

うなぎセンサーによる 水質管理装置の開発

リバーフロント研究所長 小池 達男
パシフィックコンサルタンツ株式会社 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 秋山 仁

1 はじめに

現在、有害物質に関する水質基準では「人の健康の保護に関する環境基準」により23項目が定められている。これらの有害物質には重金属、農薬、化学合成物質等が含まれている。しかし、現在様々な分野で利用されている全ての有害物質が網羅されているわけではない。

有害物質が水域に流出してくるときは、その発生が不特定な場所や時間であるため、連続監視が望ましい。しかし、連続観測が可能なセンサーは現在のところシアンシカない状況であるため、また、センサーができたとしても23種類のセンサーを用いて連続監視することは非現実的である。

そこで、個々の有害物質は流出時に特定できないが、流出してきたことを速やかに検知するためには、生物センサーが適している。水質管理を目的とした生物センサーには、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。生理反応の内、鰓蓋運動よりも心拍数変化の方が水質変化に敏感であることがわかっている。この心拍数変化を捉えるためには、魚の体内に電極を埋め込む方法が検討されてきた。しかし、この方法では手術のために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、実際には適用できない。

この問題を解決するためには、魚の体外から心拍による電位を測定して、心拍数の変化を捉えればよい。ただし、今まで検討されてきた鯉、鮒、鮎は電極を埋め込まなくては電位を捉えられず、もっと大きな心拍電位を発生できる魚が必要である。そこで、電気ウナギのように元々大きな心拍電位を発生できる魚として、ウナギを選定した。

生物センサーとしてのウナギの利点は、以下の点で水質管理としての適正、維持管理が優れているためである。

- ・心拍発生電位が大きく、外部電極で捉えられる
- ・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、比較的容易に入手可能かつ安価である

本研究では、有害物質を検知するウナギを用いた生物センサーにより水質を連続自動観測するための装置を開発し、その有効性を確認した。

2 ウナギセンサーによる水質管理のシステム

ウナギセンサーを用いて連続水質監視を実施する場合のシステムの概略を以下に示す。

まず、ウナギセンサーにより有害物質の流下が検知される。直ちに、取水ポンプが稼働して採水がなされ、有害物質の特定分析に供される。それと同時に、電話回線等を通じて通報がなされる。通報により、下流にある工場や浄水場などの取水を行っているところは取水を停止する等の対応を速やかにとることができる。また、事故調査が速やかに実施されることになる。

採水された水は分析室に持ち帰られ、毒性解析手順に基づいて、対象水に含まれる有害物質の種類と濃度が特定される。

事前にウナギセンサー設置点より上流にある工場等の分布と使用物質を把握しておけば、毒性解析の結果と合わせ、速やかに有害物質を流出させた機関を特定し、警告を発することが可能となる。よって、有害物質の流出の再発防止に非常に有効である。

この一連の流れを図-1に示す。

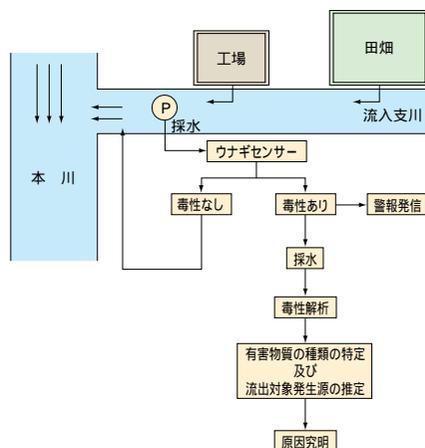


図-1 ウナギセンサーによる水質管理のシステム

3 .ウナギセンサーによる水質管理装置

今回製作した水質管理装置は、実際に現地に設置できるものである。この装置を用いて、有害物質の検知実験を実施した。実験については、次の項でのべ、ここではウナギセンサーを用いた水質監視装置について述べる。

3 - 1 ・ウナギセンサーの構成

今回作製したウナギセンサーの主構成を図 - 2 に示す。

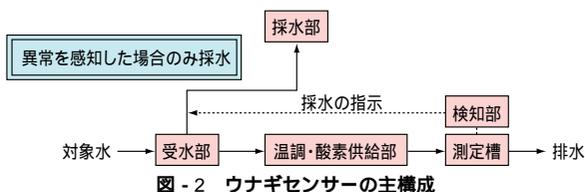


図 - 2 ウナギセンサーの主構成

ウナギを測定槽(図 - 3 参照)に入れてセットし、検知部を稼働させて心拍数の計測が行われる。ある範囲に検知部の数値を設定して、その範囲を超える場合には異常とする。すなわち、有害物質の流下と見なし、取水ポンプが稼働し、採水されることになる。

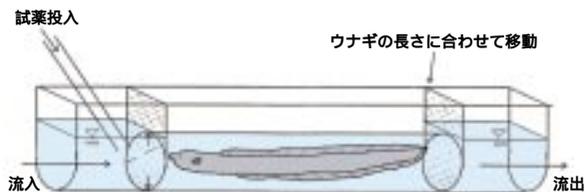


図 - 3 ウナギセンサーの測定槽の概略図

3 - 2 測定槽

測定槽はウナギを設置して心拍数を計測する心臓部である。そのため、装置の中で最重要部分である。今回の装置開発に当たり、この測定槽でウナギを設置して安定的に心拍数を計測できるために以下の条件を検討した。

- 糞やゴミが溜まらないこと
- ウナギが泳がないこと
- 測定槽にウナギが接触して動かないこと
- ウナギが反転したり、飛び出さないこと
- ウナギに十分な酸素を供給すること

～ は流量と流速に関係し、～ はウナギと槽の関係(ウナギの大きさ、槽の大きさ・形状)、～ 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 - 3 に示した測定槽を用いて実験を行った(実際の様子を図 - 4 に示す)。ウナギを入れる部分は3cm径の円筒である。



図 - 4 ウナギセンサーの測定槽の写真

実際にウナギを測定槽に設置して、上述した ～ に関して実験を実施し、以下の条件を決定した。

- ・流速(、 、 に関係)
3cm/sec
- ・流量(、 、 に関係)
ウナギの胴回りに合わせる。
流速3cm/secになるように調整する。
- ・ウナギの胴回り(、 に関係)
3cm槽で胴回り7～8cm

3 - 3 ウナギセンサーを用いた水質管理装置の仕様

今回作製した装置の仕様を表 - 1 に示す。また、装置の外観を図 - 5 に示す。

4 .ウナギセンサーによる有害物質検知実験

4 - 1 外的要因による影響把握実験

水質管理装置を実際に設置した場合には、場所によっては、自動車による騒音や振動、また、流下水の水温変化等の外的要因による擾乱が必ず存在する。そのため、この外的擾乱がウナギセンサーにどのような影響を与えるかを実験により確認した。

想定した外的要因は以下の5つである。ただし、溶存酸

表 - 1 装置の仕様

項目	内容
サイズ	全体:L1300×W650×H1650mm [※] (キャスター部分を含む) 測定槽:L900×W100×H100mm [※] (内寸)1槽 採水容量:10 $\frac{1}{2}$ ℓ×1個
重量	装置重量:400kg 運転重量:480kg(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: 1 \times (50Hz)~14(60Hz)ℓ/min
給水ポンプ	最大流量:15(50Hz)~17(60Hz)ℓ/min
使用電源	ヒーター電源:200V、20A 操作電源:100V、10A



図 - 5 ウナギセンサーの全体写真

素(DO)はDOセンサーにより監視可能であり対処できるが、ウナギにどのような影響を与えるかを確認するために選択した。

水温変化 DO 騒音 振動 昼夜の変化
実験結果を表 - 2に示す。

以上の結果より、ウナギセンサーに具備すべき条件が把握できた。

- 1) 水温: 20 以上に確保する
- 2) 生きさせるためにバッキによりDOを供給する

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ける異常検出初期30~60秒の数値を読みとらず、1分以降の数値を対象にすることで対応可能であることが判明した。

表 - 2 外的要因による影響実験結果

要因	実験条件	内容
水温変化	水温 10 から 20 / 時間の割合で上昇 10回/分 75回/分 20 以上で心拍数安定	温度上昇に比例して心拍数は上昇 10 変化: 10回/分 75回/分 20 以上で心拍数安定
DO	飽和度 10 %まで窒素ガスで減少	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
昼夜の変化	12時間の明暗を与える	ほとんど心拍数に影響しない

4 - 2 有害物質の検知実験

人の健康に係わる環境基準23項目を中心に以下に示した実験に供した有害物質を選定した。

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

工場等から有害物質が流出するその流下過程で希釈率が上昇しながら流下することとなる。

そこで今回の実験では、有害物質の濃度を希釈率を変えて調整し、実験濃度を設定した。

これらの有害物質を含んだ水をウナギセンサーに流し、その反応を実験により求めた。得られた実験結果をとりまとめて表 - 3に示す。

有害物質の種類で、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%。心拍数が増加・上昇するのは4物質の20%。

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。

心拍数の変化の例を図 - 6 に増加、図 - 7 に減少の場合を示す。

以上より、ウナギの正常な心拍数及び有害物質が存在し、心拍数が減少・下降する場合と心拍数が増加・上昇する場合の結果はそれぞれ以下となることがわかった。

- ・正常 - 40～50拍/分
- ・減少・下降 - 25拍/分以下
- ・増加・上昇 - 65拍/分以上

表 - 3 有害物質検知実験

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	-	10～50拍/分
減少、 下降	残留塩素	0.1	38拍/分以下
	シアン化物イオン	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	20拍/分以上
	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		

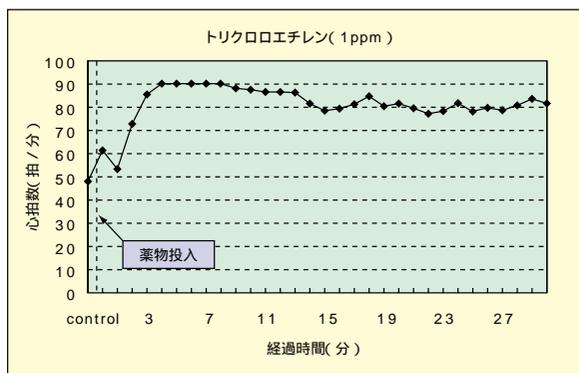


図 - 6 心拍数の増加の例(トリクロロエチレン)

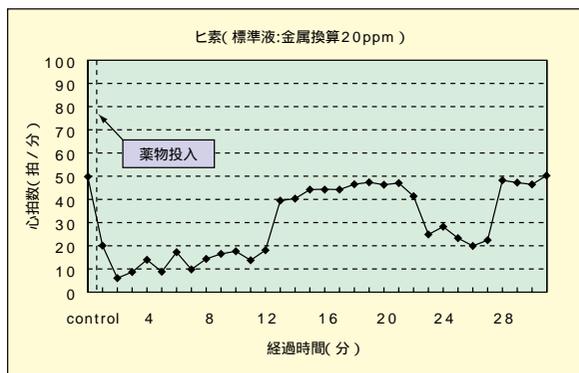


図 - 7 心拍数の減少の例(ヒ素)

5. ウナギの検定

5 - 1 ウナギの検定の必要性

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：大きくなる、複雑になる、高価になる
- ・ウナギの管理：面倒になる、個体差が大きく正常の設定が困難

等の問題があり、可能な限りウナギ1匹の使用が良い。

よって、センサーとしての信頼性を維持し、ウナギの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。

そこで、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。

通常時のウナギの心拍数と変化パターン

通常刺激(音、振動)

心拍数が減少する毒物検査(残留塩素、シアンイオン)

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)

5 - 2 検定手順及び方法

ウナギの検定手順と方法を以下のように決定した。下記の検定に合格したウナギをセンサーに用いることで、1匹のウナギでセンサーの稼働が可能である。

ウナギのサイズ：胴回り-7~8cm、体重-120~150g

検定水温：25

平常時の心拍

セットから24時間 1時間の平均心拍数：40拍/分~50拍/分

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

清水を流し、12時間以上の快復をはかる

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、変化はトリクロロエチレンと同じ

6 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緒元を設定した。

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していく予定である。

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、心拍を減少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。

7 謝辞

本研究で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)にご指導を頂きました。ここに謹んで感謝の意を表します。

