

博士論文

沖縄島河川における自然再生に関する実証的研究
(An empirical study on natural regeneration in the rivers of Okinawa Island)

平成 30 年 3 月

宮 良 工

山口大学大学院理工学研究科

目次

第1章 はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的と内容	2
【参考文献】	4
第2章 沖縄島の中小河川の現状と課題	5
2.1 沖縄島における河川環境の変化と生物の応答	5
2.1.1 基本的な河川縦断地形と生物分布様式	5
2.1.2 リュウキュウアユの生活史と過去の分布状況	8
2.1.3 環境変化と生物の応答	10
2.2 自然再生上の課題	19
2.2.1 沖縄における自然再生の経緯	19
2.2.2 リュウキュウアユの絶滅と再定着の可能性	19
2.2.3 自然環境保全・多自然川づくりから自然再生へ	23
2.2.4 沖縄島中小河川における自然再生事業の課題	27
【参考文献】	32
第3章 自然再生優先度の検討	33
3.1 優先度検討のための再生目標の設定	34
3.1.1 在来魚種に着目した自然再生優先度	34
3.1.2 リュウキュウアユに着目した自然再生優先度	36
3.2 優先度の検討手法	37
3.2.1 検討を行うための情報	37
3.2.2 自然再生における制約条件と評価方法	40
3.3 在来魚に着目した自然再生優先度	41
3.3.1 地形・地質情報による河川の類型化	41
3.3.2 水質情報による河川の類型化	46
3.3.3 河川の類型と出現魚類種との関係	49
3.3.4 河川横断構造物と外来種との関係	53
3.3.5 在来魚に着目した自然再生優先度の高い河川	55
3.4 リュウキュウアユに着目した自然再生優先度	56
3.4.1 リュウキュウアユの絶滅要因と過去の分布	56
3.4.2 リュウキュウアユ定着ポテンシャルモデルの検討	57
3.4.3 リュウキュウアユ着目した自然再生優先度の高い河川	62
3.5 自然再生優先度の検討結果と具体の再生技術効果評価の必要性	63
【参考文献】	64

第4章 奥川における落差工撤去及び引堤淵による自然再生とその評価	65
4.1 奥川における自然再生整備内容	65
4.2 モニタリング調査内容と評価手法	67
4.3 魚類モニタリング調査結果に基づく効果評価	68
4.3.1 再生整備実施後の河床変化と評価	68
4.3.2 再生整備実施後の魚類相の変化と効果評価	69
4.4 河床形状の長期的持続性評価	70
4.4.1 河床変動シミュレーションモデルの概要	70
4.4.2 計算条件	70
4.4.3 検討ケース	70
4.4.4 計算結果及び考察	72
4.5 再生整備の効果評価	76
【参考文献】	77
第5章 源河川における取水堰撤去による自然再生とその評価	78
5.1 源河川における再生手法の提案	79
5.1.1 源河川の概要	79
5.1.2 再生目標と手法	80
5.2 利水安定性からみた取水堰撤去の可能性評価	83
5.3 現地調査	87
5.3.1 河川地形測量	87
5.3.2 河床材料調査	89
5.4 河床変動シミュレーション	91
5.4.1 計算モデル	91
5.4.2 計算条件	91
5.4.3 計算対象流量	92
5.5 計算結果	94
5.5.1 出水時流速変化	94
5.5.2 地形変化	96
5.5.3 河床材料粒径変化	97
5.6 取水堰撤去による効果評価	98
【参考文献】	99
第6章 発展性と課題	100
6.1 優先度評価モデルの汎用性と課題	100
6.2 地域住民主体による自然再生の必要性	101
【参考文献】	103

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

高度経済成長期の開発行為において自然環境への配慮が不足していたことへの反省、国民ニーズの多様化、生活の質やアメニティ重視等々の理由により、自然環境の再生や創生の取り組みが全国各地でなされてきている^{1),2)}。2003年には自然再生推進法が施行された。この目的は、多様な主体が参画し、自然環境を保全・再生・創出・維持管理することにより、過去に損なわれた生態系およびその他の自然環境を取り戻すことである。この法に基づいた自然再生基本方針が同年に策定され、2014年に2回目の改訂がなされた。この中の自然再生の方向性において、地域の社会経済活動との関係を十分に考慮すること、地域の自主性・主体性が尊重されるべきであること等が記されている³⁾。生物多様性地域戦略が各地で策定され⁴⁾、自然再生に係る長期的な Vision が作られてきている。さらに、各地の取り組み事例を基に自然再生のための Project に関する蓄積もなされるようになってきた。しかし、計画論としては Vision と Project の間をつなぐ基本計画 Master Plan およびこれを作るための Planning が必要となる⁵⁾。環境問題の中で身近な自然環境である河川が注目される一方、河川の自然再生には護岸改修等の施設整備を伴う事業も多く、財政的制約がある中において、どこから事業を行うべきかを決定するという優先度決定のための方法論が必要となる。

本研究で対象とする沖縄島は1972年の本土復帰前後より、本土に比べて遅れていた社会資本整備、都市・農地開発が急ピッチで行われ、河川環境は大きく変貌した。その象徴として、アユの亜種リュウキュウアユが1980年代初頭に沖縄島から絶滅した。これに対し、リュウキュウアユフォーラム in 名護(2007)の開催の場でリュウキュウアユを蘇生させる会が結成され、絶滅したリュウキュウアユが再定着できるような川づくりや再生を目標とすることが、学識経験者、市民、河川行政等の中で確認された。2003年に自然再生推進法が施行された後、2004年にやんばる河川海岸自然再生協議会、2006年に石西礁湖自然再生協議会、2007年に奥川自然再生協議会の発足等、自然再生の社会的ニーズも高まってきている。沖縄県においても2013年に生物多様性地域戦略が策定され、沖縄県の長期計画である「沖縄21世紀ビジョン」の下で、失われた自然環境を取り戻すための方針としての河川を含めた沖縄県自然環境再生指針が2015年に策定された。本指針に基づき沖縄島北部の東村に位置する慶佐次川(げさしかわ)において2015年から自然環境再生事業が開始されている。

河川環境の再生を行う場合には、ターゲットを明確にして、治水上、土地利用上の制約との間で目標を設定し、これを達成するための技術を検討する必要がある。沖縄島北部の河川では、前述のように絶滅したリュウキュウアユが再定着できるような川づくりが一般的な目標として設定されている。このため、リュウキュウアユの再定着のための工法を検討することが望まれる。中南部河川には元来リュウキュウアユは分布しておらず、その他の目標設定が必要となる。沖縄島では人口は中南部に集中しており、このため、水質汚濁が著しく、外来生物も多い。また治水上の河川施設も多数整備されている。このような環境条件の中で再生目標を設定し、工法を検討することが望まれる。

1.2 研究の目的と内容

本研究は、沖縄島に分布する中小河川を対象に、図 1-1 に示す流れで自然再生を進めるための優先度の検討および再生手法・技術に関する効果評価を行うことを目的として、以下のとおり実施した。

最初に、研究対象とする沖縄島の中小河川における河川環境の現状を整理し、その変化要因および生物の応答と河川環境の変化をインパクト・レスポンスフローに取りまとめ、その課題として沖縄島における自然再生の経緯と自然再生を公共事業として実施する際の財政的制約及び関係者間における合意形成の必要性などから、再生を行う河川の優先度検討の必要性、優先度検討における制約条件を提示するとともに、優先度検討に当たってターゲットとした目標達成のための再生手法・技術の効果評価の必要性を抽出した（第2章）。

自然再生優先度の検討においては、河川縦断形状および水質情報等から在来魚種の生息にとって好ましい河川で優先度が高いとし、更に沖縄島における河川環境再生のシンボルであるリュウキュウアユの再定着を目標とするための定着ポテンシャルを過去の分布河川特性、河川縦断形状、稚魚生息の場である内湾規模等に基づいて検討し、再定着の可能性の高い河川、且つ在来魚種にとって好ましい河川で最も優先度が高いとした（第3章）。

具体の再生手法・技術の効果評価においては、在来魚に着目した自然再生優先度の高い河川から奥川、リュウキュウアユに着目した優先度の高い河川から源河川を選出し、奥川では落差工撤去及び引堤による淵整備に関して魚類の生息状況、河床形状の変化によって短期的な効果を検討するとともに、河床変動シミュレーションによってその効果の長期的維持に関して評価を行い（第4章）、源河川では自然再生としてリュウキュウアユの産卵河床の範囲拡大を目的とした取水堰撤去を提案し、取水堰撤去による取水停止が沖縄島の利水に与える影響に関して検討を行った後、撤去効果に関して河床変動シミュレーションなどを用いて効果評価を行った（第5章）。

自然再生優先度評価モデルは沖縄島の二級河川を対象に構築したが、このような評価モデルの汎用性及び発展性に関する検討を行った（第6章）。

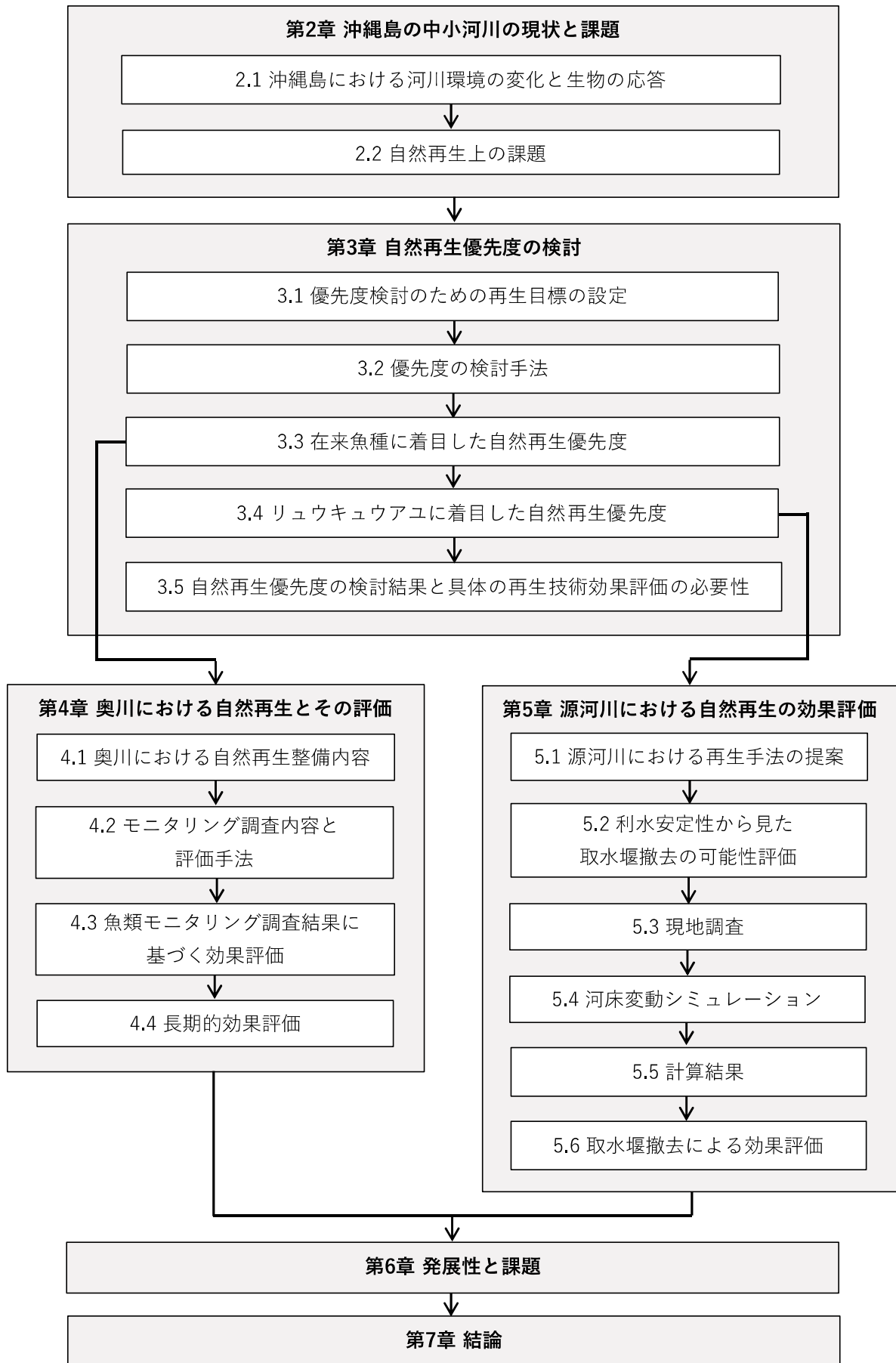


図 1.1 本研究における流れ

【参考文献】

- 1) 萩原清子編著：生活者からみた環境のマネジメント，昭和堂，2008.
- 2) 宮武晃司：川の自然再生に向けて-川本来の姿を甦らせる取り組み-，建設マネジメント技術，3月号，pp.4-10，2003.
- 3) 環境省：自然再生基本方針，2014.
- 4) 環境省：生物多様性地域戦略のレビュー，2017.
- 5) 吉川和広：土木計画学 計画の手順と手法，森北出版，1975.

第2章 沖縄島の中小河川の現状と課題

沖縄島には沖縄県指定の河川は、38 水系 58 河川分布する。本章ではこれらの中小河川を対象に現状の河川環境に至るまでの経緯をその要因と影響結果を結び付けることで現状を整理するとともにこれらを再生課題として捉え、再生行為に関する現状とその課題も併せて整理する。

2.1 沖縄島における河川環境の変化と生物の応答

2.1.1 基本的な河川縦断地形と生物分布様式

沖縄島においては河川環境の変質は流下する細粒土砂問題、水質汚濁問題、河川・河口海岸の構造改変問題、外来種問題など様々である。これらを要因とした河川環境の変化を理解するためには、変化前の状態を推定する必要がある。以下に沖縄島における基本的な河川縦断地形と生物の分布様式を示す。

沖縄島における二級河川の分布を図 2-1 に示す。以後、沖縄島の南部、中部、北部という地域区分を用いる。行政上の境界ではなく通称である。北部と中南部は表層地質が異なるため植生も異なる。北部ではスダジイを中心とした森林に覆われていたため、やんばると呼ばれてきた。北部は山地が多く、河川が発達しており、溪流、河川を中心として希少生物も豊富に分布するが、地域産業としての農業を中心とした赤土と呼ばれる微細土壌の流出も著しく、河川・海岸環境の劣化要因として社会問題化している。一方で、中南部は人口が密集しているため、まとまった森林も公園内や御嶽林などに限られる。また人口・産業の密集による水域の水質汚濁問題が社会問題化している。

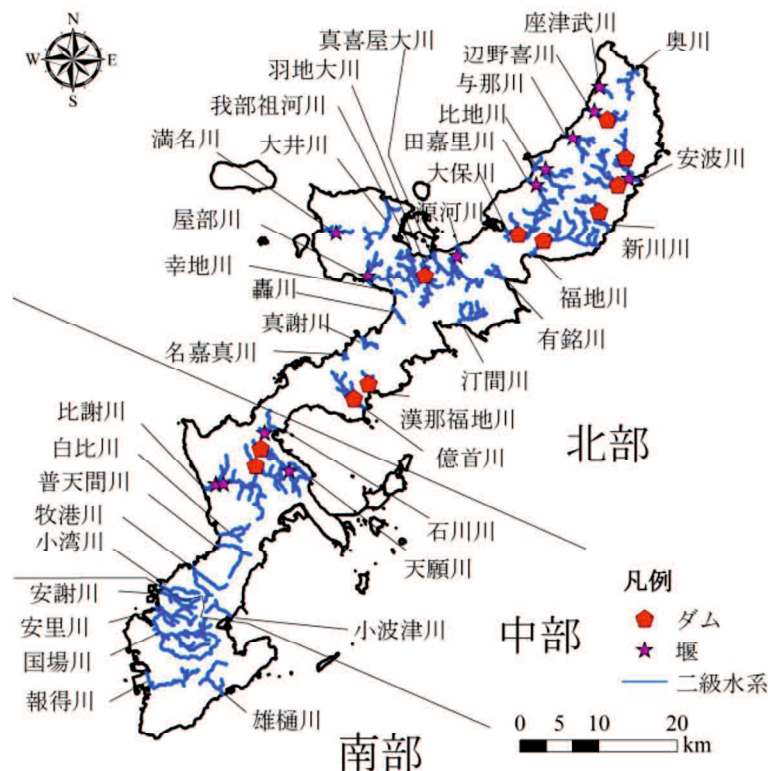


図 2-1 沖縄島における二級河川の分布

沖縄島は 1,500~2,000m の高島の山頂部分が残った島であり (図 2-2¹⁾), 図 2-3²⁾に示すように河川縦断勾配は, 本土の河川の山地渓流域の縦断勾配に類似し, 可児の河川形態³⁾で言う下流扇状地は発達していない (図 2-4). また, 併せて海成段丘により河床勾配の緩い下流区間は通常短い (図 2-6)⁴⁾, 海成段丘が浸食を受けた奥川, 源河川, 大保川などは比較的緩勾配区間が長くなる傾向にある (図 2-6)⁵⁾.

比較的緩勾配の下流区間の多くは感潮区間であり, 純淡水性の河川魚は元来少ない. 現在では純淡水魚の多くは外来種で占められている. この下流区間で最も多いのは, 海岸域を主な生活場所として一部は淡水区間まで遡上する周縁性魚類 (ギンガメアジ類, コトヒキ類, ボラ類など), 次に多いのは海岸と河川の両方を使って成長する両側回遊性魚類 (ヨシノボリ類, リュウキュウアユなど), 甲殻類ではコエビ類 (テナガエビ類, ヌマエビ類) である. 一番少ないのは河川で成長し, 産卵のために海に下る降河回遊性魚類 (ユゴイ類, ウナギ類, 甲殻類ではモクズガニ) である. 因みに海域で成長し, 産卵のために河川を遡上するサケ類のような遡河回遊性魚類は分布しない (表 2-1)⁴⁾.

海成段丘から上流へは急勾配のため, 遡上できるのはハゼ類の一部, ウナギ類, モクズガニ, コエビ類等に限られる. 海成段丘の上部には緩勾配の中流域が存在することがある. 緩勾配であることから生物の多様性が高くなる傾向にある. 河川陸封された純淡水魚のアオバラヨシノボリ (国頭地域の固有種) はこの区間が主な生息域である.

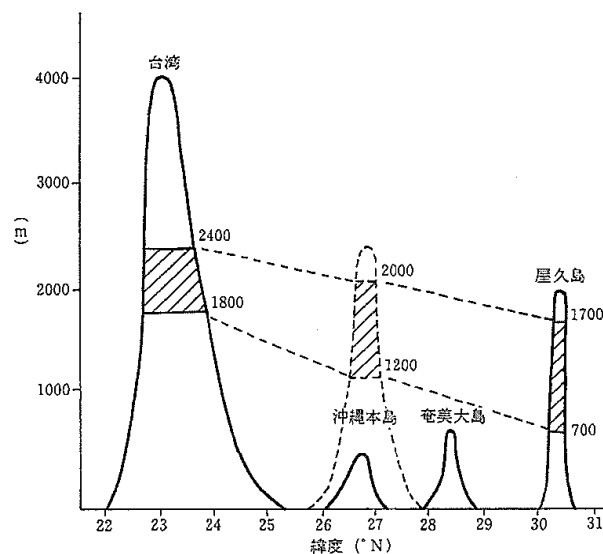


図 2-2 スギ属花粉の化石による前期更新世頃の沖縄島の高度¹⁾

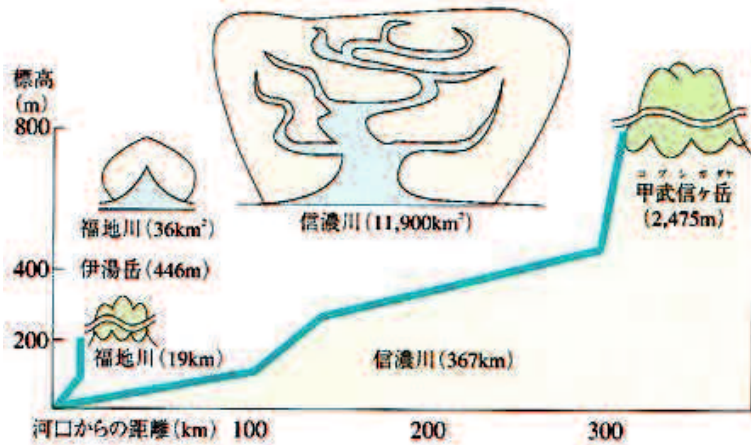


図 2-3 沖縄島の河川と本土の河川の縦断形状の比較²⁾

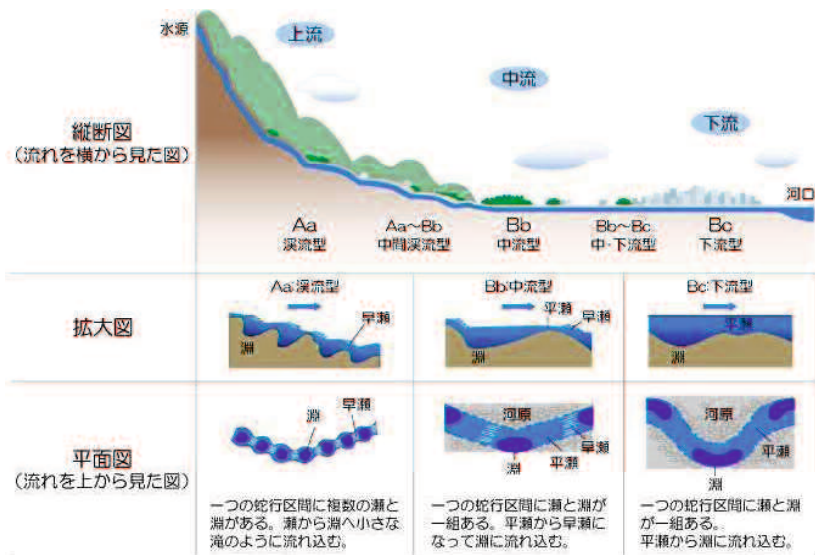


図 2-4 可児 (1944) の河川形態型模式図³⁾

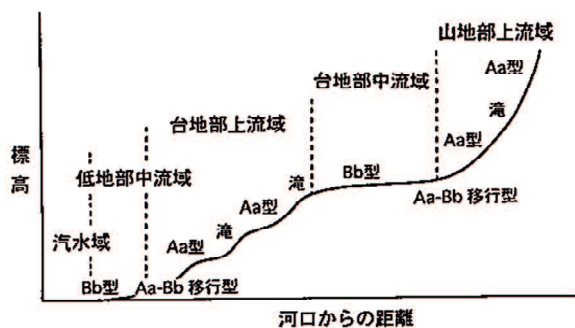


図 4 沖縄の河川の模式断面とその流程区分。
図中の Aa, Aa-Bb, Bb 各型は、可児 (1944) の河川形態型を示す (西島ら, 1984 改変)。

図 2-5 沖縄の河川の模式縦断形状⁴⁾

図中の Aa, Aa-Bb, Bb 各型は、可児 (1944) の河川形態型を示す (西島ら, 1984 改変)。

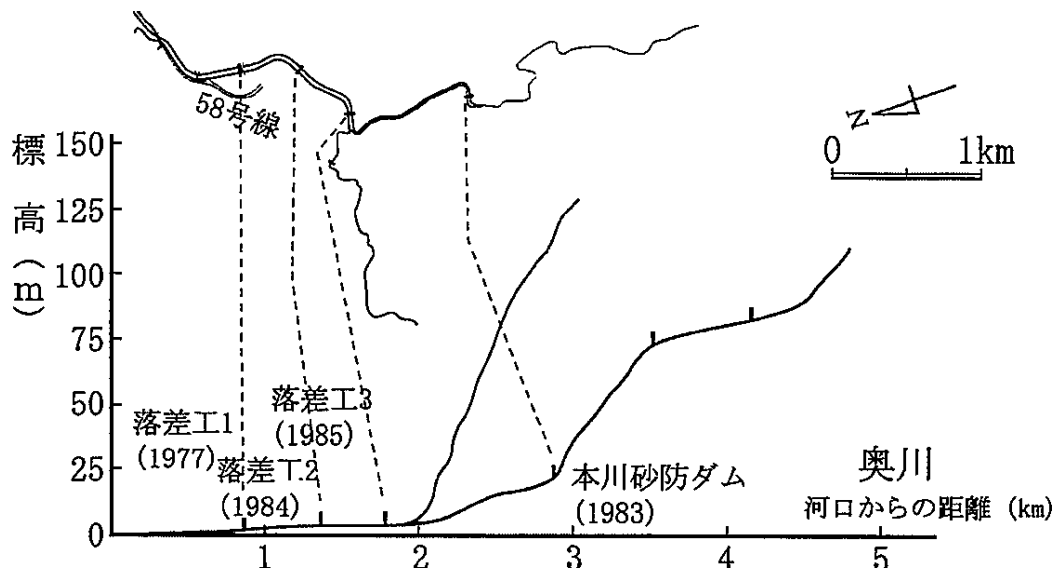


図 2-6 沖縄島奥川の縦断形状⁵⁾

表 2-1 沖縄の河川魚の生活型⁴⁾

純淡水魚類	11科	16属	23種	13.3%
(在来種は)	4科	5属	8種	4.6%
両側回遊型魚類	3科	11属	18種	10.4%
降河回遊型魚類	2科	2属	4種	2.3%
周縁性魚類	28科	87属	130種	75.1%
合計	42科	116属	173種	

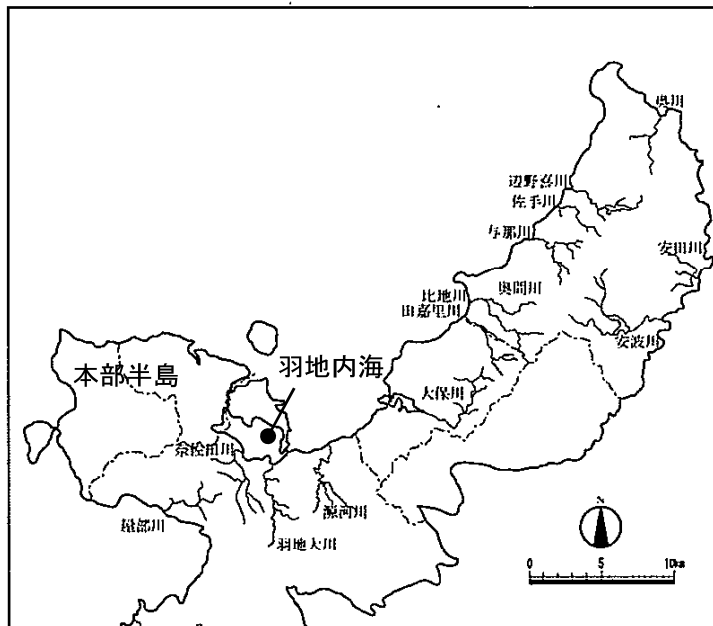
2.1.2 リュウキュウアユの生活史と過去の分布状況

沖縄島北部に分布していたアユの亜種リュウキュウアユは、1980年代初頭に河川環境の悪化によって沖縄島から絶滅したとされる。従って、絶滅前のリュウキュウアユの分布状態や生活史等を知ることによって、より河川環境の変化が生息魚類に与えた影響を明瞭にすることができると考え、以下に詳述する。

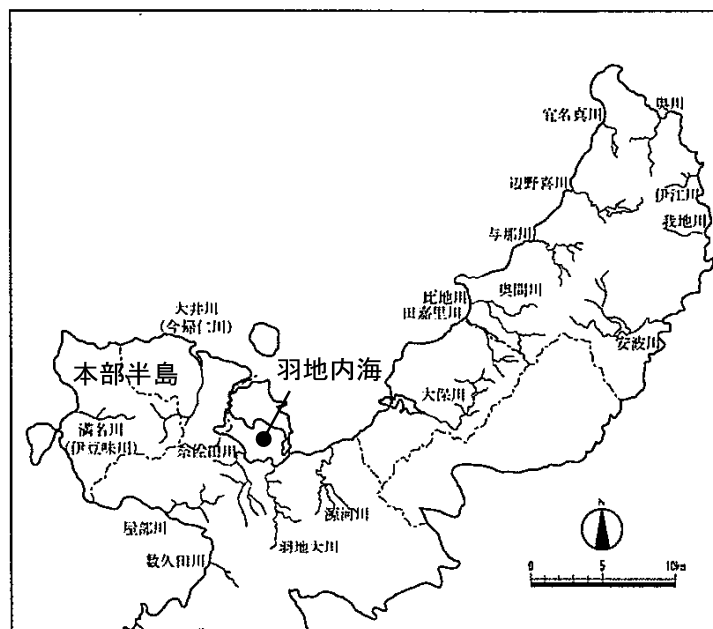
絶滅前のリュウキュウアユの分布河川は図 2-7⁶⁾に示すとおりであり、本部半島から北側の沖縄島北部地域西海岸側に集中している。これは、東海岸側は海成段丘が発達し下流の緩勾配区間が短いこと、西海岸側には羽地内海及び塩屋湾といった湾地形が存在し、河口海岸で生活する稚魚の流亡が少なかったことが関係しているものと考えられる。これらの湾地形で育ったリュウキュウアユの稚魚が周辺河川に分散した結果であると考えられ、河口干潟や湾地形といった稚魚生息場がリュウキュウアユの生息に重要であった可能性がある。

この羽地内海に近接する源河川は、沖縄島有数のリュウキュウアユの産地であった。また、奥川はこれらの拠点から遠く離れているが、かつてリュウキュウアユが豊富に生息していたと言われている。奥川の流出先も湾地形であり、外海に流亡しない稚魚が多数生育し、これが奥川に帰って来ていたものと考えられる。沖縄島における魚類の生活型ごとの生活史は、図 2-8⁴⁾に示す通りであり、リュウキュウアユを含む両側回遊性魚類はもとより、主に海岸域

で生活し、河川域に侵入する周縁性魚類もまた河口海岸域が稚魚の重要な生息場所となっている（図 2-8）⁴⁾。



絶滅以前にリュウキュウアユの分布確認がある河川
引用：主に黒岩 1927, 幸地 1991



絶滅前にリュウキュウアユが分布していたと考えられる河川
引用：澤志 HP <http://ww5a.biglobe.ne.jp/~sawashi/sub5-1.htm>

図 2-7 絶滅前のリュウキュウアユの分布河川⁶⁾

上：現地調査結果による確認河川，下：新聞記事からの抽出及び住民聞き取りによる確認河川

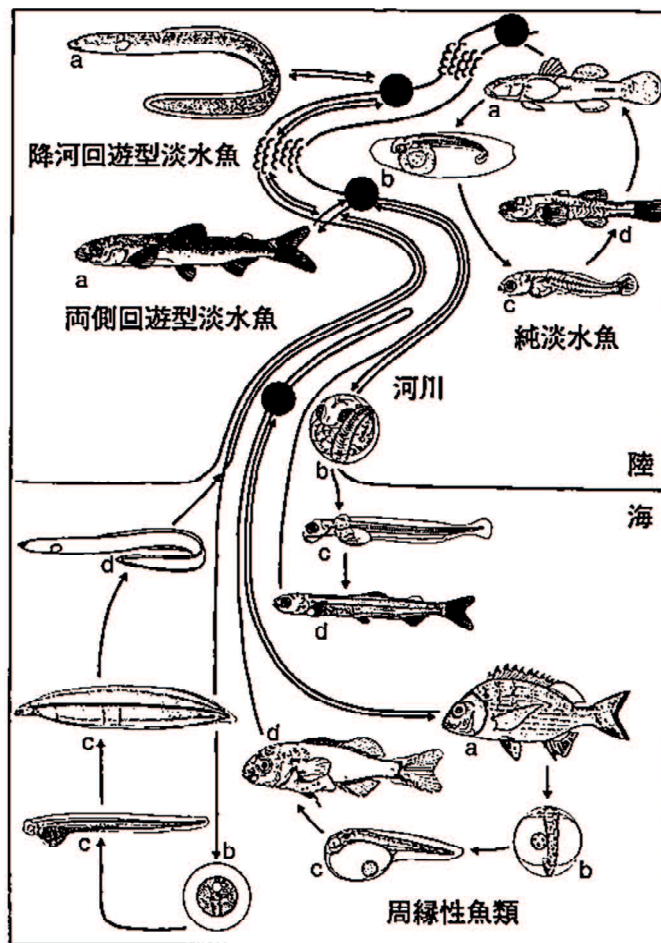


図6 沖縄島に生息する淡水魚の生活史の模式図。
 降河回遊型淡水魚の例としてはオオウナギが、両側回遊型淡水魚としてはリュウキュウアユが、純淡水魚としてはアオバラヨシノボリが、周縁性魚類としてはミナミクロダイが、それぞれ取り上げてある。
 a, 成魚; b, 卵; c, 仔魚; d, 稚魚。

図 2-8 沖縄島における河川魚の生活史の模式図⁴⁾

2.1.3 環境変化と生物の応答

人為による環境変化と生物への影響内容を図 2-9 にインパクト-レスポンスフローで示す。

(1) 河川改修・溪流砂防

a) 河道の直線化, 拡幅, 横断施設, 河床勾配修正

インパクト: 河川改修及び溪流砂防では, 洪水流や土石流を速やかに流下させるための河道の拡幅, 掘り込み, 直線化と河岸浸食防止のための護岸や護床工, 流下エネルギーを減少させるための堰堤や落差工などの横断施設などが整備される。横断施設は河床に大きな落差を発生させる。溪流砂防における施設はより大きな強度を求められ, 河川改修では少ない河床のコンクリート張もみられる。

物理的レスポンス：河道内の蛇行を抑制するとともに流速を低下させるため、淵や早瀬の形成が制限され、土砂堆積を助長することとなる。逆に砂防堰堤の下流では土砂供給量の不足によって瀬の形成が進まなくなることもある。

生物的レスポンス(1)：淵を主な生活場所として利用するテナガエビ類やウナギ類の生活場所が少なくなり、早瀬の河床礫の間隙を主な生活場所とするサワガニ類、造網型水生昆虫などの生活場所が減少する。

生物的レスポンス(2)：流速の低下や流水の滞留傾向による水温上昇に伴い糸状性緑藻類が繁茂し、藍藻類、珪藻類を主な栄養源とするリュウキュウアユなどの藻類専食者の餌が減少する。また、河床への土砂堆積は河床付着藻類の光合成や呼吸系におけるガス交換を阻害する。

生物的レスポンス(3)：落差の発生によって特に周縁性遊泳魚の淡水域への遡上が阻害される（図 2-10）⁷⁾。また、河床勾配が小さくなるため、緩流を好む外来種や砂泥底に巣作りをする外来種の定着が容易になる。周縁性魚類のうち、ギンガメアジやコトヒキなどの肉食魚の遡上が阻まれることで、これら外来種の定着が更に進む。

b) 河口の改修

インパクト：河川改修のうち、河口の改修では、橋梁設置や土地利用との関係から河口が狭まることもある。また、河口の方向が変化することもある。

物理的レスポンス：河口の狭隘化によって河口干潟の発達は制限され、また、河口の方向変化は、海砂が海域で生産される沖縄地方では河口閉塞の一要因となる。

生物的レスポンス(1)：干潟の減少は、河口干潟・周辺浅海域を稚魚時期に主な生息場所とする両側回遊性動物や周縁性動物の再生産の阻害要因となる。

生物的レスポンス(2)：また、河口閉塞は河川横断施設による遡上阻害と同様な影響を及ぼし、両側回遊性動物や周縁性動物の遡上阻害要因となる。

生物的レスポンス(3)：更に、周縁性肉食魚類の河川侵入の阻害は、河川における外来種稚魚への捕食圧を低下させ、外来種の定着要因となる。

(2) 河川取水

インパクト：河川取水のインパクトは堰の存在及びそのためによる落差の発生と平水時取水による流量低下に分類される。

物理的レスポンス(1)：取水堰によって河床への土砂堆積が助長される。

生物的レスポンス(1)：落差の発生は河川改修や溪流砂防における横断施設と同様な影響を及ぼす。

生物的レスポンス(2)：河川取水によって堰下流の平水時流量が低下して、水面幅、或いは水深が縮小し、生物の生息空間が縮小する。

生物的レスポンス(3)：取水堰は通常感潮区間の上流端付近に設置される。リュウキュウアユの産卵河床は、淡水区間最下流の瀬であるとされていることから、取水堰による土砂堆積は同種の産卵河床への土砂堆積要因となる。また、流下過程の孵化仔魚を吸引し

てしまうこととなる。

(3) 海岸道路・海岸整備

インパクト：橋梁設置のため河口が狭隘化することや向きが変化することがある。

物理的レスポンス(1)：このため、河口の改修と同様な影響が発生する。

生物的レスポンス(1)：河口の改修と同様な影響が発生する。

(4) ハイダムの存在・運用

インパクト：ハイダムの存在・運用によって、洪水時ピーク流量の低下による河床攪乱・掃流力の低下、広大な滞留水域の発生、落差の発生、平水時流量の減少、表層放流を継続している場合の温水放流などが発生する。また、場合によってはダムによって流下土砂が堰き止められ、下流河川の河床材料不足が発生することがある。

物理的レスポンス(1)：河川整備・溪流砂防と同様に、河床へのシルト等堆積・浮石の減少、平水時の水温上昇・流速の低下などが発生する。

生物的レスポンス(1)：河川整備・溪流砂防と同様な影響が発生する（図 2-11）⁸⁾。

(5) 農地整備

インパクト：農地整備によって赤土砂が流出する場合がある（表 2-2）⁹⁾。

物理的レスポンス(1)：河床への土砂堆積が発生し、淵が消滅するするとともに、河床礫間が目詰まりし、浮石が減少する。また微細成分の再浮上による濁りが発生する。

生物的レスポンス(1)：土砂堆積によって河川改修・溪流砂防における横断施設整備と同様な影響が発生する。

(6) 事業所排水・生活雑排水

インパクト：水質汚濁が発生する。

化学的レスポンス(1)：有機物分解によって DO（溶存酸素）の低下する。有機汚濁及び有機物分解によって NH₄-N（アンモニウム態窒素）が上昇する。工場排水や下水処理場排水による水質汚濁の場合、重金属濃度が上昇することがある。農業排水では農薬が流出することがある。

生物的レスポンス(1)：いずれも水生動物に対する生理的影響、直接の殺傷の影響が発生する（図 2-12）¹⁰⁾。

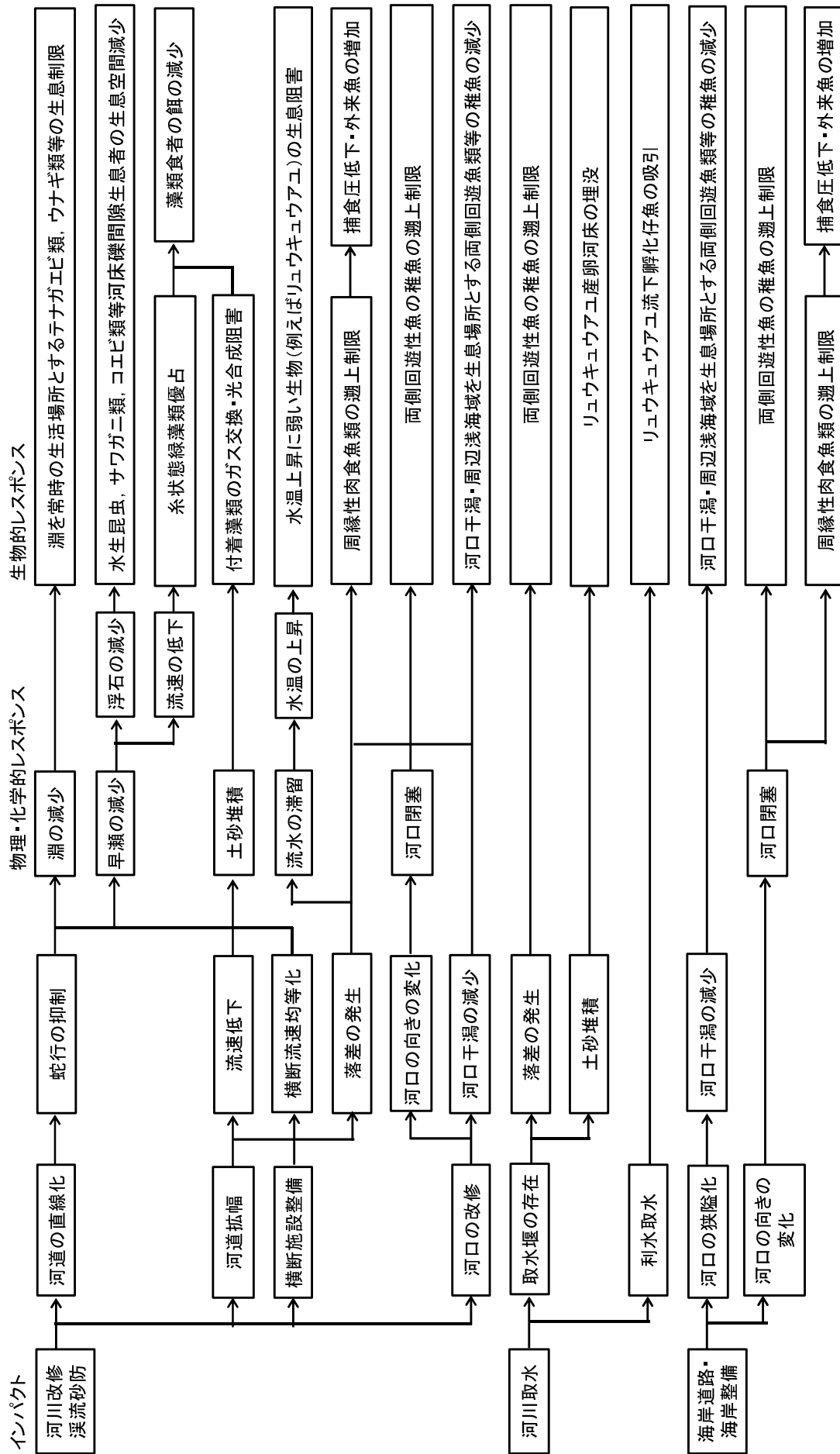


図 2-9(1) 沖繩島における河川環境の変化と河川性動物に対する影響 (河川改修・渓流砂防, 河川取水, 海岸道路・海岸整備)

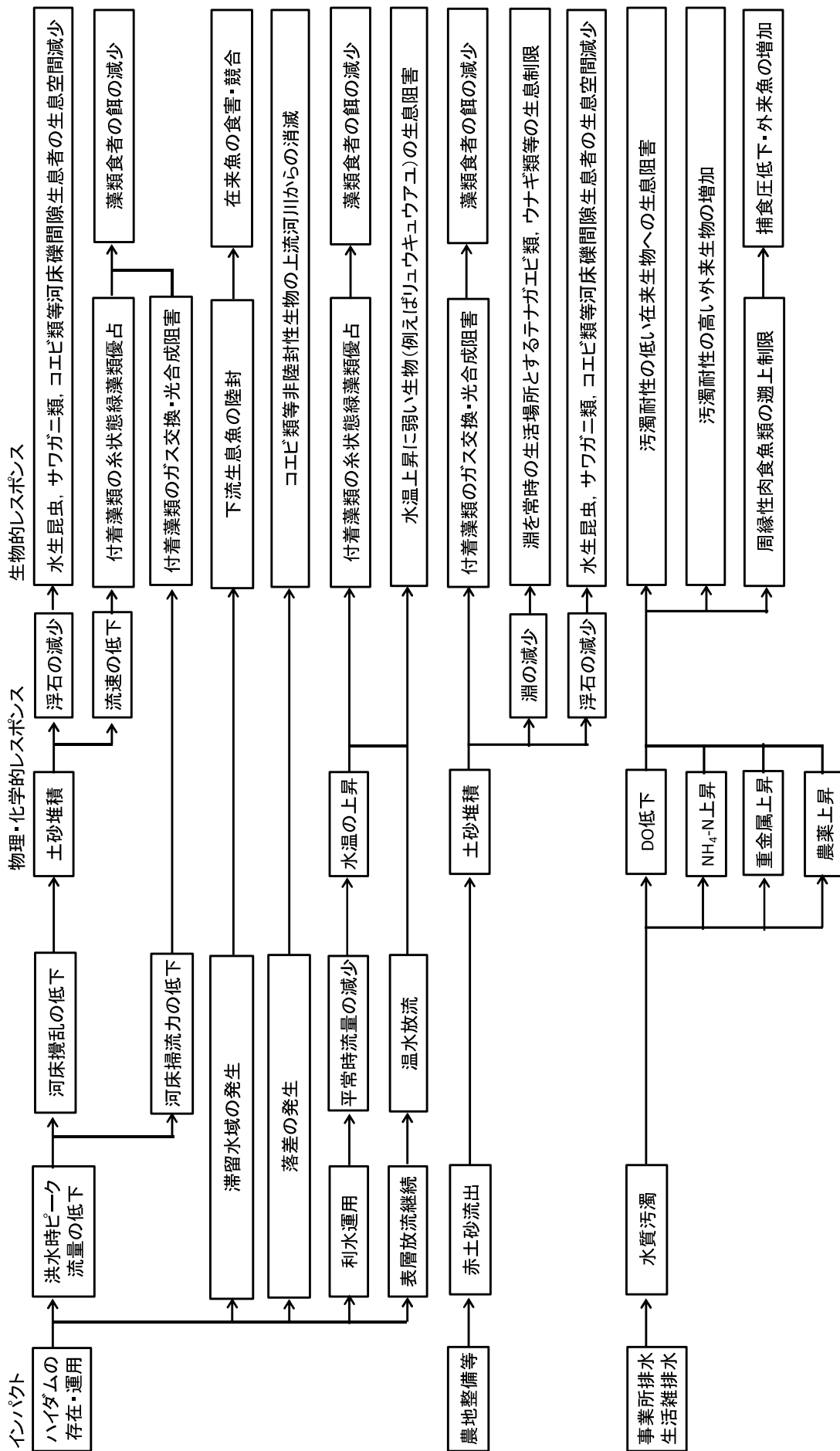


図 2-9(2) 沖繩島における河川環境の変化と河川性動物に対する影響（ハイダムの存在・運用，農地整備等，事業所排水・生活雑排水）

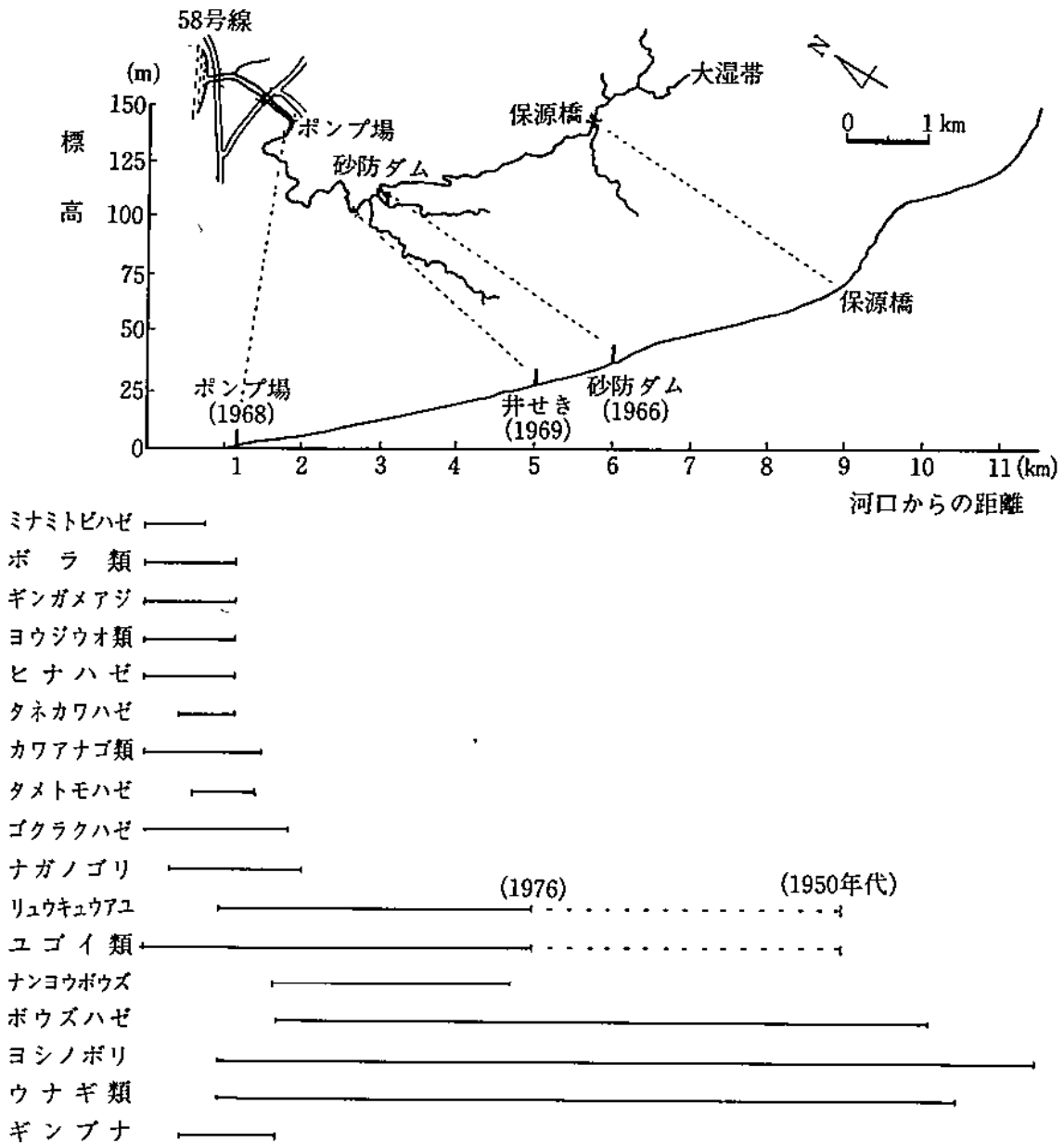


図 2-10 源河川における河川横断施設の分布と魚類の縦断分布⁷⁾

ポンプ場（沖縄県企業局取水設備：現在は魚道整備済み）、井堰（旧取水堰：現在は撤去済み）、砂防ダム（現在は魚道整備済み）によって、魚類の縦断分布がとぎれるパターン化されている。沖縄県企業局取水設備の取水堰付近でボラ類やギンガメアジの分布が途切れており、これら周縁性魚類の遡上阻害要因となっている。旧取水堰や砂防ダムはリュウキュウアユやユゴイ類といった表層遊泳魚の遡上阻害要因となっている。リュウキュウアユやユゴイが遡上していた時代でも保源橋から上流の急勾配区間には遡上できていない。これらを遡上して急勾配区間まで遡上するのはボウズハゼやヨシノボリ類などの遡上能力の高いハゼ類や同じく遡上能力の高いウナギ類のみである。

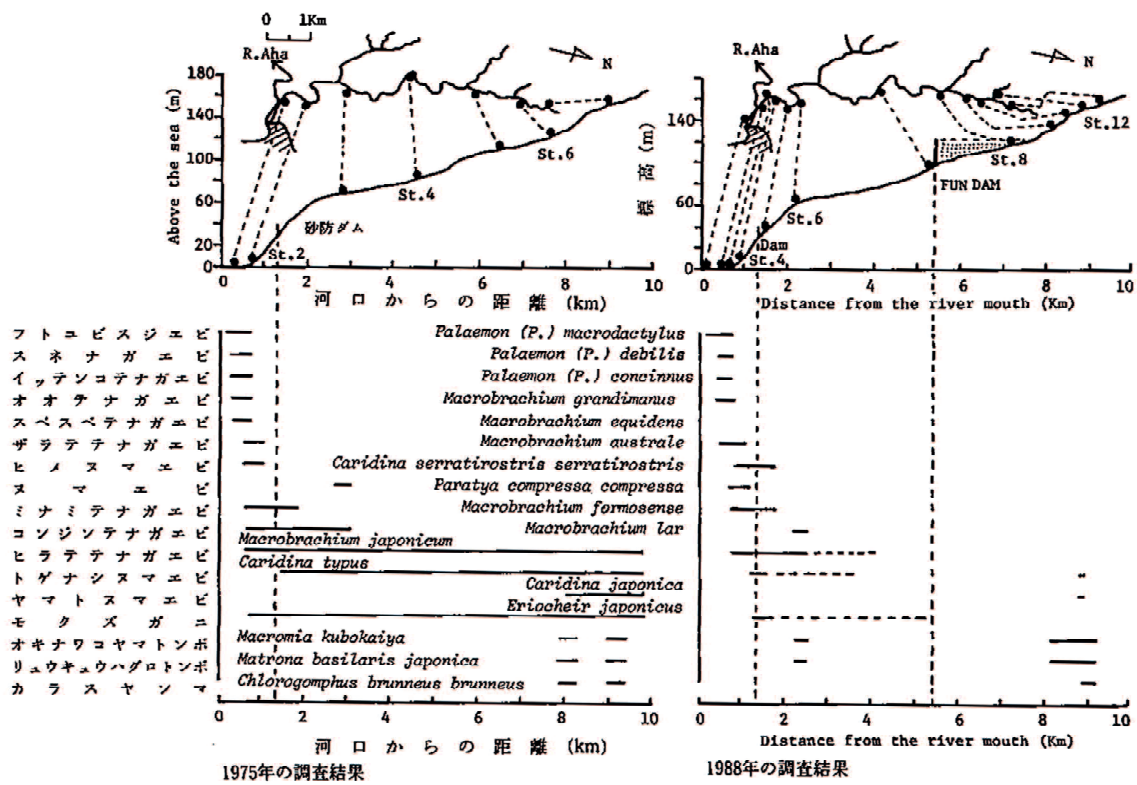


図 2-11 普久川ダム建設前後における河川動物の分布の変化⁸⁾

上流域まで生活範囲にしていたコンジテンナガエビ，ヒラタテナガエビ，モクズガニが普久川ダム建設後には，ダムの上流域で消滅傾向にある。

表 2-2 沖縄県における地目別赤土の流出状況⁹⁾

地目	面積		年間流出量				単位面積あたり 年間流出量	
	H13	H23	H13		H23		H13	H23
	(ha)	(ha)	(t/年)	(%)	(t/年) ^{※3}	(%)	(t/ha/年)	(t/ha/年)
①既存地目	202,828	204,700	312,600	81.9	262,300	87.9	1.5	1.3
森林	88,200	90,800	4,100	1.1	3,900	1.3	0.05	0.04
草地等	7,400	6,600	600	0.2	500	0.2	0.08	0.08
農地(耕地) ^{※1}	42,349	38,200	305,100	79.9	255,100	85.5	7.20	6.68
宅地	13,700	15,200	600	0.2	600	0.2	0.04	0.04
道路	9,800	11,000	400	0.1	500	0.2	0.01	0.05
水面・河川・水路	3,000	2,700	0	0.0	0	0.0	0.00	0.00
その他	38,379	40,200	1,800	0.5	1,700	0.6	0.05	0.04
②米軍基地 ^{※2}	22,658	21,792	22,800	6.0	11,300	3.8	1.0	0.5
裸地	56	23	19,400	5.1	8,000	2.7	346	348
その他	22,602	21,769	3,400	0.9	3,300	1.1	0.15	0.15
③開発事業	1,314	1,197	46,300	12.1	24,700	8.3	35	21
公共事業	1,009	1,021	22,500	5.9	21,200	7.1	22	21
土地改良	525	387	5,500	1.4	3,900	1.3	10	10
区画整理	46	25	3,900	1.0	500	0.2	85	20
施設用地造成	264	324	7,800	2.0	10,800	3.6	30	33
公園造成	29	10	600	0.2	200	0.1	21	21
河川工事	33	24	700	0.2	300	0.1	21	13
道路工事関連	99	113	2,300	0.6	3,300	1.1	23	29
公共その他	13	138	1,700	0.4	2,200	0.7	131	16
民間事業	305	176	23,800	6.2	3,500	1.2	78	20
リゾート関連	253	19	17,300	4.5	200	0.1	68	10
民間その他	52	157	6,500	1.7	3,300	1.1	125	21
合計(①+②+③)	226,800	227,689	381,700	100.0	298,300	100.0	1.7	1.3

※1 H13の農地(耕地)からの流出量は再計算値である。

※2 米軍基地からの流出量はH21年度業務における推定結果をもとに裸地を見直した。

※3 年間流出量は100t単位で四捨五入した値。但し、50(t/年)未満の流出量については100(t/年)に切り上げた。

引用：沖縄県，平成25年．沖縄県赤土等流出防止対策基本計画，p.8.

沖縄県において河川や海岸・サンゴ礁の生態系や産業に大打撃を与える赤土等微細土砂の流出状況は平成23年時点で、農耕地起源分が85.5%を占めている。

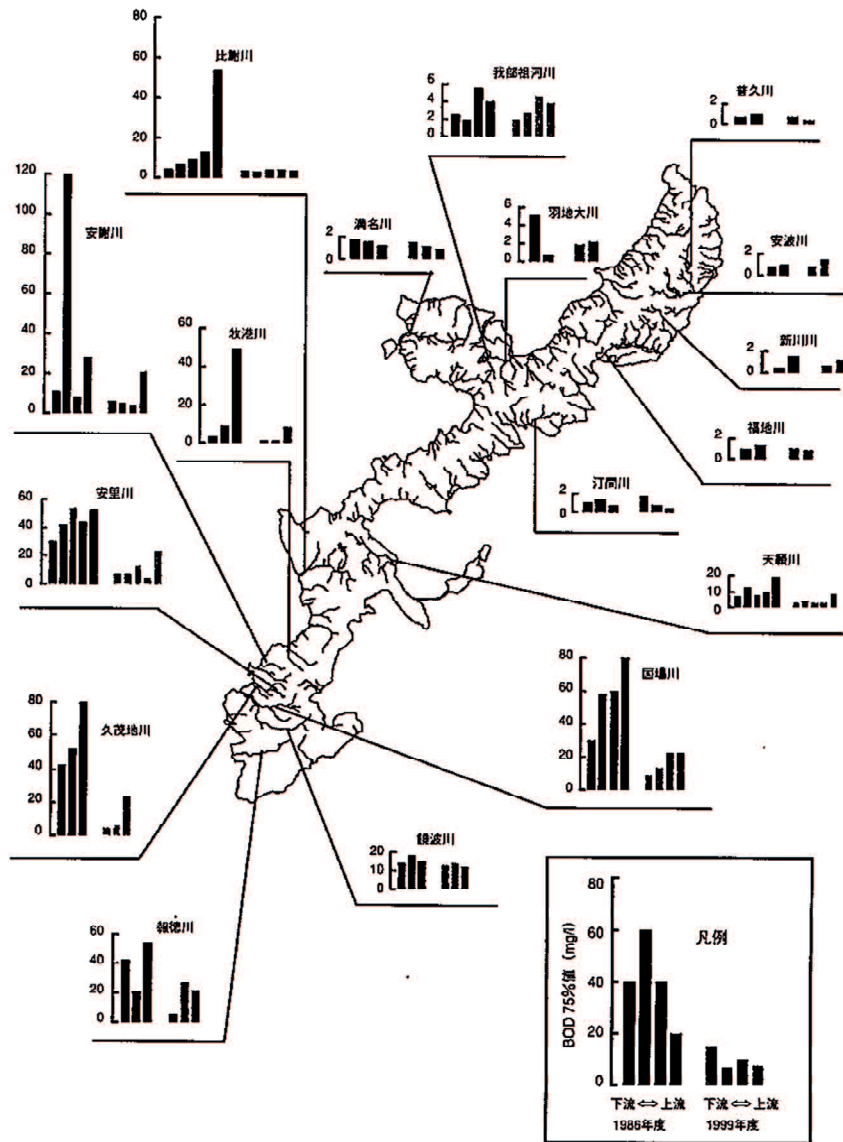


図 2-12 沖縄島における河川の有機汚濁 (BOD) の状況¹⁰⁾

沖縄島の河川における BOD は島の南側 (中南部地域) で高く、北側 (北部地域) で低い傾向にある。これは、人口や産業・経済の中心が中南部に集中していることによる。BOD で表される有機物は糖質、脂質、タンパク質で構成されており、有機物自体に生物阻害性は無いが、有機物分解の際に溶存酸素 (DO) が消費され、水中酸素濃度が低下すること、有機汚濁を受けた水域は生物の呼吸・分解系に障害を与えるアンモニウム態窒素等も高濃度になる傾向にあること、都市部では工場排水・下水処理排水などにより毒性を持つ重金属類の含有量が多くなる可能性があること、農村部では農薬の含有量が多くなる可能性があることから、生物の生息に影響を及ぼす総合的な水質汚濁の指標として挙げた。

2.2 自然再生上の課題

2.2.1 沖縄における自然再生の経緯

沖縄における自然再生は、リュウキュウアユの絶滅後約 10 年を経た 1990 年代に始まるリュウキュウアユを復元させる活動から本格化する。この活動の目的は、河川環境の悪化に伴い絶滅したと考えられるリュウキュウアユを再定着させることを通して河川環境を再生しようとするものである。

平成に入ると当時建設中の漢那ダムで自然環境保全対策が大きく推進され、併せて福地ダム湖に奄美大島産のリュウキュウアユを放流・陸封化することで、奄美大島でも絶滅の危機にあったリュウキュウアユの遺伝子保存と沖縄への再定着のための種苗確保としてダム湖を自然再生に利用する活動が始まった。

その後、1997 年に河川法が一部改正され、河川管理に環境整備も目的化されたことから、河川整備時における環境保全策も義務として実施されるようになった。

以上の流れは、福地ダム湖へのリュウキュウアユの陸封化以外は、ダムや河川整備時の環境保全対策であり、失われた自然を再生するものではなかった。このため、2003 年（平成 15 年）に自然再生推進法が制定され、沖縄県内においてもいくつかの再生事業が開始された。

以上の経緯の詳細と課題を以下に示す。

2.2.2 リュウキュウアユの絶滅と再定着の可能性

リュウキュウアユの絶滅後 1980 年代に「源河川にリュウキュウアユを呼び戻す会」、「与那川にリュウキュウアユを呼び戻す会」、「奥川にリュウキュウアユを呼び戻す会」が相次いで結成され、リュウキュウアユフォーラム in 名護（1990）を経て「リュウキュウアユを蘇生させる会」が結成され、リュウキュウアユ復元のための枠組みが形成された（表 2-3）。

1990 年代には奄美大島のリュウキュウアユの稚魚を譲り受けて福地ダム、安波ダム、辺野喜ダムへの陸封実験が開始された。同時に沖縄総合事務局北部ダム事務所、名護市の支援によりリュウキュウアユの稚魚生産が開始され、源河川、比地川、与那川、奥川へ河川放流実験が開始された。

ダム湖へ放流されたリュウキュウアユはダム湖を海替わりにして陸封され、安定的に定着してきた（表 2-4）。また、辺野喜ダムへの定着後、同ダムから調整水路によって送水を受ける普久川ダム湖でも陸封化され、定着している。なお、現在では辺野喜ダムでは確認されなくなっている。明確な記録は無いが、著者の属するリュウキュウアユを蘇生させる会では、平成 22 年に絶滅が危惧されていた奄美大島の河内川産のリュウキュウアユを羽地ダム流入河川に放流し、その後同会によって定着が確認されている。ダム湖で容易に陸封化、定着したのは、ダム湖にはリュウキュウアユの稚魚の餌生物（ワムシ類）が豊富に生息すること、稚魚の捕食者が少ないこと、冬季の水温が低いことがあげられる。

河川放流は 1992 年（平成 4 年）から源河川等へ継続的に行われてきたものの河川定着には至っていない。一方で、放流されていなかった羽地ダム下流の羽地大川では、平成 26 年にリュウキュウアユの産卵現象が確認された。羽地ダムから越流した稚魚が下流の羽地内海で成長し、羽地大川へ遡上、成長した個体によるものである可能性がある。羽地ダム湖への陸封

化、定着と、これを起源とした河川での産卵現象により、ダム湖を拠点とした同種の河川定着にも期待がかかる場所である。河川への再定着が未だ成功に至っていない要因は、表 2-5 に示すとおりであるが、ダム湖の事例をからもわかるとおり、稚魚が大量に生き残ることが最も重要であり、また併せて大量の稚魚を生産する産卵環境が整っていることも重要であると考えられる。

表 2-3 初期段階のリュウキュウアユ復元活動¹⁾

年	活動内容
1978年(S53)	この年の確認を最後に、沖縄島でリュウキュウアユ確認されず
1984年(S59)	淡水魚研究会が、リュウキュウアユの復元について提言
1986年(S61)	名護市源河区民を中心に「源河川にアユを呼び戻す会」発足
1990年(H2)	「リュウキュウアユフォーラム '90」名護市で開催
1991年(H3)	「リュウキュウアユフォーラム in なご」名護市で開催
	学識者を中心に「リュウキュウアユを蘇生させる会」発足
	リュウキュウアユを蘇生させる会、源河川にアユを呼び戻す会、北部ダム事務所、名護市の4者(4者会議)の協働によりリュウキュウアユ種苗センター完成
	種苗センターで人工産卵、受精を試みるが発眼、ふ化に至らず。
1992年(H4)	種苗センターで初の人工授精、ふ化に成功。
	福地ダム流入河川と源河川に稚魚放流 
1993年(H5)	福地ダム流入河川、源河川で前年度放流個体から生まれた稚魚の遡上を確認
1994年(H6)	「第3回リュウキュウアユフォーラム」名護市で開催
	安波ダム流入河川に稚魚放流、翌年放流個体から生まれた稚魚の遡上確認
現在	リュウキュウアユ種苗センターにおいて、人工種苗生産技術確立
	福地、安波、辺野喜、普久川の4ダム流入河川及びダム湖でリュウキュウアユが定着。河川では源河川(H4～)・奥川(H8～)・与那川(H7～9)・比地川(H6～)の4河川で放流活動を行っているが、未だ定着までには至らず
	H7に「リュウキュウアユ復元のための拡大会議」(4者会議のメンバーを中心に行政、民間、NPOで構成)を発足し、それぞれの分野で役割分担し活動(放流式、学習会、追跡調査、河川環境整備等)を継続

表 2-4 ダム湖へのリュウキュウアユの放流と定着の経緯¹²⁾

調査年	福地ダム		安波ダム		辺野喜ダム	
	放流	確認	放流	確認	放流	確認
	個体数	個体数	個体数	個体数	個体数	個体数
H4年	380	73				
H5年	1,200	1,933				
H6年		3,030	6,530	3,560		
H7年		10,310	3,500	2,900	4,000	540
H8年		4,985		13,575	4,000	460
H9年		3,440		6,310		3,270
H10年		4,225		3,990		1,760
H11年		6,130		22,511		1,795
H12年		4,810		4,190		375
H13年		4,400		7,320		215
H14年		7,100		151		351
H15年		3,478		12,598		607
H16年		6,569		38,167		3,157
H17年		8,878		5,859		1,562
H18年		4,129		23,681		(7月)620
H19年		12,378		8,502		15
H20年		4,180		未調査		未調査
H21年		17,243		未調査		未調査
H22年		9,691		未調査		未調査
H23年		3,300		(12月)708		(10月)12
H24年		20,778		4,197		未調査
合計		141,060		158,219		14,739
平均		6,717		9,889		1,053

※確認個体数は各調査年の8月期の調査データ

※安波ダムと辺野喜ダムの平成14年の確認個体数は9月期のもの

表 2-5(1) リュウキュウアユの定着条件とその阻害要因

ステージ	場所	定着条件		阻害要因
若魚 成魚期	淡水区間上 流	河床地形	夏季水温高騰時には比較的低温である淵の存在、また避難場所としての淵が重要である。 餌場としての河床礫と瀬が必要である。	河川改修や溪流砂防等による河道の直線化・横断施設整備、ダム運用による洪水時ピーク流量の低下、砂防堰堤やダムによる河床材料不足などが阻害要因となる。
		餌	餌生物としてのピロードランソウ (<i>Homoeothrix janthina</i>) が繁茂する必要がある。 藍藻類の生育最適水温: 25℃前後, Mn等の生育阻害物質が少ないこと, 土砂シルトの堆積が少ないこと, 藻類群集の天然更新が発生していること。 Mnは高濃度で藻類の生育を阻害するとされている(環境省)。	河道拡幅・横断施設整備, ダム運用などによる河床更新不足や流速低下, ダムの表層放流継続による水温上昇, 水質汚濁によって付着藻類優占種が糸状性の緑藻類と変化する。アユは糸状性緑藻類を消化できない。 微細土砂の堆積や水の濁りによっても藻類の生育不全のため朝不足となる。 ダムや砂防堰堤下流河川の河床が黒色化することがある。これは、堆積泥中のMnが溶出, 流下し河床で酸化物として析出する現象である。
		水温	盛夏においても水温30℃を下回る必要がある。 或いは、逃避のための低温の支川があること。	河床地形に同じ。
性成熟期	淡水区間上 流～下流	水温	冬季には、性成熟のために水温20℃を下回る必要がある。	河床地形に同じ。
産卵期	淡水区間最 下流	河床材	礫間に卵を生みつけるための間隙が必要である。 河床を容易に掘ることができなければならない。 淡水区間最下流の瀬で、赤土等で間隙が目詰まりしていないこと、粒径＝細礫であること。	農地等からの赤土(微細粒子)によって河床礫の間隙が目詰まりする。 ダム運用による河床の更新不足も目詰まりの原因となる。 淡水区間最下流には取水堰が整備されることがあり、堰による土砂堆積の影響で産卵河床が減少する場合がある。
孵化仔魚 流下期	淡水区間最 下流付近	障害物	取水施設によって吸引されない必要がある。	淡水区間最下流の瀬が産卵場所なので、取水施設によって吸引されることがある。
仔魚 生育期	河口・海岸	地形	仔魚が外海に拡散しないよう湾地形であることが有利である。	湾内に港がある場合、航路浚渫や防波堤による湾口狭隘化で引き潮流が大きくなり、湾外・外海に拡散する可能性がある。
		餌	動物プランクトンが豊富に生息していることが有利である。	同上、
		水温	冬季に20℃を下回る必要がある。 河口干潟によって放熱されること。	沖縄地方の冬季海水水温は最低でも22～23℃であり、この水温帯では稚魚の生残率が低下する。河口・海岸の干潟は干潮時に放熱効果が高くなる。河口の改修や土地利用等により河口・海岸の干潟が減少している。

表 2-5(2) リュウキュウアユの定着条件とその阻害要因

ステージ	場所	定着条件		阻害要因
稚魚 遡上期	河口・海岸 ～淡水区間 上流	遡上河川	上記の条件の揃っている河川に遡上する必要がある。	-
		地形 横断施設	稚魚が遡上可能な河床勾配である必要がある。	河口の改修や道路整備などによって河口の向きが変化する場合や、防波堤などによって砂が河川に入り込む場合に河口閉塞が発生することがあり、稚魚の遡上が阻害される。 取水堰や落差工によって遡上が阻害されることがある。 落差工等への土砂堆積、河川水の伏流によって瀬切れが発生し、遡上が阻害されることがある。
		捕食者	捕食者が少ないことが有利である。	海岸等の水深が大きくなると外洋性の肉食魚が増えて捕食圧が上昇する。

2.2.3 自然環境保全・多自然川づくりから自然再生へ

沖縄総合事務局北部ダム事務所では、漢那ダム建設（平成4年竣工）に伴いダム本体への魚道整備など多種の生物保全対策（図2-13）が施行され¹³⁾、漢那ダムの環境保全対策を皮切りに、羽地ダム（平成17年）、大保ダム（平成27年）建設事業へと建設事業の実施に伴う環境保全対策が拡大した。

代表例として漢那ダム本体に設置された魚道とダム下流河川に植栽されたマングローブの状況を図2-13に示す。沖縄島における水生動物の河川縦断の標準分布は先述のとおりであり、海岸段丘崖の急勾配区間を遡上して上流域にまで生活域を拡大するものは限られており、漢那ダムの魚道もこれら上流域まで生活域を拡大する小エビ類、ハゼ類、カニ類の遡上を意識して整備したものである。

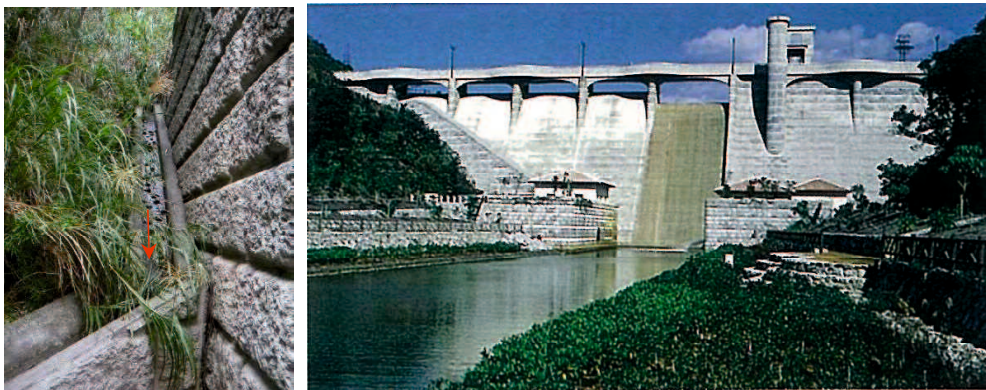


図 2-13 漢那ダム自然環境保全対策の一例
左：ダム本体に設置されたエビ・カニ・ハゼ魚道
右：ダム下流河道へのマングローブの復元

河川では，奥川（北部地域），国場川（南部地域）などで多自然川づくり事業が進んでいた（図 2-14）が，自然環境への配慮・保全ではなく，景観や親水利用に重きをおいた整備のようにも見える．河川整備基本方針策定に当たっては，配慮・保全すべき事項が明記され，その後の計画に反映されるが，モニタリングによる効果評価の視点が欠けており，効果に関しては不明の部分も多い．



図 2-14(1) 沖縄島における多自然川づくりの一例¹⁴⁾

幸地川
(名護市「東江中学校」付近)

改修前

改修後



国場川
(那覇市仲井真付近)

改修前

改修後



安謝川
(那覇市「末吉西公園」付近)

改修前

改修後



饒波川
(豊見城市饒波付近)

改修前

改修後

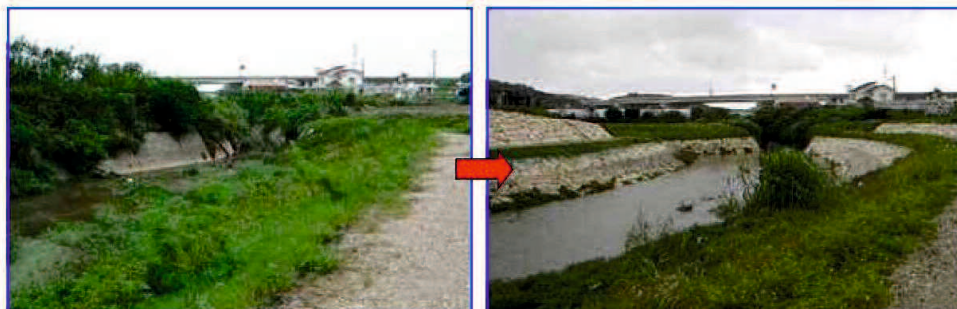


図 2-14(2) 沖縄島における多自然川づくりの一例¹⁴⁾

農地や建設事業地から流出し、河川や海岸を汚染する赤土等の流出を防止する目的で沖縄県赤土等排出規制条例が平成7年施行され、本条例に基づき県内の76海域ごとに、海域環境を良好な状態に再生するための具体的な目標として、環境保全目標（海域）と赤土等流出削減目標量（陸域）を定めた沖縄県赤土等流出防止対策基本計画が平成25年策定された。

以上の施策は、ダム建設や河川整備時における環境保全措置や環境配慮であり、これらの措置によって失われた自然が再生されるものではない。しかしながら、沖縄における環境修復の事例や技術は、これらの施策をとおして集積されつつある。建設事業等を実施する際の環境保全措置や環境配慮では、失われた自然は再生されない。このため、平成15年、自然再生推進法が施行され、これを運用するための自然再生基本方針が同年閣議決定され、沖縄においても行政を中心として以下のように自然再生が行われるようになり、沖縄県内においても下記のような自然再生事業や関連事業が開始された。

- 平成16年、やんばる河川・海岸自然再生協議会が発足するも、合意形成が進まず2年半で解散する（事務局：沖総局河川課、沖縄県河川課、リュウキュウアユを蘇生させる会）。
- 平成18年、石西礁湖自然再生協議会が発足し、同事業が開始される。平成19年には石西礁湖自然再生全体構想が策定される。
- 平成19年、奥川自然再生協議会が発足し、同自然再生事業が開始される（事務局：国頭村、同奥区、沖縄県河川課、リュウキュウアユを蘇生させる会）。第二落差工撤去（平成22年）、引き堤による淵の復元（平成23年）を経て、現在では瀬切れ対策のための河床掘削、蛇行復元のための張り出し水制整備が行われている。
- やんばる河川海岸自然再生事業および奥川自然再生事業の両事業において再生の指標はリュウキュウアユの定着であった。これは、河川・海岸環境の悪化によって絶滅した同種の再定着は、悪化した自然環境の再生を意味するとの解釈による。また、第10回沖縄県河川整備検討委員会（平成20年）では、以後の沖縄島北部地域における河川整備や再生事業の再生指標をリュウキュウアユの再定着とすることを決定した。
- 平成22年、沖縄21世紀ビジョンが策定され、県政策としての自然再生が位置付けられる。
- 平成27年、同ビジョンに基づき沖縄県で自然再生を行う際の指針である沖縄県自然環境再生指針が策定される。
- 平成27年、沖縄県のモデル事業としての慶佐次川自然環境再生モデル事業が開始される。

2.2.4 沖縄島中小河川における自然再生事業の課題

以上、自然再生を構造物の改良等によるものとして定義して論を進めてきたが、赤土汚染や水質汚濁は、河川の構造改善のみでは改善しない。また、赤土汚染や水質汚濁を課題として併せ持つ河川では、河川構造の改善による自然再生は効果が低いことが想定できる。従って、これらの流域起源の課題に関しては別問題として解決を図ることが妥当である。

以下に河川構造物の改善による自然再生上の課題を示す。

(1) 河川施設の改良に関する課題

a) 河川横断構造物の影響

護岸工や落差工などの河川施設の生物環境への影響は、本章 2.1.3 で示したとおりであるが、特に横断構造物は、河床への土砂堆積を助長するとともに横断方向の流れを均等化させるため、低水路の蛇行が制限される。また、堆積土砂への伏流が発生すると瀬切れ現象も併発し、著しく河川環境を損なうこととなる。更に、横断構造物の設置による流速低下と細粒土砂の堆積は、緩流環境を好むような外来魚の増殖・定着を招くこととなり、堆積土砂中に巣作りを行うティラピア類は、島内河川のいたるところに分布範囲を広げ、またマダラロリカリアは中南部を中心に分布範囲拡大中であり、在来種との競合による影響が懸念される場所である。このため、流域からの粘土質の国頭マージや島尻マージといった流出しやすい土壌の分布も影響を拡大する要因である。これらの分布状況は図 2-15

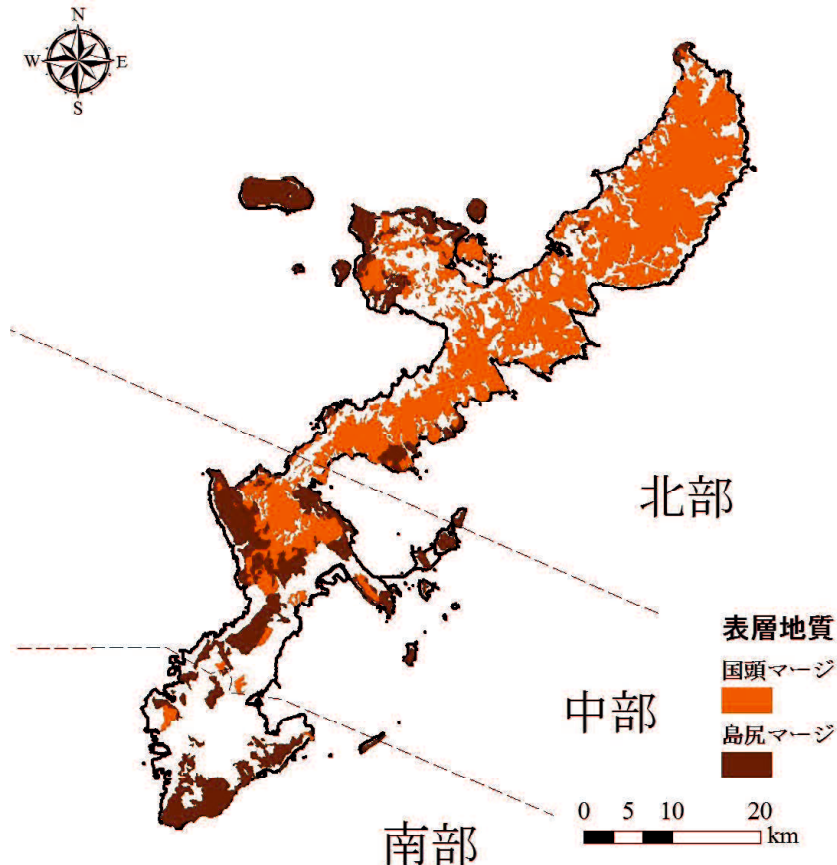


図 2-15 沖縄島における表層地質の分布

に示すとおりである。併せて、横断構造物の存在は海域からのギンガメアジやコトヒキなどの肉食性外来魚の遡上も阻むことになるため、これらの外来魚は捕食者の無い環境下で更に増殖を続ける。

治水としての河道の直線化に対しては、周辺の土地利用などもあり、蛇行復元は現実的ではないことが多い。しかしながら、落差工の撤去や改良は、護岸強度の見直しなどで実施できる可能性もあり、河川における自然再生において重要な役割を果たすものと考えられる。

b) 水利用上の課題

島嶼県であるため、恒常的に水不足に悩まされてきた沖縄県では、本土復帰前からダムによる水資源開発を進め、現在では給水制限は発生しなくなっている。利水においても地下水取水、海水淡水化以外は、河川内に河川取水施設やハイダムを設置して取水することとなる。この内河川取水施設は河口付近に整備されることが多く、自然環境に対して前述の落差工と同様な影響を与える。更に、河川取水施設では、稚魚の吸引による影響の他、リュウキュウアユの産卵河床が淡水区間下流端の瀬であることから、河川取水施設への土砂堆積によって周辺のリュウキュウアユの産卵環境にも影響を与える。

研究対象とする河川の二級河川と取水施設を及び取水量¹⁵⁾を図2-16及び表3-8に、取水から浄水までの流れを図2-17に示す。沖縄島は那覇市を中心として南部に人口および経済が集積しているが、水資源は北部に依存していることがわかる。

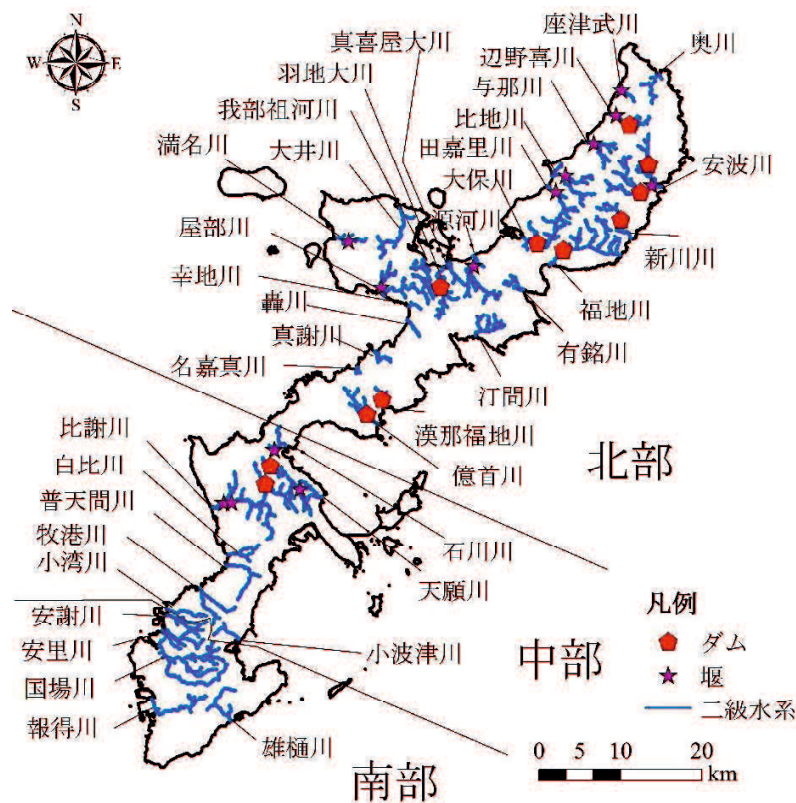


図 2-16 研究対象河川と取水施設

表2-6 取水二級河川の日平均取水量(2013年度)¹⁵⁾

取水河川名	日平均取水量	取水河川名	日平均取水量
比謝川	18.12	満名川	3.87
源河川	9.29	田嘉里川	3.26
川崎川	6.05	座津武川	2.81
比地川	5.67	西屋部川	1.75
辺野喜川	3.88	我部祖河川	0.00
与那川	3.87		

単位：千m³



図 2-17 沖縄島における水供給の流れ

これまでに建設されたダムとその水資源開発概要を表 2-7, 給水制限履歴と年間降水量の変遷を図 2-18, 降水量と水資源開発およびダム利水容量の変遷を図 2-19 に示す. 1972 年の本土復帰後は毎年のように給水制限を実施してきたが, 1994 年の給水制限以降, 安定給水がなされている. また, 最後の給水制限以降も新規 2 ダム, 再開発 2 ダムの建設が行われており, 1997 年には日最大給水量が 4 万 m³ の海水淡水化施設が建設された.

2002 年と 2004 年には貯水量低下により給水制限の実施が決定されている. 実施直前の降雨により給水制限は回避されたが, 少雨の年には依然として給水制限の可能性のあることも示されたものの, 表 2-7 及び図 2-19 に示すように, 現在においては当時よりもダムの利水容量は増加している.

リュウキュウアユに着目した自然再生検討においては、このような利水状況を踏まえて、水の安定供給に影響を与えないことが条件となるため、その影響検討が課題となる。

表 2-7 ダムによる水資源開発概要

ダム	水系名	供用開始	利水容量	ダム	水系名	供用開始	利水容量
金武ダム	億首川	1961	660	辺野喜ダム	辺野喜川	1988	1,600
瑞慶山ダム	比謝川	1961	2,350	福地ダム(再開発)	福地川	1991	44,700
山城ダム	天願川	1967	1,190	漢那ダム	漢那川	1993	6,650
福地ダム	福地川	1967	39,000	倉敷ダム (瑞慶山ダム再開発)	比謝川	1996	5,900
新川ダム	新川川	1977	600	羽地ダム	羽地大川	2005	15,600
安波ダム	安波川	1978	12,600	大保ダム	大保川	2011	17,200
普久川ダム	安波川	1978	950	金武ダム(再開発)	億首川	2014	5,360

※利水容量の単位：千 m^3 ，共用開始の単位：年度

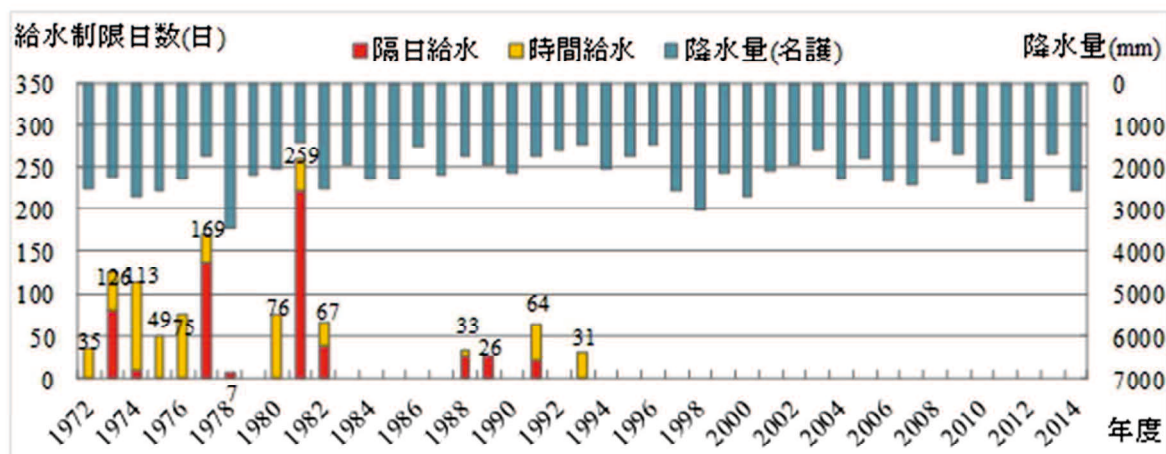


図 2-18 給水制限履歴と年間降水量の変遷

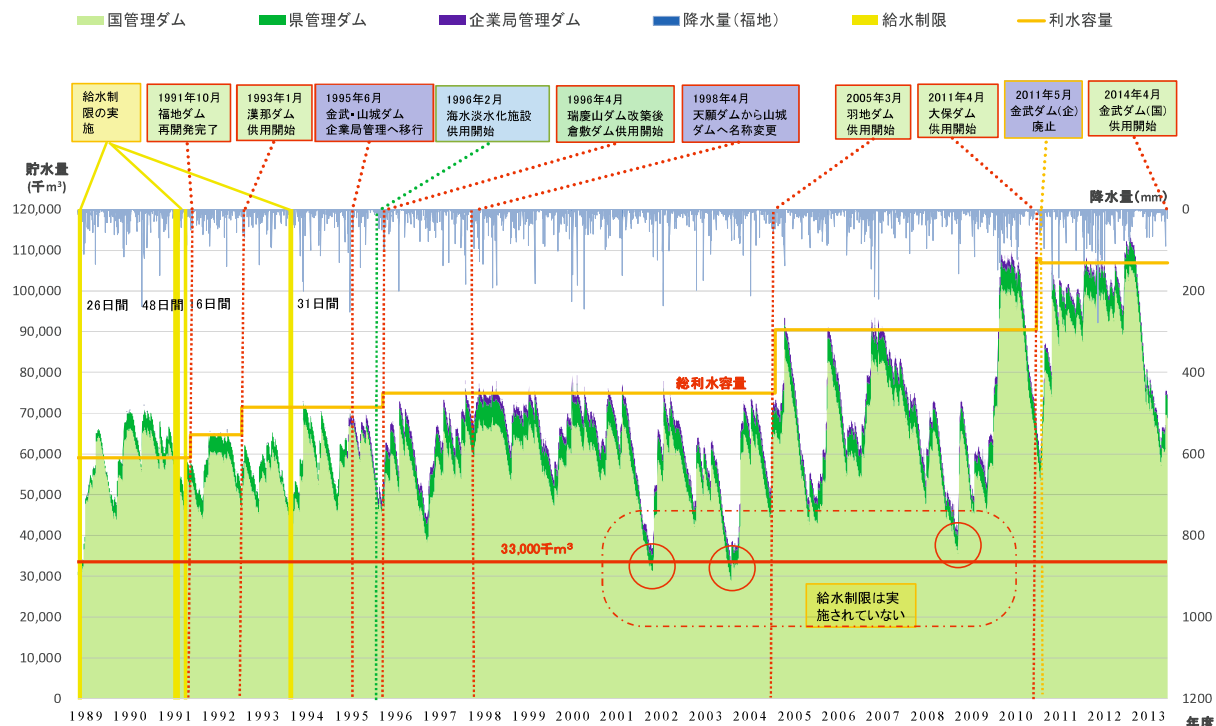


図 2-19 降水量と水資源開発およびダム利水容量の変遷

(2) 再生河川の優先度検討の必要性

ダムや河川における環境保全措置や多自然川づくりは、公共の建設事業における環境保全対策であるが、自然再生事業は主に現存する河川施設やダム施設等の改良を伴う。これらの施設改良は公費で行われることとなるため、実施対象となる施設や施策に関してより多くの納得が得られる合理的説明が求められることとなる。

沖縄県では前述のとおり、沖縄 21 世紀ビジョン・同基本計画、沖縄県自然環境再生指針によって、自然再生を全県的に展開するものと考えられるが、何のために自然再生を行うか、このためどこから何を着手すべきか、そのスケジュールと達成度などを検討したマスタープランはまだ無い。これは沖縄県の事業のみではなく、国の行うダム事業、市町村の行う普通河川整備等においてもマスタープランの思想を反映させ、地域（流域）全体としての自然が再生されるべきであると沖縄県自然環境再生指針（平成 27 年）でも位置付けられている。このようなマスタープランに基づいてこそ県内における合意形成が進むものと考えられ、マスタープランの根幹をなす再生対象河川の優先度検討が課題となる。

【参考文献】

- 1) 黒田登美雄・小澤智生：花粉と海生動物化石からみた琉球列島第四紀の環境変動，月刊地球，18(8)，pp.56-523，1996.
- 2) 沖縄総合事務局開発建設部北部ダム統合管理事務所：ホームページ
<http://www.dc.ogb.go.jp/toukan/29mizusigen/29-05.htm>.
- 3) 国土交通省国土技術総合政策研究所：ホームページ
http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/yougo/words/015/html/015_main.html.
- 4) 立原一憲：3 章琉球列島の陸水環境と陸水生物．西島信昇（監），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（東京），pp.33-41，2003.
- 5) 沖縄総合事務局開発建設部・(株)環境調査技術研究所：平成 16 年度沖縄本島北部地域河川再生調査検討業務報告書，p.62，平成 17 年.
- 6) 沖縄総合事務局開発建設部・(株)環境調査技術研究所：やんばる河川・海岸自然再生事業 自然再生全体構想（素案），平成 16 年度沖縄本島北部地域河川再生調査検討業務報告書，p.11，平成 17 年.
- 7) 幸地良仁：とっておきの話 沖縄の川魚，沖縄出版（浦添），p.141，1991.
- 8) 諸喜田茂充：沖縄島山原の陸水産大型動物相とその変動，沖縄生物学会誌，第 27 号，p.7，沖縄生物学会，1990.
- 9) 沖縄県：沖縄県赤土等流出防止対策基本計画，p.8，平成 25 年.
- 10) 仲宗根一哉：4 章琉球列島の陸水環境の人為的攪乱と生物．西島信昇（監），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（東京），pp.43-56，2003.
- 11) リュウキュウアユを蘇生させる会・沖縄総合事務局開発建設部河川課：やんばるの豊かな河川・海岸を取り戻そう！～「(仮称)やんばる河川・海岸自然再生協議会」設立準備会を開催します～：記者発表資料．平成 16 年.
- 12) 沖縄総合事務局北部ダム統合管理事務所：ホームページ
<http://www.dc.ogb.go.jp/toukan/06shizen/7-6.htm>.
- 13) 仲宗根重信・楠田鉄一郎：自然にやさしいダムを目指して～漢那ダムの周辺環境について～，しまたてい No.20，pp.22-25，2002.
- 14) 総合流域防災協議会（沖縄総合事務局・沖縄県）：沖縄県における水害・土砂災害対策等の当面の進め方，pp.7-19，平成 27 年.
- 15) 沖縄県企業局：水量記録集，2015.

第3章 自然再生優先度の検討

前章における沖縄島の中小河川における現状と自然再生上の課題を受け、本章では自然再生優先度の検討を行う。

自然再生優先度検討の流れを図3-1に示す。

第2章において課題とされた在来魚種にとっての自然再生優先度とリュウキュウアユに着目した自然再生優先度を最初に確認し、検討を行うための情報及び制約条件と評価方法を提示し、それぞれの再生目標に対する優先度検討を行った。なお、リュウキュウアユに着目した自然再生優先度の検討に当たっては、在来魚種に着目した自然再生優先度の高い河川を加味して検討を行った。

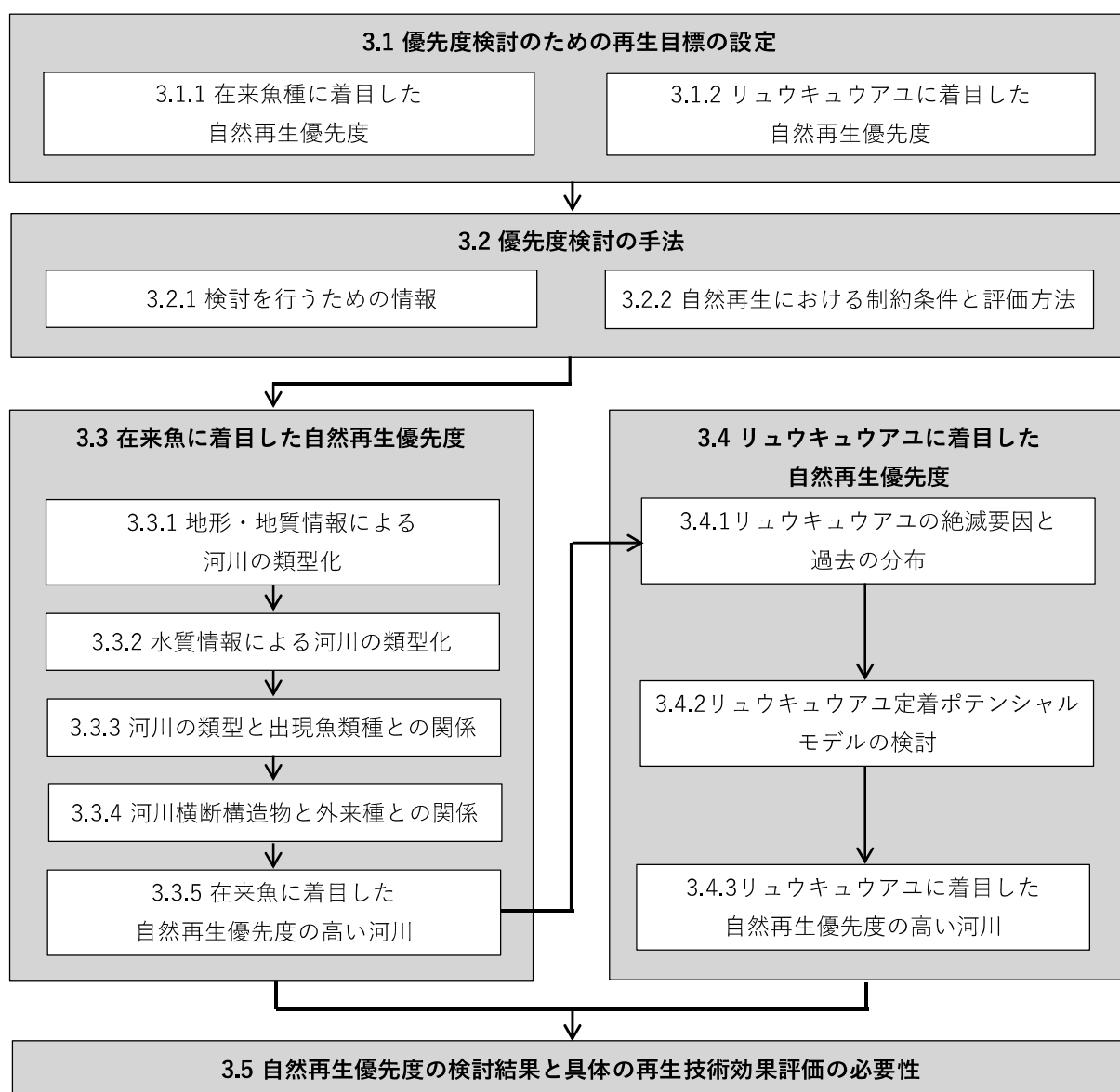


図3-1 自然再生優先度検討の流れ

3.1 優先度検討のための再生目標の設定

自然再生を行う際、前章で抽出した何のために行うのか、このためどこから何を着手すべきかという優先度の検討が重要課題である。また、目的達成のための尺度として定量可能な目標値の設定が必要である。河川の自然再生をテーマとすると水質や底質などの化学質や流速、流量などの物理量で表すことも可能であるが、生物はこれらの化学質や物理質及びその時間的な経過を総合する指標としても認識され、環境指標としても一般にわかりやすいことから、再生目標は、再生対象区間における生物で設定することとする。

3.1.1 在来魚に着目した自然再生優先度

沖縄島における河川の縦断形状から、汽水区間・感潮区間・淡水区間で構成される下流域で最も河川性動物の種数及び個体数が多く、そこから急激に立ち上がる海成段丘崖を遡上できるものはウナギ類、一部のハゼ類及び一部のエビ・カニ類のみである。通常、砂防堰堤は段丘外崖直下流の谷の出口付近に整備されることから（図 3-2）¹⁾、元々多くの河川性動物の生息区間は砂防堰堤付近までであること、段丘崖を遡上可能な前記の河川性動物は、場合によっては砂防堰堤やその周辺地山斜面を上ることが可能であるため、遡上阻害に関しては砂防堰堤による影響は小さいものと考えられる。ただし、砂防堰堤は堆砂によって溪床を埋めるため、遡上後の生活空間が奪われることで影響が大きい。利水・治水・多目的ダムによる影響は、遡上阻害として魚類、甲殻類両方に発生する。ただし、ほぼ全河川で行われている河川改修や砂防堰堤整備と比較するとその数は少ない。

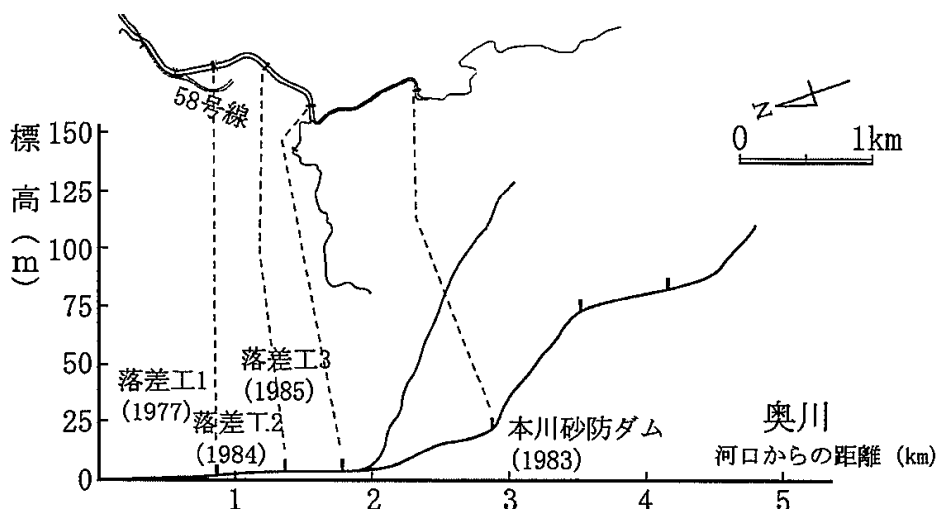


図 3-2 沖縄島奥川の縦断形状¹⁾

沖縄島の多くの河川では、人の生活との関係から問題は海成段丘崖の下流側でより多く発生している。改訂・沖縄県の絶滅のおそれのある野生生物（レッドデータおきなわ）第3版-動物編-（2017）²⁾では、魚類の絶滅種はリュウキュウアユ1種、その他多くの絶滅危惧種は遊泳性の純淡水魚や両側回遊魚の内の遡上能力の弱い一部である。なお、甲殻類では絶滅種

は無く、また在来魚類の生存に関して脅威となっている外来種の問題も要注意外来生物のアメリカザリガニ1種である。

目標設定に当たっては、河川環境の現状との関係を明確にする必要がある。沖縄島の魚類は島津³⁾によって小規模河川まで調査が実施されているが、他の河川性動物ではそのような情報は得られていない。従って、河川環境変化の影響の大きさとともに情報の充足度の観点からも、再生目標は砂防堰堤や海成段丘崖から下流域における魚類を対象とすることが妥当である。

生物への影響として人為による環境悪化の他、競合種の存在による影響が近年深刻化してきており、特に外来種に関しては、特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律(2005)も制定・施行され、厳しく管理され始めている。外来生物は人為による放逐・導入が契機となり、その地の環境に適応したものが定着することで、栄養を巡る競合、生活空間を巡る競合、捕食圧の増加、交雑による遺伝子汚染など外来種に様々な影響を与える場合がある。沖縄島では在来種のみナミメダカがマラリア対策のために導入されたカダヤシ(タップミノ)との競合に負けて分布範囲が著しく狭まり、絶滅寸前であることは有名である⁴⁾。図3-3に沖縄島の二級河川の河口から源流までの区間距離と標高差との関係を示す。沖縄島の二級河川は図3-3に示すとおり、河口から源流まで多くの河川で延長10km以下であり、5km以下の河川も多数存在し、その距離に対する標高差割合も1/50~1/100の急流河川である。このように、沖縄島の河川は急勾配のまま直接海に注ぐため、遊泳性魚類の遡上可能区間は限られているが、河川横断構造物の設置は縦断河床勾配を緩めること、海域からの在来肉食魚の遡上を阻む⁵⁾ことから、これら外来性の遊泳魚の定着を可能にする一要因と言える。石川他⁶⁾は、沖縄島の純淡水性外来魚は30種、1雑種であり、在来の純淡水魚7種の4倍以上に達していると報告している。嶋津の調査³⁾では外来魚の種数および個体数ともに多い河川では、外来魚類による在来種の駆逐も示唆されており、このため海成段丘崖から下流域における横断構造物は魚類の自由な行き来を制限するだけでなく、競合生物の定着を助長するという二重の意味で在来魚に影響を及ぼすこととなる。従って、影響の大きさから河川横断施設の存在、外来種の定着による在来種の保全を目標とすることが妥当である。

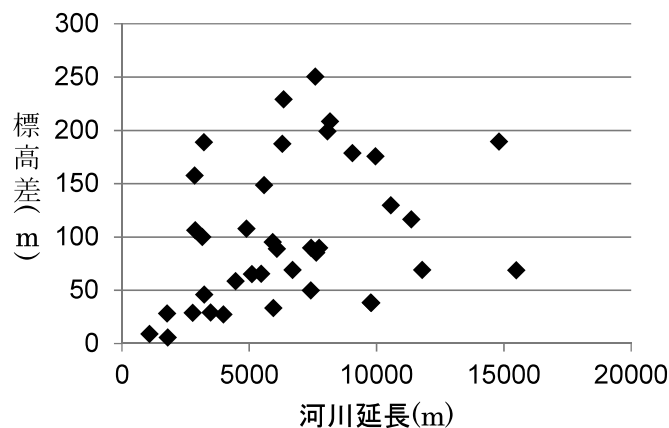


図3-3 沖縄島の二級河川の河口から源流までの区間距離と標高差との関係

3.1.2 リュウキュウアユに着目した自然再生優先度

アユの亜種リュウキュウアユが1980年代初頭に沖縄島から絶滅したことは前章で述べた。その後、源河川にリュウキュウアユを呼び戻す会、リュウキュウアユを蘇生させる会などが設立され、奄美大島から譲り受けた同種の河川放流を繰り返したが、源河川や羽地大川への遡上は確認されているものの未だ再定着には至っていない。再定着が見られない一要因に産卵・仔魚生産の絶対量不足が挙げられる。国内で唯一リュウキュウアユが自然分布する奄美大島では、2010年発生の豪雨によって水害、土砂災害が発生した際、次の年の同種の稚魚遡上量が2010年の4~5倍に達したと四宮⁷⁾によって報告されている。四宮は本報告の中で、大洪水の発生に伴う河床攪乱によって産卵河床の範囲が広がり、産卵・仔魚生産量が大幅に伸びたのではないかと考察している。同種の産卵河床の河川流程における位置は、淡水区間最下流の瀬である。リュウキュウアユは前章でも示したように沖縄島北部の西海岸地域を中心に分布していた。同時に河川取水はこれらの西海岸河川に集中しており、多くの河川に取水堰が整備されている。取水堰の設置位置は塩水の取水を防ぐためリュウキュウアユの産卵河床と同じ場所となる。このため、産卵河床は取水堰への堆砂によって埋まる可能性がある。また、先述したように取水堰の存在はリュウキュウアユの成長区間である中流域への遡上を阻むため、存在そのものも影響要因となる。従って、河川横断構造物との関係におけるリュウキュウアユの再定着もまた目標とすることが妥当である。

3.2 優先度の検討手法

3.2.1 検討を行うための情報

本研究で対象とする沖縄島の河川は、図 3-4 に示すように南部，中部，北部にかけて多数分布する。このような状況において河川環境を比較して自然再生の優先順位を検討するためには、島全体にわたって複数の情報が均質に揃っている必要がある。しかしながら、地方中小河川においては過去から河川情報を有している場合は少なく、現在においても水質や水位などの観測が行なわれていない河川が存在する。そのため国土交通省が公開しており経年変化が少ないと考えられる地形・地質の GIS 情報、既往の調査による魚類情報、水質情報、河川横断構造物設置情報などの比較的手または調査しやすい情報により評価可能なモデルを構築することとする。

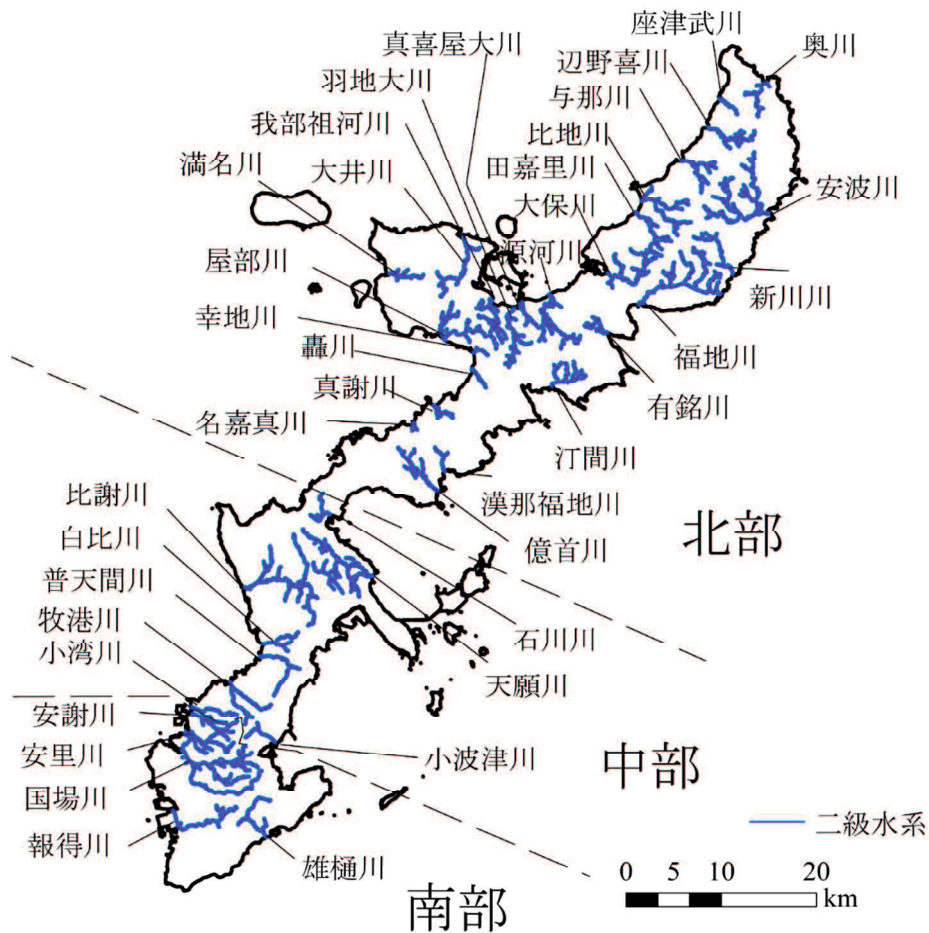


図 3-4 沖縄島における二級水系

宮良ら⁸⁾は沖縄島の河川の特徴を踏まえた上で河川改修を伴う自然再生事業における優先度の決定方法および課題の整理を行い、水質および魚類のデータを用いて河川を分類し、水質悪化による課題、過去の河川改修が外来種にとって生息しやすく、また在来種にとって生

息しにくい環境を作ってきたことを定性的に考察し、自然再生優先度の検討に当たって魚類分布情報、水質情報は有効であることを確認した。同研究においては、図 3-5 に示す対象全河川における水質 (DO, 濁度, T-N, T-P) の現地調査結果、及び沖縄島全河川を対象に目視観察によって魚類分布を調査した島津³⁾の調査結果を用い、それぞれのクラスター分析を行い、水質及び魚類それぞれが 4 分類された。河川の分類結果を表 3-1 及び図 3-6 に示す。座津武川-国場川グループで外来種数が多く、在来種が少ない傾向にあり、その他のグループでは外来種数に大差がないものの、在来種数の多寡でグループ分類される結果となった。沖縄島の河川は元来、下流まで急勾配であったが、河道拡幅や多数の落差工設置による勾配修正により、平常時の流速低下、細粒土砂の堆積がもたらされ、緩い流れを好み、砂泥底に巣穴を作って繁殖するような外来種の好適な生息環境になっているものと考えられる^{5),9)}。座津武川-国場川グループでは河道拡幅や落差工の設置によって外来種の生息にとって好適な環境となっているものと考えられる。一方、表 3-1 の下側のグループでは在来魚種が多いことから河口から純淡水区間の出現地点まで在来種の遡上に対する障害が少ないと考えられる。以上より、表 3-1 の上 2 つのグループの方が相対的に河川構造改善による自然再生事業に関する優先順位が高いと判断できる。なお、河川構造上の課題が多いと考えられる座津武川-国場川グループに属する座津武川では河口と海岸に自然の落差が生じており、在来種が少なくなったものと考えられ、このような場合には、類型化したのちに個別に精査する必要性も示されることとなった。

表 3-1 水質及び魚類の属性 (在来種, 外来種) による対象河川の特性⁸⁾

		水質						魚類								
グループ		n	統計	DO	濁度	T-N	T-P	グループ	n	統計	外来種数	在来種数	課題			
座津武川-石川川	北	座津武川	有銘川	中央値	7.7	0.0	0.49	0.015	座津武川-国場川	北	座津武川	新川川	中央値	3	3	多
		源河川	普久川								億首川					
	中	辺野喜川	安波川	26	範囲	0.0	0.0	0.03	0.002	南	普天間川	雄樋川	範囲	0~6	1~4	
	南	比地川	満名川								比謝川	安里川				
		羽地大川	真喜屋大川	16	範囲	4.2	3.4	0.30	0.004	中	報得川	大井川	中央値	2	5.5	
		汀間川	安謝川								大保川	我部祖河川				
		西屋部川	大井川	16	範囲	~10.2	~10.9	~3.15	~0.825	中	漢那福地川	億首川	範囲	1~4	4~7	
		真謝川(2)	大保川								漢那福地川	漢那福地川				
		幸地川	田嘉里川	10	範囲	0.7	10.4	0.54	0.006	北	邊野喜川	源河川	中央値	2	10	
		奥川	屋部川								邊野喜川	有銘川				
		轟川	屋部川	2	範囲	~4.5	~123.2	~72.00	~19.270	中	牧港川	安里川	範囲	1~3	8~11	
		比謝川	宇地泊川								小波津川	天願川				
		白比川	天願川	10	範囲	~8.2	~36.1	~12.87	~1.492	北	与那川	奥川	中央値	2	14	
		石川川	天願川								石川川	安謝川				
与那川-小波津川	北	与那川	福地川	16	中央値	7.3	5.6	0.8	0.043	北	大保川	名嘉真川	中央値	2	5.5	
		新川川	奥間川								大保川	真喜屋大川				
		名嘉真川	大浦川	16	範囲	4.2	3.4	0.30	0.004	中	慶佐次川	幸地川	範囲	1~4	4~7	
		平南川	慶佐次川								大井川	我部祖河川				
		漢那福地川	億首川	10	範囲	~10.2	~10.9	~3.15	~0.825	中	轟川	漢那福地川	範囲	1~4	4~7	
		牧港川	安里川								小波津川	白比川				
		小湾川	川崎川	10	中央値	5.6	14.7	0.54	0.0843	北	邊野喜川	源河川	中央値	2	10	
		普天間川	小波津川								漢那福地川	有銘川				
我部祖河川-饒波川(1)	北	我部祖河川	真謝川(1)	10	範囲	0.7	10.4	0.54	0.006	中	牧港川	安里川	範囲	1~3	8~11	
	中	与那原川									天願川	川崎川				
	南	久茂地川		10	範囲	~8.2	~36.1	~12.87	~1.492	北	与那川	奥川	中央値	2	14	
		潮渡川	国場川								与那川	田嘉里川				
		真嘉比川	雄樋川	2	中央値	2.2	107.8	39.19	10.502	北	福地川	比地川	中央値	2	14	
		報得川	饒波川(1)								安波川	比地川				
		饒波川(2)		2	範囲	0.0	92.3	6.37	1.733	南	西屋部川	汀間川	範囲	1~3	13~19	
		長堂川	饒波川(2)								大浦川	満名川				

※北:北部, 中:中部, 南:南部

※魚類グループでは、比謝川:与那原川含む, 安里川:真嘉比川含む, 国場川:長堂川, 饒波川(1), 饒波川(2)含む, 天願川:川崎川含む, 安波川:普久川含む, 比地川:奥間川含む,

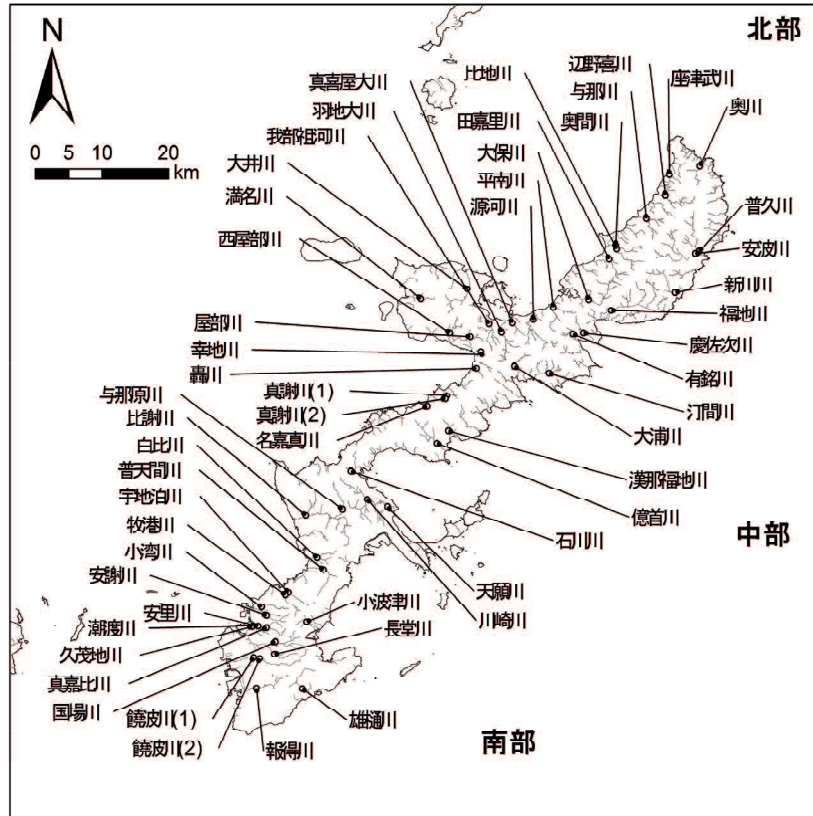


図 3-5 既往研究における対象河川⁸⁾

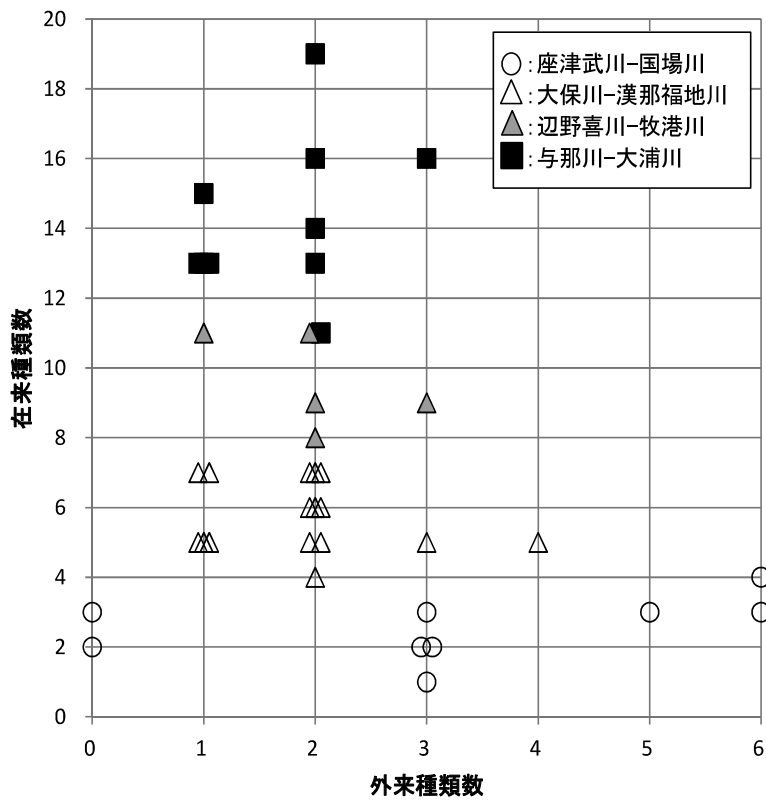


図 3-6 魚類属性（在来種，外来種）によるグループ特性⁸⁾

3.2.2 自然再生における制約条件と評価方法

前項で再生目標を「在来魚種に着目した自然再生優先度」及び「リュウキュウアユに着目した自然再生優先度」とし、前者では河川横断構造物全般を対象に改善課題とし、後者では「在来魚にとっての自然再生優先度」を踏まえた上での取水施設を改善課題とした。河川横断構造物の内多くを占める落差工は、河床洗堀、水位上昇に影響を与えなければ撤去が可能である。実際に二級河川奥川では、図3-7に示すように河川の自然再生のために落差工が撤去されている。一方、後者では水不足に悩まされ続けた沖縄島全体の利水に影響するため、撤去に当たっては渇水時にも給水制限が発生しないことが条件となる。

このため、評価は落差工などの治水施設の撤去段階、取水堰などの利水施設の撤去段階の2段階で行うこととする。



図3-7 奥川事前再生事業における第2 落差工の撤去

左：撤去前 右：撤去後

3.3 在来魚に着目した自然再生優先度

前述の既往研究成果⁸⁾に地形情報も加味した上で、図 3-4 に示した沖縄島全二級水系の本流を対象とし、在来種と外来種の出現魚類種数のデータを用い、河川の類型化および課題の整理を行った。

川の本래の姿に関する情報が殆どないことから、昔から大きく変化していないと考えられる地形や地質等の物理的情報を基に河川を類型化し、その上で、現状の河川水質および横断構造物調査結果等を用いて、在来・外来魚種の生息状況を評価し自然再生の優先順位を検討した。

3.3.1 地形・地質情報による河川の類型化

(1) 類型化のための変数設定

河川の姿を表す変数の内、経年変化が少ないと考えられるものとして、流域面積、河川延長、標高差、河川縦断形状、表層地質を選出した。

a) 流域面積、河川延長、標高差

流量に関する過去の情報が得られないこと、現在においても連続的にデータを取得している河川が少ないことより、代用として流域面積を用いた。河川の規模を表す変数として流域面積、河川延長を用いた。また、標高差とは図 3-8 に示すように河川最上流端と河口の標高差を意味し、国土基盤地図情報 10m メッシュデータより算出した。

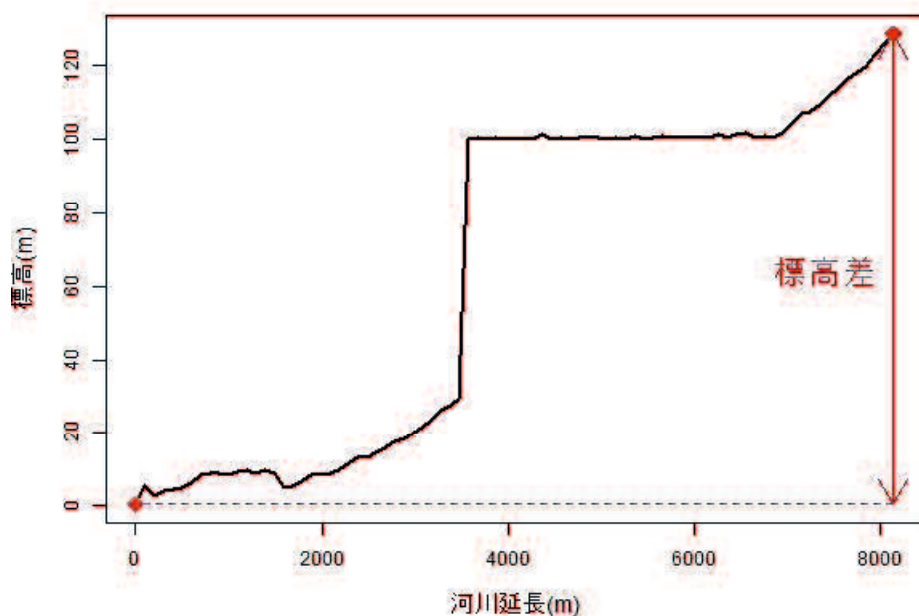


図 3-8 標高差の例（安波川）

b) 河川縦断形状

宮良ら⁸⁾は沖縄島の河川は下流まで急勾配であったが、落差工等の設置により流速低下・細粒土砂の堆積がもたらされたことを示し、緩い流れを好み砂泥底に巣穴を作って繁殖するような外来種の好適な生息環境が形成されたことを指摘している。このため、河川のどこに急勾配区間があるかということが、在来種と外来種の生息に影響を及ぼすと考えられるが、平均河床勾配では表現できない。そこで本研究では、経済学において不平等度を表す指標として用いられるジニ係数を援用し、次式のように河川縦断形状を表す変数を設定した。

$$J = 2 \left[0.5 - \sum_{i=1}^k \{ (y_{i-1} + y_i) \times (1 \div k) \div 2 \} \right] \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad \dots (1)$$

ここで、 J はジニ係数、 y_i は地点*i*と河口の標高差を全体の標高差で除した値、 k は河川を100mごとに区切った時の数である。この結果の例を図3-9に示す。ジニ係数は-1～+1の値をとり、比謝川のように一定の勾配の場合は0に近い値を示し、上流側が緩やかで中流及び河口で急勾配になる新川川のような場合は負の値を示し、上流側で急勾配でありその後緩やかな勾配の屋部川のような場合は正の値を示す。この指標を用いることにより、外来種の生息環境に関係すると考えられる河床の縦断形状を考慮できると考えられる。

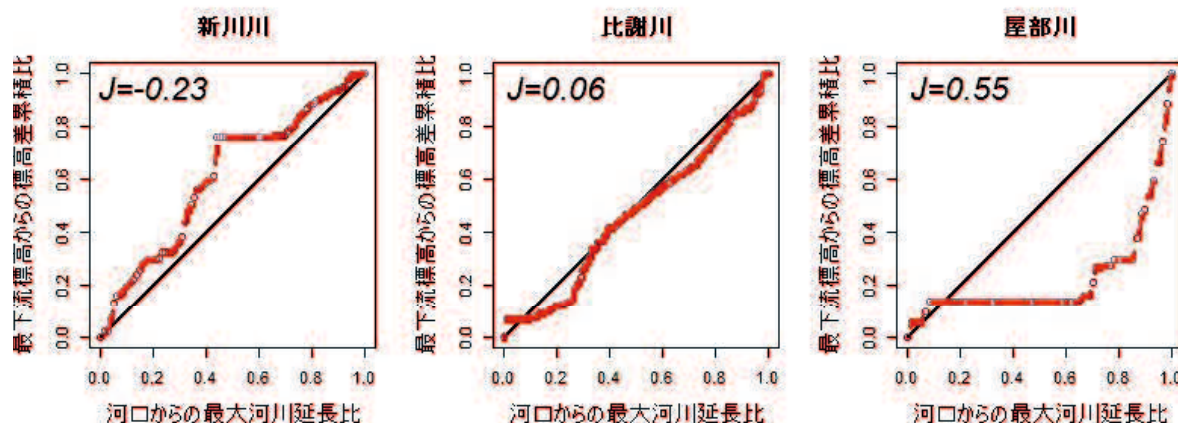


図 3-9 河川縦断形状とジニ係数の関係の例

c) 表層地質

沖縄の河川で大繁殖している外来魚種のカワスズメ類やマダラロリカリアは、河床や河岸の堆積土砂に巣穴を作って繁殖する⁹⁾。このため流域から粘土質の国頭マーヅ及び島尻マーヅ流出が課題となる。どちらも粘赤土等問題として取り上げられるほど流出しやすい土壌である。ここでは、20万分の1シームレス土地保全図を用いて、各河川流域における面積率を算出した。図3-10に示すように、国頭マーヅは北部地域で卓越し、島尻マーヅは中南部で卓越している。

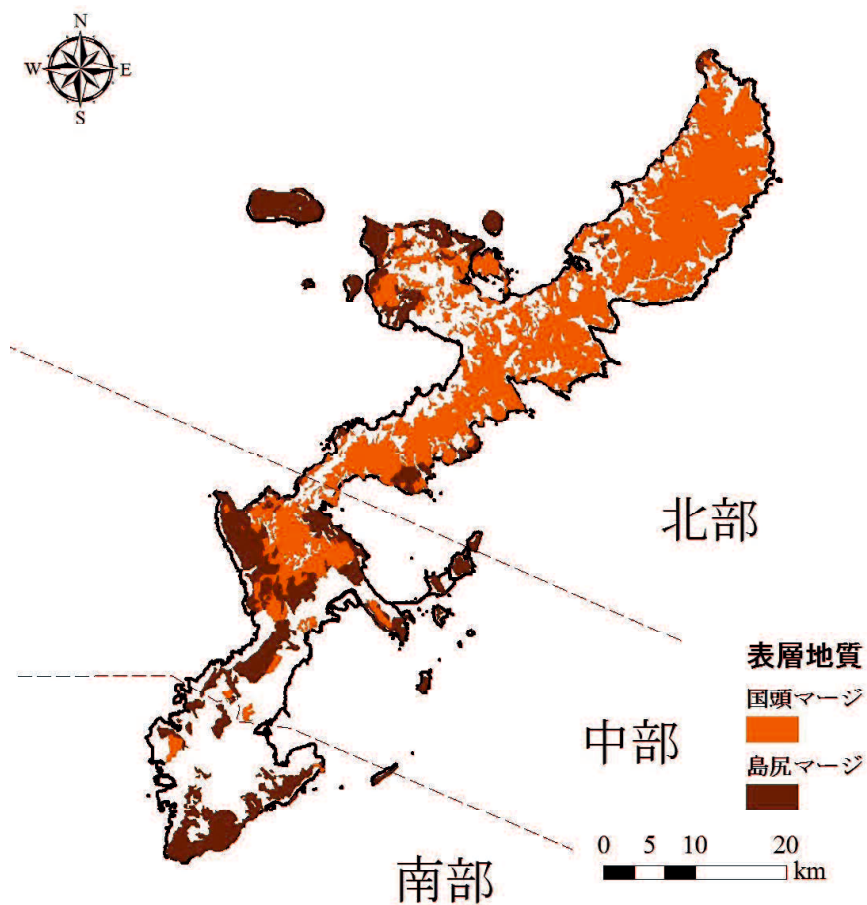


図 3-10 沖縄島における表層地質の分布

(2) 類型化と考察

前項で設定した6変数を用いて河川の類型化を行った。この時、河川延長と流域面積のように相関関係が強いと考えられる変数を用いているため偏った類型化を行ってしまう可能性がある。そこで主成分分析を用いて独立な変数に集約した。この結果を表3-2に示す。ここでは固有値1以上の第三主成分までで累積寄与率が8割を超えていることから、この3つの主成分を取り上げることとした。第一主成分は地質的特性を表し、第二主成分は河川規模を表し、第三主成分はジニ係数で表される河川縦断形状を表している。これら3つの固有ベクトルに対する各河川の主成分得点を用いてクラスター分析を行い類型化した。なお、類似度はユークリッド距離で定義し、ウォード法を用いた。これにより、4つのグループに分類された。各グループの特性を表3-3及び図3-11に示す。また、これらのグループの分布状況を図3-12に示す。各グループの相対的特性として、グループ1は標高差が小さく比較的緩やかな島尻マージ土壌の河川、グループ2は河川規模が大きく一定勾配の河川、グループ3は上流が急勾配な小規模河川、グループ4は下流が急勾配な国頭マージ土壌の極めて小規模な河川である。またこれらの内、グループ3及び4は北部地域にのみ分布する

表 3-2 主成分分析の結果

変数	第一主成分	第二主成分	第三主成分
流域面積	0.70	-1.27	0.02
河川縦断形状	0.36	0.15	-1.51
河川延長	0.68	-1.37	0.07
標高差	-0.73	-0.98	-0.37
国頭マージ	-1.30	-0.65	0.07
島尻マージ	1.35	0.16	0.22
固有値	2.067	1.982	1.001
寄与率	34.5	33.0	16.7
累積寄与率	34.5	67.5	84.2

表 3-3 地形・地質情報による類型別平均値

	グループ			
	1	2	3	4
流域面積 (km ²)	11.2	36.6	11.8	8.7
河川縦断形状	0.28	0.15	0.42	-0.14
河川延長(m)	5831.9	12056.2	5819.9	4780.8
標高差 (m)	62.1	111.8	143.2	95.4
島尻マージ (%)	21.7	15.0	0.3	1.6
国頭マージ (%)	14.3	53.1	68.9	75.1

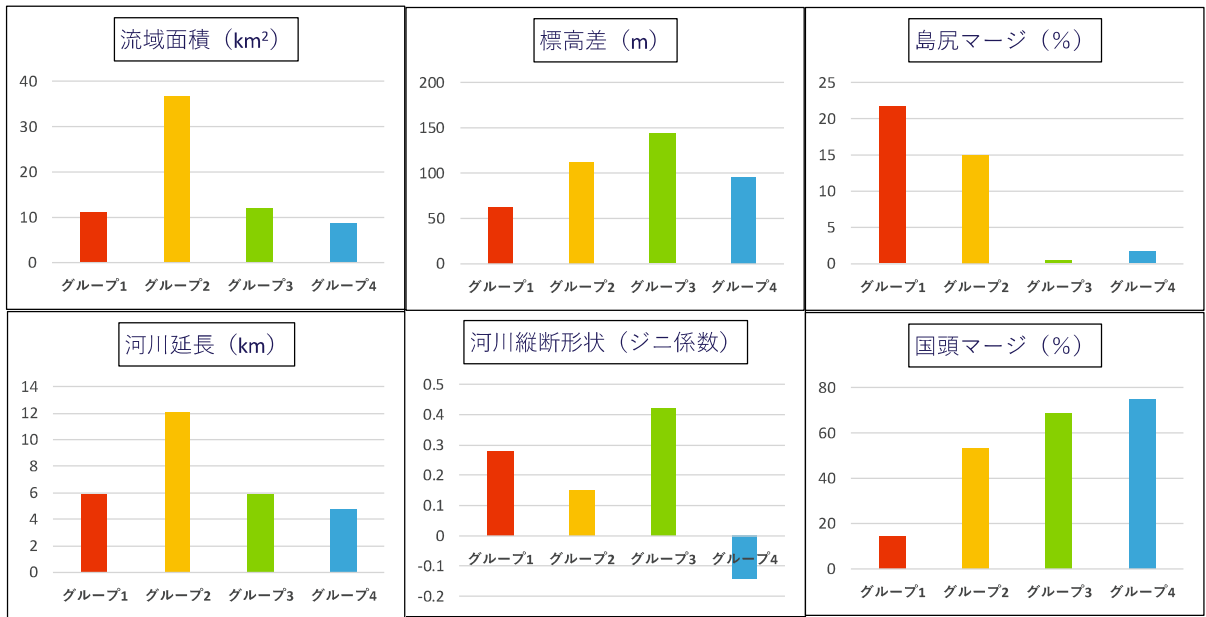


図 3-11 地形・地質情報による類型別平均値

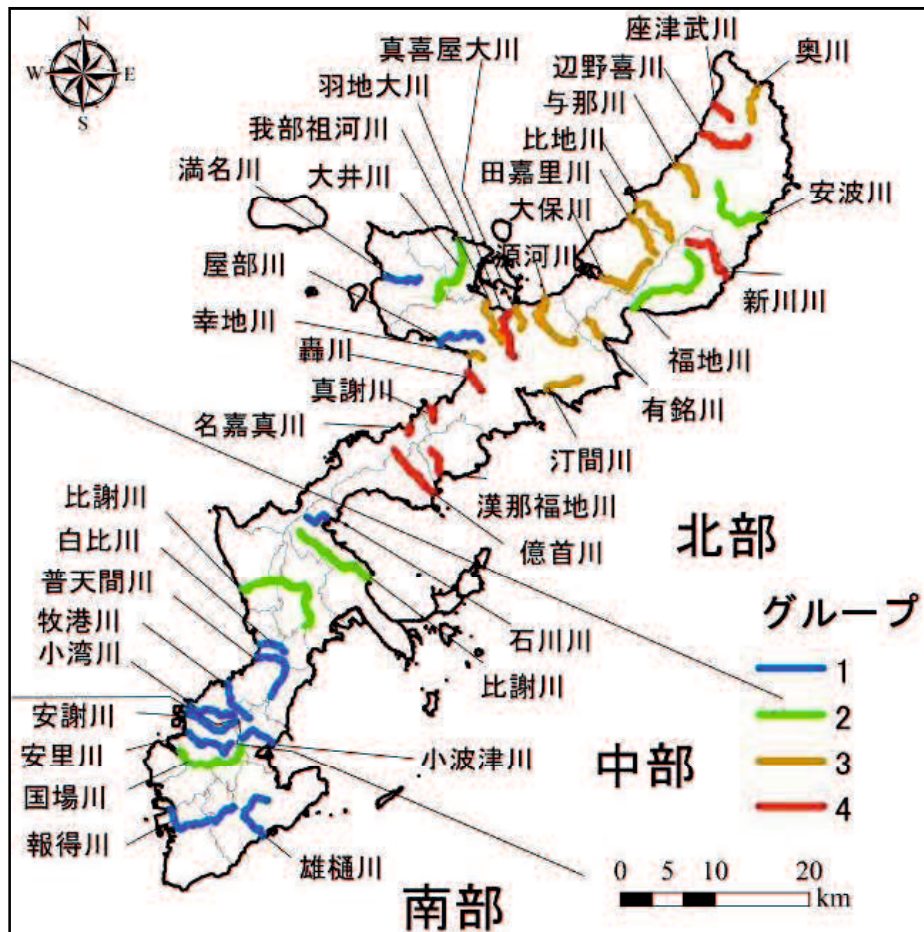


図 3-12 地形・地質グループの分布状況

3.3.2 水質情報による河川の類型化

河川管理の一環として水質を全管理河川で継続監視することが望ましいが、沖縄島では公共用水域の水質監視として一部の河川でしか水質観測が実施されていない。このため、精度を統一するために新たに現地水質調査および室内分析を実施した。調査地点は潮汐の影響が少なく、最大限汚濁負荷がとらえられるよう河川淡水区間最下流を原則とした（図 3-12）。また、出水の影響を考慮し、快晴が続いていた 2014 年 7 月 24 日及び 25 日に実施した。調査を行った水質項目は、魚類等の鰓呼吸を阻害し、或いは藻類食魚類の栄養摂取に影響を及ぼす濁りの指標としての濁度、酸素呼吸そのものの指標としての溶存酸素（DO）、血中酸素に影響を及ぼすアンモニアや硝酸などの相対的濃度指標としての総窒素（T-N）及び総リン（T-P）とした。前二者は現地観測機器（東亜ディーケーケー社製多項目水質計 WQC-24）を用い、現地観測を行った。後者は実験室において化学分析を行った。

水質調査の結果の内、濁度を図 3-13、T-N を図 3-14 に示す。濁度が高い河川は北部・中部・南部いずれにも存在するが、T-N は人口が少ない北部から人口密度が高く都市化が進行している南部に行くに従って高くなっている。

現地調査および室内分析によって得られた 4 指標を標準化し、クラスター分析を用いて河川の類型化を行った。類似度の距離を考慮し、大きく 2 つに類型化された。各水質項目の平均値を表 3-4 及び図 3-15 に示す。また、グループの分布状況を図 3-16 に示す。これより、水質Ⅰは水質Ⅱに比べて DO が小さく、濁度・T-N・T-P が大きいことから、相対的に水質Ⅰは水質の悪いグループであり、水質Ⅲは水質の良いグループである。また、水質Ⅱグループは主に北部地域に、水質Ⅰグループは主に中南部地域に分布する。

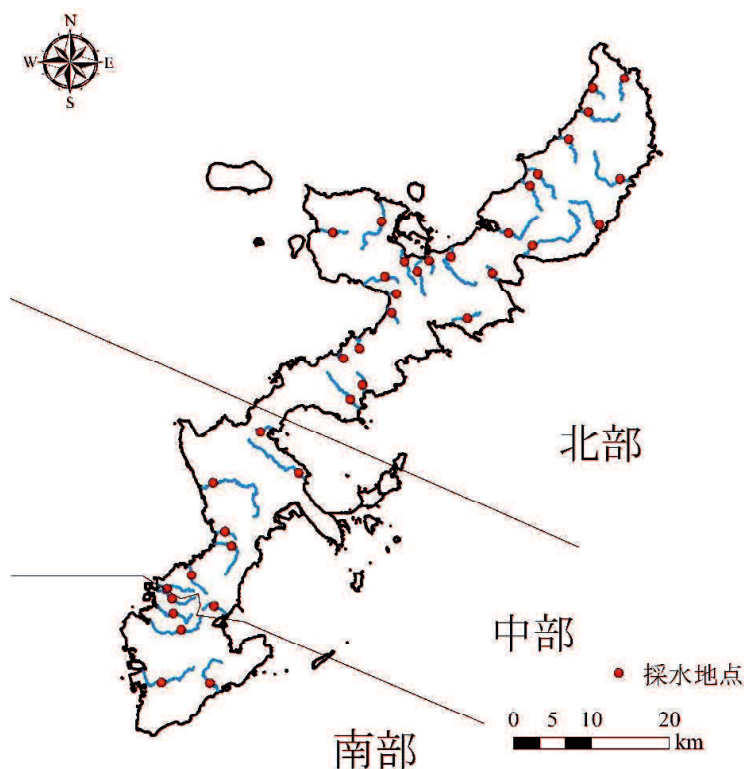


図 3-12 水質調査の地点

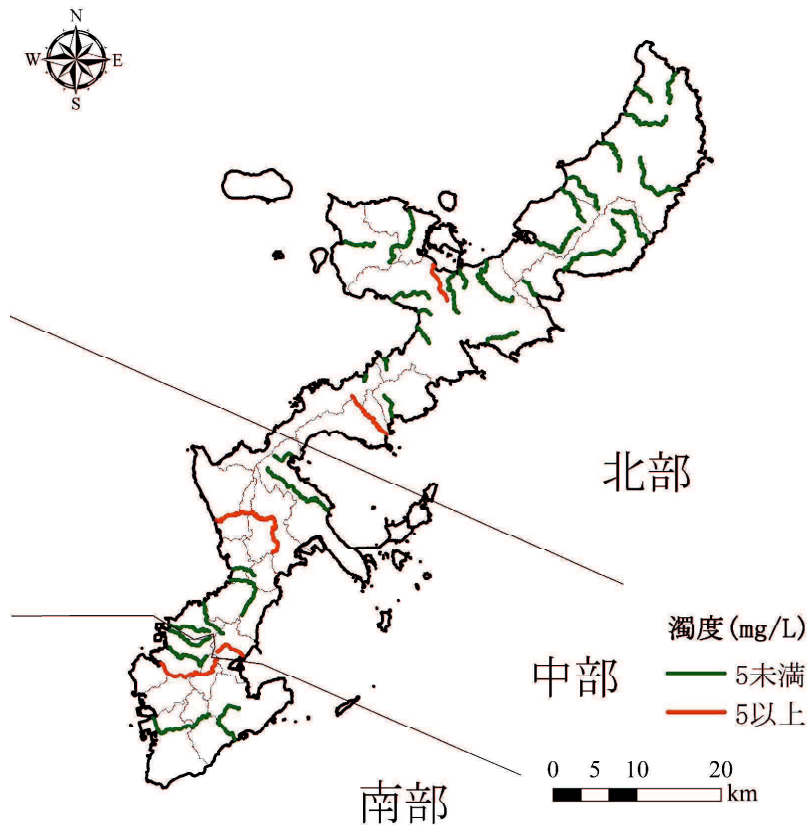


図 3-13 濁度の調査結果

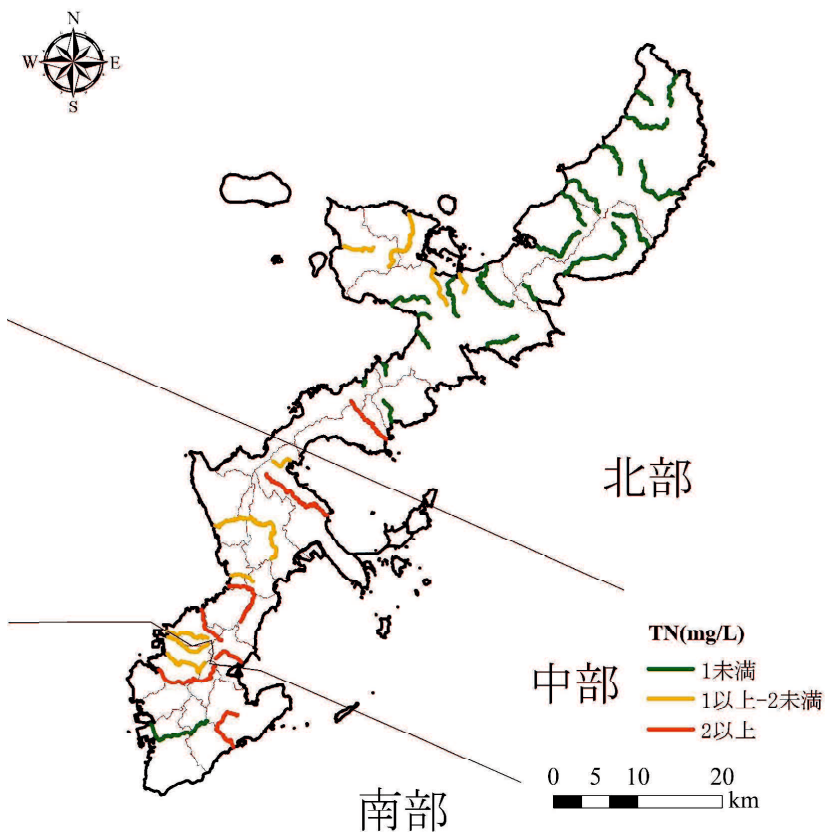


図 3-14 T-N の調査結果

表 3-4 類型別河川水質の平均値と標準偏差

調査項目	水質 I	水質 II
DO(mg/L)	6.99 (2.60)	8.53 (1.81)
濁度(mg/L)	5.05 (6.46)	0.37 (1.14)
T-N (mg/L)	2.04 (1.01)	0.64 (0.74)
T-P (mg/L)	0.20 (0.15)	0.01 (0.02)

※ () 内は標準偏差

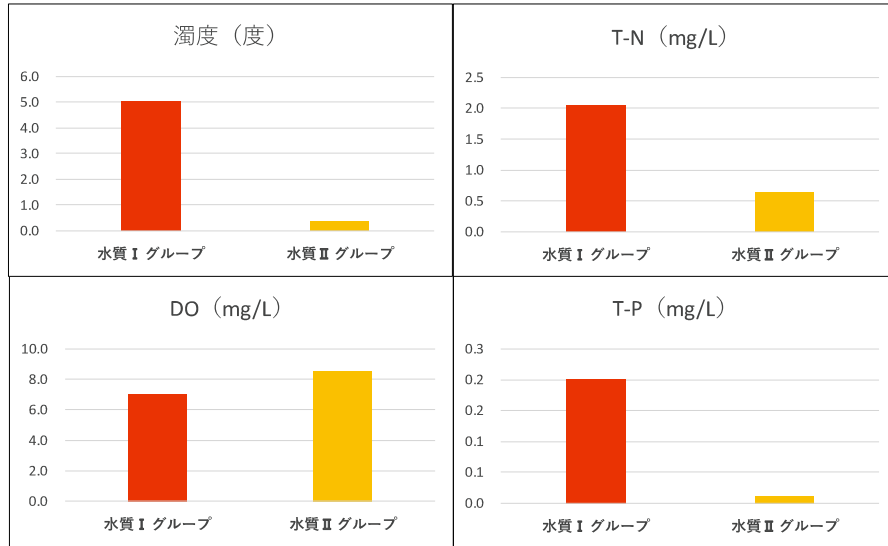


表 3-15 類型別河川水質の平均値

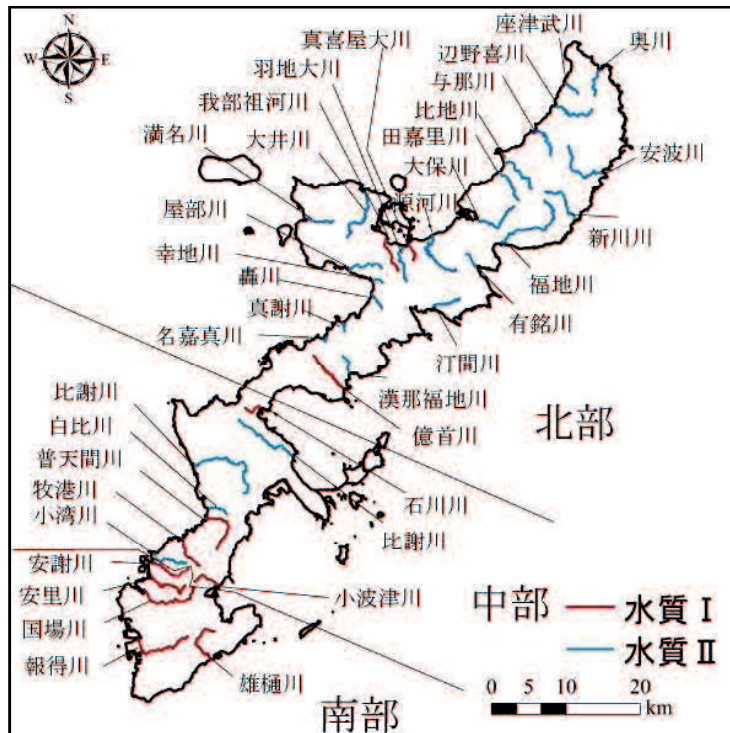


図 3-16 水質グループの分布状況

3.3.3 河川の類型と出現魚類種との関係

沖縄島全河川純淡水区間における嶋津の魚類調査結果³⁾の内、本研究の対象河川内で確認され、河川構造の健全性を検討する上で有用な魚種の出現とこれまでの類型化との関係について考察する。

嶋津の調査³⁾では、沖縄島の全河川純淡水区間における原則として目視観察による魚類調査を行っており、外来種は19分類（不明種2種を除く）、在来種は周縁性魚類も含めて41分類を確認したとしている。ただし、環境省レッドリスト¹⁰⁾、沖縄県レッドデータブック¹¹⁾、水産庁レッドリスト¹²⁾掲載の絶滅危惧種14分類の分布河川情報は伏せられている。これらの出現魚類の一部は、その生態情報から河川構造の課題性や健全性を検討可能なため、自然再生の必要性について優先性を求めることに利用可能である。なお、嶋津の調査は原則として目視観察によるものなので、種として確定できていないものも含むため、分類と表現しているが、以後の議論を平易にするため、以後は分類を種と言い換えて論を進める。

本研究の対象河川に出現するもののうち、利用可能と考えられる魚類の抽出結果を表3-5に示す。表中、外来種8分類は、池沼、湖沼、流れの緩い河川下流で生息する魚類である。また、一部は、砂泥等に巣穴を作って繁殖する^{5),9)}。先述したように沖縄島の河川は本来急勾配区間が直接海に注ぎ、下流淡水区間は極めて短く、カワスズメ属を除く外来種は塩分耐性が低いため、出水時に流された先の感潮区間での生存は困難であり、元来の急勾配河川の下では、これらの外来種は定着しづらかったものと考えられる。このため、カワスズメ属を除く外来種は、河道拡幅や落差工による河床勾配修正によって発生する流速低下によって定着しやすくなったものと考えられる。また、カワスズメ属については、ギンガメアジ、ゴマフエダイ、コトヒキなどの肉食性の周縁性種在来種に稚魚が捕食されるので、河川横断構造物による周縁性の在来種の河川への侵入阻害はカワスズメ属の定着を助長するとされている⁹⁾。在来種27分類は、海と川を行き来して生活する両側回遊性種・降河回遊性種、また、海域・汽水域で生息しながら淡水域に侵入する周縁性種からなる。従って、これらの出現種数が多いほど、河口から純淡水区間の確認地点まで、河口閉塞、河川横断構造物、瀬切れ・無水区間などの遡上障害が少ないものと考えられる。

表 3-5 河川構造の健全性を検討するために嶋津³⁾から抽出された魚類

外来種	在来種		
コイ	イセゴイ	クロダイ属	ボウズハゼ
ヒレナマズ属	ミズン	スズメダイ科	ヨシノボリ属
セルフィンプレコ属	カマス属	コトヒキ	ミナミハゼ属
インディアングラフィッシュ	ヨウジウオ科	ユゴイ	ナガノゴリ
	ボラ科	オオクチユゴイ	ツムギハゼ
オオクチバス	ギンガメアジ科	ギンユゴイ	その他のハゼ科
ブルーギル	タカサゴイシモチ属	トビハゼ属	クロホシマンジュウダイ
カワスズメ属	テンジクダイ科	カワアナゴ属	アイゴ属
コウタイ	ゴマフエダイ	ナニヨウボウズハゼ属	オキナワフグ

(1) 地形・地質と出現魚類種数

地形・地質情報によって類型化された河川と出現魚類種数との関係を図 3-17 に示す。

類型化された河川と出現魚類種数との関係では、グループ 1 と 2 で外来種が多く、特にグループ 2 では平均 5.7 種が出現している。一方、在来種では、グループ 3 が平均で 10.2 種と最も多くなっている。つまり、河川規模が大きく一定勾配の河川、および河川の勾配が緩やかな河川において外来種が生息しやすいことを示している。また同時に小規模・急勾配河川において在来種数が多くなる傾向を示している。なお、下流が急勾配になっているグループ 4 の在来種数の平均が小さくなっているが、在来種の割合はグループ 3 と同様に約 7.5% である。つまり、河川規模が極めて小さいことにより、そもそも生息できる種数が限られていると考えられる。

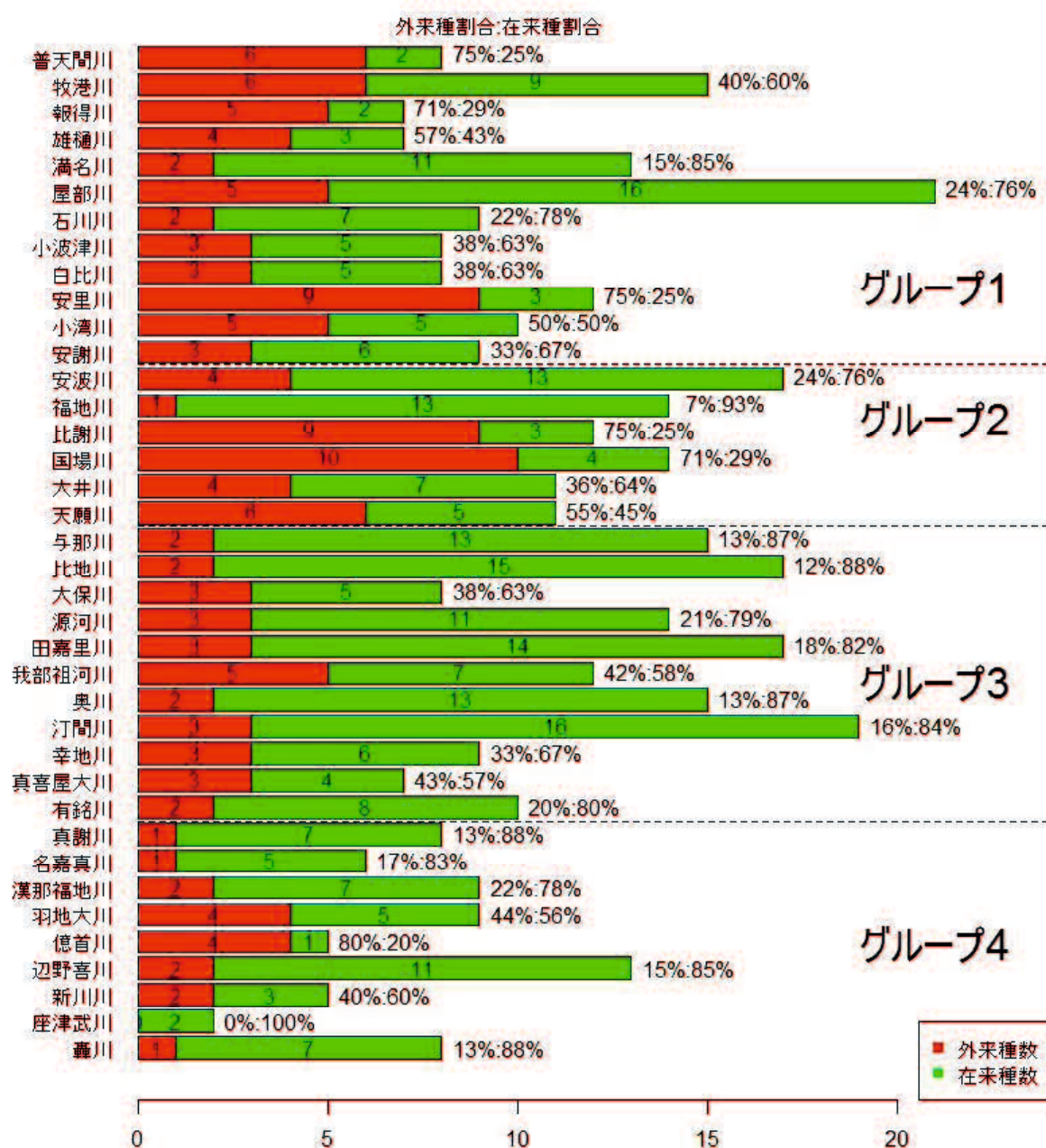


図 3-17 地形・地質による河川類型化と出現魚類種の関係

(2) 水質と出現魚類種数

水質によって類型化された河川と出現魚類種数との関係を図 3-18 に示す。

平均在来種数では、水質グループIIが 8.7 種であるのに対し、水質グループIでは 4.4 種である。平均外来種数では、水質グループIIが 2.9 種であるのに対し、水質グループIでは 5.0 種となっている。これらより、水質が悪いことは在来魚種にとっては生息しにくく、外来魚種が多くなる原因の 1 つとなっているものと考えられる。このことは、河川の汚濁が汚濁耐性の高い外来魚種¹³⁾の生息に有利に働き、在来魚種の生息空間が制限された結果、在来種個体への直接的、間接的作用にかかわらず、在来魚種は駆逐される¹⁴⁾といわれていることから理解できる。

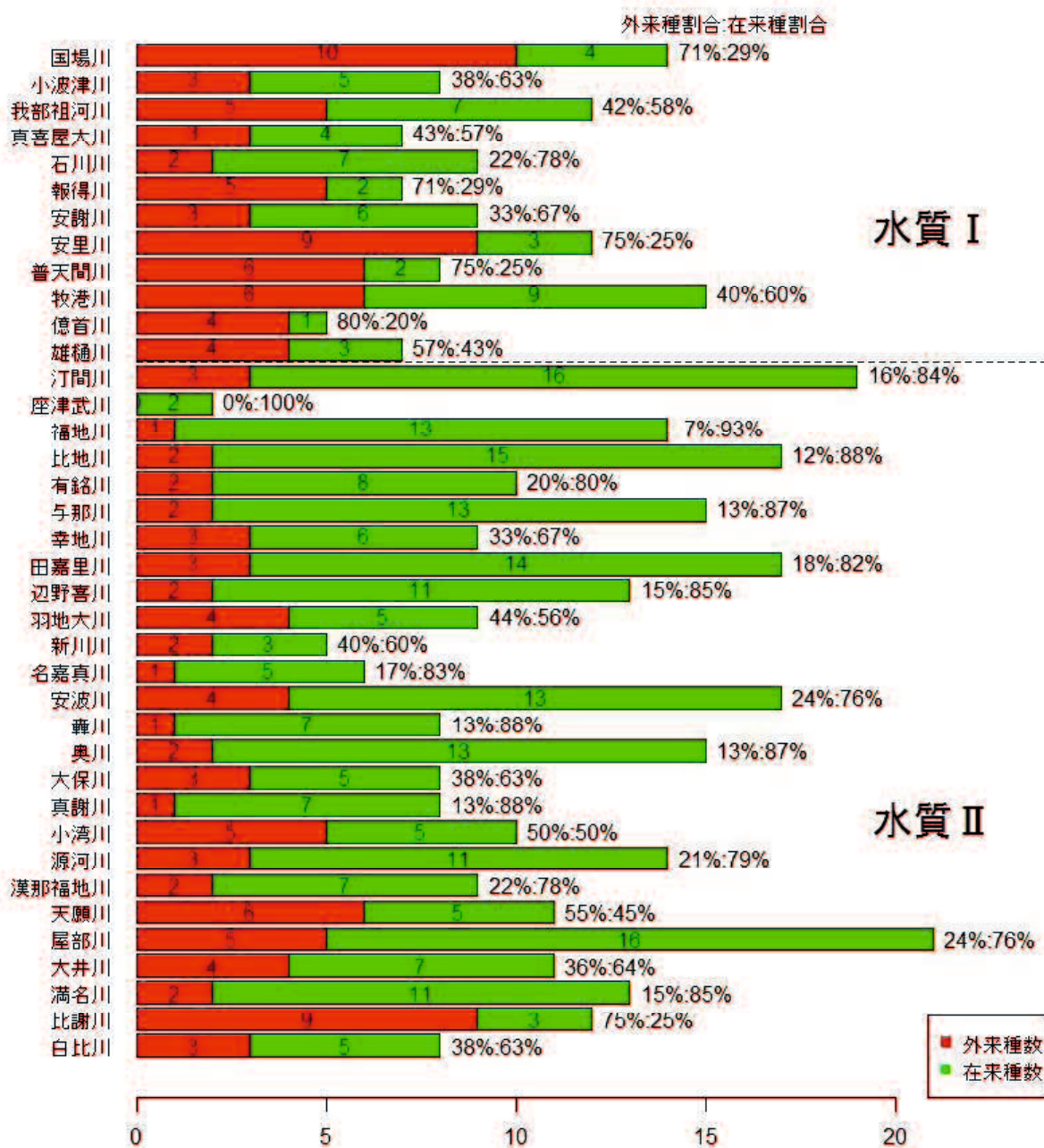


図 3-18 水質による河川類型化と出現魚類種の関係

(3) 地形・地質及び水質と出現魚類種数

地形・地質及び水質と出現魚類種数をまとめると図 3-19 に示すとおりである。

地形・地質条件から河川規模が大きい、また河川縦断勾配は一定或いは小さい場合（グループ 1 及び 2）に外来魚が多く、河川規模が小さい、また河川縦断勾配が大きい場合（グループ 3 及び 4）に在来魚が多くなる傾向にある。なお、グループ 1 の平均在来種割合はグループ 4 のそれを若干上回るが、在来種の割合は 4 が大きい。これは、急勾配河川では外来種が生息しにくいことを表している。

水質グループと出現魚類の関係では、平均在来種数は水質が良い水質Ⅱで水質が悪い水質Ⅰの 2 倍程度出現し、平均外来種数は概ねその逆の傾向にあることから、水質が悪い場合は、耐性の高い外来魚が多くなることを表している。

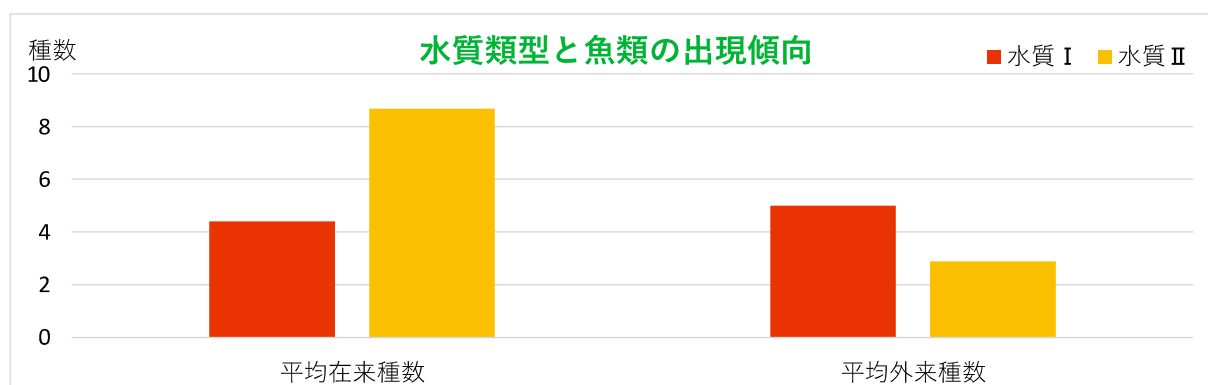
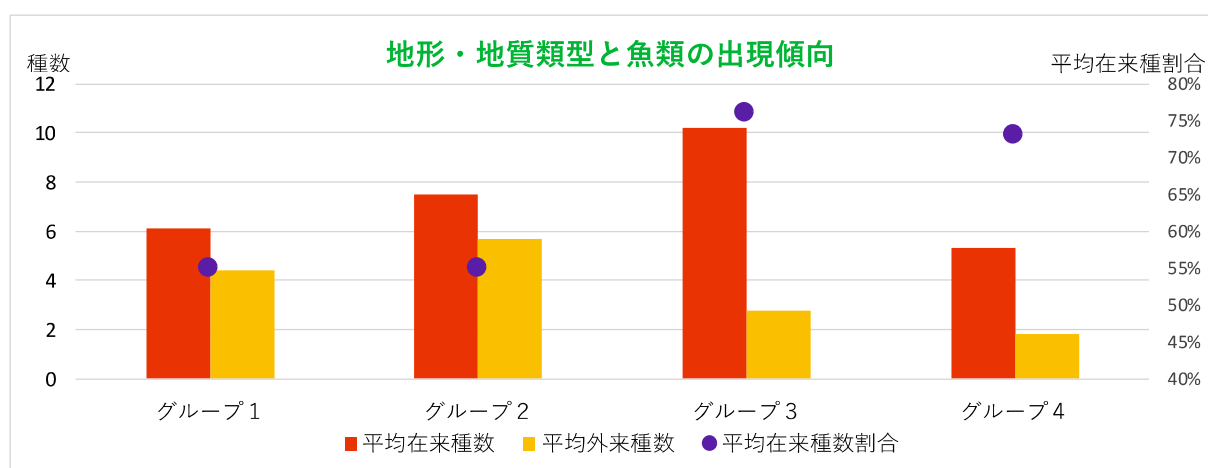


図 3-19 地形・地質グループ及び水質グループと出現魚類種の関係のまとめ

3.3.4 河川横断構造物と外来種との関係

河川横断構造物と外来種定着との関係を把握するため、水質グループⅠと水質グループⅡにおいて考察を行った。

対象河川を現地踏査することによりダム・砂防ダム・堰・落差工の設置状況を調査した。この結果を図 3-20 に示す。なお、米軍基地内については調査できていない。

表 3-4 において水質が良いと類型化された水質Ⅱの河川を対象として、地形・地質による類型化の 4 つのグループ毎に、横断構造物と外来種数の関係を図 3-21 に示す。なお、河川延長の約半分が基地内を通る比謝川は除いて図示している。グループ 1 と 2 においては関係が不明瞭であり、グループ 3 においては河川横断構造物設置と外来魚種の定着は無関係であることがわかる。グループ 4 では図中の式で表されるように、横断構造物の増加に伴い外来魚種数が増加していることがわかる。つまり、下流が急勾配になっている河川は外来種にとって棲みにくい環境であったが、堰等の横断構造物を設置することで、生息しやすい環境を作り上げたことによるものと考えられる。

沖縄島の中央付近に位置する億首川は、地形・地質による類型化の結果ではグループ 4 の下流が急勾配で外来魚種が定着しにくいグループに属する。しかしながら、実態は外来種数：在来種数＝80%：20%となっており、外来種数比率が圧倒的に高い。同時に、億首川は水質が悪い水質グループ 1 にも属する。

図 3-22 に億首川の河川縦断形状にダムサイトとそのサーチャージ水位を示す。水質が悪いことも一因と考えられるが、さらにこの河川は、感潮区間直上流にダムが建設されている。本来の淡水区間は勾配がある河川であったが、ダム建設により流れが緩やかなになっている。このことが急流よりも緩流を好む外来魚種^{5),14)}の好適な生息環境を作っていると考えられる。このため、河川横断構造物は、水質だけでなく河川縦断形状からみても外来種にとって好適な生息環境を作り上げることになったものと考えられる。

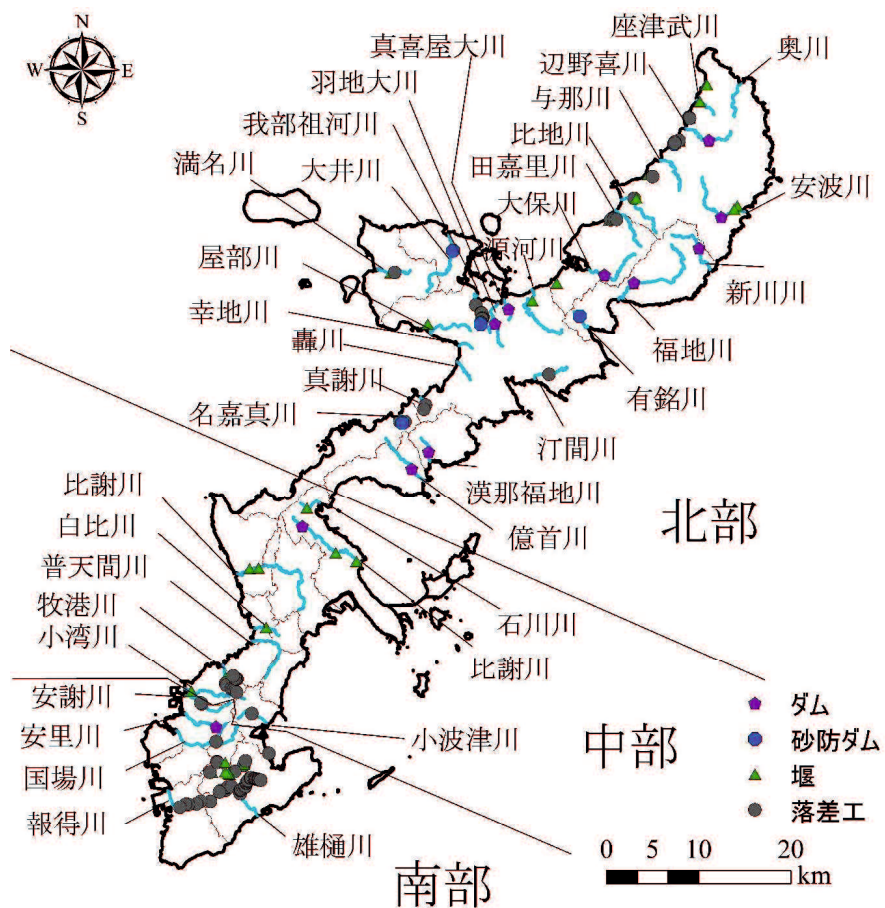


図 3-20 沖縄島の二級河川における河川横断構造物の分布

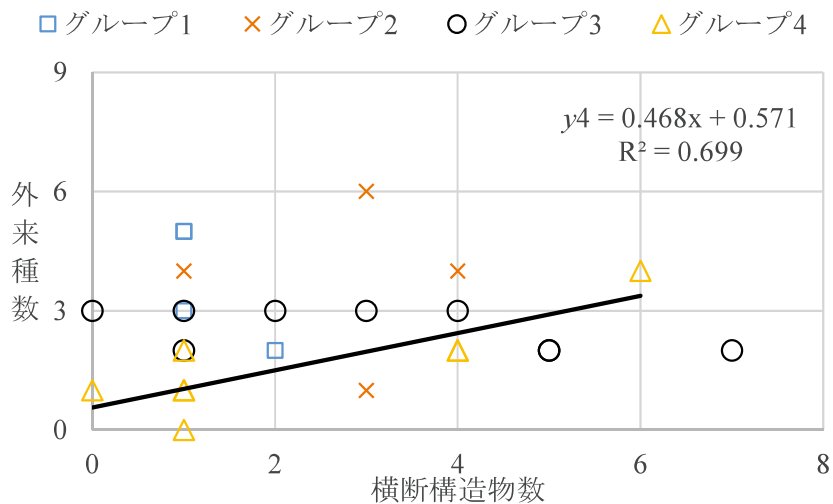


図 3-21 沖縄島の二級河川における河川横断構造物の分布

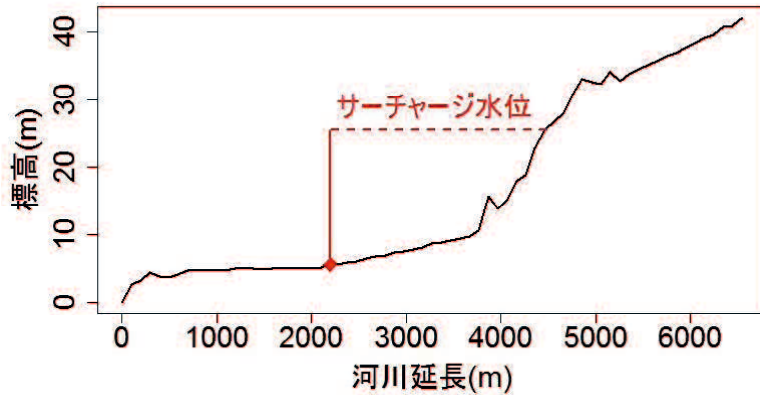


図 3-22 億首川の縦断形状とダムによる急流淡水区間の変化

3.3.5 在来魚に着目した自然再生優先度の高い河川

以上の検討結果から、在来種が多く外来種が少ない河川とは、地形・地質による類型化でグループ3および4の河川であり、かつ水質が相対的に良好な河川であると考えることができる。これに該当する河川を図3-23に示す。これらの河川が潜在的に外来種にとって生息しにくく、水質環境から見ても在来種にとって望ましい河川であると考えることができる。なお、水質が悪い河川においては、生活排水等々の影響による水質悪化の改善が優先されるものと考えられる。

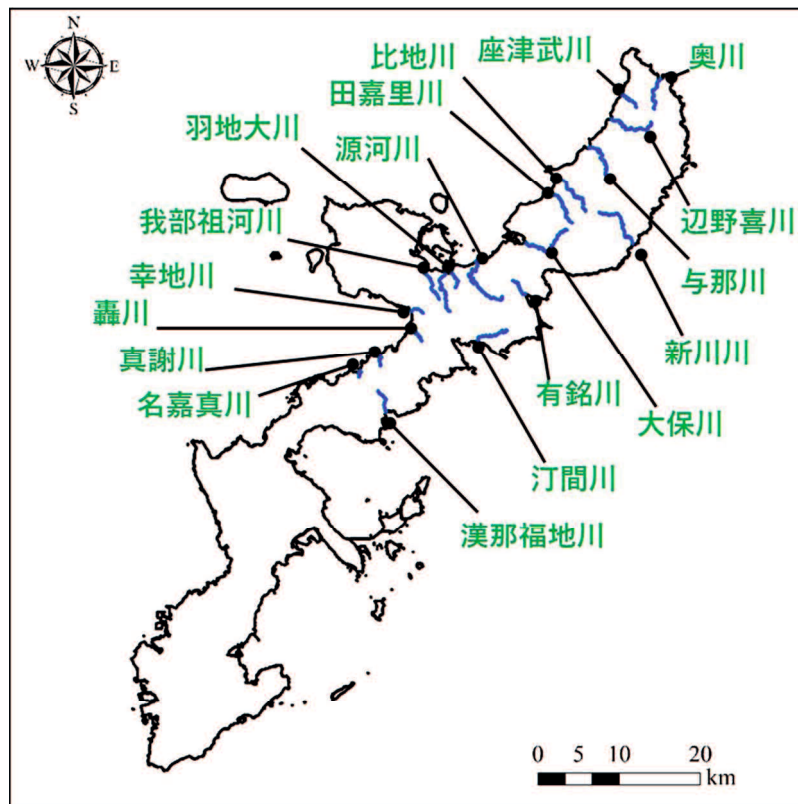


図 3-23 在来種に着目した自然再生優先度が高い河川

3.4 リュウキュウアユに着目した自然再生優先度

3.4.1 リュウキュウアユの絶滅要因と過去の分布

リュウキュウアユは現在、奄美大島のみ自然分布するアユの亜種である。過去には沖縄島にも生息していたが、1978年以降確認されていない¹²⁾。現在、沖縄島には、奄美大島から運ばれてきた個体群が、ダム湖及びその流入河川に陸封化されて生息している。沖縄島におけるリュウキュウアユ絶滅の原因については特定されていないが、河川改修やダム建設等による瀬淵構造の喪失^{14),15)}、赤土流入による産卵場環境の悪化¹⁵⁾、堰による遡上障害^{3),15)}などが指摘されている。

幸地¹⁵⁾はリュウキュウアユが生息していた河川を整理しており、この結果は図3-24に示すとおりである、沖縄島の北部西海岸の河川に分布していたことがわかる。



図3-24 絶滅前のリュウキュウアユの分布河川¹⁵⁾

3.4.2 リュウキュウアユ定着ポテンシャルモデルの検討

(1) 分析対象河川と生息ポテンシャルに関する指標

リュウキュウアユは現在の二級河川だけでなく、普通河川にも生息していたことが確認されている¹⁵⁾。このため、ポテンシャル評価モデル作成には、沖縄島二級河川で最も短い1,072m以上の全ての河川を対象とした。

河川環境を表す変数の内、流域面積、河川延長、標高差、河川縦断形状、平均河床勾配、内湾度といった経年変化が小さいと考えられる物理特性を取り上げ、リュウキュウアユの生息ポテンシャルの評価を試みた。以下に、各変数を概説する。

a) 流域面積・河川延長・標高差

リュウキュウアユは中層遊泳魚であり、また夏季の高温化に脆弱であることから、流量は重要な要因であるが、対象河川における経年的な観測が殆ど行われていない。このため、代理指標として流域面積および河川延長を用いた。標高差は図3-25に示すように河川最上流端と河口の標高差を意味し、国土基盤地図情報10mメッシュデータより算出した。

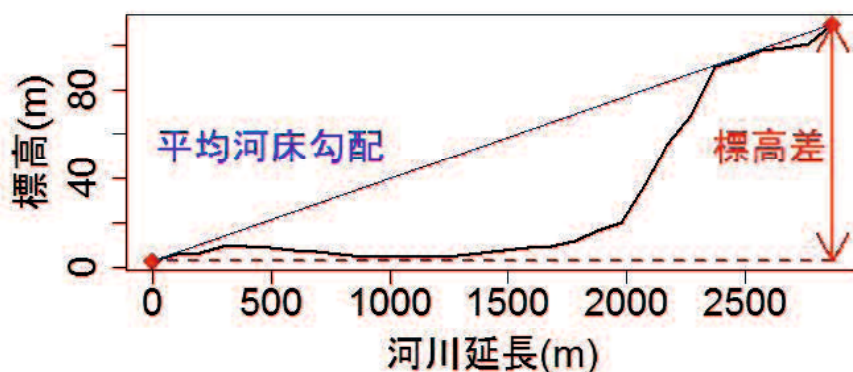


図3-25 河川延長と標高差

b) 平均河床勾配・河川縦断形状

河川の縦断質を表す指標として河床勾配がある。その代表的なものとして図3-20に示す平均河床勾配を指標の一つとした。さらに、河床勾配の変化の状況を表す指標として、河川縦断形状を採用した¹⁶⁾。河床勾配の変化の状況は経済学におけるジニ係数を援用することによって表現し、式(1)によって得られる。なお、ここでは河川を河口から100m毎に区切って得られる標高を用いて算出した。

この値を用いることにより、河川の急勾配区間がどこにあるかを表現することが出来る。結果の例を図3-26に示す。

J：河川縦断形状（ジニ係数）

yi：地点iの標高を最上流端の標高で除した値

k：河川を100m毎に区切った時の数

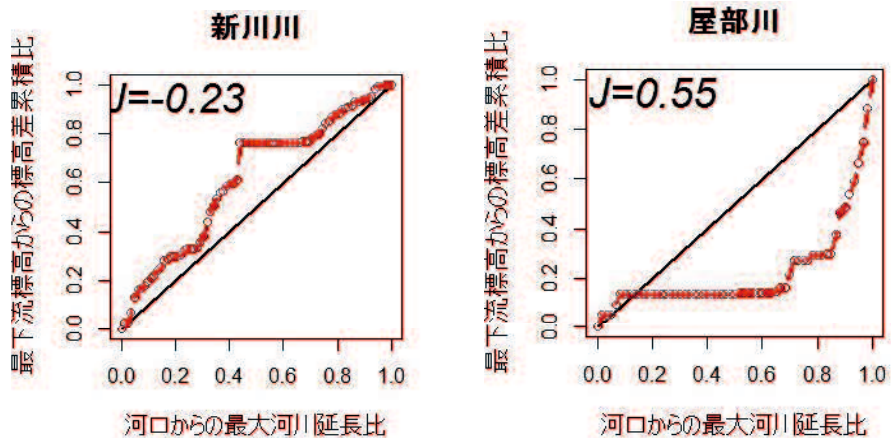
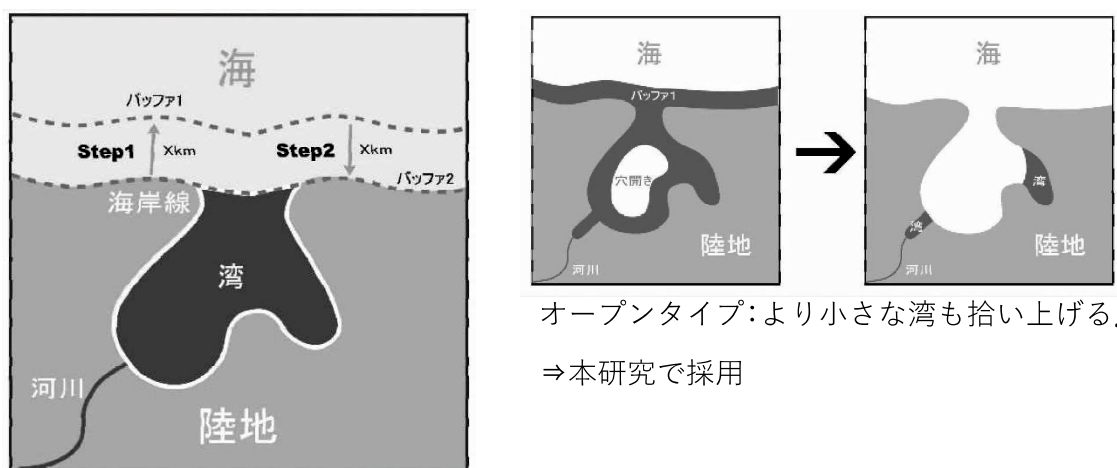


図 3-26 ジニ係数による河川縦断形状の表現例

c) 内湾度

西田ら¹⁷⁾は内湾が発達した河川でリュウキュウアユが生息していたことを指摘している。リュウキュウアユの稚魚は河口付近の浅海底を主な生息場所とする。これは気化熱によって低水温化するとともに、浅海底の海には大型肉食魚が入り込まないためと解釈される。更に湾構造によってプランクトン状態に近い稚魚が、外洋に拡散しないことによるものと考えられる。この指標として荒木田¹⁸⁾による内湾度を採用した。内湾度とは、図 3-27 に示すように海岸線からある距離 (x) を沖に出し、その距離を海岸線に戻した時にできる線の内側の湾面積。面積が大きいほど (距離 x が大きいほど)、波による攪乱が少なく、干潟の形成が進みやすいとされる。

ここでは既往研究で用いられた 5 つのスケール (100m, 300m, 500m, 1km, 3km) を設定し、オープンホイールタイプの湾面積を算出することとした (BO100, BO300, BO500, BO1000, BO3000)。沖縄島における内湾度の適用結果を図 3-28 に示す。



バッファ 2 の内側に形成された面積が「内湾度」。

オープンタイプ: より小さな湾も拾い上げる。
⇒本研究で採用

図 3-27 内湾度の計測方法

注) 荒木田¹⁸⁾から転載

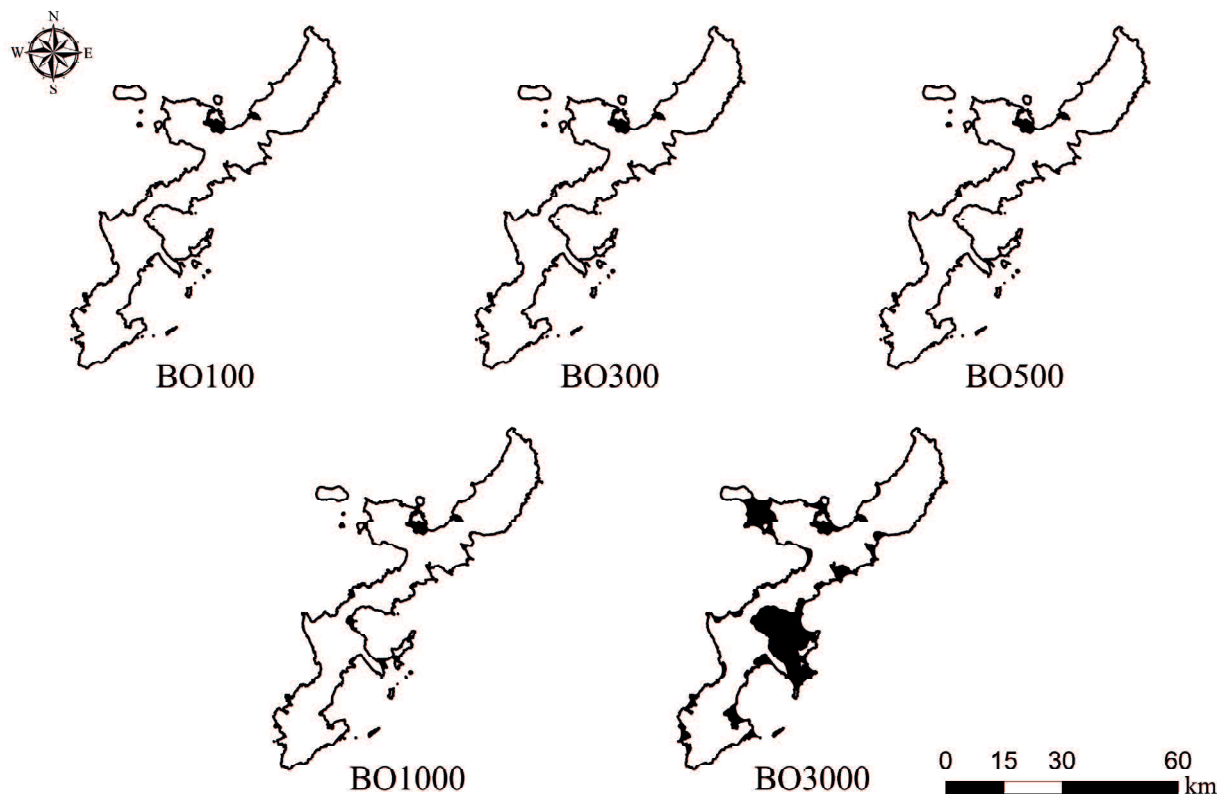


図 3-28 沖縄島における内湾度の適用結果

(2) リュウキュウアユ生息の有無と指標の関係

前述した各指標と図 3-20 のリュウキュウアユ生息の有無の関係を表 3-6 に示す。これより、リュウキュウアユが生息していた河川は相対的に河川規模が大きく、標高差が大きいにも関わらず、平均河床勾配は比較的小さく、河川縦断形状（ジニ係数）が正の値で大きいことから下流側で縦断河床勾配が緩い、また、1,000m以下の内湾度との関係が大きいことが分かる。

表 3-6 リュウキュウアユ生息の有無と指標の関係

指標項目	生息あり		生息なし		
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
河川延長(m)	7,232	2,169	3,258	2,612	
河川縦断形状	0.29	0.20	0.13	0.31	
標高差(m)	157	62	73	54	
平均河床勾配	0.023	0.010	0.029	0.027	
流域面積(m ²)	14,655,803	7,625,653	5,536,772	7,910,321	
内湾度	BO100(m ²)	1,833,890	3,914,124	164,200	1,263,803
	BO300(m ²)	2,073,087	4,270,102	226,255	1,392,790
	BO500(m ²)	2,134,281	4,299,232	309,982	1,418,989
	BO1000(m ²)	2,614,101	5,259,809	726,700	1,832,219
	BO3000(m ²)	12,661,266	15,868,796	25,499,632	56,623,777

(3) リュウキュウアユの定着ポテンシャル

ここでは、リュウキュウアユの生息ポテンシャルについて、外的基準をリュウキュウアユ生息の有無とし、また説明変数を表 3-6 で示した指標として、ロジスティック回帰分析により評価を行った。なお、変数の選択は赤池情報基準（AIC : Akaike's Information Criterion）による総当たり法で行った。

この分析の結果、全ての説明変数の有意水準が 95%以上であった。AIC の値が小さい変数の組み合わせの上位 5 つのモデルを表 3-7 に、最も AIC が小さいベストモデル化の結果を表 3-8 に、図 3-29 にリュウキュウアユの生息と地形情報との関係、図 3-30 にリュウキュウアユの定着ポテンシャルを示す。このモデルの判別中点は 0.30 であり、判別率的中率は 95%である。各変数及びモデルとしても適合度の高いモデルを得ることが出来た。これより、河川延長が長く、標高差があり、内湾が発達した河口を持つ河川においてリュウキュウアユが生息しやすいことがわかる。

表 3-7 AIC が小さいモデル

変数	AIC
河川延長・標高差・BO300	55.66
河川延長・標高差・BO500	55.71
河川延長・標高差・BO100	55.80
河川延長・河川縦断形状・標高差	56.41
河川延長・標高差・BO1000	56.64

表 3-8 ベストモデル化の結果

指標	偏回帰係数	標準偏回帰係数
河川延長(km)	0.3301**	0.2922
標高差(m)	0.0205**	0.3844
BO300 (km ²)	0.2884*	0.17
定数	-6.7674**	-

** : 99%有意, * : 95%有意

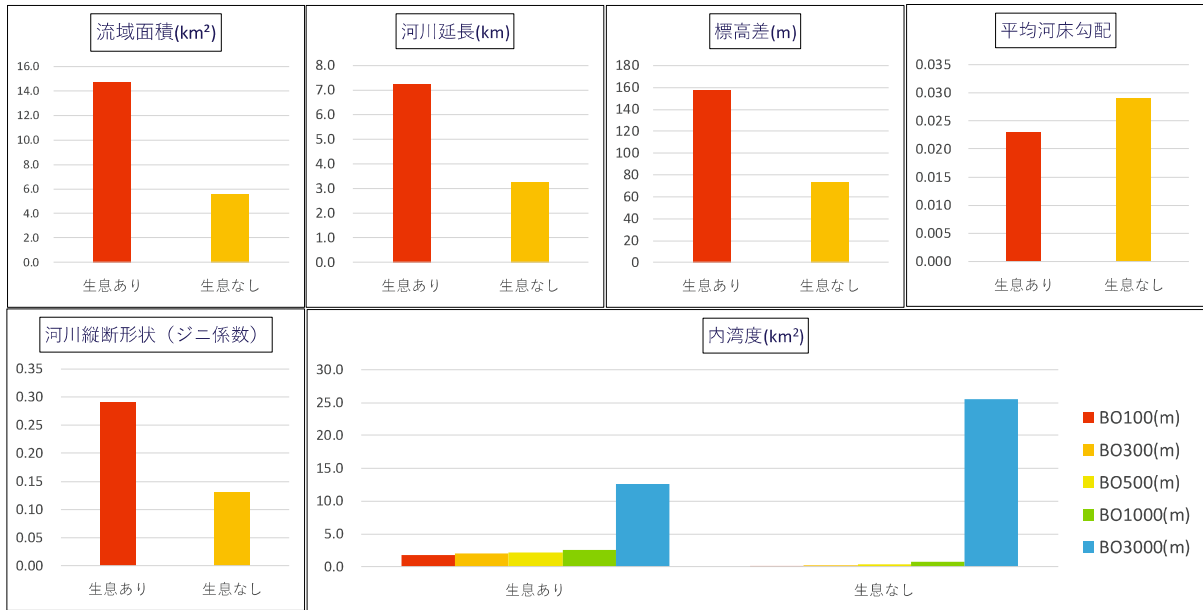


図 3-29 リュウキュウアユの生息と地形情報との関係

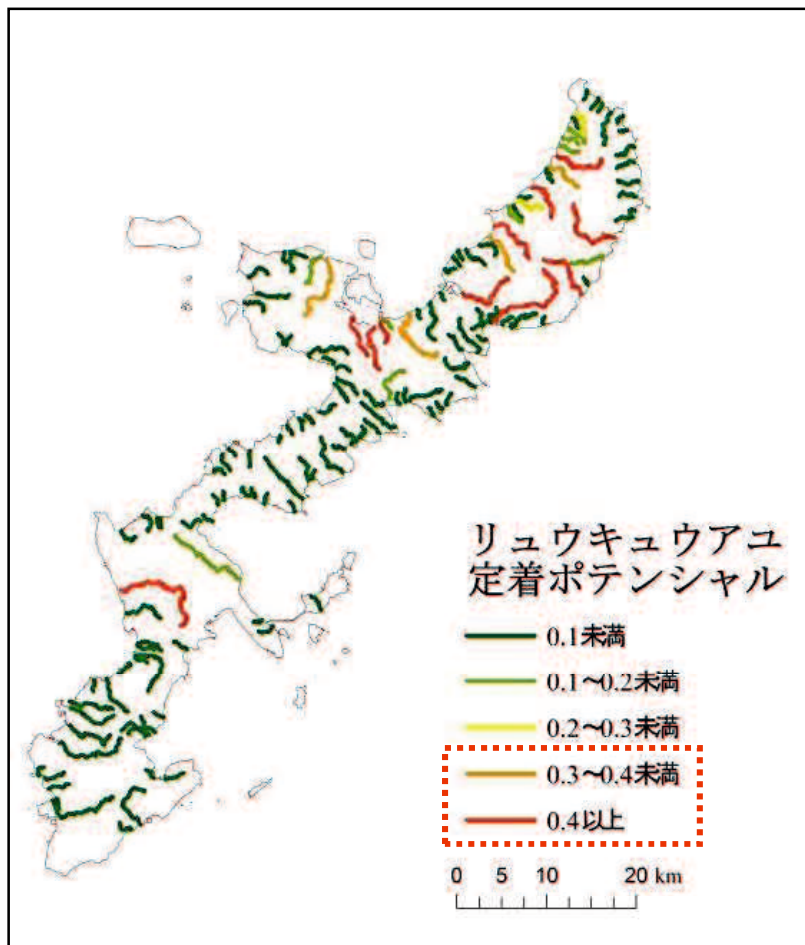


図 3-30 リュウキュウアユの定着ポテンシャル

3.4.3 リュウキュウアユに着目した自然再生優先度の高い河川

奥川自然再生事業における河川生態系再生実施計画書（案）¹⁹⁾において謳われているように、リュウキュウアユの再定着は自然再生上の一つの指標として位置付けられる。即ち、河川環境の変貌によって絶滅したリュウキュウアユが再定着可能な川づくりは、結果として他の生物にも好影響を与えるという考え方である。

このため、沖縄島における河川自然再生の目標は、単にリュウキュウアユが生息しやすいだけではなく、前節 3.3 で述べた在来種の割合が多い河川であることも併せて必要である。従って、在来種にとって好ましい河川を示した図 3-23 およびリュウキュウアユ生息ポテンシャルを示した図 3-29 を組み合わせることにより、2つの観点から自然再生優先度が高い河川が示される。具体的には、在来種にとって望ましい河川、かつ、リュウキュウアユ生息ポテンシャルが判別中点以上の河川という条件を満たす河川である。これら2つの条件を満たす河川は、図 3-30 に示す源河川以下 8 河川である。



図 3-30 リュウキュウアユに着目した自然再生優先度が高い河川

3.5 自然再生優先度の検討結果と具体の再生技術効果評価の必要性

沖縄島中小河川において比較的簡易にかつ均等に揃う情報として、地形、地質、河川規模、河川縦断形状、魚類分布、横断構造物分布などの資料整理に加えて水質調査及び河川横断構造物分布状況調査を行った。これらの情報間の関係分析の結果、下流側が急勾配となっている河川では元来外来魚は少ないが、河川横断構造物の設置に伴い外来魚種が増加すること、且つ水質の良い河川で在来魚が多くなる傾向にあるため、水質が良く、下流側で急勾配となっている奥川をはじめとする河川を自然再生の優先度が高い河川とした。

前述の河川地形に関する情報に内湾度を加えてリュウキュウアユの再定着に関するポテンシャル分析を行った結果、河川延長、標高差が大きく、内湾度が BO300 の場合にベストモデルとなることが明らかとなった。河川環境の悪化に伴い絶滅したリュウキュウアユの再定着可能な河川とは、その他多くの在来生物にとっても良好な環境であることを意味する。このため、前述の在来魚種の生息から見て再生の優先順位の高い河川と組み合わせることによって、更に高い優先度を得られる。この結果、比地川をはじめとした 8 河川が抽出された。

河川の自然再生優先度に関して検討を行い上記の成果を得た。この結果を受け、奥川をはじめとする在来魚にとって好ましい河川における横断構造物の撤去、および源河川をはじめとするリュウキュウアユに着目した河川における河川取水堰の撤去に関して自然再生の効果を評価する必要があることから、次章以降に奥川及び源河川における個別、具体の自然再生手法の効果評価を行う。

【参考文献】

- 1) 沖縄総合事務局開発建設部・(株)環境調査技術研究所：平成16年度沖縄本島北部地域河川再生調査検討業務報告書，p.62，平成17年。
- 2) 沖縄県：改訂・沖縄県の絶滅のおそれのある野生生物（レッドデータおきなわ）第3版-動物編-，http://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/shizen/hogo/okinawa_rdb_doubutu.html，2017。
- 3) 嶋津信彦：2010年夏沖縄島300水系における外来水生生物と在来種の分布記録，保全生態学研究，Vol.16，pp.99-110，2012。
- 4) 幸地良仁：トオイユからリュウキュウアユまで とっておきの話 沖縄の川魚，pp.94-104，1991，沖縄出版（浦添）。
- 5) 立原一憲・徳永桂史・地村佳純：沖縄の外来魚，外来種ハンドブック，pp.248-249，2002。
- 6) 石川哲郎・高田未来美・徳永圭史・立原憲一：沖縄島に導入された外来純淡水魚類の定着状況及び分布パターン，保全生態学研究 (*Japanese Journal of Conservation Ecology*) 18：pp.5-18，2013。
- 7) 四宮明彦：豪雨災害による河川生物への影響ーリュウキュウアユでの例ー，2010年奄美豪雨による土砂災害の実態と特徴，2010年10月奄美豪雨災害の総合的調査報告書，鹿児島大学奄美豪雨災害調査委員会，pp.121-126，平成24年。
- 8) 宮良工，神谷大介，赤松良久，乾隆帝・上鶴翔悟：地方中小河川における自然再生計画のための河川分類と評価-沖縄島を対象として-，地球環境研究論文集，pp.285-pp.291，2014。
- 9) 川那部浩哉・水野信彦・細谷和海編・監修，山溪カラー名鑑 日本の淡水魚，2001。
- 10) 環境省：レッドリスト（絶滅のおそれのある野生生物の種のリスト），2007。
- 11) 沖縄県：改訂版 レッドデータおきなわ-動物編-，2012。
- 12) 水産庁：日本の希少な野生水生生物に関するデータブック，1998。
- 13) 国土交通省：今後の河川水質管理の指標について（案）改訂版，2009
- 14) 川合禎次，川那部浩哉，水野信彦：日本の淡水生物-侵略と攪乱の生態学-，東海大学出版会，pp.114-179，1980。
- 15) 幸地良仁：沖縄島の河川環境の現状と問題点，沖縄生物学会誌，Vol.33，pp.69-77，1995。
- 16) 辻本真希，神谷大介，赤松良久，宮良工，乾隆帝：沖縄島二級河川の自然再生計画における目標設定のための河川類型化と課題に関する考察，土木学会論文集 G(環境)，Vol.71，No.5，pp. I_61- I_66，2015。
- 17) 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-1986年の調査結果，日水誌，Vol.58，pp.199-206，1992。
- 18) 荒木田葉月：シギ・チドリ類の生息地管理に向けた広域モニタリングデータの活用手法の開発，徳島大学大学院先端技術科学教育部 博士論文，pp.19-20，2012。
- 19) 沖縄県土木建築部河川課：奥川河川生態系再生実施計画，2009。

第4章 奥川における落差工撤去及び引堤淵による自然再生とその評価

第3章 3-2.在来種にとっての自然再生優先度評価において在来魚種の生息にとって好ましい河川が14河川抽出された。本章では、この内沖縄島最北端に位置する奥川における自然再生に関する評価を行った。

4.1 奥川における自然再生整備内容

沖縄県管理の二級河川奥川（図4-1）では、2009年の奥川自然再生協議会結成、2011年の河川生態系再生実施計画策定を経て、河川環境の変化とともに絶滅したリュウキュウアユが再び定着するような河川環境を取り戻すことを目標に自然再生事業が進捗中である。

奥川では河川改修前には数か所の水深2mを超す淵が存在していたが河川改修によって河道は直線化し、落差工の設置や河道拡幅によって大規模な淵は形成されなくなっている。夏季水温は30℃以上になるため、低水温を維持できる淵の存在は生物にとって重要である。また、落差工への土砂堆積に起因すると考えられる瀬切れが頻発し（図4-2）、河床形状は河道の直線化と落差工による流速の平準化によって、平瀬のみが連続する状況となっていた。

以上の河川環境の悪化を解消するため、奥川を所管する沖縄県北部土木事務所では、瀬切れの解消・流水の連続性を確保するために2010年9月に3基ある落差工のうち第二落差工を撤去し（図4-3）、その後2011年9月に第三落差工下流で引堤及び水制によって淵を整備している（図4-4）。



図4-1 奥川における河川生態系再生のための整備内容とモニタリング地点

※1) St.2, St.3, St.4 はそれぞれ第2落差工下流, 同上流, 引堤淵内に設定された調査地点,

※2) 図には第2落差工撤去及び引堤に係るそれぞれの河床変動計算範囲も示した。



図 4-2 奥川における瀬切れの状況
 左:瀬切れ発生時 (2005 年 9 月), 右:平常時 (2003 年 10 月)



図 4-3 第二落差工撤去前後の状況



図 4-4 引堤及び水制による淵整備前後の状況

4.2 モニタリング調査内容と評価手法

奥川における自然再生のモニタリングも沖縄県北部土木事務所が実施している。モニタリング内容は表 4-1 に示すとおり河床形状変化確認のための河川測量および流量観測，第 2 落差工堆積土砂中への伏流による瀬切れ対策検討のための地下水位観測，生物生息条件変化確認のための水温，水質調査，生物変化確認のための有栓生物調査が実施されている。ただし，落差工撤去前の計画段階の調査回数は 1 回しかないため，季節性などの変動要因がある項目に関しては注意が必要である。なお，調査地点は図 4-1 に示したとおりである。

これらのモニタリング結果を用いて，落差工撤去約 4 年後および引堤による淵整備約 3 年後の河床の変化状況を測量結果から把握し，魚類モニタリング調査結果を用いて整備後短期間における評価を行うとともに，河床変動予測によって整備地形の長期的な持続性に関する評価を行った。

表 4-1 奥川生態系再生整備における調査内容

	計画段階(各1回)	モニタリング段階
河川形状	河川測量	河川測量:4回/年
河床材料	粒径分布分析	無し
河川流量	連続自動水位観測	連続自動水位観測
地下水位	水位・水温観測	河道内地下水位観測
河川水質	水温, BOD, SS等調査	水温, BOD, SS等分析
河川生物	魚類, 底生動物, 付着藻類調査	魚類: 定点調査:1回/年 潜水目視観察1回/月 底生動物:1回/年 付着藻類:1回/年

4.3 魚類モニタリング調査結果に基づく効果評価

4.3.1 再生整備実施後の河床変化と評価

図 4-5 に第二落差工の撤去とその後の河床縦断形状の変化を示す。

撤去直後の 2010 年 12 月は大規模な出水を受けた後であるものの、撤去前と比較して変化は少ない。その後、3 年を経過した 2013 年 12 月には、落差工の上流側の堆積土砂が下流側に移動して縦断形状が平滑化している。これによって表流水の伏流が減少し、瀬切れが緩和されるものと期待されたものの、奥川自然再生協議会において 2013 年夏季の小雨傾向により大規模な瀬切れが再度発生したことが報告されたことから、更なる検討が必要となることが明らかとなった。

図 4-6 に引堤による淵整備後の横断形状の変化を示す。2013 年 12 月において整備後 2 年以上を経過しているが、地域の古老へのヒアリングによる過去に存在した平水時における淵の水深 2m 程度を整備直後から維持しており、生物の避難場所、生活場所として期待できることが明らかとなった。

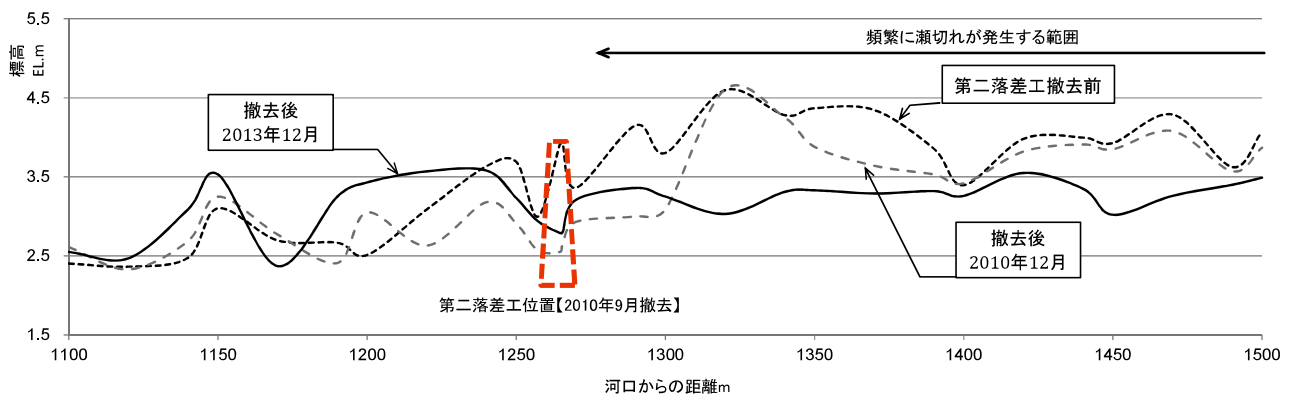


図 4-5 第二落差工の撤去と河川縦断形状の変化 ※図中の河床高はいずれも平均河床高

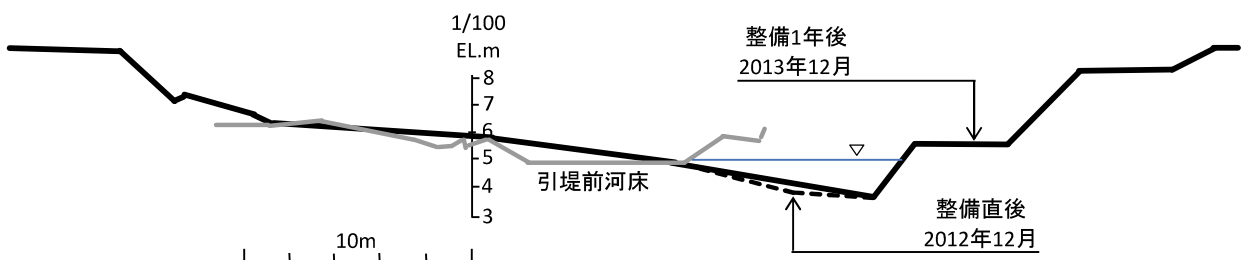


図 4-6 引堤による整備淵と横断形状の変化

4.3.2 再生整備実施後の魚類相の変化と効果評価

魚類による淵の利用状況結果を用いて落差工撤去による流水の連続性確保，引堤整備淵による魚類の生息場所確保に関する効果評価を行った。

図 4-7 に淵における魚類群集の動態を示す。前述のとおり奥川自然再生事業は絶滅したりゅうきゅうアユが再定着可能な河川環境を取り戻すことを目的としており，海から遡上する遊泳魚の状況が効果の指標となるため，併せて表 4-2 に海から遡上する遊泳魚の個体数の動態を示す。St.2 は撤去された第二落差工下流側の小規模な淵，St.3 は第二落差工の直上流の淵，St.4 は引堤淵整備前の小規模な淵，整備後は引堤による整備淵を対象としている。

撤去前の調査が少ないため明瞭ではないが，撤去前にはいずれの地点でも出現していなかったボラ類が，撤去後には St.3 および St.4 で確認され，2013 年には最大 30 個体，平均して 11 個体程度が St.4 の引堤によって整備された淵で確認されるようになってきている。また，St.3 の淵ではギンガメアジ類が撤去後に確認されている。遊泳性の魚類が第二落差工撤去後に上流側で確認されるようになり，これらが引堤によって整備された淵で多く確認されるようになったことから，第二落差工の撤去は大規模な瀬切れ発生時以外には流水の連続性を確保できており，併せて遡上してきた魚類の生活場所として効果があるものと評価できる。2011 年における大規模瀬切れ発生時には，引堤によって整備された淵で平均して 110 個体のユゴイ類が確認されている。これはその他の時期の 2 倍以上に当たり，当該淵を避難場所として利用したものと考えられ，魚類の重要な避難場所としても効果があるものと評価できる。

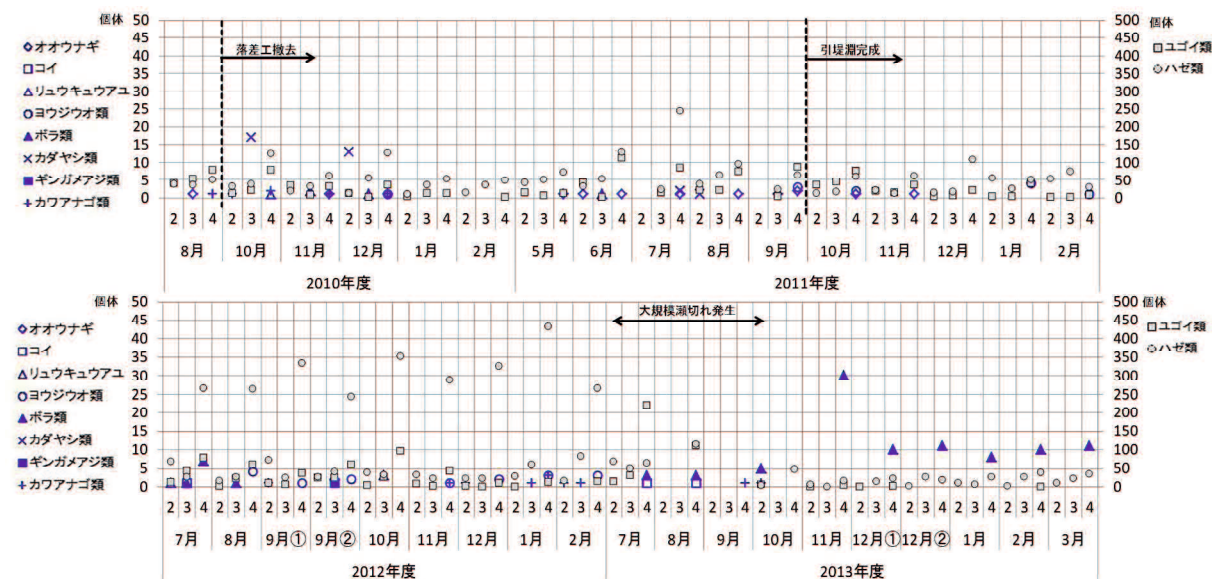


図 4-7 淵における魚類群集の動態 ※ 2:St-2, 3:St-3, 4:St-4

表 4-2 海から遡上する遊泳魚平均個体数の変化

第二落差工撤去	前			後			後			後			後		
引堤淵整備	前			前			後			後			後		
大規模瀬切れ発生	無			無			無			有			無		
期間	2010, 8			2010, 10~2011, 9			2011, 10~2012, 2			2012, 7~2012, 9			2013, 10~2014, 3		
淵番号	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
ボラ類	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0	0.0	2.0	0.7	0.0	11.4
ギンガメアジ類	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ユゴイ類	41.0	53.0	78.0	14.0	9.5	53.1	9.3	14.2	42.4	5.0	10.0	110.0	5.1	13.9	29.3

4.4 河床形状の長期的持続性評価

第二落差工の撤去，引堤による淵整備後の河床地形の変化を河床変動シミュレーションによって予測し，その維持による魚類生息場としての維持の可能性を検討した。

4.4.1 河床変動シミュレーションモデルの概要

一般座標系二次元不定流河床変動計算モデル（RIC-Nays）を用いて数値シミュレーションを行った。RIC-Nays は河道内の植生作用を考慮した水位，流速，河床変動の数値シミュレーションが可能である。本モデルでは粒径分布は一様粒径を仮定し，平均粒径を与える。掃流砂は 2 次元流れの場の流線方向とこれに直交する方向成分が計算され，流線方向は芦田・道上の式¹⁾，流線と直交する方向には長谷川の式²⁾を使用している。2 次流強度は水深平均流の流線の曲率を考慮したものから算出している。浮遊砂の浮上量は板倉・岸の式³⁾，浮遊砂の沈降量は Rubey の式⁴⁾を使用している。

4.4.2 計算条件

第二落差工の撤去区間と引堤による淵整備区間の 2 つの区間を対象として河床変動シミュレーションによる解析を行った。落差工の撤去による瀬切れの解消・小規模化についての解析対象区間は，第一落差工上流から第三落差工下流の約 650m とし，引堤による淵の維持・形成についての解析対象区間は第三落差工上流から第二落差工上流までの約 400m とした（図 4-1）。

河床材料の粒径は現地調査（表 4-1）から得られた平均粒径（D50）の 9.5mm を用い，植生密度の阻害率は 0.5 とした。境界条件は次のように与えた。流れに関しては，上流端では観測された流量を与え，下流端では等流条件とした。掃流砂量に関しては，上流端では平衡流砂量を与え，下流端では掃流砂量の流下方向勾配をゼロとした。浮遊砂に関しては上流端ではゼロとして，下流端では流下方向勾配をゼロとした。

4.4.3 検討ケース

(1) シミュレーションモデル再現性の検討

第一落差工上流から第三落差工下流の設計断面と 2 回の測量データ（2010 年 9 月，2010 年 11 月）を基に河床形状を作成し，その測量の間に発生した出水（2010 年 10 月 22 日）を対象として，河床変動シミュレーションの再現性の検討を行った。計算格子を図 4-8 に，計算対象とした 2010 年 10 月 22 日の出水の流量を図 4-9 に示す。

(2) 第二落差工撤去による河床縦断形状の変化

落差工撤去が河床縦断形状に与える影響を検討するために長期間の複数の出水を与えて落差工撤去後の長期的な河床変動について解析を行った。与えた流量は過去 11 年間（2000～2010 年）の実績流量のうち，ピーク流量が 20m³/s 以上の複数の出水である。計算対象とした 2000～2010 年にかけての流量を図 4-10 に示す。

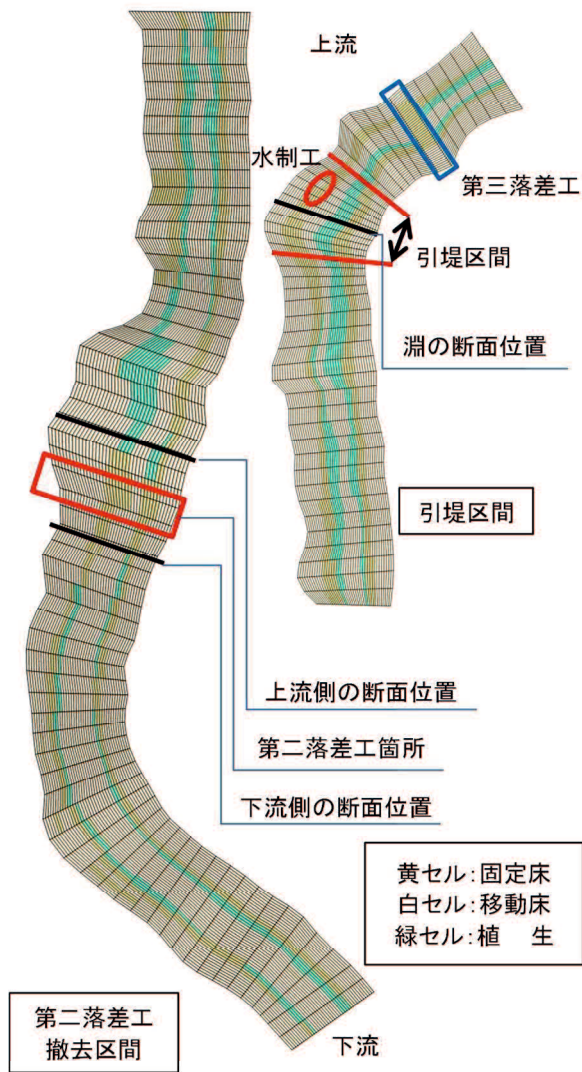


図 4-8 計算格子

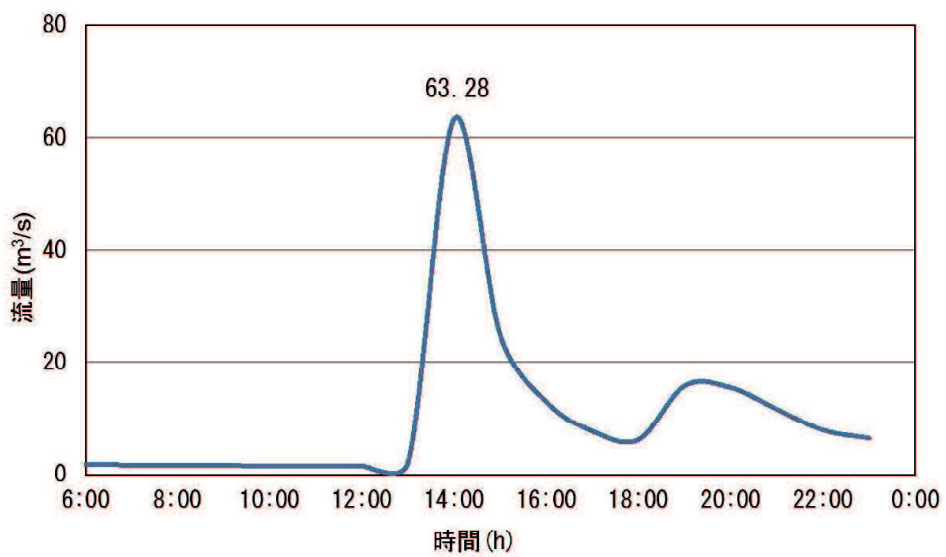


図 4-9 再現計算に用いた 2010 年 10 月 22 日の流量

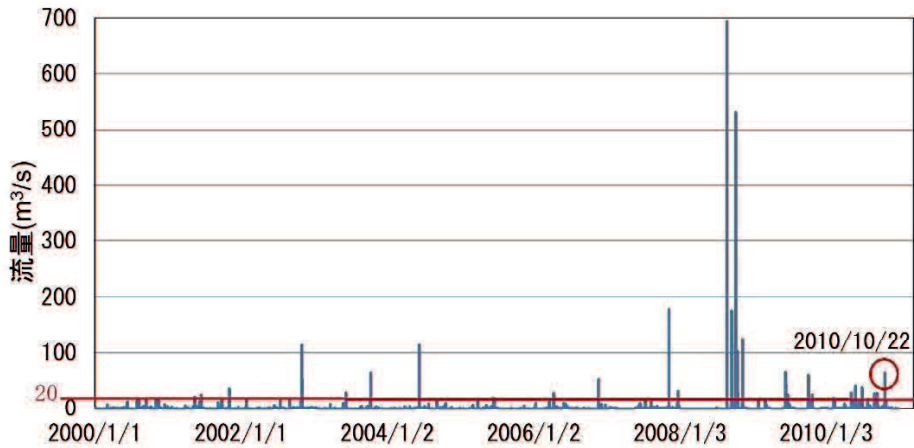


図 4-10 第二落差工撤去による河床変動計算に用いた 2000～2010 年の流量

(3) 引堤・水制工による淵の再生

引堤・水制工設置による淵の長期間の維持・形成についての検討を行うために第三落差工直上から第二落差工上流までの区間で設計断面と 2011 年 11 月の測量データを基に河床形状を作成した。計算格子は図 4-8 に示したとおりである。この河床形状を初期条件として過去 11 年間（2000～2010 年）の実績流量のうちピーク流量が $20\text{m}^3/\text{s}$ 以上の複数の出水（図 4-10）を与える解析を行い淵の堆積状況を検討した。

4.4.4 計算結果及び考察

(1) 河床変動シミュレーションの再現性の検討

第二落差工撤去直後および出水後の測量から得られた河床高コンター及び河床変動シミュレーションから得られた出水後の河床高コンターを図 4-11 に示す。

第二落差工撤去直後と出水後の測量結果を比較すると、落差工撤去箇所の直下の掘れた部分で顕著な堆積傾向が見られる。また、シミュレーションの結果でも同様の堆積傾向が見られ、平面的な堆積傾向も測量結果とほぼ一致している。

さらに、落差工撤去箇所の上流と下流の断面（図 4-8）での河床の横断形状について検討を行った。両断面についての出水前後の測量結果とシミュレーション結果との比較を図 4-12 に示す。横断面形状に関する測量結果とシミュレーション結果の断面が一致していないのは計算上でスムージングされているためであり、同様の理由で実際の出水後の測量とシミュレーションによる出水後計算結果も一致していない。図 4-12 の上流側の断面では、左岸で洗掘が起り、右岸では堆積する傾向にある。シミュレーション結果では右岸の堆積傾向は見られないものの、左岸における洗掘の傾向は再現できている。また、下流側の断面では河道の中央に堆積する傾向にあり、シミュレーション結果でもその傾向は再現出来ており、さらに、堆積厚もほぼ一致している。

以上の結果から、河床変動シミュレーションによって、落差工撤去後に見られた落差工下流部での土砂堆積を再現可能であることが明らかとなり、本モデルの再現性が確認された。

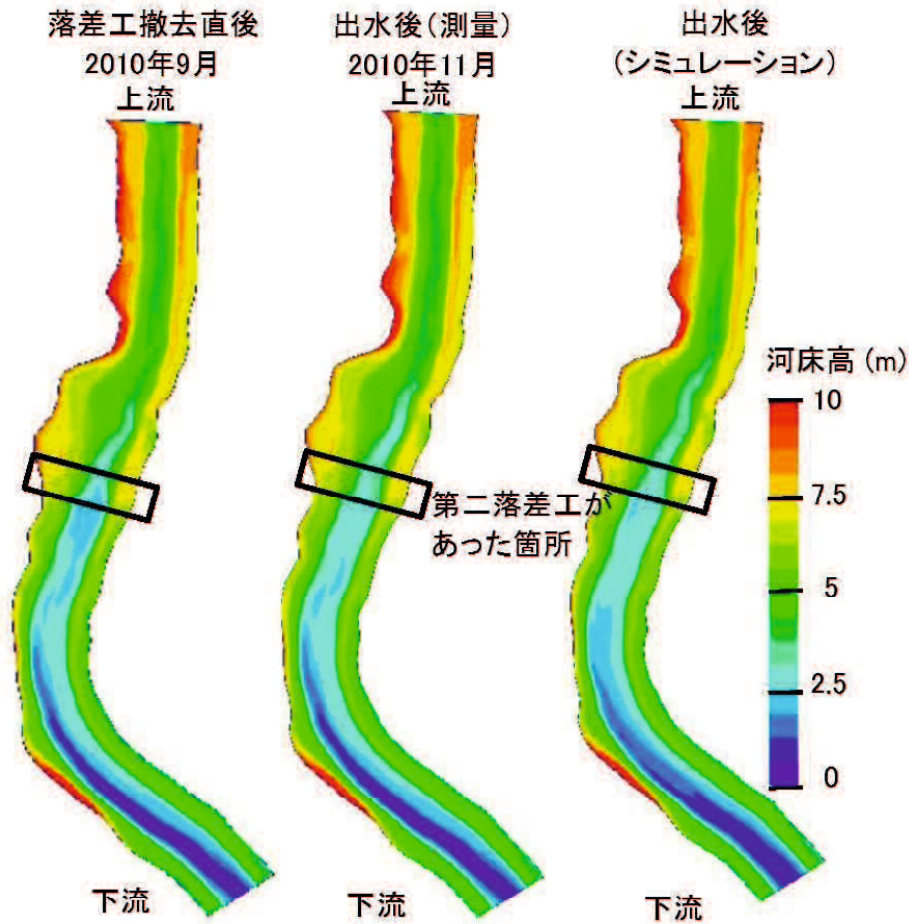


図 4-11 河床高コンターの測量結果と計算結果の比較

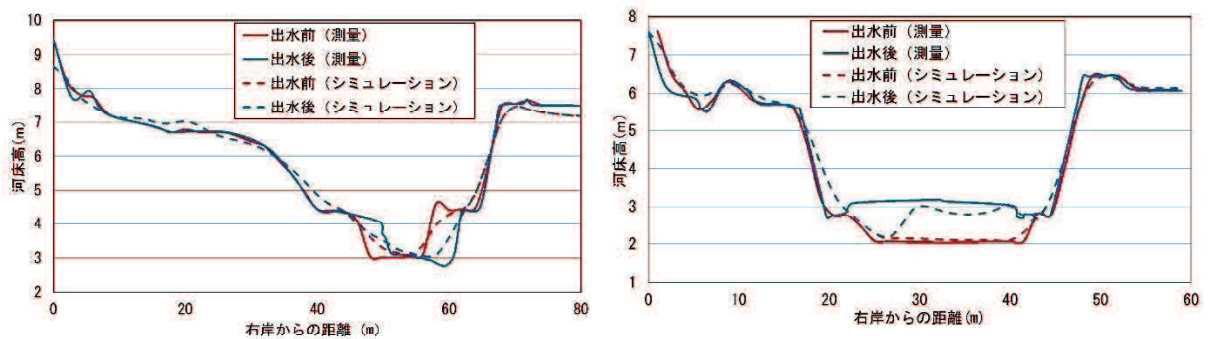


図 4-12 第二落差工上下流の横断面形状の測量結果と計算結果の比較

左：上流側，右：下流側

(2) 第二落差工撤去による河床縦断形状の変化

第二落差工撤去が河床縦断形状に与える影響を検討した。2010年10月22日の出水を与えた場合の出水前後の河床勾配、及び過去11年間の複数の出水を与えた場合の出水前後の河床縦断形状を図4-13に示す。図中で10月22日の出水後は撤去1ヶ月後であり、過去11年間における複数の出水後は撤去11年後である。河床高は低水路内の平均河床高を用いている。

落差工撤去直後と落差工撤去1ヶ月後の河床勾配を比較すると、10月22日の出水により落差工があった箇所の下流に土砂が堆積し、落差工が存在した際の階段形状の河床形状からほぼ一定の勾配の河床形状になっている。落差工撤去直後と落差工撤去11年後で比較してみると落差工があった箇所の下流に堆積し続けることなく、河床勾配が一定の形状で安定していることがわかる。また、落差工上流の顕著な土砂堆積が消失したことにより、伏流が無くなると考えられ、瀬切れの解消・小規模化が期待できることが明らかとなった。

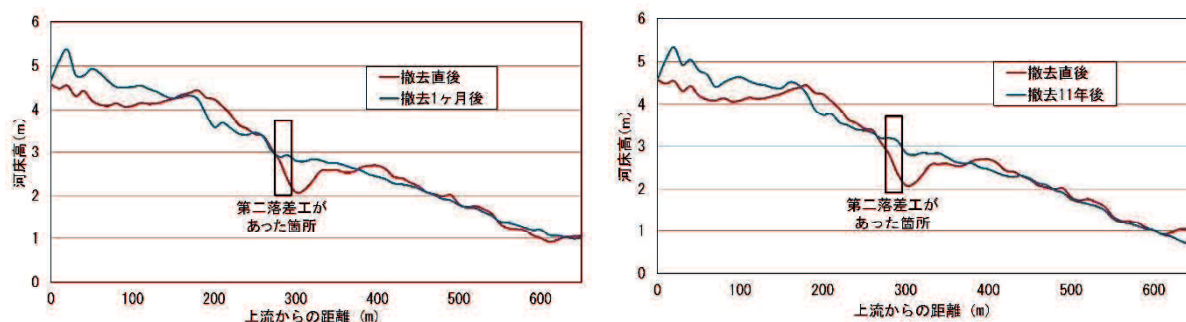


図4-13 第二落差工撤去直後と落差工撤去後の河床縦断形状

左：10月22日単一出水後，右：撤去直後から11年間における複数出水後

(3) 引堤・水制工による淵の再生

河床変動シミュレーションから得られた出水前後の河床高コンターを図4-14に示す。図中で出水前を引堤淵整備直後、2010年10月22日の出水を与えた10月22日の出水後と引堤1ヶ月後とした。また、過去11年間の複数の出水を与えた河床変動シミュレーションから得られた河床高コンターも併せて示し、過去11年間の複数の出水後は引堤11年後とした。

引堤1ヶ月後の計算結果では淵の深い部分がなくなり、引堤11年後の計算結果では淵の部分に全体的に堆積が進んでいることがわかる。しかし、引堤直後と引堤11年後を比べると、引堤直後には直線的な水路となっていた淵の下流部分に、引堤後には瀬淵構造に近いものが見られることがわかる。

引堤直後と引堤1ヶ月後、引堤後8年及び引堤後11年における淵の一断面(図4-8)における河床横断形状の比較を図4-15に示す。2010年10月22日の1回の出水により淵には約1m堆積しており、淵の部分が縮小していることがわかる。引堤8年後は最も淵の堆

積が進んだ状態であるが、その後の大きな出水によって引堤 11 年後には淵の最深部では洗堀が進んでいる。これはある程度まで堆積すると堆積土砂が掃流されるためと考えられる。以上のことから出水により淵への堆積と洗堀を繰り返すことで長期間の複数の出水後も淵が持されるということが分かった。

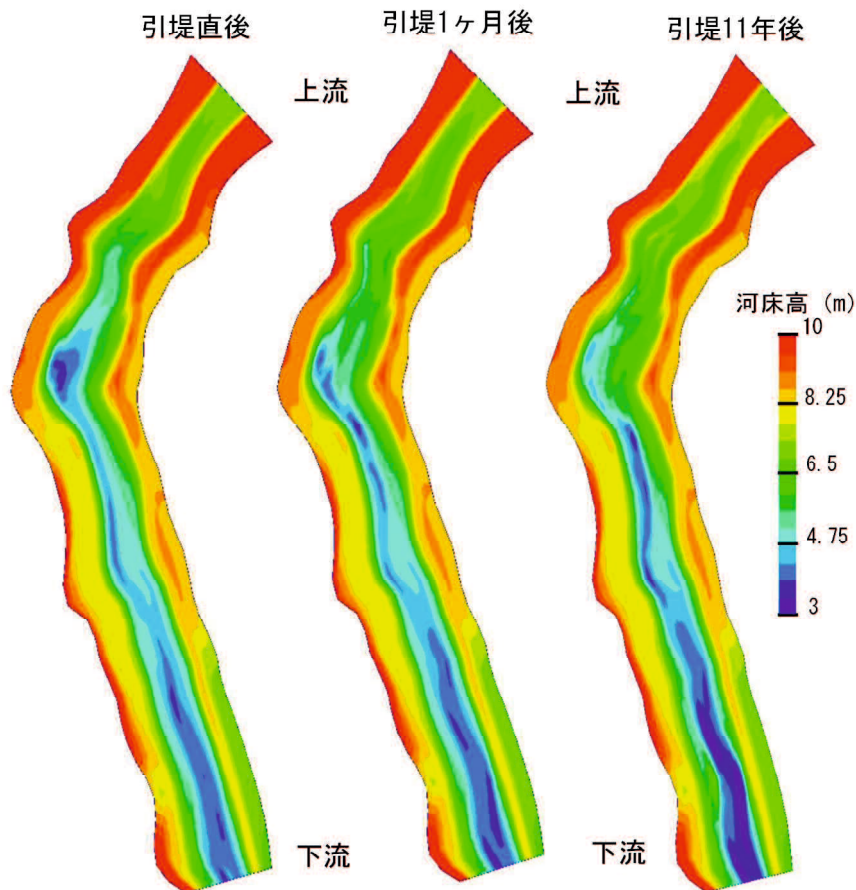


図 4-14 河床高コンターの測量結果と計算結果の比較

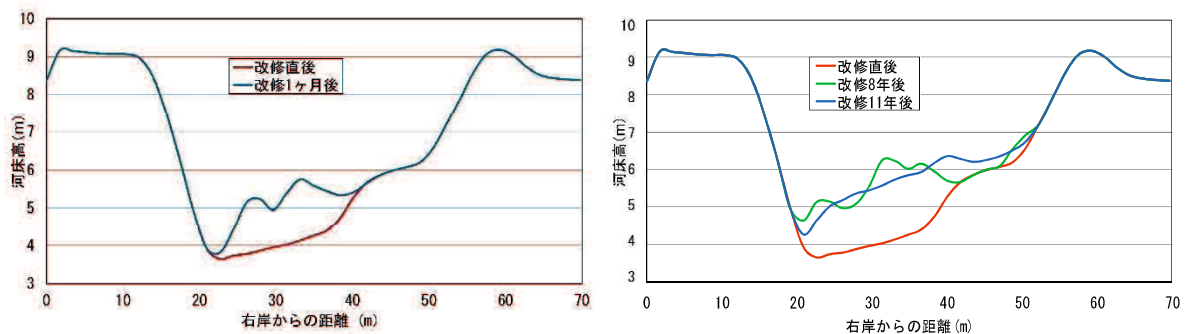


図 4-15 引堤直後からの横断形状変化の比較

左：引堤直後と引堤 1 ヶ月後，右：引堤直後と 8 年後・11 年後

※図中の改修：引堤及び水制による淵整備

4.5 再生整備の効果評価

在来魚に着目した自然再生優先度検討結果で優先度が高いとした 18 河川中，2007 年から自然再生が進められている奥川における自然再生手法・技術の効果評価を行った。

奥川では河川管理区間に 3 基の落差工があり，第 2 落差工の堆砂区間を中心に瀬切れが頻発していた。また，河道の直線化と落差工によって蛇行の少ない単調な河床形状となっていた。これに対し，第 2 落差工を撤去するとともに，その上流側で引堤による淵づくりを行っている。

河川測量結果から，第 2 落差工の撤去によって第 2 落差工上流側の堆積土砂が下流側へ移動していることを確認したことから，堆積土砂への伏流による瀬切れは軽減される可能性があるとした。また，引堤によって整備された淵は，その後の出水によっても埋まることなく水深が維持されていることが明らかとなった。魚類のモニタリング結果によって，海から淡水域まで遡上することのあるギンガメアジ類や多数のボラ類が第 2 落差工の上流側で確認されるようになったこと，再び発生した瀬切れ時に整備した淵内で多数のユゴイ類の生息が確認こと，その後引き続き多数のボラ類が確認されたことから，奥川で実施されている自然再生は効果があったものと評価された。

また，このような効果を持つ河床地形の長期的維持に関して河床変動シミュレーションを行った結果，第 2 落差工撤去後には上流側の堆積土砂が下流へ移動して河床縦断形状が平準化し，これが維持されること，引堤によって整備された淵は堆積と浸食を繰り返し，ある程度の水深が維持されることが明らかとなったため，長期的にも効果の継続が期待される結果となった。

【参考文献】

- 1) 芦田和男, 道上正規: 移動床ながれの抵抗と掃流砂に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, Vol.206, pp.59-69, 1972.
- 2) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文, 1983.
- 3) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Proc.ASCE, Vol.106, No.HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 4) Rubey, W. W.: Settling velocities of gravel, sand and silt particles, Amer. Jour. Sci., Vol.25, pp.325-338, 1933.

第5章 源河川における取水堰撤去による自然再生とその評価

第3章 3-3.リュウキュウアユ生息ポテンシャルによる自然再生優先度評価において表 5-1 に示す 8 河川が抽出された。本章では、この内、源河川において河川取水堰撤去によってリュウキュウアユの産卵河床としての適正な河床材料粒径の範囲の拡大を図る自然再生を提案した。しかしながら、沖縄島では第2章でも示したとおり過去の渇水時には度々給水制限が発生したこともあり、取水堰撤去による利水への影響が大きい場合には、この再生手法は採用できない。このため、最初に取水堰撤去による利水への影響について検討を行い、影響が無いことが確認された場合に現地調査及び河床変動シミュレーションを用いて取水堰撤去による自然再生の効果評価を行うこととした。

表 5-1 リュウキュウアユに着目した自然再生優先度の高い河川と取水施設

河川名	リュウキュウアユ定着ポテンシャル	取水施設
比地川	0.70	取水堰
大保川	0.62	ダム
新川川	0.55	ダム
与那川	0.52	取水堰
羽地大川	0.51	ダム
辺野喜川	0.50	ダム
源河川	0.35	取水堰
田嘉里川	0.30	取水堰

5.1 源河川における再生手法の提案

5.1.1 源河川の概要

源河川は、名護市北部にある一ツ岳の北東に広がる大湿帯付近に発し、蛇行しながら流下し、中流にある「源河節の碑」付近で北東に向きを変えて下流部で桃原川、福地川を合流し源河集落を抜けて東シナ海に注ぐ、流域面積 19.96km²、延長 9.42km の沖縄県指定 2 級河川である。

源河川は沖縄島有数のリュウキュウアユの産地であった。1980 年第初頭のリュウキュウアユの絶滅後、名護市源河区では 1986 年に源河川にリュウキュウアユを呼び戻す会を結成し、同区地内にリュウキュウアユ種苗生産施設を名護市、沖縄総合事務局、リュウキュウアユを蘇生させる会などと設立して、源河川に種苗放流を行ってきた。



図 5-1 源河川の流域

5.1.2 再生目標と手法

図 5-2 にリュウキュウアユの生活史と生息に関する障害の例を示す¹⁾。リュウキュウアユは両側回遊性の基本的には年魚であり、11～12 月ごろ淡水域最下流の瀬で産卵し、孵化した仔魚は河口海岸の浅瀬でワムシ類を中心とした動物プランクトンを餌にプランクトン生活を送る。3 月ごろから河川遡上を開始し、河川中流域で河床の付着藻類を餌として成長する。10 月ごろから性成熟を始め、淡水区間最下流の瀬の石礫の間隙に産卵するという生活史を持つ。このサイクルの過程において河川施設等との関係から生息に関する障害が発生する¹⁾。

図 5-3 に平成 26 年 9 月に実施されたリュウキュウアユの生息状況調査結果の概要を示す¹⁾。同年 5 月にリュウキュウアユを蘇生させる会が稚魚放流を行い、9 月中旬時点で 57 尾の生存が確認され、その多くは砂防堰堤下流の淵で生活している。同砂防堰堤には魚道が設置されており、砂防堰堤上流においても 7 尾が確認されている。源河川は沖縄島北部における河川群の中でも最も良好な河川環境を有しているにも関わらず、未だ稚魚放流によるリュウキュウアユの河川定着には至っていない。

リュウキュウアユは両側回遊魚なので、稚仔魚時代は河口海岸付近の浅瀬で生活し、3 月ごろから付近の河川に遡上する。従って、単独河川のみ環境が良好であっても定着は困難である。更に、多くの河川遡上を期待するためには、多くの産卵が必要となるが、源河川の産卵河床は、取水堰バックウォーター付近に位置するため(図 5-4)、細粒土砂やシルトで目詰まりして機能しない場所も多く、その範囲は小さい。このため、取水堰の撤去或いは改良によって産卵可能な河床の拡大する可能性がある。なお、源河川の取水堰はラバーダム方式であり、水位上昇期には水圧によって転倒し、高水時の濁水を取水しない構造となっている。しかしながら、本取水堰は満砂状態であることから見て、土砂移動を伴う全ての高水時に完全転倒していない可能性があり、堰撤去が不可能な場合にも完全転倒が可能なよう改良することが望まれる。

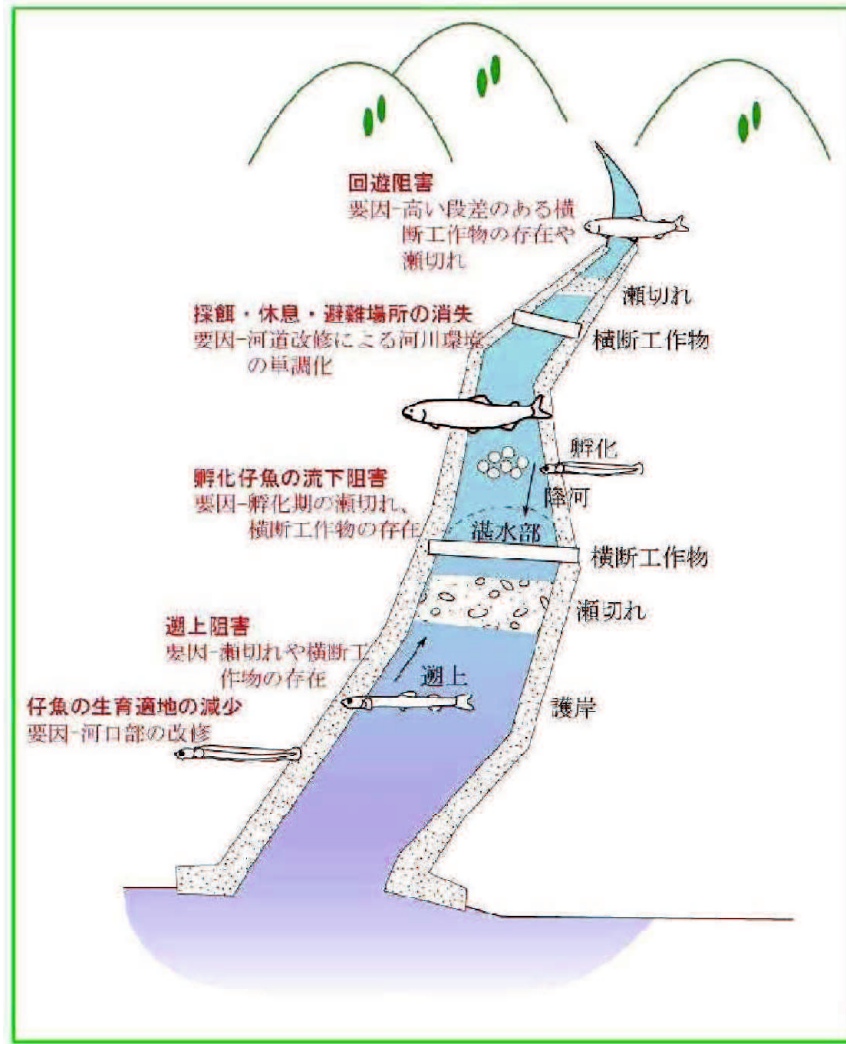


図 5-2 リュウキュウアユの生活史¹⁾

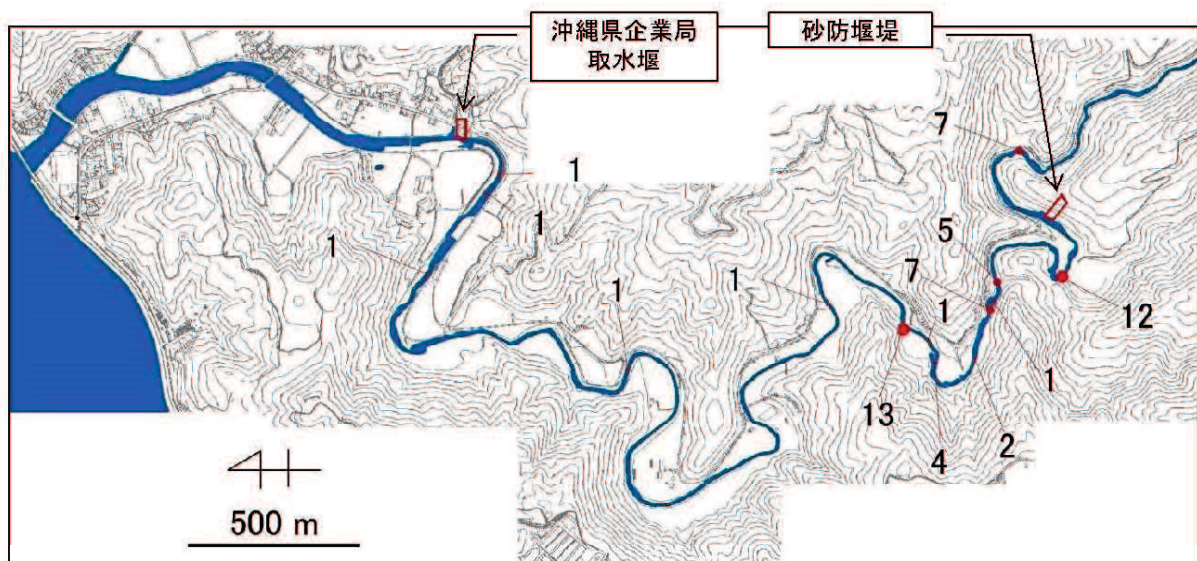


図 5-3 平成 26 年 9 月の源河川におけるリュウキュウアユ分布調査結果¹⁾

※図中の数字は 5 月に放流されたリュウキュウアユの 9 月時点における分布尾数を表す。

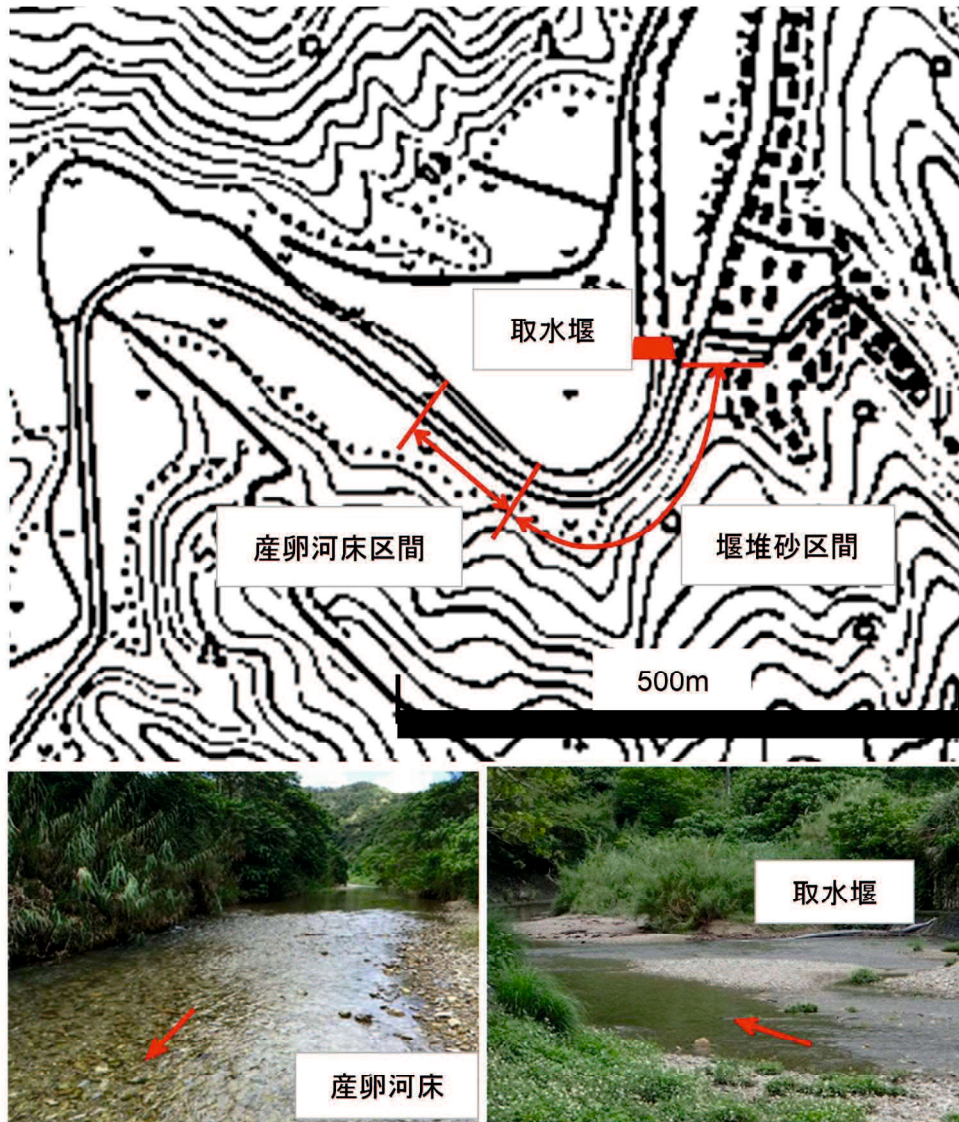


図 5-4 源河川取水堰付近の河床の状況

左：過去に過去に実績のあるリュウキュウアユの産卵河床，右：取水堰内堆積土砂

5.2 利水安定性からみた取水堰撤去の可能性評価

(1) 源河川における取水停止による利水への影響検討の考え方

図 5-5 に示すように、2002 年 6 月、2004 年 3 月、2008 年 7 月には過去の給水制限実施時よりも沖縄島における上水ダム及び多目的ダムの総貯水量が低下したため給水制限が検討された。ここではこの 3 期間および渇水基準年である 1996 年を対象として、源河川において取水堰を撤去し、取水を停止した場合の給水制限の可能性を検討した。

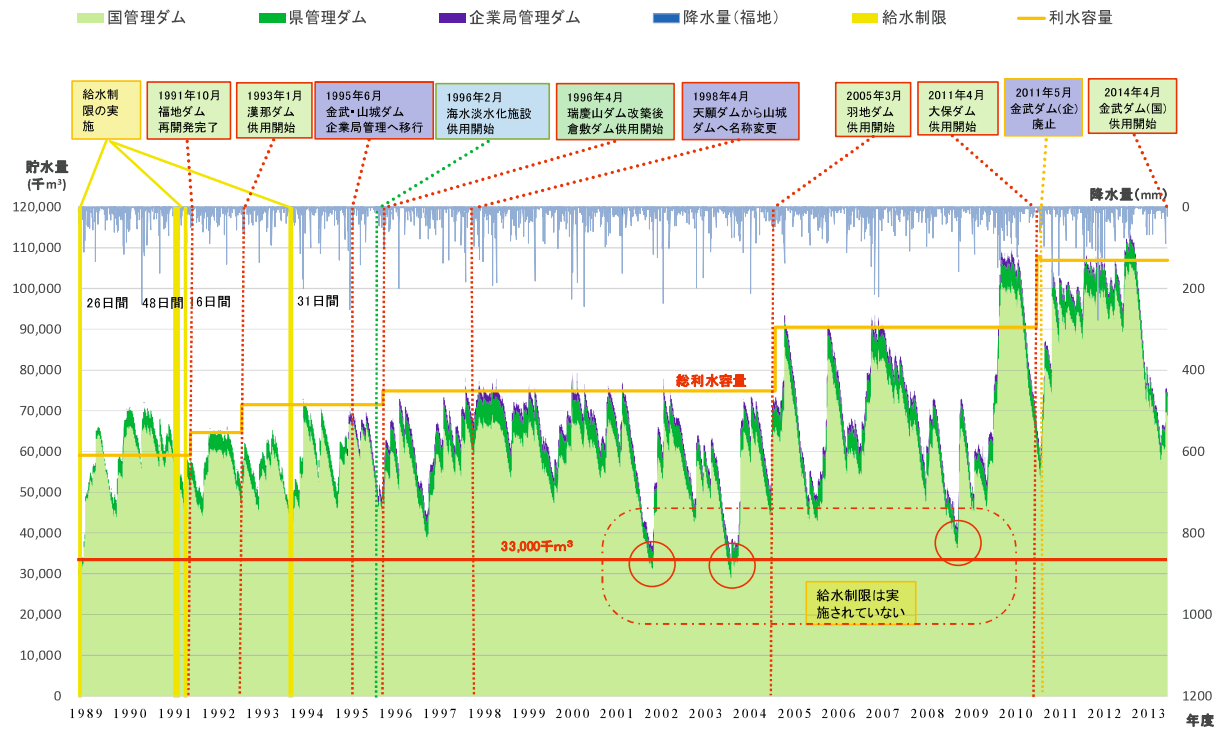


図 5-5 降水量と水資源開発およびダム利水容量の変遷

給水制限の可能性を検討するため、分析対象期間において存在したダムについては、当時の流入量等のデータを用い、その後建設された羽地および大保の 2 ダムについては次式により流入量を算出した。

$$Q_e = Q_i \times A_e / A_i \quad (2)$$

ここで、 Q_e は流入量推定値、 Q_i は最寄ダム i の実績流入量、 A_e は当該ダムの集水面積、 A_i は最寄ダム i の集水面積である。この推定式を用いて供用後の流入量と比較した結果、羽地ダムにおける推定値と実績値の相関係数は 0.86、大保ダムにおけるそれは 0.97 であった。また、分析開始時点の貯水量は当時のダム全体での貯水率を用いることとした。

取水量については 2013 年度の実績値を用いることとした。さらに、観光客が増加した場合のシナリオについても検討することとした。沖縄県の観光客数は 2010 年度には 570 万人であったが、2015 年度には 790 万人を超え、順調に増加している。さらに、2020 年度には那覇空港第二滑走路の供用が開始される予定であること、沖縄県では観光客数 1 千

万人を政策目標としていることから、観光客数が1千万人になった場合の水需要についても考慮することとした。観光用水量の推定は神谷ら²⁾による推定を用いることとし、観光客1人1泊あたりの水使用量を表5-2に示す。

表5-2 観光客1人1泊あたりの水使用量原単位²⁾

宿泊施設規模	原単位(l/人/泊)
大規模；300人以上	744
中規模；100人以上300人未満	551
小規模；100人未満	253

(2) 取水堰撤去の影響評価とその考察

前項で示した4期間を対象として、シナリオ1)現状の水需要下において、取水する場合、シナリオ2)現状の水需要下において、取水を取りやめた場合、シナリオ3)観光客が1千万人になった水需要下において、取水を取りやめた場合を想定し、4期間3シナリオに関する分析を行った。なお、沖縄県企業局におけるこれまでの実績より、海水淡水化施設は施設維持のために毎日5千m³/日の造水を行い、総貯水量が5千万m³を下回ると4万m³/日のフル稼働を行うものとした。また、3.3千万m³を下回ると給水制限を実施することとした。源河川における取水停止量は表5-3に示す取水量とした³⁾。

4期間における3つのシナリオ計算の結果を図5-6～図5-9に示す。源河川からの取水を取りやめ、かつ観光客が1千万人になったとしても、過去の降水特性においては、給水制限は十分に回避できることがわかる。これは新規にダムが建設されたこと、金武ダムが再開発されたことによる利水容量増加による効果であると考えられ、安定給水への影響はほとんどないといえる。

従って、渇水時における利水への影響を考慮した上でもリュウキュウアユ産卵河床の範囲拡大のための取水堰撤去は十分可能であることが明らかである。

表5-3 取水二級河川の日平均取水量(2013年度)³⁾

取水河川名	日平均取水量	取水河川名	日平均取水量
比謝川	18.12	満名川	3.87
源河川	9.29	田嘉里川	3.26
川崎川	6.05	座津武川	2.81
比地川	5.67	西屋部川	1.75
辺野喜川	3.88	我部祖河川	0.00
与那川	3.87		

単位：千m³

渇水基準年：1996年

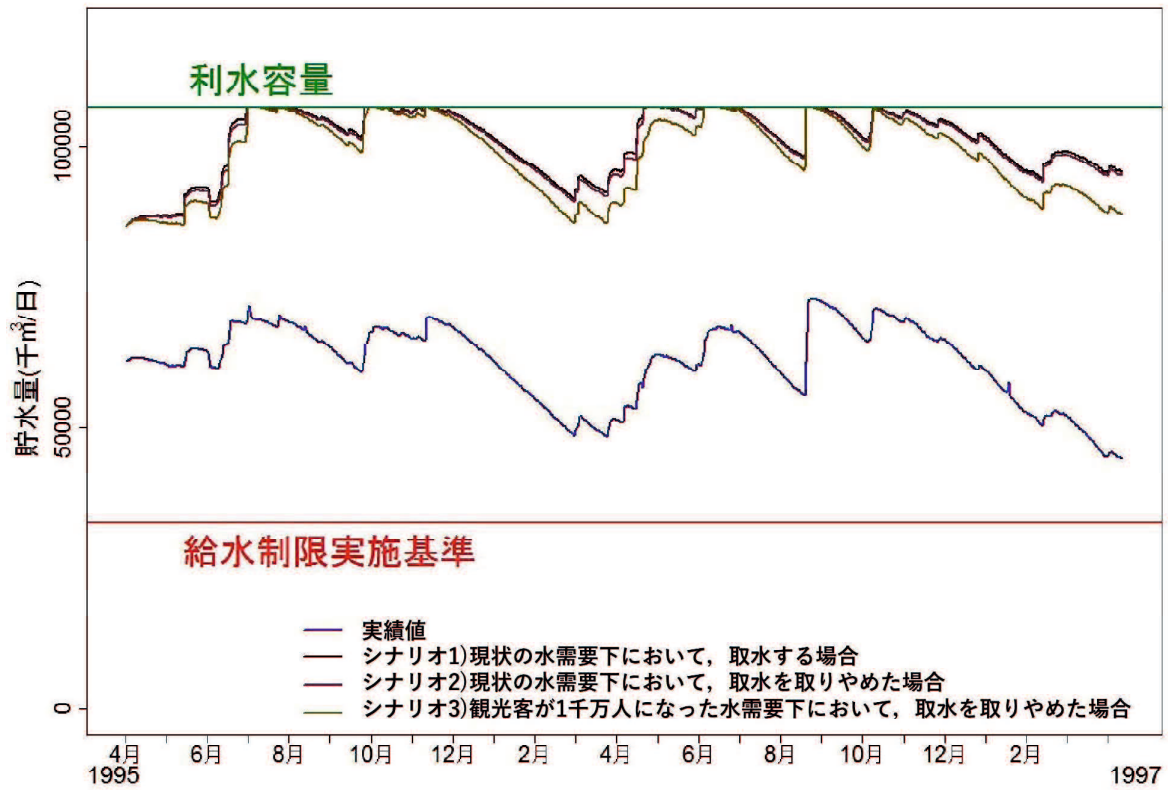


図 5-6 1996 年の降水量を想定したダム総貯水量

給水制限の可能性があった年：2002年

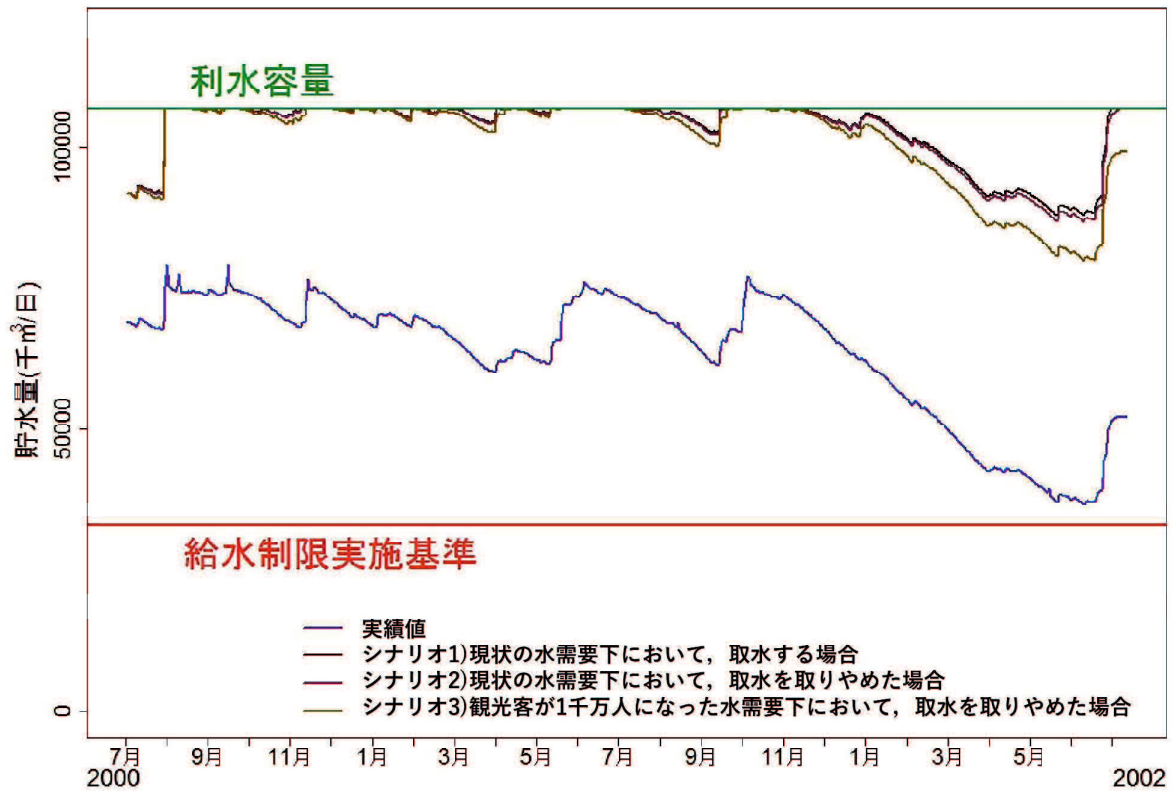


図 5-7 2002 年の降水量を想定したダム総貯水量

給水制限の可能性があった年：2004年

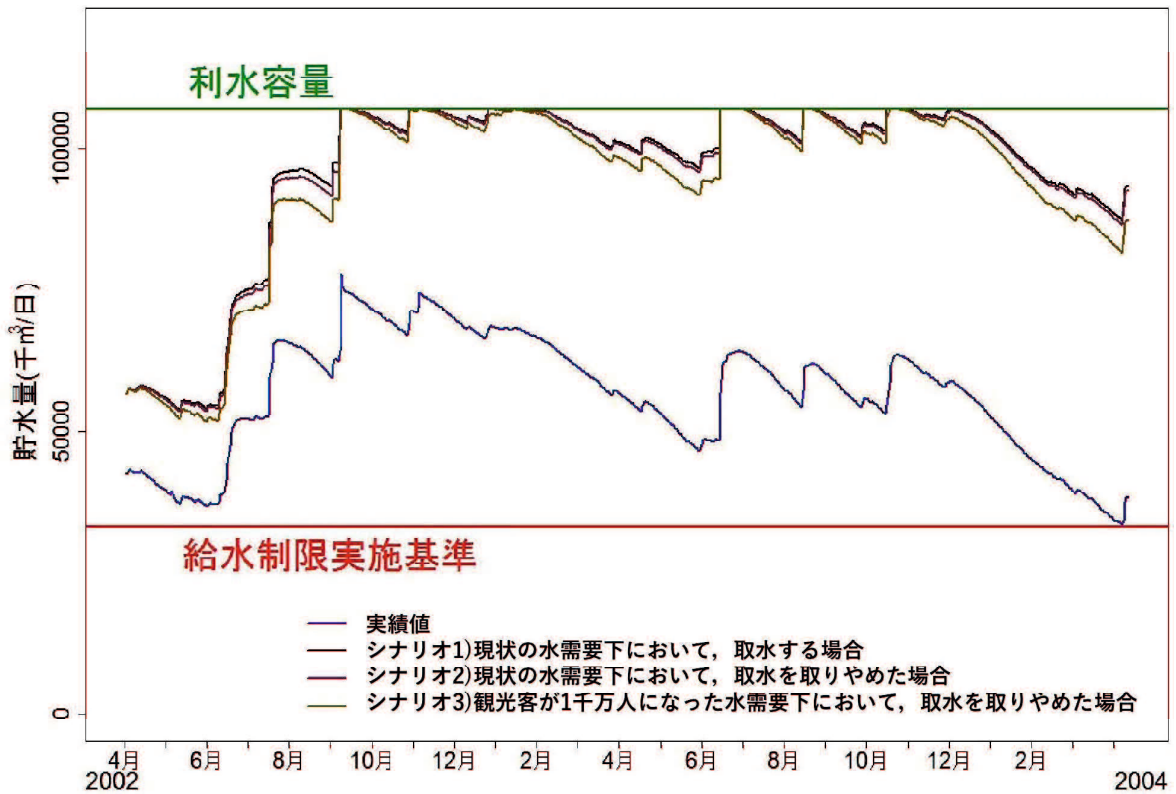


図 5-8 2004 年の降水量を想定したダム総貯水量

給水制限の可能性があった年：2008年

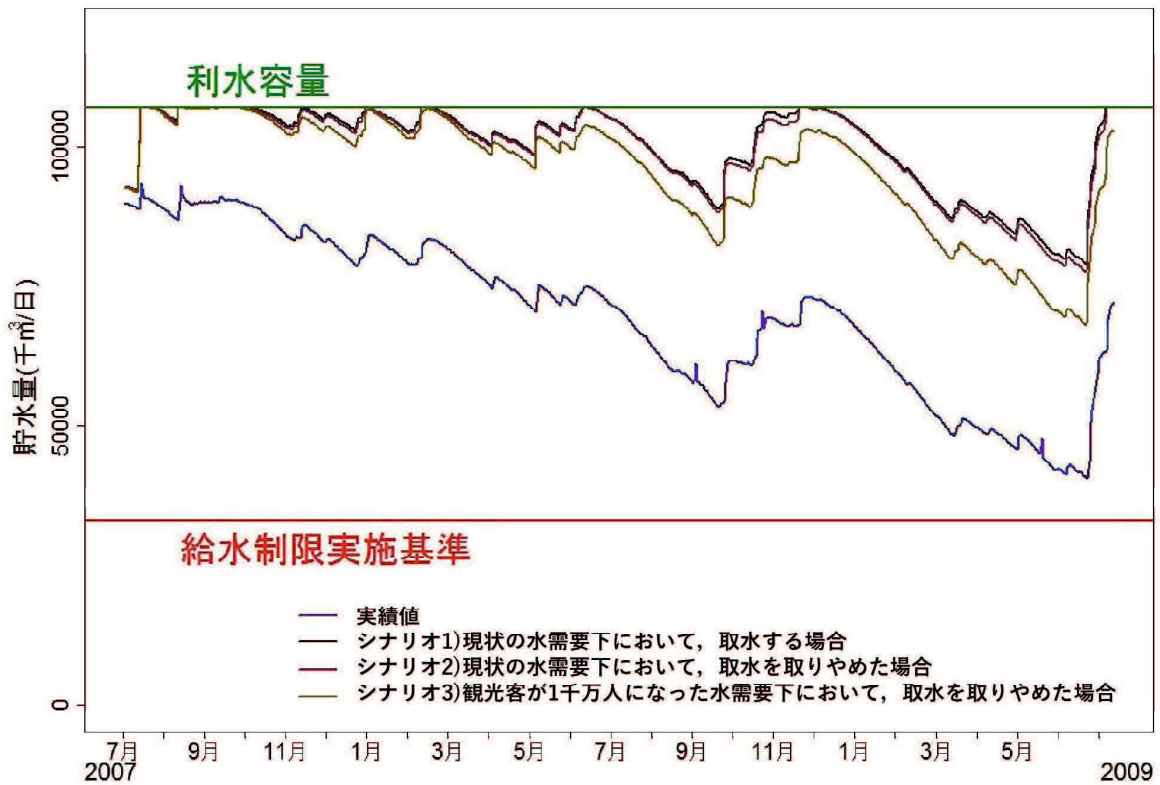


図 5-9 2008 年の降水量を想定したダム総貯水量

5.3 現地調査

検討対象範囲における河川地形の特性，河床材料粒径の流程変化傾向を把握し，また河床変動シミュレーションのための基礎情報を得るため，以下の現地調査を行った。

5.3.1 河川地形測量

対象区域は，UAV（ドローン）測量をベースに，水面下を除く 20 箇所¹に 29.7cm×20cm の対空標識を設置し，比高にして 50m の高さまで UAV を浮上させ，撮影区間全域が収まるように縦断方向に 5 往復して撮影を行った。また，この時縦横方向に画像のオーバーラップ部分が約 70%に収まるよう 15m～20m 間隔に撮影を行った。撮影した画像は photoscan

（Agisoft 社製）を用いて Sfm（Structure from Motion）として合成した。ただし，UAV のみから算出した地形情報は，撮影時や地上の樹木の揺れなどによる誤差が大きいため，GNSS（Global Navigation Satelite System）で各対空標識の Ground Control Point を測位し，UAV を補完した。水面下は対象区間内に 24 側線を設定し，RTK-GPS で河床横断測量を行い（**図 5-10** 及び**図 5-11**），DEM（Digital Elevation Model）を作成した。

測量成果のうち，検討対象区間の標高コンタを**図 5-12**に示す。河道の中心の青色の濃い部分は低水路，周辺の薄い青色から黄緑の部分は樹林或いはコンクリート護岸を表している。



図 5-10 河川測量の様子

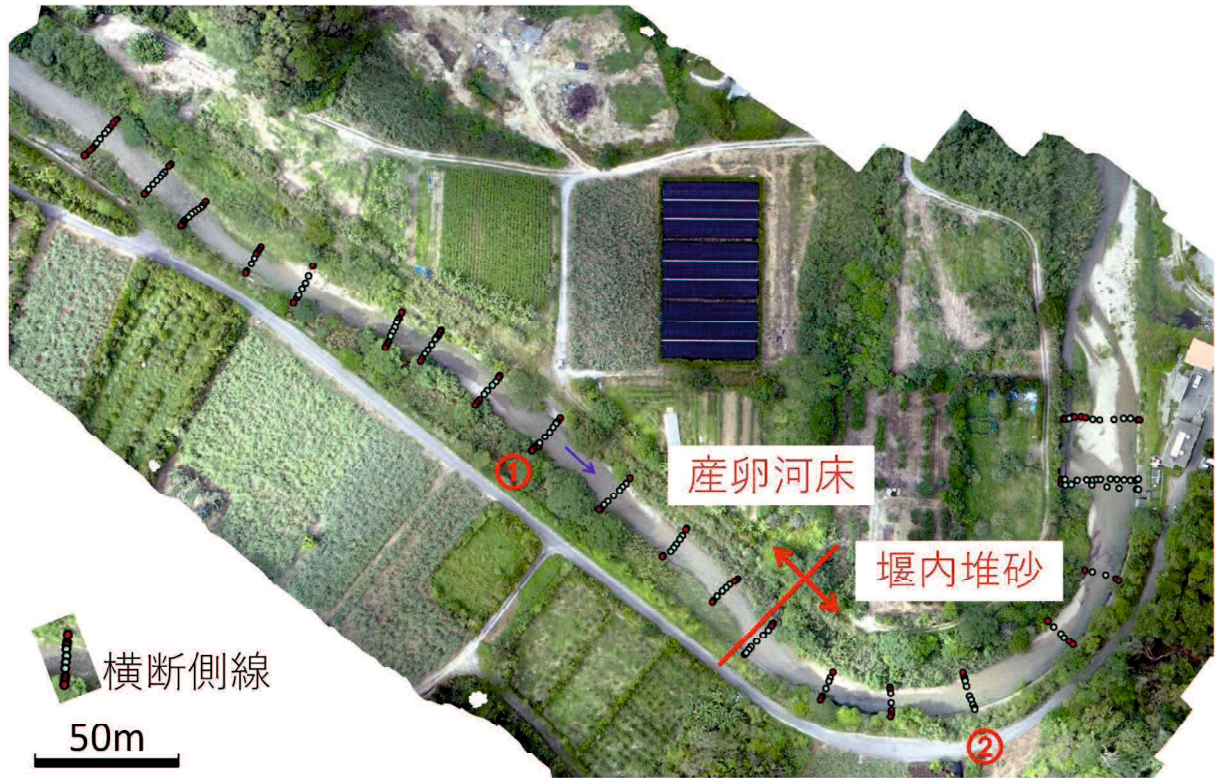


図 5-11 河床横断測量のための側線

※丸数字は、河床材料調査における粒径分布用サンプル採取地点

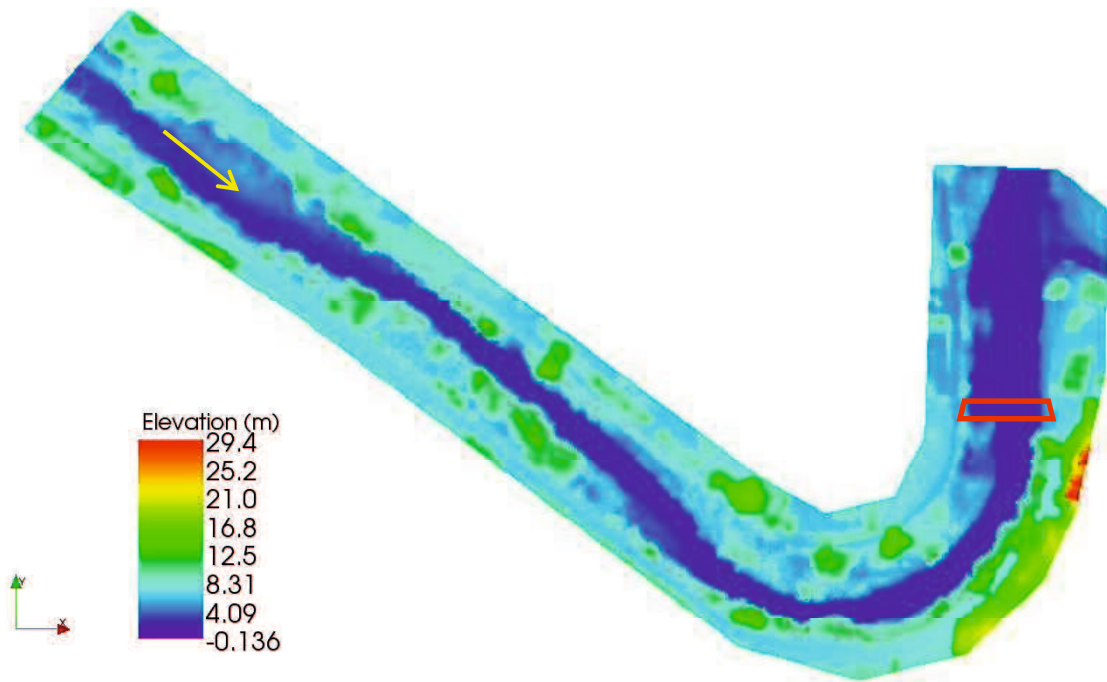


図 5-12 河床変動解析範囲における河床地形

5.3.2 河床材料調査

図 5-11 に示した産卵河床区間は過去にリュウキュウアユの産卵行動が確認されており⁴⁾、また、リュウキュウアユが自然分布している奄美大島の産卵環境調査結果⁵⁾では、河床材料の中央粒径が 11~23mm であり、その下流側に広がる堰による堆砂区間における砂状堆積物とは明確に粒径が異なるため、その境界を目視観察により特定した上で、それぞれの代表点で河床材料調査を行った。河床材料調査を行った側線における河床材料の状況を図 5-12 に示す。産卵河床範囲では、面格子法を採用して調査を行った。河床に 10cm×10cm 格子の 1m×1m コドラートを用いて、格子交点下の河床礫を 100 個選出し、現地において長径、短径、高さ、重量を測定した。その後河床表面 20cm 程度を除去し、同コドラート内の 4 分の 1 から深度 20cm までの土砂を持ち帰り、篩試験及び沈降試験にかけ、現地測定 of 河床表面の河床礫と合成して通過重量百分率図を作成した。堰内堆積土砂範囲では、細砂成分が卓越していたため、1m×1m コドラート内の深度 20cm までの土砂を全て持ち帰り、篩試験及び沈降試験にかけ、粒径加積曲線を作成した。

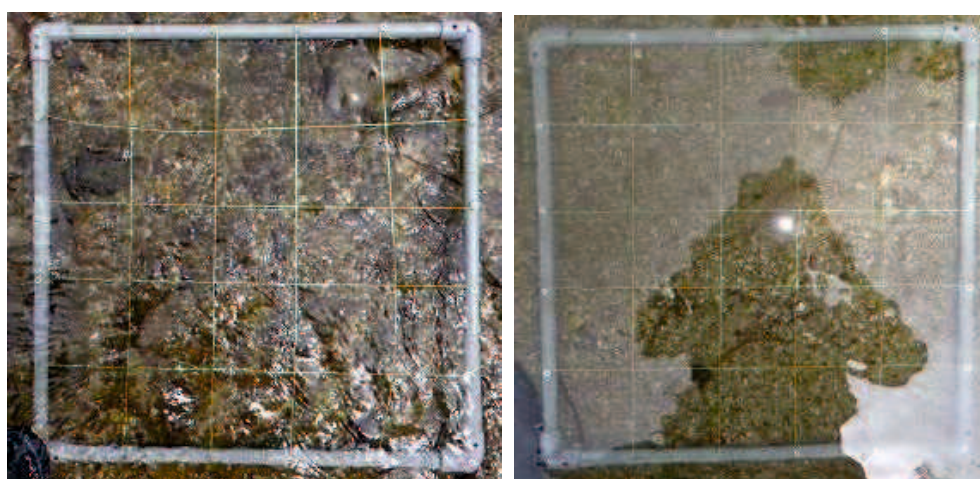


図 5-12 河床材料の状況

左：①産卵河床，右：②堰内堆積土砂

表 5-4 源河川河床材料調査地点の位置座標及び調査目的

地点	位置座標	調査目的
①産卵河床	N 26°37'44.18" E 128°03'45.86"	過去のリュウキュウアユの産卵河床内の代表粒径を得る。
②堰内堆積土砂	N 26°37'46.56" E 128°03'45.41"	取水堰内の堆積土砂の代表粒径を得る。

調査によって得られた粒径加積曲線を図 5-13 に示す。また、得られた代表粒径 (60%) を表 5-5 に示す。過去にリュウキュウアユの産卵実績のある上流側の河床材料は、中礫、粗礫で占められ、その代表粒径 (60%) は 29.5mm であり、奄美大島の産卵環境調査結果³⁾の 11~23mm に概ね近い値であった。これに対して、堰内堆積土砂は細礫、粗砂が多く、その代表粒径 (60%) は 5.17mm であり、石礫の間隙が少ないためリュウキュウアユの産卵河床としては適さないものと考えられる。

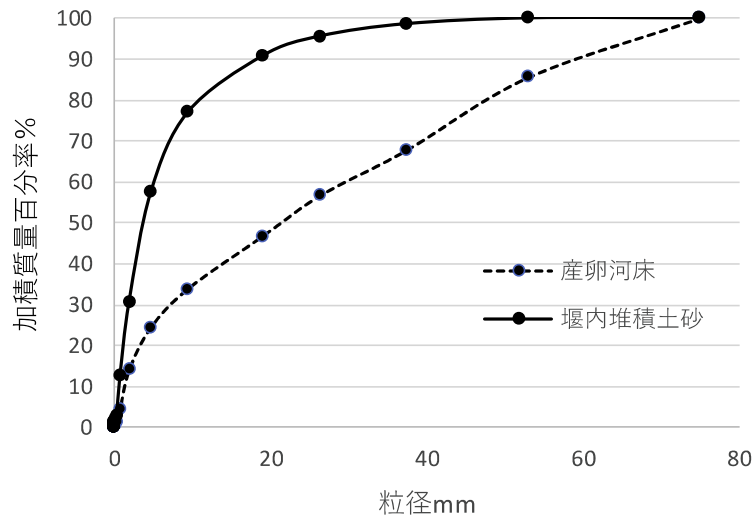


図 5-13 分析の結果得られた粒径加積曲線

表 5-5 源河川河床材料調査地点における代表粒径

地点	調査目的
産卵河床	29.5mm
堰内堆積土砂	5.17mm

5.4 河床変動シミュレーション

5.4.1 計算モデル

取水堰撤去による産卵河床の拡大に関する効果検証は、源河川と同じく沖縄島北部に位置する県指定二級河川奥川で再現性が検証された一般座標系二次元不定流河床変動計算モデル (IRIC-Nays2DH ソルバー) を用いて行った。

IRIC-Nays2DH ソルバーは河道内の植生作用を考慮した水位、流速、河床変動の数値シミュレーションが可能である。河床材料の粒径は混合粒径とし、現地調査から得られた粒径分布 (図 5-13) を産卵河床区間と堰内堆積土砂区間のそれぞれに与えた、掃流砂は 2 次元流れの場の流線方向とこれに直交する方向成分が計算され、流線方向は芦田・道上の式⁶⁾、流線と直交する方向には長谷川の式⁷⁾を使用している。2 次流強度は水深平均流の流線の曲率を考慮したものから算出している。浮遊砂の浮上量は Itakura & Kishi の式⁸⁾、浮遊砂の沈降量は Rubey の式⁹⁾を使用している。

5.3.2 計算条件

計算格子は図 5-14 に示すとおり縦断方向、横断方向のグリッドサイズが 2.0m 程度になるように設定した。河岸の樹林帯および護岸は固定床とし、低水路のみ移動床とした。また、取水堰撤去状態を現況と比較するため、現況では堰部分を固定床、堰撤去後は堰部分を移動床化した。境界条件は以下のように与えた。流れに関しては、上流端では観測された流量を与え、下流端では等流条件とした。掃流砂量に関しては、上流端では平衡流砂量を与え、下流端では掃流砂量の流下方向勾配をゼロとした。浮遊砂に関しては上流端ではゼロとして、下流端では流下方向勾配をゼロとした。

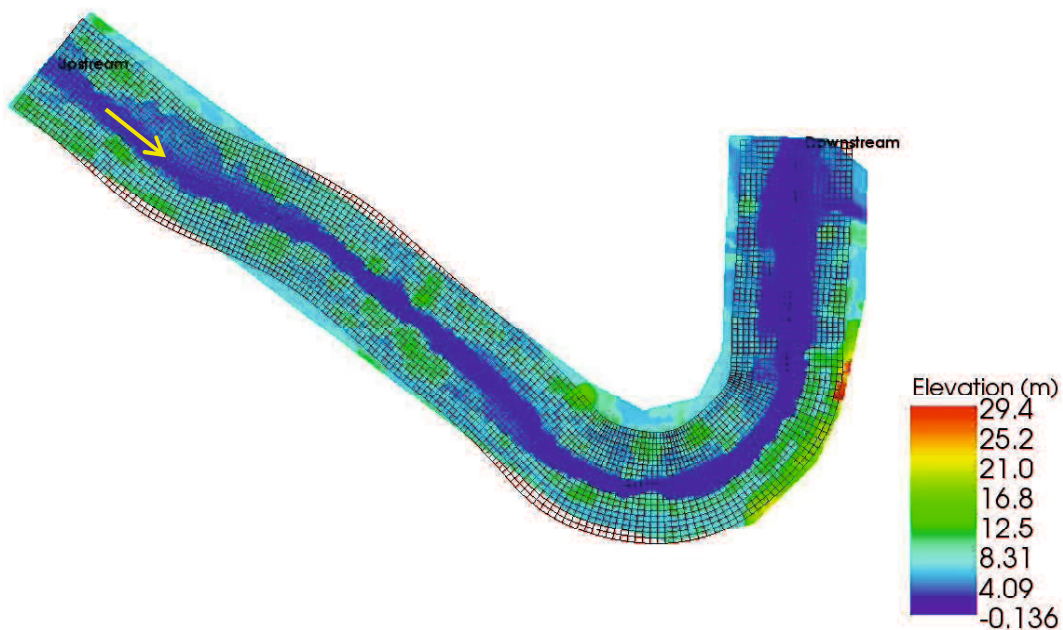


図 5-14 計算格子

5.4.3 計算対象流量

流量は国土交通省水文水質データベースに登録されている2002年～2005年までの時間流量を利用した¹⁰⁾。4年間における年間流量変動を図5-15に示す。本研究の目的から、毎年必ず発生するような中小規模出水によっても堰撤去、或いは完全転倒のための改良による産卵河床区間の拡大の可能性を確認する必要がある。このため、図中の破線枠線で囲った春期から雨季、及び夏季から秋季に発生する中小規模出水を合成して4年間における計算対象流量とした。なお、流量観測地点は、取水堰地点(CA=15.80km²)より上流地点(CA=14.70km²)で観測されているため、流域面積比で補正を行って用いた。

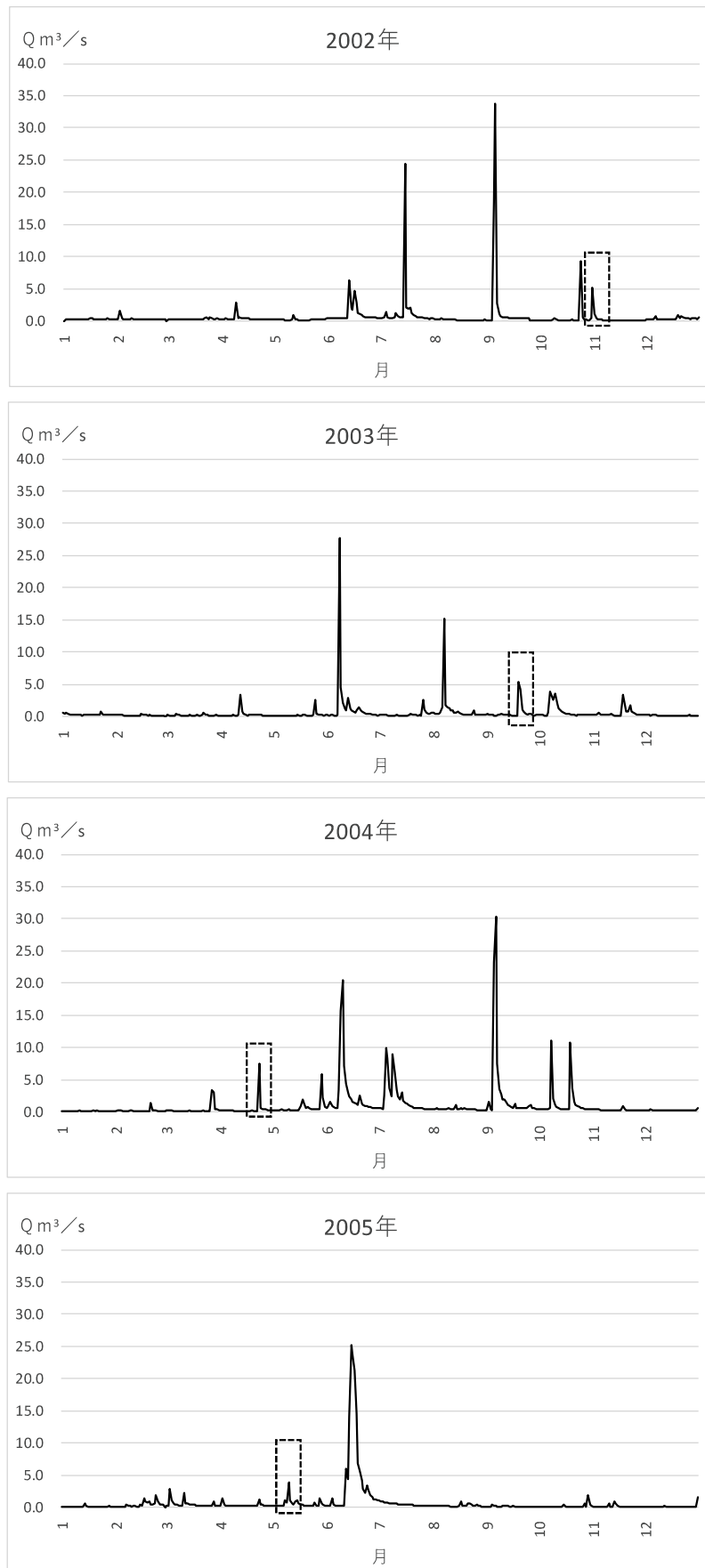


図 5-15 流量データの現存する各年における流量傾向と計算対象流量

5.5 計算結果

5.5.1 出水時流速変化

図 5-16 に現況と堰撤去後における出水時ピーク流速分布の変化を示す。図には出水発生 4 時間後のピーク流量 $44.43\text{m}^3/\text{s}$ 時の流速分布を示している。また、図 5-17 に同時期の水深を示す。源河川は沖縄県管理河川の治水安全度の基準である 1/30 降雨確率規模、取水堰地点計画高水流量= $305\text{m}^3/\text{s}$ で改修済みであり¹⁾、中小規模出水ピーク流量 $44.3\text{m}^3/\text{s}$ 程度では、水深からわかるとおり低水路部分しか冠水しない。その際の流速分布では、取水堰撤去後に蛇行部における赤色で示された最大流速 3.0m/s 超の分布がより下流側へと移動し、取水堰付近から下流側へと黄色で示される $0.654\sim 1.11\text{m/s}$ の流速範囲が伸長傾向にあり、堰内堆積土砂が下流へ移動しやすい環境になっていることを示している。

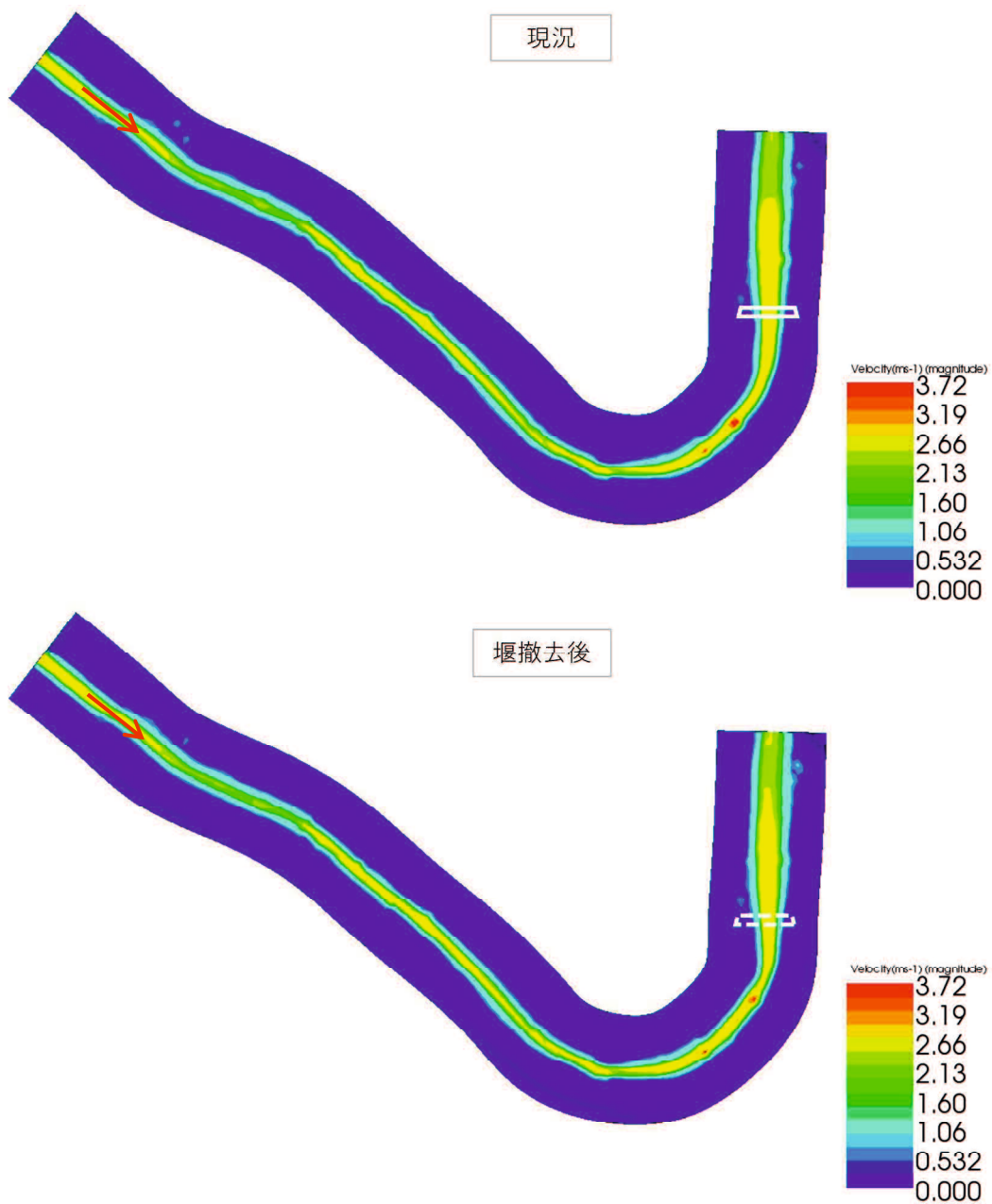


図 5-16 現況と堰撤去後における出水時ピーク流速の変化

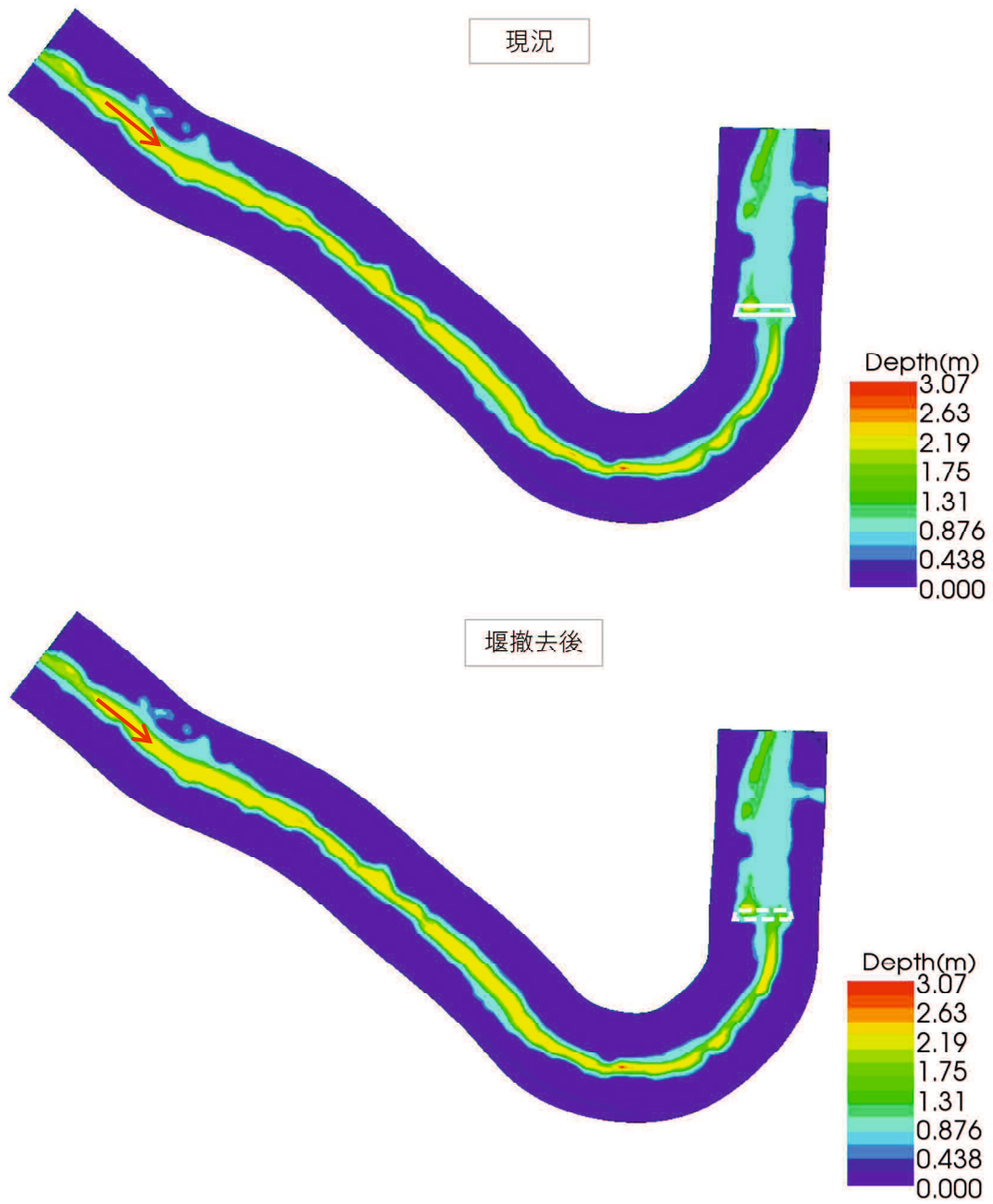


図 5-17 現況と堰撤去後における水深の変化

5.4.2 地形変化

図 5-18 に現況と堰撤去後における地形の変化を示す。図に示した標高コンタでは堰撤去後に堰から上流の蛇行部で河床高がわずかながら上がる傾向にある。取水堰撤去によって河床の土砂移動が発生し、河床の縦断形状が平準化する傾向にあるものと考えられる。

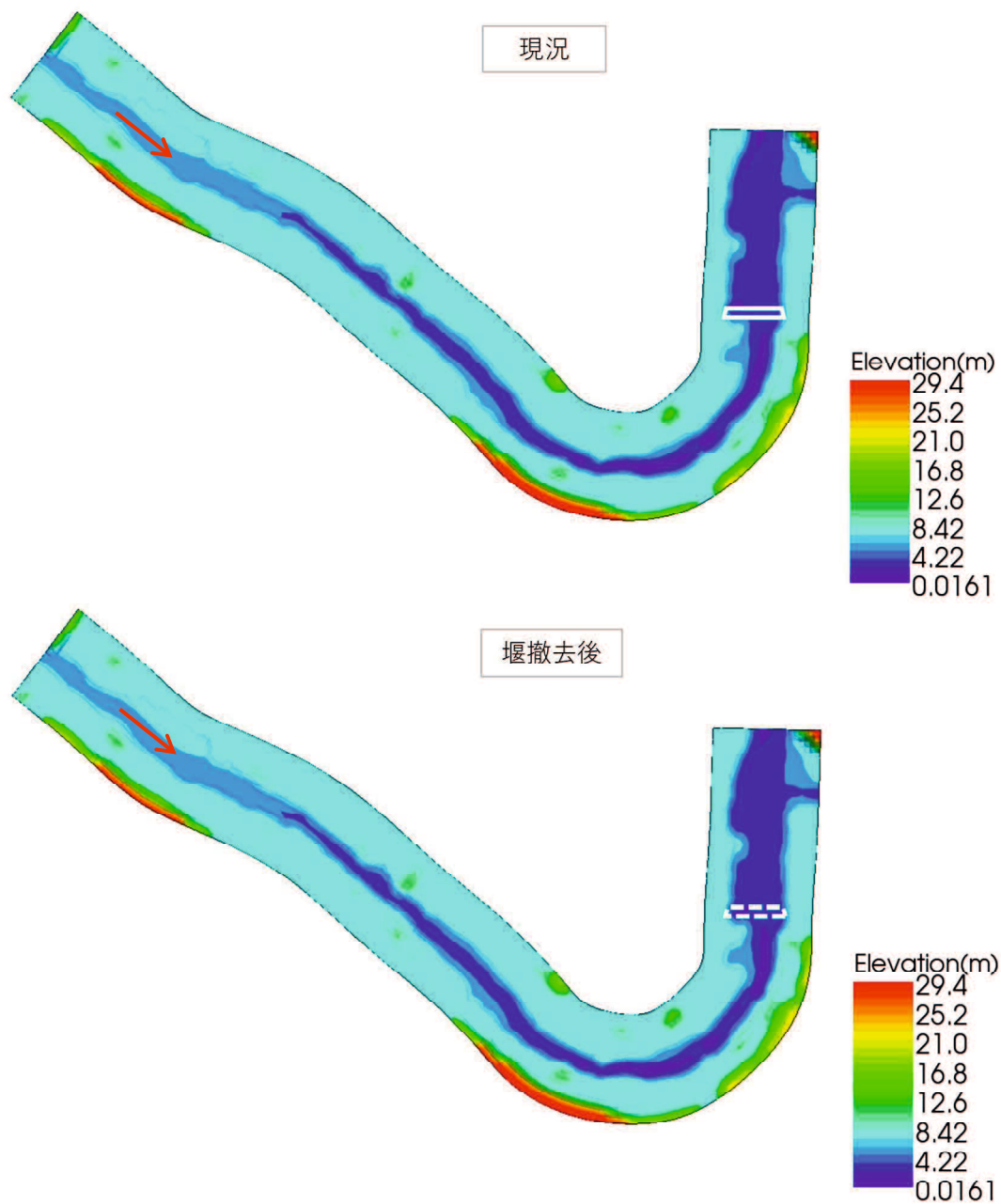


図 5-18 現況と堰撤去後における地形の変化

5. 4. 3 河床材料粒径変化

図 5-19 に現況と堰撤去後における河床材料の平均粒径の変化を示す。産卵河床区間では、現況と堰撤去後も同様の平均粒径の分布状態である。堰内堆砂区間では、大きく蛇行する区間なので、蛇行の内側では流速低下による小さな粒径が溜まる傾向に差異は無いが、蛇行の外側では黄緑色で示される大きめの粒径が増える。しかしながら、ここは河床が掘れて大水深となるため産卵河床としては不適である。堰付近から下流の堰下流区間では、堰撤去の場合に比較的大粒径の範囲が拡大する。

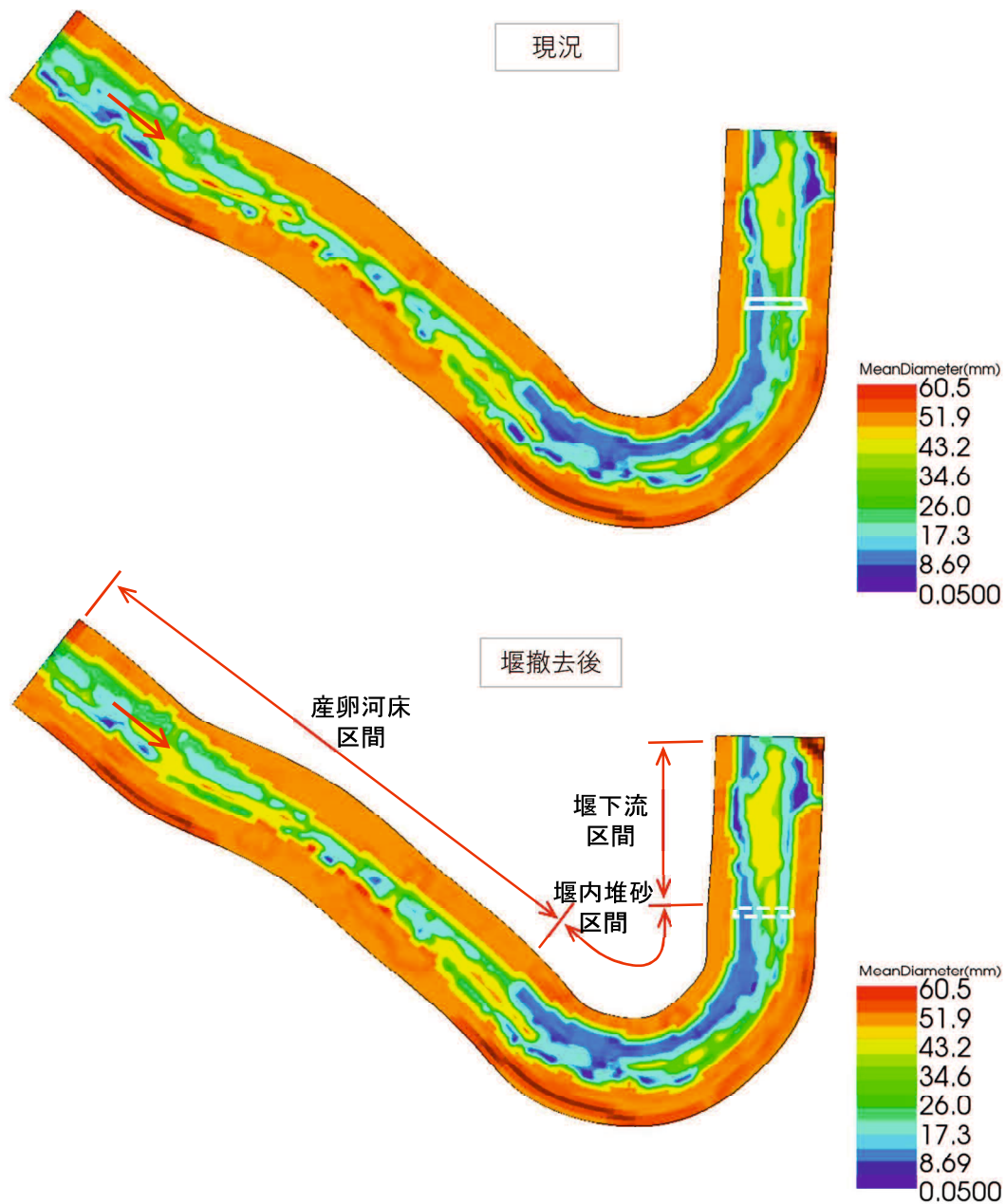


図 5-19 現況と堰撤去後における河床材料平均粒径の変化

5.6 取水堰撤去による効果評価

源河川における自然再生として取水堰撤去によるリュウキュウアユの産卵河床の拡大を提案し、取水堰撤去による取水停止が沖縄島の利水に与える影響を検討した結果、将来観光客が沖縄県の政策目標である 1,000 万人に達した場合においても、ダム総利水容量は過去の給水制限レベルには至らないことから、利水安定上も問題が少ないことが明らかとなった。

利水に影響が無いことが明らかになったため、取水堰撤去によるリュウキュウアユの産卵河床の拡大の可能性に関して、河床変動シミュレーションによって検討した。なお、流量は毎年発生する規模の中小規模出水を与えた。その結果、堰撤去によって河床堆積土砂が下流側へ移動する可能性が示されるとともに、堰から下流側に産卵河床として好適な河床材料粒径の範囲が広がる可能性が示唆されたことから、取水堰の撤去、或いは完全転倒化への改良は、源河川におけるリュウキュウアユ産卵河床の範囲を拡大し、再定着へ大きく寄与するものと評価できる。

【参考文献】

- 1) 沖縄県環境部：多自然型河川改修モデル事業報告書，2014.
<http://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/saisei/alotnature.html>.
- 2) 神谷大介，與那城学，赤松良久：気候変動を考慮した亜熱帯島嶼観光地域における渇水リスク評価，地球環境研究論文集，Vol.18，pp.89-96，2010.
- 3) 沖縄県企業局：水量記録集，2015.
- 4) 内閣府沖縄総合事務局開発建設部：平成16年度沖縄本島北部地域河川再生調査検討業務報告書，2005.
- 5) 大槻順朗，平野一成，二瓶泰雄：河床洗堀ポテンシャル簡易試験法に基づくリュウキュウアユの産卵場環境評価，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69，No.4，pp. I_1231- I_1236，2013.
- 6) 芦田和男，道上正規：移動床ながれの抵抗と掃流砂に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，Vol.206，pp.59-69，1972.
- 7) 長谷川和義：沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究，北海道大学学位論文，1983.
- 8) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with sus-pendedsediments, Proc.ASCE, Vol.106, No.HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 9) Rubey, W. W.: Settling velocities of gravel, sand and silt particles,Amer. Jour. Sci., Vol.25, pp.325-338, 1933.
- 10) 国土交通省：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=301060190002010>.
- 11) 沖縄県土木建築部河川課：河川整備基本計画調査検討業務報告書，p.157，平成10年.

第6章 発展性と課題

6.1 優先度評価モデルの汎用性と課題

本研究では、魚類の生息環境を再生目的、また地形等過去からの変化が少ないと考えられる情報及び水質の状態などを説明変数として、在来魚にとって再生を行うことが好ましい河川、及びリュウキュウアユの再定着の視点から再生を行うことが好ましい河川を抽出するための優先度評価モデルを作成した。

前者では、在来種と外来種の分布を説明可能な評価モデルを作成することができた。沖縄島のような島嶼地域の河川は、規模が小さく、縦断勾配が大きい傾向にある。このような河川では、遊泳魚の生息範囲は短い区間に制限され、また河口閉塞も発生しやすいことから河川への侵入も困難になる場合がある。従って、もともと遊泳性の河川魚にとっては脆弱な生息環境であると言えよう。両側回遊魚かつ遊泳魚であるリュウキュウアユは沖縄島から絶滅したのは、元々生息環境が脆弱であったことも一因と考えられる。後者のリュウキュウアユの定着ポテンシャルモデルについても、河川延長が大きく、下流側で緩勾配であること、中規模以下の内湾度との関係が強いことなどから、遊泳魚としての生息区間制限要因や稚魚の生活場所要因など従来から指摘されていた分布要因を反映させたものとなった。

評価モデルの作成に当たって、沖縄島の全対象河川を同一精度で網羅する調査結果が魚類しか入手できなかったことも事実ではあるが、海と川を利用して生活する他のエビ・カニ類、巻貝類は遊泳魚と比較して遡上能力が遥かに大きく、また、これらの河川性動物では外来種も少ないことから明瞭なモデル作成には至らなかったことが想定される。以上のことから、在来魚・外来魚の分布状態により評価を行う優先度評価モデル、リュウキュウアユの再定着の視点からの優先度評価モデルは、沖縄島の中小河川における自然再生上の優先度検討に関して有効であるものと言える。

今回、利用した魚類調査結果は、種の確認のみで個体数は計数されていないものであった。個体数の多寡が示すものは環境収容力であり、河川規模、瀬淵の規模や量との関係で変化する。沖縄島の中小河川は、下流域でも河床縦断勾配が 1/800 程度以下の中小規模かつ急勾配河川であり、遡上先の河川の環境収容力が小さいため、遊泳魚の在・不在が明瞭になった可能威がある。このような環境収容力の小さな河川では、横断構造物の設置は生息範囲を狭めるだけでなく、元々少ない瀬や淵を更に減少させる。第5章奥川の再生手法・技術評価では、2番目の落差工撤去によって遊泳魚の出現種が増加しており、これらのことは、魚類種の在・不在によって評価を行う今回の評価モデルは、このような中小規模河川にのみ適用可能であるということを示している。一方、規模の大きな河川では、在・不在が明瞭になる可能性が小さいため、個体数の観点をモデルに反映させなければ、精度の高い評価モデルは作成できないものと考えられる。

本研究では、外来魚分布の説明変数の一つに水質を用い、このための水質調査を行った。水質調査は海水の影響を避けるために極力淡水域最下流で行った。しかしながら、沖縄島の中小河川の下流域の多くは汽水・感潮域であり、淡水域より下流側に汚濁負荷が流入し、海からの河川魚の侵入を阻み、また塩水・汚濁に強いテラピア類などの増殖要因になっている可能性もある。このため、最干潮時に河川最下流で全汚濁負荷を捉えることができれば、更

に精度が向上するものと考えられる。また、水質はその時間における状態を反映させているに過ぎないため、年間を通じた状態は不明なままである。年間を通して水質調査を行うことは、比較的簡易に入手可能な情報によるモデル構築を図るといふ本研究の趣旨から逸脱する。このため、下水道整備計画関連資料などを入手し、流域年排出負荷量を取りまとめて水質調査の代用とすると更に精度が向上する可能性がある。

6.2 地域住民主導による自然再生の必要性

自然再生は長期間を要することから、地域住民、地域産業界、地域行政が主体となって進めることが望ましい。このため、地域住民の河川環境保全・再生に関する意識が重要な要素となる。例えば、佐賀県松浦川におけるアザメの瀬再生事業（平成13年度～平成22年度）は、徹底した地域住民のとの対話の中で計画され、地域住民主体による自然再生の成功例と言える。

松本ら¹⁾は、沖縄島全2級河川を対象として、河川環境保全に関する住民活動のポテンシャル評価を行っている。これは、水面が見えるか否か等の河川の状態、土地利用や人口構成等の河川周辺社会環境、持ち家率やNPO等のソーシャルキャピタル指標を用いて評価を行い、河川から500mの範囲内に小学校があること、持ち家率が高いこと、水面が見えること等が活動創始に重要な要因であることを明らかにしている。このモデルによって得られた活動ポテンシャルを表6-1に示す。

本研究では、在来魚にとって自然再生を行う優先度が高い河川（図6-1）から既に落差工撤去などが行われている奥川を選択して再生手法・技術評価を行った。同じくリュウキュウアユの再定着という観点から自然再生の優先度が高い河川（図6-2）として源河川における取水堰撤去の評価を行った。奥川は自然再生事業を実施していることなどから見て活動ポテンシャルも高い。在来魚にとって自然再生を行う優先度が高い18河川に対して活動ポテンシャルによって更に順位をつけることも可能であり、今後の課題である。一方、源河川は全体の中位に位置するが、リュウキュウアユは源河川や羽地大川の流出先である羽地内海で稚魚が育ち周辺河川に分散していた可能性があり、羽地内海を拠点とするならば、源河川から最初に取水堰撤去を行うことが、最大の効果をもたらすものと考えられる。

表 6-1 河川の活動ポテンシャル¹⁾

河川名	P	河川名	P
石川川	0.943	普久川	0.581
牧港川	0.942	源河川	0.566
小湾川	0.915	天願川	0.551
奥川	0.909	比謝川	0.528
我部祖河川	0.909	大井川	0.490
普天間川	0.905	川崎川	0.474
報得川	0.886	有銘川	0.467
与那川	0.849	福地川	0.448
小波津川	0.841	安里川	0.416
饒波川	0.830	真嘉比川	0.411
億首川	0.829	漢那福地川	0.345
奥間川	0.821	新川川	0.331
屋部川	0.787	羽地大川	0.300
国場川	0.777	名嘉真川	0.262
安波川	0.757	潮渡川	0.228
長堂川	0.729	大保川	0.161
雄樋川	0.728	辺野喜川	0.160
白比川	0.698	田嘉里川	0.113
満名川	0.691	汀間川	0.100
比地川	0.658	真謝川	0.088
久茂地川	0.619	西屋部川	0.067
宇地泊川	0.599	真喜屋大川	0.058
安謝川	0.593	轟川	0.035
幸地川	0.589	与那原川	0.032

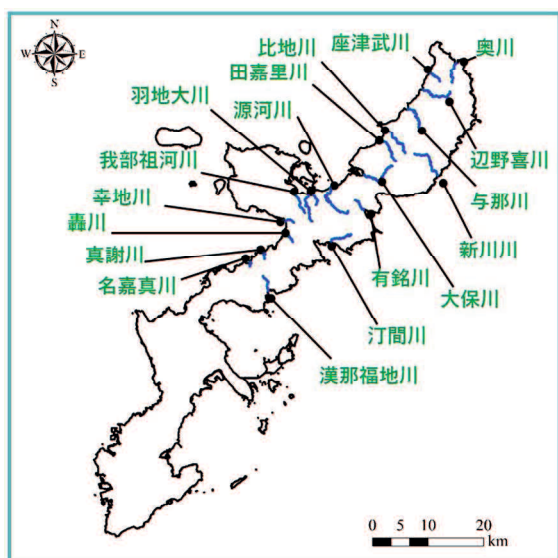


図 6-1 在来種にとって
自然再生優先度の高い河川



図 6-2 リュウキュウアユの再生定着から
見た自然再生優先度の高い河川

【参考文献】

- 1) 松本悠・神谷大介：ソーシャル・キャピタルを考慮した住民主体の河川環境保全再生活動に関する要因分析と可能性評価，環境システム研究論文集，Vol.38，pp.171-177，2010.

第7章 結論

対象地域の沖縄島では、1972年の日本本土復帰前後から始める大量のインフラ整備、農地開発、水質汚濁等により自然環境の劣化が進み、特に河川ではアユの亜種リュウキュウアユが絶滅するなど大きな影響を受けた。これに対して1980年代後半にはリュウキュウアユが再定着可能な河川再生を目指すリュウキュウアユを蘇生させる会が結成され、学术界、河川管理者、地域住民らの協働による河川における自然再生が始まる。2003年には自然再生推進法が制定され、沖縄においても河川関連の自然再生として、やんばる河川・海岸自然再生協議会（2004年）、奥川自然再生協議会（2007年）、慶佐次川自然環境再生協議会（2015年）が結成されるなど、自然再生に関する機運が高まっており、今後も実施地域が拡大される傾向にあるものと考えられる。自然再生は行政によって事業化される場合が多く、事業地選定プロセスの透明性、合理的説明が求められるが、沖縄においてはこれらが検討された経緯は無く、また、島嶼地域の中小河川における再生技術も効果評価には至っていないのが現状である。本研究の目的は沖縄島における二級河川を対象に自然再生優先度を検討し、優先度の高い河川における再生技術の効果評価を行うこととした。

対象河川は急勾配の中小河川であるため、河川横断構造物の設置による流水の分断と生息環境の狭隘化（もしくは消失）、滞留域形成による外来魚の定着などは、在来魚にとって影響が大きいものと判断され、先述した河川再生のシンボルとしてのリュウキュウアユを加えて、再生目標を在来魚に着目した場合とリュウキュウアユに着目した場合に設定した。

沖縄島では38水系が二級指定されているが、継続的な流量観測が行われている河川も少なく、優先度検討のための均質な情報は少ない。このため、在来魚に着目した自然再生優先度では、地形・地質情報に在来魚の生息に影響を及ぼす水質の状況を加えて検討を行った。リュウキュウアユに着目した自然再生優先度では、在来魚の場合に採用した地形情報にリュウキュウアユ稚魚の生息場としての内湾規模を加えて優先度を検討した。在来魚に着目した自然再生優先度では、河川縦断勾配が比較的大きく、かつ比較的流域面積が小さい河川で在来魚が多く、或いは在来魚比率が高い傾向にあり、また、水質が相対的に良い河川で在来魚が多い傾向にあったことから、これらの18河川が在来魚にとって再生する価値のある、即ち優先度の高い河川であるとした。リュウキュウアユに着目した自然再生優先度では、過去のリュウキュウアユの分布情報を目的変数、地形情報を説明変数としてロジスティック回帰分析を行い、リュウキュウアユ定着ポテンシャルモデルを作成し、判別中点0.3以上をリュウキュウアユの定着ポテンシャルが高い河川とした。リュウキュウアユの再定着は重要な視点であるが、同時に在来魚にとっても好適であることが望ましいため、在来魚優先度の高い18河川との共通8河川で自然再生優先度が高いとした。

在来魚に着目した自然再生優先度検討結果で優先度が高いとした18河川中、2007年から自然再生が進められている奥川における自然再生手法・技術の効果評価を行った。奥川では河川管理区間に3基の落差工があり、第2落差工の堆砂区間を中心に瀬切れが頻発していた。また、河道の直線化と落差工によって蛇行の少ない単調な河床形状となっていた。これに対し、第2落差工を撤去するとともに、その上流側で引堤による滞りを行って、河川測量結果から、第2落差工の撤去によって上流側の堆積土砂が下流側へ移動し、堆積土砂へ

の伏流による瀬切れは軽減される可能性があるとした。また、引堤によって整備された淵は、その後の出水によっても埋まることなく水深が維持されていることが明らかとなった。魚類のモニタリング結果によって、海から淡水域まで遡上することのあるギンガメアジや多数のボラ類が第2落差工の上流側で確認されるようになったこと、再び発生した瀬切れ時に整備した淵内で多数のユゴイ類の生息が確認したこと、その後引き続き多数のボラ類が確認されたことから、奥川で実施されている自然再生は効果があったものと評価された。また、このような効果を持つ河床地形の長期的維持に関して河床変動シミュレーションを行った結果、第2落差工撤去後には上流側の堆積土砂が下流へ移動して河床縦断形状が平準化し、これが維持されること、引堤によって整備された淵は堆積と浸食を繰り返し、ある程度の水深が維持されることが明らかとなったため、長期的にも効果の継続が期待される結果となった。

リュウキュウアユに着目した自然再生優先度検討結果で優先度が高いとした8河川中、河川取水施設のみがある4河川の内源河川における取水堰撤去の可能性とその効果を検討した。リュウキュウアユの絶滅後、奄美大島産の個体を1992年からダム湖・流入河川に放流しており、順調に陸封化・定着が進んでいる一方で河川定着には至っていない。再生産のための産卵場や河口海域における稚魚生息場が少ないからではないかと考えられている。このため、淡水域最下流に設置されている河川取水堰撤去によって、リュウキュウアユの産卵河床として適切な河床材料粒径の範囲を拡大させる再生手法を提案し、源河川における取水停止後の利水面からの可能性を検討するとともに、撤去による適切な河床材料範囲拡大の可能性を、河床変動シミュレーションを用いて検討した。その結果、沖縄県の政策目標である観光客1,000万人達成時においても、源河川における取水堰撤去によって給水停止という事態にはならないことが明らかになった。また、取水堰撤去によって産卵河床における適切な河床材料粒径が取水堰付近から下流側で拡大することが明らかとなった。このため、源河川における取水堰撤去による自然再生手法は効果があるものと評価された。

本研究における在来魚に着目した自然再生優先度評価モデルは、種の在・不在と地形・地質及び水質との関係解析によって作成された。急勾配かつ環境収容力の小さな島嶼地域の中小規模河川では、河川横断構造物の設置などによる環境改変は、当該河川からある種の魚類の消滅を引き起こす。絶滅したリュウキュウアユはその代表と考えられる。逆に、環境収容力の大きな大河川では、種の消滅までには至らない可能性があることから、種の在・不在で評価を行う本モデルは大河川では適用できず、本モデルは急勾配の中小河川のみに汎用性を持つものと考えられた。自然再生を行うには長期間を要するため、地域住民や地域経済界の主体的な参画が重要となる。自然再生優先度評価には、今後、地域住民の主体的参画の可能性評価を組み込むことにより、長期的な継続性に関する評価も行えるようになるものと考えられた。