

1. 底質の改善、河川からの土砂流入量の把握

1.1 底質環境調査

農林水産省では、底質改善対策の検討に資することを目的とし、2014(平成 26)年度から 2018(平成 30)年度に、下記の調査を実施した。

1.1.1 底質環境調査

(1) 調査内容・方法

2004(平成 16 年)度から 2007(平成 19)年度に、九州農政局が行った底質攪拌調査及び県が実施した既往底質調査の結果をもとに、含泥率などの底質特性によるクラスター分析を行い、2008(平成 20)年度に底質改善対策の検討に資する底質特性格別海域区分図を作成した。2009(平成 21)年度以降は、クラスター分析による底質区分の主な支配要因である含泥率に応じて、底質攪拌調査結果を区分図に反映した。

(2) 底質特性格別海域区分図の作成

底質特性格別海域区分図の作成方法は以下に示すとおりであり、2019(令和元)年の図は本編第 2 章 2.5.1 に記載した。

- ・試料はグラブ式採泥器(採泥面積 0.15m×0.15m、重量 10kg)により海底表層から採取
- ・クラスター分析では、81 調査地点における 8 項目の底質特性(中央粒径、含泥率、含水率、全硫化物、強熱減量、COD、全窒素、全リン)を用いて分析し、以下の 4 つに区分
- ・2004(平成 16)年度から 2018(平成 30)年度までに 366 地点(クラスター分析に用いた 81 地点を含む。)を調査し、区分図に反映

<区分>

- A(砂):有機物量が少なく嫌気化していない(砂分が 80~90%程度)
- B(泥混じり砂):有機物量はAよりも多いが、富栄養化が問題になるレベルにはない(砂分が 60~70%程度)
- C(砂混じり泥):有機物量がさらに増加して富栄養化が進んでいる(泥分が 70~80%程度)
- D(泥):富栄養化と嫌気化により底質環境が悪化している(泥分が 80~90%程度)

出典:滝川 清(2013)「有明海の底質環境と底生生物の分布特性—貝類漁場の改善に向けて—」海洋と生物

1.2 有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査

林野庁では、2012(平成 24)年度より、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・整理を開始した。さらに、2015(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、公表されている実測データや現地調査によるデータ収集を行った上で、流出モデルを用いた水量、浮遊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。

ここでいうポジティブな影響として、日本学術会議の答申(2001(平成 13)年)で示された森林の有する公益的機能のうち水源涵養機能及び土砂災害防止機能・土壌保全機能と有明海・八代海との関係に着目し、これらの機能の発揮に係るいわゆる森林の流出平準化機能とストック機能について、次の観点で検討を行った。

- ・森林の流出平準化機能:森林による流出量の平準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

なお、本調査は、上記のように森林から河川への恒常的な流出について検討を行うものであり、豪雨時における山地崩壊等による土砂流出の影響等は考慮していない。

1.2.1 対象流域

森林が海域に及ぼす影響を評価する今回のような調査は初めての試みであり、流域の面積や森林の規模及び既存データの状況等から、効果的、効率的に実施できる流域として、有明海及び八代海へ流入する1級河川(全9河川)のうち、菊池川流域を選定した。菊池川の位置は図1.2-1に示すとおりである。



図 1.2-1 菊池川流域の位置

出典:環境省(2020)「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資料」

1.2.2 調査内容・方法

(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した。そのため、ここでは全流域を対象として、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られた。

(2) 対象物質の検討

「森・川・海のつながりを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い、海域生産に主に寄与していると考えられる 水量(流量)、土砂量、栄養塩(リン、窒素)量を選定した。

※1:水産庁漁港漁場整備部・林野庁森林整備部・国土交通省河川局

(3) SWAT モデルによる解析手法

解析に用いる流出モデルとしては、流域スケールでの評価や森林への適用に適し、対象物質、表流水及び地下水を含めた水文プロセスの評価が可能であること等を踏まえ、GIS との親和性の高い SWAT (Soil and Water Assessment Tool)モデルを選定した。SWAT モデルは、アメリカ農務省農業研究局及びテキサス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であり、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なモデルである。

調査開始時において、SWAT モデルを日本の森林に適用した前例は乏しかったことから、パラメータの調整等をゼロから行った。解析手法は図 1.2-2 に示すとおりである。

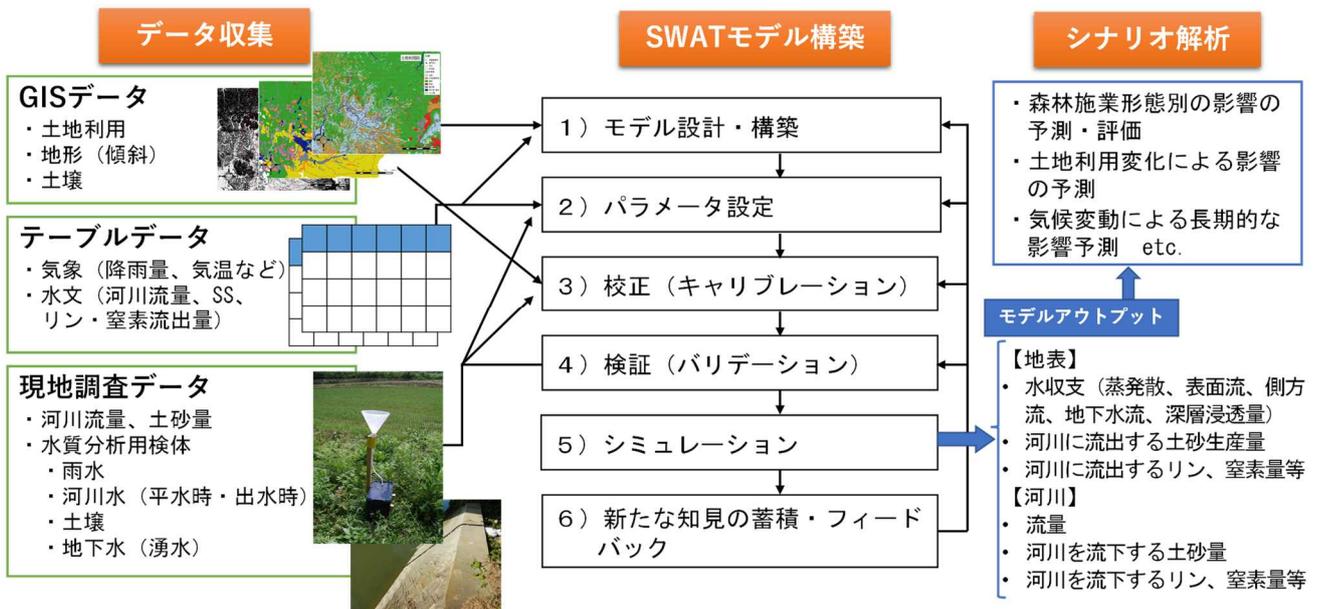


図 1.2-2 SWAT モデルによる解析手法

出典:環境省(2020)「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資料」

(4) モデル構築に必要な現地調査(2016(平成 28)年度～2019(令和元)年度)

2016(平成 28)年度から 2019(令和元)年度までに実施したモデル構築に必要な現地調査は表 1.2-1 に示すとおりである。雨水、河川、土壌、地下水等の調査を行い、窒素、リン、SS、濁度を測定した。

表 1.2-1 モデル構築に必要な現地調査(2016(平成 28)年度～2019(令和元)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"> ・ 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) ・ リン(有機態リン、無機態リン) ・ SS ・ 濁度 	
	河川	水質分析	平水時		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		
		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	平水時		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	

注)1.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。

2.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。

出典:環境省(2020)「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資料」

(5) モデルの構築

菊池川について流出モデルを構築し、水、土砂及び栄養塩(窒素、リン)の流出量について推定を行った。各物質の推定値の精度の検証には、RSR、NSE、PBIAS^{注)}という指標(以下、「精度評価指標」という。)を用いた。

なお、本モデルにおいては土地や植生等の特性に応じて区切った Hydrological Response Unit(以下「HRU」という。)ごとの水、土砂、栄養塩の発生量とそのうちの流出量を累計した河川への流出量を算出しているが、ここでは、河川への流出量を中心に報告するものである。このうち土砂については、浮遊土砂を取り扱うものである。

注)

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。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。

ア) 水流出量

流域全体の水流出量の実測値と推定値の推移は図 1.2-3 に示すとおりである。

いずれの精度評価指標についても概ね「Good」から「Very Good」の評価が得られたことから、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と考えられる。

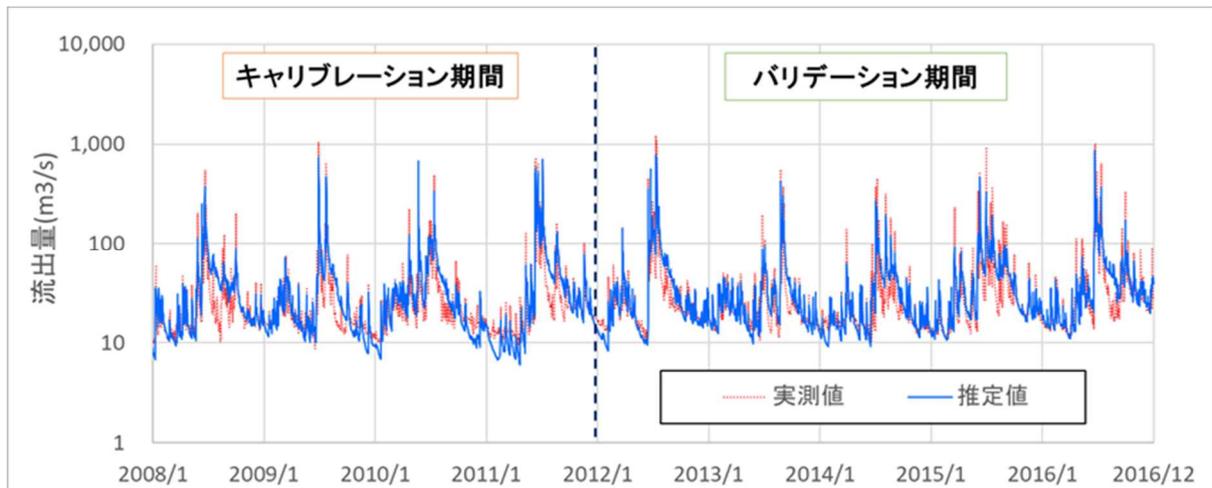


図 1.2-3 水流出量の実測値と推定値の推移

出典:環境省(2020)「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資料」

イ) 土砂流出量・栄養塩流出量

流域全体への土砂流出量(浮遊土砂相当^{注)})、リン流出量、窒素流出量の実測値と推定値の推移は図 1.2-4 に示すとおりである。

浮遊土砂量とリンの推定結果は、各精度評価指標について概ね「Good」から「Very Good」と高い精度が確認できた。一方で、窒素は過少推定の傾向で、精度評価指標が概ね「Unsatisfactory」となり、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」にみられるように、森林に限定してみると窒素収支には妥当な値が得られていることから、実測地点上流部の森林以外の土地利用からの窒素流出量がモデルにおいて過少に計算されている可能性があることに留意する必要がある。

これらを踏まえ、菊池川流域の森林域については、降水量に応じた土砂・栄養塩の流出特性を概ね捉えることができたと考えられる。

注)浮遊土砂相当:SWAT モデルでは、土砂についての基本的な流出メカニズムとして表面浸食を想定し、山地崩壊等の動的な土砂移動現象を想定していない。また、今回のモデルの土砂に関するキャリブレーションに用いた既存・実測データが浮遊土砂量(SS)であるため、本報告における推定に係る土砂は浮遊土砂相当として扱うこととした。

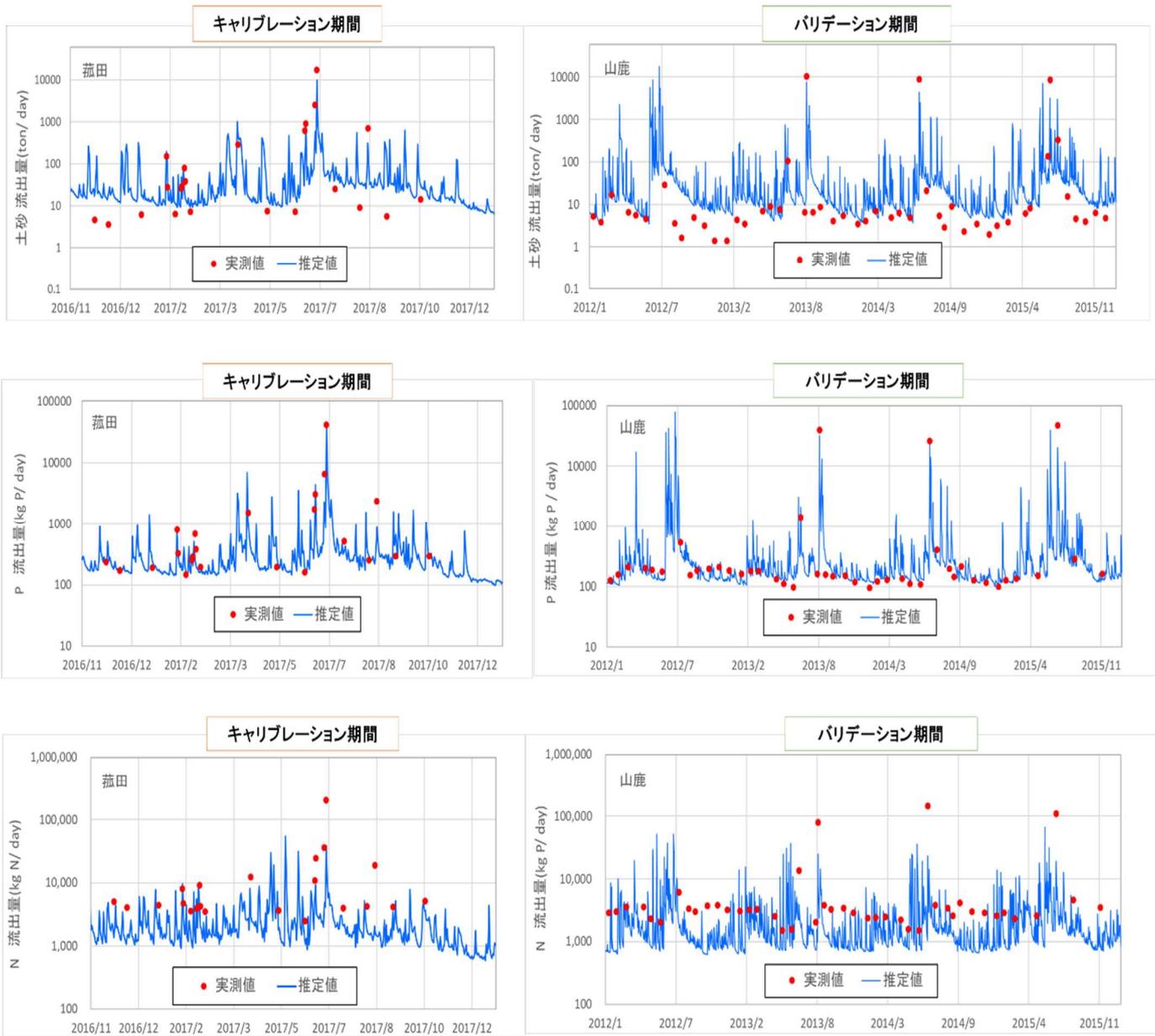


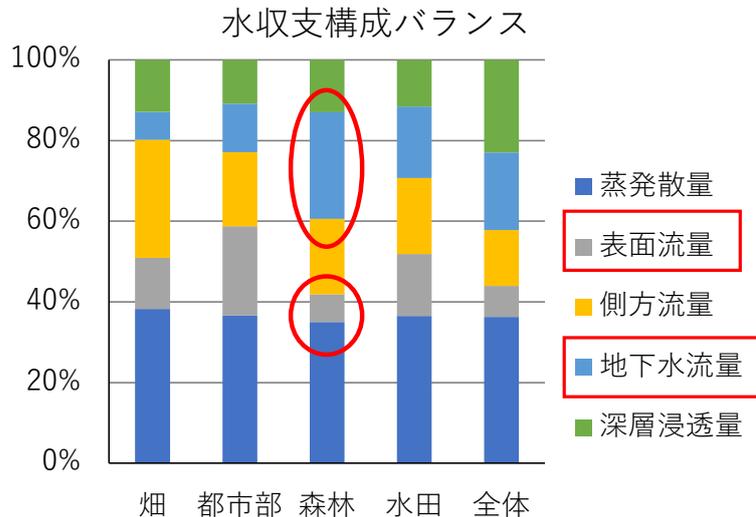
図 1.2-4 土砂流出量(浮遊土砂相当)、リン流出量、窒素流出量の実測値と推定値の推移

出典:環境省(2020)「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資料」

1.2.3 解析結果

(1) 水収支について

2008(平成 20)年から 2016(平成 28)年までのシミュレーションによる土地利用別の水収支の算定結果は図 1.2-5 に示すとおりである。これによると、他の土地利用と比べると森林の表面流は少なく、また、地下水流量が多いことから、森林の水源涵養機能を一定程度示す結果であると考えられる。



注)特徴的な結果を示す箇所を赤丸で表示。以降の図も同様。

図 1.2-5 土地利用別水収支の算定結果

出典:環境省(2020)「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資料」

(2) 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について、図 1.2-6 で表面流・側方流・地下水流に分けてプロットした(データ量が多いため、便宜上、2008(平成 20)年のシミュレーション結果のみを使用)。

例えば森林以外の土地利用として畑(平地)における降水量と表面流・側方流・地下水流の関係を図 1.2-7 において見てみると、雨が強まると表面流が側方流を上回り、森林に比べて表面流の最大値が大きくなっているが、森林では、雨が強まっても表面流は側方流を上回っておらず、森林域の特性として確認できたと考えられる。

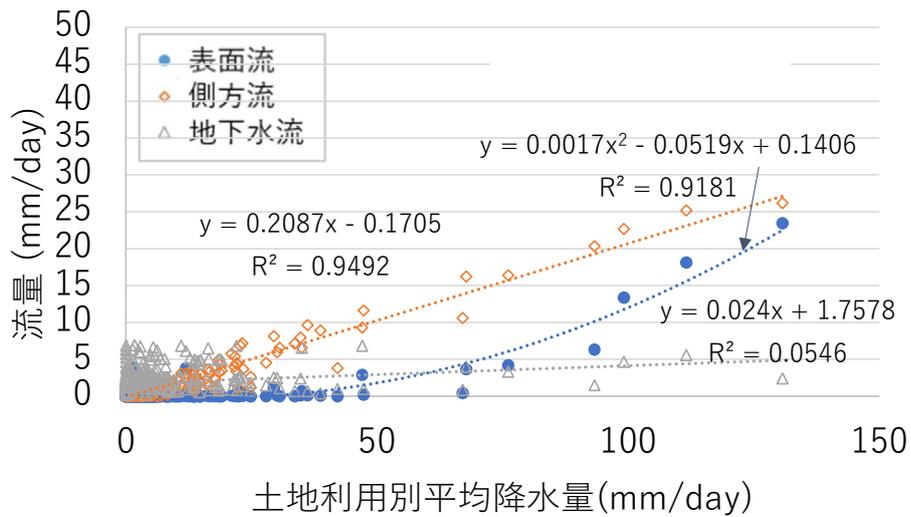


図 1.2-6 森林における降水量と表面流・側方流・地下水流の関係

出典:環境省(2020)「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資料」

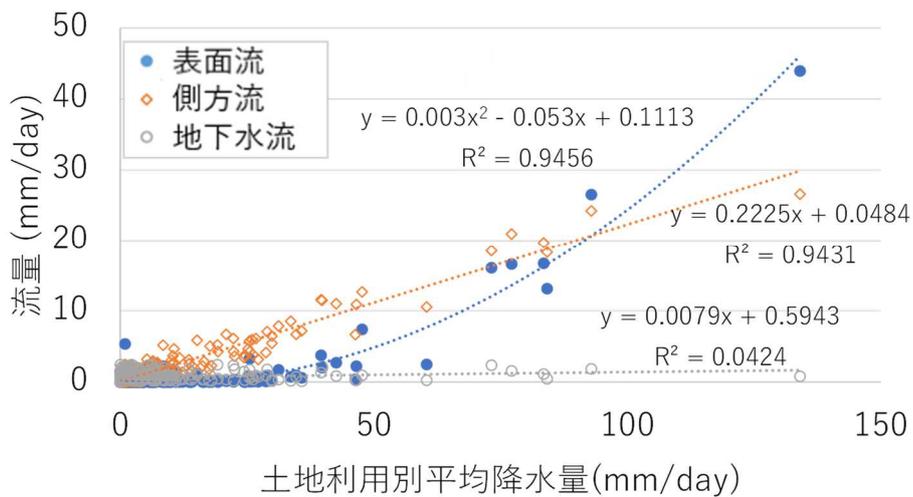


図 1.2-7 畑(平地)における降水量と表面流・側方流・地下水流の関係

出典:環境省(2020)「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資料」

(3) 森林の水の流出平準化機能等について

出水時及び渇水時の土地利用別平均降水量と流量との関係は図 1.2-8 に示すとおりである(データ量が多いため、便宜上、2008(平成 20)年のシミュレーション結果のみを使用)。

他の土地利用に比べ森林は出水時の流量が少なく、渇水時の流量が多いことが示されたことから、出水時には流出を抑制し、渇水時には流量を安定化させる流出平準化機能が示唆された。

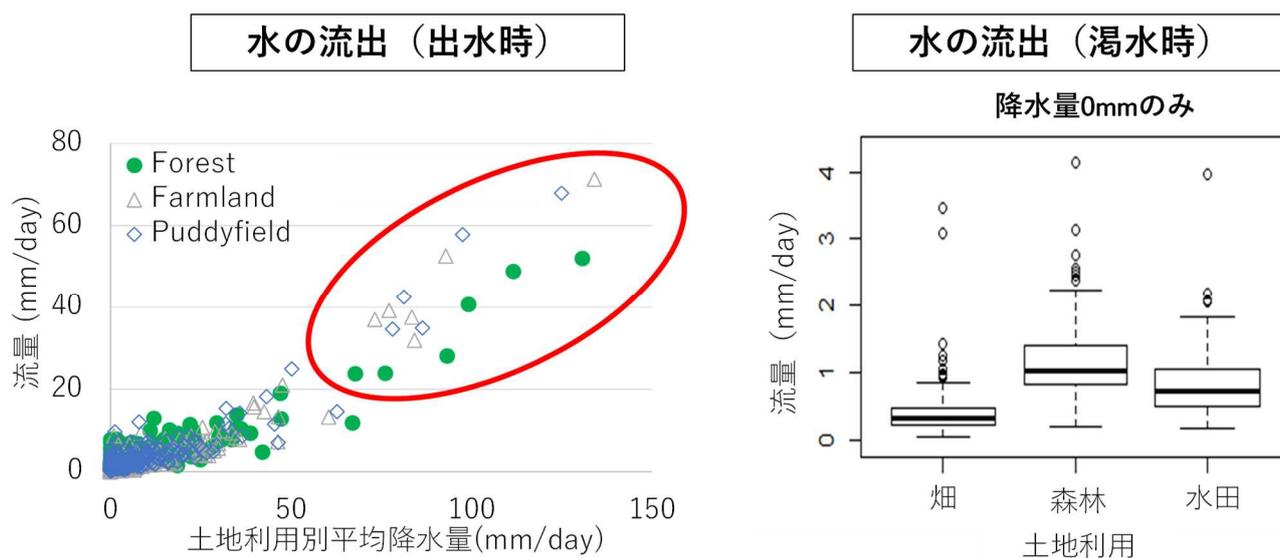


図 1.2-8 出水時及び渇水時の土地利用別平均降水量と流量

出典:環境省(2020)「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資料」

(4) 森林の物質の流出平準化機能等について

出水時の土地利用別平均降水量と土砂量(浮遊土砂相当)、リン、窒素の各流出量との関係は図 1.2-9 に示すとおりである(データ量が多いため、便宜上、2008(平成 20)年のシミュレーション結果のみを使用)。

これによると、森林における土砂(浮遊土砂相当)・栄養塩(リン、窒素)の流出量は水の流出と同様に、他の土地利用に比べ出水時には相対的に少ない結果となっており、流出平準化機能(流量安定化機能)が示唆されたと考えられる。なお、平水時の土砂(浮遊土砂相当)、リンの流出量は、土地利用別に有意な差は認められなかった。

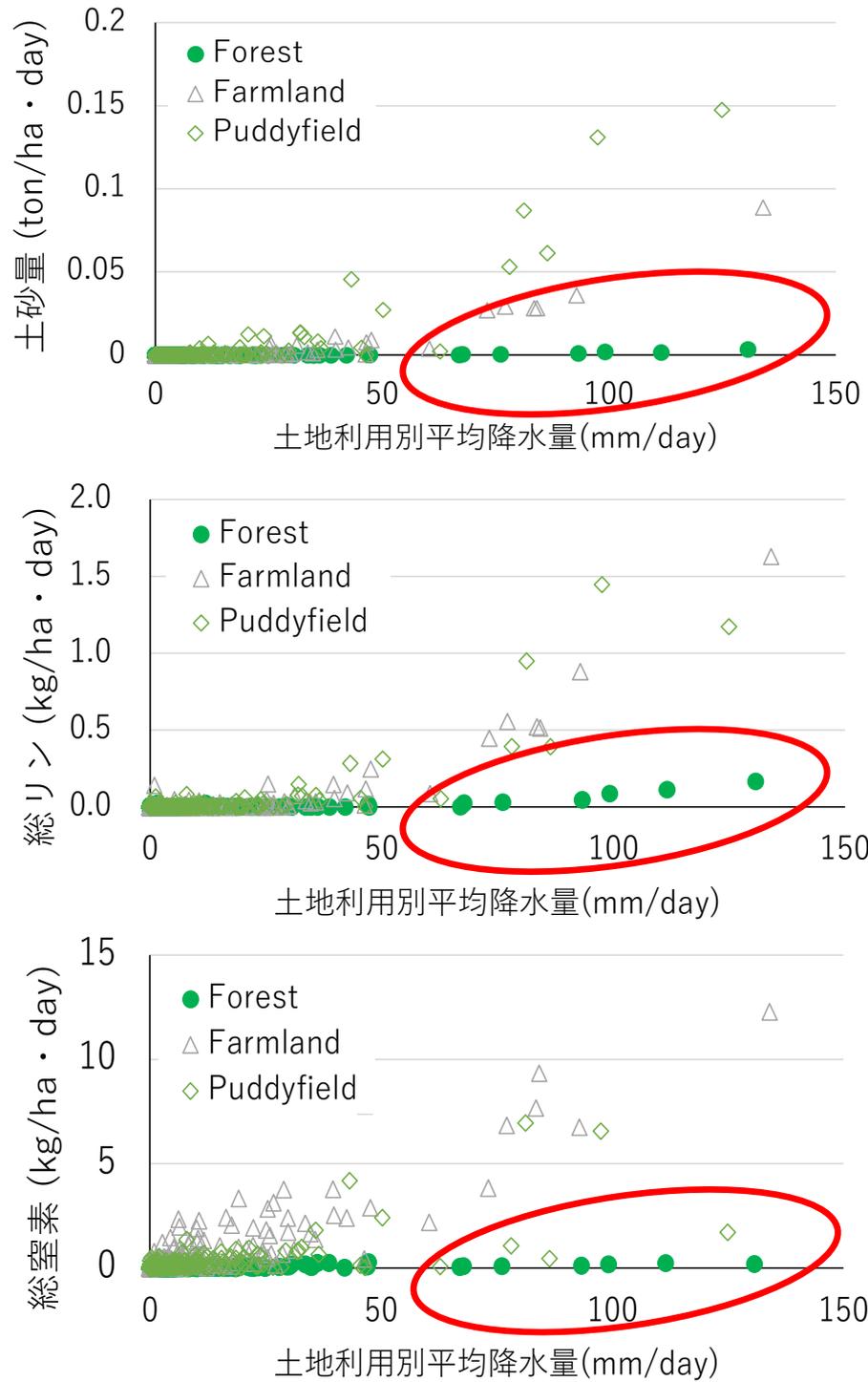


図 1.2-9 出水時の土地利用別平均降水量と土砂量(浮遊土砂相当)、リン、窒素の流出量

出典:環境省(2020)「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資料」

(5) 流域全体の土地利用別流出量

菊池川全体の土地利用別の年間の流出量は図 1.2-10 に示すとおりである。

森林からの土砂、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結果であった。

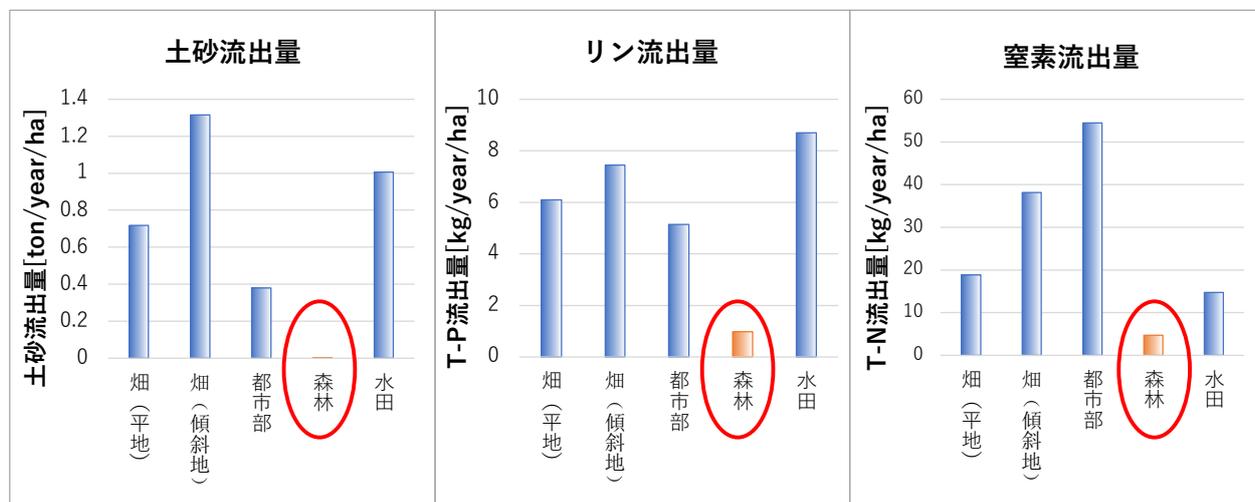


図 1.2-10 菊池川全体の土地利用別の年間の流出量

出典:環境省(2020)「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資料」

(6) 森林の流出平準化機能等について

平成 29 年 7 月九州北部豪雨が発生した 2017(平成 29)年の流量データ(SWAT モデルによる推定値)を用い、菊池川全体(森林域を含む)における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。豪雨時とそれ以外の水流出量、土砂(浮遊土砂相当)流出量、リン流出量、窒素流出量の割合は図 1.2-11 に示すとおりである。

前項の結果から、森林の存在が豪雨時における極端な流出を一定程度抑制していると捉えることはできるものの、年流出量全体に対する九州北部豪雨時の流出量の割合は、水流出量や窒素で 3~4%であるのに対し、土砂、リンは 30%程度と高い傾向にあり、流域全体で見ると土砂とリンは豪雨時に多く海域に流出すると言える。

なお、冒頭に記しているように本シミュレーションにおける森林からの土砂流出量は、河川の浮遊土砂量から降雨による表面浸食を捉えたものであり、山地崩壊による土砂流出は考慮されていないが、山地崩壊からは一般に多量の土砂が流出することから、本流出モデルにおいて山地崩壊からの流出を考慮するよう調整を図ることについて検討の余地があると考えられる。

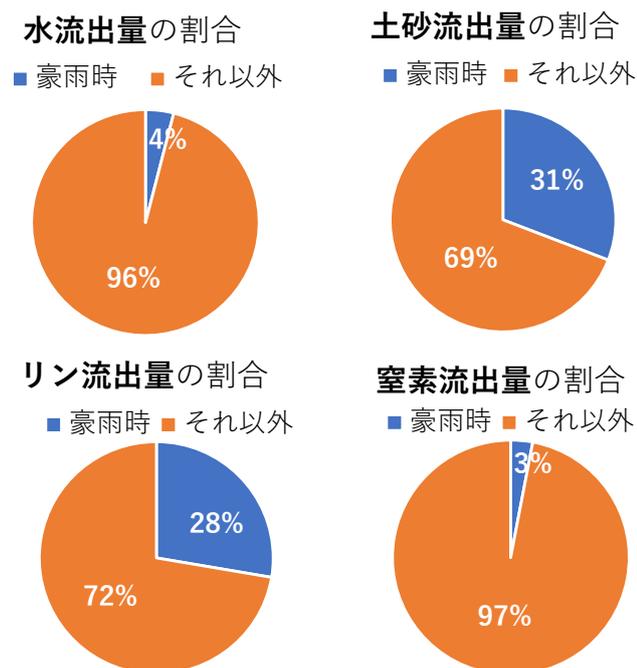


図 1.2-11 豪雨時とそれ以外の全流域からの水、土砂(浮遊土砂相当)、リン、窒素の流出量における割合

出典:環境省(2020)「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資料」

(7) 森林のストック機能について

森林のストック機能は、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である。

森林への主な栄養塩のインプットとしては、窒素収支に着目し、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。

算定結果は図 1.2-12 に示すとおりである。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、森林では、+1.2kg/year/ha(貯留)、流域全体では-4.4kg/year/ha(流出)となり、森林は、雨水から供給される窒素を貯留していることが示された。

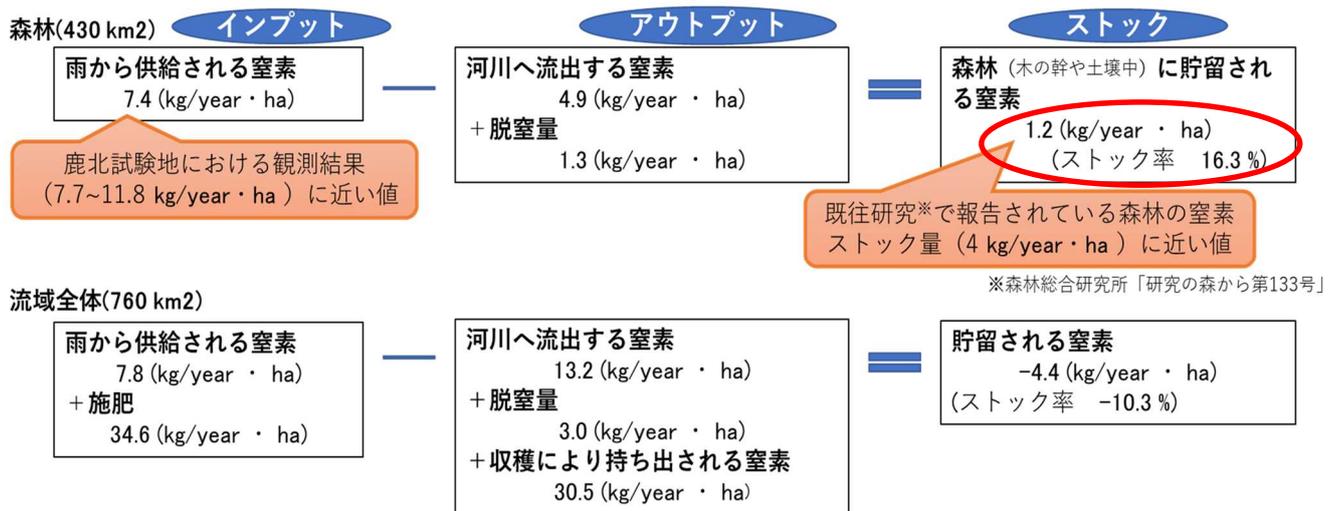


図 1.2-12 窒素のインプットに対するストック機能の算定結果

出典:環境省(2020)「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資料」

(8) 過去の森林の構成と最近の森林の構成比較

森林の機能について、森林そのものの成長や過去と最近の森林の構成の違いがどのように影響するかについて評価を行った。例えば森林面積の増減に伴う変化を捉えるよう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)。

1976(昭和51)年と2016(平成28)年の土地利用割合比較は図1.2-13に示すとおりである。森林面積に大きな変化はないものの、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。

1970(昭和45)年代と2010(平成12)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は表1.2-2、そのうち、土砂流出量の推定結果は図1.2-14に示すとおりである。森林の違いによる比較を容易にするため、両モデルに同じ気象条件(2016(平成28)年~2017(平成29)年)を設定したものである。

これによると、森林の成長に伴い、年間の土砂及びリンの流出量は減少傾向にあった。一方で窒素は、森林の変化にあまり影響しない傾向がみられ、1970(昭和45)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と考えられる。

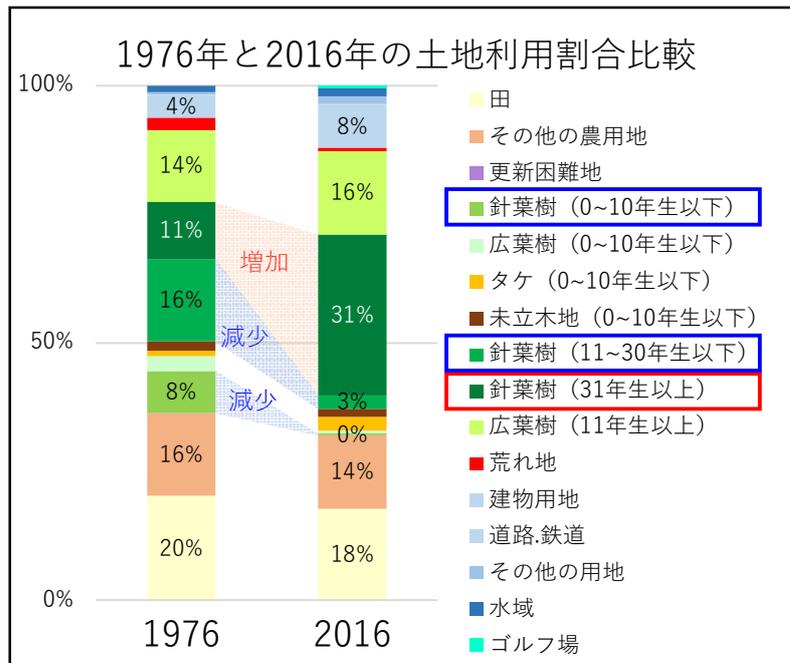


図 1.2-13 1976(昭和 51)年と 2016(平成 28)年の土地利用割合比較

出典:環境省(2020)「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資料」

表 1.2-2 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

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 (平均)	760.0	759.6	1112	1145	0.40	0.35	3.76	3.66	11.6	14.0

出典:環境省(2020)「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資料」

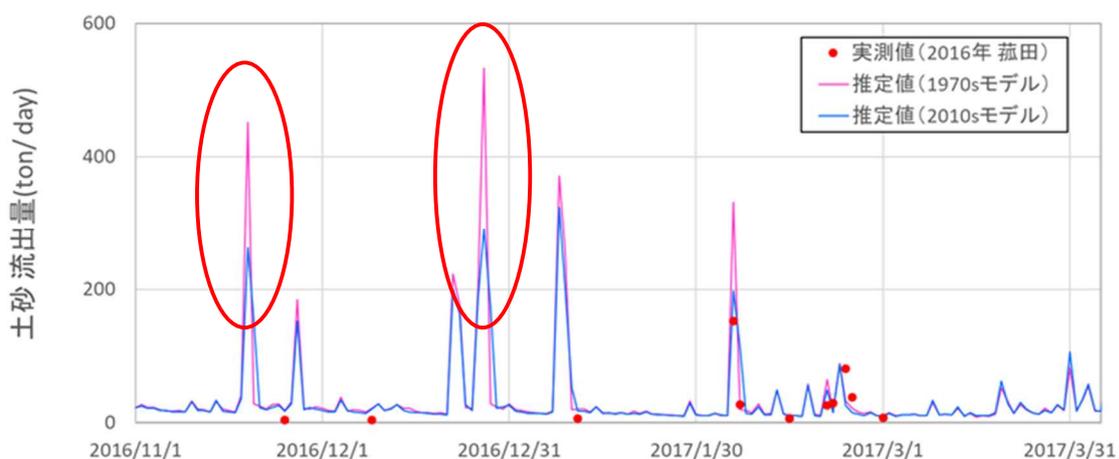


図 1.2-14 各土地利用や森林の構成等を反映したモデルによる土砂流出量(浮遊土砂相当)推定結果

出典:環境省(2020)「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資料」

1.2.4 成果、新たな知見等

解析の結果、現時点のモデルの精度において、以下の事項が明らかとなった。

一般に森林が有すると言われる水源涵養機能について、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ることを値として捉えることができ、菊池川流域の森林においても同機能を有していることが示された。

また、森林が、渇水時に水を安定的に供給し出水時に抑える流出平準化機能についても確認された。土砂・栄養塩については、出水時には同様に流出を抑えていたが、渇水時については他の土地利用と同程度であり森林について流量安定化機能が特に有意であるという結果は示されなかった。

森林のストック機能については、窒素循環に関する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が森林によって貯留されることが一定程度示された。

森林の経年変化における樹木の成長の影響については、年間の土砂流出量は抑制し、リン流出量も減少傾向であったが、窒素流出にはあまり影響しない傾向がみられた。

流出モデルにより、森林の機能（水源涵養、流出平準化、ストック機能）を可視化し、森林が海域に果たすポジティブな役割を一定程度評価。



本解析から得られたデータに基づき、シナリオ解析を行い、森林の変化によって森林の機能がどのように変わるか検証。



流出モデルにより、森林と海域の関係について、水、浮遊土砂、栄養塩（窒素・リン）の予測・評価を行うことが可能となった。

図 1.2-15 本調査で得られた成果等

出典:環境省(2020)「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資料」

1.2.5 課題及び今後の方針・計画等

(1) 課題

ア) モデル精度の向上

モデルに関しては、栄養塩について、なお一層の合理的な推計に向けてモデル精度を高めるとともに、流出量のみならず、各物質の発生量についても評価を行う余地がある。

具体的には、一般にリンの流出量は水田よりも畑からの方が大きいとされているが、本調査での推定結果では逆転している点、また水田からのリン流出量は窒素流出量の2～5割程度と言われているが、本調査での推定結果ではリン流出量が窒素流出量の5割を超えている点について、見直しを行う必要がある。

イ) 知見の不足

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、当該海域に及ぼしている影響や、水、土砂並びにリン・窒素以外の物質に係る森林から当該海域への流出についての知見が不足している。

(2) 今後の方針・計画

今後、有明海・八代海へ流入する全ての一級河川について、これまで構築してきた「菊池川モデル」をベースとした同様の解析を行う予定である。

また、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^{注)}とされており、海域側で必要とされる情報を踏まえ、本モデルの精緻化や、森林域からの流出について把握すべき物質に係る対応について検討を行う予定である。

上述の畑と水田におけるリン流出量の大小が既往の知見と異なることについては、畑(平地)の水流出量が他の土地利用に比べて小さく算出されていることが原因の1つとして考えられた。そこで、まず畑(平地)の水流出量を中心に水に関するパラメータの調整を試みたところ、水流出量の変化に応じてリン・窒素流出量の増減が見られた。このため、今後の更なる分析・精緻化に当たっては、調整するパラメータの妥当性を検証しつつ、水流出量の見直しを行うことにより、土地利用別のリン・窒素流出量の関係性についても検討を行う方針である。

注)「森・川・海のつながりを重視した豊かな漁場海域環境創出方策検討調査報告書(平成16年3月)」