

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26252027

研究課題名(和文) 魚類の分布・回遊生態にもとづくマングロープ水域の新たな保全方策の提言

研究課題名(英文) A new approach to mangrove estuary conservation based on fish distribution and migration ecology

研究代表者

佐野 光彦 (SANO, Mitsuhiro)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授

研究者番号：50178810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,700,000円

研究成果の概要(和文)：マングロープ水域で保護区の設定を行うために、魚類の分布や回遊生態を調べた。琉球諸島のマングロープ水域で優占的に分布する魚類3種(コモチサヨリ、アマミイシモチ、リボンスズメダイ)について、耳石の微量元素組成や酸素同位体比を調べた結果、3種とも通し回遊魚ではなく、非回遊魚であった。また、これらが島内の河川間や島間(西表島、石垣島、宮古島、沖縄島の間)で遺伝的にどの程度分化しているのかをDNA分析で調べたところ、コモチサヨリは島間のほか、島内の河川間でも分化していた。したがって、マングロープ水域では広域的な保全区域の設定よりも、河川ごとや島単位などの局所的な保全が必要であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To establish conservation areas in mangrove estuaries, fish distribution and migratory ecology were examined in the Ryukyu Islands, Japan. Otolith oxygen isotopic or microchemistry analyses indicated that three dominant mangrove fishes (*Zenarchopterus dunckeri*, *Fibramia amboinensis* and *Neopomacentrus taeniurus*) were not marine migrant species that spawn at sea and enter estuaries as juveniles, but rather estuarine resident species that complete their entire life cycle within the estuarine environment. Moreover, in *Z. dunckeri*, the genetic divergence was detected not only between islands (e.g. Ishigaki Island and Miyako Island), but also between rivers within an island (Ishigaki Island), suggesting the occurrence of several different populations within a single island due to restricted movements. These results showed that small spatial scale conservation, such as for each river or an area where some neighboring rivers within an island were combined, is needed in mangrove estuaries.

研究分野：水域保全学

キーワード：マングロープ水域 非回遊魚 耳石 微量元素組成分析 酸素同位体比分析 遺伝的な分化 DNA分析 琉球諸島

1. 研究開始当初の背景

マングローブは熱帯の潮間帯に生育する被子植物（特に木本類）で、大規模な群落を形成することが多い。東南アジアや沖縄などの熱帯地方では、主に河口付近の汽水域にマングローブ林が発達している。マングローブ林が存在する水域（以下、マングローブ水域とする）には、多種多様な魚類（以下、マングローブ魚類）が生息し、それらの重要な生息場となっている。しかし、近年、港湾整備や土地開発、エビ養殖場の建設などによって、マングローブ林の面積は世界的に激減し、1980年から2005年の間に約20%が消失したと言われている。このため、マングローブ水域を早急に保全する必要があるが、保全する区域をどのように設定するのかという問題がいまだ未解決のままとなっている。

この問題を解決するには、マングローブ魚類の多くが通し回遊魚（河川と海の間を往き来する魚類）か、それとも非回遊魚（海に回遊せず、生活史のほぼすべてをマングローブ水域内で完結させる魚類）かを明らかにする必要がある。これまでは前者のほうが極めて多いと言われていたため、メタ個体群に基づく大面積の保全区域が有効であると考えられていた。すなわち、個々の河川（マングローブ水域）や小さな島単位の保全よりも、多くの河川を含む広域的な面積（例えば島嶼や諸島の全域など）での安定的・持続的な保全が好ましいとされてきた。しかし、研究代表者らの予備調査によると、非回遊魚もかなりいる可能性がでてきた（佐野ほか 2008）。もしそうなら、非回遊魚の各種では島内の河川間でもすでに遺伝的な分化が生じている可能性があり、各河川の局所個体群は保全上異なる単位として管理する必要があるかもしれない。したがって、これまでのメタ個体群に基づく保全方策は再考する必要があるが、河川や島ごとの現状に合わせた、きめ細かな保全が重要となってくる。これは、保全方策における180度の方向転換を示唆するもので、極めて大きな問題である。

2. 研究の目的

本研究では、琉球諸島において以下の3つの目的で調査を実施した。

(1) 西表島のマングローブ水域に優占して生息する魚類（優占種）を可能な限り多く採集し、それらの耳石の微量元素組成、あるいは酸素同位体比を調べることによって、各種が通し回遊魚なのか、それとも非回遊魚なのかを明らかにする。

(2) 非回遊魚が確認された場合、それらは西表島内や石垣島内の河川間、および島間（西表島、石垣島、宮古島、沖縄島の間）で遺伝的にどの程度分化しているのかをDNA分析で調べる。

(3) 非回遊魚が島内の河川間や島間で遺伝的に分化していて、保全上異なる単位として管理する必要がある場合は、メタ個体群的な大

面積保全とは異なる方策を提言する。

3. 研究の方法

(1) マングローブ魚類の多くが通し回遊魚か、非回遊魚かを明らかにするための魚類採集と耳石分析は2014年と2015年に行った。魚類採集は沖縄県西表島浦内川のマングローブ水域で行い、3種の優占種（コモチサヨリ、アマミイシモチ、リボンスズメダイ）の成魚あるいは未成魚を採集した。各種の採集個体数は5個体以上とした。

採集した個体は研究室に持ち帰り、各個体から耳石を摘出し、核が露出するまで研磨した。研磨後、コモチサヨリにおいては、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置を用い、核から縁辺までのスポット分析（1スポット30 μm、スポット間隔10 μm）を行い、リチウム(Li)/カルシウム(Ca)比(mmol/mol)とストロンチウム(Sr)/Ca比(mmol/mol)を求めた。一方、アマミイシモチとリボンスズメダイにおいては、研磨後、高精度マイクロミルで核から縁辺部までの切削を行い、耳石粉末試料を採取した。この粉末試料にリン酸溶液を加え、発生した二酸化炭素を安定同位体質量分析装置で分析することで、耳石炭酸カルシウム中の酸素同位体比(^{18}O , ‰)を得た。

(2) 上述した耳石の微量元素組成分析および酸素同位体比分析の結果、コモチサヨリ、アマミイシモチ、リボンスズメダイの3種は非回遊魚であることがわかった（4. 研究成果を参照）。そこで、前2種が西表島内や石垣島内の河川間、および琉球諸島の島間（西表島、石垣島、宮古島、沖縄島の間）で遺伝的にどの程度分化しているのかを、2016年と2017年にDNA分析で調べた。2種の採集は以下のマングローブ水域で行った（図1）。
コモチサヨリ：西表島の浦内川とウダラ川、石垣島の吹通川と轟川、宮古島の川満
アマミイシモチ：浦内川、吹通川、轟川、川満、沖縄島の汀間川（近隣の慶佐次川の個体も含める）

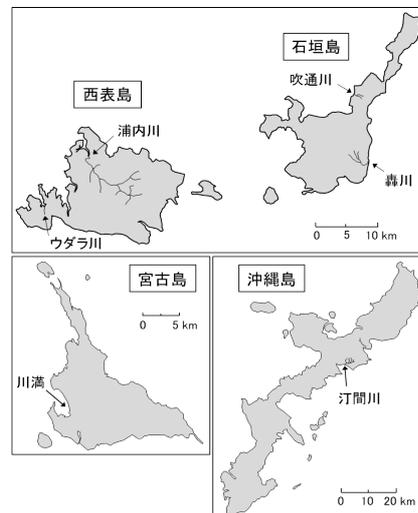


図1 各魚種の採集地。

また、先行研究 (Nakamura et al. 2008) によって通し回遊魚であることがわかっているオキフエダイ (海水性両側回遊魚) も浦内川、吹通川、汀間川で採集し、DNA 分析を行った。各地点における各魚種の採集個体数は 18 個体以上とした。

DNA 分析には、GRAS-Di 法で得た多型情報を用いた。まず、ランダムプライマーで増幅させた PCR アンプリコンを次世代シーケンサーに付して、塩基配列を取得した。次に、取得した配列をアセンブルして得たコンセンサス配列に、もとの配列をマッピングすることで多型情報を得た。本手法で得たゲノムワイドな多型情報をもとに、各魚種について pair-wise F_{st} (Weir and Cockerhams') を算出し、集団の分化状態を評価した。また、1000 回のブートストラップ法で推定した 95% 信頼区間の下限值 (0.0001) より大きかった場合に、集団間の分化が有意であると判定した。

4. 研究成果

(1) コモチサヨリの耳石微量元素組成を分析したところ、多くの個体 (分析した 31 個体の 77%) において、耳石の核から縁辺部までの Li/Ca 比と Sr/Ca 比は汽水値の範囲内 [Li/Ca 比では 0 (淡水) ~ 0.011 mmol/mol (海水), Sr/Ca 比は 4.26 (淡水) ~ 6.47 mmol/mol (海水)] に収まっていた (図 2a)。しかし、一部の個体 (23%) においては汽水値の範囲を一時的に超え、海域の値を示した後にまた汽水値の範囲に戻るということがわかった (図 2b)。以上の結果から、本種のほとんどの個体は海域へ移動しないで、マングローブ水域内で生活史を完結させる非回遊魚であることが明らかになった。ただし、一部の個体では降雨による河川流量の増加などによって偶発的に海に流され、一時的に海域で過ごした (長くて約 20 日間) 後にマングローブ水域に戻ってくることもわかった。

アマミイシモチ (18 個体) とリボンスズメダイ (7 個体) において、耳石の ^{18}O を調べたところ、耳石の核から縁辺部までの ^{18}O は、すべての個体で汽水値の範囲内 [-6.3 (淡水) ~ -1.7‰ (海水)] に収まっていた (図 3)。したがって、コモチサヨリと同様に、両種も非回遊魚であることが明らかとなった。

(2) GRAS-Di 法により、各個体から平均 300 万リードを得た。得られたリードをもとに、種ごとにおよそ 1000 SNP 座を得て pair-wise F_{st} を算出した。その結果、通し回遊魚であるオキフエダイは島内の河川間や島間において遺伝的な分化が認められなかった ($F_{st} = 0.0005 \sim 0.0021$)。

一方、耳石の結果から非回遊魚と判定されたアマミイシモチでは、弱いながらも有意な集団間の分化が認められた。特に、沖縄島の汀間川と他の集団との間で分化しており

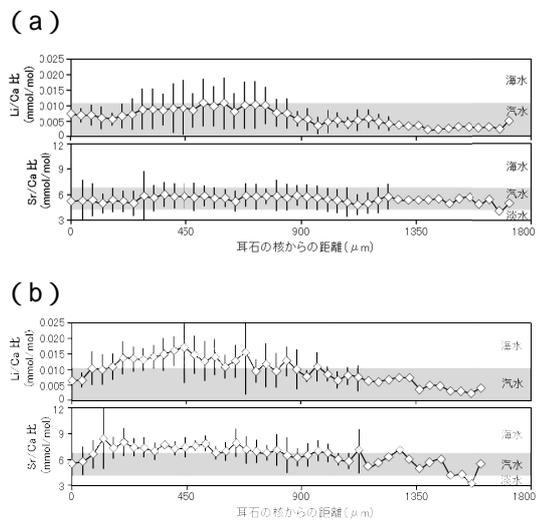


図 2 コモチサヨリの成魚における耳石の核から縁辺部までの Li/Ca 比と Sr/Ca 比 (平均値 \pm 標準偏差)。グレーの部分は、飼育実験から推定された、汽水域に生息する個体の耳石 Li/Ca 比と Sr/Ca 比の範囲を示す。Kanai et al. (2014) より改変。

- (a) 海域へはほとんど移動したことがない個体 ($n = 24$)。
 (b) 一時的に海域へ移動したことがある個体 ($n = 7$)。

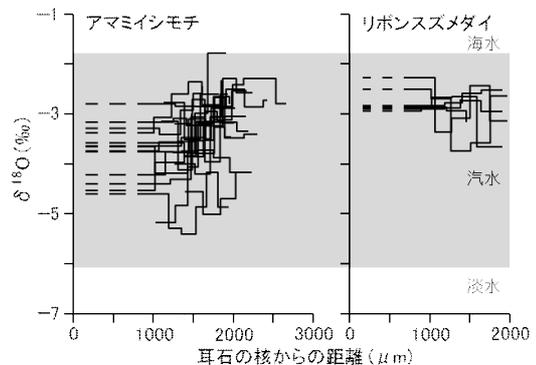


図 3 アマミイシモチとリボンスズメダイの成魚または未成魚における耳石の核から縁辺部までの ^{18}O 。採集した各個体の値を示す。グレーの部分は、汽水域に生息する魚類の耳石 ^{18}O の範囲を示す。Shirai et al. (2018) より改変。

($F_{st} = 0.0161 \sim 0.0301$), 前者が集団として孤立傾向にあることが示された。また、宮古島の川満と石垣島の吹通川、川満と西表島の浦内川、浦内川と石垣島の轟川との間にも、それぞれわずかな分化が認められた ($F_{st} = 0.0097 \sim 0.0121$)。

同じく非回遊魚と判定されたコモチサヨリでは、島間でさらに強い分化が確認された。特に、宮古島の川満は他の集団との分化が著しく ($F_{st} = 0.38 \sim 0.41$)、また、石垣島の轟川は西表島の 2 河川 (浦内川とウダラ川) と

の間だけではなく、島内の吹通川との間でも分化が認められた ($F_{st} = 0.0264 \sim 0.452$)。さらに、西表島内の浦内川とウダラ川の間でも、極めて弱いものの、分化が認められた ($F_{st} = 0.0092$)。

(3) 本研究の結果、西表島のマングローブ水域において優占種であるコモチサヨリ、アマミシモチ、リボンスズメダイはいずれも非回遊魚であり、マングローブ水域内で生活史のほぼすべてを完結させる種であることが判明した。このため、これらの種では島間や島内の河川間で集団の分化が生じている可能性があり、DNA 分析の結果もこれを支持するものであった。特にコモチサヨリでは、宮古島の集団が他の島と著しく分化しており、遺伝子的交流がほとんどないことが示唆された。また、本種は石垣島内の河川間でも分化が進んでいた。したがって、マングローブ水域の保全、特に非回遊魚の保全を行うには、島単位、あるいは河川単位からなる局所個体群を対象にすべきであることが明らかとなった。これは、島嶼や諸島全域などを対象とした広域的な保全が有効であるという、これまでの方策を覆す結果である。

今後は、各河川や島ごとにみられるマングローブ水域の現状に合わせた、きめ細かな保全が望まれる。

<引用文献>

Kanai T, Nanjo K, Yamane K, Amano Y, Kohno H, Watanabe Y, Sano M. 2014. Utilization patterns of estuarine and marine habitats by the halfbeak *Zenarchopterus dunckeri* at Iriomote Island, southern Japan, evaluated from otolith microchemistry. *Fisheries Science* 80(6): 1231-1239.

Nakamura Y, Horinouchi M, Shibuno T, Tanaka Y, Miyajima T, Koike I, Kurokura H, Sano M. 2008. Evidence of ontogenetic migration from mangroves to coral reefs by black tail snapper *Lutjanus fulvus*: a stable isotope approach. *Marine Ecology Progress Series* 355: 257-266.

佐野光彦, 中村洋平, 洪野拓郎, 堀之内正博. 2008. 熱帯地方の海草藻場やマングローブ水域は多くの魚類の成育場か. *日本水産学会誌* 74(1): 93-96.

Shirai K, Koyama F, Murakami-Sugihara N, Nanjo K, Higuchi T, Kohno H, Watanabe Y, Okamoto K, Sano M. 2018. Reconstruction of the salinity history associated with movements of mangrove fishes using otolith oxygen isotopic analysis. *Marine Ecology Progress Series* 593: 127-139.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 17 件)

Pantallano ADS, Bobiles RU, Nakamura Y. 2018. Dependence of fish on subtropical riverine mangroves as habitat in the Ryukyu Islands, Japan. *Fisheries Science* 印刷中. 査読有
DOI:10.1007/s12562-018-1202-9

川井田俊, 大土直哉, 河野裕美, 渡邊良朗, 佐野光彦. 2018. 琉球諸島西表島のマングローブ林に生息するフタバカクガニ *Parasesarma bidens* の落葉摂食量. *La Mer* 印刷中. 査読有
<http://www.sfjo-lamer.org/lamer.html>

Shirai K, Koyama F, Murakami-Sugihara N, Nanjo K, Higuchi T, Kohno H, Watanabe Y, Okamoto K, Sano M. 2018. Reconstruction of the salinity history associated with movements of mangrove fishes using otolith oxygen isotopic analysis. *Marine Ecology Progress Series* 593: 127-139. 査読有
DOI:10.3354/meps12514

Le QD, Tanaka K, Hii YS, Sano Y, Nanjo K, Shirai K. 2018. Importance of seagrass-mangrove continuum as feeding grounds for juvenile pink ear emperor *Lethrinus lentjan* in Setiu Lagoon, Malaysia: stable isotope approach. *Journal of Sea Research* 135: 1-10. 査読有
DOI:10.1016/j.seares.2018.02.004

Kanai T, Nanjo K, Kohno H, Sano M. 2017. Ontogenetic and seasonal changes in the diet of the halfbeak *Zenarchopterus dunckeri* at Iriomote Island, southern Japan. *Ichthyological Research* 64(4): 470-474. 査読有
DOI:10.1007/s10228-017-0581-8

Kawaida S, Nanjo K, Kanai T, Kohno H, Sano M. 2017. Microhabitat differences in crab assemblage structures in a subtropical mangrove estuary on Iriomote Island, southern Japan. *Fisheries Science* 83(6): 1007-1017. 査読有
DOI:10.1007/s12562-017-1139-4

関川宏美, 南條楠土, 水谷晃, 河野裕美. 2017. 西表島浦内川におけるツムギハゼ *Yongeichthys criniger* の生態分布. *日本生物地理学会会報* 71: 109-120. 査読有

<http://biogeo.a.la9.jp/>

横内一樹, 天野洋典, 石村豊穂, 白井厚太郎. 2017. 耳石の元素・同位体比分析による回遊生態研究(総説). 水産海洋研究 81(3): 189-202. 査読有
<http://www.jsfo.jp/journal/jp/index.html>

井上太之, 南條楠土, 水谷晃, 北野忠, 河野裕美. 2016. 西表島網取湾のウダラ川における魚類群集構造. 魚類学雑誌 63(2): 63-79. 査読有
DOI:10.11369/jji.63-63

井上太之, 村上智一, 南條楠土, 水谷晃, 河野裕美. 2016. 西表島網取湾ウダラ川汽水域の潮汐に伴う塩分動態および優占する魚類の分布. 土木学会論文集 B3(海洋開発) 72: I_1087- I_1092. 査読有
DOI:10.2208/jscejo.72.I_1087

Kanai T, Nanjo K, Yamane K, Amano Y, Kohno H, Watanabe Y, Sano M. 2014. Utilization patterns of estuarine and marine habitats by the halfbeak *Zenarchopterus dunckeri* at Iriomote Island, southern Japan, evaluated from otolith microchemistry. Fisheries Science 80(6): 1231-1239. 査読有
DOI:10.1007/s12562-014-0797-8

〔学会発表〕(計 18 件)

Shirai K, Koyama F, Murakami-Sugihara N, Nanjo K, Higuchi T, Kohno H, Watanabe Y, Okamoto K, Sano M. Reconstruction of the salinity history associated with movements of mangrove fishes using otolith oxygen isotopic analysis. The 6th International Otolith Symposium 2018, 2018 年 4 月 19 日, National Museum of Marine Science & Technology (Keelung, Taiwan)

藤川大学, 細谷将, 小林純也, 田島祥太, 家田梨櫻, 佐藤茉菜, 城夕香, 中村修, 菊池潔. GRAS-Di 法で明らかとなった「ゲノム再編成による新規性決定遺伝子座の誕生」. 日本水産学会春季大会, 2018 年 3 月 28 日, 東京海洋大学(東京都・港区)

Nanjo K, Kohno H, Watanabe Y, Sano M. Fish assemblage structures and environmental conditions in small tidal creeks and tide pools in a mangrove estuary. The 10th Indo-Pacific Fish Conference, 2017 年 10 月 4 日, Cultural Centre of Papeete (Papeete, Tahiti)

Pantallano ADS, Bobiles RU, Nakamura Y. Differences in fish assemblage structure between mangrove-rich and mangrove-free rivers in the Ryukyu Islands, Japan. The JSFS 85th Anniversary-Commemorative International Symposium, 2017 年 9 月 23 日, 東京海洋大学(東京都・港区)

金井貴弘, 南條楠土, 河野裕美, 佐野光彦. 琉球諸島西表島におけるコモチサヨリの食性. 日本水産学会春季大会, 2016 年 3 月 27 日, 東京海洋大学(東京都・港区)

小山楓太, 杉原奈央子, 白井厚太郎, 南條楠土, 樋口富彦, 渡邊良朗, 河野裕美, 岡本研, 佐野光彦. 耳石の酸素安定同位体比分析を用いたマングローブ魚類の移動履歴の解明. 日本水産学会春季大会, 2016 年 3 月 27 日, 東京海洋大学(東京都・港区)

井上太之, 村上智一, 南條楠土, 河野裕美. 西表島網取湾ウダラ川汽水域に優占する魚類の分布とそれに関わる塩分動態. 沖縄生物学会第 52 回大会, 2015 年 5 月 30 日, 沖縄国際大学(沖縄県・宜野湾市)

小山楓太, 南條楠土, 杉原奈央子, 白井厚太郎, 渡邊良朗, 河野裕美, 佐野光彦. 耳石の微量元素組成分析を用いたアマミイシモチの移動履歴の解明. 日本水産学会春季大会, 2015 年 3 月 30 日, 東京海洋大学(東京都・港区)

井上太之, 南條楠土, 北野忠, 木村賢史, 河野裕美. 西表島網取湾ウダラ川における魚類と甲殻類の群集構造. 沖縄生物学会第 51 回合同大会, 2014 年 5 月 24 日, 琉球大学(沖縄県・那覇市)

〔図書〕(計 2 件)

宮下直, 瀧本岳, 鈴木牧, 佐野光彦. 朝倉書店, 生物多様性概論: 自然のしくみと社会のとらえ, 2017, 101-132

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.suiiki.es.a.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 光彦 (SANO, Mitsuhiko)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授
研究者番号: 5 0 1 7 8 8 1 0

(2)研究分担者

渡邊 良朗 (WATANABE, Yoshiro)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：90280958

河野 裕美 (KOHNO, Hiroyoshi)
東海大学・沖縄地域研究センター・教授
研究者番号：30439682

岡本 研 (OKAMOTO, Ken)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・
准教授
研究者番号：20160715

菊池 潔 (KIKUCHI, Kiyoshi)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・
准教授
研究者番号：20292790

中村 洋平 (NAKAMURA, Yohei)
高知大学・教育研究部総合科学系・准教授
研究者番号：60530483

白井 厚太郎 (SHIRAI, Koutaro)
東京大学・大気海洋研究所・助教
研究者番号：70463908

細谷 将 (HOSOYA, Sho)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・
助教
研究者番号：60526466

南條 楠土 (NANJO, Kusuto)
国立研究開発法人水産研究・教育機構・
水産大学校・助教
研究者番号：70725126