33. 地球温暖化と気候変動の影響下にある浅い湖沼と貯水池に於ける底泥堆積環境と栄養塩特性

押谷　優[1]*・細川　忠幸[1]・河野　将太[2]・村上　雅博[3]

[1]高知工科大学大学院物質生命システム工学コース（〒782-8502高知県香美市土佐山田町宮ノ口185）

[2]高知工科大学環境理工学群（〒782-8502高知県香美市土佐山田町宮ノ口185）

[3]高知工科大学（〒782-8502高知県香美市土佐山田町宮ノ口185）

＊ E-mail: *kanren0@yahoo.co.jp*

地球温暖化と気温上昇に伴った、極地的豪雨などの気候変動が発生することで山林に於ける表土の流出や山腹崩壊による土砂流出量が増加し、ダム貯水池の堆砂に於いては50年間の計画堆砂量を上回るケースが増えおり、加えて海水面温度の上昇による冬季の気温低下の緩和に伴い、繁殖力の旺盛な亜熱帯性植物が越冬し、増殖と枯死を繰り返すことで浅い湖沼に有機性底泥の急激な堆積を招いている。本論では、気候変動の影響下にある様々な貯水施設に於いて異なる底泥堆積環境が栄養塩（N,P）集積に与える影響を明らかにし水質環境への影響を評価し、問題への緩和・適応策を提案するものである。底泥に含まれる栄養塩の含有濃度の差異により有機コンポスト化及び土壌改良剤等の農業への、循環利用の可能性がある他、有効貯水量の回復にも貢献できる。

Key Words : *shallow reservoir, dam removal, sludge sedimentation, accumulation of nutrient, attribution environment, recycling*

1. 序論

本章は研究の背景と目的そして、手順について述べる。

(1) 研究背景と目的

地球温暖化と気温上昇に伴った、極地的豪雨などの気候変動が発生することで山林に於ける表土の流出や山腹崩壊による土砂流出量が増加し、ダム貯水池の堆砂に於いては50年間の計画堆砂量を上回るケースが増えており、加えて海水面温度の上昇による冬季の急激な気温低下の緩和に伴い、冬季に於いても繁殖力の旺盛な亜熱帯性植物、ホテイアオイ等が越冬し、増殖と枯死を繰り返すことで浅い湖沼に有機性底泥の急激な堆積を招いている。戦後の高度経済成長を支えるために水資源の確保が大きな課題となり、世界中で多数のダムが建設された。そして現在、ダム湖や湖沼のような貯水施設に於いて老朽化や堆砂が進行しており、21世紀の環境問題に於ける一つの課題としてクローズアップされてきている。本論では、気候変動の影響下にあるダム湖や湖沼のような貯水施設に於いて異なる底泥堆積環境が栄養塩(N,P)集積に与える影響を明らかにし水質環境への影響を評価し、問題への緩和・適応策を提案するものである。貯水池に於いて、堆砂は避けて通ることのできない問題であり、日本だけでなく世界的にも解決すべき大きな課題である。堆積底泥は、落ち葉だけでなく植物性プランクトンや水生植物、魚類の排泄物など様々な有機物が堆積、分解される過程で出来ており多くの栄養塩(N,P)を含むため、それらを有効な資源として循環利用することで底泥増加による有効貯水量の圧迫軽減にも貢献できると考えられる。

(2) 研究手順

温暖化が高知県沿岸部に与える影響を確認するため、土佐湾における海水表面温度(Sea Surface Water Temperature : SST)変動、室戸岬気象観測所における気温変動、高知県中央部の時系列データを収集整理しそれぞれの特性と相関性を明らかにし、気温の上昇に伴った亜熱帯性植物であるホテイアオイの異常増殖問題を解決するため、これらの越冬原因解明のための植生分布のメッシュ調査を実施し、植物体の持つバイオマス量の算出とその影響いついて評価を行った。また、堆積する底泥の主要な有機質起源は、上記したホテイアオイのような水生植物の他に、比較対象として魚類の排泄物、陸生植物、植物性プランクトンがある。今回は、

これらに由来する底泥を有する水深6m以下の貯水池と内堀跡及び大小二つの規模のダム湖をモデル地として底質サンプリングを実施し、各底泥サンプルの化学分析(T-N,T-P,TOC)及び土質性状分析(含水率等)を行い、流域の植生環境との関連性についての評価を行い、これらの問題への適応策についての提案を行った。

2. 高知県における海水面温度及び気温の変動

本章では、高知県の、土佐湾の海水温面温度と室戸岬気象観測所及び高知市の気温変化の相関について記述する。

(1) 土佐湾における海水面温度変動

初めに、土佐湾の51定点の観測データから、34年間での海水表面温度変化を知るために1975年から2009年までの年間平均海水温度のグラフと、月平均海水面温度のグラフを作成した。その結果、土佐湾では平均海水面温度が34年間で1.5℃上昇しており(図-1)、夏期の水温には明瞭な上昇の傾向は確認できないが冬期の水温については1985年から顕著に上昇していることが分かった(図-2)[1]。

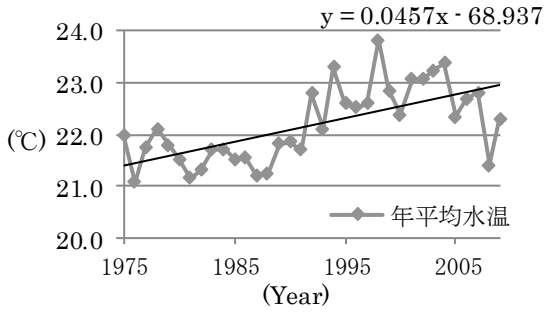

図-1 土佐湾における年平均海水面温度変動

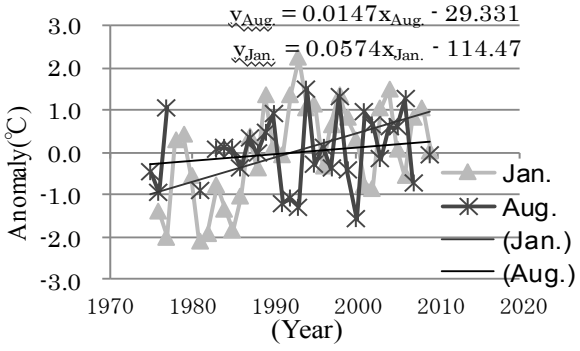

図-2 土佐湾における年平均海水面温度変動

(2) 室戸岬における気温変動

次に、室戸岬気象観測所の1920年から2012年までの92年間の年平均気温を比較した結果、気温の上昇は明らかであり、0.8℃上昇している(図-3)[2]。これは世界平均気温の上昇率0.74℃/100年間よりも高い値で、高知に於ける今後の気候変動を予兆させるものだと考える[3]。

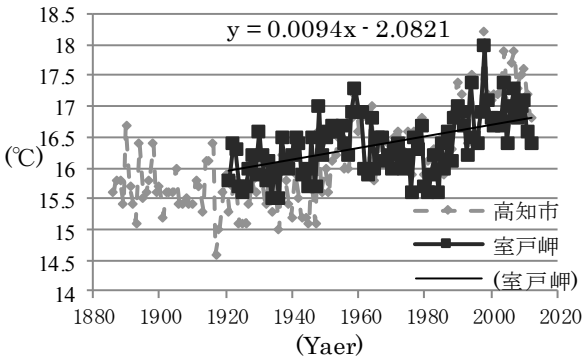

図-3 土佐湾における年平均海水面温度変動

(3) 気温と海水面温度との相関

室戸気象観測所の気温は土佐湾の海水面温度変動に似た変動を示しており、室戸岬の月平均気温と土佐湾の月平均気温海水面温度それぞれの平年値を用いた相関図では、相関係数0.79と高い値を示し、双方に強い相関があることが分かった(図-4)。この相関から今後の温暖化の影響による動植物種に与える影響が懸念される。

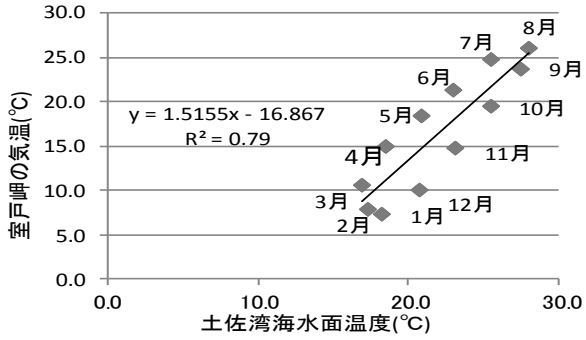

図-4 室戸気象観測所(気温)と土佐湾平均海水面温度の相関

3. 温暖化による亜熱帯性植物の異常増殖問題

本章では、第一章の気温変化の影響と亜熱帯性の水生植物の中でも増殖性の高いホテイアオイの異常増殖問題について述べる。

(1) 地球温暖化の影響とホテイアオイ

一章で記述したように、高知県の土佐湾では平均海水面温度が上昇している。この海水面温度の上昇原因は土佐

湾の南に流れる世界最大規模の暖流・黒潮海流の影響を強く受けているためと考えられ、黒潮海流の影響による土佐湾の平均海面水温の上昇により高知市の年間平均気温も近年上昇傾向にある[4]。そのような気候変動の中、高知だけでなく日本各地の池や湖沼で外来種(亜熱帯性植物)の異常繁殖が問題となっている。環境省の自然環境局ホームページ上では要注意外来種として植物は84種登録されており、特に問題視されているものとしてホテイアオイ(*Eichhornia crassipes)*がある(写真-1)。

写真-1　ホテイアオイ(*Eichhornia crassipes*)の群生

花が可憐で美しく、観賞用として明治時代にブラジルから大量輸入され、1972年に日本での野生化が確認され現在に至っており西日本を中心に分布している。特徴は、水中の窒素・リン量が多いほど増殖し時には湖面を覆ってしまう。そのため、水中に日光が届かなくなり沈水生の植物が光合成をできなくなり溶存酸素の低下を招く。本来ならば亜熱帯性植物であるホテイアオイは、日本の冬季の気温では生存が難しく枯死してしまうが、冬季に於いても気温、零度を下回ることの少ない高知県では、屋外でもホテイアオイの株の幾つかが越冬し翌春、再び増殖するという事態が発生している。

(2) ホテイアオイの増殖問題と対策

分布調査に於いて、ホテイアオイの越冬が確認された高知県南国市十市にある石土池では夏季の気温上昇と伴にホテイアオイが急速に増殖を始め、岸際の水面を被覆してしまう。増加した個体は冬季に大量枯死してヘドロとなり湖底に堆積することによって雨水調整池としての貯水機能を低下させているだけでなく、生育が確認されていた在来種の、ハスの生息域を脅かしており絶滅寸前にまで追いやっている。また、成長する過程で大量の窒素・リンを吸収するが、枯死するとこれらを水中に放出し水質の悪化を招いてしまうため、対策として年に一回、多額の費用を用い除去作業が行われている。

(3) 湖沼面の植生被覆分布

石土池の、ホテイアオイの湖面被服面積がピークに近づく9月から寒さの最も厳しい2月までの期間でメッシュ調査を行った結果(表-1)、9月はホテイアオイよりもヒシの割合が多く湖面全体の約23%、ホテイアオイが約14%を占めていた。10月の調査ではヒシが枯死し始め被覆面積が約15%減少していたがホテイアオイは約3%増加していた。11月に入り、気温の低下と伴にヒシが完全に枯死した。ホテイアオイは一部枯れ始めたが被覆面積は約1%増加しており、12月にはほぼ全てのホテイアオイが枯死し始めた。2月には石土池内ほぼ全てのホテイアオイの枯死を確認した。しかし、石土池に流入する河川の上流部ではホテイアオイの株が、枯死せず越冬していることが確認された。これらの個体が翌年、池に流入、増殖していると考えられる[5]。

表-1 石土池湖面植生被覆面積の変化

各面積	9月	10月	11月	12月
石土池	面積(ha)	面積(ha)	面積(ha)	面積(ha)
ホテイアオイ	3.3	4.2	—	—
枯死したホテイアオイ	—	—	4.4	3.1
ヒシ	5.4	1.9	0	0
水面	15.0	17.8	19.3	20.6
石土池湖面面積合計	23.7			

(4) ホテイアオイのバイオマス量

11月に枯死前のホテイアオイを採取し乾燥重量を測定し平均化した結果、0.25cm^{2}あたり約0.51kgで、計算上1m^{2}あたり約2.04kgとなった。これに、上記の湖面被覆面積を掛け合わせるとバイオマス量は約83.7tになる。これらのほぼ全てが冬季に枯死しヘドロ化、湖底に堆積すると考えられ、有効貯水量の圧迫が危惧される。これらを産業廃棄物として処理した場合には、約300万円以上の費用が必要と試算されることから、経済負担が大きく越冬個体の早期除去が望ましいと考えられる。

4. 浅い湖沼と貯水池に於ける底泥堆積環境と栄養塩特性

本章では、先に述べたホテイアオイを含め、**様々な底泥起源からなる、堆積泥の含有する栄養塩の集積特性について記述する。**

(1) 貯水施設に於ける堆砂の現状と対策

高度経済成長を支えるため日本だけでなく世界的にも

水資源の確保は大きな課題となり、ダム等の貯水施設が建設された。そして現在、貯水施設では老朽化と堆砂が進行しており、特に、堆砂に於いては50年間の計画堆砂量を上回るケースが増えており、21世紀に於ける環境問題の一つとしてクローズアップされてきている。堆砂問題へ対策は主に浚渫作業で対応されているが、1m³の底泥を浚渫する費用が六千円程の費用が掛かるため大ダム等の数百万m³単位の堆砂量を持つ現場では、費用面から多大な負担を強いられることとなる。

(2) 採泥調査地点と底泥の特徴

底泥の主要な有機質起源は、先に述べたホテイアオイのような水生植物由来のものの他に、陸生植物や魚類の排泄物、植物性プランクトンといったものが上げられる。今回は、これらに由来する底泥を有する水深 6m 以下の貯水池と内堀跡及び大小二つの規模のダム湖をモデル地として底質サンプリングを行い、土質性状等について分析と評価を行った。①高知県高知市のほぼ中心に位置する高知城の外壁を囲む外堀(写真-2)。ここは大型の魚類が多く飼育されており、堆積する底泥の起源は主に、魚類の排泄物と植物プランクトンの枯死したものである。②高知県南国市十市パークタウンにある、面積約 25ha の石土池(写真-3)では、三章で記述したホテイアオイやヒシといった水生植物が増殖し、それらが枯死、腐敗したものが主な底泥の起源となっている。③高知県東部、安芸市に流れる安芸川水系に連なる、小谷川の上流部に建造された小規模ダムである、小谷ダム(写真-4)では周囲の山林からの落葉が集まった腐葉土 (陸生植物由来)が主な底泥の起源である。④高知県香美市を流れる物部川の上流に建造された、湛水面積 208ha、堤高 87m の大ダムである永瀬ダム(写真-5)では落葉も含まれるが、山林の表土流出物が主な底質起源となっている。各モデル地に於いて、流入水源からの栄養塩流入に大きな差異は見られず、主要な有機質起源の違いによる栄養塩集積特性について見ていくこととした。

(3) 底泥の土質性状と栄養塩分析

今回採泥を行った四つの地点では①高知城外堀に於いて若干砂質が多かったが、土質性状は全体的にシルト質であり、含有する水分量が50%～90%と非常に高い傾向が見られ、底泥の含水率は、有機質起源の持つ水分量に大きく影響されていることも判明した。採泥で得られた

写真-2 高知城外壁を囲む外堀

写真-4 高知県東部安芸市の小谷ダム

写真-3 高知県南国市内の石土池

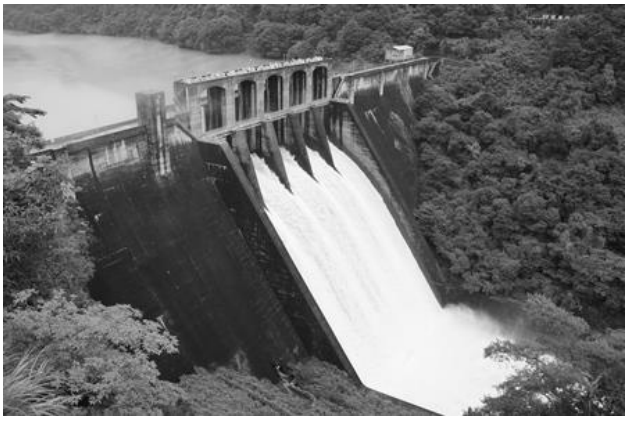

写真-5 高知県香美市物部川上流の永瀬ダム

各モデル地の底質サンプルは60℃で24H風乾させたものを粉末状にし、1mgを量り、純水15mLと混合したものを栄養塩(T-N,T-P) (図-5, 6)と全有機炭素量(TOC) (図-7)の分析を行った結果、栄養塩の間では相関は見られなかったが、全リン(T-P)とTOCには非常に高い相関があることが判明した(図-8)。また、全窒素(T-N)に関しては、永瀬ダムでは2.06mg/Lと極端に低く、植物由来の底泥を持つ石土池と小谷ダムでは47.75mg/Lと38.75mg/Lという酷似した値を示し、魚類の排泄物と植物プランクトンを起源に持つ高知城外堀の底泥のでは80.75mg/Lと植物由来の地点の2倍近い値を示した。これは堆積環境の変化に窒素分の集積が大きな影響を受けていると考えられる。これらより窒素やリンなど栄養塩の種類が異なることで底泥への栄養塩集積の特性が大きく変化していることが判明した[6)7)]。

5. 結論

本章では、研究全体の分析評価のまとめと今後の適応策についての提案、今後の課題について述べる。

(1) まとめ

高知県沿岸部に於ける温暖化の影響は土佐湾沖を通る世界最大規模の暖流・黒潮海流の影響が大きく、この影響により土佐湾の平均海面水温は34年間で1.5℃上昇しており、室戸岬気象観測所の1920年から2012年までの92年間の年平均気温では0.8℃上昇している。これは世界平均気温の上昇率0.74℃/100年間よりも高く、高知市もそれに伴い年間平均気温が近年上昇傾向にある。特に、冬季に於いて外来性の亜熱帯植物であるホテイアオイが、屋外での越冬が可能となるほどその影響力は大きなものであり、越冬と増殖、枯死を繰り返す水生植物の他、極地降雨などの異常気象を誘発するきっかけとなり、山腹崩壊などのさらなる災害を引き起こし、土砂流出量の増加を招き、貯水施設に於ける堆砂問題を加速させている。堆積する底泥に関しては、泥の起源の違いより有機物量や栄養塩(T-N,T-P)の含有特性が大きく異なり、植物体などの有機物を多量に含む底泥には比例するようにリン分が多く含まれる。また、魚類の排泄物等を起源に持つ泥では窒素成分が他所と比較し高く含有されていることが明らかとなった。

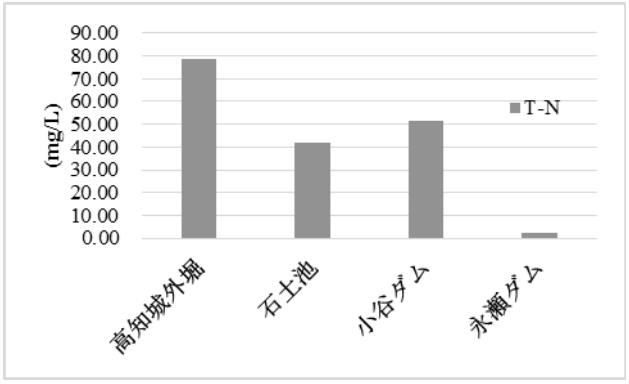

図-5 各採泥地点の全窒素(T-N)分析結果

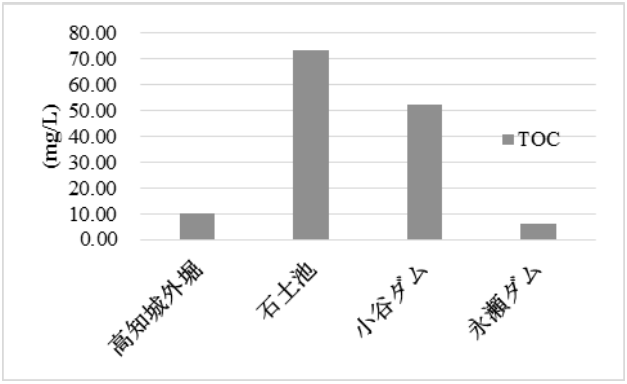

図-7 各採泥地点の全有機炭素量(TOC)分析結果

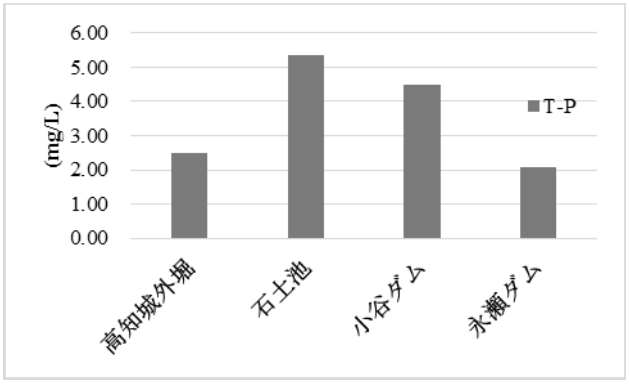

図-6 各採泥地点の全リン(T-P)分析結果

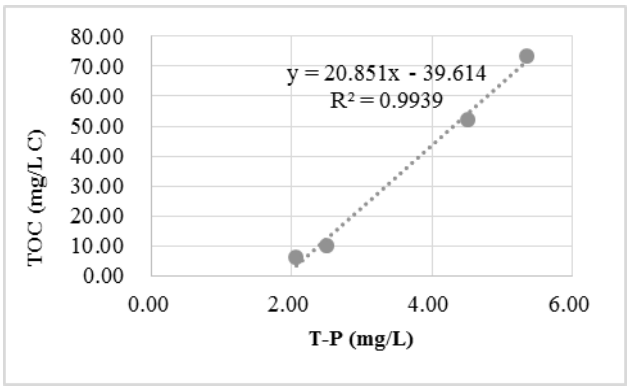

図-8 各採泥地点のT-PとTOCの相関

(2) 適応策の提案

温暖化の進行はに伴った外来性植物の増殖については、越冬地点に於ける植物体の早期撤去を行うことが重要であると考えられる。また植物性、動物性の違いはあるものの、生物体由来の底泥には多くの栄養塩(T-N,T-P)が含まれるだけでなく、有機物が多く含まれるためコンポスト化や土壌改良剤として、農業への循環利用が可能であると考えられる。有機質が少ない底泥に関しては焼成レンガなどの建材利用が見込めるため、浚渫時の費用軽減と貯水施設に於ける有効貯水量の回復が可能となる。

(3) 今後の課題

低炭素社会へ向けて、底泥堆積抑制のため撤去された植物体のバイオマス資源としての利用法の施策が必要であると考えられる。加えて、堆積底泥の鉛直方向に於ける栄養塩の分布と、豪雨に伴った堆砂状況の変化について調査していく必要がある。また、底泥を循環利用する際の各コストを試算しより有効な利用法の検討を進める必要があると考える。

謝辞：本書執筆にあたり過去35年間に及ぶ土佐湾海水温度観測結果をとりまとめたオリジナル資料の提供を頂きました、高知県・水産振興部・水産試験場・漁業資源課の方々に、この場を借り改めて御礼申し上げます。また、実地調査におきましては、多大な御協力を賜わりました高知県河川科及び永瀬ダム管理事務所、ハギノ建設及び高知県安芸農業復興センターの皆様方、同研室の面々に心より厚く御礼申し上げます。本研究をご支援くださった文科省・気候変動適応研究推進プログラム（RECCA高知）に心よりの感謝を申し上げます。

参考文献

1) 細川忠幸: 海水面温度の時空間変動が沿岸平野部の農業気象に及ぼす影響～高知県東部を例に～, pp. 3-8, 2012.
2) 気象庁　海水温度・海流データ: http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/kaikyo/dbindex.html
3) Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC 第 4 次評価報告書, 2007.
4) 村上雅博: 地球温暖化と土佐湾海水温度の時空間変動, 高知工科大学紀要第 9 巻 1 号,pp. 3-8, 2012.
5) 岡田雄也: 地球温暖化によるホテイアオイ異常増殖問題と適応策～石土池を例にして～,pp. 7-14, 2012.
6) 湖沼技術研究会底質ワーキング: 底質に関わる技術資料, pp. 8-27, 45-46, 2009.
7) 国土交通省 東北地方整備局: 「湖沼底質環境・調査手引き」（案）～小川原湖の底質調査結果から言えること～, pp. 38-56, 63-71, 2009.