

24. 西南日本（高知県）における 気候変動適応のための総合的研究

西森 基貴^{1*}・鼎 信次郎²・森 牧人³・佐々 浩司³・坂田 雅正⁴・村上 雅博⁵

¹農業環境技術研究所 大気環境研究領域（〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-3）

²東京工業大学 情報理工学研究所（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）

³高知大学 教育研究部自然科学系（〒783-8520 高知県高知市曙町2-5-1）

⁴高知県農業技術センター（〒783-0023 高知県南国市廿枝1100）

⁵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）

* E-mail: mnishi@niaes.affrc.go.jp

文科省気候変動適応研究推進プログラム高知県課題は、過去および将来の土地利用変化を考慮した気候変動予測情報のダウンスケーリング手法および地点スケールでの確率的降水量・豪雨予測手法の開発を行い、そこから得られる気候変動シナリオを用いた、水稻・園芸等の農業、気象災害、水資源、水環境および生物資源など多岐にわたる適応シミュレーションシステム予測から、高知県における気候変動適応戦略と環境政策シナリオ立案に資する。本発表では、このグランドデザイン、すなわち西南日本に位置し亜熱帯化が予想される高知県における、水稻・園芸農業における立地移動を含む収量・品質影響への適応と高知県中心部における洪水・渇水や観光・生活環境の悪化に対する対応を概説する。

Key Words: *climate change adaptation, hilly and mountainous area, protected horiculture, water environmental conservation, high temperature injury of paddy rice*

1. はじめに

IPCC報告書によると、気候変動の影響は北極、アフリカ、島嶼国およびアジアメガデルタ地域、すなわち経済基盤の弱い地域に強く現れる。そしてそれらの地域では、気候変動に伴う極端気象現象と災害が「人間の安全保障」を脅かしている。いっぽう日本でも、過疎高齢化で社会的インフラの整備が進まない日本の「地方」では、気候変動の影響がより強く現れることが予想される。ここで高知県は四国南半分に位置し、急峻・複雑な地形、多様な土地利用と豊かな自然を誇るものの、台風・集中豪雨等の災害常襲県でもある。また一次産業に依存する割合が四国他県と比べても相当に高く、県勢が気候・気象条件に大きく左右される中で、予測される地球規模の気候変動の影響とそれに対する適応策は、県勢全体の方向性とあり方を、大きく変える可能性がある。

文科省気候変動適応研究推進プログラム（REsearch program on Climate Change Adaptation: RECCA）¹⁾高知県課題は、気候変動予測情報のダウンスケーリング（DS）手

法の開発だけでなく、得られる気候変動シナリオを用いて、水稻・園芸等の農業、気象災害、水資源、水・生物環境など多岐にわたるシミュレーションにより、高知県における気候変動適応戦略と環境政策シナリオ立案に資することを目的としている。本発表ではこのグランドデザイン、すなわち西南日本で早期の亜熱帯化が予想される高知県における、水稻・園芸農業における立地移動を含む収量・品質影響への適応と主に県都高知市における洪水・渇水や観光・生活環境の悪化に対する対応を概説するとともに、農業と水・生物環境分野における研究事例について紹介する。

2. 高知県の気候に関する解析とダウンスケール

1. で述べたように高知県は太平洋側に広く面し、黒潮等海洋の影響を強く受ける。図-1には、高知県が測定した土佐湾の海面水温（SST）の経年変動に、エルニーニョ・ラニーニャ年を示したもので、1990年以降の急激な

SST上昇とラニーニャ現象に関連した変動が見える。しかしながら地球温暖化と海面水温との関係、およびその地域気候への影響に関しては未解明の点も多く、ここではまず高知県における豪雨について総観場からの分類を行い、降水量に関するDS²⁾に必要な情報を得る。次に、気候モデルから得られる情報を高知県における影響の観点から整理して、DSにおける着目点を抽出するとともに、土地利用変化を考慮したDSの手法構築を行う。

(1) 高知県における極端降水（豪雨）現象の要因解析

高知県アメダス29地点の過去35年間のデータより、時間雨量が30mm/hと50mm/hを超える事例が発生した時刻に近い地上天気図を調べ、低気圧中心、暖域、温暖前線、寒冷前線、停滞前線、台風、高気圧縁辺流などの総観規模擾乱に分類した。分類にあたって原因となる総観場をどの範囲まで考慮するかについては明確な定義がないが、気象庁ホームページや過去の研究事例を参考に、主に豪雨発生地点からの距離により、以下のように定義した。

a) 台風型

- ・台風近傍：半径500km以内に台風中心³⁾
- ・台風遠方：半径500km以上遠方に台風中心³⁾

b) 低気圧型

- ・低気圧中心：半径500km以内に低気圧中心
- ・暖域：温帯低気圧の南側で温暖前線と寒冷前線の南側に位置し、南方から暖気の流入がある場合
- ・温暖前線：半径200km以内に温暖前線⁴⁾
- ・寒冷前線：半径200km以内に寒冷前線⁴⁾

c) 停滞前線型

- ・停滞前線：北500km、南250kmの範囲内に停滞前線⁵⁾

d) 高気圧縁辺流型

- ・高気圧縁辺流：太平洋高気圧に伴う等圧線西端が事例発生地点上に位置し南方から暖気流入⁶⁾

短時間強雨の原因となる総観場分類（図-2）によると、温暖前線、寒冷前線、暖域を含む低気圧の接近に伴うものが半数に及ぶ。また台風の寄与は低気圧に次いで大きく、50mm/h以上の豪雨では低気圧の寄与も増えるが、

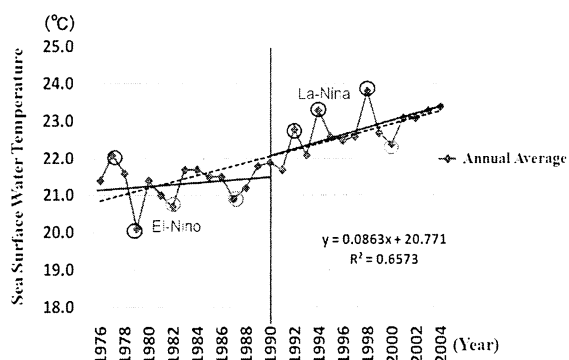


図-1 高知県沖の海面水温の変化とエルニーニョ・ラニーニャ現象の関係

台風と停滞前線の影響が相対的により大きくなる。さらに台風近傍や低気圧に伴う寒冷前線、温暖前線、暖域がそれ単体でも強雨をもたらすことが多いのに対し、台風遠方、停滞前線や高気圧縁辺流は他の擾乱と複合して強雨をもたらすことがわかった。なお50mm/h以上の事例について年別最多の1998年では、事例数45のうち高気圧縁辺流と、停滞前線、温暖前線が突出した極めて特異な年であり、また日本への台風上陸が最多であった2004年は事例数47のうち45%が台風近傍であったが、台風遠方の事例も22%あった。これは、台風中心がはるか西方にあるが台風に伴う循環によって南風が卓越する Predecessor Rain Event (PRE)⁷⁾の事例と考えられる。

(2) 高知県における気候変化の見通し

ここでは、高知県内各気象観測点について、環境省S-53プロジェクトで農業環境技術研究所が開発した「地点・日別気候データセットELPIS-JP」⁸⁾、およびMIROCやMRI-CGCM等の全球気候モデル（GCM）自身より得られる気候変動予測情報を用い、月単位で農業・水文関連要素についての将来像とその気候モデル間差異を示す。

ここでELPIS-JPとは、気候モデル出力のうち比較的信頼性の高い月値から、確率分布関数を用いて日別値を発生させるウェザー・ジェネレータという手法を用い、日本の気象観測地点毎、さらに気候モデルと排出シナリオ毎に50ものアンサンブルメンバーを持つ不確実性を考慮したデータセットである。このELPIS-JPを用いて、高知県平野部の早期作地帯（後免：水稻平均出穂日7月7日）および中山間地域（本山：同8月20日）それぞれに対応する水稻登熟期間（出穂後20日間）で平均した日最高気温を10年間毎に示した（図-3）。その結果、早期作では、平均的には普通作よりも高温期を回避しているが、それでも今世紀末には水稻の高温障害発生の目安となる35℃に達する可能性はあることが示された。

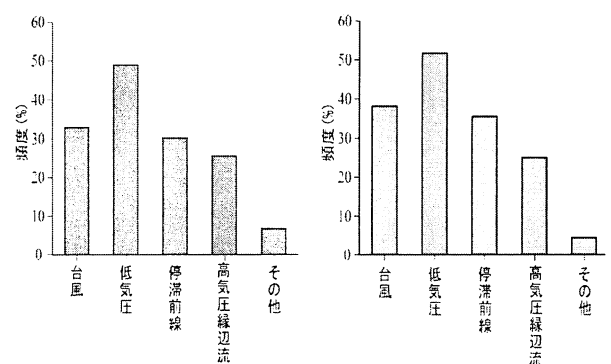


図-2 高知県に強雨をもたらす総観場の分類。（左）は 30mm/h 以上、および（右）は 50mm/h 以上のもをそれぞれ示す。複数の総観場が関係している事象があり、合計は100%を超える。

次に最新の第5期 結合モデル相互比較計画（CMIP-5）より得られる気候変動予測情報のうち、高知県内アメダス観測所近隣グリッドにおける月平均気温・日射量および月降水量の1981-2000年平均値に対する将来変化量の季節性を解析した。その結果、CMIP-5に提出される新たなモデルでは気温の将来（2046～2065年平均）変化の季節間差が大きいこと（図-4）、および多くのモデルで秋の昇温が大きく、過去30年間の実際の気温変動傾向¹¹⁾と良く一致すること等が明らかになった。なおGCMやそれを境界条件とする降水量予測については、GCM間や月ごとの予測値に不確実性が大きく、参照となる将来シナリオの提示には至っていない。

(3) 気温変化に対する土地利用変化影響の評価手法開発

RECCA高知課題は農業系と水文系の2つのサブテーマ群からなり、それぞれ必要とする空間スケールや気候要素が異なることから、2つのDS手法を用いる。つまり高知県域で、将来の土地利用変化を考慮した地域気候モデル実験による全県5kmメッシュデータ⁹⁾¹⁰⁾、および対象河川流域にて最大で時別・500mまでDSした降水量²⁾である。ここでは前者について、その手法の概念を示す。

そもそも近年、全国的に高齢化や労働力ならびに後継者の不足等により、いわゆる耕作放棄地が拡大し、水田の面積も減少している。この傾向は、四国のように中山間地を多く抱える地域で特に顕著である（図-5）。一方で、これまで都市化による気温影響が小さいとされていた農耕地においても気温上昇が顕著であり¹¹⁾、水田減少や耕作放棄地拡大という土地利用変化が1つの要因と考

えられる。実際に水田は気温上昇に対する緩和効果を持つとされ、この減少が気温上昇の一因と推察される。

本課題で開発するDS手法は、土地利用区分を地表面パラメータセットの差異で表現し、土地利用変化に伴う気温変化量は、気温のパラメータに対する感度と実際のパラメータ変化量の積で算出すると仮定する。大気陸面相互作用を考慮する3次元大気モデル（気象庁・気象研究所が共同開発し非静力学モデル：JMA-NHM）を用いて地表面パラメータの気温に対する感度を算出し、また農耕地面積データを利用することで得られる土地利用変化に伴うパラメータ変化分と組み合わせ、四国における近年の水田減少や耕作放棄地・建物用地の拡大が温暖化傾向に与えた影響を明らかにしようとする。

初期値境界値はJRA-25を用い、四国を中心として20km格子（1220km 四方）から5km 格子（405km 四方）へと単方向ネスティングを行った。地表面パラメータはアルbedo、蒸発効率、粗度、熱容量および熱伝導率とし、それぞれの気温に対する応答を感度実験から算出した。また、農地面積データにはアンケートベースである農林業センサスを用いた。このデータの収録年は1985～2005年の5年ごとで、数値モデルの計算期間はそれぞれの6

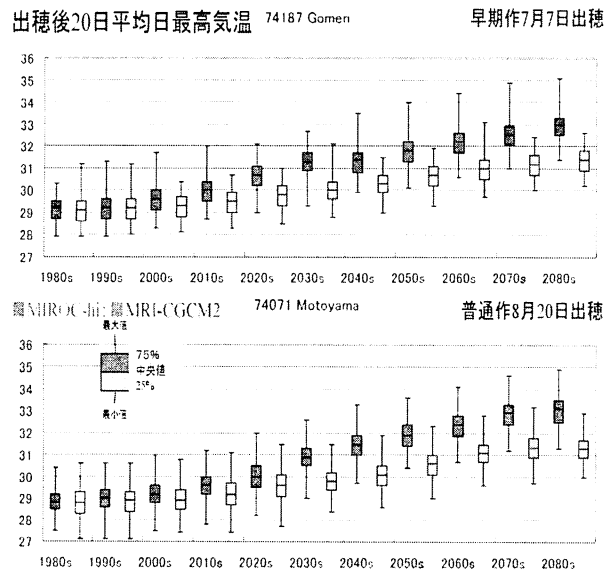


図-3 ELPIS-JP を用いた（上）早期作地帯（後免）および（右）普通期作地帯（本山）における水稻登熟期平均日最高気温の10年ごとの変動。濃（淡）色は、MIROC-hi（MRI-CGCM2）由来データ。

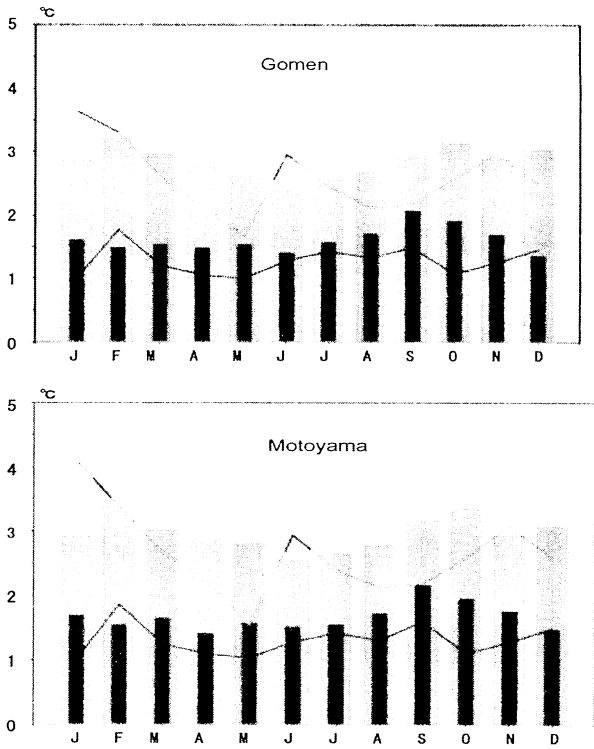


図-4 月ごとに見た MIROC モデルと MRI-CGCM モデルの予測情報のうち、高知県内アメダス観測所（左）後免および（右）本山における、それぞれ月平均気温の1981-2000年平均値に対する将来（2046～2065年平均）の変化量。淡色（濃色）はMIROC（MRI）のもので、棒（折線）グラフがCMIP-3（CMIP-5）由来のものを示す。

月5日～8月15日までとした。

予備的な解析の結果、日最高気温に対しては水田減少に伴う蒸発効率の寄与が、日最低気温には建物用地の熱容量と熱伝導率が、それぞれ支配的なパラメータであった。土地利用別に算出した気温への寄与を合計すると、1985～2005年の四国における農耕地減少、耕作放棄地・建物用地の拡大による日最高・平均・最低気温の上昇は0.28～0.65℃で、同期間のAMeDAS観測値と比較すると、土地利用由来による気温上昇は観測されたトレンドの30～45%に相当し、日最高気温に対する影響が最も大きかった。水田減少が日最高気温の上昇に最も影響を与えていることから今後農耕地の減少が進んだ場合、四国の温暖化傾向は日最高気温を中心としてさらに進行していくことが推察される。また2005年には建物用地が拡大したと設定したにもかかわらず最低気温への寄与が最も小さかった。これは、水田の気温緩和効果と都市の低温抑制効果が打ち消し合うためと考えられる。つまり気温上昇トレンドに対してはいわゆる都市気候だけではなく、耕作放棄地の拡大、特に水田の減少による影響が大きいことが明らかになった。

3. 農業分野における影響・適応研究への利用

高知県における農業は、地方における基幹産業であるコメのほか、産出額で農業全体の半数を越える園芸農業も高知県産業を大きく支えている。しかしながらいずれも近年の高温・寡照等により、農産品の収量変動が大きく、その品質も低下し、さらに農作業環境の悪化が問題となっている。また農業においては、単に気候変動に適応して収量を確保するだけでなく、地域間競争に打ち勝つために、高品質で付加価値の高いものを生産していく必要がある。ここでは、本課題で進行しているコメ収量・品質および施設園芸内環境のシミュレーションにつ

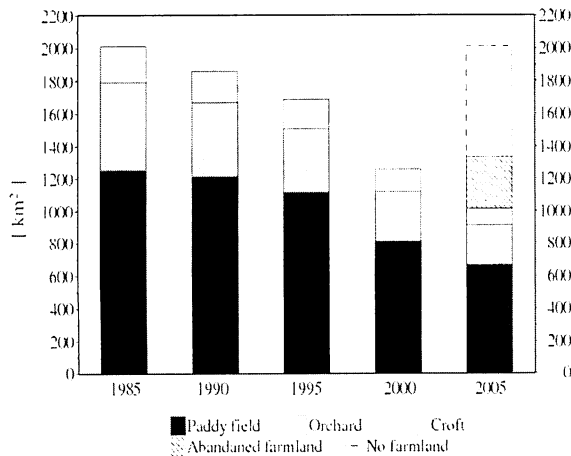


図-5 四国地方における農耕地面積の経年変動

いて、それぞれ紹介する。

(1) 温暖化のコメへの影響とその適応策

気候変動下でコメの安定生産を図るために、生育を正確に把握し詳細な栽培管理を行う必要性が増してきた。従来より農業環境技術研究所では、生育や収量を予測できるイネ成長モデル¹²⁾¹³⁾や気象データに水稻穂温や水田水温を推定するモデルを加えた結合モデル¹⁴⁾を開発してきた。しかしながら、温暖化（高温および寡照）を想定した場合での収量および品質予測におけるモデルの検証はなされていない。

本課題では上記結合により高温条件下での精度を検証して改良を行うほか、施肥方法の異なる試験データの解析により、新たに水稻の品質（白未熟粒の発生割合）や玄米タンパク質含有率等で表される食味まで診断できるモデルを開発する。食味指標となるタンパク質含有量予測モデルによる現在予測では予測値を過小評価する傾向にあったものの、年次変動については概ね実測値と同様の傾向を示し（図-6）、気候シナリオを入力することにより、おおむね将来予測が可能な状態に達した。

(2) 温暖化の園芸農業への影響とその適応策

本課題では、施設内環境シミュレーションモデルを開発し、暑熱対策と品質確保を両立できる熱線遮断フィルムの効果を検証した（図-7）。温室内では短波と長波の放射伝達が計算されるとともに、DSした外部からの入力放射を考慮出来るように設計されている。また温室被覆資材の透過率・反射率も自由に入力可能であり、作物生育と両立した温暖化時の最適な被覆資材について提案可能である。計算された下向き長波放射量と現地施設内における観測値の比較で、両者はよく一致し、温室内の長波放射環境を比較的よく再現出来ることが検証された。この園芸シミュレータを用いた試行的な将来予測として、MIROC32hi-A1bのDS長波放射を入力したところ、2100年

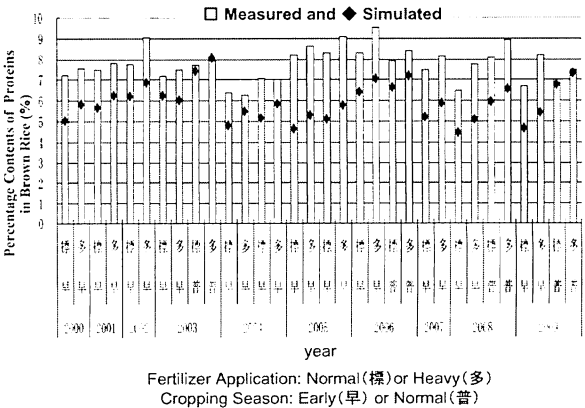


図-6 高知県における奨励品種決定試験のデータを用いた玄米タンパク質含有量の実測値と推定値の比較

頃の想定では昼間の温室内気温は現在よりも3℃ほど上昇し、現在よりもさらなる作業環境の悪化が示唆された。

4. 水文・水環境分野における適応策導出

高知県は四万十川等のイメージから、水資源や水環境に恵まれていると思われがちである。しかしながら急勾配の中小河川が多く、また全四国への配分の観点からも、水資源は十分でない。また県中心部は相対的に人口が集中していることにより、河川環境のほか高温等による半閉鎖系水域の環境悪化が特に問題となっている。高知における河川・水資源量についての影響・適応等は別稿²⁾で示されることから、ここでは半閉鎖系の水生環境における気候変動適応問題について、その概略を述べる。

1) 都市近郊遊水池における水環境の保全

日本のみならず世界の浅い湖沼では、人間活動による汚濁負荷量と温暖化の影響から毒性のある植物性プランクトンが増殖して富栄養化が進み、湖底に動植物プランクトンの死骸や魚の糞などが汚泥として堆積し、深刻な環境問題を引き起こす例が増加している。特に西南日本では、気温上昇により浅い湖沼や貯水池に亜熱帯原産の外来植物であるホテイアオイが増殖し、水界の生態系や水質が悪化して池底にヘドロの堆積が進む過程で雨水調整池の治水調整容量が減少してきている。

本研究課題で実施した室内水槽における吸収特性実験により、ホテイアオイには水中栄養塩の大量吸収効果があり、栄養塩量が多いほど成長速度が早いことがわかった。水生植物の成長時期は夏、枯死時期は冬であることから、ホテイアオイの成長・枯死過程が池の水質環境を大きく支配している。夏場に水中の栄養塩類を大量に吸収し、また水中の栄養塩量が多いほど成長速度が増すことから、成長時期のホテイアオイには水質の浄化効果があることがわかった。また同様の放出特性実験より、冬場には栄養塩類は吸収せず、枯死・腐敗して約2〜3倍の

栄養塩類を放出して水質を汚染することもあった。

石土池の水質・生態環境を持続的に保全する統合プラン策定の最重要ポイントは、ホテイアオイの回収・除去時期で、上記で得られた結果よりホテイアオイは成長が終わり枯死する直前である秋から冬の前半にかけて回収・除去を行うと効果的な水質の浄化につながるということがわかった。この結果をもとに、石土池の自然再生計画における脆弱性評価とバイオマニピュレーション手法を適用した気温・水温変動に対応する生態系モデル（図-8）を構築するとともに、増殖したホテイアオイの回収・除去時期に配慮した統合的な環境管理マスタープランを策定する。また回収・除去したホテイアオイを1トン4万円で一般産業廃棄物として処理するのではなく、バイオエタノールに変換するなど資源として循環再利用する新技術開発に取り組む必要がある。つまりこの課題に取り組むことは、高知県における環境政策上の重要課題である低炭素・循環型社会形成に大きく資するとともに、新しい環境ビジネスのチャンスを生み出す可能性もある。

2) 市内観光地における水質と生態系環境保全

高知城内堀は、市内中心部の高知城と高知県庁を取り巻く第一の観光スポットである（図-9）。古くから隣接する江の口川の水を導水していたが、公園整備の際に雨水を集める城堀跡になったため水質が悪化し、高温によ

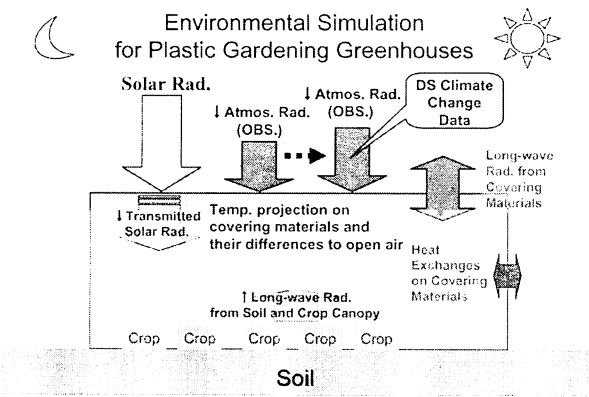


図-7 総合園芸環境シミュレータの概要

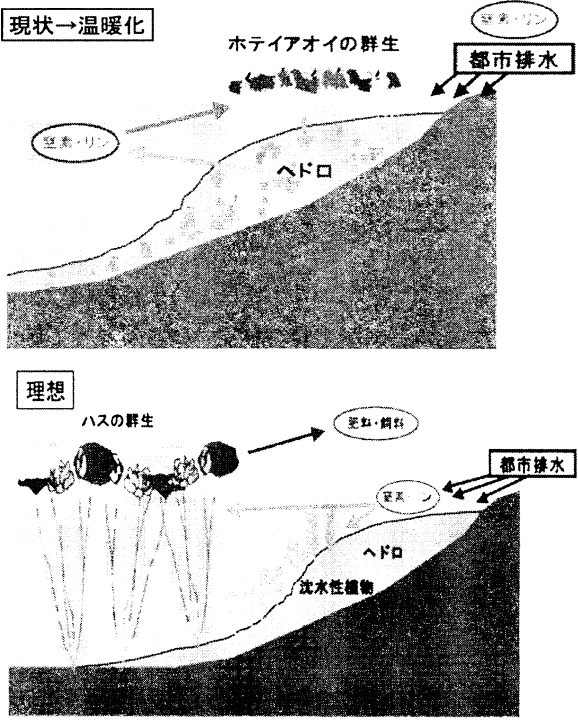


図-8 石土池における水質保全策の模式図。（上）現状で枯死した浮遊性水生植物ホテイアオイがヘドロとなり堆積している様子、および（下）温暖化によるさらなるヘドロ堆積を避けるためホテイアオイを除去し、ハスを導入して浄化する。

り発生したアオコによる景観悪化と異臭のため、浅層地下水を水源とする浅井戸に水源を切り替えた。地下水は一般的に水質が良好で透明度も高く、水温も年間15～20℃の範囲で安定しているため理想的な水源であり、問題解決の切り札的な対応策である。地下水が流入する内堀上流では水質良好で透明度も高いが、大型のコイが高密度に生息している下流では水質は著しく悪化している。

ここで温暖化がさらに進展すると、内堀では生態系と水質環境がさらに悪化する可能性があるが、水質汚濁のメカニズムや環境保全・再生に関する適応策については検討されていない。そこで1)と同様に、生物の自然浄化能力と環境再生能力に着目したエコロジカルな水界生態系管理技術であるバイオマニピュレーションを用いて、高知城内堀の予防的かつ持続的な水質管理を行う実証的な研究に取り組んでおり、最終的に都市の影響を含めて温暖化が進む市内中心部に位置する高知城内堀の水質環境の特性と汚濁メカニズムを明らかにするために、温暖化に適応する水界生物の水質浄化能力とバイオマニピュレーション技術の適応性を評価し、水質環境保全・再生のための具体的な適応策のオプションを提示する。

5. 今後の課題

今後は農業分野だけでなく、水生環境分野においても、DSデータを用いた影響予測と適応策導出を行うが、この際いくつかのポイントがある。まずDSデータの作成に当たっては、特に降水量に高い時空間解像度が求められることから、複数手法を用いることになるが、その際に境界条件として用いるGCMや温室効果ガス排出シナリオを統一しておく必要がある。次に、政策につながる適応シナリオについて、単に農業系・水文系それぞれで導出するのではなく、例えば春先の水稻移植（田植）期に十分な灌漑用水が水資源研究²⁾の結果として確保できるかというような。分野の枠を越えた総合的な、県の施策につながる適応策の導出を目指す。

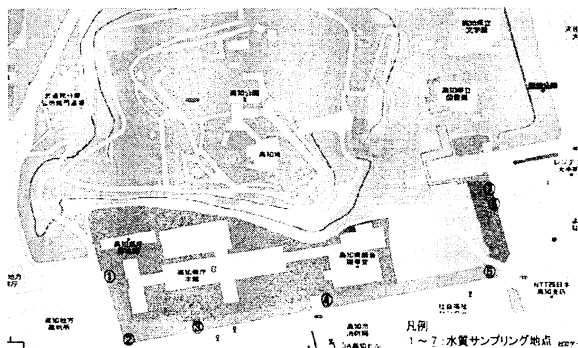


図-9 高知城内堀の概要と水質サンプリング地点

謝辞：本稿は文部科学省「気候変動適応研究推進プログラム」（RECCA）による成果を中心に構成された。

参考文献

- 1) 文部科学省：気候変動適応研究推進プログラム，<http://www.mext-isacc.jp/>, 2012.
- 2) 井芹慶彦，白羽陽藏，藤村和正，村上雅博，鼎信次郎：気候変動が早明浦ダムの渇水特性に与える影響の評価，第20回地球環境シンポジウム講演集，（印刷中），2012.
- 3) 盛宣誠，加藤内蔵進：盛夏期への進行の中でみた降水と大規模場（台風の位置付けにも注目して），日本気象学会関西支部例会講演要旨集，No.110, pp.29-32, 2006.
- 4) 榊原均，田畑明：低気圧に伴う降雨域の構造の解析，気象研究報告，No.19, pp.121-143, 1986.
- 5) 加藤内蔵進，合田泰広：地上梅雨前線の暖域における九州での降水と大気場（1997～2005年の事例解析），日本気象学会関西支部例会講演要旨集，No.113, pp.33-36, 2007.
- 6) 早川誠而，鈴木義則，前田宏，元田雄四郎：1983年9月6日の福岡市における豪雨の特徴(1)アメダス資料を主とした解析，天気，Vol.36, pp.121-126, 1989.
- 7) Thomas, N.J., Solorzano, N.N., Cummer, S.A. and Holzworth, R.H.: Polarity and energetics of inner core lightning in three intense North Atlantic hurricanes. J. Geophys. Res., 115A, doi:10.1029/2009JA014777, 2010.
- 8) Iizumi, T., Semenov, M.A., Nishimori, M., Ishigooka, Y. and Kuwagata, T.: ELPLIS-JP: A dataset of local-scale daily climate change scenarios for Japan. Phil. Tran. Roy. Soc. Ser.A, Vol.370, pp.1121-1139, 2011.
- 9) 吉田龍平，西森基貴，飯泉仁之直，大澤剛士：地表面パラメータに注目した四国における近年の農耕地減少が気温に与える影響，日本気象学会 2012 年度秋季大会予稿集，（印刷中），2012.
- 10) 吉田龍平，西森基貴，飯泉仁之直：土地利用変化の考慮の有無による四国における過去20年の気温・水熱環境場の傾向差，日本気象学会 2012 年度秋季大会予稿集，（印刷中），2012.
- 11) 村上雅則，桑形恒男，石郷岡康史，西森基貴：農耕地モニタリング地点の選定とその気温変化傾向に関する地域的な特性. 生物と気象，Vol.11, pp.41-50, 2011.
- 12) 長谷川利広，近藤始彦：日本における水稻の収量ポテンシャルの推定－生育モデルからのアプローチ，日作紀，Vol.76(2), pp.164-165, 2007.
- 13) 長谷川利広，坂田雅正：近年の温暖化傾向が水稻生育・収量に及ぼす影響のモデル解析，日作紀，Vol.76(2), pp.38-39, 2008.
- 14) 桑形恒男，濱寄孝弘：水稻生育の広域監視に利用可能な日平均水田水温の推定モデル，農業研究センター総合農業の新技术，No.14, pp.196-199, 2001.