

1. 序論 東京の年平均気温は、過去 100 年の間で約 3.0℃の気温上昇が観測されており、他の大都市の平均気温の上昇が 2.4℃、中規模の都市でも 1.0℃の気温上昇が観測されている¹⁾。これらの気温上昇は、コンクリートやアスファルトなどの「地表面被覆の人工化」や車などによる「人工排熱の発生」が引き起こすヒートアイランド現象によるものである。

東京の大手町では、1876 年の気象台設置以来、気象観測が続けられてきているが、1950 年頃を境に冬日（最低気温が 0℃未満の日）が減少しつづけ、逆に熱帯夜（最低気温が 25℃以上の夜）の日数が 1970 年頃の約 2 倍程度に増加した傾向にある²⁾。このようにヒートアイランド現象による都市の温暖化は年々進行しており、その対策は喫緊の課題である。

このヒートアイランド現象を抑制するために、さまざまな対策が施されている。たとえば屋上緑化や壁面緑化、建築物の素材の改良、人工排熱の抑制、街路樹や都市公園といった緑地の積極的な利用などである³⁾。そのなかでもヒートアイランド対策として期待されているのが都市の緑地である。緑地は日中については蒸発潜熱、すなわち植物や土壌からの水分蒸発による冷却により、入射エネルギーを消去し、また夜間については高い放射冷却効果により気温を低下させる⁴⁾ため、「クールスポット」と呼ばれる周囲より低温の空間を創出するからである。

樹林地、芝生地のような緑地では日中の水の蒸発は盛んである。芝生地のようなところでは夏季の日中に 4~5mm 程度の蒸発散があるが、水の蒸発熱は 540cal/g なので 1 m²あたり、1 日に約 2,700kcal の熱を奪っていることになる。また樹林地の蒸発散量は一般に芝生地よりも大きく、樹林地内では芝生地よりもさらに低温となる。測定場所、測定時間により温度差はまちまちであるが、最大で 5~7℃程度、一般的に 2~3℃程度の気温差が観測されている⁵⁾。したがって都市の緑地はヒートアイランド対策として非常に効果的といえる。

しかし、緑地では植物の生育がある以上、それらの栄養となる窒素やリンを与える必要がある。撒かれた肥料に含まれる窒素の多くは、硝化菌の活動により硝酸性窒素(NO₃⁻-N)として土壌中に備蓄されているが、硝酸イオンは水に溶けやすく土壌に保持されにくいいため、河川や地下水へ流出しやすい。またリン酸イオンは土壌に吸着される特徴があるので地下水を汚染しにくい、降雨時に土壌が侵食されると土粒子とともに河川へ流出する。このように施肥による窒素やリンが原因で水質が汚濁される面源負荷の問題は従来から指摘されてきている⁶⁾。この面源負荷の問題は特に農地などで顕著であり、土壌診断に基づく施肥や施肥位置の改善など、さまざまな負荷削減の技術が提案されている⁷⁾。都市緑地の場合、汚濁負荷は農地ほど大きくないが、周囲の水環境に与える影響が懸念されることは変わらない。

しかしながら、現在のヒートアイランド対策はこの汚濁負荷を考慮して行われていない。そこで今回、ヒートアイランド緩和のためのクールスポットの形成と汚濁負荷緩和の両立を目指し、保肥力・保水力で注目されている人工ゼオライトを用いて屋上緑化を行った。人工ゼオライトは、火力発電所で微粉炭を燃焼した後に発生するフライアッシュに、アルカリ処理を施した多孔質な球状粒子であり、陽イオン交換機能を有する。そのため栄養塩を吸着し、流出を抑制すると考えられている。また吸着した栄養塩を徐々に放出していくため、植物の生長を促進する効果もあると考えられている。本研究では、これらの人工ゼオライトの効果が、汚濁負荷緩和にどのように貢献するかを確かめるため、栽培植物や木本植物を用いて屋上緑化を行い、流出雨水の検査を行った。さらに植物の生長を測定することによって植物体への栄養塩の吸収量について測定を行った。また屋上緑化がどの程度クールスポットとして機能し、ヒートアイランド現象を緩和するかを、コンクリート面と緑化面の温度変化を比較することで調査した。

2. 実験材料 実験にはマメ科ダイズ属ダイズ(*Glycine max*)を用いた。また土壌は表 2-1 に示す 8 区画を使用した。各区画は 1500mm×1500mm の正方形とした。ただし、土壌の厚さが 60mm となるように枠組みを調節した。これらの枠組みを 6 階建ての建造物の屋上に配置し実験を行った。

各区画の土壌には全て腐葉土を用いた。この腐葉土は、平成 18 年の秋に回収した落ち葉を予め半年ほど発酵させておいたものである。区画 1 と区画 5 には、発酵鶏糞(株式会社 GI)を土壌体積の 4%混入した。区画 2、区画 3、区画 6、区画 7 では尿素複合バーディージャー(株式会社 GI)を用いた。最終的

表 2-1 実験に用いた土壌

区画No.	基質	肥料	ゼオライト
1		有機	
2		化学(追肥無)	有
3		化学(追肥有)	
4		-	
5	腐葉土	有機	
6		化学(追肥無)	無
7		化学(追肥有)	
8		-	

に撒いた肥料の総量が一致するように、区画2と区画6には化成肥料大さじ約6.75杯を撒いたあと追肥をせず、区画3と区画7には化成肥料大さじ約1.35杯を撒き、その後毎月1回ずつ4ヶ月間追肥をした。さらに区画1から区画4まではゼオライトを土壌体積の2%混入した。区画5から区画8にはゼオライトを混入しなかった。

3. 実験方法 a. 重量測定 平成19年6月28日に、各区画にダイズ(株式会社アタリヤ農園生産種子)を5個ずつ播種した。播種後、土壌から水が流出しない程度に毎日水を与えた。全ての区画で完全に種子ができ収穫が完了した後、平成19年12月18日に刈取りを行った。刈取った試料は80℃で48時間以上乾燥させた後、重量を測定した。さらにダイズの種子は自然乾燥させた後、重量を1個ずつ測定した。

b. 流出雨水検査 雨水採取は十分に降雨のあった7月10日~15日と9月12日、16日、10月19日に行った。雨水採取は次のような手順で行った。流出する程度の雨を確認できたら、まず1回目の採取を行い、その後雨が止むまで1時間ごとに採取を続けた。雨が止んだ後1回採取し、それを最後の採取とした。採取した試料は微生物などによる分解が進まないように、-34℃で冷凍保存しておいた。測定時は冷凍しておいた試料を自然解凍し、TPN-10(東亜DKK株式会社)にかけ、

それぞれの流出雨水のNO3-N, NO2-N, NH4-N, PO4-Pの濃度を測定した。測定値と気象庁のホームページにある1時間ごとの降雨量から、その時間の流出量を算出した。

c. 温度測定 一日のうちで最高気温が観測されやすい午後2時頃に、コンクリート面上と土壌面上の温度計を確認した。この温度計は、予め実験開始時に置いておいたものである。実験開始時から11月下旬まで毎日行うことで、コンクリート面上と土壌面上の温度推移を測定した。

4. 実験結果 a. 重量測定結果 測定結果を図4-1に、検定結果を表4-1に示した。平均乾燥重量と平均種子重量はゼオライトを混入し、施肥した区画(区画1~3)とゼオライトを混入せず、施肥した区画(区画5~7)を比較すると、ゼオライトを混入しなかった区画の方が重量は大きくなった。また区画4(肥料無し、ゼオライト有)と区画8(肥料無し、ゼオライト無)において、平均乾燥重量と平均種子重量は比較的差がなかった。1個体あたりの平均種子重量は、ゼオライトを混入した区画では、肥料無しの区画(区画4)、化学肥料(複)の区画(区画3)、化学肥料(単)の区画(区画2)、有機肥料の区画(区画1)順に総重量が大きかった。逆にゼオライトを混入しなかった区画では有機肥料の区画(区画5)を除いて、化学肥料(単)の区画(区画6)、化学肥料(複)の区画(区画7)、肥料無しの区画(区画8)の順に平均重量が大きかった。平均種子個数は、有機肥料を施肥した区画(区画1, 5)を除いて、ゼオライトを混入しなかった区画より混入した区画の方が、数が多い傾向があった。

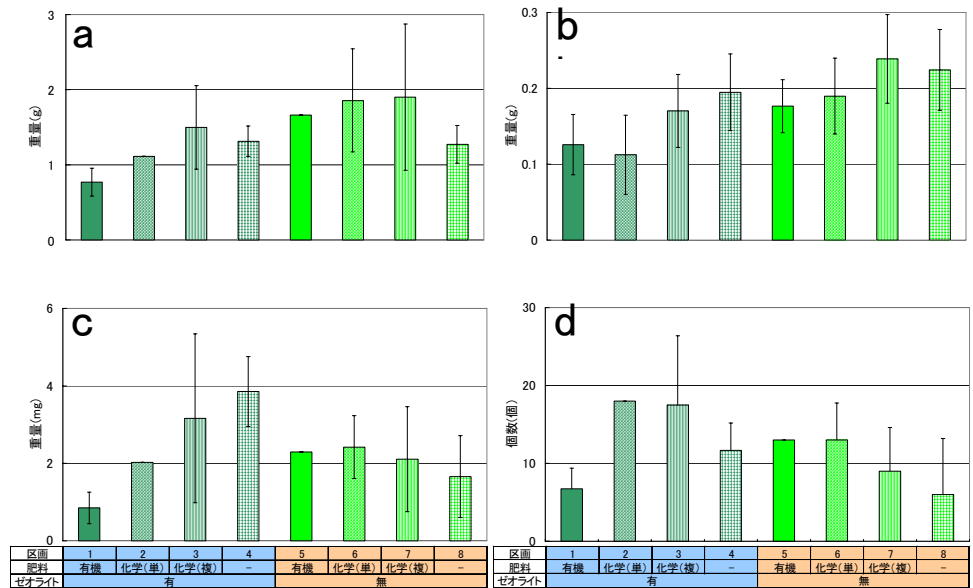


図4-1 各区画間の比較 a, b, c, dはそれぞれダイズの平均乾燥重量, 平均種子重量, 1個体あたりの平均種子重量, 平均種子個数のグラフを表す

表4-1 ダイズの分散分析結果 a, b, c, dはそれぞれ平均乾燥重量, 平均種子重量, 1個体あたりの平均種子重量, 平均種子個数を示す。zeoraito, fertilizers, zeoraito:fertilizersはそれぞれゼオライトの効果, 肥料の効果, ゼオライトと肥料の相互効果を表す。

		a	b	c	d
区画1,5	zeoraito	0.02213 *	0.000358 ***	0.05093 NS	0.1235 NS
区画2,6	zeoraito	0.3772 NS	0.2769 NS	0.6767 NS	0.3904 NS
区画3,7	zeoraito	0.4921 NS	0.266 NS	0.4012 NS	0.1219 NS
区画4,8	zeoraito	0.8333 NS	0.05318 NS	0.03469 *	0.04192 *
	zeoraito	0.0182 *	0.6361 NS	0.01428 *	0.1407 NS
区画1,2,5,6	fertilizers	0.54424 NS	0.5694 NS	0.26626 NS	0.12 NS
	zeoraito:fertilizers	0.86122 NS	0.1362 NS	0.35076 NS	0.1137 NS
	zeoraito	0.08196 NS	0.3505 NS	0.8709 NS	0.47933 NS
区画1,3,5,7	fertilizers	0.1872 NS	0.1029 NS	0.1048 NS	0.11208 NS
	zeoraito:fertilizers	0.59621 NS	0.1366 NS	0.2261 NS	0.09778 NS
	zeoraito	0.02717 *	0.215991 NS	0.212444 NS	0.16126 NS
区画1,4,5,8	fertilizers	0.09445 NS	0.006537 **	0.015481 *	0.05268 NS
	zeoraito:fertilizers	0.01476 *	0.675096 NS	0.009268 **	0.01699 *
	zeoraito	0.3061 NS	0.2503 NS	0.4276 NS	0.08717 NS
区画2,3,6,7	fertilizers	0.7713 NS	0.0966 NS	0.9593 NS	0.39143 NS
	zeoraito:fertilizers	0.7354 NS	0.6851 NS	0.4623 NS	0.67932 NS
	zeoraito	0.2665 NS	0.27031 NS	0.03557 *	0.02422 *
区画2,4,6,8	fertilizers	0.2875 NS	0.04762 *	0.50129 NS	0.19853 NS
	zeoraito:fertilizers	0.2922 NS	0.05574 NS	0.04156 *	0.25962 NS
	zeoraito	0.4964 NS	0.86635 NS	0.05369 NS	0.01105 *
区画3,4,7,8	fertilizers	0.2639 NS	0.37107 NS	0.81658 NS	0.88282 NS
	zeoraito:fertilizers	0.5456 NS	0.07115 NS	0.32156 NS	0.47987 NS

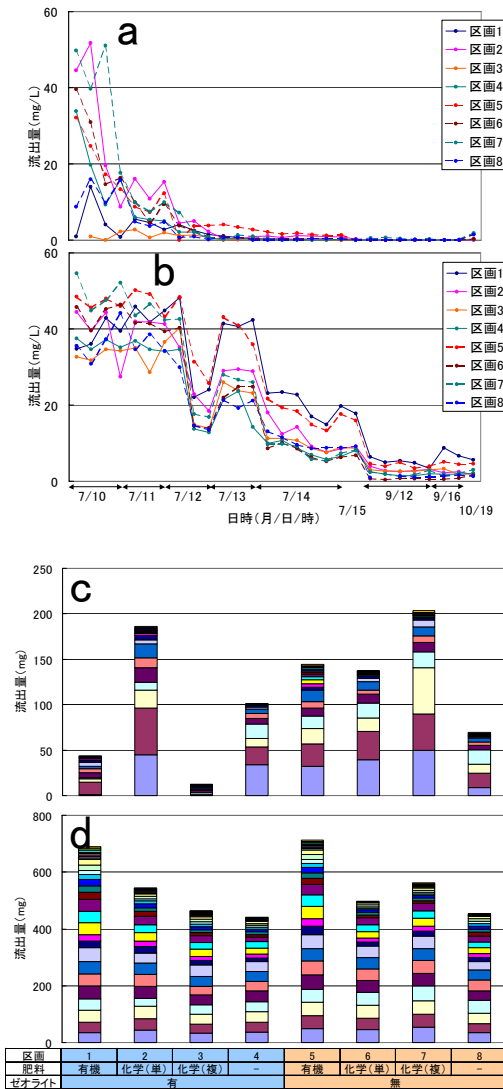


図4-2 硝酸態窒素とリン酸態リンの流出の推移と累積 aは硝酸態窒素の流出の推移, bはリン酸態リンの流出の推移, cは硝酸態窒素の流出量の累積, dはリン酸態リンの流出量の累積を表す。

リン酸態リン (PO₄-P)

有機肥料を施肥した区画 1 (有機肥料, ゼオライト有) と区画 5 (有機肥料, ゼオライト無) は他の区画に比べ流出量が多い傾向があった。また, どの区画においても, リンの流出量は窒素の場合に比べ持続し, 9月になっても流出が続いていた。

流出量の累積も有機肥料を施肥した区画 1 (有機肥料, ゼオライト有) と区画 5 (有機肥料, ゼオライト無) において高かった。ゼオライトを混入した区画 (区画 1~4) とゼオライトを混入しなかった区画 (区画 5~8) を比較すると, どの組み合わせも大差はみとめられなかった。

c. 温度測定 実験開始時から 11 月下旬までの土壌面とコンクリート面における午後 2 時の温度推移の測定結果を図 4-3 に示した。また土壌面とコンクリート面の温度の 5 区間移動平均も表示した。全体的にコンクリート面より土壌面において 3~8℃程温度が低い結果となった。特に, 気温の上昇が目立つ 8 月半ばと 9 月下旬はその差は大きくなった。逆に梅雨が明けきらない 7 月半ばまでは土壌面とコンクリート面の温度差はほとんどみられなかった。

5. 考察 a. 重量測定

区画 1 (有機肥料, ゼオライト有) と区画 5 (有機肥料, ゼオライト無) では区画 5 よりも区画 1 の方が平均乾燥重量と種子 1 個あたりの重量が有意に小さくなった(平均乾燥重量: P<0.002213, 種子 1 個あたりの重量: P<0.0003584)。ダイズは窒素分が多いと生長阻害が

b. 流出雨水検査

図 4-2, 表 4-2 に測定結果, 検定結果を示した。**硝酸態窒素 (NO₃-N)** 区画 2 (化学肥料(単), ゼオライト有) と区画 7 (化学肥料(複), ゼオライト無) において最初の 2 日程度は比較的流出量が多かった。しかし 3 日程雨が降り続けると, どの区画でも流出はほぼなくなった。

表4-2 流出量推移の共分散分析結果 a, bはそれぞれ硝酸態窒素, リン酸態リンを示す。t, zeoraito, fertilizers, zeoraito:fertilizersはそれぞれ時間の効果, ゼオライトの効果, 肥料の効果, ゼオライトと肥料の相互効果を表す。

		a	b
区画 1,5	t	0.0020257 **	2E-16 ***
	zeoraito	0.0001323 ***	0.6106 NS
区画 2,6	t	2.00E-16 ***	2.00E-16 ***
	zeoraito	0.01577 *	0.01062 *
区画 3,7	t	0.058 NS	3.946E-16 ***
	zeoraito	0.1053 NS	0.9159 NS
区画 4,8	t	0.005536 **	2E-16 ***
	zeoraito	0.397379 NS	0.8294 NS
区画 1,2,5,6	t	0.0001735 ***	2.2E-16 ***
	zeoraito	0.0760806 NS	0.0177 *
fertilizers		0.8932747 NS	1.155E-15 ***
	zeoraito:fertilizers	0.0011838 **	0.05733 NS
区画 1,3,5,7	t	0.0016331 **	2.2E-16 ***
	zeoraito	0.0005197 ***	0.7154 NS
fertilizers		0.2998262 NS	7.956E-08 ***
	zeoraito:fertilizers	0.6865936 NS	0.8504 NS
区画 1,4,5,8	t	2.97E-05 ***	2.20E-16 ***
	zeoraito	0.068793 NS	0.7191 NS
fertilizers		0.553038 NS	6.559E-09 ***
	zeoraito:fertilizers	0.004912 **	0.8837 NS
区画 2,3,6,7	t	0.008058 **	2.2E-16 ***
	zeoraito	0.735115 NS	0.0456587 *
fertilizers		0.35971 NS	0.0001642 ***
	zeoraito:fertilizers	0.059309 NS	0.0625216 NS
区画 2,4,6,8	t	0.000325 ***	2.2E-16 ***
	zeoraito	0.256796 NS	0.0279765 *
fertilizers		0.591315 NS	0.0004282 ***
	zeoraito:fertilizers	0.951883 NS	0.0634422 NS
区画 3,4,7,8	t	0.001845 **	2E-16 ***
	zeoraito	0.653941 NS	0.8359 NS
fertilizers		0.853501 NS	0.6895 NS
	zeoraito:fertilizers	0.034101 *	0.9544 NS

の比較では, ゼオライトを混入しなかった区画 (区画 6, 8) の方が流出量の累積は少なかった。

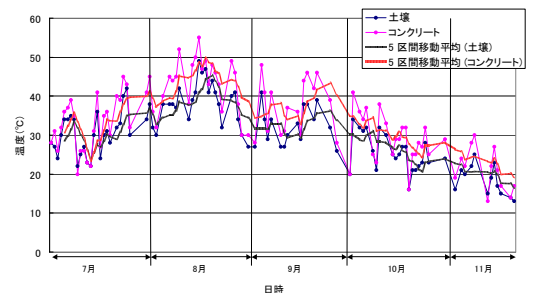


図4-3 土壌面とコンクリート面における午後2時の温度推移

引き起こされるため、有機肥料を施肥した区画ではこのような結果になったと考えられる。それ以外の区画では乾燥重量は肥料による有意差もゼオライトによる有意差も認められなかった。ダイズは比較的冷涼な気候を好む⁸⁾が、実験時の環境は過酷であったため差が出るには十分ではなかったと考えられる。また種子1個あたりの重量では比較的施肥量の多い区画(区画1, 2, 5, 6)と比較的施肥量の少ない区画(区画4, 8)との間に肥料による有意差が認められた($P < 5.018E-16$)。これは窒素分が比較的少なかったため、成長障害が比較的起こらなかったためと考えられる。一方で1個体あたりの種子個数は、肥料無しの区画(区画4, 8)でゼオライトによる有意差が認められた($P < 0.04192$)。これにより窒素分が多い場合、ゼオライトが混入されていても、有意な差が出るほど活性がよくないことが示された。

種子1個あたりの重量においても窒素分の多い区画(区画1, 2, 5, 6)より比較的少ない区画(区画4, 8)の方が有意に大きくなった。これも窒素分が多いために起こった生長障害と考えられる。

b. 流出雨水検査 硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 区画1(有機肥料, ゼオライト有)と区画5(有機肥料, ゼオライト無)では区画1の方が流出量の推移と流出量が有意に小さく($P < 0.0001323$)、区画2(化学肥料(単), ゼオライト有)と区画6(化学肥料(単), ゼオライト無)では区画6の方が流出量の推移と流出量が有意に小さかった($P < 0.01577$)。それ以外の区画ではゼオライトによる有意差はなかった。肥料は土壤に施肥されるとアンモニア化成菌によりアンモニウムイオンに分解される。その後、硝酸化成菌により亜硝酸イオン、硝酸イオンの順に酸化される。ところが硝酸化成菌はpHがおおよそ7.8で最も活発に働き、pHがそれより高くても低くても働きが鈍る¹¹⁾。また肥料の分解、酸化の過程で気化し、 N_2 として大気中に出ていく窒素量も少なくない。区画1(有機肥料, ゼオライト有)ではゼオライトを混入したため、pHが8.5以上と高めであった。そのため区画5(有機肥料, ゼオライト無)に比べ分解されたアンモニウムイオンが酸化されにくい。その結果比較的多くの窒素がアンモニウムイオンの状態で残り、ゼオライトに吸着されたり、気化したりして土壤中で硝酸イオンの状態になりにくい。これより区画5より区画1の方が有意に流出量の推移と流出量が小さくなったと考えられる。

区画2(化学肥料(単), ゼオライト有)でもゼオライトを混入したためpH8.5以上と高めであった。しかし化学肥料は有機肥料に比べて分解の速度が遅いため、硝酸化成菌の働きが鈍っていたとしても分解されたアンモニウムイオンの多くは硝酸イオンへ酸化される。そのため区画2と区画6の比較では有意な差がないと考えられる。ところが区画2の方が流出量の推移と流出量が有意に大きくなっていて、今回の実験では土壤に栄養塩を継続して供給する腐葉土を用いたため区画2と区画6の比較では予想に反した結果となったと考えられる。また何らかの影響で区画2の分解速度が遅くなった可能性もある。明確な理由を導くには実験の回数を重ねる必要がある。

区画3, 4, 7, 8では比較的肥料分が少ないため、ゼオライトの有無による有意差が出るところに及ばなかったと考えられる。またゼオライトと肥料の相互効果は区画1において比較的高い効果が認められた。これは区画1と区画5の比較のところで述べたような理由が考えられる。硝酸態窒素に関してはゼオライトの吸着効果は肥料の種類を選ぶことが示唆された。

リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) リンは土壤に吸着される特徴がある。そのため窒素に比べると比較的流出が緩慢となり9月になっても流出雨水の中から検出されたと考えられる。また、ほぼ全ての区画においてゼオライトの有無による有意差は確認されなかった。ゼオライトが吸着するのは陽イオンであり、リン酸イオンは陰イオンであるためこのような結果になったと考えられる。また比較的肥料分の多い区画(区画1, 5)では流出量の推移と流出量が有意に大きくなった。有機肥料には化学肥料に比べて多くのリンが含まれていたため、このような結果になったと考えられる。

c. 温度測定 全体的にコンクリート面より土壤面において3~8°C程温度が低い結果となった。これは土壤面では日射による熱収支の中に、コンクリート面にはない、蒸発潜熱が影響していると考えられる。

また、土壤からの蒸発潜熱ほどではないが、植物の蒸散の可能性もある。植物の蒸散は午前中からおこり始め、正午を境に減少する⁹⁾が、午後2時での蒸散は全く無いということはない。これより土壤からの蒸散効果に加え、植物からの蒸散効果もあつてコンクリート面より土壤面の温度が低下したと考えられる。

6. 結論 今回の実験ではヒートアイランド緩和と面源負荷緩和を両立させるためゼオライトを用いた屋上緑化を行った。ヒートアイランドの緩和と面源負荷緩和に関しては緑化効果とゼオライトの吸着効果により比較的和らいだ結果となった。しかし夏の植物の生育環境は非常に過酷であったため、植物のゼオライトや肥料との相性に関する実験では予想したほど効果は明確にはでなかった。ゼオライトや肥料との相性を正確に実験するならばその植物に適した環境で行うべきであった。また実生は微環境で条件が異なるため、個体数を多くして実験する必要があつた。今後屋上緑化はヒートアイランド緩和のため広く普及すると予測されるが、夏の過酷な環境を考慮して厳しい環境でも生育可能な植物を使用すべきであろう。