

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：23803

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04257

研究課題名(和文)植物の新たな大気浄化能の網羅的解析と有機ガス吸収モデルの開発

研究課題名(英文) Plant ability to purify atmosphere and development of organic gas absorption model

研究代表者

谷 晃 (Tani, Akira)

静岡県立大学・食品栄養科学部・教授

研究者番号：50240958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：植物が複数グループの含酸素有機ガスを継続的に吸収することを、雰囲気濃度の曝露実験にて明らかにした。吸収速度は、気孔開度に比例しており、暗期の吸収がほとんど見られないことから、気孔を介して吸収していると判断できた。これをモデルで説明するために吸収モデルをFickの第一法則に則り、開発した。このモデルには、葉内の様々な場所でのパラメータが必要であり、それを葉断面の顕微鏡写真を用いて求めた。細胞壁抵抗、細胞膜抵抗、細胞基質抵抗、葉緑体における代謝抵抗などを計算し、物質種や植物種による、吸収に及ぼす各抵抗の相対的寄与度を明らかにできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

植物が有機ガスを吸収することは、いくつかの物質で報告があるが、ほとんどの実験がppmレベルの大気濃度と比べはるかに高い濃度で実験が行われてきた。このような高濃度の実験は、実験上不確実性が増えるため、科学的エビデンスとしては信頼性が低い。本研究は、曝露装置に工夫を凝らすことで、大気濃度のppbレベルの有機ガスを用いて曝露実験を実施した。これによって、新たに複数種の有機ガスが継続的に植物に吸収されることを明らかにできた。一般社会で都市の植物や室内の観葉植物の、様々なガス種の大気浄化能力を定量化でき、社会における植物の新たな価値を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We have revealed that plants can absorb several groups of organic gases by fumigation experiments at realistically low concentrations. The absorption rates are correlated with stomatal conductance and approximately zero in the dark period, suggesting that the gases are absorbed through stomata.

We applied Fick's first law of diffusion to a VOC absorption model for plant leaves to evaluate the relative contribution to VOC absorption by individual sites of air spaces and in cells of leaves. Leaf morphology parameters were obtained from leaf cross-section micrographs. This model accounts for the VOC diffusion process via stomata, air-liquid partitioning, partitioning into the plasma membrane, and metabolic conversion of the VOC in plant cells. Our VOC absorption model can determine the relative importance of resistances at individual sites in the absorption pathway both for different VOCs and plant species.

研究分野：農業気象学

キーワード：有機ガス 曝露実験 気孔開度 大気濃度

1. 研究開始当初の背景

大気中の揮発性有機化合物(VOC)は光化学オキシダントである対流圏オゾンの生成に関わっており、大気汚染の原因となる。また一部のVOCは人間の健康に有害であり、環境基準が設けられている。近年の研究では植物がVOCを吸収することが明らかとなっており、街路樹などの植物による大気浄化が期待されている。これまで単独曝露におけるアルデヒドやケトンなど含酸素VOCの吸収能力について報告されてきたが、多様なVOCが存在する実大気を曝露させた場合の吸収能力は報告されていなかった。研究代表者の研究室では、植物の吸収能力を総合的に評価するため、様々なVOCの植物吸収能力について研究を進めており、データベースの構築に取り組んでいる。

2. 研究の目的

本研究では、植物の吸収能力をモデルにより推定するため、光合成に用いられる拡散抵抗理論を植物によるVOC吸収に適用しVOC吸収モデルを開発する。スパティフィラムや樹木3種の葉断面および葉肉細胞の顕微鏡画像を撮影し、モデル開発に必要な細胞内パラメータを測定した。また、パラメータの測定値と他植物種の文献値との比較や、それらの差異が抵抗値に及ぼす影響を考察した。

さらに、本研究では、実大気におけるシラカシのVOC吸収能を網羅的に解析した。

3. 研究の方法

植物のVOC吸収モデルの全体図を図1に示す。

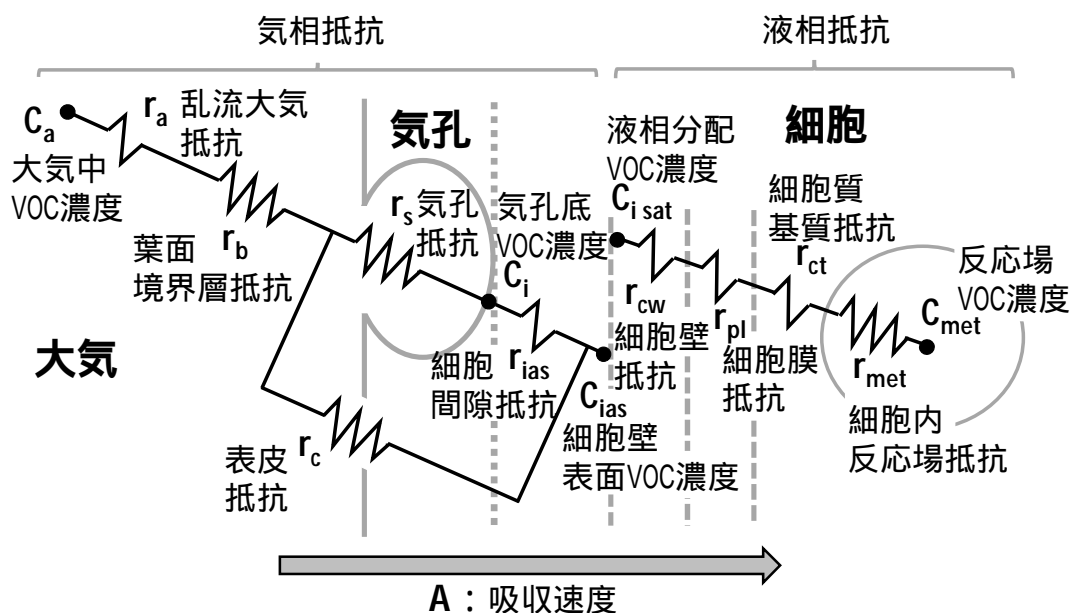


Fig. 1. The resistance diagram of plant VOC absorption pathway.

大気中のVOCは乱流大気から葉面境界層を通過して気孔に入り、葉内の細胞間隙に拡散する。乱流大気の抵抗は小さいため無視できる。表皮抵抗は気孔抵抗及び細胞間隙抵抗と並列に存在するが、夜間など気孔が閉じている場合にVOCの吸収が見られないため、表皮抵抗は極めて大きいと判断し無視できる。[Tani and Hewitt, 2009]

VOCは細胞間隙から液相である細胞に分配され、細胞壁、細胞膜、細胞基質を通り最後に反応場で代謝される。本研究では反応場を葉緑体と仮定した。VOCの吸収速度は一定と考える。

VOCが細胞間隙を通り細胞壁表面まで拡散する時の抵抗 r_{ias} ($s\ m^{-1}$)は以下の式から求められる[Niinemets and Reichstein, 2003; Syvertsen et al., 1995; Terashima et al., 1995]。

$$r_{ias} = \frac{\Delta L_{ias}\tau}{D A f_{ias}}, \quad (1)$$

ここで、 f_{ias} は葉内の細胞間隙の割合 ($m^3\ m^{-3}$)、 ΔL_{ias} は細胞間隙の有効拡散経路長(m)を示す。 τ は拡散経路の屈曲度($m\ m^{-1}$)であり1.57と推定される[Syvertsen et al., 1995]。

細胞壁および細胞質基質の抵抗($s\ m^{-1}$)は以下の式から算出した[Niinemets and Reichstein, 2003]。

$$r_i = \frac{\Delta L_i}{R_f D_L p}, (2)$$

r_i は、細胞壁の抵抗 r_{cw} もしくは細胞質基質の抵抗 r_{ct} を示す。 R_f は細胞質基質の粘度と拡散経路長の屈曲度を補正する係数であり、細胞質では 0.294 とし[Weisiger, 1998]、細胞壁では 1 とした。 p は有効間隙率であり細胞壁で 0.3、細胞質基質で 1 とする[Evans et al., 1994]。 ΔL_i は拡散経路の長さ (m) で、 ΔL_{cw} は細胞壁における拡散経路長、 ΔL_{ct} は細胞質基質における拡散経路長である。 D_L は液相における VOC の拡散係数 ($m^2 s^{-1}$) である。

細胞壁、細胞膜、細胞質基質の抵抗を合わせたものを液相抵抗 r_{liq} とすると以下の式のように表される[Evans et al., 1994; Niinemets and Reichstein, 2003; Terashima et al., 2006]。

$$r_{liq} = \frac{A_T}{\theta \times A_{mes}} (r_{cw} + r_{pt} + r_{ct}), (3)$$

ここで、 A_T は葉面積 (m^2)、 A_{mes} は葉肉細胞の全表面積 (m^2) を示す。本研究では、葉緑体に隣接していない細胞壁では VOC の拡散が進まないものとして、細胞壁が葉緑体に隣接している割合 θ ($m^2 m^{-2}$) を式に加えた。 $A_T/\theta A_{mes}$ ($m^2 m^{-2}$) は葉緑体へ向かって拡散する実面積を補正しており、実際の計算ではそれぞれの抵抗に $A_T/\theta A_{mes}$ を掛けた。

ΔL_{ias} (m)、 ΔL_{cw} (m)、 ΔL_{ct} (m)、 A_{mes}/A_T ($m^2 m^{-2}$)、 θ ($m^2 m^{-2}$)、 f_{ias} ($m^3 m^{-3}$) の値は、顕微鏡で撮影されたスパティフィラム (*Spathiphyllum clevelandii*) の画像から測定した。顕微鏡の撮影は、化学固定法によりスパティフィラムの葉の試料を作成し、透過型電子顕微鏡 (JEM-1400Plus, JEOL Ltd., Tokyo, Japan) を用いて葉肉細胞を観察した。葉断面画像は光学顕微鏡から撮影した。用いた葉は 3 枚 (異なる個体から採取) で、各個体の葉ごとに葉断面は 2 枚、葉肉細胞は 10 枚程度の画像を測定した。

実大気曝露における VOC 吸収の測定では、常緑広葉樹のシラカシ (*Quercus myrsinaefolia*) を用いた。植物の枝葉を入れた透明フッ素樹脂袋 (サンプル袋) と空の袋 (ブランク袋) に外気を導入し、袋内の空気を加熱脱着チューブに捕集しガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS) を用いて分析した。また、DNPH 誘導体化カートリッジに捕集し高速液体クロマトグラフ (HPLC) を用いて一部のアルデヒド・ケトン類を分析した。

4. 研究成果

顕微鏡画像から測定したスパティフィラムの ΔL_{cw} 、 ΔL_{ct} 、 ΔL_{ias} 、 A_{mes}/A_T 、 f_{ias} 、 θ および A_{cw}/A_{ias} と、樹木など一部の文献値を表 1 に示す。

Table 1. ΔL_{cw} , ΔL_{ct} , ΔL_{ias} , A_{mes}/A_T , f_{ias} , θ and A_{cw}/A_{ias} of *S. clevelandii* obtained in the present study and the literature values reported for trees and herbaceous plant

Species	スパティフィラム	セイヨウヒイラギガシ	インゲンマメ	ヨーロッパアカマツ
L_{cw} (m)	3.70E-07 (1.120E-07)	5.00E-07	1.20E-07	1.10E-06
L_{ct} (m)	1.85E-07 (2.215E-07)	9.70E-08	2.10E-07	1.20E-07
L_{ias} (m)	6.38E-05 (5.625E-06)	1.22.E-04	5.12.E-05	4.74.E-04
A_{mes}/A_T ($m^2 m^{-2}$)	8.99 (1.454)	30.5	22	15.4
f_{ias} ($m^3 m^{-3}$)	0.328 (0.03918)	0.181	0.271	0.228
($m^2 m^{-2}$)	0.696 (0.09477)			
Reference	measured value	Niinemets and Reichstein, 2003		

The values in parentheses indicate the standard deviation.

スパティフィラムの測定値は、いずれの値も他植物種の文献値と同じオーダーであった。細胞間隙の拡散経路長 ΔL_{ias} は草本であるインゲンマメと値が近く、樹木である他植物種の文献値と比べて一桁ほど小さかった。これはスパティフィラムの葉が表 1 の樹木種よりも薄いためである。草本植物インゲンマメは薄い葉を持ち、したがって文献に報告された値は測定されたスパティフィラムの値と近かった。

細胞質基質の拡散経路長 ΔL_{ct} もインゲンマメと値が近かった。葉肉細胞の割合 A_{mes}/A_T は、ほとんどの文献値と比べ値が小さかった。これはスパティフィラムの葉が薄く葉面積あたりの空間が小さく、存在する葉肉細胞数が少ないためと考えられた。

スパティフィラムの VOC 吸収を測定した既往研究[Tani and Hewitt, 2009]の値と、本研究のスパティフィラムの細胞内パラメータの測定値を用いて算出した抵抗値を図 2 に示す。また、実大気を曝露させた常緑広葉樹シラカシ (*Quercus myrsinifolia*) の VOC 吸収を測定し求めた抵抗値を図 3 に示す。シラカシの本モデル計算では、同じブナ科コナラ属であるセイヨウヒイラギガシの文献値を用いた。

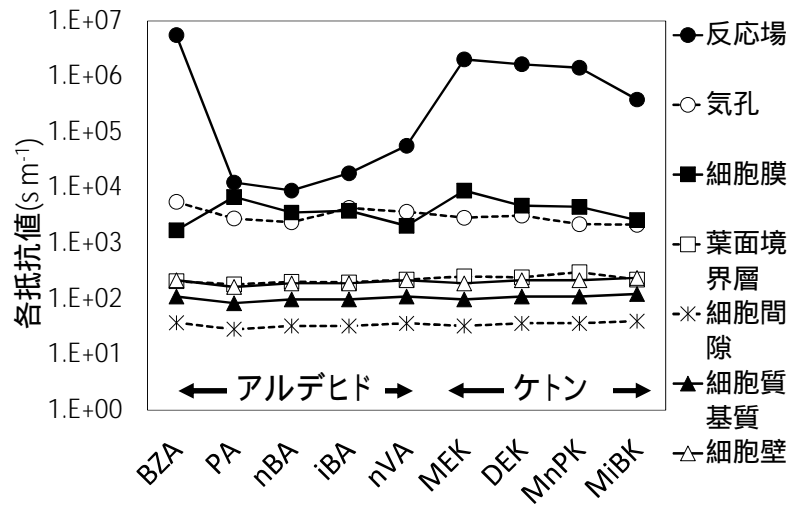


Fig. 2. Values of the resistances for VOC absorption by *S. clelandii*
 BZA はベンズアルデヒド、PA はプロピオンアルデヒド、nBA は n-ブチルアルデヒド、iBA はイソブチルアルデヒド、nVA は n-バレリルアルデヒド、MEK はメチルエチルケトン、DEK はジエチルケトン、MnPK はメチル n-プロピルケトン、MiBK はメチル iso-ブチルケトン。

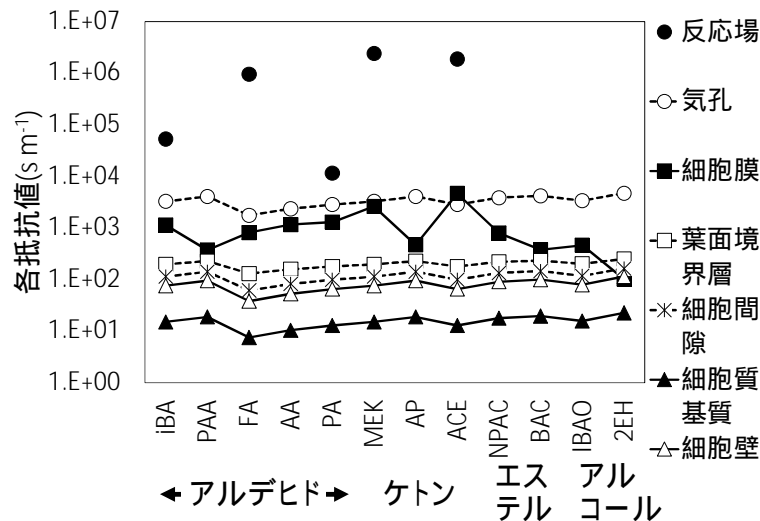


Fig. 3. Values of the resistances for VOC absorption by *Q. myrsinifolia*
 iBA はイソブチルアルデヒド、PAA はフェニルアセトアルデヒド、FA はホルムアルデヒド、AA はアセトアルデヒド、PA はプロピオンアルデヒド、MEK はメチルエチルケトン、AP はアセトフェノン、ACE はアセトン、NPAC は酢酸 n-プロピル、BAC は酢酸 n-ブチル、IBAO はイソブチルアルコール、2EH は 2-エチル-1-ヘキサノール。

スパティフィラムは他植物種と比べ細胞間隙抵抗 r_{ias} に係るパラメータである ΔL_{ias} が小さいため、スパティフィラムの r_{ias} (図 2) はシラカシの r_{ias} (図 3) より 1/10 近く小さくなった。また、液相抵抗に係るパラメータである A_{mes}/A_T がスパティフィラムは小さいため、液相抵抗の細胞壁抵抗 r_{cw} 、細胞膜抵抗 r_{pl} 、および細胞質基質抵抗 r_{ct} はシラカシより 2.5~6 倍大きくなった。しかし、スパティフィラムおよびシラカシの両方で反応場抵抗 r_{met} が最も大きく、今回測定したパラメータの r_{met} への影響もほとんど見られないため、葉内部において VOC 吸収を制御する主要因は、細胞の形態でなく、反応場での代謝であると結論付けることができる。気孔開度に加えて代謝能力が、植物間、物質間で VOC 吸収速度に違いをもたらす主要因であると考えられた。実大気曝露実験では、アルデヒド、ケトン、アルコール、エステルは吸収される物質が多く標準化吸収速度も比較的高かった。ハロゲン化炭化水素は半分以上の物質が吸収されず、標準化吸収速度も比較的低かった。脂肪族炭化水素は多くの物質が吸収されず、吸収されると判断された場合も標準化吸収速度は他の物質群より低かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tani A, Koike M, Mochizuki T, Yamane M	4. 巻 236:
2. 論文標題 Leaf uptake of atmospheric monocyclic aromatic hydrocarbons depends on plant species and compounds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ecotoxicol Environ Saf	6. 最初と最後の頁 113433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ecoenv.2022.113433	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Chang T-W, Okamoto H, Tani A	4. 巻 13(5)
2. 論文標題 Rapid Sampling Rapid Sampling Protocol of Isoprene Emission Rate of Palm (Arecaceae) Species Using Excised Leaves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Atmosphere	6. 最初と最後の頁 778
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/atmos13050778	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tani A, Mochizuki T,	4. 巻 77
2. 論文標題 Review: Exchanges of volatile organic compounds between terrestrial ecosystems and the atmosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 66-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2480/agrmet.D-20-00025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 谷 晃、増井 昇	4. 巻 85
2. 論文標題 森の空気を科学する	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aroma Research	6. 最初と最後の頁 14-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山根水月、谷晃
2. 発表標題 植物によるVOC吸収モデルの開発と実大気におけるVOC吸収の解析
3. 学会等名 令和2年度陸域生態系モニタリング研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根水月、谷晃
2. 発表標題 植物のVOC吸収モデルにおける顕微鏡画像を用いた細胞内パラメータの決定
3. 学会等名 2021生態工学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根水月、谷晃
2. 発表標題 植物によるVOC吸収モデルの開発
3. 学会等名 第62回大気環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷 晃
2. 発表標題 植物による反応性有機ガスの放出と環境との相互作用
3. 学会等名 日本学術会議公開シンポジウム「環境変動にともなう生態系の応答を測る」、（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷 晃
2. 発表標題 植物由来揮発性有機化合物のリアルタイム定性・定量分析
3. 学会等名 質量分析総合討論会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷 晃
2. 発表標題 Bidirectional exchange of Biogenic VOCs between terrestrial ecosystems and atmosphere
3. 学会等名 iLEAPS / IGAC-Japan 合同研究集会2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tani A
2. 発表標題 Volatile organic compound exchange between terrestrial ecosystems and atmosphere
3. 学会等名 Asiaflux 2019 workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koike M., Mochizuki T., Tani A.: .
2. 発表標題 Leaf uptake of monocyclic aromatic hydrocarbons by plants
3. 学会等名 Asiaflux 2019 workshop（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	高橋 善幸 (Takahashi Yoshiyuki) (40280713)	国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・室長 (82101)	
研究 分担者	望月 智貴 (Mochizuki Tomoki) (50781811)	静岡県立大学・食品栄養科学部・助教 (23803)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------