

# 生物を用いた水質管理手法に関する研究

Study on method of water quality management using biological sensor

リバーフロント研究所長 小池達男  
研究第三部 主任研究員 阿久根徹  
アクアテック株式会社 衛藤俊司  
アクアテック株式会社 村山仁

魚を用いた生物センサーは有毒物質を検知するために魚の忌避反応を用いてきた。ここで私たちが提案するのは、新たな生物センサーとしてウナギを用い、有害物質の検知には生理反応であるウナギの心拍数の変化を利用するものである。ウナギの心電図は、心臓で発生する電気が高いため外部電極で捉えることができる。そして、ウナギは他の魚に比べて有害物質に対してより敏感である。ウナギセンサーにより人の健康の保護に関する環境基準の有害物質について実験を行なった結果、ウナギセンサーがそれらの有害物質の検知について有効であることがわかった。また、水温変化、ノイズ、振動及びpHの影響が検討され、ウナギセンサーでの有害物質検出に影響が無いことがわかった。水質異常の早期発見にウナギセンサーは十分威力を発揮するものと考えている。

キーワード：水質管理、生物センサー、うなぎ、人の健康に係る環境基準、有害物質

In a biological sensor, escape behavior reaction of fish has been used to detect noxious matters. A new biological sensor uses variation of eel heartbeats in physiological reaction. Eel electrocardiogram can be detected with an external electrode because of its high electromotive force of an eel's heart. And an eel is more sensitive for noxious matters than other fishes. The noxious matters of Environmental Quality Standards Related to the Protection of Human Health were examined using the eel biological sensor. As a result, it was found that the eel biological sensor is effective to detect the noxious matters. Also, variation of water temperature, noise, vibration and pH in external disturbance were examined, and their disturbance doesn't effect to detect the noxious matters.

Key Words : water quality management, biological sensor, eel, environmental quality standards related to the protection of human health, noxious matter

## 1. はじめに

我が国では産業の発展に伴い社会活動が高度化し、様々な製品が作られるようになり、自然に対して有害な化学物質が利用されるようになってきた。そのため、河川等の水域における水質問題も複雑化しているのが現状である。このような化学物質は1万種以上もあり、毎年新たに合成されている。これらの合成化学物質は組成、発生源、移動形態等は様々であり、全てを水域で連続的に監視することは不可能である。多種多様な化学物質は全ての毒性が調べられておらず、水質基準が定められていない。現状では水質に関して「人の健康に係る環境基準」として、23項目の有害物質が定められているに過ぎない。

これら有害物質の水域での発生状況は、不特定の場所や時間で発生し、不特定の物質が種々の濃度で流下するという特徴を持つ。確かに、現在の技術では物理的、化学的、生物的処理により水質処理は可能である。しかし、有害物質の種類や発生特徴から考え、河川に浄化施設を設けて有害物質対策を実施することは非現実的である。

これらの有害物質の発生に対処するためには、24時間監視が最も有効な手段である。しかし、現在のところ、連続自動監視が可能な有害物質はシアンのみであり、他の有害物質については今後の技術の開発を待たねばならない。また、そのような技術が完成しても1つ1つの有害物質に対してセンサーがそれぞれ独立していくは、人の健康の保護に関する環境基準に限っても23本ものセンサーを連続自動観測装置につけねばならず、実際的には対応できない。

そこで、多種多様な有害物質の発生を生物によって検知することを提案する。この方法では、有害物質の特定は発生時点ではできないが、検知時に採水し、分析することで有害物質の特定が可能である。ここでは、生物としてウナギを用いた生物センサーを作製し、

その有効性を確認した。

## 2. ウナギを用いた生物センサーの原理とシステム

### 2-1 ウナギセンサーの原理

今まで検討してきた水質管理としての生物センサーは、ほとんどが魚を用いてきた。有害物質の検知には魚の生態反応、つまり、有害物質が流れてきたときに示す忌避反応が用いられてきた。この忌避反応では、無味、無臭の有害物質では反応しない場合、もしくは、反応が見分けられない場合がある。これに対して、心拍数、魚の鰓蓋運動といった生理反応は無味無臭の有害物質に対しても起こる。

この生理反応を捉えるには、鰓蓋運動よりも心拍数の方が水質変化に敏感であることがわかっている。心拍数を捉えるには、魚の体内に電極を埋め込み、電位をとらえることが行われてきた。しかし、この方法では魚の寿命が短くなる、埋め込みによる感染症により心拍数が変化してしまう等の問題があり、実用的ではない。

体外から心拍による電位をとらえれば上記の問題を回避できる。ただし、今まで利用されてきた鯉、鮒、鮎は電極を埋め込まなくては電位をとらえられず、もっと大きな心拍電位の魚が必要である。そこで、電気ウナギのように元々大きな心拍電位を発生するウナギを用いることで、外部の電極により心拍の電位をとらえることができる。

つまり、ウナギセンサーは、外部電極により心拍の変化を捉えることで、有害物質が水質に流入したことを感知するものである。ウナギセンサーの模式図を図-1に示す。

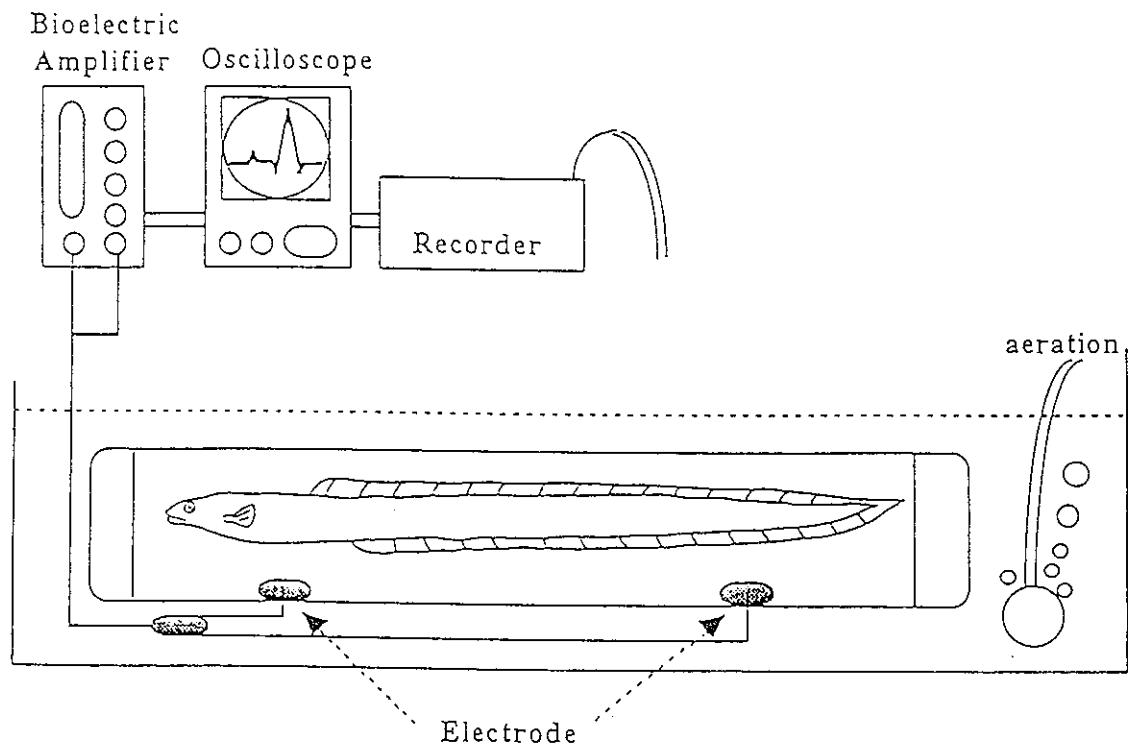


図-1 ウナギセンサーの模式図  
Fig.1 Eel Sensor Model Diagram

ウナギをセンサーとして用いる理由は、水質管理としての適正、維持管理が以下の点で優れているためである。

- ・心拍による発生電位が大きく、外部電極でとらえられる
- ・他の魚に比べ、味覚、臭覚、化学反応に敏感である
- ・暗いところを好み筒の中に入り、動きが少ないために観測しやすい
- ・生存力が強く、過酷な環境にも対応できる
- ・餌を食べなくても2~3ヶ月生存できる
- ・養殖されているため、比較的容易かつ安価である

## 2-2 ウナギセンサーのシステム

ウナギセンサーによって有害物質の流下を感知すると、直ちに、取水ポンプが稼働して所定の採水を行う。それと同時に、電話回線を通して通報がなされ、直ちに、工場等で取水停止したり、事故調査が行われることになる。

採水された試験水を実験室に持ち帰り、毒性解析の手順に基づいて、試験水の分析を行うことで、流下してきた有害物質の物質名と濃度を特定することができる。

あらかじめ、ウナギセンサー設置から上流域の工場分布と特性を把握しておれば、分析結果と合わせると有害物質を投入した機関を特定し、警告を発することにより、再発防止することが可能となろう。

ウナギセンサーによる水質事故の原因究明の流れを図-2に示す。

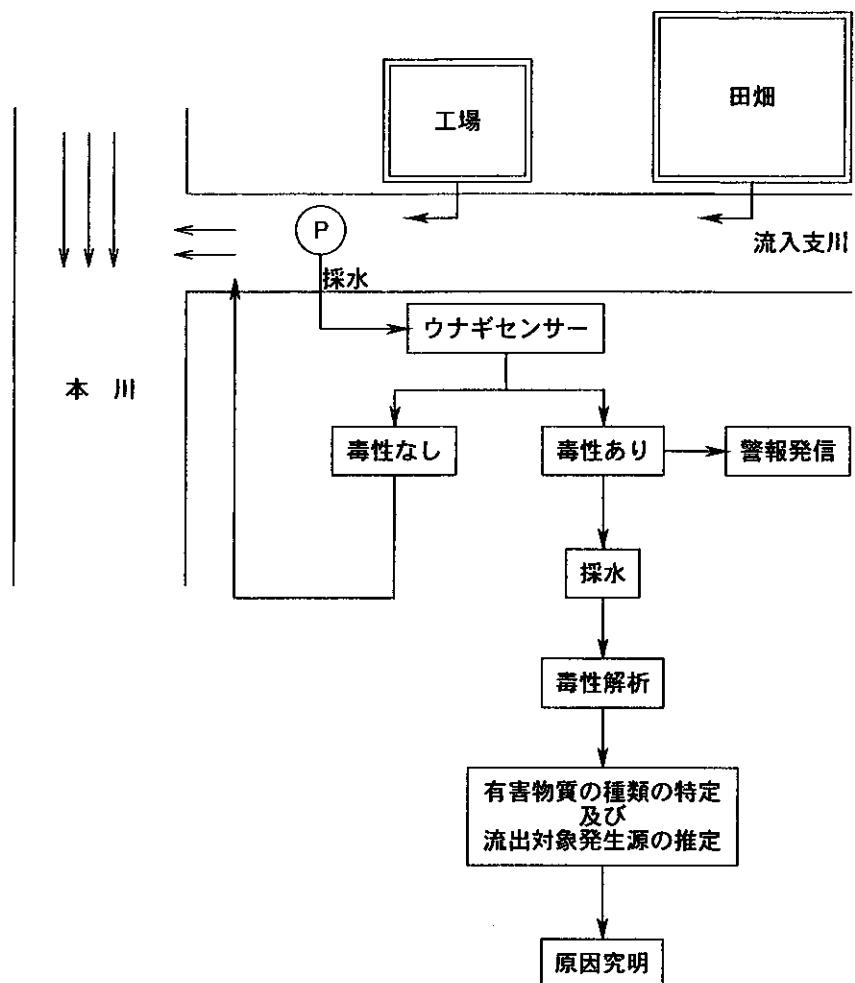


図-2 ウナギセンサーによる水質事故の原因究明の流れ  
Fig.2 Using Eel Sensors to Investigate the Causes of Water-Quality Incidents

### 3. ウナギセンサーによる実験

現地に設置できるウナギセンサーを組み立て、その実機で有害物質とウナギの心拍数の関係を知るための実験を行った。

#### 3-1 ウナギセンサーの構成

ウナギセンサーの主構成を図-3に示す。

測定槽にウナギを入れ、検知部の数値を読み取り、有害物質とウナギの心拍数の関係を調べた。ある範囲に見地部の数値を設定し、その範囲を超えた場合、異常として、即ち、有害物質の流下時に採水指示が出され、採水が実施される。

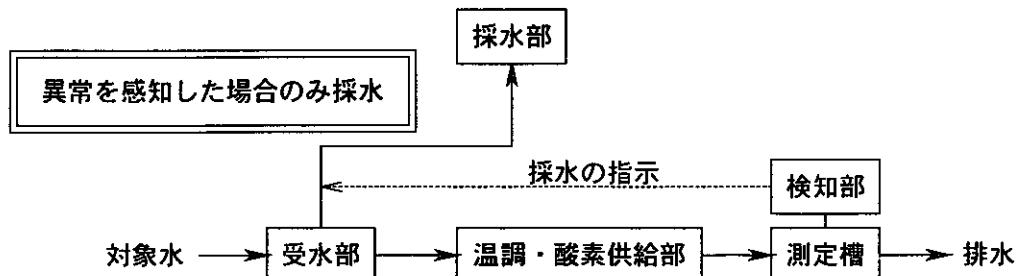


図-3 ウナギセンサーの主構成  
Fig.3 Eel Sensor Process

### 3-2 ウナギセンサーの測定槽

測定槽はウナギの心拍を検知するもっとも重要な部分である。安定して心拍の電位を検知するための必要条件を以下に挙げる。

- ①糞やゴミが溜まらないこと
  - ②ウナギが泳がないこと
  - ③測定槽にウナギが接触して動かないこと
  - ④ウナギが反転したり、飛び出さないこと
  - ⑤ウナギに十分な酸素を供給すること
- ①～②は流量と流速に関係し、③～④はウナギと槽の関係（ウナギの大きさ、槽の大きさ・形状）、⑤はウナギを活かしておくために

必要な条件（流量と流速に関係）である。これらの条件を決定するために、図-4及び5に示す測定槽を用いて実験を行った。ウナギを入れる部分は3cm径の円筒である。

実験結果から、以下の条件を決定した。

- ・流速—①、②、⑤に関係  
3cm/sec
- ・流量—①、②、⑤に関係  
ウナギの胴回りに併せて流速 3cm/sec になるように調整する
- ・ウナギの胴回り—③、④に関係  
3cm 槽で胴回り 7～8cm

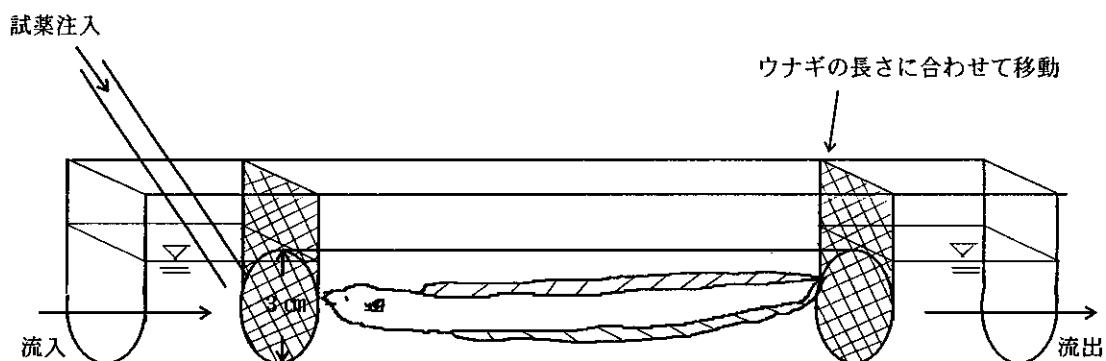


図-4 ウナギセンサーの測定槽の模式図  
Fig.4 Diagram of a Model Eel Sensor Measuring Tank

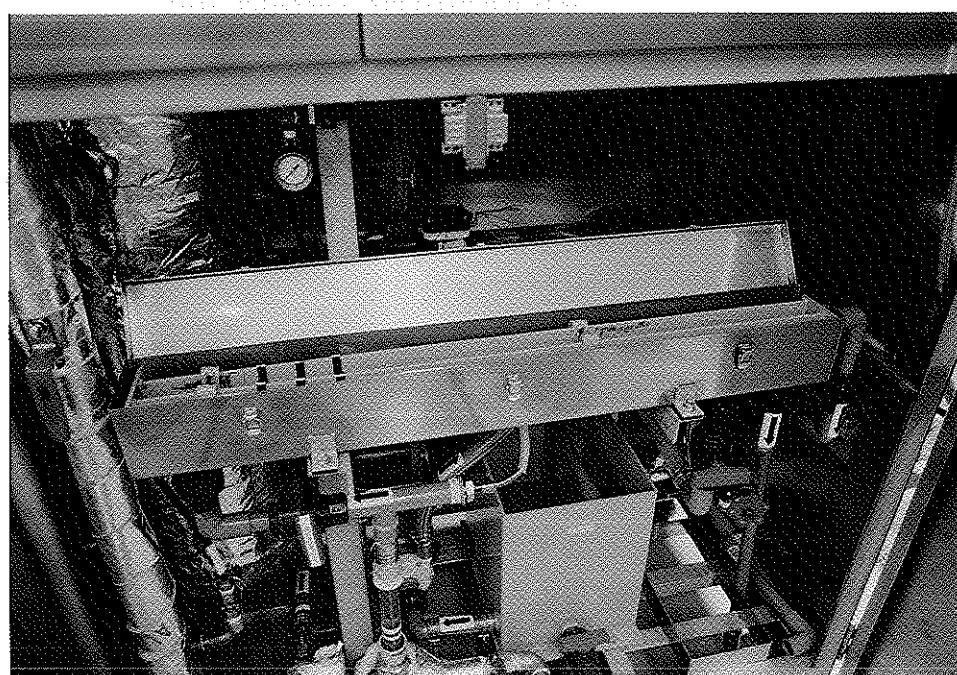


図-5 ウナギセンサーの測定槽の写真  
Fig.5 An Eel Sensor Measuring Tank

### 3-3 装置の仕様

写真を示す。

実験に用いたウナギセンサー装置の仕様を表-1に示す。また、図-6～8には装置の

表-1 装置の仕様  
Table 1 Equipment Specifications

大きさ	全体 L1300×W650×H1650 mm <sup>3</sup> (キャスター部分を含む)
	測定槽 L900×W100×H100 mm <sup>3</sup> (内寸) 1槽
	採水容量 10 ℥ ×1個
重量	装置重量 400 kg
	運転重量 480 kg (水を含む)
センサー	心拍数 5～200回/分
エアーポンプ	最大空気量 12(50Hz)～14(60Hz) 1/min
給水ポンプ	最大流量 15(50Hz)～17(60Hz) 1/min
使用電源	ヒーター電源 200V、20A
	操作電源 100V、10A

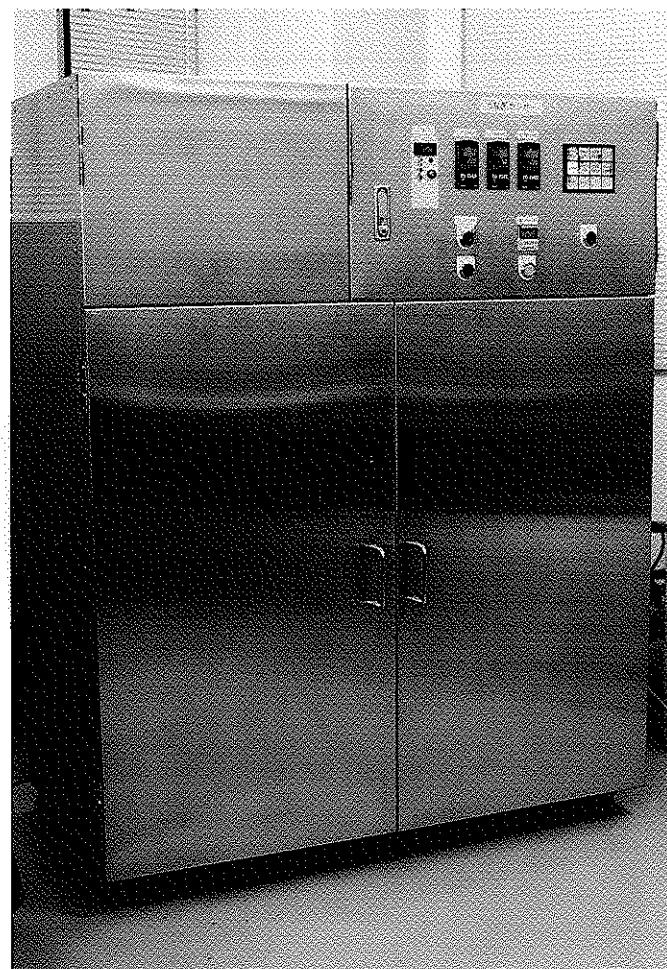


図-6 ウナギセンサーの全体写真  
Fig.6 Utilization of Eel Sensors

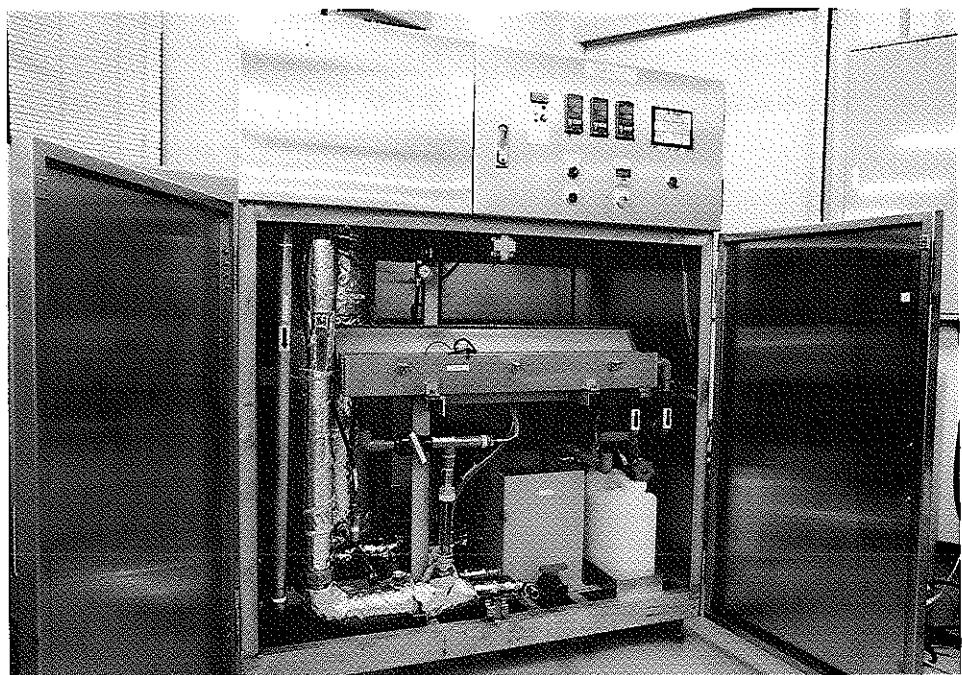


図-7 ウナギセンサーの全体と内部の写真

Fig.7 Utilization of Eel Sensors Close-up View

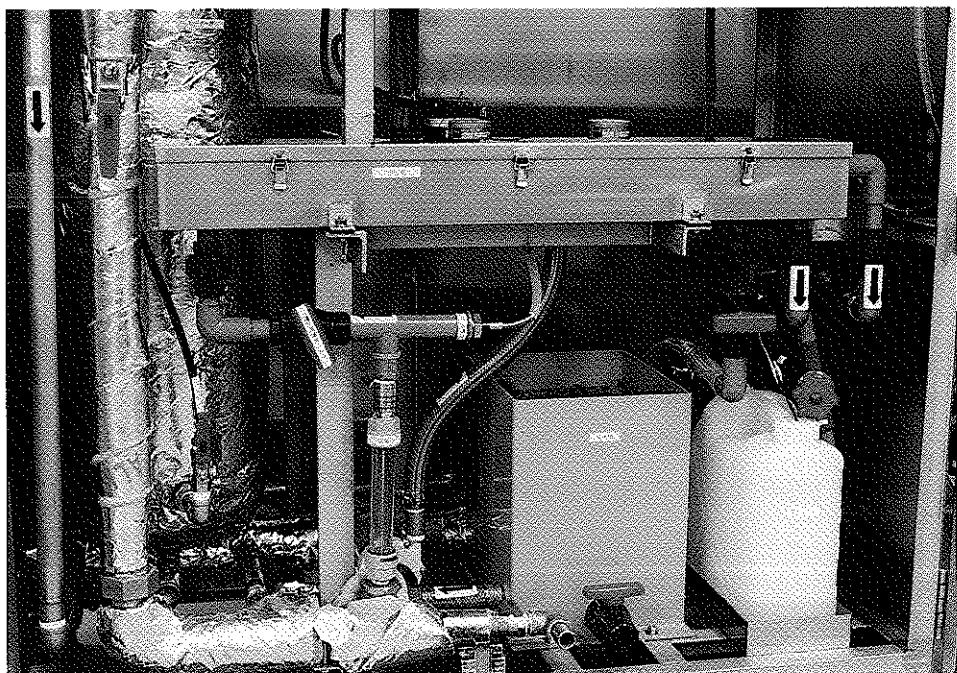


図-8 ウナギセンサーの内部

Fig.8 Eel Sensor Interior

### 3-4 外的要因による影響把握実験

ウナギセンサーを設置した場合に、外部からの擾乱によりウナギの心拍に影響を与える可能性がある。そこで、外部要因として

- ・水温変化
- ・溶存酸素 (DO) 濃度
- ・騒音
- ・振動
- ・昼夜

による影響を実験により確認した。ただし、溶存酸素不足は水質事故の 1 つであるが、DO センサーにより監視可能である。ここでは、溶存酸素不足がウナギにどの様な影響を与えるか、また、ウナギを生かしておける条件として確認するために外部要因の一つとして取り上げた。

実験結果を表-2 に示す。

表-2 外部要因による影響  
Table 2 Effects of External Factors

要因	実験条件	結果
水温変化	水温 10°Cから 20°C／時間の割合で上昇させる。	温度上昇に比例して心拍数は上昇 10°C変化：10 回/分→75 回/分 20°C以上で心拍数安定
溶存酸素濃度	飽和度 10%まで窒素ガスで減少させる	溶存酸素減少により心拍数は徐々に変化 飽和度 100%→25%： 45 回/分→35 回/分
騒音	3 秒で 5 回の金属音	1 分以上、心拍数への影響は続かない
振動	測定槽を強く振動させる	騒音より短時間で心拍数への影響が消える
昼夜	12 時間の明暗を与える	ほとんど心拍数に影響しない

以上の実験結果より、ウナギセンサーに具備すべき条件として、

①水温は、20°C以上に確保されるようとする

②酸素は生存させるために曝気する

また、騒音、振動の影響をカットするには、ウナギの心拍数において異常検出の初期 30 秒～60 秒の値を読み取らず、1 分以降の値を対象とすることにより、可能であることがわかった。

また、ウナギの特性として、38°C以上に水温が上昇すると、心拍が急激に減少する。現実には起こらないと考えられるが、40°C近い水温ではセンサーとして機能できないことがわかった。

### 3-5 有害物質の実験

#### 1) 有害物質

実験に用いた有害物質は平成 5 年度に定め

られた人の健康に係わる環境基準 23 項目を中心を選定した。表-3 に実験に用いた有害物質を示す。

表-3 実験に用いた有害物質  
Table 3 Noxious Matter Used in Testing

有害物質	有害物質
残留塩素	六価クロム
シアノ化物イオン	セレン
カドミウム	ヒ素
酸性水、塩基性水	鉛
トリクロロエチレン	フッ素
四塩化炭素	1,2-ジクロロエタン
テトラクロロエチレン	1,1-ジクロロエチレン
1,1,1-トリクロロエタン	ジクロロメタン
シマジン	ベンゼン
チラウム	1,3-ジクロロプロペン
チオベンカルブ	

工場等から有害物質が流出すると、その流下過程において有害物質は希釈される。

そこで、流下過程の稀釈を考え、今回の実験では有害物質の濃度として、原液の濃度に対して希釈率を変えて実験濃度を調整した。そしてウナギの心拍数変化を示す濃度を反応濃度とした。

## 2) 実験結果

これらの有害物質を含んだ水をウナギセンターに流し、その反応を実験により求めた。有害物質に対して、ウナギの心拍数の変化は異なる。変化を大別すると心拍数が減少・下降するものが21物質中12物質と60%である。心拍数が増加・上昇するのは4物質の20%で

ある。他に、心拍数が激変する、即ち、異常に増減を繰り返したり、また、無反応なものもあった。無反応なものは、農薬のシマジンであり、これは植物の光合成に影響を与えるが、魚には影響を与えないためである。しかし、甲殻類には毒性がある。このように魚には毒性がなく、甲殻類に毒性を持つ農薬については、今後検討していく必要がある。

これらの状況を合わせて、得られた結果を表-4に示す。また、心拍数の変化の例として、図-9には増加の場合（トリクロロエチレン）、図-10には減少の場合（ヒ素）を、それぞれ示す。

表-4 有害物質を用いた実験結果  
Table 4 Results of Testing with Noxious Matter

心拍数変化の区分	有害物質名	反応濃度(ppm)	結果
正常	有害物質無し	—	40~50拍/分
減少、下降	残留塩素	0.1	38拍/分以下
	シアノ化物イオン	0.4	20拍/分以下
	カドミウム	10	16拍/分以下
	酸性水・塩基性水	pH4、pH10	pH4:15拍/分以下 pH10:20拍/分以下
	テトラクロロエチレン	10	24拍/分以下
	チラウム	6	25拍/分以下
	チオベンカルブ	20	10拍/分程度減少を示すが、すぐ回復
	六価クロム	920	28拍/分以下
	ヒ素	20	7拍/分以下
	鉛	472	8拍/分以下
	フッ素	360	21拍/分以下
上昇	トリクロロエチレン	1	90拍/以上
	1,2-ジクロロエタン	8,820	100拍/分以上
	1,1-ジクロロエチレン	250	100拍/分以上
	1,3-ジクロロプロペン	2,500	100拍/分以上
激変	セレン	727	0~100拍/分
	ベンゼン	1.6	100拍/分以上にすぐ変化
	ジクロロメタン	6,500	計測不可
傾向無し	シマジン	10まで	
	1,1,1-トリクロロエタン	60	上昇、下降と個体差有り
	四塩化炭素		

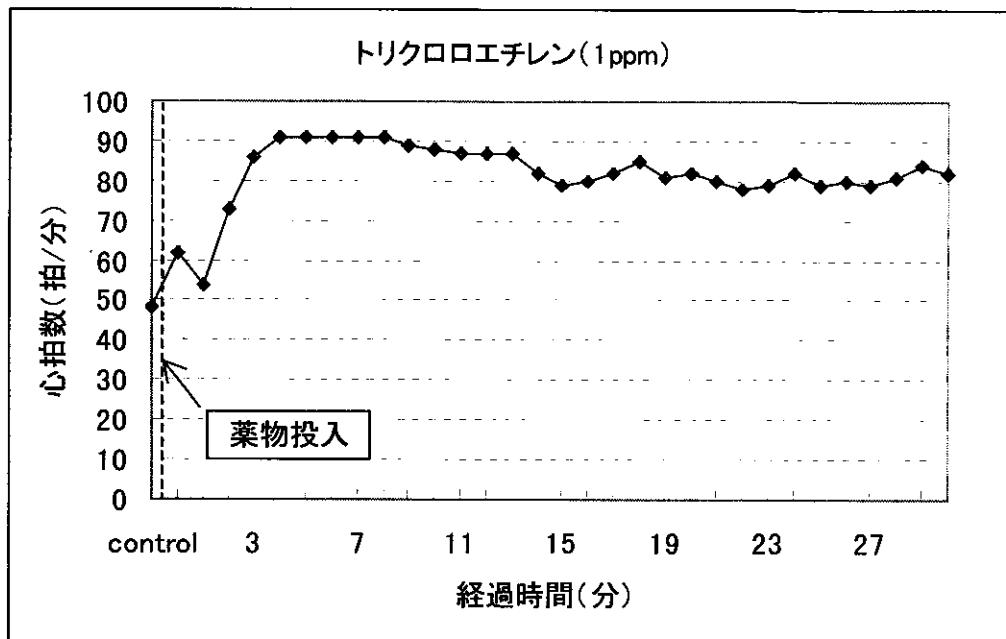


図-9 ウナギの心拍数が増加する例（トリクロロエチレン）  
Fig. 9 An Eel Heartbeat Increase Triggered by Trichloroethylene

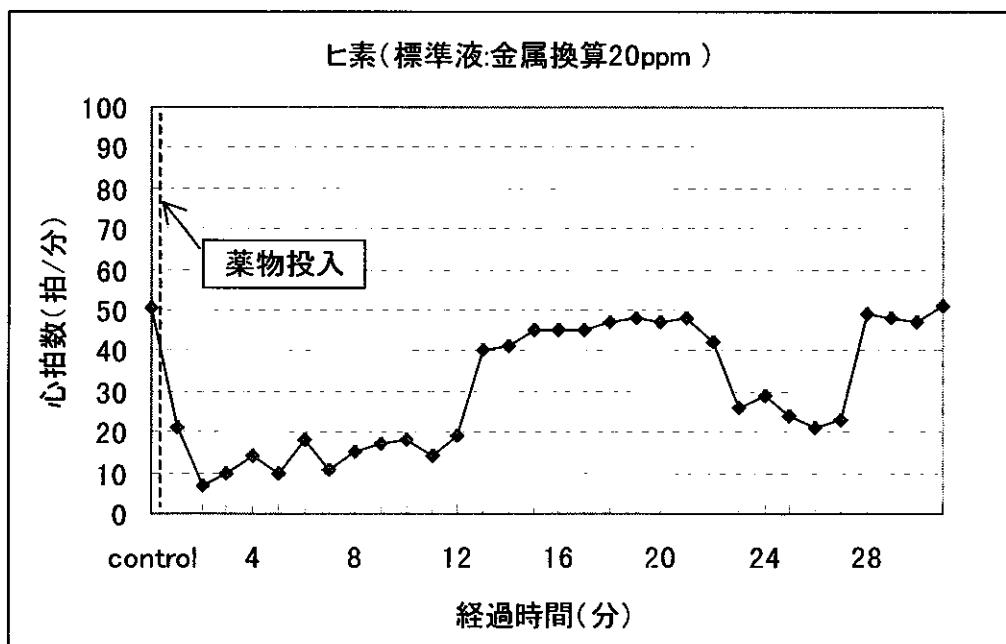


図-10 ウナギの心拍数が減少する例（ヒ素）  
Fig.10 An Eel Heartbeat Increase Triggered by Arsenic

以上の実験結果より、ウナギの正常な心拍数は、40~50 拍／分である事がわかった。また、有害物質が存在し、心拍数が減少・下降する場合は 25 拍／分以下となり、逆に心拍数

が増加・上昇する場合は 65 拍／分となる。よって、異常な場合を以下とする。  
 ・減少・下降—25 拍／分以下  
 ・増加・上昇—65 拍／分以上

### 3-6 ウナギの検定

#### 1) 検定の必要性

ウナギによる有害物質の検知は、使用するウナギの個体数を増やせば精度を向上させることが可能である。しかし、複数のウナギを用いることは、

- ・装置が大きくなる
- ・装置が複雑になる
- ・装置が高価になる
- ・ウナギの管理が面倒になる
- ・ウナギの個体差が大きく、正常の設定が困難である

等の問題があり、可能な限り1匹のウナギの使用が望ましい。

そこで、センサーとしての信頼性を維持し、ウナギの心機能における個体差の問題を解決するためには、事前にウナギの心機能を検査し、センサーに適したウナギを選別する必要がある。

#### 2) 検定実験

ここでは、センサー用のウナギを選別するための実験を行い、ウナギの検定条件を決定した。検討した条件は以下の4条件である。

- ①通常時のウナギの心拍数と変化パターン
- ②通常刺激（音、振動）
- ③心拍数が減少する毒物検査（残留塩素、シアンイオン）
- ④心拍数が増加する毒物検査（1,1,2-トリクロロエタン、トリクロロエチレン）

#### 3) 検定方法

実験により求めたセンサー用ウナギの検定手順を以下に示す。

##### ①ウナギのサイズ

胴回り：7～8cm

体重：120～150g

##### ②検定水温

25°C

##### ③正常時の心拍

セットから24時間 1時間の平均心拍数：40拍／分～50拍／分

##### ④心拍数が減少する毒物検査

・残留塩素：10ppm

心拍数の減少→平常時平均の50%以上かつ、15分間以上の持続

・シアンイオン：1ppm 特別に必要な場合のみ、変化は残留塩素と同じ

##### ⑤清水を流し、12時間以上の快復をはかる

##### ⑥心拍数が増大する毒物検査

・トリクロロエチレン：10ppm

心拍数の増加→平常時平均の40%以上かつ、6分間以上の持続

・1,1,2-トリクロロエタン：100ppm 特別に必要な場合のみ、変化は残留塩素と同じ

上記の検定に合格したウナギをセンサーに用いることで、ウナギ1匹で異常時の検知が可能である。

なお、今回の実験ではおよそ3ヶ月毎の交換でセンサーとして機能することがわかった。

## 4. ウナギセンサーの基本諸元

以上の実験により求めたウナギセンサーの基本諸元を以下に示す。

①流速：3cm/sec

②流量：流速3cm/sec になるように調整

③測定槽の大きさ：直径3cmの円筒

④水温：20°Cに調整

⑤溶存酸素濃度：バッキにより測定槽前で飽和させる

##### ⑥ウナギの仕様

・胴回り：7～8cm

・体重：120～150g

・正常平均心拍数：40～50拍／分

##### ⑦採水の設定

・異常心拍数：25拍／分以下及び65拍／分以上

・採水時間及び警報：異常検知後 60秒後

## 5. 今後の課題

ウナギの心拍数の変化を外部電極により検知することは実験により確認することができ

た。その結果を用いて、前項ではウナギセンサーの基本諸元を設定した。

しかし、心拍数のみでは有害物質に対する応答が、

- ・小さすぎて検知できない
- ・心拍数の変化に出ない有害物質の存在
- ・心拍数の変化に出ない低濃度

であるため、現在のウナギセンサーでは有害物質を検出できない場合がある。そこで、より精度を高める必要がある。

その方法として、心拍数の変化ではなく、心臓の活動の変化を利用できる。これは、有害物質が流入したときに、ウナギの心拍数の変化としては捉えられなくとも、心臓の活動が変化する。即ち弱く拍動したり、強く拍動したりする状況を心拍電位の変化として捉える方法であり、心拍数の変化よりも感度が高い。

この現象は、実験中の心電図からその可能性が示唆されていた。

今後は、心拍の電位変化を取り入れたより精度の高いウナギセンサーについて研究する予定である。

また、今回の実験で判明した魚には毒性を及ぼさないが、甲殻類には毒性を及ぼす有害物質の検知方法について検討していく予定である。さらに、今回行ってきた実験では、1種類の有害物質に対するウナギセンサーの有効性だけではなく、複数の有害物質に対する（金属と有機化合物、心拍を現象させるものと増加させるもの等）場合についても、検討を行っていく予定である。

## 6. 謝辞

本研究にあたっては、基本的な考え方から実験方法等について、広島大学 難波 憲二教授（生物生産学部 水族生理研究室）にご指導をいただいた。ここに謹んで感謝の意を表します。