

## 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

— 銅とカドミウムの吸収・蓄積に影響を及ぼす栄養塩類 —

田中修\*・柳瀬大輔\*・滝本敦\*・那須裕\*\*・釘本完\*\*

Basic studies on environment monitoring using *Lemna paucicostata*.  
— Influence of mineral nutrients on the absorption of copper and  
cadmium by *Lemna paucicostata* 6746 —

Osamu TANAKA\*, Daisuke YANASE\*, Atsushi TAKIMOTO\*,  
Yutaka NASU\*\* and Mamoru KUGIMOTO\*\*

### ABSTRACT

The absorption of copper or cadmium ions by *Lemna paucicostata* 6746 was greater when the plants were grown on the solution containing only these heavy metals than when they were grown on Bonner-Devirian's medium with these heavy metals added. Thus the components of Bonner-Devirian's medium were examined for their effect on the absorption of copper or cadmium by this plant.

Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> added together with copper or cadmium greatly suppressed the absorption of these heavy metals by the plants, and deletion of Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> from Bonner-Devirian's medium considerably promoted their absorption.

MgSO<sub>4</sub> added together with copper or cadmium also suppressed the absorption of the heavy metal, but deletion of MgSO<sub>4</sub> from Bonner-Devirian's medium did not affect the absorption, suggesting that MgSO<sub>4</sub> does not affect the absorption of the heavy metal in the presence of Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

The absorption of copper or cadmium was not affected by the coexistence of either one of the other components of Bonner-Devirian's medium, but these components given in combination influenced the absorption of the heavy metals in the presence of Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

### 緒 言

水生植物ウキクサが、重金属イオンなどの水質汚染物質に対して、形態形成や増殖速度の変化で、鋭敏な反応を示す特性を利用して、この植物を水質汚染の指標に用いることが企図されている。また同時に、この植物が窒素やリンなどの栄養塩類および銅・カドミウムなどの重金属イオンを積極的に吸収・蓄積する能力に着目して、水質の浄化を図るための基礎的研究が行なわれてきている(Hillman & Culley 1978, 釘本・那須 1980, 1981, 田中 1981a 松本 1981, 釘本ら 1982)。その結果、銅やカドミウムが、水質汚濁防止法による排水中の基準値以下の低濃度で培養液に含まれた場合にも、この植物は、生育速度や形態形成に著しい変化をきたすことが示され

た(Hillman 1962, Takimoto & Tanaka 1973, Nasu & Kugimoto 1981)。そして、その生育速度や形態形成上の変化の程度は、水質のpHや共存するアンモニウムイオン、キレート物質により、微妙に変わり得ることが明らかにされた。さらに、その主要な原因として、培養液に含まれているアンモニウムイオンやキレート物質が、この植物による銅やカドミウムの吸収・蓄積を抑制することが見い出されている(Tanaka et al. 1982a, 1982b, Nasu et al. 1983a, 1983b)。

そこで今回は、硝酸カリウムやリン酸カリウムなど、培養液に普遍的に含まれている栄養塩類が、アオウキクサによる銅やカドミウムなどの重金属イオンの吸収・蓄積に、どのような影響を及ぼすかを調べ、それらの結果をもとに、今後、この植物を、水質汚染の指標としてどのように活用し、水質浄化にどのように役立て得るかを

\* 京都大学農学部 Fac. Agr. Kyoto Univ.  
\*\* 信州大学医学部 Fac. Med. Shinshu Univ.

考察した。

#### 材料・方法

本実験において、ウキクサによる銅・カドミウムイオンの吸収・蓄積に及ぼす影響を検討した栄養塩の種類とその濃度は、ウキクサの培養液として広く使われている Bonner-Devirian 培養液の組成 (表 1) を基本としたものである。

使用したウキクサは、Hutner's medium を 2分の1 に希釈して 1% sucrose を添加した培養液で、25°C、6000 lux の照明下、10~12日間無菌培養した、アオウキクサ *Lemna paucicostata* 6746 である。実験に際しては、一定の大きさの 3 葉状体をもつコロニーを選び、これを、あらかじめ  $1.25 \text{ kg/cm}^2$  で 10 分間高圧滅菌した、50 ml 三角フラスコ内の培養液 (25ml) に、5 コロニーずつ植え込み、25°C、約 4000 lux のもとで、24 時間、無菌的に培養した。

ウキクサ体内に吸収・蓄積した銅・カドミウムイオンの定量は、次の手順に従った。培養後のウキクサを、蒸留水、1% EDTA 溶液 (pH 5.0)、再蒸留水を使って、それぞれ 10 分間ずつ攪拌洗浄し、ろ紙でよく水分を拭きとった後、生体重を測定した。続いて、この植物体に、 $\text{HNO}_3$  を  $250 \mu\text{l}$  加えて加熱溶解し、 $\text{HNO}_3$  が蒸発後、蒸留水で希釈し、原子吸光分光光度計 PERKIN ELMER 4000 により、重金属イオンの濃度を定量した。

すべての実験において、1 実験区に 3 個の試料を用い、実験は少なくとも 2 回以上反復した。

#### 結 果

##### (1) コロニーの分離と重金属体内濃度

培養液に含まれる栄養塩類が、ウキクサによる銅やカドミウムイオンの吸収・蓄積にどのような影響を及ぼすのかを調べるため、種々の濃度の銅やカドミウムを含む蒸留水と Bonner-Devirian 培養液で、ウキクサを 24 時間培養した。

本来、ウキクサ類は 1 つの葉状体で独立して生育することは珍しく、いくつかの世代が群体を成しており、この 1 群をコロニーと呼ぶ。1 コロニーを形成する葉状体数は、ウキクサの種及び培養条件によってほぼ決っており、この実験に用いたアオウキクサは、通常、3 葉状体で 1 コロニーを形成する (田中 1981 b)。

しかし、銅やカドミウムを含む蒸留水で培養したウキクサは、24 時間後には、3 葉状体のコロニーを形成するものが減少し、2 葉状体もしくは 1 葉状体のコロニーに分離しており、健全な生育をしていないことが外見的にも明白であった。3 葉状体のコロニーから、2 葉状体もしくは 1 葉状体のコロニーへの分離の程度は、培養液中

表 1. Bonner-Devirian 培養液の組成

Component	mg/l	mM
$\text{KNO}_3$	85.0	0.84
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	20.0	0.15
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	242.0	1.03
KCl	61.0	0.82
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	42.0	0.17
$\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$	4.0	0.02
Micronutrients		
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.0	0.0035
$\text{H}_3\text{BO}_3$	1.0	0.0161
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.025	0.0001
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.1	0.0006

に含まれる銅やカドミウムイオンの濃度が高くなるにつれて、強くなった。しかし、Bonner-Devirian 培養液で培養したウキクサは、培養液中に銅やカドミウムイオンを加えても、蒸留水の場合のように著しい分離を示さなかった (表 2、表 3)。たとえば、 $5 \mu\text{M}$  のカドミウムイオンを含む Bonner-Devirian 培養液で 24 時間培養した場合、最初に植え込んだ 5 コロニーのうち、3 コロニーが 2 葉状体と 1 葉状体コロニーに分離し、全体として 8 つのコロニーとなった。一方、 $5 \mu\text{M}$  のカドミウムを含む蒸留水で培養した場合には、植え込んだコロニーすべてが 1 葉状体に分離し、コロニー数は 15 となった。

このようなウキクサの体内に吸収・蓄積された銅・カドミウムイオンの量を体内濃度で表わしたものが、表 2 表 3 である。重金属を含む蒸留水で培養したウキクサは、その重金属が銅であろうとカドミウムであろうと、Bonner-Devirian 培養液で培養されたものに比べて、何倍もの濃度で、これらの重金属を吸収・蓄積していることが示されている。たとえば、 $5 \mu\text{M}$  の銅、あるいは  $10 \mu\text{M}$  のカドミウムを含む蒸留水で培養したウキクサは、同濃度の銅とカドミウムを含む Bonner-Devirian 培養液で培養した場合の 4~6 倍の体内濃度を示している。このような結果は、Bonner-Devirian 培養液の組成となっている栄養塩類が、ウキクサによる銅やカドミウムの吸収・蓄積を阻害することを示している。

また、表 2・表 3 に示される、コロニーの分離状態と銅やカドミウムの体内濃度との間には、かなり密接な相

表2. 蒸留水または Bonner-Devirian 培養液に加えた銅イオンの、アウキクサによる吸収・蓄積と、それに伴うコロニーの分離状態

Concentration of CuSO <sub>4</sub> added (μM)	Distilled water		Bonner-Devirian's medium	
	No. of colonies	Conc. of Cu <sup>++</sup> in <i>Lemna</i> (μM)	No. of colonies	Conc. of Cu <sup>++</sup> in <i>Lemna</i> (μM)
0	5.0	...	5.0	...
1	7.6	196 ± 18	5.0	97 ± 12
2	8.3	245 ± 32	5.0	105 ± 9
5	12.0	480 ± 51	6.0	126 ± 6
10	15.0	694 ± 31	7.7	178 ± 28
20	15.0	1390 ± 197	7.3	197 ± 4

表3. 蒸留水または Bonner-Devirian 培養液に加えたカドミウムイオンの、アウキクサによる吸収・蓄積とそれに伴うコロニーの分離状態

Concentration of CdCl <sub>2</sub> added (μM)	Distilled water		Bonner-Devirian's medium	
	No. of colonies	Conc. of Cd <sup>++</sup> in <i>Lemna</i> (μM)	No. of colonies	Conc. of Cd <sup>++</sup> in <i>Lemna</i> (μM)
0	5.8	...	5.0	...
1	13.7	426 ± 62	5.3	133 ± 11
2	14.3	789 ± 146	6.0	220 ± 15
5	15.0	1526 ± 174	8.2	316 ± 37
10	15.0	2609 ± 146	11.0	418 ± 53
20	15.0	3417 ± 493	13.2	699 ± 95

関関係が見られる。従って、銅やカドミウムを含む蒸留水で培養したウキクサのコロニーが、Bonner-Devirian 培養液で培養した場合よりも、多く分離するのは、蒸留水で培養された場合に、重金属イオンの吸収・蓄積量が圧倒的に多くなることに起因すると考えられる。

## (2) 重金属の吸収・蓄積を阻害する栄養塩類

表2・表3において、Bonner-Devirian 培養液の組成となっている栄養塩類が、銅やカドミウムの吸収・蓄積を阻害していることが示されたので、どの栄養塩類が、より支配的に重金属の吸収・蓄積を阻害しているのかを調べた。5 μMの銅、あるいは、10 μMのカドミウムイオンを含む蒸留水に、Bonner-Devirian 培養液の組成を7つに分けた各栄養塩を、単独で、その濃度のまま加えて培養液とし、24時間、ウキクサを培養した。その結果、体内に吸収・蓄積された銅・カドミウムイオンの量を体内濃度で示したものが、表4である。

銅やカドミウムとともに、KNO<sub>3</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、KCl、FeC<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>、微量元素などを含んだ培養水で培養したウキクサの銅・カドミウム体内濃度は、銅やカドミウムのみを含む水溶液で培養したものとほとんど同じなのに対し、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、あるいは、MgSO<sub>4</sub>を含む溶液で培養したウキクサの銅やカドミウムの体内濃度は、銅やカ

ドミウムのみで培養した場合の約半分であった。それ故、Bonner-Devirian培養液に含まれるCa(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>とMgSO<sub>4</sub>が、ウキクサによる銅・カドミウムの吸収・蓄積を阻害している主要因と思われる。

しかし、これら2つの栄養塩類による吸収・蓄積阻害は、各々単独で与えた場合、Bonner-Devirian 培養液で見られる。銅・カドミウムの吸収・蓄積阻害には遠く及ばない。そのため、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>やMgSO<sub>4</sub>も含めて、いくつかの栄養塩類による相加的、あるいは、相乗的作用が、ウキクサによる銅・カドミウムの吸収・蓄積に関与していることが推察される。

## (3) Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>とMgSO<sub>4</sub>の濃度と重金属吸収阻害作用の関係

以上のようにして、Bonner-Devirian 培養液に含まれるCa(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>とMgSO<sub>4</sub>が、ウキクサによる銅やカドミウムの吸収・蓄積を阻害することが明らかになった。そして、銅・カドミウムいずれの場合にもCa(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>の作用がMgSO<sub>4</sub>の作用を上回る傾向が示された(表4)。しかし、Bonner-Devirian 培養液組成としての、これらの濃度は、表1に示されるように、それぞれ1.03 mM、0.17 mMである。そこで、これらの栄養塩類の重金属吸収・蓄積阻害効果が、濃度によりどれほど変化するかを調べた。

表 4. Bonner-Devirian 培養液に含まれる栄養塩類が、アオウキクサによる銅・カドミウムイオンの吸収・蓄積に及ぼす影響

Treatment	Conc. of Cu <sup>++</sup> or Cd <sup>++</sup> in <i>Lemna</i> (μM)	
	5 μM CuSO <sub>4</sub>	10 μM CdCl <sub>2</sub>
Distilled water (D. W.)	467 ± 41	2824 ± 258
D. W. + KNO <sub>3</sub>	406 ± 21	2810 ± 259
D. W. + KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	484 ± 35	2600 ± 201
D. W. + Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	226 ± 27	1107 ± 170
D. W. + KCl	473 ± 33	2437 ± 279
D. W. + MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	259 ± 12	1737 ± 268
D. W. + FeC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub>	549 ± 34	3169 ± 327
D. W. + Micronutrients	517 ± 27	3075 ± 201
Bonner - Devirian's medium	173 ± 40	445 ± 62

各栄養塩類の濃度及び微量元素組成は表 1 参照。

表 5. アオウキクサによる銅イオンの吸収・蓄積に及ぼす Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> と MgSO<sub>4</sub> の効果とその濃度関係

Concentration (μM)	Concentration of Cu <sup>++</sup> in <i>Lemna</i> (μM)	
	Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O
0	537 ± 81	537 ± 81
0.086	309 ± 30	331 ± 20
0.17	309 ± 22	238 ± 32
0.51	286 ± 21	232 ± 36
1.03	260 ± 26	213 ± 54

表 6. アオウキクサによる銅イオンの吸収・蓄積に対して Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> と MgSO<sub>4</sub> が Bonner-Devirian 培養液中で果たす効果

Treatment	Conc. of Cu <sup>++</sup> in <i>Lemna</i> (μM)
Bonner-Devirian's Medium (BD)	159 ± 10
BD-Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	384 ± 43
BD-MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	175 ± 14
BD-Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O - MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	514 ± 50
Distilled water	537 ± 81

その結果、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> は、MgSO<sub>4</sub> と同じ 0.17mM の濃度で、5 μM の銅を含む蒸留水を加えた場合にも、ウキクサによるこれら重金属の吸収・蓄積を十分、阻害することが示された(表 5)。また、MgSO<sub>4</sub> による重金属吸収・蓄積阻害効果は、濃度を増加してもあまり変わらなかった。

(4) 栄養塩類の相互作用による重金属吸収・蓄積の制御  
銅やカドミウムを含む蒸留水で培養したウキクサの重金属吸収・蓄積に阻害的效果をもつ Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> や MgSO<sub>4</sub> が、重金属を含む Bonner-Devirian 培養液中において、どのようにウキクサによる重金属の吸収・蓄積を

制御しているかを調べた。Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> や MgSO<sub>4</sub> を除去した Bonner-Devirian 培養液に 5 μM の銅を加えて、ウキクサを培養し、24 時間後の植物体内の銅濃度を示したのが表 6 である。

Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> を Bonner-Devirian 培養液から抜いた場合、ウキクサによる銅の吸収・蓄積は大幅に増加し、Bonner-Devirian 培養液中においても、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> は、ウキクサによる銅の吸収・蓄積を阻害していることが確認された。

MgSO<sub>4</sub> を Bonner-Devirian 培養液から除いた場合、ウキクサによる銅の吸収・蓄積は、ほとんど増加しなかった。しかし、同時に Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> を除去した場合には、

MgSO<sub>4</sub>による銅吸収阻害効果は認められた。この結果は、MgSO<sub>4</sub>による銅の吸収・蓄積阻害作用は、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>が共存しない場合のみ認められるものであり、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>が共存すると、その作用は消失することを示唆している。

また、Bonner-Devirian 培養液からMgSO<sub>4</sub>を除去した場合、すなわち、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>がMgSO<sub>4</sub>以外の栄養塩類と共存する時に、重金属の吸収・蓄積量がほとんど増加しないのは、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>がMgSO<sub>4</sub>以外の栄養塩類との相互作用を通して、重金属の吸収・蓄積を阻害するためと考えられる。

### 考 察

本実験において、銅やカドミウムなどの重金属イオンのみを含む溶液で、24時間、培養したウキクサは、これらの重金属イオンを同濃度で含む Bonner-Devirian 培養液で培養した場合に比べて、数倍の濃度で、これらの重金属を体内に吸収・蓄積することが明らかとなった。これは、Bonner-Devirian 培養液中においては、主にCa(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、補足的にMgSO<sub>4</sub>が銅・カドミウムイオンの吸収・蓄積を阻害するためと考えられる。また、単独では効果を示さない栄養塩類も、いくつか共存することにより、相加的あるいは相乗的な作用により、ウキクサによる銅・カドミウム吸収・蓄積に阻害効果を及ぼしている可能性がある。そして、これらの要因は、調べられた限りにおいて、銅あるいはカドミウムに特異的なものではない。

Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>は、Bonner-Devirian 培養液中で最も高濃度で含まれる栄養塩であるため、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>による重金属吸収・蓄積阻害効果は、この塩の積極的働きというよりは、その高濃度に起因するものとも考えることもできる。しかし、かなりの低濃度でも、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>の効果は認められるので、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>は積極的に銅やカドミウムイオンの吸収・蓄積を制御するものと思われる。その働きが、カルシウムイオンによるか、硝酸イオンによるかは明らかではないが、Bonner-Devirian 培養液は硝酸イオンをKNO<sub>3</sub>の形で高濃度に含んでおり、KNO<sub>3</sub>が明白な銅・カドミウム吸収・蓄積阻害効果を示さないことから、おそらく、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>による重金属吸収・蓄積阻害作用は、カルシウムイオンによるものであろうと推定される。

カルシウムイオンは、植物の細胞膜を構造的・機能的に正常に保つための必須イオンであり、根の選択的吸収作用を支配する細胞膜の構造や透過性に対して、外液中のカルシウムイオンが直接的な作用を及ぼすことは、良く知られている (Epstein 1961, 1972, Lauchli & Epstein 1970, Marinos 1962, Rains et al. 1964)。従っ

て、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>を含まない培養液で培養したウキクサの銅・カドミウムイオンの吸収・蓄積は、正常な植物の作用とは異なるものと考えねばならない。このことは、このような培養液で培養したウキクサのコロニーが異常な分離状態を示すことから、強く支持される。

Bonner-Devirian 培養液に含まれている MgSO<sub>4</sub>の濃度は0.17mMであるのに対して、これより高濃度で含まれるKNO<sub>3</sub>、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、KClなどが、ウキクサによる銅・カドミウムイオン吸収・蓄積にほとんど影響をもたないことから、MgSO<sub>4</sub>による重金属イオン吸収・蓄積阻害効果は、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>の場合と同様に、この栄養塩のもつ本質的作用によるものと思われる。このMgSO<sub>4</sub>の作用が、マグネシウムイオンによるものか、硫酸イオンによるものかは、現在、検討中であるが、いくつかの予備の実験から、マグネシウムイオンによるものであろうと推察される。

筆者らが知る限りにおいては、マグネシウムイオンによる重金属イオンの吸収阻害を示す報告は他にない。その原因として、この種の多くの実験においては、細胞膜の正常な機能を保つために、培養液にカルシウムイオンが加えられており (Epstein et al. 1963, Schmid et al. 1965, Cutler & Rains 1974)、本実験が示すように、MgSO<sub>4</sub>による重金属吸収阻害は、カルシウムイオン存在のもとでは認められないことが考えられる。ただし、ウキクサは根の組織が退化していると言われており (Hillman 1961)、他の植物と違った重金属吸収機能をもっている可能性があり、MgSO<sub>4</sub>による重金属吸収阻害効果は、この植物に特有な重金属吸収機構に由来するものかも知れない。また、この植物は、培養環境に非常に鋭敏に反応するため、マグネシウムイオンによる銅・カドミウム吸収・蓄積の阻害作用も、そのような特質を通して、露呈されたものである可能性もある。たとえば、この植物において、アンモニウムイオンは銅やカドミウムの吸収・蓄積を阻害する (Tanaka et al. 1982 a, Nasu et al. 1983a)が、アサガオやコムギでは、このような現象は観察されない。アサガオやコムギにおいては、短い実験期間中の生長量はごくわずかであるため、アンモニウムイオンの積極的吸収もウキクサに比べれば極端に少なく、アンモニウムイオンのもつ重金属の吸収・蓄積を阻害する作用が明白に示し得ないものと考えられる。

銅やカドミウムだけを含む溶液に種々の栄養塩を単独で添加した培養液は、不均衡液であり、ここで培養された植物体をもつ細胞膜の透過性は正常なものではない。しかし、いくつかの塩類が同時に加えられた場合には、それらの相互作用に基づく拮抗効果により、細胞膜の透過性が正常に保たれる場合のあることが知られている。本実験において、Bonner-Devirian 培養液のいくつか

の組成が共存する時に、ウキクサの銅・カドミウム吸収・蓄積が強く阻害されたのは、このことによるものであろう。

今回の実験において、栄養塩単独の効果を見る際に、その溶液のpHの影響をまったく考慮しなかった。しかし、この植物によるカドミウムイオンの吸収はpHの影響を大きく受けることが知られている(Nasu et al. 1983a)。従って、今後更に詳細に、栄養塩類の重金属イオン吸収・蓄積阻害作用を検討する場合には、このことを考慮する必要がある。

また、Bonner-Devirian培養液に含まれる $\text{FeCl}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ 、 $\text{MnSO}_4$ などは、単独では、ウキクサによる銅やカドミウムの吸収・蓄積にほとんど影響を及ぼさなかった。しかし、これらの濃度は非常に低く、もしも、濃度を増せば、これらの塩類も重金属イオンの吸収・蓄積になんらかの影響を及ぼすであろうことは、十分考えられる。

以上の実験結果及び考察は、この植物を水質汚染の指標植物として利用する際に、十分に考慮されねばならないものと考えられる。筆者らはすでに、この植物が重金属などの水質汚染物質に対して、速やかに形態形成や増殖速度の変化で反応することを明らかにしている(Takimoto & Tanaka 1973, Tanaka et al. 1982b, Nasu & Kugimoto 1981)が、これらの知見はいずれも植物の生育に必要な栄養塩類を十分含んだ培養液で生育した植物についてのものであった。ところが、実際の排水は、このような栄養塩類をほとんど含まないか、また含んでも、その濃度はきわめて低いか、ある種の栄養塩だけを多量に含む不均衡溶液である。従って、このような排水中に含まれる重金属イオンに対して、この植物がどのように反応するかを知るためには、本実験の結果及び考察は、きわめて有用である。特に、栄養塩類を含まない水溶液で培養したウキクサは、栄養塩類を豊富に含む培養液で生育したものに比べて、数倍の速度で重金属イオンを吸収・蓄積し、体内の重金属濃度の高さは、外見的に、コロニーの分離状態で推定できるという点は、この植物を水質汚染の指標として用いる場合、重視されるべきであろう。

また、湖沼などの富栄養化に対する指標植物としてウキクサを用いる場合にも、本実験で明らかにされた、この植物による重金属イオンの吸収・蓄積量が、共存する栄養塩類に大きく影響されるという性質は有効であろう。つまり、湖沼の水に一定量の銅やカドミウムなどの重金属イオンを添加して、ウキクサを培養すると、富栄養化の程度が強ければ強いほど、ウキクサによって吸収・蓄積される重金属イオンの量は少なく、外見的にも、コロニーの分離状態などで健全な様相を呈するであろう。一

方、富栄養化の程度が低ければ、含まれる栄養塩類の濃度が低いため、ウキクサによる重金属イオンの吸収・蓄積速度は大きく、体内濃度の高まりとともに、コロニーの分離が観察されるであろう。今後、このような利用のためには、富栄養化の元凶である窒素やリン、カリウムなどによって、その吸収が鋭敏に影響される金属イオンを見い出すことが、課題となるであろう。

#### 参 考 文 献

- 釘本完・那須裕 (1980) 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 昭和54年度特定研究・信州の自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究 pp. 6-14
- 釘本完・那須裕 (1981) 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 アオウキクサによる重金属取り込み 昭和55年度特定研究・信州の自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究 pp. 14-20
- 釘本完・那須裕・田中修・滝本敦 (1982) 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 銅とカドミウムの吸収・蓄積 昭和56年度特定研究・信州自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究 pp. 1-8
- 田中修 (1981a) バイオマス資源としてのウキクサ 水草研究会報No 5 : 2-5
- 田中修 (1981b) ウキクサの開花とサリチル酸 植物と自然. 15巻9号 16-20
- 松本聡 (1981) ウキクサによる富栄養塩吸収とその利用 化学と生物 19 : 594-600
- Cutler, J.M. and D.W.Rains (1974) Characterization of cadmium uptake by plant tissue. *Plant Physiol.* 54 : 67-71.
- Epstein, E. (1961) The essential role of calcium in selective cation transport by plant cells. *Plant Physiol.* 36:437-444.
- Epstein, E., W.E.Schmid and D.W.Rains (1963) Significance and technique of short-term experiments on solute absorption by plant tissue. *Plant & Cell Physiol.* 4:79-84.
- Epstein, E. (1972) Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. John Wilkey and Sons, New York.
- Hillman, W.S. (1961) The Lemnaceae, or duckweeds. *The Botanical Review.* 27:221-237.
- Hillman, W.S. (1962) Experimental control of flowering in *Lemna*. IV. Inhibition of photoperiodic

- sensitivity by copper. Amer. Jour. Bot. 49:892-897.
- Hillman, W.S. and D.D. Culley, Jr. (1978) The uses of duckweed. American Scientist 66:442-451.
- Lauchli, A. and E. Epstein (1970) Transport of potassium and rubidium in plant roots. The significance of calcium. Plant Physiol. 445:639-641
- Marinos, N.G. (1962) Studies on the sub-microscopic aspects of mineral deficiencies. Amer. Jour. Bot. 49:834-841.
- Nasu, Y. and M. Kugimoto (1981) Lemna (duckweed) as an indicator of water pollution. I. The sensitivity of Lemna paucicostata to heavy metals. Arch. Environm. Contam. Toxicol. 10: 159-169.
- Nasu, Y., M. Kugimoto, O. Tanaka and A. Takimoto (1983a) Comparative studies on the absorption of cadmium and copper in Lemna paucicostata. Env. Poll. (Ser. A) in press.
- Nasu, Y., M. Kugimoto, O. Tanaka, D. Yanase and A. Takimoto (1983b) Effect of cadmium and copper coexisting in the medium on the growth and flowering of Lemna paucicostata 6746 in relation to their absorption. Submitted to Env. Poll. (Ser. A)
- Rains, D.W., W.E. Schmid and E. Epstein (1964) Absorption of cations by roots. Effects of hydrogen ions the essential role of calcium. Plant Physiol. 39:274-278.
- Schmid, W.E., H.P. Haag and E. Epstein (1965) Absorption of zinc by excised barley roots. Physiol. Plantarum. 18:860-869.
- Takimoto, A. and O. Tanaka (1973) Effects of some SH-inhibitors and EDTA on flowering in Lemna perpusilla 6746. Plant & Cell Physiol. 14:1133-1141.
- Tanaka, O., Y. Nasu, A. Takimoto and M. Kugimoto (1982a) Absorption of copper by Lemna as influenced by some factors which nullify the copper effect on flowering and growth. Plant & Cell Physiol. 23: 1291-1296.
- Tanaka, O., Y. Nasu, D. Yanase, A. Takimoto and M. Kugimoto (1982b) pH dependence of the copper effect on flowering, growth and chlorophyll content in Lemna paucicostata 6746. Plant & Cell Physiol. 23:1479-1482.