

## 土壤中 砒素의 行動과 水稻의 砒素吸收에 依한 被害生理 生態에 關한 研究

II. 土壤에 砒素處理로 因한 水稻의 砒素吸收 및 生育에 미치는 影響

李 敏 孝\*\* · 林 秀 吉\* · 金 福 榮\*\*

(86. 9. 15 접수)

## Behaviors of Arsenic in Paddy Soils and Effects of Absorbed Arsenic on Physiological and Ecological Characteristics of Rice Plant

II. Effect of As Treatment on the Growth and As Uptake of Rice Plant

Min Hyo Lee\*\*, Soo Kil H. Lim\* and Bok Young Kim\*\*

### Abstract

A pot experiment was conducted to find out As uptake and critical levels affecting yield loss of rice plant. The arsenic was added to two soils of sand loam and loam in the form of  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  at different As concentrations of 0, 10, 25, 50, 100, 150 ppm, respectively.

Rice yields significantly decreased with increasing soil As levels and the critical As levels in soils were estimated to be 6.79 ppm for loam and 2.75 ppm for sandy loam. Yield components also decreased with higher soil As levels and the weight of 1000 grains showed the highest significant correlation with As level in soil.

Most of arsenic was retained by the roots and a small amount of arsenic was translocated to the shoots. Arsenic content in plant organs was high in the order of root > stem > leaf blade > leaf sheath > brown rice. The number of sterilized grains also increased with higher As level in soil and it was much higher in sandy loam than in loam.

### 序 論

作物에 對한 砒素被害는 1832年 De Candolle<sup>(1)</sup>이 亞  
砒酸物質이 있는 周邊에서 植生한 草木科植物은 生育

이 크게 低下되었다고 報告한 以來 여러 研究者들에  
依해 砒素의 土壤中 行動과 作物別 吸收程度를 中心으  
로 많은 研究가 行하여져 왔다.

砒素는 엄밀히 보아 重金屬은 아니나 重金屬과 類似  
한 行動을 하는 元素로써 作物에 對한 毒性은 重金屬

\* 高麗大學校 農科大學 (College of Agriculture, Korea Univ., Seoul, Korea)

\*\* 農業技術研究所 (Institute of Agricultural Sciences, Suweon, Korea)

Table 1. Chemical properties of soils used

Soil texture	pH (1:5 H <sub>2</sub> O)	OM (%)	CEC (me/100gr)	Av. cations (me/100gr)			Av. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	Na (ppm)	As* (ppm)
				K	Ca	Mg			
Loam	5.2	3.75	8.3	0.19	2.13	0.64	63.6	44.3	0.26
Sand Loam	5.1	2.68	6.70	0.22	1.45	0.44	83.4	27.0	0.28

\* 1N HCl extractable

元素들보다 더 강한 것으로 報告<sup>(2)</sup>되어 있으며人體에도 有害한 物質로 오래前 부터 알려져 왔다<sup>(3)</sup>.

作物에 對한 砒素의 毒性은 單純히 砒素量에만 支配되는 것이 아니라 土性, 作物의 種類 및 土壤의 酸化還元 程度에 따라 크게 相異하다<sup>(4,5,6,7)</sup>.

따라서 본 試驗은 砒素汚染土壤에서 栽培되는 主作物인 水稻를 對象으로 土性이 다른 두 土壤에 砒素를 處理하고 水稻의 生育 및 砒素吸收程度를 調査하여 얻어진 몇 가지 結果를 報告하는 바이다.

### 材料 및 方法

#### 1. 供試土壤

本 試驗에 供試된 土壤은 水原市 塔洞 및 華城郡 半月面 塘水里에 위치한 畚土壤(石泉統, 新興統)의 表土인 砂壤土 및 微砂質壤土를 使用하였으며, 그의 化學的 特性은 表 1과 같이 土壤中 砒素含量은 두 土壤 모두 우리나라 一般 農耕地 土壤中 砒素含量과 類似하였고 그 外 大部分 一般成分들은 土性에 따라 그 含量이 多少 相異하였으나 우리나라 一般 畚土壤中 平均含量<sup>(8)</sup>과는 큰 차이가 없었고 pH는 多少 낮은 편이었다.

#### 2. 砒素의 土壤處理 및 水稻 栽培方法

風乾시킨 供試土壤 15kg에 砒素를 重量比로 0, 10, 25, 50, 100 및 150 ppm이 되게 Na<sub>2</sub>HAsO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O로 各各 處理하고 다시 窒素, 磷酸, 加里를 成分量으로 15:9:10kg/10a의 2倍量을 尿素, 過石, 鹽化加里로 8.7g, 12g 4.4g/pot 施用하여 土壤과 잘 混合시킨 후 1/2000 a Wagner pot에 各各 充填시키고 灌水하였다. 窒素는 基肥 50%, 1次 追肥 30%, 2次 追肥 20%로 分施하였으며 磷酸은 全量 基肥, 加里는 基肥 70%, 追肥 30%로 施用하였다.

供試作物로 水稻“曙光벼” 45日苗를 灌水後 5日에 pot 당 4株 1本씩 1983年 6月 1日에 移秧하여 收穫 3日前까지 灌水栽培하였고 10月 2日에 收穫하였다.

#### 3. 水稻體의 砒素含量 分析

分析用 試料는 70°C 熱風乾燥器에서 約 72時間 乾燥시킨 후 根 및 莖葉은 20mesh, 玄米는 60mesh에 通過된 것을 分析試料로 使用하였다.

根 및 莖葉中 砒素含量分析은<sup>(9)</sup> 試料 1g 및 5g에 蒸溜水, 黃酸 및 窒酸을 一定量 加하고 熱板上에서 加熱 分解하여 激甚한 反應이 끝난후 다시 窒酸 및 過鹽素酸을 加하여 濾液이 透明하게 될 때까지 分解시켜 50ml mess flask에 定容한 후 이 濾液을 AgDDC法<sup>(10)</sup>으로 測定하였다.

玄米中 砒素含量分析은 玄米를 105°C에서 乾燥後 粉碎하여 60mesh에 通過된 50g을 乾式灰化<sup>(11)</sup>시킨 다음 Conc. HClO<sub>4</sub>와 HNO<sub>3</sub>를 各各 5ml씩 加하여 熱板上에서 分解乾固시키고 여기에 1N-HCl 25ml를 加한 후 여과한 여액중의 砒素濃度를 AgDDC法으로 測定하였다.

### 結果 및 考察

#### 1. 收量 및 收量構成要素

水溶性 砒素化合物인 Na<sub>2</sub>HAsO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O를 砒素로써 土性이 다른 두 土壤에 處理하고 水稻收穫 3日前까지 계속 灌水하여 栽培한 結果 正租收量은 表 2와 같이 두 土壤 모두 對照에 비해 砒素處理濃度가 높아질수록 收量이 有意性있게 減收되었고 土壤間에는 砂壤土가 壤土에 비해 더 減收되었으며 回歸方程式에 依하여 調査된 土性別 有意性있는 減收濃度는 表 3과 같이 壤土에서는 6.79 ppm, 砂壤土에서는 2.75 ppm으로 砂壤土가 壤土에 比하여 크게 낮았다.

細田等<sup>(2)</sup>은 土壤에 砒酸소다를 濃度別로 處理하고 水稻를 栽培한 結果 土壤中 砒素濃度가 높아질수록 減收程度가 컸다고 하였고 小山等<sup>(4)</sup>은 數種의 砒素化合物을 土壤에 處理하고 水稻를 栽培한 結果 砒素化合物의 形態에 따라 減收程度는 多少 相異하나 砒素處理濃度가 높아질수록 收量이 減少되었다고 報告하였으며 Hara等<sup>(6)</sup> 및 石塚等<sup>(12)</sup>도 砒素를 處理한 水耕液에서 栽培된 水稻에서도 비슷한 結果를 얻었다고 하였다. 또한 Copper等<sup>(13)</sup>은 土性이 다른 두 土壤에 Calcium arsenate를 撒布했을 때 壤質土壤에 비해 砂質土壤에서 栽培된 植物이 砒素의 被害가 컸다고 하였고 澁谷<sup>(14)</sup>等은 火山灰土壤에서는 砒素 120 ppm 處理時 水稻의 收量이 50% 減少한 反面 沖積土壤에서는 同一濃度에서 收量階無現象를 나타내었다는 이들 報告들과 本 試

Table 2. Rice yields (g/pot)

Soil texture	As concentration (ppm) added in soil				
	0	10	25	50	100
Loam	154.7	129.0(16.4)	117.9(23.8)	108.7(29.8)	30.3(80.4)
Sand Loam	143.3	102.8(28.3)	94.7(34.0)	62.5(56.4)	0

LSD 1% :      Loam      Sand Loam      ( ) indicates the rate  
   22.51      21.70      of yield decreased

Table 3. Regression equations and correlation coefficients between rice yield and soil As concentration, and As critical level

Soil texture	Regression	Coeff. (r)	Critical level (ppm)
Loam	$Y=153.512-2.685x+0.0575x^2-0.000429x^3$	0.977**	6.79
Sand Loam	$Y=143.300-6.250x+0.2518x^2-0.00318x^3$	0.921**	2.75

\*\* Significant at 1% probability level

驗結果는 一致하는 傾向이다. 한편 本 試驗에서 土性 間의 減收程度 차이는 壤質系 土壤일수록 土壤中 可溶性 砒素含量은 크게 減少한다는 報告<sup>(14)</sup>와 같이 砒素의 土壤中 吸着程度의 차이에 기인되는 것으로 생각된다.

한편 Epps等<sup>(7)</sup>은 土壤中 可溶性 砒素含量이 7 ppm에서 水稻는 被害를 가져온다고 하였으며 細田等<sup>(2)</sup>은 水稻에 對한 土壤中 砒素의 刺戟限界點은 10 ppm이라고 報告하였다. 本 試驗에서 두 土壤에서의 水稻에 對한 砒素의 被害限界濃度를 보면 微砂質 壤土에서는 Epps等 및 細田等이 報告한 濃度와 類似하나 砂壤土에서는 크게 낮은 것으로 보아 이는 이들이 使用한 土壤과 CEC나 粘土含量이 相異하기 때문에 사료된다.

土壤中 砒素處理濃度에 따른 水稻收量構成要素의 變化를 表 4에서 보면 土壤中 砒素濃度가 높아질수록 두 土壤 모두 株當穗數, 穗當粒數, 登熟率 및 千粒重이 크게 減少하고 있으며 土性別로 보면 砂壤土가 壤土에 비해 이들 收量構成要素의 沮害가 더 크게 나타나는 傾向으로 收量에서와 같은 傾向이었다. 또한 土壤中 砒素處理濃도와 이들 收量構成要素들 間에는 모두 有意性 있는 負의 相關을 나타내었으며 이중 千粒重이 가장 높은 相關을 나타내었고 다음이 登熟率, 株當穗數, 穗當粒數의 順으로 높았다.

金等<sup>(15)</sup>은 Cu, Cr, Mn을 砂耕으로 水稻를 栽培한 結果 Cu處理區는 培養液中 Cu 濃度가 增加함에 따라 株

Table 4. The effects of As treatment on yield components of rice plant at harvest and their correlation coefficients.

Treatment	(ppm)	Yield components			
		No. of panicles per hill	No. of grains per panicle	Maturing ratio (%)	1000 grains (gr)
Loam	0	28.3	115.5	93.6	25.4
	10	26.5	108.8	92.1	24.3
	25	22.8	117.2	91.8	24.0
	50	27.0	103.4	85.2	22.3
	100	16.5	102.0	53.8	17.4
Sand Loam	0	25.3	117.6	94.2	25.6
	10	25.2	114.8	76.5	23.3
	25	24.0	115.1	73.5	23.3
	50	25.8	91.3	64.8	20.4
Correlation coefficients		-0.648**	-0.506*	-0.885**	-0.893**

\*\*\* significant at 5% and 1% probability level, respectively.

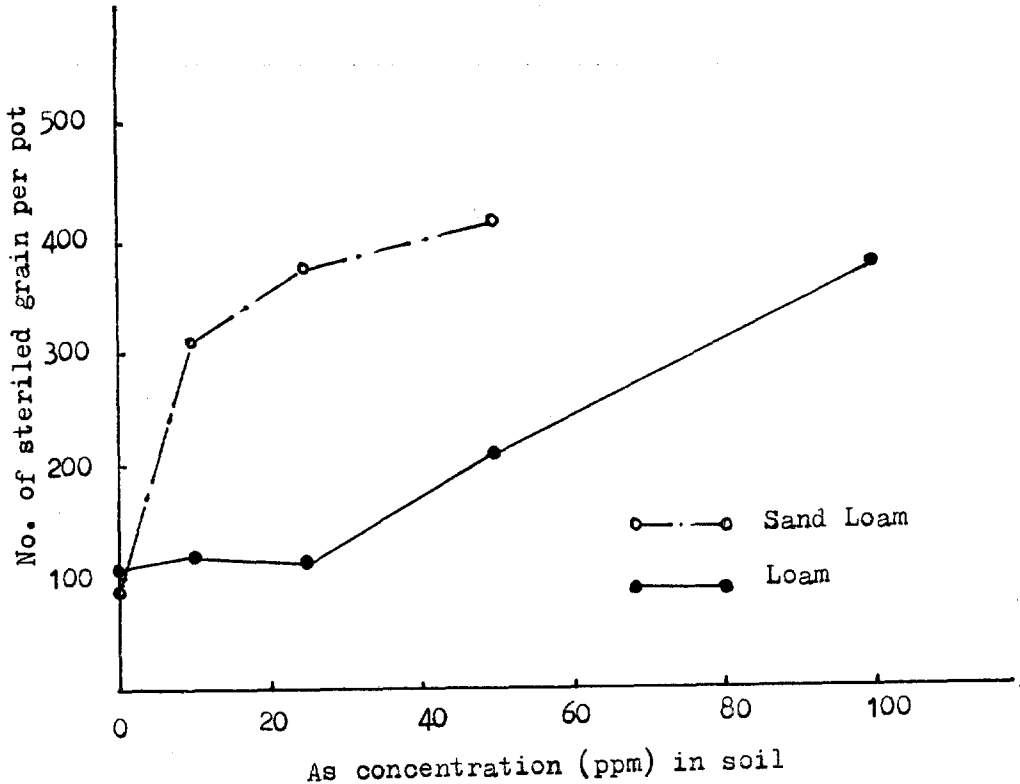


Fig. 1. No. of sterilized grains of rice plant with different As concentrations in soil and soil textures at 90 days after transplanting

Table 5. The effects of As treatment on plant growth status at different growing stages

Treatment	Stage (ppm)	Maximum tillering (July 5)		Panicle formation (July 26)			Heading date
		Height (cm)	No. of tillers	Height (cm)	No. of tillers	Dry weight (g/plant)	
Loam	0	44.3	20.8	75.4	41.0	45.6	8.7
	10	42.5	21.1	75.4	37.3	44.5	8.7
	25	39.3	18.1	75.9	33.9	34.1	8.9
	50	33.7	15.5	72.9	37.0	26.3	8.10
	100	25.1	6.8	56.8	15.2	6.1	8.17
	150	20.6	2.2	28.7	3.0	0.95	—
Sand Loam	0	42.8	23.7	71.8	39.2	44.6	8.7
	10	42.8	23.3	72.8	35.0	43.3	8.7
	25	41.3	18.5	72.2	32.4	29.4	8.9
	50	25.8	7.5	69.6	28.6	16.8	8.11
	100	21.0	1.8	29.0	2.3	0.9	—
	150	17.3	1.0	0	0	0	—

當穗數, 穗當粒數는 減少하나 千粒重은 오히려 增加하였다고 하였으며 Cr과 Mn處理區에서는 株當穗數만이 減少하였다고 하였다. 이와같이 收量에 影響을 주는 收量構成要素들은 重金屬元素들의 種類에 따라 相異하

며 本 試驗에서 砒素處理에 依한 水稻의 收量減少는 收量이 千粒重 및 登熟率과 相關이 特히 높은 것으로 보아 粒重의 低下와 그림 1에서의 不妊粒의 增加로 因한 登熟率 低下가 가장 크게 기인하는 것으로 보여진

Table 6. As contents in different parts of rice plant at harvest time

	As concentr.	As content (ppm) in different plant part				
		Brown rice	Stem	Leaf blade	Leaf sheath	Root
Loam	0	0.18	2.50	1.36	1.15	42.1
	10	0.41	5.84	5.35	4.65	328.1
	25	0.79	11.83	8.04	7.56	640.1
	50	0.60	8.75	6.20	4.81	797.4
	100	0.43	7.77	5.57	4.32	914.7
Sand Loam	0	0.40	3.94	2.92	2.37	72.6
	10	0.52	7.15	6.54	4.60	482.6
	25	1.08	13.74	9.40	9.09	722.1
	50	0.54	7.14	6.56	4.93	829.7
Average As content (%)		0.10	1.37	1.04	0.87	96.6

다.

한편 水稻收量에 直接 影響을 준 時期別 生育狀況을 調査한 結果는 表 5와 같이 두 土壤 모두 土壤中 砒素 處理濃度가 높아질수록 草長, 分蘗數 및 乾物重이 크게 減少되었으며 出穂도 遲延되었다. 土性別로 보면 砂壤土區는 壤土區에 비해 草長, 分蘗數 및 乾物重 모두 크게 抑制되었고 出穂도 더 遲延되었으며 특히 砂壤土의 砒素 150 ppm 處理區에서는 水稻가 完全 고사 되었다.

2. 水稻體中 砒素含量

土壤中 砒素處理濃度에 따른 水稻體 部位別 砒素含量과 그 分布는 表 6와 같이 砒素處理濃度가 增加함에 따라 두 土壤 모두 뿌리의 砒素含量은 크게 증가하나 地上部 砒素含量은 土壤中 砒素 25 ppm 濃度까지는 植物體 砒素含量이 增加하나 그 以上の 濃度에서는 점차 減少하였으며 土性間에는 壤土가 砂壤土에 비해 이들 部位別 含量이 모두 적었다.

小山等<sup>(4)</sup>은 土壤中 砒素處理濃度가 增加함에 따라 水稻根中 砒素含量은 크게 增加한 反面 莖葉中 砒素含量은 完만하게 增加하였다고 하였으며 土壤間에는 CEC 가 큰 土壤이 적은 土壤보다 植物體 砒素含量이 적었다고 하였다. 本 試驗에서도 砒素處理濃度가 增加함에 따라 根中 砒素含量은 두 토양 모두 小山等의 報告와 비슷하나 地上部 部位別 砒素含量은 土壤中 25 ppm 以上에서는 砒素含量이 점차 減少하고 있어 이들 報告와는 相異하나 田中等<sup>(18)</sup>은 土壤에 砒素를 濃度別로 處理하여 水稻의 砒素吸收을 調査한 結果 本 試驗과 類似한 結果를 報告하였다. 이와같은 現象은 作物 또는 品種間 차이<sup>(17)</sup>에 의해서도 相異할 것으로 판단되며 또

한편으로는 水稻根의 砒素障害濃度는 200 ppm이라고 報告<sup>(12)</sup>한 것에 比較하면 本 試驗에서 土壤中 砒素 25 ppm 處理區에서는 두 土壤의 根中 砒素含量이 壤土에서 640 ppm, 砂壤土에서 720 ppm으로 이들 濃度에서는 뿌리가 甚하게 障害를 받아 砒素의 地上部移行이 抑制된 것이 아닌가 思料된다.

部位別 砒素含量을 보면 玄米에서는 大部分의 砒素 處理區에서 1 ppm을 超過하지 않아 高濃度의 砒素를 含有한 土壤에서 栽培된 水稻 子實中 砒素含量은 1 ppm을 超過하지 않는다는 小山等<sup>(18)</sup>의 報告와 一致하는 傾向이나 砂壤土 25 ppm 處理區에서는 玄米中 含量이 1.08 ppm으로 美國 FDA의 食品中 砒素規制濃度 1.08 ppm와 同一하며 日本의 野菜中 砒素 許容量 1 ppm보다 높다. 또한 葉身, 葉鞘 및 줄기의 砒素含量은 뿌리에 比較해서는 아주 작으나 砒素를 處理하지 않은 對照區에서도 1 ppm을 上廻하고 있고 土壤中 砒素濃度가 높아짐에 따라 그 含量도 增加하고 있어 砒素汚染地에서 生産된 芻草를 家畜이 장기간 攝取할 경우 가속은 물론 食物連鎖作用에 依해 人體에 까지도 惡影響을 미칠 것으로 생각된다.

한편 水稻體의 部位別 砒素 分布比를 보면 뿌리가 96.6%로 가장 높았고 다음이 줄기, 葉身, 葉鞘, 玄米의 順으로 높았다. 이는 作物體의 砒素分布는 根部에 多量 集積되어 있고 다음 葉部이며 結實種子中에는 少量이 含有되어 있다는 Hara의 報告<sup>(6)</sup>나 遊谷<sup>(14)</sup> 등이 報告한 水稻體 部位別 分布順인 뿌리>줄기>葉身>葉鞘>玄米의 順과 一致하였다. 이와같은 사실은 植物體에 吸收된 砒素는 大部分 뿌리에 蓄積되고 地上部의 移行은 극히 적다는 것을 알 수 있다. 이와같이 뿌리中의

砒素含量이 다른 部位에 비해 월등히 많은것은 重金屬 元素의 植物體 分布는 이들 元素들의 電氣陰性도가 클 수록 根內 蓄積이 많다는 報告<sup>(19)</sup>와 같이 砒素는 電氣 陰性도가 2.0으로 他元素들에 비해 크기 때문에 根의 砒素蓄積이 많았던 것으로 思料된다.

要 約

砒素의 土壤處理에 의한 水稻體의 砒素吸收 程度 및 生育에 미치는 影響을 調査하기 위하여 壤土와 砂壤土에 水溶性 鹽인  $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ 로 砒素의 濃도가 0, 10, 25, 50, 100 및 150 ppm되게 各各 處理하여 pot 試驗한 結果는 다음과 같다.

1) 水稻收量은 土壤中 砒素濃도가 높아짐에 따라 有意性 있게 減少되었고 土性別 有意性있는 減收濃도는 砂壤土가 2.75 ppm, 壤土가 6.79 ppm이었다.

2) 收量構成要素도 土壤中 砒素濃도가 높아질수록 有意性있게 各各 減少되었고 이중 千粒重이 가장 높은 相關(-0.893\*\*)을 나타내었다.

3) 水稻體 砒素는 大部分 뿌리에 蓄積되어 있고 小量이 地上部로 移行되었으며 部位別 含量은 뿌리>줄기>葉身>葉鞘>玄米의 順으로 높았다.

4) 不粒粒數는 土壤中 砒素濃도가 높을수록 增加되었으며 土性別로는 砂壤土區가 壤土區 보다 더 많았다.

參考文獻

1. Candolle, A.P.DE. 1832. *Physiologie Vegetale*. 3v. Paris
2. 細田克己, 1942. 鎊毒土壤改良에 關する 研究(第 5 報) 銅, 砒素, 亞鉛, 鉛及鐵等の 水稻收量에 及ぼす 影響並に 其의 有害作用에 對する 防除劑의 效果에 就て, 日土肥誌, 16 : 459
3. 環境保全, 1984. 環境廳(單行本) p. 354
4. 小山雄生, 栗野博夫, 澁谷政夫, 1976. 土壤中の As と 水稻生育との 關連に 關する 研究(第一報) As 化合形態と 水稻生育阻害について. 日土肥誌. 47(3) : 85
5. Albert, W.B., and C.H. Arndt. 1932. The concentration of soluble arsenic as an index of arsenic toxicity to plants. *South Carolina Agr. Exp. Sta. Ann. Rep.* 44 : 47
6. Hara, T., Y. Sonoda, and I. Iwai. 1971. Growth

- response of cabbage plants to arsenic and antimony under water culture conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 23(2) : 253
- 7) Epps, E.A., and M.B. Sturgis. 1939. Arsenic compounds toxic to rice. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 4 : 215
8. 朴俊奎, 李景洙, 李相奎, 1985. 農地資源과 地力 提高, 農業科學 심포지움, p. 27
9. 栽培植物 分析測定法, 1976. 作物分析法 委員會編 p. 188
10. 農林水産技術會議事務局, 1972. 土壤および 作物體の 分析法(Ⅱ). 日土肥誌 43(8) : 310
11. 農林水産技術會議事務局, 1972. 土壤および 作物體の 分析法(Ⅲ). 日土肥誌 43(9) : 350
12. 石塚喜明, 田中明, 1962. 水稻の 要素代謝に 關する 研究(第 8 報)鉛, 水銀, 砒素 特に これらの 害作用을 中心としこ一日土肥誌 33(9) : 421
13. Cooper, H.P., W.R. Paden., E.E. Hall., W.B. Albert, W.B. Rogers, and J.A. Riley. 1932. Soils differ markedly in their response to additions of calcium arsenate. *South Carolina Agr. Exp. Sta. 45th Ann. Rep.* pp. 23
14. 澁谷政夫, 1972. “農用地土壤의 特定有害物質による 汚染의 解析에 關する 研究. 昭和 46年度 中間報告(農技研化學部) p. 47
15. 金奎植, 李敏孝, 金福榮, 金善寬, 1978. 有害物質의 農作物 被害度基準設定 農技研報告書(土壤肥料編) p. 65
16. 田中彰, 上田弘美, 西尾一雄, 1976. 水稻に 對する 公害에 關する 研究. 第10報, ひ素, カドミウム におぼす 影響について, 鳥取縣農業試驗場報告, 16 : 33
17. Jacobs. L.W., D.R. Keeny, and L.M. Walsh. 1970. Arsenic residue toxicity to vegetable crops grown on plainfield sand. *Agron. J.* 62 : 588
18. 小山雄生, 澁谷政夫, 1972. 農用地土壤의 特定有害物質에 關する 汚染의 解析에 關する 研究, 日農技研報告(化學部) p. 47
19. 芽野充男, 北岸確三, 1965. 重金屬 素의 過剩による 水稻의 被害에 關する 研究(第二報) 銅, ニッケル, コバルト, 亞鉛 およびマンガン の 處理時期을 變えたきの 水稻의 生育. 日土肥誌, 37(7) : 372