

# ヒ素汚染土壌における水稻生育障害の 発現機構とその対策 (第1報)

培地におけるヒ素形態の違いが水稻の養分吸収  
および生育・収量におよぼす影響

山根 忠昭\*・山路 健\*・高見 有一\*

Mechanism of Rice Plant Injury in Arsenic Contaminated  
Paddy Soils and Its Preventive Measures

I. Influence of Arsenite and Arsenate in Growth Media on  
the Nutrient Uptake, Growth and Yield of Rice Plant

Tadaaki YAMANE, Tsuyoshi YAMAJI, Yuichi TAKAMI

## 目 次

I 緒 言 .....	1	3 水稻の生育、収量及び養分含有率におよぼす影響 .....	8
II 材料及び実験方法 .....	2	1) 生育、収量 .....	8
1 栽培試験法 .....	2	2) 養分含有率と吸収量 .....	11
2 養水分の吸収試験法 .....	2	IV 考 察 .....	12
3 溶存酸素の吸収試験法 .....	2	V 摘 要 .....	15
4 分析法 .....	3	引用文献 .....	15
III 実験結果 .....	3	Summary .....	17
1 水稻の養分吸収におよぼすヒ素及び亜ヒ素の影響 .....	3		
2 水稻根による溶存酸素吸収におよぼすヒ素及び亜ヒ素の影響 .....	8		

## I 緒 言

ヒ素で汚染されている農耕地において畑作物を栽培する場合、生育障害は比較的軽微であるが、水田として水稻を栽培すれば激しい障害が発生することが多く、しばしば大きい問題となる。このような現象から直ちに水稻が本来ヒ素毒性に対して特異的に抵抗性が弱いとはいえない。なぜならば、水稻でも水管理や高畦栽培<sup>1)</sup>などによって作土を酸化的に保てば障害が著しく軽減することからみて、抵抗性の差異に起因する

ものでないことは明らかである。したがって、水稻のヒ素障害は作物間のヒ素毒性に対する抵抗性の差異よりも、栽培環境一とりわけ湛水条件に問題があると考えられる。

このことから、わが国における作物のヒ素障害問題は、主として水稻に特有な課題であるといえよう。しかし、海外では無機系ヒ素剤農薬の連用による土壌残留で、畑作物、果樹などでもヒ素障害についての報告が多い<sup>2,3,10,19,20)</sup>。近年、わが国でも花田ら<sup>8)</sup>が殺虫剤(ヒ素剤)や殺菌剤(銅剤)の散布によってヒ素と銅で汚染されたリンゴ園土壌において果樹に対する障

\* 環境保全科

害性を知るため、指標植物としてアズキを栽培したところ生育阻害がみられた。この阻害作用は銅よりもヒ素過剰害の可能性が大きいことを報告している。

しかし、多くのヒ素汚染土壌における障害問題は古くから水稲で起っている。横井<sup>26)</sup>は静岡県内のナン畑跡地で、水稲の生育が正常な部分と不良な部分についてヒ素と鉛を分析した結果、後者がこれらの含量の高いことを報告し、萩原<sup>17)</sup>も同じく徳島県下におけるナン畑跡地で麦作に対してはほとんど被害が現われないが、水稲作に対しては著しいことを報告している。これはナン畑時に散布したヒ素鉛に起因するもので、鉛より毒性の甚だしく大きいヒ素に起因するものと推察している。また高崎<sup>22)</sup>もヒ素鉛、ヒ素石灰が麦作に対してほとんど害作用はないが、水稲に対しては、その極く少量の施用も激しい有害作用を示すことを述べている。海外においても同様な報告があり、REED<sup>18)</sup>はアメリカ合衆国の LOUISIANA 地方においてワタ作に散布したヒ素石灰が、その後作として水稲を栽培した場合にのみ激しい障害を起すことを述べ、その原因として、ヒ素塩が有害性の大きい亜ヒ素塩やアルミンに還元されるためであると推定している。EPPS<sup>19)</sup>も同様にワタの害虫防除にヒ素剤（普通はヒ素石灰）を散布した結果、後作水稲に顕著な減収がみられた。このようなヒ素の有害性はヒ素の還元生成物に基づくとしている。

わが国のヒ素汚染農用地は、ヒ素農薬の残留によるものと鉱山活動に由来するものとに大別される。前者の場合は、古い果樹園や野菜園に多く、後者の場合は主に水田で、島根県、宮崎県、大分県、宮城県、山口県その他各地に分布している。本県のヒ素汚染地は県西部に多く、津和野と日原の両町にまたがる笹ヶ谷鉱山地区をはじめ、益田市の左ヶ山 鉱山地区がこれにつき、その他小規模のものを含めると5、6か所は存在する。これらの農耕地の大部分は水田であり、一部には水稲より被害度の軽い畑地や桑園に転換されているところもある。

以上のように、ヒ素による農作物の有害作用が水稲で大きいのは、ヒ素の還元物質に起因するという説が有力であるが、実験的な根拠に乏しく未だ推論の域を出ていない面が多い。

そこで筆者らはヒ素汚染水田における水稲の生育障害の発現機作を解明し、適切な対策を確立するために一連の研究を行った。今回はその第一段階として、培

地におけるヒ素とその還元物質の主体をなすと考えられる亜ヒ素の存在が水稲の養分吸収及び生育・収量におよぼす影響を明らかにするため、濃度規制が容易で、形態変化の少ない水耕法で検討したので得られた結果について報告する。

本研究の遂行に当ってご便宜とご助言を頂いた当場土壤肥料科長村上英行博士、実験に協力頂いた元当場土壤肥料科松浦一人技師（現島根県飼料検査所）に深謝する。

## II 材料及び実験方法

### 1 栽培試験法

4 l容の磁製ポットに塩化ビニール製のザルをはめ、その底が2、3mm程度つかるように井戸水を入れて、水稲品種日本晴を1973年6月12日に播種した。2葉期になると、よくそろった苗を4 l容ポットに2個体移植して水耕栽培を行った。基本培養液は木村氏B液で井戸水を加えて3 lにしたものでpHは5.0~5.5に塩酸を用いて調節した（第1表）。

苗が5、6葉期になると、培養液中のAs濃度が0、2.5、5、10 ppmの4段階になるように、ヒ素ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4$ ) と亜ヒ素ナトリウム ( $\text{NaAsO}_2$ ) のそれぞれの3,000 ppm As 溶液を原液として所定量ずつ添加した。Asの価数の違いからヒ素塩をAs(V)で、亜ヒ素塩をAs(III)で表示し、各区2連で行った。培養液の更新は、As処理前は5日ごとに、処理後は2~4日ごとに行なった。試験は降雨が入らないようにポリエチレンフィルムで屋根をし、周囲は開放にした。

### 2 養水成分の吸収試験法

培養液の更新直後にAsを所定濃度となるように晴天日の7月14日午前11時に添加し、48時間後に残存溶液の重量測定と養分元素の分析を行い、それぞれ無作付区との差引計算により、水及び各種養分の吸収量を算出した。この実験は初めて処理を開始したときと、1週間処理を継続した後との2回に行なった。一方処理を25日間継続後に稲体の乾物重の測定・分析を行い、養分とAsの吸収状況を調べた。

### 3 溶存酸素の吸収試験法

根の呼吸におよぼすヒ素の影響を知るため、あらかじめ別に水稲を水耕栽培し、生育のよくそろっているポットにAsとして3 ppmとなるように前記のヒ素塩と亜ヒ素塩をそれぞれ添加し、3時間後の溶存酸素

第1表 実験開始時の培養液の組成

要素	濃度 (ppm)		給源	
	第1回	第2回	井水(ppm)	塩類
NH <sub>4</sub> -N	10.65	9.63	0.12	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
NO <sub>3</sub> -N	14.70	17.87	1.27	KNO <sub>3</sub> , Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	12.73	10.30	0.02	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
K <sub>2</sub> O	18.25	21.50	3.18	KNO <sub>3</sub> , KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
CaO	21.65	43.33	23.40	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
MgO	24.49	27.32	9.90	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O
Fe	2.40	2.40	0.10	Fe-Citrate
SiO <sub>2</sub>	—	40.09	40.83	—
Mn	—	0.12	0.12	—

注) 第1回の養分吸収試験のみ脱塩水を使用。その他の培養液は井水で調製しており、第2回の吸収試験の場合とほぼ同じ。

量を測定して、水稲根による酸素吸収量を算出した。

### 4 分析法

#### 1) 培養液の分析

NH<sub>4</sub>-Nは蒸留滴定法、NO<sub>3</sub>-Nはフェノールホルホン酸法による比色法でそれぞれ定量した。CaO、MgOは原子吸光法で行い、定量に際しては、供試液に干渉抑制剤として1,000 ppm Sr相当を塩化ストロンチウムで加えた。K<sub>2</sub>Oは炎光法、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>はモリブデン青法による比色法、SiO<sub>2</sub>はモリブデン黄法による比色法によりそれぞれ定量した。溶存酸素はWINKLER法によって測定した。

#### 2) 植物体の分析

乾燥植物粉末の1~2 gをコニカルビーカーに採り、硝酸20~30 mlを加え、時計皿で蓋をし、150°Cのホットプレート上で加熱分解する。激しい分解が終了後、過塩素酸10 mlを加えて約230°Cで加熱分解し、ほぼ乾固させ、つぎに1 N塩酸10 mlを加えて加熱溶解し、ろ過洗浄後、蒸留水で一定量にした。これを分析原液として適当に希釈して分析に供した。SiO<sub>2</sub>は重量法、Nはケルダール法、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>はバナドモリブデン酸法による比色法、K<sub>2</sub>Oは炎光法、CaO、MgO、Fe、Mnは原子吸光法で定量した。CaO、MgOの分析は前記と同様に1,000 ppm Srを添加して行った。AsはAg-DDC法による比色法で定量した。

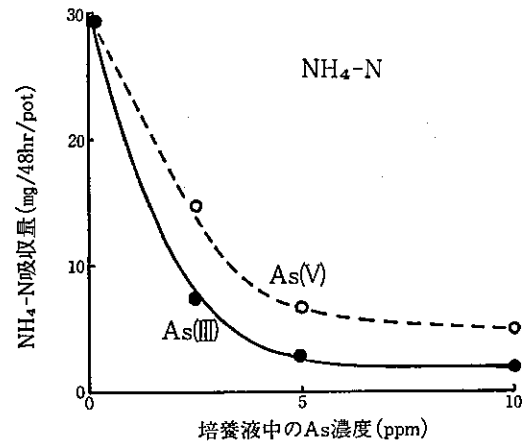
## III 実験結果

### 1 水稲の養分吸収におよぼすヒ素及び亜ヒ素の影響

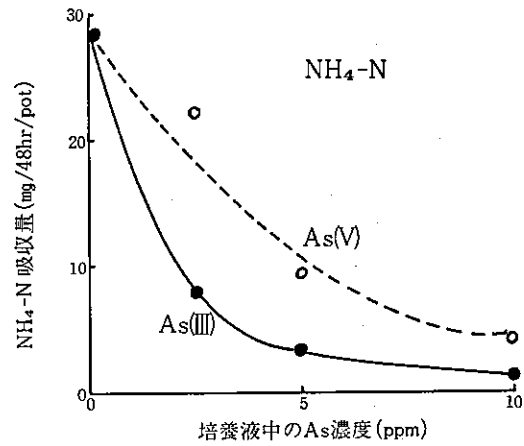
土壌溶液中のヒ素は主にヒ素又は亜ヒ素の形態で存在するので、これらの存在によって水稲の養分吸収に与える影響を試験した。試験に先だって、As処理濃度を決定するため予備的に現地でのヒ素汚染土壌(NHCl可溶、As 80 ppm)を湛水し30°Cでインキュベーションした際に溶解するAs濃度の上限を確かめ、その結果に基づいてAs処理濃度を前記のように4段階に設定した。

培養液中のAs(III)及びAs(V)濃度と根の各種養分の吸収状況を調査した結果は第1図から第15図に示すとおりであり、As処理直後から48時間までの養分吸収量と、As処理1週間継続後から48時間内の養分吸収量を比較しやすいように対称的に示した。

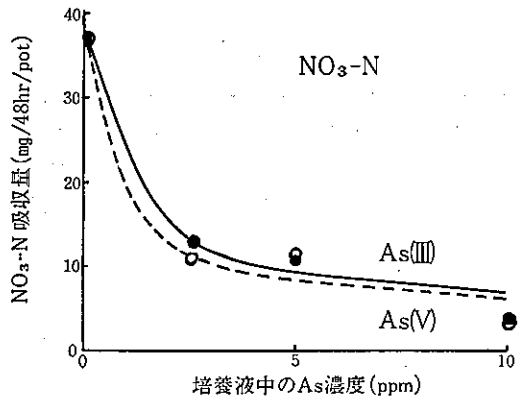
図から明らかなようにAs(III)又はAs(V)の濃度増加にともない、水稲根の養分吸収は急激な低下を示すが、ある濃度以上になると緩やかな低下となり、成分によってはほぼ一定の値を示すようにみえた。この傾向は三井<sup>16)</sup>が各種の呼吸阻害剤を添加して行った実験結果と類似しており、Asの5 ppm添加ではAs(III)及びAs(V)ともに彼らのいう究極吸収に近いと考えられる。しかし、厳密な意味では養分によって培地のAs濃度が上昇すれば、更に緩やかな減少が認められ、10 ppmでもなおこのような減少が続くことも予



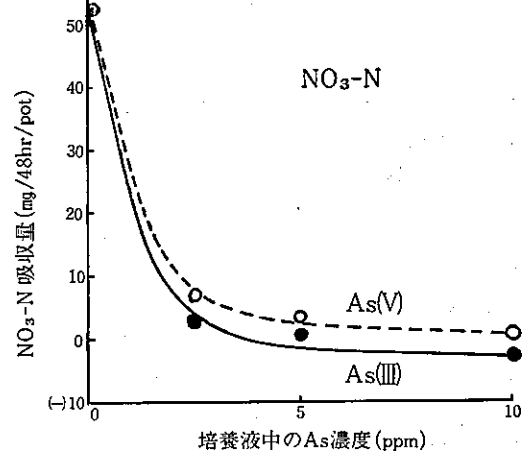
第1図 As 処理直後から48時間中の吸収量



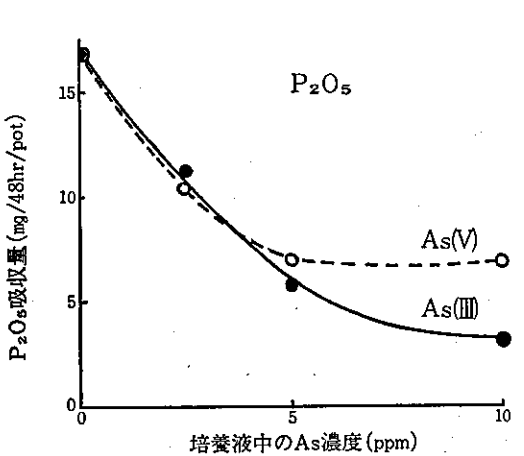
第2図 As 処理1週間後から48時間中の吸収量



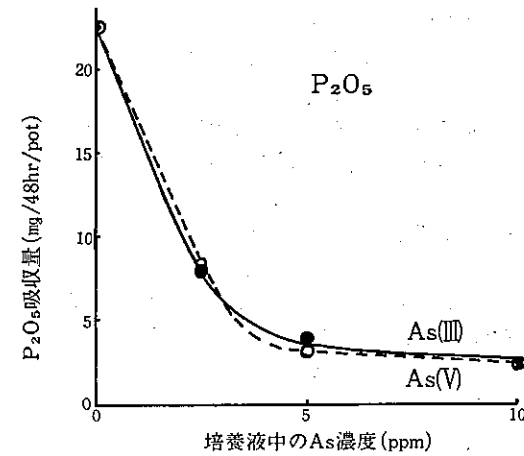
第3図 As 処理直後から48時間中の吸収量



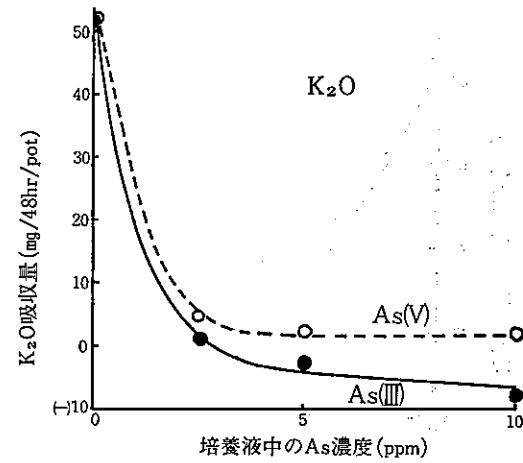
第4図 As 処理1週間後から48時間中の吸収量



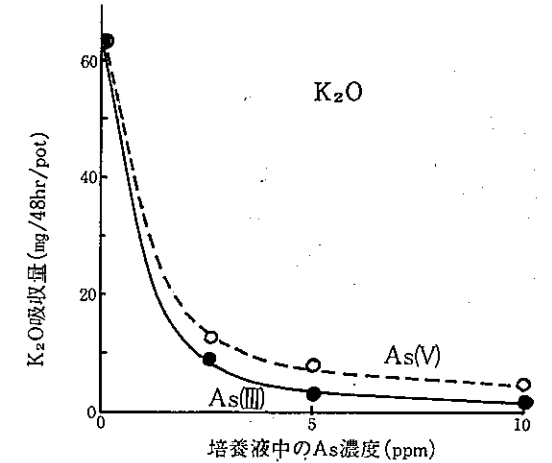
第5図 As 処理直後から48時間中の吸収量



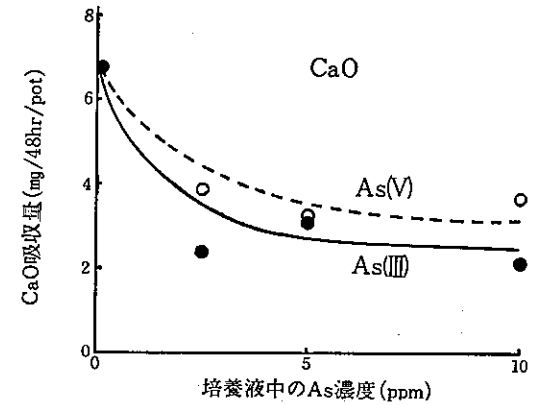
第6図 As 処理1週間後から48時間中の吸収量



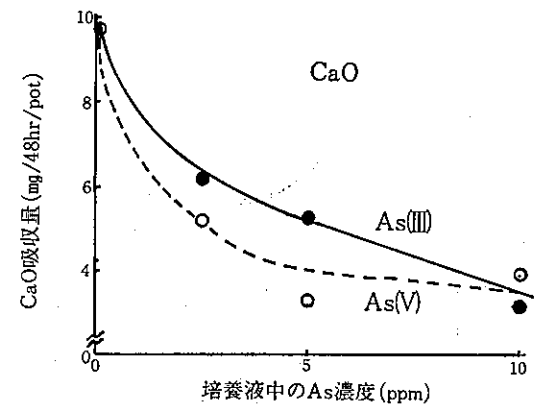
第7図 As 処理直後から48時間中の吸収量



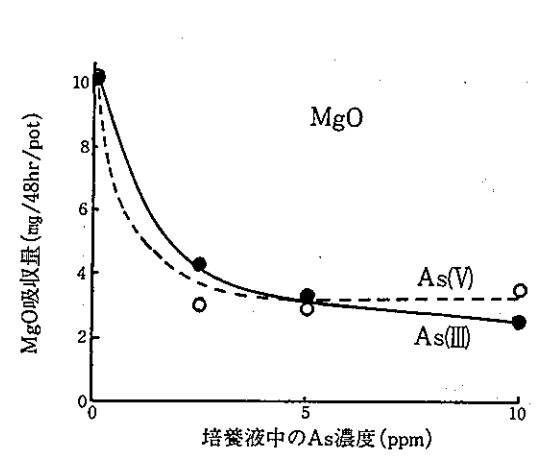
第8図 As 処理1週間後から48時間中の吸収量



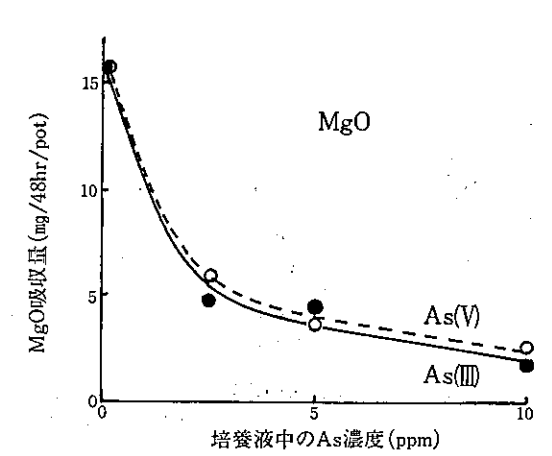
第9図 As 処理直後から48時間中の吸収量



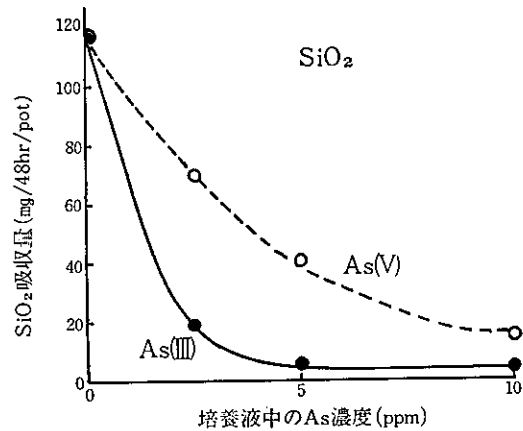
第10図 As 処理1週間後から48時間中の吸収量



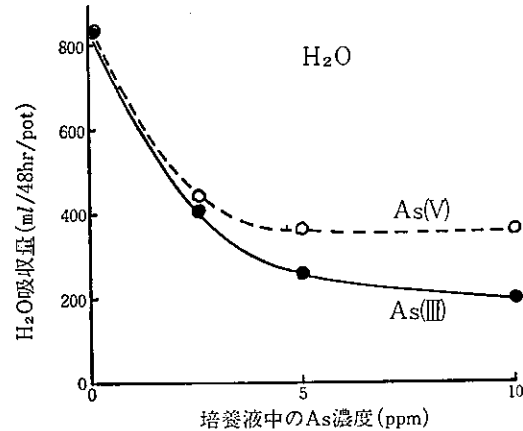
第11図 As 処理直後から48時間中の吸収量



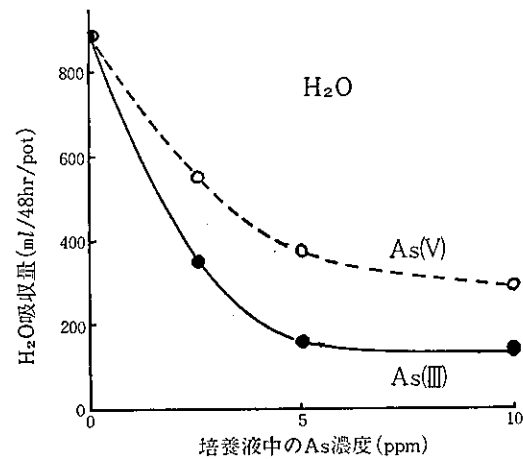
第12図 As 処理1週間後から48時間中の吸収量



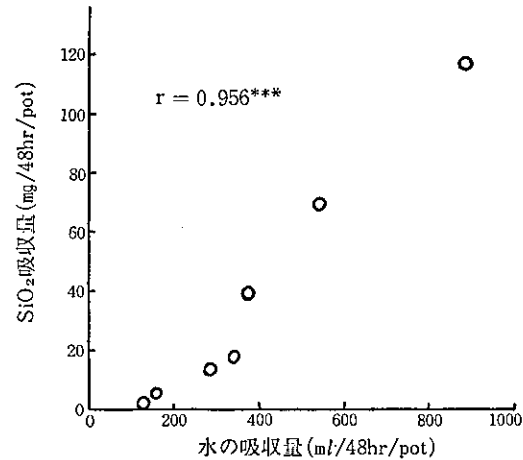
第13図 As 処理 1 週間後から48時間中の吸収量



第14図 As 処理直後から48時間中の吸収量



第15図 As 処理 1 週間後から48時間中の吸収量



第16図 水稻による水の吸収量と珪酸の吸収量との関係

第2表 養分吸収阻害係数 (IC)

吸収時期	処 理 (As 10ppm)	IC *							
		NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
処 理 直 後	As(III)	93	90	82	116	54	79	—	77
	As(V)	83	92	58	95	47	68	—	55
処 理 1 週間後	As(III)	96	105	90	96	67	89	98	84
	As(V)	86	99	90	94	59	83	88	68

注) \* IC =  $\frac{(\text{対照区の養分吸収量} - \text{究極吸収点における養分吸収量})}{\text{対照区の養分吸収量}} \times 100$

想されるが、一応 10ppm を究極吸収点とみなして養分吸収阻害係数 (Inhibition coefficient of Nutrient absorption) を算出した値を第2表に示した。

上表から As(III) 又は As(V) による養分の吸収阻害は養分の種類によって異なり、阻害係数の大きい順にならべると、As 添加の初期は次のような順となった。

As(III) : K<sub>2</sub>O > NH<sub>4</sub> · NO<sub>3</sub> > P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > MgO · H<sub>2</sub>O > CaO

As(V) : K<sub>2</sub>O · NO<sub>3</sub> > NH<sub>4</sub> > MgO · P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > H<sub>2</sub>O > CaO

この順位は若干の違いはあるが概観するとリン酸を除いて、As(III) と As(V) とはほぼ同傾向とみる事ができよう。

次に As を含有する培地にかなり適応したと思われる処理後 1 週間経過後の阻害順位を示すと次のようである。

As(III) : NO<sub>3</sub> > SiO<sub>2</sub> · K<sub>2</sub>O · NH<sub>4</sub> > P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> · MgO > H<sub>2</sub>O > CaO

As(V) : NO<sub>3</sub> · K<sub>2</sub>O · P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > SiO<sub>2</sub> · NH<sub>4</sub> > MgO > H<sub>2</sub>O > CaO

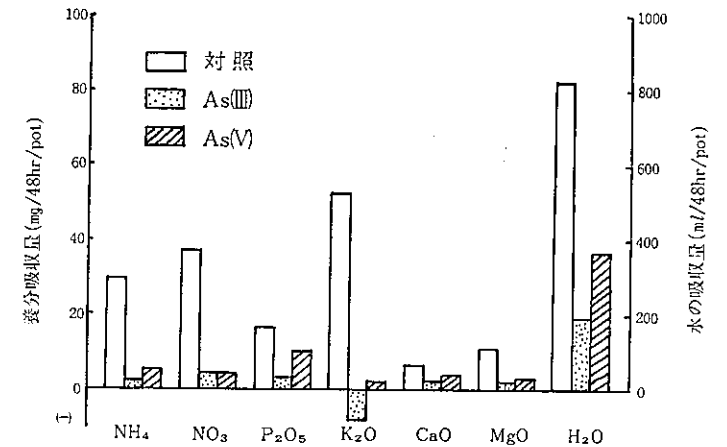
As(III) で処理 1 週間後においては全般に阻害係数が高くなったが、カリだけは減少し、各養分間の差は接近してきた。As(V) による処理も 1 週間後になるとカリを除いて増加し、特にリン酸の阻害が増大した。又養分の種類による差も As(III) 同様接近している。As(III) と As(V) による養分吸収の阻害順位は、ケイ酸とリン酸が逆になっているが、他はほぼ同傾向であった。

次に As を 10ppm (究極吸収点) 添加したときの各種養分の吸収量を第17図に示した。

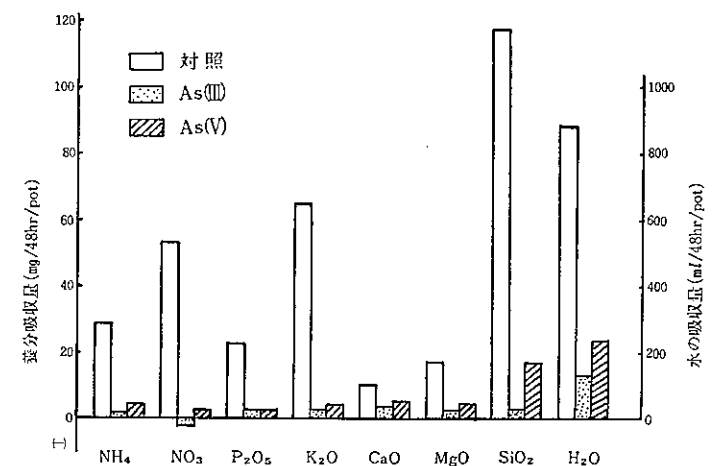
上図から明らかなように、As 添加によって各種養分の吸収が著しく阻害されたが、As(III) が As(V) よりも阻害度は大きかった。しかしその差は二、三の成分を除けば余り大きくはなく、阻害のパターンは両

者ともよく似ていた。処理を 1 週間継続すると水とケイ酸の吸収については As(III) と As(V) との差異が明瞭に認められた (第18図)。

以上の傾向から培地へ As を添加するとカリ、窒素、珪酸などは大きい吸収阻害を受けるのに対して、カルシウム、マグネシウムなどは比較的軽度の吸収阻害しか受けないことが分かった。リン酸は As(III) で中間的な阻害度を示したが、As(V) では初期軽度であり、1 週間後になるとかなり大きい阻害を受けた。このような傾向は、培地温度<sup>9,12)</sup> 呼吸阻害剤の添加<sup>1,15,16)</sup> などで養分吸収におよぼす影響を検討された



第17図 ヒ酸及び亜ヒ酸が水稻の養分及び水吸収におよぼす影響 — As 処理直後から48時間中の吸収量 —



第18図 ヒ酸及び亜ヒ酸が水稻の養分及び水吸収におよぼす影響 — As 処理 1 週間後から48時間中の吸収量 —

諸実験の結果とリン酸を除けばよく似た傾向であり、根の好気呼吸と関連があるように考えられた。

2 水稻根による溶存酸素吸収におよぼすヒ酸及び亜ヒ酸の影響

水稻根の培地における溶存酸素吸収（呼吸）に対してAs(III)及びAs(V)の影響を調査するため、別に水稻を水耕栽培し、根の呼吸量が最も大きいといわ

れている出穂7~10日前に、培養液中のAs濃度が3ppmとなるよう前述の方法でAs(III)又はAs(V)を添加した。添加直後から3時間後の溶存酸素量と、10日間処理を継続後に培養液を更新し、3時間後の溶存酸素量を測定して根による酸素吸収量を求めた結果は第3表のとおりである。

根による溶存酸素の吸収量は、初期As(III)の添

第3表 ヒ酸と亜ヒ酸が水稻根の溶存酸素吸収に及ぼす影響

吸収時期	処 理 (As 3ppm)	酸素吸収量 O <sub>2</sub> ml/l/hr	平 均	吸収阻害 係 数	平 均
処 理 直 後 (3時間)	対 照 A	1.42	1.39	0	0
	対 照 B	1.35		0	
	As(III) A	1.03	1.05	27	24
		As(III) B		1.07	
	As(V) A	1.24	1.22	13	12
		As(V) B		1.20	
処 理 10 日 後 (3時間)	対 照 A	1.02	1.08	0	0
	対 照 B	1.13		0	
	As(III) A	0.51	0.50	50	54
		As(III) B		0.48	
	As(V) A	0.71	0.73	30	33
		As(V) B		0.74	

加で24%、As(V)では12%の減少を示した。処理後10日目の酸素吸収量はAs(III)で54%、As(V)では33%減少している。この数値はAs処理によって根群の発達に阻害されるため対照区に比べて根重が減少しているため、処理後10日目における単位根重当り酸素吸収量は、上記の数値よりも多少大きく、阻害係数は小さくなるものと考えられる。培地にAsが存在すれば蒸水分的吸収のみならず、根の好気呼吸も阻害され、その程度はAs(III)がAs(V)よりもかなり強かった。

3 水稻の生育、収量及び養分含有率におよぼす影響  
1) 生育・収量

水耕栽培をしている水稻に対して、晴天の日の日中に培養液へAsを添加したところ、As(V)系列では10ppmでも外観上の異常はみとめられなかったが、As(III)系列では処理後1,2時間で5ppmではわずかに葉が巻き、10ppmでは大半の葉が巻いて、水

分の吸収阻害を受けていることが推定された。葉の萎液現象もAs添加によってみられなくなった。このような現象は実際に現地のヒ素汚染水田でもしばしば観察された。処理日数が多くなるに従って、As(III)系列ではAs濃度が増加するに伴って下葉の枯れ上りが多くなったが、As(V)系列では下葉の枯れ上りは少なく、As(III)の5ppmよりもAs(V)の10ppmの方が明らかに少なかった。根の外観は対照区の場合、素直に伸び乳白色ないし淡黄白で2次根の発達に極めて良好であった。しかしAs処理区の根は処理開始数日後に褐色に変わり、As濃度が高くなるにつれて発根が悪くなり、新根も太くて短かく、粗剛となり、2次根の発達が不良となった。その傾向は、As(V)系列よりもAs(III)系列の方が著しかった(第19図)。

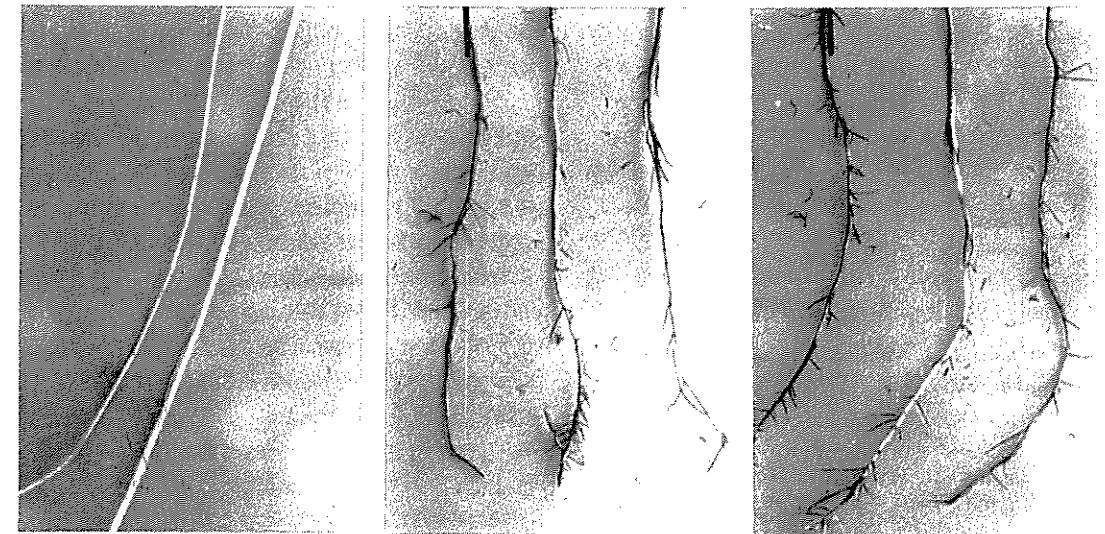
As処理後25日目(穎花分化期終期頃)の水稻の生育状況を示すと第5表及び第20,21図のとおりであ

第4表 As処理初期の水稻の生育状態

処 理	7/14 1.5時間後	7/21 根 の 概 観	
		7日後	
対 照	しおれなし	しおれなし	大半白、新旧区別やや困難、新根多く、長い。
As(III)	2.5ppm	しおれなし	大半黄褐、新根多く、やや長い。
	5 "	わずかに葉が巻く	大半黄褐、新根中、短い。
	10 "	大部分葉が巻く	黄褐、新根なし。
As(V)	2.5ppm	しおれなし	大半黄褐、新根多く、かなり長い。
	5 "	"	大半黄褐、新根やや多く、中。
	10 "	"	大半黄褐、新根中、ごく短い。

第5表 培地におけるヒ素の形態と濃度が水稻の生育におよぼす影響(8/8)

処 理	草 丈 (cm)	茎 数 (本/ポット)	地上部乾物重		地下部乾物重		
			(g/ポット)	同 百分比	(g/ポット)	同 百分比	
対 照	58.9	53.5	25.30	100	8.65	100	
As(III)	2.5ppm	38.1	26.0	9.70	38	4.70	55
	5 "	33.9	20.5	3.83	15	1.94	22
	10 "	33.6	16.5	2.65	11	0.86	10
As(V)	2.5ppm	45.4	31.0	13.73	54	6.04	70
	5 "	34.4	27.5	9.25	37	4.02	46
	10 "	36.6	23.0	5.49	21	1.87	21

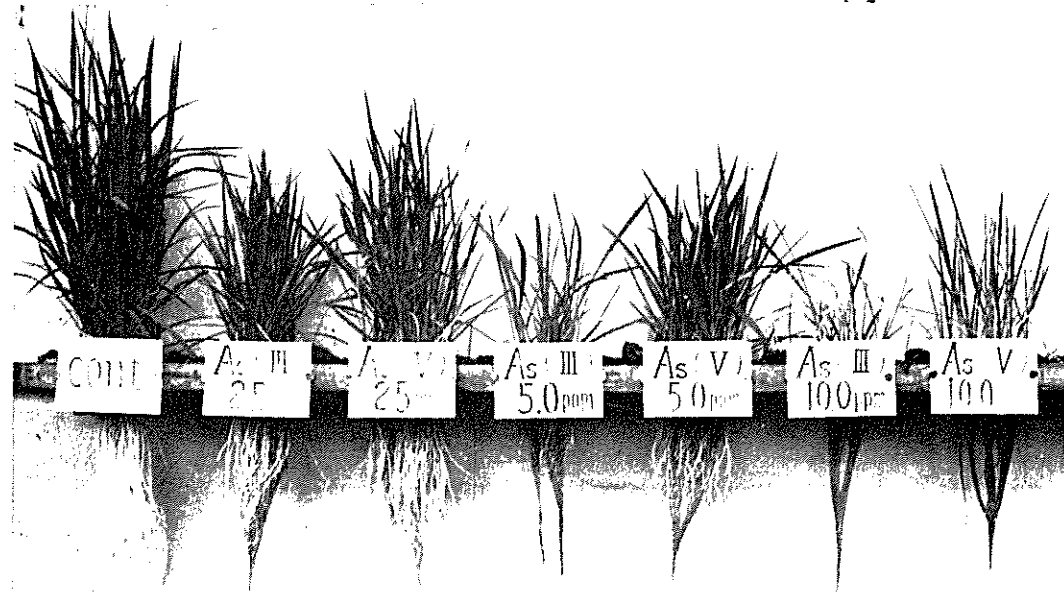


対 照

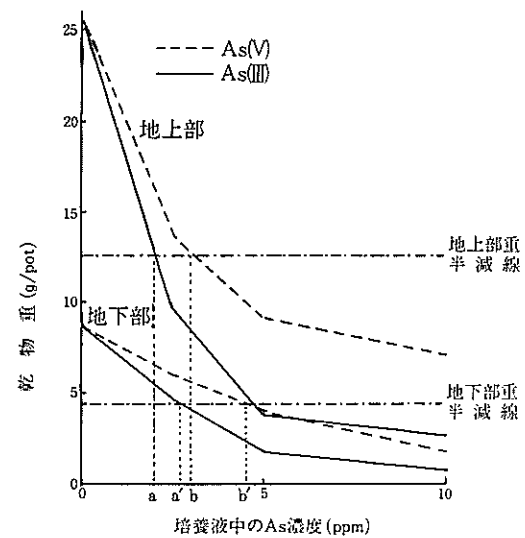
As(III) 5ppm

As(V) 5ppm

第19図 ヒ素による根の障害



第20図 培地の As (III) 及び As (V) の濃度と水稻の生育 (処理25日後)



第21図 ヒ素濃度と水稻の生育との関係  
a: 地上部As(III)半減濃度 a': 地下部As(III)半減濃度  
b: 地上部As(V)半減濃度 b': 地下部As(V)半減濃度

る。

第5表から明らかなように、As 処理によって草丈の伸長が悪くなり、茎数の増加も明らかに阻害されるが、その程度は同濃度の場合、As(V) 系列よりも As(III) 系列の方が著しかった。草丈の伸長、茎数の増加に対する抑制作用は、As 濃度の上昇に伴ない激しくなったが、草丈よりも茎数において顕著であった。乾物重では As 処理によって地上部及び地下部ともに著しい減少がみられた。この傾向は As(III) 系列が As(V) 系列よりも明らかに顕著で、半減濃度を内挿法で求めると、地上部で前者が約 2 ppm、後者が 3 ppm であった。根重の半減濃度は As(III) が 2.7ppm、As(V) で 4.5ppm 位であり、生育阻害作用は As(III) が As(V) よりもかなり強く、前者の 2.5ppm で後者の5ppm と同程度乾物重が減少した。

つぎに収穫期における生育、収量調査結果を示すと第6、7表のとおりである。

5 ppm As 以上になると枯死葉が多くなり、これ以上長くおいても乾物重の増加はなく、根の腐敗、脱落のおそれがあるため早めに抜き取った。

2.5ppm As で水稻の生育に明らかな差異がみられ、As(III) が As(V) よりも生育の阻害が強く、

第6表 培地におけるヒ素の形態と濃度が水稻の生育におよぼす影響 (登熟期)

処 理	稈 長 (cm)	穂 長 (cm)	穂 数 (本)	備 考
対 照	57	14	28	
As(III)	2.5ppm	37	15	収穫直前調査
	5 //	—	—	枯死葉多く 9月7日中止
	10 //	—	—	//
As(V)	2.5ppm	42	22	収穫直前調査
	5 //	—	—	枯死葉多く 9月7日中止
	10 //	—	—	//

第7表 培地におけるヒ素の形態と濃度が水稻の乾物重及び収量におよぼす影響 (収穫期)

処 理	地上部乾物重 (g/ポット)	根 重 (g/ポット)	わら重 (g/ポット)	同百分比	もみ重 (g/ポット)	同百分比	
対 照	94.79	10.86	55.51	100	37.27	100	
As(III)	2.5ppm	24.61	3.78	16.52	30	8.10	22
	5 //	4.24	1.96	4.24	8	—	—
	10 //	1.68	0.57	1.68	3	—	—
As(V)	2.5ppm	53.56	6.54	35.65	64	24.37	65
	5 //	10.29	4.75	10.29	19	—	—
	10 //	4.19	1.69	4.19	8	—	—

乾物重でみると As(III) の場合は、対照区の 26 % に、As(V) では 57 % にそれぞれ減少した。もみ重では、As(III) は 22% に、As(V) では 65 % の減収となった。

2) 養分含有率と吸収量

培地に As を添加すれば、水稻根による養水分の吸収が選択的に阻害され、添加の始めと、1 週間継続後とは根の養分吸収状況に違いのあることを前に述べた。更に処理が長期にわたれば養分吸収にどのような影響があるかを知るため、As 処理 25 日後の水稻体を分析した。その結果は第 8 表に示すとおりである。

上表から明らかなように、培地に As が存在すると、その濃度に応じて稲体の無機組成にも大きい影響が現われている。

茎葉中の窒素濃度は、As(III) 系列の場合では As 濃度の増加に伴って明らかな上昇がみられた。しかし、As(V) 系列では 2.5ppm で As(III) と同様一度上昇を示したが、更に As 濃度が増加すると、再び対照区か、それを下回る程度に低下した。このよう

に培地の As 形態によって傾向が著しく異なるのは、As(III) が As(V) より生育阻害が大きいため稲体小さくなり、窒素濃度が高くなったもので、吸収量でみると逆の傾向となった。

リン酸濃度は、根では培地の As 濃度の増加に伴って比例的に上昇した。この傾向は As(III) 系列が As(V) 系列よりも顕著であった。茎葉では As 濃度によって、As(V) 系列はほとんど変わらないが、As(III) 系列では、全般に若干高く、As 濃度の上昇によって余り変らなかった。

カリ濃度は、根では培地の As 濃度が 2.5ppm で一度高くなり、更に As 濃度が増加すれば、低下の傾向を示した。As 形態別には As(III) 系列が As(V) 系列よりも低濃度であった。茎葉のカリ濃度は、As(V) 系列では根とほぼ同傾向であったが、As(III) 系列は著しく高濃度で、As 濃度の増加に伴って上昇傾向を示した。

マグネシウム濃度は、培地の As 濃度が増加しても As(V) 系列では根、茎葉ともあまり変化がみられ

第8表 培地におけるヒ素の形態と濃度が水稻の無機組成におよぼす影響

処	理 部 位	T-N (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	As (ppm)
対 照	茎 葉	1.72	0.65	1.66	0.43	0.90	360	20	1.1
	根	—	0.71	0.61	0.16	0.44	6,400	10	1.8
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
As(III)	2.5ppm { 茎 葉	1.92	1.01	2.66	0.32	0.39	351	22	42
	{ 根	—	1.11	0.71	0.23	0.16	9,000	16	1,078
	5 ppm { 茎 葉	2.18	1.04	2.30	0.55	0.58	504	40	158
{ 根	—	1.83	0.45	0.41	0.18	19,200	24	2,392	
{ 茎 葉	2.57	1.05	2.90	0.41	0.69	586	56	231	
{ 根	—	3.02	0.29	0.73	0.27	33,400	90	5,260	
As(V)	2.5ppm { 茎 葉	1.90	0.68	1.97	0.25	0.36	290	22	44
	{ 根	—	0.82	2.30	0.17	0.18	6,000	8	966
	5 ppm { 茎 葉	1.71	0.62	1.52	0.26	0.34	418	24	70
{ 根	—	1.19	0.56	0.26	0.14	11,200	20	2,096	
{ 茎 葉	1.65	0.64	1.49	0.30	0.43	688	50	154	
{ 根	—	1.71	0.33	0.34	0.14	20,700	28	4,880	

ないが、As(III) 系列では茎葉において漸増した。

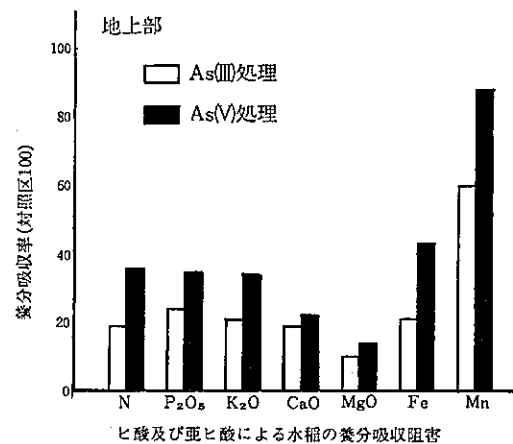
カルシウム濃度は、根において、培地の As 濃度の増加に伴ない比例的に上昇し、As(III) 系列が As(V) よりも急上昇を示した。しかし茎葉では、As(V) 系列でカルシウム濃度が低く、As(III) 系列では若干の増減はあったが、一定の傾向はなく、対照区と大差なかった。

鉄濃度は、根ではリン酸と同傾向であり、As 濃度の増加に対応して直線的に増加した。茎葉においては培地の As 濃度の増加に伴なって、緩やかな上昇傾向がみられたが、As(III) と As(V) 間に明らか差異はみられなかった。

マンガン濃度は、培地の As 濃度の増加で、根、茎葉とも上昇傾向がみられた。又 As(III) 系列は As(V) 系列よりも As 濃度の増加で急速に上昇した。

ヒ素濃度は、根では培地の As 濃度に比例して増加しており、As(III) 系列が As(V) 系列よりも多少急な上昇を示した。茎葉では As 濃度の増加で Sigmoid 曲線的な上昇を示し、2.5ppm As までは両形態間に差がなく、5 ppm 以上になると明らかに As(III) 系列が高くなった。

養分の吸収量は、As 処理の初期に行った養分の吸収阻害実験の結果とはかなり違った傾向を示したが、As(III) が As(V) よりも吸収阻害が大きい点では一致している。



第22図 As 処理25日後における養分吸収比率

IV 考 察

ヒ素汚染農耕地でも畑作物はほとんど異常なく生育するが、湛水して水稻を栽培すると激しい障害が発生することが多い。この原因として次のようなことが考えられる。(1)水稻は生育期間の大半が湛水状態で栽培されるため、土壌が還元状態になり、それにとまって土壌溶液中へ As が溶出する。(2)土壌中のヒ素がヒ酸から亜ヒ酸へ還元されるため、同じ As 濃度でも毒性が強くなる。(3)水田土壌の還元過程で(1)から(2)へ進行する。すなわち、湛水後土壌が還元状態となり、土

壤溶液中の As 濃度が上昇し、更に溶出した As がヒ酸からより毒性の強い亜ヒ酸へ変化するなどが推定される。しかし、以上の推定を実証するには、土壌溶液中のヒ酸又は亜ヒ酸濃度がどれ位で作物生育にどの程度影響があるのか、又生育に大きく関与すると考えられる作物根の養水分の吸収に対して、阻害の状況をヒ素の形態と濃度との関連で明らかにしておく必要がある。

従来、作物の生育におよぼす培地のヒ酸と亜ヒ酸の影響についての比較研究は、若干の畑作物<sup>9)</sup>と果樹苗<sup>10)</sup>で行われているが、ヒ素障害の最も問題となる水稻についてはあまり報告をみない。

そこで筆者らは水耕法でヒ酸又は亜ヒ酸のナトリウム塩を培養液に添加して、水稻の養分及び水分の吸収阻害について検討を加えた。その結果は前述したように As 処理の初期葉がしおれる場合はもちろん、外観上異常がみえなくても根の養水分の吸収が阻害されていることが分かった。又阻害の程度は、培地における As 濃度によって異なり、ある程度までは、その濃度の上昇によって、養水分の吸収は急激に低下し、更に濃度が増加すると、次第に緩やかな低下となり、ついには一定の値を示すようにみえた。このような養分吸収の阻害パターンは、三井<sup>16)</sup>が数種の呼吸阻害剤を用いて行った実験結果によく似ており、ヒ素濃度の増加にともなって指数曲線的な減少を示している。また養分吸収阻害も各成分とも一様ではなく、選択的な阻害現象がみられ、リン酸を除けば、各要素の阻害順位も呼吸阻害剤を添加して行われた諸実験結果<sup>1,9,16)</sup>によく似ており、根の代謝活性の低下に起因するものと推察された。

ヒ酸及び亜ヒ酸による水稻根の養分吸収の阻害作用を比較すると、次の3グループに分けられる。すなわち、(1)ヒ酸と亜ヒ酸との吸収阻害作用がほぼ同程度である成分…NO<sub>3</sub>, MgO, CaO。(2)As 処理の初期には亜ヒ酸の阻害作用がヒ酸より明らかに大きかったが、1週間後は差が僅少になった成分…P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O。(3)亜ヒ酸がヒ酸より阻害作用が明らかに大きい成分…NH<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O。

(3)の成分は終極吸収においてさえ、なお差異がみられることから、両者の阻害作用は、単にその強弱の面のみで説明することは困難で、阻害様式に多少の違い

があるように推察される。

このうちケイ酸は、水の吸収と酷似しており、両者の相関は極めて高く、As の形態とは関係なしに水とケイ酸の吸収量をプロットすれば、一つの直線上には乗ることがみられる(第16図)。このことからケイ酸の吸収は、水の吸収に伴っており、結果的には蒸散量に支配されているものと考えられる。従って亜ヒ酸とヒ酸で阻害程度に最も明瞭な差異がみられるのは第18図のように水とケイ酸である。

作物に対する As の作用は亜ヒ酸とヒ酸とで毒性や代謝に差異があるといわれているが養分吸収の阻害状況から概観すると、両者とも類似の傾向がみられる。養分吸収に対して、呼吸阻害剤の添加<sup>1,16)</sup>、培地温度<sup>9,21)</sup>などで検討された結果を総合するとリン酸、カリ、アンモニアなどの吸収は好気呼吸ときわめて密接に結びついて行われているが、カルシウムなどの吸収はほとんど呼吸と無関係であると考えられている。

As による養分吸収阻害は、亜ヒ酸もヒ酸もリン酸を除けば上記の結果と類似しており、As によって好気呼吸が阻害されるため、養分吸収が阻害されたと考えることができる。そこで水稻根の呼吸におよぼす As の影響を知るため、As 処理後に根による溶存酸素の吸収状況を調べた結果、As によって吸収阻害が認められ、亜ヒ酸がヒ酸よりもその程度が大きいことが分かった。

As 添加が植物の呼吸作用におよぼす影響について行われた研究はまれであるが、BONNER<sup>4)</sup>によればエン麦の幼葉切片のインドール酢酸による生長促進効果は、10<sup>-4</sup>~10<sup>-5</sup>mol のヒ酸塩により阻害されるけれども、この範囲の濃度では呼吸作用は阻害されない。しかし、インドール酢酸の添加によって増大する呼吸は阻害されることを認め、この阻害作用がリン酸添加によって回復することを明らかにした。この事実からヒ酸はリン酸代謝への影響を通して生育阻害作用を生ずることを示唆している。

As による作物の生育阻害を生理的な側面からみると、ヒ酸はリン酸との類似性のため、トリオースリン酸の酸化の際にリン酸の代行をすることができる。しかし、高エネルギー結合をもった物質、たとえば 3-phospho-1-arsenoglyceric acid などは著しく不安定であって、ただちに加水分解して無機ヒ酸と 3-phosphoglyceric acid になる<sup>5)</sup>。従ってヒ酸による阻害はトリオースリン酸の酸化が高エネルギーリン

酸 (ATP) の生成を伴うことなく進行するため呼吸作用は余り阻害されなくても、そのエネルギーは利用できず、生理的にはヒ酸はエネルギーを無だに放散して、細胞中のATPを必要とする合成反応に著しい影響をおよぼす結果となる。酸化的リン酸化作用の脱共役剤 (uncoupler) として DNP は最もよく知られているが、ヒ酸も ADP のリン酸化作用の共役を破壊し、ATP の生成を阻害する<sup>5)</sup>。

しかし DNP<sup>9,16)</sup> とヒ酸による 養分吸収の阻害を比較すると、カリ、アンモニアでは同傾向であるが、リン酸の吸収に明らかな違いがみられる。すなわち、DNP によるリン酸の吸収阻害は著しいが、ヒ酸の場合は余り大きくないことである。このような違いは両者の呼吸作用における阻害様式の相違によって生ずるものか、今後の検討にまちたい。

以上はヒ酸による阻害作用を生理的な面から論じたが、亜ヒ酸とヒ酸との違いを生理的な側面から検討したものは少ない。植物によるヒ酸の吸収はリン酸によって抑制されるが、亜ヒ酸の吸収はリン酸によって影響されないといわれている。

水稲根の養分吸収におよぼす As の影響を、その濃度が十分高い状態で形態別に検討した結果、As(III) による吸収阻害の度合いが大きいものから列挙すると、 $K_2O > NO_3 \cdot NH_4 > P_2O_5 > MgO > CaO$  の順位となり、As(V) によっては  $K_2O \cdot NO_3 > NH_4 > MgO \cdot P_2O_5 > CaO$  の順となることを述べた。この順位はリン酸を除けばほぼ同傾向とみなして差支えなからう。この傾向は25日間にわたって As 処理を継続後に、植物体を分析して求めた養分吸収量からの阻害順位とかなり結果が異なる。前者の場合は48時間という短期間の実験であるのに対し、後者の場合は25日間にわたる比較的長期の実験である。短期間の実験では As 以外の諸条件が極力同一となるように努めたのであるが、長期間処理を継続すると、As の形態、濃度などによって養分及び水分の吸収阻害が異なる。その結果地上部の生育、下葉の枯れ上り、地下部の発根、伸長、二次根の発達などに著しい相違を生ずる。このような相違自体が As 条件以外に大きい差異として光合成や養分吸収にも影響し、これらの各種因子のいわば積分によって実際には養分吸収が支配されることになる。実験開始時には培地のヒ素条件だけの違いであったものが、作物自体の大きさが異なり、生育ステージにも差を生ずるようになる。高橋ら<sup>21)</sup>は水稲根の養分吸収におよ

ぼす温度の影響を研究し、短期間の試験で以後の植物体の養分吸収を予測することは困難であり、短期間の試験は或る一定時における微分的な側面を明らかにする手段であるとしている。

馬場ら<sup>1)</sup>は水稲が硫化水素を含む培養液に適應しているとき、適応がまだおこらないときでは、硫化水素の養分吸収におよぼす影響が異なることを見出している。すなわち処理の初期においてはカリ、リン酸、アンモニアなどの阻害が大きい、処理が長びくとリン酸やアンモニアは比較的阻害されなくなり、逆にマンガンの吸収阻害率が高くなった。筆者らの実験でも処理1週間後になると初期に比べて亜ヒ酸ではカリの阻害係数が減少して、ヒ酸ではリン酸、窒素、マグネシウム、カルシウム、水などは高くなり、要素間の差も若干減少し、阻害順位も多少変わった。25日間 As 処理後に作物体を分析して求めた養分吸収量で阻害率を計算すると、前出の順位とかなり相違がある。

このように As による水稲根の養分吸収の阻害は、処理期間によって順位に若干変動はあるが、亜ヒ酸がヒ酸よりも阻害率が高い点は常に一致している。

作物の生育におよぼす亜ヒ酸及びヒ酸の影響についての報告は古くから行われているが、いずれも畑作物であり、同条件での比較は少ない<sup>6)</sup>。

LIEBIG ら<sup>11)</sup>がレモン樹を水耕栽培した場合の As 阻害は亜ヒ酸 5 ppm、ヒ酸 10 ppm で明らかに有害で、根及び地上部の生長は著しく抑制されたが、枯死には至らなかった。

水稲の生育及び収量に及ぼすヒ酸及び亜ヒ酸の影響について比較検討した成績は少ない。天正<sup>23)</sup>が風乾土に対して 100 ppm As 相当量のヒ酸又は亜ヒ酸を添加して水稲幼植物で行った試験では、ヒ酸より亜ヒ酸が地上部乾物重は畑状態で約 3%、湛水状態では約 12% 減少した程度で、両者の差は小さい。堤ら<sup>24)</sup>も土壌にヒ酸と亜ヒ酸のナトリウム塩を添加してポット試験を行い生育半減レベルを亜ヒ酸ナトリウムで 70 ppm、ヒ酸ナトリウムで 125 ppm であるとしている。しかし土壌にヒ酸又は亜ヒ酸を添加した場合は、土壌による吸着が As 形態によって異なり、土壌溶液中の As 濃度が変化すること<sup>14)</sup>、土壌の酸化還元電位の変動に伴い As の形態変化が起るため、両形態の毒性比較が困難であるなどの理由から筆者らは水耕法で検討した。その結果、耕地では水田の土壌溶液中においてのみ存在が可能であると考えられる亜ヒ酸は、ヒ酸よりも明

らかに障害が大きい。As 処理25日後における生育状況を地上部乾物重で比較すると、2.5 ppm As で、As(III) 処理の場合は As(V) 処理の 1/2 近く減少し、5 ppm 以上の濃度では 1/2 以上の減少になっている。収穫期になると As(III) 処理の生育阻害が次第に激しくなって、わら重及び根重は 2.5 ppm As でも As(V) 処理の 1/2 前後の減少となり、もみ収量においては 1/3 に減少した。この事実から As(III) の影響は、根、茎葉よりも収量に強く現われることが判明した。

しかし、実際の水田において、亜ヒ酸塩が生成されるかどうかという問題については、十分な説明がなされているとはいえない。山根ら<sup>25)</sup>は現実の水田における pH 領域でのヒ酸と亜ヒ酸の変化は

$$Eh = 0.666 + 0.295 \log \frac{[H_2AsO_4^-]}{[HAsO_2]} - 0.0885pH$$

で示されるとし、pH = 6 で  $[H_2AsO_4^-] = [HAsO_2]$  ならば  $Eh = 0.135V$  で、普通の水田では亜ヒ酸の生成を許す還元状態になり得るとしている。

従って湛水条件下で水稲の As 障害が大きい理由として毒性の強い亜ヒ酸が生成するためであるという説は、上記の実験によって、As 毒性の違いで一応裏付けられた。しかし、ヒ酸による障害も亜ヒ酸より軽いとはいえず明らかに認められており、水田における水稲のヒ素障害を土壌中のヒ素形態の側面からのみで十分な説明をすることは困難である。ヒ素汚染土壌の還元に伴って As が可溶化することは前田ら<sup>13)</sup>、山根ら<sup>25)</sup>によって認められているが、今後の研究でヒ素汚染地土壌の還元に伴い土壌溶液中へ溶出するヒ素濃度と形態を、土壌の酸化還元状態との関連で明らかにする必要がある。

## V 摘 要

ヒ素汚染土壌において水稲で特異的に激しい生育障害が発現する原因を明らかにするため、畑状態で安定なヒ酸と水田状態で存在可能と考えられている亜ヒ酸が水稲の養分吸収、生育、収量におよぼす影響を水耕法で比較検討した。得られた結果は次の通りである。

1. 苗令 5, 6 葉期のとき、培養液へ As を添加 (晴天日) すると、亜ヒ酸 (塩) 5 ppm 区では 1, 2 時間後に葉がわずかに巻き、10 ppm では大半の葉が巻いて水の吸収阻害が推定された。しかし、ヒ酸 (塩) ではこのような現象は 10 ppm でも認められなかった。苗

の生長、下葉の枯れ上りに伴ない葉は巻かなくなった。

2. 亜ヒ酸によって養水分の吸収が阻害される順位は  $K_2O > NH_4 \cdot NO_3 > P_2O_5 > MgO \cdot H_2O > CaO$  のようになり、ヒ酸は  $K_2O \cdot NO_3 > NH_4 > MgO \cdot P_2O_5 > H_2O > CaO$  の順位となった。これらの順位は多少の違いはあるが、ほぼ同傾向であるとみられ、リン酸を除けば各種の呼吸阻害剤を添加して行われた実験結果に似ていた。ヒ素添加初期における養水分の吸収阻害は一部の成分を除けば亜ヒ酸がヒ酸より大きかった。

3. As 処理を 1 週間継続すると、亜ヒ酸ではカリの吸収阻害率が減少し、ヒ酸ではリン酸の阻害率が増加して両者とも各成分間の差が減少した。

4. As 処理25日間継続した稲体の養分含有率は亜ヒ酸区が同濃度のヒ酸区よりも高かったが、吸収量では逆の傾向となった。

5. 培地の As 濃度が 2.5 ppm 以上で、分けつ草丈が抑制され、根群の発達も不良となった。このような生育障害は As 濃度の増加に伴ない激しくなり、同濃度では亜ヒ酸がヒ酸よりも生育障害が甚だしかった。地上部の乾物量によって、生育半減レベルの培地の As 濃度を求めると、25日間処理で亜ヒ酸は 2 ppm、ヒ酸は 3 ppm となり、収穫期近くまで処理を続けると、これらの濃度は多少低下した。

6. 収量は対照区に比べて亜ヒ酸 2.5 ppm で 78%、ヒ酸区では 35% の減収となり、5 ppm 以上では下葉の枯れ上りが進み収穫皆無となった。以上のことから培地に水溶性ヒ素が存在すれば、根の代謝活性を低下させ、養水分の吸収を阻害して間接的にも生育を抑制することが明らかになった。この作用は亜ヒ酸がヒ酸よりも生育量 (乾物重) で 2 倍、収量では 3 倍程度強力であった。

## 引用文献

1. 馬場 赴 (1958) : 水稲の胡麻葉枯病及び秋落の発生機構に関する栄養生理的研究。農技研報 D 7 ; 1-157.
2. BENSON, N.R. (1953) : Effect of Season, Phosphate and Acidity on Plant Growth in Arsenic-Toxic Soils. Soil Sci. 76 : 215-224.
3. BISHOP, R.F. and D. CHISHOLM (1962) : Arsenic Accumulation in Annapolis Valley Orchard Soils. Canad. J. Soil Sci. 42 : 77-80.

4. BONNER, J. (1950) : Arsenate as a Selective Inhibitor of Growth Substance Action. *Plant Phys.* 25 : 181-184.
5. BONNER, J. (1950) : 植物生化学(山田登・丸尾文治訳). 朝倉書店, p.557.
6. BRENCHLEY, W.E. (1914) : *Inorganic Plant Poisons and Stimulants*. Cambridge Univ. Press. p.110.
7. EPPS, E.A. and M.B. STURGIS (1939) : Arsenic Compounds Toxic to Rice. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 4 : 215-218.
8. 花田 慧・中野雅章・斉藤 寛・望月武雄(1975) : リンゴ園表層土壌の重金属塩類汚染とその改良に関する研究(第1報) アズキ(宝)のヒ素過剰による生育障害. 弘前大農報 25 ; 13-24.
9. 石塚喜明・田中 明(1963) : 水稻の栄養生理. 養賢堂, p.307.
10. JACOBS, L.W., D.R. KEENEY and L.M. WALSH (1970) : Arsenic Residue Toxicity to Vegetable Crops Grown on Plainfield Sand. *Agron. J.* 62 ; 588-591.
11. LIEBIG, G.F., G.R. BRADFORD and A.P. VANSELOW (1959) : Effects of Arsenic Compounds on Citrus Plants in Solution Culture. *Soil Sci.* 88 : 342-348.
12. 前田信寿・木村修一(1954) : 砒素除毒に関する研究(第2報) 畦立栽培による除毒法. 宮城農短大 学報 1 ; 1-9.
13. 前田信寿・手代木智(1957) : 水田に於ける砒素害除毒について. 土肥誌 28 : 185-188.
14. MISRA, S.G. and R.C. TIWARI (1963) : Studies on Arsenite-Arsenate System Adsorption of Arsenate. *Soil Sci. & Plant Nutr.* 9 : 10-13.
15. 三井進午・麻生末雄・熊沢喜久雄(1951) : 作物の養分吸収に関する動的吸収(第1報) 水稻根の養分吸収に対する硫化水素の影響について. 土肥誌, 22 : 46-52.
16. 三井進午・熊沢喜久雄・石原達夫(1953) : 作物の養分吸収に関する動的吸収(第7報) 水稻根の養分吸収に及ぼす硫化水素, 青酸ナトリウム, 窒化ナトリウム等呼吸酵素阻害物質並びに酪酸の影響について. 土肥誌 24 : 45-50.
17. 萩原種雄(1939) : 梨園跡地に於ける水稻の生育不良対策試験成績(第1報). 土肥誌 13 : 11-15.
18. REED, E.A. and M.B. STURGIS (1963) : Toxicity from Arsenic Compounds to Rice to Flooded Soils. *J. Am. Soc. Agr.* 28 : 432-436.
19. STEWART, J. and E. S. SMITH (1922) : Some Relation of Arsenic to Plant Growth. Part 2. *Soil Sci.* 14 : 119-126.
20. THOMPSON, A. H. and L. P. BATJER (1950) : Effect of Various Treatments for Correcting Arsenic Injury of Peach Trees. *Soil Sci.* 69 : 281-290.
21. 高橋治助・柳沢宗男・河野通佳・矢沢文雄・吉田武彦(1951) : 作物の養分吸収に関する研究. 農技研報 B4 ; 1-83.
22. 高崎 卷(1939) : 農業薬剤の作物におよぼす影響(第1報). 土肥誌 13 : 840-846.
23. 天正 清(1973) : 湛水土壤, 水稻系における微量無機成分の挙動に関する RI 技法による研究. 近代農業における土壤肥料の研究 第4集. 養賢堂, p.65-71.
24. 堤 道雄・高橋誠助(1974) : ヒ素の植物性育阻害作用に関する研究(第1報), 水稻生育に及ぼすヒ素塩類の阻害作用. 宇都宮大農学報 9 ; 87-93.
25. 山根忠昭・山路 健・高見有一・村上英行(1973) : 土壌中におけるヒ素の挙動と農作物におよぼす影響(第1報) 土壌中におけるヒ素の形態変化. 土肥講要 第19集 p.159.
26. 横井時次(1937) : 静岡県富士見町に於ける梨畑跡地水田土壌の鉛及砒素含有量. 土肥誌 11 : 291.

### Summary

Inhibitory effect of arsenic on the nutrient uptake and growth of rice plant was studied by increasing concentration of sodium salts of arsenite and arsenate in growth media. The results obtained are summarized as follows :

Rice plants were grown by water culture technique and treated with various concentrations of arsenic in the basic nutrients solution from the tillering stage to the ripening stage.

The inhibition due to arsenite in the uptake of nutrients and water was in the order  $K_2O > NH_4 \cdot NO_3 > P_2O_5 > MgO \cdot H_2O > CaO$  at the tillering stage. The order of inhibition of arsenate was similar to the case of arsenite, but rate of inhibition of arsenite was generally higher. Except for  $P_2O_5$ , the order of nutrient uptake inhibition of arsenite showed a similar tendency to that of respiration inhibitors.

One week after the treatment began, the difference in uptake inhibition among each elements decreased in the case of both arsenite and arsenate. After 25 days rice plant treated with arsenite had higher nutrient contents than the other. Whereas, amounts of uptake showed a reverse tendency. From this experiments it was found that media containing more than 2.5ppm either arsenite or arsenate have an injurious effect on growth.

Status of growth indicated that arsenite were more toxic than arsenate. When arsenite was added to culture solution in large amount (10ppm), the plant was wilted 1 or 2 hours after the treatment began, whereas, the plant treated with arsenate was not wilted.

The concentration of added arsenic at the level of half growth retardation, based on air dry weight of shoot, was estimated to be 2ppm for arsenite, 3ppm for arsenate.

The yield in 2.5ppm arsenite media showed 75 per cent decrease and in the case of arsenate 35 per cent decrease as compared with control. In media of 5ppm or more arsenic, both arsenite and arsenate, the lower leaves died and no yield was obtained.

From the result described above, it became clear that water soluble arsenic in the growth media depresses the metabolic activity of roots, inhibits the uptake of nutrient and water, and consequently retards the plant growth. Arsenite has twice the toxic effect of arsenate on the shoot weight, and has three times on the yield.