チャンバー法による植物の窒素酸化物除去効果 REMOVAL EFFECTS OF NITROGEN-OXIDES OF PLANT BY CHAMBER METHOD

藤井修二*, 車 熙 運**, 宮村 壽***, 鍵 直樹****

Shuji FUJII, Hiun CHA, Hisashi MIYAMURA
and Naoki KAGI

The removal effect of NO_x (nitrogen-oxides) is an important factor for finding the material cycle in urban environment. But there are few investigations carried out to characterize the removal efficiency of air pollutants by plants. In this paper, the removal effect of NO_x by adsorbing and absorbing on plants was studied experimentally. The chamber having NO_x concentration such as atmosphere environment was designed for the experiment. Plants were exposed to the environmental concentration level of NO_x in the chamber designed for the experiment, and the removal effects of partitioned parts of plants were evaluated as a NO_x sorption flux calculated by measurement data of decreasing trend for NO_x concentration in the chamber. The correlation of NO_x sorption velocity and CO_2 absorption velocity was evaluated.

Keywords : plant sorption, air pollutant, Carbon dioxide (CO_2), Nitrogen Oxides (NO_x)

植物収着、大気汚染物質、二酸化炭素 (CO_2)、窒素酸化物 (NO_x)

1. はじめに

都市域において緑化の促進が叫ばれるようになり、建築物に対しても、壁面緑化、屋上緑化などの必要性、重要性が盛んに取り上げられている。建物周辺の植栽には、熱・風・音・大気環境負荷低減に寄与する効果が大きく、特に直射日光の遮断による外壁からの熱負荷低減に有効であり¹⁾、自然エネルギー利用の観点から注目されているが、そのような中で、建築植栽を大気汚染物質除去に有効利用することが期待されている。

植物による、大気汚染物質の除去能力については、植物自体の植物内への固定化²⁾、植物表面への吸着、土壤中に存在する土中菌の持つ汚染物質分解作用³⁾等、定性的な報告が行われている。これらの要素を生かし、都市域における植物をより有効に大気汚染物質除去に活用するためには、まず植物の持つ大気汚染物質除去の特性について把握する必要がある。

植物の吸収作用による窒素酸化物除去効果については、既往の研究において窒素酸化物吸収量を二酸化炭素吸収量より推定するモデル等が提案されている⁴⁾。植物表面への吸着を含めた窒素酸化物除去効果については、実際の環境よりはるかに高い濃度レベルでは測定されているが、実際の環境濃度レベルにおける測定例は乏しいのが現状である。本研究では未だ環境基準を満足させるに至らない窒

素酸化物(NO_x)に着目し、都市域の一般大気レベルの環境下に植栽した場合の植物による NO_x 削減効果を検証することを目的としている。また地球温暖化に大きく寄与している二酸化炭素(CO_2)の吸収実験を行い、 NO_x 収着フラックスと CO_2 吸収フラックスの関係式より NO_x の吸収・吸着効果を検証した。外気環境に近い空間を有する測定システムを考案し、汚染物質濃度を植物の有無により比較することで季節の違いによる大気汚染物質除去効果を検証した。

2. チャンバーの概要及び基本性能

植物の NO_x 浄化能力の測定には図1に示すチャンバーを用いた。

図1 実験装置の概要

* 東京工業大学大学院理工学研究科情報環境学専攻
教授・工博

** 東京工業大学大学院理工学研究科 大学院生

*** 金沢福祉専門学校 博士(工学)

**** 国立保健医療科学院建築衛生部 研究員・博士(工学)

Prof., Department of Mechanical and Environmental Informatics, Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Graduate Student, Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology
Kanazawa Welfare College, Dr. Eng.
Researcher, Dept. of Architect. Hygiene Eng. and Housing, National Institute of Public Health, Dr. Eng.

図2 冷却装置の作動条件による温度・照度の差

実験用チャンパー（内寸が 500(W)×800(D)×300(H)mm、内部容積 0.12m³）は南面及び上面は普通板 6mm ガラス、その他の面は両表面をアルミニウムフィルムで仕上げた 16mm 厚のボードにより構成されている。チャンパー内部には外気流入口から流出口までの空気のショートカットを防止する整流板(16(W)×500(D)×300(H)mm)を設置し、植物及び検体は整流板が終わる所からチャンパー床に置く形になっている。また、チャンパー内部は日射や植物の蒸散作用により高温・多湿となる為、チャンパー内空気を冷却・除湿する冷却系（50 l/min ポンプ、冷却管、三角フラスコ）を設けた。チューブ類は冷却系には NO_x 吸着の少ない Teflon(PFA)チューブ(内径 9mm)を、測定機器との接続部には主として Teflon(PFA)チューブ(内径 1/4 インチ)を用いている。また、試験用ガス及び外気導入装置（高濃度バッグ）を設置した。実験で使用された測定装置としては、窒素酸化物濃度測定に化学発光法による NO-NO₂ 自動分析計(日本サーモエレクトロン(株)製 MODEL42C)を用いた。また、二酸化炭素濃度は非分散赤外線式の一酸化炭素・炭酸ガス測定器((株)ガステック製 CMCD-10、CMCD-11)を、鉛直面照度は受光素子にシリコンフォトダイオードを使用したデジタル照度計(東京光電(株)製 ANA-F11)をそれぞれ用いて測定を行った。

2.1 チャンパー内部の気流及び日影

内部気流については線香の煙及びドライアイスの煙を用いて行った簡単な気流の可視化実験で、整流板の効果によりサンプリング吸い込み口と吹き出し口のショートカットが生じないことを確認した。また、チャンパー内には日射による日影が生じないように設定した。

2.2 チャンパー冷却装置の評価

夏期の実験において、チャンパー内温湿度の上昇を抑制するために冷却・除湿装置を実験装置に組み込んだ。夏期において冷却装置使用時と停止時のチャンパー内温湿度を比較することにより冷却装置の効果について検証した。実験条件はチャンパー内に試験体を挿入せず、「冷却装置を作動させない場合」「冷却装置を作動させる場合」「ポンプでのチャンパー内空気の強制循環を行うものの冷却しない（空回し）」の 3 条件で行った。測定はガラスを閉じてチャンパーを密閉してから 15 分間行い、3 条件におけるチャンパー内温度・照度の測定結果を図 2 に示す。これより、今回考案した冷却除湿装置を使用することでチャンパー内部温度は外気と 5°C 前後の差に押さえられることが確認された。また湿度の場合、外気湿度が平均 42.2% に対し、冷却装置を作動させる場合のチャンパー内植物周辺における平均湿度は 38.8% を示した。この時、15 分間の実験において 7.6ml の凝縮水が捕集され、冷却系による冷却除湿効果があるこ

図3 システムブランクの測定時の温湿度及び照度

図4 システムブランクの測定・回帰例

とが確認できる。

2.3 測定システムの NO_x 吸脱着特性

チャンパー内部に何も入れない状態を測定システムのブランクとして濃度減衰実験を行い、測定システム自体の NO_x 吸脱着特性の評価を行った。ブランクの測定時の温度、湿度、及び照度を図 3 に示す。ブランクの測定結果における単位時間当りの NO_x 吸着量と NO_x 濃度の関係の例を図 4 に示す。Henry 型吸着においては、式(1)~(3)に示す吸脱着フラックスの式として表す事ができる⁷⁾。

$$u_a = k_a s C \quad \text{但し、} \quad k_a = \frac{A}{\sqrt{M_a T}} \quad (1)$$

$$u_d = N k_d \quad \text{但し、} \quad k_d = B e^{-\frac{E_d}{RT}} \quad (2)$$

$$u = u_a - u_d = k_a s C - N k_d \quad (3)$$

Henry の吸着式より導いた式に基づいて、 α は温度($\sqrt{T}$)、及び、付着確率 s に影響を及ぼす可能性のある絶対湿度と、 β は温度 ($\exp(-1/T)$)、及び、表面吸着量に關係のあると思われる周辺 NO_x 濃度の履歴との相関を見た。絶対温度と α の関係(図 5)は、通常環境に

において $T^{1/2}$ の値が殆んど変化しないために相関は見られず、本研究における実験の条件下では、絶対温度はあまり測定システムへの NO_x 吸着に影響しないことが考えられる。また、絶対湿度と α の相関は図 6 に示すように絶対湿度との相関が高いことから、絶対湿度は測定システムへの NO_x 吸着に影響を与えるものとし、相関関係の回帰式より α を絶対湿度の関数として次(4)の式に表すこととした。

$$\alpha = 4 \times 10^{-5} \sigma + 0.0002 \quad (4)$$

絶対温度と β の関係を示す図 7 には通常環境において $\text{Exp}(-1/T)$ の値は殆んど変化しないために相関は見られず、本研究の実験条件下では、絶対温度は測定システムからの NO_x の脱着にあまり影響しないことが考えられる。また、図 8 に示すように NO_x 濃度履歴と β の関係が高いことから、 NO_x 濃度履歴は測定システムからの脱着に影響を与えるものとし、相関関係の回帰式より、 β を NO_x 濃度履歴の関数として式(5)の様に表すこととした。

$$\beta = -0.0009_{\text{hr}} C_{t(60 \rightarrow 0)} - 0.009 \quad (5)$$

以上より本実験における測定システムの NO_x 吸脱着特性を、

$$-M = \{4 \times 10^{-5} \sigma + 0.0002\} C + \{-0.0009_{\text{hr}} C_{t(60 \rightarrow 0)} - 0.009\} \quad (6)$$

として表し、M の値をチャンバーからの NO_x 放出量として、植栽による NO_x 収着を評価する際の理論値の算出に用いることとした。

2.4 凝縮水中のイオンについて

冷却システムに捕集される凝縮水中に NO_x が溶解されることが考えられ、凝縮水中のイオンの検討を行った。気中の NO_x が凝縮水中に溶解することにより亜硝酸イオン(NO_2^-)及び硝酸イオン(NO_3^-)の陰イオンとなる。インピンジャーを用いて NO 及び NO_2 ガスを純水にバブリングして捕集した後、捕集液中の陰イオンについてイオンクロマトグラフを用いて分析を行った。捕集時の設定条件を表 1 に示す。気中の硝酸塩の溶解を防ぐために粒子を、光照射による測定システムからの分解を防ぐために光をそれぞれ排除した。捕集液の分析結果を表 2 に示す。 NO 及び NO_2 ガスを捕集した純水から両イオン共に検出されている。 NO_2 についてはゼロガスを捕集した際にはいずれの条件からも検出されていない。また特に NO_2 標準ガスを捕集した際に高濃度で検出されていることから、 NO_2 が溶解し NO_2^- となることがいえる。 NO_3^- についてはゼロガスを捕集した純水からも検出されていることから、気中の NO_x 由来以外にも考えられる。粒子の影響のない条件下においても同様に検出されていることから粒子に由来する可能性は低いといえる。更に光の影響のない条件下においては検出されていないことより、 NO_3^- が発生する原因として、配管の材料中の紫外線吸収剤に含まれる窒素分が、光の影響で配管中から分解することが考えられる。結果より、本測定システムにおいては NO_3^- は気中の NO_x 以外に発生源が考えられることから、 NO_3^- は考慮せず、 NO_2^- のみを気中の NO_x が溶解したものとして取り扱った。

3. チャンバーによる CO_2 及び NO_x 除去量の測定

3.1 実験対象体及び測定期間

実験対象体を表 3 に示す。壁面緑化植物としての利用が期待されているハイネズ (*Juniperus conferta* parl.、木本類) および比較対象植物としてヘデラ (*Ivy*、ツル植物) の 2 種類の試験体植物を用いた。各植物の葉面積は、各期間にデジタルカメラで撮影し、林学や植物(森林)生態学分野で使用されている LIA32 の葉面積計測機能

図 5 絶対温度と α の相関

図 6 絶対湿度と α の相関

図 7 絶対温度と β の相関

図 8 濃度履歴と β の相関

表 1 凝縮水中イオン検討時の実験条件

捕集対象ガス	ゼロガス($\text{NO}_x=0\text{ppb}$)	捕集液 純水 10 ml
	NO 標準ガス($\text{NO}=5\text{ppm}$)	捕集時間 1 hour
	NO_2 標準ガス($\text{NO}_2=5\text{ppm}$)	捕集流量 2 l/min
排除する影響	なし	捕集対象ガスを直接捕集液にバブリング
	粒子	空気の清浄な人工気象室内において、捕集対象ガスをメンブレンフィルターを通すことによりガス中の粒子を排除した後、捕集液にバブリング
	粒子・光	条件'粒子'と同様の環境において、更に測定システムの配管類をアルミにより被覆することで遮光し、捕集液にバブリング

表 2 NO_x 捕集液の分析結果

曝露したガス	排除した影響	NO_2 [mg/l]	NO_3 [mg/l]
ゼロガス (0ppm)	なし	Not found	1.34
	粒子	Not found	1.98
	粒子・光	Not found	Not found
NO 標準ガス (5ppm)	なし	0.00943	2.54
	粒子	Not found	1.87
	粒子・光	Not found	0.984
NO_2 標準ガス (5ppm)	なし	0.858	1.94

表 3 実験対象項目

植栽 / 材料	CO_2	NO_x
ハイネズ(木本類)	3検体(A,B,C)	2検体(A,B)
ヘデラ(ツル植物)	2検体(a,b)	2検体(a,b)
土壌	1検体	1検体
バックグラウンド	1検体	1検体
イミテーション		1検体

をもちい、画面を処理して計測した。ハイネズは 3 検体、ヘデラは 2 検体を対象とし、ブランクとして土壌のみを入れた場合と何も入れない場合について実験を行った。 NO_x の実験については表面吸着のみを期待したビニール製の模擬草 (イミテーション) を用いた。植物の場合、測定対象とした部位以外をテドラー(PVF)シートによ

って被覆することにより、植栽(Planting)、植物部(Plant)、土壌部(Soil)、それぞれの部位のみへの NO_x 収着量を測定した。各部位を図 9 に示す。測定は、実際に近い環境を得る為に屋外及び安定した温度、湿度、照度の得やすい屋内において行った。実験期間は表 4 に示すように夏期、中間期、冬期である。植物へのストレスを軽減するため、1 回の測定時間は 1 時間とした。

3.2 CO_2 の濃度減衰実験

チャンパー内の CO_2 濃度を上昇させるため、 CO_2 高濃度バッグを製作した。チャンパー内への CO_2 ガスの拡散のため、最初の数分間はミニポンプを用いた。ミニポンプの吸引量は夏期の測定では 6 l/min、中間期、冬期の実験では 5.2 l/min であった。チャンパー内濃度を大気環境レベルで考えられ得る範囲の高濃度に上昇させ、その後植物等の収着(吸着+吸収)・吸収などにより実験開始から 60 分まで濃度を減少させ、チャンパー内汚染物質濃度の経時変化から植物による浄化能力を検討した。 CO_2 高濃度バッグは、 CO_2 濃度を 1500ppm に調整して用いた。濃度減衰時には CO_2 浄化能力実験では外気を導入した。

3.3 NO_x の濃度減衰実験

大気 NO_x の構成成分の中でも、 NO は植物に吸収されにくい、植物に吸収される NO_x 窒素の大部分は NO_2 に由来すると考えられる^{8),9)}。そこで本研究では、チャンパー内に導入する NO_x ガスとして濃度 5ppm 程度の NO_2 標準ガスを使用した。

測定手順としては、 CO_2 濃度減衰実験と同じ方法でチャンパー内に試験体植物を挿入した後、 NO_2 標準ガスを毎分 1 l でチャンパー内に約 2 分間導入し、チャンパー内 NO_x 濃度を約 100 ppb 程度まで上昇させた。始めの濃度上昇時におけるミニポンプの吸引量は夏期、中間期、冬期共に 4.2 l/min であった。 NO_x 濃度の上昇が停止した時点より、その濃度変化を約 60 分にわたって測定した。 NO_x 濃度の測定中にチャンパー内に間隙から外気が流入する可能性がある。そのため、チャンパー内にゼロガスユニットから NO_x 濃度 0 ppb のゼロガスをポンプによって毎分約 4 l 送り込み、常にチャンパー内を正圧とし、外気のチャンパー内への流入を防止した。 NO_x 濃度の測定終了後に、冷却システムにおいて捕集された凝縮水量を測定すると共に、凝縮水中の亜硝酸イオン(NO_2^-)濃度をイオンクロマトグラフにより分析した。

4. 濃度減衰実験による CO_2 及び NO_x 除去量の評価

4.1 CO_2 浄化能力の評価方法

図 10 に CO_2 浄化能力の評価方法を示す。実験開始後ピーク濃度以降の 15 分から 60 分までのチャンパー内濃度曲線を用いた。植物が吸収する CO_2 量 U [$\text{mg}/\text{min}/\text{m}^2$] は周辺濃度(チャンパー内濃度 C) に比例すると仮定して $U = k_{\text{CO}_2} \cdot C$ とし、(7)式より CO_2 吸収フラックス: k_{CO_2} [$\text{mg}/\text{m}^2 \text{ min}$] を CO_2 浄化能力の指標とした。葉面積は各期間にデジタルカメラで撮影した画面を処理して計測した。

$$\text{CO}_2 \text{ 吸収フラックス: } k_{\text{CO}_2} = \frac{C_0 \cdot q \cdot \Delta t - C(t) \cdot q \cdot \Delta t - V \cdot \{C(t) - C(t + \Delta t)\}}{C(t) \cdot S \cdot \Delta t} \quad (7)$$

4.2 NO_x 浄化能力の評価方法

NO_x 浄化能力の評価方法を図 11 に示す。まずチャンパー内での NO_x の吸脱着や凝縮水への NO_x の溶解をゼロと仮定した場合の NO_x 濃度の理論値を求め、 $t=60$ 分時点での理論値と、実験により得られた

表 4 測定期間

夏期	2000 / 7 / 13 ~ 7 / 18
	1999 / 8 / 24 ~ 9 / 10
中間期	2000 / 4 / 3 ~ 4 / 6
	1999 / 10 / 4 ~ 10 / 26
冬期	2000 / 10 / 24 ~ 10 / 26
	1999 / 12 / 17 ~ 12 / 27

図 9 測定対象部位

図 10 CO_2 濃度減衰実験

図 11 NO_x 濃度減衰実験

NO_x 濃度の差を NO_x 減少濃度とした。理論値は(8)式より(9)式を用いた。次に、冷却系に捕集された凝縮水量と NO_2^- 、 NO_3^- イオン濃度より、凝縮水中に溶け込んだ NO_x 量を求めた。大気中、凝縮水中共に NO_x 中の N のみを換算し、N 換算値を NO_x 吸着等の指標とした。

$$\frac{C_{\text{zero}} Q(1-f) \Delta t + C_{\text{out}} Q f \Delta t + M \Delta t - C Q \Delta t}{\text{ゼロガス流入量} \quad \text{外気 NO}_x \text{ 流入量} \quad \text{チャンパー内 NO}_x \text{ 発生量} \quad \text{チャンパー内 NO}_x \text{ 変化量}} = V \Delta C \quad (8)$$

$$C_{\text{cal}}(t + \Delta t) = C(t) e^{-\frac{Q \Delta t}{V}} + \left(1 - e^{-\frac{Q \Delta t}{V}}\right) \left\{C_{\text{zero}}(1-f) + C_{\text{out}} f + \frac{M}{Q}\right\} \quad (9)$$

なお、計算式はチャンパー内部の物質収支に基づくものである。測定結果よりチャンパー内濃度の微小時間(1 分間)における理論上の濃度減衰量(計算値)と実測値理論上の濃度減衰量(計算値)と実測値の濃度減衰量の差を求めることによって、単位時間当りの NO_x 収着量 [$\mu\text{g}/\text{min}$] 及び NO_x 収着フラックス [$\mu\text{g}/\text{m}^2 \text{ min}$] を求め、その値を凝縮水中への NO_x 溶解量を考慮しない植物による NO_x 除去量とした。ただし、実験開始直後の 2 分間はチャンパー内濃度が不安定となるため、検討対象から外すこととした。その算出式を表 5 に示す。凝縮水中への NO_x 溶解量を考慮した測定毎の植物による NO_x 除去能力は、測定時間内の単位時間当り NO_x 減少量の積算値から凝縮水中への溶解量を減じた値とした。

5. NO_x 除去効果における吸収と吸着の影響

5.1 CO₂ 吸収フラックスと NO_x 収着フラックスの相関式

NO_x の濃度減衰実験時、チャンバー内に NO_x 濃度 0 ppb のゼロガスを送り込んだが、チャンバー内の CO₂ 濃度の変化を見るため、外気を導入した濃度減衰実験を行った。その結果に基づいて CO₂ 吸収フラックスと NO_x 収着フラックスの比較を行い、NO_x 除去効果における吸収と吸着の影響を評価した。

NO_x 収着フラックス及び CO₂ 吸収フラックスを求める式を式(11)、(12)に示す。

$u = k_{CO_2} \cdot C$ と仮定すると、

$$k_{NO_x} = \frac{u_{NO_x}}{C_{(t)}} = \frac{U_{NO_x}}{C_{(t)} S \Delta t} \quad (11)$$

$$k_{CO_2} = \frac{C_{out} q \Delta t - C_{(t)} q \Delta t - V(C_{t+\Delta t} - C_{(t)})}{C_{(t)} S \Delta t} \quad (12)$$

既往の研究⁹⁾において、植物の NO_x 吸収フラックス(植物学上では葉面拡散コンダクタンス)と CO₂ 吸収フラックスの関係は式(13)、(14)に示されるように一定であるとされている。

$$\frac{u_{NO_x}}{u_{CO_2}} = \frac{k_{NO_x}}{k_{CO_2}} \frac{C_{NO_x}}{C_{CO_2}} \quad (13) \quad \frac{k_{NO_x}}{k_{CO_2}} = (\text{一定}) \quad (14)$$

これを参考として、実測値における NO_x 収着(吸収・吸着)フラックスと CO₂ 吸収フラックスとの比較を行うことにより、植物の NO_x 浄化能力における NO_x 吸収の影響を評価した。結果を図 12 に示す。植物部の NO_x 収着において NO_x 吸収の影響が支配的であれば、NO_x 収着フラックスと CO₂ 吸収フラックスとの間には相関が見られるはずであるが、結果において両者の間に明確な相関関係は見られない。CO₂ 吸収フラックスがマイナスに転じている時にも NO_x 収着フラックスはプラスになっている。このことは、植栽による NO_x 浄化能力には植物内への吸収だけでなく、表面への吸着等他の要因が大きく寄与していることを示している。

5.2 NO_x 暴露履歴の影響

植物部への NO_x の暴露履歴によって、植栽への NO_x 収着フラックスに生じる差異について検討した。純水により 60 分間洗浄を行い表面に吸着した NO_x を洗い流した試験体と、同様に洗浄した後に NO₂ 標準ガス(5ppm)にそれぞれ 20 分間、40 分間暴露した試験体を用いて濃度減衰実験を行い、その際の NO_x 収着フラックスの値を比較した。結果を図 13 に示す。暴露時間の違いによる収着フラックスの値には差が生じておらず、暴露時間に比例した明確な増減も表れていない。本実験で行ったレベルの NO_x 暴露時間では、NO_x 収着フラックスの値には影響を及ぼさないことが示された。

濃度減衰実験終了直後の試験体において、葉への NO_x の吸着量を測定した。実験終了直後に、葉の一部を純水 50 ml に 5 分間浸すことで葉についた NO_x を純水中に溶解させ、その純水中の NO₂-イオンの量をイオンクロマトグラフにより測定した。結果を表 6 に示す。40 分間暴露した葉を浸した純水から NO₂-イオンが検出されたことより、葉表面に NO_x が吸着していることが示された。

5.3 植栽の乾燥と湿潤の影響

植栽に 3 日間水を与えない状態を乾燥時、純水に浸した直後の状

表 5 汚染物質浄化能力の評価法

図 12 NO_x 収着フラックスと CO₂ 吸収フラックスの関係

図 13 NO_x 暴露履歴と NO_x 収着フラックスの関係

(a) 植物部

(b) 土壌部

図 14 乾燥時と湿潤時の NO_x 収着フラックス

表 6 葉を洗浄した純水の分析結果

暴露時間	暴露なし	暴露 20 分	暴露 40 分
NO ₂ ⁻ [mg/l]	Not found	Not found	0.0707

態を湿潤時としてそれぞれ濃度減衰実験を行い、NO_x 収着フラックスの比較を行った。結果を図 14 に示す。植物部においては乾燥時よりも湿潤時の値が高くなっている。これは、表面に吸着している水への NO_x の溶解が要因として考えられる。土壌部においては逆に乾燥状態の方が湿潤状態よりも収着フラックスの値が約 2 倍程度高くなっている。

6. 測定結果

実験開始後 10 分間は高濃度バッグを接続してチャンバー内 CO₂ 濃度を上昇させ、その後外気を導入した。各期間の実験結果を図 15 に示す。夏期および中間期の実験ではチャンバーの気密性が低く、また中間期では高濃度バッグの濃度が低いために中間期の濃度は全体的に低くなった。各実験においても外気濃度、ピーク濃度は異なるが、実験開始より 15 分以降の外気導入時には植物が存在しているほうが CO₂ 濃度の減衰が激しく、特に夏期にはその傾向が顕著である。NO_x の場合、実験開始後 6 分間は高濃度バッグを接続してチャンバー内 NO_x 濃度を上昇させ、その後ゼロガスバッグよりゼロガ

図 15 CO₂ 浄化能力実験結果 図 16 NO_x 浄化能力実験結果

スを導入した。NO_x 濃度測定の実験結果を図 16 に示す。夏期はチャンパーの気密性が低いため全体的に濃度が低く、初期濃度にばらつきがある。平均するとハインズやヘデラが存在する場合のほうが「バックグラウンド」「土壌」の場合に比べて NO_x 濃度の減少が大きい。従って、植物は大気中の NO_x 濃度の減少に寄与していると考えられる。

各季節別のハインズの平均 CO₂ 吸収量及び NO_x 収着量を表 7 に示す。夏期、中間期、冬期の全ての実験について CO₂ は、60 分間の平均吸収量を示した。NO_x は t=60 時点での理論値と実験により得られたチャンパー内 NO_x 濃度差を求め、後の凝縮水考慮の為に NO_x 中の N 量だけに着目して N 換算値を求めた。

7. おわりに

本研究では植物による NO_x の浄化能力実験結果をもとに、NO_x 濃度を植物の有無により比較することで汚染物質除去効果の検証を行った。以下に得られた結果を述べる。

- (1) 濃度減衰実験による植物の NO_x 除去効果を検証するにあたり、測定システムを作製した。
- (2) 濃度減衰実験により植物は空気中の CO₂ 及び NO_x 濃度の減少に寄与していることが確認された。
- (3) システムの NO_x 吸脱着特性を評価するためチャンパー内 NO_x 吸脱着フラックスを求めた。また、ハインズの NO_x 収着フラックスを求め、CO₂ 吸収フラックスとの関係を明らかにした。
- (4) 植物による NO_x 除去には、植物内への吸収だけではなく吸着作用も寄与していることを示した。

記号

A	: 定数
A_u	: 収着面積[m ²]
B	: 定数(頻度因子)
C	: チャンパー内濃度[CO ₂ : mg/m ³ , NO _x : μg/m ³]
C_o	: 外気 CO ₂ 濃度[mg/m ³]
C_{out}	: 外気 NO _x 濃度 [μg/m ³]
C_{zero}	: ゼロガス NO _x 濃度 [μg/m ³]
$C_{in}(C_{in-60})$	: 実験開始60分間の平均チャンパー内 NO _x 濃度 [μg/m ³]
C_{calc}	: 計算上のチャンパー内NO _x 濃度 [μg/m ³]

表 7 ハインズの CO₂ 吸収量及び NO_x 収着量

項 目	夏期	中間期	冬期
葉面積 [cm ²]	800	763	796
CO ₂ 吸収量 [mg/min/m ²]	46.69	13.89	4.87
NO _x 収着量 [μgN]	4.42	2.94	3.25

f	: 外気流入率 [-]
k	: 収着フラックス [μg/m ² min]
k_a	: 吸着フラックス定数
k_d	: 脱着フラックス定数
k_{NOx}	: 植物の NO _x 収着フラックス [μg/m ² min]
k_{CO2}	: 植物のCO ₂ 吸収フラックス [mg/m ² min]
M	: チャンパー内発生量 [μg/min]
M_a	: 気体の分子量
N	: 表面吸着量[μg/m ²]
q, Q	: 換気量[m ³ /min]
U	: CO ₂ 吸収量[mg/min/m ²]
S	: 葉表面積[m ²]
s	: 付着確率
T	: 絶対温度[K]
u_a	: 吸着フラックス [μg/m ² min]
u_s	: 収着フラックス [μg/m ² min]
u_d	: 脱着フラックス [μg/m ² min]
v, V	: チャンパー容積[m ³]

参考文献

- 1) 梅干野晃: 都市の緑とアメニティー 都市の緑と環境物理, 日本建築学会環境工学部門研究協議会資料, pp. 1~26, 1993
- 2) H. ビーヴァース・赤沢堯: 植物の代謝生理, 岩波書店, pp. 175~177, 1986
- 3) 金子和己・島田幸司・高見勝重: 土壌を用いた大気浄化システムの実施例と今後の展開, 環境資源対策, pp. 542~550, 1999
- 4) 被害補償予防協会: 大気浄化植樹マニュアル, 公害健康被害補償予防協会, 1995
- 5) 小川和雄: 埼玉県内緑地による大気浄化量の推定, 水, 30~34, 1994
- 6) 戸塚綾・三宅博: 緑地の待機浄化機能, 大気汚染学会誌, 26(4), A71~A80, 1991
- 7) 熊谷寛夫・富永五郎ほか: 真空の物理と応用, 裳華房, 1992
- 8) Hill, A. C.: Vegetation: A sink for atmospheric pollutants, J. Air Pollut. Contr. Assoc., pp.21, 341-346, 1971
- 9) 岡野邦夫, 古川昭雄: 植物の NO₂ 吸収量を指標とした大気 NO_x 汚染度の評価, 大気汚染学会誌, Vol. 25, No.6, pp.371-377, 1990
- 10) 日本化学会: 季刊化学総説, No.30, 学会出版センター, 1996
- 11) 戸塚綾: 緑化による都市の空気浄化, 空気調和・衛生工学, 第 68 巻, 第 11 号, 1994
- 12) 野内勇: 大気環境変化と植物の反応, 養賢堂, 2001.6
- 13) 長谷場徹也: 植物の葉面境界層輸送係数, 農業気象, 40(1), 63~72, 1984
- 14) 東京都環境局: 東京都環境白書 2000, 2000

(2003年11月10日原稿受理, 2004年4月21日採用決定)