

圃場整備後の水田水域におけるナマズの生活史の解明

A study on life cycle and behavioral ecology of catfish in the
waters of consolidated farmland

2014.3

東京農工大学大学院

連合農学研究科

農業環境工学専攻

森 晃

学 位 論 文 要 旨

圃場整備後の水田水域におけるナマズの生活史の解明

A study on life cycle and behavioral ecology of catfish in the waters of consolidated farmland

農業環境工学専攻 農業環境工学大講座

森 晃 (MORI Akira)

圃場整備後の水田水域において、魚類の生活史と生活史を完結できる環境を総合的に研究した例は少ない。そこで、本研究は水田水域との関わりの深い代表的な魚類の1種であるナマズを対象に、1) ナマズが生活史を完結しうる環境を調査地は備えているか検討すること、2) ナマズの成長段階および季節ごとの生態学的情報を収集し、生活史を解明することを目的とした。

第1章では、研究の背景であり、水田地帯に生息する魚類の生息環境の変遷を整理し、ナマズを対象種とした要因を提示した。また、調査対象地である栃木県宇都宮市西鬼怒川地区において実施された圃場整備事業および県営農村自然環境整備事業によって、谷川と谷川に生息するナマズがどのように影響を受けたのか説明した。

第2章では、調査水域におけるナマズの繁殖場所を把握するために、谷川と接続するコンクリート製の水路（以下、小排水路）および土水路においてナマズの繁殖状況および環境特性を調査した。その結果、土水路において稚魚は発見されず、小排水路において稚魚は50地点で合計160尾確認された。小排水路における稚魚の分布は上流区間に集中しており、稚魚の分布を規定する環境要因として底質に占める泥の割合と谷川からの距離が選択され、コンクリート面に堆積した泥が稚魚の生息場を提供したと考えられた。

第3章では小排水路がナマズの成育場所として機能するか明らかにし、その成立要因を考察するとともに、本種の初期生活史における成長および河川への移動様式について把握した。その結果、小排水路において6月から7月の1ヶ月間に幼魚は急速に成長したことがわかった。次に、幼魚の移動様式として、6

月下旬から下流に降下を始め、落水前の7月下旬に大部分の個体は谷川に降下したと考えられた。小排水路がナマズの成育場所として機能した要因として、水温が高いこと、小型水生生物や泥底が存在することを指摘した。

第4章では成魚に対するバイオテレメトリー調査の適用可能性を検討する目的で、室内において発信機装着可能性を検証し、野外における行動追跡手法としての有効性も検討した。発信機を内部装着した個体の体重の変化を観察したところ、魚体の成長および生存におよぼす影響はわずかで、装着可能であることが明らかとなった。次に、谷川において放流した5尾の装着個体を超音波受信機を用いてモニタリングした結果、装着個体の多くが長期間滞在した場所は井桁護岸が施工された区間であり、隠れ家かつ越冬場所として利用されたと考えられた。超音波テレメトリーによる追跡の問題点として、受信範囲外に移動した個体の探索が困難であること、正確な存在場所を特定できないといった点が挙げられた。

第5章では電波発信機を装着した個体を追跡し、谷川における成魚の越冬期と繁殖期の行動特性および生息環境を把握した。その結果、冬期の装着個体は非活動的であり、活動量は水温と正の相関を示した。繁殖期の装着個体は夜間に最も活動的であり、水温と正の相関は見られなかった。越冬期に追跡した3個体は上流の保全区間の淵やえぐれ、圃場整備により流路が付け替えられた区間（整備区間）の沈水植物の豊富な淵環境を利用していた。繁殖期に追跡した4個体のうち2個体は、越冬期の生息場を継続して利用し、他の個体は整備区間の植生や大礫が豊富な水際区間を利用した。

第6章では、第5章と同様に電波テレメトリーを適用し、成魚の河川から繁殖場所への移動、繁殖に発展する条件等を把握した。その結果、繁殖場所である小排水路より上流に生息していた個体は定住的であり、下流に生息した個体は複数回水路へ移動したことがわかった。これは、小排水路の下流の個体が誘引物質を含む排水を感知することができたためだと推測した。発信機を装着した個体は小排水路に頻繁に侵入し、谷川の水位の増減が影響することが明らかになった。さらに、小排水路において成魚が産卵に成功する条件として、降雨により谷川および水路内の水位が増加し、遡上行動が誘発されること、落差工の存在による上流区間への移動障害が解消されることが必要であることがわかった。

第2章から第6章の知見から、調査対象水域はナマズの生活史を保証する環境が備わっていることがわかった。第7章では、圃場整備後の水田水域における本種の保全対策を検討した。改修済み水路の対策として、成魚の産卵および稚魚の生息を可能にするために底面に泥を補填し、所々に深みをつくることや、河川との接続性を確保しつつ水路内の落差を魚道により解消すること等が挙げられた。改修済み河川では、上記の方法でナマズの繁殖・成育場所としての機能を付加した水路より下流側に、水際に植生や大礫を設置するといった生息場環境を造成すること、越冬期の生存に配慮し非灌漑期にも導水することや、人工的な水位を変動させ、繁殖行動を誘発させるといった河川管理も必要である。

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 対象魚について.....	2
1.2.1 ナマズの生態に関する基礎的な知見.....	2
1.2.2 対象魚として扱う理由.....	3
1.3 成長段階の定義と調査手法.....	6
1.3.1 成長段階の定義と特徴について.....	6
1.3.2 バイオテレメトリーについて.....	7
1.4 研究の目的と構成.....	10
1.5 調査対象地の概要.....	11
1.5.1 圃場整備事業と谷川.....	11
1.5.2 谷川におけるナマズの変遷に関する知見.....	13
第2章 ナマズの繁殖場所.....	15
2.1 目的.....	15
2.2 調査対象水路.....	16
2.2.1 小排水路.....	16
2.2.2 土水路.....	19
2.3 調査方法.....	19
2.3.1 小排水路と土水路における稚魚と環境の調査.....	19
2.3.2 小排水路における卵および成魚の確認.....	20
2.3.3 継続的な水質測定.....	21
2.3.4 統計解析.....	22
2.4 結果および考察.....	23
2.4.1 小排水路と土水路の環境の比較.....	23
2.4.2 稚魚の分布に関連する環境要因.....	26
2.4.3 繁殖場所の特定.....	30
2.4.4 小排水路が繁殖場所として利用される要因.....	32
2.5 小括.....	33
第3章 ナマズの成育場所.....	35
3.1 目的.....	35
3.2 調査方法.....	35
3.2.1 小排水路における幼魚の成長と水路内移動.....	35
3.3 結果および考察.....	37
3.3.1 幼魚の水路内移動.....	37
3.3.2 小排水路に見られた水生生物.....	39
3.3.3 幼魚の成長.....	41

3.4 小括.....	45
第4章 バイオテレメトリーの適用可能性の検討	46
4.1 目的.....	46
4.2 実験の方法.....	46
4.2.1 発信機装可能性の検討	46
4.2.2 超音波テレメトリーの性質と受信テスト	51
4.2.3 発信機の装着と受信機の設置	52
4.2.4 データ解析	54
4.3 結果および考察	55
4.3.1 発信機装着実験	55
4.3.2 繁殖試験	56
4.3.3 谷川における装着個体の移動と生息環境	58
4.3.4 活動時間帯と季節的な活動パターンの特徴	61
4.3.5 行動解析手法としての超音波テレメトリーの課題	65
4.4 小括.....	66
第5章 谷川における成魚の越冬期と繁殖期の行動特性および生息環境	67
5.1 目的.....	67
5.2 調査方法	67
5.2.1 使用する電波テレメトリーの特徴	67
5.2.2 供試魚の採捕および発信機の装着	67
5.2.3 作業効率化に向けた GIS による調査システムの構築	68
5.2.4 携行型レーザバーによる 24 時間追跡	69
5.2.5 携行型レーザバーによる連続追跡	72
5.2.6 ハビタットマッピングの方法	72
5.2.7 繁殖期の装着個体の利用微環境要因の推定	74
5.3 結果および考察	75
5.3.1 越冬期と繁殖期の生息環境	75
5.3.2 越冬期と繁殖期の行動特性	89
5.4 小括.....	93
第6章 成魚の繁殖期における小排水路への侵入と遡上	94
6.1 目的.....	94
6.2 調査方法	95
6.2.1 携行型レーザバーによる連続追跡および 24 時間追跡	95
6.2.2 固定型レーザバーによる装着個体の小排水路侵入のモニタリング	95
6.2.3 赤外線カメラによる遡上行動の解析	97
6.2.4 谷川および小排水路の水理・水質データの計測	98
6.2.5 統計解析	98

6.3 結果および考察	99
6.3.1 繁殖移動のパターン	99
6.3.2 小排水路への侵入に関わる水理・水質的要因	103
6.3.3 小排水路上流への遡上と産卵	107
6.4 小括	114
第7章 総合考察	115
7.1 バイオテレメトリーの有効性と課題	115
7.2 調査地におけるナマズの生活史	118
7.2.1 稚幼魚期	119
7.2.2 成魚期	119
7.2.3 未解明な部分	120
7.3 圃場整備後の水田水域におけるナマズの保全	121
7.3.1 繁殖場所および成育場所としての改修済み排水路	123
7.3.2 生息場所としての河川	124
7.4 小括	125
第8章 総括	127
8.1 研究の成果	127
8.2 今後の課題	128
引用文献	131
謝辞	140
付録	142

【Fig.一覧】

Fig. 1-1	ナマズのアンブレラ種としての概念図	4
Fig. 1-2	日本国内におけるナマズのレッドデータカテゴリ	5
Fig. 1-3	超音波（上図）と電波テレメトリー（下図）の原理	9
Fig. 1-4	研究の構成	10
Fig. 1-5	圃場整備前後の谷川および接続水路の変化	11
Fig. 1-6	過去の採捕記録による谷川におけるナマズの分布	14
Fig. 2-1	小排水路の断面図および平面図	16
Fig. 2-2	小排水路および土水路の調査範囲	17
Fig. 2-3	小排水路に存在する2つのタイプの落差工の模式図	18
Fig. 2-4	水位および水温ロガーの設置地点	21
Fig. 2-5	3つの調査水域の平均水温の経時的変化	25
Fig. 2-6	小排水路における稚魚の分布	26
Fig. 2-7	稚魚の全長頻度分布	27
Fig. 3-1	各調査日の区間別幼魚の密度の変化	38
Fig. 3-2	各調査日の幼魚の全長組成の変化	42
Fig. 3-3	幼魚の平均全長の変化	43
Fig. 3-4	幼魚の平均体重の変化	43
Fig. 3-5	幼魚の全長と体重の関係	44
Fig. 4-1	調査対象地と受信機設置地点	53
Fig. 4-2	装着個体と非装着個体の体重の変化	56
Fig. 4-3	3つの異なる環境条件に設置したテスト発信機から得られた信号	58
Fig. 4-4	装着個体の滞在 St.の日変化	59
Fig. 4-5	No.2 と No.4 から得られた秋期の活動パターン	62
Fig. 4-6	No.2, No.4 および No.5 から得られた冬期の活動パターン	63
Fig. 4-7	夜行性活動開始時刻および終了時刻の季節変化	64
Fig. 5-1	GIS を活用した室内および野外における解析	70
Fig. 5-2	ArcPad 上でのデータ入力	70
Fig. 5-3	ハビタットマッピングの概念	73
Fig. 5-4	越冬期の装着個体の調査開始時と終了時の位置の変化	76
Fig. 5-5	越冬期の各個体の生息場所の分布と環境の特徴	77
Fig. 5-6	繁殖期の各装着個体の谷川における滞在位置の時系列的変化	81
Fig. 5-7	繁殖期の各個体の分布と環境の特徴	82
Fig. 5-8	装着個体の利用メッシュと未利用メッシュの流速の比較	85
Fig. 5-9	装着個体の利用メッシュと未利用メッシュの水深の比較	85
Fig. 5-10	水際と流心の流速（左）および水深（右）の比較	87
Fig. 5-11	各底質タイプの流速（上）と水深（下）の比較	87

Fig. 5-12	越冬期の1日あたりの活動量の経時的変化.....	89
Fig. 5-13	繁殖期の1日あたりの活動量の経時的変化.....	90
Fig. 5-14	冬期の活動量と平均水温の関係.....	91
Fig. 5-15	越冬期と繁殖期の各時間帯における活動量の平均値.....	92
Fig. 6-1	想定されるナマズの繁殖移動の経路.....	94
Fig. 6-2	固定型レシーバーの周波数設定の模式図.....	95
Fig. 6-3	固定型レシーバーによって記録された信号の可視化.....	96
Fig. 6-4	繁殖期の各装着個体の谷川における滞在位置の時系列的変化.....	100
Fig. 6-5	個体 E,F の24時間調査における推定位置の変化.....	101
Fig. 6-6	各装着個体の小排水路への侵入日.....	102
Fig. 6-7	小排水路と谷川の平均水温の経時的変化.....	104
Fig. 6-8	落差工を遡上した個体数と降雨量および水位の関係.....	109
Fig. 6-9	第1落差において観察された成魚の行動概要.....	111
Fig. 6-10	第1落差において1時間毎に観察された成魚の行動概要.....	111
Fig. 6-11	平水時と増水時の成魚の移動パターン.....	113
Fig. 7-1	ナマズの生活史の概念図.....	119
Fig. 7-2	圃場整備後の水田水域におけるナマズの保全策.....	122

【Table 一覧】

Table 1-1	水田周辺の生物に対するバイオテレメトリーの適用例	7
Table 1-2	電波および超音波テレメトリーの長所と短所	8
Table 2-1	小排水路における各落差工の概要	18
Table 2-2	水理・水質データの測定方法と測定場所	22
Table 2-3	小排水路の各区間の環境	23
Table 2-4	小排水路と土水路の環境要因の比較	24
Table 2-5	小排水路と土水路および谷川の水質の比較	25
Table 2-6	稚魚の確認地点と未確認地点の環境要因の比較	28
Table 2-7	投入した目的変数と説明変数の相関行列	29
Table 2-8	稚魚の分布に関連する環境要因, GLMによる推定結果上位3モデル	29
Table 2-9	小排水路において採捕された成魚および卵	31
Table 2-10	各区間で採集された卵の密度	31
Table 2-11	過去の調査による小排水路と土水路の繁殖の実績	31
Table 3-1	小排水路における調査区間の概要	36
Table 3-2	調査日と区間によって分けた標識色および標識部位	36
Table 3-3	小排水路における幼魚の標識個体数	37
Table 3-4	小排水路において採捕されたその他の水生生物	39
Table 4-1	人工繁殖に用いた供試魚の内訳	50
Table 4-2	装着個体の概要と受信記録	52
Table 4-3	受信機設置地点周辺の概要	53
Table 5-1	電波発信機を装着した個体	68
Table 5-2	各装着個体の各微環境タイプの利用可能性	84
Table 5-3	各装着個体の各微環境タイプの利用度と資源選択性	84
Table 6-1	繁殖期における連続追跡の結果	99
Table 6-2	小排水路および谷川の水質平均値と検定結果	104
Table 6-4	装着個体の侵入に関する水理・水質要因, GLMによる推定結果上位3モデル	106
Table 6-3	繁殖水路に侵入した個体数と水理・水質的要因の相関行列	106
Table 7-1	様々な条件における電波受信距離の違いと本研究の条件における評価	116

【Photo 一覧】

Photo 1-1	圃場整備前後の水田の排水方式の変化	12
Photo 2-1	小排水路の構造.....	17
Photo 2-2	土水路の様子	19
Photo 2-3	採集されたナマズの卵.....	20
Photo 2-4	採捕された稚魚.....	27
Photo 3-1	エラストマー標識を施した幼魚	36
Photo 3-2	ギンブナ稚魚を捕食した幼魚（上図）と幼魚が吐瀉したカエル類垂成体（下図）	40
Photo 4-1	供試魚を蓄養した FRP 水槽	48
Photo 4-2	内部装着の概念図と手術の様子	48
Photo 4-3	供試魚を人工繁殖させるための水槽.....	50
Photo 4-4	研究に用いた発信機の種類（左から V9-2L, F1040, F1170）	51
Photo 4-5	切開後の傷の回復過程（左；2 週間目, 右；3 週間目）	55
Photo 4-6	産卵基質に産み付けられた卵と孵化稚魚.....	57
Photo 5-1	使用した PDA と GPS アンテナ	71
Photo 5-2	使用した携行型レーザーと折りたたみ式八木アンテナ	71
Photo 6-1	固定型レーザーと接続された IC レコーダー.....	96
Photo 6-2	第 1 落差に設置した魚道および赤外線カメラ	97
Photo 6-3	魚道を遡上する成魚	109
Photo 6-4	跳躍する成魚	110
Photo 6-5	降下する成魚	110
Photo 6-6	6 月 15 日の流量増加時の映像	112

第1章 序論

1.1 研究の背景

一時的水域とは1年のうち、ある時期に冠水することで形成される水域を指し、水田、小溝、排水路、および河川のワンド等が含まれる。河川の増水時に冠水する一時的水域は淡水魚にとって繁殖場所や成育場所として利用されていた(斉藤ら, 1988)。やがて、縄文後期・弥生時代に人間がこうした湿地環境を水田として開拓し始めたことで、一時的水域を利用する魚種は水田水域を氾濫原の代替的な生息場所として利用するに至った(守山, 1997)。水田水域は、水稲作のため灌漑期のみ湛水される一時的水域であり、ドジョウ (*Misgurnus anguillicaudatus*)、アユモドキ (*Leptobotia curta*)、フナ類 (*Carassius spp.*)、タモロコ (*Gnathopogon elongatus*)、ナマズ (*Silurus asotus*) といった魚類は通水後速やかに恒久的水域(一年中水の存在する水域)である河川から侵入し、水田や水路において卵をばらまいたり、水草に産み付ける(斉藤, 1988; Abe et al, 2007)。斉藤ら(1988)はこれらの魚種が卵を広範囲にばらまくように産卵する理由として、水深が浅く、高温になりやすく干やがりやすい一時的水域での危険を分散し、仔稚魚間の競争を減少させるためであると考察している。水田や水路において大型の捕食者は存在せず、卵は親の保護を受けることなく孵化し、自然発生した動植物プランクトンを補食し成長する(Katano・Matsuzaki, 2012)。この水田水域における淡水魚類の繁殖を保証していたのは、水路-水田、河川、水路間の落差のない連続性であると考えられている(前畑, 2008)。

このように、一時的水域を繁殖場所とする魚類にとって水田は重要な場所であり、これらの魚類は水田の存在に強く依存していると指摘されている(斉藤, 1988; Katano. et al.2003a)。実際、水田水域は他の水域と比べ多様な魚種が豊富に存在していることが報告されており(Hosoya, 1982)、人間は身近な魚類を食料として利用するという共存関係が築かれていた(片野, 1998a)。しかし、こうした関係も近年崩れ始めている。

我が国では1960年代以降、農地の生産性向上と労働力低減のため圃場整備事業が本格的に進められた。圃場整備事業による水田水域環境の改変として水田区画の大型化、湿田から乾田への移行、用水路と排水路の分離、水路のコンクリート化などが挙げられる(片野, 1998a)。これらの変化は、水田-水路-河川といった水域間ネットワークを阻害し、一時的水域で産卵する魚類の繁殖の機会を減少させ、水路環境の直線化により遊泳力の低い魚類や稚魚の生息は困難となった。ネットワークの分断は、多様な生息地を使い分けながら生活史を展開している水田生態系の生物に対して、時として致命的なインパクトを与える(森ら, 2008)。圃場整備に伴う水路の改変は多くの場合、魚類の生息場所、すなわち産卵場所、保育場所、成育場所、摂餌場所、隠れ場所などの量的・質的低下をもたらし、種数や個体数の減少を引き起こす(中村, 2007b)。実際に、圃場整備後の改修された水路内で多数の魚種が見られなくなったという事例が複数報告されている(紀平, 1983; 坪川, 1985)。

桐谷（2010）は水田生態系に直接，間接的に関係している全生物群をリスト（田んぼの生き物全種リスト）として挙げた．その中の魚類のうち国外外来種 20 種を除く 123 種中 45 種（絶滅危惧 IA 類：11 種，絶滅危惧 IB 類：16 種，絶滅危惧 II 類：8 種，準絶滅危惧：9 種）つまり 36.6%が絶滅危惧種として計上されている．なお，ここで示された絶滅危惧種およびランクは改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック（環境省自然環境局野生生物課，2007）から引用されている．

このような水田水域における魚類の危機的状況に対して，2001 年に土地改良法が改正され，土地改良事業の施工における「原則として環境との調和への配慮」が新たに位置づけられた（農水省，2004）．これを背景に農村環境における生物多様性に配慮した事業が各地で実施されるようになった．従来，「環境との調和への配慮」は生物の生育・生息調査の結果から工事実施区域の一部を対象に実施する傾向にあったが，生物の生活史の一部を対象とした配慮では不十分であると指摘されている（鈴木，2007）．また，魚類の生活史段階，季節ごとの生息地利用の情報は対象種の保全に向けた生息地の改良や維持管理のために必要であることが指摘されている（端，1987；中村，2007b；鈴木，2007；Onikura et al. 2009；永山ら，2012）．森ら（2008）は水田や水路の物理的環境や利用方法（営農・管理）が変化する以上，施工前の状態に，正確に復帰させることは現実性を欠くと指摘している．加えて，松井（2009）は整備済み水田地区の存在は地域全体の環境に影響をもち，少なくとも最小限の環境対策の実施が望まれ，その対策を効率的に行うには同所における水生生物の生息実態を知る必要があると指摘している．

以上のことから，整備後の水田水域における魚類保全の必要性が高まり，魚類が生活史を完結可能な環境の知見を蓄積することは喫緊の課題であると考えられる．そこで，本研究ではナマズを対象に，その生活史を把握し，生活史を完結可能な環境の条件について検討する．

1.2 対象魚について

1.2.1 ナマズの生態に関する基礎的な知見

ナマズの生態に関する基礎的な知見を整理する．現在ナマズは沖縄諸島を除く日本全土に分布している（田崎・金澤，2001）．考古遺跡で出土した動物遺存体の記録から，縄文時代から古代にかけてのナマズの自然分布域は西日本の臨海平野部に限られ，東日本への分布の変遷は江戸時代中期以降に人為的な移植に伴い拡大したとみられている（宮本ら，2001）．河川の緩やかな中下流域，湖沼，池およびそれらに通ずる小川や溝などの泥底部や砂泥底部に生息する（小原，1987）．特にヨシなどの水草の繁茂した水域や岩の間隙など，隠れ場所や体の寄せることのできる場所を好む．夜行性であり夜間に活発に行動し，昼間は上記の暗所に潜んでいる．産卵期は琵琶湖では 5 月から 6 月で，関東地方では 5 月から 7 月，最盛期は 6 月中旬の梅雨期である．成熟年齢は満 2 歳以上であ

り，成熟最小型は 30cm 前後である．産卵数は体長 30cm の個体で 1 万から 1.5 万粒，60cm で 10 万粒ほどである．卵は直径 2.1~2.6mm の球形分離卵で，弱い粘着力があり産み付けられた卵は水草や藻に付着する．孵化適温は 20℃前後であり，72~82 時間で孵化する．肉食性であり，タナゴ類・ドジョウ類などの小魚，エビ・貝類などを捕食する．摂餌は 15℃以上で活発であり，25~30℃で最も盛んである．また，15℃以下になると不活発になり，10℃以下では餌をとらなくなる（小原，1987）．

ナマズの詳細な繁殖行動はこれまでに数多く報告されている．片野ら（1988）は京都府の水田地帯においてナマズの産卵行動を調査した．その結果，ナマズの繁殖行動は 21 時から 3 時までの時間帯に通常雌雄 1 尾ずつによって行われた．雄は雌の腹部に頭を近づけるように追尾し（追尾行動），次に雌の体に巻きつき（巻きつき行動），水田・小溝・用水路など移動しながら広範囲に産卵した．また，本調査地における産卵時期は灌水後 1 週間以内に限られていた（6 月中旬）．

Maehata（2002）の報告によれば琵琶湖周辺の水田において観察したナマズの繁殖行動は常に雌雄のつがいで行われ，行動様式は固定的であり（雄の雌への巻きかた：尾部，雌に巻きつく雄の数：1 尾，産卵後の巡回行動：有），同湖に生息する固有種ビワコオオナマズ（*Silurus biwaensis*）やイワトコナマズ（*Silurus lithophilus*）と類似していた．一方，前述した片野ら（1988）が報告した大堰川水系のナマズは，2 尾以上の個体による繁殖行動も見られ，行動様式は個体によって変異が見られた（雄の雌への巻きつき方：尾部もしくは頭部，雌に巻きつく雄の数：1~4 尾，産卵後の巡回行動：無）．Maehata（2007）はこのように地域個体群によってその繁殖行動に差異が見られる理由として，性比の偏りによる雌をめぐる競争の有無や，繁殖期間の長さ，流水もしくは止水環境における適応の結果であると述べている．また，Maehata（2007）はナマズの産卵行動に影響する要因として降雨や濁度を挙げている．

1.2.2 対象魚として扱う理由

本研究では，ナマズを対象に，その生活史における重要なステージを抽出し，それらについて明らかにする．以下に，ナマズを対象魚とする理由を要約した．

1. 日本全国に分布している水田水域に代表的な魚

ナマズは朝鮮半島，中国大陸東部，台湾にまで広く分布し，国内では沖縄を除く日本全土に分布する広域分布種である（前畑，2003）．平野部の河川の中・下流域や温暖な地域の湖，池，沼などの泥底部や砂泥底部に生息し，特にヨシなどの水草の繁茂した水域の岩や間隙など，隠れ場所や体を寄せることの出来る場所を好む（田崎・金澤，2001）．また，繁殖のために河川から水田水域に移動することが知られている（片野ら，1988；斉藤ら，1988；Maehata，2007；舟尾・沢田，2013）．一時的水域は水深が浅く，水が滞留するため高温にさらされ，酸素がなくなる危険性が高いと考えられるが，仔稚魚は酸素欠乏に耐性がある（前畑，2003，2008）．このようにナマズは一時的水域に適応した魚種であり（斉藤ら，1988；前畑，2003），依存した生活史を送ると考えられる．このような生

物学的特徴から，ナマズは水田水域に代表的な魚種として考えられている（棗田ら，2010）．

2.生態系調節機能を持っていると考えられる

近年，国外外来魚であるブルーギル（*Lepomis macrochirus*）は全国的に生息域を拡大し，内水面の生態系および漁業に負の影響を与えており，Katano et al.（2003b, 2005）は魚食者であるナマズを用いることによってブルーギルの個体数を抑制する可能性を示した．また，保全生物学ではアンブレラ種（umbrella species）という概念が存在し，指標となる種を選定し，保全の目標とすべき種の抽出を行うことがある（鷲谷・矢原，2007）．アンブレラ種概念はいくつか存在するが，Roberge・Angelstam（2004）によれば，ある種を保全することにより，自然に共生する多数の生物を同時に保全することができる種と定義している．アンブレラ種は1種の保全で，最小限のコストで生物群集を管理できるので魅力的である（Bifulchi・Lode，2005）．

水田生態系におけるナマズのアンブレラ種としての概念図を Fig.1-1 に示す．1) ナマズは国内の淡水生態系における頂点捕食者であること，2) 体サイズが大きく生息に必要な面積も広く，身を隠すために多様な環境が必要であること，3) 繁殖のために水田水域と河川の間を往復する必要性があり，水域間ネットワークが確保されなければならないこと，4) 3) の条件が確保されることで，同様に水域間ネットワークを必要とする魚類（フナ類，ドジョウ，タモロコ等）の生存も確保されること，5) 4) の小型淡水魚類を捕食するナマズを含む高次捕食者（サギ類，タガメ，イシガメ等）の生存も確保される．これらのことから，ナマズはアンブレラ種としての性格をもち，本種を保全することは，水田生態系における生物多様性を確保することにつながると考えられる．

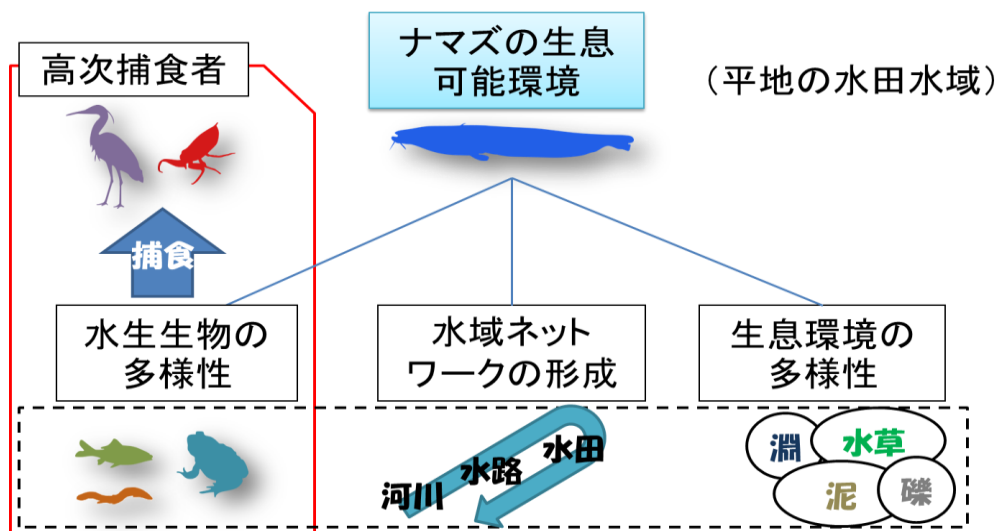
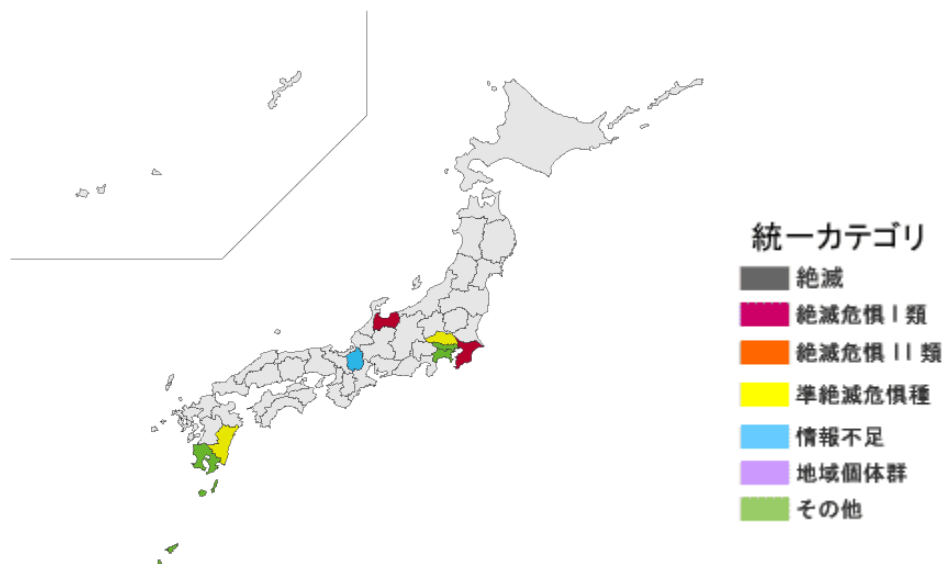


Fig. 1-1 ナマズのアンブレラ種としての概念図

3.地域によって絶滅の危険性が高く保全の必要性がある

近年、ナマズは圃場整備事業に伴う一時的な水域における産卵場所の減少と産卵場所への移動阻害により生息数を減少させている（田崎・金澤，2001；Katano et al.2003b，2005）。これによって地域によっては絶滅危惧種に指定されている（Fig.1-2）。このことから，本種の保全の対策を早急に講じる必要がある。



COPYRIGHT 2013 野生生物調査協会&EnVision環境保全事務所 All right Reserved

Fig. 1-2 日本国内におけるナマズのレッドデータカテゴリ

4.生活史に関する情報が断片的

ナマズに関する既往の知見を成長段階別に整理した。まず，成魚期の知見として，産卵行動（友田，1962；片野ら，1988；Maehata，2002），繁殖移動（片野ら，1988；斉藤ら，1988，；湯浅・土肥，1989；中村・尾田，2003；杉原・水谷，2006；舟尾・沢田，2013），産卵行動の誘発要因（湯浅・土肥，1989；Maehata，

2007) が挙げられる。このように成魚の水田周辺における繁殖行動に関する知見は豊富に存在するが、非繁殖期の河川における行動や生息環境についての報告は少ない。同様にナマズの仔稚魚期の成長については、本種の養殖技術開発のために飼育環境下において調べられているが(梅沢ら, 1994a, 1994b; 来間・野村, 1997), 自然環境下で調べられた例は見られない。また, 一時的な水域において成育した稚魚は落水の前に恒久的な水域に移動すると考えられるが, この過程は十分に明らかにされていない。このように, 本種の生活史の情報は断片的であり, 稚魚期から成魚期の詳細な生態学的情報を包括的に把握する必要性は高いと考えられる。

1.3 成長段階の定義と調査手法

ナマズは淡水生態系の頂点捕食者であり個体数が比較的少ないことや, 夜行性魚類であり日中は隠れ家内で休息することから, 採捕は困難であり, 採捕調査によって得られた情報から結果を推測することは, 過大もしくは過小評価につながる可能性がある。ナマズの存在場所を経時的に追跡可能ならば非繁殖期の河川における行動等を明らかにすることができると考えられる。これを可能にする調査手法として, バイオテレメトリー(Biotlemetry: 生物行動情報遠隔測定)が挙げられる。この手法は, 調査個体に装着した発信機からの発信情報をもとに, 位置・移動経路・行動範囲を長期間モニタリング可能であり, 保全管理施策へ寄与する有効な調査手法として注目を集めている(有賀ら, 2009)。そこで, 成魚の調査手法としてバイオテレメトリーを用いることとした。

1.3.1 成長段階の定義と特徴について

成魚の定義は田崎・金澤(2001)を参考に雌雄ともに標準体長 200mm 以上の個体とした。友田(1978)はナマズの体形がほぼ完成するまでの期間を体長によって 5 段階に分けた。調査によって観察された個体の体サイズから, 稚魚および幼魚の定義はそれぞれ全長 50mm より小さい個体, 全長 50mm より大きい個体とした。ここで, 稚魚は友田(1978)の分類の 3 から 4 に, 幼魚は 5 に相当する。3 段階目の特徴として, 体長は 14 から 20mm で, 鰭や体が急速に発達し遊泳力が強くなり, 餌に飛びついて捕食する。下顎の二対のひげはこの時期に最も長く発達し, 頭の背腹面には大形の側線孔が列をなしている。このように味覚, 嗅覚, 水の動きなどの底生生活に必要な感覚器の発達が目立つ。4 段階目の特徴として, 体長は 18 から 44mm であり, 急速に骨格, 鰭, 臓器, 体表面, 感覚器等が成長し, 水中を活発に遊泳する。5 段階目には, 体長は 50mm 以上となり, 体形的な特徴は眼の側方突出を除き, すべて底生生活をする成魚型に似る。

本文中で稚魚および幼魚に関して記述する際は稚・幼魚とする。稚・幼魚の個体数は多く採捕は容易であり, 得られた情報から個体群レベルの生態を把握できると考えられる。したがって, 稚・幼魚の調査手法として採捕法を用いる

こととした。

1.3.2 バイオテレメトリーについて

従来の調査手法では標識再捕法等により個体の移動や個体数の推定が行われていたが（鈴木ら 2004；守山ら 2008），標識再捕法で得られる情報としては，放流点と再捕点の2点に限られるためにその間の移動経路や周囲の環境情報は推測に頼らざるを得ない（光永ら，2002）．近年，標識再捕法にかわる新たな魚類行動解析の手法としてバイオテレメトリーが注目されている．

バイオテレメトリーとは超音波や電波といった搬送波を発信する発信機を個体に装着し，生体情報ないし環境情報を遠隔測定する手法である（日本バイオリギング研究会，2009）．バイオテレメトリーによって，従来の手法では得ることの難しかった生物の詳細な行動（移動経路，遊泳速度等），生理（体温，心拍数等），環境（水温，水深等）に関する情報を連続的に取得することが可能であり（日本バイオリギング研究会，2009），生物の保全管理施策へ寄与する有効な調査手法としても注目を集めている（有賀ら，2009）．バイオテレメトリーは海洋や湖沼，河川とった水域においての適用例が多いが，水田周辺の様々な生物にも適用され行動生態解明に寄与している（Table1-1）．

Table 1-1 水田周辺の生物に対するバイオテレメトリーの適用例

分類群	対象生物
鳥類	アオサギ（Van et al.1984）・トキ（Yu et al. 2009）
両生・爬虫類	トウキョウダルマガエル（戸金ら，2010）
魚類	ニゴロブナ（米山ら，2008）・ナマズ（森ら，2013）・コイ・フナ・カワムツ・ウグイ・カマツカ（佐々木ら，2001）
甲殻類	アメリカザリガニ（Gherardi et al.2002；Barbaresi et al. 2006）
昆虫類	タガメ（日鷹，2000）・トンボ類（Wikelski et al. 2006）

* 赤字：電波テレメトリー，青字：超音波テレメトリー

バイオテレメトリーは超音波テレメトリーと電波テレメトリーに分類され、さらに受信機の種類により追跡型と設置型に分けられる (Table 1-2)。電波テレメトリーは淡水から陸上まで使用することが可能で、古くから陸域の野生動物の行動研究に用いられてきた。調査者が八木アンテナとレシーバーを携行し、発信機からの電波信号が最大になる方向を2点以上得て、発信源の位置を推定する三角測量法が一般的な追跡方法である (Fig.1-3)。超音波テレメトリーは陸上では使えないが、淡水・海水問わず使用することができる。主に湖沼や沿岸域で使用されることが多く、設置型の受信機を任意の場所に設置し、装着個体が受信範囲内に侵入すると識別番号と時刻が受信機内に記録される。また、追跡型の受信機はハイドロフォンを使い、音波の発信源である装着個体をモニターしながら船舶等により移動しリアルタイムに追跡、位置を特定する (Fig.1-3)。電波と超音波、追跡型と設置型にはそれぞれ長所と短所が存在することを念頭に置き、調査目的、場所、人員、予算、期間等を考慮し適当な機材を選択する必要がある。特に使用する発信機のサイズ、装着方法は生物の行動に影響を与える可能性があり、予め影響の評価をする必要がある。

Table 1-2 電波および超音波テレメトリーの長所と短所

タイプ		長所	短所
発信機	電波	<ul style="list-style-type: none"> ・淡水・空気中問わず電波を発信可能 ・比較的小型で安価 	<ul style="list-style-type: none"> ・海水中では電波を送信できない ・電波法に抵触するおそれがある
	超音波	<ul style="list-style-type: none"> ・淡水・海水問わず広範囲に信号を発信可能 ・比較的高寿命 	<ul style="list-style-type: none"> ・空気中では音波を送信できない ・比較的高価で大型
受信機	追跡型*	<ul style="list-style-type: none"> ・測器にかかる費用が少ない ・リアルタイムに情報を取得可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・信号を受信できなければデータを取得できない ・追跡にかかる労力と費用がとて大きい
	設置型	<ul style="list-style-type: none"> ・調査作業全体にかかる労力が少ない ・同時に多くの個体から信号受信可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・受信範囲は受信機の数に依存 ・受信範囲に対象生物がいなければデータを取得できない

* 追跡型超音波受信機：ハイドロフォン，追跡型電波受信機：八木アンテナ+レシーバー

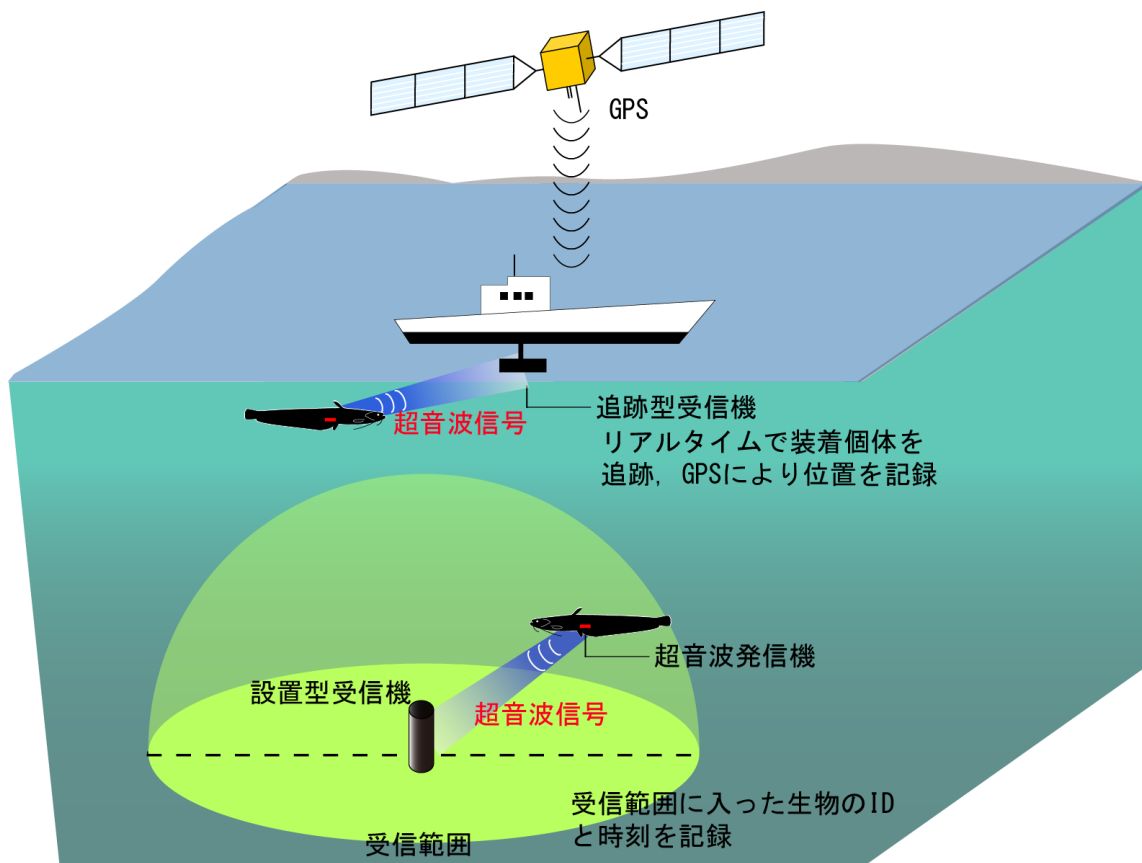


Fig. 1-3 超音波（上図）と電波テレメトリー（下図）の原理

1.4 研究の目的と構成

本研究では、圃場整備後の水田水域において、1) ナマズが生活史を完結できる環境を調査地は備えているか検討すること、2) ナマズの成長段階、季節ごとの生態学的情報を収集し、生活史を推測することを目的とした。

研究の構成を Fig.1-4 に示した。第2章では調査水域内のナマズの繁殖場所として候補に挙げられた2つの排水路において調査を実施し、繁殖場所を特定し、特徴を説明しながら、繁殖場所の成立要因について考察した。第3章ではナマズの成育場所を明らかにし、その成立要因を考察するとともに本種の初期生活史として、成長と河川への移動様式について把握する。第4章では成魚に対するバイオテレメトリーの適用可能性を検討する目的で、発信機装着可能性を検討した上で野外における行動追跡手法としての有効性も検討した。第5章では電波テレメトリーを適用し、調査河川における成魚の越冬期と繁殖期の行動特性および生息環境を把握した。第6章では、第5章と同様に電波テレメトリーを適用し、河川から繁殖場所への移動、繁殖に発展する条件等を把握した。第7章では、第2章から第6章の知見をもとに、ナマズ的生活史を推測した。

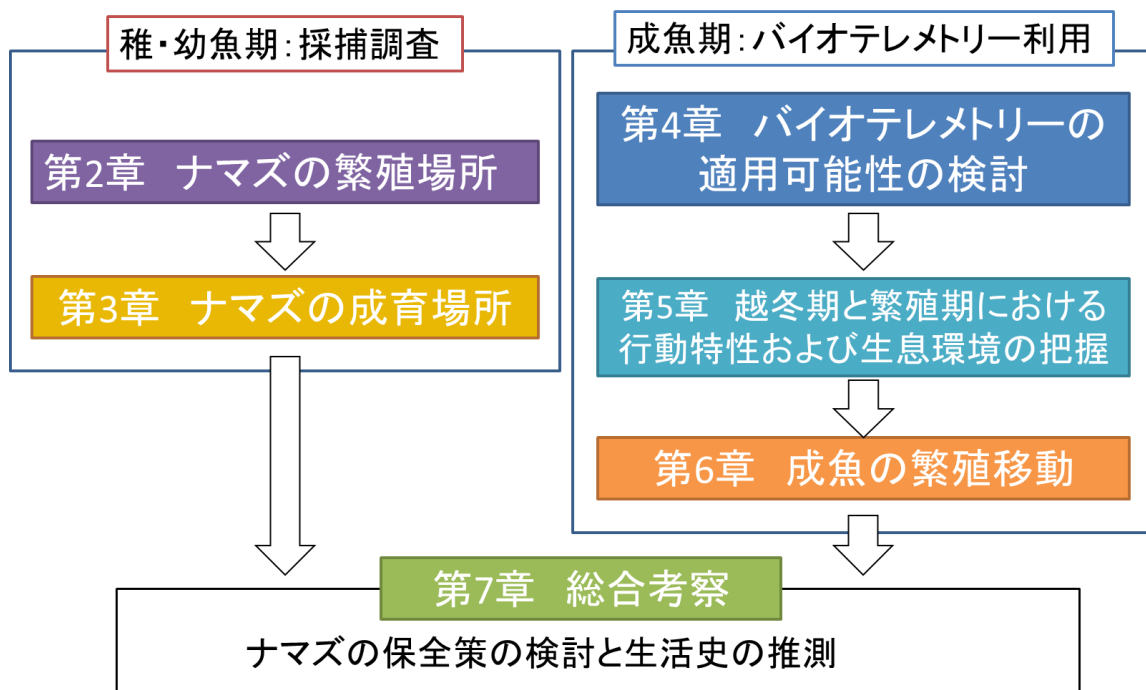


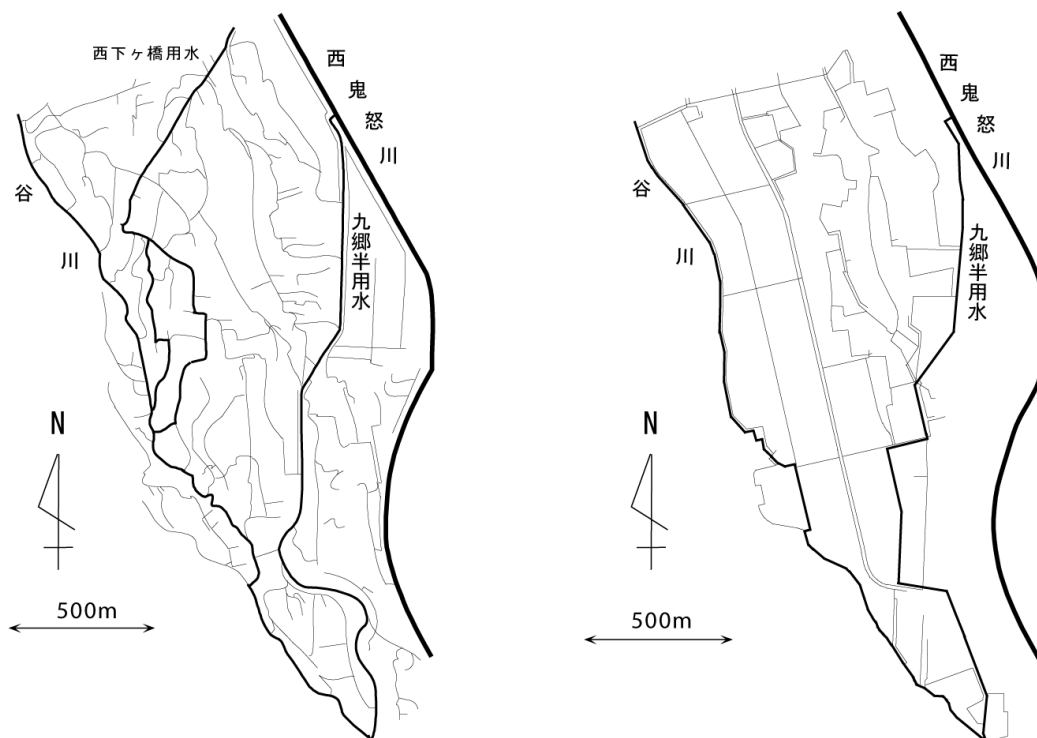
Fig. 1-4 研究の構成

1.5 調査対象地の概要

1.5.1 圃場整備事業と谷川

研究対象地は、栃木県宇都宮市西鬼怒川地区を流れる谷川とした。Fig.1-5 と Photo1-1 とにそれぞれ、圃場整備前後の水田排水路の構造と谷川流路および水路網の変化を示した。圃場整備以前の谷川は水田内を網目状に流れる多数の小排水路と落差なく接続していた（藤咲ら，1999）。西鬼怒川地区では1996年度から2001年度まで圃場整備事業が実施された。当地区における圃場整備事業の計画は0.5ha以上の大区画水田，谷川中流部1.4kmの河道付け替え，用排水路の分離と整理統合，および暗渠排水路の敷設等である（藤咲ら，2003）。

圃場整備以前と以後の水路密度はそれぞれ，217m/haと206m/haであり差は見られないが，事業後の水路は用・排水路が分離し，このうちコンクリート製のU字溝の小用水路が139m/ha，田面よりも1mから1.5m低い水路底をもつ排水路が67m/haとなっている（水谷，2007）。圃場整備以前，これらの水路は水田とも落差なく接続し，フナ類やドジョウといった魚種の生活史を保証する上で重要な役割を果たしていると考えられた（藤咲ら，1999）。しかし，圃場整備によって谷川周辺の水田排水路は整理統合，用排分離等の改修が加えられ，現在，魚類の双方向移動が可能な谷川と接続する水田排水路は後述する小排水路と土水路を含む3本のみである。また，1997年から1998年には下流から中流の約1.4kmの河道が付け替えられ，水田地帯を貫流する流路から，西鬼怒川の西部に位置する河岸段丘の崖線を通る流路へと変更された（高橋ら，2009）。



圃場整備前の水路（1996年以前）

圃場整備後の水路（1999年以降）

Fig. 1-5 圃場整備前後の谷川および接続水路の変化



Photo 1-1 圃場整備前後の水田の排水方式の変化
(上：整備以前，下：整備以後)

上記の圃場整備事業と併行して地域の自然環境保護を目的として、1997年度から2004年度に県営農村自然環境整備事業が導入され、上流区間0.7kmの自然河道および河畔林の現状存置、中流河道付け替え区間に近自然化工法（井桁護岸、ワンド、フトン籠）の設置、小規模魚道による谷川と水田とのネットワークの修復といった環境配慮対策が施された（高橋ら、2009）。また、この事業により1999年に下流の河川からの魚類の移動を阻害していた南部堰（農業用取水堰）に魚道が設置された。谷川はかつて湧水を水源としていた湧水性河川であったが、地下水位の低下により冬期に水涸れを起こすようになったことから、西鬼怒川に設けられた下ヶ橋用水堰により流量が調整される農業用の小河川になった（守山ら、2008）。谷川の平均川幅は5.0mであり、最大水深は約2.0mで大部分の水深は30cmに満たない（守山ら、2008）。底質は細礫や中礫、泥が多く、巨礫（256mm以上）はほとんど見られない。河岸の構造は土羽、練石積み、コンクリートや近自然工法であるフトン籠および井桁護岸で構成されている。谷川内や谷川と他の水域（西下ヶ橋用水や九郷半用水）間の魚類の移動を阻害する横断工作物は存在しない。

1.5.2 谷川におけるナマズの変遷に関する知見

これまでの調査・研究から谷川周辺の事業によりナマズの個体群がどのように影響をうけ、その後どのように現在に至ったのか整理した。

かつて谷川に生息していたナマズは地域住民に自家消費されるほど豊富であった（加藤ら、1999）。その後、圃場整備事業によって水路の単純化や水路の用排分離に伴い、谷川と水田間のネットワークが分断された（藤咲ら、2003）。こうした人為的環境改変の結果、ナマズの餌生物であるドジョウやフナ類の個体群密度が減少し（藤咲ら、2003）、1996年にナマズの生息が確認できない状態となった（加藤ら、1999）。しかし農村自然環境整備事業の導入後、ナマズの生息が再確認され、ナマズの生息数回復の初期段階（1999年～）にみられた個体は、南部堰に設置された魚道を介して下流の河川から遡上したと考えられている（守山、2009）。

また、ナマズ生息数が再確認されて以降に行われた谷川における魚類採捕調査の結果（2003年～2012年）をもとに、本種の分布状況を Fig.1-6 に示した。谷川においてナマズは広範囲に分布しており、局所的に密度が高い地点も見られた。このことから、谷川内でナマズは生息可能であり、生活史を完結している可能性が示唆された。

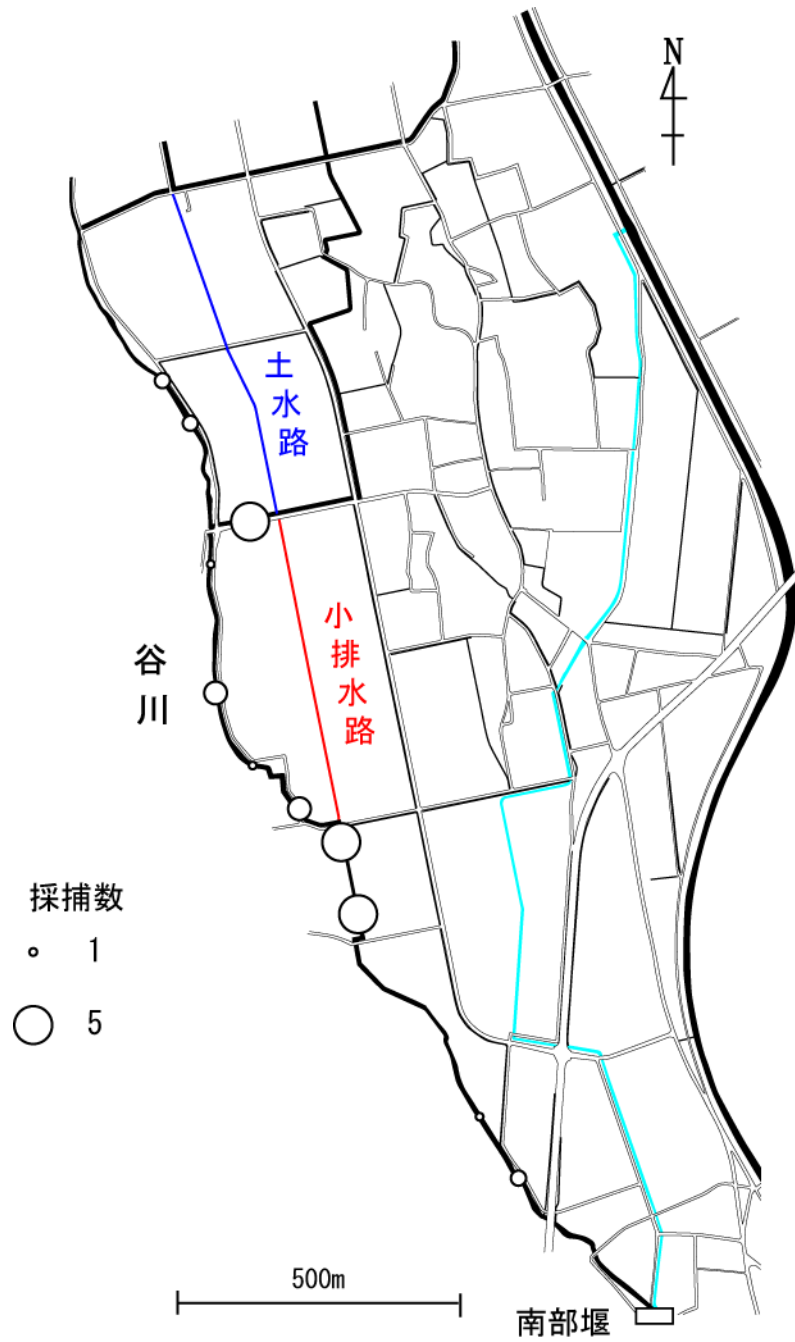


Fig. 1-6 過去の採捕記録による谷川におけるナマズの分布

第2章 ナマズの繁殖場所

2.1 目的

多くの種にとって最も重要な生活ステージは繁殖であるとされ、繁殖に利用されるハビタットの特性を明らかにすることが重要である（中村，2007a）。繁殖可能な環境を失いリクルートを確保できない場合絶滅に向かう。したがって、谷川周辺でナマズが確認されることは繁殖場所がどこかに存在していると考えられる。しかし、調査地周辺におけるナマズの繁殖場所はこれまで特定できていなかった。ナマズは河川から一時的水域である水田水域に移動し繁殖することが報告されていることから、谷川と接続する2本の水田排水路がナマズの繁殖場所として利用されている可能性があると考え対象とした。

水田に通水が開始されてから2012年5月8日にこの年初めて、小排水路においてナマズの卵を確認した。これまで、詳細な稚魚の生息環境に関する知見はみられない。そこで、谷川と接続する2つの異なる水環境の水路である小排水路および土水路において、稚魚の水路内の分布に影響する水路環境について検討した。また、ナマズは繁殖期間中複数回産卵することが示唆されている（舟尾・沢田，2013）。そこで、本調査地における成魚の産卵回数および繁殖期間を把握するために、1週間に1回の頻度で成魚および卵の存在を2012年6月から7月にかけて確認した。これらの情報をもとに繁殖場所を特定し、その成立要因を検討した。本章では以下の要点を考慮し、調査した。

- 1) 小排水路ではすでに卵が見つかっており、近接する土水路でも産卵が行われた可能性が考えられた。
- 2) 稚魚が集中的に分布しているということは、その地点が稚魚の生息に適している可能性がある。そこで、稚魚の分布と環境要因との関係を調べることで、稚魚の生息環境を把握できると考えられた。
- 3) ナマズが繁殖場所として利用するとすれば、繁殖期間中、複数回産卵が確認される可能性がある。そこで、継続的に卵を確認することで、産卵回数および繁殖期間が推定できると考えられた。

2.2 調査対象水路

2.2.1 小排水路

調査対象の小排水路のはコンクリート（ベンチフリューム）であるが、底面には湧水による浮き上がりを防ぐため、45cm 間隔で隙間（40cm×25cm）があり、底泥が露出している（Fig.2-1, Photo2-1）。水路内には沈水植物が生育し、シヤジクモが優占していた。灌漑期のみ通水する一時的水域であり、水田排水部はパイプ化し、水路底から約 60cm の落差が生じているため、小排水路から水田への魚類の遡上は不可能である。また、農作業の必要上各水田の排水量は大きく変化し、灌漑期中でも水路の一部で水枯れが起こったことを確認している。小排水路はヒューム管（直径 1m）によって谷川と落差なく接続し、魚類の移出入が可能なのはこの接続部だけである。一方、小排水路の上流端は直上を流れる幹線排水路と接続していない（Fig.2-2）。また、水路内の 4 箇所には落差工が存在している（以降、これらの落差工は下流から第 1 落差と呼ぶ）。第 1 落差および第 2 落差は水クッション型落差工で落差の高さは 60cm、水クッション部の長さは 160cm である（Fig.2-3, Table 2-1）。第 3 落差および第 4 落差は階段落差工で高さは 30cm、高さ 15cm と 14cm の隔壁が存在する（Fig.2-3, Table 2-1）。また、第 3 落差と第 4 落差は増水時に水没することが度々観察されている。2011 年 7 月に魚類の移動障害を解消するために第 1 落差に延長 150cm、幅 20cm のポリエチレン製コルゲート管を水路魚道として設置した（以下、魚道）。魚道幅に対して水路幅は大きく（80cm）、水は魚道だけでなく両側面の隙間からも流れる。

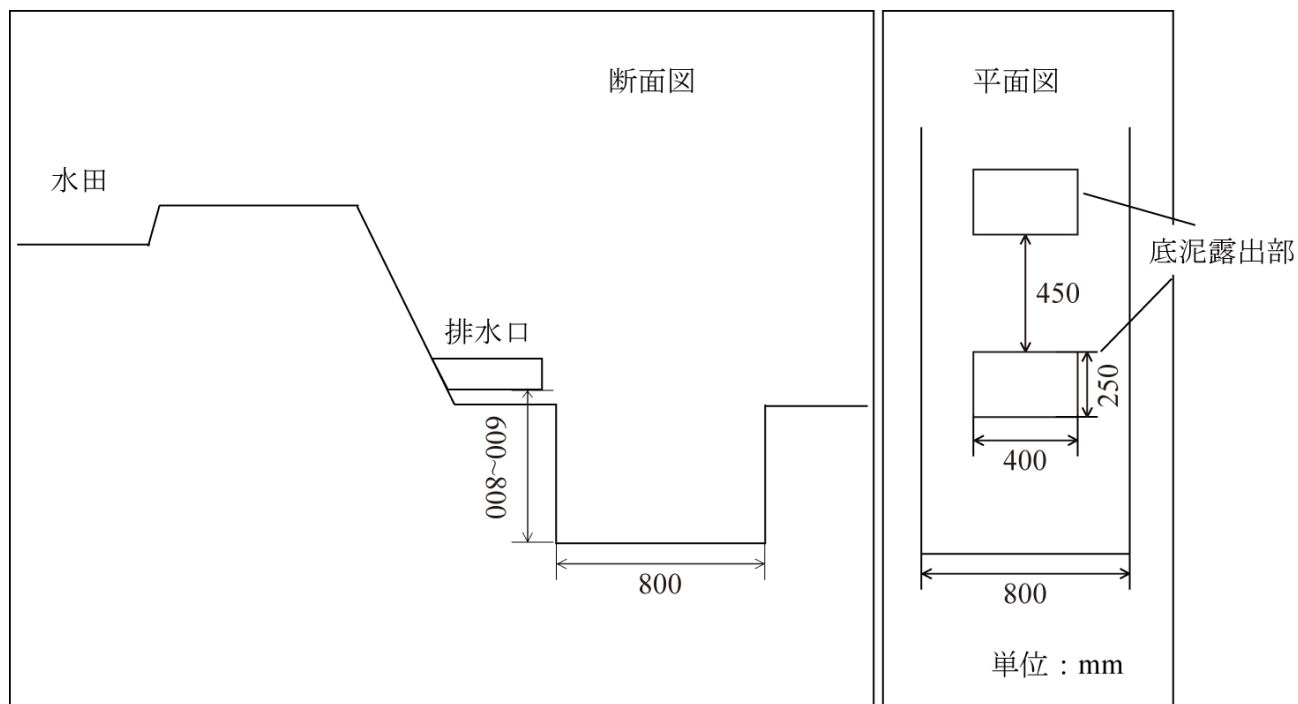


Fig. 2-1 小排水路の断面図および平面図

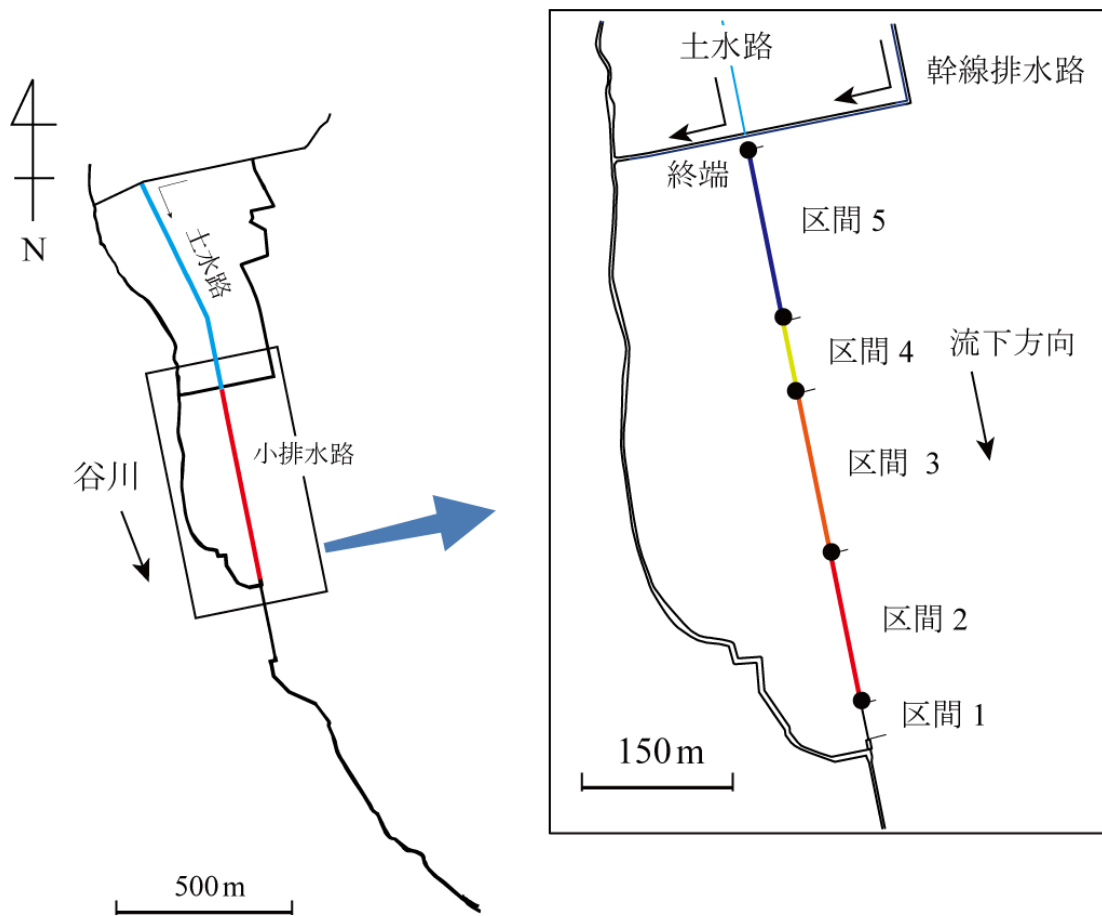


Fig. 2-2 小排水路および土水路の調査範囲



Photo 2-1 小排水路の構造

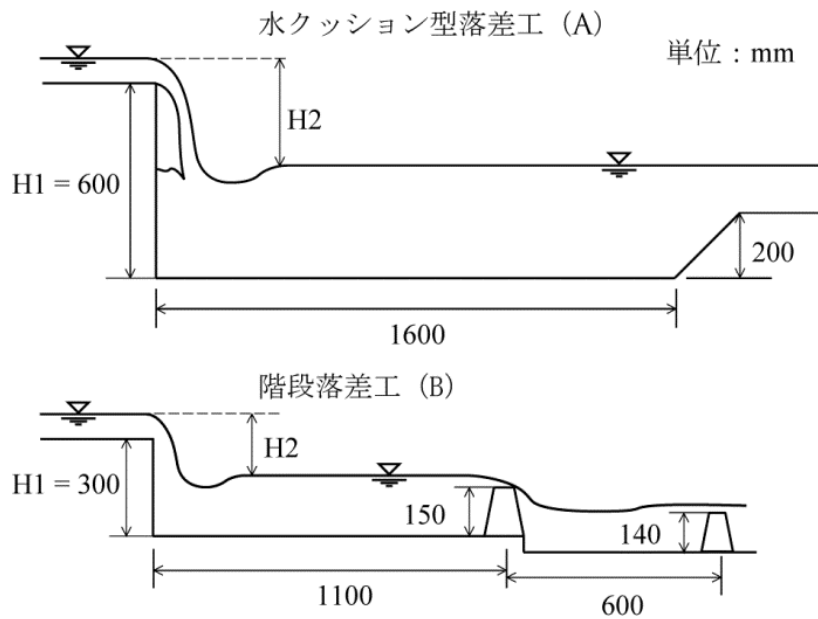


Fig. 2-3 小排水路に存在する2つのタイプの落差工の模式図

Table 2-1 小排水路における各落差工の概要

	第1落差	第2落差	第3落差	第4落差
構造	Aタイプ	Aタイプ	Bタイプ	Bタイプ
高さ H1 (cm)	60	60	30	30
平水時の水面差 H2 (cm)	45~48	15~20	5~10	5~10
増水時の水面差 (cm)	30~40	10~15	水没	水没
魚道の有無	有り	無し	無し	無し

構造，高さ H1 および平水時の水面差 H2 は Fig.2-3 に対応

2.2.2 土水路

土水路は 1999 年度冬期に新設された生態系に配慮した排水路である (Fig.2-2). 底面は主に砂泥で全域にわたりコカナダモやバイカモ, キショウブといった植物が繁茂している (Photo2-2). 土水路は千鳥 X 型魚道によって幹線排水路と接続しており, 幹線排水路はさらに末端で谷川と接続している (鈴木ら, 2004). また, 水田と土水路の落差は少なくカスケード M 型水田魚道によって接続している. このため, 河川から土水路, 水田間の水域ネットワークが構築されており, 魚類の移動が確認されている (鈴木ら, 2004). 灌漑期には 2 か所で用水路からの水を, 非灌漑期には防火用水の一部を導水するため, 恒久的水域となっている (鈴木ら, 2004)



Photo 2-2 土水路の様子

2.3 調査方法

2.3.1 小排水路と土水路における稚魚と環境の調査

調査区間は両水路とも谷川の合流部から 50m 上流の地点を始点とし, 550m の地点を終点とした. なお, 50m 地点より下流は谷川から移出入する魚類が多く, 採捕結果に偏りが生じる可能性があったため 50m 上流を始点とした. 調査区間内に 5m 間隔で 50cm×50cm のサーバーネット付コドラートを水路中央部に設置した. 環境要因はコドラートを設置した状態で測定した. まず, 流速および水深はそれぞれコドラート内の右岸, 中央, 左岸の 3 点で電磁流速計 (KENEK,

VP-1200) とスケールを用いて測定した。主な底質を泥，砂礫（粒径 2mm 以上 100mm 未満），礫（100mm 以上），沈水植物，コンクリートの 5 分類し，目視によりコドラート内の底質の割合を判定した。これらの測定によって環境を攪乱しないように努めた。測定後，コドラート内の水生生物を徒手もしくは手網（間口 15cm）でサーバーネットに集積した。サーバーネットに集められた水生生物と堆積物を選び分け，別々のバットにあけ，魚類は種を同定し採捕数を記録した。魚類が採捕されたときは，すべての個体をバット上に並べ，長さ 10cm のスケールとともにデジタルカメラで撮影した。写真画像から画像解析ソフトウェア Image J (<http://rsbweb.nih.gov/ij>，確認日：2013/3/31) を用いて採捕魚類の全長を測定した。なお，Image J は画像データの単位距離当たりのピクセル数を定義することで相対的な距離を計算できるソフトである（照井ら，2011）。

なお，調査は 2012 年 5 月 24 日から 27 日に実施した。

2.3.2 小排水路における卵および成魚の確認

小排水路における繁殖の状況を把握するために，2012 年 6 月 15 日，16 日，21 日，27 日，7 月 2 日，9 日，15 日，24 日，30 日に計 9 回調査を実施した。調査区間は小排水路の落差工の存在地点で分け，合計 5 区間設定した (Fig.2-2)。区間内全域を調査者 1 人がタモ網（間口 40cm）を用いて，下流から上流にかけて成魚および卵を採捕した。採捕した個体は採捕地点付近に放流した。また，ナマズの卵が採集された場合は，区間ごとに異なる採集瓶に収集し，実験室に持ち帰り計数した。ナマズの卵の確認は Kobayakawa (1985) に従った。すなわち，ナマズの卵は付着性を持ち，卵径は 1.5mm 程度，透明のゼリー層が黄緑色を呈す卵黄を覆うという特徴である (Photo2-3)。卵の孵化を確認するために，持ち帰った卵のうちランダムに約 20 粒を選び 3cm 水を張ったバットに並べ，数日間室温で静置した。なお，残った卵は翌日水路に戻した。

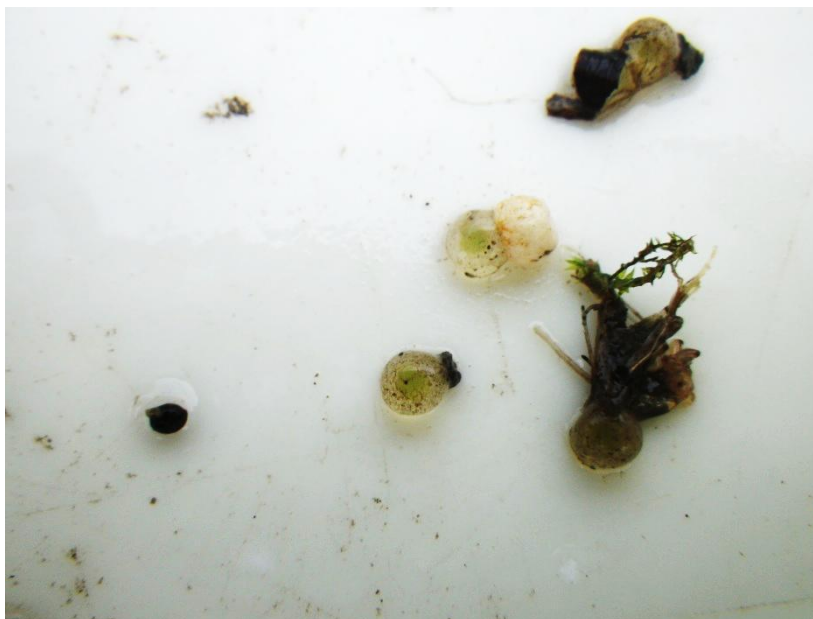


Photo 2-3 採集されたナマズの卵

2.3.3 継続的な水質測定

小排水路，土水路および谷川の環境の特徴を把握するために，灌漑期中定期的に水質を測定した．水温は水温ロガー（onset, U20-001）を用いて10分に1回の頻度で連続的に自動測定した．小排水路と土水路は谷川の接続部からおよそ30m上流の地点，谷川は両水路のほぼ中間に位置する地点に水温ロガーを設置した（Fig.2-4）．2012年5月9日から7月31日まで水温の測定期間とした．

水質および各種ロガーの測定方法および測定場所をTable 2-2に示した．pH（東亜 DKK, HM-20P）, DO（東亜 DKK, DO-24P）およびEC（東亜 DKK, CM-31P）は1週間に2回から3回の頻度でロガーを設置した場所の近くで測定した．濁度は上記の場所で採水し，実験室に持ち帰り濁度計（佐藤商事, TU-2016）を用いて計測した．2012年5月1日から7月31日まで水質項目の測定期間とした．降雨量は調査地近傍の高根沢町の観測データ（気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，確認日：2013/3/31）を参照した．

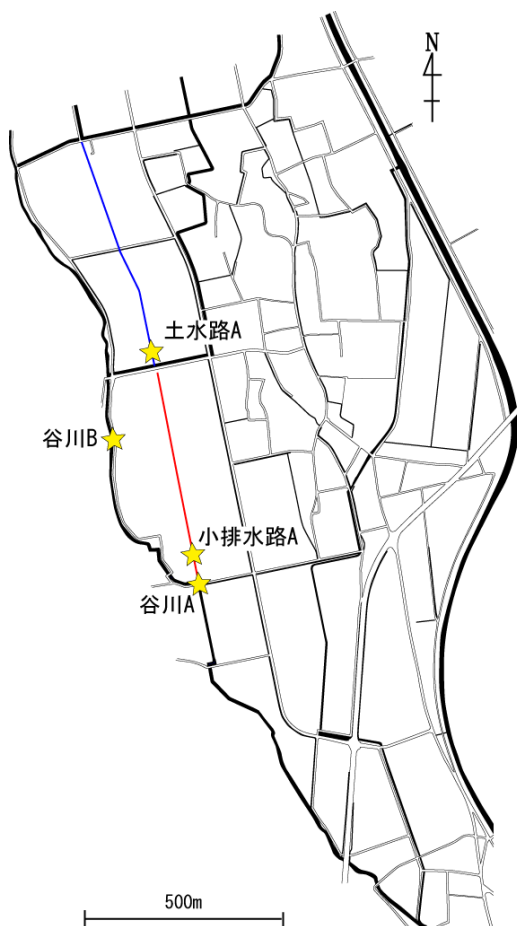


Fig. 2-4 水位および水温ロガーの設置地点

Table 2-2 水理・水質データの測定方法と測定場所

項目	頻度	器具	測定場所
水位		U22-001	谷川 A
水温	10 分間隔	U20-001	谷川 A 小排水路 A 土水路 A
pH		HM-20P	
DO	毎調査日	DO-24P	谷川地点 B
EC		CM-31P	小排水路 A 土水路 A
濁度		TU-2016	

2.3.4 統計解析

小排水路における稚魚の分布様式を調べるために森下の分布集中度指数 (I_δ) を算出した。ナマズ稚魚の水路における分布様式を調べるために森下の分布集中度指数 (I_δ) を算出した (Morisita, 1962)。 I_δ は以下の数式によって算出される。

$$I_\delta = n \frac{(\sum x^2 - \sum x)}{(\sum x)^2 - \sum x} \quad (n: \text{調査地点数}, x: \text{各地点における採捕数})$$

ここで、 $I_\delta > 1$ ならば集中分布、 $I_\delta = 1$ ならばランダム分布、 $I_\delta < 1$ ならば一様分布を示す。

I_δ が有意に 1 と異なるかは、以下の統計量の有意性により判定した (F 検定)。

$$\chi^2 = I_\delta(\sum x - 1) + n - \sum x$$

稚魚の全長組成が正規分布に従っているか調べるために、 χ^2 適合度検定を行った。

稚魚の確認地点と未確認地点の物理環境の差異を検討するため、二群の環境要因データの母平均の差の検定 (等分散を仮定しない Welch の t 検定) を行った。

ナマズ稚魚の分布に影響する環境要因を明らかにするために、稚魚の有無を目的変数、説明変数を環境要因 (谷川からの距離を追加) とした一般化線形モデル (Generalized Linear Model :GLM) を行った。はじめに多重共線性を避けるために、各独立変数間で Spearman の順位相関係数を調べ、強い相関 ($|r| > 0.7$)

が認められた変数の組み合わせは一方の変数を解析から除外した(山本・千賀, 2012). また, VIF (分散拡大要因: Variance Inflation Factor) も計算した. VIF とは 10 以上ある時, 変数間の多重共線性が存在することを示し, それらを除去して分析する必要がある (青木, 2009). そこで, VIF が 10 以上の変数は解析から除外した. 目的変数が 2 値データであるため, 誤差分布は二項分布, リンク関数は logit と指定した. モデル選択には AIC (赤池情報基準量) を基準とし, 最も低い AIC を示したモデルをベストモデルとした (綱川ら, 2012).

水域ごとの水質の差異を検討するために, Steel-Dwass 法による多重比較を行った. 水温は 1 日の全計測値の平均を代表値として解析に用いた. その他の項目は測定値を直接解析に用いた. なお, 各種の統計的検定には R version 2.14.2 (R Development Core Team) を用いた. GLM の推定には stats パッケージの glm 関数を, モデル選択には MuMIn パッケージの dredge 関数を用いた.

2.4 結果および考察

2.4.1 小排水路と土水路の環境の比較

小排水路は 4 箇所には落差工が存在し, 区間ごとに環境を比較したところ差が見られた (Table 2-3). 最大流速および最小流速はそれぞれ, 区間 4 と区間 2 が最も高く, 区間ごとに大きな差は見られなかった. 最大水深および最小水深はそれぞれ, 区間 5 と区間 2 が最も高く, 区間ごとの差は見られなかった.

小排水路の底質の大半を占める泥とコンクリートの割合を区間ごとに比較すると, 前者は下流の区間 2 が最も低く ($44.0 \pm 21.7\%$; 平均値 \pm 標準偏差), 上流の区間ほど増加する傾向が見られ, 後者は区間 2 が最も高かった ($49.3 \pm 19.2\%$).

Table 2-3 小排水路の各区間の環境

	区間 2 (n=29)	区間 3 (n=33)	区間 4 (n=15)	区間 5 (n=24)
最大流速 (cm/s)	9.3 \pm 5.9	7.7 \pm 6.6	9.6 \pm 8.1	6.3 \pm 5.5
最小流速 (cm/s)	3.5 \pm 3.4	1.3 \pm 1.9	2.2 \pm 1.9	0.9 \pm 1.4
最大水深 (cm)	8.5 \pm 4.2	8.7 \pm 3.4	8.0 \pm 4.6	8.9 \pm 3.5
最小水深 (cm)	6.6 \pm 4.7	6.0 \pm 4.2	5.3 \pm 4.6	5.4 \pm 4.9
泥 (%)	44.0 \pm 21.7	64.8 \pm 37.7	64.0 \pm 45.5	85.4 \pm 30.6
礫 (%)	1.0 \pm 5.6	3.6 \pm 11.7	1.3 \pm 5.2	2.5 \pm 7.4
沈水植物 (%)	5.7 \pm 8.5	15.7 \pm 24.0	1.3 \pm 5.2	0.0 \pm 0.0
コンクリート (%)	49.3 \pm 19.2	15.7 \pm 25.0	33.3 \pm 44.5	12.1 \pm 30.8

小排水路全域の環境の特徴として比較的流速は小さく、水深は浅い (Table 2-4)。また、底質は泥が占める割合が最も高く (約 64%)、次いでコンクリート (約 27%) であった。土水路の環境の特徴として比較的流速は小さく水深は最大および最小値ともに 10cm 以上であった。底質は泥が占める割合が最も高く (約 53%)、次いで沈水植物 (約 37%) であり、コンクリートは見られなかった。

小排水路と土水路の環境要因を比較した。最大流速、最小流速の平均値に差は見られなかったが ($p>0.05$)、最大水深、最小水深は有意に土水路の方が高いことがわかった ($p<0.05$)。泥の割合は土水路よりも小排水路の方が高かったが、有意差は見られなかった ($p>0.05$)。砂礫、礫および沈水植物の割合は土水路の方が高く、有意差は見られた ($p<0.05$)。コンクリートの割合は小排水路の方が有意に高かった ($p<0.05$)。

Table 2-4 小排水路と土水路の環境要因の比較

	小排水路 (n=101)	土水路 (n=98)	p 値
最大流速 (cm/s)	8.1±6.4	8.5±5.3	n.s.
最小流速 (cm/s)	1.9±2.5	2.6±2.7	n.s.
最大水深 (cm)	8.6±3.8	13.8±3.1	<0.01
最小水深 (cm)	5.9±4.5	10.4±3.4	<0.01
泥 (%)	63.6±36.1	53.4±38.5	n.s.
砂礫 (%)	0.0	3.4±12.3	<0.01
礫 (%)	2.3±8.3	6.2±17.2	<0.05
沈水植物 (%)	7.0±15.9	36.8±37.6	<0.01
コンクリート (%)	27.1±32.1	0.0	<0.01

測定期間中の水温の変化を比較したところ、小排水路が最も高く、次いで土水路、谷川の順であり、小排水路の水温は常に他の水域よりも高かった (Fig.2-5)。また、水温の日変動の傾向は 3 つの水域とも類似していた。小排水路の平均水温は 22.9±3.3℃、土水路は 19.8±3.6℃、谷川は 16.8±1.6℃、各調査水域間の平均値に有意差が見られた ($p<0.01$, Table2-5)。DO の平均値は土水路が小排水路よりも有意に高かったが ($p<0.05$)、谷川と他の 2 水域間に有意差は見られなかった。pH、EC および濁度の平均値は各水域間に有意差は見られなかった ($p>0.05$)。

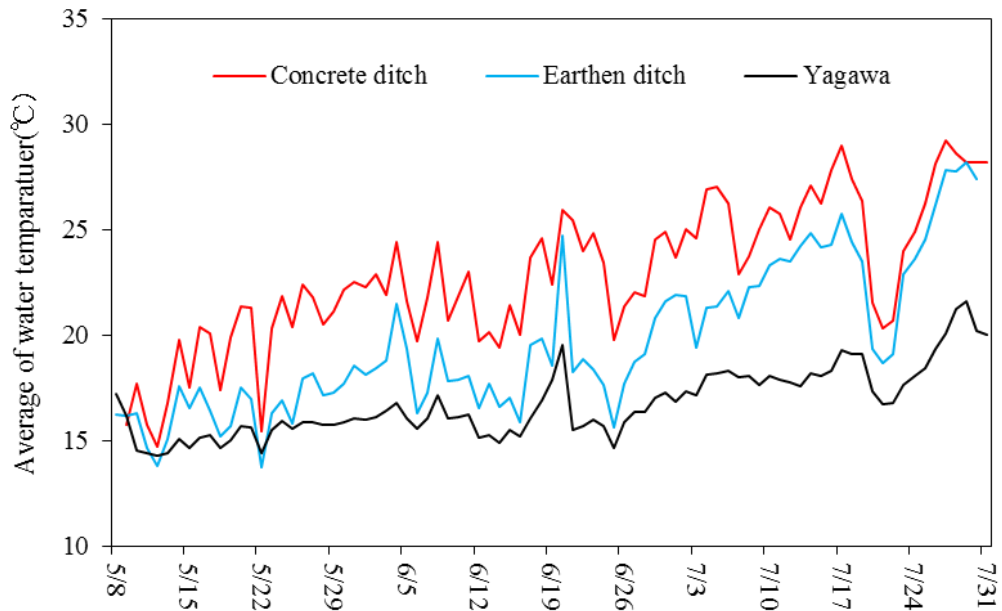


Fig. 2-5 3つの調査水域の平均水温の経時的変化

Table 2-5 小排水路と土水路および谷川の水質の比較

	小排水路	土水路	谷川
水温 (°C)	22.88±3.35 ^a	19.82±3.57 ^b	16.78±1.64 ^c
DO (mg/l)	4.48±1.98 ^a	6.62±1.98 ^b	5.76±2.14 ^{ab}
pH	7.32±0.27 ^a	7.54±0.39 ^a	7.20±0.26 ^a
EC (mS/m)	8.63±2.02 ^a	8.79±1.47 ^a	8.42±1.00 ^a
濁度 (NTU)	29.44±64.5 ^a	7.96±7.23 ^a	4.74±5.46 ^a

異なるアルファベットは水域ごとに平均値に有意差があることを示す。

2.4.2 稚魚の分布に関連する環境要因

調査の結果，土水路ではナマズの稚魚は採捕されなかった．稚魚は小排水路において，全採捕地点（101地点）の半数にあたる50地点で合計160尾確認された（Fig.2-6）．稚魚は第2落差から第3落差（区間2）まで低密度に分布していたが，第3落差から最終の地点（区間3から区間5）まで高密度に分布していた．算出された I_d は3.38で，小排水路における稚魚の分布は有意な集中分布であったことが分かった（ F 検定， $df=100$ ， $F=4.79$ ， $p<0.01$ ）．

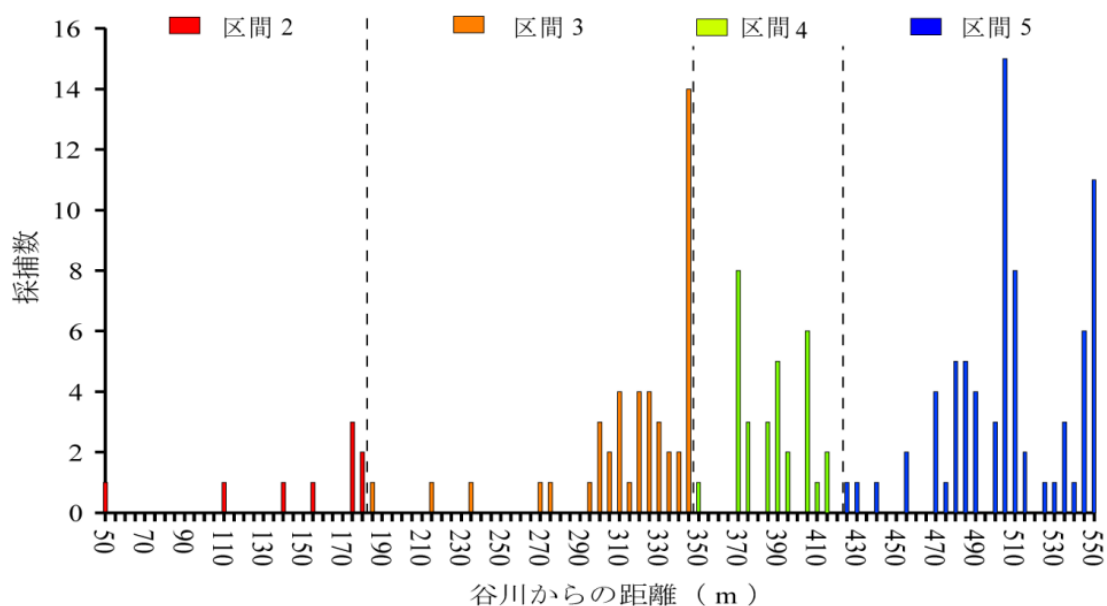


Fig. 2-6 小排水路における稚魚の分布

採捕された稚魚の全長の平均値は 18.7 ± 2.1 mm，変動係数は0.112であった．また，ヒストグラムは正規分布を示し（ χ^2 適合度検定， $df=11$ ， $\chi^2=16.4$ ， $p>0.05$ ），明確な一峰性であることから（Fig.2-7），小排水路内の稚魚はほぼ同時期に発生した集団であると考えられた．採捕された稚魚を撮影した画像をPhoto2-4に示す．

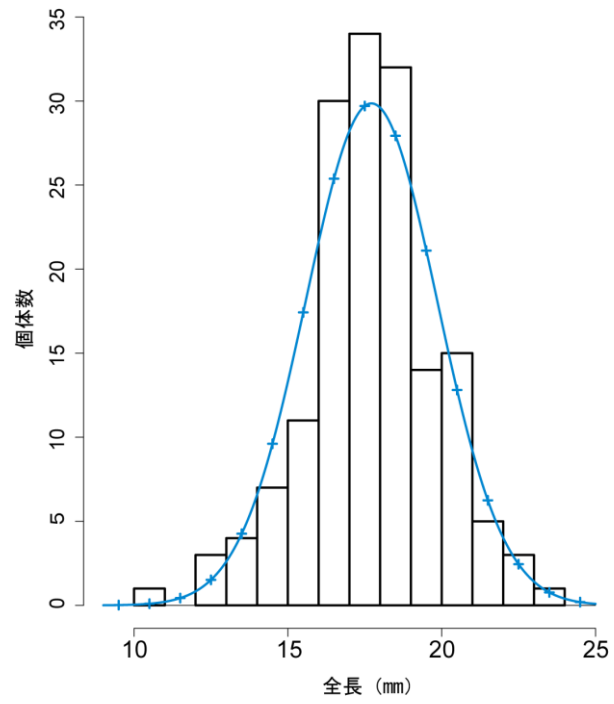


Fig. 2-7 稚魚の全長頻度分布



Photo 2-4 採捕された稚魚

稚魚の確認地点の底質は泥が優占し、未確認地点の底質は主に泥とコンクリートが占めていた (Table 2-6). 流速および水深の平均値は確認地点の方が未確認地点よりも低かったものの、有意差はみられなかった (Welch *t*-test, $p>0.05$). 底質は礫の割合に有意差はみられなかったが (Welch *t*-test, $p>0.05$), 泥, 沈水植物およびコンクリートの割合は有意差が見られた (Welch *t*-test, $p<0.01$).

目的変数と説明変数の相関分析の結果を Table 2-7 に示した. 泥とコンクリートの割合に強い負の相関 (Pearson の積率相関係数 -0.86 , $p<0.01$) が見られ、後者の VIF は 19.43 と高い値を示したので解析から除外した. 変数間の相関行列から、泥およびコンクリートの割合はそれぞれ、流速と負および正の相関が見られた.

GLM の解析の結果、泥の割合と谷川からの距離を含むベストモデルが選択された (AIC = 113.34). 偏回帰係数は泥の割合が 0.019, 谷川からの距離が 0.005 であった (Table 2-8). 仮定した誤差分布 (二項分布) がデータの母集団の誤差を正確に表現できているかどうか Dispersion parameter (今泉, 2010) を計算したところ値は 1.015 (1 であれば二項分布の分散と等しい) を示し、モデルの適合性が高いことがわかった.

Table 2-6 稚魚の確認地点と未確認地点の環境要因の比較

	未確認地点 (n=51)	確認地点 (n=50)	<i>p</i> 値
最大流速 (cm/s)	9.1±6.2	7.1±6.5	n.s.
最小流速 (cm/s)	2.4±3.0	1.4±1.8	n.s.
最大水深 (cm)	8.3±4.3	8.9±3.2	n.s.
最小水深 (cm)	5.7±4.8	6.1±4.3	n.s.
泥 (%)	46.6±32.7	81.0±31.5	<0.01
礫 (%)	3.3±10.9	1.2±4.3	n.s.
沈水植物 (%)	11.3±19.2	2.6±10.0	<0.01
コンクリート (%)	38.8±31.1	15.2±29.2	<0.01

Table 2-7 投入した目的変数と説明変数の相関

	説明変数候補										
	稚魚の有無	採捕数	最大流速	最小流速	最大水深	最小水深	泥	礫	沈水植物	コンクリート	谷川からの距離
稚魚の有無											
採捕数	0.93***										
最大流速	-0.20*	-0.23*									
最小流速	-0.1	0.33***	-0.15								
最大水深	0.15	-0.54***	-0.17								
最小水深	0.08	-0.36***	0.09	0.64***							
泥	0.49***	0.53***	-0.38***	-0.32***	0.28**	0.09					
礫	-0.07	-0.08	-0.16	-0.16	0.08	0.01	-0.22*				
沈水植物	-0.31**	-0.35***	0.15	-0.06	-0.19	-0.23*	-0.45***	-0.02			
コンクリート	-0.43***	-0.46***	0.39***	0.46***	-0.28**	0.03	-0.86***	-0.04	0.18		
谷川からの距離	0.46***	0.52***	-0.24*	-0.30**	0.13	-0.08	0.53***	0.08	-0.44***	-0.54***	
VIF	1.83	1.68	1.70	1.64	3.76	3.61	24.63	2.96	4.46	19.43	1.71

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

Table 2-8 稚魚の分布に関連する環境要因，GLMによる推定結果上位3モデル

モデル順位	定数項	谷川からの距離	礫の割合	泥の割合	水草の割合	Akaike weight	AIC	Δ AIC	Dispersion parameter
1	-2.88	0.006**		0.019**		0.297	113.34	0.00	1.015
2	-2.845	0.006**	-0.34	0.019**		0.175	114.40	1.05	1.012
3	-2.657	0.005**		0.019**	-0.014	0.156	114.63	1.28	1.013

Wald 検定から推定された偏回帰係数の有意性. ** : $p < 0.01$

稚魚の分布は上流に集中しており，確認された地点の底質は泥が優占していた（Table 2-6）．また，GLMの結果から，稚魚の分布に影響する説明変数として泥の割合および谷川からの距離が選択された（Table 2-8）．これらの説明変数の間には有意な正の相関が見られ（Table 2-7），上流にいくほど泥の存在が増え，下流区間は泥よりもコンクリートの割合が高い（Table 2-3）．これは，水路に面した水田からの排水口から供給される水は下流に行くほど増加するため，上流では土砂が流されることなく堆積し，下流では土砂は流されコンクリート面が露出すると考えられる．仔稚魚は小川や田の溝などの浅い，水草がみられる泥底に生息する（宮地ら，1976）．また，種苗生産試験の観察によれば，稚魚は底泥の隆起や窪みの形，底質の硬軟などによって決まる生息しやすい箇所に蟄集した（梅沢ら，1994a）．これらのことから，上流区間に偏在する泥底は稚魚の生息環境として適していた可能性が考えられた．

農業水路において魚類が沈水植物を選好するという報告は複数存在する（藤咲ら，1999；辻井・上田，2003；Onikura et al,2009）．竹村ら（2004）は実験水路において流速条件と底質条件を変えた（コンクリート面に泥底区，擬似植生区，擬似植生+泥底区を設定）ことによるメダカの群れの選好性を観察した．その結果，メダカ（体長 2.5cm）は流れが比較的遅い時には泥底，比較的速い時には植生の存在する空間を選好した．単純に比較することは難しいが，稚魚の体サイズはメダカと近いことから同程度の遊泳能力であると仮定すると，小排水路の流速が速ければ，流速回避のための植生が必要になると考えられる．しかし，実際の小排水路は流速が比較的小さく（ $8.1 \pm 6.4 \text{ cm/s}$ ）泥が堆積していたので，植生が少なくても生存可能であったと考えられた．

2.4.3 繁殖場所の特定

ナマズの卵は 6 月 21 日，7 月 9 日，7 月 30 日に確認され，それぞれ区間 1 から区間 3，区間 2 から区間 5，区間 2 から区間 3 の範囲に分布していた（Table 2-9，Table 2-10）．ナマズの成魚は 6 月 16 日に 1 尾，7 月 2 日に 2 尾，7 月 30 日に 1 尾採捕された．成魚や卵が同時に発見されたことから，少なくとも 7 月 30 日まで小排水路において産卵が継続していたことがわかった．

小排水路においてナマズの卵は 6 月 21 日，7 月 9 日，7 月 30 日に確認され，すべての確認日の前日から前々日に 30mm を超える降雨（33～68mm）が観測された．卵を確認できなかった調査日のうちわずかに雨が降った（5.5mm）のは 2 日，雨が降らなかったのは 4 日であった．Maehata（2007）はナマズの繁殖場所における出現に関連するパラメーターとして，濁度，水深および水温の順に相関関係が強く，繁殖が行われた日は有意に降雨日が多かったことを明らかにした．これらのことから，谷川周辺のナマズは降雨による水位や濁度の増加に誘発され小排水路に侵入したと考えられた．

Table 2-9 小排水路において採捕された成魚および卵

Species	Days of sampling									Total
	6.15	6.16	6.21	6.27	7.2	7.9	7.15	7.24	7.30	
Adult catfish	0	1	0	0	2	0	0	0	1	4
Catfish's egg	0	0	102	0	0	238	0	0	232	572

Table 2-10 各区間で採集された卵の密度

採捕日	区間				
	1	2	3	4	5
6月15日	0	0	0	0	0
6月16日	0	0	0	0	0
6月21日	3.8	73.3	11.1	0	0
6月27日	0	0	0	0	0
7月2日	0	0	0	0	0
7月9日	0	1.7	79.1	60.8	111.8
7月15日	0	0	0	0	0
7月24日	0	0	0	0	0
7月30日	0	25.8	170.9	0	0

単位は卵数/m²・10⁻².

Table 2-11 過去の調査による小排水路と土水路の繁殖の実績

	小排水路			土水路		
	卵	稚魚	成魚	卵	稚魚	成魚
2010年		△	△			
2011年	○	○	○	△		
2012年	○	○	○			△

○：10個体，粒以上発見，△：1から9個体，粒発見

小排水路において、稚魚は 50m の地点から 550m の地点まで広範囲に観察されたことから (Fig.2-6), 上流まで成魚が産卵遡上したと考えられた。小排水路に存在する落差工は降雨による増水時に水位差が小さくなる (Table 2-1)。実際に、増水時に第 1 落差の魚道を成魚が遡上する様子や第 2 落差を跳躍し上流に移動する行動を確認している。第 3 および第 4 落差における成魚の遡上行動は観察できなかつたが、これらの落差工は増水時に水没することから、移動障害にならないと考えられる。これらのことから、降雨によって成魚は上流区間まで遡上することが可能になったと考えられた。

ナマズは広範囲に移動しながら産卵する生態をもち、これは干出する可能性の高い不安定な環境内で卵や仔魚の全滅を防ぎ、餌資源の競争や共食いを緩和するための行動であると考えられている (片野ら, 1988)。以上のことを総合すると、増水した小排水路に侵入した成魚は泥底の占める割合の高い上流部まで移動しながら稚魚の生存を高めるために分散して産卵し、その後谷川へ降下したと考えられる。

補足的に 6 月から 7 月にかけて複数回、土水路において卵や孵化稚魚を確認する調査を行ったが、それらの存在は確認できなかつた。また、過去の予備調査でも 2011 年に土水路において少量の卵は見つかったものの、孵化稚魚は確認されていない (Table 2-11)。一方、小排水路において 2010 年から 2012 年に、卵および孵化稚魚を確認している。

松井・佐藤 (2004) は浅い小排水路を土水路にすることによって、水田との連続性を確保し、ナマズが容易に水田に遡上できる環境条件を提供すると述べている。本調査地の土水路は生態系に配慮するために新設された排水路であり、上記の浅い小排水路の諸元を満たしていたが、2012 年の調査では卵および稚魚は確認されなかつた。鈴木ら (2004) は、土水路に接続する水田がフナ属やドジョウの再生産場として機能することを示唆した。このことから、ナマズも土水路に接続する水田を繁殖に利用することは可能であると考えられるが、これまでに繁殖が確認されたことはない。

以上のことから、谷川周辺のナマズは小排水路をおもな繁殖場所として利用し、土水路および接続水田は利用しないと考えられた。

2.4.4 小排水路が繁殖場所として利用される要因

一般的にコンクリート三面張りの水路 (以下、改修水路) は、魚類の生息環境として不適と指摘されており、その要因として水路の直線化、粗度係数の低下に伴う流速の増加、植生の減少等が挙げられている (片野, 1998a; 松井・佐藤, 2004; 佐藤・東, 2004; 森ら, 2008)。調査地の小排水路は圃場整備後に施工されたコンクリートフリューム構造の水路である。改修水路の構造と類似点として、水田排水部はパイプ化し、水路底から落差が生じている、複数の落差工が設置されている等が挙げられ、相違点として河川と落差なく接続している、等間隔に隙間があり底泥が露出していることである。次に小排水路の環境の特徴として、1) コンクリートよりも泥の方が底質に占める割合が高い、2) 流速

および水深は比較的小さい値を示し、変動が大きい、3) 水生生物の存在量が高い、4) 降雨や農作業に伴う水量の変動が大きい、5) 水温が高いことが挙げられる。この中で、1) から 3) の特徴は改修水路の特徴と異なる。

小排水路と土水路の特徴を比較すると底質は泥が優占する、流速および水深は比較的小さいという環境の類似性が見られた (Table 2-4)。しかし、両水路の排水に着目すると違いが見られた。水温は小排水路の方が土水路よりも 3℃ 平均値は高く有意差が見られた (Table 2-5)。また、水源を比較すると、土水路は用水と水田排水、小排水路は水田排水のみであった。谷川との接続を比較すると、土水路は幹線排水路を介し、小排水路は直接的に接続していた (Fig.2-2)。これらの特徴をまとめると、小排水路の排水の水温は高く、谷川に直接的に流入し、土水路の排水は谷川に間接的に流入する。

ニゴロブナ (*Carassius auratus grandoculis*) が繁殖のために水田地帯の排水路を選択する際に溶存酸素の高低、降雨によるイオン濃度の減少、適度な濁りが関係し、水田土壌の混ざった流入水の混ざり度合いが遡上行動の誘発要因のひとつである可能性が指摘されている (水野ら, 2010a, 2010b)。また、一時的な水域形成の際に、陸地が浸水するとアユモドキの遡上行動を誘発する物質等が発生すると推測されている (阿部, 2009)。湯浅, 土肥 (1989) によって、ナマズが水温の高い繁殖場所に産卵遡上する可能性や、産卵を誘発する要因として土や草の匂い、接触感覚が指摘されている。

これらの一時的な水域において繁殖する魚類の知見を総合すると、2 つの水路の排水の差異が、成魚が小排水路を繁殖場所として利用するに至った要因であると考えられる。つまり、水田排水の水温は高く、誘引物質を含んでいると考えられ、これが直接谷川へ流入する小排水路の方が成魚の繁殖行動の誘引力が高かったと考えられる。これに対し土水路では用水や幹線排水路の水が水田排水と混合し、水温は下がり誘引物質は希釈されたことから、誘引力は低下したと考えられた。

今後は、上記の考察を検討するために、水田土壌を混合した排水の水温、濁度、濃度等を変化させ成魚の遡上行動を観察する操作実験を行うことによって、最も影響力のある誘発要因を特定する必要があると思われる。

2.5 小括

本章の結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 谷川周辺において小排水路がナマズの主な繁殖場所として機能することがわかった。
- 2) 少なくとも 5 月初旬からから 7 月下旬までナマズの繁殖が継続することがわかった。
- 3) 成魚は降雨によって遡上行動が誘発され、小排水路の増水に伴い落差工による移動障害が一時的に解消されたために上流に移動し産卵することができたと考えられた。

- 4) 小排水路から水温の高い排水が直接谷川に流入するため成魚の遡上を誘引する効果が高かったことが繁殖場所として成立した要因として挙げられた。
- 5) 小排水路の環境の特徴として 1) コンクリートよりも泥の方が底質に占める割合が高い, 2) 流速および水深は比較的小さい値を示し, 変動が大きい, 3) 水生生物の存在量が高いことがわかり, 1) から 3) の特徴は改修水路の特徴と異なる。
- 6) 小排水路において稚魚は泥底を生息環境として利用し, 流速が比較的小さいため植生の存在が少なくても生存可能であったと考えられた。

第3章 ナマズの成育場所

3.1 目的

ナマズの生活史を考慮すれば，一時的な水域で孵化した稚魚は幼魚サイズまで十分成長した後，恒久的な水域である河川に降下すると考えられる．したがって，稚魚・幼魚が河川に降下するまでの期間生存し，正常に成長すること（体長や体重が経時的に増加）ができる場所を成育場所とした．ナマズの仔稚魚期の成長については，本種の養殖技術開発のために飼育環境下において調べられているが（梅沢ら，1994a,1994b；来間・野村，1997），自然環境下で調べられた例は見当たらない．

第2章では小排水路において160尾の稚魚が第1区間を除く全域で確認された．しかし，小排水路がナマズの成育場所として機能するか不明である．そこで，稚魚の成長，水路内の個体数の消長および移動様式を把握し，小排水路が成育場所として機能するか確認することを目的とし，以下の要点を考慮し，調査した．

- 1) 定期的に採捕し幼魚の全長および体重の変化を経時的に把握する．
- 2) 小排水路は下流端で谷川と接続しているため，幼魚の採捕数は上流区間から下流区間にかけて時間とともに推移する（谷川への降下移動が卓越）と考えられる．そこで，採捕区間，日時がわかるように標識付けし，再採捕する．
- 3) 幼魚以外の魚を採捕し，成育に関わる餌生物の存在量について把握する．

3.2 調査方法

3.2.1 小排水路における幼魚の成長と水路内移動

2012年6月15日，16日，21日，27日，7月2日，9日，15日，24日，30日に計9回実施した．調査区間は小排水路の落差工の存在地点で分け，合計5区間設定した（Fig.2-2，Table 3-1）．区間内全域を調査者1人がタモ網（間口40cm）を用いて，下流から上流にかけて魚類を採捕した．区間内における魚類を全量採捕することを目標としたため，努力量を考慮しなかった．各区間で採集したナマズの幼魚の全長は個別に1mm単位で，体重はまとめて電子天秤（A&D，SH-2000）により1g単位で測定した．測定した個体は採捕区間，採捕日がわかるように標識色と標識部位を変えてエラストマー蛍光タグ（Northwest Marine Technology社）により標識付けした（Photo 3-1，Table 3-2）．採捕した個体は採捕地点付近に放流した．ナマズ以外の魚類はバットに並べ写真を撮影し，画像データから種を同定し体長を測定した．

Table 3-1 小排水路における調査区間の概要

区間	区間長 (m)	水路幅 (m)	面積 (m ²)	区間分け の地点	排水口の数
1	33	0.8	21.4	下流端～ 第1落差	2
2	150	0.8	120	第1落差～ 第2落差	21
3	163	0.6 - 0.8	117.6	第2落差～ 第3落差	19
4	74	0.6	44.4	第3落差～ 第4落差	9
5	173	0.6	103.8	第4落差～ 終端	23



Photo 3-1 エラストマー標識を施した幼魚

Table 3-2 調査日と区間によって分けた標識色および標識部位

Sampling date	Colors of elastomer tag at each study section					Injection location	
	1	2	3	4	5		
6.15	-	Yellow	Orange	Green	Pink	dorsal	left
6.16	-	Yellow	White	Green	Pink	dorsal	right
6.21	White	Orange	Yellow	Green	Pink	pectral	left
6.27	White	Yellow	Orange	Green	Pink	pectral	right
7.2	White	Yellow	Orange	Green	Pink	trunk	left
7.9	White	Yellow	Orange	Green	Pink	trunk	right
7.15	White	Yellow	Orange	Green	Pink	tail	left

3.3 結果および考察

3.3.1 幼魚の水路内移動

標識個体の再捕数は合計 100 尾で、標識再捕率は 27.4%であった。上流の放流区間（標識個体を放流した区間）から下流の再捕区間（標識個体を再捕した区間）へ降下移動した標識個体は合計 51 尾であった（Table 3-3）。下流の放流区間から上流の再捕区間へ遡上移動した個体は 1 尾のみであった。放流区間から移動しなかった個体は合計 48 尾であった。

すべての調査回で幼魚は採捕され、その合計は 367 尾であった。区間ごとの密度の変化を時系列に見ると、6月15日、16日には区間3から5にかけて幼魚は多く採捕されたが、5日後の6月21日には区間2から3へシフトした（Fig.3-1）。さらに6日後の6月27日には区間1において大部分の幼魚が採捕された。この傾向は7月15日まで続いた。この期間中、幼魚は第1落差の水クッション部において集中的に採捕された。7月24日には採捕数が5尾に激減し、7月30日に採捕された8尾のうち6尾は上流の区間5で発見された。

各調査区間における幼魚の個体数の消長および標識個体数の変化から水路内の移動をみると、幼魚は6月中旬まで水路の上流区間に分布していたが、下旬から下流へ徐々に降下した（Fig. 3-1）。区間1に到達した大部分の個体は7月中旬まで同所に滞在していた。その後、7月下旬には採捕個体数が激減し、区間1から上流に移動した標識個体は確認できなかったことから（Table 3-3）、幼魚は区間1から谷川へ降下したと考えられる。実際に多数の標識個体が水路内を降下していることから、落差工の存在によって幼魚の下流方向への移動は制限されないと考えられた。一方、水路内を遡上した個体は1尾のみであり（Table 3-3）、落差工によって上流方向の移動が阻害されている可能性がある。しかし、稚魚および幼魚は落水前に恒久的水域である谷川に降下する必要があるため、たとえ上流区間への遡上が不可能であっても落差工の存在が生存に与える影響は少ないと考えられる。

Table 3-3 小排水路における幼魚の標識個体数

放流区間	再捕区間				
	5	4	3	2	1
5	12	1	3	5	7
4	0	4	0	2	6
3	0	0	4	9	10
2	0	0	1	13	8
1	0	0	0	0	15

破線で囲まれた範囲は標識個体が放流された区間から下流の区間へ移動したこと（降下）、実線で囲まれた範囲は放流区間から上流の区間への移動したこと（遡上）を示す。

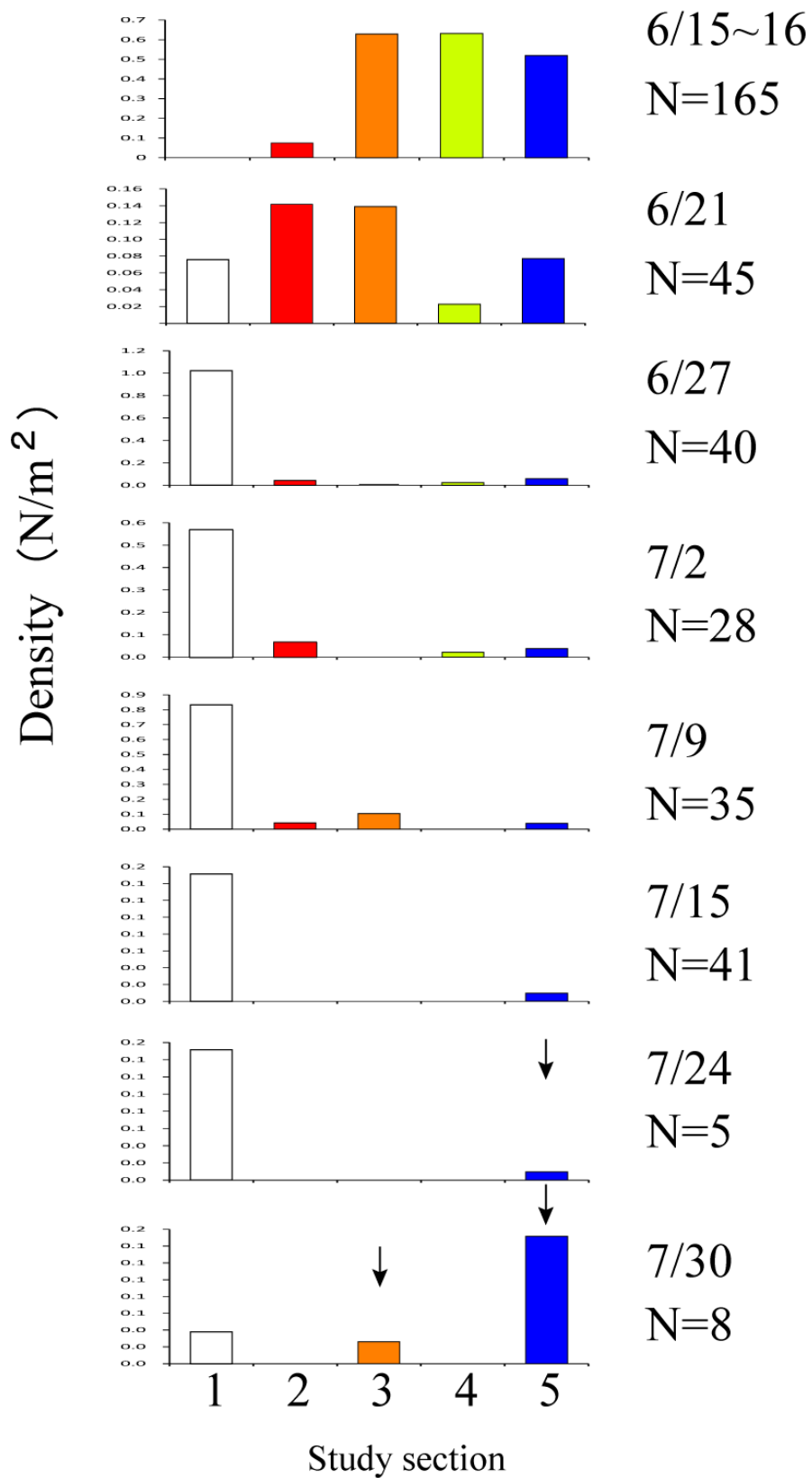


Fig. 3-1 各調査日の区間別幼魚の密度の変化
矢印は新規加入個体が含まれることを示す。

3.3.2 小排水路に見られた水生生物

ナマズ以外の魚類としては、ギンブナ *Carassius auratus langsdorfii* (536尾；25.7±19.7mm)，ドジョウ (130尾；47.0±21.3mm)，メダカ *Oryzias latipes* (111尾；23.4±4.3mm)，カワムツ *Nipponocypris temminckii* (25尾；20.4±18.0mm) の4種が確認された (Table 3-4)。

ナマズの初期成長に関連する要素である餌料は定量的に調査しなかった。幼魚とともに稚魚サイズのギンブナやドジョウが多く採捕され，計数しなかったがカエル類の幼生も同様に存在量は多かった。このため，おそらく小排水路において稚魚および幼魚はこれらの水生生物を捕食していたと考えられる。実際に幼魚を採捕し測定する際に，ギンブナの稚魚を啜った様子や吐出されたカエルの死骸を確認している (Photo3-2)。

幼魚 (5cm～7cm) の胃内容物は，大半がフナや，タナゴなどの仔稚魚であったという報告がある (友田，1978)。しかし，これは琵琶湖における個体の観察であり，水田水域における本種の餌生物の内容について記述的な報告 (前畑，2003；片野，1998a,1998b) は見られるものの，詳細な報告は見られない。また，片野ら (1988) は水田周辺の一時的な水域はナマズの仔稚幼魚の摂餌場所として適していると指摘しているが，十分な根拠は示されていない。今後は，稚魚および幼魚の餌料の内容や餌生物の存在量を定量的に把握することが，初期生活史を解明し，小排水路の成育場機能の正確な評価のために必要である。

Table 3-4 小排水路において採捕されたその他の水生生物

Species	Days of sampling									Total
	6.15	6.16	6.21	6.27	7.2	7.9	7.15	7.24	7.30	
<i>Oryzias latipes</i> (medaka)	40	14	9	14	14	0	0	18	2	111
<i>Misgurnus</i> <i>anguillicaudatus</i> (dojo)	2	6	15	11	22	6	7	34	27	130
<i>Carassius auratus</i> <i>langsdorfi</i> (ginbuna)	52	38	125	29	22	11	14	136	109	536
<i>Nipponocypris</i> <i>temminckii</i> (kawamutsu)	0	0	0	0	3	0	0	13	9	25



Photo 3-2 ギンブナ稚魚を捕食した幼魚（上図）と幼魚が吐瀉したカエル類亜成体（下図）

3.3.3 幼魚の成長

合計 9 回の調査で得られた個体の全長組成は 6 月 15 日から 7 月 2 日までは明確なモードをもつ 1 峰型であった (Fig.3-2). 7 月 9 日と 7 月 15 日の全長組成は裾野の広いばらついた分布を示したものの, 6 月 15 日から継続的に確認された集団であると考えられる. また, 7 月 24 日に 20mm 代の稚魚, 7 月 30 日に 25 から 40mm 代の稚魚および 55mm 代の幼魚が確認され, これらは新規加入個体であると考えられた. これらの個体は体サイズから 7 月 9 日に確認された卵から発生した可能性が高い. 7 月 9 日に卵は区間 2 から区間 5 において確認され, 区間 5 が最も高密度であった (Table 2-9). 前述したように小排水路における稚魚の生息環境の一つとして泥底が挙げられる. これらのことから, 成魚が泥底の優占する上流区間に産卵することが, その後の稚魚の生存をある程度保障する可能性が考えられた. 一方, 6 月 21 日に採集された卵は区間 1 から区間 3 において確認され, 中でも区間 2 が最も高密度であり, 後日室内で孵化を確認しているものの, 小排水路において孵化稚魚は確認されなかった. 区間 1 の環境要因は計測していないが, 泥の堆積は見られなかった. 同様に区間 2 の底質のおよそ 5 割をコンクリートが占める (Table 2-3). これらのことから, 底面のコンクリートが露出する下流区間ではなんらかの要因で孵化稚魚が生存できなかった可能性が考えられた.

小排水路内で採捕された同一集団の幼魚は 7 月下旬に激減したため (Fig.3-2), 6 月 15 日から 7 月 15 日の期間の成長を検討した. 6 月 15 日時点の幼魚の全長の平均値は 57.1 ± 10.0 mm, 1 ヶ月後の 7 月 15 日は 150.7 ± 15.5 mm であり, 約 2.6 倍に成長した (Fig.3-3). 6 月 15 日時点の幼魚の体重平均値は 2.4g, 1 ヶ月後の 7 月 15 日は 27.2g であり, 約 11.4 倍に成長した (Fig.3-4). 幼魚の全長および体重の関係からアロメトリー式を求めたところ, $BW = 5.88 \cdot 10^{-5} TL^{2.603}$ を得た (Fig.3-5). また, アロメトリー式の両辺の対数を取り, 直線回帰式を求めたところ, $\log BW = \log(-9.73) + (2.60) \log TL$ が得られ, 決定係数 R^2 は 9.99 と強い直線性を示した.

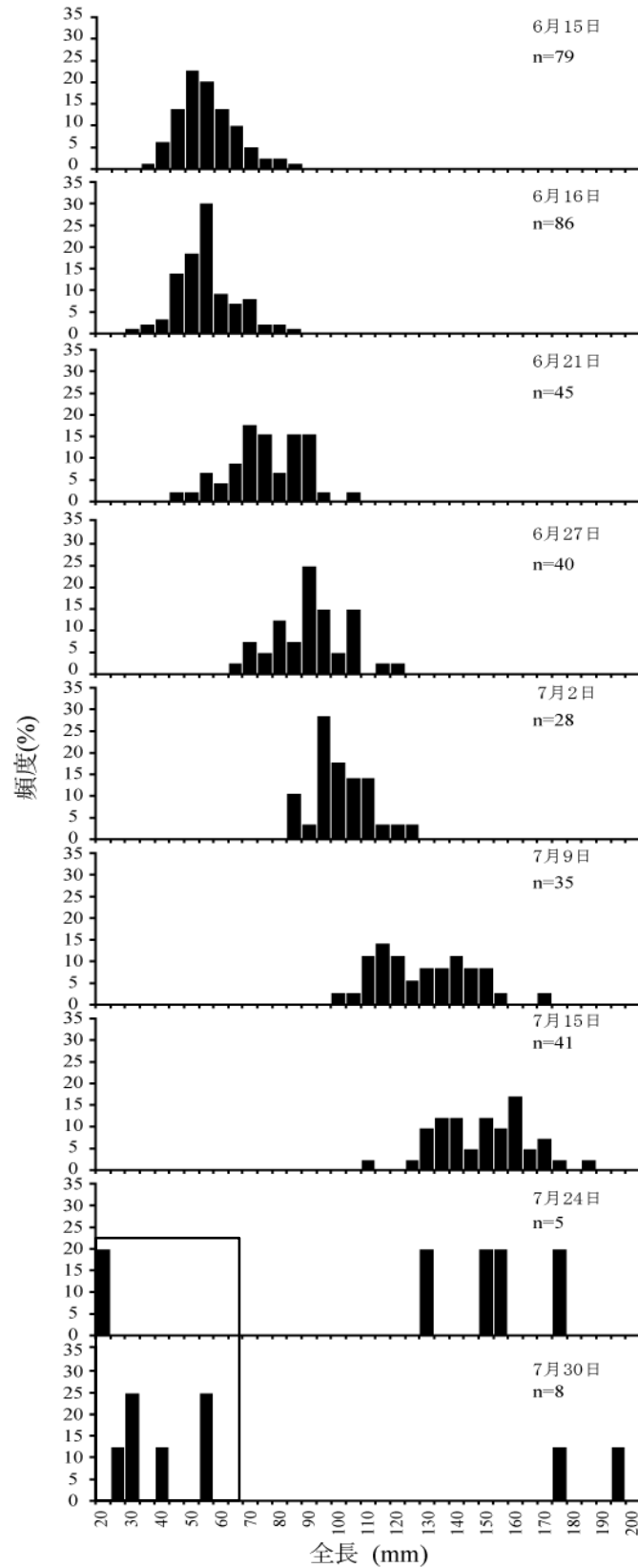


Fig. 3-2 各調査日の幼魚の全長組成の変化
 枠で囲まれた部分は新規加入個体であることを示す

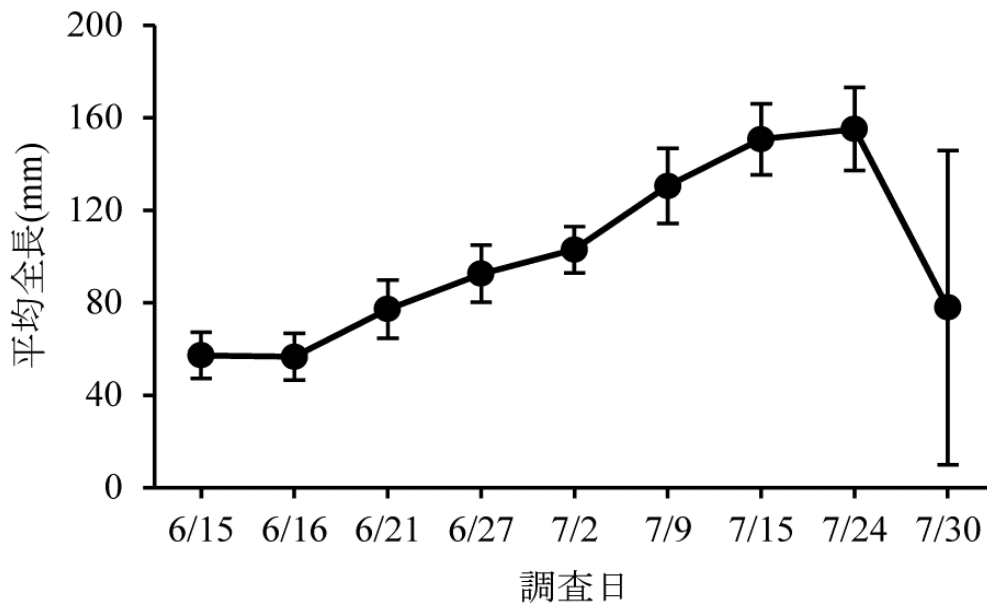


Fig. 3-3 幼魚の平均全長の変化
エラーバーは標準偏差を示す。

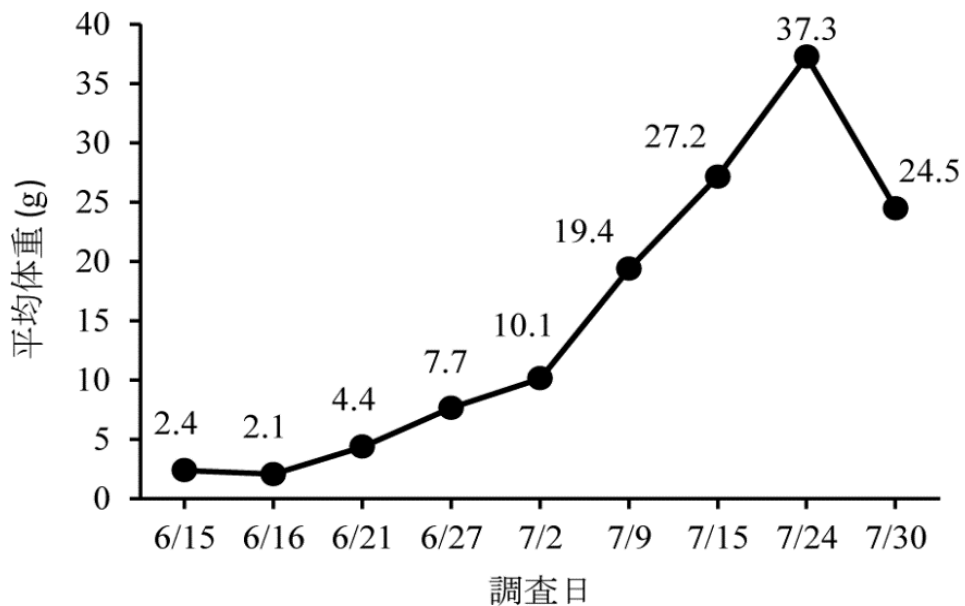


Fig. 3-4 幼魚の平均体重の変化
図中の数字は体重の平均値を示す。

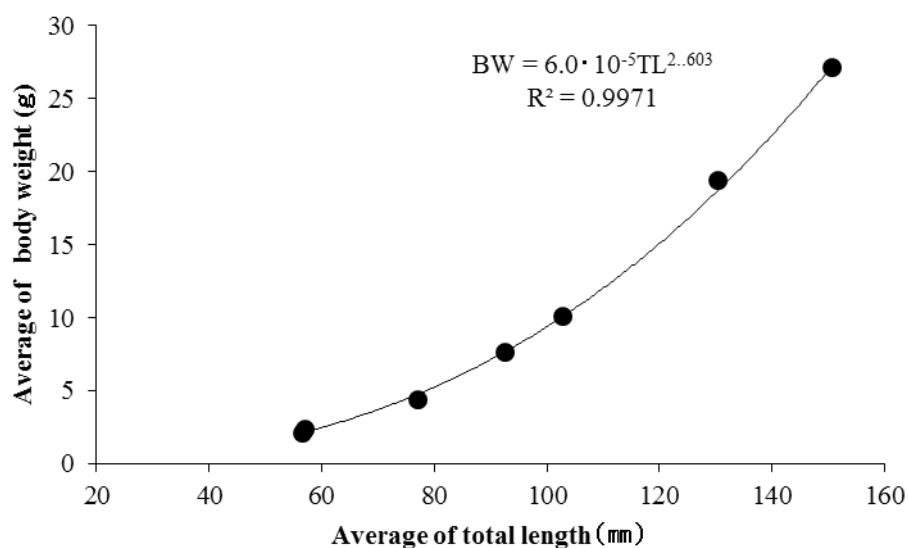


Fig. 3-5 幼魚の全長と体重の関係

Yamashita et al (2001) は魚類の成長速度に影響する外的要因として、水温、餌生物の質と量、溶存酸素、pH、有害物質などを挙げている。そこで、調査期間中定期的に測定した水質項目のデータを用いてナマズの成育場としての小排水路の特徴を考察する。

谷川や土水路と比較して小排水路の DO は $4.5 \pm 2.0 \text{ mg/L}$ と低かった (Table 2-5)。ナマズの生息する水域は β -中腐水性水域であり、水産用水基準での値は pH6.5~8.5, DO5mg/L 以上とされている (田崎・金澤, 2001)。したがって、小排水路における DO の測定値は基準より若干低いですが、仔稚魚は酸素欠乏に極めて強いとされており (前畑, 2003)、生息には問題がない範囲であると考えられる。また、今回の調査では測定しなかったが、BOD (生物化学的酸素要求量) はナマズの出現に負の影響を与える水質項目であり、 1.95 mg/L 以上で生息に不適であるとされる (鬼倉・川本, 2013)。このため、今後は調査水域において BOD についても計測する必要があると考えられる。

6月15日と7月15日の幼魚の平均全長および平均体重を比較したところ、それぞれ約 2.6 倍と約 11.4 倍になり、急速に成長したことがわかった。川津 (2000) は加温養殖によるナマズの成長を検討したところ、生息適水温の範囲であれば、高い水温ほど成長が早くなると推測した。これは、摂餌量と同化量は水温とともに増加し、最大値となる至適水温を超えると急激に減少し、代謝にエネルギーが消費されるので成長速度は低下する (山下, 2010) ためであると考えられる。ナマズは水温 25°C 前後で活発となり、 20 から 30°C が適水温とされており (田崎・金澤, 2001)、平均水温の変動をみると土水路よりも小排水

路の水温の方が適水温に近かったと考えられる (Fig. 2-5). また, 水温が増加するほどナマズの餌生物であるワムシの栄養価が高くなること(友田ら, 2008), ニゴロブナの成長速度が速くなることが報告されており(金尾ら, 2009), 水温の上昇は本種の餌条件を向上させた可能性がある. これらのことから, 水温の高い小排水路において稚魚および幼魚は成長速度を速めることが可能であったと考えられた.

3.4 小括

本章の結果をまとめると以下のようなになる.

- 1) 小排水路において幼魚は短期間に急速に成長した.
- 2) 小排水路において幼魚は 6 月下旬から下流に降下を始め, 7 月下旬にはほぼすべての個体が谷川に降下したと考えられた.
- 3) 幼魚の下流方向への移動は制限されなかったものの, 上流方向への移動は落差工の存在によって制限された可能性が示唆された.
- 4) 小排水路の水温が高いこと, 小型水生生物や泥底が存在することが幼魚の成育を可能にしたと考えられた.

第4章 バイオテレメトリーの適用可能性の検討

4.1 目的

第1章においてバイオテレメトリーの概要について触れ、水田水域における様々な水生生物に適用されたことを示した。実際に、ビワコオオナマズ（北川ら，1996；Takai et al.1997），ヨーロッパオオナマズ *Silurus glanis*（Carol et al. 2007），メコンオオナマズ *Pangasianodon gigas*（Mitamura et al. 2006, 2008）といったナマズの仲間ではバイオテレメトリーの1種である超音波テレメトリーの適用例がある。したがって、超音波テレメトリーを用いてナマズを経時的に追跡することにより、河川におけるナマズの行動を定量的に把握することができると考えられるが、これまでナマズに適用されたことはない。

そこで、第4章では第一にテレメトリーに用いる超音波発信機の装着が魚体におよぼす影響を検討する。第二に実際に発信機を装着した個体を野外へ放流することにより超音波テレメトリーを用いた追跡調査を試み、ナマズの行動解析をする上で手法としての適用可能性を検討する。さらに、周年にわたり蓄積されたデータからナマズの河川における行動に関する知見を報告する。以上を目的とし、以下の要点を考慮し実施した。

- 1) 発信機を装着した個体群と対照群との間で、魚体の成長および死亡に明確な差がなければ、発信機装着にともなう影響は少ないと考えられる。
- 2) 装着個体を野外で追跡する際に、放流から時間が経過すれば、ある場所に定着し、その周辺で活動すると考えられる。そこで、放流直後から超音波テレメトリーで各個体を追跡し、同所に長い間滞在が確認された場合、その地点周辺に受信機設置場所を設ける。
- 3) 発信機は約1分間に1回信号を発信する。装着個体が常に受信範囲内に存在すれば1時間あたり約60回信号が受信される。しかし、装着個体が受信範囲の外に移動したり、障害物内に隠れた場合、受信回数は低下すると考えられる。このように、1時間当たりの受信回数の変化から各装着個体の活動の変化をモニタリングすることができると考えられる。

4.2 実験の方法

4.2.1 発信機装可能性の検討

ナマズの魚体に対する超音波発信機装着の影響を評価するために室内実験を行った。実験は栃木県立馬頭高校水産科のガラス水槽室内において実施し、供試魚は同校で種苗生産された2から3歳のナマズ成魚12尾を用いた。装着する発信機は実際の超音波発信機と同じ材質、寸法、重量であるダミー（Vemco社，V9-2L；直径9mm，長さ29mm，空中重量4.7g，水中重量2.9g）を使用した。発信機の装着方法は多くの魚種で適用例があり（平岡ら，2003；Mitamura et al. 2006；Kawabata et al. 2007；有賀ら，2009），また実験期間中の脱落の可能性の低い内部装着法を採用した。一般的に発信機の空中重量は装着する魚体重の2%以下であることが推奨されており（Jepsen et al. 2002），本実験においてナマズ

に対し使用する発信機の装着に問題はないと考えられた (0.6~1.4%)。発信機を内部装着した 6 尾を装着群とし (雄 3 尾, 雌 3 尾, 全長 43.8 ± 3.2 cm; mean \pm SD 以下同様, 体重 535 ± 140 g), 装着しなかった 6 尾を対照群とした (雄 3 尾, 雌 3 尾, 全長 41.9 ± 2.9 cm, 体重 431 ± 101 g)。それぞれを FRP 水槽 (縦 180 cm \times 横 90 cm \times 高さ 70 cm, 容量 1 t) で別個に蓄養した。ナマズ同士の干渉を防ぐために FRP 水槽に仕切りをつくり 1 尾ごとに隔離した (2.7m^2 /尾: Photo4-1)。また, ヒーター (NITTO, デルサーモ 500W) により水温を約 $15 \sim 20^\circ\text{C}$ に加温し, 地下水を常時注水した (Photo4-1)。装着群と対照群ともに 0.3% 濃度のオイゲノール (田辺製薬株式会社, FA100) で麻酔し, 動きが止まった状態を取り上げ V 字の手術台に腹部を上にして乗せ, 全長と体重を測定し雌雄を判別した。全長と体重はメジャー (シンワ, H-163) と電子天秤 (A&D, SH-2000) を用いて, それぞれ 1 cm と 1 g の精度で測定した。

内部装着の手順として, はじめに 10% に希釈したイソジンで腹部を消毒し水分を拭き取り, 肛門から頭部側に約 3 cm の表皮に注射針を挿入し, その状態で針を持ち上げハサミを用いて腹部に小さな切込みを入れた (Photo4-2)。続けて頭部方向に約 2 cm 切開し, 消毒したダミーを腹腔内に肛門方向に注意して押し込んだ。その後, 切開部を 2 針縫合した。手術後に供試魚を FRP 水槽に戻し, 抗菌剤 (日本動物薬品工業, エルバージュ) で薬浴させた。1 個体あたりの計測と手術に要した時間はおよそ 5 分から 7 分であった。

実験期間は発信機を装着し水槽に投入した 2010 年 2 月 19 日から 2010 年 3 月 26 日までの 5 週間とした。1 週間に 1 度すべての個体の体重および体長を測定し, 装着群の術後の回復具合を観察した。同時に水質調査として水温 (東亜 DKK, HM-20P), pH (東亜 DKK, HM-20P), DO (東亜 DKK, DO-24P) および EC (東亜 DKK, CM-31P) を測定した。給餌は手術から 1 週間後に開始し, 毎夕 1 回にマス用配合飼料を適量与えた。実験期間終了後, すべての供試魚は同校敷地内のコンクリート飼育池に移動させた。

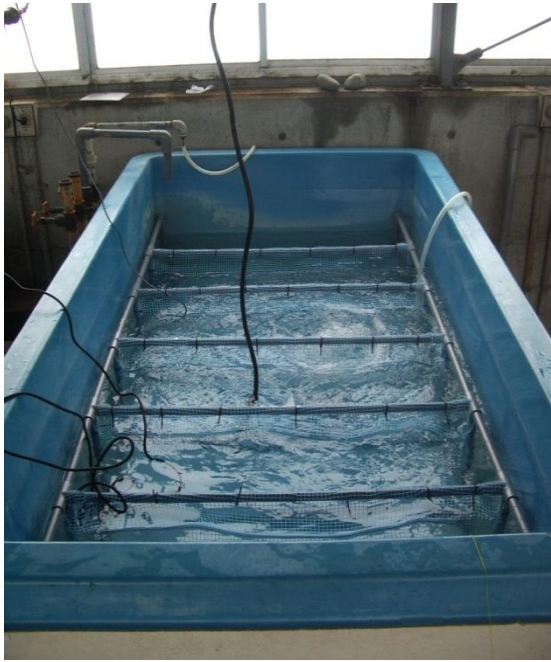


Photo 4-1 供試魚を蓄養した FRP 水槽

内部装着



Photo 4-2 内部装着の概念図と手術の様子

装着個体が長期間生残り繁殖できるか確かめるために、繁殖期である6月までコンクリート飼育池で飼育し人工産卵を試みた。産卵槽としてガラス水槽室内に用意したパンライト水槽（容量250l）に産卵基質のキンランとろ過マットを沈め、ヒーター（NITTO, デルサーモ 500W）により26℃に加温した（Photo4-3）。日射により産卵が阻害され孵化率が低下するので、産卵槽に蓋をした。人工産卵を実施した当日（2010年6月17日）のコンクリート飼育池の水温は22.5℃、pH7.14であり、産卵槽は26.2℃、pH8.04であった。目視により成熟個体であることを確認し、装着個体6尾の中から4尾（雄2尾、雌2尾）を取り上げ（Table 4-1）、麻酔（田辺製薬株式会社, FA100）を導入した。これらの個体に動物用ゴナトロピン（あすか製薬株式会社）を10単位/gずつ側線付近に筋肉注射し、産卵槽に移した後に麻酔から覚醒したのを確認した。数日後、産卵を確認した後にすべての供試魚を産卵槽からコンクリート飼育池に移した。



Photo 4-3 供試魚を人工繁殖させるための水槽

Table 4-1 人工繁殖に用いた供試魚の内訳

性別	全長 (cm)	体重 (g)	接種単位 (IU/g)
雄	42.5	450	5000
雄	40.0	370	5000
雌	48.0	900	10000
雌	46.0	800	8000

4.2.2 超音波テレメトリーの性質と受信テスト

使用した発信機（Vemco 社，V9-2L）は直径 9mm，長さ 29mm，水中重量 2.9g，平均発信間隔 60 秒，電池寿命約 300 日である（Photo4-4）．追跡調査は設置型受信機 VR-2W（Vemco 社）を 2 台用いて 2010 年 6 月から開始し，2011 年 4 月からさらに 2 台追加し 4 台とした．調査に用いた超音波テレメトリーのシステムは，受信範囲内に装着個体が存在すると，一定間隔（ 60 ± 20 秒）で発信される発信機の識別番号および受信時間が受信機に記録される．

谷川はナマズが選好すると考えられる水生植物や井桁護岸といった環境がパッチ状に存在するので，予め発信機を装着した個体がそれらの環境中に存在する時の受信状況を把握する必要があった．そこで，追跡調査開始前の 2009 年 12 月に受信テストとして，発信機の位置（河道中心部，井桁内部，ヨシ帯内部）や受信機と発信機の距離の違いが受信回数におよぼす影響を調べた．

受信テストは谷川内で水深が一定して深く，井桁護岸やヨシ帯が広い範囲にわたり存在する中流の区間で行った．発信間隔が 10 秒のテスト用の超音波発信機（Vemco 社，V9）を鉄の棒に取り付け，河道中心部，井桁内部，ヨシ帯内部の水中に固定し，信号を 1 分間受信し，それを 3 回繰り返して 1 セットとした．発信機に対し受信機を 5m，15m，25m と離し，その地点で信号を受信した．テスト用の発信機の発信間隔は 10 秒であるのに対し装着する発信機は 60 秒なので，調査で得られた 1 分間あたりの受信回数を 1 時間あたりの受信回数に換算し，平均値を求めた．

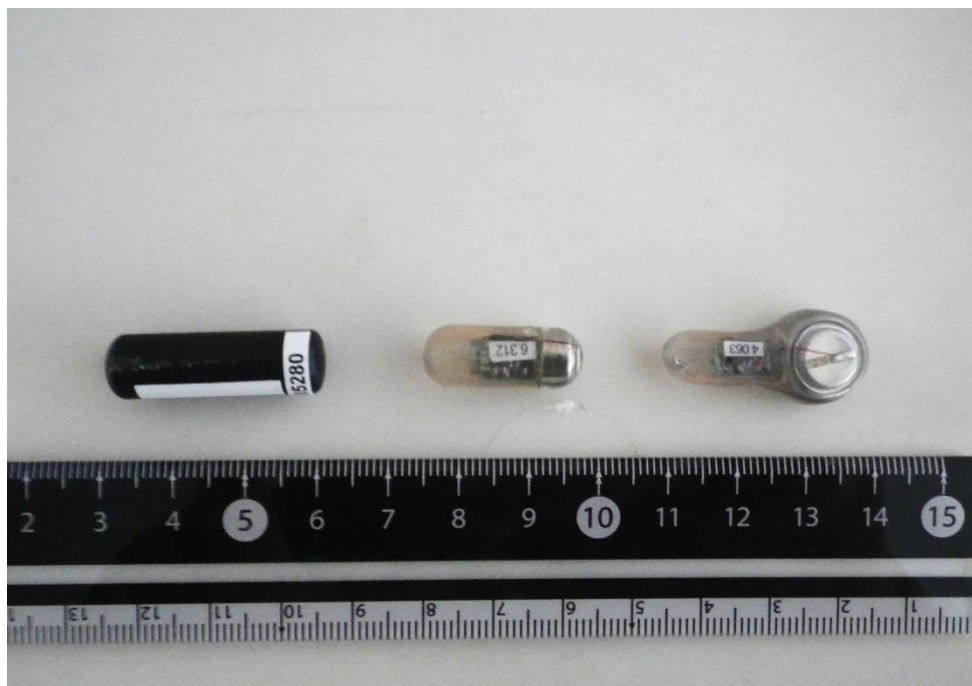


Photo 4-4 研究に用いた発信機の種類（左から V9-2L，F1040，F1170）

4.2.3 発信機の装着と受信機の設置

供試魚は2010年6月から9月にかけて谷川においてモンドリまたは電気ショッカー（Smith-Root社，Model 12B）を用いて5尾採捕した（Table 4-2）。採捕したナマズは前述の実験と同様の方法で発信機を内部装着し，全長と体重を測定し，雌雄を確認した。その後カゴの中に入れて川に沈め24時間ほど馴致させた。装着による顕著な行動の変化がないか確認したのちに放流地点（St.S）において放流した（No.2のみ St. I で放流）。

放流直後の装着個体の移動および定着場所を把握するために，翌朝まで連続的に追跡した。受信機を St.に1台，その下流に1台設置し，およそ1時間おきに受信記録を回収した。St.0から装着個体が移動した場合，受信機をさらに下流に移動した。しかし，この方法では放流直後の装着個体を追跡することができなかつたため，後日受信機を任意の場所に設置し装着個体を探索した。その結果，装着個体の存在を3地点で確認した。以降，この3地点を上流から St. I，St. II および St. III とし受信機を設置した（Fig.4-1）。

St. I は右岸側にヨシ帯が広がり，左岸法面に井桁護岸，左岸水面上にデッキが施工された区間（区間長：約70m）で，水深が深く流速が多様であった。St. II は河道が直角に屈曲する部分（約30m）で，右岸側は水深が深く，左岸側は泥が堆積し水生植物（ミクリヤコカナダモ）が繁茂していた。St. III は2010年に初めてナマズの繁殖が確認された小排水路と谷川に接続するヒューム管が存在した（約20m）。I，II，III各地点の最大受信範囲はそれぞれ，直径約40m，30m，20mであった（Table 4-3）。各地点に設置した受信機のデータはおよそ2日おきに回収し，装着個体の存在が1週間以上確認されなかつた場合は設置位置を適宜移動させ，装着個体を可能な限り追跡した。

Table 4-2 装着個体の概要と受信記録

Fish ID	Sex	TL (cm)	BW (g)	Capture Methods	Release date	Last detected date	Detection days	Ratio of days monitored (%)	Number of recorded signals of each St.		
									St. I	St. II	St. III
No.1	F	48.5	864	E	20 June 2010	2 July 2010	7	58.3	2	0	1131
No.2	M	34.5	260	T	9 August 2010	12 March 2011	128	59.2	34247	4280	555
No.3	M	34.0	244	E	20 August 2010	16 September	8	28.6	1079	0	41
No.4	F	46.0	460	E	20 August 2010	28 January 2011	117	72.2	42126	50	0
No.5	M	35.5	355	T	18 September 2010	3 June 2011	138	52.3	43492	18	4751

F：雌， M：雄， TL：全長， BW：体重， E：電気ショッカー， T：モンドリ

^a 放流日からの1回でも受信機に信号が記録された日数(%)。

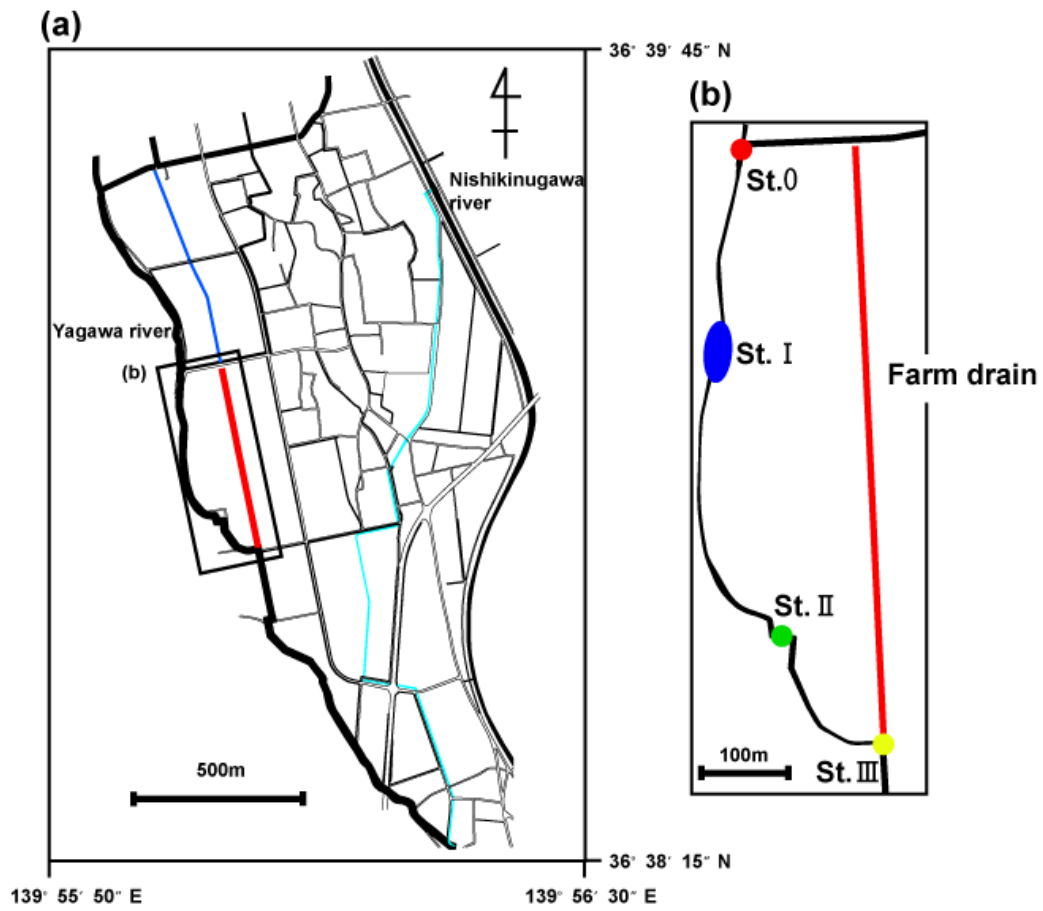


Fig. 4-1 調査対象地と受信機設置地点

Table 4-3 受信機設置地点周辺の概要

	Distance between stations (m)				Section length (m)	Stream width (m)	Range of water depth (cm)	Maximam detection range(m)
	St.0	St. I	St. II	St. III				
St. I	200	—	280	510	70	4.5	40-80	40
St. II	480	280	—	230	30	5.0	100-150	30
St. III	710	510	230	—	20	5.0	40-90	20

4.2.4 データ解析

受信データから 2 時間当たりの受信回数を求めその推移から装着個体の行動を、また受信機の設置場所から滞在地点を推測した。St. I の区間長は約 70m あり、受信機 1 台では St. I 全体をカバーしきれないので 2 台設置した期間があった。そのため、St. I に滞在していた装着個体の信号が 2 台同時に受信された場合は、1 時間当たりの受信回数が多い方のデータを使用した。

ナマズの昼夜の活動性の季節変化を把握するため、秋期（10 月から 11 月）と冬期（12 月から 1 月）の宇都宮市における各日の日出没時刻を計算し（国立天文台，2013）、昼間（日出時刻から日没時刻）および夜間（日没時刻から日出時刻）の時間帯を定義した。また、秋期から冬期にかけて継続してデータが取得された No.4 の日周期性を調べるため信号受信の開始時刻および終了時刻に関するヒストグラムを制作した（Mashiko, 1981）。ここで、秋期の期間は信号が夜間に集中して受信された 10 月 17 日から 11 月 25 日まで、冬期の期間は信号が昼間にも受信された 12 月 28 日から 1 月 22 日の受信データを用いた。夜行性活動開始時刻および夜行性活動終了時刻とは、ある日における 20 回以上の連続的な信号の受信が開始した時刻および終了した時刻と定義し、これに当てはまらない場合は欠損値として扱った。各期間における開始時刻と終了時刻のばらつきを明らかにするために変動係数（coefficient of variation）を求めた。変動係数の計算に際して時間は整数とし、分は 60 で割ることで小数に変換し、時刻を数値に変換した。

すべての解析には 2010 年 6 月 20 日から 2011 年 6 月 3 日までのデータを用いた。なお、各種の統計的検定には R.version 2.12.0（R Development Core Team 2010）を用いた。

4.3 結果および考察

4.3.1 発信機装着実験

実験期間中、死亡した個体は対照群の雄 1 尾のみであり、その個体の測定データは除外して解析した。装着群において切開部はすべての個体が術後 3 週間目にはほぼ回復しており、縫合糸は自然に消失していた (Photo4-5)。また、装着した発信機の脱落も見られなかった。装着群および対照群の水槽内を毎週掃除する際に、餌の投入量に比べ残餌の量が明らかに少なかったことと糞が確認されたことから、これらの個体の摂餌と排泄に問題はないと考えられた。装着群は 4 週目まで徐々に体重が減少し、終了時にわずかに増加したが開始時の体重まで回復しなかった (開始時: $535 \pm 153\text{g}$, 終了時: $497 \pm 130\text{g}$; Fig. 4-2)。実験開始時と終了時に測定した体重を比較したところ、装着群では開始時から終了時へと有意な減少が認められたが、対照群では有意な差は認められなかった (Wilcoxon signed-rank test, 装着群: $V = 21, p < 0.05$, 対照群: $V = 9, p > 0.05$)。また、開始時と終了時のそれぞれにおいて、装着群と対照群とで体重の中央値を比較したところ、どちらにおいても有意差は見られなかった (Mann-Whitney U -test, 開始時: $z = 1.09, p > 0.05$, 終了時: $z = 0.73, p > 0.05$)。



Photo 4-5 切開後の傷の回復過程 (左 ; 2 週間目, 右 ; 3 週間目)

対照群の水槽は水温が $16.0 \pm 1.6^\circ\text{C}$, pH が 8.0 ± 0.1 , DO が $9.5 \pm 0.7\text{mg/l}$, EC が $23.3 \pm 3.0\text{mS/m}$ であった。装着群の水槽は水温が $16.6 \pm 1.8^\circ\text{C}$, pH が 8.1 ± 0.2 , DO が $9.4 \pm 0.7\text{mg/l}$, EC が $24.6 \pm 1.1\text{mS/m}$ であった。また、両水槽の水質測定項目の各平均値間に有意差は見られなかった (Welch t -test, 水温: $t = -0.81$, pH: $t = -0.89$, DO: $t = 0.29$, EC: $t = 1.20$, すべて $p > 0.05$)。ナマズの生息する水域の水質は pH6.5~8.5, DO 5ppm 以上とされているので(田崎・金澤, 2001), ナマズの蓄養環境として水槽の水質に問題はなかったと考えられた。

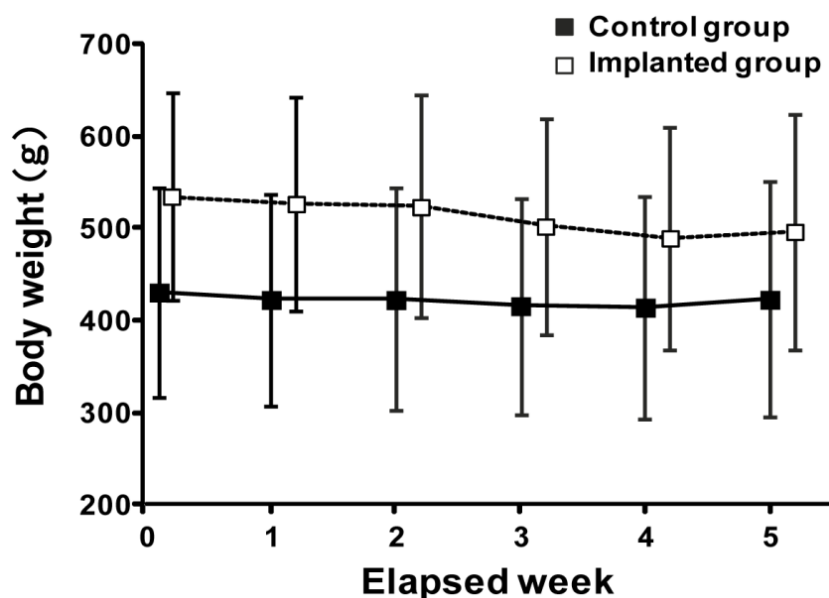


Fig. 4-2 装着個体と非装着個体の体重の変化
エラーバーは標準偏差を示す.

実験期間中，装着群の中では死亡した個体や発信機が脱落した個体は見られなかった．しかし，装着群の実験開始時と終了時の体重の間に有意差が見られた．装着個体の体重の増減には個体差が見られ，体重の減少が大きい（開始時と比べて 90g 減少）個体も存在した．実験条件下で発信機のダミーを装着した魚の体重が減少するという例は複数報告されており（Moser et al. 2003, Brown et al. 2006），これらの研究の実験期間は本研究のように比較的短かった（21日～31日）．本研究では装着群の体重は開始時から徐々に減少したが，4週間目から5週間目（終了時）にかけて増加傾向が見られ（Fig. 4-2），実験期間を延長すれば開始時の体重程度まで回復したかもしれない．

4.3.2 繁殖試験

装着個体の体重に減少は認められたものの，装着実験開始時の2月から人工産卵時の6月までの期間を通して発信機を排出した個体や死亡した個体が見られなかった．これは，腹部の切開が完全に治癒しており，内部から発信機が切開部を通して排出されなかったことを示すものである．さらに，雌雄装着個体4尾を用いて人工産卵を試みたところ，これらの個体は正常に産卵を行い，大量の孵化仔魚の生産に成功した（Photo4-6）．これらの結果から，発信機内部装着による生存や繁殖におよぼす影響は少なく，ナマズに対する装着法として妥当であり，周年の調査にも適用可能であると考えられた．



Photo 4-6 産卵基質に産み付けられた卵と孵化稚魚

Jepsen et al. (2002) はタグを内部装着する際は、性成熟の段階を考慮しなければならないと述べている。例えば、チャンネルキャットフィッシュ (*Ictalurus punctatus*) の繁殖期に装着された発信機は、生殖腺の発達を阻害し、発達した生殖腺が発信機を体外へ排出したという事例が観察されている (Marty・Summerfelt, 1986)。そのため、今回の実験のように生殖腺の未発達な非繁殖期に発信機を装着することが、発信機排出のリスクを低減し、長期間の追跡を可能にすると考えられる。

4.3.3 谷川における装着個体の移動と生息環境

受信テストの結果、発信機と受信機との距離が 5m の場合、すべての発信機設置環境における 1 時間あたりの受信回数は 50 回程度であった (Fig. 4-3)。受信回数は発信機と受信機の距離が大きくなると減少する傾向があり、15m の場合、発信機が河道中心部のときの受信回数は 50 回程度あった。これに対し、同じ 15m でも発信機が井桁内部では 3 回 (発信機に対し受信機が上流に存在する時；以下から上流とする) から 32 回 (発信機に対し受信機が下流に存在する時；以下から下流)、ヨシ帯内部では 11 回 (上流) から 3 回 (下流) と差が見られた。25m (上流) の場合、すべての発信機設置環境からの信号は受信されなかった。

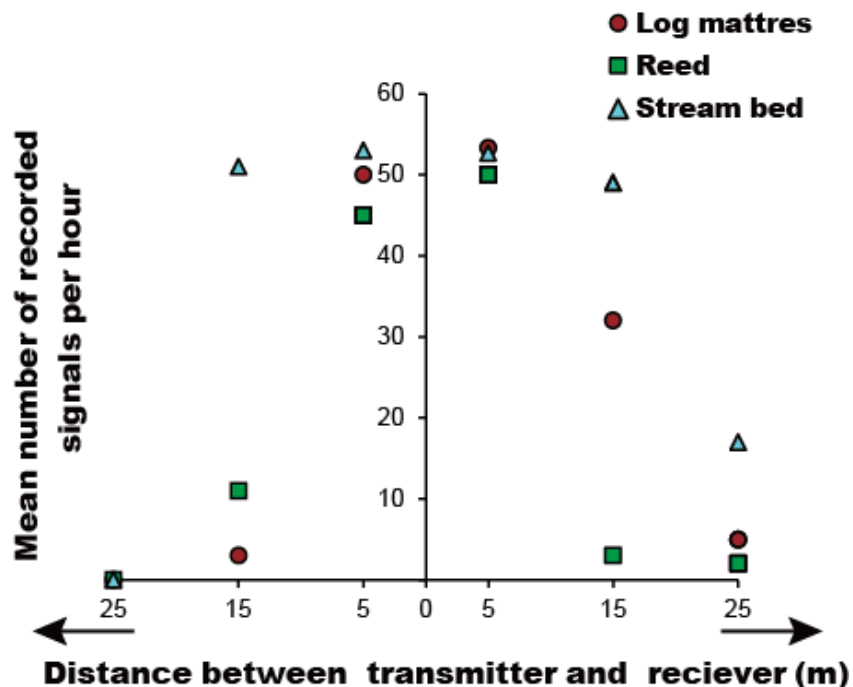


Fig. 4-3 3つの異なる環境条件に設置したテスト発信機から得られた信号

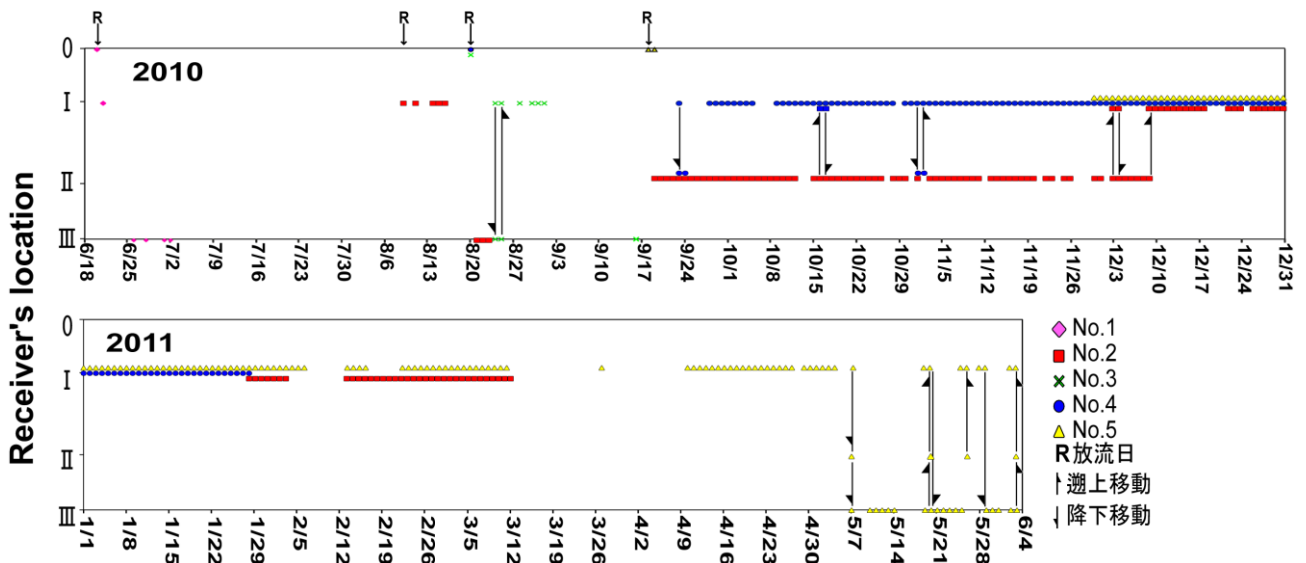


Fig. 4-4 装着個体の滞在 St. の日変化

谷川において追跡調査した 5 個体のうち 3 個体 (No.2, No.4, No.5) は放流から 100 日以上追跡することができ、最大追跡期間は No.5 の 138 日であった (Table 4-2). 滞在地点別にみると、全体の信号のうち 91.8% が St. I, 4.9% が St. III, 3.3% が St. II において受信された。

No.1 は 6 月 20 日に St.0 放流された後、下流の St. I を通過し St. III に約 1 週間滞在していた (Fig. 4-4). No.2 は 8 月 9 日に St. I で放流された後、9 月中旬に St. II において存在が確認されてから、12 月中旬まで同所に滞在していた。その後、12 月 9 日に St. I に移動して以降、3 月 12 日まで同所に滞在していた。No.3 は 8 月 20 日に St.0 放流されてから 4 日後の降雨日の夜間に St. I で確認され、最下流の St. III に降下したのち St. I に遡上した。No.1 および No.3 は短期間しか追跡することができず、最後に信号が確認されたのは St. III であった。No.4 は 8 月 20 日に St.0 放流された後、約 1 ヶ月後に St. I で確認され 1 月下旬まで同所に滞在していた。No.5 は 9 月 17 に St.S で放流された後、1 ヶ月以上存在を確認できなかったが、12 月 1 日に St. I において確認されて以降、3 月 11 日まで滞在していた。4 月 10 日の夜間から再び St. I において連続的に No.5 の信号が受信され、5 月 7 日に St. III に移動した後 6 月 3 日まで同所に滞在した。この期間中、No.5 は St. I と St. III の間を数回移動していた。

各個体が St. I に移動した時期は No.4 が 9 月下旬で最も早く、No.5 が 12 月 1 日、No.2 が 12 月 9 日とほぼ同時期であった。No.5 は 12 月初旬から 5 月上旬まで最も長い期間 (121 日間) St. I に滞在しており、同所において越冬したことが分かった。St. I における滞在期間は No.4 は 117 日間、No.2 は 58 日間であった。

ナマズはヨシなどの水草が繁茂し、岩の間や穴などの隠れることのできる場所を好むといわれる（田崎・金澤，2001）. St. I は比較的水深が深く、井桁護岸やヨシ帯といったナマズの隠れ家となる環境が形成されていた. 高橋ら（2009）は本研究地において、井桁護岸の魚類生息場機能を評価する研究を行い、ナマズを含めた多種多様な魚類にとって生息場だけではなく、産卵環境、越冬環境としても機能する可能性を示した. 以上のことから、St. I はナマズにとって井桁などの隠れ家が存在する長期間生息が可能な環境であると考えられた.

冬期以外では、No.2 と No.5 はそれぞれ、St. II に 9 月から 11 月、St. III に 5 月から 6 月にかけて滞在していた（Fig. 4-4）. St. II は右岸から左岸にかけて水深の変化が大きく、水生植物が繁茂している. 同様に St. III はコカナダモが繁茂し、延長約 8m のヒューム管が存在している. このように両 St. はナマズの隠れ家となる環境が存在していることから、滞在が可能であったと考えられた.

ナマズの減少要因として非繁殖期の生息場所である恒久的水域の環境悪化が挙げられる. 実際に、圃場整備後の 3 面コンクリート化された水路内において、ナマズが見られなくなったという事例が複数報告されている（紀平，1983；坪川，1985）. 谷川でも圃場整備による影響で一時期ナマズの生息が確認できない状態となった. しかし、下流の堰に魚道が施工されて以降谷川内でナマズの生息が再確認されたことから、魚道の設置が個体群回復に寄与したと考えられている（守山，2009）. また、ナマズが恒久的な生息場や越冬場として利用可能な St. I のような環境が存在したことも回復の要因の一つであると考えられる.

谷川のように圃場整備後の河川においてナマズの生息数が回復したという例は少なく、ナマズの個体群復元のモデルケースとなりうる. しかし、谷川におけるナマズの回復の要因は断片的な情報による推測にすぎず、谷川内で生活史を全うできるか定かではない. そのため、ナマズの生息可能条件として選好する生息場所、繁殖場所への移動等について把握する必要がある. 今後はこれらの情報を収集するために超音波テレメトリーを利用し長期間モニタリングすることが有効であると考えられる. 例えば、繁殖場所付近に設置した受信機で装着個体の繁殖移動を把握すること（Zeller, 1998）が可能であると考えられる. また、これらの情報により、河川改修の際にナマズが選好する井桁護岸のような構造物の配置、その施工範囲、また繁殖場所への移動経路の確保といった具体的な計画に必要な情報を提供できると考えられる.

4.3.4 活動時間帯と季節的な活動パターンの特徴

100日以上追跡することのできた No.2, No.4 および No.5 について, 秋期と冬期における受信パターンの変化を, 長期間(2時間あたりの受信回数のバブルプロット)および短期間(1時間あたりの受信回数の変化)のスケールにより示した(Fig.4-5, Fig.4-6). No.2 および No.4 は, 10月から11月にかけてそれぞれ St. II と St. I に滞在していた(Fig.4-4). この期間中, 両者の信号はほぼ夜間に受信され, 回数の変動は大きかった. 一方, 昼間はほとんど受信されないという規則的なパターンを示した(Fig.4-5). 12月から1月にかけて, No.2, No.4 および No.5 は St. I に滞在していた(Fig.4-4). この期間中, これらの装着個体の信号は夜間だけではなく昼間も同程度受信されるというパターンを示し, 秋期と比べて昼間の信号回数の変動は大きかった(Fig. 4-6). 図示はしなかったが, No.2 および No.5 は 2月上旬から3月上旬にかけて同様の受信パターンを示していた.

10月から11月にかけて, No.2 および No.4 の超音波信号は1日のうち夜間に集中する受信パターンを示した(Fig.4-5). アカアマダイ(*Branchiostegus japonicus*)は昼行性の魚類であり, 夜間は海底に掘削した巣穴に滞在し昼間は巢外で行動するという生態を持ち, 超音波テレメトリーにより長期間モニタリングしたところ, 夜間にほとんど信号は受信されず昼間に多く受信されるというパターンを示した(Mitamura et al. 2005). ナマズは夜行性魚類であり, 日中は物陰にひそみ夜間暗くなってから摂餌等の活動を行う(田崎・金澤, 2001). 受信テストの結果から, ナマズが身を隠すことのできる井桁やヨシといった環境から発信された信号の受信回数は河道中心部と比べて減少することがわかっている(Fig.4-3). これらのことから, No.2 と No.4 について秋期にみられた受信パターンは, 装着個体が昼間になんらかの構造物内で休息し, 夜間に構造物外で活動するという夜行性活動を行っていたことを示唆している.

この夜行性活動パターンは, 冬期になると昼夜問わず信号が受信される不規則なパターンに変化した(Fig.4-6). 冬期の装着個体の信号は24時間常に一定ではなく昼間と夜間に受信され, No.2 は約1か月間 St. I 以外の場所に移動した(Fig.4-4, Fig.4-6). 冬期のナマズは非活動的で, 石の間に隠れて越冬するといわれている(田崎・金澤, 2001). 一方, ヨーロッパオオナマズでは, 厳密な夜行性活動は秋期にのみ見られ, 春季と冬期は日中に最も活動していたことが, 電波テレメトリーを用いた調査により明らかにされている(Slavík et al. 2007). これらのことから, 既往の知見とは異なりナマズは季節的に夜行性活動が変化し, 冬期には昼夜活動する可能性が示唆された.

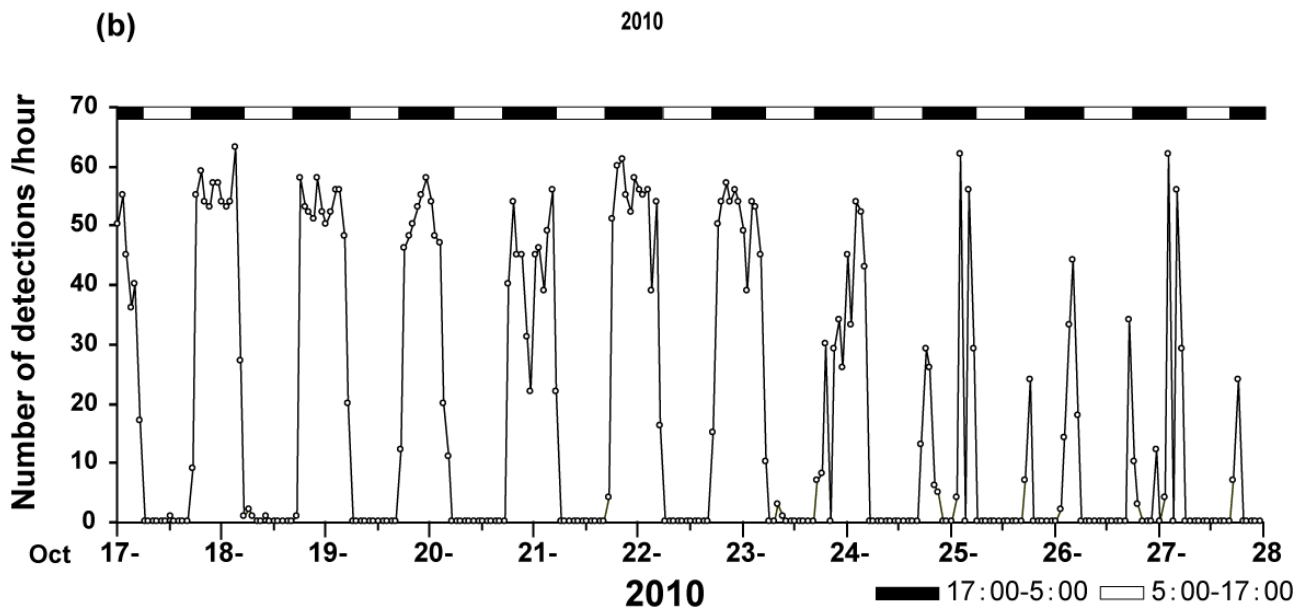
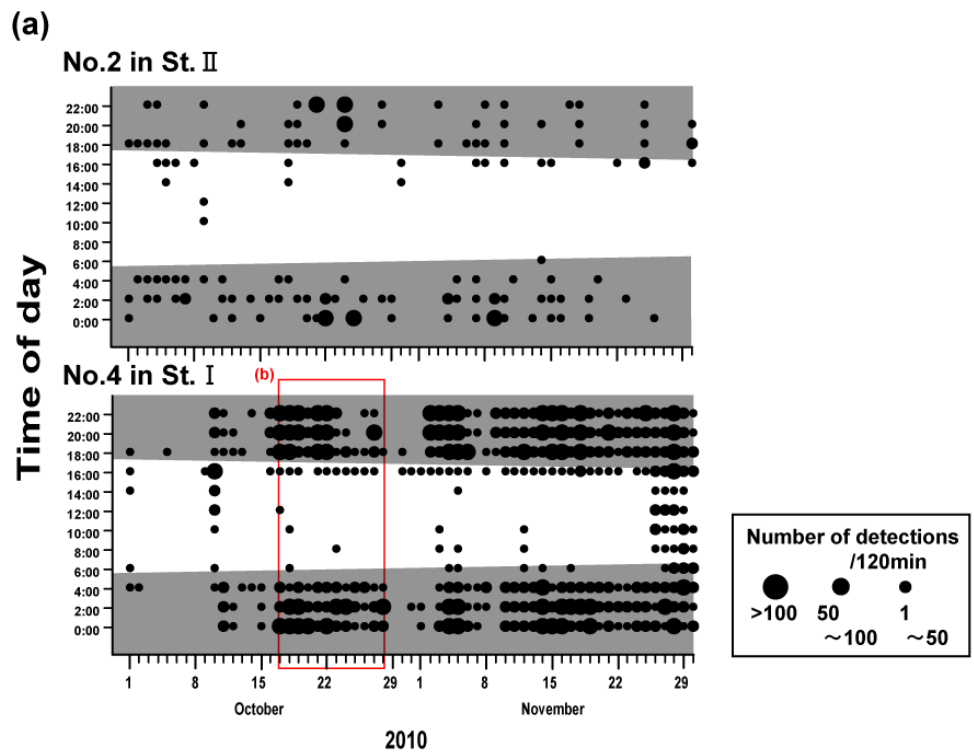


Fig. 4-5 No.2 と No.4 から得られた秋期の活動パターン

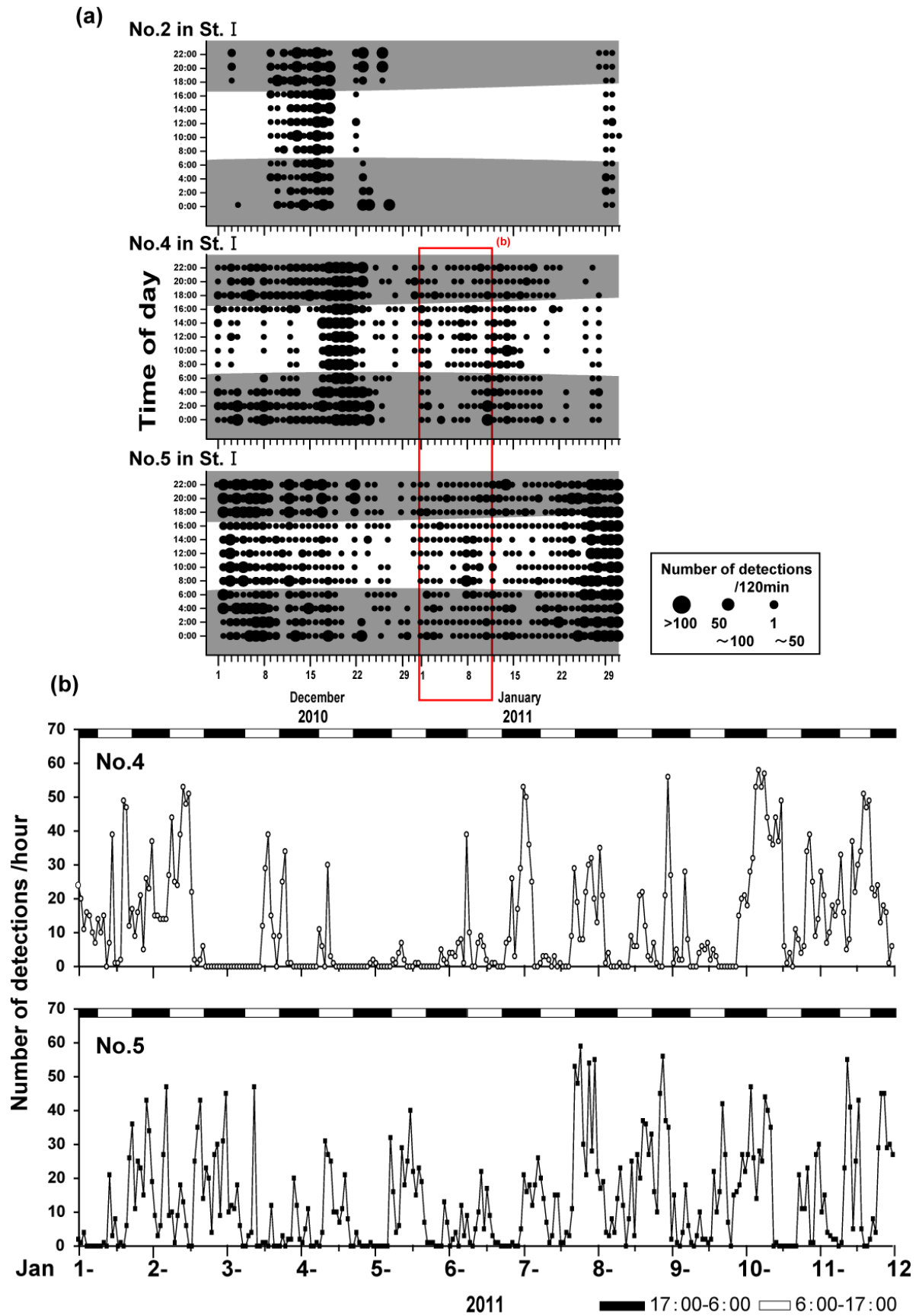


Fig. 4-6 No.2, No.4 および No.5 から得られた冬期の活動パターン

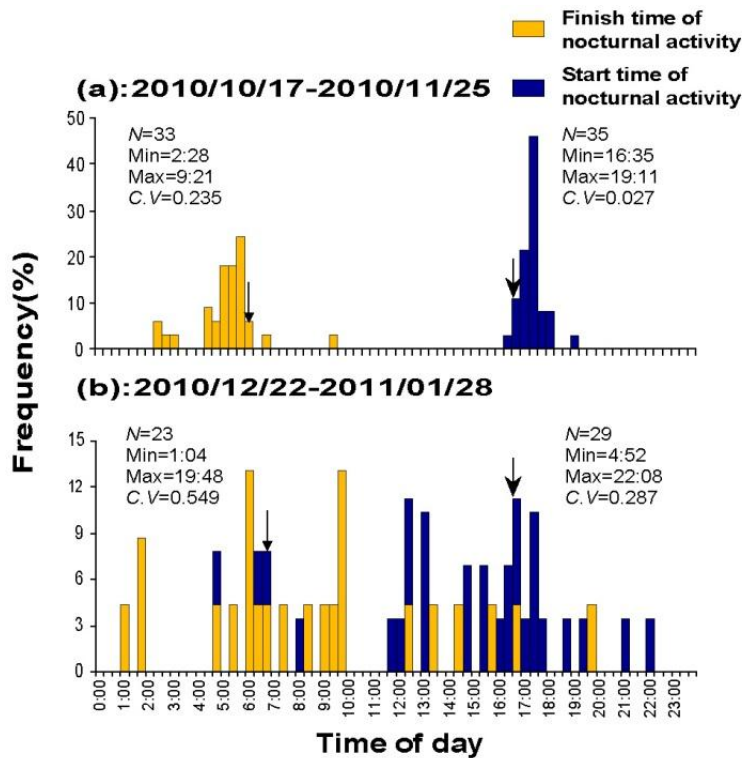


Fig. 4-7 夜行性活動開始時刻および終了時刻の季節変化

秋期（10月17日から11月25日）の St. I における No.4 の夜行性活動の開始時刻と終了時刻の変動係数（最も早い時刻および最も遅い時刻）はそれぞれ 0.03（16:35-19:11）と 0.24（2:28-9:21）であり終了時刻のばらつきの方が大きかった（Fig.4-7）。また，開始時刻のモードは日没時刻より後に，終了時刻のモードは日出時刻よりも前に出現した。冬期（12月25日から1月28日）の開始時刻と終了時刻の変動係数はそれぞれ，0.29(4:52-22:08)と 0.55(1:04-19:48)であり同じく終了時刻のばらつきの方が大きかった（Fig.4-7）。加えて，冬期の開始時刻と終了時刻は日出と日没時刻との関係性は見られず，ばらつきが激しかった。

Mashiko (1981) は自然光環境の室内水槽内でさまざまな水温条件におけるナマズの活動を比較した。その結果，夜行性活動の開始時刻はどの水温でも日没直後の傾向が見られたが，終了時刻の幅は広く，特に水温 15℃以下では夜間の活動は低下し，活動の終了時刻は不安定になった。特に水温 10℃ではこの傾向は顕著であり，深夜に活動が終了することもあった。No.4 の秋期の夜行性活動の開始時刻と終了時刻は，それぞれ日没直後と日出直前であった（Fig.4-7）。これに対し，No.4 の冬期の開始時刻と終了時刻は日没時刻と日出時刻の関係性は見られず，特に活動終了時刻のばらつきが大きかった（Fig.4-7）。このように，No.4 の冬期の活動時刻は Mashiko (1981) の実験結果と類似した傾向を示したことから，季節的に水温が低下することによって自然条件下のナマズは不完全な夜行性に移行する性質をもつと考えられた。しかし，本研究や Mashiko

(1981)の実験はともに1個体で得られたデータに依存しており、さらに多くの個体について調べる必要がある。その際は、より直接的に活動量が把握できる加速度センサー付き発信機を使用すること(Murchie et al. 2011)が有効であると考えられる。また、日周期性変化の要因は水温といった外的要因(Fraser et al. 1995)だけではなく、捕食者回避(Metcalfe et al. 1999; Metcalfe・Steele, 2001)や摂餌行動などの内的要因も考えられるので、今後は冬期のナマズの行動変化を引き起こす要因やその適応的意義の解明が必要である。

4.3.5 行動解析手法としての超音波テレメトリーの課題

超音波テレメトリーによる魚類の行動追跡の適用例は湖沼や内湾、大規模な河川で多く、その場合の受信範囲はおおむね直径100m以上になり、広大な調査範囲をカバーするため受信機の設置数も多く必要になる(例えば、有賀ら2009; Kawabata et al. 2007; Mitamura et al. 2009)。今回の対象地である谷川のような小河川は障害物が多く受信範囲は数十mほどで(Fig.4-3)、開放水域と比べ極端に狭くなるが、数台の受信機で長期間の装着個体の追跡に成功した。これは、谷川においてある程度ナマズの生息可能な環境が限られることと、比較的定住性が強いためであると考えられる。実際に、受信機設置地点のうちほとんどの装着個体はSt. Iにおいて長期間滞在していることから明らかである(Fig. 4-4)。

No.1とNo.3の放流日から最後に信号が確認された日までの日数はそれぞれ12日と27日であり短期間しか追跡できなかった(Table 4-2)。有賀ら(2009)によれば超音波テレメトリーはデータ取得が比較的容易というメリットがあるが、装着魚の死亡や発信機の脱落、あるいは受信機未設置の区間への迷入があった場合、状況の把握が困難であると述べており、No.1とNo.3が追跡不能となった要因を特定することはできなかった。また、超音波テレメトリーを用いて各装着個体が滞在しているおよその場所は推測できたが、日中の休息場等に利用した微生息環境は特定できなかった。これは、本研究に用いた設置型超音波受信機の性質上、装着個体の位置情報を取得することができないためである。

超音波テレメトリーの利点は人的な調査では得難い、個体の行動履歴を長期間収集可能なことであり、実際に本研究では谷川におけるナマズの生息場所の移動や夜行性活動に関する行動情報を長期的に収集することに成功した。以上のことから、小河川におけるナマズの行動解析手法として超音波テレメトリーは適用可能であることがわかった。一方、受信範囲外に移動した装着個体の探索が難しいことや存在場所を正確に特定できないといった手法としての問題点も明らかとなった。

複数設置した受信機の受信範囲内において個体の位置を特定するシステムは開発されており、すでに開放水域での適用例はあるものの(Mitamura et al. 2009)、障害物の存在が多い小河川での運用は困難であると考えられる。有賀ら(2009)は、シロザケ(*Oncorhynchus keta*)を対象に超音波と電波テレメトリ

一を併用することで、調査個体を見失うリスクと調査労力の低減を図り、石狩川における遡上行動の解析に成功した。電波テレメトリーは動物に装着した発信機の電波の入感最大方位を三角測量法により得て装着個体の位置を推定する（佐伯・早稲田，2006）。この方法は装着個体の正確な位置情報を取得でき、行動圏や生息地の選好性解析にも利用できる（佐伯・早稲田，2006）。以上のことから、ナマズに対し超音波と電波テレメトリーを併用することにより、装着個体を見失わずに連続的に追跡し、超音波による行動情報だけではなく、行動圏や微生息環境の選好性の解析が可能になると考えられる。

4.4 小括

本章の結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 発信機装着による成長と繁殖に与える影響は少ないことからバイオテレメトリーはナマズに対し適用可能であることがわかった。
- 2) 超音波テレメトリーを用いて谷川において5尾の装着個体を約1年間追跡したところ、3個体は100日以上モニタリングすることができた。
- 3) 秋期は規則的な夜行性活動を示し、冬期は昼夜活動を維持していたと考えられた。
- 4) 装着個体の多くが長期間滞在した場所は井桁護岸が施工された区間であり、隠れ家かつ越冬場所として利用されたと考えられた。
- 5) 超音波テレメトリーによる追跡の問題点として、受信範囲外に移動した個体の探索が困難であること、正確な存在場所を特定できないといった点が挙げられた。

第5章 谷川における成魚の越冬期と繁殖期の行動特性および生息環境

5.1 目的

魚類個体群が存続するためには，越冬の実態について明らかにすることが極めて重要であると指摘されている（西田ら，2009）．しかし，ナマズの行動特性は季節的に変化し，水温 20 から 30℃が生活適温とされ，10℃以下ではほとんど活動せず，冬には泥中や大石の間に隠れて越冬するといわれている（田崎・金澤，2001）．このように，行動特性および生息環境の季節変化に関する情報は定性的な記述に留まり，定量的に把握した例は見られない．電波テレメトリーは流水環境において様々な魚類の冬期や夏期の生息環境，行動生態解明に寄与している（Brown et al. 2001；Cooke et al. 2000，Crook et al. 2001；Slavik et al. 2007）．そこで，電波テレメトリーを適用し，本種の越冬期および繁殖期の行動特性および生息環境を解明することを目的とし，以下の要点を考慮し調査した．

- 1) ナマズは夜行性魚類であり，時間帯によって活動性が異なると考えられ，1日 24 時間を通じた活動性の変化を把握する（24 時間追跡）．
- 2) 装着個体の位置を長期間連続的に追跡することで，各個体が継続的に滞在している地点，つまり生息場所を把握することができると考えられる（連続追跡）．
- 3) 各個体の滞在地点の周辺環境を測定し，生息地選好性解析を実施することで，ナマズの選好環境および忌避環境を定量的に把握できると考えられる（利用微環境要因の推定）．

5.2 調査方法

5.2.1 使用する電波テレメトリーの特性

使用した発信機（Advanced Telemetry System（以下 ATS），F1170）は重さ約 4g，長さ 24mm でアンテナはコイル状で内包されており，内蔵電池により一定間隔ごと（約 2 秒）に固有の周波数を発信する（Photo4-4）．推定寿命は約 1 年間である．受信機の周波数を発信機の周波数に調整することにより，個体識別して追跡することが可能である．予備調査により河川からの発信機の電波の到達距離は最大 5m 程であることがわかっている．

5.2.2 供試魚の採捕および発信機の装着

Table5-1 に発信機を装着した個体の測定結果および放流日をまとめた．供試魚は谷川において電気ショッカー（Smith-Root 社，Model 12B）を用いて採捕した．採捕した個体には電波発信機（ATS，F1170，個体 H のみ F1040）を腹腔内に内部装着した．装着方法は森ら（2013）に準拠した．その後装着個体をカゴの中に入れた状態で川に沈め 24 時間ほど馴致させ，装着による顕著な行動の変化がないか確認したのち放流した．放流場所は越冬期には上流区間の最下流部，繁殖期には各個体が採捕された地点の付近とした．越冬期には A から C1 の 3 個体，繁殖期には A および B の個体に加え，2013 年 4 月に新たに採捕した C2 から H の個体を含めた 8 個体を追跡した．

Table 5-1 電波発信機を装着した個体

ID	Release date	Frequency of transmitter (Mhz)	Body weight (g)	Total length (cm)	Sex	Study* period
A	3 September 2012	144.063	495	44.3	F	W・B
B	3 December 2012	144.184	728	44.7	F	W・B
C1	27 October 2012	144.424	322	36.2	F	W
C2	10 April 2013	144.510	640	45.0	F	B
D	10 April 2013	144.572	335	38.0	M	B
E	10 April 2013	144.603	740	49.0	F	B
F	10 April 2013	144.661	140	29.0	M	B
G	10 April 2013	144.721	640	48.5	F	B
H	10 April 2013	147.012	440	43.0	F	B

* W : 越冬期, B : 繁殖期

5.2.3 作業効率化に向けた GIS による調査システムの構築

本調査では、数多くの装着個体の位置情報を正確に記録しなければならない。得られた位置情報（緯度、経度）を手書きで記録し、その後手入力でデータを整理することは効率が悪く、誤記や誤入力する可能性が高い。そこで、野外および室内での作業効率を向上させるために GPS 搭載モバイル GIS（以下、モバイル GIS）を導入することとした。

モバイル GIS とは、既存の GIS 機能に加え GPS を活用してモバイル端末の現在位置を屋外で測位し、その場所をモバイル端末画面の GIS 上に表示する機能を有する（田中・内平，2008）。これにより、屋外調査の効率化を図り、調査結果を GIS データとして現場で直接保存することにより、屋外調査後の作業（データ入力・資料作成等）の効率化も可能にする。

GIS ベースマップ作成と追跡調査のフロー図を Fig.5-1 に示した。まず、国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービス（<http://fgd.gsi.go.jp/download/GsiDLSelfFileServlet>，確認日 2013/11/11）から、宇都宮市の GIS データを入手した。これは宇都宮市全域のデータなので、基盤地図情報ビューアー・コンバーター（<http://fgd.gsi.go.jp/download/>，確認日 2013/11/11）により調査地周辺のデータを切り取りシェープファイルに変換して使用した。以降の作業はデスクトップパソコンにインストールした Arc GIS10.1（Esri）上で行った。

対象範囲の道路線，水涯線をそれぞれレイヤーに格納し，ArcToolbox のインデックスフィーチャ（格子状）の作成から 1m 四方（1m²）のメッシュを谷川の河道（水涯線）に重なるように生成し，レイヤーに格納した．ここで，メッシュのサイズを 1m²としたのは，後述する推定位置の精度は約 1m であること，河道の幅は狭い部分で 2m 弱であるため，0.5m や 2m 四方のメッシュを使用することは，結果にバイアスを生じさせる可能性があったためである．

次に，装着個体の推定位置は位置情報，個体 ID，時刻等の情報とともに記録する必要があるため，これらの属性情報を付加した推定位置をモバイル GIS 上（Esri, ArcPad 10）でポイントデータとして入力するための入力フォームを作成した（Fig.5-2）．この入力フォームは各項目に対し予め設定された値をプルダウンメニューから選択するもので，入力ミスを防ぎ作業効率を上げることができる．同様に環境項目に対しても入力フォーム（水際タイプ，底質タイプ等）を作成した．

最後に，これらを統合したベースマップをモバイル GIS をインストールした PDA（Nikon-Trimble, Pathfinder 3B）に同期させ，野外で使用した．PDA には高精度の GPS アンテナ（SOKIA, GIR1600）が無線接続されており（Photo5-1），ArcPad の画面のベースマップ上に一定間隔で測位した調査者の位置のアイコンが表示される．

5.2.4 携行型レーザーによる 24 時間追跡

位置推定の方法は八木アンテナ（NATEC, NY144X）を接続した携行型レーザー（Vertex standard, FT-817）を携行し（Photo5-2），谷川流路に沿って歩き，発信機の信号が得られた地点の周辺において，周波数をずらし感度を低下させた（入感方位を狭める）上で入感最大方位が得られる地点を推定した（以下，接近法；佐伯・早稲田，2006）．予備調査からこの方法による実際に装着個体が存在した位置と推定した位置との誤差は約 1m であることがわかっている．接近法により位置を推定した後，装着個体の位置情報を取得し，PDA（ArcPad）に時刻および個体番号の属性値を付加したポイントデータとして入力した．PDA に収集したデータは ArcGIS に定期的に出力して解析した．24 時間調査では各個体につき 3 時間間隔で 24 時間計 9 地点位置推定した．日周期によるナマズの活動の変化を把握するために，日周にもとづいた時間帯を設定した．薄暮（日没 1 時間前から日没 2 時間後），夜間（日没後），薄明（日出 1 時間前から日出 2 時間後），昼間（日出後）の 4 つの時間帯を設定した．越冬期の 24 時間調査は 2012 年 12 月から 2013 年 2 月までの期間で，月 4 回の頻度で 15 時から実施した．繁殖期の調査は 2013 年 6 月から 7 月までの期間で，月 2 回の頻度で 17 時から実施した．

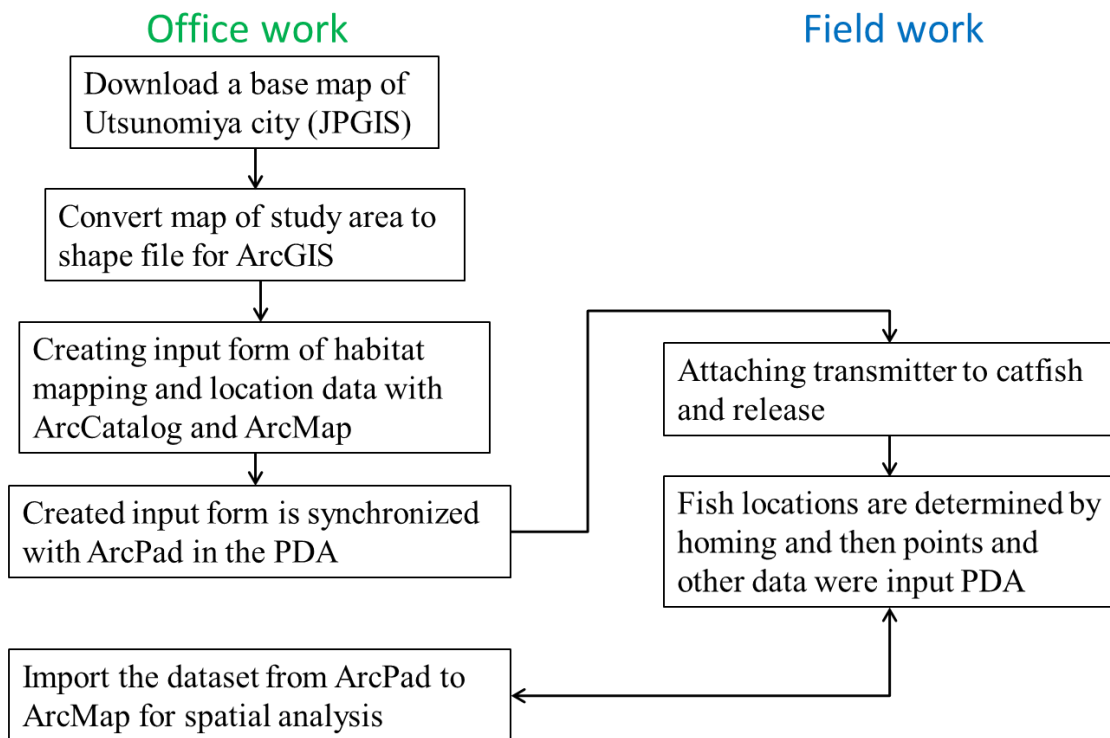


Fig. 5-1 GIS を活用した室内および野外における解析

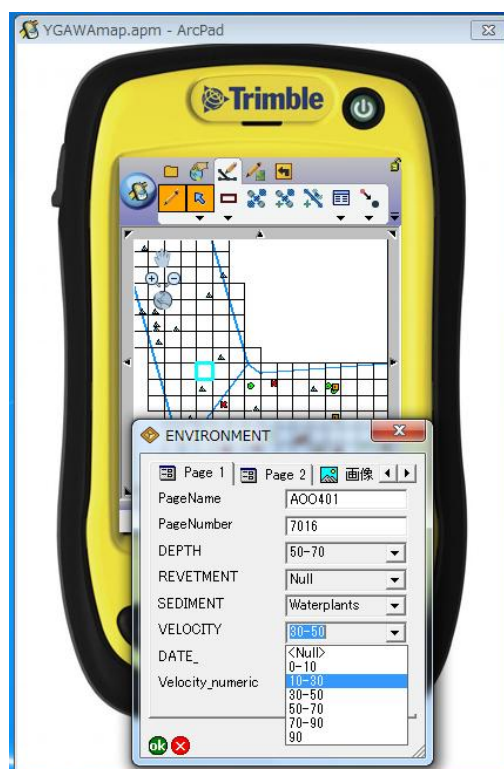


Fig. 5-2 ArcPad 上でのデータ入力



Photo 5-1 使用した PDA と GPS アンテナ

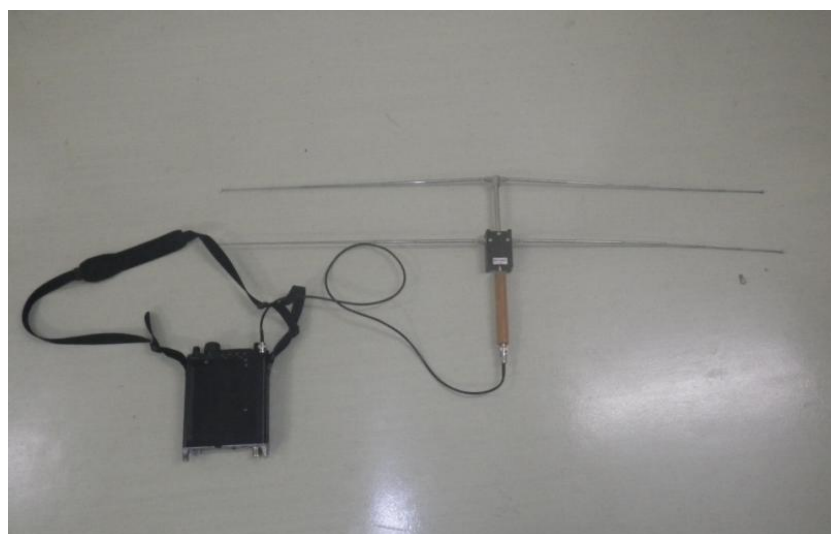


Photo 5-2 使用した携行型レシーバーと折りたたみ式八木アンテナ

5.2.5 携行型レーザによる連続追跡

繁殖期には 24 時間追跡に加え、携行型レーザを用いた連続追跡により各個体の生息場所を把握した。追跡期間は C2 から H の個体を放流した 2013 年 4 月 13 日から 7 月 31 日までとした。連続追跡とは可能な限り毎日 17 時頃に各装着個体の位置を 1 点推定する方法である。この方法により繁殖期における各装着個体の生息地点を把握した。

5.2.6 ハビタットマッピングの方法

連続追跡によって、生息地点を把握することができた A, B, E, F および H の 5 個体が利用した微環境を推定した。これらの個体が利用した周辺環境の定量化および地図化の作業をハビタットマッピングと呼び、Crook et al. (2001) や Kobler et al. (2008) を参考した。以下にその手順を記述する。

調査は非灌漑期である 9 月 12 日から 14 日にかけて実施した。したがって、調査時の谷川の流量は減少しており、繁殖期の利用環境を推定するにあたり流速や水深の測定値は参考とした。各個体につき未利用メッシュと利用メッシュの平均値に差があるか検討するために、両群に等分散性が見られる場合は Student の t 検定、見られない場合は Welch の t 検定を用いて比較した。一方、変化の少ない底質や護岸タイプに関して後述する資源選択性を解析した。

調査者は河道内を遡行し PDA 画面のベースマップに表示される現在位置から、測定メッシュ上にいることを確認しながら測定した。水深は測量用スタッフを用いてメッシュの中央部において 1cm 単位で 1 点測定した。同様に 6 割水深の流速を 2 次元流速計 (KENEK, VP-1200) により 1 点測定した。しかし、測定メッシュにおいて沈水植物 (主にコカナダモ) が 6 割水深まで密生している時は大きな誤差が生じるため流速を測定しなかった。こうした未測定メッシュの流速は、周辺で流速を測定できたメッシュの平均値を求め、広瀬ら (2008) が示したコカナダモ内の平均流速 (15.3cm/s) /水草外の平均流速 (42.3cm/s) $\times 0.36$ を乗ずることで計算した。底質タイプは目視観察によりメッシュ内を優占する河床材料について、佐藤・東 (2004) を参考に泥、砂 (粒径 <2mm)、小礫 (2-16mm)、大礫 (>256mm)、沈水植物に分類し記録した。また、水際タイプの測定方法は田中ら (2011) を参考にし、河岸に接するメッシュにおいて湿生植物等が生えている場合植生タイプとし、表土や積石が露出している場合自然タイプとした。河岸に接していないメッシュは流心タイプとした。1 メッシュごとに流速および水深の実測値を、底質タイプおよび水際タイプは属性値 (1~5) を PDA に入力した。PDA に収集したデータは ArcGIS に出力して解析した。

以上のハビタットマッピングの概念図を Fig.5-3 に示す。

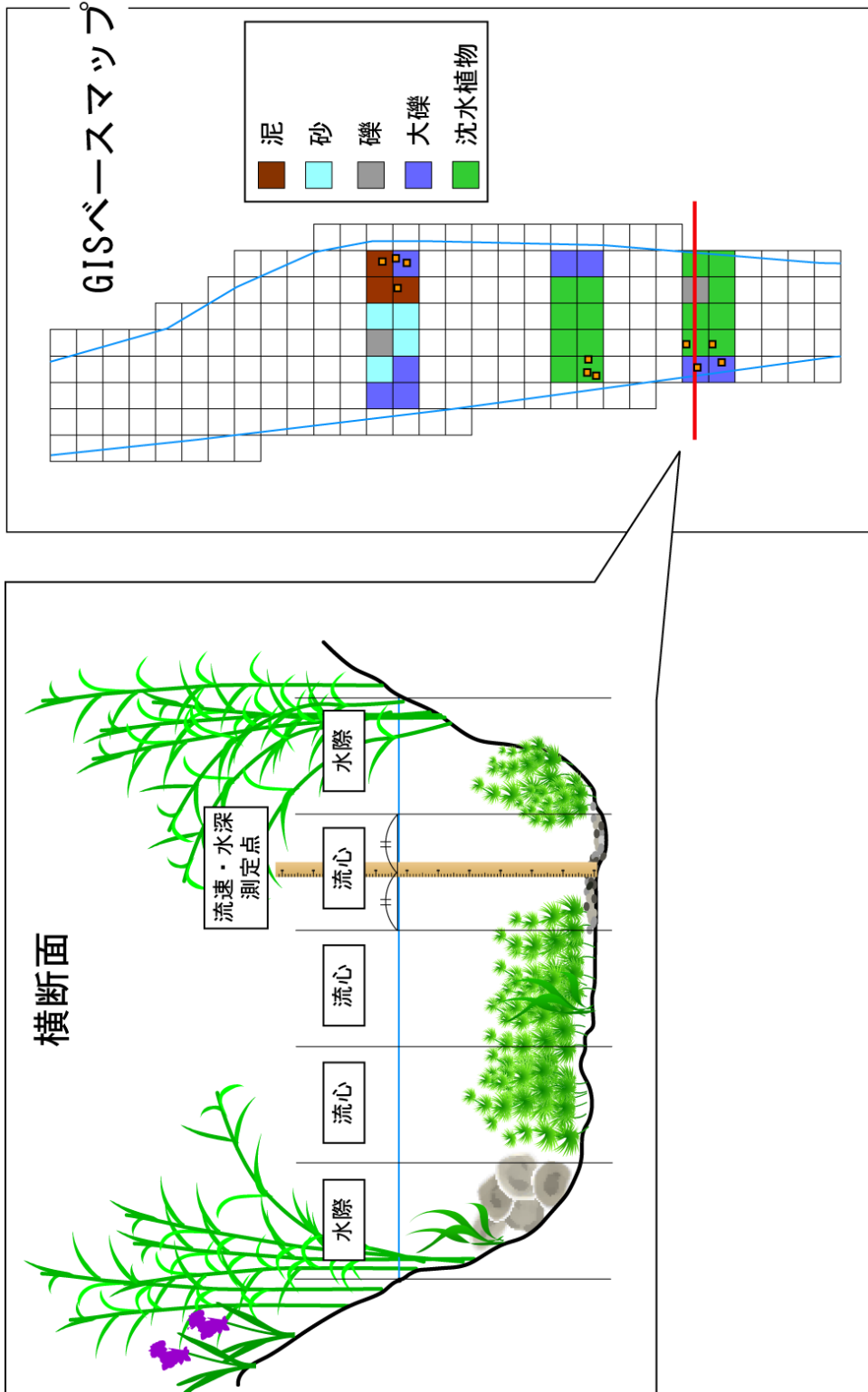


Fig. 5-3 ハビタットマッピングの概念

5.2.7 繁殖期の装着個体の利用微環境要因の推定

以下に資源選択性の基礎的な概念と解析法について記述する。食物や生息場所は、動物が生存するために必要な資源 (resource) であると思なすことができ、資源の利用様式はその種の生態を反映している (清田ら, 2004)。複数の利用可能な資源があるとき、ある動物の各資源を利用する程度が、利用可能な資源の割合に比例しない時、その動物は資源を選択的に利用すると定義される (清田ら, 2004)。各資源が実際に利用される程度を利用度、環境中に存在する生息場所のタイプの割合の利用しやすさの程度を利用可能性と呼び、利用可能性に対する利用度の比を資源選択性 (resource selection) と呼ぶ。Johnson (1980) が要約しているように、生息場所の利用は、その種の地理的分布範囲 (第 1 段階の選択性)、分布範囲内における個体や集団の行動圏 (第 2 段階)、行動圏内における各生息場所の利用 (第 3 段階) といった階層的スケールに分けて考えることができる。さらに、Thomas・Taylor (1990) は、資源選択性は対象種や考慮する選択性の種類 (食物、生息地) によって変わるので、調査方法、取得データに合わせた基礎的な 3 つの方法を提示した。第 1 は利用可能性と利用度は調査地内においてすべての生物に対し等しいと仮定する。第 2 は対象生物を電波発信機や首輪、耳標といった方法で個体識別し、各資源の利用度は個体別に推定されるが、利用可能性はすべて等しいと仮定する。第 3 は第 2 に対し、個体別に異なる利用度および利用可能性を推定する。

生物を対象とする様々な不確実性を持つデータを用いて資源選択性を解析するために、統計的な分析を前提とした様々な解析方法が開発されてきた (Manly et al. 2002)。こうした解析法を使用する際には、対象とする生物の特徴やデータの特徴に応じて適切な手法を選択する必要がある (清田ら, 2004)。ここで、連続追跡およびハビタットマッピングによって得られたデータの特徴として、個体別の 1 メッシュあたりの推定位置の頻度データ (利用度) があること、個体別の各資源カテゴリに該当する測定メッシュの数量データ (利用可能性) が存在することが挙げられる。利用可能性データは個体ごとに異なる場合を想定した。これは、各個体の生息した周辺環境の特徴はそれぞれ異なり、利用可能性は個体別に与える必要があったためである。ただし、E と F は小排水路より下流の区間に同所的に存在していたため、環境の利用可能性は等しいと仮定した。

これらのデータの特徴は Thomas・Taylor (1990) の定義の 3 に該当することから、資源選択の解析法として Manly の方法 (Manly et al. 2002; 清田ら, 2005) を用いることとした。Manly の方法は、利用データが個数で、ランダムサンプル (動物がランダムに資源と出会い、利用すると考えられる場合) であるという仮定に基づく。Manly の方法は定義 1 から 3 のすべての方法に対応可能で、簡単な選択指数が得られ結果の解釈が容易であること、他の解析法を包含すると考えられること、応用性が高いことから推薦される (清田ら, 2005)。選択指数の特徴として、資源の利用可能性と利用度の比に相当するもので、Manly の方法では対象生物が資源の選択性を持っていたかカイ 2 乗検定を用いて検討し、

個々の資源カテゴリーの選択性は Bonferroni 信頼区間を用いて検討する。

Manly の選択指数は以下の式で表される。選択指数が 1 以下の時、負の選択性（忌避性）を持ち、1 以上のとき正の選択性（選好性）もつと判断できる。

$$w_i = u_i / \sum_{j=1}^n \pi_i u_{ij}$$

w_i = 選択性指数， u_i = 利用された資源 i の個数，

π_i = 利用可能な資源の中の資源 i の割合， u_{ij} = 個体 j が利用した資源 i の個数

w_i の標準誤差は以下の式で表される。

$$se(w_i) = \sqrt{o_i(1 - o_i)/(u\pi_i^2)}$$

$se(w_i) = w_i$ の標準誤差， o_i = 利用された資源 i の割合，

このときの信頼区間は以下の式で表される。

$$w_i \pm z_{\alpha/2} \times se(w_i)$$

ここで計算された信頼区間が 1 を含まないとき、有意な選択性をもつと判断できる。

なお、各種の統計的検定には R version 2.14.2 (R Development Core Team) を用いた。Manly の方法による資源選択性の解析には adehabitatHS パッケージの wi 関数(widesIII)を用いた。

5.3 結果および考察

5.3.1 越冬期と繁殖期の生息環境

・越冬期の装着個体の生息環境

越冬期における装着個体の生息場所の位置の変化を Fig.5-4 に、谷川における分布と環境を Fig.5-5 に示した。Fig.5-4 の図上の y 軸は小排水路入り口の空間的 y 座標 (71832.682m) を原点とした時に各個体の推定位置の空間的 y 座標の差をとり、相対的な距離（垂直距離）で示される。このため、正の値は小排水路入り口より上流、負の値は下流に位置することを示す。プロットは 24 時間追跡開始時 (15:00) の位置を白抜き、終了時 (15:00) の位置を塗りつぶして区別した。Fig.5-5 の保全区間とは農村環境自然整備事業により、環境を保存した区間 (約 0.7km) を指し、整備区間とは圃場整備事業により流路が付け替えられ区間 (約 2.1km) を指す。

A の放流日は 2012 年 9 月で越冬期調査開始時まで不定期に位置を推定したところ、直後から上流 690m 付近に移動し、以降ほぼ移動しなかったことから、同所に定着したと考えられた。越冬期間中、A の推定位置は上流 690m 付近で推移したことから、同所において定住的な生活を送っていたと考えられた。A が定着した場所の分布は谷川上流域保全区間にあたり、その環境の特徴は水深の深い淵 (100cm 以上) で川幅は狭く、底質は主に泥で占められていた。水際にはヨシが密生し草体は一部水面を覆い、根は水中に伸展し遮光空間が形成さ

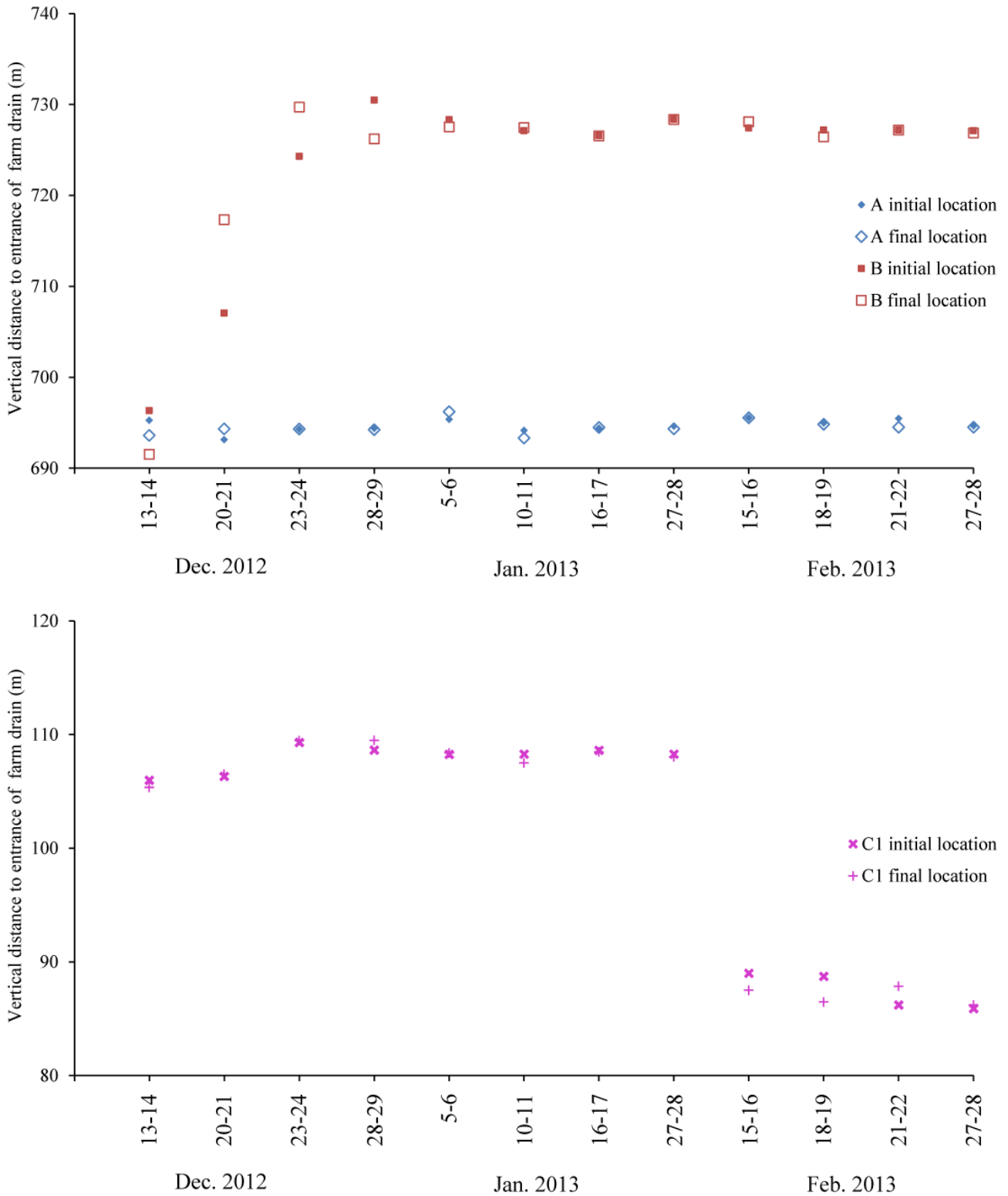


Fig. 5-4 越冬期の装着個体の調査開始時と終了時の位置の変化

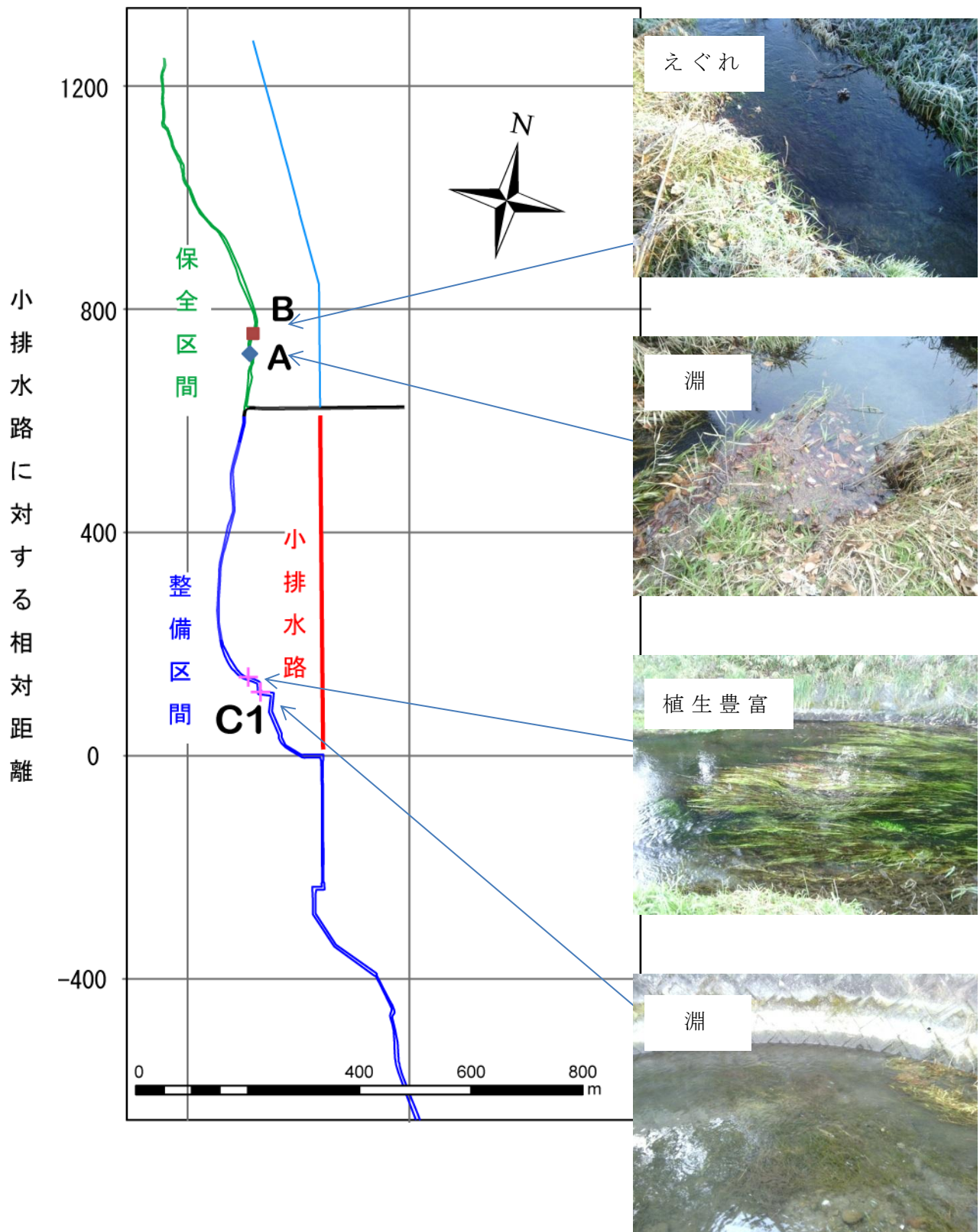


Fig. 5-5 越冬期の各個体の生息場所の分布と環境の特徴

れていた。

次に B の放流日は 12 月初旬で、直後から A が生息する 690m 付近に移動した。追跡調査開始時の 12 月 13 日に B はまだ上流 690m 付近に滞在していた。12 月 20 日に B の開始時の位置は前回よりも約 15m 上流に移動しており、終了時にはさらに 10m 上流に移動した。これと同様に、12 月 23 日と 28 日の調査日も開始時の位置は前回よりも上流に移行し、終了時には約 5m 移動していた。1 月 5 日に B の開始時の位置は前回よりもわずかに上流に移動し (2m)、終了時の位置はほぼ変わらなかった。1 月 10 日以降の B の位置は開始時と終了時は同じ位置 (上流 727m 付近) で固定された。このことから、1 月中旬以降 B は上流 727m 付近の位置に定住的に生息していたと考えられた。この環境の特徴として水深は比較的浅く (20 から 30cm)、河道の中央部はコカナダモが繁茂し、右岸側の法面は大型の植物によって覆われ、一部草体や根が水面や水中に張り出しており、えぐれていた。左岸側にえぐれは存在せず、法面は土が露出し、泥やコンクリートの破片 (長さ 30cm 以上) が散在していた。推定位置から B は右岸側のえぐれ中によく定位していることがわかった。

C1 の放流日は 2012 年 10 月で直後に A の生息場付近に移動し、後に下流に徐々に移動した。追跡調査開始時の C1 の位置は上流 105m 付近であり、1 月 27 日までほぼ同所に滞在していた。この期間の C1 の調査開始時まで位置はほぼ等しく、同所に定着し生活も完結していたと考えられた。C1 の生息した上流 105m 付近は整備済み区間であった。生息場所の特徴として、河道の中央部の底質は小礫や砂で占められナガエミクリが多く存在していた。右岸側はコンクリートによって護岸され植生は少なく、左岸側の法面は土羽で、水深は浅く底質は泥で占められ、張り出した植物が水面を覆っていた。この場所で C1 は流心のナガエミクリの中や、左岸側の浅い部分の泥底に定位していることがしばしば観察された。

C1 は 2 月 15 日に上流 105m 付近から約 20m 下流の 88m の地点に移動し、調査終了まで同所に滞在していた。上流 88m 付近の生息場所の特徴として、両岸ともコンクリートで護岸され、右岸側はほぼ直角に流路が曲がるため水深が深く淵を形成していた。全体的に植生はまばらで、左岸側は水深浅く底質は砂や小礫で植生はほぼ見られなかった。C1 はこの期間中、右岸側の水深の深い場所でよく観察された。

越冬期調査終了後の 3 月上旬に C1 は上記の場所に存在せず、約 600m 下流において C1 に装着した発信機のみ発見された。付近に魚体は発見されなかったものの、サギと思われる足跡が確認されたことから、C1 はサギに捕食されてしまった可能性が考えられた。ただし、サギの捕食が C1 の死亡原因なのか、死亡した C1 をサギが捕食したのかは定かではない。

本調査から谷川におけるナマズの越冬場所として、保全区間の自然に形成された淵やえぐれといった環境が利用されたことがわかった。越冬期の 24 時間調査において、A、B の生息場所付近では遊泳魚であるウグイ (*Tribolodon hakonensis*) やカワムツ、フナ属が開放水面の表層付近に群れで遊泳する様子

やドジョウが低層に定位する様子を度々観察している。これらの魚種の越冬期の選好環境として、水深やえぐれに正の相関が見られた（皆川ら，2010；永山ら，2012）。また，飯野（2005）によれば，河川中流域における魚類は一般的に温水性魚類であり，水温が低下すると遊泳能力は低下し，冬期は主として水際や水深の深い淵に生息することが多い。特に淵で採捕した7魚種のうちアブラハヤ（*Phynchocypris lagowskii*），ジュズカケハゼ（*Gymnogobius castaneus*），ドジョウ，シマドジョウ（*Cobitis biwae*）の4種は堆積した落葉中で確認されたことから，冬の生息場に対し落葉広葉樹の河畔林が重要であると示唆している。同様に落葉が堆積した深場は越冬場として重要であると西田ら（2009）は指摘しており，落葉や砂泥には，魚類が潜り込むことで流速などの影響を低減し，消費エネルギーを抑えることができ，また，同時に捕食者からの発見を避けることも可能であると推察している。これらの魚種は谷川において生息が確認されている魚種であり（守山，2009），河畔林は保全区間でもよくみられる。このことから，AやBが利用した保全区間の環境はナマズとともに小型魚類の越冬場としても機能し，同所的に存在する小型魚類を捕食しながらこれらの個体は越冬した可能性が考えられる。

これに対し整備区間では，第4章において，超音波テレメトリーを用いた追跡調査の結果，井桁護岸が施工された区間（以下，St. I，Fig.4-1）が成魚の越冬場所として機能した可能性が示された。しかし，本調査では，越冬期間中 St. Iにおいて装着個体が確認されたことはなかった。井桁護岸は圃場整備後に流路を付け替えた区間における水生生物の配慮のために施工された（高橋ら，2009）。このことから，整備区間には魚類の越冬場環境の存在が少なく，St. Iは井桁とともにヨシ帯が広がり，水深は比較的深いことから重要な越冬場として機能したと考えられる。実際に，4章では12月に St. Iに3個体が蟠集したことから，12月以降に多くのナマズが St. Iに越冬のために移動した可能性は高い。したがって，本調査で装着個体が St. Iにおいて確認されなかったことは，他個体との越冬場所をめぐる競争により排除された可能性が考えられた。実際に BやC1はAが越冬場所として利用した淵に滞在したが，短期間で他の場所に移ったことが確認されている。この淵の規模は小さいので（約3m四方），複数の個体が同所的に存在するほどの収容力はないのかもしれない。

冬期に越冬場を探索するために成魚が移動することは第4章で確認されている。また，超音波テレメトリーを用いて追跡した No.2はC1が利用したのと同じ場所（St. II，Fig.4-1）において長期間滞在していたが，12月に St. Iに移動して以降同所において越冬期間中滞在していた（Fig.4-4）。このことから，No.2およびC1が利用した環境は越冬場所として適していなかったため，越冬場所を探索するために移動した可能性が考えられた。

サクラマス幼魚（*Oncorhynchus masou*）は越冬に適した場所がある場合は移動しないが，近傍にない場合は河川内を広く移動し，死亡率増大の要因となることが推測されている（真山，1992）。越冬期における調査中，しばしばアオサギ（*Ardea cinerea*）が飛来し浅瀬で待ちぶせしている様子を観察している。Tojo

(1996)はサギ類の摂餌行動を観察したところ、ダイサギ(*Egretta alba modesta*)とアオサギの摂餌行動は水深 25-30cm の地点でも確認され、水深が増加するほど摂餌割合は低下することを示した。以上のことから、C1は越冬場の探索の最中に浅い場所を移動し、その時にサギ類に捕食されてしまったのかもしれない。

このことから、ナマズが越冬に適した場所の探索のために移動することはある程度リスクを伴う行為であり、整備区間において越冬環境が不足していることが原因と考えられた。ナマズの越冬期の行動や越冬環境に関する既往の知見は定性的であることが多く(田崎・金澤, 2001)、本研究で得られた知見も少ない。そのため、河川中流域における魚類の越冬環境の知見を基にナマズを含めた多様な魚類が越冬可能な環境を考察した。

皆川ら(2012)は畦畔木の根の張り出しや垂下した枝、えぐれなどの構造物によるカバーだけでなく、抽水植物帯の消失を防ぐことがドジョウやフナ属、メダカといった魚類の越冬環境保全に重要であると指摘した。飯野(2005)は護岸された水域では冬期における魚類の生息場を確保するために、蛇籠護岸のように水際の植物が繁茂できる護岸が望ましいと指摘した。土木研究所(2010)の報告によれば、夏期には石礫サイズが大きくなると遊泳魚が、小さくなると底生魚や甲殻類の占める割合が高くなる傾向が見られ、冬期には優占する魚種の傾向は不明瞭であったものの、生息量は低下せず石礫の間隙を越冬場として利用することが示唆された。皆川ら(2010)は、越冬場の造成する場所として、繁殖可能な一時的な水域と魚類が移動分散可能な範囲にすることで、親魚の体力の消耗を抑えるとともに繁殖効率を高める可能性があるとしている。

これらの知見を概観すると、水域および陸域を含む河岸の構造の重要性を示唆している。したがって、河岸を整備する際は、1) 河岸林(畦畔林)を保存もしくは配置する、2) 水際に抽水植物、大小様々な石礫を配置する、3) 繁殖場となる一時的な水域の近くに造成することで、ナマズを含めた多数の魚類の越冬および繁殖を保障すると考えられる。

・繁殖期の装着個体の生息環境

繁殖期における装着個体の生息場所の経時的变化を Fig.5-6 に、分布と環境を Fig.5-7 に示した。また、各装着個体の微環境タイプの利用可能性、利用頻度と選択性をそれぞれ、Table 5-2 と 5-3 に示した。各装着個体の未利用メッシュと利用メッシュの流速および水深をそれぞれ、Fig.5-8 と 5-9 に示した。

A および B は越冬期から継続して保全区間の越冬場所付近に生息し、繁殖期間中同所に滞在していた(A: 上流 694m, B: 上流 725m)。A の周辺メッシュの微環境タイプの特徴を推測すると、水際は植生が発達し、底質の種類は多様で、砂や小礫が優占しており、泥はわずかであった。これらの周辺メッシュのうち利用メッシュの微環境の特徴は、水際の植生が豊富で底質が泥であり、未利用メッシュと比べ流速は低く水深が深いことがわかった。B の周辺メッシュの環境は、水際は植生が発達し、底質は沈水植物が優占していた。

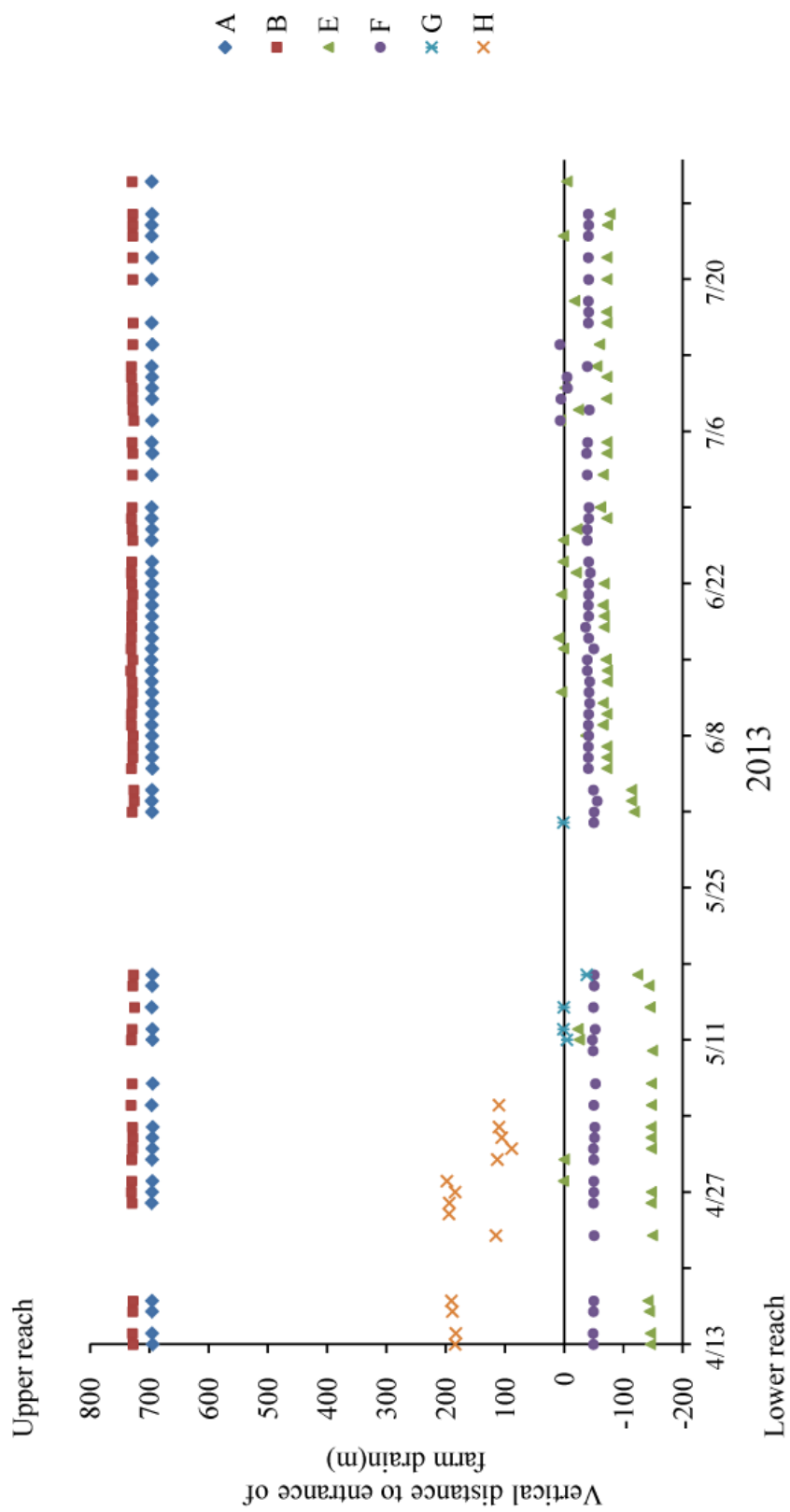


Fig. 5-6 繁殖期の各装着個体の谷川における滞在位置の時系列的変化

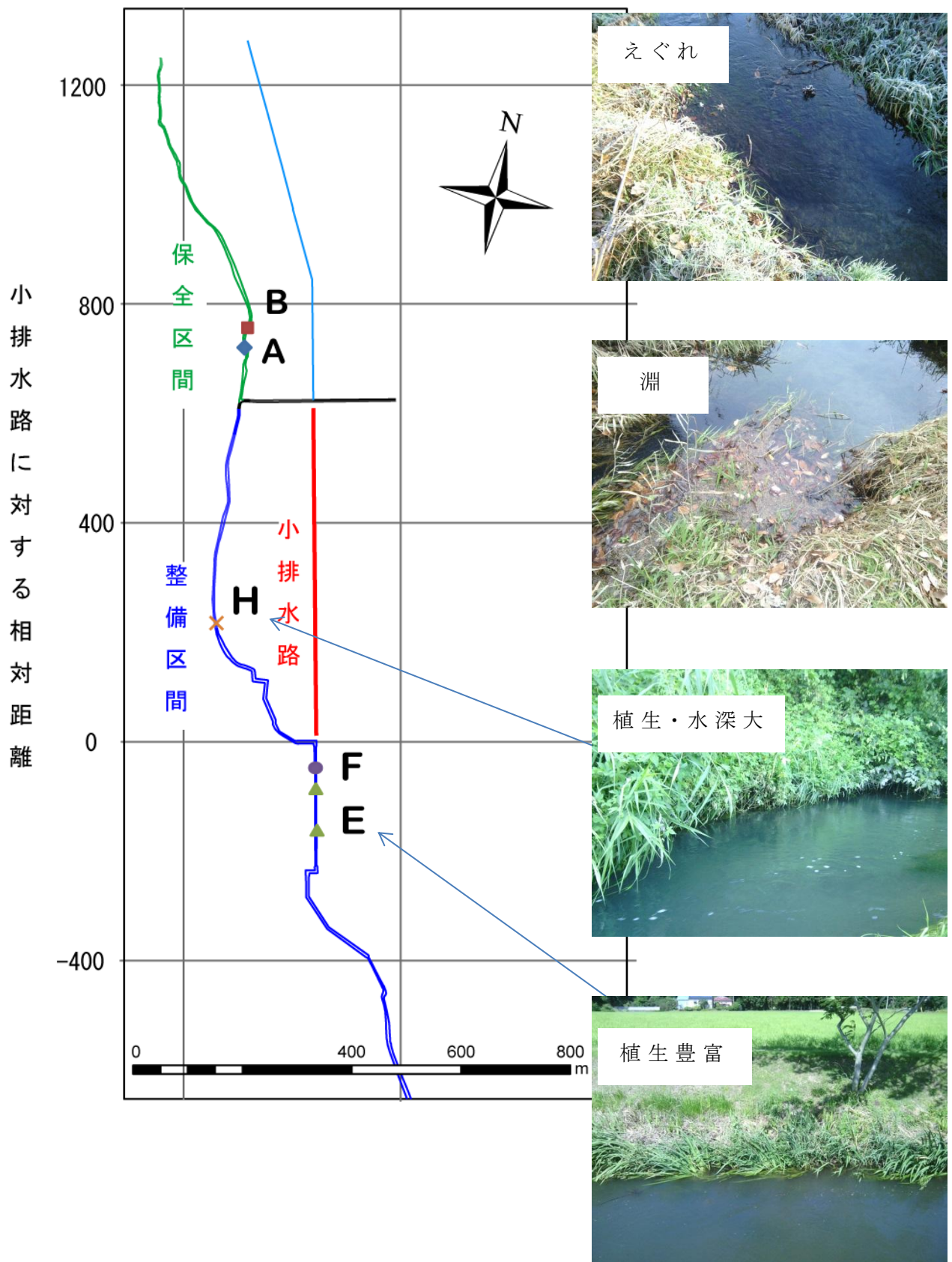


Fig. 5-7 繁殖期の各個体の分布と環境の特徴

B は流心部と植生のある水際を等しく利用し，底質はすべて沈水植物で，流速は比較的小さく，水深は深かった．

次に C2 から H は 4 月 10 日に各個体が採捕された場所の付近に放流した．放流直後から C2, D および G を見失い，繁殖期間中継続的に探索したものの，明確な生息環境を把握することができなかった．G は 5 月中旬の短期間のみ小排水路入り口で存在を確認したが，これ以降再び連続追跡により存在を確認することはできなかった．

H は放流直後から，上流 190m 付近で確認され，4 月 30 日から上流 110m 付近に移動したことを確認したものの，5 日後の 5 月 5 日を最後に見失った．H が利用した 190m 付近は左岸には井桁護岸が施工されているものの，泥が堆積し埋没化が進行している．右岸側には一部蛇籠が施工され，水際の植生および河畔林が発達し，水深は比較的深い（100cm 以上）．また，河畔林が発達しているために，日中でも薄暗い時間帯が長い．H の周辺メッシュの環境は，水際はすべて植生が占め，底質は砂，小礫，沈水植物および泥がほぼ等しく存在していた．H は植生の存在する水際部，底質は泥が優占し，流速は小さく水深の深いメッシュを利用した．

E と F は繁殖期間中，小排水路下流の区間において滞在したことを確認した．E は放流直後から約 1 ヶ月間下流 145m 地点に滞在し，度々小排水路入り口でも存在を確認している．6 月 1 日から 3 日まで下流 118m 地点において確認し，さらに 6 月 5 日から下流 72m 地点に移動し，調査終了まで長期間同所に滞在していた．F は放流直後から 6 月 3 日まで下流 50m 地点において長期間滞在していた．F は 6 月 5 日から下流 40m 地点に移動し調査終了まで同所に滞在しており，E と同じように期間中度々小排水路入り口に移動したことを確認している．E と F が長期間滞在していた区間の流路は直線状であり，環境の顕著な変化は見られなかったことから，資源の利用可能性はほぼ等しいと考えられた．この区間は比較的水深が深く水量が多く，流心部の大部分はコカナダモが密生し，部分的に砂礫底が見られた．河岸の法面に沿ってヨシや植栽されたキシノウブやアヤメ等の湿生植物が繁茂しカバー構造が形成されていた．また，水際には木杭が配置され，これより河岸側に玉石が配置された護岸が部分的に見られた．E および F の周辺メッシュの環境は，水際は植生が優占し，底質は沈水植物，小礫，大礫の順であった．E の利用した水際タイプは植生，自然護岸，流心の順に利用し，底質は沈水植物と大礫はほぼ同じ頻度で利用した．利用メッシュの流速は比較的小さく，水深は深かった．F は植生の存在する水際を利用し，底質は沈水植物，大礫，小礫の順に利用した．

流速の平均値を比較したところ，すべての個体について未利用メッシュよりも利用メッシュの方が低い傾向が見られた（Fig.5-8）．E および F の利用メッシュの流速は有意差が見られたが（Welch *t*-test, $p < 0.01$ ），A, B および H には有意差が見られなかった（ $p > 0.05$ ）．同様に水深を比較したところ，すべての個体について未利用メッシュと利用メッシュに有意差は見られなかった（Fig.5-9）．

Table 5-2 各装着個体の各微環境タイプの利用可能性

ID	水際タイプ			底質タイプ				沈水植物
	流心	植生	自然	泥	砂	小礫	大礫	
A	12	9	0	5	6	1	0	3
B	22	19	3	0	4	3	1	27
E	58	98	8	1	0	58	23	82
F	58	98	8	1	0	58	23	82
H	9	10	0	3	5	4	0	3

Table 5-3 各装着個体の各微環境タイプの利用度と資源選択性

ID	水際タイプ			底質タイプ				沈水植物
	流心	自然	植生	泥	砂	小礫	大礫	
A	0	0	59	59	0	0	0	0
B	31	0	31	0	0	0	0	62
E	7	12	38	1	0	16	15	19
F	5	0	58	0	0	0	24	37
H	0	0	21	14	7	0	0	0
選択指数 (有意性)	0.37 (-)	1.19 (n.s.)	1.53 (n.s.)	3.01 (+)	0.18 (-)	0.29 (-)	2.23 (+)	0.98 (n.s.)

- : 有意な忌避性, + : 有意な選好性, n.s. : 有意性なし

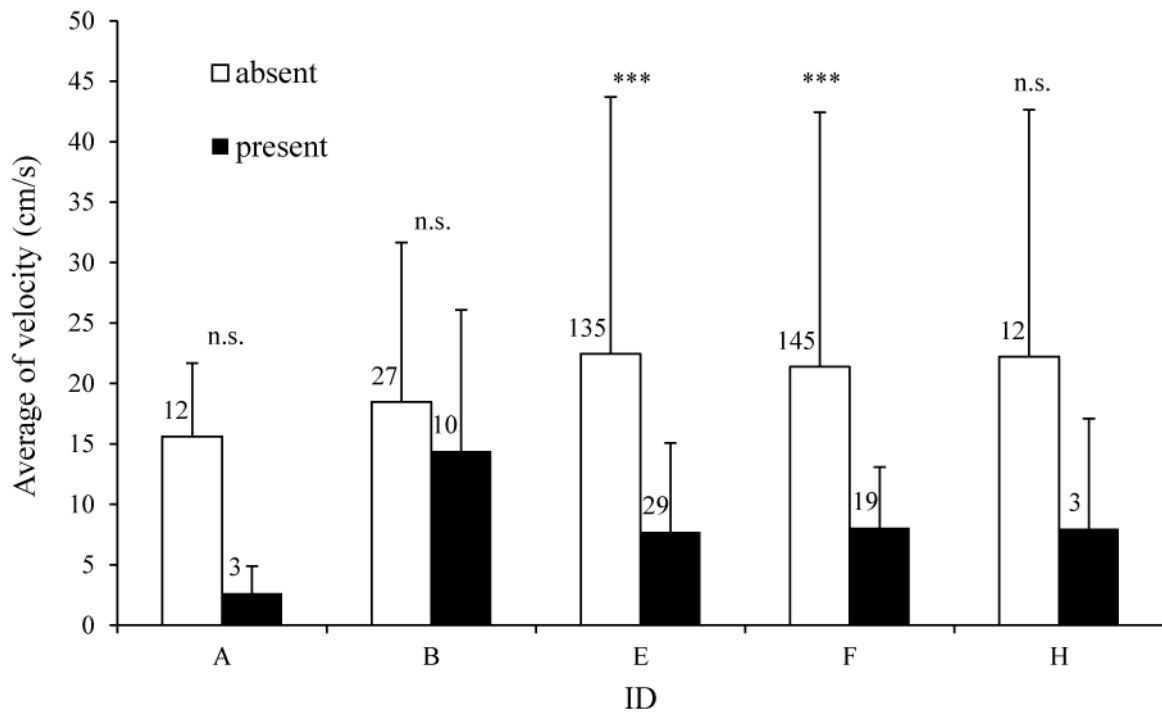


Fig. 5-8 装着個体の利用メッシュと未利用メッシュの流速の比較

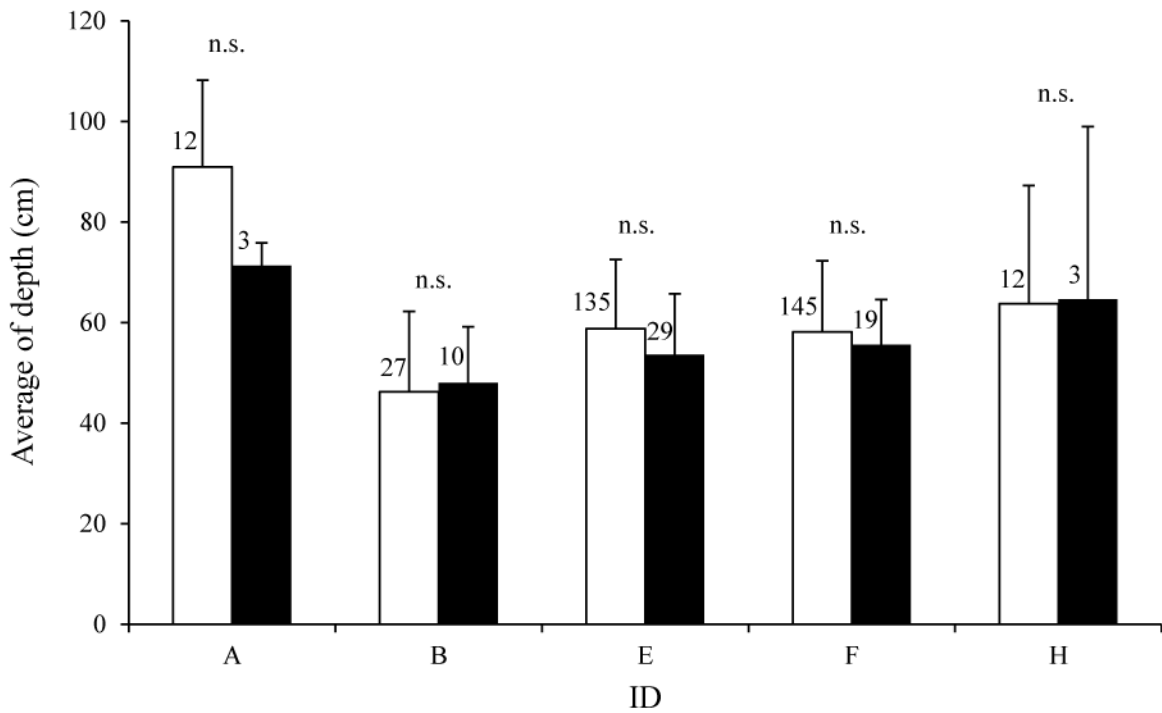


Fig. 5-9 装着個体の利用メッシュと未利用メッシュの水深の比較
 エラーバーは標準偏差，図中の数値はメッシュ数，n.sは両群の平均値に有意差がないこと，***は有意水準 0.001 で有意差があることを示す。

これらの個体を全体的にとらえた時，水際タイプと底質タイプはともに有意な資源選択性が見られた (χ^2 検定, $p < 0.01$)。個別の資源タイプの選択性をみると，流心部には有意な忌避性が見られ，自然，植生タイプの水際はともに有意性は見られなかったものの，選好性が見られた (Table 5-3)。底質タイプは，砂と小礫に有意な忌避性，大礫と泥に有意な選好性が見られ，沈水植物のみ有意性は見られなかったもののわずかに忌避性が見られた。

成魚は流心よりも水際を選択し，底質タイプに異なる選択性が見られたので，これらの流速および水深の平均値を比較した結果を Fig.5-10 と 5-11 に示した。ここで，水際とは自然護岸 ($n=11$) と植生タイプ ($n=140$) に分類されたメッシュを指す。流速および水深は忌避性があった流心の方が水際よりも有意に高かった (Welch t -test, $p < 0.001$)。次に，底質タイプの違いによる平均流速および平均水深を比較したところ，有意差が見られた (Kruskal-Wallis test, $p < 0.001$)。平均流速は忌避性があった小礫 ($27.9 \pm 18.4 \text{ cm/s}$) と砂 ($21.4 \pm 6.6 \text{ cm/s}$) に比べて，選好性のあった泥 ($5.5 \pm 14.1 \text{ cm/s}$) と大礫 ($12.5 \pm 14.1 \text{ cm/s}$) は小さかった。平均水深は砂が最も高く ($76.2 \pm 30.6 \text{ cm}$)，次いで小礫 ($68.4 \pm 9.6 \text{ cm/s}$) であり，最も低かったのは大礫 ($49.3 \pm 15.9 \text{ cm}$) であった。

第4章で用いた超音波テレメトリーでは，受信機を設置した場所において成魚がどのような環境を利用していたか定量的に把握することはできなかった。しかし，電波テレメトリーを用いた追跡調査によって繁殖期における成魚の微環境レベルでの選好性を初めて定量的に示すことができた。繁殖期間中に成魚が利用した環境は全体的に見れば，植生が存在する流速の小さい水際部，泥や大礫が存在する底質を選択していた。これに対し，成魚は流心，砂や小礫を忌避する傾向が見られた。

河川における魚類の水際の利用に関する研究は複数報告されている。例えば，萱場 (2008) は砂鉄川において水際を4タイプに分類し，7月，8月および10月に魚類を採捕し，水際タイプ別の生息密度と物理環境要因との関連を調べた。その結果，すべての時期を通じて流心よりも水際において魚類生息密度が高く，体サイズが30から50mmの当歳魚は7月に水際に多く生息し，季節が推移すると当歳魚は減少した。流心では体長50mm以上の個体が多く採捕され，水際よりも著しく流速が大きいことがわかった。水際タイプ別の生息密度を比較すると植被が全く見られない裸地タイプが最も低く，河岸が庇状に張り出し（えぐれ）草本植物が繁茂しているタイプ，河岸がえぐれ，河畔林の一部が水没しているタイプが高かった。このことから，水際に繁茂する草本やえぐれによって形成される低流速域，低照度域が遊泳魚の生息環境を提供したと考えられた。

以上の知見をまとめると，水際域は1) 流心部に比べ流速は小さい，2) 繁茂した草本は遮光空間を提供する，3) 遊泳力の低い当歳魚の流速回避場として機能する。1) および2) に関しては，谷川における測定，観察結果とも一致する (Fig.5-10)。3) に関しては，種は特定できなかったが，仔稚魚が水際で群れて遊泳する様子を度々観察している。大高・須永 (1992) はカワムツの仔魚の大群が岸辺の草むらの中の流れの緩やかな場所で観察されたと報告しているこ

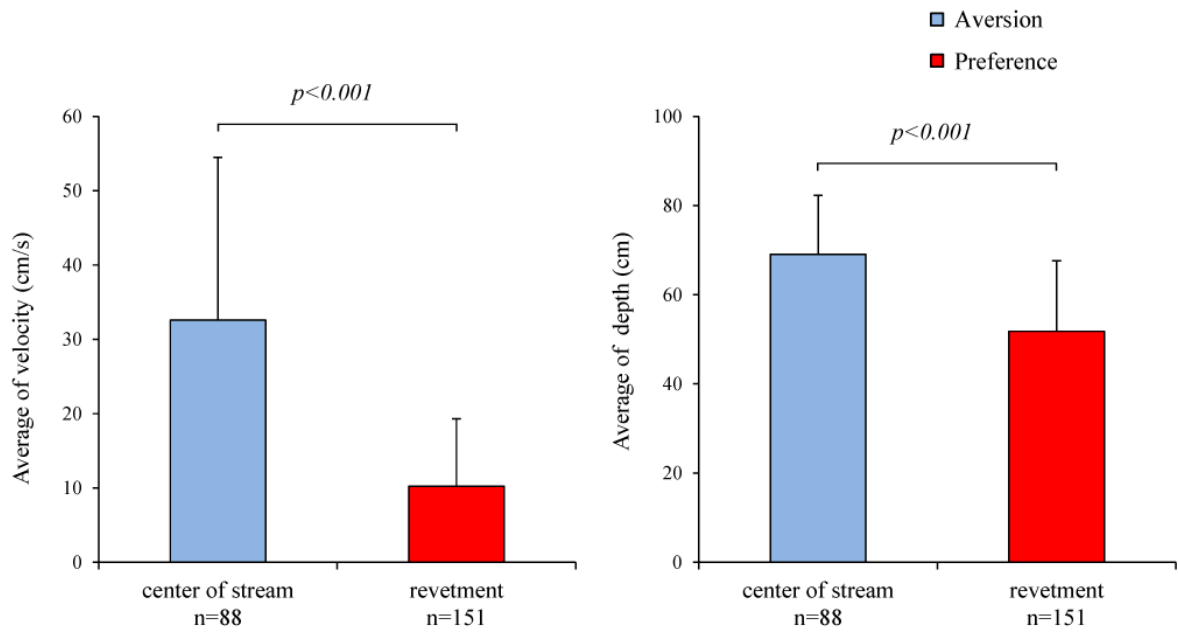


Fig. 5-10 水際と流心の流速（左）および水深（右）の比較

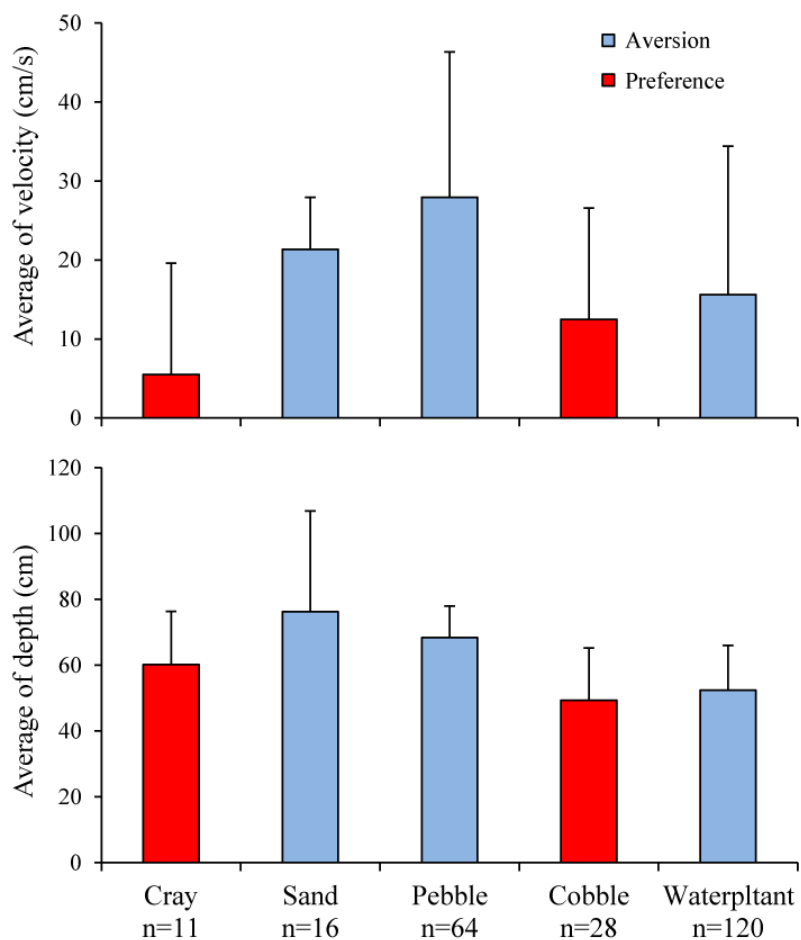


Fig. 5-11 各底質タイプの流速（上）と水深（下）の比較
エラーバーは標準偏差を示す。

とから、おそらく水際に多く見られた仔稚魚の大半はカワムツであると考えられる。このことは、谷川における優占する遊泳魚はカワムツであることから支持される。流心の平均流速は水際よりも約3倍高いことから（流心： $32.6 \pm 21.9 \text{ cm/s}$ 、水際 $10.2 \pm 9.1 \text{ cm/s}$ ）、遊泳力の低い魚類は水際に集まった可能性が高い。このことから、成魚が流心を忌避し水際を選択的に利用した要因として、餌となる小型魚の存在や流速の回避、植生による遮光が挙げられ、採餌場かつ休息場として機能した可能性がある。

底質タイプは泥および大礫に有意な選好性が見られ、これらの底質を確認したメッシュの流速は比較的小さい値を示した（Fig.5-11）。既往の知見によれば、ナマズは流れの緩やかな泥底部や砂泥底部に生息し、特にヨシなどの水草の繁茂した水域や岩の間隙など、隠れ場所や体の寄せることのできる場所を好むとされ（友田，1962，小原，1987）、本研究の結果と一致した。忌避性が見られた砂、小礫および沈水植物の平均流速は、選好性が見られた泥と大礫に比べて高かった（Fig.5-11）。また、砂や小礫はナマズが身を隠すことが困難であると考えられること、底質を優占する沈水植物であるコカナダモも隠れ家環境として適さなかった可能性が考えられる。

過去の谷川における魚類採捕調査の結果からナマズの分布を推測した結果、EおよびFが生息した小排水路より下流の流路が直線の区間（以下、直線区間）に集中的に分布していることがわかっている（Fig.1-6）。直線区間は他の区間に比べて大礫が多く存在しており、EとFはよく利用していた（Table 5-3）。この区間の水際には木杭が約30cm間隔で配置され、これより河岸側に大礫が配置された護岸が部分的に見られた。

萱場・佐川（2009）は実験河川において水際域に設置した木杭による生息場所修復効果を実験するために、木杭の配置間隔を変えたことによる物理環境と生息魚類の影響を調べた。その結果、木杭を密に配置するほうが低流速域の面積を広げ魚類の定位場所として機能し、木杭を配置しない場合と比べて生息数が増えることを明らかにした。直線区間は水際部の植生は発達し、木杭と大礫が配置されていたことから、低流速域や遮光空間が形成されナマズにとって良好な生息環境を提供していたと考えられた。

5.3.2 越冬期と繁殖期の行動特性

Slavik et al. (2007) はヨーロッパオオナマズの成魚および幼魚の河川における行動特性を把握するためにラジオテレメトリーを適用し，行動特性の評価指標として“活動量”を3時間間隔で測定した前後2点の位置間の距離と定義した．この活動量を4つの時間帯（薄暮，夜間，薄明，昼間）で求め，季節や成長段階で比較し，ヨーロッパオオナマズの行動特性を評価した．そこで，本研究もこの活動量を評価指標として用いることとした．

越冬期は12月から2月にかけて3個体を追跡した (Table 5-1)．各調査日の各個体の1日あたりの合計活動量の変化を Fig.5-12 に示した．各個体の合計活動量は12月13日から20日にかけて最も高く，C1の変動は大きかったものの1月中旬にかけて徐々に減少する傾向が見られた．その後，個体により差はあるものの2月末にかけて徐々に増加する傾向が見られた．3個体のうち最も合計活動量が高かったのが，C1 ($15.2 \pm 8.2\text{m}$)，次いで，A ($10.3 \pm 3.2\text{m}$)，B ($9.1 \pm 7.8\text{m}$) であった．これらの個体の1日あたりの活動量に有意差は見られなかった (Kruskal-Wallis test, $p > 0.05$)．

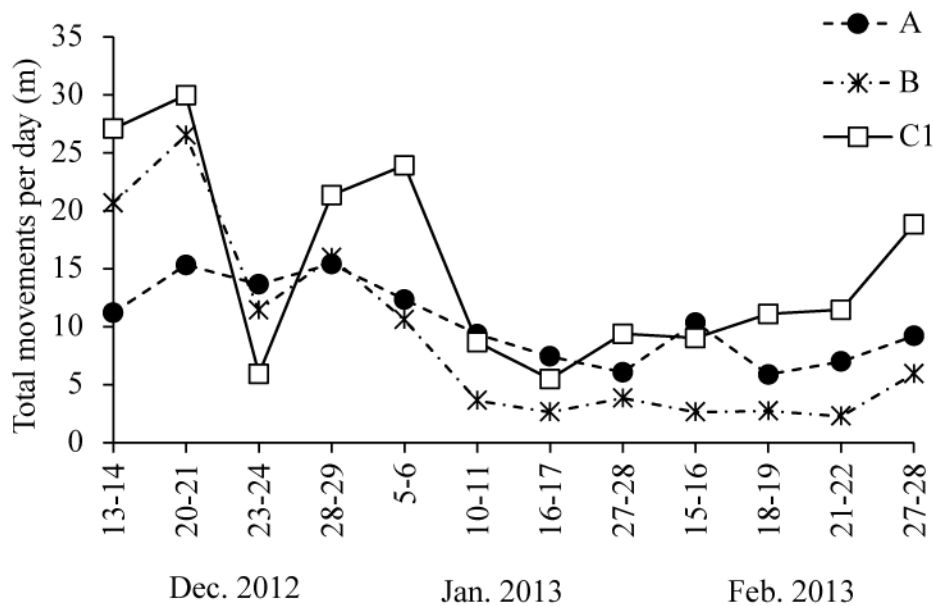


Fig. 5-12 越冬期の1日あたりの活動量の経時的変化

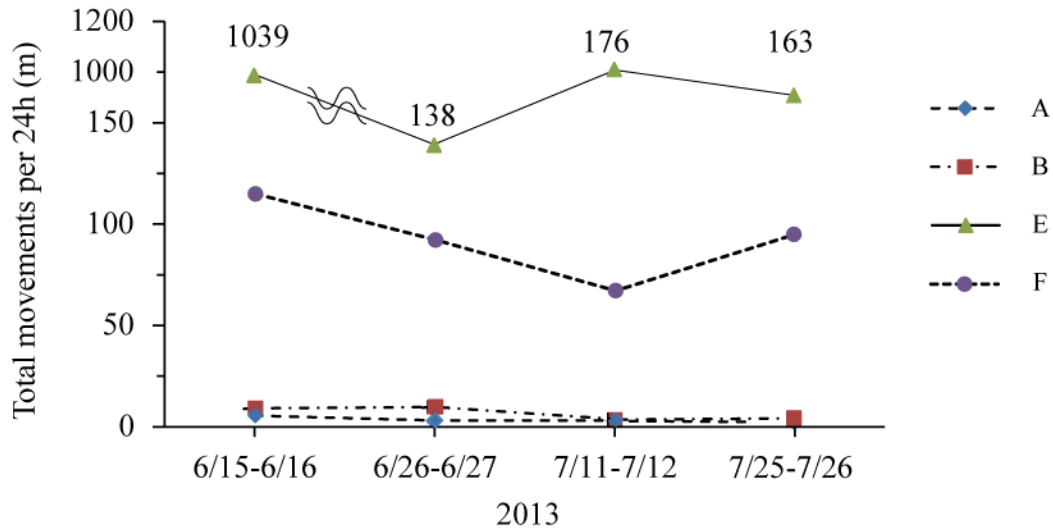


Fig. 5-13 繁殖期の1日あたりの活動量の経時的変化

繁殖期は A および B を含む 8 個体を追跡した (Table 5-1). これらの個体の中で 24 時間追跡の対象とされたのは A, B, E および F の個体であった. 各調査日の各個体の 1 日あたりの合計活動量の変化を Fig.5-13 に示した. A および B の活動量はいずれも低く推移した (2.5~9.7m). これに対し, E および F の活動量は高く (67~1039m), 調査日によって大きく変動した. 6 月 15 日から 16 日にかけて E と F の 1 日あたり活動量はそれぞれ 1039m と 114m でともに期間中の最大値であった. 4 個体のうち最も 1 日あたりの合計活動量が高かったのが F ($310.8 \pm 367.6m$), 次いで E ($75.4 \pm 37.0m$), B ($6.4 \pm 2.5m$) および A ($4.0 \pm 1.4m$) であり, 有意差が見られた (Kruskal-Wallis test, $p < 0.01$).

越冬期である谷川の平均水温は 12 月が $6.9 \pm 2.0^\circ C$ ($3.4 - 10.1^\circ C$), 1 月が $4.7 \pm 1.0^\circ C$ ($3.2 - 6.6^\circ C$), 2 月が $4.9 \pm 0.8^\circ C$ ($3.1 - 7.0^\circ C$) であった. 越冬期の各個体の 1 日あたりの活動量と各調査日の谷川の水温の関係を Fig.5-14 に示した. この結果, 1 日あたりの活動量と谷川の水温の直線回帰式 $y = 3.38x + 6.61$ を得た. 決定係数 R^2 は 0.34 で有意性が認められた ($p < 0.05$).

繁殖期である 6 月と 7 月の谷川の平均水温はそれぞれ, $15.9 \pm 0.9^\circ C$ ($15.9 - 20.5^\circ C$), $18.3 \pm 1.1^\circ C$ ($16.7 - 20.8^\circ C$) であった. 同様に水温と 1 日あたりの活動量の関係性を検定したところ, 有意な相関性は認められなかった ($p > 0.05$).

魚類は変温動物であるため, その体温は環境水温とほぼ等しく, 生命現象は水温の影響を強く受ける (板沢, 1991). 実際に冬期に魚類が水温の低い環境よりも高い環境に移動する例は複数報告されている (例えばホトケドジョウ, 勝呂, 2005; 守山ら, 2007). Brown et al. (2001) は電波発信機を装着したブラウトラウト (*Salmo trutta*), ホワイトサッカー (*Catostomus commersoni*), コイ (*Cyprinus carpio*) を 3 年間にわたり冬期 (12 月から 4 月) の移動および生

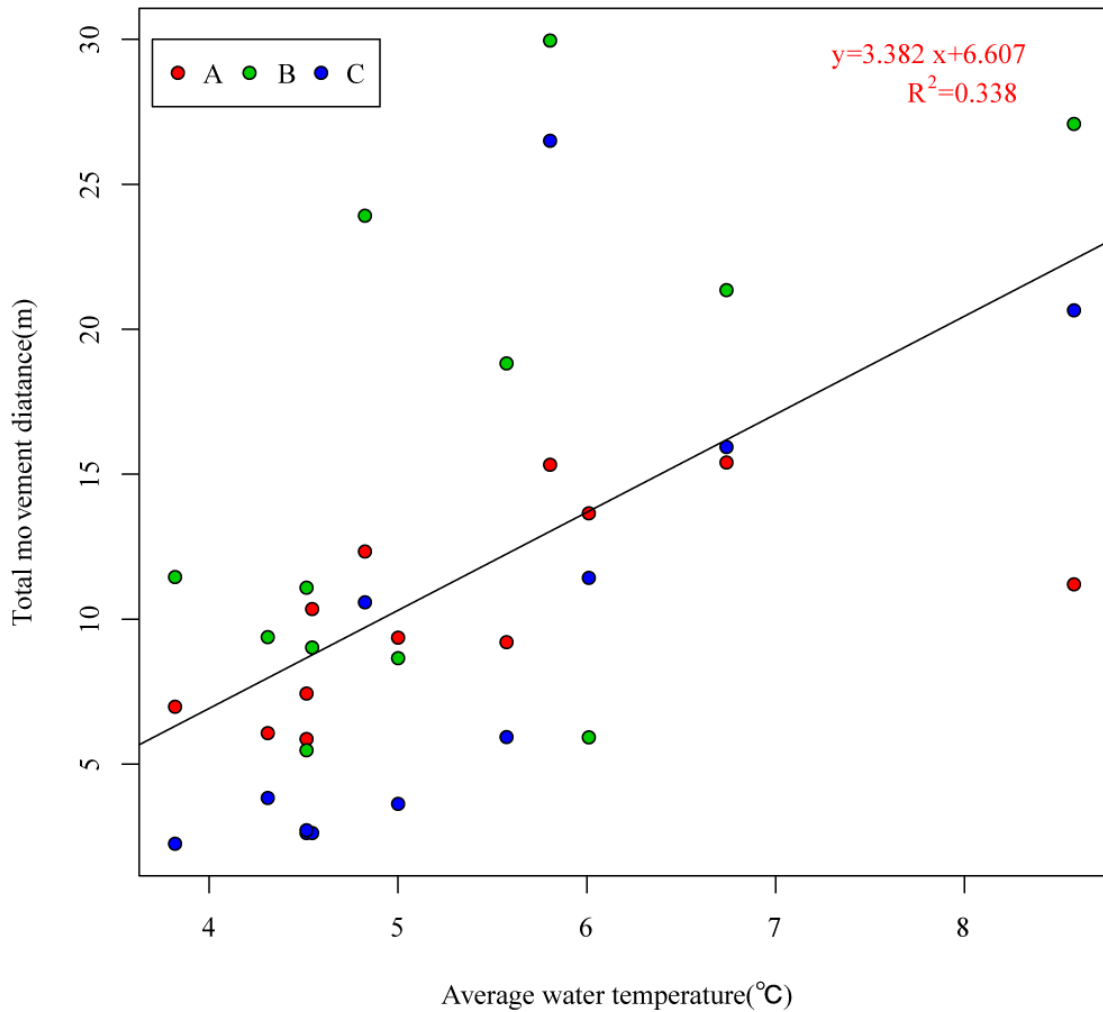


Fig. 5-14 冬期の活動量と平均水温の関係

息場所を追跡調査した。その結果，これら3魚種の1週間の合計移動距離と水温の間に有意な相関は見られなかったものの，流量と有意な正の相関が見られた。同様にヨーロッパオオナマズでは水温と活動量は正の相関関係が見られ，冬期と夏期の活動量と流量はそれぞれ，負と正の相関が見られた (Slavik et al.2007)。

越冬期と繁殖期の各時間帯における平均活動量の Fig.5-15 に示した。越冬期の活動量は日中が最も高く ($2.6 \pm 3.0m$)，次いで夜間 ($2.0 \pm 1.3m$)，薄暮 ($1.6 \pm 1.7m$)，薄明の時間帯 ($1.2 \pm 1.3m$) の順番であり，全体的に低い傾向を示した。また，薄明期の平均活動量は夜間および昼間よりも有意に低く (Steel-Dwass test, $p < 0.05$)，薄暮期との間には差は認められなかった ($p > 0.05$)。繁殖期の活動量は夜間が最も高く ($36.4 \pm 95.4m$)，次いで薄暮 ($20.6 \pm 65.5m$)，薄明 ($16.6 \pm 28.8m$)，昼間 ($5.2 \pm 11.6m$) の順番であった。昼間を除いた時間帯の活動量

は 10m 以上と高い値を示した。平均活動量は各時間帯の間に有意差は見られなかった (Steel-Dwass test, $p>0.05$)。

これまで、電波テレメトリーを適用し、肉食性魚類の季節的な行動特性を比較した事例は多い。例えば, Horky et al. (2006) はパイクパーチ (*Sander lucioperca*) に電波発信機を装着し、河川において追跡し昼間の移動距離の季節変化を調べたところ、冬期に最大値を示し、他の季節との間に有意差が認められた。この結果は、冬期に餌となる小型魚類が減少し、摂餌のために日中活動的であったと指摘した。Kobler et al. (2008) はノーザンパイク (*Esox lucius*) に電波発信機を装着し小規模な湖において夏期と冬期の移動と生息地の選択性を調べた。その結果、冬期の移動距離は比較的 low、昼間の時間帯が最も高くばらつきは小さかった。これは、冬期にパイクの餌生物の活動性は低下し、岸边に定位することが多いため、パイクも移動距離が低かったと指摘した。これに対し夏期の移動距離は増加し、薄明薄暮期に高い値を示し、ばらつきが大きかった。これは、パイクは摂餌機会を増やすため、岸边に植生帯に避難した餌生物を探索するために移動したと指摘した。

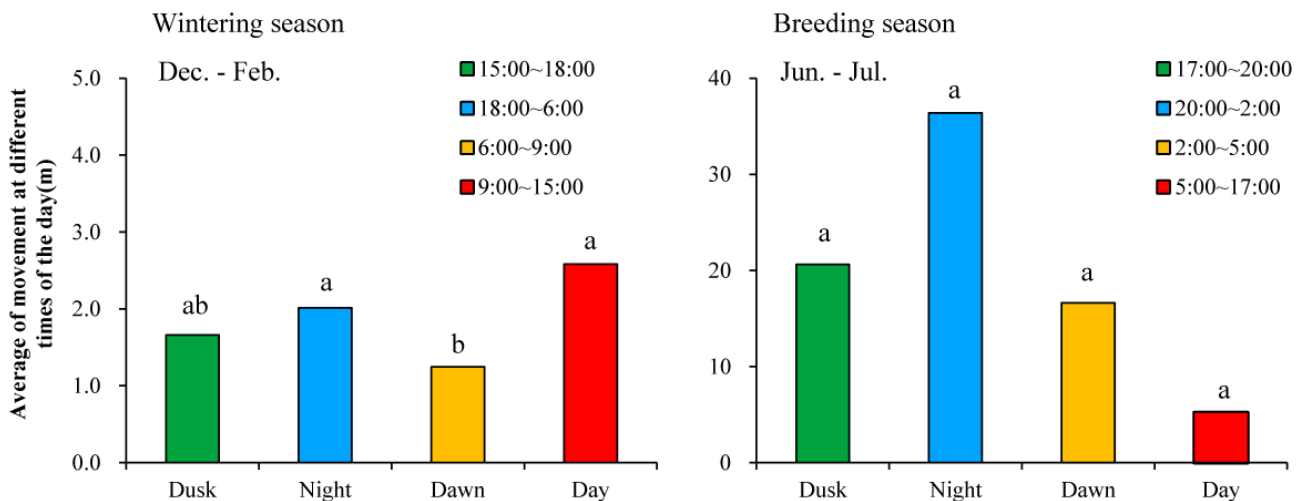


Fig. 5-15 越冬期と繁殖期の各時間帯における活動量の平均値

ナマズの仲間でも季節的な活動性について複数報告されている。Slavik et al. (2007) がヨーロッパオオナマズでは厳密な夜行性活動は秋期にのみ見られ、春期と冬期は日中に最も活動していた。夏期には活動量は最大になり、各時間帯の差異がなかった（活動していた）ことが示された。また、水温と流量が行動圏面積におよぼす影響を検討したところ、夏期の高水温高流量時に最大になり、冬期の低水温高水量時に行動圏面積が最小になった。前者は増水時に餌生物の利用可能性が増え探餌の移動が増えたこと、後者はエネルギーコスト減らすための反応であると考えられた。

本調査で、電波テレメトリーによって越冬期の昼間と夜間に成魚の活動量が高かったことが示された。第4章の超音波テレメトリーでも冬期に昼夜活動していた可能性が示唆されている（Fig.4-6, Fig.4-7）。これらのことから既往の知見（田崎・金澤, 2001）と異なり、冬期にナマズは昼夜問わず活動的であることが示唆された。これはすでに述べたとおり、水温に影響された可能性が高い。しかし、複数の研究で季節的な魚類の活動性の変化に関連する要因として水温以外に流量や餌生物との関係が示唆されている。本研究ではこれらの要因についてデータを収集していない。谷川は西下ヶ橋用水堰により流量が調節される農業用小河川であることから、非灌漑期である冬期の流入量は低く制限される。同様に谷川の水源に湧水も含まれるが、冬期の湧水量は極めて低い。このことから、越冬期の流量は低く推移し、ナマズの活動量に与える影響は少ないと考えられる。また、谷川におけるナマズの餌生物の構成や摂餌行動についてわかっていない。越冬期の24時間調査において、夜間よりも昼間に遊泳魚であるウグイやカワムツが開放水面に出て群れで遊泳する様子を度々観察している。したがって、成魚がこれらの魚を捕食するために昼間に活動した可能性も考えられる。今後はナマズが捕食する餌生物の構成を季節的に調査し定量的に評価することで、活動特性への影響を検討する必要がある。

5.4 小括

本章の結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 越冬期の活動性は低く水温と正の相関が見られ、一日の時間帯の中で昼間に最も活動的であった。これは、餌魚を捕食するための行動であると考えられた。
- 2) 越冬期に2個体は保全区間の自然に形成された淵やえぐれを利用し、1個体は整備済み区間の環境を利用した。このうち1個体は越冬場所を探索したために死亡したと考えられた。したがって、ナマズの環境収容力を考慮した越冬環境を整備済み区間に施工することが保全上重要であると考えられる。
- 3) 保全区間の河畔林や淵の存在はナマズを含めた多くの魚類にとって越冬環境を提供したと考えられた。
- 4) 繁殖期の活動性は高く水温と有意な相関は見られなかった。一日の時間帯の中で夜間が最も活動的であり、昼間はほとんど活動しなかった。
- 5) 繁殖期に成魚は水際の流速が小さく、身を隠せる泥や大礫を有意に選好した。

第6章 成魚の繁殖期における小排水路への侵入と遡上

6.1 目的

2章では、小排水路における稚魚および卵の採捕結果から成魚の繁殖行動を推察した。しかし、実際の成魚の繁殖行動を正確に把握したとは言いがたい。

既往の知見では、水田水域における繁殖行動に着目した研究は複数存在するものの（片野ら，1988；斉藤ら，1988；湯浅・土肥，1989；Maehata，2002；中村・尾田，2003；Maehata，2007；舟尾・沢田，2013），生息水域から繁殖水域までどのように移動するのか詳細に報告した例は見られない。また，繁殖移動（河川と繁殖場所との間の移動）の経路や頻度，産卵に発展する条件といった知見は本種を効果的に保全する際に必要であると考えられる。そこで，電波テレメトリーを適用し，本種の繁殖移動を解明することを目的とした。これまでの調査から，繁殖移動の経路は谷川から小排水路入り口（①），小排水路入り口から第1落差（②），第1落差から上流区間（③）であると考えられ（Fig.6-1），電波テレメトリーおよび赤外線カメラを用いた3つの手法を適用した。

- 1) 繁殖期間中，谷川における各個体の生息場所から小排水路までの移動（繁殖移動）の傾向を携行型レーザーを用いて把握する（連続追跡，24時間追跡）。
- 2) 既往の知見ではナマズの繁殖移動が行われる時間帯は夜間で，降雨日に頻繁に観察されると報告されている（片野ら，1988，Maehata，2007）。連続追跡では夜間に小排水路に侵入する個体の存在を把握しきれないので，小排水路の第1落差に到達する装着個体の数とタイミングを固定型レーザーで把握するとともに，侵入に関わる水理・水質パラメーターを推定する（固定型レーザーによるモニタリング，水理・水質データの計測）。
- 3) 小排水路での産卵は上流区間で行われると考えられるが，第1落差は小排水路に存在する落差工の中で最も落差が大きいことから，ナマズの繁殖に負の影響をおよぼす可能性が高い。そこで，第1落差を遡上することが産卵へと発展するか確認するために，第1落差において赤外線カメラで遡上行動を観察し，その後水路全域において卵の存在を確認する（赤外線カメラによる遡上行動の解析）。



Fig. 6-1 想定されるナマズの繁殖移動の経路

6.2 調査方法

6.2.1 携行型レシーバーによる連続追跡および24時間追跡

第5章で示した携行型レシーバーを用いた連続追跡および24時間追跡により、各個体の繁殖期間中の生息場所から小排水路への移動を把握した。

6.2.2 固定型レシーバーによる装着個体の小排水路侵入のモニタリング

各装着個体が小排水路にどれだけの頻度で、どのようなタイミングで侵入するのか把握するために固定型レシーバー（Alinco, DJ-X11）によるモニタリングを2013年5月から7月にかけて実施した。

固定型レシーバーは1分毎にAからHの発信機やその他の周波数を順番に変調するように設定した（Fig.6-2）。装着個体が第1落差に接近した時、その周波数の信号がレシーバーに接続したICレコーダー（Olympus, V-803）に録音される。使用したこれらの器具をPhoto6-1に示した。録音された音源をパソコン上で波形編集ソフトmp3DirectCut（<http://mpesch3.de1.cc/>、確認日：2013/11/11）により可視化し、発信機に特有の波形（Fig.6-3）を検出し基準となる周波数（FMラジオ）からの時間差により個体を識別した。この固定型レシーバーは小排水路の第1落差に設置した。調査はできるかぎり毎日17時頃から翌朝5時頃まで12時間実施した。

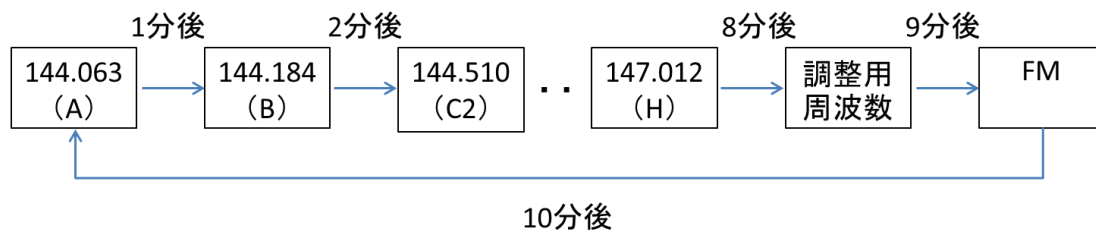


Fig. 6-2 固定型レシーバーの周波数設定の模式図

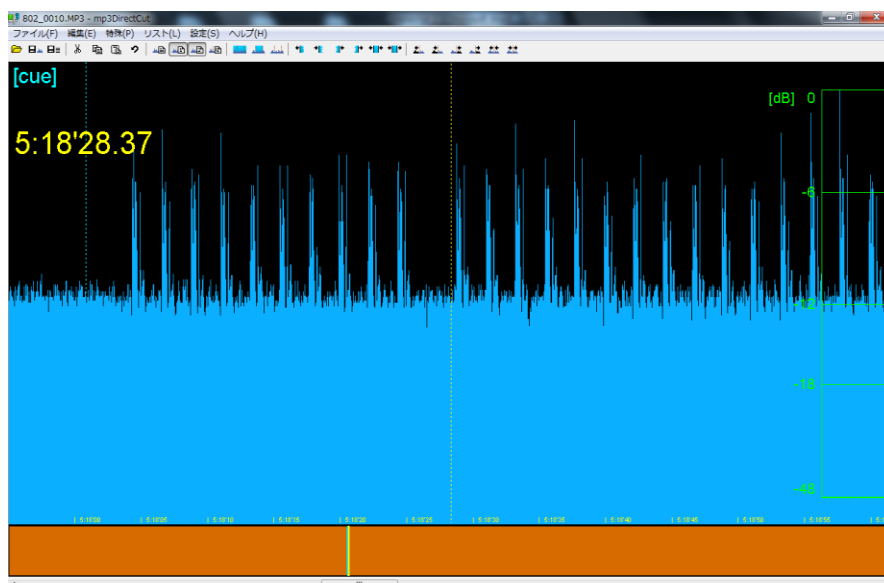


Fig. 6-3 固定型レシーバーによって記録された信号の可視化



Photo 6-1 固定型レシーバーと接続された IC レコーダー

6.2.3 赤外線カメラによる遡上行動の解析

第2章で考察したように、成魚が第1落差を遡上し上流区間まで到達できるかどうかということが繁殖の成否に影響すると考えられる。そこで、第1落差を成魚がどれだけの頻度で、どのようなタイミングで遡上するのか把握するために赤外線カメラによる遡上行動の解析を2013年5月から7月にかけて実施した。また、実際に成魚が遡上後に水路内で産卵も行ったかどうかも同時に把握した。

赤外線カメラ（塚本無線，WATER-12IR）は単体では映像を記録できないので、記録用のカメラ（Victor，GZ-MG740）を接続し内蔵HDに記録した。落差部および魚道の上部を視野に収めるように俯瞰する形で赤外線カメラを第1落差設置した（Photo6-2）。このカメラは照度によって自動で撮影モードが切り替わり夜間は白黒，日中はカラーで撮影される。この赤外線カメラは小排水路の第1落差に設置した。調査はできるかぎり毎日17時頃から翌朝5時頃まで12時間実施した。

撮影した映像をすべて視聴し、成魚の遡上数、時刻およびその状況を記録した。成魚の遡上が確認された場合は、ただちに小排水路全域においてタモ網を用いて卵の存在を確認した。



Photo 6-2 第1落差に設置した魚道および赤外線カメラ

6.2.4 谷川および小排水路の水理・水質データの計測

灌漑期の小排水路および谷川の水質の変化を把握するために、定期的に水質を測定した。同様に水理データも継続的に測定した。水温および水質の測定は第2章「継続的な水質測定」に準拠した。水理要素として水位と降雨量データを収集した。谷川の水位は水位ロガー（onset, U22-001）により10分に1回の頻度で連続的に自動測定した（Table 2-2）。水位ロガーの設置場所は谷川と小排水路の接続部とした（Fig.2-4, 谷川 A）。降雨量は調査地近傍の高根沢町の観測データ（気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 確認日：2013/3/31）を参照した。2013年5月1日から7月31日まで測定期間とした。

6.2.5 統計解析

成魚の小排水路への侵入に影響する水理・水質要因を明らかにするために、1日の装着個体の出現数を目的変数、水理・水質要因を説明変数とした一般化線形モデルによる解析を行った。投入した説明変数は水理的要素として1日の降雨量、降雨の有無、21時の谷川の水位および谷川の最大水位、水質的要素として21時の小排水路の水温、小排水路の最大水温、谷川の最大水温、pH、DO、ECおよび濁度とした。舟尾・沢田（2013）の調査により、繁殖場所に成魚が最も出現した時間帯は20時から22時までであったことから、これの中間の21時の水温および水位を説明変数に加えた。

はじめに多重共線性を避けるために、各独立変数間で Spearman の順位相関係数を調べ、強い相関 ($|r| > 0.7$) が認められた変数の組み合わせは一方の変数を解析から除外した（山本・千賀, 2012）。また、VIFも計算し10以上ある変数は除外した。目的変数がカウントデータであるため、誤差分布はポアソン分布、リンク関数は log と指定した。モデル選択には AIC（赤池情報基準量）を基準とし、最も低い AIC を示したモデルをベストモデルとした（綱川ら, 2012）。解析にあたり欠損値のあるデータは除外した。

なお、各種の統計的検定には R version 2.14.2（R Development Core Team）を用いた。GLM の推定には stats パッケージの glm 関数を用い、モデル選択には MuMIn パッケージの dredge 関数を用いた。

6.3 結果および考察

6.3.1 繁殖移動のパターン

繁殖期に実施した連続追跡の結果を Fig.6-4 (再掲) と Table 6-1 に示した。A と B は小排水路より上流 700m 付近に生息し，繁殖期間中同所から長距離移動しなかった (A : 35.6m, B : 73.96m)。G および H は短期間しか追跡できなかつたので，移動の特徴を把握できなかつたものの，H は E の次に合計移動距離が長かつた (419.1m)。E と F は小排水路より下流の区間に滞在し，それぞれ最大移動距離は 151.12m と 49.38m で，合計移動距離は 2042.06m と 416.86m であつた。第 5 章で述べたように E と F はそれぞれ，明確な生息場所をと持ち (E : 下流 145m と 118m 地点，F : 下流 50m と 40m 地点)，そこから 10 回と 5 回小排水路付近 (10m 以内) に移動したことが確認され，両個体とも小排水路に移動した後，2 日以内に生息場所付近に移動したことがわかつた。このような E と F の生息場所と小排水路間の移動は繁殖移動であると考えられた。

この E と F を 24 時間追跡した結果を Fig.6-5 に示した。初回の調査日である 6 月 15 日は 18 時頃から強い雨が降り始め，1 日合計雨量は 52.5mm であつた。この時，谷川および小排水路の水位は時間とともに徐々に増加し，小排水路入り口の水位は最大 92cm に達した。E は 17 時に下流 70m 地点で確認され，次に 0 時 06 分に小排水路内 224m の地点に移動していた (Fig.6-4 では，便宜上 23 時にプロット)。しかし，水の濁りのため，個体を目視で確認できなかつた。さらに 2 時 40 分には約 200m 上流の 430m 地点で確認され，5 時 40 分には小排水路入り口付近まで降下移動し，6 時間後の昼間の 11 時 30 分に小排水路の第 1 落差で確認された。これにより装着個体が小排水路の落差工を遡上し上流区間に到達できることが初めて観察され，この日の E の合計移動距離は 1039m であつた。同日，F は 17 時に下流 39m 地点で確認され，日没後の 20 時には小排水路入り口付近に移動し，2 時まで同所に滞在していた。日出後の 5 時には下流 43m の地点に移動し，以降小排水路に近づくことはなかつた。この調査日に F が小排水路上流区間に到達したことは確認できなかつた。F の合計移動距離は 114.8m であつた。

Table 6-1 繁殖期における連続追跡の結果

ID	Number of location	Max movement distance(m)	Total movement distance(m)	Average movement distance(m)	
				mean	sd
A	61	2.69	35.60	0.58	0.49
B	61	4.12	73.96	1.21	1.02
E	65	151.12	2042.06	31.42	39.50
F	66	49.38	416.86	6.32	12.89
G	4	39.69	87.13	21.78	20.57
H	15	99.92	419.10	27.94	37.44

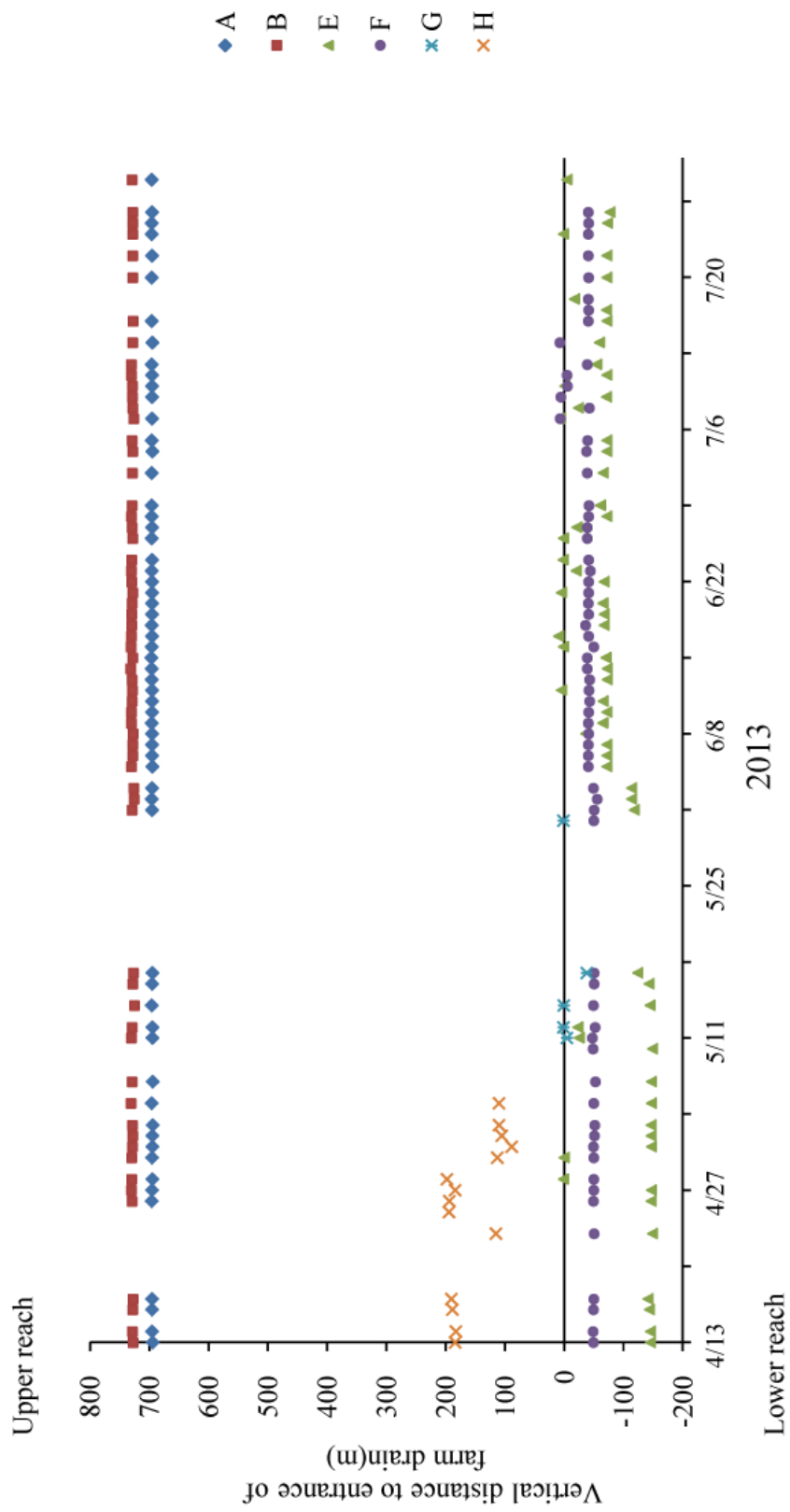


Fig. 6-4 繁殖期の各装着個体の谷川における滞在位置の時系列的変化

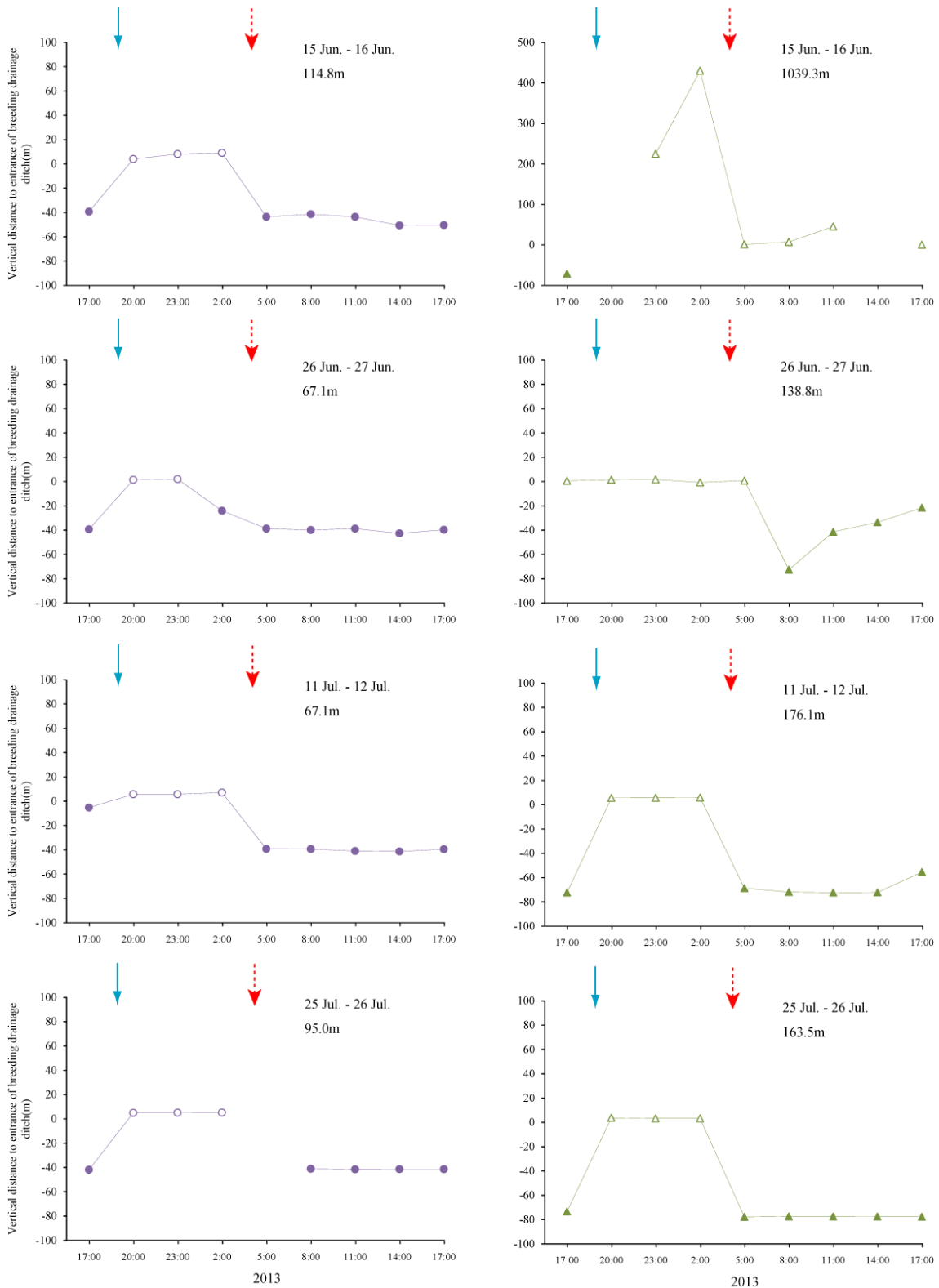


Fig. 6-5 個体 E,F の 24 時間調査における推定位置の変化

青と赤色の矢印は日没時刻と日出時刻，白抜きポイントの小排水路に侵入したことを示す．図中の数字は 24 時間あたりの合計移動距離を示した．

前述した6月15日は豪雨日であり、以降の調査回は無降雨日で、EとFの移動パターンはほぼ類似した傾向を見せた。すなわち、日没後に生息場所から小排水路入り口に移動し夜間滞在、日出後に生息場所に降下移動した後同所で休息するというパターンである。

次に固定型レシーバーによるモニタリングの結果を Fig.6-6 に示した。固定型レシーバーを設置した57日のうち、1個体以上小排水路に出現したのは37日で全体の約65%に相当した。小排水路に侵入した個体はC2, D, E, F, GおよびHでそれぞれ5, 3, 18, 20, 20および6日確認された。AおよびBは期間中1日も小排水路への侵入を確認できなかった。C2, Dは連続追跡では存在を確認できず、GおよびHは短期間しか追跡できなかったが、モニタリングの結果、複数回小排水路へ侵入していたことがわかった。

ナマズが恒久的水域である河川から繁殖場所の一時的水域に繁殖移動することが複数の地域で報告されている(片野ら, 1988, 湯浅・土肥, 1989; Maehata, 2002; 中村・尾田, 2003; 杉原・水谷, 2006; 舟尾・沢田, 2013)。しかし、これらの知見では繁殖場所に移動してから生息場所に回帰する行動は報告されておらず、本研究ではじめて確認された。さらに本調査によって成魚は夜間に繁殖場所である小排水路に移動し、日出後には回帰するというパターンを明らかにした。これは、ナマズは夜間に繁殖場所に遡上し、明け方までに降下したという知見と一致する(斉藤ら, 1988; 舟尾・沢田, 2013)。

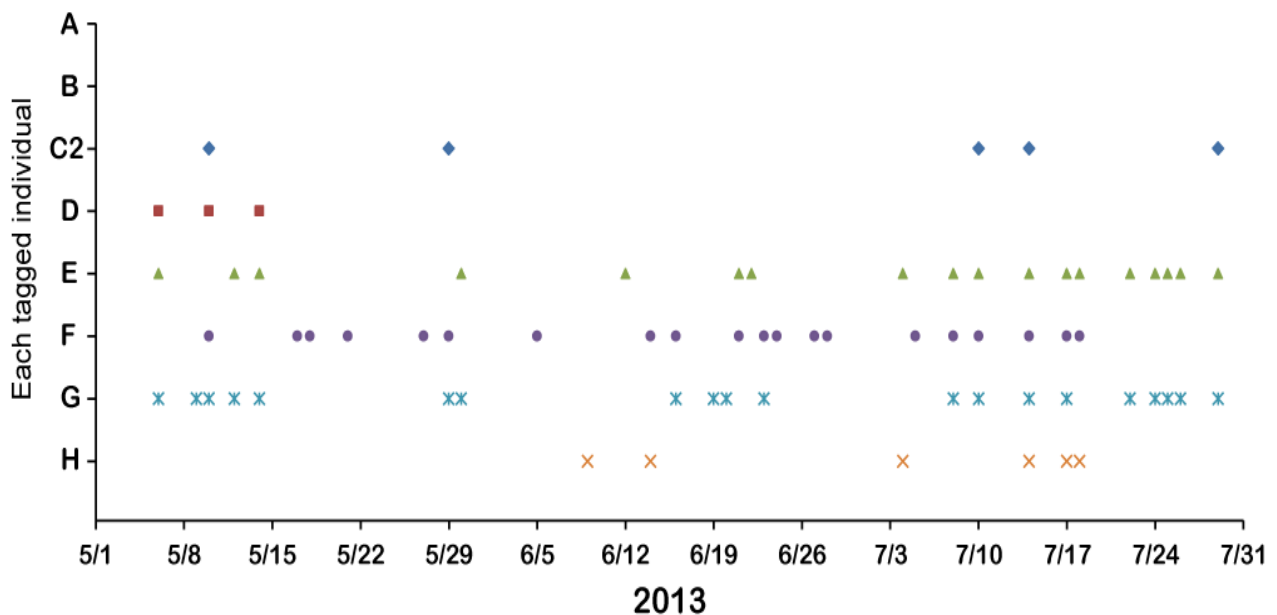


Fig. 6-6 各装着個体の小排水路への侵入日

舟尾・沢田（2013）は毎晩のように繁殖場所に遡上してきたナマズは同一個体が繰り返し遡上したか不明であり，検討が必要であると述べている．これに対し，Maehata（2007）は繁殖場所に出現した成魚に標識を施し，再採捕した結果，17尾の雌が2，3回再捕され，7尾の雄が2回再捕されたことを示した．また，これらの再捕された成魚は精子と卵を放出したことから，繁殖能力を有していた．今回の調査ではこれらの既往の知見と比べて，同一個体がより頻繁に繁殖場所に侵入することを明らかにした．

6.3.2 小排水路への侵入に関わる水理・水質的要因

測定期間中の水温の変化を比較したところ，小排水路の水温は常に谷川よりも高く，日変動の傾向は類似していた（Fig.6-7）．これは2012年の測定結果（Fig.2-5）と同様の傾向であった．期間中の小排水路の平均水温は $22.9\pm 3.2^{\circ}\text{C}$ ，谷川は $16.9\pm 1.8^{\circ}\text{C}$ であり，約 6°C の差が見られ平均値に有意差が見られた（ $p<0.01$ ，Table 6-2）．DOの平均値は谷川が小排水路よりも有意に高かった（ $p<0.05$ ）．pHおよび濁度の平均値は小排水路の方が谷川よりも有意に高かった（ $p<0.01$ ）．濁度は測定を開始した5月上旬頃が最も高く（140–693NTU），それ以降は100NTUを超えることはなかった（0.67–35.16NTU）．これは，5月上旬に調査地周辺の水田において田植えが集中的に行われたことにより，濁水が小排水路に流入したことが原因であると思われる．ECの平均値のみ水域間で有意差は見られなかった（ $p>0.05$ ）．

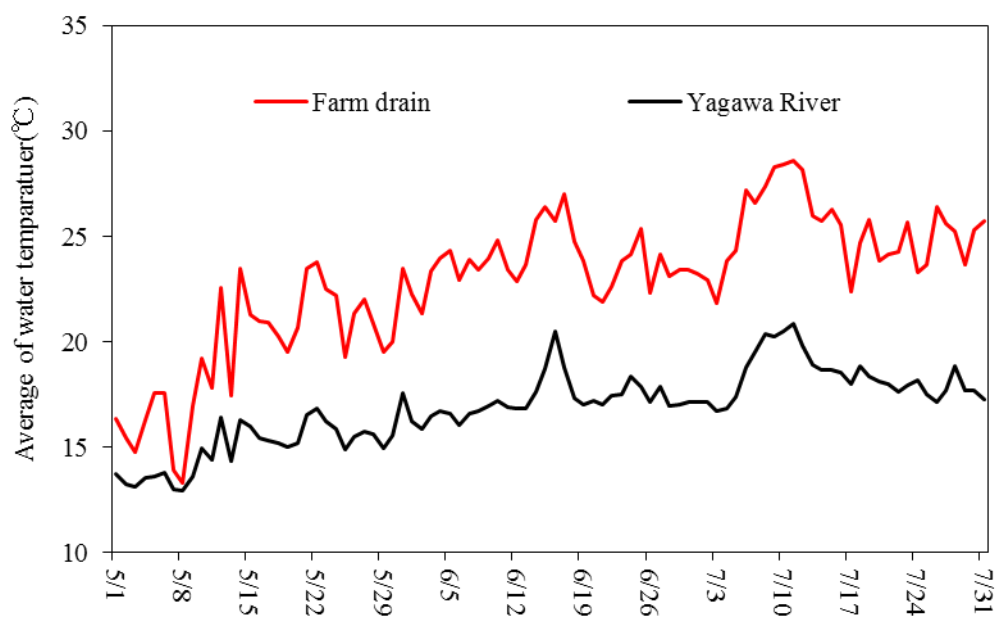


Fig. 6-7 小排水路と谷川の平均水温の経時的変化

Table 6-2 小排水路および谷川の水質平均値と検定結果

項目	小排水路	谷川	<i>t</i> 値	<i>p</i> 値
水温	22.9±3.2	16.9±1.8	13.14	<0.01
pH	7.59±0.34	7.30±0.31	2.92	<0.01
DO	4.49±1.00	6.50±0.71	-8.48	<0.01
EC	9.35±3.81	10.14±0.84	-1.40	0.16
濁度	60.58±126.09	6.59±7.61	2.81	<0.01

次に目的変数と説明変数同士の相関係数（Spearmanの順位相関係数）と有意性、VIFをTable 6-3に示した。目的変数である装着個体の侵入数と有意な相関が見られた説明変数は高い順に1日最大水位（ $r=0.43$ ）、21時の谷川水位（ $r=0.42$ ）、1日降雨量（ $r=0.40$ ）および降雨の有無（ $r=0.31$ ）であった（すべて $p<0.05$ ）。次にVIFおよび説明変数間の相関係数から、谷川の21時の水位と谷川の最大水位との間に多重共線性があると考えられた。そこで、21時の最大水位を除外し、装着個体の侵入数との相関係数がより高い最大水位を説明変数として用いた。

GLMの結果、AICの最も低い上位3モデルをTable 6-4に示した。これらのモデルのすべてに装着個体の小排水路への侵入に関わる要素として谷川の最大水位が選択された。上位3モデルのDispersion parameterはほぼ1と等しく、適合性が高いことがわかった。第2位のモデルと第3位のモデルはそれぞれ、濁度とDOを含んでいた。しかし、濁度およびDOは目的変数に対する効果の有意性が見られなかった。

Banks (1969)はサケ・マス類の遡上に影響を与える要因として河川流量がもっとも多く報告されていることを示し、一般に河川水の温度変化がサケ類の直接遡上に与える影響はほとんどないという（真山, 2004）。実際に、繁殖期において水温と装着個体の移動距離の間に相関が見られなかったことは第5章でも確認されている。

ナマズでも遡上に関して同様の報告が複数存在している。Maehata (2007)によれば、ナマズの繁殖場所における出現に関連するパラメーターとして、濁度、水深および水温の順に相関関係が強く、繁殖が行われた日は有意に降雨日が多かったことを明らかにした。この結果に対し、自然条件下では降雨によって起こる濁度と水位の増加は、現代には農作業によって人為的に引き起こされ、ナマズの産卵行動に影響すると指摘した。舟尾・沢田 (2013)によれば、2年間繁殖期にコンクリート製の河川におけるナマズの出現を観察したところ、出現数は両年とも水深と有意な正の相関がみられ、降雨とは有意な相関が見られなかったことを示した。このように、他の地域におけるナマズが降雨によらず水位の増加により繁殖移動するという報告と、本調査地における結果は一致した (Table 6-4)。

これまで比較した既往の知見におけるナマズの繁殖行動はすべて、野外における個体群を直接観察ないし採捕した結果から推測している。したがって、本研究によって少数の装着個体でも同様の結果が得られたことは、装着個体の行動は谷川周辺の個体群の行動特性を反映していると考えられる。

Table 6-4 繁殖水路に侵入した個体数と水理・水質的要因の相関行列

目的変数	説明変数候補											
	個体数	1日降雨量	降雨の有無	21時水温	小排水路の最大水温	谷川の最大水温	21時水位	最大水位	pH	DO	EC	濁度
個体数	0.40**											
1日降雨量	0.31*	0.88***										
降雨の有無	0.04	0.05	0.11									
21時水温	-0.02	-0.22	-0.31*	0.19								
小排水路の最大水温	0.21	0.12	0.06	0.53***	0.62***							
谷川の最大水温	0.42**	0.61***	0.52***	0.45***	-0.11	0.37**						
21時水位	0.43***	0.60***	0.48***	0.50***	-0.08	0.43***	0.92***					
最大水位	0.03	0.14	0.2	0.51***	0.12	0.26	0.37**	0.37**				
pH	0.19	0.12	0.08	-0.02	-0.34*	-0.08	0.19	0.24	-0.07			
DO	-0.01	-0.07	-0.09	-0.41**	0	-0.44***	-0.61***	-0.56***	-0.24	-0.33*		
EC	0.1	-0.21	-0.25	-0.42**	0.24	-0.04	-0.46**	-0.51***	-0.46**	-0.17	0.39**	
濁度	1.61	3.91	2.02	3.60	4.65	7.88	8.84	10.57	1.82	1.64	2.81	1.65
VIF												

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

Table 6-3 装着個体の侵入に関する水理・水質要因，GLMによる推定結果上位3モデル

モデル順位	定数項	最大水深	濁度	DO	Akaike weight	AICc	Δ AICc	Dispersion parameter
1	-1.65	3.23**		0.292	135.1	0	1.282	
2	-1.97	3.62**	0.001	0.200	135.9	0.76	1.275	
3	-2.22	3.15**	0.134	0.142	136.6	1.45	1.290	

Wald検定から推定された偏回帰係数の有意性. ** : $p < 0.01$

6.3.3 小排水路上流への遡上と産卵

降雨量と水位の中央値と成魚の遡上数および装着個体の侵入数と卵の有無の関係を Fig.6-8 に示した。映像を解析したところ、1) 魚道を遡上して落差工を遡上(魚道遡上)、2) 跳躍により落差工を超え、上流区間に移動(跳躍成功)、3) 魚道を途中まで遡上するものの失敗(魚道失敗)、4) 跳躍するも落差工を超えられない(跳躍失敗)、5) 上流区間から降下(降下)の5種類に成魚の行動は分類された。1) から4) までをまとめて遡上行動とした。魚道遡上、跳躍成功、降下の様子はそれぞれ Photo6-3、6-4 および 6-5 に示した。

5月から7月にかけて降雨と水位の挙動は連動していた。成魚が落差工を遡上したことを確認した日(以下、成魚遡上日)は合計8日で、すべて降雨日であり、1日降雨量は1.5mmから52.5mm、谷川の最大水位は56cmから93cmの範囲であった。成魚の遡上数は合計78尾であり、最も多い遡上数は5月30日の33尾で、次いで7月7日の20尾であった。また、小排水路において卵を確認した日(以下、卵確認日)は合計4日で、最初と最後の卵確認日は5月31日と7月29日であった。このことから、2013年のナマズの繁殖は少なくとも7月下旬まで継続したことがわかった。これは、前年の繁殖期間と比べ、開始時期は遅いものの、終了時期は一致した(第2章)。

遡上した成魚のうち95%にあたる74尾が魚道遡上した。その際の状況として、降雨により魚道を流れる水量は平常時よりも多く、成魚は尾鰭を激しく振り、勢い良く魚道を遡上していた。魚道を遡上する個体の中には途中で遊泳を止め降下した行動(魚道失敗)を見せ、合計57回観察された。魚道遡上に対し、全体の5%にあたる4尾が跳躍成功した。跳躍による遡上も降雨により水量が著しく増加した場合に観察された。跳躍するも落差工上端に到達せず、落下してしまう行動(跳躍失敗)は合計241回観察された。ナマズ以外にはギンブナやドジョウの遡上が確認された。ここで、魚道を利用した場合と跳躍した場合の落差工の遡上に成功する割合を比較するために、遡上成功率を定義した。つまり、 $\text{魚道遡上数} / (\text{魚道遡上数} + \text{魚道失敗数}) \times 100$ もしくは、 $\text{跳躍成功数} / (\text{跳躍成功数} + \text{跳躍失敗数}) \times 100$ で計算され、1日につき求めた。その結果、魚道および跳躍の遡上成功率の平均値はそれぞれ、 $52.6 \pm 40.4\%$ と $4.6 \pm 14.3\%$ であり、有意差がみられた(Welch *t*-test, $p < 0.01$)。これらのことから、成魚は跳躍よりも魚道を利用した方が有意に遡上に成功し、落差工に設置された魚道が成魚の繁殖移動を補助したことがわかった。

映像解析により成魚が確認された日の行動概要を Fig.6-9 に示した。期間中、最も成魚の行動観察数が多かった5月30日、31日、7月7日および10日について状況を説明する。

5月30日は降雨日であり1日降雨量は42mm、最大水位は73cmに達し、どちらも5月の観測値の中で最大を示した。この日小排水路の水量は時間とともに徐々に増加し、最初の魚道遡上は18時4分に確認され、20時以降魚道上部に流下物が引っかかたものの水は流れ続け、成魚は流下物の下部をこじ開けるような形で上流へと遡上していた。20時から22時の間が最も頻繁に成魚の遡

上行動を確認した時間帯であり，これ以降徐々に減少し3時6分の魚道失敗が最後であった．遡上行動は跳躍失敗が最も多く（102回），次いで魚道失敗（32回），魚道遡上（31回），跳躍成功（2回）と続いた．2時54分から3時48分の間に4個体降下したことを確認しており，撮影終了時点で29個体が小排水路に残留していたと考えられた．

翌日31日には小排水路の流量は通常程度まで減少していた．この日成魚の遡上行動は確認されなかったが，降下は19時32分から21時49分までの約2時間に23個体確認し，以降降下することはなかった．水量が減少したため，成魚はほぼ水上に露出しており，体全体を激しく振りながら移動する“匍匐”に近い状態であった（Photo6-5）．なお，日中に小排水路において10個体以上の成魚（付録2）とともに卵を確認したことから，前日に遡上した個体が産卵し，かつ大半が水路に残留し，夜間になってから降下したと考えられた．

7月7日は降雨日であり1日降雨量は3.5mm，最大水位は70cmに達した．最初の魚道遡上は19時34分に確認され20時に遡上のピークを迎え，最後は1時27分に確認した．この時の魚道遡上は20個体で，魚道失敗は確認されなかった．降下は20時27分から4時2分の間に14個体確認した．また，翌日に卵を確認したことから産卵も行われたと考えられた．

7月10日は降雨日であり1日降雨量は11mm，最大水位は79cmに達した．19時20分頃に流下物によって魚道上部が完全に塞がれてしまったため，魚道に水は流れず，側方から流れるのみとなった．魚道遡上は確認されず，魚道失敗は1個体のみ確認された．これに対し，跳躍失敗は19時30分頃から確認され始め，時間とともに増加し23時にピーク（27回）に達し，最後に2時48分に確認した（合計91回）．

6月15日には赤外線カメラによる撮影では確認できなかったが，24時間調査において装着個体Eが小排水路上流にまで侵入したことを把握している（Fig.6-5）．この時1日降雨量は52.5mm，最大水位は93cmに達した．小排水路の水量は時間とともに増加し，流下物が魚道上部に引っかかり，越流した水が落差工全体に広がったため（Photo6-6），視界を遮り遡上行動を観察できなかった．このため，当日確認できなかった遡上個体が多数存在すると思われる．また，翌日には小排水路において卵を確認していることから，産卵も行われたと考えられた．

第1落差において17時から5時までの撮影中，1時間毎に観察された成魚の行動概要をFig.6-10に示す．17時と5時には成魚の行動は確認できなかった．同様に18時と4時は各時間の中で最も成魚の行動を確認した回数は低かった．遡上行動は19時から21時にかけて徐々に増加し，22時以降減少する傾向が見られた．降下行動は20時，23時，2時をピークとする3つの山からなる多峰性が確認され，20時に最も確認数が多かった．

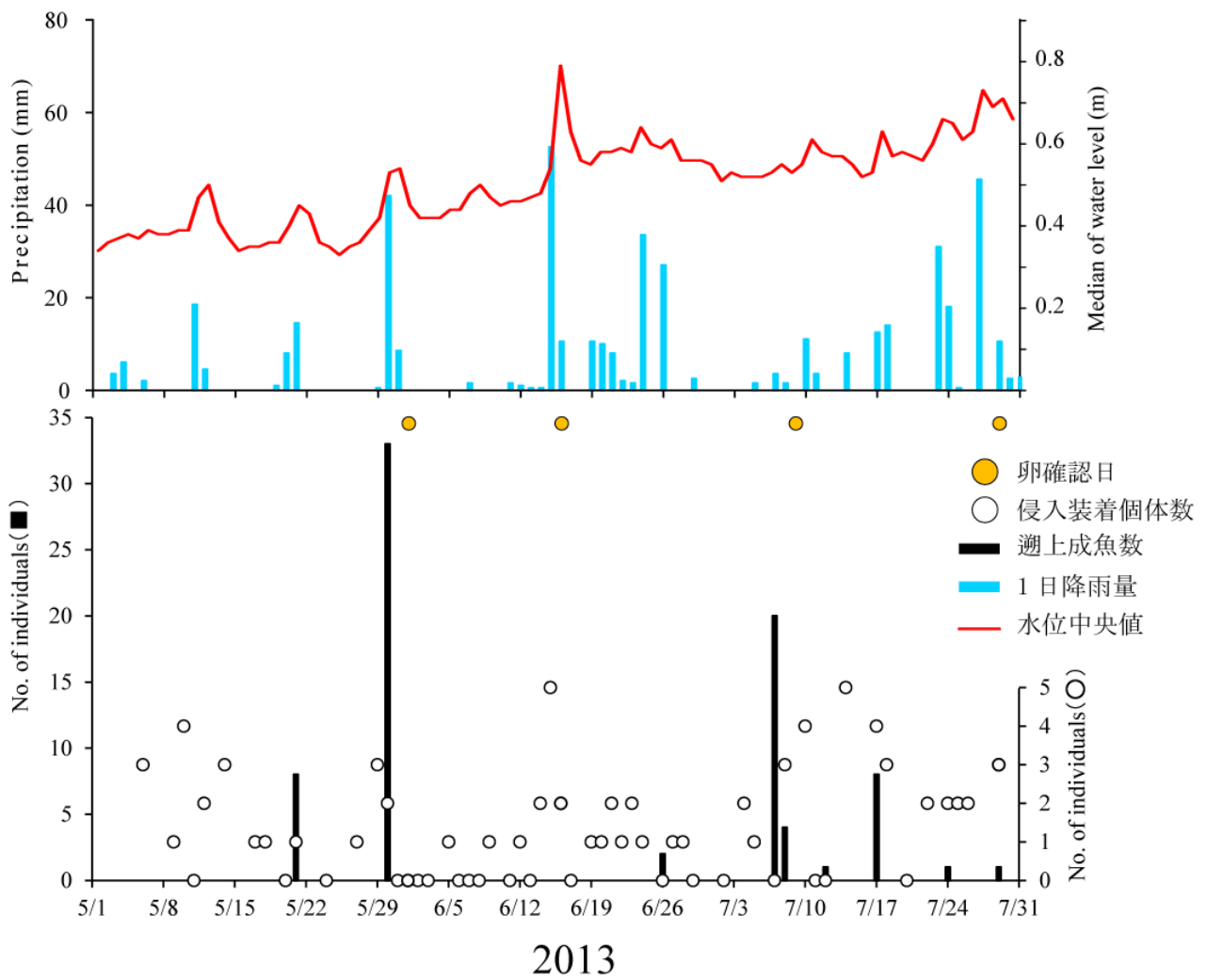


Fig. 6-8 落差工を遡上した个体数と降雨量および水位の関係



Photo 6-3 魚道を遡上する成魚



Photo 6-4 跳躍する成魚



Photo 6-5 降下する成魚

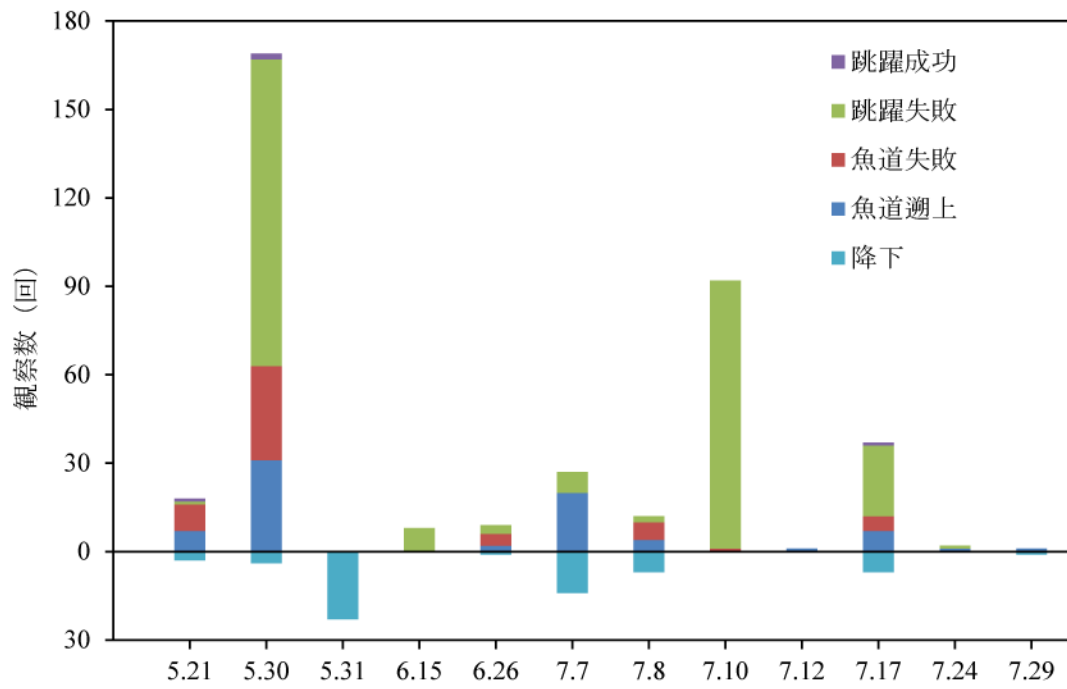


Fig. 6-9 第1落差において観察された成魚の行動概要

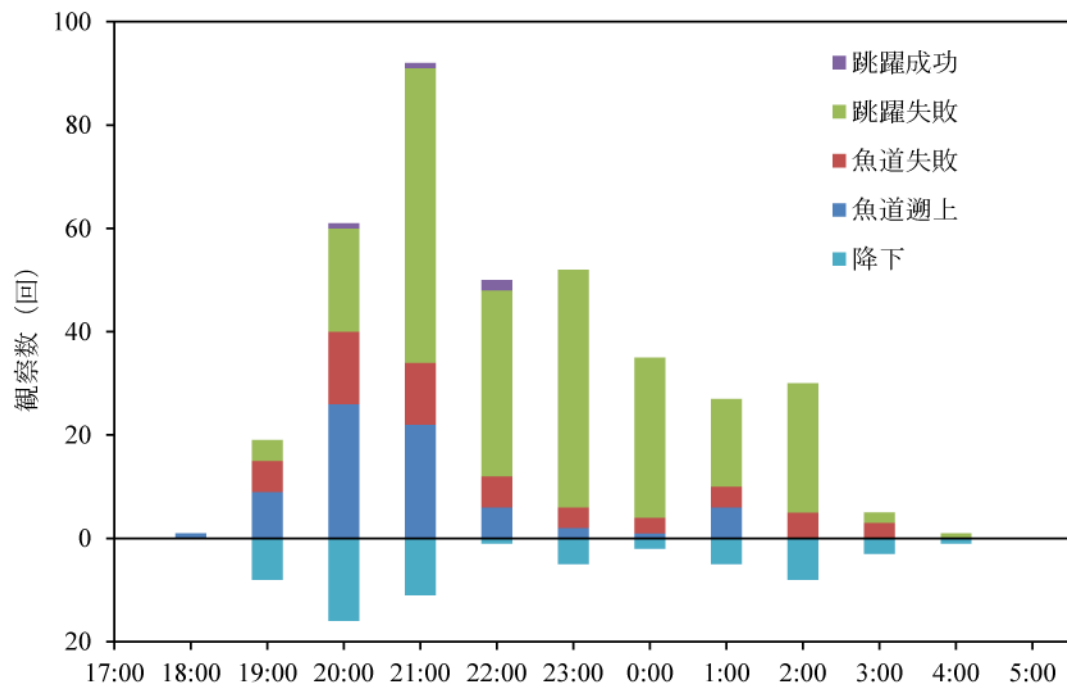


Fig. 6-10 第1落差において1時間毎に観察された成魚の行動概要



Photo 6-6 6月15日の流量増加時の映像

小排水路におけるナマズの遡上行動は日没後 19 時から 21 時にかけてピークを見せた (Fig.6-10). 片野ら (1988) の水田水域におけるナマズの繁殖行動の観察の結果, ナマズはまず, 18 時から 21 時に単独で発見され, 時間の経過とともに個体数は増え産卵集団が形成された. このことから, ナマズは別々に繁殖水域に侵入し, 時間とともに産卵集団を形成すると考えられた. 舟尾・沢田 (2013) は 2 時間あたりの成魚のナマズの出現数は 20 時から 22 の時間帯が最も多く, 周辺が明るい日没前の 18 時および日出後の 6 時に確認された個体はわずかであったと報告している. 本研究の結果はこれらの既往の知見を裏付けるものである.

3 つの手法から得られた成魚の移動および産卵の結果を総合すると, 2 通りの繁殖移動のパターンが考えられる (Fig.6-11). まずは産卵に失敗する平水時のパターンである. 成魚は日没後に小排水路に侵入するものの, 魚道の水量が少ないので第 1 落差を遡上することができず, 結果として上流域において産卵することもできない. その後, 日出前後に生息場所へと回帰する. 次に増水時のパターンとして, 降雨に伴う谷川の水量増加に誘発され, 多個体が小排水路に侵入, 魚道を遡上し, 増水に伴う落差工の移動障害が一時的に解消されたために上流に移動し産卵することができたと考えられた. 撮影映像から判定すると魚道を通る水量が約 5cm 以上, 成魚の体高の半分程度あれば遡上可能であると考えられる. このパターンは第 2 章の 2012 年に実施した小排水路における調査結果から導いた推測を裏付けるものである.

以上のことは, 小排水路におけるナマズの繁殖は本水路の構造的な問題から制限されることを示している. E, F, G は繁殖期間中 15 回以上小排水路に侵

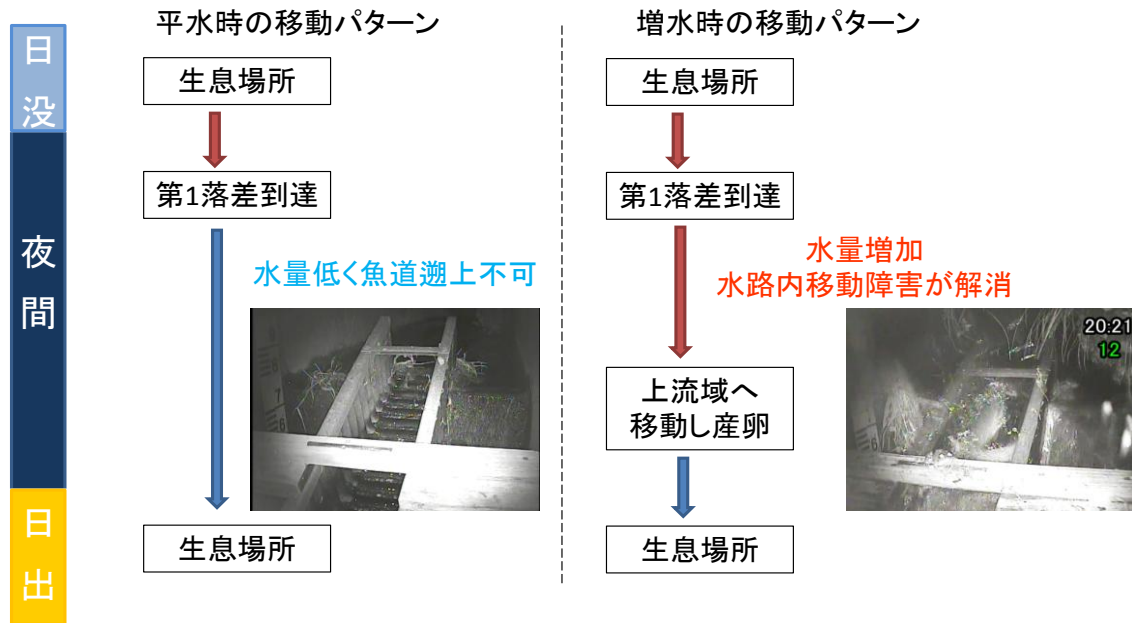


Fig. 6-11 平水時と増水時の成魚の移動パターン

入したことがわかっており (Fig.6-6), 谷川と小排水路と間に障害がないため容易に成魚が侵入できることを示している. しかし, 区間 1 で産卵することは可能であっても, 谷川からカワムツやギンブナといった魚類も多く侵入しており, それらの魚類によって卵が食害される危険性が高い. 実際にこれまでに区間 1 で確認された卵の数は上流区間に比べて著しく少ない (Table 2-10). したがって, ナマズが繁殖を成功させるためには, 第 1 落差を超え, 捕食者の少ない, かつ産卵基質となる泥底の存在する上流区間に移動しなければならない. 今後, 谷川周辺のナマズ個体群を維持するためには, 小排水路における繁殖の機会を増やすような対策が必要であると考えられる.

端 (2000) によれば, ナマズは柔らかい体の特徴を活かして 20cm 程度の落差ならば容易に遡上するとしている. しかし, 第 1 落差の水位差は通常 45 から 50cm 程度あり, ナマズの遡上を阻害していると考えられる. こうした状況に対し, 魚類の遡上を促進させるため 2011 年 7 月に第 1 落差に魚道を設置した. この結果, 2012 年と 2013 年連続して小排水路におけるナマズの繁殖が成功したことを確認しており, 魚道が繁殖移動を補助するという一定の効果を上げたと考えられた. しかし, 魚道の問題点として, 大量の流下物が漂着することにより魚道上部を塞いでしまうことが挙げられる. この状況では, 成魚は魚道ではなく魚道の両側の隙間を跳躍する必要が生じるものの, 跳躍によって落差工を遡上する成功率は低かった (4.6%).

和田 (2000) によれば, 階段式魚道の隔壁上流端が直角の場合, 落水の落下位置が隔壁から離れ空洞が生じるとともに, 気泡流や乱流も起きやすくなり, アユ (*Plecoglossus altivelis*) は跳躍により遡上することを余儀なくされる. こ

の改善策として隔壁を傾斜型にすることで、流れは斜面にそって流下し空洞はなくなり、気泡流や乱流は少なくなる。両方の隔壁形状によるアユの遡上数を比較したところ、直角型は遡上率 2.4%であったのに対し、傾斜型は 85.5%であり、遡上成功確率は改善された。小排水路における落差工の上流端は直角の形状をしている (Fig.2-3)。実際に第 1, 第 2 落差において上流端からの落水は壁面から離れて流れていることを観察している。上記の報告は魚道の隔壁を対象にしており単純に比較することは難しいが、第 1 落差の上流端形状を傾斜させることで魚道によらない跳躍遡上の成功率が向上する可能性があり、検討する必要がある。

6.4 小括

本章の結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 小排水路下流に生息した個体は頻繁に繁殖移動し、上流の個体は定住的であった。
- 2) 成魚は日没後に小排水路に移動を開始し、日出後に生息場所に回帰した。
- 3) 成魚の繁殖移動に関わる要因として谷川の水位の増減が選択された。
- 4) 小排水路に設置された魚道は成魚の繁殖移動を補助した可能性が示唆された。しかし、漂着物により魚道の機能が失われる場合もあり、落差工の上流端形状を傾斜させることで魚道によらない遡上の成功率が向上する可能性が考えられた。
- 5) 平水時と増水時の 2 つの繁殖移動のパターンが明らかになった。前者は日没後に成魚は小排水路に移動を開始し、水量が少ないため落差工を遡上できず、上流域における産卵はできない。その後、日出前に生息場所へと回帰する。後者は降雨による水量増加により、小排水路内の移動障害が解消され、上流域で産卵することができる。

第7章 総合考察

7.1 バイオテレメトリーの有効性と課題

本研究では、ナマズ成魚の河川における行動生態を解明する目的で、超音波と電波の2種類のバイオテレメトリーを適用した。その結果、成魚の夜行性活動の季節変化や利用生息場所等の情報を収集することに成功した。超音波テレメトリーの適用可能性および有効性は第4章で記述しているのので、割愛する。しかし、超音波テレメトリーでは装着個体の詳細な位置を推定することはできないという短所が存在するため、ナマズの行動生態に関するより詳細な情報を得るため電波テレメトリーを適用することにした。

本研究では携行型と固定型の2種類のレシーバーを適用した。前者を使う方法は一般的にマニュアルトラッキングと呼ばれ、電波テレメトリーで基本的に用いられる手法である（例えば、Horky et al. 2006；Slavik et al. 2007）。マニュアルトラッキングにより、個体識別したナマズの谷川における滞在場所の詳細な位置情報とその時空間的な変化を把握することができた。

固定型レシーバーを用いる方法はマニュアルトラッキングに比べて適用例は少ない（例えば、Horky et al. 2007；Ebner・Thiem, 2009）。この要因として、携行型よりも高価かつ大型であることや電源の供給のため設置場所が制限されることなどが挙げられる。本研究では、既往の研究で使用されることの多いバイオテレメトリー関連企業製（LOTEK や ATS）の固定型レシーバーではなく、国内で市販されているワイドバンドレシーバー（DJ-X11）を使用した。この機種は、一定間隔（1秒から5分）ごとに設定した周波数に移動する機能をもつ、小型軽量である（幅61×高さ106×奥行き38mm、約235g）、24時間以上の連続稼働が可能であるといった特徴をもつ。また、DJ-X11では装着個体の信号を受信しても記録することができないため、外部記録装置としてICレコーダーを用い、その音源を解析することによって装着個体を特定することも可能であった。本研究で用いた器具一式は固定型レシーバーとして適用可能であり、比較的安価（約7万円）に設置可能というメリットをもつ。この固定型レシーバーによるモニタリングの結果、繁殖のために小排水路に侵入する装着個体をモニタリングし、水理・水質パラメーターとの関係を解析することによって、谷川の水位の増減が繁殖移動に影響することを明らかにした。

個体C、D、GおよびHは繁殖期間中固定型レシーバーで小排水路への侵入が確認された（Fig.6-6）ことから、発信機は正常に作動し生存していたと考えられた。しかし、携行型レシーバーによる連続追跡でこれらの個体を確認することは困難であった（Fig.6-4）。このような現象が起きた原因を考察することはナマズの行動追跡手法としての電波テレメトリーの有効性を検討する上で非常に重要である。そこで、既往の研究から電波テレメトリーの受信可能距離（受信可能性）に影響する要因を整理し、本研究の条件での受信可能距離を三段階に評価した（Table 7-1）。ここで、受信可能距離は発信機の信号を受信できる最大の距離を指し、受信可能性は多くの装着個体を発見できる確率を指す。より遠距離から信号を受信できれば、それだけ発見確率は増えると考えられるので、

Table 7-1 様々な条件における電波受信距離の違いと本研究の条件における評価

		受信可能距離（可能性）		総合評価
		大	小	
発信機	サイズ	大	小 [○]	×
	電圧	大	小 [○]	
	周波数	高 [○]	低	
	発信間隔	短	長 [○]	
	送信アンテナ	ホイップ	コイル [○]	
水環境	水深	浅	深	△
	伝導度	低 [○]	高	
	SS濃度	低	高	
	障害物	少	多 [○]	
レシーバー	アンテナタイプ	八木 [○] > アドコック, H型 > ループ		○
	感受性	高	低	
	ケーブル長	短 [○]	長	
周辺環境	電磁的ノイズ	少	多 [○]	×

Neves et al.(1989), Sisak・Lotimer(1998), Peters et al.(2008)を参考に作成
本研究に当てはまる条件に○をつけ，不明もしくはどちらとも言えない条件にはつけなかった。

受信可能距離と受信可能性はほぼ同義である。

まず，発信機は発注の際に様々な設定が可能であり，受信可能距離に与える影響が大きい。発信機のアンテナは2種類存在し，アンテナが発信機の外部に伸びるタイプ（ホイップ）とコイル状アンテナが内包されるタイプ（コイル）に分けられ，前者のほうが受信距離は長い。電池寿命に影響する要素としてサイズ，電圧，発信間隔が挙げられる。発信機のサイズを大きくする程，内蔵電池の容量も増やせるため電池寿命は延びるものの，サイズは魚体への影響とトレードオフの関係にあり，サイズを大きくすることは魚体への影響をも増やす。

使用した電波発信機 F1170（Photo4-4）は長期間の追跡を想定し，魚体への影響を最小限にするため，小型でコイルタイプ，電圧が低く設定されている。ホイップタイプの発信機を内部装着した適用例は複数存在するが，アンテナによる炎症や発赤，裂傷等の魚体への傷害が観察されており（Adams et al. 1998），コイルタイプよりも脱落率が高く推奨されない（Broadhurst et al. 2009）。周波

数が高い（144Mhz 以上）ということ以外，使用した発信機の設定から想定される受信可能距離は低いため，総合評価は悪いと判定した（×）。

次に，発信された電波は水中で減衰するため水環境も受信距離に影響を与える．水深と伝導度が受信可能性に影響を与える最も重要な要因であるとされ，伝導度の高い環境（汽水域）では，水深の増加とともに受信距離は指数関数的に減少し，伝導度の低い環境（淡水域）では，水深の増加による変動は少ない（Peters et al. 2008）．水中では電波は減衰するため，また，高濃度の SS（懸濁物質）は電波を反射する可能性が示唆されている（Peters et al. 2008）．水中の障害物（人工構造物，陸生および水生植物，屈曲部等）の存在は，発信機の存在位置からの反射によって受信に影響をおよぼす（Peters et al. 2008）．研究対象地谷川における水環境として，伝導度は低く（ $10.14 \pm 0.84 \text{ mS/m}$ ），沈水植物や大礫等の障害物の存在量は多いと考えられる．また，水深は浅い場所や深い場所が混在し，SS 濃度は測定していないので判定できなかった．これらのことから，谷川における受信可能距離の総合評価は普通（△）とした．

レシーバーが受信可能距離に影響を与える可能性がある要素としてアンテナタイプ，感受性およびケーブル長が挙げられる．受信アンテナはラジオテレメトリーシステムにおいて重要な要素であり，信号を集める能力（利得）を持ち，これが受信プロセスに電力を与える（Samuel・Fuller, 2001）．受信範囲，感受性，方向性が高いアンテナタイプは八木，アドコック，H 型，ループの順である（Peters et al. 2008）．本研究では 2 エレメントの八木アンテナを用いたことから，受信可能性は高いと考えられる．また，レシーバーとアンテナを接続するケーブルの長さは 50m 以上で著しい伝送損失が起き，これより短いケーブルの時は，影響は少ないという（Sisak・Lotimer, 1998）．本研究で用いたケーブルの長さは約 1m であることから，伝送損失による受信可能性への影響はわずかであると考えられる．レシーバーが低レベルの信号を受信できる性能は感受性と呼ばれ，ノイズフロア（信号を受信できない時の雑音のレベル）を測定することで求められる（Sisak・Lotimer, 1998）．もし，ノイズフロアがレシーバーの感受性より低い場合，感受性が信号受信における制限要因となる．これとは逆に，ノイズフロアがレシーバーの感受性より高い場合，ノイズフロアが信号受信における制限要因となる．本研究では，使用したレシーバー（FT-817）の感受性およびノイズフロアを測定していないので，影響を評価できなかった．これらのことから，使用したレシーバーによる受信可能距離への総合評価は良い（○）とした．

最後に調査を行う周辺環境の影響も無視しがたい．Peters et al.（2008）はレシーバーを積載したモーターボート上で発動したモーターの電磁的ノイズにより受信可能距離は 22% 減少したことを報告している．調査対象地の谷川ではボートを航行することはないが，刈払い機によるノイズをしばしば受信した．また，業務用無線の周波数が発信機の周波数（G）と一致したため，混信することもあった．これらのことから，周辺環境の電磁的ノイズによる受信可能距離への総合評価は悪いと判定した（×）。

以上のように、様々な要素が受信可能距離や可能性に与える影響を評価した。その結果、発信機の設定、水環境、電磁的ノイズによる負の影響により、受信可能距離および可能性は低くなったと考えられた。このため、装着個体により接近しなければ、その信号を受信すること、つまり発見することが困難であるといえる。C2, D, G および H の 4 個体は連続追跡では存在を確認できなかったことは、水深が深い、障害物の存在が多い、調査者が侵入しにくい等の受信可能距離を低下させる場所にこれらの個体は存在していたことが原因であると考えられる。これに対し、小排水路に設置した固定型レシーバーで複数回存在を確認したことは、これらの個体がレシーバーに接近したため、信号を受信できたと考えられる。

以上のことを踏まえ、今後より詳細なナマズの行動生態学的情報を収集するために、電波テレメトリーを用いた追跡手法の改善策を提示する。まず、本研究で使用した発信機の設定（長期間の追跡を想定）では受信可能性が低いと考えられることから、より受信可能性を高めるためには電池寿命と引き換えに電圧を高める必要がある。また、成魚の移動パターンとして日出後に生息場所に回帰すると考えられることから、日出前から小排水路で待機し、回帰する個体を追跡するといった臨機応変な対応も必要である。

7.2 調査地におけるナマズの生活史

本研究で得られた知見から、谷川周辺のナマズのおおまかな生活史のサイクルについて考察し、成長段階別の生態学的情報を記述した。ナマズの生活史の概念図を Fig.7-1 に示した。

本調査地におけるナマズの繁殖期は 5 月から 7 月で、降雨に伴い著しく水位が増加した時、成魚は谷川から一時的水域である小排水路に侵入し産卵する。繁殖期間中こうした産卵行動は複数回行われる。谷川の整備区間にはミティゲーション対策として近自然工法が施されており、成魚はこれらの構造物を利用し、周年生息可能であると考えられた。小排水路において成長した稚魚は落水前の 7 月下旬には谷川に大部分が降下する。ナマズは成熟まで 2 年以上要することが報告されていることから (Kumakura et al. 2003)、谷川に降下した未成魚は谷川内で 2 年間かけて成熟し、その後繁殖に参加すると考えられる。

③ 越冬期と繁殖期の行動特性と生息環境

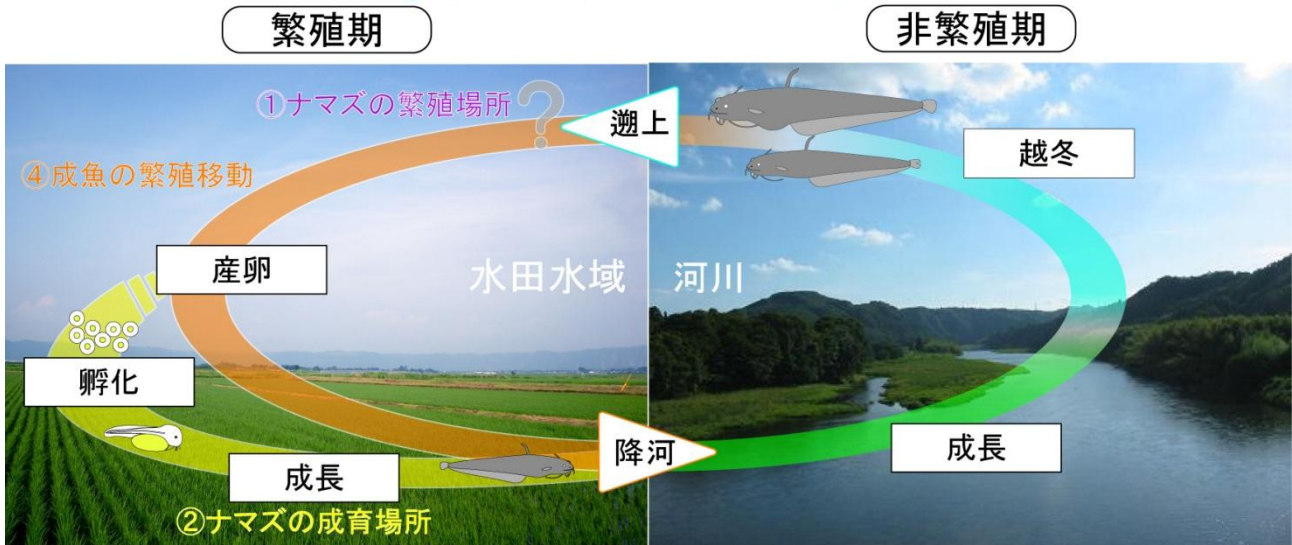


Fig. 7-1 ナマズの生活史の概念図

7.2.1 稚幼魚期

本調査地では主に小排水路においてナマズは産卵し、稚幼魚期を過ごすことがわかった。2012年の灌漑期における調査結果から、小排水路における稚幼魚期の生活史を推測した。田植え時期である5月初旬に孵化した稚魚は5月下旬には全長20mm程度に成長した。稚魚の小排水路における分布は上流区間に集中しており、底面に堆積した泥が稚魚の生息場として機能したことを示唆している。この5月生まれの個体群は6月中旬から7月中旬にかけて、上流区間から下流区間にかけて時間とともに降下し、7月下旬には大部分が谷川に降下した。この期間に全長では約2.6倍、体重では約11.4倍と急速に成長したことがわかった。急速な成長を可能にした要因として、小排水路の水温の高さ、豊富な餌生物や泥底の存在が挙げられた。

7.2.2 成魚期

本研究では、河川における成魚期のナマズの行動生態を解明するために、バイオテレメトリーを用いて追跡調査を実施した。その結果、越冬期と繁殖期における行動生態学的情報を収集することができた。

越冬期の装着個体の活動性は低く水温と正の相関が見られ、一日の時間帯の中で昼間に最も活動的であった。これは、水温の高い昼間に餌魚を捕食するための行動であると考えられた。成魚の越冬場所としては保全区間の自然に形成された淵やえぐれ、近自然工法である井桁護岸を利用したことが明らかになった。

繁殖期の活動性は高く水温と有意な相関は見られなかった。一日の時間帯の中で夜間が最も活動的であり、昼間は非活動的であった。これは後述する繁殖

移動のパターンと関連しており，夜間に装着個体は小排水路に移動し，日出後に生息場所に回帰して昼間休息していると考えられた．また，繁殖期の資源選択性を解析したところ，装着個体は植物が繁茂した水際の流速が小さく，身を隠せる泥や大礫を有意に選好したことがわかった．

電波テレメトリーを適用することによって，成魚の生息水域と繁殖水域の移動（繁殖移動）が明らかになった．小排水路より下流に長期間滞在した個体は明確な生息場をもち，夜間に水路へ移動し，日出後に生息場所に回帰する繁殖移動のパターンが観察された．また，各装着個体は小排水路に頻繁に侵入し，谷川の水位の増減が繁殖移動に影響することが明らかになった．

小排水路の最下流の落差工に設置した赤外線カメラの解析の結果，成魚の遡上を確認した日は合計 8 日ですべて降雨日であった．遡上した成魚のうち 95% が落差工に設置された魚道を利用した．その際の状況として，降雨により魚道を通る水量は平常時よりも多く，成魚は尾鰭を激しく振り，勢い良く魚道を遡上していた．このように増水時には，降雨により谷川および水路内の水位が増加し，成魚の遡上行動が誘発され，魚道の水量が増えたことで移動障害が解消し，結果的に産卵が可能になったと考えられた．しかし，平水時には魚道の水量が少ないため，侵入してきた成魚が遡上できない可能性が示唆された．

7.2.3 未解明な部分

以上のように谷川周辺のナマズの生活史を概観したが，まだ未解明な部分が存在する．一時的な水域で成長した当歳魚は恒久的な水域に移動する．恒久的な水域において成長，成熟というサイクルを経て 2 年から 3 年後に繁殖行動に参加すると考えられる．既往の知見では，未成魚が繁殖に参加するまでの期間を追跡した例は見当たらない．本研究では，幼魚が小排水路において成長し，谷川に降下するまでの過程を把握したものの，谷川において幼魚がどのような生活を送っているか定かではない．

例えば，未成魚が成魚に成長するまでの生存率，利用環境，移動力といった情報を収集することは，地域のナマズ個体群の維持管理のために重要であると考えられる．フラットヘッドキャットフィッシュ (*Pygodictis olivaris*) の稚魚は成魚と異なる生息地要求性があると示唆されている (Irwin et al. 1999)．ヨーロッパオオナマズでは幼魚と成魚の空間的分布と下流への移動について差が見られた (Slavik et al. 2007)．また，アフリカの河川や南米のアマゾン川におけるナマズ類の観察結果から，初期生活史段階の移動分散が個体群拡大の重要なメカニズムであると示唆されている (Araujo-Lima・Oliveira, 1998)．

以上のことから，ナマズについても成魚と未成魚の生息地選好性や行動特性，移動分散に違いが存在する可能性が考えられ，以上の点を明らかにするために成魚と未成魚を同様の手法で調査し結果を比較する必要がある．

7.3 圃場整備後の水田水域におけるナマズの保全

ナマズは圃場整備事業に伴う一時的な水域における産卵場所の減少と産卵場所への移動阻害により生息数を減少させているという報告がある（田崎・金澤，2001；Katano et al. 2003b, 2005）。本研究の調査対象地である谷川周辺も圃場整備に伴う環境の悪化によりナマズは一時期極端に減少した（加藤ら，1999）。現在谷川に接続する魚類の遡上可能な水路は3本であり，そのうち整備事業によって施工された小排水路において例年本種の再生産が確認されている。また，非繁殖期の生息場である谷川も同様に圃場整備によって環境は変化した（藤咲ら，2003）。谷川の整備区間にはミティゲーション対策として近自然工法が施されており，成魚はこれらの構造物を利用し，周年生息可能であると考えられた。

このように，圃場整備後の水田水域である谷川はナマズが生活史を完結することが可能な環境を有していたことが明らかになった。今後，各地の整備後の水田水域において本種の保全対策を検討する上で，本調査地の事例は貴重な情報であると考えられる。

第2章から第6章で記述した知見から，ナマズの生活史を保障する上で重要な点を以下に記述した。

- 1) 恒久的な水域である河川において周年生息できる場所が存在すること
- 2) 河川と繁殖水域の間で双方向移動が可能であること
- 3) 繁殖水域において孵化した稚魚が成長し，河川に降下できること
- 4) 河川と繁殖水域ともに最低限通水を確保すること

これらの要点に基づき，圃場整備後の水田水域においてナマズを保全するための対策を検討した。その概念図を Fig.7-2 に示す。

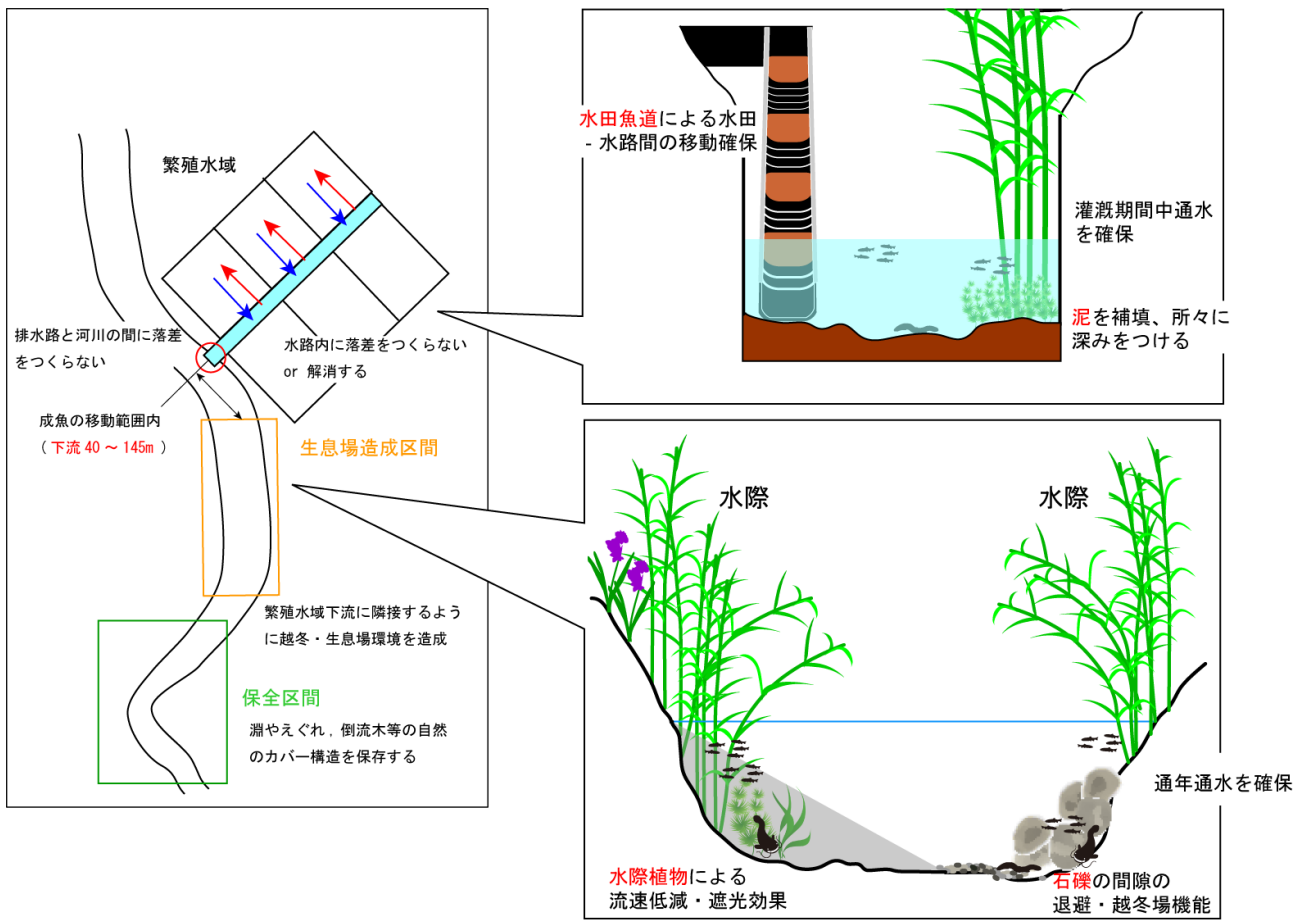


Fig. 7-2 圃場整備後の水田水域におけるナマズの保全策

7.3.1 繁殖場所および成育場所としての改修済み排水路

森ら（2008）は水田や水路の物理的環境や利用方法（営農・管理）が変化する以上、それらを施工前の状態に復帰させることは現実性を欠くと述べている。したがって、圃場整備によって改修された水路において魚類を保全することは重要な課題であると考えられる。そこで、本研究で得られた知見から、ナマズの繁殖および成育場として利用可能な改修済みの水路の条件について考察し、それらの条件を満たすために必要な対策について議論する。

1) 繁殖移動の保障

ナマズは産卵のために河川から水田水域に移動するので、両水域間の移動障害が無いことが本種の繁殖を保障する上で最も重要である。圃場整備や河川整備後に、河川と排水路の間に相当の落差が生じる事例は多く（端，1998），この対策として、段差部分については土盛りによってその傾斜を緩やかにしたり、それができない場合には魚道を設けたりすることが提案されている（片野，1998a）。また、ナマズは広範囲を移動しながら産卵する生態を持つ（片野ら，1988）ので、水路内の移動障害も同時に解消すべきである。小排水路では落差工が存在するものの、降雨時に水量が増加することで落差工による移動障害は一時的に解消されたと考えられる。しかし、こうした降雨が起こる機会は多くないので、落差工に簡易的な水のうによる魚道を設置し（竹村ら，2009），恒常的にナマズの移動を可能にするといった対策も考えられる。

2) 成育環境の保障

次に、稚魚および幼魚の成育に関する要素として挙げられた泥の存在は改修水路において重要である。コンクリート面が露出している改修水路では、通水障害が生じない程度に泥を補填することによって、稚魚および幼魚の生息が可能になるかもしれない。また、底面は平坦にするのではなく、所々深みを設けることや置き石を設置することで（片野，1998a），高流速時や低水量時の稚魚の退避場として効果があると考えられる。コンクリート三面張り水路であっても底面に泥が堆積することによってドジョウ（田中，2001）やメダカ（藤咲，2002）が生息可能になることが報告されている。このことは、小排水路においてドジョウやメダカが確認されていることから裏付けられる。したがって、稚魚や幼魚の餌生物の存在は泥を補填する対策を実施することである程度保障できると考えられる。加えて、繁殖水域と河川のネットワークを構築することで、小型魚類であれば、改修水路内で繁殖が可能になり孵化稚魚が発生するだろう。底生動物の種類は三面張り区間より二面張り区間で多いことが報告されており（森ら，2011），底面を泥で覆うことによって、多様な底生動物の生息を可能にすると考えられる。最後に、水路における水生生物の生存を保障するために、灌漑期間中通水を確保することが必要である。

3) 水田における繁殖の保障

以上に排水路におけるナマズ繁殖および成育の可能性について議論したが、

本種は水田内において繁殖，成育することが報告されている（片野ら，1988；斉藤ら，1988）．近年，魚類の水田と水路間の移動経路確保を目的として，水田魚道を設置する取組が各地で行われている（鈴木，2011）．例えば，滋賀県の琵琶湖周辺の水田に排水路堰上げ式水田魚道が設置され，ナマズ等の魚類の水田への遡上および成育を確認している（裕・堀，2010）．このため，ナマズの保全のためには水田魚道の設置を推進することも必要であると考えられる．また，吉田ら（2013）は水田への遡上を目的とした水田魚道を設置できない場合は，農業水路内での産卵場所の造成も必要であると提案している．これらのことから，今後はナマズについても水田における成育場環境の有効性や水路内での産卵場所造成の手法を検討する必要があると考えられる．

7.3.2 生息場所としての河川

1) 生息場所の造成

第5章および第6章の結果から，繁殖水域から下流に存在する個体が頻繁に繁殖移動したことで，これらの個体が長期間生息可能な環境を該当区間が備えていたことを明らかにした．皆川ら（2010）は，越冬場の造成する場所として，繁殖可能な一時的な水域と魚類が移動分散可能な範囲にすることで，親魚の体力の消耗を抑えるとともに繁殖効率を高める可能性があるとしている．本研究で装着個体のEおよびFは小排水路下流の40～145mの地点に生息し，複数回繁殖移動したことがわかっている．これらのことから，繁殖水域から下流，成魚が移動分散可能な範囲（40～145m）に越冬場および生息場を造成することが，河川における対策として重要であると考えられる．

第5章では，繁殖期において成魚は流速の小さい水際域，泥や大礫に選好性を持ち，こうした環境は成魚にとって採餌場かつ休息場として機能した可能性を示した．このことから，水際域の環境を良好に保つことは本種の生息場を提供すると考えられる．

萱場（2008）によれば，水際域は水生生物に対して餌資源，生息・成育場所，産卵環境を提供するだけでなく，法勾配が大きく対象場所として認識されやすいため景観保全上配慮すべきであると述べている．また，魚類の生息環境と関連性の高い水際域の構成要素として，植物，石礫，護岸等が挙げられ，以下に詳細を記述する（土木研究所，2010）．水際の植物，水中から繁茂し水の流れに影響を与える部分（水中部）は流速の低減，遮光，隠れ家としての機能，水中・陸上から繁茂した草本植物の枝葉が水面を覆う部分は魚類と甲殻類の生息に寄与することが示唆されている．石礫の間隙は魚類・甲殻類の生息場として機能し，サイズが大きいと遊泳魚，小さいと底生魚や甲殻類が占める割合が増える．また，冬期には水際植物は越冬場として機能しなかったものの，石礫群は越冬場としても機能したことがわかった．コンクリート護岸といった，植物が生育せず，粗度が小さく，直線的な形状の従来型の護岸は水際部特有の環境は消失し，水生生物の生息環境として不適である．影響の回避の原則から，質の高い自然河岸は保全することを前提とし，護岸が必要な場合は，控えて設置

し、その前面に盛土し微地形を形成する方法がある。また、ナマズの餌生物と考えられるドジョウの河川における保全策として、コンクリート護岸を土羽護岸に変え水際の植生を再生することや、コンクリート床は床止めに変えることが挙げられている（田中ら，2011）。

2) 保全区間の設置

装着個体 A および B は保全区間のえぐれや淵において越冬期から繁殖期まで長期間生息していたことを確認した。このことから、本種の越冬場兼生息場として河川の整備の際に自然のえぐれや淵といった自然のカバー構造物を保存する区間を設定する必要もあると考えられる。また、保全区間は小排水路から離れており上流に存在するため、保全区間に生息する成魚は積極的に繁殖移動しない可能性が示唆された。したがって、保全区間を設定する際は、繁殖水域より下流に隣接するように配置することが繁殖移動を保障する上で、好ましいと考えられる。

3) 適切な水管理

水野ら（2010a）は琵琶湖における人工的な水位調整がニゴロブナの産卵遡上行動に与える影響を検討した。その結果、小刻みな自然の水位変動のリズムを模倣することで、ニゴロブナやナマズを含めた日本の水田地帯に遡上する魚類の保全に効果があると結論づけた。本研究では、小排水路への成魚の侵入は降雨によらず、水位の増減に支配されていることが明らかにされた。これらのことから、繁殖期に河川の水位を人工的に増加させることにより、ナマズやその他の魚類の繁殖移動を誘発させることができると考えられる。また、越冬期のナマズの生息を保障するために通年河川に通水することも重要であると考えられる。

7.4 小括

本章の結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 本調査地におけるナマズの生活史を要約すると、繁殖期は5月から7月で、降雨に伴い著しく水位が増加した時、成魚は谷川から一時的な水域である小排水路に侵入し産卵する。小排水路において成長した稚魚は落水前の7月下旬には谷川に大部分が降下する。谷川に降下した未成魚は谷川内で2年間かけて成熟し、その後繁殖に参加すると考えられる。
- 2) 本研究によって小排水路がナマズの繁殖・成育場所として機能すること、同所における稚幼魚期の成長、移動様式を明らかにした。また、成魚の越冬期と繁殖期の行動特性および生息環境、繁殖移動のパターン、産卵に発展する条件といった新しい知見の収集に成功した。
- 3) 谷川に降下した幼魚が成長、成熟し繁殖行動に参加するまでの期間の情報が不足していた。

4) 改修済み排水路においてナマズの繁殖を保障するための対策として、水域間（河川－水路）と水路内のネットワークを確保すること、稚・幼魚の生息に配慮し、泥を底面に補填すること、通水を確保すること、水田での繁殖のために水田魚道を設置することが挙げられた。

5) 河川においてナマズの生息を保障するための対策として、コンクリート護岸から土羽護岸に変え、水際に植生、石礫を配置した生息場を造成すること、自然のカバー構造物を保存した保全区間を設置すること、これらの区間を繁殖水域から下流に配置すること、人為的な水位の増加や通年通水といった適切な水管理をすることが挙げられた。

第8章 総括

8.1 研究の成果

圃場整備後の水田水域において、魚類の生活史を完結できる環境を研究した例は少ない。そこで、本研究は水田水域との関わりの深い代表的な魚類の1種であるナマズを対象に、1) ナマズが生活史を完結できる環境を調査地は備えているか検討すること、2) ナマズの成長段階、季節ごとの生態学的情報を収集し、生活史を解明することを目的とした。研究の成果として、初めて得られたナマズの知見やそれらに基づく本種の保全対策を検討することができた。

第2章では調査水域におけるナマズの繁殖場所を把握するために、谷川と接続する小排水路および土水路においてナマズの繁殖状況および環境特性を調査した。その結果、土水路において稚魚は発見されず、小排水路において稚魚は50地点で合計160尾確認された。小排水路は整備後に施工されたコンクリートベンチフリューム構造であり、落差工が複数存在する。本調査地では、降雨による水量の増加により落差工の移動障害が解消され、成魚は泥底の占める割合の高い上流まで移動し産卵することが明らかになった。こうした落差工の存在する排水路において成魚が降雨イベントに伴い繁殖移動する事例はわずかであり、整備済み水田水域における本種の繁殖を保障する上で重要な知見であると考えられる。小排水路における稚魚の分布は上流区間に集中しており、稚魚の分布を規定する環境要因として底質に占める泥の割合と谷川からの距離が選択され、コンクリート面に堆積した泥が稚魚の生息場を提供したと考えられた。

第3章では小排水路がナマズの成育場所として機能するか明らかにし、その成立要因を考察するとともに、本種の初期生活史として成長および河川への移動様式について把握した。その結果、小排水路において6月から7月の1ヶ月間に幼魚は急速に成長したことがわかった。次に、幼魚の移動様式として、6月下旬から下流に降下を始め、落水前の7月下旬に大部分の個体は谷川に降下したと考えられた。小排水路がナマズの成育場所として機能した要因として、水温が高いこと、餌生物である小型水生生物が豊富であること、生息場となる泥底が存在することを指摘した。このように本種の稚・幼魚の一時的な水域から恒久的な水域への移動様式や改修済み排水路が成育場所として機能する条件を初めて明らかにした。

第5章では電波発信機を装着した個体を追跡し、谷川における成魚の越冬期と繁殖期の行動特性および生息環境を把握した。越冬期の装着個体は水温の影響を受け活動性は低いものの、既往の知見と異なり昼夜活動したことが明らかとなった。また、水温の高い昼間に餌生物を捕食するために活動した可能性が考えられた。越冬期に追跡した3個体は上流の保全区間の淵やえぐれ、圃場整備により流路が付け替えられた区間（整備区間）の沈水植物の豊富な淵環境を利用していた。

繁殖期に追跡した装着個体のうち、2個体は越冬期の生息場を継続して利用し、他の2個体は小排水路より下流の整備区間の水際域を利用した。また、これらの装着個体の資源選択性を解析したところ、流速が小さく、植生の豊富な水際

の身を隠せる泥や大礫を有意に選好したことがわかった。これはナマズが泥底部や砂泥底部に生息し、特にヨシなどの水草の繁茂した水域や岩の間隙など、隠れ場所や体の寄せることのできる場所を好むという既往の知見を裏付けるものである。

既往の知見では、水田水域における繁殖行動に着目した研究は複数存在するものの、生息水域から繁殖水域までの移動を詳細に報告した例は見当たらない。そこで第6章では、第5章と同様に電波テレメトリーを適用し、河川から繁殖場所への移動、繁殖に発展する条件等を把握した。その結果、繁殖場所である小排水路より下流に長期間滞在した個体は明確な生息場をもち、夜間に水路へ移動し、日出後に生息場所に回帰する行動が観察された。このような、成魚が繁殖移動の際に生息場と繁殖水域間を往來する繁殖移動パターンは初めて観察された。小排水路の下流に存在する落差工に設置したレーザーの解析の結果、装着個体は小排水路に頻繁に侵入し、さらに成魚の侵入に影響する水理・水質要因を解析したところ、谷川の水位の増減が繁殖移動に影響することが明らかになった。

小排水路の最下流の落差工に設置した赤外線カメラの解析の結果、成魚の遡上を確認した日は合計8日ですべて降雨日であった。遡上した成魚のうち95%が落差工に設置された魚道を利用した。このことから、魚道が小排水路における成魚の繁殖移動を補助したと考えられた。しかし、平水時には魚道の水量が少ないため、侵入してきた成魚が遡上できない可能性が示唆された。一方、増水時には、降雨により谷川および水路内の水位が増加し、成魚の遡上行動が誘発され、魚道の水量が増えたことで移動障害が解消し、結果的に産卵が可能になったと考えられた。以上のように、落差工による移動障害が存在する改修済み水路において、ナマズが繁殖に成功する条件を明らかにした。

第7章では、圃場整備後の水田水域における本種の保全対策を検討した。改修済み水路の対策として、成魚の産卵および稚魚の生息を可能にするために底面に泥を補填し、所々に深みをつくることや、河川との接続性を確保しつつ水路内の落差を魚道により解消すること等が挙げられた。改修済み河川では、上記の方法でナマズの繁殖・成育場所としての機能を付加した水路より下流側に、水際に植生や大礫を設置するといった生息場環境を造成すること、越冬期の生存に配慮し非灌漑期にも導水することや、人工的な水位を変動させ、繁殖行動を誘発させるといった河川管理も必要である。

8.2 今後の課題

1) 幼魚が河川に降下し、成熟するまでの過程の把握

本研究では、大部分の幼魚は7月下旬に谷川に降下することを明らかにした。ナマズは成熟まで2年以上要することが報告されており(Kumakura et al. 2003)、未成魚が成熟するまでの生存率、利用環境、移動力といった情報を収集することは、地域のナマズ個体群の維持管理のために重要であると考えられる。

2) 稚・幼魚および成魚の餌料の定量的な把握

本研究では、小排水路における稚・幼魚、河川における成魚の餌生物の内容は把握できなかった。今後はナマズの餌生物を特定することで、本種とセットで保全すべき種も把握できると考えられる。また、魚類の餌料を把握するためには、採捕した魚を解剖し胃内容物を観察する手法が一般的であるが、生息数が減少傾向にあるナマズを調査目的に殺処分することは保全学上避けるべきである。そこで、非殺傷的方法であり、フラットヘッドキャットフィッシュやブルーキャットフィッシュ (*Ictalurus furcatus*) の胃内容物調査に使われたストマックポンプや胃洗浄といった方法 (Waters et al. 2004) をナマズに適用可能かどうか検討する必要があると考えられる。

3) 他の整備後の水田水域におけるナマズの生息状況の把握とアンブレラ種としての可能性の検討

ナマズはその生態学的特徴から水田水域におけるアンブレラ種としての性格をもつと考えられるが、実際に検証されたことはない。もし、ナマズがアンブレラ種であれば、ナマズが生息する水域は生息しない水域と比べて、生物量や種数、多様度が高いと考えられる。このことから、ナマズの分布および同所的に生息する生物種や多様度などを調査することによって、本種がアンブレラ種であるかどうかわかり、水田生態系における本種の保全の重要性を明確にすることができると考えられる。また、調査地点の物理環境(例えば、流速や水深、圃場整備の有無、周辺の土地利用)を計測し、ナマズの生息数と物理環境の関係を解析し、得られたモデルを対象地域に適用することで本種の生息適地を抽出することも可能であると考えられる(田中ら, 2011)。

研究対象地である谷川周辺は圃場整備後の水田水域であるものの、ナマズが生活史を完結できる環境を備えていることがわかった。今後は他の整備後の水田水域でも同様にナマズ的生活史を調査し、本種が生活史を全うできる条件に関する情報を蓄積することでより効果的な保全策を提案できると考えられる。

4) 水田における繁殖および成育環境としての有効性の検討

既往の研究では、ナマズが水田に侵入し産卵する行動が報告されているが(片野ら, 1988; Maehata, 2002)、本研究では水田における産卵は確認できなかった。斉藤(1997)は水田と小溝は、水温や餌条件、干上がりやすさなどが微妙に異なっており、両方とも淡水魚の生息場所として重要であると述べている。このため、ナマズの保全のためには水田と水路間の移動経路確保をする水田魚道の設置を推進し、水田内での繁殖を可能にすることも必要であると考えられる。しかし、水田がナマズの稚・幼魚の成育場として適しているか定かではない。金尾ら(2009)はニゴロブナの稚魚を対象に水田での成育場としての有効性を検証するために、水田における稚魚の成長量、生産率、流下率(中干し時に水田から水路に流下した個体の割合)を他の水域と比較した。その結果、水田は成育場所として十分機能する可能性を示した。ナマズも水田において以上

のような調査を実施し，水田が成育場所として有効であるかどうか検討する必要があると考えられる．

引用文献

- Abe T., Kobayashi, Kon M., Sakamoto T. (2007) : Spawning of the Kissing Loach (*Leptobotia curta*) is limited to periods following the formation of temporary waters, *Zoological Science*, **24**(9), 922-926.
- 阿部 司 (2009) : アユモドキの“淡水回遊”と氾濫原環境への適応～吉井川水系における生態学的研究～, 岡山実験動物研究会, **25**, 31-34.
- Adams S.N., Rondorf W. D., Evans D. S., Kelly E. J. (1998) : Effects of surgically and gastrically implanted radio transmitters on growth and feeding behavior of juvenile Chinook Salmon, *Transactions of the American Fisheries Society*, **127**(1), 128-136.
- 青木繁伸 (2009) : Rによる統計解析, オーム社.
- Araujo-Lima C. A. R. M., Oliveira E. C. (1998) : Transport of larval fish in the Amazon, *Journal of Fish Biology*, **53**, 297-306.
- 有賀 誠, 津田裕一, 藤岡 紘, 本多健太郎, 光永 靖, 三原孝二, 宮下和士 (2009) : 石狩川におけるシロザケ *Oncorhynchus keta* の遡上行動—テレメトリーシステムの利用—, 応用生態工学, **12**, 119-130.
- Banks J. W. (1969) : A review of the literature on the upstream migration of adult salmonids, *Journal of Fish Biology*, **1**(2), 85-136.
- Barbaresi S., Santini G., Tricarico E., Gherardi F. (2004) : Ranging behaviour of the invasive crayfish, *Procambarus clarkii* (Girard), *Journal of Natural History*, **38**(22), 2821-2832.
- Bifolchi A., Lodé T. (2005) : Efficiency of conservation shortcuts: an investigation with otters as umbrella species, *Biological Conservation*, **126**(4), 523-527.
- Broadhurst T.B., Ebner B. C., Clear C. R. (2009) : Radio-tagging flexible-bodied fish: temporary confinement enhances radio-tag retention, *Marine and Freshwater Research*, **60**, 356 - 360.
- Brown R. S., Power G., Beltaoa S. (2001) : Winter movements and habitat use of riverine brown trout, white sucker and common carp in relation to flooding and ice break-up, *Journal of Fish Biology*, **59**, 1126-1141.
- Brown R.S., Geist D.R., Deters K.A., Grassell A. (2006) : Effects of surgically implanted acoustic transmitters >2% of body mass on the swimming performance, survival and growth of juvenile sockeye and chinook salmon, *Journal of Fish Biology*, **69**, 1626-1638.
- Carol J., Zamora L., Garcia-Berthou E. (2007) : Preliminary telemetry data on the movement patterns and habitat use of European catfish (*Silurus glanis*) in a reservoir of the River Ebro, Spain. *Ecology of Freshwater fish*, **16**, 450-457.
- Cooke J.S., Bunt M. C., McKinley R. S. (2000) : Winter residency of smallmouth bass in a thermal discharge canal: implications for tempering pump operation, *North American Journal of Fisheries Management*, **20**, 288-295.
- Crook A. D., Robertson I. A., King J. A., Humphries P. (2001) : The influence of spatial scale and habitat arrangement on diel patterns of habitat use by two lowland river fishes, *Oecologia*, **129**(4), 525-533.
- 独立行政法人土木研究所 (2010) : 多自然川づくりにおける河岸・水際部の捉え方, 土木研究所資料第4159号.

- Ebner B.C., Thiem J.D. (2009): Monitoring by telemetry reveals differences in movement and survival following hatchery or wild rearing of an endangered fish, *Marine and Freshwater Research*, **60**(1), 45-57.
- Fraser N.H.C., Metcalfe N. B., Heggenes J., Thorpe J. E. (1995): Low summer temperatures cause juvenile Atlantic salmon to become nocturnal. *Canadian Journal of Zoology*, **73**, 446-451.
- 藤咲雅明, 神宮字 寛, 水谷正一, 後藤 章, 渡辺俊介 (1999): 小河川・農業水路系における魚類の生息と環境構造との関係, 応用生態工学, **2**(1), 53-61.
- 藤咲雅明 (2002): 地域の生態系保全と農業農村整備事業の融合に向けて--田んぼの生きもの調査結果報告 (特集 農村再発見)-- ([農村環境整備]センター自主研究からの報告), 農村と環境, **18**, 82-90.
- 藤咲雅明, 鈴木正貴, 水谷正一 (2003): 魚類の生息からみた谷川における自然環境の再生と回復, 農村と環境, **19**, 60-67.
- 舟尾俊範, 沢田裕一 (2013): 水田地帯の小河川におけるナマズ *Silurus asotus* の侵入および繁殖について, 魚類学雑誌, **60** (1), 43-48.
- Gherardi F., Tricarico E., Ilhéu M. (2002): Movement patterns of an invasive crayfish, *Procambarus clarkii*, in a temporary stream of southern Portugal, *Ethology Ecology & Evolution*, **14**(3), 183-197.
- 端 憲二 (1987): 魚類の生息を考慮した水路の改良, 農業土木学会誌, **55**(11), 1067-1072.
- 端 憲二 (1998): 水田灌漑システムの魚類生息への影響と今後の展望, 農業土木学会誌, **66**(2), 143-148.
- 端 憲二 (2000): 田圃につける小さな魚道, 応用生態工学, **3**(2), 231-234.
- 碓 登志之, 堀 明弘 (2010): 魚のゆりかご水田プロジェクトにおける地域活動, 水土の知, **78**(10), 823-826.
- 日鷹一雅 (2000): タガメの村で起こっていること--保全と人里持続性の間で (特集・水田の水生昆虫類はどこへ.....), 昆虫と自然, **35**(9), 14-18.
- 平岡修宜, 荒井修亮, 中村憲司, 坂本 亘, 三田村啓理, 光永 靖, 米田佳弘 (2003): 超音波バイオテレメトリーを用いたスズキの移動と回遊の記録, 水産学会誌, **69**, 910 - 916.
- 広瀬慎一, 瀧本裕士, 浜田 明 (2008): 水路の水草内の流速測定, 農業農村工学会誌, **76**(11), 999-1003.
- Horký P., Slavík, O., Bartoš L., Kolářová J., Randák T. (2006): The effect of the moon phase and seasonality on the behaviour of pikeperch in the Elbe River, *Folia Zoologica*, **55**(4), 411-417.
- Horký P., Slavík O., Bartoš L., Kolářová J., Randák T. (2007): Behavioural pattern in cyprinid fish below a weir as detected by radio telemetry, *Journal of Applied Ichthyology*, **23**(6), 679-683.
- Hosoya K (1982): Freshwater fish fauna of the Yoshii River, Okayama Prefecture, *Bull. Biogeogr. Soc. Japan*, **37**, 23-35.
- 飯野哲也 (2005): 河川中流域の魚類に対する河畔植生の効果について, 埼玉県農林総合研究センター研究報告, **5**, 47-54.
- 今泉智通 (2010): R を用いた一般化線形モデル(仮説検定編)--割合データを例に (特集 統計解析(再?)入門), 雑草研究, **55**(4), 275-286.
- Irwin E. R., Freeman M. C., Costley k. M. (1999). Habitat use by juvenile channel catfish and flathead catfish in lotic systems in Alabama. Paper presented at the Catfish 2000: proceedings of the

- international ictalurid symposium. American Fisheries Society, Symposium.
- Jepsen N., Koed A., Thorstad E. Baras E. (2002): Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: how much have we learned?. *Hydrobiologia*, **483**, 239-248.
- Johnson D. H.(1980): The Comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference, *Ecology*, **61**(1), 65-71.
- 金尾滋史, 大塚泰介, 前畑政善, 鈴木規慈, 沢田裕一 (2009): ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の初期成長の場としての水田の有効性, 日本水産学会誌, **75**(2), 191-197.
- 環境省自然環境局野生生物課 (2007): 改訂日本の絶滅のおそれのある野生生物 4 汽水・淡水魚類, 自然環境研究センター.
- 片野修, 斉藤憲治, 小泉顕雄 (1988): ナマズ *Silurus asotus* のばらまき型産卵行動, 魚類学雑誌 **35**, 203-211.
- 片野修 (1998a): 水田・農業水路の魚類群集, “江崎保男, 田中哲夫編, 水辺環境の保全 - 生物群集の視点から -”, 朝倉書店, 67-79.
- 片野修 (1998b): ナマズはどこで卵を産むのか, 川魚たちの自然誌, 創樹社.
- Katano O., Hosoya K., Iguchi K., Yamaguchi M., Aonuma Y., Kitano S. (2003a): Species diversity and abundance of freshwater fishes in irrigation ditches around rice fields, *Environmental Biology of Fishes*, **66**(2), 107-121.
- Katano O., Nakamura T., Yamamoto S. (2003b): Comparison of consumption of bluegill by Far Eastern catfish and largemouth bass, *Fisheries Science*, **69**(5), 989-994.
- Katano O., Nakamura T., Yamamoto S. (2005): Prey fish selection by Far Eastern catfish *Silurus asotus* and largemouth bass *Micropterus salmoides*, *Fisheries Science*, **71**(4), 862-868.
- Katano O., Matsuzaki S. (2012): Biodiversity of freshwater fish in Japan in relation to inland fisheries, *Ecological Research Monographs*, Springer Japan, 431-444.
- 加藤潤, 中島香子, 水谷正一 (1999): 場と主体の変化から見た農村部における魚とりの変遷過程 - 栃木県西鬼怒川地区を事例として -, 農村計画学会誌, **18**, 43-54.
- Kawabata Y., Okuyama J., Mitamura H., Asami K., Yoseda K., Arai N. (2007): Post-release movement and diel activity patterns of hatchery-reared and wild black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii* determined by ultrasonic telemetry, *Fisheries Science*, **73**, 1147-1154.
- 川津浩二 (2000): 養鰻池を使用したナマズ *Silurus asotus* の加温養殖について, 千葉内水試研報, **7**, 34-40.
- 萱場祐一 (2008): 多自然川づくりにおける水際域の保全と修復: 水際域の魚類生息場所としての機能を中心として, 水環境学会誌, **31**(7), 341-345.
- 萱場祐一, 佐川志朗 (2009): 多自然川づくりにおける河岸処理手法に関する研究, 平成 21 年重点プロジェクト研究報告書, 1-5.
- 紀平肇 (1983): 環境の変化と魚相の変遷 - 用水路の魚類 -, 淡水魚, **9**, 58-60.
- 桐谷圭治 (2010): 改訂版 田んぼの生き物全種リスト, 農と自然の研究所, 生物多様性農業支援センター.
- 気象庁 (2013) (参照 2013.3.31): 過去の気象データ検索, (オンライン), 入手先 < : <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> >
- 北川貴士, 高井則之, 坂本亘, 荒井修亮 (1996): 琵琶湖北湖塩津湾における琵琶湖オオナマズ

- の回遊測定, 海洋理工学会誌, **2**, 91-96.
- 清田雅史, 岡村 寛, 米崎史郎, 平松一彦 (2004): 資源選択性の統計解析 : I. 基礎的な概念と計算方法, 哺乳類科学, **44**(2), 129-146.
- 清田雅史, 岡村 寛, 米崎史郎, 平松一彦 (2005): 資源選択性の統計解析-II : 各種解析法の紹介, 哺乳類科学, **45**(1), 1-24.
- Kobayakawa M. (1985): External characteristics of the eggs of Japanese catfishes (*Silurus*), *Japanese Journal of Ichthyology*, **32**(1), 104-106.
- Kobler A., Klefoth T., Wolter C., Fredrich F., Arlinghaus R. (2008): Contrasting pike (*Esox lucius* L.) movement and habitat choice between summer and winter in a small lake, *Hydrobiologia*, **601**(1), 17-27.
- 国立天文台 (2013): こよみの計算. <http://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/koyomix.cgi> (2013年3月12日現在)
- Kumakura N., Sakai K., Takashima F. (2003): Reproductive cycle and human chorionic gonadotropin-induced ovulation in hatchery reared Japanese catfish *Silurus asotus*, *Fisheries Science*, **69**(3), 495-504.
- 来間明子, 野村 博 (1997): ナマズ稚魚の餌付時における飼育密度と飼料について, 埼玉県水産試験場研究報告, **55**, 1-5.
- Maehata M. (2002): Stereotyped sequence of mating behavior in the Far Eastern catfish, *Silurus asotus*, from Lake Biwa, *Ichthyological Research*, **49**(2), 202-205.
- 前畑政善 (2003): ナマズはなぜ田んぼをめざすのか?, “滋賀県立琵琶湖博物館編, 鯰—魚と文化の多様性—”, サンライズ出版, 107-121.
- Maehata M. (2007): Reproductive ecology of the Far Eastern catfish, *Silurus asotus* (Siluridae), with a comparison to its two congeners in Lake Biwa, Japan, *Environmental Biology of Fishes*, **78**(2), 135-146.
- 前畑政善 (2008): ナマズ類の繁殖生態と水辺移行帯, “川那部浩哉 [監修], 鯰—イメージとその素顔—”, 八坂書房.
- Manly B. F. J., McDonald L.L., Thomas D.L., Erickson W. P. (2002): Resource selection by animals : statistical design and analysis for field studies, Kluwer Academic Publishers.
- Marty G.D., Summerfelt R.C. (1986): Pathways and mechanisms for expulsion of surgically implanted dummy transmitters from channel catfish, *Transactions of the American Fisheries Society*, **115**, 577-589.
- Mashiko K. (1981): Periodic nocturnal activities in the catfish *Silurus asotus* in captivity, *Japanese Journal of Ichthyology*, **28**, 148-156.
- 松井 明, 佐藤政良 (2004): 茨城県下館市の水田圃場整備によって造成された排水路系における水生生物の分布, 保全生態学研究, **9**(2), 153-163.
- 松井 明 (2009): 整備済み水田排水路系における魚類およびトンボ類数種の成長過程, 保全生態学研究, **14**(1), 3-11.
- 真山 紘 (1992): サクラマス *Oncorhynchus masou*(Brevoort)の淡水域の生活および資源培養に関する研究, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, p1-156.
- 真山 紘 (2004): さけ ます類の河川遡上生態と魚道, さけ ます資源管理センターニュース, **13**,

1-7.

- Metcalf N.B., Fraser N.H.C., Burns M. D. (1999) : Food availability and the nocturnal vs. diurnal foraging trade-off in juvenile salmon, *Journal of Animal Ecology*, **68**, 371-381.
- Metcalf N.B., Steele G.I. (2001) : Changing nutritional status causes a shift in the balance of nocturnal to diurnal activity in European Minnows, *Functional Ecology*, **15**, 304-309.
- 皆川明子 (2009) : 田んぼが育む淡水魚とその保全. 「春の小川の淡水魚」(水谷正一・森淳 編著), pp.9-29. 学報社, 東京.
- 皆川明子, 高木強治, 樽屋啓之, 後藤眞宏 (2010) : 非灌漑期の農業水路における魚類の移動と越冬, *農業農村工学会論文集*, **78**(5), 369-376.
- 皆川明子, 高木強治, 須戸 幹, 小谷廣通, 岩間憲治, 金木亮一 (2012) : 非灌漑期の農業水路における魚類の越冬場造成の試み, *農業農村工学会論文集*, **80**(5), 445-454.
- Mitamura H., Arai N., Mitsunaga Y., Yokota T., Takeuchi H., Tsuzaki T., Itani M. (2005) : Directed movements and diel burrow fidelity patterns of red tilefish *Branchiostegus japonicus* determined using ultrasonic telemetry, *Fisheries Science*, **71**, 491-498.
- Mitamura H., Mitsunaga Y., Arai N., Viputhanumas T. (2006) : Comparison of two methods of attaching telemetry transmitters to the Mekong Giant Catfish, *Pangasianodon gigas*, *Zoological Science*, **232**, 235-238.
- Mitamura H., Mitsunaga Y., Arai N., Yamagishi Y., Khachaphichat M., Viputhanumas T. (2008) : Horizontal and vertical movement of Mekong giant catfish *Pangasianodon gigas* measured using acoustic telemetry in Mae Peum Reservoir, Thailand, *Fisheries Science*, **74**, 787-795.
- Mitamura H., Uchida K., Miyamoto Y., Arai N., Kaihara T., Yokota T., Okuyama J., Yasuda T. (2009) : Preliminary study on homing, site fidelity, and diel movement of black rockfish *Sebastes inermis* measured by acoustic telemetry, *Fisheries Science*, **75**, 1133-1140.
- 光永 靖, 荒井修亮, 坂本 亘 (2002) : 水温・水深データロガーによるマダイの遊泳行動の長期間記録, *海洋理工学会誌*, **8**(1), 25-33.
- 宮地傳三郎, 川那部浩哉, 水野信彦 (1976) : 原色日本淡水魚類図鑑, 保育社, 264-266.
- 宮本真二, 渡邊奈保子, 牧野厚史 (2001) : 日本列島の動物遺存体記録にみる縄文時代以降のナマズの分布変遷, *動物考古学*, **16**, 61-73.
- 水野敏明, 大塚泰介, 小川雅広, 舟尾俊範, 金尾滋史, 前畑政善 (2010a) : 琵琶湖の水位変動とニゴロブナ *Carassius auratus glandoculis* の水田地帯への産卵遡上行動の誘発要因, 保全生態学研究, **15**(2), 211-217.
- 水野敏明, 大塚泰介, 金尾滋史 (2010b) : 水田地帯へ遡上するニゴロブナの水路選択に関わる環境要因, *魚類学雑誌*, **57**(2), 135-142.
- 水谷正一 (2007) : 生物多様性を維持・回復するための環境基盤づくり, “水谷 正一編著, 水田生態工学入門”, 農文教, 29-34.
- 水谷正一 (2009) : “春の小川”とは, どんな川なのか, “水谷正一, 森 淳編著, 春の小川の淡水魚”, 学報社, 1-8.
- 森 淳, 水谷正一, 高橋順二 (2008) : 水田生態系の特徴と変質水田生態工学の視点から, *農業農村工学会論文集*, **76**(2), 211-221.
- 森 淳, 渡部恵司, 竹村武士 (2011) : 環境配慮手法による農業排水路の底生動物相の違い, *農村*

- 工学研究所技報, 211, 97-107.
- Morisita M. (1962): I δ -Index, a measure of dispersion of individuals, *Researches on Population Ecology*, **4**(1), 1-7.
- 守山 弘 (1997): 水田を守るとはどういうことか: 生物相の視点から, 農山漁村文化協会.
- 守山拓弥, 藤咲雅明, 水谷正一, 後藤 章 (2006): 新設された魚道における魚類の遡上が上流の農業用小河川の魚類相におよぼす影響, 農業土木学会論文集, **74**(5), 805-806.
- 守山拓弥, 水谷正一, 後藤 章 (2007): 栃木県西鬼怒川地区の湧水河川におけるホトケドジョウの季節移動, 魚類学雑誌, **54**(2), 161-171.
- 守山拓弥, 藤咲雅明, 水谷正一, 後藤 章 (2008): 農業用の小河川, 農業水路および河川間に形成された水域ネットワークにおけるウグイの移動: 栃木県西鬼怒川地区における事例, 農業農村工学会論文集, **76**, 85-94.
- 守山拓弥 (2009): 扇状地の“春の小川”に生息する淡水魚とその保全. 「春の小川の淡水魚」(水谷正一・森淳 編著), 91-120. 学報社, 東京.
- Moser M.L., Myers M. S., Burke B.J., O'Neill S.M. (2003): Effects of surgically-implanted transmitters on survival and feeding behavior of adult English sole. In: *Aquatic telemetry: advances and applications*(eds. M. T. Lembo & G. Marmulla), 269-274. Proceedings of the Fifth Conference on Telemetry held in Europe. FAO/COISPA, Ustica, Italy.
- Murchie K. J., Cooke S. J., Danylchuk A. J., Suski C. D. (2011): Estimates of field activity and metabolic rates of bonefish (*Albula vulpes*) in coastal marine habitats using acoustic tri-axial accelerometer transmitters and intermittent-flow respirometry, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **396**, 147-155.
- 永山滋也, 根岸淳二郎, 久米 学, 佐川志朗, 塚原幸治, 三輪芳明, 萱場祐一 (2012): 農業用の水路における季節と生活史段階に応じた魚類の生息場利用, 応用生態工学, **15**(2), 147-160.
- 中村太士 (2007a): 応用生態工学が担ってきた研究領域と未知の領域—現状認識と新たな視点の発掘をめざして—, 応用生態工学, **10**(1), 47-58.
- 中村智幸, 尾田紀夫 (2003): 栃木県那珂川水系の農業水路における遡上魚類の季節変化, 魚類学雑誌, **50**(1), 25-33.
- 中村智幸 (2007b): 水路に生息する魚類の生態, “水谷正一編著, 水田生態工学入門”, 農文協, 40-50.
- 棗田孝晴, 鶴田哲也, 井口恵一朗 (2010): 絶滅のおそれのある日本産淡水魚の生態的特性の解明, 日本水産学会誌, **76** (2), 169-184.
- Neves J. R., Servello F., Wajda R. (1989): Tset of telemetry techniques on freshwater mussels, *Malacological Review*, **22**, 61-63.
- 日本バイオロギング研究会 (2009): バイオロギング: 最新科学で解明する動物生態学, 京都通信社.
- 西田一也, 大平 充, 千賀裕太郎 (2009): 農業水路における魚類の越冬環境に関する研究--東京都国立市を流れる府中用水を事例として, 環境情報科学論文集, **23**, 197-202.
- 農林水産省農村振興局計画部事業計画課 (2004): 環境との調和に配慮し事業実施のための調査計画・設計の手引き 1-基本的な考え方・水路整備-. 農業土木学会, 東京.
- 小原昌和 (1987): ナマズ. 落合明 (編), 魚類解剖図鑑, 緑書房, 111-116.

- Onikura N., Nakajima J., Kouno H., Sugimoto Y., Kaneto J. (2009) : Habitat use in irrigation channels by the golden venus chub (*Hemigrammocypris rasborella*) at different growth stages, *Zoological Science*, **26**(6), 375-381.
- 鬼倉徳雄, 川本朋慶 (2013) : 九州北部の一級水系における水質と純淡水魚類の出現との関係, 水環境学会誌, **36**(3), 99-106.
- 大高裕幸, 須永哲雄 (1992) : 香川県金倉川におけるオイカワとカワムツの分布 -- 仔・稚魚期を中心にして, 香川生物, **19**, 127-135.
- Peters M.L., Reinhardt G. U., Pegg A. M. (2008) : Factors influencing radio wave transmission and reception: use of radiotelemetry in large river systems, *North American Journal of Fisheries Management*, **28**, 301 - 307.
- R Development Core Team (2010) : R: a language and environmental for statistical computing. <http://www.r-project.org/index.html>.
- Roberge J. M., Angelstam P. (2004) : Usefulness of the umbrella species concept as a conservation tool, *Conservation Biology*, **18**(1), 76-85.
- 佐伯緑, 早稲田宏一 (2006) : ラジオテレメトリを用いた個体追跡技術とデータ解析法, 哺乳類科学, **46**, 193-210.
- 斉藤憲治, 片野修, 小泉顕雄 (1988) : 淡水魚の水田周辺における一時的水域への侵入と産卵, 日本生態学会誌, **38**, 35-47.
- 斉藤憲治 (1997) : 淡水魚の繁殖場所としての一時的水域. 「日本の希少淡水魚の現状と系統保存」(長田芳和・細谷和海編), pp.194-204. 緑書房, 東京.
- Samuel D. M., Fuller R. M. (2001) : ラジオテレメトリー, “日本野生動物医学会野生生物保護学会(監修), 野生動物の研究と管理技術”, 文永堂出版, 301-324.
- Sisak M., Lotimer J. (1998) : Frequency choice for radio telemetry: the HF vs. VHF conundrum, *Hydrobiologia*, **371-372**, 53-59.
- Slavík O., Horký P., Bartoš L., Kolářová J., Randák T. (2007) : Diurnal and seasonal behaviour of adult and juvenile European catfish as determined by radio-telemetry in the River Berounka, Czech Republic, *Journal of Fish Biology*, **71**, 101-114.
- 佐々木 丞, 関根雅彦, 後藤益滋, 浮田正夫, 今井 剛 (2001) : 多自然型川づくりに資するための魚の行動圏調査, 環境工学研究論文集, **38**, 13-19.
- 佐藤太郎, 東 淳樹 (2004) : 農業用小河川における生態系に配慮した排水路改修が魚類相と生息環境に及ぼす影響, 野生生物保護, **9**(1), 63-76
- 杉原知加子, 水谷正一 (2006) : 河川と水田間に連結する人工池が魚類の生息に果たす役割 - 栃木県上三川町谷川水系の事例 -, 農業土木学会論文集, **74**, 49-58.
- 勝呂尚之 (2005) : 谷戸の代表種ホトケドジョウ, “片野 修, 森誠一 [編], 希少淡水魚の現在と未来 - 積極的保全のシナリオ -, 信山社出版, 50-60.
- 鈴木正貴, 水谷正一, 後藤 章 (2004) : 小規模魚道による水田, 農業水路および河川の接続が魚類の生息に及ぼす効果の検証, 農業土木学会論文集, **72**(6), 641-651.
- 鈴木正貴 (2011) : 環境修復のハード技術 - 魚道技術の視点 -. 農業農村工学会誌, **79**(3), 171-174.
- 鈴木孝文 (2007) : 生態系配慮の基礎知識 (その2) 環境配慮対策の現状と課題, 農業土木学会誌, **75**(6), 515-520.

- 高橋伸拓, 水谷正一, 後藤 章 (2009): 設置環境の違いからみた井桁護岸の生息魚類に対する効果, 農業農村工学会論文集, **77**, 17-25.
- Takai N., Sakamoto W., Maehata M., Arai N., Kitagawa T., Mitsunaga Y. (1997): Settlement characteristics and habitats use of Lake Biwa catfish *Silurus biwaensis* Measured by ultrasonic telemetry, *Fisheries Science*, **63**, 181-187.
- 竹村武士, 小出水規行, 奥島修二 (2004): メダカの群泳を可能とする小水路の物理環境を探る --流速, 底質を環境因子とした実験, 農業技術, **59**(7), 316-321.
- 竹村武士, 渡部恵司, 森 淳, 小出水規行, 水谷正一 (2009): 水のうを主材料とする簡易魚道の可能性, 農業農村工学会論文集, **77**(6), 667-668.
- 田中道明 (2001): 水田とその周辺水域に生息するドジョウ個体群の季節消長, 環動昆, **12**(2), 91-101.
- 田中貴宏, 内平隆之 (2008): 住民参加型「まちづくり点検」における GPS 搭載モバイル GIS の活用に関する研究 - 尼崎市武庫地区での実践を通して -, 日本建築学会技術報告集, **14**(27), 199-204.
- 田中 亘, 鹿野雄一, 山下奉海, 斉藤 慶, 河口洋一, 島谷 幸宏 (2011): 佐渡島の河川のドジョウ密度を決定する要因とその保全策への応用, 応用生態工学, **14**(1), 1-9.
- 田崎志郎, 金澤 光 (2001): ナマズの養殖技術. 新魚種開発協会, 緑書房, 東京.
- 照井 慧, 宮崎佑介, 松崎慎一郎, 鷺谷いづみ (2011): 北海道朱太川水系におけるカワシンジュガイ個体群の現況と局所密度に影響する要因, 保全生態学研究, **16**(2), 149-157.
- Thomas D. L., Taylor E. J. (1990): Study designs and tests for comparing resource use and availability, *The Journal of Wildlife Management*, **54**(2), 322-330.
- 戸金 大, 福山欣司, 倉本 宣 (2010): テレメトリー法を用いたトウキョウダルマガエルの谷戸田における移動追跡, 爬虫両棲類学会報, **2010**(1), 1-10.
- Tojo H. (1996): Habitat selection, foraging behaviour and prey of five heron species in Japan, *Japanese Journal of Ornithology*, **45**(3), 141-158.
- 友田 努, 小磯雅彦, 島 康洋 (2008): シオミズツボワムシ培養水温がヒラメ仔魚飼育に及ぼす影響, 日本水産学会誌, **74**(4), 625-635.
- 友田淑郎 (1962): びわ湖産魚類の研究-I. びわ湖産 3 種のナマズの形態の比較およびその生活との関連, 魚類学雑誌, **8**(5-6), 126-146.
- 友田淑郎 (1978): ナマズの発育, “友田淑郎, 琵琶湖とナマズ”, 汐文社, 66-84.
- 坪川健吾 (1985): 河川改修による魚相の変化 - 倉安川用水 (岡山県) の場合 -, 淡水魚, **11**, 55-58.
- 辻井要介, 上田哲行 (2003): コンクリート化された水路におけるメダカの分布とそれに影響を及ぼす環境要因について, 環動昆, **14**(3), 179-192.
- 網川孝俊, 酒井忠幸, 吉田 豊, 久保田仁志, 佐川志朗 (2012): 栃木県南東部の自然生息地におけるミヤコタナゴ保全への取り組み - ミヤコタナゴ稚魚の生息環境評価と環境改善, 応用生態工学, **15**(2), 249-255.
- 梅沢一弘, 鈴木 栄, 田中深貴男 (1994a): ナマズ仔魚の生残率に及ぼすシェルタ-の影響, 埼玉県水産試験場研究報告, **52**, 93-96.
- 梅沢一弘, 鈴木 栄, 田中深貴男 (1994b): ナマズ仔魚の生残率に及ぼす放養密度の影響, 埼玉県水産試験場研究報告, **52**, 89-92.

- Van Vesseem J., Draulaks D., Bont A. F. (1984) : Movements of radio - tagged Grey Herons *Ardea cinerea* during the breeding season in a large pond area, *Ibis*, **126**(4), 576-587.
- 和田吉弘 (2000) : 魚道の設計で知っておきたいこと, 応用生態工学, **3**(2), 225-230.
- 鷺谷いづみ, 矢原徹一 (2007) : 保全生態学入門 : 遺伝子から景観まで : 生物多様性を守るために, 文一総合出版.
- Waters D.S., Kwak J. T., Arnott B. J., Pine E. W. (2004) : Evaluation of stomach tubes and gastric lavage for sampling diets from blue catfish and flathead catfish, *North American Journal of Fisheries Management*, **24**(1), 258-261.
- Wikelski M., Moskowitz D., Adelman J. S., Cochran J., Wilcove D. S., May L. M. (2006) : Simple rules guide dragonfly migration, *Biology Letters*, **2**(3), 325-329
- 山本康仁, 千賀裕太郎 (2012) : 都市化により分断化された水田におけるトウキョウダルマガエル *Rana porosa porosa* の分布と環境要因の関係, 保全生態学研究, **17**(2), 175-184.
- Yamashita Y., Tanaka M., MillerJohn M. (2001) : Ecophysiology of juvenile flatfish in nursery grounds, *Journal of Sea Research*, **45**(3-4), 205-218.
- 山下 洋 (2010) : 生残と成長, “塚本勝巳編, 魚類生態学の基礎”, 恒星社厚生閣, 172-181.
- 米山和良, 光永 靖, 松田征也, 平石智徳, 國宗義雄, 山根 猛 (2008) : 琵琶湖南湖における超音波テレメトリーを用いたニゴロブナ成魚の行動測定(短報), 日本水産学会誌, **74**(5), 864-866.
- 吉田 豊, 石嶋久男, 水谷正一, 後藤 章 (2013) : 栃木県那珂川水系箒川に流入する農業水路における魚類の産卵環境, 応用生態工学, **16**(1), 1-11.
- Yu X.P., Chang X.Y., Li X., Chen W.G., Shi L. (2009) : Return of the crested ibis *Nipponia nippon*: a reintroduction programme in Shaanxi province, China, *Birding ASIA*, **11**, 80-82.
- 湯浅卓雄, 土肥直樹 (1989) : 岡山県における水田及び水田に類似した一時的水域で産卵する淡水魚群-アユモドキを中心として, 淡水魚保護, **2**, 120-125.
- Zeller D. C. (1998) : Spawning aggregations : patterns of movement of the coral trout *Plectropomus leopardus* (Serranidae) as determined by ultrasonic telemetry, *Marine Ecology Progress Series*, **162**, 253-263.

謝辞

この5年間の月日の集大成として博士論文をまとめるに当たり、数多くの方々のご指導、ご助言をいただいたことに深謝するとともに、この場を借りてお礼の言葉を述べさせていただきたい。

水谷正一名誉教授には他大学から来た私を修士学生として迎えてくださり、農学のことを何も知らない私に、農業とはなにか、農業と生物と共生する道はあるのか、自然保護はなんなのかといった農学にとどまらない、広い分野、視点から熱心に指導していただいた。また、水谷先生とは学内、学外問わずいろいろな場所で研究以外にもお世話になった。研究室の諸先輩方、他大学の先生、他さまざまな人とめぐりあわせていただきましたことも、私にとってかけがえのないことだった。研究ではバイオテレメトリーという農学において新たな手法に取り組む機会をいただき、数々の高価な調査道具を調達するという、必要不可欠な支援をしていただいた。そして、私が博士課程に進学する際に、ご自身の退職までの2年間指導していただくことと、退職後の指導教員に後藤先生を推薦してくださった。水谷先生が退職された後も、折に触れ私の研究に的確なアドバイスをいただき、励みになった。今日の私がこのような道に進むことができたのも、水谷先生のお陰といっても過言ではない。あらためて感謝の意を表したい。

後藤章教授には修士の時代から、ゼミ発表の際に的確な指示をしていただいております。後年指導教員になっていただいたからは、研究の指導、投稿論文の添削、各種の事務手続き等でお世話になった。他研究室の学生の指導教員を引き受けるという、懐の広さに感服した。副指導教員の田村孝浩准教授には、測量やGISの門外漢であった私が何度も質問しにいても、それに快く応じていただいた。また、高価なGPS、GISの機材を無償で貸していただき、これにより調査の精度や効率が激的に向上した。このようなご協力がなければ、博士研究は成り立たなかつたであろう。茨城大学の小林久助教授、東京農工大学の加藤亮准教授、宇都宮市の飯郷雅之教授には、指導教員を快く引き受けて下さり、審査や指摘をしていただき深く感謝したい。また、守山拓弥講師には宇都宮大学に着任される以前より、様々な場面でお会いする機会があり、貴重なお話を聞かせていただき、とても楽しい時間を過ごすことができた。着任されてからはゼミでのご指摘はもちろんのこと、お忙しいにもかかわらず、私が質問しに伺った時に時間を忘れ熱く議論を交わし、私にとってはとても良い刺激になったし、参考になった。

西鬼怒川地区での調査を実施するに当たり、管理主体であるNPO法人グラウンドワーク西鬼怒の中澤事務局長には調査の申し出を引き受けてくださり、周辺農家の方々との連携を図っていただいた。中澤事務局長なくして本研究は成立しなかつたといっても過言ではない。また、研究以外にもプライベートで数々の行事に関わらせていただき、様々な貴重な経験ができた。重ねて御礼申し上げたい。谷川周辺の下ヶ橋集落の加藤義明氏には私が谷川で調査をしていた時に、何度かご自宅に招いてくださり、その上食事やお風呂まで用意してくれた

こともしばしばあった。加藤さんのように、西鬼怒川地区の農家の方は私の調査中に気さくに話しかけて下さり、部外者である私をととても友好的に迎え入れていただいた。このような地域の方々のご厚意があったからこそ、気兼ねなく調査地に通うことができ、時に励まされモチベーションを維持し研究を続けることができたと感じている。これまでに地域の方々との友好関係を築きあげて下さった水谷先生、研究室の諸先輩方の功労があったことも重要な要素であったと思われる。重ねてお礼申し上げたい。

本研究の装着実験に際して、供試魚や実験水槽の提供並びに供試魚の管理までご協力して下さった馬頭高校水産科の吉田宰教諭、青木信太郎教諭にも心からお礼申し上げる。

最後に、日ごろご多忙にも拘わらず事あるごとに相談に乗っていただき、研究の方法や解析方法などを丁寧に教えていただいた栃木県水産試験場の吉田豊研究員ならびに藤咲雅明氏にも心からお礼申し上げる。

最後にこの5年間、宇都宮における学生生活を承諾し、常に支えて下さった家族にも感謝したい。

ここにお世話になったすべての方々に感謝の念を示すとともに、この学位論文をもってお詫びに代えさせていただく。

付録

本研究の実施にあたり，多くの予備調査，計画性を伴わない散発的な観察からナマズの生態に関する特筆すべき情報が得られた．そこで，本文ではなく付録としてその一部を掲載する．

個別に観察された繁殖行動の事例

1.2012年6月4日の夜間

2012年6月4日17時10分，偶然第1落差の上流20mの地点で雄成魚(171g)と雌成魚(471g)を発見，体長や体重を測定して放流した．そこで，これらの個体以外にも小排水路および土水路に成魚が存在するか確認するため，午後10時まで水路下流から上流にかけて踏査し，個体数とおおよその位置，その行動内容(定位，遊泳等)を記録した．また，第2落差に赤外線カメラを設置し，移動する個体の様子を撮影した．

その結果，小排水路では観察調査とビデオ撮影により合計23尾の個体を確認した．一方，土水路では雌雄2ペアの4個体を確認した．小排水路の最も上流で谷川から400mの地点で個体を確認したことから，水路に存在する4つの落差を遡上したと考えられた．また，18時5分に約100mの地点において，雌雄の1ペアを発見し行動を追跡したところ，雌が上流にかけて先行して移動し雄がそれに追従しており，途中1回巻きつき行動を見せた(Photo1)．その後，このペアはさらに上流に移動し，第2落差まで到達した．この行動は既往の知見と一致した．つまり，繁殖行動はふつう雌雄1尾ずつによって行われ，雄が雌を追尾し，やがて雄が雌に巻き付くという行動である(片野ら，1988)．

6月4日に降雨はなかったが，前日の6月3日には合計22mmの降雨があった．このことから，前日に遡上した成魚のうちの一部の個体が翌日まで小排水路に残留していたと考えられる．



Photo1 雌雄ペアが巻きつき行動した様子

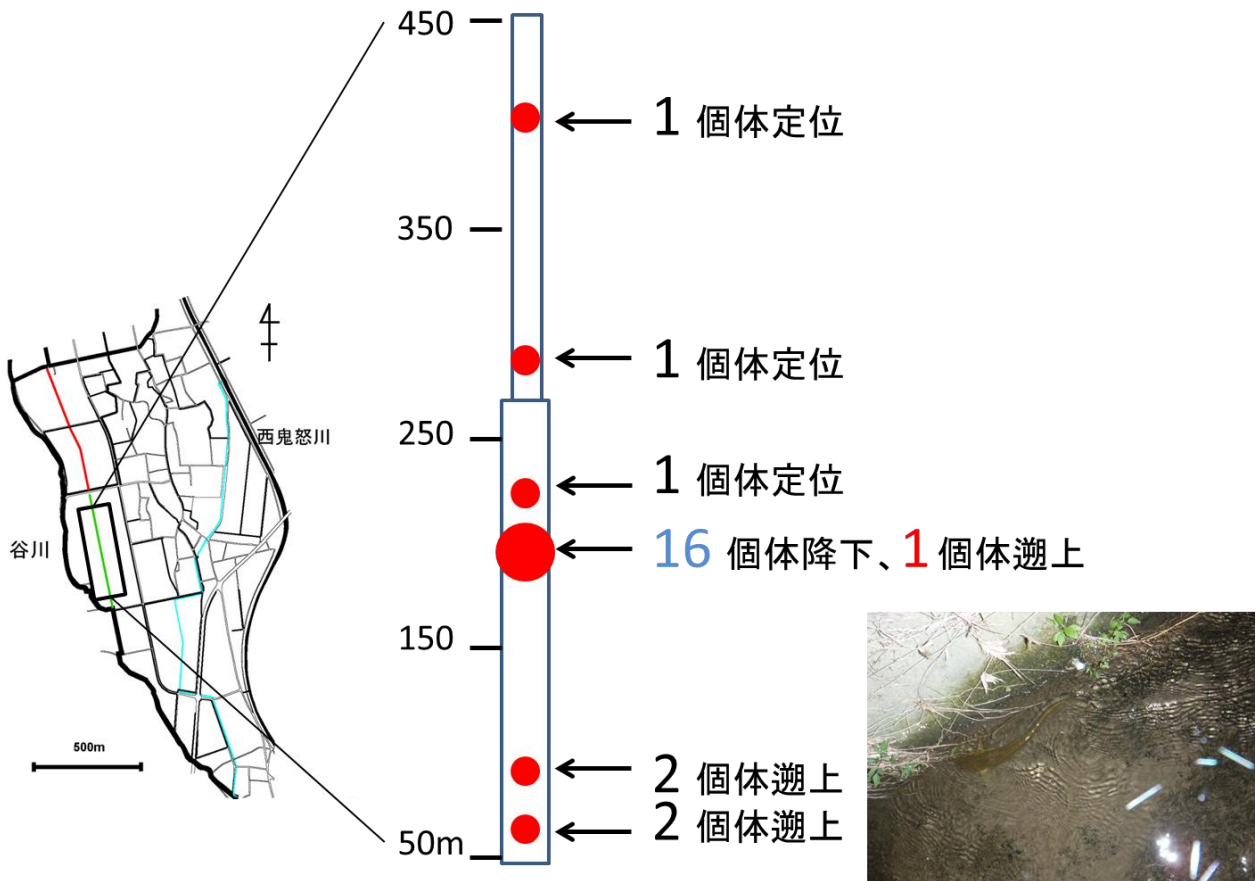


Fig.1 6月4日に小排水路全域で観察された成魚の分布

2.2013年5月31日の日中

2013年5月30日に赤外線カメラによって第1落差を成魚が魚道遡上する様子が撮影された。このため、翌5月31日に小排水路全域において、卵をタモ網を用いて確認した。その結果、卵の他に成魚が複数採捕された (Table 1)。これらの個体は15時30分頃に、第2落差で採捕され、体重、全長および性別を確認した。採捕された9尾のうち8尾が雌個体であり、全長30cm以上であり腹部が膨満していることから成熟しており、繁殖のために侵入したと考えられた (Photo2-a)。また、これらの個体の測定中に上流区間から降下移動した個体を確認した (Photo2-b)。さらに小排水路内に残留する成魚を確認するために、上流方向に徒歩で移動しながら、目視で個体を探索した。その結果、区間3において雌1尾に対し雄2尾の1グループ、雄雌1尾の1ペアが寄り添って定位している様子 (Photo2-c) を確認したほか、巻きつき行動も観察された (Photo2-d)。区間4では雄雌1尾のペアを観察した。ここで、ナマズは雄のほうが雌より体サイズは小さく、雌雄のつがいで行動することが報告されていることから (Maehata, 2002)、明らかにサイズの異なる2尾は雌雄であると判定した。これらのことから、5月30日に遡上した個体のうち、多くの個体は小排水路に残留し、それらは日中雌雄のペアで分散、もしくは落差工に集中的に分布し、日没後19時から21までの約2時間ですべて降下した (Fig.6-9) と考えられた。

Table 1 第2落差で採捕された成魚

	体重 (g)	全長 (cm)	性別
1	874	48.0	♀
2	652	41.0	♀
3	556	42.0	♀
4	335	39.0	♂
5	710	47.0	♀
6		逃走	♀
7	846	45.5	♀
8	810	46.0	♀
9	735	45.0	♀
平均	689.8	44.2	

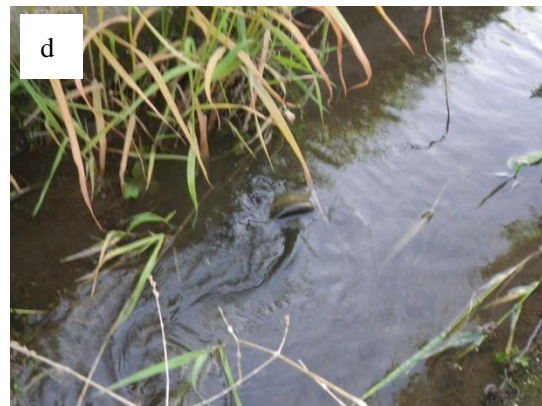


Photo2 5月31日の観察で見られた成魚の様子

2012年と2013年の繁殖期の日中に成魚が小排水路内に残留したことを確認した。既往の知見では、ナマズは夜間に繁殖場所に遡上し、明け方までに降下したとされ(斉藤ら, 1988; 舟尾・沢田, 2013), 翌日まで残留したという報告は見られない。そこで、なぜ小排水路において成魚は残留したのか考察したい。

第6章で述べたように、降雨時に水量が増加することで落差工による移動障害は一時的に解消され成魚が繁殖可能になったと考えられる。そして、前日の夜間に水量増加に伴い小排水路に侵入した成魚はペアを形成し、移動しながら所々で産卵する。実際に小排水路における繁殖行動を一部始終観察したわけではないため推測に頼る部分も多いが、2通りの理由が考えられる。1つ目の理由はナマズの卵の付着性は弱いことから、小排水路が増水した状況で産卵することは、卵の流失の危険性が高い。このことから、成魚は水量が低下するまで水路内に留まり、翌日産卵したのではないかと考えられる。2つ目の理由は小排水路における繁殖の機会は少ないので、遡上した日とその翌日にかけて産卵したのでは無いかと考えられる。2日目になると小排水路の水位は前日と比べて極端に低下する。成魚は水位低下に伴う酸欠や干上がりを恐れ、谷川に降下したのではないかと考えられる。

電波テレメトリーの予備調査で観察された長距離移動

2012年7月2日に小排水路において採捕された成魚2個体に電波発信機(ATS, F1140)を内部装着した。これらの個体(T1およびT2)を用いて電波テレメトリーによる個体追跡技術習熟のための予備調査を実施した。T1は全長31cm, 体重195g, 雄個体であった。T2は全長36cm, 体重293gの雄個体で腹部に手術痕が見られ, 開腹したところ電池の切れた超音波発信機(V9-2L)が存在していた(Photo3)。そのため, 超音波発信機を摘出した後に電波発信機を装着した。摘出された発信機の製造番号から, T2は2010年8月9日に放流した個体No.2であることが判明した。放流から再採捕までの期間は693日(約2年間)で, 装着個体の1年以上にわたる長期間の生存を初めて確認した。また, 小排水路において採捕したことから, 超音波発信機を装着した個体が繁殖移動したことを初めて確認できた。

7月8日にこれらの個体を放流し, 追跡を試みた。T1は放流日の18時に小排水路入り口で存在を確認した。その後, 谷川内でT1を探索したものの, 発見できなかったことから, 谷川より下流まで探索範囲を拡大した。その結果, 7月19日に約2km下流の白沢公園内の池(以下, A池)でT1を発見した(Fig.2)。

このように, 初めて成魚が谷川から移出し下流に長距離移動したことを確認した。谷川からA池に到達するには, 谷川最下流部に存在する南部堰の魚道を介して内川(南部堰より下流は谷川から名称が変わる)に降下し, 取水堰から白沢公園内の旧九郷半用水, A池という経路を辿らなければならない。A池がT1の生息場所であったかどうかは定かではないが, 第5章の結果から繁殖期に小排水路と生息場所間を移動することが観察されていることから, T1も繁殖のために小排水路とA池の間を往復移動した可能性も考えられる。



Photo3 個体 No.2 の切開痕と摘出された超音波発

守山ら(2008)は、ウグイを対象に谷川およびその接続水域である九郷半川、内川、西鬼怒川において魚道により構築された水域ネットワークのウグイの移動を調査した。その結果、谷川以外の場所で標識を施した個体が、谷川内の人工産卵場で再捕され、その後谷川以外の場所で再々捕されたという事例が確認された。つまり、他水域から谷川に移入し産卵した後、他水域に回帰したウグイが存在したことを示している。このようにウグイでも水域ネットワークを介して繁殖移動する個体が存在することから、ナマズも全体のうちどの程度かわからないものの、同様な移動を行う個体が存在する可能性が考えられる。

以上の推測が確かだとすれば、谷川だけではなく、接続水域を含めた広域的なスケールでのナマズの繁殖移動を把握する必要がある。そのため、今後は繁殖期における水域間の繁殖移動を把握するために、小排水路だけではなく、水域間の接続部(南部堰)にも固定型レーザバーを設置するといった調査も必要であると考えられる。

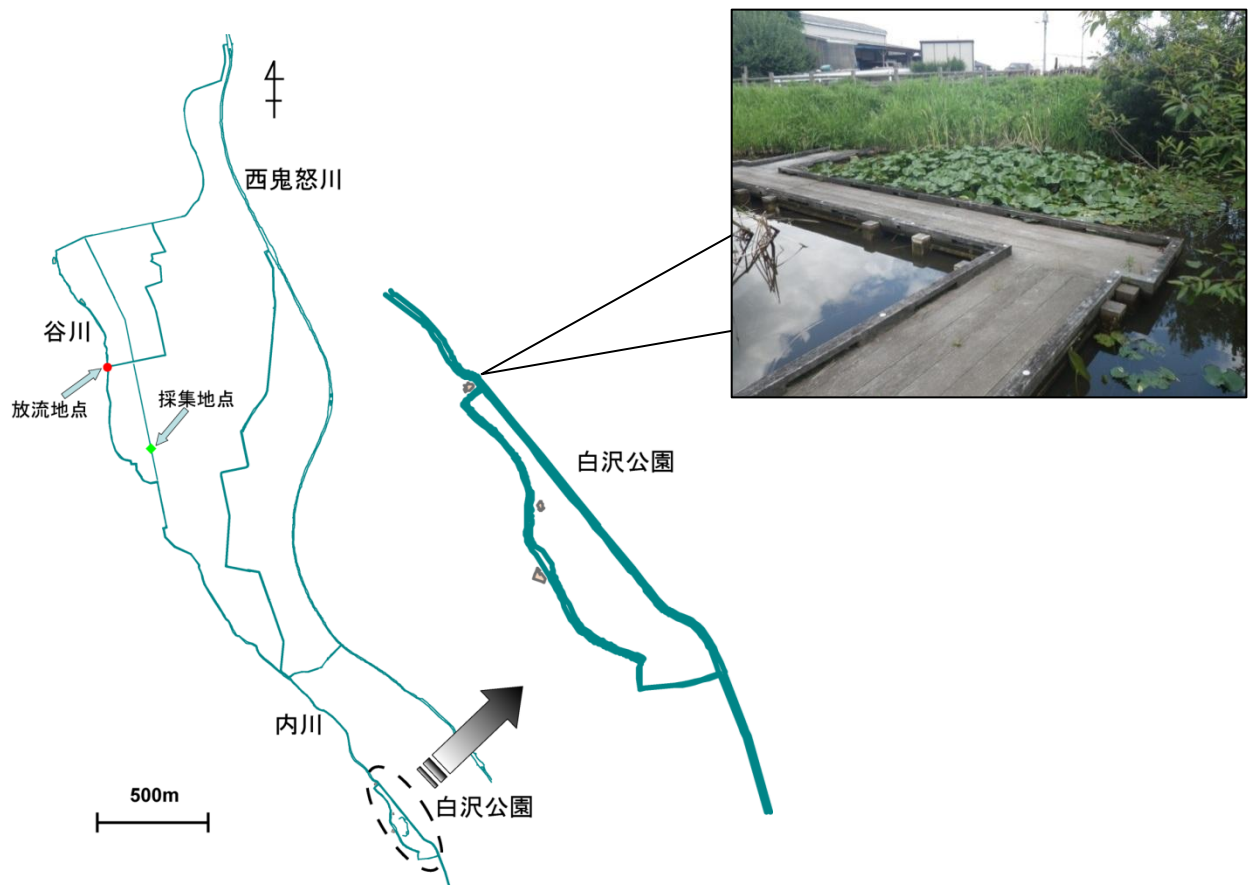


Fig.2 谷川における放流地点と再発見地点の位置