地球温暖化による河川水温変動が水環境に与える影響評価と適応策の検討

九州大学大学院工学研究院環境社会部門

教授　矢野　真一郎

地球温暖化による河川水温変動が水環境に与える影響評価と適応策の検討

九州大学大学院工学研究院　矢野真一郎

１．研究目的

IPCC の WG1 による第 5 次報告書［IPCC(2013)］により今世紀における温暖化については疑う余地が無いことが報告されたことから，我々は温暖化を基本的な前提として適応することが求められている．気候変動に対する適応策については，水災害・水資源（渇水）・水資源（水質）・自然生態系・農業・熱中症・感染症の分野について検討が始まっている［三村(2015)］．土木工学の分野では，アメリカ土木学会の気候変動適応策委員会がレポート［ASCE(2015)］を提出しており，土木構造物・運輸・水資源・都市水システム・海岸管理・エネルギー供給・寒地の分野についての今後の適応策の方針を示しているが，水環境については触れられていない．また，水工学分野においては，降水量や台風の増大に伴う水災害への適応ならびに降水量年較差の増加に伴う渇水被害への適応などに注目が集まるが［社会資本整備審議会(2015)］，その一方で，水質や水圏生態系などの水環境については，個別の河川・湖沼・沿岸域・海洋への影響は評価されるものの［環境省(2013), 永田ら(2012), Poloczanska *et al*.(2016), Thomas *et al*.(2012), 宮本ら(2010)など］，それらを包括する流域圏全体での影響評価や適応策の立案には未だ至っていない．その原因としては，水環境を構成する要素のうち，最も基本的である水の流出や熱収支などの物理的過程についてさえも温暖化の予測における不確実性が大きいことや，水質予測モデルにおけるパラメータの変化予測が困難なこと，人工系の水・熱・物質の排出予測が困難なこと，などが考えられる．

近年，気候変動による環境異変が疑われている現象が数多くみられている．例えば，公共用水域の多くで水温上昇が確認されている［環境省(2013)］. IPCC 第 5 次評価報告書では，平均気温の上昇，ならびに海洋の表層部(0～700m)での水温上昇が報告がされている．地球温暖化の進行に伴い，気温上昇に加えて懸念されているのが河川水温の上昇である．それに伴い沿岸の淡水影響域(ROFI) ［Simpson・Sharples (2012)］に与える河川水温上昇の影響が懸念されるが，これについて着目した研究はほとんどない．

本研究で対象とする有明海は半閉鎖性の内湾であり，多数の一級河川と二級河川からの流入があるため河川水の影響を受けやすい内湾型 ROFI を構成している．しかし，河川水温の連続データは筑後川以外には存在せず，流れなどの物理現象の数値計算を行う際に他の河川については仮定した水温（例えば，毎月一回の測定値や筑後川のデータを用いるなど）が与えられていた．成層構造は有明海で深刻化している底層の貧酸素水塊の発達に関係するため，温暖化後の水環境への影響を評価する上で密度成層は最も重要な現象といえる．そこで，各一級河川について河口に近い流量観測所地点で水温の連続調査を実施し，取得された河川水温連続データを利用した流動モデルにより河川水温の変動が有明海の成層構造に与える影響を評価することを試みた．

２．研究内容

まず，有明海に流入する河川水温データを取得するため，一級河川を対象にして平成27(2015)年 8 月以降継続的に水温計を設置した．今年度（平成 28 年度）は 1 年間測定を継続し，平成 28(2016)年度末現在も測定を継続中である．対象となる河川は，矢部川，嘉瀬川，六角川（牛津川），白川，緑川，菊池川の 6 つである（**図-1**）．本研究では河川水温の沿岸域への影響を評価することを主眼におくため，測定地点は国土交通省管理の流量観測所のうち，感潮域を除いて河口に最も近い場所を選定した．また，筑後川に関しては国交省水文水質データベースの久留米大橋観測所で測られた毎時ごとの水温のデータを利用する．

図-2 に平成 28(2016)年に現地調査で得られた河川水温の時系列を示す．ここで示した期間は平成 28(2016)年 1 月から 12 月中旬までである．毎正時に河川水温を記録した連続データとなっている．なお，平成 28 年 4 月に発生した熊本地震による斜面崩壊などの影響で，その後の 6 月における出水後に大量の土砂が白川の河道内に堆積しており，設置した水温計の回収が白川のみできていない．その他については，基本的に回収・交換ができており出水期の水温データを含む一年以上の連続水温データがおおむね順調に取得できている．

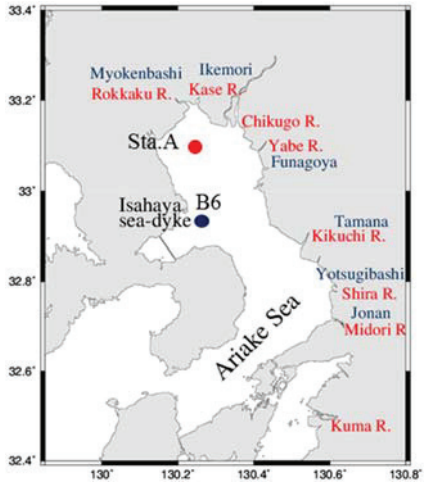

図-1　各河川の位置と比較地点

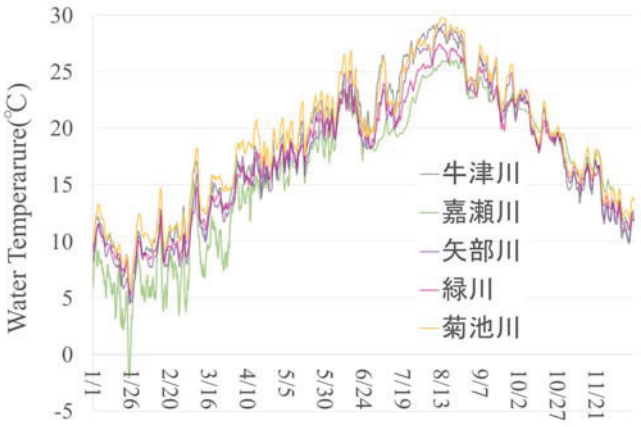

図-2　各河川の水温実測結果（2016 年）

次に，汎用型沿岸域流動数値モデルである Delft3D を用いた有明海・八代海結合モデル［矢野ら(2015)］から得られる熱成層について精度評価を行った．淡水流入については，一級河川（**図-1**）と 9 本の比較的大きい二級河川，ならびに諫早湾の締切堤南北排水門を考慮した．河川水温については，調査により得られた毎時データを使用した．二級河川については，近傍の一級河川と水温は同じに，流量は比流量が同じになるように仮定した．海水面での熱 flux モデルとしては，村上モデルを用いた．評価に必要な気象データは，全天日射量はアメダス福岡を，風速は九州農政局が管理する諫早湾の観測櫓 B6 地点を，気温はアメダス佐賀を用いた．

諫早湾内 B6 地点（**図-1**）における九州農政局測定の水温分布連続データ（**図-3a)**）と比

較した結果，モデルによる計算結果（**図-3b)**）は海水温の値や熱成層の発達・消滅過程が良く一致していることが確認できた．

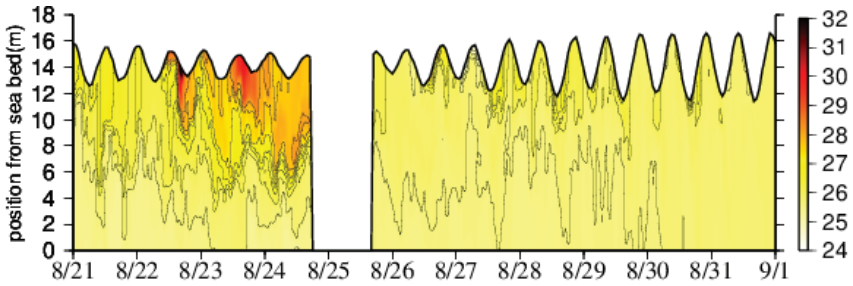

図-3a)　諫早湾 B6 地点の水温測定結果（2015 年 8 月下旬；空白は欠測）

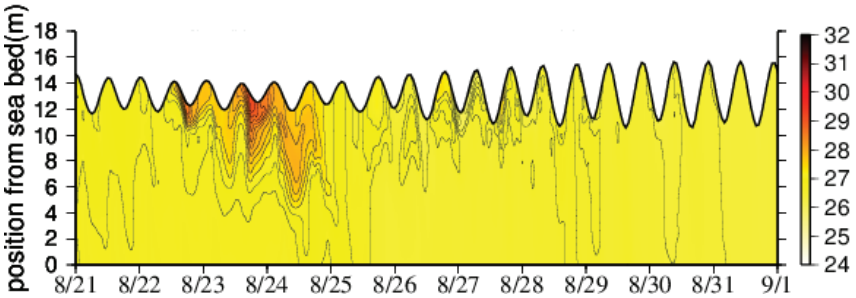

図-3b)　諫早湾 B6 地点の水温の計算結果（2015 年 8 月下旬）

次に，各河川に測定データを用いた場合（ケース 1）と各河川で毎月一度測定されている水温データを 1 ヶ月間与える場合（ケース 2）の比較により，河川水温の時間変動が与える熱成層への影響を評価した．有明海内で淡水の影響を最も強く受ける北部有明海 Sta.A で比較した（**図-1**）．比較時期は水温観測データと河川流量が両方とも揃っており，熱成層の発達が期待される 2015 年 8 月とした． 期間中の気象イベントとして，8 月 25 日から 27 日にかけて台風 1515 号による降雨に起因する出水があった．

図-4 に両ケースについての水温イソプレット，ならびにそれらの差（ケース 2 からケース 1 を差し引いた差）のイソプレットをそれぞれ示す．全体的にケース 1 の水温が低いこと，出水による河川水の到達が見られた 8 月 26 日～27 日の水温成層の違い，ならびに大潮で鉛直混合が強い 8 月 29 日以降の水温の違いが明瞭に確認できた．このことより，水温の再現性において各河川における毎時連続データを与えることの有効性が確認できた．また，出水に伴い比較的水温の低い河川水が大量に流出する状況では，成層が強化されていることも確認できた．

これは，温暖化の進行に伴う降雨パターンの変化が予測されることから，出水頻度の増加に伴う熱成層強化が進むことが想定されることを意味している．また，夏場の密度成層の強化は，底層の貧酸素水塊の発達を助長する可能性を示唆しており，沿岸域の水環境に深刻な影響を与える可能性も考えられる．田所ら(2017)による鉛直 1 次元モデルを用いた有

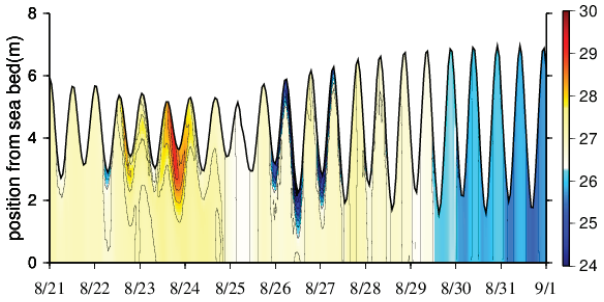

図-4a)　北部有明海 Sta. A の水温計算結果（ケース１：2015 年 8 月下旬）

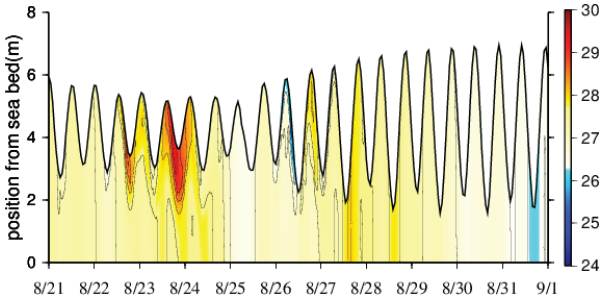

図-4b)　北部有明海 Sta. A の水温計算結果（ケース２：2015 年 8 月下旬）

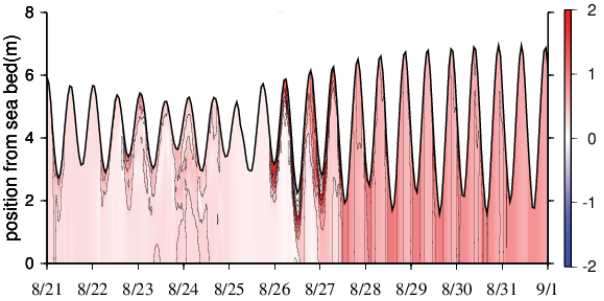

図-4c)　北部有明海 Sta. A の水温計算結果の差分（(ケース２)—(ケース１)）

明海の溶存酸素(DO)分布の評価では，成層強度の微妙な増加により鉛直混合が抑制され，底層の貧酸素化が進行することが示されている．よって，その影響度についての正確な評価を行うことが求められる．また，その結果として海洋生態系，特に二枚貝類などの底生生物への影響が大きいと評価された場合には，適切な適応策の検討が求められる．

一般に，温暖化の適応策としては，水災害部門に関心が集まっている．今後は，このような水環境部門に関する影響評価と適応策の検討も必要になってくると考えられる．水環境部門では，影響が広く薄く出ることが予想されるため，集約的に資源を投資する適応策メニューがそれほど多くは存在しないと考えられる．その中で，河川に設置されている既存のダムについては，運用方法の調整，目的別容量の再配分，堤体かさ上げなどの再開発による容量増加，サイフォン式選択取水装置の設置による放流水温の微調整[Castelletti *et al*. (2014)]などのメニューが提供できると期待される．温暖化後における，これらの適応策メ

ニューに関する効果の評価は今後の課題であり，喫緊に調査研究を進めていく必要があると考えられる．

３．結論

入力する河川水温データの違いによる有明海における水温成層の計算結果を比較することで，河川水温が海域の成層構造へ与える影響を評価した．気候変動に伴い出水形態が変化することを考慮すると，河川水温の変化が成層構造に影響を与える可能性，さらに貧酸素化の促進による水環境の悪化の可能性が有ることが示唆された．今後，影響評価を詳細に行い，実現可能性のある適応策メニューの提案を行うことが必要である．

［謝辞］本研究は，平成 28 年度九州地方計画協会公益事業により行われた．ここに記し，深甚なる謝意を表する．

［参考文献］

1) IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*.
2) 三村(2015)：気候変動適応策のデザイン.
3) 社会資本整備審議会(2015)：水災害分野における気候変動適応策のあり方について答申.
4) ASCE (2015): *Adapting Infrastructure and Civil Engineering Practice to a Changing Climate*.
5) 環境省(2013)：気候変動による水質等への影響解明調査報告.
6) 永田ら(2012)：温暖化の湖沼学.
7) Poloczanska *et al*. (2016): Responses of Marine Organisms to Climate Change across Oceans, *Frontiers in Marine Science*, 3, 1-21.
8) Thomas *et al*. (2012): A Global Pattern of Thermal Adaptation in Marine Phytoplankton, *Science*, 338, 1085-1088.
9) 宮本ら(2010)：気候変動が流域の河川水温に及ぼす影響解析，水工学論文集，54, 1207-1212.
10) Simpson & Sharples (2012): *Introduction to the Physical and Biological Oceanography of Shelf Seas*.
11) 矢野ら(2015)：諫早湾干拓締切堤による鉛直混合能の変化が有明海の塩淡成層構造に与えた影響，土論 B2, 71(2), I_1243-I_1248.
12) 田所ら(2017)：諫早湾干拓堤防による成層構造の変化が有明海の貧酸素水塊の消長に与えた影響についての検討，第 72 回土木学会年次学術講演会概要集(印刷中).
13) Castelletti *et al*. (2014): Planning the optimal operation of a multi-outlet water reservoir with water quality and quantity targets, *J. of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 496-510.