「天神川アオコ対策検討業務」の紹介　～特にアオコの性質について～

○地域戦略研究所　櫛谷 知之、基礎設計室　花田 晋一郎

まえおき

本業務は、近年の宍道湖周辺で大発生が確認されている「アオコ」について、天神川域内で回収作業を実施・処理するにあたり、より現場に則した効率のよい手法を検討・提案するものである。業務発注の背景には、水質への環境意識の高まりや、アオコに対する地域住民からの苦情の増加、水産業・観光などへのダメージなどが挙げられるが、島根県としても今後アオコ対策に重点を置く方針が明確に表れたものと思われる。

１．業務の概要と本発表のスタンス

業務の概要は、前段で「アオコの性質や発生状況等の調査・整理」を、後段で「対策工法の検討」を行い、最後に「対策と有効利用に関する提言」をまとめるという流れである。

今回の発表内容は、前段の「調査・整理」と最後の「提言」を中心とし、後段の「対策工法の検討」は省略する。理由として、後段の「対策工法の検討」については今年度の大発生を見据えたものであり、執筆時点では未実施であること、また、対策工法については始まりの緒に就いたばかりで試験段階の域を出ず、今後の変更が多分に予想されることなどが理由である。

２．アオコの基礎的な知見

２－１．アオコの生物学的分類

アオコとは、富栄養化が進行した湖沼・港湾・ため池・ダム湖などで浮遊性の藍藻が大発生し、特に水面に集積することによって、水の色が濃い緑色を呈する現象を指す。ペンキを流したように色が変わるため、別名「水の華」と言われる。原因生物は藍藻類である。

藍藻類には〔クロオコックス〕〔ユレモ〕〔ネンジュモ〕などのグループが知られている。宍道湖で発生するアオコは、クロオコックス目ミクロキスティス属に分類される『ミクロキスティス・イクチオブラーベ』と呼ばれる種であることが、平成 22 年に判明している。

表１　藍藻類の分類

目	属
クロオコックス目 (Chroococcales)	*Microcystis*
	Woronichinia
ユレモ目 (Oscillatoriales)	*Oscillatoria*
	Planktonthrix
	Planktonthricoides
	Arthrospira
	Tricodesmium
ネンジュモ目 (Nostocales)	*Raphidiopsis*
	Cylindrospermopsis
	Anabaenopsis
	Aphanizomenon
	Nodularia
	Anabaena
	Gloeotrichia
(Stigonematales)	*Umezakia*

２－２．宍道湖で発生するアオコの特徴

宍道湖で発生する主なアオコは、かつては藍藻類ミクロキスティス属の *Microcystis aeruginosa* 、あるいは同アナベナ属の *Anabaena* sp. とされてきたが、平成 22 年には新たに *Microcystis ichthyoblabe* と確認され、近年はこの種の発生が続いている。

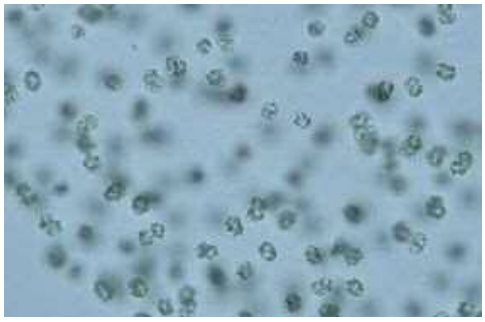


写真1 ミクロキスティス・イクチオブラーベ
（島根県環境政策課 H22 報告より）

表２　宍道湖で大発生しているアオコの性質

名称	*Microcystis ichthyoblabe*（ミクロキスティス・イクチオブラーベ）
分類	ラン藻綱 クロオコックス目 ミクロキスティス属
形状	寒天質の膜が見えない。ガス泡を多数体内に有し、不定形のスポンジ状群体を形成する。細胞は 2.5～5μm。
水温適正	高温を好み、低温に強い。水温 25℃では２日で３倍に、20℃では２日で２倍程度に増殖する。水温 10℃以下では増殖しなくなるが、4～5℃の冷暗所でも生き残り、生育適温に戻ると再び増殖する。*M.ichthyoblabe* は *M.aeruginosa* より低温に強い。
塩分適正	淡水生の藻類であり、中海（海水の 1/3 程度）では生息が難しいが、宍道湖（海水の 1/10 程度）では生息可能である。特に宍道湖の塩分が低下した状態（塩化物イオン濃度が 1000mg/l＝海水の 1/20、宍道湖平均の約半分）になると発生しやすいとされる。
発生特性	細胞内のガス胞は光合成と関連して消長する。暗条件ではガス胞が成長して浮上し、明条件では光合成の細胞内糖分蓄積により浸透圧が高まってガス胞が潰れ沈降する。このように浮き沈みを繰り返し、湖底の養分や表層の光を巧みに活用しながら増殖を繰り返す。枯死または強光により光合活性を失うと、細胞は沈下しなくなり、湖面表層に蓄積してスカム状となる。細胞は鞭毛など自らの運動性を持たないため、浮遊個体は風により容易に吹き寄せられ、高密度に堆積する。

２－３．アオコの毒性

ミクロキスティス属のアオコは「ミクロシスチン」という藍藻毒を産生するとされるが、情報は少なく、*M.ichthyoblabe* については、有毒種なのか無毒種なのか、諸説あって実態は不明である。一方で、全国的に広く見られる *M.aeruginosa* はミクロシスチン産生種として広く知られている。

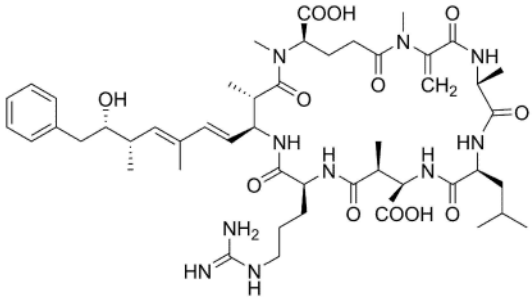


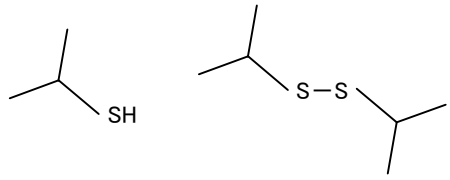
図１　ミクロシスチン-LR の構造図

「ミクロシスチン」の構造は、アミノ酸が７個環状に結合した構造であり、フグ毒に匹敵する猛毒で人体に健康被害を引き起こし、急性的には肝臓障害、慢性的には肝癌を促進する。一方で、自然分解され、生物濃縮されるという報告もある。

毒性被害については、1995 年に兵庫県内２ヶ所の池沼で水鳥が死亡した例が知られているが、農業被害や人への健康被害は国内では報告例がない。しかし海外では、病院事故（52 名死亡）や家畜被害（約 2,000 頭が死亡）が知られ、決して軽視すべきものではない。

２－４．アオコの臭気

細胞分裂中のアオコからは「２-プロパンチオール」が、枯死して腐敗するアオコからは「ジイソプロピルジスルフィド」が産生する。前者は「ガス臭」、後者は「人糞臭」に例えられ、前者が発生すると地域住民からのガス漏れ通報が頻発する。



2-プロパンチオール　　ジイソプロピルジスルフィド

図２　アオコが産生する臭気物質の構造図

アオコの臭気物質については感覚的な悪臭だけではなく、国際化学物質安全性カードなどで確認されるように、高濃度での人体への有毒性を示す。比重も重いため、くぼ地や排水管などに高濃度で滞留する可能性があり、注意が必要である。

２－５．宍道湖におけるアオコの発生状況

宍道湖では、1964 年からアオコ発生の記録がある。発生頻度は、過去は数年に１回程度で確認されてきたが、2010 年以降は毎年大発生しており、発生頻度は高まっている。

原因種で見ると、昭和から平成にかけては *Microcystis aeruginosa*、*Anabaena* sp. などの種が主体であったが、平成以降から変化が生じ、*Microcystis* sp. が確認されるようになった。2010 年には *Microcystis ichthyoblabe* と正式に確認され、この種が近年のアオコ優占種となっている。

表３　宍道湖におけるアオコの発生状況等（1964～2012 年）

年	宍道湖の発生状況
1964	水の華現象　盛夏～秋期
1966	水の華現象　盛夏～秋期
1968	水の華現象　盛夏～秋期
1969	アオコが大量に発生(9月上旬～中旬)特有の青草臭、湖水緑色
1971	8月にかなり広範囲で確認
1975	水の華の形成に至らず。
1976	8月下旬～9月初旬にアオコ大発生、9月下旬頃沈静化。
1977	夏期～秋期(8, 9, 10月)にかけてアオコ大発生、中海にも影響を及ぼした。
1981	8月上旬～10月上旬にかけて、宍道湖全域でアオコが大発生し、中海まで影響を及ぼした。
1982	アオコの現象に至らず。
1985	8月中旬～10月初旬にかけてアオコの発生が認められた。とくに、9月下旬には、来待付近へアオコの吹き寄せがあった。
1986	8月中旬～9月下旬にかけてアオコが長江干拓堤防西側及び秋鹿駅前の舟溜りに発生。
1988	8～11月まで全域にアオコ発生。今までで最大の発生。
1989	1月　湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼の指定。第1期水質保全計画。8月下旬～9月にアオコが宍道湖東南部に認められた。
1990	9月下旬～11月下旬にかけて、アオコがとくに宍道湖南岸に発生。
1993	アオコ、赤潮の発生認められず。Microcystis sp.は夏に出現せずに、10, 11月に少し見られた。
1994	第2期水質保全計画
1997	9月中旬～12月中旬にかけてアオコが発生。9月中旬は南岸、10月上旬は西長江川河口、11月下旬は白潟公園付近、12月中旬は南岸でアオコが確認された。
1998	7～2月までアオコが散見され、10月には全域で大発生。
1999	第3期水質保全計画。Dictyosphaeriumの一種と考えられる緑藻が4月に優占。Prorocentrum minimumによる赤潮が6月に発生。9～11月に小規模のアオコが発生。これはMicrocystis aeruginosaとは形質が明らかに異なりMicrocystis sp.として報告された。1～3月に緑藻が全域に出現。
2000	Dictyosphaeriumの一種と考えられる緑藻が4月に優占。9, 10及び3月に珪藻のCyclotella類が優占。10, 11月にMicrocystis sp.によると考えられるアオコが発生。
2004	第4期水質保全計画。アオコ(種類は不明)は10月下旬に鳥ヶ崎で発生。年間を通じてSynechocystis sp. が出現していた。5月、6月にP.minimum が出現。8月はSynechocystis sp.が優占。9月、10月にSynechocystis sp.、Cyclotella 類が出現。11月にCyclotella 類が出現。2月にHeterocapsa rotundata が出現。
2006	9月上旬にアオコ宍道湖一円で発生。Microcystis aeruginosa。5、6月にAphanocapsa cf.delicatissima が優占。7、8、11月にSynechocystis sp. が優占。9、10月にChaetoceros sp .が優占。2月にLobocystis sp.が優占。3月にcf. Dictyosphaerium sp.が優占した。
2009	第5期水質保全計画
2010	8月中旬から翌年3月下旬までアオコを確認。10月に2-プロパンチオールおよびジイソプロピルジスルフィドによるアオコ臭発生。(臭気物質の特定)、4月にCyclotella がspp.が優占。5月にSynechocystis sp.とCyclotella spp.が優占。6月にSynechocystis sp.が優占。9月にAphanocapsa holosatica が優占。12月にSkeletonema potamos が優占。3月にThalassiosira pseudonana とPseudodictyosphaerium sp.が優占。
2011	8月に宍道湖全域で発生～12月末まで継続
2012	8月に宍道湖全域で発生～12月まで継続

２－６．アオコ発生の他事例

他事例は、国内では霞ヶ浦、諏訪湖、琵琶湖を始め、三方五湖・湖山池などの汽水湖、津久井湖・相模湖・ダム湖などの人造湖、八郎湖など干拓湖、小規模なため池及び河口部等で発生が確認されている。多くは高度経済成長時代に初確認され、一度アオコが発生した湖沼は、その後も数年間隔もしくは毎年のように発生するケースが多い。

海外では、中華人民共和国の太湖（江蘇省）、巣湖（安徽省）、滇池（四川省）のいわゆる「三湖」でのアオコ発生が、その圧倒的な発生規模と深刻度で広く知られるようになっている。

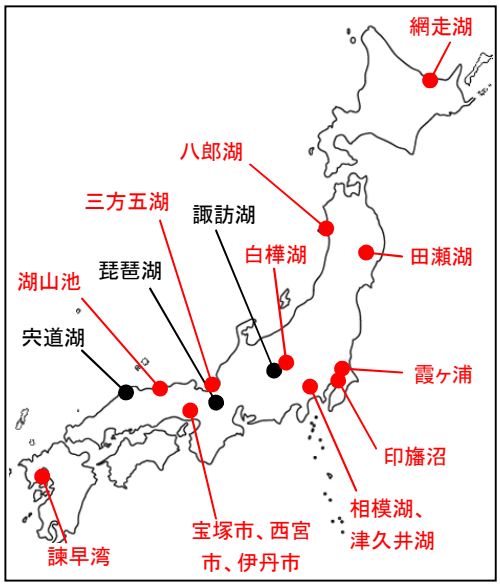


図３　主なアオコ発生地の位置

３．基礎調査

３－１．現地の状況および写真

天神川の沿岸を上流から下流まで踏査し、現地状況の確認を行った。（省略）

３－２．気象・水象条件等の整理

（１）風向・風速

宍道湖湖心の既存調査結果を見ると、卓越風向は概ね東西方向である。風配図では、7～9 月には東風が卓越する一方で、10～12 月には南西～西の風が卓越し、天神川に吹き寄せられる西風条件となる。このことから、アオコ発生がピークを迎える盛夏から秋にかけ、風況も天神川に吹き寄せられやすい状態にシフトしてくる。

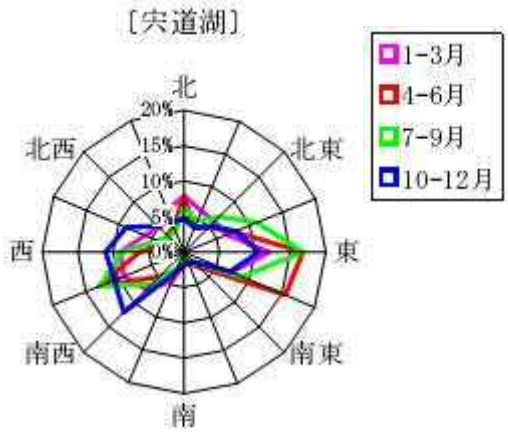


図4　宍道湖湖心の風配図（平成 15 年）
「大橋川改修事業環境調査最終とりまとめ」
（平成 21 年 2 月　出雲河川事務所）より

ヒアリングによると、アオコは大発生時に湖面上に浮遊し、強風時に風下の護岸などに吹き寄せられ、スカム状（厚い膜状の浮き滓）のアオコが水面に厚く堆積するという。このため、効率よく回収するためには自然の風の力を活用して、風下に厚く堆積している箇所を狙って回収することが重要であり、そのためには、回収実施者は風向や風速データをあらかじめ把握しておくことが大切である。

（２）降水量

松江地方気象台の平均降水量を見ると、アオコ発生ピークの盛夏～秋にかけては降水量の変動が大きい傾向を示している。増水はアオコの入れ替え促進をもたらし、少雨はアオコの滞留をもたらす。また、降水量の増減は宍道湖水の塩分濃度を変化させるため、浮き沈みを繰り返しながら増殖するアオコの発生に対し、影響を強く与える可能性がある。

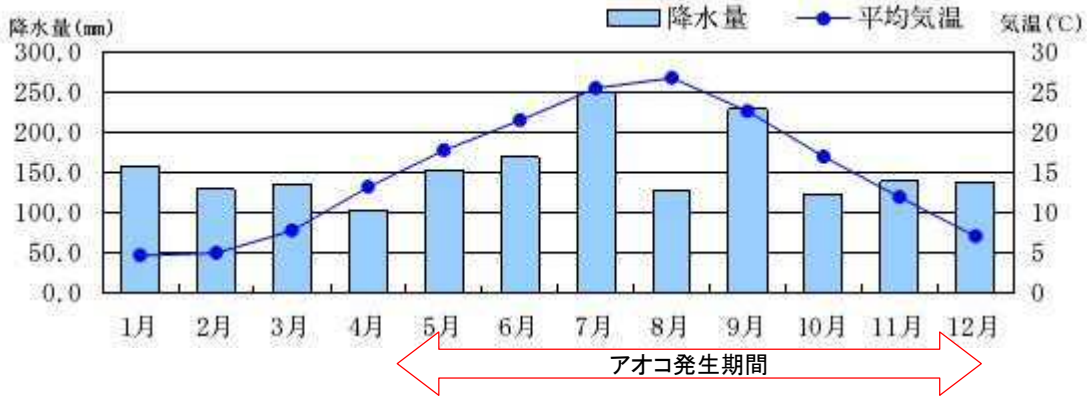


図5　松江気象台の平均気温・降水量（平成元～18 年）

（３）水温

宍道湖湖心の水温の年間変動は、年間を通して表層と深層の水温差はほとんど認められない。

M.ichthyoblabe は水温 25℃以上で大発生する。低温に比較的強く、宍道湖では冬期に死滅せずに湖底に留まり、水温が 15℃を超える４月中旬頃から増殖を開始し、冬期の 10℃以下で完全に増

殖を停止するとされる。このことから、発生の開始は概ね４月中旬～５月初旬、発生ピークは８月～９月中旬頃、11 月頃まで増殖が続き、12 月を超えて増殖を停止するものと推測される。

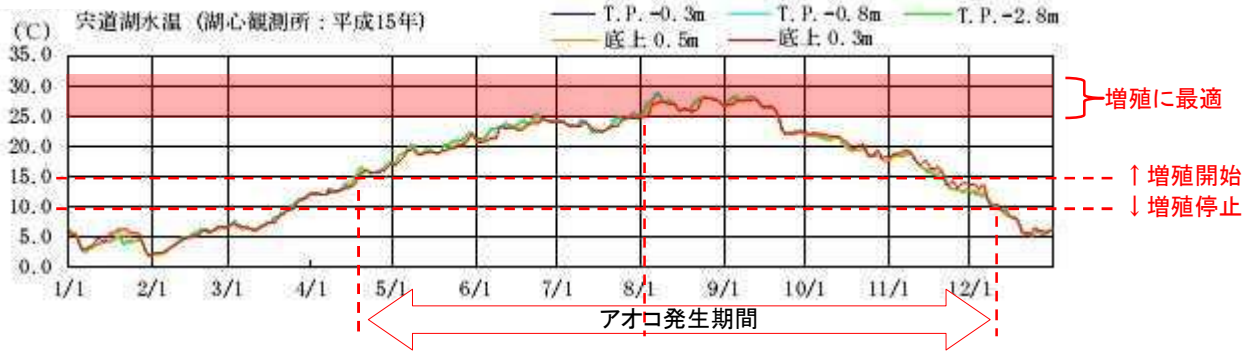


図６　宍道湖湖心の水温の年間変動（平成 15 年）

（４）塩分濃度および水温

アオコの塩分耐性については、島根県環境生活部環境政策課の平成 22 年報告（表４）で調査が行われている。それによると、塩分濃度と水温の間には密接な関係があると示唆されている。

表４　*Microcystis ichthyoblabe* の増殖特性

水温（℃）						
	25～	◎	◎	◎	◎	×
	20	○	○	○	△	×
	15	△	△	×	×	×
	～10	×	×	×	×	×
塩化物イオン濃度（mg/l）		200	2,000（宍道湖）	4,000（天神川）	5,500	10,000（中海）
		0.4 PSU	3.7 PSU	7.4 PSU	10.1 PSU	18.4 PSU

◎は2日で3倍程度、○は2日で2倍程度、△は3日で2倍程度に増える。
×は増殖が確認できない。

水温 20℃以上では、比較的高濃度の塩分でも増殖が可能であるが、増殖分岐点の水温 15℃では塩分耐性は落ち、宍道湖上層では増殖可能だが宍道湖下層では増殖不可な状況となる。

天神川の塩分濃度は、概ね大橋川と同様か若しくはやや淡水に傾いた 6～9 PSU の範囲と考えられる。よって、発生初期段階では、宍道湖から天神川へ流入したアオコは増殖が難しいが、水温が上昇するにつれて、天神川域内でも増殖が可能になると推測される。

（５）流況（流速・流向）

アオコの移動については風況だけでなく天神川の流況に直接影響されるが、現時点では天神川に流量・流向等の観測地点が設置されておらず、既存の観測データはない。

このため、天神川に近接する大橋川の流況がそれに最も近いと判断し、国土交通省「松江流量観測所」の詳細データを入手して流況解析を行った。流向別の流速・水深・降水量・平均風速・風向等のデータと合わせてまとめた結果は今回省略するが、傾向の把握結果を表５に示す。

表５　大橋川の流況の傾向

傾向①	地球の自転に伴う干満の影響
傾向②	降雨による増水と流下
傾向③	塩分躍層の存在
傾向④	吹送流の存在

３－３．関係者ヒアリング

宍道湖でのアオコ発生に関係する各団体、及び匿名の条件で回答して頂いた地域住民に対し、ヒアリングを実施した。ヒアリングの概要を以下に示す。

（１）ヒアリング先

宍道湖漁業協同組合、島根県立美術館、竪町河童隊（地元代表）、前年度回収実施事業者、ＮＰＯ自然再生センター、出雲河川事務所水環境課、地域住民（匿名）

（２）ヒアリング結果（抜粋）

Ｑ：考えられる悪影響を挙げてください ①悪臭 ②景観の悪化（観光施設などへの営業被害） ③アオコの付着（漁具や船への付着）（水草への付着、回収時の振るい落としが大変） ④風評被害（シジミなど水産物） ⑤水産資源への影響（アオコの枯死→シジミの死滅、エサ不足）（魚類へい死にも関係する） ⑥環境、生態系への影響（生態系を支える珪藻類の減少）（他のﾌﾟﾗﾝｸﾄﾝの光合成を遮断） ⑦観光客への影響（堀川遊覧船）（水郷松江市として影響が大きい） ⑧宍道湖水は利水利用されていないため、その面では大きな影響はない。
Ｑ：考えられる発生原因は何だと思われますか ①実際にはよく分からない。複合的な要因が絡んでいる。 ②栄養塩類の増大（流入負荷は減少）（湖底溶出は増大）（N/P比：リンと窒素のﾊﾞﾗﾝｽ変化） ③除草剤の規制 ④気象条件（降水量の増加：塩分の低濃度傾向の継続）（降水量の減少：滞留時間の増加） ⑤水温条件（日射量の増大：水温の上昇）（温泉排水の影響）
Ｑ：アオコ発生時の状況を聞かせてください ・風により吹き寄せられ、天神川の上流付近によく溜まる。 ・湖心ではひどい時には「アオコレベル４～５」であった。
Ｑ：悪臭の詳細を聞かせてください ・空調がある建物の中にいると気付かない。　⇔　・窓が全く開けられない。 ・細胞分裂時の臭いはガス臭（刺激臭）でひどい。　⇔　・枯死腐敗時の臭いが大きい。
Ｑ：苦情等は受けたことがありますか。またその内容は？ ・アオコの直接的な苦情は特にない。 ・シジミに関する問い合わせ程度はあるが苦情ではない。説明して納得してもらっている。 ・ガス局や消防署など担当課へ苦情や通報が寄せられるため、その件数を把握している。
Ｑ：実施しているアオコ対策等についてお聞かせください ・（関連対策として）ＮＰＯで藻刈りによる水質浄化とリサイクルを実施 ・国土交通省による浅場造成事業と水質調査などの知見収集、各機関との情報共有 ・漁協による「海底耕運」と「噴流による湖水の撹拌」（試験段階）
Ｑ：その他 ・対策上の注意点、助言 ・漁協との調整事項 ・天神川へのフェンス設置等についての確認等

４．アオコ対策に関する提言

４－１．作業全般の記録・調査および整理

アオコの直接回収に関しては、全国的にも実施事例が少なく不明な点が多いため、有効な回収法の確立と来期以降への備えとして、次回の回収実施時において、各作業段階における課題や試行錯誤状況、改良点などを記録・整理することは非常に有意義であると考えられる。

４－２．天神川のアオコに関する地域影響の把握

現場となる天神川の動態を明らかにすることは、今後の対策に役立つだけでなく、地域への悪影響の低減や問題意識の共有につながり、地域全体のアオコ問題の解決に資する。

①天神川の簡易流向調査とアオコの動態との関連
（ドップラー流速・流量計等での簡易測定）
②風雨（気象データ等）との関連
③地域住民への影響に関するアンケート等の実施。
（ex.住民が感じる悪臭の程度と、アオコレベル・発生時期・臭気物質の違い等との関連）

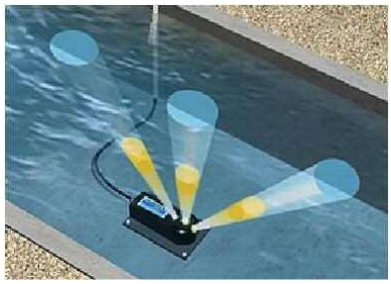


図7 ドップラー流速・流量計イメージ
（YSI ナノテック社 HP より）

４－３．効率のよい観測・判断手法の検討

過去の例から、アオコの発生は長期にわたり、また大発生のピーク予測は困難である。このため、定期的な観測が必要であるが、観測にかかる費用は大きく、効率のよい実施が求められる。

①ネットワークカメラの活用
②常時観測地点の精査　など

４－４．下水管への放流処理の検討

○下水管への放流処理に向けた検討（関連行政機関との調整等）

回収したアオコを下水管に直接放流して下水処理するための検討であるが、この方法は、下水道法や流域下水道事業との整合性、下水処理場の処理能力、自治体との処理負担調整などの課題が想定され、実現性は低い。一方で、手間と費用の大幅な低減が見込める。

実現に向けて、技術的な面については室内試験等を実施するなどの方向性が考えられる。

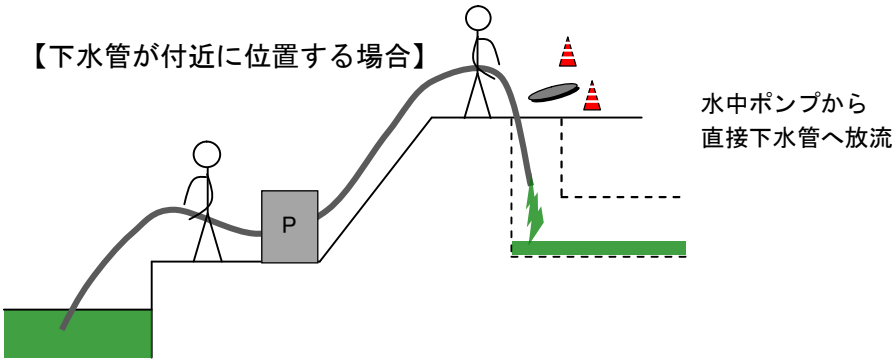


図8 下水管への放流処理イメージ

４－５．アオコの有効利用に向けた検討

発生量の膨大さと処理費用、施設への負荷等から、焼却処分は永続的な方法とは言えない。このため、アオコを「処分」ではなく、「有効利用」する方向へシフトさせていく努力が求められる。

有効利用を検討する上で、毒性の有無の確認は非常に重要である。また、後の堆肥化を想定する上で、肥料成分の含有量試験も併せて実施することが望ましい。

①アオコの毒性確認（藍藻毒）および成分分析の実施（肥料成分）

アオコは植物プランクトンであり、宍道湖の栄養塩類を体内に取り込んでいることから、自然の物質循環のサイクルに乗せることは水質浄化の観点から、また生態系の観点から好ましい。

②堆肥化の検討

②－１毒性なし〔農地での作物生育試験〕〔コンポストや野積み等などによる堆肥化実験〕

②－２毒性あり〔ミクロシスチンの土壌微生物による分解試験〕

宍道湖・中海では県事業として地元団体・NPO・大学等が参画した「藻刈りによる栄養塩循環システムモデル構築」が進められており、アオコについてもこの循環に含めるべく検討を進める。

③資源循環型「島根方式」の構築

③－１毒性なし〔上記の循環モデル事業との連携〕〔アオコ肥料などの製造・販売〕

③－２毒性あり〔リン・カリウムなど回収システムの検討〕

４－６．天神川沿岸の環境改善に向けた検討

アオコに長年悩まされてきた地域では、近年では自然環境復元に対して目が向けられ、水辺のヨシ帯整備や自然護岸の保全・創出などが試みられている。

宍道湖では、近年特にシジミ資源の減少が著しく、生態系および漁業上の危機的状況が続いている。アオコの大発生やシジミ減少については複合的な原因である可能性が高いことから、改善には自然生態系復元技術を活用し、生態系全体の底上げを図ることが重要である。

①天神川の水辺環境の自然復元

〔ヨシ帯の復活：ヨシ帯を中流～上流に拡大〕

〔なだらかな形状を持つ水辺の創出〕

→生物多様性の増大と子どもなどの事故防止

〔低水路を設置し増水等による変化を許容する〕

②天神川のヘドロ除去

〔栄養塩類の溶出防止〕

〔速やかな湖水流下によるアオコ滞留の改善〕

〔澪筋の創出による多様な水深・塩分・流速環境〕

→シジミ資源の退避場的役割

③関係者との連携　　など

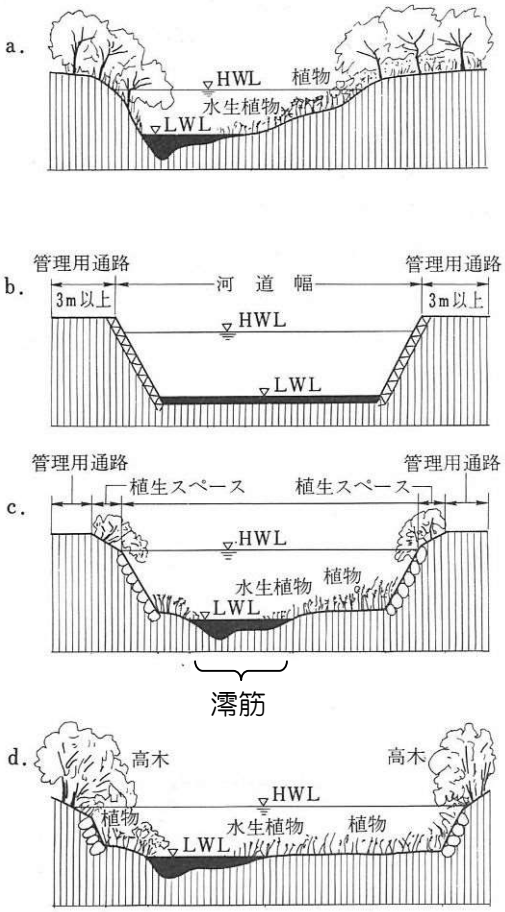


図9　河川断面の自然環境復元イメージ

「自然環境復元の技術」p95 より