

チャンパー内においたセダム類とコウライシバによる二酸化窒素除去能について

A Study of Decontamination Capacity of Nitrogen Dioxide for Sedum and *Zoysia matrella*. in the Chamber

浅井 俊光* 田中 麻美** 飯島 健太郎*** 水庭 千鶴子* 近藤 三雄*

Toshimitsu ASAI Mami TANAKA Kentaro IJIMA Chizuko MIZUNIWA Mitsuo KONDO

Abstract: This study was aimed to evaluate Sedums (*Sedum mexicanum* Britt., *Sedum sarmentosum* Bge. and *Sedum pallidum* var. *bithynicum*) and turf grass (*Zoysia matrella* Merr.) as a phytoremediator which removing NO₂ in the small chamber scale. In addition, we considered that there is a relation between ability of NO₂ removal and other factors which are pubescence, stomatal density (n/mm²) and guard cell length (μm). As a result, when 60min passed, amount of NO₂ removal of sedums was 151.2 ~ 306.5 μg/m², while those of turf grass was 79.1 μg/m². But after that, there was not much difference between them and they completely removed NO₂. It became clear that sedums had ability of NO₂ removal which was equivalent to turf grass or higher than it. Furthermore, ability of NO₂ removal was some relations to form of pubescence. But it seems that there were few relations between ability of NO₂ removal and other factors such as stomatal density (n/mm²) and guard cell length (μm).

Keywords: *Sedum*, *Zoysia matrella*, Nitrogen dioxide, Scanning Electron Microscope

キーワード：セダム，コウライシバ，二酸化窒素，走査型電子顕微鏡

1. 研究の背景及び目的

近年、薄層基盤緑化は折板屋根や一般住宅などの耐荷重の低い場所に施工できるという性能だけではなく、環境改善能力をどれだけ有しているかということが重要な評価項目となってきた。この薄層基盤緑化に利用される植物は主に芝草類やセダム類であるが、芝草と比較してセダムは乾燥に強く、土層厚も少なくできるという長所がある反面、CAM型光合成を行う性質上、どうしても強光乾燥条件下では蒸発散作用が低下し、結果として、芝草よりCO₂固定能力や熱環境改善効果が劣るということが指摘されてきた¹⁾²⁾。しかしながら、植物の環境改善能力は一元的なものではなく、浄化対象となる物質が変わることによって、高い環境改善能力を有していたことが発見される事例も珍しく無い³⁾。

そこで本研究では、多くの大気汚染物質の中から、太陽光の青緑色光を吸収し、ヒートアイランド現象を助長するといわれ、環境省の「自動車NOx・PM法」の対象物質にも位置づけられているNO₂⁴⁾に着目し、さらに、その除去の可能性を探るため、チャンパー法によりセダム類と暖地型芝草であるコウライシバのNO₂除去性能の違いについて、基礎的な知見を得ることを本研究の目的とした。また、藤井ら⁵⁾⁶⁾の研究では広葉樹よりも針葉樹のNO₂除去量が高かったという報告がなされており、NO₂除去能は葉部の形状が密接な関係があるものと推測し、コウライシバ、セダムの表面構造(毛茸、気孔密度、孔辺細胞長)を光学顕微鏡や走査電子顕微鏡にて観察することも併せて行った。

2. 実験方法

(1) 供試植物の選定

供試植物には多くのセダム類の中から薄層基盤緑化への施工事例が最も多い、メキシコマンネングサ (*Sedum mexicanum* Britt.) とツルマンネングサ (*Sedum sarmentosum* Bge.) を選出し、これに、茎葉部が細かく密で、繊細な青緑色の景観を創出でき、近年、注目を集めているパリダム (*Sedum pallidum* var.

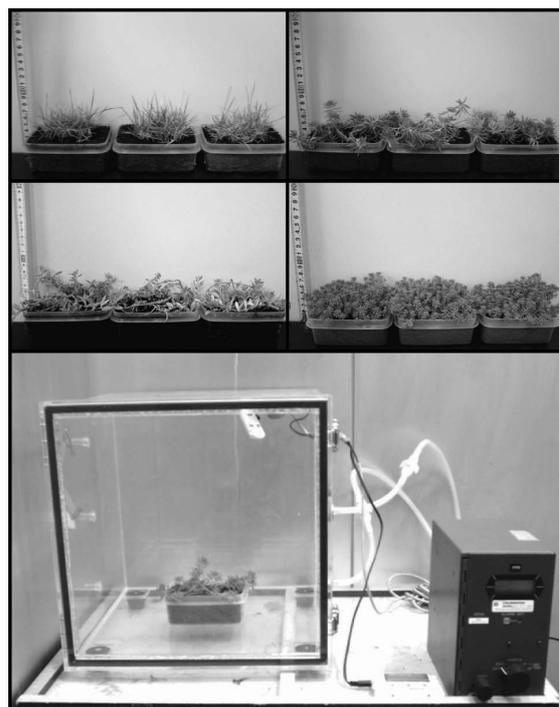


写真-1 実験区の供試植物及び実験風景

左上段：コウライシバ区、右上段：メキシコマンネングサ区、

左中段：ツルマンネングサ区、右中段：パリダム区、下段：実験風景

bithynicum) の3種を選定した。また、比較対象となる芝草は特に日本の気候風土に合致し、光合成速度や蒸発散能力が高く環境改善能力も高いとされるコウライシバ (*Zoysia matrella* Merr.) を選定した。これらの供試植物の生体重量を16±0.2gに揃え、大型の密閉容器に保管され含水率が予め算出されている黒土(関東火山灰表土：粒径2mm以下)を利用し、乾燥重量にて160gにな

*東京農業大学造園科学科

**株式会社大場造園

***桐蔭横浜大学電子情報工学科

表-1 単位換算式及びNO₂除去量の算定式

① ppbからμgへの換算式
$r = c \times (M/22.4) \times 273.15 / (273.15 + T) \times P / 1013.25 \times (0.027 - 0.00026)$
r : チャンバー内のNO ₂ 量 (μg) T : 実験時の温度
c : 検出された濃度 (ppb) P : 実験時の気圧 (1013.25hPa)
M : NO ₂ 分子量 (46.01)
② NO ₂ 除去量 : R (μg)
$R = E_r - X_r$
E _r : 対照区のNO ₂ 量 (μg)
X _r : 実験区のNO ₂ 量 (μg)
③ NO ₂ 減少率 : Rrate (%)
$Rrate = X_r / S_r \times 100$
S _r : 実験開始時のNO ₂ 量 (μg)
X _r : 実験区のNO ₂ 量 (μg)
④ 単位葉面積あたりの除去量 : NO _{2r} (μg/m ²)
$NO_{2r} = (B_r - X_r) / (2 \times A)$
X _r : 実験区のNO ₂ 量 (μg)
B _r : 黒土区のNO ₂ 量 (μg)
A : 供試植物の葉面積及び比較物の表面積 (m ²)

るように充填したポリプロピレン製容器(重量:31g、容積:260cm³)へ移植した。また、養生期間中は人工環境気象室(照度:8,400lux、光合成光子束密度:147μmol/m²/s、室温:昼間30°C(12h)、夜間25°C(12h)、湿度:50%)で2週間以上生育させた。さらに、圃場容水量を128.5gと推定し、「総重量=土壌の固相(160g)+容器重量(31g)+植物体重量(16±0.2g)+土壌水分」が常に335.5gとなるよう、2日に1度、土壌水分の不足分を灌水した(写真-1)。

(2) 実験期間、実験区及びNO₂の測定方法

実験期間は2010年8月から11月にかけて、養生期間中と同じ環境条件に設定した人工環境気象室(昼間30°C)にて行った。実験区にはNO₂+Airのみを充填した「対照区」、供試植物のNO₂除去能力を正確に測定するため、植栽は施さずポリプロピレン製の容器に黒土のみを充填した「黒土区」を設置し、これに各供試植物が植栽された「コウライシバ区」、「メキシコマンネングサ区」、「ツルマンネングサ区」、「パリダム区」を加え、合計6実験区とした。実験手順としては、アクリル製チャンパー(300×300×300mm、容積0.027m³)に、供試植物を入れ密封した後、NO₂+Air(NO₂濃度5ppm)を圧力0.1MPaでチャンパー内に注入し(排気はドラフトチャンパーに吸引)、NO₂濃度測定器(JMS社製: Interscam Model 4150)が500ppbを表示したところで注入を停止した。その後、30分毎にチャンパー内のNO₂濃度(ppb)及び相対湿度(%)を3時間記録した(写真-1)。なお、NO₂濃度の設定については既存の研究事例⁷⁾や一般的に交通量の多い幹線道路沿いなどでは、季節によって環境基準値(40~60ppb)の数倍の値となること、さらには、木全⁸⁾のガス・灯油ストーブ使用時の換気が不十分な場合、NO₂濃度が直ちに200ppbを超えたとの報告が存在している。このことから、本研究のNO₂濃度を環境基準値の約10倍である500ppbとし、様々な汚染環境下において環境基準値以下までNO₂濃度が低減できるか否かについて明らかにする実験を行った。また、葉面積の測定は実験終了後、直ちに供試植物の茎部を切除し、デジタルカメラで撮影した画像を画像処理ソフトウェア(アメリカ国立衛生研究所開発: Image J)を使用して行った。なお、セダム類に関しては肉厚な茎葉を有しているため、表皮細胞を破断させないこと、茎葉部を重ねないことなどに留意し、押し葉にした後、写真撮影を行った。これらの方法で得られたデータから、実験終了時の1ポットあたりのNO₂除去量(μg)、単位葉面積あたりのNO₂除去量(μg/m²)などを表-1の式をもとに算出した。

(3) 茎葉部の表面構造の観察

本実験の供試植物は、何れも茎葉部が細かい葉で密生する生育形態であり、肉眼でその差を見分けることは困難である。そこで、

微細な表面構造を観察するため、走査電子顕微鏡(日立ハイテクノロジーズ社製:SU1510)を用いて各供試植物の葉部表面を観察した。さらに、鈴木式万能顕微鏡印画法(SUMP法)により、各供試植物の葉部を写し取り、光学顕微鏡(社Nikon製:OPTIPHOT XF-11)、を用いて1mm²あたりの気孔密度(個/mm²)と孔辺細胞長(長径、短径)を計測した。なお、コウライシバ区とツルマンネングサ区に関しては、他のセダム類と異なり、向軸面(表)と背軸面(裏)が明確に異なる様相を呈しているため、それぞれ別けてデータ採取し、両面の平均値も算出した。

3. 実験結果及び考察

(1) 各実験区のチャンパー内のNO₂濃度(ppb)及び相対湿度(%)の経時的変化

実験の結果、実験開始時におよそ500ppbあったチャンパー内のNO₂濃度は180分後の実験終了時には対照区で259.0±39.8ppb、黒土区で6.3±4.5ppbまで減少した。一方、コウライシバ区、メキシコマンネングサ区、ツルマンネングサ区、パリダム区では全て0.0±0.0ppbとなり、植栽を施した実験区ではNO₂を完全に除去することが可能となった(図-1)。また、本実験でのチャンパー内のNO₂濃度の経時的変化は

$$x < (b/a)^2 \text{ のとき } \quad y = a \sqrt{x+b}$$

$$x \geq (b/a)^2 \text{ のとき } \quad y = 0$$

のルート回帰式で表すことができ、係数aの大小によって比較すると、対照区<黒土区<メキシコマンネングサ区<コウライシバ区<ツルマンネングサ区<パリダム区という順序となった。さらに、ルート回帰式からチャンパー内のNO₂濃度が0となるまでの予測時間を算出すると、一部、順位の変動があるものの、対照区で705min、黒土区で158min、コウライシバ区で121min、メキシコマンネングサ区で119min、ツルマンネングサ区で95min、パリダム区で60minとなった。このことから、概ね係数aの大小の関係と同様の結果となり、特にパリダム区では対照区の約11.8倍、黒土区と約2.6倍以上も速い速度でNO₂濃度が減少していることが明らかとなった。

一方、チャンパー内の相対湿度の経時的変化に着目したところ、対照区では実験開始時と終了時で40%からほぼ変化が無かったのに対して、黒土区や植栽を施した実験区では実験開始時に40~50%の間であったのが、実験終了時には80~90%まで増大していることが確認された(図-2)。また、本実験での実験区のチャンパー内の相対湿度の経時的変化は

$$x \geq 1 \text{ のとき } \quad y = ax + b$$

$$\text{ただし } \quad 0 < x \leq 180$$

の直線回帰式で表すことができ、係数aの大小によって比較すると、対照区<ツルマンネングサ区<黒土区<メキシコマンネングサ区<コウライシバ区<パリダム区という順序となり、特にパリダム区やコウライシバ区の蒸発散作用が活発であった。しかし、実際には実験開始時の相対湿度が異なり、これらを単純に時間ごとの値として表記し直すと、対照区<メキシコマンネングサ区<コウライシバ区<黒土区<ツルマンネングサ区<パリダム区という順序となり、パリダム区、ツルマンネングサ区の相対湿度が極めて高く、メキシコマンネングサ区、コウライシバ区では黒土区よりも相対湿度が低い結果となった。

(2) 各実験区のNO₂除去量、減少率

実験終了時のチャンパー内のNO₂濃度をもとに1ポットあたりのNO₂減少率(%)を算出すると、黒土区で98.8±0.9%、コウライシバ区で99.9±0.2%と高い減少率となったが、メキシコマンネングサ区、ツルマンネングサ区、パリダム区では何れも100.0±0.0%と完全にNO₂が除去されていることが明らかとなった(表-2)。因みに、対照区(チャンパー自体)のNO₂減少率を算

表-2 各実験区のNO₂除去量、NO₂減少率及び単位葉面積当たりの除去量、予測時間

実験区	実験開始時の チャンパー内の NO ₂ 濃度(ppb)	実験開始時の チャンパー内の NO ₂ 量(μg)	実験終了時の チャンパー内の NO ₂ 濃度(ppb)	実験終了時の1ポット あたりのNO ₂ 除去量 (μg)	実験終了時の1ポット あたりのNO ₂ 減少率 (%)	葉面積(m ²)	実験開始より60分後の単位 葉面積あたりのNO ₂ 除去量 (μg/m ²) ^{(注2)(注3)}	チャンパー内のNO ₂ 濃度が0と なるまでの予測時間(min) ^(注4)
対照区	505.0±1.6	24.9±0.1	259.0±39.8	—	—	—	—	705
黒土区	501.7±1.2	25.0±0.0	6.3±4.5	24.7±0.2	98.8±0.9	—	—	158
コウライシバ区	500.7±0.9	25.3±0.1	0.0±0.0	25.3±0.1	99.9±0.2	0.0130±0.0009	79.1±43.4 a	121
メキシコマンネングサ区	499.7±1.2	25.3±0.1	0.0±0.0	25.3±0.1	100.0±0.0	0.0091±0.0001	151.2±66.8 ab	119
ツルマンネングサ区	501.0±1.4	25.1±0.1	0.0±0.0	25.1±0.1	100.0±0.0	0.0100±0.0006	211.9±43.6 bc	95
パリダム区	502.7±0.5	25.1±0.0	0.0±0.0	25.1±0.0	100.0±0.0	0.0126±0.0028	306.5±77.2 c	60

注1) 表中の全ての数値は3反復による平均値

注2) 実験開始より60分後の植栽を施した実験区の1ポットあたりのNO₂除去量から黒土区のNO₂除去量を減じ、葉面積を乗じたもの。

注3) 同じアルファベットのついた値は5%水準で有意差なし(Tukey)

注4) 図-1の各実験区の近似式より算出(y=0)

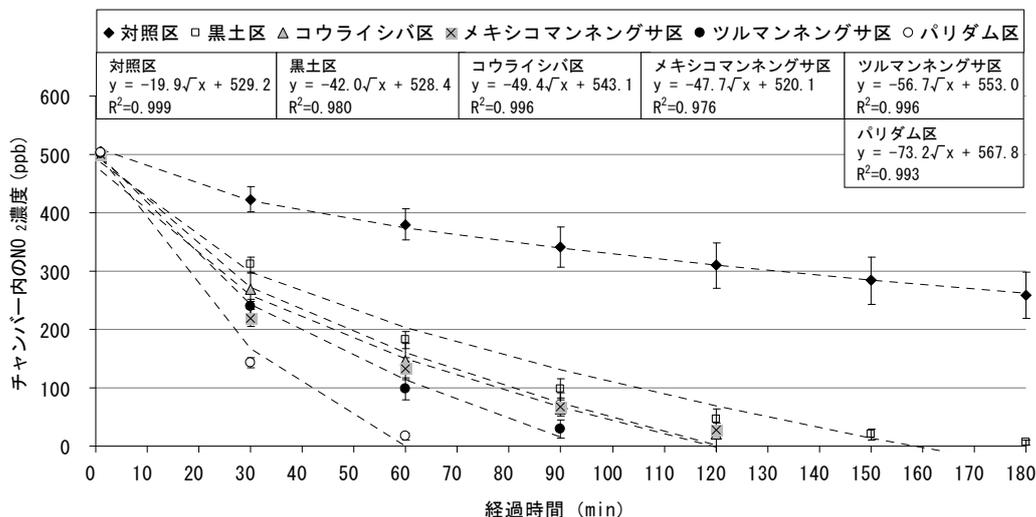


図-1 各実験区のチャンパー内のNO₂濃度の経時的変化及び近似式

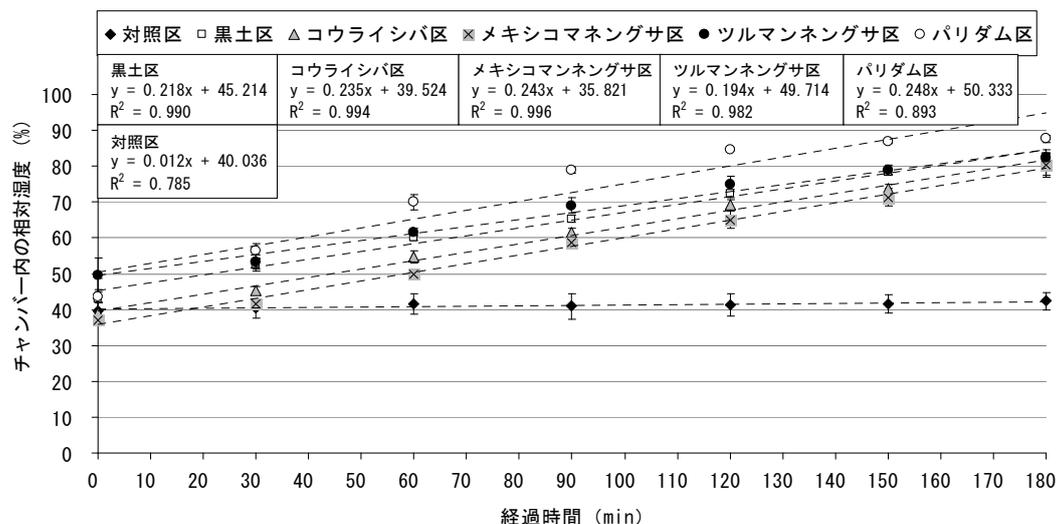


図-2 各実験区のチャンパー内の相対湿度の経時的変化及び近似式

出すると約 48%であり、注入した NO₂ の約半分がチャンパー壁面に吸着しているものと推測される。また、実験終了時である 180 分後には比較対照とした黒土区の NO₂ 除去率もほぼ 100% になった。なお、供試植物間の単位葉面積あたりの NO₂ 除去量を比較するため、チャンパー内の NO₂ 濃度について黒土区と植栽を施した区の差が最も大きかった 60 分後の値を用いて、単位葉面積あたりの NO₂ 除去量を算出した。その結果、コウライシバ区で 79.1 ± 43.4 μg/m²、メキシコマンネングサ区で 151.2 ± 66.8 μg/m²、ツルマンネングサ区で 211.9 ± 43.6 μg/m²、パリダム区で 306.5 ± 77.2 μg/m² となった。さらに、コウライシバ区とメキシコマンネングサ区の間には有意差が認められなかったものの、ツルマンネングサ区とパリダム区の間には有意差が認められ、コウライシバ区と比較するとパリダム区では 3.9 倍、ツルマンネングサ区で

は 2.7 倍もの単位葉面積あたりの NO₂ 除去量が得られた。このことから、セダム類でも環境条件によっては、コウライシバと同等か場合によってはそれ以上の NO₂ 除去量を得られる可能性があることが明らかとなった。

(3) 莖葉部の表面構造

供試植物の表面構造を毛茸、気孔密度、孔辺細胞長(長径、短径)を中心に観察した結果、毛茸ではコウライシバは向軸面(表)では直径 6 μm 程の非常に細かい角状の毛茸と無数のシリカ小体によって全面が覆われていたが、背軸面(裏)では長さ 20 μm 程の笹葉型の毛茸が一定間隔で生えている以外に目立った凹凸もなく滑らかな表面構造であった。しかし、セダム類では不定形もしくは肋骨形などの突起状の毛茸によって全ての葉面が覆われており、非常に起伏に富んだ表面構造となっていることが確認できた。

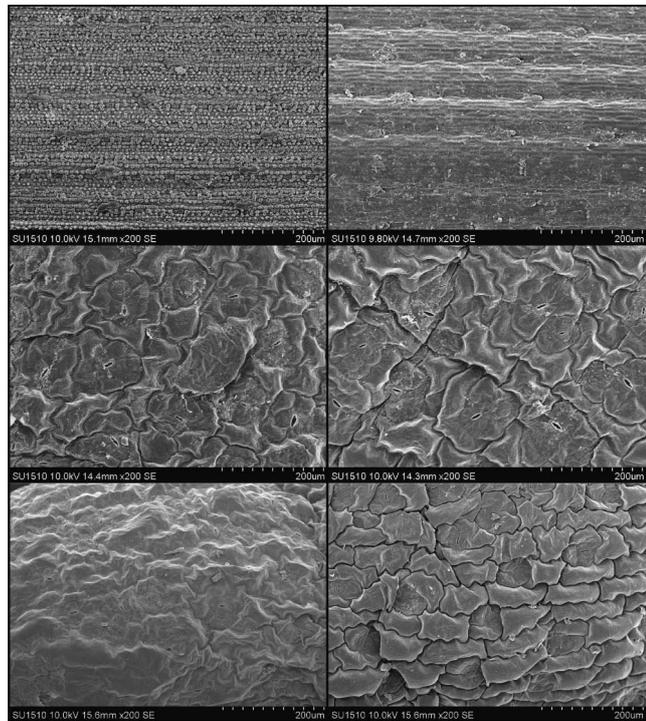
表一 各供試植物の気孔密度 (個/mm²) 及び孔辺細胞長 (μm)

実験区	測定部位	気孔密度 (個/mm ²)	孔辺細胞長 (μm)	
			長径	短径
コウライシバ	向軸面 (表)	332.8±23.5	21.0±1.2	10.5±1.0
	背軸面 (裏)	308.8±18.7	22.5±2.2	12.0±1.0
	平均値 (注2)	320.8±16.5 a	21.8±1.3 a	11.3±0.8 a
メキシコマンネングサ		33.0±1.8 bc	21.5±1.2 a	9.0±1.2 b
ツルマンネングサ	向軸面 (表)	21.6±1.4	27.5±2.2	9.5±1.0
	背軸面 (裏)	25.2±1.6	22.0±1.0	8.5±1.2
	平均値 (注2)	23.4±0.9 b	24.8±1.2 b	9.0±0.9 b
パリダム		41.6±4.1 c	16.5±1.2 c	5.5±1.0 c

注1) 表中の全ての数値は3反復による平均値

注2) 向軸面 (表) と背軸面 (裏) の気孔密度、孔辺細胞長の平均値

注3) 異なるアルファベット間は5%水準で有意 (Tukey)



写真一 各供試植物の葉部表面構造のSEM画像

注1) 左上段: コウライシバ (向軸面)、右上段: コウライシバ (背軸面)

左中段: ツルマンネングサ (向軸面)、右中段: ツルマンネングサ (背軸面)

左下段: メキシコマンネングサ、右下段: パリダム

特に、パリダムでは規則的に長方形の突起状の毛茸 (100×40×40 μm³ 程度) が並んでおり、非常に立体的な表面構造であった (写真一)。また、気孔密度に関してはコウライシバでは向軸面と背軸面の平均値が 320.8±16.5 個/mm² であったのに対して、メキシコマンネングサでは 33.0±1.8 個/mm²、ツルマンネングサでは向軸面と背軸面の平均値が 23.4±0.9 個/mm²、パリダムでは 41.6±4.1 個/mm² であり、コウライシバと比較してセダム類の気孔密度は 1/8~1/14 程度であることが確認され、特にツルマンネングサは気孔密度が低いことが明らかとなった。さらに、検定の結果、孔辺細胞長 (長径、短径) については、長径ではパリダム < メキシコマンネングサ = コウライシバ < ツルマンネングサ、短径ではパリダム < ツルマンネングサ < メキシコマンネングサ < コウライシバという順序となった (表一)。なお、これら一連の実験で得られた結果をもとに、目的変数を実験開始時より 60 分後の単位面積あたりの NO₂ 除去量とし、説明変数を実験開始より 60 分後の相対湿度、気孔密度 (向軸面)、(背軸面)、孔辺細胞長 (向軸面・長径)、(向軸面・短径)、(背軸面・長径)、(向軸面・短径) として、重回帰分析を行った。その結果、

$$y = 455.22 - 30.63x \quad R^2 = 0.83$$

変数 y = 実験開始より 60 分後の単位面積あたりの NO₂ 除去量
 変数 x = 孔辺細胞長 (背軸面・短径)

の回帰式によって表された (IBM® SPSS、ステップワイズ法、基準: 投入 F > = 2.0、除去 F > = 1.999)。以上の結果から、供試植物の NO₂ 除去量を左右する要素として、「背軸面の孔辺細胞長の短径が最も影響を及ぼしている」という結果となった。しかしながら、実測値としてみると、孔辺細胞長の短径の値はパリダム < ツルマンネングサ < メキシコマンネングサ < コウライシバという順序であり、これに対し、実験開始より 60 分後の単位面積あたりの NO₂ 除去量はパリダム > ツルマンネングサ > メキシコマンネングサ > コウライシバと全く逆の順序となっており、両事象の関係性が判然としない結果となった。このことから、本実験の結果や既存の研究事例 (56,7) をもとに総合的に判断すると、どちらかという NO₂ 除去能は気孔数や孔辺細胞長の短長など、供試植物の蒸発散に関わる要素よりも、植物体へ直接 NO₂ が乾性・湿性沈着されるために適した形態的特徴、つまり、写真一において提示したような表面構造の複雑さなどが影響を与えている可能性が示唆された。

4. 結論

本実験で使用したセダム類は何れも、環境基準値の 10 倍もの高濃度の NO₂ を短時間で環境基準値以下まで除去しており、コウライシバと比較して同等かそれ以上の NO₂ 除去能力を有していたことが明らかとなった。このことから、熱環境改善効果ではなく、大気中の NO₂ の除去を目的とした場合は、環境浄化用植物として十分に機能するものと推測される。さらに、セダム類の形態的特徴や表面構造を観察した結果、本実験では数値化が出来なかったものの、コウライシバと比較してセダム類の茎葉部の表面構造は明らかに重層的で複雑な形態をしていたことから、マイクロレベルの表面構造の差が NO₂ 除去に多大な影響を与えていた可能性があり、この点の早急な解明を今後の課題としたい。

謝辞

走査型電子顕微鏡の操作法について、東京農業大学電子顕微鏡室の矢口行雄教授、本橋慶一助教、佐藤太一君には多大なるご支援を賜りました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

補注及び引用文献

- 1) 山本美奈・川島茂人・村上暁言・渡辺達三 (2004) : メキシコマンネングサを用いた屋上緑化において植栽密度及び灌水の有無が屋上の熱環境に与える影響 : ランドスケープ研究 67(5), 443-446
- 2) 石井伸明・梅原沙和子・涌井史郎・飯島健太郎・北島信行・内山直明・佐藤忠継 (2011) : 薄層緑化が夏期の折板屋根へもたらす暑熱環境緩和効果について : 芝草研究 39(2), 127-131
- 3) 今中忠行・森川弘道・斎藤和季・佐治 光・中里広幸・長谷川功・西村 実 (2000) : 植物による環境負荷低減技術 : (株)NTS, 49-94pp
- 4) Wild, O., Prather, M.J., Akimoto, H. (2001) : Indirect long-term global radiative cooling from NO_x emissions. : Geophysical research letters 28 (9), 1719-1722
- 5) 藤井修二・車 照運・宮村 壽・鍵 直樹 (2004) : チャンバー法による植物の窒素酸化物除去効果 : 日本建築学会環境系論文集 582, 61-66
- 6) 藤井修二 (2008) : TALK ABOUT 21 - 植物による窒素酸化物の除去効果について - : (株)住化分析センター : SCAS NEWS 2008-II Vol.28, 3-6
- 7) 浅井俊光・鹿ノ戸あゆみ・水庭千鶴子・近藤三雄 (2011) : イボメアとヒューケラの二酸化窒素浄化能に注目したファイトレメディエーション能力の評価 : 造園技術報告集 6, 74-77
- 8) 木全勝彦 : 室内空気中の二酸化窒素 (NO₂) について (2005) : 愛知県学校薬剤師会 <<http://yak.a-gaku.jp/kim/sai/pdf/NO2/no01.pdf>>, 2011. 8. 22 参照