

河川本流に対する灌漑用湧水池および用水路の 魚類生息環境としての役割

要約

1. はじめに
2. 調査地および方法
 - 2.1 調査地の概況
 - 2.2 調査方法
 - 2.3 データ解析
3. 結果
 - 3.1 重信川と湧水池における水位変動および魚類相の概況
 - 3.2 湧水池の魚類群集と環境要因との対応関係
 - 3.3 用水路の魚類群集と環境要因との対応関係
 - 3.4 枯渇した湧水池における魚類群集の回復
4. 考察
 - 4.1 湧水池および用水路の魚類群集の特性
 - 4.2 湧水池の魚類群集の保全のために

引用文献

要約

我が国の自然環境のほとんどは、原生的なものではなく、何らかのかたちで人為的影響が加わった二次的自然である。河川に関しても、治水・利水を目的とした河川管理は古くより試みられており、それらによつて独特の生態系が形成されている場合もある。松山市近郊を流れる重信川流域には、100ヶ所にも及ぶ小規模な湧水池が重信川本支流に沿つて点在している。これらの湧水池は、1700年代後半より灌漑用として掘られたもので、用水路によって水田、さらに重信川本支流へと連結している。これら湧水によってつくられる水辺域は、魚類をはじめとする動植物の生息場所となっており、貴重な二次的水環境と言える。また、重信川は、典型的な天井川で、湧水池が点在する中流域では、降雨の少ない時季には表面流が枯渇する区間が広がる。このような変動の激しい環境下において、用水路を介した河川～湧水池間の連結がそれぞれの魚類群集の維持において相互に重要な役割を果たしている可能性がある。このような背景の下に、まず、本研究では、重信川流域の湧水池および水路の魚類群集の特性と環境要因との対応関係を明らかにし、魚類にとって好適な湧水池および水路の環境条件、および河川～湧水池間の連結の重要性を検討することを目的とした。

1998年8月から1999年10月までの14ヵ月にわたり、13の湧水池、22の用水路において魚類群集の動態とその生息環境を定期的に調査した。そして、湧水池および水路の魚類群集と生息環境要因との対応関係および枯渇からの回復過程について検討したが、それらの結果は、湧水池の魚類群集の動的な側面を強調するものとなった。湧水池および水路の魚類相は、基本的には重信川本流と同様なものであった。また、枯渇した湧水池へ魚類の再進入は速やかであり、魚類は河川～湧水池間を比較的頻繁に移動していることが示唆された。湧水池の魚類群集には、生息場所構造に関する要因よりは、供給源からの距離、つまり、河川との連結性が強く関与していた。一方、河川と湧水池を結ぶ水路においては、供給源から距離よりも生息場所の構造的特性の方が強く影響しており、より複雑な構造を持つ水路の方が魚類にとって好適な生息環境であることが示された。これらのことより、湧水池の魚類群集を保全するためには、湧水池自体の環境を保全するのみならず、水路の構造的複雑性を維持し、河川との連絡を確保することが極めて重要であると考えられた。

また、長期的、大局的な視点から流域全体を見れば、湧水池や水路等といった河川周辺の水域生息場所に生息する魚種の供給源となっているのは、明らかに重信川本流である（短期的、局所的に見ればその逆もあり得る）。その点から考えれば、現時点における種の多様性を維持していくためには、その供給源である本流の生息環境を保全することが不可欠であると考えられた。

1. はじめに

我が国の自然環境のほとんどは、原生的なものではなく、何らかのかたちで人為的影響が加わった二次的自然である。河川に関しても、治水・利水を目的とした河川管理は古くより試みられており、それらによって独特の生態系が形成されている場合もある。例えば、平野部の水田地帯では、農業用水路が網の目のように広がり、水田特有の生物群集を保持している³⁹⁾。このような、河川背後に広がる古くより培われた二次的水環境は、河川流域全体の生物群集の維持にとって重要な役割を果たしていると思われる。

松山市近郊を流れる重信川流域には、100ヶ所にも及ぶ小規模な湧水池（泉）が重信川本支流に沿って点在している¹²⁾。これらの湧水池は、1700年代後半より灌漑用として掘られたもので、用水路によって水田、さらに重信川本支流へと連結している。これら湧水によってつくられる水辺域は、魚類をはじめとする動植物の生息場所となっており、貴重な二次的水環境と言える。また、重信川は、典型的な天井川で（上流域での土砂生産量が高く、河道内には上流からの流送土砂が厚く堆積している）、湧水池が点在する中流域では、降雨の少ない時季には表面流が枯渇する区間が広がる。このような変動の激しい環境下において、用水路を介した河川～湧水池間の連結がそれぞれの魚類群集の維持において相互に重要な役割を果たしている可能性がある。

こういった、河川本流とそれに連結する水域生息場所（水路、水田、池等）間での、生息環境としての相互の役割を明らかにすることは、河川中流域の生物群集の保全を考える上で極めて重要である。このような背景の下に、まず、本研究では、重信川流域の湧水池および水路の魚類群集の特性と環境要因との対応関係を明らかにし、魚類にとって好適な湧水池および水路の環境条件、および河川～湧水池間の連結の重要性を検討することを目的とした。

2. 調査地および方法

2.1 調査地の概況

調査は四国北西部に位置する重信川（流域面積 445km²、幹川流路長 36km）の中流域で行った（図 2・1）。重信川では上流域における高い土砂生産のため、扇状地が発達しており、その下流側では表面流が枯渇しやすい伏流区間が広がる。扇状地付近では支流の表川が流入しており、低水時に伏流区間を流れる表面流は、この表川から供給される水と本流河道内から湧き出る湧水である。表川との合流点から約 8km 下流では支流の砥部川が合流しており、この砥部川との合流点付近が伏流区間の下流端にあたる（図 2・1）。扇状地から下流側は水田地帯となっており、重信川の小支流である内川が、重信川本流と平行するように流れている。湧水池が掘られているのはこの水田地帯であり、重信川本流および内川に沿って点在している¹²⁾。

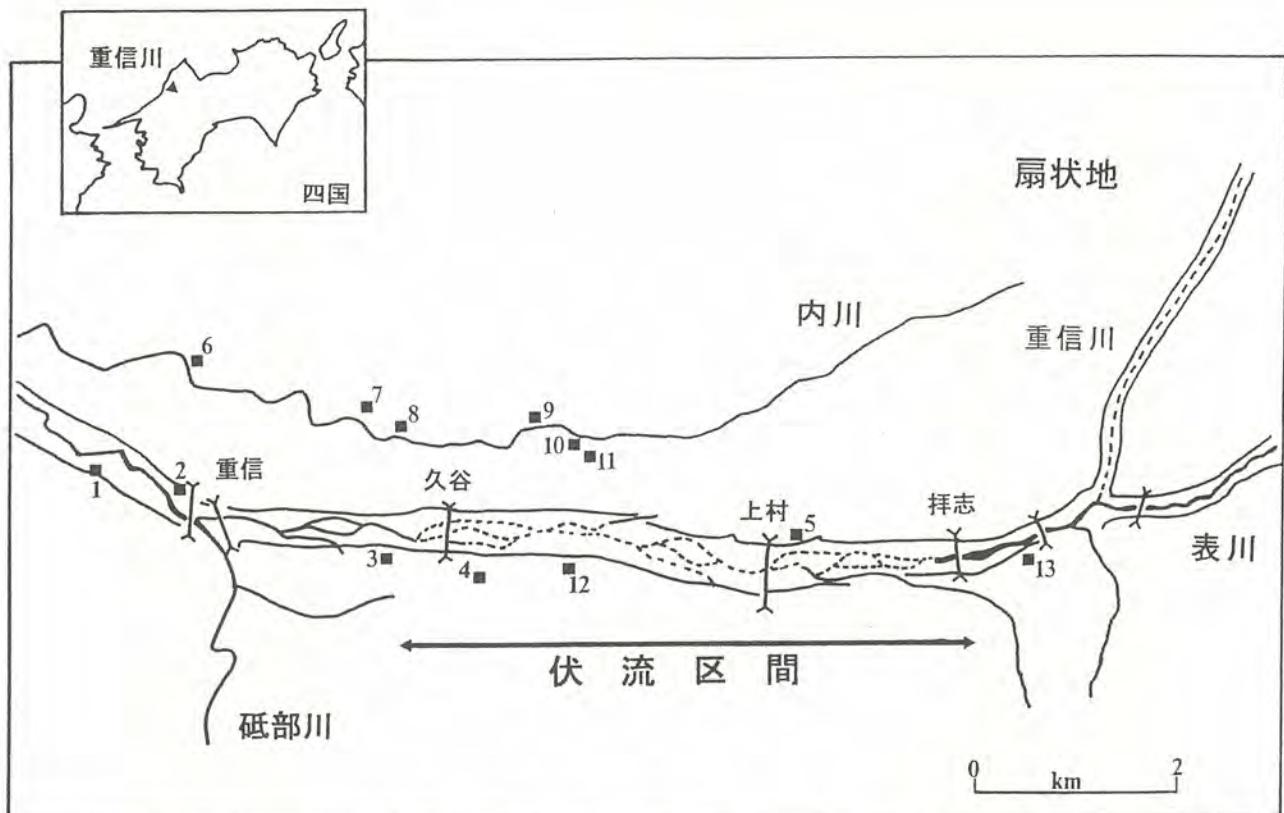


図2・1 調査地位置図。印は調査した湧水池を示す。番号は表2・1の湧水池名に対応
橋の名前：重信＝重信大橋、久谷＝久谷大橋、上村＝上村大橋、拝志＝拝志大橋

湧水池は、概して長方形の形で掘られているものが多いが、サイズは表面積で50～1000m²程度の範囲で様々なものがある。また、本来は素掘り、または石積みによって護岸されていたが、その後の改修により、コンクリート護岸で整備されたものも多い。このような湧水池間での環境特性の違いおよび位置を考慮して、重信川本流に連結する7つの湧水池と内川に連結する6つの湧水池を調査地として選んだ。1998年8月から1999年10までの期間中に、それぞれの湧水池およびそれに連結する水路において、魚類群集およびその生息環境の調査を継続的に行った（図2・1；表2・1）。

表 2・1 調査地の概況。距離 1 は重信川本流までの距離、距離 2 は内川までの距離（内川を介して重信川本流に連結している湧水池の場合）。湧水池の番号は、図 2・1 に対応。

湧水池	連結河川	距離 1 (km)	距離 2 (km)	連結水路での 調査区間数	湧水池での調査期間
1. 河原泉	重信川本流	1.2	1.2	2	98年8月～99年10月
2. 夫婦泉	重信川本流	0.6	0.6	2	98年8月～99年10月
3. 小泉	重信川本流	1.3	1.3	2	98年8月～99年10月
4. 役所泉	重信川本流	2.0	2.0	2	98年8月～99年10月
5. 龍沢泉	重信川本流	1.0	1.0	2	98年8月～99年10月
6. 弁天泉	内川	3.2	0.2	1	98年8月～99年10月
7. 鷹巣泉	内川	5.1	0.6	2	98年8月～99年10月
8. 日下泉	内川	5.7	0.2	1	98年8月～99年10月
9. 舟入泉	内川	7.2	0.2	1	98年8月～99年10月
10. 五反地泉	内川	8.6	1.1	3	98年8月～99年10月
11. 大割泉	内川	8.7	1.2	1	98年8月～99年10月
12. 梅之木泉	重信川本流	1.2	1.2	2	99年4月～99年10月
13. 森之木泉	重信川本流	1.9	1.9	2	99年4月～99年10月

2.2 調査方法

2.2.1 魚類調査

それぞれの湧水池間および水路間での魚種構成、各魚種の個体数の違い、およびそれらの時期的な変動を明らかにするために、湧水池では水中観察、水路では電気漁具を用いた採捕により、魚類個体数の調査を各時期毎（基本的に 2 カ月毎）行った。

それぞれの湧水池において、幅 1m の横断測線を 5~10 本設定し、その横断測線内で観察された魚類の個体数を魚種毎に記録した。その個体数を観察した測線面積で除し、生息密度の指標とした (N/m^2)。調査は、各時期において 3~5 回行い、それらの平均値をそれぞれの調査時期の生息密度の代表値とした。それぞれの湧水池につながる水路では、1~3 ヶ所の調査地を設定して行った（表 2・1）。水路のサイズは水路幅にして 1~3m 程度であり、水路の大きさに応じて、長さ 15~30m の調査区間を設定した。各調査区間ににおいて 3 回の繰り返し採捕による除去法⁷⁾によって魚類個体数を推定した。調査は各時期につき 1 回行い、推定個体数を調査区間面積で除し生息密度に換算した (N/m^2)。

これらの魚類調査は、湧水池では 1998 年 8 月、10 月、12 月、1999 年 4 月、6 月、7 月、8 月、10 月、12 月の 9 回行ったが、今回は 1999 年 10 月までの 8 回のデータを報告する。水路では、1998 年 8 月、10 月、12 月、1999 年 4 月、6 月、8 月の 6 回行った。ただし、13 の湧水池のうちの 2 ヶ所（梅之木泉、森之木泉）では、1999 年の 4 月から調査を行った（表 2・1）。また、水路の調査では、時期により、増水によって調査ができなかったものもある。

これら湧水池および水路での調査に加え、河川での魚類群集の動態を把握するために、内川（1調査区間で1998年8月、10月、12月、1999年4月、6月、8月、10月、12月の8回）および重信川本流（7～22調査区間で1999年5月、7・8月、12月の3回）で、水路での調査と同様な方法で魚類個体数の推定を行った（ただし、今回は湧水池と水路のデータを中心に報告する）。

2.2.2 生息環境調査

それぞれ湧水池および水路の環境変動特性を明らかにするために、調査期間中にわたり（1998年6月～1999年10月）、水位と水温を継続的に計測した。水温は最高最低温度計を各湧水池、水路に設置し、2週間毎に最低水温と最高水温を記録した。水位は各湧水池、水路に計測点を設け、基本的には2週間毎に記録したが、それらに加えて、降雨により大きな変化があった場合にも適宜記録した。また、重信川本流の伏流区間では、各流路（複数の流路が網状に配置されている；図3・1参照）における流水の有無（枯渇期間、枯渇頻度等）および流路自体の変動を定期的に記録した。

各湧水池において、長軸方向の長さを計り、これに垂直な横断測線を5～10本設定し、幅、水深、底質およびカバーを計測した。水深は横断測線上の5点で計測した。底質評価では、横断測線に沿った20cm区間毎の底質を、砂泥（礫径<2mm）、小礫（2～16mm）、中礫（17～64mm）、大礫（65～256mm）、巨礫（>256mm）、コンクリートおよび有機堆積物のいずれかに分類し、それぞれの占める割合をもとめた。カバーとは捕食者や強い水流からの避難場所またはそれを形成する構造物のことであり¹⁴⁾、今回は、水中の水草、倒木片および木枝、水底との間に隙間を持つ巨礫をカバーとみなし、測線上でのそれらの占める長さを計測し、全測線長に対するカバーの占める割合を求めた。岸部の状態を評価するために、岸部をコンクリート護岸、石積み護岸、非護岸部（護岸されていない自然状態の岸部）の3つに分類し、全水際長に対するそれぞれの割合を求めた。また、それとは別に、岸部の植生によって覆われている水際線の長さを計り、全水際線に対するその割合を求めた。さらに、横断測線上の各水深計測点において、その直上が樹冠によって覆われているかいなかを記録し、樹冠に覆われている計測点の頻度を求め、湧水池上空の樹冠被覆の程度を表した。水路の各調査区間においても5～10本の横断測線を設け、湧水池の場合と同様に計測を行った。

2.3 データ解析

以上より得られたデータから、湧水池と水路における魚類群集および環境要因を表す変数を算出し、魚類群集と環境要因との対応関係を解析した。解析は、（1）調査期間を通した通年での群集特性と環境要因との対応関係、（2）各調査時期における対応関係の2つおりで行った。

2.3.1 環境特性を表す変数

環境特性を表す変数として25変数を算出した（表2・2）、これらは、変数の意味付けから（1）位置的特性、（2）定常的（または時間平均的）特性、および（3）変動特性を表す変数として大別される。また、変数の使用対象として、通年での環境特性を表すもの（通年での分析に使用したもの）、時期毎の環境特性を表すものがある（時期毎での分析に使用したもの）。

表 2・2 湧水池および水路の環境特性を表す変数。計測、算出法の詳細については本文を参照。

変数名	算出法	対象	
		期間	生息場所
位置的特性			
流程位置 (km)	湧水池と重信川本流との連結点から重信川河口までの距離	通年・各時期	池・水路
距離 1 (km)	重信川本流までの距離	通年・各時期	池・水路
距離 2 (km)	最寄りの河川（内川）までの距離	通年・各時期	池・水路
定常的特性			
通年平均最低水温 (°C)	最低水温の年間での平均値	通年	池・水路
通年平均最高水温 (°C)	最高水温の年間での平均値	通年	池・水路
時期平均最低水温 (°C)	調査時期前後 2 カ月での平均値	各時期	池・水路
時期平均最高水温 (°C)	調査時期前後 2 カ月での平均値	各時期	池・水路
池の水表面積 (m ²)	平均幅×長さ	通年・各時期	池
池容積 (m ³)	水表面積×平均水深	通年・各時期	池
水路幅 (m)	平均水路幅	通年・各時期	水路
水路幅変異 (%)	水路幅の変動係数 (標準偏差/平均値)	通年・各時期	水路
水深 (cm)	平均水深	通年・各時期	池・水路
水深変異 (%)	水深の変動係数	通年・各時期	池・水路
底質多様度	シャノン・ウィナー関数	通年・各時期	池・水路
樹冠被覆 (%)	上空が樹冠によって被覆されている割合	通年・各時期	池・水路
非護岸部(素堀) (%)	護岸されていない自然状態の岸辺の割合	通年・各時期	池・水路
石積み護岸 (%)	石積み護岸部の割合	通年・各時期	池・水路
コンクリート護岸 (%)	コンクリート護岸の割合	通年・各時期	池・水路
岸部の植生被覆 (%)	水際部が植生によって被覆されている割合	通年・各時期	池・水路
カバー (%)	水中のカバーが水表面積に占める割合	通年・各時期	池・水路
変動特性			
通年最低水温変動 (%)	最低水温の年間での変動係数	通年	池
通年最高水温変動 (%)	最高水温の年間での変動係数	通年	池
通年水位変動 (%)	水位の年間での変動係数	通年	池
水位変動履歴 (%)	調査開始時期からそれぞれの調査時期までの水位の変動係数	各時期	水路
回復日数	枯渇後、水が回復してからの日数	各時期	池

長期的、大局的な視点から見れば、湧水池および水路に生息する魚類の供給源となっているのは、明らかに重信川本支流であり（ただし、短期的、局所的に見れば逆もあり得る）、河川からの距離は湧水池、水路の群集特性に対して潜在的に大きな影響を持つと考えられる。また、もしそうだとすれば、湧水池が河川の流程上のどの位置で連結するかということも重要になる。なぜなら、一般的に、河川では生息する魚類の種構成は上流から下流に向かって変化するからである（例えば、下流に向かって種数は増加する¹¹⁾）。このような考え方から、位置的特性を表す変数として、湧水池と重信川本流との連結点から重信川河口までの距離（「流程位置」）、湧水池または水路から重信川本流までの距離（「距離1」）、および「最寄りの連結河川（重信川本流または内川）からの距離（「距離2」）の3変数を選び、1/25,000 地形図からそれらを読みとった。

湧水池および水路の定常的（または時間平均的）特性として、水温、サイズ、生息場所の構造的特性、および樹冠被覆に関する17の変量を算出した。通年での水温の平均的特性を表すために、調査期間中（1998年6月～1999年10月）に計測された最低、最高水温それぞれの平均値を用いた（「通年平均最高水温」、「通年平均最低水温」）。また、各時期毎の水温を表すために、各調査時期前後2ヶ月の間に計測された最低、最高水温それぞれの平均値を用いた（「時期平均最高水温」、「時期平均最低水温」）。湧水池のサイズを表す変量として、「池の水表面積」、「平均水深」、「池容積」を算出した。水路のサイズを表すものとしては「平均水深」と「平均水路幅」を用いた。湧水池の構造的特性を表すものとしては、「底質多様度」、カバー占める割合（「カバー」）、岸部における「非護岸部」、「石積み護岸」、「コンクリート護岸」それぞれの占める割合、および水際部における被覆植生の割合（「岸辺の被覆植生」）を用いた。また、水路の構造特性を表すものとしては、これらに加えて、「水深変異」と「水路幅変異」も用いた。両者は、それぞれ、横断測線上で計測された水深と水路幅の変動係数（標準偏差/平均値）であり、水路形状の複雑さを表す指標とした。なお、底質多様度は、シャノン・ウィナー関数 ($H = -\sum p_i \ln p_i$: H は多様度、 p_i は底質 i が占める割合) により算出した⁴⁾⁵⁾。

変動特性としては、水位と水温の変動を変数とした。通年での水温の変動は調査期間中（1998年6月～1999年10月）に計測された最低、最高水温の変動係数を用いた（「通年最低水温変動」、「通年最高水温変動」）。通年での水位変動も同様に、調査期間中に計測された水位の変動係数を用いた（「通年水位変動」）。また、湧水池は調査期間中に完全に枯渇してしまったものもあったため、各時期における、枯渇後に水が回復してからの日数を変数として用いた（「回復日数」）。なお、枯渇していない湧水池に対しては「回復日数」として調査開始時からの日数を用いた。また、各時期における水路の水位変動特性としては、調査開始時期からそれぞれの調査時期までに計測された水位の変動係数（「水位変動履歴」）を用いた。

2.3.2. 統計解析

魚類群集と環境要因との対応関係の解析は、魚類群集特性を表す変数を目的変数、環境特性を表す変数を説明変数としたステップワイズ変数選択法による重回帰分析を用いて行った。各湧水池における通年での魚類群集の特性を表す変数として、通年で観察された総種数、平均種数、種数の変動度合いを表す変動係数、同様に総生息密度の変動係数、各主要魚種（オイカワ、カワムツ、タカハヤ、ギンブナ）の平均生息密度およびその変動係数を用いた（説明変数については表2-2 参照）。各時期毎での解析では、目的変数として種数および各主要魚種の生息密度を用いた。分析を行うにあたっては、必要に応じて変数変換（対数変換または逆正弦変換）を行った。

3. 結果

3.1 重信川と湧水池における水位変動および魚類相の概況

重信川本流では河道内に多量の土砂が堆積しており、網状流路の様相を呈している（図3・1）。

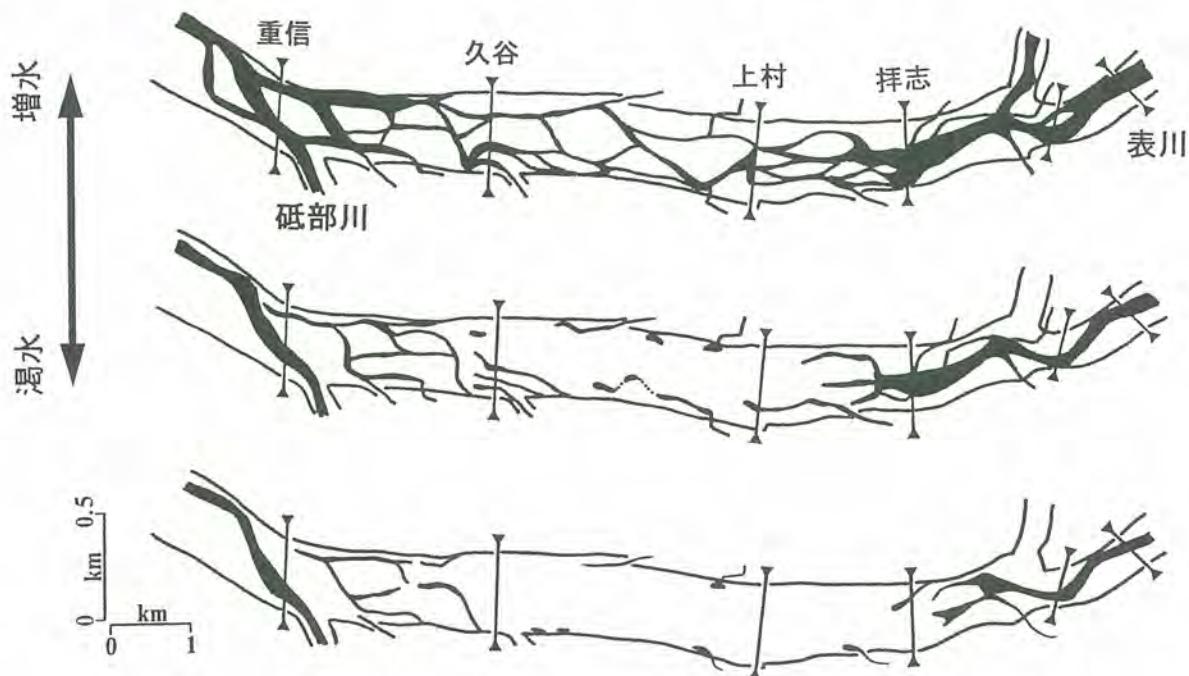


図3・1 重信川本流伏流区間における水位変動の模式図。縦横で縮尺が違うことに注意

橋の名前：重信＝重信大橋、久谷＝久谷大橋、上村＝上村大橋、拝志＝拝志大橋

増水時には、それらの流路を網状に水が流れ、上流側と下流側が連結するが、通常は、支流である表川から供給された水は下流に向かうにつれ河床内に浸透し、表面流は消滅する（図3・1：拝志大橋下流）。それより下流から砥部川との合流点付近までの伏流区間では、河道外から水路を経て流入する水や河道内から湧出する水によって、所々に分断された状態で流水が維持されている。しかし、晴天が続くと、それらの水流もしばしば枯渇する。これらの網状流路は生息場所としては極めて不安定であり、1999年4月から7月までの130日間での枯渇頻度は2～5回、流水の持続日数は長いものでも70日間であった。しかしながら、夏の魚類調査では、生息密度は上流および下流安定区間に比べて低かったものの、種数においては遜色なく、多くの魚種が採捕された（表3・1）。これらの魚類は、明らかに、伏流区間の上、下流側もしくは水路を経て河道外から進入したものであり、増水に伴って魚類が頻繁に移動（または受動的な流下）していることが示唆される。

表3・1 重信川本流、内川、湧水池および水路において採捕または観察された魚種。

印は採捕または観察された魚種を示す。「+」は他魚種に比べて生息密度が非常に低いもの。

魚種	重信川本流			内川	湧水池	水路
	上流安定区間	伏流区間	下流安定区間			
ウナギ	*	*	*	*	+	+
アユ	*	*	*		+	+
カワムツ	*	*	*	*	*	*
オイカワ	*	*	*	*	*	*
タカハヤ	*	*	*	*	*	*
タモロコ		+	*		*	+
モツゴ		+	*		+	+
カマツカ	*	*	*	*	*	+
コイ		+	*	+	*	
ギンブナ	*	+	*	*	*	*
ゲンゴロウブナ			+	+	*	
ヤリタナゴ	*	*	*	*	*	*
ドジョウ	+	+	*	*	*	*
スジシマドジョウ	+					
シマドジョウ	*	*	*	*	*	*
イシドジョウ	+	*	+			
ナマズ	*	*	*	*	*	*
メダカ					+	
オオクチバス		+	+	+	+	+
ブルーギル		+	+	+	+	+
ドンコ	*	*	*	*	*	*
シマヨシノボリ	*	*	*	*	*	*
オオヨシノボリ	*	*	+	+	+	
トウヨシノボリ		+	+	+		
カワヨシノボリ	*	*	+	*	*	*
ヌマチチブ	*	*	*	*	*	+

湧水池では、当初の予想に反して、かなり水位変動の激しいものが見られた（図3・2）。1998年6月より調査をはじめた11の湧水池のうち、比較的安定した水位を維持していたのものは小泉、弁天泉、および日下泉の3つで、河原泉、夫婦泉、龍沢泉、鷹巣泉、および五反地泉の5つでは、夏季または冬季に、ほぼ完全に枯渇した。

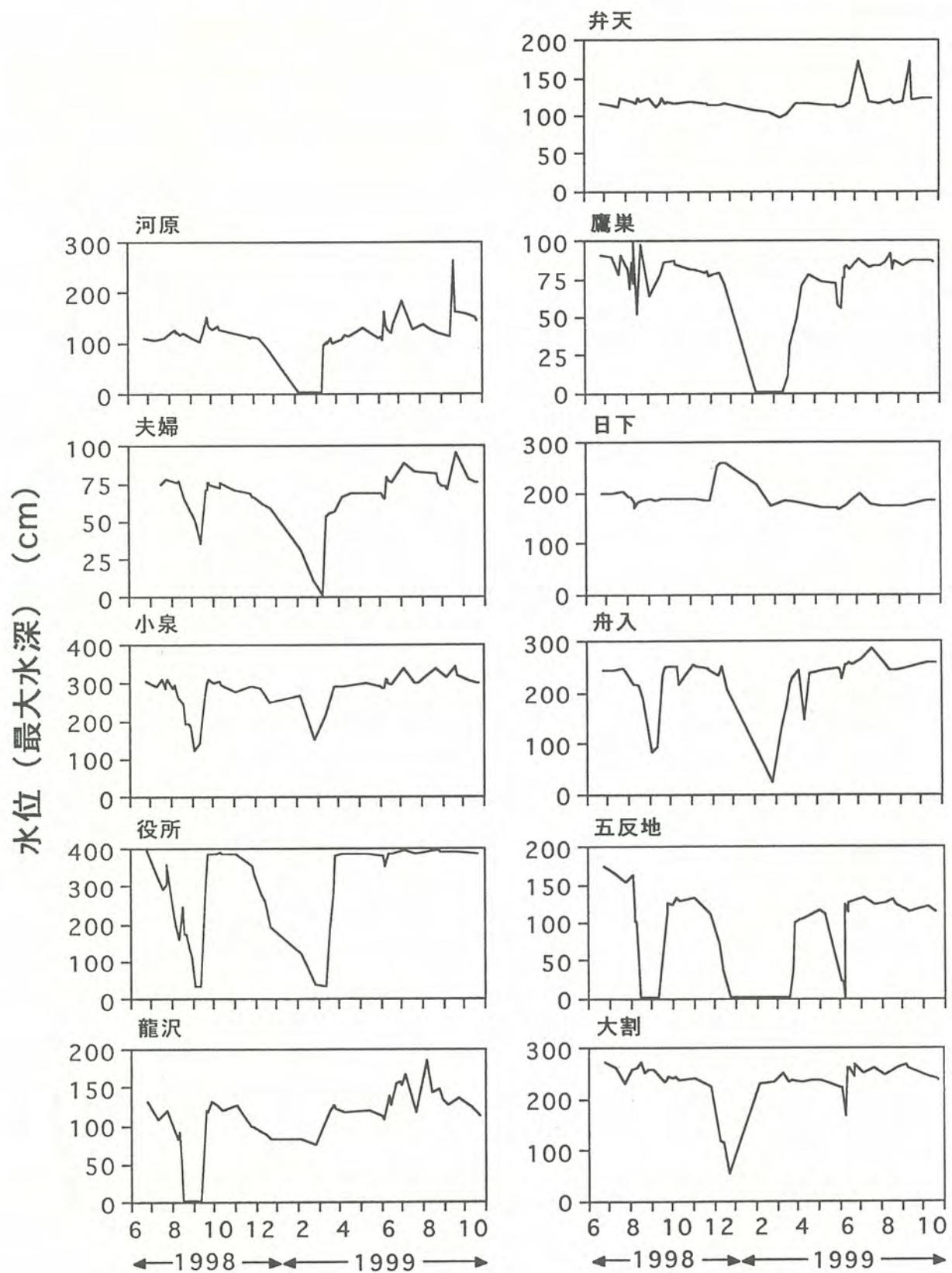


図 3・2 満水池における水位変動。

今回の魚類調査によって、重信川本流、内川、湧水池および水路において総計26種の魚種が採捕または観察された（表3・1）。重信川本流に比べて、内川、湧水池、および水路での種数は若干少なく、また、これらのうちのほぼ全てが重信川で確認された魚種であった。重信川本流では確認されず泉のみで確認された魚種はメダカのみであった。一方、湧水池では確認されず重信川本流のみで確認されたものは、スジシマドジョウ、イシドジョウおよびトウヨシノボリの3種であった。このような違いはあるが、湧水池では基本的に重信川本流とほぼ同様な魚類相を呈していると言える。なお、湧水池においては、場所によって差異はあるものの、概して、オイカワ、カワムツ、タカハヤおよびギンブナが優占種であった。

3.2 湧水池の魚類群集と環境要因との対応関係

通年での湧水池の魚類群集特性と環境要因との対応関係を重回帰分析で解析した結果（表3・2；図3・3）、年を通して観察された総種数は、距離1およびコンクリート護岸との負の相関によって回帰された。つまり、

表 3・2 湧水池での魚類特性に対するステップワイズ重回帰分析の結果。通年で確認された総種数、平均種数、種数の変動、総生息密度の変動、主要魚種の平均生息密度およびその変動に及ぼす環境要因
 n =サンプル数、 R^2 =決定係数、 F =分散比、 P =確率。「-」は有意な回帰モデル($P > 0.05$)が得られなかったものを示す。

目的変数	説明変数	標準回帰係数	回帰モデルの有意性			
			<i>n</i>	R^2	<i>F</i>	<i>P</i>
総種数	距離1	-0.79	11	0.70	9.36	0.008
	コンクリート護岸	-0.54				
平均種数	距離1	-0.76	11	0.58	12.56	0.006
種数の変動	通年水位変動	0.85	11	0.80	16.34	0.001
	通年最低水温変動	0.53				
総生息密度の変動	通年水位変動	0.77	11	0.59	12.68	0.006
オイカワ平均生息密度	通年最低水温変動	0.72	11	0.84	20.67	0.001
	コンクリート護岸	-0.55				
オイカワ生息密度の変動	水表面積	-0.72	11	0.52	9.55	0.013
カワムツ平均生息密度	通年水位変動	-0.77	11	0.60	13.21	0.005
カワムツ生息密度の変動	-					
タカハヤ平均生息密度	-					
タカハヤ生息密度の変動	通年水位変動	0.64	11	0.41	6.16	0.035
ギンブナ平均生息密度	距離2	-0.64	11	0.41	6.15	0.035
ギンブナ生息密度の変動	距離2	0.76	11	0.58	12.54	0.006

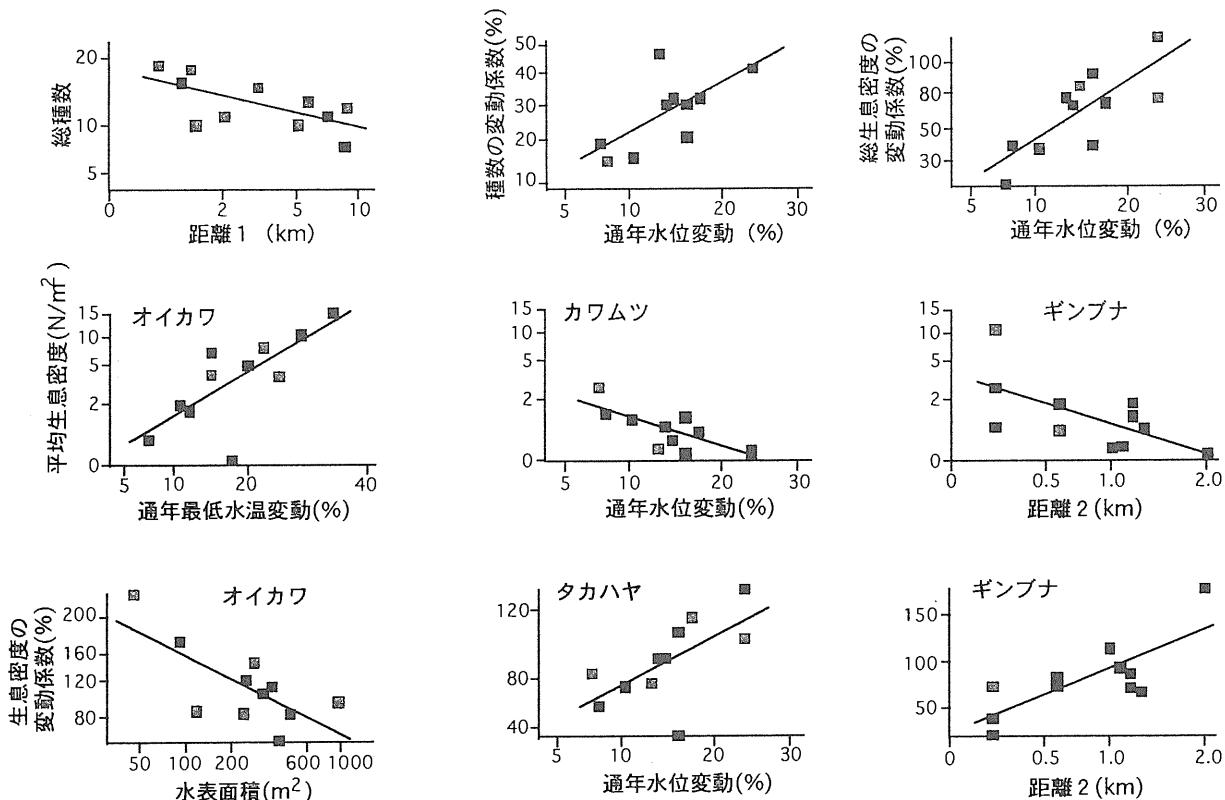


図3・3 通年での魚類群集特性と環境要因との対応関係。表3・2に示されている結果と対応

重信川との距離が近く、かつ、コンクリート護岸の占める割合が低い湧水池ほど総種数は多くなるという傾向が認められた。平均種数についても同様で、重信川に近い湧水池ほど平均種数は多かった。種数の変動については、通年水位変動が大きく、かつ、通年最低水温変動が大きな湧水池ほど種数の変動は大きかった。総生息密度の変動についても同様に、通年水位変動が大きな湧水池ほど変動が大きかった。各主要魚種別に見ると、オイカワの平均密度は最低水温の変動が大きな湧水池ほど高く、また、密度の変動は、水表面積の小さな湧水池ほど高かった。一方、カワムツでは水位変動の小さな湧水池ほど生息密度が高くなる傾向があった。タカハヤでは、水位変動が大きな湧水池で生息密度の変動が大きかった。ギンブナでは、平均密度、変動係数の両方に距離2が説明変数として挙がっており、河川から近い湧水池ほど生息密度は高く、かつ、その変動も小さかった。

時期毎に分析した結果では、種数については通年の場合と同様の結果が得られた（表3・3(1)）。概して、距離1が第一要因として挙がっており、重信川との距離が近い湧水池ほど種数は多かった。また、98年10月では回復日数が説明変数として挙がっており、水位の安定期間が長い湧水池ほど種数は多かった。オイカワでは、有意な回帰式が得られたのは99年8月、10月、99年7月の3時期のみで、夏季には水温が高い湧水池で生息密度が高くなる傾向が見られた（表3・3(2)）。カワムツでは、夏季および冬季の渴水以降にあたる99年4月より、回復日数が第一説明変数として挙がっており、水位の安定期間が長い湧水池ほど密度が高くなる傾向が認められた（表3・3(2)）。タカハヤでは、98年の8月、10月では水温の低い湧水池ほど密度が高くなる傾向があり、また、渴水後の99年4月では水位の安定期間が長い湧水池ほど密度が高かった（表3・3(3)）。ギンブナでは、99年6月までは概して距離2または回復日数が説明変数となっており、河川から近い湧水池ほど生

息密度が高かった（表3・3(3)）。また、それ以降では、水深と底質多様度が要因として挙がっており、浅く、底質多様度の低い湧水池で密度が高くなる傾向が見られた。

表 3・3(1) 湧水池での種数に対するステップワイズ重回帰分析の結果。

（各時期毎に分析を行ったもの）

目的変数 および時期	説明変数	標準回帰係数	回帰モデルの有意性			
			n	R ²	F	P
種数						
98年8月	距離1	-0.74	11	0.88	29.37	<0.001
	時期平均最低水温	0.42				
98年10月	回復日数	0.68	11	0.46	7.53	0.023
98年12月	—					
99年4月	—					
99年6月	—					
99年7月	距離1	-0.65	13	0.65	9.36	0.005
	時期平均最低水温	0.50				
99年8月	距離1	-0.41	13	0.84	15.49	0.001
	平均水深	-0.75				
	回復日数	0.52				
99年10月	距離1	-0.76	13	0.58	14.90	0.003

表 3・3(2) 湧水池での主要魚種生息密度（オイカワ、カワムツ）に対するステップワイズ重回帰分析の結果。（時期毎に分析を行ったもの）

目的変数 および時期	説明変数	標準回帰係数	回帰モデルの有意性			
			n	R ²	F	P
オイカワ						
98年8月	時期平均最高水温	0.81	11	0.85	10.48	0.016
	石積み護岸	0.49				
98年10月	時期平均最高水温	0.72	11	0.51	9.39	0.013
98年12月	—					
99年4月	—					
99年6月	—					
99年7月	時期平均最高水温	0.66	13	0.43	8.36	0.015
99年8月	—					
99年10月	—					
カワムツ						
98年8月	—					
98年10月	—					
98年12月	—					
99年4月	回復日数	0.95	13	0.80	18.19	0.001
	距離 2	-0.64				
99年6月	回復日数	0.59	13	0.71	12.11	0.002
	カバー	-0.43				
99年7月	回復日数	0.70	13	0.74	14.08	0.001
	岸部の植生被覆	0.42				
99年8月	回復日数	0.59	13	0.74	12.65	0.002
	時期平均最低水温	0.48				
99年10月	カバー	-0.67	13	0.45	8.89	0.013

表 3・3(3) 湧水池での主要魚種生息密度（タカハヤ、ギンブナ）に対するステップワイズ重回帰分析の結果。（時期毎に分析を行ったもの）

目的変数 および時期	説明変数	標準回帰係数	回帰モデルの有意性			
			n	R ²	F	P
タカハヤ						
98年8月	時期平均最高水温	-0.68	11	0.46	7.78	0.021
98年10月	時期平均最低水温	-0.76	11	0.58	12.37	0.007
98年12月	—					
99年4月	回復日数	0.60	13	0.36	5.56	0.040
99年6月	—					
99年7月	—					
99年8月	—					
99年10月	—					
ギンブナ						
98年8月	—					
98年10月	回復日数	0.54	11	0.65	7.51	0.015
	距離2	-0.49				
98年12月	距離2	-0.65	11	0.42	6.41	0.032
99年4月	—					
99年6月	距離2	-0.61	13	0.37	6.41	0.028
99年7月	水深	-0.59	13	0.35	5.94	0.033
99年8月	水深 底質多様度	-0.69 -0.62	13	0.70	10.47	0.004
99年10月	水深 底質多様度	-0.76 -0.53	13	0.72	12.67	0.002

3.3 用水路の魚類群集と環境要因との対応関係

水路における種数と環境要因との対応関係を時期ごとに解析した結果（表3・4(1)）、湧水池の場合とでは異なった傾向が見られた。湧水池では重信川からの距離が強く影響していたのに対して、水路では、底質多様度、水路幅、水路幅変異が説明変数として挙がっており、距離ではなく水路の構造的特性の方が大きな影響を与えることが示された。概して、サイズの大きな水路、または複雑な構造を持った（水路幅変異、底質多様度の高い）水路ほど種数が多くなる傾向が認められた。オイカワ、カワムツについても同様に、概して、底質多様度、水路幅変異、水深変異が説明変数として挙がっており、複雑な水路ほど生息密度が高くなる傾向が見られた（表3・4(2)）。タカハヤでは、時期間で一貫した傾向は見られず、98年8月と99年9月では、それぞれ、底質多様度と非護岸部の割合が第一説明変数となっており、98年10月と99年8月では水温が説明変数として挙がった（表3・4(3)）。ギンブナでは、有意な回帰式が得られたのは2時期のみであり、98年12月では水位変動の小さい水路ほど、99年6月ではコンクリート護岸の占める割合が高い水路ほど、密度が高くなる傾向が認められた（表3・4(3)）。

表3・4(1) 水路での種数に対するステップワイズ重回帰分析の結果。（時期毎に分析を行ったもの）

時期	説明変数	標準回帰係数	回帰モデルの有意性			
			n	R ²	F	P
98年8月	底質多様度	0.50	17	0.62	11.19	0.001
	水深変異	0.42				
98年10月	底質多様度	0.50	19	0.56	10.82	0.001
	水路幅	0.45				
98年12月	水路幅	0.71	18	0.50	16.08	0.001
99年4月	水路幅変異	0.60	22	0.35	11.50	0.003
99年6月	水路幅	0.63	21	0.63	16.98	<0.001
	カバー	-0.39				
99年8月	水路幅	0.47	20	0.56	10.77	0.001
	底質多様度	0.41				

表 3・4(2) 水路での主要魚種生息密度（オイカワ、カワムツ）に対するステップワイズ重回帰分析の結果。
時期毎に分析を行ったもの。

目的変数 および時期	説明変数	標準回帰係数	回帰モデルの有意性			
			n	R ²	F	P
オイカワ						
98年8月	底質多様度	0.61	17	0.38	9.05	0.009
98年10月	底質多様度	0.62	19	0.38	10.48	0.005
98年12月	水路幅 水路幅変異	0.50 0.46	18	0.64	13.22	<0.001
99年4月	水路幅変異	0.44	22	0.19	4.92	0.038
99年6月	水路幅変異	0.67	21	0.45	15.81	0.001
99年8月	水深変異 流程位置	0.52 0.45	20	0.64	14.95	<0.001
カワムツ						
98年8月	水路幅変異	0.68	17	0.46	12.62	0.003
98年10月	—					
98年12月	時期平均最高水温 水路幅変異	-0.48 0.45	18	0.49	7.31	0.006
99年4月	水路幅変異 非護岸部	0.66 -0.45	22	0.33	5.01	0.017
99年6月	水位変動履歴 カバー	-0.50 -0.44	21	0.40	6.02	0.010
99年8月	水深変異 コンクリート護岸	0.91 0.46	20	0.73	22.59	<0.001

表 3・4(3) 水路での主要魚種生息密度（タカハヤ、ギンブナ）に対するステップワイズ重回帰分析の結果。
 (時期毎に分析を行ったもの)

目的変数 および時期	説明変数	標準回帰係数	回帰モデルの有意性			
			n	R ²	F	P
タカハヤ						
98年8月	底質多様度	0.59	17	0.35	8.14	0.012
98年10月	時期平均最高水温	0.51	19	0.26	5.89	0.027
98年12月	—					
99年4月	非護岸部 距離 1	0.57 0.41	22	0.33	4.88	0.019
99年6月	—					
99年8月	時期平均最高水温	-0.55	20	0.31	7.93	0.011
ギンブナ						
98年8月	—					
98年10月	—					
98年12月	水位変動履歴	-0.53	18	0.28	6.22	0.024
99年4月	—					
99年6月	コンクリート護岸	-0.49	21	0.24	5.96	0.025
99年8月	—					

3.4 枯渇した湧水池における魚類群集の回復

98年の夏季および冬季に枯渇した（または異常な水位低下により影響を被ったと考えられる）湧水池において、その後の種数、総生息密度および種構成の回復過程を検討した。なお、種構成の回復は、枯渇前の種構成とそれぞれの回復途上にある種構成との百分率類似度（Proportional Similarity Index:PSI=1-0.5 $\sum |p_{ij}-p_{ik}|$; p_{ij} =枯渇前における種 i の占める割合、 p_{ik} =回復途上期における種 i の占める割合⁶⁾）を用いて検討した。PSI は0~1の範囲の値をとり、共通種が見られない時は PSI=0、各種の占める割合が全く同じときには PSI=1 となる。また、便宜的に、PSI>0.7 を以て「類似した種構成」とされることが多い⁸⁾¹⁰⁾。

98年夏に枯渇し、9月末の降雨で水が回復した2つの湧水池での回復過程を図3・4(1)に、98年冬に枯渇または水位が低下し、99年3月中旬に水が回復した6つの湧水池での回復過程を図3・4(2)、(3)に示した。夏に枯渇した龍沢泉では、その年の12月までの間（3ヵ月間）に種数、個体数ともに回復している、しかし、類似度は12月時点においても依然として低く、種数、個体数としては枯渇以前の状態に戻ったものの、魚種の入れ替わりが生じたことを示している（図3・4(1)）。一方、同時期に枯渇した五反地泉では、一ヶ月足らずの期間内に、種数、個体数、種構成のいずれにおいても急速に回復した。冬に枯渇した湧水池を見ると（図3・4(2)、(3)）、概して、10月まで（7ヵ月間）に、種数、個体数、および種構成とともにほぼ回復している。ただし、鷹巣泉と舟入泉では10月時点でも個体数の回復は遅く、10月時点での生息密度は、枯渇以前の半分程度に止まっている。また、舟入泉では、種数は増加したものの類似度指数は上がらず、魚種の入れ替わりを示している。

以上のように、湧水池によって回復様式（回復速度、枯渇以前の種構成に戻る傾向があるのか、それとも枯渇前後で種構成が変化してしまうのか、等）に差異はあるものの、魚の種数、個体数に関しては、3ヵ月～1年程度の期間内でほぼ回復すると考えられる。また、多くの湧水池で、水が回復してから一ヶ月程度の比較的短い期間内に多くの個体が進入してきており（例えば、夏に枯渇した龍沢泉、五反地泉では、それぞれ、20日以内に3種、2個体/ m^2 、10日以内に3種、8個体/ m^2 まで回復したことを確認している）、魚類が河川～湧水池間を頻繁に往来していることが示唆される。

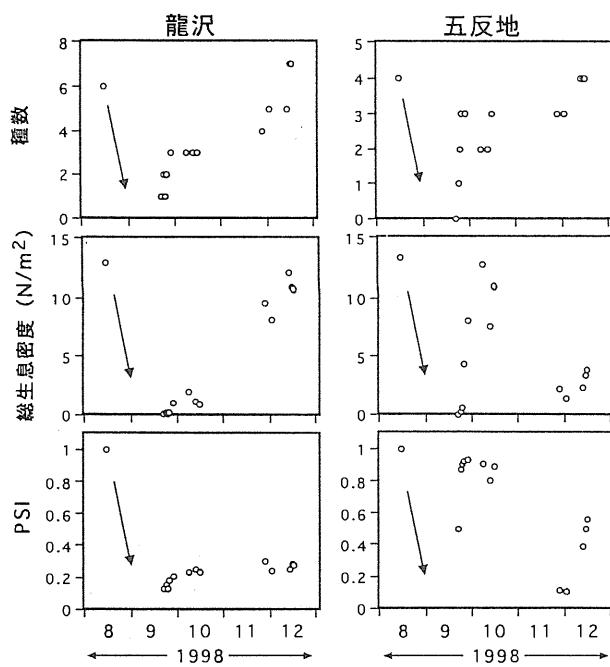


図 3・4(1) 1998 年夏に枯渇した湧水池における魚類群集の回復過程
(矢印は渇水による絶滅を示す)

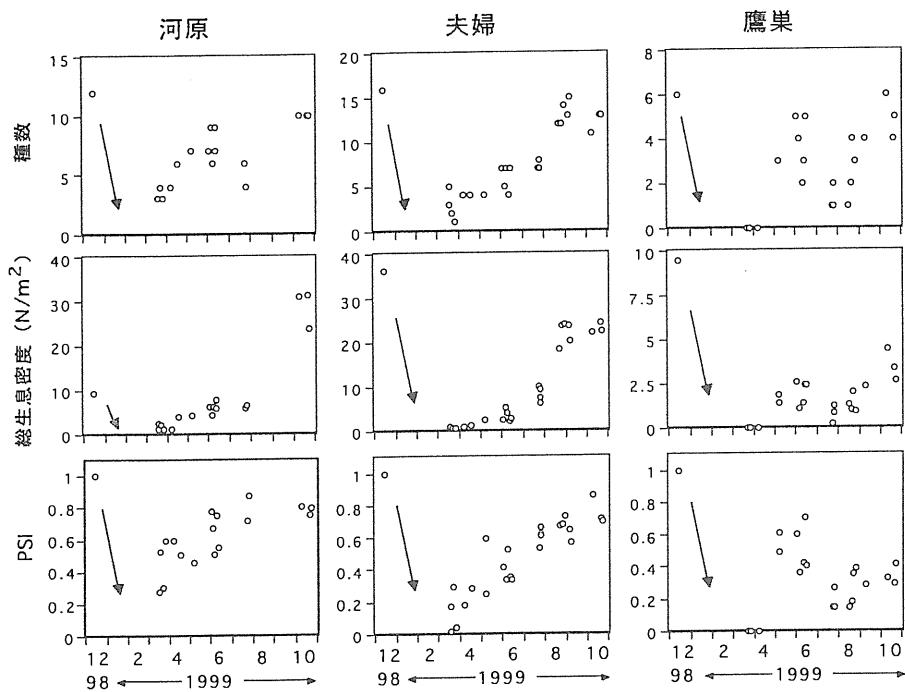


図 3・4(2) 1998 年冬に枯渇した湧水池における魚類群集の回復過程
(矢印は渇水による絶滅を示す)

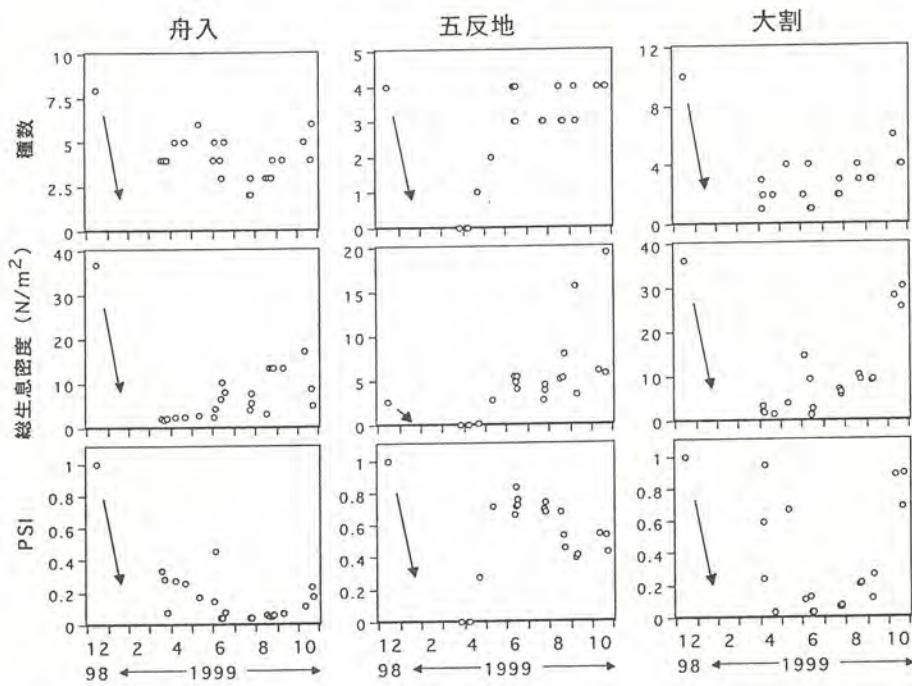


図 3-4(3) 1998 年夏に枯渇または水位が著しく低下した湧水池における魚類群集の回復過程
(矢印は渇水による絶滅または個体数の著しい減少を示す)

4. 考察

4.1 湧水池および用水路の魚類群集の特性

本報告では、湧水池および水路の魚類群集と生息環境要因との対応関係および枯渇からの回復過程について検討したが、それらの結果は、湧水池の魚類群集の動的な側面を強調するものとなった。魚類群集の決定過程は大きく分けて 2 つの側面から捉えることができる。1 つは生息場所への進入・定着過程であり¹⁶⁾、もう一つは生息場所内における環境要因と生物間相互作用（競争、捕食）を通した調節過程である¹²⁾、そしてこれら両方が相互に作用しながら群集構造を決定していると考えられる¹³⁾¹⁵⁾。今回の結果から、湧水池の魚類群集特性は、どちらかといえば、進入・定着過程の方がより強く作用している群集であることが示唆される。つまり、湧水池の群集の維持にはその供給源である河川との連結が重要であると考えられる。

一般的に、生息種数または種多様性に影響する生息場所要因としては、生息場所のサイズ、構造的複雑性、搅乱頻度、供給源からの距離が挙げられる⁴⁾¹⁶⁾¹⁷⁾。仮に生息場所内における調節過程の方がより強く影響しているとすれば、生息場所のサイズや構造的特性との対応関係の方が強く現れると考えられるが、湧水池の種数には、サイズや構造的特性というよりは、供給源からの距離の方が強く影響していた。また、本調査期間において、いくつかの湧水池は完全に枯渇したが、多くのものは半年程の間に種数の回復が見られた。少なくともこれら枯渇した湧水池においては、再進入によって形成、維持されている動的な群集像が描かれており、このことは、水位変動が激しい湧水池ほど種数および総生息密度の変動が大きいという回帰分析の結

果にも反映されている。また、湧水池は半隔離的な生息場所であるにもかかわらず、枯渇後における魚類の再進入は速やかだった。このことは、枯渇していない湧水池においても、降雨等に伴い、魚類が頻繁に河川から進入していることを示唆するものである。

主要魚種毎での解析結果では、カワムツ、タカハヤ、およびギンブナの生息密度およびその変動には、概して、水位の変動特性または距離との関係が認められた。カワムツは通年平均密度でみると、水位の安定した湧水池ほど密度が高く、また、時期毎にみても水位安定期間が長い湧水池ほど密度が高くなる傾向を示した。タカハヤでは、その生息密度の変動は、水位変動が大きい湧水池ほど大きかった。ギンブナでは、河川に近い湧水池ほど密度は高く、かつ、安定している傾向が見られた。以上のような関係は、渴水による影響とそれからの回復過程を反映しているものと思われる。一方、オイカワも同様に渴水による絶滅または壊滅的影響を被っているにもかかわらず、水位の変動や距離に関する变量との対応関係は、通年においてもどの時期においても認められなかった。これは、今回の調査間隔に対して、オイカワの回復速度が早かったためと考えられる。ただし、回復速度は、種特有の移動能力のみならず供給源となる生息場所での個体数の多寡によっても影響されるため、この種間での回復速度の違いを、即、種間での移動能力の差異に帰結することはできない。この点については、さらなる解析が必要とされる。

水路における解析結果では、湧水池とは異なる傾向が見られた。水路における種数には、どの時期においても距離の影響は認められず、生息場所の構造的特性との対応関係が認められた。オイカワ、カワムツの生息密度においても同様な傾向であった。すなわち、水路においては、進入・定着過程というよりはむしろ、進入した後に好適な生息場所が保証されているかどうかということの方が重要な要因となっていると考えられる。特に、今回、調査地となった水路には、側面と底面とともにコンクリート板で作られている極めて単純な構造の水路も含まれており、そのような水路では、潜在的に多くの魚種が進入したとしても、そこを生息場所として利用できる魚種は限られたものになると考えられる。しかし、そのような極めて単純な水路で連結されている湧水池においても、少ながらぬ魚種の進入が見られており（例えば、鷹巣泉：図3・4(2)）、魚類の通路としては機能していると考えられる。

4.2 湧水池の魚類群集の保全のために

今回の調査で、湧水池および水路の魚類相は、基本的には重信川本流と同様なものであり、また、魚類は河川～湧水池間を比較的頻繁に移動していることが示唆された。重信川本流の伏流区間は、かなり不安定な生息場所であり、湧水池との連結が伏流区間における魚類群集の動態に影響している可能性もある。この点について明らかにするためには、さらなる調査が必要であるが、もし、かりにそうだとすれば、湧水池における生息環境の保全は、湧水池自体にとどまらず河川本流に対しても重要な意義を持つことになる。

今回の解析結果では、湧水池の魚類群集には、生息場所構造に関する要因よりは、供給源からの距離、つまり、河川との連結性が強く関与していた。一方、河川と湧水池を結ぶ水路においては、より複雑な構造を持つ水路の方が魚類にとって好適な生息環境であることが示された。すなわち、湧水池の魚類群集を保全するためには、湧水池自体の環境を保全するのみならず、水路の構造的複雑性を維持し、河川との連絡を確保することが極めて重要であると考えられる。また、長期的、大局的な視点から流域全体を見れば、湧水池や水路等といった河川周辺の水域生息場所に生息する魚種の供給源となっているのは、明らかに重信川本流の

上・下流安定区間である。その点から考えれば、現時点における種の多様性を維持していくためには、その供給源である本流の生息環境を保全することが不可欠である。

引用文献

- 1) 愛媛県立博物館 (1994) : 重信川周辺の泉とその生物. 愛媛県立博物館自然環境普及シリーズ 14
- 2) 愛媛県立博物館 (1995) : 重信川周辺の泉とその生物Ⅱ. 愛媛県立博物館自然環境普及シリーズ 15
- 3) 藤咲雅明・水谷正一 (1999) : 魚類の生息場所としての水田環境. 「淡水生物の保全生態学 (森誠一 編)」 信山社サイテック. pp76-85.
- 4) Gorman, O.T. & Karr, J.R. (1978): Habitat structure and stream fish communities. *Ecology*, 59:507-515.
- 5) 木元新作・武田博清 (1989) : 群集生態学入門. 共立出版.
- 6) 小林四郎 (1995) : 生物群集の多変量解析. 蒼木書房.
- 7) 久野英二 (1986) : 動物の個体群動態研究法 I－個体数推定法－. 共立出版.
- 8) Matthews, W.J., Cashner, R.C. & Gelwick, F.P. (1988) : Stability and persistence of fish faunas and assemblages in three midwestern streams. *Copeia*, 945-955.
- 9) 森誠一・西村俊明 (1998) : 魚から見た掘田環境. 「魚から見た水環境 (森誠一 編)」. 信山社サイテック. pp209-223.
- 10) Petersen, J.T. & Baylay, P.B. (1993) : Colonization rates of fishes in experimentally defaunated warmwater streams. *Trans. Am. Fish. Soc.* 122:199-207.
- 11) Rahel, F.J. & Hubert, W.A. (1991) : Fish assemblages and habitat gradients in a Rocky Mountain - Great Plains stream : biotic zonation and additive patterns of community change. *Trans. Am. Fish. Soc.* 120:319-332.
- 12) Rodriguez, M.A. & Lewis, Jr., W.M. (1994) : Regulation and stability in fish assemblages of neotropical floodplain lakes. *Oecologia*, 99:166-180.
- 13) Schlosser, I.J. (1987) : A conceptual framework for fish communities in small warmwater streams. "Community and evolutionary ecology of North American stream fishes (Matthews, W.J. & Heins, D.C. Eds.)" University of Oklahoma Press, pp.17-24.
- 14) Shirvell, C.S. (1990) : Role of instream rootwads as juvenile coho salmon and steelhead trout cover habitat under varying streamflows. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47:852-861.
- 15) Strange, E.M., Moyle, P.B. & Foin, T.C. (1992) : Interactions between stochastic and deterministic processes in stream fish community assembly. *Environmental Biology of Fishes*, 36:1-15.
- 16) Taylor, C.M. (1997) : Fish species richness and incidence patterns in isolated and connected stream pools: effects of pool volume and spatial position. *Oecologia*, 110:560-566.
- 17) Townsend, C.R. & Scarsbrook, M.R. (1997) : The intermediate disturbance hypothesis, refugia, and biodiversity in streams. *Limnol. Oceanogr.*, 42:938-949.