

地理・気候的環境要因による リュウキュウアユ定着可能性の評価

LARGE-SCALE HABITAT POTENTIAL EVALUATION FOR AN ENDANGERED SUBSPECIES OF JAPANESE SWEETFISH

大槻順朗¹・立道大伸²・島谷幸宏³
Kazuaki OHTSUKI, Hironobu TATEMACHI and Yukihiro SHIMATANI

¹正会員 博(工) 東京理科大学理工学部土木工学科 助教 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 修(工) 株式会社東京建設コンサルタント (元 九州大学大学院)
(〒812-0016 福岡市博多区博多駅南2-12-3)

³フェロー会員 博(工) 九州大学大学院工学研究院環境社会部門 教授
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

In the planning of a conservation program, it is important to evaluate the habitat potential at not only a local scale but also a large scale. Our target species, Ryukyu-Ayu, inhabits only Amami-Oshima Is., and it has a distinct regional population that inhabits Okinawa Is., which is located south of Amami-Oshima Is. To evaluate the habitat potential, a model for explaining the record of inhabitation was constructed using generalized liner model (GLM).

Three variables were adopted in this model: watershed area, altitude-compensated air temperature, and inner bay area. The calculation result obtained using the model showed that the index of habitat potential where the target species inhabits Amami-Oshima Is. is ~90%, and that for Okinawa Is. is at most ~60%. The result of the sensitivity analysis for offset the temperature showed that the index for Okinawa Is. can change more sharply than that for Amami-Oshima Is. The amount of offset when the indexes reach 90% can be considered suitable; this corresponds to the rise in seawater temperature.

Key Words : habitat potential evaluation, Amami-Oshima, Okinawa, climate change, Ryukyu-ayu (*Plecoglossus altivelis ryukyuensis*)

1. はじめに

効果的な生物の保全再生にあたっては、対象種の局所的減少・絶滅要因のみならず、広域的環境要因による評価と並行して実施することが重要であり¹⁾、実際の保全再生プロジェクトにおいて応用される例も増えている。

本研究の対象種、リュウキュウアユ *Plecoglossus altivelis ryukyuensis* はアユの亜種であり、自然状態では現在奄美大島にのみ生息する絶滅危惧種（環境省RL, CR）である。本種はかつて沖縄島にも生息していたが、1980年代に地域個体群の絶滅が確認された²⁾。これを憂慮し、沖縄島での生息河川であった源河川や奥川では、再生に向けた取り組みがなされてきたが、再定着は果たされていない³⁾。本種は河川と河口海域を行き来する両側回遊魚であるため⁴⁾、減少要因とされる要因は河川から河口に渡り複数指摘されているが、仔稚魚期において利用する河口域における冬季の高水温の影響が有力な要因に挙げられている⁵⁾。著者ら⁶⁾は奄美大島において人為改変の程

度が異なる役勝川及び河内川河口域を対象に、小スケールでの仔稚魚の生息場評価を実施し、河口干拓による水理構造の変化により、水温・塩分に基づく生理的環境と餌資源（カイアシ類）の状態の双方に影響し、好適な生息場が著しく減少する可能性を明らかにした。

一方、大スケールの環境要因による生息場評価は未だ実施されていない。南西諸島近海における冬季海面水温は約100年で1.45~3℃の上昇傾向あると言われ^{7,8)}、本種の生息状況はこれらの気候変化に左右されと考えられる。特に沖縄島においては、奄美大島より気候が温暖であり、流域が比較的小さいことや河口に湾が無い場合が多いなど、地理・気候的観点から地域個体群の脆弱性が高かったことが推察される。

そこで本研究では、地理・気候的環境要因によるリュウキュウアユの定着可能性を評価することを試みた。具体的には、リュウキュウアユの生活史を元に生息場形成要因を抽出し、生息の可能性を推定する回帰モデルを構築した。また、モデルを用いた感度分析により、気候変

2. 研究対象地の概要

3. 定着可能性評価のためのモデル構築方針と具体的なモデル化方法

これらのことから、検討に際して5つの基本環境要素を設定し(図-2, 左部), これらの基本環境要素を代表しうる地形・気候情報との関係性を整理した(図-2, 右部). 図中の矢印は要素間に関連が想定できることを示しており, 右部の環境要素において白抜き要素は本研究の対象地域間において差が顕著ではない要素を示している. すなわち, 河川流量については流域面積を用いてパラメータ化する. 中流域長としては, ある標高以下の低平地における河川長によって代表できると想定し, 具

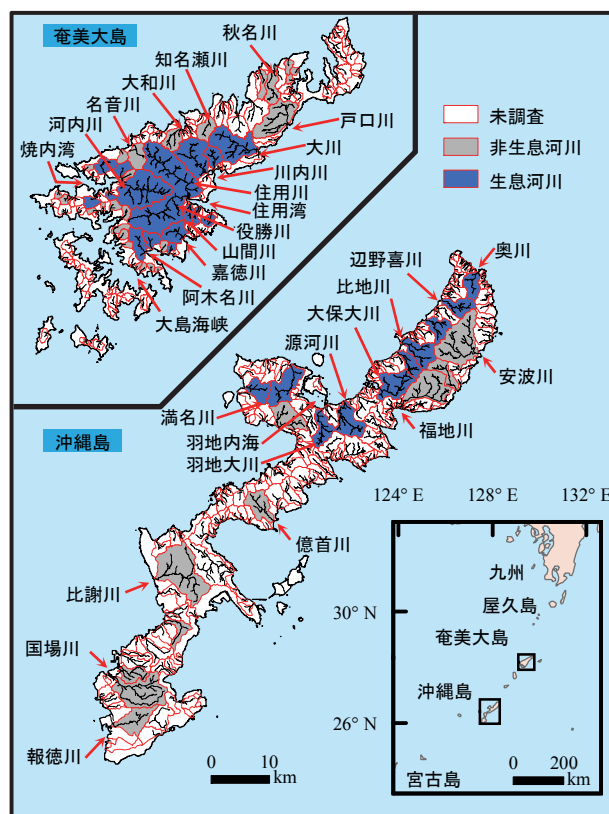


図-1 対象河川と過去を含めたリュウキュウアユの生息分布

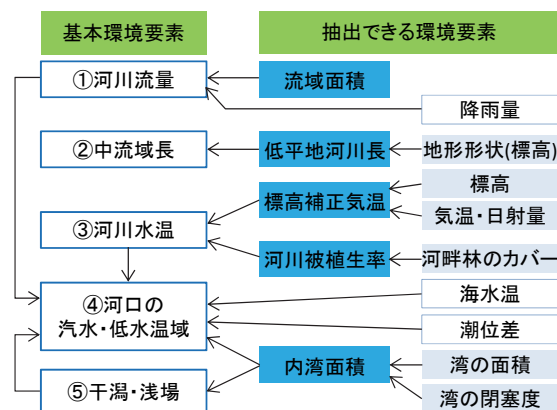


図-2 注目する基本環境要素と地理・気候データより抽出できるデータとの対応

- 418 -

GISソフトウェア (ArcGIS Ver9.3+Spatial Analyst, ESRI社) を用いた。

流域面積 [km²] : 国土地理院・基盤地図情報10mメッシュ標高データを用い抽出した。抽出された流域は地形図を用いて形状を確認し、適宜修正を行った。

低平地河川長 [km] : 国土地理院・基盤地図情報10mメッシュ標高データ及び河道網ラインデータを用い、標高10m以下の河道網を抽出し河川長の合計を算出した。

標高補正気温 [°C] : 奄美大島、沖縄島における気象庁観測所 (鹿児島観測所から渡嘉敷観測所に渡る16箇所) における12月から4月の平均気温平年値の平均を求め、観測所の標高をもとに標高0mにおける値に補正した上 (-0.55°C/100m)、距離重み付き空間補間を施した。これと10m標高データとを重ね合わせ領域全体にわたり再度標高補正を行い、各流域内平均値を求めて算出した。

河川被植生率 [%] : 国土地理院発行国土数値情報・土地利用3次メッシュデータを用い、同河道網ポリラインデータとオーバーレイする総メッシュに対する森林比率を抽出することにより求めた。

内湾面積 [km²] : 上述の手法に従って300m、500m、1000mの3段階のバッファ長によって内湾域を抽出し、面積を計算した。ここで、大島海峡及び羽地内海は海水交換口が複数あるにも関わらず内湾域に抽出される。ここでは、開口部の幅を考慮し、大島海峡開口部において閉領域となった領域については内湾として抽出せず、羽地内海については内湾域として抽出している。

(2) モデル構築

対象河川におけるリュウキュウアユの定着可能性を評価する数値モデルを構築するため、リンク関数をロジット、誤差分布を二項分布とした一般化線形モデルを使用した。目的変数には、奄美大島及び沖縄島における現在・過去におけるリュウキュウアユの生息／非生息をとり、推定値を定着可能性推定値として評価に用いた。説明変数については、前述の5つのパラメータであり、流域面積、低平地河川長及び内湾面積については、定着可能性に対する上限値が想定されたため、対数型に変換した。

モデル構築に先立って、共線性の問題を避けるために、変数間の相関係数 (ピアソンの積率相関係数: r) を求め、強い相関関係 ($|r|=0.6$) が認められた係数については、リュウキュウアユの生息／非生息データを目的変数としたロジスティック単回帰分析結果との相関係数がより大きい変数を選択した。流域面積と低平地河川長、及び補正気温と被植生率には強い相関関係が認められたため (各々 $r=0.76$, -0.73)、生息／非生息データとの相関係数がより小さい低平地河川長及び被植生率はモデル構築に用いなかった。内湾面積のうち、バッファ長500mと300mの間に比較的強い相関が見られたが、内湾面積のバッファ長選択については、図-2に示すように生息環境状態に対して他の多くの環境要素と関連することが

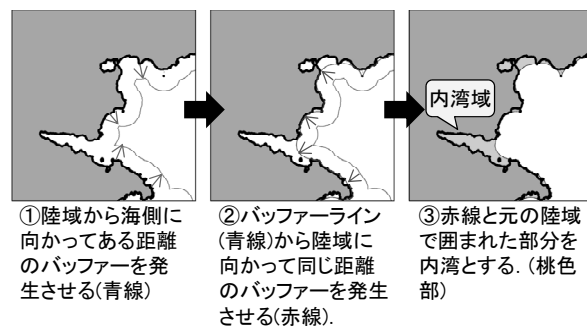


図-3 内湾域抽出方法の概念図¹²⁾

想定されることから、この方法では削除せず、後述するAIC(Akaike's Information Criterion)を用いたモデル選択によって採択する内湾面積のバッファ距離を選定した。説明変数として用いなかった変数の定着可能性に与える影響については、構築されたモデルによる定着可能性の推定結果と合わせて定性的な評価を行った。

モデル選択のため、5つの変数のすべての組み合わせに対しモデルのAICを求めた。AICがより小さなモデルがより少ないパラメータで目的変数を精度よく説明する優秀なモデルであると判断される。統計解析作業には、統計解析ソフトR version 2.10.0を用いた。

3. 定着可能性の推定結果

(1) パラメータと生息／非生息の定性的関係性

対象河川における各説明変数のリュウキュウアユ生息／非生息及び島間の相違について概略を示し、定性的な傾向を把握する。図-4にモデルに採用した説明変数の奄美大島・沖縄島のリュウキュウアユ生息／非生息河川別の概要について示す。ここでは、内湾面積についてはモデル選択の結果により最終的に選択されるバッファ距離1000mのみ示し、生息可能性推定モデルの説明変数に採択しなかった被植生率、低平地河川長については図示する。まず流域面積については、リュウキュウアユの生息河川において、より大きい傾向が見られる。中央値と比較すると、沖縄島の生息河川のほうが奄美大島の生息河川より大きい。これは奄美大島の生息河川の中に主要河川からの流入と見られる小規模の非定常的に生息が確認される河川が存在するためである。標高補正気温については、生息河川よりも非生息河川、奄美大島よりも沖縄島で高い。これは、気温の島間の相違とともに、非生息河川、特に沖縄島南部河川の多くが山地部を流域に持たない河川であるためである。内湾面積については、流域面積や標高補正気温に比べてその差は明瞭ではないが、生息河川における値は非生息河川の値より概ね大きい。沖縄島の河川において内湾面積の最大値及び平均値が大きい要因としては、面積の大きい羽地内海を内湾域として持つ河川が複数存在するためである。奄美大島の非生息河川と沖縄島の生息河川を中央値比較すると両者はほぼ同じ値であり、内湾面積の点では両者の環境条件

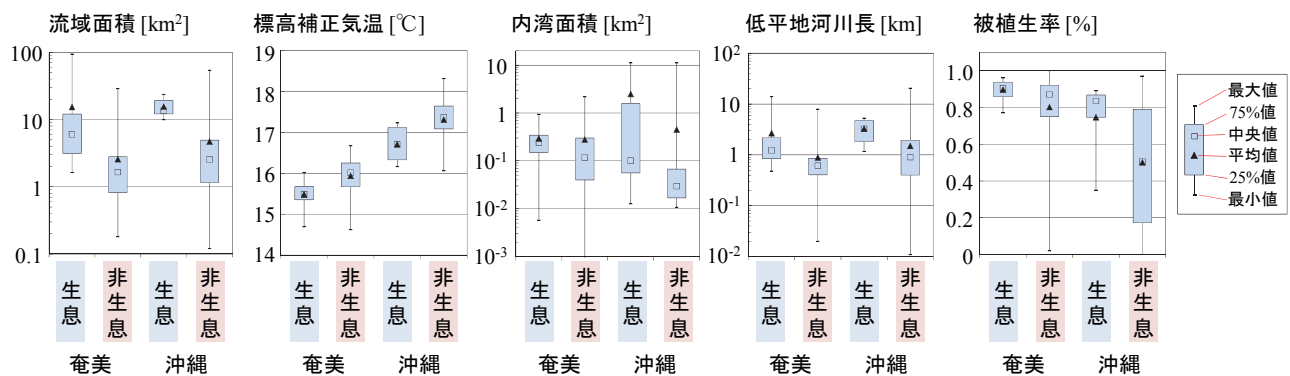


図-4 奄美大島及び沖縄島におけるリュウキュウアユ生息／非生息河川ごとの環境要因パラメータの概要
表-1 モデルの係数及び概要

はほぼ同様であると言える。また、説明変数に用いなかった被植生率、低平地河川長については、それぞれ相関関係が強かった標高補正気温、及び流域面積と同様の傾向にある。被植生率については、沖縄島の非生息河川において極めて値が低い。これらの河川は沖縄南部の低平地に位置し、市街地や基地の影響で森林面積率が低いためである。以上、目的変数となるリュウキュウアユの生息／非生息と説明変数の対応を見ると、解析対象とする範囲内においては目的変数と説明変数には極大値等を持たない線形的な関係が想定される。したがって、一般化線形モデルを用いた検討を行うにあたって特段の解析上の問題はないものと考えられる。

(2) モデル選択結果

表-1にすべての説明変数の組み合わせでの推定モデルのAIC、係数の推定値、及びその標準誤差を示す。AICが最も小さい、ベストモデルには「流域面積」「補正気温」「内湾面積（バッファー長1000m）」を用いたモデルが選ばれた。各々の係数の正負は流域面積、内湾面積が正、補正気温が負となった。全32通りの説明変数の組み合わせのうち、上位10モデルの全てに流域面積が、上位8位までのモデルの全てに補正気温が選ばれた。このことから、定着可能性に対する寄与度としては、流域面積、標高補正気温、内湾面積の順となることが示唆される。ベストモデルのAUC(Area Under Curve)は0.945となり、本モデルによる生息／非生息河川判別精度は概ね良好であると言える。

(3) 定着可能性の推定結果

図-5上部に上記ベストモデルを用いた奄美大島河川における定着化可能性推定値マップを示す。現在の主要な生息河川である奄美大島中央部の役勝川（99%）、河内川（98%）、川内川（92%）では極めて高い値を示した。一方、嘉徳川（65%）は毎年生息が確認されているものの、主要な生息河川に比べ推定値が低かった。同様に、主要な生息河川が流入する住用湾、焼内湾に隣接する河川においては、推定値が低かった（例：山間川（52%））。これらの生息河川は主要な生息河川に比べて流域面積が小さいため、推定値が低く見積もられている。

また、非生息河川における推定値は概ね小さく、特に、

AIC	係数(SE)					
	切片	流域面積	標高補正気温	内湾面積 1000m	内湾面積 500m	内湾面積 300m
			log	log	log	log
1	109.9	16.34 (5.41)	1.69 (0.3)	-1.29 (0.35)	0.46 (0.16)	-
2	111.4	17.34 (5.68)	1.66 (0.3)	-1.34 (0.36)	0.40 (0.18)	0.12 (0.17)
3	111.5	16.70 (5.43)	1.69 (0.3)	-1.31 (0.35)	0.42 (0.17)	-
4	113.0	17.67 (5.71)	1.66 (0.3)	-1.35 (0.36)	0.36 (0.19)	0.12 (0.17)
5	114.9	21.98 (5.5)	1.56 (0.28)	-1.59 (0.35)	-	0.30 (0.15)
6	115.1	21.66 (5.52)	1.59 (0.29)	-1.57 (0.35)	-	0.27 (0.15)
7	116.1	20.37 (5.27)	1.64 (0.3)	-1.52 (0.34)	-	0.20 (0.12)
8	116.9	21.13 (5.26)	1.59 (0.28)	-1.58 (0.34)	-	-
9	125.3	-4.26 (0.55)	1.43 (0.25)	-	0.63 (0.15)	-
10	127.2	-4.19 (0.59)	1.42 (0.25)	-	0.61 (0.17)	0.04 (0.12)
Null	106.9	-2.30 (0.2)	-	-	-	-
AIC上位10モデルの概要	採択数平均	10	1.59	-1.44	0.48	0.20
	最大値	1.69	-1.29	0.63	0.30	0.20
	最小値	1.42	-1.59	0.36	0.12	0.04

北部の笠利半島や南部の大島海峡に面した河川ではほとんどが10%以下の推定値となっている。一方、非生息河川にも関わらず推定値が高い河川もあり、戸口川（66%）、名音川（79%）、大和川（64%）などがある。大川（77%）や阿木名川（79%）については、生息記録はあるが、近年は確認されておらず実質的には非生息河川となっている。これらの非生息河川は、流域面積は大きい、多数の河川が所属する内湾に流入しておらず、主要な生息河川が属する住用湾、焼内湾からは遠く離れ、孤立している特徴がある。

図-5下部に沖縄島河川における推定結果を示す。過去に生息が確認された河川の推定値は、奥川（19%）、辺野喜川（24%）、与那川（27%）、比地川（13%）、大保大川（56%）、源河川（12%）、羽地大川（46%）などであり、沖縄島内では高い値であるが、奄美大島における生息河川と比較すると小さい。沖縄島の生息河川は、奄美大島における非生息河川と同様に流域面積が小さく、

次に、沖縄島河川における分析結果を見る。ここでは過去の生息河川のうち、奥川、大保大川、源河川及び羽地大川、非生息河川の中で最も推定値が高かった安波川を例として取り上げる。流域面積や内湾面積に応じて程度は異なるが、すべての河川で標高補正気温のわずかな低下に対しても定着可能性指数が鋭敏に上昇する。-1.5°Cの低下量ではほぼ50%以上、-3.0°Cではほぼ90%以上の値となる。沖縄島のかつての生息河川の特徴として、流域面積が小さく、複数の河川の流入するような奥行き深い内湾に所属していないことが挙げられた。このような地形的要因により沖縄島のリュウキュウアユ個体群は元来、気候変動に対する脆弱性が高かったことが示唆される。100年間で1.39°Cという気温上昇の推定値（日本付近・2月）⁷⁾、沖縄近海における過去85年間の約3°Cの海水温上昇推定値⁸⁾を考慮すると、気温やそれに伴う水温の変化により沖縄島リュウキュウアユ個体群が被る影響は小さくないと推察される。ただし、本種が沖縄に定着してからの100万年という歳月の中で、縄文海進は生き延び、この100年の影響で個体群絶滅に至ったことを考えれば、沖縄島における人為的改変等、小スケールの影響についても無視できないものと考えられる。

4. 結論

本研究では、絶滅危惧種リュウキュウアユを対象に、地形・気候的要因による生息適地評価を実施した。奄美大島及び沖縄島における過去を含めた生息状況を目的変数とする回帰モデルを構築し、流域ごとの定着可能性として評価をした。気候変化に対する応答を模した感度分析を実施し、流域個体群の脆弱性に関する検討を行った。以下に結論をまとめる。

① 説明変数の選定のため、リュウキュウアユの生活史と生息環境形成要因との関係性を整理した。着目する基本環境要因に対し、説明可能な環境情報を選定・計算し、説明変数とした。モデル選択の結果、流域面積、標高補正気温、内湾面積（バッファー長1000m）を用いたモデルがベストモデルに選択された。

② 構築したモデルを用いたリュウキュウアユ定着可能性の評価結果より、沖縄島河川の評価値は奄美大島の非生息河川よりも小さく、沖縄島リュウキュウアユ個体群は地形・気候的要因により脆弱な状態にあったことが示唆された。

③ 定着可能性評価値の標高補正気温に対する感度分析の結果、沖縄島の河川では奄美大島の河川に比べ鋭敏な応答を示した。沖縄島の河川においては、気温や水温の変化による個体群への影響がより強く生じる可能性が示唆された。また、定着可能性推定値が適的な値を回復するための変動量は予測されている気温や海水温変動量と概ね対応した。

謝辞：本研究の遂行においては、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（B）（課題番号:22310050 研究代表者:島谷幸宏）及び同特別研究員奨励費（大槻順朗）を使用した。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 片野 修, 森 誠一 (監修・編) : 希少淡水魚の現在と未来—積極的保全のシナリオ, 信山社出版, 2005
- 2) 西田 睦, 澤志泰正, 西島信昇, 東 幹夫, 藤本治彦 : リュウキュウアユの分布と生息状況—, 東 幹年の調査結果—, 日本水産学会誌, Vol.58, 199-206, 1992
- 3) 池原貞雄, 諸喜田茂充 (編著) : リュウキュウアユの清流—リュウキュウアユが住める川を未来へ, 沖縄出版, pp.1-229, 1994
- 4) 四宮明彦 : リュウキュウアユ「日本の希少淡水魚の現状と系統保存-よみがえれ日本産淡水魚-」(長田芳和・細谷和海編), pp.36-47, 緑書房, 1997
- 5) 岸野 底, 四宮明彦 : 奄美大島役勝川および河内川におけるリュウキュウアユの孵化時期と体サイズ, 魚類学雑誌, 第51巻, pp.149-156, 2004
- 6) 大槻順朗, 二瓶泰雄, 島谷幸宏 : 生理・餌条件に着目したリュウキュウアユ仔稚魚成育場に対する人為的改変影響評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1237-I_1242, 2013
- 7) 気象庁 : 福岡管区気象台・長崎海洋気象台・沖縄気象台異常気象レポート 九州・山口県・沖縄版2009 九州・山口県・沖縄の異常気象と気候変動 ~その実態と見通し~, 2010
- 8) 茅根 創, 波利井佐紀, 山野博哉, 田村正行, 井出陽一, 秋元不二雄 : 琉球列島石垣島白保・川平の定側線における1998年白化前後の造礁サンゴ群集被度変化, *Galaxea J. coral reef studies*, JCRS, Vol.1, pp.73-82, 1999
- 9) 川那部浩哉 : アユの社会構造の進化的意義について (付) 分布南限における社会構造, 日本生態学会誌, Vol.22, pp.141-149, 1972
- 10) Sawashi Y. and Nishida M. : Genetic differentiation in populations of the Ryukyu-ayu *Plecoglossus altivelis ryukyuensis* on Amami-oshima Island, *J. Ichthyol.*, Vol.41 pp.253-260, 1994
- 11) 根岸淳二郎 : 応用生態工学的研究におけるプロセスベースアプローチ, 応用生態工学, Vol.15, No.2, pp. 235-242, 2012
- 12) Stoneman, C. and M. L. Jones : A simple method to classify stream thermal status with single observations of daily maximum water and air temperature. *North American Journal of Fisheries Management* Vol.16, pp.728- 737, 1996
- 13) Arakida H., Mitsuhashi H., Kamada M. and Koyama K., Mapping the potential distribution of shorebirds in Japan: the importance of landscape-level coastal geomorphology, *Aquatic Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.*, Vol.21, pp. 553-563, 2011

(2013. 4. 4 受付)