

アオウキクサ(*Lemna*)を利用した環境モニタリングの基礎研究 —水中重金属とアオウキクサの増殖—

釘本 完^{*1}・那須 裕^{*2}

緒 言

人間以外の生物の反応によって環境変化、環境汚染を検知し、その対策を行なう事は、現在最も盛んに試みられており、かつ重要な研究分野の一つといえよう。

環境に住まう生物の盛衰状況から環境破壊・環境汚染の推移を測定する方法と、実験室内の制御された環境下で実験生物を用いて、環境変化・汚染が生体に及ぼす影響を検討する方法とが考えられるが、双方からの接近が統一されて初めて対策樹立も可能になると思われる。

本研究で用いた *Lemna* (アオウキクサ) は自然環境中に広く分布し、小型で扱い易く増殖率も高い事から、容易に実験生物としても使えるので、環境問題を考える際の指標生物として幅広い応用が可能である。すなわち環境中での生態学的観察により環境指標が可能となる一方、実験室内で様々な物質・条件による生体反応を調べる事も出来る。しかも高等植物であるから、他の高等生物、ひいては人間へのあてはめも、微生物によるよりは容易と考えられる。

小型浮漂植物である *Lemna* は、扱いが容易な事、増殖サイクルが極めて短かく、均一な個体を同時に多数得られる事、水中微量溶解物質に対する反応が極めて鋭敏である事、環境条件変化に敏感に反応してその姿を変化させる事等、実験用高等植物として理想的とも云える特質をそなえている。植物学の分野では 1960 年以降広く用いられており、Hillman、滝本、田中らが光周期性の研究を *Lemna* によって行なっている。

Lemna による環境汚染指標の試みは 日本でもいくつか行なわれている。中でも佐藤による“*Lemna* Test”は雨水中の大気汚染物質を *Lemna* によって検知する方式で、他の植物による検知と組み合わせて検討する事により大きな成果を挙げている。生嶋らは *Lemna* の生育、増殖に関する基礎研究を行っており、達山、江川らは水質検査の一助に *Lemna* を使う試みを行なっている。又、岸川、徳永は富栄養化の判定に *Lemna* を用いている。

以上の如く環境汚染指標に *Lemna* を用いる試み以外に、更に幅広い応用を行ない得る事が、Hillman により提唱されている。すなわち *Lemna* の増殖効率の良さと 水

中溶解物質の迅速な吸収蓄積能力によって汚水の三次処理、水中有害物質の除去を行なおうというものである。水のリサイクルを円滑に行なわしめ、あわせて有用資源の回収再利用を可能にするという点で、今後重要性を増す課題である。もう一つは *Lemna* のエネルギー獲得効率の高さ増殖効率の良さに加えてその蛋白含量の高さに注目して、*Lemna* を食糧、或は家畜飼料として活用しようとする方向である。この二つの課題を一体とする事により、廃棄物を活用して *Lemna* 増殖を活性化し、増殖した *Lemna* を飼料として活用するという完全なシステムが完成する事になる。

環境・資源問題研究の材料として *Lemna* は上記の如く大きな期待を集めている。しかしながらこのような応用に耐えるだけの *Lemna* に関する植物生理・生態面での基礎データが十分に集積されていない事も事実である。

本研究は *Lemna* を水質汚染の指標として何らかの形でものさしに使えるような実験系の確立を目的としており、その為の基礎データ蓄積を行なっている。水質汚染物質中、比較的扱いの簡単な重金属類に関して、*Lemna* の生育・増殖への阻害作用のあらわれ方について検討を行なった。*Lemna* の生育する水の組成、pH、生育温度等が重金属による *Lemna* の増殖阻害に及ぼす影響について特に考察し様々な方面への *Lemna* の応用に際しての基本データとする事を試みた。

材料・方法

京都大学農学部応用植物学研究室より、*Lemna paucicostata* strain 6746, 401, 315, 151³ 及び *L. gibba* G3 を譲り受け、継代無菌培養して実験に用いた。6746 を主に使用したが、これはアメリカ・カリフォルニア産で、多年にわたり各所実験室で無菌的に継代培養されてきた strain である。光周期性研究の材料としては広く用いられているが、汚染指標植物として用いられるのは今回が初めてである。*L. gibba* G3 も光周期性研究の為に多くの実験室で長年にわたり継代培養されている。*L. paucicostata* 401 及び 305 は日本で 1974 年に採集された strain で、strain number は採取地点の緯度を示している。*L. paucicostata* 151 は 1975 年、タイで採集された strain である。

*信州大学医学部

Table 1. The compositions of the media

	M-medium (mg/l)	Bonner-devirian's medium (mg/l)
KNO ₃	1515.0	85.0
KH ₂ PO ₄	680.0	20.0
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1180.0	242.0
KCl	-	61.0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	492.0	42.0
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22	1.0
H ₃ BO ₃	2.85	1.0
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.12	0.025
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08	0.03
MnCl ₂ ·4H ₂ O	3.62	-
MnSO ₄ ·H ₂ O	-	0.1
FeCl ₃ ·6H ₂ O	5.4	-
FeC ₆ H ₅ O ₇	-	4.0
Tartaric Acid	3.0	-

	Hutner's Medium (mg/l)
K ₂ HPO ₄	200.0
NH ₄ NO ₃	100.0
KOH	100.0
EDTA	250.0
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	177.0
MgSO ₄ ·7H ₂ O	250.0
FeSO ₄ ·7H ₂ O	124.5
MnCl ₂ ·4H ₂ O	8.95
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	32.95
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	12.6
H ₃ BO ₃	7.1
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.1
CuSO ₄ ·5H ₂ O	1.975

Lemna 培養には Hoagland 型 M-medium, $\frac{1}{2}$ strength Hutner's medium (以下 $\frac{1}{2}$ Hutner's Medium と略), Bonner Devirian's medium (以下 B. D. medium と略) の 3 種の培地を用いた。いずれも *Lemna* 培養に広く用いられている培地である。培地組成を表 1 に示す。 $\frac{1}{2}$ Hutner's medium は EDTA を含み、主として継代培養に用いる。他の 2 種は実験用として使われる。M-medium は B. D.-medium より栄養塩類濃度が高く、B. D. medium の 2-30 倍である。

Lemna 育成は一定温度 (普通は 25°C ± 1°C) にセットした 6000 lux 全日照明恒温室内で行なった。50 ml 三角

フラスコに培地を 25 ml 入れ *Lemna* の、3-frond colony と呼ばれる均一な型・大きさの colony を選んで 1 colony 植えこみ、ガラスキャップでふたをして一週間恒温室内で培養後、*Lemna* の frond (葉状体) 数と、fresh weight を計測した。frond 数は実体顕微鏡下で観察可能な frond の総数である。

培地には通常 Sucrose を 1% 添加して 120°C 1.2 気圧で 10 分間の高圧滅菌を施した。その場合 *Lemna* の植え込みも無菌的に行なった。

Sucrose を添加しない培地へは高圧滅菌も行わず、植え込みも無菌操作によらないで行なった。

培地の pH は高圧滅菌前に HCl と KOH によって調整した。

各実験区について 6 個の三角フラスコを用い、1 個当たりの平均 frond 数、fresh weight を算出した。実験に用いた重金属試薬を表 2 に示す。

Table 2. The chemicals tested

Cd ²⁺	:	CdCl ₂ ·2 $\frac{1}{2}$ H ₂ O
Zn ²⁺	:	ZnSO ₄ ·7H ₂ O
Cr ⁶⁺	:	K ₂ Cr ₂ O ₇
Mn ²⁺	:	MnCl ₂ ·4H ₂ O
As ²⁺	:	As ₂ O ₃
Cu ²⁺	:	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Ag ²⁺	:	AgNO ₃

結 果

1. *Lemna* の増殖

今回のすべての実験は 50 ml 三角フラスコに 25 ml の培地を入れ、*Lemna* を 1 colony 植え込む方式で行なった。この条件下での *Lemna* の増殖過程を示したのが図 1 である。1% Sucrose を添加した M-medium pH 4.1 についてのデータで、縦軸に frond 数と fresh weight を、横軸に培養日数を取り、増殖がピークに達する経過をプロットした。それによると、植え込み後 6 日から 14 日までの間が増殖速度の最も大きな phase といえる。植え込み用 stock として通常 10-14 日目のものを使うのも、最も活力の大きな時期の *Lemna* を実験に用いるという意味を持っている。又、今回の実験では植え込み後 7 日目に計測を行なっているが、その理由として、短期間の育成では増殖が不十分で数の上でも形態上でも明らかな差異を見出しにくい事、一方長期間の育成では、計数に手間と時間を要し更に指標或は bioassay という意味からは不利であると判断した事による。

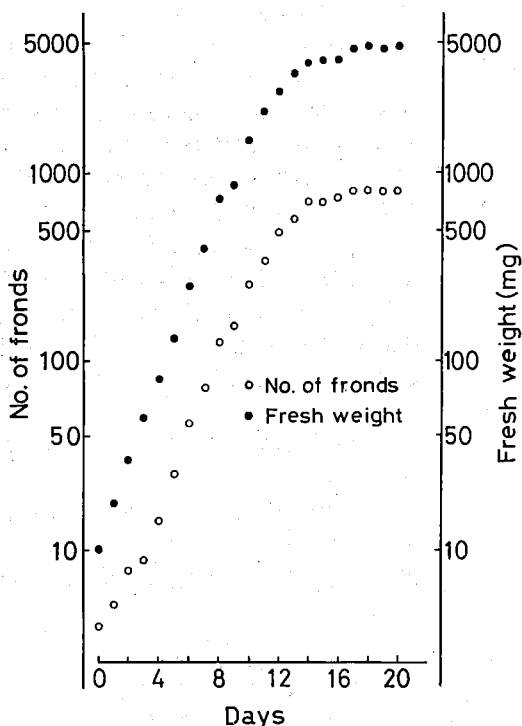


図1. *Lemna* 増殖曲線
M-medium, pH 4.1, 25°C

15日目を超えると50ml三角フラスコにおける *Lemna* 増殖は頂点に達し、20日目を経過すると、脱色、枯死等、栄養不足による現象があらわれる。

2. Sucrose 添加・高圧滅菌による重金属感受性の変化

L. paucicostata 6746について、M-medium pH 4.1 と pH 5.1 の条件下で、Sucrose を添加し高圧滅菌した培地と Sucrose を加えず従って滅菌を行わない培地とにおける重金属類に対する感受性を調べたのが図2である。7日間培養後の frond 数は Sucrose 添加培地では無添加培地の約2倍になる。又、重金属類による *Lemna* の増殖阻害は Sucrose 添加培地においてより鮮明に見られる。更に河川水等を用いて *Lemna* を育成する際には、水中の微生物増殖によって *Lemna* 生育・増殖が著しくさまたげられる。従って微生物類の影響を除去する為の高圧滅菌が必要である。

以下の実験はすべて Sucrose 添加し高圧滅菌した培地により行なった。

3. *Lemna* の strain による感受性の差

図3は3つの strain の *Lemna* における各種物質による増殖阻害を比較したものである。培地はM-medium, pH 4.1 を使用した。縦軸の％は control に対しての frond 数の割合を示す。代りに fresh weight を用いても同傾向のグラフが得られる。クサトール、サターン粒剤は各々除草剤の商品名である。 *L. gibba* G 3 を、他の

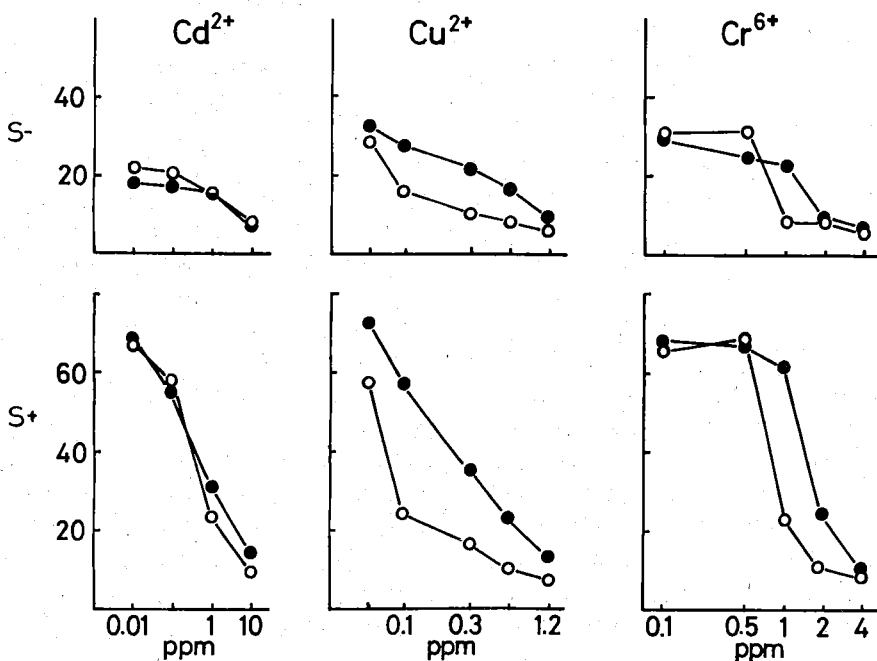


図2. Sucrose 添加による重金属感受性の変化。
25°C, M-medium) ● pH 4.1 S- Sucrose 無添加
○ pH 5.1 S+ Sucrose 添加
縦軸: No. of Fronds

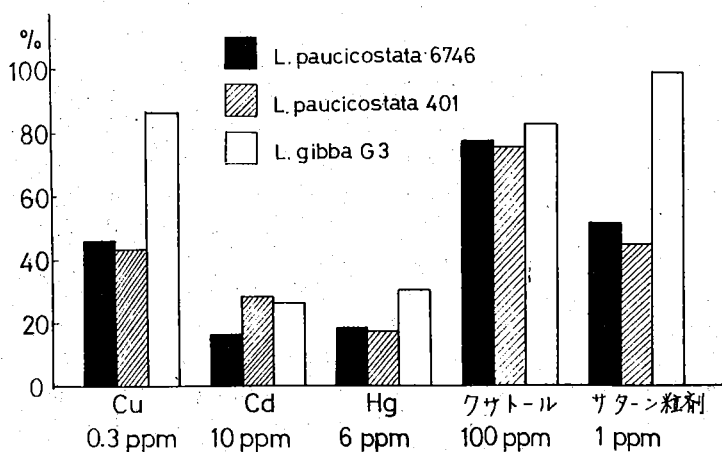


図3. 各種物質に対する3 strainの感受性の差。
25℃, M-medium, pH 4.1 %はControl に対する
frond 数の割合を示す。

L. paucicostata の2つの strain と比較すると, *L. gibba* の方が増殖阻害程度は低いと思われる。図4は, Zn^{++} と Cd^{++} について, M-medium pH 5.1, B. D. medium pH 7.1 における5種 strain の増殖阻害曲線を比較したものである。 Zn^{++} に関しては, いずれの strain においても培地条件により増殖阻害度が著しく異なる。B. D. medium, pH 7.1の方が, M-medium pH 5.1よりも大きな増殖阻害を示している。 Cd^{++} においては培地条件のちがひによる差は strain によって異なる。又, strain 間の Cd^{++} , Zn^{++} に対する感受性の差はこの結果のみでは明確でないが, 比較的感受性の高い strain として151を, 低い strain としてG3を挙げること可能である。

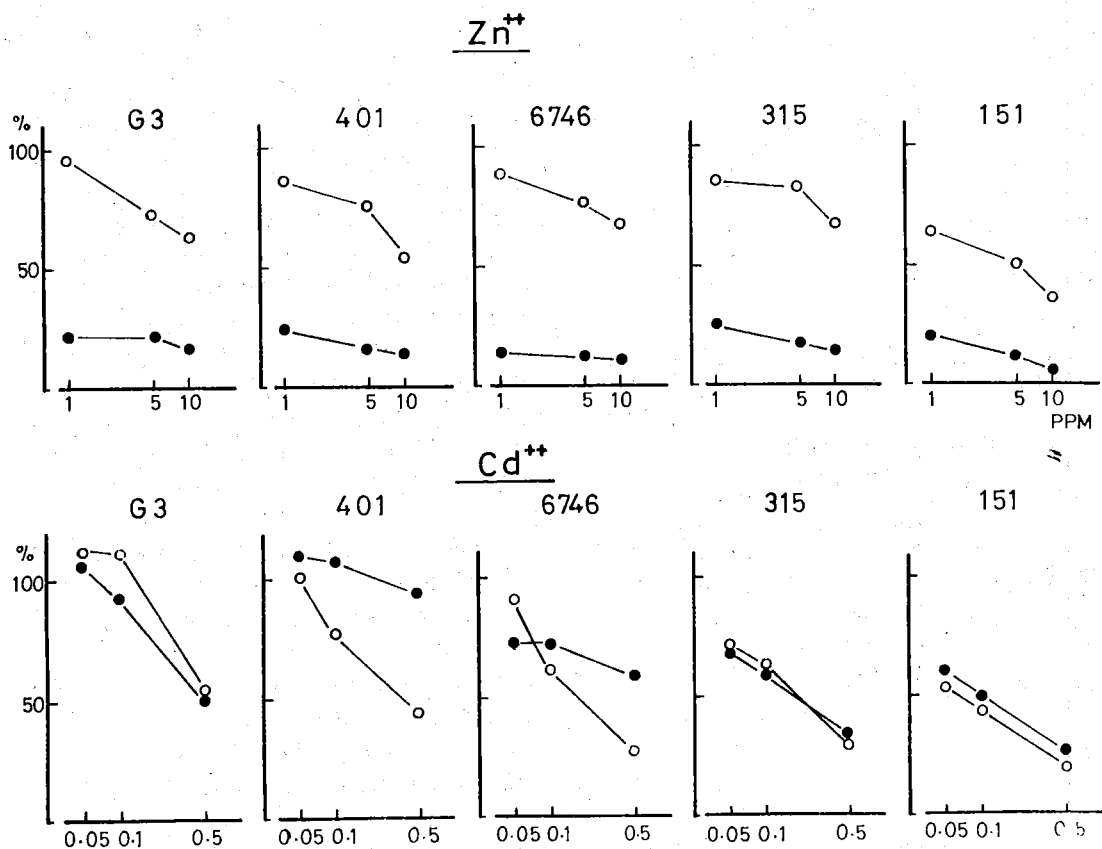


図4. Zn^{++} , Cd^{++} に対する5 strainの感受性 25℃,
○ M-medium, pH 5.1
● B. D. medium, pH 7.1

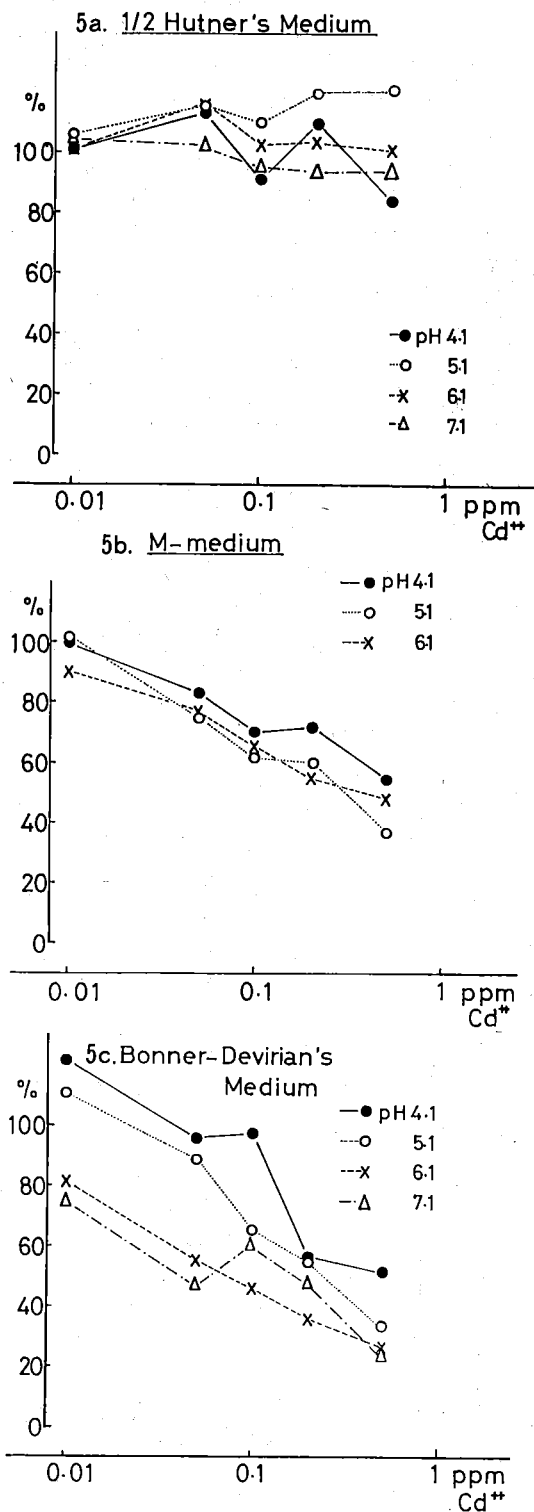


図 5. Cd²⁺による増殖阻害. 25°C

6746 は従来の汚染指標化の研究には用いられた事のない strain であるが、この実験からはその重金属感受性が他の strain に比し低いという事もない。植物生理の研究に Hillman らにより長く用いられており、長期経代培養によって安定していると考えられるので、以降の実験はすべて *L. paucicostata* 6746 により行なった。

4. 培地条件による感受性の差

3. において述べたように、培地条件の違いが重金属類による *Lemna* 増殖阻害に影響する事が示された。そこで 1/2 Hutner's medium, M-medium, B. D. medium それぞれについて、各 pH 条件下で重金属による増殖阻害の現れ方について検討した。Cd²⁺ についての結果を、図 5a - 図 5c に示す。1/2 Hutner's medium では Cd²⁺ 1 ppm でも増殖阻害は見られず、又、培地 pH の違いによる Cd²⁺ 感受性変化の傾向も見られなかった。この medium に含まれる EDTA の作用との関連が推察される。M-medium に関する実験結果の中で pH 6.1 の実験区では、培地に白沈が生じた為、正確・適切なデータとは云い難い。pH 4.1 と 5.1 を比較すると、わずかに pH 5.1 の方が増殖阻害が大きい。図 5c は栄養塩類濃度の最も低い B. D. medium での結果である。pH 4.1, 5.1 では M-medium での増殖阻害とほぼ等しい。0.01 ppm ではむしろ増殖度は高くなっている。しかし pH 6.1 - 7.1 では M-medium に比し明らかに高い増殖阻害が見られる。0.1 ~ 0.2 ppm Cd²⁺ 存在下では M-medium では 30 - 40 % の増殖阻害であるのに対し B. D. medium pH 6.1 - 7.1 では 50 - 60 % である。日本における Cd²⁺ の排水中への排出基準値は 0.1 ppm であるから、*Lemna* を実験・工業廃水等のチェックに利用するとすれば Cd²⁺ に関しては B. D. medium pH 6.1 or pH 7.1 の条件を採用して *Lemna* 育成を行なえば、Cd²⁺ の基準値を越える排水を明確に把握する事も可能と思われる。

次に Cd²⁺ 以外の各種重金属について、M-medium pH 4.1, 5.1, B. D. medium, pH 6.1, 7.1 の各条件下でどのように増殖阻害を起こすかをまとめたのが図 6a - 図 6d である。

Cr⁶⁺ は 0.5 ppm で pH, medium のちがいによる感受性の差が現れる。又 pH 5.1 - 7.1 では 1 ppm 下で双方の medium において増殖阻害度は 70 % を越える。この時小さい frond は白化し、母 frond も白化して緑色の斑点を持つ。

Mn²⁺ による増殖阻害は、M-medium よりも、B. D.

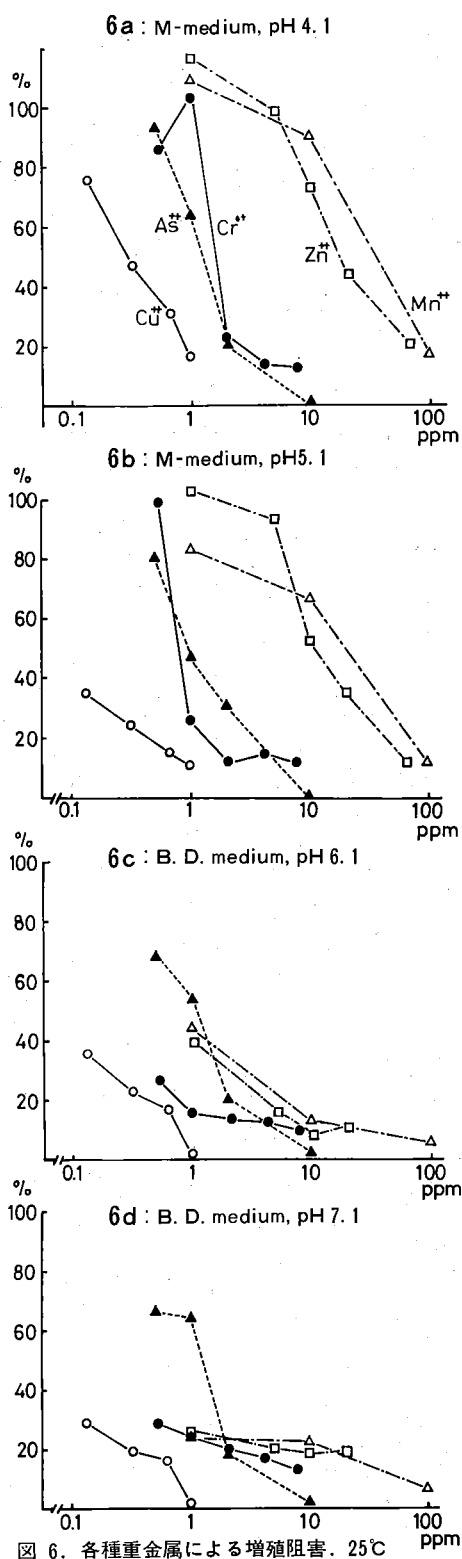


図 6. 各種重金属による増殖阻害。25℃

mediumにおいて著しい。10 ppmではB. D. mediumでfrondはバラバラに離れcolonyを形成しない。そして茶色のしみの様な斑点が見られる。しかしこの現象はM-mediumでは100 ppmにおいて初めて現れる。B. D. mediumでは1 ppmでも根が茶色に変色するものも多く、又colonyの層化がpH値の高い程著しい。1000 ppmでは双方のmedium共、増殖は全く見られず、植え込み時に3-frond colonyだったものがバラバラに離れ白茶化して枯死寸前の状態である。

Zn²⁺はMn²⁺と同様な傾向の増殖阻害を見せる。すなわちB. D. mediumでは1 ppmで既に明らかな増殖阻害が見られるのに対しM-mediumでは10-20 ppmで初めて見られる。Zn²⁺による生育阻害の徴候は、frond全体が赤茶に変色し葉脈のみ緑色を保つという症状である。B. D. mediumではこの徴候が5 ppmで現れ、10 ppmではcolonyがfrond毎にバラバラとなり枯死するものもある。20 ppmにおいても10 ppmと同様である。一方M-mediumでは20 ppmにおいても枯死・脱色は全く見られずfrond, colonyの状態も正常である。30-60 ppmでZn²⁺の生育阻害の特徴である赤茶けたfrondが生じる。しかし枯死には到らない。

As³⁺は両培地共10 ppmで完全に白化・枯死し増殖は全く見られず植え込み時のfrondがバラバラに離れている。1 ppmでは植え込み時colonyのものと見られるfrondが白化・枯死しており増殖したfrondは丸っこく小型化しているのが特徴的である。As³⁺による増殖阻害は、培地、pHによる差は見られないし、1 ppmではfrond数がcontrolの50-80%と、バラつきが大きい、fresh weightでは20数%でcontrolに比し顕著な増殖阻害が見られる。2 ppmになるとfrond数もcontrolの20-30%に抑えられる。As³⁺の環境排出基準値は0.5 ppmであるが、この濃度では90-60%とバラつきも大きく、わずかにfrondの中に黄化の見られるものがある程度で、controlに比し顕著な差は示されない。しかし十分に(controlと変らぬ程度に)増殖しているfrond群中にいくつか黄化又は白化に近い形状を示すfrondがあり、組織・形態学上からの検討により0.5 ppm As³⁺の存在を検定し得る可能性も考えられる。

Cu²⁺ではM-mediumのpH 4.1とpH 5.1の間に差が見られ、pH値の高い方が増殖阻害を起こし易い事が推察される。Cu²⁺による生育阻害はfrondの小型化・黄化・白化等で示され、増殖割合がcontrolの30%程度になる濃度では、植え込み時のcolonyは枯死寸前となり、それ以外はコロコロした小型frondばかりとなる。Cu²⁺の環境排出基準値は3 ppmであるから、どの培地条件を用いてもCu²⁺汚染のチェックは可能と思われる。

Pb²⁺に関しては、試薬にPbCl₂を用いた故か、10 ppm

でも目立った増殖阻害も色の変化も見られなかった。

以上いくつかの重金属に関して、培地条件の差が *Lemna* の増殖度に与える影響を検討した。多くの場合、*Lemna* は、栄養塩類濃度の低い B. D. medium において高い重金属感受性を示す事が明らかとなった。又、M-medium においては、pH 値が高い方が感受性大となる傾向のある事、B. D. medium では pH 6.1 と pH 7.1 の間には感受性の差が明らかでない事も示された。

従って *Lemna* を、重金属による水汚染の検定に利用する際は、B. D. medium pH 6.1-7.1 を用いるが、現在までの検討では妥当と思われる。以下の実験はすべて B. D. medium pH 6.1 にて行なった。

5. 生育温度条件による重金属感受性の差

これまでの実験はすべて、25℃下で行なわれたものである。次に異なる温度条件下での *Lemna* の重金属感受性の比較を試みた。図 7a ~ 図 7d にその結果を示す。15℃では *Lemna* は十分な増殖を示さず、従って水中重金属による影響は数字に表わすのは困難である。7日間培養後の control における三角フラスコ 1 個あたりの

frond 数は、15℃で 7-8、20℃で 20-27、25℃で 60-80、30℃で 90-130 となる。

図 7 より、 Zn^{++} による増殖阻害が最も強く生育温度に影響されている事が分る。すなわち生育温度が高い程、増殖阻害の割合は大きくなる。 Cu^{++} 、 Cr^{6+} でも同傾向であるが、25℃と 30℃の間には、差は殆んど見られない。又 Cd^{++} に関しては、この実験の限りでは、25℃において最も高い感受性を示している。

以上より、生育温度を高くセットして増殖を活発にする事で、重金属による増殖阻害の作用をより明瞭にする事が出来ると考えられる。

6. 2 種重金属の組合せによる影響

図 8 は Zn^{++} 1 ppm、 Cd^{++} 0.1 ppm、 Cu^{++} 0.1 ppm、 As^{++} 1 ppm、 Mn^{++} 1 ppm における frond 数及び fresh

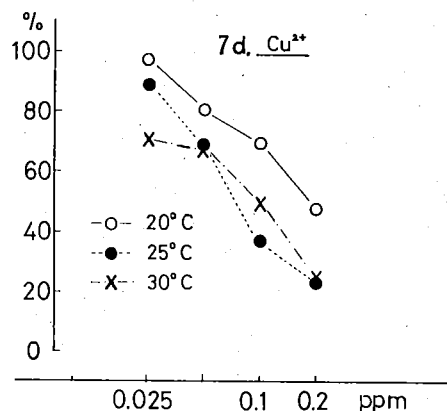
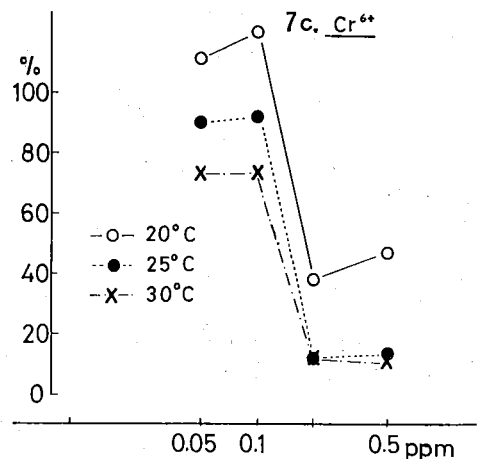
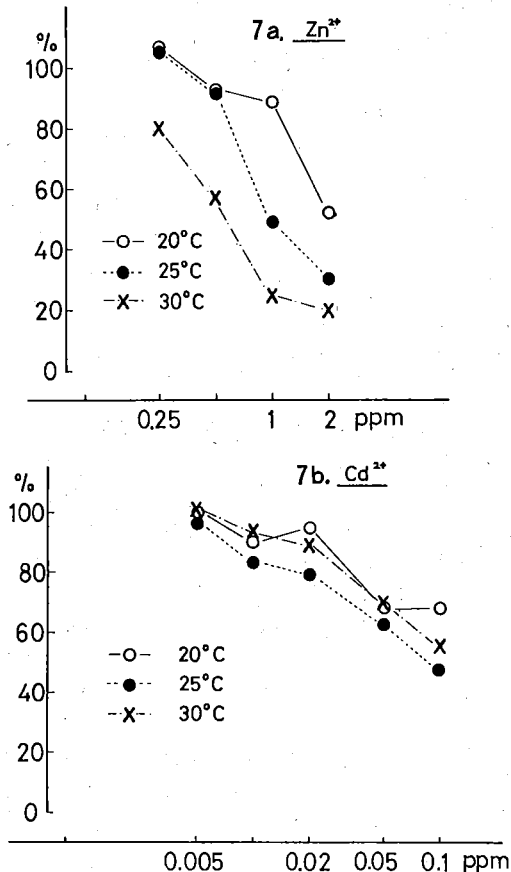


図 7. 重金属感受性に対する温度の影響。

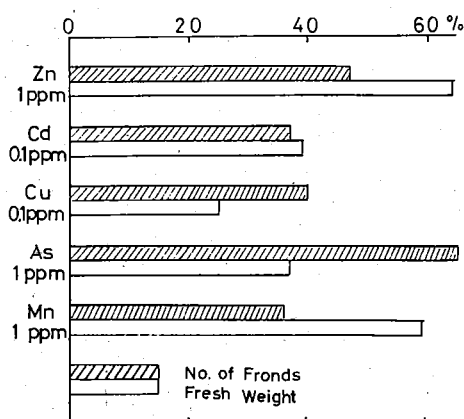


図 8. 各種重金属による50%増殖阻害
B. D. medium, pH 6.1, 25°C.

weight の control に対する%を示したものである。これらはいずれも frond 数の%が40-60の間にある。Cu⁺⁺, As⁺⁺において frond 数に対する fresh weightの割合が小さいのは frond が小型化している事を示し, Mn⁺⁺, Zn⁺⁺においてその逆になっているのは frond が大型化しラフな感じとなっている事を示している。重金属の種によって生育阻害の様式が異なる事を示しており, この事実は *Lemna* を実際に汚染指標植物として用

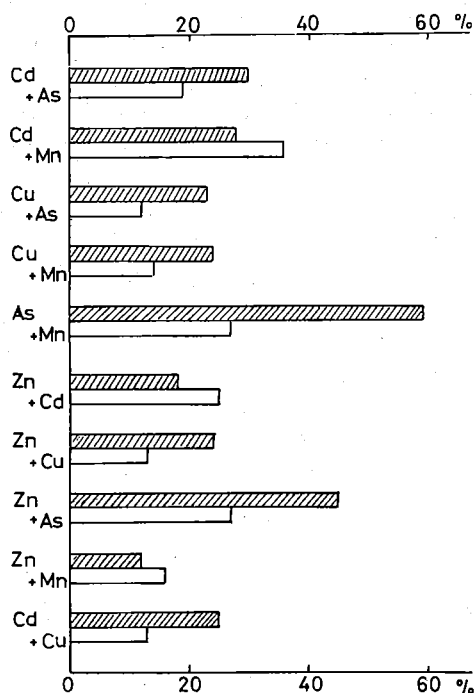


図 9. 50%増殖阻害濃度の重金属を二種組合せた場合。

いる際, 汚染物質同定の手掛りになると思われる。

これ等各種濃度重金属を2種ずつ組合せて培地に混在させた時の増殖度を図9に示す。殆んどの場合, frond 数並びに fresh weight 共に1種の場合よりも大きな増殖阻害を示している。Zn⁺⁺, Mn⁺⁺の組合せにおいてそれは著しい。しかし As⁺⁺と Mn⁺⁺の組合せでは, frond 数に関しては Mn⁺⁺1種の場合より大きな%を示し, As⁺⁺1種の時と等しい値を示す。fresh weight に関しては, As⁺⁺, Mn⁺⁺より低い値になっている。従って As⁺⁺と Mn⁺⁺は何らかの拮抗作用を行なっている事が推察される。

それ以外の組合せがすべて1種の場合より低い増殖を示す事から, *Lemna* 増殖阻害を50%前後にする濃度で2種の重金属が共存している時, *Lemna* は各々1種の重金属による増殖阻害より強い阻害作用を受けると思われる。従ってこの様な濃度で重金属が混在する汚染水に対しても *Lemna* は指標植物として役立つと考えられる。しかし濃度がより高い場合, 低い場合, 更に3種又はそれ以上の組合せの場合, 或いは重金属以外の物質との組合せの場合, 等の検討が必要である。

考 察

Lemna は水中の微量溶解物質に鋭敏な反応を示し水質汚染の指標生物となる可能性を持つが, 一方, 他の環境要因の変化に対しても劣らず敏感に反応する。従って, 汚染物質に対し最も鋭敏に反応する生育環境条件を知る事が *Lemna* を汚染のものとさして確立する上で重要な課題である一方, 生育環境のちがひによる反応と, 汚染物質による反応とを判別し得るパラメーターを探る事も必須の条件である。今回の実験では, *Lemna* が重金属類に対し最も鋭敏に反応すると思われる生育条件について考察し, 1% Sucrose を含む Bonner-Devirian's medium, pH6.1, 25°C ~ 30°C を最も適した条件と結論した。従って重金属汚染に関して検定を要する水採取して, 上記条件の培地に調整して *Lemna* を植え込み, 1週間上記温度で培養すればよい事になる。この検定は数種の重金属が混在している場合にも可能と思われる。しかし, 被検定水は重金属のみならず他の物質, 特に *Lemna* 生育を助長する物質をも併せ持っている事が推察されるので, それ等の総合された影響が *Lemna* 増殖の上に現れている事になり, 各種重金属によって *Lemna* に現れる独特の反応というものを把握していない現段階においては, この *Lemna* による bioassay の方法は, 工場排水の様な, 組成が一応決まっていて, しかも安定している水についてのみ, 用いる事が可能と思われる。多くの重金属の公共水への排出基準値附近の濃度で *Lemna* は十分に増殖阻害を生ずるので, 工場排水の長期間を通じてのチェック或いは多数の排水検体のスクリーニングに

は使用可能である。(Pb⁺⁺, Hg⁺⁺に関しては今後検討の予定である。)ただし工場のそばに排水貯留槽を作りそこに *Lemna* を浮かべるという方法は、環境要因の変化を考慮する必要があるので、現段階では実用化は無理であろう。

一般河川水、湖沼水において問題化している汚濁は、重金属類よりもむしろ、窒素、リンによる富栄養化、洗剤・除草剤、肥料等によって引き起こされる汚染等であり、これ等の汚染の指標として *Lemna* を用いる為には更に検討が必要である。

本報では *Lemna* の fresh weight と frond 数 (増殖割合) のみを測定したが、frond の型と色、根の長さ、colony の形成状態等も、重金属の種により異なる事が観察されるので、汚染物質の同定の為には、これらをデータとする方策を検討しなくてはならない。又、大気汚染の苔類による指標を試みる際行なわれている組織学的観察も、*Lemna* に応用できる方法であろう。

自然界における *Lemna* は、日本では水田に多く繁殖し、太陽光をさえぎり水中を嫌気性にする雑草として嫌がられており、硫酸銅その他の除草剤により駆除される。水流の激しい処では増殖できず、鯉や水鳥の棲む池でも繁殖はむずかしい。自然界と人間社会の様々な要因がからみ合っている中で恒常的に観察を続ける事は、従って、若干の困難があるが、*Lemna* の持つ重金属等の高い蓄積性を利用して、*Lemna* を採集してその重金属含量を測定する事により、その *Lemna* の生育している水域の汚染度を推測する事も可能と思われる。瀬戸、田崎により *Lemna* の重金属吸収・蓄積は深く研究されており、Cd⁺⁺ に関しては 24 時間以内に培地濃度の数百から数千倍にのぼると報告されている。

このような重金属類吸収蓄積のメカニズムを検討する事により、廃水中重金属回収の方策検討も可能となるであろう。

References

- Hillman, W. S.: Experimental control of flowering in *Lemna*.
1. General methods of medium composition in *L. perpusilla* 6746.
Amer. Jour. Bot. 46, 489 (1959a).
Hillman, W. S.: Experimental control of flowering in *Lemna*.
11. Some effects of medium composition, chilling agents, and high temperature on flowering in *L. perpusilla* 6746.
Amer. Jour. Bot. 46, 489 (1959b).
Hillman, W. S.: The Lemnaceae, or duckweeds.
A review of the descriptive and experimental literature. Bot. Rev. 27, 221 (1961).
Hillman, W. S.: *Lemna perpusilla* Torr., strain 6746. In: The induction of flowering.
Edited by L. T. Evans. p: 186-204.
Macmillan of Australia, Melbourne, (1969).
Hillman, W. S.: Biological rhythms and physiological timing. Ann. Rev. Plant physiol. 27, 159 (1976).
Takimoto, A. and O. Tanaka.: Effects of some SH-inhibitors and EDTA on flowering in *Lemna perpusilla* 6746. Plant Cell Physiol. 14, 1133 (1973).
佐藤治雄: 都会の雨と植物 バイオテク. 3, 22 (1971).
佐藤治雄: レムナ・テスト 図説 環境汚染と指標生物 22. (1979).
生嶋 功: 生物指標としての水草 環境と生物指標 2, 90, 共立出版 (1975).
達山和紀 et al: ウキクサ科植物による水質検定(1) 松江市内河川の水質について
山陰文化研究紀要 島根大学 14, 87 (1974).
達山和紀 et al: ウキクサ科植物による水質検定(2) ウキクサおよびアオウキクサ増殖に及ぼす金属、合成洗剤および有機汚染物質の影響
山陰文化紀要 島根大学 15, 23. (1975).
岸川昭夫・徳永隆司: アオウキクサによる淡水域富栄養化の判定 第15回日本水処理生物学会講演要旨集 (1978).
瀬戸昌之・田崎忠勝: ウキクサによる重金属イオンの吸収と生長との関係
日本植物学会第41回大会研究発表記録 (1976).