

VOC 排出削減効果等の検討業務 報告書

令和 7 年 3 月

一般社団法人産業環境管理協会

目次

1	調査の目的	1
2	調査の概要	1
2-1.	実施体制	1
2-2.	シミュレーションモデルと計算条件	2
2-3.	実施内容	5
(1)	シミュレーションにおけるBVOC排出量の設定に関する検討	5
(2)	VOC の排出削減効果の定量的評価に向けた検討等	6
(3)	VOC 削減に関する費用対効果についての検討	6
(4)	検討会の開催	6
(5)	報告書作成	9
3	調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討）	10
4	調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討①：イソプレンを放 出する樹種の BVOC の実測及び基礎放出量データベースの作成）	13
4-1.	本章における調査の目的	13
4-2.	植物材料と方法	14
(1)	コナラ(<i>Quercus serrata</i>)のイソプレン基礎放出速度の季節変化	14
(2)	モウソウチク(<i>Phyllostachys edulis</i>)のイソプレン基礎放出速度の季節変化	15
(3)	ミズナラ(<i>Quercus crispulas</i>)の夏季のイソプレン基礎放出速度	16
(4)	マダケ(<i>Phyllostachys bambusoides</i>)の夏季のイソプレン基礎放出速度	16
4-3.	テルペン類の採取方法	18
(1)	リーフキュベット(LC)法	18
4-4.	テルペン類の採取方法	20
4-5.	結果と考察	21
(1)	コナラのイソプレン基礎放出速度の季節性	21
(2)	モウソウチクのイソプレン基礎放出速度の季節性	21
(3)	ミズナラの夏季イソプレン基礎放出速度	22
(4)	マダケの夏季イソプレン基礎放出速度	22
4-6.	テルペン類基礎放出速度の季節性	23
4-7.	まとめ	26
5	調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討②：竹林の分布及び 放出されるイソプレンの量の精緻化）	27
5-1.	本章の目的	27
5-2.	衛星データ解析に基づく竹林面積分率の推定	27
(1)	解析に用いた衛星データ	27

(2) 解析方法	28
(3) 解析結果	28
5-3. Google Earth の画像データに基づく竹林面積分率推定結果の妥当性確認	28
(1) 公開されている 2 種のデータの精度比較	29
(2) 本衛星データ解析に基づく竹林ポリゴンと植生図に基づく竹林ポリゴンの比較検証	30
5-4. 現地調査に基づく竹林面積分率推定結果の妥当性確認	33
5-5. 以降の解析で使用する広範囲における竹林面積分率の推定方法検討	34
6 調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討③：イソプレン放出樹種の実測及び竹林のイソプレン放出量の精緻化を踏まえた BVOC 排出量に関する排出係数の精緻化）	36
6-1. 本章の目的	36
6-2. 植生・土地利用マップの検討	36
(1) 環境省・生物多様性センターの植生調査結果を 3 次メッシュデータに加工したデータの利用	36
(2) JAXA の高解像度土地利用土地被覆図の竹林面積分布への活用	39
(3) 衛星観測による植生分布の推定に関する JAXA ヒアリング結果	39
6-3. LAI に関する検討	41
(1) LAI に関する文献値の利用	41
(2) LAI に関する衛星観測値の利用可能性	45
6-4. 補正係数等の検討	46
6-5. BVOC 設定に関する参考知見	47
(1) 谷らによる総説論文	47
(2) イソプレン高放出種のみを設定した ADMER-PRO での参考シミュレーション結果	47
6-6. BVOC 設定に関するその他の検討	49
(1) 針葉樹(スギ、ヒノキ)の葉重量から葉面積への変換	49
(2) 自然混合林の樹種割合の検討	50
(3) BVOC の放出パターンと温度・日射依存性	51
(4) カエデ類の BVOC 放出の設定	52
(5) 放出が不明の樹種に関する基礎放出量の設定値の割り当て	53
(6) タケ類、ササ類の設定	53
(7) スギ、コナラ等のフラックス測定に関する知見の参照	54
(8) 無放出種の設定	56
6-7. BVOC 設定の更新データセットの完成	56

(1)	基礎放出量テーブル	57
(2)	基礎放出量－植生割り当て表	60
6-8.	BVOC 更新設定におけるマッピングとシミュレーション結果	60
(1)	基礎放出量分布	61
(2)	トップダウン推計との合致性	63
(3)	実測値との整合性(その 1:AQUAS-Tsukuba (2017 年 8 月))	65
(4)	実測値との整合性(その 2:AQUAS-Kyoto (2018 年 8 月))	66
(5)	各地域の広域的なオゾン濃度分布との比較	67
(6)	精緻化各版の比較検討	69
6-9.	まとめ	72
7	調査結果 (VOC の排出削減効果の定量的評価に向けた検討等) (産総研)	73
7-1.	本章における解析の背景と目的	73
7-2.	オゾン存在量低減効率の再計算	73
7-3.	VOC の排出削減効果の簡易な定量評価手法の検討	75
8	調査結果 (VOC 削減に関する費用対効果についての検討)	77
8-1.	本章における調査の目的	77
8-2.	調査方法	77
8-3.	調査結果	78
9	調査結果のまとめと今後の課題	80
9-1.	令和 6 年度の調査結果のまとめ	80
(1)	シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討	80
(2)	VOC の排出削減効果の定量的評価に向けた検討等	80
(3)	VOC 削減に関する費用対効果についての検討	81
9-2.	令和 4～6 年度の調査結果のまとめ	81
(1)	シミュレーションによる前駆物質 (VOC、NO _x) 削減によるオゾン低減効果の検討	81
(2)	主要樹種ごとの BVOC 基礎放出量データベースの構築	81
(3)	BVOC 排出量の設定改善に関する検討	81
(4)	考察と今後の課題	82

1 調査の目的

平成18年4月の大気汚染防止法(昭和43年法律第97号)改正により、光化学オキシダント(以下、「Ox」という。)の前駆物質の1つである揮発性有機化合物(以下、「VOC」という。)は、法規制と産業界の自主的取組の両輪(ベストミックス)による排出削減が行われることとなった。これにより、平成22年度におけるVOC排出量は、平成12年度比で3割程度削減という目標を超える4割以上の削減を達成した。その後は、平成22年度比で悪化しないよう自主的取組が継続され、平成22年度から10年が経過した令和2年度では、VOC排出量が平成22年度に比べて約3割(平成12年度比で約6割)削減されている。

また、法規制と産業界の自主的取組の両輪(ベストミックス)による取組は、VOCの排出削減以外にも、Ox注意報等の発令延べ日数の減少傾向や、新指標に基づく長期的な改善傾向が示唆されるなど、大気環境の改善に一定の効果をもたらしたと推測される。その一方で、我が国における大気環境中のOx濃度の環境基準達成状況は、極めて低い水準で推移しており、VOCの排出削減による効果が現れていない指標もある状況である。

こうした状況下において、今後の自主的取組については、科学的知見を踏まえて、前駆物質であるVOC及び窒素酸化物(以下、「NOx」という。)の排出とOx濃度の関係性をより明確に把握したうえで、対策を講じる事業者の負担に留意しつつ、効率的に進めていくことが必要である。

そのため、令和元年度から令和3年度に実施した「VOC排出削減効果の定量的評価に向けた検討等業務」及び令和4年度から令和5年度に実施した「VOC排出削減効果の検討等業務」(以下、令和元年度から令和5年度の調査については「過年度調査」、または単年度の調査については調査した年度を付して「令和〇年度調査」という。)において、シミュレーションを使用した前駆物質削減によるOx削減効果の定量的評価やその効果の地域性・季節性の把握、植物由来VOC(以下、「BVOC」という。)による影響について調査を実施し、その結果オゾン生成シミュレーションの改善やBVOC排出量の精緻化等について、さらに検討する必要があることがわかった。

上記を踏まえ、今年度は、BVOCの実測等を踏まえたシミュレーションにおける適正なBVOC排出量の設定に関する検討を実施するとともに、これを反映したシミュレーションを実施し、産業界によるVOCの排出削減効果の定量的評価に向けた検討等を行った。また、効率的な対策のためには、Oxの前駆物質であるVOCの排出削減対策に要した費用とVOCの排出削減量を踏まえた評価が重要となることから、Ox濃度を0.01ppm削減するために講じたVOC対策についての費用対効果の試算等を実施した。加えて、令和4年度及び令和5年度の成果も考慮し、本調査事業の総括を行った。

2 調査の概要

2-1. 実施体制

本調査は(一社)産業環境管理協会(人材育成・出版センター)が請け負い、指標の検討を行う上で必要なシミュレーション計算、及び費用対便益の検討については(国研)産業技術総合研究所安全科学研究部門環境暴露モデリンググループ 井上和也グループ長に研究委託して実施した。

また、植物由来VOC(BVOC)に関して、実際の植物からの放出量の実測と、文献調査を合わせて基礎放出量データベースを構築するため、静岡県公立大学法人静岡県立大学食品栄養科学部環境生命科学科植物環境研究室・谷 晃教授への研究委託を行った。

さらに、植物由来VOC(BVOC)に関する検討について、放出量測定とシミュレーションの両方の知見を持つ東京都環境科学研究所気候変動・環境エネルギー研究科大気環境研究チーム 國分優孝主任研究員に、産総研との共同研究の形でご参画いただいた。

事業実施体制を図 2-1 に示す。

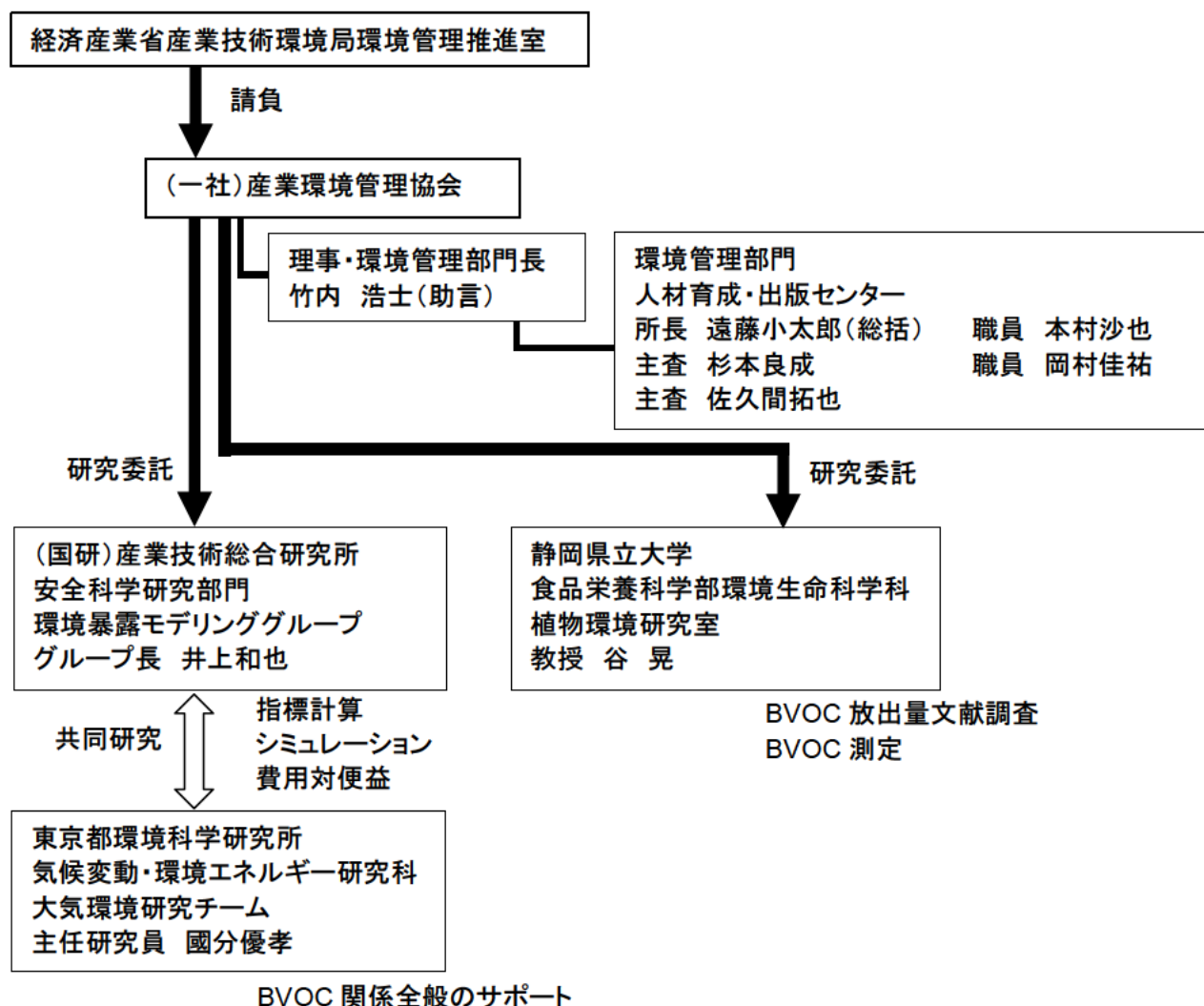
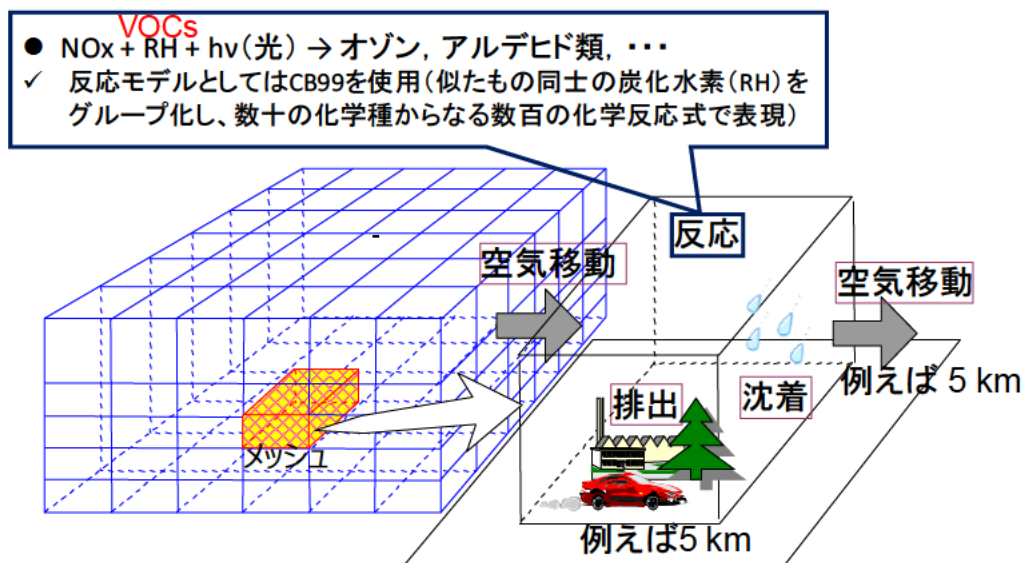


図 2-1 事業実施体制

2-2. シミュレーションモデルと計算条件

本事業のシミュレーションで用いる大気化学輸送モデルは、過年度の定量的評価調査と同様、産総研の ADMER-PRO である。ADMER-PRO には 3 次メッシュ(約 $1 \times 1 \text{ km}^2$) 単位の排出量データが内蔵されている。デフォルトで 2005 年度排出量を備えており、令和元年度調査で、2016 年度排出量詳細推計データを整備し、近年の状況に合わせた計算が可能となった。気象パターン類型化機能が備わっており、ある期間(例えば夏季)の代表日といった情報も提供される、など、シミュレーションを行うにあたって必要なデータや便利な機能が実装されている。



- 化学物質諸過程の計算に必要な気象場も同時に計算し、各メッシュの時々刻々の値を計算に反映
- 排出量等のデータを内蔵し、これ一つで排出削減効果を推定可能
- 気象パターン類型化機能(吉門ら, 2006a)が搭載されており、指定期間の典型気象パターンや各気象パターンの代表日を選出することが可能

図 2-2 シミュレーションに供するモデル (ADMER-PRO; 井上&東野, 2015)

本事業では、シミュレーションにより、VOC や NOx 等の前駆物質の単位量の削減によってオゾンがどの程度低減されたかを示す 2 つのオゾン低減効率指標を定義し、計算している。図 2-3 は、VOC を削減した場合のオゾン存在量低減効率（地表付近のオゾン濃度の低減効率）の計算手順である。大気汚染物質の排出量を与えて対策前のオゾン濃度を計算（ベースケースという）し、次に VOC や NOx を削減した条件で対策後のオゾン濃度を求め、オゾン濃度の差分を前駆物質の排出削減量で割れば指標が求まる。式 A でメッシュの面積の代わりにメッシュ内の人口に置き換えれば、オゾン集団暴露量低減効率（ヒト健康影響の低減効率）の計算式となる。また、VOC の代わりに NOx に置き換えれば、 NOx の削減によりオゾンがどのように低減されたかを示す指標となる。低減効率の指標値が負の値となった場合は、前駆物質の削減により、オゾン濃度が増加することを意味する。

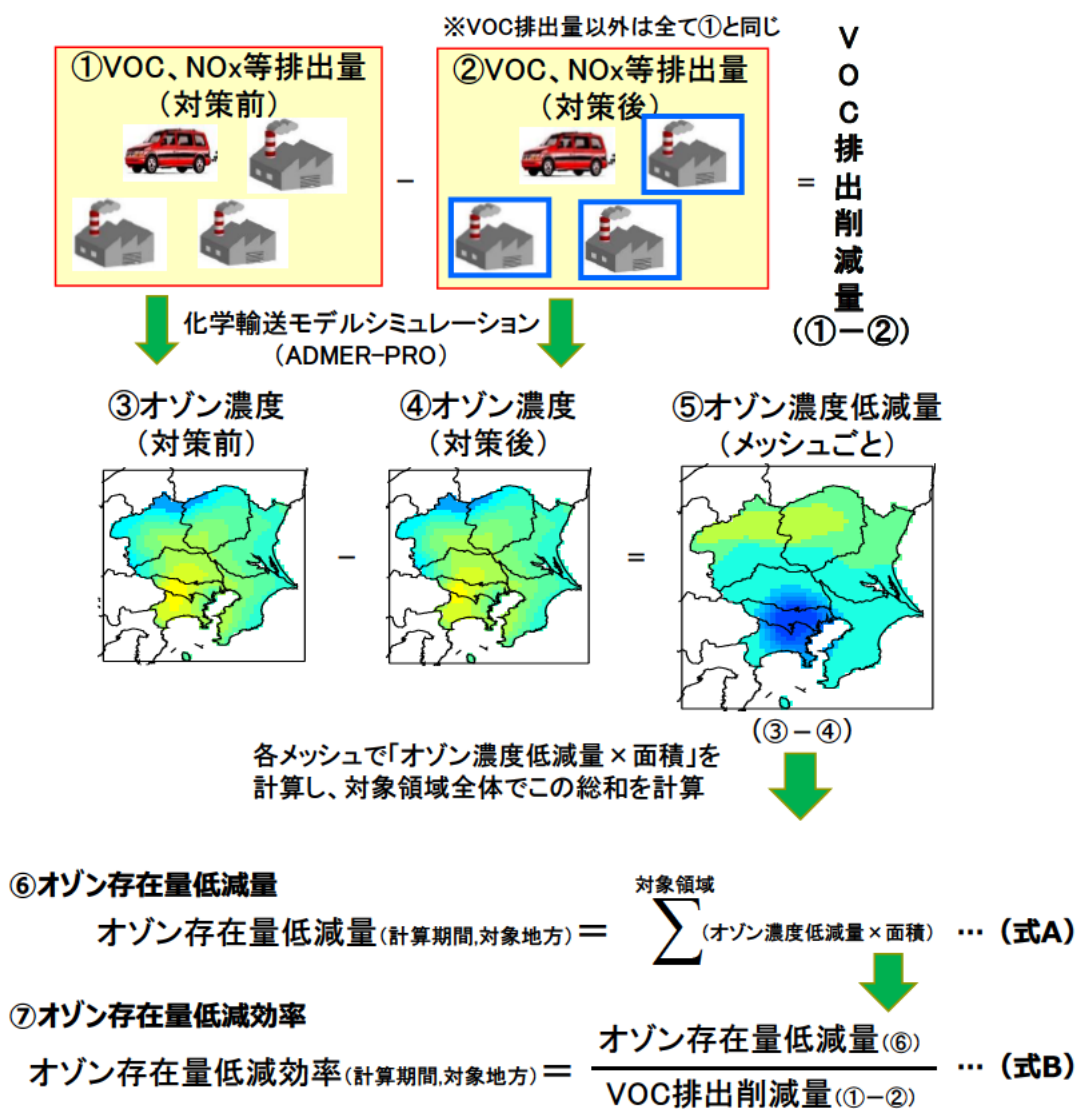


図 2-3 オゾン低減効率指標の算出手順

シミュレーションにおける計算条件を表 2-1 に示す。ここでは共通事項として示し、詳細は各項にて記述する。これらの条件は、基本的に過年度調査と同じである(※の項目は一部変更して計算)。

表 2-1 シミュレーションの計算条件(共通事項)

対象地方	関東、近畿
対象気象パターンとその代表日	春季、夏季の高濃度オゾン発生気象パターン (気象パターン類型化機能により決定)
オゾン濃度の平均化時間	昼間の 8 時間平均値(10～18 時)
気象の対象年度	2016 年度※
ベースケースの排出量データ	2016 年度詳細推計版※
植物起源 VOC 基礎放出量データ	ADMER-PRO 内蔵※

2-3. 実施内容

(1) シミュレーションにおけるBVOC排出量の設定に関する検討

BVOC は樹種によって放出量や成分が異なるが、本事業において使用する ADMER-PRO では、大きな植生区分(例えば、広葉樹、針葉樹等)ごとに BVOC の基礎放出量が割り当てられているため、BVOC 放出量が適正に見積もられていない可能性がある。

令和4年度調査において、今後より正確なシミュレーションを行うためには、BVOC 排出量をより精緻化する必要があることが指摘されているため、今年度は以下①～④の内容について検討を実施した。

① イソプレンを放出する樹種の BVOC の実測及び基礎放出量データベースの作成

令和4年度調査において、その後2年間程度での測定計画を策定し、令和5年度からイソプレンを放出する主要樹種の BVOC について、その排出量の実測を開始した。令和5年度調査では、BVOC の代表的な物質であるテルペン類のうち、モノテルペン類を放出する樹種について測定を実施した。

今年度調査では、テルペン類のうち、イソプレンを放出し、全国及び各地域（関東・近畿）別の優占樹種上位かつ論文等のデータが不足している樹種4種類（コナラ、ミズナラ、マダケ、モウソウチク）について、テルペン類基礎放出速度の夏季最大値の測定を実施した。

コナラ及びモウソウチクについては、テルペン類基礎放出速度の季節変化データの測定を実施した。

さらに、上記測定結果と、令和5年度事業で測定を実施したアラカシ、シラカシ等の測定データを合わせ、夏季の最大放出速度の平均値（測定値については標準偏差も）をとりまとめ、基礎放出量データベースとして整理した。季節変化の他樹種への適用性を検討した。

② 竹林の分布及び放出されるイソプレンの量の精緻化

令和5年度調査において、衛星観測によるホルムアルデヒド濃度（以下、「トップダウン推計」という。）とシミュレーションによるホルムアルデヒド濃度（以下、「ボトムアップ推計」という。）の比較を行ったところ、コナラ群落からのイソプレン放出量よりも竹林からのイソプレン放出量が多いことが示唆された。

また、令和5年度調査では、ボトムアップ推計の結果と実測のデータ（つくば集中観測（AQUAS-Tsukuba、2017年8月）データ）を比較したところ、現時点で把握している竹林からのイソプレン放出量を考慮したシミュレーションの方がより実態を反映していることが示唆された。

上記を踏まえ、今年度は生物多様性センターと JAXA のデータを参照しつつ、竹林の分布及びそこから放出されるイソプレンの量を精緻化した。具体的には、茨城県内を対象に衛星観測と実地調査を組み合わせた竹林の分布調査をしているスターフィールド（株）のデータを用い、JAXA データを補正する形で、全国の竹林面積分布を推定した。

③ イソプレン放出樹種の実測及び竹林のイソプレン放出量の精緻化を踏まえた BVOC 排出量に関する排出係数の精緻化

上記①、②及び令和5年度調査結果も統合したうえで、必要な場合には補正を行い、ADMER-PRO において設定する BVOC の排出係数の精緻化を行った。BVOC 設定を更新した状態で、次項の④、および以降に示す (2)、(3) 項のシミュレーションを実施した。

④ シミュレーション結果と実測値の整合性の確認

イソプレンから生成するホルムアルデヒド (HCHO) の実測値を用いて、③において作成した BVOC の更新データを基にしたシミュレーション結果と実測値がどの程度整合するか確認を行った。なお、過年度調査ではつくばの集中観測データ (AQUAS-Tsukuba、2017 年) のみを考慮していたが、今年度は同様の京都の実測データ (AQUAS-Kyoto、2018 年 8 月) についても整合性を確認した。

また、ボトムアップ推計を、2カ所 (関東及び近畿) を対象に行い、その結果とイソプレンから生成されるホルムアルデヒド (HCHO) の実測値を比較し、整合性を確認した。なお、検討会での意見を踏まえ、つくば・京都の集中観測と、関東・近畿の広域について、オゾン濃度を計算値と比較した。

□さらに、ボトムアップ推計の結果と令和 5 年度調査において用いたトップダウン推計を比較し、整合性を確認した。

□上記 2 つの整合性の確認結果を踏まえ、シミュレーションにおける適正な BVOC 排出量の設定に関する検討を行った。具体的には、③により得られる BVOC の更新設定に関するデータを用いてシミュレーションを行い、整合性に乏しい場合は、③の更新設定をさらに検討し、一定の整合性が認められるまで更新設定の検討を繰り返した。

(2) VOC の排出削減効果の定量的評価に向けた検討等

VOC の排出削減効果の定量的評価を行うため、過年度調査においてオゾン濃度低減効率に影響するパラメータについて検討を実施し、令和 5 年度調査では、地域や季節、削減場所等によって影響されるものの、オゾン生成レジームに関連するパラメータの変動による影響が大きいとされ、近年の変動傾向を調査したところ、近畿では NOx 律速が強まる傾向が示された。

今年度は、(1) において精緻化した BVOC 排出量の結果を踏まえ、その排出量データベースを ADMER-PRO の設定に反映し、2005 年と 2016 年における関東及び近畿の大気環境を比較して、オゾン生成レジームの変化に関する評価を行うなど、人為起源 VOC の排出削減効果を定量的に評価するための方策について検討を行った。

(3) VOC 削減に関する費用対効果についての検討

今年度調査では、VOC 1 トンを削減するために必要となる費用 (VOC 対策費用) を国立研究開発法人産業技術総合研究所のオゾン詳細リスク評価書付録を参照して、23 万円/トンと仮置きし、VOC 対策を講じることで得られる効果を Ox 濃度として、これを 0.01ppm (=10ppb) 削減するための費用対効果に関する分析を実施した。このとき、VOC 対策が始まった初期のころである 2005 年時点と、VOC 対策が進んでいる 2016 年時点で比較した。なお、費用対効果の計算方法を記したファイルを作成し、成果物と共に経済産業省に納品した。

(4) 検討会の開催

上記 (1) ~ (3) の調査及び検討を行うにあたり、請負者が事務局となって検討会を設置した。検討会では、実施方法を明確化し、実際に各事業の検討を行うとともに、進捗管理、結果の取りまとめ方法について議論及び整理等を行った。

検討会は 3 回開催し、1 月までに検討会を終了した。検討会委員を表 2-2 に、検討会開催実績を表 2-3 に示す。開催方法としては、現地開催とオンラインの組み合わせによるハイブリッド方式での開催とした。

表 2-2 検討会委員

氏 名	所 属	役 職
◎梶井 克純	青島大学 環境科学工程学院	首席教授
金谷 有剛	(国研) 海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター	センター長
岸本 充生	大阪大学データビリティフロンティア機構	教授
嶋寺 光	大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻	准教授
田桐 澤根*	一般社団法人 日本塗料工業会	常務理事
茶谷 聡	(国研) 国立環境研究所 地域環境研究センター 大気環境モデリング研究室	主任研究員
森 二郎	一般社団法人 日本化学工業協会 VOC 検討 SWG	主査
三浦 安史	石油連盟	安全管理部長
深山 貴文	森林総合研究所 森林研究部門 森林防災研究領域 気象研究室	主任研究員
森川多津子	一般財団法人 日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部	主任研究員

◎は委員長、敬称略

*は令和6年度より新たに参画頂いた委員

表 2-3 検討会開催実績

回数	主目的	報告事項・検討内容	検討会後の対応
1回目 令和6年 9月2日 (月)	・令和6年度実施内容説明 ・BVOC実測・DB構築の検討① ・BVOC排出係数精緻化の検討① ・竹林の検討、シミュレーション結果の検討①	・本年度事業内容説明 ・検討結果 1) BVOCの実測及び基礎放出量データベースの作成(静岡県立大) 2) BVOC排出係数の精緻化に関する検討状況(事務局) 3) 産総研担当業務の進捗報告 ①竹林の分布及び放出されるイソプレン量の精緻化 ②イソプレン放出樹種の実測及び竹林のイソプレン放出量の精緻化を踏まえたBVOC排出量に関する排出係数の精緻化」の一部について ③シミュレーション結果と実測値の整合性の確認 ④その他の産総研担当業務の今年度計画	・イソプレン放出樹種の基礎放出量の季節変化測定(静岡県立大)(継続) ・BVOC設定の精緻化検討と更新データの作成(事務局、産総研) ・竹林の面積分布の調査(産総研)(継続) ・シミュレーション結果と実測値の整合性の確認(産総研)(継続)
2回目 令和6年 11月27日(水)	・BVOC実測・DB構築の検討② ・BVOC排出係数精緻化の検討② ・竹林の検討、シミュレーション結果の検討②	・検討結果 1) BVOCの実測及び基礎放出量データベースの作成(静岡県立大) 2) 植生分布、補正事項等に関する検討状況(事務局) 3) 産総研担当業務の進捗報告 上欄①～③と同じ	・イソプレン放出樹種の基礎放出量の季節変化測定(静岡県立大)(継続) ・BVOC設定の精緻化検討と更新データの作成(事務局、産総研) ・竹林の面積分布の調査(産総研)(継続) ・シミュレーション結果と実測値の整合性の確認(産総研)(継続) ・定量的評価、費用対効果の検討(産総研)
3回目 令和7年 1月23日 (木)	・BVOC実測・DB構築の検討③ ・BVOC排出係数精緻化の検討③ ・竹林の検討、シミュレーション結果の検討③	- 検討結果 1) BVOCの実測及び基礎放出量データベースの作成(静岡県立大) 2) BVOC排出係数の精緻化に関する検討結果(事務局) 3) 産総研担当業務の進捗報告 上欄①～③は同じ ④VOCの排出削減効果の定量的評価に向けた検討結果 ⑤VOC削減に関する費用対効果についての検討	・基礎放出量データベースの最終検証(静岡県立大) ・産環小委向け資料作成(事務局) ・報告書の作成(事務局) ・一部計算結果の補足(産総研)

(5) 報告書作成

過年度は、VOC 自主的取組の成果をレビューしている産業構造審議会産業技術環境分科会産業環境対策小委員会（令和 6 年 7 月より分科会名が「イノベーション・環境分科会」に名称変更。以下、「産環小委」という）において、本事業の成果の一部を取りまとめ報告を行ってきた（ただし、令和 5 年度は、委員向け資料として整理したが、産環小委（第 12 回）では発表していない）。産環小委第 13 回（令和 7 年 2 月 26 日）においては、本事業の令和 4～6 年度の成果の概要と課題等を取りまとめ、報告を行った。これが、本報告書の概要版に相当する。

この資料は本報告書巻末の添付資料に別添する。

3 調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討）

光化学オキシダント(主にオゾン)の生成には、前駆物質として、VOC などの炭化水素と、NO_x が関与していることが知られている。VOC は、人為発生源(工場等の固定発生源、自動車等の移動発生源)から排出される VOC (AVOC: Anthropogenic VOC)と、生物(主に植物)から発生する VOC (BVOC: Biogenic VOC)に大別される。

AVOC 排出量、BVOC 排出量に関しての我が国における推計値には表 3-1 のようなものがある。BVOC は VOC 総排出量のおよそ 7 割を占めるとされ、無視できない大きさを有しているが、BVOC に関する知見の不足もあり、BVOC 排出量の推計値には不確実性が大きい。

表 3-1 我が国における VOC 排出量の推計値

調査名、出典等	VOC 排出量推計値
環境省 VOC 排出インベントリ(2000(平成 12)年度)	AVOC:約 140 万t/年
環境省 VOC 排出インベントリ(2005(平成 17)年度)	AVOC:約 109 万t/年
環境省 VOC 排出インベントリ(2022(令和 4)年度)	AVOC:約 57 万t/年
PM2.5 排出インベントリ(24 年度)* ¹	VOC 総排出量:337 万 t/年 BVOC:235 万 t/年(69.7%)
PM2.5 排出インベントリ(27 年度)* ²	VOC 総排出量:307 万 t/年 BVOC:213 万 t/年(69.4%)
Chatani et al. (2015)* ³	238～284 万 t
ADMER-PRO での設定値(2011)	330 万t/年(全国)

*1 森川多津子, 2017. PM2.5 排出インベントリの最新状況と課題, 大気環境学会誌, Vol.52, A74-A78

*2 30 年度 PM2.5 インベントリ及び発生源プロファイル策定委託業務報告書、2019 年 3 月

*3 Satoru Chatani, 2015. Estimate of biogenic VOC emissions in Japan and their effects on photochemical formation of ambient ozone and secondary organic aerosol, Atmos. Environ., 120, pp.38-50

次に、ADMER-PRO の BVOC 排出量の設定について図 3-1、表 3-2 に示す。これらの設定やデータについて、過年度調査にて、BVOC の専門家へのヒアリングに基づき、以下のことが指摘されている。

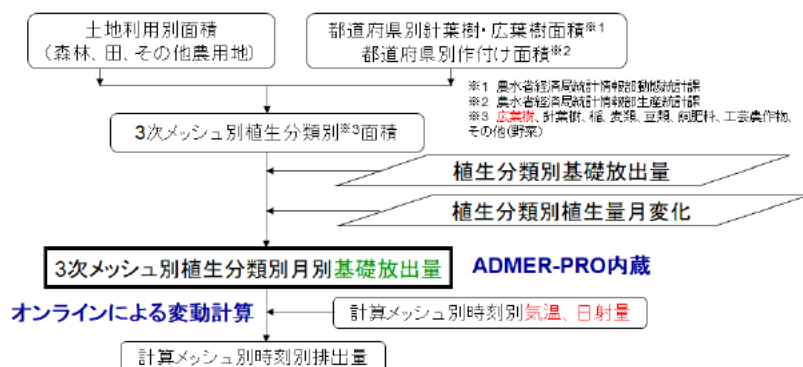


図 3-1 ADMER-PRO における BVOC 排出量算定フロー

(出典:中西ら、詳細リスク評価書シリーズ 24 オゾン、p.100、図IV.2 を編集)

表 3-2 ADMER-PRO における BVOC 排出係数

表Ⅳ.3 Kannariら(2007)において各植生分類に対して設定された標準状態の植生面積あたり排出係数 (落葉なしの状態)(神成と馬場 私信)と日本の植物種のデータ更新結果(太字)〔単位: $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ 〕				
植生分類	イソプレン	モノテルペン	その他の VOCs	NMVOC 計
広葉樹	2,112	360	872	3,353
	21,435	193	690	22,318
針葉樹	1,548	1,565	1,038	4,150
	0	3,886	1,234	5,120
稲	102	255	153	510
	0	567	2,410	2,977
麦類	12	12	10	34
豆類	22	0	0	22
飼肥料	47	118	71	235
工芸農作物	0	59	235	294
その他	56	141	84	281

注: 太字は日本の植物種データを用いた更新結果であることを示す。

日本の植物種データとしてグロースチャンパー法による **Bao et al. (2008)** のデータを使用

(出典: 中西ら、詳細リスク評価書シリーズ 24 オゾン、p.101、表Ⅳ.3)

■ 過年度調査における ADMER-PRO における BVOC 設定に関する主な指摘事項

- 1) 植生分類として、「広葉樹」「針葉樹」の2分類では粗すぎる(樹種による違いがある。無放出のブナでも広葉樹の BVOC 設定値を放出する設定になっている)。
- 2) ADMER-PRO の植生・土地利用面積当たり BVOC 排出係数の元になっている Bao et al. (2008) の論文の測定値は高めになっている(例えば、稲は殆ど BVOC を排出しない)。

BVOC 排出量に関しては、2011 年にリリースされた ADMER-PRO の開発時期には我が国での知見は殆ど無かった事情があるが、BVOC 排出量の設定が大きく変わると、VOC 総排出量が大きく変わり、よって NO_x/VOC の比が変わり、その結果オゾン生成レジームが変わる可能性がある。過年度調査において、試みとして、ADMER-PRO の BVOC 排出量設定を 0.5 倍、1.0 倍、2.0 倍と変えてシミュレーションを行ったところ、オゾン低減効率が大きく変化することが分かっている。

BVOC に関しては、未だなお知見の不足は否めないところであり、我が国の多様な植生に対応した測定値は依然不足している状況であるが、ADMER-PRO の BVOC 設定を改善すべく、検討を行った。

BVOC 設定改善のための検討項目を図 3-2 に示す。

まず、樹木の種類ごとの葉面積当たり基礎放出量が必要である。ADMER-PRO の内蔵設定では広葉樹、針葉樹の 2 種類しかないが、樹種により放出特性も放出量も異なるので、優占樹種 20 種程度について、文献調査と実測により基礎放出量(夏季の最大放出量の平均値)を整理した。さらに、季節によって、気温や日射量が変わるため BVOC 排出量は変化するが、基礎放出量自体も季節変化する(BVOC を生成する酵素活性が変わる)ことが知られており、この季節変動を把握するための測定を行った。これらは、静岡県立大学・谷教授に研究委託して行った。

次に、植生・土地利用マップの検討、葉面積指数(LAI: Leaf Area Index)、補正係数についての検討を行った。葉面積当たりの BVOC 排出量に加えて、計算メッシュ内での植生や土地利用の面積割合を設定する必要がある。また、植生面積当たりの葉の重なりを表す LAI についても検討した。

植生・土地利用面積当たりBVOC排出量＝

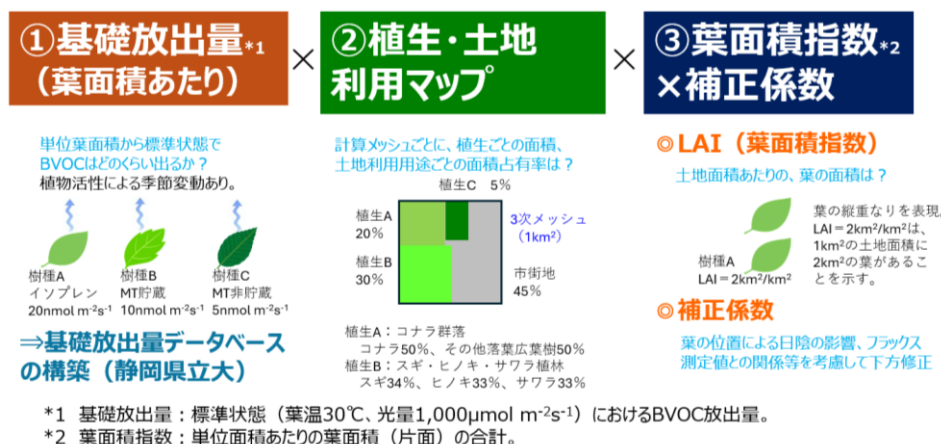


図 3-2 BVOC 設定の改善のための検討項目

例えば LAI=2km²/km² の場合、1km² の植生に対して、葉を重ねないように並べたとき、葉の面積が 2km² を占めることを示す。なお、LAI をそのまま乗じると、全ての葉を日当たりの良い陽葉と見なすことになり、BVOC 排出量を過大に見積もることになる。また、森林には人工林（植林）と自然林があり、後者の場合、多様な樹種が混合していることが一般的であり、例えばコナラの自然林では、コナラが優占していても、その割合はせいぜい 50%、ということも多い。これらを考慮して下方修正するための補正係数を設定した。

さらに、令和 5 年度調査により、BVOC 設定における竹林の重要性が示唆されている。竹類のうち、マダケやモウソウチクはイソプレンの基礎放出量が高く、近年増加傾向にあり、特に管理竹林でなく放置竹林が問題になっている。竹林は山裾地帯や河川敷の他、VOC 律速の条件になりやすい都市部や郊外部にもあり、繁殖力が強く、1つ1つの竹林規模は大きくないものの、空き地や放棄耕作地などにも繁茂する傾向がある。JAXA が衛星観測を利用した「高解像度土地利用土地被覆図」を公開しており、2021 年度にリリースされた ver.21.11 より、土地利用分類として竹林と太陽光パネルが追加されている。こうした成果も活用しつつ、竹林面積の精緻化を試みた。

本調査の仕様書「(1)シミュレーションにおけるBVOC排出量の設定に関する検討」の内容は多岐にわたり、分担して実施していることから、以下のように章を分けて結果を示す。

- ① イソプレンを放出する樹種のBVOCの実測及び基礎放出量データベースの作成（静岡県立大） 第 4 章
- ② 竹林の分布及び放出されるイソプレンの量の精緻化（産総研） 第 5 章
- ③ イソプレン放出樹種の実測及び竹林のイソプレン放出量の精緻化を踏まえたBVOC排出量に関する排出係数の精緻化（産環協、産総研） 第 6 章
- ④ シミュレーション結果と実測値の整合性の確認（産総研） 第 6-8 章
- ⑤ 過年度のシミュレーション結果の再計算と結果の比較検討（産総研） 第 7-1 章

4 調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討①：イソプレンを放出する樹種の BVOC の実測及び基礎放出量データベースの作成）

4-1. 本章における調査の目的

令和 4 年度に収集した文献データに基づき、データが不足していると思われる主要樹木について、テルペン類の基礎放出速度を令和 5 年度および令和 6 年度に実測により求める計画を立てた(表 4-1)。令和 5 年度は、放出速度が最大となる夏季に 6 位のブナ、13 位のスダジイ、14 位のクリ、17 位のアラカシ、52 位のシラカシを用いて測定した。また、ブナおよびクリは、モノテルペンを放出するという文献と放出しないという文献があるが、谷研究室の過去の測定ではモノテルペンを含むテルペン類の放出を認めなかった。再度の確認の意味で、放出速度が最大となる夏季に測定した。シラカシは樹種ランクでは 52 位であるが、街路樹や道路樹木、緑化樹として、都市や郊外で多く植栽されており、都市大気質の悪化に関与する可能性があることから、測定対象に用いた。また、テルペン類の基礎放出速度の季節変化データを収集し、年間の放出速度の予測に用いるため、スダジイとシラカシのモノテルペン放出速度を、年間を通して測定した。

令和 6 年度は、主としてイソプレン放出種を中心に測定した。放出速度が最大となる夏季に 3 位のコナラ、8 位のミズナラ、20 位のモウソウチク、24 位のマダケを用いて測定した。令和 5 年度に測定したアラカシについてはデータ数が十分でなかったため、令和 6 年夏季に追加測定を実施した。イソプレンの基礎放出速度の季節変化データを収集し、年間の放出速度の予測に用いるため、コナラとモウソウチクのイソプレン放出速度を、年間を通して測定した。

以上のデータを用いて、夏季の代表性のあるテルペン類放出速度の一覧表を作成した。

表 4-1 日本の主要樹種ランキングと令和 5 年度および令和 6 年度に行った測定対象樹種

樹種	優占順位	基礎放出速度	季節変化	測定計画	備考
スギ	1	●	●	-	-
ヒノキ	2	●	●	-	-
コナラ	3	●	△	R6	通年で季節変化を測定
トドマツ	4	×	×	-	*1
他 広葉樹	5	×	×	-	-
アカマツ	6	●	●	-	-
ブナ	7	●	-	R5	夏季に測定を実施(無放出樹種であることの検証)
ミズナラ	8	●	△	R6	夏季の放出ピークを測定
カラマツ	9	●	●	-	-
ダケカンバ	10	×	×	-	*1
カエデ類	11	●	×	-	イロハモミジの季節変化を適用
シナノキ	12	×	×	-	*1
スダジイ	13	●	×	R5	通年で季節変化を測定
クリ	14	●	×	R5	夏季の放出ピークを測定
ハンノキ類	15	△	×	-	*1
シデ類	16	●	●	-	-
アラカシ	17	●	×	R5	夏季の放出ピークを測定; 季節変化はシイ・カシ類の傾向を適用
ツブラジイ	18	×	×	-	スダジイの基礎放出速度・季節変化を適用
イタヤカエデ	19	●	×	-	イロハモミジの季節変化を適用
モウソウチク	20	△	△	R6	通年で季節変化を測定*2
以下、20位圏外					
マダケ	24	△	△	R6	初夏～盛夏の基礎放出速度のピークを測定*2
シラカシ	52	●	×	R5	通年で季節変化を測定
イネ	-	●	×	-	成長量に比例させて基礎放出速度を適用

●: データ有、△: データ不十分、×: データ無 R5: 令和5年度に実施予定、R6: 令和6年度に実施予定 — 測定計画なし又は未定

*1 高山帯や北海道など局所的に生育しており、O₃生成への影響度は小さいことから対象外

*2 ササ・タケ類に関して季節変化の放出データは報告されているものの、放出のピークが想定される初夏～盛夏のデータが不足

4-2. 植物材料と方法

(1) コナラ (*Quercus serrata*) のイソプレン基礎放出速度の季節変化

測定は、葉が展開する 2024 年 4 月から落葉する 2025 年 11 月まで毎月行った。各月の測定期間を表 4-2 に示す。当測定に使用した個体は、静岡県立大学芝生園地に隣接する緑地内（3 個体）および近隣のひょうたん塚公園（2 個体）に植えられている成木計 5 個体である（図 4-1）。測定する直前に、陽当たりの良い地上 4m 程度に位置する枝を先端から 30 cm ほど採取した。採取した直後、枝は水中で切り口から 3 cm 程度を再度切断し導管内の通水性を維持した。測定方法としてリーフキュベット（LC）法（4-3(1)を参照）を使用した。キュベット内における環境条件は PPFD $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 CO_2 濃度 400 ppm、葉温 30°C に設定した。但し、2024 年 11 月は外気温が大きく低下し葉温 30°C の設定が植物に対してストレスとなりうるため、葉温 25°C に設定した。



図 4-1 テルペン放出速度季節変化測定に用いたコナラ成木の様子
左および中央：芝生園地隣接の緑地、右：ひょうたん塚公園

表 4-2 コナラのイソプレン基礎放出速度の季節変化測定における各月の測定期間

	測定期間
2024 年 4 月	4/22-4/26
2024 年 5 月	5/14-5/17
2024 年 6 月	6/12-6/14
2024 年 7 月	7/17-7/19
2024 年 8 月	8/4-8/6
2024 年 9 月	9/6-9/9
2024 年 10 月	10/7-10/10
2024 年 11 月	11/5-11/7

(2) モウソウチク (*Phyllostachys edulis*) のイソプレン基礎放出速度の季節変化

測定は、2024 年 5 月～2025 年 2 月まで毎月行った。測定期間を表 4-3 に示す。当測定に使用した個体は、静岡県立美術館に隣接する竹林に自生している 5 個体である (図 4-2)。測定する直前に、陽当たりの良い地上 4m 程度に位置する枝を先端から 30 cm ほど採取した。採取した直後、枝は水中で切り口から 3 cm 程度を再度切断し導管内の通水性を維持した。実験室へ持ち帰った後、傷害のない葉を選定しコナラと同様に LC 法へ供試した。キュベット内における環境条件は PPFD

(Photosynthetic Photon Flux Density : 光合成有効光量子束密度) $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 CO_2 濃度 400 ppm、葉温 30°C に設定した。但し、2024 年 11 月以降は外気温が大きく低下し葉温 30°C の設定が植物に対してストレスとなりうるため、葉温 $20\text{-}25^\circ\text{C}$ に設定した。

また、樹木では枝切りによる純光合成速度やイソプレン放出速度へ影響がないことを過去の実験から確認しているものの、モウソウチクを含むタケ類においては不明であった。そこで、予備検討として 2024 年 7 月にキンメモウソウ (*Phyllostachys pubescens* f. *bicolor* : モウソウチクの亜種) の樹高 1m 苗を用いて、枝切前後の純光合成速度およびイソプレン放出速度の比較を行った。その結果、モウソウチクにおいても枝切前後のこれら値の変化は認められなかったため (図 4-3)、当測定におけるサンプル採取の手法は問題ないことが確認された。

表 4-3 モウソウチクのテルペン放出速度
季節変化測定における各月の測定期間

	測定期間
2024 年 5 月	5/28-5/31
2024 年 6 月	6/18-6/21
2024 年 7 月	7/29-7/31
2024 年 8 月	8/18-8/21
2024 年 9 月	9/17-9/19
2024 年 10 月	10/21-10/24
2024 年 11 月	11/25-11/27
2024 年 12 月	12/20-12/24
2025 年 1 月	1/21-1/23
2025 年 2 月	2/25-2/28



図 4-2 イソプレン基礎放出速度の季節変化測定に用いた
モウソウチク個体の様子

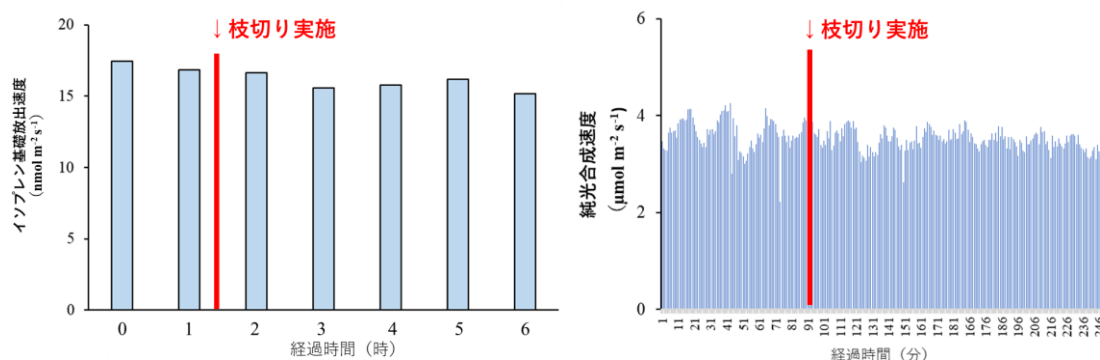


図 4-3 キンメモウソウ苗の枝切り前後におけるイソプレン放出速度（左）および純光合成速度（右）の変化

リーフキュベットを用いた PPFD $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、葉温 30°C 、 CO_2 濃度 400 ppm の条件下における測定結果。2024 年 7 月実施。

(3) ミズナラ (*Quercus crispulas*) の夏季のイソプレン基礎放出速度

ミズナラの枝を、2024 年 9 月 18 日および 19 日に採取した。採取地は山梨県富士山科学研究所（図 4-4：山梨県富士吉田市上吉田剣丸尾）の駐車場付近で、樹高 10 m 程度の成木 6 個体から、それぞれ陽当たりの良い枝 3 本を午前 7 時～9 時の間に採取した。採取した直後、枝は水中で切り口から 3 cm 程度を再度切断し導管内の通水性を維持した。その後、採取した枝を静岡県立大学実験室内へ持ち帰り、LC 法へ供試した。キュベット内における環境条件は PPFD $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、葉温 30°C 、 CO_2 濃度 400 ppm に設定した。

(4) マダケ (*Phyllostachys bambusoides*) の夏季のイソプレン基礎放出速度

測定は、2024 年 8 月から 10 月初旬にかけて実施した。サンプル採取場所は、静岡県立大学薬草園周辺、舞台芸術公園（静岡市日本平）および富士川河川敷（富士市宮下）とし、それぞれ 5 個体、5 個体および 6 個体を測定に用いた（図 4-5）。各個体の測定期間を表 4-4 に

示す。陽当たりの良い地上 $4 \sim 10 \text{ m}$ の高さに位置する枝を個体当たり 2 本採取した。但し、富士川の個体は個体あたり 1 本採取した。採取した直後、枝は水中で切り口から 3 cm 程度を再度切断し導管内の通水性を維持した。その後、採取した枝を実験室内に持ち帰り、LC 法へ供試した。キュベット内における環境条件は PPFD $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、葉温 30°C 、 CO_2 濃度 400 ppm に設定した。



図 4-4 山梨県富士山科学研究所駐車場周辺のミズナラ

表 4-4 マダケの夏季イソプレン基礎放出速度における各採取地個体の測定期間

採取地	測定期間
静岡県立大学	2024/8/22-8/26
	2024/9/20-9/21
	2024/10/3-10/4
静岡市日本平	2024/9/20-9/25
富士川河川敷	2024/10/3



図 4-5 テルペン放出速度の夏季測定に用いたマダケ個体の様子
左：静岡県立大学、中央：舞台芸術公園、右：富士川河川敷

4.3. テルペン類の採取方法

(1) リーフキュベット (LC) 法

純光合成速度、気孔コンダクタンス、細胞間隙の CO_2 濃度、葉温等の測定に携帯型光合成蒸散測定装置 (LI-6400、Li-COR 社)を用いた(図 4-6)。装置へ供給される空気は、以下の方法で VOC を分解除去したものである。外気をポンプ (APN-240NAN-1、イワキ)で吸引し、7~10℃に冷却した水にペットボトルを沈めた除湿装置に通すことで、水蒸気濃度を低下させた。この空気を、400℃に加熱した白金触媒(白金触媒 ST タイプ、島津製作所)に通し VOC を分解除去した。リーフキュベット出口に T-ジャンクションテフロンチューブを取り付けることで、VOC 捕集することを可能にした。



図 4-6 携帯型光合成蒸散測定装置 (LI-6400、Li-COR 社)

気体の捕集には、200 mg Tenax TA (GL Sciences)と 100 mg Carbotrap (Supelco Incorporation)を充填した採取管 (Stainless Steel ATD Sample Tubes、PerkinElmer)を用いた(図 4-7)。捕集前に採取管を 280℃で 10 分前処理することで、チューブ内の VOC を取り除いた。捕集後は分析するまでチューブを冷蔵庫で保管した。



図 4-7 採取管

リーフキュベット法での葉面積あたりの放出速度 $Flux_L$ ($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)は式 1 に従って算出した。

$$Flux_L = \frac{[C_{out}(1-w_{in}/1-w_{out})-C_{in}]\times F}{S_L} \dots (式 1)$$

ここで、 C_{out} はキュベット内のイソプレン濃度 ($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 w_{in} は流入空気の水蒸気濃度 (nmol m^{-2})、 w_{out} は流出空気の水蒸気濃度 ($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 C_{in} は流入空気のイソプレン濃度 ($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)を示す。 F はリーフ

キュベットへの通気量 ($= 500 \times 10^3 \text{ nmol s}^{-1}$)、 S_L はリーフキュベットに挟む部分の葉面積 ($= 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) を示す。

本測定での水蒸気濃度 w_{in} および w_{out} は 0.5～2% の範囲であり、 $(1 - w_{in})/(1 - w_{out})$ は 1 としてみなすことができる (式 2)。

$$\frac{1-w_{in}}{1-w_{out}} \approx 1 \quad \dots (\text{式 2})$$

また、 C_{in} 及び C_{out} は式 3 に従って算出した。

$$C_{in} = \frac{k \times S_{iso/T}}{N_{air}} \quad C_{out} = \frac{k \times S_{iso/T}}{N_{air}} \quad \dots (\text{式 3})$$

ここで、 k はイソプレン標準ガスを用いて作成した検量線の傾き (nmol) であり、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC-MS) で 1.53、ガスクロマトグラフ水素炎イオン化検出器 (GC-FID) で 6.92 であった。 C_{in} における $S_{iso/T}$ はブランクを測定した際のイソプレンと標準物質の Toluene-D8 とのピーク面積比、 C_{out} における $S_{iso/T}$ はサンプルを測定した際のイソプレンと標準物質の Toluene-D8 とのピーク面積比である。サンプルの S_{MT} が検出限界 (Limit of Detection, LOD) 以下の場合はゼロとみなした。LOD は、ブランクを測定した際の S_{MT} の標準偏差を 3 倍した値である。

N_{air} は式 4 に従って算出した。

$$N_{air} = \frac{V_{air}}{22.4} \times 10^9 \quad \dots (\text{式 4})$$

ここで、 V_{air} は採取管に通した全体の空気の体積 ($= 2 \text{ L}$)、 $22.4 (\text{L mol}^{-1})$ は標準状態 (温度 0°C 、気圧 1 atm) での理想気体の状態方程式で得た 1 mol あたりの気体体積を示す。

秋季および冬季のイソプレン放出速度測定では、リーフキュベット内の葉温を 20°C あるいは 25°C に設定した。以下に示す G93 モデルを用いて、葉温 $T (\text{K})$ 、PPFD $L (\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ における $Flux_L$ を E_s (葉温 $T_s = 30^\circ\text{C}$ (303 K)、PPFD = $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ における放出速度) に換算した (式 5)。

$$E_s = \frac{Flux_L}{C_L \cdot C_T} \quad \dots (\text{式 5})$$

C_L は以下の式で定義される (式 6)。

$$C_L = \frac{\alpha C_{L1} L}{\sqrt{1 + \alpha^2 L^2}} \quad \dots (\text{式 6})$$

ここで、 $\alpha (= 0.0027)$ と $C_{L1} (= 1.066)$ は経験的に得られる係数である。

C_T は以下の式で定義される (式 7)。

$$C_T = \frac{\exp \frac{C_{T1}(T-T_S)}{RT_S T}}{1 + \exp \frac{C_{T2}(T-T_M)}{RT_S T}} \quad \dots (\text{式 7})$$

ここで、 R は気体定数($= 8.31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)であり、 C_{T1} ($= 95000 \text{ J mol}^{-1}$)、 C_{T2} ($= 230000 \text{ J mol}^{-1}$)、 T_M ($= 314 \text{ K}$)は経験的に得られる係数である。

4-4. テルペン類の採取方法

2024 年 4 月～6 月には、加熱脱着装置(TurboMatrix 650ATD、パーキンエルマー)を装備したガスクロマトグラフ質量分析計(GCMS-QP2010 SE、島津製作所)を用いて分析・定量した(図 4-8)。採取管の吸着剤に吸着したガスサンプルは、加熱脱着装置を用いて 280°C で 10 分間加熱脱着し、 -20°C の低温に保たれたトラップチューブで再度トラップした(クライオフォーカス処理)。GC-MS では採取管のガスサンプルの脱着が終了後、トラップチューブを 280°C に急速に加熱し、 $60 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.1 \mu\text{m}$ のキャピラリーカラム(SH-I-5MS、島津製作所)にスプリット比 22:1 で注入し分析した。カラム温度は、 35°C でガスサンプルを注入後、 250°C まで 5°C min^{-1} で上昇させ、 250°C で 10 分間維持した。キャリアガスには G1 グレードのヘリウム(99.99995%)を使い、カラム流速は 1 ml min^{-1} とした。

2024 年 7 月以降は加熱脱着装置(TD-30R、島津製作所)を装備したガスクロマトグラフ水素炎イオン化検出器(GC-FID: Nexis GC-2030、島津製作所)を用いて分析・定量した(図 4-9)。採取管の吸着剤に吸着したガスサンプルは、加熱脱着装置を用いて 280°C で 10 分間加熱脱着し、 -20°C の低温に保たれたトラップチューブで再度トラップした。採取管のガスサンプルの脱着が終了後、トラップチューブを 280°C に急速に加熱し、 $60 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.1 \mu\text{m}$ のキャピラリーカラム(SH-Rxi-5ms、Restek)へスプリット比 20:1 でガスサンプルを注入し分析した。昇温プログラムは GC-MS に倣った。



図 4-8 熱脱着装置付きガスクロマトグラフ質量分析計(TurboMatrix 650ATD+ GCMS-QP2010 SE)



図 4-9 加熱脱着装置付きガスクロマトグラフ質量分析計(TD-30R+ Nexis GC-2030)

4-5. 結果と考察

(1) コナラのイソプレン基礎放出速度の季節性

コナラの通年の基礎放出速度および純光合成速度の変化を図 4-10 に示す。イソプレン基礎放出速度は展葉直後の 4 月から $17.6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の高い値が認められた。その後、純光合成速度の増加とともにイソプレン基礎放出速度も増加し、いずれも 7 月にピークを示した(イソプレン基礎放出速度: $44.6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、純光合成速度: $8.3 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。8 月以降はいずれも次第に低下したものの、落葉直前の 11 月でも高いイソプレン基礎放出速度($13.8 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を示した。このイソプレン基礎放出速度の季節性は、既存のテルペン類放出推定モデルである MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosol from Nature) と一致した。

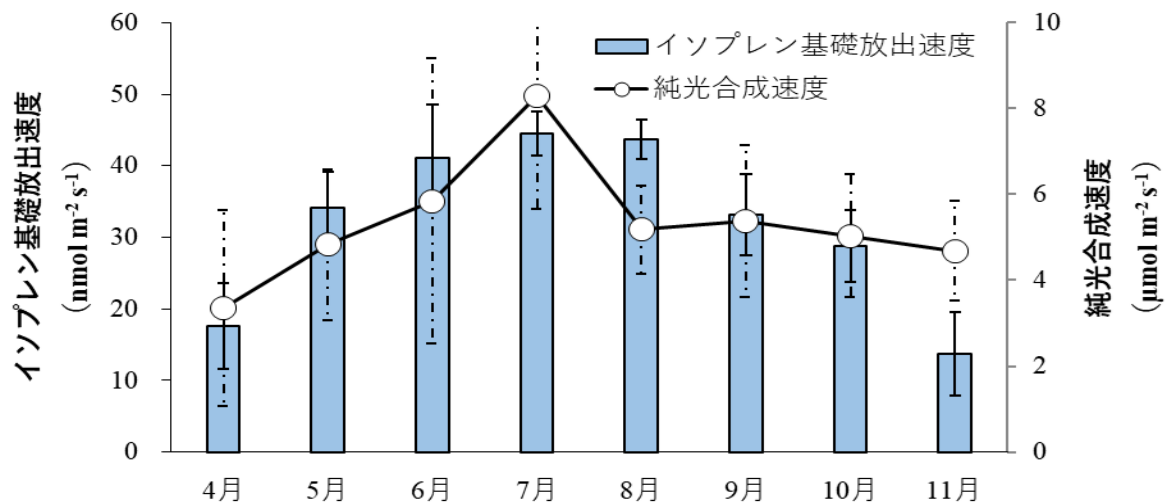


図 4-10 コナラ陽葉におけるイソプレン基礎放出速度および純光合成速度の季節変化
エラーバーは標準偏差を示す。

(2) モウソウチクのイソプレン基礎放出速度の季節性

モウソウチクの通年の基礎放出速度および純光合成速度の変化を図 4-11 に示す。5 月では $4.3 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のイソプレン基礎放出速度を示し、その後純光合成速度の増加とともにイソプレン基礎放出速度も増加した。コナラと同様、いずれも 7 月にピーク(イソプレン基礎放出速度: $27.5 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、純光合成速度: $6.8 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を示したものの、10 月までピーク同等の値を維持した。11 月以降、純光合成速度の低下とともにイソプレン基礎放出速度も次第に低下した。しかし、2025 年 2 月時点でも $7.6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の高いイソプレン基礎放出速度を示した。モウソウチクはコナラとは異なるイソプレン基礎放出速度の季節変化の傾向を示しており、既存の MEGAN では正確にイソプレン放出量を推定できないことが示唆された。したがって、タケ類に関しては独自のイソプレン放出推定モデルを構築する必要があると考えられた。

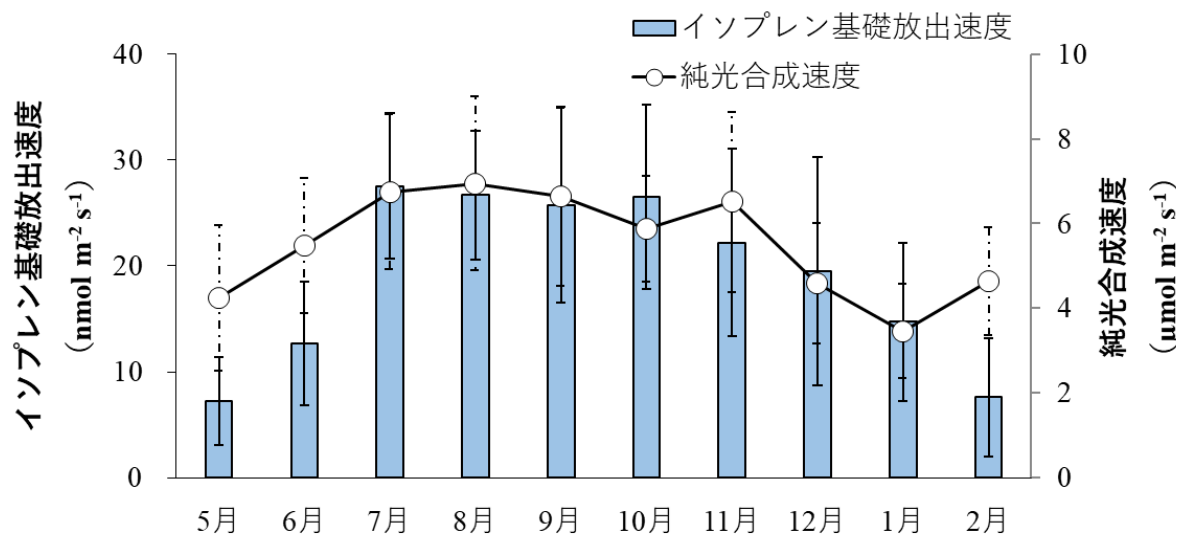


図 4-11 モウソウチク陽葉におけるイソプレン基礎放出速度および純光合成速度の季節変化

(3) ミズナラの夏季イソプレン基礎放出速度

ミズナラは、夏季の9月に $30.0 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のイソプレン基礎放出速度、 $6.4 \text{ μmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の純光合成速度を示した。コナラの9月の値 ($33.1 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) と比較すると、ほぼ同等のイソプレン基礎放出速度であった。但し、イソプレン放出は生育環境の過去の温度履歴に依存する。ミズナラの採取地は標高約 1000m の高地であることから、ミズナラの生育環境の気温は低地で採取したコナラよりも低い。一般的にミズナラの生育地はコナラよりも冷涼地にあるものの、同一の生育環境条件ではコナラ以上のイソプレン基礎放出速度を示す可能性がある。

(4) マダケの夏季イソプレン基礎放出速度

各採取地におけるイソプレン基礎放出速度および純光合成速度の結果を図 4-12 に示す。8月(静岡県立大学)には、 $65.4 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の高いイソプレン基礎放出速度を示し、同時期のモウソウチク及びコナラを大きく上回った。9月には同じく静岡県立大学の個体で $48.3 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、舞台芸術公園の個体で $38.3 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と8月の値よりやや低下したものの、いずれもモウソウチクより高くコナラと同等であった。10月初旬に富士川河川敷で採取した個体は $41.9 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、静岡県立大学の個体は $48.3 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のイソプレン基礎放出速度を示した。したがって、9月～10月初旬は地点間のイソプレン基礎放出速度に大きな差は認められなかった。なお、マダケの純光合成速度は $7.7\text{--}12.0 \text{ μmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、8-9月のモウソウチク ($6.3\text{--}6.9 \text{ μmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) よりもやや高かった。上記の夏季測定の結果から、マダケは日本において特に重要なイソプレン放出源であることが示唆された。

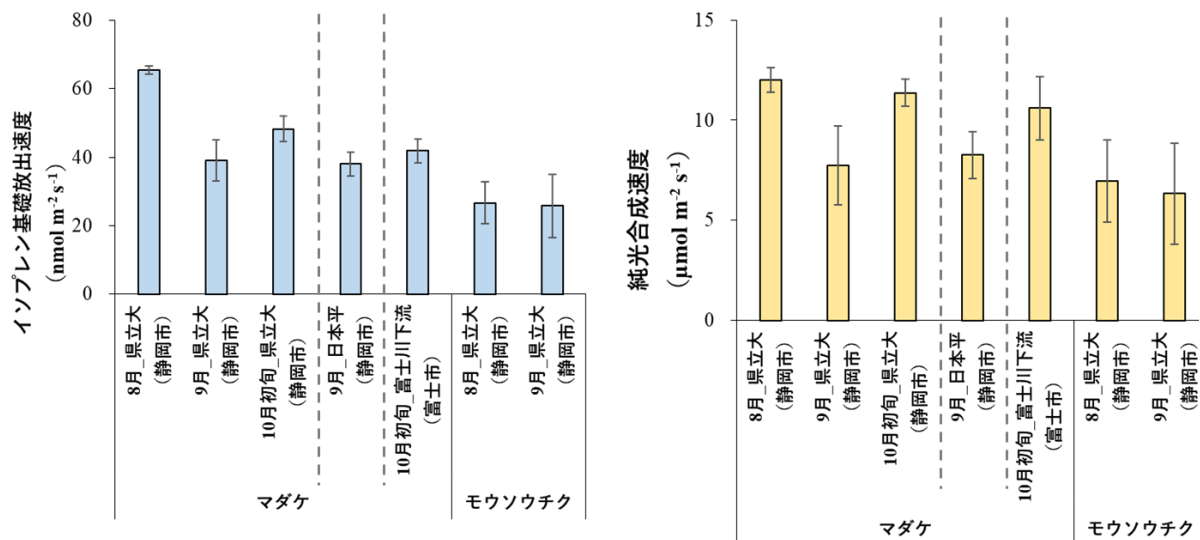


図 4-12 マダケ陽葉におけるイソプレン基礎放出速度(左)および純光合成速度(右)の測定地間の比較
各図の右端に、モウソウチクの結果(図 4-11)を併記する。エラーバーは標準偏差を示す。

4-6. テルペン類基礎放出速度の季節性

令和5年度および令和6年度の測定により、常緑広葉樹のスダジイとシラカシ(モノテルペン放出)、落葉広葉樹のコナラ、およびイネ科のモウソウチク(イソプレン放出)に関して基礎放出速度の季節変化データを取得できた。

スダジイおよびシラカシのモノテルペン基礎放出速度の季節性を図 4-13 に示す。スダジイ、シラカシはいずれも夏季に放出ピークを示したものの、春(展葉直後)や冬の基礎放出速度は無視できるほど小さかった。また、これら樹種間でモノテルペン基礎放出速度の値に差はあるものの、いずれも類似した季節性を示した。したがって、これら樹種の季節性は、同じく常緑広葉樹であるアラカシのモノテルペン放出にも適用可能であると考えられた。なお、MEGAN で広葉樹のテルペン類基礎放出速度を推定する場合には、落葉期を定め、その期間の推定値をゼロと設定する。しかし、スダジイとシラカシは常緑性であり、落葉期を定めないため、MEGAN による推定を試みた場合には春や冬季にもプラスの放出速度推定値を示す。そのため、MEGAN による推定では大きな誤差が生じることに注意が必要である。今後、貯蔵組織を持たない常緑広葉樹のモノテルペン放出に特化した、新たなテルペン類放出速度の推定モデルの構築を試みる。

コナラおよびモウソウチクのイソプレン基礎放出速度を図 4-14 に示す。また、ミズナラおよびマダケの夏季の基礎放出速度の値を用いて、それぞれコナラおよびモウソウチクの季節性を当てはめることで推定したイソプレン基礎放出速度の季節性も図 4-14 に示す。コナラのイソプレン基礎放出速度はスダジイやシラカシ同様に夏季にピークを示した。但し、展葉直後や落葉直前にも一定のイソプレン放出が認められた。これは、過去のミズナラにおけるイソプレン基礎放出速度の季節性と類似していた(Matsunaga et al. 2012)。また、放出ピークを示す夏季測定値も、過去のコナラ(20.5-42.9 nmol m⁻² s⁻¹)、ミズナラ(26.3-29.5 nmol m⁻² s⁻¹)の報告値と同等であった。(Tani et al. 2024)。以上の知見から、本実験で得たコナラのイソプレン基礎放出速度の季節性は、コナラ属を中心とした落葉広葉樹のイソプレン放出に適用可能であると考えられた。

一方で、モウソウチクはコナラとは全く異なるイソプレン基礎放出速度の季節性を示した。落葉期にイソプレン放出がゼロとなるコナラやミズナラと異なり、常緑性のイネ科に分類されるタケ類は冬季にも大きなイソプレン

放出源となることが示唆された。また、マダケはコナラに匹敵する夏季のイソプレン基礎放出速度を示した。モウソウチクのイソプレン基礎放出速度の季節性をマダケに適用した場合、マダケは夏季から冬季にかけて、単位土地面積当たりで評価した場合、最も大きなイソプレン放出源となり得る。MEGAN などの従来のテルペン類放出推定モデルではタケ類のイソプレン放出の季節性の推定が困難であることから、今後タケ類に特化した放出推定モデルの開発が必要である。

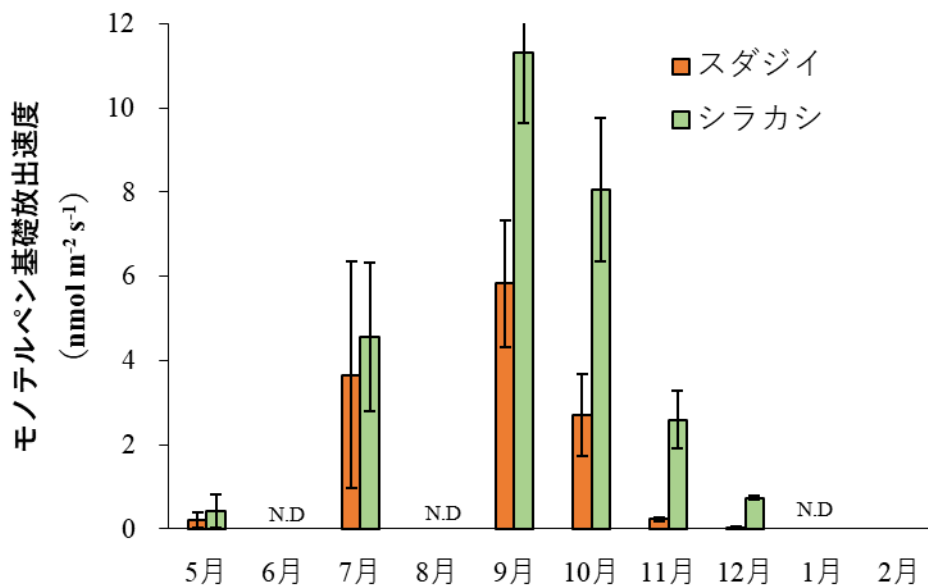


図 4-13 モノテルペン基礎放出速度の季節性比較

エラーバーは標準偏差を示す。N.D.:測定データなし

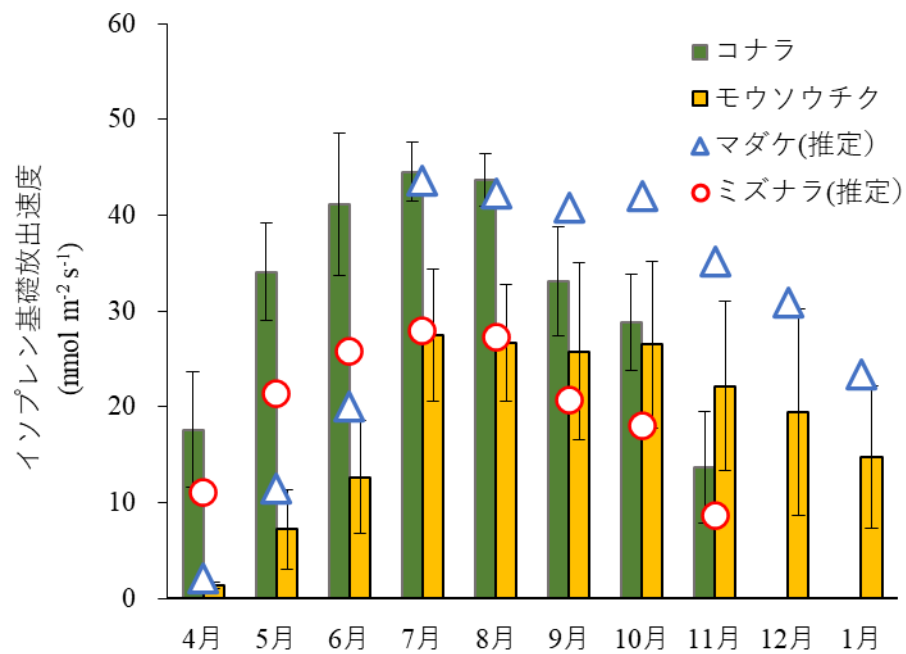


図 4-14 イソプレン基礎放出速度の季節性比較

エラーバーは標準偏差を示す。マダケおよびミズナラは、夏季のイソプレン基礎放出速度(表 4-5)を最大値として、それぞれモウソウチクおよびコナラの季節性を適用した場合の推定値を示す。

4-7. まとめ

令和5年度および6年度の測定、及び令和4年度から行っている文献調査によって、下記に示す主要樹種のテルペン類基礎放出速度の夏季の最大値を求めた。

表 4-5 テルペン類基礎放出速度の夏季の最大値(暫定値)

樹種ランキング	植物名	イソプレン	モノテルペン
1	スギ	0	$<0.1-5.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1*}$ ($\beta=0.03-0.17$)
2	ヒノキ	0	$0.1-1.0^* \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1*}$ ($\beta=0.08-0.12$)
3	コナラ	$38.4 \pm 9.2 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0
6	アカマツ	0	$0.7-3.8 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1*}, **$ ($\beta=0.15-0.19$)
7	ブナ	0	0
8	ミズナラ	$27.9 \pm 1.9 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0
9	カラマツ	0	$1.2-1.7 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1*}, **$ ($\beta=0.09-0.20$)
13	スダジイ	0	7.8^*
14	クリ	0	$0.76 \pm 0.64 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
17	アラカシ	0	$8.7 \pm 4.0 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
18	ツブラジイ***	0	$7.8 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1*}$
20	モウソウチク	$25.5 \pm 1.9 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0
24	マダケ	$43.6 \pm 6.6 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	0
52	シラカシ	0	$9.5 \text{ nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

*文献データのバラツキが大きいので、範囲で示す。

単位 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ については単位葉面積当たりのデータであるが、を付したデータのみ土地面積当たりの値である。

***近縁種のスダジイの値を適用。

グレーで塗ったデータは、文献データのみから得た値。

【引用文献】

- 1) Matsunaga SN, Muller O, Chatani S, Nakamura M, Nakaji T, Hiura T (2012) Seasonal variation of isoprene basal emission in mature *Quercus crispula* trees under experimental warming of roots and branches. *Geochem J* 46:163-167. doi:10.2343/geochemj.1.0157
- 2) Tani A, Masui N, Chang T-W, Okumura M, Kokubu Y (2024) Basal emission rates of isoprene and monoterpenes from major tree species in Japan: interspecies and intraspecies variabilities. *Prog Earth Planet Sci* 11:42. doi:10.1186/s40645-024-00645-8

5 調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討②：竹林の分布及び放出されるイソプレンの量の精緻化）

5-1. 本章の目的

令和 5 年度調査で示したように、竹林から放出されるイソプレンの BVOC 全体の放出量に対する寄与は大きいと考えられるため、竹林からのイソペン放出量を精緻に推定することは重要である。そこで、今年度は、イソペン放出量分布推定のための基礎データとなる竹林の存在量分布について、竹林マップの開発実績が豊富なスターフィールド(株)のデータを活用して推定することにより、竹林存在量分布ひいてはイソペン放出量分布推定の精緻化を目指した。スターフィールド社は、茨城県内全域を対象に衛星解析技術を用いて竹林ポリгонを抽出し、3 次メッシュ単位で竹林面積分率を推定している(同社の推定方法の概要を 5-2 章に示す)。この推定値と、全国規模の 2 種の公開データ(「JAXA 高解像度土地利用高解像度土地利用土地被覆図」(以下では単に「JAXA データ」と呼ぶことがある)、「環境省自然環境局生物多様性センター 植生自然調査 第 6.7 回調査」(以下では単に「植生図」と呼ぶことがある))に基づく推定値との相関関係を解析することにより、以降の解析に用いる広範囲(関東、近畿等)における竹林面積分率分布の推定手法を検討した。

5-2. 衛星データ解析に基づく竹林面積分率の推定

竹林面積分率推定を行うため、茨城県全域を対象として、衛星データ解析により竹林が存在する位置情報とその面積をポリゴンで抽出した。

(1) 解析に用いた衛星データ

解析に用いた衛星データは以下の通りである。

使用衛星 : Sentinel-2/MSI (運用機関 ESA、図 5-1 参照)

シーン番号 : S2A_MSIL2A_20230517T012701_N0509_R074_T54SUE_20230417T050757.SAFE

S2A_MSIL2A_20230517T012701_N0509_R074_T54SUF_20230417T050757.SAFE

S2A_MSIL2A_20230517T012701_N0509_R074_T54SVE_20230417T050757.SAFE

S2A_MSIL2A_20230517T012701_N0509_R074_T54SUF_20230417T050757.SAFE

撮影日時 : 2023 年 5 月 17 日

使用バンド : B2.B3.B4.B8 (解像度 10m) B5.B6.B7.B8a.B11.B12 (解像度 20m) の合計 10 バンド

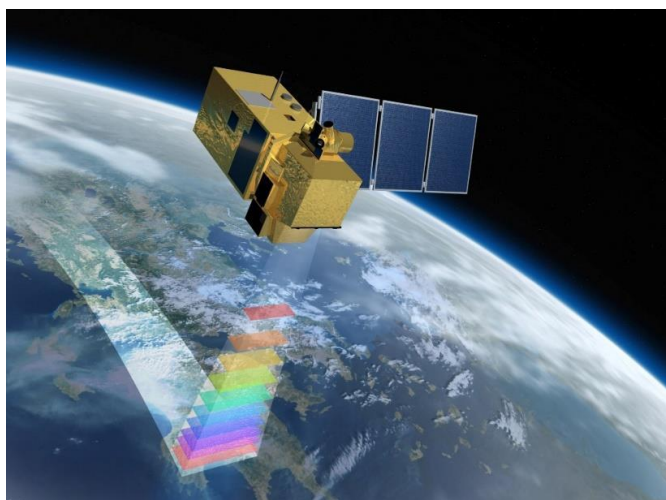


図 5-1 使用衛星 Sentinel-2 (提供 ESA)

(2) 解析方法

画像解析ソフト ENVI(NV5 Geospatial Japan)を用いて、竹林の位置情報と面積をポリゴンとして抽出するために、竹林の教師データを作成した。衛星データ上でその教師データを活用し、各バンドの反射率、指数によってマスク処理を実施し竹林ではない箇所を衛星データ上から除去した。その後、マスク処理を実施した衛星データ上で、竹林とその他の植生の代表的な地点を教師データとして入力し半自動の分類処理を実施した。茨城県全域において竹林ポリゴンを抽出するため、県南地区、県西地区、県央地区、鹿行地区、県北地区の5地区に対象地域を分けて解析を実施した。

(3) 解析結果

茨城県内に存在する県南地区、県西地区、県央地区、鹿行地区、県北地区の計5地区の竹林ポリゴンを合成し、茨城県全域の竹林ポリゴンを衛星データ解析により抽出した結果を図 5-2 に示す。

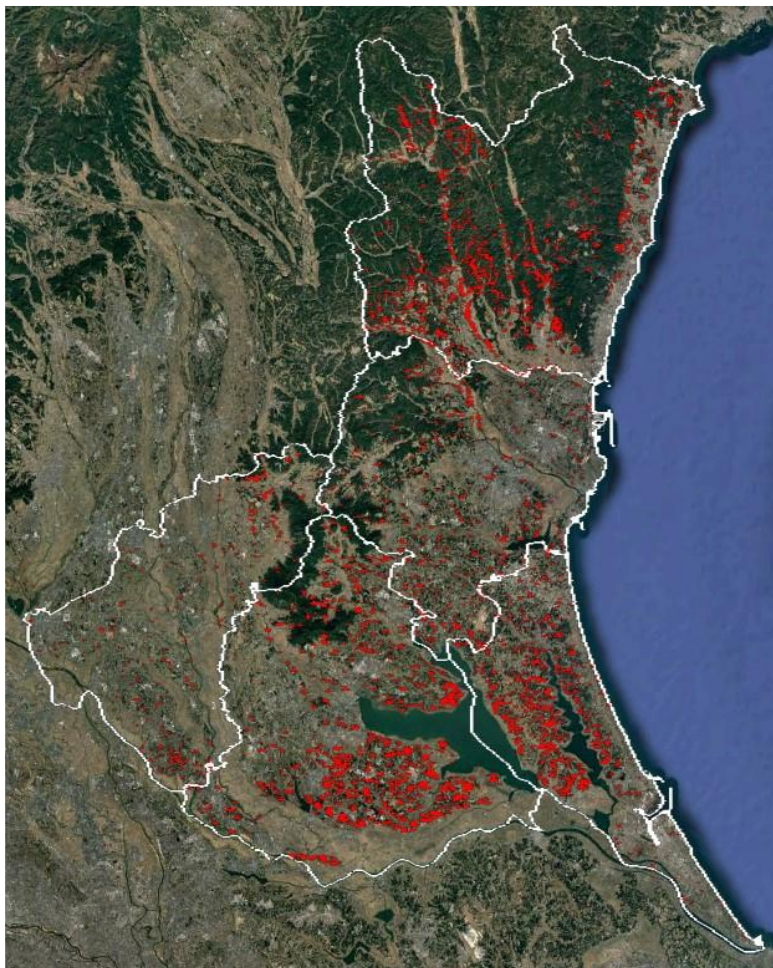


図 5-2 衛星データ解析に基づく茨城県全域の竹林ポリゴン抽出結果

5-3. Google Earth の画像データに基づく竹林面積分率推定結果の妥当性確認

衛星データ解析による竹林面積分率推定の妥当性を確認するためには、面積分率推定に使用する衛星データ解析による竹林ポリゴンが正しく抽出されているかの確認が必要である。この精度確認を Google Earth の画像データを用いて行い、公開されているデータに基づくポリゴン抽出精度と比較した。

(1) 公開されている 2 種のデータの精度比較

本衛星データ解析に基づき抽出した竹林ポリゴンの茨城県全域における比較検証に使用する公開データを選定するため、まずは、2 種の公開データ、「環境省自然環境局生物多様性センター 植生自然調査 第 6.7 回調査」と「JAXA 高解像度土地利用土地被覆図」による竹林ポリゴン抽出精度の比較を行った。2 種の公開データから抽出した竹林ポリゴンを Google Earth の画像データ(過去 5 年以内)に表示し、茨城県内の比較検証範囲(3 次メッシュ 100 タイル)において目視確認により妥当性を確認した。具体的は、ポリゴンの範囲内に 3 分の 1 以上、竹林が入っている場合「正解」、竹林以外の要素が入っている場合「誤分類」とし精度(適合率)を算出した。精度(適合率)算出結果を表 5-1 に示す。また、それぞれの公開データに基づくポリゴン抽出結果と目視による確認結果の一例を本解析によるポリゴン抽出結果と併せて図 5-3 に示す。

表 5-1 公開されている 2 種のデータとの比較検証結果

	総数	誤分類数	総数－誤分類数	精度(%)
環境省自然環境局生物多様性センター 植生自然調査 第6.7回調査	187	39	148	79.14
JAXA高解像度土地利用土地被覆図	3983	3412	571	14.33

表 5-1 によると、「環境省自然環境局生物多様性センター 植生自然調査 第 6.7 回調査」のほうが「JAXA 高解像度土地利用土地被覆図」よりも、竹林ポリゴンの抽出精度(適合率)が高いことがわかる。そのため、以下では、「植生図」データを今回の衛星データ解析により抽出した竹林ポリゴンとの精度比較に使用する。

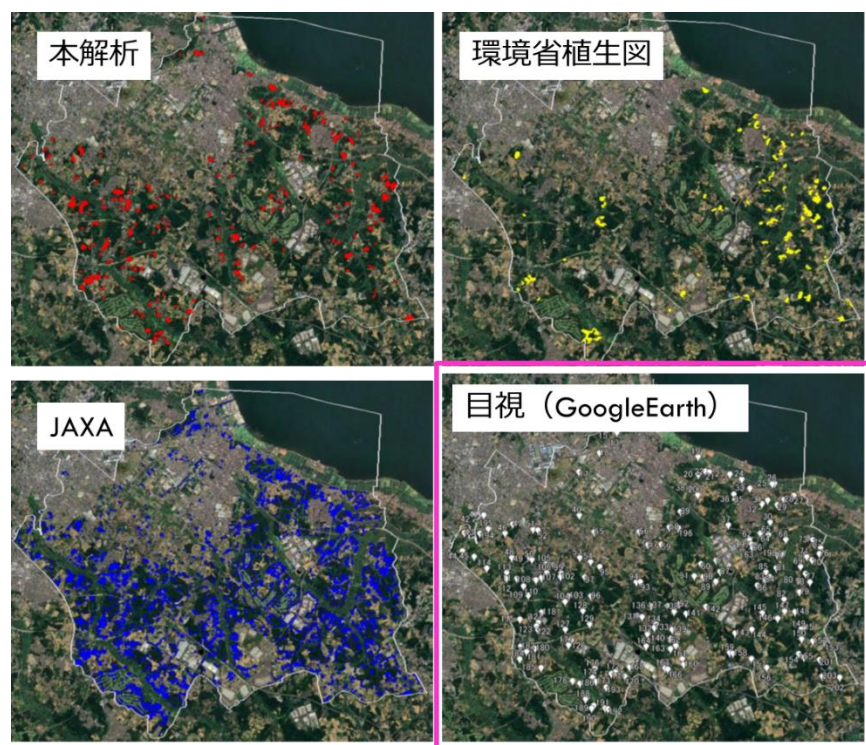


図 5-3 それぞれの公開データと本衛星解析に基づくポリゴン抽出結果と目視による確認結果の一例(県南地区内の阿見町付近)

(2) 本衛星データ解析に基づく竹林ポリゴンと植生図に基づく竹林ポリゴンの比較検証

本衛星データ解析と植生図から抽出した竹林ポリゴンを Google Earth の画像データ(過去 5 年以内)に表示し、茨城県内に存在する県南地区、県西地区、県央地区、鹿行地区、県北地区の各地区において目視確認により妥当性を確認し、最終的に5地区を合算することで茨城県全域の比較検証検証を実施した。ここでも、前項と同様ポリゴンの範囲内に 3 分の 1 以上、竹林が入っている場合「正解」、竹林以外の要素が入っている場合「誤分類」とし精度(適合率)を算出した。

表 5-2 に茨城県内の各地区および全地区を対象とした精度算出結果を、図 5-4～図 5-8 に各地区における本衛星データ解析に基づく竹林ポリゴンと植生図に基づく竹林ポリゴンの抽出結果を比較して示す。

表 5-2 茨城県内の各地区および全地区を対象とした精度算出結果

県南地区	総数	誤分類数	総数－誤分類数	精度(%)
衛星 竹林ポリゴン	979	49	930	94.99
植生図 竹林ポリゴン	955	245	710	74.34
県西地区	総数	誤分類数	総数－誤分類数	精度(%)
衛星 竹林ポリゴン	306	31	275	89.86
植生図 竹林ポリゴン	82	49	33	40.24
鹿行地区	総数	誤分類数	総数－誤分類数	精度(%)
衛星 竹林ポリゴン	832	53	779	93.62
植生図 竹林ポリゴン	279	59	220	78.85
県央地区	総数	誤分類数	総数－誤分類数	精度(%)
衛星 竹林ポリゴン	586	52	534	91.12
植生図 竹林ポリゴン	239	107	132	55.23
県北地区	総数	誤分類数	総数－誤分類数	精度(%)
衛星 竹林ポリゴン	1373	151	1222	89.00
植生図 竹林ポリゴン	1445	234	1211	83.81
茨城県	総数	誤分類数	総数－誤分類数	精度(%)
衛星 竹林ポリゴン	4076	336	3740	91.75
植生図 竹林ポリゴン	3000	694	2306	76.87

表 5-2 によると、茨城県全体では、本衛星データ解析に基づく結果の方が植生図に基づく結果よりも抽出ポリゴン総数が多く、精度も高いこと、また、本衛星データ解析に基づく結果は、植生図に基づく結果とは異なり地区による精度のバラつきが少なく、安定して高精度となっていることがわかる。

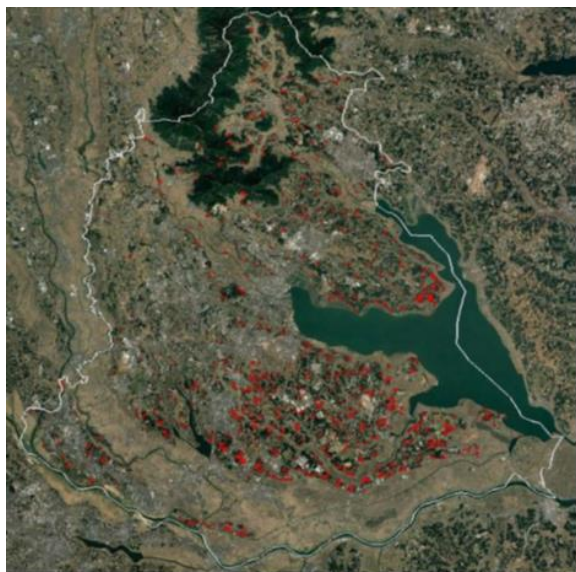


図 5-4 本衛星データ解析に基づく抽出ポリゴン(左)と植生図に基づく抽出ポリゴン(右)(県南地区)

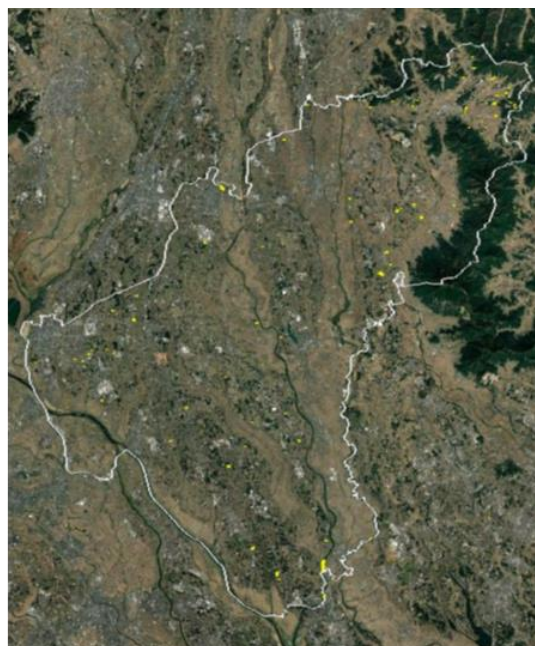
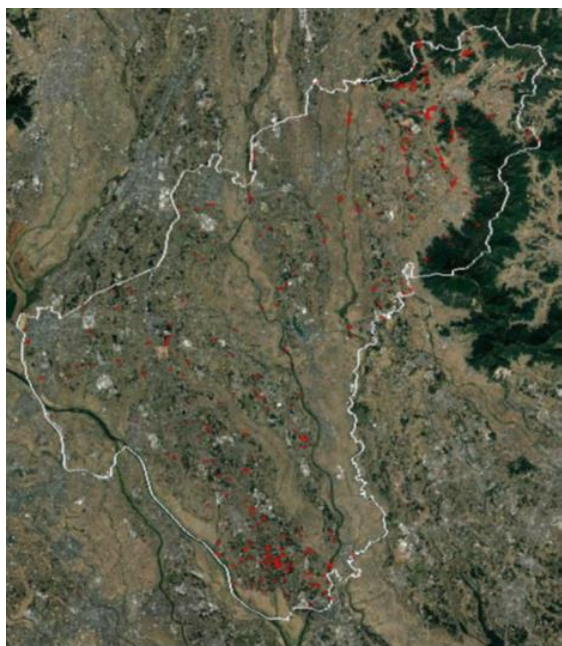


図 5-5 本衛星データ解析に基づく抽出ポリゴン(左)と植生図に基づく抽出ポリゴン(右)(県西地区)



図 5-6 本衛星データ解析に基づく抽出ポリゴン(左)と植生図に基づく抽出ポリゴン(右)(県央地区)

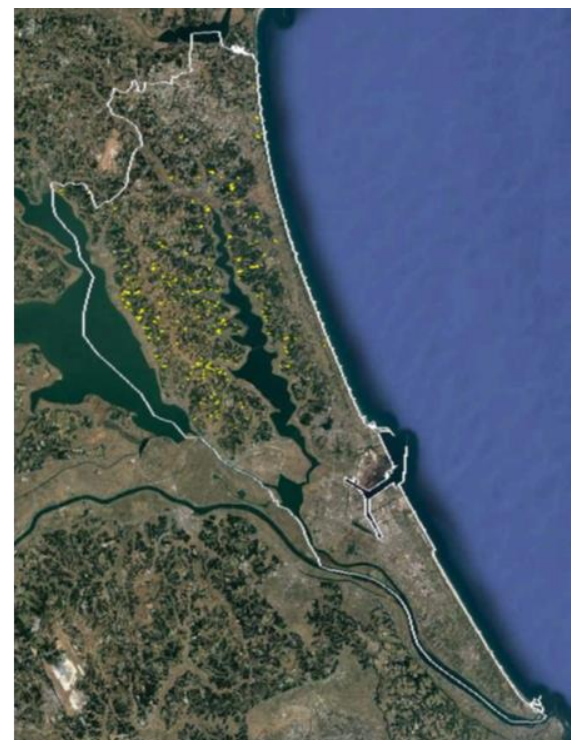


図 5-7 本衛星データ解析に基づく抽出ポリゴン(左)と植生図に基づく抽出ポリゴン(右)(鹿行地区)



図 5-8 本衛星データ解析に基づく抽出ポリゴン(左)と植生図に基づく抽出ポリゴン(右) (県北地区)

5-4. 現地調査に基づく竹林面積分率推定結果の妥当性確認

本衛星データ解析に基づく竹林抽出結果についてさらに妥当性を検討するため、茨城県牛久市ひたち野うしく駅周辺の3次メッシュ6タイル(約6km²)の範囲において、現地調査も実施した。現地調査では、対象範囲内で Google Earth 上での目視確認により、正解と判断された衛星データから抽出した竹林ポリゴン18か所に実際に竹林が存在するのかを現地調査により調べた。

2024 年 12 月 16 日の 9:00～16:00 にかけて現場を訪れ、撮影時に位置情報と方角が付与されるカメラ(OMSYSTEM TG-7 オリンパス社)を用いて写真判読を行った。

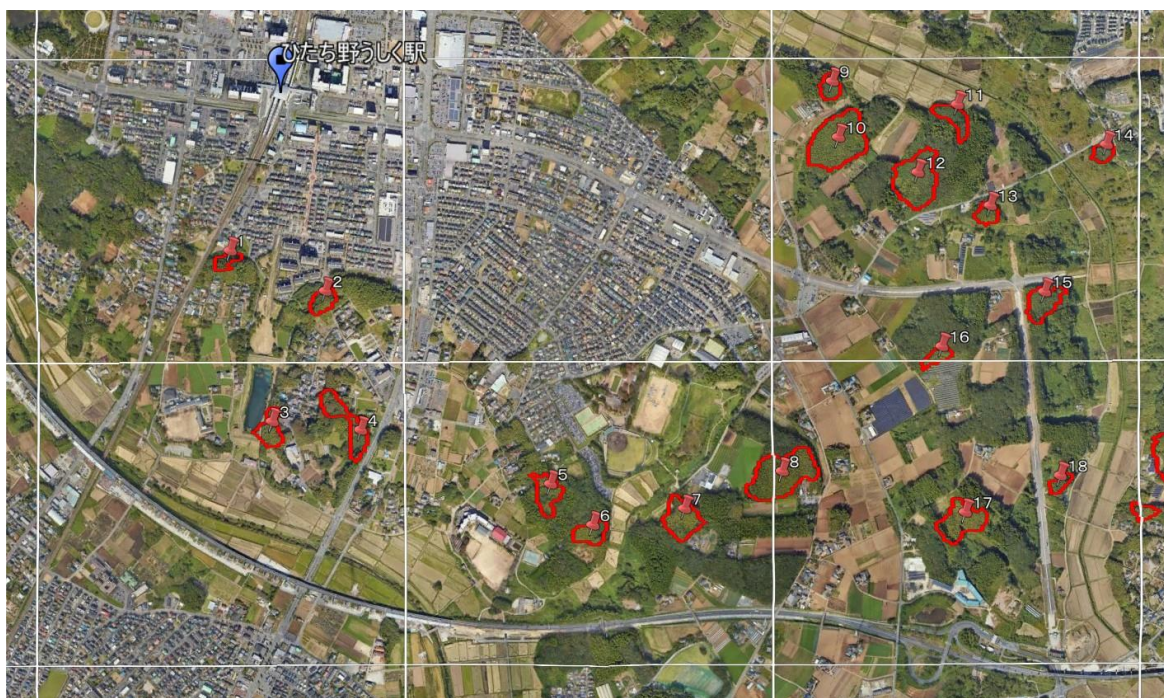


図 5-9 現地調査実施範囲の竹林ポリゴン 18 か所(赤色の曲線で表示)



図 5-10 竹林ポリゴン 18 か所における写真撮影結果。○数字は、図 5-9 に示されたポリゴン番号を示す。

衛星データ竹林ポリゴン 18 か所の現地調査による写真撮影結果を図 5-10 に示す。

図 5-10 より、すべてのポリゴンで実際に竹林が存在することが確認できた。これは、茨城県全域で実施した Google Earth 上での目視確認による精度検証の結果の信憑性を裏付ける結果であり、本衛星データ解析による竹林面積分率分布推定の妥当性を改めて示す結果である。

5-5. 以降の解析で使用する広範囲における竹林面積分率の推定方法検討

以上で、本衛星データ解析による竹林面積分率推定結果の妥当性が示されたが、本解析を用いて関東・近畿といった広い範囲の面積分率を推定するのは労力的にも時間的にも困難である。そこで、本衛星データ解析による竹林面積分率推定結果と全国規模のデータがある既存データベース(JAXA データ、植生図)に基づく推定値との相関関係を分析することにより、以降の解析に用いる広範囲(関東、近畿等)における竹林面積分率分布の推定手法を検討することとした。図 5-11 に、本衛星データ解析とその他データに基づく 3 次メッシュごとの竹林面積分率推定結果の散布図を示す。

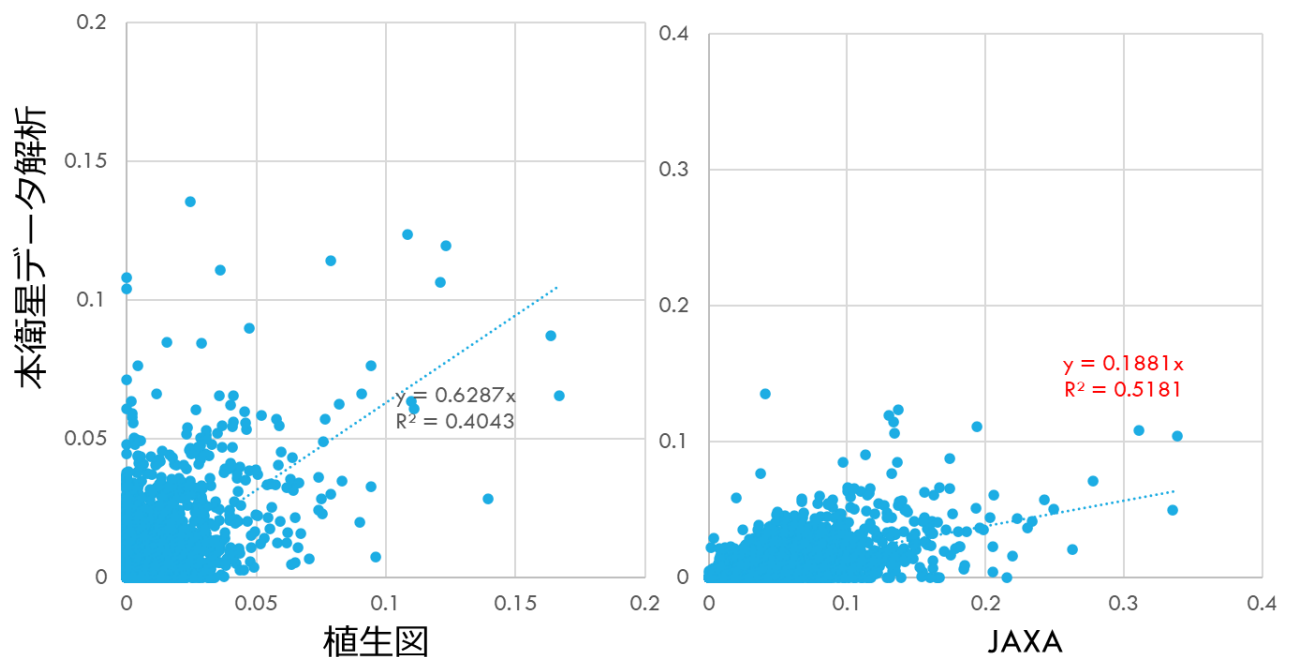


図 5-11 本衛星データ解析とその他データに基づく 3 次メッシュごとの竹林面積分率推定結果の散布図 (茨城県全域)

図 5-11 によると、本衛星データ解析に基づく 3 次メッシュごとの竹林面積分率推定結果は、植生図に基づくそれより、JAXA データに基づくそれの方とより高い相関があり、それらの関係は、原点を通る直回帰式 $y=0.1881x$ で表現されることがわかる。従って、以降の解析で用いる関東・近畿といった広い範囲の竹林の面積分率については、JAXA データに基づく面積分率を 0.1881 倍して用いることとする。ただし、本衛星データ解析による手法では 2500 m² 未満の竹林は抽出できないため、6-6(6)章で示す通り、それを加味した補正も行っている。

6 調査結果（シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討③：イソプレン放出樹種の実測及び竹林のイソプレン放出量の精緻化を踏まえた BVOC 排出量に関する排出係数の精緻化）

6-1. 本章の目的

4 章に示したように、静岡県立大にて葉面積あたりからの樹種ごとの基礎放出量を精緻化するが、シミュレーションに供するにはさらに、以下の設定が必要である。本章では、これらの設定項目について検討した結果を示す。

- ①植生・土地利用マップの検討
- ②LAI の検討
- ③補正係数の検討

これらを経て、計算メッシュごとの排出係数を設定することが出来る。

なお、本章の主担当は産環協であるが、一部内容において、シミュレーションやマッピングによる確認が必要であるため、これらについては産総研が担当した。

6-2. 植生・土地利用マップの検討

令和 4 年度の調査において、検討会委員である国立環境研究所・茶谷委員より、環境省・生物多様性センターの植生調査結果を 3 次メッシュ単位の面積割合に加工したデータを提供していただいている。

また、JAXA が高解像度土地利用土地被覆図を作成している。竹林に特化した凡例が設定されており、10m 解像度での分布図を公開している。

植生マップについては、これら 2 つの既往研究・調査成果を用い、さらに基礎放出量をどのように割り当てるかを検討した。

(1) 環境省・生物多様性センターの植生調査結果を3次メッシュデータに加工したデータの利用

この調査は1973(昭和48)年から実施されており、最新のものは令和2年度調査結果である。全国を二次メッシュレベル(5km²ごと)に分け、調査地点データ(緯度、経度)と植生分類データを入手可能である。

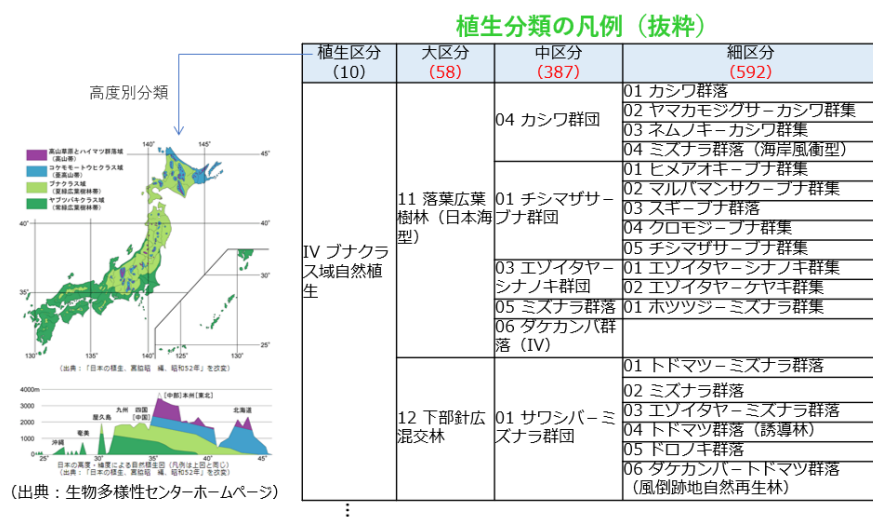


図 6-1 生物多様性センターの植生調査データのイメージ

この植生データでは図 6-1 左のように、まず高度によって植生を区分し、さらにそれを大区分 58、中区分 387、細区分 592 に分けている。図 6-1 では、比較的樹種名が群落名に明示されている細区分を示しているが、細区分名称は必ずしも代表的な樹種を表さない場合もある。

国立環境研の茶谷らは、この生物多様性センターの植生データの中区分までを 3 次メッシュ(1km² ごと)に配分した加工データを作成し、世界的によく使われている MEGAN モデル(植生を含めた土地利用 15 分類ごとに排出係数(Emission Factor)を設定している)でのデフォルト設定と、植生や排出係数をこの 3 次メッシュデータに変更した場合で BVOC 排出量推計やオゾンシミュレーション結果を比較した論文(Chatani et al. (2018), Atmosphere)を発表している。

茶谷らが生物多様性センターの植生データを加工した 3 次メッシュデータのイメージを図 6-2 に示す。



図 6-2 多様性センターの植生データを茶谷らが加工した 3 次メッシュデータのイメージ

図 6-2 中の大区分、中区分とあるのが生物多様性センターの分類に対応し、「茶谷先生の植生分類コード」は、MEGAN モデルで設定されている 15 区分と「その他」を合わせ、16 分類としている。令和 4 年度調査期間に、茶谷先生より産総研・井上先生に、この 3 次メッシュデータをご提供いただいた。

さて、この 3 次メッシュデータでは、植生分類は図 6-2 のように 3 デジットの番号で示されており、中区分に対応した 387 の分類となっている。図 6-1 でも分かるように「群落」など、単一の樹種からなる森林よりは、複数の樹種が混在した森林を表していることが多い。よって、1 つの植生区分名に対し、樹種ごとに分割して面積を配分し、樹種ごとの基礎放出量を割り当てる必要がある。

そこで、上記の 3 次メッシュデータを全国の 3 次メッシュすべてについて積算し、面積の合計値のランクが上位の植生・土地利用区分から順に整理した。令和 5 年度調査で、387 位まで全てを網羅しなくても、上位 60 位までで全 3 次メッシュ(457,392km²)の 94.9%、100 位までで 98.2%の面積をカバーできることが分かっている。上位 10 位までの植生・土地利用区分に対する植生割り当てと面積配分を、表 6-1 に示す。

人工林である「植林」については、その区分を示す樹種で 100%を占め、面積を等分するものとした。すなわち、1 樹種の植林(例:カラマツ植林(積算面積順位 9 位))ならカラマツ 100%、2 樹種の植林なら 50%ずつ、3 樹種の植林(例:スギ・ヒノキ・サワラ植林(1 位))なら面積を 3 等分とした。一方、「群落」や「群集」は自然林であり、この場合は優占樹種でも、面積的には半分程度、という場合が多い。このため、1 樹種の自然林(例:コナラ群落(6 位、8 位))ならコナラ 50%、その他の落葉広葉樹 50%とし、2 樹種の自然林なら 40%ずつとその他 20%(例:ブナ・ミズナラ群落(4 位)、サワシバ・ミズナラ群落(5 位))とした。この 2 樹種名明示の自然林の面積設定値は、特に根拠がある訳ではないが、「その他の落葉広葉樹」等の割合を、3 等分よりは下げた。表 6-1 の「基礎放出量割り当て」列は、後述の基礎放出量テーブル(表 6-16)と対応させる名称である。

表 6-1 植生分類・土地利用区分に対する植生面積と基礎放出量割り当てイメージ(面積ランク上位 10 区分)

ラ ン ク	分類番号	区分名	樹種/土地区分名 樹種分類	人工林/ 自然林	面積 配分	基礎放出量割り当て
1	54-01-01	区分 IX 植林地・耕作地植生 大コード 54 植林地 中コード 01 スギ・ヒノキ・サワラ 植林	スギ 常緑針葉樹	人工林	0.34	1.スギ
			ヒノキ 常緑針葉樹	人工林	0.33	2.ヒノキ
			サワラ 常緑針葉樹	人工林	0.33	常緑針葉樹 MT 設定値
2	57-04-15	区分 IX 植林地・耕作地植生 大コード 57 耕作地 中コード 04 水田雑草群落	耕作地	—	1	Isop 極低
3	58-01-16	区分 X 市街地等 大コード 58 市街地等 中コード 01 市街地	市街地 非植生	—	1	非植生
4	22-01-07	区分 V ブナクラス域代償植生 大コード 22 落葉広葉樹二次林 中コード 01 ブナ・ミズナラ群落	ブナ 落葉広葉樹	自然林	0.4	7.ブナ(無放出)
			ミズナラ 落葉広葉樹	自然林	0.4	8.ミズナラ
			ブナ・ミズナラ以外 落葉広葉樹	自然林	0.2	落葉広葉樹 Isop 設定値
5	12-01-01	区分 IV ブナクラス域自然植生 大コード 12 下部針広混交林 中コード 01 サワシバ・ミズナラ 群団	サワシバ 落葉広葉樹	自然林	0.4	16.シデ類
			ミズナラ 落葉広葉樹	自然林	0.4	8.ミズナラ
			サワシバ・ミズナラ 以外 落葉広葉樹	自然林	0.2	落葉広葉樹 Isop 設定値
6	41-01-07	区分 VII ヤブツバキクラス域代 償植生 大コード 41 落葉広葉樹二次林 中コード 01 コナラ群落	コナラ 落葉広葉樹	自然林	0.5	3.コナラ
			コナラ以外 落葉広葉樹	自然林	0.5	落葉広葉樹 Isop 設定値
7	57-03-15	区分 IX 植林地・耕作地植生 大コード 57 耕作地 中コード 03 畑雑草群落	耕作地	耕作地	1	Isop 極低
8	22-05-07	区分 V ブナクラス域代償植生 大コード 22 落葉広葉樹二次林 中コード 05 コナラ群落	コナラ 落葉広葉樹	自然林	0.5	3.コナラ
			コナラ以外 落葉広葉樹	自然林	0.5	落葉広葉樹 Isop 設定値
9	54-07-03	区分 IX 植林地・耕作地植生 大コード 54 植林地 中コード 07 カラマツ植林	カラマツ 落葉針葉樹	人工林	1	9.カラマツ
10	11-01-07	区分 IV ブナクラス域自然植生 大コード 11 落葉広葉樹林(日 本海型) 中コード 01 チシマザサ・ブナ 群団	チシマザサ 落葉広葉樹	自然林	0.4	ササ類(モウソウチク・マ ダケの平均値の 1/10 程 度)
			ブナ 落葉広葉樹	自然林	0.4	7.ブナ(無放出)
			チシマザサ・ブナ 以外 落葉広葉樹	自然林	0.2	落葉広葉樹 Isop 設定値

(2) JAXA の高解像度土地利用土地被覆図の竹林面積分布への活用

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、陸域観測技術衛星(ALOS(Advanced Land Observing Satellite)、日本名「だいち」、2006 年から運用開始)を用いて様々な植生や土地利用に関する観測を行い、その成果を「プロダクト」として提供している。衛星観測による植生分布や LAI 等のプロダクト作成の概要は、JAXA へのヒアリング結果として 6-2 (3)に示す。ここで「プロダクト」と言っているのは、衛星で直接、対象物性を観測しているのではなく、衛星観測で得られる単波長の電磁波観測値を組み合わせ、アルゴリズム処理や補正、参照テーブル等によって、データセットを作り出しているからである。

植生分布に関する JAXA のプロダクトとして、「高解像度土地利用土地被覆図」(HRRLULC (High-Resolution Land-Use and Land Cover Map)がある。これは 2016 年に公開され、その後何度かバージョンアップが図られている。本調査で利用しているのは 2021 年 11 月にリリースされた version21.11 (バージョンの数字がリリース年月を示す)である。このバージョンから、新たな凡例として、「竹林」と「ソーラーパネル」が追加されている。10m の解像度でマッピングが行われており、非常に高い解像度を有している。

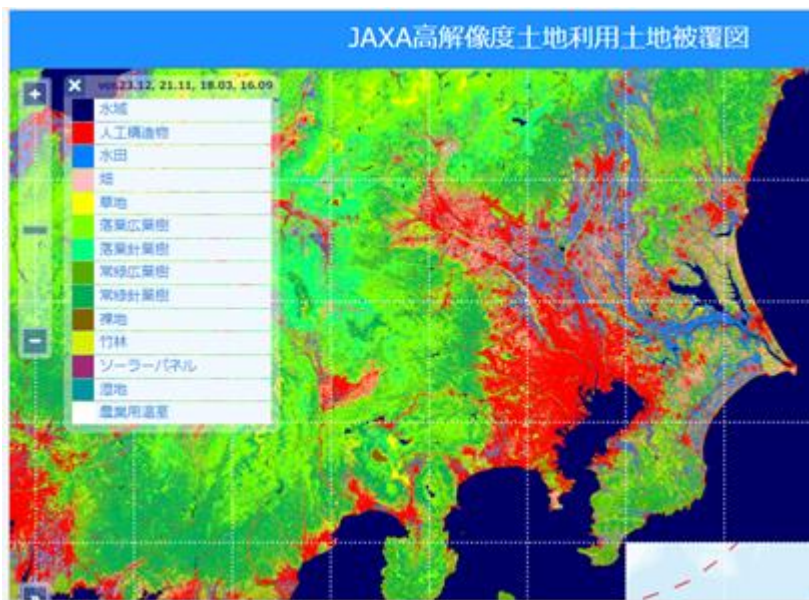


図 6-3 JAXA 高解像度土地利用土地被覆図のイメージ(出典:JAXA ホームページ)

残念ながら森林樹種については、落葉広葉樹、落葉針葉樹、常緑広葉樹、常緑針葉樹の 4 分類となっているため、約 20 種の主要な優占樹種ごとに整備した基礎放出量データを割り当てることが出来ない。そこで、高解像度土地利用土地被覆図のデータは 5 章に示したように、補正の上で竹林の面積分布の推定に用い、その他の森林樹種や土地利用(市街地など非植生の区分を含む)については、生物多様性センターの植生調査データを 3 次メッシュごとの面積分率に加工したデータを用いることとした。

(3) 衛星観測による植生分布の推定に関する JAXA ヒアリング結果

前節に示した「高解像度土地利用土地被覆図」について、どのような方法で観測・推定し、どの程度の精度が期待できるかについて、JAXA 第一宇宙技術部門 地球観測研究センター・平山颯太氏にヒアリング(産総研・井上先生も同行)を行い、ご教示を得た。同氏からご提供いただいた資料、JAXA のウェブサイト等も参考に、衛星観測による植生マップの作成方法を以下に簡単に整理する。

人工衛星によって、様々な波長バンドで地表を観測しており、日本では陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS:Advanced Land Observing Satellite)シリーズを 2006 年から運用している。欧州宇宙機関(ESA)の Sentinel-2 が同様な可視～近赤外域の波長での測定ができる光学衛星である。



図 6-4 人工衛星による地球観測のイメージ(出典:JAXA ホームページ)

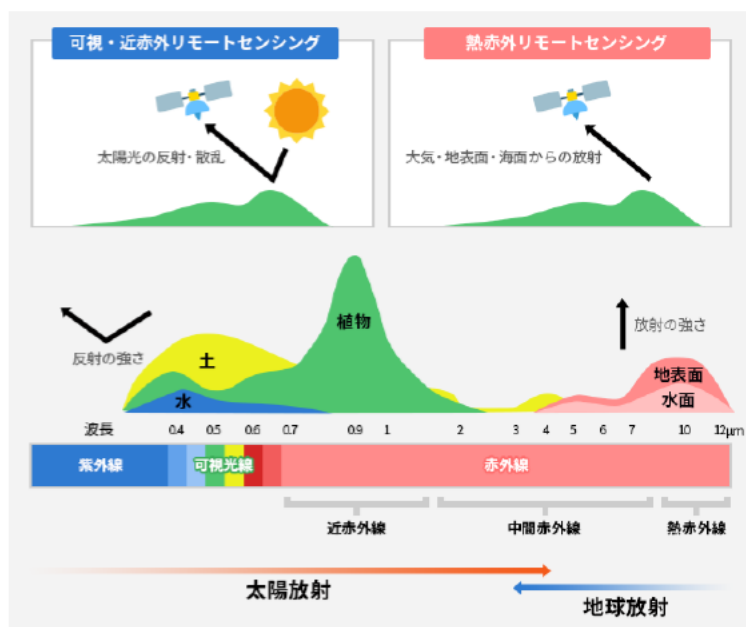
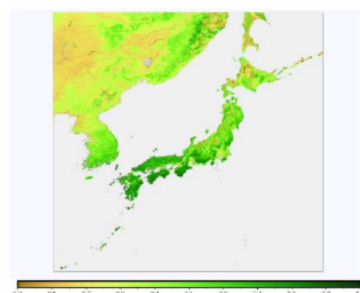
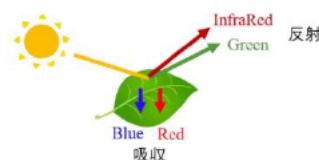


図 6-5 衛星による植生観測のイメージ

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$



地表面の状態で反射率が変わるので土地被覆情報が分かる。植物は近赤外線(IR)を反射し、赤色(R)を葉緑素が吸収する。そのため、この2波長域の測定値からLAIとも一定の相関がある正規化植生指標(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)を算出できる(図 6-5 中の式)。NDVIを図示すると、植生が多く、植

物の活性度が高いと緑が濃い分布となる(図 6-5 の右下図)。

JAXA 高解像度土地利用土地被覆図(HRRLULC)は 2016 年に初版がリリースされ、最新版は 2023 年 12 月版である。10m 解像度で 14 の土地分類に分類している。ALOS-2 衛星の合成開口レーダーに加え、Sentinel-2、Landsat-8 の観測情報を使用している。

森林や樹種の識別方法の概要は、以下のとおりである。

- ・落葉樹／常緑樹の識別 ⇒1 年を 6 時期に分けその変化で分類
- ・広葉樹／針葉樹の識別 ⇒赤外、短赤外、標高等で区別
- ・竹林の識別 ⇒春に葉が黄色くなる(竹の秋)特徴で区別

現在よりも細かい樹種分類にできるか、については、例えばスギとヒノキなら、衛星直下で見て、樹冠のテクスチャーが異なる(スギは隣接木との接触を嫌うため樹冠の 1 つ 1 つが明瞭、輪郭の陰影がある。一方でヒノキは隣接木同士が枝が重なるため樹冠の輪郭が不明瞭)ことを利用して、分類することが可能とのことであった。

高解像度土地利用土地被覆図の精度については、表 6-2 のように、2,502 の検証データに対して全体で 88.85%、竹林は 83.54%との値が示されている。継続的にアルゴリズム改善、後処理、検品、手動編集により誤分類の改善を行っているとのことである。

表 6-2 高解像度土地利用土地被覆図の精度検証結果(ver.21.11)

		Validation													User's accuracy (%)
		Water bodies	Built-up	Paddy field	Cropland	Grassland	DBF	DNF	EBF	ENF	Bare	Bamboo forest	Solar panel	Total	
Classified	Water bodies	153	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	154	99.35
	Built-up	0	243	1	2	0	0	1	0	0	8	1	5	261	93.10
	Paddy field	0	0	235	17	3	0	0	0	0	0	0	0	255	92.16
	Cropland	0	0	11	188	16	2	1	0	0	5	1	0	224	83.93
	Grassland	0	0	0	19	202	2	1	1	0	4	1	4	234	86.32
	DBF	0	0	0	2	5	193	39	6	3	0	8	0	256	75.39
	DNF	0	0	0	0	0	3	162	0	0	0	0	0	165	98.18
	EBF	0	0	0	1	1	0	0	126	10	0	4	0	142	88.73
	ENF	0	0	0	1	0	9	7	16	214	1	12	0	260	82.31
	Bare	3	11	0	6	0	0	0	0	0	199	0	3	222	89.64
	Bamboo forest	0	0	0	1	0	1	0	17	0	0	137	1	157	87.26
	Solar panel	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	171	172	99.42
	Total	156	255	247	237	227	210	211	166	227	218	164	184	2502	---
Producer's accuracy(%)		98.08	95.29	95.14	79.32	88.99	91.90	76.78	75.90	94.27	91.28	83.54	92.93	---	Overall accuracy: 88.85%

(出典:平山ら、RSSJ、Vol.42、No.3、2022、pp.199-216)

6-3. LAI に関する検討

葉面積指数(LAI: Leaf Area Index)は、単位土地面積あたりの片側葉面積の比率と定義される。「片面」とあるのは、葉っぱの両面の面積の和ではない、という意味である。LAI=3km²/km²であれば、植生の 1km²の面積に対して、葉を重ねないように並べたとき、3km²を占めることを意味する。LAI に関しては、文献値と、衛星観測によるプロダクトを利用する方法が考えられ、この 2 つについて適用可能性を検討した。

(1) LAI に関する文献値の利用

LAI を測定する方法は、表 6-3 のように整理される。

表 6-3 LAI の主要な測定方法

分類	測定方法	具体的な方法
直接的な方法	層別刈り取り法	伐採して葉を採取
	リタートラップ法	落葉を収集
間接的な方法	光学的な方法	・LAI-2000 等 (樹冠部透過率) ・魚眼カメラ (全天写真)
	可視・近赤外光での測定	・透過 PAR (光合成有効放射) ・NIR (近赤外) ・反射 NDVI
	植物成長指標から計算	・胸高直径と葉量の関係

直接的な方法は、古くから行われており、樹木を伐採し、葉を刈り取って葉面積を測る層別刈り取り法や、落葉樹の落葉期に落葉をトラップして集め、葉面積を測るリタートラップ法がある。単一樹木の正確な LAI の実測値が得られる一方で、広範囲の平均値を求める場合は、作業が大掛かりとなり、森林資源を痛めるため忌避される傾向がある。

間接的な方法は、植物の投影面積や、関連する物性値から求める方法である。簡単に、多くの樹木や広範囲な測定ができる一方、精度は直接法よりは劣る傾向がある。

LAI は、様々な要因で変動し、もっとも分かりやすいのは、季節による展葉、落葉などによる変化である。参考として、LAI の変動要因を表 6-4 に挙げておく。

表 6-4 LAI の変動要因

変動要因	変動傾向、文献
樹齢	・同齢林では LAI は 20～40 年でピークとなり、その後緩やかに減少 (大島 1958 他)。 ・林分密度が高いとピークが早まる (安藤ら、1968)。 ・樹冠が閉鎖すれば林齢 4 年程度でもピークになり得る (汰木 1964)。
季節変動	・落葉樹は展葉／落葉期に変動。常緑樹でも季節変化が見られる。
森林の粗密	・密林になるほど LAI の概算値は大きくなる (近藤ら、1992)
結実の影響	・ブナ林の標高による LAI の大小関係が実の豊作度により変化 (倉田ら、2006)
CO ₂ 濃度の上昇の影響	・高 CO ₂ 環境では、LAI は高くなる (小池ら、2013)。

次に、LAI の測定値や推定値の記載がある文献を調査した。収集した 31 文献の一覧を表 6-5 に示す。

表 6-5 LAI の測定値の記載がある文献

1	スギ・ヒノキ人工林 LAI	村上 2003	https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030662409.pdf
2	スギ・ヒノキ	森林総研・スギヒノキ 形質データベース	https://db.ffpri.go.jp/SugiHinoki-TraitDB/index.html
3	スギ・コナラ LAI	関 2010	https://www.jstage.jst.go.jp/article/taiki/45/1/45_1_32/_pdf
4	コナラ二次林	小笠原ら 1988	https://core.ac.uk/download/pdf/227465606.pdf
5	ブナコナラミズナラ	野中ら 2015	http://www.kantoforest.jp/papers/pdf/66-2-A2.pdf
6	トドマツ	宇都木ら 2007	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjfs/89/3/89_3_174/_pdf
7	アカマツ	杉田ら 1986	https://www.ied.tsukuba.ac.jp/wordpress/wp-content/uploads/pdf_papers/ercbull10/1047.pdf
8	アカマツ	飯田ら 2003	https://www.ied.tsukuba.ac.jp/wordpress/wp-content/uploads/pdf_papers/tercbull04/t401.pdf
9	ブナ	石原 2018	https://www.sumitomo.or.jp/pdf/kankyo/15_kankyo_seika/Ishihara_Masae_Seika_153471.pdf
10	カラマツブナミズナラ	石井ら 1999	http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00519/1999/07-0033.pdf
11	季節変化全般	石井 2007	https://waseda.repo.nii.ac.jp/record/19979/files/Honbun-4603.pdf
12	カラマツ	栗林ら 2023	https://www.pref.nagano.lg.jp/kanken/johotekyo/kenkyuhokoku/hoken/documents/kh19_6.pdf
13	カラマツ	小野ら 2013	https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010852796.pdf
14	ダケカンバ	隅田ら	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/119/0/119_0_176/_pdf/-char/en
15	カンバ類 3 種	原ら 2013	http://lab.agr.hokudai.ac.jp/jfs-h/index.php?plugin=attach&pcmd=open&file=041-042%A1%CB%B8%B6%CD%AA%BB%D2.pdf&refer=%BB%D9%C9%F4%CF%C0%CA%B8%BD%B8%2F%C2%E861%B9%E6-%CB%CC%CA%FD%BF%B9%CE%D3%B3%D8%B2%F1
16	クリ	荒木ら 1982	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshs/1925/51/3/51_3_278/_pdf/-char/ja
17	ヒノキナラカエデ他	近藤ら 1992	https://metsoc.jp/tenki/pdf/1992/1992_03_0159.pdf
18	ハンノキウカエデ等	荒木 1986	https://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/kanko/339-3.pdf
19	広葉樹概算値	環境再生保全機構 総論編	https://www.erca.go.jp/yobou/pamphlet/form/05/pdf/jyoka03_dai1.pdf
20	ブナ標高差	倉田ら 2006	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfsc/117/0/117_0_659/_pdf
21	カラマツマツスギ他	服部ら 2001	https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010640243.pdf
22	アラカシ	給楽 2022	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jshwr/35/0/35_67/_pdf/-char/ja
23	カンバミズナラカエデ季節変化	山本ら 1996	https://www.env.go.jp/earth/suishinhi/wise/j/pdf/J95B0180.pdf
24	モウソウチク	伊藤ら 2018	https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030922614.pdf
25	シラカシ	安井ら 1983	https://ir.lib.shimane-u.ac.jp/files/public/0/1785/20170425011848491471/d0030017n006.pdf
26	シラカシ	渡辺ら 1983	https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/record/26329/files/esr023004.pdf
27	衛星 LAI 推定	小林 2008	https://www.jstage.jst.go.jp/article/rssj/28/1/28_1_1/_pdf/-char/ja
28	落葉広葉樹 LAI 文献値	谷岡 et al., 2020	https://tsukuba.repo.nii.ac.jp/record/2003129/files/Forests_11-10-1037.pdf
29	スダジイ他	只木 1970	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjfs/1953/52/9/52_9_263/_pdf
30	樹種 LAI 文献値多数	只木 1966 林業試験 場研究報告 184	https://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/kanko/184-3.pdf
31	マダケ	井上 et al., 2014	https://www.jstage.jst.go.jp/article/jfp/19/2/19_53/_pdf/-char/ja

文献ごとに、対象樹種、対象とする森林、測定方法、測定年代、樹齢など様々な条件が異なることによるばらつきが認められた(表 6-6)。

表 6-6 文献調査を通じての LAI データのばらつき

	文献値:樹種別
常緑広葉樹	3～12(平均 7～8)
常緑針葉樹	1～17(平均 5～6)
落葉広葉樹	0.5～9.2(平均 4～5)
落葉針葉樹	1.7～5.2(平均 3.8)
竹類	2.5～7.0
草木	5.0
畑地	5.0
その他	1.0

そこで、文献のうち、常緑/落葉、広葉樹/針葉樹等の樹種の大分類に対して、統一的な方法で代表値を求めている総説的文献に絞り、再度整理した結果を表 6-7 に示す。これら文献は 1960～1970 年代と古いが、層別刈り取り法などの直接法で求められており、研究者もほぼ同一であり、一定の代表性があると考えられる。

表 6-7 総説的文献に見られる LAI の値

樹種	LAI 文献値	LAI 推定 最頻値	文献
常緑広葉樹	5.5～9	6.0	只木・蜂屋 1968、只木 1978
常緑広葉樹林	7～12		只木 1966_林業試験場研究報告 184
	5～9		只木 1976
	8.0		只木 1976、只木・蜂屋 1968、岩城 1979、内嶋ら 1982
常緑針葉樹林	15～20	8.0	只木 1966_林業試験場研究報告 184
	8.0		只木 1976、只木・蜂屋 1968、岩城 1979、内嶋ら 1982
常緑針葉樹林※ ¹	5～10		只木・蜂屋 1968
落葉広葉樹林	4～6	8.0	只木 1966_林業試験場研究報告 184
落葉広葉樹	3～7		只木・蜂屋 1968、只木 1978／只木 1968
落葉広葉樹林	3～6		只木・蜂屋 1968／吉良 1976
落葉針葉樹林	5～7	8.0	只木 1966_林業試験場研究報告 184
	5.0		只木 1976、只木・蜂屋 1968、岩城 1979、内嶋ら 1982
草本(ササなど)	5.0	8.0	只木 1976、只木・蜂屋 1968、岩城 1979、内嶋ら 1982
畑地 ※ ²	5.0	6.0	只木 1976、只木・蜂屋 1968、岩城 1979、内嶋ら 1982
水田	5.0	5.0	只木 1976、只木・蜂屋 1968、岩城 1979、内嶋ら 1982
その他 ※ ³	1.0	1.0	只木 1976、只木・蜂屋 1968、岩城 1979、内嶋ら 1982

※¹:マツ、スギを除く ※²:牧草地を含む ※³:都市、荒地など

以上のことから、おおまかな植生分類ごとに、表 6-7 の LAI 値を設定することとした。

(2) LAI に関する衛星観測値の利用可能性

人工衛星を使った植生や土地利用の観測が行われており、主なものとして以下がある。

表 6-8 代表的な衛星観測による LAI プロダクト

機関	衛星	LAI プロダクトの概要
JAXA (日本)	GCOM-C 衛星(気候 変動観測衛星、しき さい、GCOM: Grobal Change Observation Mission)	SGLI(多波長光学放射計)センサによる赤～近赤外波長の観測データ から、放射伝達モデル⇒Look up Table を使って LAI を推定。 250m メッシュ単位 https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/update/Algorithm_LAI_ja.html
ESA(欧 州宇宙 機関)	Sentinel-2 衛星の LAI プロダクト	Grobal、1km 解像度 10 日ごと、1999-2020 年

衛星観測に基づく LAI データも、植生分布と同様に、アルゴリズムによって観測データを処理し、補正した上で生成されている。これらは、基本的に公開されており、有用なものであるが、ADMER-PRO への適用に当たっては、以下の点に留意する必要がある。

表 6-9 衛星観測による LAI データを利用する上での留意点

項目	留意点
(1) データフォーマット	公開 LAI データが、ADMER-PRO で容易に利用できるフォーマットとなっているか。
(2) 座標系、位置	座標系や、格子点の緯度・経度が異なる場合、データを加工し、ADMER-PRO のグリッドに配分し直す必要がある。
(3) 解像度	解像度が 1km よりも高精細の場合、3 次メッシュ(1km ²) 単位にデータを積算する必要がある。また、例えば 300m のような解像度の場合は、1km の区切りに合わないため、グリッドへの配分加工が必要となる。
(4) LAI 値はグリッド平均値か、植生部分のみの LAI 値か	衛星 LAI 値は、非植生部分も含めたグリッド内の平均値を表す。このためグリッド内の植生被覆率(VCF:Vegetation Coverage Factor)で割り戻し、植生部分のみの LAI 値を求める必要がある。
(5) 森林の高低方向の構造	森林は、高木による樹冠部と、下草などの低木・草本類が上下方向に重なっている。下層構造も含めた LAI 値となっている場合、高木のみを考慮した場合に比べて LAI 値が大きくなり、BVOC 排出量を多めに見積もる要因となる。

本調査では、東京都環境科学研究所・國分優孝主任研究員(産総研と共同研究)のご協力を得て、関東圏について、Sentinel-2 衛星データからの 3 次メッシュごと LAI データを加工・提供いただき、これを前項の文献値から設定した LAI 値×補正係数と比較検討するに留めた(衛星観測値に対し、設定値が 1～2 倍程度の範囲であった)。JAXA のデータは、hdf5 というフォーマットであり、ADMER-PRO では直接的に扱うことが出来ない。また、衛星観測から得られる LAI は、非植生部分も含めたグリッド内の平均値であるため、ADMER-PRO の計算グリッドに与える、植生部分のみの LAI データセットを生成する処理が必要である。以上の理由から、

衛星観測による LAI プロダクトの利用は、将来においては可能と考えられるが、計算時間の観点から、本調査の限られた調査期間内での適用は難しいと判断した。

6-4. 補正係数等の検討

葉面積当たりの基礎放出量に、単純に LAI を乗じた場合、すべてを陽葉と扱うことになるため、BVOC 排出量を高めに見積もってしまうことになる。本節ではこれを下方修正するための補正係数について記述する。

静岡県立大による夏季の BVOC 測定で、陽葉と陰葉の測定を行った。サンプル数が少ないので参考程度であるが、コナラでは陽葉は陰葉に対し最大で 8 倍程度の基礎放出速度を示し、モウソウチクでは陰葉は陽葉に比べて 3 割程度基礎放出速度が落ちる結果となった。

モウソウチクがコナラより、陽葉と陰葉の差が少ない理由としては、以下のことが考えられる。測定対象のモウソウチクは、鬱蒼とした放置竹林の内部ではなく、比較的日当たりが良い場所に生育しており、竹は単木ではコナラのような高木樹木に比べると葉や枝の密集度が低く、コナラの陰葉ほどには、モウソウチクの陰葉は日当りは悪くないと考えられる。また、竹の陽葉は、竹の最上部からのサンプリングは採取器材の点で難しく、可能な範囲で高い場所の日当たりの良い枝葉を採取しているため、最上部の樹冠部の陽葉は、測定した陽葉より基礎放出速度が高い可能性がある。

既述のように、季節によって、実際の気温や日射が変化することに伴って BVOC 排出量が変わることだけでなく、季節によって BVOC 合成酵素の活性が変わり、基礎放出量自体が夏場は高く、冬場は低く、変動する。同様に、陽葉に対して陰葉は、日当たりが悪いことによる基礎放出量の低さだけでなく、そもそも基礎放出量自体が低い、という性質を有している。

そこで、限られた知見からではあるが、樹木全体の基礎放出量の平均値が、陽葉の基礎放出量に対して効率が落ちることを、補正係数(c)として表現した。LAI が大きければ、葉の重なりによる日陰部分が増えると考え、0.4~0.7 の範囲で、樹種の大分類程度のカテゴリーで補正係数を設定した。なお、この補正係数(c)は、精緻化第 5 版において、フラックス測定値との関係による補正も含め、総合的な補正係数として見直している。

葉面積当たりの基礎放出量(a)、表 6-7 に示した LAI(b)、補正係数(c)を乗じて、基礎放出量テーブル(精緻化初版)を作成したが、このデータセットを使って、基礎放出量のマッピングと、実測値との比較シミュレーションを行ったところ、結果として精緻化初版では ADMER-PRO のデフォルト設定による基礎放出量分布、濃度計算値に近く、全体として高めの計算値となり、更なる修正が必要であることが分かった。

そこで、後述の 6-6 項に示すような様々な検討を踏まえつつ、シミュレーションと設定変更を繰り返し、精緻化第 5 版に至って、静岡県立大・谷先生の経験的なアドバイス(LAI(b) × 補正係数(c)は概ね 2 以下、最大でも 3 以下ではないか)も参考に、ここでの補正係数を 0.3 に下方修正した。また、基礎放出量(a) × LAI(b) × 補正係数(c)はフラックス(その植生の土地面積当たり基礎放出量)に相当し、この積を第 4 版までと概ね同等の値とするため、(c)の値をスギは 0.1、コナラ・ミズナラは 0.15、ササ類は 0.1 と調整している。

本調査では、この精緻化 5 版を、最終的な更新版の BVOC 設定データとして扱うこととした(産環小委の発表資料での「更新版」は「精緻化 5 版」のことである)。参考までに精緻化 5 版で竹のみをさらに 2 倍に設定したデータセットでも、一部の比較計算を行っている。

後述のように、「精緻化 5 版」に至って、トップダウン推計の分布、イソプレンの基礎放出量分布、実測値との比較において、定性的に参照値との合致が見られるようになった。なお、静岡県立大による基礎放出量データベースは、その精度や信頼性において、科学的知見としても優れた成果と言えるものの、そこからシミュレーション用の設定値を作成する過程での植生分布、LAI、補正係数などの設定についてはまだ不確実性が高く、さらなる検討により精緻化を図ることが重要である。

6-5. BVOC 設定に関する参考知見

(1) 谷らによる総説論文

本事業の実施者である谷らは、2024 年 6 月に、様々な樹種、植物種(農作物や草花など)からの BVOC の基礎放出量について、総説的な論文を発表している^{*}。ここでは基本的に、令和 5~6 年度調査での同大の測定値は含まれておらず、文献レビューを基本としている。この論文の図を引用して図 6-6 に示す。

※Tani et al., Progress in Earth and Planetary Science (2024) 11:42

<https://doi.org/10.1186/s40645-024-00645-8>

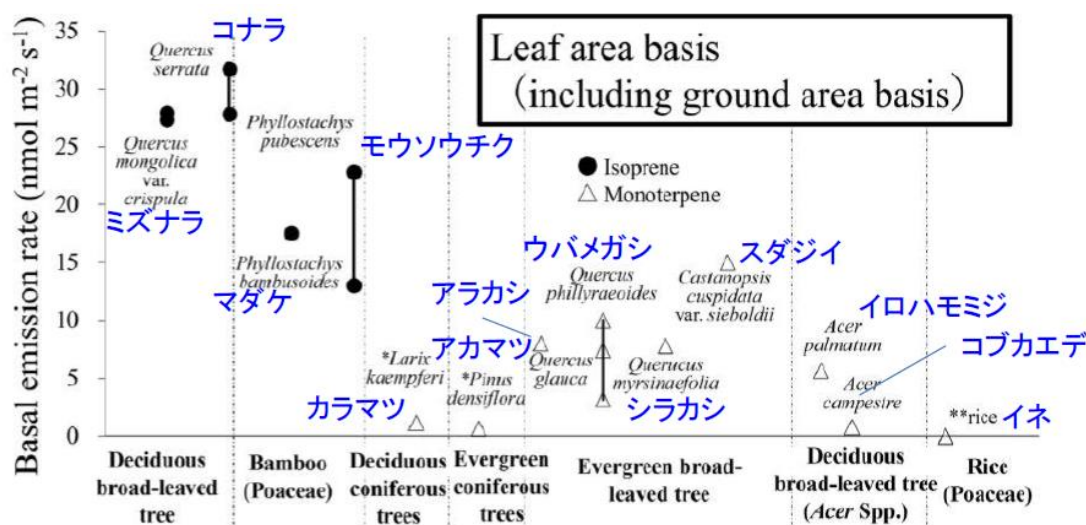


図 6-6 主要な樹種・植物種からの BVOC の放出物質と基礎放出量の概観

(出典:谷ら(2024)、図中に樹種和名を追加)

これによれば、樹木については、落葉広葉樹のコナラ、ミズナラがイソプレンの高放出種(葉面積当たり $30\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度)であり、イネ科のタケ類のうちモウソウチクやマダケもイソプレンの高放出種 ($20\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度)と言える。落葉針葉樹(日本ではカラマツのみ)や常緑針葉樹のモノテルペン放出はそれほど高くなく($1\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度)、シイ・カシ類などの常緑広葉樹が中程度のモノテルペン放出 ($5\sim 10\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度)を示している。

カエデ類は、放出物質、放出形態、放出量ともまちまちであり、無放出種もあるが、植生面積ランクで見ると、優占樹種として上位にはカエデ類は見られない(6-6(4)で後述)。イネ科の稲は、ADMER-PRO のデフォルト設定では一定の放出量を設定しているが、BVOC 放出量はほぼゼロと見なしでも良さそうである。

樹種ごとの測定値がない場合について、「落葉広葉樹のイソブレン設定値」、「常緑針葉樹のモノテルペン設定値」、等の設定値を与える必要があるが、その場合にもこの論文内容を参考にした。

(2) イソブレン高放出種のみを設定した ADMER-PRO での参考シミュレーション結果

産総研では第 1 回検討会において、イソブレン高放出種である竹、コナラ群落、ミズナラ群落のみを考慮した場合の参考シミュレーション結果を示している。竹林の重要性は、第 5 章でも述べられているところであるが、本シミュレーションの結果は、実測値との合致性を改善する上で参考となったので、ここで示しておく。

シミュレーション条件は、表 6-10 のとおりである。イソブレン以外の BVOC はすべて放出 0 と設定した。

表 6-10 イソブレン高放出種のみを設定したシミュレーションの計算条件

	竹林	コナラ群落	ミズナラ群落
面積分率ソース	JAXA	植生図※1	植生図※2
基礎放出量※3 (nmol・m ⁻² ・s ⁻¹)	50	30	30
LAI※4	4.0	2.8	4.2
補正係数※5	—	0.5 倍	0.5 倍

※1: 生物多様性センターのデータを 3 次メッシュに加工したデータ。中分類が「コナラ群落」のものを集計

※2: 同上。中分類が「ミズナラ群落」のものを集計

※3: 令和 4 年度調査の報告書 p.40 に記載のデータより

https://www.meti.go.jp/policy/voc/vocr4_haishutsusakugenkouka_houkokusho.pdf

※4: 竹林は Ji et al. (2021), コナラ群落、ミズナラ群落は星ら(2001)より

※5: 自然林は 1 位の優先樹種でも割合 50%程度のことであるため(令和 2 年度調査報告書、p.87)

https://www.meti.go.jp/policy/voc/r2_teiryohyouka_houkokusho.pdf

ここでは、竹林の JAXA (高解像度土地利用土地被覆図) データは補正せずに使用しており、陰葉の基礎放出量が陽葉より低いことを表現する補正も行っていない。基礎放出量や LAI の値も、精緻化検討時の設定値とは若干異なるが、ある程度現実性のある値を使用している。

この計算条件で、AQUAS-Tsukuba の観測値との比較シミュレーションを行った。まず、3 つの植生の面積分率の地理分布の推定結果は以下の通りである(図 6-7)。

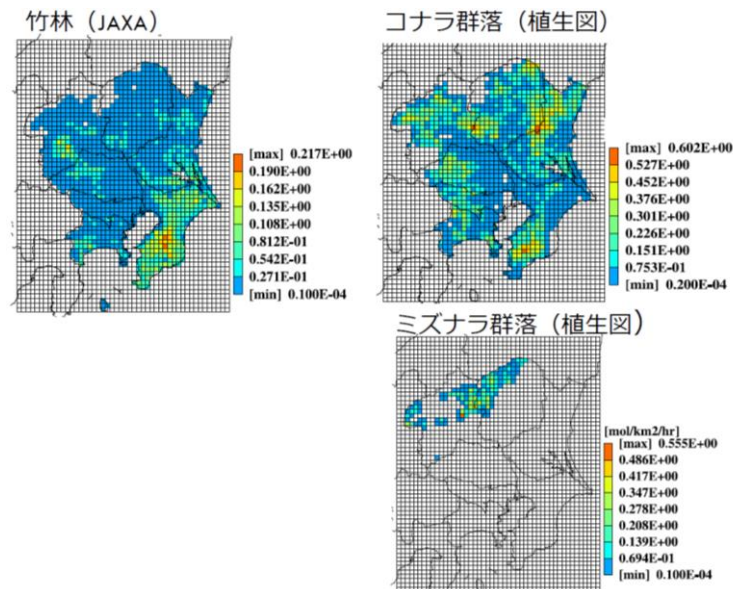


図 6-7 イソブレン高放出種の面積分率の地理分布(5km メッシュ)

竹林の分布は、関東圏では相対的に房総半島に多い印象である。コナラは北海道を除いた日本全域に分布しているのに対し、ミズナラは概ね関東地方より北に分布しており、関東地方では群馬県や栃木県の北部に分布は限られる。

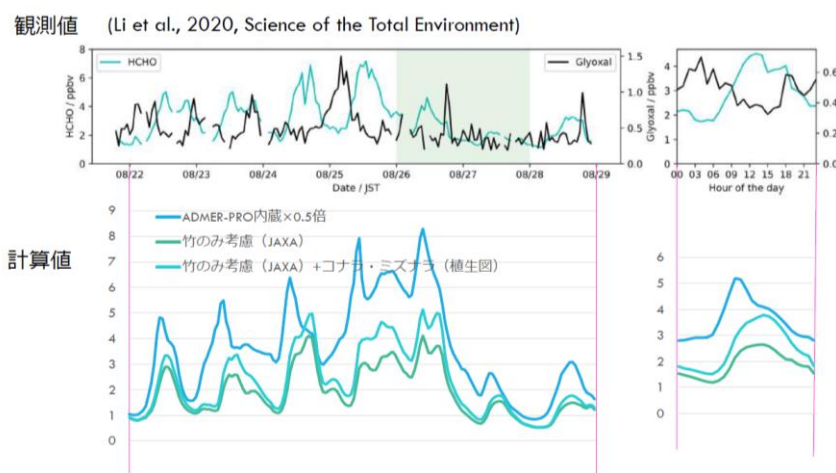


図 6-8 イソプレン高放出種だけ設定したシミュレーション結果と実測値(AQUAS-Tsukuba)との比較

AQUAS-Tsukuba (2017) の観測値と計算値を比較すると、竹、コナラ、ミズナラからのイソプレン放出のみを設定した計算条件では、観測期間の濃度値(最大ピークで 5ppbv 程度)、日内変動(14 時ごろに最大ピークとなっている)とも、かなり観測値に近い結果が得られた。

ローカルな条件としては、2017 年 8 月下旬の観測対象日の関東地方の風況はゆるやかな南風であり、房総半島中央部にある竹類とコナラ群落(図 6-7 中の赤いプロット)からイソプレンが放出され、つくば方面に移流しながら 14 時ごろのホルムアルデヒドの濃度ピークを形成したものと推測される。

ここでの計算条件は、極端な仮想設定であり、これを BVOC の更新データとして採用することはできないが、イソプレン高放出種の設定をしっかりと作り込むことが重要であることが示唆された。コナラは北海道を除く全域に、ミズナラは北日本全域に分布し、これらは竹林より総面積も大きいことから、計算地域全体のイソプレン放出量を左右し、VOC 律速の市街地や郊外にも多い竹林は、局地的な濃度分布や変動に対して影響していることが示唆される。

なお、提案書に示したように、この仮シミュレーションに先立って別途、ADMER-PRO のデフォルト設定をベースにし、イソプレン以外の BVOC(モノテルペン及びその他の BVOC)設定をゼロにして、2016 年/関東/夏季のオゾン濃度シミュレーションを行った。この場合は、ADMER-PRO の内蔵設定(最大値 92ppb)に対して、イソプレン以外の BVOC をゼロ設定とした場合、明らかにオゾン濃度が小さくなった(最大値 71ppb)。ADMER-PRO の内蔵設定では稲に比較的大きなモノテルペン放出量を与えており、これをゼロにしたことが影響している可能性がある。また、本章前半で述べたイソプレン高放出種のためのシミュレーションでは、竹を加味したことで、結果的にオゾン濃度が補完されたものと考えられる。

6-6. BVOC 設定に関するその他の検討

BVOC 設定の改善に関しては、令和 4 年度調査から継続して行っているが、令和 6 年度は ADMER-PRO に供するデータセットとして確定する必要から、様々な数値や条件を具体的に設定・確定する必要が生じた。過年度から継続検討している項目も含め、以下に整理する。

(1) 針葉樹(スギ、ヒノキ)の葉重量から葉面積への変換

スギ、ヒノキのような針葉樹の場合、基礎放出量は葉面積当たりではなく、葉重量当たりで表現されることが多い。シミュレーションでは植生の面積を扱うことから、これらの値を葉面積当たりに変換する必要がある。

令和5年度調査にて、深山委員より、森林総研の成果として、「スギ・ヒノキ形質データベース検索システム」をご紹介いただいている。このデータベースでは、1950年以降に発表された364の一次資料から、スギとヒノキの177の植物形質をまとめており、2019年8月現在、スギ16,410件、ヒノキ8,273件のデータが登録されている。

この中に葉の乾物重1g当たりの葉面積である比葉面積(SLA: Specific Leaf Area, cm^2/g)のデータの平均値が示されており、これを使って重量から葉面積に変換することができる。379個体のスギの平均SLAが4.9、244個体のヒノキのSLAが5.83となっている。地域、測定月、樹齢など様々なものを含むためデータのばらつきは認められるものの、十分なサンプル数があり、これら平均値を用いることとした。

スギのモノテルペン放出量 乾重量ベース $1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1} \Rightarrow$ 葉面積ベース $4.17\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

ヒノキのモノテルペン放出量 乾重量ベース $1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1} \Rightarrow$ 葉面積ベース $3.50\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

<スギ・ヒノキ形質データベース検索システム(森林総研)>

<https://db.ffpri.go.jp/SugiHinoki-TraitDB/index.html>

(2) 自然混合林の樹種割合の検討

自然林の場合、多数の樹種が混合して生息しており、優占樹種であっても、多くの占有面積割合を示すことはそれほどない。令和2年度調査におけるBVOC専門家ヒアリングでは、コナラ群落におけるコナラの割合は、多くても50%程度だろうとのコメントがあった。

自然林に関するデータベースとして、林野庁の「天然林樹種別蓄積」では、計画対象森林を対象に、都道府県別の針葉樹(スギ、ヒノキ、マツ類、カラマツ、トドマツ、エゾマツ、その他)、広葉樹(ブナ、クヌギ、ナラ類、その他広葉樹)の森林蓄積量(2017年)が示されている。我が国の森林面積は約25万 km^2 であるが、一方、森林蓄積量は約52億 m^3 であり、こちらは木材として使用できる幹の体積のことである。この資料では計画対象森林の計19.3億 m^3 に対する内訳を示しているが、個別森林の樹種面積割合の参考とすることは出来なかった。日本長期生態学研究ネットワークのデータベースでは、バイオマス量に関する公開資料があるが、例えば「富士北麓」の調査結果では4ha(200×200m)に対する毎木調査が行われているが、樹種がカラマツとフジザクラに限定され、「高山」の調査結果は測定地点の調査範囲が比較的小さく、樹種面積率の評価に利用するには難しいと判断した。

<自然林の割合についての林野庁データベース>

1) 天然林樹種別蓄積【計画対象森林】(林野庁)

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/attach/pdf/6-1.pdf>

<毎木調査が行われているデータベース>

2) 日本長期生態学研究ネットワークのデータベース・・・現地観測ネットワーク

<http://www.jalter.org/>

従来より示している生物多様性センターの植生調査や、林野庁の森林生態系多様性基礎調査については、調査地域ごとの保護すべき樹種の選定などが調査目的であり、景観上の優占樹種については述べていても、樹種や植生区分ごとの面積比率を求めることは目的ではない。すなわち、自然環境そのものを対象とした生態学的な目的での調査であり、森林の多くは純林ではない複雑な植生の混合状態であることを考えても、面積を算定することは、概略図を描く程度の意味しか持たない。また、LAIやBVOC排出量を意識した植生分類や

植生面積・植生量については、この分野の専門家の個々の研究・調査が散見される程度で、全国や広域を対象に大規模に実施された事例は無い。結果として、6-2(1)に示したように、人工林は、主要樹種だけで 100% を占め、自然林は樹種名が明示されていない樹種が一定割合含まれる設定とした。

(3) BVOC の放出パターンと温度・日射依存性

BVOC の放出物質は主にイソプレンとモノテルペンであり、このうちモノテルペンを放出する樹種には、貯蔵型と非貯蔵型の2つの放出形態がある。そしてこれら 3 つの放出パターンに対して、温度・日射に対する依存性は次のように整理される。

- 1) イソプレン放出種および MT 非貯蔵種は、広葉樹や草木に多く、BVOC を生成と同時に放出し、放出特性として光と温度に依存する。
- 2) MT 貯蔵種は、葉に BVOC の貯蔵組織を持ち、温度依存性を持つことが多い。
なお、貯蔵・非貯蔵の両方のメカニズムを合わせ持つ樹種も稀に存在する。

静岡県立大で基礎放出量データベースの構築の対象とした樹種については、同大の協力も得て表 6-11 のように整理したが、温度・日射に対する依存性をシミュレーションモデルで表現するのであれば、モノテルペン放出種を貯蔵か、非貯蔵かの放出タイプ別に分類する必要がある。

表 6-11 優占 20 樹種程度の BVOC 放出物質と放出形態

順位	優占樹種	放出成分	MT 放出特性	備考
1	スギ	モノテルペン	貯蔵	
2	ヒノキ	モノテルペン	貯蔵	
3	コナラ	イソプレン	—	
4	トドマツ	モノテルペン	貯蔵	対象外
5	その他広葉樹	樹種依存	—	
6	アカマツ	モノテルペン	貯蔵	
7	ブナ	無放出	—	
8	ミズナラ	イソプレン	—	
9	カラマツ	モノテルペン	貯蔵	常緑針葉樹はこれのみ
10	ダケカンバ	モノテルペン (推定)	貯蔵 (推定)	対象外
11	カエデ類	モノテルペン	非貯蔵 (推定)	無放出種あり
12	シナノキ	不明	不明	対象外
13	スダジイ	モノテルペン	非貯蔵	
14	クリ	モノテルペン	不明	無放出の報告もあり
15	ハンノキ類	モノテルペン	貯蔵	
16	シデ類	モノテルペン	不明	
17	アラカシ	モノテルペン	非貯蔵 (推定)	
18	ツブラジイ	モノテルペン (推定)	非貯蔵 (推定)	
19	イタヤカエデ	モノテルペン	非貯蔵	
20	モウソウチク	イソプレン	—	
24	マダケ	イソプレン	—	
52	シラカシ	モノテルペン	非貯蔵	
—	イネ	モノテルペン	不明	

わかっている範囲では、落葉広葉樹はイソプレン放出(温度・光依存)、常緑広葉樹はモノテルペン非貯蔵(温度・光依存)、常緑針葉樹はモノテルペン貯蔵(温度依存)という大まかな傾向があるが、既知の樹種の類縁種について同じような設定をすることは出来るが、根拠をもって設定作業を行うには、知見が不足している。

幸い、今般の ADMER-PRO での BVOC 更新設定によるシミュレーションは、夏場のオゾン高濃度気象条件下で行う。夏場の太陽光は 2,000~2,500PPFD 程度で、図 6-9 に示すように光依存性は飽和しており影響は小さいと考えられる。つまり、モノテルペン放出種に関して、温度に加え、光に依存するかどうかを設定しなくて

も、影響しないと考えられる。そこで本項目に関しては、現時点では、放出物質がイソプレンか、モノテルペンかは設定したが、モノテルペンの放出形態が貯蔵か非貯蔵かについては、無理に設定しないこととした。

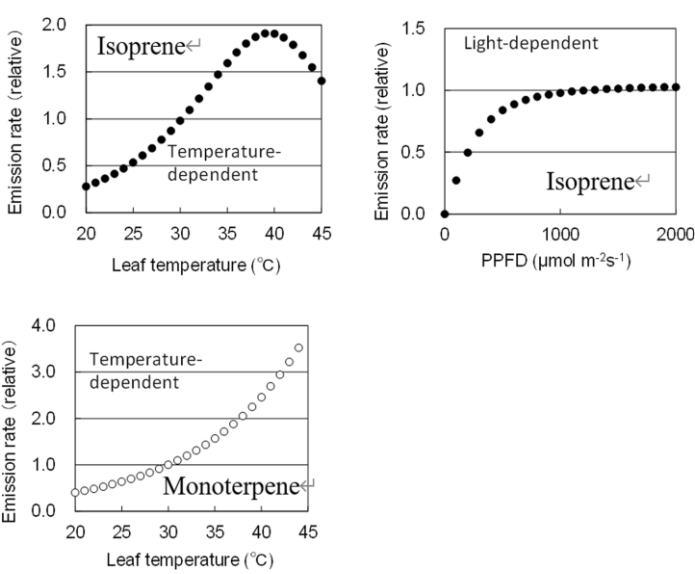


図 6-9 BVOC 放出の温度・光依存性 (G93 モデル (Guenther ら))

(4) カエデ類の BVOC 放出の設定

望月は、様々なカエデ類の BVOC 基礎放出量を網羅的に研究している。その成果データが、前出の谷らのレビュー論文の中にまとめられている (Tani et al, 2024)。この論文の Supplemental Information として、望月の成果データが整理されている。カエデについては、放出物質も放出量もまちまちで、中には無放出種もある。

表 6-12 カエデ類の BVOC 基礎放出速度

樹種名 (積算面積順位)	基礎放出速度 $\text{nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	
	イソプレン	モノテルペン
イロハモミジ (—)	—	4.8~7
イタヤカエデ (100)	<0.023	0.39
ノルウェーカエデ (—)	0.0047	0.51
コブカエデ (—)	0	0.117
トウカエデ (—)	<0.002	<0.012

(出典: Tani et al, 2024 の Supplemental Information)

ここで、面積順位は、生物多様性センターの植生調査結果から 3 次メッシュごとの面積分率に加工したデータの、全国メッシュでの面積合計値のランキングである。

カエデの無放出種に関しては、以下のものが挙げられる。

■カエデの無放出種 (カッコ内は面積順位)

オオモミジ、ハウチワカエデ、コハウチワカエデ (245)、オオイタヤメイゲツ (197)、ウリハダカエデ、コミネカエデ、ヒナウチワカエデ、ウリカエデ、イタヤカエデ (100)、ミツデカエデ、アサノハカエデ、ヒツバカエデ、テツカエデ、クロビイタヤ、メグスリノキ、タタールカエデ、ハナノキ、カジカエデ、チドリノキ

カエデ類の場合、生物多様性センターの植生中分類において、樹種名が明示的に出てくることが少ないのは、辺り一面がすべてカエデ類、のような景観を構成することが少なく、生息していても多くの他の樹種と混在している場合が多いためと推測される。

以上のことから、カエデ類の基礎放出量の設定に関しては、以下のように整理した。

- 1) 無視できない放出量を有するのは、イロハモミジの MT だが、面積順位には無い。
- 2) 放出があり、面積順位にもあるのは、イタヤカエデのみ。ただし、放出量は低く、無放出との文献もある。
- 3) 面積順位にあるが、コハウチワカエデ、オオイタヤメイゲツ、ミネカエデ(108)は無放出とした。

なお、カエデ類の基礎放出量は針葉樹と同様、乾重量あたりの放出量データである場合があり、その場合は文献^{※1, ※2}より SLA 値をイタヤカエデ $0.0167 \text{ m}^2/\text{g}$ 、イロハカエデ $0.0183 \text{ m}^2/\text{g}$ 、カエデ類の平均 SLA を $0.0175 \text{ m}^2/\text{g}$ として葉面積あたりの排出量に変換した。

※1: 高木ら、1994 <https://jfs-q.jp/kfr/47/bin090722104822009.pdf>

※2: 小池ら、2004 https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/67932/1/09_2-09.pdf

(5) 放出が不明の樹種に関する基礎放出量の設定値の割り当て

静岡県立大で基礎放出量データベースを構築の対象とした優占上位 20 種程度の樹種を除けば、具体的な放出物質、放出形態、放出量は分かっていない樹種が多い。従って自然林に対し、「その他の落葉広葉樹」など、設定値を割り当てる必要がある。最初に作成した精緻化初版のデータでは、表 6-13 のように、排出が分かっている樹種の平均値程度の値として、 $5 \sim 10 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に設定したが、基礎放出量分布が高すぎる結果となったため、下方修正した。

生物多様性センターの中分類(387 分類)の中について、文献(APG 原色樹木大図鑑、北隆館、2016)により、落葉／常緑、広葉樹／針葉樹の種別は分かるものの、放出物質は不明である。この点で、設定値を等しく揃えることは一定の意味があると考え、最終的に森林樹木に関しては $1 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に揃えた。

表 6-13 放出が不明の樹種に関する基礎放出量の設定値〔単位： $\text{nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 〕

MT: モノテルペン Isop: イソプレン	精緻化初版		精緻化第 5 版	
	設定値	設定の考え方	設定値	設定の考え方
常緑針葉樹 MT 設定値	4.9	スギ、ヒノキ、アカマツの平均値	1.0	精緻化初版では、放出不明樹種からは、放出が分かっている樹種の平均値程度の放出があるものと仮定したが、基礎放出量分布が高いまま改善されないため、下方修正した。
落葉広葉樹 Isop 設定値	10	コナラ、ミズナラの平均値の 1/3	1.0	
落葉広葉樹 MT 設定値	5	常緑広葉樹の設定値を援用	1.0	
常緑広葉樹 MT 設定値	5	スダジイ、アラカシ、シラカシの平均値の 1/2	1.0	
常緑広葉樹 Isop 設定値	5	常緑広葉樹の設定値を援用	1.0	

(6) タケ類、ササ類の設定

モウソウチクとマダケについては、精緻化初版の段階では、既述の文献値(谷ら、2024)を使用していたが、精緻化 5 版の段階では令和 6 年度の測定値(夏季ピーク値)がまとまったため、その値に更新した。

生物多様性センターの中分類では、タケ類はモウソウチクやマダケとして明示されない場合もあるため、これらの平均値をタケ類の設定値としてセットした。

表 6-14 タケ類、ササ類の基礎放出量の設定値〔単位： $\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 〕

Isop: イソプレン	精緻化初版		精緻化第 5 版	
	設定値	設定の考え方	設定値	設定の考え方
モウソウチク	17.6	文献値(谷ら, 2024)	25.5	R6 年度測定値の平均
マダケ	18.0	文献値(谷ら, 2024)	43.6	R6 年度測定値の平均
タケ類 Isop 設定値	17.8	モウソウチク、マダケの文献値の平均値	34.6	モウソウチク、マダケの測定値の平均値
ササ類 Isop 設定値	4.5	上欄平均値の 1/4	3.5	上欄平均値の 1/10

ササ類は、タケ類に比べると基礎放出量は低く、比較的高地や冷涼な地域にあり、オゾン生成への影響は大きくないと考えられる。精緻化第 5 版において、タケ類の 4 分の 1 という設定では、 $8.7 \text{ nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の高い値となるため、これもタケ類の 10 分の 1 に下方修正した。ササ類については、最終的には、フラックスに相当する基礎放出量(a)×LAI(b)×補正係数(c)の積の値が、上表の落葉／常緑、広葉樹／針葉樹の設定値と同等になるよう、補正係数(c)を調整した。

第 5 章にて記載のとおり、竹林については、補正係数(c)以外に、植生の補足不足を補う係数として補正係数(d) = 3.0 倍を設定している。この数値の根拠は、以下のような総合的な理由からである。

■タケ類の植生の補足不足を補う補正係数(d) (=3.0) の根拠

- 1) 竹の樹幹構造上、既存の基礎放出測定は完全に陽葉ではない葉を対象に測定されているため、基礎放出量の文献値や測定値が小さめになっている可能性がある。
- 2) 最近の破壊測定に基づく方法では従来のリモートセンシングによる LAI 推定値($2.2\text{--}6.5 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$)より高い値が報告されており($6.7\text{--}30.6 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) (Fuang et al, 2021)、精緻化第 4 版までの LAI 設定値(精緻化初版では $7\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ 、第 2 版～第 4 版では $10\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$)は過小の可能性がある。
- 3) スターフィールド社の方法で推定された竹林の面積分率には $50\text{m}\times 50\text{m}$ 規模未満の竹林は含んでいないため、竹林の面積を過小評価している可能性が高い。

(7) スギ、コナラ等のフラックス測定に関する知見の参照

①スギのモノテルペン放出量設定の調整

Tani & Mochizuki (2021)によると、世界における様々な植生を対象としたモノテルペンのフラックス観測結果は最大値でも $7\text{nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度であり、精緻化初版の設定値(基礎放出量(a) $11.05\times$ LAI(b) $8.0\times$ 補正係数(c) $0.4=35.36$)はこの数値より数倍高い。

また、Tani et al., 2024 によると、スギ(*Cryptomeria japonica*)の基礎放出量推定値として 0.1 未満、0.3, 0.65, $0.74 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ などが報告されており、精緻化初版のスギの設定値($2.65\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)はこれらの数値より数倍高い。

これらの知見から、精緻化第 4 版において、スギの MT 基礎放出量に対して、0.18 倍の補正係数(日陰効果の補正係数とは別に設定)を加味して下方修正している。補正係数全体をまとめて再度見直した精緻化第 5 版では、スギの基礎放出量(a)×LAI(b)×補正係数(c)の積の値が、精緻化第 4 版と精緻化第 5 版で同程度の値になるように、補正係数(c)を 0.1 に調整している。

②コナラ・ミズナラのイソプレン放出量設定の調整

コナラ、ミズナラについて、個葉からの積み上げによる放出推定値より、群落フラックスがかなり小さい、という知見(図 6-10、図 6-11)を参照し、反応速度が速いイソプレンを放出するコナラ、ミズナラについて、精緻化第 2 版において、スギの MT 基礎放出量に対して、0.2 倍の補正係数(日陰効果の補正係数とは別に設定)を加味して下方修正している。補正係数全体をまとめて再度見直した精緻化第 5 版では、コナラ、ミズナラの基礎放出量(a) × LAI(b) × 補正係数(c)の積の値が、精緻化第 2 版と精緻化第 5 版で同程度の値になるように、補正係数(c)を 0.15 に調整している。

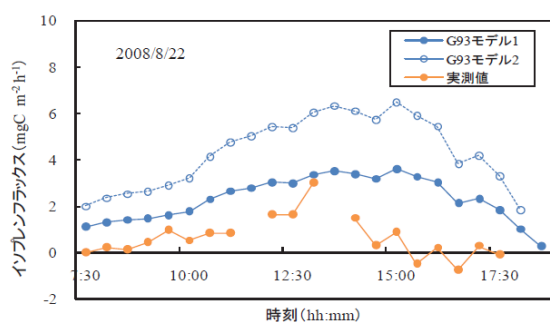


図 6-10 コナラ・ミズナラの積み上げ推定とフラックス測定値の比較の例①(奥村智憲(博士論文)、2009)

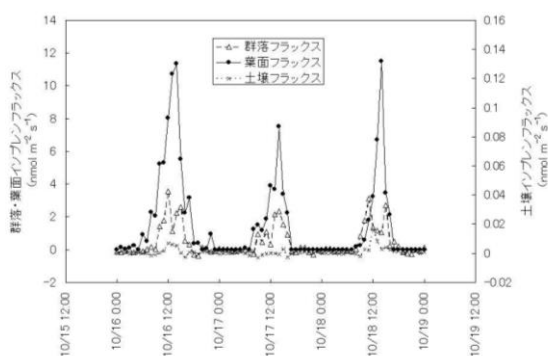


図 - 69 PTR-MSで同時多点連続観測されたイソプレンフラックス

図 6-11 コナラ・ミズナラの積み上げ推定とフラックス測定値の比較の例②(深山ら、2011※)

※日本の落葉広葉樹林におけるメタンおよび全炭化水素フラックスの高精度推定(RF-0903 平成 21~22 年度) https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/RF0903-1.pdf

③基礎排出フラックスの設定値の検証

BVOC 設定として、ADMER-PRO のデフォルト設定と同様に、基礎放出量分布が高めの結果となった精緻化第 2 版の段階で、基礎放出フラックスが高い 3 次メッシュで、かつ、単一の植生中分類が 100%を占めるデータを産総研で抽出いただいた(表 6-15)。表中の $16.156 \text{ kg} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{hr}^{-1}$ は、最もフラックス値が高い場合である。

表 6-15 基礎排出フラックスの設定値の検証

								基礎排出フラックス				
								精緻化 第 5 版	精緻化 第 5 版			
分類	面積 ランク	メッシュ 数	区分名		大コード		中コード	植生面積設定	kg/km²/hr	kg/km²/hr		
12-01-01	5	804	IV	ブナクラス域自然 植生	12		下部針広混交林	1	サワシバ・ミズナ ラ群団	サワシバ(シデ類)40%、ミズナラ 40%、そ の他落葉広葉樹 (Isop) 20%	16.156	3.55
41-01-07	6	4	VII	ヤブツバキクラス域 代償植生	41		落葉広葉樹二次 林	1	コナラ群落	コナラ 50%、その他落葉広葉樹 (Isop) 50%	15.423	3.121
22-05-07	8	3	V	ブナクラス域代償 植生	22		落葉広葉樹二次 林	5	コナラ群落	コナラ 50%、その他落葉広葉樹 (Isop) 50%	15.423	3.121
22-11-07	14	8	V	ブナクラス域代償 植生	22		落葉広葉樹二次 林	11	ミズナラ群落	ミズナラ 50%、その他落葉広葉樹 (Isop) 50%	13.953	2.754
22-01-07	4	80	V	ブナクラス域代償 植生	22		落葉広葉樹二次 林	1	ブナ・ミズナラ群 落	ブナ 40%、ミズナラ 40%、その他落葉広葉 樹 (Isop) 20%	9.694	2.13
09-01-13	38	9	III	コケモートウヒク ラス域代償植生	9		二次草原	1	ササ群落	ササ類 100%	3.812	0.846

シミュレーションで用いる基礎放出フラックスは、 $\text{kg} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{hr}^{-1}$ の単位であり、これは土地面積当たり $\mu\text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}^{-1}$ の単位では 1000 倍になる。例えば、イソプレンのみが排出されるコナラ群落の $15.423 \text{ kg} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{hr}^{-1}$ は $15423 \mu\text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{hr}^{-1}$ となるが、これは、さらに単位換算すると $63.0 \text{ nmol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (土地面積当たり) に相当し、 $\text{LAI} = 5$ 、補正係数 $= 0.6$ (精緻化第 2 版の設定) とすると葉面積当たり $21.0 \text{ nmol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ に相当するので、かなり高めの設定となっていたが、精緻化第 5 版では解消されている。

(8) 無放出種の設定

BVOC を放出しない無放出の樹種には、以下のようなものがある。

林野庁・森林生態系多様性基礎調査に基づく全国の優占順位 (= 基礎放出量データベースの構築対象の樹種) では、ブナ 7 位、クリ 14 位となっている(下記*印)。

一方、生物多様性センターの中分類(387 分類)においては、上位 100 位に入る主要なものは、ブナ、ケヤキくらいである。ここでは、中分類の全 387 項目について、樹種名が明示されている無放出種(下記の無放出樹種と、カエデ類の無放出種)は、放出ゼロを設定した。

■ 無放出を設定した樹種(カッコ内は面積順位) ※カエデ類の無放出種は 6-6 (4) 参照

ブナ*(4,10,36,89(ブナ),340(イヌブナ))、クヌギ(208,263)、イチョウ、サクラ、アベマキ、クリ*、ハナミズキ、クロガネモチ、サルスベリ(318(シマサルスベリ))、キョウチクトウ、ケヤキ(83,86,110,154)、ユリノキ

この他、草地や耕作地、非植生の土地利用区分に対しては、BVOC 設定はゼロとした。また、樹種でも高地偏在種(ダケカンバなど)、北海道偏在種(エゾマツなど)は、BVOC の排出設定をしていない。

6-7. BVOC 設定の更新データセットの完成

BVOC の更新設定のデータセットは、次の 2 つである。

1) 基礎放出量テーブル

優占 20 樹種や、放出不明樹種への設定値を含め、葉面積当たりの基礎放出量 ($\text{nmol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) を元に、単位を変換し、LAI や補正係数を加味して、樹種ごとの土地面積当たりの排出係数 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$) をまとめたもの。表 3-2 の排出係数(ADMER-PRO のデフォルト設定)を、樹種分類を細分化して更新したもの。

2) 基礎放出量－植生割り当て表

生物多様性センターの植生調査の中分類(387 分類(例:54-01-01 スギ・ヒノキ・サワラ植林))に対し、構成樹種と面積比率を設定し、1)の排出係数を割り当てた上で、この中分類の単位土地面積当たりのイソプレン、モノテルペンの排出係数を面積加重平均値として算定したもの。

実際に ADMER-PRO の 3 次メッシュに植生分類を割り当てる場合のイメージを図 6-12 に示す。図 6-12 では 3 次メッシュにブナ・ミズナラ群落(22-01-07)、サワシバ・ミズナラ群団(12-01-01)、スギ・ヒノキ・サワラ植林(54-01-01)の 3 つの植生分類がそれぞれの面積率で存在し、植生部分が合計 81%、非植生の市街地が 19%あると仮定している。それぞれの植生中分類ごとに、基礎放出量－植生割り当て表からイソプレン排出係数、モノテルペン排出係数が得られるので、これを面積重み付け平均し、メッシュの植生被覆率(0.81)を乗じれば、この 3 次メッシュからのイソプレン、モノテルペンそれぞれの排出係数を求めることができる。

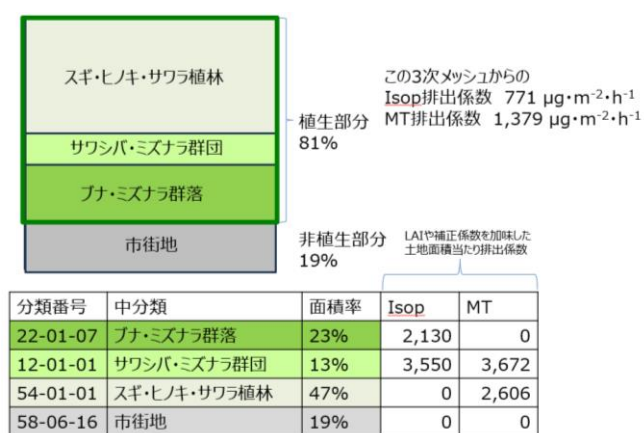


図 6-12 排出係数を 3 次メッシュに適用するイメージ

(1) 基礎放出量テーブル

基礎放出量テーブルは、最終的には精緻化第 5 版(表 6-16)を産総研に納めたが、実際には精緻化初版～第 5 版まで 5 つのバージョンについて、データを修正しては基礎放出量のマッピングやシミュレーションを行って、再度修正する、ということを繰り返している。各段階での細かな更新内容の説明は割愛し、設定の根拠や考え方は、第 5 章と 6-2～6-6 章にまとめた。参考までに、精緻化初版の設定値を表 6-17 に示す。

表 6-16 基礎放出量テーブル(精緻化第5版=最終的なBVOC更新データ)

種別	樹種名/土地区分名	放出物質	A 基礎放出量 (葉面積あたり)	基礎放出量 (単位換算後)	B LAI 設定	C 日陰と ラックスを加 味した補正 係数	D 植生捕 捉不足を 補う補正 係数	補正後排出係数 (土地面積あたり)	ADMER-PRO設定値 (土地面積あたり)
			nmol・m ⁻² ・s ⁻¹	μg・m ⁻² ・h ⁻¹				μg・m ⁻² ・h ⁻¹	μg・m ⁻² ・h ⁻¹
常緑針葉樹	1.スギ	MT	11.05	5,410	8	0.1	—	4,328	針葉樹MT 3886
常緑針葉樹	2.ヒノキ	MT	1.93	943	8	0.3	—	2,264	
常緑針葉樹	6.アカマツ	MT	1.6	783	8	0.3	—	1,880	
常緑針葉樹	常緑針葉樹MT設定値	MT	1.0	490	8	0.3	—	1,175	
落葉針葉樹	9.カラマツ	MT	1.4	685	5.5	0.3	—	1,131	針葉樹MT 3886
落葉広葉樹	3.コナラ	Isop	32	7,834	5	0.15	—	5,875	広葉樹Isop 21435
落葉広葉樹	7.ブナ (無放出)	無放出	0	0	5	0.3	—	0	
落葉広葉樹	8.ミズナラ	Isop	28	6,854	5	0.15	—	5,141	
落葉広葉樹	落葉広葉樹Isop設定値	Isop	1.0	245	5	0.3	—	367	
落葉広葉樹	落葉広葉樹 (無放出)	無放出	0	0	5	0.3	—	0	広葉樹MT 193
落葉広葉樹	15.ハンノキ	MT	5	2,448	5	0.3	—	3,672	
落葉広葉樹	16.シデ類	MT	5	2,448	5	0.3	—	3,672	
落葉広葉樹	落葉広葉樹MT設定値	MT	1.0	490	5	0.3	—	734	
常緑広葉樹	13.スダジイ	MT	7.8	3,819	8	0.3	—	9,165	
常緑広葉樹	17.アラカシ	MT	7.3	3,574	8	0.3	—	8,578	
常緑広葉樹	52.シラカシ	MT	9.5	4,651	8	0.3	—	11,163	
常緑広葉樹	常緑広葉樹MT設定値	MT	1.0	490	8	0.3	—	1,175	
常緑広葉樹	18.ツブラジイ	MT (推定)	7.8	3,819	8	0.3	—	9,165	広葉樹Isop 21435
常緑広葉樹	常緑広葉樹Isop設定値	Isop	1.0	245	8	0.3	—	588	
常緑広葉樹	常緑広葉樹 (無放出)	無放出	0	0	8	0.3	—	0	稲 (イネ科) Isop 0 MT 607 その他 2410
竹類	20.モウソウチク	Isop	25.5	6,242	10	0.3	3	56,182	
竹類	24.マダケ	Isop	43.6	10,673	10	0.3	3	96,060	
竹類	タケ類 (モウソウチク、マダケ平均値)	Isop	34.6	8,458	10	0.3	3	76,121	
竹類	ササ類 (上記平均値の1/10程度)	Isop	3.5	846	10	0.1	—	846	
カエデ類	11.カエデ類Isop,MT	無放出 (設定)	0	0	5	0.3	—	0	※基礎放出量が大まか いはイロハモミジだが、面 積占有率のランクに出て こない。
カエデ類	イロハモミジMT	MT	6.1	2,987	5	0.3	—	4,480	
カエデ類	19.イタヤカエデIsop	Isop	0.04	10	5	0.3	—	15	
カエデ類	19.イタヤカエデMT	MT	0.01	6	5	0.3	—	9	
草地、耕作地	Isop極低	Isop	0	0	3	0.1	—	0	0
偏在種	(高地偏在種)	一部不明	0	0	5	0.1	—	0	0
偏在種	(北海道偏在種)	MT	0	0	5	0.1	—	0	0
市街地等	非植生	放出なし	0	0	1	0	—	0	0

表 6-17 基礎放出量テーブル(精緻化初版=参考)

種別	樹種名/土地区分名	放出物質	(a) 基礎放出量 (葉面積あたり) nmol・m ⁻² ・s ⁻¹	基礎放出量 (単位換算後) μg・m ⁻² ・h ⁻¹	(b) LAI設定	(c) 日陰 とフラックス を加味した 補正係数	排出係数Isop (土地面積あたり) μg・m ⁻² ・h ⁻¹	排出係数MT (土地面積あたり) μg・m ⁻² ・h ⁻¹
常緑針葉樹	1.スギ	MT	11.05	5,408	8	0.4	—	17,306
常緑針葉樹	2.ヒノキ	MT	1.93	943	8	0.4	—	3,018
常緑針葉樹	6.アカマツ	MT	1.6	783	8	0.4	—	2,506
常緑針葉樹	常緑針葉樹MT設定値	MT	4.9	2,378	8	0.4	—	7,610
落葉針葉樹	9.カラマツ	MT	1.4	685	5.5	0.55	—	2,072
落葉広葉樹	3.コナラ	Isop	32	7,834	5	0.6	23,502	—
落葉広葉樹	7.ブナ (無放出)	無放出	0	0	5	0.6	0	0
落葉広葉樹	8.ミズナラ	Isop	28	6,854	5	0.6	20,562	—
落葉広葉樹	落葉広葉樹Isop設定値	Isop	10.0	2,448	5	0.6	7,344	—
落葉広葉樹	落葉広葉樹 (無放出)	無放出	0	0	5	0.6	0	0
落葉広葉樹	15.ハンノキ	MT	5	2,448	5	0.6	—	7,344
落葉広葉樹	16.シデ類	MT	5	2,448	5	0.6	—	7,344
落葉広葉樹	落葉広葉樹MT設定値	MT	5.0	2,448	5	0.6	—	7,344
常緑広葉樹	13.スダジイ	MT	15.0	7,344	8	0.4	—	23,501
常緑広葉樹	17.アラカシ	MT	8.0	3,917	8	0.4	—	12,534
常緑広葉樹	52.シラカシ	MT	7	3,427	8	0.4	—	10,966
常緑広葉樹	常緑広葉樹MT設定値	MT	5.0	2,448	8	0.4	—	7,834
常緑広葉樹	18.ツブラジイ	MT (推定)	15.0	7,344	8	0.4	—	23,501
常緑広葉樹	常緑広葉樹Isop設定値	Isop	5.0	2,448	8	0.4	7,834	—
常緑広葉樹	常緑広葉樹 (無放出)	無放出	0	0	8	0.4	0	0
竹類	20.モウソウチク	Isop	18	4,406	7	0.5	15,421	—
竹類	24.マダケ	Isop	17.6	4,308	7	0.5	15,078	—
竹類	タケ類 (モウソウチク、マダケ平均値)	Isop	17.8	4,357	7	0.5	15,250	—
竹類	ササ類 (モウソウチク・マダケの1/4程度)	Isop	4.5	1,089	7	0.5	3,812	—
カエデ類	11.カエデ類Isop,MT	無放出 (設定)	0	0	5	0.7	0	0
カエデ類	イロハモミジMT	MT	6.1	2,987	5	0.7	—	10,455
カエデ類	19.イタヤカエデIsop	Isop	0.04	10	5	0.7	34	—
カエデ類	19.イタヤカエデMT	MT	0.01	6	5	0.7	—	20
草地、耕作地	Isop極低	Isop	0	0	3	0.75	0	0
偏在種	(高地偏在種)	一部不明	0	0	5	0.6	0	0
偏在種	(北海道偏在種)	MT	0	0	5	0.6	0	0
市街地等	非植生	放出なし	0	0	1	0	0	0

表 6-16 には、ADMER-PRO のデフォルト設定値(表 3-2 と同じ)を比較のため記した。ADMER-PRO のデフォルト設定に比べて、以下のように更新された。

- ・常緑針葉樹(スギ等)、落葉針葉樹(カラマツ)のモノテルペンは同程度かやや下方修正
- ・落葉広葉樹(コナラ等)、常緑広葉樹(設定値)のイソプレンは大きく下方修正
- ・落葉広葉樹(ハンノキ等)、常緑広葉樹(スダジイ等)のモノテルペンは上方修正
- ・イネ科の植物は、ADMER-PRO で放出が設定されていた稲からの放出設定を 0 とし、新たにイソプレン高放出種の竹林を加味

総じて、森林からの BVOC 排出量は下方修正気味になった一方で、郊外部等で増加している竹林は、他の樹種と比較しても、かなりインパクトのあるイソプレン排出係数を設定したことになる。ADMER-PRO のデフォルトでの広葉樹、針葉樹の 2 分類から、樹種分類も植生区分も細分化され、改善が図られた。

なお、表 6-16 において、(a) 基礎放出量(葉面積当たり)は、静岡県立大の測定・調査によって、信頼性が高いデータとしてまとめられているが、これをシミュレーションに供するための様々な設定や補正に関しては、不確実性は残っている。我が国の植生調査が、BVOC に関連付けて行われていないことや、そもそも BVOC の網羅的な測定値(同時継続的に多数の箇所で測定したデータ)が乏しいなど、基本的な部分でも課題は多く、この分野の知見の蓄積が今後必要と考えられる。日陰効果のモデリングや、フラックス測定値と個葉測定値の関係、混合林における BVOC 排出の実態なども、引き続き検討すべき課題である。

(2) 基礎放出量－植生割り当て表

もう1つの産総研への納品物が、基礎放出量－植生割り当て表である。実際には植生中分類 387 分類すべてに対してイソプレンとモノテルペン排出係数を算出・設定しているが、表 6-18 では 3 次メッシュ面積データの全国面積積算順位の上位から 30 位までを抜粋して示す。

表 6-18 基礎放出量－植生割り当て表(積算面積ランク 30 位までの抜粋)

ランク	分類番号	積算km ²	ha	面積占有	植生区分	区分名	大コード	大コード名称	中コード	中コード名称	補正後排出係数 Isop (植生分類単位)	補正後排出係数MT (植生分類単位)	MEGAN CODE	MEGAN分類名
1	54-01-01	80182.7	8018269	17.57%	IX	植林地・耕作地植生	54	植林地	01	スギ・ヒノキ・サワラ植林	0	2606	01	Needleleaf Evergreen Temperate Tree
2	57-04-15	39058.6	3905857	8.56%	IX	植林地・耕作地植生	57	耕作地	04	水田雑草群落	0	0	15	Crop
3	58-01-16	32630.6	3263062	7.15%	X	市街地等	58	市街地等	01	市街地	0	0	16	Others
4	22-01-07	24787.1	2478701	5.43%	V	ブナクラス域代償植	22	落葉広葉樹二	01	ブナ・ミズナラ群落	2130	0	07	Broadleaf Deciduous Temperate Tree
5	12-01-01	22198.3	2219834	4.87%	IV	ブナクラス域自然植	12	下部針広混交	01	サウスピー・ミズナラ群団	3550	3672	01	Needleleaf Evergreen Temperate Tree
6	41-01-07	21785.8	2178582	4.77%	VII	ヤブツバキクラス域	41	落葉広葉樹二	01	コナラ群落	3121	0	07	Broadleaf Deciduous Temperate Tree
7	57-03-15	20107.5	2010746	4.41%	IX	植林地・耕作地植生	57	耕作地	03	畑雑草群落	0	0	15	Crop
8	22-05-07	15046.9	1504685	3.30%	V	ブナクラス域代償植	22	落葉広葉樹二	05	コナラ群落	3121	0	07	Broadleaf Deciduous Temperate Tree
9	54-07-03	13398.4	1339839	2.94%	IX	植林地・耕作地植生	54	植林地	07	カラマツ植林	0	1131	03	Needleleaf Deciduous Boreal Tree
10	11-01-07	13124.8	1312482	2.88%	IV	ブナクラス域自然植	11	落葉広葉樹林	01	チシマササ・ブナ群団	412	0	07	Broadleaf Deciduous Temperate Tree
11	40-01-05	12643.4	1264340	2.77%	VII	ヤブツバキクラス域	40	常緑広葉樹二	01	シイ・カシ二次林	367	5170	05	Broadleaf Evergreen Temperate Tree
12	58-06-16	11965.1	1196500	2.62%	X	市街地等	58	市街地等	06	開放水域	0	0	16	Others
13	42-01-01	11030.1	1103004	2.42%	VII	ヤブツバキクラス域	42	常緑針葉樹二	01	アカマツ群落	0	1528	01	Needleleaf Evergreen Temperate Tree
14	22-11-07	9549.3	954930	2.09%	V	ブナクラス域代償植	22	落葉広葉樹二	11	ミズナラ群落	2754	0	07	Broadleaf Deciduous Temperate Tree
15	56-02-15	9390.31	939030	2.06%	IX	植林地・耕作地植生	56	牧草地・ゴル	02	牧草地	0	0	15	Crop
16	23-01-01	8910.53	891052	1.95%	V	ブナクラス域代償植	23	常緑針葉樹二	01	アカマツ群落	0	1528	01	Needleleaf Evergreen Temperate Tree
17	54-05-01	7836.36	783636	1.72%	IX	植林地・耕作地植生	54	植林地	05	トドマツ植林	0	0	01	Needleleaf Evergreen Temperate Tree
18	04-01-02	7240.18	724017	1.59%	II	コケモモ・トウヒク	04	亜高山帯針葉	01	エゾマツ群団	0	588	02	Needleleaf Evergreen Boreal Tree
19	57-02-15	6618.06	661806	1.45%	IX	植林地・耕作地植生	57	耕作地	02	果樹園	0	0	15	Crop
20	54-02-01	4033.62	403362	0.88%	IX	植林地・耕作地植生	54	植林地	02	アカマツ植林	0	1880	01	Needleleaf Evergreen Temperate Tree
21	05-01-02	3701.99	370199	0.81%	II	コケモモ・トウヒク	05	亜高山帯針葉	01	オオシラビソ群団	0	1175	02	Needleleaf Evergreen Boreal Tree
22	58-07-16	3579.2	357920	0.78%	X	市街地等	58	市街地等	07	自然裸地	0	0	16	Others
23	06-01-08	3440.5	344049	0.75%	II	コケモモ・トウヒク	06	亜高山帯広葉	01	ミドリキザサ・ダケカンバ	122	0	08	Broadleaf Deciduous Boreal Tree
24	58-03-16	3275.62	327562	0.72%	X	市街地等	58	市街地等	03	工場地帯	0	0	16	Others
25	10-00-11	3116.99	311698	0.68%	III	コケモモ・トウヒク	10	伐採跡地群落	00		0	0	11	Broadleaf Deciduous Boreal Shrub
26	57-01-15	2976.82	297681	0.65%	IX	植林地・耕作地植生	57	耕作地	01	路傍・空地雑草群落	0	0	15	Crop
27	58-04-16	2450.19	245019	0.54%	X	市街地等	58	市街地等	04	造成地	0	0	16	Others
28	06-03-08	2360.65	236064	0.52%	II	コケモモ・トウヒク	06	亜高山帯広葉	03	エゾメシジロ・ウコンツギ群	367	367	08	Broadleaf Deciduous Boreal Tree
29	55-00-05	2261.56	226155	0.50%	IX	植林地・耕作地植生	55	竹林	00		76121	0	05	Broadleaf Evergreen Temperate Tree
30	56-01-15	2137.81	213780	0.47%	IX	植林地・耕作地植生	56	牧草地・ゴル	01	ゴルフ場・芝地	0	0	15	Crop

6-8. BVOC 更新設定におけるマッピングとシミュレーション結果

BVOC 設定を更新の上で、シミュレーションを実施する、というストーリーであるが、実際には、精緻化各版を産総研に納め、ADMER-PRO デフォルト設定と比較して、以下の項目について産総研で整理・計算を行い、産環協へフィードバックして修正を図る、ということを繰り返した。以下の①～⑥の項目について、(1)～(6)に順次結果を示す。

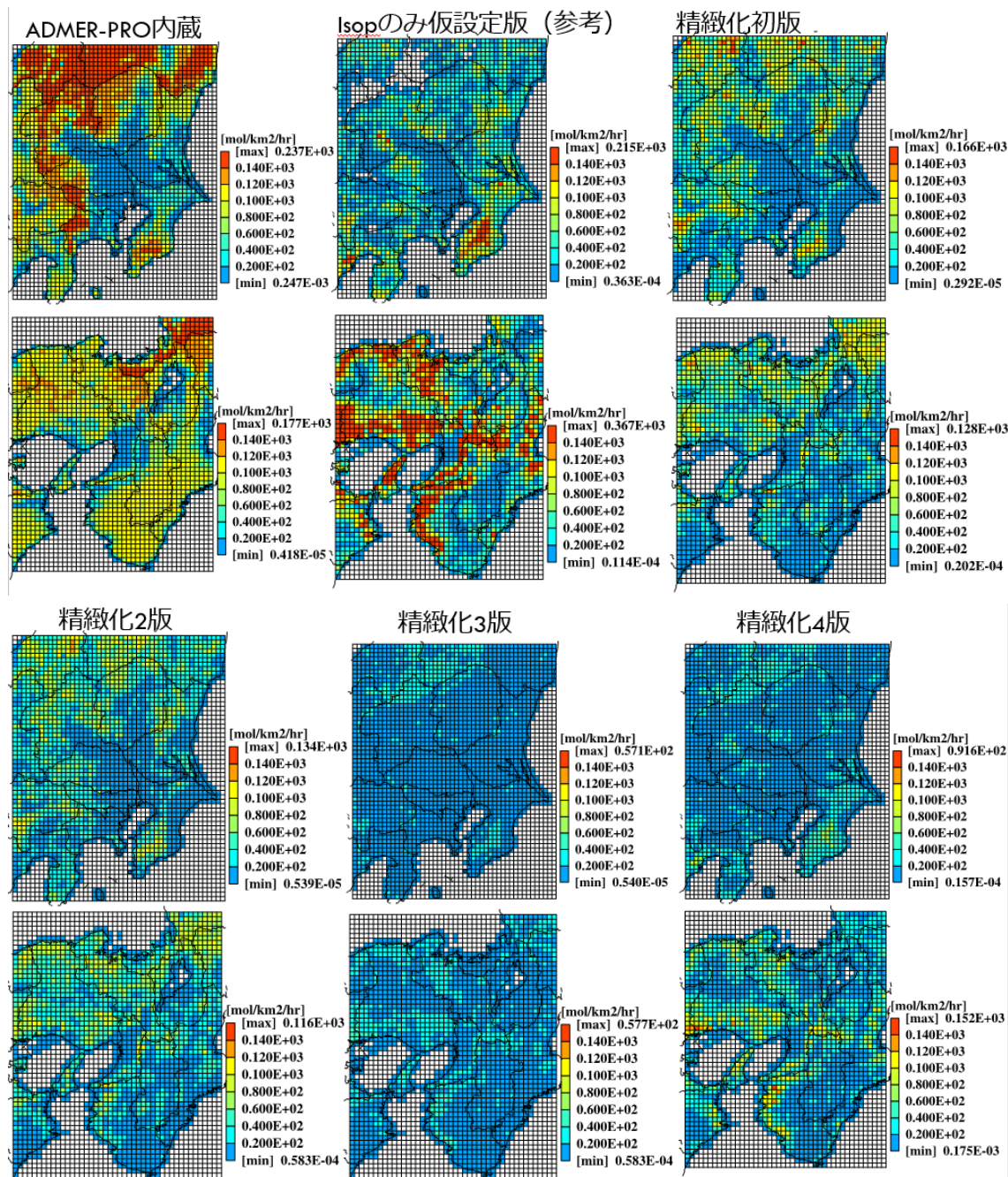
■産総研でのマッピング、およびシミュレーションによる精緻化データの検証項目

- ①基礎放出量分布 BVOC 更新設定を元に、基礎放出量の分布をマッピングした。
- ②トップダウン推計との合致性 HCHO カラムと、基礎放出量(温度補正)の分布合致性を検証した。
- ③実測値との整合性(その 1:つくば) AQUAS-Tsukuba(2017 年 8 月)でホルムアルデヒド濃度、オゾン濃度を計算し、実測値の再現性を検証した。
- ④実測値との整合性(その 2:京都) AQUAS-Kyoto(2018 年 8 月)でホルムアルデヒド濃度、オゾン濃度を計算し、実測値の再現性を検証した。ただし、ホルムアルデヒド濃度は、直接の実測値が無かったため、アセトアルデヒド濃度から推計した値を、近畿大学・河野七瀬先生からご提供いただいた。
- ⑤地域のオゾン濃度 関東地方、近畿地方のオゾン濃度実測値の分布とシミュレーションによる濃度分布を対比した。
- ⑥精緻化各版の比較検討 上記の検証成績や、相関分析による比較検討を行った。

(1) 基礎放出量分布

まず、関東地方、近畿地方での 2017 年 8 月におけるイソプレンの基礎放出量分布を図 6-13 に示す。

「Isop のみ仮設定版」は、6-5(2)に示した、イソペン高放出種のみを設定した仮計算値である。最終的に精緻化 5 版を本調査の更新設定としたが、参考までに、精緻化 5 版で竹のみ 2 倍とした場合、精緻化 5 版でコナラ・ミズナラのみ 2 倍とした場合についても合わせて示す。



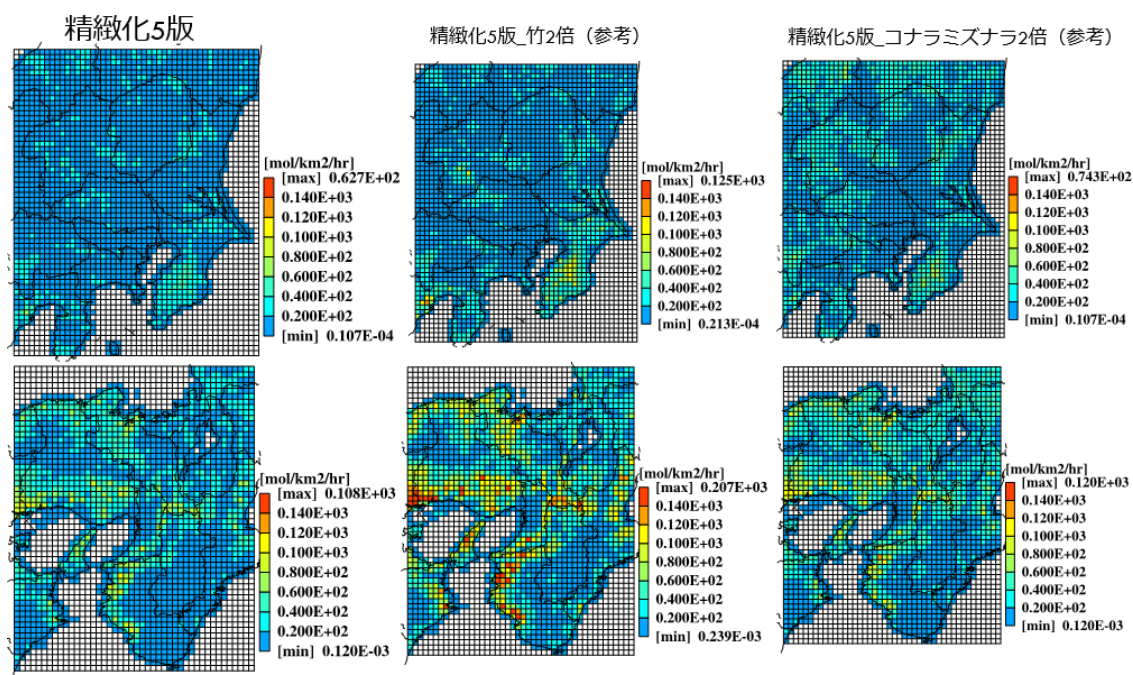
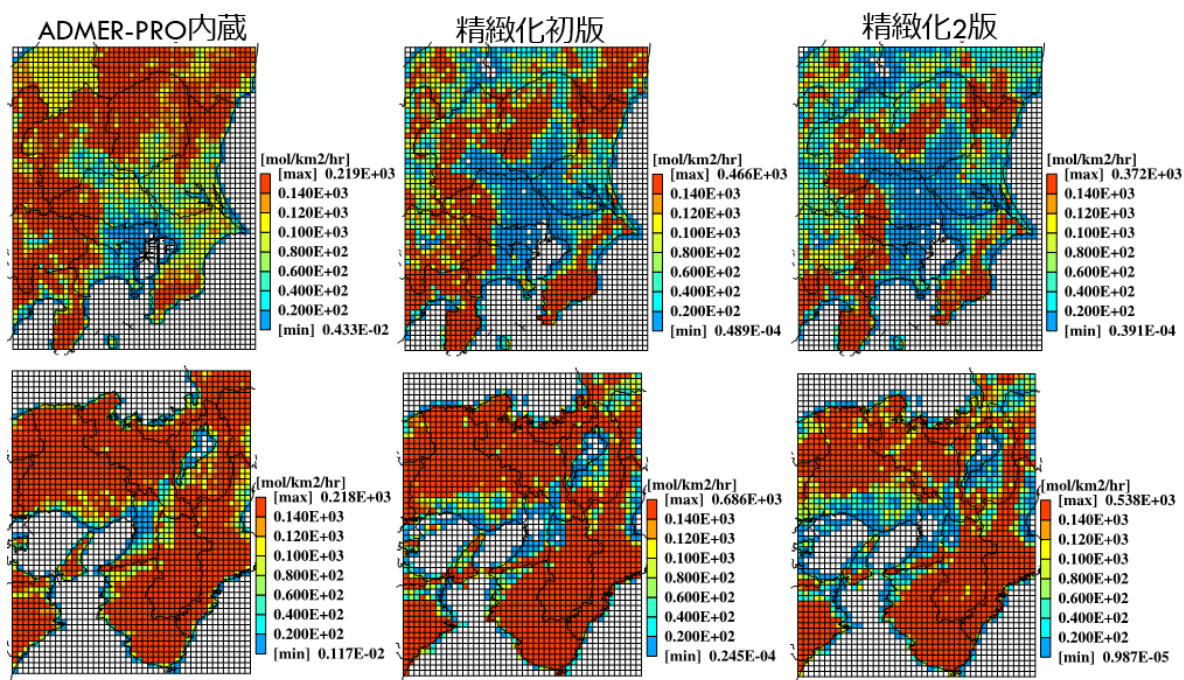


図 6-13 精緻化各版における基礎放出量分布 (イソプレン、2017 年 8 月)

精緻化初版～第 2 版では、まだ山岳部等でイソプレンの基礎放出量分布が高い傾向が見られるが、精緻化第 5 版では、分布の違和感は解消されている。竹林とコナラ・ミズナラの 2 倍設定では、前者の方が、都市部の基礎放出量分布への影響が強く出ているように思われる。

次に、イソプレン以外の BVOC の基礎放出量分布を図 6-14 に示す。「Isop のみ仮設定版」はイソプレンしか設定していないので、図 6-14 には現れない。



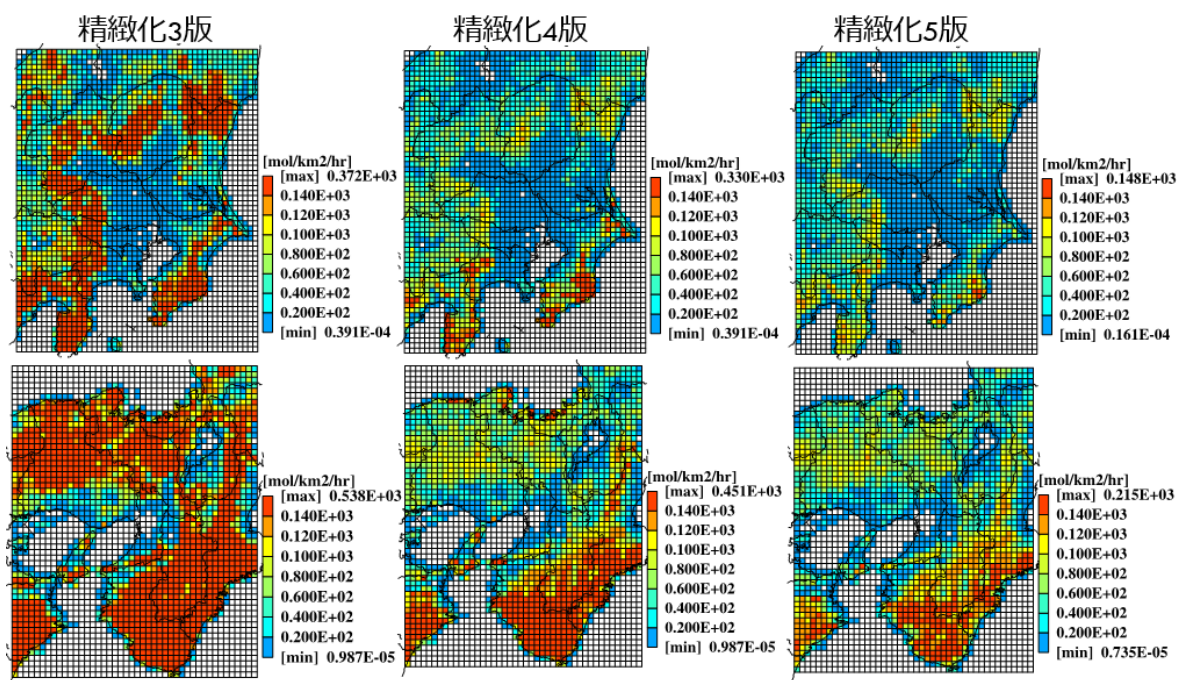


図 6-14 精緻化各版における基礎放出量分布（イソプレン以外、2017 年 8 月）

イソプレン以外の BVOC についても、精緻化の初版～第 2 版では、ADMER-PRO のデフォルト設定に近い分布となっているが、精緻化第 5 版では、分布の違和感は解消されている。

(2) トップダウン推計との合致性

次に、衛星観測による HCHO カラムの分布と、温度補正を施したイソプレン基礎放出量分布の関係を図 6-15 に示す。基礎放出量は 30℃での値であるが、高緯度や高地では気温はこれより低いと思われるので、温度補正をした上で分布を比較した。

精緻化初版では日本海側や山岳部で高い傾向があるが、精緻化第 4 版あたりに至って、分布が合致して来ている。

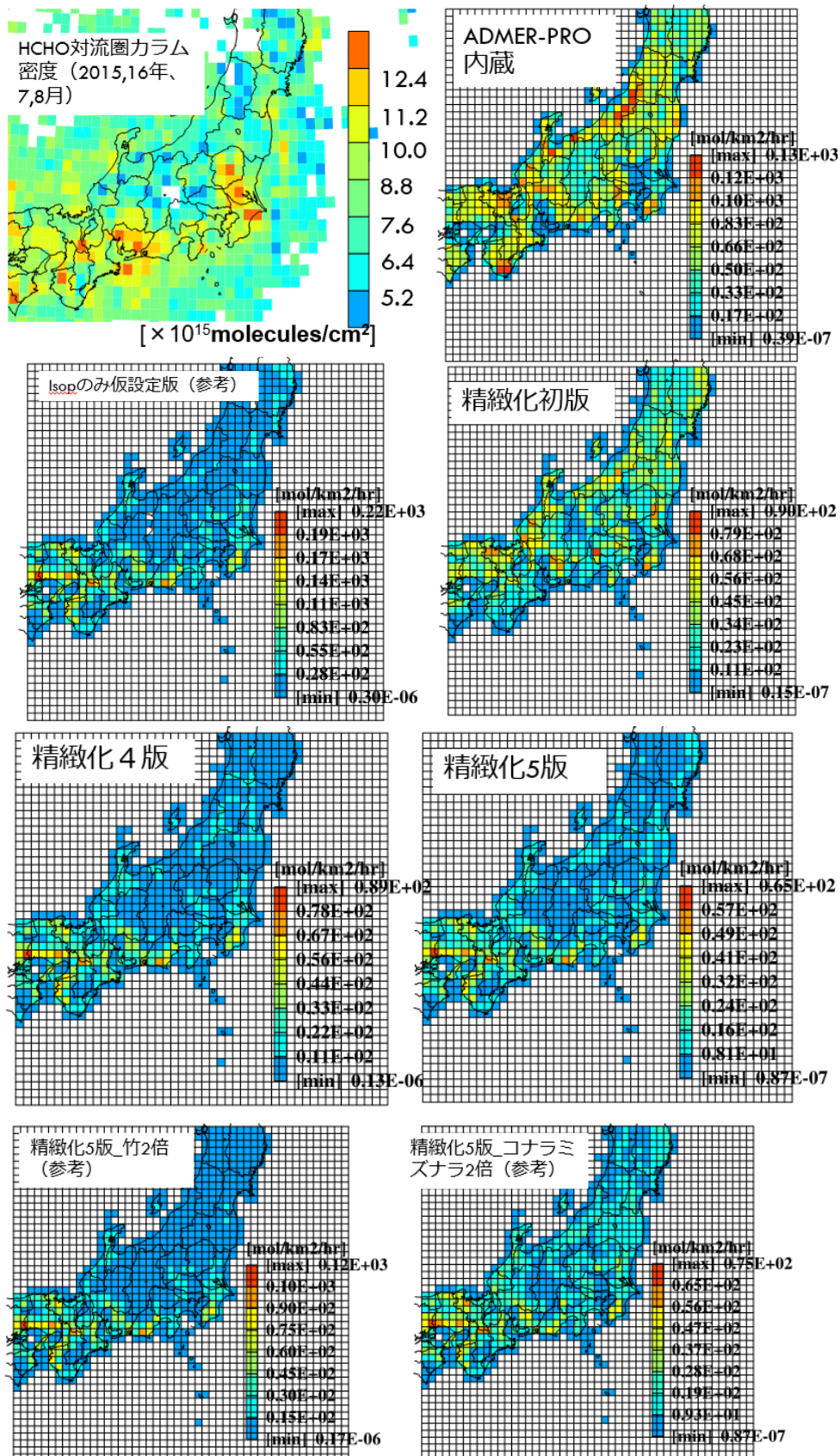


図 6-15 HCHO カラム密度と精緻化各版における温度補正したイソプレン基礎放出量分布 (2017 年 8 月)

(3) 実測値との整合性（その1：AQUAS-Tsukuba（2017年8月））

実測値との整合性の検討として、2017年8月に実施されたつくば集中観測期間（AQUAS-Tsukuba）におけるホルムアルデヒドの実測値・計算値の比較を図 6-16 に、オゾンの比較を図 6-17 に示す。

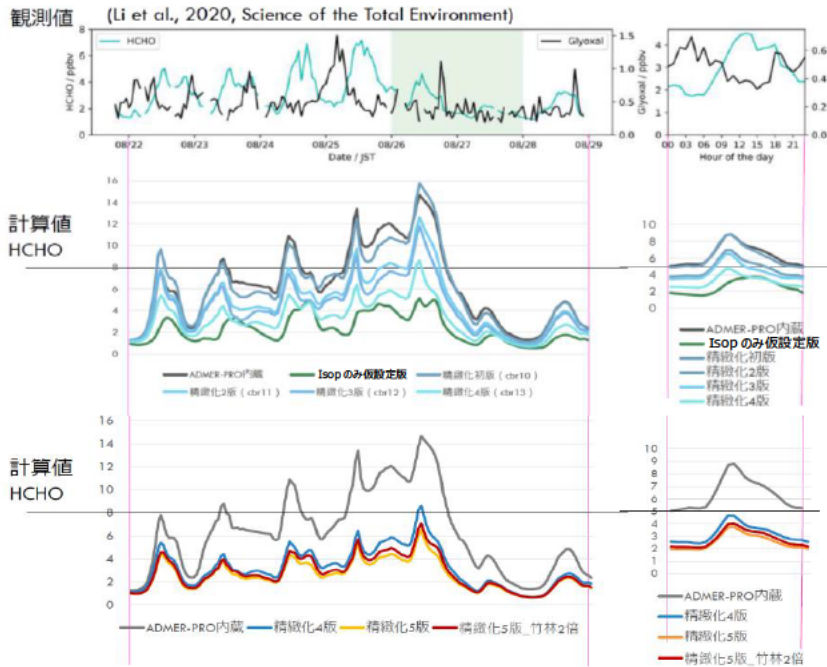


図 6-16 AQUAS-Tsukuba のホルムアルデヒド実測値と同期間を対象とした計算値の比較

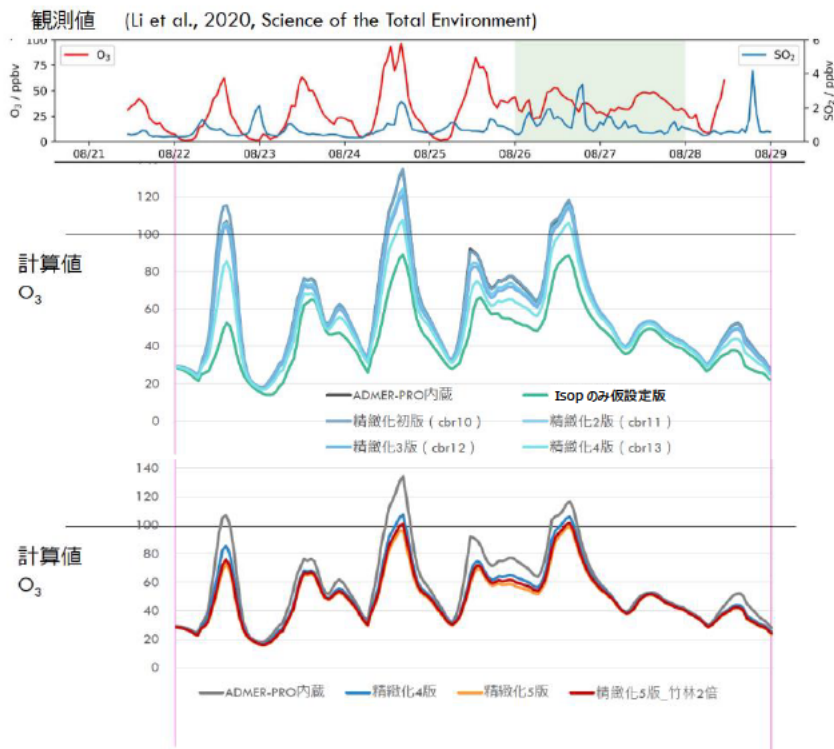


図 6-17 AQUAS-Tsukuba のオゾン実測値と同期間を対象とした計算値の比較

ホルムアルデヒド濃度、オゾン濃度とも、ADMER-PRO のデフォルト設定では観測値を大幅に上回る計算結果となっており、精緻化第3版辺りまでは計算値が高い傾向があったが、精緻化4版以降は、実測値の最大値である8ppbv 前後に収まってきている。

なお、Isop のみ仮設定版では、図 6-16 の右に示す日内変動も概ね合致したが、今般の精緻化各版では、いずれも日内変動は合致しなかった。

(4) 実測値との整合性（その2：AQUAS-Kyoto（2018年8月））

実測値との整合性の検討の2つ目として、2018年8月に実施された京都の集中観測期間（AQUAS-Kyoto）におけるホルムアルデヒドの実測値・計算値の比較を図 6-18 に、オゾンの実測値・計算値の比較を図 6-19 に示す。

なお、AQUAS-Kyoto では、ホルムアルデヒド濃度は直接測定されていないため、アセトアルデヒド濃度から推定したホルムアルデヒド濃度のデータを、近畿大学・河野七瀬先生からご提供いただき、これを実測値と見なして比較を行った。ここでのホルムアルデヒド濃度の推定方法の概略は、以下のとおりである。

- 1) PRTR のアセトアルデヒドデータを、2020 年の同時期京都の平均値と一致するように感度補正(アセトアルデヒド濃度は2018 年と2020 年で劇的には変わっていないだろうという仮定)。
- 2) アセトアルデヒドとホルムアルデヒドの比率はほぼ2018 年と2020 年で一致しているであろう、という仮定から、2018 年の補正アセトアルデヒド濃度から2018 年のホルムアルデヒド濃度を推定。

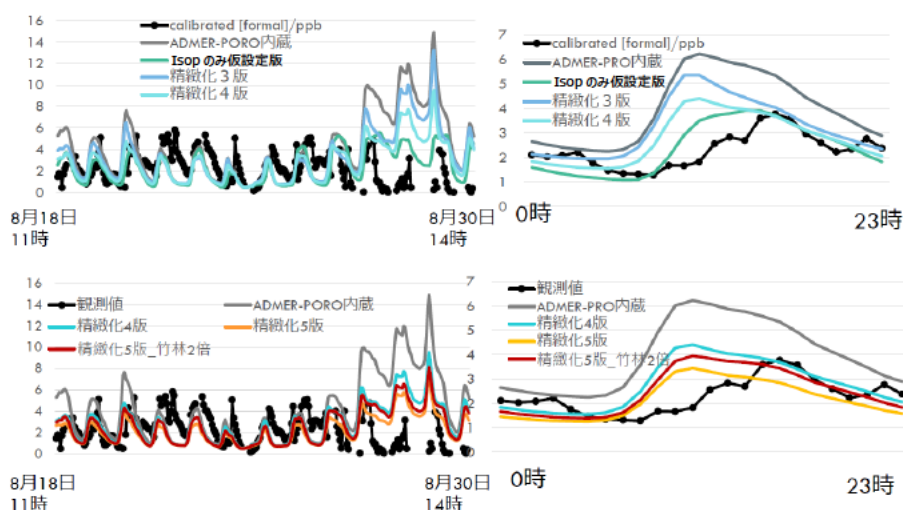


図 6-18 AQUAS-Kyoto のホルムアルデヒド濃度推定値と同期間を対象とした計算値の比較

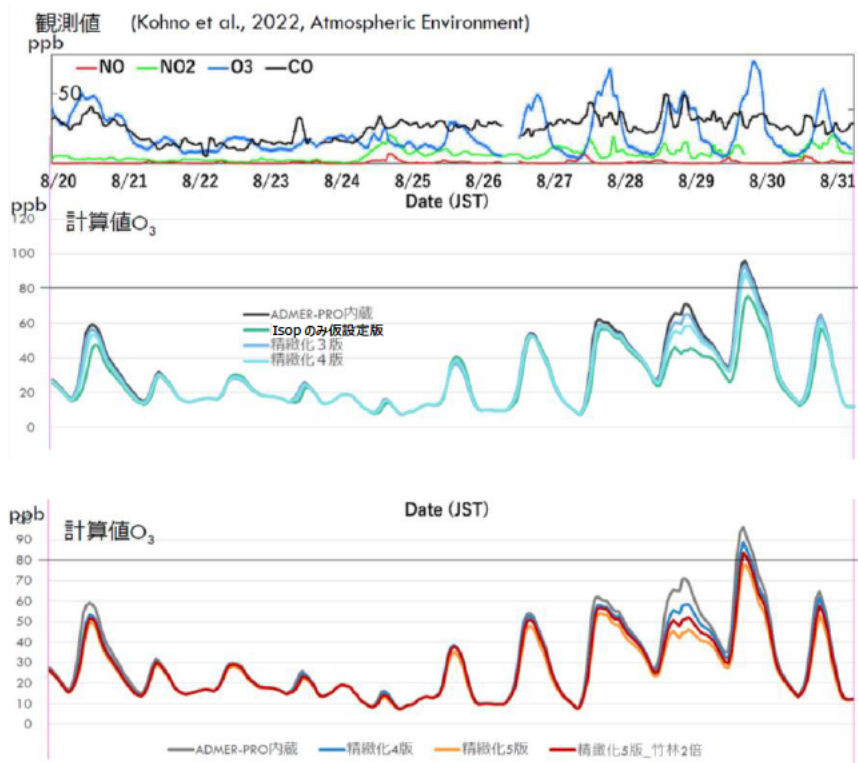


図 6-19 AQUAS-Kyoto のオゾン濃度測定値と同期間を対象とした計算値の比較

ホルムアルデヒド濃度については、ADMER-PRO のデフォルト設定では顕著に高い濃度が計算されているのに対し、精緻化各版では改善されている。期間中の最大値を 6ppbv とみれば、精緻化 5 版、及び精緻化 5 版+竹林 2 倍の合致性が高い。日内変動は、日内最高値のピーク位置まで含めると「Isop のみ仮設定版」が最も良いが、各精緻化版では日内変動のピーク値の点では精緻化 5 版+竹林 2 倍が最も良い。ただし、AQUAS-Tsukuba と同様、AQUAS-Kyoto に対しても、日内変動のピーク時間は再現されていない。

オゾン濃度に関しては、ADMER-PRO のデフォルト設定も含めて、精緻化各版で大きな差異は見られないが、精緻化各版で差が生じている 8/29、8/30 の両日に着目すれば、精緻化 5 版または精緻化 5 版+竹林 2 倍が実測値のピーク(約 80ppbv)との合致性が良いと言える。

(5) 各地域の広域的なオゾン濃度分布との比較

前項に述べた AQUAS-Tsukuba (2017) や AQUAS-Kyoto (2018) は、測定場所において夏季の 2 週間程度の期間、OH ラジカル等も含めた様々な物質を同時集中的に測定して、オゾンや PM2.5 の生成メカニズムに関する知見を得ようとしたものである。

ここでは、より広域的に、関東地方、近畿地方におけるオゾン観測値との分布を比較した。関東地方について、2017 年 8 月の特定日の 15 時の計算値による比較を図 6-20 に、AQUAS-Tsukuba の測定対象期間の 15 時の平均値による比較を図 6-21 に、近畿地方について、2018 年 8 月の特定日の 15 時の計算値による比較を図 6-22 に、AQUAS-Kyoto の測定対象期間の 15 時の平均値による比較を図 6-23 に示す。

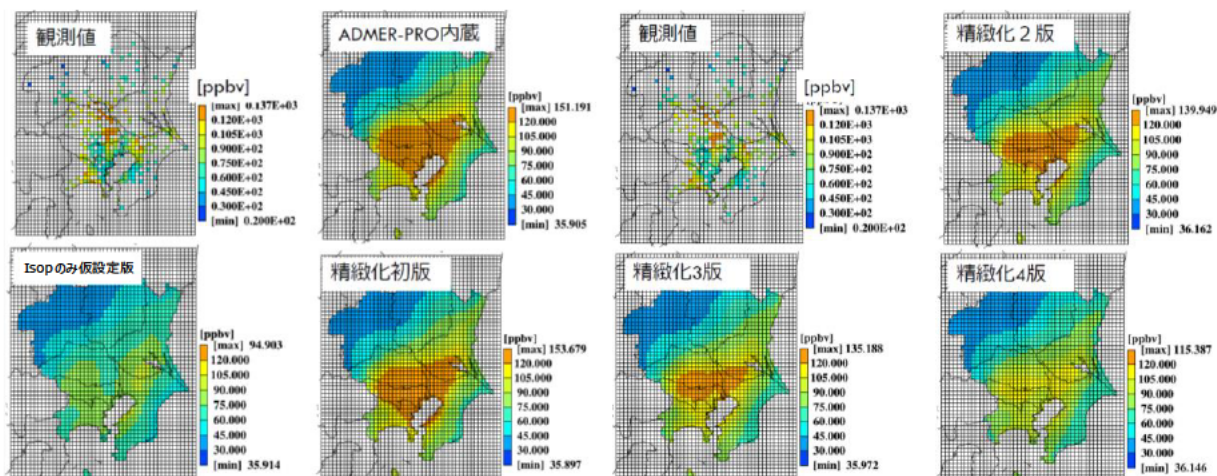


図 6-20 AQUAS-Tsukuba の観測期間内の特定日 (2017 年 8 月 24 日 15 時) におけるオゾン濃度の観測値と計算値の比較

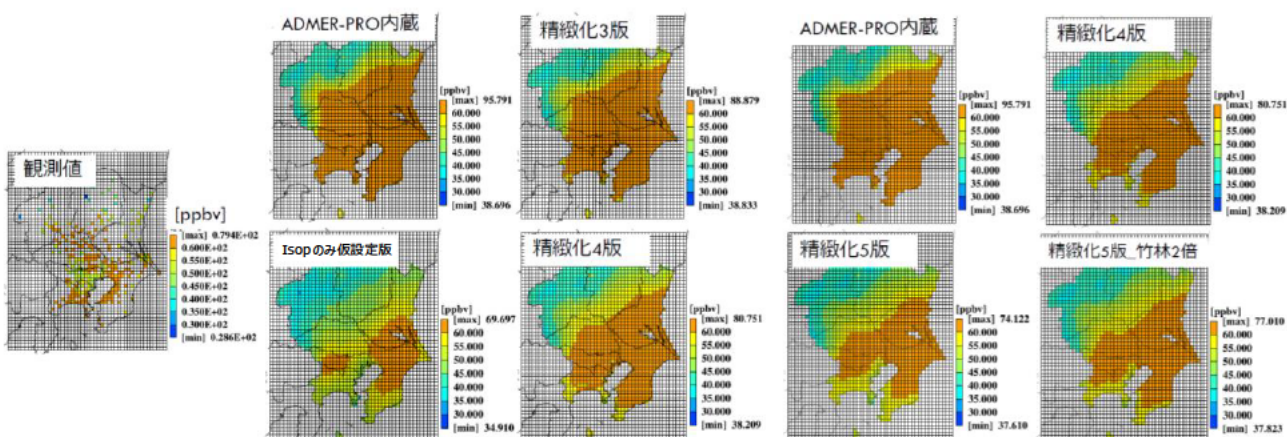


図 6-21 AQUAS-Tsukuba の観測期間の 15 時平均におけるオゾン濃度の観測値と計算値の比較

まず、関東地方において、2017 年夏季の特定日におけるオゾン濃度分布の比較では、ADMER-PRO のデフォルト設定および精緻化第 3 版までは、都市部を中心に過大推計となっており、一方で精緻化第 4 版では埼玉県の高濃度が再現されていない。AQUAS-Tsukuba の観測期間内の 15 時平均値の比較では、精緻化各版で、都市部を中心に過大推計となっており、「Isop のみ仮設定版」では埼玉県、栃木県で過小推計となっている。

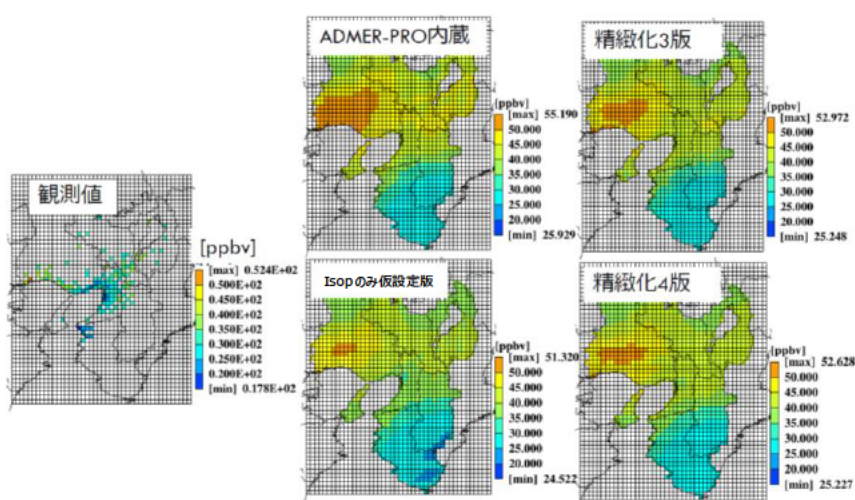


図 6-22 AQUAS-Kyoto の観測期間内の特定日(2018 年 8 月 29 日 15 時)におけるオゾン濃度の観測値と計算値の比較

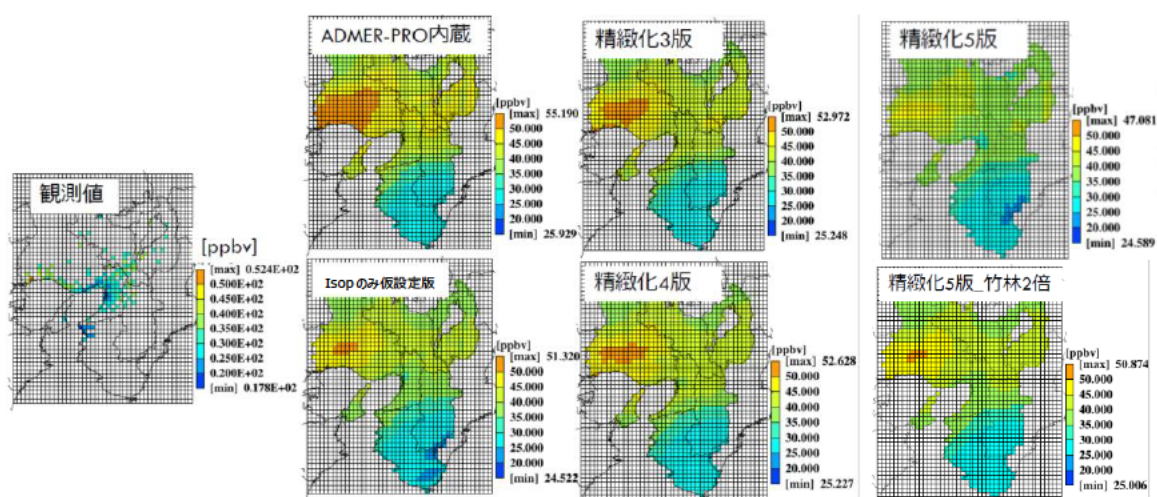


図 6-23 AQUAS-Kyoto の観測期間の 15 時平均におけるオゾン濃度の観測値と計算値の比較

次に、近畿地方において、2018 年夏季の特定日におけるオゾン濃度分布の比較では、ADMER-PRO 内蔵、Isop のみ仮設定版、精緻化各版いずれも、湾岸部を中心に過大推計となっている。AQUAS-Kyoto の観測期間内の 15 時平均値の比較でも、同様に湾岸部を中心に過大推計となっている。後者については、精緻化第 5 版、精緻化第 5 版+竹林 2 倍の設定でも計算しているが、過大推計の傾向は変わらなかった。

(6) 精緻化各版の比較検討

上記の検証成績や、相関分析による比較検討を行った。ここまでの定性的な合致性の検討から、概ね精緻化第 4 版、第 5 版、第 5 版+竹林 2 倍のいずれかを、本調査の BVOC 設定の更新版として扱うことが適当と考えられる。ここでは、相関係数や統計指標を用いて、比較検討を行った。

①AQUAS-Tsukuba の観測期間の 15 時平均値に関する統計分析

関東地方について、2017 年 8 月の AQUAS-Tsukuba の観測期間の 15 時平均値を対象に、精緻化各版（第 4 版以降）での領域平均値と統計指標の算出を行った。

表 6-19 AQUAS-Tsukuba の観測期間の 15 時平均値の領域平均値と統計指標算出結果

項目	観測値	ADMER-PRO 内蔵	ADMER-PRO 内蔵 ×0.5 倍	精緻化 第 4 版	精緻化 第 5 版	精緻化第 5 版_竹林 2 倍
領域内平均値	60.3	77.5	66.9	65.2	60.4	62.3
MNB	－	0.285	0.108	0.081	0.002	0.033
MNGE	－	0.295	0.171	0.159	0.132	0.140

※MNB: Mean Normalized Bias

※MNGE: Mean Normalized Gross Error

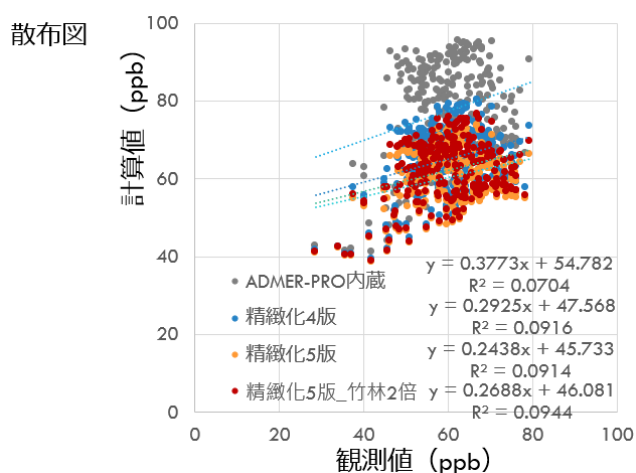


図 6-24 観測値と計算値の相関分析結果(関東地方・AQUAS-Tsukuba)

関東地方については、AQUAS-Tsukuba の観測値との比較対照において、領域平均値の観測値との一致性は各精緻化版で大きく改善し、観測値との相関係数は「精緻化 5 版_竹林 2 倍」が最も高く、統計指標で見ると「精緻化 5 版」が最も良い。

表 6-20 AQUAS-Kyoto の観測期間の 15 時平均値の領域平均値と統計指標算出結果

項目	観測値	ADMER-PRO 内蔵	ADMER-PRO 内蔵 ×0.5 倍	精緻化 第 4 版	精緻化 第 5 版	精緻化第 5 版_竹林 2 倍
領域内平均値	31.5	45.3	38.1	42.7	37.8	40.8
MNB	－	0.438	0.211	0.355	0.200	0.295
MNGE	－	0.439	0.219	0.357	0.209	0.298

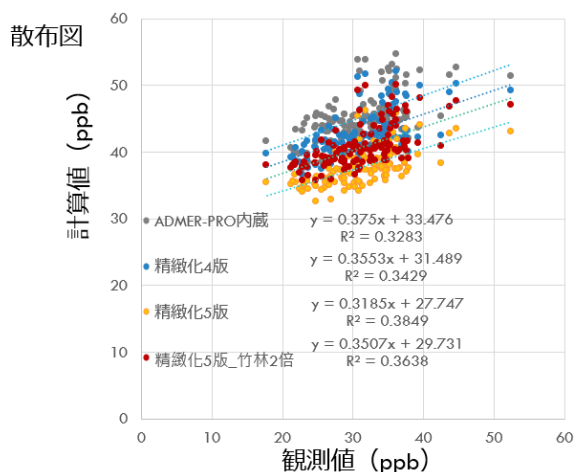


図 6-25 観測値と計算値の相関分析結果(近畿地方・AQUAS-Kyoto)

近畿地方については、AQUAS-Kyoto の観測値との比較対照において、全てのインベントリで観測値に比べて計算値が大きすぎる傾向が見られた。領域平均値の観測値との一致性は「精緻化 5 版」で最も高く、決定係数は「精緻化 5 版」が最も高く、統計指標でも「精緻化 5 版」が最も良かった。

以上、6-8 章における各種の検証・比較検討の結果を星取表にまとめてみると、次のようになる。最も良い成績を◎、最も悪い成績を×で示している。

表 6-21 各精緻化版の観測値再現性等の比較に関するまとめ

対象	ADMER-PRO	精緻化 4 版	精緻化 5 版	精緻化 5 版_竹林 2 倍
全国トップダウン※1	×			◎
つくば HCHO※2	×	◎		
関東オゾン※1	×		◎	
京都 HCHO※2	×			◎
近畿オゾン※1	×		◎	

※1:統計指標 (MNB, MNGE)

※2:ピーク値の一致性

「ADMER-PRO 内蔵」ではすべての項目で最下位の成績であり、「精緻化 5 版」、及び「精緻化 5 版_竹林 2 倍」はそれぞれ 2 つの項目で首位を獲得している。「精緻化 5 版」と「精緻化 5 版_竹林 2 倍」では、検証項目により優劣が異なるが、実測値との比較において勝っている「精緻化 5 版」を、本調査での BVOC 設定の「更新版」として取り扱い、「精緻化 5 版_竹林 2 倍」は参考として扱うこととした。

なお、図 6-13 に示したイソプレン、図 6-14 に示したイソプレン以外の BVOC に関する基礎放出量について、精緻化 5 版の領域(関東、近畿)内の基礎放出量の和を求めて比較すると表 6-22 のようになる。

表 6-22 ADMER-PRO の設定値と精緻化第 5 版の領域内基礎放出量の和の比較

地方	BVOC	領域内全メッシュの基礎放出量の和 ($\text{mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$)		
		(A) ADMER-PRO 内蔵	(B) 精緻化第 5 版 (更新版)	(B)/(A)
関東	イソプレン	1.81E05	2.66E04	6.8 分の 1
	イソプレン以外	2.63E05	7.80E04	3.4 分の 1
近畿	イソプレン	1.33E05	3.90E04	3.4 分の 1
	イソプレン以外	2.57E05	1.15E05	2.2 分の 1

ADMER-PRO の内蔵設定での基礎放出量の和に対し、精緻化第 5 版では 2.2～6.8 分の 1 の BVOC 放出設定となっている。これは、夏季の高濃度オゾンが観測される気象条件下での値であるが、ADMER-PRO の内蔵設定に対してかなり低い BVOC 設定となっている。ADMER-PRO の内蔵設定では、BVOC の年間排出量は 330 万トン／年であり、この 9 割が夏季に放出されると仮定すると、精緻化第 5 版では夏季におよそ 43～135 万トン程度の排出を設定していることになる。

我が国の BVOC 排出量に関しては、表 3-1 に示したように様々な推計値があるが、ベンチマークとなる数値がある訳ではない。仮に精緻化第 5 版で、BVOC の設定をやや過小に見積もっているとした場合でも、7-2 章で示すように、過年度結果の再現性が確認されたことによって、真の BVOC 設定を行ったと仮定した場合には両者の中間的な結果が出ると考えられるので、定性的に結果が変わらないと推定することが出来る。

6-9. まとめ

本章の結果の要約を、以下にまとめて示す。

- ・植生マップの検討として、竹林以外の植生面積は生物多様性センターの植生調査結果を 3 次メッシュごとの面積分率を算定したデータ、また、竹林に関しては JAXA の高解像度土地利用土地被覆図を補正して使用し、これに基礎放出量に対応させることにより、従来より細分化された BVOC 設定に改善された。
- ・特に、従来設定されていなかった竹林の面積分布を詳細に調査し、設定することが出来た。
- ・LAI および補正係数の検討として、LAI は文献値を使用し、補正係数は日陰の葉の基礎放出量が低いことや、土地面積あたりの BVOC 放出量が、一般に基礎放出量×LAI の値よりも低いこと等を考慮して設定した。LAI に関しても、将来は、衛星観測から得られるデータを活用できる可能性はある。
- ・以上を総合して BVOC の精緻化版のデータを作成し、衛星観測データとの定性的合致、実測値との合致など、改善が図られた。
- ・ただし、葉面積当たり基礎放出量以外の BVOC 設定に関しては、様々な不確実性は残っている。

7 調査結果（VOC の排出削減効果の定量的評価に向けた検討等）

7-1. 本章における解析の背景と目的

令和元年度と令和 2 年度の調査において、地方及び年代を変えて、VOC 削減によるオゾン存在量低減効率、NOx 削減によるオゾン存在量低減効率をそれぞれ計算し(図 7-1)、次の結果を得ている。

■令和元年度、令和 2 年度の結果

- 1) VOC 削減によるオゾン存在量低減効率は、地方では、関東＞近畿＞東北の順に高い。
- 2) 対策初期(2005 年頃)と近年(2016 年)で比較すると、VOC 削減によるオゾン存在量低減効率は低下しており、近年は VOC 削減がオゾン低減に対して効きにくくなっている。
- 3) NOx 削減によるオゾン存在量低減効率は、VOC 削減によるオゾン存在量低減効率と逆の傾向を示しており、東北＞近畿＞関東の順に高く、近年は NOx 削減がオゾン低減に対してますます効くようになっていく。

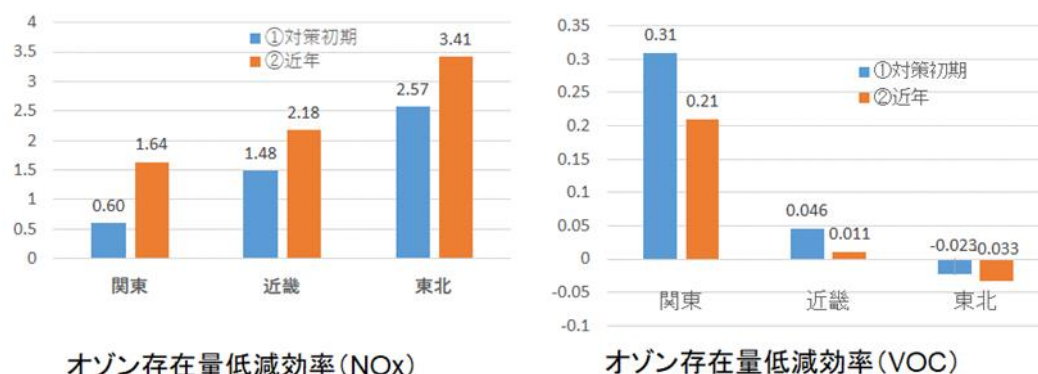


図 7-1 過年度調査におけるオゾン存在量低減効率(VOC 削減、NOx 削減)の算出結果

以上の結果は、BVOC 設定が ADMER-PRO 内蔵の設定であったので、今年度調査では、BVOC 設定を更新版として、関東・近畿地方、対策初期(2005 年頃)・近年(2016 年)について、オゾン存在量低減効率(VOC 削減、NOx 削減)を再計算し同様の傾向がみられるかどうか検討した。さらに、衛星観測データによるオゾン生成レジームの診断結果と比較検討することにより、VOC の排出削減によるオゾン低減効果を、シミュレーションを行わずに衛星データから簡易的に定量評価するための方法について検討した。

7-2. オゾン存在量低減効率の再計算

オゾン存在量低減効率再計算の計算条件を表 7-1 に示す。ここで、BVOC 設定以外の計算条件は基本的に過年度調査と同様であるが、対象とする発生源を全発生源(NOx: 全 12 セクター、VOC: 全 11 セクター)とした点は過年度調査とは異なる(過年度調査では、複数業種を対象にオゾン存在量低減効率を導出し、それらの平均値として結果を示していた)。

表 7-1 オゾン存在量低減効率再計算の計算条件

1. 対策の期間 (排出量データ)	①初期（対策初期の削減効果の評価のための計算） →対策前：2005年度の排出量 対策後：2005年度の排出の10%削減値 ②近年（近年の削減効果の評価のための計算） →対策前：2016年度の排出量 対策後：2016年度の排出の10%削減値
2. 対象発生源 (業種、セク ター)	VOC：全発生源（10セクター：大規模固定燃焼、群小燃焼、自動車、船 舶・漁船、航空機、建設・産業・農業機械、固定蒸発、小型焼却炉、野 焼き、その他） NOx：全発生源（9セクター：上記10セクターの内「固定蒸発」を除く すべて）
3. 対象地方	2地方（関東、近畿）
4. 対象気象パ ターン、平均化時 間	夏季（7、8月）に高濃度オゾンが頻発する気象パターン（気圧 傾度弱、日射量大）の2005年度における代表日）、オゾン濃度 は昼間の8時間（10-18時）値として計算
5. BVOC設定	更新版（精緻化5版）、精緻化5版_竹林2倍

BVOC 設定を更新版(精緻化 5 版)として、オゾン存在量低減効率(VOC 削減、NOx 削減)を再計算した結果を図 7-2 に示す。ここで、参考として、精緻化 5 版+竹林 2 倍の設定での計算結果も示している。

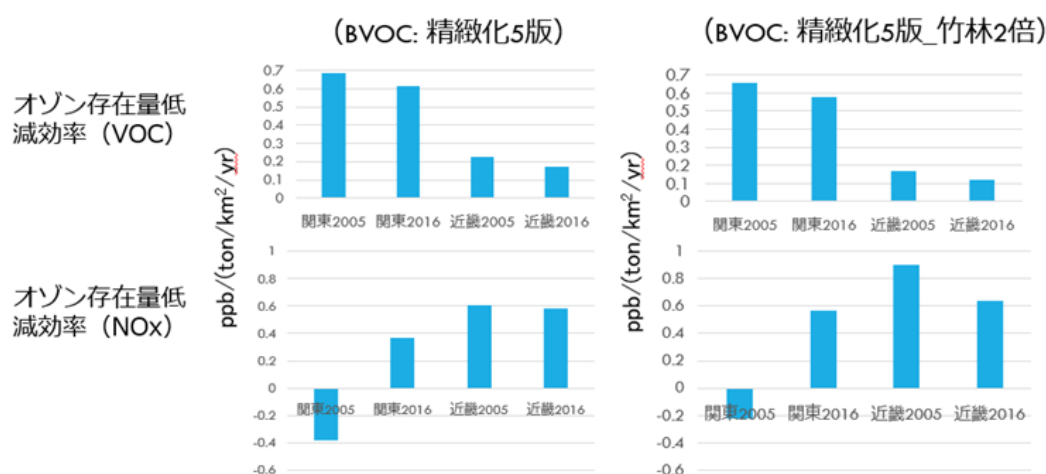


図 7-2 令和 6 年度調査を経て、BVOC 設定を更新した場合におけるオゾン存在量低減効率(VOC 削減、NOx 削減)の算出結果

図 7-2 より、東北地方に関しては再計算を実施していないものの、7-1 章で示した過年度の 1)～3)の結果は、定性的に変化しないことが確認できる。オゾン存在量低減効率(VOC)は両 BVOC 設定であまり変わらないが、精緻化 5 版_竹林 2 倍の方が地方間や年代間の変動がやや大きくなっている。また、今回の計算では、6 章で示したように、過年度調査と比べて BVOC 設定を全体として下方修正しているため、VOC 律速側にシフトしたことになり、過年度結果に比べると VOC 削減指標は上昇し、NOx 削減指標は低下している。例えば 2005 年の関東については、過年度調査ではオゾン存在量低減効率(VOC 削減)が 0.31ppb/(ton/km²/yr)であったのが、0.69ppb/(ton/km²/yr)に上昇した。つまり、過去の VOC 対策については、過年度調査での分析結果以上にオゾン低減に寄与したことになる。

7-3. VOC の排出削減効果の簡易な定量評価手法の検討

図 7-3 に、衛星観測データ解析により診断された夏季(7, 8 月)におけるオゾン生成レジームの年代別地理分布と、関東、近畿地方における年代別の VOC 律速(VOC-sensitive)または混合律速(mixed-sensitivity)である領域の比率を示す。

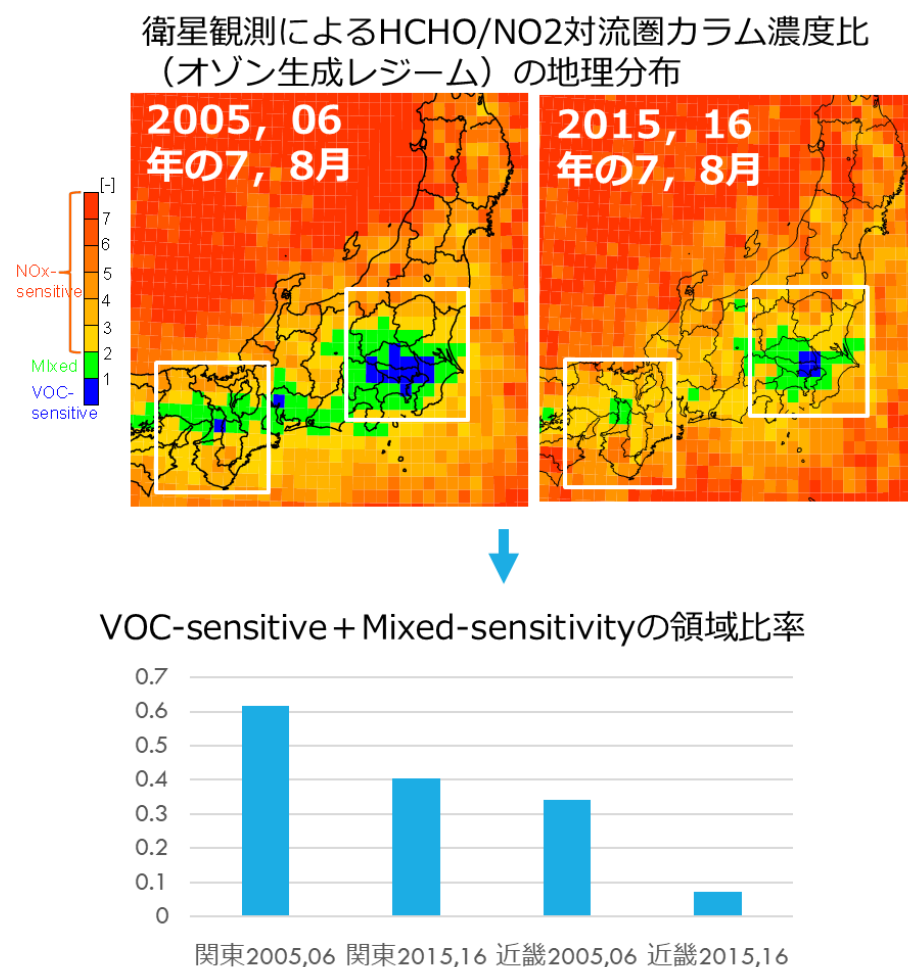


図 7-3 衛星観測データ解析により診断された夏季(7, 8 月)におけるオゾン生成レジームの年代別地理分布(上図)と年代別の VOC 律速(VOC-sensitive)または混合律速(mixed-sensitivity)である領域の比率(下図)

図 7-3 の下図によると、衛星観測データ解析により導出された VOC 律速と混合律速の領域比率の年代間・地方間の定性的な変動傾向は、図 7-2 で見られたシミュレーションにより計算されたオゾン存在量低減効率のそれと一致していることがわかる。

図 7-4 に、衛星観測データ解析により導出された夏季(7, 8 月)における地方・年代別の VOC 律速(VOC-sensitive)または混合律速(mixed-sensitivity)である領域の比率とシミュレーション(BVOC 設定としては更新版(精緻化 5 版)を使用)で算出された地方・年代別のオゾン存在量低減効率の散布図を示す。

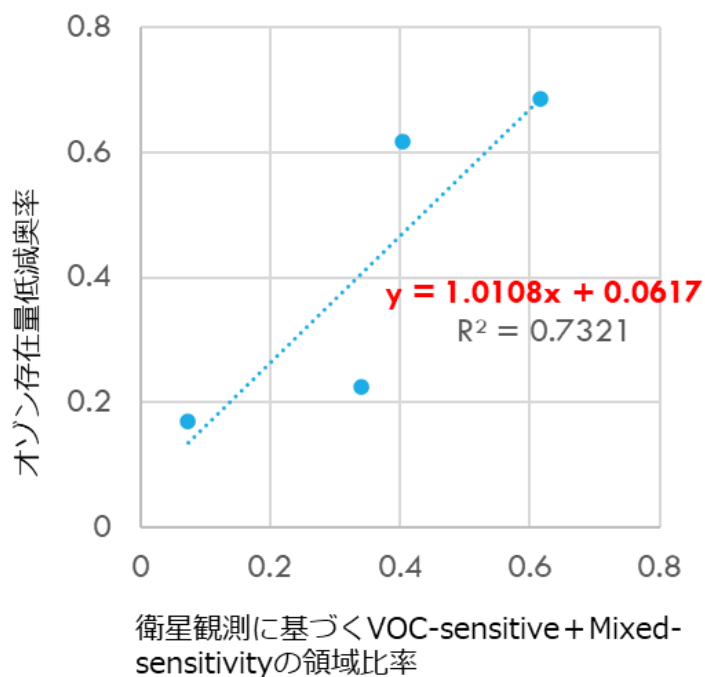


図 7-4 衛星観測データ解析により導出された夏季(7, 8 月)における地方・年代別の VOC 律速または混合律速の領域比率とシミュレーション(BVOC 設定としては更新版(精緻化 5 版)を使用)で算出された地方・年代別のオゾン存在量低減効率の散布図

図 7-4 によると、シミュレーションで算出されたオゾン存在量低減効率(y)は衛星観測データ解析により導出された VOC 律速または混合律速の領域比率(x)と実際に強い相関があり、それらの関係は線形式 $y=1.0108x+0.0617$ で近似されることがわかる。以上より、各年代、各地方のオゾン存在量低減効率を、シミュレーションをせずに、衛星観測データ解析により導出される VOC 律速または混合律速の領域比率から線形式として簡易的に算出できる可能性が示唆された。ただし、上記の近似式は少ないデータプロットのみから導出したものであるため、今後、実際に簡易式の運用を行うにあたっては、より多くの地域、年代について同様の検討を行い、データのサンプル数を増やしたうえで簡易式の妥当性を確かめる必要があると思われる。

8 調査結果（VOC 削減に関する費用対効果についての検討）

8-1. 本章における調査の目的

7 章で確認したように、VOC 削減によるオゾン存在量低減効率は地方間や年代間で異なるため、施策策定にあたって重要な指標である「VOC 削減の費用対効果」も地方間や年代間で異なると考えられる。そこで、本章では、関東・近畿地方、対策初期(2005 年頃)・近年(2016 年)について、それぞれ、BVOC 設定を最新版としたシミュレーションを行い、VOC 削減の費用対効果を計算することとした。

8-2. 調査方法

シミュレーションの計算条件を表 8-1 に示す。

表 8-1 費用対効果検討のためのシミュレーションの計算条件

1. 対策の期間 (排出量データ)	①初期（対策初期の削減効果の評価のための計算） →対策前：2005年度の排出量 対策後：2005年度の排出の10%削減値 ②近年（近年の削減効果の評価のための計算） →対策前：2016年度の排出量 対策後：2016年度の排出の10%削減値
2. 対象発生源	VOC：全固定蒸発発生源（40業種）
3. 対象地方	1地方（関東）
4. 対象気象パターン、平均化時間	夏季に高濃度オゾンが頻発する気象パターン（気圧傾度弱、日射量大）の2005年度における代表日）、オゾン濃度は昼間の8時間（10-18時）値として計算
5. BVOC設定	更新版（精緻化5版）、精緻化5版_竹林2倍

費用対効果は、対策による「効果」を各地方内の単純平均、人口加重平均、コメ収量加重平均のオゾン濃度低減量とし、「費用」を、各種平均濃度をそれぞれ 0.01ppm (=10ppb)削減するための費用として、定量化した。具体的な計算方法は下式の通りである。

各種オゾン平均濃度を 0.01ppm 削減するための費用(円/yr)= 排出削減量 (ton/yr)×1ton 削減費用(円/ton)/(各種オゾン平均濃度低減量(ppm))×0.01(ppm)

ここで「排出削減量」は、表 8-1 の対策前後シナリオにおける排出量の差分であり、「各種オゾン平均濃度低減量」は、対策前後シナリオでのオゾン推定濃度の差分の地理分布、および、人口の地理分布、コメ収量の地理分布を用いて計算した。人口、コメ収量の地理分布は、国立研究開発法人産業技術総合研究所のオゾン詳細リスク評価書を、「1ton 削減費用」は同書付録を参照して、23 万円/ton と仮置きた。

費用対効果の計算方法を、2016 年、関東、夏季を例として以下に述べる。

①2016 年のベース排出量を与えた上で、関東で全 VOC 固定発生源一律 10%削減(=関東全体で 26,700 トン削減)とし、5km メッシュごとにオゾン濃度の低減量(ppb)を求める。

②単純平均では面積、人口加重平均では人口、コメ収量加重平均ではコメ収量で加重平均し、関東地

方でのそれぞれのオゾン低減量平均値を求める。

③これを削減量で割り、VOC1トン削減あたりのオゾン平均低減量をそれぞれ求める。

④線形性を仮定し、0.1ppm(=10ppb)オゾンを低減するための VOC 必要削減量(トン)を逆算で求める

⑤④に対策費用 23 万円/トンを乗じ、対策費用を求める。

8-3. 調査結果

関東地方における費用対効果検討結果を表 8-2 と表 8-3 に、近畿地方における費用対効果検討結果を表 8-4 と表 8-5 に、それぞれ示す。

表 8-2 関東地方における費用対効果の検討結果(BVOC 設定:最新版(精緻化 5 版))

関東 BVOC設定 = 最新版 (精緻化第5版)	2005年		2016年	
	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)
単純平均値	555,798	1,278	586,082	1,348
人工加重平均値	237,008	545	218,192	502
コメ収量加重平均値	845,329	1,944	982,634	2,260

表 8-3 関東地方における費用対効果の検討結果(BVOC 設定:精緻化 5 版_竹林 2 倍)

関東 BVOC設定 = (精緻化第5版+竹2倍)	2005年		2016年	
	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)
単純平均値	580,435	1,335	630,852	1,451
人工加重平均値	234,767	540	224,803	517
コメ収量加重平均値	921,052	2,118	1,100,627	2,531

表 8-4 近畿地方における費用対効果の検討結果(BVOC 設定:最新版(精緻化 5 版))

近畿 BVOC設定 = 最新版 (精緻化第5版)	2005年		2016年	
	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)
単純平均値	1,539,316	3,540	2,048,130	4,711
人工加重平均値	481,402	1,107	528,714	1,216
コメ収量加重平均値	1,348,769	3,102	1,859,058	4,276

表 8-5 近畿地方における費用対効果の検討結果(BVOC 設定:精緻化 5 版_竹林 2 倍)

近畿 BVOC設定 = (精緻化第5版+竹2倍)	2005年		2016年	
	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)
単純平均値	2,086,157	4,798	3,061,250	7,041
人工加重平均値	560,615	1,289	661,539	1,522
コメ収量加重平均値	1,792,368	4,122	2,787,379	6,411

関東地方については、表 8-2、表 8-3 によると、オゾンの単純平均値及びコメ収量加重平均値を 0.01ppm 削減するための費用は年間 1~2 千億円程度であり、2005 年から 2016 年にかけて増加している

ことがわかる。一方、オゾンの人口加重平均値を 0.01ppm 削減するための費用は年間 5 百億円程度であり、2005 年から 2016 年にかけて減少している。この費用の減少傾向は、オゾン生成レジームの変動傾向からは説明できず、VOC の組成変化の影響などが原因と考えられた。

近畿地方については、表 8-4、表 8-5 によると、オゾンの単純平均値及びコメ収量加重平均値を 0.01ppm 削減するための費用は年間 3~5 千億円程度であり、2005 年から 2016 年にかけて増加していることがわかる。オゾンの人口加重平均値を 0.01ppm 削減するための費用は年間 1 千億円程度であり、この費用も 2005 年から 2016 年にかけて増加している。これらの費用の増加傾向はオゾン生成レジームの変動傾向から説明されうるものである。

9 調査結果のまとめと今後の課題

9-1. 令和 6 年度の調査結果のまとめ

本年度は、以下の調査項目を実施し、それぞれ成果を得た。

(1) シミュレーションにおける BVOC 排出量の設定に関する検討

下記①～④の調査項目を経て、BVOC 設定の更新版データを「基礎放出量テーブル」、「植生割り当て表」として作成し、更新した BVOC 設定で過年度成果、定量的評価、費用対効果をシミュレーションした。

① イソプレンを放出する樹種の BVOC の実測及び基礎放出量データベースの作成（静岡県立大）

令和 6 年度はイソプレン放出種の夏季ピーク測定（ミズナラ、マダケ）、季節変化を測定（コナラ、モウソウチク）し、令和 4 年度に実施した文献調査、令和 5 年度に実施したモノテルペン放出種の実測結果も合わせ、優占 20 程度の樹種に対し、基礎放出量の夏季最大放出量の平均値（測定値については標準偏差も）を求め、季節変化について他樹種への適用性を検討し、BVOC 基礎放出量データベースとしてとりまとめた。

② 竹林の分布及び放出されるイソプレンの量の精緻化（産総研）

竹林の植生面積を精緻化するため、JAXA の高解像度土地利用土地被覆図（ver.21.11）を全国データのベースとし、これに茨城県内のスターフィールド社の推定値との相関係数を乗じ、さらに、小規模竹林が補足できないため 3 倍の補正係数を乗じて、竹林の面積分率のデータとして使用した。

③ イソプレン放出樹種の実測及び竹林のイソプレン放出量の精緻化を踏まえた BVOC 排出量に関する排出係数の精緻化（産環協、産総研）

竹林以外の植生マップとして生物多様性センターの植生調査結果を 3 次メッシュに面積配分したデータ（国立環境研・茶谷先生ご提供）を用い、植生区分を個別樹種に分けて基礎放出量を割り当てた。LAI 値については、衛星データの利用可能性を調査するとともに、文献調査から樹種の大分類ごとに LAI 値を設定した。人工林と自然林の樹種混合構成の違い、針葉樹やカエデ類の重量から葉面積への変換、陽葉と陰葉の基礎放出量の違い、BVOC 排出量に関する個葉からの積み上げ推定値とフラックス観測値の関係等、各種調査を行い、補正係数を検討し、設定した。

④ シミュレーション結果と実測値の整合性の確認（産総研）

産環協でのデータ更新の都度、産総研にて、基礎放出量分布、トップダウン推計値との分布比較、実測値（AQUAS-Tsukuba、AQUAS-Kyoto）との比較、地域のオゾン濃度分布との比較など、マッピングとシミュレーションを行い、最終的に精緻化 5 版を本調査における BVOC 設定の更新版とした。

(2) VOC の排出削減効果の定量的評価に向けた検討等

更新版の BVOC 設定データを用いて、関東／近畿、2005 年／2016 年の 4 ケースについて VOC 削減によるオゾン存在量低減効率を求め、令和元年度調査の結果（低減効率は関東＞近畿＞東北の順で、近年、低減効率が低下）が、定性的に変わらないことが確認された。

なお、VOC 削減によるオゾン存在量低減効率は、令和元年度調査より今回の計算値の方が高く（例：2005 年／関東では、令和元年度調査：0.31、本年度調査：0.69）、過去における VOC 対策は、過年度結果以上にオゾン低減に寄与したと評価される。

なお、上記で計算した 4 ケースのオゾン存在量低減効率(VOC)は、衛星観測で求められる地域内の VOC 律速+混合律速の領域割合と一定の相関を示し、シミュレーションを行わずとも、オゾン生成レジームと関連する衛星測定値から、オゾン存在量低減効率(VOC)を推定できる可能性が示された。

(3) VOC 削減に関する費用対効果についての検討

更新版の BVOC 設定データを用い、VOC 対策費用として 23 万円/トン削減(詳細リスク評価書付録)とし、オゾン濃度を 10ppb 低減するための費用を試算した。

オゾンの単純平均値及びコメ収量加重平均値を 0.01ppm 削減するための費用は関東:年間 1~2 千億円程度、近畿:年間 3~5 千億円程度であった。

オゾンの人口加重平均値を 0.01ppm 削減するための費用は、関東:年間 5 百億円程度、近畿:年間 1 千億円程度であった。

対策費用は関東地方より近畿地方の方が高く、過去(2005 年頃)より近年(2016 年頃)の方が対策費用が上昇する傾向が認められた。関東地方の人口加重濃度平均値については、例外的に過去(2005 年頃)より近年(2016 年頃)の対策費用が若干低下した。

9-2. 令和 4~6 年度の調査結果のまとめ

令和 4~6 年度の 3 年間の実施項目と成果を表 9-1 にまとめた。

第 13 回産環小委(令和 7 年 2 月 26 日開催)において、令和 4~6 年度の本調査の成果の要点について、報告を行った。報告資料を添付資料として添付する。

表 9-1 や産環小委資料と一部重複するが、大きな項目ごとに以下に簡単に整理しておく。

(1) シミュレーションによる前駆物質(VOC、NOx)削減によるオゾン低減効果の検討

人為発生源からの VOC(AVOC)を減らせば、削減量に応じてオゾンも減るという単純な構図ではなく、地域、季節、年代によって、オゾンの削減効果は異なっている。過去から近年にかけて、VOC 律速から NOx 律速への移行により AVOC 削減によるオゾン削減効果は低くなってきており、今後もさらに NOx 律速へ移行すると想定される。

基礎放出量の見直しや竹林の設定をはじめとする BVOC 設定を更新しても、上記の結果は成り立つことが示された。

今後更新した BVOC 設定を用いて、過年度に実施した他の成果(例えば季節による違い)についても、再計算しておくことは有用と考えられる。

(2) 主要樹種ごとの BVOC 基礎放出量データベースの構築

令和 4 年度から、静岡県立大学・谷教授に実施者として本調査に参画していただき、文献調査と実測によって、我が国の優占 20 樹種程度に対して、基礎放出量の夏季ピーク値を BVOC 基礎放出量データベースとして取りまとめ、季節変動についても検討した。これは、オキシダント問題の検討や学術利用としても有用なものであり、本調査の重要な成果の 1 つである。

(3) BVOC 排出量の設定改善に関する検討

前項の基礎放出量データに加え、植生マップ、LAI、補正係数等について多角的に検討し、精緻化 5 版を本調査の更新版 BVOC 設定として決定し、ADMER-PRO のシミュレーションに供した。ADMER-PRO のデフ

ォルト設定からは、基礎放出量のデータ整備、樹種分類の細分化、竹林の加味など改善が行われ、未だ多くの不確実性が残されているものの、基礎放出量分布の違和感や、実測値に対する計算値の過大評価を改善できた。

BVOC 放出樹種としては、イソプレン高放出種として落葉広葉樹のコナラ、ミズナラ、イネ科のモウソウチク、マダケ、モノテルペンの中放出種としてシイ・カシ類が主なものであり、これらの植生面積や樹木資源量をより精緻化するだけでも、さらに BVOC 設定を改善できると考えられる。これら 3 つの樹種の BVOC 設定に対する感度分析(設定を上下に振ってみる)も有用と考えられる。

基礎放出量が陽葉と陰葉で異なることや、個葉の排出量とフラックス測定値の関係をモデル化することは、学術的にも興味深い検討項目である。

また、自然林をはじめとして、様々な樹種が混在する森林における BVOC 実測値が不足しており、一定の広さのエリア(例えば特定の 3 次メッシュ)や、全国の複数個所における同時多地点計測なども有用な将来の実施項目と考えられる。

(4) 考察と今後の課題

AVOC の削減によるオゾン削減効果は低くなっていることが示唆されているので、AVOC 削減だけに着目せずに、引き続き、科学的なオゾン生成機構の解明、BVOC 排出量のさらに精緻な把握、オゾン生成レジームの影響の解明等が必要と考えられる。

コロナ禍を対象とした文献調査において、VOC、NO_x ともに減少したことによって、全球オゾン負荷は低下したものの、都市部を中心に世界各地でオゾン濃度が上昇したとの論文が世界中で多数報告されている。このことから、前駆物質の削減が、オゾン低減に必ずしも繋がらないという、厄介な構図となっていることを理解する必要がある。

高濃度オゾンが観測される地域や、オキシダント注意報が頻繁に発令される地域に絞って、その地域の AVOC、BVOC、植生分布、気象条件等を検討し、当該地域の自治体や事業者、森林研究者等からヒアリングを行い、シミュレーションによって、当該地域でオゾンが高濃度となる要因や、オゾン濃度が減少する条件等を解析することは、今後考えられる調査の 1 つと思われる。

表 9-1 令和4～6年度「VOC排出削減効果等の検討業務」* 実施事項とその結果、及び今後の方向性(案)

大項目	年度	実施事項	結果	今後の課題(案)
1. シミュレーションによるオゾン低減効率の立地特性の一般性の検討	R4	1-1. 夏季／春季、関東／近畿、2016年ベースでの計算[R4報告書第3章]	・R1 定量的評価調査で夏季・関東・2005年ベースで計算し、オゾン低減効率との相関分析を行い、MIR だけでなく、立地パラメータも重要であることが示された。 ・R4 は春季/夏季・関東/近畿・2016年ベースで計算したところ、夏季・近畿、春季・関東でオゾン濃度低減効率地理分布が理論と異なり、相関についても傾向が異なった。	・1-2.で理論と不一致となるケースについて追加検討を行い、要因を考察した。
	R4	1-2. 理論と不一致となるケースの考察[R4報告書第3章]	・春季・関東については、出現頻度の稀な気象パターンであった可能性がある。春季・関東は、より出現頻度の高い気象パターンであれば、理論と合致する可能性がある。 ・夏季・近畿について、1-1.の計算対象日が土曜日であったことが要因である可能性。そこで異なる計算対象日を2つ追加(2015/8/15(土)、8/7(金))して再計算(計算時間の制約から、湾岸部と郊外部の代表メッシュのみ実施)した。 ・NOx排出量は大阪湾岸部で平日>土曜日が顕著となり、これがオゾン濃度低減効率地理分布の違いになった可能性がある。夏季・近畿は、平日を対象とすれば、理論と合致する可能性がある。	・令和5年度以降、オゾン低減効率に影響を及ぼす因子の詳細分析(削減時期、地方、季節、立地場所等、オゾン低減効率に影響を与える因子のうち、特にオゾン低減効率の正負の符号が変わるような条件について、何が低減効率値に影響しているかの検討を行った[第11回産構審小委資料2-2]
	R5	1-3. 夏季・近畿の全域について計算し再検討[R5報告書第3章]	・2016年/近畿全域/夏季を対象に、計算対象日を平日として再検討したが、オゾン低減効率の地理分布の湾岸/内陸部のコントラストは弱く、オゾン存在量低減効率(業種別)と立地パラメータの相関は小さいままであった。 ・衛星観測の結果から、2016年ごろの近畿では、VOC-sensitiveの領域が無くなっているためと考えられる。 ・さらに、オゾン存在量低減効率(業種別)と立地パラメータの計算日を揃えて再分析を試みたが、相関は若干改善したが弱いまま。	・近畿の2005年夏季(過去)について、2016年夏季との比較のために計算してはどうか？(現在より、オゾン低減効率地理分布のメリハリがあるのかどうか？立地パラとの相関は大きいのか)
	R5	1-4. オゾン低減効率が正負の値を取る場合、何が影響しているか分析する[R5報告書第3章]	・オゾン濃度低減効率地理分布と、オゾン生成レジームに関連するパラメータ(NMHC/NOx、MIRi × VOCi/NO2、HCHO/NO2)の相関を調べた。この比の値が高いほど、NOx-Limitedになるので、理論的には負の相関を示すはずである。 ・全データでの相関は、いずれのパラメータとも弱い負の相関。 ・立地分布の検討で理論と異なった夏季の近畿のデータのみで相関をとると、弱い相関となり理論と矛盾。 ・夏季の近畿のみを除いたデータでは、負の相関となり、理論と合致	・レジームの変化を検討するため、NMHC/NOx比について、ADMER-PROと実測値の比較(年代による分布の違い)を試みる。加えて、可能な範囲でHCHO/NO2比(よりレジーム診断に適、ただし実測値少ない)についても可能な範囲で検討する。

			・HCHO/NO₂比が2以上ならオゾン低減効率は負になる、と言えるかも知れない。	
2. BVOC のトップダウン・ボトムアップ推計改善に関する検討	R4	2-1. 他モデル研究者へのヒアリング [R4 報告書第4章]	・茶谷(国環研)、森川(自動車研)、嶋寺(大阪大)、梶野(気象研)、伊藤昭(国環研)の5氏にヒアリングを行い、トップダウン・ボトムアップ推計の改善に資する文献紹介、我が国で両者が合わない要因について、コメントをいただいた。	
	R4	2-2. トップダウン・ボトムアップ調査の推計改善に関する文献調査 [R4 報告書第4章]	・産総研による抽出9論文と、前項ヒアリングに基づく文献8論文をレビューし、要旨をまとめた。	
	R4	2-3. シミュレーション改善のための初期検討 [R4 報告書第4章]	・文献調査結果を基に、HCHO>4×10¹⁵ molecules cm⁻²かつ、NO₂>1×10¹⁵ molecules cm⁻²のメッシュを抽出すると、日本の陸域はトップダウン推計が適用できる可能性がある。[R4 報告書第4章]	・トップダウン推計を行う場合、水平解像度は一定以上の粗さで行う必要がある。
			・竹林は平野部に多く、イソプレン放出係数が大きく、基礎放出量は場所によっては竹林>街路樹となる。	・ブナ、コナラ等の基礎放出量を下方修正し、竹林の放出を加味することで、ボトムアップ推計の改善を試みる。
	R5	2-4. トップダウン・ボトムアップ推計の改善検討 [R5 報告書第4章] ・トップダウン:複数年度につき計算 ・ボトムアップ:ブナ、竹林等を加味して計算	■竹のみ考慮(生物多様性セ)での検討 ・OMI の HCHO カラムデータに対しては、コナラ群落の面積分率より、竹林の面積分率の方が相関が高い。 ・イソプレン基礎放出フラックスの比較では、ADMER-PRO 内蔵と竹のみ考慮(生物多様性セ)では、地理分布は「竹のみ」では小さいが、近畿で局所的に「竹のみ」>「ADMER-PRO 内蔵」となる。 ■竹のみ考慮(JAXA)での検討 ・JAXA の高解像度土地利用土地被覆図(2018~2020、10m 解像度)で竹林の分類が示されている。これを3次メッシュデータに加工して検証すると、「竹のみ考慮(生物多様性セ)」より、竹林のデータが増加する(小規模の竹林も拾うため?)。 ・竹林の面積分率が増加し、近畿では領域全体でコナラ群落に匹敵。 ・イソプレン基礎放出フラックスは、関東では「竹のみ考慮(生物多様性セ)」より「竹のみ考慮(JAXA)」が上昇するが、全体量は「ADMER-PRO 内蔵」>「竹のみ考慮(JAXA)」。 ・一方近畿では、「竹のみ考慮(JAXA)」>「ADMER-PRO 内蔵」のメッシュが多数現れる。 ・近畿では、「竹林からのイソプレン基礎放出量フラックス(JAXA)」>「全人為起源 VOC 排出フラックス(ADMER-PRO 内蔵)となるメッシュが多い。」 ・関東では VOC 量は竹林<人為だが、MIR も考慮すると竹林>人為。	・JAXA の分類(落葉広葉樹、落葉針葉樹、常緑広葉樹、常緑針葉樹等)について、生物多様性セのデータとどの程度の差異があるのか検討(竹林のみ JAXA データを使えるのかの検証)

			・近畿では、VOC 量も、MIR を加味した量でもいずれも竹林＞人為。	
3. ホルムアルデヒドやオゾンの実測値と計算値の比較	R4	3-1. つくば集中観測期間(2017)の実測値とシミュレーション値の比較 [R4 報告書第 4 章]	・つくば集中観測期間(AQUAS-Tsukuba)(2017 年 8 月)を参照実測データとし、同じ条件でシミュレーションを行うと、イソプレンの日内変動やHCHOの濃度レベルが現状(ADMER-PRO のデフォルト BVOC 設定)では異なっている。	・トップダウン、ボトムアップのシミュレーションの改善を行い、相互の比較、および実測値との比較を行い、改善の妥当性を検証する。[第 11 回産構審小委資料 2-2]
	R5	2-4. 関東・近畿の夫々年間 10 気象パターンにつきホルムアルデヒド濃度等を実測値と計算値で比較 [R5 報告書第 4 章]	■ホルムアルデヒドの有害大気汚染物質測定局での実測値(6 か月の平均)分布と計算値 2016 年暖候期)の比較(BVOC=ADMER-PRO 内蔵、ADMER-PRO 内蔵×0.5/竹のみ考慮(生物多様性セ) ・ADMER-PRO 内蔵では、計算値＞実測値となるケースが多く、地理分布は合わない。 ・HCHO 濃度は「ADMER-PRO 内蔵系」＞「竹のみ考慮」 ・観測値と計算値の一致性は判定しづらい。 ・暖候期の HCHO 衛星観測データとは、「竹のみ考慮」の方が「ADMER-PRO 内蔵系」より整合性がある。 ■つくば集中観測と計算値の比較 ・「ADMER-PRO 内蔵×0.5」は、ピーク値は合うが日変化は合わない ・「竹のみ考慮(生物多様性セ)」は、計算値は小さいが、日変化は観測値と類似する。 ・「竹のみ考慮(JAXA)」は、「竹のみ考慮(生物多様性セ)」より計算値は実測値に近づき、日変化は観測値と類似する。	・近畿地方において「つくば集中観測」のような実測データがあれば、それと計算値を比較することは一考に値する。 ・BVOC データベース構築に基づき、竹林や他植生からの BVOC 放出量推計を行い、トップダウン推計との整合性や現況再現性が向上するかを確認。
	R6	2-5. 更新 BVOC 設定における計算値(HCHO、O ₃)と、AQUAS-Tsukuba (2017)、AQUAS-Kyoto (2018)の比較 [R6 報告書第 6 章]	・実測値と計算値の比較において、HCHO、O ₃ ともに、ADMER-PRO デフォルト設定では計算値が過大であったが、AQUAS-Tsukuba (2017)に対しては精緻化第 4 版、第 5 版、第 5 版+竹林 2 倍が、AQUAS-Kyoto (2018)に対しては精緻化第 5 版、第 5 版+竹林 2 倍が、観測期間内の最大値において概ね合致する。しかしいずれの精緻化版も、日内変動パターンは再現されない。	
	R6	2-6. 更新 BVOC 設定における基礎放出量分布(温度補正)と、トップダウン HCHO カラムの比較 [R6 報告書第 6 章]	衛星観測による HCHO カラムデータの分布と比較すると、精緻化初版では ADMER-PRO の内蔵設定とあまり変わらず、日本海側や北日本で高い基礎放出量を示す傾向が残っているが、精緻化第 4 版以降、太平洋側や西日本で高い分布傾向が定性的に合致するようになった。	
	R6	2-7. 更新 BVOC 設定における O ₃ 計算値と地域内の O ₃ 観測値	関東地方については、特定日の 15 時の値の比較では、精緻化第 3 版までは都市部を中心に過大推計、Isop のみ仮設定版や精緻化 4 版以降で	

		の分布との比較 [R6 報告書第 6 章]	は埼玉県での高濃度が再現されない。観測期間での 15 時平均値の比較では、精緻化を進めるにつれ最高濃度の凡例領域は小さくなるが、各版とも都市部を中心に過大推計となっている。 近畿地方については、特定日の 15 時の値の比較、観測期間での 15 時平均値の比較ともに、精緻化を進めるにつれ最高濃度の凡例領域は小さくなるが、各版とも都市部を中心に過大推計となっている。	
4. BVOC 基礎放出量データベースの構築	R4	4-1. 植生データの選定と測定対象とする樹種の抽出検討 [R4 報告書第 5 章]	・林野庁ー森林生態系多様性基礎調査のデータを基に、優占樹種を地点数×配分値で計算し、全国で占有上位と思われる 20 樹種を抽出した。	
	R4	4-2. BVOC 放出に関する文献調査 [R4 報告書第 5 章]	・落葉／常緑・広葉樹／針葉樹とイネ等の樹種・植物種について、BVOC 放出量の測定値が記載されている文献を調査し、まとめた。	文献調査は、実測を実施しつつも継続的に実施し、最新論文が無いかわけチェックする。
	R4	4-3. 2 年程度での BVOC の測定計画の策定 [R4 報告書第 6 章]	・3-1. の約 20 樹種のうち、3-2. 文献調査にて測定値や季節変化に関するデータが無いまたは不足の樹種の実測計画を立てた。夏季の最大ピーク放出値と、年間変動を測定する。	・R5 年度はモノテルペン放出種、R6 年度はイソプレン放出種について実測を行った。
	R5	4-4. モノテルペン放出種の BVOC 実測と季節変動のモデル化 [R5 報告書第 5 章]	R5 年度はモノテルペン放出種を中心に、常緑広葉樹のスダジイ、アラカシ、シラカシ、無放出の確認として落葉広葉樹のブナ、クリについて実測。 ■季節変化測定 スダジイ、シラカシについて実測し、季節変化を把握。 ■夏季の平均放出速度の測定 アラカシ、スダジイ、シラカシの夏季のピーク値を精度よく把握。 ■無放出の確認 ブナは無放出種であることを確認。クリは文献により異なるが、モノテルペンの放出を僅かに認めた。	・R6 年度は、当初計画どおり、イソプレン放出種(コナラ、タケ類)を中心に実測、DB 構築を進める。
	R6	4-5. イソプレン放出種の BVOC 実測と季節変動のモデル化 [R6 報告書第 4 章]	R6 年度はイソプレン放出種を対象に、コナラ、ミズナラ、モウソウチク、マダケについて実測。 ■季節変化測定 コナラ、モウソウチクについて実測し、季節変化の適用性を検証。 ■夏季の平均放出速度の測定 ミズナラ、マダケの夏季のピーク値を精度よく把握。	・文献値、測定値、を含めてとりまとめ、基礎放出量データベースとして完成する。季節変化の他樹種への適用性を検討する。
5. BVOC の植生・土地利用マップ、LAI、補	R4	5-1. 環境省生物多様性センターの植生調査を元にした 3 次メッシュデータの活用検討 [R4 報	・植生データとして、環境省生物多様性センターの植生調査結果を 3 次メッシュごとの面積データに配分したデータ(国立環境研・茶谷先生ご提供)の活用を検討。	

正係数の検討		告書第5章]		
	R5	5-2. 環境省生物多様性センターの植生調査を元にした3次メッシュデータの活用検討 [R5 報告書第6章]	・中分類すべて(387 分類)でなくとも、上位 100 種まで割り当て設定すれば、全国3次メッシュの98%までの面積をカバーできる。	
	R5	5-3. 補正項目(針葉樹の葉重量→葉面積変換) [R5 報告書第6章]	補正項目に関する検討 ・針葉樹の葉重量→葉面積変換は、森林総研のスギ・ヒノキ形質 DB を参考に変換できる。	
	R5	5-4. 基礎放出量 DB と植生の結び付け方法の検討 [R5 報告書第6章]	・混合林の面積配分の割り当ては、毎木調査が地域ごとに分かれており、全国一括的に扱うのは容易ではない。引き続き調査要。 ・樹種の特長として、放出パターン(イソプレン/MT 貯蔵/ MT 非貯蔵)と、温度依存の型(測定日温度/積算温度)を考慮の要あり。	
	R6	5-5. 竹林の分布及び放出されるイソプレンの量の精緻化 [R6 報告書第5章]	・JAXAの高解像度土地利用土地被覆図(ver.21.11)をベースに、茨城県内を対象としたスターフィールド社(SF 社)の推定値との相関係数(0.1881)を乗じ、さらに SF 社の方法では 50m×50m 以下の小規模竹林が捉えられないことから、文献(菊川ら 2024)も参考に 3.0 倍の補正係数を乗じ、全国の竹林面積分布データとした。	
	R6	5-6. BVOC 排出係数の精緻化 [R6 報告書第6章]	・植生・土地利用マップは、竹林は第5章に示したように JAXA 高解像度土地利用土地被覆図の全国データを補正して用い、その他の植生・土地利用については、生物多様性センターの植生調査結果を3次メッシュに面積配分したデータを活用した。 ・生物多様性センターの中分類は、樹種ごとに展開して基礎放出量を割り当て、人工林(植林)は構成樹種のみ、自然林(群落等)は優占樹種以外の樹種が一定割合混在する設定とした。 ・LAI は、衛星観測からのプロダクトを利用できる可能性はあるが、ファイルフォーマットが ADMER-PRO に対応しておらず、計算データの生成作業が必要なことから、文献値を参考に設定した。 ・補正係数は、陽葉と陰葉で基礎放出量が異なること、単葉からの積み上げ推定値より、フラックス観測値が小さい傾向にあることなどを考慮して設定した。 ・最終的に、基礎放出量分布、HCHO カラム分布との比較、実測値の再現性等を検討し、精緻化第5版を本事業の BVOC 設定更新版として採択した。基礎放出量テーブル、植生割り当て表を成果物とした。 ・基礎放出量を設定する樹種、植生マップが細分化され、従来設定してい	

			なかった竹林からのイソブレン排出が加味され、BVOC 設定が更新された。	
6. 費用対効果・費用対便益の検討	R4	6-1. 米国／環境、日本／環境、日本／環境以外の分野での費用対便益文献調査 [R4 報告書第7章]	・海外における環境対策の費用便益分析につき、米国 EPA の規制影響分析から 11 件の文献を和訳・要約。 ・わが国における環境対策の費用便益分析の文献調査は、6 件の論文。 ・わが国における環境対策以外の費用便益分析の文献調査は、「平成 23 年度会計検査院委託業務報告書アメリカとイギリスにおける費用便益分析の手法と実例に関する調査研究」に詳述されており、費用対分析マニュアルの整備状況を見ると、国土交通省・農林水産省をはじめ、費用便益(効果)分析は行われている。	VOC 対策の費用の検討、費用便益比の試算[第 11 回産構審小委資料 2-2]
	R5	6-2. コロナ禍における大気汚染物質に関する文献調査 [R5 報告書第7章]	・化学工学 Vol.86, No.9 掲載の 4 報、Google Scholar で "Ozone", "NOx", "VOC", "Sensitivity" でヒットする 39 報、金谷委員ご紹介の 2 報を合わせた 45 論文の内容を整理。 ・コロナ禍における NOx、VOC 等の減少に伴い、粒子状物質は減少したが、オゾンが増加した、という報告が多い。 ・全球評価をした論文では、オゾン負荷量はコロナ禍で減少したと評価されている。	対策費用の調査が可能か？ ※対策の種類ごとの費用(装置コスト、ランニングコスト)に加え、対策の適用割合が必要と思われる。
	R5	6-3. VOC 削減による費用対便益比の計算 [R5 報告書第7章]	・BVOC 設定を「ADMER-PRO 内蔵×0.5」とし、2016 年を対象に関東、近畿について、それぞれ全 VOC の 10%を削減したと仮定すると、(死亡者数低減+コメ増収の便益)/費用比は近畿で 2.8、関東で 5.0 となり、米国の過去の対策の範囲内であるが、日本の過去の殆どの対策よりは大きくなった。	・精緻化された BVOC インベントリを入力データとして、ベースケース、人為起源 VOC 削減ケース、竹林からのイソブレン放出量削減ケースのシミュレーションを行い、各対策の費用便益比を算出する。 ・上記について、ベースケースを 10 年程度前としたシミュレーションも行い、人為起源 VOC 削減ケースについて算出された費用便益比を比較する ・NOx と VOC を 0%から 100%まで変更したらオゾン濃度がどのように変わるのかを示したのがオゾン等値線図である(前提条件は設定必要)が、これに加え、便益等値線図、あるいは、費用便益比等値線図を作成し、より政策決定に役立つ情報として整理する。

	R6	6-4. BVOC 更新設定と、対策費用を仮定しての費用対効果 [R6 報告書第 8 章]	・本報告書第 6 章までで更新された BVOC 設定を用い、VOC 対策費用を 23 万円/トン削減(詳細リスク評価書(オゾン)参考資料 8)と仮定して、オゾン濃度を 10ppb 低減するための費用を試算した。 ・単純平均値、人口加重濃度平均値、コメ収量加重濃度平均値のいずれの場合も、おおむね 1000 億円単位の対策費用を要し、関東地方より近畿地方の方が高く、過去(2005 年頃)より近年(2016 年頃)の方が対策費用が上昇する(関東地方の人口加重濃度平均値のみ例外)傾向がある。	
7. 定量的評価に向けた検討	R6	7-1. 過年度シミュレーション結果の再現性検討 [R6 報告書第 7 章]	・令和元年度調査で得られた以下の結論が、更新 BVOC 設定で再計算しても定性的に変わらないことが確認された。 ①オゾン存在量低減効率(VOC)は、関東>近畿>東北の順に高い ②オゾン存在量低減効率(VOC)は、過去より近年、低下している。 ③オゾン存在量低減効率(NOx)は、上記の①、②について、オゾン存在量低減効率(VOC)と逆の傾向を示す。 ・ただし、BVOC 設定を減らしたことで、VOC 律速側にシフトしたと考えられ、VOC 削減指標値が上昇した。すなわち、過去の VOC 対策は、過年度調査の結果以上に、オゾン低減に寄与したことになる。	
	R6	7-2. オゾン生成レジーム関連指標を用いた簡易な定量的評価の可能性の検討 [R6 報告書第 7 章]	・関東/近畿、2005 年/2016 年の 4 ケースのオゾン存在量低減効率(VOC)は、衛星観測によるそれぞれの領域内の VOC 律速+混合律速の領域比率と一定の相関を示した。 ・衛星観測データを用いて、VOC の排出削減によるオゾン低減効率を定量的に評価できる可能性が示唆された。	
8. その他の調査	R4	8-1. VOC 自主的取組フォローアップの頻度低減に関する調査 [R4 報告書第 8 章]	・37 団体にアンケート調査を行い、全団体から回答を得た。 ・フォローアップ頻度の低減については、7割が賛成、影響なしと回答した一方で、意識低下、参加率低下、引き継ぎ支障への懸念、または業務軽減の効果なしとの理由から、現状維持を求める声も一定数あった。 ・フォローアップ頻度については、現状維持(1 年に 1 回、32%、2 年に 1 回(30%)、3 年に 1 回(24%)の 3 つの意見が拮抗した。	・フォローアップ頻度が低減した場合でも、84%の団体は各年度の排出量データを集計する意向であり、フォローアップ低減による負担軽減の効果は限定的と考えられ、当面、1 年に 1 回のフォローアップを維持する方向性となった。[第 11 回産構審小委資料 2-1]

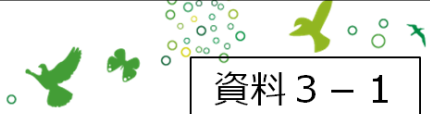
*令和 4 年度、令和 5 年度の事業名は「VOC 排出削減効果の検討等業務」、令和 6 年度の事業名は「VOC 排出削減効果等の検討業務」である。

添付資料

1. 報告書要約版（産環小委第13回 資料3-1）



一般社団法人産業環境管理協会
Japan Environmental Management
Association for Industry



資料3-1

VOC排出削減効果等調査について （令和4年度～令和6年度）

令和7年2月26日
（一社）産業環境管理協会

1

目次

調査の目的	3
調査体制	4
前駆物質の排出削減によるオゾン低減効果の評価方法	5
R4～R6年度の実施内容	6
ADMER-PROのBVOC設定に関する指摘事項	7
1.シミュレーション精緻化のためのBVOC設定見直し	8
(1) BVOC基礎放出量データベースの構築	9
(2) 植生・土地利用面積分布の改善	11
竹林の重要性	12
(3) BVOCへ排出係数の細分化・更新	14
2.更新したBVOC設定におけるシミュレーションの検証	15
(1) トップダウン推計との整合性の検討	15
(2) 実測値との比較	16
(3) 過年度成果の再現性の検証	17
3.費用対効果の試算	18
4.定量的評価の検討	19
5.各種文献調査の結果	20
6.成果のまとめ	21
7.提言	22
(参考) R1～R3年度の成果概要	23 ²

調査の目的

- 改正大気汚染防止法（平成18年4月1日施行）により、揮発性有機化合物（VOC）の排出削減が法規制と自主的取組の両輪で行われ、平成22年度には4割以上の削減を達成。
- その後も、自主的取組は継続され、令和2年度ではVOC排出量が平成22年度比でさらに約3割削減されている。
- 新指標による評価などはあるものの、光化学オキシダント（Ox）の環境基準達成率は依然として低い水準で推移しており、VOC排出削減効果が現れていない指標もある状況。
- このため、今後は科学的知見を基に前駆物質（VOC、窒素酸化物（NOx））の排出とOx濃度の関係性を明確にし、効率的な対策を講じる必要がある。
- 令和元年度から令和6年度にかけ、VOC排出削減の定量的評価、地域性・季節性の分析、植物由来のVOC（BVOC）の設定の影響、費用対効果について調査した。
- 本資料では令和4年度から6年度の成果を総括し、まとめと今後の課題を提示する。

3

調査体制

- ・調査体制は以下のとおり。
- ・有識者や産業界委員からなる検討会を設置。

調査検討会委員

（○：委員長、五十音順、敬称略、肩書は最新のものの）

事務局
（一社）
産業環境
管理協会

氏 名	所 属	役 職
○ 梶井 克純	青島大学 環境科学工程学院	首席教授
金谷 有剛	(国研)海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター	センター長
岸本 充生	大阪大学 データリテリフロンティア機構	教授
児島 與志夫	一般社団法人 日本塗料工業会	常務理事（～R5）
嶋寺 光	大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻	准教授（R5～）
田桐 澤根	一般社団法人 日本塗料工業会	常務理事（R6～）
茶谷 聡	(国研)国立環境研究所 地域環境研究センター 大気環境モデリング研究室	主任研究員
森 二郎	一般社団法人 日本化学工業協会 VOC検討SWG	主査
三浦 安史	石油連盟	安全管理部長
深山 貴文	森林総合研究所 森林研究部門 森林防災研究領域 気象研究室	主任研究員
森川 多津子	一般財団法人 日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部	主任研究員

外注

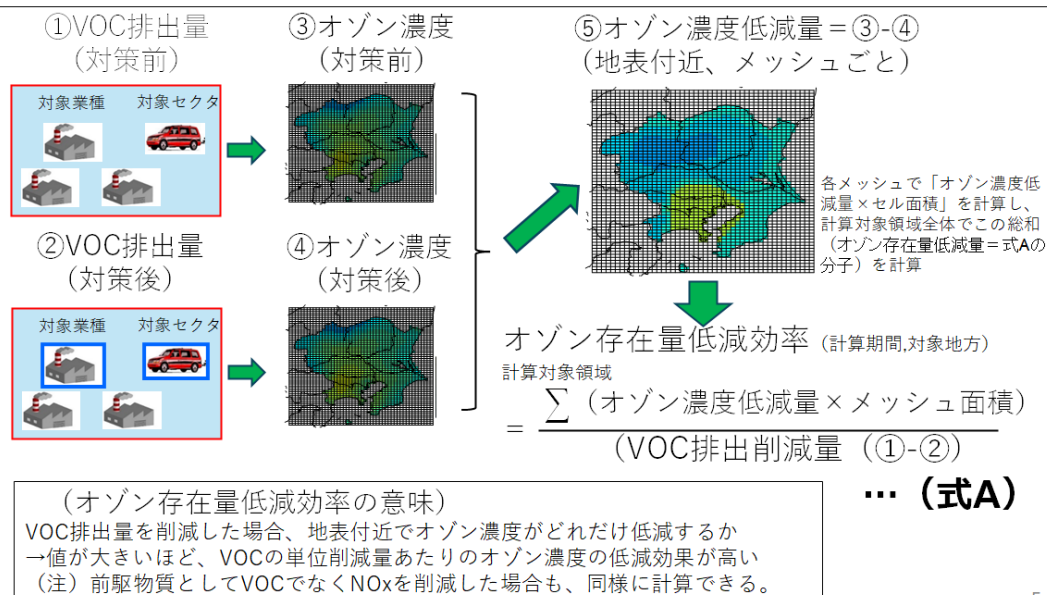
氏 名	所 属	役 職
谷 晃	静岡県立大学食品栄養科学部環境生命科学科	教授

共同研究

氏 名	所 属	役 職
井上 和也	(国研)産業技術総合研究所 安全科学研究部門	研究グループ長
氏 名	所 属	役 職
國分 優孝	東京都環境科学研究所環境資源研究科 大気環境チーム	研究員（主任）

前駆物質の排出削減によるオゾン低減効果の評価方法

- 排出削減前後のオゾン濃度を計算し、評価式は「オゾン存在量低減効率」を用い、オゾンの低減効果の評価した。シミュレーションモデルは「ADMER-PRO」とした。
- 具体的な計算方法は以下のとおり。



5

R4～R6年度の実施項目

1. シミュレーション精緻化のためのBVOC設定見直し

- (1) 全国優占樹種 (約20種) の基礎放出量データベースの構築
 - ・文献データが不足している樹種の実測を行いデータベース化 (公表予定)
- (2) 植生・土地利用面積分布の改善
 - ・植生・土地利用データとして活用できる調査結果を取り入れ改善。
 - ・調査の過程で竹林からのイソプレン排出量推定の重要性が示唆されたため、特に竹林の面積分布の推定の精緻化を行った。
- (3) BVOC排出係数の細分化・更新
 - ・樹種分類の細分化 (広葉樹、針葉樹⇒樹種ごとの排出係数)、竹林の新設

2. 更新したBVOC設定におけるシミュレーションの検証

- ・BVOC更新版シミュレーションによるトップダウン推計・実測値との比較。過年度成果の再現性確認。

3. 費用対効果の試算

- ・VOC対策費用を23万円/トン削減と仮定し、費用対効果を試算。

4. 定量的評価の検討

- ・オゾン生成レジームとの関係から、VOC削減によるオゾン低減効率を簡易推定できないか検討。

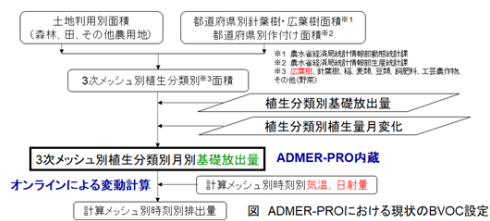
5. 文献調査

- ・コロナ禍における大気汚染物質の影響についての文献調査等。

背景 ADMER-PROのBVOC設定に関する指摘事項

R1～R3年度の調査で、以下の指摘があった。

- 植生分類として、「広葉樹」「針葉樹」の2分類では粗すぎる（樹種による違いがある。無放出のブナでも広葉樹のBVOCを放出する設定になっている）。
- ADMER-PROの植生・土地利用面積当たり排出係数の元になっているBao et al. (2008) の測定値は高めになっていると思料（例えば、稲は殆どBVOCを排出しない）。



表M.3 Kannariら (2007) において各植生分類に対して設定された標準状態の植生面積あたり排出係数 (落葉なしの状態) (柳成と馬場 私信) と日本の植物種のデータ更新結果 (太字) (単位: $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$)

植生分類	イソプレン	モノテルペン	その他のVOCs	NMVOCS計
広葉樹	2,112	360	872	3,353
	21,435	193	690	22,318
針葉樹	1,548	1,565	1,038	4,150
	0	3,886	1,234	5,120
稲	102	255	153	510
	0	567	2,410	2,977
麦類	12	12	10	34
豆類	22	0	0	22
飼肥料	47	118	71	235
工業農作物	0	59	235	294
その他	56	141	84	281

注: 太字は日本の植物種データを用いた更新結果であることを示す。

日本の植物種データとしてグロースチャンパー法によるBao et al. (2008) のデータを使用

7

1. シミュレーション精緻化のためのBVOC設定見直し

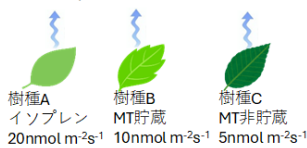
植生・土地利用面積当たりBVOC排出量 =

① 基礎放出量^{*1}
(葉面積あたり)

② 植生・土地利用マップ

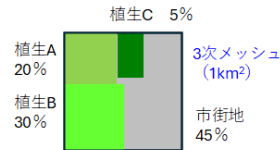
③ 葉面積指数^{*2}
× 補正係数

単位葉面積から標準状態で
BVOCはどのくらい出るか？
植物活性による季節変動あり。



⇒ 基礎放出量データベース
の構築 (静岡県立大)

計算メッシュごとに、植生ごとの面積、
土地利用用途ごとの面積占有率は？



植生A: コナラ群落
コナラ50%、その他落葉広葉樹50%
植生B: スギ・ヒノキ・サワラ植林
スギ34%、ヒノキ33%、サワラ33%

◎ LAI (葉面積指数)
土地面積あたりの、葉の面積は？



◎ 補正係数
葉の位置による日陰の影響、フラックス
測定値との関係等を考慮して下方修正

⇒ 更新データを作成し、夏季のオゾン高濃度発生条件での
ADMER-PROシミュレーションに供した。

*1 基礎放出量: 標準状態 (葉温30℃、光量1,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) におけるBVOC放出量。

*2 葉面積指数: 単位面積あたりの葉面積 (片面) の合計。

8

(1) BVOC基礎放出量データベースの構築

R4年度に全国優占樹種約20種を選定し、文献データが不足の項目（緑の行）を測定

順位	樹種	基礎放出速度	季節変化	測定計画	備考
1	スギ	●	●	—	—
2	ヒノキ	●	●	—	—
3	コナラ	●	●	R6	通年で季節変化を測定
4	トドマツ	×	×	—	*1
5	その他広葉樹	×	×	—	—
6	アカマツ	●	●	—	—
7	ブナ	●	—	R5	夏季に測定を実施（無放出樹種であることの検証）
8	ミズナラ	●	●	R6	夏季の放出ピークを測定
9	カラマツ	●	●	—	—
10	ダケカンバ	×	×	—	*1
11	カエデ類	●	×	—	イロハモミジの季節変化を適用
12	シナノキ	×	×	—	*1
13	スダジイ	●	×	R5	通年で季節変化を測定
14	クリ	●	×	R5	夏季の放出ピークを測定；季節変化はシイ・カン類の傾向を適用
15	ハンノキ類	△	×	—	*1
16	シデ類	●	●	—	—
17	アラカシ	●	×	R5	夏季の放出ピークを測定；季節変化はシイ・カン類の傾向を適用
18	ツブラジイ	×	×	—	スダジイの近縁種であるため、スダジイの基礎放出速度・季節変化を適用
19	イタヤカエデ	●	×	—	イロハモミジの季節変化を適用
20	モウソウチク	△	●	R6	通年で季節変化を測定*2
以下、20位圏外					
24	マダケ	△	●	R6	初夏～盛夏の基礎放出速度のピークを測定*2
52	シラカシ	●	×	R5	通年で季節変化を測定
—	イネ	●	×	—	成長量に比例させて基礎放出速度を適用

●：データ有、△：データ不十分、×：データ無 R5：令和5年度に測定 R6：令和6年度に測定

*1 高山帯や北海道など局所的に生育しており、オゾン生成への影響度は小さいことから対象外とする。

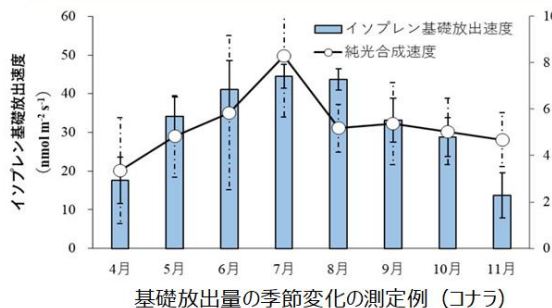
*2 ササ・タケ類の季節変化に関して放出のピークが想定される初夏～盛夏のデータが不足しているため。

9

(1) BVOC基礎放出量データベースの構築

○実測による基礎放出量の測定結果

リーフキューベット法を用い、R5年度はモノテルペン放出種、R6年度はイソプレン放出種について、夏季のピーク、季節変化について測定した。文献値と統合し、基礎放出量データベースとして整理した（公開予定）。

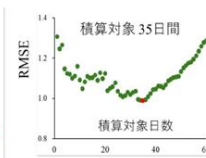
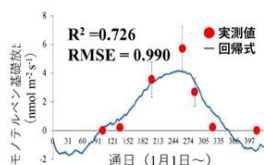


基礎放出量の夏季ピーク値整理例 (nmol・m⁻²・s⁻¹)

	平均値	標準偏差
コナラ <i>Quercus serrata</i>	38.4	9.2
ミズナラ <i>Quercus mongorica</i> var. <i>crispura</i>	27.9	1.9



リーフキューベット法
（葉を挟んで測定）



X_1 : 積算気温 (p値 < 0.01)

X_2 : 積算全日射量 (p値 = 0.64) (スダジイ)

$$\text{基礎放出速度} = 3.66 \times 10^{-4} X_1 - 2.45 \times 10^{-3} X_2 - 2.90$$

積算気温や積算日射量を加味した季節変化の定式化の例

10

(2) 植生・土地利用面積分布の改善

◎環境省生物多様性センターの植生調査結果を3次メッシュごとの面積割合に配分・加工したデータ
(国立環境研・茶谷先生ご提供)

市町村コード 三次メッシュコード 生物多様性センターの植生調査における大区分 中区分 茶谷先生の植生分類コード 全樹種中の占有割合

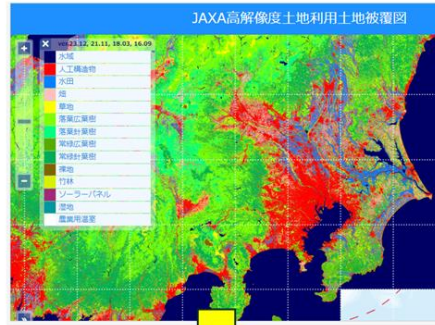
08201-54403278,58-01-16,frac,0.0004148
08201-54403278,54-01-01,frac,0.1995570
08201-54403278,57-02-15,frac,0.0027728
08201-54403278,57-03-15,frac,0.0993372
08201-54403278,57-04-15,frac,0.6979180

58市街地等の01市街地が0.04148%、
54植林地の01スギ・ヒノキ・サウラ植林が19.96%
57耕作地の02果樹園が0.2773%
57耕作地の03畑雑草群落が9.934%
57耕作地の04水田雑草群落が69.79%

・生物多様性セの植生調査は樹種面積を求める目的ではないが、**387の植生中分類の面積データ**として貴重。

竹林以外の植生・土地利用面積データとして活用

◎JAXA高解像度土地利用土地被覆図 (ver. 2021.11)



・**竹林**が独立して推定されている。
・森林は落葉／常緑・広葉樹／針葉樹と粗い。

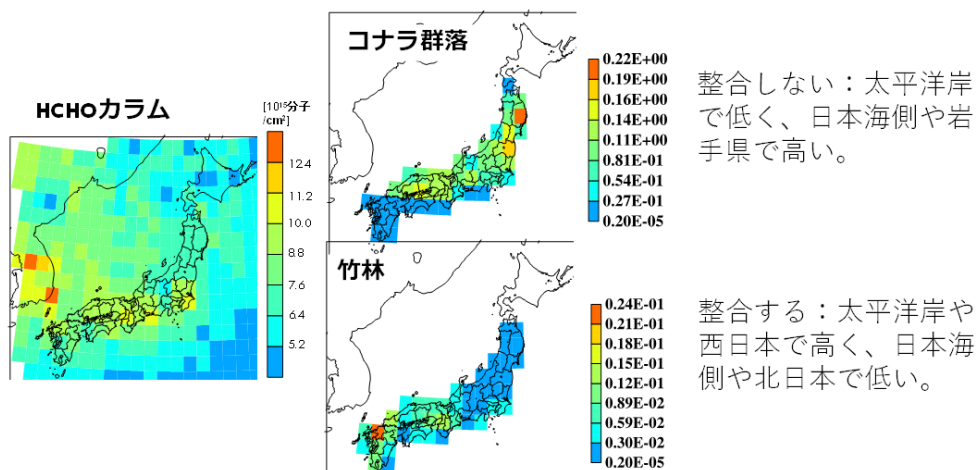
検討の上、補正して竹林面積データとして活用

11

(2) 植生・土地利用面積分布の改善（竹林の重要性）

○HCHOカラムとコナラ、竹林の面積分布

- ・イソプレンの分布と一定の相関があると考えられるHCHOカラム濃度分布は、コナラ群落の植生面積分率とは整合せず、竹林の植生面積分率の分布と整合的。
- ・竹林は近年、都市部及び郊外部において急速な増加傾向にあることが多数報告されており、この植生分布の精緻化、イソペン排出量の推定が重要と考えられる。



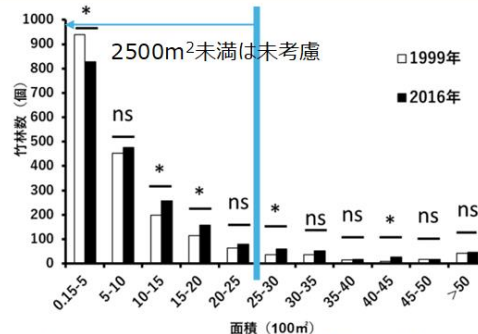
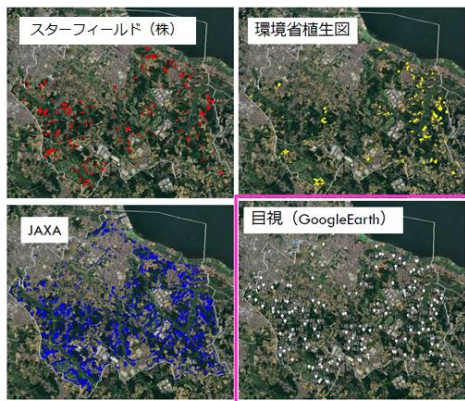
・コナラ群落、竹林の植生面積は、生物多様性センターデータの3次メッシュ加工データによる。

12

(2) 植生・土地利用面積分布の改善（竹林の重要性）

○竹林の面積分布推定の精緻化

- ・スターフィールド（株）（以下SF社）が茨城県内を対象に、衛星観測と目視（Google Earthまたは現地確認）による竹林推定調査を実施。
- ・目視調査を「正」とすれば、JAXA高解像度土地利用被覆図による竹林推定は過大であると考えられる。
- ・全国版のJAXAデータに、茨城県内のSF社の推定値の相関係数を乗じ、さらにSF社の方法で捕捉できない50m×50m以下の小規模竹林が多数存在することを考慮し、その3倍を竹林面積として設定した。



丹波篠山市を対象とした竹林数の規模別分布
 菊川ら2024, <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/288756/1/dnogk02588.pdf> 13

(3) BVOC排出係数の細分化・更新

種別	樹種名/土地区分名	放出物質	基礎放出量 (葉面積あたり) nmol・m ⁻² ・s ⁻¹	修正後排出係数 (土地面積あたり) μg・m ⁻² ・h ⁻¹	ADMER-PRO設定値 (土地面積あたり) μg・m ⁻² ・h ⁻¹
常緑針葉樹	1.スギ	MT	11.05	4328	
常緑針葉樹	2.ヒノキ	MT	1.93	2264	針葉樹MT 3886
常緑針葉樹	6.アカマツ	MT	1.6	1880	
常緑針葉樹	常緑針葉樹MT設定値	MT	1.0	1178	
常緑針葉樹	9.カラマツ	MT	1.4	1131	針葉樹MT 3886
常緑広葉樹	3.コナラ	Isop	32	5875	
常緑広葉樹	7.ブナ (無放出)	無放出	0	0	広葉樹Isop 21435
常緑広葉樹	8.ミズナラ	Isop	28	5141	
常緑広葉樹	常緑広葉樹Isop設定値	Isop	1.0	367	
常緑広葉樹	常緑広葉樹 (無放出)	無放出	0	0	
常緑広葉樹	15.シラカシ	MT	5	3672	
常緑広葉樹	16.シデ類	MT	5	3672	
常緑広葉樹	常緑広葉樹MT設定値	MT	1.0	734	
常緑広葉樹	13.スダシイ	MT	7.8	9165	広葉樹MT 193
常緑広葉樹	17.アラカシ	MT	7.3	8578	
常緑広葉樹	52.シラカシ	MT	9.5	11163	
常緑広葉樹	常緑広葉樹MT設定値	MT	1.0	1178	
常緑広葉樹	18.ツブライ	MT (推定)	7.8	9165	
常緑広葉樹	常緑広葉樹Isop設定値	Isop	1.0	588	
常緑広葉樹	常緑広葉樹 (無放出)	無放出	0	0	広葉樹Isop 21435
竹類	20.モウソウチク	Isop	25.5	56182	種 (イネ科)
竹類	24.マダケ	Isop	43.6	96060	Isop 0
竹類	タケ類 (モウソウチク、マダケ平均値)	Isop	34.6	76121	MT 607
竹類	ササ類 (上記平均値の1/10程度)	Isop	3.5	846	その他 2410
カエデ類	11.カエデ類Isop, MT	無放出 (設定)	0	0	※基礎放出量が大きいのはイロハモミジだが、面積占有率のランクが出てこない。
カエデ類	イロハモミジMT	MT	6.1	4480	
カエデ類	19.イタカエデIsop	Isop	0.04	15	
カエデ類	19.イタカエデMT	MT	0.01	9	
草地、耕作地	Isop程度	Isop	0	0	0
偏在種	(高地偏在種)	一部不明	0	0	0
偏在種	(北海道偏在種)	MT	0	0	0
市街地等	非種生	放出なし	0	0	0

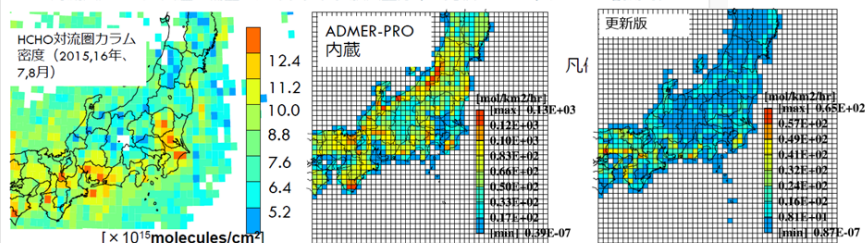
- ・ **基礎放出量**は、文献調査と実測により精緻化された。
- ・ 広葉樹/針葉樹の2分類だったが、**主要樹種に細分化した排出係数を設定**できた。
- ・ イソプレン放出種の**竹林**を新たに加味した (**上方修正**)。
- ・ **森林樹種**についてはフラックス測定値 (文献値) を参照して **下方修正**した。

2. 更新したBVOC設定におけるシミュレーションの検証

○トップダウン推計とイソプレン放出量分布（気温補正後）

- ADMER-PROのBVOC設定における日本海側の高濃度域が解消され、HCHO対流圏カラム分布と定性的に合致するようになった。

HCHO対流圏カラムと気温で補正したイソプレン放出量分布の比較その1（AQUAS-Tsukuba観測時）



領域内の全てのメッシュの基礎放出量の和

地方	BVOC	領域内全メッシュの基礎放出量の和 (mol・km ⁻² ・hr ⁻¹)		
		(A) ADMER-PRO内蔵	(B) 更新版	(B)/(A)
関東	イソプレン	1.81E05	2.66E04	6.8分の1
	イソプレン以外	2.63E05	7.80E04	3.4分の1
近畿	イソプレン	1.33E05	3.90E04	3.4分の1
	イソプレン以外	2.57E05	1.15E05	2.2分の1

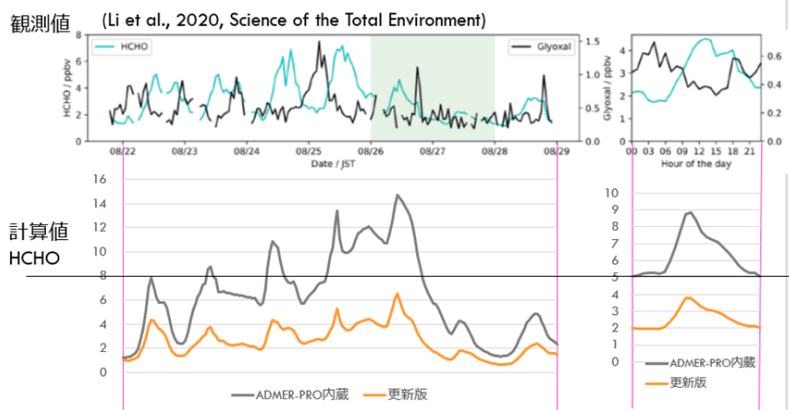
- 領域内の基礎放出量の和が、BVOC排出量を表すとすれば、内蔵設定での排出量を2.2～6.8分の1程度に下方修正したことになる。

2. 更新したBVOC設定におけるシミュレーションの検証

○実測値との比較（AQUAS-Tsukuba 2017年夏季）

- ADMER-PRO内蔵では顕著な過大推計となっていたが、BVOC更新設定ではピーク値（約8ppbv）がおおむね合致するようになった。
- ただし、日内変動パターンは合わない。なお、実測における不確実性や、化学反応モデルの不確実性等も影響している可能性がある。

HCHO濃度の観測値・計算値の比較結果（AQUAS-Tsukuba, 2017年夏季）



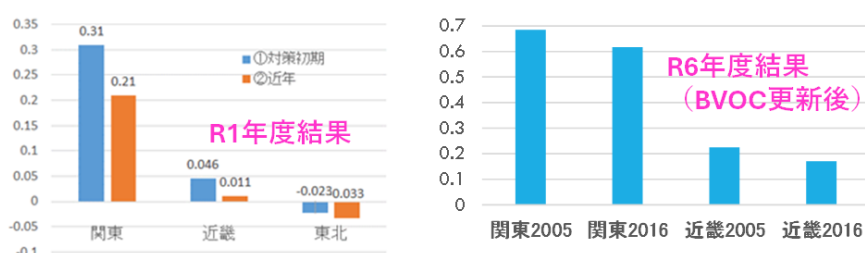
2. 更新したBVOC設定におけるシミュレーションの検証

○R1年度の成果

- ・VOC削減によるオゾン存在量低減効率は、地方によって異なり、関東＞近畿＞東北の順である。
- ・VOC削減によるオゾン存在量低減効率は、年代によって異なり、2005年に比べて2016年は低下しており、VOC削減がオゾン低減に効かなくなっている。

○R6年度の結果と再現性の検証

- ・上記の結果は、BVOC設定を更新しても定性的には成立することが確認された。
- ・VOC削減によるオゾン存在量低減効率は、関東地方で2005年についてADMER-PRO内蔵で0.3程度であったのが、BVOC更新設定では0.7程度と上昇した。
- ・BVOC設定を全体としては下方修正したことにより、VOC律速側にシフトした。
- ・過去のVOC対策はオゾン濃度低減により寄与していたと評価される。



オゾン存在量低減効率（VOC削減）の計算値の比較

17

3. 費用対効果の試算

- BVOC設定を更新した設定で、VOC対策費用を23万円／トン*1と設定し、VOC対策の費用対効果を試算した。
- オゾンの単純平均値及びコメ収量加重平均値を0.01ppm削減するための費用は関東：年間1～2千億円程度、近畿：年間3～5千億円程度であり、2005年から2016年にかけて増加
- オゾンの人口加重平均値を0.01ppm削減するための費用は、関東：年間5百億円程度であり、2005年から2016年にかけて減少。近畿：年間1千億円程度であり、2005年から2016年にかけて増加。

関東地方	2005年		2016年	
	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)
単純平均値	555,798	1,278	586,082	1,348 ↑
人工加重平均値	237,008	545	218,192	502 ↓
コメ収量加重平均値	845,329	1,944	982,634	2,260 ↑

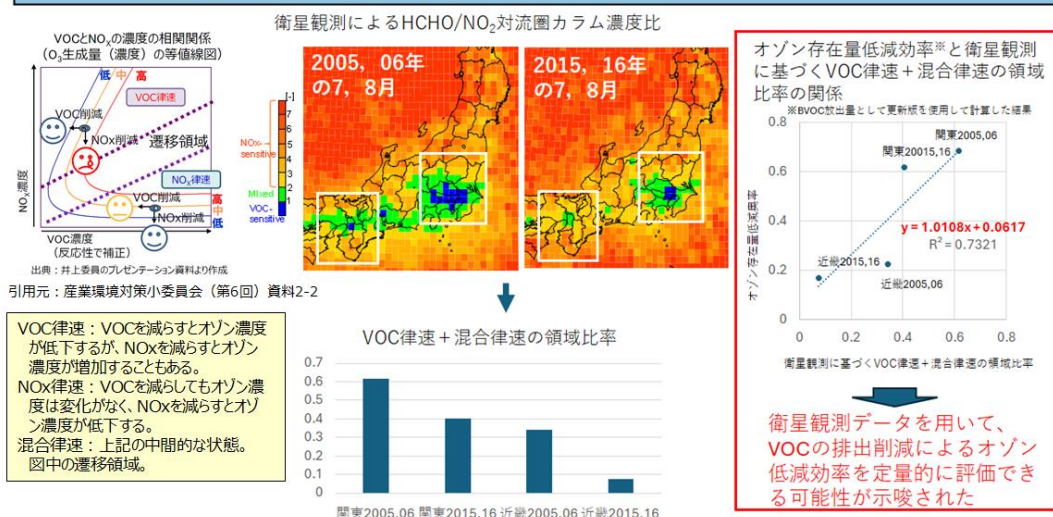
近畿地方	2005年		2016年	
	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)	必要排出削減量 (ton/yr)	必要コスト (億円/yr)
単純平均値	1,539,316	3,540	2,048,130	4,711 ↑
人工加重平均値	481,402	1,107	528,714	1,216 ↑
コメ収量加重平均値	1,348,769	3,102	1,859,058	4,276 ↑

*1：中西ら、詳細リスク評価書シリーズ24 オゾン、p.176、2009、丸善出版。
2000～2010年の対策費用をVOC排出削減量で割ったもの。

18

4. 定量的評価の検討

- 関東、近畿の2地方について、2005年頃と2016年頃のオゾン存在量低減効率と、オゾン生成レジームを表すVOC律速 + 混合律速の領域比率はある程度の相関が認められた。
- 衛星観測データを用いて、VOCの排出削減によるオゾン低減効率を定量的に評価できる可能性が示唆された。



5. 各種文献調査の結果

○コロナ禍における大気汚染物質の影響についての文献調査

- ・ 2020年冬季～春季のオゾン濃度の変化に係る論文を調査。
- ・ NO₂やVOCの大気中濃度は世界的に減少し、粒子状物質濃度は減少した一方、オゾン濃度は増加したという報告が世界各地で見られる。全球オゾン負荷は低下。

○BVOCのトップダウン推計の可能性調査

- ・ 文献調査により、日本近郊でもトップダウン推計ができる可能性はあるが、解像度は10～100kmとなることが示された。

○BVOC基礎放出量の文献調査

- ・ 既存文献を調査したところ、樹種によるBVOC排出は以下の概観。
イソプレン放出種・・・落葉広葉樹：コナラ、ミズナラ、
竹類：モウソウチク、マダケ（高放出）
モノテルペン放出種・・・常緑針葉樹：スギ、ヒノキ等、
常緑広葉樹：シイ、カシ類等（中放出）
無放出種・・・・・・・・・・ブナ、ケヤキ等

○費用対効果に関する文献調査

- ・ 様々な政策に関する費用対効果、費用対便益分析は、アメリカやイギリスでは盛んに行われている。日本では、道路建設に関する費用対効果分析に限定される。

6. 成果のまとめ

○BVOC設定の改善

- ・基礎放出量データベースを構築し、一定の精度のある主要樹種の葉面積当たり基礎放出量、及びその季節変動を定式化した。公表して活用に資する予定。
- ・竹林の加味、森林からのBVOC放出量の補正等により、衛星観測データとの定性的合致、実測値との合致など、改善が図られた。
- ・葉面積当たり基礎放出量以外のBVOC設定に関しては、不確実性は残っている。

○シミュレーションによるオゾン低減効率の評価

- ・VOC削減によるオゾン存在量低減効率は、地方によって異なり、関東＞近畿＞東北の順である。
- ・VOC削減によるオゾン存在量低減効率は、年代によって異なり、2005年に比べて2016年は低下しており、VOC削減がオゾン低減に効かなくなって来ている。
- ・VOC削減によるオゾン存在量低減効率は、ADMER-PRO内蔵で0.3であったのが、BVOC更新設定では0.6程度と上昇した。過去のVOC対策はオゾン濃度低減に一定程度寄与したと評価される。

○費用対効果

- ・VOC対策費用を23万円と設定し、オゾンの単純平均濃度、コメ収量加重平均値、人口加重平均値をそれぞれ0.01ppm下げるための費用を関東・近畿で試算した。

○定量的評価

- ・VOC削減によるオゾン存在量低減効率は、衛星観測により得られるVOC律速、混合律速の領域の比率を用いて、簡易的に推定できる可能性が示された。

7. 考察

■これまでの調査により以下のことがわかった。

- ・AVOCを減らせば、削減量に応じてオゾンも減るという単純な構図ではなく、地域、季節、年代によって、オゾンの削減効果は異なる。
- ・BVOCの排出量の大小によっても、AVOC削減によるオゾン削減効果は変化する。
- ・BVOCのうち、竹林の影響が大きいことが示唆された。
- ・VOC律速からNOx律速への移行により、AVOC削減によるオゾン削減効果は低くなってきていることが示唆された。今後もさらにNOx律速へ移行すると想定される。
- ・コロナ禍においては、VOC、NOxともに減少していてもオゾン濃度が上昇した論文が世界中で多数報告された。

■AVOCの削減によるオゾン削減効果は低くなっていることが示唆されているので、AVOC削減だけに着目せずに、引き続き、科学的なオゾン生成機構の解明、BVOC排出量のさらに精緻な把握、オゾン生成レジームの影響の解明等が必要。

参考 R1～R3年度の主要な成果

結果1：定量指標の基本計算

- ・関東、近畿、東北の3地方で比較すると、VOC削減指標は関東＞近畿＞東北の順に大きく、NOx削減指標はこの逆の順。
- ・過去（2005年ベース）と近年（2016年ベース）で比較すると、VOC削減指標は小さく、NOx削減指標は大きくなっている。この傾向は、近年（2016年）と将来（2030年ベース）についても同様である。

結果2：排出場所の立地場所の影響（2005年ベース、関東、夏季）

- ・VOC削減指標とMIR（光化学反応性）、VOC削減指標と立地パラメータとの相関は低いが、VOC削減指標とこれらの積（MIR×立地パラメータ）との相関は非常に高い。すなわち、MIRだけでなく、排出場所（＝削減場所）の立地も、前駆物質削減によるオゾン低減効果を検討する上では考慮する必要がある。

23

参考 R1～R3年度の主要な成果

結果3：気象条件の影響

- ・春季と夏季を比較すると、夏季はNOx律速、春季はVOC律速が強まる傾向となる。
- ・関東地方について、夏季（高濃度オゾンが出現する気象パターン：地衡風＝弱、日射＝強）は「VOC、NOx削減指標とも正で、NOx削減指標が大きい」、冬季は「VOC削減指標がほぼゼロで、NOx削減指標は負値」、春と秋は「VOC削減指標は正值で小さく、NOx削減指標は負値」となる。

結果4：BVOCの設定の影響

- ・BVOCに関しては、測定値や排出量の推計方法に関して未だ知見が不足しており、今後も引き続き知見の充実が待たれる。
- ・BVOCの設定を変更すると、「オゾン低減効率等」は大きく変動する。
- ・ADMER-PROの現状におけるBVOC設定は、BVOCは排出量を若干高めに見積もっている可能性がある。

24