実オフィス環境におけるアレカヤシのホルムアルデヒド浄化効果

学生員 沢田 史子*

正 員 大藪多可志**

非会員 竹中幸三郎***

非会員 吉田 武稔*

Purification Effect of Areca Palm for Continuously Emitting Formaldehyde in a Real Office Environment

Ayako Sawada*, Student Member, Takashi Oyabu**, Member,
Kozaburo Takenaka***, Non-member, Taketoshi Yoshida*, Non-member

Plant air-purification effect to reduce formaldehyde in a real office environment was examined. A potted Areca palm (height: about 2m) was adopted as a subjective plant. Plant purification effect was evaluated using a tin oxide gas sensor and a commercial tool for formaldehyde measurement was also used. The effect became higher as the atmospheric formaldehyde concentration was higher. The concentration became lower as the plants were installed. The effect did not greatly increase when the number of the installed pots was increased to seven from four. Concentration of carbon dioxide increased up to 450ppm by placing the pots at night. It is, however, below the regulated value (1000ppm) of Japan building managing law. Light intensity in the room fluctuated periodically and the carbon dioxide concentration changed periodically according to the fluctuation of light intensity from outside. There was a negative correlation between their characteristics. When the characteristic of carbon dioxide concentration was shifted forward by 1 hour with respect to the light intensity characteristic, the maximum value of correlation coefficient was obtained to be about -0.9. An integration value of a sensor output curve with time after the setting of potted plants could be regarded as a measure of an exposure volume of the plants to formaldehyde. The exposure value was found to become smaller as the number of the plants increased. In the experiment, formaldehyde was emitted continuously and the atmospheric concentration was kept at about 0.3ppm and the value was decreased to about 0.1ppm by the potted plants. This is close to the regulated value of 0.08ppm by WHO.

キーワード：室内空気質，観葉植物，ガスセンサ，二酸化炭素濃度

Keywords: indoor air quality, foliage plant, gas sensor, carbon dioxide concentration

1. まえがき

最近，様々な化学物質による室内空気汚染が注目されてきている。その中で，建材などから放射されるホルムアルデヒド，トルエン，キシレンなどにより引き起こされるシックハウス症候群が最も注目されている問題である。この問題を解決するために，日本においてはホルムアルデヒドなどの使用を規制する改正建築基準法が2003年から施行さ

れることとなった。しかしながら，規制の対象となる物質が2種類のみであることと，ホルムアルデヒドについては住宅の設計段階での規制のみであることなどから，実効性に欠けるとの指摘もされている。

このような背景において，我々は室内空気汚染対策の一つとして，植物が空気汚染物質を分解することに着目しその能力について調べ，観葉植物を室内に設置することを提案してきた。例えば，代表的な観葉植物であるポトスなどを用いて，ホルムアルデヒドなど主要な汚染物に対する浄化特性を，実験用チャンバーを用いて測定し報告してきた。結果として，浄化能力は植物や汚染物の種類によって異なり，温度，照度，土壌種など外的要因にも影響を受けることが明らかとなった^{(1)~(4)}。また，医療機関という実労働環境に植物を設置し，揮発性有機化合物（VOC: Volatile Organic Compounds）の浄化効果についても調べ，その効果を確認した⁽⁵⁾。

* 北陸先端科学技術大学院大学
〒923-1211 石川県能美郡辰口町旭台 1-1
Japan Advanced Institute of Science and Technology
1-1, Asahidai, Tatsunokuchi, Nomi 923-1211

** 金沢星稜大学
〒920-8620 金沢市御所町丑 10-1
Kanazawa Seiryo University
Ushi 10-1, Goshomachi, Kanazawa 920-8620

*** (株) 竹中庭園緑化
〒134-0091 東京都江戸川区船堀 7-11-17
Takenaka Garden Afforestation, Inc.
7-11-17, Funabori, Edogawa-ku, Tokyo 134-0091

本研究では、植物の実オフィス環境におけるホルムアルデヒドの浄化効果を調べた。浄化の評価には、連続モニタリング可能な酸化スズ系ガスセンサとタブレット式ホルムアルデヒド計を用いた。また、夜間において植物により二酸化炭素濃度が上昇するため、二酸化炭素計および酸素濃度計を用いてモニタリングを行った。さらに、植物の蒸散作用による湿度変化も測定した。これら測定データの融合により、植物の浄化効果に対する様々な環境要因による影響を調べたので報告する。

2. 実験方法

実験は実オフィス環境において行った。そのレイアウトを図1に示す。実験は夏季である7月から9月に行った。この部屋は、実験中は無人とした。窓は東向きで太陽光が入り、蛍光灯は点灯していない。窓は、床から92 cmの位置より上に151 cmの高さに設置されている。エアコンディショナーを24時間作動させ室温を23℃になるように設定した。これにより、室温は23℃～26℃の間で推移した。

ホルムアルデヒドの浄化特性は、酸化スズ系ガスセンサ（新コスモス電機：CH-N）で測定した。センサからの信号はA/Dコンバータを介し、1分毎にコンピュータに取り込まれる。また、実験中にホルムアルデヒド計（理研：FP-85）を用いて、連続的にホルムアルデヒドを放射させる前、被験植物としてアレカヤシ設置前と設置3日後の3回測定を行い、ガスセンサ出力との照合を行った。ホルムアルデヒド計はタブレット式で連続計測できない。ガスセンサによるモニタリングと同時に照度、温度、湿度、二酸化炭素および酸素濃度も連続して計測した。サンプリング間隔はガスセンサと同様1分であるが、温度、湿度センサは急激な変動がないため10分間隔とした。採用したガスセンサ、照度、温度、湿度センサの写真を図2に示す。二酸化炭素計（新コスモス電機：IRC-630）および酸素濃度計（新コスモス電機：KS-60）の写真を図3に示す。

被験植物としては、比較的大きな観葉植物であるアレカヤシを採用した。アレカヤシの写真を図4に示す。鉢の直径、高さは40 cmで、アレカヤシの高さは鉢底から約2 mのものを7鉢準備した。灌水は実験する前日の夕方に行い実験中は行っていない。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 浄化特性 ガスセンサで測定を開始後24時間経過時に、図1に示した場所に蓋のない容器（container）に入れたホルムアルデヒドを設置し、その容器から連続して放射するホルムアルデヒドに対する浄化特性を調べた。その特性を図5に示す。ホルムアルデヒドが部屋に拡散すると、その濃度上昇に伴いガスセンサの出力が上昇する。その後、温度、湿度、気圧など様々な環境要因に影響を受けセンサ出力が幾分変動する。図5において、ホルムアルデヒドを連続放射させた後、24時間毎にタブレット式のホルムアルデヒド計でその濃度を測定したところ、0.9ppmから

図1 実験室の容積とセンサの設置位置

Fig. 1. A size of experimental room and positions of each sensor.

図2 実験で用いたガス、温度、湿度、照度センサ

Fig. 2. Photograph of gas sensor, thermometer, hygrometer and photo sensor adopted in this study.

図3 実験で用いた二酸化炭素、酸素センサ

Fig. 3. Photograph of CO₂ and O₂ sensor adopted in this study.

1ppm で 4 日間の変動は 0.1ppm 以内であった。放射されるホルムアルデヒド濃度は、室温やエアコンディショナーの風量が同程度の時、容器の口径により、ほぼ一定になることを確認した。

また、ホルムアルデヒド濃度とセンサ出力の関係をセンサ出力の変動幅を用いて調べた。変動幅は、次のように求めた。まず、ホルムアルデヒド設置前 24 時間の平均値を基準レベルとする。次にホルムアルデヒドを設置し、センサ出力が上昇しほぼ一定になるのは設置約 12 時間後であったため、植物を設置しないガスセンサの応答を調べた実験においてはホルムアルデヒド設置 12 時間後から実験終了まで、植物を設置した場合はホルムアルデヒド設置 12 時間後から植物設置前までのセンサ出力の平均値を求めた。この値から基準レベルを引くことにより変動幅 (V_f) を導出した。

図 4 実験に用いたアレカヤシ

Fig. 4. Areca palm adopted in this study.

図 5 ホルムアルデヒドに対するガスセンサの応答

Fig. 5. Response of gas sensor for formaldehyde without plant.

その結果を図 6 に示す。実験を行った範囲では、ホルムアルデヒド濃度とセンサ出力の関係は、ほぼリニアで幾分幅があることが認められた。

アレカヤシによる浄化特性の例を図 7 に示す。測定開始 24 時間後にホルムアルデヒドを設置し、さらにその 24 時間後にアレカヤシを設置した。その後 3 日間の特性を調べた。図 7 はガスセンサによるモニタリング結果である。この図においては、濃度が 1.6ppm になるように設置した。アレカヤシの鉢数は 4 鉢である。1.6ppm は人が目、鼻、のどに刺激を感じる濃度である。この実験中においてはホルムアルデヒド計を用いて、ホルムアルデヒドを放射させる直前、放射させてから 24 時間後、アレカヤシを設置し 3 日後の濃度を測定した。図 7 において、アレカヤシ設置 3 日後の濃度は 0.59ppm であった。アレカヤシを設置後 24 時間経過すると減少特性がほぼ飽和し、72 時間後に完全に一定となる。このため、72 時間後のホルムアルデヒド濃度によりアレカヤシの浄化効果を評価することとした。

図 6 V_f とホルムアルデヒド濃度の関係

Fig. 6. Relationship between V_f and formaldehyde concentration.

図 7 ホルムアルデヒド 1.6ppm に対する浄化特性

Fig. 7. Purification characteristic for formaldehyde of 1.6ppm.

放射されるホルムアルデヒドの濃度が0.3, 0.4, 1.0, 1.6ppmに設定した場合において、アレカヤシをそれぞれ4鉢と7鉢設置した場合の浄化効果を図8に示す。横軸は連続放射しているホルムアルデヒド濃度、縦軸はアレカヤシ設置72時間後の濃度 (C_{after3}) をホルムアルデヒド計を用いて測定した結果である。放射濃度が0.3ppmの部屋に7鉢のアレカヤシを設置すると3日後の濃度は0.14ppmであった。WHOや日本のホルムアルデヒド室内規制値は0.08ppmであるが、欧米諸国では0.1から0.2ppmの範囲にある。本実験においては、欧米諸国の規制値まで浄化されることが確認できた。

図8の放射ホルムアルデヒド濃度が0.4ppmの場合において、7鉢の方が4鉢より低くなっているものの、それ以上の濃度では鉢数を4個から7個に増やしても効果は余りない結果が得られた。さらに、放射ホルムアルデヒド濃度が高いほど、3日後の濃度が減少する割合が高くなった。すなわち、連続放射ホルムアルデヒド濃度が高いほど浄化効果が高くなることが明らかとなった。

〈3・2〉 浄化速度 アレカヤシを設置後24時間経過すると濃度が減少し、ほぼ一定状態になる。このことから、設置後24時間の浄化速度について検討を行った。

植物設置後24時間のセンサ出力の減少率の傾向を求めた。このとき、ノイズ成分の除去を次のように行った。まず、センサ出力の各値から基準レベルを差し引いた特性を積分する。積分する範囲を6時間毎とすることにより、かなりノイズ成分を取り除くことができた。積分値はホルムアルデヒドの被曝量を意味する。積分値導出のイメージを図9に示す。導出した積分値を経過時間に対してプロットした特性を図10に示す。横軸はアレカヤシを設置してからの経過時間を示している。したがって、図10の横軸においてTimeが6(h)にあるプロットは、アレカヤシ設置直後から6時間分の被曝量を示す。浄化効果を評価するために、図10の時間6, 12, 18における微分係数を求めた。すなわち、3つの時間に対する8つの特性に対して、24個の微分係数が求められた。微分係数は3点微分法により導出した。6時間経過点における微分係数のうち7鉢の各濃度に対する4つの微分係数の絶対値は、12, 18時間における微分係数より大きい結果が得られた。したがって、7鉢設置してから初めの6時間は、浄化速度が速いことがわかる。さらに、導出した24個の微分係数が-621から0の範囲に入る減少関数が認められた。前述の6時間における7鉢の微分係数は、1.6ppmでは-621, 1.0ppmは-604, 0.4ppmは-413, 0.3ppmは-378であり濃度が高いほど大きい結果が得られた。すなわち、濃度が高いほど植物鉢の浄化速度は速くなることが明らかとなった。

図10の植物設置後24時間の各放射ホルムアルデヒド濃度毎の総被曝量 (E_{V24}) を図11に示す。7鉢を設置すると総被曝量は、4鉢の時より少なくなる。最小二乗法により4鉢と7鉢の各プロットに対する近似式を求めた。結果を式(1)と(2)に示す。

$$E_{V24_4} = 440 \ln(C) + 714 \dots \dots \dots (1)$$

図8 植物設置3日後のホルムアルデヒド濃度
Fig. 8. Formaldehyde concentrations at 3 days later after the setting of plants in the environment for different emitting concentrations.

図9 6時間毎の被曝量の導出
Fig. 9. Meaning of exposure volume during each 6 hours-exposure to formaldehyde.

図10 植物設置後の被曝量の時間変化
Fig. 10. Changes in exposure volume with time after the setting of plants.

(4pots: ◆1.6, ▲1.0, ■0.4, ●0.3ppm,
7pots: ◇1.6, △1.0, □0.4, ○0.3ppm)

$$E_{v24,7} = 440 \ln(C) + 630 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $E_{v24,4}$ は 4 鉢の総被曝量で $E_{v24,7}$ は 7 鉢の総被曝量、 C は放射ホルムアルデヒド濃度である。これらの式から、WHO や日本の規制値 0.08ppm の 30 倍と 40 倍に相当する 2.4ppm、3.2ppm において $E_{v24,4}$ と $E_{v24,7}$ を求めた。その値を図中にプロットした。さらに、鉢数を増加することによる総被曝量の減少効果を $(E_{v24,4} - E_{v24,7}) / E_{v24,4}$ によって導出したところ、1.6ppm では 0.108、2.4ppm では 0.076、3.2ppm では 0.068 であった。したがって濃度が高くなる程、鉢数による総被曝量の差は同じであっても、鉢数による効果は減少することになる。

〈3・3〉 植物による二酸化炭素濃度変化 放射ホルムアルデヒド濃度 0.4ppm にアレカヤシを 7 鉢設置した時の二酸化炭素と酸素、照度の経時変化を図 12 に示す。(a) は二酸化炭素と酸素の特性であり、(b) は照度の特性である。図(a)と(b)において時間軸は同期している。実験開始 48 時間後に、アレカヤシを設置するため入室した。このため図 12 (a) の二酸化炭素濃度特性が一時的に上昇している。

通常、植物は光が照射されている昼間は光合成により酸素を放射し、光がない夜間は呼吸のみ行い二酸化炭素を放射している。1 日を通して照度は変化し、それに伴い部屋の二酸化炭素濃度も変化する。照度と二酸化炭素濃度特性の間には負の相関関係がある。図 12 において、二酸化炭素濃度特性が 1 時間ほど遅れることが判明した。すなわち、照度の特性に対して二酸化炭素濃度特性を 1 時間進めると最大相関係数が得られる。その値は約-0.91 であった。

図 12 における二酸化炭素の最高濃度は 426ppm であった。夜間において二酸化炭素濃度が上昇するが、他実験 (7 鉢設置) の場合でも最高濃度は 451ppm で、ビル管理法で規制されている 1,000ppm 以下であった。

酸素は、植物による光合成のため昼間増えると考えられるが、その割合がパーセントで換算すると僅かであるため、センサの出力としてはほぼ一定であった。

図 11 植物設置後 24 時間の総被曝量
Fig. 11. Total amount of exposure volume after 24 hours from the setting of plants.

〈3・4〉 蒸散作用による湿度変化 図 12 の実験における湿度と室温の変化を図 13 に示す。エアコンディショナーにより、室温の大きな変化はなく、約 4℃の幅で変動している。アレカヤシ設置前 24 時間の平均相対湿度は 61.7%で、設置後 24 時間の平均は 66%で 4.3%の上昇が認められた。やや高め湿度であるため蒸散効果による影響は少ないと

図 12 二酸化炭素濃度と照度の相関関係
Fig. 12. Relationship between CO_2 and light intensity.

図 13 植物設置による湿度変化
Fig. 13. A change in humidity induced by the setting of plants.

言える。

実験全体では、アレカヤシ 4 鉢においては最高 10.7% で平均 4.1% の上昇が認められた。7 鉢では最高 16.1%, 平均 8.7% の上昇があった。鉢数を増やすと上昇率が高くなった。乾燥した室内に植物を設置することにより、空気浄化効果とともに適度な潤いも保つことが出来る。

4. まとめ

実オフィス環境において、ホルムアルデヒドに対するアレカヤシの浄化効果を調べた。浄化の評価には、酸化スズ系ガスセンサを用いた。また、タブレット式ホルムアルデヒド計によりセンサ出力と濃度を校正した。ホルムアルデヒドの雰囲気濃度が高いほど浄化効果が高くなることが明らかとなった。アレカヤシの鉢数を 4 から 7 に増やしても効果はそれ程増加しない。夜間においては、植物により二酸化炭素濃度が上昇するが 500ppm を越えることはなく、ビル管理法で規制されている 1,000ppm を十分に保つことも明らかとなった。1 日を通して照度は変化し、それに伴い二酸化炭素濃度も変化する。照度と二酸化炭素濃度特性の間には負の相関関係がある。このとき、二酸化炭素濃度特性を照度特性に対して 1 時間進めると最大相関係数が得られた。その値として約 -0.9 が得られた。ガスセンサ出力からみたホルムアルデヒド被曝量は、鉢数が多いほど少なくなる。すなわち、鉢数が多い程、初期浄化効果が高い。アレカヤシ鉢により、0.3ppm になるように連続して放射させたホルムアルデヒドを約 0.1ppm まで減少させることが可能であり、欧米諸国の規制値まで浄化できることが明らかとなった。また、アレカヤシ 7 鉢を設置してから、初めの 6 時間は浄化速度が速く、ホルムアルデヒドの濃度が高い程その速度は速くなることも明らかとなった。

今後は、他の観葉植物での浄化効果や、異なる季節についても調べ、植物による実オフィス環境の空気浄化の有効性を示す予定である。

(平成 14 年 12 月 16 日受付, 平成 15 年 4 月 24 日再受付)

文 献

- (1) T. Oyabu, A. Sawada, K. Takenaka, B. C. Wolvertson, B. Bensley, H. Nanto, and T. Katsube : "CHARACTERISTICS OF POTTED PLANTS FOR REMOVING OFFENSIVE ODORS", 6th International Conference on Engineering Design and Automation, No.169, pp.711-716, Hawaii, USA (2002-8)
- (2) A. Sawada, T. Oyabu, T. Yoshida, K. Takenaka, and B.C. Wolvertson : "Effect of Soil-kinds and Room Temperature on Purification Capability of Foliage Plant for Atmospheric Formaldehyde", *Trans. of IEE Japan*, Vol.122-E, No.6, pp.300-305 (2002-6) (in Japanese)
沢田史子・大藪多可志・吉田武稔・竹中幸三郎, B.C.Wolvertson : 「観葉植物による大気中ホルムアルデヒド除去能力に対する土壌種と室温の影響」, 電学論 E, **122**, 6, pp.300-305 (2002-6)
- (3) T. Oyabu, T. Onodera, H. Kimura, and Y. Sadaoka : "Purification Ability of Interior Plant for Removing of Indoor-Air Polluting Chemicals Using a Tin Oxide Gas Sensor", *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, Vol.36, No.6, pp.319-325 (2001-6)
- (4) T. Onodera, S. Hirobayashi, H. Kimura, and T. Oyabu : "Purification Rate for *Epipremnum aureum* for Formaldehyde in Light", *Trans. of IEE*

Japan, Vol.119-E, No.11, pp.532-537 (1999-11) (in Japanese)

小野寺 武・広林茂樹・木村春彦・大藪多可志 : 「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」, 電学論 E, **119**, 11, pp.532-537 (1999-11)

- (5) A. Sawada, T. Oyabu, Y. Nakamoto, K. Takenaka, and T. Yoshida : "Purification Effects of Odor and VOC Chemicals using Plants in a University Hospital", *Journal of the Society of Plant Engineers Japan*, Vol.14, No.2, pp.101-107 (2002-2) (in Japanese)
沢田史子・大藪多可志・中本・竹中幸三郎・吉田武稔 : 「医療機関における観葉植物導入によるニオイ・VOC 成分浄化効果」, 日本設備管理学会誌, **14**, 2, pp.101-107 (2002-2)

沢 田 史 子

(学生員) 2003 年 3 月北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了。現在同大学院博士後期課程在学中。ガス、ニオイセンサを用いた室内空間におけるセンシングシステムに関する研究に興味を持っている。大気環境学会, 日本設備管理学会, ライフサポート学会各会員。

大 藪 多可志

(正員) 1973 年工学院大学修士課程修了。75 年早稲田大学第二文学部英文科卒業。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教授。98 年金沢星稜大学経済学部教授。現在, 植物の環境浄化能力の評価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, 電気化学会, 日本設備管理学会各会員。

竹 中 幸三郎

(非会員) 1940 年 12 月 6 日生まれ。1986 年(株) 竹中庭園緑化設立。植物を用いた環境修復や植物配置デザインによる癒しの効果など人と植物の関係に興味を持ち企業活動を行っている。特に, 植物が人間に与える諸利益についての研究も行っている。

吉 田 武 稔

(非会員) 1981 年工学院大学工学研究科修士課程修了。84 年 Case Western Reserve University システム工学科博士課程修了 (Ph.D.)。85 年日本アイ・ビー・エム (株) 入社。97 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教授。3 年同教授。システム科学に関する研究に従事。経営情報学会, 計測自動制御学会, IEEE などの会員。