<総 説>

水質汚濁研究におけるマイクロコズムの利用

The Use of Microcosms for the Study of Water Pollution: A Review and Perspective

高 橋 正 征*

Masayuki TAKAHASHI

1. 緒 言

近年の人間活動の活発化に伴い、周辺環境への廃棄物投棄は著しい。過去から現在にわたり、何百、何千種類もの物質が周辺に捨てられ、地圏、気圏、水圏に拡散し、蓄積していく。物質によっては、局所汚染が進行して、自然生態系はおろか周辺に生活する人間にも深刻な影響を与えている。また、非・難分解物質の地球規模の拡散も無視できず、広域汚染が問題化しつつある。しかし、こうした人間活動が原因でまき散らされる物質の大半について、その生物への影響はおろか、自然界での行方や存在化学型すら十分にはわかっていない現状である。これはごく近年まで、周辺環境に対する人々の関心が薄かったこともこうした遅れをつくった原因である。1970年頃より、“環境問題”が急速に注目されるようになり、自然界での各種廃棄物質の挙動や作用が、各所でとりあげられるようになった。

化学物質の挙動や作用を知る手段として、従来広く使われてきたのは、(1)実験室内で極めて限定した環境を設定して、その中で観察するか、(2)実際に自然界に放出された物質を追跡調査して行くかのいずれかであった。前者は非常に有効ではあるが、反面単純すぎて、得られる情報には限界がある。後者は逆に複雑すぎて、しばしば目的とする化学物質の挙動や作用を正確に把握することが困難である。特に化学物質濃度が低かったり、重金属のように天然にも存在するような物質を対象とする場合には、ほぼ不可能に近い。しかし、多くの問題をかかえてはおりながらも、この2つの方法は現在でも盛んに利用されており、多くの有効な知見を与えてくれている。

近年、前2者の中間の方法、すなわち、ある程度自然界での複雑性をとり入れた第3の方法が着目されるようになった。称して、マイクロコズム法とか、制御実験生態系法と呼ばれるのがそれである。マイクロコズムは実験室から野外に至るまで広範囲に使われるが、ここではこれまで野外に設定されたものを紹介し、マイクロコズム法の有用性および問題点を検討してみた。

2. マイクロコズムとは

マイクロコズム (microcosm) は“何らかの人工的制御環境下で、単一生物種あるいは生物群集を、長時間にわたり維持・発展させるための装置”である。マイクロコズムには、環境条件の設定に応じ、極めて自然に近いものから、実験室での特殊条件培養まで、幅広い範囲の性格をもたせることが可能である (Fig. 1)。生態系を対象としたマイクロコズムは、特にマイクロエコシステム (microecosystem) とか、制御実験生態系 (controlled experimental ecosystem) とも呼ばれる。実験室から野外に至る幅広いマイクロコズムの適用について Beyer¹⁾、Odum²⁾ の総説が、海洋での自然群集への適用例については Menzel and Steele³⁾ の報告が参考になる。

3. 天然水中に設置するマイクロコズム

これには大別して、浮遊型と着底型とがある。浮遊型は、水柱内での現象解析が中心になる。たとえば水深が

Fig. 1 Schematic diagram of natural aquatic ecosystem and various types of microcosms

*筑波大学生物科学系・環境科学研究科 300-31 茨城県新治郡桜村

Institute of Biological Sciences, and Graduate School of Environmental Science, University of Tsukuba Sakura-mura, Ibaraki, Japan 300-31

深く、水柱の大部分が底質の影響を受けなかったり、水柱の鉛直成層が著しく水柱内部の各部分の独立性が強い時に使われる。また、底質の影響が顕著な浅い水域でも、底質の影響の程度や特異性を知るために利用されることが多い。マイクロコズム法ではマイクロコズムの型と大きさが問題となる。浮遊型マイクロコズムのサイズは、横への広がりや深さが重要である。深さについては、多くの場合、光合成層と若干の亜光層を含むように設計される。着底型は、底質の影響が表層にまでも及ぶ浅い水域でよく利用される。この場合、マイクロコズムのサイズは主に横の広がりが問題となる。

3.1 浮遊型

3.1.1 Strickland 型マイクロコズム (1961-62)^{4) 5) 6)}

自然水中での植物プランクトンの消長を正確に把握する目的で開発されたもので、今日の野外でのマイクロコズム実験の草分けとなったものである。壁面効果を小さくするために、技術的・経済的に可能な限り大型化した結果、マイクロコズムは直径 6 m の球型が採用された(Fig. 2)。本体は半透明ポリ塩化ビニール布 (80~85% の光透過率) で作り、補強のために外側から漁網をかぶせた。外界の水の動きは、布面を通して若干は内部にも伝導する。マイクロコズムは水面下 1.8 m 以深に設置して、太陽放射からのマイクロコズム内の温度上昇を小さくした。マイクロコズムへは直径 45 cm、長さ 300 cm の円筒部分で連絡しており、空中に大きく開放したものに比べ、大気との酸素や二酸化炭素などのガス交換を最小にした。円筒周囲には浮子を設置して、浮子中の空気/水の量比を調整して水位を一定に保ち、マイクロコズム下

部には 1800 kg の重りをつけて、システム全体を垂直に保った。測定や採水はすべて中央の円筒を通じて行ない、マイクロコズム外表面へは数日毎に硫酸銅結晶を散布して、付着生物の発生を阻止した。

マイクロコズムはカナダのブリティッシュ・コロンビア州ナナイモ市郊外の Departure Bay に設置され (水深は干潮時で 11 m)、実験開始に当り、湾内底近くからポンプ揚水し、珪藻土で汙過した試水約 120 m³ が注入され、さらに表層水約数百リットルを加えて、種付けがほどこされた。種付け用の水は、300 μm のネットで汙過して大型動物プランクトン以上的大型生物が除かれている。実験はマイクロコズム一基を使って 1961 年と 62 年に 30 日と 100 日にわたり行われた。前者では主として植物プランクトンの増殖過程と水中の栄養状態との関係が、後者では増殖後の栄養塩類の回帰を中心に実験されている。

つまり、表層の植物プランクトンと従属栄養微生物群集を、栄養物質豊富な深層水で稀釈して、自然光下での増殖過程の追跡実験といえる。室内培養との大きな相違は、seed stock として用いた自然群集が、多種類でしかも種々の生理状態の細胞を含んでおり、用いた培地 (汙過深層水) が多種類の栄養物質を含んでいることである。さらに常時変動する自然光下、自然水温下で行われたことも特色である。水塊は常時物理的に鉛直混合され、自然界における水塊混合時の状態を再現したことになる。自然状態と異なる主な点は、捕食者がいないことであり、それにより水塊からの藻体の除去、物質の分解・回帰が著しく限定されている。

3.1.2 Lock Ewe 型マイクロコズム (1973-)^{7) 8)}

動物プランクトン、ニシン稚魚を含む、多数栄養段階

Fig. 2 Strickland type microcosm (floating system).
Derived from Strickland and Terhune⁴⁾

Fig. 3 Loch Ewe type microcosm (floating system).
Derived from Gamble et al⁸⁾

から構成される生態系の再現・維持を目的としている。そのためにマイクロコズムは球型から円筒型に変えて、鉛直移動生物の生息を可能にした (Fig. 3)。ただし、水塊混合は特に考慮せず、底に沈殿した物質を定期的に底から除去し、物質の不足を補うために多量元素を中心とした無機栄養塩類を適時加えた。マイクロコズムはナイロン強化ポリエチレン布製で、95%以上の光透過率が確保されている。実験開始に当り、ダイヤフラムポンプで水深15mから揚水し、そのまま容器中へ注入した。注入には24時間を要した。大型動物プランクトンとニシン稚魚は網で別途捕獲され加えられている。同時に4基のマイクロコズムが設置され、制御条件を変えた実験を並行して進行することが可能である。実験の行われたLoch Eweは、スコットランド北部に位置し (57°50'N, 5°40'W)、水深20m前後で、強風や波浪から守られている。

このシステムでは、特定水深から揚水してマイクロコズムを満たしているため、初期にはマイクロコズム内に鉛直構造はないが、時間経過と共に、パラメーターによっては鉛直変化が発達する。2ヵ月間の実験期間中、周辺生態系で優占する生物種が維持され、100m³程度の隔離水塊でも、限られた期間、自然と酷似した生態系の維持が可能ながことが確かめられた。ただし、各生物群や、栄養物質の量変化が、マイクロコズムと周辺生態系ではまだかなりの相違があり、検討が必要である。

3.1.3 CEPEX 型マイクロコズム (1973-)⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾

沖合生態系への低濃度の汚染物質の影響を検討するために開発されたシステムである。型は空中に向かって開放した円筒型で (Fig. 4)、巨大化しても力学的に最も抵抗性の強いデザインである。直径10m、長さ29m (容量1818m³) を最大にして、中、小の3つのサイズがあ

Fig. 4 CEPEX type microcosm (floating system)

る。マイクロコズムの材料は半透明の強化ポリエチレン布で、ほぼ50%の減光率である。大型化とともに従来のポンプ注入法から、水柱の直接捕獲法が採用された。つまり、ポリエチレン袋をいったんアコーディオン状に折り畳んで海面下に沈め、潜水チームによって袋を海面までひき上げながら水柱をスッポリ捕獲する方法である。大型でも5分以内で水柱捕獲が完了し、しかも100%の捕獲率である。同時に複数個の水柱捕獲が容易に進行でき、現在では潜水チームを使わずに海面上からリモート操作でバックの留具を外して浮上させる技術も開発され、夜間でも捕獲が可能となった。動物プランクトン以下の生物は逃避することなく捕獲されるが、魚類はほとんど入らないため、別に網で捕えて必要数を加えてやる必要がある。

捕獲直後数日~1週間は捕獲による環境変動で、生物量や活性に周辺生態系とは異質の変動の認められることがあるが、その後は落ち着いた変化を示すようになる。マイクロコズム間では、当初1ヵ月程度は酷似した変動型を示しているが、次第に時間的ずれを生じたり、変動幅に相違が目立つようになる。しかし、変化の方向は3ヵ月程度では変わらない¹²⁾。

CEPEX 型の主な問題点は以下の3つである。これらは他のマイクロコズムについても同様に問題となる。第一は、マイクロコズムを構成する布、および浮輪による入射光の50%におよぶ減光と、マイクロコズム内部の光分布型の変化である。これにより生物の分布が大きく影響され、複雑な空間分布を示すようになる¹²⁾¹³⁾。第二は、マイクロコズム内の水塊が、自然の水塊運動 (例えば、潮汐、恒流、密度流、湾流など) から隔離されることである。拡散係数、特に鉛直拡散の低下が顕著となり、プランクトンを含め水中の懸濁粒子の沈降速度が増加し、水塊の透明化がおこる。内部波も細かい部分はプラスチック膜で吸収され、内部へは伝わらない。またプラスチック膜に接する外部水塊水温は水塊運動と共に変動し、プラスチック膜内外に温度差ができる。これは、マイクロコズム内に特異的な水塊運動を生起させる¹⁴⁾。第三はプラスチック膜面への付着生物の発生で、特に光合成層上半分が著しい。放置すると、マイクロコズム内のエネルギーや物質吸収の上で、壁面生物の優占化がおこる。鉛直混合については、補償深度付近に細かい気泡発生装置をセットして、間歇的に気泡を発生させることにより、光合成層内の水塊を混合している。また、透明ポリエチレン布をマイクロコズム内壁に沿って巡らし、水深5m付近迄吊らし、定期的に膜面に付着した生物を除去することにより、壁面生物による影響を少なくする努力が払われている。

CEPEX 型は、自然状態の再現の上で、現在最も成功しているマイクロコズムで、最近では環境条件を人為的に制御することにより、一次生産者段階の生物を、希望する目的のグループ別にある程度選択して発達させることも可能になった。また、上位栄養段階についても、質、量両面でかなりの制御が可能である。

3.1.4 Goldman型マイクロコズム¹⁵⁾ (1962)

底が閉じていず開放型である。上下が完全に開いているプラスチック袋を水面から静かに降ろしながら、水柱を隔離する (Fig. 5)。温度成層の発達した湖では、水温躍層がある程度“底”としての役を果たしてくれる。しかし、水温変化の影響を受けにくい生物群や、沈降物質にとっては、水温躍層の“底”は効果がない。従って、マイクロコズム内での物質やエネルギー収支を把握するには、逸脱・流入を正確にキャッチする努力が必要である。ともあれ、取り扱いが極めて容易なことから、その後海洋でも利用され効果をあげた¹⁶⁾¹⁷⁾。

Thomas¹⁸⁾ は直径 5.4~5.6 cm で、両端が開いている透明アクリルパイプを Goldman 型同様、静かに降ろしながら、水塊を隔離して各種実験を行ない成果をあげている。特にこれは Plankton-Test-Loten と命名されている。

Fig. 5 Goldman type microcosm (floating system, open bottom)

3.2 着底型

3.2.1 キール大学型マイクロコズム (1974-) ¹⁹⁾²⁰⁾

バルチック海に面した実験水域は最大水深が11mしかなく、水塊と底質との相互に密接な関係があり、底質を含んだマイクロコズムの開発が必要であった。キール大システムではまず10m×10m×16.5m (高さ) の鉄製槽を海中に設置し、それに4基の着底型マイクロコズムをセットできるように工夫されている。各々のマイクロコズムは、PVC の薄膜を被覆したナイロン布でできていて、底の直径 2 m の円筒で、上部がくびれた瓶型をしている (Fig. 6)。容積は約 30 m³。マイクロコズムの下端

Fig. 6 Kiel University microcosm (landing system)

には布袋がとりつけてあり、底に密着して着底するように配慮されている。布の光透過率は約30%である。底層から水中への栄養塩帰還を目指した1ヵ月間に及ぶ実験から、塩分含量の異なる水塊が出入りする沿岸域では、密度の高い富栄養海水が底泥内部を流れて、水中に湧出して栄養物供給を果していることを発見した。

3.2.2 諏訪湖型マイクロコズム (1968-69) ²¹⁾

湖での物質循環を正確に把握するために、湖の自然環境に近いマイクロコズム開発を目指して設計されたもので、日本における最初の試みである。

マイクロコズムは、直径1.5mの円柱で、厚さ0.1mm

Fig. 7 Lake Suwa type microcosm (landing system). Derived from Hayashi et al²¹⁾

のビニール布製である (Fig. 7)。ビニール円柱を水面から静かに水中に降ろしていきながら、底泥を含めて水柱を隔離する。実験は諏訪湖で行われ、その都度数日～10日間程度にわたり続けられた。特に24時間観測が何回も行われ、偉力を発揮している。数日間内では、マイクロコズム内の変動は周辺生態系と一致しており、自然状態をかなりよく再現していると考えられる。但し、懸濁物の沈殿物量がマイクロコズム内では外部の2倍にもなり、詳しい検討が必要である。

同じく諏訪湖で、西村を中心に1976年7月～8月に3週間にわたってマイクロコズムによる綿密な実験が行われている²²⁾²³⁾。彼等が使ったマイクロコズムは、厚さ2mmの透明ポリエチレン布製、5m×2.5m×6m (水深)の箱型で、水面は完全に気相に露出している。2基のマイクロコズムがポリエチレン布を隔てて隣接して設置され、片方は底迄完全にポリエチレン布で塞ぎ、もう一方は底泥を含んでいる。このマイクロコズムを用いて、底泥から水柱への栄養塩類 (アンモニア態窒素) 回帰が調べられた。

Lund²⁴⁾ は、更に規模を大きくして、塩ビの板で湖水中に直径数十mの円型の囲いを作り、湖の一部を仕切ったマイクロコズムを設置して、長期間にわたり主として植物相の変動を観察している。

4. 陸上に設置するマイクロコズム

4.1 MERL 型マイクロコズム (1976-) ²⁵⁾

水塊と底質の相互依存の大きな内湾の生態系を再現する目的で開発された。設計に当り、底質と底生生物を含み、しかも底質表層に不自然なほど多量の光が届かないよう工夫し、タンク型が採用された。サイズは内径1.83

Fig. 8 MERL type microcosm (terrestrial system, continuous flow through). A bar hanging in the microcosm moves up and down, which creates water movement near the sediment. Bay water comes in near the bottom and goes out near the top. Derived from Pilson²⁵⁾.

m, 高さ5.5mの円筒型で、ファイバーガラスで作られている (Fig. 8)。実験開始に当り、タンクを小舟に積んであらかじめ調査して適当な底質のある地点まで運び、注意して中に生息する生物を含めて底泥を採取した。タンクを陸上施設に固定後、岸から50mの地点から海水をポンプ揚水し、0.48m³/日の流速で、タンクに加えた。タンク内全部の水が交換するのに27日を要する。タンク内には上下移動する攪拌子をとりつけ、常時動かし、底泥表面に常時水流が当るよう工夫し、底生生物が湾内で受けていると予想される流水効果の再現に努めた。

14ヵ月にわたる、タンク内と、米国ナラガンセット湾の採水点における生物量、生物相、栄養塩類の変動型は酷似しており、タンク内でも内湾と同様の生態系が常時維持されていることを示している。

MERL システムは、内湾の性格を極力変えることなく、陸上に再現することを目的とし、一応成功している。現在多数のタンクが設置されて、各々のタンクに石油系物質を加えて人工攪乱をおこし、その内湾生態系への影響が克明に研究されている。

4.2 Deep tank 型マイクロコズム (1968-) ²⁶⁾²⁷⁾

湖沼や海岸に設置したマイクロコズムよりも一段と限定された条件下で、精密な実験を行うことを目的として設計された。実験室システムとの相違は、主に生物量濃度を薄くして、自然界で普通に認められるレベルにし、天然光と同程度の強光で、しかも波長組成の酷似した光を与え、鉛直的に十分な光量傾度をつける点にある。そ

Fig. 9 Deep Tank microcosm (terrestrial system, batch system). Derived from Strickland et al²⁶⁾.

の結果、直径 3 m、長さ 10 m の試験管型の鋼鉄製タンクを作り、内部を Laminar x500 黒色プラスチックで覆った (Fig. 9)。この物質はあらかじめ藻類への毒性テスト済である。タンク外部は保温材で十分囲んで、熱伝導速度は内外の温度差 1°C で $0.001^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ と低い。

河過海水をタンクに満し、ついで純粋培養植物プランクトンを接種し、2 週間にわたり生長を追跡した。光源は 80V, 175amp. の探照灯一基で、日照時間に合わせて点燈した。タンク内部は底に圧搾空気を導入して常時攪拌した。

この実験は培養藻類株を、自然状態に近い水柱内で生育させ、それを観察した最初である。タンク内部には自然水柱同様の光量の鉛直傾度ができ、植物プランクトンの生長速度は、フラスコでの最適培養条件下よりも低下する。また、フラスコ培養では沈下してしまうものが、タンク内では中性浮力を持ち、常に水柱内に浮遊していたのは注目される。

Mullin and Evans²⁷⁾は、藻類だけでなく、植物プランクトン—植食動物プランクトン—肉食動物プランクトン—の 3 栄養段階をタンク内につくり、数ヶ月にわたって各栄養段階間のエネルギーの転換効率を求める実験を行った。用いた動物試料も、植物同様、実験室で純粋に飼育されてきた種類である。長時間実験したばかりか、各々の生物の密度を自然界で実際に認められるような低濃度に保った点でも画期的である。

自然太陽光下で、純粋生物種を大量に培養・飼育して活発な実験が英国のサザンプトン大学で 1950 年代に盛んに行われた²⁸⁾²⁹⁾。

5. マイクロコズム実験の問題点と利点

マイクロコズムは面積的 (R) と深度的 (H) 広がり の 2 要因から簡単に表現できる (Fig. 10)。 $x=R$, $z=$

Fig. 10 Schematic diagram showing a microcosm. R and H indicate the width and the depth of a natural water body, respectively. x and z are the width and the depth of a given microcosm, respectively

H の状態は、湖や海洋の全体を表わし、 $0 < x < R$, $0 < z < H$ の状態が、ここで論じているマイクロコズムを表わす。 x と z が小さくなれば自然生態系からは離れ、逆に大きくなると近づいていく。

マイクロコズムのサイズは、次の 4 項目に対して大きく影響する。1. 水塊の動き。2. 壁面効果。3. 含める生物の種類数と生物量。4. 光環境。どの項目もマイクロコズムが大きいかほど自然に近く、小型化するにつれ問題が大きくなる。自然界でおこっている水塊の大きな動きは、マイクロコズム内に隔離された水塊ではほぼ完全に消滅する³⁰⁾。反面、マイクロコズム内では独特の水塊混合がおこり、この問題の理論解析は Boyce³¹⁾ が行なっている。マイクロコズム内では、水平方向には比較的速かな動きがあっても、鉛直方向の成層化が著しく、何らかの人工的な混合機構を加えないと、各要因は鉛直方向の極端なパッチ分布を示し、さらに生物を含めて水中懸濁粒子の現場沈降速度が増加して、水塊が透明化してしまう。水塊混合は、気泡、攪拌子、上下の水温差、水流などを導入して行われている。混合方法、混合頻度や混合の強度は、研究目的によって十分検討が必要である。塩分のように生物利用がほとんどない溶存物質はいったん混合して成層が破壊されると再生は不可能であり、また一方水温のように容易に再生されるものもある。

壁面効果は、マイクロコズムがもっているもう一つの大きな問題点である。特に内壁表面、それも光合成層上部での付着生物の繁殖が問題である。容積/壁面の比を大きくすることにより、壁面効果は小さくなる。また、マイクロコズム容器を作る材質や、コーティングで若干は抑えられるが、長時間実験では役に立たない。CEPEX 型では、透明ポリエチレン布をマイクロコズム内に吊らして、定期的に付着物を除去して影響を最小化しており、今のところこれ以外に良い工夫はないようである。

天然水塊を隔離する際、小規模ではマイクロコズム内に捕獲される生物の種類数が大幅に限定されてしまい、生態系の再現が困難である。Sheldon³²⁾ らによれば、海洋では水域の小型動物プランクトンと微生物を満足にとりこむのに 20 l 以上の規模が必要とのことである。大型動物を含ませるには生物の大きさに応じて大容量が要求される。加えて、実験中サンプリングによる減少効果が出ないようにするには、さらに大きな規模を必要とする。一応の目安として、各種生物の生長速度を基礎にして、水域では一日のサンプリングクロスは、各項目別に全体の 1% 以下に保たなければならないとされている。つまり、あるマイクロコズム内に 10,000 匹の動物プランクトンがいた場合、1 日に採取してもよいのは 100 匹以下ということである。培養種を使ってマイクロコズムで

Fig. 11 Size comparison of different types of microcosms. Top 6 are floating system with closed bottom except for the Goldman type. Kiel and Suwa types are landing system, and MERL and Deep Tank types are terrestrial system.

実験するときには、自然界での濃度レベルにするため、濃度が実験室に比べ薄くなり、大きな容量を必要とする。

マイクロコズム内の光環境は、透明膜マイクロコズムでは構造物や浮子、ロープによる影以外は、周辺環境と大差ないと思われる。半透明膜システムでは、水面から直接入射する分は問題ないが、半透明膜を通過してくる光は、かなり散光化され方向性を失う¹³⁾。不透明膜や壁でできているマイクロコズムでは、光は水面から入るものに限定され、マイクロコズム内部に透入する光量は激減する。特に小型マイクロコズムで著しい。

Fig.11は、ここでとりあげたマイクロコズムを同一縮尺で相互比較したものである。

水塊捕獲時に、マイクロコズムにはいる機会のなかった生物や物質は、MERL型のようにその後特別に加えてもしない限り、マイクロコズム内へは入りこむことができない。一方、自然界では、水塊混合や、水流、あるいは生物自身の移動で、水塊中にそれまで存在しなかった因子でも常に入りこむ可能性がある。

純粋培養した生物種を用いる場合と、天然の水試料を使うときとの決定的な相違は、天然水中には多種類の生物種が含まれ、しかもそれらが多彩な生理状態下にあることである。マイクロコズムの条件を変えることにより、全く異質の生物群集を発達させることが可能である。現に CEPEX 実験では、同一水塊を複数基のマイクロコズムに捕獲して、光、栄養条件、鉛直混合の条件を

変えることにより、任意に珪藻主体の群集にしたり、微小鞭毛藻主体の群集を発達させることに成功している。

以上のようにマイクロコズムはいくつかの問題点をかかえてはいるが、反面周辺生態系との数多くの点で相似性が確認されており、かなりの正確さで自然環境を再現しているといえる。外界との相似性は隔離当初が最も高く、時間経過とともに低下する。これはマイクロコズム内の環境が完全には外界とは同一ではないこと、また捕獲時にマイクロコズム内にはいなかったものは実験途中から入りこめないというマイクロコズムの特殊性とも関係していると思われる。マイクロコズム内の諸因子の変化速度は、実験期間の設定とも大いに関係がある。普通、マイクロコズムの実験期間は、問題としている生態系内にある生物の中で、生活史の最も長いものに合わせられる。

複数基のマイクロコズムを使って、異なった種類や濃度の汚染物質を加えたり、物理要因や生物要因を変えて、その攪乱効果を検証していく実験にはマイクロコズム法は極めて有力な手段であり、実績も上がっている。また、赤潮のように、群集が著しいパッチ分布を示し、しかも時間的に場所を移動してしまうような現象には、マイクロコズムによる野外での捕獲実験が効果的と思われる。さらに、着底型マイクロコズムを使って、マイクロコズム内に赤潮現象を再現させる検討も必要であろう。自然に近い状態での実験は、変化要因が複雑で、再現実験が困難なことも多いが、そのような状態ですら数多くの有益な仮説が導き出され、その検証や関係づけが自然生態系において可能になることも多い³³⁾。

(原稿受理：昭和53年12月27日)

—引用文献—

- 1) Beyers, R.J. (1964) the microcosm approach to ecosystem biology. Amer. Biol. Teacher, 26, 491-498.
- 2) Odum, E.P. (1971) Fundamentals of ecology, 3rd ed., p. 574, Saunders Co., Philadelphia.
- 3) Menzel, D.W. and Steele, J.H. (1978) The application of plastic enclosures to the study of pelagic marine biota. Proc. Verbaux.
- 4) Strickland, J.D.H. and Turhune, L.D.B. (1961) The study of *in situ* marine Photosynthesis using a large plastic bag. Limnol. Oceanogr. 6, 93-96.
- 5) McAllister, C.D., Parsons, T.R., Stephens, K. and Strickland, J.D.H. (1961) Measurements of primary production in coastal sea water using a large-plastic sphere. Limnol. Oceanogr. 6, 237-258.
- 6) Antia, N.J., McAllister, C.D., Parsons, T.R., Stephens, K. and Strickland, J.D.H. (1963) Further measurements of primary production using a lar-

- ge volume plastic sphere. *Limnol. Oceanogr.* **8**, 166-183.
- 7) Davies, J.M., Gamble, J.C. and Steele, J.H. (1975) Preliminary studies with a large plastic enclosure. In Cronin, L.E. ed. *Estuarine Research*, vol. 1, p. 251-264, Academic Press, New York.
 - 8) Gamble, J.C., Davies, J.M. and Steele, J.H. (1977) Loch Ewe bag experiment, 1974. *Bull. Mar. Sci.* **27**, 146-175.
 - 9) Menzel, D.W. and Casè, J. (1977) Concepts and design: Controlled Ecosystem Pollution Experiment. *Bull. Mar. Sci.* **27**, 1-7.
 - 10) Case, J. (1978) The engineering aspects of capturing a marine environment, CEPEX and others. *Proc. Verbaux.*
 - 11) 高橋正征 (1978) 「制御実験生態系」を用いた海洋汚染の機構解明のアプローチ. 環境科学セミナー 1: 89-102. 筑波大学環境科学研究科.
 - 12) Takahashi, M., Thomas, W.H., Seibert, D.L., Beers, J., Koeller, P. and Parsons, T.R. (1975) The replication of biological events in enclosed water columns. *Arch. Hydrobiol.* **76**, 5-23.
 - 13) Takahashi, M. and Whitney, F.A. (1977) Temperature, salinity, and light penetration structures: Controlled ecosystem pollution experiment. *Bull. Mar. Sci.* **27**, 8-16.
 - 14) Steele, J.H., Farmer, D.M. and Henderson, E.W. (1977) Mixing in large enclosures. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **34**, 1095-1104.
 - 15) Goldman, C.R. (1962) A method of studying nutrient limiting factors *in situ* in water columns isolated by polyethylene film. *Limnol. Oceanogr.* **7**, 98-101.
 - 16) Anderson, G.C. personal communication.
 - 17) Hood, D.W. (1978) Upwelled impoundments as a means of enhancing primary productivity. *Rapp. P.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer*, **73**.
 - 18) Thomas, E.A. (1961) Vergleiche über die Planktonproduktion in Flaschen und im Plankton-Test-Lot nach Thomas. *Verh. Ver. Limnol.*, **14**, 140-146.
 - 19) Bodungen, von Bröckel, K., Smetacek, V. and Zeitzschel, B. (1976) The plankton tower. I. A structure to study water/sediment interactions in enclosed water column. *Mar. Biol.*, **34**, 369-372.
 - 20) Smetacek, V., von Bodungen, V., von Bröckel, K. and Zeitzschel, B. (1976) The plankton tower. II. Release of nutrients from sediment due to changes in the density of bottom water. *Mar. Biol.* **34**, 373-378.
 - 21) 林秀剛・沖野外輝夫・青山莞爾(1972) 水柱内での有機物収支について. I. ビニール膜による水柱の人為的隔離. 陸水雑, **33**, 51-59.
 - 22) 田中哲治郎・西村肇(1977) 水塊隔離実験による湖の物質循環過程の解析. I. 溶存物質の濃度変化の相互関係. 未発表資料.
 - 23) 田中哲治郎・西村肇(1977) 水塊隔離実験による湖の物質循環過程の解析. II. 物質循環過程のモデル化. 未発表資料.
 - 24) Lund, J.W.G. (1972) Preliminary observations on the use of large experimental tubes in lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **18**, 71-71.
 - 25) Pilson, M.E.Q. (1978) An adventure in studying marine ecosystems. *Maritimes*, **22**, 12-15.
 - 26) Strickland, J.D.H., Holm-Hansen, O., Eppley, R. W. and Linn, R.J. (1969) The use of a deep tank in plankton ecology; I. Studies of the growth and composition of phytoplankton crops at low nutrient levels. *Limnol. Oceanogr.* **14**, 23-34.
 - 27) Mullin, M.M. and Evans, P.M. (1974) The use of a deep tank in plankton ecology. II. Efficiency of a plankton food chain. *Limnol. Oceanogr.* **19**, 902-911.
 - 28) Raymont, J.E.G. and Miller, R.S. (1962) Production of marine zooplankton with fertilization in an enclosed body of sea water. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* **47**, 169-209.
 - 29) Ansell, A.D., Coughlan, J., Lander, K.F. and Loosmore, F.A. (1964) Studies on the mass culture of *Phaeodactylum*. IV. Production and nutrient utilization in outdoor mass culture. *Limnol. Oceanogr.* **9**, 334-342.
 - 30) Verduin, J. (1969) Critique of methods involving plastic bags in aquatic environments. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **98**, 335-336.
 - 31) Boyce, F.M. (1974) Mixing within experimental enclosures: A cautionary note on the limnocorral. *J. Fish. Res. Bd. Can.* **31**, 1400-1405.
 - 32) Menzel, D.W. (1978) The application of results derived from experimental microcosms to the study of natural pelagic marine ecosystems. unpublished manuscript. p. 18.
 - 33) Sheldon, R.W., Sutcliffe, W.H.Jr. and Prakash, A. 1973. The production of particles in the surface waters of the ocean with particular reference to the Sargasso Sea. *Limnol. Oceanogr.* **18**, 719-733.