

セダム緑化を正しく活用しよう！

生理・生態にもとづくセダム緑化の勘どころ -

桐蔭横浜大学医用工学部
生命・環境システム工学科 准教授
飯島健太郎

1. はじめに

環境の世紀がスタートして久しい今日、環境負荷の実態に対する認識の拡大と共にその対策が政策と技術を駆使して具体的に展開し始めている。とりわけ環境修復の一つの形態の如く、都市空間の屋根が次々と緑に姿を変えていく様は、ある意味で頼もしいことである。同時にこの極めて重要な時代にあって、その努力が無駄にならないようあらゆる緑化空間をしっかりとケアしていくことも重要である。

ところで屋上緑化の代名詞的存在として飛躍的に普及したのが「セダム」であった。本種のもつ地被的形状の美しさ共に際立った耐乾性を有しており、普及の背景にはオールマイティな緑化素材と誤解されながら短期間に多くの企業が本種を用いた緑化工法をとにかく世に出すという努力と挑戦のプロセスがあった。一方、筆者らもその生理・生態を探るべく実験研究を行ない、屋上緑化への導入の道筋を築いてきた。しかしある程度体系的に研究成果がまとまりつつある段階に至っては、少なからず現場から枯損の情報が伝わってくることとなった。セダムのもつ特殊な生育特性に加えて、屋上空間そのものが状況に応じて多様な環境条件を呈しているために十分な対応がなされず、枯損させている実態が存在したわけである。そうしたセダム緑化に追い打ちをかけるように、「屋上緑化人気のセダム・ヒートアイランドに効果なし」との新聞報道があり、産学官を取り巻くセダム緑化の混乱が生じた。

国交省の全国屋上緑化施工面積調査によれば、2000年から2004年の5カ年に施工された屋上緑化のうち30%がいわゆるセダム主体の緑化であるという。極めて大きな数字であった。これから行われるであろうセダム緑化も含め良質な緑化状態を保つべく方向性を見出す必要がある。こうした混乱期を経て、施工ならびに維持管理手法について既往の研究成果を整理し、セダムの生育に関わる現場の情報を共有するなど、セダム緑化の健全化を目指して発足した薄層屋上緑化向上協会の役割は極めて重要である。そうした活動を支援する意味も含め、あらためてセダム緑化の目指すもの、そしてその生理生態に基づく施工、維持管理の方針について整理したい。

2. セダム緑化の意義と機能性をどのように考えるのか

自然の植物は、いわゆる自生地では何の手入れがなされなくとも自然環境に合わせて生育サイクルを営んでいる。その分布や生育に作用するのは、温度や降雨量などの大きな気候条件に加え、日照や土壌条件、他種との競争関係も重要な要因となる。多くの緑化用植物は、持続的な生育を意図して導入されるため、植栽地の環境条件に対して対象となる植物の生育が適正であること、少なくとも適応性をもって生育できることを前提として導入されている。

そのような観点からしても特殊緑化空間が多くの植物にとって厳しい条件となっていることは明らかである。また植栽種の生育を妨げるものとしては、温暖で降雨量に恵まれるわが国では雑草の存在が大きい。正にこの競争を制御すべく除草作業が重要な維持管理作業になっている。

なお、緑化の目的には、存在効用と利用効用という側面がある。光合成の営みにより O_2 をもたらしたり、暑熱環境を緩和したりといった環境作用をもつ緑化面は存在効用（一次効用）であり、景観を楽しんだり休息や競技を行う緑地は利用効用（二次効用）をもたらしているといえる。人が高度高密度に活動する都市空間は、こうした多面的な緑化の創造が必要であることは論を待たない。

そうした背景を踏まえ、セダム緑化とはどういう存在なのか、セダムを活用してどのような屋上緑化を目指そうとしているのか、過剰あるいは間違っただ期待を懐いていないか再確認が必要である。都市とはどのような空間を形成しているのか。林立する建築構造物をはじめとした人工素材の被覆である。遠くから眺める建築物群は見ようによっては切り立った岩山のようにも見えてくる。その屋上部に肥沃で十分量の土壌を搬入すれば、豊かな緑を伴う植栽地も形成されよう。しかし多くの建物の屋上は荷重制限のためそうはいかない。当然、軽量化を図るべく薄層の緑化が余儀なくされる。とは言え、わが国にも自然の岩山、あるいは海岸の岩場に植生がある。露出した岩肌の割れ目やわずかな吹き溜まりなどの厳しい条件に、形態的生理的な適応機構を發揮しつつ群落を形成している多くの植物群があり、その一つがセダム類である。すなわち植栽基盤に制約を受ける建築環境にあっては、こうした植物の導入がその生育特性（適応機構）からしてみれば最も相応しいのである。

では、利用する側からみた場合、一次効用の中でもとりわけ期待が大きい暑熱環境の緩和に焦点をあてるとどうであろうか。蒸散量の大きい植物と比較すればセダムの効果が小さいのは当然のことである。しかし蒸散量の多い植物であっても、暑熱環境の緩和効果は十分な給水施設がシステム化されることで、蒸散（蒸発）というプロセスを通じて大きな効果を發揮していることを認識しなければならない。都市の建築空間において、そうしたシステムが導入できる空間とそうでない空間により適材適所の観点から緑化を選択することが重要である。セダムによる緑化では、蒸散による積極的な放熱を目指す観点ではなく、水資源と緑化の関係からその特質を見出すことが重要

である。併せてセダムを含む薄層基盤の緑化では、夜間も含めた暑熱環境の動態からの評価が重要である。

また管理に関わる生育上の大きな特質は、夏期数週間に及ぶ渇水に対して緊急的な給水がなされなくとも枯死しない点である。こうした性質が故にこれまで緑化が不可能とされていた空間で緑化を可能にしてきた経緯を大切に、セダム緑化を有効活用すべきである。換言するならば、セダム緑化は建築物緑化の大半を担うものではなく、構造上の制約条件から選ばれた一緑化手法に過ぎないということを述べておきたい。

3. セダム緑化の美しさとその誤解

セダムはグラウンドカバープランツである。茎葉はライトグリーンの色彩を呈することからそのカバー状態とともに、開花期にはメキシコマンネングサやタイトゴメをはじめとして黄色一色に染まる色彩もまた美しい。セダム緑化のもたらす景観美の効用であり、春季の開花は季節感の演出として定着するかも知れない。しかしそこには大きな誤解もあった。多くの人々がその景観とともに休息空間として愛する芝生とセダムを同一視する向きもあった。開花が美しく刈り込み不要で耐乾性に富む芝生として、緻密かつ広大なターフ状態を期待される場面も少なくなかったようだ。当然結果は期待外れとなった。

セダムは匍匐性によって地被的な性状ではあるが、決して広大なターフを形成するものではない。自生地においても小さなコロニーを形成している。ときに一定の面積をカバーしている美しい景観に出会うこともあるが、よく見るとコロニーが点在しているのである。まずは、その形成の狙い、基盤整備から維持管理の方針に至るまで芝生とセダムはまったく異なった存在であることを認識する必要がある。

4. 建築物緑化における耐乾性植物の選択の視点

建築物緑化において当初最も懸念された問題の一つは、基盤の乾燥による植物の枯損とその防止策であった。ではそもそも植物は乾燥条件に遭遇して何故枯れるのか？もちろん乾燥に伴う様々な生理的阻害要因によっても衰退を招くわけであるが、最も直接的な影響は細胞の水分減少に伴って起こる原形質分離、すなわち植物の構造的破壊から回復不能な状態を招くことが大きな要因である。

多くの耐乾性植物は、こうした被害を回避するためのさまざまな機構や形態的特徴を有している。例えば、エフェメール：乾季を種子で過ごす短命植物や干ばつにあう度に葉を落とす植物、蒸散を抑え、貯水機能を発達させて吸水が絶たれてもしばらく生命を維持できる植物、組織内の浸透圧が高く、吸水能に優れた植物、根群の分布を拡げることで広範囲の水分を吸収できる植物、ポイキロ乾生植物：乾燥に伴

う水分の減少に対して原形質分離を起こさず完全な萎凋に耐えて過ごすことが可能な植物などが知られている。

このように数ある耐乾性植物の中から何故多肉植物のセダムを導入するのだろうか。まず緑化修景を目的とした場合、吸水が制限されている状態であってもある程度の緑被状態を維持したい。よって耐乾性には富んでいても乾燥条件下で極端に見苦しくなるような種類は適さない。次に吸水機構を検討すると、浸透圧調整や根圏の拡大によりどんなに吸水能が優れていても、肝心な水分そのものが基盤に確保できなければ無用の機能となる。建築物緑化のうち超薄層条件となる場合には、降雨の最中や直後は湿潤だが、特に夏季晴天時は極度の乾燥条件下におかれるため、こうした機能が備わっていても、なかなか吸水には結びつかないであろう。よって超薄層条件を伴う建築物緑化において最も有効な耐乾性植物は、浸透圧や根圏の拡大による吸水能を武器とせず、吸水停止状態で乾燥適応機構が働いている時においても緑被を保ち、生命を維持することができる貯水植物（多肉植物）ということになる。

また多肉植物の中でもセダム類は、緻密な地被状の緑化形態を有すること、季節的に開花景観を呈することなど修景効果をもたらす点で緑化材料として重要な性能を具備していることが特質である。

5. 多肉植物セダムの乾燥適応機構

セダムについて、より詳細な乾燥適応機構をあげると、低い蒸散比、貯水機能、CAM型光合成が挙げられる。

一般に多肉植物は肥大した葉、根、茎が貯水層となって水分を蓄えており、その最も典型がサボテンである。また蒸散による水分の消費を抑制するために気孔数も少ない。ちなみにあるサボテンでは、 $1\sim 4/\text{mm}^2$ 、アサガオでは約 $100/\text{mm}^2$ というデータもある。セダムの場合には主として葉が肥大化して貯水層となっている。そうした葉面の気孔数は、アサガオに比較して少なく、例えばメキシコマンネングサ（*Sedum mexicanum*）では、約 $15/\text{mm}^2$ であった。

もう一つ重要な乾燥適応機構にCAM型光合成（Crassulacean Acid Metabolism：ベンケイソウ型酸代謝）がある。これはサボテン類やベンケイソウ類に見られる典型的な光合成型である。植物にとって日中光合成のために CO_2 を吸収することは、気孔が開くために同時に葉から大気中に水分が奪われることを意味している。通常、湿潤な条件では根からの吸水と蒸散のバランスを保って生育を営むわけだが、砂漠ではそうはいかない。まさしく灼熱地獄の日中に気孔を開けば、直ちに体内の水分は奪われ枯死を招くことになる。砂漠のサボテンは、こうした状況を回避する機構が働き、空中湿度の高い夜間に CO_2 を吸収し、これを有機酸に変換して細胞中の液胞に蓄える。日が昇る頃には、 CO_2 の吸収を停止し、気孔も閉鎖している。日照条件下では予め夜間に

備蓄していた有機酸を脱炭酸し、これを同化作用に用いて光合成を営むのである。実際にはもっと複雑な昼夜間の反応があるが、概ねこういったところである。夜間に蓄積された有機酸含有量の範囲でのみ同化作用が営まれるために極めて生育が遅いことも特徴である。

セダム（メキシコマンネングサ）についても昼夜の有機酸（リンゴ酸）レベルの変化から CAM 植物であることが確認されている。この CAM 型光合成は、乾燥適応機構として極めて重要であるが、メキシコマンネングサの実験では^{1,2)}、15 程度の低温条件下では働きにくく、20 ~ 30 の中・高温条件下で働くことが明らかとなっている（図-1）。

つまり夏季の高温条件下では乾燥適応機構が十分に発揮されるのであり、その季節に情をもって散水を行なうことは無意味なだけでなく、かえってセダムの生育を損ねる結果になるのである。

6. 日本の気候に適したセダムの種類

もう一つ重要なセダムの乾燥適応機構に関連した性質がある。前述したとおり CAM 型光合成を営むということは、その分、成長速度も遅くなるのが普通である。しかしセダムの生育は決して遅くなく、ある環境条件下や季節によっては急速な勢いで生育を見せることがある。実は何種類かのセダム類は環境にうまく応答しながら光合成作用を選択している。言わば条件によって「サボテン（CAM）型光合成」と「アサガオ（ C_3 ）型光合成」を切り換えているのである。土壌が湿潤条件であれば C_3 型光合成によって生育を営み、乾燥条件下に遭遇すると CAM 型光合成を誘導するのである。こうした反応を誘導型 CAM（可変的 CAM）といい、少なくともキリンソウ、メキシコマンネングサでは、誘導反応が確認されている。

図-2、図-3 にメキシコマンネングサの給水時と給水停止後の乾燥条件下における昼夜の CO_2 吸収と有機酸レベルの変化を示したものあり、給水下では明らかな明期の吸収 CO_2 吸収反応が認められ、また乾燥条件下では暗期に有機酸が蓄積される日変化が認められる。なおこの時の CO_2 吸収は、CAM 特有の夜間に行われる反応も認められず、呼吸によって発生した CO_2 を再固定する CAM アイドリング（CAM idling）反応を示していたと考えられる³⁾。乾燥のより厳しい条件においては、夜間のガス交換も停止することで水分の消費を最大限に抑制する反応として有効である。

岩盤面に生育する自生地 of セダムは、晴天乾燥時には CAM 型光合成によって、日中気孔を閉じて水分を過剰に消費しない方法でゆっくりと生育を営み、ひとたび降雨に恵まされると、一時的に C_3 型光合成に切り換えて太陽光照射下で存分に CO_2 を吸収して積極的に生育を営むのである。なおしばらく吸水が停止し水ストレスが進行したセダムであっても、一時の給水で数時間中に葉内の水分レベルが回復することが明らかとなっており（図-4）光合成作用の迅速な切り替えが可能になっていると考えられる⁴⁾。

なおこうした環境応答を人為的にうまく制御できれば、大量増殖したい生産時点、現場において生育を促進させるべき時と乾燥適応機構を働かせるべき時など、必要に応じてセダムの特性を効果的に発揮できるのである。

7. 不適地ではセダムは逃げていく？

セダムの生態の話である。新天地を求めて移動する植物の話は多い。特に着生形態を持つシダ植物やラン科植物、パイナップル科植物などでは、長い年月をかけて着生した樹上や岩上を茎葉や根を更新させながらゆっくりと移動している。その方向は、最大の生長を営むことができる水分条件や光条件の適した環境という考え方もあるが、必ずしもそうではない。

セダムについても、植栽したら永遠にその場で生育する（または生育に適さず枯死するか？）植物とは異なり、移動する可能性を持った生育形態を有している。セダムは非常に背の低い形状であり、他の草種と同居すると光を十分に受けることが出来ない。セダムが光を得るためには、耐乾性を獲得することで他の草種の侵入できない乾燥した岩盤の最前部に進出することが必要であった。

切り立った岩盤面は典型的なセダムの自生環境の一つであるが（写真-1）例えば自生地のタイトゴメ（*S. oryzifolium*）の観察事例では、海岸岩場の僅かな吹き溜まりに小さな群落を形成しているが、それらは数年経ても群落を僅かに拡大生育しているものの、ほとんど移動無く存在し続けている（写真-2）。ところが土壌が堆積してきて他の背の高い草種が侵入することで混在した条件におかれると一種の徒長現象を呈し、茎は地を這いずるようになる。基部は枯れてシュートはより先端方向に移動して根は活着する。結果、常に岩盤の最前面に群落が形成されることになる（写真-3）。半人工的な空間である河川護岸でもそうした様子が観察され、ツルマンネグサ（*S. sarmentosum*）が他の背の高い草種に被圧され、土壌のないコンクリート面にシュートを広げている（写真-4）。

一方、蒸れなどで基部が枯損すると、シュート先端部に生命を託して外れやすくなる。こうして風に飛ばされることで、新しい土地で根を降ろすことも少なくない。このようにセダムは不適地において、その場を離れるための回避的な生育を開始するので植栽地では留意したい。環境しだいでは、いとも簡単に逃げられてしまうのである。

8. 全面一斉開花には留意せよ

セダム緑化において花期に花が群開すれば、一見大成功である。しかし緑化の永続性という観点からその生育を疑ってみる必要がある。特にメキシコマンネグサではこの留意したい。地被状の群落を形成するメキシコマンネグサのシュートの一つ一つ

は、前年の秋頃に元親のシュート基部に発生した越冬芽である。この越冬芽がより多く形成されれば、緻密な地被状態を呈するために緑化景観も良好になる。しかし適正な維持管理をしない場合には、こうした生育を見せてくれない。多数の越冬芽が形成されて春先にシュートが展開してきて、喜ぶのもつかの間、著しく伸長してしまう。およそ20~30cmもの高さになる頃には、開花し始め黄色いカーペット状の花景観を呈する。問題はしばらく後のことである。多くの場合に枯れ野原と化すのである。メキシコマンネングサの花は、シュートの側芽としてではなく、その先端部に形成される。そのため冬芽が春の温度上昇とともに展開伸長を始め、そこにさらに伸長を促進する条件が加わると、シュートは花茎に転じてしまう。それらは開花後不要の器官となるのは明らかである。シュートの大半が花茎となれば、じきに全滅に近い状態が訪れる。仮に僅かなシュートが残存していても、不要の器官となった花茎は、蒸れによって腐敗を起こし、健全なシュートにまで蔓延する。特にそういった現象は、有機質に富んだ土壌、春期の過剰散水や保水処理、施肥等によって起こりやすい。もちろんそうした条件は他の草種にとっては侵入しやすい環境であるから、セダムは開花後種子を形成散布してその場を去るほうが懸命なのかも知れない。世代交代を兼ねた生存戦略である。もちろん緑化施工者としては、それでは敵わない。

ではそれを防ぐにはどうしたらよいか？ メキシコマンネングサの自生状態の事例では、生育の制約を受ける超薄層基盤条件においては、シュートの丈は10cm程度、その群落の中で15~20cm程度の高さの花茎がぼつぼつと僅かに見られる程度である。この程度であっても全体としてみれば十分な花景観であり、開花後も多数のシュートが残ってくれるのである。開花後の器官もほどよく乾燥して離脱するために腐敗の危険もない(写真-5)。この観察例では土壌の厚みは約10mm(Lic:軽埴土/国際法における粒径組成)であった。

植栽地に安定的にセダムを維持するためには、環境を出来る限り厳しくする視点が重要である。すでに各社の植栽基盤においては、抑制的な生育を目指しつつも、その生育を支援するための素材の種類、排水・保水の観点からみた粒径、基盤の容積(土層厚)のバランスについて、最適な組み合わせが開発されている。加えて春期の過剰散水や施肥を避けることなども重要なポイントとなっている。

9. カーペットからコロニ一点在型へ、混植には工夫を

セダムの自生地を観察調査してみても広大なカーペットを呈するような群落はなかなか見つからない。現在、屋上緑化で見られる大カーペット状のセダムの景観は、セダムの生態からすればある意味では異常な光景とも言えるのである。

山地の岩場に自生するマルバマンネングサ(*S. makinoi*)、海岸の岩場に自生するタイトゴメ、都市のコンクリートの縁に群落を形成するメキシコマンネングサ、河川護岸に生育するツルマンネングサのいずれもが根域に制約を受ける土壌、すなわち恵まれな

い環境に生育している。超薄層基盤緑化では薄層であるという点ではセダムにとって適正な条件と言えるが、広大な連続面であることの問題が懸念される。

「原産地必ずしも敵地ならず」という考え方がある。栽培の世界では一般に収量・生産量が最も大きくなる環境を良しとする。この環境を「生理的最適域」という。こうした観点からすれば短期的にはセダムも肥沃で湿潤な環境を良しとする。しかしながら自然条件において肥沃で湿潤な環境は、前述のとおり他の草種の侵入による被圧を受けるためにセダムにとって永続的に生育可能な条件とはならない。

一方、環境的な制限要因により生育量が小さくとも、その環境で長期的に個体の維持が可能な場合、その環境を「生態的最適域」という。言うまでもなく緑化にあたっては「生態的最適域」の視点が重要となる。抑制的な生育を心がけることによりセダムをコンパクトに生育させることが、他の草種の侵入を防ぐことと共に極めて有効である。

なおわが国でもドイツの工法に習い、セダムと野草の混植が一部に展開されているが、恐らく期待どおりの景観を維持することは困難である。一般に恵まれた環境にあっては、種間の競争が激化する。野草が生育できるほどの土層厚が確保され、なおかつわが国のように降雨に恵まれた条件では、ただちにセダムは被圧されて衰退を招くことになる。ドイツでは、日本よりも降雨が少ないこと、冷涼な気候であること等により、いずれの草種も環境的制限要因により生育が抑えられるために種間の競争が抑えられ、共存の可能性が広がるのである。これがドイツに見られる様々な花が咲き乱れる屋上のお花畑である。わが国に例えれば、森林限界を越えた高山の砂礫に見られるお花畑であり、互いを影響しあうことなくコンパクトに共存している姿と似ている。ドイツのように気候的な制限要因により生育が抑えられる地域では、基盤整備や養生・維持管理は「生育助長型」指向になる。一方、わが国のように温暖で、降雨に恵まれた気候条件において、セダムを一定の場所で生育を持続させるためには、「生育抑制型」指向での基盤整備、養生・維持管理が不可欠となる。それが最もセダムの自生地に近い姿だからである。自生地で生育しているように葉一枚々々が肥大したコンパクトな形状になると、耐乾性のみならず耐寒性なども優れることが明らかとなっている^{5,6)}。

セダム緑化では、芝生のようなターフを形成させて緑被率を上げていくのではなく、一つ一つのコロニーの生育を大切にすること、混植する場合には植栽地で無用の競争を避けるべく緻密な維持管理を行うことが不可欠となる。

10. おわりに

緑化用途としてのセダムは、決して汎用性のある万能素材ではない。環境に対して幅広い適応性をもって分布を拡げる種と限られた環境域にだけ生息できる種があるが、どちらかと言えばセダムは後者にあたる。セダムの生育に影響を与える主たる要因は土壤水分であり、自生地環境に学ぶならば他の草種が侵入できないほどに限られた土

壤量とそれに伴う乾燥、さらには断続的な水分供給がセダムの個体維持に貢献すると考えられる。

屋上面が正にそうした厳しい条件である時、他の草種では植栽が困難な時こそ、セダムの出番なのである。安全係数を高めるべく従来の緑化手法の常識から土層厚を増加したり、連続的に給水や施肥を行なうことは、かえってセダムにとってはマイナスの環境を提供することになるのである。十分土層厚と養生・維持管理が提供できるならば、もっと有効な草種の導入による確実な緑化を推めたい。

都心の屋上面は極めて貴重な水平空間であり、今後、人の直接的な活用も含めた積極的な空間づくりが望まれる。芝生空間をはじめとして、多様な緑地として整備し、人の休養、微気象緩和、環境負荷低減施設として、さらには生物多様性の保続に資する場として、より質の高い空間整備が求められる。セダム緑化は、このような多彩な建築物緑化メニューの中の一工法に過ぎないのである。であるからこそ効果的な活用をお願いしたい。

文 献

- 1) 飯島健太郎・近藤三雄、メキシコマンネングサの光合成型ならびに生育に及ぼす土壤水分と気温の影響、東京農業大学農学集報、41(3)、156-163(1996)
- 2) 飯島健太郎・近藤三雄、乾燥条件下におけるメキシコマンネングサの光合成反応と気温、照度との関係、東京農業大学農学集報、42(4)、274-286(1998)
- 3) 飯島健太郎・近藤三雄、異なる照度条件下で生育したメキシコマンネングサの生育と耐乾性、東京農業大学農学集報、42(4)、287-294(1998)
- 4) 鬼頭恵助・飯島健太郎・近藤三雄、メキシコマンネングサの乾燥ストレスと給水による回復反応について、日本造園学会関東支部大会研究・報告発表要旨、16、37-38(1998)
- 5) 飯島健太郎・馬場直哉・近藤三雄、異なる環境条件下で生育したメキシコマンネングサの草型の差異と葉内成分について、第27回日本緑化工学会研究発表会・研究発表要旨集、72-75(1996)
- 6) 飯島健太郎・馬場直哉・近藤三雄、異なる環境条件下で生育したメキシコマンネングサの耐凍性の差異、第27回日本緑化工学会研究発表会・研究発表要旨集、76-79(1996)