

平成30年度 河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野(河川生態) 研究開発テーマ
 <一般研究:事後評価結果>

テーマおよび概要		研究代表者名	評価	審議結果
テーマ	人との相互作用によって持続する汽水湖生態系の構築	国立研究開発法人 産業技術 総合研究所 山室 真澄	B	研究目的は概ね達成され、研究成果があった。
概要	望ましい宍道湖の環境を設定し、植物プランクトンと物理・化学環境との関係、ヤマトシジミの動態等の観点から、望ましい状態を保つ塩分を総合的に検討する			

評価の判例

- A: 研究目的は達成され、十分な研究成果があった。
- B: 研究目的は概ね達成され、研究成果があった。
- C: 一定の研究成果があった。
- D: 研究成果があったとは言い難い。

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属				役職
	山室真澄 (やまむろますみ)		国立研究開発法人産業技術総合研究所				クロスポインタメントフェロー
②研究テーマ	名称	人との相互作用によって持続する汽水湖生態系の構築					
	政策領域	[分野] 地域課題分野 (河川生態)					
		[公募課題]					
③研究経費 (単位: 万円)	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	総合計
※端数切り捨て。	250 万円	1000 万円	1000 万円	1000 万円	1000 万円	1000 万円	5250 万円
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)							
氏名		所属・役職 (※平成30年3月31日現在)					
浅枝 隆		埼玉大学理工学研究科環境科学・社会基盤部門・教授					
井上徹教		独立行政法人港湾空港技術研究所沿岸環境研究領域・上席研究官					
大谷修司		島根大学教育学部自然環境教育講座・教授					
神谷 宏		島根県保健環境科学研究所水質グループ・環境科学部長					
清家 泰		島根大学総合理工学部物質科学科・教授					
勢村 均		島根県水産技術センター内水面浅海部・部長					
谷 幸則		静岡県立大学環境科学研究所・教授					
矢島 啓		島根大学エスチュアリー研究センター・教授					
管原 庄吾		島根大学大学院総合理工学研究科物質化学領域・講師					
⑤研究の目的・目標 (申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)							
本研究では当初、下記3点を目的として設定したが、FS研究を進める中で当初想定していなかったことが判明したため、「⑥研究成果」に記した1)～5)に修正した。							
①「ヤマトシジミ漁業により流入する栄養物質の1～2割が除去される状態」を望ましい宍道湖の環境と設定し、この状態を保つ塩分で宍道湖に生じうる現象を総合的に検討する。							
②治水事業を通じて望ましい塩分を保つ仕組みや対策を提言する。							
③土砂動態によってヤマトシジミに悪影響が予測される場合は、対策を検討する。							

⑥研究成果

治水事業を行う際の環境影響評価では、計画段階での環境や生態系に対して、事業がどのような影響を与えるかを予測して対策を立てる。しかし気象や地形などの自然環境は常に変動しており、比較対象とした環境やそれに対応した生態系が、その河川本来のものであった保証はない。特に近年の宍道湖の状態は住民によって「異変」と認識されており、どのような状態が望ましいのか過去に遡って設定する必要がある。また人間が高密度に住まう日本においては、“人にとって望ましい状態が相互作用によって持続する生態系”という観点も重要である。この観点から本研究では上記⑤に記載した3つの目標を設定した。しかし研究を進めるうちに、斐伊川からは土砂だけでなく、河岸の草原化に伴う植物枯死体の流入も深刻な影響を与える可能性を検討する必要があることが分かった。また水草の繁茂がヤマトシジミの生息を妨げる可能性が高いことも分かってきた。そこで上記の当初目標を踏まえつつ、本研究終了までの目標を下記のように再整理した。

- 1) 近年定着するようになった水草類の塩分耐性を明らかにし、その影響を評価する。
- 2) 「ヤマトシジミ漁業により流入する栄養物質の1~2割が除去される状態」を望ましい環境として、その状態を維持する塩分を決定する。
- 3) 目標とする環境が成立していた時点に存在していなかった植生や構造物などの影響を定量化して提示する。
- 4) 上記塩分範囲での宍道湖の環境をシミュレーションにより再現する。
- 5) 生物相の変化などシミュレーションでは復元できない要因も加え、宍道湖の環境を科学的に復元し提示する。

ここではまず5) について江戸時代後期以降を対象に、戦後の高度経済成長により公害列島と言われた深刻な環境破壊を経て現在に至った宍道湖の状況を示した上で、1)~4)に関する総括を行う。

宍道湖は大正期に行われた大橋川拡幅までは淡水だったとする見解が一部に流布しているが、渡辺ほか(1988)は花粉分析の結果を総括して、6世紀前半から20世紀前半の期間、宍道湖は現在のようない汽水湖になっていたと記している。また Yamamuro and Kanai (2005) は宍道湖東部で得られた柱状堆積物の生元素濃度や炭素・窒素安定同位体比を分析し、1820年代から1850年代に堆積した有機物の炭素安定同位体比から塩分が現在より高かったこと、また C:N:P 比から現在の中海で発生するものと同じ渦鞭毛藻が有機物起源だったとしている。これらは大西(1986)が近傍で採取した柱状堆積物の同様の深度において、渦鞭毛藻のシストが存在したと記載していることと一致している。

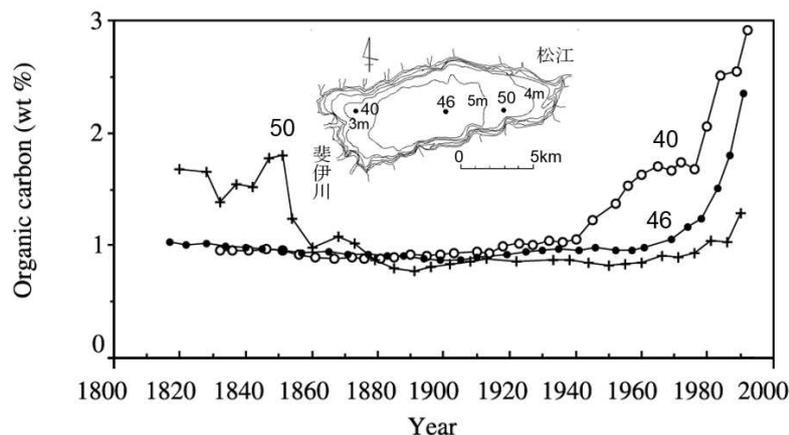


図1 図中で示した宍道湖3カ所(40・46・50)で得られた柱状堆積物における有機物炭素濃度。年代は放射性鉛・セシウム法で決定した。

図1に Yamamuro and Kanai (2005) による、宍道湖柱状堆積物中有機炭素濃度を示した。江戸時代の宍道湖東部は赤潮の頻発や塩分成層により、現在よりも堆積物中有機炭素濃度が高かったことが分かる宍道湖では1990年代まで、*Prorocentrum minimum* による大規模な赤潮が発生していたが、1994年11月に発生した同種による赤潮は、ヤマトシジミが生息する湖岸部ではシジミの摂食により翌朝

には消滅していた（山室、未公表資料）。2012年にアオコが発生した際にはこのような現象は生じず、ラン藻類が全く濾過されずに残存していたことから、シジミにとって *P. minimum* は餌としての価値があると考えられる。

宍道湖東部では1800年代に現在よりも有機物が蓄積しやすい状況だったが、その後、第二次世界大戦終了までは東西・湖心ともに同様に低い有機炭素濃度を示している。この頃の宍道湖は住民に対するインタビューによるとシャジクモに似た植物が繁茂し、肥料用に盛んに刈り出されていた（平塚ほか、2006）。また1947年10月3日にアメリカ軍が撮影した写真は湖底が水深4mまで見えるほど透明度が高く、また湖底を這うタイプの水草が湖底に点在している様子が写っている（図2）。このことから1950年代までの宍道湖は貧栄養で、植物プランクトンが非常に少なかったと考えられる。



図2 米軍写真による1947年当時の宍道湖。水深4mにある湖底の砂堆が見えている。小室・山室（2013）より。

朝鮮戦争が勃発し、米軍の日本での物資補給の必要から工業化が促され、農業から工業に労働人口を移動させる必要が生じた。このため全国一斉に農薬や化学肥料の使用が開始され、各地の平野部湖沼で一斉に沈水植物が消滅し、肥料用採草も行われなくなった（平塚ほか、2006）。宍道湖ではこれにより富栄養化が進み、植物プランクトンを摂食するヤマトシジミが急増する。ただしその漁獲量は他産地が衰退したり、衰退した産地にシジミを運搬する手段が開発されるなど、外部条件に左右されていた（図3）。

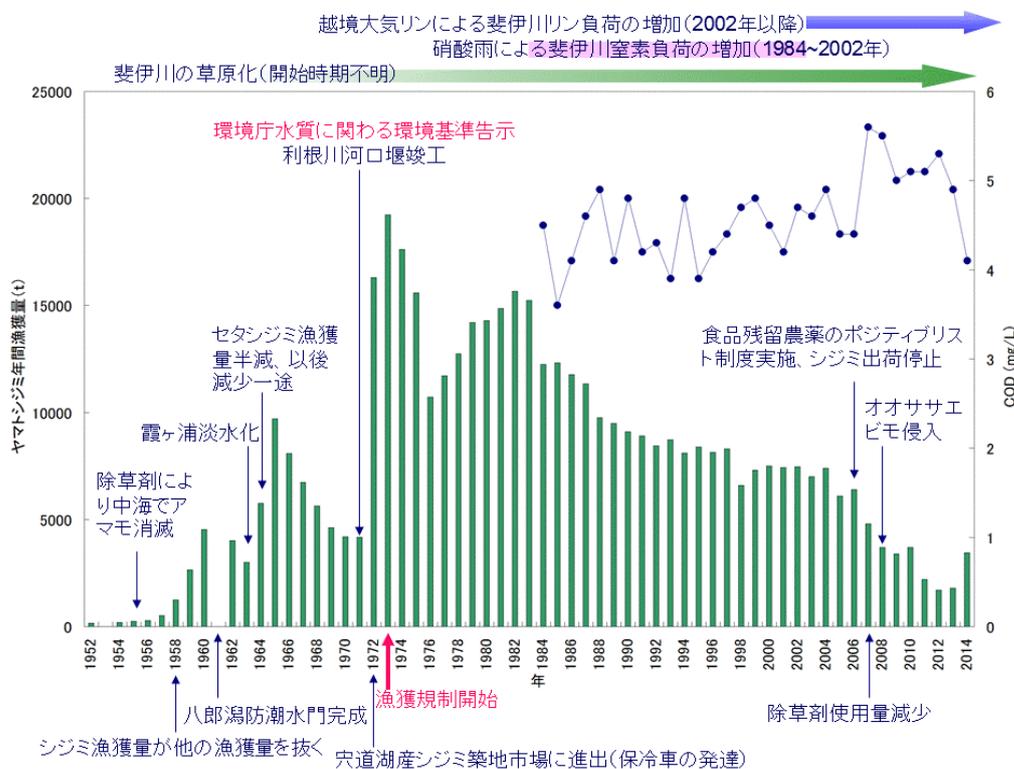


図3 宍道湖におけるヤマトシジミ年間漁獲量、年間平均COD濃度と関連事項

環境庁（当時）が水質に関わる環境基準を告示したのが1971年で、流域からの汚濁負荷を減らす試みはこの年からようやく始まり、1980年代からこの効果が現れてきたと考えられる。このことは後述する、シジミ以外の漁獲対象種の増減からも推定できる。しかし宍道湖では漁獲規制によりシジミ漁獲量を抑制することで流入負荷減少効果が相殺されたために、2006年頃までCOD濃度がほぼ同じレベルで推移した（図3）。1980年代から2000年代初めまでのシジミ漁獲量減少は資源の枯渇ではなく意図的な漁獲規制の為であったことは、シジミ漁獲量とシジミ単価の関係から推定できる（図4）。2000年代前半までは価格が上がることで資源を維持しつつ、売り上げ額を維持できていた。

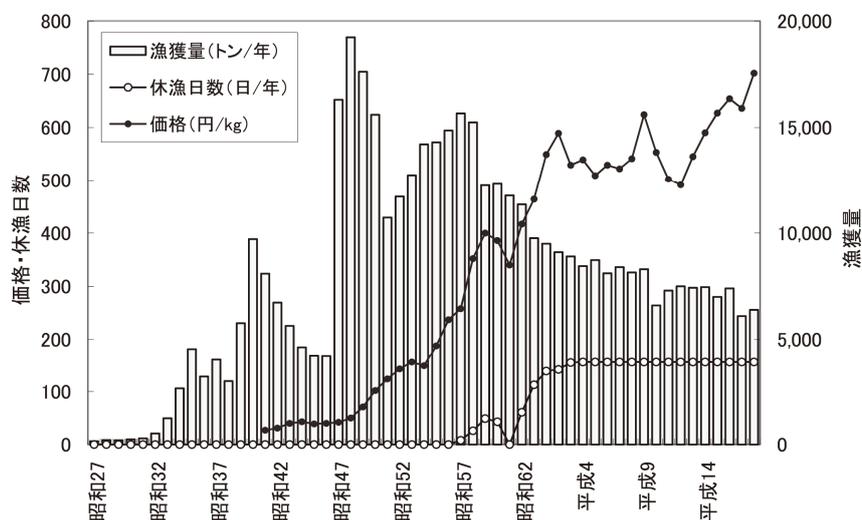


図4 宍道湖における漁獲量、価格、休漁日数の変遷。高橋・森脇（2009）より。

斐伊川では1984年頃から越境大気窒素による窒素負荷の増加が見られ、特に冬季の斐伊川水の硝酸濃度が高くなる現象が顕著になった（Kamiya et al. 2008）。その後、中国での石炭燃焼量の増加から越境大気リンが増加し、2002年以降は斐伊川でN/Pが減少するようになり（Miyazako et al. 2015）、宍道湖水のN/Pも減少するようになった（図5）。

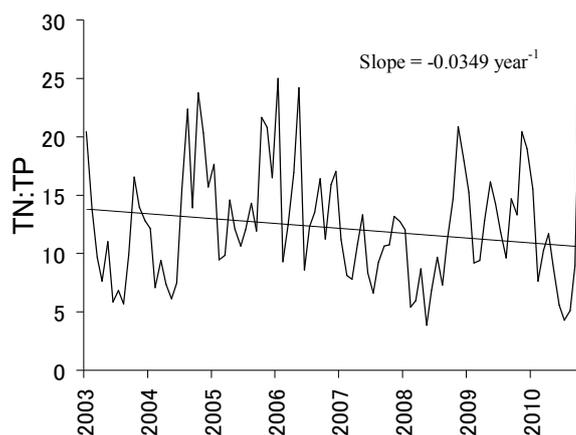


図5 宍道湖湖心表層水の全窒素：全リン比の経年変化。Tabayashi et al. (in prep.)より。

斐伊川水系でも「樹林化」が進行していたが、斐伊川は砂河川であるため樹林ではなくセイタカヨシを中心とする「草原化」が進行していた。さらに、斐伊川水系では越境大気負荷により窒素やリンが供給されること、河床が砂であることから、他の日本の河川よりも植物生産が大きく、出水時に植物枯死体が宍道湖への有機汚濁負荷になることが分かった（図6）。

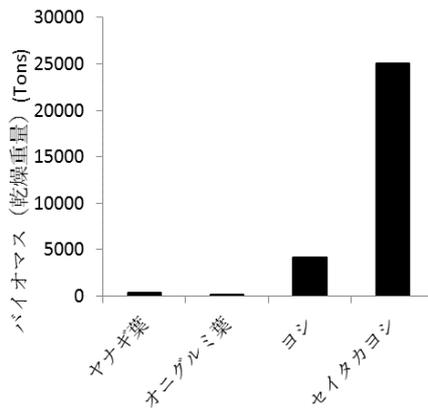


図6 宍道湖上流25km区間における洪水時の植生流出量

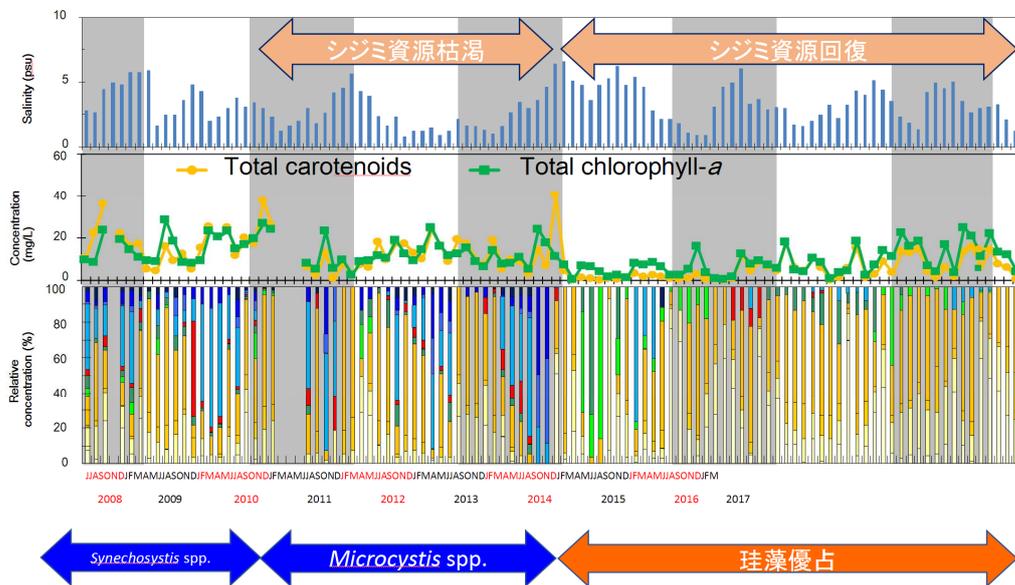


図7 宍道湖湖心表層水の色素濃度・組成・塩分濃度

湖水の N/P が低下すると珪藻よりラン藻類が優占しやすくなることから、ラン藻類の優占によって、2007年頃からシジミの漁獲量の減少と COD 濃度の増加が起こったと考えられる。実際、本研究の色素を使った植物プランクトン構成の検討でも、シジミが減少していたときはラン藻類が優占していたことが分かっている (図7)。この頃同時に、除草剤使用量の減少により水草の繁茂も始まった為、「宍道湖異変」として関係者の不安を引き起こすこととなった。

以上述べた宍道湖における生元素循環の変遷は、過去30年間における宍道湖表層堆積物中有機炭素濃度を比較からも裏づけられた。強熱減量と有機炭素濃度の近似式から計算した表層堆積物の有機物濃度は、流入負荷の削減を進めた1982年から1997年にかけて減少傾向だったが、水質がラン藻類に有利になった2002年以降である2016年に向けて増加傾向に転じていた。この結果は強熱減量を有機炭素濃度に変換していた為、別途、全く同じ方法で採泥し、全く同じ方法で表層堆積物中有機炭素・窒素・リン濃度を分析し、隣接する中海についても同様の比較を行った (図8)。宍道湖では有機炭素と窒素が1996年よりも2017年で増加し、いずれも中海に近い濃度になった (表1)。中海では有意な増加は生じていない。このことは、宍道湖では2002年以前まで働いていた有機物除去システム (=シジミ漁業による系外除去) が働かなくなり、中海と同様の状況になったことを示すと解釈できる。

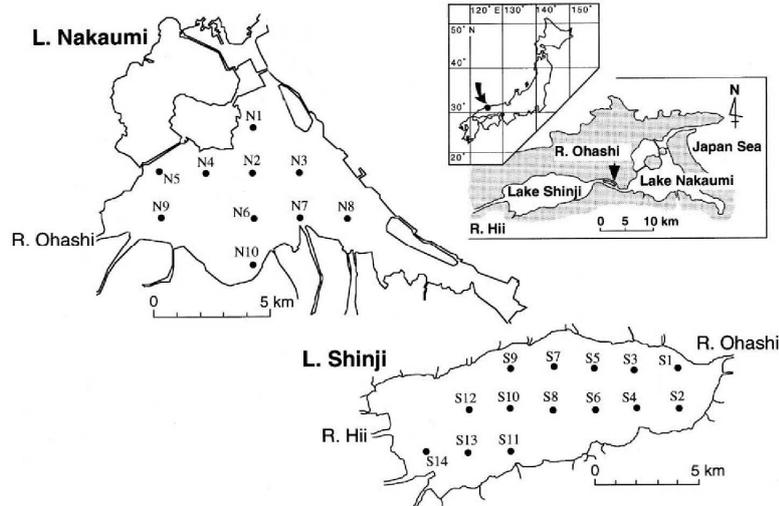


図8 1996年10月と2017年8月に採泥を行った地点

リンはもともと宍道湖の方が高く、1996年と2017年で有意差が無かった。宍道湖ではヤマトシジミの殻が大量に存在することから中海よりもカルシウム濃度が高く、アパタイトとして吸着しているリンの濃度が高いために、有意な増加が生じなかった可能性がある。これを確認するには宍道湖と中海の堆積物中カルシウム濃度を比較する必要がある。

先述のように宍道湖では越境大気リンの影響で湖水のN/Pが減少しており、過去と同じ塩分でもラン藻類が優占しやすい状態になっている。加えて、近年の水草の繁茂は湖水中の二酸化炭素を水草が光合成で使用することからpHがアルカリに傾き、珪藻は利用できないがラン藻は利用できる HCO_3^- が卓越する状態を引き起こす。宍道湖では2012年に過去最大のアオコが発生したが、同じく水草に覆われている琵琶湖でも2016年には過去最多、2017年には過去最速でアオコが発生している。本研究で水草が繁茂している場所の方がそうでない場所より貧酸素化しやすい傾向があることが示されたが、それに加えてラン藻類の優占を促進する影響も生じると考えられる。その水草は、暖候期の塩分が平年値の2倍である8PSUで推移した2013年にはほとんど繁茂せず、同時に珪藻の優占によってシジミ資源の回復につながっていた。

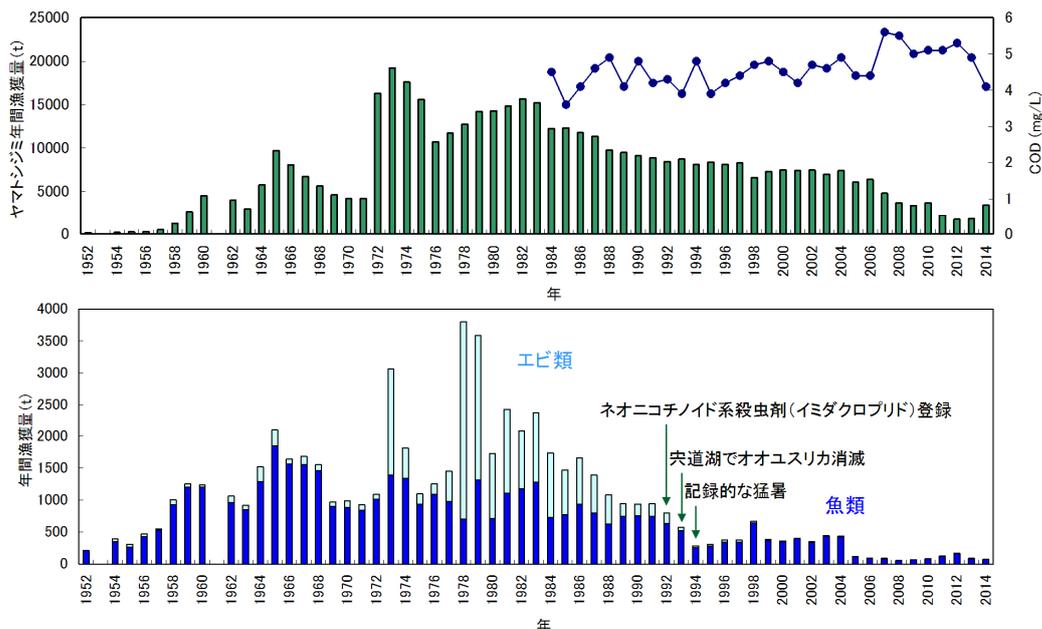


図9 宍道湖におけるヤマトシジミ年間漁獲量(上)とその他の漁獲対象種の年間漁獲量。宍道湖漁協ホームページに掲載されたデータから作成。

表1 宍道湖と中海の表層堆積物における有機炭素・窒素・リン濃度の1996年と2017年の比較。
*p*値は対応のある *t* 検定の結果を示す。

	Organic C (wt. %)			Nitrogen (wt. %)			Phosphorus (mg g ⁻¹)		
	1996(a)	2017(b)	b/a	1996(a)	2017(b)	b/a	1996(a)	2017(b)	b/a
Lake Shinji									
S1	1.5	2.6	1.7	0.19	0.38	2.0	0.57	0.80	1.4
S2	1.1	1.8	1.6	0.13	0.25	2.0	0.46	0.59	1.3
S3	2.2	3.3	1.5	0.28	0.46	1.6	0.62	0.82	1.3
S4	1.9	2.9	1.5	0.23	0.42	1.8	0.52	0.76	1.5
S5	2.6	4.3	1.7	0.33	0.68	2.1	0.68	0.99	1.5
S6	2.5	3.8	1.5	0.31	0.48	1.6	0.55	0.87	1.6
S7	2.8	4.5	1.6	0.36	0.67	1.9	0.72	0.96	1.3
S8	1.5	4.3	2.9	0.17	0.66	3.9	0.50	0.99	2.0
S9	2.3	3.7	1.6	0.28	0.50	1.8	0.68	0.84	1.2
S10	3.1	3.8	1.2	0.40	0.55	1.4	0.67	0.77	1.2
S11	2.7	3.2	1.2	0.31	0.43	1.4	0.73	0.82	1.1
S12	3.0	2.7	0.9	0.36	0.32	0.9	0.79	0.69	0.9
S13	2.6	4.5	1.7	0.31	0.57	1.8	0.69	0.97	1.4
S14	2.8	3.9	1.4	0.29	0.42	1.5	1.8	1.1	0.6
Average	2.3	3.5	1.6	0.28	0.48	1.8	0.71	0.86	1.3
<i>p</i> -value		<0.0001			<0.0001			0.073	
Lake Nakaumi									
N1	2.7	3.1	1.1	0.30	0.39	1.3	0.49	0.72	1.5
N2	3.3	3.3	1.0	0.39	0.43	1.1	0.48	0.73	1.5
N3	2.9	3.3	1.1	0.32	0.37	1.2	0.68	0.69	1.0
N4	2.8	3.1	1.1	0.34	0.39	1.1	0.60	0.69	1.2
N5	4.0	3.8	0.9	0.54	0.57	1.0	0.69	0.77	1.1
N6	3.3	3.6	1.1	0.38	0.41	1.1	0.59	0.67	1.1
N7	3.1	4.3	1.4	0.32	0.38	1.2	0.53	0.56	1.1
N8	4.1	3.0	0.7	0.49	0.31	0.6	0.55	0.59	1.1
N9	2.6	3.1	1.2	0.30	0.38	1.3	0.48	0.64	1.3
N10	3.0	3.8	1.3	0.31	0.47	1.5	0.76	0.61	0.8
Average	3.2	3.4	1.1	0.37	0.41	1.1	0.59	0.67	1.2
<i>p</i> -value		0.221			0.161			0.048	

懸濁物食性二枚貝であるヤマトシジミは富栄養化とともに漁獲量が増加したが、その他の漁獲対象種も1980年代まではヤマトシジミと類似した増加をたどっていた。しかしヤマトシジミが2000年代前半まで一定の漁獲量を保っていたのに対して、エビ類は1992年にネオニコチノイド系殺虫剤が登録され、翌年に水田での使用が開始されると同時に激減し、現在ではほとんど漁獲されていない(図9)。ネオニコチノイド系殺虫剤は昆虫を標的にし、人間を含む他の生物に対して、それまで主に使われていた有機リン系殺虫剤よりも影響が少ないなどの理由で、現在、主要な殺虫剤として広範に使用されている。本研究では、宍道湖集水域でネオニコチノイド系殺虫剤の使用が始まった1993年に、それまで羽化時に迷惑害虫とされるほど大量に生息していたオオユスリカが消滅したことを明らかにした。また、1982年8月に採泥した場所と同じ場所で2016年8月に採泥を行ったところ、節足動物を中心に淡水性から低鹹汽水性の大型底生動物が激減していることが判明した(表2)。大型底生

動物は魚類にとって重要な餌資源である。宍道湖では有機物生産（＝富栄養化の度合い）は変わらない、もしくは増加傾向にあるにも関わらず魚類の生産が減っていることは、餌資源が化学物質によって減少している可能性があることが分かった。

表2 1982年夏と2016年夏の宍道湖における1㎡あたりの大型底生動物平均個体数の比較

動物名/年	1982	2016
節足動物		
オオユスリカ	121	0.0
Tanypodinae亜科ユスリカ類	125	19
ムロミスナウミナナフシ	30	0.2
環形動物		
ヤマトスピオ	88	131
イトゴカイ科の1種	101	0.4
ヒガタケヤリムシ	4.2	12
カワゴカイ属の1種	5.1	2.6
貧毛類	188	14

以上を踏まえて、先述の1)～5)の目標について総括を行う。

- 1) 近年定着するようになった水草類の塩分耐性を明らかにし、その影響を評価する。

暖候期の塩分が8PSUだった2013年には水草類の繁茂が生じなかったことから、この程度の塩分を保つことにより、今年度の研究で観測された貧酸素化などを軽減することができる可能性がある。一方で、今年度に行った水草の塩分耐性実験では、8PSUが宍道湖に繁茂している水草の生息限界値であるという明確な結果は得られなかった。今後の研究課題としてさらに検討する必要がある。

- 2) 「ヤマトシジミ漁業により流入する栄養物質の1～2割が除去される状態」を望ましい環境として、その状態を維持する塩分を決定する。

本研究では大橋川上流地点における塩分の連続観測データが得られている計算格子を境界位置として物理モデルの再現性を確保した上で、水質計算に島根県の第6期湖沼水質保全計画において構築された水底質結合生態系モデルを基本とし、塩分に起因する植物プランクトン種の交代と、植物プランクトン種交代の影響を受けたヤマトシジミの成長を考慮した生態系モデルを構築して計算を行った(図10)。その結果、2012年、2013年の宍道湖の状況は概ね再現できていた。また感度解析として、シジミが全くいないと仮定した場合に主要水質がどのように変化するか解析した(図11)。今後は、2013年同等の塩分が維持された場合に、上記の望ましい状況が再現できるかを計算する必要がある。

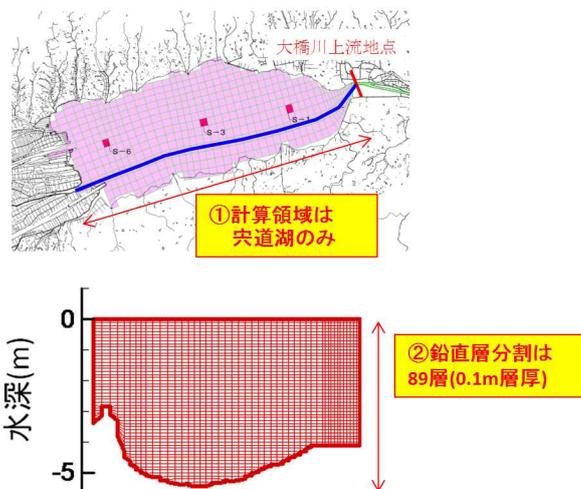


図10 開発したモデルの計算条件の一例。水底質結合生態系モデルの物理モデルに対して、①大橋川上流地点を境界位置として宍道湖のみを計算対象とする、②宍道湖の鉛直座標において層数を32

層から 89 層 (0.1m ピッチ) に増やす、の改変を行った。

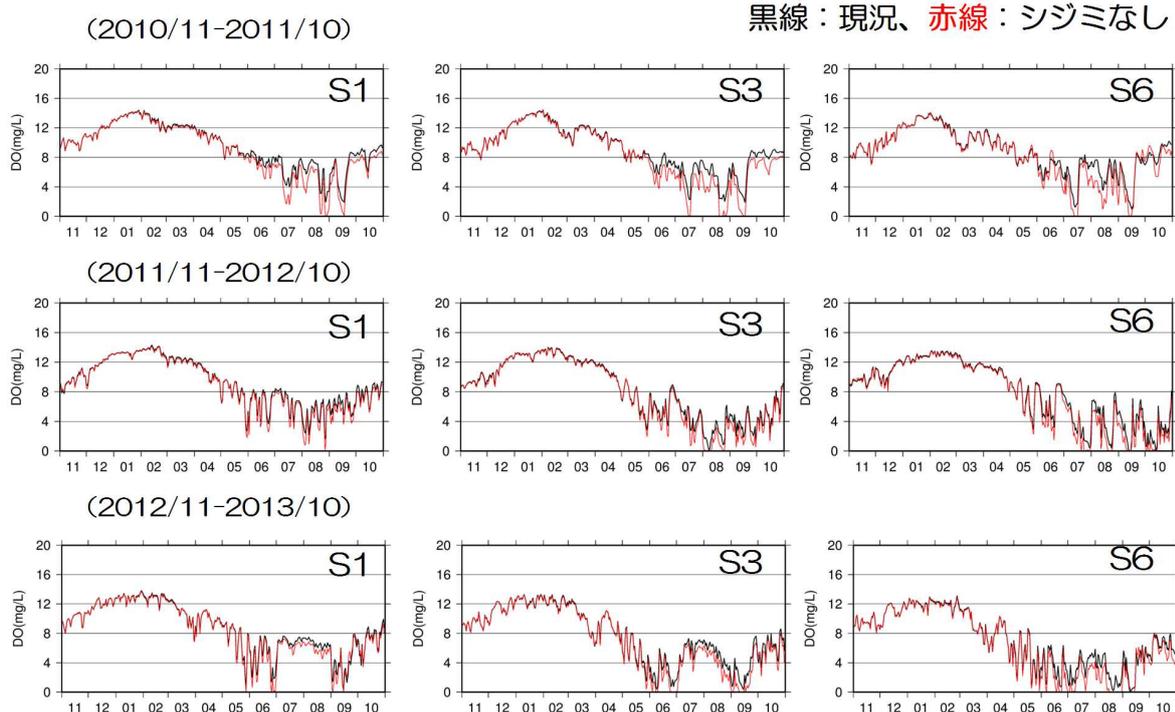
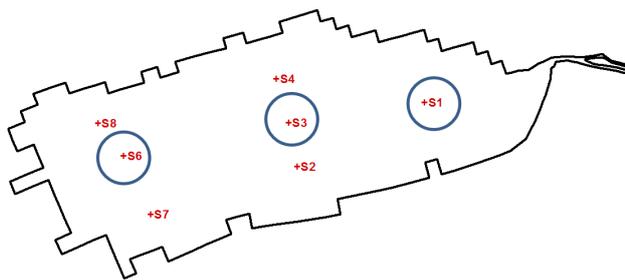


図 1 1 宍道湖の 3 地点について行った底層水溶存酸素濃度の感度解析結果

本検討課題は「4) 上記塩分範囲での宍道湖の環境をシミュレーションにより再現する。」と重複しており、達成できたことと今後の課題は同様である。

3) 目標とする環境が成立していた時点で存在していなかった植生や構造物などの影響を定量化して提示する。

除草剤使用量の減少により発生したと考えられる水草の繁茂の影響については、貧酸素化を生じやすくするという、一定の見解は得られた。一方で、その駆除方法としての塩分上昇については、どの程度上昇させればよいかについて明確なデータは得られなかった。またヤマトシジミの餌となる植物プランクトンとしてラン藻類が優占すると資源量が減少することが分かったが、例えば現在の海面に合わせて大橋川を拡幅してラン藻の優占を抑制する場合、将来、海面が上昇すれば、想定以上の塩分になってしまう可能性がある。従って、今後、塩分をコントロールする以外に対策ができない局面が発生した場合には、高塩分水の流入量が制御できるシステムにする必要があると考えられる。

斐伊川河岸の草原化により、出水時にセイタカヨシ枯死体が有機汚濁負荷として流入する可能性が示唆された (図 1 2)。これについては、斐伊川放水路の運用により、ある程度の負荷削減が可能であることが、本研究より明らかになった。また出雲河川事務所では枯死ヨシの刈り取りとその有効利用を図っており、ヨシをマルチング材として使用した場合にアレロパシー効果が皆無ではないこと

も、本研究で実証された。

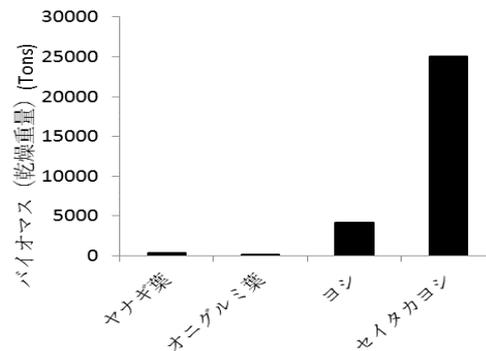


図 1 2 宍道湖上流 25km 区間における洪水時の植生流出量

本研究を進める過程で、殺虫剤による底生動物の減少が漁獲対象水生生物の減少をもたらした可能性があることが浮上した。その場合、河川管理者の所掌範囲だけで宍道湖の生物多様性や生産性を再生することは不可能と考えられる。

引用文献

- 平塚純一・山室真澄・石飛裕 (2006) 「里湖モク採り物語 50 年前の水面下の世界」 生物研究社
- Kamiya, H., Y. Kano, K. Mishima, K. Yoshioka, O. Mitamura, and Y. Ishitobi (2008) Estimation of long-term variation in nutrient loads from the Hii River by comparing the change in observed and calculated loads in the catchments. *Landscape Ecology and Engineering* 4, 39–46.
- 小室隆・山室真澄 (2013) 1940 年代に撮影された米軍空中写真を用いた宍道湖における水草群落分布範囲の推定, *応用生態工学*, 16, 51-59
- Miyazako, T, Kamiya, H., Godo, T., Koyama, Y., Nakashima, Y., Sato, S., Kishi, M., Fujihara, A., Tabayashi, Y., Yamamuro, M. (2015) Long-term trends in nitrogen and phosphorus concentrations in the Hii River as influenced by atmospheric deposition from East Asia. *Limnology and Oceanography*, 60, 629–640
- 大西郁夫(1986)中海・宍道湖湖底表層コアの花粉分布と環境変遷. *山陰地域研究(自然環境)*, 2, 81-89.
- 高橋正治・森脇晋平 (2009) 宍道湖におけるシジミ漁業の漁業管理制度. *島根県水産技術センター研究報告*, 2, 23-29
- Yamamuro, M. and Kanai, Y. (2005) A 200-year record of natural and anthropogenic changes in water quality from coastal lagoon sediments of Lake Shinji, Japan. *Chemical Geology*, 218 (1-2), 51-61
- 渡辺正巳・中海・宍道湖自然史研究会(1988)中海・宍道湖の自然史研究一その 8.中海・宍道湖より得られた柱状試料の花粉分析. *島根大学地質学研究報告*, 7, 25-32.

