

硫黄山噴火に伴う河川汚濁水が水稻栽培に与える影響

原田隆大*・山内正仁*・山田真義*・山口隆司**・松田曜子**・丁子哲治***

* 鹿児島工業高等専門学校

** 長岡技術科学大学

*** 前鹿児島工業高等専門学校校長

要 旨

本研究では、利水の安全性確保のために、硫黄山噴気孔近くのえびの橋（赤子川最上流部）から採水した河川水を10万倍まで段階的に希釈し、汚濁水に含まれる成分が水稻栽培に与える影響についてポット試験を実施し、検討した。ポット試験では、根長、地上部乾物重、根乾物重、穂数、籾数、実籾数、玄米収量を調査した。その結果、pHが低く、EC、SS濃度が高い河川水原水を水稻栽培に利用すると苗の生育が急激に悪化すること、河川水を水道水で10倍希釈した試験区2と100倍～10万倍希釈（試験区3～6）及び対照区（試験区7）の間には水稻の生育、収量に顕著な差が見られた。

1. はじめに

2018年4月、250年ぶりに霧島連山・硫黄山で噴火が発生し、川内川、長江川、赤子川では予期せぬ有害成分を含む強酸性の噴出汚濁水により汚染され、1トンを超える魚の死骸が回収されるに至った。また、これらの流域では河川水を利用した稲作が盛んであるが、2018年度の水稲栽培は、環境基準を超えるヒ素などの有害物質が検出されたことを受け、2市1町（宮崎県えびの市、鹿児島県湧水町、伊佐市）の水田853haで稲作が中止された。次年度においても風評被害などを恐れ、自治体で対応が分かれたこともあり、流域全体での稲作再開に至っていない状況にある。

本研究では、利水の安全性確保のために、硫黄山噴気孔近くのえびの橋（赤子川最上流部）から採水した河川水を10万倍まで段階的に希釈し、汚濁水に含まれる成分が水稻栽培に与える影響についてポット試験を実施し、検討した。

2. 試験方法

2.1 河川水の採水及び試験土壌の採取

本試験では、硫黄山から近くのえびの橋で河川水を6回（2018年6月27日から10月3日まで）採水し、pH、EC、SS及び金属・重金属を定量した。また、宮崎県

えびの市向江地区水田土壌を150 kg採取し、2 mm篩に通した後、これらをポット試験に用いた。

2.2 河川水の採水及び試験土壌の採取

本試験では、まず7月10日に1/5,000 aのワグネルポットに水田土壌を2.6 kg（現物：水分率40.1%）ずつ充填後、6月27日に採水した河川水原水（試験区1）、水道水で希釈した河川水（試験区2～試験区6：10倍～10万倍まで5段階に希釈）及び水道水（試験区7：対照区）を各試験区1 L添加した。つぎにポットあたりヒノヒカリの苗を1株（4本）ポット中心に移植し、化学肥料0.8 g（ひかりエース2号（N:P:K 10-18-14））を添加した。栽培開始後は原則湛水状態を維持した。また追肥として8月10日、24日に基肥と同じ化学肥料を0.4 gずつ施肥した。栽培期間中は、分けつ数、草丈を20日間隔で栽培80日（9月28日）まで測定した。収穫は10月26日に行った。収穫後、ポットごとに根長、地上部乾物重、根乾物重、穂数、籾数、実籾数、玄米収量を調査した。また玄米については金属・重金属含有量を調査し、河川汚濁水を水稻栽培に利用することによる影響を対照区（試験区7）と比較した。

3. 試験結果および考察

表-1 えびの橋（赤子川最上流部）で採水した河川水の水質分析結果

分析項目	pH (-)	EC (mS/m)	SS	Cd	As	T-Hg	Se	Cu	Zn	Cr	Pb	F	B
環境基準	6.5-8.5	-	25以下	0.003以下	0.01以下	0.0005以下	0.01以下	-	農業用水基準 (0.5mg/L)	0.05以下	0.01以下	0.8以下	1以下
2018.6.27	1.7	1,094	22	0.0017	0.4	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.35	0.03	0.032	17	9
2018.7.11	1.1	2,930	1,220	0.0058	1.5	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	1.20	0.04	0.12	42	33
2018.8.02	1.5	1,487	96	0.0017	0.7	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.41	0.02	0.036	17	20
2018.8.18	1.4	1,246	120	0.0036	1.0	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.83	0.05	0.072	23	37
2018.9.6	1.8	742	85	0.0011	0.3	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.36	0.02	0.015	6.4	26
2018.10.3	1.8	537	63	0.0007	0.2	0.0005未満	0.002未満	0.1未満	0.17	0.02	0.01	4.2	6.7

表-1にえびの橋で採水した河川水（原水）の水質分析結果を示す。全体的にpHは極端に低く、1.1~1.8の範囲にあった。EC, SSは7月11日の河川水で2,930mS/m, 1,220 mg/Lであったが、それ以降は減少傾向にあった。金属及び重金属含有量は、As, Pb, F, Bが全ての試料で環境基準値を上回った。表-2に各試験区における河川水、河川希釈水及び水道水のポット土壌への1日平均灌水量、平均累積灌水量を示す。1日平均灌水量は栽培24日目~43日目が多く、その後は徐々に減少した。ポットあたりの平均累積灌水量は13.8~15.4 L/ポットであった。なお、試験区1については、7月18日（栽培8日目）に7月11日に採水した河川水添加後、徐々にポット土壌表面からの水位の変化が少なくなり、7月23日に灌水を停止した。また、試験区2についても9月13日以降、ポット土壌表面の水位変化が小さく、灌水量が低下した。表-3に水稻の生育調査結果を示す。最高分けつ数（栽培40日目（8月19日））、草丈、根長及び根乾物重に試験区間の有意差は認められなかった（写真1参照）。根長、根乾物重については、試験区内でのバラツキが大きかった。これは植物根がポット全体に周り、土壌と分離する際、細根が切断されたりしたことが影響していると考えられる。地上部乾物重については、試験区2とその他の試験区で有意差が認められた。なお、試験区1については上述したように、河川水が土壌浸透し難くなり、急激に苗の生育も悪化し、7月28日（栽培18日目）に枯死した（写真2参照）。この期間にポットに灌水した河川水はSS濃度が非常に高い。またECも極端に高い。このことから、ポット土壌の間隙がSSにより塞がったり、浸透圧が増加したりしたことで、根の吸水障害により根腐れを起こし、枯死したと考えられる。表-4に水稻の収量構成要素の結果を示す。ポットあたりの穂数、粒数に有意差は認められなかったが、実粒数、玄米重量は試験区2と試験区3~試験区7で有意差が認められた。試験区7の実粒数、玄米重量はそれぞれ528.8±4.91粒、8.5±0.52gと河川希釈水を利用した試験区3~試験区6よりもやや多かったが、統計的有意性はなかった。表-5に玄米に含まれる金属、重金属含有量の分析結果を示す。Asは試

表-2 栽培期間における1日平均灌水量、平均累積灌水量

試験区	河川水採水日						平均累積灌水量 (L/ポット)
	6月27日	7月11日	8月2日	8月18日	9月6日	10月3日	
	7/10-7/17 (8日)	7/18-8/1 (15日)	8/2-8/21 (20日)	8/22-9/12 (22日)	9/13-10/2 (20日)	10/3-10/11 (9日)	
	1日平均灌水量(L/ポット/日)						(L/ポット)
1 河川水原水	0.150	0.067	-	-	-	-	2.2
2 10倍希釈	0.166	0.100	0.339	0.167	0.008	0.044	13.831
3 100倍希釈	0.166	0.112	0.326	0.169	0.065	0.061	15.095
4 1,000倍希釈	0.163	0.101	0.308	0.198	0.070	0.075	15.396
5 10,000倍希釈	0.156	0.105	0.299	0.138	0.078	0.072	14.025
6 100,000倍希釈	0.156	0.109	0.306	0.164	0.080	0.072	14.858
7 対照区(BL)	0.194	0.105	0.296	0.170	0.079	0.056	14.875

表-3 水稻の生育調査結果

試験区	最高分けつ数	草丈	根長	地上部乾物重	根乾物重
	(-)	(cm)	(cm)	(g/ポット)	(g/ポット)
2 10倍希釈	19.0±1.22	80.3±4.11	29.9±4.90	18.7±0.55a	12.0±1.82
3 100倍希釈	17.5±2.29	79.4±2.25	32.4±5.46	23.5±0.99b	14.7±2.29
4 1,000倍希釈	14.5±2.29	80.9±1.37	33.7±5.25	22.9±0.63b	13.9±1.47
5 10,000倍希釈	15.5±3.28	81.1±1.76	31.5±1.73	23.2±1.79b	14.7±0.79
6 100,000倍希釈	16.5±1.50	78.3±5.21	39.5±3.82	23.7±1.36b	16.2±1.80
7 対照区(BL)	15.5±1.80	80.4±5.27	38.4±3.59	24.0±0.87b	13.9±1.43

平均値±標準偏差を示す。同一列の異なるアルファベット間にはTukeyの多重比較により5%水準で有意差あり(N=4)。

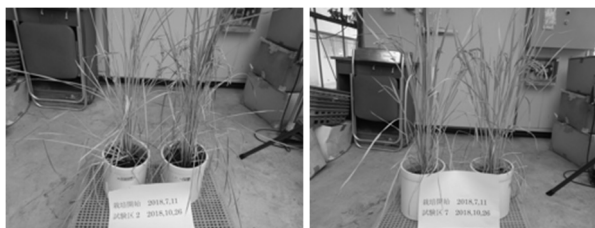


写真1 収穫前の生育状況
左：試験区2 右：試験区7



写真2 枯死した水稻試験区1

験区2で0.40±0.11 mg/kgと最も高かったが、試験区3では試験区7と同様に低く、試験区5では試験区1、試験区7と有意差がないなど希釈倍率に関係なく0.14～0.40 mg/kgの範囲で変動した。Cd, Asは水田の水管理により玄米への吸収を抑制可能なことが報告されている(荒尾, 2010)。しかしながら、Cdは湛水管理で減少させることが可能な一方、Asは間断灌漑を行う必要があり、両者には負の相関がある(荒尾, 2010)。本試験の水管理は湛水管理に近い状態で栽培を実施したため、全ての試験区でAsが検出されたと推察される。厚生労働省は米(玄米及び精米)のCdについては0.4 mg/kg以下の規格基準を示している。一方、Asについては玄米で0.35 mg/kg(無機ヒ素)、精米で0.2 mg/kg(無機ヒ素)のCodex基準がある。また玄米に含まれる総ヒ素の92%は毒性の強い無機ヒ素である(農林水産省HP)。本試験では試験区2、試験区5において基準値と同等、それ以上の無機ヒ素を含む可能性があると考えられる。

川内川上流部の宮崎県えびの市、鹿児島県湧水町及び伊佐市のそれぞれの観測地点の年平均流量は豊水流量で18.8～37.3 m³/s, 平水流量で12.4～23.8 m³/s, 低水流量で9.6～17.9 m³/s(2015-2017国土交通省 水文水質データ参照)である。採水場所のえびの橋の流量は0.23 m³/s(実測)であったことから、川内川では40倍～160倍程度希釈されると考えられる。本試験結果では河川水を10倍希釈した試験区2で水稻の生育、収量に顕著な差が見られた。また、玄米中のAs量も試験区2と試験区5で有意差が見られないなど、河川希釈水を利用した試験区は試験区7と比較して全体的に高くなる傾向にあった。これらのことから、2018年度、河川水を水稻栽培利用していた場合、水稻の生育、収量構成要素及び玄米への重金属(As)の濃縮など少なからず影響を受けていたと推察される。

4. おわりに

本研究では、硫黄山噴火に伴い発生した汚濁水が水稻栽培に与える影響をポット試験で調査し、以下の知見を得た。

- 1) pHが低く、EC, SS濃度が高い河川水原水を水稻栽培に利用すると苗の生育が急激に悪化した。これは河川水の塩類濃度の高まりによる浸透圧の変化や微粒懸濁物による水田土壌の透水性、通気性の悪化が影響していると考えられた。
- 2) 河川水を水道水で10倍希釈した試験区2と100倍～

表-4 水稻の収量構成要素

試験区	穂数 (本/ポット)	籾数 (粒/ポット)	実籾数* (粒/ポット)	玄米重量** (g/ポット)
2 10倍希釈	15.0 ± 1.28	484.3 ± 8.32	342.3 ± 6.32 b	3.7 ± 0.66 b
3 100倍希釈	14.5 ± 0.76	448.0 ± 9.08	433.5 ± 8.92 a	7.8 ± 0.59 a
4 1,000倍希釈	12.5 ± 1.00	472.5 ± 2.53	462.0 ± 3.20 a	7.4 ± 0.47 a
5 10,000倍希釈	12.8 ± 0.98	451.8 ± 7.25	432.0 ± 7.19 a	7.6 ± 0.79 a
6 100,000倍希釈	14.0 ± 1.28	483.8 ± 4.18	454.0 ± 4.98 a	7.3 ± 0.78 a
7 対照区(BL)	13.3 ± 1.23	537.5 ± 4.86	528.8 ± 4.91 a	8.5 ± 0.52 a

同一列の異なるアルファベット間にはTukeyの多重比較により有意差あり(N=4)。* P<0.05 **P<0.01

表-5 玄米に含まれる金属・重金属分析結果

試験区	Cd As Pb Cr Zn B F (mg/kg)						
	2 10倍希釈	N.D.	0.40±0.11 a	N.D.	0.18±0.13	25.0±2.76 b	3.65±0.69
3 100倍希釈	N.D.	0.14±0.04 b	N.D.	N.D.	30.3±2.07 ab	1.68±0.45	N.D.
4 1,000倍希釈	N.D.	0.24±0.03 bc	N.D.	0.30±0.17	34.5±1.54 a	1.17±0.46	N.D.
5 10,000倍希釈	N.D.	0.30±0.11 ac	N.D.	N.D.	32.5±1.82 ab	1.07±0.50	N.D.
6 100,000倍希釈	N.D.	0.23±0.04 bc	N.D.	N.D.	36.0±1.07 a	0.56±0.55	N.D.
7 対照区(BL)	N.D.	0.15±0.04 bc	N.D.	0.65±0.15	37.5±1.44 a	0.50±0.29	N.D.

同一列の異なるアルファベット間にはTukeyの多重比較により5%水準で有意差あり(N=4)。

10万倍希釈(試験区3～6)及び対照区(試験区7)の間には水稻の生育、収量に顕著な差が見られた。また、玄米中の総As量は試験区2で0.40±0.11 mg/kg, 試験区5で0.30±0.11 mg/kgであり、バラツキも大きい。試料によってはCodex基準値(0.35 mg/kg)と同等、それ以上の無機ヒ素を含む可能性があると考えられた。

3) 赤子川最上流部の流量、川内川の観測地点の年平均流量から、川内川上流における試験区を推定すると試験区2～4に相当すると考えられ、2018年度、河川水を水稻栽培利用していた場合、水稻の生育、収量構成要素及び玄米への重金属(As)の濃縮など少なからず影響を受けていたと推察された。

謝 辞

米盛誠心育成会研究助成事業及び京都大学防災研究所自然災害研究協議会の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 荒尾知人：水稻におけるカドミウムとヒ素の吸収を管理する技術開発, 土・水研究会資料 27, 1-7, 農業環境技術研究所, 2010.
- 2) 農林水産省：「平静24年度 国産玄米及び精米中のヒ素の含有実態調査」の結果について, <http://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/140221.html> (2018.1.25閲覧)。