

琵琶湖のアユの魚群数と産着卵数との関係とその応用

井出 充彦

Relationships between numbers of ayu (*Plecoglossus altivelis altivelis*) schools in Lake Biwa revealed by echo sounder surveys and estimated numbers of the eggs laid in river spawning grounds around the lake

Atsuhiko Ide

キーワード：アユ、琵琶湖、魚群、産着卵数、予測

琵琶湖漁業にとって、アユは全漁獲量の約半量を占め、佃煮や揚げ物などに利用される鮮魚はもとより、活魚は河川放流用や養殖種苗として出荷されるなど最も重要な魚種である。ところが、2012年の3月中旬以降にアユの肥満度がこれまでになく低下し、その後の回復も遅れたことから、減耗したと考えられその年の秋の産卵状況調査(以降単に「産卵調査」という。)による総有効産着卵数(死卵を除く推定産着卵数の総数。以降、「有効」は生存を意味する。)が平年値の約6%となる7億粒となった(平年値とは過去10年の産着卵数のうち最大と最少を除いた8年間の平均値)。¹⁾ また、2016年秋には総有効産着卵数が平年値の約2倍であったものの、ふ化が10月上旬に集中したことから、ふ化後に密度効果によると考えられる成長不良のため産卵期まで平均体長が平年値よりも大幅に小さく推移した。その結果、漁獲加入も遅れ特に漁期前半に「かつてない」と称されるほどの不漁となった。さらに、2017年の総有効産着卵数は2012年を下回る2.7億粒となった。^{2,3)} これらは2011年以前には見られなかった異常な現象であり、その原因として瀬戸内海でのイカナゴの不漁の原因と考えられている基礎生産力の低下と同様の理由による餌環境の悪化が考えられるが、⁴⁾ 詳細については明らかとなっていない。

滋賀県水産試験場(以下「当場」という。)では、長年アユの資源調査として、前述の琵琶湖に流入する主要11河川の下流部での産卵調査(8月下旬から11月上旬まで、2週間に1回の頻度で実施し、各次調査で得られた死卵を除く推定産着卵数を合計し総有効産着卵数としている。)や、琵琶湖での魚群探知機による水深30m等深線上付近の周回コースによる

湖中アユ魚群分布調査(1月から8月まで、各月の中旬に1回の頻度で実施している。以降単に「魚群数調査」という。)等を実施してきた。⁵⁾ これらの調査から各漁期の漁獲状況を予測することを試みてきたが、魚群数調査では同年であっても平年値比が月ごとに大きく変動すること、産卵調査では後述するとおり推定産着卵数の区間推定が困難な調査手法であることなどから、いずれもその解釈や精度の評価が難しく、その時々ではこれらを参考値として利用し、年間を通じたすべてのアユ資源調査の結果から、その年の資源評価を総合的に行ってきた。

また、当場では過年に、アユについて漁獲尾数、平均体長、プランクトン量、湖水温の各データを用いて、春季に河川に遡上するアユの遡上開始日と遡上尾数を予測する重回帰式(予測式)を開発したが、⁶⁾ 琵琶湖全体のアユの資源量または資源指標を予測する技術は開発されてこなかった。このように、アユの肥満度の低下や、成長不良が起こる中で、アユ資源の予測技術の確立は急務となっている。

現在、アユ種苗を琵琶湖に添加して増殖を図る方法としては、長浜市南浜町地先の姉川人工河川と高島市安曇川町地先の安曇川人工河川へアユ親魚を放流し、アユの産卵にとって適度な大きさの礫を敷き詰め揚水した琵琶湖水を流した人工河床に自然産卵させる方法が唯一となっている。これら人工河川は、琵琶湖総合開発にともない、水資源開発公団(当時)によって整備されたもので、その後滋賀県に譲渡され、1981年から水産関係団体への委託により運営されている(現在は公益財団法人滋賀県水産振興協会へ運営委託されている)。本来の施設の目的は、琵琶湖総合開発による琵琶湖の人為的水位低下に伴う

流入河川下流での流水の伏流化によりアユの産卵環境が悪化した場合でも、最低限のアユの産着卵数を確保するためのものである。⁷⁾

現在、少雨等で河川水量の減少が長期間続くなど通常の気候条件ではない場合や極端なアユの資源減耗時を除き、姉川人工河川では姉川に産卵遡上しヤナで採捕したアユ親魚4トンを、安曇川人工川では、複数の民間養殖業者が養成した琵琶湖産アユ親魚8トンを基準に放流して産卵させ、アユの産卵ふ化にとって好適条件のもとで管理し、ふ化仔魚を琵琶湖に自然流下させている。総有効産着卵数が激減した2012年には7トン、2013年には10トンの養成親魚を、同様に2017年と2018年にはそれぞれ10トンの養成親魚を安曇川人工河川に追加放流して、琵琶湖へのアユの仔魚添加数を増やした。しかし、2012年と2017年については、産卵期に入ってからの緊急措置であったために、以後の漁獲状況を想定したふ化時期の調整を行ったものではなかった。

そこで、アユのふ化後の漁獲状況をも考慮してふ化時期やふ化尾数を調整するなど、人工河川をさらに高度に有効活用するため、これまでに得られたアユ資源調査やふ化日組成調査の結果を用いて、魚群数とその年の産卵期の有効産着卵数(以後前年の産着卵数との混同を避けるため明らかな場合を除き「次期有効産着卵数」等「次期」の文言を付ける。)との関係から両者の資源指標としての関係を明らかにし、できるだけ早い時期に次期の有効産着卵数を予測し、人工河川に放流する、より適切なアユ親魚の放流時期や数量を決定するための判断材料にでき

ないか検討した。

材料および方法

魚群数と次期有効産着卵数との関係把握のため、これまで長年当场が実施してきたアユの資源調査のうち、従属変数を産卵調査で得られた死卵を除く推定有効産着卵数(億粒)とし、独立変数としてその年の1月から8月まで各月の魚群数調査による魚群数(群)として、単回帰分析した。回帰式にはすべて直線を当てはめた。有効産着卵数は、1989年から2021年までのものとした。死卵を除いた理由は、河川内の淵など流れが停滞する場所に死卵が堆積することがあり、主要な産卵床ではないと判断しその場所での計数をしないことや、古いものが長期間残っていることがあるためである。1989年以降とした理由は、調査範囲や調査河川数が現在と同等と認められる期間としたことなどであるが、産卵調査が増水等で不完全であった年を除いた。また、アユの肥満度が極端に低下した2012年の総有効産着卵数は、魚群数との関係で明らかな異常値となるため除いた。その結果、1989年から1994年まで、1998年、1999年、2004年、2011年、2012年を除く21年間のデータとなった。

また、琵琶湖のアユの産卵期は通常8月下旬から11月上旬の間にあるが、総有効産着卵数のほか、便宜的に早生まれ有効産着卵数(9月中旬までの有効産着卵数で、産卵調査では第2次調査までに該当し、おおむね9月中にふ化するもの)と、遅生まれ産着卵

表1 解析に使用した全データ

	魚群数(参考区間除く)								平均体長(mm)			有効産着卵数(億粒)		
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	4月	5月	6月	総計	早生まれ	遅生まれ
1995年	135.0	82.0	112.0	80	233	246	157	292	50.4	54.3	60.8	73.8	24.9	48.9
1996年	43.0	50.0	49.0	29	34	52	30	85	42.9	45.8	58.5	108.6	80.0	28.6
1997年	244.0	214.0	311.0	442	472	554	256	115	50.0	58.6	62.7	200.7	5.3	195.4
2000年	965.0	805.0	490.0	829	546	467	132	48	58.7	60.1	62.9	133.6	0.0	133.6
2001年	344.0	383.0	349.0	372	599	719	448	182	56.2	59.3	60.7	174.1	56.6	117.5
2002年	307.0	362.0	288.0	308	381	650	31	119	56.2	58.9	59.2	53.2	0.1	53.1
2003年	198.0	101.0	155.0	92	134	257	123	142	56.5	60.3	63.9	59.6	18.5	41.1
2005年	156.0	237.0	142.0	104	167	122	107	274	54.1	62.1	71.1	153.3	116.1	37.2
2006年	590.0	708.0	467.0	73	23	140	76	74	53.0	60.4	65.0	87.8	61.1	26.7
2007年	475.0	165.0	200.0	393	502	919	192	289	62.1	66.4	69.6	177.3	3.5	173.8
2008年	560.0	405.0	334.0	203	353	431	359	434	59.2	66.7	60.7	154.6	82.7	71.9
2009年	512.0	432.0	373.0	173	327	442	717	757	52.3	55.7	62.8	107.4	38.1	69.3
2010年	306.0	530.0	508.0	459	675	837	389	987	58.2	64.2	62.7	252.3	9.8	242.5
2013年	145.0	142.0	66.0	12	24	70	90	103	50.6	55.5	58.9	45.1	42.5	2.6
2014年	149.0	65.0	92.0	21	99	174	70	67	54.5	58.1	64.0	70.7	37.2	33.5
2015年	199.0	99.0	欠測	5	286	197	66	82	47.9	57.0	59.3	97.1	79.3	17.8
2016年	179.0	233.0	335.0	718	1,558	1,331	334	237	51.0	58.4	60.9	213.8	6.4	207.4
2017年	33.0	51.0	12.0	16	6	96	65	62	39.9	48.6	53.5	2.7	0.1	2.6
2019年	44	92	57	110	344	315	72	72	45.1	59.2	59.3	53.6	13.1	40.5
2020年	213	209	244	406	322	527	12	70	53.9	56.4	63.8	47.8	12.4	35.3
2021年	195	203	192	64	463	168	78	5	46.6	53.8	69.2	156.2	138.9	17.3

数(9月下旬以降の有効産着卵数で、産卵調査では第3次調査以降に該当し、おおむね10月以降にふ化するもの)に分けた場合の魚群数との関係も考慮した(以降「生まれ」は「ふ化」と同義とする。)。独立変

数とした魚群数には 2003 年から参考区間として追加調査している「延勝寺～西野」「つづら尾～海津大崎」「今津～外ヶ浜」「彦根～愛知川」の各地先の魚群数は、分析にそれ以前のデータも使用するため含

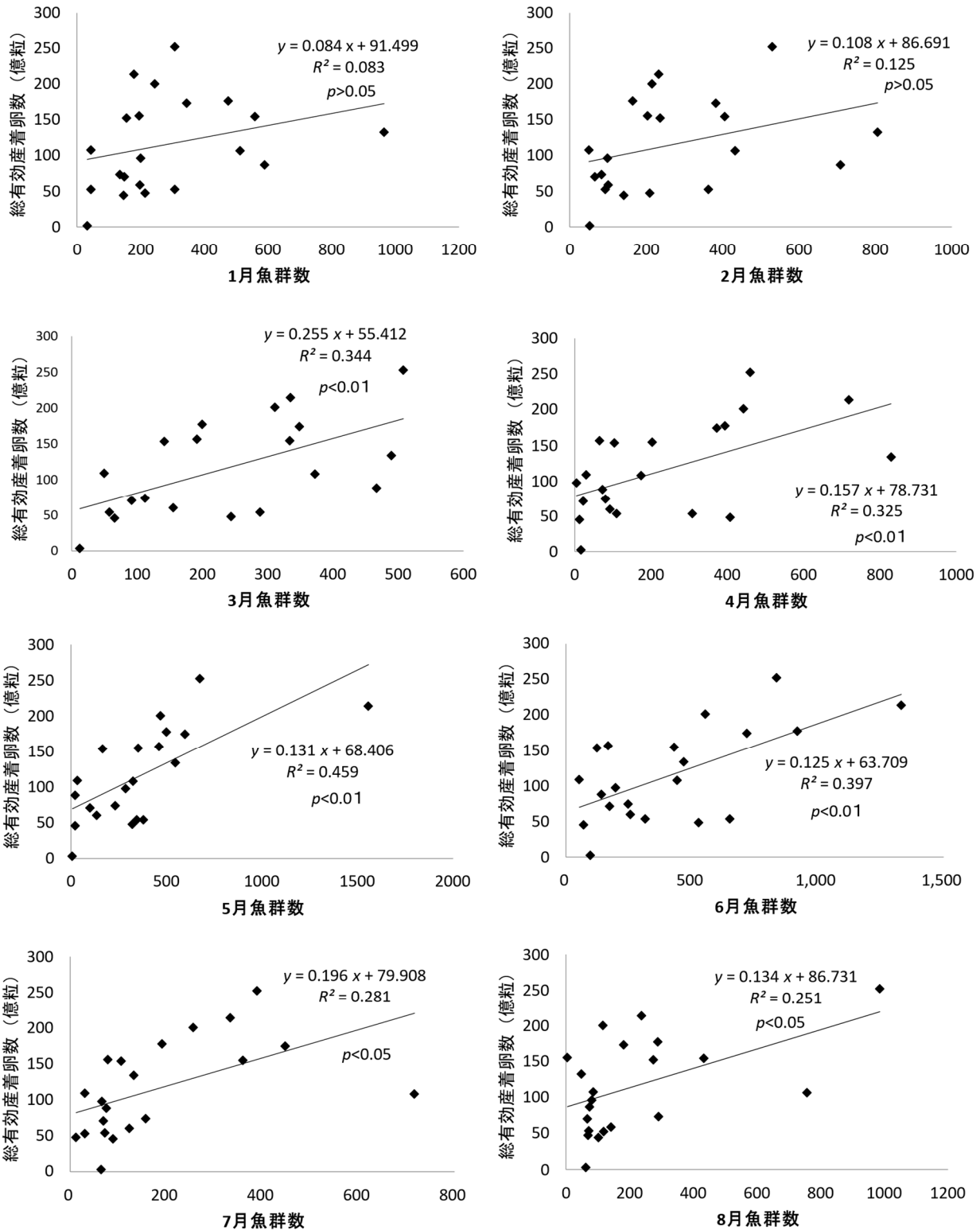


図1 魚群数調査による各月魚群数と産卵調査による次期総有効産着卵数との単回帰分析結果。

めなかった。2003年からはこれらの区間を加えることによって切れ目のない全周調査となっている。

さらに、アユの抱卵数はアユのサイズによって増

減することから、⁸⁾ 総有効産着卵数、早生まれ有効産着卵数および遅生まれ有効産着卵数との関係式で最も決定係数が高かった月の魚群数に、抱卵数の指

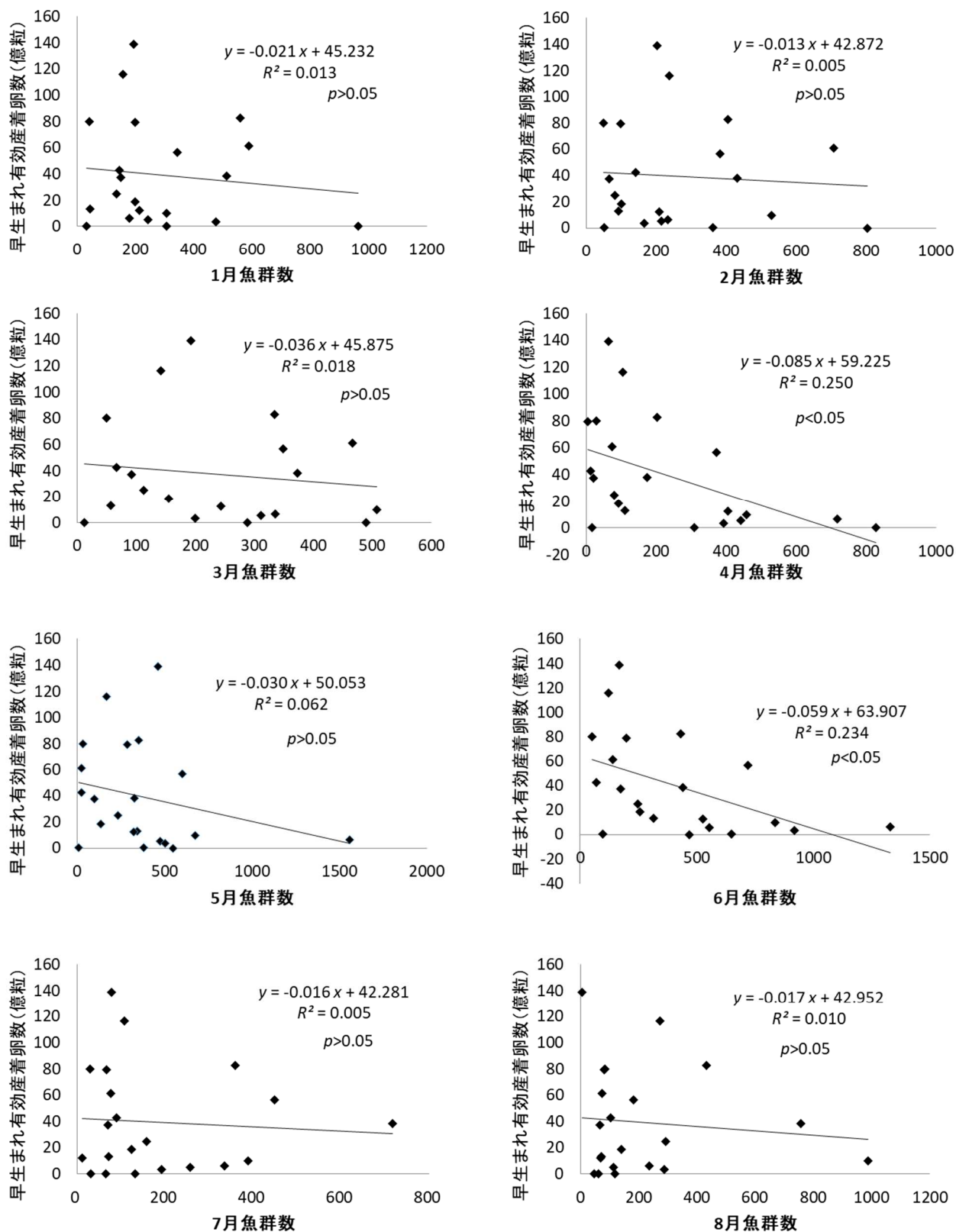


図2 魚群数調査による各月魚群数と産卵調査による次期早生まれ有効産着卵数との単回帰分析結果.

標としてその年の漁獲物の平均体長を独立変数に加えて、重回帰分析(変数増減法)を行い、予測精度を高められないか検討した。利用した漁獲物のデータは、

ほぼすべてのアユがシラス型仔魚から稚魚へ変態しており魚群を形成していると思われる4月以降の⁹⁾8漁業協同組合のエリ(小型定置網の一種)のサンプル

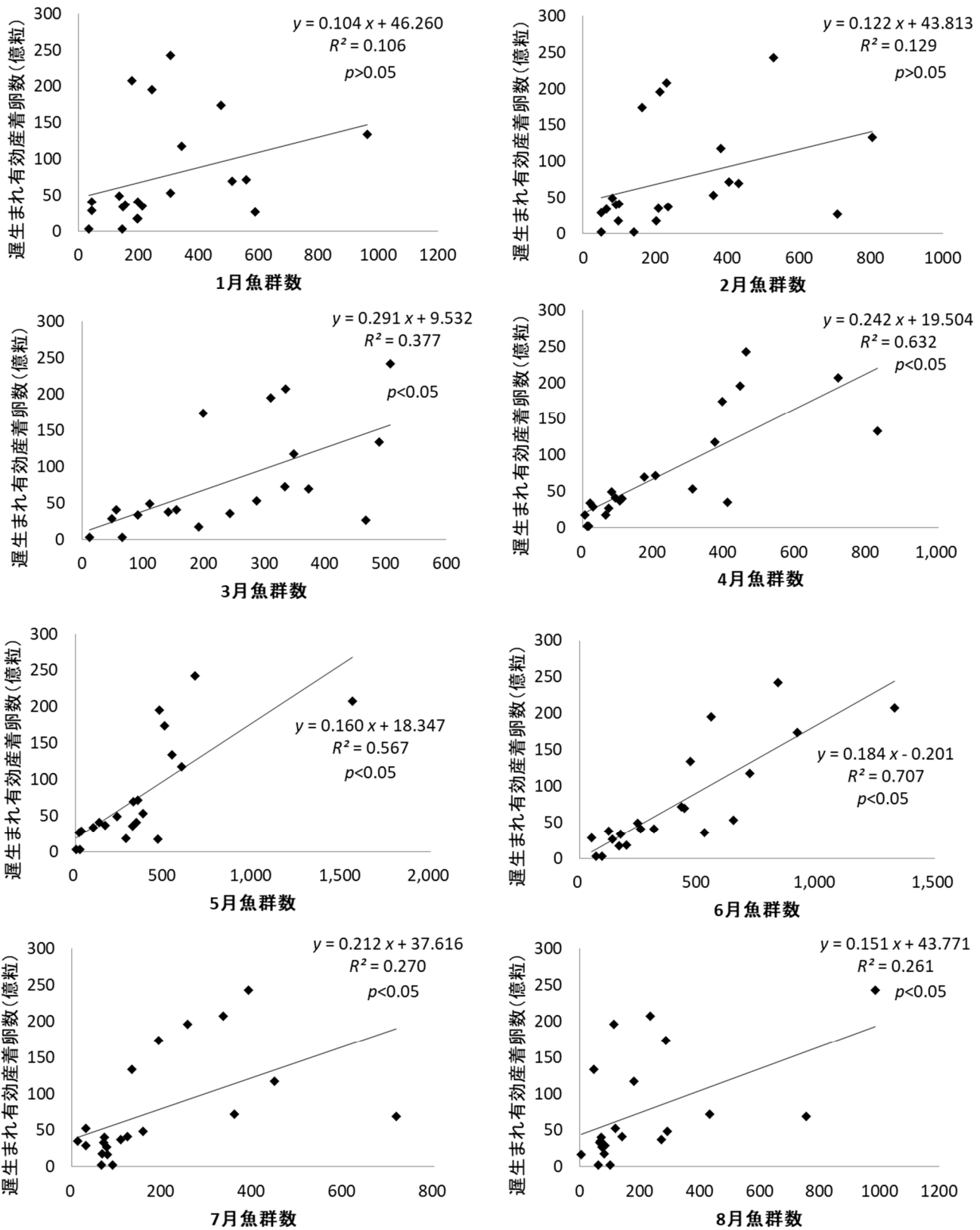


図3 魚群数調査による各月魚群数と産着卵数調査による次期遅生まれ有効産着卵数との単回帰分析結果.

ルを用いて各月の平均体長を求めたもので、データがほぼすべての漁業協同組合で揃っている6月までのものとした(7月以降ではその年の漁を終了している漁業協同組合も存在するため)。体長は標準体長とした。解析に使用したデータの一覧は表1に示した。解析にはマイクロソフト社の表計算ソフト EXCEL 上で動作する市販の統計解析アドインソフト EXCEL 多変量解析 Ver.7(株式会社エスミ)を用いた。

なお、この解析に先立ち、2014年の段階でアユの体サイズの指標として各月の平均体重、予測には役立つが産卵期の河川水量の指標として8月の彦根市の降水量を独立変数として重回帰分析したが、これらは独立変数として選択されなかった。

結果

各月魚群数と次期総産着卵数との関係 各月魚群数と次期総有効産着卵数との関係は図1のとおりであった。1月または2月魚群数と総有効産着卵数との関係を除き有意水準5%または1%で正の傾きの単回帰式で表された。このうち5月魚群数を用いた式で最も決定係数(R^2)が高く0.459であったが、一般的に予測に使用できる高い値($R^2 \geq 0.50$)ではなかった。

各月魚群数と次期早生まれ産着卵数との関係 各月魚群数と次期早生まれ有効産着卵数との関係は図2のとおりであった。4月魚群数または6月魚群数と早生まれ有効産着卵数との関係で、有意水準5%で負の傾きの単回帰式で表され、このうち4月魚群数を用いた式で決定係数が高く0.250であったが、一般的に予測に使用できる高い値ではなかった。

各月魚群数と次期遅生まれ産着卵数との関係 各月魚群数と次期遅生まれ有効産着卵数との関係は図3

のとおりであった。1月または2月魚群数と遅生まれ有効産着卵数との関係を除き有意水準5%または1%で正の傾きの単回帰式で表され、4月魚群数、5月魚群数または6月魚群数を用いた式で、一般的に予測に使用できる高い決定係数であった。このうち、6月魚群数と遅生まれ有効産着卵数との関係で最も決定係数が高く0.707であった。

平均体長を独立変数に加えた重回帰分析 前述した総有効産着卵数、早生まれ有効産着卵数および遅生まれ有効産着卵数と各月魚群数との関係のうち、それぞれで最も決定係数が高かった単回帰式の独立変数に4月から6月の各月体長(mm)を加えて重回帰分析を行ったところ、それぞれ次の最適関係式(予測式)を得た。なお、それぞれの関係式における残差の正規性は正規確率プロットにより確認した。また重回帰式において多重共線性の指標となるVIF値は、各独立変数とも2未満であり、多重共線性の問題はなかった。

(1)総有効産着卵数を予測する重回帰式 独立変数として5月魚群数のほか6月の平均体長が選択され、重回帰式は次のとおりとなった。

$$Y_T = 0.124X_{I_{May}} + 5.947X_{2_{Jun}} - 300.168$$

$$\hat{R}^2 = 0.551 \quad p < 0.01$$

Y_T は総有効産着卵数(億粒)、 $X_{I_{May}}$ は5月魚群数(群)、 $X_{2_{Jun}}$ は6月平均体長(mm)である。 \hat{R}^2 は自由度修正済決定係数である。

年ごとに実測値と予測値の推移、併せて95%信頼区間を図4に示した。実測値が95%信頼区間の外に位置するなど予測値との乖離が大きかった年が1997年、2002年、2008年、2010年、2020年の5年あったが、予測値の推移は実測値の推移と同様の傾向を示した。

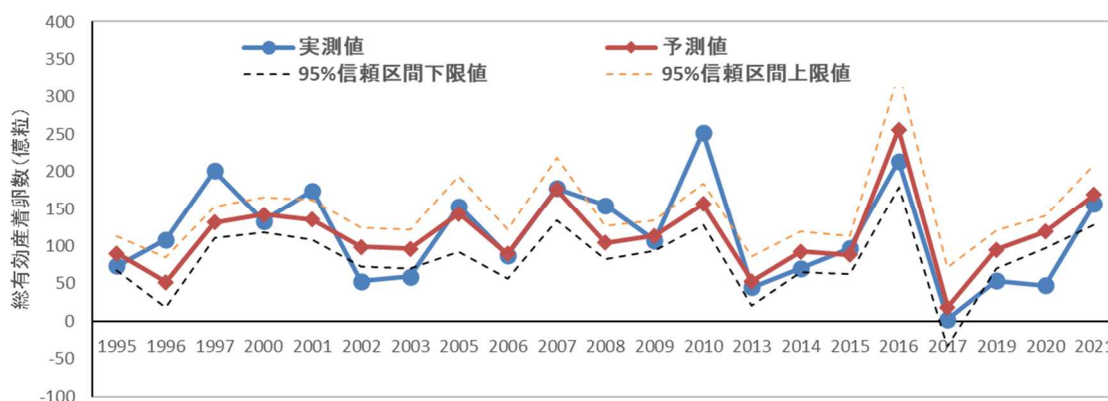


図4 総有効産着卵数を予測する重回帰式による予測値と実測値の推移。

(2)早生まれ産着卵数を予測する重回帰式 独立変数として4月魚群数のほか、6月平均体長が選択された。重回帰式は次のとおりとなった。ただし、予測式として利用するには決定係数がやや低かった。

$$Y_E = -0.094X1_{Apr} + 4.426X2_{Jun} - 214.706$$

$$\hat{R}^2 = 0.384 \quad p < 0.01$$

Y_E は早生まれ有効産着卵数(億粒)、 $X1_{Apr}$ は4月魚群数(群)である。

年ごとに実測値と予測値の推移、併せて95%信頼区間を図5に示した。実測値が95%信頼区間の外に位置するなど予測値との乖離が大きかった年が1996年、2001年、2003年、2007年、2008年、2015年、2021年の7年あったが、予測値の推移は実測値の推移とおおむね同様の傾向を示した。

(3)遅生まれ産着卵数を予測する単回帰式 独立変数として6月魚群数のみが選択され単回帰式となった。

$$Y_L = 0.184X2_{Jun} - 0.201$$

$$R^2 = 0.707 \quad p < 0.01$$

Y_L は遅生まれ有効産着卵数(億粒)である。

年ごとに予測値と実測値の推移、併せて95%信頼

区間を図6に示した。実測値が95%信頼区間の外に位置するなど予測値との乖離が大きかった年が1997年、2000年、2002年、2010年、2020年の5年あったが、予測値の推移は実測値の推移と同様の傾向を示した。

なお、単回帰分析で、決定係数が高かった遅生まれ有効産着卵数と4月魚群数、および5月魚群数との関係においても、それぞれ平均体長を独立変数に加えて重回帰分析をしたところ、次のとおり、それぞれ5月平均体長、4月平均体長との組み合わせで遅生まれを予測する最適重回帰式が求められたが、それぞれの自由度修正済み決定係数は0.637、0.616であり6月魚群数を用いた単回帰式より精度がやや低かった。

$$Y_L = 0.215X1_{Apr} + 3.261X2_{May} - 160.241$$

$$\hat{R}^2 = 0.637 \quad p < 0.01$$

$X2_{May}$ は5月魚群数(群)である。

$$Y_L = 0.114X1_{May} + 3.919X2_{Apr} - 181.053$$

$$\hat{R}^2 = 0.616 \quad p < 0.01$$

$X2_{Apr}$ は4月平均体長(mm)である。

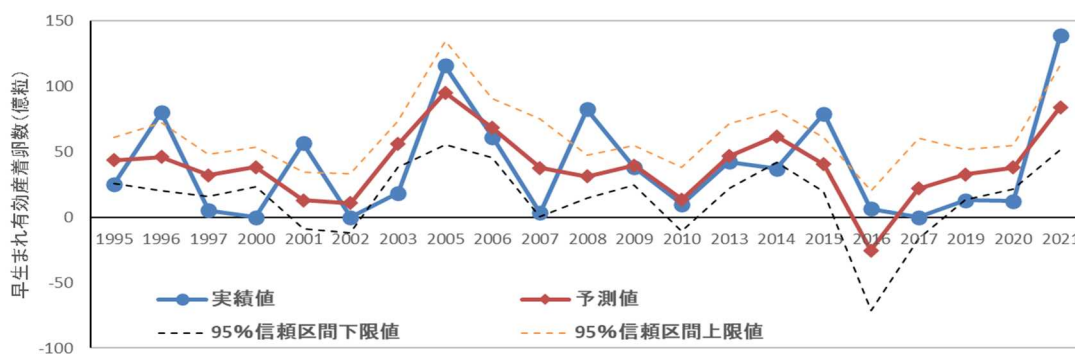


図5 早生まれ有効産着卵数を予測する重回帰式による予測値と実測値の推移。

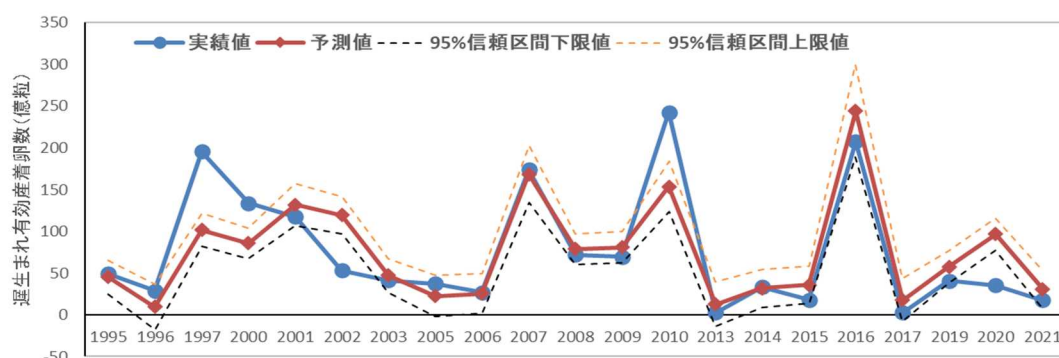


図6 遅生まれ有効産着卵数を予測する単回帰式による予測値と実測値の推移。

考 察

漁獲物と魚群とのふ化日組成の関係 当場の過年の調査では 1999 年生まれのアユに関して、耳石日輪計数による漁獲アユの漁法ごとのふ化日組成が調べられている。¹⁰⁾ その結果に基づき、図 7 に漁法別に早生まれアユ、遅生まれアユ(以降単に「早生まれ、遅生まれ」という。)別に個体数割合を読み取りグラフ化した。これによると、エリでは、漁期当初の 11 月には(11 月 21 日が滋賀県漁業調整規則上のアユ採捕解禁日で、使用した標本は 11 月下旬のもの。2009 年以降では滋賀県漁業協同組合連合会内部の取り決めで 12 月 1 日から漁期の開始となった。)早生まれが 100%であったが、月の経過に伴い早生まれの割合が減少し、3 月には早生まれと遅生まれの割合はほぼ同等となり、4 月から 5 月にかけては若干増加するが 6 月には 6%になり全体的には早生まれの割合は減少傾向であった。ヤナ漁獲アユでは 3 月では 90%が早生まれで、4 月以降では 32%以下となったが、同時期のエリよりも常に高かった。また、2019 年生まれアユと同様の調査を行い 1999 年生まれアユとの比較が行われている。それによってもおおむね同様の傾向であった。¹¹⁾ 以降、これらの傾向は一般的であると仮定して考察する。

また、エリは琵琶湖の沿岸部に設置されている小型定置網の一種で、アユを主な漁獲対象とするものでは、ツボと呼ばれる魚が最終的に迷入する魚取り部は、湖岸から沖合 500m~1000m 程度の距離の水深 10m~20m 付近に設置されることが多く(ワタリと呼ばれる垣網を含めたエリの全長は最大で 500m)、体長 30mm(シラス型後期仔魚)以上の様々なサイズのアユが捕獲されることから、¹⁰⁾ エリ漁獲アユは、目目で漁獲されるサイズが制限される刺網と異なり、湖中アユの体長組成やふ化日組成をおおむね代表できるものと考えられる。

このことから、魚群探知機で把握される魚群のふ化日組成(沖合で群れで存在するアユ)とエリで漁獲されるアユのふ化日組成を同等と仮定して考察する。**早生まれと遅生まれに分ける利便性** 早生まれと遅生まれの区別については、田中による過去の耳石日輪解析による成長曲線から 9 月 30 日以前生まれ(早生まれ)と、10 月 1 日以降生まれ(遅生まれ)との曲線

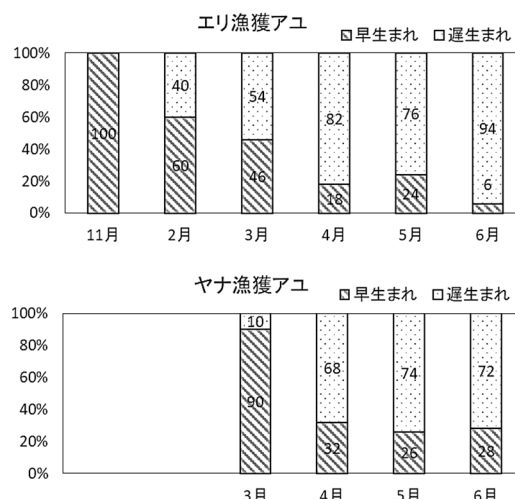


図 7 1999 年生まれ漁獲アユの早生まれ・遅生まれ別組成(個体数割合)、田中¹⁰⁾の記述をもとに作図。

の傾きに乖離があることから(曲線に変曲点のあるふ化後約 120 日までは早生まれの方が遅生まれより傾きが大きく、その後は逆転する。)、⁹⁾ 成長の傾向が違う別の系群として扱うことで予測や人工河川の運用上の取扱いがしやすくなる。

すなわち、早生まれが大きく寄与する 12 月から 3 月まで(3 月は特にヤナの場合)の漁具別豊凶、遅生まれが大きく寄与する 4 月以降での漁具別豊凶といった、その後の漁期・漁法別の漁獲状況を、産着卵数の推移やふ化日組成から予測することや、後述のとおり早生まれ・遅生まれ別に有効産着卵数を予測し、人工河川の運用において「早生まれを増やすか遅生まれを増やすか」をその後の漁獲状況を想定して単純化して判断できるといった水産施策上の利便性がある。

例えば、2016 年から 2017 年にかけての「かつてない不漁」時には、12 月のエリの漁獲が少なかった理由として、「早生まれが非常に少なかったことで引き起こされた」と迅速に判断でき、「遅生まれが多かったことから 4 月以降に漁獲が増加する」と 2016 年内には大まかに予測していた実例がある(実際はアユの成長が想定外に悪く、漁獲の増加は 2017 年 5 月以降となった。)³⁾ このように、現在のところ定性的評価を含めて実用的に応用できる。

また、先述の田中による 1999 年生まれのアユに関する調査による漁獲アユの成長曲線では早生まれ

と遅生まれの体長差が、5月下旬には大部分が20mm以下の範囲に収まったことから、⁹⁾産卵期には早生まれと遅生まれとで体長組成が明確に分かれるわけではないこと、図7のとおり3月ではヤナの漁獲物の90%が早生まれで、それ以降32%以下に減少したものの、エリより高い割合であったことから、成長の速いものから河川に遡上することで、^{9,10)}結果的に産卵期まで遡上しなかった成長がより遅い小型の個体に早生まれが少なかったと考えられる。

魚群数と次期総有効産着卵数との関係 各月魚群数と次期総有効産着卵数との関係では、3月からの各月魚群数のすべてで有意な正の傾きの単回帰式で表され、5月魚群数で最も決定係数が高かった(図1)。また、図7のとおり、1999年生まれアユの調査でのエリの漁獲物の組成から3月以降遅生まれの割合が高くなり、5月のエリ漁獲物組成では76%が遅生まれであった。このことから、総有効産着卵数に寄与する親魚の大部分が遅生まれであり、総有効産着卵数は主に遅生まれアユに依存していると言える。

魚群数と次期早生まれ・遅生まれ有効産着卵数との関係 図2による4月から6月の各月魚群数と早生まれ有効産着卵数との負の相関関係と、図3による4月から6月の各月魚群数と遅生まれ有効産着卵数との正の相関関係から、4月から6月の各月魚群数が多い年ほど早生まれ有効産着卵数が減少する一方で遅生まれ有効産着卵数が増加するといった早生まれ有効産着卵数と遅生まれ有効産着卵数との連続した関係があることがわかる。これは、毎年の親魚量で総有効産着卵数が決定されるので当然の関係であり、さらに総有効産着卵数が遅生まれに偏る傾向があるために魚群数と早生まれ有効産着卵数とで負の相関関係となったものである。ただし、4月から6月の各月魚群数と早生まれ有効産着卵数との式では決定係数が0.3未満と低い値であることから、この関係には他の要因も大きく関わっていることが予想される。

また、同一の個体群であっても小型の個体が繁殖に参加する時期は大型個体よりも遅れ気味になるとの知見があり、¹²⁾さらに、アユ親魚のふ化日と生殖腺体指数GSIとの関係から湖中残留アユのうち、大型のものから産卵に参加すると推測されていることから、¹³⁾産卵開始の早遅は、その年々のふ化日別のアユの成長によって前後すると思われる。

これは、前述のとおり総有効産着卵数が遅生まれに偏る中、さらに早遅を決める要因として、生息量に応じた密度効果が関係していると考えられる。^{2,3)}

さらに、独立変数に4月魚群数を用いた重回帰分析で、従属変数を早生まれ有効産着卵数とした場合に6月平均体長が独立変数(正の偏回帰係数)として選択され重回帰式となったこと、6月魚群数を用いた重回帰分析で、従属変数を遅生まれ有効産着卵数とした場合に、平均体長が独立変数として選択されず単回帰式となったことから、6月平均体長が大きいほど早生まれ有効産着卵数を増やす方向へ働くが遅生まれ有効産着卵数を減らすわけではなく、6月魚群数が多いほど遅生まれ有効産着卵数を増やす方向へ働くと解釈される。

また、一産卵期の有効産着卵数の推移は横軸方向(時間)へずれるほか、縦軸方向(有効産着卵数)への変化も考えられ、例えば、2017年のように遅生まれの一時期に集中することもあると考えられる。^{2,3)}その他、産卵の開始の早遅に影響する要因として、気温や水温の影響が考えられ、^{14,15)}これらが各回帰式への誤差要因として作用している可能性がある。

遅生まれアユの産卵貢献と先行研究との比較 遅生まれ有効産着卵数と魚群数との関係では5%水準で3月以降すべての魚群数とで有意な正の傾きの単回帰式で表され、特に4月魚群数、5月魚群数、6月魚群数とでは1%水準でも有意であり決定係数も0.5以上と高い値であった。エリ漁獲物に含まれる遅生まれの割合が7割以上となる4月以降の各月魚群数とで決定係数が高く、漁獲物の9割以上が遅生まれとなる6月の魚群数とで決定係数が最も高かったことから、遅生まれの有効産着卵数は遅生まれの魚群数に大きく依存していると言える。言い換えれば、湖中残留アユの大部分が遅生まれであり、それらは遅生まれアユを生む確率が高いと言える。

塚本は、¹⁶⁾琵琶湖のアユの耳石解析による研究で、春遡河群のほとんどの個体が8月、9月の早生まれであるのに対し、6月になっても湖中に残留していた個体の大部分は10月、11月の遅生まれであったと述べている。これは、先に述べたエリやヤナ漁獲アユの早生まれと遅生まれの割合の月別変化と矛盾しない。しかし東⁸⁾による湖中残留群(コアユ)の産卵期(8~9月)は春遡河群(オオアユ)のそれ(9月~11月)より1か月以上早いという知見をもとにコアユの

子は次世代でオオアユとなり、春遡河群であるオオアユの産卵期は残留群であるコアユより遅いのでその子は遅生まれとなり、残留群であるコアユとなる可能性が高いという、いわゆるスイッチング・セオリーを提唱した。

しかし、今回の分析からは産卵に寄与する個体の多くが前年の遅生まれであり、次世代の大部分も遅生まれになる傾向が強いと考えられた。この違いが、塚本や東らによる先行研究より後の環境変化など何らかの理由によるものかは不明である。

現状において、河川遡上したアユが産卵に寄与しにくい理由としては、姉川、安曇川等主要河川でのヤナ(上りヤナ)などでの漁獲や釣獲、河川でのカワウ等鳥類による捕食、産卵期を含む遡上後の河川での瀬切れなどによる資源減耗や産卵環境悪化などが考えられるが、それぞれの影響の程度については別途詳細に調べる必要がある。

予測式の応用 回帰分析の結果から、親魚となる琵琶湖内残留アユの資源尾数の指標となる4月から5月の各月魚群数が多い年ほど遅生まれ有効産着卵数が多くなり、6月の平均体長が大きい年ほど早生まれ有効産着卵数が多くなる。

ところが、2007年頃からアユの平均体長が緩やかに縮小する傾向が続いており、これは、餌料環境悪化に起因する琵琶湖の生産力低下が主な原因と考えられるが、¹⁷⁾今後もこの傾向が続くようであれば、親魚数に対する産着卵数の減少が生じるほか、成熟の遅れによりさらに遅生まれに偏る年が多くなる可能性が高い。早生まれが少ない場合、図7の11月エリ漁獲アユの早生まれの割合が示すとおり早期漁獲物には早生まれが大きく寄与していることから、漁期早期の不漁の発生が多くなると予想される。

また、平均体長縮小傾向は密度効果の結果と思われる、遅生まれが多い年には密度効果の影響が大きくなってさらなる成長不良となり、遅生まれがエリ漁獲物の大部分を占める4月以降の漁獲加入が遅れることにより漁期後半に不漁となる可能性が高い。また、極端な場合、産卵期に成熟するサイズの2gに満たないサイズのものが多くなり、2017年のように産卵が激減することが頻繁に起こる可能性も考えられる。¹⁸⁾

産卵期を通した有効産着卵数の推移と、その後発生した仔魚のふ化日組成による早生まれ・遅生まれ

別の多寡を知ることにより、前述のとおり漁期前期、後期別の豊凶などおよその漁獲動向や資源動向が予測できる。さらに有効産着卵数予測式で総有効産着卵数や遅生まれ有効産着卵数が6月の段階で一定の精度で予測でき、さらに、精度に若干の課題が生じるが、早生まれ有効産着卵数の予測式から早生まれ有効産着卵数を予測し、もしくは、予測した総有効産着卵数から予測した遅生まれ有効産着卵数を差し引くことにより早生まれ有効産着卵数を予測し、6月の時点で人工河川の運用方針を決定する資料とすることができる。

すなわち、早生まれが少ないと予測される場合は、電照飼育で成熟を早めた養成親魚を早めに人工河川へ放流し、できるだけ早期にふ化する群を増やす方法である。¹⁹⁾ 遅生まれが少ないと予測される場合は、人工河川へ放流する養成または天然親魚を9月中旬以降に多くするといった運用が想定される。

現在のところ、どの程度早生まれ仔魚数が琵琶湖へ流下すればどの程度初期の漁獲に貢献するかについてもある程度の予測ができるようになりつつある。²⁰⁾ ただし、放流できる親魚量には限界があるものの、将来的には過大放流による密度効果の影響も考慮する必要が生じる可能性がある。

誤差要因の推測 今回求めた関係式の誤差要因としては、先に述べた気温や水温などの影響のほか、魚群数に関しては、琵琶湖全域をカバーする調査によるものではないこと、他の魚種の魚群を計数している可能性があること、魚群との距離が調査船と近い場合に逃避している可能性があることなどが考えられる。産着卵数に関しては、直径10cmの円筒を産卵床に埋め込み、その中の底質中の産着卵を現場で計数する方法によるが、厳密には無作為抽出や系統抽出でない独自手法のため(調査員の手が届かない水深が深い場所では計数できない。また、一河川あたり十数か所から数十か所といった数多い産卵床のうち、一産卵床当たり数か所しか計数できない、限られた労力での広範囲にわたる調査のため、効率も重視した方法である。)、サンプリングの偏りが生じる可能性があること、一河川に通常5人が分かれて担当区間を調査し産着卵数の合算を行うが、年や場合によっては調査次ごとに調査員が異なることによる技術的なばらつきがある可能性が排除できないこと、死卵数については評価が明確でないこと、産

卵調査の対象範囲は毎年ほぼ一定であるが、自然的あるいは人為的な河川形状変更により物理的に産卵環境が変化することがあることなどがあげられる。

また、アユ資源の減耗による誤差要因として、アユの漁獲量や遊漁による採捕量、捕食者としてのカワウなどの鳥類の他県からの飛来数を含めた生息羽数、アユの仔魚を積極的に捕食するワカサギ²¹⁾や成魚も含めて捕食するハスやビワマスなどの資源尾数、冷水病等魚病の発生状況などの減耗要因の年変動も考えられるが、分析するにあたって十分なデータがなく今後の課題としたい。

今後の予測精度の向上とさらなる課題 今回の結果による回帰式(予測式)は、先に述べたとおり効果的な人工河川運用を事前に検討するために有用と思われる。今後も従来手法によるデータの蓄積による精度向上を図るほか、科学計量魚群探知機を用いた調査では、ライントランセクト法による琵琶湖北湖全域を調査対象(母集団)とする新たな手法を2015年から試行実施しており、²²⁾ このデータの蓄積と評価により精度よくその時々のアユの資源量を推測し、さらに漁獲量や有効産着卵数等の予測が可能となることが期待される。

今回の回帰式では2012年のようなアユの肥満度の異常低下時の予測には役立たない。この年の平均体長の推移を見る限りでは、平年値をやや下回る程度で推移しており、魚群数調査でも異常を検知できず産卵期になり産卵遡上親魚がそれまでの魚群数と比較して非常に少なかったことから異常に気付いたものである。これは餌料生物の継続的で過度な種内競争により小型化したと思われる2017年とは違い、3月頃に急速に餌料生物密度が下がり、それまで成長してきた体型を維持できなくなり引き起こされたものと考えられ、さらに、餌料生物の少ない状況が数ヵ月続きその影響が産卵期にまで及んだものと考えられる。²³⁾ これについては予測が難しく、減耗の一様式として常に肥満度と餌料生物であるミジンコ類やケンミジンコ類などの動物プランクトンをモニタリングして備え、異常を検知した場合に、次期の漁期を想定して人工河川への親魚追加放流をするなど対策が必要である。

謝 辞

本報は、これまで長年アユ資源調査に関わってこられた当場のアユ資源調査担当者や補助調査員、サンプルの測定等基礎処理を行った臨時的職員により収集整理したデータを用いており、これらの皆様に感謝申し上げます。また、琵琶湖産アユに関し、場内・外の先輩方が実施されたアユの生態調査に関する先行研究が、当場の現在のアユ資源調査の基礎になっており、これらの方々に深謝申し上げます。

摘 要

1. これまでに得られたアユ資源調査の結果を用いて、回帰分析(直線回帰)により魚群探知機による魚群数と産卵調査による次期有効産着卵数との関係を明らかにし、魚群数から次期有効産着卵数を予測できないか検討した。検討に当たっては9月中にふ化する早生まれと10月以降にふ化する遅生まれに分類した。
2. 魚群数と次期総有効産着卵数とでは3月以降の各月魚群数とで正の相関関係となり5月魚群数とで最も決定係数が高い単回帰式で近似できた。魚群数と次期早生まれ有効産着卵数とでは6月魚群数とで最も決定係数が高い負の傾きの単回帰式で近似できた。魚群数と次期遅生まれ有効産着卵数とでは6月魚群数とで最も決定係数が高い正の傾きの単回帰式で近似できた。総有効産着卵数は遅生まれ有効産着卵数に偏る傾向があった。湖中残留アユの大部分が遅生まれであり、それらは遅生まれアユを生む確率が高いと言えた。
3. 重回帰分析の結果、5月魚群数と6月平均体長を独立変数とした総有効産着卵数を予測する重回帰式、4月魚群数と6月平均体長を独立変数とした早生まれ有効産着卵数を予測する重回帰式が選択された。遅生まれ有効産着卵数を予測する重回帰式は選択されず単回帰式となった。これらを用いて人工河川に用いるアユ親魚の放流時期や数量をあらかじめ決定し、その後の時期別漁獲状況を考慮した人工河川の有効利用が可能となると考えられた。
4. 6月平均体長が大きいほど早生まれ有効産着卵数を増やす方向へ働き、6月魚群数が多いほど遅生まれ有効産着卵数を増やす方向へ働くと解釈された。

5. 今後もデータを蓄積し、科学計量魚群探知機を用いるなどして産着卵数予測の精度向上を図る必要がある。また、不漁や産着卵数減少の原因となる肥満度の極端な低下の産着卵数への影響については予測できないため、別途肥満度や餌料生物のモニタリングが必要である。

文 献

- 1) 吉岡剛・寺井章人(2016):平成 24 年湖中アユの肥満度低下について,平成 26 年度滋賀県水産試験場事業報告,52.
- 2) 太田滋規・亀甲武志・田中秀具・久米弘人・松田直往・孝橋賢一・西森克浩・井出充彦・大山明彦(2021):2016 年(平成 28 年)生まれのアユの不漁原因について,令和元年度滋賀県水産試験場事業報告,64.
- 3) 太田滋規・亀甲武志・田中秀具・久米弘人・松田直往・孝橋賢一・西森克浩・井出充彦・大山明彦(2021):2016 年(平成 28 年)生まれのアユの不漁原因検討結果報告書,令和元年度滋賀県水産試験場事業報告,97-114.
- 4) 橋口晴穂・西川哲也・魚住香織・古澤一思・森敦史・今尾和正・反田實(2021):播磨灘におけるイカナゴ当歳魚の胃内容物重量指数の経年的低下とその要因,水産海洋研究,**85(1)**, 24-32.
- 5) 久米弘人・太田滋規・田中秀具・大前信輔・松田直往(2022):コアユ資源予測調査データ(令和 2 年度),滋賀県水産試験場研究報告,**58**,33-48.
- 6) 酒井明久(2010):琵琶湖産アユにおける河川への遡上開始日と開始日数の予測,日本水産学会誌,**74(4)**,670-677.
- 7) 原紀男(1990):琵琶湖の人工河川によるアユの増殖について,ダム技術,**40**,58-62.
- 8) 東幹夫(1973):びわ湖における陸封型アユの変異性に関する研究Ⅲ.各集団における成熟過程,産卵習性および形態の特徴について.日本生態学会誌,**23(4)**,147-159.
- 9) 田中秀具(2003):琵琶湖産アユのふ化時期と成長・発育,滋賀県水産試験場研究報告,**50**,19-33.
- 10) 田中秀具(2003):琵琶湖産アユのふ化時期からみた漁期・漁法別特徴,滋賀県水産試験場研究報告,**50**,1-17.
- 11) 松田直往・久米弘人・田中秀具(2020):2019 年級漁獲アユの漁期漁法別ふ化日組成,令和 2 年度滋賀県水産試験場事業報告,60.
- 12) Iguchi.K. and M. Yamaguchi (1994): Adaptive significance of inter-and intrapopulational egg size variation in ayu *Plecoglossus altivelis*. *Copeia*,184-190.
- 13) 松田直往・久米弘人(2021):早期産卵に貢献するアユ親魚の特徴,令和元年度滋賀県水産試験場事業報告,62.
- 14) 西森克浩(2011):高水温がアユの産卵におよぼす影響,平成 21 年度滋賀県水産試験場事業報告,60.
- 15) 西森克浩(2011):湖産アユ産卵期の河川水温の長期化がアユの産卵におよぼす影響予想,平成 21 年度滋賀県水産試験場事業報告,61.
- 16) 塚本勝巳(1988):アユの回遊のメカニズムと行動特性,現代の魚類学,朝倉書店,100-133.
- 17) 太田滋規・亀甲武志・田中秀具・久米弘人・松田直往・孝橋賢一・西森克浩・井出充彦・大山明彦(2021):長期的な視点で見たアユ資源と餌料環境の変動傾向,令和元年度滋賀県水産試験場事業報告,65.
- 18) 山本充孝・久米弘人・井出充彦(2021):琵琶湖産アユの飼育環境下における成熟および産卵特性,令和元年度滋賀県水産試験場事業報告,84.
- 19) 伏木省三(1979):アユの成熟への春季長日処理の降下に関する研究,滋賀県水産試験場研究報告,**31**,1-56.
- 20) 井出充彦(2018):今期アユの早期漁獲不振の原因と過去知見からの漁獲見込み,平成 28 年度滋賀県水産試験場事業報告,63.
- 21) 井出充彦・山中治(1998):琵琶湖で増加したワカサギの特性,滋賀県水産試験場研究報告,47,11-16.
- 22) 寺井章人・井出充彦(2017):計量魚探機による湖中アユの資源尾数推定,平成 27 年度滋賀県水産試験場事業報告,57.
- 23) 吉岡剛・寺井章人(2016):平成 24 年の湖中アユの肥満度低下について,平成 26 年度滋賀県水産試験場事業報告,52.