

水質モデルを用いた筑後川水系ダム群連携事業の影響分析

佐賀大学 理工学部都市工学科

准教授 Vongthanasunthorn Narumol

水質モデルを用いた筑後川水系ダム群連携事業の影響分析

Vongthanasunthorn Narumol

1 はじめに

筑後川水系ダム群連携事業(以下、ダム群連携事業)は、流水の正常な機能の維持を目的として筑後川本川から導水し、江川ダム・寺内ダム・小石原川ダムの空容量を活用することにより不特定容量を確保し、渇水時において筑後川・有明海の水量確保及び河川環境保全、既得利水等の供給を行う事業である。筑後川水系河川整備計画により、ダム群連携事業の一環として筑後川中流域の筑後本川から佐田川への導水施設が建設される予定である。

導水に伴う江川ダム及び寺内ダムのダム湖内の水質変化が懸念されており、ダム湖内の水環境において本事業の影響を検討することは急務である。さらには、これらダム群からの放流水は、筑後大堰湛水域を介して感潮域そして有明海湾奥部へと流出している。したがって、筑後川水系の水資源開発の影響分析は、ダム群から筑後大堰湛水域、筑後川感潮域そして有明海湾奥部まで視野に入れた検討が必要である。

これまでダム群連携事業の影響を評価する際、導水が行われるダム湖内及びダムの下流のみ評価することが多く、感潮域や海域を含む影響分析を試みる例は少ない。また、公共事業を開始前と開始後の現地調査及び室内実験の研究が多く、得られたデータから同時に進行する複数の自然現象の影響を把握するには限界がある。

以上のことから、本研究の目的は総合的な水質管理の観点から水質モデルの構築を試み、筑後川水系ダム群連携事業による影響を分析することを目指す。

2 筑後川水系ダム群連携事業について

筑後川水系では、2005 年 4 月に水資源開発基本計画(フルプラン)¹⁾の全面変更がなされ、2015 年度(平成 27 年度)を目標とし、筑後川水系に各種用水を依存している福岡県、佐賀県、熊本県及び大分県の諸地域を対象に安定供給を確保するため、「福岡導水事業」、「大山ダム建設事業」、「佐賀導水事業」、「小石原川ダム建設事業」が決定された。

また、「ダム群連携事業」は適正な河川流況の保持に努めるために既設ダム群等の有効活用により計画された。図-1 に筑後川水系ダム群連携位置図を示す。



図-1 筑後川水系ダム群連携位置図²⁾

2.1 両築平野用水事業(江川ダムと寺内ダム)

両築平野用水事業の目的は農業用水、水道用水、工業用水を供給することであり、1975 年 3 月に事業が完了し、同年 4 月に管理開始された。江川ダムにおける取水と配水は独立行政法人水資源機構両築平野用水管理所によって運用され、寺内ダムの水管理は独立行政法人水資源機構朝倉総合事業所寺内ダム管理所によって実施されている³⁾。寺内導水路を利用し、両ダムの総合運用を行うことで水不足を解消することができる。図-2 に江川ダム・寺内ダムの総合利用模式図を示す。

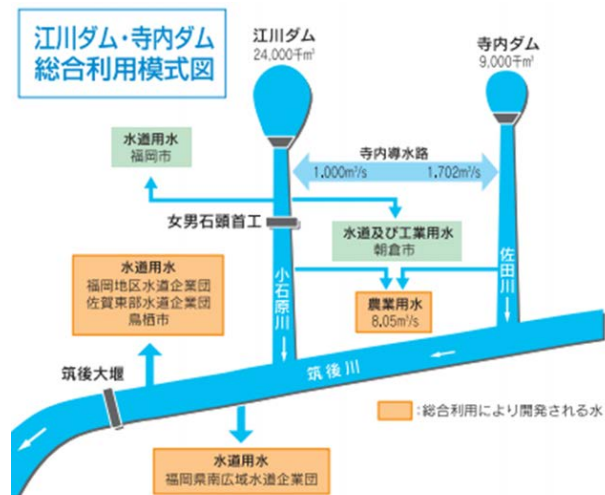


図-2 江川ダム・寺内ダムの総合利用模式図³⁾

2.1.1 江川ダムについて

江川ダムは1972年8月に完成した重力式コンクリートダムである。農業用水、工業用水、福岡県・佐賀県の水道用水を供給するために寺内ダムと総合的に運用されており、有効貯水容量は24,000千m³である³⁾。流入河川は小石原川であり、江川ダムの上流に小石原川ダムが建設されている。江川ダムの概略図を図-3に示す。



図-3 江川ダムの概略図⁴⁾

2.1.2 寺内ダムについて

寺内ダムは福岡県朝倉市に位置しており、洪水調節、水道用水の供給及び灌漑用水の確保、流水の正常な機能の維持を目的とする多目的ダムとして1978年に管理開始された⁵⁾。流入河川は佐田川と帝釈寺川である。寺内ダムの概略図を図-4に示す。

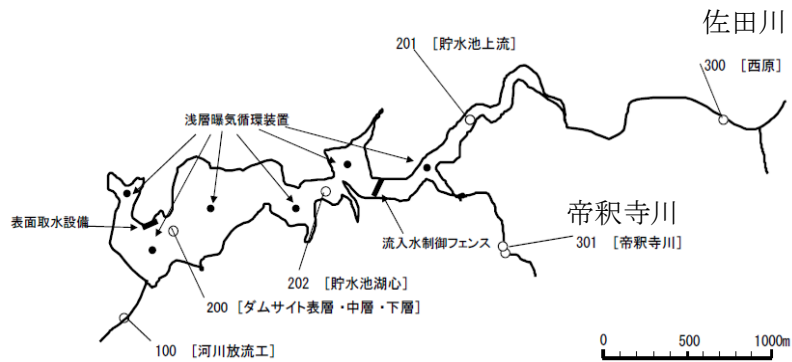


図-4 寺内ダムの概略図⁶⁾

管理当初より寺内ダム貯水池内ではアオコの発生が確認されており、その後もアオコが頻繁に発生している。富栄養化対策として曝気循環装置が1999年に1基、2003年に1基、2011年に4基が増設され計6基が現在稼働している。その他にも様々な水質保全対策がなされている⁵⁾。図-5に貯水池内に設置されている曝気循環装置の位置図を示す。

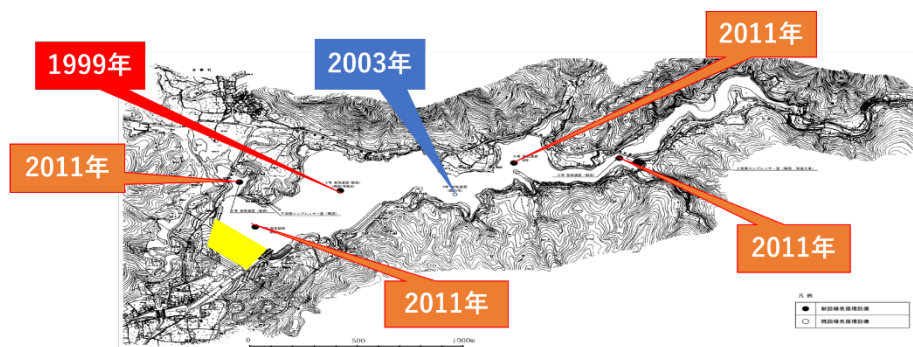


図-5 曝気循環装置の位置図

2.2 筑後大堰湛水域・筑後川感潮域

図-6に筑後大堰湛水域と筑後川感潮域の概略図を示す。筑後大堰は筑後川の河口から23km流に位置しており、治水、水資源開発並びに筑後川下流域における水道用水、灌漑用水の安定供給等を目的として1985年4月に運用が開始された⁷⁾。筑後大堰の湛水域は筑後大堰より上流の小森野床固及び宝満川の下野堰までとされている。湛水域の容量は約550km³、計画高水量は9000m³/sである。筑後川下流部における塩害の防除する役割もあり、潮の干満の影響を受けて、堰下流水位が堰の湛水位を上回る恐れがある場合は堰のゲートを全開にして逆流を防ぐ対策としている。

筑後川下流域は国内最大の干満差6mを有する有明海の影響を受け、23kmに及ぶ感潮域を形成している。筑後川の下流部は、有明海の干満の影響を受ける感潮域で、筑後大堰の大堰下流側では水位差が最大3mほどにも達する。図-7に筑後大堰付近の河川縦断図を示す。



図-6 筑後大堰湛水域と筑後川感潮域

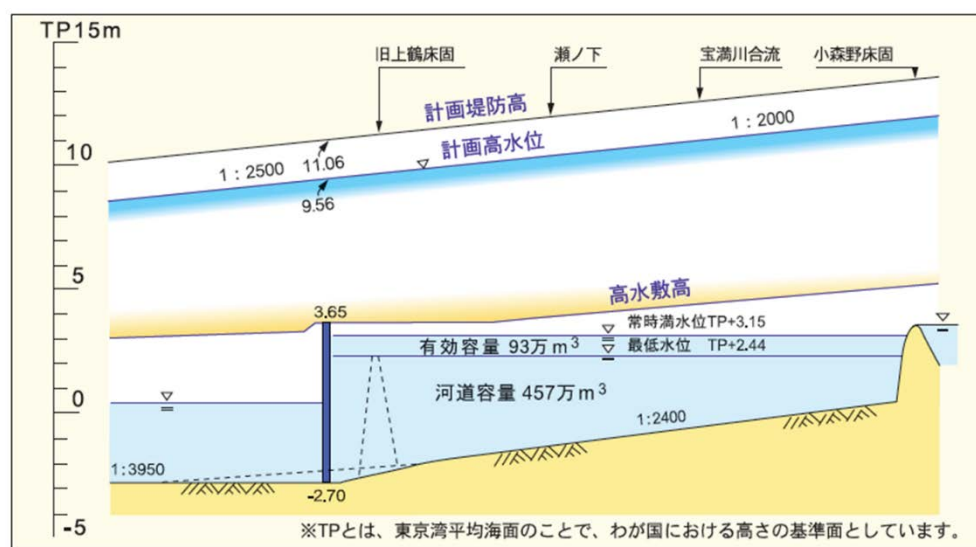


図-7 筑後大堰付近の河川縦断図⁷⁾

2.3 有明海湾奥部

有明海は九州西部に位置し、湾軸約 100km、平均幅 15km、平均水深約 20m、海域面積 1,700km² である。図-8 に有明海及び流入河川を示す。また、有明海は閉鎖性が高い海域であり、大きな潮位差と広大な干潟を有し、海水は浮泥による強い濁りがあるなどという特徴がある。有明海の大きな潮位差は我が国で最も広大な干潟を生じさせ、熊本県沿岸では砂質、湾奥部では泥質の干潟が形成されている。

有明海は佐賀県、福岡県、長崎県、熊本県に囲まれ、湾奥部には筑後川、矢部川、嘉瀬川、六角川、諫早湾には本明川、湾中央部東側には白川、緑川、菊池川の計 8 本の一級河川が注いでいる。流入する河川の流域面積は約 8,000km² である。図-9 に示すように筑後川の流量が最も高いため、有明海に対する筑後川水系ダム群連携事業の影響を確認することは必要不可欠である。

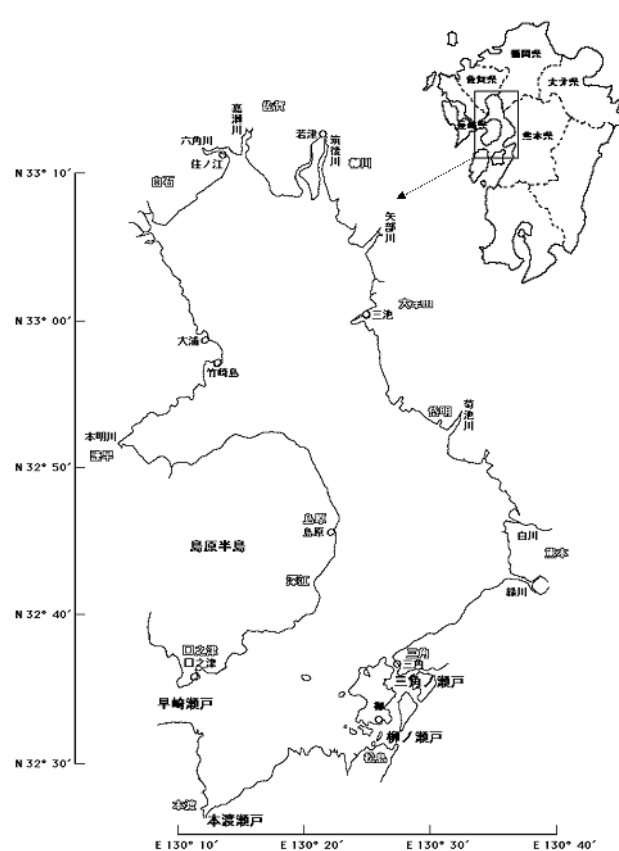


図-8 有明海⁸⁾

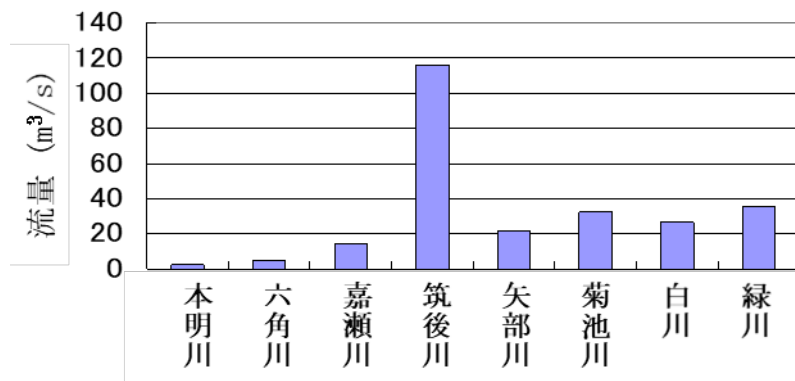


図-9 有明海の流入河川の平均流量⁸⁾

3 研究方法

3.1 筑後川水系及び有明海湾奥部の水環境に関する情報収集

ダム群連携事業の影響を検討するために、研究の対象水域である江川ダム及び寺内ダム、筑後大堰湛水域、筑後川感潮域、有明海湾奥部の水環境について把握する必要がある。以下の研究対象水域の水環境及び水管理に関する情報を収集する。

3.1.1 江川ダム及び寺内ダム

独立行政法人水資源機構筑後川局等関係する機関から江川ダム及び寺内ダムにおける水環境の状況や施設運用ルールに関する情報収集を行う。

3.1.2 筑後大堰湛水域・筑後川感潮域

筑後大堰湛水域・筑後川感潮域における水環境及び水管理について独立行政法人水資源機構筑後川局及び国土交通省九州地方整備局から情報収集及び意見交換を行う。

3.1.3 有明海湾奥部

有明海湾奥部の水環境について独立行政法人水資源機構筑後川局、国土交通省九州地方整備局、佐賀県有明水産振興センター、福岡県水産海洋技術センター有明海研究所から情報を収集する。

3.2 水質モデルの構築

先に述べた「1. 筑後川水系及び有明海湾奥部の水環境に関する情報収集」から得られた情報に基づいて各対象水域の水質モデルを構築する。本研究では内部生産に注目し、水質モデルを用いて筑後川上流から有明海湾奥部まで各対象水域の COD の変化を検討する。

3.2.1 江川ダム及び寺内ダム

内部生産を検討するために江川ダム及び寺内ダムの貯水池の表水層を一池完全混合モデルとし、流入負荷は各ダムの流入河川の L-Q 式で与える。

3.2.2 小石原川、佐田川、筑後川

収集した情報の都合により、小石原川、佐田川、筑後川本川の水質モデル作成に必要な情報が不十分であったことから、収集した筑後川本川の荒瀬地点の水質データ及び各観測地点の流量を用いて境界条件である流入負荷の L-Q 式及び C-Q 式を作成する。得られた L-Q 式及び C-Q 式を用いてダム群連携事業の導水の影響を分析する。

3.2.3 筑後大堰湛水域

水深が浅いことから筑後大堰湛水域を一池完全混合モデルとする。湛水域の流入負荷は筑後川本川の流量と計算結果を用いて、宝満川からの流入負荷は下野地点の L-Q 式で与える。

3.2.4 筑後川感潮域

筑後川感潮域を一次元有限容積モデルをとし、流入負荷は筑後大堰からの放流量と湛水域モデルの計算結果から求める。

3.2.5 有明海湾奥部

有明海湾奥部の水質モデルとして二次元有限容積モデルを用いる。筑後川感潮域モデルから得られた計算結果を流入負荷として考慮する。

構築した水質モデルを用いて各対象水域の COD を再現し、実測データとの比較で水質モデルの再現性を確認する。

3.3 筑後川水系ダム群連携事業の導水による影響の分析

ダム群連携事業の導水の影響を分析するために、導水による流入負荷を考慮し COD の計算を行う。水質モデルの検証より再現性が概ね良好であるモデルのみを用いて分析する。導水に伴う流入負荷を筑後川本川の導水量及び水質の観測データから求める。導水の流入負荷を考慮する場合と考慮しない場合の計算結果を比較し、各対象水域の内部生産において導水の影響を評価する。

4 筑後川水系及び有明海湾奥部の水質特性について

4.1 寺内ダムの水質特性

4.1.1 水温

1994 年～2017 年の寺内ダム貯水池内における表層・中層・底層の水温を図-10 に示す。曝気循環装置台数の増加に従い水温の鉛直方向の差は減少傾向を示しており、曝気循環装置の循環効果がみられる。図-11 に示すように貯水池における水温の鉛直分布図から、成層期は 4 月～11 月であることが分かる。

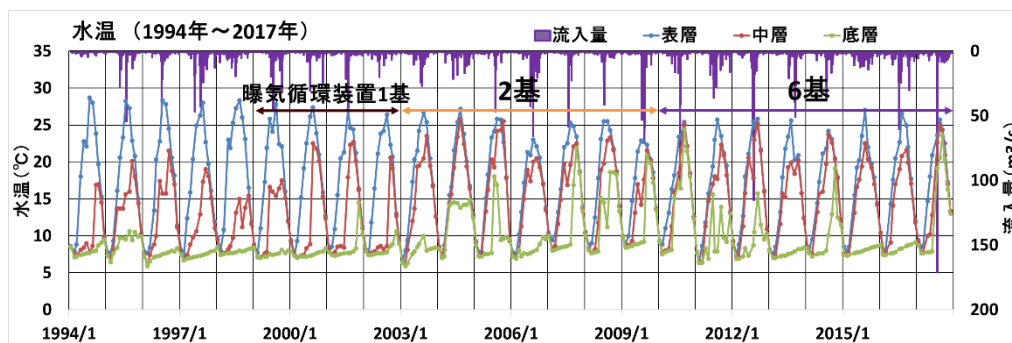


図-10 寺内ダム貯水池における水温の経年変化⁹⁾

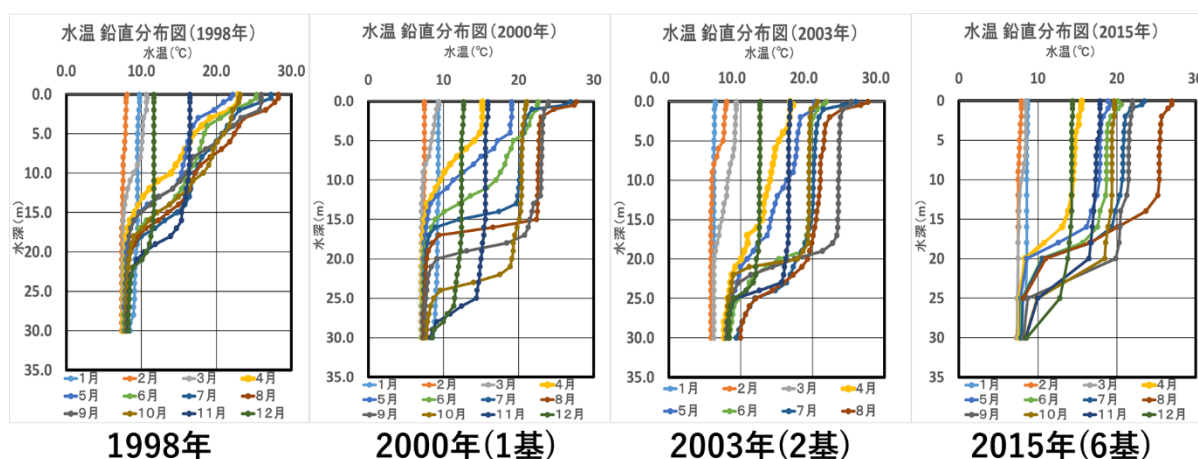


図-11 寺内ダム貯水池における水温の鉛直分布

4.1.2 Chl-a

図-12 に貯水池及び流入の Chl-a の経年変化を示す。2002 年から表層の Chl-a 濃度が減少しており、流入河川の濃度に変化が見られないことから Chl-a の減少は曝気循環装置の効果によるものと考えられる。また、流入河川の Chl-a は継続的に低い値を示しているため、流入負荷の影響は弱く、貯水池の Chl-a は内部生産の影響を強く受けていると言える。

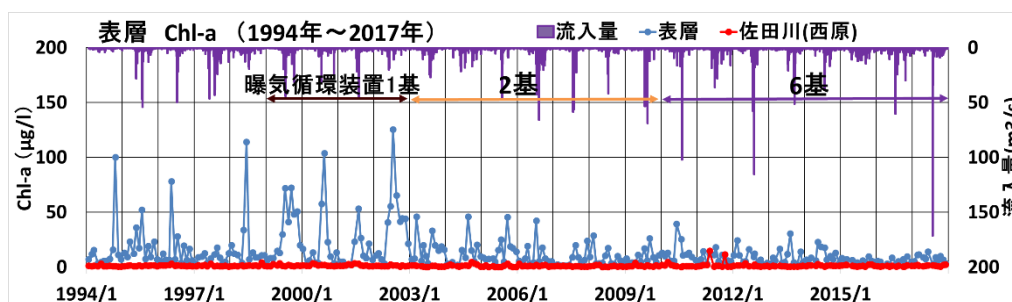


図-12 寺内ダム貯水池及び流入河川における Chl-a の経年変化

4.1.3 DIN

図-13 に貯水池と流入河川の DIN の経年変化を示す。1994 年～2001 年において、PO₄-P と同様に藻類の栄養摂取によって表層の DIN は流入河川より低い値を示している。2002 年以降は Chl-a が減少し、藻類への摂取も低下したため、表層の DIN は流入河川に近い値となったと考えられる。

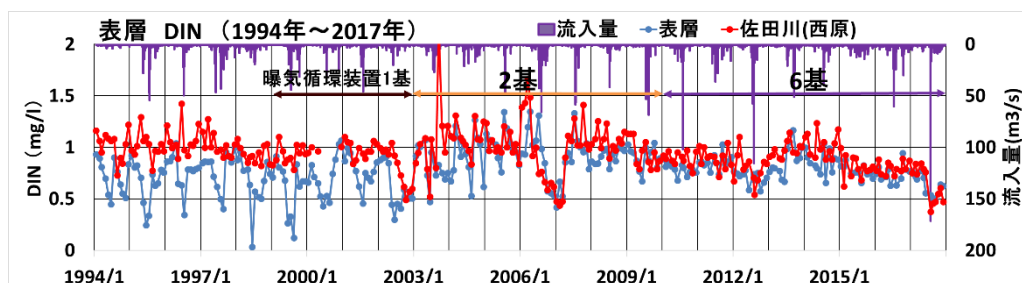


図-13 寺内ダム貯水池及び流入河川における DIN の経年変化

4.1.4 PO₄-P

貯水池と流入河川の PO₄-P の経年変化を図-14 に示す。出水時に表層の濃度は流入河川の濃度と同じような傾向を示すことから貯水池内の PO₄-P は流入負荷の影響を受けているようである。表層の濃度は流入河川の濃度を下回っており、貯水池内の PO₄-P の減少は内部生産による消費が考えられる。

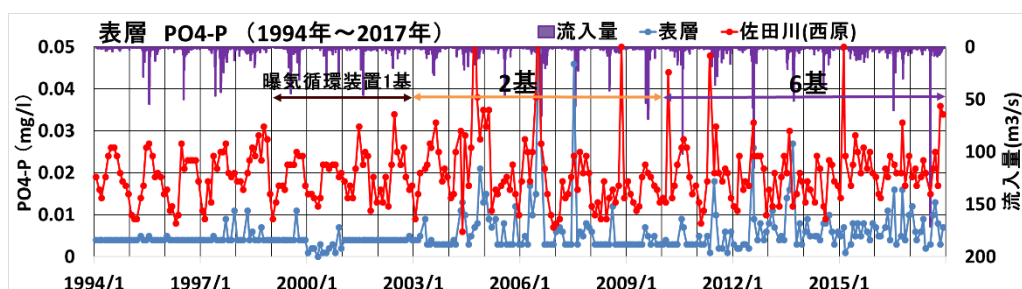


図-14 寺内ダム貯水池及び流入河川における PO₄-P の経年変化

4.1.5 COD

図-15 に貯水池と流入河川における COD の経年変化を示す。Chl-a と同様に表層の COD は 2002 年から減少傾向にある。流入河川の COD は貯水池の表層の COD より低いため、表層の COD は流入負荷の影響に加えて貯水池内での内部生産の影響を受けていることが分かる。

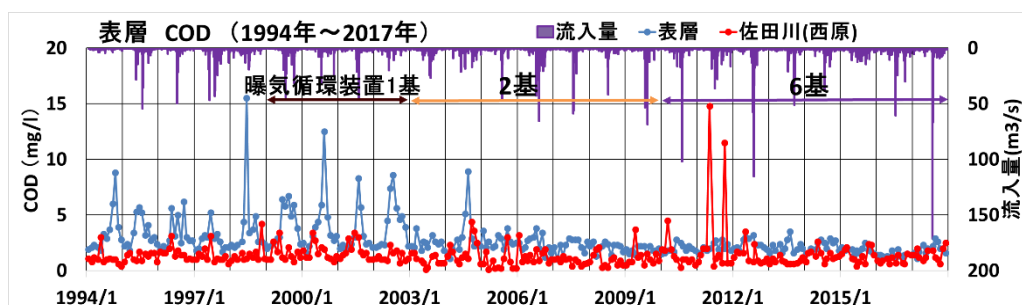


図-15 寺内ダム貯水池及び流入河川における COD の経年変化

4.2 江川ダムの水質特性

4.2.1 水温

図-16 に江川ダム貯水池内における表層・中層・底層の水温を示す。表層の水温は季節的な変化が見受けられる。底層の水温は、1993年～1995年を除いて、10℃以下となっている。図-17に示すように貯水池における水温の鉛直分布図から、成層期は4月～12月であることが確認できる。

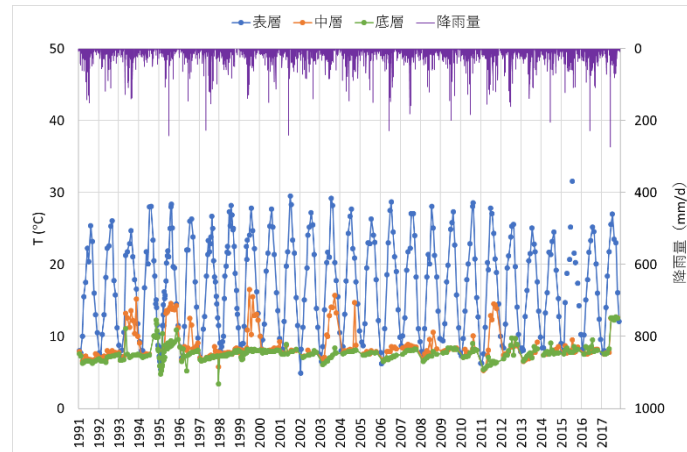


図-16 江川ダム貯水池における水温の経年変化

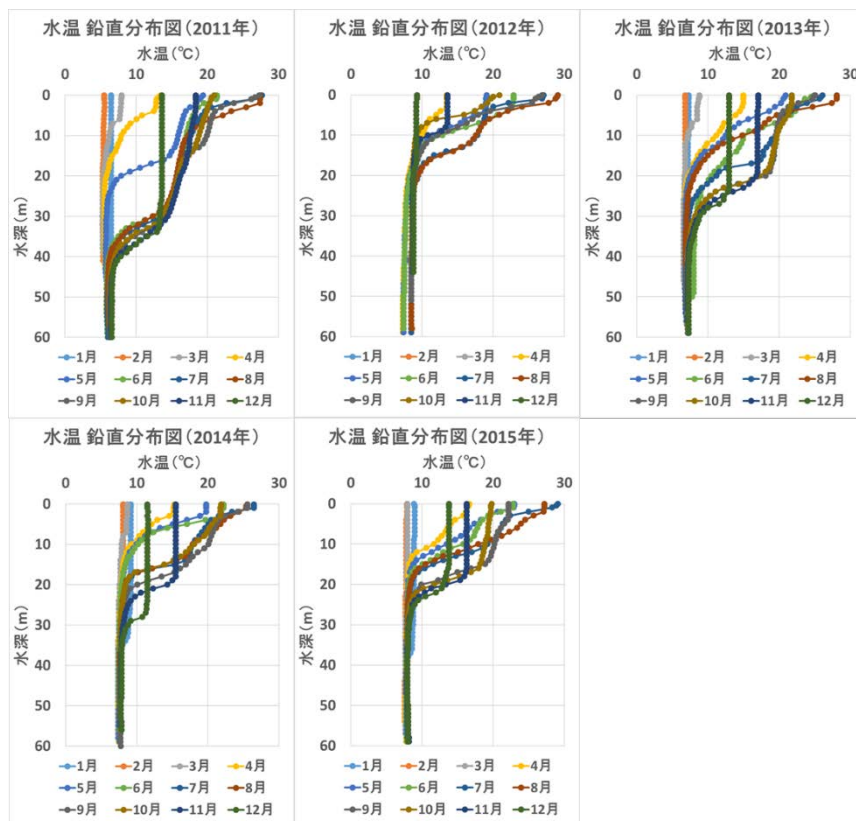


図-17 江川ダム貯水池における水温の鉛直分布

4.1.2 Chl-a

図-18 に Chl-a の経年変化を示す。図-18 から春季から夏季において表層の Chl-a が増加傾向にあり、一部の期間では夏季から秋季において Chl-a が高い値を示すことが分かる。2003 年～2015 年の春季から夏季にかけて淡水赤潮の発生、夏季から秋季にかけてアオコの発生¹⁰⁾が報告されていることから貯水池内での藻類増殖が確認できる。流入河川の Chl-a は観測されていないが、Chl-a の高い時期において降雨量が少ないため流入負荷の影響は小さいと考えられる。

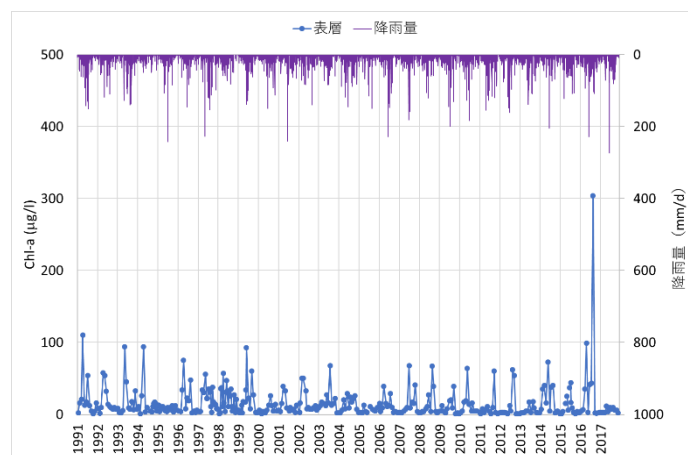


図-18 江川ダム貯水池における Chl-a の経年変化

4.1.3 T-N

図-19 に貯水池と流入河川の T-N の経年変化を示す。夏季に表層の T-N が高い値を示しており、流入河川の T-N も表層と同じレベルであることから貯水池の T-N は流入負荷の影響を受けていることが推測できる。また、2006 年から表層の T-N は減少傾向にある。Chl-a が高い時期に表層の T-N の減少がみられるため、藻類増殖による消費の影響が考えられる。

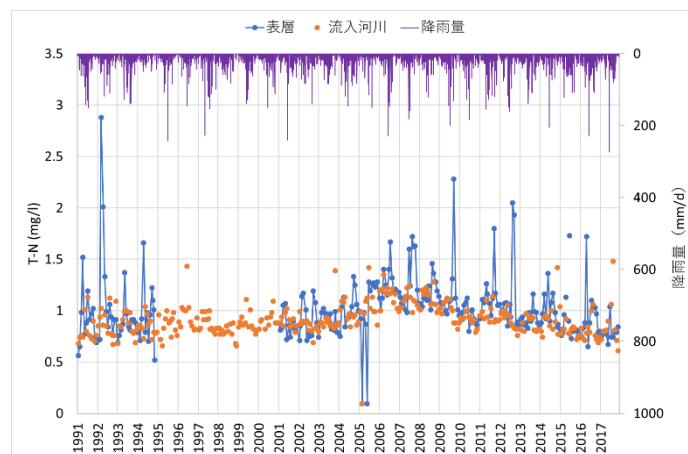


図-19 江川ダム貯水池及び流入河川における T-N の経年変化

4.1.4 T-P

貯水池と流入河川の T-P の経年変化を図-20 に示す。T-N と同様に貯水池と流入河川の T-P はほぼ同じレベルであり、貯水池の T-P は流入負荷の影響を強く受けていると言える。

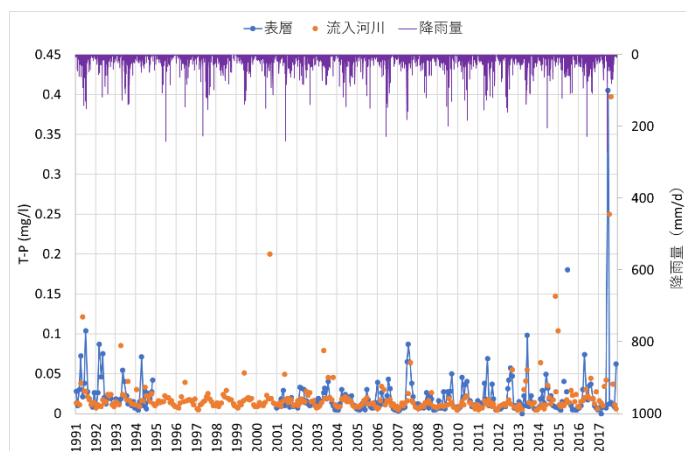


図-20 江川ダム貯水池及び流入河川における T-P の経年変化

4.1.5 COD

COD の経年変化を図-21 に示す。表層の COD は季節的な変化を示しており、Chl-a とほぼ同じ時期に増加傾向にある。また、流入河川の COD は貯水池の表層の COD より低いことから、表層の COD は流入負荷の影響に加えて貯水池内での内部生産の影響を受けていると言える。

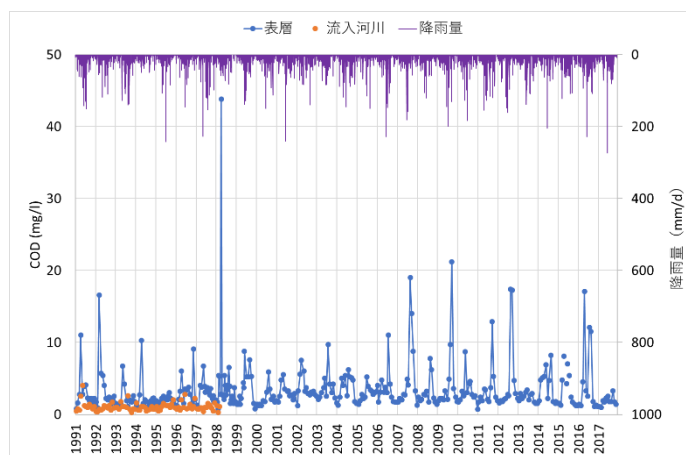


図-21 江川ダム貯水池及び流入河川における COD の経年変化

4.3 筑後大堰湛水域の水質特性

図-22 に筑後大堰湛水域の水質観測地点を示す。筑後川本川(E 地点)、宝満川(F 地点)、堰直上(G 地点)の水温、Chl-a、DIN、PO4-P、COD を比較し、筑後大堰湛水域における水質特性について考察する。



図-22 筑後大堰湛水域の水質観測地点

4.3.1 水温

図-23 に各地点の水温の経年変化を示す。河川の水温は、主に気候の影響を受けて夏期に上昇し、冬季に低下し、河川流量によっても変動する。各地点の水温は概ね同様の傾向を示しているが、近年各地点ともに1～2℃程度の上昇傾向がみられる。近年の水温の上昇傾向は、筑後川流域の周辺の都市における気温の年平均気温の上昇によるものと考えられる。

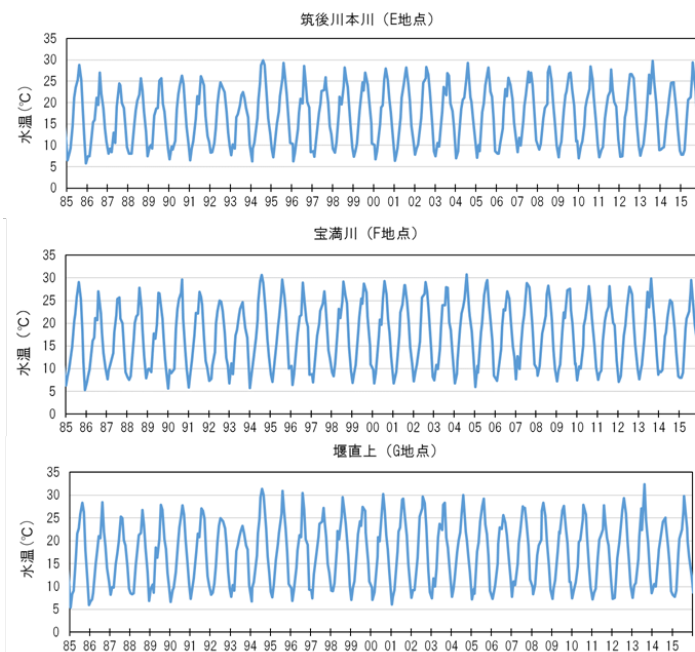


図-23 筑後大堰湛水域における水温の経年変化

4.3.2 Chl-a

図-24 に各地点の Chl-a の経年変化を示す。湛水域(G 地点)の Chl-a 濃度は湛水域流入端である宝満川(F 地点)と筑後川本川(E 地点)の流入負荷の影響を受けていることが分かる。大堰直上(G 地点)の Chl-a 濃度が上流より高い濃度を示しており、流入負荷の影響に加え、滞留時間が長いことによる藻類の増殖が要因として考えられる。

各地点の DO と飽和溶存酸素(Cs)を図-25 に示す。DO は、水温の変化に伴い夏期に低下し冬

期に上昇する季節的変動があり、藻類の光合成によって高い値を示す傾向にある。各地点において Chl-a 濃度の上昇時に、溶存酸素の過飽和状態が確認できる。

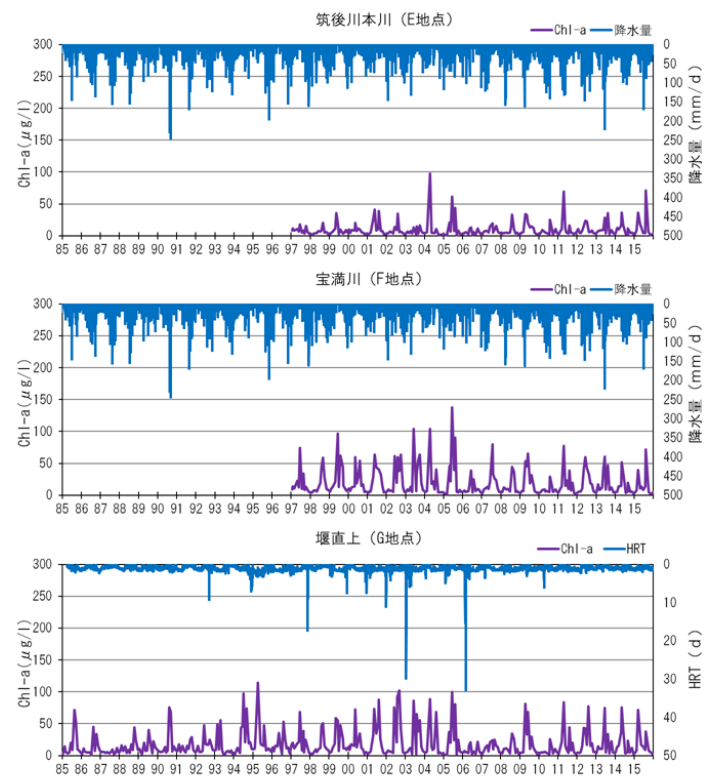


図-24 筑後大堰湛水域における Chl-a の経年変化

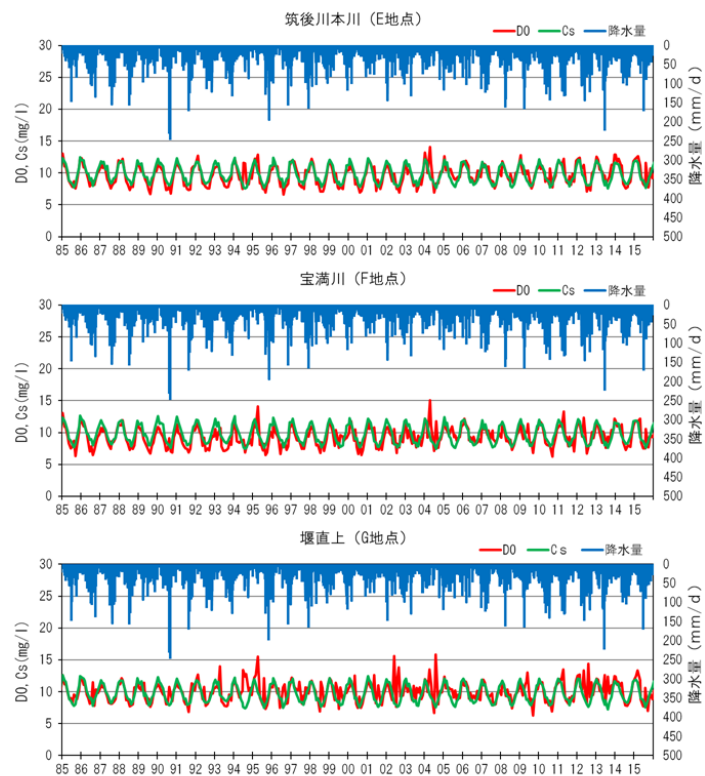


図-25 筑後大堰湛水域における DO 及び飽和溶存酸素 (Cs)

4.3.3 DIN

図-26 に DIN の経年変化を示す。湛水域(G 地点)と筑後川本川(E 地点)の DIN がほぼ同じレベルであることから、湛水域の DIN は筑後川本川の流入負荷の影響を強く受け、宝満川の流入負荷の影響は小さいと考えられる。2005 年 6 月などに見られる DIN 濃度の減少は藻類の増加に伴う影響が考えられる。

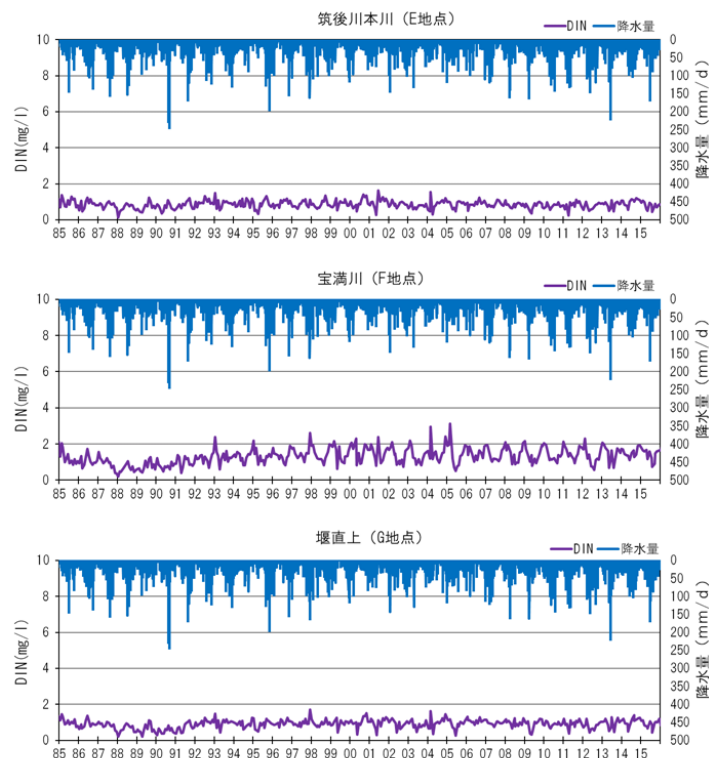


図-26 筑後大堰湛水域における DIN の経年変化

4.3.4 PO4-P

各地点の PO4-P の経年変化を図-27 に示す。DIN と同様、湛水域(G 地点)と筑後川本川(E 地点)の PO4-P がほぼ同じレベルを示すことから、湛水域における宝満川の流入負荷の影響は筑後川本川に比べて小さいと考えられる。PO4-P の減少の原因は藻類の増殖に伴う消費が考えられる。

4.3.5 COD

図-28 に COD の経年変化を示す。湛水域(G 地点)の COD 濃度が筑後川本川(E 地点)の COD 濃度より若干高い傾向を示しており、雨季に COD の上昇が見られることから、上流からの流入負荷の影響に加えて、湛水域における内部生産の影響を受けていることが考えられる。

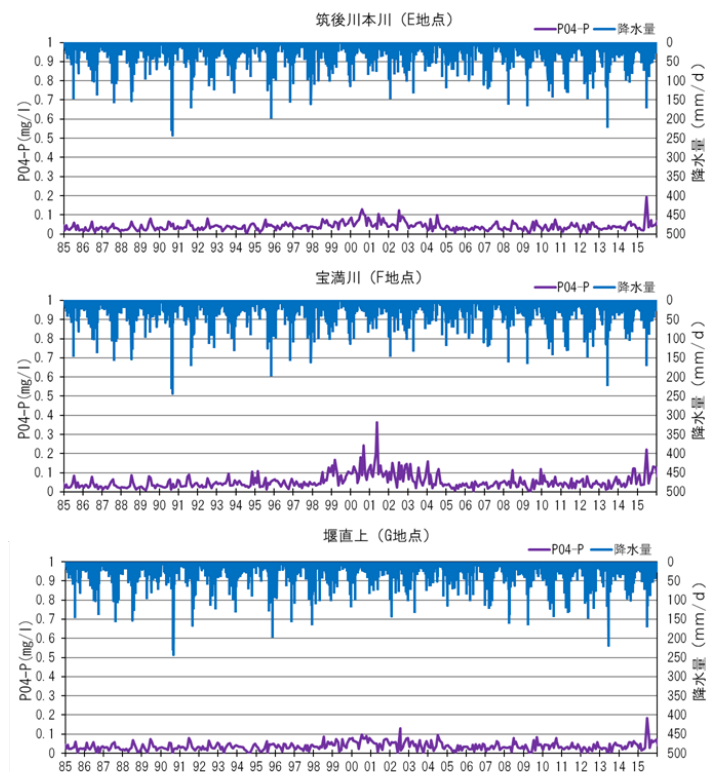


図-27 筑後大堰湛水域における PO4-P の経年変化

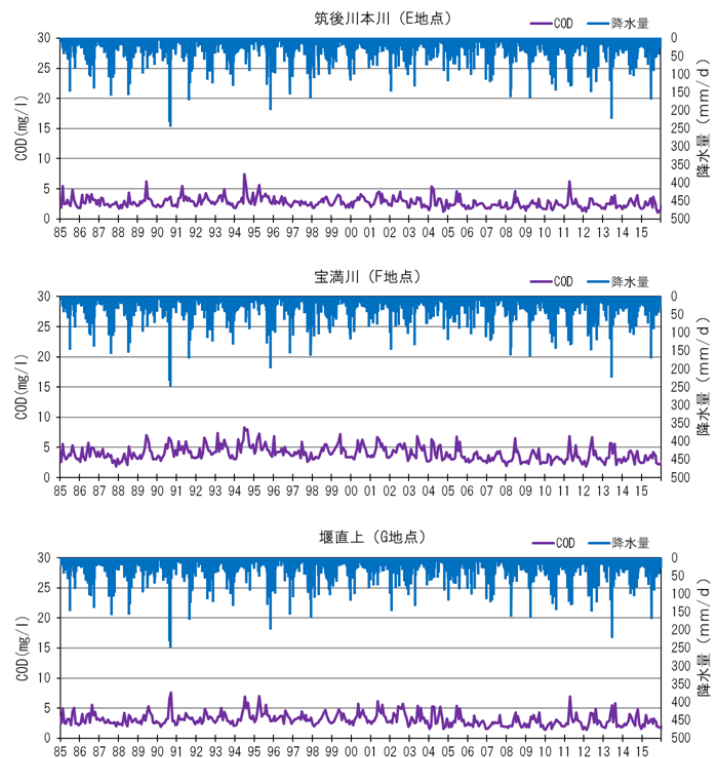


図-28 筑後大堰湛水域における COD の経年変化

4.3 筑後川感潮域・有明海湾奥部の水質特性

図-29 に筑後川感潮域・有明海湾奥部の水質観測地点を示す。筑後川感潮域の観測地点(C 地点、No.1 地点)、有明海湾奥部の L1 地点、そして筑後大堰からの負荷の影響と関連する堰直上(G 地点)の水質を比較し、筑後川感潮域・有明海湾奥部における水質特性について考察する。



図-29 筑後川感潮域(左)及び有明海灣奥部(右)の水質観測地点

4.3.1 水温

各地点の水溫(鉛直方向の平均値)の経年變化を図-30 に示す。列島大渇水で流量が低下した1994 年以降は各地点ともに 1~2℃程度の上昇傾向がみられる。近年の水溫の上昇傾向は、主に氣候の影響及び上流からの流入によって変動することが考えられる。

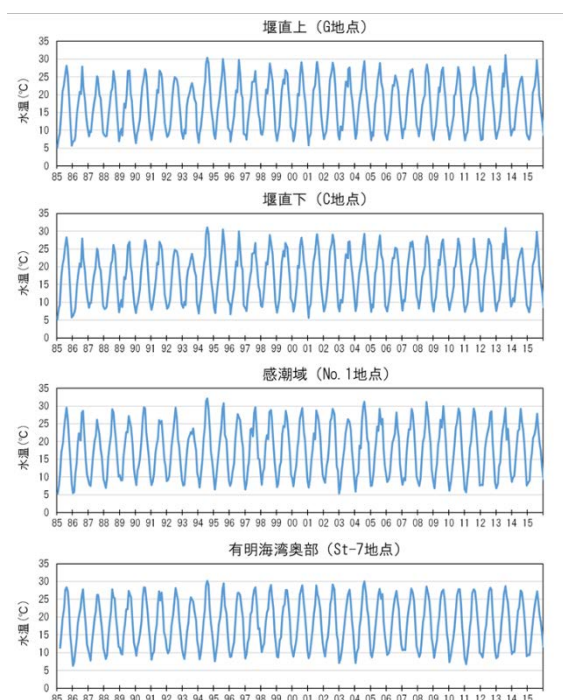


図-30 筑後川感潮域・有明海灣奥部における水温(鉛直方向の平均値)の経年変化

4.3.2 Chl-a

図-31 に各地点の Chl-a の経年変化を示す。有明海湾奥部の L1 地点において Chl-a は観測されていないため、G 地点から No.1 地点まで比較する。C 地点の Chl-a 濃度は G 地点と同時期に高い値を示しており、C 地点において筑後大堰湛水域からの流出負荷の寄与度が高いと言える。No.1 地点において、上流の C 地点より低い値を示しており、また、Chl-a の長期的な減少が見られ、塩分の影響による藻類抑制が考えられる¹¹⁾。

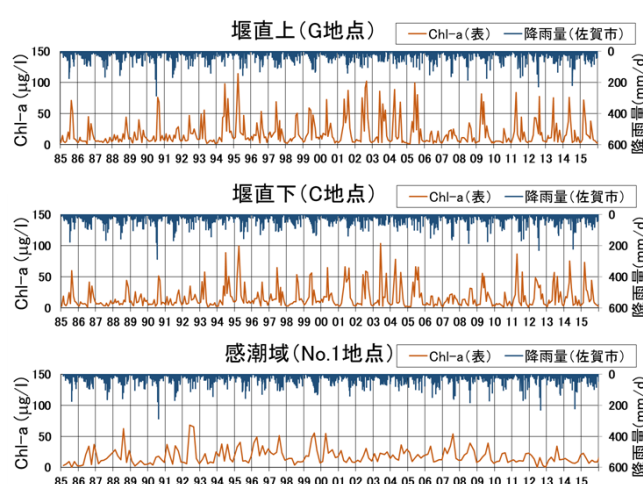


図-31 筑後川感潮域・有明海湾奥部における Chl-a の経年変化

4.3.3 DIN

DIN の経年変化を図-32 に示す。感潮域(C 地点と No.1 地点)において、DIN は長期的な減少傾向にある。図-33 に示すように有明海湾奥部の干潮の潮位及び年平均潮位は増加傾向にあり、近年の有明海の潮位上昇に伴う低 DIN 濃度による希釈¹²⁾が続いていると考えられる。

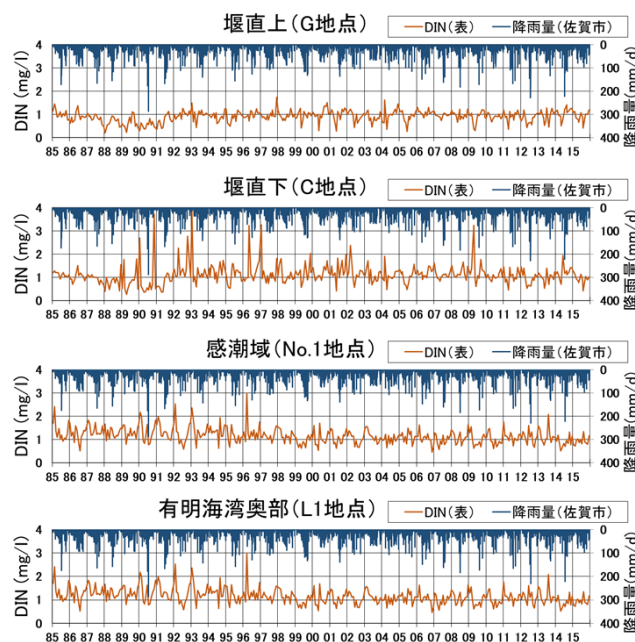


図-32 筑後川感潮域・有明海湾奥部における DIN の経年変化

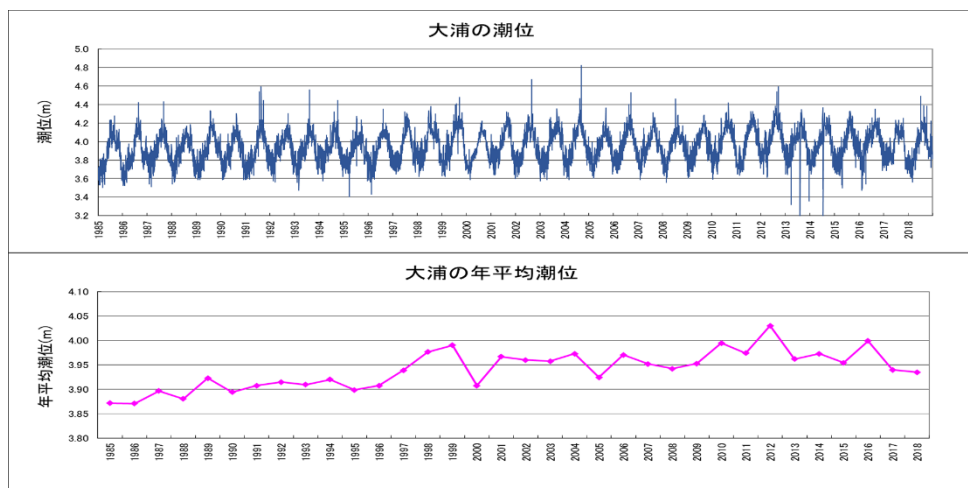


図-33 有明海湾奥部(大浦地点)における潮位の経年変化

4.3.4 PO4-P

図-34 に各地点の PO4-P の経年変化を示す。図-34 に示すように C 地点と No.1 地点の PO4-P は長期的な増加傾向にある。この増加原因は筑後川感潮域での物質変換・輸送現象によるものと指摘されている¹²⁾。具体的には、PO4-P の挙動は底泥からの溶出に加えて有明海の潮位上昇に伴う塩分増加による共沈と溶脱の影響を受けていると考えられる¹²⁾。

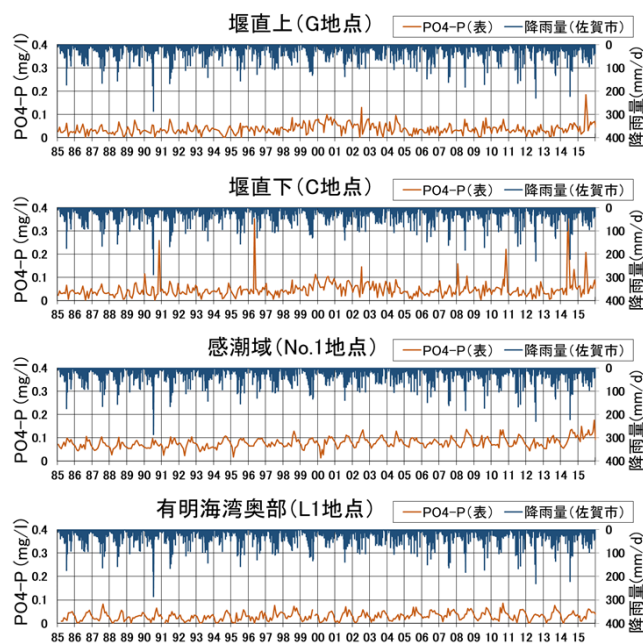


図-34 筑後川感潮域・有明海湾奥部における PO4-P の経年変化

4.3.5 COD

各地点の COD の経年変化を図-35 に示す。C 地点の COD 濃度は G 地点とほぼ同じレベルとなっており、堰直下の C 地点の COD は筑後大堰湛水域からの負荷の影響を強く受けていることが分かる。No.1 地点の COD は全体的に上流より若干低い値を示している。1997 年、2003 年～2007 年において、No.1 地点の COD は C 地点の値より上回っており、感潮域内の滞留に伴う内部生産が見受けられる。また、湛水域と感潮域の COD は Chl-a と同じ傾向にあり、内部生産と寄与度が高いと

考えられる。1999 年～2000 年を除いて、有明海湾奥部の L1 地点は上流より低い値を示す。No.1 地点において、Chl-a と同様に塩分による藻類抑制が推測される。

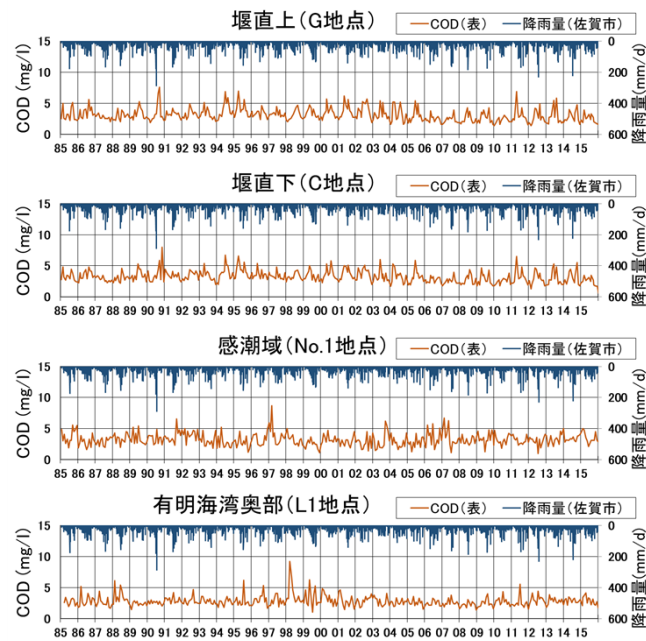


図-35 筑後川感潮域・有明海湾奥部における COD の経年変化

5 水質モデルの構築

「4 筑後川水系及び有明海湾奥部の水質特性について」の考察から明らかになった研究対象水域の水質挙動と管理者及び関連機関から収集した情報を用いて各対象水域の水質モデルを構築する。内部生産について検討するために COD を対象水質項目とする。

5.1 寺内ダム及び江川ダムの水質モデル

ダム貯水池の水質計算を行う際に用いた連続式⁹⁾を式(1)に示す。

$$\frac{dV_0}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

V_0 : 全体貯水容量(m^3); Q_{in} : ダム貯水池への流入流量(m^3);

Q_{out} : ダム貯水池からの流出流量(m^3)

貯水池流入量は、残留域からの流量も含まれており計測が困難である。容積 V_0 はダム全体の水位(H-V)から求めた。本研究では、計測が容易な容積と放流量より流入量を算出している。

$$Q_{in} = \frac{dV_0}{dt} + Q_{out} \quad (2)$$

寺内ダム貯水池への流入河川である佐田川と帝釈寺川の流量は流域面積比を用いて算出した⁹⁾。

$$Q_1 = \frac{A_1}{A} Q_{in} \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{A_2}{A} Q_{in} \quad (4)$$

$$A = A_1 + A_2 \quad (5)$$

Q_1 : 佐田川の流量(m^3); Q_2 : 帝釈寺川の流量(m^3); A_1 : 佐田川の流域面積(km^2);

A_2 : 帝釈寺川の流域面積(km^2); A : 寺内ダム全流域面積(km^2)

本研究では、水温鉛直分布に基づいて成層期における表水層を設定し、表層の容積 V は水位(H-V)から求めた。寺内ダム及び江川ダムの表水層は 10m とする⁹⁾。

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} - Q_{exc} \quad (6)$$

$$Q_{exc} = \frac{dV}{dt} - Q_{in} + Q_{out} \quad (7)$$

V : 表層容量(m^3); Q_{exc} : 下層との交換流量(m^3/s)

収集した情報の都合により、寺内ダムの計算期間は1994年～2017年の成層期(4月～11月)⁹⁾、江川ダムの計算期間は2012年～2015年の成層期(4月～12月)とし、計算ステップは1日である。

式(8)にCODの物質保存式を示す。

$$\frac{d(COD \cdot V)}{dt} = L_{in} - L_{out} - COD \cdot Q_{exc} + K_1 \cdot COD \cdot V - K_2 \cdot COD \cdot V - w_{COD} \cdot COD \cdot A \quad (8)$$

COD: COD濃度(mg/l); V: 表層容量(m³); L_{in}: 流入負荷(g/s); L_{out}: 流出負荷(g/s);
Q_{exc}: 下層との交換流量(m³/s); K₁: 一次反応速度(1/d); K₂: 分解速度(1/d);
w_{COD}: 沈降速度(m/d), A: 沈降面積(m²)

流入負荷は流入河川のL-Q式を用いて与えた。表-1に各流入河川のL-Q式を示す。

表-1 寺内ダムと江川ダムの流入河川のL-Q式

ダム	流入河川	L-Q式(COD)	流域面積 (km ²)	流域面積比 (%)
寺内ダム ⁹⁾	佐田川 (残留域を含む)	L=1.4212Q ^{1.2426}	49.3	96.7
	帝釈寺川	L=5.9218Q ^{1.3768}	1.7	3.3
江川ダム	小石原川	L=1.1122Q ^{1.1945}	30	100

寺内ダムにおいて曝気循環装置による鉛直方向の物質輸送を考慮する際、曝気循環装置の運用状況に基づき、式(9)より連行水量¹³⁾を定める。

$$Q_w = 0.302 Q_B \left(z \left(\frac{g}{Q_B^2} \right)^{\frac{1}{5}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (9)$$

Q_w: 連行水量(m³/s); Q_B: 曝気空気量(m³/s); z: 曝気吐出口からの高さ(m);
g: 重力加速度(m/s²)

本研究では曝気空気量(Q_B)=3.7 m³/minとし、各曝気循環装置の稼働時間を考慮する¹³⁾。

5.2 小石原川、佐田川、筑後川本川の水質モデル

収集した筑後川本川の荒瀬地点の水質データ及び各観測地点の流量を用いて境界条件である流入負荷のL-Q式及びC-Q式を作成し、ダム群連携事業の導水の影響を分析する。

図-36に荒瀬地点におけるCODのL-Q式を示す。L-Q式からbの値は1に近いので、CODの濃度(C)はほぼ一定(約2mg/l)である。

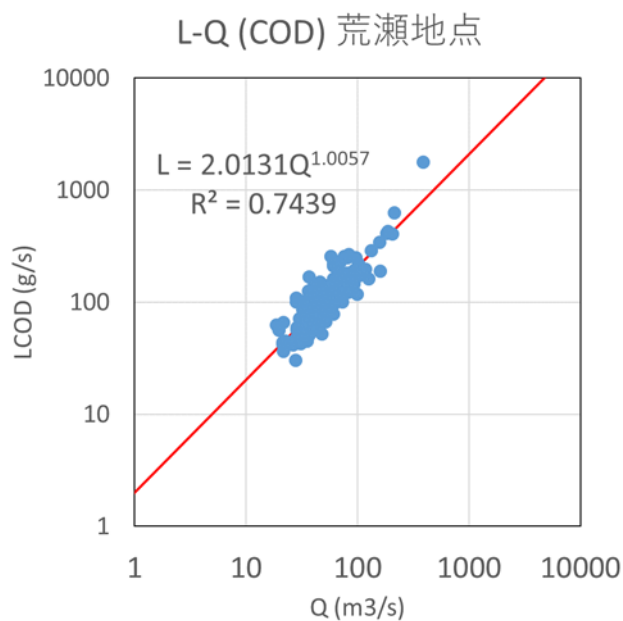


図-36 筑後川本川荒瀬地点の L-Q 式(COD)

5.3 筑後大堰湛水域の水質モデル

筑後大堰湛水域の水深が浅いことかつ水平方向の濃度分布が均一であるため、筑後大堰湛水域を一池完全混合モデルとする¹⁴⁾。筑後大堰湛水域の水質モデルで用いた連続式を式(10)に示す。

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (10)$$

V：湛水域容量(m³)； Q_{in}：筑後大堰湛水域への流入流量(m³/s)；

Q_{out}：筑後大堰湛水域からの流出流量(m³/s)

計算期間は2009年～2014年とし、計算ステップは1日である。

CODの物質保存式を式(11)に示す。

$$\frac{d(COD \cdot V)}{dt} = L_{in} - L_{out} - COD \cdot Q_{exc} - K_2 \cdot COD \cdot V - w_{COD} \cdot COD \cdot A + K_{COD} \cdot A \quad (11)$$

COD：COD濃度(mg/l)； V：湛水域の容量(m³)； L_{in}：流入負荷(g/s)； L_{out}：流出負荷(g/s)

K₂：分解速度(1/d)； w_{COD}：沈降速度(m/d)； A：沈降面積(m²)； K_{COD}：溶出速度(g/m²・d)

筑後大堰湛水域の流入河川は、筑後川本川と宝満川である。流入負荷を算出するにあたり、筑後川本川(E地点)と宝満川(F地点)の流量及び水質の観測データを用いた。表-2に各流入河川のL-Q式を示す。

表-2 筑後大堰湛水域の流入河川のL-Q式

流入河川	L-Q式(COD)
筑後川本川 (E地点)	$L=1.8Q^{1.0811}$
宝満川 (F地点)	$L=2Q^{1.1913}$

5.4 筑後川感潮域の水質モデル

筑後川感潮域を2つのエレメントに分けて1次元有限容積モデル¹⁵⁾を構築した。エレメント構成概略図を図-37に示す。

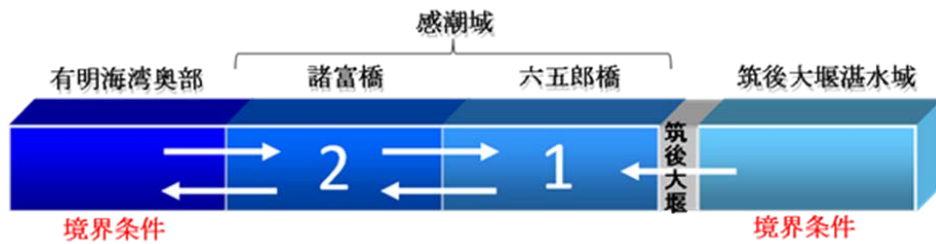


図-37 筑後川感潮域のエレメント構成概略図

筑後川下流域の水質計算を行う際に用いた連続式を式(12)、物質保存式を式(13)¹⁵⁾に示す。

$$\frac{dV_n}{dt} = \sum Q_{nm} + Q_{bn} \quad (12)$$

$$\frac{dV_n \cdot c_n}{dt} = \sum \{Q_{nm} [\delta_{nm} \cdot c_m + (1 - \delta_{nm}) c_n] + E'_{nm} (c_m - c_n)\} \pm S_n \quad (13)$$

V_n : エレメント n の体積(m^3); Q_{nm} : エレメント n からエレメント m への流出入量(m^3/s);
 Q_{bn} : 降雨などによる外部との流出入量(m^3/s); c_n : エレメント n の濃度(mg/l);
 c_m : エレメント m の濃度(mg/l); δ_{nm} : エレメント m からエレメント n への移流係数(-);
 E'_{nm} : エレメント m とエレメント n への分散係数(m^3/s); S : 反応; n, m : エレメント番号

筑後川下流域における流入負荷等、境界条件の設定に際して、日流量、降雨量等の実測データが必要となるが、本研究では、筑後大堰から下流域への流入量は瀬ノ下地点の流量データを、降雨データに関しては佐賀市の実測データを用いている

移流係数及び分散係数を把握するために式(14)に示す塩化物イオンの物質保存式を用いて計算する必要がある。得られた係数を用いて COD の物質保存式を計算する。

$$\frac{dV_n \cdot c_n}{dt} = \sum \{Q_{nm} [\delta_{nm} \cdot c_m + (1 - \delta_{nm}) c_n] + E'_{nm} (c_m - c_n)\} \quad (14)$$

筑後大堰湛水域からの流入境界条件は一池完全混合モデルの計算結果、有明海湾奥部の境界条件は、2次元有限容積モデルの計算結果を用いた。計算期間は1985年～2015年とし、計算ステップは1日とした。

5.5 有明海の水質モデル

図-38に示すように有明海を11エレメントに分けて2次元有限容積モデル¹⁶⁾として構築されている。河川からの流入負荷の影響を考慮するために有明海に注ぐ各河川の形状を考慮して区切っている。また、湾奥部に関しては濃度変化が激しいため細かく分けた。陸域から各エレメントへの淡水流入量は、有明海に流入する一級河川の各観測所の実測流量と面積換算により算出した。潮位は、口之津潮位観測所と太浦潮位観測所の潮位データを使用した。



図-38 有明海海域の2次元有限容積モデル

本研究で、ダム群連携事業の影響を把握するために、筑後川が流入するエレメント9の計算結果を用いて検討する。

陸域からの流出量は河川の実測流量を面積地から計算した。陸域の負荷は順流域と残留域からの負荷をまとめた。順流域からの負荷は有明海に流入する各一級河川のL-Q式から求め、残留域からの負荷は原単位を用いて計算した。各河川のL-Q式の係数を表-3に示す。残留域から排出された負荷は生活由来と考えられるため、毎年同じ原単位を用いた。

表-3 有明海の流入河川の L-Q 式

流入河川	L-Q 式(COD)
緑川	$L=Q^{1.211083}$
白川	$L=2.228Q^{1.026}$
菊池川	$L=2Q^{1.105621}$
矢部川	$L=1.5Q^{1.150515}$
筑後川	$L=3.001575Q^{0.999913}$
嘉瀬川	$L=1.2Q^{1.125906}$
六角川	$L=2.8Q^{1.125906}$
本明川	$L=5.786771Q$

COD は溶解性(DCOD)と懸濁性(PCOD)の和とした。各エレメントにおけるCODの物質保存式を式(15)～式(17)に示す。計算期間は 1977 年～2016 年とし、計算ステップは 1 日である。

$$COD_n = DCOD_n + PCOD_n \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt}(V_n \cdot DCOD_n) = \sum_m [Q_{nm} \{ \delta_{nm} \cdot DCOD_m + (1 - \delta_{nm}) DCOD_n \} + E'_{nm} (DCOD_m - DCOD_n)] + LDCOD_n + R_{r,n} \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt}(V_n \cdot PCOD_n) = \sum_m [Q_{nm} \{ \delta_{nm} \cdot PCOD_m + (1 - \delta_{nm}) PCOD_n \} + E'_{nm} (PCOD_m - PCOD_n)] + LPCOD_n + R_{res,n} - R_{sed,n} \quad (17)$$

COD_n : エレメント n の COD 濃度(mg/l); DCOD_n : エレメント n の溶解性 COD 濃度(mg/l);
 PCOD_n : エレメント n の懸濁性 COD 濃度(mg/l); V : 水の体積(m³); Q_{nm} : エレメント m からエレメント n への流入量(m³/s); δ_{nm} : エレメント m からエレメント n に移流係数; E'_{nm} : エレメント m とエレメント n の分散係数; LDCOD_n : エレメント n への陸域から DCOD の流入負荷(g/day); LPCOD_n : エレメント n への陸域から PCOD の流入負荷(g/day); R_{r,n} : エレメント n の DCOD の溶出量(g/day); R_{res,n} : エレメント n の SS の巻き上げ由来の COD(g/day); R_{sed,n} : エレメント n の PCOD の沈降量(g/day); n, m : エレメント番号

6 水質モデルの検証及び水質解析

6.1 寺内ダム

6.1.1 寺内ダムの水質モデルの検証

図-39 に寺内ダムの表層における 1994 年～2017 年の成層期(4 月～11 月)の COD の再現結果を示す。曝気循環装置の運用を考慮することによって COD の減少を概ね再現できた。曝気循環による藻類抑制の効果も確認できる。



図-39 寺内ダムの表層における COD の再現結果

6.1.2 寺内ダムにおける曝気循環の効果に関する検討

流入負荷に加えて内部生産及び沈降を考慮した COD の計算結果を図-40 に示す。曝気循環装置を設置した期間において計算結果は実測値を上回っており、この乖離から曝気循環の効果が確認できる。

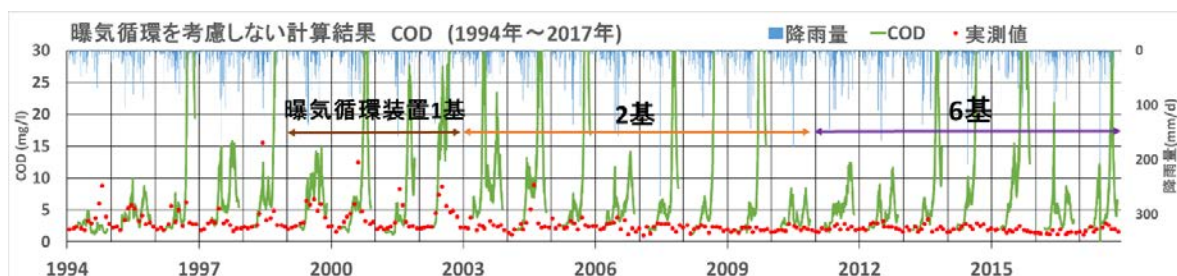


図-40 曝気循環を考慮しない寺内ダムの表層における COD の計算結果

6.1.3 寺内ダムにおける流入負荷の影響に関する検討

流入負荷のみ考慮した COD の計算結果を図-41 に示す。計算値は実測値を下回っていることから、流入負荷の影響は低いことが確認できる。また、2004 年以降、内部生産量が低下していることが分かる。

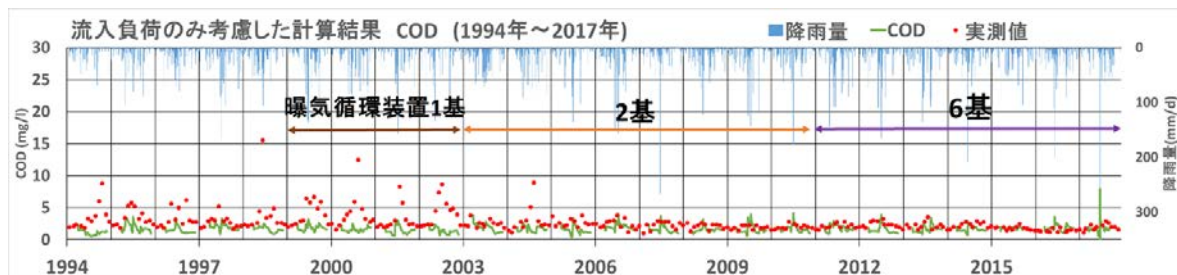


図-41 流入負荷のみ考慮した寺内ダムの表層における COD の計算結果

6.2 江川ダム

6.2.1 江川ダムの水質モデルの検証

江川ダムの表層における 2012 年～2014 年の成層期(4 月～12 月)の COD の再現結果を図-42 に示す。2012 年において COD が高い値を示す 9 月～10 月を除いて概ね良好な再現結果が得られた。2013 年 4 月～7 月に概ね再現できたが 2013 年 8 月以降及び 2014 年 4 月～12 月の再現性に改善の余地がある。収集した情報の都合によりモデル検証の期間が短いため、モデル検証の期間の延長による水質モデルの改良が今後の課題である。

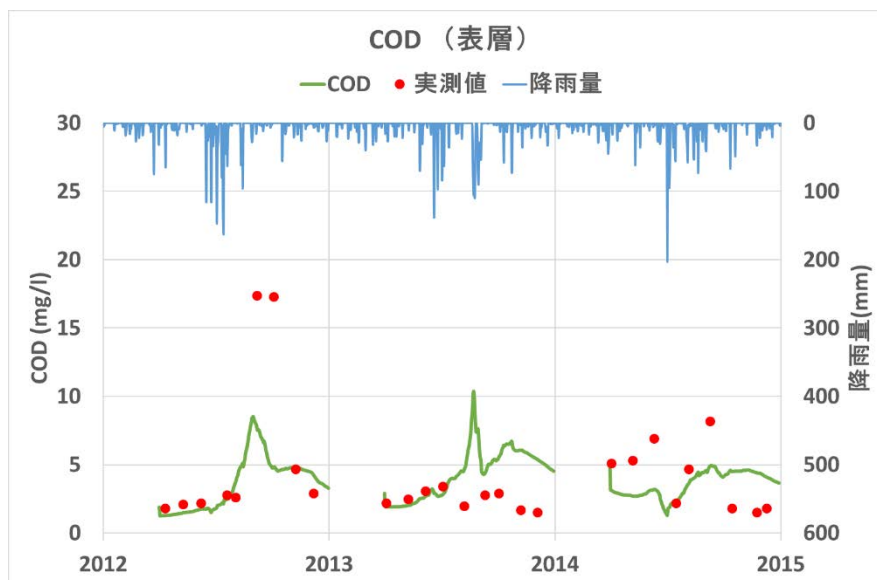


図-42 江川ダムの表層における COD の再現結果

6.2.2 江川ダムにおける流入負荷の影響に関する検討

ダム群連携事業の導水による影響を把握するために江川ダムの現状において上流からの流入負荷の影響を検討する必要がある。COD の流入負荷のみ考慮した計算結果を図-43 に示す。計算結果が実測値を下回っており、成層期において江川ダムの COD は流入負荷の影響に加えて内部生産の影響を受けていることが分かる。

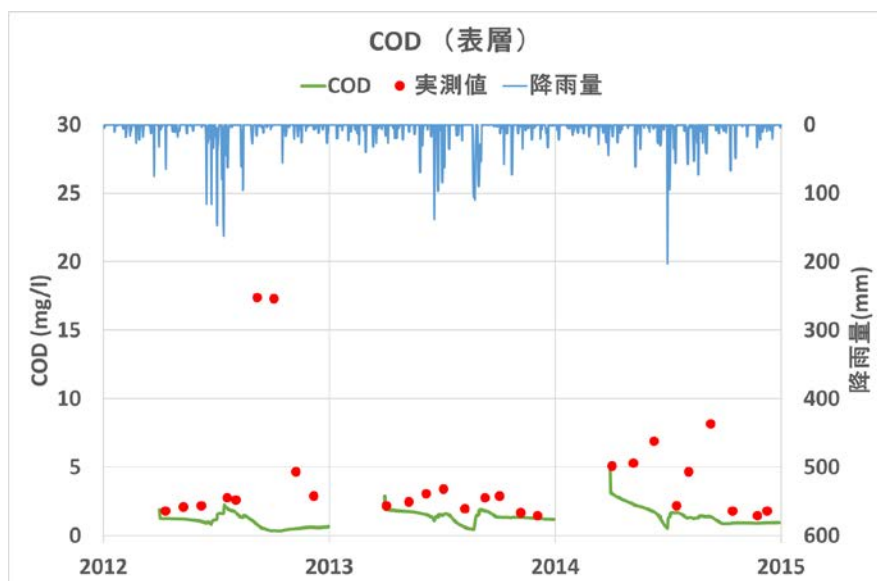


図-43 流入負荷のみ考慮した江川ダムの表層における COD の計算結果

6.3 筑後大堰湛水域

6.3.1 筑後大堰湛水域の水質モデルの検証

図-44 に筑後大堰湛水域の水質モデルから得られた COD の再現結果を示す。再現性に関して、改善の余地があるが、ほぼ再現できていると言える。藻類種の考慮による再現性の向上が今後の課題である。

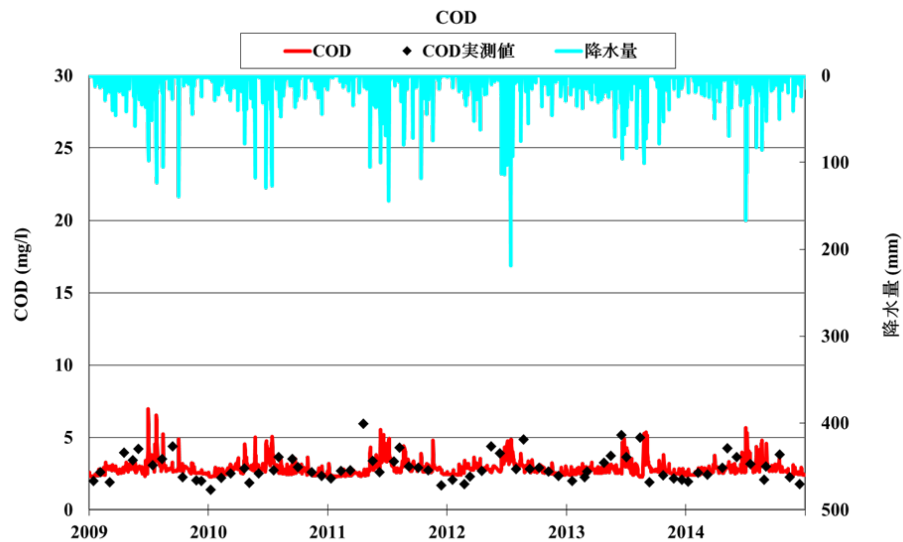


図-44 筑後大堰湛水域における COD の再現結果 (2009 年～2014 年)

2009 年以降のパラメータを用いて 30 年間 (1985～2014 年) の COD を計算した結果を図-45 に示す。同一パラメータを用いることで概ね良好な再現結果が得られるため、COD の挙動に大きな変化は生じていないと言える。

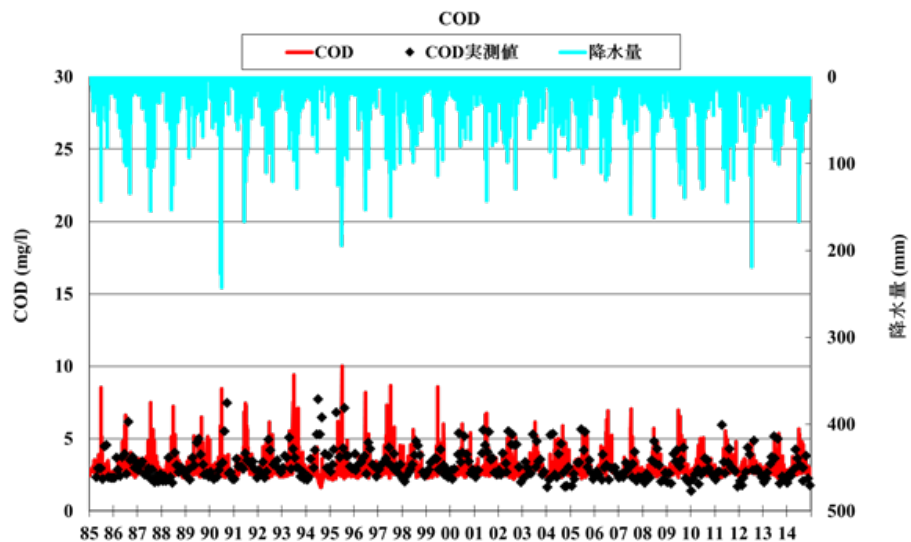


図-45 筑後大堰湛水域における COD の長期的な再現結果 (1985 年～2014 年)

6.3.2 筑後大堰湛水域における流入負荷の影響に関する検討

図-46 に流入負荷のみを考慮した計算結果を示す。流入負荷のみを考慮した計算結果は実測値とほぼ同じレベルであることから、筑後大堰湛水域において流入負荷の影響が強いことが分かる。

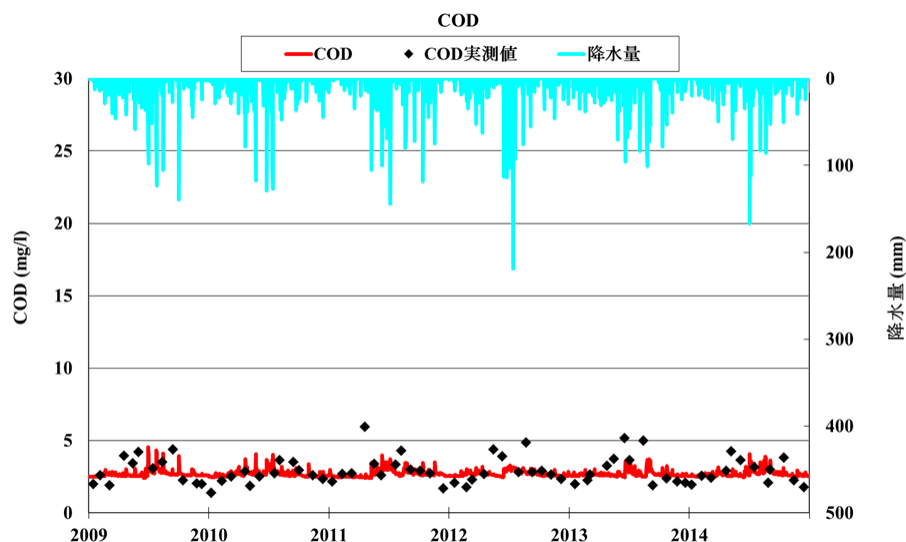


図-46 流入負荷のみ考慮した筑後大堰湛水域における COD の計算結果

図-47 に筑後川本川(E 地点)と宝満川(F 地点)の月間流量の比率、表-4 に総負荷量の比率を示す。図-47 に示すように E 地点の流量に比べ、F 地点は約 4 分の 1 の流量であるが、本研究で用いた L-Q 回帰式による計算では、F 地点の総負荷量は E 地点の約 3 分の 1 を有しており、宝満川の流入負荷は無視できない量であることが分かる¹⁷⁾。なお、より正確な比率を得るために今回用いた L-Q 回帰式の精度向上が今後の課題である。

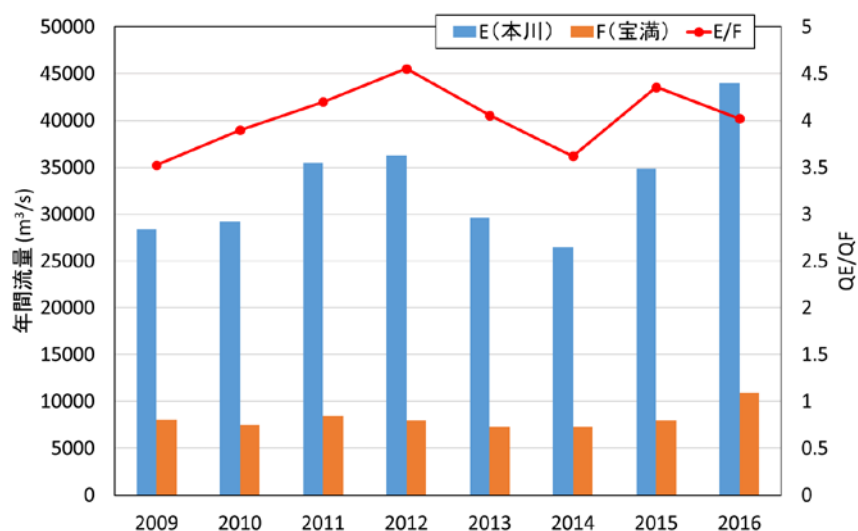


図-47 筑後川本川(E 地点)と宝満川(F 地点)の月間流量の比率

表-4 筑後大堰湛水域の流入河川の L-Q 式

	年間 COD 総負荷量		比率 (E/F)
	E 地点	F 地点	
2009	80910	30674	2.64
2010	83025	28339	2.93
2011	101780	32071	3.17
2013	84491	27633	3.06
2014	75102	27617	2.72
2015	99567	30174	3.30
2016	126489	41694	3.03
2017	82216	29188	2.82
平均			2.96

※2012 年に欠測の回数が多いため、比較対象外とした。

6.4 筑後川感潮域の水質モデルの検証

図-48～図-49 に筑後川感潮域の水質モデルによる塩分濃度の再現結果を示す。エレメント 1 の六五郎橋地点において実測値と乖離が見られる。エレメント 2 の諸富橋地点では、低濃度では良好な結果が得られたが高濃度に乖離が見られる。全ての計算期間において妥当な移流係数及び分散係数が得られなかった。

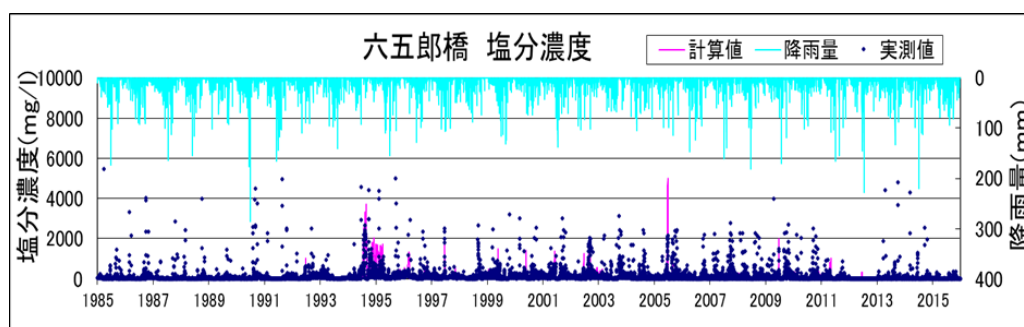


図-48 エレメント 1(六五郎橋地点)の塩分濃度の再現結果

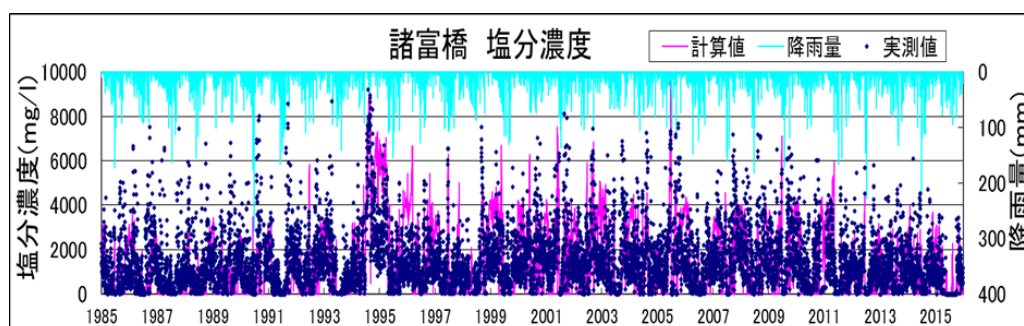


図-49 エレメント 2(諸富橋地点)の塩分濃度の再現結果

COD または他の水質の計算を行う際、正確な移流係数及び分散係数が必要である。本研究の塩分濃度の再現性に改善の余地があるため、COD を計算する前に塩分濃度の再現性を向上させることが必要不可欠である。塩分濃度の再現性の改善には潮位変動の特性を分析する必要がある

と考えられ、更なる情報収集が必要である。以上のことから、塩分濃度の再現性の改善及び COD の再現が今後の課題となる。

6.5 有明海湾奥部

6.5.1 有明海の水質モデルの検証

図-50 に有明海の水質モデルから得られた筑後川河口付近であるエレメント 9 の COD の再現結果を示す。図-50 から COD の再現結果は概ね良好であることが確認された。

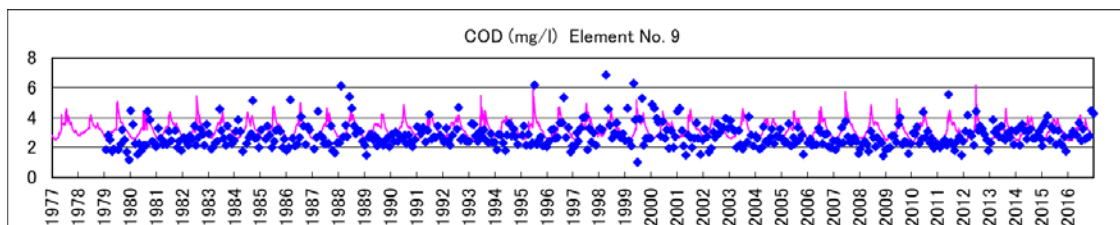


図-50 有明海湾奥部の筑後川河口付近(エレメント 9)の COD の再現結果

6.5.2 有明海湾奥部における流入負荷の影響に関する検討

図-51 に陸域からの流入負荷のみを考慮した COD の計算結果を示す。流入負荷のみを考慮した計算結果は実測値より大幅に下回っており、計算値と実測値の差は内部生産の影響を示している。図-51 から有明海湾奥部の COD は流入負荷に加えて、内部生産の影響を強く受けていることが分かる。

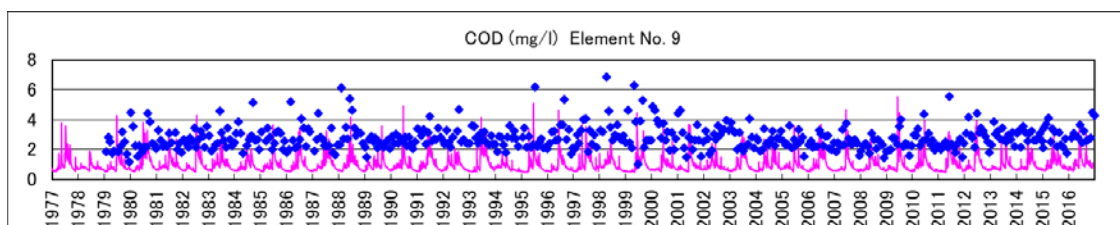


図-51 エレメント 9 の陸域からの負荷のみ考慮した COD の計算結果

6.5.3 有明海湾奥部における内部生産の影響に関する検討

図-52 に内部生産を考慮しない COD の計算結果を示す。全体的に計算値は実測値より下回っており、筑後川河口付近の COD は内部生産の影響を受けていることが確認できる。

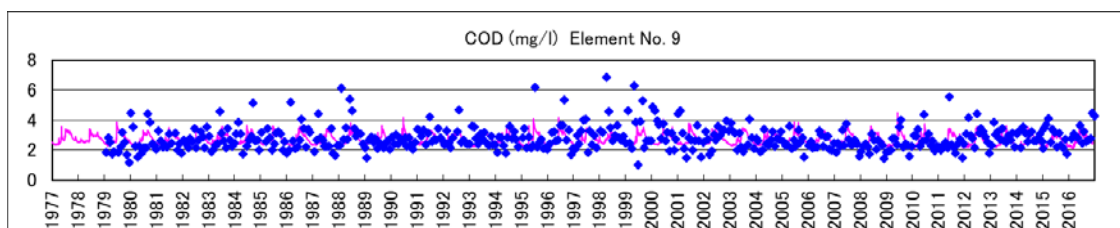


図-52 エレメント 9 の内部生産を考慮しない COD の計算結果

7 筑後川水系ダム群連携事業の導水による影響の分析

図-53 にダム群連携事業の仕組みを示す。筑後川本川の流量が豊富な時にポンプで最大 $2.0\text{m}^3/\text{s}$ を佐田川の本和田地点まで導水し、江川ダム、寺内ダム、小石原川ダムの利水容量の空き容量を活用する計画となっていることが分かる。

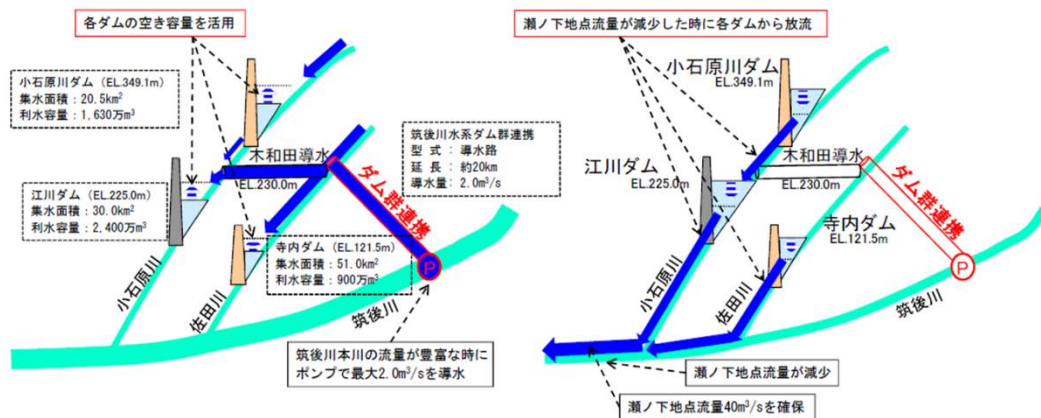


図-53 筑後川水系ダム群連携事業の仕組み²⁾

「6 水質モデルの検証及び水質解析」より各対象水域の水質モデルを検証した結果は以下の通りである。

再現性は概ね良好: 寺内ダム、筑後大堰湛水域、有明海湾奥部

再現性の改善が必要: 江川ダム、筑後川感潮域

以上の結果から、ダム群連携事業の導水による影響の分析が可能な対象水域は寺内ダムのみである。成層期に筑後川本川(荒瀬地点)から寺内ダムの上流に毎日 $2.0\text{m}^3/\text{s}$ の導水が行われるシナリオを想定し、寺内ダムの水質モデルの境界条件に筑後川本川からの流入負荷が追加されるように計算する。L-Q 式から荒瀬地点の COD 濃度は一定で約 $2\text{mg}/\text{l}$ である。

図-54 に筑後川本川から導水が行われる場合と導水がない場合の寺内ダムの COD の比較を示す。導水がある場合の COD は導水がない場合より低くなっており、曝気循環装置が 6 基の場合は COD の差が最も小さい。COD の減少は導水による希釈の効果が推測される。より正確な評価結果を得るために寺内ダムの水質モデルの再現性を改善する必要がある。

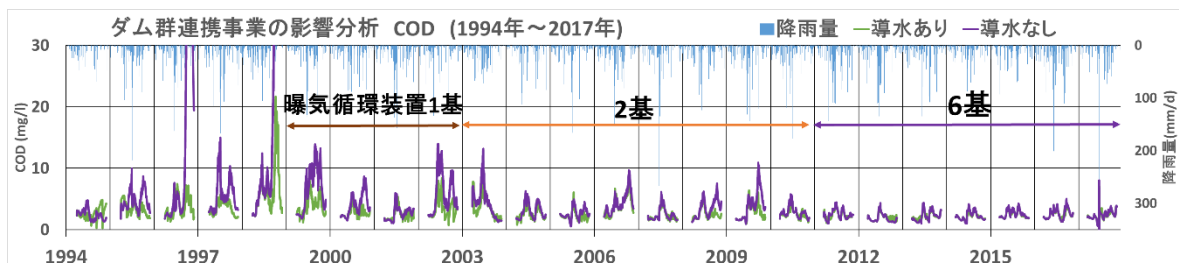


図-54 寺内ダム貯水池におけるダム群連携事業の導水による影響

まとめ

本研究では、総合的な水質管理の観点から筑後川水系ダム群連携事業の各対象水域の水質モデルを構築し、筑後川水系ダム群連携事業による影響を分析することを試みたものである。

収集したデータの都合により、各水質モデルの計算期間が異なり、一部の水質モデルに改善及び更なる情報収集が必要である。モデル検証の結果から、寺内ダム、筑後大堰湛水域、有明海湾奥部の水質モデルの再現性は概ね良好であり、江川ダム及び筑後川感潮域の水質モデルの再現性を改善する必要がある。より正確な計算結果を得るために各水質モデルの改善及び佐田川・筑後川本川のモデル作成及びモデル検証が今後の課題である。

ダム群連携事業の導水による影響の分析が可能な対象水域は寺内ダムのみであることから、筑後川本川から導水が行われる場合の計算結果は導水がない場合より減少した傾向が見られる。また、曝気循環装置の数によって COD の差も異なり、曝気循環装置が 6 基の場合は COD の差が最も小さい。以上のことから COD の減少は導水による希釈の効果が推測される。なお、より正確な評価結果を得るために寺内ダムの水質モデルの再現性を改善する必要がある。

本研究で得られた研究成果を踏まえて、構築された水質モデルを改善することによって筑後川水系ダム群連携事業の全体の影響評価を目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省：水資源開発基本計画(フルプラン)
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000005.html
- 2) 国土交通省 九州地方整備局：筑後川水系ダム群連携事業の検証に係る検討報告書(原案)
案、平成 28 年 6 月, http://www.qsr.mlit.go.jp/n-kawa/kensyo/04-damugunrenkei/160614-genan_an/houkokusyo/houkokuyo_genan_an_damugunrenkei.pdf
- 3) 独立行政法人水資源機構両筑平野用水管理所：両筑平野用水事業概要
https://www.water.go.jp/chikugo/ryochiku/pdf/h27_outline.pdf
- 4) 独立行政法人水資源機構 両筑平野用水管理所：両筑平野用水二期事業パンフレット
https://www.water.go.jp/chikugo/ryochiku/pdf/sec_term.pdf
- 5) 独立行政法人水資源機構 朝倉総合事業所 寺内ダム管理所ホームページ：
<http://www.water.go.jp.chikugo/terauchi>
- 6) 独立行政法人水資源機構：水質年報（寺内ダム）：
<http://www.water.go.jp/honsya/honsya/torikumi/kankyo/suisitu/index.html>
- 7) 独立行政法人 水資源機構 筑後川局 筑後大堰管理室：筑後大堰ちつごと共に歩む, 2017.
http://www.water.go.jp/chikugo/coozeki/images/top_img/2017oozekigaiyo.pdf
- 8) 北島 洸平：透明度から見た有明海の懸濁性物質の挙動に関する研究，佐賀大学卒業論文，2012.
- 9) 3) 黒木 翔太，丸野凌司，V. Narumol，佐々木 広光，古賀 憲一：曝気循環を考慮した寺内ダム表水層における水質解析，平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会，pp.811-812，2019.
- 10))独立行政法人水資源機構：平成 29 年 水質年報(江川ダム)
http://www.water.go.jp/honsya/honsya/torikumi/kankyo/suisitu/h29_suisitu.html
- 11) 馬場進：低次生態系モデルを用いた筑後川感潮域の内部生産特性に関する研究，佐賀大学卒業論文，2014.

- 12) 永瀬真豪, 古賀憲一, 荒木宏之, 山西博幸, V. Narumol: 筑後川感潮域における栄養塩の挙動に関する研究、平成 25 年度全国大会第 68 回年次学術講演会, 土木学会, VII-116.
- 13) 梅田信, 宮崎貴紅子, 富岡誠司: 曝気式循環施設により生じる貯水池内流動の現地観測, 土木学会論文集 No. 775/II-69, pp.55-68, 2004.
- 14) 阪田 真由子, V. Narumol, 佐々木 広光, 古賀 憲一: 筑後大堰湛水域における内部生産の変動に関する研究, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, pp.775-776, 2017.
- 15) 長谷川 雄一, V. Narumol, 佐々木 広光, 古賀 憲一: 筑後川感潮域における栄養塩及び内部生産特性に関する研究, 平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会, pp.841-842, 2019.
- 16) 諸石 直人, V. Narumol, 佐々木 広光, 古賀 憲一: 有限容積モデルを用いた有明海の内部生産特性に関する解析, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, pp.769-770, 2018.
- 17) 田平 健介, V. Narumol, 佐々木 広光, 古賀 憲一: 宝満川の水質特性に関する基礎的研究, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, pp.741-742, 2018.