〈論 文〉

魚類行動パターンに及ぼす魚種および環境因子の影響

Studies on effects of fish species and environmental factors on fish movement analysis

馬 場 研 二* 矢 萩 捷 夫*
Kenji BABA Hayao YAHAGI

Abstract

Vertical location profiles (VLPs) of carp (*Cyprinus carpio*), crucian carp (*Carassius carassius buergeri*), bitterling (*Rhodeus osellatus osellatus*) and dace (*Leuciscus hakonesis*) were analyzed under normal and abnormal conditions by using the breathing movement index (BMI) in order to develop a fish image automonitoring system for detecting acute toxicity in water. It was found that CN^- ($0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) could be detected on the basis of a difference in the BMI, in which the sensitivity was the highest in dace, and next in bitterling. Furthermore, the frequency of the BMI followed that of an exponential distribution under normal conditions, but deviated from it under abnormal ones.

Effects of water temperature and dissolved oxygen (DO) concentration as environmental factors on VLPs were investigated with dace. In this case, $0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ of CN^- was detected in 10~30 min when water temperatures were 5~25°C, in addition, the BMIs increased when the DO concentration was smaller than $0.5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Therefore, it is necessary to keep the water temperature and DO at suitable levels to ensure suitable fish activity for the detection of acute toxicity.

Key words: toxicity detection, bioassay, fish, movement patterns, image processing

1. 緒 言

化学的または物理的な手段による水質分析精度は年々向上しているが、多様な急性毒性物質の有無を常時監視するためには、魚など水棲生物の行動観察が広く行われている。河川などで魚の大量死が認められた場合には水質異常の発生を知ることができるが、低濃度の急性毒性物質の有無を常時調べるには連続的かつ定量的な監視手法が必要といえる。

著者らは、急性毒性物質に起因する水質異常を連続的に検知することを目的に、画像認識技術を応用して魚類の行動パターンを自動監視するシステムを開発している。すでに前報において、効果的な画像認識方法、並びに行動パターンを評価するための「鼻上げ行動指標」を提案し、コイについて CN^- 濃度の影響を調べた。その結果、 CN^- で $0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上を 10min の画像監視で検知できる可能性を示した^{1)~2)}。

つぎに、提案した方法を水質監視に広く用いるには、その他の魚種での検知可能性を調べると共に、魚の行

動に及ぼす因子の影響を明らかにしておく必要がある。影響因子としては、水の物理的因子である温度や水流状態、また化学的因子としては溶存酸素濃度、pH、無機および有機の溶解成分などが考えられる。また、外界から影響する因子としては音(振動)、光および気圧などが挙げられよう。著者らが提案している画像解析法はこれらの影響を定量的に調べる方法として有効と思われ、広い応用が考えられる。本研究は浄水場における急性毒性物質の検知を主目的とするので、本論文では比較的影響が小さいと思われる因子は除外した。すなわち、浄水場で魚を飼育する場合には、物理的因子の水流はほぼ一定条件とみなせ、また化学的因子の pH、無機および有機の溶解成分は、温度と溶存酸素濃度に比べると魚の行動に影響するほど変動することは極めてまれであると思われる。そこで、年間で変動する因子として温度を、また異常時と誤認する可能性のある溶存酸素濃度を取りあげてその影響を検討した。

* 日立製作所日立研究所 〒319-12 茨城県日立市久慈町4026番地, Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Kuji-cho 4026, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-12 Japan

2. 実験装置, 材料および方法

2.1 実験装置¹⁾

実験装置は Fig. 1(a) に示すように、飼育水槽、撮像系および画像処理装置からなる。Fig. 1(b) に示す飼育水槽（有効容積：40 l）には、整流用の多孔性仕切板を設置し、さらに工業用テレビカメラによる撮像で死空間ができないように、飼育水槽の底板を工業用テレビカメラの撮像角度に合わせて傾斜させた。この中で魚類が行動できる空間の形状は400mm（縦）×400mm（横）×140mm（奥行き）である。飼育水槽には水を循環してフィルターで濾過する浄化装置、酸素供給のためのエアレーション装置、温度調節系および溶存酸素濃度計を設置した。照明法は、後方から光散乱板を介して照射する方式とした。工業用テレビカメラで撮像した映像信号を画像処理装置に伝送してこれを画像処理した。

2.2 材料

異なる魚種への画像監視法の適用可能性、および急性毒性物質に対する反応感度、水温および溶存酸素濃度（以下 DO と略称する）の影響を調べる目的で、コイ（carp: *Cyprinus carpio*）、フナ（crucian carp: *Carassius carassius buergeri*）、タナゴ（bitterling: *Rhodeus osellatus osellatus*）、およびウグイ（dace:

Leusiscus hakonesis）について実験した。これら魚類の体長および体重を Table 1 に示す。1つの実験に使用した魚はその他の実験には使用せず、各実験で異なる魚を供試した。飼育条件は、水温=19~21°C、pH=7.4~7.6、DO≥7.8mg・l⁻¹であった。実験は、Fig. 1(b) とほぼ同じ容積と水質の水槽で予め飼育しておいた魚類を実験用の水槽に移し、この水槽の環境に2日以上順応させて実験を開始した。被検水にはチオ硫酸ナトリウムを適量注入して予め残留塩素を除去した水道水を用いた。急性毒性物質のモデルとしてはシアン化カリウムを用いた。

2.3 実験方法

まず、水質正常時における魚類の水深方向の位置分布を連続的に画像計測し、その後、CN⁻を0.1mg・l⁻¹溶解させた異常状態で1時間計測した。飼育水槽にはフィルター濾過装置が設置されているため、溶解したCN⁻の濃度はフィルター表面への吸着や微生物による分解などにより徐々に減少するもの考えられる。したがって、本研究で実験条件として示すCN⁻濃度は注入直後の濃度である。

次に、水温の影響を調べるために水温を5~25°Cまで5段階に設定してCN⁻=0.1mg・l⁻¹におけるウグイの位置分布を調べた。さらにDOの影響を調べるために、エアレーションガスを空気からアルゴンガスに切り換え、DOが低下する過程でのウグイの位置分布を画像計測した。この実験では、水槽上部を覆蓋して水面からの酸素溶解を防止した。

2.4 画像計測方法

第1報¹⁾で提示した画像認識方法を用い、第2報²⁾で提案した鼻上げ行動指標を用いて魚の行動パターンを解析した。ここで、鼻上げ行動指標とは、Fig. 2 に示すように魚が水面近く（水面から鼻上げ判定座標 Y_c まで）に位置した割合を表し、(1)式で定義した。

$$R_w(Y_c, t) = \frac{\sum_{Y_i=Y_1}^{Y_c} F_w(Y_i, t)}{100} \quad (1)$$

ここで、 $R_w(Y_c, t)$: 鼻上げ行動指標[-], $F_w(Y_i, t)$: 水深方向の位置頻度分布[%], Y_c : 鼻上げ判定座

Fig. 1 Experimental system

Table 1 Experimental conditions

fish species	length[mm]	weight [g]
carp (<i>Cyprinus carpio</i>)	140	35
crucian carp (<i>Carassius carassius buergeri</i>)	90	8.5
bitterling (<i>Rhodeus osellatus osellatus</i>)	65	3.0
dace (<i>Leusiscus hakonesis</i>)	110~120	9.5~11.0

Fig. 2 Concept of breathing movement index, $R_w(Y_c, t)$

Fig. 3 Time course of $R_w(Y_c, t)$ under normal condition (carp: *Cyprinus carpio*)

Fig. 4 Time course of $R_w(Y_c, t)$ under normal condition (crucian carp: *Carassius carassius buergeri*)

標, Y_i : 水深方向の座標(1単位は約10mm)。なお, 位置分布を図示 (Fig.8, 13, 17) する場合には単位をピクセル(1ピクセル=約2.0mm)とし, この座標を Y_p とした。 R_w 値は, 魚が水面近く ($Y_1 \leq Y_i \leq Y_c$) に浮上した頻度を表す。したがって, R_w 値が大きい場合には魚が鼻上げ行動を呈していることを意味する。

画像認識の頻度を0.5秒に1回, 1周期の計測時間を10min (画像認識時間: 9 min, 計算結果の整理とフロッピーディスクへのデータ格納および待機時間: 1 min) とし, この周期で監視を繰り返した。

3. 実験結果と考察

3.1 魚種の検討

3.1.1 鼻上げ行動指標値の経時変化

水質正常時におけるコイ (carp), フナ (crucian carp), タナゴ (bitterling), およびウグイ (dace) の鼻上げ行動指標 (R_w 値) の経時変化を Figs. 3~6 に示

Fig. 5 Time course of $R_w(Y_c, t)$ under normal condition (bitterling: *Rhodeus osellatus osellatus*)

Fig. 6 Time course of $R_w(Y_c, t)$ under normal condition (dace: *Leuciscus hakonesis*)

す。ここで、 Y_c については正常時と異常時とで R_w 値の差が大きくなる条件で予備検討し、 $Y_c = 5$ の値を予選んだ。 R_w 値は Figs. 3~6 で明らかなようにいずれも低い値であった。したがって、水面から水深約50mmまでの領域は、正常時には高頻度で浮上しない領域とみなすことができる。

CN⁻を $0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 溶解した場合の R_w 値の経時変化を Fig. 7 に示す。CN⁻注入後の R_w 値の変化パターンは魚種によって異なるが、いずれの場合も水質正常時 (Figs. 3~6) と比較して R_w 値が急激に増加した。このことは、正常時の R_w 値と比較することにより鼻上げ行動を判定可能なことを示す。

CN⁻注入前と注入後19min までの位置分布を Fig. 8 に示す。Fig. 8 で明らかなように、魚種に関係なく類似のパターン変化が認められた。すなわち、コイを除いて 0~9 min においてピーク P_1 と P_2 とが混在し、10~19min ではピーク P_1 がより顕著になった。このことから、CN⁻注入前に水槽の底部付近に高頻度で位置していた魚が、CN⁻の注入により逆に水面近くに高頻度で分布するようになり、Fig. 7 に示す R_w 値の増加をもたらしたことが明らかである。いずれの魚種についても CN⁻注入後 2 回目 (10~19min) までの計測でピーク P_1 が出現しており、10min の時間遅れで水質異常を検知できる可能性が示された。

3.1.2 鼻上げ行動指標値の頻度分布

鼻上げ行動指標 (R_w 値) の判定基準値を求めるには、正常時における R_w 値の頻度分布を統計的に把握しておくことが重要である。そこで、Figs. 3~6 から R_w 値の頻度分布を計算した。Figs. 9~12 は横軸に R_w 値、縦軸に (2) 式で示すように相対頻度の対数値 F_i をとって整理した結果である。

$$F_i = \log_e(\text{相対頻度}) \quad (2)$$

この結果、Figs. 9~12 に示すように、実験した 4 魚種についてはいずれも直線で近似できることを見出した。ただし、 $R_w = 0$ が持続する場合には、この相対頻度が 1.0 となり $F_i = 0$ となる。したがって、原点を通る直線で近似した。近似式を (3)~(6) 式に示す。

$$\text{コイ (carp)} : F_i = (-89.8) R_w \quad (3)$$

$$\text{フナ (crucian carp)} : F_i = (-70.9) R_w \quad (4)$$

$$\text{タナゴ (bitterling)} : F_i = (-150) R_w \quad (5)$$

$$\text{ウグイ (dace)} : F_i = (-49.9) R_w \quad (6)$$

この結果は、水質正常時の R_w 値の頻度分布として指数分布を仮定してよいことを意味する。このことは、Figs. 9~12 に斜線で示すような、指数分布から外れた R_w 値を少なくとも異常とみなせることを示唆する。ただし、Fig. 9 には指数分布内に斜線部が認められた。これは Fig. 7 に実線で示す carp の 120min の R_w 値に

Fig. 7 Detections of abnormal condition (CN⁻ = $0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) by the breathing movement index for 4 fish species

対応しており、60min の CN⁻注入後から R_w 値が一旦増加し、その後減少した後の値である。このような値が CN⁻注入直後に表れると、この値は正常時と区別できないが、本実験では CN⁻注入直後の R_w 値は指数分布の外側に位置しているので、後述する方法によってこれを異常とみなすことが期待できる。

3.1.3 考察

検出感度の点では、異常時における R_w 値の最大値 ($R_{w, \max}$ と記す) が、大きいほど有利であり、水質異常の早期検出のためには R_w 値の立ち上がり勾配 (dR_w/dt と記す) が大きいほどよい。この観点から、Fig. 7 の結果を整理して Table 2 を得た。

ところで、(3)~(6) 式の一般式として (7) 式が得られる。

$$F_i = -r_f \cdot R_w \quad (7)$$

ここで、 r_f は比例係数で、値が大きいほど水面近傍に浮上する頻度が低いことを表す。(7) 式から $F_i = -7$ での R_w 値を求め、安全率を見込んでこの 1.5 倍の値を R_w^* 値とした。 R_w^* は (8) 式で計算できるが、本研究ではこれを正常/異常の判定基準値とした。

$$R_w^* = 1.5 \frac{-7}{-r_f} \quad (8)$$

この R_w^* 値を超える R_w 値を異常とみなして、Fig. 7 から水質異常の検出時間を 10min 単位で読みとると、いずれも CN⁻注入後 10min となった。

また、異常検出の信頼性の点では、 R_w^* 値が低く、 $R_{w, \max}$ が高いほど、すなわち $R_{w, \max} - R_w^*$ が大きいほどよい。これらの値を計算して Table 2 にまとめた。浄水場などで水質監視に用いるには、

- ① 急性毒性物質への応答感度 ($R_{w, \max}$)
- ② 応答速度 (dR_w/dt)
- ③ 検出の信頼性 ($R_{w, \max} - R_w^*$)
- ④ 原水の水質

Fig. 8 Vertical location profiles of four fish species during normal to abnormal conditions

⑤魚の飼育性
⑥入手の容易さ
などを考慮しなければならない。Table 2を参考にして魚種を比較すると、①についてはウグイ(dace)、②についてはフナ(crucian carp)、③についてはウグイ

(dace)が優れている。④については水質が良好でない場合にはコイ(carp)とフナ(crucian carp)が適しており、⑤⑥については4魚種とも同等であろう。これらの中でフナとタナゴとをTable 2およびFig. 7で比較すると、タナゴは dR_w/dt でフナより劣るが、

Fig. 9 Frequency distribution of $R_w(Y_c, t)$ (carp) Fig. 10 Frequency distribution of $R_w(Y_c, t)$ (crucian carp)

$R_{w,max}$ および $(R_{w,max} - R_w^*)$ ではタナゴより優れる。したがって、あえて優劣をつけるならば、本研究の実験結果からはウグイついでタナゴが適しているといえよう。ただし、本実験で用いた魚類は大きさも異なり、しかも個体差を無視できない生体現象を取り扱う意味で、再現性については確認していく必要がある。

橋本³⁾は水道原水監視用の魚類として、生態的な条件と生理的な条件(24hrTLm値の比較)を検討し、オイカワが適していること、およびウグイについてもその可能性があることを示唆している。これに対して、本研究で用いた画像解析法は、急性毒性物質に対する魚類のダイナミックな応答を調べる上でその有効性を示したといえるだろう。

なお、本論文で着目している鼻上げ行動(または浮上反応⁴⁾と称す)は毒物に対して一般的に表れる現象とされており、CN⁻以外の急性毒性物質についてもその有無を検知可能なものと推察される。

3.2 水温の影響

3.2節および3.3節では、 $R_{w,max}$ が大きく環境変化に敏感と思われるウグイについて環境因子の影響を検討

Fig. 11 Frequency distribution of $R_w(Y_c, t)$ (bitterling) Fig. 12 Frequency distribution of $R_w(Y_c, t)$ (dace)Table 2 Difference of movement features in fish species (CN⁻=0.1mg·l⁻¹)

fish species	carp	crucian carp	bitterling	dace
$\frac{dR_w}{dt}$	0.11	0.37	0.30	0.20
$R_{w,max}$	0.67	0.46	0.63	1.00
R_w^*	0.12	0.15	0.07	0.21
$R_{w,max} - R_w^*$	0.55	0.31	0.56	0.80

した。実験に供試した個体は各温度で異なる。

各水温において、CN⁻注入前後のウグイ(dace)の位置分布の経時変化をFig. 13に、 R_w 値の経時変化をFig. 14に示す。Fig. 13において、ピークP₁の出現は15℃以上ではCN⁻注入後1回目(0~9min)の計測で、10℃では2回目(10~19min)の計測で認められた。しかし、5℃では2回目(10~19min)の計測ではピークP₁は出現せず、3回目(20~29min)の計測で出現した(図示省略)。一方、Fig. 14で見ると、実験した範囲(水温≥5℃)では R_w 値の増加から水質異常を検知可能であるといえよう。異常判定のための R_w^* 値は温度によって異なると予想されるが、かりにTable 2

Fig. 13 Influences of water temperature on the breathing movement index R_w during normal to abnormal conditions (dace, $\text{CN}^- = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

の $R_w^*=0.21$ により検知時間を読みとると10~30minとなる。

Fig. 15 は水温が dR_w/dt に及ぼす影響を示す。このように、 CN^- に対する応答感度は水温が低いほど鈍くなることが明らかである。10°C 以下の水温が継続する場合(冬季)には、魚の動きがさらに鈍くなるものと予想され、魚種によっては冬眠するものもある。したがって、早期検知の観点からは水槽に導く被検水の水温をある程度上昇させておくことが望ましい。

異なる水温で CN^- が魚類に及ぼす影響を検討した例として、佐伯ら⁵⁾によるコイを用いた実験、および橋本³⁾によるコイ、フナおよびオイカワを用いた実験が報告されている。橋本の実験では、水温が10°C の場合

Fig. 14 Vertical location profiles at different water temperature during normal to abnormal conditions (dace, $CN^-=0.1mg \cdot l^{-1}$)

Fig. 15 Dependency of dR_w/dt on water temperature (dace)

にコイが CN^- に反応する最低濃度は $CN^-=0.1mg \cdot l^{-1}$ であり、本論文でのウグイの結果と同等であった。

3.3 溶存酸素濃度の影響

Fig. 16 は60min で曝気ガスを空気からアルゴンガスに切り換えた時の、DO と R_w 値との経過を示す。

Fig. 16 に示すように、DO は徐々に低下し $DO \leq 0.5 mg \cdot l^{-1}$ になって R_w 値が急激に上昇した。この過程における位置分布の変化を Fig. 17 に示すが、120min 以降で水面に浮上（ピーク P_1 の出現）しており、 CN^- 注入時と同じように鼻上げ行動を呈したことがわかる。これらの結果から、 $DO \leq 0.5mg \cdot l^{-1}$ 程度になると酸欠の影響が表れ、鼻上げ行動を呈することがわかる。佐伯ら⁵⁾はコイ（体重90~300g）について DO 飽和濃度の2~3%で横転することを報告しているが、ウグイの場合も同様の結果といえる。

通常の原水では河川や湖沼で微生物の異常増殖により DO が低下したり、逆に別の原因で DO が過飽和になり気泡病に至る場合もありうる。したがって、DO を常時モニターするか、被検水を水槽の前段でエアレーションしておくことが有効であろう。

以上、報告したように画像監視による水質異常検知は、目視あるいは従来の物理的な監視方法に匹敵する性能を期待できよう。なお、本論文で報告した結果は1尾を対象にした実験結果であるため結果の普遍性についてはさらに再現性を確認していくことが必要である。また、個体差の影響を取り除き信頼性をさらに向上させるには、実際の飼育方法と同じように複数の魚を飼育してこの魚群を画像監視することが理想的である。この手法と結果については別途報告する⁶⁾。

4. 結 言

前報で提案した鼻上げ行動指標を用いて魚類の行動

Fig. 16 Influence of DO on the breathing movement index R_w during normal to abnormal conditions (dace, $Y_c=5$, minimum value of $DO=0.1mg \cdot l^{-1}$, $CN^-=0.1mg \cdot l^{-1}$)

Fig. 17 Time courses of vertical location profiles during DO decrease

パターンを画像解析した。特に、本論文では異なる魚種への適用可能性を検討すると共に、環境因子として水温とDOの影響を調べた。得られた結果を以下に要約する。

(i)コイ、フナ、タナゴおよびウグイを対象に実験した結果、 $CN^- = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ における鼻上げ行動指標(R_w 値)は正常時と比較して急激に増加した。このことから、前記4魚種について鼻上げ行動指標による異常検知法が有効であることを確認した。(3.1.1節)

(ii)前記4魚種について、水質正常時の R_w 値の頻度分布を調べた結果、指数分布を仮定してよいことを見だし、このことから、指数分布からはずれた R_w 値を異常とみなすことが可能であった。(3.1.2節, 3.1.3節)

(iii)急性毒性物質への応答感度、応答速度、検出の信頼性などから判断すると、本研究の結果からはウグイまたはタナゴが適していると思われた。(3.1.3節)

(iv)水温($5 \sim 25^\circ\text{C}$)がウグイの行動に及ぼす影響を調べた結果、 $CN^- = 0.1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ を10~30minで検知可能であった。(3.2節)

(v)ウグイの位置分布は、 $DO = 0.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下では酸欠の影響が表れはじめ、 CN^- 注入時と類似の鼻上げ行動を呈した。したがって、DOの管理が重要であるといえる。(3.3節)

(原稿受理 昭和63年8月6日)

参考文献

- 1) 馬場研二, 矢萩捷夫(1988)水質異常検知を目的とする魚類行動の画像監視—画像認識法の検討—, 水質汚濁研究, 11, 114-122.
- 2) 馬場研二, 矢萩捷夫, 飯田高士, 大木伸夫(1988)魚類行動パターンの画像解析に基づく水質異常判定, 水質汚濁研究, 11, 506-512.
- 3) 橋本徳蔵(1961)水道原水監視用の魚類についての考察, 日本水処理生物学会誌, 6(1), 1-6.
- 4) 日本水道協会(1970)上水試験方法, p.548.
- 5) 佐伯新三, 難波憲二, 村地四郎(1975)魚類心電図の水質監視への応用, 第26回全国水道研究発表会講演集, 329-331.
- 6) 馬場研二, 矢萩捷夫(投稿中)魚群行動の画像解析による水質異常監視支援技術の研究, 水道協会雑誌.

水中の有機化合物に関する研究（第4報） 水道水および水道原水中の環状イオウ分子のイオウ(S_8)

高橋 保雄* 森田 昌敏**

* 東京都立衛生研究所 ** 国立公害研究所

〈水質汚濁研究 Vol.11 No.11 (1988) pp.710~714〉

水道原水および水道水中の有機農薬・有機リン酸トリエステルを定量中、ヘキサン分画のGC-ECD上に大きな未知ピークが認められた。この未知ピークを同定確認したところ、環状イオウ分子のイオウ(S_8)であった。

水中における S_8 の分析法を確立し、さらに、この分析法を使用して、水道原水・水道水および蛇口水中の S_8 の濃度レベル調査を行った。その結果、水中の S_8 は検出せずから $4\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ であり、7・8月の濃度は他の月に比較して低かった。また、 S_8 は水道原水から検出されていても、緩速汙過、あるいは活性炭処理を行っている水道水からも検出せずであった。

水道原水中の S_8 濃度と過マンガン酸カリウム消費量・アンモニア性窒素・硫酸イオン濃度との相関係数および有意水準は0.64・0.79・0.41および99%・99%・95%有意であった。

魚類行動パターンに及ぼす魚種および環境因子の影響

馬場 研二* 矢萩 捷夫*

* (株)日立製作所 日立研究所

〈水質汚濁研究 Vol.11 No.11 (1988) pp.715~723〉

魚類行動パターンの画像解析による水質異常検知を目的に、コイ、フナ、タナゴおよびウグイ各1尾について、水質正常時および水質異常時($\text{CN}^- = 0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)における水深方向の位置分布を鼻上げ行動指標(R_w 値)を用いて解析した。その結果、いずれも CN^- に対する鼻上げ行動を検知できることを見出した。検知感度と応答性からウグイまたはタナゴが適していると思われた。さらに、 R_w 値の頻度分布が指数分布に従うことを見出し、指数分布からはずれた値を異常とみなすことが可能であった。

次に、ウグイを用いて、環境条件として水温と溶存酸素濃度の影響を調べた。その結果、 R_w 値の増加勾配は水温が低い場合には緩やかであったが、 $5\sim 25^\circ\text{C}$ では $\text{CN}^- = 0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を10~30minで検知可能であった。また、溶存酸素濃度が $0.5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下では R_w 値の増加が認められた。これらのことから、水質異常検知のためには環境条件をできるだけ魚類の行動に好適に維持することが望ましいといえる。