

淀川のアユ溯上数に与える大阪湾の環境要因の影響

Influence of Coastal Environmental Factors in the Osaka Bay on Upstream Migration of Ayu-fish in the Yodo River

竹門康弘・浦部真治⁽¹⁾・角哲也

Yasuhiro TAKEMON, Shinji URABE⁽¹⁾ and Tetsuya SUMI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Population of Ayu-fish in the lower reaches of the Yodo River System owes to the number of young fish migrating up-stream from the Osaka Bay in spring to early summer every year. Variations in the total number of upstream migration have been attributed to coastal environmental factors affecting survival ratio of the juvenile fish. In order to predict the number of their upstream migration in the Yodo River, we made correlation and regression analyses between the annual total number of upstream migration and a set of coastal environmental factors in the previous autumn to winter season in the Osaka Bay. Results indicated that cold water temperature less than 9°C in winter and Chl.*a* concentration in autumn in the Osaka Bay were positively correlated with the upstream migration of Ayu-fish to the Yodo River.

キーワード: アユ、溯上数、沿岸水温、シラス漁獲量、淀川、大阪湾

Keywords: Ayu-fish *Plecoglossus altivelis*, upstream migration, water temperature, catch of larval anchovy, Yodo River, Osaka Bay

1. はじめに

両側回遊性のアユ *Plecoglossus altivelis* は日本列島、朝鮮半島及び中国大陸東部に分布し、我が国において内水面漁業上、最も重要な魚種であり、河川では漁業・遊漁だけでなく、養殖漁業も広く営まれている。

全国の河川では、春になると種苗アユの放流が行われるが、天然アユの資源変動が大きいため、生息密度や餌の量に配慮した適正な放流量の決定が困難であり、天然アユの溯上量の予測が求められている。

既往の研究では、冬季の海水温、秋口の降雨量、イワシシラスの漁獲量などがアユ資源の変動に寄与することが報告されており、那珂川、相模川、長良川、日高川などで天然アユの溯上数予測が行われている。また、河川に溯上後のアユの自然減耗は小さいが(川那部, 1970)、海域に降下後の仔稚魚の初期減耗は大きいとされ(塚本, 1991)、アユにとって、海域の生活期はアユの資源量を大きく左右する生活史段階と考えられている(山本ら, 2008)。これらのことから、本研究では、大阪湾の環境要因が、淀川のアユに与える影響の解明と、溯上数の予測を目的として、溯上

数に影響を及ぼすと考えられる大阪湾の月別海水温、月別全窒素量、月別クロロフィル *a* 濃度、月別イワシシラス漁獲量及び新淀川感潮域の月別水温、月別全窒素濃度、淀川中流の月平均流量を用いて分析を行った。

2. 材料及び手法

1.1 溯上量調査

淀川では、淀川河川事務所により河口から約 9.8km 上流に位置する淀川大堰魚道でアユ溯上数の調査が行われている。本魚道は、左右兩岸に一基ずつ設置されており、いずれも階段式魚道である。また、アユが溯上できる流路は本魚道のみで、ここで計数することで淀川の総溯上量を把握することが可能である。

調査は 2003 年から毎年 3－6 月にかけて行われている。方法は、2003－2011 年にかけて大潮と中潮の日に目視(10 分目視・10 分待機の繰り返し)により行われ、2012－2013 年にかけては、カメラで連続録画した映像の解析・計測(5－19 時)により行われた。2012－2013 年の溯上数は、目視・自動計測、待機時間、計測時間の補正がなされ、目視による計測値に変換されている。

2.1 大阪湾の月別海水温・月別全窒素量・月別クロロフィル *a* 濃度

湾内の海水温、全窒素濃度、クロロフィル *a* 濃度のデータとして、大阪府及び瀬戸内海環境情報センターが公表している公共用水域水質調査による月一回の水深 0.5－1m の水温、全窒素濃度、クロロフィル *a* 濃度を用いた。海水温、全窒素濃度については湾内 19 定点を対象とし、このうち、12 定点(A-2, B-3, B-4, B-5, C-3, C-4, C-5, O-1, O-2, O-4, O-5, O-6):2000 年 1 月－2012 年 3 月, 7 定点(Amagasaki, Kobe1, Kobe 2, Kobe 3, Koshienhama, Nishinomiya 1, Nishinomiya 2): 2000 年 1 月－2012 年 3 月のデータを収集した。クロロフィル *a* 濃度については、湾内 12 定点(A-2, B-3, B-4, B-5, C-3, C-4, C-5, O-1, O-2, O-4, O-5, O-6): 2000 年 1 月－2012 年 3 月のデータを収集した。

2.2 大阪湾 イワシシラス漁獲量

イワシシラス漁獲量のデータとして大阪府環境農林水産総合研究所水産技術センターの事業資料・事業報告の 2002 年 1 月－2011 年 12 月の月毎のイワシシラス漁獲量を用いた。

2.3 淀川感潮域の月別水温・月別全窒素濃度

新淀川の感潮域における水温、全窒素濃度のデータとして、大阪府が公表する公共用水域水質調査の伝法大橋(河口から約 2.8km 上流にあり淀川大堰の下流)の月別水温、月別全窒素濃度を用いた。

2.4 淀川の月平均流量

淀川における流量のデータとして河口から約 25.9km 上流に位置する枚方大橋の月平均流量を用いた。2003 年 1 月－3 月は、国土交通省水文水質データベース、2003 年 4 月－2013 年 3 月は、大阪広域水道企業団、2013 年 4 月は、淀川河川事務所公共用水域水質データベースからデータを収集した。

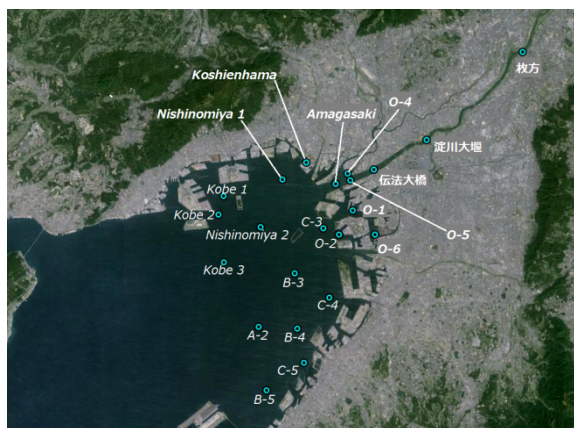


Fig. 1 Location of survey stations on environmental factors in the Osaka Bay and the Yodo River.

2.5 研究手順

毎年のアユ溯上数の合計を目的変数、7 月から翌年の 6 月までの月毎の大阪湾と淀川の環境要因を説明変数として、まず単回帰分析を行い、個々の環境要因が溯上数に与える影響を検討した。次に、単回帰分析の結果を踏まえ 10－3 月の環境要因の内、主に溯上数との相関が高かったものを説明変数として選択し、溯上数予測の 1)多項式回帰、2)ニューラルネットワーク回帰を次の手順で行った。

1) 多項式回帰：選択した説明変数の中から寄与率が最も低いものを 1 つ除外し、変数減少法により線形式を算出した。この操作を説明変数が 1 つになるまで繰り返し、交差検証法により RMSE 及び MAE が最も低いものを予測式として選んだ。

2) ニューラルネットワーク回帰：選択した説明変数の中から寄与率が最も低いものを 1 つ除外し、アルゴリズム Multilayer Perception を用いて、ニューラルネットワーク回帰を行った。この操作を(隠れ層数) = (説明変数+1) / 2 の設定で説明変数が 1 つになる

まで繰り返し、モデルの予測精度の検証を交差検証法により行った。

3. 淀川のアユの溯上数に影響する要因分析

大阪湾及び淀川的环境要因と溯上数の単回帰分析の結果を Table 1 に示す。

3.1 溯上初認日・溯上数

2003 年から 2013 年の溯上初認日の平均は 4 月 8 日であった。最も早かったのは 2012 年に 3 月 19 日、最も遅かったのは 2009 年に 4 月 24 日であった。

2003 年から 2013 年の溯上数の平均は 61,486 尾であった。最も多かったのは 2006 年に 148,845 尾、最も少なかったのは 2013 年に 3,790 尾であった。二番目に少ない 2005 年の溯上数は 14,949 尾であり、2013

Table 1 Correlation coefficients between the number of upstream migrants of Ayu fish in the Yodo River and surface water temperature, total nitrogen, chlorophyll *a* and the CPUE of clupeoid juveniles in the Osaka Bay, water temperature, total nitrogen in the estuary, and the mean discharge of the Yodo River.

Factors	Sampling stations	Month												Distance (km) from mouth of river	Distance (km) from shore
		Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun		
sea surface water temperature (°C)	O-5	0.408	0.266	0.112	-0.016	0.111	-0.479	-0.083	-0.197	*-0.747	-0.387	-0.212	0.057	0	0.4
	O-4	0.510	0.281	-0.209	0.112	-0.113	-0.532	-0.233	-0.250	*-0.871	-0.420	-0.074	-0.017	0.8	1.2
	Amagasaki	0.408	0.077	0.145	-0.095	0.140	*-0.835	-0.137	-0.632	-0.004	-0.648	-0.413	-0.527	1.7	0.6
	O-1	0.345	0.278	-0.136	0.052	-0.201	-0.337	-0.561	-0.166	*-0.754	-0.221	-0.164	-0.285	3.4	0.3
	Koshienhama	-0.276	0.427	0.586	0.401	0.586	-0.210	0.136	0.531	-0.519	-0.591	*-0.945	0.408	5.6	0.1
	O-2	0.522	0.140	0.032	-0.016	-0.176	-0.451	-0.585	-0.164	-0.692	-0.370	-0.321	-0.279	6.3	2
	C-3	0.144	-0.226	0.111	-0.403	0.139	-0.219	-0.699	-0.631	-0.514	-0.696	-0.583	0.239	6.3	3.4
	O-6	0.408	0.004	0.024	0.068	-0.083	-0.490	-0.286	-0.146	-0.563	-0.237	-0.310	-0.226	6.8	1.3
	Nishinomiya 1	-0.243	-0.414	0.134	-0.311	0.089	-0.258	*-0.849	-0.393	0.247	-0.728	0.035	-0.071	7.9	2.4
	Nishinomiya 2	-0.199	0.120	0.150	-0.285	0.234	-0.279	*-0.812	-0.733	0.190	-0.784	-0.448	0.055	11.6	8
	B-3	0.135	-0.061	0.090	-0.522	0.128	-0.196	-0.595	*-0.775	-0.292	-0.698	-0.689	-0.177	12.3	5
	C-4	0.164	-0.071	0.430	-0.390	-0.068	-0.409	*-0.833	-0.051	-0.304	*-0.849	-0.295	0.011	13.6	1.6
	Kobe 1	-0.232	-0.465	0.458	-0.698	0.150	-0.145	*-0.858	-0.697	0.130	-0.663	-0.113	0.138	14.6	3.9
	Kobe 2	-0.234	0.015	0.380	-0.683	0.128	-0.335	-0.744	-0.519	0.125	-0.753	0.142	-0.056	15.7	5.6
	Kobe 3	-0.242	0.026	0.024	-0.436	0.100	-0.379	-0.786	-0.650	-0.014	-0.831	-0.238	-0.038	17.3	10.6
	B-4	0.008	-0.144	0.348	-0.275	0.039	-0.262	*-0.754	*-0.755	-0.322	-0.735	-0.417	-0.426	17.9	1.9
	A-2	-0.042	-0.070	0.203	-0.662	0.105	-0.234	-0.616	*-0.815	-0.405	*-0.872	-0.628	0.098	19.7	6.4
	C-5	0.133	-0.199	0.003	-0.371	0.001	-0.262	*-0.789	-0.348	-0.526	-0.467	-0.360	-0.577	21.4	0.9
	B-5	0.140	0.013	0.233	-0.397	0.146	-0.325	*-0.755	-0.248	-0.510	*-0.796	-0.431	-0.339	25.7	3.2
total nitrogen (mg/L)	O-5		0.361			0.104			0.484			-0.582		0	0.4
	O-4		0.558			0.088			*0.812			0.476		0.8	1.2
	Amagasaki	0.024		0.553		0.410		-0.398		-0.157		0.533		1.7	0.6
	O-1		0.212			-0.295			0.424			0.694		3.4	0.3
	Koshienhama	-0.471				0.329				-0.925		*0.999		5.6	0.1
	C-3	0.003	-0.218	-0.083	0.158	-0.573	-0.563	*-0.817	-0.144	-0.147	-0.290	-0.503	-0.347	6.3	3.4
	O-2		0.523			0.343			0.581			0.357		6.3	2
	O-6		0.290			-0.338			0.272			-0.306		6.8	1.3
	Nishinomiya 1	*0.898	0.335	0.580	-0.156	-0.171	-0.835	-0.100	0.646	**0.985	0.705	0.872	-0.582	7.9	2.4
	Nishinomiya 2	0.736	0.534	-0.100	0.412	-0.191	-0.442	-0.684	0.341	0.511	0.786	0.031	-0.648	11.6	8
	B-3	0.359	-0.027	-0.079	-0.031	-0.289	-0.287	*-0.815	-0.080	-0.139	-0.176	-0.606	0.076	12.3	5
	C-4	-0.283	0.217	-0.143	-0.165	-0.433	-0.131	-0.598	-0.615	-0.505	-0.035	0.032	-0.596	13.6	1.6
	Kobe 1	*0.913	-0.214	0.437	0.487	-0.382	*-0.958	-0.813	0.151	0.447	0.832	-0.659	-0.367	14.6	3.9
	Kobe 2	*0.898	-0.112	0.609	0.833	-0.226	-0.629	-0.765	0.736	0.754	0.496	*-0.965	-0.530	15.7	5.6
	Kobe 3	0.375	0.626	0.301	0.828	0.254	0.042	-0.742	0.323	0.509	0.055	0.913	-0.880	17.3	10.6
	B-4	0.242	-0.103	-0.353	0.414	-0.096	-0.474	-0.612	*-0.77	-0.286	-0.068	-0.503	0.116	17.9	1.9
	A-2	0.075	0.433	-0.303	0.394	-0.272	-0.270	-0.389	-0.283	-0.351	-0.703	-0.548	-0.594	19.7	6.4
	C-5	-0.645	-0.291	-0.369	-0.030	-0.366	-0.178	-0.455	-0.612	-0.398	0.432	0.586	-0.009	21.4	0.9
	B-5	-0.314	-0.528	-0.107	-0.010	-0.041	-0.332	-0.224	-0.581	-0.321	0.437	-0.539	-0.745	25.7	3.2
chlorophyll a (µg/L)	O-5		-0.401			0.506			0.011			-0.528		0	0.4
	O-4		-0.047			0.178			-0.434			*-0.797		0.8	1.2
	Amagasaki	0.077										-0.527		1.7	0.6
	O-1		-0.229			-0.208			-0.346			-0.279		3.4	0.3
	Koshienhama											0.827		5.6	0.1
	C-3	-0.111	-0.102	0.104	0.488	-0.315	-0.329	0.384	-0.653	0.519	-0.316	-0.736	-0.616	6.3	3.4
	O-2		0.292			0.210			-0.169			-0.650		6.3	2
	O-6		0.080			0.112			0.208			-0.218		6.8	1.3
	Nishinomiya 1													7.9	2.4
	Nishinomiya 2													11.6	8
	B-3	-0.516	-0.342	-0.371	0.781	-0.342	-0.065	0.428	-0.164	0.801	-0.305	-0.828	-0.606	12.3	5
	C-4	-0.273	0.045	-0.286	**0.972	-0.104	-0.394	0.683	-0.578	0.832	0.124	-0.611	-0.505	13.6	1.6
	Kobe 1													14.6	3.9
	Kobe 2													15.7	5.6
	Kobe 3													17.3	10.6
	B-4	-0.559	-0.534	-0.332	0.656	0.142	-0.152	0.730	-0.421	0.832	-0.216	-0.620	0.050	17.9	1.9
	A-2	-0.660	-0.243	-0.397	***0.993	-0.479	-0.131	0.383	0.180	0.818	-0.373	-0.312	-0.501	19.7	6.4
	C-5													21.4	0.9
	B-5	0.214	-0.406	*-0.912	0.183	-0.233	0.243	0.870	-0.384	0.849	0.488	-0.665	-0.219	25.7	3.2
Catch of clupeoid juveniles(kg/day)		-0.116	0.604	-0.136	-0.498	-0.718	-0.426				0.209	0.047	0.173		
Water temperature (°C)	Denpo	0.437	0.045	-0.171	0.196	-0.168	-0.467	-0.241	-0.057	-0.062	-0.525	-0.363	-0.003		
Total nitrogen (mg/L)	Denpo	0.200	-0.294	-0.230	-0.236	0.136	0.414	0.530	0.090	-0.108	-0.049	-0.413	0.206		
Mean flow(m³/s)	Hirakata	-0.103	-0.197	0.260	-0.418	-0.252	-0.599	-0.162	-0.148	0.526	0.603	0.366	0.293		
* 5% significant, **1% significant, ***0.1% significant. $ r > 0.5$															

年は極端に溯上数が少ない結果となった。

3.2 海水温

湾内各地点の海水温の月平均値は 8-9 月に 26-29.5℃と最も高くなり、3 月にかけて徐々に降下し、4 月に 12.5-16℃に上昇した。水温が最も低くなったのは 2-3 月(8-9℃)であった。冬季の湾内の水温分布は、12 月に一様で、1 月には沖合に比べ河口域を除いた沿岸域で高く、2-3 月は湾東部沿岸比較的高いという傾向がみられた。

溯上数と海水温との間には 8 月以外の全月に各地点で比較的高い相関がみられた。10 月及び 12-5 月には、各地点で負の相関がみられる傾向にあった。また、有意な相関が($p < 0.05$)がみられたのは 12-5

月に限られ、すべて負の相関であり、海水温が高いほど溯上数が減少する傾向がみられた。

海域生活期(10-3 月)に有意な相関がみられたのは、12-3 月であり、12 月：1 地点、1 月：7 地点、2 月：3 地点、3 月：3 地点であった。それぞれ、河口から 12 月：約 2km(1 地点)、1 月：7-2km(7 地点)、2 月：12-2km(3 地点)、3 月：4km 以内(3 地点)の地点、岸から 12 月：約 1km(1 地点)、1 月：約 1-4km(6 地点)、約 8km(1 地点)、2 月：約 2km(1 地点)、5-7km(2 地点)、3 月：2km 以内(3 地点)の地点であり、大きく 12 月に河口域、1 月に河口から離れた沿岸域、2 月に沖合、3 月に河口域であった。また、これらの地点の海水温と溯上数の関係をみると、それぞれ、12 月：15℃、1 月：11℃、2 月：8℃、3 月：11℃を上

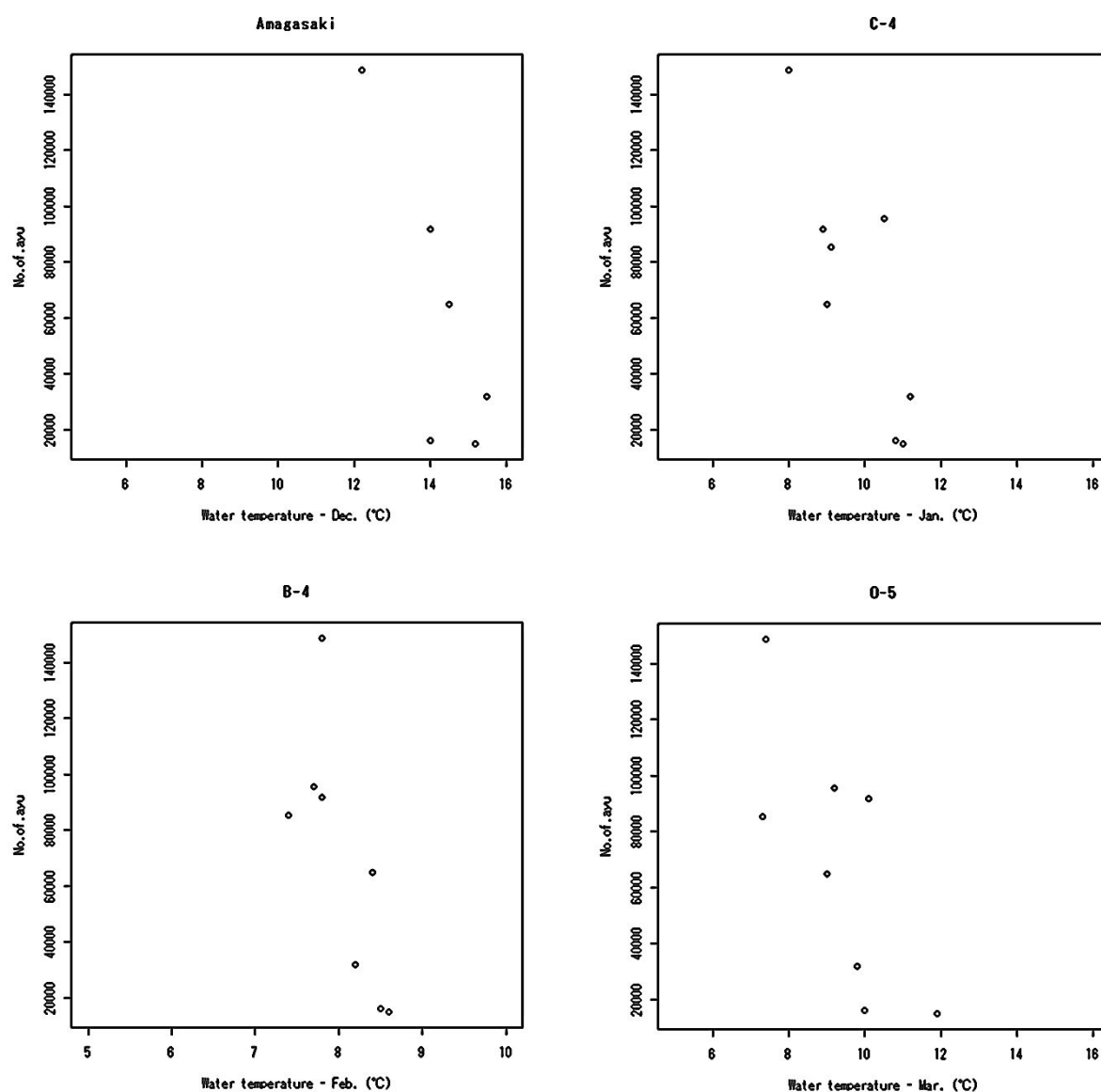


Fig.2 Relationship between the number of upstream migrants of Ayu fish in the Yodo River and the surface water temperature at Amagasaki in December, C-4 in January, B-4 in February and O-5 in March.

Table 2 Correlation coefficients between the number of upstream migrants of Ayu fish in the Yodo River and the cumulative sea surface water temperature from December to March in the Osaka Bay.

Sampling stations	<i>r</i>	Distance (km) from mouth of river	Distance (km) from shore
O-5	** -0.860	0	0.4
O-4	** -0.920	0.8	1.2
Amagasaki	-0.573	1.7	0.6
O-1	* -0.755	3.4	0.3
Koshienhama	-0.120	5.6	0.1
C-3	-0.563	6.3	3.4
O-2	* -0.749	6.3	2
O-6	-0.627	6.8	1.3
Nishinomiya 1	-0.422	7.9	2.4
Nishinomiya 2	-0.526	11.6	8
B-3	-0.494	12.3	5
C-4	-0.543	13.6	1.6
Kobe 1	-0.622	14.6	3.9
Kobe 2	-0.493	15.7	5.6
Kobe 3	-0.538	17.3	10.6
B-4	-0.560	17.9	1.9
A-2	-0.514	19.7	6.4
C-5	-0.523	21.4	0.9
B-5	-0.543	25.7	3.2
* 5% significant, **1% significant.		<i>r</i> > 0.5	

回ると溯上数が比較的少なく、12月:13°C、1月:9°C、2月:8°C、3月:9°Cを下回ると比較的多くなる傾向がみられた。また、12-3月に最も高い相関がみられたのは3月の地点 O-4($r = -0.871$)であった。次に、12-3月の月別水温の積算値と溯上数の関係を見たところ、全地点で比較的高い負の相関がみられ、有意な負の相関($p < 0.05$)がみられたのは、淀川河口域の4地点に限られ、神崎川河口域(O-4)、淀川河口(O-5)では、1%有意であった(Table 2)。

3.3 全窒素濃度

湾内の全窒素濃度の月平均値は、河口域(O-1, O-2, O-4, O-5, O-6)で年間 1mg/L 以上で推移する地点が多くみられ、河口から離れていくにつれ低下する傾向がみられた。河口から最も離れた湾東部の地点(B-5)では年間 0.5mg/L 以下で推移した。全窒素濃度と溯上数との間には、全月に各地で比較的高い相関がみられた。湾北部(Nishinomiya 1, Nishinomiya 2, Kobe 1, Kobe 2, Kobe 3)で7月、10月及び2-4月に正の相関月に正の相関、12-1月に負の相関がみられ、河口域(O-1, O-2, O-4, Amagasaki)では8-9月、2月及び5月に正の相関がみられ、湾東部(A-2, B-3, B-4, B-5, C-3, C-4, C-5)では、11-6月に負

の相関がみられる傾向にあった。有意な相関($p < 0.05$)がみられたのは、7月、12-3月及び5月であり、7月、3月に正の相関、12-1月に負の相関、2月、5月に正の相関、負の相関の両方がみられたが、季節的、地理的な傾向は特にみられなかった。

海域生活期(10-3月)に有意な相関がみられたのは、12-3月であり、12月:1地点、1月:2地点、2月:2地点、3月:1地点であった。これらの地点の全窒素濃度は、2月に正の相関がみられた河口域(1地点:O-4)で1.0-3.5mg/Lと比較的高く、1月、2月に負の相関がみられた湾東部(2地点:B-3, B-4)で0.10-0.77mg/Lと比較的低く、他地点(C-3, Kobe 1, Nishinomiya 1)は0.41-1.2mg/Lの範囲であった。

3.4 クロロフィル *a* 濃度

湾内の各地点のクロロフィル *a* 濃度の月平均値は、6-9月にかけて12-86µg/Lと最も高くなり、沖合に比べ沿岸域の方が高くなる傾向がみられた。クロロフィル *a* 濃度が最も低下したのは11-12月、2月で2-5µg/Lの間であった。クロロフィル *a* 濃度と溯上数の間には12月、4月以外の全月に各地で比較的高い相関関係がみられた。7月、9月、2月、5-6月に負の相関、10-11月、1月、3月に正の相関がみられる地点があった。有意な相関($p < 0.05$)がみられたのは、9月に湾東部沿岸1地点(B-5)で負の相関、10月に湾東部沖合2地点(A-2, C-4)で正の相関であった。

海域生活期に有意な相関がみられたのは10月:2地点であり、いずれも正の相関がみられ、クロロフィル *a* 濃度が多いと溯上数が増える傾向がみられた。これらの地点のクロロフィル *a* 濃度は0.7-16.0µg/Lの範囲で推移し、溯上数との関係をみてみると、5µg/L以下で溯上数が比較的少なく、10-16µg/Lで比較的多くなる傾向がみられた。

3.5 イワシシラス漁獲量

イワシシラス漁獲量と溯上数の関係は、11月に比較的高い相関がみられた。また、9-12月にかけ相関係数は負の値を示した。また、最も相関が高かったのは11月であり、 $r = -0.718$ ($p = 0.069$)であった。

3.6 淀川の環境要因

伝法大橋の水温が最も低下するのは、12-2月であり7°C以下になる年もみられた。また、全窒素濃度は0.5mg/L以上で推移した。月平均流量は、梅雨期、台風期に400m³/sを超えることが散見された。一方、冬期の流量は他の時期に比べ低めで推移した。

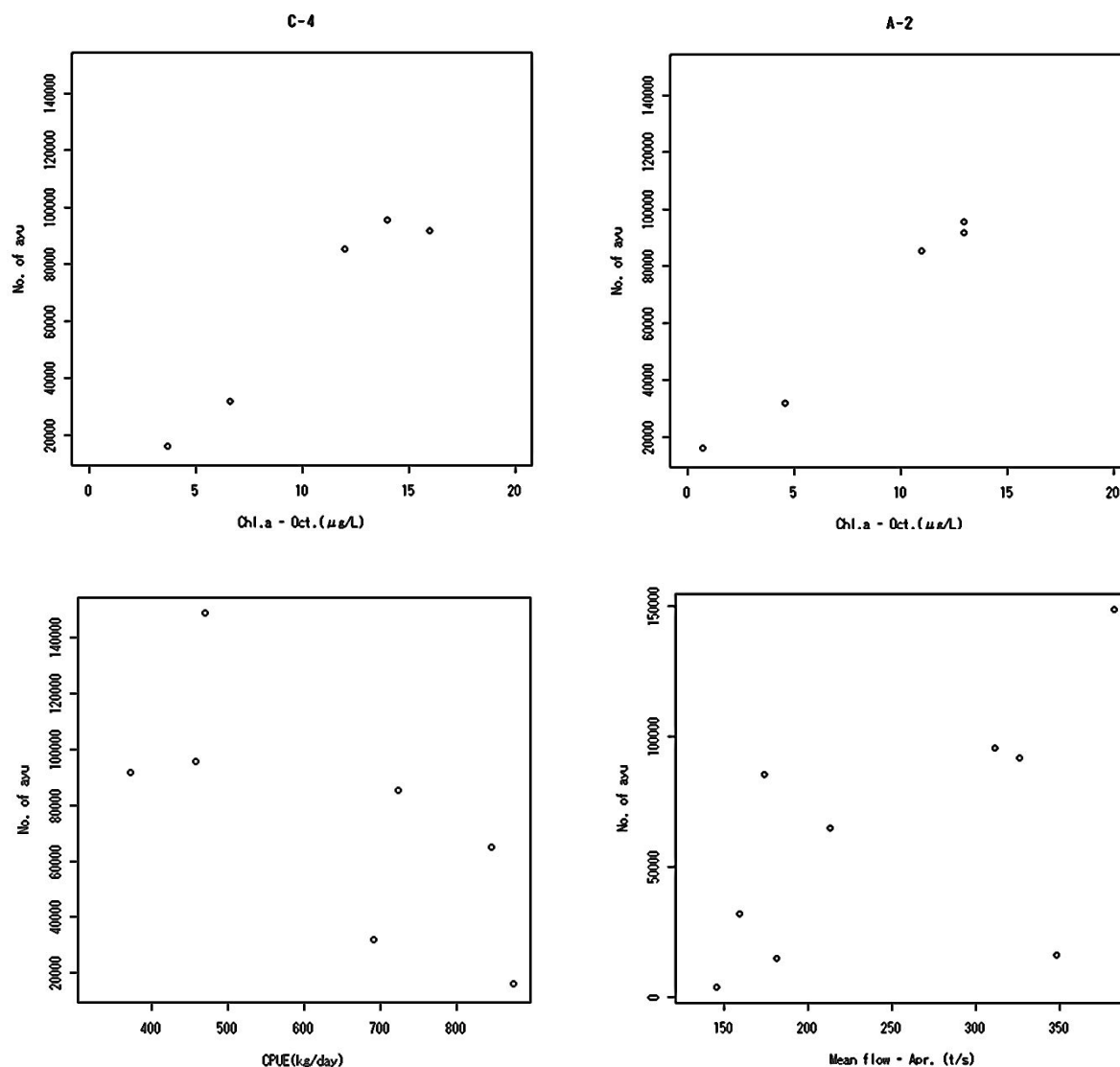


Fig. 3 Relationship between the number of ascending ayu in the Yodo River and the chlorophyll *a* at C-4 and A-2 in October, the CPUE of clupeoid juveniles in the Osaka Bay in November and the mean flow in the Yodo River in April.

溯上数と伝法大橋の水温の関係をみると4月に負の相関($r = -0.525$)がみられた。溯上数との全窒素量の関係をみると1月に正の相関が($r = 0.530$)みられた。伝法大橋の1月の全窒素量は1.0mg/L以上であった。溯上数と枚方の平均流量の関係をみると、12月、3-4月に比較的高い相関関係がみられた。12月には負の相関、3-4月には正の相関であり、3月の平均流量が280(m³/s)を下回ると、溯上数が比較的少なく、300(m³/s)を超えると比較的多くなる傾向がみられた。最も相関が高かったのは4月($r = 0.603$, $p = 0.086$)であった。

次に、共に正の相関がみられた3-4月の積算月平均流量と溯上数の関係をみてみると $r = 0.647$, $p = 0.060$ となり、3月、4月の月平均流量よりも高い相関が得られた。

3.7 溯上数の予測式

単回帰分析の結果から溯上数の説明変数として以下のものを選んだ(Table 3)。これらの説明変数を用いて溯上数予測モデルの算出を行った。

(1) 重回帰分析による予測式

選択した説明変数の中から寄与率が最も低いものを1つ除外し、多重共線性に注意し、変数減少法により線形式を算出した。この操作を説明変数が1つになるまで繰り返した。予測モデルの性能の確認は、今回、データ数が十分でないため、交差検証法により行った。この方法では、まず説明変数を n 個のブロックに分割し、 $n-1$ 個を学習データ、1個を未学習データとして入力し溯上数の予測値を求め、実測値

Table 3 Predictor variables of environmental factors for the multiple regression and multilayer perceptron.

	Sampling station	Factor	Month	
X_1	Amagasaki	Water temperature(°C)	Dec.	X_{27}
X_2	Nishinomiya 1	Water temperature(°C)	Jan.	X_{22}
X_3	Kobe 1	Water temperature(°C)	Jan.	
X_4	Nishinomiya 2	Water temperature(°C)	Jan.	X_{23}
X_5	C-4	Water temperature(°C)	Jan.	X_{24}
X_6	B-4	Water temperature(°C)	Jan.	
X_7	C-5	Water temperature(°C)	Jan.	
X_8	B-5	Water temperature(°C)	Jan.	
X_9	B-3	Water temperature(°C)	Feb.	X_{25}
X_{10}	A-2	Water temperature(°C)	Feb.	X_{26}
X_{11}	B-4	Water temperature(°C)	Feb.	
X_{12}	O-5	Water temperature(°C)	Mar.	
X_{13}	O-4	Water temperature(°C)	Mar.	X_{27}
X_{14}	O-1	Water temperature(°C)	Mar.	
X_{15}	Kobe 1	T-N(mg/L)	Dec.	X_{28}
X_{16}	C-3	T-N(mg/L)	Jan.	X_{29}
X_{17}	C-4	Chl a(μ g/L)	Oct.	X_{30}
X_{18}	A-2	Chl a(μ g/L)	Oct.	X_{31}
X_{19}		CPUE of clupeoid juveniles(kg/day)	Nov.	X_{32}
X_{20}	枚方	Mean flow(m^3/s)	Apr.	X_{33}
Y		No. of ascending ayu		

と比較するという操作を n 回繰り返す、各回で算出された精度の平均をモデルの推定精度とするものである。交差検証法($n=8$)により最も RMSE 及び MAE が低いものとして次式を選んだ(Linear 1)。

$$Y = 415049.0969 - 12158.9586X_3 - 15612.5702X_{12} - 128.2095X_{19} \quad (1)$$

交差検証法の結果として、予測値と実測値の相関係数は 0.9136 と高く、地点 C-4 の 1 月の海面水温(X_5)、O-5 の 3 月の海面水温(X_{12})及び 11 月のイワシラス漁獲量(X_{19})が淀川のアユ溯上数を予測するのに有効であることが示唆された。偏回帰係数から溯上数に対し、地点 C-4 の 1 月の海面水温、地点 O-5 の 3 月の海面水温、11 月のイワシラス漁獲量が減少要因となった。また、溯上数に対する寄与の指標である標準偏回帰係数から地点 O-5 の 3 月の水温: -0.4745、地点 C-4 の 1 月の海面水温: -0.3949、11 月のイワシラス漁獲量: -0.36 の順で寄与していることがわかった。

次に、選択した説明変数を地理的・季節的傾向に基づき分類し(X_{21} - X_{33})、平均をとり、上式で選ばれた地点 O-5 を含む淀川河口域の 3 月の海面水温(X_{27})、地点 C-4 を含む湾東岸沿岸域の 1 月の海面水温(X_{24})、11 月のイワシラス漁獲量(X_{32})を用いて変数減少法による重回帰分析を行った結果を下に示す。また、モデルの精度を、交差検証法($n=8$)により確認した(Linear 2)。

$$Y = 388517.9546 - 24544.5337X_{27} - 135.4617X_{32} \quad (2)$$

交差検証の結果として、予測値と実測値の相関係数は 0.8929 と高く、淀川河口域の 3 月の海面水温

(X_{27})と 11 月のイワシラス漁獲量(X_{32})が淀川のアユ溯上数を予測するのに有効であることが示唆された。偏回帰係数から溯上数に対し、淀川河口域の 3 月の海面水温、11 月のイワシラス漁獲量が減少要因となった。また、標準偏回帰係数から淀川河口域の 3 月の海面水温: -0.7202、11 月のイワシラス漁獲量: -0.5374 の順で寄与していることがわかった。

(2) ニューラルネットワーク回帰による予測

選択した説明変数の中から寄与率が最も低いものを 1 つ除外し、隠れ層数を一定の基準にしたニューラルネットワークで非線形モデルを算出し、予測精度を交差検証法により確認した。この操作を説明変数が 1 つになるまで繰り返した。交差検証($n=8$)により最も RMSE 及び MAE が低いものとして、地点 Amagasaki の 12 月の海面水温(X_1)、地点 Nishinomiya 1 の 1 月の海面水温(X_2)、地点 C-4 の 1 月の海面水温(X_5)、地点 B-4 の 1 月の海面水温(X_6)、地点 B-3 の 2 月の海面水温(X_9)、地点 A-2 の 2 月の海面水温(X_{10})、地点 B-4 の 2 月の海面水温(X_{11})、地点 O-5 の 3 月の海面水温(X_{12})、地点 O-1 の 3 月の海面水温(X_{14})、地点 Kobe 1 の 12 月の全窒素量(X_{15})、地点 A-2 の 10 月のクロロフィル a 濃度(X_{18})、11 月のイワシラス漁獲量(X_{19})を説明変数として、慣性パラメータ: 0.2、学習率: 0.3、中間層ユニット数: 6 とする設定を選んだ。交差検証の結果として、予測値と実測値の相関係数は 0.9549 となった(Newral 1)。

次に、選択した説明変数を地理的・季節的傾向に基づき分類し(X_{21} - X_{33})、平均をとり、それらを説明変数として扱い、上記と同じ方法で予測・検証をおこなった。結果として、兵庫県沿岸部の 1 月の海面水温(X_{22})、淀川河口域の 3 月の海面水温(X_{27})、大阪南港西の 1 月の全窒素量(X_{29})、11 月のイワシラス漁獲量(X_{32})を説明変数として、慣性パラメータ: 0.2、学習率: 0.3、中間層ユニット数: 2、としたときに最も RMSE 及び MAE が低い結果となった。また、検証による予測値と実測値との間の相関係数は 0.9287 となった(Newral 2)。

4. 大阪湾におけるアユの溯上に影響する条件

4.1 大阪湾の海水温

大阪湾では、12-5 月にかけて海水温が低いと溯上数が多くなる傾向がみられた。淀川のアユ溯上は早くて 3 月下旬に始まり、河口から離れた地点で 4-5 月に有意な負の相関($p < 0.05$)がみられたことは、この頃、稚魚は河口付近に分布していると考えられ

るので、擬似相関の可能性が考えられる。一方、12-3月の海水温と溯上数の関係は、12月に河口域、1月に河口から離れた湾沿岸、2月に沖合、3月に河口域の地点で有意な負の相関がみられ、それぞれ、15℃、11℃、8℃、11℃を超えると溯上数が比較的少なく、13℃、9℃、8℃、9℃を下回ると比較的多くなる傾向がみられた。アユ仔稚魚の適水温は7℃以上とされているが(下茂ら, 2000)、致死水温の下限値についての情報は得られなかった。一般的に、致死水温の上限は、非常に正確に決定できるのに対し、下限は、寒冷昏睡などの現象により正確な決定が困難とされている(川本, 1996)。今回、8℃、9℃以下で溯上数が増加する傾向がみとめられたことは、必ずしも低温化でアユ仔魚の生存率が低下しないことを意味している。ただし、各月において、一定水温以下で溯上数が増えた事実を解釈するためには、同時に水温以外の環境要因との関係についても検討する必要がある。変温性の魚類は、その体温が環境水温に依存するため、活動度も体内の代謝活性も水温の影響を受け、水温が高いほど酸素消費量が大きくなる(板沢, 1997)。また、体重維持に必要な餌の量は水温が上昇すると一般に増加し、適温範囲内での飽食量は水温が上がると増加するとされている(板沢, 1997)。今回、湾内の水温が、仔稚魚の適水温下限(7℃)を下回することは、ほとんどなかった。したがって、高水温下では、仔稚魚の餌環境が良好であれば生存可能であるが、餌環境が十分でない場合、生存に関して水温はマイナス要因となりうる。一方、低水温下では、餌環境が良好でなくとも、呼吸によるエネルギー消費が比較的小さいため、高水温下に比べ生残が上がるものと考えられる。大阪湾では、植物プランクトン量の指標とされるクロロフィル *a* 濃度は11-12月、2月に最も低下し2-5μg/Lになり、仔稚魚の餌料プランクトンが高水温下では十分に確保されず、海域での生残低下につながり、溯上数に影響を及ぼしたものと推察できる。

次に、海水温と溯上数の間に有意な負の相関($p < 0.05$)がみられた地点は、12月の河口域から、1月に河口から離れた湾沿岸、2月に沖合、3月に河口域へと遷移したが、この結果は海域での仔稚魚の時期的な分布の移り変わりに対応している可能性がある。まず河口へ流下した仔魚は汽水域の沿岸から次第に流心部へ移り (Takahashi et al., 2002)、次いで一部は波打ち際に留まるものの多くは沖帯に分布を広げ (Azuma et al., 2003)、成長すると波打ち際に集まり (東ほか, 2002)、さらに溯上が近づくと河口付近に移動すると考えられている (堀木, 1990; 東ほか, 2003)。また、仔稚魚の海域での高密度分布域は熊野

灘で距岸 2.5km 以内(塚本ら, 1989)、土佐湾(八木ら, 2006)、富山湾で 1km 以内(田子, 2002)、伊勢湾では河口域に近い湾奥部にあることが報告されている(八木ら, 2006)。今回、12-3月の間に水温と溯上数の間に有意な負の相関がみられた13地点のうち9地点は距岸約 3km 以内にあった。これらを考え合わせると、大阪湾では、今回、12-3月に海水温と溯上数の間に有意な負の相関がみられた地点に仔稚魚が分布しており水温が影響を与えた可能性が考えられる。また、海水温と有意な負の相関がみられた地点は湾東部では河口から約 26km の地点まで広がっていたのに対して、湾北部では、河口から約 15km 以内に限られていた。大阪湾東岸には恒流帯が存在し、その流れは密度流と地形性によるものと考えられており、淀川の河川流量が大きくなると強くなり、湾奥部から東岸沿いに南下していくものである。したがって、湾東岸において、河口から約 26km の地点にも淀川を溯上する仔魚が分布することは十分に考えられ、それに伴い水温が仔稚魚の生残に影響を及ぼしている可能性も考えられる。さらに、アユには母川回帰性がないといわれており(塚本ら, 1989)、湾北部海水温の影響は、加古川などの他河川からの流下仔魚が湾北部で海域生活期を過ごし淀川を溯上する可能性が考えられる。

4.2 大阪湾の全窒素濃度

大阪湾では、12-3月の間に溯上数との間に有意な相関($p < 0.05$)がみられた。2月に正の相関がみられた河口域において、全窒素濃度は1.0-3.5mg/Lと環境省の環境保全に関する基準値(1mg/L)を上回っており、全窒素濃度の上昇がアユ仔魚に直接、生残を高める要因としてはたらいとは考えにくい。1-2月に負の相関がみられた湾東部海域の2地点では、全窒素濃度は0.10-0.77mg/Lと基準値以下で推移しており、全窒素濃度の低下がアユ仔魚に直接、生残を高める要因としてはたらいとは考えにくい。このことについては、全窒素濃度と他の環境要因との関係性の検証が必要と思われる。

4.3 大阪湾のクロロフィル *a* 濃度

大阪湾では、初夏から秋にかけてのクロロフィル *a* 濃度が上昇すると、翌年の溯上数が少なくなり、秋から冬にかけてクロロフィル *a* 濃度が上昇すると溯上数が多くなる傾向がみられた。このことは、秋から冬の藻類生産の増加が仔稚魚の餌となる動物プランクトンの増加に寄与し、海域でのアユの生残を高め、溯上数に影響したものと考えられる。秋季に有意な相関($p < 0.05$)がみられたのは、9月、10月で

あり、湾東部の比較的沖合の地点であった。この時期に、仔魚が沖合に分布している事は考えにくく、クロロフィル *a* 濃度が仔魚の生残に直接的な影響を与えていることは考えにくい。

4.4 大阪湾のイワシシラス漁獲量

イワシシラス漁獲量と溯上数の関係は、11月に負の相関($r = -0.718$)がみられた。土佐湾の調査ではアユがシラス漁獲物の中から採集されたことから(吉本ら, 2006), 海域でのアユとシラスの分布は、成長における一時期に重複していることが考えられる。また、アユ仔稚魚とマイワシ、カタクチイワシの仔魚が摂餌するのは、共にカイアシ類とされる。これらのことから、アユとイワシシラス類との間に、カイアシ類などの動物性餌料プランクトンを巡っての競合が想定され、アユの生残に何らかの影響を与えている可能性も考えられる。また、9月のクロロフィル *a* 濃度と溯上数の間に有意な負の相関($p < 0.05$)がみられたが、9月のクロロフィル *a* 濃度の上昇がイワシシラスの餌となる動物プランクトンの増加につながり、結果的にイワシシラスの増加が仔稚魚の生残を下げた可能性が考えられる。さらに、冬に近づくにつれイワシシラス漁獲量は、減少することから、10月以降には、クロロフィル *a* 濃度と溯上数の間に正の相関がみられた可能性が考えられる。今回、イワシシラスとアユ溯上数との間に負の相関がみられたことについて、今後は餌となる動物プランクト

ン量・種間競争などの観点から総合的な研究が必要と思われる。

4.5 淀川環境要因

淀川の月平均流量と溯上数の関係は、3-4月に正の相関($r = 0.526$, $r = 0.603$)がみられた。3-4月に正の相関がみられたのは、4月は淀川でのアユ溯上期にあたり、3-4月の流量が淀川への溯上を促す呼び水として働いた可能性が考えられる。また、春先の流量が $300\text{m}^3/\text{s}$ を超えると溯上数が多くなる傾向がみられ、 $300\text{m}^3/\text{s}$ 以下では溯上数は比較的少なかった。

4.6 予測式の評価

重回帰分析及びニューラルネットワークを用いた予測を行った。重回帰分析により最終的に選択された説明変数は、地点 C-4 の1月の海面水温、地点 O-5 の3月の海面水温及び11月のイワシシラス漁獲量となり、寄与率が最も高かったのは、地点 O-5 における3月の海水温であった。地点 O-5 は淀川河口中央である。四万十川では河口域がアユ仔稚魚の重要な生息地であることが知られており(高橋ら, 1989), 淀川においても、やはり河口域の環境が仔稚魚の生残に影響を与えているものと考えられる。また、地点 C-4 は、淀川河口からの距離が 13.6km 、距岸 1.6km にあり、日本各地の仔稚魚分布調査の結果から十分に仔稚魚の生残に直接的に影響を及ぼす海域地点として考えられる。11月のイワシシラス漁獲量につい

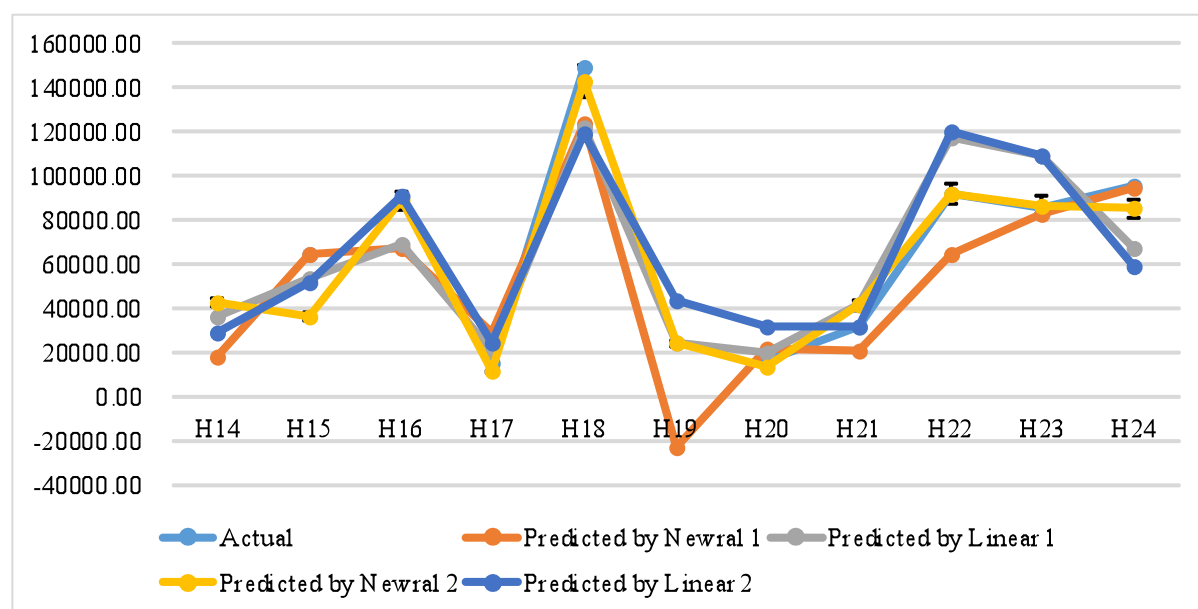


Fig. 5 Results of comparisons among the actual number of upstream migrants of Ayu fish in the Yodo River and predicted numbers by the model of Linear 1, Linear2, Newral 1 and Newral 2.

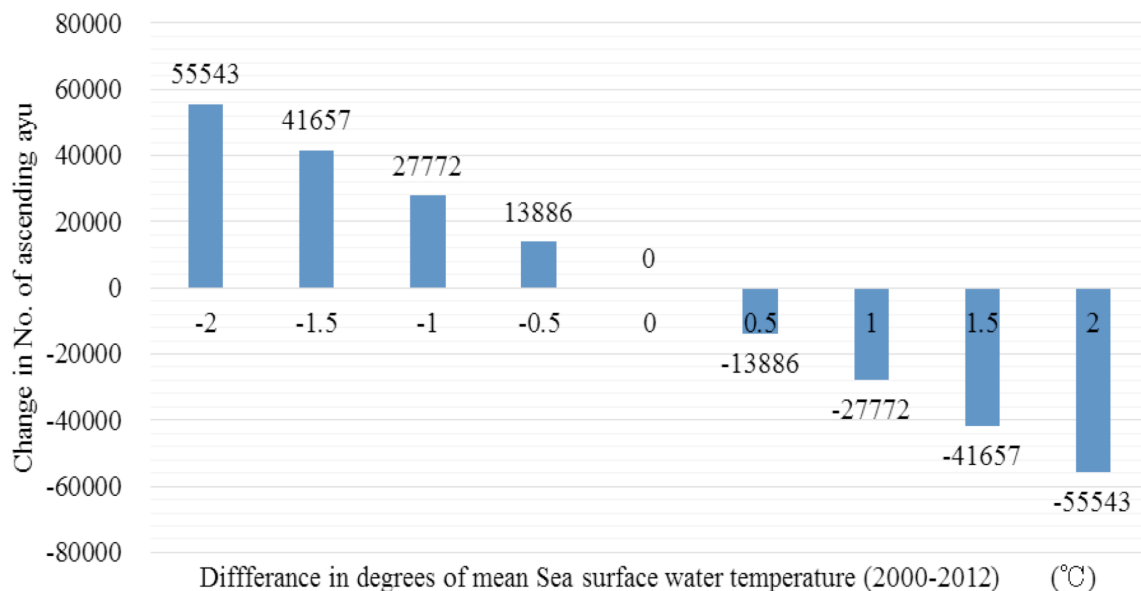


Fig. 6 Changes in the predicted number of upstream migrants of Ayu fish in the Yodo River under the different mean surface water temperature conditions in the Osaka Bay.

ては上で述べた通りである。

次に、ニューラルネットワークを用いた溯上数予測について、今回、隠れ層の数を一定の基準に従い、最も予測精度の高い説明変数の組み合わせを模索した。ニューラルネットワークについては、重回帰分析と異なり、今回、導いた説明変数の組み合わせが全て揃わなくとも、新たに設定を変えることにより、精度の高い予測が可能になるものと考えられる。また、今回の研究では、データ量が少ないにも関わらず、精度の高い予測が可能であることが示唆された。しかし、ニューラルネットワークでは、選択された説明変数は、溯上数との関係がブラックボックスとなっているため、溯上数の変動に影響を与えている要因の特定は困難であるため、要因分析の為に重回帰分析を併用することが望まれる。

今回、予測に使用した溯上数のデータは 8 個であり、予測モデルを導くには十分とはいえず、今後、データの蓄積とともに、更なる、要因分析及び予測モデルの構築が必要であると思われる。また、今回構築した 4 種類の予測モデルを用いて、溯上数の予測を行ったところ(Fig. 5)、溯上数の計測がなされていない H14 年、H16 年、H19 年の溯上数は、H14 年、H19 年の予測では、平年値(61,486 尾)を下回る結果となり、H16 年は平年並みの結果となった。また、式(1)を用いて、海水温による溯上数の感度分析を行った(Fig. 6)。感度分析の結果として海水温が 1°C 上昇すると溯上数は約 30,000 尾減少する結果となった。

5. 結論ならびに今後の課題

本研究では淀川におけるアユの溯上数を予測するために大阪湾の沿岸海域ならびに河川の環境要因と溯上数の関係を分析した。その結果、大阪湾の冬場の海水温が 10°C を上回ると淀川のアユ溯上数が比較的少なくなり、9°C を下回ると比較的多くなることがわかった。また、他地域と異なり、淀川では春先の流量増加が溯上数の増加要因となり、春先 3-4 月の月平均流量が 300m³/s を超えると溯上数が概ね増加することが分かった。したがって、結果として、淀川のアユ溯上数の予測には、河川水の影響が強い沿岸部の冬季の水温ならびに前年 11 月のイワシシラス漁獲量流量及び河川水の影響が強い沿岸部の水温が必要であることが分かった。

今後、この予測式を、内水面漁業のためのアユ適正放流量の推定などの目的に対して有効に活用するためには、アユの溯上数を規定すると考えられる海域及び河川の環境要因の将来変化を、放流計画を作成する 2 月頃までに予測する技術が必要となる。ただし、近年は気候変動などの要因によって、環境条件の年々の変動幅が大きかつ非定常的な変化も見受けられる。このため、中長期的な将来予測への社会的要請も大きい。鈴木ら(2014)は、伊勢湾及び木曾三川で分布型流出モデル、不定流モデル、3 次元海洋循環モデル、海洋拡散モデルの 4 つのモデルを統合することにより閉鎖海域での河川及び海域の環境要因を予測する河川海洋結合モデルを構築し、水

温の将来変化がアユの溯上に与える影響を評価している。このような気候変動をもとに、将来予測することは、長期的な社会適応を検討する上で必要である。いっぽう、前述の水産業などの立場からは、むしろ翌年や数年後の予測が重大な関心事となる。したがって、大阪湾及び淀川でも鈴木ら(2014)と同様のモデル構築を行なった上で、溯上数の将来予測精度を高めるための研究を行うことによって、様々な将来シナリオの下で、アユの溯上数の将来予測が可能となり、淀川流域におけるアユ適正放流量の推定にもつながることが期待される。

また、本研究の過程において、淀川河口域を含む汽水域の環境データが沖合に比べて極めて貧弱であることが分かった。汽水域は、アユなどの両側回遊性種のみならず、ヒラメやヨシエビなどの沿岸性種にとっても重要な生息場であり、埋め立てや護岸等の人間活動による影響を軽減し自然再生を積極的に進める必要がある。そのためには、汽水域生息場において物理化学的環境や動植物の生息状況の調査が今まで以上に精力的に計画・実施されるべきである。

謝 辞

本研究には、気候変動リスク情報創生プログラムならびに科学研究費補助金(252410245001)の一部を使用した。また、本論文の作成にあたり、国土交通省淀川河川事務所河川環境課の濱田様には、淀川大堰におけるアユ溯上数に関する資料を提供していただいた。また、国土交通省近畿地方整備局神戸港湾技術調査事務所調査係の橋本様には、お忙しい中、大阪湾内の環境要因についてのデータ所在に関する助言をいただいた。さらに、大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センターの山本様には、大阪湾内のイワシシラス漁獲量についてのデータ所在に関する助言をいただいた。最後に、たかはし河川生物調査事務所の高橋様には、アユの成長と水温に関する助言をいただいた。以上の方々に、心より感謝の意を表する。

参考文献

東健作・平賀洋之・木下泉(2003): 降下仔アユの海域への分散に及ぼす降水量の影響, 日本水産学誌, 69(3), 352-358.
東健作・平賀洋之・堀木信男・谷口順彦(2002): 和歌山県中部の破碎帯におけるアユ仔魚の分布, 水産増殖, 50(1), 9-15.
板沢靖男(1997): 温度・魚類生理学概論, 恒星社厚

生閣, 東京, 66-83.

川那部浩哉(1970): アユの社会構造と生産Ⅱ: 15年間の変化をみて, 日本生態学会誌, 20(4), 144-151.

川本信之(1966): 水温・魚類生理生態学, 恒星社厚生閣, 東京, 186-201.

下茂繁・秋本泰・高浜洋(2000): 海生生物の温度影響に関する文献調査, 海洋研報, 2, 1-351.

鈴木靖・本間基寛・佐藤嘉展・道弘有理・竹門康弘(2014): 水温の将来変化がアユの生息環境に及ぼす影響について, 水工学論文集, 58.

高橋勇夫・木下泉・東健作・藤田真二・田中克(1989): 四万十川河口内に出現するアユ仔魚, 日本水産学誌, 56(6), 871-878.

田子泰彦(2002): 富山湾河口域およびその隣接海域表層におけるアユ仔魚の出現・分布, 日本水産学会誌, 68(1), 61-71.

塚本勝巳(1991): 魚類の初期減耗過程とそのメカニズムに関する標識放流実験, 魚類の初期発育, 恒星社厚生閣, 東京, 105-118.

塚本勝巳・望月賢二・大竹二雄・山崎幸夫(1989): 河口水域におけるアユ仔魚の分布・回遊・成長, 水産土木, 25, 47-57.

堀木信男(1990): 和歌山における海産稚アユ採捕量の年変動, 特に近年における採捕量の激減について, 日本水産学誌, 57(6), 1065-1070.

八木佑太・美藤千穂・舟越徹・木下泉・高橋 勇夫(2006): 土佐湾沿岸域におけるアユ仔魚の分布及び食性, 日本水産学会誌, 72(6), 1057-1067.

山本敏也・三戸勇吾・山田佳裕・野崎健太郎・吉鶴靖則・中田良政・新見克也(2008): 矢作川河口周辺海域(三河湾西部)におけるアユ仔稚魚の分布と底質の関係, 日本水産学誌, 74(5), 841-848.

吉本洋・高橋芳明(2006): 紀伊水道東部海域における稚アユの漁獲量変動要因, 水産増殖, 54(1), 89-94.

Azuma K., Takahashi I., Fujita S. and Kinoshita I. (2003): Habitat shift of ayu *Plecoglossus altivelis* altivelis in early stages from waters adjacent to the bank to the center of flow in the Shimanto Estuary, Fisheries Science Vol. 69, pp. 355-360.

Takahashi I., Azuma K., Fujita S. and Kinoshita I. (2002): Habitat shift of ayu *Plecoglossus altivelis* altivelis in early stages from waters adjacent to the bank to the center of flow in the Shimanto Estuary, Fisheries Science Vol. 68, pp. 554-559.

(論文受理日: 2014年6月11日)