物質循環からみた森ー川ー海のつながりに関する一考察

西村　修
東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
osamu.nishimura.d2@tohoku.ac.jp

水環境の現状

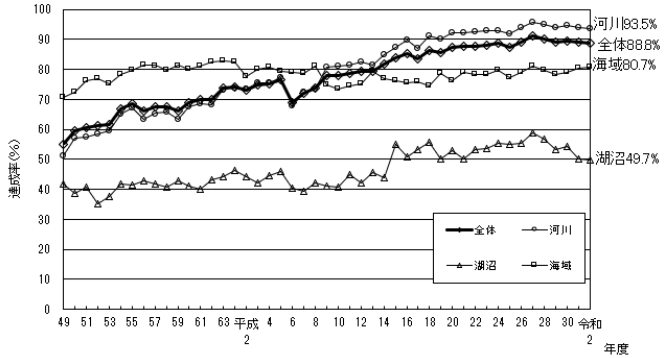


図　環境基準達成率の推移（BOD又はCOD）
出典：環境省水・大気環境局，令和2年度公共用水域水質測定結果，令和4年1月

河川の水質は改善しているのに，湖沼の水質に顕著な改善は見られない．海域に至っては，

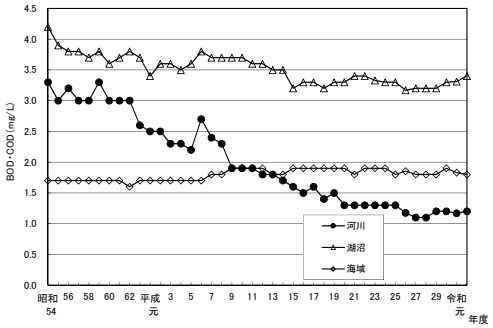


図　水域群別水質の推移（BOD又はCOD年間平均値）
出典：環境省水・大気環境局，令和2年度公共用水域水質測定結果，令和4年1月

その理由は，富栄養化

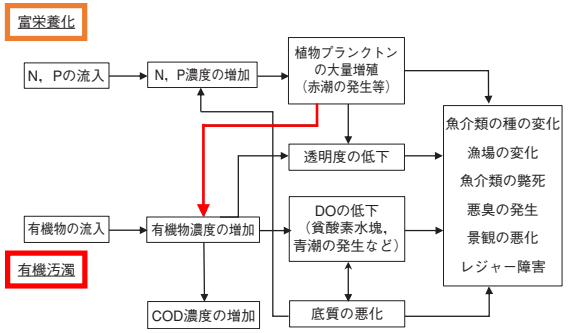
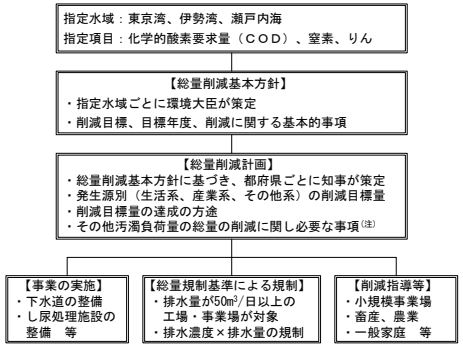


図　富栄養化と有機汚濁による利水障害発生に至るプロセスの概念　出典：日本の水環境行政（ぎょうせい，2009）

人口、産業の集中等により汚濁が著しい広域的な閉鎖性海域の水 質汚濁を防止するための制度

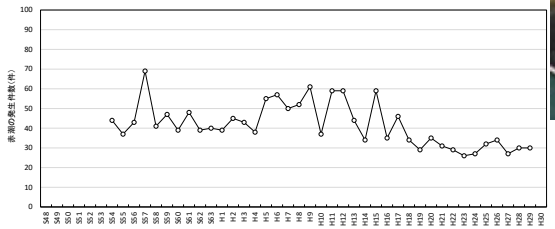
昭和53年に導入され，44年経過



注）干潟・藻場の保全・再生、底質改善対策等

図 水質総量削減制度の概要

出典：日本の水環境行政（ぎょうせい，2009）

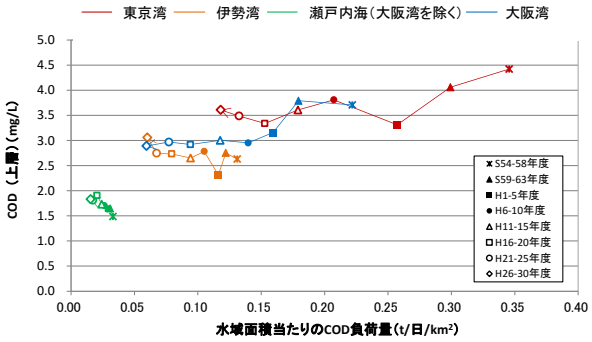


東京ゲートブリッジ付近に発生した赤潮
（令和3年5月6，7日）
出典：東京都環境局　令和3年度東京都内湾赤潮速報

注）昭和 54～平成 15 年までは年次内、平成 16～29 年度は年度内の発生件数を示す。
出典）昭和 54～平成 15 年：環境省環境管理局水環境部水環境管理課閉鎖性海域対策室資料
平成 16～24 年度：「東京湾の水環境の現状（第一期期末評価時点）」（東京湾再生推進会議）
平成 25～29 年度：「東京湾水質調査報告書（平成 29 年度）2017」（東京湾岸自治体環境保全会議、平成 31 年 3 月）

図　東京湾における赤潮発生件数の推移

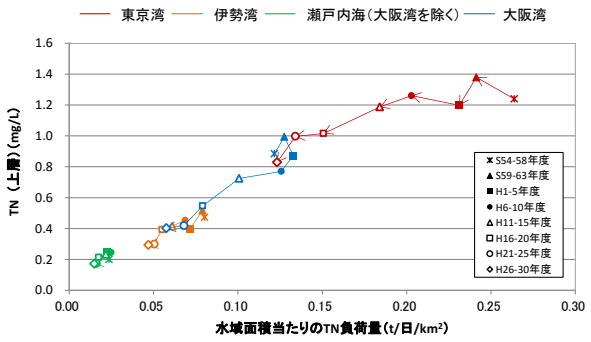
出典：総量削減専門委員会，第９次水質総量削減の在り方について，令和3年3月



注）ＣＯＤ負荷量については第１次～第８次総量削減開始年度の値を、水質については各総量削減期間中の平均水質を用いた。
出典）「広域総合水質調査」（環境省）、「発生負荷量等算定調査」（環境省）

図 水域面積あたりのCOD負荷量とCOD濃度の推移

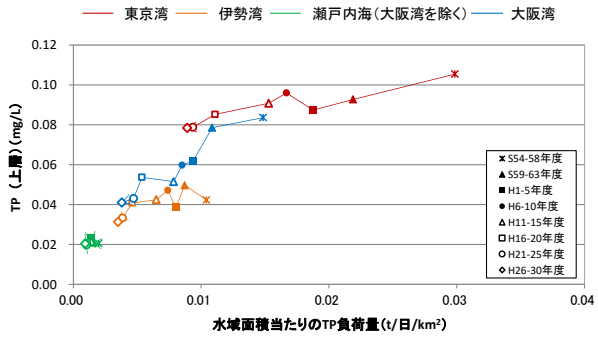
出典：第９次水質総量削減の在り方について（総量削減専門委員会報告案）



注）窒素負荷量については第１次～第８次総量削減開始年度の値を、水質については各総量削減期間中の平均水質を用いた。
出典）「広域総合水質調査」（環境省）、「発生負荷量等算定調査」（環境省）

図 水域面積あたりの窒素負荷量と窒素濃度の推移

出典：第９次水質総量削減の在り方について（総量削減専門委員会報告案）



注）りん負荷量については第１次～第８次総量削減開始年度の値を、水質については各総量削減期間中の平均水質を用いた。
出典）「広域総合水質調査」（環境省）、「発生負荷量等算定調査」（環境省）

図 水域面積あたりのりん負荷量とりん濃度の推移
出典：第９次水質総量削減の在り方について（総量削減専門委員会報告案）

近年は，有機汚濁と富栄養化のデカップリング

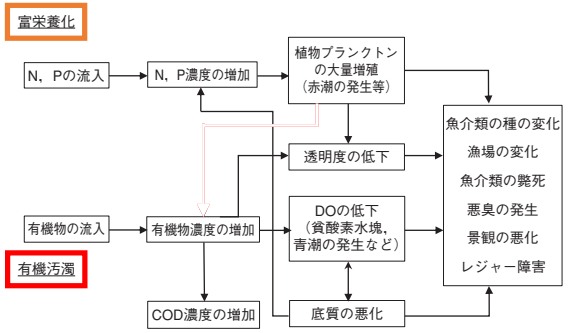
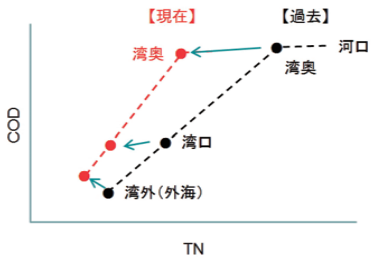


図 富栄養化と有機汚濁による利水障害発生に至るプロセスの概念　出典：日本の水環境行政（ぎょうせい，2009）

さらに海域（瀬戸内海）では貧栄養化も



湾奥部のCODが下がらなければ湾内のCODも下がらない.

図 TNとCODの関係の概略図

出典：藤原建紀，内湾の貧栄養化ー窒素・リン負荷量削減が海域のCOD，栄養塩レベルに及ぼす影響ー沿岸海洋研究，52，1，11-17，2014

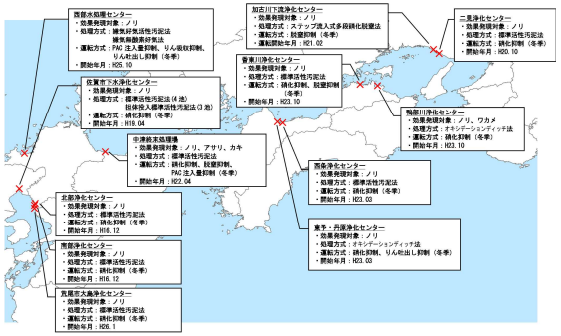
「第9次水質総量削減の在り方について(総量削減専門委員会報告)」の概要（抜粋）令和3年3月

1. 指定水域全体の水質改善を目的とする窒素・りんの負荷削減は、現状の対策を維持。(局所的な水質対策として有効な場合の窒素・りんの除去はあり得る)
2. COD の負荷削減に当たっては、生活排水対策に力点を置いて実施。
3. 瀬戸内海は、地域における海域利用の実情を踏まえ、必要に応じ、順応的かつ機動的な栄養塩類の管理等、特定の海域ごとのきめ細やかな水質管理を行うことが妥当。

(環境基準の範囲内で、かつ、一定のルールの上で、栄養塩類を増加させることもあり得る)

4. 湾奥部等の局所的な水質改善は、流況改善や藻場・干潟の再生・創出といった、負荷削減以外の手法も用いて総合的に実施。

3. 季節別運転管理を実施している処理場(試行も含む)
（平成25年度末までに報告のあった自治体）



出典：国土交通省下水道部，下水放流水に含まれる栄養塩類の能動的管理のための運転方法に係る手順書（案），平成27年9月

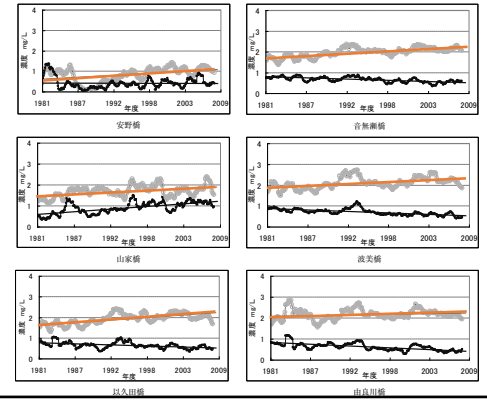


図 由良川６地点におけるBODとCODの推移図（1981～2008年度）

出典：田口寛，日下哲也，由良川におけるBODとCODの長期推移，京都府保環研年報，第55号，79-83，2010

結果及び考察

・ダムより上流の安野橋等COD増加傾向
→森林地域からのフミン質の流入増加

・山家橋でCOD（及びBOD）増加傾向
→由良川ダム（の内部生産）の影響

図1. 由良川及び支川の採水地点
●は、由良川本川の毎月のデータがある採水地点、●は、支川の採水地点、○は、由良川本川の奇数月のデータがある採水地点、▼はダムを示す。
図中番号は、以下のとおり
①：黒瀬橋、②：土師橋、③：天津橋、
①：大野ダム、②：和知ダム、③：由良川ダム

出典：田口ら，京都府保環研年報

開放性内湾が連なる三陸沿岸海域における沿岸環境管理法の開発

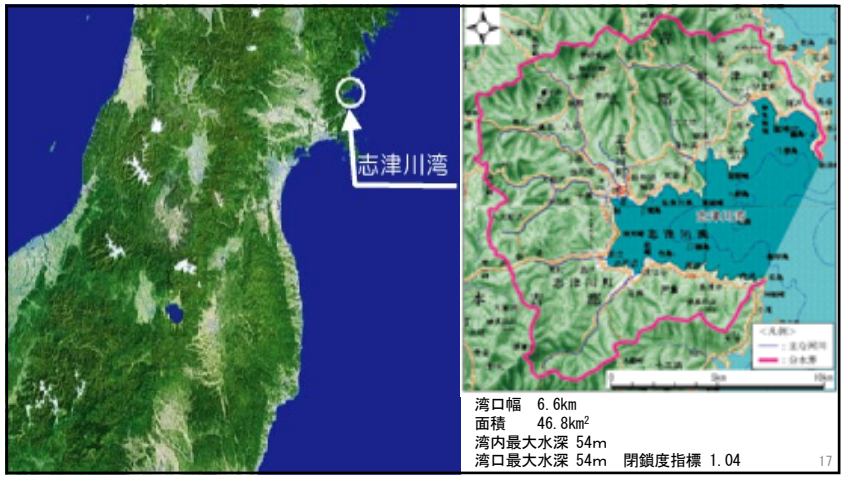
環境研究総合推進費（平成26～30年度）

〈研究代表機関〉横浜商科大学（小松輝久）

〈研究分担機関〉北海道大学（門谷茂），東京工業大学（吉村千洋，藤井学），東北大学（西村修，坂巻隆史）

研究背景（抜粋）

過去の人間活動で沿岸域へ与え続けた過大な負荷は，沿岸海域の環境容量を超えるものとなっている．外洋の影響を受けながら，河川から流入する陸起源物質と湾内の養殖漁業により人為的な影響を強く受ける開放性内湾については，閉鎖性内湾と異なり研究例が少ない．沿岸海域とその後背地である陸域の自然・人間活動を総合的にとらえ，物質循環・エコトーンのあるべき姿を明らかにし，豊で賑のある開放性内湾域をつくるための具体的提案を行うことは，社会的・経済的に有意義である．



湾口幅　6.6km
面積　46.8km^2
湾内最大水深 54m
湾口最大水深 54m　閉鎖度指標 1.04

研究の目標

沿岸生態系サービス（生物多様性，水産資源etc.）の持続的利用を可能とする沿岸海域管理方策の具体化は急務

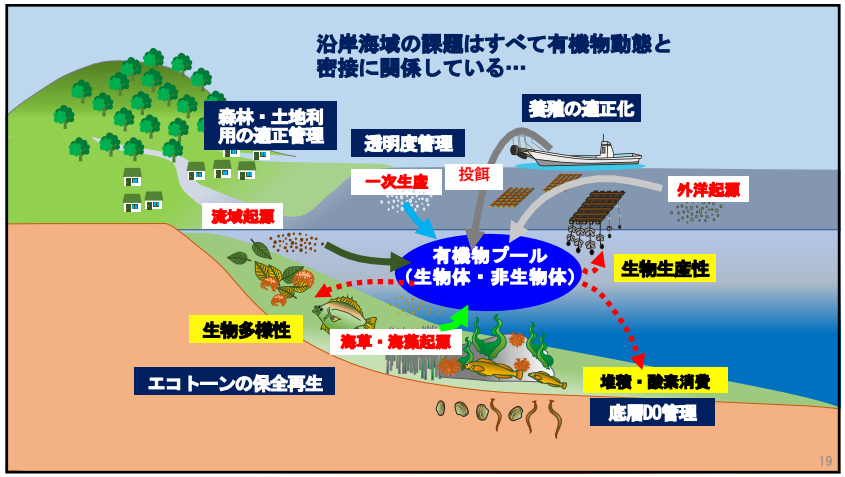
↓

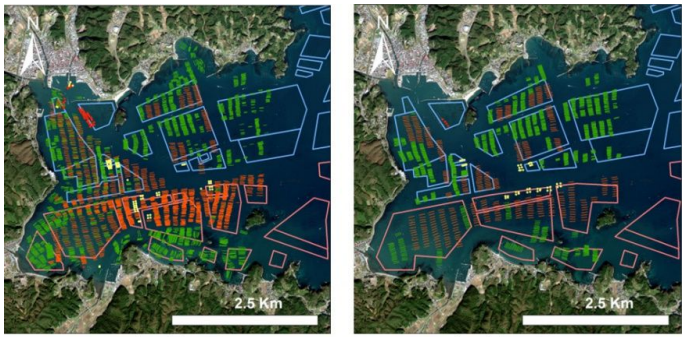
何を適正化すべきなのか（環境政策的課題）

特に三陸沿岸海域を対象として
- 流域管理（流域-沿岸海域のリンクの観点）
- 沿岸海域の水産利用の管理（環境容量の観点）
- エコトーンの保全・再生
- 水質・底質環境の管理（透明度・底層DOの基準化・管理に向けて）

↓

本研究（当該グループ）の目標
上記課題への対応を適正化するために必要な有機物動態に関する環境科学的知見を提示する.





2009年2月3日　　2014年1月15日

図8　衛星画像解析で検出した2009年2月3日（左図）と2014年1月15日（右図）の海面養殖施設配置図。多角形は志津川地区（青）と戸倉地区（赤）の区画漁業権、短線はワカメ延縄式（緑）、カキ延縄式（橙）、カキ筏式（赤）、サケ生簀（黄）。

小松先生の研究成果

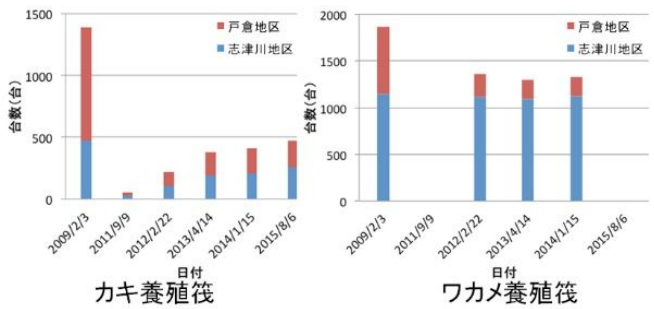


図9　衛星画像解析で検出した2009年2月3日から2015年8月6日までの志津川地区(青)と戸倉地区(赤)の区画漁業権内のワカメ養殖施設(右図)とカキ養殖施設(橙)。

小松先生の研究成果

森-川-海の栄養物質輸送機構（報告書抜粋）

志津川湾ではマガキ養殖が盛んである．マガキの餌資源を明らかにするため，

- マガキ
- 水柱植物プランクトンの粒状有機物(POM)
- マガキ殻の付着藻類

のδ13Cおよびδ15Nの季節変動を調べたところ，マガキのδ13C値は水柱植物プランクトンと付着微細藻類の間の値で、付着微細藻類も餌資源としていることが強く示唆された。

門谷先生の研究成果

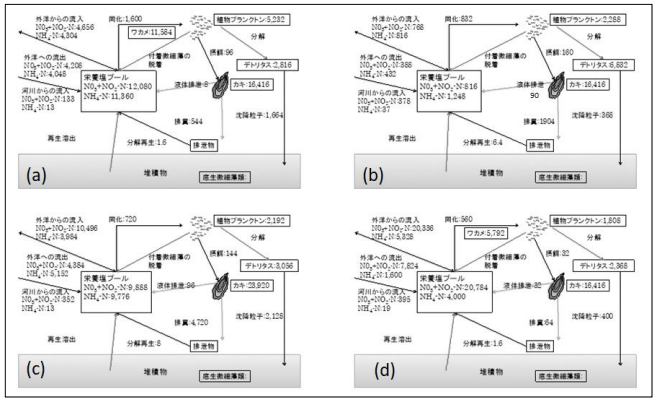


図12　志津川湾の窒素循環:春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)(現存量: kgN、フラックス: kg day^{-1})。

門谷先生の研究成果

微細藻類の養殖ロープへの付着量と脱着量に有意な相関

- 夏季の付着量：3.5　μgChl.a/cm^2　（実測）
- 夏季の脱着量：0.051μgChl.a/cm^2/日（実験より推定）

マガキは脱着した微細藻類や水柱植物プランクトンを肉に変換するだけではなく，排泄による栄養塩再生を介して，再び基礎生産者に栄養塩を供給する．

養殖場内に存在する年間平均のDINとDIPの現存量38.5kmol，2.81kmolに対して，養殖マガキの1日あたりの栄養塩再生量は，養殖海域の栄養塩プールの約7～8%と栄養塩循環過程に大きなインパクトを持つ．

門谷先生の研究成果

マガキは，微細藻類に養殖ロープとカキ殻表面という基質を提供し，そこで生長脱落した微細藻類を摂餌し，消化排泄を通じて栄養塩を微細藻類に供給する．つまり、マガキ養殖と微細藻類とは共生関係にあり．環境悪化を起こさない適切なカキ養殖は物質循環を速く長くする里海活動である．

志津川湾の栄養塩循環は窒素律速で，外洋からの栄養塩供給が支配し，河川からの栄養塩は湾奥部の生産を支えていた．

門谷先生の研究成果

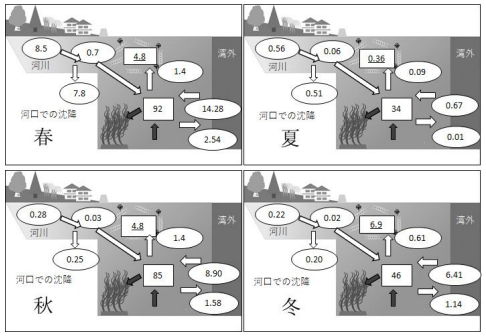


図15　各季節における志津川湾での溶存鉄の収支．各矢印および楕円内の数値は一日あたりの溶存鉄のフラックス(kg day^{-1})を、長方形および長方形内の数値は湾内海水中の溶存鉄の現存量(kg)を、長方形内の下線を付した数値は湾内の植物プランクトンとしての溶存鉄の現存量(kg)を示す．湾外との交換については、表層5m（上矢印）と底層5m位深（ 下矢印））に分けて示す

吉村先生の研究成果

志津川湾における溶存鉄循環の全体像を調べ，河川からの溶存鉄が河口域に限られ，湾内では外洋からの溶存鉄の供給が支配的で，夏季には湾中央部から湾口側上層で溶存鉄が藻類増殖に不足することを明らかにした．

溶存有機物と溶存鉄の関係を調べ，陸域からの溶存鉄輸送にはフルボ酸様DOMが，海域での藻類の溶存鉄取り込みには微生物由来タンパク質様DOMが正に相関することを明らかにした．

吉村先生の研究成果

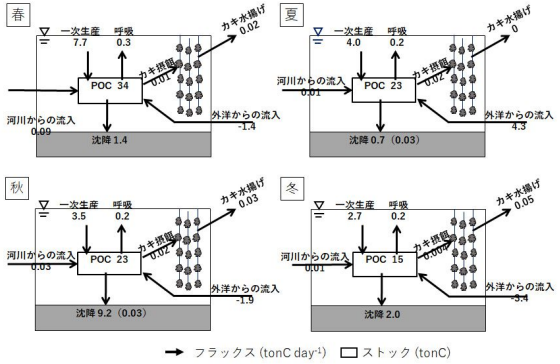


図17　静穏時を想定した志津川湾奥部13.8km^{2}における粒状有機炭素の各種フラックスの比較。夏・秋の沈降フラックスの括弧内の値はカキ養殖施設からの沈降量推定値。

坂巻・西村の研究成果

志津川湾における粒状有機物動態を調べ，湾内における内部生産が最も大きく，河川を通じた陸域からの粒状有機物の貢献が非常に小さいことを明らかにした.

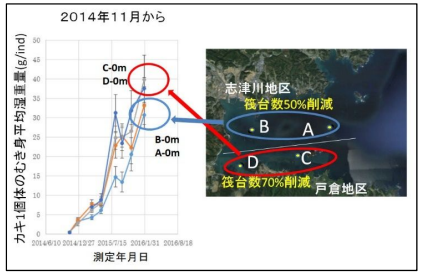


図18　2014年11月から約2年間、A、B、C、Dの定点(右)で追跡したカキの成長(左)。

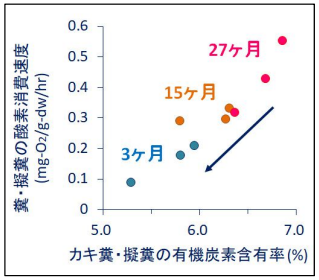


図19　カキの月齢ごとの糞・疑糞中の有機炭素含有量とその分解に必要な酸素の消費速度

カキ養殖筏を削減し，速い成長での若齢出荷が，海洋環境にもよいという科学的根拠を提出した.

笑顔の架け橋 Rainbowプロジェクト

ウェブサイトより

日本初！ ASC国際認証を取得した南三陸町戸倉のカキ養殖
2016.06.23

森は海の友達

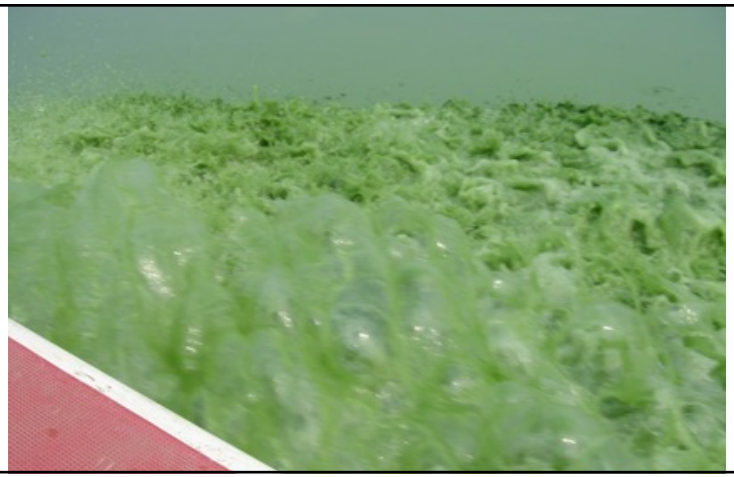
アオコの発生する
霞ヶ浦（茨城県）
1996.8.3

アオコの発生する八郎湖（秋田県）　2016.9

中国　太湖

面積：2,250 km^2
周囲長：400 km
最大水深：4.8 m
平均水深：　2 m
水面標高：3.3 m

アオコの発生する太湖（中国）　2005.9.10



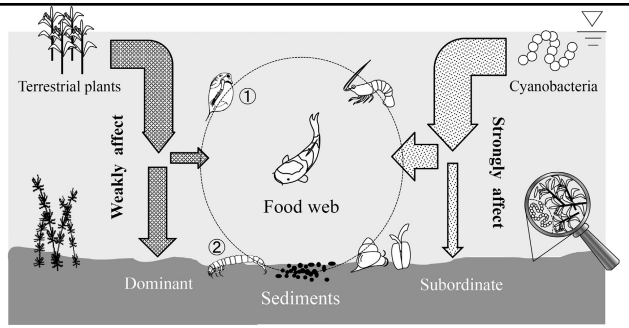


Fig. 8. Simplified schematic view of organics behaviors in shallow eutrophic lakes with algal blooms. The conceptual figure illustrates two key points: one is the organics asymmetry between water column and surface sediments based on the results of this study, i.e. although algae is dominant in the water column due to algal blooms, its position is replaced by terrestrial plants in the surface sediments. The other is the influence of pelagic and benthic food web on organic matter migration from water column to surface sediments, which is discussed in this article including bacteria (black points), snails, bivalves, shrimps and fishes and others (① zooplankton (de Kluijver et al., 2012) and ② benthic macroinvertebrates excluding snails and bivalves (Yu et al., 2013)). It should be noticed that the food web described here is simplified without trophic interactions. Arrows indicate the maximum abundance of organics variations.

出典：Xiaoguang Xuaほか, Asymmetric response of sedimentary pool to surface water in organics from a shallow hypereutrophic lake: The role of animal consumption and microbial utilization, Ecological Indicators, 2015

浅い富栄養湖沼である中国の太湖における有機物の挙動（炭素循環）について，堆積有機物の起源を安定同位体比と脂肪酸バイオマーカーを使用して解析した．

その結果，水中と堆積物中で非対称現象を示した．優勢な有機物は，水中ではシアノバクテリア，堆積物中では陸上植物にシフトした．

・底生動物と動物プランクトンの両方ともシアノバクテリアが主な餌源である

・底質のバクテリアが陸上植物ではなく不安定なシアノバクテリアを炭素源として優先的に利用している

出典：Xiaoguang Xualほか，Ecological Indicators

伊豆沼から採取したハスをフリーズドライして好気・嫌気分解実験

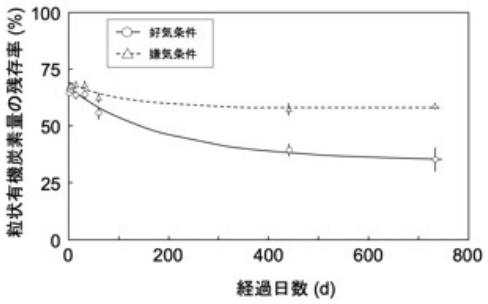


図-4 粒状有機炭素量残存率の経時変化

出典：野村宗弘ら，ハスの長期分解実験による粒状有機物の残存割合の評価及び底質への堆積傾向，土木学会論文集G（環境），73，7，III_241-III_246，2017

図1 伊豆沼におけるハスの繁茂状況

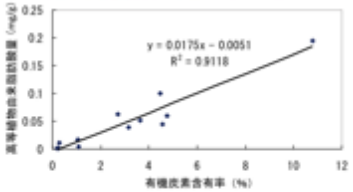


図3 伊豆沼底泥の有機炭素含有率と高等植物由来脂肪酸量の関係

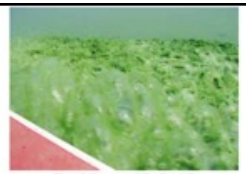


図2 太湖における藍藻の発生状況

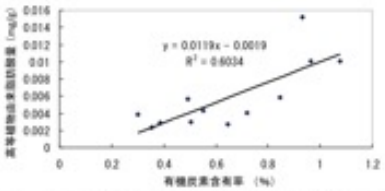
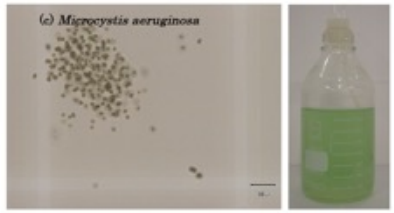


図4 太湖底泥の有機炭素含有率と高等植物由来脂肪酸量の関係

出典：西村，浅い湖沼に堆積する有機物の起源，低平地研究，24，7-10，2015

藍藻類の優占化で生態系がどうなる？

緑藻セネデスムス



藍藻ミクロキスティス

出典：WEI LI，Doctoral Thesis of Tohoku University，2014.9

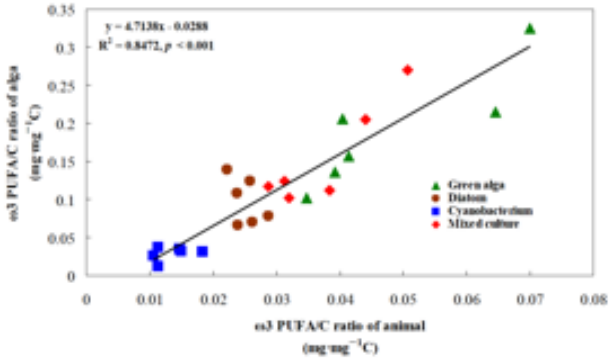


図　ミジンコ体内のω3PUFAと藻類体内のω3PUFAの関係

出典：WEI LI, Doctoral Thesis of Tohoku University

出典：Wei Li et al., Combined effects of elevated carbon dioxide and temperature on phytoplankton-zooplankton link: A multi-influence of climate change on freshwater planktonic communities, Science of the Total Environment, 658, 1175-1185, 2019

ω3 PUFAの少ない藍藻を餌とした場合，動物の成長速度が低下する．

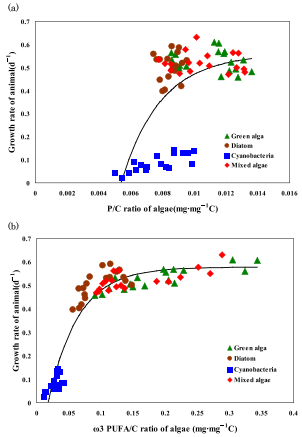
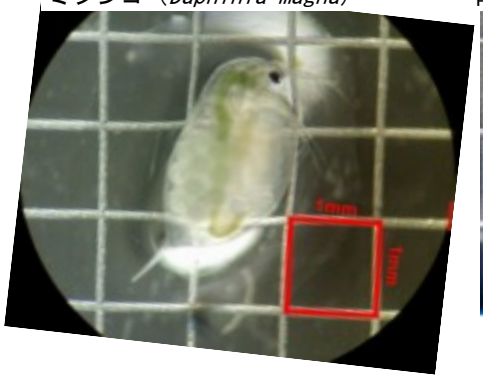
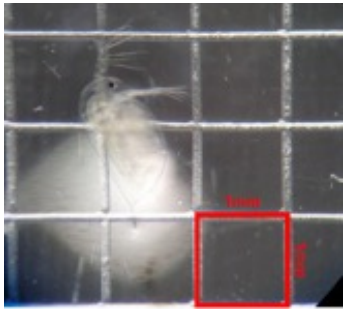


Fig. 6. Relationship between (a) the molar phosphorus to carbon ratio and daphnid growth rate; (b) the molar ω3 PUFAs to carbon ratio and daphnid growth rate.

緑藻セネデスムスを食べて育ったミジンコ（*Daphinia magna*）



藍藻ミクロキスティスを食べて育ったミジンコ



目的：底質の脂肪酸組成が出現動物に与える影響の解明

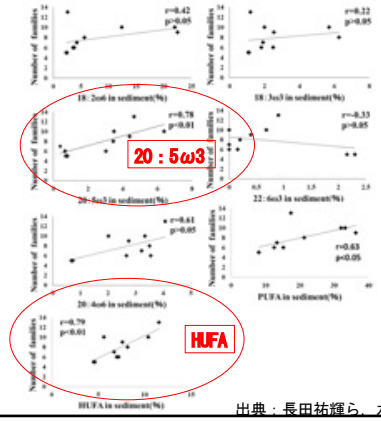
調査項目	
底質	脂肪酸組成 クロロフィルa
底生動物	出現動物科数

表1　調査地点の状況

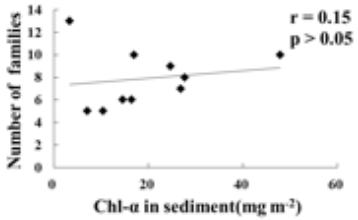
水田	A,B,C	D	E,F	G,H	I,J
採集地点	名取市	七ヶ浜	亘理町	川崎町	川崎町
農法	休耕田	慣行型	休耕田	無農薬	無農薬
調査時期	2009年9月	2010年7月		2011年7月	2011年8月

出典：長田祐輝ら，水田生態系における底質の必須脂肪酸組成と出現底生動物科数の関係，水環境学会誌，43, 1, 17-23，2020

図　底生動物の出現科数と底質の必須脂肪酸の関係



・底質のHUFA含有率と出現した底生動物の科数に有意な正の相関（p<0.01）が見られた。
・HUFAの中でも特に20:5ω3(EPA)に有意な正の相関（p<0.01）が見られた。



出典：長田祐輝ら，水環境学会誌，長田祐輝　東北大学博士学位論文2022.3

考察：シリカ・珪藻が育む生物多様性

HUFA及びEPA含有率と出現底生動物の科数における正の相関

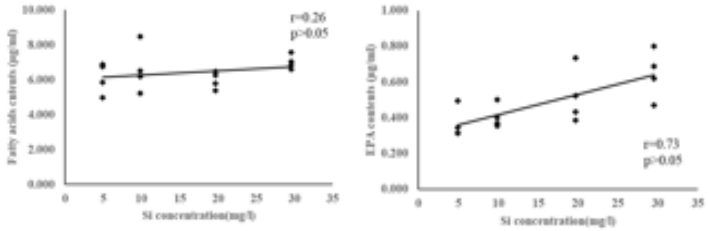
・コオロギ*Acheta domestica* の成育に欠かせない物質[1)]
・餌のEPA含有率が高いほど動物プランクトンの成長率が高い[2)]
・動物体内で高い蓄積割合を示す脂肪酸が生存に重要であり[3)]、淡水ベントスではEPAが高い割合で含まれている[4)]

EPAは底生動物にとって生存や成長に重要な物質

環境中でEPAを含んでいる物質とは？

参考文献：長田祐輝，東北大学博士論文，1)Destephano and Brandy (1977)，2) Brett and Muller-Navara (1997)，3) Sargent et al.(1999)，4)Makhutova et al.(2011)

図　*Nitzscha palea*を対象にケイ素(Si)濃度を変化させた培養実験における脂肪酸の変化



培養12日目の*N. palea* 個体群密度当たりにおいて
・脂肪酸量はSi濃度と相関関係は確認されず
・20:5ω3(EPA)含有量についてはSi濃度が高いほど多くなる傾向

出典：長田祐輝，東北大学博士論文2022.3

・底層DOを低下させる有機物とは？
・生物多様性を劣化させる有機物とは？
・それらをどのように管理するか？

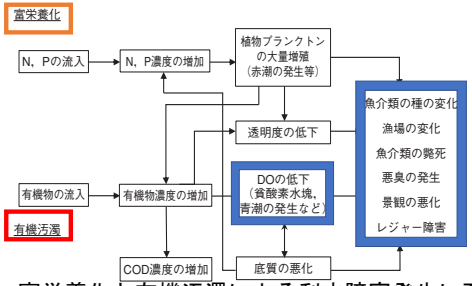


図３　富栄養化と有機汚濁による利水障害発生に至るプロセスの概念　出典：日本の水環境行政（ぎょうせい，2009）

漆沢ダム（宮城県鳴瀬川上流）

出典　http://www.pref.miyagi.jp/sabomizusi/mizusi/urusizawa.htm

アオコの発生する漆沢ダム湖 2004.7.28

河川・湖沼・海域の水質を保全するために森林等の非特定汚染源の負荷対策は重要

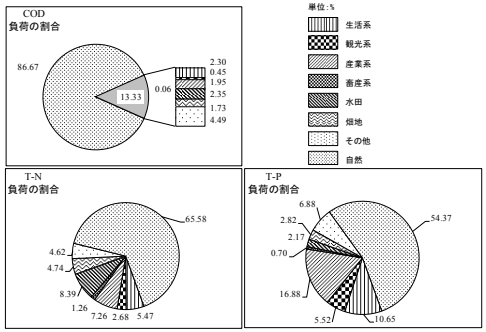
釜房ダム貯水池

・昭和62年に指定湖沼の指定を受け、第1期「釜房ダム貯水池に係る湖沼水質保全計画」を策定

・第6期が令和3年度で満了

・令和4年度に第7期策定

35年計画



排出負荷量の割合（平成23年度）

出典：釜房ダム貯水池湖沼水質保全計画（第6期）

第6期計画において重点的に取り組む対策

(1) 自然由来汚濁負荷対策

第6期計画の策定にあたり現地調査を実施し，森林の適正管理によって一定の低減効果を得られることがわかった．第6期計画では森林整備を着実に推進していく．

また，長期的な木材価格の低迷によって，森林所有者の森林整備への意欲が減退しており，業生産活動を通じた森林整備は危機的状況にある．今後の課題として，林業の低コスト化，高付加価値林産物の生産，木材需要の拡大等といった，林業経営の収益性を高めていくことが挙げられ，これらの方策を支援することで森林整備の推進につなげる．

出典：釜房ダム貯水池湖沼水質保全計画（第6期）

第6期計画において重点的に取り組む対策

(2) 魚類養殖に係る汚濁負荷対策

魚類養殖に係る汚濁負荷対策については，関係機関が連携して事業者に必要な助言，指導を行っていく．

具体的には，既存の養殖場に対しては，施設管理方法の改善や水質浄化施設の設置等の汚濁負荷対策の可能性について，事業者や関係機関と連携して検討を進めていくこととする．また，新規の養殖場の設置に際しては，河川からの取水に関する許可権者(宮城県)と十分な意見調整を行っていく．

出典：釜房ダム貯水池湖沼水質保全計画(第6期)

非特定汚染源からの負荷：定量・制御

- 森林：適正管理→脱炭素
- 市街地等：不浸透域の浸透域化→グリーンインフラ
- 農地：化学肥料・化学農薬の抑制
  →みどりの食料システム戦略

非特定汚染源対策
と
気候変動・災害・食料供給など対策のカップリング

出典：日本大学工学部校友会ウェブサイト
https://www.nichidai-ce-koyukai.com/koyukai-letter/cat headquarters report/200531 lohas-sake.html

出典：ファン秋田ウェブサイト https://fan-akita.sakigake.jp/#support