

水生無脊椎動物における内分泌攪乱

マイケル H. デプレッジ

英国 プリマス大学プリマス環境研究センター

皆さん、おはようございます。まず最初に、この場に立つ機会を下さったことを環境大臣にお礼申し上げます。

このシンポジウムはこれまでのところ、脊索動物門の脊椎動物という生物の一つの門を主に扱ってきました。本日私は、人工化学物質、特に内分泌攪乱化学物質が脊索動物門以外の 18 の動物門、すなわち無脊椎動物に及ぼす影響について少しお話しします。

本題に入る前に、ひとつ問い直してみたいと思います。内分泌攪乱現象がどうしてそんなに特別なのでしょうか？これに対しては、何通りかの答えをすることができるのではないかと思います。

その第 1 として、内分泌攪乱現象の分野が発展しつつあったほんの少し昔においては、内分泌攪乱現象はその他の毒性の閾値未満の濃度で生物に影響を及ぼすから特別なのだ、というふうに考えられていたと思います。内分泌攪乱問題がたいへん大きなものになったのも、そういう懸念があったからです。

第 2 として、内分泌攪乱化学物質はダーウィン適応度を左右する過程に影響を与えると考えられています。そうした過程には、代謝、生殖、子の生存能力、成長速度などがあります。

無脊椎動物を取り上げる際に考慮しておかなければならないことの一つとして次のことがあります。先ほど述べた意見は、無脊椎動物に対しても当てはまるのでしょうか？それとも内分泌攪乱現象に関わっているのは異なる毒性様式なののでしょうか？やはり非常に低い濃度で起こるのでしょうか？私のお話しの中で、そうした点における可能性をいくつか見つけることができればうれしく思います。

何かきちんと整理されているとは考えないでください。そうではなく、私が申し上げたかったのは、内分泌攪乱現象は代謝毒性とか免疫毒性などが見られるようになるよりも低い曝露濃度で起こるらしい、ということです。では、これが無脊椎動物で同様に当てはまるのかを見てみましょう。

大部分の皆さんは無脊椎動物について特に馴染みはないでしょうから、ここで無脊椎動物について少しお話しします。地球上の動物全種の中で 95%が実は無脊椎動物なのです。無脊椎動物は非常に広範囲の門にまたがっています。ここには 18 の門を挙げてありますが、世界中に分布している海綿、イソギンチャク、腔腸動物、サンゴ、種々の蠕虫類、軟体動物、節足動物、特に水圏では甲殻類、種々の蠕虫類、環形動物、ヒトデなどの棘皮動物などです。

こうした生物はすべて、地球の生態系の一員であることを忘れないでください。彼らは生態系の構成に一役かっており、生態系のプロセスである栄養物やエネルギーなどの循環に役割を負っています。彼らは非常に重要な存在なのです。環境中に放出される人工化学物質が、彼らにとってすでに我々が知っているような内容の毒性だけでなく、彼らのホルモン系を密かに乱しているとするならば、明らかにそれは全地球的な意味でも重大事です。

もう一つ、無脊椎動物について忘れていただきたいくないのは、彼らの生化学や生理機能は大変に異なっている、という点です。脊椎動物とまったく異質であることもまれではありません。無脊椎動物におけるホルモンや各種酵素の役割は、同じホルモンや酵素が脊椎動物で持つ役割とはたいへんに異なっているのです。

彼らの生理機能も、やはり大きく異なっています。鰓を持つものもあれば、持たないものもあります。身体中全体に走る消化管をひとつも持たないものもあれば、消化管が盲端になっているものもあります。実に多種多様です。我々が想定する多くのこと、すなわち我々が脊椎動物について知っている多くのことが、無脊椎動物には当てはまらないのです。

ここで無脊椎動物の多様な形態をスライドで少しお見せします。これは、よく話題になる二枚貝です。こちらは甲殻類のカニ。これはウミウシでやはり軟体動物類です。この軟体動物は二枚貝と大きく異なっていることに注目してください。組織が大きく異なっています。これはイソギンチャク…。実に多種多様な無脊椎動物の形態や組織は、いくらでも示すことができます。

昨日のセッションで、人工化学物質すなわち内分泌攪乱化学物質の影響から野生生物を保護するのに役立つ、OECD とその試験システムについての話がありました。

その中に、無脊椎動物を保護する目的の試験システムは現在ありません。多くの試験システムが開発途中にありますが、その中には一般的に、例えば甲殻類用のエビアッセイのようなものが含まれています。しかし明らかに、そうした甲殻類を保護するアッセイ法は、イソギンチャクなど別の生物に起こっていることを予測することにはたいして役に立たないでしょう。このことは、汚染物質の影響から無脊椎動物を保護する全地球的な戦略を開発する際には、必ず留意しておかねばなりません。

無脊椎動物に関して何が重要な問題なのでしょう？そもそも無脊椎動物に内分泌攪乱現象が起こっているという証拠があるのでしょうか？いくつかの門ではそういう証拠が存在することが分かっています。後で、軟体動物について特に取り上げてみようと思います。

すべての門で起こっているのでしょうか？それは分かりません。そのことが分らないのは、さまざまな門の大部分において調べるべきエンドポイントを我々が知らないから、というのが理由の一つです。例えばイソギンチャクの場合、ある群のホルモン系が攪乱されているかどうかを調べるためのエンドポイントとして、我々は何を調べればいいのでしょうか？それについてはまだ明らかになっていません。

もっとも被害を受けやすい門はどれでしょうか？ここでもやはり軟体動物と甲殻類が、水圏汚染のモニターに昔から使われてきたという理由から、注目される傾向があります。しかし、棘皮動物やその他のグループはもっと被害を受けやすいのかもしれないのです。

中でも一番重要な問題として、無脊椎動物における内分泌攪乱現象は生態学的に重大な結果をもたらすのでしょうか？個体群や群落の構成が変化するのでしょうか？生態系のプロセスに影響が及ぶのでしょうか？

それでは、主なグループにおける内分泌攪乱現象について、我々が現時点までに所有している情報全体の概観をざっと眺めてみましょう。

軟体動物における内分泌攪乱現象が最初に注目されたのは、有機スズ化合物の TBT に曝露したカキなどの二枚貝類の研究によるものでした。これは 70 年代後半から 80 年代初期に遡りますが、この防汚塗料によりカキや二枚貝類では稚貝の数が減少しました。つまり、個体数を維持するのに十分な数の幼生を持てなくなったわけで、その幼生にも奇形が多発しました。

これら軟体動物が有機スズのような物質に敏感であった理由としてひとつ考えられるのが、これらの動物が P450 解毒酵素をあまり高い濃度では持っていないという点です。通常ならばトリブチルスズは P450 解毒酵素によってジブチルスズやモノブチルスズに変えられ、排泄されるはずですが。実際、トリブチルスズが高濃度で蓄積すれば、トリブチルスズによる影響が現われてきます。こうした解毒酵素の濃度が低いのです。つまり、軟体動物は特に被害を受けやすい動物群であるということが言えるでしょう。

軟体動物腹足類の広い範囲の種において、有機スズの TBT への曝露によって雌の雄性化(インポセックス)や間性(インターセックス)が生じることは、皆さんご存じでしょう。これは、雌の巻貝に雄の特徴が付加されたものです。

金属、メタロイド類の特にヒ素など、多様な有機汚染物質に曝露した二枚貝類のいろいろな種に卵精巢が形成されたという証拠が、文献、または少なくとも灰色文献に増えつつあります。しかし、これが内分泌攪乱物質の影響であるということを示す確定的な実験は、まだ端緒についたばかりだと思います。この先、まだまだやるべきことがたくさんあります。

これがその実例のカキです。写真があまり良くなくてすみません。これはマガキ属のポルトガルカキの正常なものです。このようにカキ本体が生活する空間があり、殻が見事にごつごつしているのが分ります。これは有機スズに曝露した同じ種のカキです。カキ本体が暮らす空間が非常に小さく、殻が薄くなっています。

これらの研究は 80 年代初期に行われました。そうした研究は全地球規模で行われたことに意義があります。というのも、これは中国南部の様子でこれがカキの貝殻ですが、カキは人間にとって主な食糧源であり、経済的にも重要です。こうした食糧の供給が内分泌攪乱を引き起す防汚塗料によって被害を受けることは、当然大きな問題です。

インポセックスは、雌の腹足類に、雄の特徴が付加されたものです。特に中腹足類に影響を及ぼします。文献を探ってみますと、有機スズ曝露で影響を受けた腹足類が世界で 100 種類以上います。

蓄積される証拠の量は増え続けており、今では、インポセックス現象の主な原因は、雌の巻貝においてテストステロンをエストロゲンに変換する酵素のアロマターゼが有機スズによって抑制され、そのためにテストステロンが蓄積したことであり、それで偽ペニスが形成されたということが多くの人に受け入れられていると思います。

人々の間にはこの考え方が広く行き渡っていますが、真の理由は少し違うと私は思います。ノースカロライナ大学のゲリー・ルブラン氏が著していますが、もっと重要だと思われるメカニズムは、有機スズに曝露した雌の巻貝においてテストステロンのエステル化が減少し、そのために遊離テストステロン濃度が上昇し、変換が影響されたことです。

これら軟体動物腹足類については、有機スズ曝露によって世界中で数が顕著に減少していることが分っています。

この図は、インポセックス現象を示したものの一部です。これが正常の雄巻貝で、ここにペニスと輸精管があります。こちらは有機スズに曝露した雌の巻貝で、機能しないペニスと輸精管起始部があります。これは後期の様子で、やはり雌の巻貝ですが、卵が陰門の入口よりも大きく成長したために、陰門のところで引っかかってしまい、卵は変性し、巻貝は死んでしまいました。

甲殻類に話を移しましょう。室内研究では、蔓脚類が影響を受けることが示されています。カニ、ロブスター、エビなどの十脚類では、脱皮ホルモンのエクジステロンに影響があることが報告されています。また、卵精巣の形成を示唆する報告が一部にあり、日本からも高橋博士の研究で、淡水カニでインターセックス様の徴候があることが報告されています。

性ホルモンへの影響の可能性もありますが、ビテロゲニン誘導のような現象をカニやエビで調べたところ、影響は見つかりませんでした。しかし、ちょっとだけ申し上げると、英国北東部では、海洋の小型の甲殻類である橈脚類ハルパクチクスが、ひどくエストロイド類に汚染された下水において、インターセックス様の徴候を示したことが報告されています。また、端脚類に発生奇形が観察されています。

ここで、多くの無脊椎動物が一生の間に性別を変えることを指摘しておきましょう。雌から雄へ、または雄から雌へ変化します。また、多くの無脊椎動物では、寄生生活で性別が変化します。

こうした現象を見るときに、それが例えば、こうした動物の性腺の組織はいろいろですが、そうした自然な変化ではないことに、絶対的な確信を持っていなければなりません。こうした現象が寄生生活によるものではないという確信が無ければ、人工化学物質がこうした問題の原因であると実際に仮定することはできません。

これは蔓脚類の別の種の第1幼生段階であるノープリウス幼生です。こちらは蔓脚類の第2幼生段階であるキプリス幼生です。

我々の研究室で、これら蔓脚類の幼生を水中に自由浮遊させて曝露実験をしてみました。幼生は通常ならばやがて岩に固着して新しいコロニーを形成するところですが、ノニルフェノールをいろいろな濃度で曝露させたところ、幼生の固着成功率が顕著に減少しました。

最初は、ノニルフェノールの作用で幼生の成長に何かが起こったのだ、これは内分泌攪乱化学物質の影響かもしれないという結論に引き寄せられました。実のところ今では、ノニルフェノールの洗剤としての性質が幼生の岩に固着する能力に影響を及ぼしたというのがほぼ確実だろうと考えています。このように、気を付ける必要があります。

しかし、「キプリス幼生主要タンパク質」というタンパク質についていくつか実験を行ってみました。このタンパク質はビテロゲニンに類似した卵黄タンパク質であり、発生途中の蔓脚類幼生に見られます。この場合も、いろいろな濃度のノニルフェノールに曝露させてみたところ、最初のキプリス段階において(これがコントロール群の値で、こちらがノニルフェノール曝露群の値です)、キプリス幼生主要タンパク質の濃度が有意に増加しましたが、幼生が固着する時期になるまでにキプリス幼生主要タンパク質の濃度は対照群を下回るようになりました。これらは統計的に有意な差がありました。

我々は内分泌攪乱物質の影響が引き起されるのを観察したわけですが、それが何を意味するのか分かりません。

魚類において、ビテロゲニンの測定の重要性についてはすでにお話しがありました。ビテロゲニンはエストロゲン様物質への潜在的な曝露量を示す、すぐれたバイオマーカーです。甲殻類でも血液中に同様にビテロゲ

ニンが存在します。エストロゲン類などの内分泌攪乱化学物質に曝露した甲殻類、特に十脚類でも、ビテロゲニンの誘導が起こるかどうかを調べてみました。

卵巣組織を摘出して、ELISA 技術を開発しました。この ELISA システムは非常に堅牢だと思います。さらに、甲殻類の十脚類をノニルフェノール、ビスフェノールA、有機スズ、その他、エストラジオールなど、非常に広範囲な内分泌攪乱化学物質に曝露させました。実験室環境の下では、雄のカニ、雌のカニともに、ビテロゲニン濃度に対する影響はまったく見られませんでした。この場合でもやはり、脊椎動物といろいろな無脊椎動物間との間に違いあることがはっきり出ています。

別の甲殻類の十脚類であるロブスターの精巣における卵母細胞を報告したものは、私が今まで探した限りでは、この簡略なものが唯一ですが、おそらく皆さんは目にしたことがないかと思います。この簡単な要旨の著者は、この研究者たちですが、彼らの続報を私は見たことがありません。それどころか、甲殻類における卵精巣形成のデータは、他にはまったく見たことがありません。

スウェーデンからの報告に移りましょう。これはサンデリンとエリクソンによる報告です。これはやはり小型の甲殻類である端脚類の正常胚です。スウェーデン沿岸部のパルプ製造工場の排水の近くでこれら端脚類を採取してみると、排水の濃度が比較的低くても、端脚類に卵の死が観察され、胚の多くが、先ほどのスライドでお見せしたものと比べて高度に異常形態であることが分ります。

この論文の著者は、こうした異常形態の胚、通常でない、損傷している胚は、パルプ製造工場の排水に曝露したことによる内分泌攪乱現象の指標として利用可能だと述べています。しかし、これが内分泌攪乱現象であるとの直接的な証拠を我々は持っていませんから、この種のアプローチに対しては警戒心をもってあたらなければならないと、私は思います。これは単に一般的な代謝毒性であったり、遺伝子毒性であったり、それらが組み合わさったものであるかもしれません。

これは端脚類の別の種で、ノニルフェノールに曝露したものです。この個体は対照で、こちらは曝露した個体です。写真の質がちょっと悪いですが、それでも、ノニルフェノールに曝露した雄の端脚類では、対照に比べて触角が大きく伸長していて、底部から発しています。

端脚類のこの種の雄は、生殖周期のある時期において触角が顕著に長く伸びるというのが当たり前です。これは二次性徴で、生殖にこの触角を使います。しかし、興味深いことに、低濃度のノニルフェノールに曝露すると、曝露群の雄の全個体に触角の顕著な伸長がすぐに出現します。これは内分泌攪乱化学物質の作用である可能性もあります。

これは軟体動物、こちらは節足動物の代表である甲殻類です。その他の無脊椎動物門はどのようなのでしょうか？実は、まったく分っておらず、おそらく皆さん全員、非常に気にかけておられるでしょう。我々は、海綿動物、腔腸動物など、ここにお見せしているすべての生物グループにおいて、ホルモン系や内分泌系についてまったく知らないのです。内分泌系のことが分らないのですから、内分泌攪乱現象を特定することなど困難の極です。何をエンドポイントにしたらいいのか、分らないのです。

これらのいろいろな動物門を代表する種の組織に、エストロゲン、テストステロンなどのステロイドホルモンが存在することは検出できています。しかし、それらホルモンの機能的役割の確定はまったく立ち遅れています。こうした動物グループにおいては、これまで不可能だったのです。実際、組織内に存在するアンドロゲンとエストロゲンは、これらの生物の食物に単純に反映するかもしれないということが示唆されています。エストロゲンやテストステロンは、それらを含んでいる別の生物を摂食することによる汚染物質であるかもしれません。もっと詳しい研究が必要なのは明らかです。

しかしヒトデやウニなどの棘皮動物においては、脊椎動物のものと似た機能性ステロイド類が存在する証拠があります。しかし、私と違う意見の方もいるかもしれませんが、私が知る限りでは内分泌攪乱現象が *in situ* で存在する証拠はありません。

後半の話題に移りましょう。内分泌攪乱現象はその他の毒性と混同されているのでしょうか？もしそうならば、それは問題でしょうか？何年か前に誰かが証拠を見つけたとします。内分泌攪乱現象が大きな関心の対象になるよりも前にです。その時に卵巣と精巣とが混ざり合ったものを見つけたとしたならば、それは汚染化学物質によって遺伝子が損傷したり、何らかの原因で遺伝子発現が損害をうけたことによる奇形発現作用つまり発生への作用であると、おそらくは結論づけたでしょう。

英国の「海洋環境における内分泌攪乱現象」というプログラムで得られた情報を見てみると、いろいろな汚染汽水域（河口水域）から採取されたヒラメにおいて、ある個体にはビテロゲニン誘導が見られ、別の個体にはビテロゲニンがあると同時に卵精巣が形成されていました。しかし別のグループでは、ビテロゲニンの誘導が見られずに卵精巣が形成されていました。

したがって、これらの現象は異なるプロセスなのかどうか、卵精巣の形成は発生における奇形誘発作用であるのかどうか、ビテロゲニンの誘導は内分泌あるいはホルモン作用であるのかについて、研究する価値はあるという意見も出てくるでしょう。その疑問への答えは私には分かりませんが、こうした種類の質問に答えられるような領域での研究が必要であると思います。

異常な卵母細胞、異常な幼生発生、子個体の生存能の低下、成長速度の変化は、すべて無脊椎動物において確認されています。また文献を調べれば、遺伝子毒性や代謝毒性の作用として報告されているものが見つかるでしょう。実際、この種の遺伝子毒性は極低濃度においてよく起こります。では、これは遺伝子毒性あるいは内分泌攪乱現象なのでしょうか？それとも別の何かなのでしょう？

ここで内分泌攪乱現象は、生体の健康に影響を及ぼす可能性のある要因の一つに過ぎないことを思い出してください。内分泌攪乱現象は、神経毒性、遺伝子毒性、免疫毒性、代謝毒性などと同時に起きる可能性があります。それだけでなく、内分泌攪乱現象を始めとする細胞内の何らかの現象を測定する際に採用するバイオマーカーは、密に結びついており、いろいろな具合に絡み合っているのです。

例えば、先日話に出たメタロチオネインは、グルタチオンの非存在下できちんと調べられていないでしょう。グルタチオン濃度は、有機汚染物質等への曝露や、ストレスタンパク質、多剤耐性遺伝子、多汚染物質耐性遺伝子によって減少します。ライソゾーム膜の安定性は、ストレスタンパク質によって影響されます。これらの事柄がすべて、細胞内で一斉に働いているのです。したがって我々は、内分泌攪乱現象とは細胞内で進行している一群の毒性メカニズム全体の中の一つに過ぎないということを肝に銘じておかなければなりません。

我々は最近、ムラサキガイの研究をしており、米国の港湾における汚染濃度勾配が、ムラサキガイ (*Mytilus edulis*) の免疫適格性の変化に反映されているとの報告をしました。これはきわめて低濃度においてです。

我々が取り組まねばならないことの一つとして、生物の体内で起きている毒性のいろいろなメカニズムをすべて、バイオマーカーと海洋バイオアッセイを用いて検出することがあると思います。実際に我々は現在、毒性学の手法の改変に取り組んでいます。過去の毒性試験では、化学物質曝露量、バイオアベイラビリティ、化学物質残留量などが生態系へのダメージを予測するために用いられてきました。

現在の我々は生物学的作用を *in situ* で検出する方向に大きく動いていると思います。どのような種類の毒性が起きているかを知る手がかりとなるバイオマーカーが現在用いられています。それは遺伝子毒性かもしれないし、内分泌攪乱現象かもしれない。そうした上で、組織内の化学物質残留量を調べ、適切な分析を行います。生物学的作用の測定のプロセスは変わりつつあると思います。

また、研究は世界中で行われていますので、全地球的な観点で見ことを忘れないようにしなければなりません。例えば、全地球的な海洋監視システムでは現在、生物相に対する化学物質の影響だけでなく、気象の変化や物理的な変化も調べられています。これら個々の毒性物質をすべて検出できる非常に高度な監視プロセスが必要です。

最後に結論を述べて終わります。無脊椎動物の中で、軟体動物の腹足類や二枚貝類の一部の種は、内分泌攪乱化学物質、特に有機スズ曝露に関連した影響を受けやすく、このことは生態学的に重要な影響をもたらします。現在ある証拠に基づけば、軟体動物においてエストロゲン様作用が非常に強く作用しているという明確な証拠は、無いように思われます。

甲殻類については、魚類に影響を与えるエストロゲン様物質の多くに対して傷害を受けないことが、少なくとも室内実験で示されています。特定の農薬類は、脱皮ホルモンなどの一部のホルモンに影響を及ぼすことが知られており、卵精巣形成や異常な変異発生については不確かな証拠があります。これは、内分泌攪乱現象によるものかもしれませんが、遺伝子毒性などの作用の可能性を除外することはできません。

その他の無脊椎動物門については、情報が不足しています。内分泌攪乱現象はその他の毒性メカニズムと関連性があると強く考えられますので、このことについていつか活発な議論ができればいいと思います。

最後に、人工化学物質の影響を検出する総合的な監視プログラムは、さまざまな種類の毒性とさまざまな種類の化学物質が検出できるように設計するべきでしょう。それができてはじめて、これら化学物質の影響について証拠の重み付けという方法を探ることができ、環境における重要性の評価が可能になります。ありがとうございました。

質疑応答

井口：無脊椎動物での例と、それから内分泌攪乱ということだけではなかなかわからない、さまざまな毒性も入っていて、その仕分けが難しいというお話でした。

質問を1つ2つ受け付けたいと思いますが、どうかご質問はありませんでしょうか。どうぞ。所属とお名前をおっしゃってください。

質問：名城大学の田村廣人です。専攻は農薬学です。農薬学分野では、内分泌攪乱現象が、脊椎動物と無脊椎動物との間で高度に選択的な農薬を開発する際の重要な対象になります。先生のスライドの中で、20-ヒドロキシ-エクジソンが昆虫において内分泌攪乱現象を起こすとありました。これは我々の分野ではよく知られています。

ではどのようにすれば有効な農薬が開発できるのでしょうか？クリントン前大統領は企業に対して報奨金を出したので、企業は昆虫の内分泌系を攪乱させて阻害する非常に優れた殺虫剤を開発しました。その物質が20-ヒドロキシ-エクジソンのアゴニストです。コメントをお願いします。

デブレッジ：なかなかお答えするのが難しいご意見です。もちろん、そうした化学物質は昆虫を駆除するために特別に開発されたものであり、甲殻類にも影響を及ぼすでしょうが、コリンエステラーゼ合成の阻害剤など農薬には非常に多岐にわたるものがあることも事実です。コリンエステラーゼ合成の阻害剤も水圏環境の節足動物に影響を及ぼします。メカニズムをもっと選択的に絞り込めるような研究を試みる必要があると思います。

昆虫の駆除については全地球的な観点で取捨選択する必要があると思います。マラリアのように、多くの人間に影響を受け、人の健康を大きく損ねるような疾患の原因となる昆虫もいますが、それら化学物質は低濃度で環境中に流出して、エビの養殖場やカニの漁場などに影響を及ぼす可能性があります。漁業が壊滅するとなれば、特に開発途上国では、非常に多くの人に影響が及びます。

あなたのご質問に対する答えは分りませんが、大変重要な問題を提示して下さったと思います。大事な点です。

質問：それと、幼若ホルモンの抑制も我々の目標であることも付け加えておきます。

デブレッジ：同じ原理ですね。はい。

質問：優れた農薬です。

井口：どうぞ。

質問：プロクター・アンド・ギャンブルのジョージ・ダストンです。マイク、大変面白い話でした。あなたの話の後半で取り上げたことから、内分泌攪乱現象は毒性全体の視点で考えなければならないという考え方に関して議論に火がつくかもしれません。今は議論するつもりではなく、むしろ、その考え方は脊椎動物や哺乳類の毒性に対しても認識し拡張すべきであるということをおきたいのです。内分泌攪乱現象は重要なメカニズムではないと言っているわけではありません。重要です。

しかし、内分泌攪乱現象は発生異常における数多くのメカニズムの中のひとつであり、メカニズムについて最初に仮定を設けたことにより自分で自分の首を絞めるようなこともあります。我々が行っているのは観察をすることであり、それがひいてはメカニズムの理解につながるのだと思います。あなたの意見に拍手を送り、無脊椎動物の話だけにとどまらず、その視点ですべての毒性が考察されるようになればいいと思います。

デブレッジ：ありがとうございます。