

<総説>

琉球諸島の流域における水循環と生物多様性に関する 学際研究の可能性と展望

渡部哲史¹, 荒谷邦雄¹, 内海信幸², 苅部治紀³, 北野忠⁴, 木村匡臣⁵,
嶋田奈穂子⁶, 富永篤⁷, 中村泰之⁸, 藤岡悠一郎¹, 永井信^{9,10}

Potential and Prospects for Interdisciplinary Research on Water Cycle and Biodiversity in Ryukyu Islands Watersheds

Satoshi WATANABE, Kunio ARAYA, Nobuyuki UTSUMI, Haruki KARUBE,
Tadashi KITANO, Masaomi KIMURA, Nahoko SHIMADA, Atsushi TOMINAGA,
Yasuyuki NAKAMURA, Yuichiro FUJIOKA, NAGAI Shin

¹ Faculty of Social and Cultural Studies, Kyushu University, 744 Motoooka Nishi-ku Fukuoka 819-0395, Japan

² School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552 Japan

³ Kanagawa Prefectural Museum of Natural history, 499 Iryuda, Odawara, 250-0031, Japan

⁴ School of Humanities and Culture, Tokai University, 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1992, Japan

⁵ Faculty of Agriculture, Kindai University, 3327-204 Nakamachi, Nara, Nara 631-8505, Japan

⁶ Strategic Planning and Management Department, Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Kamigamo Motoyama, Kyoto, 603-8047, Japan

⁷ Faculty of Education, University of the Ryukyus, Senbaru 1, Nishihara, Okinawa, 903-0213, Japan

⁸ Fujikan, the Museum of the University of the Ryukyus, Senbaru 1, Nishihara, Okinawa 903-0129, Japan

⁹ Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan

¹⁰ River Basin Research Center, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

Abstract

The potential and prospects for interdisciplinary research on the water cycle and biodiversity in the Ryukyu Islands are discussed. The biodiversity of the Ryukyu Islands is in critical condition, especially in the terrestrial and aquatic ecosystems. The socioeconomic aspects of the island, such as agriculture, tourism, and the livelihood of the islanders, as well as changes in the water environment due to climate change, are important in implementing these countermeasures. Based on these points, we have identified three key elements of interdisciplinary research in the Ryukyu Islands: collaboration with stakeholders, relationships inside and outside the islands, and changes in conditions at different points in the past, present, and future, and have discussed each of these elements.

Keywords: interdisciplinary; Ryukyu islands; water cycle; agriculture; biodiversity

¹ 九州大学 大学院比較社会文化研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡 744

² 東京工業大学 環境・社会理工学院 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

³ 神奈川県立生命の星・地球博物館 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 499

⁴ 東海大学 教養学部 〒259-1292 平塚市北金目 4-1-1

⁵ 近畿大学 農学部 〒631-8505 奈良県奈良市中町 3327-204

⁶ 総合地球環境学研究所 経営推進部 〒603-8047 京都府京都市上賀茂本山 457 番地 4

⁷ 琉球大学教育学部 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1

⁸ 琉球大学博物館（風樹館） 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町千原 1

⁹ 国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

¹⁰ 岐阜大学 流域圏科学研究センター 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

1. はじめに

太平洋島嶼地域には独特の生態系や景観、さらにそれらに基づく固有の文化に恵まれた地域が多く存在する。これらの島嶼地域の流域は他の流域と比べて、気候変化をはじめとする自然環境の変化や社会経済の変化に対して脆弱である¹⁾。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は気候変動により太平洋島嶼地域は干ばつや水不足の増加、沿岸部の洪水や浸食、生態系や食糧生産に影響を及ぼす降雨量の変化、人間の健康への悪影響による壊滅的な影響が生じる可能性があることを指摘している^{2), 3)}。島嶼地域における流域はそれ以外の地域の流域と比べて面積が小さい。このことは降水量などの自然環境の変化や、人間による開発や放棄などの社会経済の変化が流域全体に及ぼす影響が大きいことを意味する。気候変動の影響が顕在化する今日において、固有の生態系や景観、文化を維持しつつ持続的な発展を遂げることは島嶼地域の流域における大きな課題である。また、太平洋島嶼地域においては気候変動の影響やそれに伴う課題が世界に先駆けて顕在化しているため、これらの解決は世界の他の地域でのモデルケースとなり得る⁴⁾。

我が国における琉球諸島も上述の特徴を有する太平洋島嶼地域と同じく、固有の生態系や景観、特異的な文化を持つ流域が存在している。それらを基にした観光業は地域の主要な産業となっている。これらの流域に対して気候変化に伴う水循環の変化、観光業や農業形態の変化に伴う土地利用の変化は流域の生態系や景観、それらに基づく文化に様々な影響を及ぼし得る。琉球諸島における流域が抱える諸課題について理解を進めその解決の方針を探ることは太平洋島嶼地域における課題解決にも資する。我が国は日本・太平洋諸島フォーラム首脳会議 (<https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/pif/index.html> (参照:2023年6月1日)) を開催するなど、太平洋島嶼国と深いつながりを有している。このこともまた、この課題の重要性を高めるものである。

琉球諸島における流域が抱える諸課題に関しては、以下の2章、3章で示すような様々な学術分野において研究が行われている。多くの課題はいずれかの学術分野の範疇に収まるものではなく、その濃淡には差があれども複数の学術分野の知見が必要とされる。特に気候変動の影響が顕在化し、経済のグローバル化に伴う人や物の移動の広域化が進む昨今においては、従来の学問領域を超えた分析が重要と考えられる。本稿では琉球諸島における諸課題に対して水文学、人文社会学、生物学の諸学問分野の融合研究の可能性とその効果について考察を行うことを目的とする。

以下本稿では、まず2章と3章において、学術研究の進展や課題および研究の実装という観点から琉球諸島における水循環と生物多様性を取り巻く状況についてそれぞれ複数の観点から述べる。そのうえで第4章ではこれらの状況を整理すると共に学際研究の可能性と展望について論じる。

2. 琉球諸島の流域における水循環を取り巻く状況

2.1 水循環とその特徴

琉球諸島として示される範囲は複数の定義が存在する⁵⁾が、本稿では大東諸島を除く沖縄県全域を指すこととする。これらの地域は北緯20~30度の緯度帯に位置し、暖流である黒潮が流れる海に囲まれ年間を通して温暖で多湿な気候である(亜熱帯海洋性気候)。気象庁による予報区分では沖縄本島地方、宮古島地方、八重山地方に分けられている。南北に長い地域に島が分布していることから平均気温は地域により異なるが、概ね気温は1月前後が最も低く(那覇平均気温約17度)、7月が最も高い(那覇平均気温約29℃)。年間平均降水量は沖縄本島、宮古島、八重山地方で2,000mm/月を超える程度である⁶⁾。季節別にみると降水量は冬に少なく(100mm/月程度)、最も多い時期は梅雨期である5月から6月と台風の影響を受ける8月から9月である(那覇の6月と9月の平均降水量は280mm/月程度)。

気候変動が水循環にどのような影響を及ぼすかという点に関しては多くの研究が行われている。例えば琉球諸島を含む東アジア沿岸域では台風による豪雨が過去数十年間で増加しており、その理由として温室効果ガス排出による気候変動が影響していることが確認されている⁷⁾。また、海面水位上昇に伴う浸水被害と渇水は島嶼地域における気候変動の影響として重要な関心事項である⁸⁾。海面水位上昇の予測に比べて島嶼地域における降水量の変化に関する予測は困難である。気候変動下での島嶼地域の水資源に関する予測は他の地域と比較して、不確実性が高い⁹⁾。気候変動の予測は一般に数十から数百キロメートルスケールの空間解像度で行われるが、多くの島嶼地域はこれらの空間解像度に対して十分な面積を持たないため、地形性の降雨などに対して十分な再現性を得ることが困難である。島嶼地域における気候変動の影響予測は、気候変動に関する研究においても残された課題と言える。

琉球諸島は台風や梅雨による短時間の集中的な豪雨が多く、急激な出水が発生しやすい¹⁰⁾。特に沖縄島では平地の多くを米軍基地が利用していることも相まって、傾斜地に住宅が多く立地し、大雨による土砂災

害が多く発生している¹⁰⁾。沖縄島北部では7～10月の局所的な豪雨や台風による出水が多いのに対し、沖縄島中南部では梅雨と台風のどちらにもよる出水が多い。また八重山地方では局所的な豪雨等による浸水被害が発生することがある¹⁰⁾。

琉球諸島は、平均降水量が全国平均と比べて多い一方、降水量の年々変動が大きい¹¹⁾。また河川は流域や河道の貯留能力が極めて小さく、降雨の多くは海へ短時間で流出する¹⁰⁾。このためかつては毎年のように渇水による給水制限が行われてきたが、ダムや海水淡水化施設の建設など水資源開発もあり、沖縄島での給水制限は1994年以降行われておらず、他の離島地域についても減少傾向にある¹²⁾。

水資源に関する問題は島嶼地域に広く共通する課題である。水資源を考慮する際には需要と供給のバランスが問題となる。島嶼地域とそれ以外の地域における水供給の大きな差は河川からの取水量の差にある。大陸の場合、河川により離れた地点における降水量を水資源として活用することが出来るが、島嶼地域では大河川が存在しないため、その地域にもたらされた降雨のみが利用可能な供給源である。供給に関しては海水淡水化技術の利用も可能であるが¹³⁾、必要となる電力や発電のためのコストを十分に有するかどうかという点に課題が残る。水資源の需要に関しても島嶼地域は他の地域と異なる特徴がある。琉球諸島では観光業が主要な産業の一つであり、観光開発による水資源利用の変化が島全体の水資源利用可能性を検討する上でも重要と考えられる。このように、島嶼地域の水資源は気候変化や観光や農業をはじめとする経済や人口など社会環境変化に大きな影響を受けると予想されるため、これらの変化の傾向と変化への適応が今後の重要な研究課題となると考えられる。

2.2 水利用—湧水・聖地の変遷

沖縄島も他の島嶼地域と同様に水資源の確保が重要な課題であり、特に大規模な河川の少ない中南部地域では井戸や湧水が生活用水として利用されてきた¹⁴⁾。湧水付近は整備され、上水道が整備された現在においても年中行事の場としても使用されているなど地域に溶け込んでいる⁴⁾。ただし、戦後から本土復帰後にかけて山原地域に大規模ダムが建設された後、これらの地下水利用の割合は減ってきている。沖縄水道局(<https://www.cb.pref.okinawa.jp/water/73> (参照:2023年6月1日))によると、昭和47年には地下水利用は全体の30パーセントを占めていたが平成29年には全体の5パーセントとなり、現在ではダムからの水供給が80パーセントを占めている。水供給が改善することにより慢性的な水不足も改善しているが、その一方で水不足は現在でも深刻な課題として沖縄に横たわっている。その大きな原因は水利用量の増加である。沖縄水道局(同上)によると人口や観光客の増などにより昭和47年と比べて平成29年の1日の平均取水量は約2倍となっている。2.1節で述べた通り、気候変動による集中豪雨や渇水はダムの水量が不安定なものとする。再び深刻な水不足におちいる可能性が高まる現在において、地域の小規模湧水の活用が再度着目されるようになり、行政における計画でも活用やそのための把握が図られている¹⁵⁾。

沖縄の集落には必ず複数の湧水や公共井戸がみられる。その水は生活用水だけでなく、農業用水や防火用水、そして人生儀礼のための神水としても利用されてきた¹⁶⁾。つまり地下水は沖縄の人々の暮らしと人生になくてはならないものであり、それが湧き出る場はただの水辺ではなく聖地としても捉えられてきた。湧水や井戸には必ず拝所が設けられ、水場を汚すことやゴミを放置することを注意する看板には「ここは神聖な場所である」と明記された湧水地(ウッカガー、金武町)もある。現地をたずねてみると、生活用水を汲む場というよりはむしろ聖地的な性格を強く帯びた湧水地さえあることが分かる。このような事実は、沖縄地域の小規模水源の特筆すべき文化的特性を示唆する。

ダムからの水供給が大部分を占めるようになると、人は湧水から遠ざかるようになった。都市化やゴルフ場建設などの開発によって地下水量が減少し、水が枯渇した湧水も多い。著者の一人である嶋田がそのような水源の現状について調査を行ったところ、使われなくなった井戸場においてゴミが散乱して荒れているケースが確認された。一方で、ある村では使われなくなった井戸の蓋の上に置かれた香炉にまだ新しい線香が置かれているケースも確認できた。また、湧水を取り巻く景観が近年重要視され、コンクリート造にされた井戸がかつての石積造に戻されるケースもあった。水が出なくなった湧水地が「拝井戸」として地域の「拝所」として今に残るものもある¹⁷⁾。

このように、自然と社会の両面の環境の変化にともない、水資源の利用や供給の在り方や湧水地自体の在り方も変化を続けている。この湧水や井戸を再び地域の水源の1つとして見直すとき、同時にそこが聖地であること、信仰の拠り所であることを明確に意識する必要があると言える。なぜなら、水源としての維持

管理には、ただルールがあっただけではなく、その場の神聖性が非常に大きな役割を果たしたことは間違いないからである。このような伝統的な沖縄地方の水利用の在り方を在来知として見直す意義は大きいと考えられる。

2.3 農業における灌漑排水と水圏生態系

琉球諸島に代表される亜熱帯島嶼地域では、前述の降雨の特徴に加えて、流域面積が小さく河床勾配が急峻といった地理的条件も影響して、河川の流況は不安定である。琉球諸島は、山地を有する高島と琉球石灰岩による台地を主とする低島に分類でき¹⁸⁾、それぞれにおいて特徴的な対策により水資源の確保に取り組んできた。前者では、沖縄島北部や石垣島におけるダム群の高度な統合運用¹⁹⁾、ダム間送水²⁰⁾、後者ではカー（ガー）と呼ばれる井泉^{21)、22)}、沖縄島南部や宮古島の地下ダム²³⁾が有名である。島の地形、地質はそこで営まれる農業とも大きな関わりを持ち、高島の山地では酸性土壌である国頭マーヅ（赤土）が中心であるため、パイナップルや柑橘類、低島では弱アルカリ性の島尻マーヅやジャーガルが主であり、野菜類の栽培に適している。サトウキビはどちらの土壌においても広く栽培されている²⁴⁾。

農業のための貴重な水資源の確保や効率的な水利用を実現するために、ダムや頭首工、揚水機場やパイプライン等の水利施設が整備され、地域の農業の発展に大きく貢献してきた。しかしそのような農業農村整備事業が周辺環境へ与える影響もさまざまな点があり、環境との調和に配慮した事業のための技術指針や手引きが農林水産省によりとりまとめられている²⁵⁾⁻²⁷⁾。代表的なものとして水圏生態系、特に魚類相への影響が挙げられ、河川横断構造物による移動阻害のほか、上流部に形成される淡水域（淵）による魚類生息地の環境改変もその要因として着目されている²⁸⁾。琉球諸島の河川における魚類相の特徴として、純淡水魚や通し回遊魚に比べて周縁性淡水魚が大部分を占めること、ハゼ亜目魚類が豊富であることが報告されている²⁹⁾が、例えば石垣島の宮良川における物理環境と魚類相の分布を対象とした調査では、頭首工やダムで区切られた河川区間ごとに環境や生息魚種が大きく異なり、河川横断構造物が特に周縁性淡水魚の分布に影響している様子が報告されている³⁰⁾。頭首工に併設される魚道については、構造や設置状況の問題のほか、堆砂や転石、流木の対策、除去といった維持管理の観点からも、数多くの課題が報告されている^{31)、32)}。設計の際に魚類の巡航速度と突進速度を重視する工学的な視点と、魚類の視点や生活史に基づく生態学的アプローチとの乖離を指摘する主張³³⁾もあり、工学的視点と生態学的視点の融合に加えて、既存の魚道における実態調査や人工構造物における生物の動態に関するさらなる知見の蓄積、さらには行政制度や流域住民の意識、歴史性等を対象とした社会科学的なアプローチも必要である³⁴⁾。魚道の継続的な性能評価、堆砂や流木の除去、持続的な維持管理に向けては、施設管理者や研究者のみならず、あらゆるステークホルダーの参画も有効である。「魚道カルテ」とその手引き書を作成することで、魚道の点検、維持活動を一般市民とともに実施することを可能にした、岐阜県の「フィッシュウェイ・サポーター制度」³⁵⁾の取り組みのような市民科学的アプローチも、水共生社会の構築に向けて貢献が期待される。

琉球諸島における農業と水圏生態系との関わりとしては他にも、赤土等の流出によるサンゴ礁生態系への影響が代表的である³⁶⁾。一般的に赤土と呼ばれる国頭マーヅや島尻マーヅだけではなく、ジャーガル等の灰色系の土壌や泥岩も流出が顕著である。赤土等が流出する要因としては、有機物の分解が速く腐植層の薄い土壌条件や、急傾斜で河川が短いといった地形条件、降雨強度の高い気象特性等の自然的要因と、開発や営農活動による人為的要因があり、農地からの流出が占める割合は全体の8割を超えるとされている³⁷⁾。農地からの赤土等の流出を防止する手法としては、勾配修正や沈砂池等の土木的対策のほか、営農対策には緑肥、間作、マルチング（被覆）といった、裸地化の防止や表面被覆、葉柄梱包や植生帯による流出抑制、株出し栽培や春植え栽培等の不耕起・減耕起栽培があり³⁷⁾、それぞれについての効果の検証も進んでいる³⁸⁾⁻⁴¹⁾。しかしながら、その費用面での課題や、対策に必要な資源の投入が非効率である点なども指摘されており⁴²⁾、学際的な研究取り組みが今後も必要といえる。また、耕起回数を減らすことによる流出抑制効果について認知は広がりつつある一方、栽培していない裸地状態の時期でも定期的に耕起して、畑地をきれいな状態で保たなければならない、といった先入観に近い認識も根強く残るという話も聞く（私信）。対策効果の実証や知見の共有、費用や労力負担の観点からも、さまざまな分野のステークホルダーとの協働が、農業と水圏生態系との関わりにおいても求められている。

3. 琉球諸島の流域における生物多様性を取り巻く状況

3.1 琉球諸島の生物多様性とその保全の課題

九州と台湾の間に連なる琉球列島は「琉球弧」とも言われる約 1,200km に及ぶ弧状の列島だが、列島にはほぼ直交して、北側にトカラギャップ（現在のトカラ列島の悪石島と小宝島の間のトカラ海峡に相当する）、南側にケラマギャップ（現在の沖縄諸島と宮古諸島の間のケラマ海峡に相当する）と呼ばれる水深 1,000m 以上の二本の亀裂が発達している。この 2 つの亀裂は今から約 200 万年前の新第三紀鮮新世後期に琉球列島が大陸の辺縁部であった頃のそれぞれ前者が古黄河、後者が古揚子江の河口にあたるとされており⁴³⁾、この 2 つの亀裂を堺にして北・中・南琉球の 3 つの地域に分けられる。トカラ海峡は、生態学や生物地理学の観点から「渡瀬線」と呼ばれ、動物地理学ではこの「渡瀬線」を境に哺乳類、両生・爬虫類、昆虫類などの陸棲動物相が大きく異なるため、旧北区と東洋区の境界とみなされてきた⁴⁴⁾。また、植物相においても「渡瀬線」が日本本土と中・南琉球の植物相の境界であり、生態学的には暖温帯と亜熱帯の境界でもあるとされている⁴⁵⁾。

琉球諸島が位置する北緯 24～30 度付近は亜熱帯気候に区分される地域であり、モンスーンの影響で降水量が多い東アジアでは照葉樹林（ブナ科を主体とする常緑広葉樹）が発達している。しかし、世界的に見れば、これはむしろ例外的で、亜熱帯地域のほとんどは砂漠や乾燥した草原となっている。照葉樹林は、湿潤な東アジア地域を特徴づける生態系であり、豊かな生物多様性を育んできた⁴⁶⁾。照葉樹林帯はそこに生活する人類の生活にも大きな影響を与え、日本の基層文化をなす要素の多くが、中国雲南省からネパール・ブータンに至る照葉樹林帯を基層とする東亜半月弧を起源とする照葉樹林文化にあるとされる⁴⁷⁾。

しかし一方で、照葉樹林文化の基層となった東アジア大陸部の照葉樹林は、人類の生活圏と分布が重なり、有史以前からの土地利用に伴って改変され続けてきたため、自然植生はすでにほとんどの地域で著しく分断・矮小化され、その生物多様性も大きな打撃を受けてきた⁴⁸⁾。こうした現状にあって琉球諸島に残された照葉樹林生態系は世界的に見ても非常に貴重な存在と言える。

加えて、琉球諸島は、更新世の氷期・間氷期サイクルに伴う海水面の変動によって、近隣島嶼間で分離と結合を繰り返すことにより、多くの固有分類群を含む多様な生物相を形成してきた。例えば、地球上で最も種の多様性が高い昆虫類を例にとると、琉球諸島に奄美地域を加えた地域（以降では奄美・琉球地域とする）からは約 8100 種の昆虫類が記録されているが、これは日本全体（約 30,000 種）の 27% に当たる。面積で見れば奄美・琉球地域は日本全体の 1% にも満たない地域であり、いかにこの地域に多くの昆虫類が生息しているかがうかがえる。また、これら奄美・琉球地域の種の属性に注目すると、東洋区系が全体の 39.8% と最も多く、次いで奄美・琉球地域の固有種も 26.7% に上る⁴⁹⁾。

固有種に関して見ると、近縁種が奄美・琉球地域の近隣の島嶼には分布せず、大陸など遠く離れた地域に分布する「遺存固有種」と、近縁種が奄美・琉球地域内の近隣の島嶼に分布する「新固有種」の両方のタイプが存在している点も本地域の大きな特徴である。前者の「遺存固有種」は、かつて大陸や近隣地域にも広く分布していた祖先種が様々な要因でほとんどの地域で絶滅し、奄美・琉球地域にだけ残ったタイプの固有種であり、後者の新固有種は琉球列島に隔離された後にさらに種分化が進んだタイプの固有種である。

奄美・琉球地域の典型的な「遺存固有種」は、哺乳類では奄美大島と徳之島のアマミノクロウサギ (*Pentalagus furnessi*)、鳥類では奄美大島のルリカケス (*Garrulus lidthi*)、昆虫では沖縄島北部のヤンバルテナゴガネ (*Cheirotonus jambar*) など、いずれも奄美群島と沖縄諸島を含む中琉球地域に分布している⁵⁰⁾、⁵¹⁾。これら中琉球の遺存固有種に関しては、近年の分子系統解析の結果から、従来の推定よりも古く、大陸の東縁が島嶼化する過程で、遅くとも後期中新世（約 1,200 万年前～約 500 万年前）までには大陸や北琉球、南琉球の陸棲動物相からの隔離が成立し、継続したと考えられており、中琉球が大陸から分断される以前に大陸内の地形的・環境的要因等で隔離されていた可能性も指摘されている⁵²⁾、⁵³⁾。

後期中新世～更新世初期（約 1,200 万年前～約 200 万年前頃）には、奄美・琉球地域を含む琉球列島が形成され、島弧が成立したと考えられているが、その後の気候変動に伴う海面変化で、奄美・琉球地域の近隣の島嶼間で分離・結合が繰り返された結果、島嶼間の種分化が進み、新固有のタクサ（種や亜種）が生まれた。中琉球では、奄美大島のアマミトゲネズミ (*Tokudaia osimensis*)、徳之島のトクノシマトゲネズミ (*T. tokunoshimensis*)、沖縄島北部のオキナワトゲネズミ (*T. muenninki*) のトゲネズミ属の 3 種、アマミイシカワガエル (*Odorrana splendida*) とオキナワイシカワガエル (*O. ishikawae*)、アマミマルバネクワガタ

(*Neolucanus protogenetivus*) とオキナワマルバネクワガタ (*N. okinawanus*) など、遺存固有な系統が奄美群島や沖縄諸島でさらに種分化した事例が見られる^{54), 55)}。このように、遺存固有かつ新固有な系統が見られることは、中琉球の生物相の隔離が長いことを表している。

奄美・琉球地域のうち、南琉球の陸棲動物相は、近年の分子系統解析の結果から、後期中新世に中琉球と分断され、さらにその後、鮮新世(約 500 万年前～ 約 260 万年前)の間に、大陸との分断や台湾島との一時的な接続を経て形成されたと考えられる⁵³⁾。このため、南琉球の動物相は、ヤエヤマセマルハコガメやキシノウエトカゲ、ヤエヤママルバネクワガタ、ヤエヤマノコギリクワガタなど、近縁な種・亜種が中琉球よりも、台湾や大陸の対岸(東部)に見られる固有種・亜種に多い^{51), 55), 56), 57)}。

これまで見てきたように、奄美・琉球地域は、島嶼という隔離された条件に加え、地史や自然環境の多様性により、多くの生物が島に固有の進化を遂げてきた。この世界に類を見ない貴重な生物相が高く評価され、奄美・琉球地域のうち、奄美大島、徳之島、沖縄島北部、西表島の4島は2021年8月世界自然遺産として登録された⁵⁸⁾。しかし、一方で琉球列島の生物多様性は危機的な状況にある。すでに述べたように、貴重な琉球列島の照葉樹林は観光や農地開発のために伐採され、豊かな水生昆虫相を育んできた水田は後継者不足から放棄され消失の一途を辿っている。温暖な気候のため、定着し蔓延する外来種も多い上に、世界自然遺産登録による観光客の増加に伴うオーバーユースという新たな懸念材料もある。近年、多数の分子系統学的知見がもたらされている陸棲脊椎動物に比べて、本地域の昆虫類に関する研究は大きく立ち遅れている。こうした状況にあって、琉球列島の昆虫類保全と持続的利用をめざした実効的なシステムを構築するためには、琉球列島の昆虫相の起源や成立の過程、種分化の様相を解明するとともに、ESU(進化的に重要な保全単位)の検出とそれに基づく保全管理ユニットの設定などが不可欠である。

3.2 琉球諸島の陸水環境と在来・外来両生類の分布

九州と台湾の間に連なる琉球諸島の大部分の島々は、過去に大陸と陸続きだった大陸島であるため、洋上分散のできない純淡水魚や両生類も生息し⁵⁶⁾、それらの動物には島嶼間でも遺伝的な分化がみられる⁵⁹⁾。また、動物地理区としては旧北区と東洋区に属し、東南アジアなどで多様化している生物が多く分布することもこの地域の生物相の特徴である。北緯25-30度という他地域では乾燥地の多い緯度帯にもかかわらず、周辺の海洋や季節風の影響で、湿潤な気候が維持され、独自性の高い陸棲生物の生息環境が維持されてきた⁴⁵⁾。一方、もともと平坦な土地の少ない島嶼地域の琉球諸島では、陸水環境は少数の小規模な湿地と河川などに限定されており⁶¹⁾、他地域に比べると小規模なこれらの陸水生態系が、この地域の在来生物の生息の上で極めて重要な役割を担っていると考えられる。

琉球諸島の中でも人口密度の高い沖縄本島は、人間の活動の影響などにより、こうした身近な陸水環境が様々な要因で危機的な状況にある。たとえば、人工的な陸水環境を創出する水田は減少の一途をたどっており、沖縄県の水田の作付面積は、12,500ha(1955年)であったものが、現在はその10分の1以下まで減少している⁶²⁾。陸水環境の消失と同様に大きな問題として挙げられるのが、国内外から持ち込まれた外来生物の影響である^{60), 63)}。奄美・琉球の外来生物の問題の特徴は、温帯性の生物に加えて、熱帯や亜熱帯性の生物も野外に定着して外来生物になりうることである。国内の他地域の多くでは、定着できない国外の生物でも琉球諸島では侵略的な外来生物となり、固有の生態系や生物に多大な影響を与えていると考えられる。実際に、沖縄県だけで侵入・定着した外来生物の種数は1,350種を超え(沖縄県外来種対策指針)、国内でも有数の外来生物の侵入地域になっている。これらの多数の外来生物のうちで、実際に野外で増加して大きな生態的影響をもたらす種は限定的であると考えられるが、潜在的に外来生物の問題に関して大きなリスクを抱える地域といえる。さらに、この地域に生息する在来種には固有種も多くおり、この地域の個体群の絶滅が、種としての絶滅に直結するものもあり、外来生物が在来生物に与える影響は他の地域よりも概して深刻である。

著者である富永と中村をはじめとする研究グループでは在来の生態系の保全と在来種の保護のため、外来の両生類、魚類、水生植物など奄美・沖縄の水辺の外来生物の問題解決のため、その影響評価や駆除手法の検討を行ってきた。これまでに主に行った水辺の外来両生類の中では、ウシガエル(*Lithobates catesbeianus*)が、水辺の在来生物に対して影響が大きいことがわかってきた。本種は、多くの水生昆虫を捕食するほか、在来の多くの両生類、さらに爬虫類まで捕食することが明らかになった^{64), 65)}。これらの影響を軽減するために、沖縄本島の北部の主要なウシガエルの繁殖地では駆除や繁殖の抑え込みを試みてきた。ウシガエルの駆除により、調査池のウシガエル個体群はほぼ消滅しつつあり、調査池では水生昆虫の顕著な増加が見られている⁶⁶⁾。このほか、別のある池では、繁茂することで水辺のもともとの生態系を破壊してしまう外来水

草オオフサモ (*Myriophyllum aquaticum*) の駆除実験も行っており、オオフサモの極低密度化が達成され、それと共に在来の水草などが顕著に回復しつつある。ウシガエルとオオフサモともに、手間をかければ小規模な地域での根絶は難しくなく、これらを進めることにより、在来生態系の回復過程を調査していく必要がある。



Fig. 1 A pond on Okinawa Island after the extermination of the Parrotfeather watermilfoil. Esthwaite Waterweed recovered after extermination.

3.3 琉球諸島における水生昆虫の危機的現状とその減少要因と再生への道

近年、国内各地でトンボ類やゲンゴロウ類などに代表される止水性水生昆虫の激減が観察されているが、これは琉球諸島を含む南西諸島などでも例外ではない。減少要因としては以前から環境破壊の要因として知られていた池沼の埋め立てや、侵略的水生外来生物(琉球諸島では、ティラピア類(*Oreochromis niloticus*), カダヤシ(*Gambusia affinis*)などの魚類, オオフサモ(*Myriophyllum aquaticum*), ホテイアオイ(*Eichhornia crassipes*), 熱帯スイレン(*Nymphaeaceae* sp.)などの外来植物), 排水流入などによる水質悪化, 護岸などの影響がある。さらに近年明らかになってきたのが、本州のアカトンボ類の激減要因として注目された「ネオニコチノイド系農薬」による影響である⁶⁷⁾。同農薬による環境影響は、既存の農薬と比較しても水生昆虫に大きな影響を与えることは実験水田の検証などでも明らかである。さらに土壌吸着した化学物質の分解が遅く、たとえ使用を停止しても、長年にわたる影響を与えることが指摘されている⁶⁸⁾。

著者である荻部らは現在、同地域でも農薬汚染の実態調査を展開しているが、作業仮説において懸念されたとおり、絶滅危惧種の生息地を含む里山環境で広く検出されることが分かってきている。検出される薬剤も多剤であることが多く、影響が強く懸念される状況にある。本薬剤の影響は最初におもに水田に生息するアカトンボ類から確認されたため、その薬剤による影響は水田生態系が中心であると考えてしまう傾向がみられるが、現在の同農薬使用実態は水稻だけではなく、畑の作物や身近な殺虫剤まで多岐に渡っている。そのため、影響も水田周辺だけではなく、サトウキビ畑周辺でも確認されている(荻部ら未発表資料)。

環境省レッドリストの改訂時期に当たる現在、著者である荻部らは同地域の水生昆虫相の現況調査を進めている。その結果、国内では同地域にしか生息していない種の中で、すでに2種(コウトウコガシラミズムアシ *Halipplus kotoshonis*, ニセコケシゲンゴロウ *Hyphydrus orientalis*)が2010年代に国内絶滅した可能性が高いことが明らかになった。いずれも体長数mm程度で、一般の関心を引かない種類である。さらに昆虫の中でもマイナーな水生昆虫調査者がほとんど存在しない地域であるため、このような危機的な実態に気が付くのが遅れた可能性が示唆される。また、絶滅予備軍といえる残存産地が10か所程度に減少している種(例えば、マダラアシミズカマキリ *Ranatra longipes*)もかなりあることを確認している。これらの多くは20年ほど前まではかなり普通に生息していた種であり、多様な環境での激減は「水」という彼らの生息に不可欠な基盤を破壊していったことで生じた何よりの証拠である⁶⁹⁾。

このような危機的現況の中、残された個体群の保全はどのように取り組むべきかを模索している。現存、生息地のほとんどは、調査の結果農薬汚染の中にあり、また外来種の管理を展開することも、もともと同地域は人口も少なく、地域が核になって継続した活動を実施することが難しい立地であるという実情がある。こうした実態の中、環境再生の試行として、ある程度のインターバルがあっても駆除効果がある外来水草の管理を実施し、さらに、農薬汚染から逃れる視点から、環境再生から環境創出へと舵を切っている。つ

まり、現在侵略的外来種が生息している場所での駆除管理や、水質改善を図るのではなく、それらの心配が少ない立地（古く放棄された水田跡など）を選択して、水生生物の新たな生息地を創出する手法である。

すでに著者である荏部らによって人工的な池の造成に着手した事例では、造成後飛来定着した種が多数生息するようになり、同池への系統保全個体群の導入試験の着手にも至った。継続的に予算と人が多く投入できる現場であれば、域内の現状を改善していく手法は有効であることがあるが、今回の琉球諸島のような遠隔地でかつ、専門家による頻度の高い管理が事実上不可能な場所では、今後、上記のような新たな視点、新たな手法での良好な水環境創出が効果を上げる可能性は高い⁶⁹⁾。

里山の水辺環境は、劣化要因として気候変動による干ばつやゲリラ豪雨による出水の被害も多く見られるようになっており、さらに管理放棄によるため池周辺の樹木被陰の影響など、既述した劣化要因に加えて状況は悪化していくばかりである。

絶滅危惧種をこれ以上絶滅させないためには、残された生息地の域内保全は急務であるが、上記のような新たなアプローチによる環境創出や再生も視野にいれ、同時並行に実施することが重要である。

3.4 琉球諸島に生息する希少水生昆虫の現状と生息域外保全

前述のとおり、琉球諸島において数多くの水生昆虫が危機的状況に追い込まれている。ただし、このような生息地の消失や個体数の減少は水生昆虫に限ったことではなく、ほぼすべての陸水生生物に当てはまるものと考えられ、実際に琉球諸島では、両生・爬虫類や淡水魚、淡水貝類や水草など様々な生物群において絶滅や減少が報じられている^{70), 71)}。またその一方で、前節にて紹介されているとおり、減少の要因解明や湿地の再生や創出など、効果のある対策事例も知られるようになってきた。

しかし、琉球諸島の陸水環境における生物圏は現状として壊滅的な状況にあり、その再生には途方もない時間と労力をともなう。そのうえ、回復するまで手をこまねいている間にも確実に絶滅は進行している。生態系におけるピースともいえる「種」が一度失われてしまうと、仮に生息環境が回復したとしても、そのピースを埋め直すことは原則として不可能である。しかし、それを可能とする唯一の手段が生息域外保全である。

生息域外保全とは、人間による飼育・成育下での人工的な手法によって種を絶滅から防ぐ方法である⁵⁷⁾。ただし、単に飼育下で個体数を増やすだけではなく、最終的には増やした生きものを生息地に戻す野生復帰の取り組みも必要である。この生息域外保全の意義は、当然のことながら絶滅を回避できることである。飼育下で効率よく繁殖させることができれば多くの個体を得ることが可能であり、野生下で絶滅もしくは絶滅に瀕した場合でも、野生復帰させることで個体数を回復させられる可能性がある。

著者である北野らは、種の保存法における国内希少野生動植物種の指定種を中心に、原則として飼育が禁止されている種においては然るべき申請を済ませたうえで、10 種ほどの水生昆虫の生息域外保全を実践している。中でも近年特に力を入れているのが、フチトリゲンゴロウ (*Cybister limbatus*) とタイワンタイコウチ (*Laccotrephes grossus*) である⁷²⁾。

フチトリゲンゴロウは、国内では琉球・奄美に分布するゲンゴロウ類の最大種である。かつてはトカラ列島宝島以南の複数の島で生息が確認されていたが 2010 年以降の確認地点はごくわずかとなり、個体数も少ないことから、2011 年には種の保存法における国内希少野生動植物種に指定された⁷⁴⁾。ただし、その後も生息状況は改善されず、現在はほぼ野生絶滅の状態にある。著者である北野らによる取り組みでは、2007 年より飼育下での繁殖に取り組み始め、2012 年より現在に至るまで 2 島の個体群を由来とした生息域外保全を継続している。年によって個体数の増減はあるものの近年は毎年 100 個体近く（2022 年度には 300 個体以上）の新成虫を得ることに成功している。さらに危険分散を目的として、2019 年からは環境省の許可を得たうえで伊丹市昆虫館、観音崎自然博物館、アクアマリンいなわしろカワセミ水族館に譲渡した。いずれの館においても、繁殖の成功が確認されており、飼育下における絶滅のおそれは当面免れることができたと言える。

タイワンタイコウチは、国内では琉球の八重山諸島に分布する大型の水生カメムシである。2010 年以降激減し、いずれの地域（島）でも絶滅の危機がきわめて高い状況となっていることから、2021 年には国内希少野生動植物種に指定された⁷⁴⁾。著者である北野らは 2016 年より飼育下での繁殖に取り組み始め、2018 年より現在に至るまで西表島の個体を由来として生息域外保全を継続している。やはり年によって個体数の増減はあるものの毎年数十個体（2022 年度には 100 個体以上）の新成虫を得ることに成功している。現在のところ他機関への譲渡には至っていないが、今後は複数機関での生息域外保全や、現地への野生復帰の取り組みが必要といえる。

陸水環境における生物圏の回復に向けては、生息域外保全によって十分な個体数を確保するだけではな

く、環境省と連携のもと、今後は積極的な野生復帰の取り組みが必要である。しかし、その取り組みに関する事例は未だ少なく今後増加することが期待される。失われたピースを一つずつ埋めることができれば、琉球・奄美の陸水環境におけるかつての生物圏への回復が徐々に進むと考えられる。

4. 学際研究の可能性と展望

上述の通り琉球諸島の水循環と生物多様性に関する諸問題に対しては各学術分野での知見やその社会実装例が蓄積されている。それらの蓄積からは、水循環に関しては気候変動や観光業をはじめとする社会経済の変化、それらの変化の下での湧水の在り方や湧水を取り巻く在来知、農業が水圏環境や生物に及ぼす影響のそれぞれに関する重要性が指摘された。生物多様性に関しては陸水生態系の危機的な状況とそれへの対応としての外来種駆除、新たな生息地の創出、生息域外保全に関する取り組みの重要性が指摘された。

2章と3章で示した内容を基に、琉球諸島の水循環と生物多様性の諸問題について、地球圏—生物圏—人間圏の3つの圏域と、過去から現在そして将来に至る時系列の2つの観点から整理を行った(Fig. 2)。この図から、豪雨や渇水など地球圏の要素、住民の生活用水の確保や農業・観光業などの人間圏を構成する要素、流域生態系や生物多様性などの生物圏の要素が相互に関連しながら推移し、それらの複数の要素が生物多様性の損失に結び付いている様相が認められる。そして、生物多様性の保全・再生・創生・域外保全などの取り組みが進められている。

このように、琉球諸島の水循環と生物多様性を巡り、地球圏—生物圏—人間圏の諸要素が複雑に関連しながら変化している現象を捉える視点として必要とされるものは、第一にステークホルダーとの協働であり、第二に島内外の関係である。またこれらの二点とも関連するものとして、第三に過去、現在、将来にわたる状態の変化が挙げられる。

ステークホルダーとの協働が持続可能な水循環や生物多様性の実現に向けて重要であることは論を俟たない。上述(2.3節)の通り、耕起回数を減らすことによる流出抑制効果など、科学的に明らかとなった知見であっても慣習により実装に至らない事例は多数存在する。これらの実装に向けては学術研究の成果を研究者以外にも理解しやすく伝えるための努力が必要である。このためには、各分野による専門家に加えて科学コミュニケーションや環境教育といった側面での学際的取り組みが有益と考えられる。また、解決に時間を要する事項に関しては、将来像と合わせた長期ビジョンの提示も重要な課題となる。気候変動予測分野で進む将来予測情報なども踏まえて、想定される様々な将来像を示し、どの将来像を目指すべきかという目標を据えること、さらに、その目標に向けた道筋を探るバックキャスティングの方法論を検討することが学際研究として重要と考えられる。

島内外の関係についての検討も重要である。琉球諸島における諸課題を考えるに際しては琉球諸島と日本の本州や世界との繋がりや影響を無視することはできない。例えば水資源に関しては、島内で必要な農作物を島外で生産して輸入することにより、本来島で必要であった水を輸入したことと同等の効果が得られるという仮想水(バーチャルウォーター)⁷⁵⁾の考え方が有益である。本来島で必要であった稲作を島外で生産し輸入することにより、島内の水資源の消費を減らすことが出来る。ただしこのことは、島内における水田の減少を意味し、水田やため池に関連する生態系への影響についても関連している。また、琉球諸島における主産業の一つが観光業であることも島内外の関係を考える上で重要である。島内のステークホルダーの決定に島外からの印象という要素がより強く加味される。観光やその他活動を通じて島外からの支援が増えることは、島単独では実現困難な事項の達成を強力に後押しする可能性がある。

過去、現在、将来の異なる時点における状態の変化の重要性についての検討も重要である。水循環に関しては「水利用—湧水・聖地の変遷」にて述べられた通り、気候変動による水資源の供給の変化や社会変化による需要の変化が将来に向けて進む中で、過去の水循環の在来知を踏まえた対応の重要性が増すと考えられる。水循環のみならず生物多様性やその他の諸課題に対しても、気候変動や社会経済変化を踏まえた将来予測およびバックキャスティングを行う際は、過去から現在への変化の考慮の有無がステークホルダーや島外からの視点に対する説明で重要になると考えられる。例えば歴史文献の活用、気象プロキシ資料(例えば、年輪)の活用、水文気象シミュレーションによる再現や予測など、各学術分野で構築された様々な手法を持ち寄り過去や現在、将来の水循環や生物多様性の姿を描き出す学際研究が重要である。

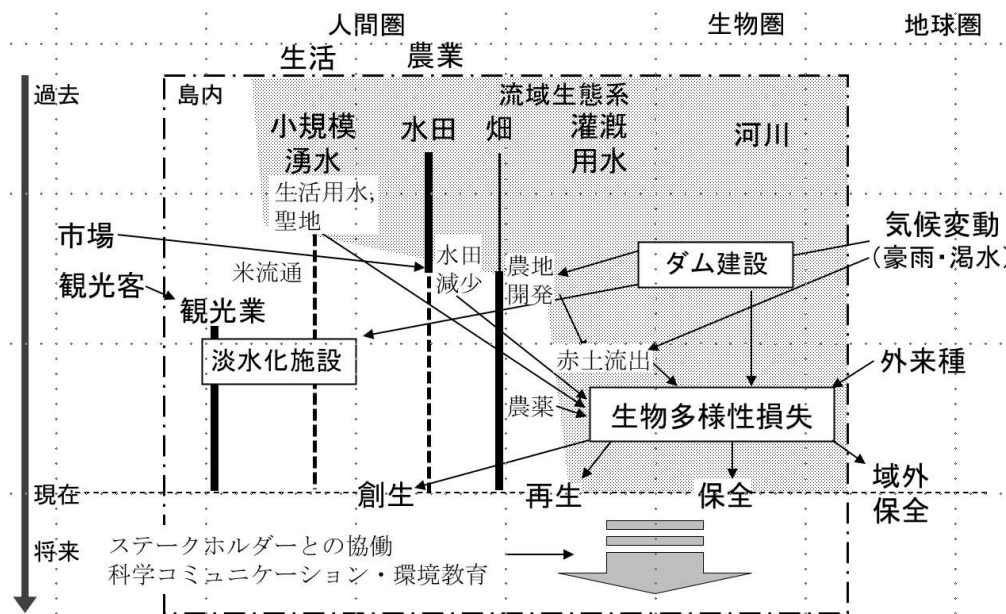


Fig. 2 Factors Related to Changes in Watershed Ecosystems in the Ryukyu Islands

5. おわりに

我が国における島嶼地域の一つである琉球諸島において水循環と生物多様性に関する学際研究の可能性と展望について考察した。琉球諸島の生態系、特に陸水生態系は危機的な状況にあり、それらに対する対策が急がれている。この対策を行う上では気候変動による水環境の変化に加えて、農業や観光業さらには島における人の暮らしといった社会経済の側面も重要となる。このような点を踏まえ、琉球諸島における学際研究の鍵となる要素としてステークホルダーとの協働、島内外の関係、過去、現在、将来の異なる時点における状態の変化という3点を挙げそれぞれについて考察を行った。陸水生態系に関連した取り組みは上述のとおり学術研究やその実装として複数の取り組み例があるが課題も多い。ここで上げた3点はその課題の解決に資する内容であり、学際研究が求められている内容である。学際研究の重要性は広く認識されているが、その実施は容易ではないことが多い。その第一の壁は学術分野間の目的や手法の違いによる意思疎通の難しさである。本稿では琉球諸島を対象とする水循環と生物多様性に関連する研究事例を紹介した。このような相互理解の試みが学際研究、ひいては琉球諸島における課題解決に資するものであると期待したい。

謝辞

本研究はJSPS 科研費(21H05178, 21H05179, 21H05181, 22H05240, 22H05242, 22H05245)の助成を受けた。記して、感謝の意を表する。

参考・引用文献

- 1) Pelling, M., and Uitto, J. I. (2001): Small island developing states: natural disaster vulnerability and global change. Glob. Environ. Change Part B Environ. Hazards 3, 49–62. doi: 10.1016/s1464-2867(01)00018-3.
- 2) IPCC (2018): “Summary for Policymakers,” in Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, And Efforts To Eradicate Poverty, eds V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, et al. (Geneva: World Meteorological Organization).
- 3) IPCC (2014): “Climate Change 2014,” in Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds C. B. Field, et al. (Cambridge: Cambridge University Press).
- 4) Mcleod, E., Bruton-Adams, M., Förster, J., Franco, C., Gaines, G., Gorong, B., James, R., Posing-Kulwaum, G.,

- Tara, M. and Terk, E. (2019): Lessons From the Pacific Islands – Adapting to Climate Change by Supporting Social and Ecological Resilience. *Front. Mar. Sci.* 6:289. doi: 10.3389/fmars.2019.00289.
- 5) 安城たつひこ, 割田育生 (2009): 我が国の広域な地名及びその範囲についての調査研究, 海洋情報部技報, val.27, pp9-17.
 - 6) 沖縄気象台 (2022a) : 沖縄の平年の天候, <https://www.jma-net.go.jp/okinawa/known/kaiyo/tenko/tenko.html#TOPM> (参照:2023年6月1日).
 - 7) Utsumi, N., and Kim, H. (2022): Observed influence of anthropogenic climate change on tropical cyclone heavy rainfall. *Nat. Clim. Chang.*, 12, 436–440, doi:10.1038/s41558-022-01344-2.
 - 8) Karnauskas, K., Donnelly J., and Anchukaitis K. (2016): Future freshwater stress for island populations, *Nat. Clim. Change*, 6, 720–5, doi:10.1038/nclimate2987.
 - 9) Mason, D., Iida, A., Watanabe, S., Jackson, L., and Yokohari M. (2020). How urbanization enhanced exposure to climate risks in the Pacific: A case study in the Republic of Palau, *Environmental Research Letters*, 15, 114007, doi:10.1088/1748-9326/abb9dc.
 - 10) 総合流域防災協議会（沖縄総合事務局・沖縄県）(2023) : 沖縄県における水害・土砂災害対策等の当面の進め方, https://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/kasen/kasen/documents/1-230228_mokuiji.pdf, (参照:2023年6月1日)
 - 11) 沖縄気象台 (2022b) : 沖縄の気候変動監視レポート 2022.
 - 12) 沖縄県 (2015) 沖縄の河川の特徴, <https://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/kasen/kikaku/okinawanokasennotokutyo.html>, (参照:2023年6月1日).
 - 13) 神谷大輔, 2009, 沖縄県の島嶼における水需要構造変化と観光の影響に関する分析, 地域学研究, 39, 2, 267-281.
 - 14) 川満一史, 島野安雄, 藪崎志穂 (2011) : 名水を訪ねて (94) 沖縄本島中部の名水, 地下水学会誌, 53, 309-316.
 - 15) 沖縄県(2019) : 沖縄県長期水需給計画 2019.
 - 16) ぐしともこ (2016) : おきなわ湧き水紀行—散策・樋川と井戸-, ボーダーインク
 - 17) 長嶺操(1992) : 沖縄の水の文化誌, ボーダーインク, pp22-25.
 - 18) 尾方隆幸, 大坪 誠 (2019) : 琉球弧の地球科学的研究—断層と風化・侵食プロセスに関する研究の課題と展望—, 第四紀研究, Vol.58, No.6, pp377-395.
 - 19) 内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 : 北部 5 ダムの統合運用, <http://www.dc.ogb.go.jp/toukan/learn/tougounyo.html> (参照:2023年6月1日).
 - 20) 内閣府沖縄総合事務局 石垣島農業水利事業所 : 事業の概要, <https://www.ogb.go.jp/o/nousui/nns/ishigakijima/contents.html> (参照:2023年6月1日).
 - 21) 下地邦輝, 島野安雄 (2004) : 名水を訪ねて(66) 沖縄・首里城とその周辺の名水, 地下水学会誌, Vol.46, No.3, pp227-238.
 - 22) 森岡 渉, 金 洪稷, 濱田貴之, 樋野公宏 (2017) : カー（井泉）の空間分布に関する調査報告—沖縄県中頭郡北中城村大城・荻道地区を事例として—, 都市計画報告集, Vol.15, No.4, pp313-316.
 - 23) 白戸 明, 清水 修, 小徳 基 (2003) : 沖縄県宮古島における大規模地下ダムによる水資源開発, 農業土木学会誌, Vol.71, No.5, pp411-416.
 - 24) 沖縄県 : 農業農村整備事業の概要, 2022年12月13日, <https://www.pref.okinawa.jp/site/norin/muradukuri/jigyougaiyou.html> (参照:2023年6月1日).
 - 25) 農林水産省 : 農業農村整備事業における環境との調和への配慮, <https://www.maff.go.jp/j/nousin/keityo/kankyo01.html> (参照:2023年6月1日).
 - 26) 農林水産省 : 土地改良事業における環境影響評価, https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/eikyou_hyouka/index.html (参照:2023年6月1日).
 - 27) 農林水産省 : 農村環境保全のための調査, https://www.maff.go.jp/j/nousin/kankyo/kankyo_hozen/index.html (参照:2023年6月1日).

- 28) 用田悠介, 鹿野雄一, 阿部信一郎, 井口恵一朗, 棗田孝晴 (2018): 河川工作物による環境改変が淡水魚類群集に及ぼす影響, 応用生態工学, Vol.21, No.1, pp17-28.
- 29) 四宮明彦, 池俊人 (1992): 奄美大島における陸水域の魚類相, 鹿児島大学水産学部紀要, Vol.41, pp77-86.
- 30) 笠原太一, 福田信二, 木村匡臣, 浅田洋平, 乃田啓吾 (印刷中): 石垣島宮良川流域の物理環境および魚類相の流程分布と河川横断構造物の影響河川工作物による環境改変が淡水魚類群集に及ぼす影響, 土木学会論文集 G (環境) .
- 31) 岩村勉 (1993): 頭首工魚道の変遷と課題, 農業土木学会誌, Vol.61, No.5, pp423-428.
- 32) 井出早喜子, 川端伸博, 長谷部均 (2014): 近年における頭首工の魚道の状況について, 農業農村工学会誌, Vol.82, No.4, pp321-324.
- 33) 森誠一 (2000): 必要な魚道, 不要な魚道, 応用生態工学, Vol.3, No.2, pp235-241.
- 34) 森誠一 (2000): 魚道の思想・機能評価・今後の魚道の在り方, 応用生態工学, Vol.3, No.2, pp151-152.
- 35) 藤田裕一郎, 森誠一, 清水佳子, 和田清, 原田守啓, 藤井孝文, 児玉孝哉, 坂野嘉治, 伊藤克敏, 内川靖 (2016): 水生生物の移動を支える河川環境のきめ細かな修復活動, 水利科学, Vol.60, No.2, pp39-55.
- 36) 沖縄県: 赤土汚染がおきるしくみ, 2019年6月10日, https://www.pref.okinawa.jp/site/hoken/eiken/kankyo/mizu_hp/akatsuchiosennoshikumi.html (参照: 2023年6月1日) .
- 37) 沖縄県: 沖縄県赤土等流出防止対策基本計画最終評価, 2022年9月30日, <https://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/hozen/documents/01akatuchiyouka.pdf> (参照: 2023年6月1日)
- 38) 吉永安俊, 酒井一人, 仲村渠将, 大澤和敏, 塩野隆弘 (2007): ススキ束を用いたうね間部分マルチの土砂流出防止効果に関する研究, 農業土木学会論文集, Vol.75, No.3, pp313-318.
- 39) 塩野隆弘, 原貴洋, 山元伸幸, 原口暢朗, 生駒泰基 (2007): 草生帯およびソバ栽培導入による営農的赤土流出防止対策, 農業農村工学会誌, Vol.75, No.9, pp817-820.
- 40) 乃田啓吾, 大澤和敏, 池田駿介, 小沢聖 (2009): サトウキビ畑における営農的侵食抑制対策の評価, 農業農村工学会論文集, Vol.77, No.2, pp153-162.
- 41) 玉城重則, 宮本善和 (2020): サンゴ礁生態系の保全に資するローカル環境認証に向けた赤土流出の抑制のための営農対策の評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol.76, No.5, ppI_393-I_399.
- 42) 坂井教郎, 森高正博, 横川 洋 (2015): 赤土流出対策の検証と費用負担問題—石垣島の圃場データの分析から—, 農林業問題研究, Vol.51, No.2, pp65-73.
- 43) Osozawa, S., Shinjob, R., Armidc A., Watanabe Y., Horiguchi T., and Wakabayashi, J., (2012): Palaeogeographic reconstruction of the 1.55 Ma synchronous isolation of the Ryukyu Islands, Japan, and Taiwan and inflow of the Kuroshio warm current. *International Geology Review*. 54: 12, 1369-1388.
- 44) 徳田御稔 (1969): 生物地理学.築地書館, 東京.
- 45) Numata, M. (1969): Progressive and retrogressive gradient of grasslandvegetation measured by degree of succession. *Vegetatio* 19:96-127.
- 46) 清水善和 (2014): 日本列島における森林の成立過程と植生帯のとらえ方-東アジアの視点から. 地域学研究. 27:19-75.
- 47) 湯本貴和 (2017): 照葉樹林の生物文化多様性とその活用 特集・森のめぐみと生物文化多様性「森林環境 2017」124-133.
- 48) Yang, Y., Fujiwara, M., Li, B., Yuan, X., Hara, K., Da, L., Tomita, M., Zhao, Y. (2014): Structure and diversity of remnant natural evergreenbroad-leaved forests at three sites affected by urbanizationin Chongqing metropolis, Southwest China*Landscape Ecol Eng* (2014) 10:137–149.
- 49) 東清二 (2013): 沖縄昆虫誌.榕樹書林.272pp.
- 50) Matthee, C.A., Vuuren, B. J., Bell, D. Robinson, T. J. (2004): A Molecular supermatrix of the rabbits and hares (Leporidae) allows for the identification of five international exchange during the Miocene. *Sytematic Biology*. 53 : 433-447.

- 51) 細谷忠嗣・荒谷邦雄. 2010. DNA に依る系統解析の紹介. コガネムシ研究会(編)コガネ博 2010 レジューメ集. 16-18.
- 52) Honda, M., Kurita, T., Toda, M., Ota, H. (2014): Phylogenetic relationships, genetic divergence, historical biogeography and conservation of an endangered gecko, *Goniurosaurus kuroi* (Squamata: Eublepharidae), from the Central Ryukyus, Japan. *Zool. Sci.* 30:309-320.
- 53) Okamoto, T. (2017): Historical biogeography of the terrestrial reptiles of Japan: A comparative analysis of geographic ranges and molecular phylogenies. p.135-163. In: M. Motokawa and H. Kajihara (eds.), *Species Diversity of Animals in Japan*. Springer Japan, Tokyo.
- 54) Kuramoto, M., Sato, N., Oumi, S., Kurabayashi, A., Sumida, M. (2011): Inter-and Intra-Island divergence in *Odorrana ishikawae* (Anura, Ranidae) of the Ryukyu Archipelago of Japan, with description of a new species February 2011 *Zootaxa* 86(2767):25-40.
- 55) 細谷忠嗣, 荒谷邦雄 (2006): 琉球列島におけるマルバネクワガタ属の分子系統地理. *昆虫と自然*. 41(4): 5-10.
- 56) Ota H. (1998): Geographic patterns of endemism and speciation in amphibians and reptiles of the Ryukyu Archipelago, Japan, with special reference to their paleogeographical implications. *Researches on Population Ecology* 40: 189-204. doi:10.1007/BF02763404.
- 57) 太田英利 (2012): 琉球列島を中心とした南西諸島における陸生生物の分布と古地理-これまでの流れと今後の方向性. *月刊地球*. 34(7):427-436.
- 58) 日本政府 (2019): 世界遺産一覧表記載推薦書 奄美大島、徳之島、沖縄島北部及び西表島 325pp.
- 59) Nishikawa, K. (2017): Species diversity of Japanese amphibians: recent progress and future prospects of systematic studies. 165-181. doi:10.1007/978-4-431-56432-4_6 In: Motokawa M, Kajihara H, eds. *Species diversity of animals in Japan*. Amsterdam: Springer.
- 60) 日本生態学会編 (2015) :南西諸島の生物多様性, その成立と保全. 南方新社, 鹿児島. 67 pp.
- 61) 立原一憲 (2003) : 琉球列島の陸水環境と陸水生物. Pp.33-41. In: 西田睦・鹿谷法一・諸喜田茂充 (編著) 琉球列島の陸水生物. 東海大学出版会, 秦野. 572pp.
- 62) 滝沢宏美.(2007): 現代沖縄の米農家事情. 77-86. In: 島村恭則, 日高水穂 (編) 沖縄フィールド・リサーチ. 秋田大学教育文化学部, 秋田.
- 63) 日本生態学会編 (2002) : 外来種ハンドブック. 地人書館, 東京. 390pp.
- 64) Nakamura, Y., Tominaga, A. (2021): Diet of the American bullfrog *Lithobates catesbeianus* naturalized on Okinawajima, Ryukyu Archipelago, Japan. *Current Herpetology*, 40 (1) 40-53. doi:10.5358/hsj.40.40.
- 65) Nishijima, S., Shiroma, H., Kamimura, R., Hentona, A., Nakamura, H., Uchiwa, K., Nakamura, Y., Tominaga, A. (2022): Predation by *Lithobates catesbeianus* on *Goniurosaurus kuroi* and *Achalinus werner* on Okinawajima Island, Ryukyu Archipelago, Japan. *Herpetology Notes* 15, 139-142.
- 66) 富永篤, 中村泰之 (2021) : 奄美・琉球の水生昆虫に対する外来両生類の影響と対策. *昆虫と自然* Vol. 56, No. 10, pp. 18-21.
- 67) 上田哲行, 神宮子寛 (2013): アキアカネに何が起こった のか: 育苗箱施用浸透性殺虫剤のインパクト. *Tombo*, 55: 1-12.
- 68) Kasai, A., Hayashi, T. I., Ohnishi, H., Suzuki, K., Hayasaka, D., Goka, K., (2016): Fipronil application on rice paddy fields reduces densities of common skimmer and scarlet skimmer. *Scientific Reports*. doi:10.1038/srep23055.
- 69) 荻部治紀 (2021): 奄美・琉球の里地里山の希少水生昆虫類の現状と保全への挑戦. *昆虫と自然*, 56(10):10-13.
- 70) 西田睦, 鹿谷法一, 諸喜田茂充 (2003) : 琉球列島の陸水生物, 東海大学出版会, 572pp.
- 71) 沖縄県環境部自然保護課 (2017) : 改訂・沖縄県の絶滅のおそれのある野生生物第3版 (動物編), 沖縄県環境部自然保護課, 712pp.
- 72) 北野忠, 渡部晃平 (2016) : 絶滅を回避する最後の手段・生息域外保全, *昆虫と自然*, Vol.51, No.7, pp.24-27.

- 73) 北野忠 (2021) : 絶滅危惧水生昆虫の生息域外保全の現状と課題, 昆虫と自然, Vol.56, No.10, pp.14-17.
- 74) 国内希少野生動植物種一覧, <https://www.env.go.jp/nature/kisho/domestic/list.html> (参照: 2023 年 6 月 1 日)
- 75) Allan, J. A. (2011): Virtual water: tackling the threat to our planet's most precious resource. London ; New York, I. B. Tauris.

(原稿受付 2023 年 1 月 13 日 原稿受理 2023 年 7 月 9 日)