

長良川における稚アユ遡上量予測 に関する一考察

吉村研人¹・高橋陽一²・山口和好³

¹ (独) 水資源機構 長良川河口堰管理所 環境課 (〒511-1146 三重県桑名市長島町十日外面136)

² (独) 水資源機構 長良川河口堰管理所 所長 (同上)

³ (独) 水資源機構 長良川河口堰管理所 環境課長 (同上)

長良川河口堰管理所では、河口堰の運用にともなうアユの遡上及び降下への影響を把握するため、アユ遡上数等の各種調査が実施されているが、アユ遡上数には年変動が大きく、その要因については様々な要素が挙げられている。アユは国内において最も注目度の高い魚種の一つであり、水産資源として非常に重要な地位を占めているため、安定的な資源量を確保することは漁業関係者にとって重要である。本稿は、これまでのアユ遡上数調査における年変動の要因について各種の環境調査データに着目し、GLMを用いた稚アユ遡上数の予測モデル構築の検討を行うとともに、環境要因についての考察を行うものである。

キーワード：長良川，アユ，遡上量予測，一般化線形モデル（GLM）

1. はじめに

長良川河口堰（以下「河口堰」という）は、三重県北部、長良川の河口より5.4 km上流に位置し、治水（河道しゅんせつを可能ならしめ計画高水流量を安全に流下させる）及び新規利水（水道用水、工業用水）を目的とする総延長661 mの可動堰（可動部555 m）である。1995年7月より本格運用を開始し、本年で22年目を迎えている。

長良川は古来より鵜飼に代表されるようにアユをはじめとする水産業が盛んな河川であり、自然環境の保全、なかでも水産資源の保全は、長良川河口堰建設事業を進める上で重要な課題であった。

河口堰では、木曽三川河口資源調査（KST調査）¹⁾ 結果を基に学識経験者及び漁協関係者等の意見を採り入れ、3種類（呼び水式魚道、ロック式魚道、せせらぎ魚道）5箇所の魚道を設置している（図-1）。

魚道の効果については、河口堰運用開始後の1995年より5年間に渡るモニタリング調査において、魚類等の遡上・降下状況等の調査を行った。特にアユについては長良川を代表する回遊魚であり重要な水産資源となっていることから、全魚道を対象に目視による遡上調査が実施されその効果を確認した。

アユ遡上調査については、モニタリング調査からフォ

ローアップ調査に移行した現在においても、調査手法は異なるものの継続して調査を行っている。河口堰におけるアユ遡上数調査結果については、年による変動が大きく、その要因については明確になっていない。

本稿は、長良川河口堰における、これまでのアユ遡上数調査における年変動について、河口堰管理において蓄積された各種環境データに着目し、一般化線形モデル（Generalized Linier Model : GLM）を用いた遡上数予測検討を行う中で、各種環境要因の影響度について考察した経過について報告するものである。



図-1 長良川河口堰に設置されている魚道

2. 稚アユ遡上数予測モデルの検討

(1) 検討データ

a) 稚アユの遡上調査状況

河口堰における稚アユの遡上数調査は、おおむね2月から6月までの期間に、遡上盛期（4～6月）は毎日、それ以外の月は2～3日に1回の間隔で日の出から日の入りまでの間に実施している。1995～1999年までは、左右岸の呼び水式魚道及びせせらぎ魚道において、目視により10分観測、10分休憩の観測頻度で稚アユの計測を行った。2000年以降は、左岸呼び水式魚道の呼び水水路を挟んだ2つの魚道のうち陸側の魚道（陸側魚梯部）において、魚道を水平部（幅2 m）と切欠部（幅1 m）とに2分割し、ビデオカメラによる連続撮影を行い、録画画像から目視により水平部と切欠部を交互（日毎）に観察し稚アユ遡上数を計測した（図-2）。左岸呼び水式魚道の陸側魚梯部における年ごとの稚アユ遡上計測実績を図-3に示す。



図-2 左岸呼び水式魚道陸側魚梯部での稚アユ遡上数測定概況

b) 河口堰地点における稚アユの遡上数の推定

本検討に用いる河口堰地点における稚アユの遡上数は、1995～1999年に行われたモニタリング調査²⁾の結果より、各魚道の遡上比率と4～5月の平均堰流出量との間には比較的高い相関があることが明らかになっており（相関係数： $r = -0.854$ ）、左岸呼び水式魚道（陸側）の稚アユ遡上比率は、以下の回帰式で表される。

$$y = -0.0005x + 0.3434 \quad (1)$$

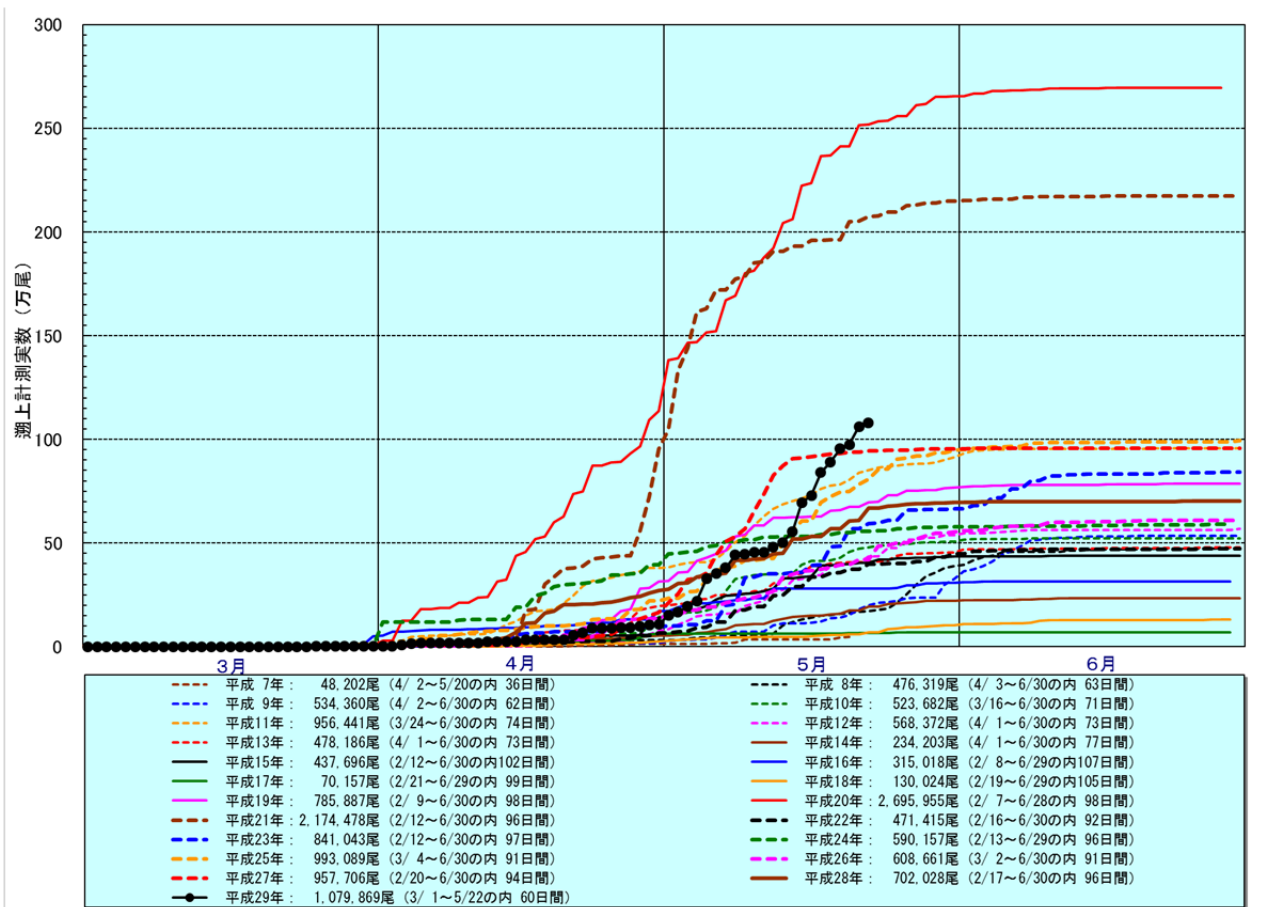


図-3 左岸呼び水式魚道陸側魚梯部のアユ遡上計測実績

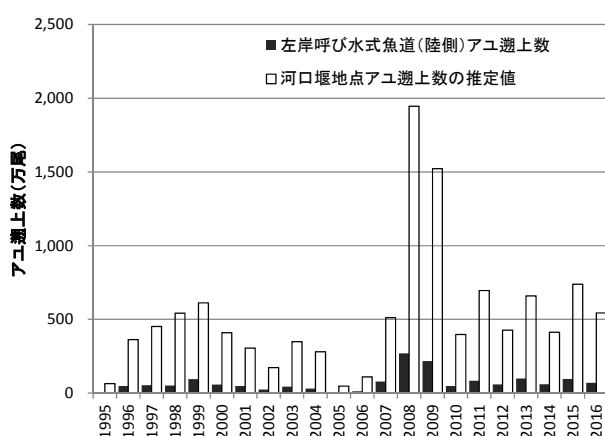
ここで、 x_i は4－5月の平均堰流出量、 y_i は左右岸呼び水式魚道及びせせらぎ魚道を利用する稚アユ遡上数に対する左岸呼び水式魚道（陸側）の稚アユ遡上数の比率（％）とした。

以降の解析には（1）式より算出した河口堰地点における推定遡上数を用いた。なお、1995年の調査に関してはゲート全開操作のため遡上数調査が遡上盛期中の5月20日で終了していることから、本検討の対象期間は1996年から2016年までとした。

また、外れ値を検出するために棄却検定として一般的なSmirnov-Grubbs検定³⁾（有意水準5％）を用いて予備的な解析を行った。ここでは、帰無仮説はすべてのデータは同じ母集団に含まれるものであるとし、対立仮説はデータのうち最大のものは外れ値であるとした。その結果、2008年及び2009年のデータが外れ値とされたため（表－1）、以降の解析から除外した。図－4に（1）式から算出した河口堰地点における稚アユ遡上数の推定値を示す。

表－1 Smirnov-Grubbs検定の結果。有意水準は5％とした。アユ遡上数の推定値が高いものから順位付けした。 T 値はアユ遡上数の推定値とその平均値の差を不偏標準偏差で割ったもの、 t 値はSmirnov-Grubbsの棄却検定値である。 $T > t$ で帰無仮説が棄却される。

順位	年度	アユ遡上数の推定値 (万尾)	T	t
1	2008	1,946	3.187	2.580
2	2009	1,522	3.395	2.557
3	2015	739	1.665	2.531



図－4 左岸呼び水式魚道陸側魚梯部におけるアユ遡上数と河口堰地点アユ遡上数の推定値

c) 環境調査（水文・水象）データ

環境調査データについては、過年度の検討資料²⁶⁾⁷⁾を参考に、長良川河口堰稚アユの遡上数に影響を及ぼすと考えられるものを抽出した。河口堰地点の放流量につい

ては、正時データより日平均流出量を算出したのち、月平均値を算出した。

仔アユは降海したのち、沿岸域数10キロメートルの範囲で生活していることが明らかになっていることから⁴⁾、海水温が海域での仔アユの生育に影響を及ぼすと考えられるため、三重県水産研究所が公表している伊勢湾沿岸の白子地点の表層海水温を利用した。

また、河川流量については、産卵及びふ化期と考えられる10月及び11月は産卵場に近い河口からの距離39.2 km地点（墨俣）、海域生活期と考えられる12－2月は堰地点の放流量データを用いた。

アユの産卵場近傍の環境として、河口からの距離31.2 km地点（大藪）の水質自動観測装置による濁度及び水温の観測結果を利用した。河川流量を除く変数については、10月から翌年2月までの月平均値を用いた。各調査地点の位置関係を図－5に示す。

本検討では、環境調査データとして全部で20の説明変数を解析に用いた。



図－5 各調査地点の位置図

(2) 統計解析手法

本検討では多くの観測データをよりわかりやすく説明するために検定ではなくモデリングを行う。多数の説明変数を用いて応答変数の挙動を明らかにするために、基本といえる一般化線形モデル（Generalized linear model : GLM）を用いた解析を行った。稚アユ遡上数の決定要因を明らかにするために、河口堰地点における各年のアユ遡上数の推定値の前年との比を対数変換したものを応答変数、12～2月の堰流出量（ m^3/s ）の月平均値、10～2月の白子地点の表層海水温（ $^{\circ}\text{C}$ ）の月平均値、10～11月の墨俣地点の流量（ m^3/s ）の月平均値及び10～2月の大藪地点の濁度及び水温の月平均値を説明変数とした。応答変数はすべて正規分布に従うと仮定した。各説明変数同士の相関を検討し、相関の高い変数のうち片方を除外しモデルを作成した。

最適なモデルを抽出するために、作成したモデルについて赤池情報量基準（Akaike's information criterion : AIC）に基づくステップワイズ法（増減法）によるモデル選択を行った。AICとは、統計モデルの当てはまりの良さを評価する指標である。ステップワイズ法とは指標（本検討ではAIC）の値が最も改善されるように、変数を追加、削除するアルゴリズムである。

解析にはR 3.1.1⁵⁾及びRのパッケージであるvegan及びMuMInを使用した。Rはオープンソースフリーウェアの統計解析用プログラミング言語であり、世界中の専門家により活用されているものである。

3. 結果

(1) 各種環境データの特徴

河口堰の月平均放流量は12月が最も多く（平均84 m^3/s ）、1月が最も少なかった（平均72 m^3/s ）。しかし、年によっては167 m^3/s 以上の月や、40 m^3/s 未満の月があり、月変動だけでなく年変動も大きいことがわかった。

白子地点の表層海水温は10月が最も高く（21 $^{\circ}\text{C}$ ）、2月が最も低かった（8.4 $^{\circ}\text{C}$ ）。よって5ヶ月間で10 $^{\circ}\text{C}$ 以上の変動がみられていた。また、1月が最も水温が低い年もみられた。墨俣地点の流量は10月が最も多く（平均119 m^3/s ）、11月が最も少なかった（平均73 m^3/s ）。河口堰の放流量とは異なっているが、流量の変動については概ね同様の傾向がみられた。大藪地点の濁度は10月と2月が最も高く（5.8）、11月が最も低かった（4.2）。同地点の水温は10月が最も高く（18 $^{\circ}\text{C}$ ）、1月が最も低かった（7.7 $^{\circ}\text{C}$ ）。

(2) 統計解析

稚アユ遡上数は様々な環境要因と密接な関係がみられた。AICによるモデル選択の結果、10月及び11

月の墨俣地点流量、12月の堰放流量及び10月の白子地点水温の合計4つの説明変数を取り込まれた（表－2）。なお、モデル自体の決定係数（ R^2 ）は0.6321となった。

稚アユ遡上数は前年10月及び11月の墨俣地点流量の増加に伴い減少し、前年12月の堰放流量及び前年10月の白子地点水温の増加に伴い増加する傾向がみられた。

また、係数の大きさより前年10月の白子地点水温が最も大きな影響力をもつことが示された。

表-2 GLMの結果。最適モデルに取り込まれた説明変数、係数、 t 値、 p 値およびモデルの決定係数（ R^2 ）を示した。

説明変数	係数	標準誤差	t 値	p 値	R^2
切片	-4.940	2.246	-2.199	< 0.05	0.6321
前年10月の墨俣地点流量	-0.001558	0.0005142	-3.030	< 0.01	
前年11月の墨俣地点流量	-0.01067	0.004034	-2.644	< 0.05	
前年12月の堰放流量	0.005646	0.002100	2.690	< 0.05	
前年10月の白子地点水温	0.2541	0.1001	2.539	< 0.05	

(3) 統計解析予測モデルによる遡上数予測

最適モデルによる予測値と、河口堰におけるアユ遡上数の推定値を比較（2008～2009年を除く）すると図－6のとおりであり、遡上傾向を表現できている年とそうでない年があることがわかる。

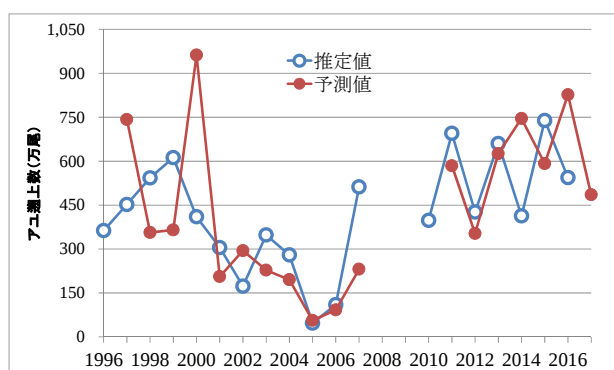


図-6 河口堰地点におけるアユ遡上数の推定値と最適モデルによる予測値との比較。縦軸は遡上尾数、横軸は年を表す。

4. 考察

本稿は、河口堰地点における稚アユの遡上数の年変動について、各種環境調査データに着目し稚アユ遡上量の予測モデルの作成を行った。稚アユ遡上数は墨俣地点流量、堰流出量及び白子地点水温といった河川及び海域の環境との関連性が高いことが明らかとなった。このうち10月の白子地点水温が最も影響が大きいとされたことから、稚アユ遡上数は仔アユ降下期の海域の環境が大きな影響を与えていると考えられる。これは、「仔アユの降下期の海域の水温が高いことで、餌となる動物プランク

表-3 河口堰地点での仔アユ放流量。1997年から2004年は放流事業が行われていない。

実施年	推定放流仔魚数 (万尾)	実施年	推定放流仔魚数 (万尾)
1994	1490.6	2005	250
1995	5872	2006	250
1996	13789.3	2007	300
1997	-	2008	1550
1998	-	2009	3000
1999	-	2010	4450
2000	-	2011	4750
2001	-	2012	4900
2002	-	2013	5100
2003	-	2014	5100
2004	-	2015	5350

トン等の状況が良好となる」とする岐阜県水産研究所等⁶⁾の研究成果とも一致する。

10月及び11月の墨俣地点流量の増加に伴いアユ遡上数が減少するという結果に関しては、アユ産卵期の産卵場付近において、台風等による大規模な出水に伴う物理的攪乱によって卵や仔魚が減耗したためと考えられる。

また、12月の堰放流量については、仔アユ降下期の堰地点では流量の増加により流速が増加し、仔アユがよりスムーズに海域に下ることができたためと考えられる。一般に、ふ化直後のアユは遊泳力をほとんど持たないため、餌資源が豊富な海域へ速やかに降下することが重要であるとされている。

さらに、本検討を行う中で、河口堰右岸の人工河川において、長良川漁業対策協議会により行われている仔アユふ化放流事業（表-3）が翌年の遡上数に及ぼす影響を明らかにするために、放流事業の有無と翌年の稚アユ遡上数について一元配置分散分析による差の検定（Analysis of Variance : ANOVA）を行ったが、有意な差はみられなかった（ $p > 0.05$ ）。しかし、アユふ化事業を実施した年は、実施していない年と比べ、約150万尾程度多くなる傾向がみられた（表-4、図-7）。アユには、厳密な意味で母川回帰性はないものの、閉鎖的水域に河口をもつ河川の場合、結果的に母川に帰る比率が高い⁷⁾といわれており、図-7はその傾向が表れたものであると考えられる。

5. おわりに

本検討により、稚アユの遡上数と各種環境要因とに一定の関係性があることが確認できた。

アユが生息できるニッチは限られており、長良川だけでなく各地の漁協はアユの効率的な放流という課題を長年抱えているため、稚アユ遡上数の予測を行った本稿は、漁協が行っている資源増殖事業の最適化に寄与できるも

表-4 放流事業の有無と翌年のアユ遡上数

放流あり		放流なし	
年	遡上数（万尾）	年	遡上数（万尾）
1996	363	1998	543
1997	452	1999	612
2006	110	2000	410
2007	512	2001	305
2008	1,946	2002	173
2009	1,522	2003	348
2010	398	2004	280
2011	695	2005	47
2012	426		
2013	660		
2014	413		
2015	739		
2016	544		

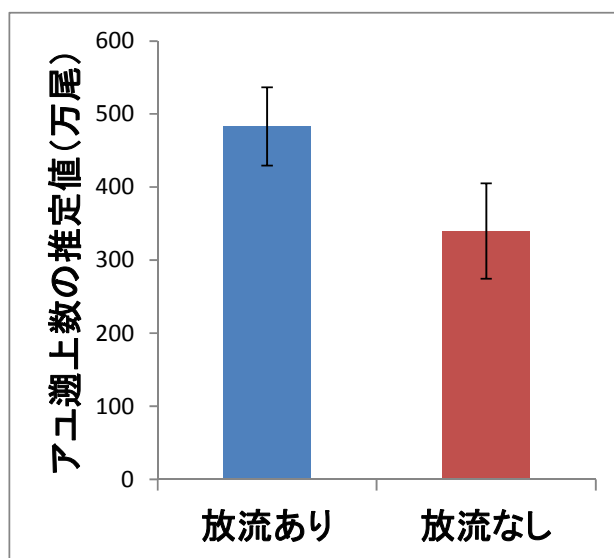


図-7 アユの仔魚放流を実施した年と未実施の年の翌年のアユ遡上数の推定値の比較。縦軸は尾数。エラーバーは標準誤差を示す。

のであると考えられる。すなわち、翌年の天然遡上アユの数を予測することができれば、各河川の環境収容力に合わせた最適な放流量を決定することができるためである。

なお、本稿においては、アユ仔魚期の生育を左右すると考えられる海域の環境データが乏しかったことから、海域の環境データをより多く収集し解析に用いることで、予測モデルの精度の向上が期待できると考えられる。また、本稿で用いたモデル作成の方法は他の地点・生物にも応用することができると考えられる。

今後も、仔アユふ化放流事業への協力を促進するとともに、長良川上流域や周辺の河川等にも検討範囲を広げ

ることで予測モデルの改善に努め、稚アユ遡上数の決定要因について理解を深めると同時に、アユと人間のより良い関係を模索していきたい。

参考文献

- 1) 木曽三川河口資源調査団 (KST) . 1968. 木曽三川河口資源調査結論報告.
- 2) 笹浩司、後藤浩一、実松利朗、嶋田敬一、井口謙、和田清. 2005. 長良川中流域における稚アユの遡上特性と遡上量調査の効率化に関する一考察. 河川技術論文集. 第11巻. p.453-458.
- 3) AOKI Shigenobu. 2006. <http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/JavaScript/>.
- 4) 高橋勇夫. 2009. 天然アユが育つ川. 築地書館.
- 5) R Core Team (2014) R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://R-project.org/>.
- 6) 長良川における天然アユの遡上数予測について、岐阜県農政課水産振興室資料.
- 7) 嶋田啓一、後藤浩一、山本一生、和田吉弘. 2006. 長良川における稚アユ遡上量の予測に関する検討. 日本水環学会誌. p.665-672.