

ガスセンサを用いた光環境下における *Epipremnum aureum* のホルムアルデヒド浄化率の導出

学生員 小野寺 武 (金沢大学)
 正員 広林 茂樹 (富山大学)
 非会員 木村 春彦 (金沢大学)
 正員 大薮 多可志 (金沢経済大学)

Purification Rate of *Epipremnum aureum* for Formaldehyde in Light

Takeshi Onodera, Student Member (Kanazawa University), Shigeki Hirobayashi, Member (Toyama University), Haruhiko Kimura, Non-member (Kanazawa University), Takashi Oyabu, Member (Kanazawa University of Economics)

Houses are gradually becoming airtight due to heat insulating structures. Thus, air exchange is decreasing in an indoor environment. Indoor air-quality is also worsening by generation of VOCs (Volatile Organic Compounds) from building materials, and it causes sick-house syndrome. On the other hand, it is known that plants and microorganisms inhabiting the rhizosphere purifies indoor air-pollutants. The empirical model, however, involves some problems such as the long interval needed for the measuring of the purification process, and the process is modeled by a simple straight line approximation. In this paper, we find the purification process of plants in detail for the basic study of a design that suitably arranges plants in a room. As an example of a typical foliage plant, a purification process of *Epipremnum aureum* for formaldehyde is measured continuously using a tin oxide gas sensor. As a result, it is found that the purification rate is fixed at about 40%/h when the formaldehyde concentration range is less than 50ppm in the experimental chamber. Therefore, the purification process could be approximated using an exponential function. Furthermore, the purification rate rose with the increasing intensity of illumination.

キーワード：室内空気汚染, ホルムアルデヒド, 空気浄化, ガスセンサ, 観葉植物, 環境修復

1. はじめに

熱効率の高い冷暖房機器の普及に伴い、高気密・高断熱住宅が普及してきている。このため、通風が悪化し室内空気汚染に関する諸問題が起こっている⁽¹⁾。例えば、シックハウス症候群や化学物質過敏症などである^{(2)~(5)}。これらは主に室内において発生する揮発性有機化合物 (VOC: Volatile Organic Compound) が原因である。代表的な VOC として建材や家具に使用されている接着剤などから発生するホルムアルデヒド、塗料などの溶剤に用いられるトルエン、キシレンなどが挙げられる⁽⁶⁾。特にホルムアルデヒドについては、発ガン性が高く、厚生省が厳しい指針値を示している⁽⁷⁾。著者らは室内空気汚染の認知に関する研究を行ってきた経緯から^{(7)~(12)}、認知システムに加え、室内の空気環境を改善する技術が必要であると考えに至った。この改善方法として、機械的換気やベーク・アウトなどが考えら

れるが完全ではない。これらの欠点を補うものとして、生物が本来持つ浄化能力を利用し汚染物を無害な物質まで分解する、バイオレメディエーションが有効であると考えられる^{(13)~(14)}。

一方、観葉植物の鉢やプランタなどは、観賞や景観の向上を目的として、一般家庭やオフィス、会議室などの屋内に置かれることが多い。Wolverton 等は、一般家庭にも置かれるような観葉植物あるいはその根圏に生息する微生物が、揮発性有機化合物などの室内空気汚染ガスを吸収・分解し浄化する能力を持つことを明らかにしている^{(15)~(18)}。しかしながら、実験における計測の時間間隔が長く、浄化過程は単純な直線近似でモデル化されており、詳細は未だ明らかになっていない。本研究は、より適した植物を室内に配置し最大の浄化効果を得るための、植物適切配置設計の基礎研究として行ったものである⁽¹⁹⁾。本論文では、主に代表的な観葉植物ポトス (*Epipremnum aureum*) のホル



図1 実験に用いたポトス
Fig. 1. Photograph of *Epipremnum aureum*.

ホルムアルデヒド浄化特性を調べ、その浄化過程を調べた。特にガスセンサを用いてポトスの時間的な汚染ガス浄化過程を明らかにした。また、計測された浄化過程における浄化率は、一定でありほぼ指数関数で近似できることを示した。さらに、照度を高くしていくと浄化率が上昇し、その上昇はしだいに飽和する傾向であることを明らかにした。

2. 実験試料と計測システム

本実験では植物浄化過程を調べるため、一例として、観葉植物として広く利用されているポトス (鉢上45cm, 6号鉢) を用いた。ポトスはサトイモ科に属し、育成には半日陰から日陰の環境が適している。そのため、光が少ない環境でも良く育ち、観葉植物の中でも比較的育てやすい植物である⁽¹⁸⁾。土壌には、市販の軽石500cc, 観葉植物用の土2000ccを用いた。図1に実験に供したポトスを示す。22.0°C, 60.0%に設定した恒温恒湿室(タバイエスペック製 TBR-5HA2G3A)中に200lのチャンバーを設け、その中にポトスを配置した。図2に示すように、実験開始から1時間後にホルムアルデヒド(HCHO:35%)の液体をシリンジで注入した。チャンバー内の空気は、小型のファンにより連続的に攪拌した。チャンバーオープン時までの気温の変動は、最大約2.6°C, 湿度の変動は最大約35.0%であった。

実験時にはサンプリング周期1分とし、ホルムアルデヒド濃度を可燃性ガスセンサ(フィガロ技研 TGS#800)で計測した。可燃性ガスセンサはガス選択性に乏しいが、その反面さまざまなガスに対して高感度である。なお、当該センサは二酸化炭素には感度がない。このガスセンサを用いることにより連続的な計測が可能になり、より詳しい浄化過程を計測することが可能である。ガスセンサ素子部はチャ

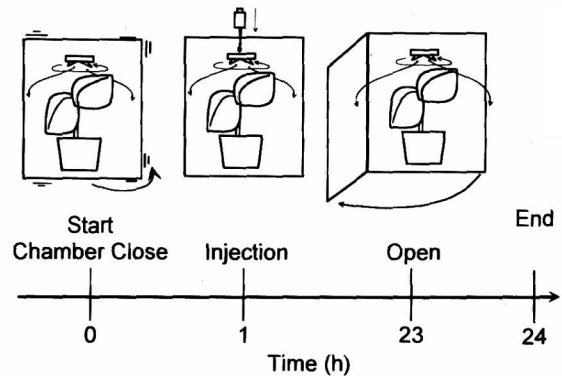


図2 実験手順
Fig. 2. Experimental procedure.

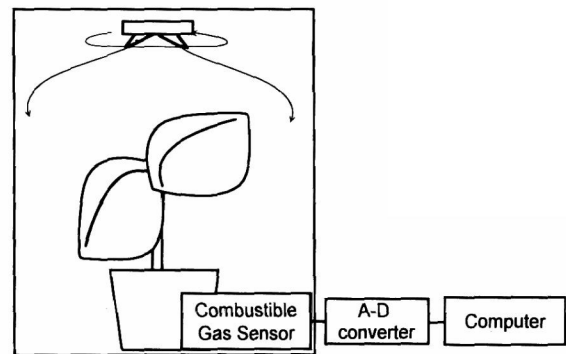


図3 計測システム
Fig. 3. Measurement system.

ンバー内に設置し、出力電圧はA/Dコンバータを介し、コンピュータに記録する。図3に計測システムを示す。

光の照射はチャンバーの周囲(下方向を除き5方向)から、一般家庭やオフィスでも広く用いられている蛍光灯(白色光)により行った。蛍光灯は太陽光に近い波長を含むように作られており⁽²⁰⁾、植物の育成にも有効である。

3. ホルムアルデヒド浄化過程

〈3・1〉 浄化効果の相違 人体への影響が大きいと考えられるホルムアルデヒドに対する植物の浄化効果を相対的に明らかにするために、ホルムアルデヒド注入量0.03cc(約45ppm)で、4種類の実験を行った。得られた特性を図4に示す。(a)は、植物をチャンバー内に置かずホルムアルデヒドを注入する。これにより、チャンバーからのガス漏れおよび壁面への吸着等の影響を調べた。(b)は、鉢のみを置き、土壌のみの浄化作用を調べた。土壌はポトスに用いたものと同種、同量のものである。水分量も同等である。(c)は、遮光したチャンバーに植物を置き、暗黒下における植物浄化作用を調べた。(d)では、一般家庭の室内を想定し、照度を葉表面で平均1000lux程度に照射したときの植物浄

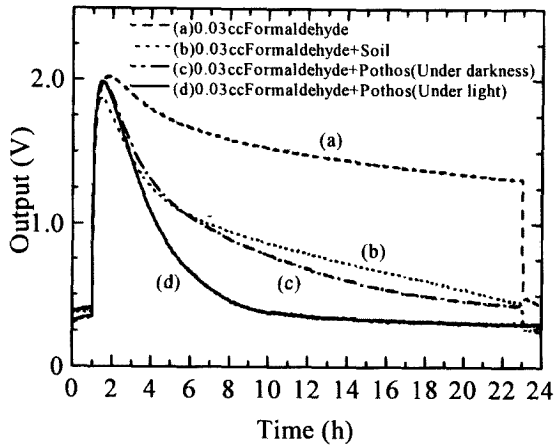


図4 浄化効果の相違
Fig. 4. Difference of purification effect.

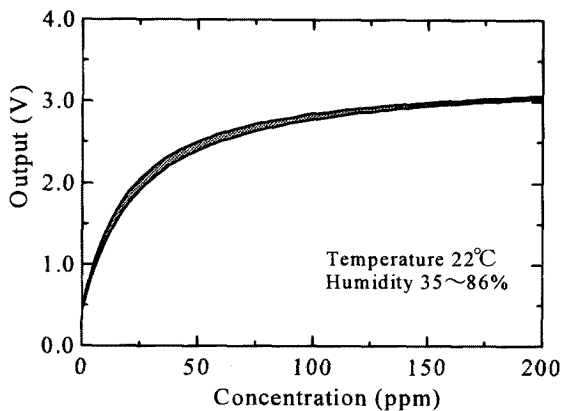


図5 ホルムアルデヒドに対するガスセンサ出力
Fig. 5. Gas sensor outputs vs. formaldehyde concentration.

化作用を調べた。葉表面に照射された最大照度は1850lux, 最小照度は300lux程度であった。この最大照度は晴れた日のブラインドを閉めた窓際と同程度である。

ガスセンサの出力は電圧で示されており、図4(b)と(c)の特性に差が認められなかった。また、出力電圧を濃度に変換するため、ガスセンサ出力対濃度特性を求めた。植物の蒸散により、チャンパー内の湿度が大きく変動するため、温度22℃に設定し、湿度が35~86%の範囲のホルムアルデヒドに対するガスセンサ特性を調べた。この特性を図5に示す。図中の実線は最小二乗法を用いて⁽²¹⁾,

$$V_r = \frac{\alpha_0}{C - \alpha_1} + \alpha_2 \dots\dots\dots (1)$$

で近似した曲線である。ただし、 V_r (V)は出力電圧、 C (ppm)はガス濃度、 α_0 (一般的に負の値を取る)、 α_1 、 α_2 は最小二乗法により得られる係数である。同図より、湿度変動による影響は少ない。そこで、本実験では、

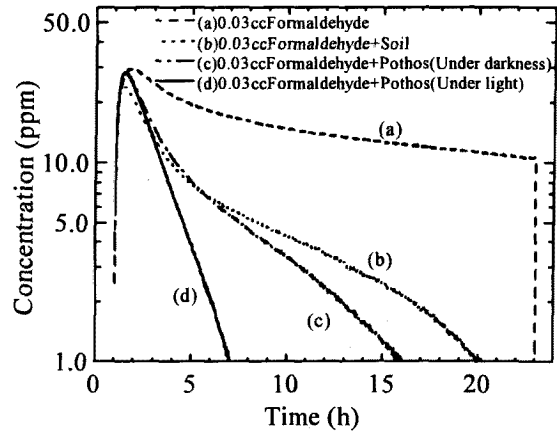


図6 図4の出力電圧をホルムアルデヒド濃度に変換した特性
Fig. 6. Formaldehyde concentration as a function of time. The concentration is derived from sensor output in Fig.4.

$$C = \frac{\alpha_0}{V_r - \alpha_2} + \alpha_1 \dots\dots\dots (2)$$

に対し、中央値である湿度62%時の係数を用いて、センサ出力をガス濃度に変換した。図4の出力電圧から濃度変換した特性を図6に示す。図6(a)から漏洩あるいは吸着によるホルムアルデヒド濃度の減少がわかる。(a)と(b)には明確な差が認められ、土壌のみによってもホルムアルデヒドをある程度浄化することがわかる。しかしながら(b)と(c)を比較すると、植物が存在することにより、さらに浄化作用が促進されることが明らかである。また、植物が暗黒下においてもホルムアルデヒドを浄化することがわかる。光のない環境では光合成は行われませんが、呼吸はその場合でも行われる。したがって、呼吸によるガス交換により、ホルムアルデヒドが植物内に取り込まれると考えられる。(c)と(d)は、過渡応答にこそ差があまり見られないものの、実験開始から4時間後より、明らかに浄化過程が異なる。したがって、光の有無により、浄化特性が異なることが明らかである。以上から、土壌のみよりも鉢植えの方が浄化効果が高いことがわかった。また、光を照射することにより浄化効果がさらに高くなることがわかった。

〈3・2〉ホルムアルデヒド浄化率の導出 本節ではポトス(鉢を含む)によりホルムアルデヒドが指数関数的に減少し、1時間当たりの浄化率(以後、浄化率と略す)は一定であることを示す。ホルムアルデヒド0.03cc(約45ppm)および0.01cc(約15ppm)注入時のセンサ出力から濃度変換後の濃度対時間特性を図7に示す。

図7(a)はポトスを配置せずホルムアルデヒド0.03ccを注入し、(b)はポトスを配置している。これらはそれぞれ図6(a)、(d)と同じものであるが、比較のためここに示す。図7(c)、(d)は、図7(a)、(b)の注入量を0.01ccにした他は同条件である。図7(a)、(c)では対数濃度域でほぼ非線形な減

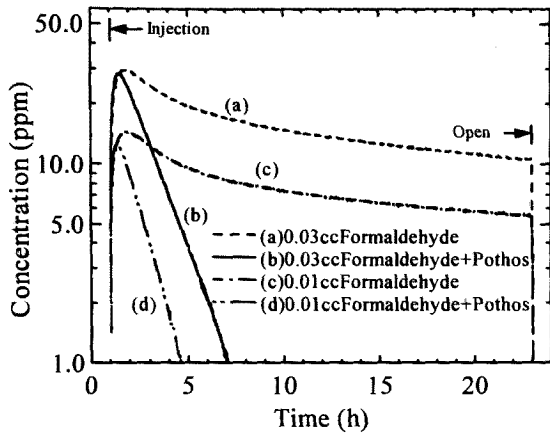


図7 異なる量のホルムアルデヒド注入時の浄化特性

Fig. 7. Characteristics of purification at different formaldehyde concentrations.

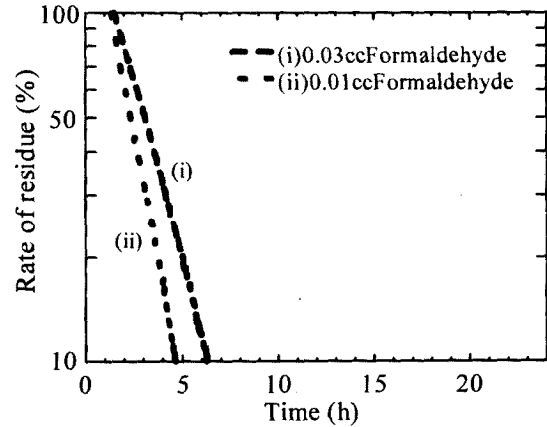


図8 ホルムアルデヒド残留率の経時変化

Fig. 8. Rate of formaldehyde residue as a function of time.

少過程が伺える。これはチャンバーからの漏洩や吸着などの植物以外の環境変動要因によるものである。図7(b), (d)は、図7(a), (c)の減少と異なり、若干非線形であるが、対数濃度域ではほぼ直線的に浄化されている。図7(a), (c)に示したように空のチャンバー内にガスのみを注入した場合でも減少する。したがって、図7(b), (d)におけるガスセンサを用いて得られた浄化過程には、植物浄化以外にチャンバーからの漏洩や吸着などによる濃度減少の影響が含まれるはずである。そこで、図7より植物のみの浄化過程を以下のように求めた。

図7(b), (d)の濃度変換された減少過程は植物浄化過程 $\hat{C}(t)$ (ppm) に植物以外の減少関数 $F(t)$ が重畳したものと考えられる。すなわち、図7(b), (d)に示された濃度関数 $C(t)$ (ppm) は、

$$C(t) = C_0 F(t) \hat{C}(t) \dots\dots\dots (3)$$

と表わせる。ただし、初期濃度 C_0 (ppm)、経過時間 t (h) である。したがって、観葉植物自体の浄化特性は

$$\hat{C}(t) = \frac{C(t)}{C_0 F(t)} \dots\dots\dots (4)$$

と求められる。この式より求めた 0.03cc, 0.01cc 注入時のホルムアルデヒド残留率をそれぞれ図8(i), (ii)に示す。両特性とも、図7(b), (d)に若干重畳されていた非線形成分が軽減され、対数領域で直線的に減少している。すなわち、指数関数的に浄化している。したがって、植物の浄化過程はほぼ

$$\hat{C}(t) \simeq (1 - a)^{t-t_0} \dots\dots\dots (5)$$

と近似できることがわかる。ただし、 $(1 - a)$ は1時間当たりの残留率、1時間当たりの浄化率 a 、ガス注入時間 t_0 である。式(5)に当てはめて浄化率を求めた結果、図8(i), (ii)

表1 照射照度

Table 1. Intensity of illumination (lux).

6方向の平均照度	前	後	左	右	上	下
0	0	0	0	0	0	0
73	94	40	57	73	143	32
201	140	128	92	563	237	46
444	293	270	1020	605	330	147
689	1220	363	1180	713	448	212
1090	1550	550	1630	920	1580	310
1234	1550	790	1760	1020	1940	342
1390	1570	1423	1800	1080	2060	405

については、それぞれ1時間当たり 37.8%, 48.8% の割合 ($a \times 100$) でホルムアルデヒドが浄化されることがわかった。したがって、45ppm以下の濃度域においては、初期濃度に関わらず指数関数的に浄化することがわかる。

〈3.3〉 照度変化による浄化率の変動 霧困気中のホルムアルデヒドは気孔から植物内に取り込まれ、植物内の転流によって根圏に運ばれる。あるいは蒸散によっておこる空気の対流により、根圏に運ばれると考えられている。ホルムアルデヒドはそこに生息する微生物により分解されると考えられている⁽¹⁸⁾。気孔の開閉や蒸散は光合成と密接な関係がある。光合成や蒸散は光が強くなると活発化し、また、光がある程度の強度になると光合成速度が飽和する傾向にある⁽²²⁾。これらのことから、浄化率も同様の傾向を示すものと考えられる。そこで植物のホルムアルデヒド浄化過程において、照度の違いによる浄化率の変化を調べた。

チャンバー内に植物を配置していない状態で、照度計(古河サイエンス製 840006)の光センサ部をチャンバーの外側、前後左右上下の6方向に向けたときに得られる照度とこれらの平均値を表1に示す。これらはチャンバーの中心部で測定したものである。この環境中に植物を置き、それぞれの照度で実験を行った。

それぞれの平均照度における0.03ccのホルムアルデヒド

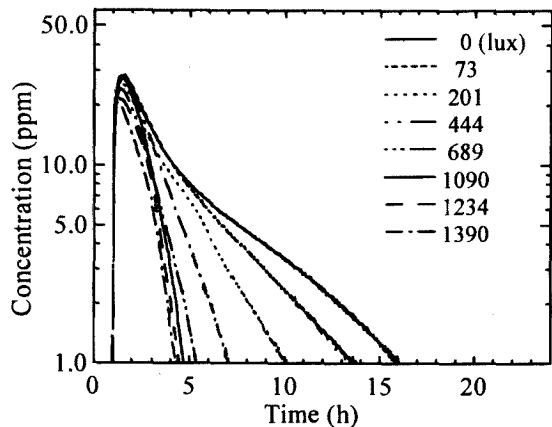


図9 各照度におけるホルムアルデヒド浄化特性
Fig. 9. Characteristics of formaldehyde purification at various intensities of illumination.

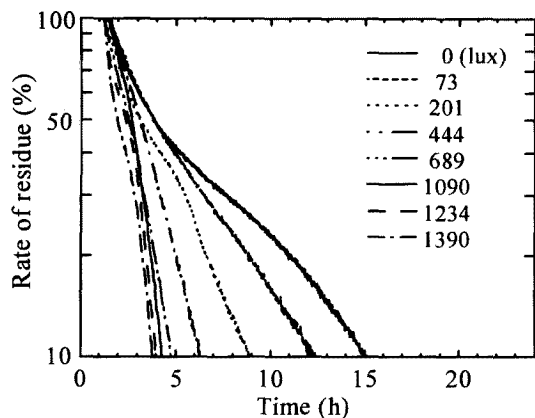


図10 各照度におけるホルムアルデヒド残留率の経時変化
Fig. 10. Rate of formaldehyde residue at various intensities of illumination as a function of time.

浄化過程を図9に示す。同図において、特性が若干湾曲している部分が見られるものの、ほぼ指数関数的に浄化している。式(4)にこれらの特性を当てはめ、植物の浄化特性を求めた。これを図10に示す。各々の照度における浄化特性は、対数領域においてほぼ直線的に減少している。したがって、照度が変化してもポトス自体の指数関数的な浄化特性は変化しないことがわかる。また、この図から照度が高くなるにしたがい、浄化率に大きな変化が見られなくなっているように思われる。そこで、式(5)を用いて、これらの各照度ごとの浄化率を求めた結果を図11に●印で示す。平均照度が1090 luxまでは照度と共に浄化率も上昇していることがわかる。しかしながら、それ以降、浄化率の向上は飽和、あるいは若干減少する傾向にあることがわかる。これらの現象は前述した光強度と光合成速度の特性と酷似している。なお、図中実線曲線は●印を曲線で近似するため

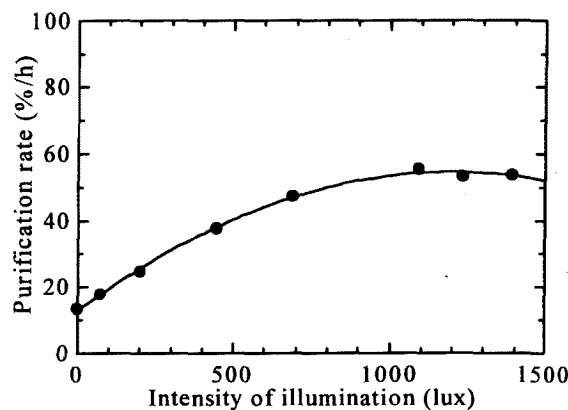


図11 浄化率の平均照度依存性
Fig. 11. Purification rate vs. intensity of illumination.

簡単な照度変数の2次式によって図示したものである。すなわち、2次式の最小二乗近似を用いて1時間当たりの浄化率 a を

$$a = \frac{-2.90 \times 10^{-5} l^2 + 6.96 \times 10^{-2} l + 12.8}{100} \dots (6)$$

と近似したものである。ただし、 l は平均照度 (lux) である。同図より、屋内を想定した1390lux以下の平均照度においては、本式により浄化率の導出が可能であることがわかる。

4. まとめ

本論文では屋内に配置された植物の空気汚染浄化作用に着目し、植物の室内最適配置・設計問題を取り扱うための基礎研究として、ガスセンサを用いて詳細な空気汚染ガス浄化特性を調べた。実験では200lのチャンパー内でガスセンサを用いてポトス(鉢含む)のホルムアルデヒド浄化特性を実測した。ホルムアルデヒドは居住空間で発生する度合いが高く、人体への影響についても種々指摘されてきている。結果として、土壌のみよりもポトスの方が浄化効果が高いことがわかった。また、ポトスによって汚染ガス濃度が45ppm以下の濃度域では、指数関数的に浄化されることが明らかとなった。この浄化特性をモデル化し、浄化率を求めた結果1時間当たりほぼ40%前後で浄化されることがわかった。さらに、光環境を変化させ浄化率の変化を調べた。その結果、平均照度が高くなるにつれて浄化率も上昇することがわかった。しかしながら、この浄化率の変化はおよそ1000lux以降は飽和する傾向であり、屋内を想定した1390lux以下の平均照度であれば、簡単な2次式によって浄化率の推定が可能であることが明らかになった。これらの結果は光強度と光合成の関係と同様の傾向であり、植物による空気汚染浄化作用特性も照度に強く依存するものと考えられる。

今後は土壌や植物の表面積に対する浄化過程の関係を調

べ、さらに詳細なモデル化を行い、植物によるガス状空気汚染物浄化作用を応用した最適な室内空間設計手法の確立を検討する。

謝 辞

金沢経済大学人工気象室の使用に際しご協力頂いた、金沢経済大学 平下政美 教授ならびに本実験をお手伝い頂いた金沢大学 古川真土君、ガスセンサをご提供いただいた(株)フィガロ技研 松浦吉展氏に厚くお礼申し上げます。

(平成11年3月23日受付, 同11年6月3日再受付)

文 献

- (1) 小野寺, 広林, 木村, 松浦, 大藪: "植物の空気清浄機能の評価", 電気学会化学センサシステム研究会資料, CS-98-53, pp.31-36 (1998)
- (2) 松村年朗: "化学物質による室内空気汚染について", 建築雑誌, 113, 1421, pp.18-19 (1998)
- (3) 池田耕一: "ホルムアルデヒドとVOCによる室内空気汚染問題", 生活と環境, 43, 4, pp.24-33 (1998)
- (4) 難波龍人: "化学物質過敏症", 建築雑誌, 113, 1421, pp.26-27 (1998)
- (5) 田辺新一: "シックハウス・シックビルとその対策", 空気・調和衛生工学, 72, 5, pp.37-42 (1998)
- (6) "安全な材料と設備を使う", 建築知識, 1月号, pp.72-78 (1996)
- (7) 大藪, 大藪, 木村, 広林, 松浦: "新築住宅における室内空気汚染種とそのグレードの同定", 電気学会化学センサシステム研究会資料, CS-97-53, pp.69-74 (1997)
- (8) 大藪, 木村: "新しい室内空気汚染検知システムの開発", 計測自動制御学会論文集, 32, 7, pp.1121-1128, 1996
- (9) 大藪, 木村: "プロダクションシステムを用いた相対的室内空気汚染の測定", 電学論E, 117, 5, pp.92-99 (1997)
- (10) 大藪, 広林, 木村: "マルチガスセンサシステムによる室内空気汚染ガス種の認知と濃度測定", 電学論E, 118, 2, pp.92-99 (1998)
- (11) 広林, 木村, 南保, 坂森, 大藪: "マルチガスセンサとプロダクションシステムを用いた室内空気汚染ガスの検知システム", 計測自動制御学会論文集, 34, 8, pp.913-921 (1998)
- (12) T. Oyabu, T. Onodera, S. Hirobayashi, H. Kimura: "Outputs of Plural Tin Oxide Gas Sensors for Compound Gaseous Indoor-air Pollutants", T. IEE Japan, 118-E, 12, pp.572-577(1998)
- (13) 滝本, 戎野, 稲森: "微生物を用いる環境浄化", 資源処理技術, 42, 3, pp.36-40 (1995)
- (14) 矢木修身: "微生物による土壌の浄化", 遺伝, 51, 5, pp.17-22 (1997)
- (15) B. C. Wolverton, J. Wolverton: "Continued Research By Dr. Wolverton and FCAC", Interiorscape, MARCH/APRIL, pp.6-63, (1991)
- (16) 中西友子: "植物による室内空気浄化能", バイオサイエンスとインダストリー, 49, 10, pp.37-39 (1991)
- (17) B. C. Wolverton and J. D. Wolverton: "Plants And Soil Microorganisms: Removal of Formaldehyde, Xylene, and Ammonia from the Indoor Environment", JOURNAL OF THE MISSISSIPPI ACADEMY OF SCIENCES, AUGUST/SEPTEMBER, Vol.38, No.2, pp.11-15 (1993)

- (18) B. C. Wolverton: "ECO-Friendly HOUSE PLANTS", George Weidenfeld & Nicolson Ltd (1996)
- (19) 小野寺, 広林, 木村, 大藪: "Epipremnum aureumのホルムアルデヒド浄化特性", 平11電学大全, 706, 3-254(1999)
- (20) 藤井正一: "住居環境学入門", 彰国社 (1984)
- (21) 広林, 坂森, 木村, 大藪: "温度・湿度変化に対する酸化スズ系ガスセンサ応答のモデル化", 電学論E, 118, 5, pp.260-265 (1998)
- (22) 増田芳雄: "植物生理学改訂版", 培風館 (1988)

小野寺 武 (学生員) 1973年8月30日生まれ。96年富山国際大学人文学部社会学科卒業。98年3月金沢大学大学院教育学研究科修士課程修了(技術教育)。同年4月同大学院自然科学研究科博士後期課程入学。ガス・ニオイセンサシステム, 植物による空気浄化, 植物センサに関する研究に従事。



広林 茂樹 (正員) 1968年9月1日生まれ。94年3月工学院大学工学研究科修士課程修了。95年3月同大学博士課程中退。同年4月金沢大学工学部助手。99年3月富山大学工学部講師。主として, 室内音響, 音響振動論, 音響信号処理, 流体伝播のモデル化の研究に従事(工学博士)。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本音響学会, 米国音響学会各会員。



木村 春彦 (非会員) 1974年 東京電機大学工学部応用理化学科卒業。79年東北大学工学研究科博士(情報工学)課程修了。同年富士通(株)勤務。80年金沢女子短期大学講師。84年金沢大学経済学部助教授を経て, 現在, 同大学工学部電気情報工学科教授。その間, 最適コード変換, プロダクションシステムの高速度の研究に従事(工学博士)。情報処理学会, 電子情報通信学会各会員。



大藪 多可志 (正員) 1973年 工学院大学工学研究科修士課程修了。75年早稲田大学第二文学部英文科卒業。73年電気音響(株)技術部研究所勤務。80年金沢女子短期大学講師, 助教授, 教授を経て94年富山国際大学人文学部社会学科教授。98年金沢経済大学経済学部教授。ガスセンサシステムに関する研究に従事(工学博士)。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本ファジィ学会各会員。

