

< 解説論文 >

## フロリダ州エバーグレイズ流域における 流域再生プロジェクトと研究学習拠点

山下慎吾\*<sup>1</sup>, 根岸淳二郎\*<sup>2</sup>, 河口洋一\*<sup>3</sup>, 赤坂卓美\*<sup>4</sup>, 中村知美\*<sup>5</sup>, 島谷幸宏\*<sup>6</sup>, 中村太士\*<sup>4</sup>

### The comprehensive restoration project of the Everglades in Florida, and two laboratories for field based education and research

Shingo YAMASHITA \*<sup>1</sup>, Junjiro NEGISHI \*<sup>2</sup>, Yoichi KAWAGUCHI \*<sup>3</sup>, Takumi AKASAKA \*<sup>4</sup>,  
Satomi NAKAMURA \*<sup>5</sup>, Yukihiro SHIMATANI \*<sup>6</sup> and Futoshi NAKAMURA \*<sup>7</sup>

Sakanayama Lab\*<sup>1</sup>, Hokkaido University\*<sup>2,4</sup>, University of Tokushima\*<sup>3</sup>, Hokkaido resident\*<sup>5</sup>, Kyusyu University\*<sup>6</sup>

#### Abstract

The aim of this paper is to provide an overview of the restoration project in southern Florida, the United States. In May 2011, we visited Florida to see the Kissimmee-Okeechobee-Everglades watershed, which is the object place of the Comprehensive Everglades Restoration Plan (CERP). The host organization is the South Florida Water Management District. The CERP provides a framework to restore, protect and preserve the water resources and the ecosystem of central and southern Florida. It covers over 46,000 square kilometers area and centers on an update of the Central & Southern Florida Project that is also known as the Restudy. We also introduce two laboratories for field based education and research.

**Key words:** Everglades, Field laboratory, Floodplain, Florida, Restoration project, Water management

### 1. はじめに

米国フロリダ州は、大西洋とフロリダ湾に挟まれたフロリダ半島の全域を占める面積 170,306 km<sup>2</sup> (全米第 22 位) の州である。気候は亜熱帯もしくは熱帯に属しており、Sunshine state ともよばれる一方、年間降水量はどの州よりも多く、雷発生回数やハリケーンの上陸も多い。人口は約 1,880 万人 (全米第 4 位) で、マイアミなど沿岸部に大都市圏が成立している。この地域は有数の観光地でもあり、州の経済は観光業に強く依存しているほか、柑橘類やサトウキビなどをはじめとする農業が主要産業となっている。フロリダ半島における最高峰は Sugarloaf Mountain (海拔 95m) で、一帯は極めて平坦な地形となっている。半島の中南部には広大な氾濫原環境が存在し、いくつかの区域がエバーグレイズ国立公園やビッグサイプレス国立自然保護地域として連邦国立公園局により管理されており、フロリダパンサー、ハクトウワシ、スネイルカイト、アメリカアリゲーターなど多くの貴重な野生動物が生息している。

氾濫原は、生物多様性や生物生産の中核<sup>1)</sup>ともいわれる空間である。Tockner and Stanford (2002)は、世界の氾濫原面積について再検討を行った結果、ヨーロッパや北米では氾濫原の 90%以上がすでに耕作地となって



図1 エバーグレイズ流域の概念図<sup>2)</sup>

\*1 魚と山の空間生態研究所 〒788-0785 高知県宿毛市山奈町芳奈 566 yama@sakanayama.org

\*2 北海道大学地球環境科学院 \*3 徳島大学工学部 \*4 北海道大学大学院農学研究科 \*5 北海道在住 \*6 九州大学工学研究院

おり、生態的な機能が大きく減衰していることを報告している。フロリダ州においても、中南部に広がる氾濫原で大規模な農地利用や治水プロジェクト（Central and Southern Florida Flood Control Project; C&SF）が進められた結果、著しい環境劣化が引き起こされた。その後 C&SF プロジェクトの見直しが行われ、現在では包括的な再生プロジェクト（Comprehensive Everglades Restoration Plan; CERP）が実施されている。

2011年5月、フロリダ州の再生プロジェクトについて、約10日間にわたり現地を視察する機会を得た。対象区域はエバークレイズ流域（図1）のうち、キシミー川、オキチョビー湖およびエバークレイズ国立公園で、受け入れ機関は南フロリダ水管理局（South Florida Water Management District; SFWMD）である。本稿では、今回の視察内容に基づき、キシミー川、オキチョビー湖およびエバークレイズに関する知見、包括的再生プランの概要、興味深いふたつの研究学習拠点について紹介する。

## 2. キシミー川（The Kissimmee River）

キシミー川は、フロリダ半島中央部に位置し、かつては約166kmにわたり極めて平坦な地形を蛇行しながら流れていた河川で、その流域には湿性植物、魚類、両生類、爬虫類および鳥類など多くの生物を育む広大な氾濫原を有していた。しかし、1947年のハリケーン被害を契機として、1954年に連邦議会の承認を得て1960年代の約10年間で大規模な治水・排水事業が行われた。治水・排水事業は、浚渫によりキシミー川を延長90km、水深9m、幅90mの直線水路に改変するとともに（図2）、複数のダムによる水位コントロールによって南部フロリダ地方の洪水被害を軽減し、同時に周辺地域の酪農土地利用を可能にするものであった。その結果、自然環境の大規模な劣化がおり、氾濫原に依存する野生動植物の種類や個体数が激減した。

そこで、連邦議会は、キシミー川をかつての自然豊かな湿地に再生するための蛇行河川復元プロジェクトを1992年に承認し、南フロリダ水管理局と陸軍工兵部隊の共同事業として、キシミー川再生プロジェクトが開始された。この再生プロジェクトは、約35kmの直線河道区間の埋め戻しと、約70kmにおよぶ旧蛇行流路の復元が目標とされており、いくつかのフェーズに分かれて実施されている。第一フェーズでは、約13kmの直線河道区間が埋め戻され、約23kmの蛇行流路が復元された。直線河道の埋め戻しには、かつて浚渫した土砂が用いられた。日本であれば浚渫土は処分されていたであろうが、ここでは河道横に残置されたままになっており、それが幸いしたといえる。また、途中にある水位調整施設も撤去された。この復元工事に対する生態系の応答は明瞭で、水の流れが元に戻り、冠水頻度の回復に伴い植生が戻り、貧酸素環境は改善され、システムが元に戻りつつある。

ここで、特筆すべきことが1点ある。蛇行河川復元プロジェクトに対して、しっかりとした評価計画がたてられていることである（図3）。河川再生プロジェクトの評価（Restoration Evaluation）は、参照（リファレンス）の状態、予測や仮説、モニタリング、評価、統合性の検証という流れで実施されており、その結果に応じて、順応的管理がフィードバックされる。参照となる状態は、北米の湿地帯における鳥類出現種の平



図2 かつて蛇行しながら流れていたキシミー川（左）と 浚渫により直線河道となったキシミー川（右）  
（River Woods Field Lab の壁にかかっていた写真を撮影）

均値など、簡単かつ合理的に設定されている。統合性 (Integrity) は、単一種を対象とした評価ではなく、本来の生態系が元通りに回復されつつあるかどうかという視点で行われている。また、モニタリングにおけるデータ収集においては BACI (Before-After-Control-Impact) アプローチが徹底されている。この場合、Before (事前) には復元工事前 (Baseline), After (事後) には復元工事後 (Post-construction) の期間が該当するものであり (After はさらに中間段階 Interim とその後 New の 2 時期からなっている), Control (対照区) には復元区間よりも上

流の直線河道区間, Impact (実験区) には蛇行河川復元区間が設定されている。この BACI アプローチに基づいて、地形、水質、植物、無脊椎動物、魚類、鳥類などのさまざまな観点から、モニタリングが継続的に行われており、その結果、図 3 に示す 1-4 のデータを組み合わせると比較評価することが可能となっている。

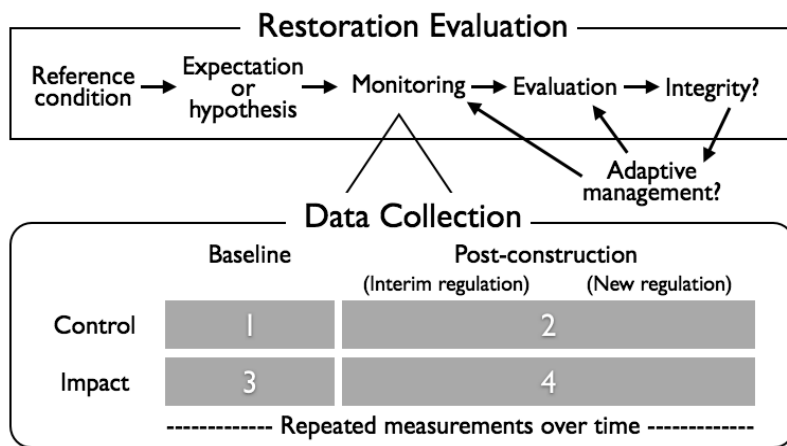


図 3 キシミー川蛇行復元プロジェクトにおける評価計画  
(南フロリダ水管理局におけるミーティングで提示された図を一部改変)

### 3. オキチョビー湖 (Lake Okeechobee)

オキチョビー湖は、キシミー川の下流に位置し、周囲に広大な氾濫原を有する湖である。名称は、先住民であるセミノール族の言葉で“大きな水”を意味する“Okeechobee”に由来している<sup>3)</sup>。1900年代のはじめ、オキチョビー湖に南接する氾濫原が干拓され豊かな農地と街がうまれた後、1920年代と1947年にフロリダを襲った巨大なハリケーンによって甚大な被害が発生

した。陸軍工兵部隊は、洪水災害を防ぐためオキチョビー湖を取り囲むように堤防 (Herbert Hoover) を建設するとともに、表面水を直接太平洋と大西洋に排水する人工水路を設置した。

現在、オキチョビー湖で発生している問題は主に3点である。第一は、堤防化と水位管理が引き起こす極端で不自然な水位変動が、湖内の水生植物群落等にダメージを与えていることである。この現状に際し、南フロリダ水管理局の研究者達は、水生植物群落を生息場とする魚類、両生類、爬虫類、鳥類などについても定量的な継続調査を行っている (図 4 左)。第二は、周辺の農耕酪農地から流入する過剰な栄養塩 (特にリン) が水質汚濁をもたらしていることである。1975年から1985年の間に湖水のリン濃度は2倍になり (全リン濃度は約100ppb), 過去50年以上にわたる流入により、湖底堆積物の表層には200t以上のリンが蓄積している<sup>3)</sup>。第三は、生育生息する動植物相の変化である。不自然な水位変動と富栄養化による環境変化は、本来広く生育していた Sawgrass (*Cladium jamaicense*) などから Southern cattail (*Typha domingensis*) が優占する植生への変化をもたらした。また、在来種の貝類 Florida apple snail (*Pomacea paludosa*) によく似た侵略的外来種 Island apple snail (*Pomacea insularum*) の生息が拡大しており、それが絶滅危惧種である貝類専食性の猛禽類 Snail kite (*Rostrhamus sociabilis plumbeus*) の個体数減少に影響している。その原因として、外来種は在来種よりも大きく殻が厚いため、Snail kite の幼鳥が外来種の貝をほとんど餌資源とすることができず、Snail kite 個体群の存続が不安定になっていることが報告されている<sup>4)</sup>。これは大きな課題であり、在来種 Florida apple snail の保全を目的としたフィールド実験を行っている (図 4 右)。



図 4 オキチョビー湖で研究に用いられているエアボートやトラップ(左)と在来種貝類の保全を目的とした実験メソコスム(右)

## 4. エバーグレイズ (The Everglades)

エバーグレイズは、フロリダ半島中南部に位置する広大な湿地帯である。かつてはオキチョビー湖 (Lake Okeechobee) の南側からあふれた水が、浅くて(水深 1m 程度) 広い(幅 96km 程度) シートフローとして極めてゆっくりとしたスピードで流れており、River of grass とよばれていた。その面積は、南に向かってはフロリダ半島の先端まで、東は沿岸丘陵地帯まで、西は Immokalee 丘陵までの約 290 万エーカー (11,735km<sup>2</sup>) に及ぶものであった。その後、農地利用と 1950 年代の大規模な治水プロジェクト (Central and Southern Florida Flood Control Project; C&SF) 等により、現在ではオキチョビー湖のすぐ南に連なる地域 (約



図5 かつてのエバーグレイズ (左) と現在の姿 (右)  
(エバーグレイズ国立公園の案内板を撮影)

70 万エーカー $\approx$ 2,833km<sup>2</sup>) は農業地帯に変わり、東の境界部は都市地域となるなど、湿地帯のおよそ半分は人間が利用する土地に転換された<sup>3)</sup> (図 5)。これらの改変により、湿地の水文学的な変化 (涵養機能の低下や乾燥化と落雷によるPEAT火災を含む)、富栄養化、外来植物の拡大といった問題が発生している。流域の環境変化と対策については包括的再生プランの項で後述する。

南端には、エバーグレイズ国立公園が存在する。公園面積は四国の約 1.5 倍に相当し、1979 年には世界遺産 (自然遺産) として登録され、1987 年にはラムサール条約登録地として選定されている。しかしながら、かつて生息していた多くの動植物は減少し、農地と都市開発に起因する水環境悪化やハリケーンアンドリューによるダメージを根拠として、1993 年には危機遺産としてリストアップされた。その後、公園管理努力により 2007 年には危機遺産から脱することができたが、涵養機能の低下、富栄養化、ハビタット減少などの水域生態系の悪化を根拠として、2010 年に再び危機遺産としてリストアップされた<sup>5)</sup>。公園内には多数のトレイルやビジターセンターがあり、多くの旅行者が訪れている。

## 5. 包括的エバーグレイズ再生プラン (Comprehensive Everglades Restoration Plan; CERP)

### 5.1 流域環境の変化と今後の水環境管理

南フロリダ水管理局(SFWMD)は、流域の変化と今後の水管理に関して図6に示す情報を公開している<sup>2)6)</sup>。

図 6 上段は、中南部治水プロジェクト (C&SF) 実施前の流域の状況である。当時のフロリダの人口は 10 万人以下で、そのうち中南部の人口はごく少数であった。フロリダ中南部に降った雨の大部分は、キシミー川やオキチョビー湖なども経てエバーグレイズに保留され、土中に浸透し地下水涵養機能が存在していた。

図 6 中段は、現在を示す。農地利用が進み、1947 年にハリケーンがフロリダを襲って甚大な被害がでたあと、連邦議会は陸軍工兵部隊に指示して、C&SF プロジェクトとして大規模な排水路や堤防を築き成功を収めた。しかし、地表に排水路が存在することによって、大量の水資源がエバーグレイズや地下水層に供給されることなく海に放流されており、この水の損失のために、東部沿岸地域で汲み上げられる地下水は、海水侵入の脅威にさらされている。さらに、河口沿岸帯には過剰な淡水が流入するため、ここでも水質問題が発生している。このような現状を背景として C&SF の見直しが行われ、包括的再生プランにつながった。

図 6 下段は、長期的な解決策が示されている。水の貯留と水質問題の長期的な解決をはかる目的で、沿岸と内陸部の生態系の再結合が行われる。西部に水保全地域 (Water Preserve Area) を確保し、現存する排水路をより自然の川に近づけ、緑の回廊として機能するように再改修することも計画されている。この水路網は自然生態系をつなぎ、大量の水が水保全地域やエバーグレイズに貯留され、水質を改善し、人々にレクリエーションの機会をも与えることを可能にするものである。

## 5.2 再生プランの概要

包括的エバーグレイズ再生プラン（CERP）は、エバーグレイズを含むフロリダ中南部の水資源と生態系を再生し、保全するためのフレームワークであり、2000年に開催された Water Resources Development Act (WRDA2000) において法的に成立したものである<sup>7)</sup>。CERPはC&SFプロジェクトの見直し(Restudy)の根幹であり、18,000平方マイル(約46,000km<sup>2</sup>)以上にわたる16の郡をカバーしている<sup>7)</sup>。CERPは、かつてエバーグレイズに流れていた水の流れを戻すことで、(1)自然環境を回復し、(2)洪水調節機能も維持・改善し、(3)都市や農地へ用水供給を改善することを目的としている。このプランは今後30年かけて、80億ドル(約8000億円)を投じて上記目的を達することを想定している。費用の負担は連邦政府とフロリダ州政府で行われ、実行に際しては陸軍工兵部隊、環境省およびその他州レベルの関係部局が協力することになっている。現段階では、フロリダ州は最初の10年に20億ドル、連邦政府は15億ドルの費用を投じることが決定している。

## 5.3 雨水処理区 (Stormwater Treatment Areas; STA)

雨水処理区 (STA) は、農地からエバーグレイズへのリンの流入量を減少させるための事業で、CERPに明記されている。現在、STAは農業地帯下流端の6箇所に設置されており、その総面積は約52,000エーカーで、農地から流入するほぼすべての水がSTAを通過している。原理は人工湿地に水を通して水生植物による吸収を利用してリンの回収を行うもので、富栄養条件に適した Southern cattail (*Typha domingensis*)、沈水植物、浮遊植物が用いられている。21日間の滞留時間を期待して設計されており、総リン濃度は流入量に対して約80%低下させることができているようである。ただし、リンの抽出と移動には大きな費用がかかるため現段階では再利用不能で、高濃度のリンを含む土砂は掘り出されて一部の場所に貯留されている。STAの生産性が高く、希少な鳥類を含む多くの動物が集まってきており、それらの希少種にも留意しながら実験が行われている。

## 6. リバーウッズ フィールドラボ (Riverwoods Field Lab)

来訪者に現地をみせるとともに再、生プロジェクトへの理解を促す仕組みとして、キシミー川のすぐ近くに自炊宿泊が可能なフィールドラボ (Riverwoods Field Lab) がある (図7)。フロリダ環境学習センター (Florida Center for Environmental Studies; CES) が南フロリダ水管理局 (SFWMD) と協力しながら管理をしており、南フロリダ水管理局のモニタリング調査拠点であると同時に、学生、教員、一般人向けに、キシミー川自然再生プロジェクトに焦点をおいた環境教育や調査プログラムを提供している。敷地内にはヘリコプター、ボート、カヌー、調査機材なども置かれている。今回は、ヘリコプターやボートでキシミー川流域内に深く入り込み、その実態をみることもできた。室内には、会議スペースのほか、キシミー川流域全体の地図、生息する生物の詳細情報、再生プロジェクトに関するビデオ資料やクイズボードなども常備されていた。クイズは20問ほど用意されており、例えば、In the 1960's how much did it cost to channelize the Kissimmee River? というクイズカードの裏には30 million dollars, How much is the total restoration project estimated to cost? というクイズには Over 500 million dollars という解答が記されているなど、キシミー川流域とその再生プロジェクトを

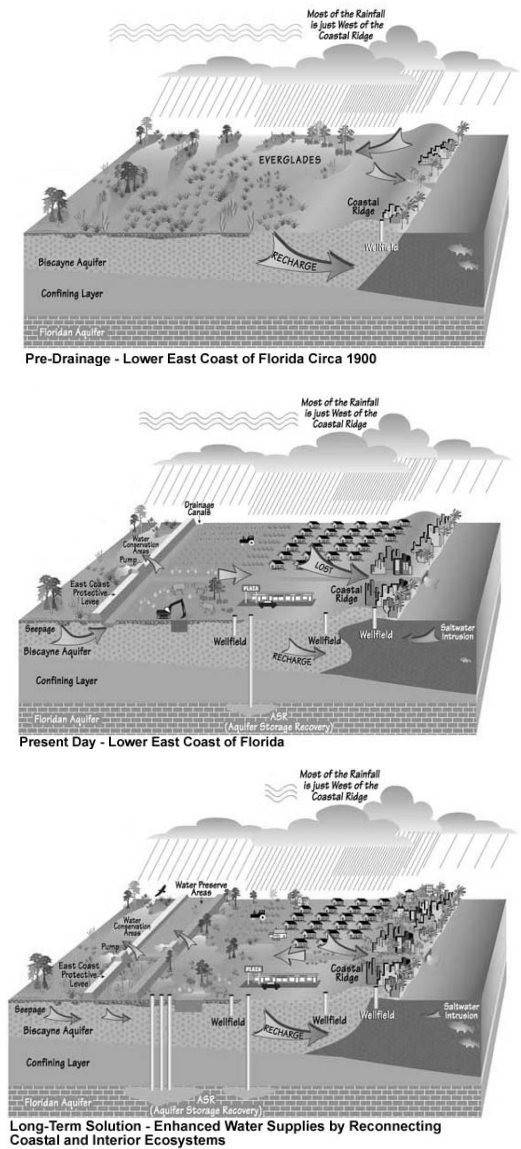


図6 エバーグレイズ流域の環境変化と今後の水環境管理 (上段: 1900年代, 中段: 現状, 下段: 長期的解決策)<sup>2)6)</sup>

実地で理解する学習拠点として極めて効果的な気配りがなされていた。なお、今回の好奇心旺盛な視察メンバーは、キシミー川で捕獲したオオクチバスやイシガイ類をもフィールドラボで調理し、美味しくいただいたことを追記しておく。



## 7. LILA (Living Laboratory)

LILA は野生動物保護区の一部にあり、エバーグレイズ生態系のモデルとして2003年から稼働している面積80エーカーの野外実験施設である。正式名称はLoxahatchee Impoundment Landscape Laboratory であるが、Living Laboratory というニックネームをもっている。エバーグレイズは、氾濫原のなかに島状の微高地が点在する独特の地形となっているが、



図7 キシミー川(左上)のそばにあるフィールドラボ(右上)とヘリコプター(左下)やボート(右下)を用いた現地レクチャー

その環境を決定する主要因は、水の流れ特性と微地形との相互作用であるとの仮定に基づき、水量と流下土砂量の関係や、微地形と植生との関係などのテーマで研究が行われている。(1)実物スケールに近い環境で科学的な実験を行えること、(2)一般市民にも見学が開放されていること、(3)様々な研究者が個々の興味に基づき共同研究を進めることを推奨しそのための環境が整っていること、(4)学校教員を科学的な観点からトレーニングする活動を行っていること、(5)連邦、SFWMD、大学など複数部局が関わっていることなどが極めて興味深い施設で、教育、研究、再生への応用の舞台となっている。一般にも開放されているため年間30万人が訪れているとのことであり、自然再生プロジェクトにともなう新たな教育観光資源といえるかもしれない。

## 8. おわりに

南フロリダ水管理局(SFWMD)発行のパンフレットに、「Managing every drop」「Our underground “mountains”」というキーワードが記されていた。我々日本人が山に水源涵養機能を期待するように、フロリダでは地下がその機能を有する重要な地形要素であり、今回の視察によりCERPはC&SFを基盤として水管理を主軸としたまさに統括的な流域生態管理であることがわかった。また、地方公務員としてドクターが多く採用されており、さまざまな関係者が分野の壁を越えた議論と論理的なつながりをもって連携しているとともに、フィールドやプロジェクトをわかりやすく説明できる施設やスキルのレベルの高さに圧倒された。視察を受け入れてくれたSFWMDの研究者各位に、厚くお礼を申し上げる。

(原稿受付 2012年2月28日) (原稿受理 2012年3月16日)

### 参考文献

- 1) Tockner, K. and Stanford, J.A. (2002): Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29, 308-330.
- 2) Website of the South Florida Water Management District. <http://www.sfwmd.gov/>
- 3) 南フロリダ水管理局 編. 桜井喜雄 訳編. (1999): エバーグレイズよ 永遠に-広域水環境回復をめざす南フロリダの挑戦-. 信山社サイテック, 東京, pp.94.
- 4) Cattau, C., Martin, J., and Kitchens, W. (2010): Effects of an exotic prey species on a native specialist: Example of the snail kite. *Biological Conservation*, 143, 513-520.
- 5) Website of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <http://www.unesco.org/>
- 6) South Florida Information Access (SOFIA) USGS Greater Everglades Ecosystem Science. <http://sofia.usgs.gov/>
- 7) Official website of the Comprehensive Everglades Restoration Plan. <http://www.evergladesplan.org/>