

## スギ材表面における二酸化窒素の浄化評価関数

辻野 喜夫

### 1. はじめに

奈良東大寺正倉院（現、宮内庁所管）では、ヒノキの校倉のスギの唐櫃の中に数多くの聖武天皇遺愛の御物が納められ、1250年もの間、大きな損傷もなく保存されてきた。従来、この現象は、校倉の内部の温度、湿度が一定に保たれてきたことに起因すると考えられてきた。<sup>1-3)</sup>

しかし、近年、木造建造物の内部では、二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ )、二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) およびオゾン ( $\text{O}_3$ ) 等の大気汚染物質が外気よりも 70~90%減少し、<sup>4, 5)</sup> その現象が 800~1250 年前の木造建造物内でも認められた。<sup>6, 7)</sup> また、前報のおが屑（スギ、ヒノキ、米スギ）を U 字型ガラス管に充填し、 $\text{NO}_2$  標準ガスを通気した実験では、スギにより大部分の  $\text{NO}_2$  が浄化されたことを報告した。<sup>5, 7, 8)</sup>

これらの調査や実験から、木質空間内部では、温度、湿度が一定に保たれ、且つ、大気汚染物質が浄化されてきたために、文化財の良好な保存環境が保てたものと考えられる。このような環境は、文化財だけではなく、人間の生活空間としても適切なものであり、都市の屋内空気環境改善にも役立つものである。

一方、都市域では、窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ ) の削減対策の効果は不十分であり、沿道における二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ ) 環境基準達成率は、まだまだ低い状況にある（大阪府の平成 14 年度の達成率は、一般局が 91.9 %、自動車排ガス局は 62.2 %）。

本研究では、都市の屋内空気環境改善と、間伐材の有効利用とを目的として、木造建築の設計時に必要となる  $\text{NO}_2$  の浄化評価関数を定める。

材料に供した。また、対照としてスギおが屑（粒径 0.297~0.590 mm）についても、同様の条件で調製した。



図 1. スギ板暴露試験材料.  
スギ板 (10×10×1 cm)

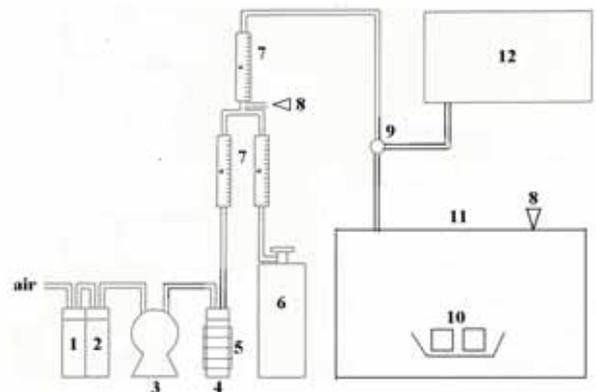


図 2. バッグテストによる  $\text{NO}_2$  暴露実験装置.

1: oxidizer (Purafil, Nitta Co., 500 g), 2: activated charcoal (500 g), 3: air compressor, 4: humidifier, 5: ribbon heater, 6:  $\text{NO}_2$  standard gas cylinder (90.4 ppm), 7: flow meter, 8: hygrometer, 9: 3-way cock, 10: wood plate (10×10×1 cm), 11: 200-L Tedlar bag (AAPS-200, GL Sciences, Tokyo, Japan), 12:  $\text{NO}_x$  meter (Model-NA623, Kimoto, Osaka, Japan).

### 2. 調査方法

#### 2.1 暴露試験材料

おが屑による通気実験では、スギが最も  $\text{NO}_2$  浄化効率が高く（通気実験：91.2%）<sup>7, 8)</sup>、且つ、大阪府域の主な間伐材の樹木であるため、図 1 に示すスギ板 (10×10×1 cm) を 20℃, RH 50% で 3 日間調製し、バッグテストによる拡散接触の暴露試験

## 2.2 バックテストによる NO<sub>2</sub> 暴露試験

バックテストによる NO<sub>2</sub> 暴露試験の実験装置を図 2 に示す。

スギ板 (1~4 枚) を 200L-テドラバック (AAP8-200, ジーエルサイエンス社製) に挿入し、初期 NO<sub>2</sub> 濃度 (1,000 ppb)、初期 NO<sub>2</sub> ガス充填量 (120 L)、NO<sub>2</sub> ガスサンプリング流量 (720 mL/min)、暴露時間 (60 min)、バック内温度 (0-40)、バック内湿度 (40-60%) の条件で暴露試験を実施し、output NO<sub>2</sub> および output NO の変化を NOx メーターで連続測定し、スギ板の NO<sub>2</sub> 浄化評価関数を定めた。

また、対照として、ガラスシャーレ (底面積 103.8 cm<sup>2</sup>) に 5 mm の厚さにスギおが屑 (5 g) を敷いた試料を同様に暴露試験に供した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 NO<sub>2</sub> 浄化量に及ぼす暴露時間の影響

バックテストによるスギ板の NO<sub>2</sub> 浄化量は、図 3 に示すように、暴露時間の経過と共に直線的に増加した。

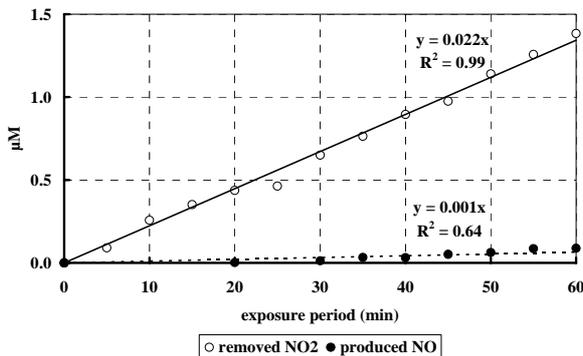


図 3. スギ板のバックテストによる NO<sub>2</sub> 浄化量と NO 生成量の変化。初期 NO<sub>2</sub> 濃度=1,000 ppb。初期 NO<sub>2</sub> ガス容量=120 L。反応温度: 20。RH: 45 ± 3%。サンプル: スギ板 1 枚 (10 × 10 × 1 cm)。

### 3.2 NO<sub>2</sub> 浄化量に及ぼすスギ板表面積の影響

NO<sub>2</sub> 浄化量は、スギ板の表面積の増加 (スギ板 1~4 枚) と共に直線的に増加した (図 4)。

### 3.3 NO<sub>2</sub> 浄化量に及ぼす初期 NO<sub>2</sub> 濃度の影響

NO<sub>2</sub> 浄化量は、バック内の初期 NO<sub>2</sub> 濃度に対応して、べき乗関数で増加した (図 5)。

### 3.4 NO<sub>2</sub> 浄化量に及ぼす反応温度の影響

NO<sub>2</sub> 浄化量は、温度に対しては凹型を示し、20 で最低の NO<sub>2</sub> 浄化量を示した (図 6)。これはリグニンの反応の場合と同様であった (図 7)。<sup>7, 8)</sup> ま

た、スギ板が氷点下で凍ると NO<sub>2</sub> 浄化量は急激に低下した。リグニンの反応 (図 8) で示すように、スギの NO<sub>2</sub> 除去量への水分の関与が大きいと考えられる。<sup>7)</sup>

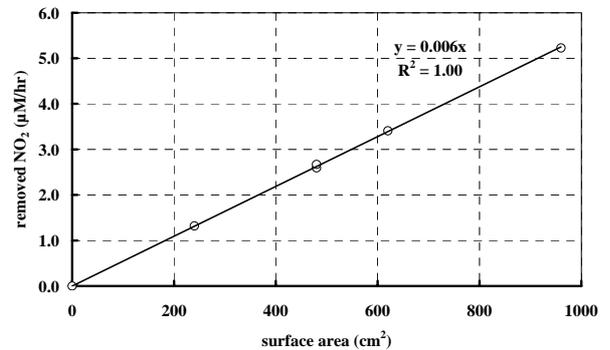


図 4. NO<sub>2</sub> 浄化量に及ぼすスギ板面積の影響。

初期 NO<sub>2</sub> 濃度=1,000 ppb。初期 NO<sub>2</sub> ガス容量=120 L。反応温度: 20。RH: 45 ± 3%。サンプル: スギ板 1~4 枚 (10 × 10 × 1 cm)。

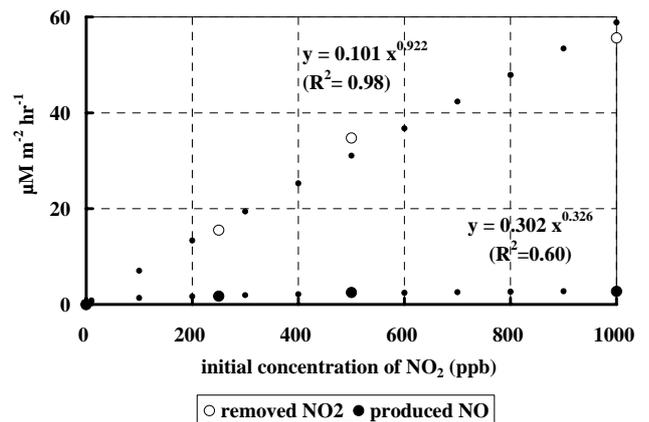


図 5. NO<sub>2</sub> 浄化量と NO 生成量に及ぼす初期 NO<sub>2</sub> 濃度の影響。初期 NO<sub>2</sub> ガス容量=120 L。反応温度: 20。RH: 45 ± 3%。サンプル: スギ板 1 枚 (10 × 10 × 1 cm)。

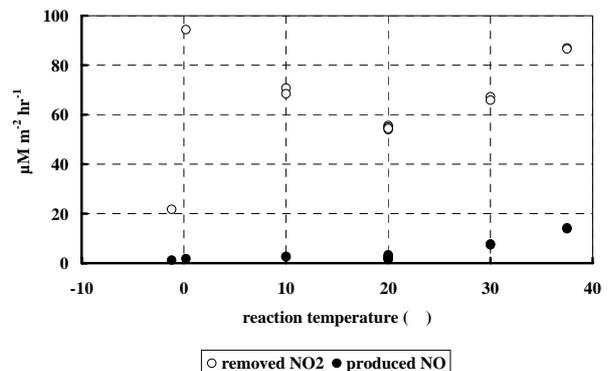
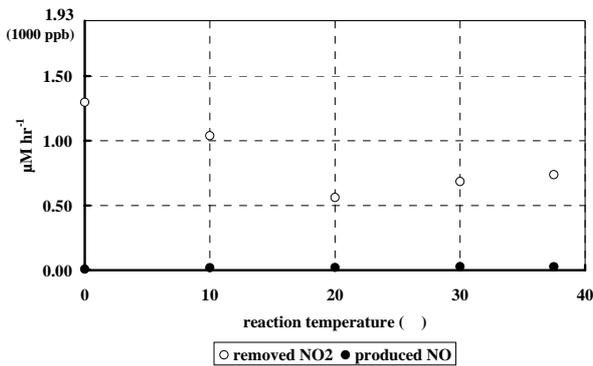
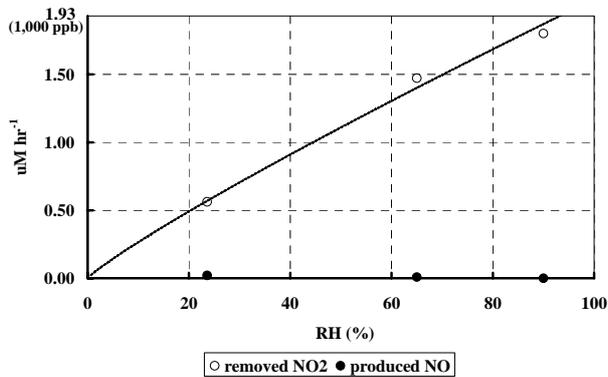


図 6. NO<sub>2</sub> 浄化量および NO 生成量に及ぼす反応温

**度の影響.** 初期 NO<sub>2</sub> 濃度=1,000 ppb. 初期 NO<sub>2</sub> ガス容量=120 L. RH=19~79%. サンプル: スギ板 1 枚 (10×10×1 cm).



**図 7. リグニンの NO<sub>2</sub> 浄化量に及ぼす反応温度の影響.** input NO<sub>2</sub> 濃度: 1,000 ppb. 通気速度: 720 mL/min. RH: 23.6 30.9% (26). サンプル量: 1 g.



**図 8. リグニンの NO<sub>2</sub> 浄化量に及ぼす相対湿度の影響.** input NO<sub>2</sub> 濃度: 1,000 ppb. 通気速度: 720 mL/min. 反応温度: 20. サンプル量: 1 g.

### 3.5 スギ板表面の NO<sub>2</sub> 浄化能力

スギ板表面における NO<sub>2</sub> 浄化能力を示す。

NO<sub>2</sub> 浄化能力 = 52.9 ± 0.5 μM m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup> (n = 5)

[初期 NO<sub>2</sub> 濃度 = 1,000 ppb, 初期 NO<sub>2</sub> ガス容量 = 120 L, サンプル量 = 1 g, サンプル厚さ = 5 mm, 通気速度 = 720 mL/min, 反応温度 = 20, RH = 45 ± 3%]

対照として、スギおが屑シャーレの試験結果を図 9 に示す。

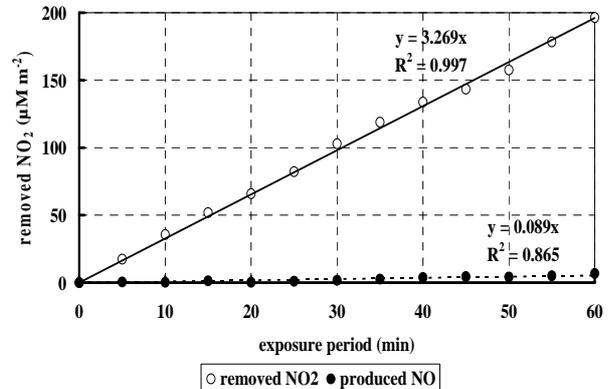
おが屑による NO<sub>2</sub> 浄化能力 (196 μM m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>) は、スギ板表面における浄化能力より 4 倍優れているので、高い NO<sub>2</sub> 浄化能力が期待される場合には、スギおが屑を用いる方が望ましい。

本研究では、スギおが屑の NO<sub>2</sub> 浄化能力はバツク中の静穏状態で定めた。

一方、光触媒 (NOx: 652 ~ 891 μM m<sup>-2</sup> hr<sup>-1</sup>)<sup>9, 10</sup> は風速 1 m/sec の条件で試験されているため、直接的には比較できないが、スギおが屑の場合のお

よそ 3 倍大きい。しかし、光触媒は夜間に機能が停止し、雨天時に性能が低下するため、平均実稼働時間は 1/3 倍であり、実質的にはスギおが屑の場合と同程度の浄化能力とすることになる。

さらに、屋内で利用する場合は、スギによる浄化機能の方が遙かに優れている。



**図 9. スギおが屑シャーレの試験結果.**

初期 NO<sub>2</sub> 濃度=1,000 ppb. 初期 NO<sub>2</sub> ガス容量=120 L. 反応温度: 20. RH: 90 ± 3%. サンプル: スギおが屑 5 g, おが屑厚さ 5 mm (ガラスシャーレ 103.8 cm<sup>2</sup>).

### 3.6 NO<sub>2</sub> 浄化評価関数

べき乗関数 (図 5) から下記の NO<sub>2</sub> 浄化評価関数および NO 生成評価関数を定めた。

(スギ板による NO<sub>2</sub> 浄化評価関数)

$$C_{(n+1)t} = C_{nt} - 2.26(S/V)C_{nt}^{0.922}t + (C_{outdoor} - C_{nt})V \cdot R \cdot t + 22.4(Q/V)t \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

[C<sub>nt</sub>: n × t 時間後の NO<sub>2</sub> 室内濃度 (ppb), S: 室内のスギ板面積 (m<sup>2</sup>), V: 室内容積 (m<sup>3</sup>), R: 室内の換気速度 (times/hr), C<sub>outdoor</sub>: 屋外の NO<sub>2</sub> 濃度 (ppb), Q: 室内での NO<sub>2</sub> 発生量 (μM/hr), t: 差分時間 (hr)]

(スギ板による NO 生成評価関数)

$$C_{(NO)(n+1)t} = C_{(NO)nt} + 6.77(S/V)C_{nt}^{0.326}t + (C_{(NO)outdoor} - C_{(NO)nt})V \cdot R \cdot t + 22.4(Q_{(NO)}/V)t \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

[C<sub>(NO)nt</sub>: n × t 時間後の NO 室内濃度 (ppb), C<sub>(NO)outdoor</sub>: 屋外の NO 濃度 (ppb), Q<sub>(NO)</sub>: 室内での NO 発生量 (μM/hr)]

### 3.7 NO<sub>2</sub> 浄化評価関数によるシミュレーション

6 畳の部屋を想定した場合の NO<sub>2</sub> 浄化評価関数 (1) によるシミュレーション結果を図 10-11 に示す。

図 10 に示すように、換気がなく、室内に NO<sub>2</sub> 発生源のない場合、室内の一面、例えば、天井 1 面

をスギ板で内装すれば、初期 NO<sub>2</sub> 濃度が 1,000 ppb の場合は 6 時間で、また、6 面全部を内装すれば、1 時間でほぼ室内の NO<sub>2</sub> が浄化されることになる。

スギ板は、屋内（閉鎖系空間）で用いられる限り優れた浄化能力を発揮する。

また、換気速度 R を 0, 0.1, 0.2 times/hr に変化させた場合の室内の NO<sub>2</sub> 濃度の変化を図 11 に示す。

初期 NO<sub>2</sub> 濃度および屋外の NO<sub>2</sub> 濃度を自動車排出ガス測定局（摂津市役所）で観測された 1 時間最高値の 119 ppb（平成 5 年 7 月）とすると、木造建築を設計する際、換気速度を R=0.1 times/hr 以下にすれば、30 分程度で環境基準の 40 ppb は達成される。

以上のことから、スギ材を活用した木造建築は、窒素酸化物汚染の激しい道路沿道およびその近傍の地域において、屋内空気環境改善に役立つと考えられる。

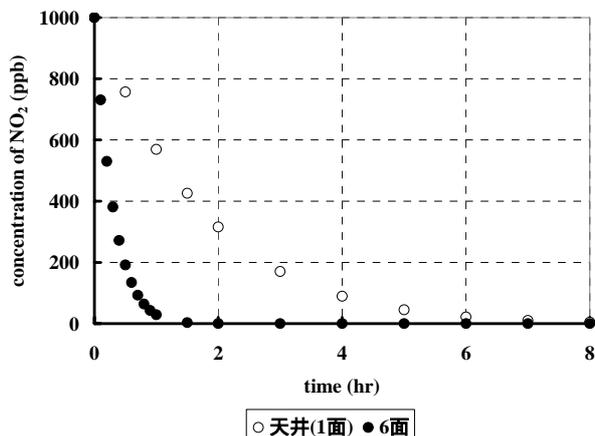


図 10. スギ板を内装にした場合の室内の NO<sub>2</sub> 濃度のシミュレーション(1). 初期濃度  $C_0=1,000$  ppb, 室内容積  $V=2.7 \times 2.7 \times 2.4$  m, スギ板内装面積  $S_1=2.7 \times 2.7$  m(天井),  $S_6=40.5$  m<sup>2</sup>(6面), 換気速度  $R=0$ (times/hr), 室内での NO<sub>2</sub> 発生量  $Q=0$ ( $\mu$ M/hr),  $t=0.01$  hr, 室温=20, RH=45 $\pm$ 3%.

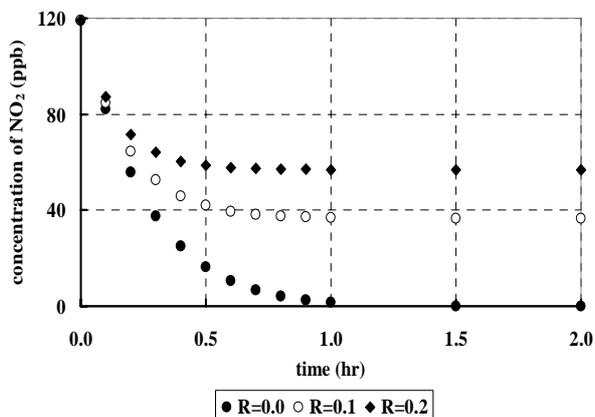


図 11. スギ板を内装にした場合の室内の NO<sub>2</sub> 濃度のシミュレーション(2). 初期濃度  $C_0=119$  ppb, 屋外の NO<sub>2</sub> 濃度  $C_{outdoor}=119$  ppb, 室内容積  $V=2.7 \times 2.7 \times 2.4$  m, スギ板内装面積  $S_6=40.5$  m<sup>2</sup>(6面), 換気速度  $R=0 \sim 0.2$ (times/hr), 室内での NO<sub>2</sub> 発生量  $Q=0$ ( $\mu$ M/hr),  $t=0.01$  hr, 室温=20, RH=45 $\pm$ 3%.

#### 4. おわりに

何故、今日まで世界中で、木材による環境浄化商品の開発が進んでこなかったのか？

欧米各国では、何でも塗装する慣習により木材表面で NO<sub>2</sub> 浄化機能が潰失してしまうため、乾燥地帯では、木材の乾燥により浄化機能が低下してしまうため、寒冷地帯では、木材表面の凍結により浄化機能が低下してしまうため、熱帯雨林地帯では、木材の生物劣化（白カビ、シロアリ）により白木は短期間で朽ちてしまうため等の理由が考えられる。

温帯モンスーン地帯（照葉樹林地帯）の白木文化を受容する日本でこそ、自然木（白木）を利用した木造建築・木材工芸等の環境浄化商品が開発される要素がある。

日本古来のスギ板の天井、ヒノキの柱、床、和紙（セルロース）の襖に囲まれた木造建築の中で、植物性の木綿や麻の着物（セルロース）を身に着け、い草（セルロース、リグニン）の畳に座り、緑茶（カテキン）を飲みながら和紙の障子を透かして入ってくる穏やかな空気に浸っていると、心安らぐものである。

家の新築あるいは改築の計画のある方は、少し贅沢をして、スギやヒノキなどの自然木を用いた一室を設け、心身ともに安らぐ空間を確保されてはいかがでしょうか。

#### 参考文献

- 1) 成瀬正和: 短報 - 正倉院の温湿度環境調査. 正倉院紀要 **23**, 61-66 (2001).
- 2) Kamba, N.: Performance of wooden storage cases to regulate relative humidity. *Journal of Japan Society for Conservation of Cultural Property* **37**, 36-45 (1992).
- 3) 上野 崇, 大釜敏正, 則元 京: 内装材料の調湿効果に及ぼす換気の影響. *木材学会誌* **43**, 839-849(1997).
- 4) 門倉武夫: 文化財の保存環境と汚染因子の挙動, *環境技術*, **20**,489-492 (1991).
- 5) Tsujino, Y., Warashina, M., Morioka, J., Takenaka, N., Bandow, H., Maeda, Y.: Wooden materials suitable for storage boxes or cellar walls to remove nitrogen dioxide and ozone in ambient air. *Global Environmental Research* **4**, 89-94 (2000).

- 6) Nishiyama, Y.: A study on virgin forest's ability to protect cultural properties from air pollution -Investigation of air pollution (NO<sub>2</sub>) all over Nara Park. *Memories of Nara University* **22**, 171-182 (1994).
- 7) 辻野喜夫, 西村貴司, 松原宏樹, 竹中規訓, 小河 宏: 木材表面における二酸化窒素の浄化作用と還元性雰囲気との醸成. 大阪府環境情報センター所報 **23**, 49-55(2003).
- 8) Tsujino, Y., Nishimura, T., Matsubara, H., Takenaka, N.,: Reduction of Nitrogen Dioxide on the Surface of Wood (I) & (II). *8<sup>th</sup> International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality (ASAAQ 2003)*, 11-13 March 2003, Tsukuba, Japan.
- 9) 高見勝重: 自動車排ガスの対策技術 土壌による大気浄化システム/ 光触媒を用いた新型遮音壁とその改善効果. 環境技術 **29**, 848-853 (2000).
- 10) Zhang, J. *et. al.*: Investigations of TiO<sub>2</sub> photocatalysts for the decomposition of NO in the flow system. The role of pre-treatment and reaction conditions in the photocatalytic efficiency. *Journal of Catalysis* **198**, 1-8 (2001).