

Title	植物の空気浄化能力の定量的評価法の導出
Author(s)	沢田, 史子
Citation	
Issue Date	2005-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/812">http://hdl.handle.net/10119/812</a>
Rights	
Description	Supervisor: 吉田 武稔, 知識科学研究科, 博士

博 士 論 文

植物の空気浄化能力の定量的評価法の導出

指導教官 吉田 武稔 教授

北陸先端科学技術大学院大学  
知識科学研究科知識社会システム学専攻

沢田 史子

2005 年 3 月

# 目次

## 第1章 序論

1.1 序言	1
1.2 研究の背景と目的	2
1.3 本論文の構成	4

## 第2章 室内空気汚染問題の現状と対策

2.1 室内空気汚染問題	7
2.1.1 症例	7
2.1.2 代表的な原因物質	10
2.1.3 化学物質の発生源	11
2.2 室内空気汚染対策	15
2.2.1 厚生労働省の室内濃度指針値	15
2.2.2 室内空気汚染の実態調査	15
2.2.3 室内空気汚染対策に係わる法規および基準	19
2.2.4 室内空気汚染物濃度低減対策	20

## 第3章 植物の空気浄化能力に関する研究の現状と問題点

3.1 緒言	23
3.2 Wolverton らの研究	24
3.3 Giese らの研究	27
3.4 結言	28

<b>第4章 植物の空気浄化能力評価法</b>	
4.1 緒言	29
4.2 ガスセンサによる空気浄化特性測定	30
4.3 実験方法	30
4.4 浄化能力評価法	36
4.4.1 センサ出力	36
4.4.2 植物の空気浄化システム	36
4.4.3 評価法および評価式の提案	39
4.4.4 評価法の検証	44
4.5 結言	45
<b>第5章 環境要因の浄化能力に与える影響</b>	
5.1 緒言	46
5.2 土壌種の影響	47
5.3 室温の影響	52
5.4 照度の影響	53
5.5 結言	54
<b>第6章 評価指標の妥当性の検証</b>	
6.1 緒言	56
6.2 代表的な観葉植物の浄化能力評価	57
6.3 植物のサイズと浄化能力の関係	63
6.3.1 サイズの違いによる浄化特性の相違	63
6.3.2 葉面積の導出	63
6.3.3 浄化能力評価	64
6.4 様々な汚染物種の評価	69
6.5 結言	73

<b>第7章 活性炭鉢植物の空気浄化能力評価</b>	
7.1 緒言	75
7.2 活性炭鉢植物のホルムアルデヒド除去効果	76
7.3 活性炭鉢植物のトルエン除去効果	76
7.4 活性炭鉢植物のキシレン除去効果	79
7.5 結言	80
<b>第8章 結論</b>	
8.1 本研究の成果	82
8.2 検討事項と今後の課題	83
謝辞	87
参考文献	88
本研究に関連する発表論文	96
本研究に関連しない発表論文	100

# 目 次

1.1	本論文の構成	6
2.1	シックハウスの症状が表れた人の性別および年代	12
2.2	症状の内訳	12
4.1	測定システム	32
4.2	測定システムの外観	33
4.3	実験に使用したガスセンサ	34
4.4	ガス検知回路	34
4.5	実験に用いたポトス（左）とスパティフィラム	35
4.6	ホルムアルデヒド濃度に対するセンサ出力値	37
4.7	チャンバーへの吸着および漏洩実験	37
4.8	浄化特性	38
4.9	浄化システムのブロック線図	41
4.10	片対数グラフで表した浄化特性	42
4.11	測定値と導出された理論値	43
4.12	ホルムアルデヒド濃度に対するポトスとスパティフィラムの浄化能力	44
5.1	実験に使用した <i>Eco-Do</i> と <i>Clay</i>	49
5.2	実験に使用したポトス	49
5.3	植物の有無による浄化特性の相違	50
5.4	5種類の土壌に生育しているポトス鉢の浄化能力の相違	51
5.5	浄化能力の雰囲気温度依存性	52

5.6	浄化能力の照度依存性	54
6.1	実験に使用した 10 種類の観葉植物	59
6.2	ポトスとサンスベリアの浄化特性比較	61
6.3	10 種類の観葉植物の浄化能力	62
6.4	異なるサイズの 3 つのポトス	65
6.5	異なるサイズのポトスの除去特性	66
6.6	土壌の効果を除外した場合の 3 種類のサイズのポトスの除去特性	66
6.7	ポトスの葉の幅(W)と長さ(L)の比のヒストグラム	67
6.8	葉面積と浄化能力の関係	68
6.9	ポトスのサイズと単位面積当たりの浄化能力の関係	68
6.10	植物の高さと浄化能力の関係	69
6.11	スパティフィラムの各種汚染物に対する除去特性	71
6.12	トルエン濃度に対するポトスとスパティフィラムの浄化能力	72
6.13	キシレン濃度に対するポトスとスパティフィラムの浄化能力	72
6.14	汚染物の分子量と浄化能力の関係	73
7.1	実験に用いた活性炭鉢	77
7.2	活性炭表面の電子顕微鏡写真	77
7.3	ホルムアルデヒドの吸着・除去特性	78
7.4	トルエンの吸着・除去特性	79
7.5	キシレンの吸着・除去特性	80
8.1	ホルムアルデヒド除去能力と二酸化炭素吸収能力の関係	84
8.2	憩いの空間のレイアウト	85
8.3	植物設置による除去効果	85

# 表 目 次

2.1	短時間曝露のホルムアルデヒド人体影響	3
2.2	各種の発生源と発生する化学物質の一例	14
2.3	厚生労働省による室内濃度指針値	16
2.4	築1年以内の新築住宅室内空气中の化学物質濃度の指針値超過率	17
2.5	学校における室内空气中の化学物質濃度の指針値超過率	18
3.1	観葉植物によるホルムアルデヒド除去率	26
3.2	観葉植物によるキシレン除去率	26
3.3	観葉植物によるアンモニア除去率	27
6.1	異なるサイズのポトスの葉面積の推定	67



# 第 1 章

## 序 論

### 1.1 序言

20 世紀に高度に発達した科学技術は、生活の向上や経済の発展に多大な貢献をした。その反面、経済成長と爆発的な世界の人口増加により、現在様々な地球規模の環境問題が発生している。地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨、森林破壊、砂漠化、海洋汚染などである[1]。これらの問題と高度成長期に起こった公害問題との最も大きな違いは、我々自身が環境汚染を発生させる立場とそれにより被害を受ける両方の立場を持っている点にある。今日の環境問題は、我々自身の問題として捉える必要がある。レイチェル・カーソンは 1962 年に DDT などの殺虫剤の危険性に警鐘を鳴らした「沈黙の春 (Silent spring)」を出版した[2]。その約 30 年後、シーア・コルボーンは「奪われし未来 (Our storen future)」で内分泌攪乱物質 (環境ホルモン) が生体へ及ぼす毒性を警告した [3]。今日、推計で 5 万種以上の化学物質が流通し、また、日本国内において工業用途として化学物質審査規制法に基づき届け出られるものだけでも毎年 300 物質程度の新たな化学物質が市場に投入されている[4]。化学物質は、石油化学製品やナト

リウム化合物といった工業原料として用いられる基礎的な化学製品から、合成洗剤、塗料、化粧品、医薬品といった身近な製品に至るまで、様々な製品の製造などに用いられている。利便性を追求し、多種多様な化学物質を大量に生産・消費・廃棄する社会経済活動や生活様式は、環境汚染をもたらす[5]。

## 1.2 研究の背景と目的

近年、顕在化してきた環境問題の一つに室内空気汚染がある。1973年と1979年の2度のオイルショックにより、我が国では冷暖房のエネルギー消費を抑制するため住宅の高気密化が進行した。わずか50年程前までは、床や壁、天井には畳、むく板、漆喰壁、障子、ふすまなどが使われていた。これらの資材は、木材や土、紙などの天然素材であった。しかしながら、これらは経済性、生産性、気密性、断熱性に欠けることから、次第に様々な化学物質を含む合板やパーティクルボードが使用されるようになった。このような住環境の変化により、室内に多くの化学物質が放散し、その濃度が高くなる結果となった[6]。建材や家具などから発生するホルムアルデヒドや揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds) などが原因となりシックハウス症候群などを引き起こすことが数多く報告されている[7][8]。その対策として、厚生労働省は室内空気汚染物に対する指針値を示している。1997年に初めてホルムアルデヒドの指針値が設定され、さらに2000年6月にはトルエン・キシレン・パラジクロロベンゼンについて規制され、現在までに全部で13物質の指針値が策定されている。2003年にはシックハウス症候群対策を盛り込んだ改正建築基準法が施行された。これにより、住宅完成後の室内ホルムアルデヒド濃度が厚生労働省の指針値以下になるよう、面積に応じて建材の使用が制限されることとなった。しかしながら、

完成後の濃度測定を義務付けていない、対象となる物質の種類が少ないことなどから室内空気汚染問題の解決には至っていない。また、換気装置が設置されたり、室内空気汚染対策用の空気清浄機の開発・販売も行われているが[9]、コストが高いことやメンテナンスが必要なことなどから新たな対策が切望されている。

一方、NASA (National Aeronautics and Space Administration) では、宇宙船内生活環境システム開発において様々な空気汚染物を検出した。その対策を講ずるため室内空気汚染に関する研究を開始した。その結果、NASA の Wolverton らにより植物が空気汚染物を分解・除去する能力を有していることが報告された[10][11]。植物は、従来から観賞用に室内に配置されることが多い[12]。近年では、植物を室内に置くことにより視覚疲労の緩和・回復[13]や労働作業効率の向上[14]、人間に対する生理的・心理的効果[15]-[18]があることが報告されている。さらに蒸散作用による湿度調整機能もある[19][20]。これらのことから、室内空気汚染対策として植物を利用することは有効であると考えられる。しかしながら、これまで行われてきた研究では[21]-[23]、空気浄化効果が明らかにされた植物種は十分とはいえない。さらに、浄化効果の測定をガスクロマトグラフィ (GC) やガス検知管を用いて行っているが、GC による測定は複雑な処理過程と専門知識・技術および高価な専用機器が必要である。また、測定後の分析に時間が掛かり、測定結果を即座に得たり連続測定はできない。一方、ガス検知管はガス濃度を短時間で測定できるが、短い時間間隔での連続計測はできず、ガス捕集の手間も掛かる。植物の空気浄化過程を詳細に把握するためには連続的に計測を行う必要がある。また、浄化効果の評価においても、統一された環境・方法で行われておらず課題が残されている。

これまでに行われてきた評価は、除去率 ( $\mu\text{g/hr}$ ) を用いていた。しかしながら、除去率はその定義から初期濃度に依存するため、植物の固有な浄化能力を

示していない。植物の浄化能力を示す時、その能力はその植物固有なものでなければならない。したがって、植物固有な浄化能力を定量的に評価する指標が必要である。本研究では、植物の空気浄化過程を連続モニタリング可能なガスセンサを用いて計測し、その実験値から浄化能力を定量的に評価する指標を含んだ植物の空気浄化のダイナミクスのモデルを提案することを目的とする。

## 1.3 本論文の構成

本論文は本章を含め、8つの章から構成されている。図 1.1 に全体の構成を示す。第 1 章では本研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、室内空気汚染問題に関する症例や原因物質、化学物質の発生源について述べている。さらに、室内空気汚染の実態調査結果やその対策に係わる法規および基準について説明している。また、従来から行われてきた汚染濃度低減対策について述べている。

第 3 章では、植物の室内空気浄化能力に関する研究の現状として、世界で初めてその能力を報告した Wolverton らの研究について述べるとともに、問題点についても言及している。植物によるホルムアルデヒドの分解メカニズムについて報告している Giese らの研究についても述べている。

第 4 章では、植物の空気浄化能力の新しい評価法を提案している。ここでは初めに植物の空気浄化効果を測定するための実験方法について説明している。測定に使用したガスセンサの空気汚染物検出原理および検知回路についても述べている。次に、実験データから浄化能力を定量的に評価する指標を含んだ植物の浄化システムのモデルを提案している。

第 5 章では、浄化能力とその評価を行う実験時の環境要因の関係を調べている。植物の浄化能力は様々な環境要因の影響を受けると考えられる。したがっ

て、植物の浄化能力評価を正しく行うには、浄化能力に影響を与える諸要因を把握しておく必要がある。このため、Wolverton らが明らかにしていない土壌の種類、温度、照度について調べ、その結果から実験環境のパラメータを決定している。

第 6 章では、4 章で提案した評価指標の妥当性を示すために、5 章で決定した実験環境パラメータ下で浄化能力に対する植物の種類、サイズによる影響および様々な汚染物の評価の可能性について検討している。初めに、植物種による浄化能力の違いを明らかにするため、代表的な観葉植物についてホルムアルデヒドを用いて評価を行なっている。次に、3 つのサイズのポトスの浄化能力を提案指標を用いて評価している。汚染物が葉の気孔から取り込まれることから、サイズの指標として葉面積を用いている。さらに、ホルムアルデヒド以外の汚染物に対する評価可能性を示すため、シックハウス症候群の代表的な原因物質であるトルエン、キシレンに対する評価を行っている。

第 7 章では、提案した指標により活性炭鉢植物の浄化効果を評価している。活性炭で作られた鉢に植物を植え、それを室内に置くことにより、継続的な空気汚染物の分解と一時的に高濃度な汚染物の吸収が可能となる。活性炭鉢植物は、今後、より付加価値の高い室内空気汚染対策として期待できる。除去効果が非常に高い活性炭鉢植物を評価することにより、提案手法の有効性について確認している。

第 8 章では、結論として、本研究の成果および検討事項と今後の課題について述べている。

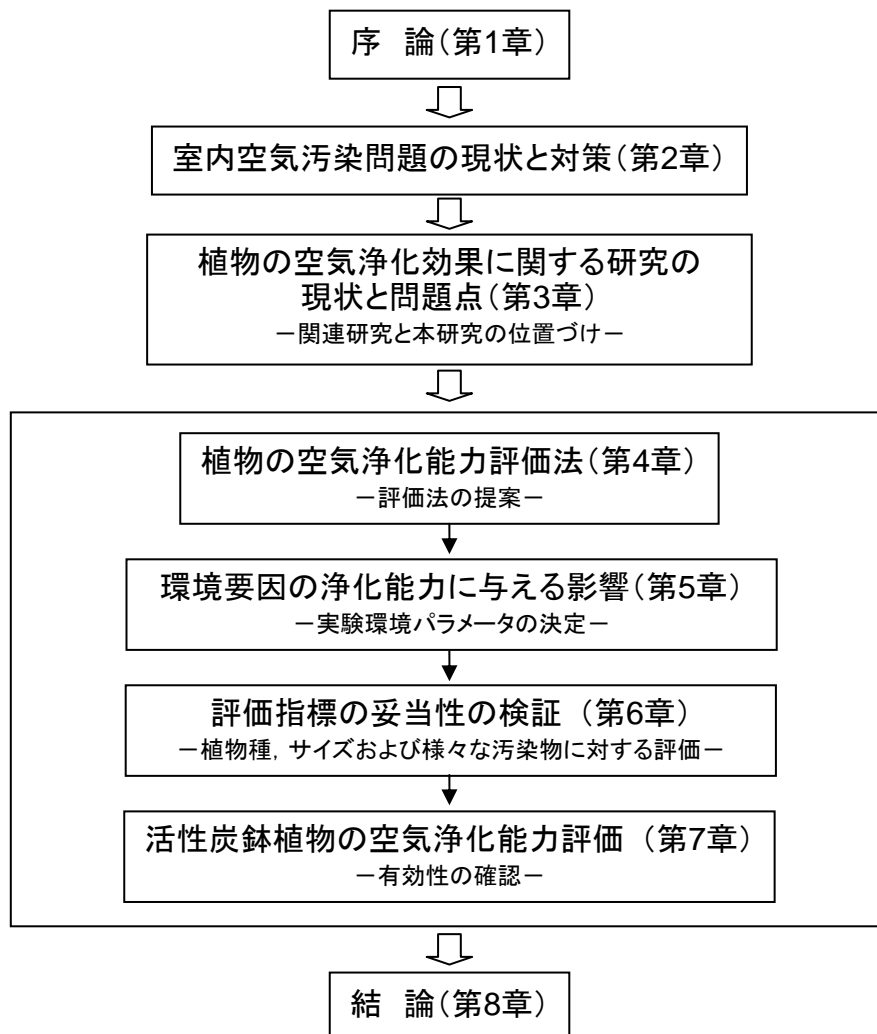


図 1.1 本論文の構成

## 第 2 章

# 室内空気汚染問題の現状と対策

## 2.1 室内空気汚染問題

現代の住宅は省エネルギーの観点より、高気密・高断熱の仕様となっている。また、低コストや品質維持のために、接着剤、防蟻剤、防腐剤など様々な化学物質が使われている。室内の化学物質の濃度が高くなると健康被害が起こる。引き起こされる症例と主な原因物質、発生源について述べる。

### 2.1.1 症例

#### ① シックハウス症候群

新築住宅の建材に使われる接着剤や壁材から出る揮発性有機化合物やホルムアルデヒドなどの化学物質および衣料用防虫剤・パラジクロロベンゼンなどによる室内汚染を原因とする体調不良のことをシックハウス症候群 (Sick House Syndrome) という。症状には目や喉の痛み、頭痛、嘔吐、鼻炎、呼吸器疾患、疲労感、精神不安定など多様である[24]。また、欧米でシックビルディングシン

ドローーム (Sick Building Syndrome, SBS) と呼ばれているものに相当する[25].

厚生労働省の参考定義によると，“住宅の高気密化や化学物質を放散する建材・内装材の使用等により，新築／改築後の住宅やビルにおいて，化学物質による室内空気汚染等により，居住者の様々な体調不良が生じている状態が，数多く報告されている．症状が多様で，症状発生の仕組みをはじめ，未解明な部分が多く，また様々な複合要因が考えられることから，シックハウス症候群と呼ばれる”とされている[26].

1997年から2000年9月末の間に全国の消費者センターに寄せられたシックハウスに関する消費者の相談件数は1,570件であった[27]. 症状が表れた人の性別および年代を図2.1に示す．女性1,105人(70.4%)，男性370人(23.6%)で女性が男性の3倍であった．年代別にみると，30歳代が最も多く，以下50歳代，40歳代，60歳代と続いている．職業では主婦などの家事従事者743人(47.3%)が一番多く，無職の173人(11.0%)を併せると58.3%となり，在宅率が高いと思われる人の割合が高いという結果が報告されている．その症状の内訳を図2.2に示す．症状で最も多いのは体調がすぐれない，吐き気がするなどのその他の傷病および諸症状が58%，次いで，咳き込む，息苦しいなどの呼吸器障害が22%，湿疹，かゆみなどの皮膚障害が14%であった．その他の傷病および諸症状の具体的な症状としては，鼻がつまる，目がチカチカする，目がかすむ，頭痛，吐き気，めまいなどが報告されている．

## ② シックスクール症候群

シックハウス症候群と同様の症状が学校環境において発生しており，これらはシックスクール症候群 (Sick School Syndrome) と呼ばれている．2002年2月に文部科学省が，「健康的な学習環境を確保するために－有害な化学物質の室内濃度低減に向けて－」のパンフレットを公表した[28]．学校施設で留意すべき



主な点をまとめたもので、発生源となる恐れのある材料、厚生労働省の室内濃度指針値、建物整備時における発生源の持ち込みや換気に対する留意事項、日常生活時における換気励行に関して概説している。

### ③ 化学物質過敏症

化学物質過敏症（Chemical Sensitivity, CS）とは、化学物質を大量に浴びたり、長時間接触したりしたために、身の回りの化学物質に対して過敏になり、超微量でも頭痛、めまい、不眠、鼻炎、下痢、皮膚炎、不安感、倦怠感など様々な症状を呈する病気である [24]。また、重症になると複数の化学物質に反応する多種類化学物質過敏症（Multiple Chemical Sensitivity, MCS）に進行し、外を自由に歩くこともできなくなる。シックハウス症候群と同様に建材や塗料などから発生する化学物質によって引き起こされることが多い。米国の調査では、化学物質過敏症の患者は人口の 13.9%と報告されており、日本にも潜在的に多数の患者がいると考えられる [29]。

シックハウス症候群は、場所をキーワードとして不特定多数に発症したことから、公的機関による大掛かりな疫学的研究がなされた。これに対し、化学物質過敏症は、患者間に共通事項があまり見当たらず、症状が多岐に亘ることから組織だった検討がなされ難い面があった。しかしながら、最近、諸外国ではいくつかのプロジェクト研究が組織され知見も重ねられてきた。我が国においても厚生労働省や環境省が各専門家の考え方を客観的に評価してまとめている。厚生労働省の報告書によると、化学物質過敏症とは、“最初にある程度の量の化学物質に曝露されるか、あるいは低濃度の化学物質に長期間反復曝露されて、一旦過敏状態になると、その後極めて微量の同系統の化学物質に対しても過敏症状を来す者があり、化学物質過敏症と呼ばれている。化学物質との因果関係や発生機序については未解明な部分が多く、今後の研究の進展が期待される。”

と理解するよう示されている[26].

## 2.1.2 代表的な原因物質

### ① ホルムアルデヒド

ホルムアルデヒド (Formaldehyde) は、化学式  $\text{HCHO}$ 、分子量 30.03、融点  $-92^{\circ}\text{C}$ 、沸点  $-19.5^{\circ}\text{C}$ 、蒸気密度 1.067 の無色で鋭い刺激臭の可燃性気体である。合板用接着剤、フェノール樹脂、多価アルコールなど広範囲に使用されている。生物標本などを保存するホルマリンもホルムアルデヒド水溶液である[26]。ホルムアルデヒドの短期間曝露による症状を表 2.1 に示す。

### ② トルエン

トルエン (Toluene) は、化学式  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ 、分子量 92.13、融点  $-95^{\circ}\text{C}$ 、沸点  $110.6^{\circ}\text{C}$ 、蒸気密度 3.18 のベンゼンのような臭気を持つ無色の可燃性液体である。爆薬、染料、有機顔料、医薬品、甘味料、合成繊維、溶剤、石油精製などに使用されている。比較的高濃度の短期曝露で、精神錯乱、疲労、吐き気など中枢神経に影響を与えることがある。また、高濃度の長期曝露により、頭痛、疲労、脱力感などの神経症状へ影響を与えることがあり、心臓に影響を与え不整脈を起こすことがある[31]。

### ③ キシレン

キシレン (Xylene) は、化学式  $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$ 、分子量 106.17、蒸気密度 3.66 の無色の可燃性液体で刺激臭がある。溶剤、染料、香料、合成繊維、可塑剤、医薬品、農薬、アンチロック剤などに使用されている。比較的高濃度の短期曝露の影響はトルエンと類似している。高濃度の長期曝露により、頭痛、不眠症、

興奮などの神経症状へ影響を与えることがある[31].

#### ④ 揮発性有機化合物

揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOC) は、沸点が 50–100 ~240–260°Cの揮発性有機化合物の総称で、アルカン類、芳香族炭化水素、テルペン類、ハロカーボン類、エステル類、アルデヒド・ケトン類などが含まれる[30]. その代表格として、外気や室内で最も多く検出される溶剤のトルエンやキシレン、エチルベンゼンや衣類の防虫剤 (トイレの芳香剤) のパラジクロロベンゼンなどが挙げられる. 揮発性有機化合物の総量を総揮発性有機化合物 (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) という.

### 2.1.3 化学物質の発生源

室内における化学物質の発生源は多岐に亘る. それらの発生源と発生する化学物質の一例を表 2.2 に示す. 発生源における化学物質の発生量を低減させるか, その発生源を除去することにより汚染濃度を低減できる. このため, 発生源を知ることは非常に重要である.

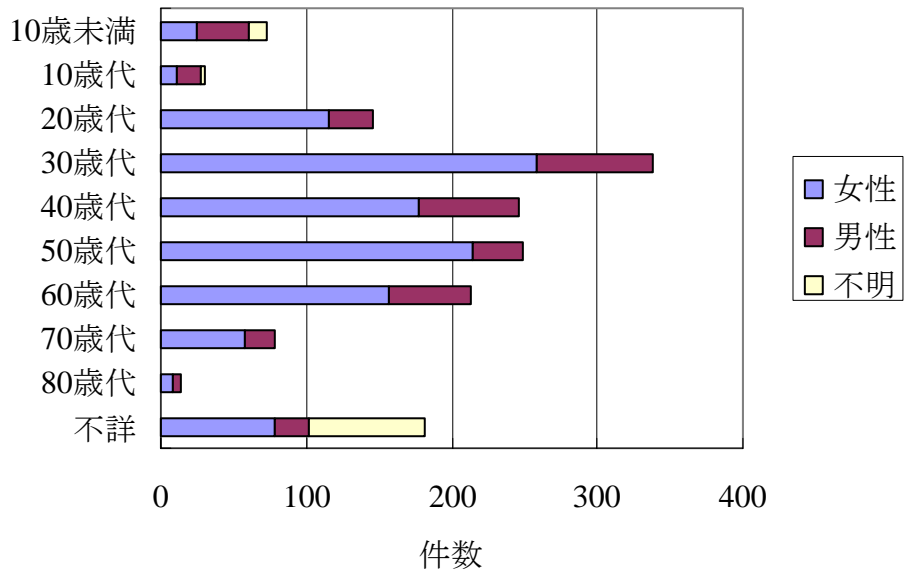


図 2.1 シックハウスの症状が表れた人の性別および年代[27]

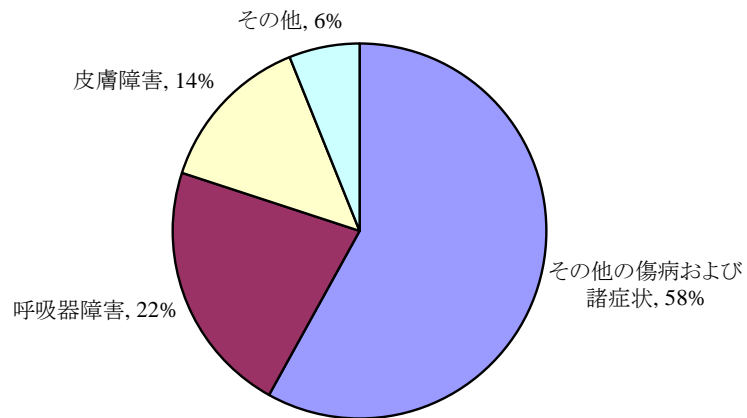


図 2.2 症状の内訳[27]

表 2.1 短時間曝露のホルムアルデヒド人体影響[32]

影 響	ホルムアルデヒド濃度 (ppm)	
	推定中央値	報告値
におい検知閾値	0.08	0.05-1
目への刺激閾値	0.4	0.08-1.6
のどの炎症閾値	0.5	0.08-2.6
鼻・目への刺激	2.6	2-3
催涙 (30 分間なら耐えられる)	4.6	4-5
強度の催涙 (1 時間続く)	15	10-21
生命の危険, 浮腫, 炎症, 肺炎	31	31-50
死亡	104	50-104

表 2.2 各種の発生源と発生する化学物質の一例[33]

発生源		化学物質
建築材料	合板, 集成材	ホルムアルデヒド, トルエン
	断熱材	スチレン, フタル酸エステル類
	塩ビ系壁紙	フタル酸エステル類
	木材保存剤, 防蟻剤	有機リン系, ピレステロイド系化合物
家庭用品	洗浄剤	テトラクロロエチレン, アルコール類, 塩化メチレン, アセトン
	塗料, スプレー	トルエン, キシレン, アルコール類, ノルマルヘキサン
	殺虫剤	パラジクロロベンゼン, ピレステロイド系, 有機ハロゲン化合物
	芳香剤	プロピレングリコール, エチルエーテル, アセトン, エチルアルコール
	家具, 絨毯	ホルムアルデヒド, スチレン, エチレングリコールエーテル
建築物	暖房	窒素酸化物, 二酸化炭素, 一酸化炭素, 二酸化硫黄, メタン
	燃焼器具	窒素酸化物, 二酸化炭素, 一酸化炭素, プロパン, ブタン
	車庫	一酸化炭素, 窒素酸化物, 二酸化硫黄, ベンゼン, ニッケル, 白金
	建築資機材	n-デカン, トルエン, ホルムアルデヒド, ラドンガス, ウレタン
生活起因	たばこの煙	ベンゾ(a)ピレン, 無機ガス, 含窒素化合物, ケトン類
	炊事などの燃焼	ベンゾ(a)ピレン, 一酸化炭素, 二酸化炭素, 窒素酸化物, メタン
	飲料水	トリハロメタン, トリクロロエチレン, クロロホルム
	ヒト, 動物由来	二酸化炭素, 代謝物による揮発性ガス

## 2.2 室内空気汚染対策

### 2.2.1 厚生労働省の室内濃度指針値

室内空気中の化学物質汚染の低減化が促進され、快適で健康な居住空間が確保されることを目的として、厚生労働省は、2000年4月よりシックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会を開催し、特定の化学物質に対して室内濃度指針値を策定してきた。表 2.3 に現時点までにおいて策定された室内濃度指針値を示す[34]。表 2.3 に示された室内濃度指針値は、策定された時点において入手可能な毒性に関する科学的知見に基づき、ヒトがその濃度の化学物質を一生涯に亘って摂取しても、健康への有害な影響を受けまいと判断により設定された値とされている。今後も検討が継続され、合計でおよそ 40～50 の化学物質に対して室内濃度指針値が策定される予定となっている。

### 2.2.2 室内空気汚染の実態調査

国土交通省では 2000 年より、室内空気中の化学物質濃度の現状を把握することを目的に実態調査を行っている。新築 1 年以内であった住宅を対象に集計し、指針値を超過した割合と調査個数を表 2.4 に示す。

文部科学省は、2000 年 9 月から 2001 年 2 月まで全国 7 ブロック(北海道・東北、北信越、関東、東海、近畿、中国・四国、九州)中の 1 都府県から人口および築年数を考慮し、50 校を選定し室内濃度の実態調査を行った。指針値を超過した割合と測定個所数を表 2.5 に示す。午前、午後の測定時間帯別に見るとどの物質についても大きな違いはないが、ホルムアルデヒドは夏期に超過率が増加

する傾向を示している。また、教室別ではコンピューター室の 20%、音楽室においても 4.3%が指針値を超過していた。児童・生徒が安心して学習できる環境を提供するために、早急に室内濃度を低減させる必要がある。

表 2.3 厚生労働省による室内濃度指針値[34]

化学物質	室内濃度指針値		設定日
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	
ホルムアルデヒド	100	0.08	1997/6/13
トルエン	260	0.07	2000/6/26
キシレン	870	0.2	2000/6/26
パラジクロロベンゼン	240	0.04	2000/6/26
エチルベンゼン	3,800	0.88	2000/12/15
スチレン	220	0.05	2000/12/15
クロルピリホス	1	0.00007	2000/12/15
	小児	小児	
	0.1	0.000007	
フタル酸ジ-n-ブチル	220	0.02	2000/12/15
テトラデカン	330	0.04	2001/7/5
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	120	0.0076	2001/7/5
ダイアジノン	0.29	0.00002	2001/7/5
アセトアルデヒド	48	0.03	2002/1/22
フェノルカルブ	33	0.0038	2002/1/22
総揮発性有機化合物量(TVOC)	暫定目標値		2000/12/15
	400		



表 2.4 築 1 年以内の新築住宅室内空气中的化学物質濃度の指針値超過率[35]

化学物質	2000 年度冬期	2001 年度夏期	2002 年度夏期	2002 年度冬期
ホルムアルデヒド	28.7% (2,815 戸)	13.3% (1,726 戸)	7.1% (1,390 戸)	0.2% (502 戸)
トルエン	13.6% (2,816 戸)	6.4% (1,680 戸)	4.8% (1,390 戸)	1.7% (118 戸)
キシレン	0.2% (2,816 戸)	0.3% (1,680 戸)	0% (1,390 戸)	0% (118 戸)
エチルベンゼン	0% (2,816 戸)	0% (1,680 戸)	0% (1,390 戸)	0% (118 戸)
スチレン	未実施	1.1% (1,680 戸)	0.0% (1,390 戸)	0.8% (118 戸)
アセトアルデヒド	未実施	未実施	9.2% (1,390 戸)	16.3% (502 戸)

表 2.5 学校における室内空気中の化学物質濃度の指針値超過率[35]

化学物質	時期	測定時間帯別		教室別
		午前	午後	
ホルムアルデヒド	夏期	4.3% (281)	4.3% (278)	コンピュータ教室 20% 音楽室 4.3% 図工室 2.3%
	冬期	0%	0.4% (278)	音楽室 1.1%
トルエン	夏期	1.1% (269)	0.4% (271)	図工室 3.4% コンピュータ教室 1.1%
	冬期	1.5% (264)	1.5% (260)	普通教室 2.2% 音楽室 2.2% 体育館 2.4% 図工室 2.5%
キシレン	夏期	0%	0%	
	冬期	0%	0%	
パラジクロロベンゼン	夏期	0%	0%	
	冬期	0%	0%	

## 2.2.3 室内空気汚染対策に係わる法規および基準

シックハウス症候群対策を盛り込んだ改正建築基準法が成立し、2003年7月1日に施行された。シックハウス対策に係る改正建築基準法の概要を以下に示す。

### (1) 規制対象とする化学物質

クロルピリホスおよびホルムアルデヒドとする。

### (2) クロルピリホスに関する規制

居室を有する建築物には、クロルピリホスを添加した建材の使用を禁止する。

### (3) ホルムアルデヒドに関する規制

- 内装の仕上げの制限

居室の種類及び換気回数に応じて、内装仕上げに使用するホルムアルデヒドを発散する建材の面積制限を行う。

- 換気設備の義務付け

ホルムアルデヒドを発散する建材を使用しない場合でも、家具からの発散があるため、原則として全ての建築物に機械換気設備の設置を義務付ける。

- 天井裏等の制限

天井裏等は、下地材をホルムアルデヒドの発散の少ない建材とするか、機械換気設備を天井裏等も換気できる構造とする。

また、建築物における衛生的環境の確保に関する法律（通称：ビル衛生管理法）も改正され、2003年4月1日に施行された。述べ床面積3000m<sup>2</sup>以上の百貨店や学校などを対象に、新築時や大規模の修繕および模様替えを行った後、最初に訪れる夏期6月初めから9月末の期間にホルムアルデヒドの濃度測定が

義務付けられた。測定方法も規定されている。

これらの法律は、室内空気汚染問題対策として化学物質規制を行うものであるが課題が残されている。建築基準法では、ホルムアルデヒドは住宅の設計段階の規制であり、完成後の濃度測定までは義務付けていない。また、厚生労働省は13物質に対し指針値を示しているが、今回の規制の対象となるのは2物質のみに留まっており、さらに増やす必要があると指摘されている[36]。

文部科学省は、2000年から2001年にかけて行った50校における室内濃度の実態調査の結果を踏まえ、学校環境を衛生的に維持するためのガイドラインである学校環境衛生基準を改訂し、2002年4月1日から適用が開始された。その改定事項には、教室などの室内濃度の定期検査物質に新たにホルムアルデヒド、トルエン、キシレン、パラジクロロベンゼンの4物質が追加され、備品購入時の臨時検査とともに厚生労働省の指針値と同値である判定基準と事後措置が含まれた[37]。

## 2.2.4 室内空気汚染物濃度低減対策

室内空気中の汚染物濃度は、建材や家具の化学物質放散量や部屋の気密性や換気回数、部屋の大きさ、温度、湿度によって大きく変化する。以下に、従来から実施されてきた汚染物濃度低減対策について述べる。

### ① 換気による化学物質の排出

換気は、室内空気汚染物濃度を減少させる有効な対策の1つである。自然換気と機械換気がある。自然換気は人工エネルギーとコストを伴わない有効な方法である。しかしながら、オフィスビルなどでは空調設備により室温が快適に保たれており、住宅においても夏の高温時や冬の低温時などは自然換気を常に

行うことは難しい。機械換気は自然換気に比べ、より効率的に化学物質を排出することが可能である[38]。改正建築基準法では24時間換気設備の設置が義務付けられた。しかしながら、換気設備の設置により住宅の建設費が高騰し、「音の煩さ」、「電気代がかさむ」、「寒い」、「メンテナンスがし難い」などの多数のクレームが施工主から設計者へ寄せられており、24時間換気設備が抱える問題が示されている[39]。

## ② ベークアウト

ベークアウト (Bake-out) は数日間に亘って対象室を加熱 (30°C強) し、建材などからの VOC の放出を促進して、その放出量を初期段階において多く排除する方法である。放出量の差が大きな建材が混在する環境下では、ベークアウト後において、低放出量の建材に再付着したホルムアルデヒドや VOC の放出により、一時的に放出量が大きくなる可能性が示唆されており、ベークアウト直後の徹底した換気の必要性が指摘されている[40]。また処理コストも高く、ヒータなどの装置を持ち込まなければならないという作業の煩わしさと、加温することにより内装材の持っている本来の諸性能が変化するのではないかという懸念からあまり行なわれていない[41]。

## ③ 空気清浄機

室内空気汚染問題が取り上げられようになり、ホルムアルデヒドや VOC を除去対象とした空気清浄機が市販されている。活性炭の吸着効果を利用したものが一般的であり、フィルターの交換など定期的なメンテナンスが必要となる。最近、酸化チタンなど光触媒を利用した空気清浄機も開発されているが、問題点として光源を必要とすることや、その効果を目視で判断することが難しいためあまり効果のない製品も出回っていることが挙げられる[42]。

これらの対策を組み合わせれば、かなりの濃度低減が期待できる。しかしながら、これらは人工エネルギーを用いる、コストが高い、作業が繁雑である、メンテナンスが必要など多くの課題が残されており新たな対策が切望されている。

## 第 3 章

# 植物の空気浄化能力に関する研究の 現状と問題点

### 3.1 緒言

室内空気汚染物濃度を軽減するために換気やベークアウト、空気清浄機などが採用されているが、効果やコスト、メンテナンスにおいて一長一短であり新しい対策が切望されている。

植物が汚染物を分解し、環境を修復することをファイトレメディエーション (Phytoremediation) といい[43]、アメリカを中心に精力的に研究されている[44][45]。室内において、植物は古来より観賞用として親しまれてきた[12]。植物は癒し効果[15]-[18]や湿度調整機能[19][20]も有している。本章では、新しい室内空気汚染物濃度低減対策として期待される植物の室内空気浄化能力に関する研究の現状と問題点について述べる。

## 3.2 Wolverton らの研究

NASA では、宇宙ステーションにおける生活環境システムを開発するため、1973 年から室内空気汚染に関する研究を行っている。この研究は 1980 年代からは、生体を用いた室内空気の浄化システム開発へと移行した。1987 年からは、特に、観葉植物を用いた空気浄化能の可能性が検討され始めた。1989 年に観葉植物のベンゼン、トリクロロエチレン、ホルムアルデヒドの除去効果を GC を用いて定量し報告している[10]。その後、この研究を精力的に行ってきた研究者の一人である Wolverton らは、アザレアのホルムアルデヒド除去効果について次のような実験を行っている[21]。実験用チャンバーに植物を配置すると、蒸散効果によりチャンバー内の湿度が上昇する。湿度が除去効果に与える影響を調べるため、乾燥剤を用いて湿度をコントロールし、低湿度（38～44%）の環境下においてもその除去効果はほとんど変わらないことを明らかにしている。また、初期濃度が 2ppm のチャンバーにアザレアを設置し 1.5 時間後の濃度を測定したところ、光環境下（1100 lx）では除去率が 95%であったのに対し暗黒下では 62%であったことから、光がホルムアルデヒドの除去効果に影響を与えることを示している。

チャンバー内に配置した数十種類の観葉植物について、各植物のホルムアルデヒド、キシレン、アンモニアに対する除去率（ $\mu\text{g/hr}$ ）も報告している[22]。各物質に対する除去率の一部を表 3.1, 3.2, 3.3 にそれぞれ示す。この実験は初期濃度と温度、鉢のサイズが異なった条件で行なわれた。測定にはガス検知管を用いている。浄化能力評価のために用いた除去率（ $\mu\text{g/hr}$ ）は初期濃度に依存するため、植物の固有な浄化能力を示していない。

さらに、滅菌した砂で植物鉢の表面を覆う実験を行い、ホルムアルデヒド除



去に対する土壌微生物の割合は 60～67%、葉のそれは 33～40%であると報告している。キシレンについては土壌微生物が 50.5～53%、葉が 47～49.5%の割合で除去していることを明らかにしている。また、植物を植えた鉢から採取した土壌における細菌数とグラム染色法による判定の結果から、彼らは、根圏にグラム陰性菌が多く棲息する植物鉢は、陽性菌が優勢な植物鉢より汚染物除去能力が高く、根圏の陰性菌を増殖させることが汚染物除去に有効であることを確認している[22]。土壌微生物の有する分解能力は極めて高く、最近、微生物を用いて汚染物質を分解する環境修復技術に関する研究が盛んに行われている[46]-[49]。微生物を用いることの利点は、汚染物質に対する特異性が高いこととコストが掛からないことである。一般に、微生物を用いて汚染された土壌を処理する場合、土着の微生物だけでは汚染現場の有害な物質を分解できない、あるいは分解に時間が掛かりすぎるような時には、その汚染物質の分解能を有する微生物種を移植する方法が有効である[46]。植物鉢に室内空気汚染物を分解する微生物を添加することによって、植物鉢の汚染物除去能力を高めることが期待できる。

Wolverton らが示している植物の空気浄化作用の概念[23]を以下に述べる。空気汚染物は植物の気孔から取り込まれて植物自身によって、あるいは根圏に運ばれてそこに棲息する微生物によっても分解される。また、葉の蒸散作用によって対流が起こり、これにより空気中の汚染物は鉢の土壌に直接吸収され、土壌微生物によって分解されると考えられている。

表 3.1 観葉植物によるホルムアルデヒド除去率[22]

和名	学名	除去率 ( $\mu\text{g/hr}$ )	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	鉢サイズ (cm)
ボストンタマシダ	<i>Nephrolepis exaltata</i> "Bostoniensis"	1,863	26.1	20.3
ポットマム	<i>Chrysanthemum morifolium</i>	1,450	26.0	15.2
シンノウヤシ	<i>Phoenix roebelenii</i>	1,385	22.8	35.6
アオワーネッキー	<i>Dracaena deremensis</i> "Janet Craigs"	1,361	24.7	25.4
ネフロレピス・ オブリテラータ	<i>Nephrolepis obliterated</i>	1,328	25.7	25.4

表 3.2 観葉植物によるキシレン除去率[22]

和名	学名	除去率 ( $\mu\text{g/hr}$ )	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	鉢サイズ (cm)
シンノウヤシ	<i>Phoenix roebelenii</i>	610	23.1	35.6
カミーラ	<i>Dieffenbachia camille</i>	341	26.6	15.2
マルギナータ	<i>Dracaena marginata</i>	338	26.9	20.3
マラクータ	<i>Dieffenbachia maculata</i>	325	26.4	25.4
ホマロメナ	<i>Homalomena</i> sp.	325	26.0	20.3

表 3.3 観葉植物によるアンモニア除去率[22]

和名	学名	除去率 ( $\mu\text{g/hr}$ )	温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	鉢サイズ (cm)
カンノンチク	<i>Rhapis excelsa</i>	7,356	24.1	25.4
ホマロメナ	<i>Homalomena</i> sp.	5,208	24.3	20.3
コヤブラン	<i>Liriope spicata</i>	4,308	26.4	15.2
アンスリウム	<i>Anthurium andraeanum</i>	4,119	24.5	25.4
ポットマム	<i>Chrysanthemum morifolium</i>	3,641	26.5	15.2

### 3.3 Giese らの研究

Giese らは植物の汚染物の分解メカニズムを調べるため、放射性物質をトレースする実験を行った[50]。オリヅルランを放射性同位元素でラベルしたホルムアルデヒド ( $7.1\mu\text{L/L}$ ) で 24 時間曝したところ、復元された放射活性は 56.4%でその内の約 88%が植物によるものであった。放射活性のほとんどは糖と有機酸に分布していた。使用した葉 (36.6g) とホルムアルデヒド ( $170\mu\text{g}$ ) の重量から、ホルムアルデヒドを代謝物質に変換する量を、オリヅルランの葉 36.6g 当たり  $80\mu\text{g} / 24\text{h}$  であると試算している。この実験は土壌微生物の影響を除外するため、水栽培の条件下で行なわれた。Giese らはこれらの結果から、NASA と Wolverton らが明らかにした植物の汚染物除去効果は、植物の代謝によるも

のであると結論付けている。

また、Lohr らは植物を室内に設置することにより、室内の粒子状物質 (Particulate Matter, PM) が減少することを報告している[51]。粒子状物質のうち、粒径が 10 $\mu\text{m}$  以下の物質を浮遊粒子状物質 (Suspended Particulate Matter, SPM) といい、慢性の呼吸器疾患の原因とされている。植物設置による粒子状物質の減少のメカニズムは明らかにされていない。しかしながら、植物の気孔の平均的なサイズは数十  $\mu\text{m}$  であることから、気孔から SPM を取り込む可能性は十分に考えられる。

### 3.4 結言

植物は室内空気汚染物に対し高い吸収・分解能力を有している。汚染物を分解するために人工エネルギーを必要とせず、かつコストが安価である。植物を室内に設置することにより、視覚疲労の緩和・回復や労働作業効率の向上、癒し効果および湿度調整機能があることが報告されている。したがって、植物を室内空気汚染対策として用いることは非常に有効である。植物による空気浄化を一般社会へ応用・浸透させることにより、シックハウス症候群の減少に貢献できる。しかしながら、これまで行われてきた研究では、空気浄化効果が明らかにされた植物種は十分とはいえない。さらに、植物による空気浄化を浸透させるためには、その効果を分かりやすく示す必要がある。これまで Wolverton らが行った浄化能力の評価は、除去される汚染物の濃度に依存するもので、植物固有な浄化能力を示すものではない。したがって、植物固有な浄化能力を定量的に評価する新しい指標が必要である。

## 第 4 章

# 植物の空気浄化能力評価法

### 4.1 緒 言

植物は室内空気汚染物を分解し、空気を浄化する能力を有している。このような植物の浄化能力はマスメディアでも取り上げられ、市場では空気浄化を謳い文句にした観葉植物をしばしば目にする。しかしながら、現在示されている浄化能力は、空気浄化目的で植物購入を希望する消費者に対し分かりにくい。これまで報告されてきた浄化能力の評価法は、除去される汚染物の濃度に依存するもので、植物固有な浄化能力を示すものではない。そのため、同じ植物でも汚染物の濃度毎に浄化能力が異なるものであった。植物の浄化能力を示す時、その能力はその植物固有なものでなければならない。したがって、植物固有な浄化能力を定量的に評価する新しい指標が必要である。

本章では、連続測定可能なガスセンサを用いて空気汚染物濃度を計測した。植物の空気浄化ダイナミクスに着目し、浄化能力を定量的に評価する指標を提案した。また、提案指標の汚染濃度の依存性について確認するため、ホルムアルデヒド初期濃度が 5 ppm, 6.5 ppm および 8ppm における浄化特性の評価を

行い検討した。

## 4.2 ガスセンサによる空気浄化特性測定

本研究において、浄化特性測定には連続計測可能なガスセンサを用いた。Wolverton らは、GC やガス検知管を用いて測定を行った。GC は、ガスを捕集してから分析することにより定量的な計測が可能であるが、ガスの捕集には手間がかかり分析にも時間がかかる。このため連続的な計測はできない。ガス検知管は、ガス濃度を短時間で測定できるが、短い間隔での連続計測はできない。

ガスセンサは、ガス漏れを検知するセンサとして古くから市場にでており信頼性が高い。長期安定性に優れ、比較的安価なシステムで計測可能である。コンピュータにデータを取り込むことにより、短い時間間隔の連続計測が可能である。ガスセンサを用いた室内環境計測には、災害の認知[52]、室内空気汚染の測定[53]-[58]、単身高齢者世帯のモニタリング[59]-[62]、温熱環境の判断・予測[63]などがあり、その有用性が示されている。また、小野寺らはガスセンサを用いてポトスの浄化特性を連続的に計測し、ポトスのホルムアルデヒド除去能力を明らかにするとともに、植物の空気浄化特性の計測におけるガスセンサの有効性を示している[64][65]。

## 4.3 実験方法

測定システムを図 4.1 に示す。透明なアクリル製の密閉型チャンバー(575×510×1000mm)の中に被験観葉植物鉢を配置し、ホルムアルデヒドをマ

イクロシリンジにより注入し除去特性を調べた。天井に取り付けられた 32W の蛍光灯 4 本とチャンバー外側の左右と後方からそれぞれ 27W の蛍光灯により照射し、チャンバー内の周囲 6 方向（前後左右上下）の平均照度を 970 lx に制御した。このとき、外部からの太陽光は遮断した。チャンバーが設置してある部屋はエアコンディショナーによって温度調節した。部屋の温度、チャンバー内の温度、気圧もモニタリングした。測定システムの外観を図 4.2 に示す。チャンバー内の汚染物濃度は酸化スズ系ガスセンサ（フィガロ技研製、TGS#826）を用いて計測した。センサからの信号は 1 分毎にコンピュータに取り込んだ。センサの外観を図 4.3 に示す。これはセンサ素子部が見えるようにステンレスメッシュカバーを開いたものである。また、計測システムに用いた基本的なガス検知回路を図 4.4 に示す。センサと負荷抵抗  $R_L$  を直列に接続し、直流 5V の電圧を印加する。被検ガスがセンサ素子部に吸着すると、素子バルク内の自由電子が増加し抵抗値  $R_s$  が減少する。このとき、負荷抵抗の両端の電圧が上昇する。この変化を 0~5V の電圧の変化として捉え検知を行う。被検ガスの吸脱着の促進および水蒸気の付着を防ぐため、用いたセンサにはヒーター  $V_H$  が組み込まれている。センサは図 4.1 に示したようにチャンバー内の低部に設置した。本研究で測定した汚染物はホルムアルデヒド、トルエン、キシレンの 3 物質である。これらの蒸気密度はそれぞれ 1.067, 3.18, 3.66 である。蒸気密度が大きく重い気体は低部に滞留する性質がある。また、通常は対流によって拡散し、空気との混合気体は相対的に空気と同じ密度になると考えられる[31]。チャンバー内の濃度が均一になるまで、低部の濃度は高部より高くなると考えられるためセンサを低部に設置し測定を行った。

被験植物として代表的な観葉植物であるポトス(Golden pothos)とスパティフィラム(Peace lily)を選んだ。これらの植物鉢の写真を図 4.5 に示す。各植物は園芸店で購入した。上部直径 24cm, 高さ 26cm の鉢に軽石 500cc と微生物が棲

息しやすいように改良された土壌 (*Eco-Do*) [66] 4000cc を入れ植物を植えた。植物は日の当たる室内で、室温 15~25°Cの一般的な室内環境で育成し、2週間経過後から順次、実験に供した。植物の高さはポトスが約 55cm でスパティフィラムは花のような仏炎苞部分も含めるとほぼ同じ高さであった。植物の個体差の影響を考慮し、各植物は同程度の大きさのものを 3 鉢ずつ準備し実験を行った。

植物鉢に灌水すると、植物の生体電位は微弱な変化はあるものの徐々に低くなり始め 2 日後に安定する[67]。これより、植物がより安定している時に実験を行うため、実験開始 2 日前に 300mL の灌水を行った。

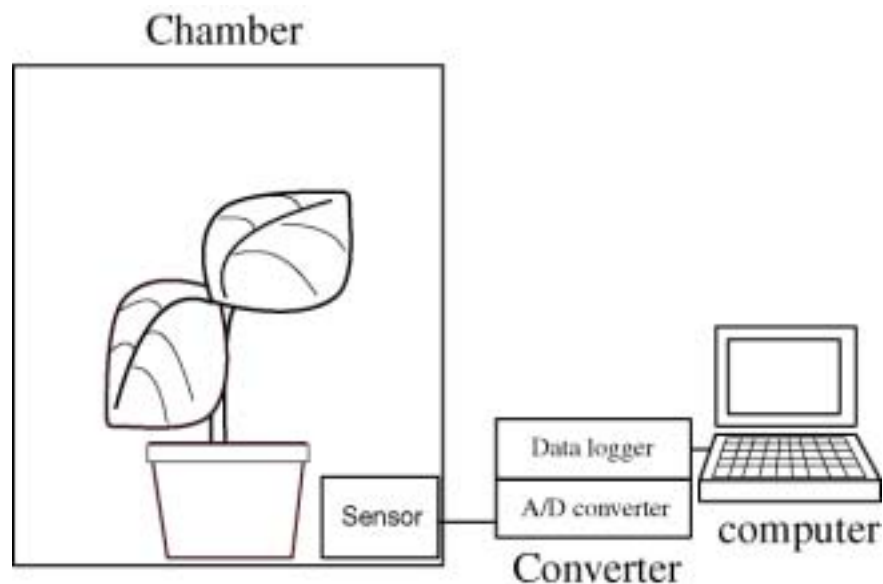


図 4.1 測定システム





図 4.2 測定システムの外観

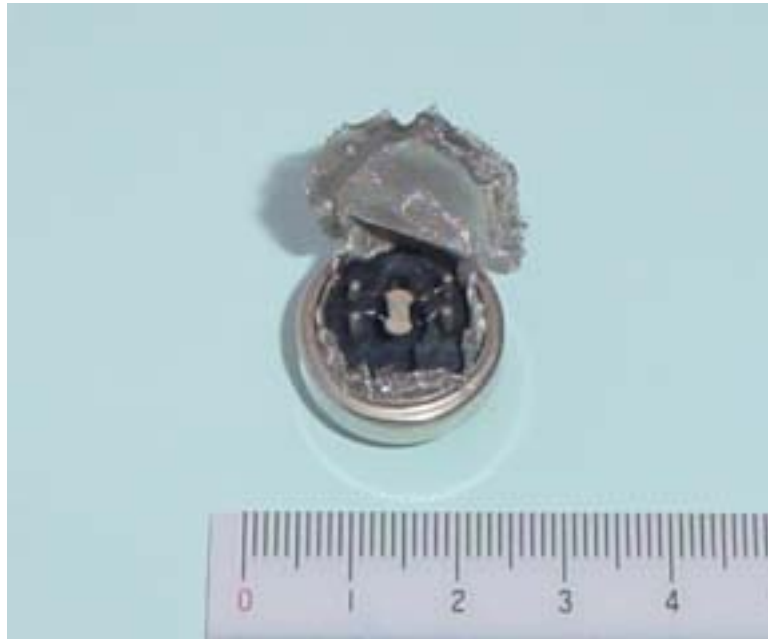


図 4.3 実験に使用したガスセンサ

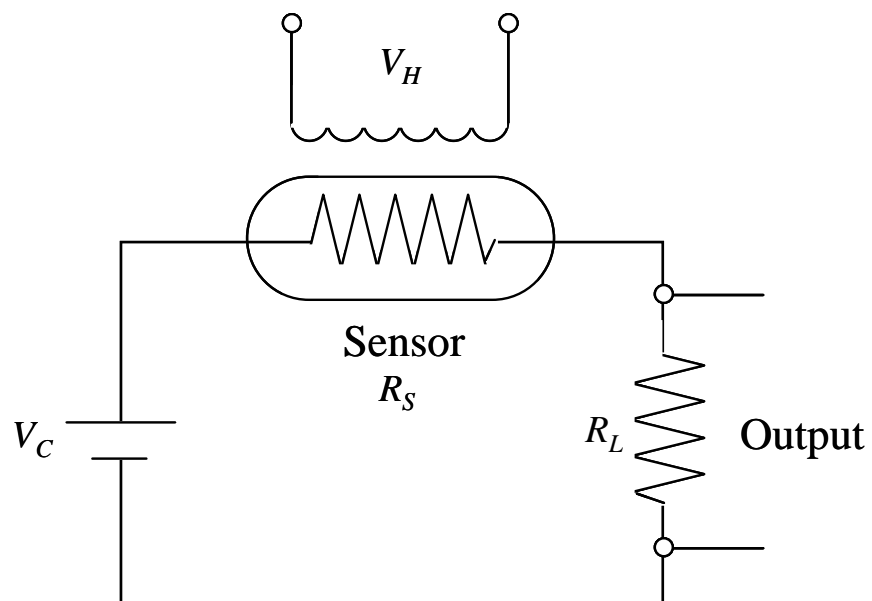


図 4.4 ガス検知回路



図 4.5 実験に用いたポトス（左）とスパティフィラム

## 4.4 浄化能力評価法

### 4.4.1 センサ出力

植物を設置していない空のチャンバー内にホルムアルデヒドを注入し、ホルムアルデヒド濃度とガスセンサ出力の関係を調べた。その結果を図 4.6 に示す。縦軸は、ホルムアルデヒドの注入によるセンサ出力の増分を表している。濃度が 3ppm から 10ppm の範囲において、濃度とガスセンサ出力はリニアな関係にあることが示されている。

また、空のチャンバーにホルムアルデヒドを 8ppm になるように注入し、チャンバー壁面への吸着および漏洩量を調べた。その結果を図 4.7 に示す。

### 4.4.2 植物の空気浄化システム

観葉植物の空気汚染物浄化過程の例として、スパティフィラムのホルムアルデヒド 8ppm に対する特性を図 4.8 に示す。Control はチャンバーに何もセットされていない時のセンサ出力で比較のために求めた。チャンバーに汚染物を注入すると、濃度に応じてセンサ出力がピークに達した後、植物による汚染物の吸収・分解・除去によりセンサ出力は減少し、数時間後に汚染物注入時のレベルにまで戻った。

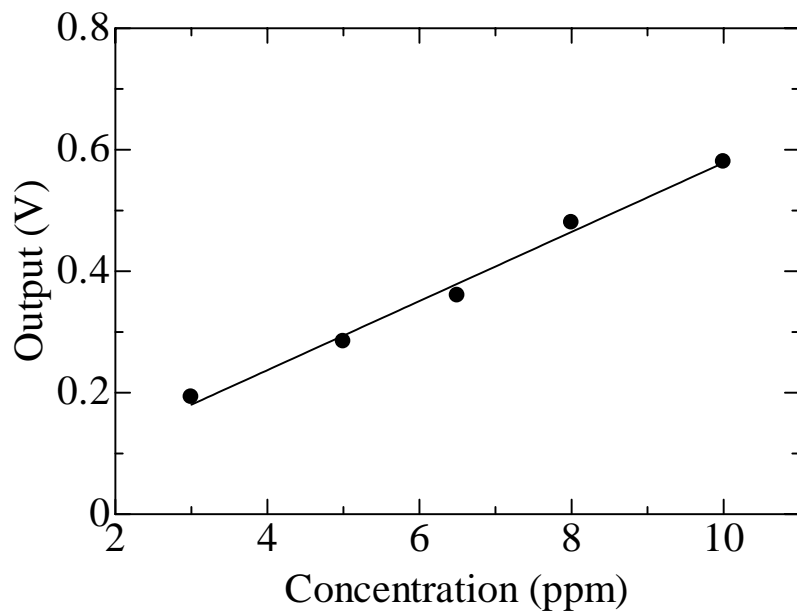


図 4.6 ホルムアルデヒド濃度に対するセンサ出力値

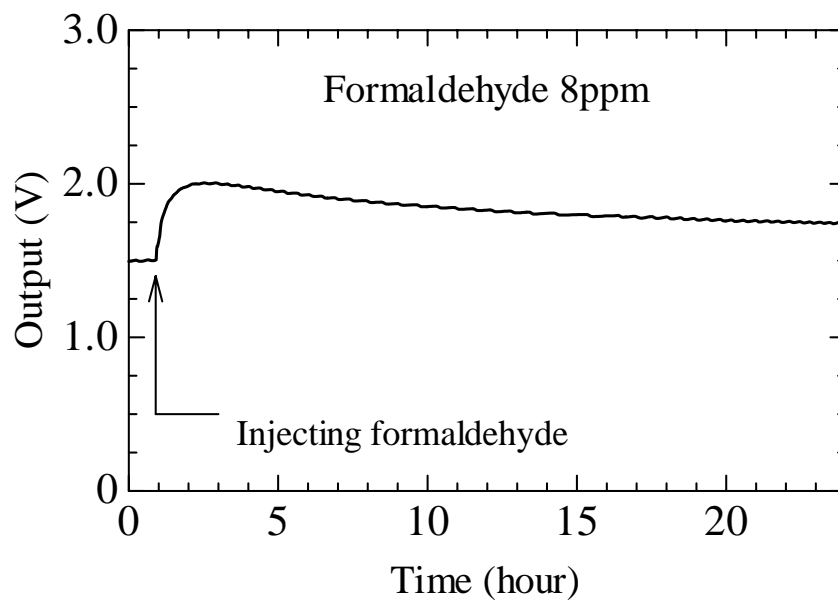


図 4.7 チャンバーへの吸着および漏洩実験

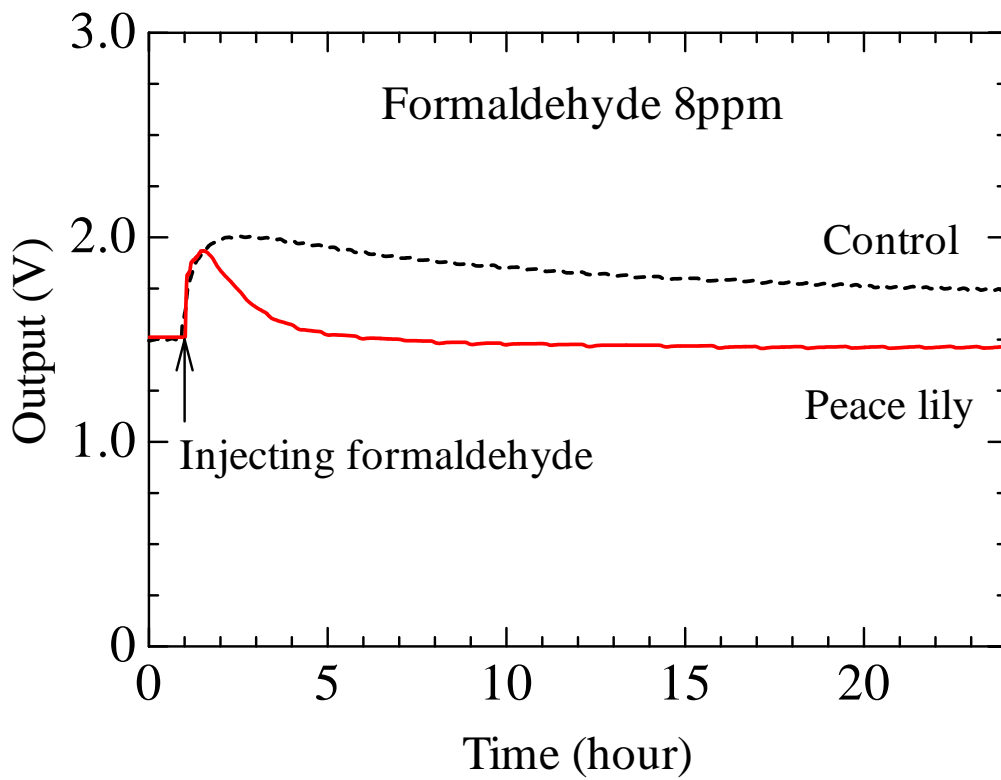


图 4.8 净化特性

### 4.4.3 評価法および評価式の提案

図 4.8 において、汚染物を注入するとセンサ出力はその濃度に応じて上昇し、その後、スパティフィラムを設置した場合の出力は徐々に下降し平衡状態になる。このことから植物の浄化システムの応答を一次遅れ系であると想定し[68]、植物の空気浄化のダイナミクスをブロック線図で図 4.9 に示す。  $u$  は汚染物の入力、  $x$  はチャンバー内の汚染濃度、  $v$  はセンサ出力である。  $a$ 、  $b$ 、  $c$  は定数で、  $b$  は注入する量、  $c$  はセンサ、  $a$  は植物の固有な浄化能力を表しており、  $a$  は負の値になる。  $\int$  は積分器である。ホルムアルデヒドを注入すると、チャンバー内の濃度が上昇し、その濃度はセンサ  $c$  を介して、出力される。植物の浄化作用によりチャンバー内の濃度は徐々に減少する。  $\dot{x}$  はある瞬間にチャンバー内の濃度  $x$  が変化する割合を示している。

また、図 4.9 のブロック線図は次の(1)(2)式で表すことができる。

$$\dot{x} = ax + bu \dots\dots\dots(1)$$

$$v = cx \dots\dots\dots(2)$$

ここで、各記号はブロック線図（図 4.9）で定義した通りである。(1)、(2)式をラプラス変換すると、

$$sX = aX + bU \dots\dots\dots(3)$$

$$V = cX \dots\dots\dots(4)$$

となる。したがって、このシステムの伝達関数は

$$G(s) = \frac{V}{U} = \frac{bc}{s-a} \dots\dots\dots(5)$$

となる。各実験においてホルムアルデヒドを一定量瞬間的に注入する。 $-a$ は時定数 $T$ の逆数である。 $T$ は一次遅れ系の減衰特性を表す一つの目安である。

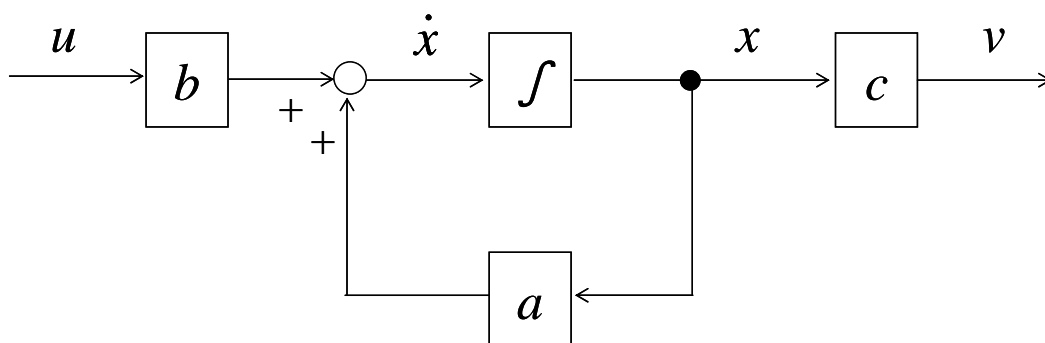
時定数 $T$ については、図 4.10 に示すように実験データを利用しその直線の傾き( $a$ )から決定する。横軸はホルムアルデヒドを注入しピークになった時間を 0 (hour)とし、縦軸はホルムアルデヒド注入時のレベルを差し引いたセンサ出力値を表している。図 4.10 において (図 4.8 のスパティフィラムの実測値を利用)、 $T = 1.51$ となる。なお、片対数グラフ (図 4.10) 上で浄化特性が直線で表されることは、浄化システムの応答が一次遅れ系であることを示している。

片対数グラフ上の直線の傾き  $a$  を用いて(6)式により浄化特性の理論値を求めた。

$$v = cb \exp(at) \dots\dots\dots(6)$$

例えば、ポトスのホルムアルデヒド **6.5ppm** に対する測定値と導出された理論値を図 4.11(a)に示す。また、スパティフィラムの結果を図 4.11(b)に示す。いずれも測定値と理論値がほぼ一致した結果が得られた。この結果は、植物の浄化システムの応答が一次遅れ系であることを示している。





$u$  : 汚染物の入力  
 $x$  : チャンバー内の汚染濃度,  $\dot{x} = dx/dt$   
 $v$  : センサ出力  
 $a, b, c$  : 定数 ( $a$ は負)

図 4.9 浄化システムのブロック線図

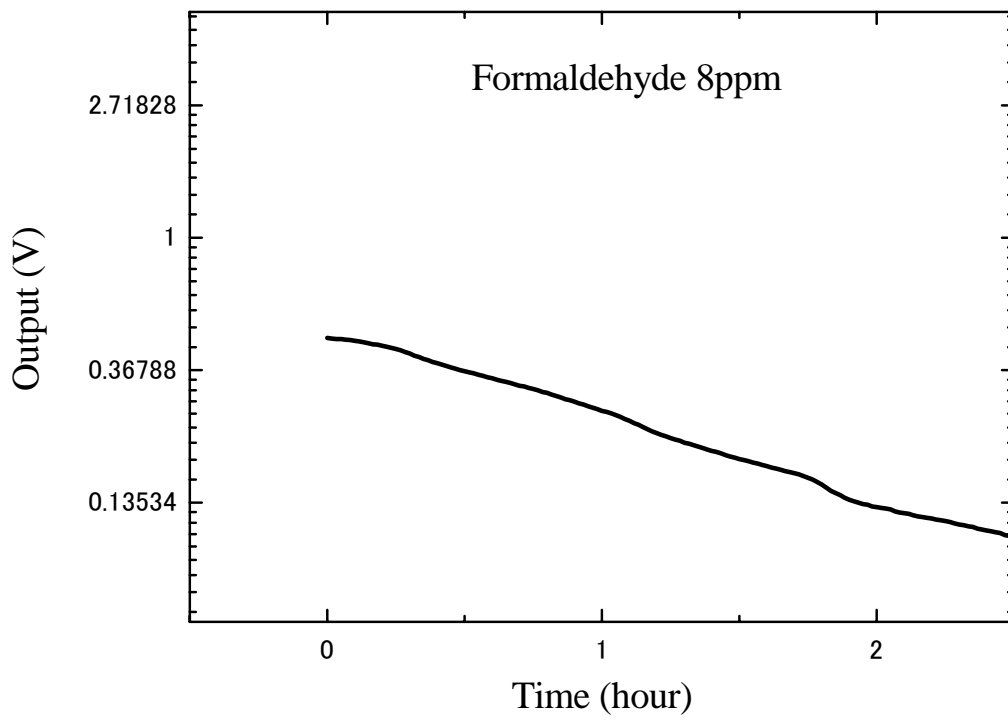
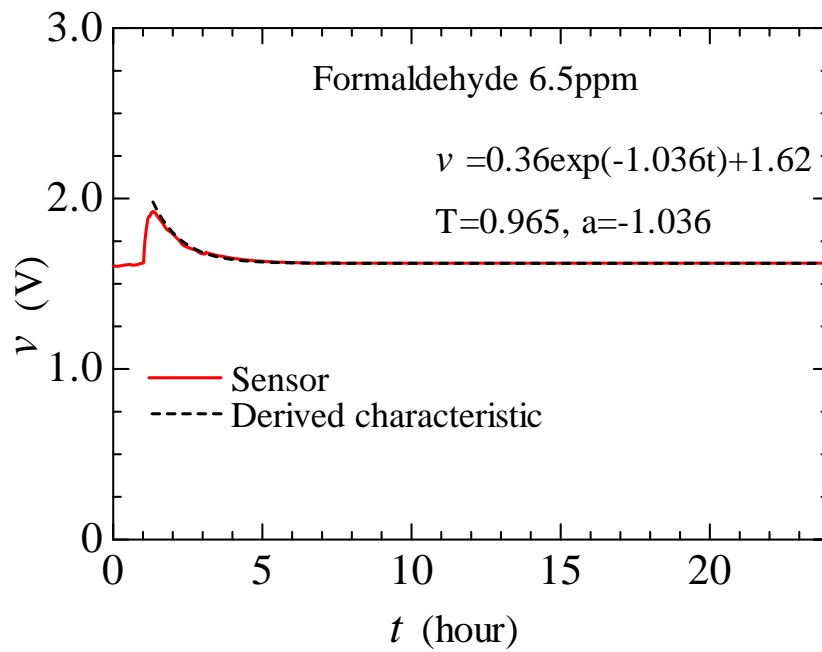
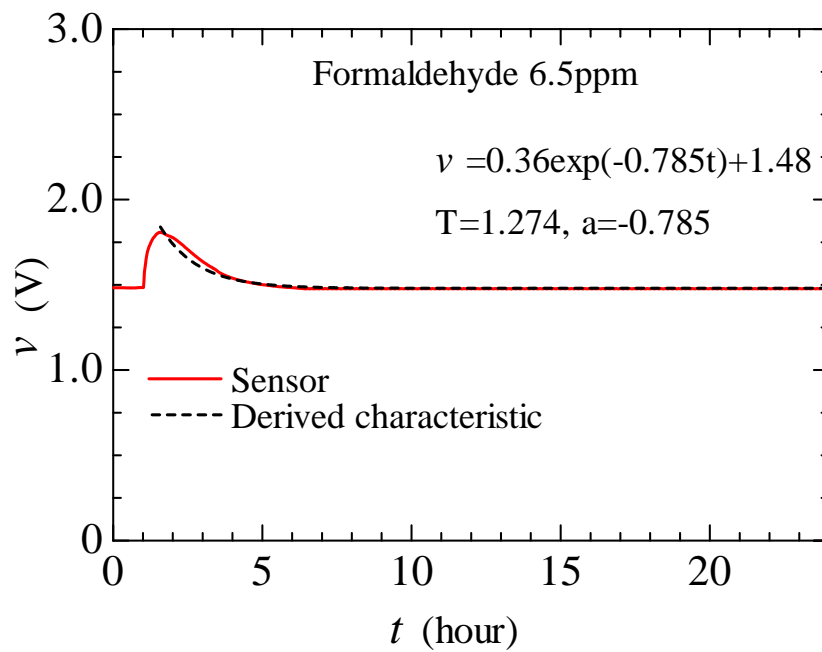


図 4.10 片対数グラフで表した浄化特性



(a)ポトス



(b)スパティフィラム

図 4.11 測定値と導出された理論値

#### 4.4.4 評価法の検証

ポトスとスパティフィラムのホルムアルデヒド 5 ppm, 6.5 ppm, 8ppm に対する除去特性を測定した。能力の評価には時定数を用いた。実験結果を図 4.12 に示す。図中の値は植物毎に準備した 3 鉢の時定数の平均値を示している。エラーバーは標準誤差を示している。実験を行った濃度範囲において、ポトスとスパティフィラムの浄化能力は各々ほぼ一定であった。この結果より、時定数は除去される汚染物の濃度に依存せず、植物固有な浄化能力を定量的に評価する指標であることを確認した。また、ポトスの時定数の平均は 0.97, スパティフィラムの平均は 1.40 であった。ポトスの能力がスパティフィラムの 1.4 倍程度高いことが明らかとなった。

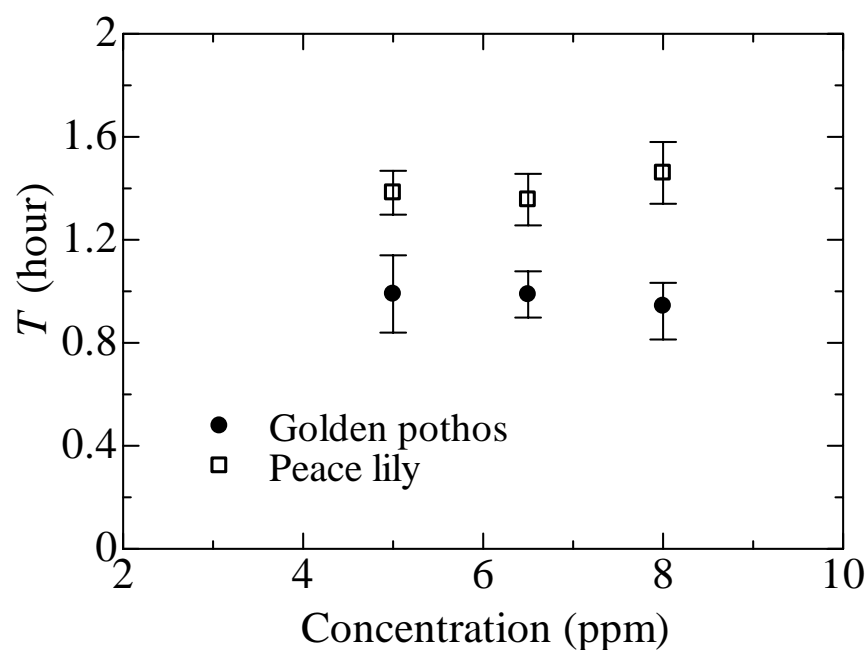


図 4.12 ホルムアルデヒド濃度に対するポトスとスパティフィラムの浄化能力

## 4.5 結 言

酸化スズ系ガスセンサを用いて、ポトスとスパティフィラムの空気浄化特性を連続計測した。植物の空気浄化システムの応答が一次遅れ系であることが明らかとなり、浄化能力の評価に時定数を用いることを提案した。システムのダイナミクスのモデルから時系列（理論値）を導出した結果、測定値とほぼ一致した。さらに、ホルムアルデヒド濃度 5 ppm, 6.5 ppm, 8ppm に対する除去特性を時定数を用いて評価したところ、ポトスとスパティフィラムの浄化能力はそれぞれほぼ一定であった。これにより、時定数は汚染濃度に依存しないことが明らかとなった。また、ポトスの能力がスパティフィラムの 1.4 倍程度高いことが明らかとなった。

## 第 5 章

# 環境要因の浄化能力に与える影響

### 5.1 緒言

植物は置かれている環境を認知し順応する[69]. また, 植物の浄化能力は様々な環境要因によって変化すると考えられる[70]. このため, 浄化能力を正しく評価するためには, 影響を与える諸要因を把握しておく必要がある.

本章では, 環境要因と浄化能力の関係について調査した. 3章で述べたように, Wolverton らは根圏にグラム陰性菌が多く棲息する植物鉢は, 陽性菌が優勢な植物鉢より汚染物除去能力が高いことを確認している[22]. さらに, Donnelly らは菌根菌がファイトレメディエーション効果を高めることを示唆している[71]. 植物鉢の土壌の種類によって, そこに棲息する微生物種や数が異なることから, 土壌種が浄化能力に与える影響を調べた. また, 温度は植物体内における生化学的反応や植物の生理活性機能に大きく影響することが知られている[72]. Wolverton らは植物によるホルムアルデヒド, キシレン, アンモニアの除去には弱い光が必要であると報告しているが[22], 段階的な照度の違いによる浄化能力への影響を明らかにしていない. 以上のことから, 温度と照度が浄化

能力に与える影響も調べた。

## 5.2 土壌種の影響

土壌種の浄化能力に与える影響について調べた。実験に使用した *clay* は粘土や泥板岩からできており、主にケイ酸アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ ) を含んでいる。それと少量の鉄やその他の酸化物の混合物である。*Eco-Do* は培養土 (有機堆肥, 赤玉, バーミキュライト, 鹿沼土, 川砂を混ぜ合わせたもの) に, 活性炭を混ぜ 2000°C の高熱処理を施し粉砕した *clay* を配合したものである。実験に使用した土壌は次に示す 5 種類である。培養土, 普通の土, ハイドロ (ハイドロ栽培用ボール), *Eco-Do* と *clay* を 3 対 1 の割合で配合したもの (以下 *Eco-Do*3 : *clay*1 と表す), *clay* と炭を 8 対 2 の割合で配合したもの (以下 *clay*8 : 炭 2 と表す) である。*Eco-Do* と *clay* の写真を図 5.1 に示す。上部直径 25cm, 高さ 25cm の鉢に各土壌 4500cc を入れ同程度の大きさのポトスを植えたものを, 実験に供した。その写真を図 5.2 に示す。植物の高さは約 45cm である。

チャンバー内のホルムアルデヒド濃度が 20ppm になるように注入したときの, *Eco-Do*3 : *clay*1 の土壌に植えたポトス鉢の浄化特性 (*Eco-Do*3 : *clay*1 + *potthos*) を図 5.3 に示す。室温は 22°C になるようエアコンディショナーで制御した。チャンバー内の平均照度は 970 lx とした。測定開始 1 時間後にホルムアルデヒドを注入した。注入と同時にチャンバー内の汚染濃度が増加するとともにセンサ出力が上昇する。注入後約 30 分でピーク値に到達し, 浄化作用により約 12 時間でベースレベルに回復した。この時の時定数 ( $T$ ) を求めたところ 1.9 であった。*Eco-Do*3 : *clay*1 は土壌のみの実験で  $T$  は 12.4 であった。土壌中の微生物が汚染物を分解するため, 植物が生育していない土壌のみの鉢でも浄化能力

を有している。しかしながら、植物の有無により浄化能力に大きな差が認められた。植物は土壌中の微生物と共生関係にあり、植物の好む微生物が棲息しやすい土壌と環境を提供することにより、汚染物の除去能力を高めるものと思われる[73]。

ホルムアルデヒド 20ppm に対する各種土壌を用いたポトス鉢の  $T$  を図 5.4 に示す。最も浄化に時間が掛かったものは培養土 ( $T = 6.5 \sim 7.4$ ) だった。Eco-Do3 : clay1 や clay8 : 炭 2 など、多孔質物質を混入した土壌ほど浄化が速く行われる傾向が認められ、Eco-Do3 : clay1 の浄化能力 ( $T = 1.8 \sim 1.9$ ) は培養土のそれより約 3.8 倍高い結果となった。以上の結果から、土壌種が浄化能力に与える影響は大であることが明らかとなった。





(a) *Eco-Do*



(b) *Clay*

図 5.1 実験に使用した *Eco-Do*  
と *Clay*



図 5.2 実験に使用したポトス

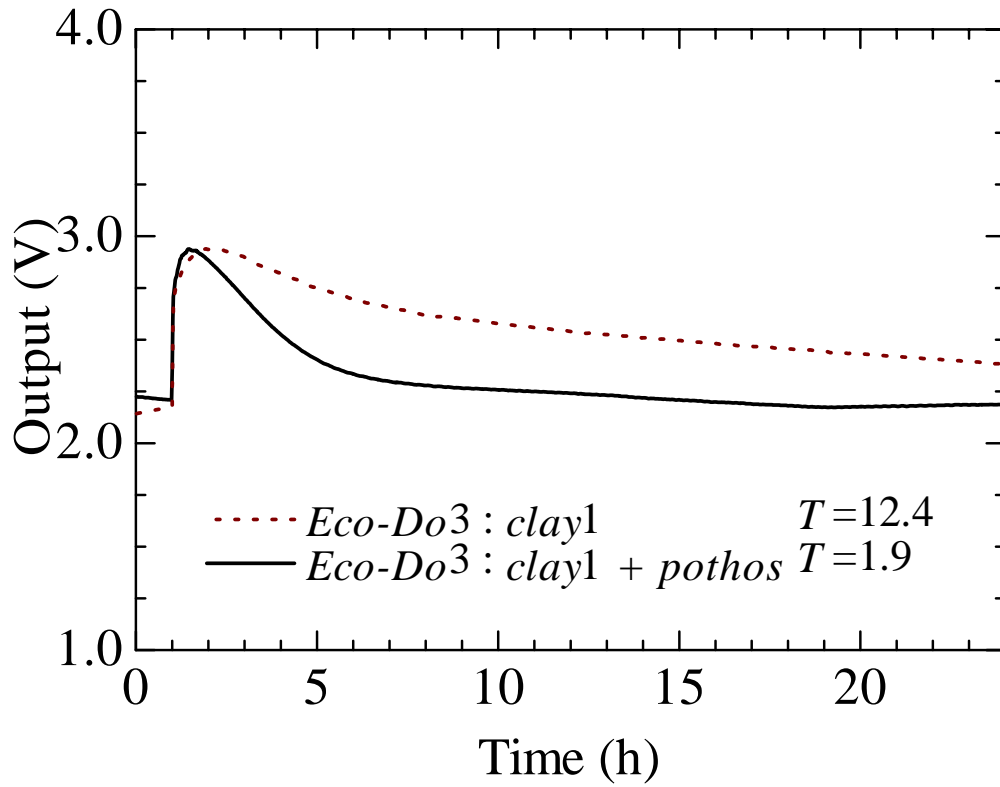


図 5.3 植物の有無による浄化特性の相違

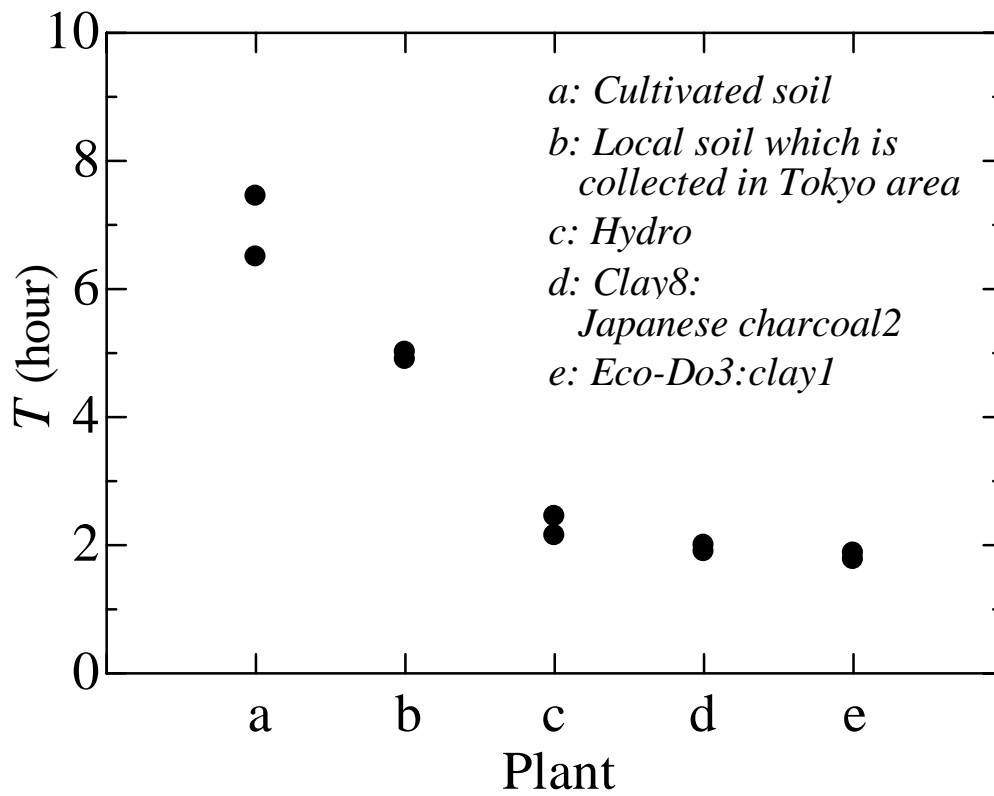


図 5.4 5 種類の土壌に生育しているポトス鉢の浄化能力の相違

### 5.3 室温の影響

室温の浄化能力に与える影響を調べた。ポトス鉢 (*Eco-Do3: clay1*) を配置したチャンバーにホルムアルデヒド濃度が 20ppm になるように注入した。照度は 970 lx に制御し、エアコンディショナーにより雰囲気温度を変えたときの、 $T$  の変化を図 5.5 に示す。実験を行った範囲では、約 2.8 倍の開きがあった。ポトスの最適生育温度範囲は 18°C から 24°C である。最適生育温度範囲における  $T$  は低い値を示している。最適な温度で生育している時、浄化能力が高くなるものと考えられる。

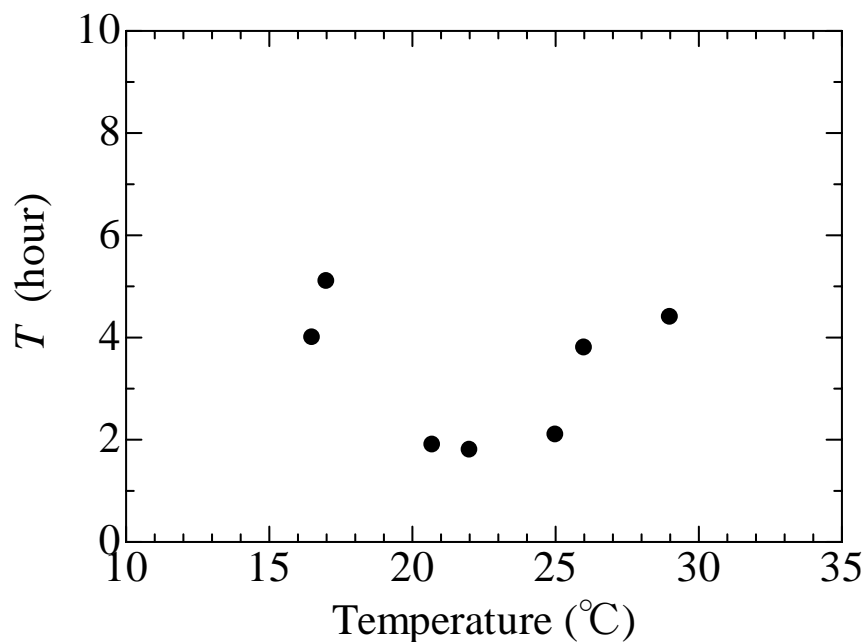


図 5.5 浄化能力の雰囲気温度依存性

## 5.4 照度の影響

Kondoらは、9種類の植物の蒸散率とホルムアルデヒド除去率の関係を調べ、蒸散と除去効果に高い相関（相関係数 0.983）があることを報告している[74]。また、気孔開度は照度に影響を受けることが知られていることから[75][76]、照度をコントロールすることにより変化させた蒸散率とホルムアルデヒドの除去率との関係も調べている。

本節では、室温 22°Cの環境下でポトス鉢のホルムアルデヒド除去能力に対する照度依存性を調べた。照度は、植物を設置していないときのチャンバー内の周囲 6 方向（前後左右上下）の平均値とした。この環境の中に植物を配置し、浄化特性を測定した。結果を図 5.6 に示す。照度と  $T$  の間には相関が認められ、照度が高くなるほど、浄化能力も高くなる傾向を示した。しかしながら、1000 lx を超えると浄化能力は飽和する傾向にあった。また、暗黒下でも植物鉢は浄化能力を有しており、浄化能力が最も高かった照度における結果と比較すると約 4.2 倍の開きがあった。

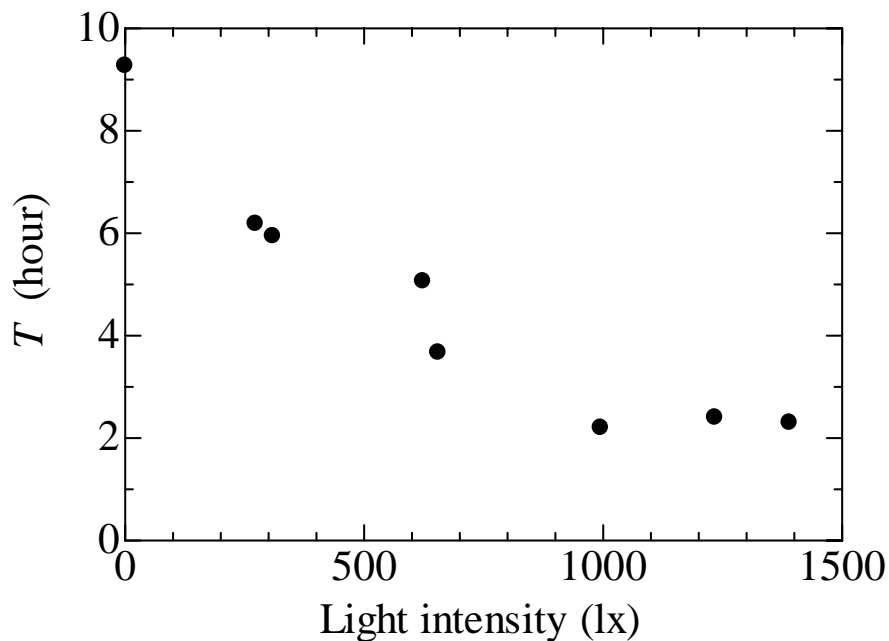


図 5.6 浄化能力の照度依存性

## 5.5 結 言

植物の空気浄化能力は様々な環境要因に影響を受けると考えられることから、土壌種、室温、照度の影響を調べた。5種類の異なる土壌にポトスを植え、土壌の種類が与える影響を調べた結果、多孔質物質を混入した *Eco-Do3: clay1* が最も浄化能力が高く、培養土のそれよりも約 3.8 倍高い結果となった。このように、植物が植えられている土壌種により、その植物の浄化能力が大きく影響を受けることが明らかとなった。また、室温を 16.5°C から 29°C まで変化させ、温度が浄化能力に与える影響を調べた結果、浄化能力は 2.8 倍の差が認められた。さらに、照度が浄化能力に与える影響を調べたところ、照度が高くなるほど浄化能力が上昇する結果が得られたが、1000 lx を超えた範囲では浄化能力は飽和する傾向を示した。

以上の結果から，浄化能力を評価する場合は，土壌種や室温および照度について同条件で実験を行う必要があることが明らかとなり，今後の実験は室温 22℃，照度 970 lx で行うこととした．

## 第 6 章

# 評価指標の妥当性の検証

### 6.1 緒言

4章において、植物の浄化システムの応答が一次遅れ系であることを確認した。また、システムのダイナミクスのモデルから浄化特性の理論値を導出したところ測定値とほぼ一致したことより、植物の浄化能力評価に時定数を用いることを提案した。さらに、時定数はホルムアルデヒド濃度に依存せず植物の固有な浄化能力を示すことができることも確認した。しかしながら、植物を実際の生活環境に設置して空気浄化を行う場合、植物の種類や大きさは様々である。また、室内ではホルムアルデヒドのみならず各種の汚染物が発生する。したがって、時定数が評価指標として妥当であることを示すためには、浄化能力に対する植物の種類、サイズによる影響およびホルムアルデヒド以外の物質に対する評価の可能性について検討する必要がある。

本章においては、植物種による浄化能力の違いを明らかにするため、まず、ホルムアルデヒドを用いて代表的な観葉植物の浄化能力評価を行なった。次に、植物サイズの影響を調べた。汚染物が葉の気孔から取り込まれることから、サ



イズの指標として葉面積を用いた。葉面積と浄化能力の関係を提案した指標を用いて評価した。さらに、ホルムアルデヒド以外の汚染物に対する評価の可能性を示すため、シックハウス症候群の代表的な原因物質であるトルエン、キシレンに対する評価も行った。

## 6.2 代表的な観葉植物の浄化能力評価

ホルムアルデヒドに対する代表的な観葉植物の除去能力を調べた。5章で決定したパラメータ、すなわち室温 22℃および照度 970 lx の環境で実験を行った。次に示す 10 種類の植物を用いて実験を行った。

- ポトス (Golden pothos)
- アオワーネッキー (Dracaena “Janet Craing”)
- 幸福の木 (Corn plant)
- スパティフィラム (Peace lily)
- ベンジャミン (Weeping fig)
- カミーラ (Dumb cane)
- アレカヤシ (Areca palm)
- コンシンネ (Dragon tree)
- シルバークイーン (Chinese evergreen)
- サンスベリア (Snake plant)

実験に供した植物の写真を図 6.1 に示す。上部直径 20cm、高さ 20cm の鉢に各植物を植えた。土壌は *Eco-Do* 1800 cc を使用した。ポトスとサンスベリアのホルムアルデヒド 8ppm に対する除去特性を図 6.2 に示す。サンスベリアの浄化特性はポトスのそれより緩やかであるが、一次遅れの応答を示している。その

他の植物についても同様の応答を示したことから、時定数によって浄化能力を評価した。結果を図 6.3 に示す。図中のプロットは 3 回の平均値，エラーバーは標準誤差を示している。能力が高かったものから順に，

- ポトス (  $T = 1.17$  )
- アオワーネッキー (  $T = 1.30$  )
- 幸福の木 (  $T = 1.67$  )
- スパティフィラム (  $T = 1.71$  )
- ベンジャミン (  $T = 2.14$  )
- カミーラ (  $T = 2.36$  )
- アレカヤシ (  $T = 2.44$  )
- コンシンネ (  $T = 2.58$  )
- シルバークイーン (  $T = 3.71$  )
- サンスベリア (  $T = 4.42$  )

であった。10 種類の浄化能力差は約 3.8 倍もあった。

10 種類の被験植物は，形状が異なり大きさや葉面積も様々である。しかしながら，一般の園芸店などで販売されている観葉植物は，同種類の植物の場合，鉢の大きさによって植えられる植物の大きさはほぼ同じである。このことから，図 6.3 の結果は一般の消費者が空気浄化目的で植物を購入する時の一つの目安となる。



(a) ポトス



(b) アオワンネッキー



(c) 幸福の木



(d) スパティフィラム



(e) ベンジャミン



(f) カミーラ



(g) シルバークイーン



(h) アレカヤシ



(i) コンシンネ



(j) サンスベリア

図 6.1 実験に使用した 10 種類の観葉植物

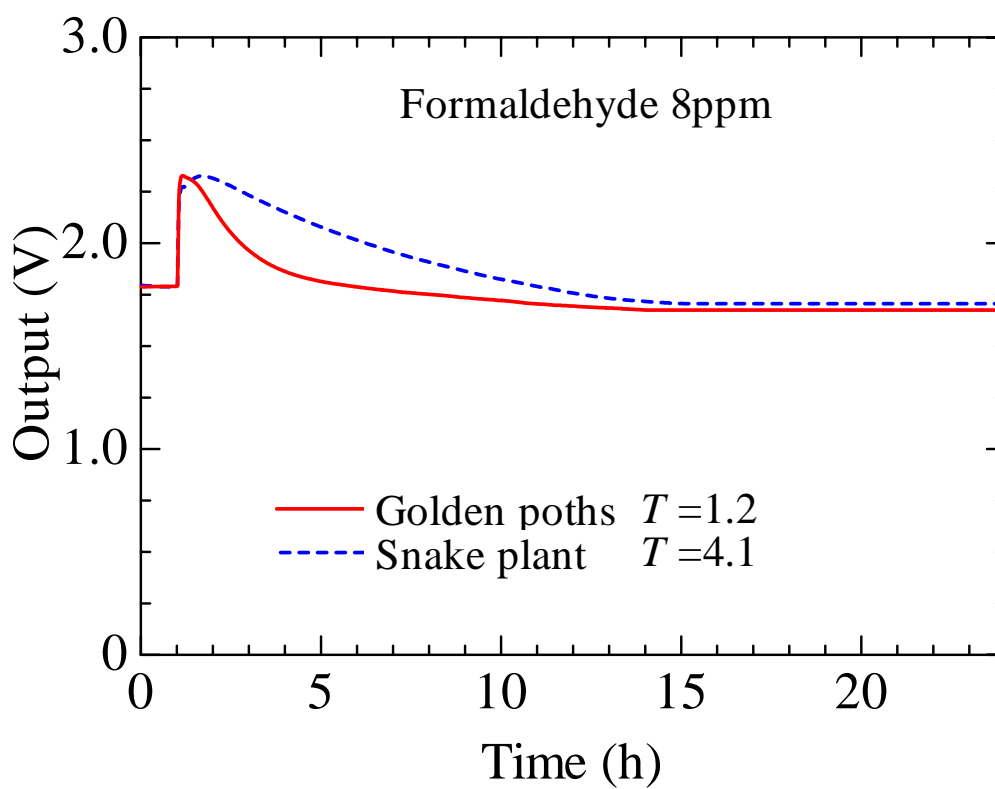
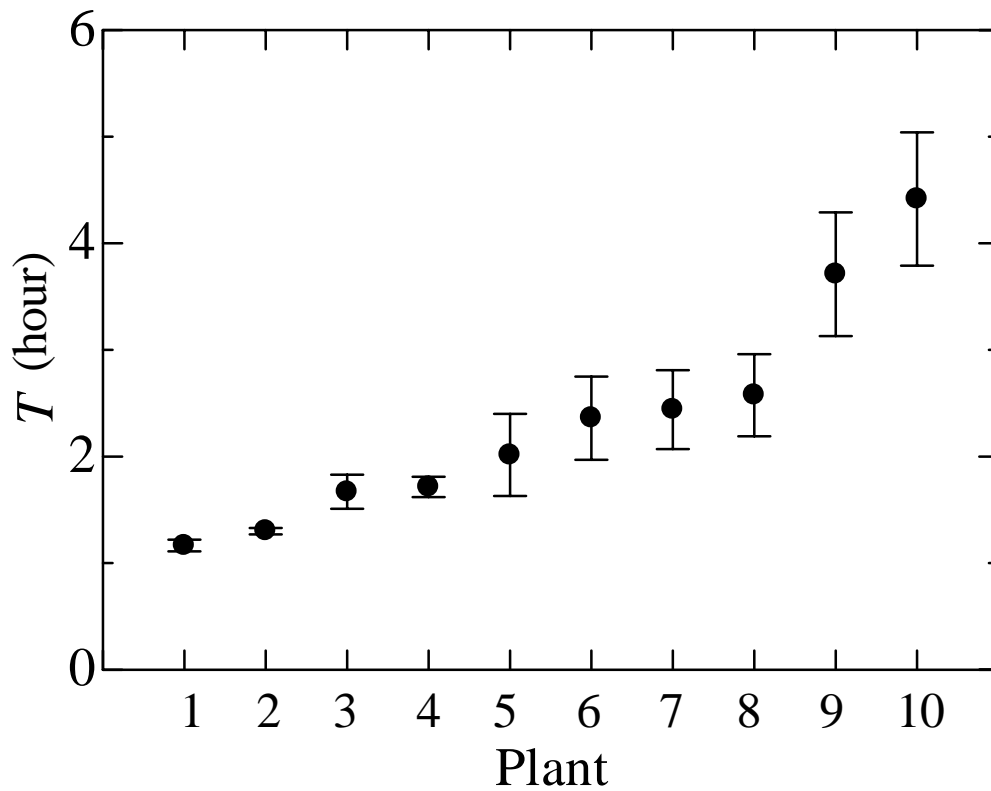


図 6.2 ポトスとサンスベリアのホルムアルデヒド除去特性比較



- |                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| 1: Golden pothos           | 6: Dumb cane         |
| 2: Dracaena "Janet Craing" | 7: Areca palm        |
| 3: Corn plant              | 8: Dragon tree       |
| 4: Peace lily              | 9: Chinese evergreen |
| 5: Weeping fig             | 10: Snake plant      |

図 6.3 10 種類の観葉植物の浄化能力

## 6.3 植物のサイズと浄化能力の関係

### 6.3.1 サイズの違いによる浄化特性の相違

植物サイズの異なるポトスを 3 鉢準備し、浄化能力を調べた。実験に用いたポトスを図 6.4 に示す。各ポトスは培養土 2500cc, 軽石 300cc を入れた直径 21cm, 高さ 23cm の鉢に植え、室温 22°C および照度 970 lx の環境で実験を行った。同じサイズの鉢に同量の土壌のみを入れたものも準備し実験を行った。ホルムアルデヒド 8ppm に対する各ポトス鉢と土壌のみの鉢の除去特性を図 6.5 に示す。全ての特性が一次遅れ系の応答を示している。ポトスのサイズが大きいもの程浄化が速く、土壌のみの鉢が最も遅い結果が得られた。

図 6.5 における実験データを用い、1 分間隔で測定した土壌のみの鉢の除去特性をコントロールとし、各ポトス鉢特性との差を求める。その差の累計値を  $V_{outs}$  とし図 6.6 に示す。ホルムアルデヒド注入後 12 時間における合計除去量は、小サイズの鉢に比べ中サイズでは約 2.7 倍、大サイズでは約 3.6 倍であった。

### 6.3.2 葉面積の導出

葉面積は植物のサイズを表す一つの指標である。特に、植物は汚染物を葉の気孔から取り込んでいると考えられるため[23]、葉面積が浄化能力に与える影響は大きいと考えられる。そのため、次のような方法で葉面積を測定した。まず、ポトスの葉の幅と長さの関係を調べるため、3 つの被験ポトスの全ての葉の幅と長さを測定した。葉の葉脈が見られる部分を葉身という。ポトスの葉は概ね楕円形である。葉身と茎とを連ねる棒状の葉柄と呼ばれる部分は含まず、楕円形

の葉身の長い径の最大長を長さ  $L[\text{cm}]$ 、短い径の最大長を幅  $W[\text{cm}]$ とした。これらの比  $W/L$  を導出した。その結果をヒストグラムで図 6.7 に示す。葉の総数 123 枚の  $W/L$  の平均値は 0.602、標準偏差は 0.074 でほぼ正規分布に従う結果が得られた。次に、被験ポトスと同じ種類のポトスの大小 6 枚の葉を切り取り、スキャナーで画像を取り込んだ。デジタル画像から葉面積を算出する画像解析ソフト (LIA32 for Win32, フリーウェア) を用い、各葉の正確な面積 $[\text{cm}^2]$ を導出した。その面積を葉の幅と長さの積で割り 6 枚の平均を求めたところ、約 0.7 であった。すなわち、幅と長さの積の約 7 割が実際の面積に相当する。したがって、被験ポトスの各葉の幅と長さの積に 0.7 を乗じた値の合計値を推定面積とした。その結果を植物の高さと葉の枚数とともに表 6.1 に示す。

### 6.3.3 浄化能力評価

被験ポトスのホルムアルデヒド 8ppm に対する除去特性をそれぞれ 3 回ずつ測定した。その結果を図 6.8 に示す。図中のプロットは 3 回の平均値、エラーバーは標準誤差である。横軸は推定面積、縦軸は時定数である。チャンバーに注入したホルムアルデヒドは植物の気孔から取り入れられたり、土壤に直接拡散したりする。このため、土壤のみの鉢でも浄化効果を有している。土壤のみの鉢の  $T$  は平均で 5.92、小サイズの鉢では 5.13、中サイズでは 2.56、大サイズでは 1.24 であった。

図 6.6 で求めたホルムアルデヒド注入後 12 時間における合計除去量を、葉面積で除した結果を  $V_{outs12}$  とし図 6.9 に示す。単位面積当たりの浄化能力は小および中サイズの鉢は大サイズの約 2.6 倍であった。この結果より、若い葉 (小、中サイズの鉢) は成長過程にありホルムアルデヒドの吸収が活発に行なわれるものと考えられる。



さらに、植物の高さと時定数の関係を図 6.10 に示す。植物の高さは必ずしも葉の枚数や葉面積と比例関係にあるわけではないが、大雑把に植物のサイズを示す一つの指標になると考えられる。結果として、植物の高さが高い程浄化能力が大きい結果が得られた。



図 6.4 異なるサイズの 3 つのポトス

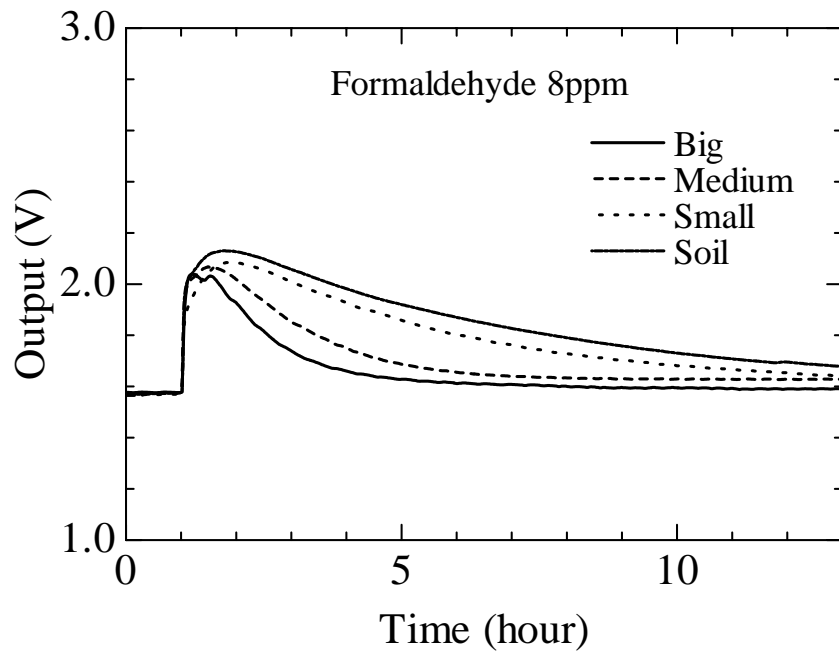


図 6.5 異なるサイズのポトスの除去特性

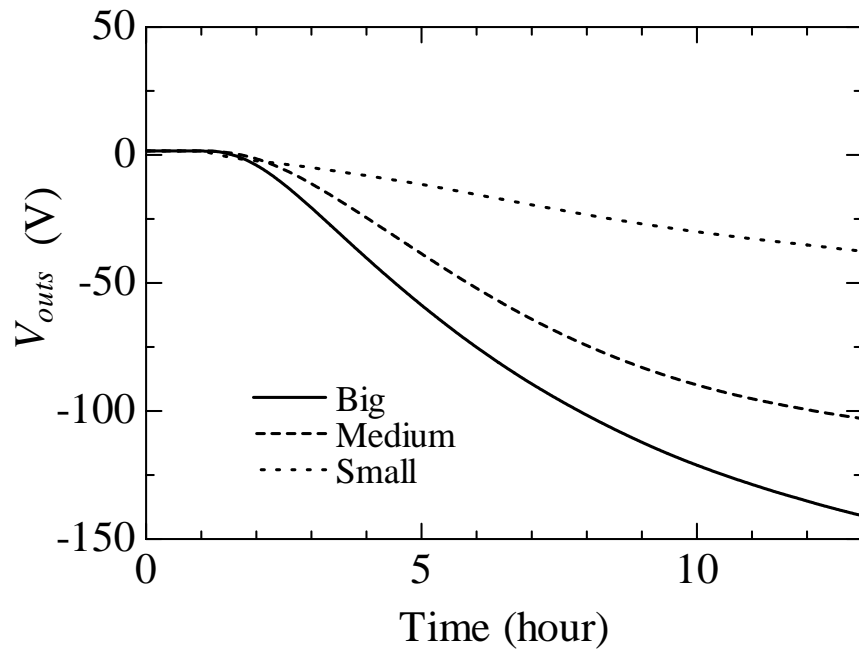


図 6.6 土壌の効果を除外した場合の 3 種類のサイズのポトスの除去特性

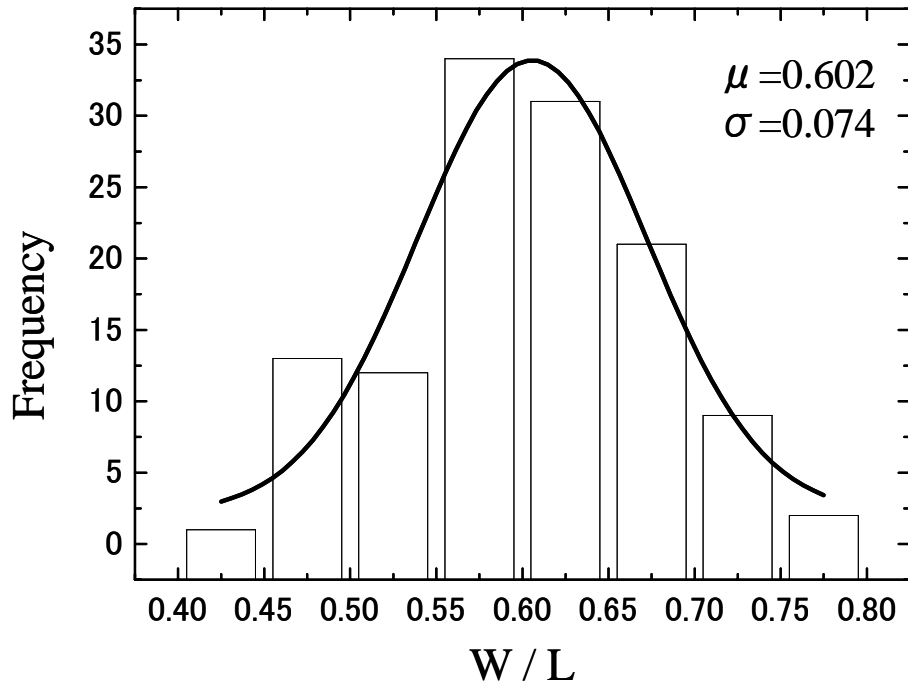


図 6.7 ポトスの葉の幅(W)と長さ(L)の比のヒストグラム

表 6.1 異なるサイズのポトスの葉面積の推定

	(1) Big	(2) Medium	(3) Small
Estimated area(cm <sup>2</sup> )	5,015	1,371	521
Height (cm)	60	45	15
Leaves	65	34	24

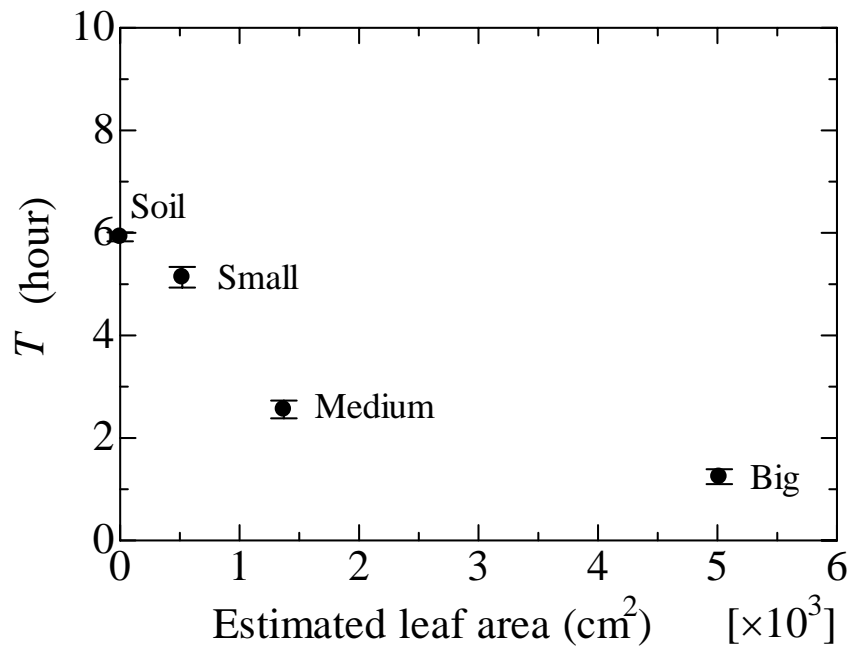


図 6.8 葉面積と浄化能力の関係

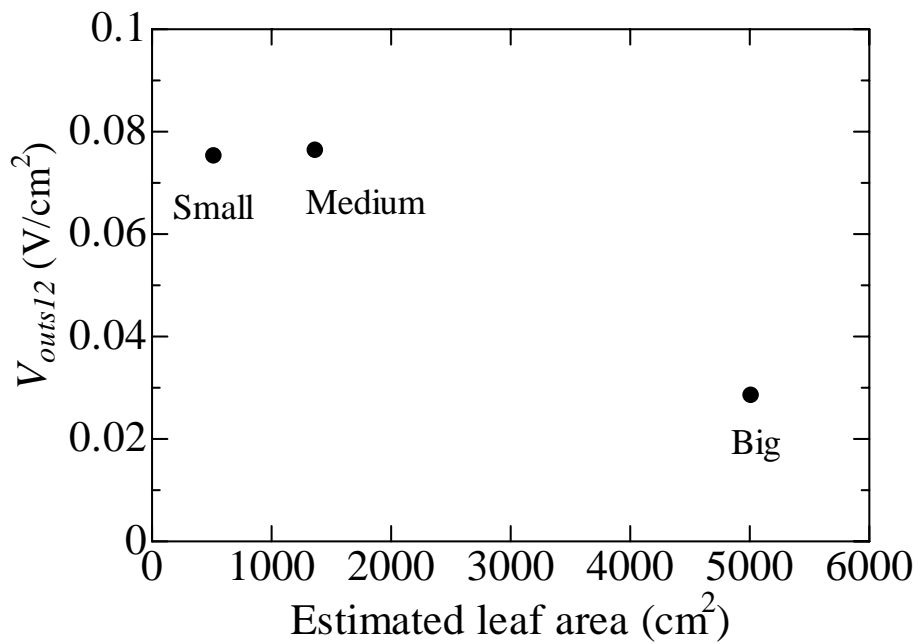


図 6.9 ポトスのサイズと単位面積当たりの浄化能力の関係

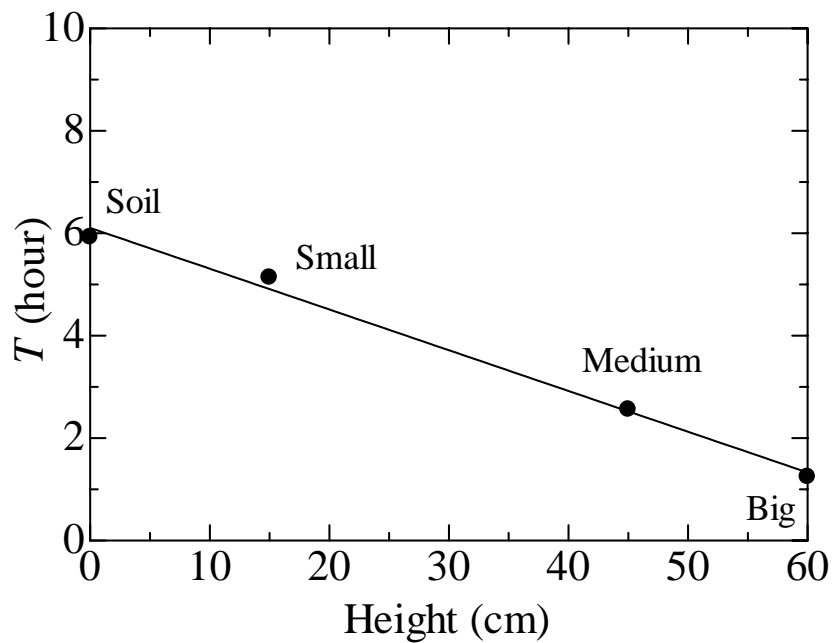


図 6.10 植物の高さと浄化能力の関係

## 6.4 様々な汚染物種の評価

ホルムアルデヒド以外のシックハウス症候群の代表的な原因物質であるトルエンとキシレン（*o*-キシレン 10%，*m*-キシレン 70%，*p*-キシレン 10%，エチルベンゼン 10%）に対する評価の可能性について検討した。被験植物は4章で用いたポトスとスパティフィラムを採用した。室温 22°C および照度 970 lx の環境下で実験を行った。スパティフィラムのトルエン、キシレンに対する除去特性を図 6.11 に示す。図中には4章で行ったホルムアルデヒドに対する浄化特性も併せて示した。使用したガスセンサは被験ガスの種類によって感度が異なる。このため、それぞれの物質に対するセンサ出力の増分、すなわち注入時のレベルからピーク値の差が異なる。トルエン、キシレンに対するセンサ出力の増分

はホルムアルデヒドのそれに比べかなり大きいですが、いずれも一次遅れの応答を示していることから、1ppm, 1.5ppm, 2ppm のトルエン, キシレンに対する除去能力を時定数で評価した。トルエンの結果を図 6.12 に、キシレンの結果を図 6.13 に示す。図中の値は植物毎に準備した 3 鉢の時定数の平均値、エラーバーは標準誤差を示している。実験を行った各濃度範囲において、ポトスとスパティフィラムのトルエンとキシレンに対する除去能力はほぼ一定であった。この結果は、時定数がホルムアルデヒド以外の汚染物に対しても濃度に依存せず、その汚染物に対する植物固有な浄化能力を定量的に評価することが可能であること示している。

4 章で前述したように、ホルムアルデヒド 5ppm, 6.5ppm, 8ppm に対するポトスの時定数の平均は 0.97, スパティフィラムの平均は 1.40 であった(図 4.12)。ポトスの能力がスパティフィラムの 1.4 倍程度高いことが明らかとなっている。トルエン 1ppm, 1.5ppm, 2ppm に対するポトスの時定数の平均は 15.1, スパティフィラムの平均は 12.5 であった。トルエンに対してスパティフィラムの能力がポトスの 1.2 倍程度高いことが分かった。キシレン 1ppm, 1.5ppm, 2ppm に対するポトスの時定数の平均は 15.0, スパティフィラムの平均は 16.6 であった。キシレンに対するポトスとスパティフィラムの浄化能力はほぼ等しい結果が得られた。

時定数はガスセンサの汚染物に対する感度の違いに影響されない指標であることから、汚染物種と時定数の関係について検討を行なった。図 4.12, 6.12, 6.13 より汚染物濃度が 1ppm の時の浄化能力と分子量の関係を調べた。ただし、ホルムアルデヒド濃度 1ppm に対する実験は行っていないが、実験を行った濃度範囲において、浄化能力はほぼ一定であったことから、各濃度の平均値を採用した。結果を図 6.14 に示す。比較した汚染物種の数には十分ではないが、ポトス, スパティフィラムともに分子量が大きくなるほど浄化能力が小さくなり、

浄化に時間が掛かることが分かった。

このように、植物の除去能力は汚染物により異なる。したがって、植物を実環境に応用する場合には、あらかじめ植物を設置する環境においてどのような汚染物が発生しているかを調べ、その汚染物に対する除去能力が高い植物を組み合わせて配置することが望ましい。

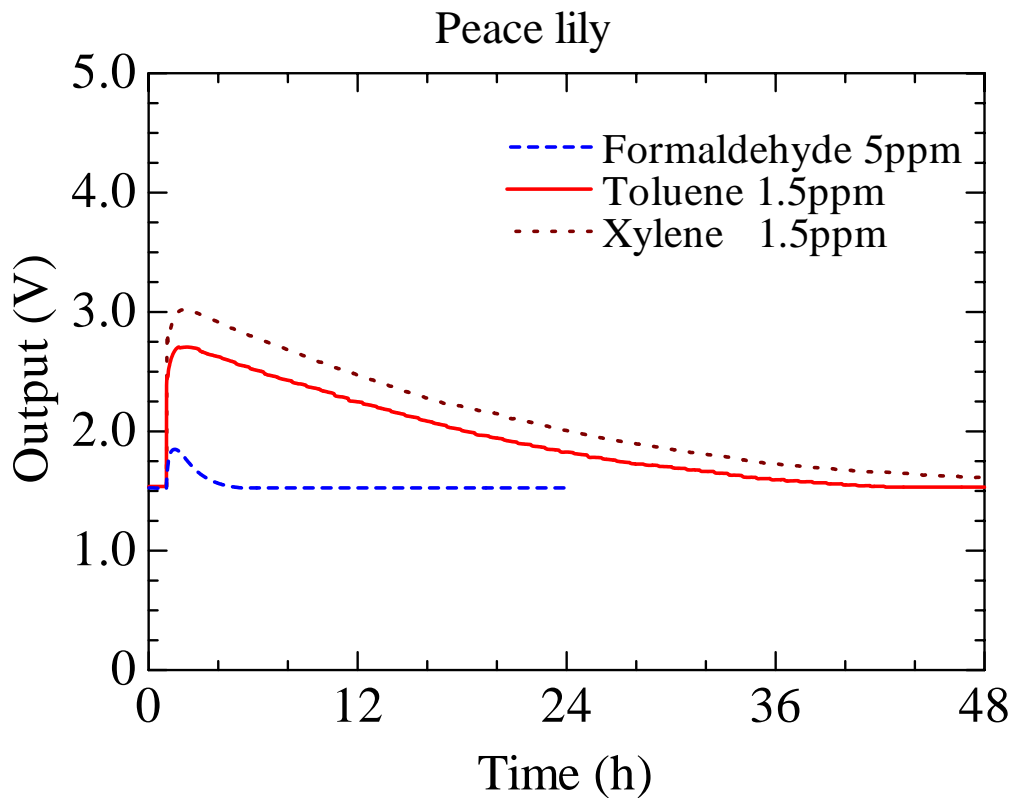


図 6.11 スパティフィラムの各種汚染物に対する除去特性

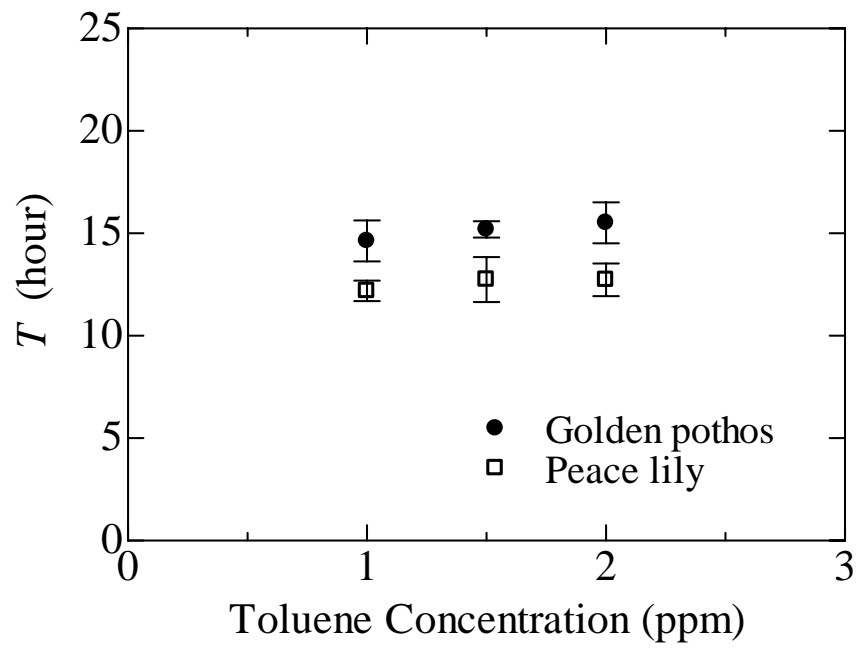


図 6.12 トルエン濃度に対するポトスとスパティフィラムの浄化能力

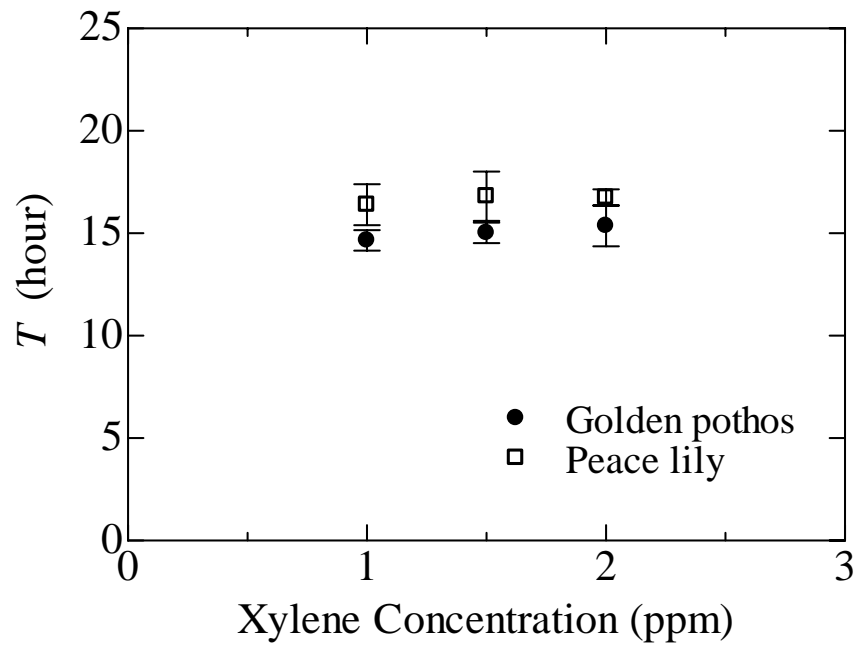


図 6.13 キシレン濃度に対するポトスとスパティフィラムの浄化能力



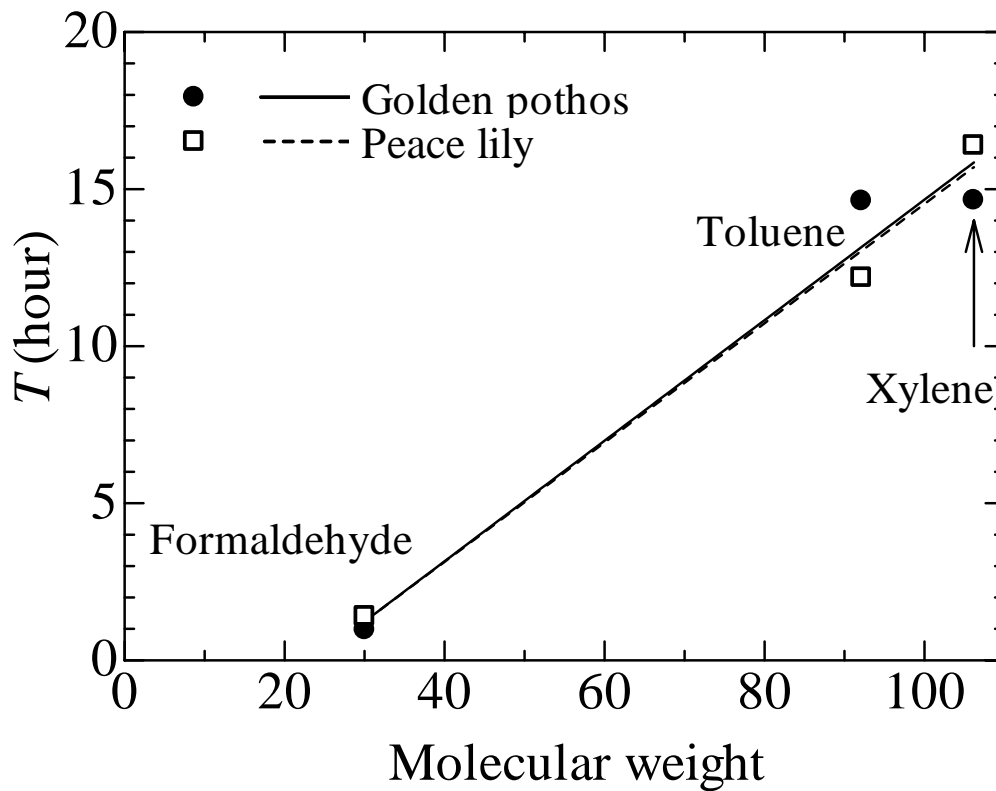


図 6.14 汚染物の分子量と浄化能力の関係

## 6.5 結 言

本章では、時定数が浄化能力の評価指標として妥当であることを示すために、植物種、サイズによる影響およびホルムアルデヒド以外の物質の評価の可能性について検討した。10種類の代表的な観葉植物についてホルムアルデヒドを用いて浄化能力評価を行なった結果、植物毎に除去特性の傾きは異なるものの、全ての植物が一次遅れの応答を示した。時定数で浄化能力を評価したところ、

10 種類の植物の間で約 3.8 倍の開きがあることを確認した。また、3 つの異なるサイズのポトスの浄化特性を測定したところ、全て一次遅れ系の応答を示した。時定数を用いて浄化能力と葉面積の関係を評価した結果、ポトスのホルムアルデヒドに対する除去能力は葉面積が大きい程高く、若い葉は単位面積当たりの浄化能力が高いことが明らかとなった。ガスセンサは被験ガス種によって感度が異なるため、それぞれの物質濃度に対するセンサ出力の増分も異なる。トルエン、キシレン濃度に対するセンサ出力の増分はホルムアルデヒドのそれに比べかなり大きいですが、いずれも一次遅れの応答を示した。また、1ppm, 1.5ppm, 2ppm のトルエン、キシレンに対する浄化能力を時定数で評価したところ、各濃度範囲においてポトスとスパティフィラムのトルエンとキシレンに対する浄化能力はそれぞれほぼ一定であった。

以上の結果から、時定数は種類およびサイズの異なる植物の浄化能力評価において有効であり、かつホルムアルデヒド以外の汚染物に対しても、その汚染物に対する植物固有な浄化能力を定量的に評価することが可能であることを確認した。

## 第 7 章

# 活性炭鉢植物の空気浄化能力評価

### 7.1 緒 言

活性炭は高い汚染物除去効果を有し，室内空気汚染対策として空気清浄機のフィルターなどに用いられている．活性炭の除去効果は吸着によるもので汚染物は残留しているため，フィルターの交換が定期的に必要である．一方，植物は汚染物を連続的に分解・除去する能力を有している．しかしながら，6章で明らかになったようにホルムアルデヒドに対しては高い除去能力を有しているが，トルエン，キシレンに対しては除去に時間が掛かる．一般に，室内空気の汚染物濃度は新築時に高くなる傾向にある．活性炭で作られた鉢に植物を植えた活性炭鉢植物を室内に置くことにより，継続的な空気汚染物の分解が可能であるとともに一時的に高濃度な汚染物の吸収という相乗効果が期待できる．

本章では，活性炭鉢植物のホルムアルデヒド，トルエン，キシレンに対する吸着・除去特性を測定し時定数を用いて評価した．

## 7.2 活性炭鉢植物のホルムアルデヒド除去効果

室温 22℃および照度 970 lx の環境下で実験を行った。実験に用いた活性炭鉢の写真を図 7.1 に示す。活性炭鉢は直径 23cm, 高さ 23cm, 重量 1300g である。鉢に用いた活性炭表面の電子顕微鏡写真を図 7.2 に示す。活性炭は細孔構造をしており表面積が大きく空気汚染物の吸着性に優れていることが伺える。一般に、活性炭の吸着能は表面積に依存する。活性炭 1g 当たりの表面積（比表面積）は 800~1500m<sup>2</sup>/g のものが多い。

ゼラニウム（Geranium）を培養土 2000cc に植えた活性炭鉢のホルムアルデヒド 8ppm に対する吸着・除去特性を、図 7.3 に示す。また、植物を植えていない活性炭鉢の吸着特性も併せて示した。センサ出力はいずれも指数関数的に減少し、一次遅れの応答を示している。ゼラニウムを植えた活性炭鉢のホルムアルデヒドに対する除去特性の時定数は 1.3, 活性炭鉢のそれは 1.7 であった。活性炭鉢に植物を植えることにより鉢の表面積が減少するが、植物や土壌の浄化作用によって除去能力は空の鉢より若干高くなったと思われる。

## 7.3 活性炭鉢植物のトルエン除去効果

スパティフィラムを植えた活性炭鉢のトルエン 1.5ppm に対する吸着・除去特性を、図 7.4 に示す。また、活性炭鉢による吸着特性も併せて示した。ホルムアルデヒドと同様に、センサ出力はいずれも指数関数的に減少し一次遅れの応答を示している。スパティフィラムを植えた活性炭鉢の除去特性の時定数は 2.1,



図 7.1 実験に用いた活性炭鉢



10μm

図 7.2 活性炭表面の電子顕微鏡写真

(写真提供：(株)メイスイ)

活性炭鉢の時定数は 1.6 であった。6 章で示したスパティフィラムのトルエン 1.5ppm に対する時定数は 12.7 であった。鉢と植物の大きさは 6 章で用いたものの方が小さかったにも係わらず、活性炭鉢植物の除去能力はプラスチック製の植物鉢に比べ非常に高い結果が得られた。活性炭鉢植物が分子量の大きな物質であるトルエン除去に効果があることが判明した。

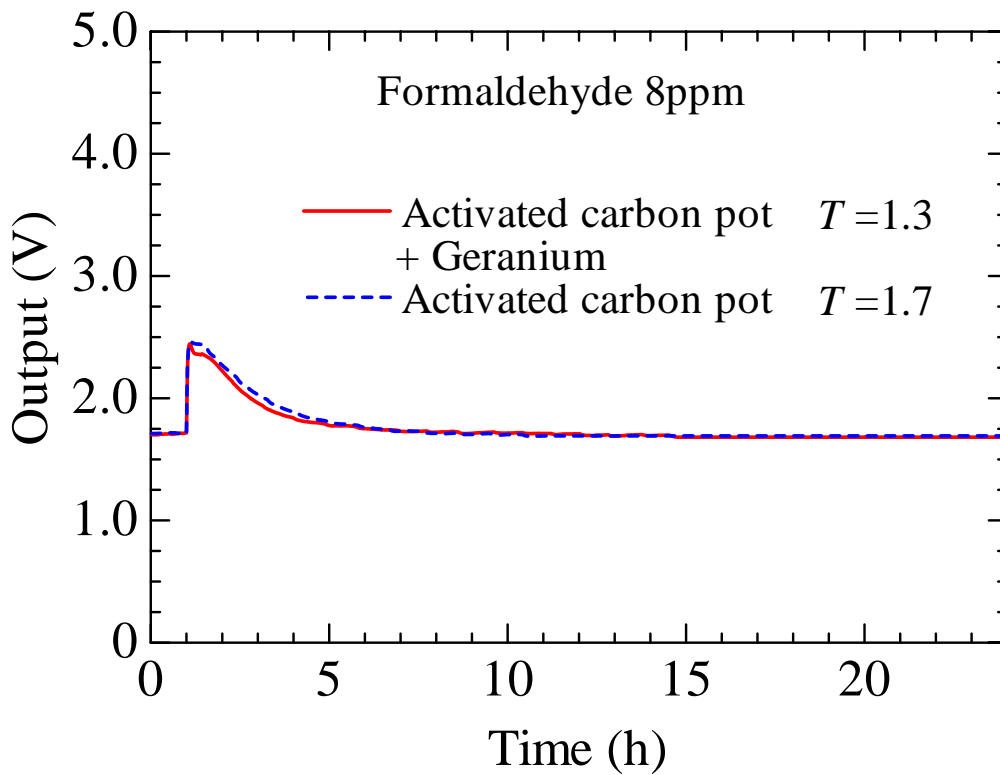


図 7.3 ホルムアルデヒドの吸着・除去特性

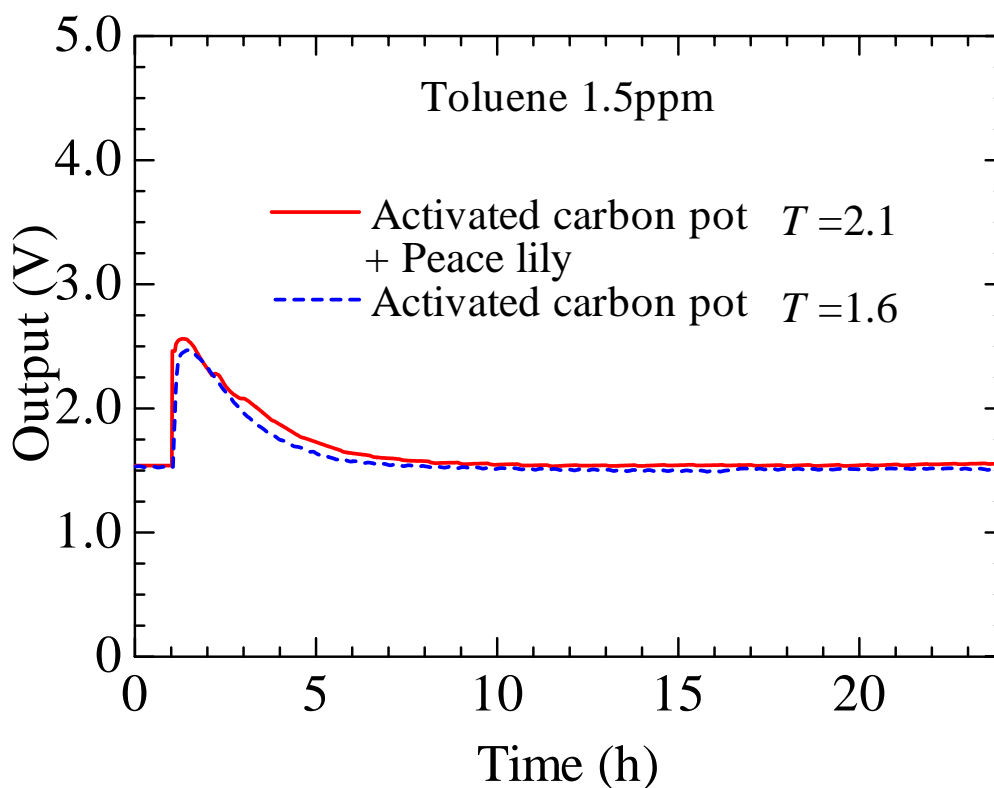


図 7.4 トルエンの吸着・除去特性

## 7.4 活性炭鉢植物のキシレン除去効果

7.3 節で使用した活性炭鉢植物（スパティフィラム）のキシレン 1.5ppm に対する吸着・除去特性を図 7.5 に示す。活性炭鉢植物および活性炭鉢の除去特性は、いずれも一次遅れ系の応答を示した。時定数は活性炭鉢植物は 2.3，活性炭鉢は 2.0 であった。6 章で示したスパティフィラムのキシレン 1.5ppm に対する時定数は 16.8 であった。キシレンに対する活性炭鉢植物の除去能力は、トルエンと同様に非常に大きいことが判明した。

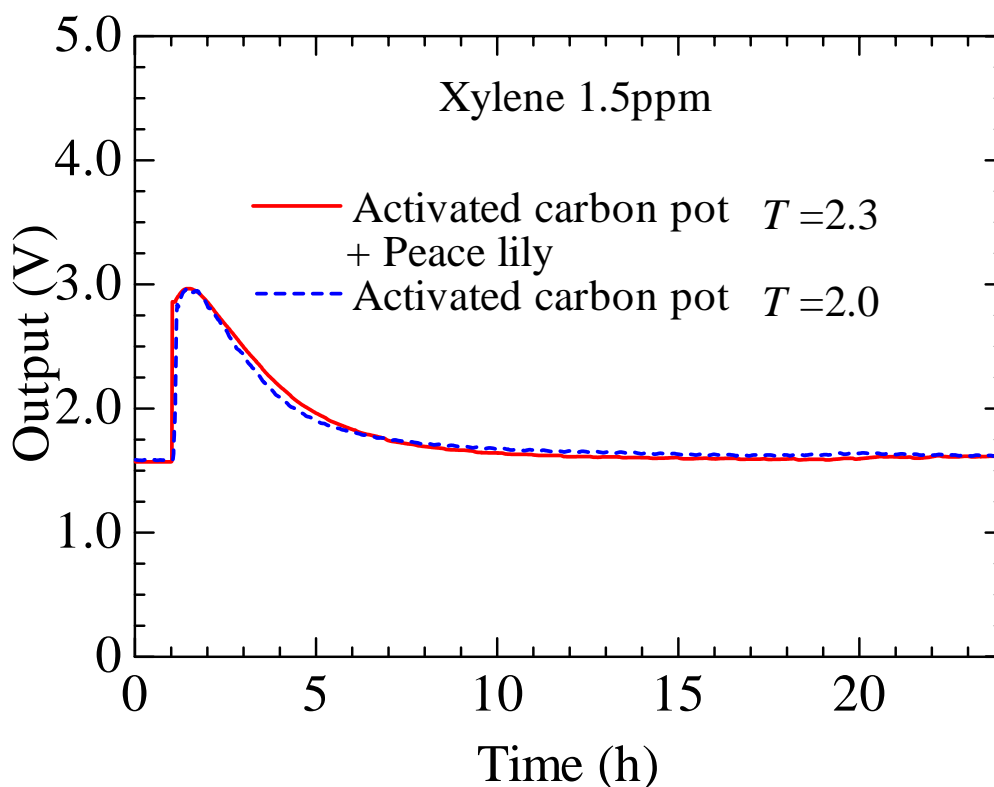


図 7.5 キシレンの吸着・除去特性

## 7.5 結 言

活性炭鉢植物のホルムアルデヒド，トルエン，キシレンに対する除去特性を調べた．活性炭は分子量が小さいホルムアルデヒドやアセトアルデヒドなどのアルデヒド類の吸着能力は低い，分子量が大きいトルエンやキシレンなどのVOCに対し高い吸着能力を有している[9]．このため，トルエン，キシレンの除去特性は通常のプラスチック製の植物鉢に比べ，非常に急峻な減衰を示したが，



各汚染物に対する特性は全て一次遅れの応答を示した。このことから、時定数は活性炭鉢植物の各汚染物に対する除去能力評価において有効であることを確認した。さらに、プラスチック鉢に植えられている植物では分子量の大きい物質の浄化には時間が掛かるが、活性炭鉢植物はトルエンおよびキシレンの除去に効果が大きいことも明らかとなった。活性炭鉢植物を室内に設置することにより、継続的な汚染物の分解と一時的に高濃度な汚染物の吸収が可能となる。

# 第 8 章

## 結 論

### 8.1 本研究の成果

植物は室内空気汚染物を分解し，空気を浄化する能力を有している．NASA が初めて観葉植物の空気浄化能力を発表して 15 年が過ぎた．しかしながら，これまでに空気浄化能力を評価する適切な指標が示されていなかった．本研究は，植物固有な空気浄化能力を定量的に評価する指標を導出することを目的として行った．本来の研究目的とその目的を達成する過程で得られた成果を以下に示す．

- 植物の空気浄化過程をガスセンサを用いることにより連続測定可能にした．
- 植物の浄化システムの応答が一次遅れ系であることを明らかにした．これにより，Wolverton らの初期濃度依存性を排除し，植物固有な空気浄化能力を定量的に評価する指標を提案した．さらに，種類や大きさの異なる植物においてもその応答が一次遅れ系であることを

確認した。また、様々な汚染物に対する応答も一次遅れ系であることを確認し、提案指標の妥当性を示した。

- 土壌の種類、温度、照度が浄化能力に与える影響を明らかにした。
- 10 種類の代表的な観葉植物のホルムアルデヒド除去能力を明らかにした。
- サイズの異なるポトスの浄化特性を測定し、ホルムアルデヒドに対する除去能力は総葉面積が大きい程高く、若い葉は単位面積当たりの除去能力が高いことを明らかにした。
- 分子量の大きいトルエン、キシレンは小さいホルムアルデヒドに比べ除去に時間が掛かることを明らかにした。
- 活性炭鉢植物のトルエン、キシレンに対する除去効果が非常に高いことを明らかにした。

提案した評価法は、これまで用いられていた汚染濃度に依存する評価法と異なり、植物固有な浄化能力を評価可能にするもので、能力評価のための測定回数を飛躍的に減らすことができる。空気浄化ダイナミクスの線形領域ではあるが、本評価法の提案により浄化能力評価に一つの指針を与えることができた。本評価法がこの分野における研究の加速に貢献し、人々の健康増進やシックハウス症候群など室内空気汚染による症状改善の一助となれば幸いである。

## 8.2 検討事項と今後の課題

本節では、これまで記載した内容以外の検討事項と今後の課題について述べる。

6.2 節で評価した 10 種類の観葉植物鉢のホルムアルデヒド除去能力と二酸化炭素吸収能力の関係を調べた結果を図 8.1 に示す。二酸化炭素吸収能力( $t_w$ )は、チャンバー内の濃度 500ppm の場合において植物設置により 250ppm まで減少する時間を表している。ホルムアルデヒド除去能力と二酸化炭素吸収能力には非常に強い相関があり、相関係数は 0.88 であることが明らかとなった。

本論文ではチャンバー内での基礎実験についてのみ言及してきたが、これまで実際の労働環境に植物を設置してその効果を調べている。ここではオフィスの一角にある憩い空間に植物を設置した応用事例について述べる。図 8.2 に部屋のレイアウトを示す。A~C が植物の設置箇所、ベンジャミンとポトス、スパティフィラム、アレカヤシが植えられている。測定は、TVOC センサ（新コスモス電機製、XP-339V）とニオイセンサ（新コスモス電機製、XP-329）を用いて計測した。測定結果を図 8.3 に示す。TVOC に対しては 74%、ニオイに対しては 68%という高い除去率を示した。チャンバー内の実験では、汚染物の注入は 1 回のみであるが、実環境においては連続的に汚染物が放出される。このような環境においても植物は高い浄化能力を持っていることを確認した。

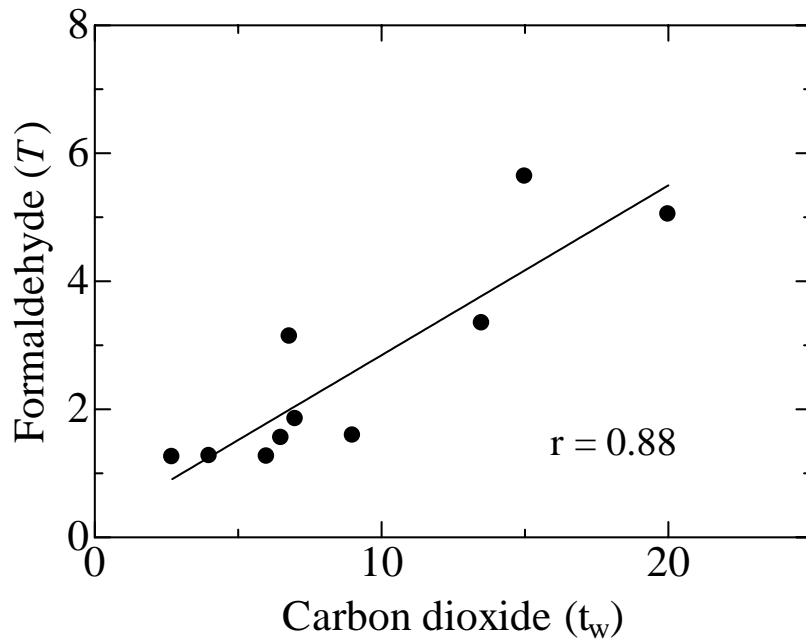


図 8.1 ホルムアルデヒド除去能力と二酸化炭素吸収能力の関係

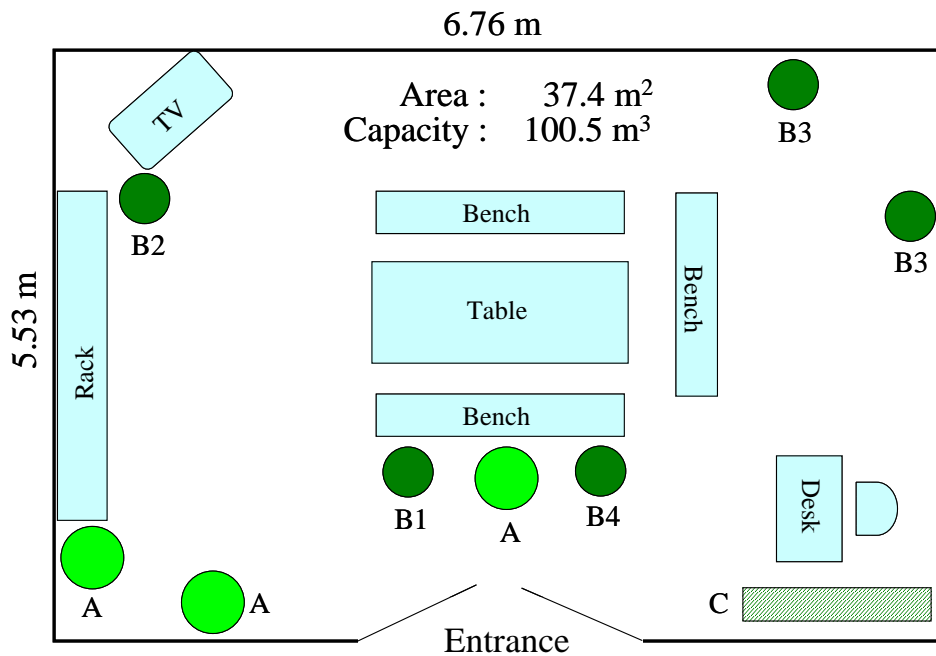


図 8.2 憩いの空間のレイアウト

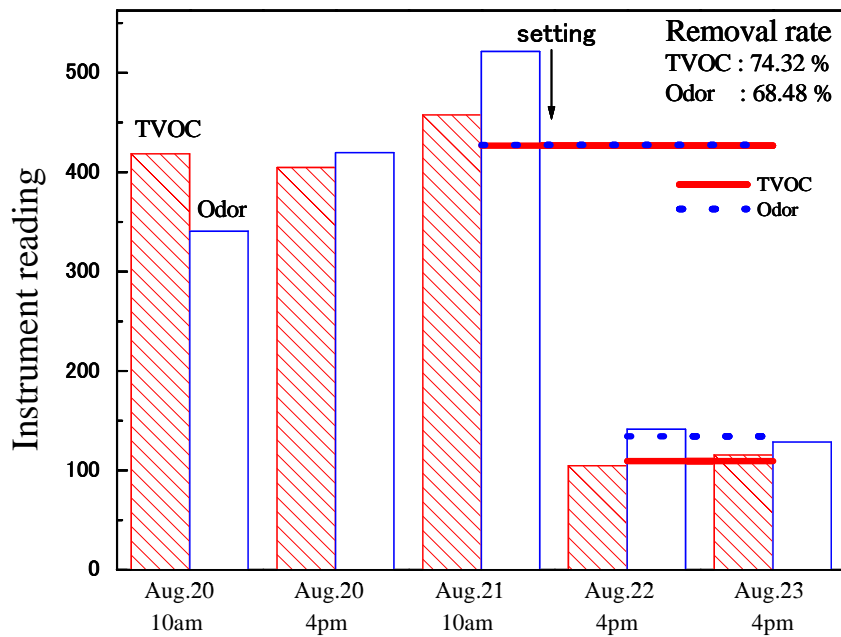


図 8.3 植物設置による除去効果

今後の目標として、植物の空気浄化作用を利用した最適な室内空間設計が挙げられる。実環境における応用事例について前述したが、空気浄化のために設置すべき植物鉢の種類や鉢数を明確に示すに至っていない。これらを示すことは、植物による空気浄化作用の一般社会への応用・浸透を促進するものである。本評価法で導出した植物の浄化能力は、植物に固有なもので実環境においても変わらないため室内空間設計に適用可能である。実環境においては、連続的に汚染物が発生し、さらに温度や湿度、風などの影響により室内濃度が増加する。このため、導出した植物の浄化能力を適用し室内空間設計を行うためには、変化する環境による汚染物発生量の同定が課題である。今後も、本評価法を用いた室内空間設計の実現を目指し検討を重ねることが必要である。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり，多くの方々から御指導，御教示をいただきました．ここに深甚なる謝意を表します．

特に，北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科・吉田武稔教授には終始熱心な御指導，御教示を賜りました．また，主婦である私の立場を常に御気遣いいただき暖かい励ましの御言葉を頂戴いたしました．心より感謝申し上げます．

また，本論文をまとめるにあたり，貴重な御指導と御意見を賜りました北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科・本多卓也教授，中森義輝教授，金沢工業大学工学部ロボティクス学科・南戸秀仁教授に心より感謝申し上げます．

金沢星稜大学大学院地域経済システム研究科・大藪多可志教授には，研究の実験設備の提供および，懇切丁寧な御指導と御助言をいただきました．さらに，研究に対する厳しい姿勢と継続的な熱意など多くの事を学ばせていただきました．心から謝意を表します．

実験を行うにあたり，株式会社竹中庭園緑化・竹中幸三郎様には貴重な御意見と試料を提供していただきました．ここに厚く御礼申し上げます．

最後に，研究に関する議論や多くの支援をいただきました北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科吉田研究室の皆様には感謝いたします．

## 参 考 文 献

- [1] (財) 地球産業文化研究所：“地球環境 2000-’01 CO<sub>2</sub> から環境ホルモンまで”，ミオシン出版 (2000)
- [2] R. Carson：“Silent spring (40<sup>th</sup> anniversary edition)”，Mariner books (2002)
- [3] T.Colborn, D.Dumanoski and J.Peterson：“Our stolen future: Are we threatening our own fertility, intelligence, and survival? – A scientific detective story”，E.P.Dutton (1996)
- [4] 環境省：“平成 15 年度版環境白書”
- [5] 環境庁：“平成 11 年度版環境白書”
- [6] 安藤正典：“住まいと病気”，丸善 (2002)
- [7] 池田耕一：“室内空気汚染の原因と対策”，日刊工業新聞社 (1998)
- [8] 池田：“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，Vol.43, No.4, pp.24-33 (1998)
- [9] 湯：“揮発性有機化合物 (VOC) とアルデヒド類除去用フィルタ”，空気調和・衛生工学，Vol.76, No.10, pp.25-33 (2002)
- [10] B.C.Wolverton, J. Anne and B. Keith：“Interior landscape plants for indoor air pollution abatement”，NASA/ALCA Final Report, pp.1-22 (1989)
- [11] 中西：“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，Vol.49, No.10, pp.1081-1083 (1991)
- [12] N.R.Harmmer and R.A.Wood：“Interior landscapes: An American design”



portfolio of green environments”, Rockport Publishers, Massachusetts, USA (1999)

- [13] 浅海, 仁科, 中村, 増井: “観葉植物を見ることが VDT 作業に伴う視覚疲労に及ぼす影響”, 植物工場学会誌, Vol.7, No.3, pp.138-143 (1995)
- [14] V.I.Lohr, C.H.Pearson-Mims and G.K.Goodwin: “Interior plant may improve worker productivity and reduce stress in a windowless environment”, Journal of Environmental Horticulture, Vol.14, No.2, pp.97-100 (1996)
- [15] 仁科, 中本: “観葉植物, 花, 香りが人間に及ぼす生理・心理的効果の脳波および SD 法による解析”, 日本建築学会計画系論文集, Vol.509, pp.71-75 (1998)
- [16] 仁科, 中本, 渡森, 増井, 橋本: “観葉植物が人間の心理に及ぼすアメニティ効果の脳波および SD 法による解析”, 植物工場学会誌, Vol.10, No.2, pp.65-69 (1998)
- [17] 中村, 藤井: “植物 (ゼラニウムおよびベゴニア) を見たときの脳波特性, 特に  $\alpha$  波の量と周波数について”, 造園雑誌, Vol.53, No.5, pp.287-292 (1990)
- [18] V.I.Lohr and C.H.Pearson-Mims: “Physical discomfort may be reduced in the presence of interior plants”, HortTechnology, Vol.10, No.1, pp.53-58 (2000)
- [19] 浅海, 仁科, 塚西, 増井, 橋本: “観葉植物が室内の温熱環境および温熱快適性に及ぼす影響 —冬期における実験による解析—”, 日本建築学会計画系論文集, Vol.464, pp.39-46 (1994)
- [20] 仁科, 川西: “観葉植物が室内の温熱環境および温熱快適性に及ぼす影響 —春期, 夏期における実験による解析—”, 生物環境調節, Vol.37, No.1,

pp.73-81 (1999)

- [21] B.C.Wolverton and J.D.Wolverton : “Continued Research By Dr.Wolverton and FCAC”, InteriorScape, March/April, pp.6-10,62-63 (1991)
- [22] 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)
- [23] B.C.Wolverton : “HOW TO GROW FRESH AIR”, New York, PENGUIN BOOKS (1996)
- [24] “環境問題情報事典 第2版”, 日外アソシエーツ (2001)
- [25] S.Burge, A.Hedge, S.Wilson, J.H.Bass and A.Robertson : “Sick building syndrome: a study of 4373 office workers”, Annals Occupational Hygiene, Vol.31, No.4A, pp.493-504 (1987)
- [26] 厚生省生活衛生局企画課生活化学安全対策室 : “室内空気汚染問題に関する検討会中間報告書—第1回～第3回のまとめ” (2000)
- [27] 国民生活センター : “危害情報からみた最近のシックハウスについて” (2002)
- [28] 文部科学省 : “健康的な学習環境を確保するために—有害な化学物質の室内濃度低減に向けて—” (2002)
- [29] 菅家, 三上, 石川, 土本 : “化学物質過敏症の診断・治療施設の開発”, 空気調和・衛生工学, Vol.76, No.11, pp.57-65 (2002)
- [30] 田辺新一 : “室内化学汚染”, 講談社現代新書 (1998)
- [31] 厚生労働省 : “室内空気中化学物質についての相談マニュアル作成の手引き” (2001)

- [32] ECA, Commission of the EC, “IAQ and Its Impact on Man”, No.6 (1989)
- [33] 安藤：“室内空気汚染と化学物質 第4回 室内空気中に存在する化学物質一覧”，資源環境対策, Vol.33, No.8, pp.737-744 (1997)
- [34] 厚生労働省医薬局審査管理課化学物質安全対策室：“室内空気汚染問題に関する検討会中間報告書－第6回～第7回のまとめ” (2001)
- [35] 国土交通省住宅局住宅生産課：“平成14年度室内空気中の化学物質濃度の実態調査の結果について” (2003)
- [36] 吉澤：“シックハウス対策と課題”，建築雑誌, Vol.119, No.1521, pp.8-9 (2004)
- [37] 文部科学省スポーツ・青少年局学校健康教育課：“「学校環境衛生の基準」の改訂について” (2002)
- [38] 木村：“換気システムによるシックハウス対策”，空気調和・衛生工学, Vol.77, No.1, pp.33-37
- [39] “24時間換気クレームと不満が続出”，日経アーキテクチュア, No.774, pp.66-69 (2004)
- [40] 野田：“ベークアウトによる建材相互の影響”，環境の管理, Vol.31, pp.73-76 (2000)
- [41] 呂：“シックハウス対策のための室内空気汚染防止技術”，空気清浄, No.39, No.6, pp.378-384 (2004)
- [42] 竹内：“環境浄化を目指した光触媒技術の歩み”，電気学会誌, No.123, No.5, pp.291-294 (2004)
- [43] 今中, 森川, 斎藤, 佐治, 中里, 長谷川, 西村：“植物による環境負荷低減技術”，エヌ・ティー・エス (2000)
- [44] T.J.Olexa, T.J.Gentry, P.G.Hartel, D.C.Wolf, J.J. Fuhrmann and C.M.Reynolds：“Mycorrhizal Colonization and Microbial Community

Structure in the Rhizosphere of Annual Ryegrass Grown in Pyrene-Amended Soils”, International Journal of Phytoremediation, Vol.2, No.3, pp.213-231 (2000)

- [45] S.フィオレンツァ, C.L.オーブル, C.H.ワード : “ファイトレメディエーション—植物による土壌汚染の修復—”, シュプリンガー・フェアラーク (2001)
- [46] ウィリアム C.アンダーソン : “バイオレメディエーション—微生物による環境修復の実際”, シュプリンガー・フェアラーク東京 (1997)
- [47] T.A.Anderson and J.R.Coats (Editors) : “Bioremediation through Rhizosphere Technology”, Washington, D. C., American Chemical Society (1994)
- [48] B.S.Schepart (Editor) : “Bioremediation of Pollutants in Soil and Water”, Philadelphia, ASTM (1995)
- [49] 岡本, 加藤 : “VOC のバイオ脱臭”, 臭気の研究, Vol.30, pp.141-149 (1999)
- [50] M.Giese, U.Bauer-Doranth, C.Langebartels and H.Sandermann,Jr. : “Detoxification of formaldehyde by the spider plant (*Chlorophytum comosum* L.) cell suspension cultures”, Plant Physiology, Vol.104, pp.1301-1309 (1994)
- [51] V.I.Lohr and C.H.Pearson-Mims : “Particulate matter accumulation on horizontal surfaces in interiors: influence of foliage plants”, Atmospheric Environment, Vol.30, No.14, pp.2565-2568 (1996)
- [52] 大藪, 木村 : “プロダクションシステムを用いた家庭内災害の同定”, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.9, pp.1077-1083 (1994)
- [53] 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, Vol.32, No. 7, pp.1121-1128 (1996)

- [54] 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”, 電気学会論文誌E, Vol.117, No.5, pp.92-99 (1997)
- [55] 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”, 電気学会論文誌E, Vol.118, No.2, pp.92-99 (1998)
- [56] 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, Vol.34, No.8, pp.913-921 (1998)
- [57] T.Oyabu, A.Sawada and H.Nanto : “Diffusion Characteristics of Chemicals Causing Sick-Building Syndrome”, Sensors and Materials, Vol.13, No.2, pp.87-97 (2001)
- [58] 山口: “シックハウスにおける臭いセンサーの応用”, 粉体と工業, Vol.35, No.7, pp.50-60 (2003)
- [59] 大藪, 広林, 木村: “複数の酸化スズ系ガスセンサによる独居老人世帯モニタリング”, 電気学会論文誌E, Vol.117, No.6, pp.314-320 (1997)
- [60] 大藪, 沢田, 南戸: “ニオイセンサアレイによる人間の基本的室内活動の同定”, 電気学会論文誌E, Vol.121, No.1, pp.20-25 (2001)
- [61] A.Sawada, T.Oyabu and H.Nanto : “Identification of Meal-Degree for Aged Living in Solitude using Odor Sensors”, Trans. of IEE Japan, Vol.121-E, No.8, pp.434-439 (2001)
- [62] 沢田, 大藪, 南戸: “ニオイセンサのマハラノビスの距離による人間のふるまい判別”, ライフサポート学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.20-25 (2001)
- [63] 中本, 大藪, 木村: “室内温熱指標が酸化スズ系ガスセンサに与える影響とその出力の予測”, 電気学会論文誌E, Vol.121, No.1, pp.14-19 (2001)
- [64] 小野寺, 広林, 木村, 大藪: “ガスセンサを用いた光環境下における *Epipremunum aureum* のホルムアルデヒド浄化率の導出”, 電気学会論文

- 誌 E, Vol.119, No.11, pp.532-537 (1999)
- [65] 小野寺, 上宮, 木村, 大藪, 都甲: “建材および観葉植物を配置したチャンパー内におけるホルムアルデヒド濃度変化解析”, 電気学会論文誌 E, Vol.122, No.6, pp.306-311 (2002)
- [66] 沢田, 大藪, 吉田, 竹中, B.C.Wolverton: “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”, 電気学会論文誌 E, Vol.122, No.6, pp.300-305 (2002)
- [67] 新保, 大藪, 広林, 勝部, 原, 竹中: “植物の生体電位の統計的解析による環境認知”, Proceeding of The 37th Chemical Sensor Symposium, 19-B-34, pp.103-105 (2003)
- [68] 西村 (編), 北村, 武川, 松永 (共著): “制御工学” (1987)
- [69] 寺島一郎: “環境応答”, 朝倉書店 (2001)
- [70] T.J.Olexa, T.J.Gentry, P.G.Hartel, D.C.Wolf, J.J. Fuhrmann and C.M.Reynolds: “Mycorrhizal Colonization and Microbial Community Structure in the Rhizosphere of Annual Ryegrass Grown in Pyrene-Amended Soils”, International Journal of Phytoremediation, Vol.2, No.3, pp.213-231 (2000)
- [71] P.K.Donnelly and J.S.Fletcher: “Bioremediation though Rhizosphere Technology”, pp.93-99, T.A.Anderson and J.R.Coats (Editors), Washington, D. C., American Chemical Society (1994)
- [72] “花卉園芸大百科 3 環境要素とその制御”, 農村漁村文化協会 (2002)
- [73] B.T.Walton, E.A.Guthrie and A.M.Holyman: “Bioremediation though Rhizosphere Technology”, pp.11-26, T.A.Anderson and J.R.Coats (Editors), Washington, D. C., American Chemical Society (1994)
- [74] T.Kondo, K.Hasegawa, R.Uchida, M.Onishi, A.Mizukami and

K.Omasa : “Absorption of Atmospheric Formaldehyde by Deciduous Broad-Leaved, Evergreen Broad-Leaved, and Coniferous Tree Species”, Bulletin of the chemical society, Vol.69, No.12, pp.3673-3679 (1996)

[75] H.H.Roberts, H.E.Jeffries and A.M.Witherspoon : “Measuring air pollutant uptake by plants: Nitrogen Dioxide”, Journal of environmental quality, Vol.8, No. 4, pp.551- 557 (1979)

[76] P.J.Hanson, K.Rott, G.E.Taylor, Jr.C.A.Gunderson, S.E.Lindberg and M.Ross-Todd : “NO<sub>2</sub> deposition to elements representative of a forest landscape”, Atmospheric Environment, Vol.23, No.8, pp.1783-1794 (1989)

# 本研究に関連する発表論文

[査読付き論文]

1. 沢田, 大藪, 吉田, 竹中, B.C.Wolverton: “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”, 電気学会論文誌E, Vol.122-E, No.6, pp.300-305 (2002)
2. 沢田, 大藪, 中本, 竹中, 吉田: “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, Vol.14, No.2, pp.101-107 (2002)
3. Takashi Oyabu, Ayako Sawada, Takeshi Onodera, Kozaburo Takenaka, Bill Wolverton: "Characteristics of potted plants for removing offensive odors", Sensors & Actuators B, Vol.89, pp.131-136 (2003)
4. Takashi Oyabu, Takeshi Onodera, Ayako Sawada, Kozaburo Takenaka: "Purification Capability of Potted Plants for Removing Atmospheric Formaldehyde", Electrochemistry, Vol.71, No.6, pp.463-467 (2003)
5. 沢田, 大藪, 竹中, 吉田: “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”, 電気学会論文誌E, Vol.123, No.10, pp.416-421 (2003)
6. Ayako Sawada, Takashi Oyabu, Taketoshi Yoshida: "Formaldehyde Removal Capability in Plants Growing in an Activated Carbon Pot", ITE Letters on Batteries, New Technologies & Medicine, Vol.4, No.5, pp.673-679 (2003)
7. Hiroyuki Kuroda, Takashi Oyabu, Ayako Sawada, Taketoshi Yoshida, Syuji Maoka, Kozaburo Takenaka, B.C.Wolverton: "Volatile-Emitting Trees and Decomposing Characteristics of Foliage Plants Using A Tin Oxide Gas Sensor", ITE Letters on Batteries, New Technologies &



Medicine, Vol.5, pp.303-308 (2004)

8. 沢田, 吉田, 黒田, 大藪: “植物の空気汚染物浄化能力評価法の提案と検証”, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.10, pp.994-999 (2004)
9. Takashi Oyabu, Ayako Sawada, Tomoaki Hashimoto, Takayuki Yoshioka: "Removing characteristic of indoor air pollutants according to activated carbon pot and plant using a tin oxide gas sensor", Electrochemistry, Vol.72, No.12, pp.813-817 (2004)
10. 沢田, 吉田, 黒田, 大藪, 竹中: “ポトスとスパティフィラムの室内空気汚染物除去効果とその実環境への応用”, 電気学会論文誌E (印刷中)

[国際会議]

1. Takashi Oyabu, Ayako Sawada, Kozaburo Takenaka, Bill Wolverson, Bill Bensley, Hidehito Nanto and Teruaki Katsube: "Characteristics of Potted Plants for Removing Offensive Odors", 6th International Conference on Engineering Design and Automation, No.169, pp.711-716 (Aug. 4-7, 2002, Hawaii, USA)
2. Ayako Sawada, Taketoshi Yoshida, Takashi Oyabu, Akira Okada, Kozaburo Takenaka, Olavi Manninen: "Purification Effects of Plants for Indoor Air-pollution in a University Hospital", 10th International Conference on the Combined Effects of Environmental Factors (Aug. 28-31, 2002, Takatsuki, Osaka, Japan)
3. Ayako Sawada, Takashi Oyabu, Taketoshi Yoshida, Hideki Nagai: "Removing Capability for Formaldehyde of Plant Growing in an Activated Carbon Pot", SICE Annual Conference 2003, pp.1549-1554 (Aug. 4-6, 2003, Fukui, Japan)

4. Takashi Oyabu, Hiroyuki Kuroda, Ayako Sawada, Kozaburo Takenaka, B.C. Wolverton: "Comparison of Air-purification Characteristics for Potted Golden Hahnii and Warneckii", ENVIRONMENTAL HEALTH RISK 2003 (Sep. 17-19, 2003, Catania, Italy)
5. Ayako Sawada, Taketoshi Yoshida, Hiroyuki Kuroda, Takashi Oyabu, Kozaburo Takenaka: "Proposition and Verification of Evaluation Method for Plant Air-purification Capability", 33rd International Conference on Computers & Industrial Engineering, F4.7-CIE529 (Mar. 25-27, 2004, Jeju, Korea)

[口頭発表 (国内)]

1. 沢田,竹中,大藪,中本,勝部: “土壌種と室温の大気中ホルムアルデヒド除去能力への影響”, 信学技報・有機エレクトロニクス研究会, OME2001-50, pp.31-36 (2001.8)
2. 沢田,吉田,大藪: “多変量解析による室内環境における植物の浄化能力について”, 日本設備管理学会第2回知能技術応用研究会 (2001.10)
3. 黒田,沢田,岡野,小林,菅田,大藪: “観葉植物鉢の土壌種によるホルムアルデヒド除去効果”, 電気関係学会北陸支部連合大会, H-4, p.491 (2001.10)
4. 大藪,沢田,竹中,B.C.Wolverton,B.Bensley: “労働環境における空気質向上を目的とした植物鉢の効果”, 日本設備管理学会秋期研究発表大会, pp.3-29 - 32 (2001.11)
5. 沢田,吉田,大藪: “医療機関における植物の空気汚染物除去効果”, 日本フレンジイ学会北信越支部研究会 (2001.12)
6. 沢田,吉田,大藪: “医療機関における植物導入による空気汚染浄化効果”, 日本経営工学会北陸支部若手交流会, pp.13-17 (2002.3)

7. 沢田,吉田,大藪,竹中,B.C.Wolverton: “医療機関における植物の室内空気汚染物の浄化効果”, 電気学会全国大会, No.3-142, p.180 (2002.3)
8. 沢田,吉田,大藪,竹中,B.C.Wolverton,B.Bensley: “植物の香り発生と除去機能を考慮した効果的な配置”, 日本設備管理学会春期研究発表大会, pp.D17-22 (2002.6)
9. 沢田,吉田,大藪,床島: “ゴールドデンハニーとワーネッキーの空気汚染浄化能力”, 電気学会センサ・マイクロマシン準部門総合研究会, CHS-02-32, pp.73-78 (2002.11)
10. 沢田,黒田,大藪,満岡,竹中,吉田: “実オフィス環境における植物のホルムアルデヒド浄化効果”, 信学技法・ME とバイオサイバネティクス研究会, MBE-03-23, pp.41-44 (2003.1)
11. 沢田,大藪,吉田,永井: “活性炭鉢に生育する観葉植物のホルムアルデヒド浄化能力”, 日本設備管理学会春期研究発表大会, pp.B15-20 (2003.6)
12. 黒田,大藪,沢田,吉田: “労働空間における活性炭の空気汚染物吸収効果”, 日本設備管理学会秋季研究発表大会, B1-2-2, pp.157-162 (2003.11)
13. 沢田,吉田,黒田,大藪: “植物の空気汚染物浄化能力評価法の提案と検証”, 電気学会センサ・マイクロマシン準部門総合研究会, CHS-03-67, pp.51-54 (2003.11)
14. 沢田,大藪: “植物の力を利用した室内汚染リスクの軽減と化学センサによるモニタリング”, 電気学会全国大会シンポジウム, No.3-S21-1, pp.3-S21(1)-(4) (2004.3) (招待講演)
15. 沢田: “植物の力を利用した室内汚染リスクの軽減と化学センサによるモニタリング”, 電気学会・21世紀におけるセキュリティとセンシングシステム調査専門委員会 (2004.4) (招待講演)
16. 沢田,黒田,吉田,大藪,竹中: “ポトスとスパティフィラムの室内空気汚染物

除去効果とその実環境への応用”, 電気学会センサ・マイクロマシン準部門  
総合研究会, CHS-04-13, pp.57-62 (2004.5)

## 本研究に関連しない発表論文

### [査読付き論文]

- 1.大藪, 沢田, 南戸: “ニオイセンサアレイによる人間の基本的室内活動の同定”,  
電気学会論文誌 E, Vol.121-E, No.1, pp.20-25 (2001)
2. Ayako Sawada, Takashi Oyabu, Hidehito Nanto: "Identification of Meal-Degree for  
Aged Living in Solitude using Odor Sensors", Trans. of IEE Japan, Vol.121-E,  
No.8, pp.434-439 (2001)
3. Takashi Oyabu, Ayako Sawada, Hidehito Nanto: "Diffusion Characteristics of  
Chemicals Causing Sick-Building Syndrome", Sensors and Materials, Vol.13, No.2,  
pp.87-97 (2001)
4. 沢田, 大藪, 南戸: “ニオイセンサのマハラノビスの距離による人間のふるまい  
判別”, ライフサポート学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.20-25 (2001)

### [国際会議]

1. Ayako SAWADA, Takashi OYABU, Hidehito NANTO, Takeshi ONODERA,  
Teruaki KATUBE: "Identification of Meal-Degree of a Solitude Aged using Odor  
Sensors", Asian Fuzzy Systems Symposium, No.0W2D-2, pp.68-73 (May 31-June  
3, 2000, Tsukuba, Japan)