

(タイトル)

令和 4 年度 日本大学 生産工学部 公開講座

水清ければ魚棲まず

(リード)

日本大学生産工学部の公開講座は、専任教員の専門分野と関連する“地域に開かれた教養講座”として令和 3 年度にリニューアル。令和 4 年度は環境問題を専門とする 2 名の教員が担当し、第 1 回目は「水清ければ魚棲まず」と題して、土木工学科の森田弘昭教授が登壇しました。

(プロフィール)

日本大学 生産工学部 土木工学科
教授 森田 弘昭

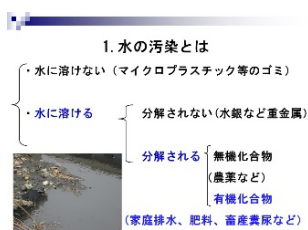
東北大学大学院土木工学科修了後、建設省（現国土交通省）入省。環境庁水質保全局水質管理課長補佐や岡山県土木部下水道課課長、熊本市副市長などを歴任したほか、社会活動として国土交通省海外技術評価委員会委員長や、千葉市下水道経営審議会委員長、環境省水環境基準検討委員会委員なども務めてきた。

(小見出し・本文)

1. 水の汚染とは

本日は、水の汚染とは何か、下水道はどのような仕組みなのか、閉鎖性水域の富栄養化とはどのようなメカニズムの現象であり、どのような対策が有効であるかといったポイントを中心に話を進めてまいります。

まず、水の汚染は大きく分けて「水に溶けないもの」と「水に溶けるもの」とで特徴が異なります。水に溶けない物質としては、海や川に出ていくマイクロプラスチックが挙げられます。水に溶ける物質には、かつて水俣病などの公害で問題となった水銀などの重金属があり、水には溶けるものの分解されることなく、人や生物に「劇症」といわれたほどの重大な影響を与えるケースもありました。ただ、現在の日本国内ではほとんど発生していないと考えられています。



一方で、家庭排水や肥料、畜産糞尿など、水に溶けて分解された無機化合物や有機化合物が影響を与えるケースもあり、現在圧倒的に多いのが、このうちの有機化合物による汚染です。最近はマイクロプラスチックに代表されるように、目に見える汚染状況に注目が集まりますが、実際の被害として問題視されているのは、マイクロプラスチックに有機塩素化合物が付着して発ガンすることです。発ガンは短期間で起きる被害は少ないとはいえ、

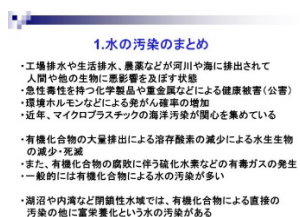
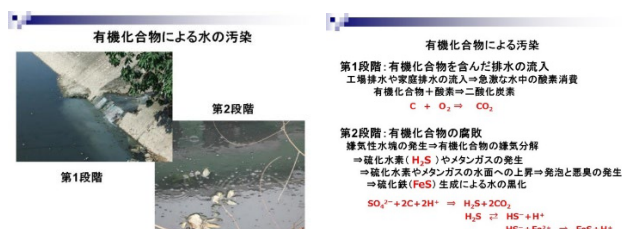
緩慢な被害を発生させる汚染が増えてきているのです。

世界に目を向けてみると、例えばベトナムの中部で鉄鋼業が盛んになり、その工業排水によって 2016 年には魚介類の大量死につながりました。この構造は日本の水俣病と同じであって、今もお場所を変えて発生しているということです。

また、有機化合物による汚染については、日本も海外も構造的には同じです。人々は働き口の多い都会に集まるものですが、道路や鉄道などのインフラが十分に整備されていなければ交通渋滞が発生します。飲み水用のインフラは整備できても、下水道設備まで十分でなければ、さまざまな廃水が処理されずに流されてしまい、川や海が汚染されてしまうのです。

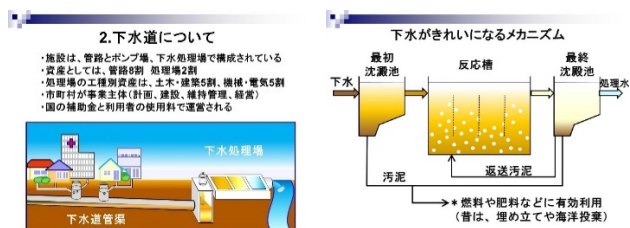


有機化合物によって汚染された水が環境内にそのまま出ていくと、まずは白みを帯びた水となって川や海を汚します。その後、微生物と反応することで黒ずんでいき、メタンガスや硫化水素などを発生させます。第1段階では有機化合物である C が水中の酸素 O₂ を大量に消費して CO₂ となり、第2段階では酸素を必要としない微生物と反応することで硫化水素やメタンガスを発生させるのです。



2. 下水道について

有機化合物による汚染を軽減・抑制するための主力の対策となるのは下水道です。日本国内では、下水道の維持管理は市町村単位で行われ、住宅や工場の廃水は地下のパイプを通して下水処理施設に集められます。



下水処理施設では、まずは下水を沈殿池に集めます。すると、重さのあるものは沈みますので、上方にある水分が反応槽に移ります。この反応槽で活躍するのが、下水浄化の“主役”である微生物です。30 μm から 80 μm のツリガネムシをはじめ、さまざまな種類の微生物に沈殿池で沈んでいかなかった有機物を食べさせるのです。最後は、増えた微生物ときれいになった水とを分け、水は消毒されて処理水となり、川などに放流。沈殿池で下に溜まった汚泥と、反応槽で増えた微生物も回収し、燃料や肥料などに有効利用されます。

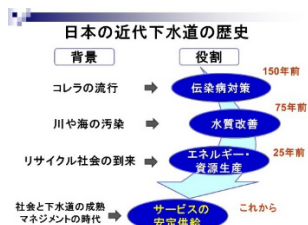
人が集まり、長く過ごしていけば、自ずと排水施設が必要になります。古くは紀元前 2500 年頃、実に約 4500 年前のインダス文明のものとされるモヘンジョダロ遺跡でも、排水路などの下水道設備が確認されています。



もちろん当時は微生物によって処理する技術はなく、微生物による浄化技術が開発されたのは約 100 年前です。それまでは、汚水を生活圏から遠くへ移していたと考えられ、その形跡は日本でも発見されています。神奈川県で港北ニュータウンを造成する際に遺跡が発掘され、地質の年代などを調べてみると、今から 2200 年前の弥生時代だとわかりました。稲作をする人々が住んでいた竪穴式住居がいくつも集まったエリアの近くに、排水路が整備された跡が見つかったのです。



そこから時が流れ、日本の近代における下水道整備の歴史は 4 つの段階に分けることができます。



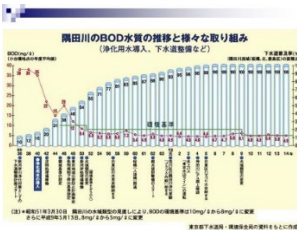
まず、約 150 年前には、鎖国から開国を経てコレラが流行した背景があり、主に伝染病対策として下水道整備が進められました。コレラに罹患すると 7 割以上が死に至ります。死者が 1 万人を切る年もありましたが、多い年には 10 万人以上がコレラで亡くなっていたのです。

年	患者数 (人)	死亡者数 (人)	死亡率 (%)
明治10年(1877)	13,710	7,967	58.1
明治12年(1879)	162,637	105,788	65.0
明治14年(1881)	9,328	6,197	66.4
明治15年(1882)	51,638	33,784	65.4
明治18年(1885)	13,772	9,310	67.6
明治19年(1886)	155,363	106,405	69.5
明治23年(1890)	46,019	35,277	76.7
明治24年(1891)	11,142	7,760	69.6
明治28年(1895)	55,144	40,154	72.8
明治35年(1902)	13,362	9,226	69.0

その後、第二次世界大戦が終わると、人々は戦後復興の過程でまずは食べるものの確保を最重要課題としました。その分、環境面への配慮は二の次にせざるをえなかった結果、各地で川の汚染が進行しました。今も昔も墨田川には遊覧船がありますが、かつては異臭のため乗客が鼻をつまんでいたほどでした。そこで約 75 年前に都市における水環境の整備に重点が置かれるようになり、現在の墨田川ではハゼ釣りができるまでになっています。



水質の改善はデータ上でも明らかです。川の汚さを示す BOD という値と下水道の普及率を並べてみると、見事に普及率の上昇に伴って汚染度が低くなっていったことがわかります。



この間、下水道に携わる人々が何をしてきたかという、実は既に約 40 年前から温暖化対策として炭酸ガスを減らすことと、下水処理場でエネルギーの生産まで行うことをめざしてきました。先ほど黒ずんだ水から発生するメタンガスについて説明しましたが、下水処理場でメタンガスの発生につながる微生物を意図的に投入し、発生したメタンガスを燃焼させて発電する仕組みを開発してきました。また、汚泥についても固形燃料として活用する取り組みを進めてきました。

つまり、下水処理場を単に水を浄化処理するためだけの施設として捉えるのではなく、エネルギーの生産と脱炭素社会への貢献をコンセプトに技術開発を進め、現在に至っているのです。

エネルギー・資源生産の時代

■バイオガスの活用

- 下水処理場の汚泥堆肥化や発酵（家畜）で発生する有機物、糞尿、上り分離水（上清）を原料として、メタン（CH₄）を生成し、これを燃焼させて発電。
- 上清（上清）を原料として、メタン（CH₄）を生成し、これを燃焼させて発電。

■汚泥堆肥化としての活用

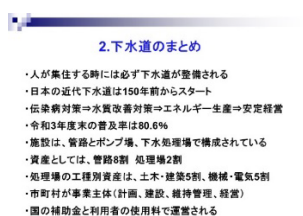
- 下水処理場の汚泥堆肥化、堆肥（肥料）として、農作物（野菜、果物）の肥料として利用。
- 上清（上清）を原料として、メタン（CH₄）を生成し、これを燃焼させて発電。

一方で、従来から下水汚泥の農業利用は行われていました。「コンポスト」や「堆肥化」といわれるもので、下水汚泥を籾殻と混ぜて積んでおくと、微生物反応によって良質な堆肥になります。これを農業などに利用するので。現在、国内では肥料の原料輸入が滞り、肥料不足になりつつある中で、シンプルな方法のコンポストが再び

脚光を浴び、政府も下水処理場発の肥料の増産を指示したほどです。私の研究室でも学生が中心となって実際に汚泥ベースでコンポストをつくり、唐辛子を育てています。とても成長がよく学生からも好評です。



こうして現在は、下水処理場に限らず、橋梁や河川、堤防、港湾の整備まで、さまざまなサービスの安定供給が求められる時代を迎えています。人口減少に伴って職員が減少しているほか、施設が老朽化しつつある中で、保全・修繕に必要な税収も減ってきているのですが、だからこそ期待したい取り組みの一つが官民連携です。従来、下水処理場をはじめとする公共施設は、すべて“官”が管轄してきました。しかし、それだけでは非効率な側面もあるため、民間が参画する仕組みづくりが求められているのです。

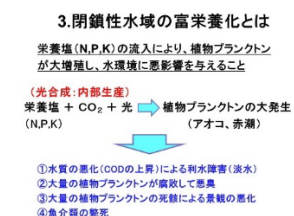


3. 閉鎖性水域の富栄養化とは

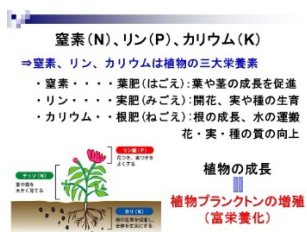
ここからはやや専門的な内容になりますが、湖や東京湾のように水の交換があまりよくない「閉鎖性水域」と呼ばれるエリアでの「富栄養化」について説明します。

「富栄養化」は、人間に例えるならば、メタボリックシンドロームと似ています。植物の栄養塩（栄養素）である窒素、リン、カリウムが閉鎖性水域内に流れ出ることによってプランクトンが増え、水環境に悪影響を与えることが富栄養化です。

これまで下水道設備の不備による汚染対策を講じる際には、汚染物質が川に流れ込んでも、川の水量はある程度安定しているため、物質の濃度から汚染状況を把握しやすい面がありました。しかし、富栄養化はプランクトンを介することで、従来とは異なる物質となって汚染が進み、悪影響を及ぼす点に難しさがあります。



窒素、リン、カリウムという栄養塩は、そもそも地面に足りてないからこそ肥料として与え、植物を成長させ、食物の収穫につながります。先ほどのコンポストにしても、これらの栄養塩を多く含んでいます。ところが、この窒素、リン、カリウムが水の中に入ると悪さをしてしまうのです。



湖の外から栄養塩が流入すると、水中のプランクトンも植物と同じように窒素、リン、カリウムを摂取して増えていきます。その後、プランクトンが死んだとしても再度栄養塩が溶け出すため、プランクトンが増えるサイクルが生まれます。これが富栄養化の実態です。



東日本大震災では“黒い津波”が街を襲いましたが、それは海底の泥を巻き上げたからです。なぜ泥が黒かったかといえば、長年にわたる養殖や廃水の放出によって、海底にプランクトンやそのエサとなった栄養塩が残っていたからです。海では「赤潮」も発生しますし、湖でミクロキスティスというプランクトンが増殖して「アオコ」が発生することも富栄養化が原因です。湖では外部から水が流入してから出ていくまで4日間程度かかると、植物プランクトンが増殖すると考えられています。



- 3. 閉鎖性水域の富栄養化のまとめ**
1. 閉鎖性水域の富栄養化は人為的に大量のリン等の栄養塩が閉鎖性水域に流入することによって発生
 2. 閉鎖性水域の基準は4日間程度の水理学的滞留時間
 3. 大量の流入栄養塩はアオコ、赤潮、青潮などの現象(内部生産)を引き起こし、水環境に悪影響を及ぼす

4. 富栄養化メカニズムの研究

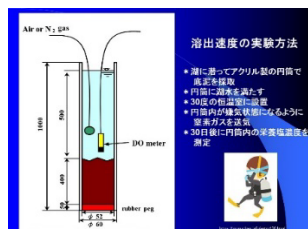
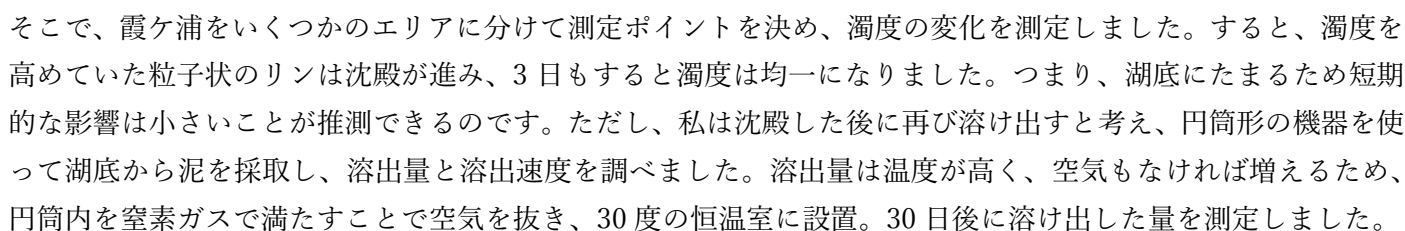
ここでは、閉鎖性水域で富栄養化が進むメカニズムを理解するために、湖を例に挙げようと思います。まず湖の周辺は、ある程度平地が広がっていることが多く、多くの人が集まって生活するケースが多々あります。湖から水を引くことで農業生産もしやすくなりますし、工場などが集積することもあります。こうして人が増え、人の営みが活発になれば廃水も生まれますので、富栄養化対策が必須になります。

水中で酸素を必要としないプランクトンが増えて湖面に広がれば、魚は呼吸できずに死んでしまいますし、メタンガスなどで悪臭が漂い、景観も損ないます。1973年には、日本国内で2番目に大きい湖である茨城県の霞ヶ

網いけす養殖魚の大量死死



昭和48年(1973年)

[illegible]

研究テーマ①②③から分かったこと

- ①霞ヶ浦のような浅い湖において、雨天時流入粒子態負荷は、一旦すべて沈降し、湖水質への影響は、底泥からの溶出現象と取り扱うことが合理的である。
- ②底泥に移行した粒子態リンは、ほとんど溶出せずブラントンに摂取される可能性は極めて小さい。
- ③リンを対象とした溶出量削減対策の効果は限定的

研究テーマ④から分かったこと

- ①流入負荷削減対策を評価する際には、形態別（粒子態・溶解態）の負荷量を把握するとともに生物利用可能性（溶存態）を把握する事が重要である
- ②リン荷の流入負荷は、生物利用可能性から判断するとリソゲル域であり、生活汚水や肥料などから利用されやすいリン負荷の削減が効果的な水質改善対策として期待される
- ③下水道の高度処理はリンを対象にした方が効果的

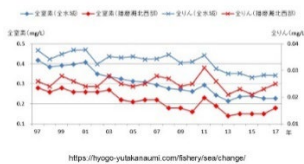
4.富栄養化研究のまとめ

- 露ヶ浦は、リン制限
⇒窒素の環境基準も窒素除去対策も意味が無い
- 露ヶ浦は晴天時に流入する溶存態リンが湖水質に最も大きな影響を与える
⇒下水道の高度処理はリンを対象にするべき
⇒底泥の浚渫対策は効果が小さい
- 水域の富栄養化や貧栄養化は全窒素や全リンではなく生物利用可能性から議論すべき

5. 富栄養化対策

日本では、汚染が進むなど問題が発生してから環境基準を設け、法制度の整備やインフラ整備を進めていくことが一般的であり、法治国家らしいプロセスといえます。富栄養化対策では、1973年に「瀬戸内海環境保全特別措置法」が制定されました。富栄養化によって赤潮が発生し、養殖していた魚の死によって養殖業者に大打撃を与えたからです。当時は、下水道の普及率が10%台後半でしたが、普及率の上昇に反比例するように、瀬戸内海の水質も改善されていきました。先ほど紹介した墨田川の事例とも重なります。

瀬戸内海環境保全特別措置法の効果



同様に諏訪湖の富栄養化の程度を表す“クロロフィルa”の濃度も、昭和52年、平成8年、平成15年で着実に減少していきました。諏訪湖の水をすべて集めて処理する施設ができたためであり、窒素やリンも削減されていきました。

下水道整備による富栄養化の改善
～諏訪湖流域下水道～



しかし、近年では思わぬ事態も起きています。瀬戸内海での漁獲量が減少し、海苔の色は悪くなり、ワカメも痩せてきてしまっているのです。それは東京湾でも同様で、窒素やリンなどの栄養塩が減るにつれ、漁獲量も減っていったのです。それはデータを見れば一目瞭然です。

単位面積当たりの栄養塩負荷量と漁獲量の推移



栄養塩負荷量の減少とともに漁獲量も減少

そこで環境省は、海の栄養レベルを保つために、特定の海域であれば窒素やリンを出してもいいとしましたが、実は、そもそも下水道事業に従事する人々や一部の漁業関係者も、「水清ければ魚棲まず」ということはわかっていました。流れ出た窒素やリンをプランクトンが食べ、それを小さな魚が食べ、その小さな魚を食べるより大きな魚がいることで、私たちが海の恵みとして収穫し、享受できているのです。この点からも、対策・政策にはバ

ランスが重要だといえるのです。

5.富栄養化対策のまとめ

1. 栄養塩の削減が基本
2. 法律や環境基準設定や下水道の高度処理
3. 栄養塩不足による漁獲量の減少が社会問題化
4. 環境省は栄養塩を水域に供給（投入）することを法的に可能にした
5. 50年間続いてきた水環境政策の180度の大転換
6. この50年間、下水道は栄養塩の除去に技術的にも予算的にも真摯に取り組んできた
7. 下水道は水域の富栄養化・貧栄養化の管理をする新たな役目を負った

6. 真実の眼

映画『ローマの休日』で有名になった「真実の口」は、古代ローマ時代の下水道設備の一部であるマンホールの蓋だといわれています。ここで私がお伝えしたいのは、下水道事業でも富栄養化対策でも、真実の眼、真実を見きわめる眼の大切さです。富栄養化対策では、きちんとデータを見ておけば、現在のような漁獲量減少の憂き目には遭っていなかった可能性もあります。研究者も学生も、地域みなさんにしても、科学的に信頼できるデータを拠り所にして物事を判断していくことが大切でしょう。

6.真実の眼

