



センサネットワークによるニッポンバラタナゴの 生息環境のモニタリングシステムの構築

坂田 伊織*・岡田 龍也**・杉本 智嗣**・須山 敬之***・
柳沢 豊***・岸野 泰恵***・松永 賢一****・北川 忠生*

* 近畿大学農学部環境管理学科
** 近畿大学大学院農学研究科環境管理学専攻
*** NTT コミュニケーション科学基礎研究所
**** NTT マイクロシステムインテグレーション研究所

Construction of the environmental monitoring system using sensor network to investigate the habitat of the Japanese rosy bitterling (Cyprinidae)

Iori SAKATA*, Ryuya OKADA**, Tomotsugu SUGIMOTO**, Takayuki SUYAMA***,
Yutaka YANAGISAWA***, Yasue KISHINO***, Ken-ichi MATSUNAGA****, Tadao KITAGAWA*

* *Department of Environmental Management, Faculty of Agriculture, Kinki University,
3327-204 Nakamachi, Nara 631-8505, Japan*
** *Program in Environmental Management, Graduate school of Agriculture, Kinki University,
3327-204 Nakamachi, Nara 631-8505, Japan*
*** *NTT Communication Science Laboratories,
2-4, Hikaridai, Seika-cho, "Keihanna Science City", Kyoto, Japan*
**** *NTT Microsystem Integration Laboratories,
3-1, Wakamiya, Morinosato, Atsugi, Kanagawa 243-0198 Japan*

Synopsis

Environmental monitoring systems using sensor networks were constructed in a pond in the "Satoyama" field of Nara Campus (also called the "Kisho-gyo Biotope"). Water temperature, dissolved oxygen concentration, atmospheric temperature, humidity, and illumination are automatically measured over time by the specific sensors located at the edge of the cables connected to wireless sensor nodes, and the data are sent to the data server in NTT Communication Science Laboratories through the wireless relay station. This system makes it possible to access to the data in a Hmely manner via internet connections. In this pond, the Japanese rosy bitterling *Rhodeus ocellatus kurumeus*, categorized as "Critically Endangered" in the Japanese Red List, has been introduced, and its new habitat is under construction to preserve the local population in Nara Prefecture. This new system would contribute to conservation of this endangered species.

Keywords: sensor network; endangered species; conservation introductions; enviromental monitoring

はじめに

生物を保護する上で、それらの生息環境を適切に把握し、理解する事は不可欠である。しかし、調査にかけられるさまざまなコストや調査自体への人為的影響を考慮した場合、継続的な十分な情報を得ることは困難な場合が多く、調査の現場に

おいてその対策のためにさまざまな工夫が必要とされる。現在、多くの調査で温度や湿度、水深、水流などの環境要素に対して現場に設置して継続的に測定・記録する装置（データロガー）が用いられているが、定期的なデータの回収が必要であること、回収までデータが確認できないこと、回収までの間に生じた装置の不具合等への対応の遅

れが生じるなど不都合な点も多い。また、既存の装置では測定できる項目も限られている。実際に野外で調査・観察を行っている研究者にとって、センサや通信部門の専門家と連携し、それぞれの環境に応じた必要な環境要因が測定できること、回収などの手間や影響を抑えること、即時に情報が得られることなどを可能にした最適な環境モニタリングシステムを構築することは、的確に環境要因を把握するうえで非常に意義深い。

近畿大学農学部では、2006年より里山修復プロジェクトを進行させており、キャンパス内に創出されたさまざまなビオトープを利用した自然環境の観察や調査が行われている（池上・米虫, 2007）。この中には、希少生物の保護において重要な生息地も含まれている。これらについて詳細かつ継続的な調査を行うことは、その生息地の保全のみならず、知見が不足している場合が多い希少生物の生態や好適生息環境を解明するうえでも重要である。農学部環境管理学科は、平成25年5月25日に NTT グループとの包括的な自然環境保全と環境協力に関する協力関係を提携し、その一環として NTT コミュニケーション科学基礎研究

所（以下、NTT CS 研）との間で、近大奈良キャンパスの里山ビオトープを利用した共同研究が始められている。NTT CS 研が持つ環境測定および通信技術を実際の里山における自然環境のモニタリングに応用し、得られたデータを希少生物や健全な里山環境の保全に役立てる取組みが始まったところである。

最初となる平成25年度からの取組みとして、第2共同実験棟南側の棚田の上に位置するため池「希少魚ビオトープ（従来の報告（小山ほか, 2007）等での通称F池）」を対象として、モニタリングシステムの実践的な利用および技術開発に取り組んでいる。この希少魚ビオトープには、もともとこの池に生息していた希少魚のミナミメダカ *Oryzias latipes*（従来、メダカ南日本集団と呼ばれていた淡水魚）の他、全国的にも最も絶滅の危険性が高い淡水魚の1つであるニッポンバラタナゴ *Rhodeus ocellatus kurumeus* (Fig. 1A) の移殖個体群が生息している。つまり、この希少魚ビオトープは、現在、絶滅危惧種の保全の上でも大変重要な意味を持つ池となっている。

希少魚ビオトープに移殖されたニッポンバラタ

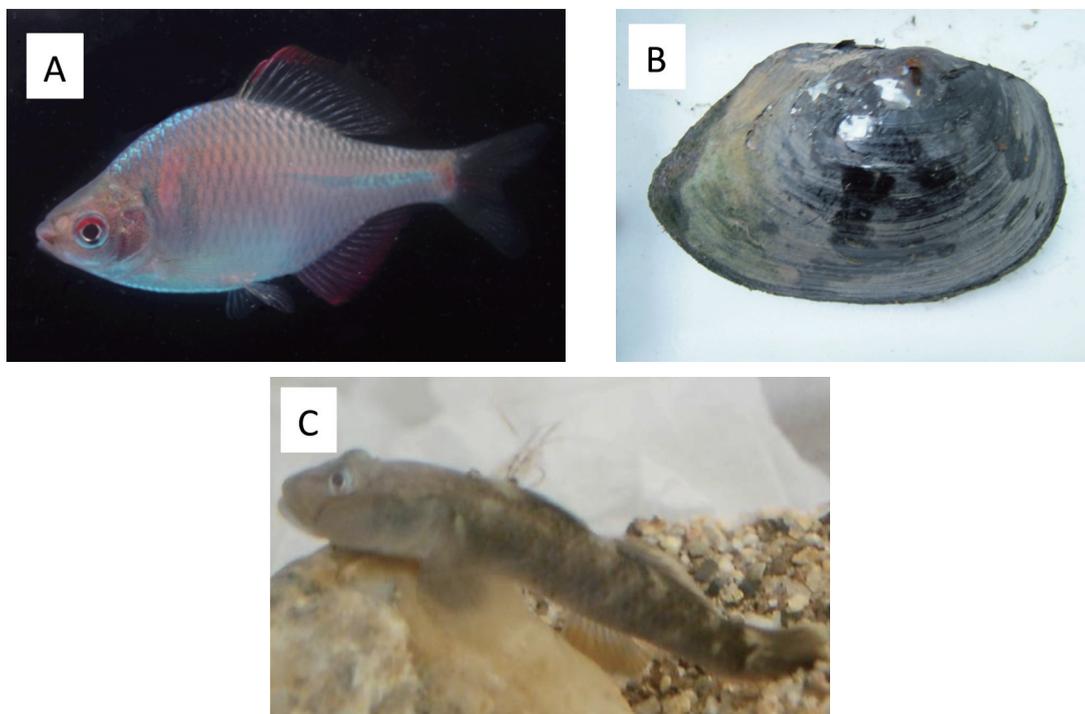


Fig. 1. A, Japanese rosy bitterling, *Rhodeus ocellatus kurumeus* (male, 40 mm in standard length) ; B, Freshwater mussel, *Anodonta japonica* (Japanese (100 mm in shell length) ; C, Freshwater goby, *Rhinogobius* sp. BF (35 mm in standard length). Rosy bitterling parasitize freshwater mussels by laying their eggs in the gills of mussel. And the larvae of freshwater mussels also parasitize on the fins or gills of the goby fish.

ナゴという魚は、体長 4 cm ほどの小型コイ科魚類に属する日本固有亜種で、かつては琵琶湖以西の地域に広く生息していたが、近年では生息環境の悪化、中国から持ち込まれた近縁亜種のタイリクバラタナゴ *R. o. ocellatus* との交雑と置換によって激減し、その生息地域はごく一部に残されているにすぎない。そのため、環境省版レッドリストにおいて最も絶滅の危険度が高い「絶滅危惧 IA 類」に指定されている（環境省、2013）。奈良県ではすでに絶滅したと考えられていたが、著者らの一部が2005年に行った魚類相調査において、奈良公園内にある1つの池からニッポンバラタナゴの個体群の生息を発見し、詳細な DNA 分析によってこれが純粋かつこの地域に残存していた個体群であることが確認されている（三宅ほか、2007）。この個体群については、2007年より本格的な調査・保護活動が行われているが、生息環境の悪化や外来生物の侵入のリスクにさらされており、きわめて絶滅の危険性が高い状況が続いている（野口・北川、2012）。現生息池の環境の改善には多大なコストと時間を要するために、環境の改善を待っている間にこの個体群が絶命に陥ることは容易に想像できる状態であったため、より安全な場所に新たな生息池を創出する必要性が生じていた。本来、生息している生物を他地域に移殖する行為は、安易に行うべきではない。また、このニッポンバラタナゴ個体群は淡水性二枚貝であるドブガイ属のタガイ *Anodonta japonica* (Fig. 1B) を産卵床として利用し、タガイもまた淡水性のハゼ科魚類であるシマヒレヨシノボリ *Rhinogobius* sp. BF (Fig. 1C) を幼生の宿主として利用している。したがって、ニッポンバラタナゴを移殖するという事は、ニッポンバラタナゴにかかわるその他の生物の移殖も必要とするため、より一層の注意が必要である。しかしながら、この個体群を絶滅から救うには、新たな場所に移して個体群を維持する危険分散が不可欠な状況にまで陥っていたため、2009年2月から、この希少魚ビオトープへの移殖（保全的導入）に取り組んでいる。これらの生物の移殖に際しての方針、プロセス、経過については、北川ほか（2013）にまとめられているため、そちらを参照されたい。

希少魚ビオトープは、ニッポンバラタナゴの本来の生息環境に近い里山環境である点、維持・管

理が十分可能な規模である点、外来種などの混入がおこりにくいという点で、永続的なニッポンバラタナゴの生息域としてふさわしい場所の1つであると考えられる。希少魚ビオトープは、環境改善のため人為的に毎年環境が改変されている。ニッポンバラタナゴの生息池として最適な環境を創出するためには、環境改善作業と並行して詳細な生物の観察と環境のモニタリングが不可欠である。本ビオトープでのニッポンバラタナゴの最適な環境創出と、ニッポンバラタナゴおよび他の関連生物の生態、環境要因との関連性を連続的かつ詳細に把握することができれば、今後、絶滅の危機にあるニッポンバラタナゴの生息環境を管理・創出する上でも重要な情報となる。

本報告では、現在進行している NTT CS 研との共同研究で実施している希少魚ビオトープでのセンサネットワークを利用した試行的な環境モニタリングシステムについて紹介する。

調査地の概要

希少魚ビオトープは、近畿大学奈良キャンパスの第2共同研究棟西側に位置する周囲約 50 m のため池である (Fig. 2, 3)。戦前から長年放置されていたため、2006年にこの池で初めて行った水抜き調査の際には、池底一面を有機物（ヘドロ）層が覆い、もっとも深い場所では1メートル以上が堆積していた（小山ほか、2007）。しかし、その後の毎年における冬期の池干し（水を抜いて池底を乾かす作業）、ヘドロ除去作業によって、周囲の水深 30 cm ほどの岸際の浅場域には、約 50 cm の幅で本来の底質である砂礫が表出するようになってきている。水源は主に数地点の池底からの湧水で、池への流入水路はなく、池からの流出水路はその下流にある棚田ビオトープに水を供給している。池の西側と東側には樹木が繁茂しており、日中でも池内には日陰が存在している (Fig. 2)。池の中には、深さ 10 cm 程度の土を入れたプランター（縦 25 cm 横 80 cm 深さ 20 cm）を、ヘドロに埋もれないようにブロックで底上げして水深約 40 cm に設置し、ニッポンバラタナゴの産卵床であるタガイを各約10個体投入している。一般にニッポンバラタナゴの産卵期は5月から6月に最盛期を迎える（川那部・水野、1989）。タガイの中に産みつけられた卵はその中で発生して

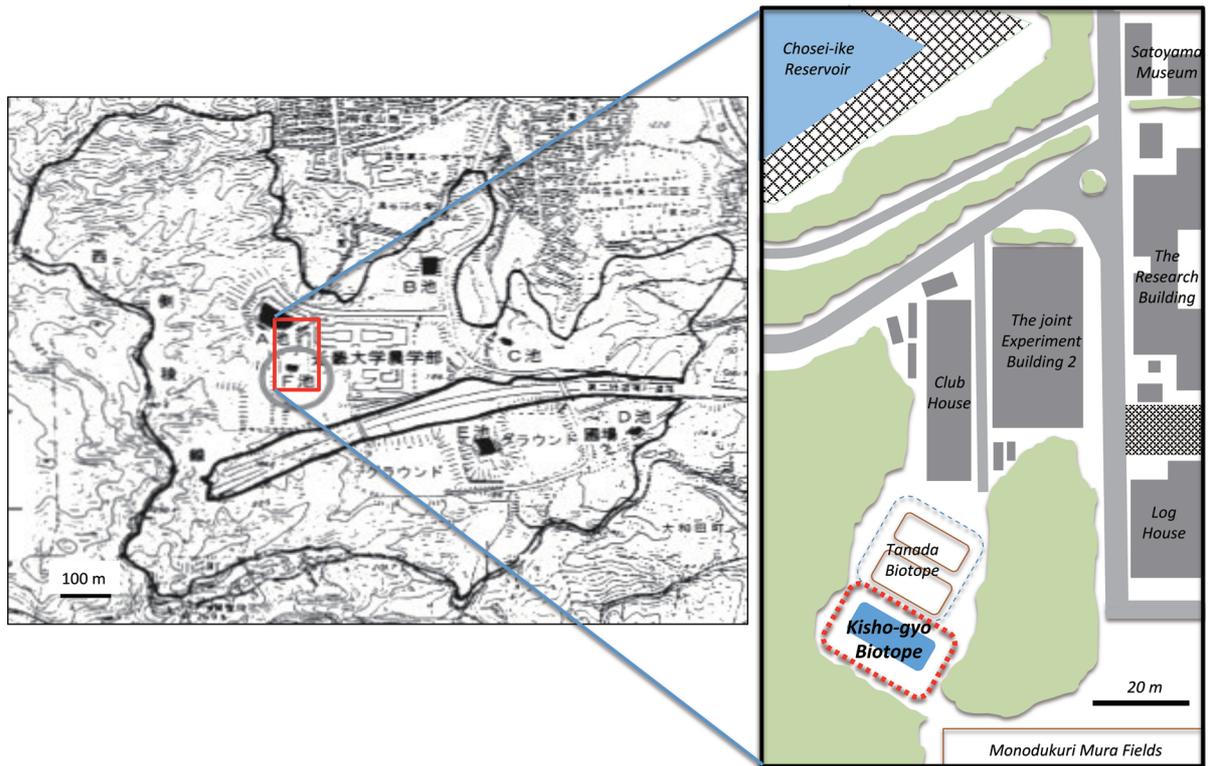


Fig. 2. The location of the “Kisho-gyo Biotope” in Nara campus of Kinki University.

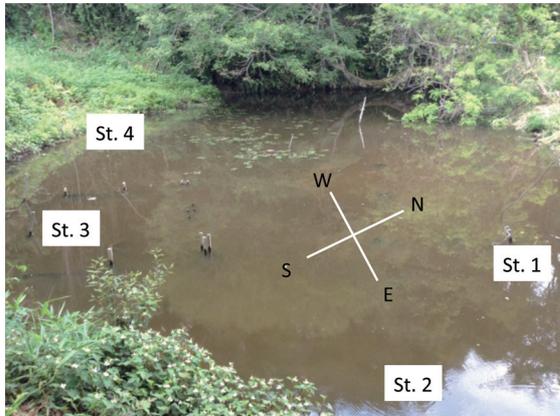


Fig. 3. Investigation sites in “Kisho-gyo Biotope” in this study.

稚魚になるまで過ごすため、タガイが健全に生存していることがニッポンバラタナゴを繁殖させる上で最も重要な条件となっている。特に、タガイが生息する池の底部は高水温時に酸素欠乏状態に陥りやすく、もっとも影響を受けやすいため、タガイが生息するプランター付近の環境要因を中心に、モニタリング調査を実施している。

センサネットワーク

センサネットワークとは、無線通信可能なセンサノードと呼ばれる端末を用いてさまざまな状況をモニタリングするためのネットワークである。センサノードには気温や湿度などモニタリングする対象に応じたセンサを使用する。センサノードで測定した結果のデータを無線通信で基地局まで送信することで、基地局はモニタリングのためのデータを収集することができる。

希少魚ビオトープにおけるセンサノードには、岸野ほか(2009)で開発した無線センサノードを用いた(Fig. 4)。このセンサノードは免許不要の無線通信モジュール(IEEE 802.15.4 準拠)を備え、見通しで数百メートルの距離で通信できる。

センサノードは電池で駆動し、通信は無線であるため、配線工事をすることなくセンサノードを設置するだけでネットワークを構築できる。しかし、一方で電池の容量は限られているため、定期的に電池を交換しなければならない。また、無線通信は見通しがよい場所であればセンサノードと基地局が直接通信を行えるが、間に電波を遮蔽するもの(建物や土手など)があると通信が行えな



Fig. 4. Wireless sensor node used in this study.

い、といった制約がある。このため、これらの制約を考慮してセンサネットワークを構築する必要がある。

調査方法

希少魚ビオトープでは、これまで水質調査として計器による水温、pHの測定と、試薬検査による溶存酸素(DO)、COD、SiO₂の5項目を週に一度の頻度で実施してきた。本調査では、池内の4ヶ所において、タガイの生存に最も大きな影響を及ぼし、季節的、時間的変動の大きい水温とDOについて、センサモニタリングシステムを導入するとともに、貝を設置しているプランター内に定時撮影デジタルカメラを設置し、ニッポンバラタナゴの繁殖行動と、環境要因の関係を試みている。池内の設置場所として、St. 1は、池の北側(棚田側)に配置されたプランター、St. 3は、反対の池の南側(山側)に配置されたプランターとし、水温、DOセンサと水中カメラの設置を行った。St. 2は、池の東端で流出口に近い方に設置したプランターで、比較的水中の透明度が高いため水中カメラを設置した。St. 4は、水源となる湧水の出現点で、この池の原水の特徴を把握するために水温とDOセンサを設置した(Fig. 3, 5)。気温および湿度は池の南側に近接するひらけ

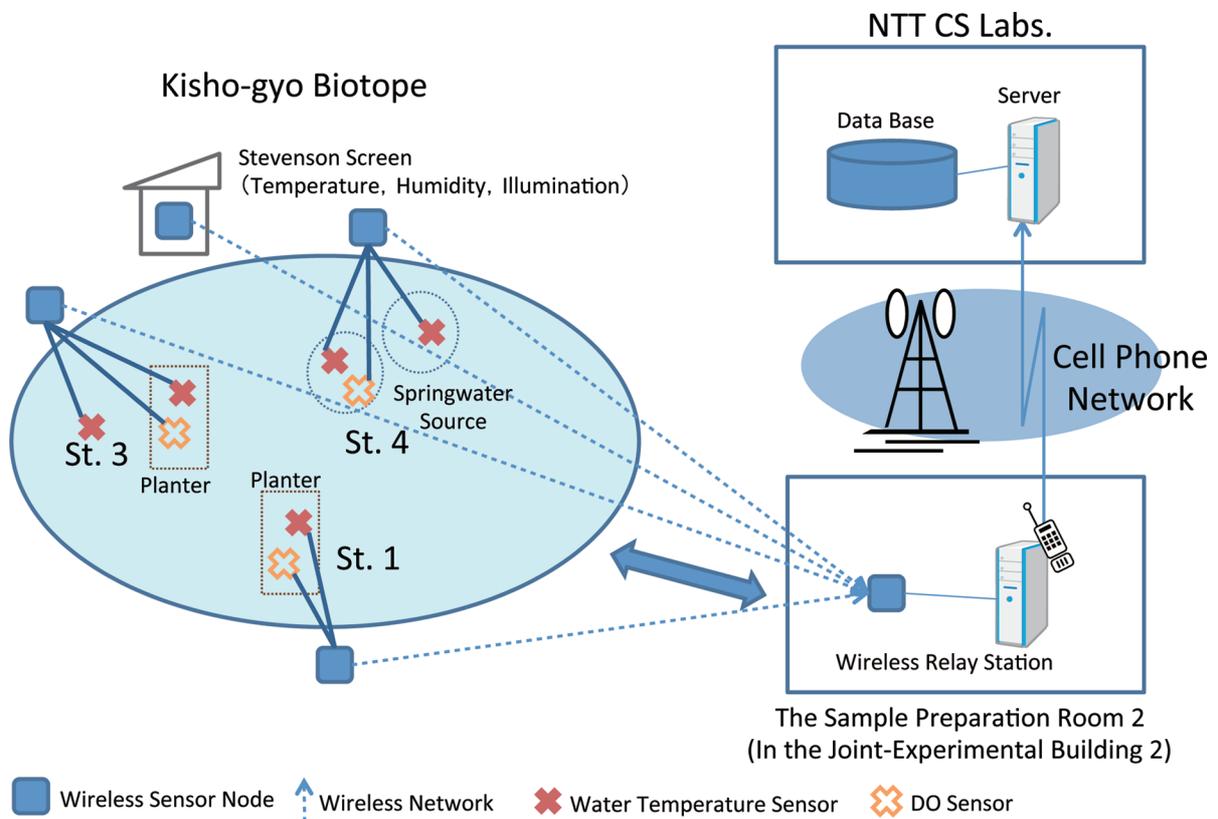


Fig. 5. Schematic diagram of the sensor network system installed in "Kisho-gyo Biotope".

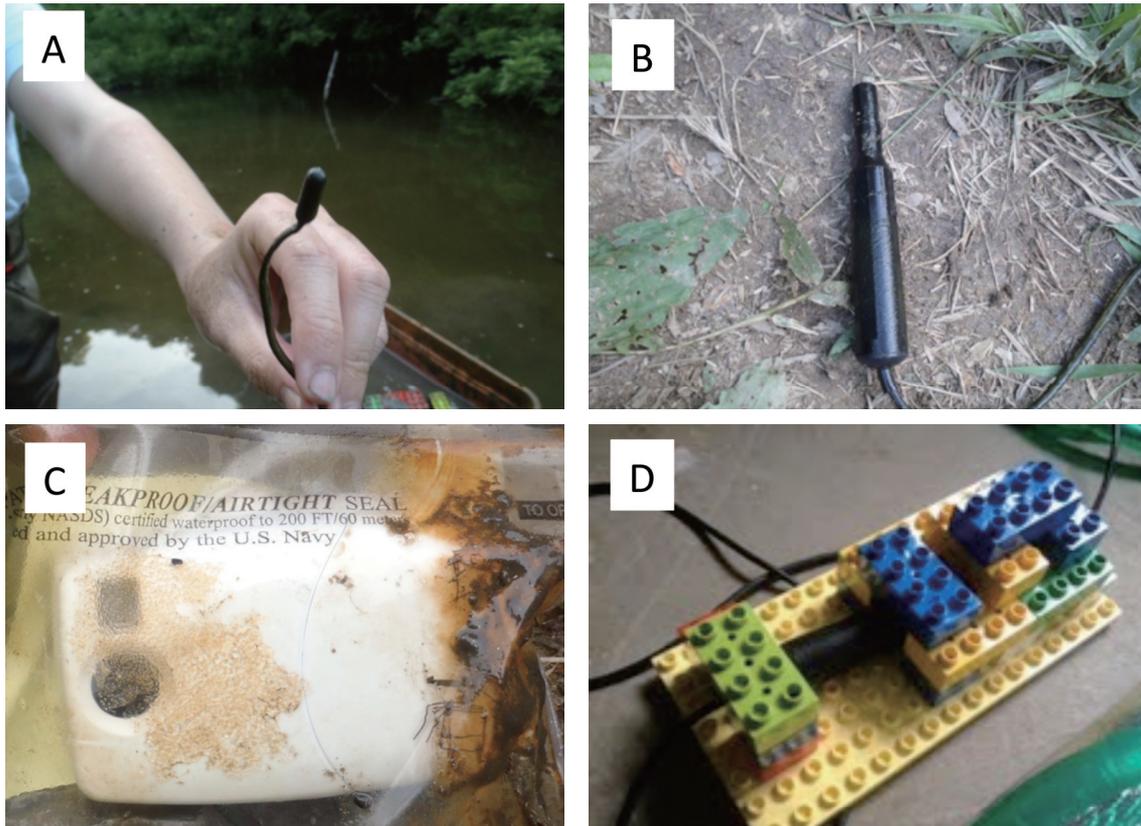


Fig. 6. A, water temperature sensor; B, dissolved oxygen (DO) sensor; C, underwater digital camera; D, sensors fixed by toy blocks.

た草地に設置した百葉箱内で測定し、照度は百葉箱の上部の直接日照があたる場所で測定している (Fig. 5)。

希少魚ビオトープにおいてセンサネットワークを構築するためには、水中は電波が通らないため、水温センサ及び DO センサを 5 m のケーブルで延長して水中に設置し (Fig. 6A, B)、池の端に設置したセンサノードでデータを送信する構成とした。DO センサはこれまでにセンサネットワークの分野では用いられてこなかった新たなセンサであるため、既存の DO メータのプロープ部分を用いて、NTT CS 研で新たに回路を開発してセンサノードで使用できるようにした。

池の北側に 2 ヶ所、南側に 1 ヶ所、百葉箱内に 1 ヶ所センサノードを設置し、水温、DO、照度のデータは、センサノードからのケーブルの先端に各センサを取り付け、毎分 1 回測定する。またセンサの池内の設置にあたっては、形状の異なるセンサを同一地点に安定的に設置するため、市販の玩具のプロック (LEGO 社製) を現場の設置形態に合わせてくみ上げて各地点に固定している

(Fig. 6D)。また、各センサノードは無線通信が届くよう、基地局が見通せる数十 cm から 1 m の高さに設置した (Fig. 7)。センサノードから送信されたデータは、第 2 共同棟 1 階の製品試作室



Fig. 7. Installation of wireless sensor nodes in "Kisho-gyo Biotope".

(5, 110室) 室に設置された基地局で受信されたデータを圧縮した後、携帯電話ネットワークを通じて NTT CS 研のサーバーに送信される。NTT CS 研内のサーバーでは、自動的にデータベースにアップロードされ、アップロードされたデータは、インターネット上で専用のアプリケーションを使用して NTT CS 研内のサーバーにアクセスすることで、常時、どこからでも確認することができる (Fig. 5)。通信の不具合に備え、発信器および基地局で、送信済みデータを保存している。

各センサによって得られたデータについては、定期的実施している従来の計器、試薬による水温、DO 測定値と比較し、その精度と安定性を検討している。

デジタルカメラについては、産卵行動のためにタガイに集まるニッポンバラタナゴの映像を確認するため、タガイの入れられたプランターの内側を撮影するように設置し、10分毎のデータを記録している (Fig. 6C)。得られた画像については、データ容量が多いため現時点ではデータ送信を行っていない。そのために、2週間に1度程度の頻度でデータの回収が必要である。また、池内の設置ではカメラケースが藻などで汚れるため、データを回収する際にカメラケースを清掃、あるいは交換する必要がある。実際に Fig. 6C で示したように、カメラケースにシマヒレヨシノボリの卵が産みつけられていたこともあった。

現状と今後の展開

センサの設置は平成25年4月以降に順次行われ、同年7月までに段階的にセンサを増やしながら発信器の設置位置、受信状況を確認しながら各センサ、カメラの設置を完了させた。現在、実際に自然環境下で安定的に作動させるための設置方法などを検討しながら調査を進めている。

各項目ともにデータの計測、送信、受信は可能な状態となっており、従来の手作業による測定結果と比較しながら、自然的攪乱などがある野外での安定的な稼働についてさらに検討を重ねている。特に、DO については、水温や気候環境（降雨、日照、水の循環の有無）によって、大きく変動する値であるにもかかわらず、今まで野外での設置式の継続的な測定装置として市販の機器はなかった。そのため、従来は隔週などのある程度の

間隔で設定した調査日特定の時間に採取されたサンプル水を計測する事で、その時期の DO 値を代表させてきた。しかし、本システムによって実際に連続的な計測を行ってみると、1日のうちで大きな変動が確認され、また天候による大きな変動も確認された。DO は主に日照の変化とリンクしていることから、水中の植物プランクトンの光合成に大きく影響されていると考えられる。水生生物、特に移動能力の乏しい底生生物において、大きな影響を及ぼす要素の1つである DO をこのように詳細に把握できることは大変意義深い。

システムの安定性については、近年頻発している集中的な豪雨や台風による水中の攪乱が生じると池内のヘドロの巻上がりがおこり、センサが埋没してしまう事態が生じている。現状のシステムでもそれらの異常をタイムリーに把握する事ができるため、速やかな復旧が可能となっているが、設置の向きや設置基盤の形状など、これらの攪乱にも耐性のあるセンサの設置方法のさらなる検討が必要である。また、里山環境は、人の手が加わった二次的自然である。純粋な自然による作用だけではなく、里山環境の人の活動による不具合も生じている（草刈りによるケーブルの切断や、作業に伴う送信装置の破壊などでいずれも故意によるものではない）。センサや周辺装置の破壊が生じないように、里山での活動への影響のない場所への設置や、人に認識されやすい装置の設置も考慮する必要がある。センサモニタリングシステムは、屋内環境ではその安定的な稼働が確認されているものであるが、さまざまな環境の変化に伴う野外でこのようなシステムを安定的に稼働させるために、どのような設置方法や工夫・配慮が必要なのかの知見を蓄積することで、今後、より幅広い応用へとつながっていくと考えられる。

また、本システムでは通信技術を利用しているためにデータの回収の作業の必要がないが、各センサやセンサノードが計測とともにデータの送信も行うため一定の電力消費を伴う。そのため一定期間での電池の交換が必要である。現在は試行段階のため、毎分1回という頻度での計測、送信を行っているため、小型装置に設置できる電池では比較的高い頻度での交換が必要である。しかし、今後、実際のデータを検証して各センサの計測・送信頻度を下げることによって電源の長期的維持も可能になると考えられる。現在は、キャンパス

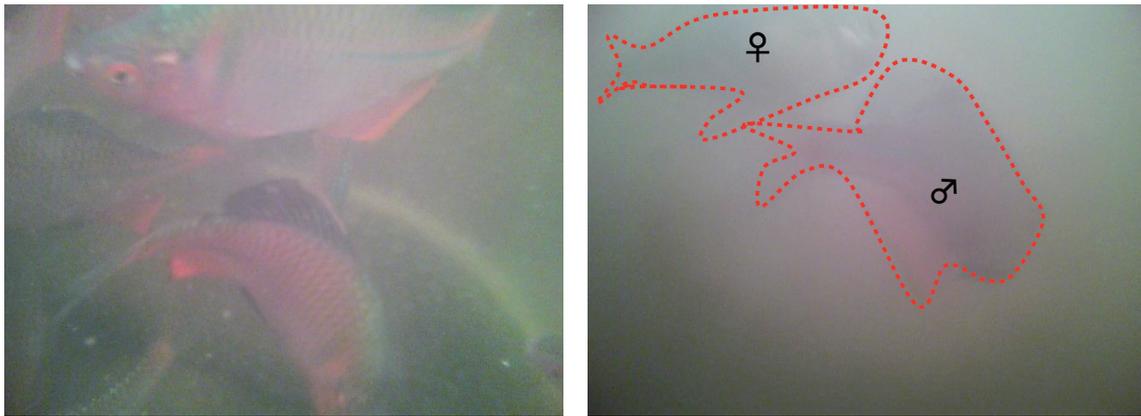


Fig. 8. Japanese rosy bitterling gathering around freshwater mussels recorded by underwater digital camera. In the right picture, a male and female pair of fish was observed.

内の容易にアクセスできる場所での検証であるが、観測条件の適切な設定によって長期間の電源の維持ができれば、立ち入りが難しい場所での実用も可能となる。

定時撮影によるデジタルカメラの撮影では現時点では画像の送信は行っていないが、回収された画像からニッポンバラタナゴの姿を確認することができ、ニッポンバラタナゴが集中して撮影される時間が観察されている。画像の中には雄と雌がつかい、明らかに繁殖行動のためにタガイに集まってきた事が確認できるものもあった (Fig. 8)。ニッポンバラタナゴが集中的に撮影され時間帯や日照、水温などの環境要因との関係を整理することで、繁殖行動を促す条件が見いだされることが期待できる。

現在、希少魚ビオトープでは、ニッポンバラタナゴが大量に繁殖し、絶滅の危険を一時的に回避させる場としての機能は十分に果たしているといえる。しかし、ニッポンバラタナゴの個体群が永続的に維持されていくためには、産卵床となるタガイの繁殖も不可欠であるが今のところ安定的な再生産は確認出来ていない。したがって、ニッポンバラタナゴの生息池として確立したとは言えず、今後も改善作業を継続していく必要がある。どの程度のヘドロ除去や、日照の確保をすればいいかなど、その整備の方法や程度とそれによる生息生物や環境の変化をモニタリングしながら、今後も検討を重ねていく。

また、本調査で確立した技術をさらに異なる場所や目的に応用していく予定である。

謝 辞

本調査は、農学部環境管理学科と NTT CS 研の間で締結された「センサネットワークによる里山環境のモニタリングに関する共同実験協定」に基づいて実施されているものである。本取組は、希少魚ビオトープの環境維持や管理作業も含め環境管理学科全教員の全面的な協力によって実施されている。また本協定の締結の橋渡しとなっていた NTT 西日本奈良支店のみなさまに感謝申し上げます。

引用文献

- 池上甲一・米虫節夫 (2007) 里山修復プロジェクトが目指すもの。近畿大学農学部紀要, 40, 17-19.
- 環境省 (2013) レッドリスト, 汽水・淡水魚. 環境省ホームページ: http://www.biodic.go.jp/rdb/rdb_f.html (参照2013-9-30)
- 川那部浩哉・水野信彦 (1989) 検索入門 川と湖の魚①. 保育者, p. 89.
- 岸野泰恵・柳沢 豊・田中 聡・寺田 努・塚本昌彦・須山敬之 (2009) 小型無線デバイスのための CIL 仮想マシン. 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム論文集, 893-900.
- 北川忠生・倉園知広・池田昌史 (2013) 奈良県におけるニッポンバラタナゴの保全的導入. p. 203-215. *In* 日本魚類学会自然保護委員会編「見えない脅威 “国内外来魚”: どう守る地域

- の生物多様性 (叢書イクトオロギア), p. 268.
- 小山直人・澤井悦郎・上村英幸・久米幸毅・森宗智彦・細谷和海・北川忠生 (2007) 近大奈良キャンパスF池における魚類の生息状況. 近畿大学農学部紀要, 40, 86-91.
- 三宅琢也・河村功一・細谷和海・岡崎登志夫・北川忠生 (2007) 奈良県内で確認されたニッポンバラタナゴ. 魚類学雑誌, 54, 139-148.
- 奈良県 (2010) 奈良県希少野生動植物の保護に関する条例. 奈良県ホームページ: http://www.pref.nara.jp/dd_aspx_menuid-14036.htm (参照 2013-9-30).
- 野口亮太・北川忠生 (2012) 奈良県産ニッポンバラタナゴ集団の保護の現状. 地域自然史と保全, 34, 157-164.