

資 料

溶融スラグの土木資材利用時の環境影響について

岡 正人, 形見武男*, 安田 裕, 渡辺祐二**, 青山光治**, 後藤益宏**

要 旨

可茂衛生施設利用組合の灰溶融炉から発生した溶融スラグについて, 土木資材(下層路盤材)としての適応性について, 環境への影響という観点から検討した。溶融スラグを下層路盤材として利用した場合については, 現在に至るまで重金属の溶出等異常は認められなかった。また, 溶融スラグを舗装材へ利用した場合の環境大気への影響については, 岐阜県内で実施された過去の事例と比較しても, 影響を及ぼしていないことがわかった。また, 実際の施工と同一条件でカラム試験を行ったところ, 環境への影響についての予測手法として有益であることが分かった。

キーワード: 溶融スラグ, 有効利用, 路盤材, 環境影響

1. はじめに

一般廃棄物の処理は, 焼却による減容化・安定化・無害化処理後, 埋立処分されているのが現状である。一方, 最終処分場の不足や新規埋め立て地の立地が困難なことより, ごみの排出抑制及びリサイクルの推進・焼却による減容化が必要となっている。そこで, ごみの溶融固化技術が開発され, 各県の市町村に, 灰溶融及びガス化溶融設備の導入が進んでいる。また, 平成14年12月より規制が強化された排気ガス中のダイオキシン類低減対策として導入され始めているところが多いものと推測している。

ごみの溶融技術は, ダイオキシン類の低減や最終処分場への負荷低減に効果があり, 資源循環型社会構築へのキーテクノロジーとして注目されている^{1)~3)}。ここから生成する溶融スラグの有効利用についても平成10年3月26日に厚生省から溶融スラグの有効利用に関する指針「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の促進について」が通知され, JIS化の検討も進んでいる。また, コンクリート用細骨材及び道路用骨材への利用については, 平成14年7月20日にTRが公表されている。

可茂衛生施設利用組合では, ごみ焼却灰の減容・無

害化ならびに溶融スラグの資源化を目的として灰溶融炉を導入し, 平成11年4月から本格的に稼働している。本施設では, 焼却灰を電気プラズマ式灰溶融炉で溶融し, 溶融スラグは水砕処理している。この水砕スラグについて土木資材としての有効利用を検討するため, スラグの化学的性状, 砕石との組み合わせによるカラム試験, 試験区での下層路盤材へ利用した場合の浸出水における経時変化及び舗装材へ利用した場合のハイボリウム・エアースンプラーを用いた環境大気への影響について検討したので報告する⁴⁾。

2. 実験方法

2.1 溶融スラグの溶出試験

溶融スラグの溶出試験は, 「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用に関する指針」に基づいた溶出試験(環境庁告示第46号試験)で行った。

すなわち, 溶融スラグを風乾後, 目開き2.0mmの標準ふるいを用いて試料を調整し, 個液比1:10で6時間攪拌後, ろ過して試験液とした。

2.2 アベィラビリティ試験

粉末スラグからの重金属の溶出試験(アベィラビリティ試験)を実施した。アベィラビリティ試験とは,

岐阜県保健環境研究所: 504-0838 各務原市那加不動丘1-1

* (現) 岐阜県生物産業技術研究所: 505-0004 美濃加茂市蜂屋町上蜂屋3481-2

** 可茂衛生施設利用組合: 509-0247 岐阜県可児市塩河839

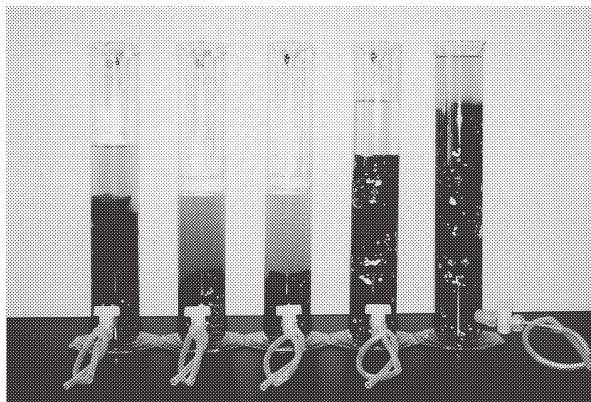


写真1 カラム試験の状況

オランダの公定法で粉末廃棄物（125 μm 以下）から実験室レベルでの最大溶出量を示す値として知られており、 $\text{pH}=7$ 及び4における総溶出量を評価する方法である。この方法は、実環境において pH が変動した非常に過酷な条件下での廃棄物からの最大溶出可能性とされている^{5)~7)}。すなわち、溶融スラグをメノウ乳鉢を用いて粉碎した後、目開き125 μm の標準ふるいを用いて試料を調整し、固液比1:50で $\text{pH}=7$ を維持した溶液で3時間攪拌後ろ過し、その残さを再び固液比1:50で $\text{pH}=4$ を維持した溶液で3時間攪拌し、全ろ液を試験液とした。

2.3 カラム試験

現在下層路盤材として使用されている碎石（C-40, M-30：県内A、B社）に本施設から発生した溶融スラグを実施工と同一条件（溶融スラグを10 wt%混入）で配合し、1000 mlのcock付きメスシリンダー（内口径63 mm）に詰めた（写真1）後、蒸留水に24時間浸漬し下部より採水した。再び24時間浸漬する工程を繰り返し採水を行った。この採水溶液を対象に金属類の溶出濃度を評価した。

2.4 試験施工

2.4.1 下層路盤材への適用

県道のアスファルト舗装工事現場で、下層路盤材の一部として溶融スラグを10 wt%混入した試験区を設定し、浸出液の環境への影響を検討した。試験区においては、下層路盤中に採水管（塩化ビニル製、 $\phi 50\text{ mm}$ ）を2車線分2箇所（図1）に勾配を付けて埋設した（写真2）。採水場所として、採水管の一端に採水用ピット（容量：約2 L）を設置した。また、施工現場における地下水位を確認するため、採水ピットの横に地下水位計測用の塩化ビニル管を設置した。この採水溶液を対象に金属類の溶出濃度を評価した。



写真2 試験施工時の採水管設置状況について

2.4.2 表層アスファルトへの適用

県道のアスファルト舗装工事現場で、表層アスファルトへ溶融スラグを10 wt%混入した舗装材を用いた試験区を設定し、粉じんによる環境大気への影響について検討した。すなわち、道路の両端2カ所にハイボリウム・エアーサンプラーを設置し、施工直後と1年経過時において、環境大気約1000 Lを24時間連続捕集して大気粉じんを採取し、粉じん濃度を算出した。また、シリカ繊維ろ紙上に捕集した粉じんの一部について各金属成分の定量を行った。

2.5 分析装置及び試薬

溶融スラグの組成分析は、蛍光X線装置3080 E（リガク社製）を使用した。また、重金属類の測定は、誘導結合プラズマ発光分析装置IRIS（日本ジャーレル・アッシュ（株）社製）を、還元気化水銀測定装置RA-2 A（日本インスツルメンツ（株）社製）を、また、陰・陽イオン分析にはイオン分析装置IC7000（横河電機（株）社製）を用いた。

3. 結果及び考察

3.1 施設概要

本施設のごみ処理等流れを図1に示した。

焼却炉は全連続式ストーカー炉80 t/日 $\times$ 3炉、灰溶融炉はプラズマ式30 t/日 $\times$ 2炉である。焼却灰は、焼却炉から輸送コンベアで前処理設備へ運ばれた後、鉄分等を除去し灰溶融炉で溶融している。プラズマ式灰溶融炉は直流電気抵抗炉で、密閉構造の炉蓋から黒鉛電極が挿入され、溶融スラグに直接通電され、その電気抵抗熱でスラグ自体が加熱され、供給灰を連続的に溶融する方法であり、また、炉内を常に窒素ガスで満たすことにより還元雰囲気下を保っている。本施設は、溶融スラグと溶融メタルは炉内で完全に比重分離され、出滓口から排出する構造になっている。したがっ

表1 蛍光X線によるスラグ分析結果 (単位: wt%)

	スラグA	スラグB
SiO ₂	32.14	33.75
CaO	30.83	28.97
Al ₂ O ₃	26.5	26.08
Fe ₂ O ₃	2.72	3.38
P ₂ O ₅	1.49	1.27
MgO	0.75	0.69
Na ₂ O	0.66	0.89
塩基度	0.96	0.86

て、供給灰中に含まれるPb, Zn等の重金属類は、還元雰囲気下で長時間溶融されるため、スラグからメタル分として分離除去される。このことは、重金属含量の少ない安全性の高い溶融スラグが得られることを示唆している。

3.2 スラグの化学組成

発生した溶融スラグの蛍光X線による分析結果を表1に示す。溶融スラグは、主成分がSiO₂, CaO, Al₂O₃であり、これらで全体の約80%以上を占め、化学的に安定したガラス状の物質である。本プロセスでは炉内で溶融スラグと溶融メタルが比重分離されているため、スラグ中の鉄分の混入が非常に少なく、蛍光X線による分析でも3%前後という結果であった。このため、溶融スラグ中の鉄に起因した赤錆等の発生が少なくなり、有効利用する上で非常に好ましい性状であるものと考えられる。

表2 溶融スラグの溶出試験結果 (環告46号)

	スラグA	スラグB	目標基準※
Cd (mg/l)	<0.001	<0.001	0.01以下
Pb (mg/l)	<0.005	<0.005	0.01以下
Cr ⁶⁺ (mg/l)	<0.05	<0.05	0.05以下
As (mg/l)	<0.005	<0.005	0.01以下
T-Hg (mg/l)	<0.0005	<0.0005	0.0005以下
Se (mg/l)	<0.01	<0.01	0.01以下

※目標基準:

「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の促進について」
(旧厚生省: 平成10年3月26日 生衛発第508号)

3.3 溶融スラグの溶出試験

溶融スラグの溶出試験結果を表2に示す。本施設から発生する溶融スラグは、厚生省が提示する目標基準を充分満足するものであった。

また、スラグの土木資材としての適応性をさらに調査するため、粉末スラグからの重金属の溶出試験（アベリビリティ試験）を実施した。表3の結果より、Cu, Zn, Pb等の金属類が溶出しやすい傾向を示した。これは、これらの金属は溶液が酸性側へ傾くことで溶出しやすくなることを示唆するものである。したがって、溶融スラグを土木資材として他の骨材と併用する場合、骨材からの浸出液のpHに充分留意して使用する必要があると考えられる。

3.4 土木資材としての適応性

3.4.1 カラム試験

カラム試験結果を表4及び表5に示した。ここで、

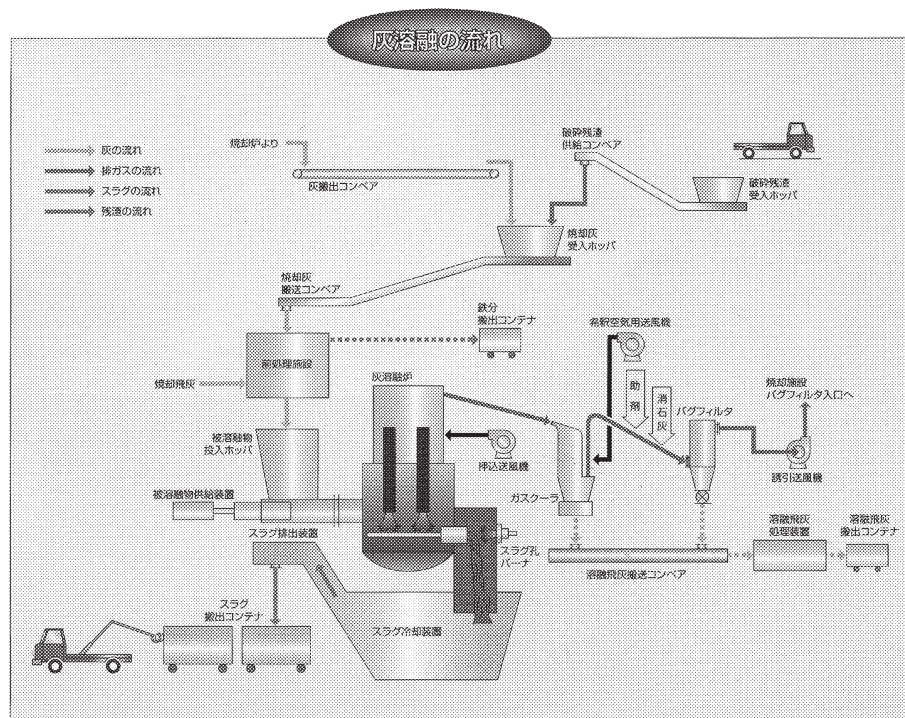


図1 可茂衛生施設利用組合 施設フロー

表3 アベィラビリティ試験結果

項目	溶出濃度 ($\mu\text{g/g}$)
Cd	0.003
Pb	0.044
T-Cr	0.026
As	<0.005
Se	<0.01
Cu	2.178
Fe	<1.000
Zn	1.863

想定年数とは、岐阜地方気象台資料による過去5年間（1996年～2000年）の年間降水量の平均値（1900mm）を基礎に、積算した採水溶液をこの平均値で割ることにより算出した。また、各金属の濃度は、相当する想定年数における採水した溶液のものを表している。その結果、採水直後の0.1年では電気伝導度が非常に高い値を示し、Fe、Mn、Zn等の溶出が認められた。しかし、時間の経過に伴い溶出は急激に減少していくことが確認された。また、溶出初期0.1年のカラム浸漬溶液（A社採石使用）について陰イオン・陽イオンの分析を行い、結果を表6に示した。初期段階のカラム浸漬溶液では塩素イオン濃度が非常に高い値を示すことが分かった。これは溶融スラグに付着している塩素

表6 カラム試験イオン分析結果

(A社採石使用)	
項目	0.1年（想定年数）
Cl^- (ppm)	902
NO_3^- (ppm)	8
SO_4^{2-} (ppm)	5
Na^+ (ppm)	314
K^+ (ppm)	223
Ca^{2+} (ppm)	148

イオンが浸漬の初期段階で溶出したことによるものと考えられた。

3.4.2 下層路盤材試験施工

溶融スラグを下層路盤材に適用した場合のピット水分析結果を表7及び表8に示す。これらの結果より、A及びB地点における各種金属濃度は施工直後から現在に至るまで環境基準を充分満足する結果であった。なお、B地点においてZnの溶出が確認されたが、この地点の土壌の溶出試験を行ったところ、0.03 mg/Lと同程度確認されたことより、土質由来であると考えられた。

また、カラム試験と同様に施工直後のピット水の電気伝導度は高い値を示した。そこで、A地点の施工直

表4 A社の砕石を用いた場合のカラム試験結果

EC : $\mu\text{S/cm}$ 金属濃度 : mg/l									
想定年数	pH	EC	As	Cd	Fe	Mn	Pb	Se	Zn
0.1年	7.92	1720	<0.005	<0.001	0.198	0.051	<0.005	<0.01	<0.01
0.2年	8.18	655	<0.005	<0.001	0.566	0.014	<0.005	<0.01	<0.01
0.3年	8.27	192	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
0.5年	8.24	152	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
1.0年	8.00	124	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
2.0年	8.31	141	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
3.0年	8.09	123	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
4.0年	8.05	110	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01

溶融スラグ混入率：10wt%

表5 B社の砕石を用いた場合のカラム試験結果

EC : $\mu\text{S/cm}$ 金属濃度 : mg/l									
想定年数	pH	EC	As	Cd	Fe	Mn	Pb	Se	Zn
0.1年	7.42	1840	<0.005	<0.001	<0.01	0.124	<0.005	<0.01	<0.01
0.2年	7.78	362	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	0.027
0.3年	7.90	154	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	0.036
0.5年	7.80	87	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
1.0年	7.98	73	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
2.0年	7.97	45	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
3.0年	7.99	35	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01
4.0年	7.92	45	<0.005	<0.001	<0.01	<0.01	<0.005	<0.01	<0.01

溶融スラグ混入率：10wt%

表7 ピット水の分析結果 (A地点)

単位: mg/L

	施工直後	3ヶ月後	6ヶ月後	9ヶ月後	12ヶ月後	15ヶ月後	18ヶ月後	環境基準
pH	7.2	7	6.7	6.6	6.8	7	6.8	
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01以下
Pb	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01以下
Cr ⁶⁺	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05以下
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01以下
T-Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005以下
Se	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01以下
Cu	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
Zn	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	
Cr	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	

表8 ピット水の分析結果 (B地点)

単位: mg/L

	施工直後	3ヶ月後	6ヶ月後	9ヶ月後	12ヶ月後	15ヶ月後	18ヶ月後	環境基準
pH	7.2	6.9	6.7	6.4	6.6	7.7	7	
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01以下
Pb	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01以下
Cr ⁶⁺	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05以下
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01以下
T-Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005以下
Se	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01以下
Cu	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
Zn	<0.02	0.03	0.07	0.04	<0.02	0.04	<0.02	
Cr	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	

後のピット水について陰イオン・陽イオン分析を行い、結果を表9に示した。カラム試験と同様に高い塩素イオン濃度を示すことが分かった。これは、溶融スラグに付着しているイオンが施工直後に流出しているものと推測された。これらの結果より、カラム試験が環境への影響を予測する一つの指標となりうるものであることが示唆された。

3.4.3 表層アスファルト舗装材に適用時の浮遊粉じん調査

溶融スラグを表層アスファルトに混入した舗装材を施工した現場の浮遊粉じん濃度を調査した結果、施工直後では0.077 mg/m³であり、1年経過後は0.061 mg/m³であった。

次に、粉じん中の金属組成について蛍光X線による分析を行った結果を表10に示す。また、粉じん中の金属濃度について表11に示す。これらの結果を、形見ら⁸⁾が昭和60年及び昭和61年に実施した岐阜県内におけるアスファルト舗装道路における粉じん中の金属濃度の2年間の平均値と比較すると、今回の各金属濃度は変動の範囲内であり、特に高いものではないことがわかった。

表9 ピット水のイオン分析結果

(A地点)

項 目	施 工 直 後
EC (μS/cm)	1,840
Cl ⁻ (ppm)	695
NO ₃ ⁻ (ppm)	41
SO ₄ ²⁻ (ppm)	687
Na ⁺ (ppm)	169
NH ₄ ⁺ (ppm)	0.53
K ⁺ (ppm)	41
Ca ²⁺ (ppm)	443
Mg ²⁺ (ppm)	78

次に、粉じん中のイオン性成分の分析を行った。分析法は、角田ら⁹⁾が昭和63年に実施した岐阜県内における環境大気中における浮遊粉じん中のイオン性成分の分析法に従った。その結果を表12に示す。角田ら⁹⁾の報告によると岐阜県内の浮遊粉じん中におけるCaイオン濃度は1.3～4.6 μg/m³であり、今回の結果は変動の範囲内であり、特に高いものではないことがわかった。

これらの結果から、舗装材としての表層アスファルトへの溶融スラグの混入は、岐阜県内で実施された過

表10 粉じんの蛍光X線分析結果

単位：mass%

	施工直後	1年経過
Na	4.5	6.1
Mg	2.9	2.2
Al	22	12
P	0.28	0.87
S	6.9	19
K	13	12
Ca	12	15
Mn	1	0.85
Fe	30	18
Ni	0.25	0.049
Cu	1.3	6.9
Zn	1.7	5.3

表11 粉じん中の金属濃度

単位：ng/m³

	Cd	Pb	Cr	Fe	Mn	Cu	Ni	Zn
施工直後	0.7	18	2.6	1400	60	25	2.6	120
1年経過	0.8	29	2	600	21	130	2.6	180
A市	1.2	57	6.8	1500	58	120	5.6	350
B町	1.1	37	3.5	1000	77	46	3.4	96
C町	0.8	62	6.7	2400	120	160	8.3	400
D町	1.3	53	8.9	1900	77	180	11	300

表12 粉じん中のイオン性成分分析

単位：μg/m³

	施工直後	1年経過
SO ₄ ²⁻	1.5	2.1
NO ₃ ⁻	0.5	0.6
Cl ⁻	0.2	ND
NH ₄ ⁺	0.2	0.6
Na ⁺	0.4	0.4
K ⁺	0.1	0.1
Ca ²⁺	1.2	0.2
Mg ²⁺	0.1	0.1

去の例から判断しても、環境大気中へ特に影響を及ぼしていないことが示唆された。

謝 辞

本研究に際しご協力をいただきました可茂衛生施設利用組合、岐阜県基盤整備部企画管理課建設技術室及び岐阜県砕石工業組合の関係者各位に深謝いたします。

文 献

- 1) 谷川昇：新処理技術，廃棄物学会誌，**9**，470-486，1998.
- 2) 中村一夫：新処理技術を組み合わせたシステムの検討，廃棄物学会誌，**9**，496-508，1998.
- 3) 原田裕昭：廃棄物の分解・溶融・有価物回収システムについて，環境管理，**31**，37-46，1995.
- 4) 岡正人，形見武男，安田裕，渡辺祐二，青山光治，後藤益弘，渡邊光雄：溶融スラグの土木資材利用時の環境影響評価，第12回廃棄物学会研究発表論文集，561～563，2001.
- 5) 金子栄廣：溶出試験法の現状と展望，廃棄物学会誌，**3**，182-191，1992.
- 6) 酒井伸一，水谷聡，高月紘，岩田拓郎：廃棄物の溶出試験に関する研究，廃棄物学会誌，**6**，225-234，1995.
- 7) 酒井伸一，水谷聡，高月紘：溶出試験の基本的考え方，廃棄物学会誌，**7**，383-393，1996.
- 8) 形見武男他：岐阜県におけるスパイクタイヤによる道路粉じんの現状，岐阜県公害研究所年報，No.15，21～24，1987.
- 9) 角田寛他：大気浮遊粉じん中のTOCについて，岐阜県公害研究所年報，No.17，32～38，1989.

Influence to the Surrounding Environment in the Utilization of Molten Slag to Public Works

Masato OKA, Takeo KATAMI*, Yutaka YASUDA,
Yuji WATANABE**, Koji AOYAMA**, Masuhiro GOTO**

*Gifu Prefectural Institute of Health and Environmental Sciences : 1-1 Naka-fudogaoka,
Kakamigahara, Gifu 504-0838, Japan*

* (Present adress) *Gifu Prefectural Institute for Bio-industrial Technology : 3481-2,
Kamihachiya, Hachiya-cho, Minokamo, Gifu 505-0004, Japan*

** *Clean Association of Kamo : 839, Shuga, Kani, Gifu 509-0247, Japan*