

GIS とオープンデータを活用した

瀬戸内海流域における農地由来の環境負荷の評価

2014年2月

高橋 英博



GIS とオープンデータを活用した

瀬戸内海流域における農地由来の環境負荷の評価

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科  
先端農業技術科学専攻  
博士（農学）学位論文

高橋 英博



# 目 次

## 第1章 緒言

1.1 はじめに	1
1.2 研究背景	1
1.2.1 瀬戸内海的环境	1
1.2.2 農業生産の変化と環境対策	9
1.2.3 GISによるデータ統合	13
1.2.4 オープンデータの活用	13
1.3 研究目的	14

## 第2章 陸域から海域への流入負荷

2.1 背景および目的	16
2.2 方法	17
2.2.1 対象流域の設定と流域概要	17
2.2.2 流入負荷量の推定手法	20
2.2.3 河川データに基づく流入負荷量の推定手法	21
2.2.4 原単位に基づく発生負荷源別の排出負荷量の推定手法	24
2.3 河川データに基づく海域への流入負荷量の推定	27
2.4 原単位法に基づく発生負荷源別の排出負荷量の推定	34
2.5 データ統合による海域への流入負荷量と淡水量の推定	35
2.6 陸域からの流入負荷による海域への影響	39
2.7 まとめ	39

## 第3章 農地由来の排出負荷量の不均一性と経年変化

3.1 背景および目的	41
3.2 方法	41
3.2.1 対象地域の概要	41
3.2.2 小流域データの作成	42
3.2.3 土地利用データの作成	45
3.2.4 土地利用細分メッシュデータの面積集計値の検証	45
3.2.5 流域に対応した農地面積の推定方法	46
3.3 農地面積および農地由来の排出負荷量の経年変化	48
3.3.1 農地面積の動向	48
3.3.2 農地の排出負荷量の経年変化	48

3.4 窒素収支に基づく農地の環境負荷の評価 .....	55
3.4.1 単位法の問題と作付作物の反映 .....	55
3.4.2 窒素収支による環境負荷の評価法 .....	55
3.4.3 GISを利用したメッシュデータの構築 .....	57
3.4.4 窒素投入量・収支の作物間差 .....	61
3.4.5 窒素投入と収支 .....	73
3.5 まとめ .....	74

#### 第4章 モデルによる環境負荷の評価

4.1 背景および目的 .....	76
4.2 メッシュモデルによる水収支の解析 .....	76
4.2.1 水収支解析モデルの基本構造 .....	76
4.2.2 水収支解析モデルの計算手順 .....	77
4.2.3 モデルの主要データ .....	80
4.2.4 水収支解析モデルによる推定 .....	82
4.3 原単位を用いた環境負荷モデルによる推定 .....	82
4.3.1 流出負荷推定モデルの基本構造 .....	82
4.3.2 レーダー・アメダス解析雨量データの利用 .....	83
4.3.3 モデルによる水収支の推定 .....	84
4.3.4 モデルによる窒素・リン負荷量の推定 .....	85
4.4 まとめ .....	85

#### 第5章 総合考察 .....

謝辞 .....	101
引用文献 .....	102
摘要 .....	107

## 図目次

- 図 1-1 瀬戸内海環境保全特別措置法による対象区域
- 図 1-2 中国四国地域の一級河川流域と水質状況（2004 年）
- 図 1-3 瀬戸内海の赤潮の発生件数と発生海域図（2008 年）
- 図 1-4 瀬戸内海における漁獲量の推移
- 図 1-5 瀬戸内海的全窒素、全リン発生負荷量
- 図 1-6 瀬戸内海の水質
- 図 1-7 瀬戸内海の COD 環境基準の達成率
- 図 1-8 全国および中国地域の耕地面積の推移
- 図 1-9 耕地かい廃の要因(2010 年)
- 図 1-10 耕地かい廃面積の推移
- 図 1-11 農業地域類型別の耕作放棄地の状況
- 図 2-1 対象地域の流域界と土地利用
- 図 2-2 土器川および香東川の水位・流量の関係
- 図 2-3 原単位法による流入負荷の計算過程
- 図 2-4 岡山流域の月別降水量と流量および流入負荷量の変化
- 図 2-5 香川流域の月別降水量と流量および流入負荷量の変化
- 図 2-6 排出負荷量の発生源別割合
- 図 2-7 香川流域の排出負荷量と流入負荷量の関係
- 図 2-8 河川・沿岸流域からの全窒素および全リンの流入負荷量の分布
- 図 3-1 対象地域の水系と土地利用
- 図 3-2 河川・流域界と農業集落
- 図 3-3 農林業センサスと土地利用細分メッシュの農地面積の相違
- 図 3-4 流域による農業集落の分断と農地メッシュ分布の例
- 図 3-5 広島県の農地面積の推移
- 図 3-6 太田川流域、芦田川流域の農地面積の推移
- 図 3-7 太田川流域における農地の変化（1976 年→1997 年）
- 図 3-8 芦田川流域における農地の変化（1976 年→1997 年）
- 図 3-9 単位流域の 1970 年の田面積と 2000 年/1970 年の面積比
- 図 3-10 単位流域の 1970 年の畑面積と 2000 年/1970 年の面積比
- 図 3-11 芦田川の単位流域での農地の窒素排出負荷量の変化
- 図 3-12 芦田川の単位流域での農地のリン排出負荷量の変化
- 図 3-13 類別作付面積の秘匿データの例
- 図 3-14 類別作付面積の推移
- 図 3-15 類別作物の化学肥料窒素量と収穫物持出窒素量

- 図 3-16 露地野菜の化学肥料窒素量と収穫物持出窒素量
- 図 3-17 旧市区町村の耕地面積
- 図 3-18 旧市区町村の水稲作付割合の動向
- 図 3-19 旧市区町村での窒素収支（化学肥料窒素量－収穫物による持出窒素量）
- 図 3-20 1km メッシュでの耕地面積
- 図 3-21 1km メッシュでの窒素収支（化学肥料窒素量－収穫物による持出窒素量）
- 図 3-22 降水量および耕地への降水による窒素量
- 図 3-23 1km メッシュでの家畜由来投入窒素量
- 図 3-24 1km メッシュでの豚飼養頭数
- 図 3-25 1km メッシュでの肉用牛・乳用牛飼養頭数
- 図 3-26 1km メッシュでの窒素収支（畜産由来投入窒素量等を含む）
- 図 4-1 月別浸透量の計算結果
- 図 4-2 メッシュでの水収支の基本構造
- 図 4-3 水収支解析モデルのメインフォームと設定パラメータ
- 図 4-4 モデルによる実蒸発散量の分布（1995 年）
- 図 4-5 モデルによる 2 段目タンクへの浸透量の分布（1995 年）
- 図 4-6 モデルによる 1 段目タンクへの湧出量の分布（1995 年）
- 図 4-7 降水量と河川流出量、河川流量の比較（1993～1996 年）
- 図 4-8 流出負荷推定モデルのデータ設定画面
- 図 4-9 吉井川流域の年間降水量（2003 年）の比較
- 図 4-10 吉井川における河川流量とモデルによる流出量
- 図 4-11 モデルによる浸透量の分布（2003 年）
- 図 4-12 吉井川における河川の全窒素、全リン濃度とモデルによる推定結果
- 図 4-13 モデルによる窒素およびリン流出負荷量の分布（2003 年）
- 図 4-14 窒素・リン流出負荷量の比率

## 表目次

- 表 1-1 瀬戸内海の総合的水質保全対策の進展状況
- 表 1-2 地域別の耕作放棄地の状況
- 表 2-1 岡山・香川流域の概要
- 表 2-2 使用した河川関連のデータ
- 表 2-3 既往の面源系の排出負荷量の原単位
- 表 2-4 生活系・畜産系・面源系の排出負荷原単位
- 表 2-5 原単位による推定で使用したデータ
- 表 2-6 河川流域の降水量，比流量および比負荷量
- 表 2-7 河川データから推定した淡水量と流入負荷量
- 表 2-8 原単位によって推定した排出負荷量
- 表 2-9 河川データと排出負荷量から推定した淡水量と流入負荷量
- 表 3-1 土地利用細分メッシュの土地利用の再分類
- 表 3-2 窒素収支の推定に使用したデータ
- 表 3-3 主要な畑作物の作付面積
- 表 3-4 河川流域での窒素投入量・収支の変化
- 表 4-1 土地利用別の設定係数
- 表 4-2 開発モデルで使用するデータ
- 表 4-3 土地利用の面積割合
- 表 4-4 太田川流域の年間水収支の推定結果
- 表 4-5 芦田川流域の年間水収支の推定結果
- 表 4-6 流出負荷推定モデルによる水収支の推定結果
- 表 5-1 第7次総量削減基本方針（瀬戸内海）の目標値
- 表 5-2 第6次総量削減基本方針（瀬戸内海）の目標値
- 表 5-3 第7次岡山県水質総量削減計画
- 表 5-6 農地減少に伴う窒素負荷量の変化
- 表 5-7 全農業経営体で削減目標に対応する場合に必要な面積
- 表 5-8 3割削減技術で削減目標に対応する場合に必要な面積



# 第 1 章 緒言

## 1.1 はじめに

本論文では、瀬戸内海流域を対象として、環境とのバランスに配慮した農業生産への転換を図る現状に対して、これまでの農地から海域への環境負荷の影響を把握するとともに、その評価に必要となる GIS やオープンデータの活用について述べていく。

第 1 章「緒言」では、研究の背景となる瀬戸内海的环境、農業生産と環境について概況を整理するとともに、GIS やオープンデータの利用の現状を概説する。

第 2 章「陸域から海域への流入負荷」では、近年の陸域から海域への流入負荷を分析し、流域による流出負荷の特性の相違を検討する。

第 3 章「農地由来の負荷量の不均一性と経年変化」では、面源負荷の算出基礎となる土地利用の変化と農地分布について整理を行い、流出負荷の経年的な変化と空間分布を検討するとともに、作物の作付実態を反映させた流出負荷量の指標として窒素収支を検討する。

第 4 章「モデルによる環境負荷の評価」では、流出負荷推定モデルを用いて、海域への影響を考える際に必要となる負荷量の年間の季節変動を検討する。

第 5 章「総合考察」では、各章の結果をもとに農地からの流入負荷量の評価を行う。また、残された課題や今後の展望について検討し、本論文のまとめを行う。

## 1.2 研究背景

### 1.2.1 瀬戸内海的环境

瀬戸内海は大小 700 余りの島々が散在する多島海として知られ、1934 年に日本最初の国立公園に指定された地域であり、世界各地から多くの観光客が訪れる自然環境に恵まれた海である。また 13 府県に囲まれた日本唯一の内海であり、12 の湾・灘などの海域がまとまった面積 23,203km<sup>2</sup> の日本最大の閉鎖性水域でもある（図 1-1）。中国四国地域の 21 の一級河川のうち、瀬戸内海に注ぐのは 12 河川であるが、河川の水質状況を見ると太平洋、日本海に注ぐ河川に比べて BOD（生物化学的酸素要求量）値の高い河川が多い（図 1-2）。

臨海部には 1950 年代後半からの高度成長期に数多くの鉄鋼、石油コンビナート等の工業地帯が形成され、排水による水質の悪化が問題となった。この時期、周辺地域は都市化の進展によって人口が増加し、家庭の雑排水、し尿などの生活系排水による環境負荷も増大した。赤潮の発生件数は 1970 年代に入って増えて大きな漁業被害をもたらした。赤潮は 1976 年を

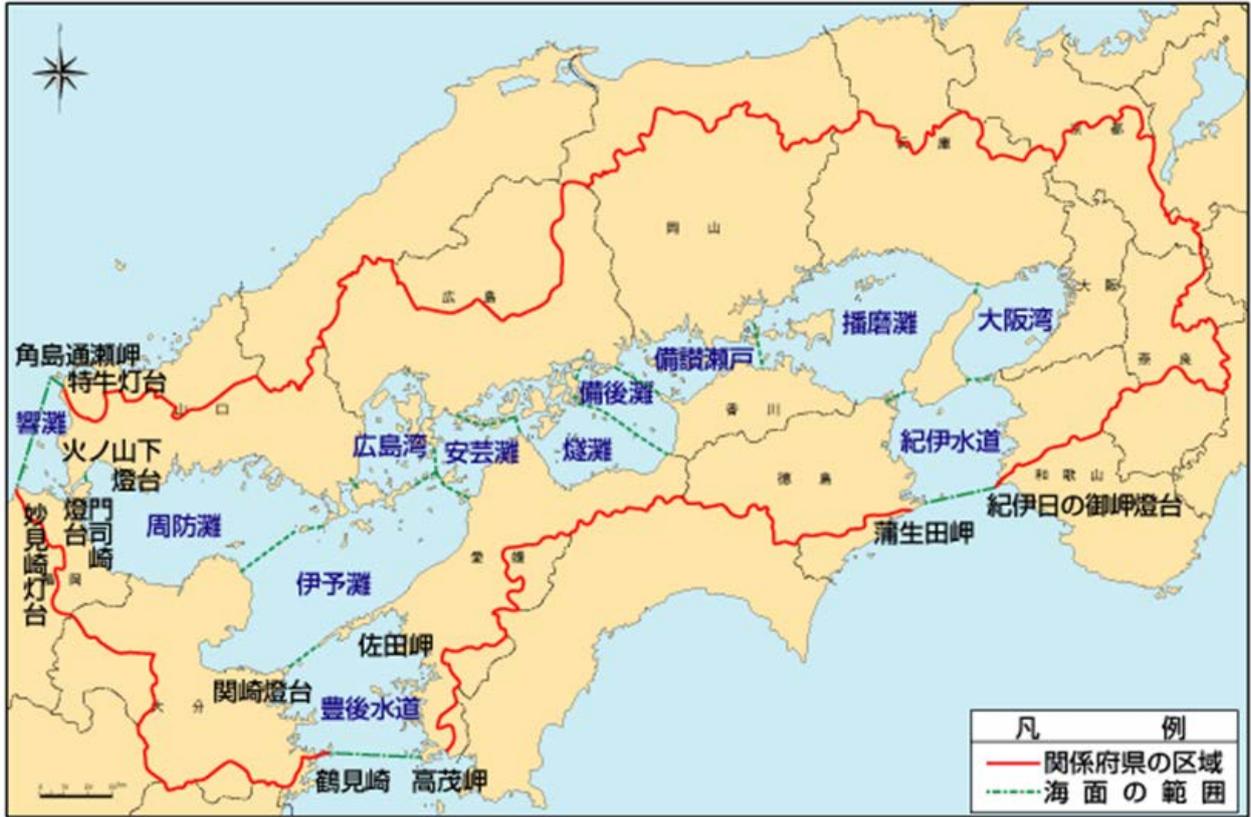
ピークに減少しに転じたが、現在も年間 100 件前後の発生が確認されている（図 1-3）。

瀬戸内海は豊富な海洋生物資源を有し、世界の閉鎖的沿岸海域の中でも単位時間・単位面積あたりで最も高い漁獲量となる海域である（柳 2006）。瀬戸内海全域の海面漁業による漁獲量は、1964 年から増加し、1982 年に過去最高の 46 万トンとなったが、1987 年以降は減少傾向にある（図 1-4）。これには赤潮や透明度の低下による海草類の生育への影響といった富栄養化に伴う被害だけではなく、護岸工事や海浜の埋め立てによる魚介類の生育の場として重要とされる藻場の減少、生態系の維持や水域浄化に重要な役割を担う干潟の減少、砂利採取に伴う海底環境の大きな改変等も要因としてあげられている。

こうした公害問題、環境問題は、瀬戸内海に限ったことではなく、全国的な問題であった。表 1-1 に示すように 1970 年に水質汚濁防止法が制定され、法的な規制による取組が進められるとともに、1971 年には環境庁が発足し、行政として対応する体制が強化された。瀬戸内海では 1973 年に瀬戸内海環境保全臨時措置法、1978 年には瀬戸内海環境保全特別措置法が制定され、瀬戸内海の保全に関する計画が策定されることとなった。これにより有機物汚濁の指標とされる化学的酸素要求量（COD）に係る総量規制が実施されるとともに、富栄養化対策として窒素・リンの環境基準が設定され、排水規制の取組が進められた。また国においても 1993 年には環境の保全について基本理念を定めた環境基本法が施行され、2001 年には環境省が設置される等、環境問題への取組は近年一層重要となっている。

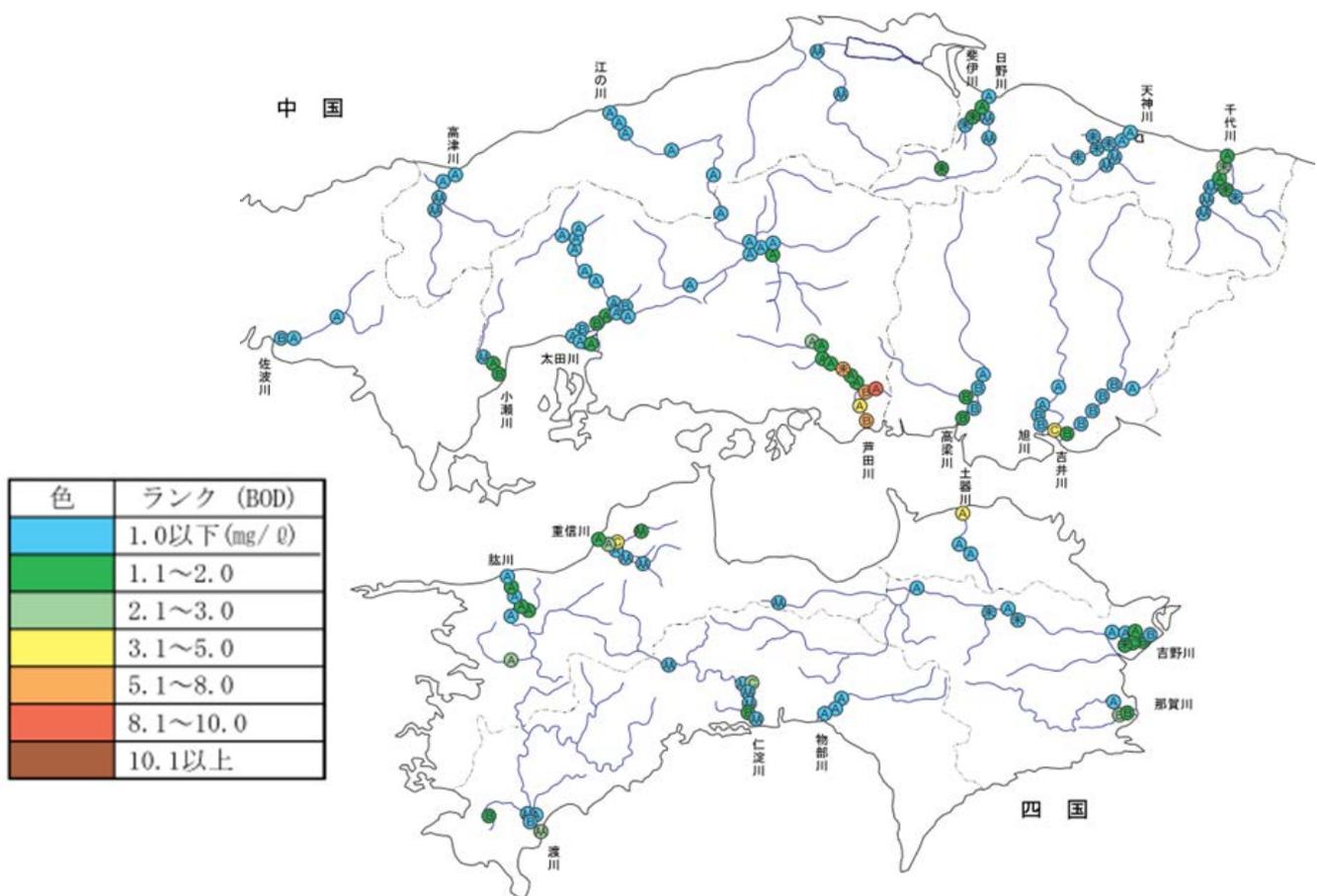
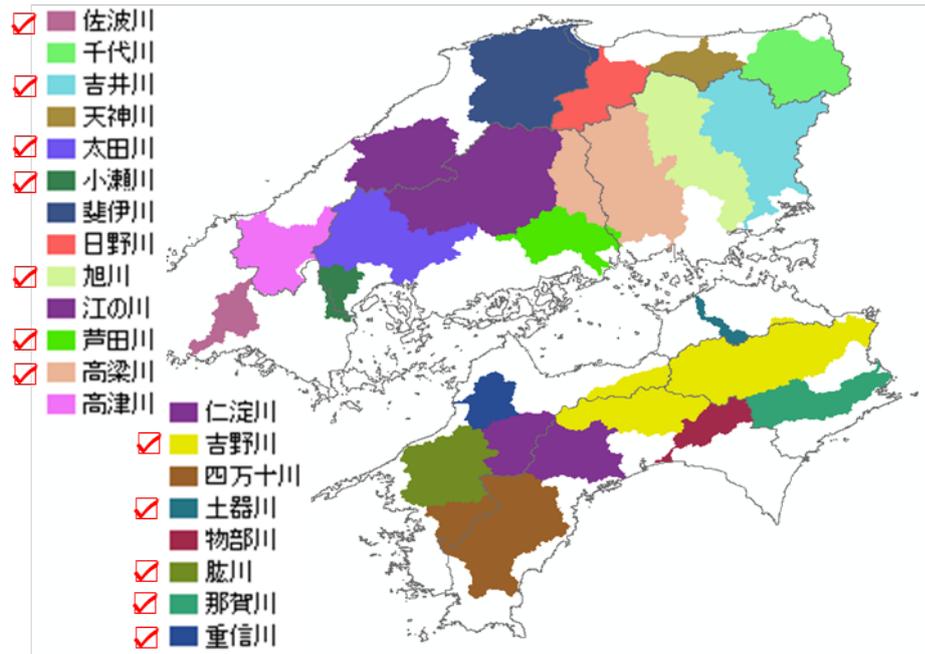
瀬戸内海は紀州水道、豊後水道、響灘において外洋との間に海水の流入出があり、内部の潮流も複雑であるため、灘・湾によって陸域からの流入負荷量やその影響はかなり異なる。産業系・生活系の負荷削減の結果、瀬戸内海への流入量は着実に減少した（図 1-5）。第 5 次となる「化学的酸素要求量、窒素含有量及びりん含有量についての総量削減基本方針」（環境省 2001）までは瀬戸内海全体で削減目標が立てられていたが、第 6 次の総量削減基本方針（環境省 2006）では大阪湾を除く瀬戸内海では現在の水質からの悪化を防ぐとされた。大阪湾ではさらに水環境の改善を図るとされ、初めて海域によって達成目標を変えた方針が出された。これは第 7 次の総量削減基本方針（環境省 2011）でも継続されている。

瀬戸内海の水質をみると全窒素、全リン濃度は減少傾向にあり、透明度も上昇しているが、COD 濃度はわずかながら増加傾向で（図 1-6）、環境基準の達成率は概ね横ばいで推移しており（図 1-7）、陸域からの負荷量の削減が海域の環境改善に反映していない面がある（瀬戸内海環境保全協会 2013）。一方、近年ではノリの色落ち等において貧栄養化問題が指摘されている（藤原 2011）。このように海域の環境を巡る状況は複雑で、海洋の環境保全のあり方として、広域を一律に規制するのではなく、利用形態に応じて望ましい水質等の基準を設定すべきとの考え方もあり、規制一辺倒から管理保全へと対応も変わりつつある。



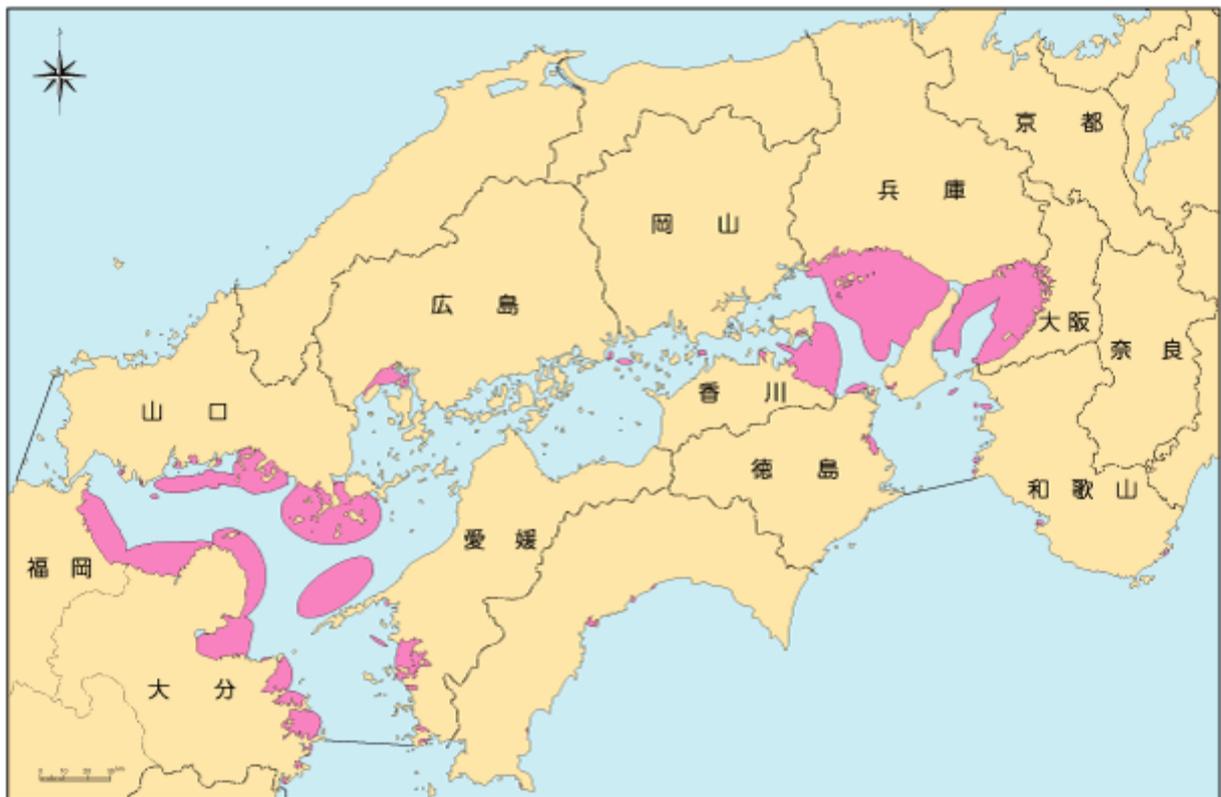
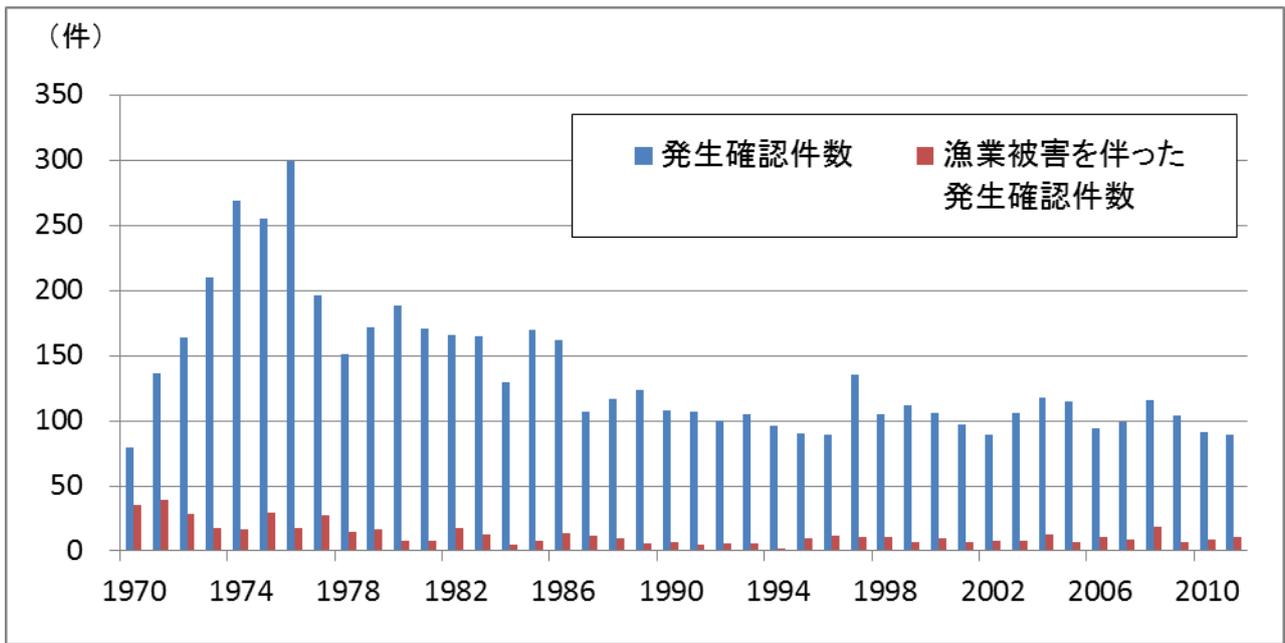
出典：「せとうちネット」（環境省）

図 1-1 瀬戸内海環境保全特別措置法による対象区域



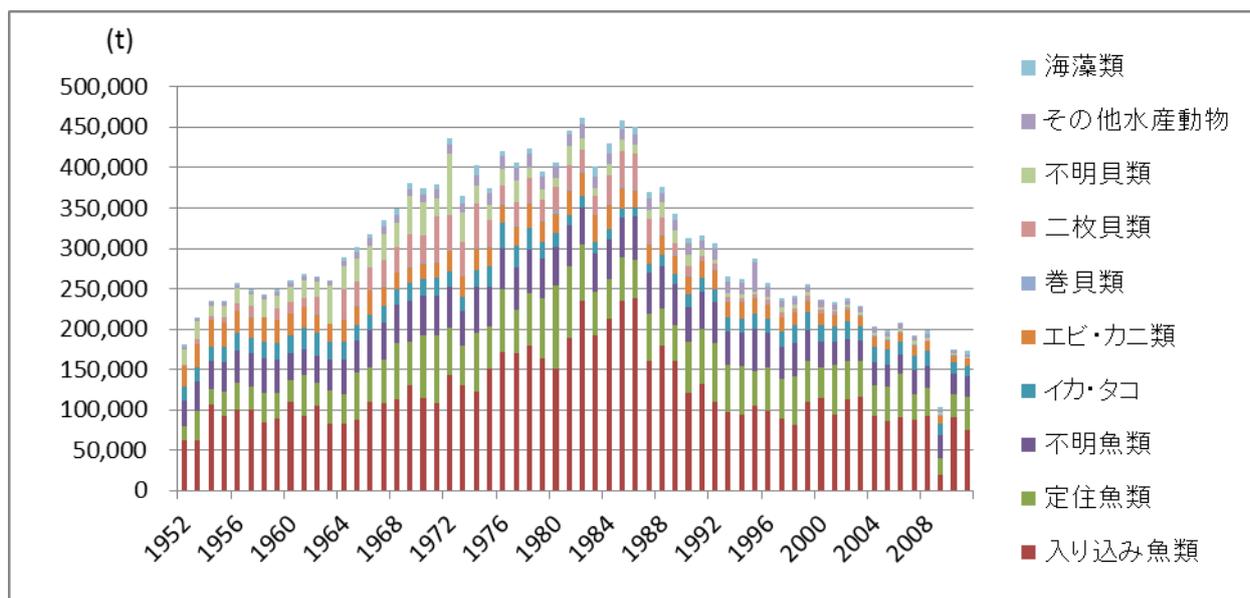
出典：「平成 16 年度全国一級河川の水質現況」（国土交通省河川局 2005）

図 1-2 中国四国地域の一級河川流域と水質状況(2004 年)



出典：「瀬戸内海の赤潮」（水産庁瀬戸内海漁業調整事務所）

図 1-3 瀬戸内海の赤潮の発生件数と発生海域図(2008年)

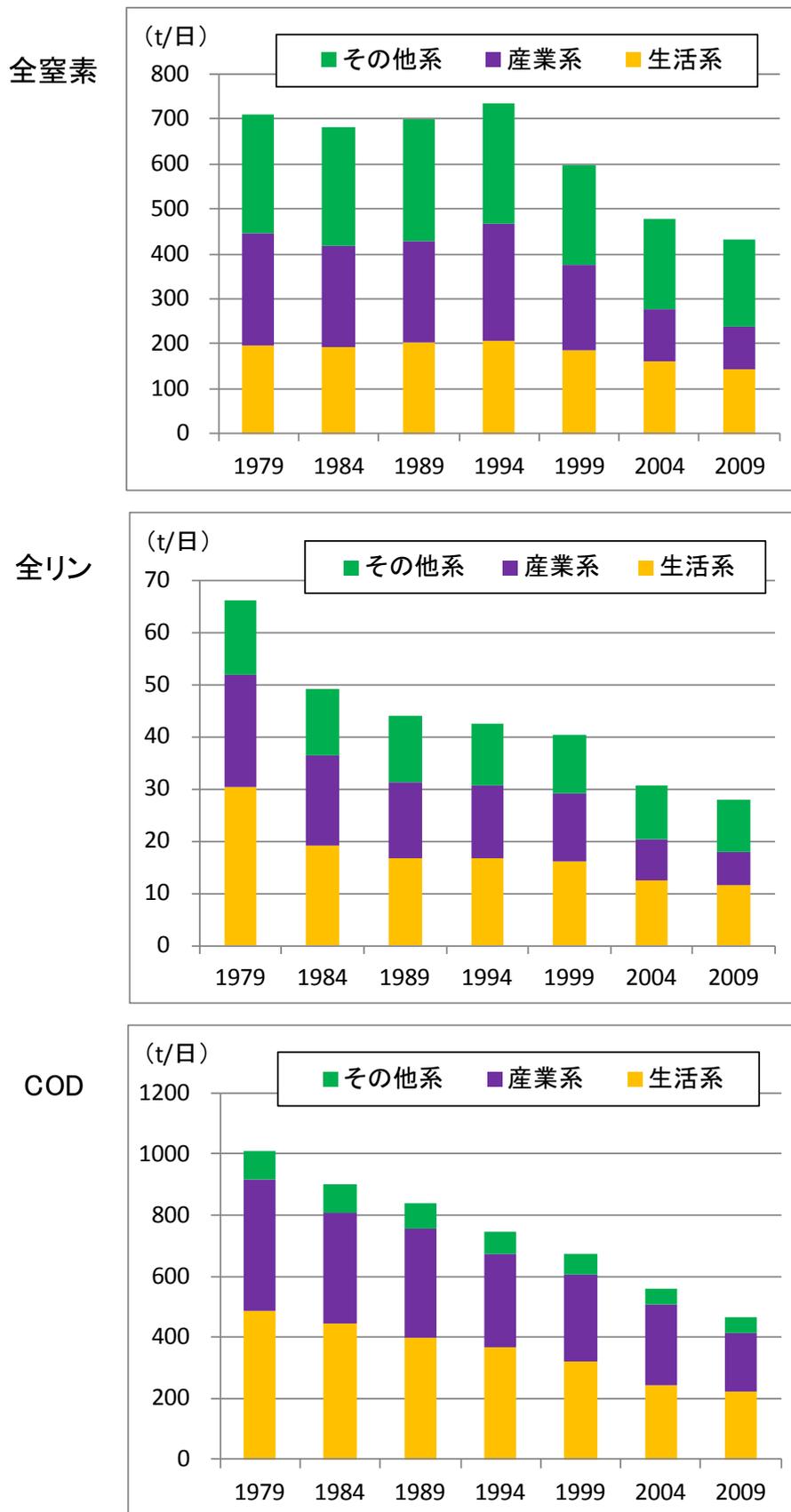


出典:「瀬戸内海における海面漁業による漁獲量の変遷」(瀬戸内海環境情報センター)

図 1-4 瀬戸内海における漁獲量の推移

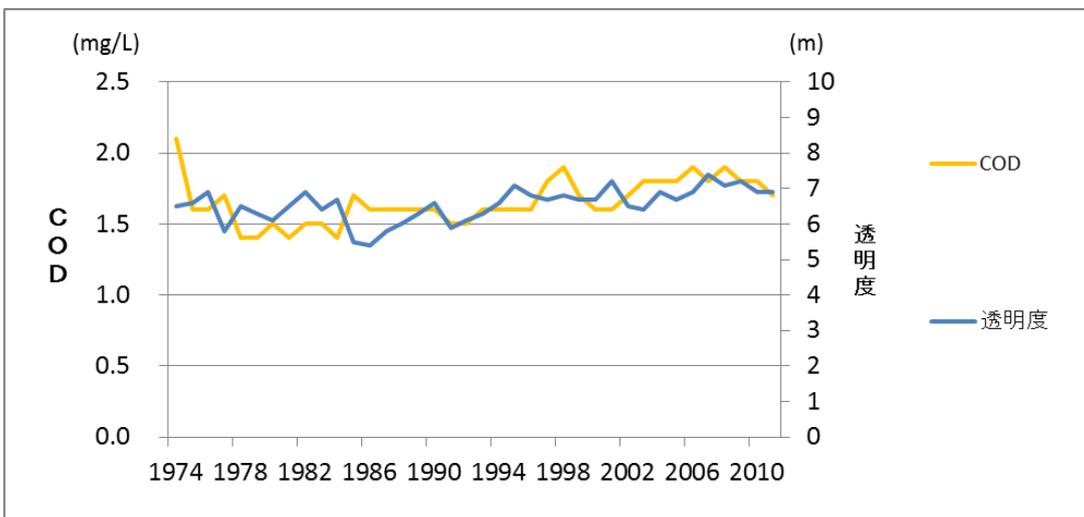
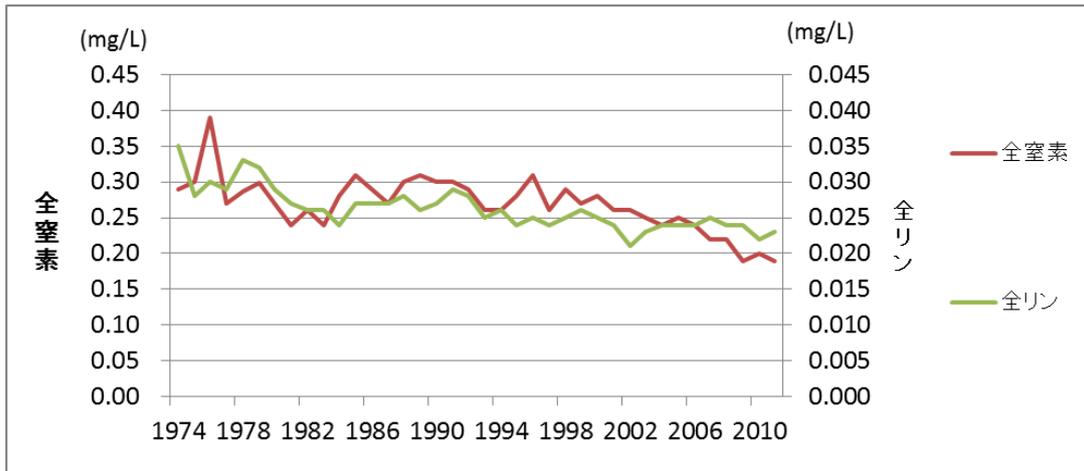
表 1-1 瀬戸内海の総合的水質保全対策の進展状況

COD対策		富栄養化対策		環境に係る国の対応	
				1970年	水質汚濁防止法
1973年	瀬戸内海環境保全臨時措置法の成立 (3か年で72年の1/2に削減する目標)			1971年	環境庁設置
1978年	瀬戸内海環境保全特別措置法の成立				
1980年	第1次COD総量規制 (基準年度79、目標年度84)	1979年	第1次磷削減指導方針の策定指示 (基準年度79、目標年度84)		
1987年	第2次COD総量規制 (基準年度84、目標年度89)	1985年	第2次磷削減指導方針の策定指示 (基準年度84、目標年度89)	1984年	湖沼水質保全特別措置法
1991年	第3次COD総量規制 (基準年度89、目標年度94)	1990年	第3次磷削減指導方針の策定指示 (基準年度89、目標年度94)		
1996年	第4次COD総量規制 (基準年度94、目標年度99)	1996年	第4次窒素・磷削減指導方針の策定指示 (基準年度94、目標年度99)	1993年	環境基本法
2002年	第5次COD、窒素、磷総量規制 (基準年度99、目標年度04)			2001年	環境省設置
2006年	第6次COD、窒素、磷総量規制 (基準年度04、目標年度09)				
2011年	第7次COD、窒素、磷総量規制 (基準年度09、目標年度14)				



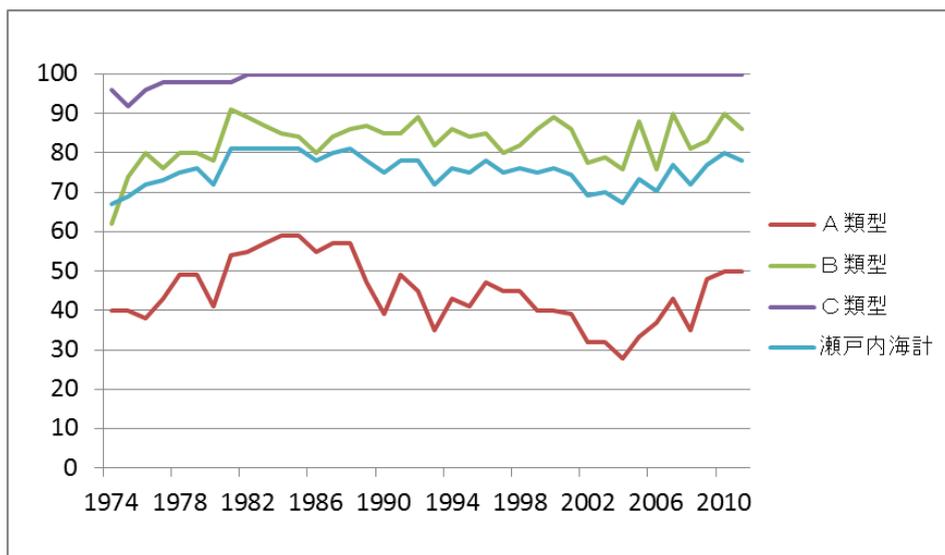
出典:「瀬戸内海における窒素・燐の発生負荷量等解析調査報告書」(環境省)  
「化学的酸素要求量、窒素含有量及びびりん含有量に係る総量削減基本方針(平成23年6月)」(環境省)

図 1-5 瀬戸内海的全窒素、全リン、COD 発生負荷量



出典:「広域総合水質調査」(環境省)

図 1-6 瀬戸内海の水質



出典:「広域総合水質調査」(環境省)

図 1-7 瀬戸内海の COD 環境基準の達成率

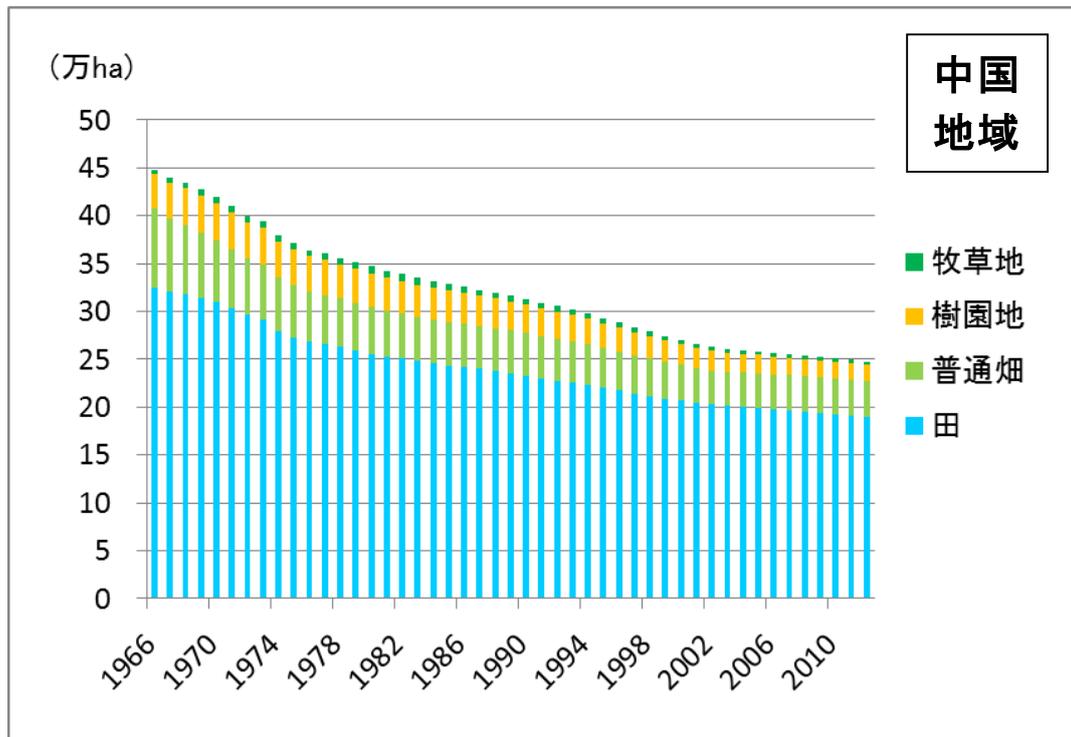
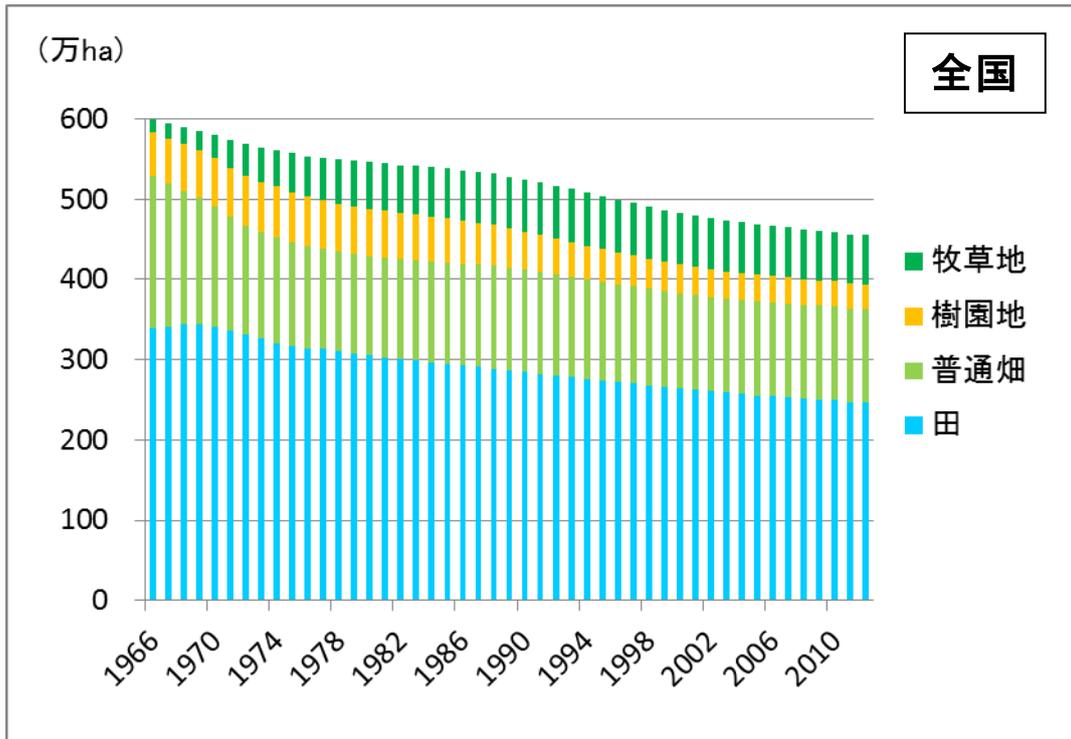
### 1.2.2 農業生産の変化と環境対策

陸域からの栄養塩負荷源としては、産業系や生活系の排水とともに、農地からの流出も主要因の一つである。農林水産省の長期累年統計によると、国内の耕地面積（田、普通畑、樹園地、牧草地）は1961年の6,086千haをピークに減少の一途をたどっている（図1-8）。地目別にみると田面積は1969年の3,441千haをピークに減少が続くのに対して、畑面積は1958年の2,719千haをピークに減少するが、1970年代、80年代には一時増加に転じ、1987年以降は減少が続いている。面積の増減は1970年に対して2000年で耕地83.3%、田77.3%、畑91.9%で地目による違いがあり、普通畑79.5%、樹園地59.4%で大きく減少している。同様に同時期の中国地域の面積増減は、耕地64.4%、田66.8%、普通畑58.0%、樹園地56.0%で全国と比べて高い減少率となっている。

耕地面積減少の主要因は耕作放棄と工場用地・宅地等への転用で、2010年の全国では耕作放棄による割合が約44%、工場用地・宅地等への転用による割合が45%であるのに対して、中国四国地域では耕作放棄が63%と高くなっている（図1-9）。かい廃面積の推移を見ると両要因ともに減少傾向にあるものの（図1-10）、優良農地の確保と有効利用を進めるためには、耕作放棄地の解消および発生防止が喫緊の課題であり、転用規制の厳格化も重要となっている（農林水産省2011）。耕作放棄地の状況を見ると、表1-2のように中国四国地域は全国平均に比べて耕作放棄地率が高い地域となっている。この理由の一つとして中国四国地域は中山間地域の割合が約6割と高いという地域特性があり、農業地域類型別の耕作放棄地率を見ると中山間地域は平地農業地域に比べて高い（図1-11）。中国四国地域においては農地から流出する栄養塩負荷の総量は、長期的には耕地面積の減少に伴って大きく減少してきたと考えられる。

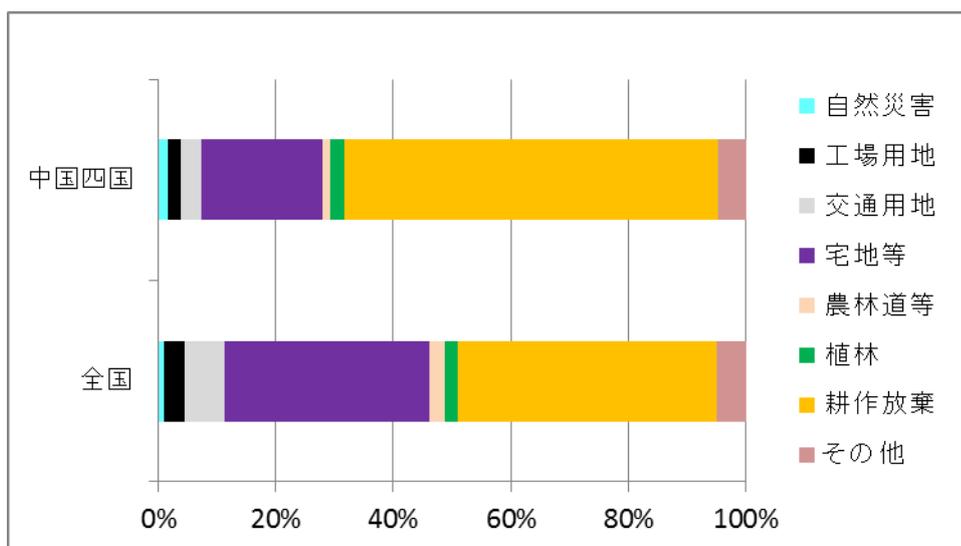
農業生産における畜産排泄物の処理や肥料の過剰施用による水系への栄養塩流出に伴う富栄養化などの環境への影響は1990年代に入って問題視されるようになった。農業用地下水の水質調査（農林水産省1991）では、全国128地点のうち28地点で硝酸性窒素濃度が水道の水質基準値10mg/Lを超えていた。硝酸性窒素は1999年に地下水の環境基準項目に追加され、同時に水質汚濁防止法の有害物質としても指定された。

このような環境への影響に対処するため、農林水産省は1999年に「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」を制定した。また2000年には「持続性の高い農業生産方式の導入の促進に関する法律」を、2005年には「環境と調和のとれた農業生産活動規範（農業環境規範）」を制定している。2007年からは農地・水・環境保全向上対策により、農地・農業用水等の資源の保全向上に関する地域ぐるみの共同活動の支援と、化学肥料・化学合成農薬を大幅に低減する先進的な営農活動への支援を一体的に実施している。



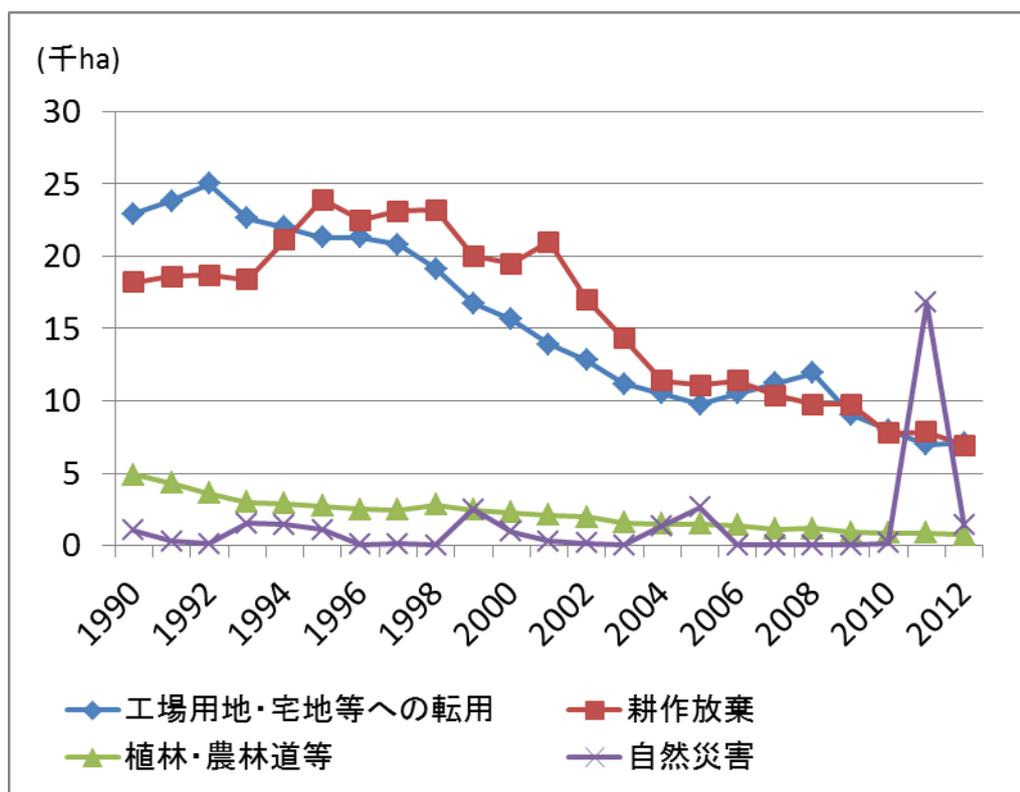
出典:「耕地及び作付面積統計」(農林水産省)

図 1-8 全国および中国地域の耕地面積の推移



出典:「平成 22 年耕地及び作付面積統計」(農林水産省)

図 1-9 耕地かい廢の要因(2010 年)



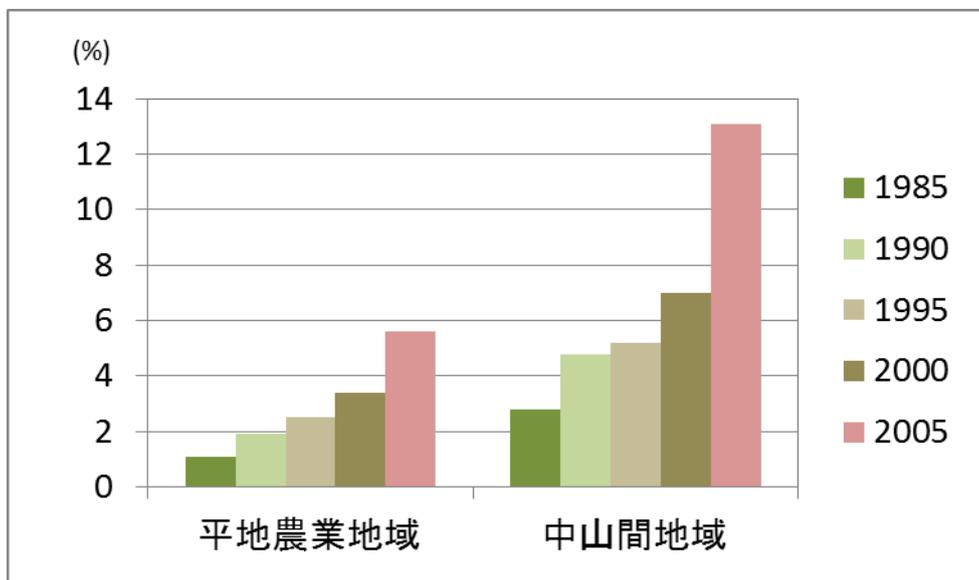
出典:「耕地及び作付面積統計」(農林水産省)

図 1-10 耕地かい廢面積の推移

表 1-2 地域別の耕作放棄地の状況

	単位:千ha、%							
	耕作放棄地面積				耕作放棄地率			
	1995	2000	2005	増減率	1995	2000	2005	
全国	162	210	385	238	3.8	5.1	11.2	
北海道	9	9	19	211	0.9	0.9	2.0	
東北	31	44	71	229	3.8	5.6	10.5	
北陸	8	11	18	225	2.7	3.7	7.5	
関東・東山	41	55	99	241	5.7	8.1	18.7	
東海	14	16	33	236	5.6	6.8	18.8	
近畿	7	10	19	271	3.2	4.7	11.6	
<b>中国</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>39</b>	260	<b>6.1</b>	<b>8.5</b>	<b>23.2</b>	
四国	9	12	23	256	6.4	9.0	22.8	
九州	26	31	61	235	5.0	6.5	15.4	
沖縄	2	2	3	150	4.7	4.8	12.7	

出典:「農林業センサス」(農林水産省)



出典:「農林業センサス」(農林水産省)

図 1-11 農業地域類型別の耕作放棄地の状況

農地・水保全管理支払交付金（共同活動支援交付金）は、2013年3月末時点で全国1,189の市町村において18,662組織が約146万haの農地を市町村との協定に位置付けて取り組んでおり、対象農用地面積の34%のカバー率となっている（農村振興局 2013）。地域別に取り組面積の比率を見ると、近畿地域は54%とカバー率が高いが、中国地域は28%、四国地域は29%で全国平均をやや下回っている。肥料価格の高騰の影響もあるが、生産現場においても環境保全型の栽培管理技術の導入や営農活動の実践が増えつつあり、農地からの流出負荷量の低減につながっていると考えられる。

### 1.2.3 GISによるデータ統合

陸域からの負荷量の推定では、多種多様なデータを統合して評価を行う必要がある。行政部局から出される統計情報の多くは、市区町村といった行政単位のデータとなるが、流入経路として河川との対応を考える場合には、行政界と流域界の相違による分断が生じるため、単に統計表を組み替えるだけでは対応できない。また地形や降水量等の気象条件を組み合わせる場合は地理的な位置関係に基づいたデータ間の対応付けが必要となる。

このような地理空間の単位の異なるデータを統合するには、GIS（地理情報システム）の活用が不可欠となる。GISは情報を管理・統合し、目的達成を支援するための地図（主題図）を作成するシステムである。GISのデータは個々の目的に応じて地図の構成要素となる点・線・面で表されるデータ（図形情報）とその図形情報と関連づけられるデータベース（属性情報）で構成される。GISの主な機能は、データを構築するための入力・編集・管理機能、データを利用するための表示（出力）・検索・解析機能に大きく分けられる。地理情報を持つ多様なデータを組み合わせて利用者が望む地図として可視化でき、またそれらの情報を用いて解析等を行い、新たなデータを作成できる点が特長としてあげられる。山本（2009）が述べているように環境情報システムとしてもGISの果たす役割は非常に大きい。

流域汚濁負荷量の算定に関連する情報については、藤生ら（2004）が指摘しているように、国土数値情報を始めとして電子化されて公開されている基盤的データが増えつつあるが、電子化されていないデータや年次・データ形式の不統一によって独自に整備・加工が必要なデータも多い。そのため、GISやモデルでの活用を踏まえた関連データベースの構築手法の検討も重要な課題であり、負荷量の算定結果の精度向上にもつながる。

### 1.2.4 オープンデータの活用

政府では行政機関等が保有するデータ（公共データ）の民間事業者等による活用が進むよう、機械判読可能な形でデータを提供する「オープンデータ」の取組を推進している。これ

までの政府による電子的な情報提供は、利用者が各府省等が作成したホームページでの閲覧を前提にした取組が中心であったが、インターネットやデータ取得・分析にかかる技術の進展、データ利用ニーズの多様化などにより、各府省等が閲覧用に加工したデータだけではなく、民間事業者等が加工・分析したり、他のデータと組み合わせることが可能となるよう、各府省等が閲覧用に加工する前のデータをコンピュータ処理に適した形（機械判読可能な形）で提供することが求められている。

オープンデータに関する取組は、アメリカ合衆国やEUを始めとして海外においても積極的に進められている。国内では2000年に出された「IT基本戦略」において「行政内部や行政と国民・事業者との間で書類ベース、対面ベースで行われている業務をオンライン化し、情報ネットワークを通じて省庁横断的、国・地方一体的に情報を瞬時に共有・活用する新たな行政を実現する電子政府への取り組みの推進」がうたわれた。IT戦略本部が2012年に決定した電子行政オープンデータ戦略に基づき、行政情報の電子的提供・オープンデータの推進が取り組まれ、電子行政オープンデータ実務者会議において、推進に向けた具体的な議論が行われている。統計データについては、2006年に各府省情報化統括責任者連絡会議で決定された「統計調査等業務の業務・システム最適化計画」に基づき、統計情報の電子的提供の推進を含む取組が施されている。

このような取組は研究者にとっても歓迎する動きであり、データの入手性・利便性の向上が大いに期待できる。図1-12に示すようにデータの公開が第1段階であるが、より利用しやすいデータ形式での提供が進むことを期待するとともに、利用者側でも積極的にオープンデータの活用事例を作り出すことが必要である。

段階	公開の状態	データ形式例	参考) Linked Open Data 5star	
1段階	オープンライセンスの元、データを公開	PDF, JPG	OL - Open License (計算機により参照できる(可読))	人が理解するための公開文書(編集不可)
2段階	1段階に加え、コンピュータで処理可能なデータで公開	xls, doc	RE - Readable (Human & Machine) (コンピュータでデータが編集可能)	
3段階	2段階に加え、オープンに利用できるフォーマットでデータ公開	XML, CSV	OF - Open Format (アプリケーションに依存しない形式)	
4段階	Web標準(RDF等)のフォーマットでデータ公開	RDF, XML	URI - Universal Resource Identifier (リソースのユニーク化, Webリンク)	機械判読可能な公開データ
5段階	4段階が外部連携可能な状態でデータを公開	LoD, RDFスキーマ	LD - Linked Data (データ間の融合情報が規定。検索可能)	

**オープンデータの5つの段階**

出典：★ Open Dataのサイト (<http://5stardata.info/>) およびTim Berners-Lee氏のLinked Dataに関する提言ページ (<http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>) を参考に作成。

出典：小池博(2012)

図 1-12 オープンデータの 5 つの段階とデータ形式

### 1.3 研究目的

瀬戸内海において環境問題が深刻化し、総量規制などの取組が始まった 1970 年代以降の農地からの負荷量を空間分布と合わせて時系列的に把握するため、これら環境負荷の評価に必要な関連情報をオープンデータを活用しつつ、GIS を用いて統合するとともに、陸域さらには海域のモデルで解析するための流域 GIS データを構築し、流入負荷の影響を明らかにすることが本研究の目的である。

最初に、岡山県、香川県において河川の流量・水質に基づき、陸域から海域への流入負荷量を推定するとともに、原単位法に基づき各流域の負荷源別の排出負荷量を整理する。両手法による推定結果を統合して、海洋モデルでの解析に利用できる陸域からの流入負荷量、負荷流入地点のデータを GIS で整理する（第 2 章）。

次に、1970 年から 2000 年の土地利用の流域内の経年変化と空間分布について、広島県を流れる一級河川太田川と芦田川を対象に検討する。また、作物の作付実態を反映させた流出負荷量の指標として、栄養塩収支による解析について広島県、岡山県を対象地域として検討する（第 3 章）。

次に、流域 GIS をベースとして 1km メッシュを単位として水収支を解析する分布型モデルを開発し、太田川と芦田川流域で検証するとともに、原単位法に基づきモデルを拡張して栄養塩負荷量の年間の季節変動を岡山県の吉井川流域、香川県の土器川流域において検討する（第 4 章）。

最後に、総合考察として、各章の結果をもとに農地からの流出負荷量の評価を行う。また、残された課題や今後の展望について検討する（第 5 章）。

## 第 2 章 陸域から海域への流入負荷

### 2.1 背景および目的

海洋沿岸部の富栄養化や汚染などの水域環境の悪化は世界各地で大きな問題となっている。これは、陸域から海洋へ流出する物質負荷量が増加しているためであると指摘されている (Burt et al. 1993)。特に水質が問題となりがちな内湾や半閉鎖性水域においてその影響は大きい。国連環境計画 (UNEP) では、閉鎖性海域の環境を守るため、周辺の国々が協定等を通じて互いに海洋汚染の防止に協力し合うという地域海計画が 1975 年の地中海を始めとして計 13 の地域で策定されている (国際エメックスセンター 2003)。

日本最大の閉鎖性海域である瀬戸内海では、1960 年代の高度経済成長による水質悪化に伴い、赤潮発生による漁業被害が頻発したが、1970 年代以降は排水規制対策が進み、赤潮の発生は減少に転じた。一方で漁獲量の減少や養殖ノリでの栄養塩不足による色落ち被害が拡大してきており (環境省環境管理局水環境部 2005)、岡山県ではノリの色落ち対策として 2006 年から冬季に吉井川上流の苫田ダムで緊急放流を実施している。これらの水産業被害には、溶存無機態窒素 (DIN)、溶存無機態リン (DIP) といった栄養塩や COD 負荷量等の濃度や比率が密接に関係していることがわかっている (岡市 1996、堤ら 2003、大山ら 2008)。

そのため、陸域からの栄養塩の寄与を定量的に明らかにすることは環境学、水産学的に重要な課題である。瀬戸内海全域では山本ら (1996) が全窒素 (T-N)、全リン (T-P)、淡水流入量の推定を行っており、この他にも広島湾 (李・星加 2000)、東京湾 (松村・石丸 2004)、有明海 (中嶋ら 2005) 等での報告がある。

本研究では、観測データの限られた二級河川や沿岸流域が含まれる岡山県と香川県に挟まれた瀬戸内海海域へ流入する流域を対象に、河川の観測データと発生源から推定した排出負荷データを統合して、海域への流入負荷量と発生負荷源の寄与程度を推定することを目的とする。あわせて陸域からの流入地点別の負荷量のデータを作成し、海洋の流況や水質をシミュレーションするモデルに受け渡すことによって、赤潮の発生や養殖ノリの生産等の海域の環境影響の評価につなげる。

## 2.2 方法

### 2.2.1 対象流域の設定と流域概要

対象流域は、岡山県、香川県の海岸線に至る図 2-1 の流域である。本研究では、この対象流域を岡山県側、香川県側それぞれに河川経由で淡水が流入する「河川流域」とそれ以外の直接海域に淡水が流入する「沿岸流域」に区分した。

岡山県側は、北部は 1,200m 前後の中国山地で、吉備高原と津山盆地を中心とする内陸部、瀬戸内海沿岸の平野部からなり、森林が 70% を占める。平年の気象条件は内陸部の津山では平均気温 13.4℃、降水量 1,478mm、沿岸部の岡山では 15.7℃、1,147mm であり、南北で気温・降水量に差がある。

河川流域としてまず一級河川の高梁川、旭川、吉井川流域を設定した。3 河川とも中国山地から瀬戸内海まで南北を縦断しており、流域面積は 2,670、1,810、2,110km<sup>2</sup> と広域である。一級河川の他に指定湖沼の児島湖流域を河川流域として設定した。児島湖には二級河川の笹ヶ瀬川、倉敷川、鴨川が流入しており、流域面積は 544 km<sup>2</sup> である。岡山県側の対象流域面積は 7,768km<sup>2</sup>、河川流域として設定した面積は 7,134km<sup>2</sup> で、面積割合は 92% である。

香川県側は、南部に 900m 前後の讃岐山脈が控えるが、森林は 47% で平野部が広く、農地、市街地の占める割合が高い。平年の気象条件は高松では 16.0℃、1,112mm で瀬戸内式気候に属し、温暖小雨である。そのため、利水容量 176 百万 m<sup>3</sup> となるダム・ため池が重要な水源となっており、県外水源となる香川用水への依存も 30% 程度と大きい。

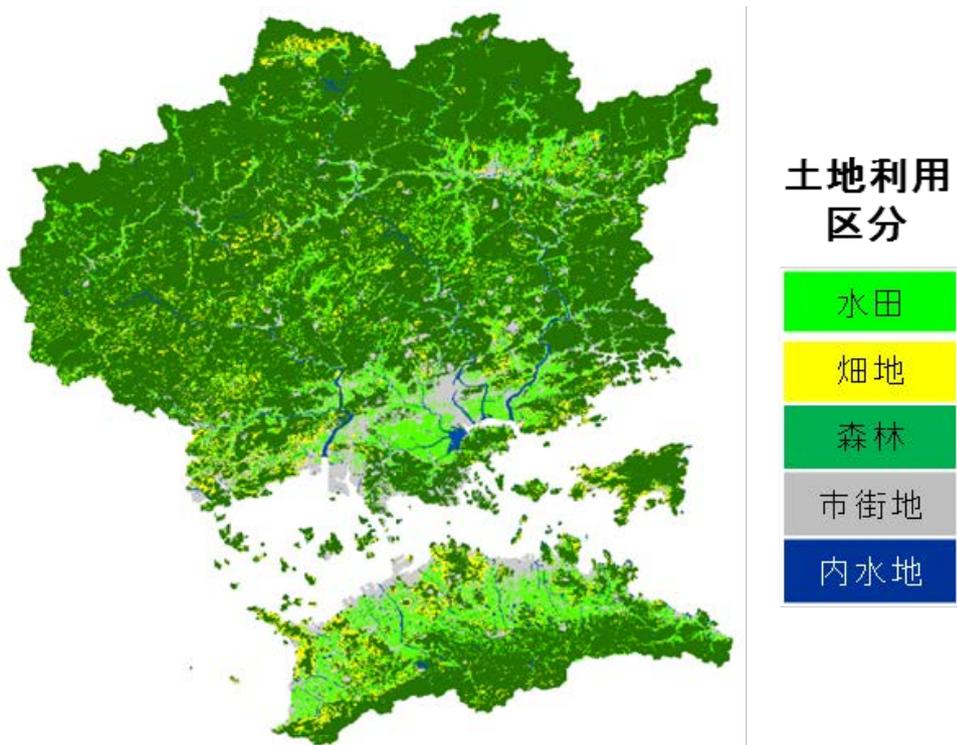
香川県が取りまとめた発生負荷量等算出調査（香川県、2005）の流域区分に合わせ、一級河川の土器川（流域面積 140km<sup>2</sup>）と二級河川の香東川、高瀬川等の 26 河川を河川流域として設定し、残る地域をさらにその他の河川流域と沿岸流域に区分した。香川県側の対象流域面積は 1,844km<sup>2</sup>、河川流域として設定した面積は 1,504km<sup>2</sup> で、面積割合は 82% である。

なお、岡山県側の流域には高梁川流域面積の 26% にあたる広島県北東部 685km<sup>2</sup> が含まれる。また、岡山県南西部の芦田川流域 18km<sup>2</sup>、香川県南東部の吉野川流域 27km<sup>2</sup> は県外への流出となるため除いている。県の行政界とはこれらの相違があるので、ここでは対象流域を「岡山流域」、「香川流域」と記す。両流域の人口、土地利用等の流域概要を表 2-1 に示す。

流域界は、GIS ソフト ArcGIS（ESRI 社）を用いて、国土地理院刊行の 50m メッシュ標高データから水文解析で得られた集水域と国土交通省国土数値情報の流域界・非集水域データを基に作成した。作成には香川県の水質測定地点図、岡山県の河川整備計画策定ブロック図、児島湖流域図、岡山河川事務所管内図等を参考にした。



原データ：国土数値情報 流域界・非集水域



原データ：国土数値情報 土地利用細分メッシュ (1997年)

図 2-1 対象地域の流域界と土地利用

表 2-1 岡山・香川流域の概要

項 目	岡山	香川
流域面積 (km <sup>2</sup> )	7,768	1,844
-----		
土地利用割合 (%)		
水田	4.3	9.5
畑地	3.6	8.8
森林	70.3	45.6
市街地	16.7	25.6
内水地	5.2	10.5
-----		
降水量 (mm)	1,420	1,160
人口 (千人)	1,953	1,020
污水処理人口普及率 (%)	64.8	54.0
乳用牛 (頭)	25,400	7,790
肉用牛 (頭)	37,000	20,500
豚 (頭)	34,200	38,800
工業生産額 (億円)	64,024	20,743

原データ

流域面積：国土数値情報 流域界・非集水域

土地利用割合：農林業センサス、国土数値情報 土地利用細分メッシュを元に算出

降水量：アメダス降水量データ（気象庁）を元に 1995-2005 年の平均値を算出

人口：人口推計（平成 15 年 10 月 1 日現在）（総務省統計局）

污水処理人口普及率：平成 15 年度末の污水処理人口普及状況について

（農林水産省・国土交通省・環境省 2004）

牛・豚飼養頭数：平成 15 年畜産統計（農林水産省）

工業生産額：平成 15 年工業統計表「市区町村編」データ（経済産業省）

注：人口以下の項目は岡山県・香川県の数値で流域に対応していない

## 2.2.2 流入負荷量の推定手法

陸域からの負荷量の推定では、海域への主要な負荷流入経路となる河川の流量と水質濃度データを用い、陸域からの出口で負荷量を直接推定する方法がある。河川水による栄養塩輸送については、比較的容易に算定できることから、これまでに多くの報告 (Lance et al. 1984, Pettine et al. 1998, McIsaac et al. 2001, 比嘉ら 2001 等) がある。国内では一級河川については流量・水質等の観測データが整備されており、国土交通省の水文水質データベースから入手できるが、二級河川については防災を目的とした水位データの観測のみとなっている河川が多く、負荷量の推定に必要な水質のデータが不足している。また直接海域に負荷を排出する沿岸流域が含まれる場合にはその対応が問題になる。このような場合に、観測データの豊富な主要河川の単位流域面積当たりの比負荷量に基づいて、その他の流域の負荷量を推定する方法がある。ただし、降水量や地形等の自然環境、負荷の発生源となる人口や事業所の分布、土地利用や利水状況等、これらの流域特性の相違があり、河川水質に対するこれらの寄与度を明らかにするのは難しいため、このような流域特性の相違が大きい場合には推定精度は低下する。

一方、総量削減計画や湖沼水質保全計画等では、原単位法を用いた対象地域全体の排出負荷量の算定・評価が行われている。原単位とは、環境アセスメント用語集 (環境省 <http://www.env.go.jp/policy/assess/index.html>) では、「大気汚染や水質汚濁の予測を行う際に、事業行為などにより発生する負荷量を算定するために用いる係数で、たとえば、成人 1 人 1 日当たり排出する生物化学的酸素要求量 (BOD) 負荷、ある工場の製品出荷額 1 万円当たりの硫黄酸化物 (SO<sub>2</sub>) 排出量や BOD 負荷などがある。」とされている。瀬戸内海では、全窒素、全リン負荷量を対象に浮田 (1996) が 1957~1987 年の 5 年毎、清木ら (1998) が 1979~1994 年の 5 年毎に、この方法で推定を行っている。原単位法では、発生負荷源毎に単位負荷量を設定することにより、総負荷量に対する各排出負荷源の寄与率や経年的な変化が容易に算定できる。また、河川の観測データに直接は依存しないため、観測データの無い河川流域や沿岸流域においても排出負荷量が推定でき、過去に遡って推定することも可能である。その反面、設定された原単位は日もしくは年単位の一定値の負荷量であり、気象等の影響を受け、季節変動や年次変動が生じる観測データから得られる負荷量とはギャップが生じることもある。

この他には、各種の水文モデルによる負荷量の推定も行われている。水文モデルを用いる場合にもパラメータの較正や推定精度の検証のために通常は観測データが必要

である。IAHS では未観測流域での予測のために、既存の水文モデルの改善や新たなモデルの開発を目的にあげており、2003 年から 10 年間の重点的な活動を推進している状況にある (Sivapalan et al. 2003)。

本章では、河川データに基づく推定と原単位法による推定手法を取り上げ、各手法のメリット・デメリットを踏まえながら、海域への影響を評価する基礎データとして対象地域の陸域から海域への負荷量を推定する。

### 2.2.3 河川データに基づく流入負荷量の推定手法

対象期間を岡山県、香川県で発生負荷量調査が行われた 2003、2004 年を中心に、渇水年、豊水年を含む 2000～2005 年として、河川流量と海域への流入負荷量を算定した。使用した河川関連のデータの概要について表 2-2 に示す。

岡山側の河川流域は、一級河川と指定湖沼であるため、国および岡山県により流量・水質が観測されている。

流量データは、国土交通省岡山河川事務所 (2001～2006) の観測データから河口部に近い観測地点として、高梁川は酒津 (河口距離 10.2km)、旭川は牧山 (河口距離 20.4km)、吉井川は御休 (河口距離 14.1km) 観測所の日流量データを使用した。児島湖は、樋門操作月報 (岡山県 2001a～2006a) より、開閉後の水位差の日別値に児島湖の面積 10.88km<sup>2</sup> を乗じた値を児島湾への排水量とした。

高梁川、旭川、吉井川の 3 河川では、流量観測地点より下流でも取水されていることから、河口流量の推定のために、各河川に設定されている取水権水量を水利現況調書 (中国地方整備局河川部 2007) から整理した。取水量のうち、水道および工業用水は年間を通してほぼ一定であるが、農業用水は灌漑期と非灌漑期で大きく変動したので、月平均値に換算した。上記観測地点流量からこれらの取水量を差し引き、河口流量を推定した。3 河川の平均取水量はそれぞれ 13.4、14.9、5.7 m<sup>3</sup>/s である。

水質データは、公共用水域水質測定結果 (岡山県、2001b～2006b) より、高梁川は霞橋 (河口距離 3.2km)、旭川は桜橋 (河口距離 6.7km)、吉井川は永安橋 (河口距離 5.4km) 観測所のデータを使用した。これらの観測所では月 1～2 回平水時に観測を行っている。河川負荷量は、月平均流量に全窒素、全リン、COD 濃度を乗じて月別に算定した。なお、桜橋、永安橋の観測地点は感潮域である。

香川側の河川流域は、土器川は国土交通省香川河川国道事務所が観測する丸亀橋 (河口距離 2.6km) のデータを国土交通省水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) より入手して用いた。ただし、2002、2003、2005 年は流量データが無いため、2004 年の時刻水位・

流量データから回帰式（H-Q 式）を求めて各年の水位データから流量を推定した。

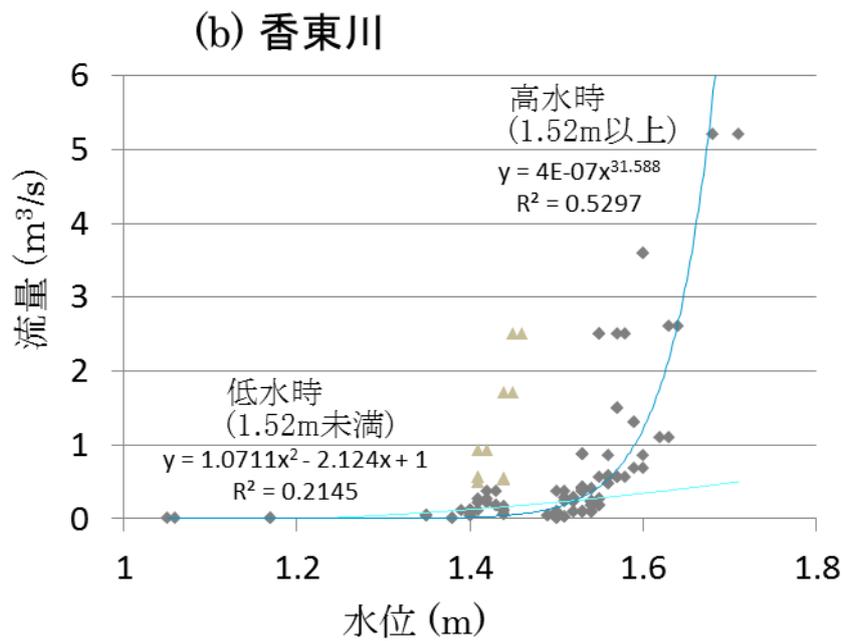
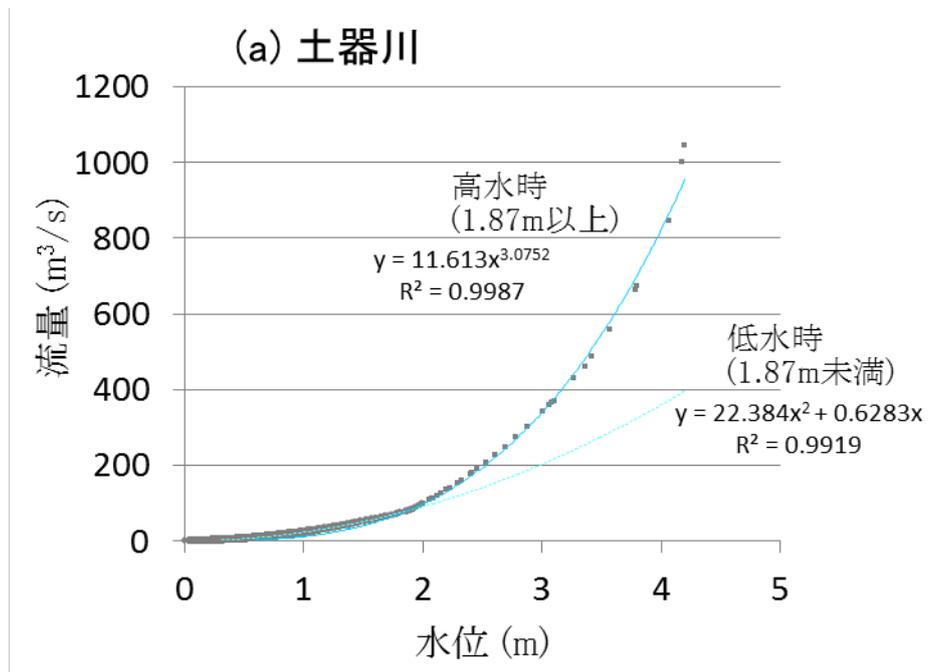
土器川以外の二級河川での流量の定点観測は限られている。そこで、流域設定した 26 河川を対象に水質調査時等に測定された既存の水位・流量データの収集・整理を行った。これらのデータと香川県が防災のために計測している水位データおよび補足調査データを解析して、14 の二級河川（流域面積計 729km<sup>2</sup>）について、四国地方整備局河川部（2004）を参考に水位と流量の回帰式を独自に求め、水位データから流量を算定した。ただし、降雨時の調査点数が少ないため、高水位時における流量との関係の把握は十分ではない。代表河川として土器川と香東川の水位と流量の関係を図 2-2 に示す。土器川は連続した時別データで高水位までのデータがあるため、低水時と高水時に分けて回帰式を求めた結果、非常に相関の高い回帰式が得られた。香東川はデータ数が限られ、水位に対する流量データのばらつきも非常に大きく、回帰式の相関も低い。水位上昇期と下降期で同じ水位に対応する流量が大きく異なるループが発生している可能性があるが検証できていない。

水質データは、土器川は最下流の丸亀橋の観測データを用い、その他の河川は各河川の環境基準地点で最も河口寄りの観測データを使用した。負荷量は月毎の全窒素・全リン・COD 濃度に流量を乗じて算定した。香川流域で二級河川を対象に含めた海域への流入負荷量の推定を行った研究は少なく、山本ら（1996）は二級河川も含めて淡水量、負荷量の推定を行っているが、流量が測定されていない河川は同じ海域に流入していて流量が測定されている河川の月平均流量に流域面積比を乗じて流入負荷量を算出している。

対象期間の流域降水量は、水文学で降水量の集計法として使われるティーセン法（Thiessen 1911）を用いて求めた。ティーセン法は、隣接する観測点間の垂直二等分線によって観測点の最近隣領域を割り当てる方法である。GIS ソフトを用いて各アメダス観測地点に対応するティーセン領域を作成し、各領域内の 3 次メッシュ区画（約 1 km<sup>2</sup>）に観測所の降水量を割り当てた。流域降水量は対象流域に属する 3 次メッシュの平均値とした。

表 2-2 使用した河川関連のデータ

データ項目	区分	データ形式	データ入手先
流量	一級河川	CSV	国土交通省 水文水質データベース
水質	一級河川	CSV	国土交通省 水文水質データベース
取水量	一級河川	印刷物	水利現況調書(中国地方整備局河川部)
水位	児島湖	印刷物	児島湖締切堤防樋門操作月報(岡山県)
水質	児島湖	XLS	公共用水域水質測定結果(岡山県環境保健センターより提供)
水位	香川県	CSV	香川県環境研究保健センターより提供
水質	香川県	XLS	公共用水域水質測定結果(香川県環境保健研究センターより提供)
流域界		TXT	国土交通省 国土数値情報 流域界・非集水域



注：△の観測データはH-Q式の評価から除外している

図 2-2. 土器川および香東川の水位・流量の関係

## 2.2.4 原単位に基づく発生負荷源別の排出負荷量の推定手法

流入負荷の発生負荷源を生活系、畜産系、面源系、産業系に区分して、全窒素、全リン、CODの排出負荷量を推定した。

本研究では、流入負荷の計算過程に沿って、発生負荷、排出負荷、流入負荷に分けることとする（図 2-3）。一般的に、詳細なデータと原単位を用いれば、推定結果の精度も高くなる。高岸（2000）は琵琶湖集水域を事例として原単位法と詳細な統計情報を用いた河川流域別の負荷量を算出しているが、地域によって詳細なデータを揃えることが困難である。また、原単位の代表性や適応性をどのように保証するかという問題も指摘されている（武田 1997）。実際に既往の原単位には、その数値に大きな幅がある（表 2-3）。しかし、時空間上の相対的な比較には有効であり、それぞれの流域の特性を明らかにできるという利点がある。流域の環境管理の視点からすると、流域のどこに大きな排出負荷が存在するかを検討できる。

利用する原単位は、既存の原単位について整理された流域別下水道整備総合計画制度設計会議（2008）、国土交通省（2006）、國松・村岡（1989）を参考にし、対象地域で用いられている総量削減計画の排出負荷量原単位の県別値を選定した。児島湖流域については、近年の調査結果に基づいて設定されている湖沼水質保全計画の原単位を適用した（表 2-4）。

表 2-3 既往の面源系の排出負荷量の原単位

		(g/ha 日)			
		市街地系	水田系	畑地系	森林系
COD	指定湖沼	98.4~160	66.2~159	13.0~105	31.0~157
	流総	93.2~1036	95.1~1301	11.0~181	107~422
	環境省マニュアル	247~1036	—	—	293~381
	既往調査事例	37.0~578	31.5~565	22.5~181	18.7~151
T-N	指定湖沼	14.9~46.0	16.0~62.9	6.50~261	3.45~23.9
	流総	12.3~108	14.0~185	6.58~652	0.82~34.2
	環境省マニュアル	48.2~93.7	-41.6~115	—	5.01~19.0
	既往調査事例	8.40~76.4	28.5~121	6.58~652	6.68~72.6
T-P	指定湖沼	0.71~2.98	0.74~13.40	0.54~1.79	0.18~0.88
	流総	1.64~17.81	4.22~20.36	0~6.66	0.03~3.59
	環境省マニュアル	2.47~17.81	-5.75~44.66	—	0.26~1.51
	既往調査事例	0.70~9.00	1.23~18.92	0.27~3.42	0.15~3.75

流総：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説（平成 11 年版）

環境省マニュアル：「非特定汚染源負荷調査マニュアル」（1990 年 3 月）

出典：国土交通省・農林水産省・環境省（2006）

表 2-4 生活系・畜産系・面源系の排出負荷原単位

流域	負荷種別	生活系			畜産系	
		合併浄化槽 (g/人日)	単独浄化槽	雑排水	牛 (g/頭日)	豚
岡山	T-N	11.1	9.0	2.6	68.4	12.3
	T-P	1.09	0.85	0.38	1.35	2.25
	COD	10.5	6.0	18.4	36	16.1
香川	T-N	8.9	8.4	2.6	64.4	13.2
	T-P	0.77	0.65	0.38	1.50	3.25
	COD	9.4	4.0	18.4	47.7	11.7
児島湖	T-N	6.7	8.28	2.3	14.5	2.0
	T-P	0.88	0.63	0.24	2.5	1.25
	COD	5.9	5.2	14.0	26.5	6.5

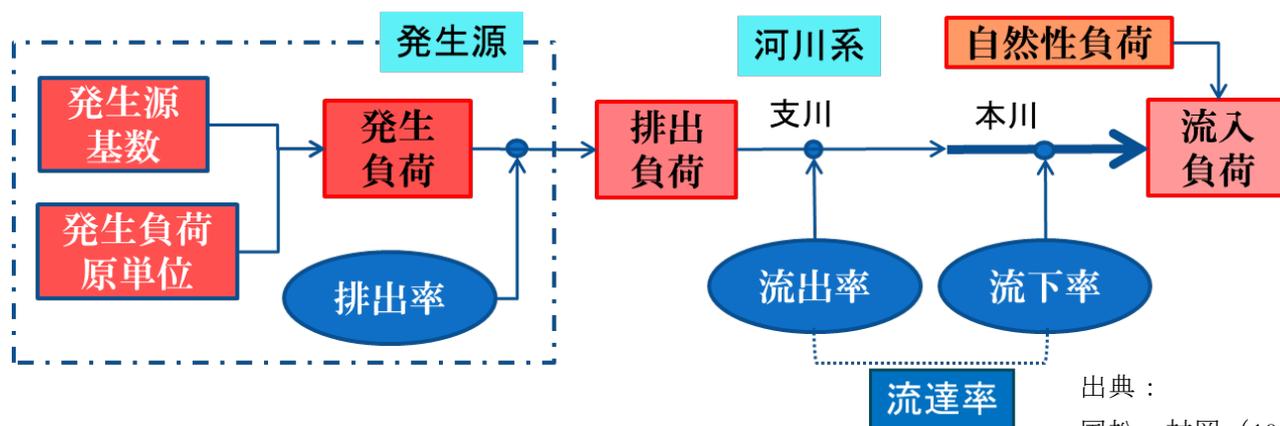
  

流域	負荷種別	面源系			
		水田 (g/ha日)	畑地	山林	その他
岡山 香川	T-N	76.0	76.0	19.0	19.0
	T-P	1.00	1.00	0.50	0.50
	COD	17.5	10.0	2.5	10.0
児島湖	T-N	31.2	6.5	3.8	20.6
	T-P	13.40	1.79	0.22	1.92
	COD	139.0	22.6	38.7	98.4

出典：流域別下水道整備総合計画制度設計会議(2008)

表 2-5 原単位による推定で使したデータ

データ項目	データ形式	データ入手先
人口	XLS	平成17年国勢調査 地域メッシュ統計 (CD-ROM)
汚水処理人口普及率	HTML	汚水処理施設普及率(各市町村別) 平成15年度末普及状況(岡山県HP)
畜産飼養頭数	XLS	農林業センサス(農林水産省)
農地・森林面積	XLS	農林業センサス(農林水産省)
土地利用	TXT	国土数値情報 土地利用細分メッシュ(国土交通省)
事業系排出負荷量	XLS	平成16年度汚濁負荷削減状況調査結果(岡山県) (岡山県環境保健センターより提供)



出典：  
国松・村岡 (1989)

図 2-3 原単位法による流入負荷の計算過程

生活系原単位は、人口1人当たりの排出負荷量で、排水処理形態別で合併浄化槽・単独浄化槽・雑排水に区分されている。畜産系は、牛・豚1頭当たりの排出負荷量である。生活系・畜産系で岡山県と香川県の原単位が異なるのは除去率の違いによる。面源系は、土地利用を水田、畑地、森林、市街地の4つに区分し、各1ha当たりの排出負荷量が設定されている。これらの原単位は負荷の排出地点での値であり、海域への流入負荷量を推定する場合には、流達率を考慮する必要がある（図2-3）。

児島湖の面源系の原単位は、岡山県が独自に測定したデータに基づいており、総量削減計画の原単位より、現地に適していると考えられるが、鷹野ら（2010）が指摘しているように、児島湖は干拓地に存在する湖沼で、周辺は高低差が少なく、水の流れも緩やかな地域である。森林の面積割合が高く、勾配も土壌も様々な他の一級河川流域へ適用することへの疑問があり、ここでは児島湖流域に限定した。

これらの原単位に対応する発生源基数（フレーム）のデータの概要を表2-5に示す。

岡山流域では、生活系を平成17年国勢調査の人口および2003年度の市町村別の污水处理施設普及率から、畜産系・面源系は2000年農林業センサス等のデータから畜産頭数・土地利用面積を算定した。香川流域は、発生負荷量等算出調査（香川県2005）の総括表によった。なお、農地面積については、水稻の生産調整により畑作物が作付けされている水田も多いため、作付作物に基づいて水田・畑地の面積を設定した。2000～2005年の水田の水稻作付率は岡山県67%、香川県61%である。

産業系の負荷量は、事業所の排出量を別途整理した。岡山県については、水質汚濁防止法及び瀬戸内海総量負荷削減計画に基づく2004年の実績報告（岡山県2005）から工場・事業場等の排出負荷量を流域別に整理した。香川県については、日平均排水量50m<sup>3</sup>以上の排水規制事業場は実測値から、未規制事業場は環境省の業種別の原単位で算定した発生負荷量等算出調査の総括表によった。

本研究においては、共同研究を行った岡山県環境保健センター、香川県環境保健研究センターを通じて、両県から事業所の排出量の実績データを入手できたが、これらは一般的には公開されておらず、通常は入手が困難である。そのため、流域別下水道整備総合計画制度設計会議（2008）で解説されているように、産業系においても工業統計で入手できる産業部門別の出荷額に対する原単位を適用して、排出負荷量を推定する方法が用いられており、本研究でも未規制事業場の負荷量の算出に使用されている。石本・井手（2005）は滋賀県産業連関表を用いて原単位による工業系汚濁負荷の解析を行っている。

## 2.3 河川データに基づく海域への流入負荷量の推定

岡山流域の2000～2005年の降水量と高梁川、吉井川の流量、児島湖の排水量、および全窒素、全リン、CODの流入負荷量を図2-4に示す。3本の一級河川は概ね同様の流量・負荷量の変動を示した。河川流量は降水量にほぼ連動し、梅雨時と台風が到来する夏から秋にかけてピークがみられるが、児島湖では樋門操作で水位を調節しているため、3河川に比べて排水量の変動は緩やかになっている。また、水質濃度の変動は流量に比べて小さいため、負荷量は流量に対応した増減となっている。児島湖流域においては、水田でリンが流出しやすいことが報告されている（岡山県 2002）が、排水量が増加した時の全リンの増加率は、全窒素、CODと比べて大きく、今回の河川負荷量のデータからもリンが流出しやすい流域であることが裏付けられた。同様に、香川流域の降水量と河川流量・負荷量を土器川、香東川、高瀬川を代表として図2-5に示す。河川流量は、岡山流域と同様に降水量に連動した変動を示した。流域面積が小さいため、流量は岡山流域の一級河川に比べて1～2桁ほど小さく、負荷量も同様に小さく見積もられた。

2000～2005年の流量および負荷量を流域面積で除した河口部での比流量、比負荷量を表2-4に示す。各流域の降水量は、岡山の一級河川、香川の河川、児島湖流域の順で少なくなり、それぞれで約200mmと大きな開きがある。比流量ではこの順序が入れ替わり、児島湖流域、岡山の一級河川、香川の河川の順で少なくなっている。降水量の流達率となる淡水量の降水量比では、児島湖流域が93%と高く、岡山の一級河川は42%で香川の土器川が同程度、香川の二級河川は20%とそれに比べて低かった。この理由として岡山の一級河川では下流部で取水されて流量を減らしているが、児島湖流域では旭川、高梁川から農業用水を取水していることがあげられる。岡山の一級河川について取水補正前の流量から降水量比を算出すると55%であり、取水による低下が大きい。また、香川流域では、河川からの取水に加え、ダムやため池での貯留により河川への流出が抑制されること等が降水量比の低下要因として考えられる。河川によっても降水量比にはかなり差があり、通常は流量がほとんど無い河川も含まれている。國松・村岡（1989）は年降水量と蒸発散量による年損失降水量を差し引いた有効降水量の比による年流出率を0.6～0.7程度としているが、流域の水利用に伴う取水や貯留といった人為的な操作により、流達率には大きな差が出ていると考えられる。

比負荷量は、児島湖、次いで土器川が高く、水質汚濁の状況が反映された結果となっている。ただし、取水は負荷量にも影響があり、児島湖流域については流域外からの持ち込みが、岡山の一級河川からは逆に持ち出しがある点に留意する必要がある。全窒素と全リンの比を見ると、岡山の一級河川の19.8に対して、児島湖流域では6.7と低く、香川流域では土器

川は 8.3 で二級河川も同程度である。このことから、児島湖流域、香川流域では全窒素に対して全リンの流出が大きいことがわかる。まとめると香川の二級河川流域は、岡山の一級河川と比べて全窒素、COD が低く、全リンが高い。この理由としては、降水量が少ないために農地等の面源からの排出負荷量が少なくなることや、河川の流量が少ないために河床等の土壌や植物に負荷が捕捉されやすいことが推察される。また、香川流域では水田やため池が多く、灌漑水が繰り返し利用される間に脱窒が進み、窒素負荷が抑制されることも考えられる（吉川ら 2008）。COD に関しては流路灌漑水の繰り返し利用や、河川では河川水と河床下の浅層地下水が頻繁に入れ替わる過程で土壌による懸濁物のろ過が進んで抑制されることが考えられる。松森ら（1992）はリンの負荷発生を広域的に評価するために土壌・傾斜・土地利用の 3 要因についての分級を提案している。香川流域では灰色低地土が広く分布する（田辺 2007）のに対し、岡山流域は県北部に黒ボク土、県中央部には黄色土・褐色森林土が広く分布する（石橋 2004）。岡山流域では森林の面積割合が高く、傾斜の急な山間部に負荷発生可能性の低い土壌が分布するため、リン負荷が抑制されていることが考えられる。

次に 2003 年の河川データを基に、岡山・香川流域から海域への流入負荷量を推定した結果を表 2-7 に示す。(a)は岡山流域の一級河川の取水前の比負荷量を一級河川以外の流域面積に乗じて算出、香川流域については土器川の比負荷量を土器川以外の流域面積に乗じて算出した。(b)は児島湖流域と香川の二級河川流域を一級河川とは別に算出した。香川の二級河川流域は流量を推定した 14 河川の比負荷量を残りの河川流域の面積に乗じて算出した。

(a)の一級河川のデータのみで算出した総負荷量は、全窒素、全リン、COD で、22.8、1.56、71.0 t/日で、これに対して(b)の総負荷量は(a)の推定に対して 90、92、101%であった。これは各流域の比負荷量の差が反映した結果であり、岡山流域では児島湖流域の比負荷量が一級河川流域より高いために(b)の各負荷量は(a)に対して 105、131、116%に増加、香川流域では二級河川流域が土器川流域より低いために(b)の各負荷量は 55、53、61%へ減少となり、推定結果は岡山流域と香川流域で大きく異なった。

上記の計算では、河川負荷量の算定基礎となる水質濃度は、概ね平水時の測定値であるため、降雨時の水質濃度の変動が反映されておらず、河川負荷量が過小評価となっている可能性が高い。降雨時の土砂や河川堆積物の流出による懸濁物質の増加やそれに伴う水質濃度の上昇については、これまでに沖縄県（比嘉ら 2001）、手賀沼流域（二瓶ら 2002）、牛久沼流域（湯澤 2005）、有明海流域（田中ら 2006）、琵琶湖流域（大久保ら 2006）等、多くの報告がある。吉田ら（2008）は四万十川での測定で、流量増加時にリン濃度が 0~40%程度増加するという結果を得ている。海域への流入負荷量をより精度良く見積もるためには、降雨時の水質データの蓄積が今後も重要である。

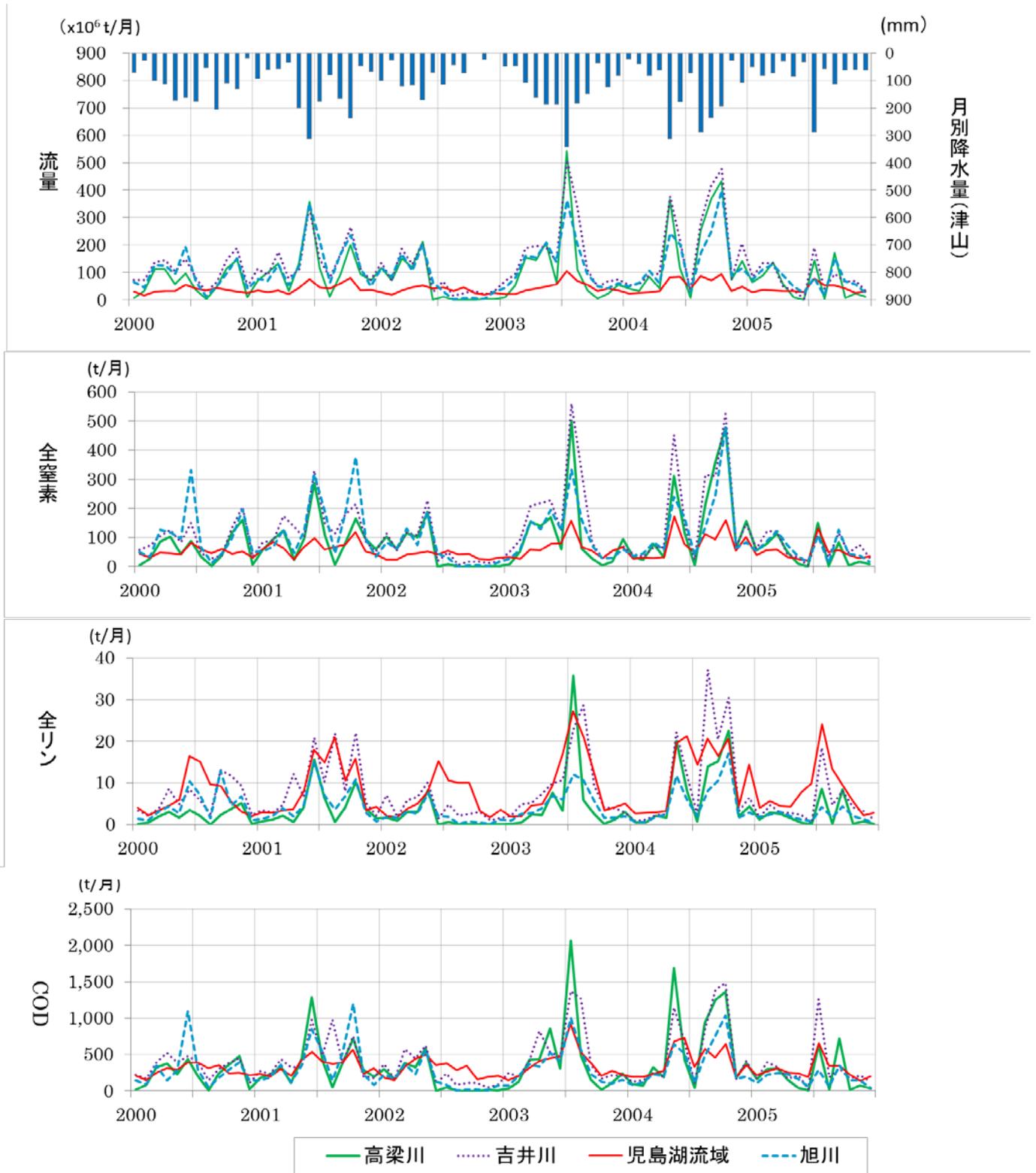


図 2-4 岡山流域の月別降水量と流量および流入負荷量の変化

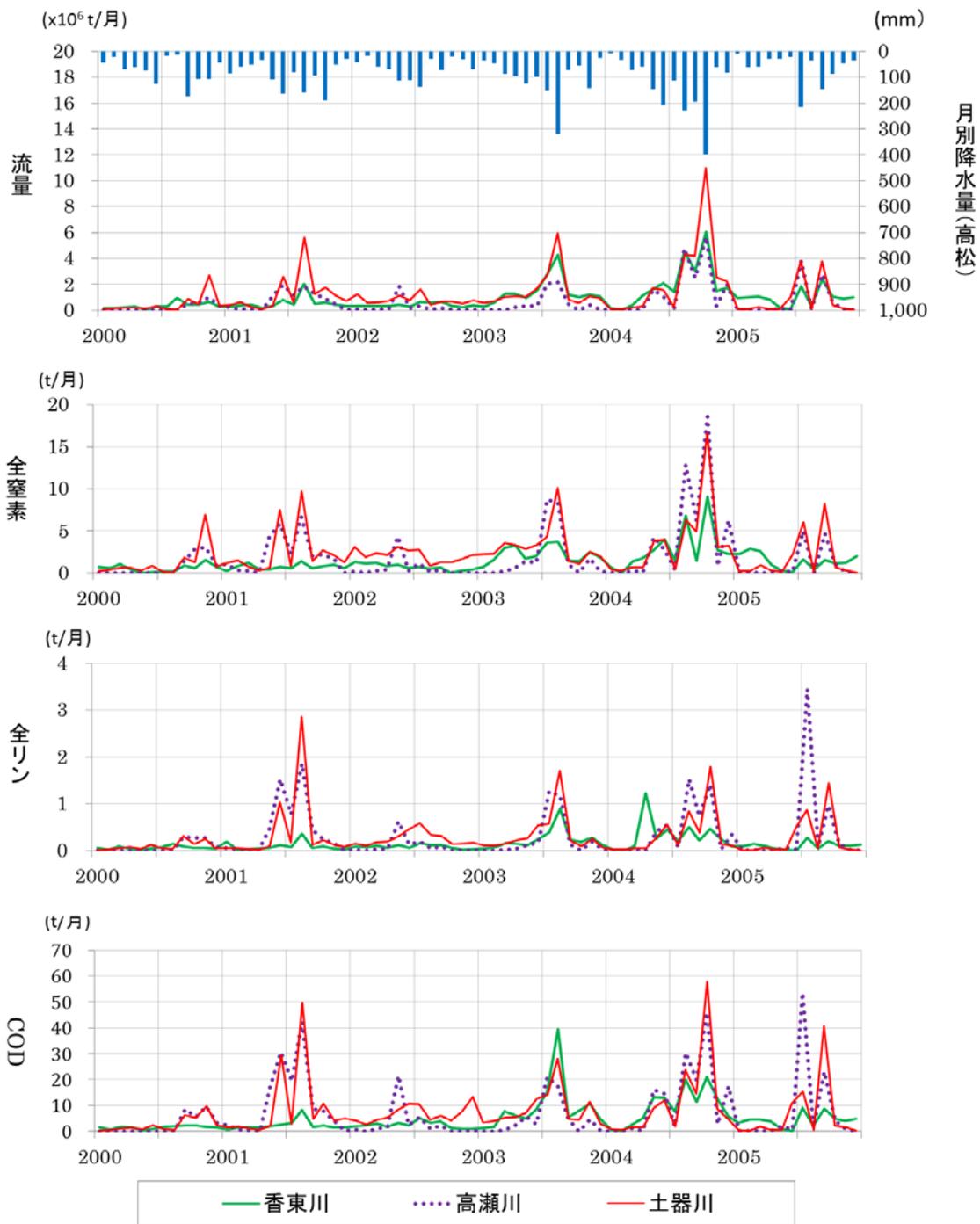


図 2-5 香川流域の月別降水量と流量および流入負荷量の変化

注：土器川の流量は他の 2 河川と比べて大きいため 1/5 でプロットしている

表 2-6 河川流域の降水量, 比流量および比負荷量

流域	年	降水量 (mm)	淡水量		全窒素	全リン	COD
			比流量 (千t/km <sup>2</sup> )	降水量比 (%)	比負荷量 (kg/km <sup>2</sup> )	比負荷量 (kg/km <sup>2</sup> )	比負荷量 (kg/km <sup>2</sup> )
高梁川 旭川 吉井川	2000	1,332	466	35	457	24	1,556
	2001	1,579	729	46	693	35	2,265
	2002	1,059	371	35	302	14	1,012
	2003	1,589	763	48	714	36	2,374
	2004	1,806	927	51	874	45	2,798
	2005	1,107	381	34	320	16	1,226
	平均	1,412	606	42	560	28	1,872
標準偏差	296	232	8	235	12	710	
児島湖流域	2000	815	746	92	1,075	150	6,206
	2001	1,199	977	81	1,500	200	7,730
	2002	794	759	96	833	138	6,528
	2003	1,166	1,024	88	1,407	209	8,377
	2004	1,471	1,194	81	1,723	264	8,938
	2005	721	856	119	1,067	173	6,280
	平均	1,028	926	93	1,267	189	7,343
標準偏差	296	173	14	331	46	1,171	
土器川	2000	989	200	20	519	43	1,138
	2001	1,288	554	43	1,097	177	4,127
	2002	790	353	45	921	113	2,964
	2003	1,376	657	48	1,419	157	3,752
	2004	1,873	1,031	55	1,619	160	4,965
	2005	1,081	358	33	719	113	2,726
	平均	1,233	525	41	1,049	127	3,279
標準偏差	377	296	12	417	49	1,325	
香川 二級河川*	2000	943	177	19	457	66	1,461
	2001	1,216	208	17	521	74	1,892
	2002	814	165	20	388	47	1,366
	2003	1,340	231	17	552	57	1,729
	2004	1,863	387	21	883	90	2,842
	2005	934	236	25	492	72	1,760
	平均	1,185	234	20	549	68	1,842
標準偏差	386	80	3	173	15	528	

\* H-Q 曲線で推定した14河川

表 2-7 河川データから推定した淡水量と流入負荷量

(a)主要河川データのみによる推定

流域	流域型	河川	淡水量 (m <sup>3</sup> /s)	割合 (%)	全窒素 (t/日)	割合 (%)	全リン (t/日)	割合 (%)	COD (t/日)	割合 (%)
岡山	河川流域	一級河川	159.5	71.9	12.9	56.6	0.64	41.0	42.9	60.4
	河川流域	児島湖流域	16.2	7.3	1.3	5.8	0.07	4.2	4.4	6.2
	沿岸流域		18.9	104.5	1.5	6.7	0.08	4.9	5.1	7.2
	小計		194.7	87.8	15.7	69.0	0.78	50.0	52.4	73.7
香川	河川流域	土器川	2.1	0.9	0.5	2.4	0.06	3.8	1.4	2.0
	河川流域	二級河川	20.1	9.0	5.2	22.9	0.58	37.0	13.8	19.4
	沿岸流域		5.0	2.3	1.3	5.7	0.14	9.2	3.4	4.8
	小計		27.1	12.2	7.1	31.0	0.78	50.0	18.7	26.3
計		221.8	100.0	22.8	100.0	1.56	100.0	71.0	100.0	

(b)児島湖流域，香川流域の二級河川を個別に推定

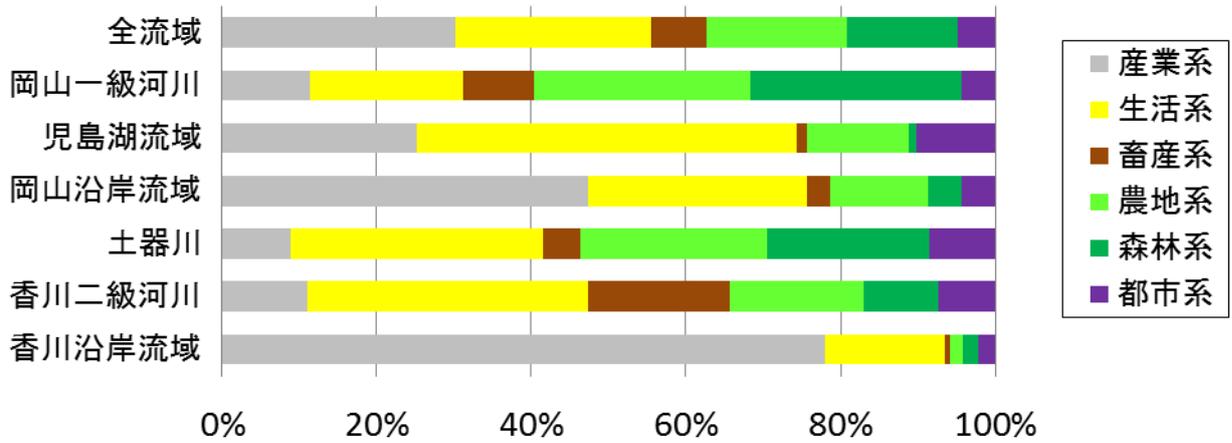
流域	流域型	河川	淡水量 (m <sup>3</sup> /s)	割合 (%)	全窒素 (t/日)	割合 (%)	全リン (t/日)	割合 (%)	COD (t/日)	割合 (%)
岡山	河川流域	一級河川	159.5	75.2	12.9	63.1	0.64	44.4	42.9	59.7
	河川流域	児島湖流域	17.7	8.3	2.1	10.3	0.31	21.5	12.5	17.4
	沿岸流域		18.9	8.9	1.5	7.5	0.08	5.3	5.1	7.1
	小計		196.1	92.4	16.5	80.9	1.03	71.1	60.5	84.2
香川	河川流域	土器川	2.1	1.0	0.5	2.6	0.06	4.1	1.4	2.0
	河川流域	二級河川	9.0	4.2	2.1	10.1	0.21	14.8	6.5	9.0
	沿岸流域		5.0	2.4	1.3	6.4	0.14	10.0	3.4	4.8
	小計		16.0	7.6	3.9	19.1	0.42	28.9	11.3	15.8
計		212.2	100.0	20.4	100.0	1.44	100.0	71.8	100.0	

表 2-8 原単位によって推定した排出負荷量

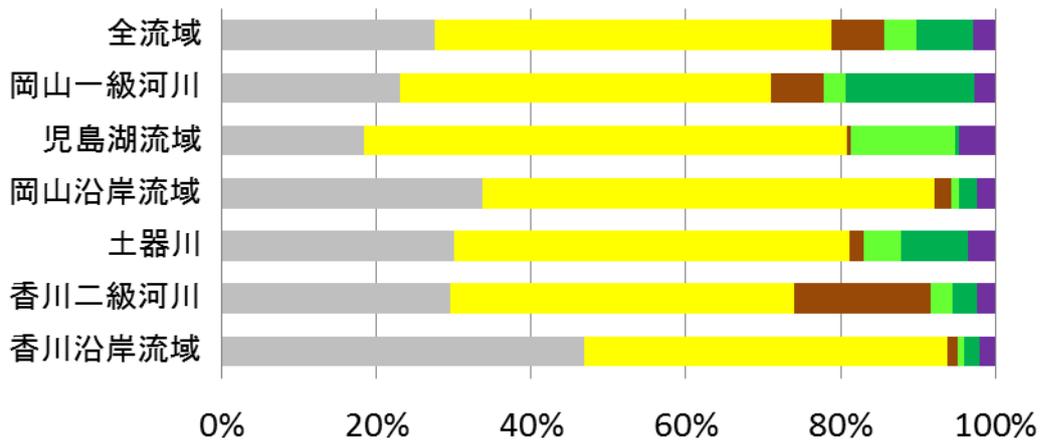
流域	流域型	河川	全窒素 (t/日)	負荷割合* (%)	全リン (t/日)	負荷割合* (%)	COD (t/日)	負荷割合* (%)
岡山	河川流域	一級河川	34.6	37.2	1.50	42.8	21.3	201.7
	河川流域	児島湖流域	7.0	30.1	0.70	44.1	11.8	105.8
	沿岸流域		12.8	12.0	0.63	12.0	11.6	44.0
	小計		54.4	30.4	2.8	36.3	44.7	135.5
香川	河川流域	土器川	0.7	75.8	0.05	130.4	0.9	154.5
	河川流域	二級河川	11.9	17.3	0.95	22.5	17.9	36.2
	沿岸流域		14.6	8.9	0.40	35.9	8.9	38.6
	小計		27.3	14.3	1.4	29.9	27.7	40.9
計		81.7	25.0	4.2	34.2	72.4	99.2	

\* 負荷割合 = 流入負荷量 / 排出負荷量

## 全窒素



## 全リン



## COD

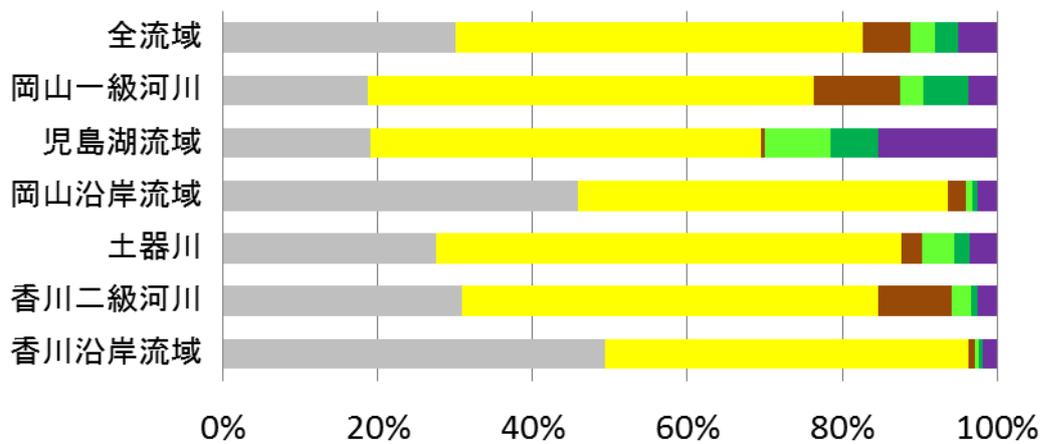


図 2-6 排出負荷量の発生源別割合

## 2.4 原単位法に基づく発生負荷源別の排出負荷量の推定

原単位法によって推定した発生源別の排出負荷量を表 2-8 に示す。岡山・香川流域の総排出負荷量は、全窒素、全リン、COD が、81.7、4.2、72.4 t/日と算定された。岡山流域からの排出負荷量が多いが、単位流域面積当たりの比排出負荷量では香川流域が岡山流域の 2.1、2.1、2.6 倍と高く、河川流域のみの比較でも香川流域が高い。これは表 2-1 に示すように、排出負荷量のフレームとなる人口や畜産頭数が単位面積当たりでは香川流域が岡山流域より大きく、面源で原単位負荷量の大きい農地面積の割合も高いことが反映されている。しかし、表 2-6 で示した河川観測データによる流入負荷の比負荷量を河川流域全体で算出すると、全窒素と COD は岡山流域が香川流域より高く、排出負荷量とは傾向が異なる。

同様にして排出負荷量と表 2-5(b)で示した流入負荷量を比較した場合、全流域の流入負荷量は排出負荷量に対して全窒素、全リン、COD で 25、34、99%であった。COD の比率が高いが、流域別に見ると沿岸流域と香川の二級河川流域では 36~44%と低い。岡山の一級河川や土器川流域は 150%以上であるため、適用した原単位では COD が過小評価となっている可能性がある。他には全リンで土器川流域の比率が 130%と高いのが特徴的である。

排出負荷量の発生源別割合を図 2-6 に示す。河川流域では、全窒素で面源系負荷の比率が岡山の一級河川流域と土器川流域で 50%を越え、生活系では児島湖流域が 49%、香川の二級河川流域が 36%と高い。全リン、COD は類似の傾向を示し、生活系、産業系で高く、両者で概ね 70%を越えている。

面源系負荷については、農地からの肥料成分等が河川や地下水の水質に及ぼす影響が問題視されてきており(竹内 1997, 熊澤 1999, 小川 2000)、近年では琵琶湖流域(蓮川ら 2009)を始めとした指定湖沼流域等で、肥料の適正化や節減技術への取り組みが進んでいる。排出負荷量に占める農地系の割合は、全窒素では岡山の一級河川流域、土器川流域、香川の二級河川流域で 28、24、18%で、沿岸流域では相対的に小さい。高島ら(1995)は、平常時負荷量の多くは産業系・生活系の点源負荷で、降雨時流出負荷においては点源負荷の一時的な堆積や土地からの排出である面源負荷に由来するとしており、河川流域は降雨時の負荷量増加が生じやすい負荷源の構成比率であると考えられる。

沿岸流域では、全窒素で産業系負荷の比率が高く、香川では 78%を占める。次いで生活系となり、面源系は低い。全リン、COD は河川流域と同様に生活系が高く、産業系と同程度以上で、両者を合わせると 90%を越えている。これは岡山、香川流域ともに沿岸流域に工業地帯や市街地が立地していることが反映されている。

香川流域で流量を算定した二級河川と土器川の流入負荷量と排出負荷量の関係を図 2-7

に示す。これらの河川は、気象や土壌条件、流域面積等で類似する流域特性を持っているが、全窒素、全リンともに、排出負荷量に対して流入負荷量が 10%以下と低い河川から 50%を超える比率の高い河川まで分布範囲が広い。降水、農業用水、生活用水、工業用水に含まれる窒素、リン、COD は、土壌や水路を經由して河川に入り流下する過程で、土壌による捕捉、植物への吸収、脱窒等によって負荷量が減少する。このため、河口に達する負荷量は排出負荷量に比べてかなり小さくなることがわかっている (Hill 1996, Nagumo and Hatano, 2000)。この他にも流入負荷量は河川流量と高い相関を持つことから、取水による影響や下流域においては流域外への生活系・産業系の排水等も要因としてあげられる。排出負荷量と流入負荷量との関係については、土地利用や負荷源別の比率、利水状況等、複数の要因が絡むと考えられるが、ここでの計算ではこれらの寄与程度については明らかにできなかった。

## 2.5 データ統合による海域への流入負荷量と淡水量の推定

平水年であった 2003 年について、河川流域と沿岸流域から流入する淡水量と全窒素、全リン、COD の負荷量を推定した結果を表 2-7 に示す。香川流域の流量データの無い河川については、河川流域の標準的な排出負荷量と流入負荷量との関係を適用するため、これらの負荷量の比率が中位となった河川を元に回帰式 (図 2-7) を求め、流入負荷量を推定した。また、沿岸流域における面源系分の淡水量として、岡山流域は 2003 年の一級河川の流達率 0.48、香川流域は 14 河川の流達率 0.17 を流域降水量に乗じた値を計上した。

海域への流入負荷量は、全窒素、全リン、COD でそれぞれ 43.6、2.2、76.8 t/日と推定された。岡山流域の寄与率が大きく、COD、全リン、全窒素の順に下がり、83、66、59%、岡山の一級河川流域のみでは、56、29、30%であった。沿岸流域は、全窒素では 58%の寄与率があり、そのうち産業系のみで 38%を占め、河川流域と同程度の大きな排出源・排出域となっている。全リンも 40%の寄与率があり、こちらは生活系が 21%で産業系よりも大きい。海域へ流入する淡水量は 213m<sup>3</sup>/s と算定され、岡山流域からの流入が 92%、岡山の一級河川流域のみで 75%と高い寄与率となった。

表 2-5(b)で示した河川データに基づく推定に対しては、岡山流域では全窒素、全リン、COD が 164、189、121%に増加し、香川流域では全窒素で 252%と増加したが、全リン、COD は 98、72%と減少し、水質項目による相違も大きかった。観測データと排出負荷データを統合することで、特に沿岸流域では主要な発生負荷源である産業系・生活系の負荷量を反映させたことで、流入負荷量の推定精度の向上が図れた。

表 2-8 河川データと排出負荷量から推定した淡水量と流入負荷量

流域	流域型	河川	負荷源	淡水量 (m <sup>3</sup> /s)	割合 (%)	全窒素 負荷量 (t/日)	負荷 割合 (%)	全リン負 荷量 (t/日)	負荷 割合 (%)	COD 負荷量 (t/日)	負荷 割合 (%)
	河川流域	一級河川		159.5	74.8	12.9	29.6	0.64	28.6	42.9	55.9
	河川流域	児島湖流域		17.7	8.3	2.1	4.8	0.31	13.8	12.5	16.3
岡山	沿岸流域		産業系	4.0	1.9	6.0	13.7	0.21	9.2	5.1	6.7
	沿岸流域		生活系	2.2	1.0	1.8	4.1	0.27	12.1	2.2	2.8
	沿岸流域		畜産系			0.4	0.9	0.01	0.6	0.3	0.4
	沿岸流域		土地系	12.3	5.8	2.7	6.3	0.04	1.6	0.5	0.6
		小計			195.7	91.7	25.9	59.3	1.5	65.9	63.4
	河川流域	土器川		2.1	1.0	0.5	1.2	0.06	2.6	1.4	1.8
	河川流域	二級河川		10.9	5.1	2.8	6.4	0.34	15.4	4.1	5.4
香川	沿岸流域		産業系	1.1	0.5	10.6	24.4	0.15	6.6	3.3	4.3
	沿岸流域		生活系	1.1	0.5	2.8	6.4	0.19	8.4	4.2	5.4
	沿岸流域		畜産系			0.1	0.2	0.01	0.3	0.1	0.1
	沿岸流域		土地系	2.4	1.1	0.9	2.0	0.02	0.9	0.3	0.3
	小計			17.7	8.3	17.8	40.7	0.8	34.1	13.4	17.4
	計			213.4	100.0	43.6	100.0	2.2	100.0	76.8	100.0

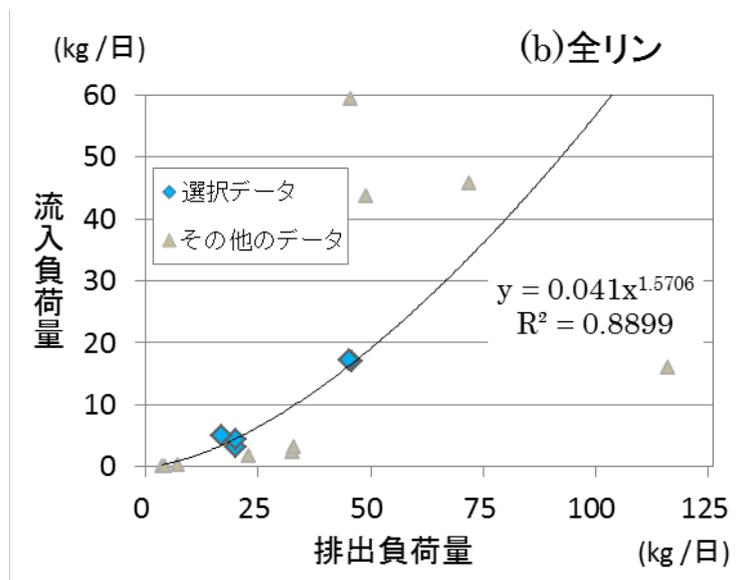
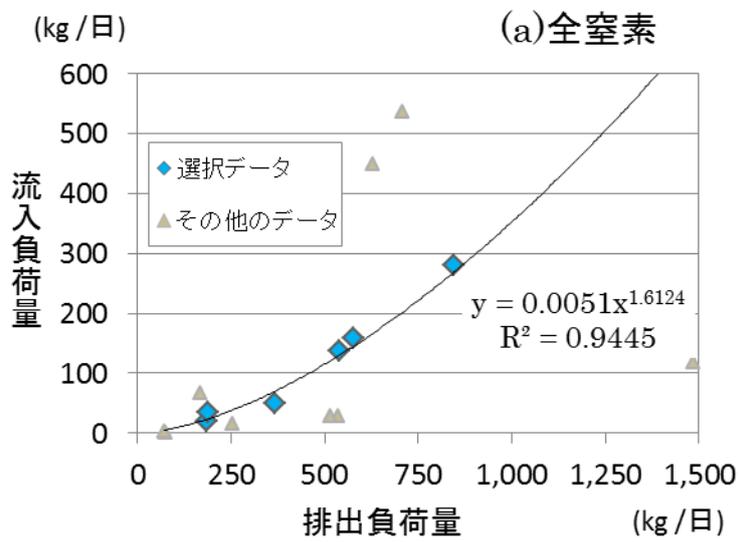
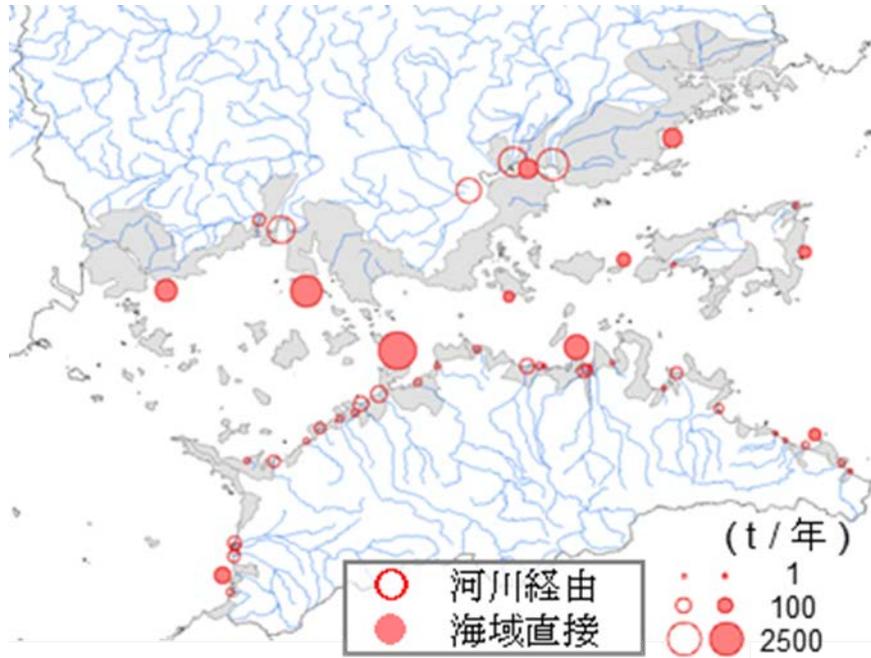


図 2-7 香川流域の排出負荷量と流入負荷量の関係

全窒素



全リン

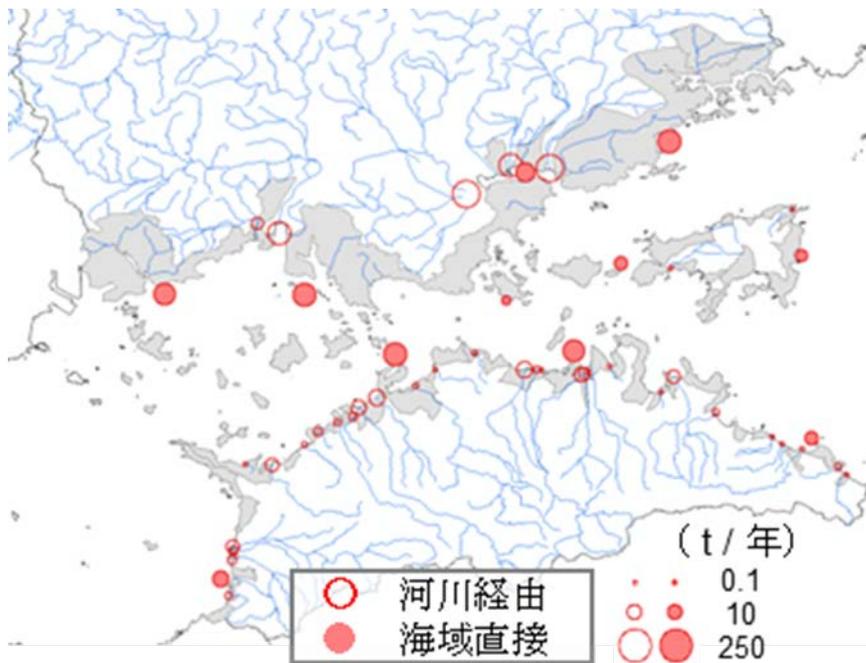


図 2-8 河川・沿岸流域からの全窒素および全リンの流入負荷量の分布

最後に、河川・沿岸流域からの流入負荷量の分布を図 2-8 に示す。海域への負荷流入地点は、岡山流域では高梁川河口の玉島・水島地区と児島湖・旭川・吉井川河口の児島湾の 2 カ所に集中する。沿岸流域の流入負荷は分散した点源となるが、工業用水確保の利便性等から河川に近い位置に大規模な工業地帯があり、負荷が多量に流入する海域は集約される。一方、香川流域は多くの中小河川で成り立つ流出地点が東西に広がっており、工業地帯も海岸沿いに高松市と坂出市から三豊市北部にかけて点在し、分散型となっている。

## 2.6 陸域からの流入負荷による海域への影響

高橋ら（2012）は図 2-8 に示す陸域からの流入負荷量と負荷流入地点のデータを流況再現モデルの境界条件として与え、備讃瀬戸での流況や栄養塩動態をシミュレーションした。植物プランクトン量の指標となるクロロフィル a（Chl.a）の表層濃度分布と、夏期の栄養塩分布とを比較解析した結果、栄養塩濃度は高くても Chl.a 濃度は周辺と大差ない海域や栄養塩濃度が周辺と同程度でも Chl.a 濃度が高い海域等が存在することを明らかにした。

赤潮発生件数とモデル実験で得られた潮流を重ねた結果、潮流の強い備讃瀬戸中央部では赤潮の発生は見られず、発生件数の多い海域は比較的潮流の弱いことがわかった。さらにこの関係とモデル実験で得られた栄養塩分布とを比較した結果、植物プランクトンの発生には栄養塩と潮流の強さが重要な要素であることを明らかにした。また、三好ら（2012）は同様にモデルから得られた栄養塩分布とノリ養殖被害との関係について解析を行い、被害の生じやすい地区を明らかにした。

このように、陸域からの流入負荷量のデータを整備し、海洋の流況や水質をシミュレーションするモデル等と連携することによって、海域にどのように影響するかを具体的に論じることが可能になった。

## 2.7 まとめ

本章では、瀬戸内海に流入する岡山、香川流域を対象に、河川の流量・水位・水質の観測データからの流入負荷量の推定と原単位法を用いた負荷発生源からの排出負荷量の推定を行った。

河川データから推定した比負荷量は、児島湖流域、土器川の順に高く、香川の二級河川流域、岡山の一級河川流域を大きく上回った。また、岡山の一級河川では河口部の流量観測点より下流での取水量が大きく、淡水量の降水量比や比負荷量に影響していた。

原単位法を用いて発生負荷源から排出負荷量を推定した結果では、河川流域と沿岸流域、全窒素と全リン・CODで発生負荷源の比率の違いが明確であった。河川流域では全窒素で面源系の比率が高く、全リン・CODでは生活系が高かった。一方、沿岸流域では全窒素では産業系の比率が高く、全リン・CODでは生活系と産業系が同程度で高かった。比排出負荷量は、香川流域で高く、河川の観測データから得られた比負荷量とは逆の結果となった。

このような河川流域や沿岸流域の流出特性や負荷源の分布の相違から、海域への流入負荷の推定では一級河川の算出値を二級河川流域や沿岸流域に広げて全流域を推定する方法と比べて、河川観測データの流入負荷量と原単位による排出負荷量を統合する方法は流域の特性を反映することができ、推定精度の向上が図れることを示した。河川データに基づく推定に対しては、岡山流域では全項目で増加し、香川流域では全窒素で増加したが、全リンは同程度、CODは減少し、水質項目によって影響は異なった。

また、これらの陸域の流入負荷量のデータを用いて海洋のモデルで流況や水質をシミュレーションした結果からは、赤潮の発生条件やノリ養殖の水産被害の生じやすい海域に関する知見が得られた。

今後の問題点として、特に香川県において負荷量の推定に必要となる二級河川の水位データを流量に関するためのH-Q式の整備が必要である。また、産業系の排出負荷量に関しても市町村別・流域別のデータの公開が望まれる。

## 第3章 農地由来の負荷量の不均一性と経年変化

### 3.1 背景および目的

瀬戸内海では産業化の進展や人口増加に伴い1960年代から水質汚濁が進行し、1970年代から1980年代にかけて赤潮の大量発生という環境問題が生じた。そのため1973年に瀬戸内海環境保全臨時措置法、1979年に特別措置法が制定され、以降工場排水や生活排水の水質改善対策が取り組まれ、これらの環境負荷低減が図られてきた。

一方、面源負荷である土地からの環境負荷は排出規制が困難なこともあり、法的な対応は取られてこなかったが、農地への過剰施肥等が問題となり、第5次の総量削減規制方針（環境省 2001）では、汚濁負荷量の削減の方途として環境保全型農業の推進が記されるようになり、第7次の総量削減規制方針（環境省 2011）にも引き継がれている。

海域の環境評価には、人間活動の影響が急激に増加した1970年代以降について陸域からの栄養塩流出の変動を明らかにすることが重要である。しかし、多くの流域で河川からの負荷量の算定に必要な長期的な水文観測データが整備されていないため、河川以外の統計情報などのデータをもとにして陸域からの負荷量を推定する必要がある。

本章では、広島県西部を流れる太田川と東部を流れる芦田川の流域を対象地域として、1970年から2000年にかけての土地利用、特に農地について、GISを活用して流域内の空間分布や経年的変化の不均一性を把握するとともに、原単位法を用いて流域内の農地からの窒素、リンの負荷量の変化を評価する。

また、広島県、岡山県を対象として2000年から2010年にかけての農地からの窒素負荷量の経年変化について、作付作物の相違を反映させる手法として、作物毎の施肥量、収量等のデータに基づく窒素収支を用いて排出負荷量を旧市区町村単位に算出するとともに、GISを活用して1kmメッシュの農地面積や負荷量を算出し、その空間分布や年次間の変化の把握、流域間の比較を行う。

### 3.2 方法

#### 3.2.1 対象地域の概要

広島県の一級河川である太田川と芦田川流域の水系と土地利用を示す（図3-1）。

太田川は、広島県廿日市市（旧吉和村）の冠山にその源を発し、幾つもの溪流を合わせながら、広島市安佐北区可部で山峡の地を離れ、支川根谷川・三篠川合流後、南に流下し、

デルタの要である大芝にて太田川（放水路）と旧太田川とに分派、さらに京橋川、天満川、元安川、猿猴川の計 6 本の川に分かれ、瀬戸内海に注ぐ。幹川流路延長 103km、流域 1,710km<sup>2</sup>、流域人口は約 98 万人である。

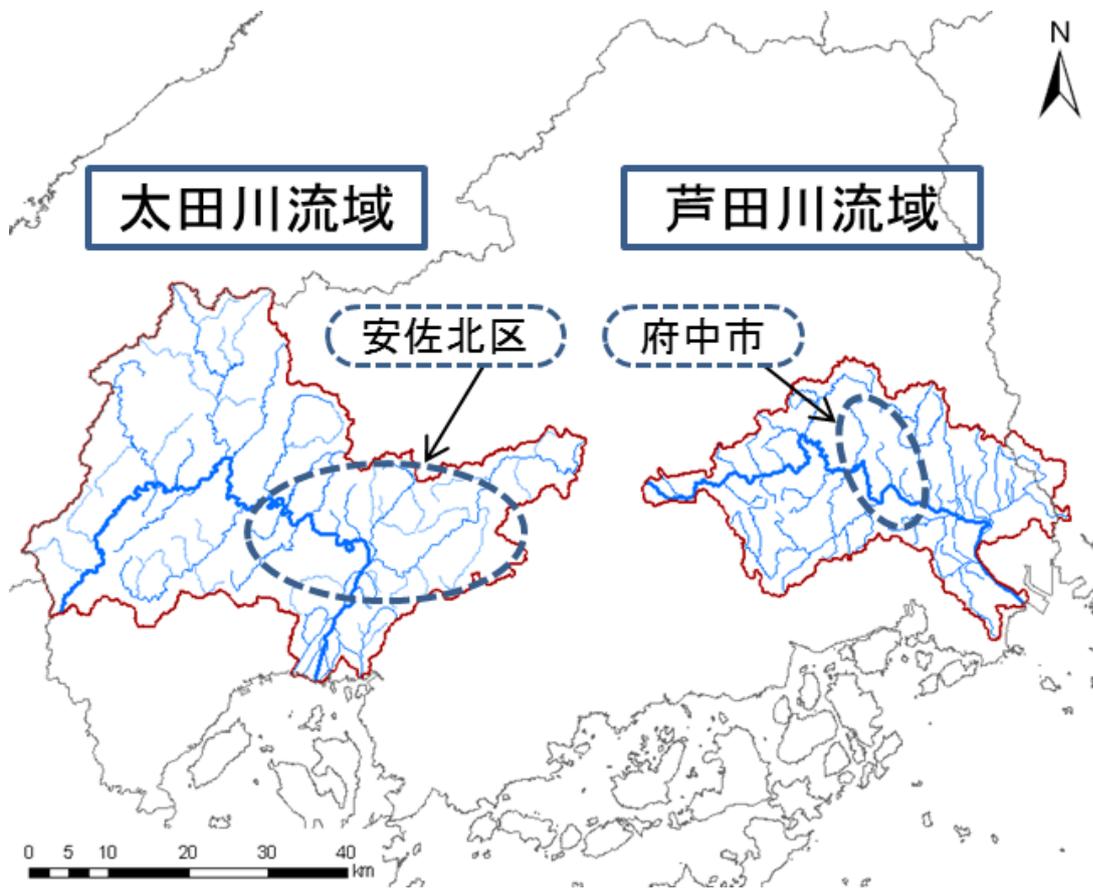
芦田川は、その源を広島県賀茂郡大和町大字蔵宗（標高 570m）に発し、世羅台地を貫流し、矢多田川、御調川等の支川を合わせ府中市に至り、その下流で神谷川、有地川、高屋川等を合わせ、神辺平野を流下し、さらに瀬戸川を合わせて福山市箕島町において瀬戸内備後灘に注ぐ。流域は県中央部までであり、中国山地のある県北エリアは江の川、高梁川流域となるため、流域内の年間降水量が少なく、河川流況が悪いにもかかわらず、水利用率が高いことから、高屋川、瀬戸川が合流する下流域では水質の汚濁が顕著で、中国地方の一級河川において 2012 年まで 38 年連続で水質ワースト 1 であった。幹川流路延長 86km、流域面積 860km<sup>2</sup>、流域人口は約 27 万人である。なお、流域には岡山県笠岡市、井原市の 18km<sup>2</sup>を含んでいる。

### 3.2.2 小流域データの作成

流域内の土地利用の空間的な不均一性を評価するには、流域を分割して流域内での相違を比較する必要がある。流域を分割する方法として、小流域に分割する方法と等サイズのグリッドに分割する方法があげられるが、今回は小流域に分割する方法とした。

流域界の設定にあたっては、国土交通省国土計画局が提供する国土数値情報で整備されている水文データの流域界・非集水域、および流路データを使用した。これらのデータを GIS ソフト ArcGIS（ESRI 社）で利用するため、国土数値情報変換ツール（エクシード社）を使用して GIS 業界の標準フォーマットの一つである SHAPe 形式へデータ形式を変換した。ただし、流域界・非集水域は現在 SHAPe 形式のデータが提供されており、利用者が変換する必要は無い。流域界と流路は二次の支川までに集約し、太田川は 146、芦田川は 102 の単位流域に分割した（図 3-2）。

小流域への分割は、標高（DEM）データから水文解析を行う方法が一般的である。水文解析では、各グリッドの累積流量を計算し、推定された流路によって小流域に分割する。そこで国土地理院の数値地図 25000（標高）の 50mメッシュ標高データ、数値地図 25000（空間データ基盤）の標高データを用い、ArcGIS の拡張機能 Spatial Analyst を使用して水文解析を行った。得られた流域界を国土数値情報の流域界と比較すると、起伏のある山間部では一致するが、平坦部では分水地点を捉えきれなかったり、実際の小河川を越えて小流域が推定される等、使用した標高データでは不十分で、修正が必要であった。そのため、水文解析のデータは用いず、国土数値情報の水文データを用いた。



土地利用区分	
田	畑
果樹園	河川地・湖沼
森林	荒地
建物用地	その他用地
幹線交通用地	

原データ：国土数値情報 土地利用細分メッシュ（1976年）

図 3-1 対象地域の水系と土地利用

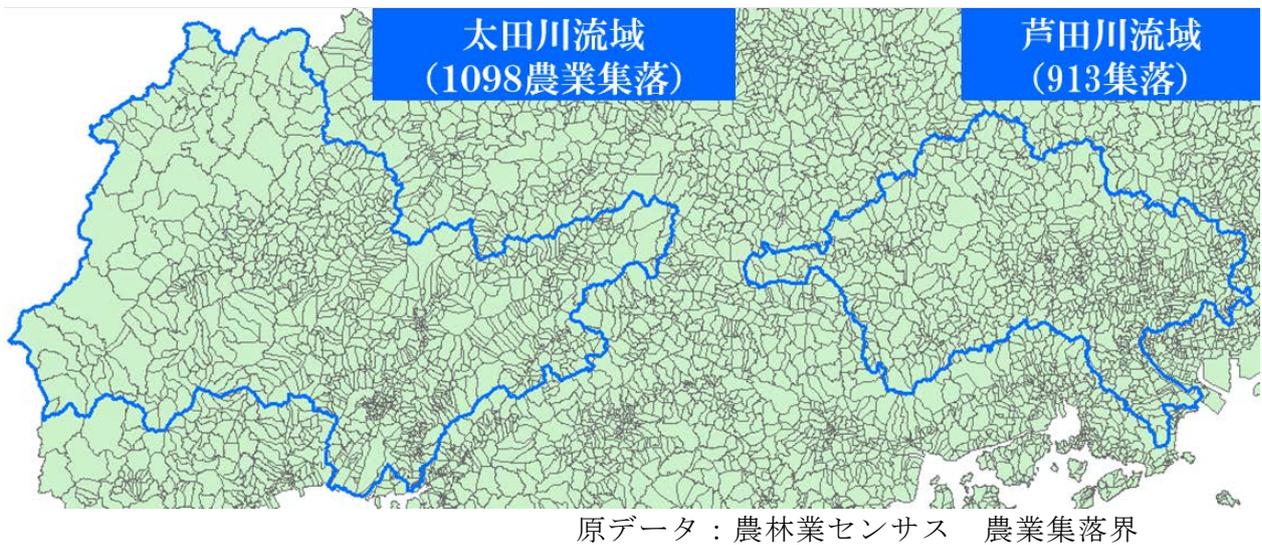
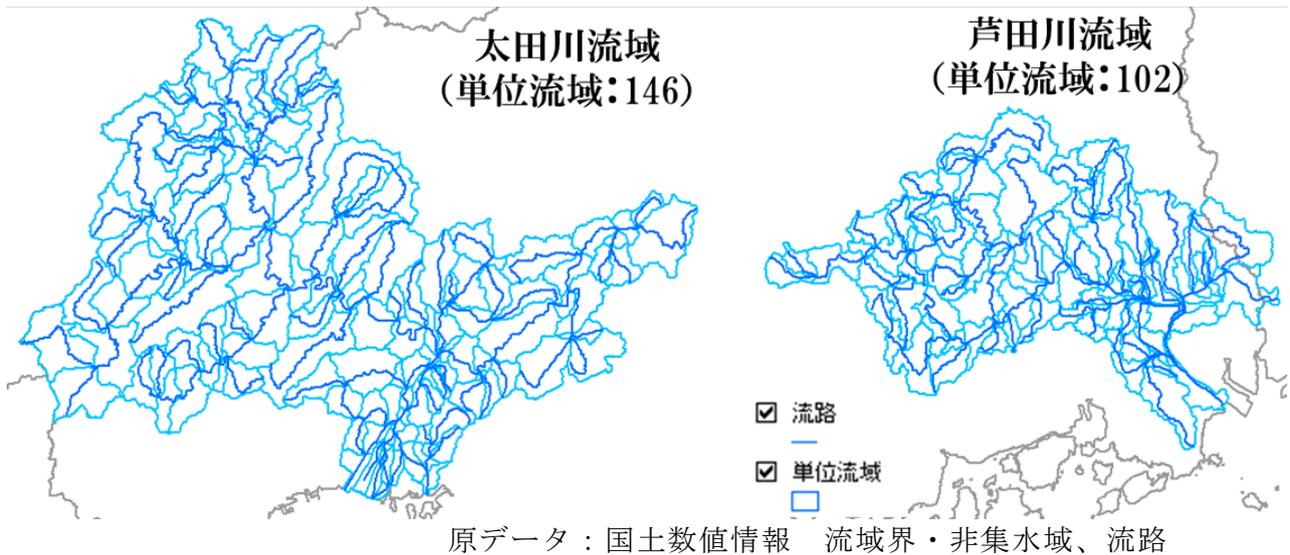


図 3-2 河川・流域界と農業集落

表 3-1 土地利用細分メッシュの土地利用の再分類

コード	1976年	1987年	1991, 1997年	土地カテゴリ	負荷別カテゴリ
1	田	田	田	田	水田
2	畑	畑	その他の農用地	畑	畑地
3	果樹園	果樹園	↑	樹園地	畑地
4	その他の樹木畑	その他の樹木畑	↑	樹園地	畑地
5	森林	森林	森林	森林	森林
6	荒地	荒地	荒地	荒地	森林
7	建物用地A	建物用地	建物用地	建物用地	市街地
8	建物用地B	↑	↑	建物用地	市街地
9	幹線交通用地	幹線交通用地	幹線交通用地	幹線交通用地	市街地
A	その他用地	その他用地	その他用地	その他用地	市街地
B	湖沼	内水地	河川地・湖沼	河川地・湖沼	内水地
C	河川地A	↑	↑	河川地・湖沼	内水地
D	河川地B	↑	↑	河川地・湖沼	内水地
E	海浜	海浜	海浜	海浜	市街地
F	海水域	海水域	海水域	海水域	海水域
G			ゴルフ場	その他用地	市街地

### 3.2.3 土地利用データの作成

土地利用に関して各種の統計情報が公開されているが、そのほとんどは市区町村レベルまでの情報である。市区町村の行政界は必ずしも流域界と一致しないので、統計値を処理して流域界に対応する数値を推定する必要がある。小流域を対象として土地利用を検討するには、市区町村は領域として大きく、そのままでは利用に適さない。

本研究では、市区町村より詳細な領域のデータとして、国土数値情報の土地利用細分メッシュ、農林水産統計協会より市販されている農林水産省の農林業センサスの2000年農業集落カードおよび農業集落地図データ（図3-2）を使用した。

国土数値情報の土地利用細分メッシュは、一般に1kmメッシュと呼ばれる3次メッシュをさらに縦横10等分したメッシュサイズで、各メッシュの主な土地利用種別を属性データとして持つ。今回は1976、1987、1991、1997年の4時期のデータを使用した。土地利用は10数項目に分類されているが、年次により分類項目に相違があるため、まず土地カテゴリとして各年次を11項目で共通化し、さらに負荷別カテゴリとして6項目に分類した（表3-1）。

2000年農業集落カードでは、1970年から2000年まで5年おきに調査された7回の農林業センサスデータが整備されている。このうち、経営耕地面積データの農家数、農地面積、水田面積、畑面積、樹園地面積を属性データとして、農業集落地図に結合した。農業集落は、太田川流域で1098集落、平均面積1.47km<sup>2</sup>、芦田川流域で913集落、平均面積1.21km<sup>2</sup>である。ただし集落数には一部が流域内となる農業集落も含む。

### 3.2.4 土地利用細分メッシュデータの面積集計値の検証

土地利用細分メッシュデータを用いて、対象流域における土地利用の概要や変化を把握することは問題ないが、メッシュ数の合計を面積として利用する場合には、注意が必要となる。メッシュ内に複数の土地利用が混在する場合には、主たる土地利用以外の面積が切り捨てられること、主たる土地利用の面積としてそれ以外の土地利用の面積が計上されることにより、実際の土地利用面積との誤差が生じる。

そこで農地面積について、土地利用細分メッシュと農林業センサスデータを比較し、その誤差を検証した。ここでは、対象地域として太田川流域の広島市安佐北区と芦田川流域の府中市（2000年の行政区画）を取り上げた（図3-1）。土地利用細分メッシュはメッシュ数に両区域の3次メッシュ平均面積である約1.06km<sup>2</sup>の1/100を乗じて面積に換算した。

図3-3に田・畑・樹園地について、1970～2000年の農林業センサスの集計値と土地利用細分メッシュの集計面積を示す。

データの年次が異なるため、近隣の年次で比較した。土地利用細分メッシュの面積値は、農林業センサスの集計値に対して、安佐北区では田で約9倍、畑で約4倍、樹園地で約1.1倍、府中市では田で約3倍、畑で約5倍、樹園地で約0.2倍となる。

土地利用細分メッシュの集計面積が農林業センサスの面積を上回ることから、田・畑は比較的まとまって存在するために、細分メッシュの主たる土地利用になりやすいと考えられる。また、地域間差については、農地と他の土地利用の混在度を反映していると考えられる。

この比較結果は、土地利用細分メッシュの集計面積は、かなり大きな誤差を含んでいることを示している。その誤差は、安佐北区では水田が最も大きく、府中市では畑で大きいというように、地目間・地域間でも傾向が違い、年次間の相違も一様ではない。そのため、土地利用細分メッシュから面積を推定するような補正式の作成といった対応も困難である。

したがって、土地利用細分メッシュの集計値は、対象地域の土地利用の予備検討や参考データにとどめ、土地利用の空間分布の概要を表すデータとして参照すべきである。

### 3.2.5 流域に対応した農地面積の推定方法

農林業センサスのデータを基に、流域に対応した農地面積の推定手法を検討した。問題となるのは、流域境界で分断される場合に農業集落の農地面積を各流域にどのように配分するかである。土地面積で比例配分する方法が処理としては容易であるが、農地の分布は集落内で必ずしも均一ではない。そこで、土地利用細分メッシュの農地メッシュ数に応じて農地面積を配分する方法とした（図3-4）。ただし、農林業センサスと土地利用メッシュではデータ作成年次が異なるため、面積配分時には近隣年次の土地利用メッシュと組み合わせて使用した。

土地利用細分メッシュと農業集落界や流域界においても、同様の分断が生じるが、ここでは細分メッシュの中心点が位置する農業集落や単位流域に各細分メッシュを所属させる形で整理した。

農地面積は、田・畑・樹園地の地目別に算出したが、対応する細分メッシュが存在しない農業集落もあった。その場合、他の地目の農地の周囲に存在するであろうという前提で、田や樹園地であれば畑メッシュ、畑では田メッシュを用いて面積配分を行った。流域による分断が生じた農業集落では、このような方法により、各流域へ農地面積を配分した。このデータを単位流域で集計した農地面積を推定値とした。

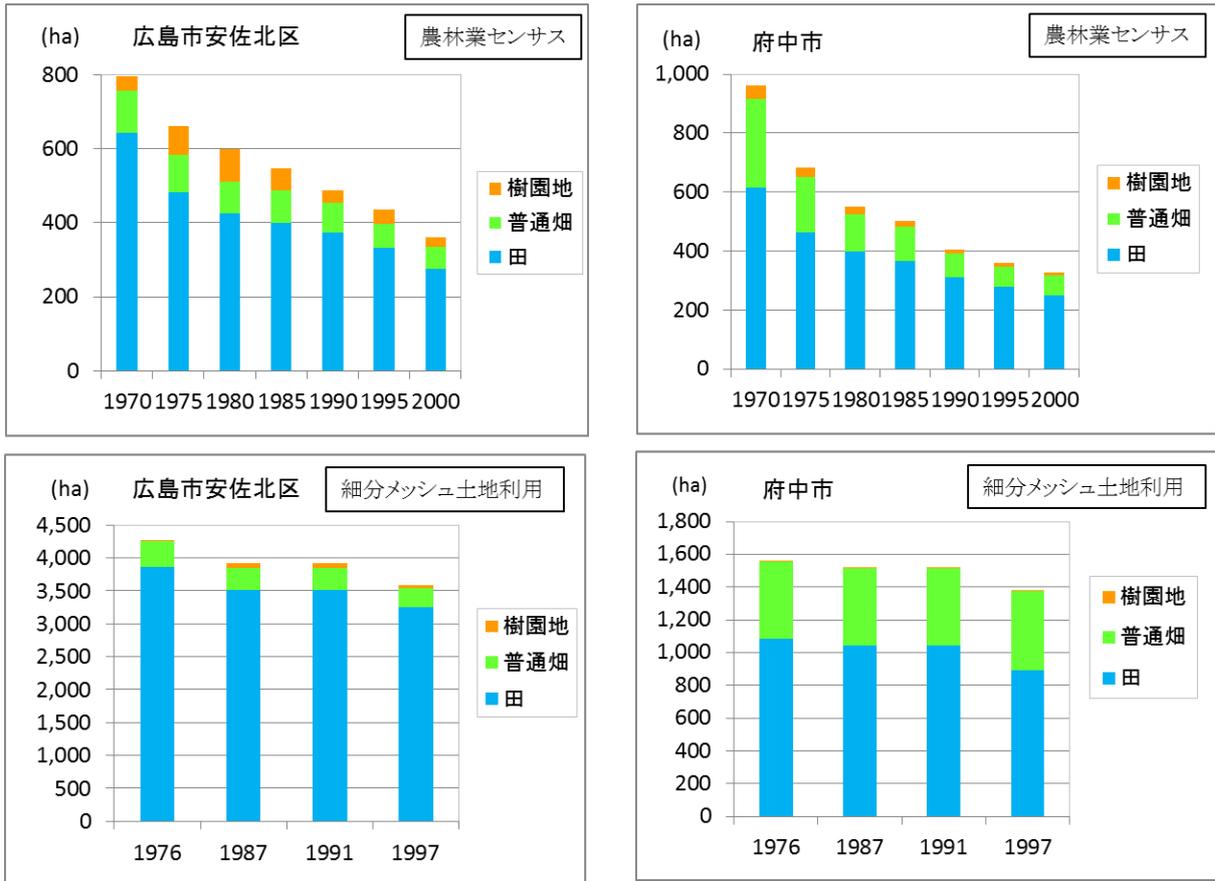


図 3-3 農林業センサスと土地利用細分メッシュの農地面積の相違



図 3-4 流域による農業集落の分断と農地メッシュ分布の例

### 3.3 農地面積および農地由来の排出負荷量の経年変化

#### 3.3.1 農地面積の動向

広島県の農地面積の動向を図 3-5 に示す。農地面積は 1970 年で約 10 万 ha、地目別には水田が 7 割で、畑地、樹園地がほぼ同面積である。農地面積は 1970 年以降減少が続き、1970 年から 2000 年で 38% の減少、地目別には田が 34%、畑地 48%、樹園地 45% 減少である。農地の減少は、宅地等への転換、耕作放棄が主要因である。

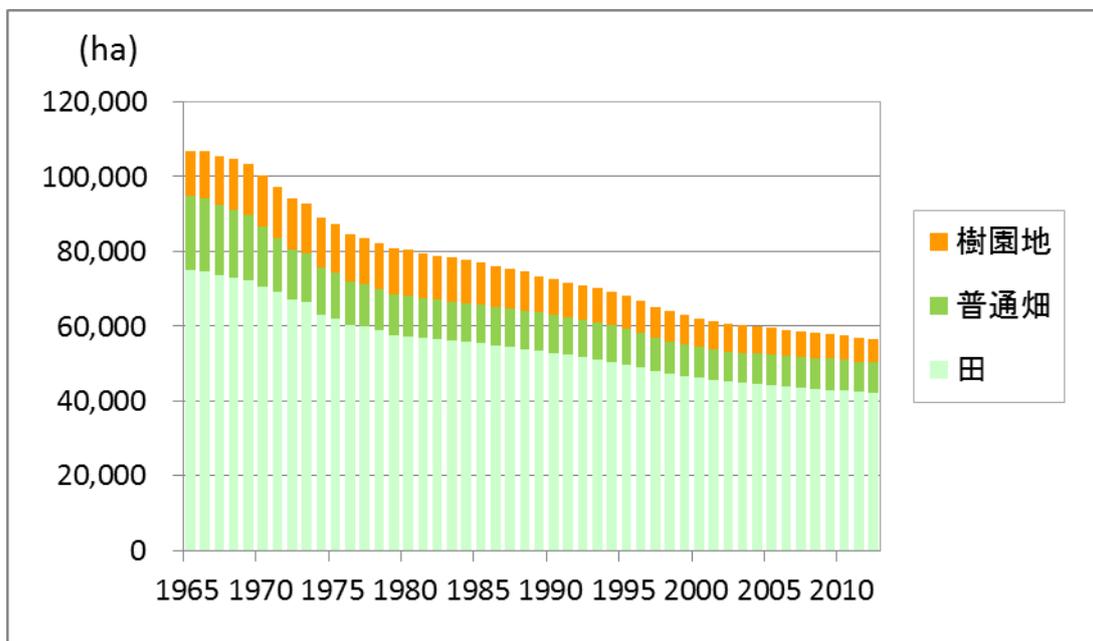
次に、両流域の農地面積の動向を図 3-6 に示す。太田川流域の農地面積は 1970 年で約 8,800ha、地目別には田が約 9 割で、樹園地は 1% 未満である。流域全域の農地面積は 1970 年から 2000 年の間に 50.8% 減で、広島県全体の減少率を上回っている。地目別に見ると田が約 50% 減、畑が約 40% 減で、田面積の減少が反映した結果となっている。芦田川流域の農地面積は 1970 年で約 11,800ha で、農地面積の比率は太田川流域に比べて高く、地目別には田が 8 割弱で、畑が 2 割弱である。流域全域の農地面積は 1970 年から 2000 年の間に 48.7% 減で、太田川流域と同様に広島県全体の減少率を上回っている。地目別には水田が約 42% 減、畑が約 71% 減で、畑面積の減少著しい。

図 3-7、3-8 に両流域の農地の変化を示す。太田川流域では、最上流の北西部での変化は少ないが、下流域の広島市中心部では建物用地への変化が目立ち、その他の地域では森林、荒地への変化が主となっている。芦田川流域では、西部の中流から上流域での農地の変化が少なく、中下流域の福山市郊外と府中市では建物用地へ、北東部では主に森林へと変化している。

図 3-9、3-10 に単位流域での田、畑の面積動向を示す。流域内の農地の変化、地目間での相違が明瞭にあらわれている。太田川流域では、田は広島市市街地周辺から北に向かって、減少率が高い単位流域が広がるとともに、西南部にも減少率が高い単位流域がまとまっている。畑は北西部で大きく減少している。芦田川流域では田では上流部の世羅台地で減少率が相対的に低く、中・下流域で高いという傾向が出ているが、畑については流域内全体が高い減少率を示した。

#### 3.3.2 農地の排出負荷量の経年変化

単位流域の農地面積に基づき、原単位法によって排出負荷量の経年変化を検討した。原単位は対象地域と同じ中国地方の指定湖沼である宍道湖の水質保全計画（島根県 2005）を選択した。この原単位は、水田は島根県農業試験場での現地田調査結果、畑地は島根県の調査結果に基づいて設定されている。



出典:「耕地及び作付面積統計」(農林水産省)

図 3-5 広島県の農地面積の推移

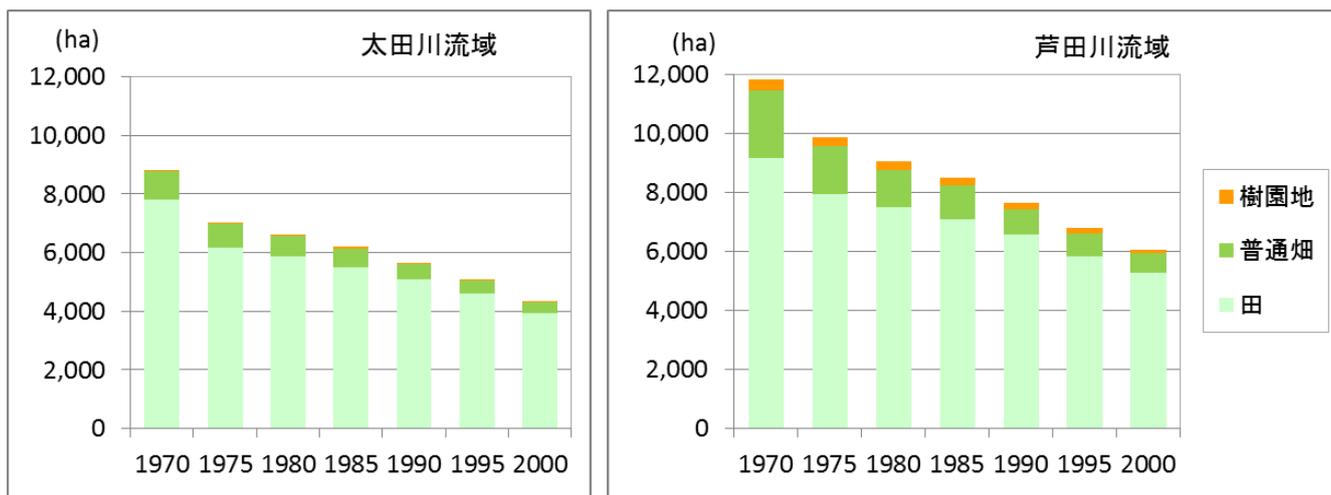


図 3-6 太田川流域、芦田川流域の農地面積の推移

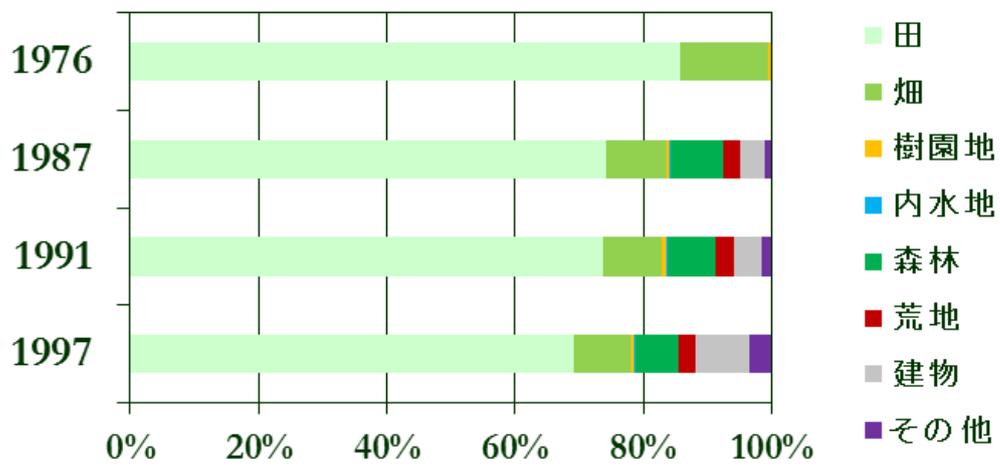
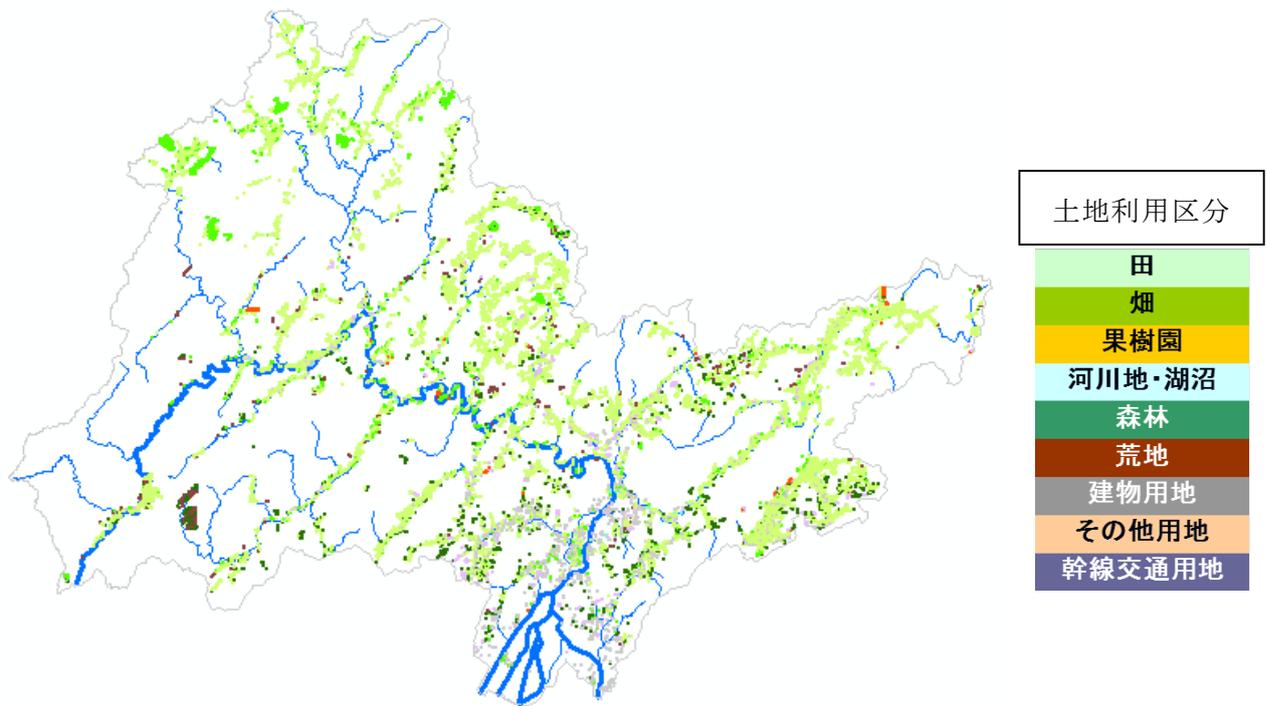
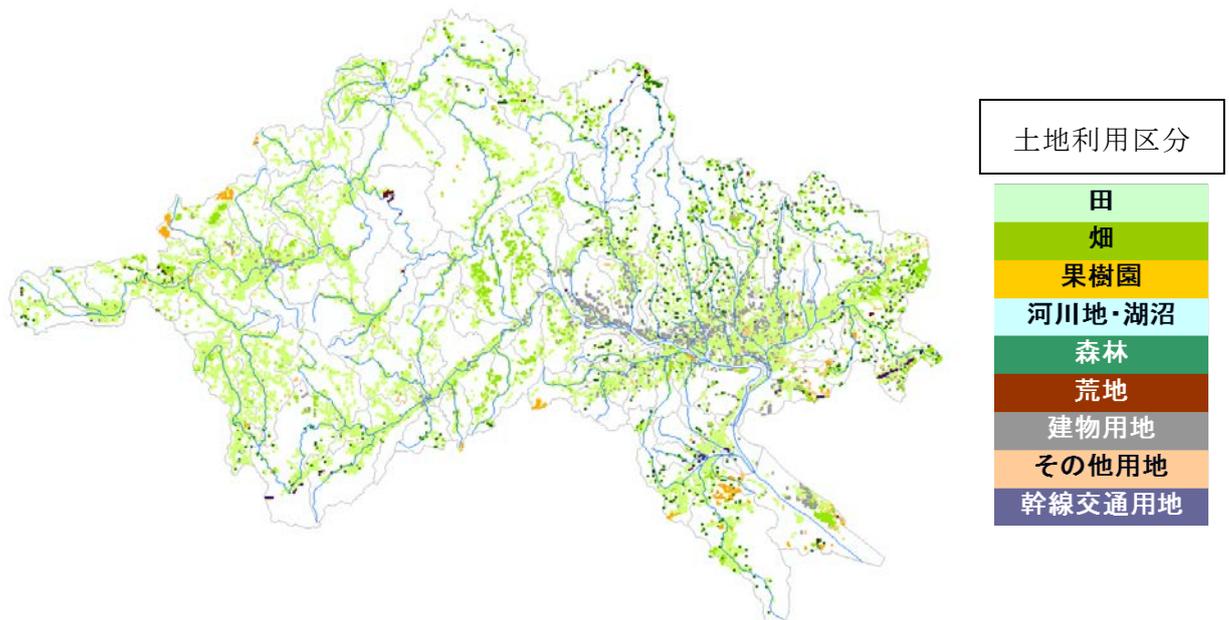


図 3-7 太田川流域における農地の変化(1976 年→1997 年)

1976 年に農地であったメッシュを抽出・集計



原データ：国土数値情報 土地利用細分メッシュ（1997年）  
 1976年に農地であったメッシュを抽出

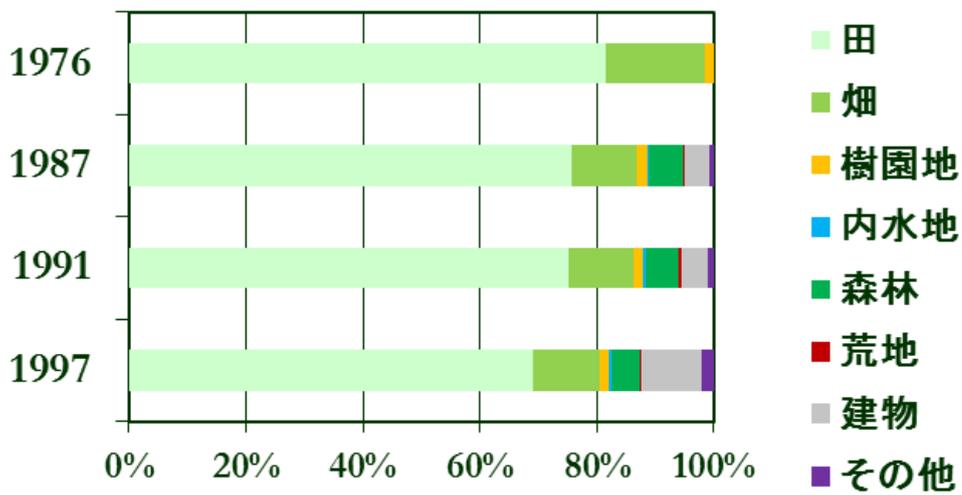


図 3-8 芦田川流域における農地の変化(1976年→1997年)

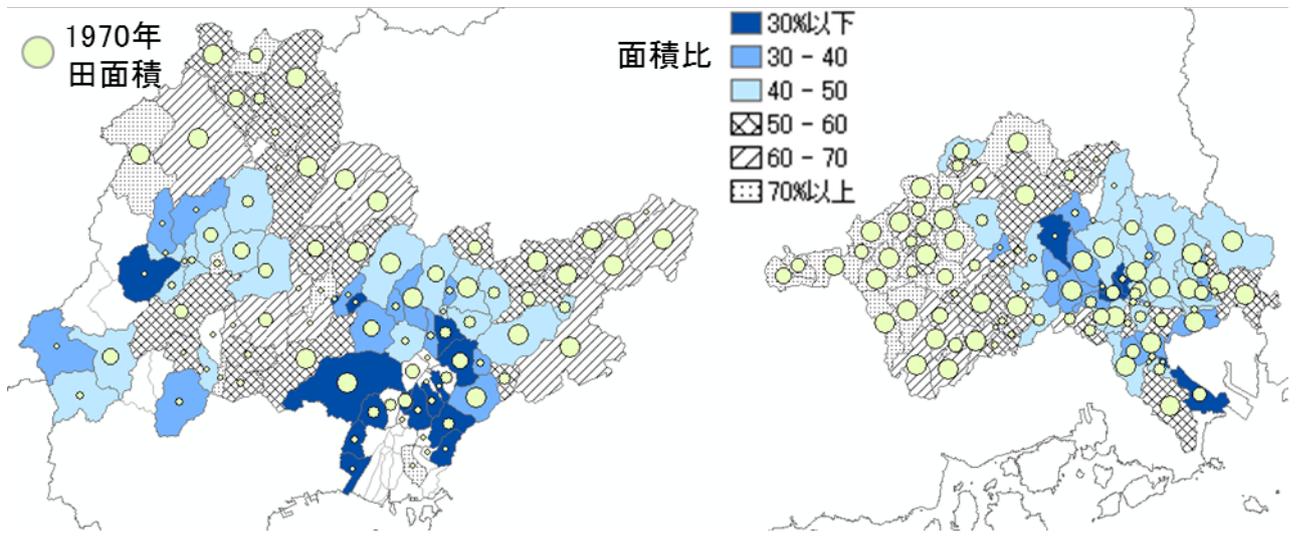


図 3-9 単位流域の 1970 年の田面積と 2000 年/1970 年の面積比

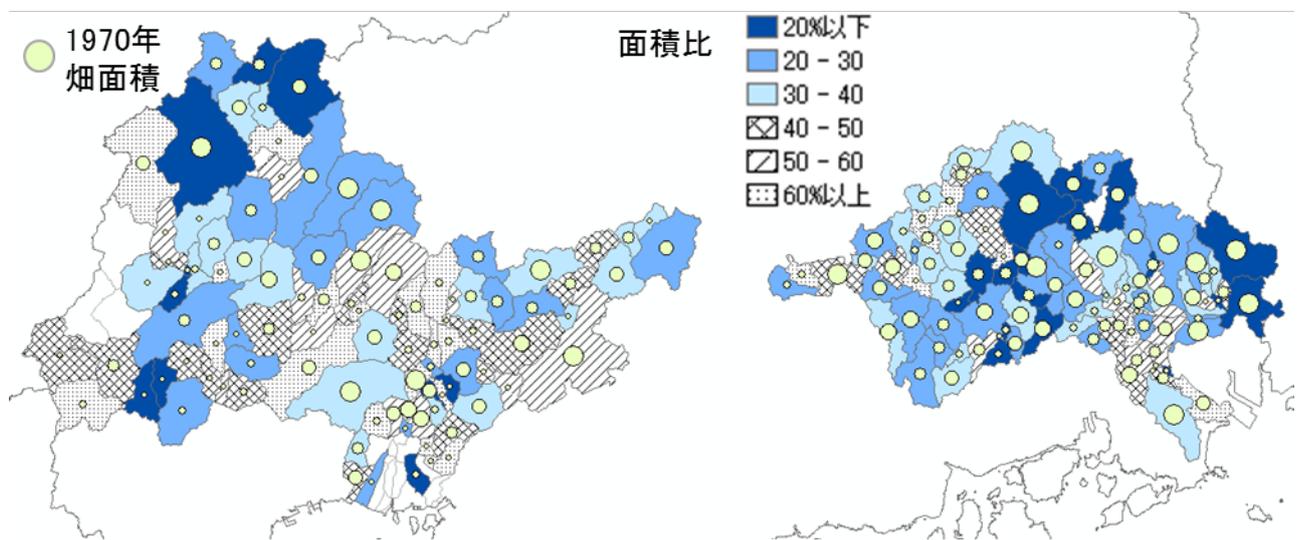


図 3-10 単位流域の 1970 年の畑面積と 2000 年/1970 年の面積比

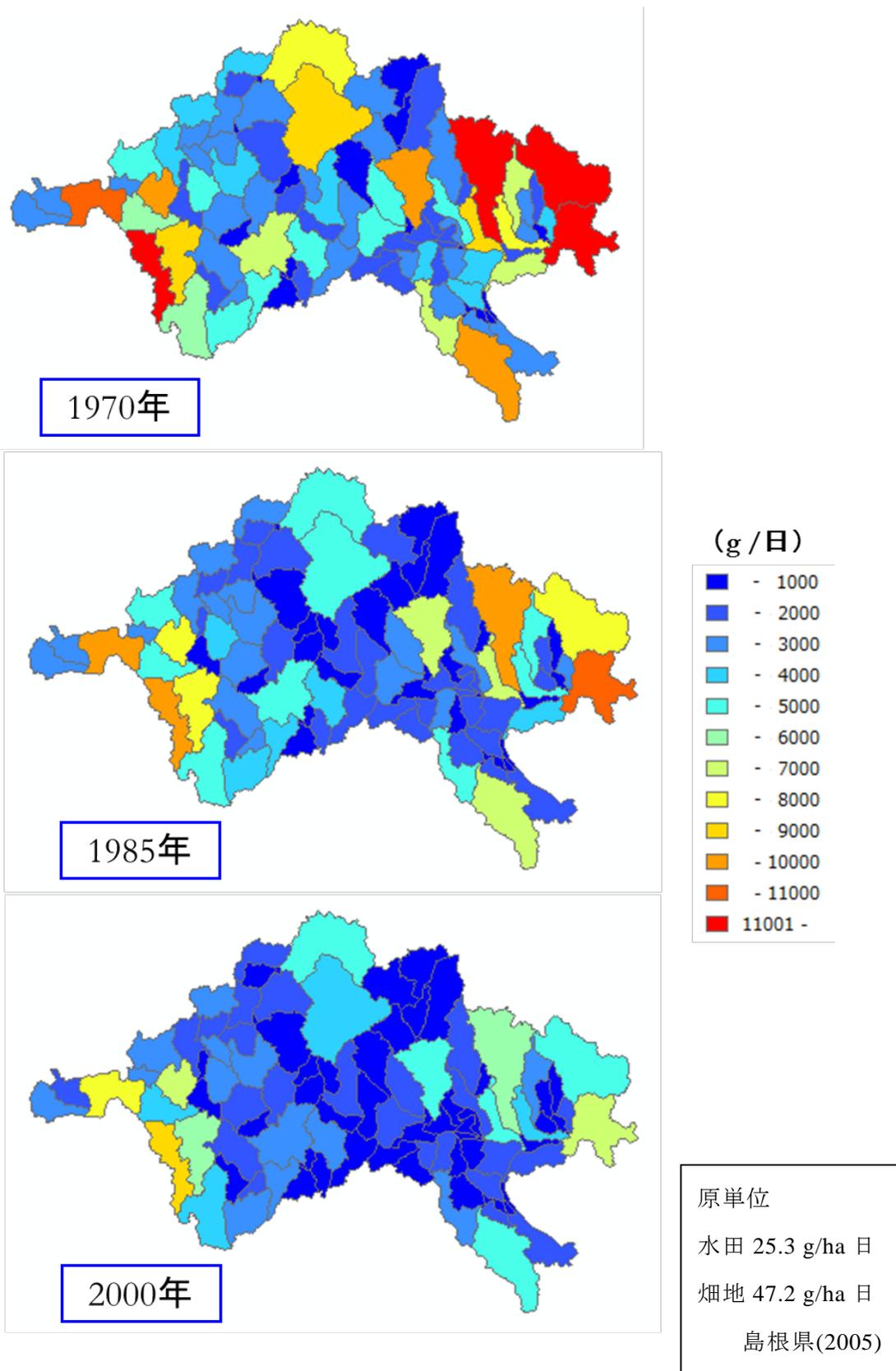


図 3-11 芦田川の単位流域での農地の窒素排出負荷量の変化

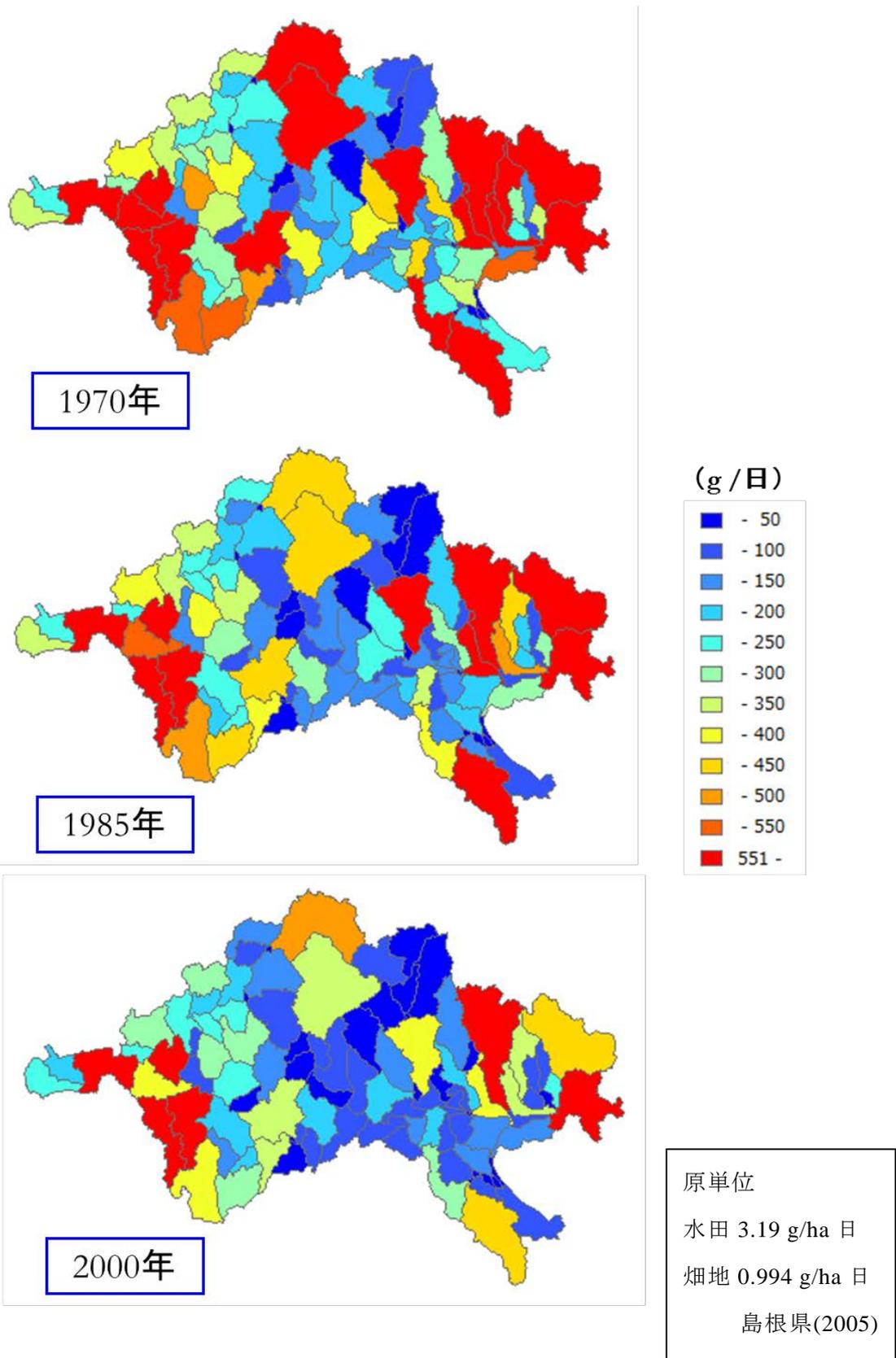


図 3-12 芦田川の単位流域での農地のリン排出負荷量の変化

図 3-11、3-12 に芦田川流域における窒素およびリンの農地からの排出負荷量を示す。ここでは農地の負荷量のみを算出しているため、同じ農地面積でも水田比率が高い単位流域では相対的に窒素の排出負荷量は小さくなり、逆にリンの排出負荷量は大きくなる。

農地面積の減少を受けて流域全体で排出負荷量が減少しているが、上流部の流域西部では畑地面積の減少は大きいものの、水田面積が維持されているため、流域内では窒素、リンともに排出負荷量が相対的に高いまま維持されており、下流部の流域東部では、水田、畑ともに面積が減少し、特に窒素負荷量が低下している。

面源系として土地利用の変化を含めて排出負荷量を考えると、耕作放棄の場合には荒地の扱いとなり、森林の原単位（全窒素 16 g/ha 日、全リン 0.29 g/ha 日）を適用するために負荷量は減少するが、下流部に多く見られる宅地へ変化する場合には、市街地の原単位（全窒素 46 g/ha 日、全リン 2.3 g/ha 日）を適用するため、窒素負荷量は水田より大きく、畑と同程度であることから概ね増加となり、リンの場合は水田では減少、畑では増加と地目によって増減は変わる。また宅地の場合、生活系の排出負荷も新たに生じるとすれば、総合的には排出負荷量の増加につながりやすい。

問題点として 1970 年～2000 年までを同一の原単位で評価していることがあげられる。既存の原単位を過去のデータに適用するにあたっては、栽培管理、品種等の相違を反映させることが困難である。

### 3.4 窒素収支に基づく農地の環境負荷の評価

#### 3.4.1 原単位法の問題と作付作物の反映

環境負荷を評価する際に原単位法は非常に簡便な手法であり、負荷量の経年的な変化を把握する上でも有用で、実際に行政部局で活用されている。しかし、面源系の既存の原単位には大きな幅があることがわかっている（表 2-2）。

その要因の一つとして、特に畑の場合には作付されている作物が多様であり、施肥量なども作物によって大きく異なることが挙げられる。そのため、指定湖沼などでは独自に調査を行い、作物別の原単位を設定している場合もある。しかし、それらの原単位の値も地域による品種、土壌、地形、気象条件等の相違を考えれば、他地域での適用が適切かどうかの保証はない。

そこで地域の作付実態を反映させる原単位に代わる指標として、西尾（2001）、賓示戸ら（2003）の手法を参考に農地での窒素収支に基づく評価方法を検討し、岡山県、広島県を対象地域として、2000、2010 年時点の窒素収支を評価した。

### 3.4.2 窒素収支による環境負荷の評価法

窒素収支の基本計算式は、賓示戸ら（2003）を参考にして式 3-1～3-3 とした。

$$\text{窒素収支} = \text{窒素投入量} - \text{窒素収奪量} \quad (\text{式 3-1})$$

$$\text{窒素投入量} = \text{化学肥料窒素量} + \text{家畜由来窒素量} + \text{降水窒素量} \quad (\text{式 3-2})$$

$$\text{窒素収奪量} = \text{収穫物持出窒素量} + \text{脱窒量} \quad (\text{式 3-3})$$

使用するデータは、全国的に整備・公表がなされ、地域の作付実態を反映できるデータを選択した。表 3-2 に窒素収支の推定に使用したデータの概要を示す。

化学肥料窒素量は「農業生産環境調査報告書」（農林水産省 2000）の作物毎の施肥量に基づき、小麦のみ「持続性の高い農業生産方式への取組状況調査報告書」（農林水産省 2005）を参照した。地域別の値がある作物はその値を用い、2000 年と 2010 年は同じ値とした。

家畜由来窒素量は、堆肥として投入される窒素量からアンモニア揮散分を差し引いた量とし、アンモニア揮散については処理時、散布時、畜舎での揮散率を足し合わせた。ふん尿の処理法によっても揮散率は異なってくるが、今回は賓示戸らの混合・堆肥化処理の値である乳牛 18.2%、肉牛 20.08%、豚 40.0%を用い、鶏については対象外とした。家畜からの排出窒素量は、岡山県の畜産系の原単位（表 2-3）を参考に、除去されるふん尿分が堆肥製造に供出されるとして家畜由来窒素量を算出した。アンモニア揮散分を除いた 1 頭あたりの家畜由来窒素量は、乳用牛 63.2kg、肉用牛 61.7kg、豚 6.1kg となった。

降水による窒素量は 0.72mg/L とし、降水量は平年値で評価することとして気象庁のメッシュ平年値 2010 を使用した。降水による窒素量は岡山県の平均降水量 1,478mm で 1.07 kg/10a となる。

収穫物による持出窒素量は、作物収量と窒素含有率から算出し、収量は岡山県および広島県農林水産統計年報から作物毎の作付面積、収穫量より、年次変動を考慮して 2000 年では 1996 年から 2000 年の平均値、2010 年では 2006 年から 2010 年の平均値を用いた。収穫物の窒素含有率は農研機構中央農業総合研究センターのデータベース（金澤 2009）の値を参照した。

脱窒量は、畑地 3.0kg/10a として先行研究に倣ったが、水田 7.0kg/10a の脱窒量は化学肥料の施肥窒素量の 8 割にも達して過剰と判断し、鳥山（2001）に基づき基肥の 30%、追肥の 20%とした。

類別作付面積および乳用牛・肉用牛・豚の飼養頭数は、農林業センサスの都道府県別統計書を用い、旧市区町村を単位として 2000 年は販売農家で、2010 年は農業経営体で整理した。農業集落単位としなかったのは、各集計区分での調査対象者総数が 2 経営体（戸）以下の場合、調査結果の秘密保護の観点から、データの秘匿が行われるためである。農

業集落単位では経営体の総数が少なくなるために秘匿データが非常に多くなり、データの精度が確保できないと判断した。対象旧市区町村数は岡山県 389、広島県 386 で、類別分類は水稻、麦類、豆類、野菜、その他の畑作物（雑穀、ばれいしょ、かんしょ、工芸農作物）、果樹の 6 分類に集約し、花き類、施設栽培等は除外した。

旧市区町村単位においても秘匿データの問題は避けられないため、はじめにデータの補完を行った。新市区町村の面積データに秘匿値がある場合、県全体の値から確定している新市区町村の値を差し引き、秘匿データ全体の経営体数と面積・飼養頭数から平均面積・飼養頭数を求め、経営体数で比例配分した。同様にして旧市区町村の面積データに秘匿値がある場合、新市区町村の値から確定している所属の旧市区町村の値を差し引き、新市区町村毎に秘匿データの経営体数と面積・飼養頭数から平均面積・飼養頭数を求め、経営体数で比例配分した。図 3-13 に秘匿データの例として 2010 年の岡山県の類別作付面積のデータを示す。水稻、露地野菜では秘匿データが少ないが、作物によっては 4 割が秘匿データとなっている。

類別作付に対応する面積あたりの化学肥料窒素量、収穫物による窒素持出量は、県毎に各類別作付に含まれる作物の作付面積を加重平均した値を用いた。

表 3-3 に両県で 100ha 以上の作付面積があった主要な畑作物を示す。作付面積は農林水産統計年報の値を用いたが、2006 年以降はつきく等の温州みかん以外のかんきつ類の面積が掲載されていないため、農林水産省の特産果樹生産動態等調査表から補完している。農林水産統計年報のデータから類別に集計した面積を図 3-14 に示す。露地野菜では 2000 年では掲載されていない作物もあるため、両年ともデータのある作物のみとした。作付面積は 2000 年から 2010 年で減少しており、岡山県では普通畑作物の減少率が高く、広島県では果樹類の減少率が高いが、麦類は作付面積が増加している。

### 3.4.3 GIS を利用したメッシュデータの構築

旧市区町村で整理した作付面積を元に 1km メッシュ（3 次メッシュ）データの作成を行った。作成には 3.2.5 で取り上げた国土数値情報の土地利用細分メッシュを用いた面積の配分法を適用した。先の事例では農業集落から単位流域への変換であったが、これを旧市区町村から 3 次メッシュに置き換えることになる。

まず GIS ソフトで土地利用細分メッシュの各メッシュの中心位置のポイントデータを作成する。空間的位置関係に基づいて他のレイヤの属性データを結合する機能を用いて、ポイントデータが位置する旧市区町村の行政コードを結合する。この属性データを元に旧市区町村毎に水田、畑地の細分メッシュ数を集計する。

表 3-2 窒素収支の推定に使用したデータ

データ項目	データ形式	データ入手先
化学肥料窒素量	印刷物	農業生産環境調査報告書(農林水産省 2000)
化学肥料窒素量(小麦)	印刷物	持続性の高い農業生産方式への取組状況調査報告書(農林水産省 2005)
降水量	CSV	メッシュ平年値2010(気象庁)CD-ROM
作物別作付面積・収穫量	印刷物	岡山および広島農林水産統計年報(1996~2010)(農林水産省)
作物別作付面積・収穫量(果樹の一部)	印刷物	特産果樹生産動態等調査表(農林水産省)
収穫物の窒素含有率	印刷物	農研機構中央農業総合研究センターデータベース(金澤 2009)
類別作付面積	XLS	農林業センサス都道府県別統計書(農林水産省)付属CD-ROM
畜産飼養頭数	XLS	農林業センサス都道府県別統計書(農林水産省)付属CD-ROM
事業系排出負荷量	XLS	平成16年度汚濁負荷削減状況調査結果(岡山県) (岡山県環境保健センターより提供)
土地利用	TXT	国土数値情報 土地利用細分メッシュ(国土交通省)

表 3-3 主要な畑作物の作付面積

岡山県		2010年		広島県		2010年	
作物名	作付面積(ha)	作物名	作付面積(ha)	作物名	作付面積(ha)	作物名	作付面積(ha)
大豆	3,230	大豆	1900	温州みかん	3,280	温州みかん	2,529
二条大麦	2,230	二条大麦	1890	大豆	1,040	大豆	847
ぶどう	1,190	ぶどう	1230	ばれいしょ	737	ばれいしょ	585
もも	749	もも	696	だいこん	601	だいこん	494
小豆	650	かき	455	ほうれんそう	457	そば	416
だいこん	645	小豆	441	かき	435	ほうれんそう	413
かき	503	小麦	422	はっさく	431	かき	397
はくさい	448	だいこん	410	小豆	388	ねぎ	337
くり	441	くり	359	ぶどう	333	うめ	310
ばれいしょ	436	はくさい	356	そば	322	キャベツ	306
小麦	414	ばれいしょ	329	はくさい	318	ぶどう	302
キャベツ	391	キャベツ	327	うめ	318	デコボン	297
かんしょ	341	かんしょ	259	くり	310	はっさく	282
たまねぎ	251	そば	206	キャベツ	309	くり	274
かぼちゃ	249	ほうれんそう	200	ネーブルオレンジ	299	かんしょ	264
ほうれんそう	238	かぼちゃ	193	かんしょ	259	はくさい	264
なす	211	たまねぎ	181	たまねぎ	243	たまねぎ	222
茶	184	なす	158	ねぎ	240	小豆	193
さやえんどう	173	ねぎ	157	きゅうり	204	かぼちゃ	182
温州みかん	172	温州みかん	150	なつみかん	197	えだまめ	173
うめ	168	うめ	149	日本なし	197	きゅうり	170
そば	167	日本なし	141	すいか	186	トマト	168
きゅうり	162	茶	131	いよかん	185	さといも	164
日本なし	161	トマト	125	さといも	183	なす	153
ねぎ	160	きゅうり	122	デコボン	179	日本なし	151
スイートコーン	151	さといも	117	かぼちゃ	178	スイートコーン	143
トマト	147	れんこん	117	トマト	177	すいか	140
れんこん	143	ブロッコリー	115	なす	176	アスパラガス	135
裸麦	133	さやえんどう	112	えだまめ	162	ネーブルオレンジ	124
さといも	133	にんじん	104	茶	154	小麦	121
レタス	126	レタス	100	アスパラガス	148	さやいんげん	108
にんじん	125			こんにゃくいも	116	こまつな	106
すいか	124			もも	116	さやえんどう	103
さやいんげん	100			さやえんどう	107		

原データ：岡山県農林水産統計年報、広島県農林水産統計年報

水稲以外の作付面積 100ha 以上の作物を面積順に表示



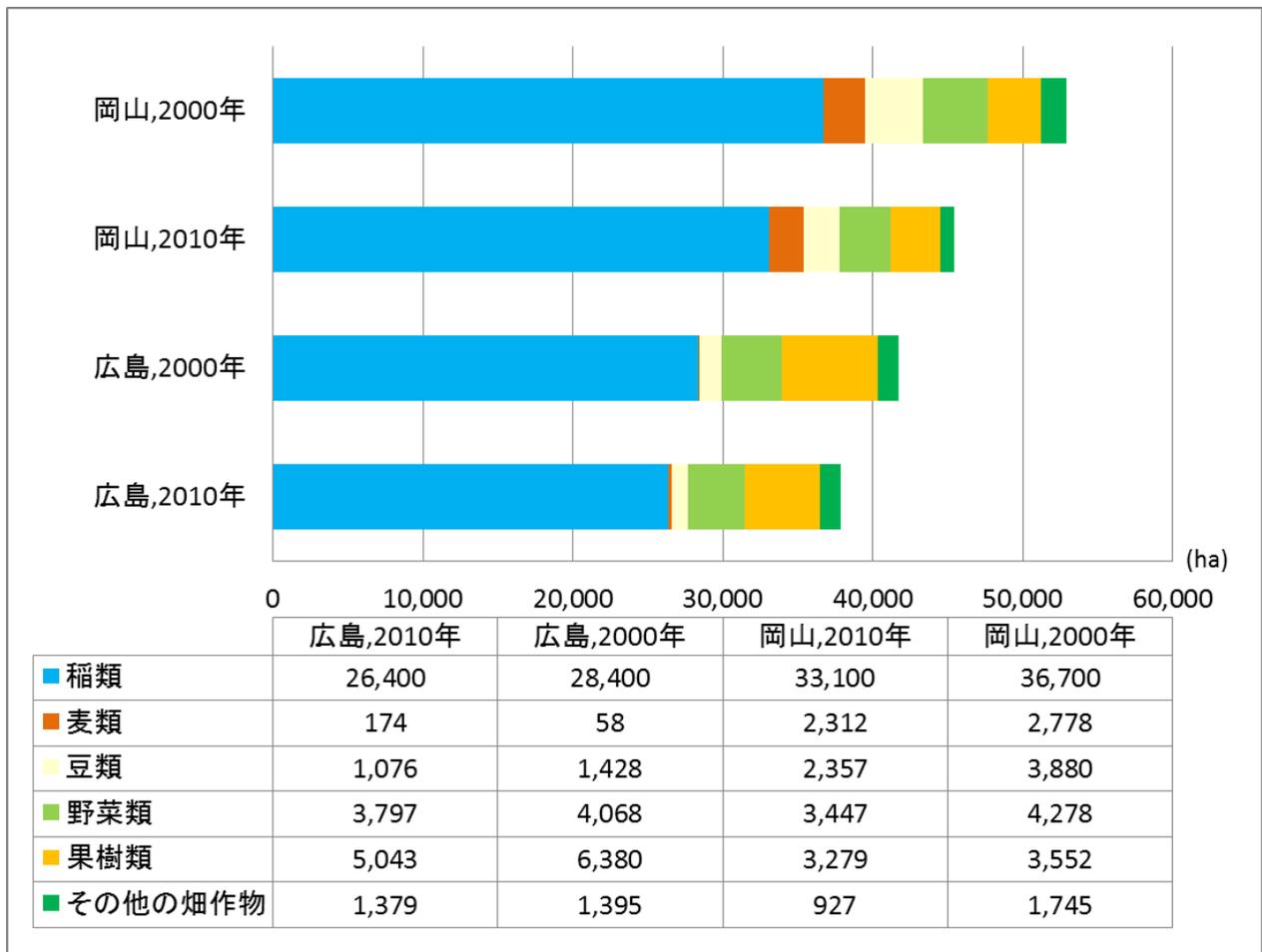


図 3-14 類別作付面積の推移

農林業センサスの水田、畑地の面積をそれぞれの細分メッシュ数で除して1メッシュあたりの割当面積を設定する。その後3次メッシュ毎に所属する細分メッシュの割当面積を集計する。

畜産飼養頭数は、同様に旧市区町村内の水田と畑地メッシュの合計で除して1メッシュあたりの割当頭数を畜種毎に設定し、3次メッシュで集計する。この割当頭数を元に家畜由来窒素量を算出するため、各旧市区町村内で飼養している家畜のふん尿を処理するという設定になる。

#### 3.4.4 窒素投入量・収支の作物間差

本研究で取り上げる窒素収支は、施肥等の窒素投入量と収穫物による持出量、脱窒量との差であるため、この残存量には土壌への蓄積分だけでなく、作物残さ中の窒素成分を含む。そのため、窒素収支の数値が即座に排出原単位の代替となるわけではない。ただし、作物残さが農地から持ち出されず、土壌に鋤込まれる場合にはその窒素成分も長期的には発生源に加わることになる。國松・村岡（1989）はライシメータや農耕地の測定事例をまとめ、畑地における窒素施肥量と浸透流出量の相関関係から、窒素肥料の32%を流出率としてあげている。本研究ではこの窒素収支を排出原単位と関係性を有する指標として位置付け、地域的な傾向や相対的な大小関係を比較・検討するために用いる。

まず化学肥料窒素量と収穫物による窒素持出量のみ窒素収支をみていく。図3-15に作物の類別の窒素投入量・収支を示す。窒素収支で見た場合、露地野菜類が22kg/10aと最も多く、水稻は収穫物による窒素持出量が多いために残存量は低い。また豆類は窒素固定分が実際には加わるため、収支だけ見た場合にはマイナスとなっている。麦類では収量水準の関係で、果樹では作物の面積構成の違いから県間の差が大きい。

図3-16に露地野菜の作物別の窒素投入量・収支を示す。ここで取り上げた24作物の窒素投入量の平均は26.5 kg/10aでキャベツが平均値である。ほとんどの作物が収穫物中の窒素成分含有率が低いために、投入量と収支の差は小さく、窒素収支の平均は21.5 kg/10aである。作物間の差はかなり大きく、なすの窒素収支は平均の3倍近いが、だいこん、かぼちゃ等は1/3以下となっている。さらに降雨による窒素量と脱窒量を考慮すると平均で約1.4 kg/10aさらに差し引かれ、約20 kg/10aが露地野菜の窒素収支の平均となる。

露地野菜において作付作物を考慮することで、窒素収支に地域性を反映させることができると考えられる。また、既存の畑地の原単位と比べると窒素収支の平均値は流域別下水道整備総合計画調査の最大値をやや下回る値となっている。

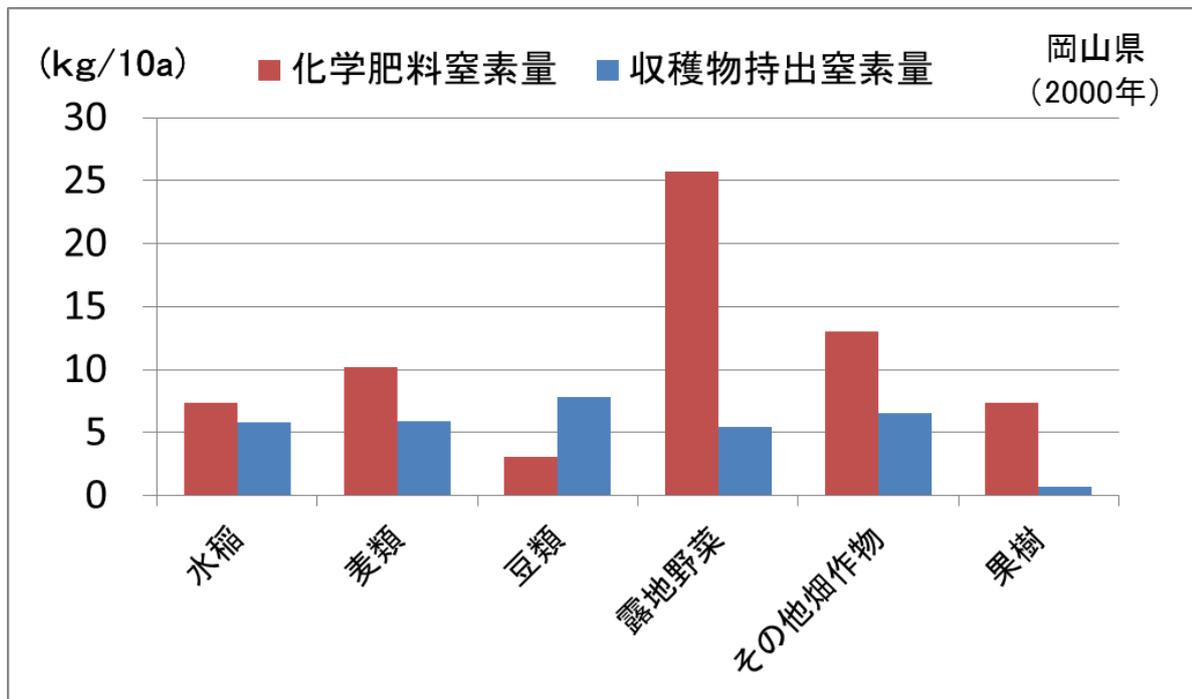


図 3-15 類別作物の化学肥料窒素量と収穫物持出窒素量

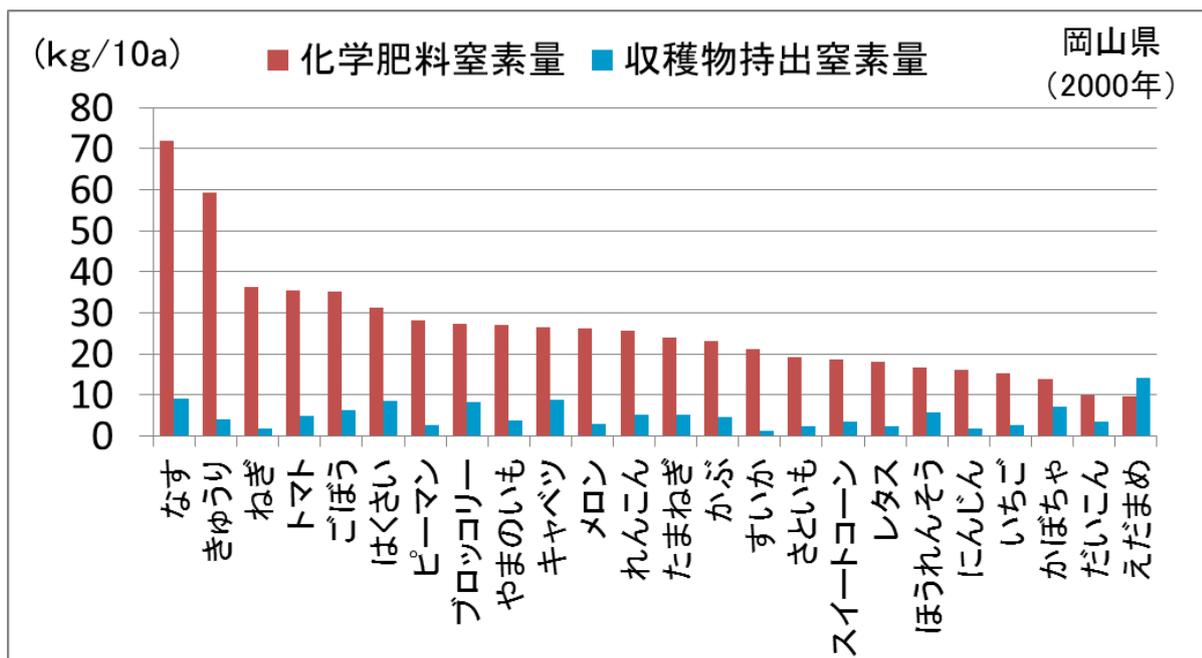
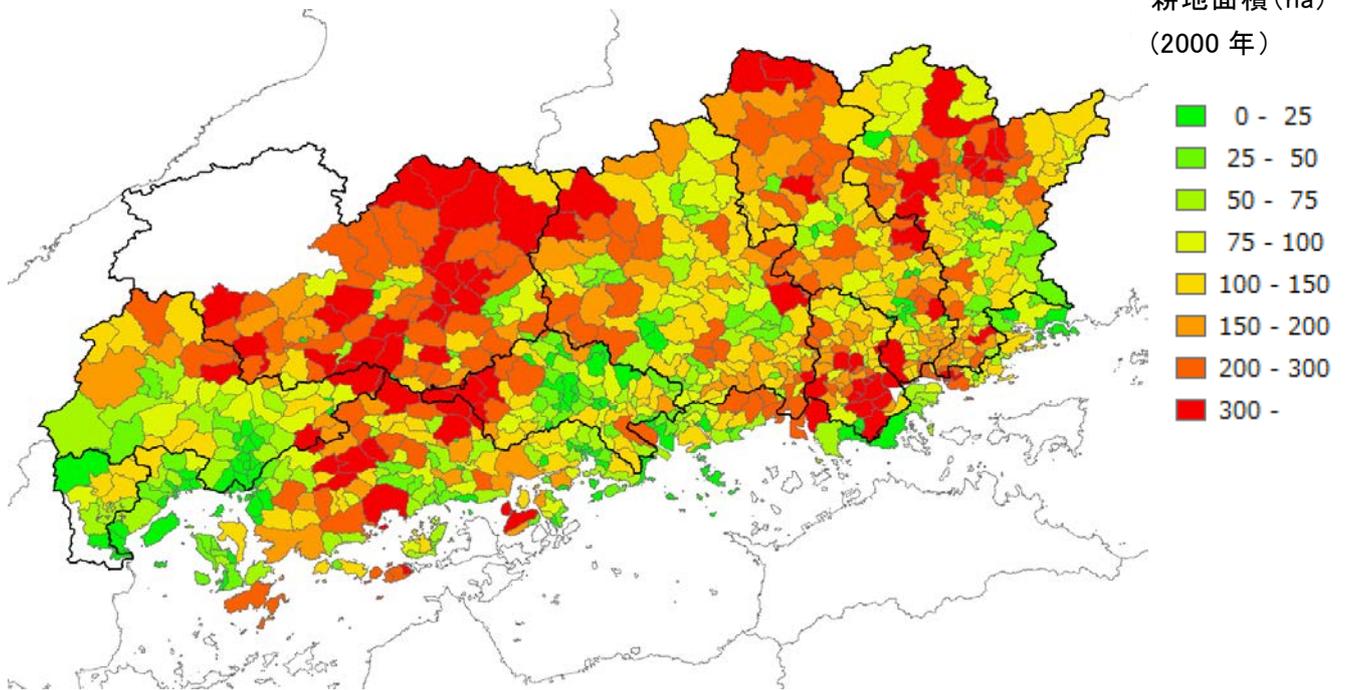


図 3-16 露地野菜の化学肥料窒素量と収穫物持出窒素量

耕地面積 (ha)  
(2000 年)



耕地面積の変化 (ha)  
(2000 年→2010 年)

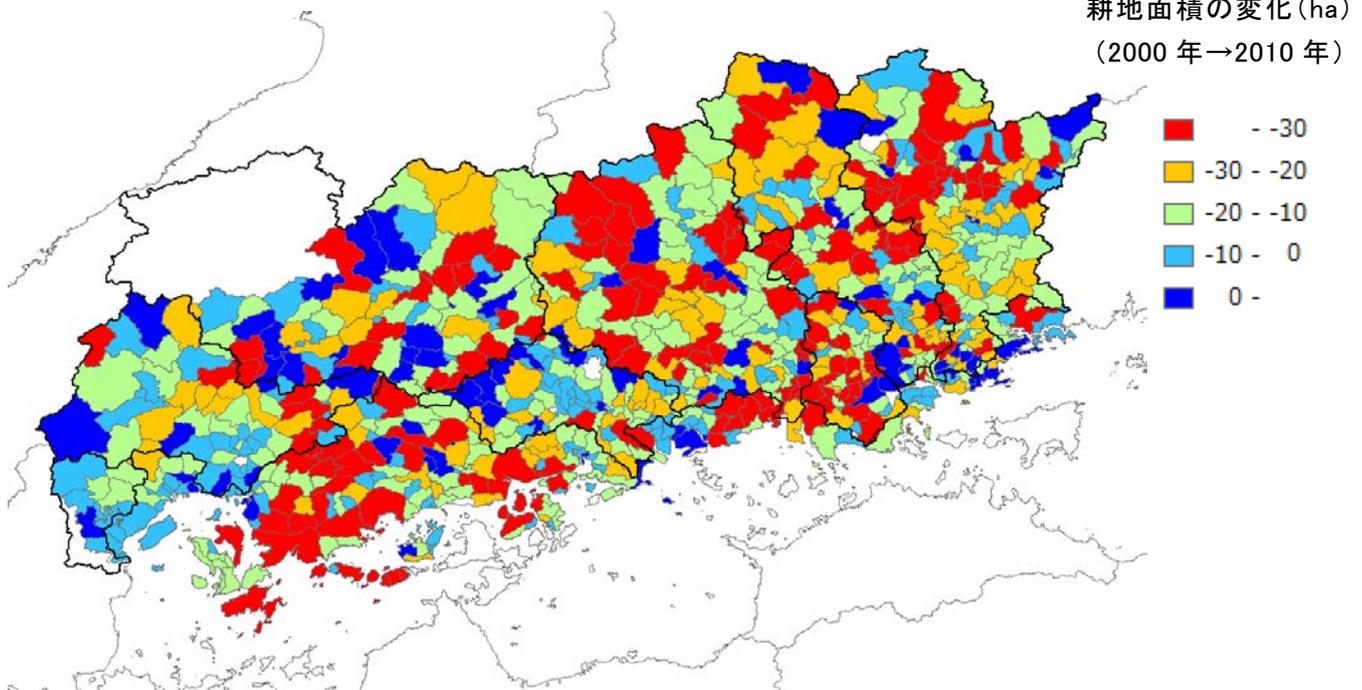


図 3-17 旧市区町村の耕地面積

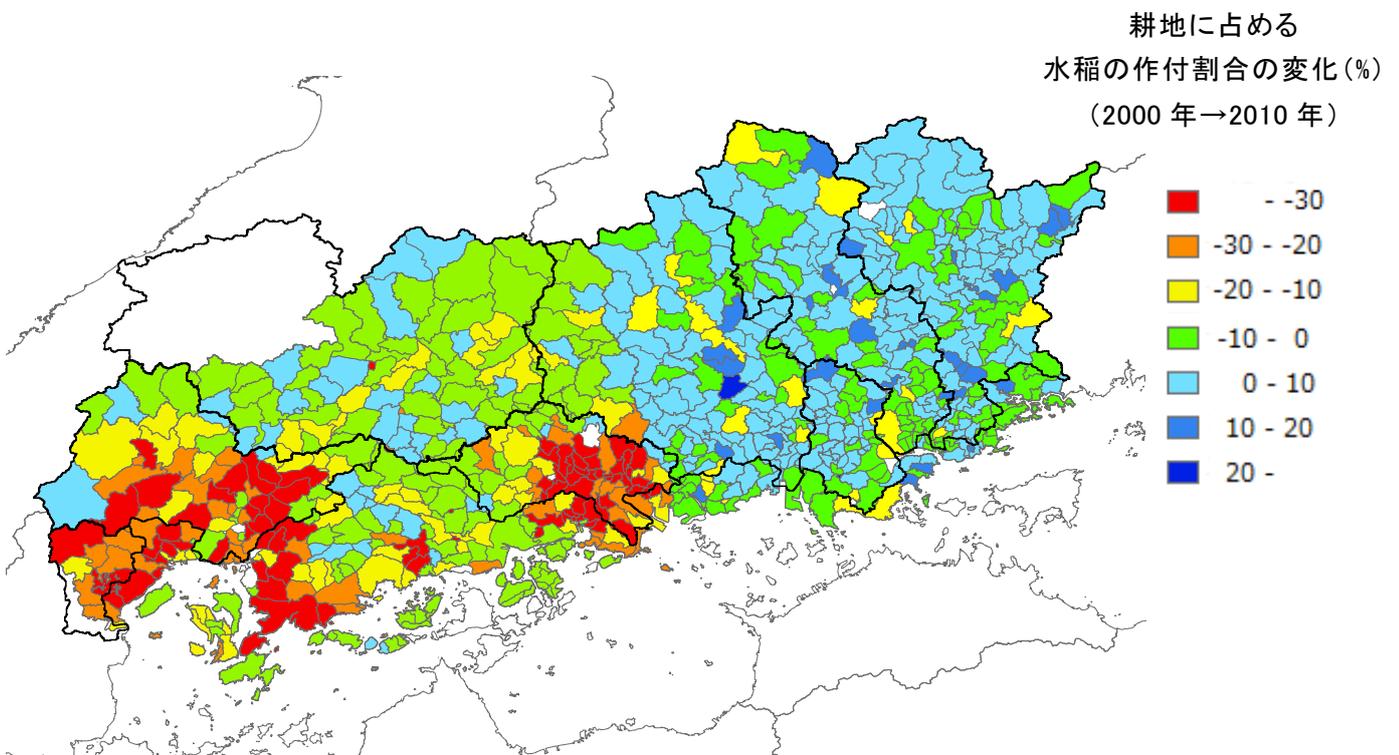
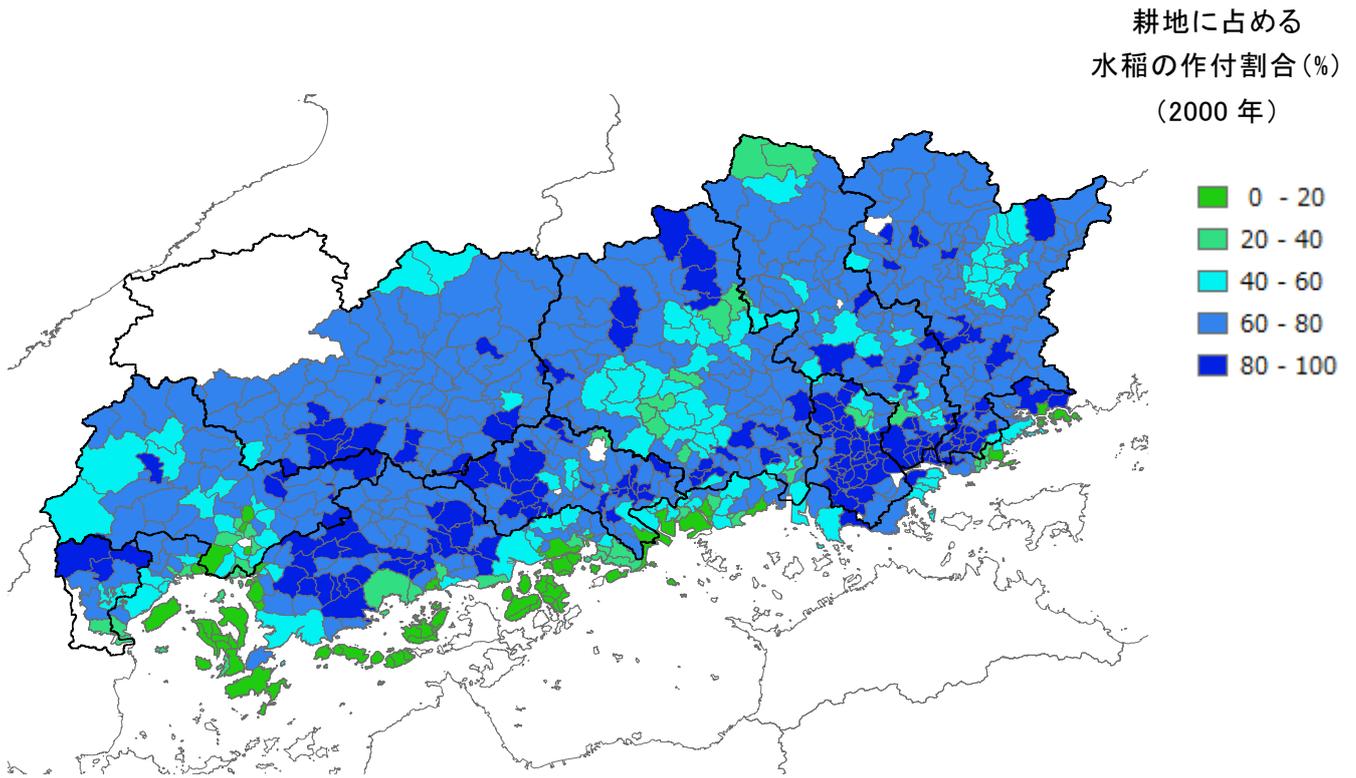


図 3-18 旧市区町村の耕地に占める水稲の作付割合

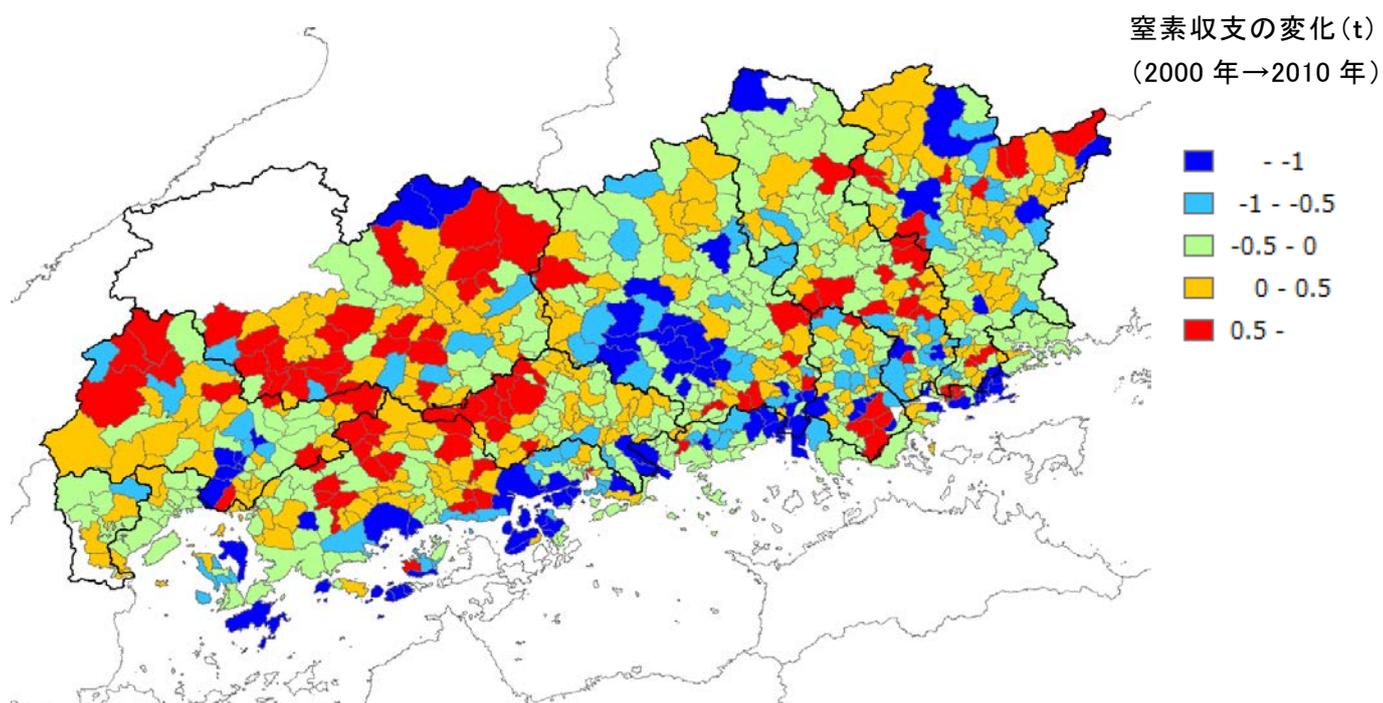
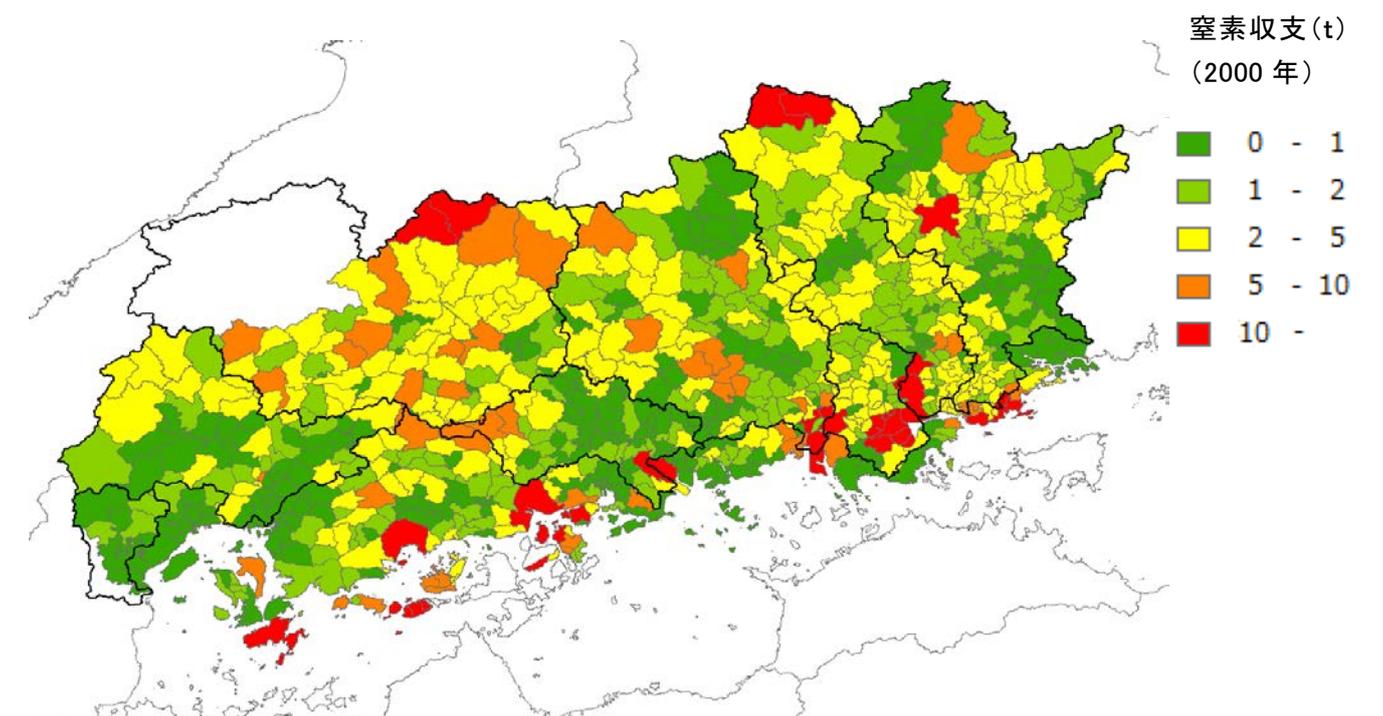
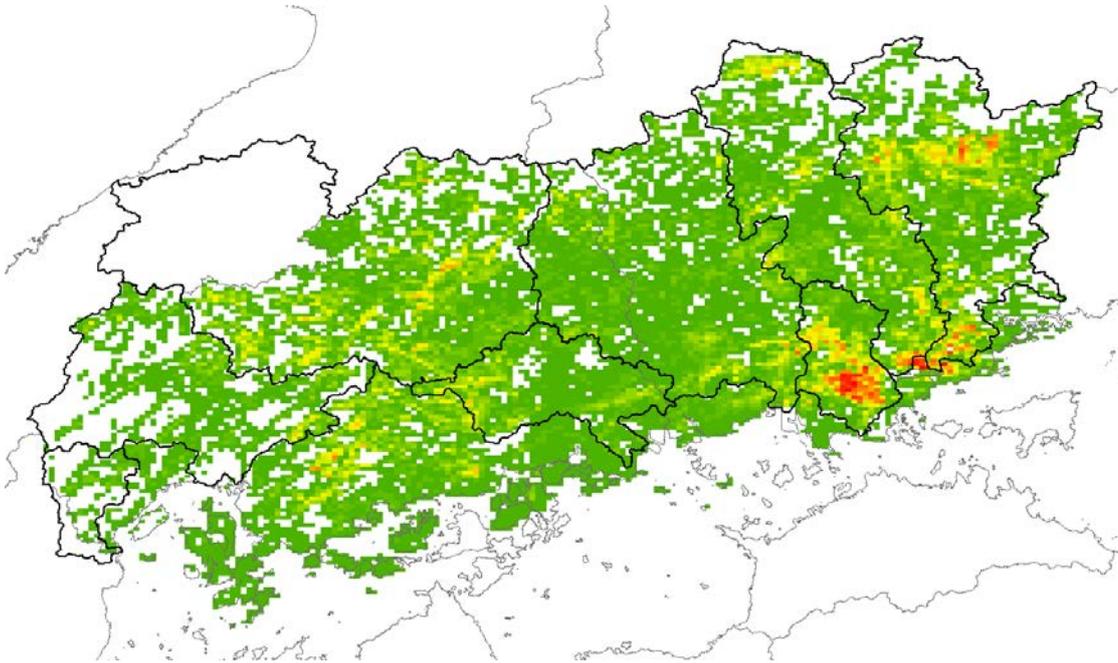
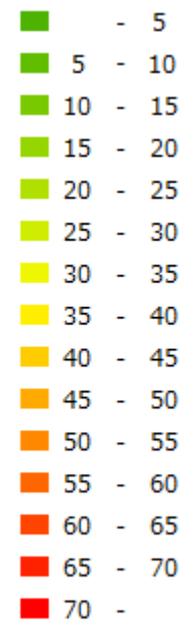


図 3-19 旧市区町村での窒素収支(化学肥料窒素量－収穫物による窒素持出量)

耕地面積 (km<sup>2</sup>)  
(2000 年)



耕地面積の変化 (km<sup>2</sup>)  
(2000→2010 年)

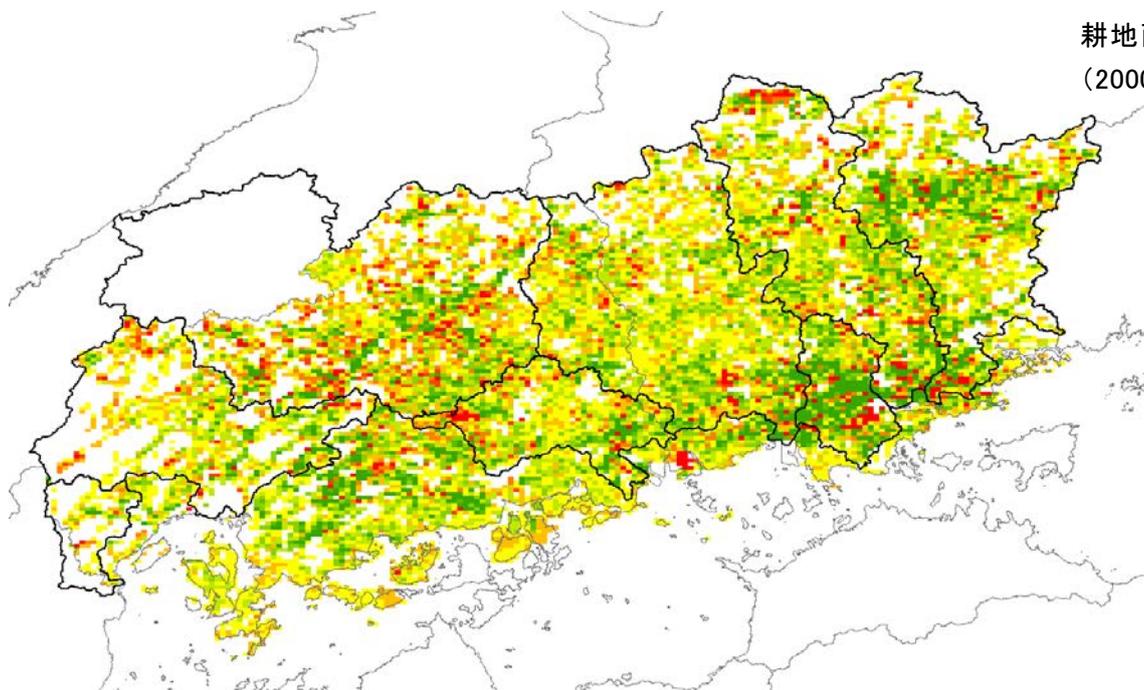
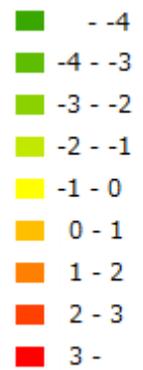


図 3-20 1km メッシュでの耕地面積

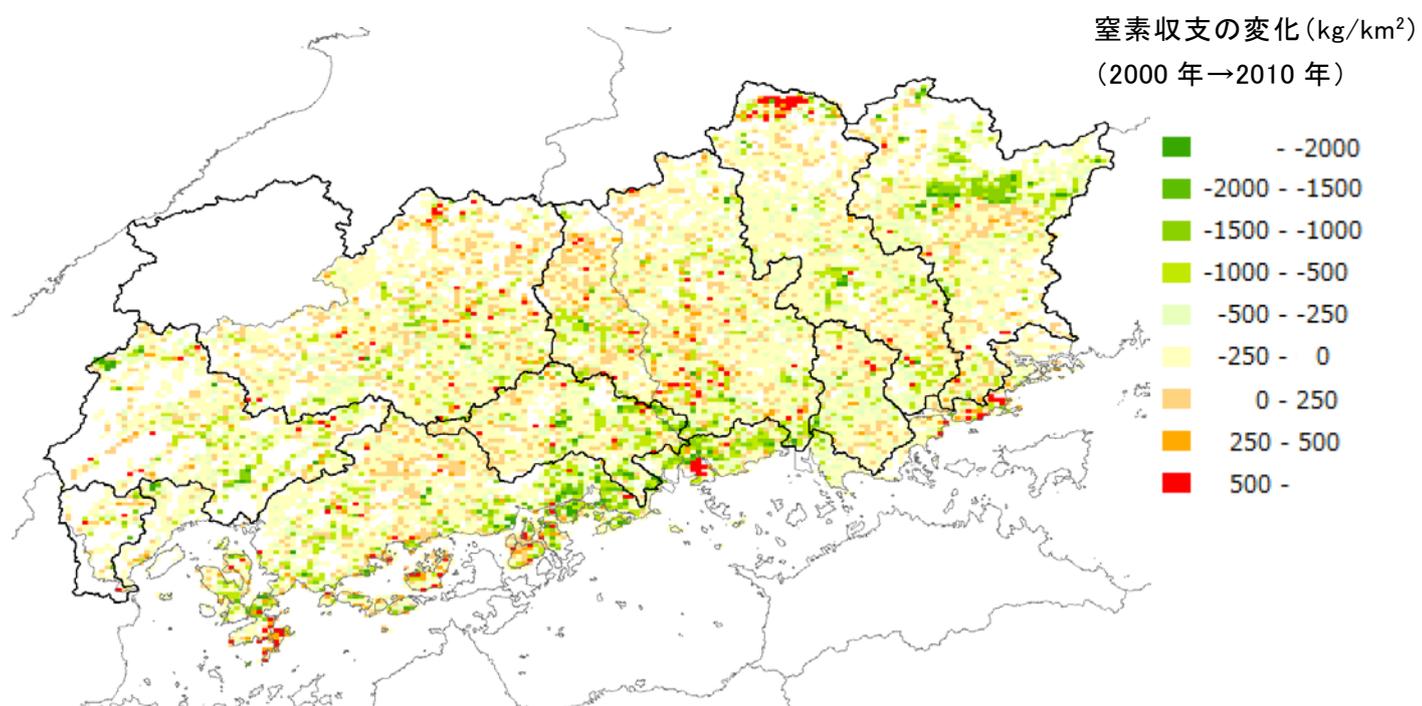
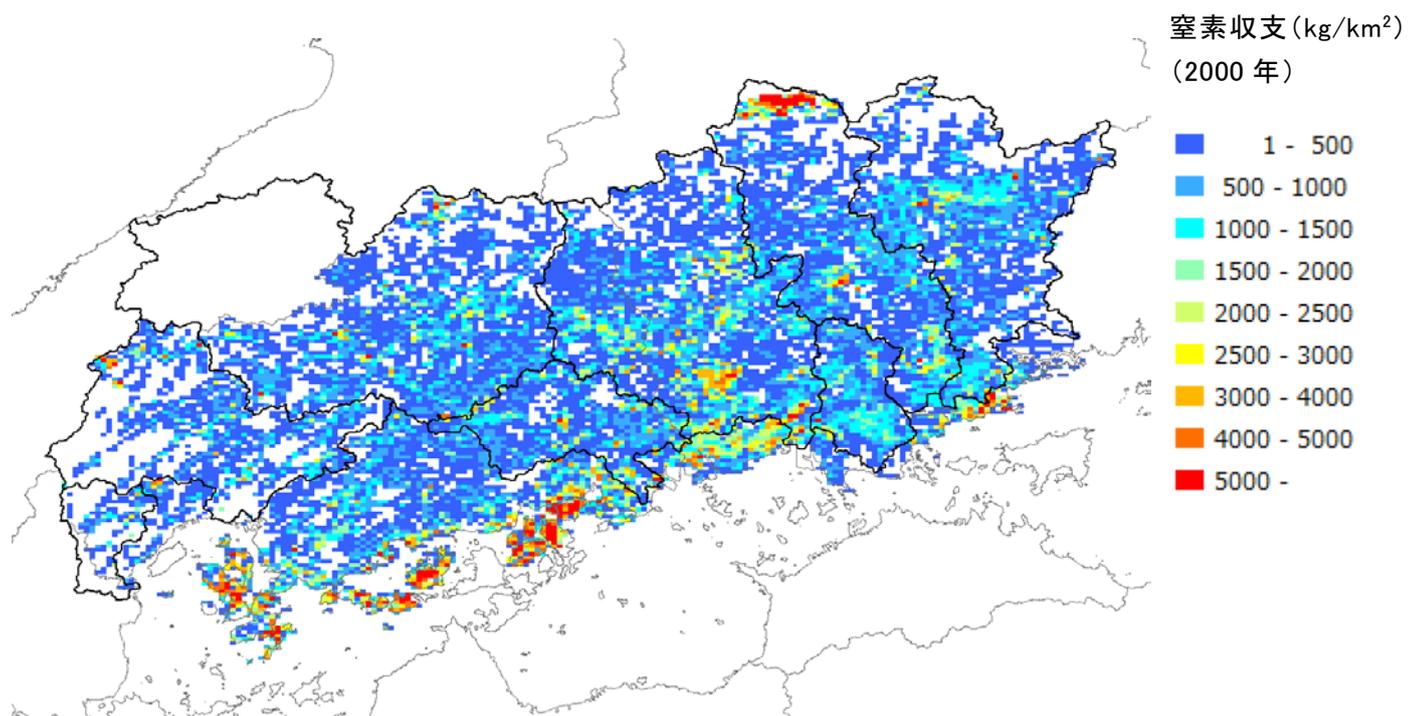


図 3-21 1km メッシュでの窒素収支(化学肥料窒素量－収穫物による持出窒素量)

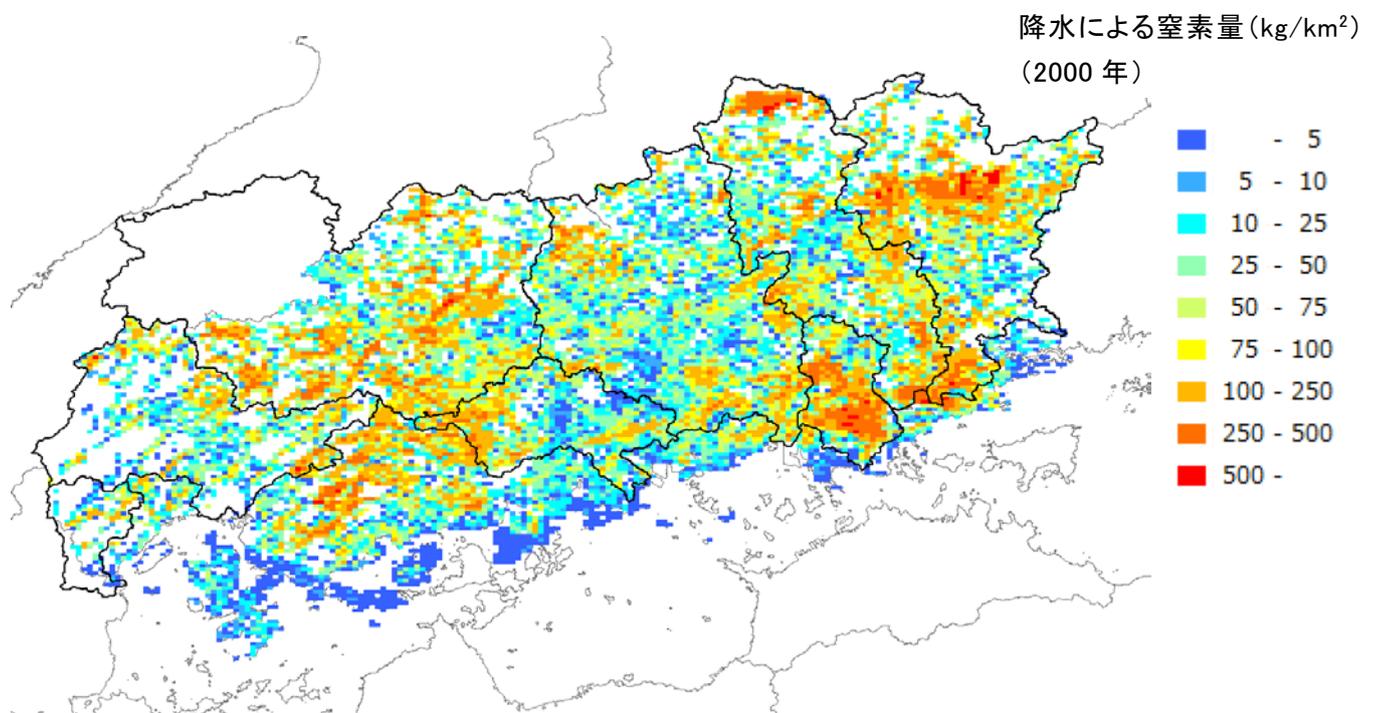
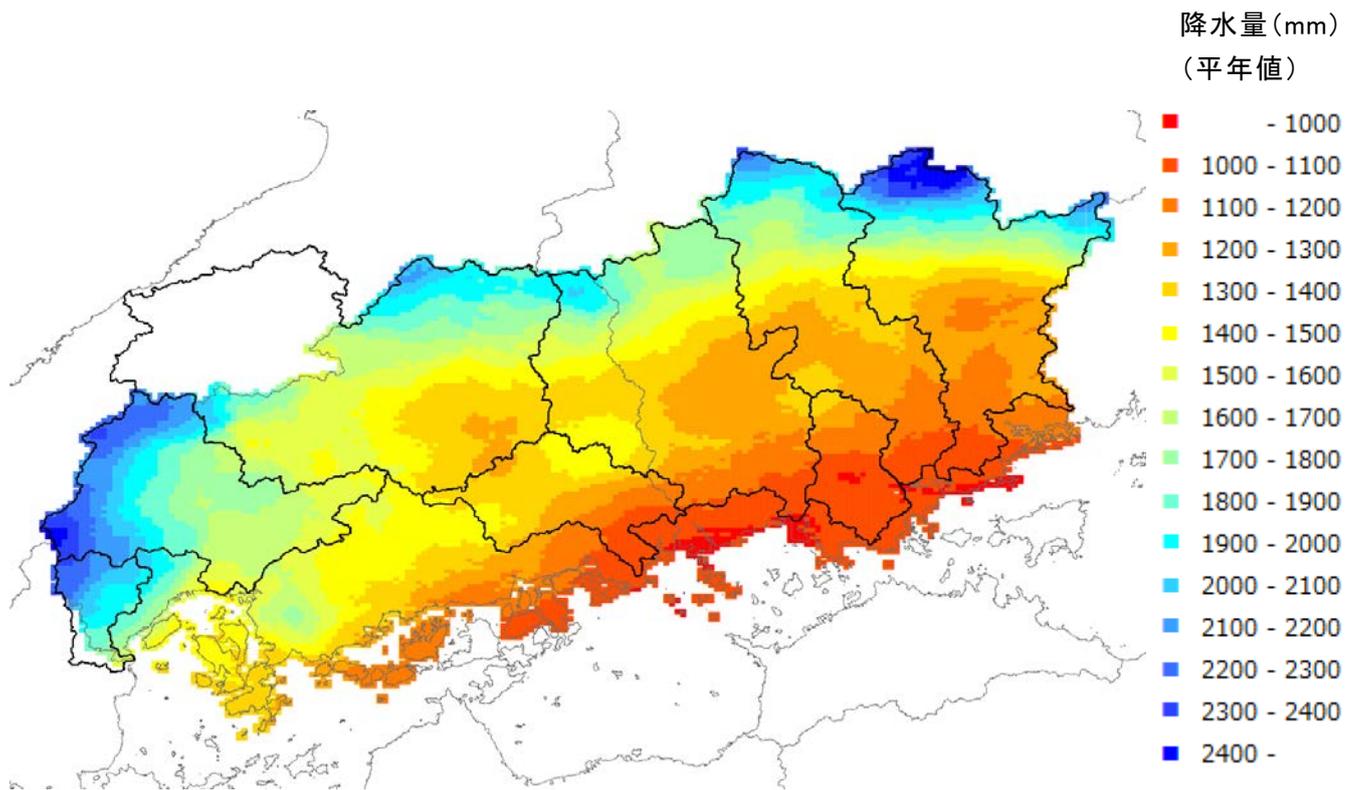


図 3-22 降水量および耕地への降水による窒素量

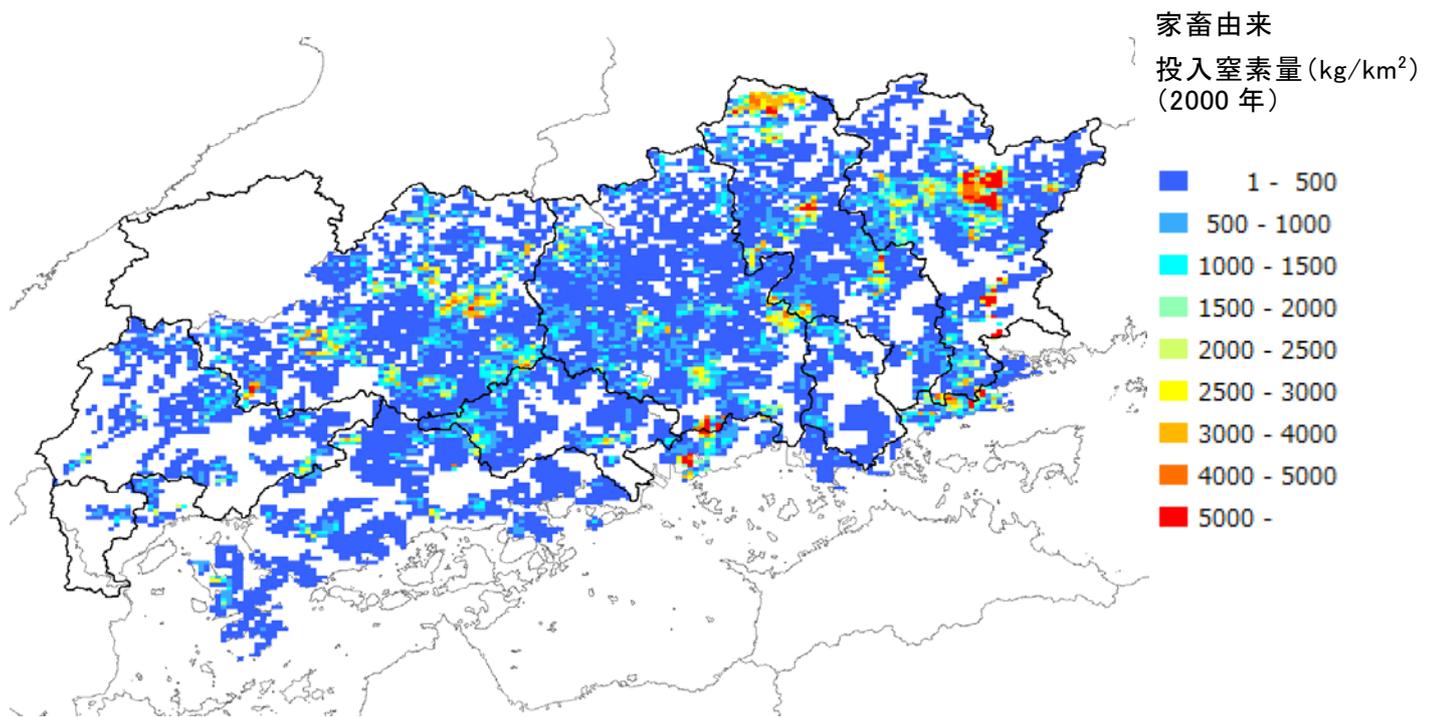


図 3-23 1km メッシュでの家畜由来投入窒素量

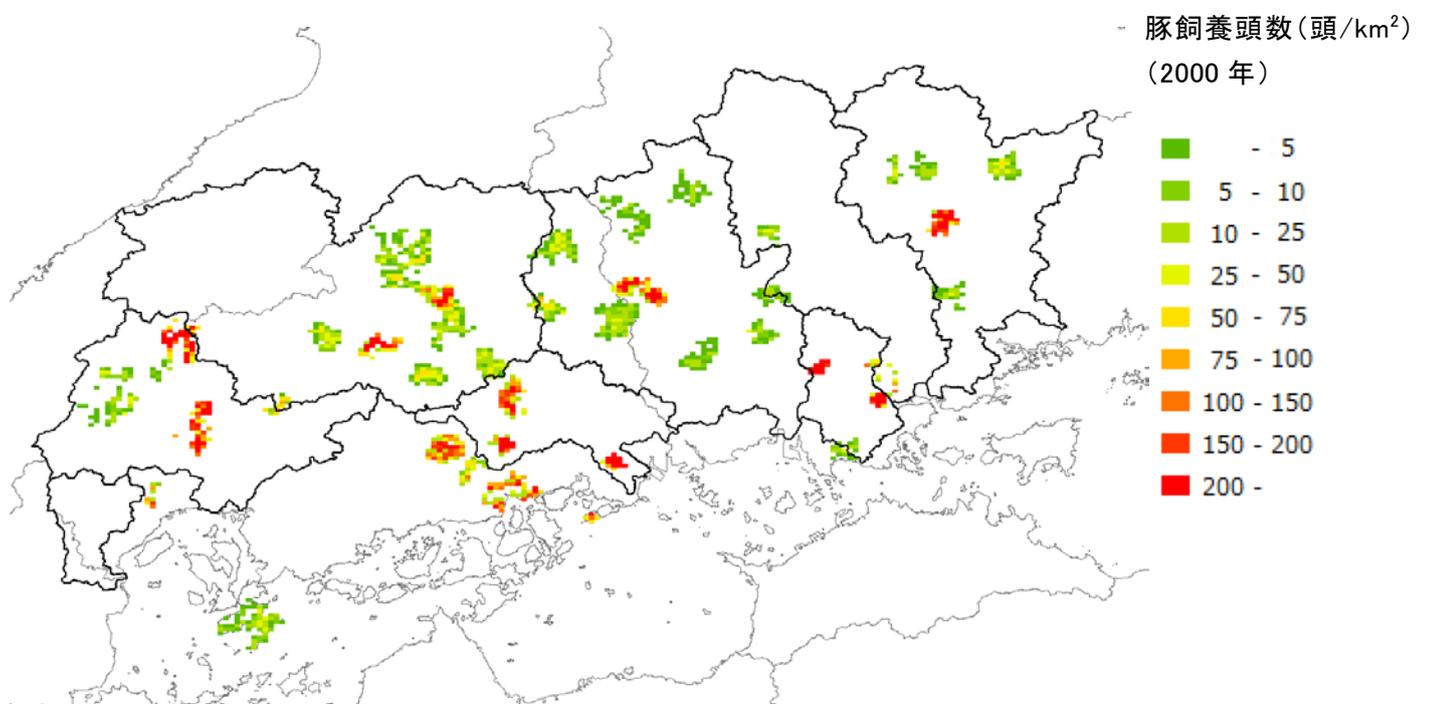


図 3-24 1km メッシュでの豚飼養頭数

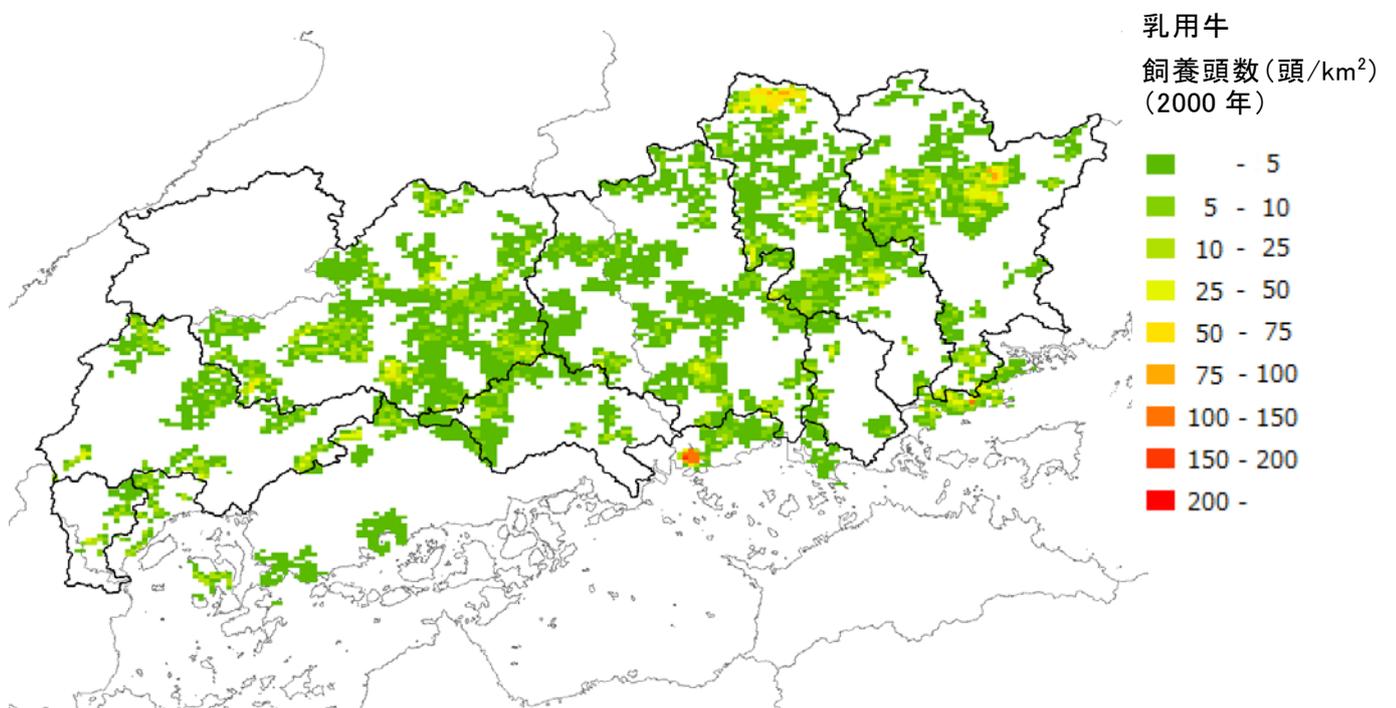
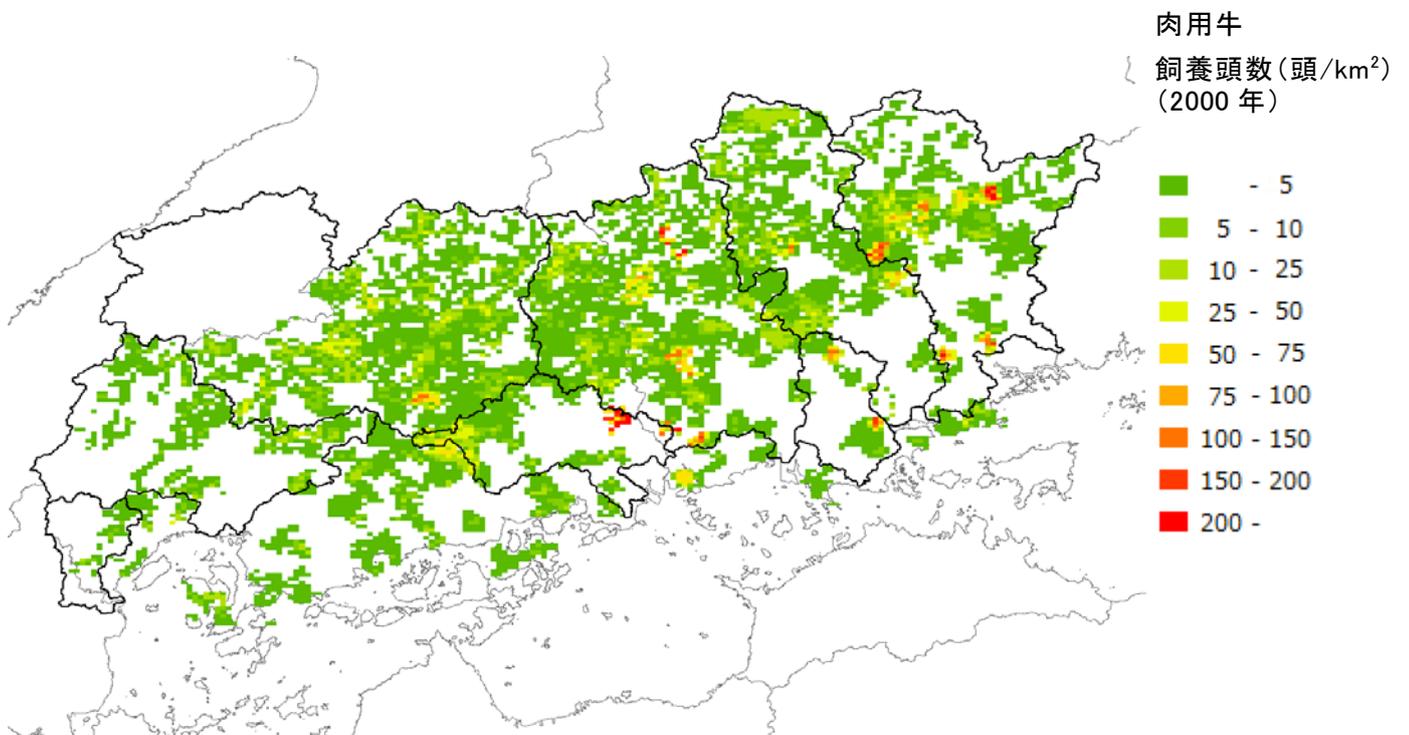


図 3-25 1km メッシュでの肉用牛・乳用牛飼養頭数

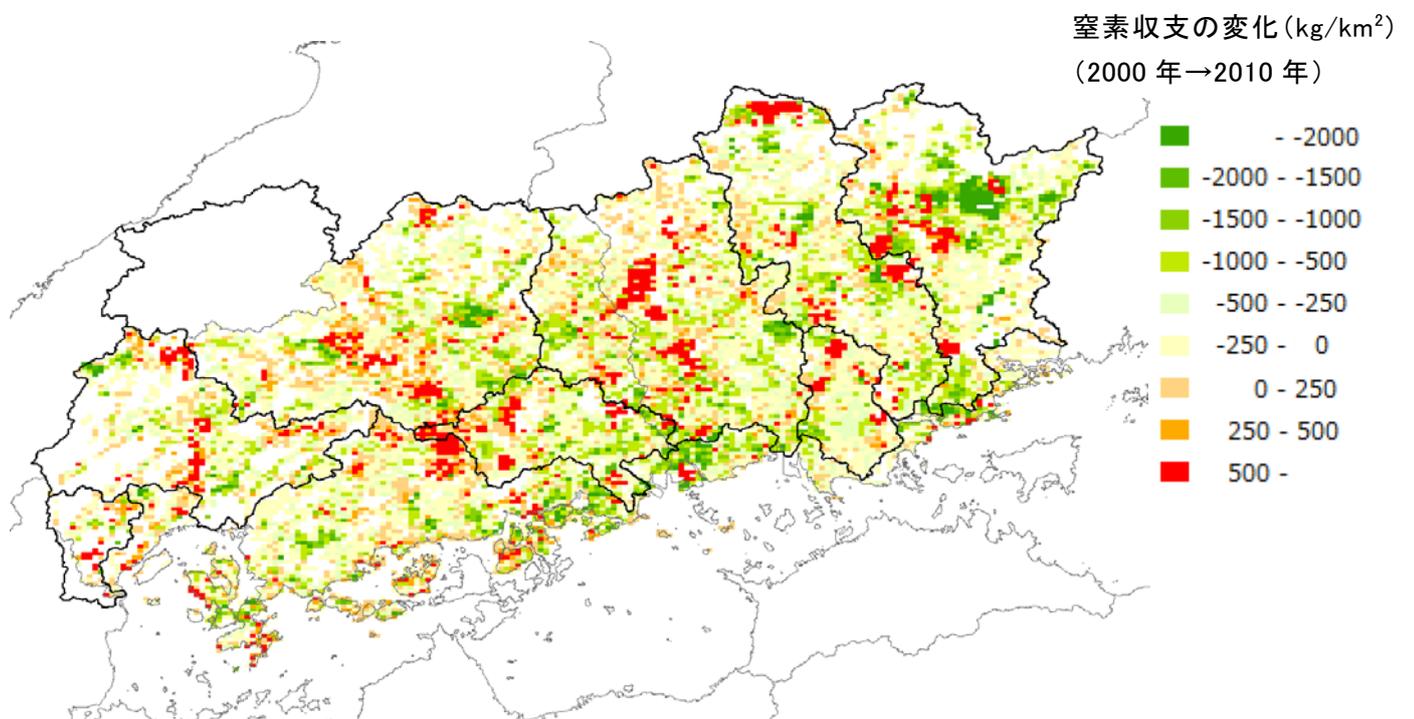
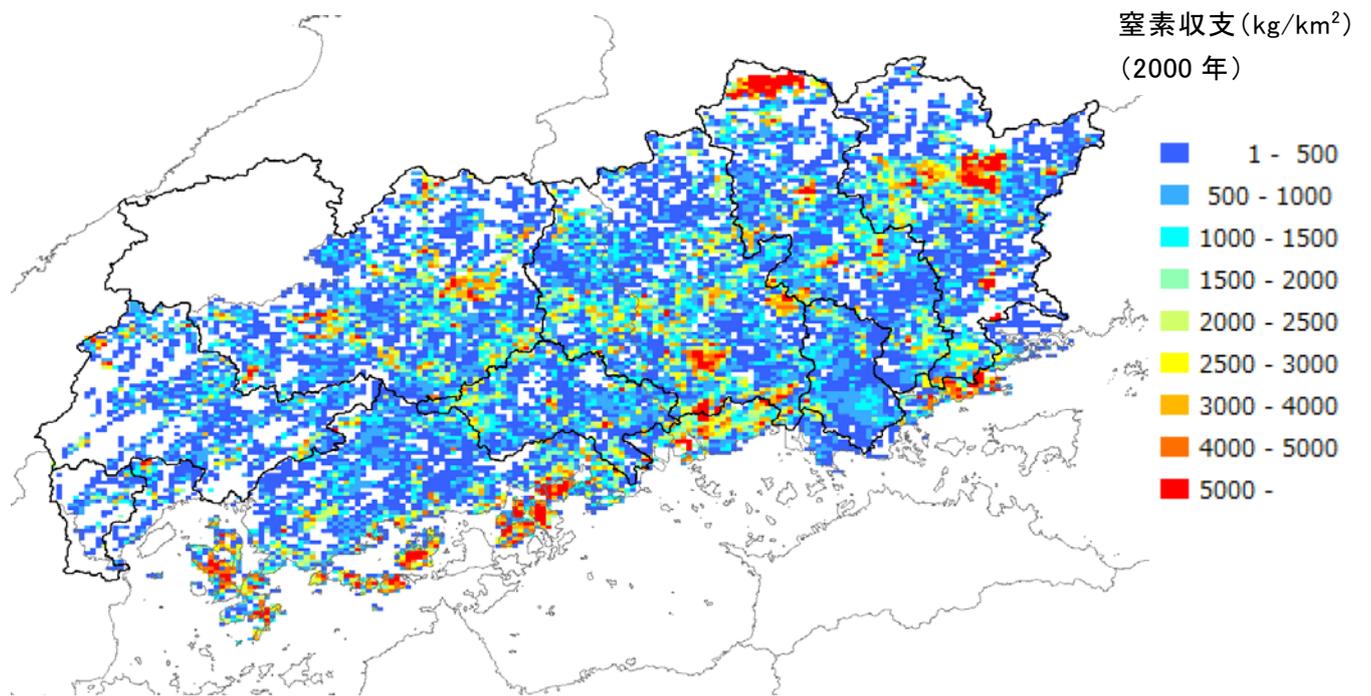


図 3-26 1km メッシュでの窒素収支 (畜産由来投入窒素量等を含む)

表 3-4 河川流域での窒素投入量・収支の変化

項目		単位	太田川	芦田川	高梁川	旭川	吉井川	児島湖
流域面積		km <sup>2</sup>	1,710	860	2,670	1,810	2,110	544
水田面積	2000年	ha	3,350	4,424	9,657	10,024	14,612	8,975
畑地面積	2000年	ha	462	497	2,562	2,069	1,588	286
耕地面積	2000年	ha	3,813	4,921	12,219	12,093	16,199	9,261
流域の耕地割合	2000年	%	2.2	5.7	4.6	6.7	7.7	17.0
耕地の水田比率	2000年	%	87.9	89.9	79.0	82.9	90.2	96.9
水田面積増減	2010/2000年	%	84.8	86.7	82.2	86.8	87.5	89.9
畑地面積増減	2010/2000年	%	81.9	79.5	80.5	89.2	81.1	72.8
耕地面積増減	2010/2000年	%	84.5	86.0	81.8	87.2	86.9	89.3
耕地の水田比率増減	2010-2000年	%	0.4	0.8	0.3	-0.4	0.7	0.6
乳用牛	2000年	頭	1,995	1,076	4,564	8,205	8,647	1,073
肉用牛	2000年	頭	726	2,222	9,712	4,334	12,479	221
豚	2000年	頭	2,976	833	4,839	2,237	3,375	395
家畜由来窒素量	2000年	t	189	210	917	799	1,337	84
流域面積あたり家畜由来窒素量	2000年	kg/km <sup>2</sup>	110	244	344	442	634	154
耕地面積あたり家畜由来窒素量	2000年	kg/ha	50	43	75	66	83	9
降水量	平年値	mm	1,870	1,284	1,412	1,473	1,537	1,098
降水窒素量(耕地分)	2000年	t	48	46	118	121	159	70
水田化学肥料窒素量	2000年	t	776	930	1,892	1,581	2,083	1,106
畑地化学肥料窒素量	2000年	t	350	405	1,669	1,099	649	151
耕地化学肥料窒素量	2000年	t	1,126	1,335	3,560	2,680	2,733	1,257
脱窒量	2000年	t	78	99	261	254	327	180
水田窒素収支(化肥-収穫)	2000年	t	168	201	409	342	450	239
畑地窒素収支(化肥-収穫)	2000年	t	285	320	1,262	793	433	110
耕地窒素収支(化肥-収穫)	2000年	t	453	521	1,671	1,135	883	349
耕地窒素収支(家畜分等含む)	2000年	t	612	678	2,445	1,802	2,052	324
水田窒素収支(化肥-収穫)	2010/2000年	%	75.8	74.3	75.2	77.9	86.2	79.5
畑地窒素収支(化肥-収穫)	2010/2000年	%	48.5	55.5	84.9	85.9	72.6	73.2
耕地窒素収支(化肥-収穫)	2010/2000年	%	58.6	62.7	82.5	83.4	79.5	77.5

### 3.4.5 窒素投入と収支

対象地域の農地の状況は、耕地面積は全体としては減少しているが、旧市区町村単位では一部で増加している（図 3-17）。水稻と畑作物では窒素収支の差が大きいため、水稻の作付割合は農地面積あたりの窒素収支の目安となる。水稻の作付割合は岡山県が全体的に増加傾向となっており、地域的な偏りが見られないのに対して、広島県は全体的に減少傾向となっており、作付割合の減少が大きい地域は県南部にまとまっており、両県での地目間の変化は対照的になっている（図 3-18）。化学肥料窒素量と収穫物による窒素持出量による窒素収支（図 3-19）では、作付作物の比率の違いが影響するが、全体としては作付面積の影響を強く受けた分布図となった。2000 年から 2010 年の窒素収支の変化を見ると収支が増加している旧市区町村では、両県ともに野菜類の面積の増加が要因となっており、多くのところが多い。各作物の窒素投入量と窒素収支とで、作物間の大小関係が大きく変わらないため、窒素投入量もかなり類似した分布となった。

1km メッシュでの耕地面積（図 3-20）は、旧市区町村での耕地面積（図 3-17）と異なり、耕地面積の大きいメッシュが筋状に連なり、耕地が河川を中心にまとまっている状況を見ることができ、耕地面積の変化は増減が入り交じっていることがわかる。また、1km メッシュでの窒素収支についてメッシュでの分布（図 3-21）を見るとスポット的に収支や変化の大きな地域を見ることができる。

降水量（図 3-22）は、瀬戸内海沿岸部では 1,000mm 前後に対して北部の中国山系近くでは 2,000mm を超える。降水による窒素量は耕地へ直接降った分のみを算出しているが、実際にはため池やダムによって貯留されている降水も農業で利用されるため、より大きな影響があると考えられる。

家畜由来の投入窒素量は畜産の盛んな岡山県北東部の津山地域や北部の蒜山地域、南西部の笠岡干拓地域、広島県の県北部の庄原市北広島市で高くなっている。畜種別にみると豚は生産経営体が少なく、飼養頭数の多い法人経営体もあるが 1 頭あたりの窒素量が牛の 1 割程度であるために影響は小さい。両県とも肉用牛・乳用牛の経営体は県全域に広がっており、受入先としての農地が必要となっている（図 3-23,24,25）。脱窒も含めた窒素収支（図 3-26）を見ると飼養頭数の多い地域を中心に収支の高い地域が拡大しており、環境負荷のリスクが高くなっている。ただし、家畜のふん尿処理を旧市区町村内に割り当てていること、堆肥受入に対して肥料の削減を考慮していないことから、実際よりも過大な負荷量として見積もられていると考えられる。

また、メッシュ化を行うことで流域で区分した数値の集計が容易になる。表 3-4 に 5 本の一級河川と児島湖流域で集計した農地、家畜、化学肥料窒素量、窒素収支等を示す。児

島湖流域では特に水田比率が高いことや旭川流域のみが水田比率が10年間で減少していること、太田川、芦田川流域では畑地の窒素収支の減少率が高い等、空間分布と合わせて見ることで流域の特徴となる情報が得られる。

この窒素収支は発生負荷原単位に相当するため、排出原単位を代替するには排出率の推定がさらに必要となるが、窒素負荷量を評価する指標として、特に作物によって施肥量の差が大きい畑作物の作付の相違を一定程度反映でき、地域性などの比較に有効と考えられた。

### 3.5 まとめ

本章では、行政区域で整理された農林業センサスの農地面積のデータを元に、GISを用いて単位流域や3次メッシュの面積に変換して、農地の空間分布や負荷量を可視化するとともに、その経年的変化を検討した。

まず国土数値情報の土地利用細分メッシュの農地データを農林業センサスの農地面積との比較により評価し、その集計面積の誤差が大きいことを検証した。信頼性の高い農林業センサスの農地面積データと空間解像度の高い土地利用細分メッシュデータの長所を生かして、GISを活用して単位流域や3次メッシュへと変換する手法を提示した。

この手法を適用し、太田川および芦田川流域において単位流域で田・畑の地目別に1970年から2000年にかけての農地面積の変化を可視化し、太田川と芦田川流域で地目による面積の減少傾向の違いと流域内での地目間の変化の相違を明らかにした。また、芦田川流域で原単位法を適用して農地からの排出負荷量の経年変化を比較し、流域内における窒素、リンでの減少傾向の違いを明らかにし、流域の特徴を把握するのに有効であることを示した。

原単位法で問題となる作付実態を反映させる方法として、化学肥料窒素量、堆肥を想定した家畜由来窒素量、降水窒素量を窒素投入量とし、収穫物による持出窒素量と脱窒による窒素収奪量を差し引いた窒素収支による環境負荷の評価方法を検討した。

広島県、岡山県を対象地域として、旧市区町村単位で2000年から2010年にかけて類別作付面積に基づく窒素収支による農地の窒素負荷量を算出した結果、田、畑の地目間の収支変化の地域的な偏りが明らかになるとともに、GISを用いてメッシュ化することで、単位流域とは異なる形でスポット的な変化を捉えることができた。家畜由来の窒素量は地域に偏りがあり、特に畜産の盛んな地域では窒素収支への影響が大きい。また流域単位で集計することによって、農地からの排出負荷について流域の特徴が把握できた。

今後の課題として、土地利用の空間情報としては細分メッシュ土地利用データでは主と  
ならない農地の分布情報が失われてしまうことから、他の調査データの土地利用データを  
活用することがあげられる。例えば、環境省生物多様性センターが公開している自然環境  
保全基礎調査植生調査の植生調査データは1973年以降、7回の調査が継続的に実施され、  
GISデータも提供されていることから、データ統合によって農地の空間分布情報の精度向  
上が期待できる。

また、使用したデータは印刷物として公開されているデータを含んでいる。今後新たに  
公開されるデータは電子化されたオープンデータに置き換わっていくと思われるが、統計  
データのように過去に遡って利用可能なデータの電子化の進展も期待したい。

## 第 4 章 モデルによる環境負荷の評価

### 4.1 背景および目的

陸域からの環境負荷の海域への影響を考える上では、経年変化とともに、年間の季節変動を捉えることも重要である。赤潮は夏場に発生が多く、この時期の富栄養化が問題となるのに対して、近年問題となっている養殖ノリの色落ちは冬季の栄養塩量の不足が問題となっている。また、農業からの環境負荷としては農地周辺の地下水や河川への影響が問題視されている。

本章ではこれまでに構築した流域の GIS データをベースに、物質輸送を考慮したモデルを連動させ、環境負荷の季節変動や地下への浸透水量を評価できるシステムの開発を目的とする。まず前段として、栄養塩の流出を生じさせる水移動を把握するために水収支解析モデルを開発する。次にこのモデルを拡張して原単位法の考え方に基づいた流出負荷を推定するモデルを開発する。

水収支や流出解析を行うモデルには大別して、対象地域を一つの系として時間的な流出過程を解析する集中型モデルと空間的・時間的な流出過程を解析する分布型モデルがあるが、流域内の地形・土地利用・気象等の不均一性を反映させた評価を行うために、分布型モデルを採用する。

朴ら（2003）、山下ら（2006）が取り上げているように、既に同様の目的を持った多種多様な分布型モデル・システムが開発されている。今回のモデル開発では、一級河川の流域全体がカバーできる数千 km<sup>2</sup> 程度までを対象地域とし、空間的・経年的な水収支の概要が把握できる簡易な構造のモデルを目指した。また、使用するデータが容易に入手できるようにオープンデータを活用することとした。

### 4.2 メッシュモデルによる水収支の解析

#### 4.2.1 水収支解析モデルの基本構造

流域の分割は、水の流れを重視して地形情報から小流域に分割する方式と同サイズのメッシュに分割する方式があるが、既存の GIS データの活用が容易である点を重視してメッシュ型とした。メッシュを細分化することで、モデルで使用する異なる境界域を持つデータとの対応関係が改善されるが、データ構築の際の作業量やモデルでの計算時間が増大するため、開発するモデルは面積約 1 km<sup>2</sup> の 3 次メッシュを分割領域の単位とした。

水収支の基本計算式は、周ら（2001）を参考にして式 4-1 とした。

$$\Sigma (\text{降水量} + \text{農業用水量}) = \Sigma (\text{蒸発散量} + \text{流出量} + \text{浸透量}) \quad (\text{式 4-1})$$

まず香川県を対象として、水収支について式 4-1 を変形して浸透量を求める形で予備検討を行った。降水量は気象庁のメッシュ平年値を用い、農業用水量は 6～9 月を灌漑期として水田に対して日灌水量を 14mm とした。蒸発散量はソーンズウェイト法により月別値を求め、流出量は降水量に対する流出係数で求めることとし、洪水流出計算で用いられる流出係数（建設省河川局 1997）を参考に土地利用別の値を設定した（表 4-1）。その結果、図 4-1 のように夏季の瀬戸内海地域は高温小雨であるため、沿岸部や山地部の農業用水量の少ないメッシュで蒸発散量が上回り、水収支式がマイナスとなり、沿岸部では年間を通じて水収支がマイナスとなるメッシュが見られた。これは、土壌が乾燥して蒸発散する水が不足している状況が生じている状態と考えられるため、水収支において土壌の水分条件を考慮した推定手法を検討することとした。

そこで、土壌の水分貯留量が反映できるモデルとして菅原（1979）が提案したタンクモデルを採用することとした。また、3 次メッシュを単位領域とした場合、複数の土地利用を考慮する必要があるため、石岡ら（2004）を参考に、表層の 1 段目を土地利用別とし、地下の 2 段目タンクを共通とする 2 段タンクモデルを設定した。土地利用区分は、有田（2001）の分類を参考に、流出特性・負荷発生特性を考慮した水田、畑地、森林、都市、内水地の 5 区分とした（図 4-2）。

#### 4.2.2 水収支解析モデルの計算手順

モデルにおける各メッシュでの計算は、土地利用別に 1 段目タンクへの入力、出力の算出、2 段目タンクへの入力、出力の算出の順で行う。

1 段目タンクでは、入力には降水量、農業用水量、上流メッシュからの流入量、2 段目タンクからの湧出量で、出力は下流メッシュへの地表流出量、表層流出量、2 段目タンクへの浸透量、蒸発散量である。このうち、流路を含む河川メッシュでは、地表流出量、表層流出量は河川への流出として扱い、その他のメッシュでは下流メッシュへの流出とする。2 段目タンクでは、入力には上流メッシュからの流入量－1 段目タンクへの湧出量、1 段目タンクからの浸透量で、出力は下流メッシュへの地下流出量である。

これらのメッシュでの入出力の計算を日別に上流から下流メッシュの順に行う。メッシュ間の接続は、各メッシュで周囲 8 方向のいずれかを下流メッシュとして設定し、そのメッシュに全て流下するとした。

表 4-1 土地利用別の設定係数

土地利用	流出係数	蒸発散係数
水田	0.70	0.84
畑地	0.52	0.60
森林	0.52	0.80
都市	0.85	0.10
内水地	1.00	0.70

水田の非灌漑期は畑地の係数を適用

表 4-2 開発モデルで使用するデータ

データ項目	データ形式	データ入手先
標高	MEM	数値地図25000 50mメッシュ標高データ(国土地理院)
流路	TXT	国土数値情報 流路(国土交通省)
土地利用	TXT	国土数値情報 土地利用細分メッシュ(国土交通省)
農地・森林面積	XLS	農林業センサス(農林水産省)
降水量、平均気温、日照時間、風速	CSV	アメダスデータ(気象庁)
相対湿度	CSV	地上気象観測所データ(気象庁)
降水量	BIN	レーダーアメダス解析雨量年報(気象庁)
畜産飼養頭数	XLS	農林業センサス都道府県別統計書(農林水産省) 附属CD-ROM
污水处理人口普及率	HTML	污水处理施設普及率(各市町村別)平成15年度末普及状況(岡山県HP)

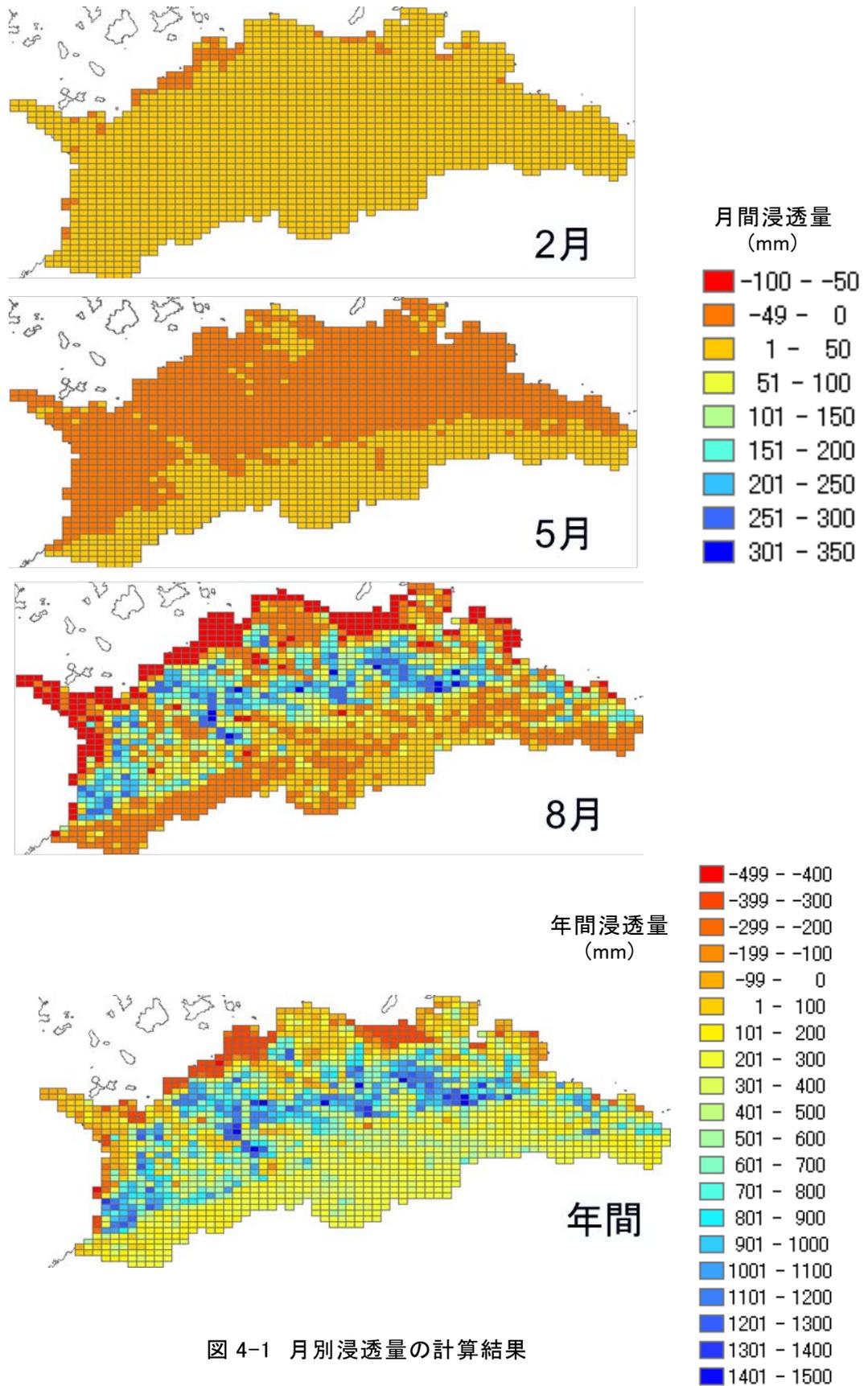


図 4-1 月別浸透量の計算結果

次に各入出量の算出方法を示す。降水量は、各メッシュに対応するアメダス観測所の日降水量を用いる。農業用水量は、水田のみを対象とし、設定した灌漑期間に日用水量を配水する。湧出量は、2 段目タンクに勾配をパラメータとする流入許容量を設定し、それを上回る流入がある場合に余剰分を割り当てる。表層流出量は前述の土地利用別の流出係数、土壌の水分貯留量と透水係数、勾配をパラメータとして算出する。

地表流出量は、土壌の水分貯留量が設定した最大量を上回る場合の余剰分とする。浸透量は、土壌の水分貯留量と浸透係数より算出する。浸透係数は土地利用によらず 0.1 で一定とした。蒸発散量は、ペンマン法で蒸発散位を算出し、近藤（2000）を参考にして土地利用別の補正係数を設定した（表 4-1）。蒸発散位の計算に用いる平均気温は、各メッシュに対応するアメダス観測所とメッシュの標高差で気温減率による補正を行う。

以上のモデルの基本構造と計算手順を実装した Windows PC で動作する水収支算出プログラムを作成した（図 4-3）。

#### 4.2.3 モデルの主要データ

本モデルで使用するデータセットは、各メッシュの属性データと土地利用データ、気象データである。モデルで使用するデータを表 4-2 に示す。

各メッシュの属性データは、3 次メッシュコードで整理し、緯度・経度、行政コード、標高、下流メッシュコード、対応する気象観測所番号、勾配、流路の有無等で構成される。

地形データとして数値地図 25000 の 50m メッシュ標高データを用い、3 次メッシュごとに近似平面を算出して各メッシュの傾斜度と傾斜方向を求めた。メッシュの接続は、算出されたメッシュの傾斜方向を基に決定を試みたが、メッシュ内で谷に向かう傾斜方向が算出され、河川の流下方向とは一致しないメッシュが相当数生じた。そのため、国土数値情報の流路データを用いて、まず流路を含むメッシュの接続関係を決定し、その後に残されたメッシュの接続を行い、計算順を決定した。この手順においてもメッシュ間で傾斜方向の衝突、小ループ等が生じたので個別に修正した。

土地利用データは、国土数値情報の土地利用細分メッシュの 1997 年を水田、畑地、森林（森林、荒地）、都市（建物用地、交通用地、その他の用地）、内水地（内水地、海浜）に整理し、3 次メッシュ毎に集計した。対象流域内の土地利用は表 4-2 に示すように、両流域とも森林割合が高く、都市域の割合は同程度であるが、芦田川流域では農地、特に水田割合が高い。また農地・森林面積として農林業センサスのデータを用いた。

気象データは、アメダスデータから降水量、平均気温、日照時間、風速を用い、地上気象観測所データから相対湿度を用いた。各メッシュとアメダス観測所の対応は、降水量のみの

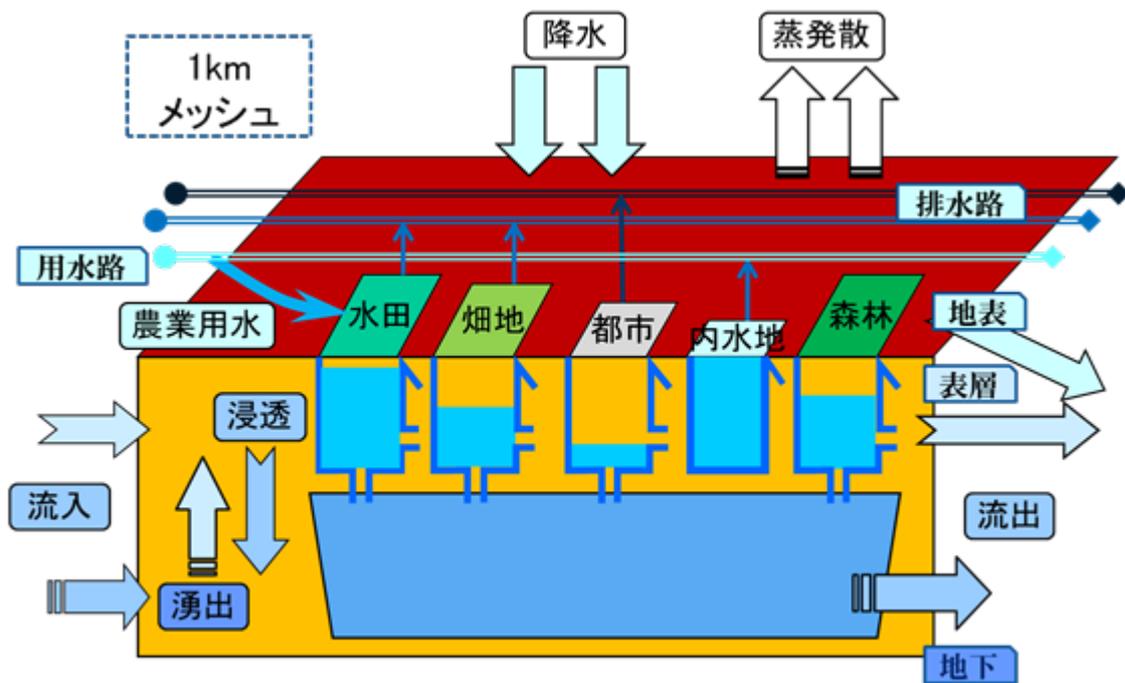


図 4-2 メッシュでの水収支の基本構造

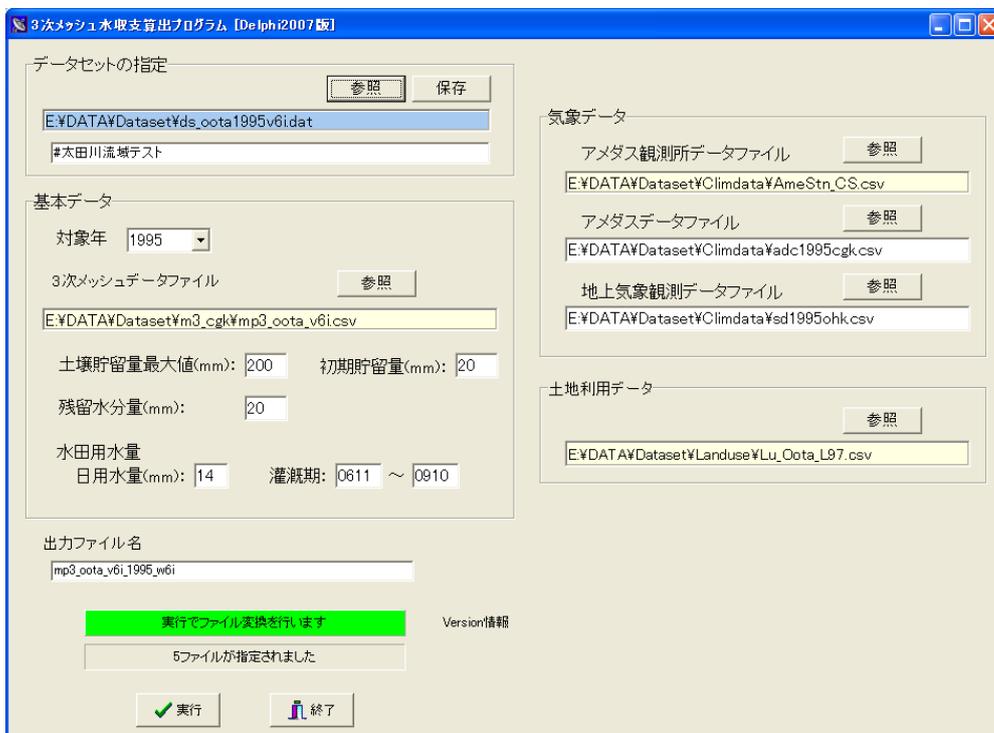


図 4-3 水収支解析モデルのメインフォームと設定パラメータ

観測所があるために降水量と気温等を分け、GIS ソフト ArcGIS (ESRI 社) を用いて観測地点に対応する領域をティーセン法によって決定し、各領域内のメッシュに観測所番号を対応付けた。

太田川流域は、4 要素観測所が広島、加計、佐伯、可部、東広島の 4 カ所で、降水量は八幡、王泊、志和が加わる。芦田川流域は、4 要素観測所が福山、世羅、油木、笠岡の 4 カ所で、降水量は佐屋が加わる。地上気象観測所は、各県で数カ所しかないことから、芦田川流域は福山特別地域気象観測所、太田川流域は広島地方気象台のデータを対応付けた。

#### 4.2.4 水収支解析モデルによる推定

広島県の太田川流域（幹川流路延長 103km、流域 1,710km<sup>2</sup>）および芦田川流域（幹川流路延長 86km、流域面積 860km<sup>2</sup>）を対象にして水収支の算出を試みた。

1992～1997 年の太田川流域および芦田川流域の水収支算出結果を表 4-3、4-4 に示す。河川流量は、国土交通省の水文水質データベースより、太田川は矢口第 1 観測所、芦田川は山手観測所の日別流量値を整理した。

対象期間の年降水量の平均は、太田川流域が芦田川流域の約 1.5 倍で、流域の総降水量では太田川が芦田川の約 3 倍であった。降水量の変動は、対象期間の平均降水量に対して約 0.6～1.45 倍とかなり大きかった。

蒸発散量はペンマン蒸発散位に土地利用別の蒸発散係数を乗じた値で、実蒸発散量は土壌の水分貯留量による制約を受けた場合の算出値である。蒸発散量は芦田川流域が太田川流域をやや上回ったが、実蒸発散量では土壌の乾燥状態の影響を強く受けて太田川流域を下回った。両流域とも実蒸発散量の変動は約±60mm で降水量に比べてかなり小さい。図 4-4 に平均的な降水量であった 1995 年の分布を示す。

浸透量の最も大きい区分のメッシュは、湧水量の多いメッシュと重なっており、再浸透する量の影響が出ていると考えられる（図 4-5、4-6）。太田川下流のデルタ地帯や芦田川中下流の平坦地に浸透量・湧水量の多いメッシュがまとまっている他、上流域においても河川メッシュへの集中が見られる。また、太田川流域の西側で浸透量の大きい領域が広がっているが、これは八幡のアメダス観測所に対応するメッシュとほぼ同じであり、ティーセン分割の弊害と考えられる。

降水量に対する水収支をみると、太田川流域では河川流出量が河川流量と比較してやや少ないという算出結果となった。実蒸発散量の推定値の変動は小さく、影響が小さいので、降水量が少なく見積もられている可能性もある。芦田川流域では、降水量の少ない年で算出した河川流出量と河川流量の差が大きい。芦田川の流量は、太田川よりかなり少なく、河川か

らの取水が影響している可能性がある。また、1994、1996年では蒸発散量と流出量の合計が降水量を上回った。これは、各メッシュで式4-1を基にした水収支計算を行っているが、降水量で用水量を供給しきれていないという結果であり、取水の問題と合わせて今後検討する必要がある。

降水量と河川の流出量・流量の月単位での比較を図4-7に示す。芦田川で河川流量が低い時期に流出量が追従できていないが、ダム・ため池等での貯留の影響が考えられる。太田川流域での1994、1996年1月の河川流出量が低くなっているのは、土壌水分の初期貯留量の設定値が小さいことによる。

### 4.3 原単位を用いた環境負荷モデルによる推定

#### 4.3.1 流出負荷推定モデルの基本構造

全窒素、全リン負荷量の推定に対応するため、水収支解析モデルを拡張した流出負荷推定モデルを作成した。対象とする環境負荷項目は、面源系、生活系、畜産系である。産業系に対応していないのは、事業所からの排出負荷量が一般的に公開されておらず、データ整備が困難なためである。

面源系負荷は、1段目タンクからの流出量（地表流出量＋表層流出量＋浸透量）に応じた排出負荷が発生するものとして、地目別に基準負荷量を設定した。水田は灌漑期と非灌漑期を分けた。生活系負荷は原単位法に基づいて人口と下水道整備率に応じた除去率で、畜産系負荷は同様に牛・豚の頭数と除去率に応じてそれぞれ負荷量を発生させ、排水路経由で毎日排出する設定とした。

また水収支の改善として、農業用水量は日用水量を固定とせず、水田の地表層に湛水深を設定し、不足分を供給する方式に変更した（図4-8）。

#### 4.3.2 レーダー・アメダス解析雨量データの利用

1kmメッシュで降水量データを扱う手法として、アメダス観測所によるティーセン分割によって各メッシュに対応する観測所を定める方法は、領域境界で降水量の差が顕著になるという問題があり、水収支の算出にも影響する。また、降水量は局所性があり、約17kmメッシュで配置されているアメダス雨量計でも空間分布は十分に把握できないことがある。気温の場合には、標高による補正を加えて観測点のデータを補間する手法が用いられるが、降水量では微地形の影響などもあり、空間的な変動が大きい。

そこで、空間解像度の高いレーダー・アメダス解析雨量データの利用を検討した。1988

年4月以降のデータが提供されており、当初はメッシュサイズが5kmであったが、2001年4月からは2.5km、2006年1月からは1kmとなっている。データは、独自フォーマットで提供されているため、2005年までのデータ形式に対応したデータ変換ツールを独自に作成した。

一例として吉井川流域での適用結果を示す(図4-9)。2003年の吉井川流域の平均降水量は、アメダスデータでは1738mm、レーダー・アメダス解析雨量データでは1637mmで、流域降水量はアメダスデータが上回った。アメダス観測値による降水量では、特に山地部で隣接する観測所間の差が大きくなるが、解析雨量データでは観測所間を単に線形補間したような分布ではなく、局所性が現れている。

レーダー・アメダス解析雨量データは、複数のアメダス観測所にまたがる地域を対象とし、1kmメッシュ程度の空間分布で降水量データを利用する場面で精度向上に有効であると判断されたため、解析プログラムにおいて利用できるように拡張を行った(図4-8)。

#### 4.3.3 モデルによる水収支の推定

流出負荷推定モデルによる水収支の推定を岡山県の吉井川流域(幹川流路延長133km、流域面積2110km<sup>2</sup>)、香川県の土器川流域(幹川流路延長33km、流域面積127km<sup>2</sup>)を対象として行った。

2001~2005年の結果を表4-5に示す。モデルは、吉井川流域において河口近くにある御休観測所の河川流量に対して、地下浸透係数、流出係数を調整して流出量の較正を行った。

モデルで推定した河川流出量は、河川流量に対して5年間の平均は96%であったが、84~110%と年次間でばらつきが生じた。河川流量の変動に対しては、概ね追従していたが、ピーク流量には対応しきれっていない(図4-10)。

実蒸発散量は、土壌水分の制約を受けて平均で89%、2005年の小雨年では80%に抑えられた。1段目タンクからの浸透量の分布は、水収支の入力が降水量と農業用水量であるため、水田地帯となる北部の津山盆地と河口付近の岡山平野で浸透量の多いメッシュがまとまっている(図4-11)。浸透量は降水量の13%で比率の年次変動は小さかった。

土器川流域で吉井川流域と同一のパラメータを用いた結果では、流出量は河川流量に対して106%とやや上回り、年次によるばらつきも66~164%とかなり大きかった。蒸発散量は、土壌水分の制約が無い場合に対して84%、小雨年の2002、2005年では76%となり、吉井川流域より強く抑制された。

タンクモデルの導入により、土壌の水分状態を反映させ、蒸発散量を抑えることができ、個々のメッシュでは水収支のバランスが図られた。ただし、水収支としては必要とする用水

量が無条件で供給され、その水源の水量を管理していないため、モデル内で水収支が完結していない。ため池等の農業用水の供給源をモデルに組み込む必要がある。香川県の場合には、流域外から香川用水を経由する用水量が加わっているが、現在のモデルではその対応はできていない。

また、モデルの推定結果は量的にはまだ精度が十分では無く、流域内の空間分布を検討する情報としての利用が適切である。河川流量の応答性の向上には、地表面の浸透能を考慮して降水量を地表流と浸透流に配分する手法や1段目タンクの流出口を2つにしてより早い流出時間を設定できるような構造の変更、日単位より短い時間での算出等の改善方策を検討する必要がある。ただ本モデルは、洪水解析のような短期流出を対象としたものではなく、海域への流入量の季節変動といった月単位程度での負荷量の評価を対象としていること、特別の気象データが必要となること、計算時間が増大することを考慮すると、応答性についての対応は優先度が低いと考えている。

#### 4.3.4 モデルによる窒素・リン負荷量の推定

図 4-12 に吉井川流域の全窒素、全リン濃度の推定例を示す。全窒素、全リン濃度の観測値は、国土交通省の永安橋観測所のデータ、モデルの濃度は河口メッシュでの流出量と負荷量から求めた値である。モデルによる濃度推定値は、観測値と比較して同程度のオーダーに収まっているが、モデルでは流出量が多い場合に濃度が低下しているのに対し、観測値では濃度が高めになっている。モデルでは発生負荷の積み上げのみで、流量増加による洗い出しが反映されていないことが、濃度変動の差に現れていると考えられる。

図 4-13 に窒素およびリン流出負荷量の空間分布の例を示す。農地がまとまっている北部の津山盆地と下流の平野部は、市街地が発展している地域でもあるために生活系の負荷量も加わってくるが、浸透量と類似した分布となった。窒素、リンともに農地からの負荷量の影響が大きいため、相対的に類似の分布となっているが、窒素・リン流出負荷量の比率（図 4-14）で表すと、水田地帯と畑作地帯の差が反映された分布を見ることができる。

## 4.4 まとめ

本章では、これまでに構築した流域の GIS データをベースに、流域内を 1 km メッシュ、日単位で解析する簡易な構造の分布型の水収支モデルを開発し、このモデルを拡張して原単位法に基づき、面源系、生活系、畜産系の窒素、リンの排出負荷量を設定して、河川流量・水質を推定する流出負荷推定モデルを開発した。

水収支については、広島県の太田川流域と芦田川流域で、負荷量の推定を岡山県の吉井川流域、香川県の土器川流域で検討した。モデルの推定結果は量的にはまだ精度が十分では無いが、地下水の涵養状況の推定や栄養塩負荷量に対する土地利用変化の影響の検討など、流域内の分布や季節的な変動を可視化するために活用できると考えられた。

今後の課題としては、使用するデータに関しては、各メッシュにおける気象データ、土地利用面積の推定値の精度向上、モデルに関しては、土壌条件や農業用水等の取水、ダム・ため池での貯留の考慮等、改善を要する点が残されている。また、1kmメッシュの場合には傾斜度の算出やメッシュの接続関係の定義が煩雑であるため、単位流域での解析に変更して、可視化の時点で単位流域からメッシュデータに変換する方法も考えられる。

原単位については、流域内で同一の値としているが、実際には作付作物の相違があるため、3.4.5 で検討した窒素収支に基づくパラメータの設定が有効と考えられる。今後は利用の簡便さとのトレードオフ等も考慮して対応を検討していきたい。

使用したデータの中で解析雨量データは利用場面の多いデータと考えられるが、現在は仕様は公開されているが、独自フォーマットとなっているために利用しづらい。手軽に利用できるようにCSV形式などのより汎用的な形式でのデータ提供が望まれる。

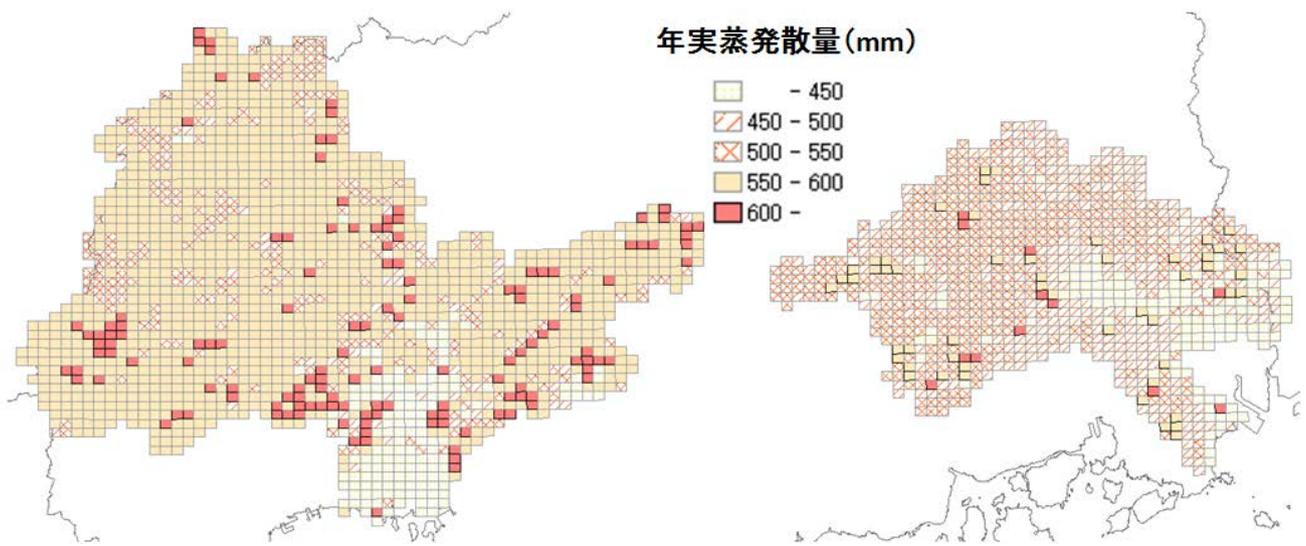


図 4-4 モデルによる実蒸発散量の分布(1995 年)

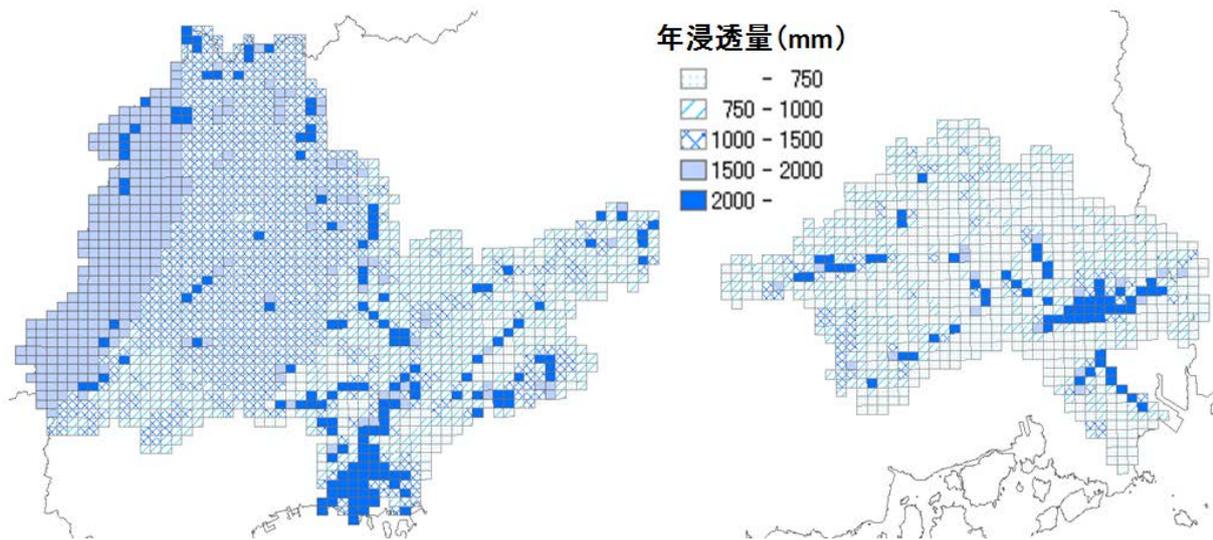


図 4-5 モデルによる 2 段目タンクへの浸透量の分布(1995 年)

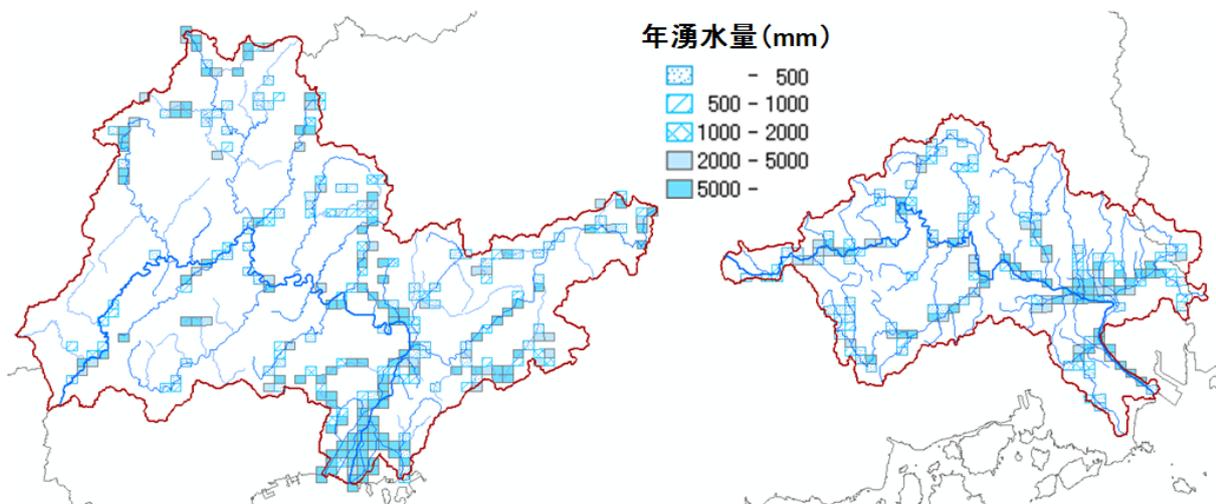


図 4-6 モデルによる 1 段目タンクへの湧出量の分布(1995 年)

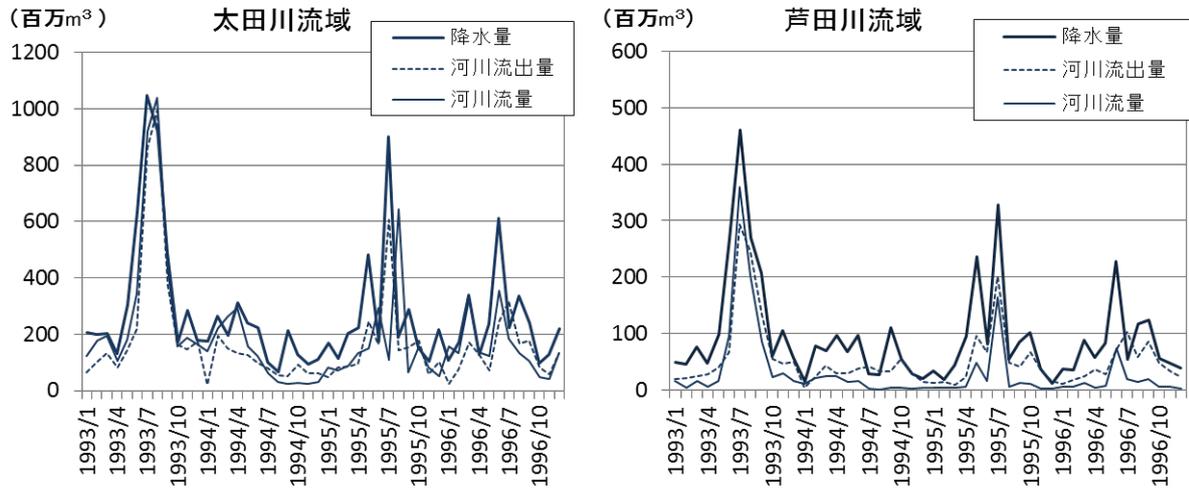


図 4-7 降水量と河川流出量、河川流量の比較(1993~1996年)

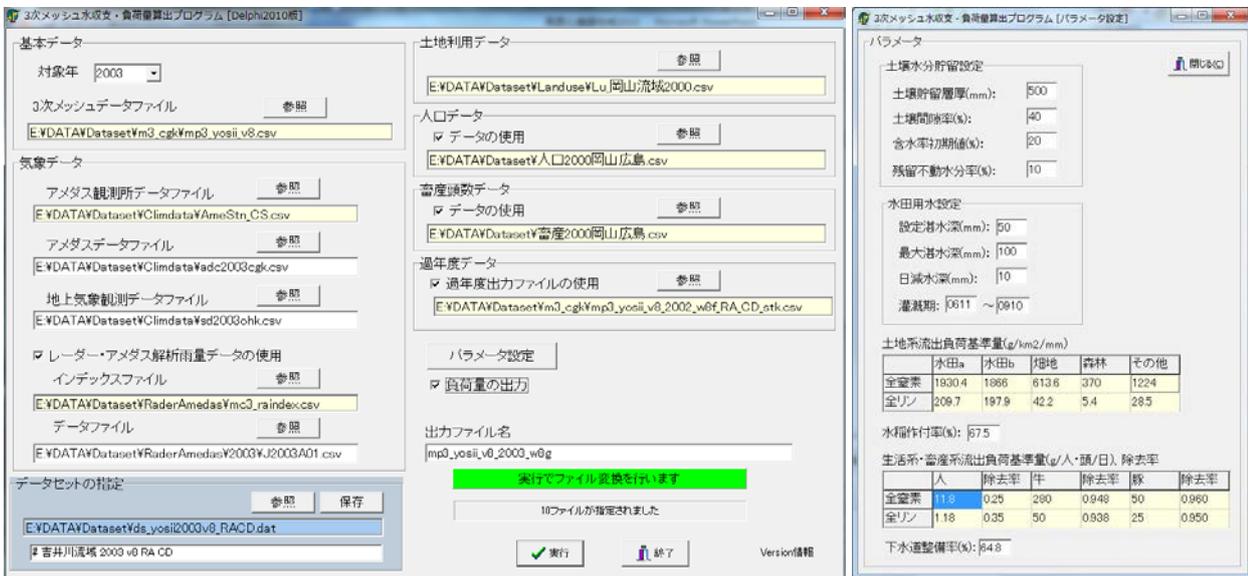


図 4-8 流出負荷推定モデルのデータ設定画面

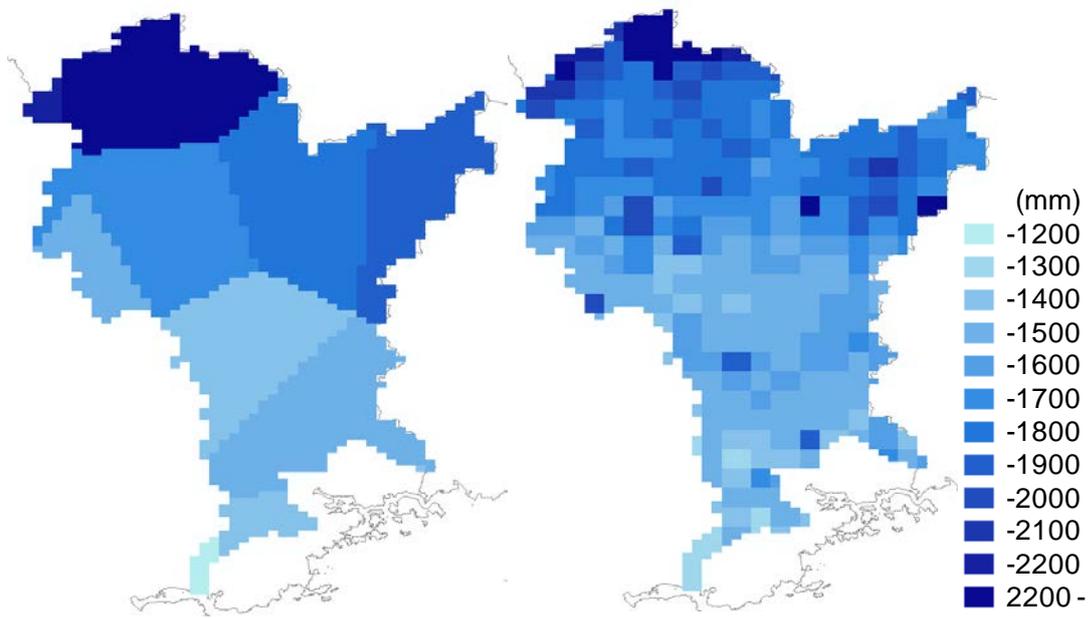


図 4-9 吉井川流域の年間降水量(2003 年)の比較

アメダス観測値(左)、レーダー・アメダス解析雨量データ(右)

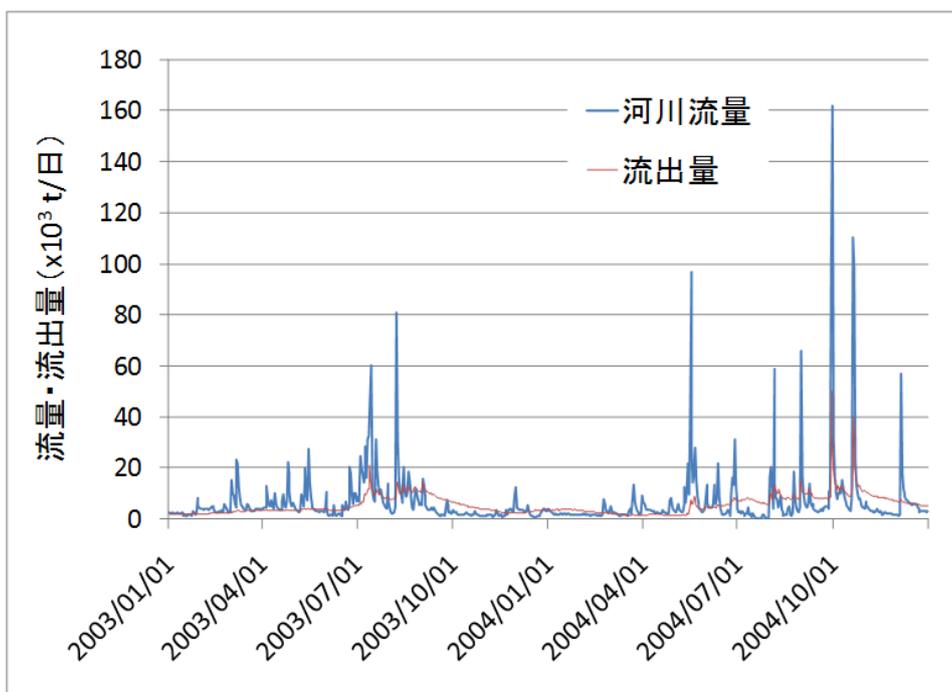


図 4-10 吉井川における河川流量とモデルによる流出量

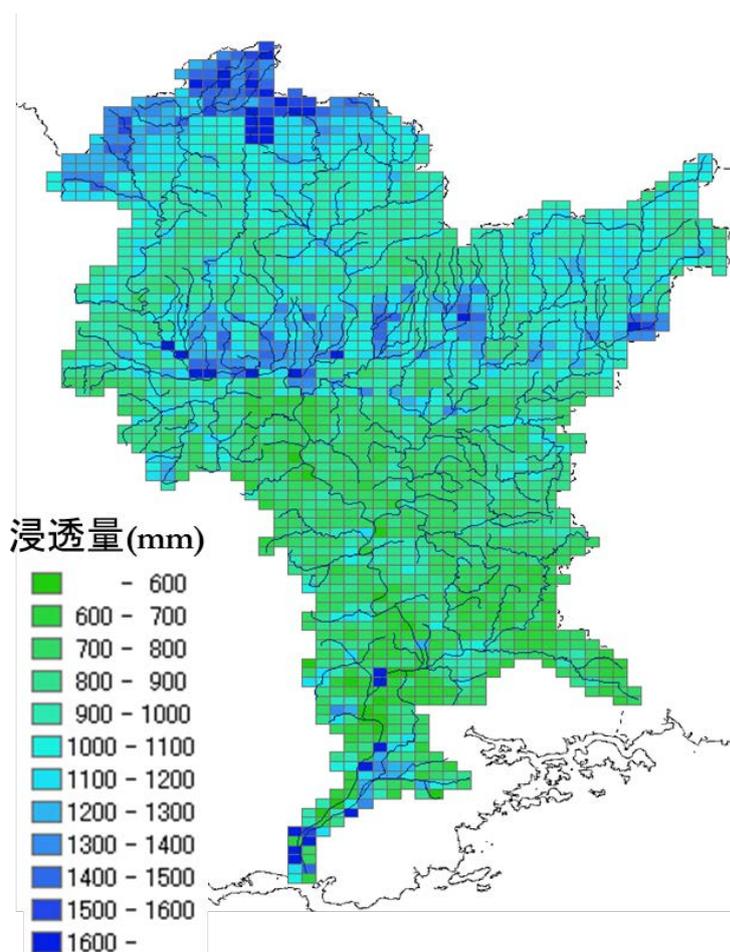


図 4-11 モデルによる浸透量の分布(2003 年)

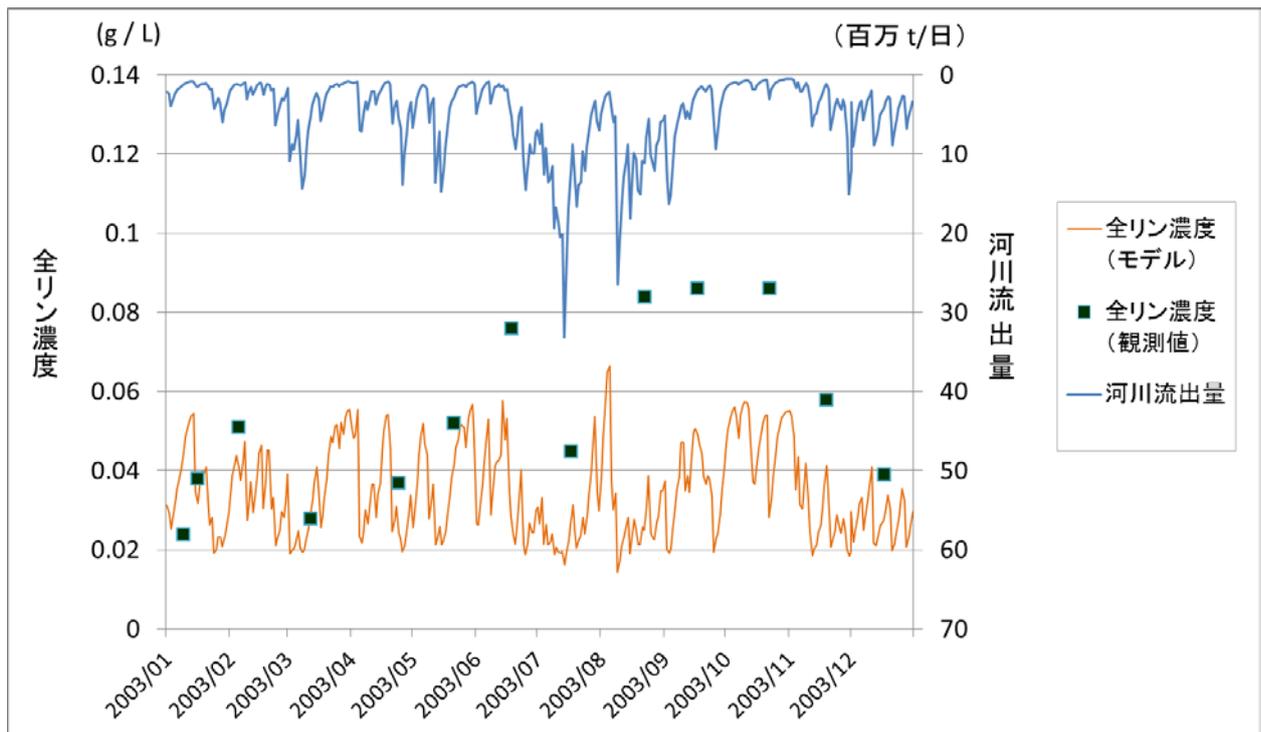
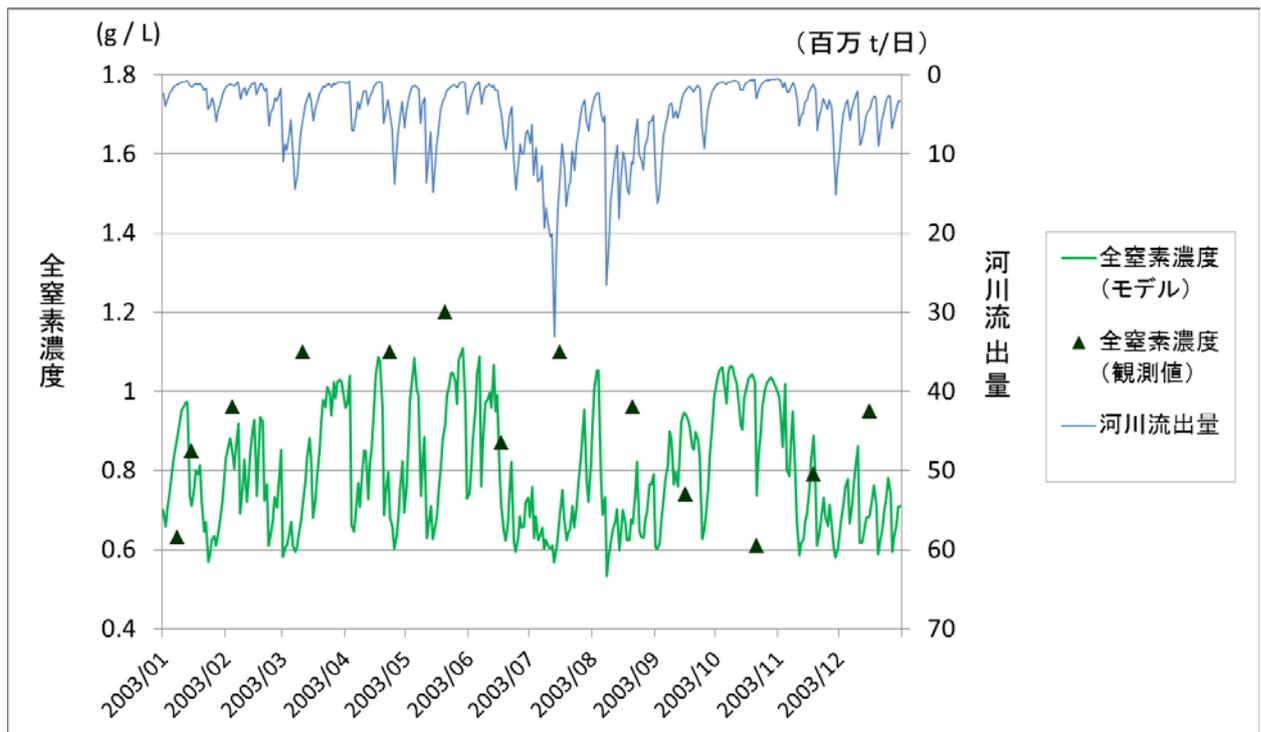


図 4-12 吉井川における河川的全窒素、全リン濃度とモデルによる推定結果

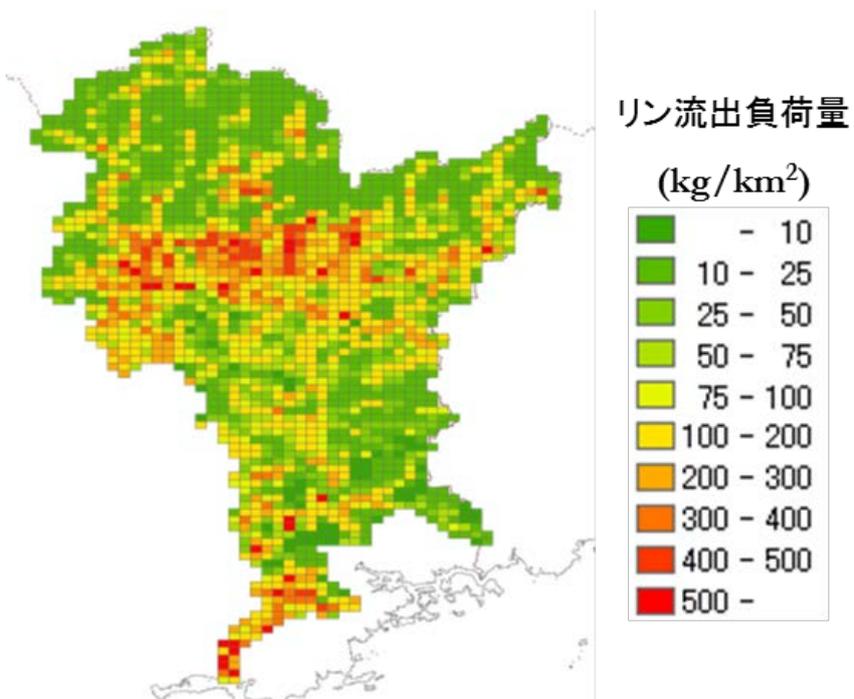
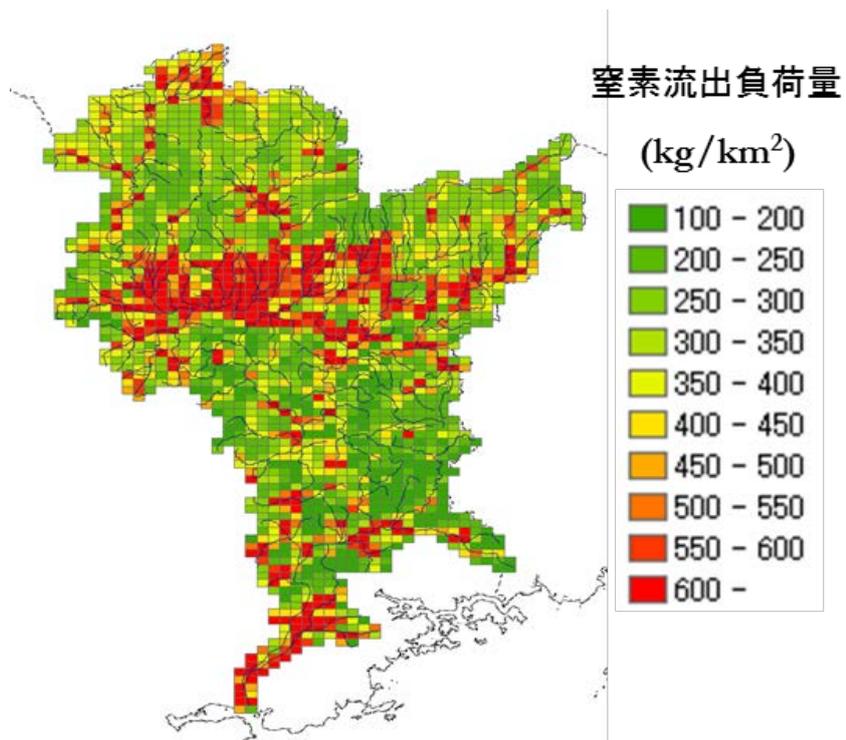


図 4-13 モデルによる窒素およびリン流出負荷量の分布(2003 年)

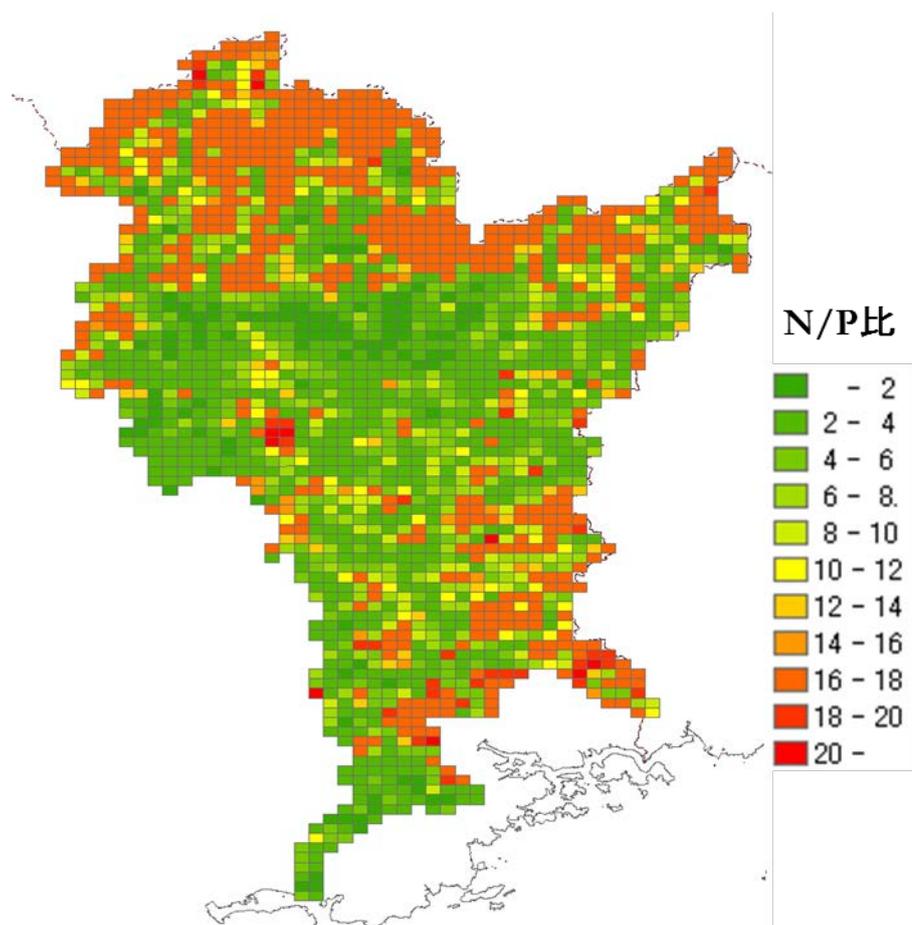


図 4-14 窒素・リン流出負荷量の比率

表 4-3 土地利用の面積割合

土地利用	太田川流域	芦田川流域
水田	0.06	0.15
畑地	0.01	0.04
森林	0.83	0.70
都市	0.08	0.09
内水地	0.02	0.02

表 4-4 太田川流域の年間水収支の推定結果

年	メッシュ平均						降水量比			
	降水量	用水量	蒸発散量	実蒸発散量	浸透量	湧出量	実蒸発散量	海域直接流出量	河川流出量	河川流量
1992	1,609	65	622	540	1,407	1,231	0.34	0.08	0.59	
1993	2,609	65	583	535	2,090	1,882	0.21	0.06	0.72	0.79
1994	1,162	65	727	481	1,021	887	0.41	0.09	0.53	0.62
1995	1,756	65	642	546	1,478	1,297	0.31	0.08	0.61	0.56
1996	1,550	65	641	533	1,372	1,199	0.34	0.08	0.58	0.62
1997	2,409	65	641	565	1,940	1,740	0.23	0.06	0.69	
平均	1,849	65	643	533	1,551	1,373	0.31	0.08	0.62	0.65

表 4-5 芦田川流域の年間水収支の推定結果

年	メッシュ平均						降水量比			
	降水量	用水量	蒸発散量	実蒸発散量	浸透量	湧出量	蒸発散量	海域直接流出量	河川流出量	河川流量
1992	1,195	155	616	492	1,138	1,095	0.40	0.01	0.54	
1993	1,810	155	592	501	1,592	1,553	0.27	0.01	0.58	0.50
1994	717	155	758	428	689	669	0.57	0.02	0.54	0.18
1995	1,167	155	666	492	1,049	1,028	0.41	0.01	0.56	0.25
1996	1,003	155	652	478	952	924	0.46	0.01	0.56	0.18
1997	1,463	155	685	547	1,319	1,281	0.36	0.01	0.52	
平均	1,226	155	662	489	1,123	1,092	0.41	0.01	0.55	0.28

表 4-6 流出負荷推定モデルによる水収支の推定結果

年	吉井川流域									土器川流域									(mm)
	降水 量	河川 流量	河川流 出量	用水 量	実蒸発 散量1	実蒸発 散量2	地表 流出量	表層 流出量	浸透 量	降水 量	河川 流量	河川流 出量	用水 量	実蒸発 散量1	実蒸発 散量2	地表 流出量	表層 流出量	浸透 量	
2001	1,671	910	914	25	589	535	167	1,396	202	1,261	502	599	40	655	578	185	756	256	
2002	1,149	524	512	34	611	524	113	743	160	752	335	220	53	686	519	58	284	173	
2003	1,637	1,049	881	18	560	541	165	1,313	201	1,198	643	541	36	623	563	159	693	244	
2004	1,883	1,217	1,064	25	616	580	209	1,570	210	1,775	1,009	999	36	690	608	404	1,172	276	
2005	1,167	515	568	28	618	492	119	834	157	1,147	351	575	47	685	520	201	708	227	
平均	1,501	843	788	26	599	534	155	1,171	186	1,227	568	587	43	668	558	202	723	235	

実蒸発散量1：ペンマン蒸発散位に土地利用別の蒸発散係数を乗じた値、実蒸発散量2：土壌貯留量による制約を受けた場合の算出値

## 5. 総合考察

本研究の目的は、瀬戸内海において環境問題が深刻化し、総量規制などの取組が始まった1970年代以降の農地からの負荷量を空間分布と合わせて時系列的に把握するため、これら環境負荷の評価に必要となる関連情報をGISを用いて統合するとともに、陸域さらには海域のモデルで解析するための流域GISデータを構築し、海域への影響を明らかにすることである。

陸域からの負荷量の推定では、河川観測データと原単位法によるデータを統合して流入負荷量を推定することで、海域への流入負荷量の推定精度の向上が図れた。しかし、河川観測データだけでは負荷源別の負荷量が推定できないため、流域全体についても原単位法による発生原単位による推定が必要となる。発生負荷量の推定では、単位流域や旧市区町村、メッシュで分割して地図化することで、対象地域内の土地利用・負荷量の空間分布や経年変化の相違を明らかにでき、流域GISの有効性が確認できた。またメッシュ化したデータを分布型の流域モデルに適用することで、原単位法では困難な年間の季節変動が把握できた。また海洋モデルと連携し、これら陸域からの負荷量を条件に含めてシミュレーションすることで海域での水産被害の解析につなげることができた。

次の展開として、今後の農地からの負荷量削減の取組の必要性について、第7次の総量削減基本方針（環境省 2011）を元に検討する。表 5-1 のように瀬戸内海全体と各県毎の目標値があり、大阪湾とその他の海域に分けて目標が設定されている。瀬戸内海全体では削減目標量に対して2009年時点で窒素は達成しており、リンで0.6 t/日の削減である。農地を含めた面源系は、畜産系、養殖系とともにその他の項目に含まれるが、削減目標量は窒素4 t/日、リン0.4 t/日の削減となっている。府県別の削減目標量では岡山県や香川県のように2009年時点の数値で目標値に達している県もある。表 5-2 に示す第6次の総量削減基本方針（環境省 2006）との比較では、2009年における量は、第6次の削減目標量を窒素、リン含有量では生活排水、産業排水、その他の項目のいずれも達しており、これまでの削減の取組の成果であると言える。これらの数値からも第7次の削減計画が現在の水質からの悪化を防ぐことを目指していることが読み取れる。

表 5-3 に示す岡山県の第7次水質総量削減計画（岡山県 2012）では、より細分化された現状と目標の数値が出されている。削減量の総量は窒素、リンは2009年時点で2014年目標値を下回り、CODのみが削減となっている。しかし個別に数値を見ていくと窒素では産業系・生活系は増加が見込まれており、その他系では純減となる目標となっている。

この岡山県の土地系の窒素削減量66kg/日を水田面積で考えると、表 3-2 の田の排出負荷

原単位 25.3g/ha 日を適用した場合は約 2,600ha 相当分となる。仮に水稲のみでこの削減量を達成する場合、岡山県の農業経営体の水稲の作付面積は 2010 年で 28,958ha で面積比では 9.0% となり、これは全ての水田で約 1 割の削減に取り組む必要があるということになる。同様に畑面積で考えた場合は約 1,400ha 相当分となり、2010 年の畑作物面積 10,660ha に対して 13.1% となる。なお原単位については、中国山地を上流域とし、森林面積の割合の高い岡山県の一級河川流域と土地条件が類似し、実測データに基づく信頼性の高い中海の原単位で試算した。これらの仮定をシナリオとしてモデルによる解析を行うことで、今後の海域の水質予測につなげることができる。

負荷削減対策とは別に、農地の減少による削減量も検討が必要である。近年耕地面積の減少は鈍ってきているが、岡山県では 2000 年から 2005 年で 2,738ha、2005 年から 2010 年で 2,073ha 減少しており、無視できない面積である。その際、耕作放棄されて荒地となるのか、宅地に転換されるのかで環境への影響は大きく異なる。3.3.2 で述べたように、宅地への転換では農地系の排出負荷は減っても面源系の排出負荷の減少にはつながらない。

水質総量規制では、備讃瀬戸海域においてはこれ以上の負荷削減は必要でないとしているが、水産業からみると、赤潮発生とノリ養殖に焦点を当てた場合、栄養塩負荷は夏季に減らして冬季にはむしろ増やすことが理想的と考えられる。これまでに開発されてきた環境保全型の栽培技術は、夏作物の栽培期間中の栄養塩流出を減少させる技術が主である。このような対策と合わせて、冬季に負荷を増やす方策として、例えば秋季の堆肥投入や冬季の水田、特に転換畑の水張り、ダムやため池の放流、水処理施設における栄養塩管理運転（排出基準値内での窒素排出量増加運転）などの方策がある。岡山県吉井川水系の苫田ダム（2005 年完成）では、ノリ色落ち対策としてダムの緊急放流冬季に実施しており、同様の試みは佐賀県の中木庭ダムでも実施されている。また栄養塩の放出を目的としたため池の放流も兵庫県などで実施例がある。このような技術をモデルで対応するには、機能拡張が必要である。

本研究では農地から水系への環境負荷を主に対象としてきたが、農業からの環境負荷においては畜産系の負荷の考慮も重要である。畜舎で飼養される場合、家畜排泄物の多くは堆肥として農地に還元される。原単位法では排出源を基に整理しているため、面源系の負荷とは切り離して算定しており、本研究の流出負荷推定モデルでも別途畜産系の負荷を設定している。農地と畜産を合わせた栄養塩収支を元に農地からの流出を評価することが望ましい。

また、今後の海域の環境保全管理の方向としては利用状況に合わせた対策を実施することがあると思われる。今後の閉鎖性海域対策に関する懇談会においても水環境改善施策の効果を予測するためのシミュレーションモデルの必要性が指摘され、そのために必要な要件として、現存するデータで駆動可能であること、実海域での事後検証が可能であること、時間的

に改善効果が再現可能であること、技術的に長期間の将来予測計算に耐えうる構造を有すること、長期的な気候変動・人口変動等のシナリオが入力可能であること、想定する施策の効果が評価可能であること、過去の水環境の変化について現況再現を実施し妥当性が説明可能であることの7項目を挙げている。この要請に答えるには、本研究で取り組んだような陸域と海域とが連携したデータ・モデルの枠組みによる評価が必要である。

表 5-1 第 7 次総量削減基本方針(瀬戸内海)の目標値

	COD (t/日)			窒素含有量 (t/日)			リン含有量 (t/日)		
	削減 目標量	(参考) 平成21年度 における量	削減量	削減 目標量	(参考) 平成21年度 における量	削減量	削減 目標量	(参考) 平成21年度 における量	削減量
生活排水	201	221	20	138	143	5	10.7	11.4	0.7
産業排水	215	193	-22	111	95	-16	7	6.5	-0.5
その他	56	54	-2	191	195	4	9.7	10.1	0.4
総量	472	468	-4	440	433	-7	27.4	28	0.6
京都府	18	18	0	15	16	1	1.2	1.2	0.0
大阪府	65	65	0	61	61	0	3.6	4	0.4
兵庫県	50	53	3	52	53	1	2.8	2.9	0.1
奈良県	16	17	1	11	12	1	0.8	0.9	0.1
和歌山県	20	21	1	16	16	0	1.2	1.2	0.0
岡山県	38	39	1	42	40	-2	2.4	2.3	-0.1
広島県	53	56	3	42	43	1	2.4	2.5	0.1
山口県	45	42	-3	33	30	-3	2	1.8	-0.2
徳島県	35	31	-4	19	18	-1	1.5	1.4	-0.1
香川県	25	27	2	30	30	0	1.7	1.7	0.0
愛媛県	58	55	-3	62	65	3	4.6	5	0.4
福岡県	17	11	-6	24	15	-9	0.8	0.5	-0.3
大分県	32	33	1	33	34	1	2.4	2.6	0.2
総量	472	468	-4	440	433	-7	27.4	28	0.6

表 5-2 第 6 次総量削減基本方針(瀬戸内海)の目標値

	COD (t/日)			窒素含有量 (t/日)			リン含有量 (t/日)		
	削減 目標量	(参考) 平成16年度 における量	削減量	削減 目標量	(参考) 平成16年度 における量	削減量	削減 目標量	(参考) 平成16年度 における量	削減量
生活排水	237	261	24	152	159	7	11.6	12.4	0.8
産業排水	247	245	-2	116	117	1	7.7	8	0.3
その他	53	55	2	197	200	3	10.2	10.2	0.0
総量	537	561	24	465	476	11	29.5	30.6	1.1
京都府	20	20	0	17	17	0	1.2	1.2	0.0
大阪府	76	83	7	67	71	4	4.3	4.8	0.5
兵庫県	56	61	5	59	61	2	3.1	3.3	0.2
奈良県	18	20	2	12	13	1	0.9	1	0.1
和歌山県	27	28	1	17	17	0	1.4	1.4	0.0
岡山県	43	47	4	42	43	1	2.4	2.5	0.1
広島県	64	65	1	43	44	1	2.5	2.6	0.1
山口県	53	53	0	34	34	0	2.1	2.1	0.0
徳島県	36	36	0	20	20	0	1.6	1.6	0.0
香川県	27	28	1	32	33	1	2.0	2.0	0.0
愛媛県	63	65	2	66	66	0	5.0	5.0	0.0
福岡県	17	17	0	24	24	0	0.8	0.8	0.0
大分県	37	38	1	32	33	1	2.2	2.3	0.1
総量	537	561	24	465	476	11	29.5	30.6	1.1

表 5-3 第 7 次岡山県水質総量削減計画

区分	COD kg/日			窒素 kg/日			りん kg/日			
	H21現状	H26目標	削減量	H21現状	H26目標	削減量	H21現状	H26目標	削減量	
生活系	下水処理場(生活系)	2,480	3,234	754	1,442	2,146	704	148.3	175.5	27
	合併浄化槽	3,558	3,789	231	3,736	3,872	136	393.5	420.8	27
	し尿処理場	35	27	-8	27	23	-4	2	1.4	-1
	単独浄化槽	1,800	1,575	-225	2,709	2,375	-334	255.2	222.7	-33
	雑排水	11,643	9,008	-2,635	1,698	1,321	-377	254.7	198.1	-57
小計	19,516	17,633	-1,883	9,612	9,737	125	1,054	1,019	-35	
産業系	工場・事業場	6,127	7,181	1,054	6,736	8,554	1,818	207.9	333.7	126
	小規模事業場	2,373	2,522	149	670	720	50	248.7	253.4	5
	未規制事業場	3,472	3,537	65	464	463	-1	148.9	154.7	6
	下水処理場(産業系)	408	576	168	261	432	171	23.5	33.9	10
	小計	12,380	13,816	1,436	8,131	10,169	2,038	629	776	147
その他	畜産系	2,696	2,562	-134	4,321	4,124	-197	163.2	153.5	-10
	土地系	4,303	4,345	42	17,533	17,467	-66	399.6	400.5	1
	養殖系	0	0	0	63	40	-23	14.5	5.5	-9
	小計	6,999	6,907	-92	21,917	21,631	-286	577	560	-17
合計	38,895	38,356	-539	39,660	41,537	1,877	2,260	2,355	95	

表 5-4 検討に使用した原単位

	g/ha 日				
	田	畑	農地	山林	市街地
a 総量削減計画	76.7	76.7	76.7	18.9	18.9
b 児島湖	31.2	6.5	24.6	3.8	20.6
c 宍道湖	25.3	47.2	31.2	16.0	46.0
d 窒素収支	21.1	176.6	67.8	16.0	20.6

表 5-5 かい廃耕地の原単位

	g/ha 日		
	田	畑	農地
a 総量削減計画	-57.8	-57.8	-57.8
b 児島湖	-22.7	2.0	-16.1
c 宍道湖	-0.9	-22.8	-6.8
d 窒素収支	-3.8	-159.3	-45.6

表 5-6 農地減少に伴う窒素負荷量の変化

	田	畑	農地	削減総量
2005～2010年 減少面積(ha)	1,239	954	2,193	
a 総量削減計画	-71.6	-55.1	-126.8	-60.8
b 児島湖	-28.1	1.9	-26.2	39.8
c 宍道湖	-1.2	-21.8	-22.9	43.1
d 窒素収支	-4.7	-152.0	-156.7	-90.7

表 5-7 全農業経営体で削減目標に対応する場合に必要な面積

	ha		
	田	畑	農地
農業経営体 作付面積 (2010)	28,958	10,660	39,618
b 児島湖	1,274	6,116	1,619
面積比(%)	4.4	57.4	4.1
c 宍道湖	1,571	842	1,275
面積比(%)	5.4	7.9	3.2
d 窒素収支	1,884	225	586
面積比(%)	6.5	2.1	1.5

表 5-8 3 割削減技術で削減目標に対応する場合に必要な面積

	ha		
	田	畑	農地
農業経営体 作付面積 (2010)	28,958	10,660	39,618
b 児島湖	4,247	20,387	5,397
面積比(%)	14.7	191.2	13.6
c 宍道湖	5,238	2,808	4,249
面積比(%)	18.1	26.3	10.7
d 窒素収支	6,282	750	1,955
面積比(%)	21.7	7	4.9

## 謝辞

本論文をとりまとめるにあたり、ご指導ならびにご助言をいただいた、筑波大学大学院 生命環境科学研究科 教授 林武司 博士(独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 情報利用研究領域 上席研究員)、筑波大学大学院 生命環境科学研究科 教授 瀧川具弘 博士、東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授 二宮正士 博士、農(当時 筑波大学大学院 生命環境科学研究科 教授、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 研究管理監)、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター 平藤雅之 博士(当時 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター フィールドモニタリング研究チーム長)、筑波大学大学院 生命環境科学研究科 准教授 竹澤邦夫 博士(独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 情報利用研究領域 上席研究員)に、深く感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたって、研究課題において協力いただいた、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 吉田智一氏、独立行政法人 農業環境技術研究所 吉川省子氏、独立行政法人 産業総合研究所中国センター 高橋暁氏、三好順也氏、三島康史氏、香川県環境保健研究センター 笹田康子氏、冠野禎男氏、岡山県環境保健センター 鷹野洋氏、広島大学 小野寺真一氏、法政大学 小寺浩二氏、岡山大学 齋藤光代氏、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター 望月秀俊氏、清水裕太氏に感謝の意を表します。

また、大学院ゼミでお世話になった独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 田中慶氏、柴田静香氏、近畿中国四国農業研究センター 寺元郁博氏、パナソニック株式会社 中山将司氏に感謝申し上げます。

この他、職場での研究活動、学会活動等で、ここにお名前を記すことのできなかつた多くの方々にご支援・ご協力を賜りましたことに御礼を申し上げます。

なお、本研究の一部は農林水産省実用技術開発事業「備讃地域陸海域の水・栄養塩動態解明と農業への再利用技術の開発」(2007～2009年度)、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)「瀬戸内海流域から海洋への陸域地下起源物質の不均一・非定常な流出機構の定量的評価」(2006～2008年度)の支援を得て行われました。

## 引用文献

- 有田正光（2001）地圏の環境，東京電機大学出版局，231-237.
- Burt, T. P., A. L. Heathwaite and S. T. Trudgill (1993) Nitrate; Processes, Patterns and Management. John Wiley & Sons Press, Chichester, 444.
- 中国地方整備局河川部（2007）水利現況調書，国土交通省中国地方整備局，広島.
- 藤生和也・吉田敏章・田本典秀（2004）GISを活用した流域汚濁負荷情報データベースの構築に関する調査．平成16年度下水道関係調査研究年次報告書集，15-18.
- 藤原建紀（2011）瀬戸内海の貧栄養化．水環境学会誌，34(2), 34-38.
- 蓮川博之・柴原藤善・駒井佐知子・水谷智・大林博幸・藤井吉隆・須戸幹（2009）環境こだわり農業の取り組みによる水稻作付期の流出負荷低減効果．滋賀県農業技術センター研究報告，48，1-21.
- 比嘉榮三郎・仲宋根一哉・大見謝辰夫・満本裕彰（2001）沖縄等の河川河口から海域へのSSおよび栄養塩の流出．沖縄県衛生環境研究所報，35，111-120.
- Hill, A. R. (1996) Nitrate removal in stream riparian zones. *Journal of Environmental Quality*, 25(4), 743-755
- 賓示戸雅之・池口厚男・神山和則・島田和宏・萩野暁史・三島慎一郎・賀来康一（2003）わが国農耕地における窒素負荷の都道府県別評価と改善シナリオ．日本土壌肥科学雑誌，74(4), 467-474.
- 石橋英二（2004）岡山県の農業と土壌肥料－岡山県の特徴的な土壌－．日本土壌肥科学雑誌，75(5), 623-624.
- 石本貴之・井手慎司（2005）水質汚濁負荷量の流入原単位の算定と減少要因の特定に関する研究 滋賀県の工業系汚濁負荷を対象として．環境システム研究論文集，33，199-205.
- 石岡義則・吉野邦彦・白谷栄作・石川雅也（2004）土地利用別メッシュタンクモデルを用いた湿原流域降雨流出解析，水文・水資源学会誌，17(3)，233-240.
- 香川県（2005）発生負荷量等算出調査報告書，香川県，香川．
- 金澤健二（2009）都道府県の施肥基準値及び堆肥の施用基準値のデータベース並びに作物の収穫物の養分含有率のデータベースとその利用法．中央農業総合研究報告，12，27-50.
- 環境省環境管理局水環境部（2005）平成16年度瀬戸内海の環境保全資料集．社団法人瀬戸内海環境保全協会，兵庫．
- 環境省（2011）化学的酸素要求量、窒素含有量及びりん含有量に係る総量削減基本方針（東京湾）（伊勢湾）（瀬戸内海）平成23年6月．環境省，東京．

- 建設省河川局（1997）改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編，山海堂，85-88.
- 小池博（2012）データ形式・構造、データカタログに関する技術について．電子行政オープンデータ実務者会議第1回データWG，東京．
- 国土交通省河川局（2005）平成16年度全国一級河川の水質現況．国土交通省，東京．
- 国土交通省・農林水産省・環境省（2006）湖沼水質のための流域対策の基本的考え方～非特定汚染源からの負荷対策～．国土交通省・農林水産省・環境省，東京．
- 国土交通省岡山河川事務所（2001～2006）高梁川，旭川，吉井川，河川水量観測結果，国土交通省，岡山．
- 国際エメックスセンター（2003）世界閉鎖性海域環境ガイドブック，財団法人国際エメックスセンター，兵庫．
- 近藤純正（2000）地表面に近い大気の科学-理論と応用，東京大学出版会，221-228.
- 熊澤喜久雄（1999）地下水の硝酸態窒素汚染の現況．日本土壌肥科学雑誌，70(2)，207-213.
- 國松孝男・村岡浩爾（1989）河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，東京．
- Lance, F. W. L., E. H. Robert, and M. M. John (1984) Transport of carbon, nitrogen, phosphorus, and major solutes in the Gambia River, West Africa. *Limnology and Oceanography*, 29(4), 816-830.
- 李寅鐵・星加章（2000）広島湾における汚濁負荷と水質の季節変動特性.水環境学会誌，23(6)，367-373.
- 増田貴則（2000）GISを活用した流域環境情報の統合化とその現象解析・計画論への適用に関する研究 - 琵琶湖流域を対象として．京都大学，博士論文．
- 松村剛・石丸隆（2004）東京湾への淡水流入量と窒素・リンの流入負荷量（1997,98年度）．海の研究，13(1)，25-36.
- McIsaac, G. F., M. B. David, G. Z. Gertner, and D. A. Goolsby（2001）Nitrate flux in the Mississippi River. *Nature*, 414, 166-167.
- 三好順也・高橋暁・三島康史（2012）備讃瀬戸における栄養塩動態とノリ養殖被害との関係．陸水学雑誌 73(3), 199-206.
- Nagumo, T. and R. Hatano（2000）Impact of nitrogen cycling associated with production and consumption of food on nitrogen pollution of stream water. *Soil Science and Plant Nutrition*, 46(2), 325-342.
- 中嶋雅孝・横山佳裕・内田唯史・中野拓治・中西弘（2005）有明海における冬季のノリ及び赤潮プランクトンの増殖特性．水環境学会，28(5), 339-345.
- 二瓶泰雄・大竹野歩・菊間弘和・藤本美樹（2002）手賀沼流域における汚濁負荷特性に関する現地観測．河川技術論文集，8：517-522.

- 西尾道徳（2001）作物種類別の施肥窒素負荷量に基づく地下水の硝酸性窒素汚染リスクの評価手法．日本土壤肥料学雑誌，72(4)，522-528．
- 農林水産省（1991）農業用地下水の水質調査結果概要．農林水産省，東京．
- 農林水産省（2000）農業生産環境調査報告書．農林水産省，東京．
- 農林水産省（2005）持続性の高い農業生産方式への取組状況調査報告書．農林水産省，東京．
- 農林水産省（2011）耕作放棄地の現状について．農林水産省，東京．
- 農林水産省・国土交通省・環境省（2004）平成15年度末の汚水処理人口普及状況について．農林水産省・国土交通省・環境省，東京．
- 農村振興局（2013）平成24年度農地・水保全管理支払交付金の取組状況．農林水産省，東京．
- 小川吉雄（2000）地下水の硝酸汚染と農法転換．農文協，東京．
- 岡市友利（1996）瀬戸内海の赤潮40年．瀬戸内海，7・8，22-36．
- 岡山県（2002）児島湖総合水質改善対策推進事業委託業務報告書，岡山県，岡山．
- 岡山県（2005）平成16年度汚濁負荷削減状況調査結果，岡山県，岡山．
- 岡山県（2001a～2006a）児島湖締切堤防樋門操作月報，岡山県，岡山．
- 岡山県（2001b～2006b）公共用水域水質測定結果，岡山県，岡山．
- 大久保卓也・川寄悦子・辻村茂男・須戸幹・柴原藤善（2006）降雨時等の非定常流入負荷の定量的把握とその琵琶湖水質への影響把握．滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書，2：59-66．
- 大山憲一・吉松定昭・本田恵二・安部享利・藤沢節茂（2008）2005年2月に播磨灘から備讃瀬戸に至る香川県沿岸域で発生した大型珪藻 *Chaetoceros densus* のブルーム-発生期の環境特性とノリ養殖への影響．日本水産学会誌，74(4)，660-670．
- 朴珍赫・小尻利治・友杉邦雄（2003）流域環境評価のためのGISベース分布型流出モデルの展開，水文・水資源学会誌，16(5)，541-555．
- Pettine, M., L. Patrolocco, M. Camusso, and S. Crescenzo（1998）Transport of carbon and nitrogen to the northern Adriatic Sea by the Po Rive. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 46, 127-142.
- 流域別下水道整備総合計画制度設計会議（2008）流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，43-68，日本下水道協会，東京．
- 清木徹・駒井幸雄・小山武信・永淵修・日野康良・村上和仁（1998）瀬戸内海における汚濁負荷量と水質の変遷．水環境学会誌，21(11)，780-788．
- 瀬戸内海環境保全協会（2013）平成24年度瀬戸内海の環境保全．瀬戸内海環境保全協会，神戸市．
- 四国地方整備局河川部（2004）第2版水文観測の手引き（案）H-Q曲線作成編．国土交通

- 省四国地方整備局，高松。
- 島根県（2005）宍道湖に係る湖沼水質保全計画．島根県，松江。
- Sivapalan, M., K. Takeuchi, S. W. Franks, V. K. Gupta, H. Karambiri, V. Lakshmi, X. Liang, J. J. McDonnell, E. M. Mendiondo, P. E. O'Connell, T. Oki, J. W. Pomeroy, D. Schertzer, S. Uhlenbrook, and E. Zehe（2003）IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an Exciting Future for the Hydrological Sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6) 857-880.
- 菅原正巳（1979）流出解析法，共立出版。
- 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所（2009）瀬戸内海の赤潮．水産庁，東京。
- 周国云・江崎哲郎・三谷浩泰（2001）GISを用いた水循環—地盤沈下時空解析システムの構築，*地下水技術*，43(10)，1-10.
- 高岸且（2000）GISを用いた琵琶湖保全のための環境解析．*水環境学会誌*，23(9)，553-560.
- 高橋暁・三好順也・三島康史（2012）備讃瀬戸における赤潮発生と栄養塩分布および潮流強度との関係．*陸水学雑誌* 73(3), 207-215.
- 高橋英博（2010）備讃地域陸域からの負荷量推定技術 1）メッシュモデル．先端技術を活用した農林水産高度化事業研究成果報告書 課題番号 1947，26-30.
- 高橋英博・小野寺真一・清水裕太（2009）瀬戸内海流域における分布型モデルによる水収支解析．*科学研究費補助金基盤研究 A(2)研究成果報告書（課題番号 18201007）*，236-241.
- 高橋英博・清水裕太・澤野美沙（2009）瀬戸内海流域における土地利用の不均一性の評価．*科学研究費補助金基盤研究 A(2)研究成果報告書（課題番号 18201007）*，114-119.
- 高橋英博・吉川省子・鷹野洋・笹田康子・二宮正士（2010）流域特性を考慮した岡山・香川流域から瀬戸内海への流入負荷量の推定．*陸水学雑誌*，71(3)，269-284.
- 鷹野洋・冠野禎男・吉川省子・高橋英博（2010）備讃海域での汚濁負荷の解析．*岡山環境保健センター年報*，34，25-30.
- 高島英二郎・田中宏明・中村栄一（1995）手賀沼流入河川における汚濁負荷量の流出特性および年間負荷量の把握．*水環境学会誌*，18(4)，297-306.
- 武田育郎（1997）農地におけるノンポイント汚染源負荷．*水環境学会誌*，20(12)，12-16.
- 竹内誠（1997）農耕地からの窒素・リンの流出．*日本土壤肥料学雑誌*，68(6) 708-715.
- 田辺和司（2007）香川県の農業と土壤肥料．*日本土壤肥料学雑誌*，78(3)，331-332.
- 田中義人・熊谷博史・松尾宏・中村又善（2006）有明海に流入する筑後川および矢部川の降雨時流出と負荷量変動．*用水と廃水*，48(9)，791-797.
- Thiessen, A.H.（1911）Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*. 39,

1082-1084.

- 鳥山和伸（2000）データベース化による水田の施肥窒素脱窒率の推定．平成12年度研究成果情報（総合農業），226-227.
- 堤裕昭・岡村絵美子・小川満代・高橋徹・山内一岩・門谷茂・小橋乃子・足立貴浩・小松利光（2003）有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係．海の研究，12(3), 291-305.
- 浮田正夫（1996）流入負荷を削減させるためには．瀬戸内海の生物資源と環境，岡市友利・小森星児・中西弘編，144-157．恒星社厚生閣，東京．
- 牛尾進吾・吉村直美・斉藤研二・安西徹郎（2004）家畜ふん堆肥の成分特性と肥料的効果を考慮した施用量を示す「家畜ふん堆肥利用促進ナビゲーションシステム」．日本土壌肥料学雑誌，75(1), 99-102.
- 山本佳世子（2009）環境情報システムとしてのGISの到達点と今後—琵琶湖集水域における土地利用解析を事例として—．環境科学会誌，22(2), 143-154.
- 山本民次・北村智顕・松田治（1996）瀬戸内海に対する河川流入による淡水，全窒素および全リンの負荷．広島大学生物生産学部紀要，35, 81-104.
- 山下三男・市川新・佐藤冬樹・柴田英明（2006）河川水文シミュレーションモデルの現状と新しい提案，陸水学雑誌，67, 267-280.
- 柳哲雄（1997）瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支．海の研究，6(3), 157-161.
- 柳哲雄（2006）里海論，恒星社厚生閣，東京．
- 吉田正則・村上敏文・吉川省子・藤原伸介（2008）四万十川の一流域における流量，および窒素，リン，無機イオン負荷量の日単位連続評価法．近畿中国四国農業研究センター研究報告，7, 49-69.
- 吉川省子・山本博・吉田正則・石原暁（2008）丸亀平野二毛作水田域における湧水中の硝酸態窒素の変動．日本土壌肥料学雑誌，79(5), 461-470.
- 湯澤美由紀（2005）第一期牛久沼水質保全計画期間における水質調査．茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報，1, 134-141.

## 摘要

日本最大の閉鎖性海域である瀬戸内海では 1960 年代の高度経済成長による水質悪化に伴い、赤潮発生による漁業被害が頻発したが、1970 年代以降は排水規制対策が進み、赤潮の発生は減少に転じた。一方で近年では漁獲量の減少や養殖ノリの色落ち被害等の貧栄養化問題が顕在化してきている。これらの水産業被害には、溶存無機態窒素（DIN）、溶存無機態リン（DIP）といった栄養塩や COD 負荷量等の濃度や比率が密接に関係していることがわかっている。そのため、陸域からの栄養塩の寄与を定量的に明らかにすることは環境学、水産学的に重要な課題である。

陸域からの栄養塩負荷源としては、産業系や生活系の排水とともに、農地からの流出も主要因の一つである。農地から流出する栄養塩負荷の総量は、長期的には耕地面積に伴って減少してきたと考えられる。一方で肥料の過剰施用による水系への栄養塩流出等の環境への影響は 1990 年代に入って問題視されるようになり、環境保全型の農業生産への転換が図られつつある。

本論文では、瀬戸内海流域を対象として、環境とのバランスに配慮した農業生産への転換を図る現状に対して、環境問題が深刻化し、総量規制などの取組が始まった 1970 年代以降の農地からの負荷量を空間分布と合わせて時系列的に把握するため、環境負荷の評価に必要な関連情報をオープンデータを活用しつつ、GIS を用いて統合するとともに、陸域さらには海域のモデルで解析するための流域 GIS データを構築し、流入負荷の影響を明らかにすることが本研究の目的である。

はじめに、瀬戸内海に流入する岡山、香川流域を対象に、河川の流量・水位・水質の観測データからの流入負荷量の推定と原単位法を用いた負荷発生源からの排出負荷量の推定を行った。

河川データから推定した比負荷量は、児島湖流域、土器川の順に高く、香川の二級河川流域、岡山の一級河川流域を大きく上回った。また、岡山の一級河川では河口部の流量観測点より下流での取水量が大きく、淡水量の降水量比や比負荷量に影響していた。

原単位法を用いて発生負荷源から排出負荷量を推定した結果では、河川流域と沿岸流域、全窒素と全リン・COD で発生負荷源の比率の違いが明確であった。河川流域では全窒素で面源系の比率が高く、全リン・COD では生活系が高かった。一方、沿岸流域では全窒素では産業系の比率が高く、全リン・COD では生活系と産業系が同程度で高かった。比排出負荷量は、香川流域で高く、河川の観測データから得られた比負荷量とは逆の結果となった。

このような河川流域や沿岸流域の流出特性や負荷源の分布の相違から、海域への流入負荷

の推定では一級河川の算出値を二級河川流域や沿岸流域に広げて全流域を推定する方法と比べて、河川観測データの流入負荷量と原単位による排出負荷量を統合する方法は流域の特性を反映することができ、推定精度の向上が図れることを示した。河川データに基づく推定に対しては、岡山流域では全項目で増加し、香川流域では全窒素で増加したが、全リンは同程度、COD は減少し、水質項目によって影響は異なった。

また、これらの陸域の流入負荷量のデータを用いて海洋のモデルで流況や水質をシミュレーションした結果からは、赤潮の発生条件やノリ養殖の水産被害の生じやすい海域に関する知見が得られた。

今後の問題点として、特に香川県において負荷量の推定に必要となる二級河川の水位データを流量に関するための H-Q 式の整備が必要である。また、産業系の排出負荷量についても市町村別・流域別のデータの公開が望まれる。

次に、行政区域で整理された農林業センサスの農地面積のデータを元に、GIS を用いて単位流域や 3 次メッシュの面積に変換して、農地の空間分布や負荷量を可視化するとともに、その経年的変化を検討した。

まず国土数値情報の土地利用細分メッシュの農地データを農林業センサスの農地面積との比較により評価し、その集計面積の誤差が大きいことを検証した。信頼性の高い農林業センサスの農地面積データと空間解像度の高い土地利用細分メッシュデータの長所を生かして、GIS を活用して単位流域や 3 次メッシュへと変換する手法を提示した。

この手法を適用し、太田川および芦田川流域において単位流域で田・畑の地目別に 1970 年から 2000 年にかけての農地面積の変化を可視化し、太田川と芦田川流域で地目による面積の減少傾向の違いと流域内での地目間の変化の相違を明らかにした。また、芦田川流域で原単位法を適用して農地からの排出負荷量の経年変化を比較し、流域内における窒素、リンでの減少傾向の違いを明らかにし、流域の特徴を把握するのに有効であることを示した。

原単位法で問題となる作付実態を反映させる方法として、化学肥料窒素量、堆肥を想定した家畜由来窒素量、降水窒素量を窒素投入量とし、収穫物による持出窒素量と脱窒による窒素収奪量を差し引いた窒素収支による環境負荷の評価方法を検討した。

広島県、岡山県を対象地域として、旧市区町村単位で 2000 年から 2010 年にかけて類別作付面積に基づく窒素収支による農地の窒素負荷量を算出した結果、田、畑の地目間の収支変化の地域的な偏りが明らかになるとともに、GIS を用いてメッシュ化することで、単位流域とは異なる形でスポット的な変化を捉えることができた。家畜由来の窒素量は地域に偏りがあり、特に畜産の盛んな地域では窒素収支への影響が大きい。また流域単位で集計することによって、農地からの排出負荷について流域の特徴が把握できた。

今後の課題として、土地利用の空間情報としては細分メッシュ土地利用データでは主とされない農地の分布情報が失われてしまうことから、他の調査データの土地利用データを活用することがあげられる。また、使用したデータは印刷物として公開されているデータを含んでいる。今後新たに公開されるデータは電子化されたオープンデータに置き換わっていくと思われるが、統計データのように過去に遡って利用可能なデータの電子化も必要である。

次に、これまでに構築した流域の GIS データをベースに、流域内を 1 km メッシュ、日単位で解析する簡易な構造の分布型の水収支モデルを開発し、このモデルを拡張して原単位法に基づき、面源系、生活系、畜産系の窒素、リンの排出負荷量を設定して、河川流量・水質を推定する流出負荷推定モデルを開発した。

水収支については、広島県の太田川流域と芦田川流域で、負荷量の推定を岡山県の吉井川流域、香川県の土器川流域で検討した。モデルの推定結果は量的にはまだ精度が十分では無いが、地下水の涵養状況の推定や栄養塩負荷量に対する土地利用変化の影響の検討など、流域内の分布や季節的な変動を可視化するために活用できると考えられた。

今後の課題としては、使用するデータに関しては、各メッシュにおける気象データ、土地利用面積の推定値の精度向上、モデルに関しては、土壌条件や農業用水等の取水、ダム・ため池での貯留の考慮等、改善を要する点が残されている。また、1km メッシュの場合には傾斜度の算出やメッシュの接続関係の定義が煩雑であるため、単位流域での解析に変更して、可視化の時点で単位流域からメッシュデータに変換する方法も考えられる。

原単位については、流域内で同一の値としているが、実際には作付作物の相違があるため、窒素収支に基づく負荷量の設定が有効と考えられる。今後は利用の簡便さとのトレードオフ等も考慮して対応を検討する必要がある。

使用したデータの中で解析雨量データは利用場面の多いデータと考えられるが、現在は仕様は公開されているが、独自フォーマットとなっているために利用しづらい。手軽に利用できるように CSV 形式などのより汎用的な形式でのデータ提供が望まれる。

以上のことより、陸域からの負荷量の推定において、単位流域や旧市区町村、メッシュで分割して地図化することで、対象地域内の土地利用・負荷量の空間分布や経年変化の相違を明らかにでき、流域 GIS の有効性が確認できた。またメッシュ化したデータを分布型の流域モデルに適用することで、原単位では困難な年間の季節変動が把握できた。海洋モデルと連携し、これら陸域からの負荷量を含めてシミュレーションすることで海域での水産被害の解析につなげることができた。