

## ノシバを用いた節水型都市緑化

～増加する屋上緑化への警鐘！遺伝子保護と少水緑化への挑戦～

京都府立桂高等学校 草花クラブ・TAFF

### 1. 序 論

日本では京都議定書でのCO<sub>2</sub>6%の削減目標を達成するために、都市部のヒートアイランド現象を緩和させエネルギー消費の抑制やCO<sub>2</sub>の削減を目的として、建物に屋上緑化・壁面緑化を推進している。中でも屋上緑化の面積は、2000年から8年間で14倍と都市の緑化面積は増加の一途をたどっている。

屋上緑化面積の増加は、都市の温度上昇を抑制しエネルギーの消費を抑えるには大変効果的な方法であるが、重量や水の消費の問題も抱えている。地震の多い日本においては耐震荷重の問題で重量軽減の必要がある上に、水消費の増加を招くことになる。日本の年平均降水量は1700mm、世界平均の2倍と豊かな雨量に恵まれているが、人口比に換算すると一人当たり3300m<sup>3</sup>と世界平均の3分の1で、都市部に至っては905m<sup>3</sup>と中東・アフリカ諸国に匹敵している。また、貯水量も73m<sup>3</sup>であり、ロシア5455m<sup>3</sup>やアメリカ3384m<sup>3</sup>どころか中国392m<sup>3</sup>やインド189m<sup>3</sup>に比べて利用量・保存量ともに少ない。日本では水の消費を抑えるために地下水や雨水・一度使用された水をろ過した再生水を緑地へ使用することも行われているが、設備等にコストがかかり根本的な問題解決とはなっていない。本研究は、屋上緑化の促進と水消費の抑制を植物面から取り組んだ研究である。

軽量・少水化を目的とした緑化はセダム植物を使用した屋上緑化が代表的であるが、セダムを含むCAM植物は25℃以上の気温になると、気孔を閉じて蒸散活動を行わないので、建物の温度抑制効果ほとんど無く25℃以上の地域には不向きである。建物の温度抑制と少水化を実現するため、セダム植物の4倍の蒸散量を持つ芝植物による緑化が有効だが、40℃を越す夏季の気温や-5℃以下の冬季の低温や耐旱・耐湿性に適応する芝植物は少ない

(参考文献6)。

研究対象とした*Zoysia japonica* (ノシバ) は日本を中心に中国・韓国沿岸部に古来より自生する植物である。*Zoysia*属はイネ科の芝植物で、熱帯性のC4植物で高温・乾燥・塩害に強い性質を持ち、アジア・オセアニアを中心に22種が確認されている。*japonica*は*Zoysia*属生息地域最北限の日本固有の植物であり、唯一耐寒性を持つ植物である。特に冷帯気候帯に属する北海道に自生地を持つことは、この植物の環境適応能力が極めて高いことを意味している。本研究ではこの植物の能力を最大限に活用し引き出すことで、今までに無い軽量・少水の緑化システムの開発を行いKatsura New Easy Technology of Roof-top Landscape (K-NET) を開発した(写真1)。この研究は緑化の増加と水の問題を解決するだけでなく、軽量化を実現することにより多くの建物での利用が可能となり、都市化する途上国でのヒートアイランド化の抑止にも繋がると私達は考える。



写真1 桂高校の屋上緑化試験圃場

## 2. 研究材料と研究方法

### 2.1 軽量・小水屋上緑化システム

#### Katsura New Easy Technology of Roof-top Landscape (K-NET) の製作 (図1)

K-NETを開発・製作する際に留意した点は以下の通りである。

- 1、一般家屋の屋上緑化の耐震荷重限度60kg/m<sup>2</sup>以下をクリアすること
- 2、温度差・乾湿差の大きい日本の屋上環境変化に適応する植物を選定すること
- 3、屋上緑化の増加に比例する水の消費量を抑えた少水化を実現すること

緑化重量の多くは土壌及びそれに含まれる水の重さであり、軽石質の屋上軽量土を使用したとしても満水状態では柵の高さ6cm/m<sup>2</sup>が限度である。地震の多い日本において、一般家屋の耐震荷重60kg/m<sup>2</sup>以下にするためには土壌を用いない緑化基盤を考える必要がある。新しい緑化基盤のヒントは日本在来植物で緑化植物として用いられる *Zoysia japonica* (ノシバ) であった。この植物は火山地域や海岸の岩盤地帯に多く自生しており、土壌をあまり必要としない特徴を持っている。

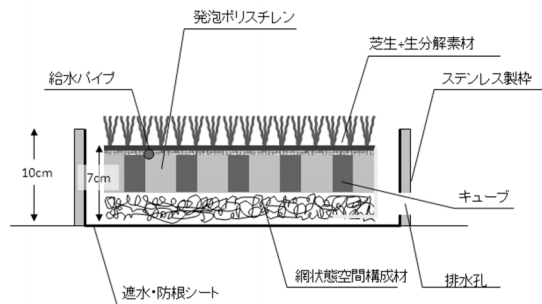


図1 Katsura New Easy Technology of Roof-top の断面図

土壌は、植物根の展開を容易にして植物体を支える役割と水の保水・肥料保持・断熱効果などの役割を持つが、本研究では土の機能を他の素材で代替することで軽量化を目指した (図1に断面図を添付)。水を給水し植物に分配する機能は導水シート (不織布) で補い、保水と排水及び植物体を支える機能は、建築用発泡断熱素材のスチレンボードと筒状のキューブと命名した植物性素材の給排水棒を組み合わせたハイブリッドベースマットを開発・製作した (写真2)。スチレンボードは日本ではリサイクル断熱材として利用され、キューブは

竹・葦・ヤシの繊維を圧縮加工して製作した。これらを組み合わせた屋上緑化システムを構築し、5年間の実用化テストを行った。本研究では屋上及び屋上緑化面及び緑化面下室内に複数の温度計測装置を設置して *Zoysia japonica* の環境適性及び緑化効果の調査を行った。



写真2 左：ハイブリッドベースマットの制作 中：キューブ 右：K-NETの設置

### 2.2 *Zoysia japonica* の種子繁殖による芝マット化

*Zoysia japonica* は発芽率が極端に悪く、種子繁殖での栽培は行われていない。*japonica* を使った緑化は栄養繁殖で芝マット化されたものを使用する。栄養繁殖は畑に芝を株分けしたものを播き、年数をかけて展開させて土壌ごと切り取って使用するため土壌が付着しており、導水シートやキューブの目詰まりを招く。そこで、竹・葦・ヤシの繊維を圧縮した生分解マットを土壌の代用として種子による芝マット化が必要であった (写真3)。種子を使う場合、*japonica* の種子が外えいと内えいの2つの種皮で覆われており、表皮が固く水が侵入しにくく発芽率が10%と低い。高槻成紀氏の「鹿の生態学」(2006年 参考文献5) によると *Zoysia japonica* の種子は鹿に摂食され糞に混入することで発芽率を高めることが判明した。種子の摂食後の糞残留率はイタリアンライグラスの7%、オーチャードグラスの0.6%に比べて38.0%と高く、発芽率も57.8%と向上することからも、硬い種皮は摂食を前提としていることが判明した。そこで、種皮を柔らかくすることで発芽率を高め、種子繁殖による芝マット化を目指した。



写真3 左：*Zoysia japonica* の種子の採種 中：生分解マットへの播種 右：生分解マット上の芝

### 2.3 Zoysia japonicaの屋上緑化適正

Zoysia属はイネ科の熱帯性芝植物で、アジア・オセアニアの熱帯地域に14種自生している。日本は南北に長く寒帯から熱帯まで幅広い気候帯が存在し、japonicaはこの全域に生息している(図2)。japonica以外のZoysia属は国内の温帯地域と熱帯地域にtenuifolia(コウライシバ)とmatrella(コウシュンシバ)が自生する。japonicaはZoysia属の中でも最も北限に自生している植物である。Zoysia属は、熱帯性植物に多い二酸化炭素の濃縮回路を持つC4型光合成を行う植物であり高温・乾燥に大変強い性質を持つ。japonicaはこの性質を持ちながら高い耐寒性も有している。日本の屋上環境は高温・冷温・乾燥以外に梅雨期のような湿潤な気候もあり厳しい植物環境であり、japonicaが最も適性があると考えた。本研究の緑化システムの場合、軽量化のため土壌を無くしたことによって植物の水環境が特に厳しいと判断でき、Zoysia japonicaの耐旱能力を確認する必要がある。そこで、夏季の屋上緑化における植物生存限界水量4ℓ/㎡/日の約1/2の水量2.15ℓ/㎡/日で管理して耐旱能力の検証を行った。



図2 日本におけるZoysia japonicaの生息域

## 3. 成果と考察

### 3.1 軽量・少水屋上緑化システム

Katsura New Easy Technology of Roof-top Landscape (K-NET)の構築

#### 3.1.1 K-NETの開発

屋上緑化基盤の着想はZoysia japonicaの岩盤地帯でも生育できる点がヒントとなった。緑化基盤はレクリエーションを考慮し、踏圧に耐えることを考慮して(写真4左)、スチレンボードの厚さを

5cmとした。スチレンボード下に1cmの排水空間を設けたが、踏圧によるスチレンボードにかかる圧力を分散させる目的で、極太のモノフィラメント製の網状態空間構成材(写真4中)を緑化下層全面に使用した。キューブの主たる機能はスチレンボード下層へ水を排水する機能であるが、少量の水を保持する能力もあり乾燥時に導水シートを通して植物に水を供給することもできる。なおキューブに使用する素材はZoysia japonicaの播種用のマット素材としても使用しているものである。

水を緑化植物に分配する導水シート(不織布)は厚さ1mmの合成繊維製で灌水チューブからの水を植物体に均等に分配する以外に、不足した水をキューブから吸収し植物体に供給する役割を持つ。Zoysia japonicaの植物素材との組み合わせによって、軽量で長期間緑化を維持できる屋上緑化システムを制作した(写真4右)。

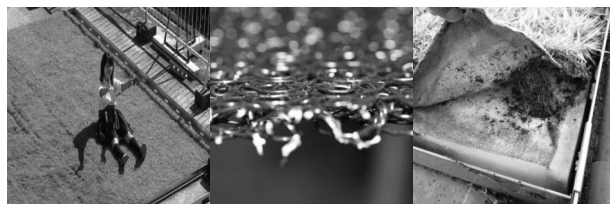


写真4 左:栽状態屋上は人の癒しの空間でもある。中:網状態空間構成材 右:K-NETの植栽状態

#### 3.1.2 K-NETの重量計測

緑化基盤のハイブリッドベースマットはスチレンボード5cm厚にキューブ(62個/㎡)に水を含ませた状態で計測したら3.9kg/㎡となり、軽量土の緑化基盤の40kg/㎡(比重0.8)や通常土壌基盤60kg/㎡(比重1.2)に比べて大幅な軽量化となった。緑化基盤に付加する機材重量は、導水シート(0.8kg/㎡)、排水用の空間構成材(0.38kg/㎡)、防根シート(0.06kg/㎡)及び軽量化のためのステンレス製柵(15.8kg/㎡)となり約17.0kg/㎡となる。植栽材料重量は葦・竹・ヤシの生分解素材に播種して製作した芝マットが1枚当たり2.8kg(28cm×56cm)、1㎡6枚使用で16.8kg/㎡である。従来使用されているZoysia japonicaの張り芝苗は3.1kg(28cm×56cm換算)となり18.6kg/㎡となった。この結果K-NET総重量は37.7kg/㎡となり通常の緑化基盤95.6kg/㎡や軽量土利用の緑化基盤75.6kg/㎡と比べても大幅な軽量化を実現した(写真5)。

これらの重量算出の結果、一般建物において枠等の付帯設備を軽量化しても、60kg/m<sup>2</sup>を切ることは土壌を利用する限り物理的に不可能でありK-NETのような革新的な機能を有するシステムを使用するか、もしくは建物に耐震補強を行い60kg/m<sup>2</sup>以上の負荷に耐えられるようにして設置するかになると考えられる。



写真5 左：スチレンボードの設置 中：導水シート設置 右：芝マットの張りつけ

### 3.1.3 K-NETの断熱能力

K-NETの断熱能力を検証した。検証方法は、まず緑化基盤を構成する各素材の熱伝導率に基づいた断熱能力と植物の蒸発量を加えた緑化基盤下層への流入熱量を算出した。その結果、断熱能力(熱貫流率)は土壌を使った在来緑化の2.81kcal/m<sup>2</sup>h<sup>2</sup>Cに比べ、K-NETは0.87kcal/m<sup>2</sup>h<sup>2</sup>Cと断熱能力が格段に高いことがわかった(表1)。また屋上軽量土を利用した販売されている薄層緑化システムも検証したが1.93kcal/m<sup>2</sup>h<sup>2</sup>CとなりK-NETが高い断熱能力を有していることがわかる。

表1 断熱能力の比較

表1 断熱能力の比較				
	構成	厚さ	熱伝導率	熱貫流率
		d [mm]	λ [Kcal/mh°C]	K [Kcal/mh°C] [(w/mk)]
従来緑化	外表面熱伝導率α0		20	2.81
	土(湿潤状態RH95%)	100	0.58	
	パーライト(体積水分80%)	50	1.87	
	合成樹脂(導水シート)	1	0.163	
	内表面熱伝導率αi		10	
K-NET	外表面熱伝導率α0		20	0.87
	泥炭(湿潤状態 体積水分80%)	10	0.43	
	土(湿潤状態RH95%)	10	0.58	
	毛織布(湿潤状態RH95%)	1	0.13	
	スチレンボード(ポリスチレン)	22.5	0.03	
	泥炭2(湿潤状態 体積水分80%)	7.5	0.43	
	空気層(排水シート)	10	0.055	
	合成樹脂(導水シート)	1	0.163	
内表面熱伝導率αi		10		

灌水による蒸発量を加えた緑化基盤下層への流入熱量の算出も行った。灌水量は夏季の植物生存限界灌水量4ℓ/m<sup>2</sup>/日を加えて算出した。その結果、緑化基盤下層への流入熱量は15.5kcal/hm<sup>2</sup>となり在来工法の50.1kcal/hm<sup>2</sup>・薄層緑化工法の27.6kcal/hm<sup>2</sup>と比べても高い断熱性能を示した。

次にK-NETによる断熱効果温度を実測することにより検証した。図3と図4に夏季と冬季の温度証拠の結果を示す。図3には、7月と8月の2カ月分の屋上緑化圃場の計測データを示したが、屋上表面温度は43℃を超え植物にとって厳しい環境にある

ことがわかる。一方緑化基盤下層温度は、外気温とそれほど変わらず推移しており、温度変化も緩やかであり緑化効果を十分に発揮していることがわかる。

図4は日本の厳寒期2月の屋上緑化圃場の計測データを示した。外気温の変動と屋上表面温度は上下しているが、緑化面の気温の変動は少なく保温効果を発揮していることがわかる。また、このような低温にも*Zoysia japonica*は凍死することなく高い耐寒性も持つことがわかった。

図3 屋上緑化温度計測結果(夏季)

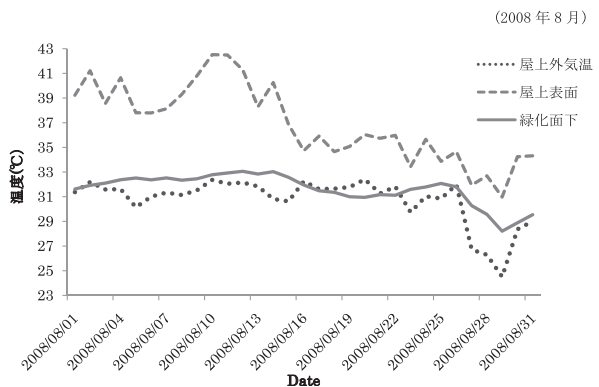
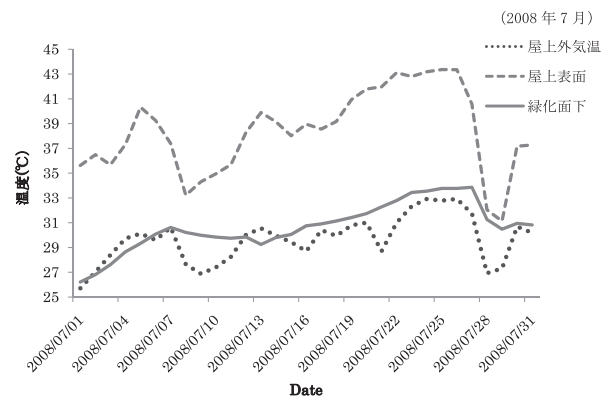
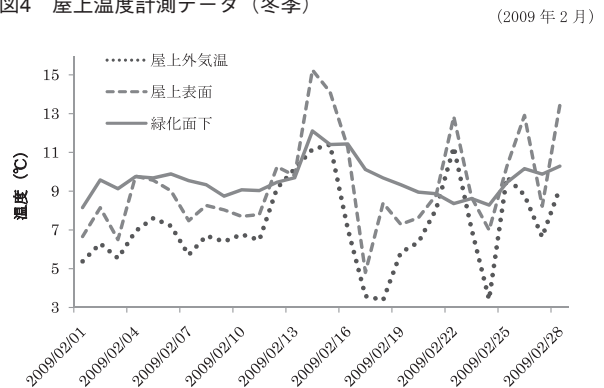


図4 屋上温度計測データ(冬季)



### 3.2 自家採種種子による繁殖技術の開発

*japonica*の種子は外えいと内えいの種皮で覆われており、特に外えいは硬く種子内へ水が侵入し

にくく、発芽率を低下させる要因となっている。発芽率の向上は種皮を柔らかくし外えい内に水を侵入しやすくする必要があり、酸もしくはアルカリで種皮を柔化処理して発芽率を高める必要があった。供試薬品はKOH15vol%・30vol%溶液とNaOCl 5vol%溶液及び木酢液を使用した（表4）。結果としてKOH30vol%溶液（25min）＋光（24h）（写真6）が66.8%と発芽率が高く、KOH15vol%溶液（50min）＋光（24h）も播種後20日目で55%と高い発芽率を示した。天然素材として木酢（pH2.4）24h+40℃＋光（24h）も最終的に発芽率50%以上の効果があるが湿潤に24時間が必要であることと、発芽に時間を要する問題があり、アルカリ処理による発芽率向上処理が適切だと考えている。

表4 発芽試験の結果（発芽率%）

計測日	処理薬品 vol% 浸種時間 pH	木酢液	KOH	KOH	NaOCl
		24h 2.4	15% 50min 14	30% 25min >14	5% 25min 13.4
播種後7日目		0	12.7	15.4	8.1
10日目		0	25.2	52.1	12.1
14日目		1	38.6	66.8	14.2



写真6 種子発芽光処理

芝マット化は発芽率向上処理を施した自家採種種子を生分解マットに播種を行い製作するが、覆土を行わずに生分解マットに展着させるためにはプレッシャーボードが必要となる。*Zoysia japonica*は光発芽性種子のため透明（アクリル素材）のプレッシャーボードを開発して使用した。これらの結果土壤を利用しない芝マットを開発し、土壤の付着しない軽量植栽材料として開発することができた。

### 3.3 *Zoysia japonica*の屋上緑化適正

夏季の植栽植物の生存限界水量は4 l/m<sup>2</sup>/日であり、ほとんどの屋上緑化はこの基準をもとに設定

されている。*Zoysia japonica*は耐旱・耐暑性の強い植物であり、灌水量を減らして*Zoysia japonica*の耐旱能力試験をおこなった。灌水量はセダム緑化に適した2 l/m<sup>2</sup>/日を目安として、2.15/m<sup>2</sup>/日と設定した。これは夏季の植物生存水量を大きく下回っており耐旱性の高い*Zoysia japonica*においても大変厳しい環境だと考えられた。結果は、夏季の高温・乾燥期を十分な緑化状態を維持することができ、屋上緑化機能も十分に発揮し高い耐旱能力持つことが解った。しかし蒸散量の多い植物が多肉植物と同等であるとは考えられず、植物体の能力以外の要素が存在する可能性が推測された。そこで、K-NET上の2地点（AとB）で*Zoysia japonica*を導水シートごと切り取り分析したところ、植物根には80%を超える菌根菌の感染（写真7）が計測され、導水シート及び葦・竹・ヤシの繊維で作られた生分解マットからも、菌根菌の胞子が4793個/25g土壤が確認され、高い感染率が多肉植物なみの耐旱能力を発揮させていることが判明した。

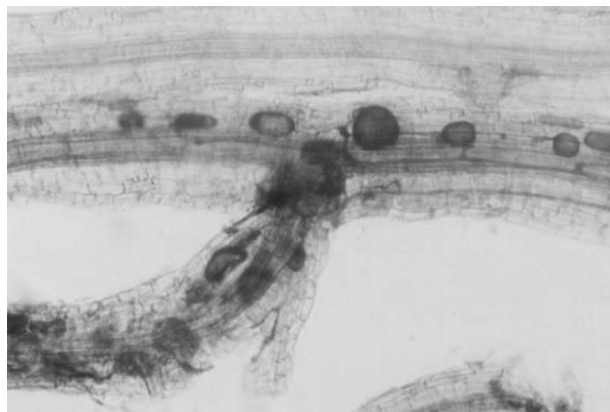


写真7 K-NET *Zoysia japonica*の根への菌根菌の感染

対象として人為的に管理されておらず、天然の自然条件が整っている奈良県若草山から採取した*Zoysia japonica*の根及び土壤も分析した。この結果、若草山が菌根菌の胞子量は11681個/25gと多いが、菌根菌の根への感染率はK-NET区のほうが高く水を菌根菌によって効率よく摂取していることが考えられた。また、導水シート・スチレンボードの人工物との組み合わせで緑化しているにも関わらず増殖・感染などの共生環境を確認できたことは、*Zoysia japonica*が菌根菌を共生・増殖させやすく上手く利用できる植物であることの証明であり、小水化が望まれる屋上緑化に最適な植物であると考えている。

表5 菌根菌感染率

	感染根長(μm)	非感染根長(μm)	菌根感染率(%)
K-NET A点	1150	120	89.6
	2150	960	55.3
			Mean:72.5
K-NET B点	1050	20	98.0
	860	180	79.1
	900	170	81.1
			Mean:86.1
若草山	3200	750	76.5
	500	220	56
	1400	230	83.6
			Mean:72.0

#### 4. 結論

K-NETは地震が多く建物荷重制限の厳しい日本の一般家屋に適合(60kg/m<sup>2</sup>)させることを目的として製作した緑化システムである。特に軽量・断熱性能に優れているだけでなく、緑地の少ない都市環境においての貴重な緑地資源として、癒しや憩いという要素も考える必要があった。四季のある日本の屋上環境は50℃近い温度差と雨量の多い梅雨や乾燥しやすい冬季など、植物が生存するには過酷な環境であった。軽量化のために土壌を極力使用しないK-NETは水を保水する部分が極端に少なく、乾燥に対してさらに過酷であり、適応できる植物は限られていた。私達は日本全域の熱帯から寒帯の気候帯に生息し、海岸や岩盤地域に自生する*Zoysia japonica*を緑化材料として軽量の屋上緑化を開発することができた。さらにこの植物の持つ耐旱能力に着目して屋上緑化の少水化に取り組んだ結果、屋上緑化の植物への1/2の灌水量出で十分に緑地を維持できることがわかった。さらにこの要因の究明をおこなったところ、*japonica*の根や導水シートに菌根菌が多く感染・増殖しており、セダム植物なりに耐旱能力を向上させていることも発見できた。この植物の利用と緑化システムは、世界人口の増加と共に急激に拡大し発展する都市のヒートアイランド化の抑止に有効な手段であると考えている。

私達は*Zoysia japonica*の自生地の保護活動も行っている。本研究の供試植物として使用している*Zoysia japonica*は、日本各地に自生する植物であり古来より庭園や飼料用植物として利用されてきた。明治以前の*japonica*や*Miscanthus sinensis*(ススキ)などの草原地域は国土の11%あったが、利用価値の低下や宅地開発・農地利用等により現在は3%と減少しており、京都府のレッドデータで

は要注意種目に指定されている。近年、緑化の増加で*Zoysia japonica*の高い環境適応能力に着目され利用は増加しつつあるが、自生地保護等の活動は行われていない。私達はK-NET用に開発した種子繁殖による芝マット化技術を用いて、*japonica*の自生地の一つである奈良県若草山の芝地復元を行っている。復元にあたって自生地を調査したところ、この植物が鹿等の草食動物と共生関係にあり、過度に摂食されることや糞尿が分解され菌根菌を介して植物に供給される関係を利用し高い生産性を発揮して1300年以上芝地を維持していることがわかってきた(写真8)。これは現在世界が抱えている羊や山羊の過放牧による砂漠化の問題や1年生牧草栽培で問題となっている糞尿や肥料過多による水質汚染等についても解決することができる植物であると確信している。

この研究によって多くの人々に理解され着目され利用されることは、この植物の保全にもつながり世界の水問題や温暖化問題の解決に繋がると考えている。



写真8 若草山自生地調査

#### 参考文献

- 1、芝草物語 北村文雄 著 平成13年3月 ソフトサイエンス社
- 2、ノシバ・コウライシバ 中村直彦 編 平成5年4月 ソフトサイエンス社
- 3、シバ(*Zoysia japonica* Steud)の種子繁殖形質に関する種生態学的研究  
(5) 種子の形態形質と発芽並びに実生の初期生育  
松村正幸・車戸憲二・西條好洵 岐阜大学 1992年
- 4、草原の科学への招待 中村 徹 編 筑波大学出版会 2007年10月初版
- 5、シカの生態誌 高槻成紀 東京大学出版会 2006年6月初版
- 6、立体緑化による環境共生 下村孝・梅干野晃・奥水肇 編 2005年ソフトサイエンス社

協坂 奈於 小川 哲央  
石田 有香