静岡水技研研報 (46)：51-57，2014
Bull. Shizuoka Pref. Res. Inst. Fish.(46)：51-57，2014

2001 ～ 2011 年における天竜川下流部の水温及び透視度の推移とその変動要因

鈴木邦弘 *1・谷髙弘記 *2・井口　明 *2

天竜川の下流部で 2000 年 11 月～ 2011 年 12 月に観測した水温と透視度の統計解析から変動要因を明らかにし，この変化がアユに与える影響について検討した。期間中の水温と透視度の平均値 (最低値～最高値) は，それぞれ 13.8℃ (3.2 ～ 25.5℃)，43.1cm(0 ～ 110cm 以上) であり，中長期的に低下傾向にあった。また，この水温変動に対して，前月の履歴を含む気温とダム放水量がそれぞれ正と負の影響を与えていた。同様に，月別の水温変動は 5 月と 6 月に低下傾向が認められ，6 月の水温変動に対して 5 月の気温とダム放水量がそれぞれ正と負の影響を与えていた。アユの成長期である 5 ～ 7 月の生息適水温 (15 ～ 25℃) の出現割合は 58 ～ 91% で年により変動したが，中長期的には減少傾向にあった。また，透視度から推定した浮遊物質量は 0.3 ～ 3,224mg/L まで大きく変動したが，2006 年以降は上昇傾向にあり，2010 年以降にはアユの生息に影響を与える 25mg/L を超える日が急増した。これらの結果から，アユの成長不良や産卵期の遅延，さらには漁獲量の低迷が起きている可能性が示唆されるため，今後も定時観測を継続して健全な漁場環境を維持させることが重要である。

キーワード：天竜川，水温，透視度，濁り，浮遊物質量 (SS)，ダム，重回帰分析，アユ *Plecoglossus altivelis*

静岡県西部に位置する天竜川は，長野県諏訪湖に源を発し南流して遠州灘に注ぐ流路延長 213km(全国第 9 位)，流域面積 5,090㎢ (全国第 12 位) のわが国屈指の急流河川であり [1]，流路には佐久間ダムに代表される幾多のダムが設置されている。流域ではアユ釣りが盛んであり，1965 年 12 月には水産資源保護法に基づくアユ保護水面が河口より上流 16.4km の範囲に指定された [2]。当該指定を契機に，禁漁期の設定のほか，産卵場造成や再生産に関わる各種調査 [3] が開始されたが，アユの漁獲量は 1990 年頃を境に減少の一途を辿っている [4]。この原因については，長期化する濁りによる再生産への影響，すなわち親魚の成長不足と産卵期の遅延が疑われている [5] ものの，過去の環境観測データがないために必ずしも明らかになっていない。

一方，近年は，地球規模での気候変動いわゆる地球温暖化が陸水環境や河川生態系に与える影響も危惧され [6]，冷水性淡水魚であるサケ科魚類を中心にその分布や個体群動態の変化などが指摘されている [7]。現在までのところ，温水性淡水魚であるアユに対する影響は不明であるが，餌である藻類の現存量や種組成の変化に伴う成長への影響 [8] などが予想される。

また，天竜川では，これまでにダム湖内への堆砂や下流河道の河床低下などの土砂問題の解決のため，ダム湖内堆積物の下流への排出を目的とした「土砂供給試験事業」[9] や「流水掃砂事業」[10] が実施されており，今後は総合的な土砂管理を目指した「天竜川ダム再編事業」[11] が開始されようとしている。これらの事業は河床材料の更新など河川環境にとってプラスに働く一方で，新たな濁水の発生やその長期化などのマイナス面も指摘されており [11]，事業の実施による漁場環境の変化が予想される。

著者らは，天竜川の漁場環境を把握するとともに，アユ資源の減少や漁場環境変化の原因を明らかにするため，水温と透視度の定時観測を 2000 年 11 月に開始した。今回，観測開始から 11 年が経過したことから，これまでの経過と変動要因を解析しアユへの影響について検討した。

2012 年 2 月 6 日受理
静岡県水産技術研究所富士養鱒場業績第 41 号
*1 静岡県水産技術研究所富士養鱒場
*2 天竜川漁業協同組合

図 1　観測点の位置

材料および方法

1　観測方法

2000 年 11 月 9 日以降，原則として毎日 9 時に，船明ダム下流右岸側の遠州天竜舟乗船場 (浜松市天竜区米沢，河口から上流約 28.5km，図 1) において，水温と透視度を観測した。水温は棒状水銀温度計により 0.1℃ 単位で，透視度は JIS K0102 に準拠した 110cm まで測定可能な透視度計により 1cm 単位で測定した。また，水産用水基準で濁りの指標として用いられる浮遊物質量 (以下, SS と略記する)[12] を，JIS K0102 14.1 に従い 2001 年 2 月 13 日～ 2005 年 12 月 31 日に測定した。

2　環境要因データの収集

天竜川の水温及び透視度に影響を与えていると予想される環境要因 (平均気温，日照時間，降雨量，平均風速，船明ダム放水量) に関する日データを以下により収集した。平均気温，日照時間，降雨量及び平均風速に関する日データは，浜松特別地域気象観測所における観測値を気象庁ウェブサイト*より入手した。船明ダム放水量に関する日データは，電源開発株式会社船明発電所に毎朝 9 時の値を電話により聞き取った。

表 1　水温変動要因解析で用いた説明変数

項目名	当月	前月
平均気温偏差	*x1*	*x6*
ダム放水量偏差	*x2*	*x7*
降雨量偏差	*x3*	*x8*
日照時間偏差	*x4*	*x9*
平均風速偏差	*x5*	*x10*

3　水温及び透視度の推移と水温変動要因の解析

水温及び透視度並びに環境要因それぞれの変化を把握するために，2000 年 12 月 1 日～ 2011 年 12 月 31 日の日データを解析対象とした。水温等の中長期的な傾向は，年月別に集計平均化した観測値から 2001 ～ 2011 年の月別平均値を差し引いた月別偏差 (*y*) と年月 (*x*) の回帰直線の傾きの有意性から判断した。また，水温変動に影響を与える要因を探索するために，水温偏差を目的変数 (*y*)，表 1 に示した 10 種類の環境要因を説明変数 (*x1* ～ *x10*) として，変数減少法による重回帰分析 [13] を行った。

水温の季節変動は，月別の水温偏差 (*y*) と年 (*x*) の回帰直線の傾きの有意性から判断した。また，傾きが統計的に有意でありその傾向が最も顕著であった月については，水温変動に影響を与える要因を探索するために，先の解析結果で採択された環境要因を説明変数として変数減少法による重回帰分析を行った。

なお，解析の結果，誤差項に系列相関が認められた場合は，コクラン・オーカット法により系列相関を除去した [14]。また，外れ値，残差の等分散及び正規性並びに独立性，多重共線性などの回帰診断を行った。統計解析は，エクセル統計 2008(株式会社社会情報サービス) により行った。

4　アユの成育環境としての水温及び濁りの分析

アユの成長時期にあたる 5 ～ 7 月 (92 日間) に，生息適水温である 15 ～ 25℃ [15] の日数の割合を年別に集計し，割合 (*y*) と年 (*x*) の回帰直線の傾きの有意性により水温から見たアユの成育環境を評価した。

次に，2001 年 2 月 13 日～ 2005 年 12 月 31 日に観測した透視度と SS の各対数値から求めた直線回帰式により未観測日の SS を推定し，以下の方法により濁りから見たアユの成育環境を評価した。すなわち，推定された SS を , アユに影響がほとんどないとされる 5mg/L 未満 , 長期間続くと漁獲に影響が現れるとされる 5-25mg/L[16], 生理及び生態的な側面に強く影響を与え水産用水基準である 25mg/L 超過 [12] の 3 段階に区分し , 各年での出現割合を求めた。

---

* 気象統計情報
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php

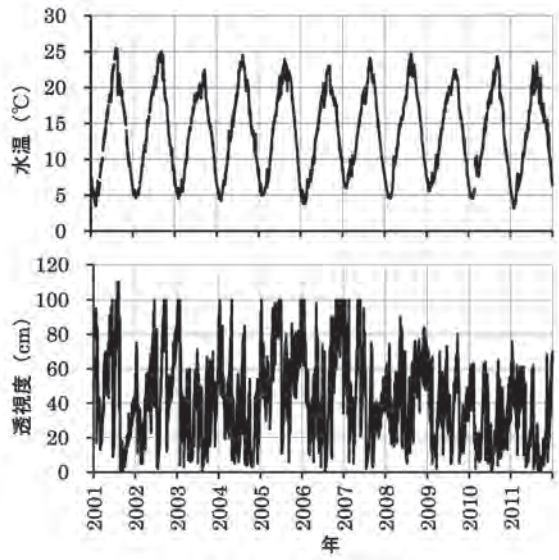

図２　水温及び透視度の日推移

表２　重回帰分析による水温変動要因解析結果

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P値	95%信頼区間	
				下限	上限
定数項	-0.006		0.883	-0.083	0.071
(x1) 平均気温偏差	0.471	0.549	0.000	0.383	0.560
(x2) ダム放水量偏差	-0.004	-0.512	0.000	-0.004	-0.003
(x6) 前月平均気温偏差	0.350	0.408	0.000	0.263	0.438
(x7) 前月ダム放水量偏差	-0.002	-0.253	0.000	-0.003	-0.001

結　果

1　中長期的推移

水温及び透視度の日推移を図２に示した。水温は，毎年１～２月に最低値を，８～９月に最高値を示しながら明瞭な季節変動を繰り返して推移し，平均水温は 13.8℃，最低水温は 3.2℃，最高水温は 25.5℃であった。また，数日単位での急変動が主として２～３月や夏季に観測された。一方，透視度は短期間での変動が激しく，また年による差が大きかったが，初夏と冬季に高くなる傾向にあった。平均透視度は 43.1cm, 最低値は 0cm, 最高値は 110cm 以上であった。また，2007 年６月以降は 100cm 以上に達したことは一度もなく，変動を繰り返しながらも徐々に低下し，2010 年や 2011 年には透視度 20cm 以下の強い濁りが１～２ヵ月継続することもあった。

水温及び透視度並びに環境要因 (平均気温，降雨量，ダム放水量，日照時間，平均風速) の月偏差の推移を図３に示した。回帰直線の傾きから，水温偏差，透視度偏差，平均風速偏差で減少傾向が，ダム放水量偏差で増加傾向が認められた。周期的な変動については，水温偏差，透視度偏差，ダム放水量偏差において半年～１年のやや長い周期が認められたが，他の要因は数ヵ月単位で激しく変動した。また，その変動傾向は，水温偏差と透視度偏差で同じ傾向を示した。

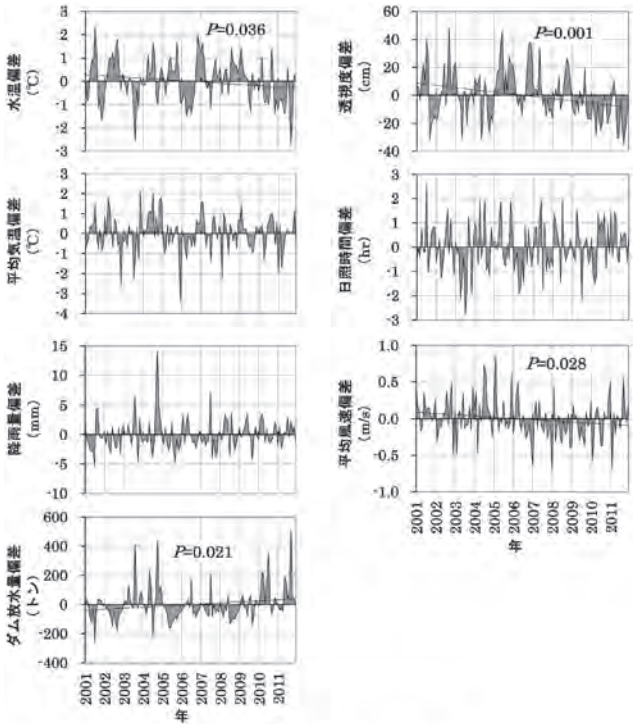

図３　水温及び透視度並びに各環境要因の月偏差の推移

2　水温偏差の中長期的変動の要因

重回帰分析による水温変動要因の解析結果を表２に示した。誤差項に系列相関が認められたため (ダービン・ワトソン比 =1.20)，コクラン・オーカット法により系列相関を除去した。採択された説明変数は，平均気温偏差 (*x1*)，ダム放水量偏差 (*x2*)，前月平均気温偏差 (*x6*) 及び前月ダム放水量偏差 (*x7*) で，回帰式は，y=-0.006+0.471*x1*-0.004*x2*+0.350*x6*-0.002*x7* であった (自由度修正済み R^2=0.672，P=0.000)。

この結果から，水温変動に対し当月及び前月の平均気温が正の影響を，当月及び前月のダム放水量が負の影響を与えていること，さらには当月の平均気温が最も大きい影響を与えていることが推察された。なお，回帰診断の結果，解析から除外するような外れ値，残差の等分散性及び正規性並びに独立性，多重共線性は認められなかった。

3　水温偏差の季節変動とその要因

月別の水温偏差の年推移を図４に示した。４～８月の回帰直線の傾きは低下傾向にあり，５月と６月は統計的に有意であった。そこで，低下傾向が最も顕著であった６月の水温偏差 (*y*) の変動要因について重回帰分析を行った結果 (表 3)，５月の平均気温偏差 (*x1*)，６月の平均気温偏差 (*x2*) 及び５月のダム放水量偏差 (*x3*) が採択され，回帰式は，y=1.040*x1*+0.497*x2*-0.006*x3* であった (自由度修正済み R^2=0.627，P=0.019)。

この結果から，６月の水温変動に対し５月の気温が正の影響を，５月のダム放水量が負の影響を与えていること，

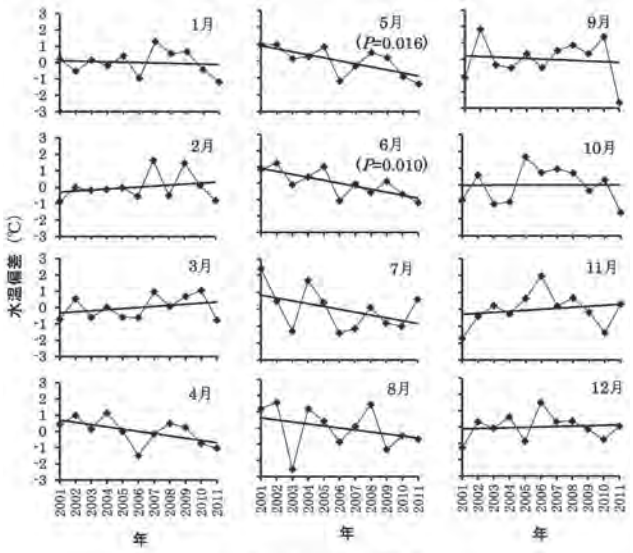

図4 月別の水温偏差の年推移

表3 重回帰分析による6月の水温変動要因解析結果

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	P値	95%信頼区間	
				下限	上限
(x1) 5月平均気温偏差	1.040	0.632	0.020	0.217	1.864
(x2) 6月平均気温偏差	0.497	0.354	0.139	−0.207	1.201
(x3) 5月ダム放水量偏差	−0.006	−0.913	0.005	−0.010	−0.003

さらには5月のダム放水量が最も大きい影響を与えていることが推察された。なお，回帰診断の結果，残差の等分散性及び正規性並びに独立性，外れ値，多重共線性は認められなかった。

4　アユの成育環境としての水温及び濁りの分析

5～7月で，アユの生息適水温である15～25℃に達した日数の割合の年推移を図5に示した。最高値は91%(2002年)，最低値は58%(2011年)で年により変動したが，近年は顕著に減少し，中長期的には減少傾向にあった(R^2=0.538, P=0.010)。

透視度とSSの関係を図6に示した。関係式は，ln(SS)=-1.153 × ln(透視度)+6.286であり(R^2=0.855, P=0.000)，透視度14.3cmが環境基準であるSS25mg/Lに相当していた。この関係式から推定したSSの日推移を図7に示した。SSは0.3～3,224mg/Lまで大きく変動したが，2006年以降は上昇傾向にあった。

推定されたSSを，5mg/L未満，5～25mg/L，25mg/L超過の3段階に区分し，各年での出現割合を図8に示した。アユの生息に適する5mg/L未満の割合は年により6～74%まで大きく変動したが，2009年以降は6～13%で推移し低下傾向が顕著であった。反対に，生息に不適な25mg/L超過の割合は，2010年が25%，2011年が32%と急増した。

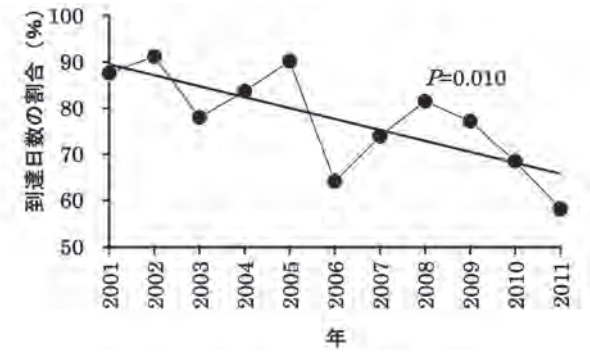

図5　5～7月における適水温（15～25° C)の到達日数の割合の年推移

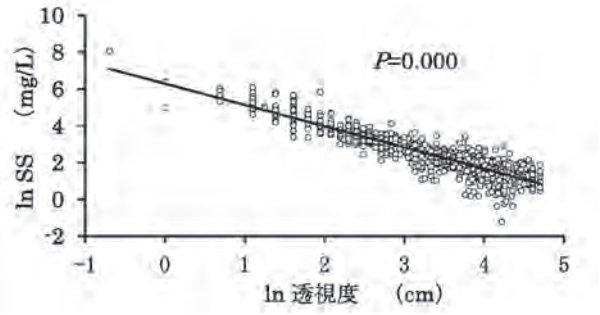

図6　透視度とSSの関係

考　察

1　水温変動の要因

本研究により，天竜川下流部における最近11年間の水温と透視度並びに関連する環境要因の中長期的推移や季節変動，さらにはその変動要因を明らかにすることができた。このうち水温については，中長期的及び夏季(5～6月)の低水温化が認められ，その変動に対し気温が正の影響をダム放水量が負の影響を及ぼしていると推察された。河川水温の形成には，気温，日射などの気象要素のほかに，水深，流速，流量，水源の種類などの水文要素，さらには沿岸の地質や地形，ダムや取水堰などの運用方法などが影響するとされており[17]，本研究においても気温とダム放水量が水温を左右していた。

一方，地球温暖化は，降水量の年変動幅や豪雨を増加させる[18]と共に，河川水温の上昇を引き起こす[19]と報告されている。しかし，本研究で得られた結果では，降水量と密接に関わるダム放水量の増加は水温に対してマイナスに作用していた。天竜川水系で最大の貯水容量を誇る佐久間ダムでは，ダム放水の水温がダム上流に比べ2～8月に最大で約5℃低いこと[11]が報告されており，豪雨の増加はこれらダム内に滞留した低温水の放出を増大させ，夏季の低水温化を助長するものと予想される。今後は，水温データロガーによる多地点での連続観測などによりその影響を評価して，対策を検討していくことが必要である。

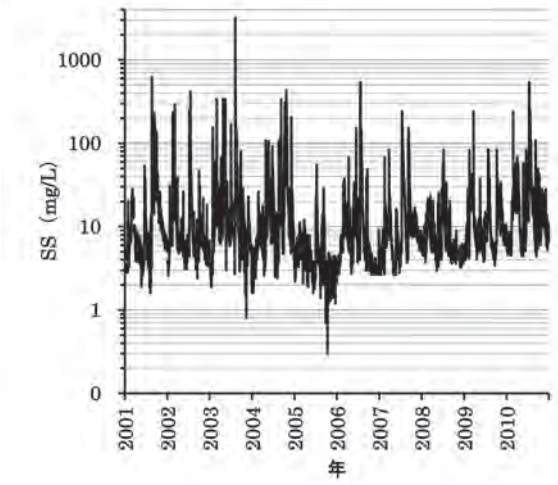

図7 推定されたSSの日推移

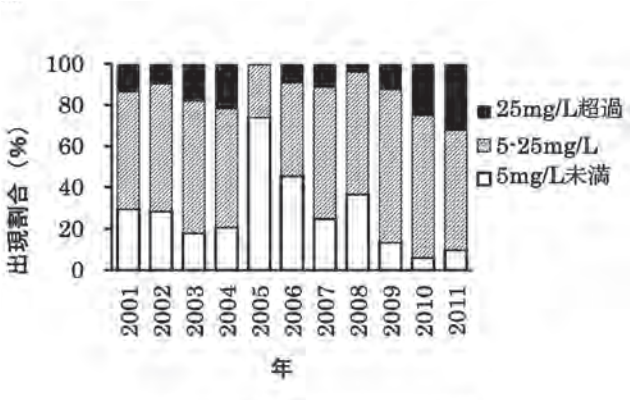

図8 濃度区分別のSSの出現割合

2 夏季の低水温化がアユに与える影響

天竜川下流部では，5～7月にアユの生息に適する日数が減少していることが明らかとなった。一般的に，魚類の成長は好適な水温範囲内であれば高温なほど成長が良い[20]ことが知られており，適水温日数の減少はアユの成長不良を招き，ひいては産卵期の遅延や卵数の減少[21]といった問題を引き起こしている可能性がある。

また，夏季のアユ漁の主体である友釣りは，河川内でコケを占有する縄張りアユを釣獲する漁法であるが，縄張行動は23℃以下では水温低下と共に減退するため友釣り漁獲量の減少[22]も懸念される。

このように夏季の低水温化は，天竜川のアユの成長や産卵，資源，漁獲の各方面に影響を及ぼしている可能性があるため，今後は産卵期親魚の体長組成や流下仔魚数の出現状況などのデータから実態を解明する必要がある。

3 濁りがアユに与える影響

天竜川下流部での透視度は中長期的に低下傾向が認められ，近年の濁りが特に強くなっていることが判明した。

近年，天竜川の遊漁者数の減少は甚だしく，静岡県全体に占める天竜川漁協管内の遊漁者数の割合は1999年以降31～34%で推移してきたものが，濁りが強くなった2009年には29%，2010年には25%まで落ち込んでおり(静岡県内水面漁連未発表資料)，遊漁者数減少の原因として増水に加え濁りの影響も示唆される。

濁りがアユやアユ漁業に与える影響として，SSで5mg/Lを越える濁りを長期間受けるとアユの漁獲量が減少する[16]こと，25mg/Lを超えた濁りは摂餌阻害による成長不良や濁水への忌避行動などを誘発する[23]ことが報告されている。また，濁りがストレッサー[24]になることで縄張性が消失したり[25]，ストレスにより免疫機能が低下する[26]ことも報告されている。このように，濁りはアユの生理および生態的な側面に影響を及ぼしていると考えられる。

また，今回の観測地点とほぼ同じ場所での水棲昆虫の調査結果では，ヒゲナガカワトビケラ科の出現密度が低いなどの高濁度によると思われる影響が出ており[27]，濁りによる河川生態系の変化も示唆される。

近年の濁りは森林荒廃や一部の土砂崩落が原因となり発生していると思われることから，濁りの発生原因そのものを取り除く対策が必要である。

以上のように，11年間に渡り積み重ねた日々のデータを解析することで，水温や濁りの実態が解明されアユ漁への影響についても考察することができた。定時観測による漁場環境の把握は，健全な漁場環境の維持には重要であり，ここから得られた知見は環境変化の原因究明やアユ資源を支える力になると考えられる。

文　献

1) 建設省中部地方局浜松工事事務所(1990): 天竜川治水と利水，38～39.
2) 大上皓久(1968): 天竜川におけるアユの産卵について，静岡県水産試験場研究報告，1，37～41.
3) 大上皓久(1968): 天竜川保護水面調査，静岡県水産試験場事業報告(昭和41年度)，284～287.
4) 静岡農林統計情報協会(2009): 静岡県の内水面漁業生産(魚種別漁獲量)，静岡県水産累計統計，262～263.
5) 鈴木邦弘(2002): 海産遡上アユの資源生態に関する調査(静岡県)，アユ種苗の放流の現状と課題－琵琶湖産、人工産、海産の特性を考慮した増殖事業－(全国内水面漁業協同組合連合会)，27～71.
6) 花里孝幸・吉岡崇仁(2000): 陸水学における温暖化研究の現状と展開，陸水学会誌，61，21～23.
7) 谷口義則・中野茂(2000): 地球温暖化と局所的環境撹乱が淡水魚類群集に及ぼす複合的影響：メカニズム，予測そして波及効果，陸水学雑誌，61，79～94.

8) Abe S. (2003): Effects of ayu (*Plecoglossus altivelis*) on the structure and function of lotic benthic algal communities, 東京水産大学博士学位論文，123pp.
9) 岡野眞久・菊井幹男・石田裕哉・角哲也 (2004): ダム貯水池堆砂とそのダム下流河川還元についての研究，河川技術論文集，10，191 ～ 196.
10) 井口明・谷高弘記・服部典子・村上哲生 (2010): 天竜川下流 (静岡県) の透視度と栄養塩負荷の変動，陸の水，43，1 ～ 6.
11) 国土交通省中部地方整備局浜松河川国道事務所 (2008): 天竜川ダム再編事業環境検討委員会の検討結果 (とりまとめ)，40pp.
12) 社団法人日本水産資源保護協会 (2005): 懸濁物質 (SS)，水産用水基準 (2005 年版)，19 ～ 25.
13) 有馬哲・石村貞夫 (1987): 重回帰分析，多変量解析のはなし，東京図書株式会社，東京，37 ～ 77.
14) S. チャタジー・B. プライス (1981): 回帰分析の実際 (佐和隆光・加納悟翻訳)，新曜社，東京，264pp.
15): 鈴木規夫 (1982): アユ，淡水養殖技術 (野村稔編)，恒星社厚生閣，東京，254 ～ 267.
16) 水産庁 (1986): 漁業公害調査報告書　ダム等河川工作物設置による漁業への影響調査，75 ～ 111.
17) 新井正 (2009): 気候変動と陸水の温度および氷況の変化，陸水学雑誌，70，99 ～ 116.
18) 環境省地球温暖化影響適応研究委員会 (2008): 気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－第 2 部第 3 章水環境・水資源分野，1 ～ 35.
19) 森和紀 (2007): 地球温暖化からみた水文環境の変化，地学雑誌，116(1)，52 ～ 61.
20) 落合明 (1970): 成長，魚類生理 (川本信之編)，恒星社厚生閣，東京，205 ～ 232.
21) Iguchi K. and Yamaguchi M. (1994): Adaptive Significance of Inter- and Intrapopulational Egg Size Variation in Ayu *Plecoglossus altivelis* (Osmeridae) , *Copeia*，1，184 ～ 190.
22) Uchida K., Iguchi K. and Kiso K. (1995): Effects of Water Temperature on Aggressive Behaviour of the Territorial Ayu *Plecoglossus altivelis* in Aquaria, ***Bull. Natl. Res. Inst. Fish. Sci.***，7，389 ～ 401.
23) 藤原公一 (1997): 濁水が琵琶湖やその周辺河川に生息する魚類へおよぼす影響，滋賀県水産試験場研究報告，46，9 ～ 37.
24) 安房田智司・武島弘彦・鶴田哲也・矢田崇・井口恵一朗 (2010): 短時間・長時間の濁りに対するアユのストレス応答，水産増殖，58，425 ～ 427.
25) 井口恵一朗・安房田智司 (2011): 環境要因がアユの行動に与える影響の解析，良好なアユ漁場を維持するための河川環境調査の指針～漁場環境調査指針作成事業報告書～ (水産庁)，18 ～ 25.
26) Iguchi K., Ogawa K., Nagae M. and Ito F. (2003)：The influence of rearing density on stress response and disease susceptibility of ayu (*Plecoglossus altivelis*), *Aquaculture*，220，515 ～ 523.
27) 村上哲生・池田ゆう子・出丸志帆・梶川育見・寺田寿世・服部典子 (2005): ダム直下流の水棲昆虫群集の特徴－天竜川・船明ダムの事例－，名古屋女子大学紀要，51，159 ～ 164.

Studies on the transition and variation factors of water temperature and transparency in the Tenryu River from 2001 to 2011

Kunihiro Suzuki, Hiroki Yataka and Akira Iguchi

Abstract We analyzed the transition and variation factors of water temperature and transparency in the downstream of the Tenryu River observed from December 2000 to November 2011, and studied the effects of these changes on ayu *Plecoglossus altivelis*. The medium-long-term transition of water temperature and transparency tended to decline. Similarly, water temperature during May and June tended to decline. Moreover, water temperature showed positive correlation with atmospheric temperature and negative correlation with the amount of discharge from the dam (including the previous month's history). The appearance rate of water temperature (15-25℃) suitable for the habitation of ayu varied violently, and its medium-long-term transition tended to decline. Suspended solids (SS) affecting the transparency sharply changed from 0.3 mg/L to 3,224 mg/L, but its transition showed an upward tendency from 2006 and after. Furthermore, the number of days exceeding 25 mg/L that affects the habitation of ayu increased rapidly from 2010 and after. Based on these results, there is a possibility of stagnation of growth in ayu, delay in the breeding season, and also a decrease in fish catch, it is important to continue regular monitoring and maintain a healthy fishery environment.

Key words: Tenryu River, water temperature, transparency, turbidity, suspended solids (SS), dam, multiple regression analysis, ayu, *Plecoglossus altivelis altivelis*