

大船渡湾の陸域からの汚濁負荷源の解析と 改善に向けた対策の抽出

辻 盛生*・岩渕 勝己**

要 旨 大船渡湾は閉鎖性水域であり、恒常的な水質悪化が課題であった。東日本大震災に伴う津波の影響により、水交換が行われたことで湾内の水質は改善したものの、近年悪化傾向が見られる。ここでは、その対策に向けた現状把握として、陸域からの負荷要因の解析を試みた。その結果、河川よりも都市下水路において、BOD、全窒素、全リン共に濃度が高く、結果として負荷量も相対的に多くなる傾向が見られた。富栄養化の要因とされる全窒素、全リンは、都市下水路合計で大船渡湾への流入負荷量の2割を占め、流量が少なく濃度が比較的高い都市下水路の浄化対策の必要性が浮かび上がった。公共下水道に未接続の排水が残存し、都市下水路に流入していることを示唆する結果であり、これらの接続を促す必要がある。さらに、都市下水路は河川に比べ易分解性有機物の占める割合が高いことから、直接浄化による対策も検討の余地がある。

キーワード 閉鎖性水域 流入負荷 都市下水路 易分解性有機物

1. 背景・目的

大船渡湾は最大水深 38 m と比較的深く、閉鎖度指標が 14.0 と極めて高い閉鎖性水域である (図 1)。1972 年以降岩手県による公共用水域水質測定が実施され、水質のモニタリングが継続されている。1972 年に行われた水域の類型指定では、大船渡湾は A 類型であり、水中有機物の指標である COD (化学的酸素要求量) の環境基準は 2.0 mg/L 未満が当てはめられた。しかしながら、公共用水域水質測定結果では、湾口防波堤外 (S-33) では COD75% 値において概ね環境基準を満たしているものの、湾奥部 (S-31)、中央部 (S-32) では基準を満たせない年度が多い傾向が見られた (図 2)。その過程では、1990 年に岩手県による「大船渡湾水質管理計画」が、2000 年には岩手県と大船渡市の共同で「大船渡湾水環境保全計画」を策定すると共に、「大船渡湾水環境保全計画推

進協議会」を設置した。2004 年には「大船渡湾水環境保全アクションプラン」を加え、大船渡湾の水質改善に向けた対策を実施してきた。図 2 を見ると、湾奥部、湾中央部における COD75% 値は、環境基準である 2 mg/L を上回ってはいるものの、2010 年までに若干ではあるが改善に向かう傾向が見られた。

そのような中、2011 年の東日本大震災に伴う津波の影響により、湾口防波堤が破壊され、外洋との水交換が行われたことで湾内の水質は一時的に改善した。2017 年に新たに作られた湾口防波堤は、震災前のものに比べると水交換が容易に行えるよう配慮した構造になっているものの、湾奥部において再び COD の環境基準を上回る傾向が見られ、震災前の状況に戻りつつある。

震災前においては、岩渕による大船渡湾への陸域からの流入負荷量の見積り²⁾が行われている

* 岩手県立大学総合政策学部 〒020-0693 岩手県滝沢市菓子 152-52 m_tsuji@iwate-pu.ac.jp

** 岩手県大船渡保健福祉環境センター 〒022-8502 岩手県大船渡市猪川町字前田 6-1 kt-iwabuchi@pref.iwate.jp

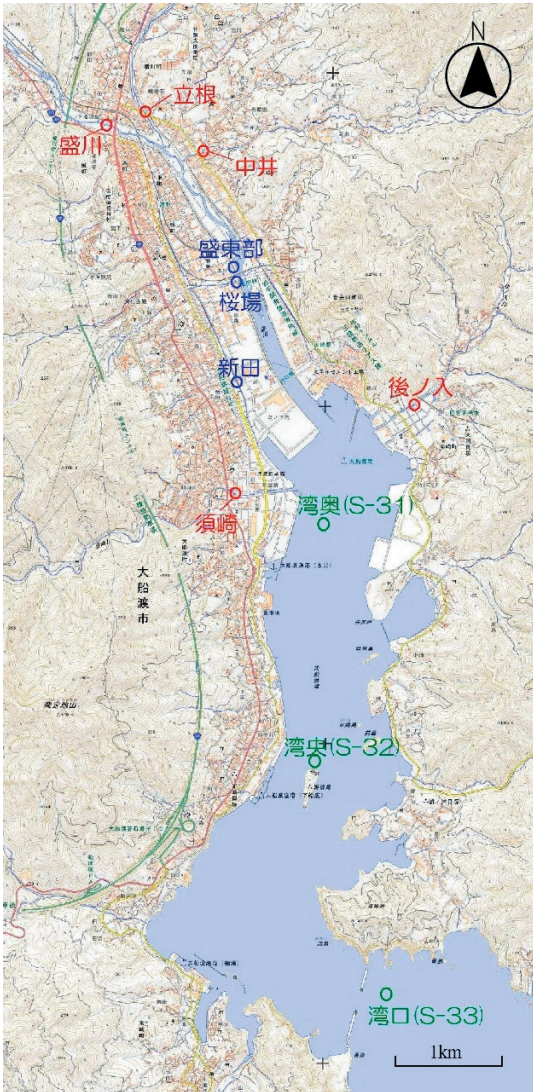


図1 大船渡湾調査地点
(地理院地図より加筆引用。)

が、津波の被害により事業所の構成や施設に変更が生じた震災後の状況は明らかではない。そこで、現在の大船渡湾への負荷量の現状を把握すると共に、対策が必要なポイントの抽出および実施可能と考えられる対策の検討を試みた。

2. 材料および方法

現地調査は、2021年5月から2022年3月までの間、概ね1回/月の頻度で12回実施した。調

査日は、2021年5月4日、6月2日、7月1日、8月2日、9月1日、9月29日、10月27日、11月26日、12月22日、2022年1月15日、2月5日、3月5日である。測定はそれぞれの河川が合流する前の地点で、盛川、立根川、中井川、後ノ入川、須崎川の5河川と、新田都市下水路、桜場都市下水路、盛東部都市下水路の計8箇所とした(図1)。なお、新田都市下水路は潮汐の影響を受けることから、満潮時には流量測定場所を自然流下が見られる上流側に移した。水質は、現地にて水温、電気伝導度(EC)、溶存酸素(DO)、pHについて携帯型水質測定機器を用いて測定した。500ccのサンプルを持ち帰り、有機物の指標としてBOD、COD、全窒素(TN)、全リン(TP)、溶存物質(イオン)として硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)を測定した。測定に用いた機器を表1に示した。なお、 $\text{TN} - (\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N})$ を有機態窒素(Org-N)、 $\text{TP} - \text{PO}_4\text{-P}$ を有機態リン(Org-P)とした。また、日流量は、現地の状況に応じて河川を横断方向に分割し、水深を測定して断面積を、水深測定点間の中央において6割水深で流速を測定し、断面積と流速の積から流量を求めた。負荷量は、各測定回の水質測定結果の濃度と日流量の積から日あたり負荷量(kg/日)を求めた。

大船渡浄化センター(下水処理施設)の処理水は、新田都市下水路の測定地点より下流側で放流されていることから、別途大船渡市より資料⁹⁾を得て加えた。また、大船渡湾に直接排水処理水を放流する事業所に関するデータについては、岩手県大船渡保健福祉環境センターの協力を得た。

気象に関する情報は、アメダス大船渡観測所の情報に基づいた。

3. 結果および考察

3.1. 調査期間の気象条件と各測定地点の概況

調査期間中の日平均気温、日降水量および調査日を図3に、調査期間中の流量の推移を図4に示す。5月4日の調査時においては、4月29日～5

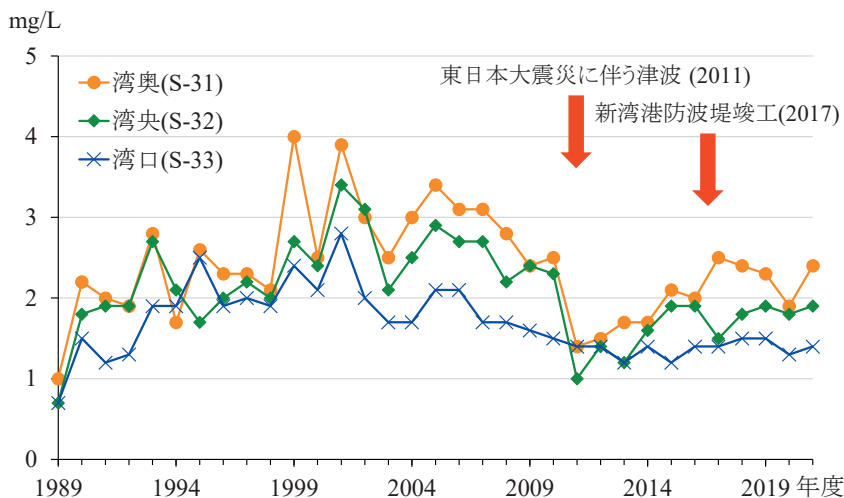


図2 大船渡湾における湾奥，湾央，湾口表層水のCOD75%値の推移
(岩手県公用水域水質測定結果より加筆引用。2021年度の値は速報値。)

表1 各測定に用いた機器

測定項目	測定方法	使用機器
主要イオン	イオンクロマトグラフ法	Thermo Fisher, IC1100 (column: AS23, CS16)
EC	電極法	東亜-DKK, CM21
pH	電極法	TOKO, TPX-999i
DO	光学式センサ法	WTW, MonoLine Oxi 3310
濁度	散乱光法(ポリスチレン)	共立理科学研究所, DTC-4DG
BOD	5日間培養法	WTW, MonoLine Oxi 3310
COD	過マンガン酸カリウム法	Hach, DR3900
TN	ペルオキシ二硫酸カリウム分解 ナフチルエチレンジアミン吸光度法	Hach, DR3900
TP	ペルオキシ二硫酸カリウム分解 モリブデンブルー吸光度法	Hach, DR3900
流速	簡易型プロベラ式流速計	KENEK, VR-201

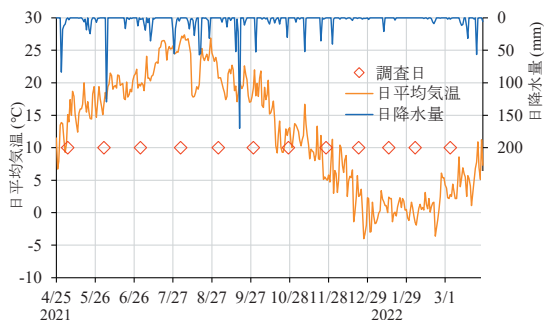


図3 調査期間中の気温、降水量

月2日にかけて総雨量100mmを越える降水があり、流量は多かった。特に流域面積の広い盛川、立根川の増加が目立った。8月2日も各河川とも比較的流量が多い傾向が見られた。前日8月1日の14時頃に4.5mmの降水を確認したが、7月27～29日にかけて総雨量90mmを越える降水があったことが影響したと考えられる。

各地点の日流量平均値を図5に示す。盛川からの流入水量が湾への流入水量の7割以上を占めた。立根川が1割、須崎川、後ノ入川、中井川は5%未満であった。都市下水路は、桜場、新田、盛東

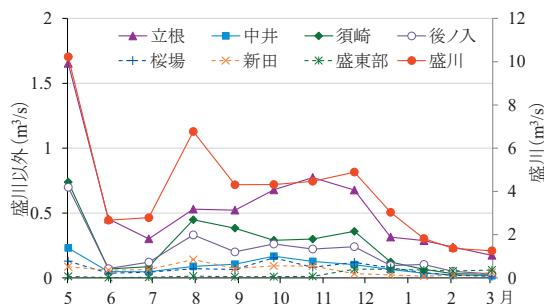


図4 調査期間中の流量の推移

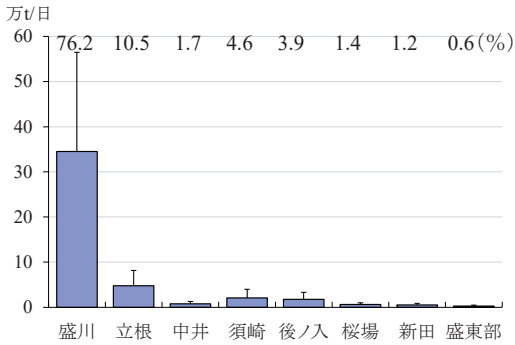


図5 各測定地点の日流量平均値
(エラーバーは標準偏差を示す。)

部合わせて3.2%と流量としては少なかった。なお、盛東部都市下水路は、11月の調査以降流量が増加した。

3.2. 各調査地点における水温, pH, ECの状況

各測定地点の水温, pH, ECの測定期間内の推移を図6に示す。

盛川, 立根川, 中井川, 須崎川の水温は、各測定回において2~4℃の差は見られるものの、季節変化は類似した(図6-a)。後ノ入川の水温の傾向は上記河川とは異なり、最大値が9月に現れ、冬期の水温が5℃程度高い傾向が見られた。流量が少ないときは調査地点の上流側で瀬切れが生じた状況から、測定地点において河床から伏流水が流出していたと考えられる。都市下水路は、冬季に高く推移する傾向が見られた。温排水による影響が考えられるが、所々で河床から湧水が確認されたことも影響している可能性がある。

pHは、盛川で平均8.1、標準偏差0.20と比較的高い値を維持しつつ安定する傾向が見られた(図6-b))。pHが比較的高いのは集水域に存在する石灰岩を含む堆積岩¹⁰⁾が影響したと考えられる。なお、盛川以外の河川流域には石灰岩を含む堆積岩の地質構造は見られない。立根川, 中井川, 須崎川のpHは、2~3月に上昇する傾向が見られた。これは、流量が減少、安定して攪乱が減少する冬期に、河床に繁茂した藻類の炭酸同化作用によって相対的にpHが上昇したため⁷⁾と考えられる。他方で、伏流水が多い後ノ入川のpHは、

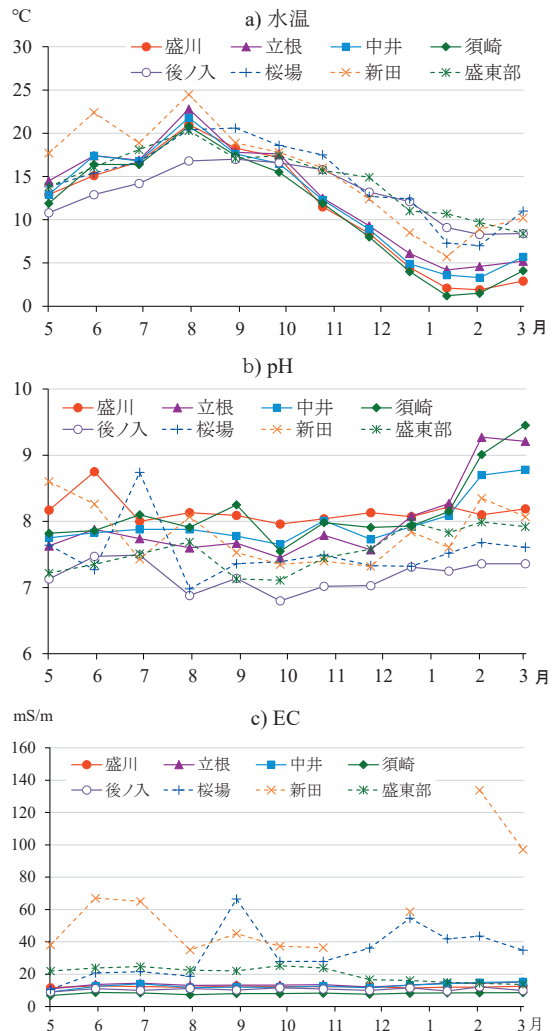


図6 各地点における測定期間中の水温, pH, EC値の推移(新田都市下水路のEC値は、海水の影響を強く受けた11月, 1月の値を除外した。)

平均7.2、標準偏差は0.22であり、最も低く安定した。

ECは、各河川においては10~15 mS/mの値で比較的安定した(図6-c))。中でも、須崎川の値は8 mS/m前後と低い傾向が見られた。一方、都市下水路では、桜場, 新田でEC値は不安定に上昇したことから、河川とは異なる溶存態の汚濁負荷の流入が懸念された。なお、新田都市下水路では、11月26日, および1月15日の測定が満潮

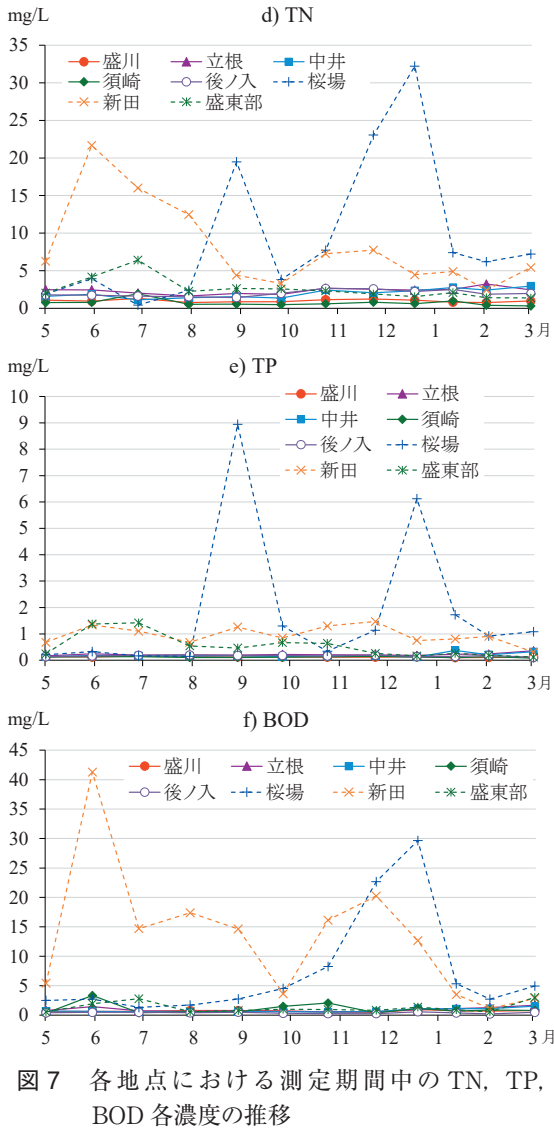


図7 各地点における測定期間中のTN, TP, BOD各濃度の推移

時に近く、それぞれ 1,524 mS/m, 274 mS/m と海水の影響を受けていたと考えられることから EC の結果から除外した。また、盛東部都市下水路において、11月の調査日から水量の増加が見られたものの EC 値は低下しており、流量の増加は汚水の増加によるものではないと考えられる。

3.3. 各調査地点における栄養塩, 有機物の状況

各測定地点の全窒素 (TN), 全リン (TP), BOD 各濃度の測定期間内の推移を図7に、各測

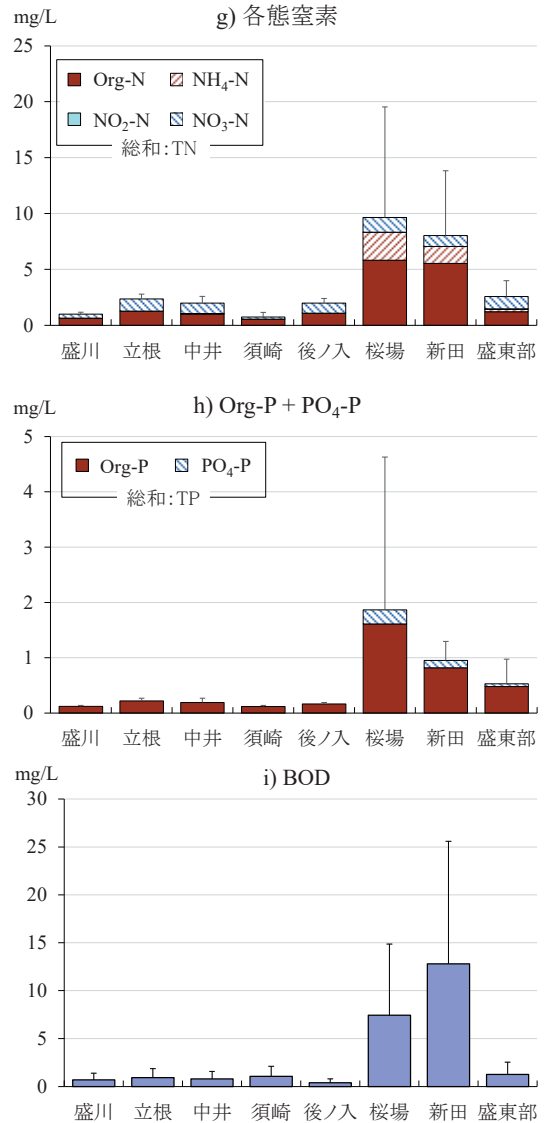


図8 各調査地点の窒素, リン, BOD 各濃度の平均値 (エラーバーは標準偏差を示す。)

定地点の平均値を図8に示す。なお、図8の各態窒素は、有機態窒素を示す Org-N に、溶存態窒素の NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N を積み重ねグラフで示したもので、上端の値およびエラーバーの標準偏差は TN のものである。なお、大船渡浄化センターの 2021 年度における放流水の濃度平均値は TN : 5.4 mg/L, TP : 0.5 mg/L, BOD : 2.0

mg/Lであった⁹⁾。

窒素の状況を見ると、各河川ともに低く安定していた(図7-d, 図8-g))。盛川、須崎川のTN濃度平均値は1 mg/Lを下回り、低い傾向が見られた。立根川、中井川、後ノ入川のTN濃度平均値は2 mg/L前後であり、盛川や須崎川に比べれば2倍以上の値である。立根川流域は公共下水道が未整備であったことが影響したと考えられる。中井川、後ノ入川流域は下水道整備がなされているものの、流量が少ないことから希釈効果が働きにくく、農地への施肥などの面源負荷を含む人為の影響の指標となるNO₃-Nが残る¹⁴⁾結果となったと考えられる。一方、盛川や須崎川ではNO₃-N濃度は0.5 mg/L未満と低かった。盛川や須崎川における窒素負荷の多くは、上流部からもたらされる落ち葉や水生生物の遺骸などの環境由来、あるいは降水中の窒素酸化物由来であると考えられる。

他方で、桜場、新田両都市下水路においてTN濃度平均値はそれぞれ9.6 mg/L, 8.0 mg/Lと高く、ばらつきも大きかった。Org-Nが占める割合が高く、NH₄-Nも見られたことから、排出されて間もない有機物由来の窒素であることが想定された。浄化センター処理水より高い濃度であり、処理が不十分、あるいは未処理の放流水の存在が裏付けられた。なお、浄化センターの2021年におけるTN濃度は平均で5.4 mg/Lと排水基準を満たしたが、除去率は64.2%と基本計画における除去率より低く⁹⁾改善の余地が残された。

リンについては、河川においては低い値で安定しており、溶存態であるPO₄-Pは検出されなかった(図7-e, 図8-h))。都市下水路においてTP濃度が高くばらつきも大きくなった。窒素と同様に有機態が多く、ここでも排水からの汚濁負荷が示唆された。

BOD濃度を見ると、河川では概ね1 mg/L未満と低く、都市下水路で高い結果となった。河川では須崎川において6月、10月にそれぞれ3.3 mg/L, 2.1 mg/Lと若干高いBOD濃度となった。これは上流側で草刈りや川遊びが行われており、

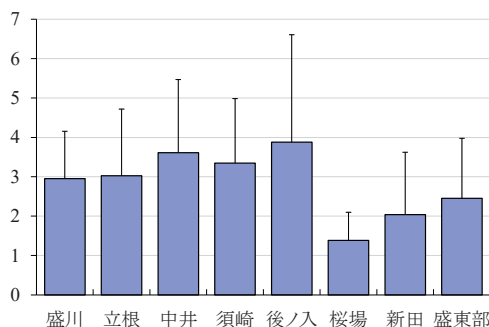


図9 各測定地点におけるCOD/BOD濃度比
(エラーバーは標準偏差を示す。)

河床に沈降していた有機物が流されたためと考えられる。都市下水路におけるBOD濃度の変動は大きく、新田では6月に最大41.2 mg/L、桜場では12月に30.0 mg/Lを記録した。なお、浄化センター放流水のBOD濃度は2.0 mg/Lである。都市下水路は流量が少なく、水質汚濁防止法の規制対象外である小規模事業場からの排水、公共下水道に接続していない家庭からの雑排水、家庭用浄化槽の放流水などの影響が考えられる。図9に各測定地点におけるCOD/BOD濃度比の平均値を示す。一般的にBODとして測定される有機物は微生物によって分解されやすい物質(易分解性有機物)であり、CODとして測定される有機物は酸化剤により分解することからBODよりも分解されにくい物質(難分解性有機物)が含まれる¹⁾。都市下水路ではCOD/BOD濃度比が低い傾向が見られ、易分解性有機物が占める割合が高いといえる。一方、河川由来のCOD/BOD濃度比は高い傾向が見られ、難分解性有機物が多い傾向が見られる。琵琶湖や諫早湾干拓調整池では、流域対策による流入負荷減少にもかかわらず、水域内のCOD値の下げ止まりが指摘されている。その要因として陸域からの難分解性懸濁態有機物や、溶存態の難分解性有機物であるフミン物質が指摘されている⁴⁾。他方で、大船渡湾におけるCODとクロロフィルa濃度との相関を見ると、回帰直線はクロロフィルa濃度が0に対しCOD濃度は1 mg/L以上を示した⁸⁾。6月～9月にお

ける4ヶ月間の限られたデータであり、それ以外の状況は不明ではあるが、湾内の内部生産による植物プランクトン以外の有機物の存在を示唆しており、これが陸域河川由来の難分解性有機物と照合する可能性がある。詳細の把握は今後の課題であるが、河川からの自然由来の有機物負荷が大船渡湾のCOD値に影響を与えている可能性が示唆された。

3.4. 陸域から大船渡湾への栄養塩および有機物負荷量

窒素、リン、有機物(BOD)の大船渡湾への流入負荷の日平均値を図10に示す。なお、河川や都市下水路を経由せず直接大船渡湾に流入する負荷を「直流」、大船渡浄化センター処理水を「浄化セ」と示し、窒素、リンについてはTN、TPのみで示した。直接調査した河川および都市下水路については、有機態、溶存態それぞれの負荷量の総和をTN、TPの負荷量とした。また直流の有機物負荷についてはCODのみであったことからこれで代替した。

窒素の流入負荷量は、濃度は低いものの流量の多い盛川で全体の50%を越えた(図10-j)。なお、盛川の流量の割合は76.2%であり(図5)、流量が多いために自然由来の負荷量が多くなるものの、相対的に良好な水質であることを示す。続いて多かったのが立根川で、流量では10%程度であったが、窒素濃度の高さから窒素負荷では16.6%となった。調査時点では公共下水道が未整備であったが、整備が着手されたことから今後の改善に期待したい。濃度が高い傾向が見られた都市下水路の窒素負荷は合計で17.4%であり、立根川の16.6%を上回った。都市下水路の流量の占める割合が合計3.2%であったことを踏まえると大きな負荷といえる。なお、直流、浄化セは、合計で5%弱の負荷量であった。

リンの流入負荷量においても盛川の割合は53%と高かった。これは窒素と同様に自然由来の負荷であり、回避は困難である。立根川のリン流入負荷量は流量の割合とほぼ等しい11.9%となったが、都市下水路においては、桜場のみで14.1%と立根

川を上回った。都市下水路を合計すると21.2%であり、2割を上回った。

BOD流入負荷量においては、河川についてはそれぞれの流量の割合を下回った。一方、都市下水路の総負荷量は29.3%と3割に迫った。浄化センターのBOD負荷は2%弱であり、現在も高い都市下水路のBOD負荷量は、公共下水道に未接続の排水の残存を示す。

3.5. 大船渡湾の水質維持に向けた対応

通年の水質測定の結果、流量が多いことから盛川の負荷量が多いものの、水質は良好であった。自然由来の負荷が多くを占めると考えられることから、これ以上の改善は難しい。立根川の窒素濃度が高い傾向が見られたが、これは流域の公共下水道整備によって今後の改善が期待できる。直接大船渡湾に排水処理水を流入させる事業所は少なく、浄化センター処理水は窒素除去に改善の余地は残るものの、十分に機能しているといえる。他方で、都市下水路においては、BOD、全窒素、全リン共に濃度が高く、流量は少ないものの負荷量が大きくなった。都市下水路の窒素、リンの大船渡湾への流入負荷は合計で2割前後を占め、大船渡湾の内部生産の要因になり得る。

「都市下水路」は、雨水排水を目的とする⁵⁾ものであるが、名称からか、排水処理水や小規模事業所排水が結果として集まった。過去のデータでは1987年における新田都市下水路のCOD負荷量は66.8%と、盛川の24.4%の2倍以上であり³⁾、水生生物が生息できる条件ではなかったと推測される。一方、現在の新田都市下水路のCOD負荷量は8.2%であり、この間に都市下水路の水質は大幅に向上したことを示す。このことは、公共下水道への接続をはじめとする大船渡湾水質保全の取り組みによって改善したことを示すが、改善した現在においても、公共下水道への未接続が残存することが課題として明らかになった。大船渡湾への流入負荷対策を行うとすれば都市下水路に着目すべきであり、公共下水道への接続を促す必要があると考える。

ところで、調査時に新田都市下水路には魚影が

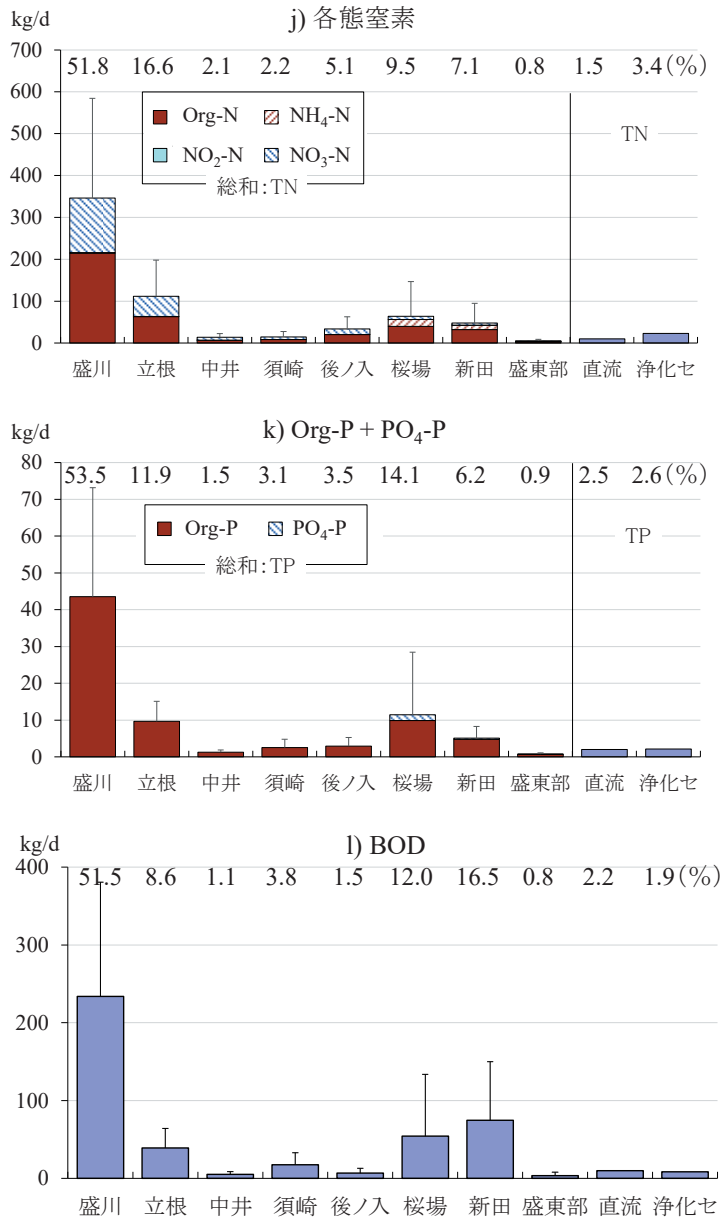


図10 大船渡湾への窒素, リン, 有機物負荷量の日平均値
(直接流入排水のBODはCODで代替。)

多く見られたが、これは魚類が生息可能な水質に改善されたことを示す。これをさらに進め、「下水路」を生物の生息が感じられる「せせらぎ」に環境改善(可能であれば「都市下水路」の名称変更)できないだろうか。生態系の回復と共に市民の意識を川に誘導する¹²⁾ことで環境意識を向上させ

ることにつなげ、延いては下水接続率の向上や放流水質への配慮につなげるのだ。

他方で、都市下水路の積極的な水質改善策も検討の余地がある。桜場、新田は比較的小流量であり、BOD、TN、TP共に自然河川に比べて明らかに高い(図8)。しかし、この濃度は直接浄化に

よる改善が期待できる程度⁶⁾である。さらに、有機物はCOD/BOD濃度比が低いことから易分解性が多く、浄化できる余地は大きい。潮汐を活用できれば自然エネルギー活用型の浄化システムとなる人工干潟¹⁵⁾で都市下水路の水を再浄化することも考えられる。

なお、大船渡湾沿岸の干潟の多くが埋め立てられたことから、湾内の自浄作用が働きにくいことも湾内の水質悪化の一因と考えられる。都市下水路に残された流入負荷の低減や浄化は残された実現可能な課題であるが、湾内のCOD値上昇に影響を与えていると考えられる河川由来の自然の負荷は回避不能であり、難分解性有機物の割合が高い。これらに対しては、湾が持つ自浄能力を修復する対策が重要性を増す¹¹⁾。急峻な地形の大船渡湾に残された数少ない干潟や浅瀬の多くは、既に埋め立てや護岸が形成されているものと考えられる。このような条件下で再生できる干潟や浅瀬は限られるが、大船渡市による干潟の再生事業も進められている¹³⁾。大船渡湾の水質悪化を防ぐためには、前述の都市下水路の人工干潟による直接浄化処理も併せ、湾内の自浄作用の修復に向けた努力を継続、発展させることが必要と考える。

謝辞

大船渡市市民生活部の伊藤真紀子氏、佐々木卓也氏、米田大祐氏、岩手県大船渡保健福祉環境センターの千葉大介氏には、調査中間報告による情報交換や情報提供をいただいた。本調査は、岩手県立大学地域協働研究事業によって実施した。記して感謝申し上げる。

引用文献

- 1) 服部廉・渡邊博・新谷建・高田文子・水野勝 (2011) 河川水中の難分解性有機物についての検討. 愛知県環境調査センター所報 39, 35-39.
- 2) 岩淵勝己 (2011) 大船渡湾に流入する汚濁負荷に関するインベントリー作成. 環境情報科学 39(4), 58-67.
- 3) 岩手県環境保険部環境公害課 (1990) きれいな大船渡湾を守り続けるために～大船渡湾水質管理計画の概要～.
- 4) 陣野宏宙・浦仲孝・桑岡莉帆・橋本京太郎・植野康成 (2019) 諫早湾干拓調整池等における有機物特性に関する研究. 水環境学会誌 42(4), 177-184.
- 5) 国土交通省, 下水道の種類. <https://www.mlit.go.jp/crd/sewera/ge/shikumi/shurui.html>, 2022年9月4日確認.
- 6) 松尾保成 (2003) 水域直接浄化システムの開発とその評価に関する研究. 佐賀大学大学院工学系研究科博士論文, pp.108-109.
- 7) 小田泰史・久保清・策俊郎・北岡宏道・上本清次 (1997) 2) 底生動物と付着藻との関係に起因する水質の変化. 熊本県保健環境科学研究所報 26, 41-44.
- 8) 大船渡市 (2019) 環境関連調査業務報告書 (要約版). pp.17-20.
- 9) 大船渡市 (2022) 大船渡市の下水道 (令和3年度版).
- 10) 産業技術総合研究所, 20万分の1日本シームレス地質図. <https://gbank.gsj.jp/seamless/v2/viewer/?center=39.1330%2C141.6821&z=12>, 2022年9月4日確認.
- 11) 相馬明郎 (2009) “富栄養化の抑制”と“豊かな生態系の回復”に関わるパラダイム転換—生態系モデルから見た閉鎖性海域修復の方向性—. 水産工学 46(2), 155-162.
- 12) 高橋達哉・吉川勝秀・山本有二 (2005) 水辺からの都市再生に関する研究報告. リバーフロント研究所報告 16, 198-205.
- 13) 東海新報 (2019) 湾内の失われた干潟,再び 市内12地点の造成完了 大船渡. <https://tohkaishimpo.com/2019/10/11/267209/>, 2022年9月14日確認.
- 14) 都築俊文・伊藤八十男・上田祥久 (1996) 水と水質汚染. 三共出版, 106 pp.
- 15) 山中亮一・上月康則・松重摩耶 (2022) 尼崎運河での水質改善を中心とした環境再生の取り組み. 水環境学会誌 45(2), 60-65.