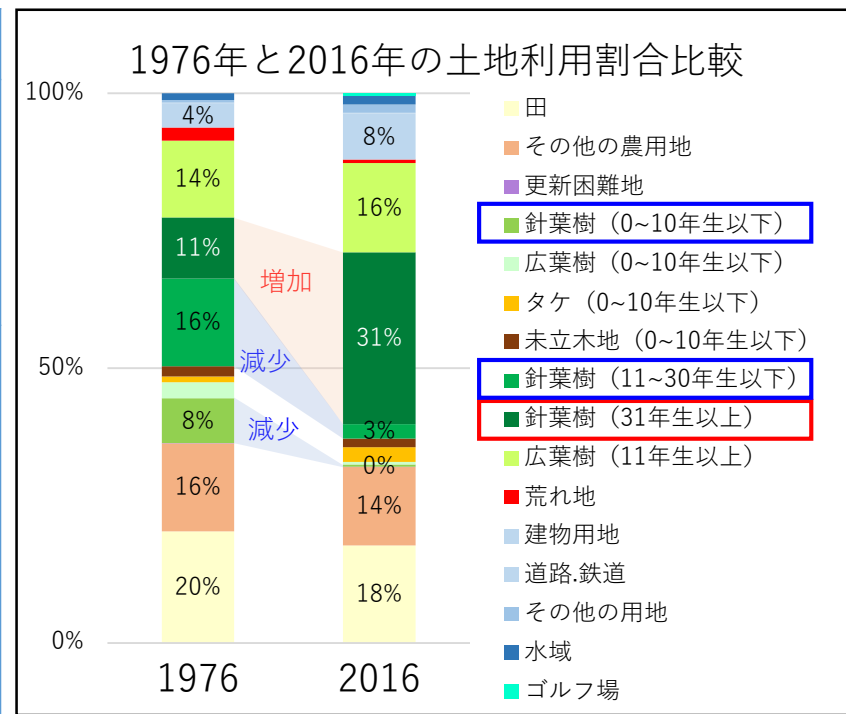
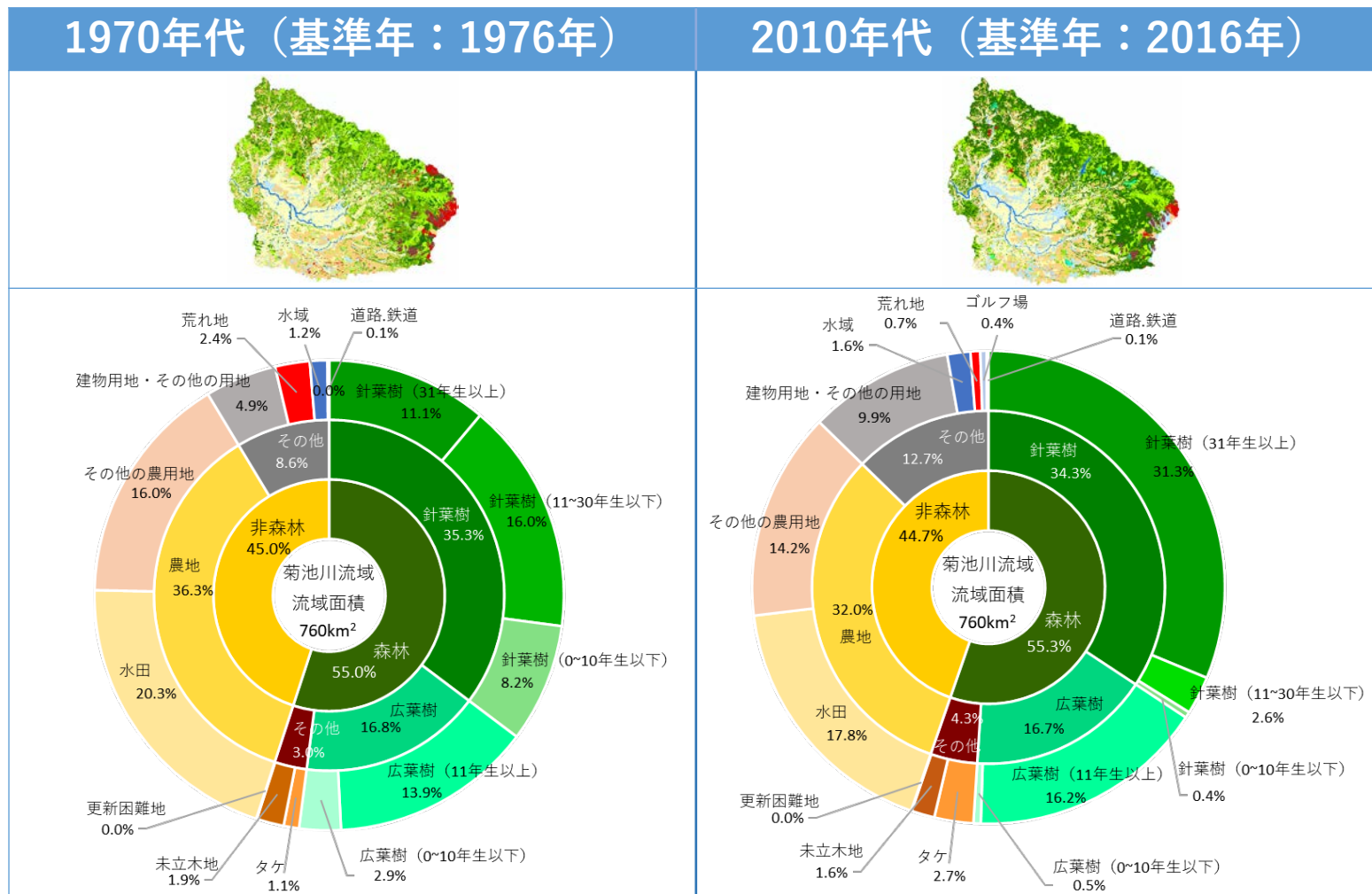
SWATモデルにおける窒素循環の模式図 (Neitsch et al. 2011 より)

- インプット量とアウトプット量を差し引きした窒素ストック量は、森林地では、**+1.2kg/year/ha** (貯留)、流域全体では**-4.4kg/year/ha** (流出) となった。  
→ **森林は、雨水から供給される窒素を貯留している (ストック機能)。**

# (4) 周辺域における森林の変化と流出について

## i. 過去の森林の構成と最近の森林の構成比較

➤ 「土地利用別」だけでなく、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も検証を行うため、2時点のデータを作成・比較した（樹種と林齢により森林タイプを細分化）。



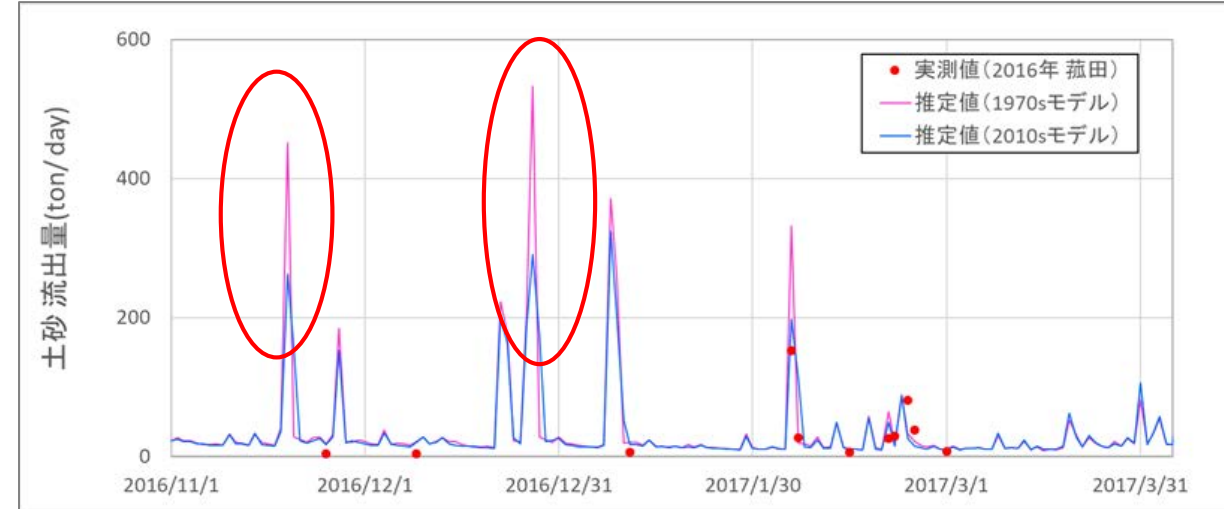
森林面積に大きな変化はないものの、以下の傾向が示唆される。

- 31年生以上の針葉樹の割合が増加し、30年生以下の針葉樹の割合が減少しており、**当該地域の森林の多くが成熟期に達している。**

# (4) 周辺域における森林の変化と流出について

## ii. 森林の経年変化による流出量等の変化

- 1970年代と2010年代の各土地利用や森林の構成等を反映したモデルによる流出量推定結果の比較 (右グラフは「土砂流出量」の例)
- ✓ 比較を可能にするため、両モデルに同じ気象条件 (2016~2017年) を設定した。
- ✓ 森林が成長した「2010年代モデル」結果の流出量の方がピーク流量を抑えている。



土地利用	面積 [km <sup>2</sup> ]		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 (平均)	760.0	759.6	1112	1145	0.40	0.35	3.76	3.66	11.6	14.0

- 森林の成長により、年間の土砂流量は抑制され、リンも減少傾向。
- 窒素は森林の変化にあまり影響しない傾向がみられた (1970年代モデルのポイントソースの設定について見直しが必要)。

## (5) 本事業の成果まとめ

### i. 本事業の成果まとめ

#### ➤ 森林の水源涵養機能

- ✓ 他の土地利用と比較して、平水時に地下水流量が多く、出水時は表面流を抑える傾向にあったことから、森林の水源涵養機能が示された。

#### ➤ 森林の流出平準化機能

- ✓ 森林は、渇水時に水を安定的に供給し出水時に抑える効果があることが示された。土砂・栄養塩については、出水時に同様に流出を抑えていたが、渇水時の流量安定化機能は有意には示されなかった。

#### ➤ 森林のストック機能

- ✓ 窒素循環関係パラメータにはやや改良の余地を残すものの、雨水から供給される窒素は森林によって貯留されることが一定程度示された。

#### ➤ 森林の経年変化による各種機能の変化

- ✓ 森林の成長により、年間の土砂流量は抑制され、リンも減少傾向。窒素は、森林の変化にあまり影響しない傾向がみられた。

森林の機能（水源涵養、流出平準化、ストック機能）をデータから定量化・可視化し、**森林が海域に果たすポジティブな役割を一定程度明らかにすることができた。**



本解析より得られたデータを用いて、SWATモデルで**シナリオ解析**を行うことにより、森林の変化によって森林のもつ機能がどのように変わるかを検証することで、**陸域（森林）と海域の関係について予測・評価を行うことが可能。**

### vii. 課題

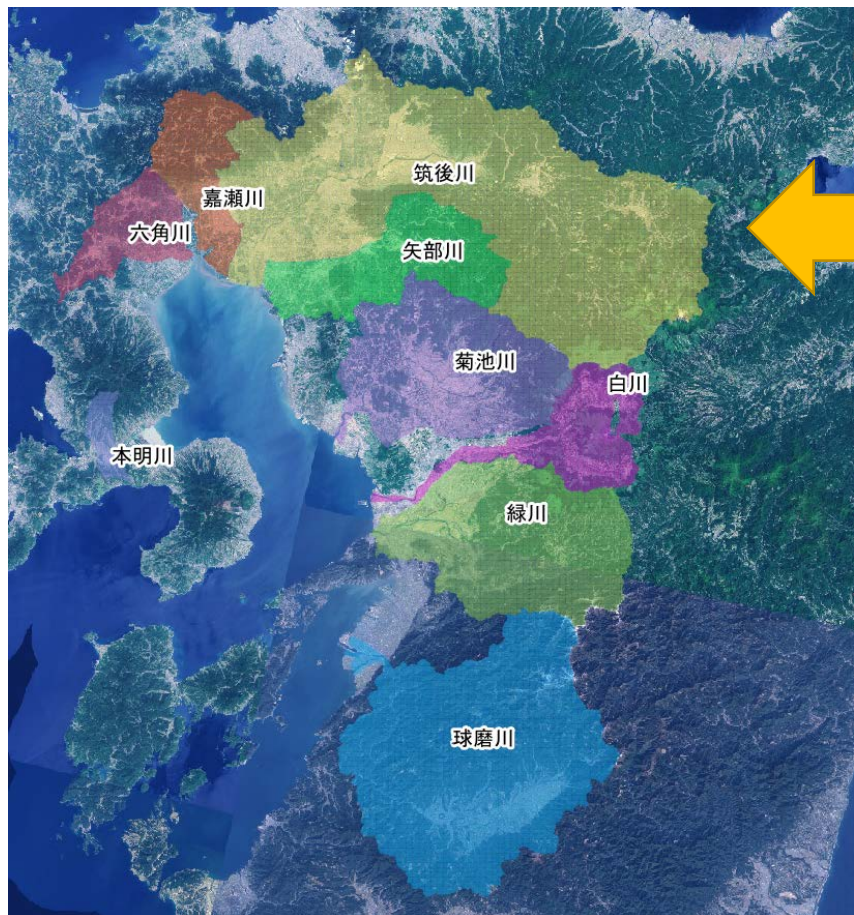
#### ➤ 不足している知見について

- ✓ 有明海・八代海等に注ぐ他の河川流域の流出特性を把握しておらず、当該海域周辺の森林全体としては、当該海域にどのように影響を及ぼしているかについては、定量的に明らかになっていない。
- ✓ 水、土砂並びにリン・窒素以外の物質が森林から当該海域への流出に関する知見が不足している。

## (5) 今後の調査の方向性について

### ii. 菊池川モデルの他流域（一級河川）への適用

- 今後、有明海及び八代海へ流入するすべての一級河川に、これまで構築してきた「**菊池川モデル**」をベースとして同様の解析を行っていく。



年度	モデル構築予定
~2019年	菊池川(済み)
2020年	筑後川、球磨川 (注)
2021年	緑川、白川、矢部川、本明川、六角川、嘉瀬川

(注) 今般の被災を受けて変更も視野に検討中

当該海域に流入する主要河川流域における水や物質の流出特性の把握およびデータの多角的な分析を行い、**森林からの水や物質流出が有明海等の閉鎖性海域に与える影響について総合的な評価**を行うよう、引き続き調査を継続。

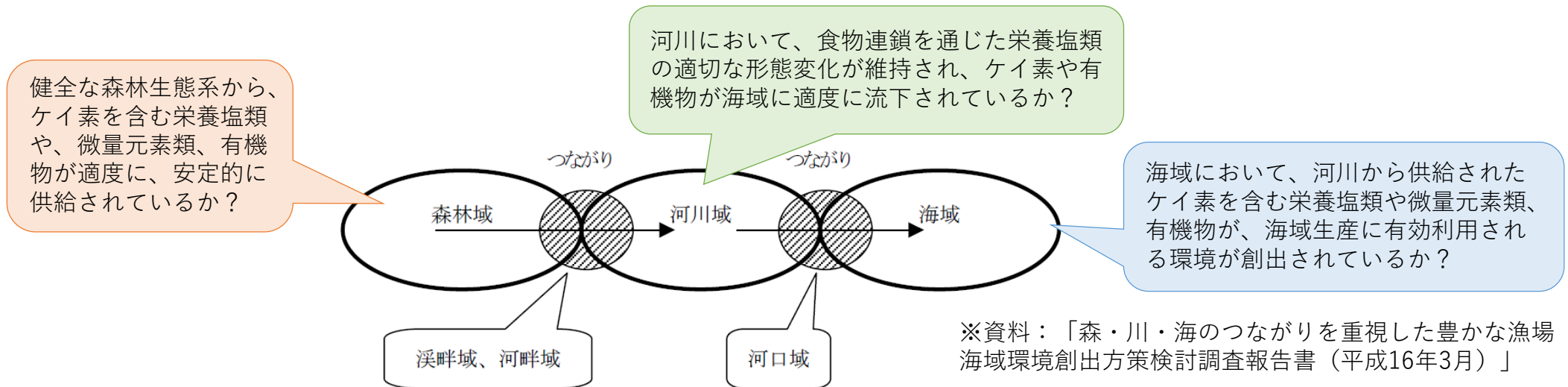


## (5) 今後の調査の方向性について

### iii. 本調査の解析対象外の物質への対応方向

#### ➤ これまでの成果と今後の対応

- ✓ 本事業の調査により、降雨や土地利用の状態に応じた、森林から流出する水、浮遊土砂、リン、窒素の動態については一定の知見が得られた。
- ✓ 一方、豊かな漁場海域環境を創出していくためには、「森・川・海のつながり」を意識した長期的な視点や連携方策が重要\*とされており、連動性を考慮するためにも、海域側で必要としている情報を把握し、森林域で調査すべき物質に不足がないかを再確認する必要がある。



- ✓ 本事業では未検証の栄養塩類（ケイ素等）、微量元素（ミネラル）、落葉落枝等由来の有機物等を対象に、引き続き、追加調査の必要性の有無・調査方法等について検討を行う。