

# The attempt to afforest in the desertified soils using coal ashes in the case of Inner Mongolia, China

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/45816">http://hdl.handle.net/2297/45816</a>

## 石炭灰を用いた沙漠化土壌での緑化への試み —中国内モンゴル自治区を例として—

三津野真澄\*\*\*・田崎和江\*・菅沼浩敏\*\*\*

Masumi MITSUNO\*\*\*, Kazue TAZAKI\* and Hirotoishi SUGANUMA\*\*\*: The attempt to afforest in the desertificated soils using coal ashes in the case of Inner Mongolia, China

**ABSTRACT:** China has been suffering from two environmental issues of the desertification and coal ash (residue after combustion of coal). The pot planting experiments were performed in order to examine the application of coal ash to afforest in desertificated areas. Four soils (desertificated soil, sand, Akadama and Kanuma) and three coal ashes (Chinese coal ash, clinker ash and fly ash) were mixed with various combinations and rates in pots, which the four kinds of plants were planted. The following observations and analyses were carried out about plants and soils in pots; mineralogical, physical and chemical analyses of soils, the rate of growth, observation of plants (up ground and underground parts), cultivation of soil microbes, and chemical composition of leaves. The results indicated that the plants in coal ash (especially clinker ash 100%) and soils added coal ash grew up very well with developed roots and root hairs. The K and P contents in leaves were high in case of mixture of soils and coal ash. The results of cultivation experiment in media showed that the soil microbes (bacteria, actinomycetes and fungi) multiplied in case of pots with clinker ash. The clinker ash provides the microbes with water and living site because of porous structure with numerous cavities. The microbes multiplied around the plant roots form the mycorrhizas. The nutrient absorption increases into plant thorough the mycorrhizas. This study shows the possibility that addition of coal ash (clinker ash) into soils might be effect on afforestation in desertificated soils as remediation.

**Key words:** Afforestation, China, Clinker ash, Coal ash, Desertification, Fly ash, Remediation, Soil microbes.

### はじめに

近年、沙漠化現象は世界各地で悪化の一途をたどっており、世界の陸地面積の1/6が既に沙漠化し、人口の25%がその影響を受けている (UNEP 1991)。ここで沙漠化とは、“乾燥、半乾燥地域における土地 (土壌、水資源、植生などを含む概念) の劣化現象”と定義され、その原因は気候変動および、過放牧、過耕作、開発の失敗など人間活動に拠る (環境庁地球環境部 1993; Noble and Gitay 1996)。中国は世界最大の沙漠化問題に悩む国であり、国土面積

\*〒920-1192 金沢市角間町 金沢大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa 920-1192, Japan

\*\*〒922-8510 加賀市大聖寺永町33-1 石川県立大聖寺高等学校 Daisyohji High School, Daisyohjinagamachi, Kaga 922-8510, Japan

\*\*\*〒270-1194 我孫子市我孫子1646 中央電力研究所我孫子研究所応用生物部 Biology Department, Abiko Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, 1646 Abiko, Abiko, 270-1194, Japan

の27%が既に沙漠あるいは沙漠化している(朱・朱 1999)。沙漠化地域の修復のために、これまで多様な提言がされ、植林や灌漑、防砂柵の建設など様々な方策がとられてきた(蘭州沙漠研究所 1979; 真木 1996; 吉野 1997; Matsumoto and Haper 1997; 康 2001)。中でも植林が最も効果的であるとされるが、実際には沙漠化地への苗木の活着率は低く、緑化は難しい(吉川 1998)。

中国のもう一つの環境問題は、石炭燃焼による廃棄物である石炭灰(coal ash)である。毎年8400万トンもの石炭灰が排出され、そのうち6割以上は利用されないまま投棄されている(Manz 1997)。乾燥し風が強い冬から春には舞い上がって粉塵公害を引き起こし、公衆衛生上も問題となっている。日本において石炭灰の利用は、コンクリート・セメント混和材、建材など主に土木建設分野で行われてきたが、農業への利用も近年始まっている(菅沼 1999 a, 1999 b; 環境技術協会・日本フライアッシュ協会 2000)。しかし林業への応用例は極めて少なく、また沙漠化地域への土壌改良や植林を目的とした利用も事例が無い。

そこで本研究において、石炭灰を沙漠化地域へ植林を行うための資材として利用できないか検討することを目的としてポット植栽実験を行った。植物の成長量の測定や植物体の観察、土壌微生物の培養を行い、石炭灰利用の可能性について検討を行ったので報告する。

### 試料および方法

#### ポット植栽実験に使用した土壌、石炭灰、植物

ポット植栽実験では、土壌4種類と石炭灰3種類を組合せと混合比を変えてポットに入れ、4種類の植物を植えた。使用土壌は、中国内モンゴル自治区包頭市で採取した沙漠化土壌、ホームセンターで園芸用資材として売られている砂、赤玉土、鹿沼土の4種類である。また石炭灰は、包頭市の製鉄所から排出された石炭灰(包頭石炭灰と表記、粒径10–1000  $\mu\text{m}$ )、北陸電力七尾大田火力発電所から排出されたクリンカアッシュ(0.5–15 mm)とフライアッシュ(10–100  $\mu\text{m}$ ) (ともに石炭灰の種類)を用いた。ここにポプラ(*Populus* spp.)、ツツジ(*Rhododendron indicum*)、サザンカ(*Camellia sasanqua*)の刺し穂を植え、またコナラ(*Quercus serrata*)の種を蒔いた。作成したポット(土壌・植物)の一覧をTable 1に示す。植付け時の刺し穂の全体長さはおおよそ、ポプラ12 cm、ツツジ6 cm、サザンカ7 cmで、ほぼ同様の長さであった。コナラの種はなるべく大きさと重さが等しくなるよう、中粒のものを選んで実験に用いた。また植付けは、ツツジ、サザンカは2000年9月、コナラは2000年10月、ポプラは2001年4月に行った。

#### 使用土壌と石炭灰の鉱物的、化学的特性の測定

使用土壌と石炭灰の鉱物組合せを、X線粉末回折装置(XRD: 理学電気製 RINT1200および2100)により測定した。測定はCuK $\alpha$ 線を用いて電圧40 kV、電流30 mAで行った。定方位試料の分析には、遠心分離機を用いて2  $\mu\text{m}$ 以下の粒度分を分離したものをスライドガラスに塗布し、乾燥後に測定した。

土壌と石炭灰の保水力を評価するために、Fig.1-Aの装置を用いて水分量を測定した。十

Table 1. Ratio of soils and coal ashes for pot planting experiments with number of plants.

Symbols	Mixture rate of soils in pots (%)							Number of plants (number of pots)			
	Clinker ash	Fly ash	Chinese coal ash	Sand	Desertificated soils	Akadama	Kanuma	Poplar ( <i>Populus Spp.</i> )	Japanese oak ( <i>Quercus serrata</i> )	Azalea ( <i>Rhododendron indicum</i> )	Sasanqua ( <i>Camellia sasanqua</i> )
S-100	0			100				4 (4)	6 (2)		
Sc-10	10			90				4 (4)	6 (2)		
Sc-25	25			75				4 (4)	6 (2)		
Sc-50	50			50				4 (4)	6 (2)		
Sc-75	75			25				4 (4)	6 (2)		
C-100	100							4 (4)	6 (2)		
Sf-10		10		90				4 (4)	6 (2)		
Sf-25		25		75				4 (4)	6 (2)		
Sf-50		50		50				4 (4)	6 (2)		
Scf-10	10	10		80				4 (4)	6 (2)		
Scf-25	25	25		50				4 (4)	6 (2)		
CF-50	50	50						4 (4)	6 (2)		
L-100			0		100			2 (2)			
Lc-20			20		80			2 (2)			
Lc-40			40		60			2 (2)			
Lc-60			60		40			2 (2)			
Lc-80			80		20			2 (2)			
A-100	0					100		4 (4)			8 (2)
Ac-5	5					95		4 (4)			8 (2)
Ac-10	10					90		4 (4)			8 (2)
Ac-15	15					85		4 (4)			8 (2)
Ac-20	20					80		4 (4)			8 (2)
Af-5		5				95		4 (4)			8 (2)
Af-10		10				90		4 (4)			8 (2)
K-100	0						100			8 (2)	
Kc-5	5						95			8 (2)	
Kc-10	10						90			8 (2)	
Kc-15	15						85			8 (2)	
Kc-20	20						80			8 (2)	
Kc-30	30						70			8 (2)	
Kf-5		5					95			8 (2)	
Kf-10		10					90			8 (2)	
Total numbers								86 (86)	72 (24)	64 (16)	56 (14)

S; sand, L; desertificated soil, A; Akadama soil, K; Kanuma soil, C and c; clinker ash, F and f; fly ash.

分に風乾させた試料100 gに蒸留水100 mlを徐々に注ぎ、容器底から水が流出した後、試料の質量を測定して試料中に保持された水分量を算出した。装置は室温(25℃)中に14日間設置し、試料の質量の測定を毎日行うことにより、土壌中の水分量の変化を調べた。14日間における土壌中の水分量を Fig. 1-B に示した。結果については後述する。

土壌と石炭灰中の含有元素を、エネルギー分散型蛍光 X 線分析(ED-XRF: 日本電子製 JSM-3201)により測定した。測定は Rh-K $\alpha$  線を用いて、電圧30 kVで行い、FP-バルク法により半定量分析を行った。土壌と石炭灰は風乾後に粉末にして測定を行った。また炭素、窒素、硫黄の含有量を NCS 元素分析装置(アムコ NA2500)を用いて定量分析した。

### pH, EC と交換性陽イオン

土壌と石炭灰各10 gに対し蒸留水25 mlを加え、よく攪拌して1時間放置後、pHメーター(HORIBA, D-12)を用いて上澄みの pHを測定した。また土壌と石炭灰10 gに対し蒸留水50 mlを加え、同様にして電気伝導度 ECを ECメーター(HORIBA, ES-12)で測定した。

土壌と石炭灰の交換性 Na<sup>+</sup>と K<sup>+</sup>濃度は酢酸アンモニウム抽出後に炎光光度法により、また交換性 Ca<sup>2+</sup>と Mg<sup>2+</sup>濃度はフレイム原子吸光光度法で、それぞれ定量分析を行った。両分析ともセイコー電子工業製 SAS-727を用いて、分析波長は Na<sup>+</sup>(589.0 nm), K<sup>+</sup>(766.4 nm), Ca<sup>2+</sup>(422.6 nm), Mg<sup>2+</sup>(285.2 nm)である。

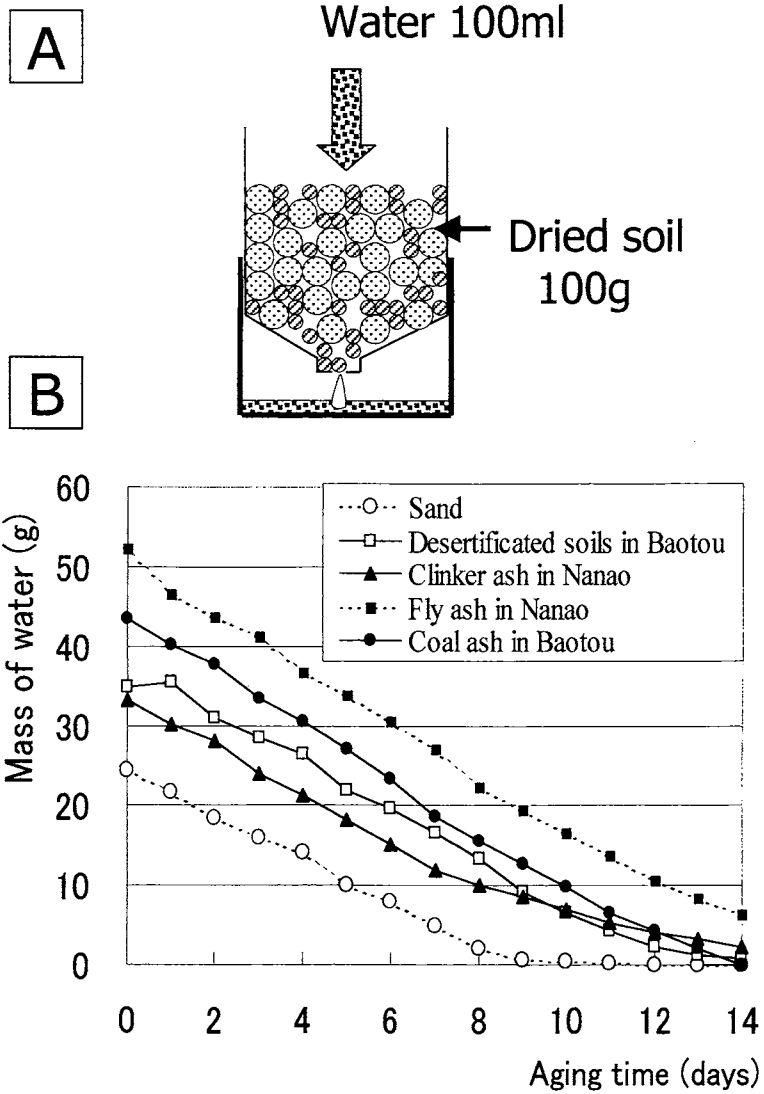


Fig. 1. Measurement of water mass in soils.  
 [A] Experimental water system, [B] Mass of water vs. aging time compared with five different materials within 14 days.

### 石炭灰の孔隙率の測定

七尾クリンカアッシュと包頭石炭灰中の多孔質粒子の表面に分布する小孔の面積を、走査型電子顕微鏡写真を用いて測定した。1粒子あたりの各孔隙面積を合計して積算小孔面積とし、全表面積に対する積算小孔面積を孔隙率と定義した。

### 植物の成長の観察

ポットに植栽された植物は2001年8月に、成長を観察・測定した。まず枯死しておらず生きている植物の数を確認し、各苗木の地上部を測定した。ただしポプラは挿し穂から出ている若枝（挿し木の後に育った部分）の長さを測定した。また挿し穂についた葉の枚数をカウントした。またポプラとコナラについてはポットから抜き、根の成長状態を比較した。

### 根の光学顕微鏡観察および走査型電子顕微鏡観察 (SEM)

ポットから抜いたポプラとコナラの根を、DAPI (4'6-diamido-2-phenylindole) で染色後、微分干渉および落射蛍光顕微鏡 (NIKON Optiphot-2) を用いて観察した。また根およびその周辺の微細構造は、走査型電子顕微鏡 (SEM: 日本電子製 JSM-5200LV, 加速電圧15 kV) を用いて観察した。

### 土壌微生物の培養

ポット内の土壌微生物を2種類の培地を用いて培養した。使用培地は、バクテリアと放線菌用にアルブミン培地（培養11日間、希釈率 $10^5$ 倍）、糸状菌用にローズベンガル培地（培養8日間、希釈率 $10^3$ 倍）である。培養後、培地上のコロニー数を比較した。

### 葉の化学成分の半定量分析

植物の葉中の含有元素を ED-XRF (Rh-K $\alpha$  線, 30 kV, FP-バルク法) により半定量分析した。葉4枚を表と裏で測定し、平均値を求めた。

## 結 果

### 使用土壌と石炭灰の鉱物組合せ, 化学組成, pH, EC と交換性陽イオンの測定

ポット植栽実験で使用した土壌および石炭灰の鉱物組合せについて、XRD で分析した結果を Table 2 に示す。まず全岩測定において、沙漠化土壌と砂は石英の反射が強く、弱い長石類の反射も認められた。赤玉土では石英、長石類の他に酸化鉄の反射が認められ、鹿沼土ではベースラインが高くブロードなピークが見出されたことから、非晶質物質の存在が示された。また3種類の石炭灰はいずれもムライトの反射が強く、次いで石英、酸化鉄が認められ、カルサイトも伴っていた。次に2 $\mu\text{m}$ 以下の定方位法による測定では、沙漠化土壌と砂で石英の強い反射の他に、粘土鉱物のピークも認められた。

使用した土壌および石炭灰の水分量の測定結果を、Fig. 1-B に示す。測定の14日間を通じて七尾フライアッシュの水分量が高く、次いで包頭石炭灰が高かった。また、砂の水分量は全期間を通じて最も低かった。さらに、七尾クリンカアッシュは粗粒であるため注入した水はすぐに落下し、9日目までの水分量は砂に次いで低い値であった。しかし10日目以降には、水分量減少の程度がゆるやかとなった。七尾クリンカアッシュの水分量は、14日目に七尾フライアッシュの次に高い値となり、長期間で保水性が高いことを示唆した。

Table 2. Mineral components of utilized materials for pot planting experiments.

Sample style	Bulk													< 2 μm						note		
	Quartz	Feldspars	Calcite	Mica group minerals	Kaoline minerals	Smectite	Halite	Mg-Hornblende	Anatase	Iron oxide	Cristobalite	Rhodochrosite	Magnesioferrite	Mullite	Smectite	Mica group minerals	Kaoline minerals	Calcite	Quartz		Feldspars	Iron oxide
Clinker ash	s	-	tr	-	-	-	-	-	tr	w	-	-	s	not performed								
Fly ash	m	-	tr	-	-	-	-	-	w	tr	-	-	s	not performed								
Chinese coal ash	s	w	w	-	-	w	-	-	m	-	-	m	s	not performed								
Sand	s	w	-	tr	tr	tr	-	-	tr	tr	-	-	-	w	s	w	tr	s	tr	-	-	
Desertificated soils	s	w	w	tr	tr	tr	-	w	w	tr	tr	tr	-	m	m	m	s	s	m	-	tr	
Akadama	s	m	tr	-	-	-	-	-	m	w	-	-	-	-	-	-	-	w	s	-	-	
Kanuma	tr	s	-	-	-	-	-	-	tr	w	-	-	-	w	-	w	m	-	w	w	-	with broad peak

\* Characters in this table indicate the intensity of the minerals.  
s: strong, m: middle, w: weak, tr: trace, -: not detected.

次に、土壌および石炭灰の、化学組成、pH、EC および交換性陽イオンの測定結果を、Table 3 に示す。主成分はSiO<sub>2</sub>と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>であるが、沙漠化土壌ではCaOが、また赤玉土ではFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が多い。次に包頭石炭灰はC含有量が約9%と高いが、他の石炭灰（七尾クリンカアッシュと七尾フライアッシュ）では1～2%と低い。これはボイラー内の燃焼温度が、中国で低く七尾で高いためと考えられる（環境技術協会・日本フライアッシュ協会 2000）。また沙漠化土壌中の2%のCは、含有するカルサイトCaCO<sub>3</sub>に起因する無機態の炭素であると考えられる。pHは七尾クリンカアッシュが11.7、砂が9.3、沙漠化土壌が8.9とアルカリ性を示した。その他の試料のpHはほぼ中性である。交換性陽イオンCa<sup>2+</sup>の値は他のイオン(Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)に比較して高い値を示し、特に沙漠化土壌とフライアッシュでCa<sup>2+</sup>は高かった。

Table 3. Chemical composition and exchangeable cations of utilized materials for pot planting experiments.

Soils	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	VO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	ZrO
Clinker ash	0.9	14.8	47.8	0.7	-	3.1	8.3	2.7	0.1	0.3	20.9	0.3	0.3
Fly ash	-	16.7	57.2	1.4	-	4.5	4.5	3.3	0.2	-	11.7	0.2	0.2
Chinese coal ash	0.1	26.4	42.4	1.0	1.2	2.1	7.9	3.3	tr	0.2	15.2	0.1	-
Sand	0.9	10.5	59.8	0.9	-	9.9	5.3	1.2	tr	0.3	11.2	-	-
Desertificated soils	1.5	7.7	36.1	0.3	-	5.5	31.1	1.7	tr	0.2	15.5	0.3	0.1
Akadama	0.4	23.0	23.1	0.7	-	2.6	1.2	2.3	0.1	0.8	33.1	-	-
Kanuma	-	30.5	49.5	1.1	-	2.2	4.6	1.2	tr	0.3	10.8	-	-

(wt %)

Soils	C <sub>t</sub> (wt %)	N	pH	EC (mS/cm)	Na <sup>+</sup> (cmol/kg)	K <sup>+</sup> (cmol/kg)	Mg <sup>2+</sup> (cmol/kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmol/kg)
Clinker ash	1.02	0.03	11.7	0.05	0.15	0.06	0.34	2.29
Fly ash	1.97	0.03	7.8	1.47	0.55	0.34	1.53	16.52
Chinese coal ash	8.93	0.13	8.6	0.32	0.32	0.12	1.19	9.64
Sand	0.23	0.01	9.3	0.05	*	*	*	*
Desertificated soils	2.01	0.06	8.9	0.07	0.10	0.38	1.23	33.76
Akadama	0.92	0.08	5.9	0.03	0.10	0.30	0.30	0.61
Kanuma	0.20	0.01	6.1	0.02	0.12	0.07	0.17	0.52

tr: trace

-: not detected

\*: not performed

pH: soil 5g + distilled water 12.5 ml

EC: soil 5g + distilled water 25 ml

## 石炭灰の孔隙率の測定

七尾クリンカアッシュおよび包頭石炭灰中の多孔質粒子の孔隙率を測定した。小孔が表面積に占める割合である孔隙率（全表面積に対する積算小孔面積の割合）は七尾クリンカアッシュで21.1~46.9%,包頭石炭灰で37.1~54.3%であり,平均値はそれぞれ33.1%と49.0%であった。

## 植物の成長の観察

ポット植栽実験にポット植栽実験における4種類の植物の成長結果（生き残った苗数,地上部の平均の高さ,葉の平均の枚数)の一覧をTable 4に示す。また2001年7月でのポプラ(植付け3ヵ月後)とコナラ(種まき9ヵ月後)の成長状態を, Fig. 2に示す。砂100%のポットでは4本のポプラ全てが植付け3ヵ月後には枯死したが,クリンカアッシュ100%やフライ50%・クリンカ50%のものは,4ヵ月後でも全て生き残り成長も良好であった。同様にコナラについても,砂100%では6本中4本が枯死し,生き残った2本も葉が茶変したが,クリンカ75%や100%のものでは全てよく成長した。砂へのクリンカアッシュの混合率と,生存苗数および地上部の平均の高さとの関係をFig. 3に示す。ポプラについてはクリンカアッシュの混合率が高いほど生存率が高く,かつ,平均の高さも高くなる傾向が見られた(Fig.3-A)。コナラの生存率についてもほぼ同様の傾向が見られた。また沙漠化土壌へ石炭灰を混合することにより,ポプラの成長は促進される傾向がみられた(Table 4のポプラ, L-100~Lc-80)。ツツジ,サザンカとも試験土壌へクリンカアッシュを混合することにより,生存率の上昇がみられた。

Table 4. Results of number of living seedlings, mean height and mean number of leaves of four kinds of plant of pot planting experiments.

Symbols of pots	Poplar ( <i>Populus</i> Spp.)				Japanese oak ( <i>Quercus serrata</i> )				Azalea ( <i>Rhododendron indicum</i> )				Sasanqua ( <i>Camellia sasanqua</i> )			
	Pl. No.	Lv. No.	M.H.	M.L.	Pl. No.	Lv. No.	M.H.	M.L.	Pl. No.	Lv. No.	M.H.	M.L.	Pl. No.	Lv. No.	M.H.	M.L.
S-100	4	0 (-)	-	-	6	2	4.0	5.0								
Sc-10	4	0 (-)	-	-	6	5	9.2	5.2								
Sc-25	4	2 (1)	14.0	12.5	6	6	7.5	4.2								
Sc-50	4	3 (1)	11.0	4.7	6	5	6.4	4.4								
Sc-75	4	3 (1)	17.0	5.3	6	6	7.2	4.0								
C-100	4	4 (1)	14.0	5.3	6	6	5.7	3.2								
Sf-10	4	3 (0)	18.3	5.0	6	5	8.8	4.6								
Sf-25	4	3 (1)	19.3	6.3	6	4	7.8	4.8								
Sf-50	4	3 (1)	16.7	7.7	6	1	10.0	5.0								
Scf-10	4	4 (0)	23.3	2.8	6	1	4.0	3.0								
Scf-25	4	4 (1)	17.0	5.0	6	3	5.7	5.0								
CF-50	4	4 (1)	19.8	6.8	6	2	4.0	5.0								
L-100	2	1 (0)	9.5	8.5												
Lc-20	2	2 (0)	15.0	1.0												
Lc-40	2	2 (1)	13.5	7.0												
Lc-60	2	2 (1)	10.0	10.5												
Lc-80	2	2 (2)	19.0	9.0												
A-100	4	4 (1)	9.5	7.8									8	2	4.0	3.0
Ac-5	4	3 (1)	20.0	8.7									8	5	4.2	3.0
Ac-10	4	2 (0)	16.0	5.5									8	8	5.3	4.9
Ac-15	4	4 (0)	13.3	8.0									8	6	4.2	3.2
Ac-20	4	4 (1)	20.0	7.0									8	6	4.3	4.0
Af-5	4	3 (0)	20.3	6.3									8	7	3.9	3.1
Af-10	4	4 (1)	19.8	6.5									8	3	4.0	4.0
K-100									8	4	7.5	16.3				
Kc-5									8	5	7.4	16.0				
Kc-10									8	7	10.6	25.3				
Kc-15									8	5	5.4	7.8				
Kc-20									8	6	8.4	17.8				
Kc-30									8	7	7.4	16.0				
Kf-5									8	3	6.3	11.3				
Kf-10									8	5	9.2	16.8				
Total	86	66 (16)			72	46			64	42			56	37		

Pl. No. : Number of planting seedlings

M.H. : Mean height (cm)

\* Other symbols are the same as Table 1.

Lv. No. : Number of living seedlings (number of with brantches)

M.L. : Mean number of leaves



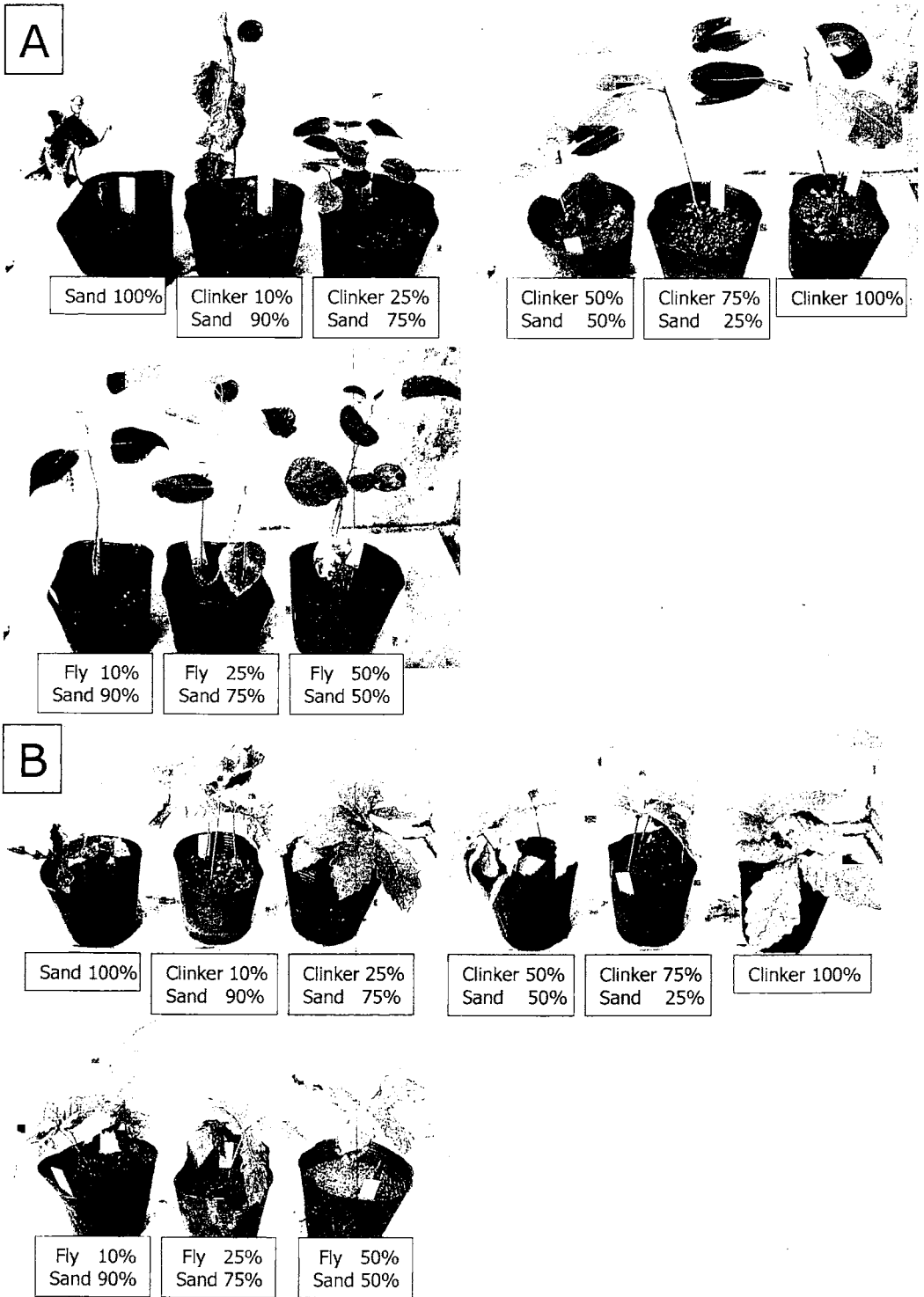


Fig. 2. Pot planting experiments of [A] Poplar (*Populus Spp.*) planted on April 20, 2001 after 100 days aging, [B] Japanese Oak (*Quercus serrata*) sowed on October 13, 2000 after nine months aging.

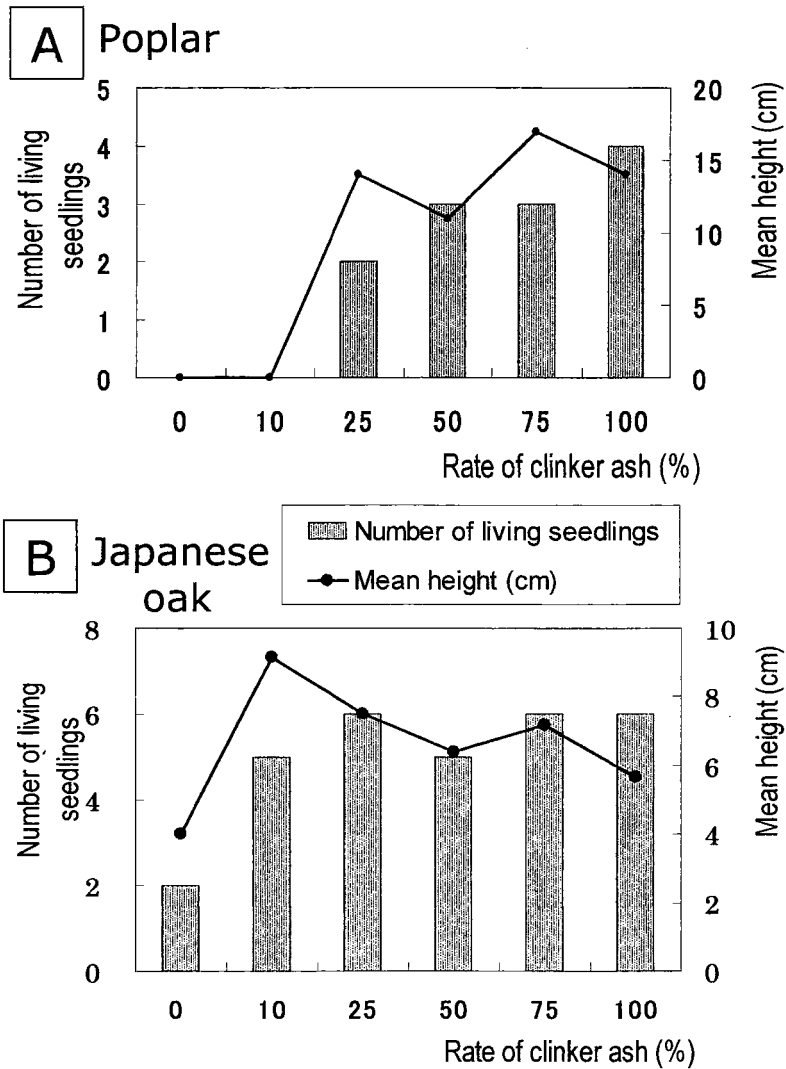


Fig. 3. Number of living seedlings and mean height by the pot planting experiments of [A] Poplar and [B] Japanese oak. Bar graphs; the number of living seedlings, line graphs; the mean height.

ポプラについては6ヵ月間、コナラについては12ヵ月間の実験終了後、苗をポットから抜いて根の成長状態を比較した (Fig. 4)。砂100%のポットで育ったポプラは根の発達が悪く、クリンカアッシュ100%中のポプラは根の発達は良好であった (Fig.4-A)。同様にコナラについてもクリンカアッシュ100%中の苗の根はよく発達していた (Fig.4-B)。

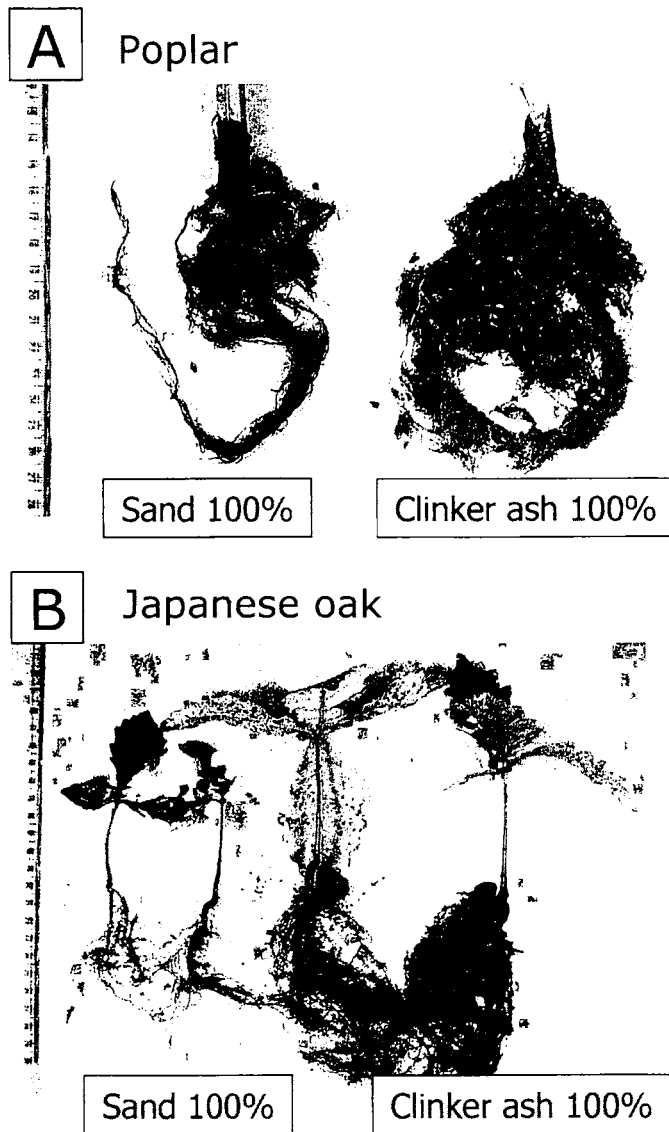


Fig. 4. Comparison of roots development between sand 100% and clinker ash 100% in pot planting experiments. (taken in October 2001) [A] Poplars, [B] Japanese oaks. Both plants in clinker ash better develop the roots to compare with the plant in pure sand.

#### 光学顕微鏡観察および走査型電子顕微鏡観察 (SEM)

ポットから抜いたポプラとコナラについて、根を光学顕微鏡およびSEMを用いて観察した。まず、ポプラの光学顕微鏡観察では、砂100%中の根ではほとんど根毛が認められず、DAPI染色し蛍光観察下でも自発光は弱かった (Fig. 5-A, B)。一方、クリンカアッシュ100%中の根では多くの根毛が認められ、蛍光下での発光も明瞭であった (Fig. 5-C, D)。同様に、沙

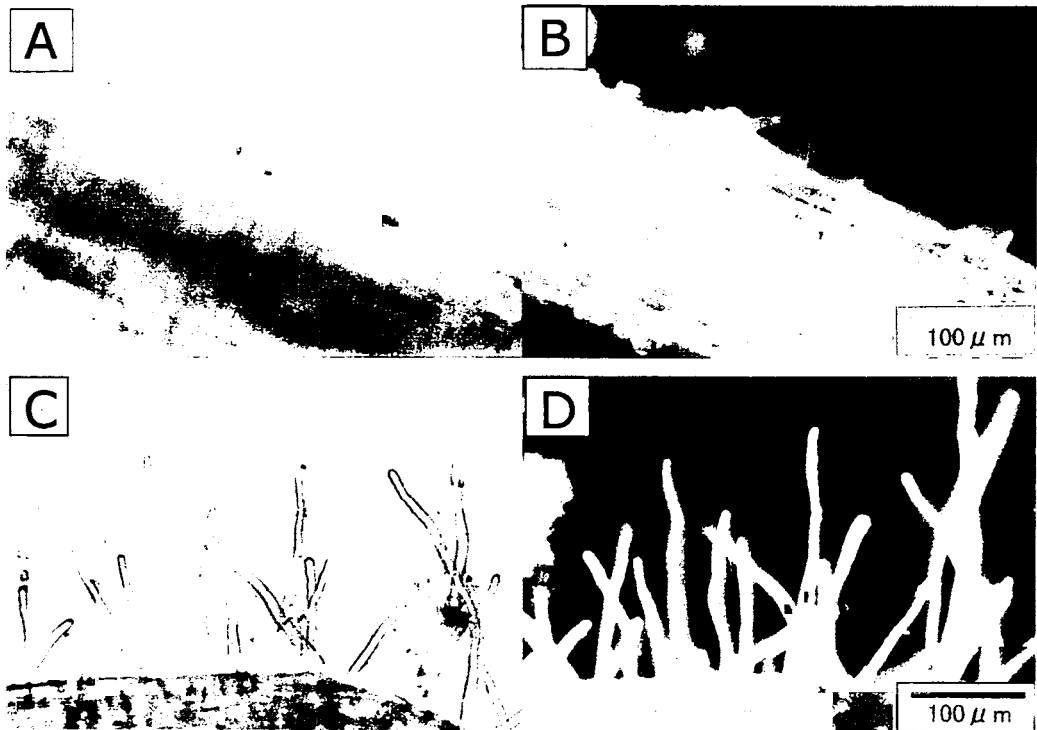


Fig. 5. Optical and fluorescence micrographs of poplar's roots. [A] Root in sand 100% pot, [B] Fluorescence microscopic observation of [A] with DAPI staining, [C] Root hairs in clinker ash 100% pot, [D] Fluorescence microscopic observation of [C] with DAPI staining. The numerous root hairs can be observed in [C] and [D].

漠化土壌100%のポット中の根よりも、石炭灰を混合したポット中の根のほうが、根毛がよく発達していた。次にSEMを用いたコナラの観察で、根はクリンカアッシュの粒子を包み込むように発達しているのが認められた (Fig.6-A)。また、クリンカアッシュの粒子に向かって伸びている根や根毛も観察された (Fig.6-B, C)。以上の観察から、クリンカアッシュを適用した場合、根の発達が促進されることが示唆された。

#### 土壌微生物の培養

ポット内の土壌微生物を2種類の培地を用いて培養した。このうち(沙漠化土壌100%)および(沙漠化土壌80%+包頭石炭灰20%)のポプラのポットでの培養結果をFig. 7に示す。まず培養8日後のローズベンガル培地では、石炭灰を混合したもので糸状菌のコロニーが多数認められたが、沙漠化土壌のみのもものではわずかのコロニーが見出されたにすぎなかった (Fig.7-A)。同様に、培養11日目のアルブミン培地においても、包頭石炭灰混合のものでバクテリアと放線菌からなるコロニーが多く認められた (Fig.7-B)。砂にクリンカアッシュを混合した実験においても、クリンカアッシュの混合比率を多くしたポットでは、土壌微生物のコ

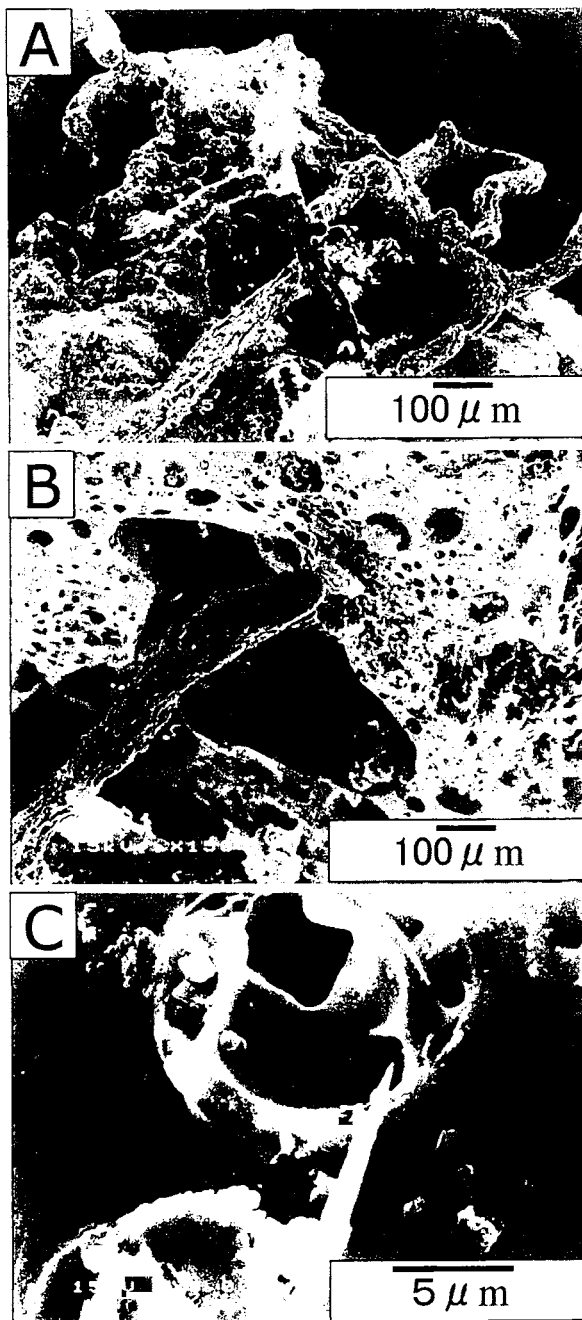


Fig.6. Scanning electron micrographs of the roots of Japanese oak in clinker ash 100% pot after 12 months aging. [A] The roots twine around the clinker ash, [B] The roots proceed toward the clinker ash, [C] The root hair reached the hole in the surface of clinker ash.

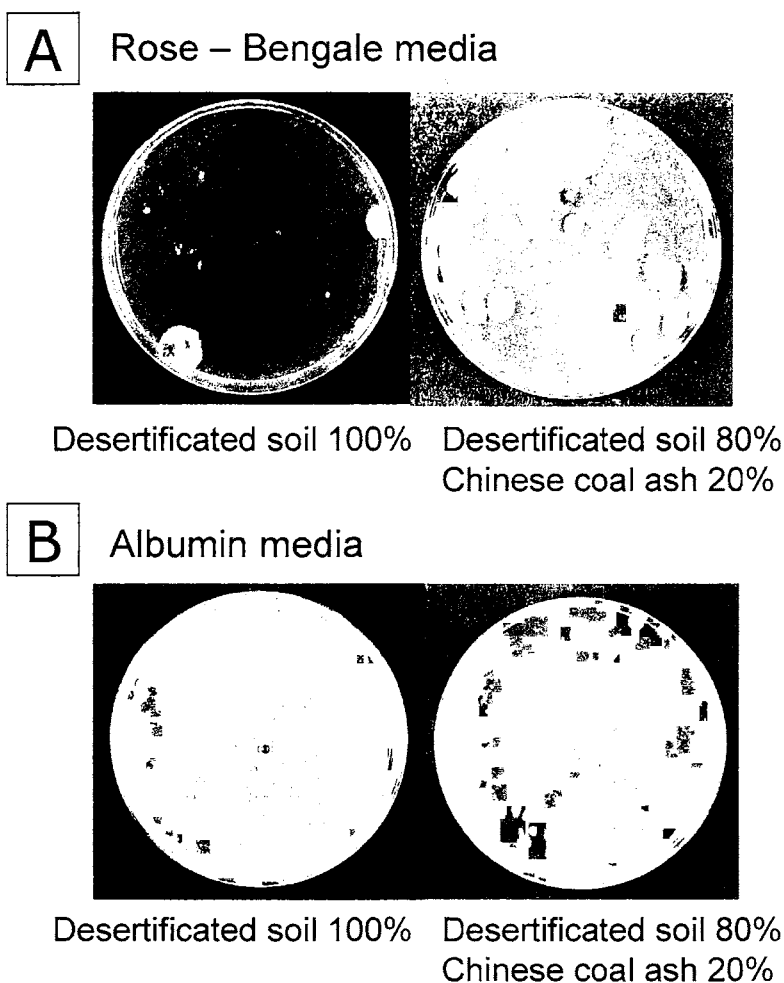


Fig. 7. Cultivation results in media of soil microbes with poplars. [A] Rose-Bengale media for fungi cultivated after 8 days aging, [B] Albumin media for bacteria and actinomycetes cultivated after 11 days aging, showing that the soils microbes well multiplied in pots (Desertificated soil 80% + Chinese coal ash 20%).

ロニーがより多く認められた。この傾向はポプラのみならず、コナラにおいても同様の結果を得た。以上のことから、石炭灰（包頭石炭灰やクリンカアッシュ）を混合した場合、土壤微生物の活動が活発化されることが示唆された。

#### 葉の化学成分の半定量分析

ポプラとコナラの葉4枚の表裏面をED-XRFにより、化学成分を求めた (Table 5)。ED-XRFの測定特性によりNaより重い元素のみ検出されているため、Table 5の値はH, C, N, Oなどを除いたものとなっている。ポプラでは主成分がCaO, K<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>であり、MgO, SiO<sub>2</sub>,

Table 5. chemical composition of leaves of poplar and Japanese oak after completed experiments.

Plant	Symbols	Materials and mixture rates	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO
Poplar	S-100	Sand 100%	5.6	0.4	8.3	0.9	8.2	25.7	50.4	0.1	0.2	0.4	0.0
	Sc-50	Sand 50%, Clinker 50%	2.1	-	1.1	1.6	10.5	43.4	41.0	-	0.1	0.2	-
	Sf-50	Sand 50%, Fly 50%	5.0	-	1.6	6.9	6.7	47.3	31.9	0.4	0.1	0.0	-
	Scf-10	Sand 80%, Clinker 10%, Fly 10%	4.8	0.1	2.4	5.3	10.1	42.7	34.5	-	-	0.1	-
	C-100	Clinker 100%	4.1	-	2.7	1.2	15.0	33.0	43.8	-	0.0	0.1	0.0
	L-100	Desertificated soils 100%	7.9	0.1	7.7	2.1	15.5	24.0	42.4	0.0	0.2	0.0	-
	Lc-20	Desertificated soils 80%, CA 20%	3.9	0.5	11.7	1.3	10.6	28.5	43.2	-	0.1	0.3	-
	Lc-80	Desertificated soils 20%, CA 80%	6.6	0.1	4.8	2.6	13.8	32.1	39.9	0.1	0.0	0.1	-
Japanese oak	S-100	Sand 100%	5.6	1.6	12.3	2.9	6.0	9.8	60.3	-	0.7	0.9	-
	Sc-25	Sand 75%, Clinker 25%	8.2	0.8	11.5	1.6	2.3	12.1	61.7	-	1.5	0.3	-
	Sf-25	Sand 75%, Fly 25%	8.0	1.1	5.0	1.8	7.5	29.1	47.0	0.1	0.1	0.4	-
	Scf-10	Sand 80%, Clinker 10%, Fly 10%	5.2	0.6	14.6	1.3	4.9	14.4	56.8	-	0.7	0.6	-

\* Each data is the mean of four leaves.

- : not detected

(wt %)

\* Clinker; clinker ash, Fly; fly ash, CA; chinese coal ash.

Other symbols are the same as Table 1.

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を少量含み、微量成分としてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、MnO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等を含んでいる。ここで植物の成長にとって重要なK<sub>2</sub>Oの割合に注目すると、砂100%のポプラ(S-100)では25.7%を示し、クリンカアッシュやフライアッシュを混合したもの(Sc-50, Sf-50, Scf-10)では42.7~47.3%へとその割合が上昇している。また、沙漠化土壌100%のポプラ(L-100)では24.0%であるが、包頭石炭灰を混合したもの(Lc-20, Lc-80)では28.5~32.1%に上昇している。次に、K<sub>2</sub>Oと同様に植物の成長にとって重要なP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の割合は、砂100%(S-100)の0.9%に比較して、クリンカアッシュやフライアッシュ混合のもの(Sc-50, Sf-50, Scf-10)では1.6~5.3%に上昇した。沙漠化土壌100%(L-100)の2.1%に対して、包頭石炭灰を80%混合したもの(Lc-80)は2.6%に上昇した。次にコナラのK<sub>2</sub>Oについてはポプラ同様、石炭灰を混合したものでその割合が上昇したが、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>については石炭灰混合による明瞭な効果は得られなかった。

以上の分析結果から、砂や沙漠化土壌へ七尾クリンカアッシュ、七尾フライアッシュや包頭石炭灰を混合すると、ポプラ中でK<sub>2</sub>OとP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、コナラ中でK<sub>2</sub>Oの割合が上昇することが明らかとなった。これは石炭灰の混合が植物の成長を促進することを示唆している。

## 考 察

以上の観察と実験結果から、沙漠化土壌の修復に石炭灰、特にクリンカアッシュがもたらす効果について考察する。

### 石炭灰の物理的効果

七尾フライアッシュや包頭石炭灰は沙漠化土壌(包頭のもの)や沙漠化地域に多い砂に比べて、高い保水力を示した(Fig. 1)。その理由として七尾フライアッシュは粒子が細かく(直径10-100 μm)、包頭石炭灰は微粒子(10-50 μm)を多く含有するため、微粒子間に水が保持されたためと考えられる。また、七尾クリンカアッシュの場合は粗粒(0.5-15 mm)にもかわらず含水量の測定で10-14日目に高い値を示したのは、多孔質で孔隙率が高い(33.1%)

ためであると推測される。Wild (1993) は、一般に鉱物粒子間には water film が存在し、鉱物間を結んでいると述べている。沙漠化土壌は主に粗粒の石英からなり団粒構造が見られないため、この water film はほとんど無いかごくわずかと考えられる (Fig.8-A)。しかし、ここにクリンカアッシュを添加と、その保水性から water film が発達すると同時に、粗粒であるため空隙 (air pore) も形成され、根や微生物の呼吸や地表とのガス交換が円滑化する効果が期待できる (Fig.8-B)。一方、フライアッシュを添加した場合、細粒 (粒径10-100  $\mu\text{m}$ ) であるため全体が塊状となり、保水性は向上するが空隙は失われ、根や微生物の呼吸が阻害されると考えられる (Fig.8-C)。これは、フライアッシュの割合が高いコナラのポット (Sf-50, フライアッシュ50%) 内で土壌がセメント状に硬くなり、植物の葉に茶斑点が現れて生存数が6本中1本と低くなった結果からも明らかである。また、実験終了後にポットから抜いた根の発達が極端に悪かったことから、フライアッシュは根の発達を阻害することが明らかである (Fig. 2, Table 4)。

植物の根の観察で、クリンカアッシュ内の植物がいずれも根および根毛を発達させているのが認められた (Figs. 4, 5)。これは土壌中に水と空気 (孔隙) が与えられた結果、植物は生存率が高まったと考えられる。

### 石炭灰の化学的効果

植物にとって重要な元素である P と K についてみると、クリンカアッシュ中の  $\text{P}_2\text{O}_5$  と  $\text{K}_2\text{O}$  の割合はそれぞれ0.7%と3.1%であり、これは砂の含有割合 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ :0.9%,  $\text{K}_2\text{O}$ :9.9%) に比べて低い (Table 3)。しかし、クリンカアッシュ100%で育ったポプラの葉中の  $\text{P}_2\text{O}_5$  (1.2%) と  $\text{K}_2\text{O}$  (33.0%) の値は、砂100%の葉中の  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.9%),  $\text{K}_2\text{O}$  (25.7%) に比べて高くなっている (Table 5)。また、砂にクリンカアッシュを混合したポット (Table 5 の Sc-50, Sf-50, Scf-10) では葉中の  $\text{P}_2\text{O}_5$  や  $\text{K}_2\text{O}$  の割合はさらに上昇し、しかも砂へのクリンカアッシュの混合比が多いほど、葉中の  $\text{P}_2\text{O}_5$  や  $\text{K}_2\text{O}$  の割合が高くなる傾向がみられる。沙漠化土壌へ包頭石炭灰を混合したポット (Table 5 の L-100, Lc-20, Lc-80) の  $\text{K}_2\text{O}$  においても、沙漠化土壌に石炭灰を混合することにより、植物体中の  $\text{K}_2\text{O}$  が上昇した。

これらの結果は、石炭灰の混合は植物の P や K の吸収力を向上させることを示唆している。石炭灰を添加することによって、植物は根を発達させた (Figs. 4, 5)。この発達した根により吸収力が向上する結果、植物体中の P や K の割合が増加して成長が促進されたと考えられる。

### 石炭灰と根圏および微生物との相互作用

一般に、植物は根に菌根を伴い、根と微生物が共生する根圏をもつことが知られており、菌根は菌糸を土壌中に伸ばして水や栄養分 (特に K や P, N など) を吸収して植物に供給し、菌糸は植物から炭素化合物を受け取っている (Harley and Smith 1983; 小川 1987)。沙漠化した土壌にクリンカアッシュが添加されると、クリンカアッシュは多孔質であるため微生物に水と棲みか (Living site) を与え、微生物の活動を活発にする効果が示された (Fig. 7) (Mitsuno



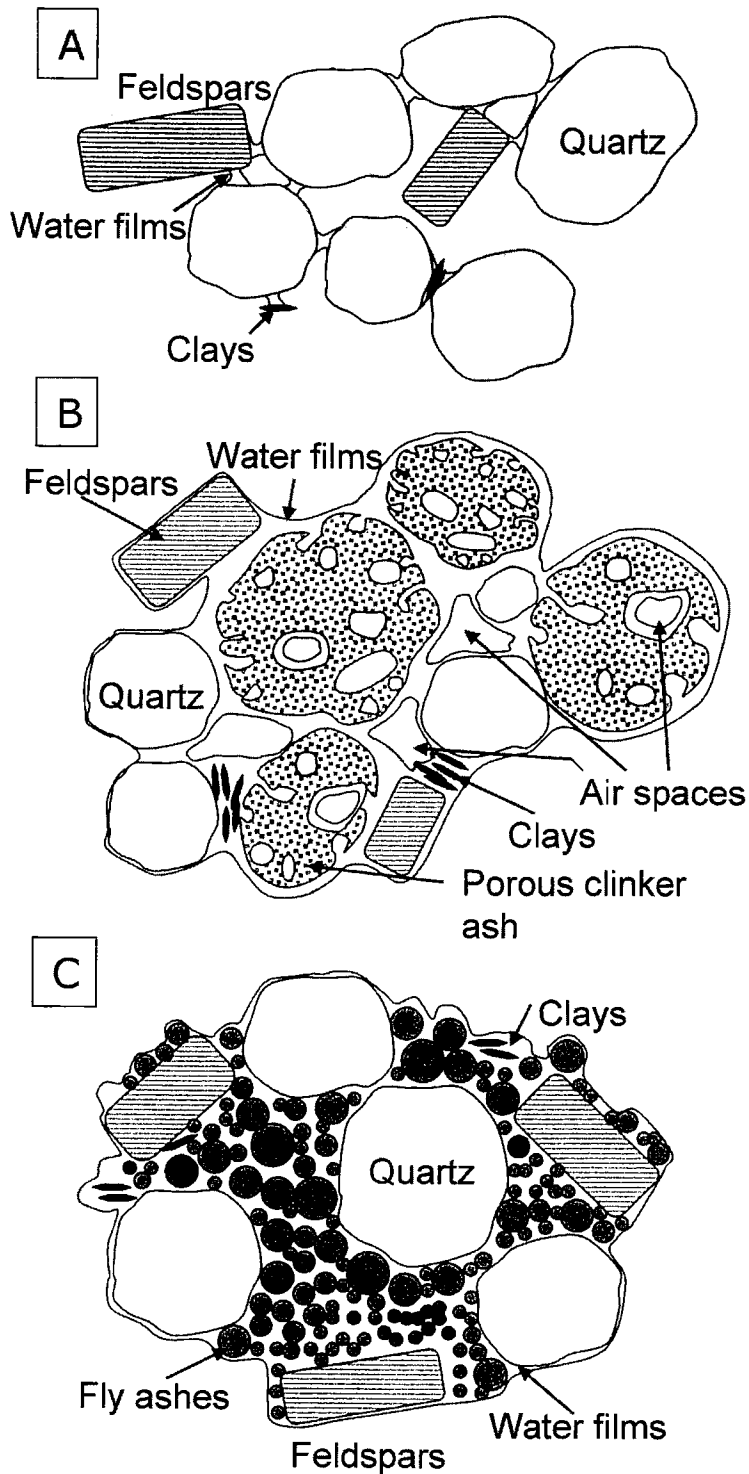


Fig.8. Schematic soil structures with porous clinker and fly ashes, showing presence of water films around mineral grains. [A] The desertificated soils, [B] The added clinker ash into soils, [C] The added fly ash into soils.

et al. 2002)。活発化した微生物は土壌中の鉱物を風化して元素を溶出させ、微生物風化により粘土の形成を促進する（三津野ほか 2001）。また、粘土が多くなれば土壌の保水力が高まり、粘土と微生物の効果により団粒構造化がすすむ。すなわち、沙漠化土壌の改良が期待される。またクリンカアッシュを添加することにより、一般に硬くなりがちな沙漠化土壌中で空隙率が増加し、土壌と大気とのガス交換がよりスムーズになり、植物根や微生物の呼吸が活発化することが期待される。さらに、代・米林（2000）は生物起源の有機物は粘土に選択的に吸着されると報告しており、沙漠化地域でも粘土化が進めば有機物がより固定されるようになり、有機物によってさらに植物と微生物の相互作用が進むことが考えられる。

以上のように、緑化が困難である沙漠化した土地においても、石炭灰（特にクリンカアッシュ）を混合することにより、土壌中の微生物が活発化し植物の生育がより促進される可能性が示唆された。中国の現地に投棄・放置されている石炭灰を、沙漠化土壌に混合して緑化するという本研究の方法は極めて簡易で、かつ、低コストであり、持続可能なやり方である。また、本研究結果は、廃棄物と沙漠化という中国が苦悩している2つの環境問題を、同時に解決する可能性を示している。

#### ま と め

中国は現在、沙漠化と石炭灰（石炭燃焼後の残留物）という2つの環境問題に直面している。廃棄物である石炭灰を沙漠化地域への植林に利用できないか検討するため、ポット植栽実験を行った。土壌4種類（沙漠化土壌、砂、赤玉土、鹿沼土）に石炭灰3種類（中国石炭灰、クリンカアッシュ、フライアッシュ）をいろいろな組合せと混合比で混ぜ、植物4種類を植えて、成長量の測定、植物体（地上部・地下部）の観察、土壌微生物の培養、葉の化学分析を行った。結果は、石炭灰のうち特に多孔質であるクリンカアッシュ100%あるいはクリンカアッシュを土壌に混合したポットで、植物の生存率と成長（特に根）がより良好であり、葉中のKやPの割合が高かった。また土壌中の微生物（バクテリア、放線菌、糸状菌）が増え、根はクリンカアッシュの周辺に集まり根毛を発達させている様子が観察された。これはクリンカアッシュが多孔質で保水力が高く孔隙が微生物の棲みかとなった結果、菌根を通じて植物の栄養吸収が向上したためと考えられる。以上の結果から、沙漠化した土壌への石炭灰（特にクリンカアッシュ）の混合は、緑化に際して高い効果が期待できることが示唆された。

#### 謝 辞

ポプラの刺し穂は川上農園（茨城県伊奈町）から、クリンカアッシュとフライアッシュは北陸電力七尾大田火力発電所から提供いただいた。本研究を行うにあたって、石川県教育委員会、石川県立大聖寺高校（永江庸悦校長）、金沢大学科学教育研究室から特別にご配慮を頂いた。また、田崎研究室の院生、学生の方々には実験にご協力いただいた。以上の方々に深く御礼申し上げます。

文 献

- 代静玉, 米林甲陽. 2000. 吉林省の土壌中の有機・無機複合体とその腐食酸の特性. *ペドロジスト*, 44: 72-80.
- Harley, J. L. and Smith, S. E. 1983. *Mycorrhizal symbiosis*. p. 483. Academic Press.
- 康峪梅. 2001. 内モンゴルの自然環境特性と持続的発展の方向性. *沙漠研究*, 11: 3-12.
- 環境庁地球環境部. 1993. *地球環境キーワード事典*. pp.104-113. 中央法規出版.
- 環境技術協会, 日本フライアッシュ協会. 2000. *石炭灰ハンドブック: I章*, 16-23. 環境技術協会・日本フライアッシュ協会.
- 真木太一. 1996. 中国の砂漠化・緑化と食糧危機. p.191. 信山社.
- Manz, O. E. 1997. World production of coal and utilization in concrete and other products. *Proceeding of the 52nd Conference, Artificial Clay Minerals Congress*. pp. 1-18.
- Matsumoto, S. and Haper, R. J. 1997. The evaluation of prevention and remedies for desertification in Japan. *In: Study of environmental evaluation method for effects of desertification prevention*. National Institute for Environmental Studies. pp. 55-63.
- 三津野真澄, 田崎和江, 長濱 直. 2001. 植林による土壌の粘土化の促進と微生物の活性化-中国ホルチン沙地ウルスのポプラ植林地を例として. *沙漠研究*, 11: 187-198.
- Mitsuno, M., Tazaki, K., Fyfe, W. S., Powell, M. A., Hart, B., Sun, D. and Li, S. 2002. Influence of coal ash on microorganisms and applicability of coal ash to remediate desertified soil-In the case of desertified land in Inner Mongolia of China. *Clay Science*. (in press)
- Noble, I. R. and Gitay, H. 1996. *Deserts in a changing climate: Impacts*. *Climate change 1995*. pp. 159-169. Cambridge Univ. Press.
- 小川 真. 1987. 作物と土をつなぐ共生微生物. p.241. 農文協.
- 蘭州沙漠研究所. 1979. 中国沙漠及沙漠化防治的研究. p.59. 中国科学院蘭州沙漠研究所.
- 菅沼浩敏. 1999a. 礫質暗赤色土壌(烏尻マージ)への石炭灰施用がベニイモの生育に及ぼす効果. *我孫子研究所依頼報告 U98523*. p.43. 電力中央研究所.
- 菅沼浩敏. 1999b. 石炭灰の土壌改良剤としての利用. *農業電化*, 52: 15-19.
- UNEP. 1991. Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification / GCSS. III. p.88. UNEP, Nairobi.
- Wild, A. 1993. *Soils and the environment: an introduction*. p. 287. Cambridge Univ. Press.
- 吉川 賢. 1998. 砂漠化防止への挑戦. p.215. 中央公論社.
- 吉野正敏. 1997. 中国の砂漠化. p.301. 大明堂.
- 朱俊風, 朱震達. 1999. 中国沙漠化防治. p.495. 中国林業出版社.