

淀川におけるアユ遡上数の変動要因解析に基づいた 将来予測モデルの検討

Analyses on Fluctuation Factors of Ascending Number of Ayu Fish and Future Prediction by Distributed Hydrological Model in the Yodo River Basin

浦部真治⁽¹⁾・竹門康弘・角哲也

Shinji URABE⁽¹⁾, Yasuhiro TAKEMON and Tetsuya SUMI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Prediction formula of the number of upstream migration in the Yodo River in Japan, was constructed using chlorophyll-a in Oct (X_1) and sea water temperature in Feb (X_2). $Y=89340X_1-288402X_2+2579513$. Impacts of climate change on the number of Ayu-fish migrating upstream in the Yodo River was also assessed under CMIP3 climate models by developing distributed hydrological model which calculate river discharge and temperature. Under the A1B scenario, future mean water temperature at the river mouth from January to March increase by about 2 degrees and the future number of upstream migration is estimated to decrease. As a mitigation measure of increasing water temperature by climate change, lowering temperature of the sewage treatment water that flows into river is found to be effective based on a comparison between heat flux from the sewage treatment water inflow to river and increment heat flux in river by climate change.

キーワード: アユ, 遡上数, 水温, 分布型流出モデル, 淀川, 大阪湾

Keywords: Ayu-fish *Plecoglossus altivelis*, upstream migration, water temperature, distributed hydrological model, Yodo River, Osaka Bay

1. はじめに

両側回遊性のアユ *Plecoglossus altivelis* は我が国において内水面漁業上, 最も重要な種の一つであり, 漁業・遊漁だけでなく, 養殖漁業も広く営まれており, 我々日本人の生活と深く結びついている。

国内のアユ資源は近年減少傾向にあり, 海産稚アユの採捕量・河川産アユの採捕量は 1970~1980 年頃から急激に下降しており, アユ漁獲量についても 1992 年以降減少を続けている。その主な原因の一つ

にアユの種苗放流効果の低下があげられる。種苗放流は年変動が大きく不安定な天然アユ資源の不足分を補い河川における全体のアユ資源量を安定させる目的で行なわれている。しかし, 種苗放流には過剰放流による天然アユの駆逐, 漁協の放流コストの増大, 冷水病等の病原菌の拡散, 遺伝子汚染による生態系攪乱リスク等の問題がある。特に過剰放流による天然アユの駆逐, 放流コスト増大の問題に関しては, 種苗放流が天然アユ資源量に配慮した形で行なわれていないことが問題となっている。そこで, 天

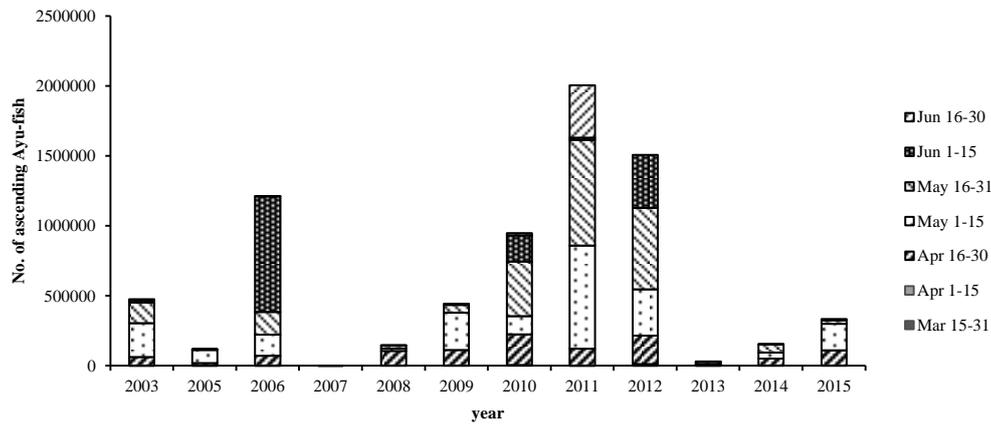


Fig.1 Annual total number of ascending Ayu-fish at the Yodo Rivermouth Barrage fishway from 2003 to 2015

然アユ資源量に応じた適正な種苗放流量を決定する為、天然アユ遡上数の予測が求められている。海域から河川へ遡上後のアユの生残はそれほど悪くないことが知られており（川那部，1970），遡上数が分かれば河川における天然アユ資源量がわかる。天然アユ遡上数が予測できれば，遡上数の多い年には放流量を少なくすることで天然アユの駆逐を防ぎ，放流コストの削減，冷水病等の病原菌拡散や遺伝子汚染による生態系攪乱のリスク低減につながる。一方，遡上数の少ない年には種苗放流を多めに行なうことで，河川におけるアユ資源の安定的な確保の助けとなり放流計画の目安となる。岐阜県水産試験所では，伊勢湾の環境要因から長良川のアユ遡上数の変動要因解析を行ない，10月の平均海水温，11～12月のカタクチイワシ仔魚数，動物プランクトン量を説明変数とした予測式を開発している。

また，我が国は1993年に生物多様性条約に批准しており，水産分野において多様性を保全しつつ持続的な資源利用につなげる水域の管理手法の開発が緊急課題となっている（内田，2005）。近年は気候変動などの要因により流域内の環境条件の年々の変動幅が大きく非定常的な変化も見受けられ，天然アユ資源量もその影響を受けることが想定される。気候変動を考慮した資源の将来予測を行うことは長期的な社会適応を検討するうえで重要である。鈴木ら（2014）は，伊勢湾及び木曾三川において分布型流出モデル，不定流モデル，三次元海洋循環モデル，海洋拡散モデルを結合することによって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遡上に与える影響を評価している。

以上から，適正な種苗放流量を定めるための短期的な天然アユ遡上数予測及び，長期間にわたる持続的な資源管理に向けた適応策を検討するための長期的な天然アユ遡上数予測が求められている。

そこで，本研究では，淀川・大阪湾を対象として，以下の手順で，遡上数の短期的及び長期的予測手法の開発を試みた。①遡上数と淀川・大阪湾の環境要因との間で相関分析により，淀川のアユ遡上数の変動要因解析を行ない，②多変量解析により淀川における天然アユ遡上数の短期的遡上数予測用及び長期的予測用の2種類を構築した。長期的予測では，河川水温及び流量の将来変化が遡上数に及ぼす影響を検討するため，流量及び水温を説明変数候補とした式を構築した。③最後に，流域の水温及び流量の将来予測を行うため，分布型流出モデル Hydro-BEAM に水温モデルを組み込み，流出解析及び水温解析を行ない，予測式に基づき淀川におけるアユ遡上数の将来予測を行った。

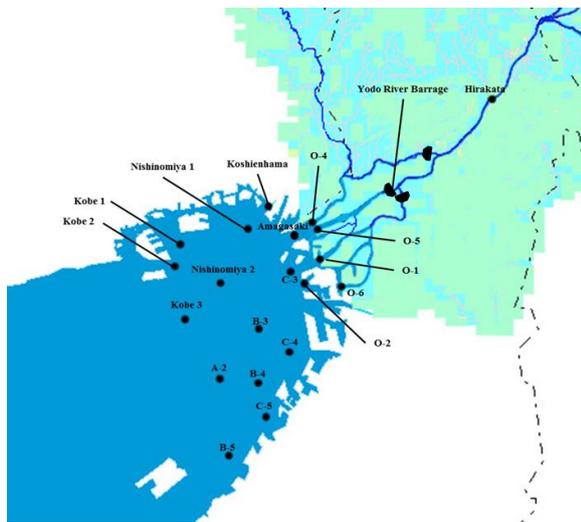
2. 収集データおよび手法

2.1 収集データ

大阪湾・淀川の環境要因が遡上数に与える影響を検討するため，以下のデータを収集した。

(1) 遡上数

国土交通省淀川河川事務所による，淀川大堰魚道での2003～2015年（2004年は欠測）の3月下旬～6月中旬にかけて遡上数データを収集した（Fig.1）。平均遡上初認日は4月10日，平均遡上終認日は6月15日であり，4月上旬～6月下旬にかけて遡上がおこなわれている。



	environmental factors	survey stations
Yodo River	monthly mean discharge [m ³ /s]	Hirakata: 25.9km from rivermouth Yodo Rivermouth Barrage: 9.8km from rivermouth
Osaka Bay	water temperature (0.5-1.0m) [°C] (19 stations) chlorophyll-a (0.5-1.0m) [µg/l] (*5 stations)	*A-2, *B-3, *B-4, *B-5, *C-3, C-4, C-5, O-1, O-2, O-4, O-5, O-6, Amagasaki, Kobe1, Kobe2, Kobe3, Nishinomiya1, Nishinomiya2, Koshienhama

Fig.2 Map of survey stations of the Osaka Bay and the Yodo River

淀川の分派河川である大川及び神崎川には魚道が設置されておらず、アユの遡上が困難なことから本研究では、淀川大堰魚道における遡上数を淀川の天然アユ遡上数とした。

(2) 大阪湾環境要因

大阪湾の環境要因として公共用水域水質調査の湾内 19 定点の月別海水温（表層 0.5～1.0m）、植物プランクトン量の目安として湾内 5 定点の月別クロロフィル a 濃度（表層 0.5～1.0m）のデータを収集した（Fig.2）。また、大阪府立環境農林水産総合研究所による月別イワシラス漁獲量データを収集した。

(3) 淀川環境要因

淀川の環境要因として、大阪広域水道企業団の水質試験成績並びに調査報告から淀川枚方地点（河口から 25.9km 地点）の月平均流量及び国土交通省淀川河川事務所から淀川大堰の月平均放流量のデータを収集した（Fig.2）。

2.2 手法

以下の手順で研究を行った。

(1) 遡上数の変動要因解析

前年 7 月から翌年 6 月までの大阪湾月別海水温・

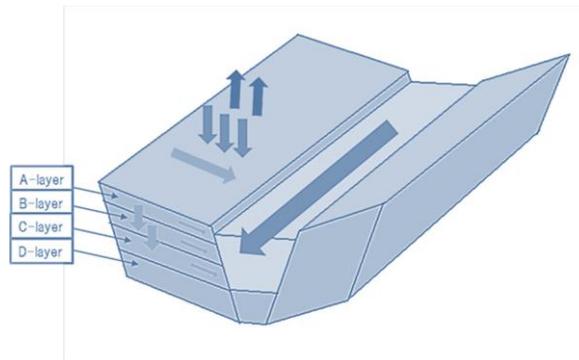


Fig.3 Schematic view of Hydro-BEAM

月別クロロフィル a 濃度・月別イワシラス漁獲量及び淀川枚方地点平均流量・淀川大堰平均放流量と遡上数の間に相関分析を行い、有意な相関 ($p < 0.05$) がみられる環境要因を求め、遡上数予測式の説明変数候補とした。

(2) 遡上数予測式の構築

変動要因解析の結果を基に、多変量解析により遡上数の短期的及び長期的予測式をそれぞれ以下のように構築した。

(a) 短期的予測

淀川水系における種苗放流は 4 月頃に行われるため、遡上数予測は 3 月以前に行われなければならない。そこで、前年 7 月から翌年 3 月までの月毎の環境要因の中で遡上数との間に有意な相関 ($p < 0.05$) がみられたものを予測式の説明変数候補とし、変数増加法により予測式を構築した。

(b) 長期的予測

流量及び水温の将来変化が遡上数に及ぼす影響を検討するため、前年 7 月から翌年 6 月までの月刻みで平均水温及び平均流量を求め、各環境要因について、遡上数と最も相関が高い期間を求め、水温と流量を説明変数とした遡上数予測式を構築した。

(3) 流出解析・水温解析

次に、2.2(2)(b)で構築した予測式を用いて、淀川における将来のアユ遡上数を予測するため、将来気候条件下における流量及び水温を Kojiri (2006) による分布型流出モデル Hydro-BEAM を用いて解析を行った。

Hydro-BEAM の概念図を Fig.3 に示す。Hydro-BEAM はセル型集中モデルであり、流域を正方形(1km×1km)に区切り、各メッシュは一本の河道と二つの斜面により表現され、鉛直方向に地表面近くから A～D の 4 層に分けられる。流域内に供給された降水は一旦、その全てがメッシュ内斜面に供給され、その一部が遮断蒸発・地面蒸発及び蒸散により大気中に戻された後、残りが直接流出成分に相当

する地表流と A 層の内を流れる地中流の和と、B・C 層を流れる地中流成分に分離され、それぞれ Kinematic Wave モデル、線形貯留モデルによって各セル内の河道上流端に流入する構造となっている。そして、各メッシュの落水線と河道勾配に従って、上流端から河口までの水の流れを追跡する（佐藤，2010）。以下、水温解析の方法について述べる。

(a) 水面熱収支

以下の一次元熱輸送方程式に従い解析を行なった。

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + u \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{G_w}{c_w \rho_w h} \quad (1)$$

ここに、 T_w [°C]：河川水温、 t [s]：時間、 u [m/s]：流速、 x [m]：距離、 G_w [Wm⁻²]：水面熱量、 c_w [J・kg⁻¹K⁻¹]：水の定圧比熱、 ρ_w [kg・m⁻³]：水の密度、 h [m]：平均水深である。水面熱量の算出には、葉面積指数 (LAI) を用いて樹林による水面到達日射量の減衰を考慮した。

地表面流及び基底流による横からの流入熱は、それぞれの水温を流量で重み付けし計算を行った。

$$T_w = \frac{Q_u}{Q_u + Q_s + Q_b} \times T_{wu} + \frac{Q_s}{Q_u + Q_s + Q_b} \times T_{ws} + \frac{Q_b}{Q_u + Q_s + Q_b} \times T_{wb} \quad (2)$$

ここに、 Q_u [m³s⁻¹]：上流メッシュにおける流量、 Q_s [m³s⁻¹]：地表面流出及び雨滴、 Q_b [m³s⁻¹]：基底流出、 T_{wu} [°C]：上流水温、 T_{ws} [°C]：地表面流の水温、 T_{wb} [°C]：基底流の水温

(b) 地表面流

地上に到達した雨滴は地表面付近を流れ河川に流入する。雨天時の地表面流は近似的に雨滴温度に等しいと仮定した。雨滴温度は以下の式で求められる（近藤，2007）。

$$T_{ws} = T_{rain} = T_a - \frac{(1 - rh)q_{sat}(T_a)}{(c_p/l) + \Delta} \quad (3)$$

$$rh = e_a/e_{sat}(T_a) \quad (4)$$

$$q_{sat}(T_a) = 0.622e_{sat}(T_a)/(p - 0.378e_{sat}(T_a)) \quad (5)$$

$$e_{sat}(T_a) = 6.108 \times 10^{(7.5T_a/(237.5+T_a))} \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{dq_{sat}}{dT} = \frac{0.622p}{(p - 0.378e_{sat}(T_a))^2} \times \frac{4098.03}{(237.3 + T_a)^2} \times e_{sat}(T_a) \quad (7)$$

ここに、 T_{rain} [°C]：雨滴温度、 rh ：相対湿度、 $q_{sat}(T_a)$ ：気温 T_a における飽和比湿、 Δ [K]：飽和比湿の変化率、 $e_{sat}(T_a)$ [hPa]：気温 T_a における飽和水蒸気圧である。

(c) 基底流

基底流は地中の温度を保ったまま流出し、比較的浅い層から湧出する水と比較的深い層から湧出する水の混合である（近藤，1995）。また、地中深部には一年を通して温度が安定的な恒温層が存在し、その温度は年平均気温と仮定できる（福田ら，1980）。これらは、Hydro-BEAM における B 層、C 層、D 層にそれぞれ対応付けられる。本研究では、恒温層(D 層)

を 6m 深として期間平均気温 $\overline{T_a}$ [°C] を与え、地表面温度が気温に等しいと仮定し、B 層中心 ($z = z_1$ [m])、C 層中心 ($z = z_2$ [m]) の地中温度 $T(z)$ [°C] を以下の式で求め基底流の水温を計算した。

$$T(z) = T_s - (T_s - \overline{T_a}) \times \frac{z}{6} \quad (8)$$

$$T_{wb} = \frac{Q_{bB}}{Q_b} \times T(z_1) + \frac{Q_{bC}}{Q_b} \times T(z_2) \quad (9)$$

ここに、 Q_{bB} [m³s⁻¹]：B 層の基底流量、 Q_{bC} [m³s⁻¹]：C 層の基底流量であり

$$Q_b = Q_{bB} + Q_{bC} \quad (10)$$

である。

淀川大堰より下流域は、その大部分が大阪湾の潮汐の影響を受ける感潮域である。そのため、淀川大堰から放流される河川水と大阪湾からの海水が混合し塩水楔が形成されるなど、水平方向のみならず鉛直方向の流動も複雑である。淀川河口水温は主に大阪湾表層海水温、淀川水温、淀川大堰放流量により支配されるものと考えられる。そこで、本研究では大阪湾表層水温 (B-3 定点)、淀川枚方地点水温、淀川大堰放流量を説明変数とした多項式により淀川河口表層水温を推定した。

流出解析及び水温解析において現在再現実験期間は 1997～2010 年、将来予測実験期間は 2097～2110 年であり、将来予測実験は、CMIP3 の A1B、B1 シナリオに対するマルチモデルアンサンブルにより計算を行った。また、将来気候条件下における流量及び水温の算出は、再現実験結果と将来実験結果の差分を実測値に上乘せする、上乘せ法により行った（道弘ら，2012）。

3. 結果

3.1 大阪湾・淀川の環境要因と遡上数の関係

Table1 に大阪湾の環境要因と遡上数の間で行なった相関分析の結果を示す。

(1) 海水温

遡上数と海水温の間には2~3月にかけて湾内各地で有意な負の相関($p < 0.05$)がみられ、2月:8°C, 3月:9°Cを下回ると遡上数が比較的多くなる傾向がみられた。一方、11~1月に遡上数と海水温との間に有

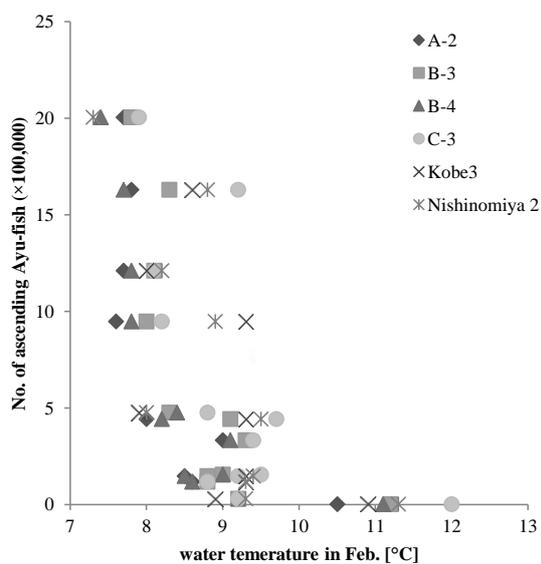
意な関係性はみられなかった。

2~3月に遡上数と海水温の間に有意な負の相関がみられたのは、2月:湾奥部沖合6地点, 3月:淀川河口域4地点 (Fig.4) であり、その時期における仔稚魚の分布域に遷移に対応している可能性が考えられる。海域の仔稚魚の分布は沿岸水の強い範囲に分散されるもののその一部は河口からかなり離れた距岸16km以上の沖合に広がるとの報告がある(塚本, 1989)。今回、2月に有意な負の相関がみられた地点は距岸11km以内の地点であり仔稚魚が分布してい

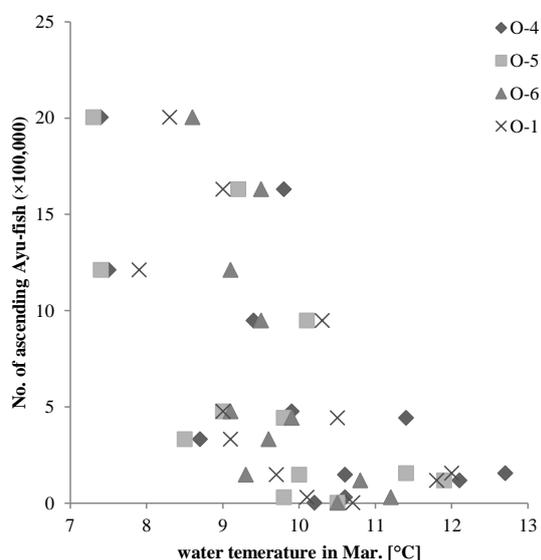
Table 1 Correlation coefficients between the number of ascending Ayu-fish in the Yodo River and the sea water temperature, chlorophyll-a and catch of clupeoid juveniles in the Osaka Bay

factor	station	correlation coefficient						distance [km] from	
		Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	river mouth	shore
sea water temperature (0.5-1.0m)[°C]	O-5	-0.116	0.069	0.222	-0.194	-0.424	*-0.696	0.0	0.4
	O-4	0.218	0.058	0.077	-0.303	-0.514	*-0.695	0.8	1.2
	Amagasaki	0.066	0.067	0.097	-0.128	-0.597	-0.511	1.7	0.6
	O-1	-0.137	-0.054	0.227	-0.466	-0.500	*-0.673	3.4	0.3
	Koshienhama	0.028	0.511	0.272	0.099	-0.465	0.032	5.6	0.1
	O-2	-0.192	0.137	0.181	-0.525	-0.510	0.004	6.3	2.0
	C-3	-0.268	-0.060	0.179	-0.418	*-0.578	-0.434	6.3	3.4
	O-6	-0.067	0.094	0.003	-0.392	-0.468	*-0.584	6.8	1.3
	Nishinomiya 1	0.298	0.173	0.258	-0.330	-0.536	0.007	7.9	2.4
	Nishinomiya 2	0.149	0.325	0.189	-0.357	*-0.714	0.127	11.6	8.0
	B-3	-0.268	-0.067	0.234	-0.268	*-0.678	-0.279	12.3	5.0
	C-4	-0.221	-0.052	0.066	-0.567	-0.407	-0.213	13.6	1.6
	Kobe 1	-0.072	0.269	0.221	-0.178	-0.575	-0.101	14.6	3.9
	Kobe 2	-0.102	0.182	0.159	-0.233	-0.559	-0.079	15.7	5.6
	Kobe 3	0.234	0.099	0.120	-0.328	*-0.717	-0.213	17.3	10.6
	B-4	-0.024	0.001	0.135	-0.433	**0.739	-0.271	17.9	1.9
A-2	-0.393	0.053	0.244	-0.309	**0.728	-0.401	19.7	6.4	
C-5	-0.142	-0.059	0.114	-0.527	-0.476	-0.488	21.4	0.9	
B-5	-0.261	0.084	0.054	-0.462	-0.480	-0.476	25.7	3.2	
chlorophyll-a (0.5-1.0m) [µg/l]	C-3	0.249	-0.109	-0.214	-0.111	-0.391	-0.170	6.3	3.4
	B-3	0.560	-0.353	-0.228	0.115	-0.315	-0.069	12.3	5.0
	B-4	0.258	-0.021	-0.280	0.324	-0.351	-0.113	17.9	1.9
	A-2	**0.833	-0.259	-0.308	-0.083	-0.200	0.094	19.7	6.4
	B-5	0.120	-0.089	-0.075	0.041	-0.310	-0.197	25.7	3.2
catch of clupeoid juveniles [kg/day]	---	-0.182	-0.205	-0.513	---	---	---	---	

* 5% significant. **1% significant. ***0.1% significant.



(a)



(b)

Fig.4 Relationship between the number of ascending Ayu fish and sea water temperature in Feb (a) and in Mar (b)

ることも十分に考えられる。さらに、3月に淀川河口及び淀川の分流河川である神崎川・安治川・木津川の河口のみの水温と遡上数との間に有意な相関がみられたことについては、4月から遡上が始まることを踏まえると、これらの水域に仔稚魚が分布しているものと考えられる。

以上の結果から、冬季の大阪湾海水温の上昇が遡上数に対し減少要因となることがわかった。そこで、次に、1~3月の平均海水温と遡上数との間に相関分析を行った (Table 2)。結果として、湾内5地点で遡

Table 2 Correlation coefficients between the number of ascending Ayu-fish in the Yodo River and mean sea water temperature from Jan to Mar in the Osaka Bay

survey stations	correlation coefficient	distance (km) from river mouth
O-5	*-0.711	0.0
O-4	*-0.717	0.8
Amagasaki	-0.458	1.7
O-1	*-0.725	3.4
Koshienhama	-0.234	5.6
O-2	-0.268	6.3
C-3	-0.556	6.3
O-6	*-0.659	6.8
Nishinomiya 1	-0.404	7.9
Nishinomiya 2	-0.489	11.6
B-3	-0.512	12.3
C-4	-0.508	13.6
Kobe 1	-0.358	14.6
Kobe 2	-0.382	15.7
Kobe 3	-0.560	17.3
B-4	*-0.635	17.9
A-2	-0.564	19.7
C-5	-0.544	21.4
B-5	-0.563	25.7

* 5% significant. **1% significant. ***0.1% significant.

上数と1~3月の平均海水温の間に有意な負の相関 ($p < 0.05$) がみられた。有意な負の相関がみられた場所は、淀川・神崎川・安治川・木津川河口及び泉大津沖であった。この結果から、総じて冬季の淀川河口域及び泉大津沖の水温上昇が遡上数の減少要因となることがわかった。

(2) クロロフィル a 濃度

遡上数とクロロフィル a 濃度の間には10月に湾東岸沖1地点で有意な正の相関 ($p < 0.01$) がみられた。植物プランクトン量の指標となるクロロフィル a 濃度の増加が仔稚魚の餌料プランクトンの増加につながり遡上数に影響を与えたものと推察できる。

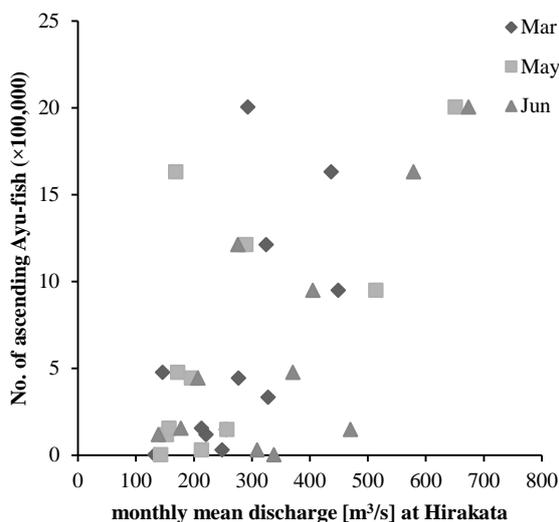
(3) イワシシラス漁獲量

湾内のイワシシラス調査は4~12月(1~3月は欠測)に行なわれている。遡上数とイワシシラス漁獲量の間には12月に比較的高い負の相関 ($r = -0.690$) がみられた。このことはアユ仔稚魚が11~12月頃に海域に到達することを踏まえると、イワシシラスと餌料などを巡って競合し仔稚魚の生残に影響を及ぼした可能性が考えられる。実際に土佐湾ではイワシシラスとアユ仔魚の海域での分布が一時期重複することが知られており互いにカイアシ類を摂餌することがわかっている (浜田ら, 1998)。

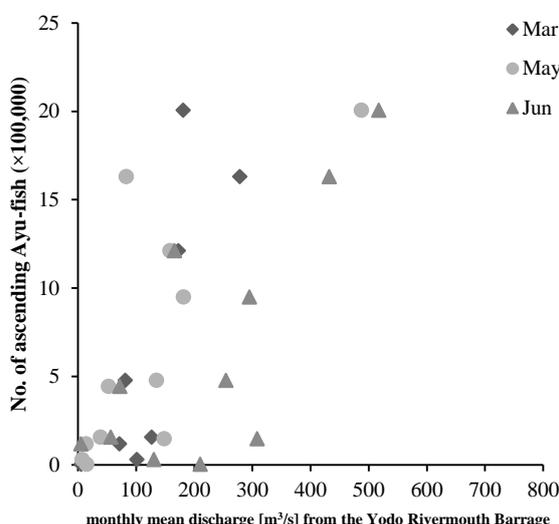
Table 3 Correlation coefficient between the number of ascending Ayu-fish in the Yodo River and the montly mean discharge at Hirakata and from the Yodo Rivermouth Barrage.

survey stations	correlation coefficient											
	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.
Hirakata	0.146	-0.184	0.160	-0.240	-0.174	-0.481	-0.315	-0.011	*0.614	0.221	*0.67	*0.72
Yodo River Barrage	-0.178	-0.156	0.481	-0.231	-0.205	-0.489	-0.460	0.155	*0.817	0.411	**0.765	**0.757

* 5% significant. **1% significant. ***0.1% significant.



(a)



(b)

Fig.5 Relationship between the number of ascending Ayu-fish in the Yodo River and the monthly mean discharge at Hirakata (a) and at the Yodo Rivermouth Barrage (b)

Table 4 Correlation coefficients between the number of ascending Ayu-fish in the Yodo River and monthly mean discharge at Hirakata

	correlation coefficient	p-value
Mar	*0.651	0.030
Apr	0.221	0.540
May	*0.670	0.024
Jun	*0.720	0.012
Mar-Apr	0.584	0.059
Mar-May	*0.732	0.010
Mar-Jun	**0.825	0.002
Apr-May	0.574	0.065
Apr-Jun	**0.801	0.003
May-Jun	**0.775	0.005

* 5% significant. **1% significant. ***0.1% significant

(4) 淀川流量及び淀川大堰放流量

遡上数と淀川の環境要因との間で相関分析を行った結果を Table 3 に示す。遡上数と淀川枚方地点流量の間には、3月、5～6月に有意な正の相関がみられ、月平均流量が3月及び5月で300m³/s、6月で400m³/sを超えると遡上数が比較的多くなる傾向がみられた (Fig.5)。遡上数と淀川大堰放流量の間には、枚方地点流量と同じく、3月、5～6月に有意な正の相関がみられ、月平均放流量が3月及び5月で150m³/s、6月で250m³/sを超えると遡上数が比較的多くなる傾向がみられた (Fig.6)。遡上期である5～6月の流量増加は、呼び水として遡上数増加につながったものと考えられる。以上から、春季における流量増加が遡上数の増加要因となることがわかった。そこで3～6月の4ヶ月間について月刻みで平均流量を求めて、それぞれの要因と遡上数との関係を調べた (Table 4)。結果として3～6月の期間平均流量が $r=0.825$ ($p<0.01$) で遡上数に対し最も相関が高くなった。このことから、総じて3～6月の流量増加が遡上数の増加要因となることが分かった。

3.2 予測式の構築

以上の結果を基に多変量解析により 2 種類の淀川におけるアユ遡上数の予測式を構築した。

(1) 短期的予測式

種苗放流は例年 4 月頃に始まるため、3 月以前の環境要因の中で遡上数と有意な相関がみられたものを説明変数の候補として選択した。海水温については、その月で、遡上数との間に最も有意な関係性がみられたものを説明変数の候補として選択した（2 月：B-4 泉大津沖、3 月：O-5 淀川河口）。淀川流量及び淀川大堰放流量についても同様に、その月で遡上数との間に最も有意な関係性がみられたものを選択した（3 月：淀川大堰放流量）。予測式は変数加法により推定した。その計算過程を に示す。結果として Type2 の式が採択され、AIC が最小の 145 と

なり 5% の水準で有意であった（F 検定、 $p=0.044$ ）。

$$Y = 89340X_1 - 288402X_2 + 2579513 \quad (11)$$

以上から、 X_1 ：10 月の忠岡港沖のクロロフィル a 濃度、 X_2 ：2 月の泉大津沖海水温が淀川におけるアユ遡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、遡上数に対し 10 月の忠岡港沖のクロロフィル a 濃度が増加要因、2 月の泉大津沖海水温が減少要因となった。

(2) 長期的予測式

次に、気候変動を考慮した遡上数将来予測を行うための予測式を構築した。将来気候条件下では、現在気候条件下と比較して遡上時期等が少なからず変動することが想定される。そこで、前節で検討した、冬季の平均海水温及び春季の平均流量を説明変数として用いた。前節の結果から、 X_3 ：1～3 月の淀川河

Table 5 Correlation coefficient between the number of ascending Ayu-fish and factors and results of multiple regression of the number of Ayu-fish on selected four variables

month	station	factor	correlation coefficient matrix					estimation of regression			
				Y	X_1	X_2	X_3	X_4	Type1	Type2	Type3
		No. of ascending Ayu-fish (p-value)	Y	---	**0.833	** -0.739	* -0.696	*0.817			
Oct.	A-2	chlorophyll-a [$\mu\text{g/l}$]	X_1		---				122494	89340	76455
Feb.	B-4	water temperature [$^{\circ}\text{C}$]	X_2		-0.486	---				-288402	-230364
Mar.	O-5	water temperature [$^{\circ}\text{C}$]	X_3		-0.414	0.462	---				-171497
Mar.	Rivermouth Barrage	Yodo monthly mean discharge [m^3/s]	X_4		0.651	* -0.626	-0.509	---			
		intercept							-125156	2579513	3806435
		adjusted R-squared							0.651	0.782	0.823
		AIC							263	145	199
		p-value (F-test)							0.005	0.004	0.008

*5% significant. **1% significant.

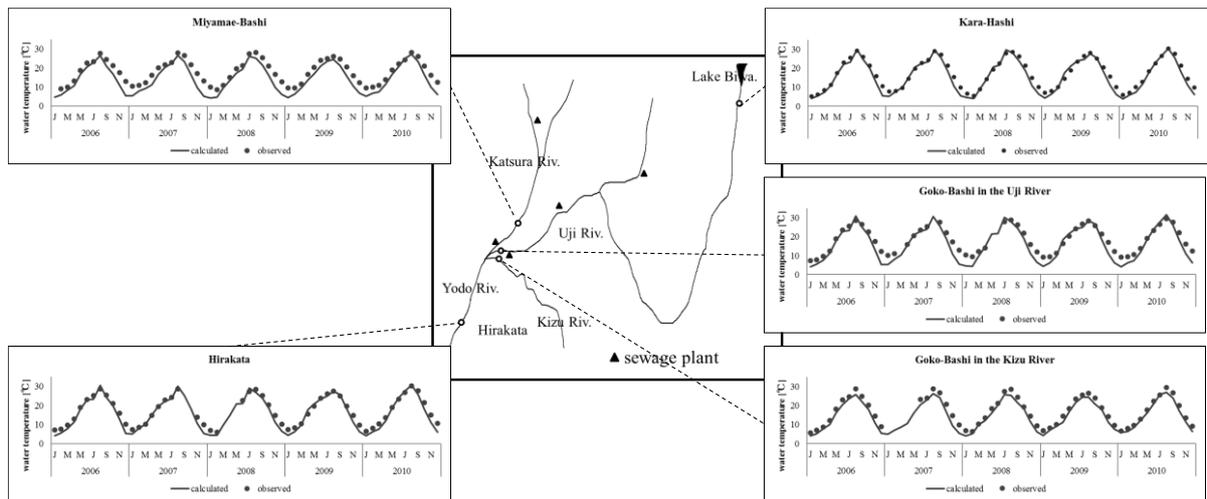


Fig.6 Comparison of water temperature between observed and calculated in the Yodo River Basin and the location of sewage plant

口平均水温及び X_6 : 3~6 月の淀川枚方地点平均流量を説明変数とした予測式を構築した。

$$Y = -238605X_5 + 4220X_6 + 1515703 \quad (12)$$

結果として、決定係数は 0.730 であり 5% の水準で有意であった (F 検定, $p=0.05$)。また、偏回帰係数から遡上数に対し、1~3 月の淀川河口平均水温が減少要因、3~6 月の淀川枚方地点平均流量が増加要因となった。

3.3 水温再現実験結果

淀川流域内では、桂川宮前橋地点、瀬田川唐橋地点、宇治川御幸橋地点、木津川御幸橋地点、淀川枚方地点において一時間毎の水温自動観測データが得られる。各地点のデータを月平均値に整理し、Fig.6 に 2006~2010 年の実測値と計算値の比較を行なった。各地点において季節性は概ね再現できていたが、冬季に比較的再現性が低下する傾向となった。宇治川においては、唐橋地点に比べ下流に位置する御幸橋地点において冬季の再現性が低下する傾向にあり、3~9 月にかけて、誤差 2°C 以内の範囲で推移し、10~12 月、1~2 月にかけては 2°C 以上となり 12 月に誤差が最大となった。いずれの月も、実測値に比べ計算値が低い結果となった。この冬季の計算誤差については人工排水等による昇温などが考えられる。実際に、唐橋地点から御幸橋地点までの区間において 4 の下水処理場からの放流水が流入しており冬季の水温上昇に寄与したものと考えられる。特に、御幸橋地点直上流には R 浄化センターからの処理水が流入しており観測地点の水温に大きな影響を与えているものと推察される。桂川宮前橋地点においては、他の 4 地点に比べ最も年間誤差が大きく 7~8 月を除いて月平均誤差が 2°C 以上となった。桂川は京都市

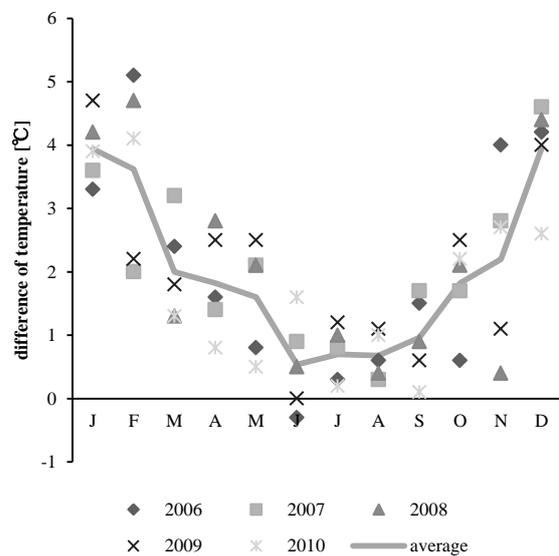


Fig.7 Difference of the Katsura River water temperature before and after inflow of T sewage treatment water from 2006 to 2010.

$$(\text{Difference}) = (\text{After inflow}) - (\text{before inflow})$$

内を流れ木津川、宇治川に比べ流域人口が最も多く、人工温排水の影響を強く受けているものと考えられる。また、桂川宮前橋地点の上流には T 下水処理場からの処理水が流入している。Fig.7 に 2006~2010 年における T 下水処理場の処理水流入前後における河川水温差を示す。一年を通じて処理水流入後の水温上昇が確認され、冬季に顕著となり、12 月には 2006~2010 年の平均で 4°C の上昇がみられた。木津川御幸橋地点においては、再現性が最も高かった。木津川は宇治川、桂川に比べ流域人口が最も少なく人工排熱等の影響が比較的小さかったものと考えら

Table 6 Relative change of monthly basin precipitation and river discharge at Hirakata in the Yodo River between future and present climate condition

scenario	factor	relative change												
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	year
A1B	precipitaion	1.03	1.09	1.05	1.05	1.05	1.05	1.12	1.10	1.05	0.99	0.95	0.98	1.06
	discharge	0.98	0.93	0.93	0.95	1.00	1.01	1.06	1.05	1.02	1.01	0.92	0.95	1.01
B1	precipitation	0.97	1.01	1.02	1.05	1.08	1.06	1.13	1.15	1.04	0.99	0.95	0.90	1.06
	discharge	0.94	0.98	0.93	0.97	1.02	1.03	1.08	1.10	1.03	0.98	0.92	0.88	1.02

Table 7 Change of monthly basin air temperature and river temperature at Hirakata in the Yodo River between future and present climate condition

scenario	temperature	temperature change (future - present) [°C]												
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	year
A1B	air	3.07	3.24	2.93	2.79	2.79	2.77	2.65	2.75	2.99	2.98	2.89	3.05	2.91
	river	1.44	1.52	2.02	1.64	1.53	1.57	1.69	1.78	1.97	2.04	2.05	1.99	1.77
B1	air	1.99	1.85	1.82	1.74	1.88	1.95	1.99	2.08	2.20	2.15	1.98	2.05	1.97
	river	0.82	0.82	1.31	1.02	1.01	1.04	1.17	1.20	1.40	1.48	1.40	1.30	1.16

れる。

3.4 将来実験結果

Table 6 に、現在気候条件下に対する将来気候条件下における流域内降水量及び枚方地点流量の増加率を示す。A1B・B1 シナリオ下で降水量・流量ともに増加する傾向にあり、遡上数の増加要因となる 3~6 月の平均流量は、A1B・B1 シナリオ下では、それぞれ現在気候条件下の 0.97 倍、0.99 倍となり、あまり大きな変化はみられなかった。

Table 7 に現在気候条件下に対する将来気候条件下における流域内平均気温及び枚方地点の水温の上昇度を示す。年間気温が 1 度上昇するのに対し水温は A1B シナリオ：0.61°C、B1 シナリオ：0.59°C 上昇する結果となり、気温の上昇度よりも水温の上昇度の方が低い結果となった。淀川におけるアユ遡上数の増加要因となる 1~3 月の 1~3 月の河川水温度は A1B シナリオ：1.64°C、B1 シナリオ：0.97°C 上昇する結果となった。淀川河口水温度は、1.99°C、1.43°C 上昇する結果となった (Fig.8)。

3.5 アユ遡上数の将来予測

将来気候条件下における 3~6 月の淀川枚方地点流量は現在気候条件下に比べ A1B シナリオ：0.97 倍、B1 シナリオ：0.99 倍とほとんど変化せず、1~3 月の淀川河口水温度は A1B シナリオ：1.99°C、B1 シナリオ：1.43°C 上昇する結果となった。

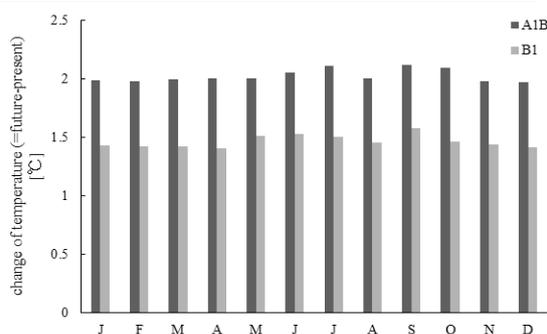


Fig.8 Difference of monthly water temperature in the Yodo river mouth between present and future climate conditions

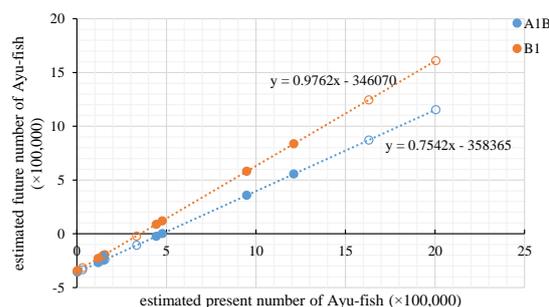


Fig.9 Comparison number of ascending Ayu-fish in the Yodo River between present and future climate condition

Fig.9 に将来気候条件下における淀川のアユ遡上数を推定した。中塗りの丸は、現在気候条件下での実測値と将来気候条件下での推定値の関係式(回帰式)を構築する際に用いたデータを示しており、中抜き丸は、構築した関係式を基に、現在気候条件下の

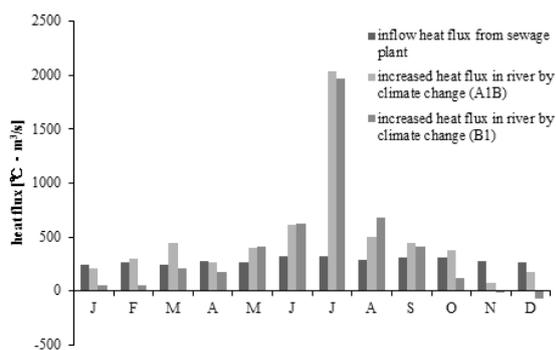


Fig.10 Comparison between inflow heat flux from sewage plant and increased heat flux in river by climate change

実測値から将来気候条件下の値を推定したものである。将来、淀川におけるアユ遡上数は河口水温の上昇を受け減少し、A1B, B1 シナリオ下では、現在気候下における遡上数がそれぞれ 47 万尾、35 万尾の場合に遡上数が 0 となる結果となった。

4. 適応策の検討

淀川のアユ遡上数に対し冬季の河口水温の上昇が減少要因となり、気候変動を考慮し流域圏の流出解析・水温解析を行った結果、淀川河口水温は 21 世紀末に 1.43~1.99°C 上昇し、淀川のアユ遡上数は減少する結果となった。淀川河口は汽水域であり、生物層が豊かな水域である。したがって、河口水温の上昇は他の水産資源にも影響を及ぼすものと考えられる。そこで、本章では将来の河口水温の上昇を緩和する方策について検討を行った。

淀川の河口水は大阪湾の海水と淀川の河川水の混合である。海水の熱容量は、河川水の熱容量に比べ膨大であり、河川水の温度上昇緩和が、河口水温上昇緩和の適応策として有効であると考えられる。水温再現実験結果の検証では、桂川の河川水温は、上流域の下水処理放流水の影響を受け、放流前後で水温が上昇していることについて言及した。そこで、下水処理放流水温を低下させることが気候変動による河川水温上昇を緩和する適応策になる可能性があると考え、下水処理放流水の排熱フラックスと気候変動により増加した河川熱フラックスの比較を試みた。下水処理放流水の排熱フラックスは、淀川枚方地点より上流に位置する 5 の下水処理場 (Fig.6) の放流水温と放流量の積の和として定義し、気候変動により増加した河川熱フラックスを枚方地点における将来気候条件下の水温と流量の積から現在気候条件下における水温と流量の積を差し引いたものとし

て定義した。

- ・下水処理放流水排熱フラックス

$$\sum T_{out} \times Q_{out} \quad (13)$$

ここに、 T_{out} [°C]: 下水処理放流水温, Q_{out} [m³/s]: 下水処理放流量

- ・気候変動により増加した河川熱フラックス

$$T_{future} \times Q_{future} - T_{present} \times Q_{present} \quad (14)$$

ここに、 T, Q は枚方地点における将来気候条件下および現在気候条件下での水温、流量である。

Fig.10 に検証結果を示す。11 月、12 月、1 月の下水処理放流水排熱フラックスは、気候変動により増加した河川熱フラックスを上回り、秋から冬にかけて、ほぼ同等の値となった。このことは、放流量が一年を通して安定しているのに対し、河川流量は夏季に比べ冬季に減少する傾向にあるためと考えられる。以上のことから、冬季の河口水温の上昇緩和に対し、河川流量の比較的少ない秋・冬期の下水処理放流水温を低下させる対策が求められる。現状では、冬季の下水排熱を家庭に送り届け、有効利用する方法や、遊水池等に放流水を一時的に貯留し放熱させるなどの方法が考えられる

5. 結論

本研究では、淀川におけるアユ遡上数の変動要因解析を行い、アユ遡上数に影響を与える淀川・大阪湾の環境要因を明らかにし、遡上数の予測式を構築した。また、流出解析モデルに新たに水温モデルを組み込み、流域内の流量及び水温を算出することで気候変動による流量・水温の変化が将来のアユ遡上数に与える影響を検討した。

まず、淀川のアユ遡上数と大阪湾・淀川の環境要因との間で相関解析を行い、多変量解析により予測式を構築した結果、以下のことがわかった。

- ① 2 月の湾奥部海域及び 3 月の淀川河口域の海水温とアユ遡上数の間に統計的に有意な負の相関がみられ、それぞれ 8°C, 9°C を下回ると遡上数が比較的多くなる傾向が見られた。
- ② 10 月の湾東岸沖におけるクロロフィル a 濃度とアユ遡上数の間に統計的に有意な正の相関がみられ、この時期の植物プランクトン量の増大が、翌年の遡上数増加に寄与する。
- ③ 3・5・6 月の月平均流量及び淀川大堰放流量とアユ遡上数の間に統計的に有意な正の相関がみられ、3・5 月の流量及び放流量が、それぞれ、300m³/s, 150m³/s を超えると遡上数が比較的多くなり、6 月の流量及び放流量が、それぞれ 400m³/s, 250m³/s を超

えると遡上数が比較的多くなる傾向がみられた。

④ 10月の湾東岸沖におけるクロロフィル a 濃度 X_1 , 2月の湾東岸沿岸海水温 X_2 , 3月の淀川河口水温, 3月の淀川大堰月平均放流量を説明変数とし淀川のアユ遡上数を目的変数として変数増加法により重回帰分析を行った結果, 以下の式で AIC が最小となりアユ遡上数の予測が可能であった。

$$Y = 89340X_1 - 288402X_2 + 2579513$$

次に, 淀川流域を対象に流出解析モデルに新たに水温モデルを組み込み, 流出・水温解析を行った結果, 以下のことがわかった。

⑤ 水面の熱収支, 樹林による日射減衰を考慮し, 地表面流に雨滴温度, 基底流に地中温度を与え, 水温解析を行った結果, 水系全体で水温の季節性を精度よく再現することができた

⑥ 下水処理水等の人工排水の影響を強く受ける河川では, モデル再現性が低下し, 特に冬季の誤差が顕著であり, 今後, モデル再現性の向上のためには, 人工排熱等の影響についても考慮する必要がある。

⑦ 桂川下流域においては下水処理水の流入前後で一年を通して水温上昇が観測され, 下水処理水と河川水温の温度差が大きい冬季に顕著であり, 1・12月には, 流入前後で 4°C の水温上昇がみられた。

⑧ 将来気候条件下では気温が 1°C 上昇するのに対し, 淀川枚方地点の水温は A1B シナリオ下で 0.61°C , B1 シナリオ下で 0.59°C 上昇する結果となり, 気温の上昇度に比べ河川水温の上昇度の方が低い結果となった。

⑨ 将来気候下における 1~3月の河口平均水温(X_3)の上昇, 3~6月の枚方地点平均流量(X_4)減少を受け, 予測式 $Y = -238605X_3 + 4220X_4 + 1515703$ を用いたところ, 淀川におけるアユ遡上数は将来減少し, A1B, B1 シナリオ下では, 現在気候下における遡上数がそれぞれ 47 万尾, 35 万尾の場合に遡上数が 0 となった。

⑩ 下水処理放流水の排熱フラックスと気候変動により増加した河川熱フラックスの比較を試みたところ, 冬季においては下水処理放流水の排熱フラックスが気候変動により増加する河川熱フラックスに匹敵することがわかった。

今回, 分析に用いた淀川におけるアユ遡上数は 12 年分であり, データの蓄積が未だ十分とは言えない。したがって, 今後のデータ蓄積と共に, 遡上数の変動要因解析及び予測式の構築を更に行い, 予測精度の向上を図る必要がある。また, 本研究では分布型流出モデルに水温モデルを組み込み, 月スケールで概ね良好な水温再現結果が得られた。しかし, 日スケールでは, 実際の現象に比べ水温の変動が大きく,

良好な再現ができなかった。今後は, 河床の伝導熱等を考慮しモデルの精緻化を図る必要がある。また, 本研究の最終的な目標は, 淀川及び大阪湾を対象に河川海洋結合モデルを構築することである。今後, 淀川及び大阪湾を対象に河川水の海洋への拡散等をモデル化することで, 河川上流域から河口付近沿岸域の環境評価としてのツールを作成することが期待される。

謝辞

本研究においてアユ遡上及び淀川大堰放流量等のデータを国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所より提供していただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 内田和夫 (2006): アユの種苗放流が生物の多様性に与える影響, 水研センター研報, 別冊第 5 号, pp. 175-177
- 川那部浩哉 (1970): アユの社会構造と生産-15 年の変化を見て-, 日本生態学会誌, 第 20 巻, 4 号, pp. 144-151
- 近藤純正 (2007): 水環境の気象学, 朝倉書店
- 近藤純正 (1995): 河川水温の日変化(1)計算モデル, 水文水資源学会誌, 第 8 巻, 2 号, pp. 184-196
- 佐藤嘉展・森英祐・浜口幸雄・田中賢治・小尻利治・中北英一 (2010): 気候変動に対する先行適応のための流域スケールでの洪水および渇水リスク評価, 京都大学防災研究所年報, 第 52 号 B, pp. 573-586
- 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遡上時期に及ぼす影響について, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 70 巻, 4 号, pp. I_1213-I_1218
- 塚本勝巳・望月賢二・大竹二雄・山崎幸雄 (1989): 河口水域におけるアユ仔稚魚の分布・回遊・成長, 水産土木, 第 25 号, pp. 47-57
- 浜田理香・木下泉 (1988): 土佐湾の砕波帯に出現するアユ仔稚魚の特性, 魚雑, 第 35 号, pp. 382-388
- 福田正巳・石崎武志 (1980): 平衡地表面温度による土壌凍結深推定モデル, 日本雪氷学会誌, 第 42 巻, 2 号, pp. 71-80
- 道弘有理・佐藤嘉展・鈴木靖 (2012): 流域スケールの水文解析に向けた GCM 出力の活用手法の検討, 土木学会論文集 B1, 第 68 巻, 3 号, pp. 125-135
- Kojiri T. (2006): Hydrological River Basin Environment Assesment Model (Hydro-BEAM). In Watershed

models, Singh VP, Frevent DK. (eds). Taylor & Franceis, CRC Press: Slorida

(論文受理日 : 2016年6月13日)