論文　石炭灰を利用した植栽型ポーラスコンクリートの耐乾燥性の研究

柳橋　邦生[*1]・石川　嘉崇[*2]

要旨：屋上緑化基盤に緑化コンクリートを適用する場合，潅水設備等のメンテナンス設備は極力軽微なものとすることが望ましく，乾燥時の植生の維持が必要とされる。また，屋上を緑化することにより，夏季の温度上昇を抑える効果が期待できる。本研究では，石炭灰を利用した緑化コンクリートとその下部に土層を設けた構成の緑化基盤を製作し，植生評価を行うとともに，水分量と温度分布を調べた。下部に設けた土層の水分は，植物の蒸散により消費され，緑化基盤各部の温度を下げる効果が確認でき，建物の熱負荷の低減に有効であることが確認できた。

キーワード：植栽，緑化，ポーラスコンクリート，乾燥，温度分布

1.　はじめに

屋上に緑化を施す場合，常時風と日射により乾燥の影響を受けるため，土壌の飛散と水分不足が起こりやすい。筆者らは，植栽型のポーラスコンクリートを研究・開発し，これまで河川護岸や各種盛土面・切土面，建築物の外部等に適用を図るとともに，耐乾燥性に関する研究を行ってきた[1)~3)]。また，石炭火力発電所で発生する石炭灰の植栽型ポーラスコンクリートへの有効利用方法についても研究を行ってきた[4)]。本研究では，風による飛散がない石炭灰を利用した軽量型の植栽型ポーラスコンクリートを屋上緑化に適用することを目的とし，水分保持性能を増強するため，下部に土層を設けた構造の植栽基盤を製作して乾燥時の植生評価を行った。また，基盤各部の水分状態と温度変化についても計測を行った。

2.　実験概要

2.1　実験の因子と水準

保水性に影響を与える因子として，ポーラスコンクリートの厚みや空隙率，充填保水材の量や種類，ポーラスコンクリート上層の客土の厚みや種類が考えられる。また，ポーラスコンクリートの下部に客土層を設ける場合，その量と種類も保水性に影響を与える。本実験ではポーラスコンクリートの空隙率，充填保水材の量と種類，上層客土の厚みと種類は一定とし，**表－１**の因子を変化させて保水性に違いを持たせ，芝の植生評価を行った。実験の因子と水準の組合せは**表－２**に示す。なお，比較のため，畑土を厚さ15cmで充填した試験体も評価に加えた。

表－１　実験の因子と水準

因　子	水　　準
ポーラスコンクリートの厚み	8cm, 12cm
下層客土	なし(0cm)，あり（5cm）
下層客土の種類	PA パーライト系人工土壌 CA クリンカーアッシュ BI 石炭灰発泡多孔体

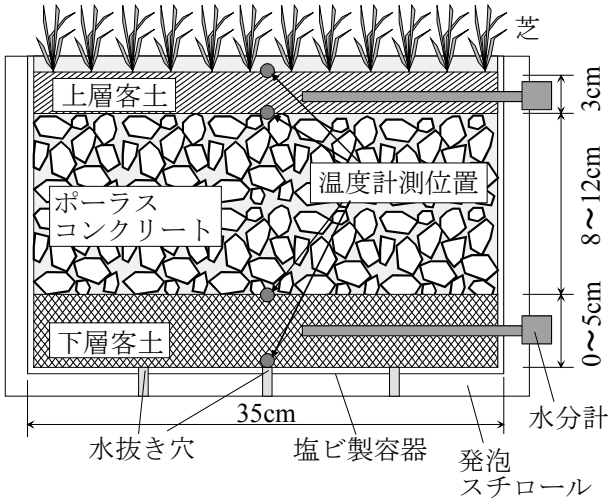
表－２　因子と水準の組合せ

記号	ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄの厚み	下層客土種類	下層客土厚
8-N-0	8cm	なし	0cm
8-PA-5	8cm	PA	5cm
8-CA-5	8cm	CA	5cm
8-BI-5	8cm	BI	5cm
12-N-0	12cm	なし	0cm
12-PA-5	12cm	PA	5cm
12-CA-5	12cm	CA	5cm
12-BI-5	12cm	BI	5cm
客土	―	畑土	15cm

1)　(株)竹中工務店技術研究所　研究主任　（正会員）
2)　電源開発(株)茅ヶ崎研究センター　課長　工修　（正会員）

2.2 試験体の形状

試験体の断面図を**図－１**に示す。試験体は，**図－２**に示すように底面が 35cm×35cm のポーラスコンクリートの下層に保水用の客土層を施し，ポーラスコンクリートの上面に上層客土を固着させ，メンテナンスが比較的軽微なノシバで張芝したものである。周囲と底面は厚さ 5cm の発泡スチロールで覆った。1 条件当たりの繰り返し数は 2 とした。



図－１　試験体断面図

2.3 試験体製作方法

底面に水抜き穴を設けた塩ビ製容器（寸法 35cm×35cm×高さ 20～25cm）の底に実験因子に従って下層客土を詰めた。その上に石炭灰を利用した軽量型のポーラスコンクリートを打設した。試験体上部をシートで覆い，1 週間湿潤状態で養生した後，空隙部への充填が容易な粉砕ピートモスを主成分とするスラリーを保水性材料として空隙量相当分を注入した。表層にピートモス，バーク堆肥，化成肥料，結合剤で構成される材料を所定の比率で混合した客土を塗布して張芝（ノシバ）を押し付けて密着させ，屋外で 5 ヶ月間適宜潅水を行いながら芝を生育させた。比較用の良質土壌は薄層客土と同一の材料を使用し，発泡スチロール製型枠内に充填した。

2.4 コンクリートの使用材料と配(調)合

ポーラスコンクリートの使用材料，および配(調)合を**表－３～表－４**に示す。今回の実験では，石炭灰の有効利用を図るため，結合材としてセメントにフライアッシュを 40%置換するとともに，クリンカアッシュを細骨材として利用した。また，軽量化のために，粗骨材に絶乾密度 0.54g/cm^3 の発泡ガラス造粒物を使用した。配合表を見ると，ポーラスコンクリートの密度は乾燥状態で 0.7t/m^3 程度と非常に軽量であり，屋上緑化に適用する際，屋上スラブの耐荷重条件に適合させやすいと考えられる。

2.5 試験項目および試験方法

(1) ポーラスコンクリートの圧縮強度

ポーラスコンクリートの打設の際にφ10cm，高さ 20cm の試験体を採取し，圧縮強度試験を

表－３　ポーラスコンクリートの使用材料

結合材	普通ポルトランドセメント密度 3.15 g/cm^3 フライアッシュ　密度 2.21 g/cm^3
細骨材	クリンカーアッシュ　絶乾密度 1.78 g/cm^3　表乾密度 1.92 g/cm^3 (最大粒径 3mm)　吸水率 7.82%　FM1.93
粗骨材	発泡ガラス造粒物絶乾比重 0.54　表乾密度 0.60 g/cm^3 (粒径 10-20mm)　吸水率 10.9%　実積率 64.2%
化学混和剤	標準型高性能 AE 減水剤　竹本油脂製 HP-11

表－４　ポーラスコンクリートの配(調)合

粗骨材最大寸法 (mm)	粗骨材最小寸法 (mm)	W/C (wt%)	目標空隙率 (%)	目標フロー* (mm)	単位量 (kg/m^3)					混和剤使用量 (Cx%)
					水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	
20	10	25	25	175*	54.5	156	62	109	332	1.0

*ポーラスコンクリートからモルタル分を 5mm でふるいとった試料のフロー値

行った。試験材齢は，1 週および 4 週，13 週，養生は 20℃の標準水中養生とした。

(2) 各種材料の有効保水量

使用した各構成材料を土質工学会基準 JSF T151-1990 の pF 試験を行い，pF 値 2.0～3.6 の水分を有効保水量として求め，試験版ごとに単位緑地面積当たりの保水量を算出した。

(3) 芝の生育状態

芝の植生評価は,試験体への潅水を中止し，上部に透明のビニールシートで覆いをかけて無潅水状態とし，その後の芝の生育状態を表－５の 6 段階で評価した。

(4) 温度変化・湿度

ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の試験体の各部分の温度および設置場所の気温を熱電対で測定した。

(5) 水分量

各試験体の表層客土および下層客土と比較用の土壌の表層および下層の水分量を誘電率式の水分計で測定した。

3. 実験結果

3.1 ポーラスコンクリートの圧縮強度

試験結果を**表－６**に示す。圧縮強度としては低強度であるが，これは今回使用した軽量骨材の表乾比重が 0.60 と軽く，骨材の強度が低いことが原因であるが，屋上（非歩行）の芝の植栽基盤としては，適用可能な強度であると考えられる。

3.2 各種材料の有効保水量

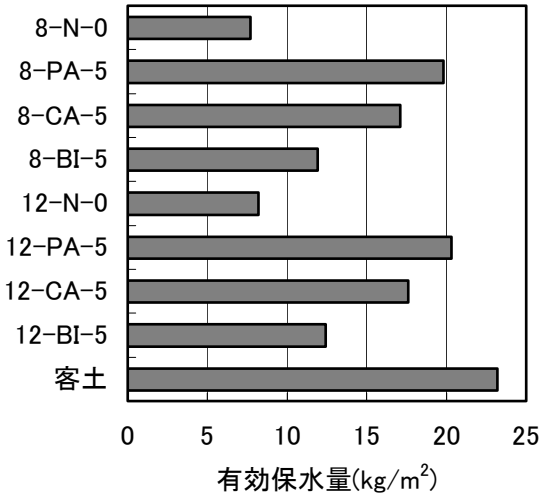
測定した各種材料の有効保水量(pF2.0～3.6)を**表－７**に，試験版の単位面積当りの有効保水量を**図－２**に示す。下層客土の材料を有効保水量の多い順に並べると，パーライト系人工土壌，クリンカーアッシュ，石炭灰発泡多孔体であった。今回製作した試験体では，下層の客土の有効保水量に影響を受け，単位面積当りの有効保水量もこの順序で多くなった。また，下層客土のある試験体の単位面積当りの有効保水量は，下層客土のない試験体と比較す

表－５　植生評価基準

評価点	状態
5	芝全体が旺盛に生育し緑の状態
4	全面緑の状態
3	10%程度の面積が黄変
2	50%程度が黄変
1	90%程度の面積が黄変
0	芝全体が黄変

表－７　各種材料の有効保水量

種　　別	有効保水量 (kg/m^3)
表層基盤	134
ポーラスコンクリート	10
充填保水材	209
クリンカーアッシュ	188
石炭灰発泡多孔体	84
パーライト系人工土壌	243
畑土	110



図－２　各試験体の有効保水量

表－６　圧縮強度試験結果

材齢 1 週強度(N/mm^2)		材齢 4 週強度(N/mm^2)		材齢 13 週強度(N/mm^2)	
試験値	平均値	試験値	平均値	試験値	平均値
1.8 2.2 2.1	2.0	2.3 2.4 2.8	2.5	2.4 2.6 2.5	2.5

ると，およそ 1.5～2.5 倍の値となった。

3.3 芝の生育状況

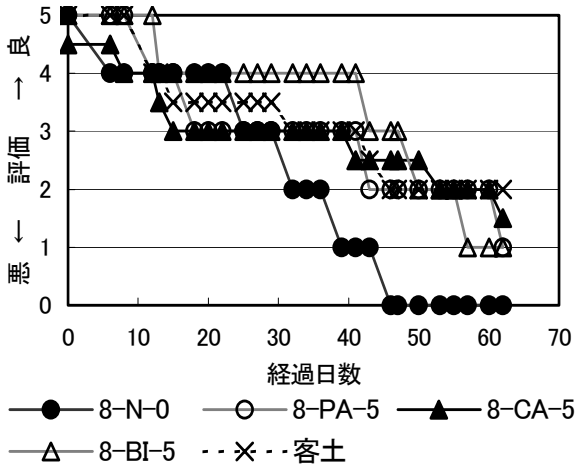
芝を生育させた後に無潅水条件に移行し，その後の生育状況を評価した結果を**図－３～図－４**に示す。ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の場合，客土に比較すると下層客土のない試験体 8-N-0 は，早期に黄変する傾向が認められた。下層客土のある試験体 8-PA-5, 8-CA-5, 8-BI-5 の黄変する時期は，客土の場合とほぼ同程度であった。また，下層客土の種類による違いは，見られなかった。ポーラスコンクリートの厚みが 12cm の場合，客土に比較すると下層客土のない試験体 12-N-0 も，ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の場合と同様に早期に黄変する傾向が認められた。下層客土のある試験版の黄変する時期は，下層客土の種類により違いがあり，石炭灰発泡多孔体を使用した 12-BI-5 はやや黄変が早く，パーライト系の人工土壌を使用した 12-PA-5 は，客土使用時の黄変時期と同等であった。

全般的にポーラスコンクリートの厚みが 8cm と薄いほうが，今回の実験では長期に渡り芝が生育したが，これは，ポーラスコンクリートを根が貫通し，下層客土に達しやすかったためと考えられる。

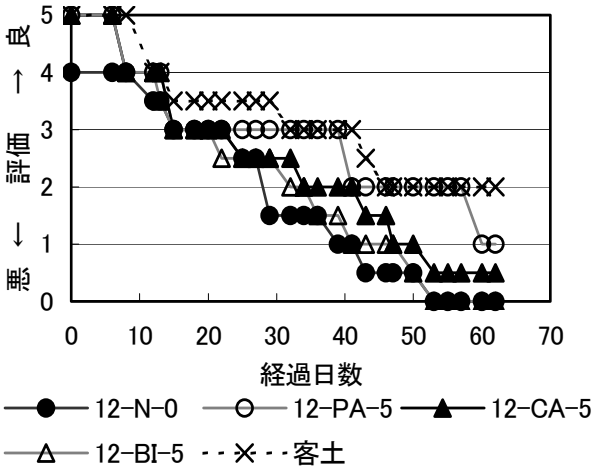
3.4 各部の温度変化

測定結果のうち，植生評価開始後 20 日前後の気温を**図－５**に，試験体 8-N-0 の温度測定結果を**図－６**に，試験体 8-CA-5 の温度測定結果を**図－７**に示す。表層客土の上は，直射日光を受ける状態であり，試験体 8-N-0 の試験体表層は日中，気温より高くなる傾向が見られた。表層客土の下部でやや温度上昇は小さくなり，ポーラスコンクリートや下層客土の下部では，温度変化は少なかった。試験体 8-CA-5 の試験体表層は日中，気温と同程度の温度であり，最高温度は 8-N-0 より 10℃程度低かった。同様に試験体 8-CA-5 の表層客土の下部の最高温度は，試験体 8-N-0 より 5℃程度低かった。

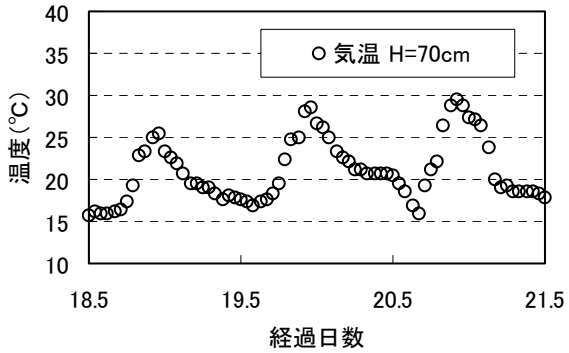
図－８は，ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の各試験体のポーラスコンクリートの下部の温度変化を比較したものであるが，下層に客土のない試験体 8-N-0 と下層の客土の有効保水量が比較的少ない 8-BI-5 は，8-PA-5 や 8-BI-5



図－３　植生評価結果
（ポーラスコンクリート厚が 8cm の場合）



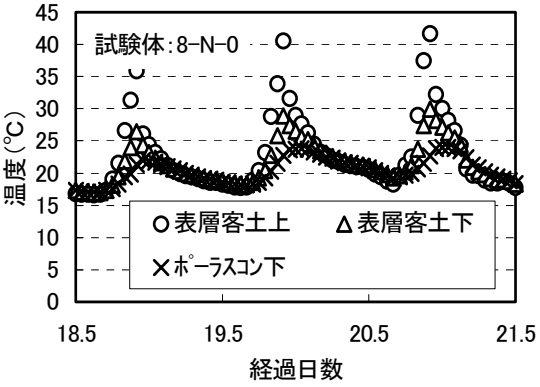
図－４　植生評価結果
（ポーラスコンクリート厚が 12cm の場合）



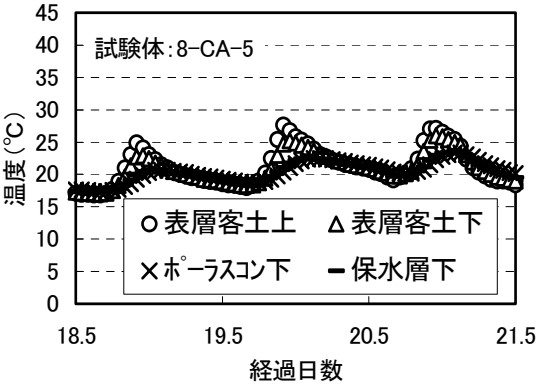
図－５　気温測定結果

に比較して日中の最高温度で 2℃程度高い傾向が見られた。

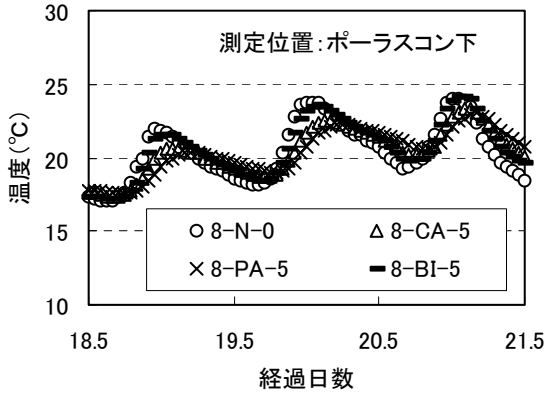
このようにある程度有効保水量の高い客土をポーラスコンクリートの下部に施すことにより，植栽基盤各部の温度を低下させる効果があり，夏季の冷房に要するエネルギー負荷の低減を図ることができると考えられる。



図－６　温度測定結果
（試験体が 8-N-0 の場合）



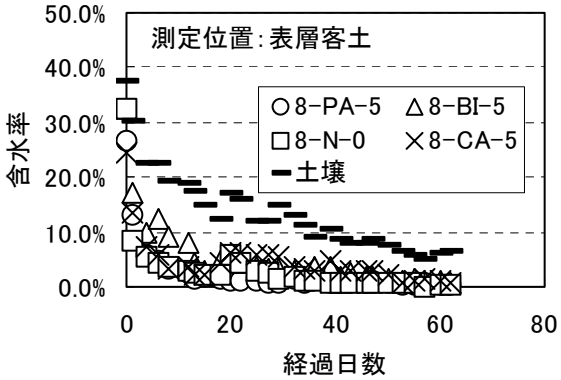
図－７　温度測定結果
（試験体が 8-CA-5 の場合）



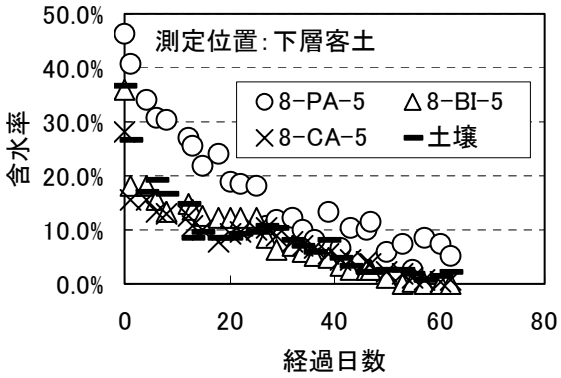
図－８　温度測定結果
（ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の場合）

3.5 試験体表層客土および下層客土の保水量

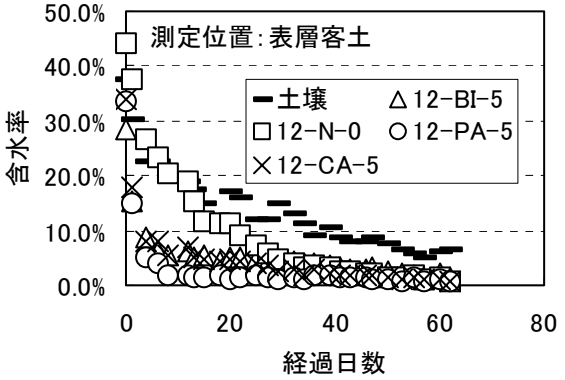
各試験体の表層客土および下層客土の含水率の変化を比較用の客土の含水率の変化とともに図－９～図－１２に示す。ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の場合の表層客土の含水率は，試験開始直後から急激に低下し，試験体間の差はほとんどなかった。比較用の客土は，含水率の低下が最も緩慢であった。下層客土の含水率の低下は，表層客土より変化が緩慢で，比較用の客土と同程度以上の保水性を示した。中でも有効保水量の高い試験版 No.8-PA-5 は，最も含水率の低下が緩慢であった。比較用の客土では，下層の水分が上層より先に低下する現象が観察された。これは，根の分布が試験版の下層に集中し，結果として植物の蒸散により日中の温度変化を低く抑えていたこと推察される。



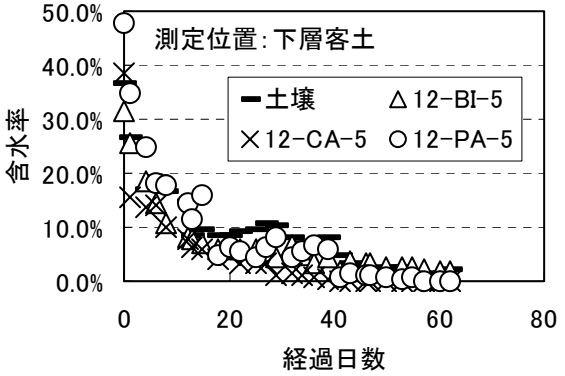
図－９　表層客土の水分量測定結果
（ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の場合）



図－１０　下層客土の水分量測定結果
（ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の場合）



図－１１　表層客土の水分量測定結果
（ポーラスコンクリートの厚みが 12cm の場合）



図－１２　下層客土の水分量測定結果
（ポーラスコンクリートの厚みが 12cm の場合）

ポーラスコンクリートの厚みが 12cm の場合の表層客土の含水率は，12-N-0 の減少の度合いが緩慢であること以外は，ポーラスコンクリートの厚みが 8cm の場合と同様の傾向を示した。

4. まとめ

上述の試験の結果について総合的に考察を加えると，以下の点が明らかとなった。

(1) ポーラスコンクリートの下層に有効保水量の高い客土を設けた構造とすることにより，芝が無潅水で生育できる期間は長くなる。

(2) 無潅水での生育期間が長くなったのは，表層客土の水分量の変化に差がないことから，ポーラスコンクリートを貫通した根が，下層の客土から直接水分を吸収できたためと考えられる。

(3) ポーラスコンクリートの下層客土の種類は，植生状況にあまり影響しなかったが，有効保水量により，植栽基盤各部の温度に差があり，パーライト系の人工土壌やクリンカーアッシュを下層客土に利用した場合，温度変化が小さかった。

(4) 下層客土の含水率の変化の緩慢さは，比較用の土壌と同等以上であり，無潅水化での下層客土を施した試験体の植生の変化が，土壌と同等であったことと一致する。従って，下層客土が根に水分の大半を供給していたと考えられる。

(5) 植生の維持の面ではポーラスコンクリートの厚さは 8cm 程度に薄くした方が，下層客土への根の貫通が容易であり，かつ軽量であるため，屋上緑化基盤として適している。

5. さいごに

以上のように，石炭灰を利用した植栽型のポーラスコンクリートの下層に客土を組み合わせた構成の緑化基盤を屋上緑化に利用すると，植生の維持，建物への熱負荷の緩和に貢献できることが確認できた。

今後，実際に施工等を通じて，その効果を検証したい。

参考文献

1) 柳橋邦生他，緑化コンクリートの河川護岸への適用，コンクリート工学協会年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1017-1022，1996

2) 柳橋邦生他，緑化コンクリートの研究(その9)建築物外部の急斜面への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.735-736, 1996.9

3) 柳橋邦生他，緑化コンクリートに成育した植物の耐乾燥性に関する研究，コンクリート工学協会年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1039-1044，1997

4) 石川嘉崇，石炭灰を利用した植栽型ポーラスコンクリートの開発、日本建築学会技術報告集，第 12 号，pp.31-34，2001