

<特集>

環境モニタリングと生物活動のシミュレーションとしての脂質膜センサ(エコセンサ)

石森 義雄

株式会社 東芝 研究開発センター 機能材料ラボラトリー
 (〒212-8582 川崎市幸区小向東芝町1 E-mail: yoshio.ishimori@toshiba.co.jp)

概要

最近、生活の場における安心・安全が益々求められるようになってきた。一人一人の健康や防犯などに加えて、身近な空気や水などの安全に対する関心が強くなっているように思われる。このような流れの中で、環境モニタリングの重要性が益々高まっている。本稿では、環境モニタリングと細胞膜への環境汚染物質の相互作用を模倣した脂質膜センサ(エコセンサ)の開発について、現状と今後の動向を概説する。

キーワード: 環境モニタリング, 脂質膜, 環境汚染物質, エコセンサ, エコチップ

1. はじめに

水道の蛇口を開いたときにジャーと出てくる水、皆さんは何の躊躇もなくコップに受けて飲んでおられると思う。公共水道なのだから安全である、という意識があるからだろうが、この安心感を醸し出すために様々な環境モニタリング技術が使われていることをどれだけの方々がご存知だろうか？

ところで近年、いろいろな環境汚染物質が河川や井戸水に含まれていることが明らかになり、健康への被害も無視できない状態にある地域も出てきた。例えば、一昔前まではこの電子工場でも日常的に基板洗浄などに使われていたトリクレン(トリクロロエチレン)は、長期摂取により肝臓障害をもたらすことが分かり、使用が禁止された溶剤であるが、土壌から地下水に漏出して代表的な地下水汚染物質となっているのである。我が国だけでも約24万個所の汚染サイトがあると言われている。もし環境汚染物質のモニタリングが広く実施されていれば、これだけ多くのサイトが汚染されることはなかったかもしれない。

ここでは、まず環境モニタリングの現状を概説し、併せて筆者らが開発を進めているエコセンサ(環境汚染物質計測用センサ)の原理と現状について簡単にご紹介したい。最後に、今後の環境モニタリングの動向にも触れたいと思う。

2. 環境モニタリングとは？

環境モニタリングとは、一言で言えば、「いろいろなセンサを使って対象となるいくつかの環境因子を連続的に測定・監視することである」と言えるだろう。地下水などのモニタリングの場合、大きく分けて、温度や水量などの物理量のモニタリングと、pHや各種イオンなどの化学量モニタリングの2つに分類できる。物理量モニタリングは、現在でも優れた特性を持つものが開発されているが、化学量はイオンセンサ(金属イオンや塩素など一部の陰イオンの測定に使われる)のよう

なデバイスが使える項目に限られているのである。前述のトリクレンのような環境汚染物質は、ガスクロマトグラフィーなどの精密分析機器を用いて、間歇的に測定されているのが現状である。土壌・地下水の化学分析の現状について、Table 1に簡単にまとめた。

Table 1 土壌・地下水の化学分析の現状

環境因子	精密分析器	ポータブル分析機器	センサ方式(モニタリング)
溶存酸素	○	○	○
pH	○	○	○
電気伝導度	○	○	○
BOD (生物化学的酸素要求量)	○	×	○
重金属	○	○	×
トリクレンなど	○	○	×
農薬	○	×	×
環境ホルモン類	○	×	×

○: 実用化済み
 ×: 実用化されていない

3. エコセンサとは？¹⁾

上記の通り、トリクレンなどの環境汚染物質を連続的に測定できるセンサは未だ開発されていない。そこで筆者らは、地下水や河川水などでの環境汚染物質を測定(検出)できるセンサ(便宜的に「エコセンサ」と名付けた)の開発に着手した。では、どうしたらトリクレンなどの有機性環境汚染物質を測定できるのだろうか？筆者らの仮説が導出された経緯について Fig.1 で簡単に説明する。

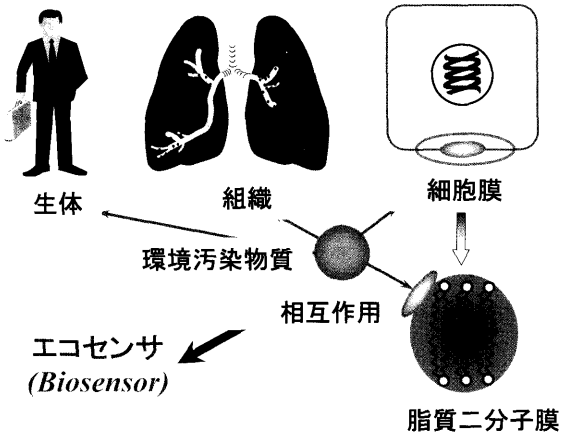


Fig. 1 エコセンサの基本概念

すなわち、トリクロレンなどの有機性の環境汚染物質は、最終的にヒトの細胞に対して影響を及ぼすと考えられる。したがって、細胞を覆っている細胞膜(脂質二分子膜)と何らかの相互作用が存在すると仮定できるだろう(筆者らの仮説)。そこで、人工的に作製した脂質膜をセンサ素子とした環境汚染物質の検出が可能なのではないか、と思ったのである。

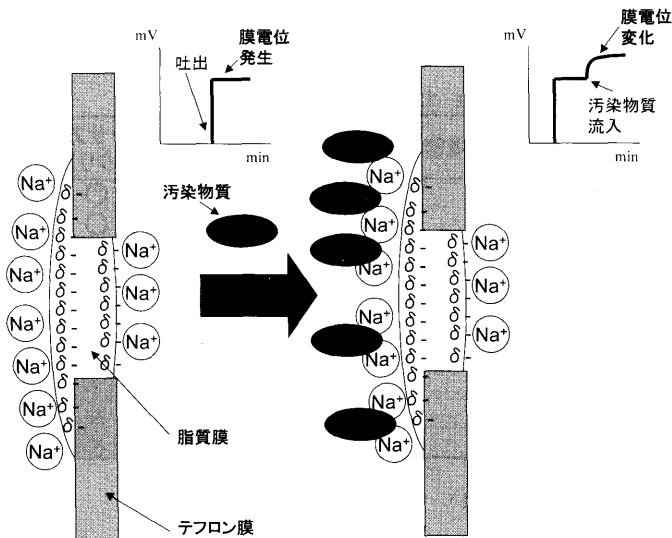


Fig. 2 エコセンサの検出原理図

例えば、テフロン膜(厚さ:25 μ m程度)に開けた小孔(直径:0.1mm~0.2mm)内で脂質膜が形成されると、Fig. 2(左側)に示すように膜電位が発生する。これは、形成された脂質膜が非対称構造を取るからであると考えている。このような状態で、膜の片側だけに環境汚染物質を含む試料液が来ると、環境汚染物質が脂質膜に吸着されるために膜電位が変化する(脂質膜の表面電位の変化および膜構造の変化に起因する荷電容量の変化)。

この膜電位の変化量は、用いる脂質の種類・環境汚染物質の濃度・種類などによって変化してくると思われる。そこで予め、膜電位変化量と環境汚染物質/脂質膜の種類などを使って膜電位応答のデータベースを作成し、実際に得られたデータと照合することで、汚染物質の種類と大まかな濃度を知ることができると考えている。因みに、このような手法

で環境汚染物質を測定する方法は、筆者らの特許技術である。

一例としてトリクロレンなどの揮発性有機塩素化合物(VOC)をエコセンサで測定したときの結果をFig. 3に示す。脂質膜としては、モノオレインという模擬脂質とコレステロールを混合したものを用いた。同じ脂質組成でありながら、環境汚染物質が異なると膜電位の変化の仕方が変わってくるのが分かる。これは、VOCの種類が異なると脂質膜への溶解性が異なることから推定できる結果である。因みに脂質膜には殆ど溶解できないグルコースのような水溶性物質では、膜電位の変化は観測されないのである。

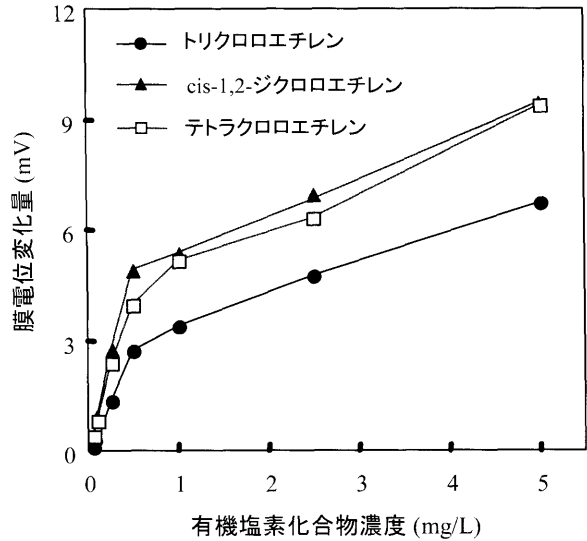


Fig. 3 エコセンサによるVOCの測定例

VOC以外の汚染物質として、数種類の農薬を測定した例をFig. 4に示す。使用した脂質は上記VOCの場合と同一である。農薬の種類を変えても、膜電位変化に大きな差異は認められなかった。

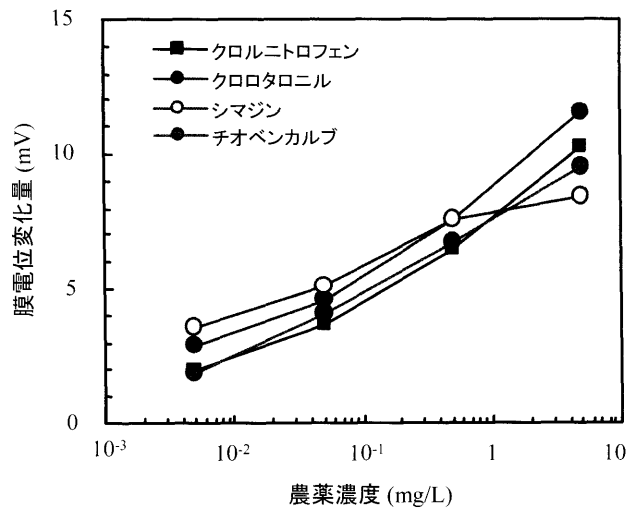


Fig. 4 各種農薬の測定結果

しかし脂質膜は、言わば水中にあるシャボン玉の膜のような構造をしているため、振動や静電気などによって簡単に壊れてしまう。このままでは、安定なセンサを開発できないと思われた。

そこで筆者らは、脂質膜が壊れるとすぐに自動的に再生する機構を考え出した。これは、水中インクジェットのようなもので、脂質膜が壊れた(膜電位が消失した)ときに吐出ポンプを使って脂質液をテフロン膜の小孔に供給するデバイスである。Fig. 5 に開発したエコセンサデバイスの写真を示す。

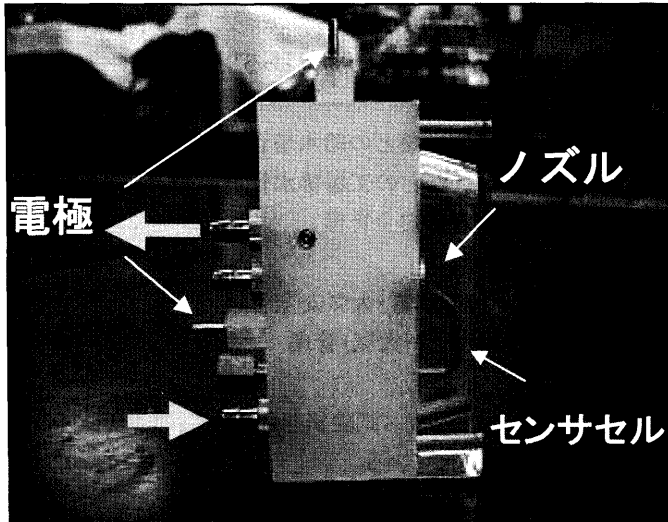


Fig. 5 エコセンサデバイスの写真

写真の右側は試料液が流れて行く透明なアクリルセルである。セル内での流れの様子を観察するために透明なセルを使用した。写真の左下側から導入された試料液はセンサセル内を満ち、ノズルの少し上の穴から排出される。一方ノズルの先端近傍には、小孔を開けたテフロン膜がセットされ(写真では見えないが)、この小孔内に吐出ポンプから脂質液が供給されるのである(1回に1 μ L程度)。写真で白く見える部分には、2本の参照(銀/塩化銀)電極が装着され、基準液(環境汚染物質を含まない食塩水)と試料液との間の膜電位を測定できるようになっている。このセンサデバイスやコントローラ及び吐出ポンプなどを収めた装置の概観写真をFig. 6に示す。正面のパネル下部にコントローラやポンプなどが収められている。実際の大きさは、底面が50cm四方、高さが120cm程度であり、センサデバイスが高さ10cm未満であるのと比較すると、まだかなり大きな筐体である。現在筆者らは、脂質膜の安定性を向上させる検討を継続しており、Fig. 7のような細孔構造を持つ薄膜の適用を考えている。細孔構造部分に脂質膜を形成するのである。

4. 環境モニタリングの将来展望

環境モニタリングの近い将来像では、現在開発され実用化されているいくつかのセンサ類を効果的に組み合わせた複合型モニタリングシステムが使われることになると思われる。システム全体が小型化され、屋外環境での使用を意識した耐久性に富んだものになるだろう。個別の環境汚染物質(例えばトリクレン)に対応したセンサシステムも実用化される可能性もあると思う(上記エコセンサを含めて)。

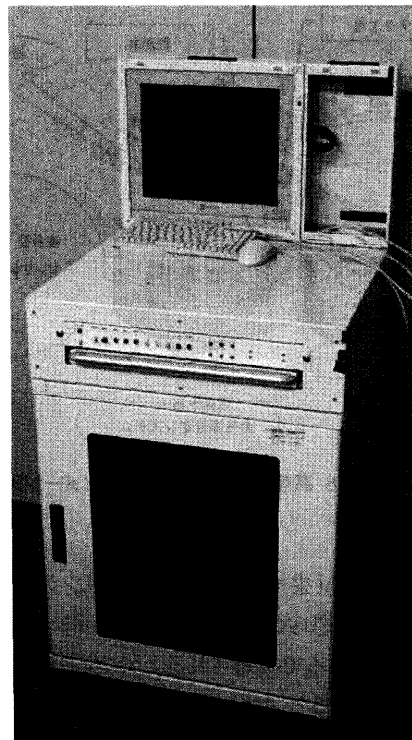


Fig. 6 エコセンサシステム概観

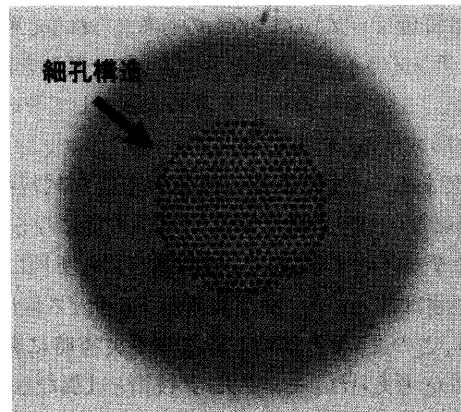


Fig. 7 細孔構造を持つ薄膜の写真

これらのセンサシステムからの情報を基に、総合的に汚染状態を把握するための環境管理センターの機能が重要になってくることも予想される。すなわち、複数のセンサを一箇所に設置し、一つのサイトでいくつものモニタリング箇所を選定して、サイト全体の環境監視を実施して行くようになると思われる。汚染状況の予測や汚染の原因場所の特定なども可能になるかもしれません。このような高度環境モニタリングのイメージ図を次ページのFig. 8に示す²⁾。

このような環境モニタリングが可能になれば、生産施設やその近傍における環境リスクを著しく低減できるようになると考えられる。一方エコセンサのように、ある程度環境汚染物質の種類が推定できるようなセンサの場合には、緊急時の警報センサとして採用されると思われる。このように近未来の環境モニタリングは、工場などの生産施設を中心に環境リスク低減を意識したものになるのである。

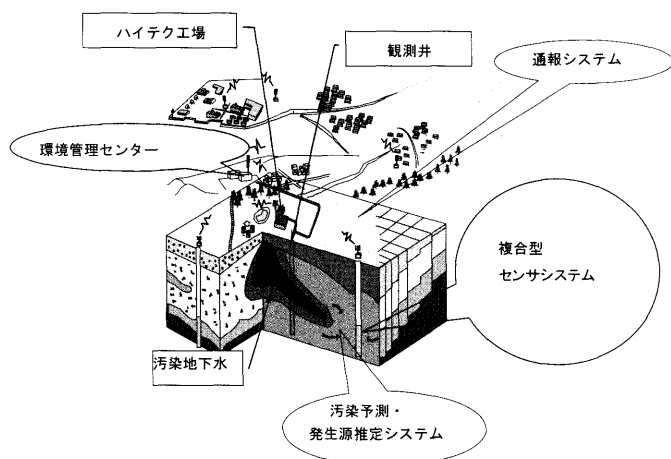


Fig. 8 高度環境モニタリングのイメージ図

ではもう少し先の将来では、環境モニタリングはどのようになるのでしょうか？恐らくモニタリングのサイトが拡大し、より一般環境に近いところで実施されるようになると思われる。それに伴い、使用されるセンサシステムの大きさやコストは益々削減されて行くことだろう。こうした小型化や低価格化の究極的な姿が使い捨てのチップタイプのセンサではないかと思っている。例えば、前述のエコセンサをチップタイプにしたエコチップ(脂質膜チップ)のようなものも考えられると思う。Fig. 9 にエコチップのイメージ図を示す。小さな窪みを作った基板を用意し、この窪みの中に基準液を満たしてその表面に脂質膜を形成する。個々の窪みが一つのエコセンサになっているのである。一度に多数の種類の脂質が試料液と反応できるようになり、より正確な物質同定が可能になると考えている。またチップ化することで、持ち運びにも便利になる(チップの大きさは数 cm 角、検出装置が B5 サイズ程度を目指している)。このようなチップは緊急時や災害時に非常に役に立つものと考えられ、モニタリング技術とは異なるが、環境リスクの評価には重要な役割を果たす可能性があると思っている。

上の検討を行っており、実用化を目指して開発を継続している。更に並行して、上記エコチップの可能性についても検討を行っている。この場合、一度にチップからの情報を取得できるというメリットから、膜電位応答色素を適用した蛍光検出方式を採用したいと思っている。エコチップは、安心・安全な生活環境を保障する一つの標準ツールになるのではないかと期待しているのである。なおエコチップに期待される応用分野としては、以下のようなものがあると思われる。

- ・ビル・マンションなどの給水塔管理
- ・化学・食品会社などの工場排水管理
- ・簡易井戸水の水質安全管理
- ・化学テロ対策向け
- ・災害時・緊急時の水質・大気安全管理
- ・家庭での安全(水質・大気)管理

環境リスク評価のリトマス試験紙を目指して、エコチップの開発を進めたいと思っている。

<謝辞>本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成金「生産施設における有害化学物質漏出モニタリングシステムの研究開発」の一環として行われた。この場を借りて、感謝の意を表したい。

[参考文献]

- 1) Y. Ishimori, K. Kawano, T. Shinozaki, M. Mouri, T. Kase, E. Tamiya, and M. Ishizuka, "Development of an eco-sensor for the continuous monitoring of environmental volatile organic chlorinated compounds", *Measurement Science and Technology*, 13, (2002): 1786-1792.
- 2) 加瀬隆雄, ほか. 生産地域における高度環境監視システムの研究. 平成 10 年度 IMS 研究成果講演論文集. p.115-118. 1999.

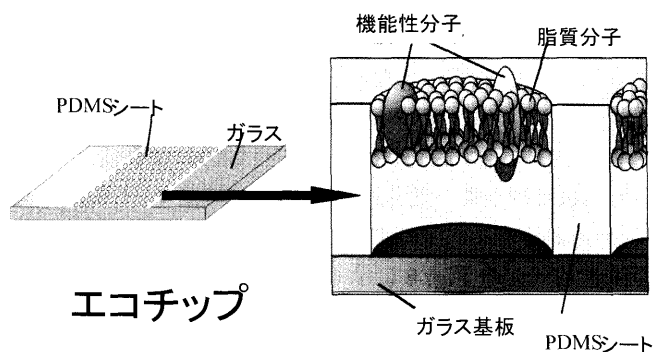


Fig. 9 エコチップのイメージ図

5. おわりに

環境モニタリング技術について現状と将来展望を略述し、併せて、筆者らが開発を進めているエコセンサについてご紹介させていただいた。筆者らは現在もエコセンサの安定性向