

有明海の全流域における環境変化が 流出量に与える影響の評価

IMPACT ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL CHANGE ON RUNOFF
DISCHARGE IN THE OVERALL ARIAKE BAY RIVER BASIN

朴童津¹・田辺智子²・齋田倫範³・大八木豊⁴・李智遠⁵・矢野真一郎⁶
Dongjin PARK, Tomoko TANABE, Tomonori SAITA, Yutaka OYAGI,
Jiwon LEE and Shinichiro YANO

¹正会員 工博 株式会社建設技術研究所九州支社 河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

²学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 工博 九州大学大学院学術研究員 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

⁴正会員 工博 株式会社建設技術研究所大阪本社 河川部 (〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7)

⁵非会員 工博 韓国総合技術 技術研究所 (〒143-715 韓国ソウル市カンジン区グイドン546-1)

⁶正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

The change of basin environment has a great influence on river and bay area. For examples, urban development in river basin causes increasing of the peak discharge and shortening of the peak arriving time. The purpose of this study is to estimate the change of outflow discharge by transition of land-use and change of rainfall pattern in the Ariake Bay watershed.

To estimate that we applied the distributed runoff model considering the land-use in 1976, 2003 of the basin about two type rainfall. The results of calculation showed that the peak discharge at Chikugo river mouth has been increased 131.3m³/s(4.3%). And the averaged increasing rate of that is 22.4% in this simulation studies.

Key Words : hydrological cycle, distributed model, land-use, Ariake sea, watershed

1. はじめに

九州の代表的な閉鎖性水域である有明海では、近年、赤潮の多発、貧酸素水塊の発生など海域環境の異変による養殖ノリの色落ちやタイラギ・アサリ・カキ等二枚貝類の漁獲量減少が問題となっている。

「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」に基づき、環境省に設置された「有明海・八代海総合調査評価委員会」の委員会報告書¹⁾に取りまとめられた有明海の海域環境異変の要因を表-1に示す。ここに取り上げている環境異変要因のほとんどは海域内のものであり、有明海流域からの影響は土砂供給量減少のみとされている。しかし、海域環境異変前後の有明海流域の土地利用状況や、近年の気候変動による降雨パターン変化が及ぼした流出量の変化と、それに伴う有機物や栄養塩の流出パターンの変化が及ぼした影響が正確に評価

されているとはいいがたい。

本研究は、有明海流域の土地利用変化などに起因する環境変遷が海域環境に及ぼす影響について、流量・有機物・栄養塩・土砂・温暖化などの観点から解明することを最終目標としている。本論文では、そのツールとして有

表-1 有明海の環境異変とその原因

環境異変	原因
二枚貝, その他底生生物の減少	底質の泥化, 底層の貧酸素化, ナルトビエイによる食害, 過剰漁獲
魚類等の減少	底棲種の減少, 底層の貧酸素化, 生育場(干潟など)減少, 潮流変化による稚魚輸送への影響, 水温の上昇(エイ類増加)
ノリ不作(H12)	大型珪藻の赤潮発生による栄養塩の吸収
赤潮発生の増加	透明度上昇と海水の滞留(潮汐の減少), 水温上昇, 浄化能力の低下(二枚貝や底生生物減少)
底質の泥化	潮流の低下(干拓・埋立て, 潮位上昇, 人工構造物, ノリ網), 陸域からの土砂供給の減少
底質中の有機物・硫化物の増加及び貧酸素化	沈降する有機物の増加(赤潮増加, 潮流の低下), 底層の貧酸素化, 硫化物の発生

明海流域全体についての分布型流出モデルを構築するとともに、海域環境異変前後の流域土地利用状況及び降雨パターンの変化に伴う流出量変化について考察を行った。

2. 既往研究のレビュー

有明海を対象とした環境変異に関する既往研究の多くは海域内の流れ場の変化、貧酸素水塊の形成、赤潮の発生メカニズムなどに関するものである。例えば、西ノ首²⁾、濱田³⁾、堤⁴⁾の研究が取り上げられる。流域の環境変化に伴う流出量の変化についてはほとんど研究がなされていない。その理由として有明海が1級河川8水系、5県に広がる膨大な流域面積を持つことがあげられる。その中で唯一、大串⁵⁾は筑後川・菊池川・白川・緑川における流出モデルを構築し流出負荷量の算定を行っているものの、有明海流域全体は検討対象にされていない。本研究では、初めて有明海流域全体を対象にして流域の土地利用・表層地質・土壌の水文学的な特性を反映した分布型流出モデルを構築したこと、流域環境変遷に伴う主要河川流域別の流出量について考察したことなど既存研究に無かった有明海の流出特性に関する新しい知見を多く得ている。

流域と閉鎖性水域の環境改善方策の検討ツールとして本研究と類似なモデル研究が東京湾⁶⁾、大阪湾⁷⁾においてもなされている。両研究とも分布型流出モデル、物質循環モデルに水域モデルを結合させ、水域に及ぼす流域からの影響について検討している。

3. 有明海流域における環境変遷

まず、養殖ノリの色落ちが問題となった平成12年を前後に、環境異変進行前を「昭和50年代（土地利用S51，降雨S51～S52）」、環境異変進行後を「現況（土地利用H9，降雨H15～H16）」として、流域環境変化の整理を行った。整理項目は、流出量に影響が大きい土地利用状況、降雨量とした。

(1) 土地利用状況の変化

有明海は福岡県、佐賀県、熊本県、長崎県の4県が直接に海岸に面しており、上流域では大分県も流域に含まれ、約8,400km²の膨大な流域面積を持っている。

表-2に、国土数値情報データをもとに整理した昭和50年代と現況における有明海流域内の土地利用の変化を示す。昭和50年代から現況にかけて（約20年間）、森林が約1.4%（116.3km²）、田畑が約1.4%（109.2km²）減少し、市街地が約2.6%（210.7km²）増加している。

図-1に主要河川の流域別土地利用変化面積および各流域面積に対する土地利用変化面積率を示す。各流域にお

いても森林・田・畑が減少し、市街地が増加する傾向が見られるが、本明川流域では田・畑が減少し森林が増加、筑後川・矢部川流域では森林・田が減少し畑は増加している点が特徴的である。

図-2は昭和50年代から現況の間における森林面積の増減を示したものである。平野部と山林の境界部分で森林

表-2 有明海流域の土地利用の変遷

		森林	田	畑	市街地	その他
昭和50年代	面積(km ²)	4024.6	1843.9	958.7	467.7	937.8
	比率(%)	48.9	22.4	11.6	5.7	11.4
現況	面積(km ²)	3908.3	1740.8	952.7	678.4	952.7
	比率(%)	47.5	21.1	11.6	8.2	11.6
面積変化量(km ²)		-116.3	-103.2	-6.0	210.7	14.8
面積変化率(%)		-1.4	-1.3	-0.1	2.6	0.2

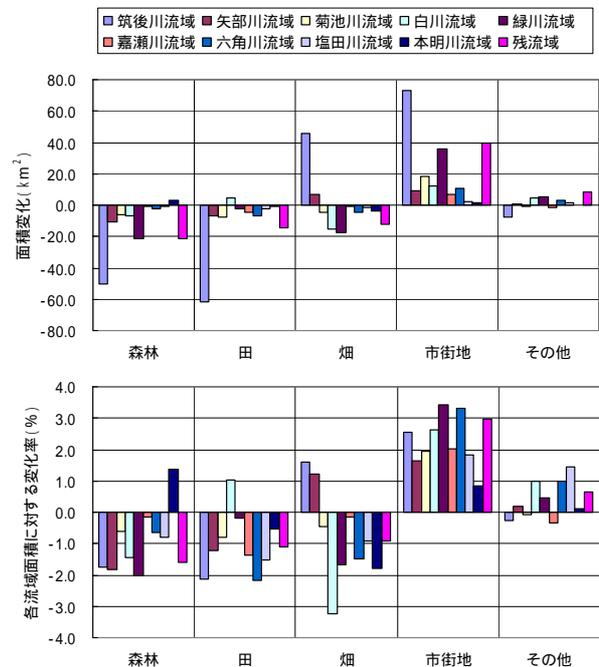


図-1 流域別土地利用状況（上図：面積変化，下図：流域面積に対する変化率）

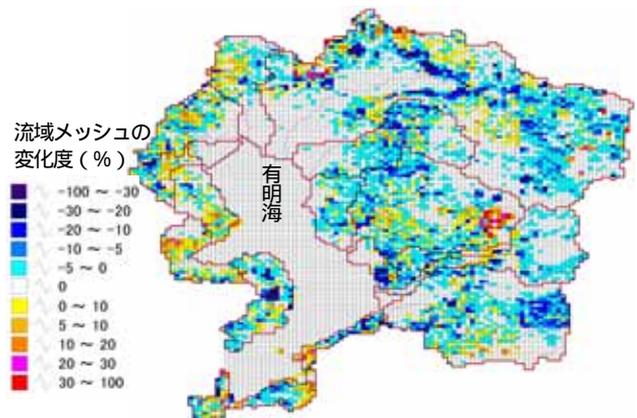


図-2 森林の増減分布状況

の減少が大きく、平野部から山林に向けて市街化が進んだことが示唆される。

(2) 降雨パターンの変化

昭和50年代と現況の降雨パターンはアメダス気象観測地点の時間雨量データを用いた(図-3参照)。海域環境異変前後で時間雨量データが存在する22地点のアメダス時間雨量データのうち、降雨パターンが大別しやすい筑後川上流の日田地点における昭和52年と平成16年の時間雨量を図-4に示す。

図中の は台風が接近した日を示しており、台風の接近による集中豪雨を除いても現況では平成16年の6月の降雨のような集中豪雨の傾向が明確に見られる。流域の全アメダス観測地点(図-3参照, 22地点)における時間雨量20mmを越える2年間の延べ回数を見ると、昭和50年代には310回、現況では401回となっている。

4. 分布型流出モデルの構築

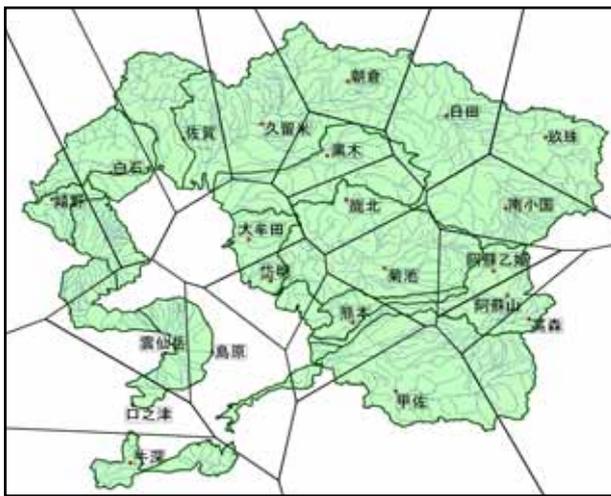


図-3 有明海流域内のアメダス地点分布

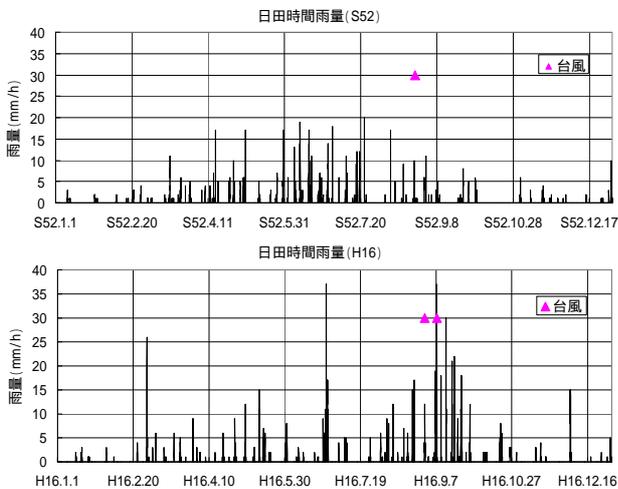


図-4 日田地点(筑後川流域)の降雨パターン(上図:昭和52年,下図:平成16年)

次に、流域の市街化と集中豪雨の増加が流出量に及ぼす影響を評価するために、分布型流出モデルを構築した。

(1) 分布型流出モデル

本研究で採用した分布型流出モデル^{8)~11)}の概念図を図-5に示す。分布型流出モデルは、流域内の全メッシュに鉛直方向に3層のモデル(表層, 不飽和層, 地下水層)と河道モデルから構成されている。表層モデルは、土地利用別に5分類(森林, 田, 畑, 市街地, その他)のタンクモデルによって構成され、不飽和層モデルや地下水層モデルはそれぞれ土壌データ・表層地質データから浸透度別に3分類したタンクモデルで構成した。各層の水は落水線に沿って河道に流入し、河道内の流量はKinematic Wave法によって計算される。このモデルでは、土地利用, 土壌, 表層地質の局所的な水文学的特性が反映できる。

(2) 有明海流域への適用

流域のメッシュスケールとして、1kmメッシュ(基準地域メッシュ第3次地域区画)を採用し、対象流域を20流域, 7,938メッシュに分割した(図-6)。国土数値情報標高データから、各メッシュの平均標高を取得し、落

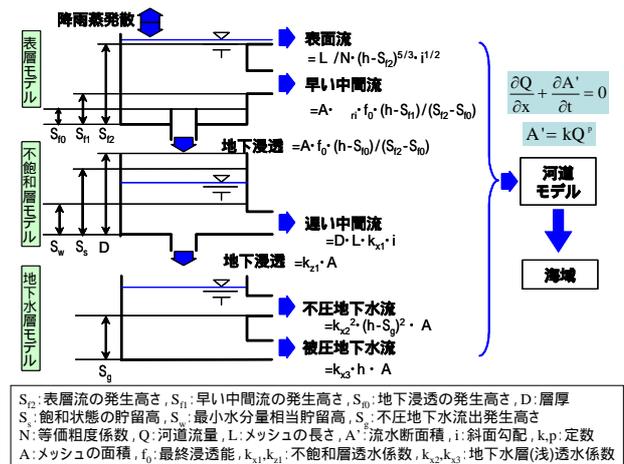


図-5 分布型流出モデル^{8)~11)}の概念図

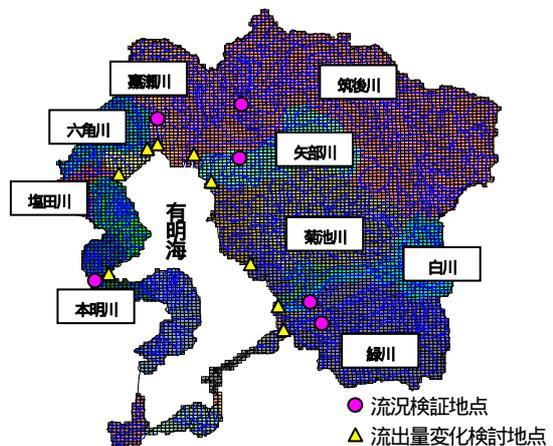


図-6 メッシュ分割図

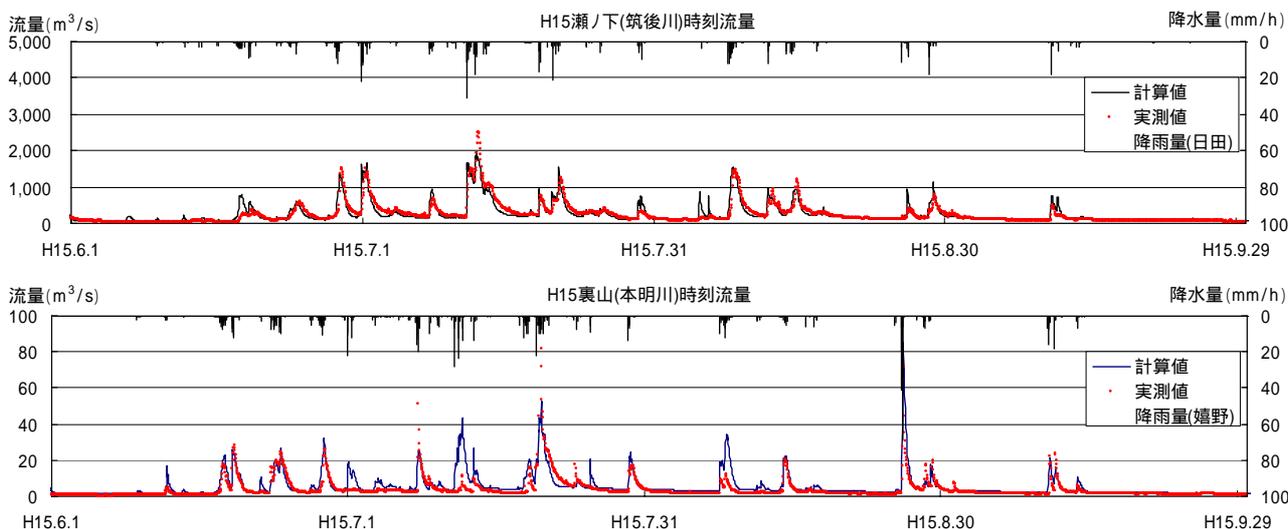


図-7 計算結果の検証

水方向を設定した。また、国土数値情報の河道位置、河道長、河床高から河道モデルを作成した。蒸発量は熱収支法と空気力学法をあわせたPenman法を用いて算定した。計算時間間隔は出水の流出波形が明確に表現できるよう $t=1$ 時間とした。

本研究で採用したモデルは計算時間が早い（有明海流域の場合：Intel(R)Core(TM) 2CPU2.40GHz, 1.46GBRAM のデスクトップで $t=1$ 時間、1年間の計算が5分程度）ことから、大流域での計算にも活用できる。

(3) 流出量の再現計算

多様な降雨パターンに対するモデルの再現性を検証するため、平成15年～平成16年の2年間について流出量解析を行った。なお、検証計算においては規模が大きい松原ダムを含めた8つのダムの放流量を境界条件として与えた。検証地点（図-6参照）は1級河川の流量観測地点である筑後川瀬ノ下地点、矢部川船小屋地点、白川代継橋地点、緑川城南地点、嘉瀬川池森橋地点、本明川裏山地点としたが、紙面の都合上流域面積が最大である筑後川の瀬ノ下地点と流域面積が比較的小さい本明川裏山地点のみについて平成15年の検証結果を図-7に示す。

大きい出水時のピーク流量の計算値が若干小さいこと、および出水後の流出が若干早くなっているものの、平水時および出水時の流出パターンがおおむね良好に再現されていると判断される。なお、本明川流域の裏山地点においては降雨発生にともなう流出が見られない時期（例えば、平成15年7月1日など）があった。これは、本モデルに考慮されていない人工系水循環の影響によるものと推測されるため、流域の人工系水循環機構の組み込みが精度向上に必要だろう。

5. 流域環境の変遷に伴う流出現象の変化

開発された分布型流出モデルを用いて、3章で整理し

表-3 計算ケース

	土地利用	降雨パターン	計算条件
CASE1	現況	平成16年の降雨	1年計算 $t=1$ 時間
CASE2	現況	昭和52年の降雨	
CASE3	昭和50年代	平成16年の降雨	気象条件固定 ダム無し
CASE4	昭和50年代	昭和52年の降雨	

た有明海流域の土地利用状況や降雨パターンの変化に伴う流出量変化を評価するために、表-3に示す4ケースについて数値実験を実施した。純粋な土地利用状況の空間的・時間的変化の影響を見るために、全流域に同じ降雨を与えた（図-4参照、日田地点の昭和52年、平成16年の降雨）。他の気象条件は全ケースで固定しており、既設ダムは考慮していない。各流域の流出特性は下流部の残留域も評価できるよう河口地点とした（図-6参照）。

(1) 土地利用変化に伴う流出特性の変化

CASE1とCASE3, CASE2とCASE4を比較することによって、昭和50年代と現況の流域土地利用変遷による流出特性の変化を評価できる。表-4に各ケースのピーク流量(CASE1&CASE3：6月26日出水, CASE2&CASE4：6月16日出水), 図-8に出水時における白川と本明川流域の流出計算結果をそれぞれ示す。

まず、ピーク流量は全ての河川流域で降雨パターンに関係なく、現況の土地利用で大きくなっている。これは3章で整理したとおり流域での市街化の進行により出水初期の表層流出が大きくなるためである。流域の土地利用変化によるピーク流量増加率が最大であったのは緑川流域で、現況の降雨に対し17.1%, 昭和50年代の降雨に対し10%増加している。次には白川、菊池川、嘉瀬川流域の順にピーク流量の増加率が大きかった。しかし、図-8の下図本明川河口地点を見ると白川流域に比べ、土地利用変化によるピーク流量の増加はほとんど見られない。その理由としては流域における森林増加と低い市街化率(0.8%)が挙げられる。なお、図-9に示すように全

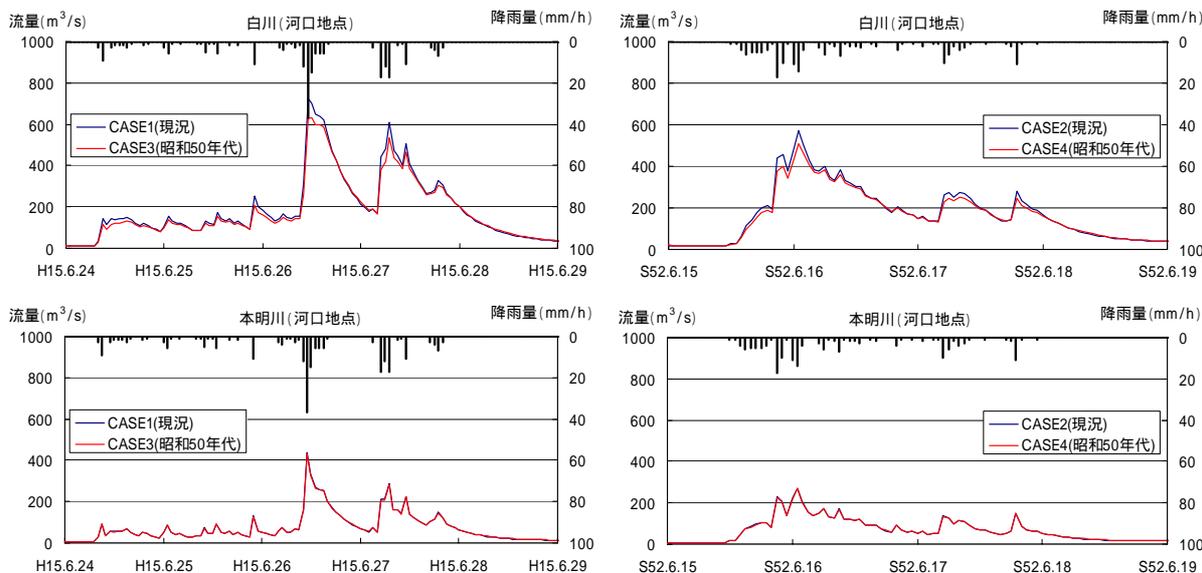


図-8 白川・本明川における流出量特性の比較

体の流域面積に対して、森林・田畑の占める面積が小さく、市街地・その他（荒地等樹林が存在しない土地）の占める面積が大きい流域において、ピーク流量の増分が大きい傾向が見られる。

以上の結果から、現況の有明海流域では昭和50年代に比べて各流域面積が0.8～3.4%程度市街化され、その影響を受けて今回検討した降雨状況に対して出水時のピーク流量が流域によって1.6～17.3%大きくなっていると言える。

(2) 降雨パターンの変化に伴う流出特性の変化

次にCASE1とCASE2、CASE3とCASE4をそれぞれ比較することによって、第3章(2)で述べた降雨パターン変化による流出特性への影響を評価することを試みた。図-8を見ると40mm/h程度の集中豪雨が発生した場合は、土地利用状況に関係なく流出波形が一気に立ち上がり、降雨のピークと流量のピークが一致する。しかし、10mm/h以下の場合には降雨のピークと流量のピークに時間の遅れが見られ、降雨パターンによって、ピーク流量の到達時間が変化することが分かる。なお、表-4のピーク流量増加率から、土地利用変化より降雨パターンの変化による増加が大きいことが分かる（流域によって増加率10.7～67.9%）。

以上の結果から、現状では出水時のピーク流量到達時間が早く、昭和50年代には頻度が少なかった集中豪雨が現況で多くなっていることから、海域への流出量の時間変化が激しくなっていると推測される。また、それに伴う物質流入パターンにも変化が現れている可能性も示唆される。

さらに、CASE1とCASE4（海域環境異変前後）を比較すると、表中には示していないが流域によって20.5～70.7%のピーク流量増加が見られた。

表-4 土地利用変化に伴う流出特性の変化

流域名	ピーク流量(m ³ /s)				増加率(%)	
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE1-3	CASE1-2
筑後川	3203.7	2644.2	3072.4	2553.6	4.3	21.2
矢部川	1229.1	854.1	1189.1	837.3	3.4	43.9
菊池川	975.8	862.6	896.3	810	8.9	13.1
白川	724.5	572.3	628.8	511.1	15.2	26.6
緑川	1319	1064.9	1124.1	966.77	17.3	23.9
嘉瀬川	900.7	536.6	848.9	512.7	6.1	67.9
六角川	744.9	476.4	712.6	458	4.5	56.4
本明川	437.1	272.7	428.3	268.3	2.1	60.3
塩田川	205.6	142.3	195.7	138.9	5.1	44.5

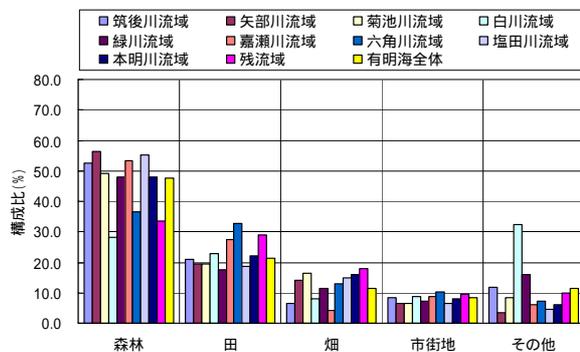


図-9 各流域別土地利用構成比（現況）

6. 空間的な土地利用変化に伴う流出特性の変化

土地利用の平面的な分布によって、流出パターンが変化することが予想される。図-10に筑後川既設松原ダム地点～河口までのCASE1の流出量変化について計算結果を示す。流域上流の山地である既設松原ダム地点では上流の森林域における貯留機能によって、降雨のピークと流量のピークに時間の遅れが発生している。しかし、下流の瀬ノ下地点では田畑・都市部における表層流出の影

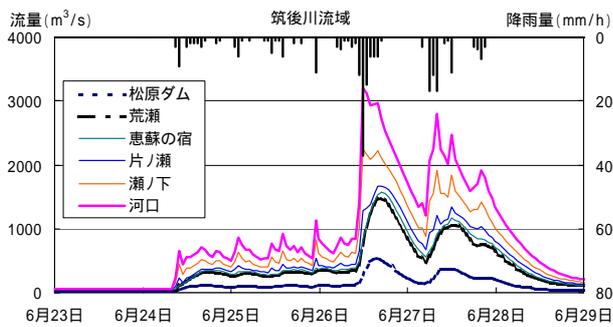


図-10 筑後川流域の河道流量 (CASE1: 既設松原ダム地点～河口まで)

響で降雨のピークと流量のピークがほぼ一致することが分かる。したがって、一つの流域に中でも土地利用の空間的な違いによって流出パターンが異なることが分かる。

7. 結論

本研究では有明海流域全体を対象に分布型流出モデルを構築し、有明海の海域環境異変発生前後の土地利用状況変化や仮想的に与えた降雨パターンの変化による流出特性への影響を考察した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

昭和50年代から現況にかけて(約20年間)有明海流域では、森林が約1.4%(116.3km²)、田畑が約1.4%(109.2km²)減少、市街地が約2.6%(210.7km²)増加し、平野部と山林の境界部分で森林の減少が大きく、平野部から山林に向けて市街化が進んだ。

現況の有明海流域では昭和50年代に比べて各流域面積の0.8～3.4%程度が市街化されるとともに、集中豪雨の頻度が増えている。その影響は、出水時のピーク流量が大きくなり、ピーク到達時間が早くなるという形で表れる。

土地利用の平面的な分布の違いによって、流出パターンが大きく異なる。流域上流においては森林の貯留機能によって、降雨のピークと流出量のピークに時間遅れが生じる。一方、下流では田畑・都市部からの表層流出の影響で降雨のピークと流出量のピークがほぼ一致する。

流域の市街化や集中豪雨の頻発によって、海域への河川水流入の時間変化が激しくなり、それに伴う物質流入パターンが変化している可能性が示唆される。

本研究グループの最終目標である有明海流域の環境変遷が海域環境に及ぼす影響の解明のためには、次の課題が挙げられる。

人工系の水循環、土砂・物質循環モデルの追加構築
河口流量観測点より下流の残流域について評価
河口での力学過程を取り入れた海域モデルとの結合

流域管理(土地利用規制など)の経済効果などの予測手法を取り入れ、包括的な政策検討ツールへの発展

今後、これらの課題の解決に向けてモデルの改良を行っていく予定である。

謝辞: 本研究の一部は平成19年度社団法人九州地方計画協会公益事業の助成により行われた。また、国土交通省九州地方整備局河川環境課、ならびに筑後川河川事務所には、基礎資料の提供をいただいた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 有明海・八代海総合調査評価委員会：委員会報告，pp.41-75，2006.
- 2) 西ノ首英之，小松利光，矢野真一郎，齋田倫範：諫早湾干拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価，海岸工学論文集，Vol.51，pp.336-340，2004
- 3) 濱田孝治，速水祐一，山本浩一，大串浩一郎，吉野健児，平川隆一，山田裕樹：2006年夏季の有明海奥部における大規模貧酸素化，海の研究，Vol.17(5)，pp.371-377，2008
- 4) 堤裕昭，木村千寿子，永田紗矢香，佃政則，山田一岩，高橋徹，木村成延，立花正生，小松利光，門谷茂：陸域からの栄養塩負荷量の増加に起因しない有明海奥部における大規模赤潮の発生メカニズム，海の研究，Vol.15(2)，pp.165-189，2005
- 5) 大串浩一郎，鶴田芳昭，山本浩一，濱田孝治：GISを用いた筑後川・菊池川・白川・緑川における流出・負荷モデルの構築と佐賀東部クレーク地帯における流出負荷量の算定，佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告書，Vol.4，pp.75-84，2008.
- 6) 安間智之，小路剛志，伊藤弘之，藤田光一：流域水物質循環モデルを用いた東京湾と流入河川における水質変遷再現について，水工学論文集，Vol.50，pp.1381-1386，2006.
- 7) 西田修三，北畠大督，入江政安：淀川流域圏の水環境と大阪湾への影響解析，水工学論文集，Vol.51，pp.1153-1158，2007.
- 8) 安陪和雄，大八木豊，辻倉裕喜，安田佳哉：分布型流出モデルの広域的適用，水工学論文集，Vol.46，pp.247-252，2002.
- 9) 吉野文雄，吉谷純一，堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，Vol.32(10)，pp.54-59，1990.
- 10) 鈴木俊朗，寺川陽，松浦達郎：実時間洪水予測のための分布型流出モデルの開発，土木技術資料，Vol.38(10)，pp.26-31，1996.
- 11) 大八木豊，大槻順朗，杉本知佳子，島谷幸宏，江崎哲郎，朴崎環：御笠川流域における土地利用の変遷に伴う洪水流量の変化に関する研究，水工学論文集，Vol.51，pp.391-396，2007.

(2008.9.30受付)