

## 植生土としてのクリンカアッシュの適用性に関する検討

## Applicability of Clinker Ash as Vegetation Soil

竹内智哉	Tomoya TAKEUCHI	(山口大学大学院)
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院)
兵動正幸	Masayuki HYODO	(山口大学大学院)
中田幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院)

近年、石炭灰の利用拡大が重要な課題となっている。石炭灰の一つであるクリンカアッシュは、軽量で保水性・排水性が良好といった特徴があると言われており、その特徴から屋上緑化材としての利用が考えられる。しかしながら、クリンカアッシュに対して、このような観点から詳細に調べられた事例はほとんどない。そこで本研究では、クリンカアッシュの特性を植物の生育条件の観点から調べると同時に、実際に植生調査を行った。その結果、クリンカアッシュは生育条件を物理的、化学的に生育不良を起さない範囲で満たし、適度な保水性と排水性を兼ね備えていることが明らかとなった。さらに植生調査においてクリンカアッシュは生育に必要な水分を長期間保持し、特に屋上緑化に適用性を持つという結果が得られた。

キーワード：クリンカアッシュ、保水性、排水性、植生、緑化 (IGC : A10,D02,D04)

## 1. はじめに

現在、国土開発における道路・宅地造成のための建設現場は都市部から山岳丘陵地帯に移り変わり、斜面安定化や自然と調和のとれた植生は環境問題の観点からも重要な課題であり、都市部においてもヒートアイランド現象や大気汚染の緩和、緑による景観向上、生態系の保全といった観点から屋上緑化が社会的に求められている。実際に、東京都・大阪府・京都府においては全国に先駆けて、敷地や建築物上への一定基準以上の緑化が義務付けられている<sup>1)</sup>。

緑化に用いる土壌として求められる条件は「生育に十分な広さ」、「生育に十分な厚さ」、「透水性」、「排水性」、「適度な硬さ」、「化学的障害性のない土壌」、「適度な養分」、「適度な保水性」である。特に屋上緑化に関しては、環境条件から極度の乾燥や高温状態にさらされやすく、屋上緑化に用いる土壌には、自然砂と比べて高い排水性と保水性が求められる。加えて屋上は建築物への負荷を軽減するために「土壌の軽量性」が重要な条件<sup>2)</sup>であり、これらの条件を満足する材料の開発が重要となっている。

一方、我が国の発電は約3割を石炭火力が占め、重要なエネルギー供給の役割を担っている。近年では石油の枯渇化や価格不安定の問題により、代替エネルギーとして安定供給が可能な石炭の需要が増加しており、それに伴い石炭灰の発生量も増加傾向にある。石炭灰の有効利用化は促進されているものの、多くは処分場で処理される。しかし年々、処分場の数は減少し、今後の処分場建設も難航している現状にある。

すでに、2001年に社会の物質循環を確保するために「循環型社会形成推進基本法」が施行された。これにより、「廃棄物処理法」、「資源有効利用促進法」、「グリーン

購入法」等の法律が次々に改正・施行された。その中でも特に「資源有効利用促進法」では、石炭灰は「特に再生資源として有効利用を促進しなければならない指定副産物」に位置づけられたため、石炭灰の有効利用の拡大は喫緊の課題となっている<sup>3)</sup>。

石炭灰はその生成過程の違いからフライアッシュとクリンカアッシュ(以下CA)の2種類に分類できる。CAは、石炭火力発電所において微粉炭燃焼方式により、微粉炭燃焼ボイラー内で燃焼によって生じた石炭灰の粒子が溶解して相互に凝集し、ボイラー底部の水槽に落下したもので、主に砂分・礫分で構成されている。また、その発生割合は、CA：フライアッシュ=5～15%：85～95%である<sup>4)</sup>。

CAは、文献<sup>5)</sup>によると多孔質で軽量、排水性が良好といった特徴を持ち、植生に用いる土壌として適用できる可能性が高い。近況でのCAの有効利用分野は、盛土材<sup>6)・7)</sup>、テールアルメ工法の裏込材<sup>8)・9)</sup>、パーチカルドレーン工法<sup>10)・11)</sup>、コンパクションパイル工法<sup>12)</sup>、路盤材<sup>13)</sup>への利用が挙げられるが既往の研究成果ではCAの保水性・排水性が詳細に調べられたものはほとんど存在しない。そこで、CAの持つ特性を考慮して屋上緑化材としての適用性を明らかにすることを最終目的とすることにした。

その中で本研究では、CAの持つ保水性・排水性を植物の生育条件の観点から調べた。地盤工学の分野における植生については、規模の大きさや不定期な雨水等により水分量を管理、コントロールすることは困難で、あまり人の手を使わず自然状態に任せて植物を生育させることが期待される。よって本研究では、実際に観葉植物を用いて植生調査も行い、CAの植生土としての適用性について検討した。

表-1 各試料の物理的性質

	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	e	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{dmax}$ g/cm <sup>3</sup>	$d_{50}$ mm	Uc -	Ar -	Rc -
C. A. a	1.954	1.241	0.872	0.969	2.228	13.8	1.398	1.665
C. A. b	2.066	1.248	0.919	1.021	0.562	16.9	1.412	2.004
C. A. c	2.079	1.035	1.022	1.135	1.174	16.5	1.508	1.508
C. A. d	2.092	1.338	0.895	0.994	2.563	36.4	1.550	1.572
G. C. A.	2.286	1.537	0.901	1.001	-	-	-	-
U-Masado	2.639	0.620	1.629	1.810	0.509	1.1	1.445	1.251

eと $\rho_d$ はDc=90%における値である。

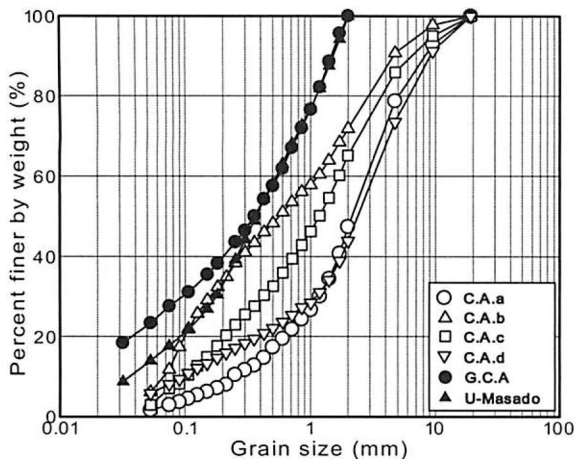


図-1 各試料の粒径加積曲線

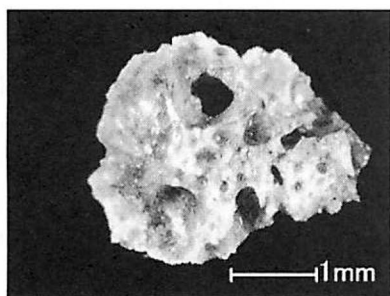


写真-1 CAの粒子形状

## 2. 用いた試料

試料は各発電施設のCA (C.A.a~d), 比較材料としてフライアッシュにセメントを添加して作製した造粒石灰灰 (G.C.A.), 自然砂である宇部まき土 (U-Masado) を用いた。各試料の物理的性質を表-1, 粒径加積曲線を図-1, CAの形状写真を写真-1に示す。なお, 本研究に用いた試料の密度は, 予め突固めによる締固め試験を行い, 最大乾燥密度を求めている。その結果を用いて, 水の流入によるコラプス等の密度変化を避けるため全て締固め度  $D_c=90\%$  で管理した。

CAの粒度分布は粒径幅が広く, 粒度分布が良い。表中のArは縦横比(投影粒子の相当楕円の長軸長さとし短軸長さの比), Rcは真円度(1に近いほど形状は円に近く, 大きくなるほど角張っている)で, 粒子形状を数値として示したもの<sup>17)</sup>である。CAはU-Masadoに比べて, 特に真円度が大きく, 凸凹した形状であることがわかる。また写真より, 粒子の表面が粗く空隙を多数有していることが観察でき, このために土粒子密度が小さく, さらに空隙比が大きくなっていると考えられる。

表-2 有効水分量の取扱い

著者名	分野	名称	pF値
吉川, 三木 <sup>2)</sup>	土壌環境分析法	易効性水分量	1.5~2.7
山崎ら <sup>14)</sup>	都市再生機構	有効水分保持量	1.8~3.0
	都市緑化技術開発機構	有効水分保持量	1.5~3.8
西尾ら <sup>15)</sup>	農学	正常生育有効水分量	1.8~3.0
横尾ら <sup>16)</sup>	土質工学	植物有効利用水分量	1.8~3.5

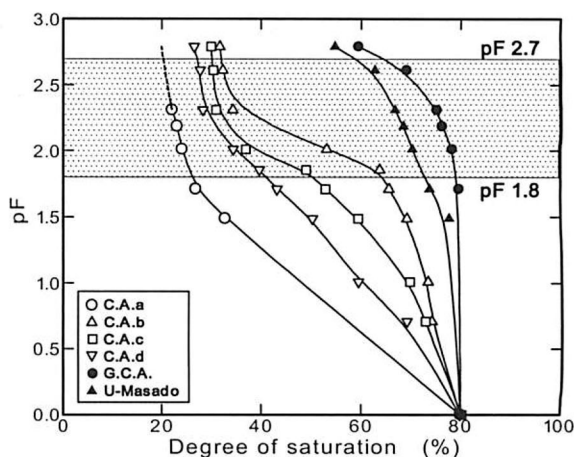


図-2 各試料の水分特性曲線

## 3. 生育条件による検討

### 3.1 生育条件と測定方法

一般に植物の生育に支障とならないような土壌条件を把握するために, 透水係数, 礫分含有率, 有効水分量, pH, 電気伝導度, 窒素, 腐植等を調べる必要がある<sup>2)</sup>。そこで, CAの植生土としての適用性の有無を判断する上で必要な生育条件である透水係数:k, 礫分含有率: $G_c$ , 有効水分量:AM, pH, 電気伝導度:ECについて調べた。

透水係数kは定水位透水試験より求めた。その際の供試体サイズは直径10cm, 高さ40cmを標準とした。供試体作製方法は密度を $D_c=90\%$ で管理し, C.A.a~dについては飽和しやすくするために水中落下法, G.C.A., U-Masadoについては空中落下法によりランマーで突き固めて作製した。本試験では供試体内を流れる水が層流状態となる動水勾配0.3~0.5の範囲で値を得た。一般の植物では $k: 10^{-4} \text{cm/s}$ 以上<sup>18)</sup>, 屋上緑化では $10^{-3} \text{cm/s}$ <sup>19)</sup>以上が適正範囲と言われている。礫分含有率 $G_c$ は絶乾土壌をふるい分けし得られたもので, 40%以上で乾燥や肥力不足を引き起こす可能性があるといわれている<sup>2)</sup>。有効水分量はAMで表され, 供試体は直径5cm, 高さ5cmを標準とし, メンブレンディスクフィルター(材質:親水性ポリエーテルスルホン, AEV値:90kPa, 孔径:0.45 $\mu\text{m}$ , 厚さ:140 $\mu\text{m}$ )を用いた加圧法による保水性試験により取得した。供試体の作製は, あらかじめ飽和度を80%に調整した試料を $D_c=90\%$ の密度となるように, 突き固めて作製した。

表-2はAMに関する参考文献から, 取り扱われている分野とその分野での名称及びpF値の範囲を表にしたものである。ここでpF値とは, 吸引圧(kPa)を対数表示

表-3 生育条件の測定結果

	C.A.a	C.A.b	C.A.c	C.A.d	G.C.A.	U-Masado
k cm/s	$3.6 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$8.9 \times 10^{-4}$
$G_c$ %	52.6	28.1	34.8	47.2	0.0	0.0
AM $L/m^3$	⑥ 31.0	① 158.4	② 101.8	④ 85.3	③ 90.6	⑤ 57.1
pH	8.1	7.5	7.5	8.3	8.9	6.4
EC ds/m	0.271	0.222	0.094	0.025	1.703	0.025

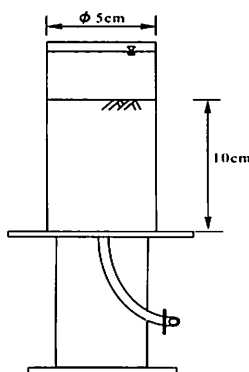
した値である。AM は用いられる分野によって生育条件の範囲が異なっているため、本研究では植物が十分に生育できる水分量を有効水分量として扱うこととし、pF 1.8 (圃場容水量) ~ pF 2.7 (毛管連絡切断点) を有効水分量の値として用いている。AM は図-2 に示すように各試料の水分特性曲線から pF 1.8~2.7 の範囲の値に対応した有効水分となる飽和度を求め、体積当りの水分量 ( $L/m^3$ ) に変換した値を用いている。ここで、C.A.a の AM については pF 2.3 以上の測定が出来なかったため外挿により算定した。大きい値を示すものほど保水性が良いと判断できる。pH は 4.5~8.0 の範囲を超えた場合、EC は 0.5ds/m 以上で生育不良を引き起こす可能性があるといわれている<sup>2)</sup>。

### 3.2 生育条件の測定結果

生育条件の測定結果を表-3 に示す。CA は透水係数が  $3.2 \times 10^{-2} \sim 3.6 \times 10^{-2}$  cm/s となり G.C.A., U-Masado に比べ透水性が非常に良く、特に屋上緑化に適用性があるという値を示した。C.A.b~C.A.d はさらに保水性も良い。これは CA の持つ多孔質性が粒子の表面に水分を保持し、スポンジのような水分保持能力をもたらししていると考えられる。C.A.a は最も透水性が良いものの、保水性は悪いという結果が得られた。理由として  $G_c$  が高いことが影響していると考えられ、乾燥しやすい材料といえる。G.C.A. は pH および EC が高く、生育に化学的な支障を及ぼす可能性がある。

植物にとって水分は重要な要素であり、適切な水分量を長期間保水する土が植生土としての適用性があると考えられる。これらのことから総合的に判断して植生土として CA は適用性が高いと推察される。

### 4. 排水能力調査



定水位透水試験結果より CA は G.C.A., U-Masado より飽和状態での透水性が良いことを示したが、実際の植生が行われる地盤は不飽和状態が長期間続くことが想定されるため、水分特性曲線と並び不飽和状態での排水性 (透水性) の把握が必要となる。

図-3 排水能力調査装置

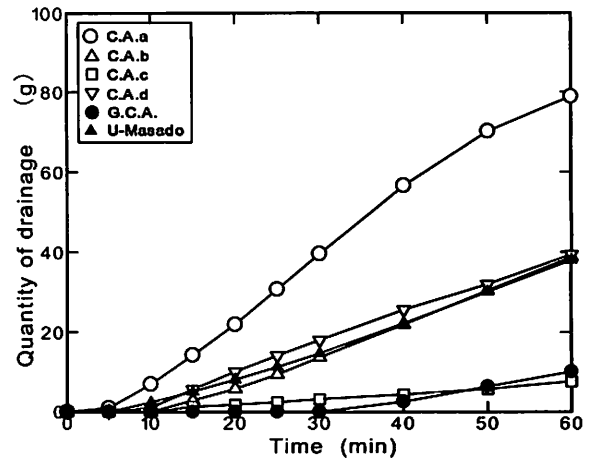


図-4 排水能力調査結果

一般に不飽和における排水性は粒度分布や間隙、サクシオンに依存して変化すると言われている<sup>20)</sup>。また、杉井らによれば、砂と粘性土の透水係数とサクシオンの排水過程での関係は、飽和状態においては、砂の透水係数の方が大きいですが、不飽和状態になると砂の間隙径の方が大きいため水が抜けやすく、一気に水分子の流れが曲がりくねる屈曲性が増し、透水係数が大きく低下する。

一方、粘性土は、負の圧力水頭が増加しても、間隙径が小さいために水が抜けにくく、屈曲性が砂よりも増加せず、透水係数があまり低下しない<sup>21)</sup> としている。

以上の知見を踏まえると、CA は既往の研究から粒度分布における粒径幅が広く、多孔質で粒子の内外に空隙を有し、複雑な形状をしている<sup>5)</sup> ため、不飽和における排水性は一般の土と比べて異なる性質を示すと考えられるため、今回は図-3 に示すような簡易な装置を用いた排水能力調査により、排水性の定量的評価を試みた。直径 5cm、高さ 15cm の円柱の亚克力容器を用意し、底部の中心に直径 5mm の穴を 1 つ開け、ゴムチューブとコックを付けて排水を調節できる装置を作製した。調査は絶乾状態の試料を直径 5cm、高さ 10cm、締固め度 90% の密度となるように 3 層に突固めて供試体を作製し、上部から 150g の水を投入すると同時にコックを開放し、経過時間ごとにゴムチューブから排水された水の量を排水量として 60 分間計測した。この結果を短時間での排水能力として、60 分間での排水量を不飽和状態における透水性の指標として用いた。極端な実験ではあるが、不飽和状態での急激な水の浸入に対する排水性を表しているものと捉え、結果を検討に用いた。

調査結果を図-4 に示す。グラフの傾向をみると、不飽和状態での排水性は飽和状態での排水性と傾向が異なり、また、2 時間経過後でも C.A.c は 49.09g、G.C.A. は 38.48g の水が土の表面に残り、排水性が悪い結果となった。

これらの結果は、植生土壌においても不飽和状態が続くと考えられるため、排水能力調査結果の 60 分間の排水量を排水性の能力と捉え、植生調査での検討に用いた。

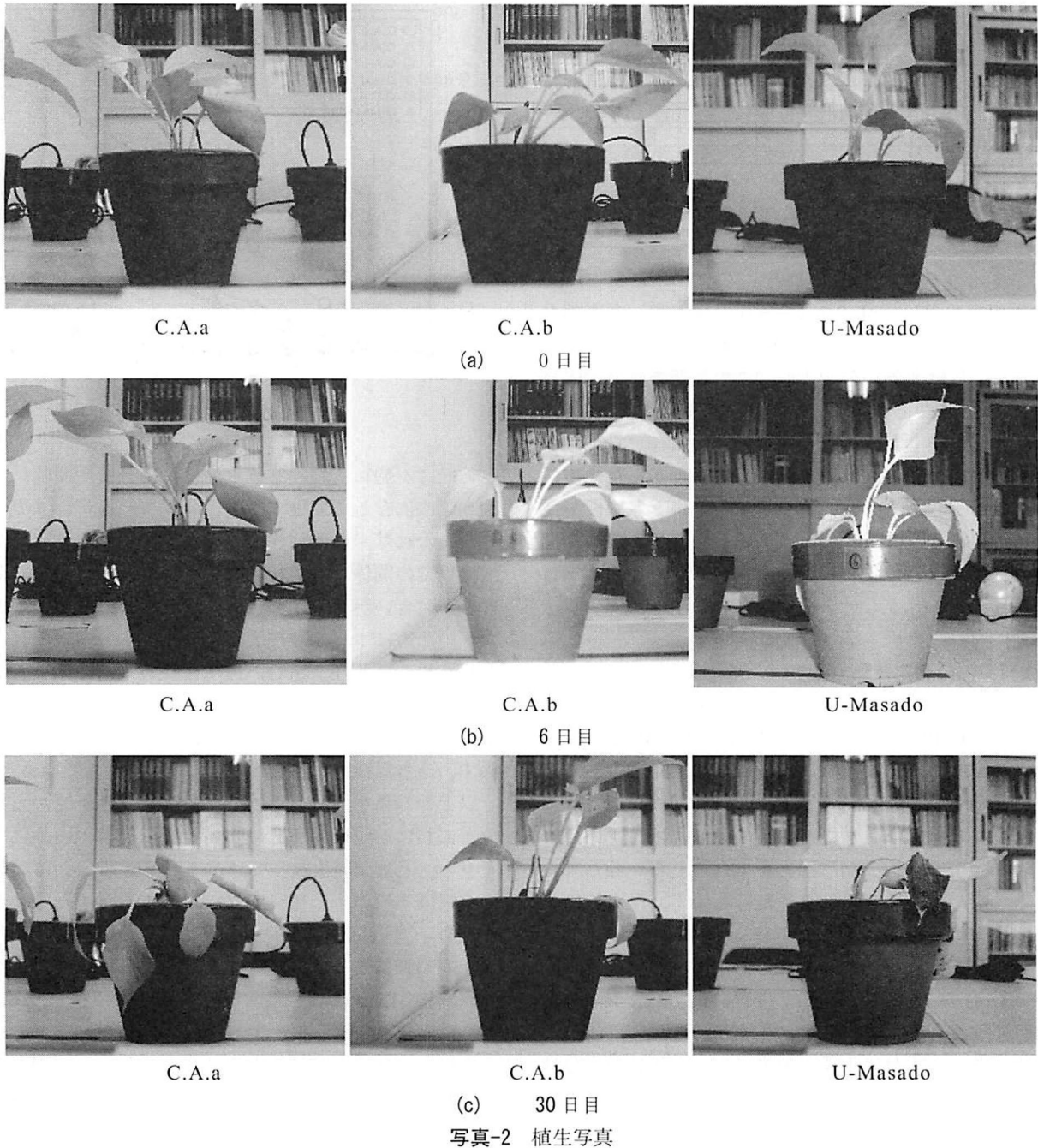


写真-2 植生写真

表-3 土壌水分計の仕様

型式	CDC-EC-5
測定項目	体積含水率
測定範囲	0~100%VWC
精度	±3%
動作環境	-40~50°C
寸法	8.9×1.8×0.7cm

表-4 土壌水分計測定結果

C. A. a	Sr = 0.183 × R. D. -87.78
C. A. b	Sr = 0.143 × R. D. -75.84
C. A. c	Sr = 0.214 × R. D. -105.04
C. A. d	Sr = 0.172 × R. D. -87.52
G. C. A	Sr = 0.119 × R. D. -62.42
U-Masado	Sr = 0.215 × R. D. -115.32

ここに, Sr : 飽和度 R. D. : 生データ

## 5. 植生調査

植生調査では一般的な観葉植物としてポトスを用いた。ポトスは耐寒性があり、成長が早く、比較的同条件で調査を開始できるという理由から選定した。調査には鉢を2つ用意し、一方にポトスを植生し、もう一方には同じ密度の試料のみを入れ、土壌水分計を挿入して計測を行い1ヶ月間のデータを得た。土壌水分計の仕様は表-3に示すような計測器を用い、事前にキャリブレーション

を行っている。キャリブレーションの方法は0%から80%まで20%ずつ供試体の飽和度を増加させ、土壌水分計で測定を行った。生データとして得られる誘電率と各飽和度の関係から一次の近似曲線を取得し、植生調査において1ヶ月間の飽和度の推移データを得た。キャリブレーションの結果を表-4に示す。植生調査の際、試料のみ入れた鉢で飽和度の測定を行ったのは、ポトスの根の成長による試料の密度変化の影響を懸念したためである。しかし、その影響から植生した鉢より、試料のみを入れた鉢はポトスによる水の利用がないため、少し飽和度が高いと考えられるが今回は考慮していない。実際の3つの試料の代表的な植生調査の写真を写真-2に示す。調査の結果、飽和度の推移が他と比べても常に高い状態にあったC.A.bは30日目でも茎が立った状態が維持されていた。一方で、乾燥が早く生育率も低いU-Masadoは30日目

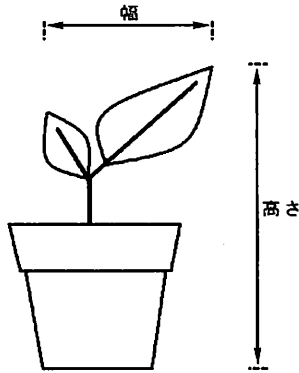


図-5 生育率に使用する高さとは幅

$$\text{生育率(\%)} = \frac{i\text{日目の葉の高さ} \times i\text{日目の葉の幅}}{0\text{日目の葉の高さ} \times 0\text{日目の葉の幅}} \times 100 \quad (1)$$

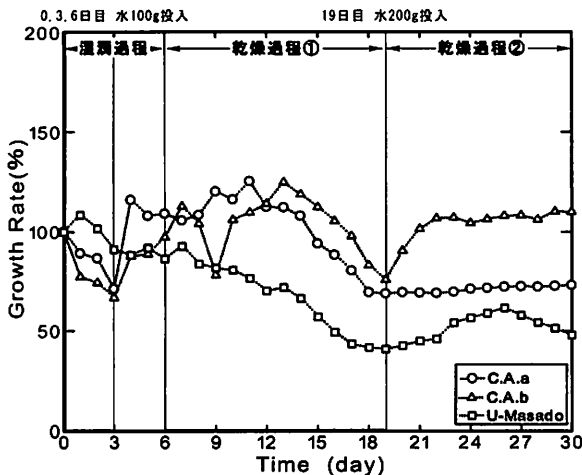


図-6 1ヶ月間の生育率の推移

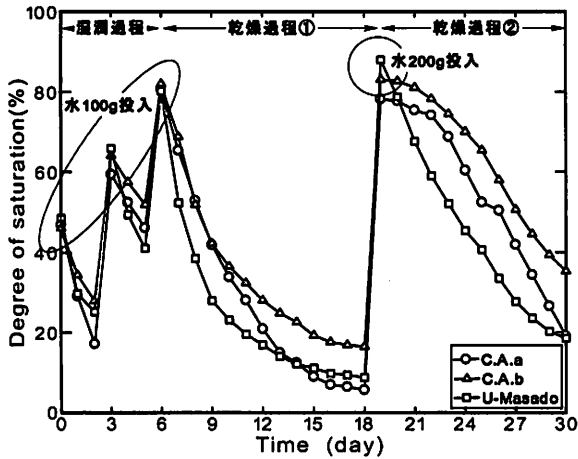


図-7 1ヶ月間の飽和度の推移

には茎は折れ曲がり、葉の色も茶色に変色していた。

U-Masado は2mm以下の試料を使用しているため、礫分含有率は0%であり、条件の上では乾燥しにくいと思われた。しかし、30日目のU-Masadoのように枯れてしまったのは有効水分量が低く、U-Masadoの水分特性曲線から見ても  $S_r \approx 70\%$ 以下は有効水分を保持できる範囲外にあり、根が土壌から水分を得難い飽和度が継続したため、生育不良に大きく影響を与えているものと思われる。

さらに、植物の生育を定量的に判断するため、図-5のように鉢の底辺からポトスの最頂部までの高さとは横に伸

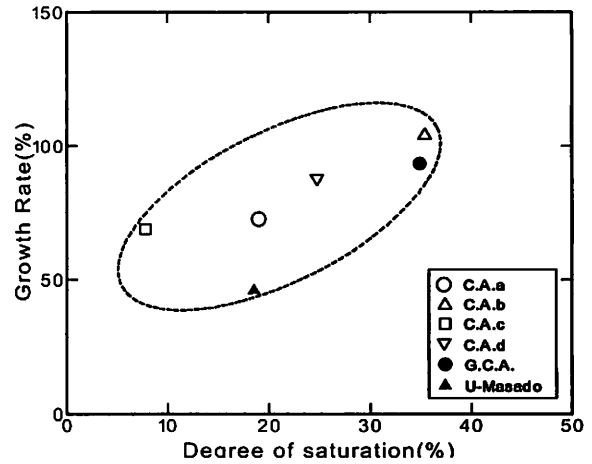


図-8 30日目の生育率と飽和度の関係

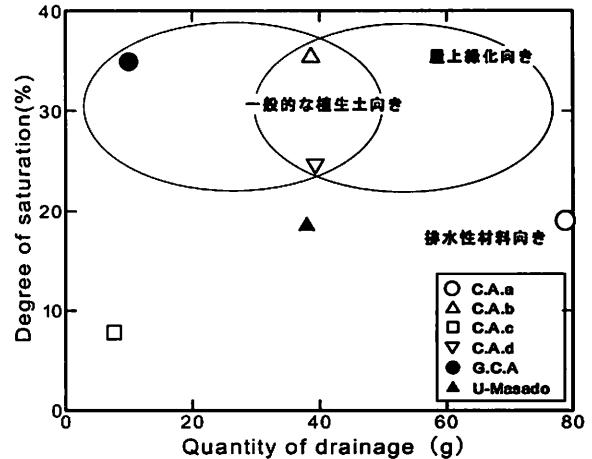


図-9 30日目の飽和度と排水調査排水量の関係

びた葉を幅として調査開始日の正午の値を0日目の値として、それに対する変化割合を生育率として式(1)から算定し、植生土としての適用性を検討した。

1ヶ月間の植生調査の結果として、C.A.aとC.A.b、U-Masadoの1ヶ月間の生育率の推移を図-6に、飽和度の1ヶ月間の推移を図-7に示す。0.3, 6日目に100gの水を投入し湿潤過程として、定期的に水やりを行い、飽和度が高い状態で維持された場合を観察した。その後、乾燥過程①として6日目から18日目までは水をやらない期間を与え、さらに19日目に水を200g投入し、19日目から30日目までを乾燥過程②として生育率と飽和度の推移を観察した。湿潤過程によって、ある程度成長させた後、水をやらない期間を長くとしたのは降雨が頻繁に起こらない場合を想定したためである。湿潤過程において飽和度が高い状態で維持されていると、生育率はほぼ安定しているが、乾燥過程で飽和度が下がると生育率も数日遅れて下がってゆくことがグラフよりわかる。CA同士で比較した場合、C.A.aとC.A.bで飽和度の低下の速さが異なっていることがわかる。これは、礫分含有率が高いためC.A.aの乾燥が早かったことが要因として考えられる。また、生育率の低下傾向がCAとU-Masadoでは異なっている。この傾向の違いは、保水性の良し悪しの影響を受けていると思われる。

30日目の生育率と飽和度の関係を図-8に示す。この

結果を考察すると飽和度が高い状態で保持されている土ほど生育率が高い。また、C.A.b, C.A.d, G.C.A.は、過酷な乾燥過程を2回与えても初期の生育率を維持している。この結果からC.A.b, C.A.d, G.C.A.は植生に適しているといえる。

植生調査における30日目の飽和度と排水能力調査の排水量の関係を図-9に示す。自然砂であるU-Masadoを基準に考えると、C.A.b, C.A.d, G.C.A.が高い飽和度を維持するため一般的な植生に適し、さらにC.A.b, C.A.dは不飽和での排水性も良いので、重さが制限される屋上緑化にも向いていると考えられる。また、C.A.aとC.A.cは30日目の飽和度が低く、植生土としての適用性はあまり高くはないといえる。C.A.aは排水性の良さから排水性材料としての有効利用の可能性はある。

## 6. まとめ

CAは植生調査の結果から、まさ土に比べて屋上緑化の植生土としての適用性があるといえる。特にC.A.b, C.A.dについては必要以上の水分は速やかに排水され、植物にとって適切な水分を長期間保持することがわかった。CAは自然砂に比べて保水性が良く、排水性が良いという一見矛盾した性質を兼ね備え、植物の生育に必要な水分量を保持しつつ、必要以上の根腐れを起こすような水分は速やかに排水されることから植生土として適用性があることがわかった。また、CAは多孔質で軽量の土であるので、重さが制限され乾燥しやすい屋上緑化に用いる土壌としての適用性もあるといえる。

今回は、排水能力調査を行って不飽和状態の排水性を表現したが、不飽和での透水実験を実施し、不飽和透水係数等から不飽和状態の透水性を定量的に把握し、今回の結果の解釈につなげたい。

## 参考文献

- 財団法人都市緑化技術開発機構：屋上・壁面緑化の推進に関する諸制度，2008。http://www.greentech.or.jp/
- 吉川勝秀，三木博史：生態学的な斜面・のり面工法 これからの緑化技術，pp.67-337，2006。
- 財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（平成17年度実績），pp.1-16，2007。
- 土木学会エネルギー土木委員会：石炭灰有効利用技術について－循環型社会を目指して－，2003。http://www.jsce.or.jp/committee/enedobo/report20040214.html
- 若槻好孝，田中等，内田裕二，入江功二郎，兵動正幸，吉本憲正：クリンカアッシュの材料特性と適用性の検討，地盤工学ジャーナル，Vol.2，No.4，pp.271-285，2007。
- 国土交通省東北地方整備局東北技術事務所（ゼロエミッション社会を目指す技術開発委員会，廃棄物・溶融スラグ利用技術等専門部会）：道路盛土における石炭
- 灰と建設発生土利用ガイドライン（案）（クリンカアッシュ編），2003。http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/choshi/pdf/zeroemi01.pdf
- 荒川高而，成田健，大高昌彦：リサイクルクリンカアッシュの土質改良材への適用性，電力土木，No.310，pp.44-47，2004。
- 小川憲保，川口一男，岡野実，天野正道：クリンカアッシュを使用した補強土壁の設計・施工，第27回土質工学研究発表会，pp.2461-2462，1992。
- 池田陵志，澄川健，安野孝生：テールアルメ盛り土材としてのクリンカアッシュの有効利用，土木学会第56回年次学術講演会，III，pp.410-411，2001。
- 谷口清，濱野暢裕，土井義昭，田中良英，中堀和英：サンドドレーン代替材についての性能評価実験，第35回地盤工学研究発表会，pp.1377-1378，2000。
- 奥田康三，粟田益生，伊藤隆光：サンドドレーンへのクリンカアッシュの利用，電力土木，No.324，pp.76-78，2006。
- 滝英治，中島秀雄，鈴木英治，肥後道憲，仁田尾洋：石炭灰を中詰め材料に利用したコンパクションパイプ工法の試験工事，土木学会第54回年次学術講演会，III，pp.522-523，1999。
- 池田陵志，斉藤直，岩谷朋律：リサイクル高規格道路における石炭灰路盤の活用，電力土木，No.310，pp.78-82，2004。
- 山崎淳，森雅人，高橋弘：土壌物理特性の観点から見た植生基盤材の生成，資源・素材，Vol.2007，No. A/B，pp.33-36，2007。
- 西尾伸也，林豊，米村惣太郎，薬師寺圭，小田原卓郎：植栽基盤に用いる軽量土壌の物理化学的性質，第37回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.853-854，2002。
- 横尾磨美，鬼塚克忠，原裕，桃崎節子：植生における発泡廃ガラス材の保水性について，第34回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.953-954，1999。
- 穴井隆太郎，吉本憲正，兵動正幸，吉永祐二，中下明文：クリンカアッシュの粒子特性及び静的せん断特性，地盤改良シンポジウム論文集，Vol.8th，Page.43-46，2008。
- 多島秀司，深川良一，湯浅まゆ，羽賀浩，勝見武：植生用土壌の供試体作製に関する基礎的研究，環境システム研究論文集，Vol.31，p.154，2003。
- 都市緑化技術開発機構：屋上・壁面緑化技術のてびき一環境共生時代の都市緑化技術，p.62，1999。
- 西村拓，西村友良，北村良介：不飽和土・不飽和地盤2.不飽和土の保水特性，地盤工学会誌，Vol.56，No.4，pp.55-63，2007。
- 杉井俊夫，神谷浩二，阿部廣史：不飽和土・不飽和地盤3.不飽和土の透水・透気特性，地盤工学会誌，Vol.56，No.5，pp.40-47，2008。

(2009年6月29日 受付)