

令和 3 年度「森は海の恋人」水の循環研究会

「森は海の恋人」水の循環研究会

成果報告書

令和 4 年 3 月

「森は海の恋人」水の循環研究会を終えて

地球の存在維持には水の循環で結ばれた森と海の関係を理解することが重要です。

「森は海の恋人」水の循環研究会は、富士山とその山系の水循環が駿河湾の環境にどのように影響しているのかを科学的に検証してきました。そして、研究会の研究成果が日本一の富士山の恵みを受け入れる駿河湾がいつまでも豊かであり続けられるようにするための、科学的検証に基づいた県民に理解されるような「くらしと環境の政策立案」のツールの一助になることを目的としました。

森林から河川そして海域までの栄養塩物質等の循環過程のモデル化は、全国的にも先進的な取組であり、その重要性の道筋を提示できたと考えています。すなわち、駿河湾の豊かな生物生産を維持・保全させて行くためには、湾岸水の影響を受けやすく、流入河川や流域の土地利用などの特性を踏まえた効果的な栄養塩物質等の供給を施策の方向性として捉えることの重要性が改めて認識されました。陸水の影響における挙動要因としては、流域の土地利用状況と陸水の海域へ注ぐまでの流動経路に大きく分けられました。流域の土地利用を反映して、狩野川・富士川・大井川・安倍川などの主要河川では、総じて生活排水の影響が大きく、安倍川や大井川では畠地や森林からの窒素負荷の割合が増加する特性もみられました。また、陸水の流動経路をみると、上流域などの山地の多くでは、地表水は比較的近傍の谷部へ湧出し、そのまま海域まで流下する軌跡が示されますが、富士山など透水性が高い山地では地下水として浸透流動して下流域で湧出しながら海域に流出する比較的長い流動経路がみられる地形的特性を示しました。このことは、大井川や安倍川下流の平野部においても認められ、両河川において畠地や森林からの窒素やリンの負荷割合が増加する傾向は、流域の土地利用と陸水の流動経路の形態が反映されていると考えられました。加えて、太平洋に大きく開いた構造の駿河湾では黒潮などの湾外からの海水の流入も栄養状況に大きく影響していることがわかりました。

また、栄養塩物質等の湾内への供給特性では、春から秋にかけて陸水からの供給寄与が勝り、冬季から春先には湾外から流入する海水の影響が無視できないという特性がみえてきました。このような湾内の栄養状況に及ぼす季節的特性と一次生産に関与する植物プランクトンの発生量及びその種遷移の季節的变化とは同調していることもみてきました。

駿河湾の栄養状況の変化を知るために、栄養塩物質等の陸水からの供給寄与度と黒潮流路を捉えた湾外からの海水流入動態をモニタリングすることが重要であると考えられました。駿河湾の環境変動に関する陸水及び湾外水の影響をシミュレーションすることは、サクラエビ浮遊幼生やイワシ類のシラス期（シラス）のように遊泳力が弱い生物種にとっては、湾内でのその分布状況に海流の影響が強く反映されることから、当該モデルを用いて海流の動態を把握することは重要な要因です。また、栄養状況の指標の一つである一次生産量を推定することも、食物連鎖において主としてプランクトン食性であるサクラエビ

やシラスの生産量に直結する要因の一つと考えられ、食物連鎖網を通じた高次生産系に発展させる高度化がモデルの今後の課題です。

開発研究として、約3年という期間は決して時間的余裕があったとは言い切れません。併せて、着手し始めた頃よりCOVID-19のコロナ禍で会議もほとんどがリモートとなり、機動的な調査や意見交換ができたかなどいろいろと制約がありました。このような状況下で、委員の先生方をはじめ、くらし環境部の事務局の方々及び県の試験研究機関や関連部局の職員の方々の御努力でここに報告書が完成されましたことは感謝に堪えない次第です。報告書には、「駿河湾の生物資源を次世代に継承するために」として第6章に当該研究会で構築したスルガベイ・シミュレータの活用方針とモデルの更なる再現性向上を目指した課題について取りまとめると共に、これまでの成果からみえる施策の方向性が示されました。県の方針としてこのモデルを多様な研究機関等に利用可能な形で広く公開する方針のようです。是非とも活用いただき、課題として残ったことを解決して、モデルの更なる精度向上と高度化に繋げていただければと考えております。そして、県においてはこれらの研究情報成果を踏まえつつ駿河湾の資源を次世代に継承するための具体的な施策を打ち出されることを期待しています。

「森は海の恋人」水の循環研究会 委員長 鈴木 伸洋

目次

1.はじめに	1
2.本研究会の取組について	3
a. 研究会の目的	3
b. 研究会の経緯	3
c. 駿河湾及びその流域圏の概況	5
3.森・川・海のつながりを再現するシミュレーションモデルについて	7
a. モデル構築の目的	7
b. モデルの特性	7
c. モデルの全体像と対象領域	9
d. 各モデルの構成と具体的内容	10
i. 陸域モデル	10
ii. 海域モデル	10
e. 駿河湾のモデル再現結果からみえる環境特性	17
i. 森・川における水循環の特性	19
ii. 森・川から海への水循環とプランクトン生産の特性	21
4.モデルを用いた森・川と海の生産との関係解析結果	26
a. 駿河湾へ流入する栄養塩物質等の供給先による寄与度分析	26
i. 分析方法	26
ii. 分析結果および考察	29
b. 駿河湾流域から供給される栄養塩物質の発生源別の寄与度分析	39
i. 分析方法	39
ii. 分析結果および考察	39
c. 過去の駿河湾流域の再現結果	74
i. 栄養塩物質流入量の変化による海域の一次生産への影響把握	74
ii. 黒潮流路の変化による影響把握	79
5.駿河湾の現状把握の総括	83
6.駿河湾の生物資源を次代へ継承するために	88
a. モデルの活用	88
i. 活用方針	88
ii. 活用例	89
iii. 現状での課題	90
b. 施策の方向性	93
7.用語解説	94
8.参考文献	97

※が付してある言葉の解説は「7. 用語解説」参照

「森は海の恋人」水の循環研究会の成果

1. はじめに

水は、生命を育み、私たちの生活や産業に不可欠の物質である。大気から森林※、河川等を経て海域に達し、再び大気中に戻る水の循環は、河川水や地下水としての水量や水質の確保や、栄養塩物質等※（生物が生活するために必要な塩類。ここでは主に窒素、リン、鉄、ケイ素※などを指す。）の循環を通して、陸域・海域における生態系の保全に大きな役割を果たしている。この水の循環は、治水や用水（用水としての利用）によって私たちの暮らしを守り、また豊かにするなど、長い時間をかけて人間活動と自然が結びついたものであり、森林や農地等による水資源のかん養や、下水道等の排水処理による汚濁負荷の軽減も、健全な水循環の維持に大きな役割を果たしている。また、持続可能な開発目標（SDGs）にある「海・陸の豊かさを守る」ためには、森林から海域に至る連続した水の流れを一つの系として捉え、これを健全に保つことが必要不可欠である。

静岡県は、日本一高い富士山と日本一深い駿河湾をあわせもった地域であり、県民は「富国有徳」の民として古くからこの存在に支えられ、それぞれがもつ豊かな自然やそこからもたらされる恵みなどを享受してきた。この県民の宝とも言える豊かな自然によって形成され、維持されてきた素晴らしい環境を未来に引き継ぎ持続的に活かすための取組として、静岡県では「ふじのくに生物多様性地域戦略」を策定して、多様な生態系の保全等を推進すると共に、2020年には「美しく豊かな静岡の海を未来につなぐ会」を発足させるなど、積極的な取組を展開しているところである。

一方、我が国の海域では、主に高度成長期の工業化及び都市化に伴う水質悪化が顕在し、昭和45年には水質汚濁防止法が制定された。その後、昭和60年頃からは、森林も含めた河川流域及び海域の資源価値に関する考えが広まり、流域全体をより多面的・一体的に管理しなければならないという認識も高まってきた。また、平成元年には、汽水域における森林からの栄養塩物質等の供給の重要性に着目し、宮城県気仙沼市において、「森は海の恋人」のキャッチフレーズと共に、漁師による森づくり活動が開始された。このような森林の保全による水産資源保全活動は全国へ広がり、令和2年度には全国72ヶ所で同様の活動が実施され、海域と森林・河川域の繋がりの重要性が全国規模で認識されつつある。

さらに、「森は海の恋人」の科学的な根拠に関する研究も行われており、森林を含む陸域から海域へ栄養塩物質等が移動し、植物プランクトンなどの増殖に寄与するという説（入交ら、2008）が唱えられている。松永（1997）によると、特に森林腐植土や水田※等が起源のフルボ酸鉄は植物プランクトンに多く摂取され、より速く増殖するとされている。また、原島（2003）は海洋生態系の基盤となっているケイ藻類に必要不可欠なケイ素に着目し、琵琶湖－淀川－瀬戸内海の水系を中心にして、ケイ素が少ない海域では、それを必要としない鞭毛藻類※による赤潮が多く発生し、海域の環境を悪化させていることを明らかにした。しかし、このように、「森は海の恋人」の概念は一般的に認識されつつあるものの、海域における生物生産に果たす森林や河川水、地下水などの役割については、未だ科学的な検証例が少

ないのが実情である。

現在、駿河湾では水質環境の変化や漁業生物の減少などが課題となっている。これらの課題の解決のため、長年、研究や取組が行われてきたが、課題となっている現象の発生原因は複雑であり、単一の対策により解決できる問題ではないと考えられる。この課題を解決していくためには、科学的な知見に基づいて、実際に流域や海域で何が起きているのか、また過去から現在、将来にわたる長期的な流域や外海などの変化によって、何がどう変わらのかを推定できるようにした上で、効果的な対策を検討する必要がある。そのためには、このような問題が生じている構造や因果関係を明らかにし、現状理解や対策の立案を行うツールとして多種多様な要素からなる複雑な環境状況を水循環、物質循環※のシステムとして捉え、科学的知見から再現するモデルの活用が有効である。

このような認識から、「森は海の恋人」水の循環研究会は、駿河湾と湾に流入する河川の流域（以下、駿河湾流域と呼ぶ）を研究対象として、陸域（森林・河川）における水や栄養塩物質等の収支、それらの海域への流入、また、海域における外海、温暖化の影響などの外部要因などの情報を統合した環境現象の発生要因推定ツールを整備した上で、陸域の水循環が駿河湾の環境にどのように寄与しているのかを科学的に検証してきた。また、駿河湾の海域環境と森林・河川（陸域）との関係や健全な水循環を守るために必要な施策の方向性を検討している。この研究会の成果が、日本一の富士山の恵みを受け入れる駿河湾が豊かさを保つための、科学的検証に基づいた、県民に理解されるくらしと環境の政策立案の一助になるようにしたい。

本文書はその成果の概要を示したものである。

2. 本研究会の取組について

a. 研究会の目的

本研究会は令和元年度に、南アルプスおよびその周辺を源流とする富士川・大井川水系と駿河湾沿岸部までをケーススタディとして、駿河湾の海の生態系の保全とその恵みの持続的な利活用に向けた実践活動につなげるため、陸域から流入する栄養物質等と駿河湾における生物生産との関係を推定することを目的に設置された。

関係の推定にあたっては、駿河湾流域の物質循環などを連続して再現できるシミュレーションモデル（以下、モデルと呼ぶ）が必要であり、その推定精度を向上させるために本研究会を構成する各委員の多様な専門分野の知識を結集して、まずモデルを構築することから取組を始めた。なお、このモデルは、今後、公開して様々な研究に活用いただくことを通じてさらに発展させ、駿河湾流域の現状分析や課題の原因推定に役立てていくことを目指している。

なお、本研究会では海域における生物生産の最も基礎となる一次生産※（植物プランクトン生産）をモデルによって再現することから始めたが、将来的には後述の 6 章に示したように、さらなる発展を目指している。

b. 研究会の経緯

本研究会の流れは図 1 に示すとおりであり、以下のように検討を進めた。

研究会の委員一覧は表 1 に示すとおりであり、委員全員での全体研究会と並行して、陸域（森林から河川）と海域それぞれの検討を深めるための陸域部会、海域部会を開催した。

令和元年度は、既存知見を中心に、駿河湾流域における環境等の知見・データを収集して、次年度以降の研究計画を策定した。

令和 2 年度は、前年度に引き続き、駿河湾流域における環境等の知見、データ収集を継続しつつ、モデルの構築を開始した。特に現在の駿河湾の環境を再現することを目的として、近年、湾内の水質環境への影響が懸念されている外海からの影響（黒潮の大蛇行による影響）を考慮し、2015 年（黒潮の蛇行が弱い平均的な流況の年として選定）、2018 年（黒潮の大蛇行期※の年として選定）を対象に、既存データや現地調査結果をもとにして、モデルの再現状況を検証し、精度向上に努めた。なお、参考として黒潮流路の経年変動を図 2 に示す。また、研究計画に沿って、ケーススタディの流域にもある富士川、大井川において河川から海域、湧水場所における栄養塩物質等の濃度の現地調査を実施して、モデルの精度向上に活用した。

令和 3 年度は、前年度までのモデル精度の課題解決に取り組み、最近年 2020 年を対象にモデルの再現状況を検証したうえで、その構築したモデルを用いて、研究会の当初の目的でもある海域の一次生産（植物プランクトン生産）へ寄与する要素を分析し、その変化要因について検討した。

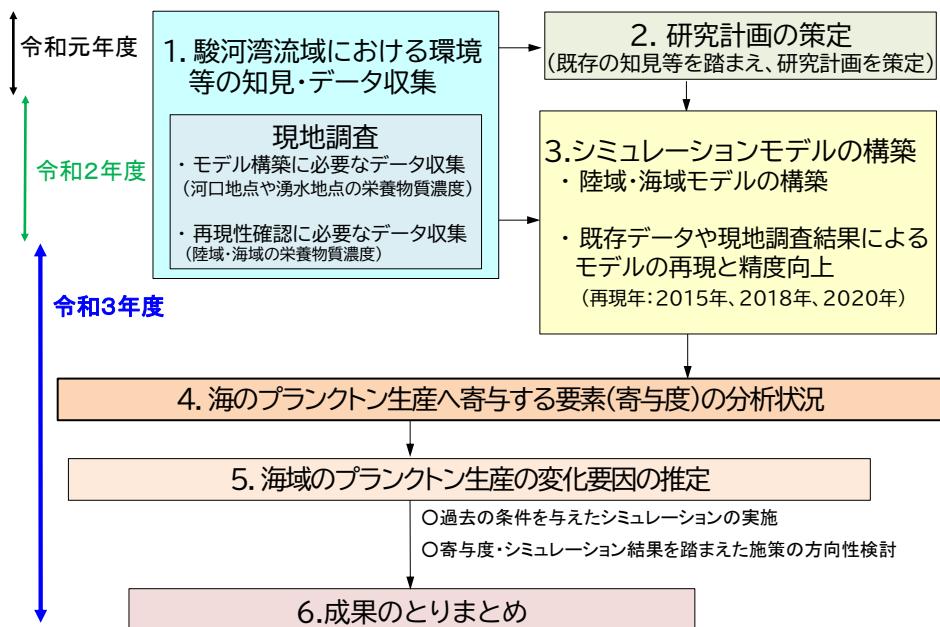
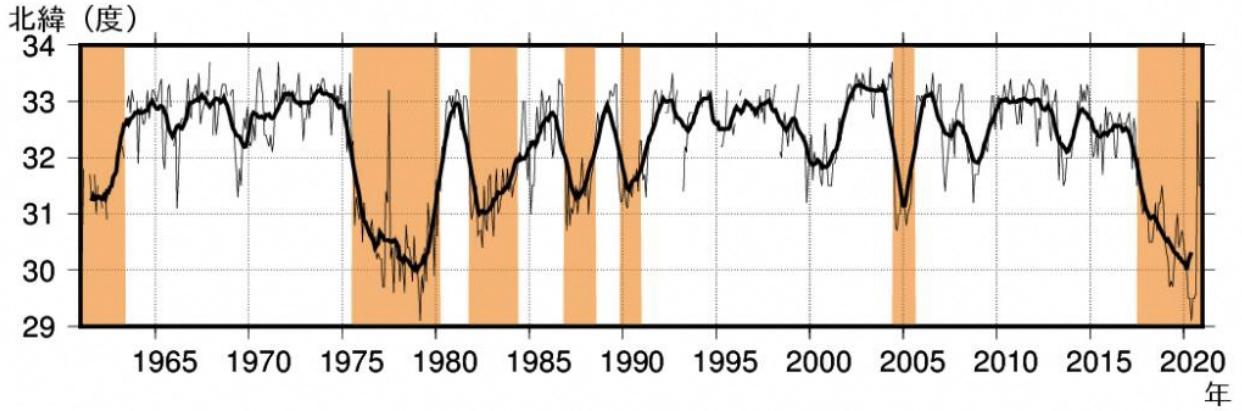


図 1 「森は海の恋人」水の循環研究会の検討の流れ

表 1 「森は海の恋人」水の循環研究会委員一覧

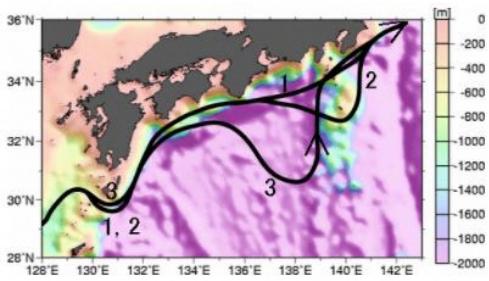
(五十音順、敬称略)

氏名	所属等	部会	
		陸域	海域
鈴木 伸洋 <委員長>	(国研) 水産研究教育機構 フェロー		部会長
石坂 承二	名古屋大学宇宙地球環境研究所教授		○
カサレト ベアトリス エステラ	静岡大学創造科学技術大学院特任教授		○
後藤 真太郎	立正大学地球環境科学部環境システム学科教授	○	
宗林 留美	静岡大学理学部地球科学科准教授		○
戸田 浩人	東京農工大学農学研究院自然環境保全学部門教授	○	
藤原 義弘	(国研)海洋研究開発機構 地球環境部門(海洋生物環境影響研究センター) グループリーダー代理		○
横田 久里子	豊橋技術科学大学建築・都市システム学系准教授	○	
吉崎 真司<委員長代理>	東京都市大学名誉教授	部会長	
吉村 千洋	東京工業大学環境・社会理工学院准教授	○	○
<顧問>			
秋道 智彌	山梨県立富士山世界遺産センター所長		
<アドバイザー>			
東郷 和彦	静岡県对外関係補佐官		
安田 喜憲(令和2年度まで)	NPO 法人森は海の恋人理事、前静岡県对外関係補佐官		



上図：東海沖における黒潮流路の最南緯度の経年変動（1961年1月～2020年12月）

東海沖における黒潮流路の月ごとの最南緯度を細線で、13か月移動平均値を太線で示しています。オレンジ色は黒潮大蛇行の期間を表しています。東海沖（東経136度～140度）で黒潮が北緯32度より南まで南下した状態で安定していることが黒潮大蛇行の判定の目安になります（下記「黒潮大蛇行とその判定基準について」を参照）。この黒潮流路は、深さ200mの水温資料、衛星の海面水温画像等から総合的に判断して決定したものです。



左図：黒潮の典型的流路（1：非大蛇行接岸流路 2：非大蛇行離岸流路 3：大蛇行流路）

出典：気象庁ホームページ (<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>)

※駿河湾内では、通常、反時計回りの流れが見られるが、黒潮大蛇行期には黒潮が分岐して駿河湾内に貧栄養の流れが多く侵入する場合があり、黒潮非大蛇行期よりも植物プランクトンの生産量が少なくなりやすくなることが予想される。令和2年度のモデル再現の取組に当たっては、黒潮の蛇行が弱く平均的な流況であった2015年と、大蛇行期にあたる2018年を分析年として選定した。

図2 黒潮流路の経年変動

c. 駿河湾及びその流域圏の概況

静岡県は東西155km、南北118km、総面積7,780km²で、全国では13番目の広さを有している。県土の南側は延長506kmの海岸線で黒潮の流れる太平洋に面し、北側には富士山など3,000m級の山々からなる北部山岳地帯を擁している。月平均気温の平年値は16.5°C、年間降水量の平年値は2,324.9mmで、北部山岳地帯を除いて全般的に温暖な海洋性気候である。県内人口は約360万人（令和2年国勢調査）である。

駿河湾は水深約2,500mの日本一深い湾として知られている。伊豆半島南端の石廊崎と御前崎を結ぶ湾口は約56kmで、奥行きは約60km、表面積は約2,300km²に及ぶ。海底勾配は急であり、「黒潮系海洋深層水」、「亜寒帶系海洋深層水」及び「太平洋海洋深層水」の三種類の深層水が存在する。大井川や富士川などの大河川からの栄養塩物質などの流入に加えて、駿河湾北部の富士山からの地下水や海底湧水等の影響も受け、沿岸域*から深海にかけて生物多様性に富んだ生態系が形成されている。日本沿岸に生息している魚類約2,300種のうち、約1,000種が駿河湾に生息しているとも言われており、古くから漁業も盛んに営まれている。

駿河湾流域には、富士火山帯に属して多くの温泉が湧出している伊豆半島や、日本三大急流の一つである富士川がある。駿河湾に流入する主な河川流域の諸元を表2に示す。

地質構造は、富士山周辺から伊豆半島北部にかけては新生代第四紀の溶岩の上位に粘着性の小さい火山灰を主体とする火山噴出物堆積層が分布するのに対し、伊豆半島南部は新第三紀層が分布する。標高 3,776m の富士山から深さ 2,500m の深海まで高低差は 6,000m 以上あり、変化に富む地形地質を有している。

表 2 駿河湾に流入する主な河川流域の諸元

	幹川流路延長 (km)	河床勾配	流域形状	流域面積 (km^2)
大井川	168	上流域：1/50～1/100 中流域：1/220 下流域：1/250	静岡県の中部に位置し、間ノ岳（標高3,189m）から静岡県の中央部を南北に貫流しながら駿河湾に注ぐ。流域には島田市、焼津市、藤枝市、吉田町、川根本町が含まれ、下流には扇状地が広がる。	1,280
富士川	128	上流域：1/100～1/700 中流域：1/200～1/400 下流域：1/300～1/400	山梨県と長野県境の鋸岳（標高2,685m）から山間渓谷部を抜け、甲府盆地を南流し、再び山間渓谷部に入り、静岡県富士市と静岡市の境で駿河湾に注ぐ。流域には甲府市、富士市及び富士宮市などが含まれている。	3,990
狩野川	46	上流域：1/180～1/500 中流域：1/1000 下流域：1/1800	伊豆半島中央部に位置する伊豆市の天城山系から北流し、田方平野に出て西へ転じて駿河湾に注ぐ。流域は沼津市、三島市、御殿場市、裾野市、伊豆市、伊豆の国市、函南町、清水町、長泉町の6市3町からなる。	852
安倍川	51	上流域：1/6～1/130 上中流域：1/150 下流域：1/250	静岡県の中部に位置し、静岡県と山梨県の県境に位置する大谷嶺（標高2,000m）から山間部を流れ、静岡平野を形成する扇状地に出てから静岡市街地を貫流して駿河湾に注ぐ。流域は静岡市に含まれている。	567

出典：大井川水系のホームページ | しづおか河川ナビゲーション (shizuoka-kasen-navi.jp)、日本の川 - 中部 - 大井川 - 國土交通省水管理・國土保全局 (mlit.go.jp)、安倍川水系のホームページ | しづおか河川ナビゲーション (shizuoka-kasen-navi.jp)、安倍川水系河川維持管理計画 (mlit.go.jp)、富士川水系のホームページ | しづおか河川ナビゲーション (shizuoka-kasen-navi.jp)、富士川河川維持管理計画 (mlit.go.jp)、狩野川水系のホームページ | しづおか河川ナビゲーション (shizuoka-kasen-navi.jp)、狩野川河川維持管理計画 (mlit.go.jp)

また、駿河湾は開放型の形状であることから外海からの影響が大きい湾であるが、その影響を左右するのが黒潮大蛇行と呼ばれる現象である。黒潮大蛇行は、紀伊半島から東海沖で黒潮が大きく南まで蛇行する流路が長期間継続する現象であるが、一度始まると 1 年以上にわたって続くことが知られている。2017 年 8 月末に始まった黒潮大蛇行は前回から約 10 年ぶりの現象であり、大蛇行中には暖流である黒潮が位置を変えることで、離岸が大きくなる紀伊半島沖では水温が下がる一方、関東から東海沖では黒潮が直撃するようになり温度が上昇する。これにより、水温分布や流れが大きく変わり、海洋生態系や気候に変化があらわれる。例えば、紀伊半島では黒潮が遠ざかり 2018 年冬期のサンゴ大量死の一因になったと考えられており、一方で黒潮が近づいた関東から東海沿岸では、シラスの不漁などが指摘されている。

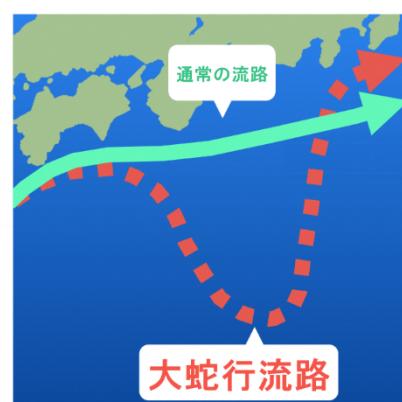


図 3 黒潮大蛇行のイメージ

3. 森・川・海のつながりを再現するシミュレーションモデルについて

a. モデル構築の目的

駿河湾流域や外海における変化が駿河湾内の生物生産に与える影響を推定するためには、森林から河川、海域、外海に至る水と栄養塩物質等のつながりを過去から現在まで再現でき、なおかつ将来の変化による影響を空間及び時間スケール※において連続的に推定できるモデルが必要である。駿河湾流域を包括して再現できるモデルは存在しなかったことから、本研究会において基礎的なモデルの構築を行うこととした。

また、構築したモデルを公開することにより、関連する研究が発展していくとともに、モデルによる推定精度の向上や新たな活用分野が広がっていくことが期待できる。駿河湾流域の環境や生物の状況を精度良く再現し、各構成要素の関係を科学的・定量的に推定することによって、海域生態系の保全やその恵みの持続的な利活用につなげられるモデル、いわば「スルガベイ・シミュレータ」を本研究において構築するものである。

b. モデルの特性

海域の生物生産に与える影響を推定するに当たり、現時点では、高次生態系※の生産・捕食等に関する詳細な知見が得られていないが、植物プランクトンは、駿河湾における生物生産の底辺を支える生物であり、その生産を推定することにより、高次生態系の食物連鎖の状況をある程度把握できると想定される。よって、まずは、将来の研究開発によって高次生態系の生産等まで再現できるモデルが構築されることを期待し、その基礎となる陸域や海域の変化が一次生産（植物プランクトン生産）に与える影響までを再現できるモデルを構築し、その生産の変化要因の推定から始めることとした。

モデルは、森林から河川水・地下水までの水量や水質などを再現する「陸域モデル」、その計算結果を受けて、海域の流れや水質、プランクトン生産量を計算する「海域モデル」から構成されている。

なお、陸域モデルについては、GETFLOWS（地圏環境テクノロジー株式会社開発、<https://www.getc.co.jp/ja/getflows/>）、海域モデルについては、伊勢湾シミュレータ（国立研究開発法人港湾空港技術研究所開発）を駿河湾流域に適用している。陸域モデルは従来困難であった地表および地下の水の流れを一体化して計算できる点、海域モデルはこれまで扱われていなかった海域中の微生物ループ※を考慮した点がそれぞれ特徴的である。

各モデルの詳細は次のとおりである。

＜陸域モデル「GETFLOWS」＞

「GETFLOWS」(GEneral purpose Terrestrial fluid-FLOW Simulator) は、陸域で生じる様々な水問題（水資源、水環境、水災害）において要請される実用的かつ客観的な水文・水理モデリングに供する事を目的として開発されたモデルである。

GETFLOWS の特徴は、陸域の水循環システムにおける様々な要素間の関係を定式化し、

従来困難であった地表および地下の水の流れを一体化させて計算できる点にあり、一般的な地下水解析、河川流出解析、洪水・はん濫解析、地表水・地下水の相互作用解析、汚染物質を含む移流分散解析、油層解析、熱解析など、極めて広範な分野における地圈流体モデリングと数値シミュレーションを可能としている。

陸域モデル「GETFLOWS」における対象要素とその関係は図4に示すとおりである。降雨・降雪、蒸発散など大気中との水の移動、農業や畜産などによって発生する栄養供給、地下水利用などの様々な要素を考慮に入れつつ、流域全体の地表水、地下水の流れを再現して、その結果、洪水の氾濫解析などの検討が可能なツールである。



図4 陸域モデル「GETFLOWS」

<海域モデル「伊勢湾シミュレータ」>

沿岸海域は陸域からの栄養塩物質等が流入し、プランクトンによる一次生産が活発に行われる、生態系にとって非常に重要な海域である。一方で、陸域からの栄養塩物質等の増大によって赤潮や青潮などの発生が問題となっている海域もあり、沿岸域の水環境は複雑であることから、現状理解や対策の立案を行うツールとして、数値シミュレーションモデルが必要である。海洋生物学の分野では、植物プランクトンを動物プランクトンが捕食するという古典的生食食物連鎖に加えて、細菌から原生動物※、動物プランクトンへ至る経路、いわゆる微生物ループの重要性が明らかとなってきた。本研究で適用した海域モデル「伊勢湾シミュレータ」は、この微生物ループを考慮した新たな生態系モデルである。

伊勢湾シミュレータの低次生態系※モデルにおいて考慮できる要素とその間の物質の流れは図5に示すとおりである。水中におけるプランクトンや、原生動物、細菌類など、これまで対象にできなかった微細な生物も要素に含めて、それらの生物間の物質循環を再現できるモデルである。

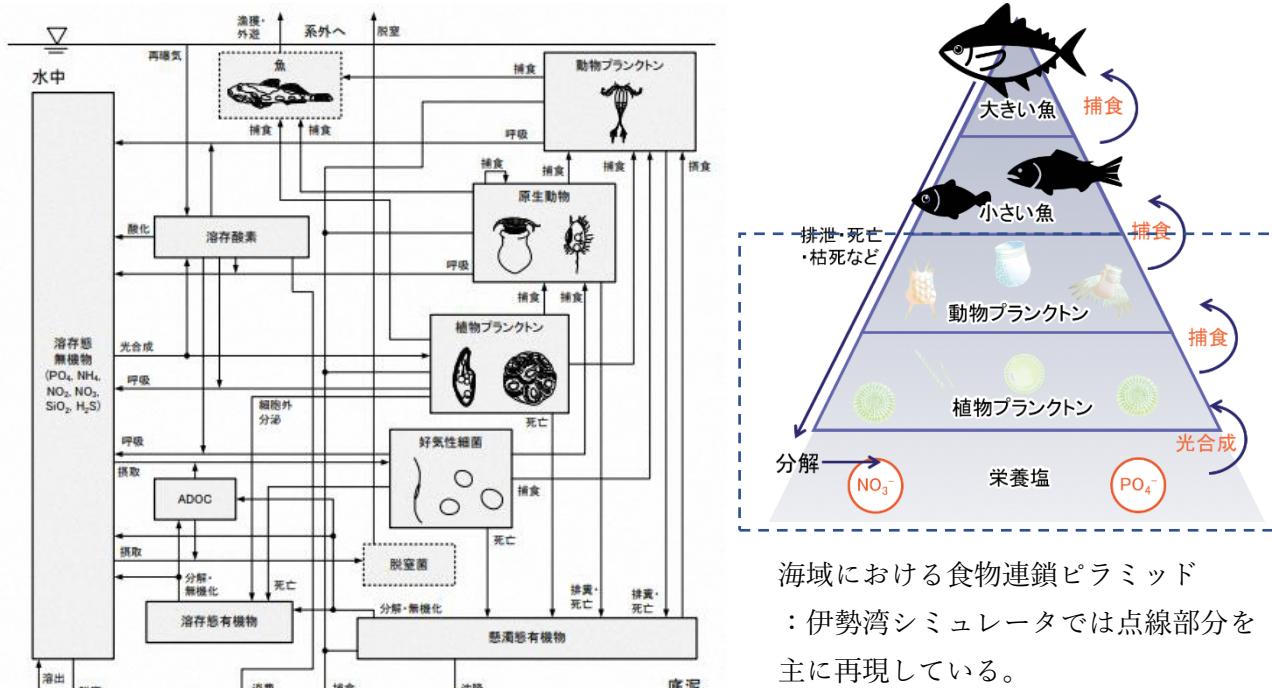


図 5 伊勢湾シミュレータにおける物質の流れ

c. モデルの全体像と対象領域

モデルの全体像と対象領域を図 6 に示す。

モデルの対象領域は、駿河湾流域とし、陸域側では富士川、大井川、安倍川、狩野川などを含む流域全体を範囲とし、海域は駿河湾内を基本とした。なお、湾口側は外海からの影響をできるだけ反映するために外海も一部含んだ位置にモデルの境界を設けた。

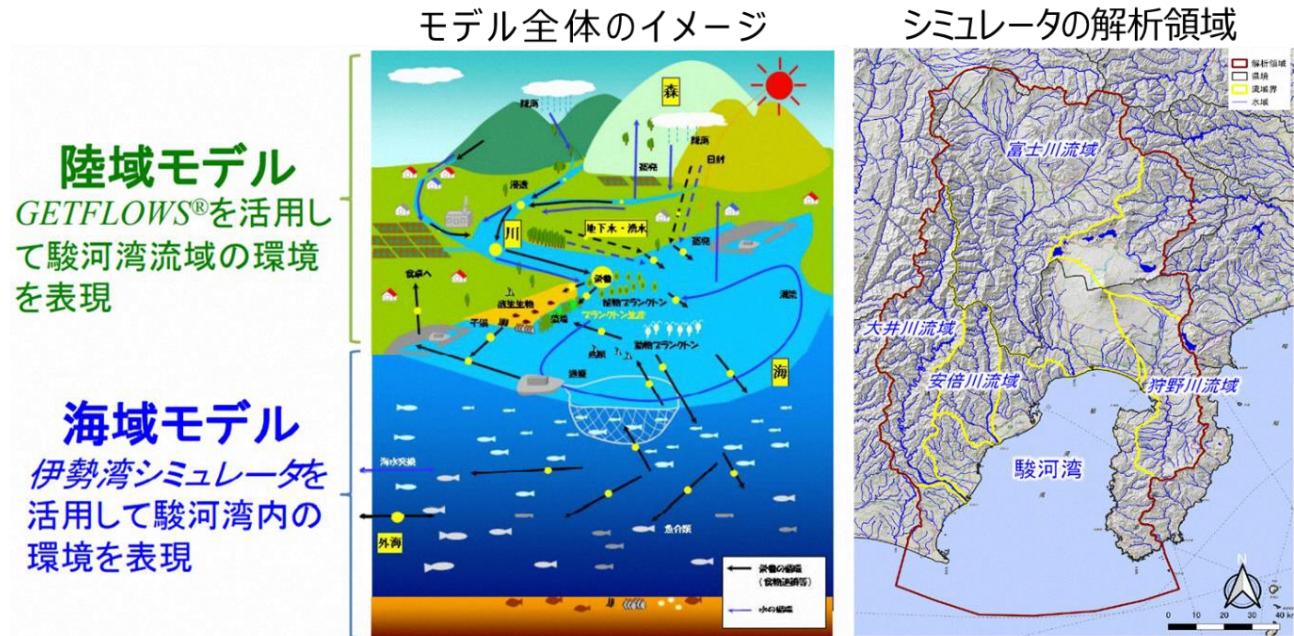


図 6 モデルの全体像と対象領域

d. 各モデルの構成と具体的な内容

前述のとおり、モデル全体は陸域モデルと海域モデルから構成されるが、さらにそれぞれ2つのモデルから構成される。モデルの詳細構成と概要を図7、モデル間のデータの収受等を図8に示した。

なお、モデルの構築にあたっては、再現状況の確認を行っており、その結果については付録における陸域モデル、海域モデルの再現性検証に示したとおりである。本研究会において、再現性の検証を行っており、一定の再現性があることを研究会において評価頂いたモデルである。

i. 陸域モデル

駿河湾流域での陸域における水循環、物質循環を把握・再現するモデルであり、次の2つから構成される。

1) 流出解析モデル*

降雨、風、気温等の気象条件を受けて、陸域の水循環・収支を想定するモデルである。河川水や地下水の水量を計算して、下記の陸域物質循環モデル*や海洋流動モデル*にその計算結果を受け渡している。

2) 陸域物質循環モデル

社会的要因（流域人口、土地利用）、流出解析モデルの結果を受けて、陸域の栄養塩物質等の循環を推定するモデルである。河川水や地下水における栄養塩物質等の供給量を計算して、下記の低次生態系モデルにその結果を受け渡している。

ii. 海域モデル

駿河湾での栄養塩物質等の流動・循環、低次生態系との関係を把握・再現するモデルであり、次の2つから構成される。

1) 海洋流動モデル

黒潮等の外海条件、流出解析モデルの計算結果を受けて、駿河湾の海水の流動を推定するモデルである。海域における潮流、海流、水温・塩分を計算して、下記の低次生態系モデルにその結果を受け渡している。

2) 低次生態系モデル

陸域物質循環モデル、海洋流動モデルの計算結果を受けて、駿河湾の栄養塩物質等と動物・植物プランクトンとの関係を推定するモデルである。モデル全体のアウトプットとして、駿河湾の生物生産の状況を示す。

なお、本モデルでは、駿河湾の生態系の中のプランクトンの挙動までを再現しているが、実際の生態系では、食物連鎖の上位にあたる魚類などが生息している。海域の生産性を評価するためには、本来、そこまで含めた生態系を再現することが理想ではあるが、餌となるプランクトンと魚類との間の関係等については未だ研究段階の検討が多く、モデル化できる情報がない。今後、さらに研究やモデルの発展が待たれるところである。

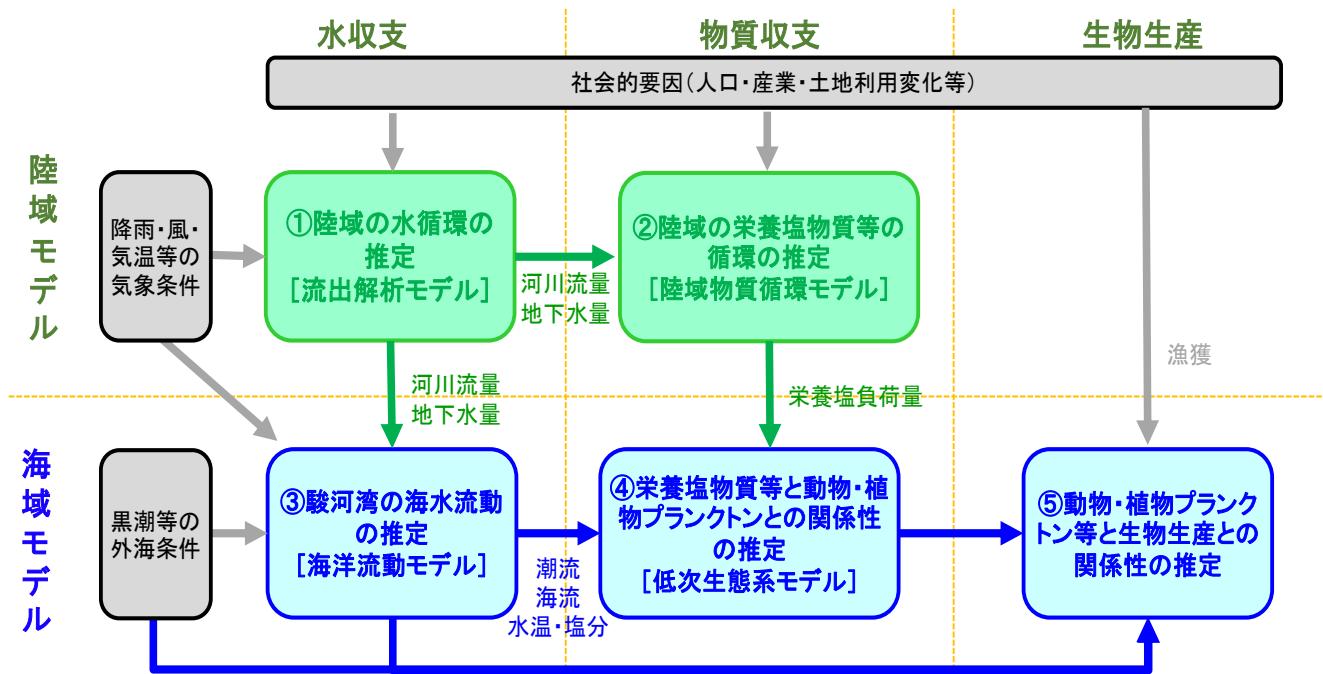


図 7 モデルの詳細構成と概要

e. モデルの設定条件

各モデルにおける設定の概要は以下に示すとおりであり、モデル間のデータの収受等は図 8 に示すとおりである。なお、詳細な設定条件については、付録編に示す各モデルの資料を参照頂きたい。

陸域モデルは、降水条件、蒸発散条件、標高、地表水の流動条件、土地利用条件、地下水の流動条件、水利用条件などを与え、境界条件として上面は無限大の領域を持つ大気層に設定するため定圧境界、側面・底面は閉境界、海域は無限大の領域を持つ海域に設定するため、定圧境界（塩分を考慮しない標高 0m で水位固定）を基本とした。なお、陸域物質循環モデルでは、生活排水、畜産排泄物※、土地利用（農地への施肥、森林）による栄養塩物質等の供給を設定、それぞれの負荷の原単位（単位時間・単位面積・人口当たり等の負荷量）を設定し、市町毎で統計量を掛けて負荷量とした。土地利用による負荷は各時代の利用データを基に、農地や森林、市街地の面積を算出し、各土地利用区分の範囲に負荷を与えた。

なお、ダムの扱いについては、他流域へ導水する過程はモデルに組み込んでいるが、ダム内での水の収支などは設定するための参考データも無いため、考慮していない。また、栄養塩については全窒素・全リンとして取り扱っており、ダムによって浮遊砂濃度が変化する効果は考慮できていない。また、駿河湾流域圏においては標高差が非常に大きく、森林や土壤の種類も空間的に異なるが、本研究ではその相違による水や栄養塩物質等の物質循環への影響は考慮していない。ただし、浮遊砂については、粒度組成と水流による浸食に関するパラメータを土壤分布に応じて与えている。

海域モデルは、気象条件、潮汐条件、外洋からの条件（水温・塩分）を設定して計算した。水平方向には約 1km メッシュ、鉛直方向には、水深 1,500m までは水深に応じて 1~300m メッシュで表現し、1,500m 以上は一定水深とした。陸域からの淡水流入による条件は、陸

域モデルの出力結果（各再現年の1月から12月の1年間）を用いた。主要河川、地下湧水などの流入先からそれぞれ設定した。なお、陸域モデルからの全窒素・全リンは河口域における平均値から形態別（各態窒素・リン）に分画して与え、さらにSS濃度に依存して、その分画比が動的に変動するように設定した。なお、ケイ素・鉄は現地調査結果（現地調査の内容については次項3.f参照）によって得られた分析値をそのまま利用した。湾外からの栄養塩等の負荷量は、定期海洋観測結果（気象庁）、中央水産研究所による本州南方の東経138度線（御前崎沖定線：O-line）での水質調査結果などを利用し、水温の関数として、栄養塩濃度の境界条件を設定した。

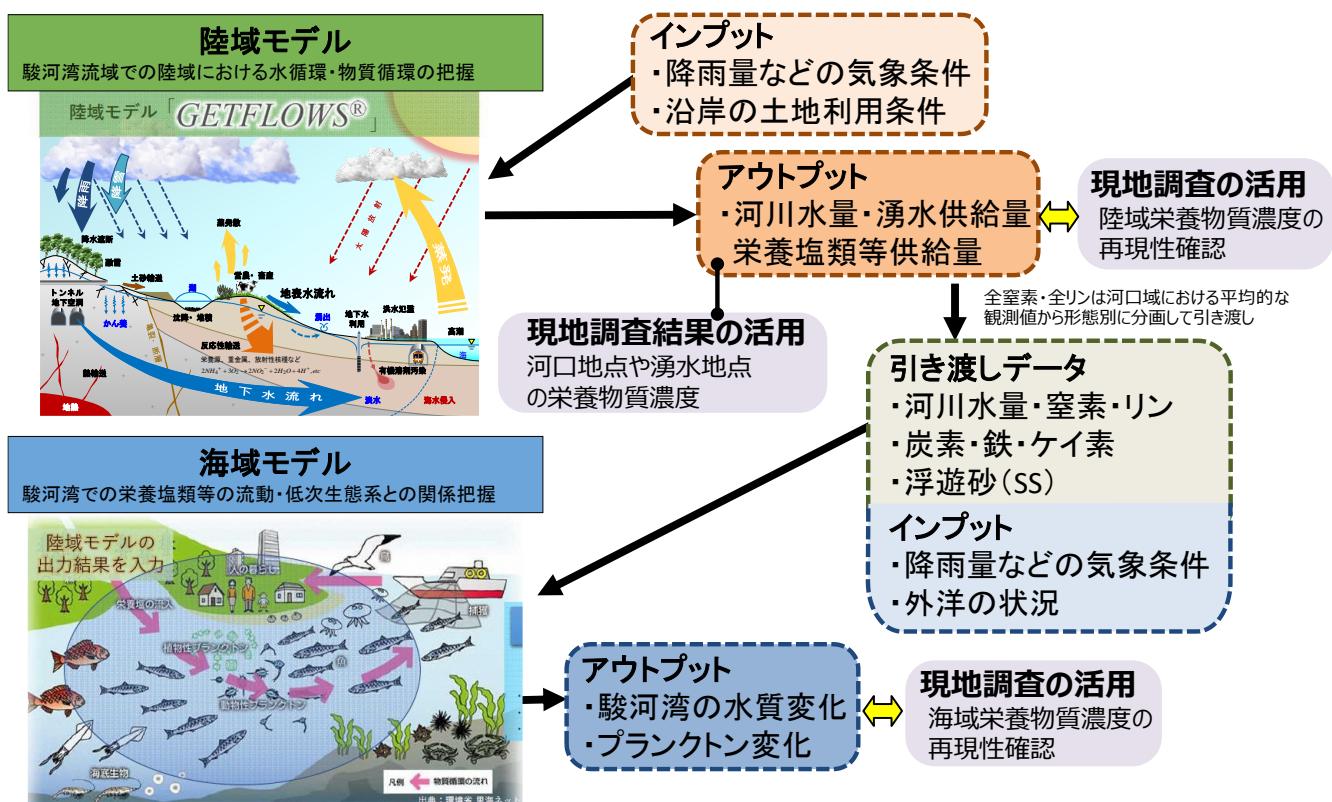


図8 モデル間のデータの収受等

f. モデル構築にあたっての情報収集（現地調査）

モデル構築にあたって条件設定や再現性検証のため、駿河湾流域における水質など様々な既存データを収集した。その結果、情報不足であった駿河湾流域の栄養塩物質等の分布（特に鉄やケイ素など）については、現地調査によって把握することとした。

現地調査は、ケーススタディ水域にあたる富士川・大井川流域から海域までに各10地点を設けて、陸域から海域にかけての栄養塩物質等（窒素、リン、鉄、ケイ素など）についての採水分析、海域での多項目水質計による鉛直水質測定と動物プランクトン採集分析を令和2～3年度の2年にわたり実施（令和2年度：9月、11月、2月の3回、令和3年度：5月・降雨後の2回）した。また、令和3年度はそれに加えて、今後衛星データをモデルの

検証材料として用いることを目指し、海域におけるクロロフィル a*や SS などの採水分析を行った。

以上の現地調査結果は、図 8 に示すようにモデルの条件設定や再現性確認に活用した。また、令和 3 年度に実施した海域におけるクロロフィル a などの採水分析結果は、後述の図 71 に示すように衛星データとの相関性を検討して、今後衛星データを再現性確認などに活用するための検証を行った。

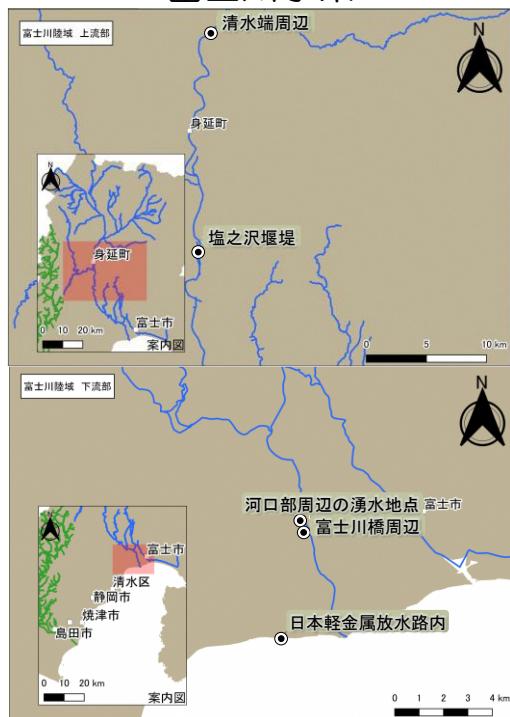
主な調査結果は以下のとおりである。なお、現地調査の詳細は付録編を参照頂きたい。

- ・ 植物プランクトンが利用可能な栄養塩物質等（無機態窒素、リン酸態リン、溶存鉄、溶存ケイ素*）に着目すると、無機態窒素、リン酸態リン、溶存ケイ素の濃度は調査地点ごとにみると調査時期で大きな差はみられなかった。一方で、これら全項目の濃度は大井川に比べて富士川で高い傾向がみられた。また、富士川流入先沿岸部では、無機態窒素、リン酸態リン、溶存ケイ素の濃度は降雨後に高い傾向が確認された。
- ・ 富士川・大井川ではクロロフィル a 濃度と SS の値は、衛星データからの推定値と本調査による実測値で概ね一致する傾向が確認された。
- ・ 参考に、現地調査の調査地点を図 9 に、主な現地調査結果を図 10 に示す。

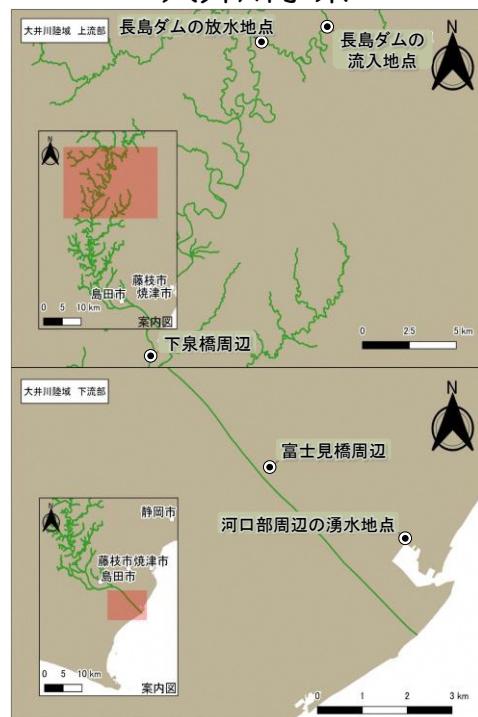
<調査地点図>

陸域の調査地点

富士川水系

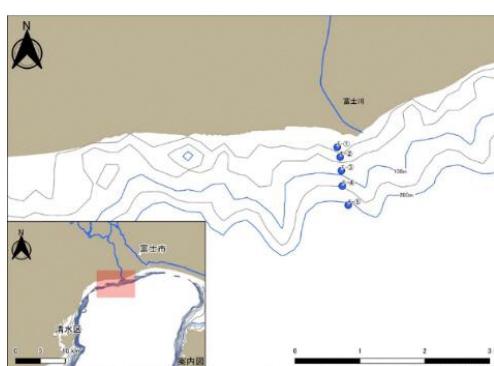


大井川水系



海域の調査地点

富士川流入先沿岸部



大井川流入先沿岸部

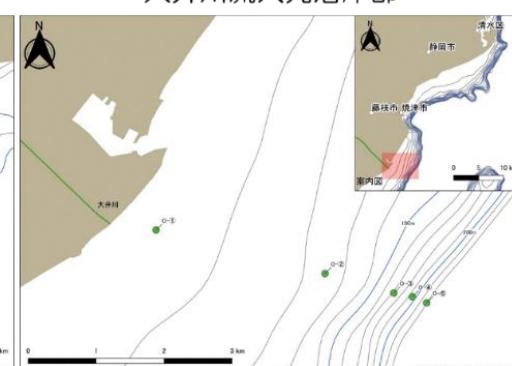
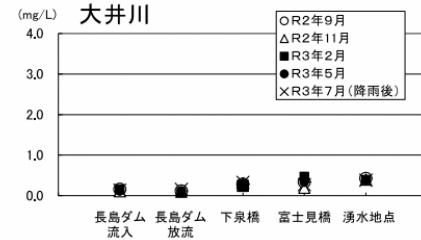
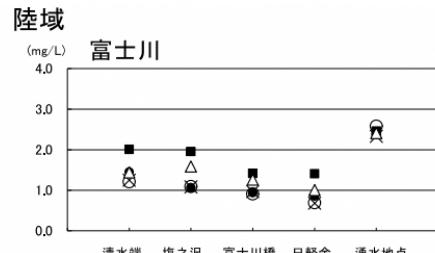
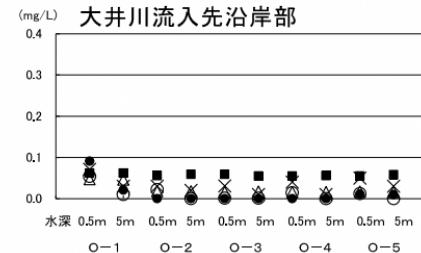
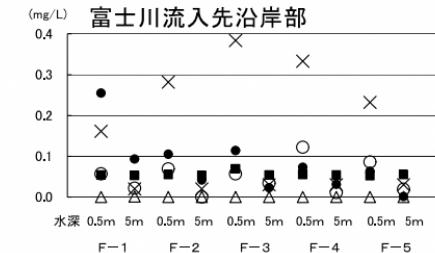


図 9 現地調査の調査地点

無機態窒素

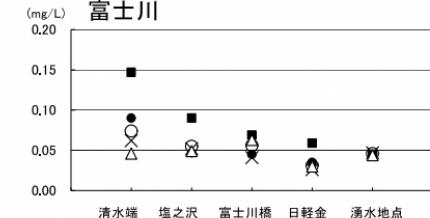


海域



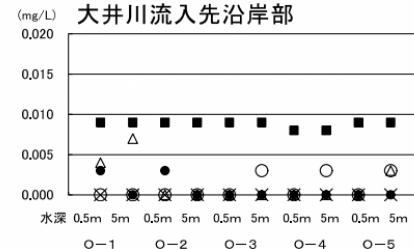
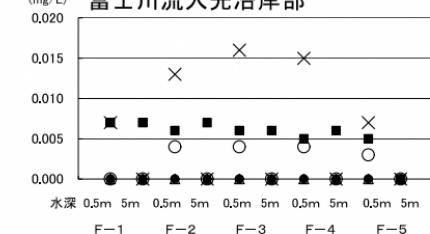
* 検出限界値未満は0とした。

リン酸態リン



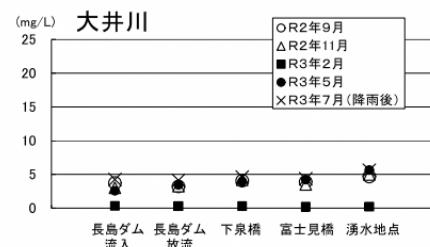
* 検出限界値未満は0とした。

海域



* 検出限界値未満は0とした。

溶存ケイ素



* 検出限界値未満は0とした。

海域

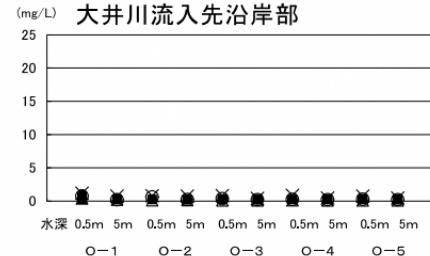
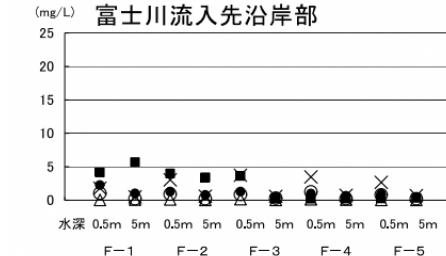
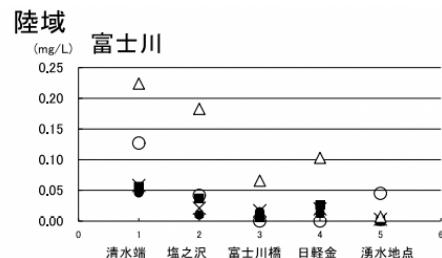
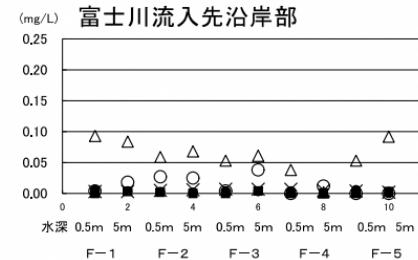


図 10(1) 主な現地調査結果

溶存鉄

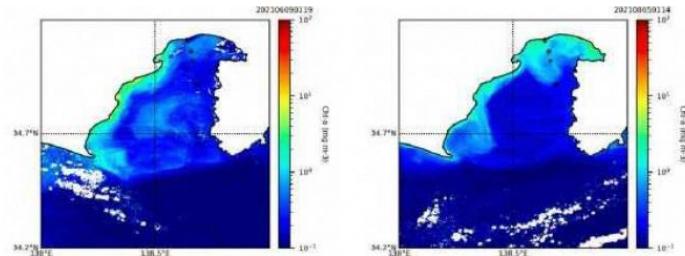


海域

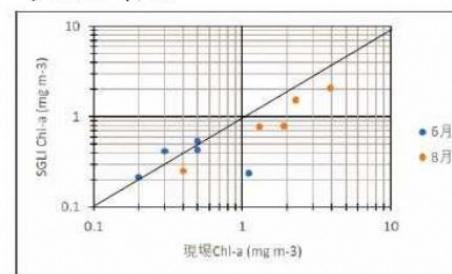


* 検出限界値未満は0とした。

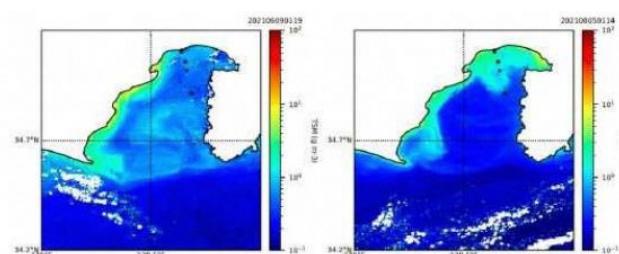
クロロフィルa



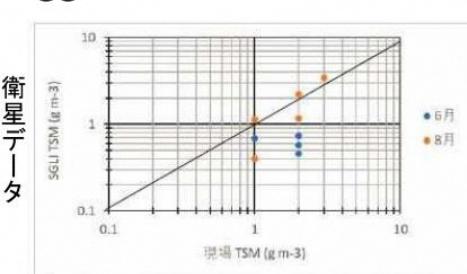
クロロフィルa



SS・濁度



SS



濁度

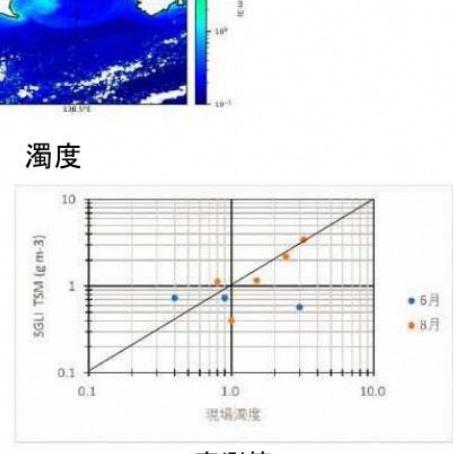


図 10(2) 主な現地調査結果

g. 駿河湾流域の地勢とモデル再現結果からみえる環境特性

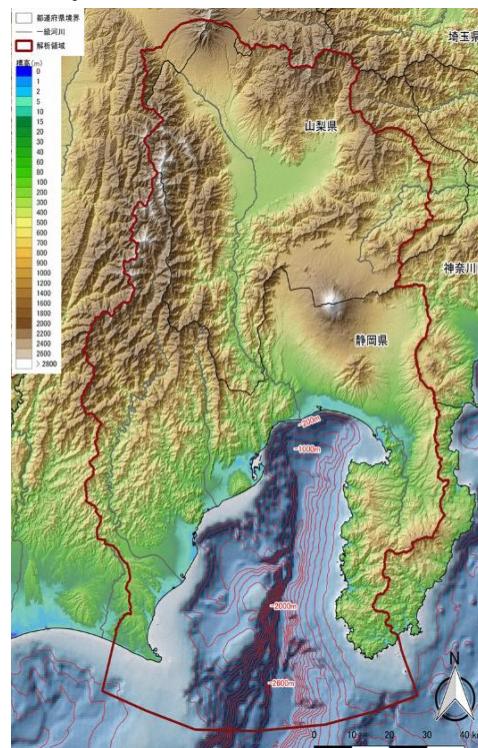
i. 駿河湾流域の地勢

駿河湾は、伊豆半島の石廊崎と御前崎を結んだ線を湾口とした内湾であるが、湾口部は水深 2,500m 以上、湾奥部でも水深 1,000m 程度に達する急峻な海底地形を特徴とする日本一の深海湾である。また、湾を取り囲むように東側に伊豆半島、北側に富士山、北西側に南アルプスが存在し、これらの地域を源流とする。

4 つの一級河川がもつ広大な河川流域（狩野川 852 km²、富士川：3,990 km²、安倍川：567 km²、大井川：1,280 km²）から豊富な淡水が流入している（図 11）。また、流域の土地利用は、全体的には森林面積 496,865ha（森林・林業統計要覧 2021）であり、森林が県土の約 6 割を占めるが、静岡市周辺の沿岸部や甲府市周辺では、建物用地※やその周辺に水田などの農用地が多く存在している。過去 40 年程度（1976 年から 2016 年）の変化傾向をみると、建物用地が増加している傾向が確認されている（図 12）。

また、流域の地質は、各流域の上流部には主に、堆積岩、花崗岩、火山岩がみられ、沿岸部には主に砂礫層がみられている。表層の土壤は、全体としては褐色森林土が多いが、富士山西麓では泥炭土が多いといった特性もみられている（図 13）。

静岡県内の平均気温は、沿岸部では 15~16°C と比較的温暖であるが、標高の高い場所では 11~12°C と差が大きい。日本一の標高差を持つ県で、海岸に近い地域の海洋性気候と、標高の高い内陸台地や山間部の内陸性気候とに分かれ、伊豆半島の天城山付近や富士山麓などでは雨が多い傾向がみられる。



データ出典：

陸域：基盤地図情報数値標高モデル 10m メッシュ（国土地理院）

海域：500m メッシュ水深データ（J-EGG500）（日本海洋データセンター）

図 11 駿河湾流域から海域に至る地形

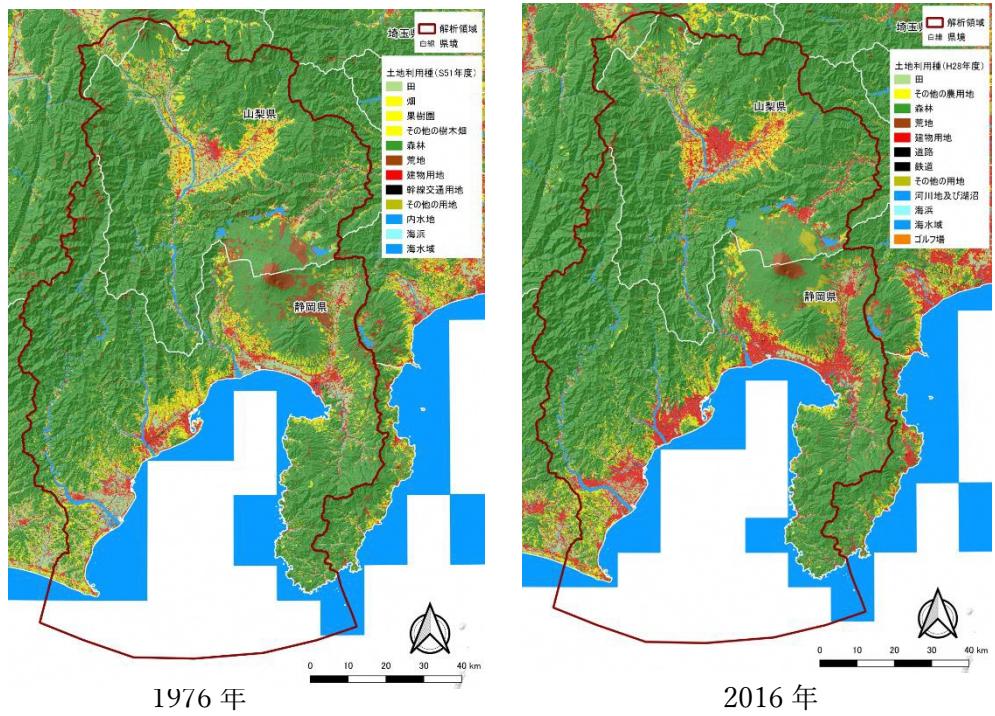
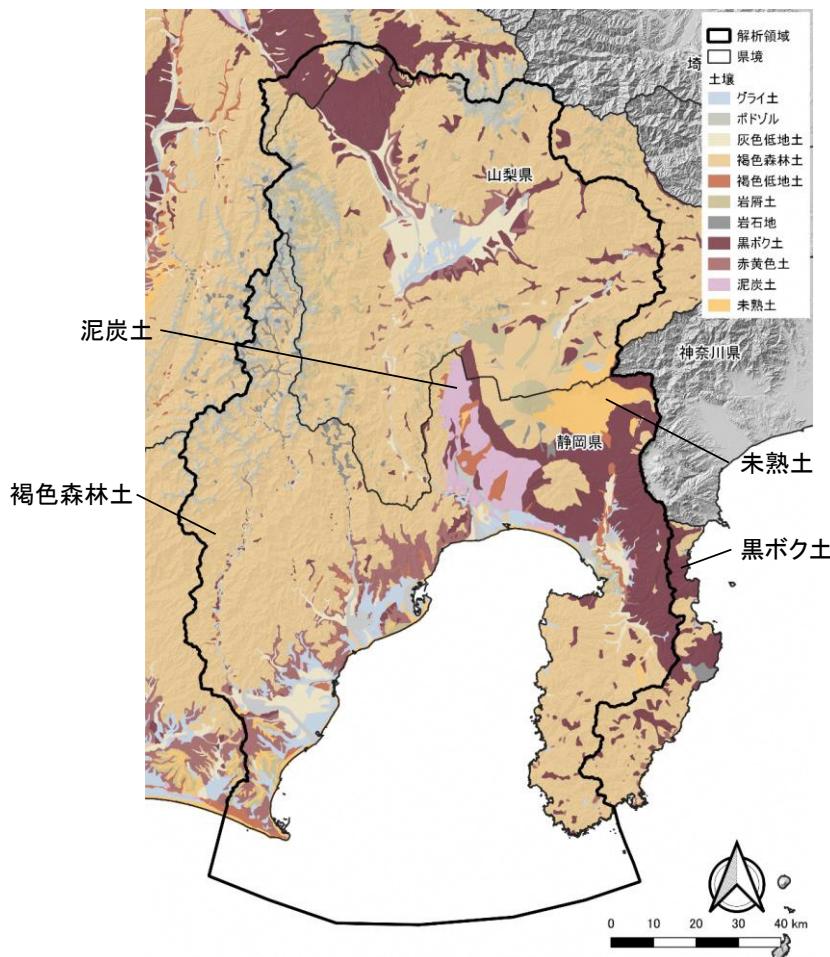


図 12 駿河湾流域の土地利用の変遷



データ出典：20万分の1 土地分類基本調査（土壤図）（国土交通省）

図 13 駿河湾流域の表層土壤

ii. 森・川における水循環の特性

＜駿河湾流域の流れの特性＞

平均的な気象条件を与えて得た河川の流速を用いて、地表面直下に均等に配置した粒子が、流動していく軌跡の検討結果を図 14 に示す。なお、ここでは、地表面に沿って流動する地上の水を地表水、地表面よりも下に存在する水を地下水と定義している。

代表的な各一級河川の上流域などの山地の多くでは、地表水は比較的近傍の谷部へ湧出し、そのまま海域まで流下する軌跡が示されている。

一方、富士山など一部の透水性の高い山地では、比較的長い経路で地下水として流動し、下流域で湧出している特性をもつ。また、大井川や安倍川下流域の平野部においても、比較的長い経路で地下水として流動し海域に流出することが認められる。このように一部の地域では、地形の特性の影響を強く受けた地下水の流動経路が示されている場合もみられる。

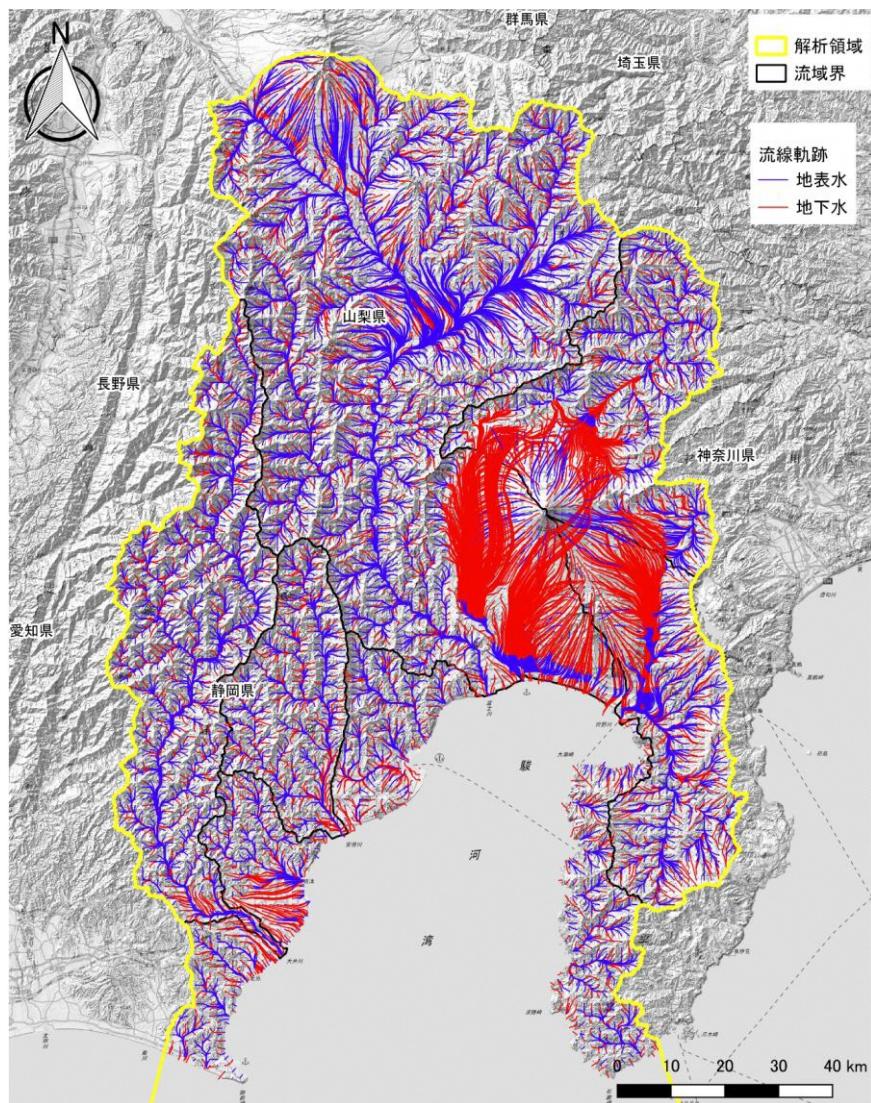


図 14 地表面下に均等配置した粒子が流動していく軌跡の検討結果

＜駿河湾流域の水収支特性＞

駿河湾流域における年間の水収支（2015年）の算定結果を図15に示す。水収支を構成する各項目は、年間の流量（億m³）だけでなく、その値を駿河湾流域の面積（約9,022km²）で割って単位面積当たりの水量を高さの単位（mm）で示したものも併記している。

降水量（2594mm）と蒸発散量（808mm）、浸透量（1561mm）の関係を見ると、降水量から蒸発散量を差し引いたほとんどの水量が一旦地下に浸透していることがわかる。

さらに、地下への浸透水量（1561mm）のうち、その4%程度（60mm）が取水され、約4%（58mm）が地下水として海に流出し、これらを除いたものが陸域で湧出（1350mm）し、地表水・地下水として海に流出（それぞれ1637mm、58mm）していることが想定される。また、地表水として海に流出するまでの過程で、河川からの取水やかんがい、下水処理による放流など人間活動による水の収支がある。

最終的に地表水として海に流出する水量は、地下水として流出する値の約30倍であり、ほとんどが地表水として海に流出していることが想定される。

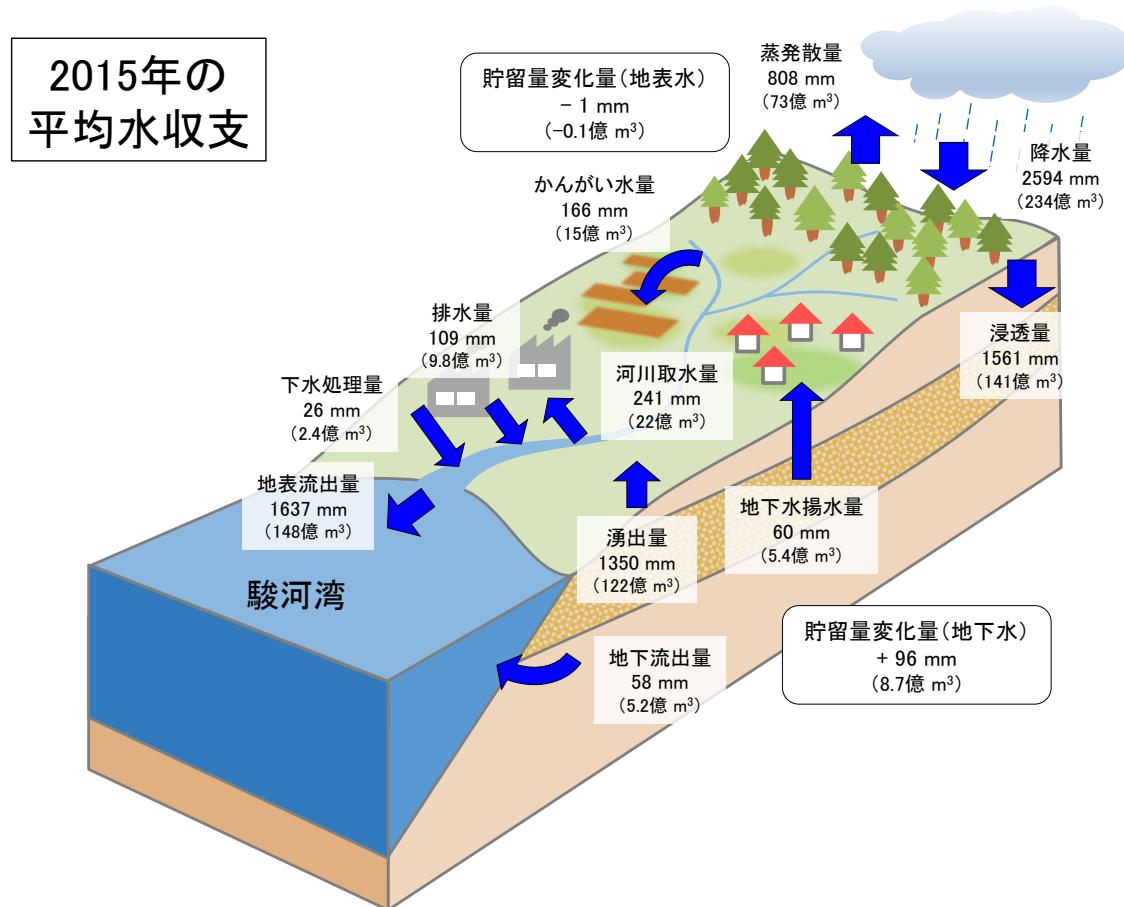


図15 駿河湾流域における年間の水収支（2015年）

iii. 森・川から海への水循環とプランクトン生産の特性

＜駿河湾内への河川水の供給とそれによる一次生産※特性＞

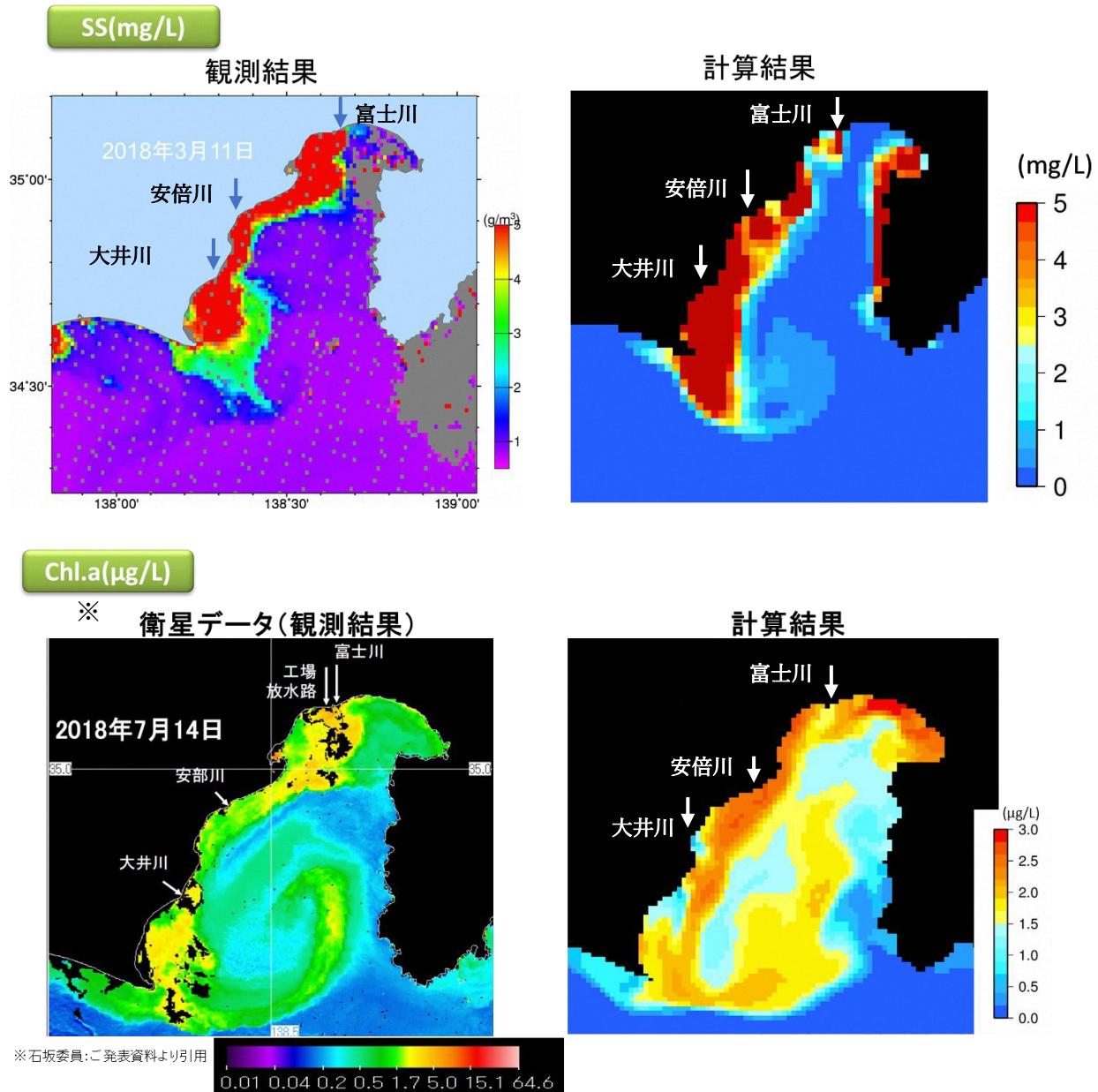
河川から海域への淡水・栄養供給の過程は、特に淡水供給が多くなる出水時※の SS（濁り※）の状況や SS とともに供給される栄養塩物質等によって起こる一次生産の量であるクロロフィル a の分布をみることが効果的である。

出水時の駿河湾における SS（濁り）とクロロフィル a（植物プランクトン量の指標）の衛星データによる観測結果とモデルによる計算結果を図 16 に示す。なお、SS の分布を示した 2018 年 3 月 11 日はその前の 8 日から 9 日にかけて、静岡で約 150mm、クロロフィル a の分布を示した 2018 年 7 月 14 日はその前の 6 日から 12 日にかけて、静岡で約 100mm の降雨が確認されている。

駿河湾沿岸では、降雨後に特に富士川から大井川に至る西側沿岸に大きな SS（濁り）が確認され、その分布に対応するようにクロロフィル a の分布も確認される。

また、クロロフィル a は富士川から大井川付近までに多く分布するだけでなく、その分布は湾口付近から湾央へ向かって回帰する様子も確認されている。駿河湾内には、反時計回りの流れがあることが知られているが、富士川から大井川まで供給された河川水がその流れにのって湾内を循環し、その中に含まれる栄養塩物質等を湾内に拡散させつつ、植物プランクトン生産を起こすメカニズムが確認できたものと考えられる。

以上のように、駿河湾流域の各河川からの水や栄養塩物質等の供給は、その流入先の海域の生産を支えるだけでなく、湾内の流れにのって拡散・循環することで、湾内全体の生産にも寄与していると考えられる。



※Chl.a では衛星データの黄色は計算結果の黄色から橙色に相当

図 16 降雨時の SS とクロロフィル a の観測結果とモデルによる計算結果

＜流域からのミネラル分供給特性＞

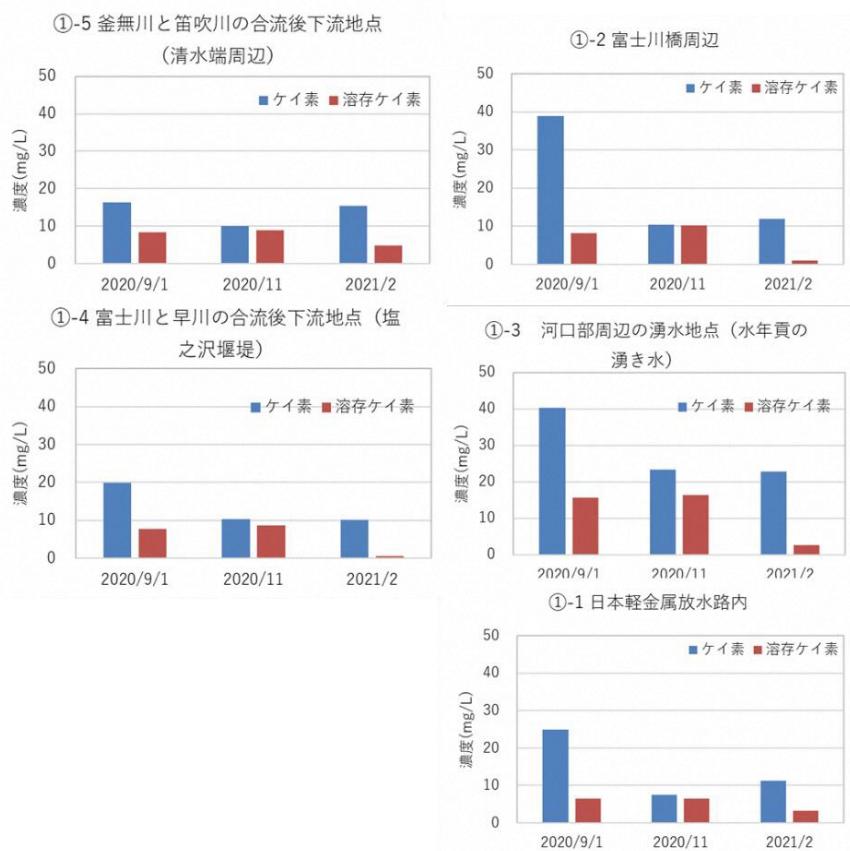
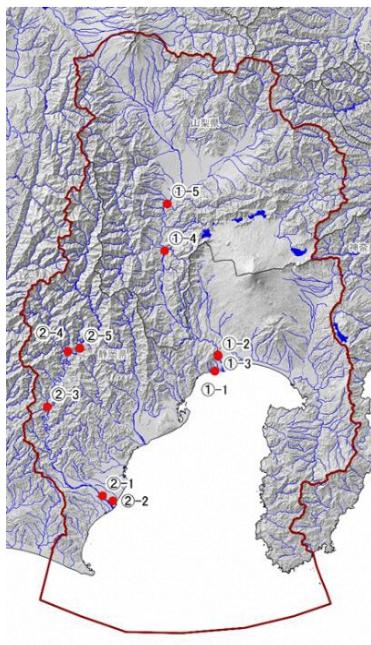
流域から供給される栄養塩物質等の中には、一般的に知られている窒素、リンなど以外に、鉄やケイ素などのミネラル分があり、海域における特に沿岸部の一次生産を左右する重要な物質の1つと考えられる。

ケーススタディの対象水域としている富士川・大井川各5地点における2020年9月、11月、翌年2月のケイ素濃度を図17に示す。

富士川では、いずれの地点においても、冬季（2月）は溶存ケイ素濃度が低くなる傾向があるが、上流域と下流域での濃度差は小さい結果であった。また、湧水のケイ素濃度はやや高い傾向がみられた。

大井川においても富士川と同様の季節的な傾向などがみられたが、富士川よりも濃度が低い傾向がみられた。その要因としては、それぞれの流域に分布する地層の鉱物組成の違いや、その地層と地下水との接触時間の違いなどが考えられる。なお、ケイ素はほとんどの地層に含まれていることを踏まえると、大井川流域は富士川流域に比べて、透水性が相対的に低く、地下水が地下深くまで浸透しにくいために地層との接触時間が短くなり、そのことが、濃度を低下させている要因ではないかと考えられる。

富士川



大井川

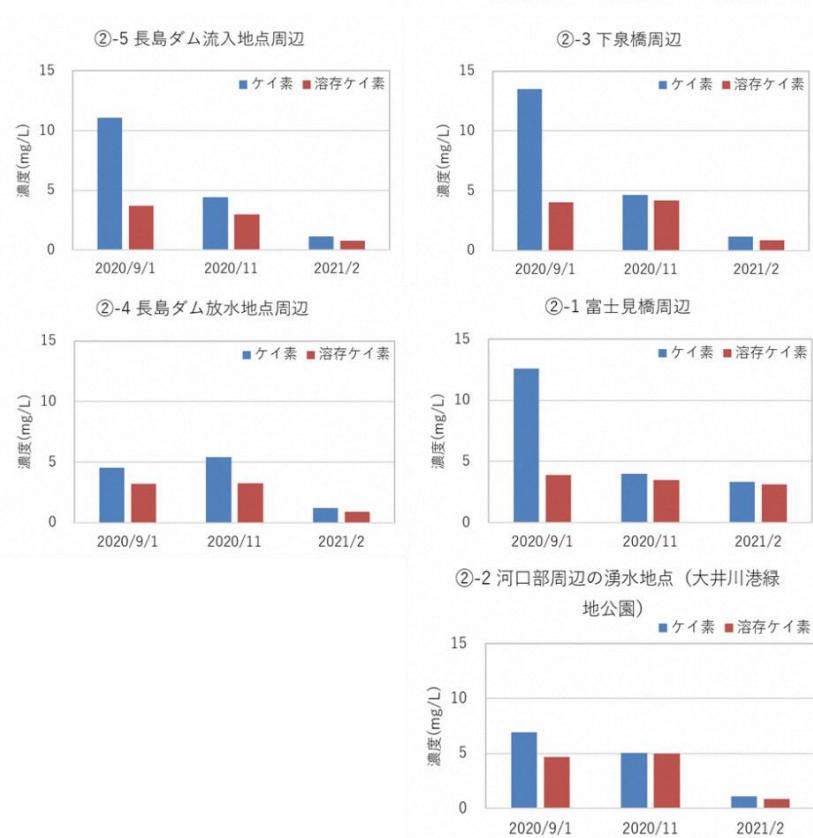
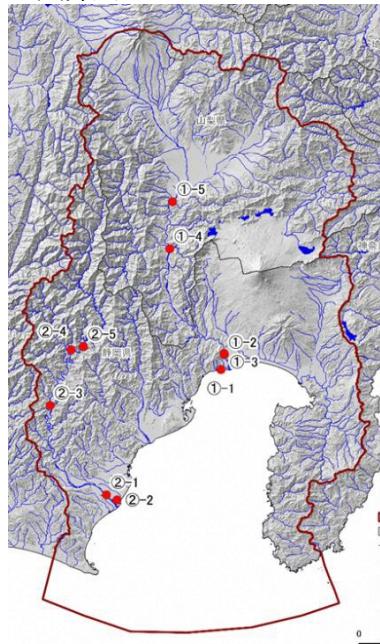


図 17 現地調査における富士川・大井川のケイ素濃度

＜駿河湾における植物プランクトンの発生※特性＞

モデルによるクロロフィルaおよび植物プランクトンの再現結果を図18に示す。

駿河湾では、春季の植物プランクトンのブルーム※の発生時期に大型珪藻※を中心とした植物プランクトン(*Thalassiosira*属など)が多く発生し、秋季のブルーム時には、小型の植物プランクトン(*Asterionellopsis*属など)が多く発生することが示唆されている(Dinh et al., 2021)。

このような季節的な植物プランクトンの発生※特性は、モデル計算結果においても同様に再現されており、さらに食物連鎖の上位に位置する魚類などの生息や成長を左右する重要な特性と考えられる。

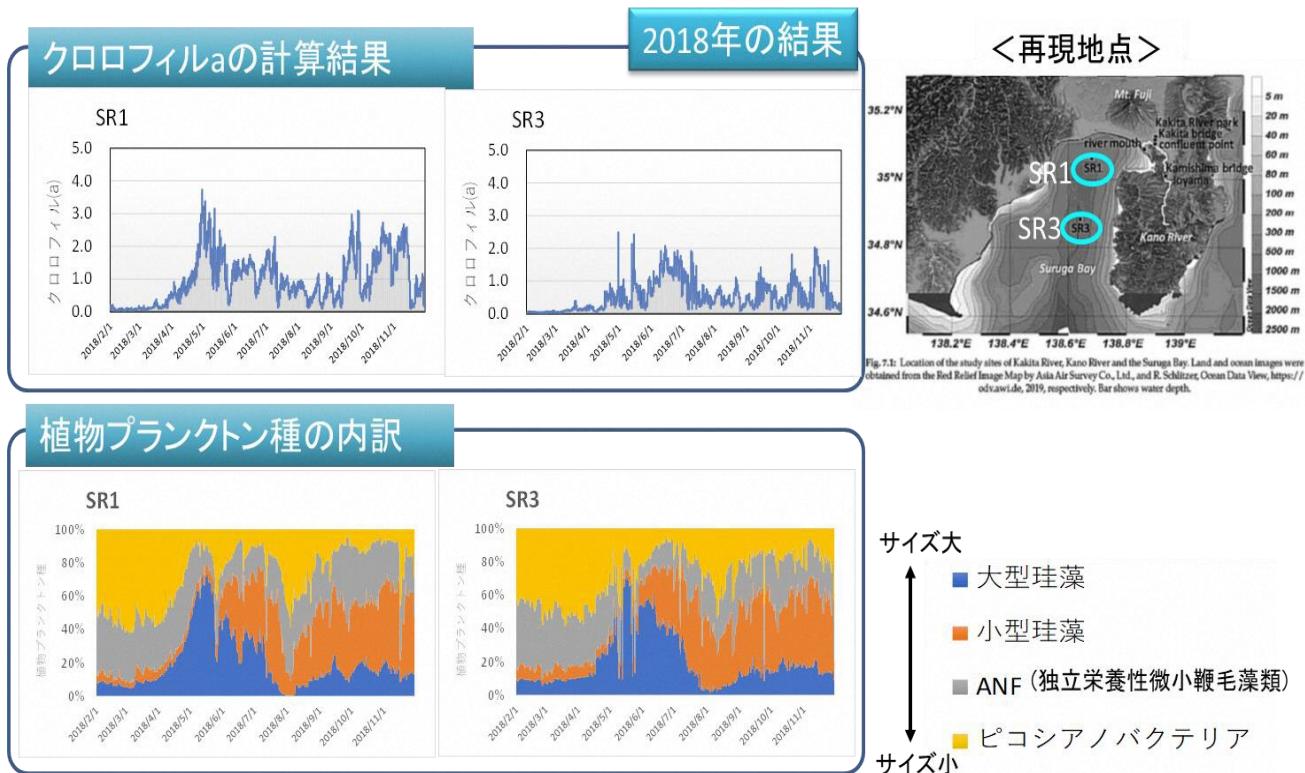


図18 モデルによるクロロフィルaおよび植物プランクトンの再現結果
(上図はクロロフィルa量の実測値、下図はモデルによる植物プランクトン計算結果)

4. モデルを用いた森・川と海の生産との関係解析結果

ここでは構築したモデルを用いて、研究会の目的である森林・河川と海域の生産との関係を解析した。本モデルは、森林から河川、海域にかけて全体を対象にして連続的に構築された全国的にも実践例の少ないものであり、森林・河川と海域の生産との関係が定量的に検討できるものである。

関係解析にあたっては、まず、海域の生産に寄与する栄養塩物質等の主な供給源について解析した。さらに、その供給源のうち、地表水・地下水からの栄養塩物質等の供給について、各流域の特性を解析し、今後の施策の方向性を検討するための知見を得ることとした。

これらの解析を以下では寄与度分析と呼ぶ。寄与度とは、様々な栄養供給源などがプランクトン生産に対して効いている程度を示している、

a. 駿河湾へ流入する栄養塩物質等の供給源に関する寄与度分析

i. 分析方法

駿河湾へ流入する栄養塩物質等の主な供給源のイメージを図 19 に、分析にあたってのモデル検討項目一覧を表 3 に示す。

本分析においては、駿河湾へ流入する栄養塩物質等の主な供給源として駿河湾に注ぐ河水および地下水とそれ以外の湾外水に便宜的に区別した。なお、湾外水はさらにその供給源の違いから、黒潮系水※、100m 以深から湧昇※・混合する深層水、湾内に流入後の湾沿岸表層水などが含まれるが、ここではそれを一体として扱っている。

上記を前提として、植物プランクトンの生産（一次生産）に寄与する駿河湾へ流入する栄養塩物質等の供給源別の寄与度を検討した。具体的には、栄養塩物質等の供給源ごとにその供給を無くした 4 つの検討（表の①～④）の計算結果と現況再現※結果を比較することにより、各供給源からの栄養塩物質等の供給が無くなった場合の一次生産の減少傾向の比較から寄与度を検討した。

各供給源の寄与度の検討にあたっては、その供給源を無くしたケースを 1 月から 12 月にかけて 1 年間継続して与えて計算を実施した結果をもとに、水温や降水量などの気象条件などにより季節的に寄与度が変化する可能性があることを踏まえて、四季別に該当する各 1 カ月間（冬季：2/15-3/15、春季：4/15-5/15、夏季：7/15-8/15、秋季：9/15-10/15、特段の記載のない場合には以後の四季はこの期間を対象とした計算結果とする）の結果を集計した。なお、湾内の栄養塩物質等に影響を及ぼすと推定される湾外水の寄与をできる限り把握するために、最近の黒潮大蛇行の状況を反映した 2018 年を対象年として検討した。

● 陸域からの栄養塩物質等の供給

- ・河川水
- ・地下水

● 湾外からの栄養塩物質等の供給

- ・湾外水（黒潮系水）

※表層の黒潮系水は貧栄養、黒潮の蛇行状況によってその湾内への影響は年によって変動

- ・湾外水（深層水）

※湧昇・混合を通して湾内表層に供給、栄養塩は豊富

- ・湾外水（沿岸表層水）

※陸水（モデルの対象範囲に限らず）の影響を受けた沿岸水で、黒潮系水などにより湾内に流入、栄養塩は豊富

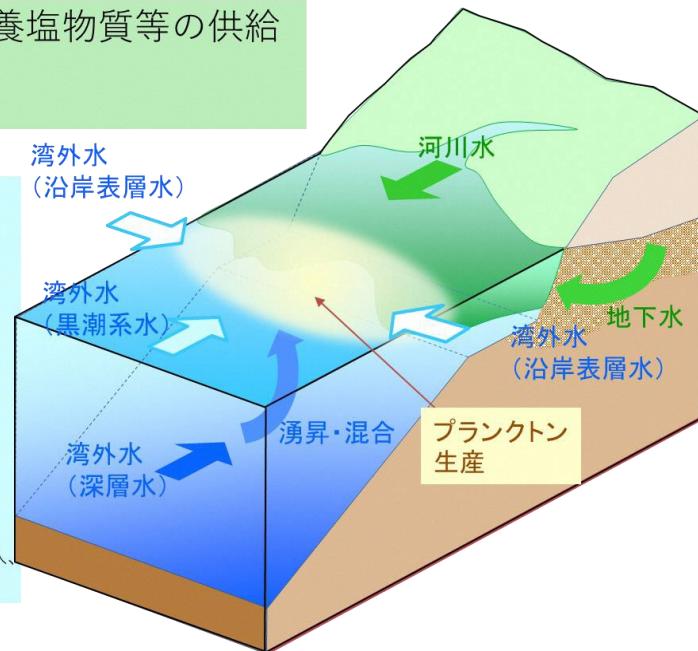


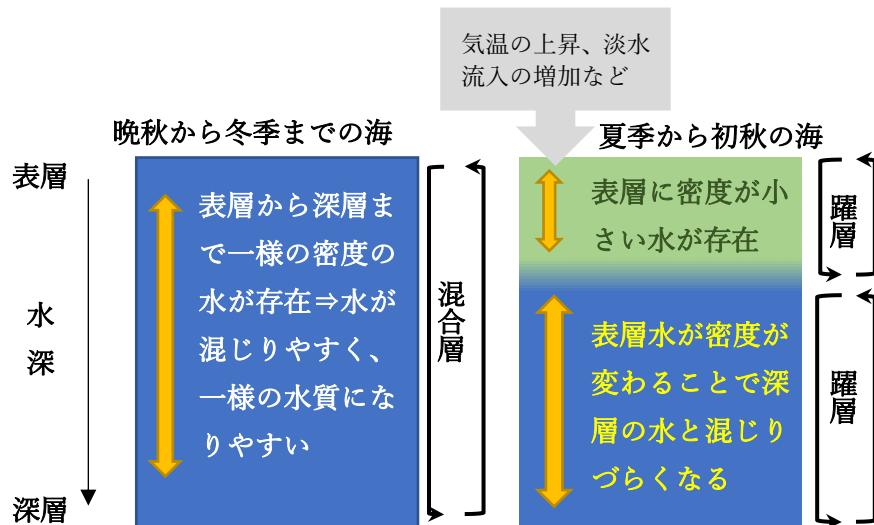
図 19 駿河湾に流入する栄養塩物質等の主な供給源のイメージ

表 3 分析にあたってのモデル検討項目一覧

寄与度検討項目	具体的な内容
現況再現	2018 年の現況
陸域（河川水・地下水）から供給される栄養塩物質等の寄与	<p>①河川・地下水からの栄養供給無し 地下水を考慮しないとともに、河川水の栄養塩物質等の濃度を 0 とする（参考として地下水のみを考慮しない場合も検討）</p> <p>②河川・地下水からのケイ素・鉄供給無し 河川水および地下水のケイ素と鉄の濃度を 0 とする</p>
湾外から供給される栄養塩物質等の寄与	③湾外水からの栄養供給無し 湾外水の全水深層の栄養塩物質等の濃度を 0 とする
深層水から供給される栄養塩物質等の寄与	<p>④湾外水 100m 以深からの栄養供給無し 湾外水の 100m 以深のみの栄養塩物質等の濃度を 0 とする ※深海区分を 100m に設定し、寄与を把握する</p>

<コラム：躍層と鉛直混合*>

海水は、水温や塩分によってその密度が異なり、密度の異なる水同士は混じりづらくなります。温帯域では、夏季から初秋は気温の上昇などによる表層の水温上昇や、降雨の増加に伴った河川水の流入の増加による塩分低下によって、表層水*の密度が小さくなり、深層水と混じりづらくなります。一方、晚秋季から冬季は、気温の低下によって表層の水の密度が大きくなり沈みやすくなったり、さらに強風によって水がかき混ぜられることによって、混合しやすくなります。このように水温や塩分、密度などの変化が起きる層を「躍層」、水温・塩分・密度が均一で水が混合しやすい状態を「混合層」と呼びます。深層まで混合があると、深層にある栄養塩物質などが表層に届きやすくなります。



<コラム：植物プランクトンのブルーム>

多くの温帯海域では、春と秋に「ブルーム」と呼ばれる、植物プランクトンが大量発生する現象が確認されます。鉛直混合が盛んな冬季には、日射量が少なく、さらに混合によって光が届かない深層に植物プランクトンが運ばれてしまうので、表層に栄養塩物質等はありますが、植物プランクトンは増加しにくいと考えられます。春になり日射量が増加するとともに、躍層が発達することによって、表層で栄養塩物質等を利用して植物プランクトンが増加する現象が春のブルームです。夏には、植物プランクトンが栄養塩物質等を使いきってしまい、さらに動物プランクトン等に食べられると、また植物プランクトンは減少します。秋になると、表面が冷やされ混合層が深くなり、栄養塩物質等が表層に供給され植物プランクトンが増加します。これが秋のブルームです。しかし、あまり深くまで混合するとまた植物プランクトンは減少します。このような季節的なブルームは主に、沖合で起こりますが、沿岸で河川水の影響がある場合は、淡水中の栄養塩物質等を利用して、植物プランクトンのブルームが起こることもあります。

ii. 分析結果および考察

1) 一次生産量の変化

(a) 河川・地下水からの栄養供給無しの場合の計算結果

河川水、地下水からの栄養塩物質等の供給を無くした設定による、現況再現結果(2018年)に対する一次生産量の季節別変化を図 20 に示す。河川水や地下水からの栄養塩物質等の供給が無くなつた場合の一次生産の減少程度から、河川水・地下水による寄与度を分析した。

陸水(河川水と地下水)からの栄養塩物質等の供給がない場合には、現状再現結果に比べて春季(4~5月)・夏季(7~8月)・秋季(9~10月)の一次生産が大きく減少した。特に、夏季・秋季の減少が大きいことから、一次生産量の6~7割は、陸水からの栄養塩物質等の供給によって支えられている可能性が推測され、2018年は7月に2回、9月に2回、台風が静岡県を来襲し、降雨が多くなつたことから、陸水からの栄養供給による寄与度が高くなつているものと考えられる。

なお、冬季(2月~3月)の一次生産量は他の季節に比べて小さく、陸水の供給による寄与度が不明瞭な結果となつた。図 18 に示したように、冬季は他の季節に比べて珪藻類などの植物プランクトンが少なく、ANF*やピコシアノバクテリア*などが卓越することと関係している可能性も考えられる。また、冬季の栄養供給は早春期に起つる一次生産(植物プランクトンのブルーム)に寄与している可能性があることから、各季節の連続性も踏まえた評価が課題である。

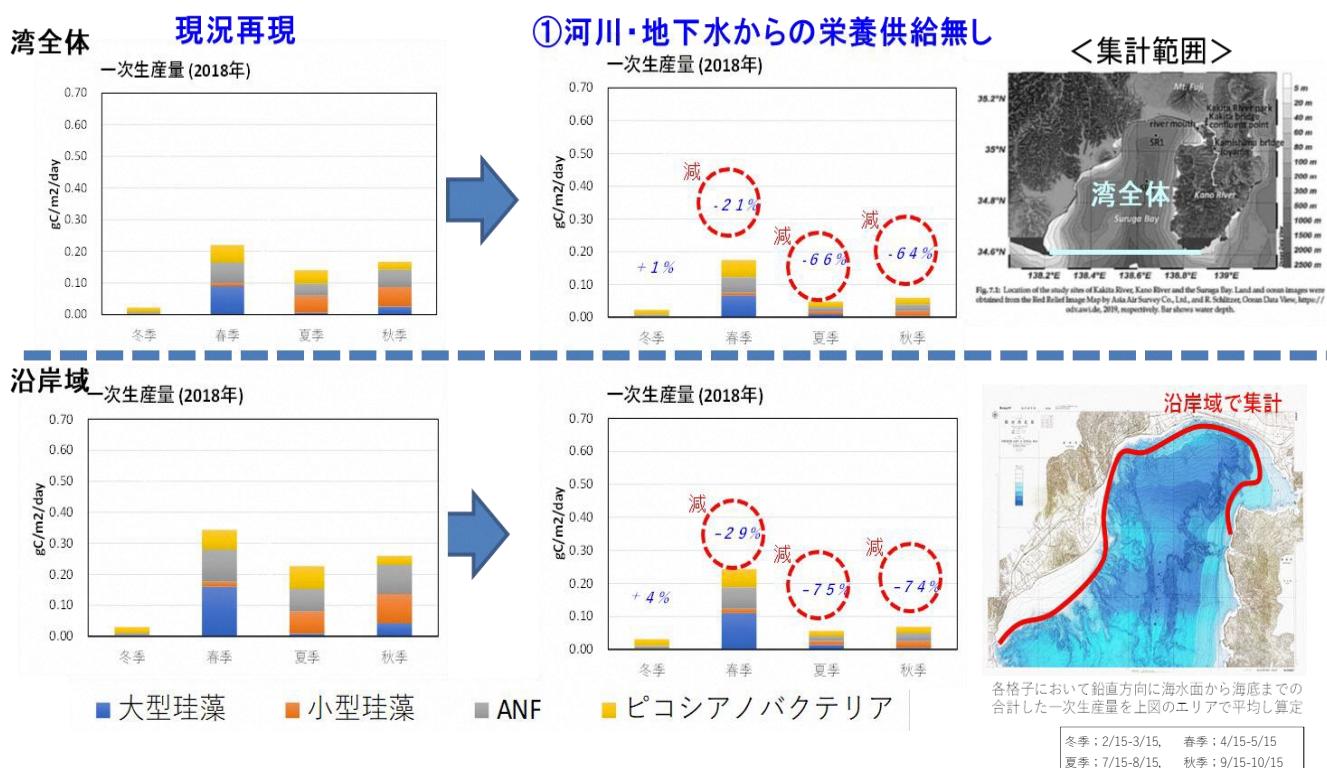


図 20 河川水・地下水からの栄養供給無しの場合の計算結果
(2018 年、現況との比較)

(b) 河川・地下水からのケイ素・鉄供給無しの場合の計算結果

河川・地下水から供給されるケイ素と鉄の濃度を無くした設定（ケイ素と鉄が含まれない河川水・地下水を供給）による、現況再現結果(2018年)に対する一次生産量の季節別変化を図21に示す。河川・地下水からケイ素や鉄の供給が無くなつた場合の一次生産の減少程度から、河川・地下水から供給されるケイ素・鉄による寄与度を分析した。

河川・地下水からケイ素・鉄の供給を無くした場合には、現況再現結果と比べて、夏季（7～8月）・秋季（9～10月）には一次生産が減少する傾向にあった。なお、前述の＜駿河湾における植物プランクトンの発生特性＞より、夏季から秋季にかけて春季に優占していた大型珪藻が減少し、秋季には小型珪藻が優占する季節的な変化が認められている。冬季（2～3月）については(a) 河川・地下水からの栄養供給無しの場合の計算結果と同様な傾向が確認されており、各季節の連続性も踏まえた評価などが課題である。

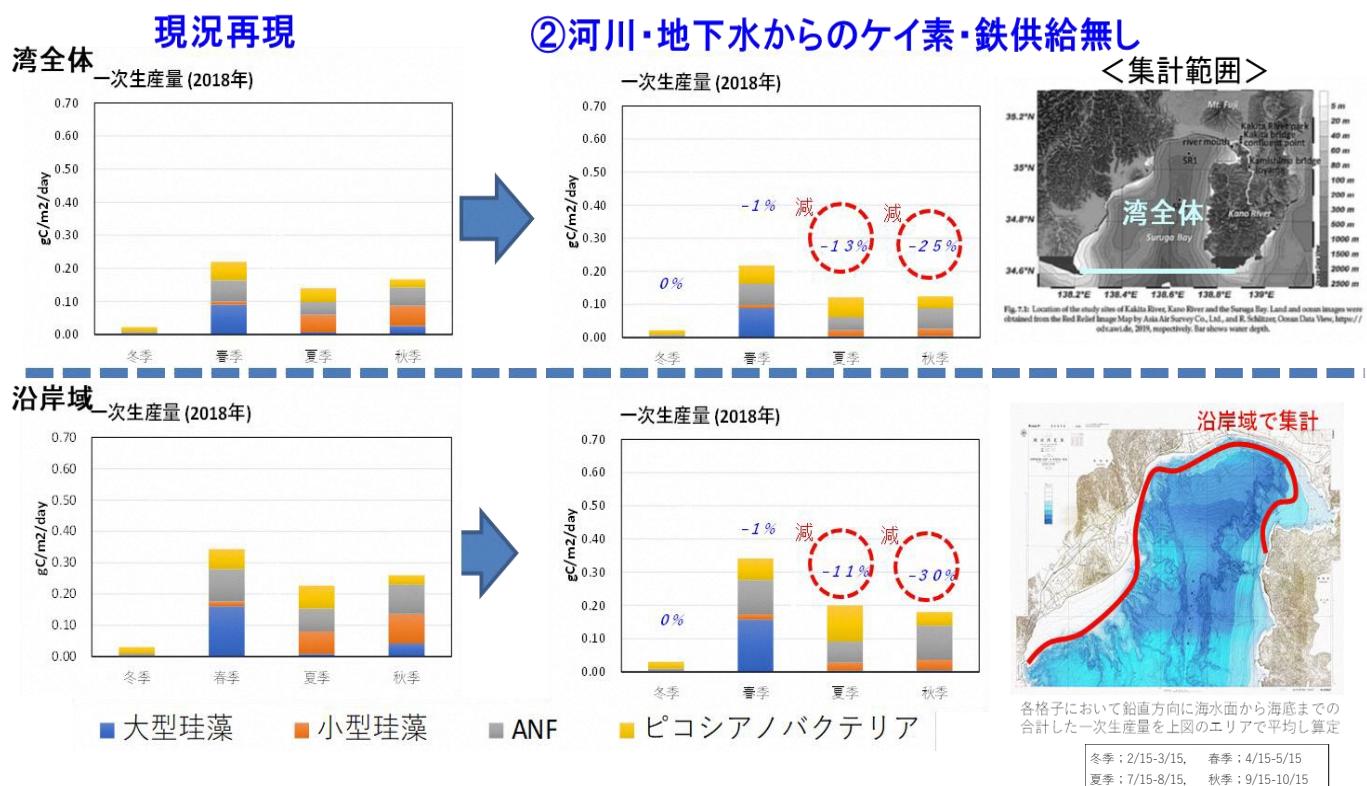


図 21 河川水・地下水からのケイ素・鉄供給無しの場合の計算結果（2018年、現況との比較）

(c) 湾外水からの栄養供給無しの場合の計算結果

湾外水からの栄養塩物質等の供給を無くした設定による、現況再現結果(2018年)に対する一次生産量の季節別変化を図22に示す。湾外からの栄養塩物質等の供給が無くなった場合の一次生産の減少程度から、湾外水による寄与度を分析した。

湾外水からの栄養塩物質等の供給を無くした場合は、現況再現結果に比べて、春季(4~5月)の一次生産が減じる結果となった。湾外水からの供給が無くなることで、より栄養塩物質等を必要とする大型珪藻が減少したためと考えられる。なお、2018年は黒潮の大蛇行の影響で湾外から栄養塩物質等の濃度が低い海水が駿河湾へ流入しやすい年であり、2015年など大蛇行の影響が少ない年を対象にすると、春季の低下量はさらに大きくなると考えられる。また、(a) 河川・地下水からの栄養供給無しの場合に比べ、冬季(2~3月)と春季には、一次生産が減少する結果となり、湾外水からの寄与が大きい傾向がみられた。鉛直混合が活発となる冬季と春季は、深層からの栄養塩供給も無くしている影響も含まれた結果である。そのため、湾外水による寄与は総じて大きく見積もられる傾向にあり、さらなる湾外水の供給源の精査が必要ではあるが、一方で、同時期の湾外水による一次生産への寄与に対する重要性が示唆される結果となった。

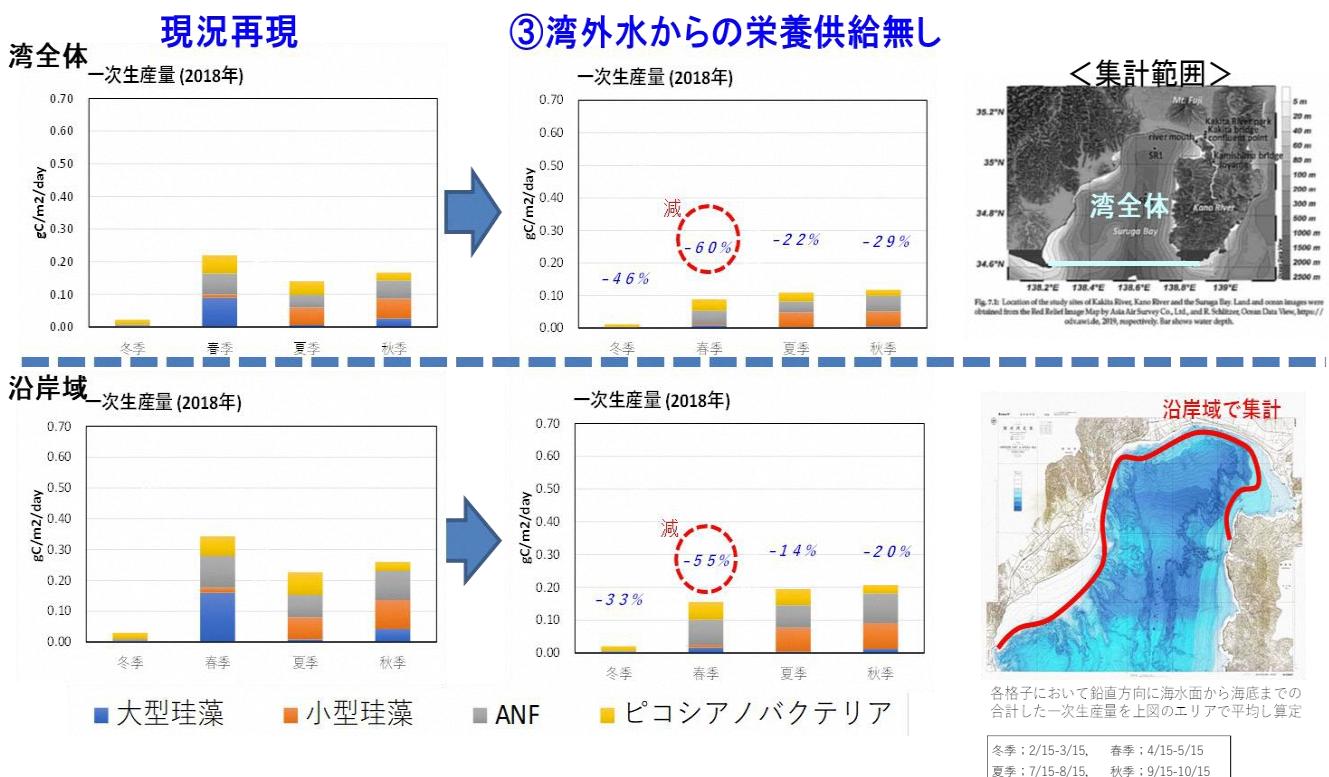


図22 湾外水からの栄養供給無しの場合の計算結果（2018年、現況との比較）

(d) 深海からの栄養供給無しの場合の計算結果

深海(100m以深)からの栄養塩物質等の供給を無くした設定による、現況再現結果(2018年)に対する一次生産量の季節別変化を図23に示す。深海からの栄養塩物質等の供給が無くなった場合の一次生産の減少程度から、深海からの湧昇水による寄与度を分析した。

100m以深の深層水からの栄養塩物質等の供給の影響を無くした場合は、現況再現結果に比べて、春季(4~5月)・秋季(9~10月)の一次生産が減じる結果となった。いずれの時期も夏季とは異なり、表層水から底層水までの鉛直混合が起きやすい時期であるため、寄与が確認されやすかったものと考えられる。また、図22に示された湾外水からの栄養供給無しの場合と比較すると、両者の影響の差分が100m以浅の湾外水由来の影響とみることができる。最も影響が大きかった春季では、湾外水による寄与度である55~60%(図22に示した湾外水の影響なしの湾全体※、沿岸域の結果)のうち、図23に示す春季の21~24%が深層(100m以深)から、両者の差分にあたる31~39%が100m以浅の湾外水由来の影響と想定できる。また、また、秋季について同様に検討すると、湾岸水100m以深の深層水(深海)からの栄養塩供給は湾外水による寄与度の7~8割(湾全体:湾外水寄与度29%に対して21%、沿岸域:湾外水寄与度20%に対して16%)を占めており、さらに深海からの栄養塩供給の重要性が示唆された結果と考えられる。なお、Sohrin(2019)の栄養塩の観測結果を踏まえると水深100~150m程度から栄養塩物質等の供給が生じていると考えられる。また、富山湾など他海域においても、同様に深海からの栄養塩物質等の供給の重要性が想定される例(中口ほか、2005)もあり、水深を精査したさらなる解析が必要と考える。

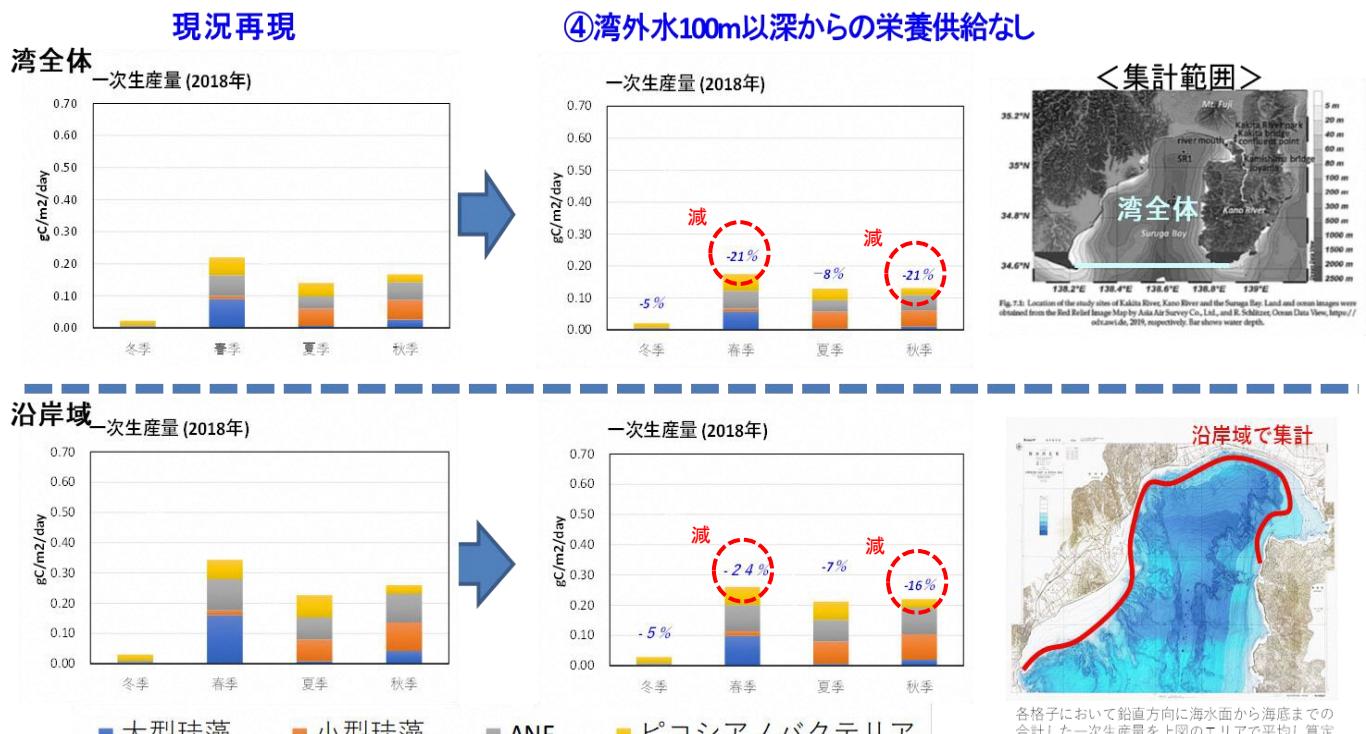


図23 深海(湾外水100m以深)からの栄養供給無しの場合の計算結果
(2018年、現況との比較)

冬季: 2/15-3/15, 春季: 4/15-5/15
夏季: 7/15-8/15, 秋季: 9/15-10/15

(e) 全検討項目の一次生産量の比較

ここまで示してきた全検討項目での一次生産量の比較を図24に示す。

2018年においては、春季（4～5月）は、現況再現に比べて湾外水からの栄養供給無しの場合、夏季（7～8月）・秋季（9～10月）は河川水・地下水からの栄養供給無しの場合がそれぞれ最も一次生産量の減少幅が大きいことから、春季は湾外水、夏季・秋季は河川水・地下水が駿河湾の一次生産を支える重要な要素と考えられた。また、ケイ素、鉄などの物質も一次生産に寄与している重要な要素であることもわかった。

一方で、この検討の中では、冬季（2～3月）における各供給源からの寄与や、湾外水のさらなる各供給源（黒潮系水、深層水、沿岸表層水など）からの寄与について詳細に検討できなかった。躍層が消滅する時期の深層水との混合過程や、湾外水の各供給源からの寄与度を想定するための知見などから、さらなる精査が必要と考えられる。

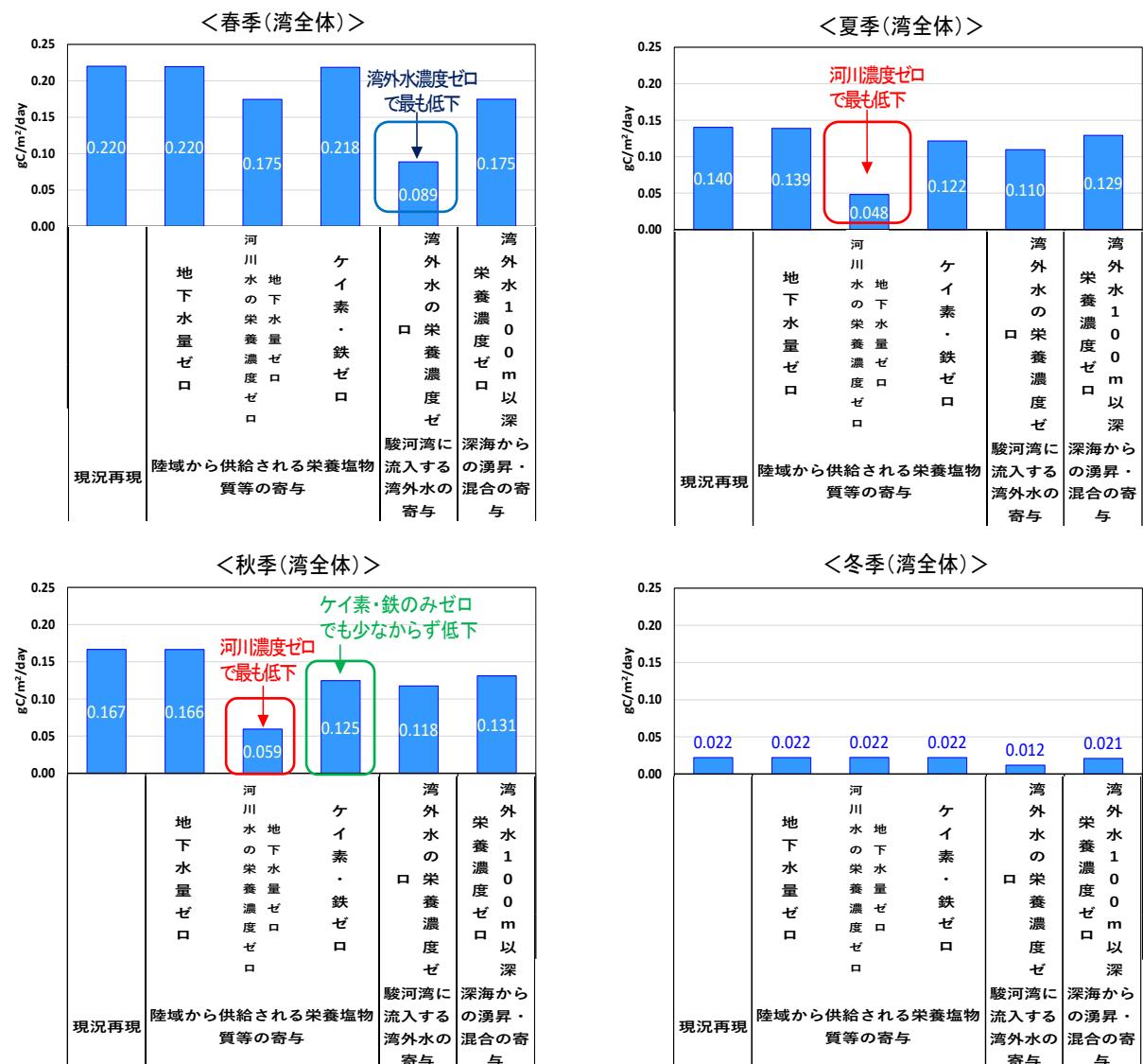


図 24 湾全体での一次生産量の比較（2018年）

(f) 全検討項目の一次生産量の比較（沿岸域）

「(e)全検討項目の一次生産量の比較」について沿岸域（おおよそ 200m 以浅）を対象に集計した結果を図 25 に示す。沿岸域は湾全体の中でも生物生産力が特に高い範囲として知られており、その範囲への寄与度を精査することを目的に再集計した。

一次生産量の集計対象を沿岸域のみにすると、湾全体で確認された傾向がさらに顕著となり、夏季（7～8月）・秋季（9～10月）の一次生産の約7割を河川水・地下水からの栄養塩物質供給が支えている結果となった。一方、春季（4～5月）においては、夏季・秋季に比べて河川水・地下水からの栄養塩物質等の供給の寄与度が低下して、さらに湾外水の寄与度が高い結果が得られた。

駿河湾における沿岸域における栄養塩物質等の管理においては、河川水・地下水による影響に加えて、湾外水の流入動態にも注視した分析の必要性を示唆しているものと考えられる。

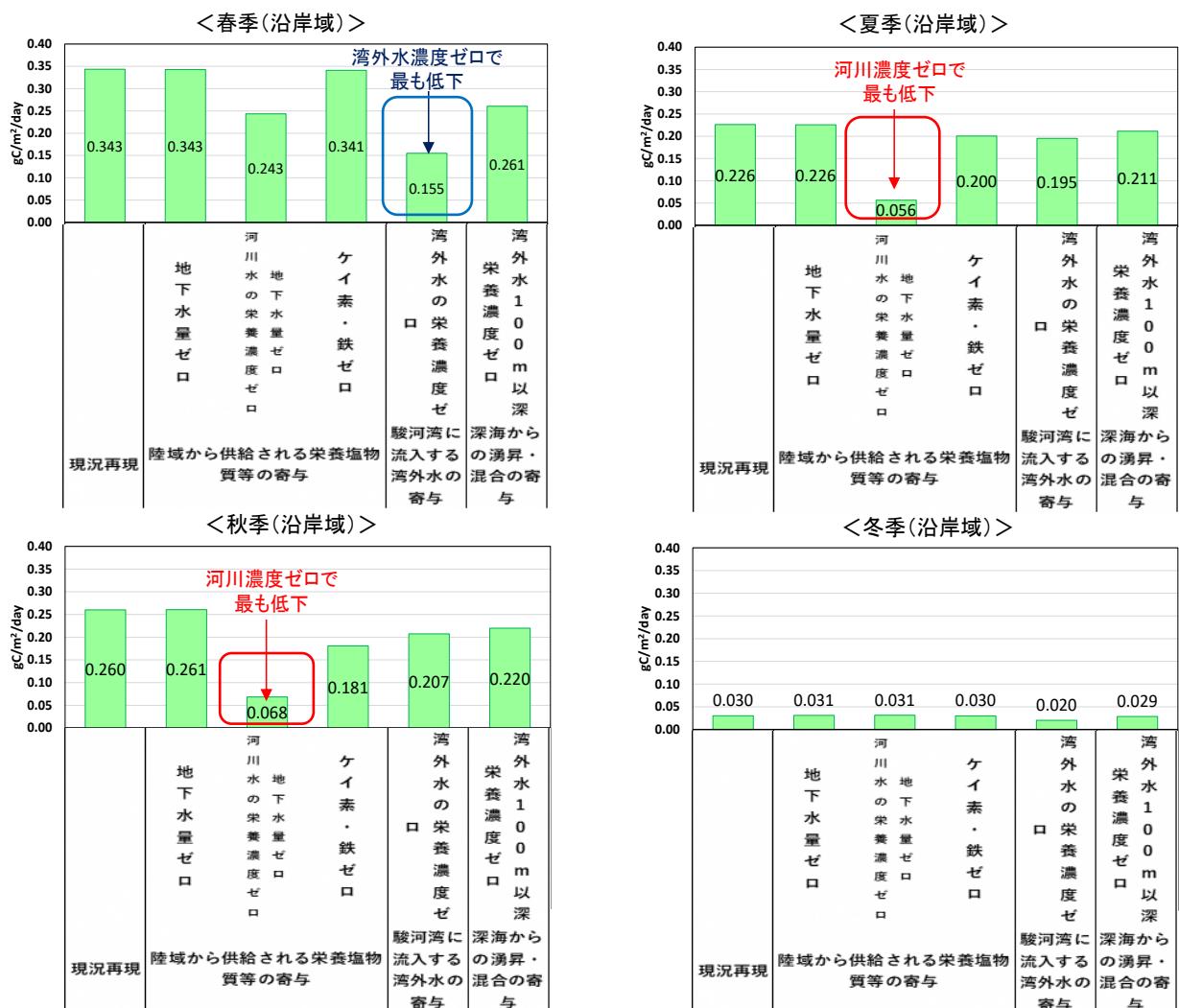


図 25 沿岸域での一次生産量の比較（2018 年）

2) プランクトン構成比の変化

1)では、各検討項目の場合の一次生産量の変化を示したが、ここでは、そのうちの代表的な2つの場合（河川水・地下水と湾外水の寄与度を検討した場合）を対象に、一次生産の基礎となる植物プランクトン構成種の変化を整理した。

植物プランクトンは動物プランクトンや魚類など食物連鎖の上位生物の餌資源であり、その構成種の変化は食物連鎖自体を変化させる可能性がある。

(a) 河川水・地下水からの栄養供給無しの場合の計算結果

1)の(a)の場合における一次生産量の構成種ごとの比率（構成比）を図26に示す。

現況再現結果に比べて、夏季（7～8月）・秋季（9～10月）に卓越していた小型珪藻の比率が減少する傾向にあった。河川水・地下水からの栄養塩供給を無しにすると、ANFやシアノバクテリアの量に変化は見られないが、窒素・リンを栄養として要求する小型珪藻の量が減少した。

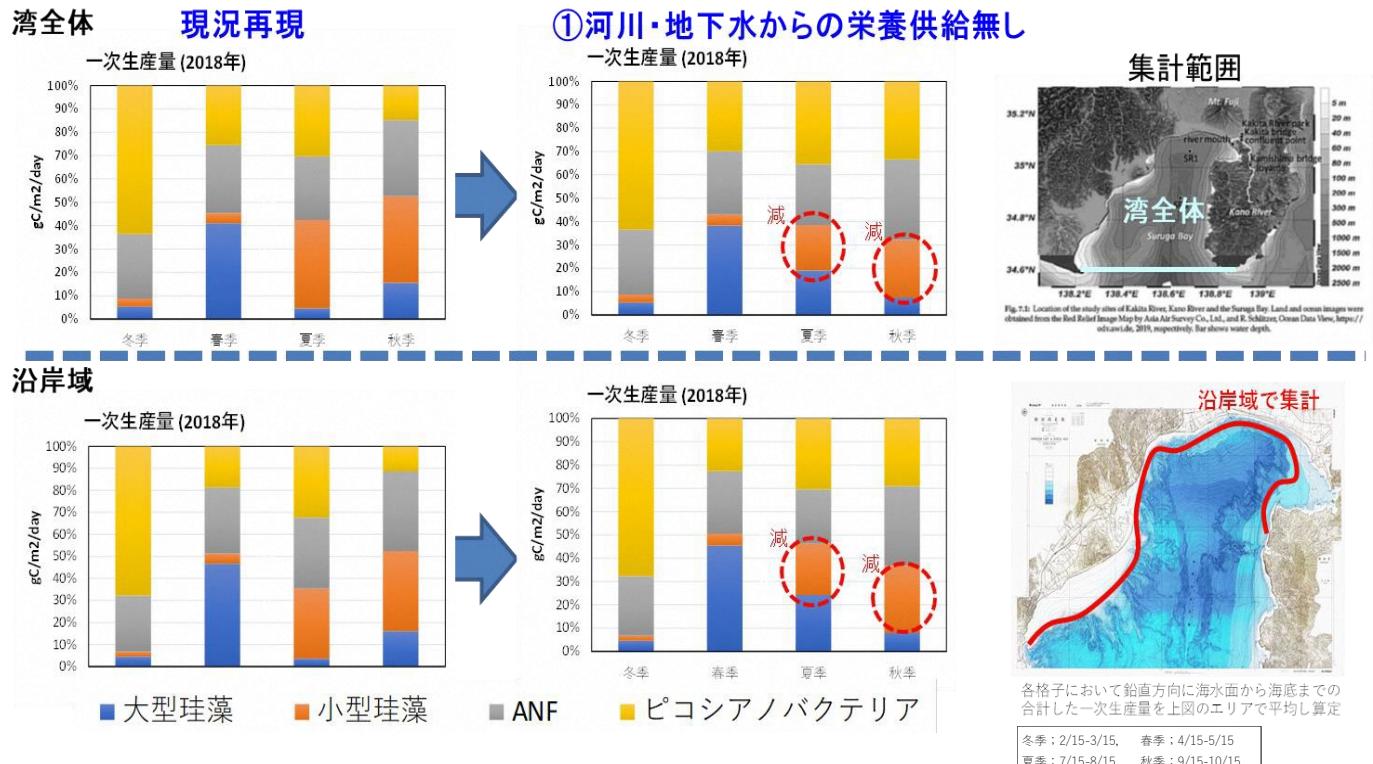


図26 河川水・地下水からの栄養供給無しの場合の計算結果

（プランクトン構成比の変化、2018年、現況との比較）

(b) 湾外水からの栄養供給無しの場合の計算結果

1)の(c)の場合における一次生産量の構成種ごとの比率（構成比）を図 27 に示す。

現況再現結果に比べて、春季において卓越する大型珪藻の量が減少し、相対的に ANF やシアノバクテリアの量が増加した。しかし、夏季・秋季にはその現象は顕著ではなくなっており、春季における湾外水の寄与の重要性が伺える結果であると考えられる。

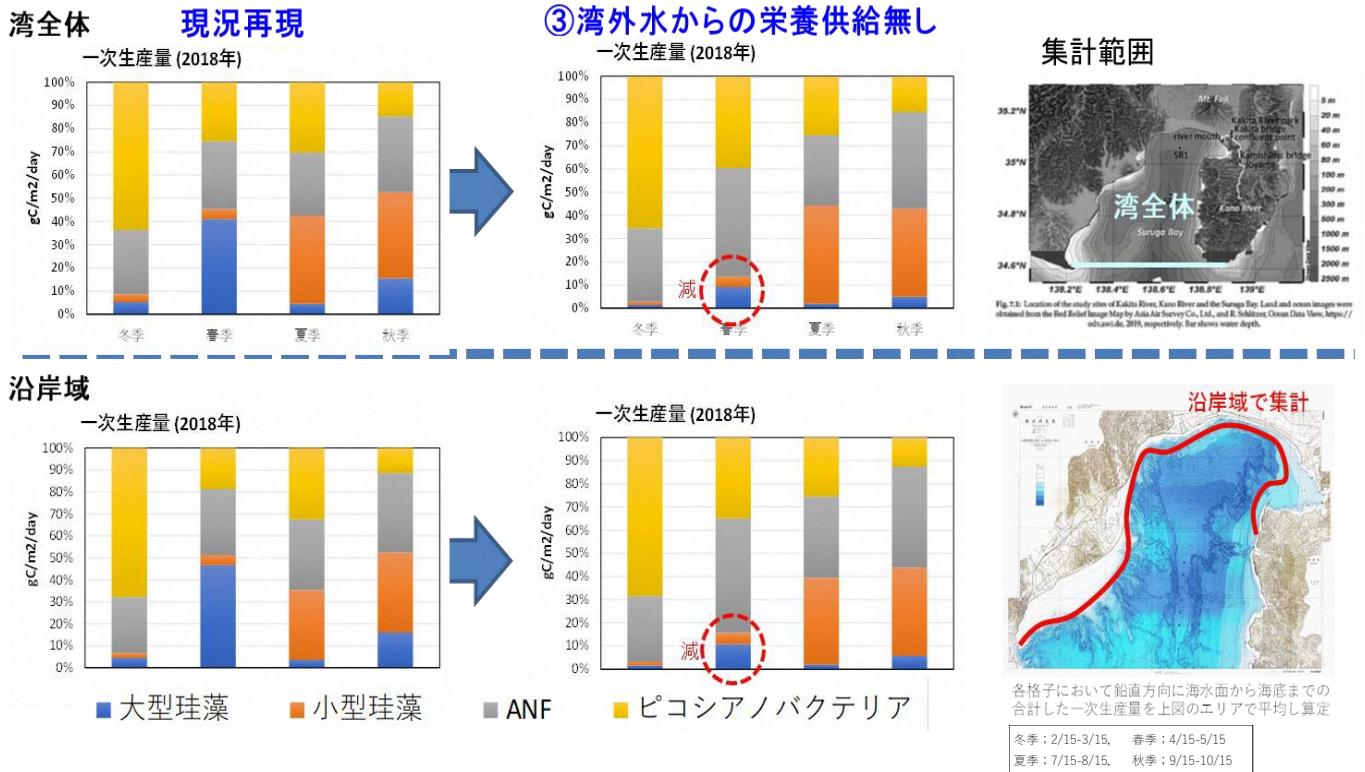


図 27 湾外水からの栄養供給無しの場合の計算結果

(プランクトン構成比の変化、2018 年、現況との比較)

3)まとめ

駿河湾へ流入する栄養塩物質等の供給源による寄与度分析の結果のまとめは以下のとおりである。

- 駿河湾の一次生産を支える主な供給源の寄与度について、当該モデルでは陸水（河川水・地下水）と湾外水（沿岸表層水・黒潮系水・深層水）のカテゴリーに大きく分けて分析した。一次生産に影響を与える供給源には、季節性が存在する可能性が示唆された。また、地下水からの寄与は、湾全体および沿岸部においても、小さい傾向であったが、陸水から供給される鉄・ケイ素は、夏季・秋季の一次生産に一定の寄与（1～3割程度）があることが想定された。なお、寄与度の分析では、各季節の代表的な1ヶ月を対象にした集計結果を用いたが、1年間の計算結果から3ヶ月毎の四季での平均値を対象にするなど、集計対象期間によって傾向が変わる可能性もあるものと考えられる。
- 2018年においては、夏季（7～8月）および秋季（9～10月）の一次生産は、陸域からの栄養塩物質等の供給の寄与を強く受けており（湾全体で6割以上、沿岸部では7割以上）、湾外水による寄与は1～2割にとどまる結果となった。また、春季（4～5月）の一次生産は、湾外水からの栄養塩物質等の供給が5割近く寄与しており、湾外水の寄与のうちの1/3程度は深層からの寄与であった。
- 冬季（2～3月）においては、相対的に他の季節に比べて一次生産量が低く見積もられ、栄養塩物質等の供給源の違いを見出すことは困難であった。冬季における栄養塩物質の状態は、次に続く春季の大型珪藻等の一次生産（ブルーム）につながる時期として重要な位置付けられ、さらなる精査が必要な課題と考えられた。
- 深層水の湧昇・混合に伴う一次生産への寄与は春季・秋季の100m以浅で大きく、特に秋季においては、湾外水全体の寄与に対して2/3を占めていた。冬季においては、100～150m程度の水深から栄養塩物質等の供給が生じていると想定され（Sohrin,2019:図28参照）、このことについても考慮する必要がある。
- モデル計算結果から、駿河湾全域で平均した一次生産量は約0.02～0.49gC/m²/day（200m以浅の沿岸域では0.03～0.60gC/m²/day）と推測された。他海域における既存の調査事例では、伊勢湾・三河湾：0.4～3.5gC/m²/day（運輸省第五港湾建設局、1997）、瀬戸内海域の年平均値として、大阪湾奥部：1.3、広島湾北部：1.0、備讃瀬戸・安芸灘：0.3 gC/m²/day（橋本ら,1997）が報告されており、ほぼ同じ程度の一次生産量が計算されている。

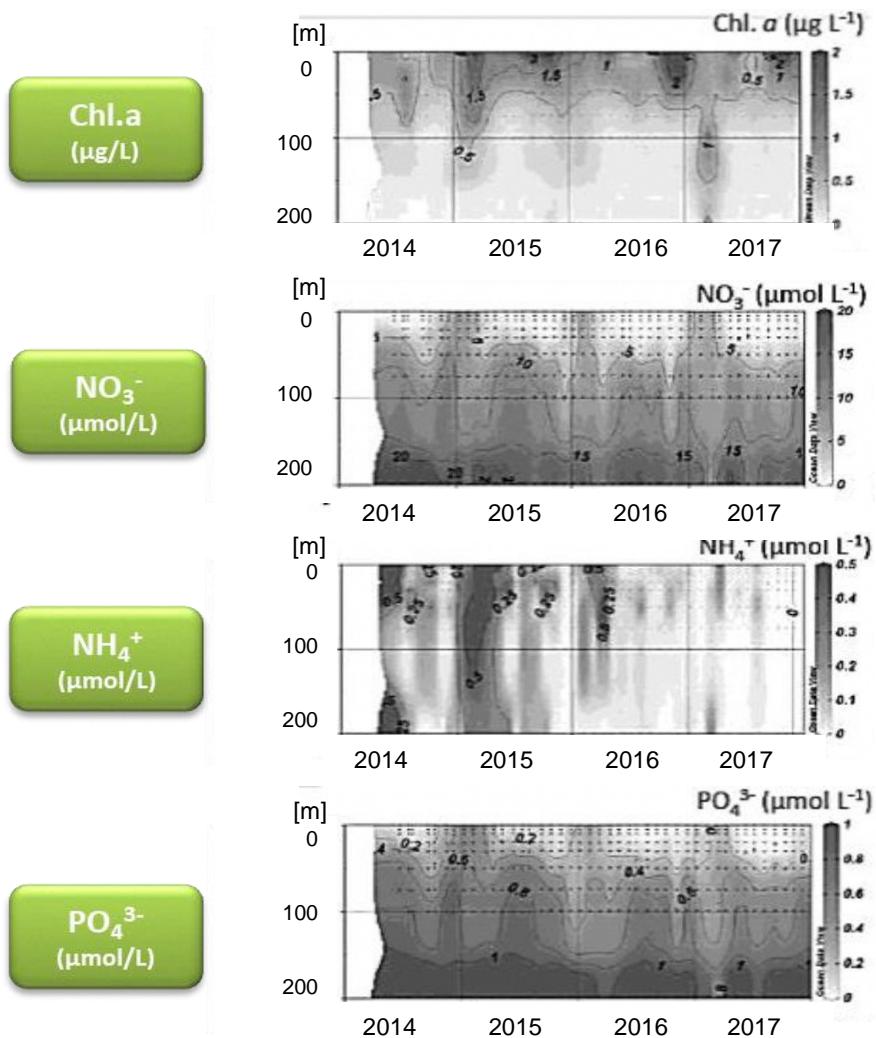


図 28 Sohrin(2019)の栄養塩の観測結果

b. 駿河湾流域から供給される栄養塩物質の発生源別の寄与度分析

i. 分析方法

陸域から海域に供給される栄養塩物質等は、沿岸から地表水や地下水を通じて供給されるが、その供給経路の土地利用特性などから異なることが考えられる。また、a.の寄与度分析結果から、特に夏季から秋季にかけては、地表水・地下水からの栄養供給による海域の一次生産への寄与度が高く、今後、その供給を維持する観点から、各河川・各流域など様々な単位で栄養供給特性を把握しておくことは有効である。

以上から、地表水・地下水によって運ばれる栄養塩（全窒素、全リン）の海域への流出量を、以下のような項目に着目して分析した。なお、一次生産を大きく左右すると考えられる全窒素・全リンを対象とし、近年の平均的な傾向を把握するために 2015 年から 2020 年の平均値を集計した。

- 地表水・地下水それぞれによって運ばれる全窒素・全リンの割合
- 各流域間からの全窒素・全リン供給比較による空間的な寄与度分析
- 地表水の海域への流出量と全窒素・全リンの海域への流出量との関係
- 海域への全窒素・全リンの流出量に対する各発生源の寄与度の内訳、またそれらの流域間の比較

ii. 分析結果および考察

1) 地表水、地下水からの流出量

駿河湾の代表的な流域を区分して分析するため、海岸線を①～⑥（概ね 4 つの一級河川の下流域とその他の流域に対応）に区分し、かつ陸域から海域へ通過する水・全窒素・全リンの流出量を地表からと地下からに分けて集計した。地表からの流出量については①～⑥の 6 区分に分けて、地下からの流出量については①～⑥を合計した結果を示した。

集計範囲を図 29、集計結果を図 28～図 29 に示す。

地下水からの流出量は、水・全窒素・全リンとともに地表からの流出量に比べて約 4%程度と考えられた（図 30、図 31）。また、季節別にみると、各流域からの水量は夏季・秋季に相対的に大きい傾向が確認された。一方で、全窒素、全リンは水量ほどの相対的な違いが確認されない結果となり、夏季・秋季だけでなく、その他の季節にも一定の栄養塩物質等の供給が確認される結果となった（図 32）。なお、これは発生源毎に設定している原単位の季節変化を考慮できていないことにも起因していると考えられる。

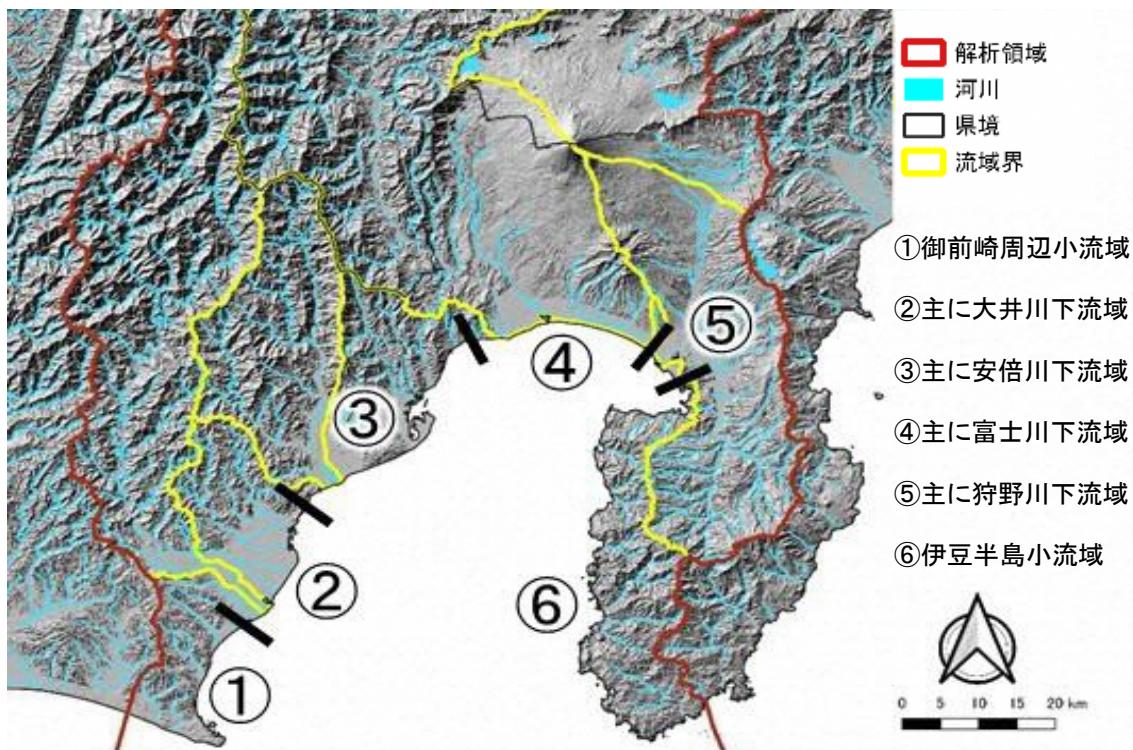


図 29 集計範囲

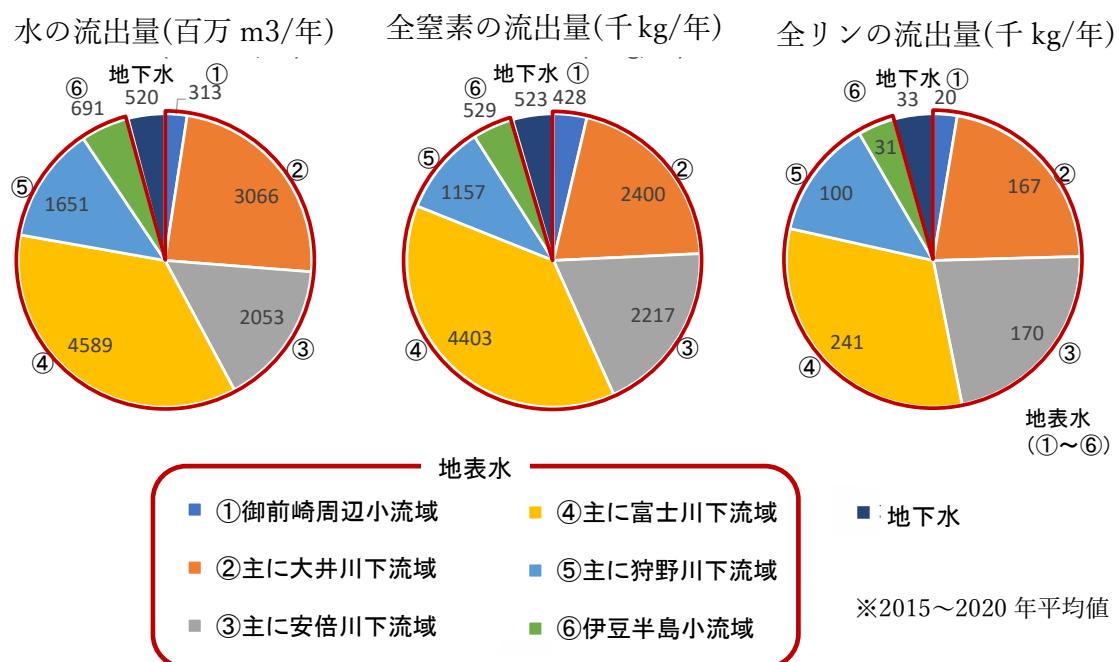


図 30 地表水、地下水からの集計結果

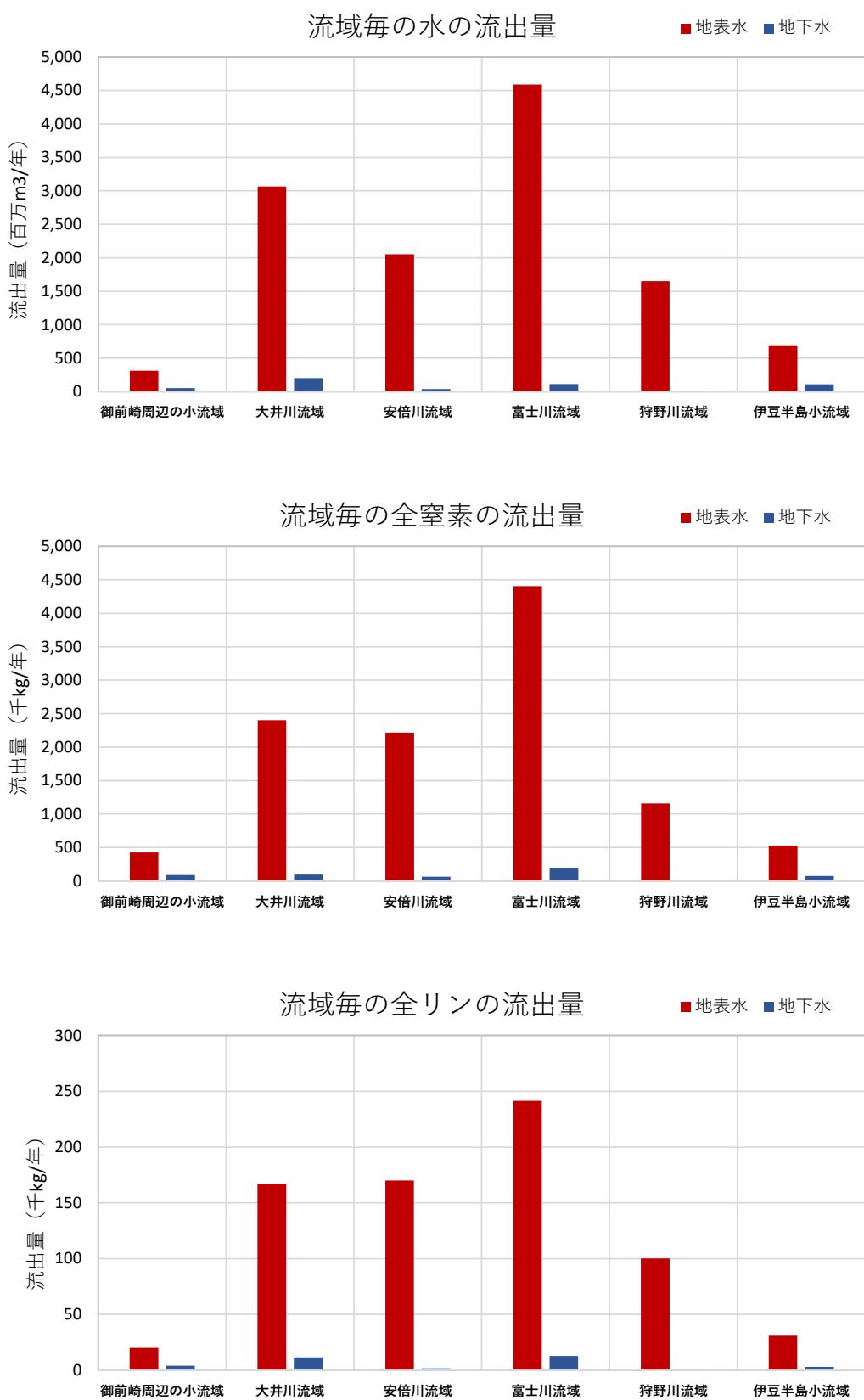


図 31 地表水、地下水の集計結果（流域別）

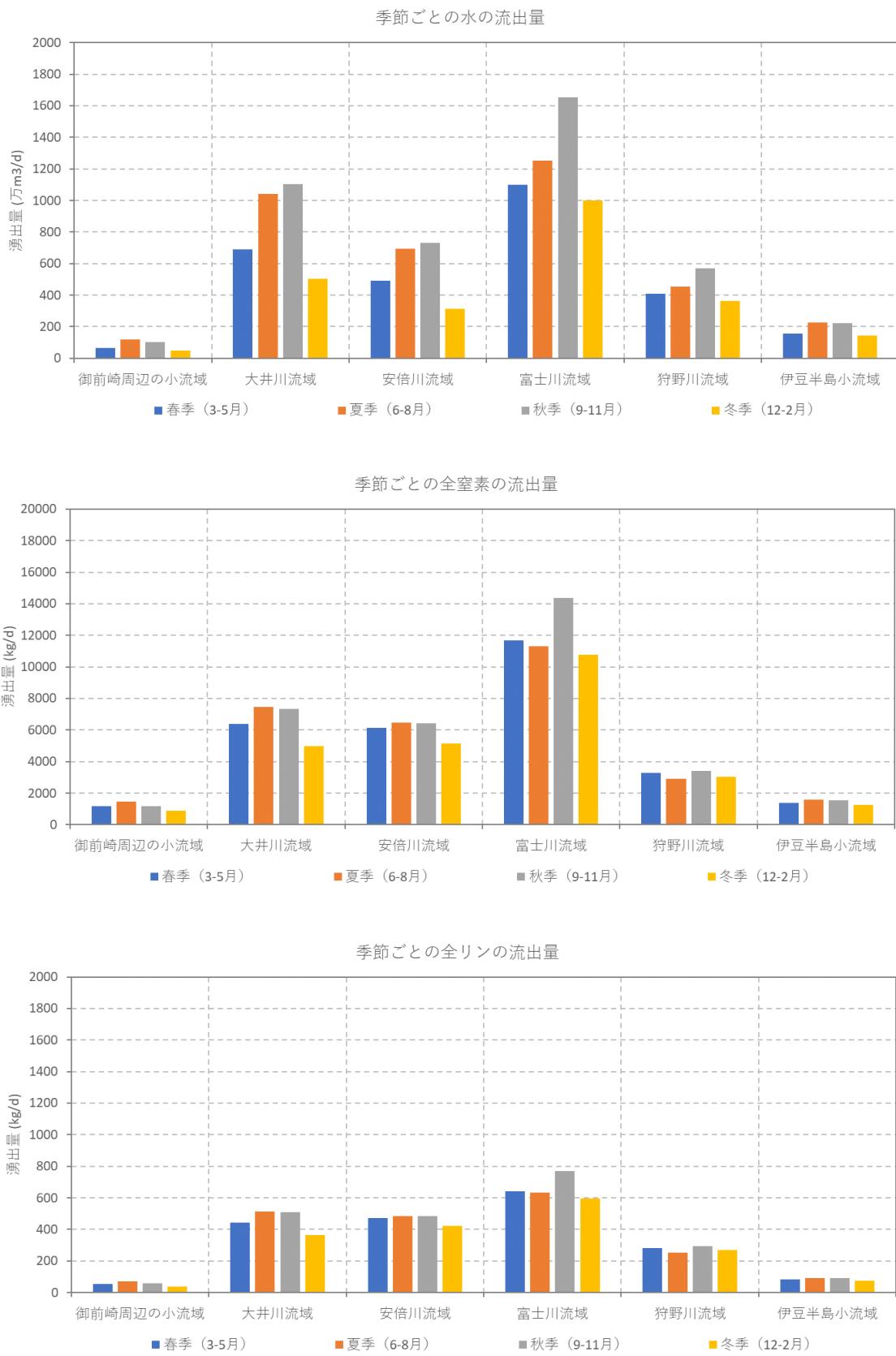


図 32 地表水、地下水からの集計結果（季節別）

2) 地表水からの流出量

地表水からの流出量の寄与度を分析するために、1)の検討から地下水を除いて集計した結果を図33に示す。また、図34は地表水流出量と全窒素・全リン流出量の関係を示したものである。

これらを見ると、全窒素・全リンの流出量は水の流出量と概ね対応していた。一方で、③主に安倍川下流域の水の流出量に対する全窒素・全リンの流出量の割合が他の流域の結果に比べて、相対的に大きい傾向が確認された(図34)。流域ごとの土地利用割合と畜産頭数、面積に対する人口を表4、表5に示したが、安倍川流域の土地利用割合や畜産頭数を見ても、発生源となる土地利用区分や畜産頭数が他流域と比較して著しく多いわけではなく、他流域に比べ面積当たりの人口が多いことが分かる。これに起因して、安倍川流域では全窒素・全リンの流出量の割合が高くなつたと考えられる。

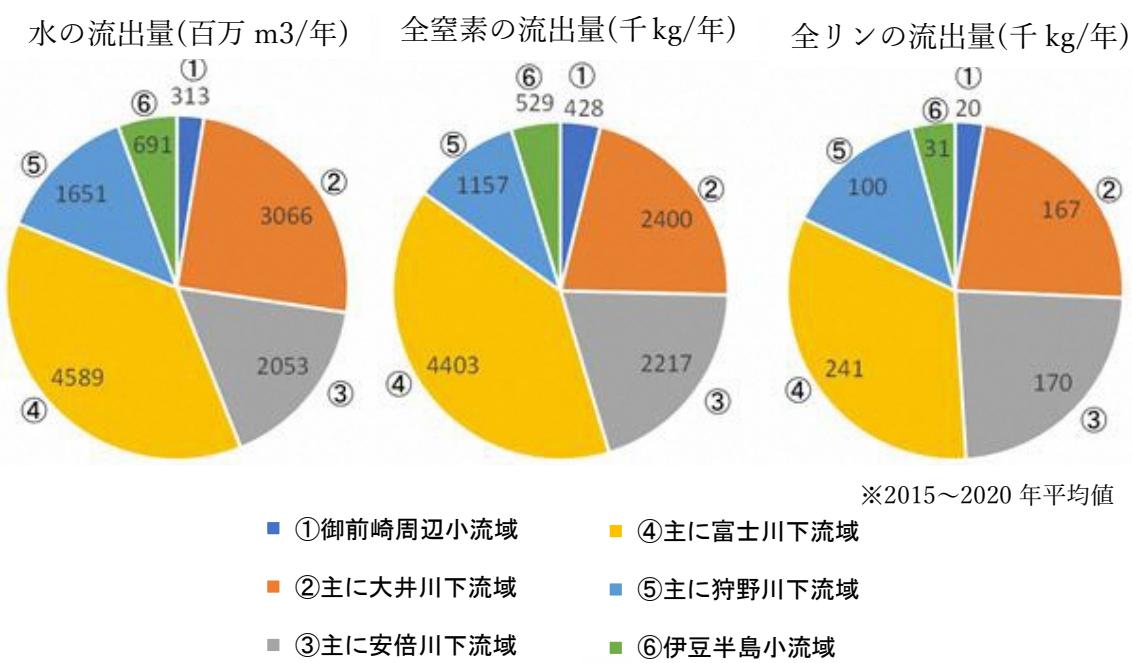


図 33 地表水からの流出量集計結果

地表水流出量と全窒素量（左）、全リン量（右）との関係

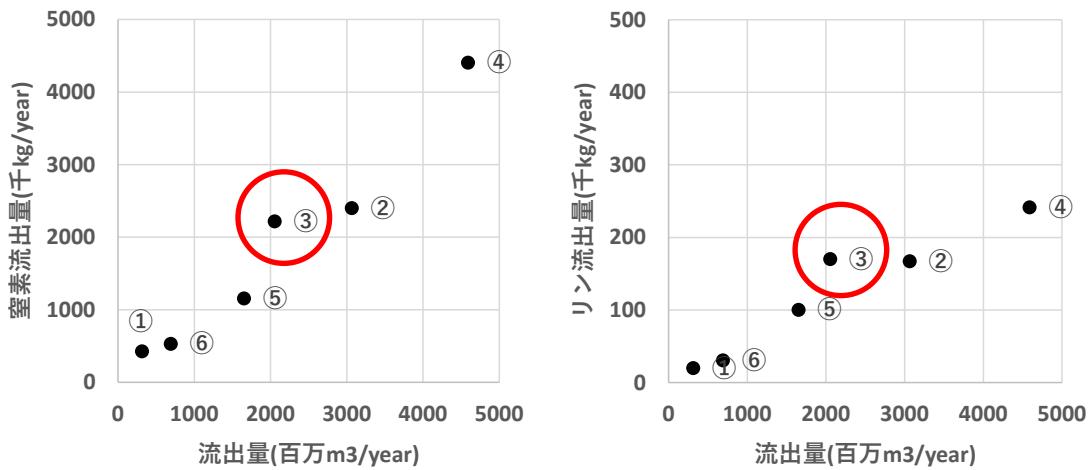


図 34 地表水流出量と全窒素・全リン量との関係

表 4 流域ごとの土地利用割合と畜産頭数

	土地利用割合(%)						畜産頭数(推定)		
	水田	畑地	森林	建物用地	淡水域	その他	牛	豚	鶏
狩野川流域	4.4	5.1	66.9	12.9	1.3	9.3	5,000	20,000	23,000
富士川流域	3.9	8.9	73.6	8.4	2.0	3.2	11,000	10,000	3,160,000
安倍川流域	0.7	5.7	83.1	5.0	4.0	1.5	300	1,000	25,000
大井川流域	0.5	2.5	88.2	2.2	4.2	2.4	1400	5,000	13,000

土地利用割合: 国土数値情報土地利用細分メッシュ(平成28年度)より集計
畜産頭数: 静岡県の畜産要覧2020より推計

表 5 流域ごとの面積に対する人口

流域	流域面積 (km ²)	人口 (千人)	面積に対する人口 (人/km ²)	含まれる市区町村 (静岡県のみ)
狩野川 流域	852	638	731	沼津市、三島市、御殿場 市、裾野市、伊豆市、伊 豆の国市、函南町、清水 町、長泉町
富士川 流域	3,990	1172 静岡県:386 山梨県:786	293	富士宮市、富士市
安部川 流域	567	700	1,241	静岡市
大井川 流域	1,280	419	327	島田市、焼津市、藤枝 市、吉田町、川根本町

静岡県人口:R1の住民基本台帳人口より集計
山梨県人口:R2の住民基本台帳人口より集計

3) 地下水からの流出量

地下水からの流出量の寄与度を分析するために、1)の検討から地表水を除いて集計した結果を図 35、図 36 に示す。

全窒素・全リンの流出量は水の流出量に対応しないエリアが存在した特性がみられた。具体的には以下のとおりである。

②主に大井川下流域と⑥伊豆半島小流域において、水の流出量に対する全窒素・全リンの流出量が相対的に小さい傾向が確認された。②主に大井川下流域は原単位が相対的に小さい水田が地下水涵養域に分布し、人口も相対的に少ないためと考えられる。また、⑥伊豆半島小流域は原単位が相対的に小さい森林が広く分布し、人口も少ないためと考えられる。

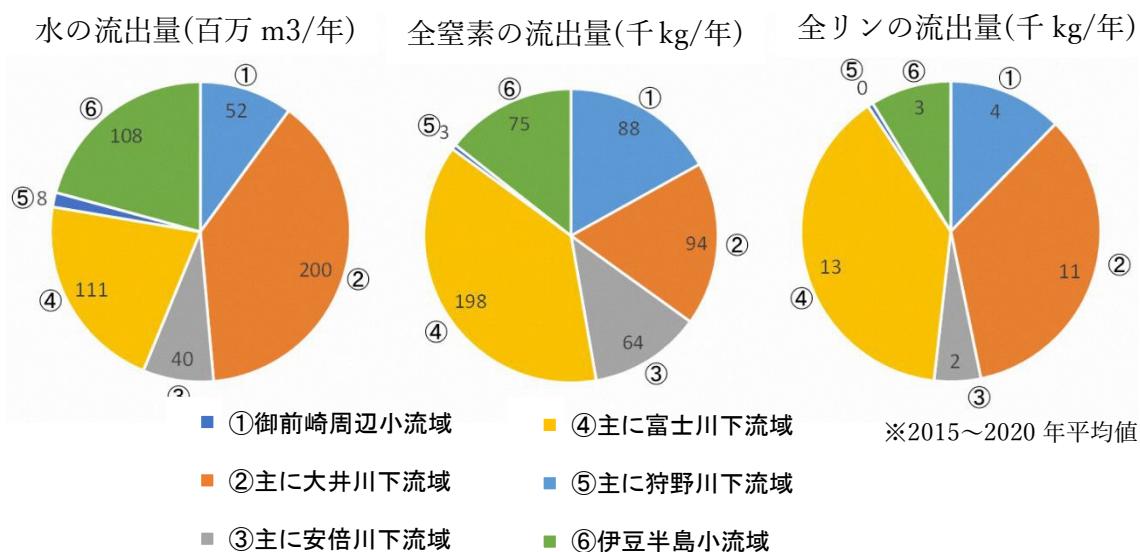


図 35 地下水からの流出量集計結果

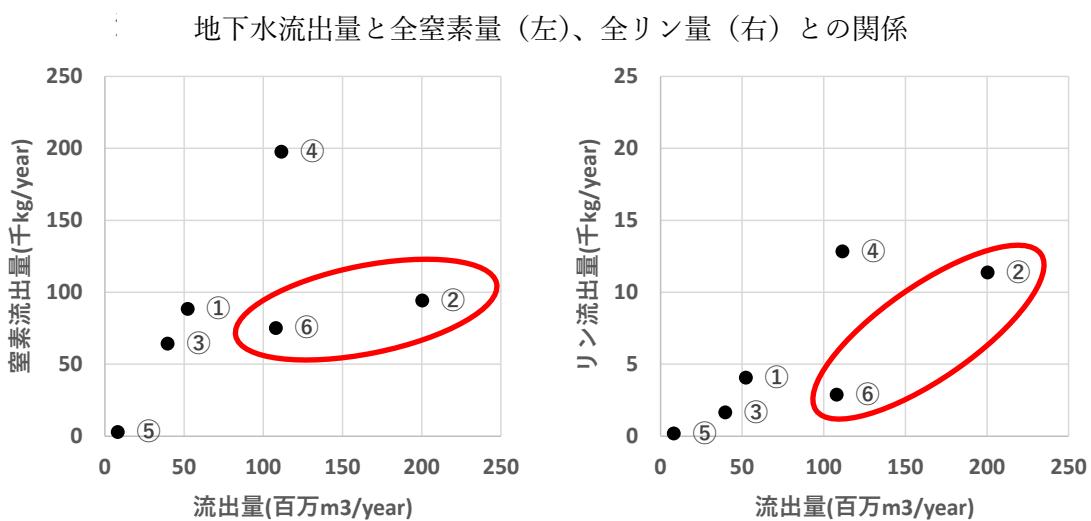


図 36 地下水流出量と全窒素・全リン量との関係

4) 河川毎の栄養塩物質等の供給特性の分析結果

ここまで駿河湾流域を大きく6区分した場合の流量や全窒素、全リンの供給量の違いをみてきたが、ここからは、その中で特に流量が大きく寄与度が大きいと考えられる主要な河川毎の全窒素、全リンの発生源について検討した。これまで検証に用いてきた図35に示す黒瀬橋、富士川橋、安倍川橋、富士見橋（駿河湾流域における一級河川の全窒素、全リン濃度※観測地点の最下流地点）において観測されている濃度が、どのような発生源の割合で構成されているのか、また、それがどのように変化してきたのかを分析することを目的とし、各発生源のみを与えたシミュレーションを実施した。

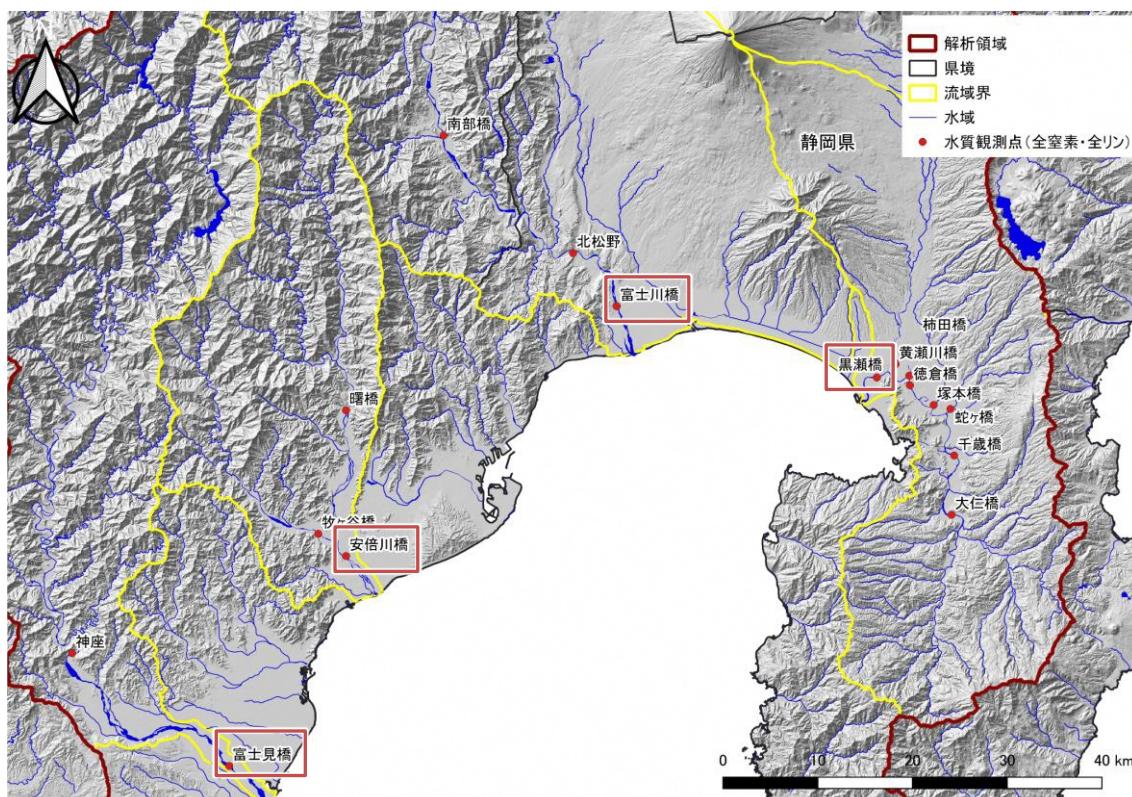


図 37 一級河川の全窒素、全リン濃度観測地点

<全窒素（狩野川）>

黒瀬橋地点（狩野川）における全窒素濃度※中の発生源別割合を図38、表5に示す。

生活排水（合併処理浄化槽・コミュニティプラント※+農業集落排水施設※+単独処理浄化槽※+広域下水道※）の寄与度が大きく、合計する河川の全窒素濃度の50.2%を占める（2015年～2020年平均）ことが特徴的であった。次いで畑地※からの負荷が大きく、全体の22.8%を占めていた。また、下水道の普及に加えて人口の減少により（図39）、生活排水による供給量が減少している傾向、畜産排泄物※処理の厳格化により（図40）、畜産による供給量が減少している傾向が確認された。

土地利用の変化に伴い、田・畑（その他農用地）の供給量（面積）は減少し、森林・市街

地（建物用地）※の供給量（面積）は増加しているが（図 41）、それらの構成割合は生活排水に比べれば低く、またその変化も狩野川の流域面積 852km²と比べれば数%程度であることから、土地利用の経年的な変化が、地表水中の濃度に与える影響は大きくなきものと考えられる。

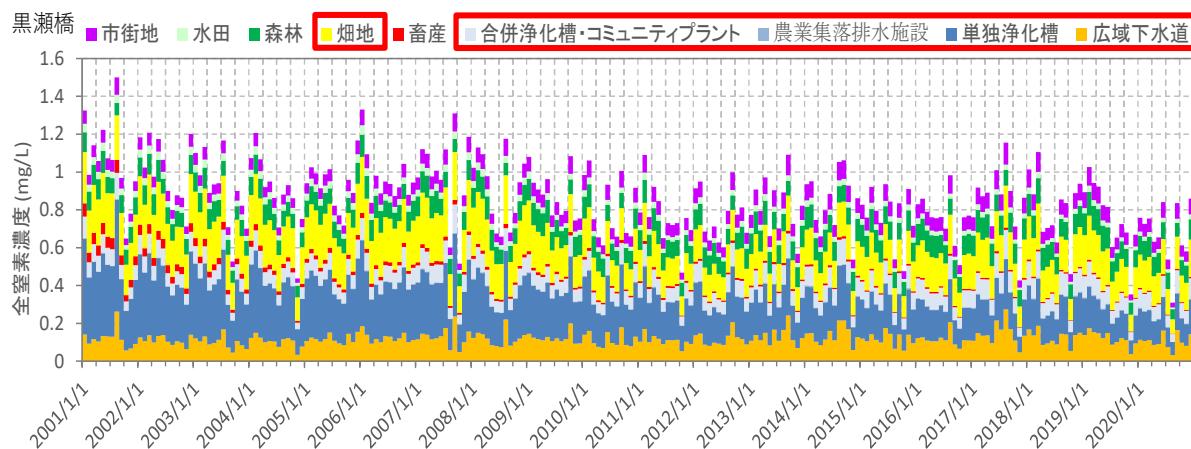
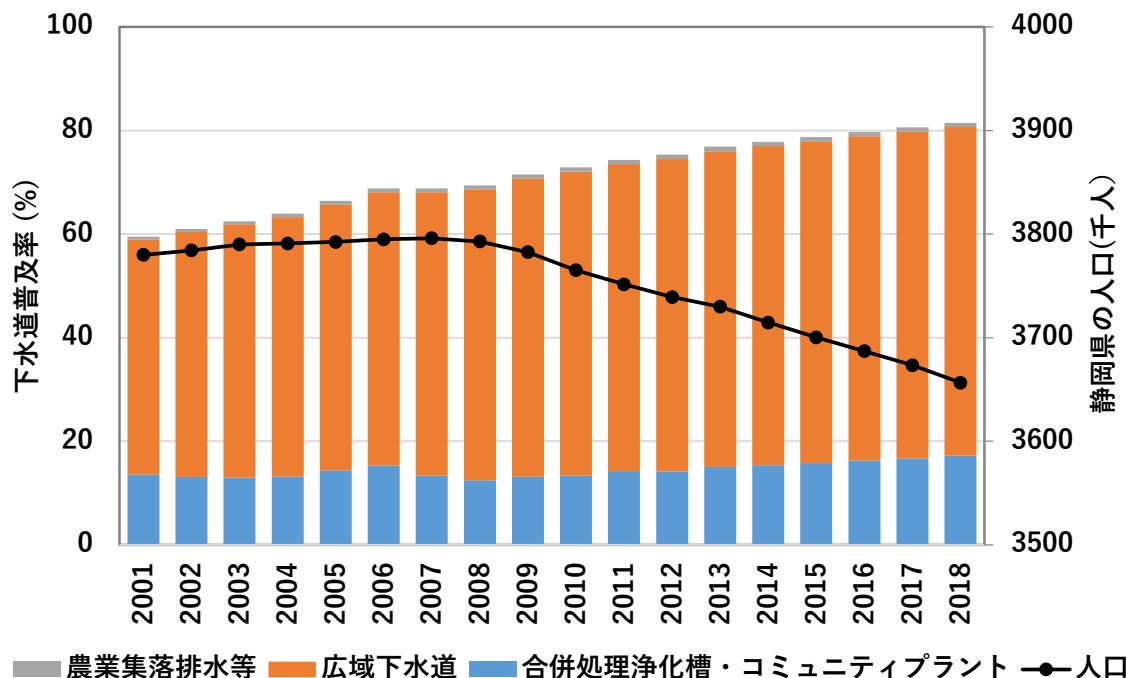


図 38 黒瀬橋地点（狩野川）における全窒素濃度中の発生源別割合

表 6 黒瀬橋地点（狩野川）における全窒素濃度中の発生源別割合（2015－2020 年平均）

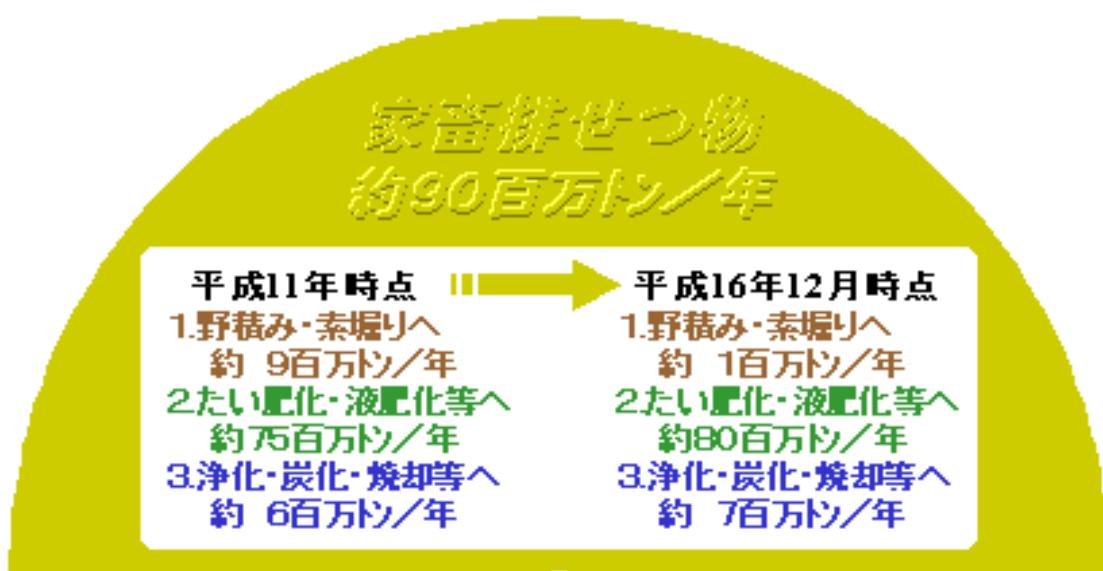
項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	9.4	357.5
水田	3.1	116.7
森林	13.5	510.8
畠地	22.8	862.8
畜産	1.0	38.1
合併処理浄化槽・コミュニティープラント	12.0	455.9
農業集落排水施設	0.5	19.6
単独凈化槽	22.0	835.8
広域下水道	15.7	595.5
合計	100	3792.6



下水道普及率：静岡県資料、人口推移：静岡県統計年鑑（総務省統計局）より

图 39 静岡県の下水道普及率と人口等の推移

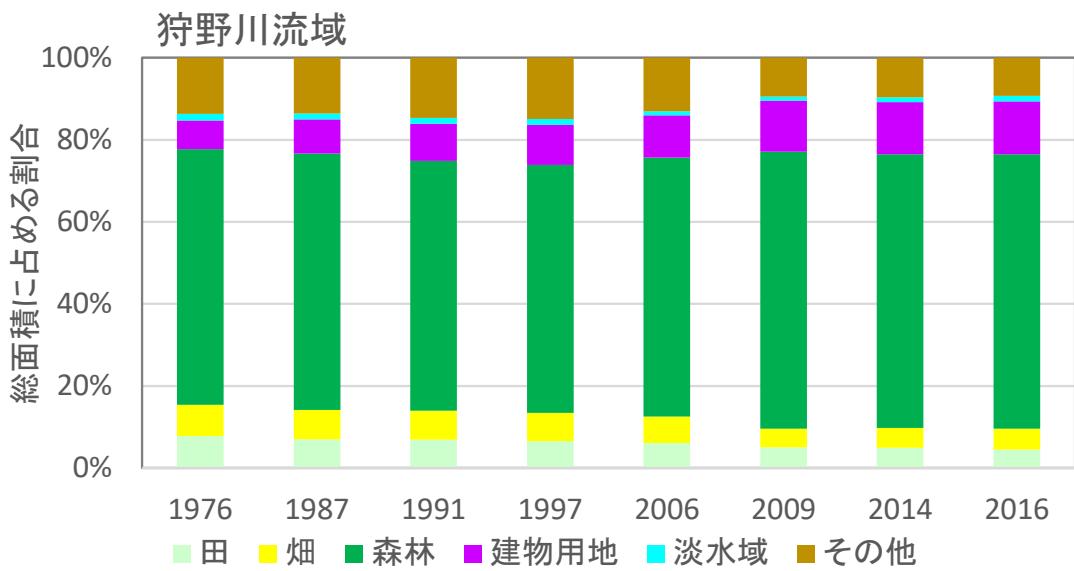
○我が国の家畜排せつ物の処理・保管状況



出典：農林水産省ウェブサイト

https://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/t_mondai/02_kanri/

图 40 我が国の家畜排せつ物の処理・保管状況



データ出典：国土数値情報土地利用細分メッシュ（国土交通省）

図 41 狩野川流域の土地利用の変遷

<全窒素（富士川）>

富士川橋地点（富士川）における全窒素濃度の発生源別割合を図 42、表 7 に示した。ただし、富士川の上流域には山梨県が含まれるため、山梨県からの流入についても、その構成割合も追加している。

ここでは、山梨県からの流入量が 90.2% の割合を占めることが大きな特徴である（2015 年～2020 年平均）。山梨県からの流入量を除くと、生活排水（合併処理浄化槽・コミュニティプラント + 農業集落排水施設 + 単独浄化槽 + 広域下水道）の割合が大きく、合計すると河川の全窒素濃度の 66.2%（山梨県からの流入量を含めると 6.5%）であった。なお、山梨県からの流入量について、その中の発生源別割合を本検討の範囲では算出できないが、計算上与えている 2020 年の発生量から推測すると、生活排水、畠地、森林の割合が高くなると推定される。富士川の流域面積は $3,990 \text{ km}^2$ であるが、そのうち $3,147 \text{ km}^2$ は山梨県にあたり、その大部分を占めている。

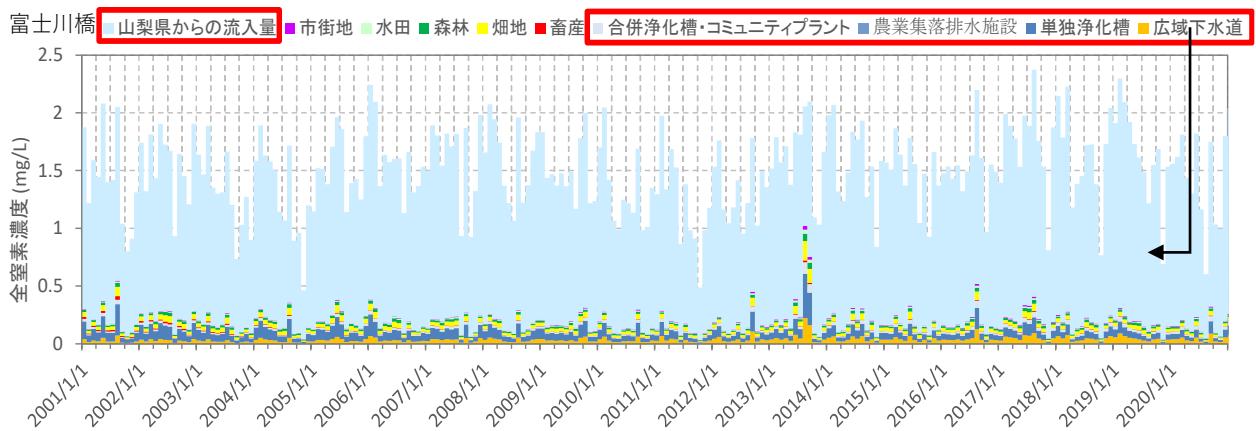
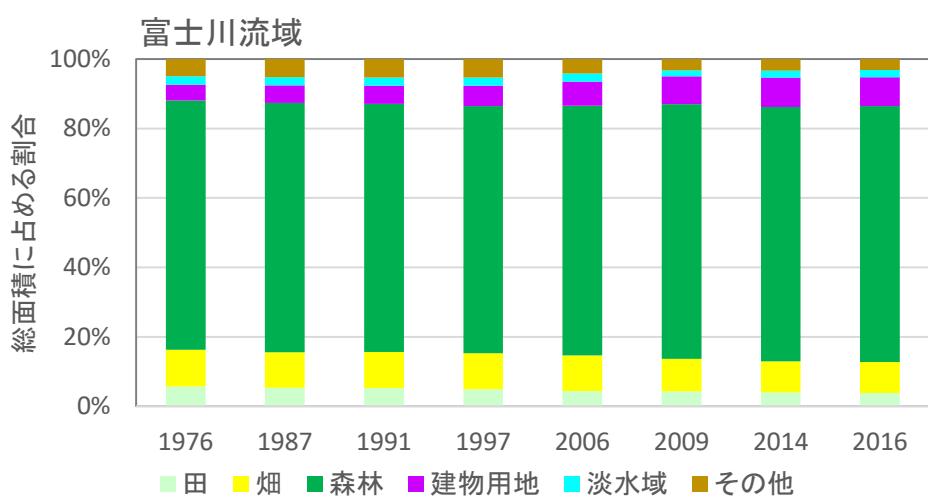


図 42 富士川橋地点（富士川）における全窒素濃度中の発生源別割合

表 7 富士川橋地点（富士川）における全窒素濃度中の発生源別割合（2015–2020 年平均）

項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	3.2 (0.3)	44.8
水田	2.8 (0.3)	38.6
森林	9.7 (1.0)	135.5
畠地	16.5 (1.6)	230.1
畜産	1.6 (0.2)	22.1
合併処理浄化槽・コミュニティプラント	11.5 (1.1)	161.2
農業集落排水施設	0.1 (0.0)	0.8
単独浄化槽	31.6 (3.1)	441.4
広域下水道	23.0 (2.3)	321.6
合計	100 (9.8)	1396.1(12882.2)

※山梨県からの流入量を除いた割合（含めた割合）



データ出典：国土数値情報土地利用細分メッシュ（国土交通省）

図 43 富士川流域の土地利用の変遷

<全窒素（安倍川）>

安倍川橋地点（安倍川）における全窒素濃度中の発生源別割合を図44、表8に示した。

畑地からの負荷が大きく、河川の全窒素濃度の39.3%を占める（2015年～2020年平均）。次いで森林からの負荷が大きく、全体の27.9%を占める。広域下水道の普及により、単独浄化槽の供給量は減少傾向にあることが確認された。

また、土地利用の変化に伴い、田・畑（その他農用地）の供給量（面積）は減少し、森林・市街地（建物用地）の供給量（面積）は増加している。その変化は安倍川の流域面積567km²と比べれば数%程度であることから、土地利用の経年的な変化が、地表水中の濃度に与える影響は大きくないものと考えられる。

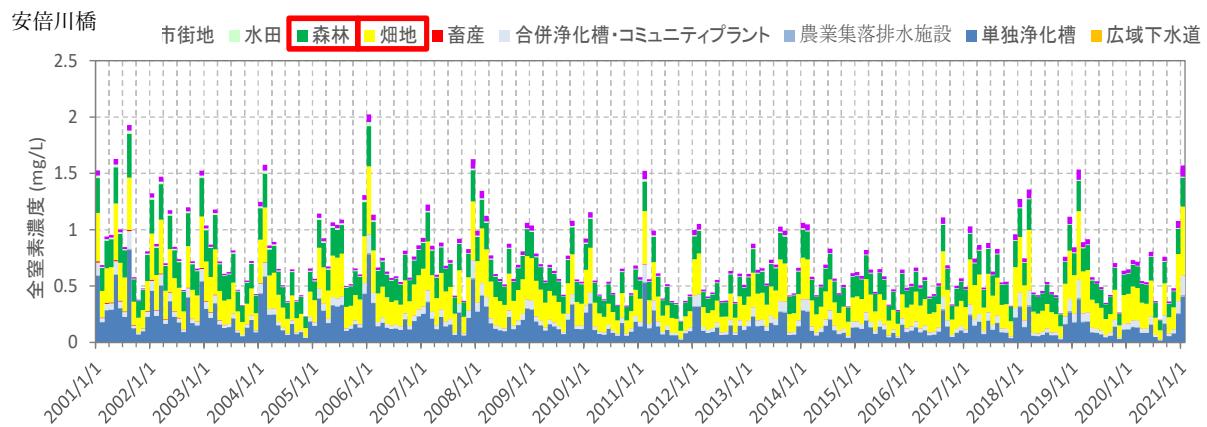
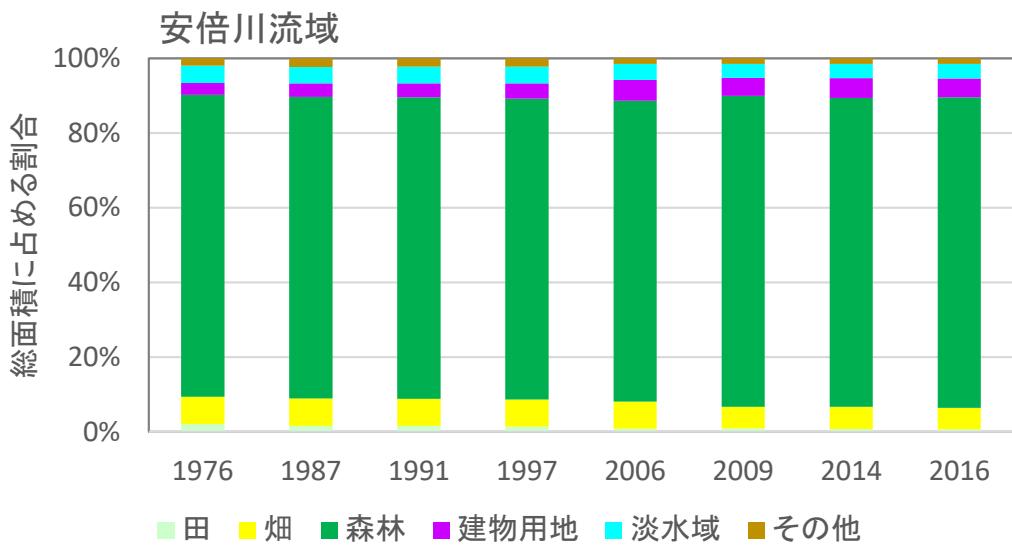


図44 安倍川橋地点（安倍川）における全窒素濃度中の発生源別割合

表8 安倍川橋地点（安倍川）における全窒素濃度中の発生源別割合（2015～2020年平均）

項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	4.6	110.8
水田	0.7	16.1
森林	27.9	673.8
畑地	39.3	949.3
畜産	0.2	4.0
合併処理浄化槽・コミュニティプラント	7.4	177.9
農業集落排水施設	0.8	19.2
単独浄化槽	19.3	465.9
広域下水道	0.0	0.0
合計	100	2416.9



データ出典：国土数値情報土地利用細分メッシュ（国土交通省）

図 45 安倍川流域の土地利用の変遷

<全窒素（大井川）>

富士見橋地点（大井川）における全窒素濃度中の発生源別割合を図 46、表 9 に示した。生活排水（合併処理浄化槽・コミュニティプラント+農業集落排水施設+単独浄化槽+広域下水道）の寄与度が大きく、合計すると河川の全窒素濃度の 47.5% を占める（2015 年～2020 年平均）ことが考えられる。次いで、森林・畠地からの負荷も大きく、全体の 26.4%、21.9% を占めることが想定された。

また、土地利用の変化に伴い、田・畠（その他農用地）の供給量（面積）は減少し、森林・市街地（建物用地）の供給量（面積）は増加しているが、その変化は大井川の流域面積 1,280km² と比べれば 1% 前後であることから、土地利用の経年的な変化が、地表水中の濃度に与える影響は大きくないものと考えられる。

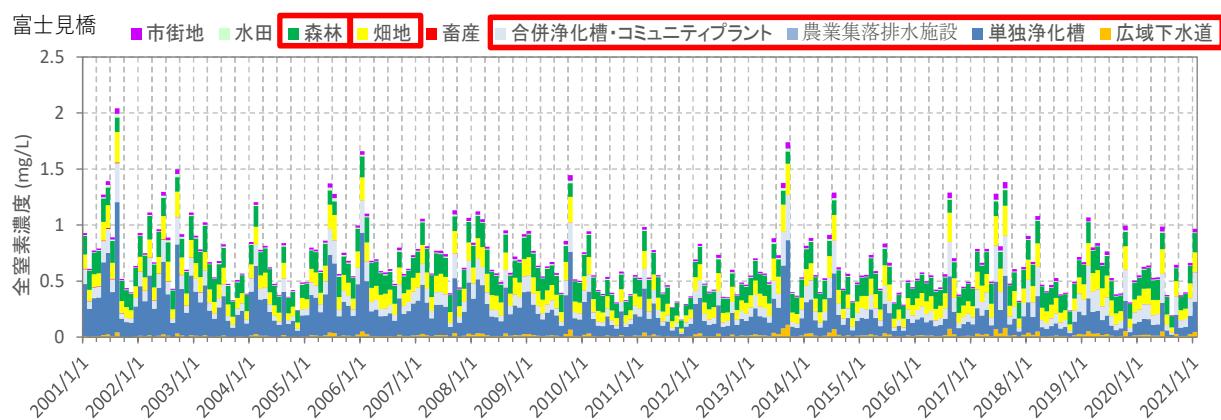
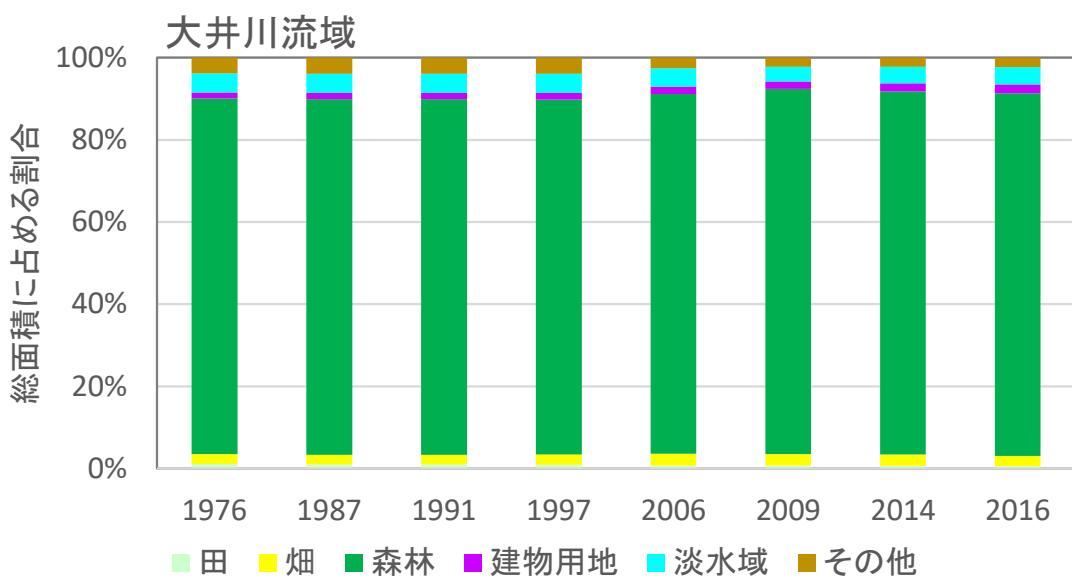


図 46 富士見橋地点（大井川）における全窒素濃度中の発生源別割合

表 9 富士見橋地点（大井川）における全窒素濃度中の発生源別割合（2015–2020 年平均）

項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	3.4	120.4
水田	0.9	30.6
森林	26.4	944.5
畠地	21.9	785.1
畜産	0.1	3.2
合併処理浄化槽・コミュニティプラント	18.9	676.4
農業集落排水施設	0.3	9.0
単独浄化槽	24.9	891.6
広域下水道	3.4	122.0
合計	100	3582.6



データ出典：国土数値情報土地利用細分メッシュ（国土交通省）

図 47 大井川流域の土地利用の変遷

<全リン（狩野川）>

黒瀬川橋地点（狩野川）における全リン濃度中の発生源別割合を図 48、表 10 に示した。生活排水（合併処理浄化槽・コミュニティプラント+農業集落排水施設+単独浄化槽+広域下水道）の寄与度が大きく、合計すると河川の全リン濃度の 60.2%を占める。なお表 11 に発生源毎に設定している全窒素、全リンの原単位を示したが、発生源間で全窒素と全リンの原単位比率が異なるため、全窒素濃度の構成割合とは異なる結果となる。

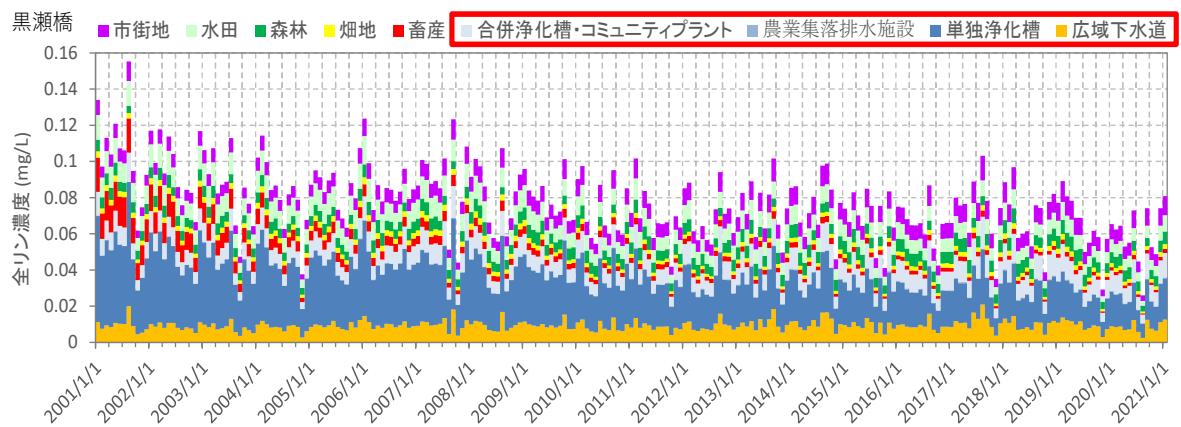


図 48 黒瀬川橋地点（狩野川）における全リン濃度中の発生源別割合

表 10 黒瀬川橋地点（狩野川）における全リン濃度中の発生源別割合（2015–2020 年平均）

項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	12.8	41.9
水田	11.0	36.1
森林	9.5	31.3
畠地	3.3	11.0
畜産	3.2	10.5
合併処理浄化槽・コミュニティープラント	16.0	52.6
農業集落排水施設	0.6	2.0
単独処理槽	29.4	96.6
広域下水道	14.2	46.5
合計	100	328.6

表 11 発生源毎に設定している全窒素、全リンの原単位

項目	浄化処理	分類	負荷量		単位	出典
			T-N	T-P		
生活排水	あり	広域下水道	1~24	0.1~2	mg/L	1
		農業集落排水施設	6.1	0.63	g/人・日	2
		合併処理浄化槽・コミュニティ・プラント	6.5	0.75	g/人・日	2
		単独処理浄化槽	9.17	1.06	g/人・日	2
畜産排泄物	あり（たい肥化）	牛（原単位）	0	0	g/頭/日	2
		豚（原単位）	0	0	g/頭/日	2
		鶏（原単位）	0	0	g/頭/日	2
	あり（浄化・炭化・焼却等）	牛（原単位）	16.7	0.95	g/頭/日	2
		豚（原単位）	3.9	0.95	g/頭/日	2
		鶏（原単位）	0.110	0.002	g/頭/日	2
	なし	牛（原単位）	247	44	g/頭/日	2
		豚（原単位）	41	18	g/頭/日	2
		鶏（原単位）	2	0.34	g/頭/日	2
土地利用による負荷	なし	水稻(純排出量)	13.4	4.14	kg/ha/年	2
		畑地	100.4	1.28	kg/ha/年	2
		市街地	16.2	1.9	kg/ha/年	2
		森林	10.5	0.66	kg/ha/年	2

出典：

- 1 静岡県提供資料より
- 2 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説（国土交通省、H27）より

<全リン（富士川）>

富士川橋地点（富士川）における全リン濃度の発生源別割合を図49、表12に示した。ただし、富士川の上流域には山梨県が含まれるため、山梨県からの流入についても、その構成割合も追加している。

山梨県からの流入量が、寄与度の87.8%を占めて（2015年～2020年平均）、最も多いが、山梨県からの流入量を除くと、生活排水（合併処理浄化槽・コミュニティプラント+農業集落排水施設+単独浄化槽+広域下水道）の寄与度が大きく、合計すると河川の全リン濃度の78.3%（山梨県からの流入量を含めると9.5%）を占めることが想定される。なお、山梨県からの流入量について、その中の発生源別割合を本検討の範囲では算出できないが、計算上与えている2020年の発生量から推測すると、生活排水、森林の割合が高くなると推定される。

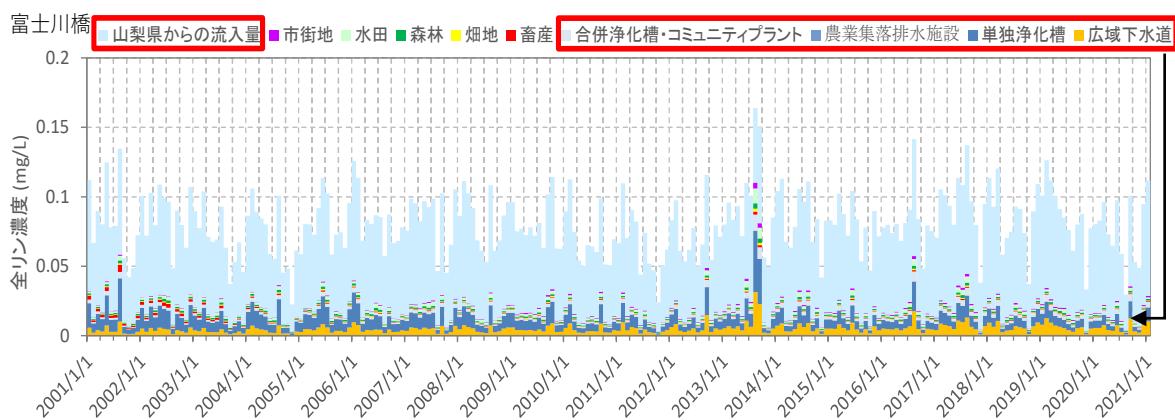


図49 富士川橋地点（富士川）における全リン濃度の発生源別割合

表12 富士川橋地点（富士川）における全リン濃度の発生源別割合（2015～2020年平均）

項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	3.9 (0.5)	5.8
水田	8.1 (1.0)	11.9
森林	5.7 (0.7)	8.3
畠地	2.0 (0.2)	2.9
畜産	2.0 (0.2)	3.0
合併処理浄化槽・コミュニティプラント	12.7 (1.5)	18.6
農業集落排水施設	0.1 (0.0)	0.1
単独浄化槽	34.7 (4.2)	51.0
広域下水道	30.8 (3.8)	45.2
合計	100 (12.2)	146.8(1058.3)

※山梨県からの流入量を除いた割合（含めた割合）

<全リン（安倍川）>

安倍川橋地点（安倍川橋）における全リン濃度中の発生源別割合を図 50、表 13 に示した。

生活排水（合併処理浄化槽・コミュニティプラント+農業集落排水施設+単独浄化槽+広域下水道）の寄与度が最も大きく、合計すると河川の全リン濃度の 44.3%を占める。次いで森林からの負荷が大きく、全体の 23.9%を占めることが想定された。

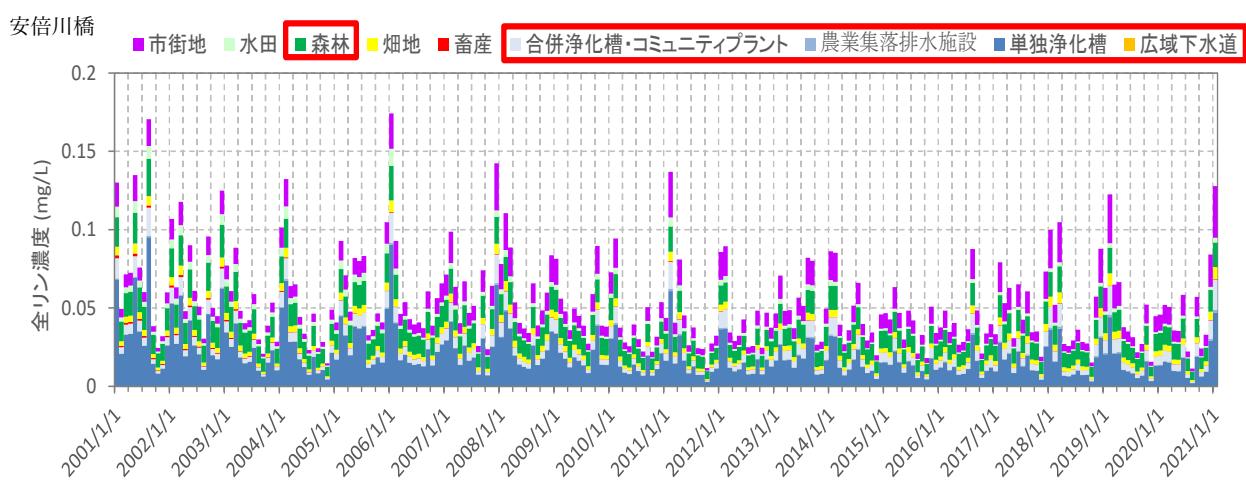


図 50 安倍川橋地点（安倍川）における全リン濃度の発生源別割合

表 13 安倍川橋地点（安倍川）における全リン濃度の発生源別割合（2015–2020 年平均）

項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	21.5	37.1
水田	2.9	5.0
森林	23.9	41.3
畠地	7.0	12.1
畜産	0.3	0.5
合併処理浄化槽・コミュニティプラント	11.9	20.5
農業集落排水施設	1.1	2.0
単独浄化槽	31.3	53.8
広域下水道	0.0	0.0
合計	100	172.3

<全リン（大井川）>

富士見橋地点（大井川）における全リン濃度中の発生源別割合を図 51、表 14 に示した。

生活排水（合併処理浄化槽・コミュニティプラント+農業集落排水施設+単独浄化槽+広域下水道）の寄与度が最も大きく、合計すると河川の全リン濃度の 67.1%を占める。次いで森林からの負荷が大きく、全体の 20.5%を占めることが想定された。

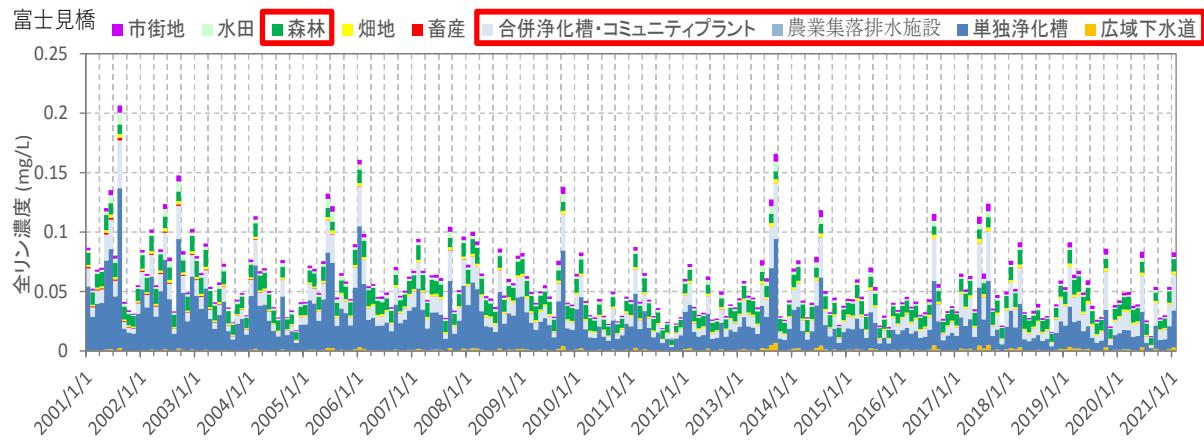


図 51 富士見橋地点（大井川）における全リン濃度中の発生源別割合

表 14 富士見橋地点（大井川）における全リン濃度中の発生源別割合（2015–2020 年平均）

項目	割合(%)	流出量(kg/day)
市街地	5.2	14.5
水田	3.3	9.4
森林	20.5	57.8
畠地	3.5	10.0
畜産	0.3	0.8
合併処理浄化槽・コミュニティプラント	27.6	78.0
農業集落排水施設	0.3	0.9
単独浄化槽	36.5	103.1
広域下水道	2.7	7.6
合計	100	282.3

5) 駿河湾流域を 6 つに分割した各エリアの栄養塩物質等の供給特性の分析結果

4) で示した大きな河川毎の栄養供給特性の分析に加え、ここからは、1)~3)に示した大きな 6 つの下流域区分における全窒素、全リンの発生源について検討した。

<御前崎周辺の小流域>

地表、地下からの流出量の各発生源の構成割合を図 52 に示す。

地表水と地下水の流出傾向が比較的一致している特性があり、海域へ流出する地表水と地下水が同様の経路で流動しているためと考えられる。

全窒素は畠地からの割合が高いが、全リンは市街地、生活排水、水田の割合も高くなっている。表 10 に示したように、畠地では全窒素の原単位が全リンに比べて高く、他の発生源については逆の傾向にあるためと想定される。

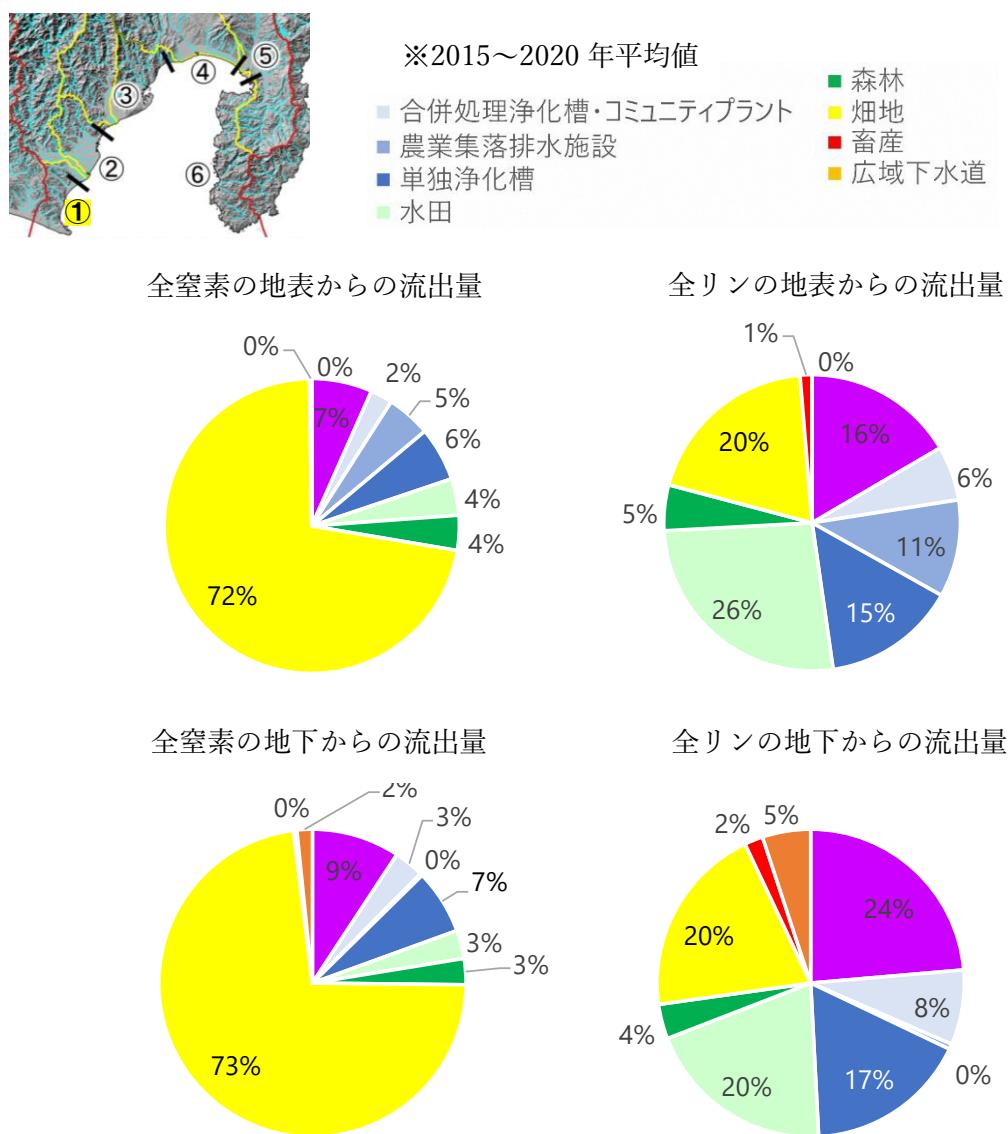


図 52 地表、地下からの流出量（御前崎周辺の小流域）

<主に大井川下流域>

地表、地下からの流出量の各発生源の構成割合を図 53 に示す。

地表水、地下水ともに生活排水の寄与度が大きかった。

全窒素と比較して、全リンの寄与度は、水田が増加し畑地が減少する傾向があり、水田や畑地における単位面積当たりの全窒素・全リンの発生量の割合が異なるためと考えられた。また、地表水と地下水の流出傾向が一致しない結果となり、海域へ流出する地表水と地下水が異なる経路で流動しているためと考えられる。

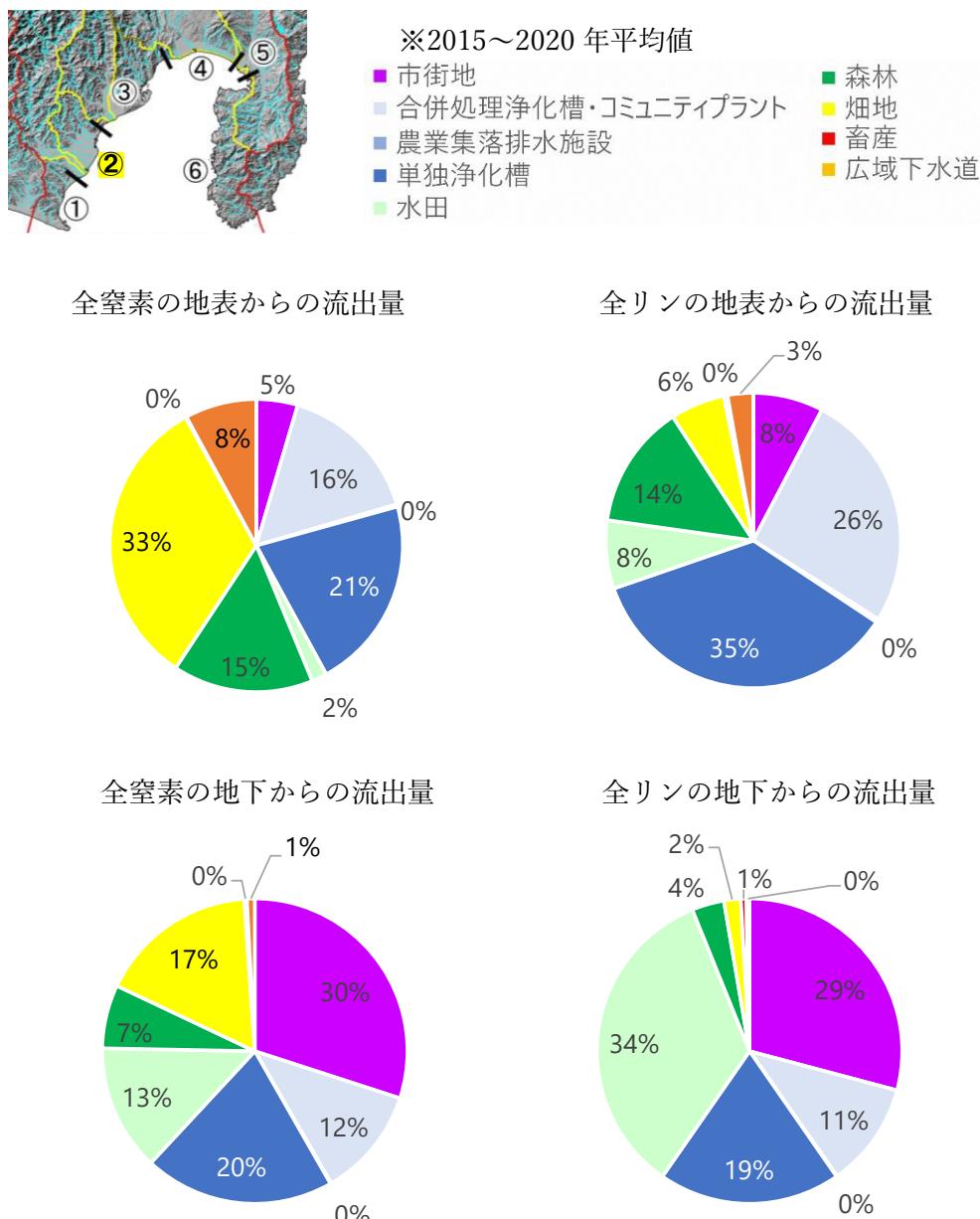


図 53 地表、地下からの流出量（大井川流域）

<主に安倍川下流域>

地表、地下からの流出量の各発生源の構成割合を図 54 に示す。

地表水の全窒素・全リンはともに広域下水道の寄与度が大きい結果となったが、排水処理施設の多くが沿岸に位置するためと考えられる。

また、地下水の全窒素・全リンとともに畠地の寄与度が大きい結果となっており、海域へ流出する地下水の起源となるエリア（主に静岡平野）に畠地が広く分布するためと考えられる。

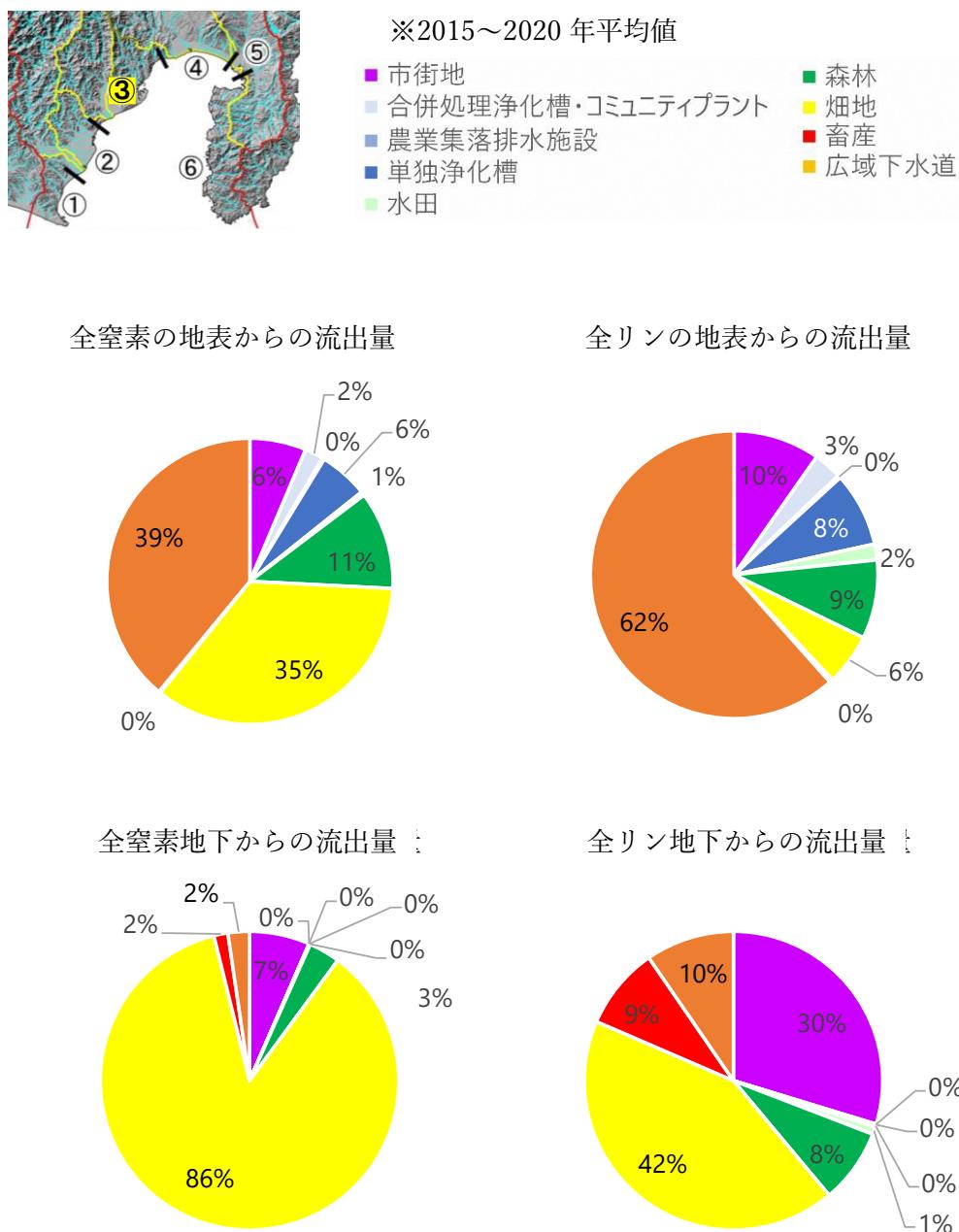


図 54 地表、地下からの流出量（安倍川）

<主に富士川下流域>

地表、地下からの流出量の各発生源の構成割合を図 55 に示す。

地表水は、上流に位置する山梨県からの寄与が全窒素・全リンともに大きく、地下水については、全窒素・全リンとともに、生活排水の寄与が大きいと考えられる。また、他流域に比べ、水田、森林、畠地からの寄与が小さいと考えられる。地下からの流出量で山梨県からの寄与が小さいのは、④の主に富士川下流域において海域へ流出する地下水は静岡県側で浸透したものであり、山梨県側の地下水が海域へ流出する水量は小さいことに起因すると考えられる。また、地下からの流出量の構成割合を見ると広域下水道が全窒素、全リンともに50%程度を占めている。広域下水道については河川へ放流（負荷）されるため、地下からの流出量において構成割合が大きくなることは通常無いが、この地域は放流地点が小河川にあり、小さな河川をモデルでは再現できておらず、放流した水が地下へ浸透している状況と考えられる。

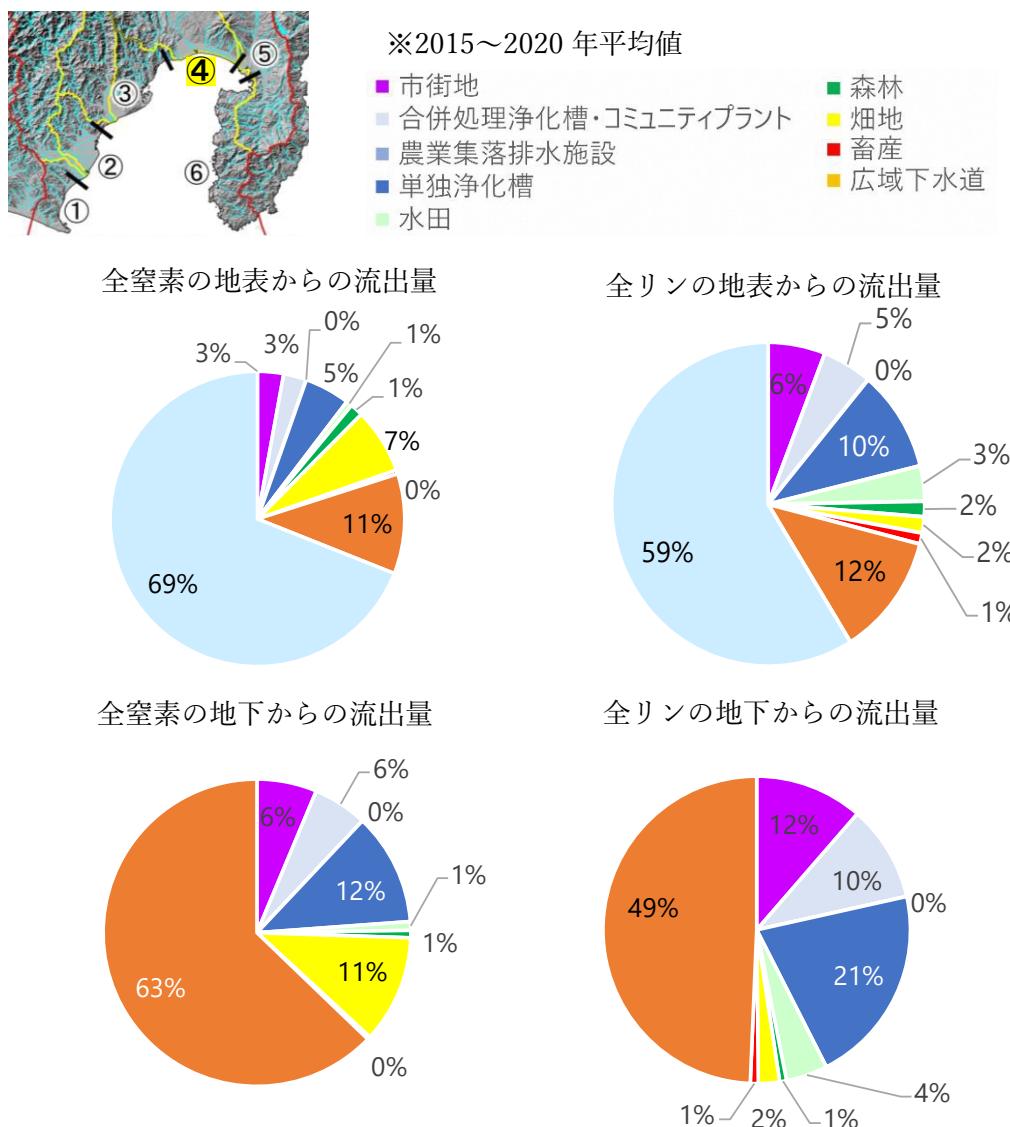


図 55 地表、地下からの流出量（富士川）

<主に狩野川下流域>

地表、地下からの流出量の各発生源の構成割合を図 56 に示す。

地表水は、全窒素・全リンともに生活排水の寄与度が大きく、地下水は、市街地（建物用地）、森林、畠地の寄与度が大きい結果となった。狩野川流域は、前述したように安倍川流域に次いで面積に対する人口が相対的に多く（表 5）、それに伴い排水処理施設も多く存在することに起因すると考えられる。海域へ流出する地下水の起源は田畠・平野だけでなく、その上流域も含まれていると考えられる。

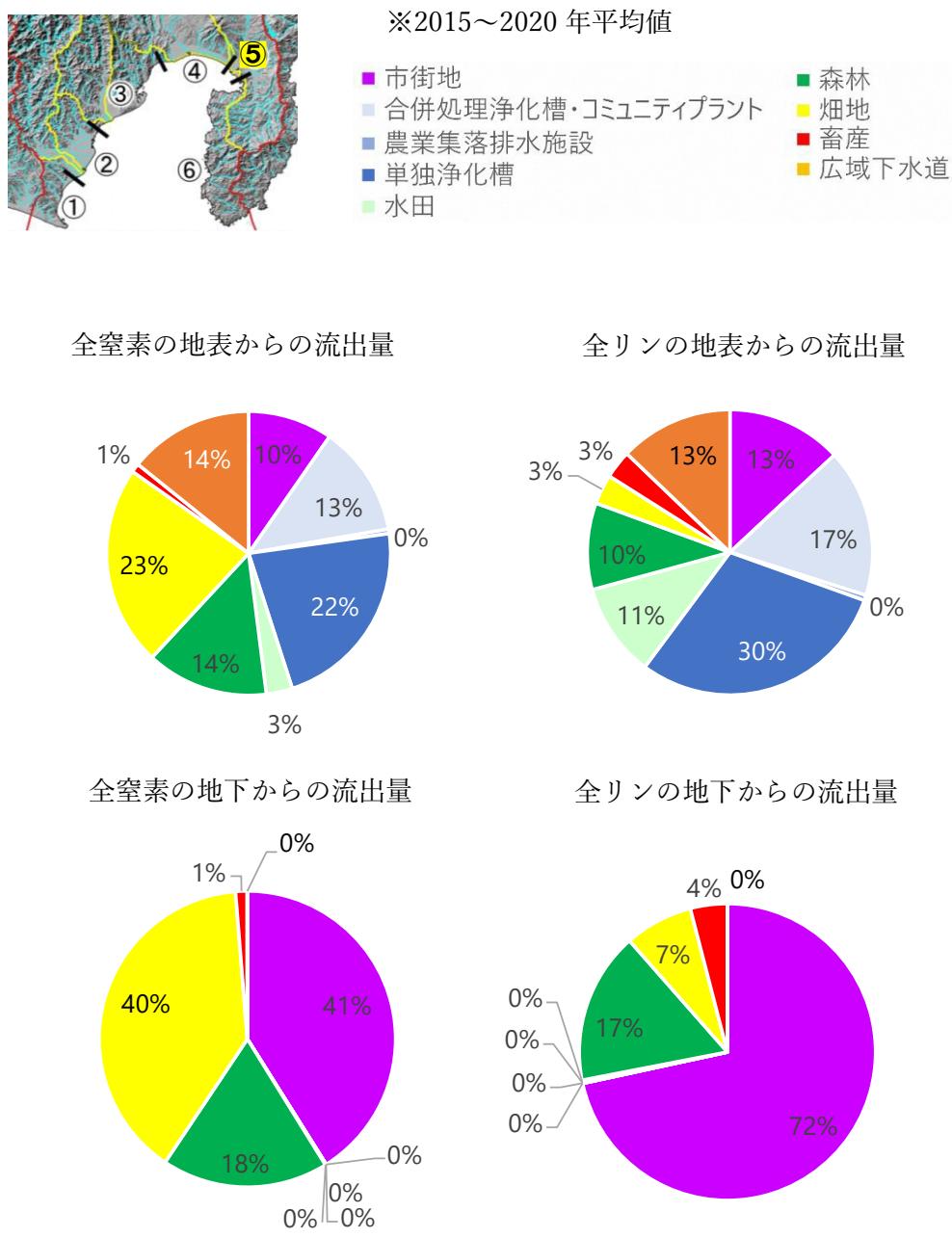


図 56 地表、地下からの流出量（狩野川）

<伊豆半島小流域>

地表、地下からの流出量の各発生源の構成割合を図 57 に示す。

他流域と比較して、地表水・地下水ならびに全窒素・全リンとともに、森林と畠地の寄与が大きい結果となった。これは、人口も相対的に少なく、森林と畠地が広く分布することに起因する。

なお、地下水は、より森林と畠地の寄与度が大きくなっている、海域へ流出する地下水の起源となるエリアに森林と畠地が広く分布するためと考えられる。

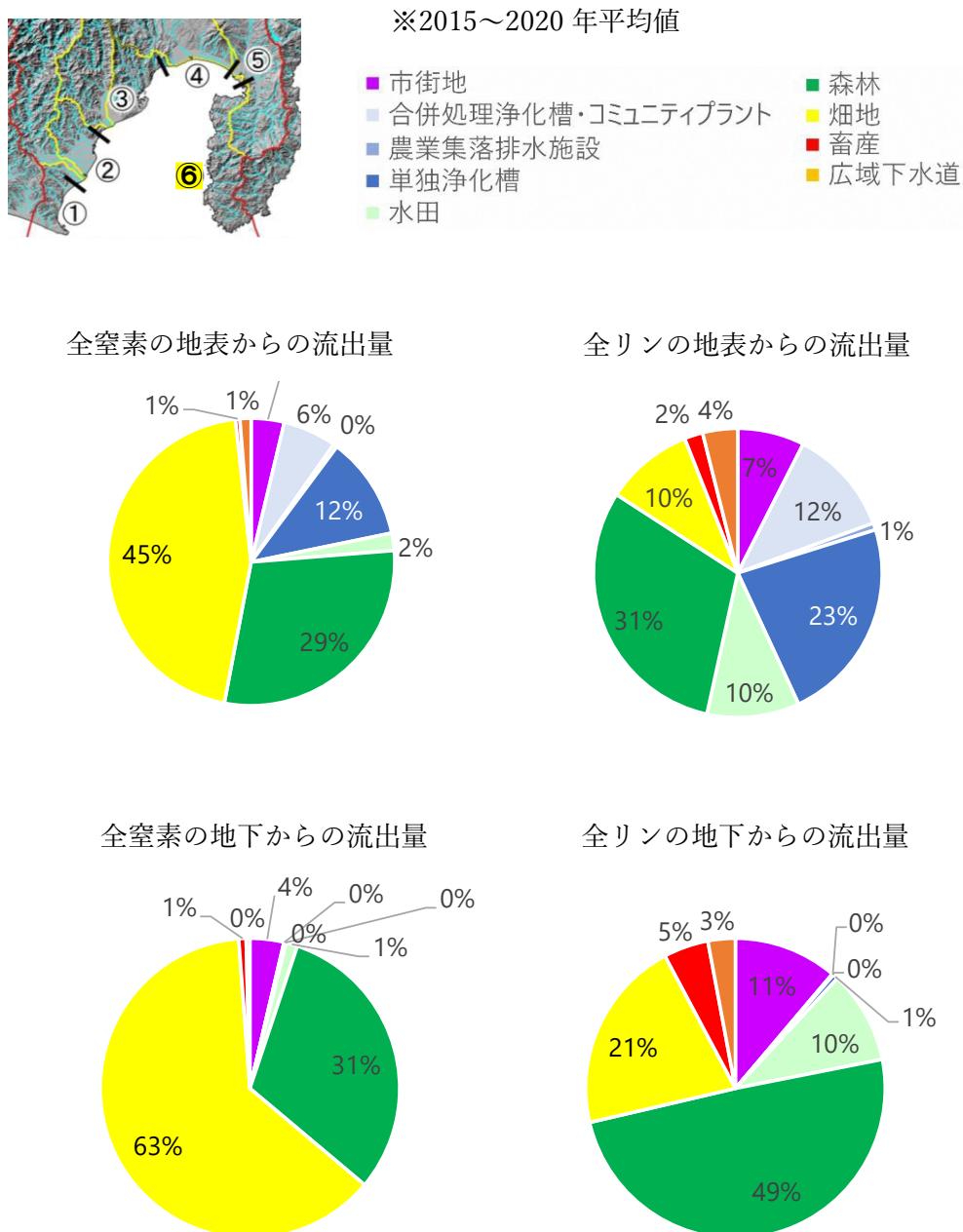


図 57 地表、地下からの流出量（狩野川）

6)まとめ

主要河川の最下流観測地点において寄与度の高い発生源の上位3つをまとめたものを表15に示す。全ての河川で、全窒素・全リンとともに生活排水による寄与度が高い結果となつた。また、生活排水による供給量は、下水道の普及に加えて人口の減少により、長期的には減少傾向であった。また、富士川は山梨県からの流入の寄与が非常に高い、安倍川は畠地からの全窒素負荷の寄与が最も高い、安倍川・大井川流域においては森林の寄与が比較的高い特性が見られた。特に図12 駿河湾流域の土地利用の変遷に示すように、森林は静岡県の土地利用の大部分を占めていること、また、将来的には、人口減少による生活排水や農用地（水田・畠地）の減少が予想され、相対的に森林の寄与度が高まっていく可能性があることなどから、今後の栄養塩物質等の供給源として重要な役割を果たすことになることが推定される。

表 15 主要河川において寄与度の高い発生源

	狩野川	富士川	安倍川	大井川
全窒素	生活排水(50.2%) 畠地(22.8%) 森林(13.5%)	山梨県からの流入分(90.2%) 生活排水(6.5%、66.2%※) 畠地(1.6%、16.5%※)	畠地(39.3%) 森林(27.9%) 生活排水(27.5%)	生活排水(47.5%) 森林(26.4%) 畠地(21.9%)
全リン	生活排水(60.2%) 市街地(12.8%) 水田(11.0%)	山梨県からの流入分(87.8%) 生活排水(9.5%、78.3%※) 水田(1.0%、8.1%※)	生活排水(44.3%) 森林(23.9%) 市街地(21.5%)	生活排水(67.1%) 森林(20.5%) 市街地(5.2%)

生活排水：合併処理浄化槽・コミュニティプラント、農業集落排水施設、単独浄化槽、広域下水道を合算
※山梨県からの寄与を除いた数値

また、エリア別の地表水と地下水毎の寄与度の高い発生源をまとめたものを表16に、エリア別の各発生源寄与度を駿河湾流域圏の地形・地質・土地利用の概略図とともに、図58に示す。全体的には全窒素・全リンとともに、生活排水と畠地の寄与度が高い傾向であるが、主要河川がない「①御前崎周辺の小流域」や「⑥伊豆半島小流域」のエリアでは、それぞれ、水田（全リンのみ）、森林の寄与度が高いのが特徴的であった。なお、地表水と地下水における寄与度の相違は、地表水と海域へ流出する地下水の経路の土地利用の違いに起因するものと考えられる。

表 16 エリア別の地表水と地下水毎の寄与度の高い発生源

		エリア① (御前崎周辺の 小流域エリア)	エリア② (主に大井川 下流域エリア)	エリア③ (主に安倍川 下流域エリア)	エリア④ (主に富士川 下流域エリア)	エリア⑤ (主に狩野川 下流域エリア)	エリア⑥ (伊豆半島 小流域エリア)
全窒素	地表水	生活排水(45%) 畠地(33%)	生活排水(47%) 畠地(35%)	山梨県からの流入分(69%) 生活排水(19%)	生活排水(49%) 畠地(23%)	畠地(45%) 森林(29%)	
	地下水	生活排水(32%) 市街地(30%)	畠地(86%)	生活排水(81%)	市街地(41%) 畠地(40%)	畠地(63%) 森林(31%)	
全リン	地表水	生活排水(33%) 水田(26%) 畠地(20%)	生活排水(64%)	生活排水(73%)	山梨県からの流入分(59%) 生活排水(27%)	生活排水(60%)	生活排水(40%) 森林(31%)
	地下水	生活排水(30%) 市街地(24%) 水田(20%) 畠地(20%)	水田(34%) 生活排水(31%) 市街地(29%)	畠地(42%) 市街地(30%)	生活排水(80%)	市街地(72%)	森林(49%) 畠地(21%)

※生活排水：合併処理浄化槽・コミュニティプラント、農業集落排水施設、単独浄化槽、広域下水道を合算

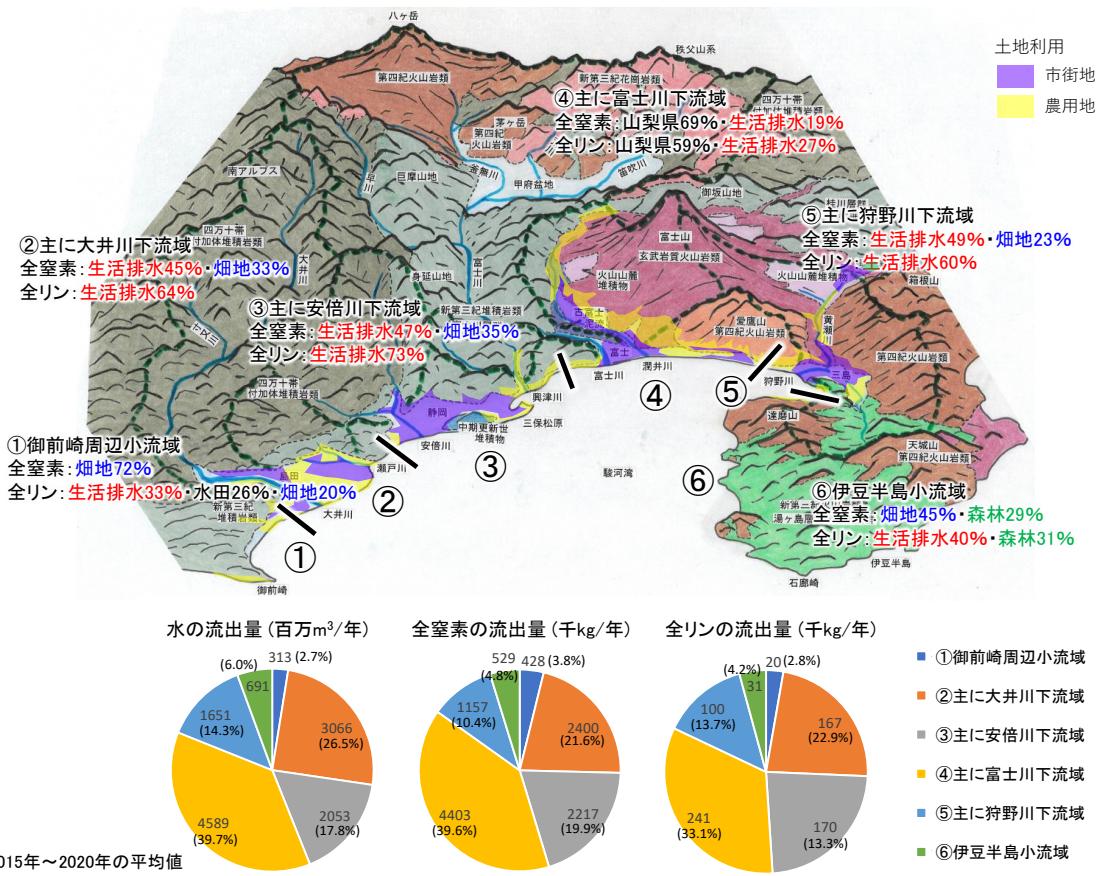
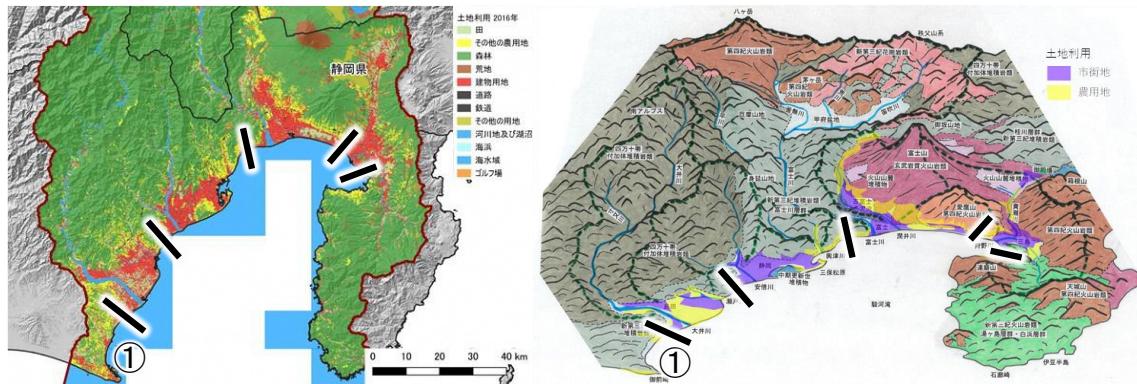


図 58 河川・流域別の各発生源寄与度のまとめ

図 59～図 64 にエリア毎に地形・地質・土地利用の状況や海への流出量とその寄与度を示し、エリア毎の特性としてまとめたものを示す。

全窒素、全リンの濃度については、降雨時の利用可能データが無いため、出水時の濃度を現状モデルでどの程度再現できているか検証されていない。従って、今後、出水時のデータが入手され、その再現性状況によっては、モデルの修正が必要となり、海域への流出量や発生源別の寄与度など、これまでに示した結果が変わる可能性がある。また、発生源毎に設定している原単位の長期的な変化や、年間の中での季節変化を考慮できていないことにも留意が必要である。

①御前崎周辺の小流域エリア



地形・地質

- 萩間川などの中小河川が丘陵地から駿河湾に注いでいる。流域の基盤地質は新第三紀の堆積岩類（中新世後期～鮮新世、海成の砂岩・泥岩互層）であるが、牧之原など丘陵の頂稜部は平坦で更新世の段丘砂礫が覆っている
- 段丘砂礫は、空隙が多く、降雨をいったん貯留して徐々に河川に流出する効果を持つと考えられる。一方、基盤の堆積岩類は透水性が低いため、降雨は浸透せずに、短時間に河川に流出する。

土地利用

- 主に水田や畠地などの農用地

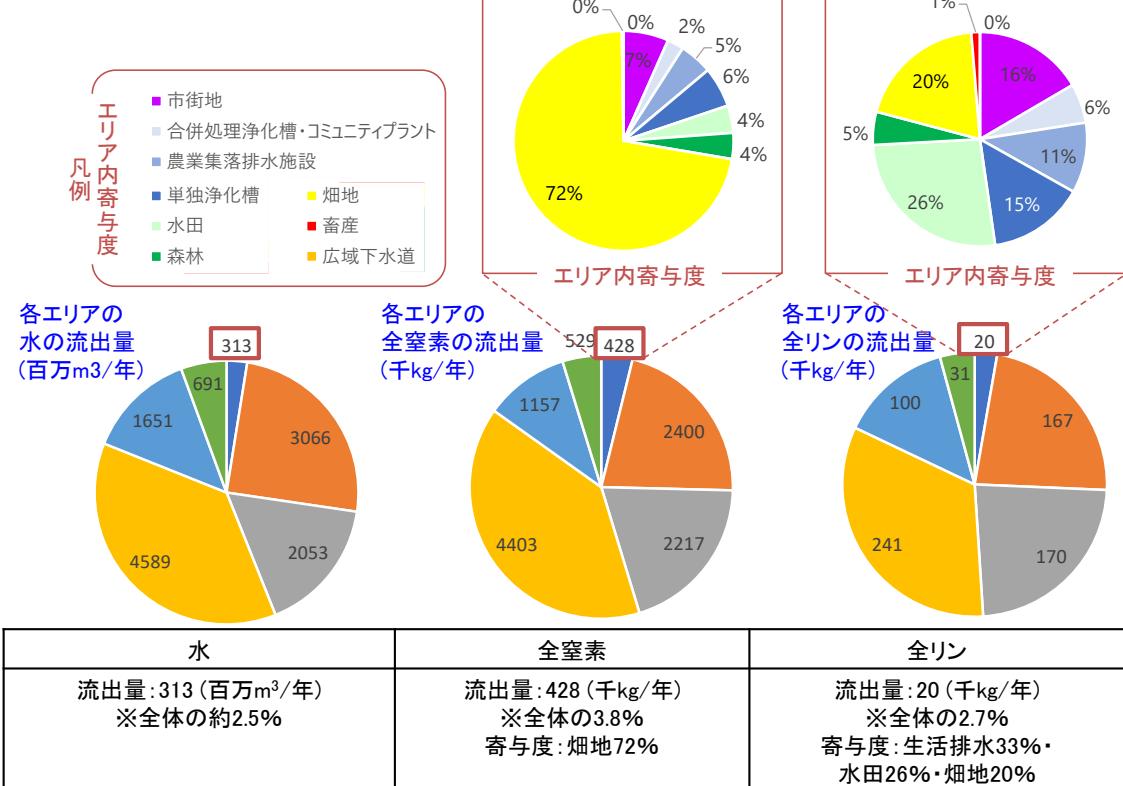
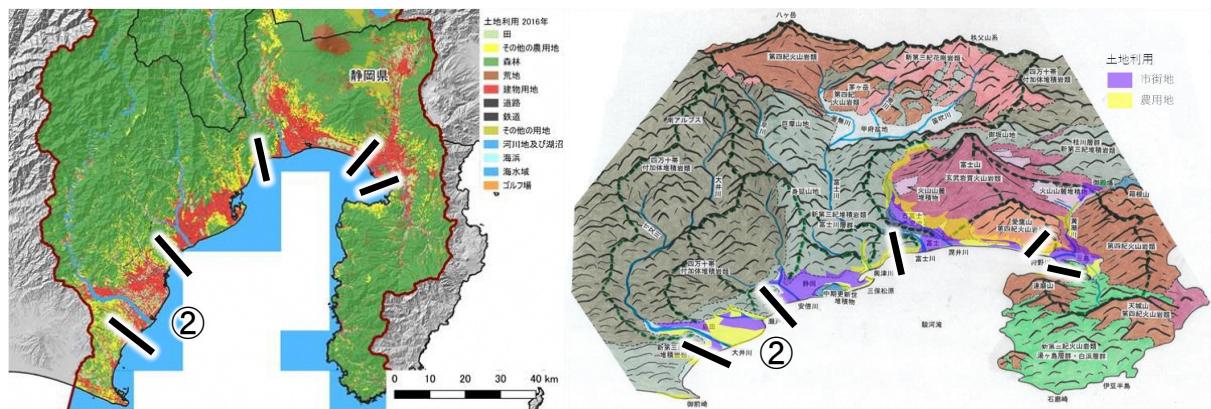


図 59 ①御前崎周辺の小流域エリアの特性まとめ

②主に大井川下流域エリア



地形・地質

- 大井川は、急峻な南アルプスの中心部を北から南に流れている。流域の地質は、四万十帯(中生代～古第三紀の付加体堆積岩類)で、岩種は頁岩優勢砂岩互層が主体で、少量の緑色岩、チャート、石灰岩を含む
- 地形が急峻で河川勾配も急なため、降雨は流出しやすく、豊水期と渴水期の流量の差が著しいが、大規模な発電用ダムがあり、河川流量を幾分か平準化していると考えられる

土地利用

- 上流部は主に森林、下流平地部は主に建物用地・水田や畠地などの農用地

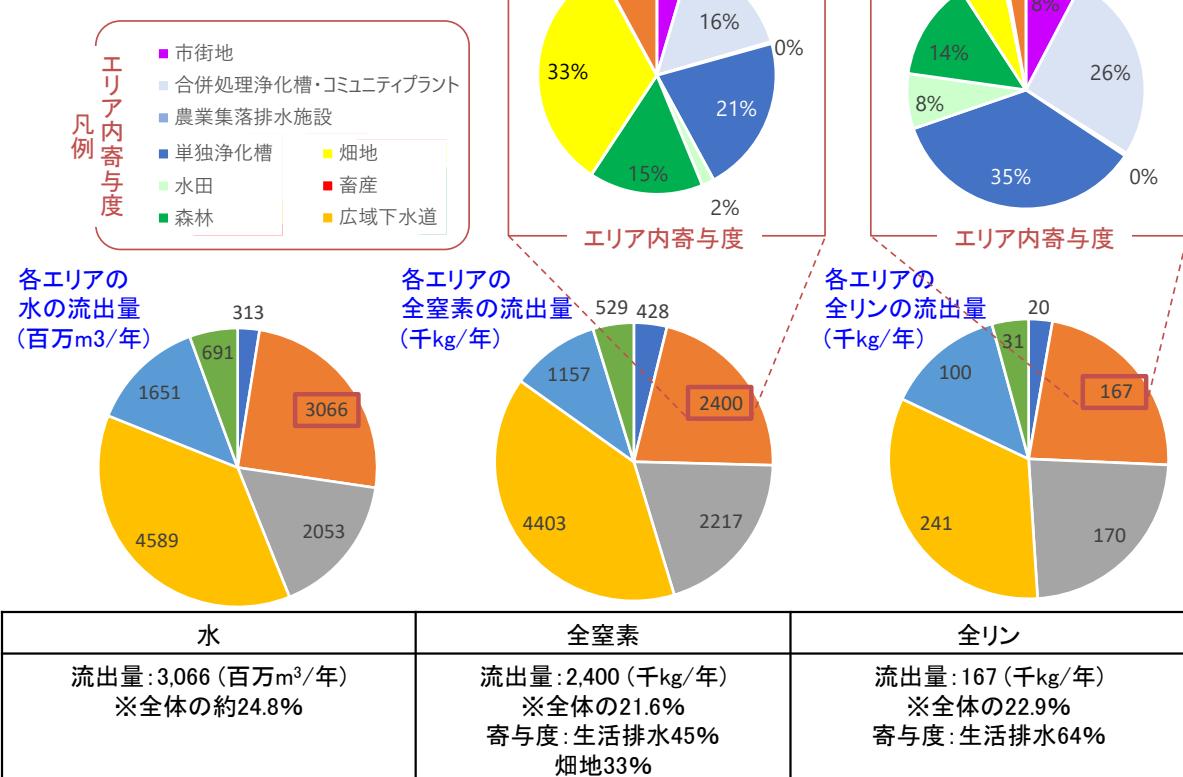
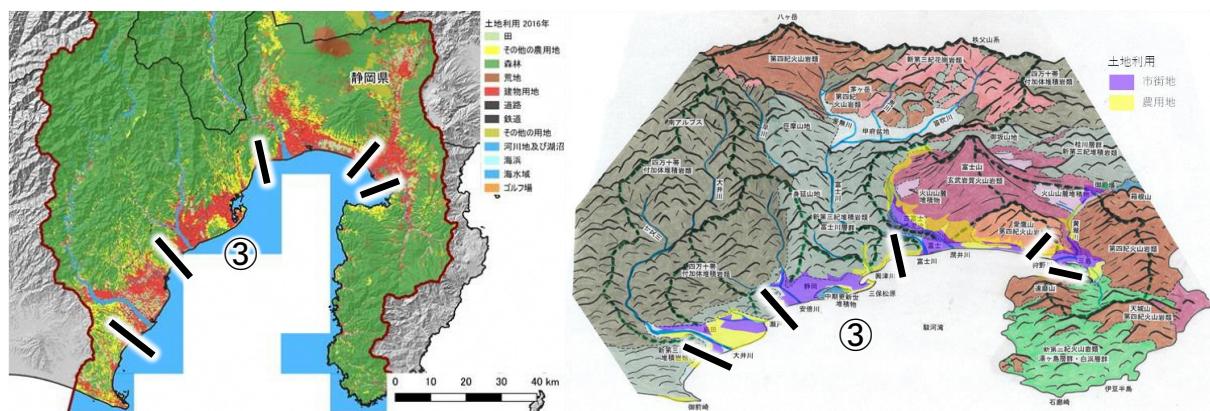


図 60 ②主に大井川下流域エリアの小流域の特性まとめ

③主に安倍川下流域エリア



地形・地質

- 安倍川、瀬戸川流域の大半は四万十帯上部(中生代末～古第三紀)の堆積岩で、砂岩優勢頁岩互層が主体で、ごく少量の緑色岩を挟んでいる。安倍川流域東部および瀬戸川流域南部は新第三紀の堆積岩、火山岩が分布している。大井川同様、降雨は流出しやすいが、大井川と比較すると、河川勾配がやや緩く、山地は低く岩盤の風化も進んでいるため、渴水期の河川流量も多少は維持されやすい。
- 興津川流域の地質は、新第三紀の堆積岩および火山岩で、山地はより低く、岩盤の風化も進んでいる。渴水期の河川流量は維持されやすい。

土地利用

- 上流部は主に森林、下流平地部は主に建物用地・水田や畠地などの農用地

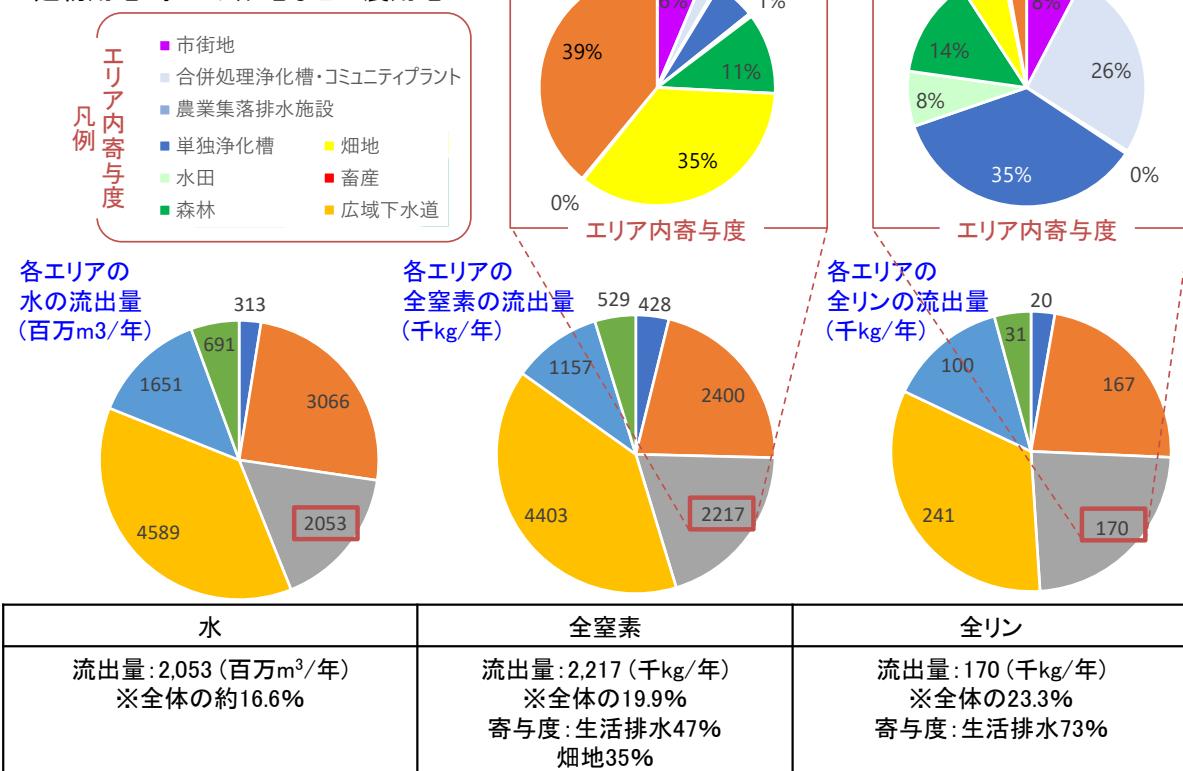
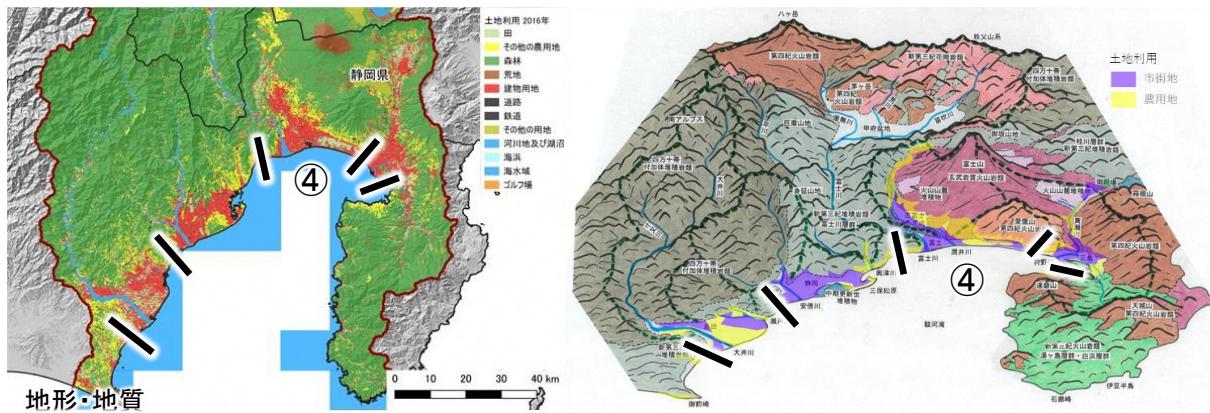


図 61 ③主に安倍川下流域エリアの小流域の特性まとめ

④主に富士川下流域エリア



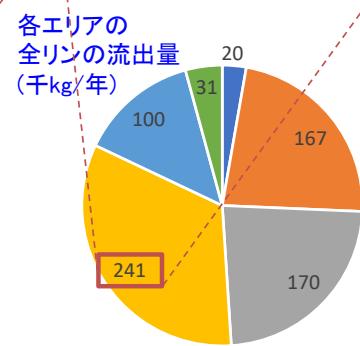
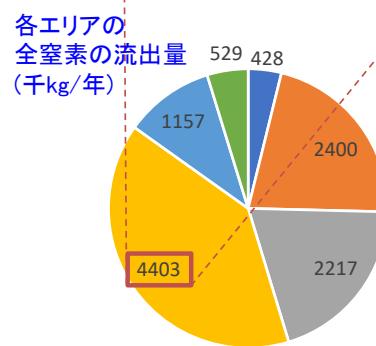
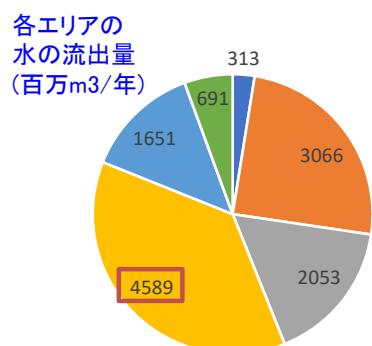
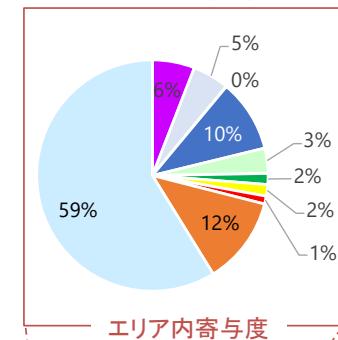
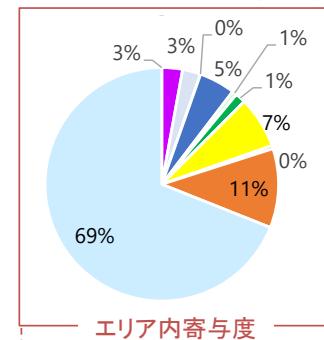
- 上流の甲府盆地で、釜無川に笛吹川、荒川などが合流し、中流で早川が合流する。駿河湾に流入する河川の内では、流域面積は最大である。各支川の上流域にはハケ岳や茅ヶ岳などの第四紀の火山、秩父山系や南アルプスに分布する四万十帯の堆積岩類、新第三紀の堆積岩、新第三紀の花崗岩類など多様な地質が分布する。甲府盆地から駿河湾までは、おおむね新第三紀の堆積岩類(泥岩、砂岩、火碎岩など)である。
- 上流域の火山岩類は、空隙が多く保水性が高い、構造盆地である甲府盆地を通過するため河川勾配が緩く、河川の流況は比較的安定している。

土地利用

- 上流部は山梨県、下流平地部は主に建物用地・水田や畠地などの農用地



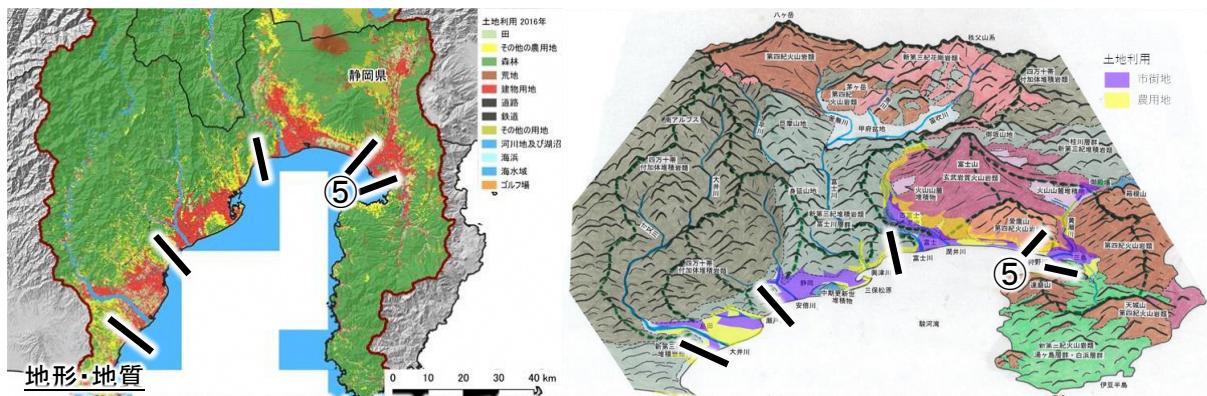
※他のエリアと異なり、他県(山梨県)の土地利用も含んだ寄与度である。



水	全窒素	全リン
流出量: 4,589 (百万m ³ /年) ※全体の約24.8%	流出量: 4,403 (千kg/年) ※全体の21.6% 寄与度: 山梨県69% 生活排水19%	流出量: 241 (千kg/年) ※全体の22.9% 寄与度: 山梨県59% 生活排水27%

図 62 ④主に富士川下流域エリアの小流域の特性まとめ

⑤主に狩野川下流域エリア



- 潤井川と黄瀬川は大規模な成層火山である富士山の西側および東側の山麓を流れている。富士山の山体は空隙の多い火山岩(玄武岩質)で構成され、多量の地下水を貯留し山麓に湧出している。このため、両河川の流況は極めて安定している。富士山の山腹斜面は単調で、地形上の流域界は判断しがたい。但し、地下水の流れも含めた実際の集水域は地形からの判断とは、大きく異なる可能性がある。
- 上流の狩野川の本川は、伊豆半島の中央部から北に流れ、下流部で黄瀬川を合流している。流域の地質は、天城山などの第四紀の火山岩類と下位の新第三紀の火山岩類(湯ヶ島層群・白浜層群)である。第四紀火山岩類は、富士山ほどではないが空隙が多く、地下水を貯留して流況の安定に寄与している。一方、新第三紀の火山岩類は変質して透水性が低く、渴水期の河川流量の維持には寄与しない

土地利用

- 上流部は主に森林、下流平地部は主に建物用地

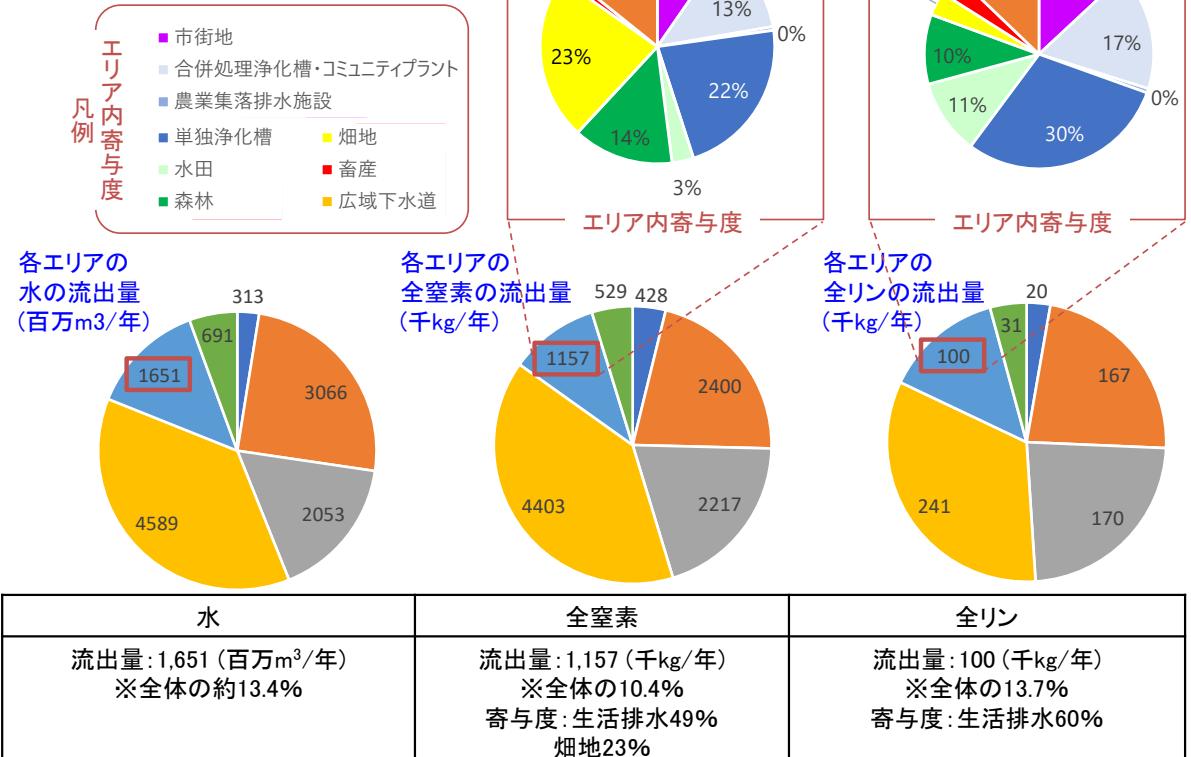
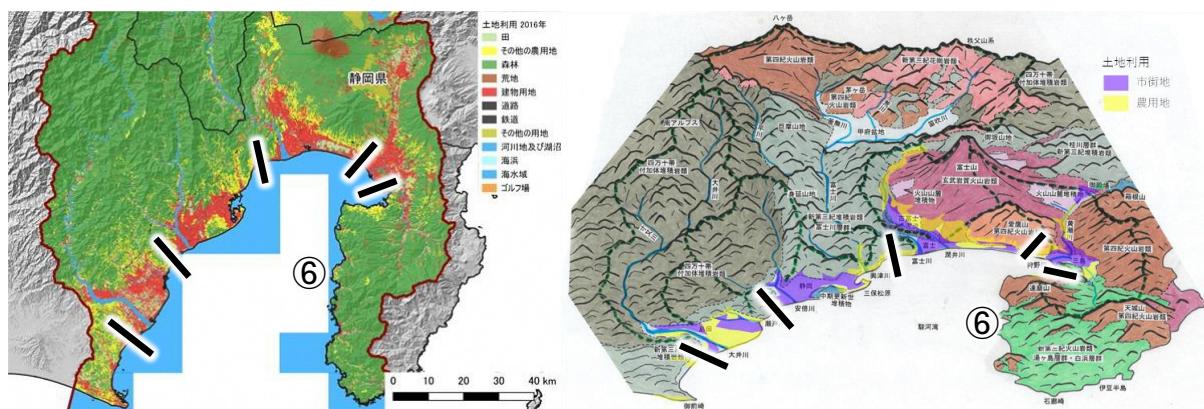


図 63 ⑤主に狩野川下流域エリアの小流域の特性まとめ

⑥伊豆半島の小流域エリア



- 伊豆半島西海岸では、戸田大川、宇久須川、仁科川、那賀川などの中小河川が、頂稜部の標高1,000m前後の山地から、駿河湾に流入している。
- 戸田大川の流域は、第四紀の火山岩類(達磨山火山)である。宇久須川、仁科川、那賀川などは、上流部は山地の稜線部に分布する第四紀の火山岩類であるが、中流以下では新第三紀の火山岩類が分布している。北部ほど、第四紀の火山岩類となる。
- 狩野川本川と同様に、第四紀火山岩類は地下水を貯留して流況の安定に寄与するが、新第三紀の火山岩類は渴水期の河川流量の維持には寄与しない

土地利用

- 主に森林と畠地

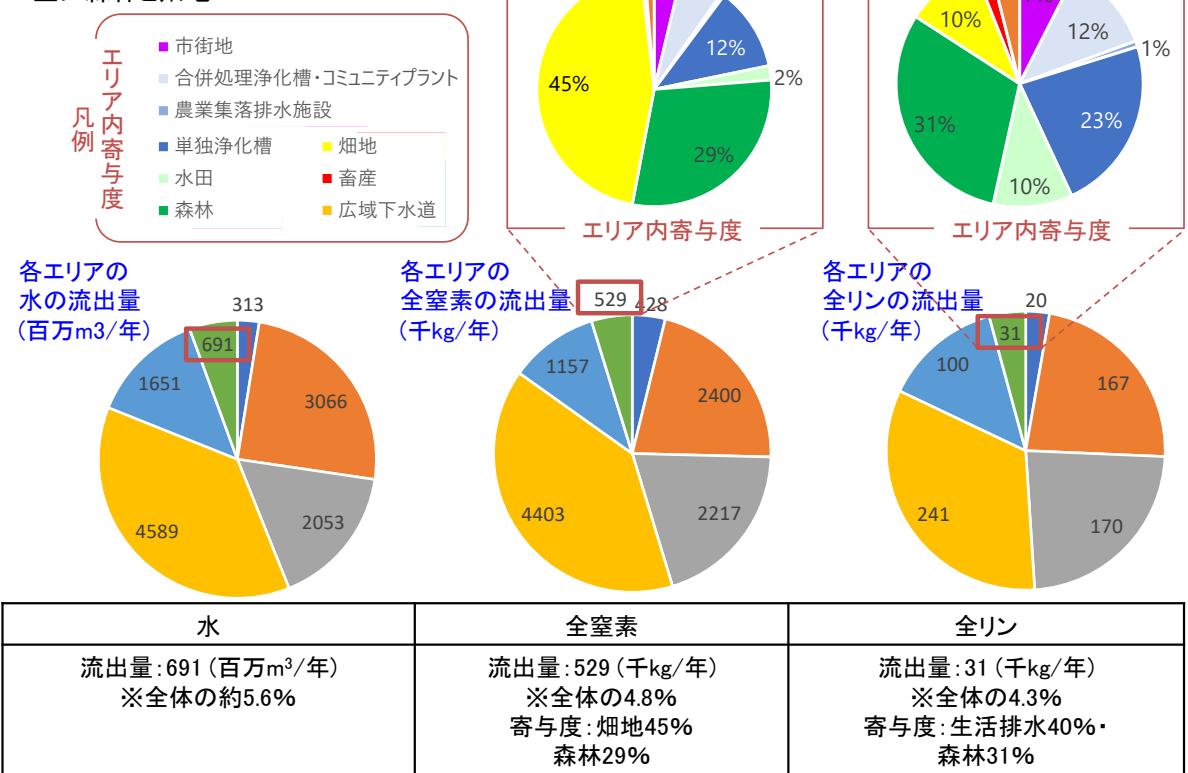


図 64 ⑥主に伊豆半島の小流域エリアの特性まとめ

c. 過去の駿河湾流域の再現結果

ここまででは近年の駿河湾の現状を評価したが、評価にあたって、流域の土地利用や下水処理などの条件が異なる過去の年代の再現結果との比較が有効である。

そこで、ここでは、過去の年代でモデル再現のためのデータがおおよそ実在する 1980 年代、1990 年代の駿河湾および流域における状況を再現し、近年の再現結果と比較し、以下の視点について検討した。なお、モデルに与える外海条件については、a～b での検討では、外洋モデル HYCOM の結果を用いて設定していたが、本検討では同モデルによる該当年度の結果がないことから、外洋モデル FORA(JAMSTEC)の結果を用いて設定している。

・栄養塩物質流入量の変化による海域の一次生産への影響把握

黒潮流路が安定している 1992 年と 2015 年を比較し、陸域の土地利用状況(排水処理等)の変化が、植物プランクトン生産に与える影響を評価した。

・黒潮流路の変化による影響把握

過去の黒潮大蛇行期(1983 年)と非大蛇行期(1992 年)などを比較し、黒潮大蛇行が植物プランクトン生産に与える影響を評価した。

過去と近年との比較結果は以下のとおりである。

i. 栄養塩物質流入量の変化による海域の一次生産への影響把握

1) 陸域モデル計算結果の比較

过去年代の流域の主たる条件として与えた、土地利用割合の変化を図 65 に、下水道普及率の変化を図 66 に、また、各主要河川最下流部で観測された 1980 年から 2020 年までを 3 つの年代別に区分した場合の全窒素、全リン濃度の平均値の変化を表 17 に示す。

土地利用としては 1980、1990 年代は現在に比べて田畠のような農耕地の割合がやや高く、一方で建物用地の割合が低い傾向にあった。また、下水道普及率は現在の 65% 程度に比べて、1980 年代は 25% 程度、1990 年代は上昇はみられるものの、35% 程度と低い状況にあった。これらや畜産など他の栄養塩物質等の供給条件の変化も含めて、河川の全窒素、全リン濃度を計算した結果、全河川ともに現在は過去の年代に比べて、両者ともに低く、過去の約 50~80% 程度の濃度となった。特に下水道が普及するなどの条件の変化が原因と考えられる。なお、河川流量はほとんど変化がない結果となった。

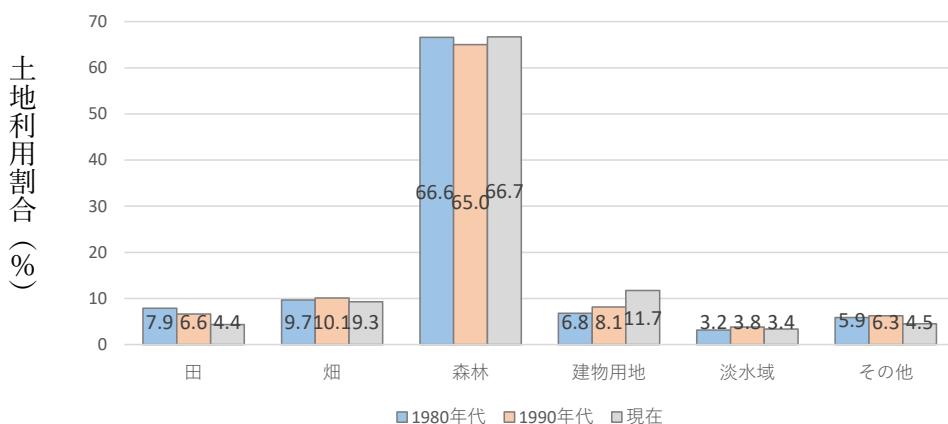


図 65 土地利用割合の変化

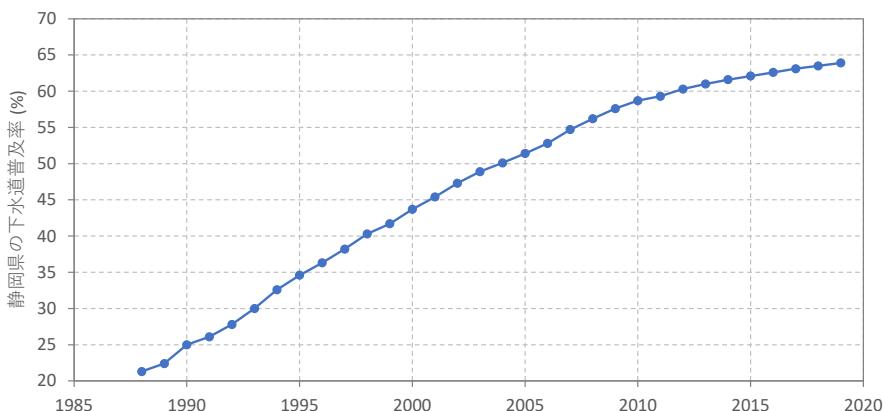


図 66 下水道普及率の変化

表 17 主要河川最下流部で観測された全窒素、全リン濃度 (mg/L) の変化 (観測値)

対象物質	集計期間	安倍川	狩野川	大井川	富士川
		安倍川橋	黒瀬橋	富士見橋	富士川橋
全窒素	1980年～1985年	1.68	1.47	0.78	1.54
	1990年～1995年	1.69	1.61	0.91	1.33
	2015年～2020年	0.73	1.15	0.44	1.10
全リン	1980年～1985年	0.063	0.166	0.034	0.126
	1990年～1995年	0.062	0.140	0.023	0.076
	2015年～2020年	0.031	0.100	0.011	0.080

※各集計期間における平均値を示す。

2) 海域モデル計算結果の比較

黒潮流路が安定している 1992 年と 2015 年を比較し、陸域の土地利用状況(排水処理等)の変化が、一次生産に与える影響を評価した。両年の毎月の一次生産量の比較を図 67 に示す。

1992 年は、2015 年に比べて、一次生産量は 6 月～8 月程度の夏季に卓越する傾向が確認された。「a.駿河湾へ流入する栄養塩物質等の供給源に関する寄与度分析」に示したように、夏季は陸域からの栄養塩物質等の供給に寄与度が高い時期であり、表 17 に示すように 1992 年は 2015 年に比べて、陸域から供給される全窒素や全リンが多かったことを踏まえると、1992 年の土地利用状況で与えた陸域からの栄養塩物質等により、夏季を中心に多くの一次生産が起こる状況にあったことが推察できる。

なお、4 月から 6 月の春季においては、逆に 1992 年は、2015 年に比べて、一次生産量が少ない傾向が確認されており、その要因の一つとしては、海面における水温の条件が大きく異なることが考えられた。以下に詳しく示す。

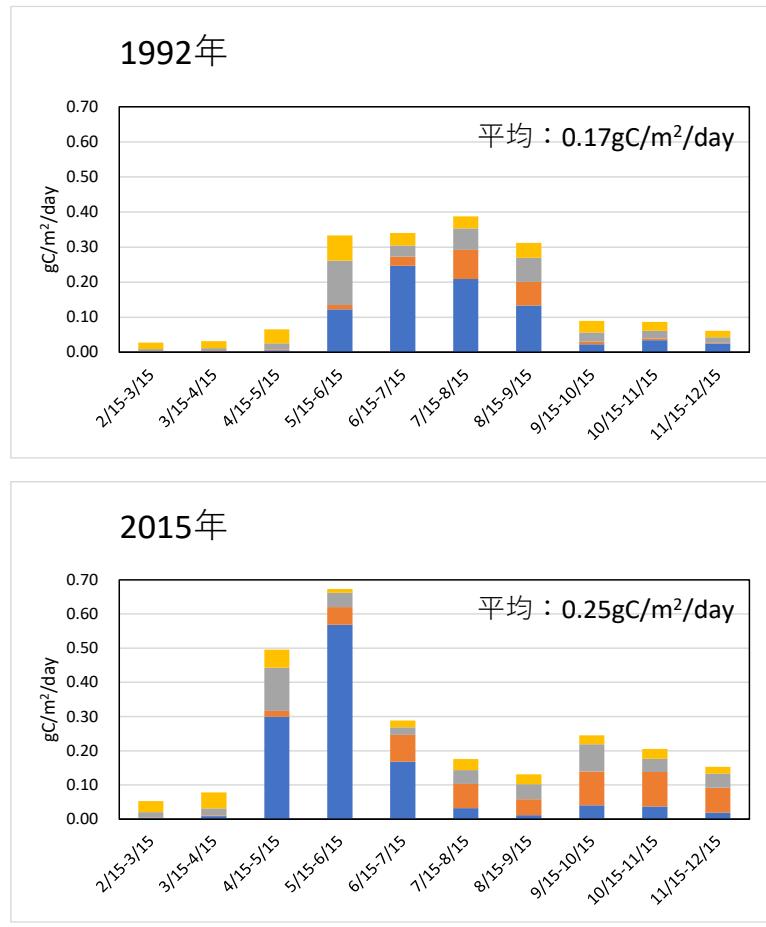


図 67 1992 年と 2015 年の一次生産量の比較（湾全体）

春季と夏季の海面水温の計算値の比較を図 68 および図 69 に示す。春季・夏季ともに、2015 年に比べて 1992 年の方が水温は低い傾向であった。なお、観測値をもとに整理されている海洋速報でも同様の傾向であり、モデルで与えた外洋の境界条件が適切に反映されている結果と考えられる。特に 1992 年の春季は湾内で水温が 16°C 程度となっており (2015 年は 18~19°C)、低水温傾向により、植物プランクトンによる一次生産が制限されていた可能性が考えられる。

一方で、夏季は、2015 年に比べて 1992 年で一次生産量が 2 倍程度と大きくなっている、春季の傾向を踏まえると一次生産のピークが遅れたものと考えられる。また、1992 年の夏季に一次生産量が大きい要因としては、表 17 に示されるように、陸域からの栄養塩物質等の供給が多かったことが考えられ、特に夏季は、陸域からの淡水供給に伴い塩分成層が形成され表層水と底層水が混合しづらくなるため、淡水とともに供給された栄養塩物質等が特に表層の有光層となる層に多く存在して、一次生産量を大きくしている可能性が考えられる。

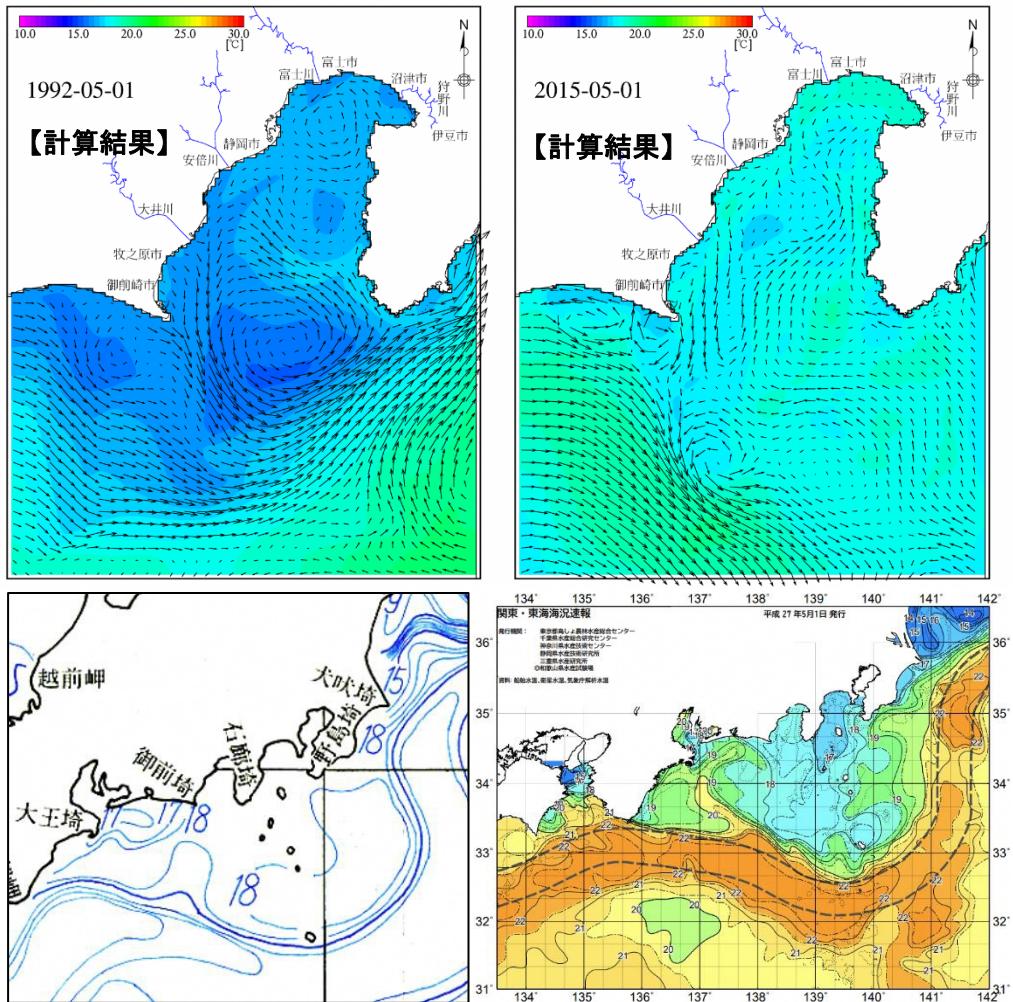


図 68 春季の海面水温の比較（上段：計算結果、下段：観測データ等）

出典) 左下図：海上保安庁海洋速報（1992年4月28日～5月13日）

右下図：静岡県水産・海洋技術研究所 海洋情報（2015年5月1日）

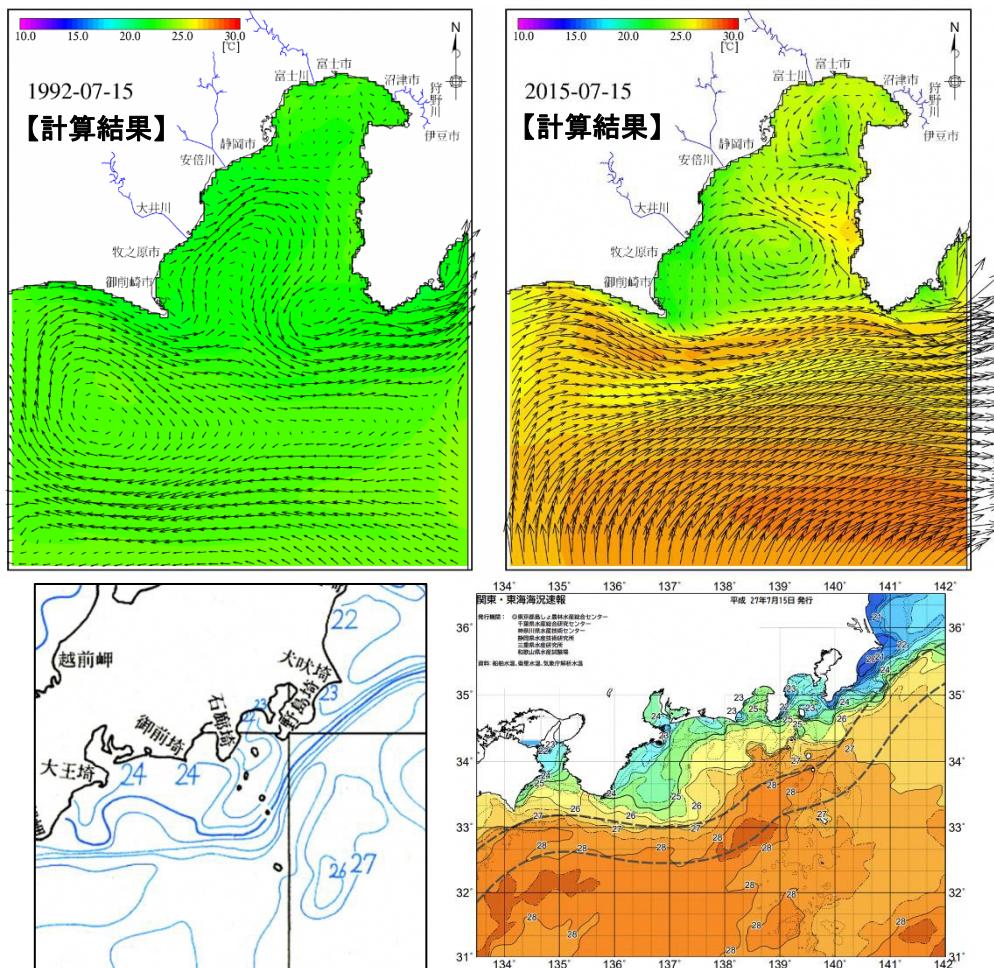


図 69 夏季の海面水温の比較（上段：計算結果、下段：観測データ等）

出典) 左下図：海上保安庁海洋速報（1992年7月15日～8月5日）
 右下図：静岡県水産・海洋技術研究所 海洋情報（2015年7月15日）

ii. 黒潮流路の変化による影響把握

過去の黒潮大蛇行期（1983年・2018年・2020年）と非大蛇行期（1992年・2015年）を比較し、黒潮大蛇行が一次生産量に与える影響を評価した。図70に各計算年の毎月の一次生産量の比較を示す。なお、計算を実施した各年の河川流量および負荷量、さらにはそれから算定した平均濃度について表18に、静岡（気象官署）における気象要素の平年比較を表19に示す。

年平均値で見た場合、黒潮非蛇行期（1992年・2015年）が大蛇行期（1983年・2018年・2020年）よりも一次生産量が大きくなる傾向にあった。その詳細を考察するために1983年と1992年を比較したところ、6月から8月にかけては同様に一次生産量が高い傾向がみられるが、春季の5月から6月にかけての一次生産量は非蛇行期にあたる1992年の方が高い傾向がみられた。「a.駿河湾へ流入する栄養塩物質等の供給源に関する寄与度分析」において、4月から5月にかけては湾外水の影響が大きい時期という分析結果があり、それを考慮すると、その直後にあたる5月から6月にかけての一次生産量の違いは、湾外水の影響を左右する黒潮の蛇行状況による違いである可能性が示唆される。なお、1983年は1992年に比べて、河川流量や全窒素や全リンの負荷量も多い傾向があり、陸域からの栄養供給条件は一次生産量がむしろ多くなる傾向の年と考えられるが、年間の平均一次生産量もそれとは逆になっている点も注目すべき点と考えられる。

参考に、過去の1983年・1992年と近年の2015年・2018年・2020年の状況を比較した。1983年・1992年は2015年・2018年・2020年に比べて一次生産が多くなる時期が1か月程度遅れていることがわかるが、これは前述したように4月から5月にかけての水温の上昇傾向の違いによるものと考えられた。表19に示す気象要素の平年比較からも、春季～夏季については、気温および全天日射量について、1983年・1992年は2015年・2018年・2020年に比べて低い傾向であった。具体的には、1983年・1992年は、気温は平年差で0.0～-0.8°Cと平年より低く、全天日射量も92～100%と平年より低い値であったが、2015年・2018年・2020年はいずれも平年より高い値であった。これらは、水温の変化傾向と気象の変化傾向が整合している結果であり、沿岸海域の表層水温が、気象の影響を受けていることを示唆するものであった。さらに、過去の時期と近年の時期との違いについては、長期的な地球温暖化の影響も考えられた。ただし、黒潮系水など外洋における海水温の変化については、必ずしも沿岸域の気象条件のみと対応するものではなく、その解釈は今後の課題である。

また、同じ黒潮非蛇行期にあたる1992年と2015年を比較すると、2015年は春季に一次生産量が多くなり夏季は少なくなるが、1992年は春季の一次生産量が少ないものの、その後夏季にかけて多い状況が続くといった季節変化の違いが見られた。1年間で平均した一次生産量は1992年よりも2015年が高かったが、それは2015年の栄養塩物質等の濃度が1992年よりも低い一方で、2015年の河川流量が1992年より多いため、両年の負荷量に大きな差がなかったためと推測される。なお、1983年・1992年ともに春季の大型珪藻のブルームを中心とした一次生産量が低く、9～12月の小型珪藻のブルームが顕著に現れないことがシミュレーションから示された。また、この時期の海水温は、2015年・2018年に比べて

低いこともわかった。珪藻類を中心とする植物プランクトンの季節における消長パターンの変遷と海水温との関係性については、2015年、2018年では現れなかった春季の低水温期が1983年と1992年では現れている。低水温期(12月～2月)で推定されたクロロフィルa濃度やブルームの出現時期等の再現性については、実域の観測値を用いた検証が行われていないため、更に検証する必要がある。

表 18 計算対象年の平均河川流量および平均負荷量（湾全体の合計）

年	河川流量 (m ³ /s)	全窒素負荷量 (g/s) (平均濃度(mg/L))	全リン負荷量(g/s) (平均濃度(mg/L))	参考 (静岡降水量) (mm/year)	黒潮の 状況
1983年	441.7	515 (1.17)	43 (0.097)	3008.5	大蛇行
1992年	347.0	396 (1.14)	34 (0.098)	2234.5	非大蛇行
2015年	481.7	359 (0.75)	25 (0.052)	2804.5	非大蛇行
2018年	438.1	346 (0.79)	23 (0.053)	2442.0	大蛇行
2020年	524.5	353 (0.67)	24 (0.046)	2613.5	大蛇行

※流量、全窒素負荷量、全りん負荷量は陸域モデルによる計算値の合計値

※平均濃度は、表中の負荷量／流量から算出した

表 19 静岡（気象官署）における気象要素（気温、降水量、全天日射量）の平年比較

※平年比較は各要素の観測がある 1974～2020 年までの平均値との比較とした

気温 平年差(°C)				
年	冬季(12～2月平均)	春季(3～5月平均)	夏季(6～8月平均)	秋季(9～11月平均)
1983 年	-0.3	0.0	-0.6	-1.1
1992 年	0.8	-0.1	-0.8	-0.7
2015 年	-0.2	0.8	0.1	0.2
2018 年	-0.8	1.7	1.5	0.7
2020 年	2.4	0.9	1.1	1.0

※+0.5 以上を赤で、-0.5 以下を青で示した

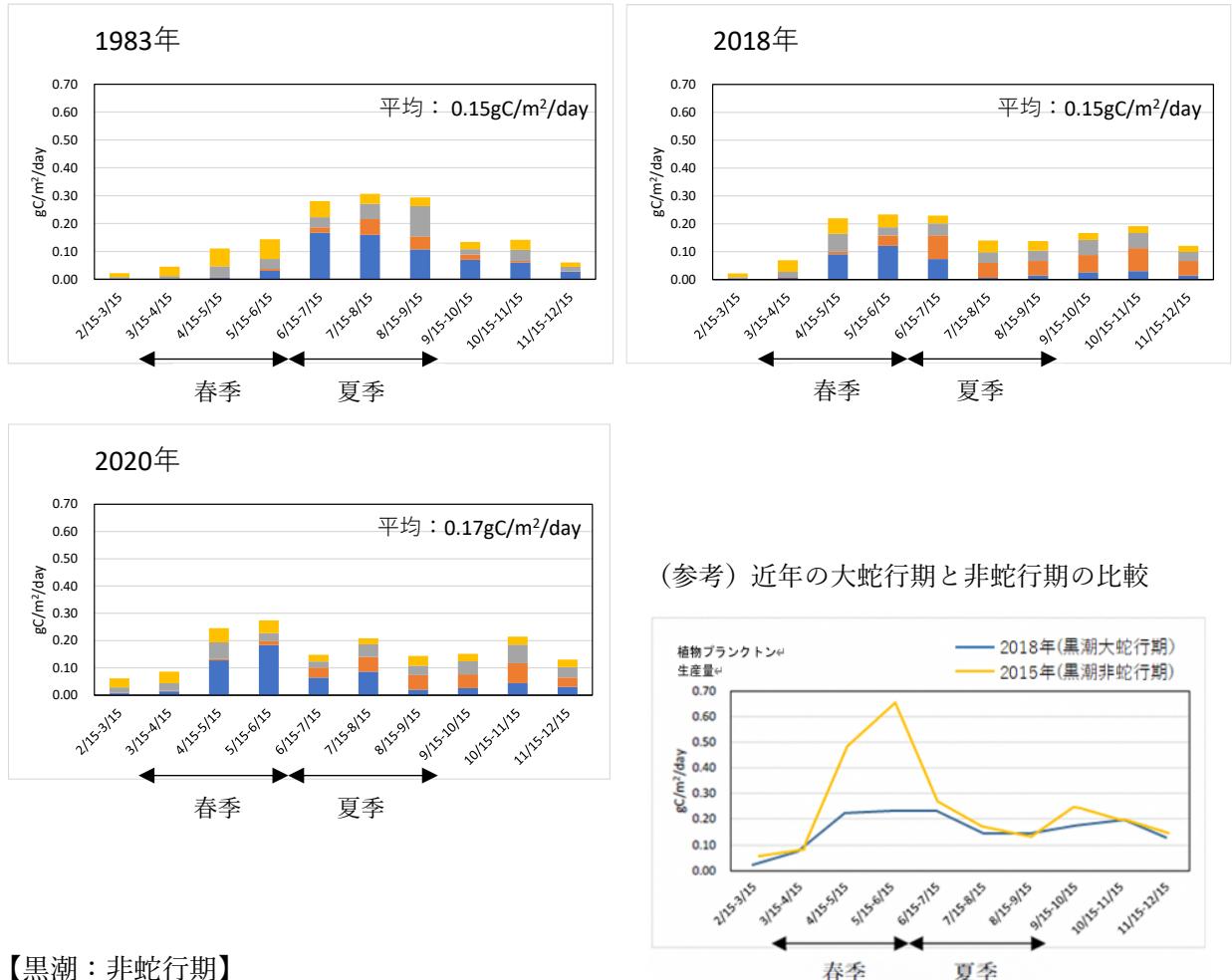
降水量 平年比(%)				
年	冬季(12～2月平均)	春季(3～5月平均)	夏季(6～8月平均)	秋季(9～11月平均)
1983 年	60	137	160	112
1992 年	68	115	72	103
2015 年	148	91	109	143
2018 年	64	154	83	82
2020 年	128	95	157	79

※120 以上を赤で、80 以下を青で示した

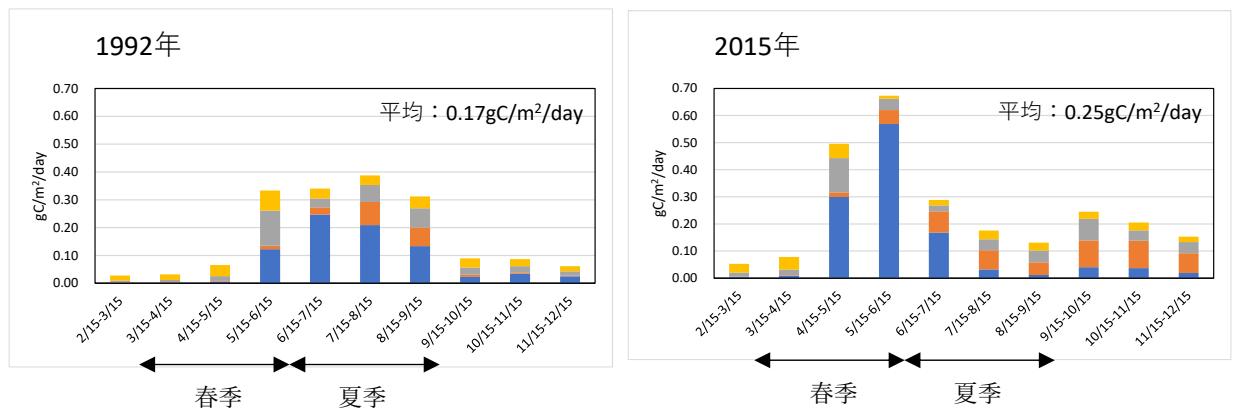
全天日射量 平年比(%)				
年	冬季(12～2月平均)	春季(3～5月平均)	夏季(6～8月平均)	秋季(9～11月平均)
1983 年	101	98	100	99
1992 年	97	92	100	100
2015 年	108	107	101	106
2018 年	117	108	116	102
2020 年	106	114	103	106

※105 以上を赤で、95 以下を青で示した

【黒潮：大蛇行期】



【黒潮：非蛇行期】



■ ピコシアノバクテリア ■ ANF ■ 小型珪藻 ■ 大型珪藻

図 70 一次生産量の比較（湾全体）

5. 駿河湾の現状把握の総括

駿河湾は、富士山や南アルプス、伊豆・箱根地域の広大な森林域を流域に持つ富士川や大井川、狩野川をはじめ大小様々な河川から豊富な水と栄養の供給を受けている。

森林は、水源かん養を始め多面的機能を有しており、河川の洪水や渇水の緩和効果への寄与が期待されるなど、流量や水質等を安定的に保つ役割を担っている。また、栄養塩物質等を河川を通じて供給する機能を有している。森林から供給された栄養塩物質等は河川に流れ出て、河川に棲息する生物にも利用されながら、徐々に下流に供給される。さらに、河川の下流域では都市や農耕地などの土地利用が多くなり、そこからは人為的な栄養塩物質等が多く供給される。これらは最終的に海域に供給され、それをもとに特に沿岸域などの有光層を中心に多くの一次生産が生まれる。このような森林から海域にわたる水や栄養の循環は、海域の生物多様性を保持するために重要な要素であり、これらの流れを円滑に保つことが重要となる。本研究会において、駿河湾を再現するシミュレーションモデルを構築して、それらの関係を検討してきたが、「森は海の恋人」という言葉が示すとおり、森林や都市、農耕地などからもたらされる栄養が河川を通じて駿河湾に運ばれ、その栄養を源にして植物プランクトン生産が起きるという物質循環が定性的かつ定量的に明らかになってきた。また、近年の駿河湾流域における物質循環を過去（1980～90年代）と比較すると、河川水由来の栄養塩物質等の供給量の減少も確認された。

各分析結果から駿河湾の現状についてまとめると、以下のとおりである。

<海域の現状（海域の寄与度分析まとめ）>

駿河湾における植物プランクトン生産を支える栄養塩物質等の供給過程についてモデルを用いて解析した結果、供給量や供給源に以下の結果が得られた。

- 駿河湾において河川水・地下水からの栄養塩物質等の供給による一次生産への寄与が認められる一方、季節によって駿河湾の一次生産量を支える栄養塩物質等の供給源が異なる可能性が考えられた。また、地下水からの寄与は、湾全体および沿岸部においても、小さい傾向であったが、陸水から供給される鉄・ケイ素は、夏季・秋季の一次生産に一定の寄与がある（1～3割程度）ことが想定された。
- 春季の植物プランクトン生産には、湾外からの栄養物質供給が5割近く寄与しており、陸域からの栄養物質供給の影響（2～3割）よりも湾外の影響を強く受けていることがわかった。また、夏季および秋季の植物プランクトン生産は、陸域からの栄養物質供給の影響を強く受けており（湾全体で6割以上、水深200m以浅の沿岸部では7割以上）、湾外水の影響は1～2割にとどまる。季節によって駿河湾の一次生産量を支える栄養物質供給源が異なる可能性が考えられた。
- 冬季（2～3月）においては、相対的に他の季節に比べて一次生産量が低く見積もられたが、次に続く春季の大型珪藻等の一次生産（ブルーム）につながる時期として重要と位置付けられる。Dinh et al.(2021)では、春季の大型珪藻のブルームにはケイ素

と窒素の比 (Si/N 比) が影響するとされており、今後は Si/N 比を含めてさらなる精査が必要な課題と考えられた。

- ・ 深層水の湧昇・混合に伴う一次生産への寄与は春季・秋季の 100m 以浅で大きく、特に秋季においては、湾外水全体の寄与に対して 2/3 を占めていた。なお、既存の観測結果等を踏まえると、深層水の寄与を確認するために適切な水深などをさらに精査した解析などが課題として考えられた。

＜陸域の現状（陸域の寄与度分析まとめ）＞

駿河湾流域からの栄養塩物質等の供給過程についてモデルを用いて解析した結果、供給量や供給源に以下の特性が確認された。

- ・ 現状での陸域からの栄養塩物質等の供給源としては、生活排水、畠地や森林の寄与が大きいことが考えられた。
- ・ 一方で、陸域からの栄養塩物質等の供給量は経年的に減少していると考えられ、その要因として、人口減少や下水道普及による生活排水の減少、畜産排泄物の処理率上昇、また、狩野川など一部の河川流域では田畠の減少などが考えられた。
- ・ 河川からの栄養塩物質等の供給は水の流出量に概ね対応し、主に富士川など大河川からの供給量が多かった。また、地下水からの栄養塩物質等の供給としては、その供給経路の土地利用に影響されることが考えられた。なお、各河川・流域からの発生源別の栄養塩物質の供給特性については前述の図 58 に示すとおりである。
- ・ 陸域から供給されるミネラル分としては、ケイ素の濃度が大井川に比べて富士川で高い特性がみられた。これは流域の地質特性によるものと推定された。

＜駿河湾流域の過去と現在の比較（過去の駿河湾流域の再現結果まとめ）＞

過去の駿河湾流域の再現結果とともに、「栄養塩物質流入量の変化による海域の一次生産への影響把握」、「黒潮流路の変化による影響把握」から得られた比較結果を表 20 に示した。なお、この表では、冬季は 2/15-3/15、春季は 4/15-5/15、夏季は 7/15-8/15、秋季は 9/15-10/15 の平均濃度を示している。

黒潮蛇行の条件が異なる近年の 2015 年（非大蛇行期）、2018 年・2020 年（大蛇行期）を比較すると、大蛇行期にあたる 2018 年・2020 年は 2015 年に比べて、春季を中心に栄養塩物質等、クロロフィル a がやや少ない傾向が確認され、特に大型珪藻は少ない傾向が確認されている。

過去の 1983 年・1992 年と近年の 2015 年・2018 年・2020 年を比較すると、過去の 1983 年・1992 年の栄養塩物質等の濃度は総じて近年の 2015 年・2018 年・2020 年よりも高い傾向にあり、特に近年は無機態窒素 (DIN)・無機態リン (DIP) が夏季や秋季に枯渇する傾向も確認された。しかしながらクロロフィル a 濃度は近年と同程度か、春季に限っては近年の方が高い傾向にあり、一次生産が活発化する季節が 1 か月程度遅れている状況であった。

表 20 各再現年における栄養塩物質等の濃度と植物プランクトン発生量の比較

計算年の考え方			平均的な栄養塩濃度および植物プランクトン発生量					
年	黒潮 蛇行	陸域からの 栄養供給						
1983 年	大蛇行 期	多い	1983年	単位	冬季	春季	夏季	秋季
			栄養塩物質等 の濃度	無機態窒素 (DIN) (mg/L)	0.067	0.070	0.006	0.018
				無機態リン (DIP) (mg/L)	0.010	0.010	0.000	0.002
				一酸化ケイ素 (SIO) (mg/L)	0.375	0.408	0.066	0.115
				鉄 (Fe) (mg/L)	0.002	0.003	0.003	0.004
			植物プランクト ン発生量	大型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.38	1.34	28.36	7.97
				小型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.31	0.59	6.70	3.50
				ANF ($\mu\text{gC/L}$)	1.20	5.64	5.44	5.08
				シアノバクテリア ($\mu\text{gC/L}$)	1.74	7.48	3.75	2.06
				クロロフィル濃度 ($\mu\text{g/L}$)	0.07	0.30	0.89	0.37
1992 年	非大蛇 行期	多い	1992年	単位	冬季	春季	夏季	秋季
			栄養塩物質等 の濃度	無機態窒素 (DIN) (mg/L)	0.079	0.050	0.018	0.010
				無機態リン (DIP) (mg/L)	0.012	0.008	0.002	0.001
				一酸化ケイ素 (SIO) (mg/L)	0.453	0.293	0.140	0.059
				鉄 (Fe) (mg/L)	0.002	0.002	0.002	0.002
			植物プランクト ン発生量	大型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.44	1.00	26.65	3.16
				小型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.33	0.58	8.84	1.34
				ANF ($\mu\text{gC/L}$)	1.33	2.59	5.68	2.96
				シアノバクテリア ($\mu\text{gC/L}$)	2.39	4.19	3.30	3.45
				クロロフィル濃度 ($\mu\text{g/L}$)	0.09	0.17	0.89	0.22
2015 年	非大蛇 行期	少ない	2015年	単位	冬季	春季	夏季	秋季
			栄養塩物質等 の濃度	無機態窒素 (DIN) (mg/L)	0.072	0.032	0.005	0.008
				無機態リン (DIP) (mg/L)	0.011	0.004	0.000	0.000
				一酸化ケイ素 (SIO) (mg/L)	0.429	0.416	0.110	0.228
				鉄 (Fe) (mg/L)	0.003	0.006	0.005	0.009
			植物プランクト ン発生量	大型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	1.23	105.09	10.93	13.37
				小型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.39	6.64	17.27	32.87
				ANF ($\mu\text{gC/L}$)	4.05	42.37	9.29	24.95
				シアノバクテリア ($\mu\text{gC/L}$)	6.63	12.11	6.43	6.35
				クロロフィル濃度 ($\mu\text{g/L}$)	0.25	3.32	0.88	1.55
2018 年	大蛇行 期	少ない	2018年	単位	冬季	春季	夏季	秋季
			栄養塩物質等 の濃度	無機態窒素 (DIN) (mg/L)	0.077	0.023	0.004	0.009
				無機態リン (DIP) (mg/L)	0.012	0.003	0.000	0.001
				一酸化ケイ素 (SIO) (mg/L)	0.446	0.222	0.060	0.149
				鉄 (Fe) (mg/L)	0.002	0.004	0.003	0.006
			植物プランクト ン発生量	大型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.29	24.79	1.76	7.95
				小型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.21	2.91	10.64	18.83
				ANF ($\mu\text{gC/L}$)	1.42	16.31	7.91	14.78
				シアノバクテリア ($\mu\text{gC/L}$)	2.47	11.03	8.02	5.43
				クロロフィル濃度 ($\mu\text{g/L}$)	0.09	1.10	0.57	0.94
2020 年	大蛇行 期	少ない	2020年	単位	冬季	春季	夏季	秋季
			栄養塩物質等 の濃度	無機態窒素 (DIN) (mg/L)	0.043	0.031	0.013	0.006
				無機態リン (DIP) (mg/L)	0.006	0.004	0.001	0.000
				一酸化ケイ素 (SIO) (mg/L)	0.263	0.266	0.267	0.091
				鉄 (Fe) (mg/L)	0.003	0.003	0.011	0.004
			植物プランクト ン発生量	大型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	1.80	34.18	30.82	6.46
				小型珪藻 ($\mu\text{gC/L}$)	0.44	1.46	15.58	12.28
				ANF ($\mu\text{gC/L}$)	5.45	15.52	12.75	11.57
				シアノバクテリア ($\mu\text{gC/L}$)	6.71	9.72	5.22	5.75
				クロロフィル濃度 ($\mu\text{g/L}$)	0.29	1.22	1.29	0.72

注) 表中の「0.000」はモデル計算限界以下であることを示す。

<駿河湾の現状（各分析結果のまとめ）>

以上の結果から本研究会の総括として次のようにまとめることができる。

- 駿河湾の生物生産の源は、陸水や海水の鉛直混合等によって供給される栄養塩物質等であると考えられ、その円滑な循環を維持することが重要であるが、ここまで検討結果から、植物プランクトン生産を支える栄養塩物質等と陸水からの供給とは密接な関係にあり、陸水からの一定の供給機能を保持する重要性があらためて示唆されたと考えられる。
- なお、陸域および海域の特性を踏まえると、陸水の寄与が大きい夏季から秋季にかけては、陸域からの生活排水や畠地・森林などからの栄養塩物質等が大きな割合を占めていることが考えられた。一方、春季は陸水の影響を受けた沿岸表層水を含んだ湾外水の寄与度が大きくなる特性が示唆された。
- 湾外水の寄与が強くなる春季において、黒潮大蛇行期と重複した場合には、駿河湾の栄養状態が貧栄養化する傾向が推定される。春季は植物プランクトンのブルーム期であり、貧栄養化は植物プランクトン等を含めて低次生産量の減少につながることが懸念される。黒潮大蛇行の影響は、駿河湾への栄養塩物質等の供給ならびに維持に関する重要なファクターの一つであり、黒潮系水（黒潮分岐流）の湾内への流入状況をモニタリングすることが重要であると考えられる。
- モデルから算定された駿河湾の一次生産量は他の海域に劣るものではなかった。一方、陸域からの栄養塩物質等の供給量、特に全窒素と全リンの濃度は、近年、減少傾向にあるが、湾内の無機態窒素やリンの濃度には著しい減少は認められなかった。水産資源保護協会発行の水産用水基準等を基に、養殖業・漁場で必要な栄養塩物質等の濃度、クロロフィル a 量、全窒素、全リンの環境基準値を示した（表 21 と表 22）。これらの値と計算結果および現地調査の観測データを比較すると、沿岸域においては概ね基準値を満たしているが、湾全体でみた場合は海藻養殖業や漁場で必要な基準値に対してやや低い傾向となり、特に夏から秋にかけてその傾向が顕著になる特性があった。併せて、黒潮大蛇行期と重複した場合には、駿河湾の栄養状態が貧栄養化になる傾向が懸念された。以上のことから、陸域からの栄養塩物質等の供給状況や気象および海況変動に伴う湾内の栄養状態や植物プランクトンのブルーム状況などを含む一次生産量の把握と監視をする必要があると考えられた。

表 21 養殖業・漁場で必要な栄養塩物質等の濃度、クロロフィルa量一覧

項目	濃度基準	出典
海藻養殖に必要な栄養塩濃度	ノリ養殖： 無機態窒素 0.07-0.1mg/L 以上 ワカメ養殖： 無機態窒素 0.028mg/L 以上	水産用水基準(2018年、公益社団法人 日本水産資源保護協会)
	ノリ養殖： 無機態燐 0.007-0.014mg/L 以上	
アサリ漁場での値として望ましいクロロフィルa量	3 μg/L 以上	三重県アサリ資源管理マニュアル改訂版(平成23年、三重県水産研究所)

表 22 海域における環境基準値(全窒素・全リン)一覧

類型/ 項目	利用目的の適用性	基準値	
		全窒素	全リン
I	自然環境保全及びII以下の欄に掲げるもの(水産2種及び3種を除く。)	0.2mg/L 以下	0.02mg/L 以下
II	水産1種水浴及びIII以下の欄に掲げるもの(水産2種及び3種を除く。)	0.3mg/L 以下	0.03mg/L 以下
III	水産2種及びIVの欄に掲げるもの(水産3種を除く。)	0.6mg/L 以下	0.05mg/L 以下
IV	水産3種、工業用水、生物生息環境保全	1mg/L 以下	0.09mg/L 以下

(注)

- 1 基準値は、年間平均値とする。
- 2 自然環境保全：自然探勝等の環境保全
- 3 水産1種：底生魚介類を含め多様な水産生物がバランス良く、かつ安定して漁獲される
水産2種：一部の底生魚介類を除き、魚類を中心とした水産生物が多獲される
水産3種：汚濁に強い特定の水産生物が主に漁獲される
- 4 生物生息環境保全：年間を通して底生生物が生息できる限度

6. 駿河湾の生物資源を次代へ継承するために

駿河湾は、富士山や南アルプスなどを含む広大な流域や外海、深海部などの大きな容積をもつ海域など様々な供給源から供給される栄養塩物質等をもとに、豊かな生物資源を生み出すことができる静岡県民にとってかけがえのない場所である。このかけがえのない場所とそこに生産される豊かな生物資源を次代に永続的に継承するためには、駿河湾流域の特性や物質循環のメカニズムなどを調査や研究などを通じて把握するだけでなく、それを有効に活用して、今後起こりうる可能性がある環境変動や開発行為などの影響を把握し、さらにその影響を軽減する施策を検討できるツール整備が必要と考える。特に科学的なアプローチによるツールを整備することで、客観的に認められる評価を実施しうる。

以上の考え方から、本研究会で構築したモデルの活用方針や現状での課題、また、ここまで得た成果からみえる施策の方向性をとりまとめた。今後、これらの方針をもとに、モデルを有効に活用しつつ、生物資源を保持するための有効かつ具体的な施策を打っていく必要がある。

a. モデルの活用

本研究会で構築してきたモデルを用いることによって、駿河湾とその流域における水や栄養塩物質等の循環過程やそれを受け変化する海域での一次生産過程との関係が定量的に把握できるようになった。今後、温暖化など地球規模的な変化や、流域での開発事業など駿河湾の流域や沿岸での環境変化が想定される場合には、このモデルを用いて、それらの影響の程度を把握することやそれを回避する手法の検討、また、現状でも問題になっている主要な漁業生物の変化要因の検討などができるようになり、将来的に駿河湾の豊かさの恵みを県民のために維持するための有効なツールになると考えられる。

具体的に想定している活用内容は以下のとおりである。

i. 活用方針

「森は海の恋人」水の循環研究会において構築したシミュレーションモデルを、以下の方法により、今後、海の生態系の保全とその恵みの持続的な利活用のために活用していく予定である。

- 駿河湾のあるべき姿となる生態系保全とその恵みの持続的な利活用に向けた施策方向性検討に活用する。
 - 静岡県による環境施策などの方向性の検討に活用する。
 - 陸域及び海域での供給源別の寄与度の分析結果等を基に、土地利用に係る各種施策の方向性を検討する
- 森・川・海に関する研究の発展に寄与する。
 - 構築したシミュレーションモデルを公開し、森・川・海のつながりを含めた駿河湾の生態系の保全に関する研究等の発展に寄与する。
 - シミュレーションモデルを公開し、多様な研究機関等による利用を可能にする。

- 多様な研究機関等の活用により、魚類など高次生態系の解明など、さらなるモデルの高度化につなげる。

ii. 活用例

構築したシミュレーションモデルの活用例として、以下が考えられる。なお、活用する際には、対象となる課題に対して仮説を立てた上で、シミュレーション計算を行いつつ検証することが効果的であると考えられる。

<現行のモデルを活用してシミュレーションする場合（検討例）>

- 陸域（土地利用等人为的な利用を含む）・海域環境（水温、潮流等）の変化がプランクトン生産に与える影響の推定
- 将来的に想定される温暖化などによる気候変動（気温上昇、降水量増加等）が海域の水温上昇やプランクトン生産に与える影響の推定
- 将来的に想定される温暖化などによる気候変動や土地利用変化が陸域の水資源に与える影響の推定 等

<新たな知見の取得によるモデル高度化で可能になるシミュレーション（検討例）>

新たな知見の取得等によりモデルの高度化で可能になるシミュレーション（例）を表23に示す。

表23 新たな知見の取得等によりモデルの高度化で可能になるシミュレーション（例）

新たな知見によるモデルの高度化	シミュレーション例
海域の高次生態系（魚類など）とプランクトンとの関係に関する知見取得・モデルへの反映	陸域・海域の環境変化が高次生態系に与える影響の推定
海域における粒子動態の計算ツール追加	陸域から流出する微小物質、海洋生物の卵等の拡散過程の推定
土地利用毎の微量金属（鉄・ケイ素）の情報（化学形態や輸送プロセス）の充実、プランクトンとそれらとの関係に関する知見取得・モデルへの反映	陸域から流出する微量金属（鉄・ケイ素）等がプランクトン生産に与える影響のより精緻な推定
出水時の河川流量、栄養塩物質等流出量のデータの充実	出水による栄養供給がプランクトン生産に与える影響のより精緻な推定
現在のモデルを利用した感度解析、水利用・水処理・水環境利用との関係をモデルへ反映（もしくは出力の追加的評価）、複数の評価指標および総合評価指標の提案	森海のつながり、内湾での生物生産、生活環境としての水環境など生態系を多面的な観点から定量評価

iii. 現状での課題

現状のモデルにおける精度や利用上の課題について、それぞれのモデル毎に以下に示した。モデルの再現性検討結果については、付録に示したとおりである。

なお、現状の低次生態系までを再現したモデルを高度化させた発展形も将来的には想定されるが、そのうち、漁業生物の減少要因などの課題に対応できるモデルに発展させていくことは、喫緊の目標と考えられる。そのためには、例えば、各対象生物の生活史毎の分布状況や餌生物の種類・量との関係など、高次生態系の生産・捕食等の知見を十分に取得するなど、現状のモデルを高度化するための調査・研究が重要と考えられる。

1) 現状モデルのさらなる再現性の向上

現状のモデルは研究会をとおして、その再現性を検証し、一定の再現性を確保してきたが、森林から河川、海域までの環境は非常に広い範囲を含み、かつ出水などの気象条件によってダイナミックに変化する部分までの精緻な検証には至っていないと考えられる。また、現状モデルの再現精度を向上させるためには、本検討において収集した既存資料だけでは不十分と考えられる。さらなる情報収集やそれを用いた検証が必要な点として、以下が考えられる。

<陸域モデル>

- 現状のモデルでは、狩野川流域の一部の地点以外は概ね観測データと整合する計算結果を得ることができていたが、不整合がみられる一部の地点もあった。その原因是湧水による流量増加など局所的な影響と想定され、今後はそのような局所的な条件もできるだけ適用しながら、局所的な再現性を向上させる必要がある。また、再現性検証を行うことができた地点の流域の中の小流域については、観測データがなく、再現性を検証できていないため、本モデルを利用した評価の際にはその点に留意する必要がある。
- 現状のモデルは、平水時のデータを用いて再現性を検証したものであり、寄与度の分析結果も平水時の場合を想定したものとなっているが、流域からの栄養供給量は出水時に特に多くなると考えられるため、出水時のデータを用いたモデル再現、寄与度の精査が必要と考えられる。出水時の河川流量や栄養供給の変化を精度よく再現するためには同時期のデータを集中的に取得して参考にする必要がある。

<海域モデル>

- 再現性の検証にあたっては、流れや水質、プランクトンに関する既存情報が限定された年や位置でのものしかないと、今後新たにデータが取得されれば、さらにそれを用いた再現性の検証が望まれる。特に、比較検証に用いる流動データ（係留観測）がごく沿岸部のみを対象にしたものしかないと不足しており、検証が十分でない（湾中央部の若干のデータは存在していたが、限定的であった）。さらなるデータを収集

した上で、再現性の検証に努める必要がある。また、栄養塩、鉄、ケイ素等の水質データ、サイズ別の動物・植物プランクトンデータについてもさらなる収集に努め、再現性の検証に努める必要がある。

- 植物プランクトンの光合成速度は水温・光・栄養塩濃度によって変化するが、今回過去(1983年・1992年)の計算を通じて、春季の比較的低い水温環境において実際に植物プランクトンがどの程度光合成しているのかを的確に再現できていない可能性が示唆された。低水温時のクロロフィルa濃度や栄養塩濃度の検証データを更に収集し、モデル式や計算パラメータの最適化を図る必要があると考えられる。
- また、クロロフィルaおよびSSについては、衛星データから推測可能であるため、再現性の検証材料としてさらなる活用が期待される。現状においても海域での実測値と衛星データによる推測値の間に比較的相関があると考えられたが、その確度をより向上させるためには、引き続きデータを蓄積する必要がある。参考に、SSおよびクロロフィルaの衛星データによる推定値と採水による実測値との関係を図71に示す。

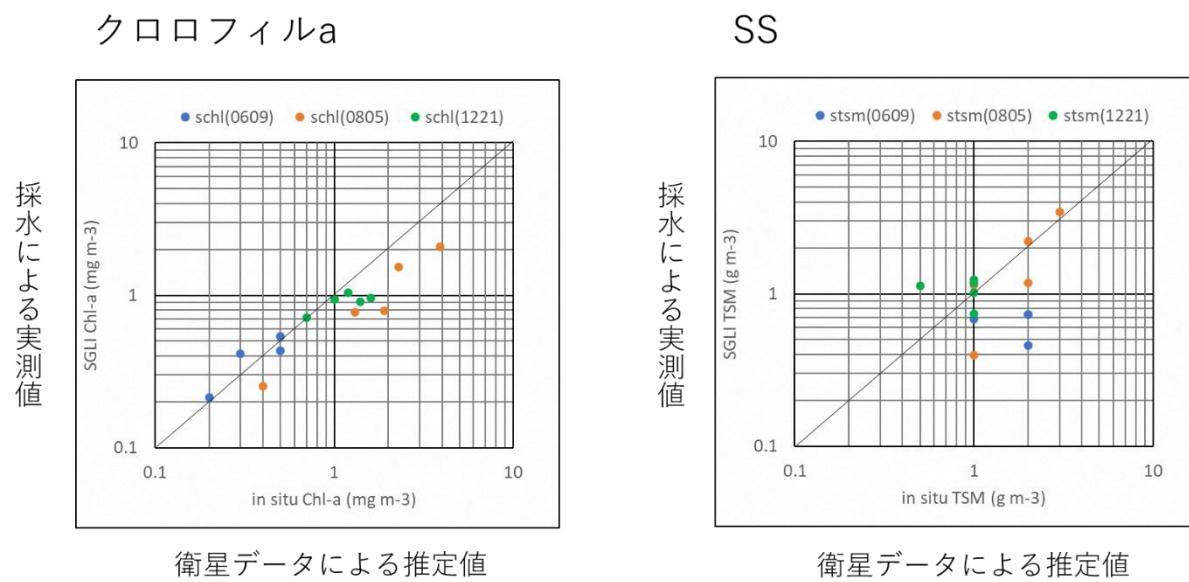


図 71 SS・クロロフィルaの衛星データによる推定値と採水による実測値との関係

2) さらなるモデルの精緻化（詳細なモデル設定条件の整備）

現状においても可能な限り精緻な構造でモデル化してきたが、森林、河川や湾外水から駿河湾への影響をより精度よく再現するためには、さらなる精緻化が必要な点として、以下の課題が考えられる。

＜陸域モデル＞

- 陸水経由の栄養塩物質等として、窒素・リンなどの栄養塩類や鉄・ケイ素などのミネラル分、銅や亜鉛などの微量元素があるが、前者の栄養塩類については、モデルに条件として与える原単位情報が豊富にあるものの、後者のミネラル分や微量元素についてはその情報がほとんどない。今後、それらの原単位を想定する情報を取得しつつ、モデルにおける条件設定をさらに高度化させて、陸域等からの寄与をさらに精査していく必要が考えられる。
- また、森林や畠地などから供給される栄養塩物質等を与える原単位は、現状では、樹種や樹齢などの森林の状態、作物の種類など畠地の利用形態の違い、水田などにみられる季節的な利用変化に関わらず一定の値を与えて計算しているが、本来はそれぞれの場合の原単位を精査して用いることが実態に近づくと考えられる。それらの原単位を算出できるような調査・研究が必要である。特に、今後は拡大造林期にあたった人工林が伐採時期を迎える、伐採・再造林などが急速に進む可能性もあることから、小流域における伐採の規模や再造林・更新、シカ食害などによる影響が考慮できる知見の取得が必要と考えられる。

＜海域モデル＞

- 陸域から河川を通じて供給される栄養塩物質等の河口域や海岸線に沿った沿岸域での挙動については、その場での海水の流動動態を含めて未だ研究途上段階にあり、これらの現地調査によるデータを集積し、現モデルに与えた条件の再精査を実施してモデルの再現性の確認が必須と考えられる。

b. 施策の方向性

駿河湾流域は豊富な森林資源や生物資源を併せ持ち、陸域と海域とのつながりの重要性を検討するフィールドとして恰好の場所である。本検討において、森林から河川、海域までの水の循環を通してつながった栄養塩物質等の供給過程を黒潮系水の影響を含めてモデル化した取組は全国的にも先進的と考えられ、今後、同様な環境をもつ流域や海域において参考になる取組である。

森林は落葉などを起源とする栄養を保持して、降雨などによって徐々に河川に栄養を供給する機能を持っており、また、河川は森林から供給される栄養だけでなく、畠地や水田などの農地などからも供給された栄養を海の生産につなげる機能を果たしている。

モデルを用いたこれまでの検討結果から、生物資源の豊かな駿河湾の生物生産を維持・向上させていくためには、湾外水の影響を受けやすい特性、流入河川や流域の特性を踏まえて、どのように栄養塩物質等を効果的に供給するかといった検討が重要と考えられた。また、過去と現在のシミュレーション結果の比較から、2015年と2018年の春季ブルームの発生時期に比べて1983年と1992年のこの時期の海水温が約2度低く、この時期にはブルームの発生がみられない傾向が確認されている。このような海水温の変動が海洋生物の産卵・成育などの時期に影響を及ぼす可能性も考えられ、その時期に黒潮大蛇行による湾内への黒潮系水の流入で貧栄養化傾向が強まった場合は、海洋生物にとって重要な初期生活史の餌環境に打撃を与える可能性も推測される。今後、「スルガベイ・シミュレータ」を用いて海洋生産系に与える影響をさらに詳細に検討することで、懸念される海洋生物の減少要因に迫り、効果的な施策計画に活用できるようにモデルの高度化を図っていきたい。その際には、過剰な栄養供給による赤潮や貧酸素水塊の発生などが起きないように留意すべきであり、水質環境と生物生産の両面からみたバランスを考慮することが重要である。

また、「森は海の恋人」の森にあたる森林は静岡県では陸域面積の約6割近くを占め、陸と海とをつなぐ水（降水）の主な受け皿となっている。森林は、河川における洪水と渴水の緩和効果や水質等を安定的に保つ役割を担いつつ、河川や湧水等を通じて海域への栄養塩物質等の供給源として機能し、豊かな海の維持に重要な役割を担っていることが解析結果から明らかにされた。将来的には、人口減少による生活排水等の減少が予想されていることを踏まえると、相対的に海域への栄養塩物質等の供給源としての森林の寄与度がより高まる可能性がある。加えて、静岡県では「ふじのくに生物多様性地域戦略」を策定して、多様な生態系の保全等を推進しているが、森林は多様な生態系を育む基盤とも位置付けられ、引き続き森林生態系の維持・保全につながる環境施策の遂行が重要である。

7. 用語解説

用語	解説	該当ページ (最初)
ANF	独立栄養性微小鞭毛藻類(Autotrophic nanoflagellates)。光合成を行う藻類であり、珪藻に比べてサイズが小さい。	29P
Chl-a	クロロフィル a	22P
gC/m ² /day	一次生産量の単位。一次生産により生じる、単位面積あたり、単位時間当たりの、炭素の重量	29P
ug/L	濃度の単位。1 リットル当たりの重量(マイクログラム 10 ⁻⁶ グラム)	22P
一次生産	基礎生産。光合成による有機物生産を指す。一般に水域では、植物プランクトンや海底に生息する単細胞微細藻類、大型藻類やアマモなどの海草類が主要な担い手である。水域では、基礎生産量を面積 1m ² 当りの水柱全体を積算した数値として表すことが多い。このことにより、あらゆる生態系で得られている基礎生産量との比較が可能になる。	3P
栄養塩物質等	生物が生活するために必要な塩類で、窒素、リン、鉄、カリウム、ケイ素など、無機態を指す。また、無機態と有機態を含め栄養塩類ともいう。	1P
沿岸域	100m 以下の水深となっている計算格子に該当する水域	5P
鉛直混合	海洋においては、海水の密度差によって深さ方向(鉛直方向)に、層構造が形成されることがある(成層化)。これらの層構造が鉛直方向に混合して一様化されることを鉛直混合という。	28P
海洋流動モデル	流出解析モデルの計算結果を受けて、海の流れや水温、塩分などの要素を推定するモデル	10P
合併処理浄化槽・コミュニティプラント	トイレだけでなく生活排水全般をそれぞれの家庭・団地・集落できれいにする施設のこと。しくみは下水道とほぼ同じ。	47P
空間スケール	水深や面積、体積などが示す大きさからみた尺度	7P
黒潮系水	黒潮に由来する水塊	26P
黒潮大蛇行期	本州南方を流れる黒潮の流路には、大きく分けて 2 種類の安定したパターンがある。一方は、東海沖で南へ大きく蛇行して流れる「大蛇行流路」、他方は、四国・本州南岸にほぼ沿って流れる「非大蛇行流路」と呼ばれており、それぞれの流路となっている期間は、黒潮大蛇行期、非蛇行期、と呼ばれている。	3P

クロロフィルa	植物の葉緑体やシアノバクテリアに含まれる光合成に関する緑色色素。一般には葉緑素と言われてきた。クロロフィルaはほとんどの植物に含まれているが、水域ではその濃度が植物プランクトンの量を示すこととなるので、様々な環境指標として用いられる。	13P
珪藻	珪藻（ケイソウ）は不等毛植物に含まれる单細胞性の藻類のグループである。分類階級は珪藻植物門または珪藻綱が割り当てられる。細胞が珪酸質の被殻に覆われているのが特徴である。淡水から海水まで広く分布する。海洋生態系においては一次生産者として大きな生態的地位を占める一方、大発生して赤潮を引き起こすこともある。陸水においても重要な生産者であり、魚類の餌として重要である。また、そのうち、大型のものを大型珪藻、小型のものを小型珪藻と呼んでいる。	25P
ケイ素濃度	多様な形態で存在するケイ素をすべて足し合わせた濃度	1P
現況再現	現在（近年）の状況を現実的な諸条件を与えることで、数値モデルで再現した場合	26P
原生動物	単細胞生物のうち生態が動物的なもの。歴史的には、生物を動物と植物に分けていた（2界説）頃に使われた分類群であり、動物「のうち」単細胞のものと定義されていた。実際は雑多な生物の集まりであり、系統学的に妥当なグループに修正する試みもされたが、現在ではどの意味でも分類群としては使われず、大まかな総称として伝統的なグループを表すのに使われている。	8P
広域下水道	公共下水道と流域下水道を一括して扱うため、広域下水道とした。終末処理場を有し、下水を浄化させて公共用水域に放流する大規模な下水道。	47P
高次生態系	食物連鎖の中で高次に位置する生物を中心とした生態系、海域では主に魚類や哺乳類などが高次に位置する生物に該当する。	7P
建物用地	土地利用種別の一つ。住宅地・市街地等で建物が密集しているところとする。道路、鉄道・操車場などで、面的にとらえられるものを含む。（国土交通省 国土数値情報 土地利用種別の定義より）	17P
時間スケール	過去から現在までの時間からみた尺度	7P
出水時	洪水などで河川流量が増加している時期	21P
浄化・炭化・焼却	家畜排せつ物の処理方法の一つで、乾燥処理、スラリー処	49P

	理等がある。その他の処理方法としてはたい肥化、液肥化があるが、本研究では水田・畑地に含まれるとして扱わない。	
植物プランクトンの発生	光合成により植物プランクトンが増殖・発生すること。	25P
森林	土地利用種別の一つ。多年生植物の密生している地域とする。（国土交通省 国土数値情報 土地利用種別の定義より）	1P
水田	土地利用種別の一つ。湿田・乾田・沼田・蓮田及び田とする。（国土交通省 国土数値情報 土地利用種別の定義より）	1P
全窒素濃度	窒素は自然界にて多様な形態 (NH_4^+ 、 N_2 、 N_2O 、 NO 、 NO_2 、 NO_3^- など) で存在するが、それらすべてを足し合わせた濃度	47P
全リン濃度	多様な形態で存在するリンをすべて足し合わせた濃度	47P
単独処理浄化槽	トイレの水だけをそれぞれの家庭できれいにする施設で、生活雑排水は処理していない。	47P
畜産排せつ物	家畜からの排せつ間もないふん尿だけでなく、稻わら等との混合物、乾燥物、発酵後のたい肥や液肥といったものまでを含む。（農林水産省 HP より）	47P
低次生態系	海洋生態系のうち、主に栄養塩を利用してプランクトンが生産されるまでの過程、その過程を再現したモデルが低次生態系モデルである。	8P
濁り	水の中に(濁りの基となる)溶存物質や懸濁物質が存在し、水の光学的清澄さが損なわれている状態	21P
農業集落排水施設	農業集落におけるし尿、生活雑排水などの汚水等を処理する施設の整備により、農業用排水の水質の汚濁防止を図るもの。（農林水産省 HP より）	47P
畠地	土地利用種別の一つ。麦・陸稲・野菜・草地・芝地・りんご・梨・桃・ブドウ・茶・桐・はぜ・こうぞ・しゅろ等を栽培する土地とする。（国土交通省 国土数値情報 土地利用種別の定義より）	47P
ピコシアノバクテリア	シアノバクテリア（藍色細菌）は、酸素発生を伴う光合成（酸素発生型光合成）を行う細菌の一群。珪藻・ANF に比べてサイズが小さい。	29P
微生物ループ	植物プランクトンが光合成の中間代謝物や自己の分解物として排出する溶存態有機物を細菌が栄養基質（餌）として利用し、細菌を原生動物が捕食し、さらに原生動物が甲殻類等の大型動物プランクトンに捕食されることによって生食連鎖につながるとする考え方	7P

表層水	表層に存在する水塊	28P
物質循環	自然界で様々な物質が循環的な動態をとることを指していう概念。炭素循環や窒素循環、水循環などが挙げられる。	2P
物質循環モデル	流出解析モデルの計算結果を受けて、森林から河川にかけての栄養の収支や循環を推定するモデル	10P
ブルーム	水界において植物プランクトンが顕著に増殖した状態を指す。温帯域では季節的なブルームが出現することが多い。冬季には臨界深度を超える強い鉛直混合によって光が継続的に利用できず、栄養塩類は表層に残存している。水温上昇に伴い成層化が進むと、この栄養塩を消費して春のブルーム(spring bloom)が出現する。同様に、栄養塩が枯渇した状態で混合が始まると、秋に出現する場合もある。富栄養な水域では、季節を問わず出現することがある。	25P
湧昇	水塊が鉛直上向きに移動すること	26P
溶存ケイ素	ケイ素濃度に対し、溶存しているケイ素	13P
流出解析モデル	降水などの影響を受けて、森林から河川にかけての水量の収支や循環を推定するモデル	10P
湾全体	御前崎一石廊崎を結んだラインより北側の駿河湾を示す。	32P

8. 参考文献

- 環境省_水・大気環境行政のご案内-日本の公害克服経験-(2)
- 日本海水学会誌 65巻4号_森川海の一体的管理に関する調査研究
- NPO 法人森は海の恋人_活動の経緯
- (公財)海と諸環境美化・油濁対策機構_令和2年度漁民の森づくり活動等調査報告書
- 九州森林研究(九州森林学会)No.61_漁民の森運動の現状と意義
- 土と基礎(地盤工学会)45.1_陸と海を結ぶ生態学
- 水環境学会誌 Vol.26 No.10(G 雜-0148)
- 第116回日本森林学会_セッション報告
- 黒潮大蛇行とその影響(海洋政策研究財団 HP、
https://www.spf.org/opri/newsletter/448_1.html?latest=1)
- Iwata et al.(2005):Relationship between Salinity and Nutrients in the Sub-surface Layer in the Suruga Bay .Journal of Oceanography, Vol. 61, pp. 721- 732
- Inaba,H.(1984):Current variation in the sea near the mouth of Suruga Bay. J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol.40, 193–198
- Sugimoto,S et al.(2020):Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander. Journal of Oceanography, <https://doi.org/10.1007/s10872-019-00531-8>

- Toyoda,T et al.(2021): Surface-Layer Circulations in Suruga Bay Induced by Intrusions of Kuroshio Branch Water. *Front. Mar. Sci.*,
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.721500>
- Dinh, N. V., Casareto, B. E., Niraula, M. P., Toyoda, K., Meekaew, A., & Suzuki, Y. (2021):Effect of diatom abundance and biogenic silica availability on the population growth of tintinnid ciliates at Suruga Bay. *Journal of Oceanography*, 77(2), 307-321.
- Sohrin(2019):Nutrient Concentrations in Natural Waters from Mt. Fuji to the Suruga Bay., “Green Science and Technology”,344p
- 運輸省第五港湾建設局 (1977) :伊勢湾環境対策調査報告書、昭和 52 年度報告 195p
- 橋本俊也, 山本民次, 多田邦尚, 松田治, 永末寿宏. (1997): 濑戸内海の一次生産と海洋構造. *沿岸海洋研究*, 35(1), 109-114.
- 中口譲・山口善敬・山田浩章・張勁・鈴木麻衣・小山裕樹・林清志(2005):富山湾海底湧水の化学成分の特徴と起源、*地球化学* 39,199-130