

B-60 京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究

(2) 生態学的アプローチによる吸収量評価モデルの開発と不確実性解析

- 1) 生態学的吸収量評価モデルの開発
- 2) 生態学的吸収量評価モデルの不確実性解析

独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター 山形与志樹

G. Alexandrov

木下嗣基

東北大学東北アジア研究センター

石井敦

(研究協力者) 独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター 岩男弘毅

平成14～18年度合計予算額 114,980千円
 (うち、平成18年度予算額 22,076千円)

※上記の予算額には、間接経費 26,248千円を含む

〔要旨〕本研究では、日本の森林における広域炭素収支を推定することを目的として、生態学的なプロセス（光合成・呼吸・土壌分解等）を組み込んだ生態学的炭素吸収量評価モデルを開発し、リモートセンシングや林業統計（森林インベントリ）手法による推計値との比較によるその不確実性を評価する研究を実施した。生態学的なアプローチによる炭素収支推定手法は、従来の林業統計に基づいた炭素吸収量の推定手法とは方法論的に異なるアプローチであるため、林業統計情報に基づいた京都議定書に関する森林の炭素吸収量の評価に際し、検証（Verification）ツールとしての役割が期待されている。プロジェクトの前半では、グローバルな森林生態学的モデルを日本の森林環境状態に適合するものに改良を進めるとともに、テストサイトにおいて観測された森林炭素吸収量データによるキャリブレーション分析を実施した。また、全国レベルでの生態系モデルによる森林炭素吸収量評価に必要な森林環境情報（1kmメッシュ）の収集と整備を進め、広域の森林生態系に対する全炭素収支算定を可能とした。後半では、森林簿等の林業インベントリ情報の一部を生態学的アプローチによるモデルの入力データとして利用することで、地域的な森林成長の違いを反映することによる吸収量算定精度の向上を図ることができた。炭素吸収量の算出に際して、樹高成長量や林分密度（本数推移）の推定を生態モデルに組み込むことで、植栽や間伐効果の評価も可能となり、現実の森林管理の即した森林生態系の炭素収支を推定できるようにした。さらに、モデルにより推定された森林成長量や炭素吸収量について、リモートセンシングや林業統計手法による結果との比較検討を実施し、樹種によって過大評価したり過小評価になったりすることが解った。また、実際の施業体系を生態モデルに組み込んで検討したところ、森林簿と併せれば全炭素収支の将来予測が可能なることも解った。

〔キーワード〕炭素吸収量、生態学的モデル、インベントリ、比較分析、不確実性評価

注：当サブ課題には1）生態学的吸収量評価モデルの開発、2）生態学的吸収量評価モデルの不確実性解析、の2つのサブサブ課題があるが、同一モデルを用いて評価していることから、両者を統合して報告する。

1. はじめに

森林の吸収源機能は、京都議定書において認められ、2008年の開始を目前に控えた第1約束期間(2008-2012年)では、人為的な活動に伴う温室効果ガスの排出量・吸収量を適切に算定し、条約事務局に報告することが義務付けられている。吸収源機能に関する報告では、議定書第3条3項および4項活動に伴う排出・吸収量として、地上バイオマスだけでなく、地下バイオマス、枯死木、リター、土壌の5つのプールについて、炭素ストック変化も含めた吸収量を算定する必要がある。

本課題では、炭素吸収量の構成要因である森林生態系の光合成等の各プロセス（図1参照）を生態学的なモデルによ

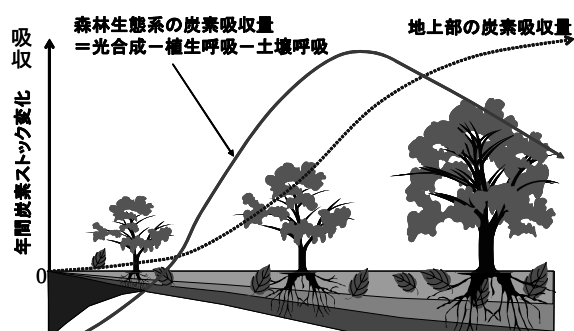


図1 森林における地上部と地下部への炭素蓄積量の変化

て定量化し、森林生態系全体における炭素吸収量の算定を行った。京都議定書は、90年以降の追加的人為的な活動（3条4項活動）として森林管理（経営）のなされた森林における約束期間（2008－2012年）での炭素吸収量がカウントされることになるが、本テーマにおけるモデル分析の対象としては、まずは気候変動枠組み条約上に報告される「管理された森林」全体における炭素吸収量の評価を生態学的なモデルによって実施することを目標とし、さらに第2約束期間以降に吸収源の評価手法として取り入れられる可能性がある、広域の森林生態系に対する全炭素収支算定（フルカーボンアカウンティング）手法への発展が可能なアプローチを採用することとした。尚、特に吸収量の算定に当たっては、地上バイオマスの変化量について高精度な推定を行うため、森林インベントリデータを用いて地域性、樹種などの空間的に詳細なデータを考慮する生態学モデルの開発を実施した。

生態学モデルについては、総一次生産(Gross Primary Production: GPP)、純一次生産(Net Primary Production: NPP)、純生態系生産(Net Ecological Production: NEP)を算定対象とした（図2参照）。また、上記のモデルに加え、本プロジェクトの他課題との連携により、伐採などの人為

的影響を加えた純生物総

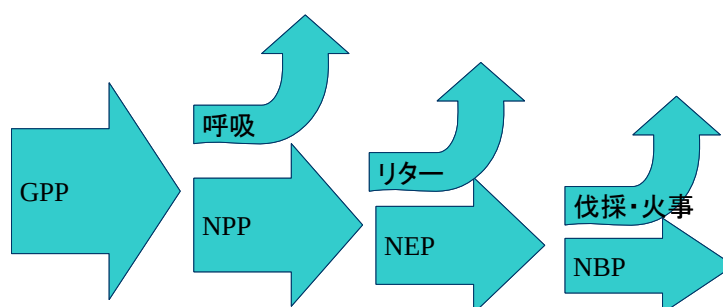


図2 GPP, NPP, NEP, NBPの定義

生産(Net Biome Production: NBP)を推定するモデルの構築も行った。

2. 研究目的

2008年から始まる京都議定書の第一約束期間を目前に控え、第3条3項、4項活動に伴う吸収量の評価に向けて、炭素収支算定方法の確立が急務となっている。炭素収支算定方法は、大きく分けて、1)森林インベントリ(サンプル調査や成長表による材積量から森林バイオマスを推定した値)から炭素ストック量の変化を評価する林学的アプローチと、2)計測可能な環境・森林パラメータを変数とする生態系モデルを用いて炭素収支を推定する生態学アプローチの2つが考えられる。

現在、気候変動枠組条約において提出が義務付けられている温室効果ガスの排出・吸収量の国別報告は、林学的アプローチをベースとするIPCCが作成したガイドライン(96年改訂IPCCガイドライン、土地利用・土地利用変化及び林業に関する良好指針(以下、GPG-LULUCF))に従って、報告書を作成することが義務付けられている。しかし、この推定手法は、林業活動に伴う統計情報の経年的な蓄積を前提として炭素収支を近似する手法であり、発展途上国など林業活動のデータが乏しい国については、精度の高い結果を保証するものであるとは言い難い。

国レベルの吸収量を算定するにあたって、長期間にわたって継続的に整備されてきた林学的インベントリ情報の活用は不可欠であるが、インベントリ情報の中には間接的な推計値も多く含まれているため、サンプリング調査や他の算定手法(モデルやリモートセンシング計測)による検討も含めて、検証方法の構築が必要となる。また、第2約束期間以降に向けて、フルカーボンアカウンティング手法の導入も議論される見通しであり、新たな手法(リモートセンシング計測、フラックス、生態モデル等)を取り入れた炭素アカウンティングシステムの構築が喫緊の課題となっている。

生態学的モデルによるアプローチは、従来のインベントリに基づく吸収量評価手法をすぐに代替する段階には到達していないものの、これまでに蓄積されてきた生態学的な知見に基づき、現在開発が進んでいる最新の計測手法(リモートセンシングやフラックス計測)における研究成果を取り入れながら、より直接的にCO₂吸収量を推定するアプローチとして発展することが期待されている。

また、中長期的な吸収源の取り扱いを検討するためには、現在の吸収源活動の動態および、吸収量の変動を把握するとともに、今後の吸収源活動を予測する手法の開発も必要となってくる。

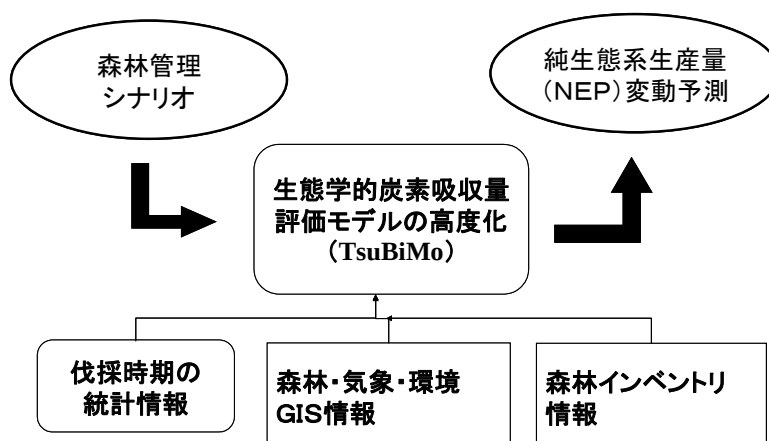


図3 本プロジェクト、サブ課題における研究計画

生態学的なモデルでは森林や環境パラメータを変更した状況でのシミュレーションによる検討が可能となるため、将来の気候変動や様々な吸収源対策シナリオに対する評価や予測も可能となる点に大きなメリットがある。本課題では、生態学的なアプローチに、日本の森林状況をより適切に反映するために、インベントリデータの利用を組み込んだモデルを新たに開発し、炭素吸収量評価し、その不確実性を検討することを目的とした。研究のフローを図3に示す。

3. 研究方法

(1) 生態学的モデルについて

生態学的なアプローチによるモデルの特徴・利点は、各種の計測手法（リモートセンシング等）によって取得される植生のバイオマス・光合成に関する情報や、日本各地において展開されている森林生態系における各種計測情報を活用することにより、森林生態系における炭素ストック変化の推定を展開できる点にある。また、生態系モデルの中の樹齢構造（林分構造）パラメータを調整することによって、従来の林学的インベントリでの成長表による材積蓄積量の変化からは把握することが困難であった、残材や土壌における炭素収支の動的変動のモデル化が可能となり、森林管理等の吸収源活動の変更に伴う森林生態系全体でのCO₂吸収量の変動を定量的に評価することが期待される。また、生態学的なモデルに、森林インベントリデータを併せて用いることで、様々な地域、様々な樹種に適用できるモデルを作成することが可能となる。さらに、森林の吸収量に大きな影響を及ぼす人為活動を加えることにより、第2約束期間以降のフルカーボンアカウンティングに対応したモデルの構築が可能となる。

本テーマにおいて開発された生態系モデルの概要を図4に示す。森林生態系におけるCO₂の吸収・排出に関与する各プロセス（光合成量、植物呼吸、落葉・残材、土壌呼吸、伐採等）が直接組み込まれており、計測可能な気象情報や森林特性からモデルのパラメータが決定され吸収量が評価できるようになっている。

モデル構築の方針

吸収量評価システムの構築に際しては、広域な推定において不確実性を抑制する必要があり、適度な複雑さを持つモデルの開発が重要となる。本研究では、モデルの複雑さとパラメータ設定に関しては下記の方針に従いモデル構築を進めることとした。

- 観測データが得られないプロセスを組み込んで過度に複雑なモデルになることを避け、広域にわたり頑強な推定値を得ることができるようパラメータ選択する。
- 吸収量算定に影響を与える入力パラメータを出来る限り妥当な値に設定する（テストサイトのデータに対する過剰適合を避ける）。
- 森林・気象関係のデータ（樹種、樹齢、気温、日射量等）を地理情報化し、1 km の分解能のメッシュデータで与える。
- 1 km の分解能で指定できないパラメータについては、過去の実験的モデル（オズナブルック

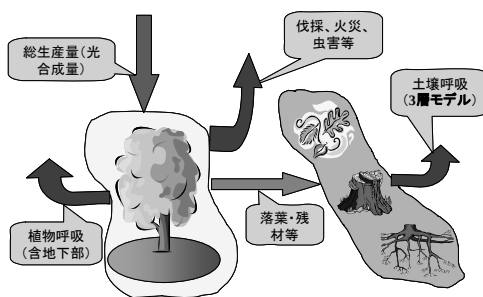


図4 森林生態系の吸収量評価モデルの概念

生物圏モデル等) から得られた値に設定する。

森林インベントリ情報に基づいた炭素吸収量評価のアプローチでは、樹木の材積量（幹部分の体積）の推定値から、森林の炭素ストック量を推定し、その時間変化から炭素吸収量を推定する。この方法では、これまでに林業に関連して蓄積している情報を活用する利点があるものの、材積量から森林全体のバイオマス(体積)を推定する係数(Expansion Factor)や、土壌やバイオマス中の炭素含有量を推定する係数(Conversion Factor)の不確実性が問題となる。一方、生態学アプローチでは、森林生態系の炭素吸収に関与する各プロセス(光合成量、植物呼吸、落葉・残材、土壌呼吸、伐採等)を、各種計測データに基づいて直接モデル化することが可能である一方、異なる条件の多くの地点におけるデータを取得することは事実上不可能である。そこで本研究では、生態学アプローチにより時間的に詳細なデータを取得し、これを基本とした上で、森林インベントリ情報を用いることで空間的に詳細なデータを取得するという手法を用いる(前出図4)。

モデルの入出力パラメータ

本研究で開発するモデルにおける主要変数と入・出力パラメータを図5に示す。入力パラメータは、気温、降水量、日射量、日照時間、樹種・樹齢別面積である。本モデルを用いたシミュレーションにおいて、気温・日射量等の気象情報はメッシュ気候値を用い、森林情報は林小班単位、国家森林資源データベースの情報を1kmメッシュに再構築されたものを活用している。尚、土壌の生産性については、各林分単位では重要な変数であるが、本研究では、日本全体もしくは都道府県単位では平均的な値を用いることとした。人工林における伐採期間については、広嶋による伐採モデルの値を用いる。これにより、将来の吸収量の推定に関して林産材の需要予測や、将来計画を導入することが可能となる。一方、本モデルによって出力可能なパラメータは、光合成の総量に当たるGPP、植物による呼吸量を差引いたNPP、さらに土壌による呼吸を差引いたNEP、そしてさらに伐採等の影響を差引いたNBPである。そのため京都議定書では、生態学的には、3条4項活動として登録される森林における、NBPが炭素吸収量としてカウントされることになる。

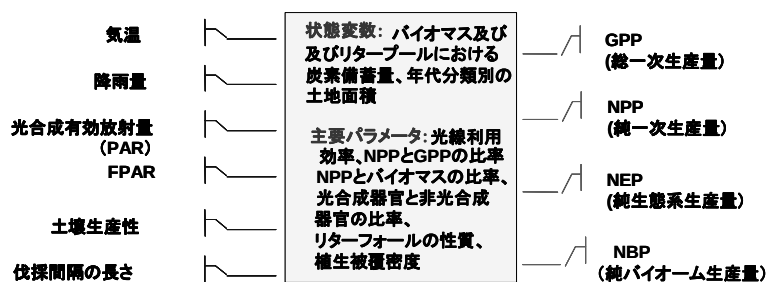


図5 モデルの主要変数と入力・出力パラメータ

本モデルでは、森林生態系全体の炭素ストックの長期的な変動を評価することが可能であるが、土壌中炭素蓄積量の推定については、モデル化を行うための情報が十分に得られていない。また、土壌中炭素蓄積量は短期間では大きく変化しないことが予測されるため、本プロジェクトでは地上部バイオマスの推定精度の向上に注力することとした。

TsuBiMo概要

生態系モデルにはTsuBiMo(Tsukuba Biosphere Model)をベースとした。TsuBiMoでは、GPPの推定では、温度依存性にArrhenius型関数を用い、個葉の日射依存性にMichaelis-Menten型関数を用いている。これらを門司－佐伯理論等に従って林分単位にスケールアップすることで林分のGPPを求めている。NPPの推定は、GPPとNPPの経験則に従い次の式で推定する。

$$NPP = 1350 \cdot [1 - \exp(-GPP/1863)] \quad (1)$$

バイオマス量は、相対成長モデルを用いることによって、バイオマス量(B)とその林齢(t)との関係を数量化すると次式で表される。

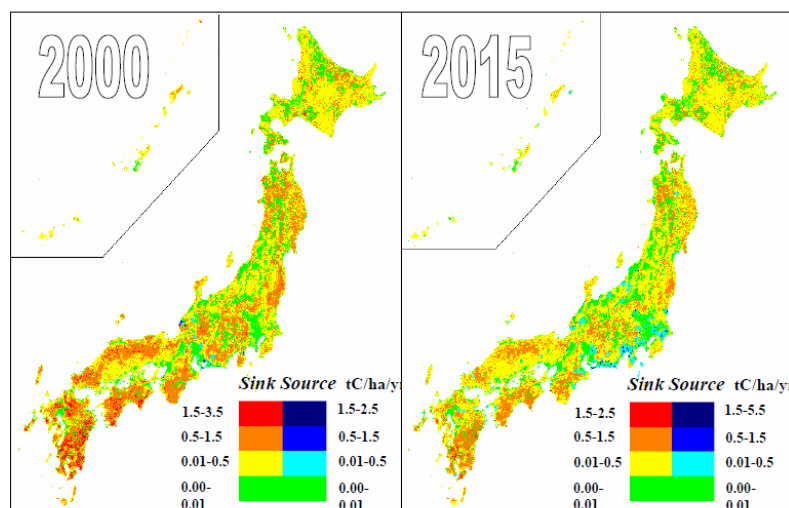
$$B(t) = b_1 \cdot NPP \cdot t^{b_2} \quad (2)$$

上式で b_1 、 b_2 はデータベースより各々0.591、0.792とする。NEPは上式を時間で微分することにより次の式で推定される

$$NEP = b_1 \cdot b_2 \cdot NPP \cdot t^{b_2-1} \quad (3)$$

TsuBiMoは天然林を基礎として開発されたモデルである。これを拡張して植林や伐採等の人為影響を考慮するように拡張をおこなうこともされているが、定性的な傾向を把握するものである。TsuBiMoは単純かつロバストなモデルであるが、天然林での観測値との一致度は高いモデルである。TsuBiMoによる日本全国の吸収量予測を図6に示す。

生態学的モデルによる日本の森林CO2吸収量推定



Alexandrov and Yamagata (2002) よ

図6 TsuBiMoによるCO2吸収量推定

日本の林業インベントリ情報

日本は国土の67%を森林が占め、そのうち41%を人工林が占める。人工林には森林簿があり、林分毎の面積や施業の情報が記録されている。森林簿は都道府県毎に記録方法や内容が異なるが、

面積、樹種、樹齢の記録は大半の都道府県で行われている。また、林業を行う上で、地方や都道府県毎に蓄積表が用いられている。この蓄積表は、地位級毎もしくは平均的な蓄積量の時間変化を表したものである。この表を参考にしながら材積の推定を行う。一方、人工林林分密度管理図は、樹高・本数と材積の関係や、自己間引きの影響をインベントリ情報を集積して作成したもので、間伐を行う際の参考にする情報である。これは、樹高成長は林分密度に依存しないという経験則に基づいて作成されたものである。

TsuBiMoの人工林への拡張

日本の人工林における吸収量の算定には、TsuBiMoをそのまま用いるにはいくつかの問題点がある。以下に問題点を挙げる。

- 成熟した林分のGPPは一定となりNPPも一定となるため、林分は永遠に成長する
- 間伐などの施業の影響を取り込むことが困難

前者は高齢林化が進行する日本の現状にそぐわず、後者は間伐による排出と成長の回復を正しく評価することが困難なものとなる。上記の二点について拡張・改良を行う。

TsuBiMoではNPPはGPPから一意に推定されるが、これはTsuBiMoが高齢林を想定していないことが原因と考えられる。そのため、本課題では、呼吸を考慮するモデルへの改良を加えることとした。間伐の影響を考慮するには、林分密度管理図と同様に、樹高・本数の推定を行い、材積は樹高・本数の関数として表す手法を用いる。樹高成長にTsuBiMoの成長モデルを適用し、本数の変化は林分密度管理図に従うとする。

これにより、枯死木の推定は、林分密度管理図の経験則に基づくものとする。また、従来のTsuBiMoではGPPの温度依存性が強すぎるとの指摘があるため、個葉のGPPの推定には広く用いられているFarquhar式を適用する。計算に使用したデータを表1に示す。

表1 計算に用いた入力条件

変数	単位	引用元
月積算日射量	MJ m ⁻²	メッシュ気候値
月積算日照時間	hour	メッシュ気候値
平均気温	℃	メッシュ気候値
月積算降水量	mm	メッシュ気候値

GPPの推定

上述のように個葉のGPPの推定にはFarquhar式を用いた。Farquhar式では、二酸化炭素濃度、気温、日射量等が必要となるが、本プロジェクトでは、気温と日射量のみを月ごとの入力として取り扱いを行った。林分への拡張は門司－佐伯の方法を用いた。また間伐の影響を考慮するため、GPPは林分密度に比例すると仮定した。

NPPの推定

NPPの推定は、GPPから呼吸を差し引く手法を用いた。呼吸は、地上部の木部と枝・葉部に分けて取り扱う。これは、根部は地上部の木部と相関があるためである。枝・葉部の量は、林分密度の関数として取り扱いを行う。

$$NPP = GPP - R_h - R_t - R_G$$

$$R_h = 5.0 \times L \times 2.0^{\frac{T-15}{10}}$$

$$R_t = 0.05 \times B \times 2.0^{\frac{T-15}{10}}$$

$$R_G = 0.3 \times \Delta B$$

R_h は葉量に比例する呼吸、 R_t はバイオマス量に比例する呼吸である。 R_y は林分密度、 R_g はバイオマス増加分の成長呼吸、 B は地上部バイオマス量、 L は葉量である。

バイオマス量の推定

TsuBiMoと同様の手法を用いた。TsuBiMoではリターの量は次の式で表される。

$$L(t) = NPP(t) \cdot (1 - b_1 \cdot b_2 \cdot t^{b_2-1})$$

$b_1 = 0.59$ 、 $b_2 = 0.792$ とすると、上式は下記の式で近似できる。

$$L(t) \approx B(t) \times t^{-0.7176} \times R_y$$

これより、枯死を除いたバイオマス変化量は、

$$\frac{dB}{dt} = NPP - B(t) \times t^{-0.7176}$$

また、材積(地上部バイオマス)は樹高と単位面積あたりの本数の関数とした。

$$V(t) = f(N, H)$$

N は単位面積あたりの本数を表し、 H は上層樹高を表している。但し、

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dV}{dt} \frac{dH}{dV} = a \cdot t^b \frac{dH}{dV}$$

とする。 dH/dV 、 d 、 g は人工林林分密度管理より求めることが出来る。単位面積あたりの本数は、密度管理図と同じ方法で算出する。用いる変数は樹高、材積、同一自然枯死線の材積0の値である。単位面積あたりの本数の減少は枯死に相当するため、枯死は明示的には導入をしていない。

伐採量の推定

間伐に関しては、林分密度(R_y)が0.8になると0.7に減少させる。主伐に関しては、広嶋による林齢別伐採量推定を用いた。伐採推定は次の通りである。

1. 1990年、1995年の森林資源現況の齢級別人工林面積の差より90～94年の齢級別伐採面積を便宜的に計算
2. 1の伐採面積では、低齢級で過大な値となる誤差がみられるので、別途伐採率を計算し、これに寿命分布モデルをあてはめて、90～94年の齢級別伐採率を模式化

3. 90年、95年の齢級別人工林面積は16もしくは17齢級に、一括表示があるため、便宜的に齢級上限を延長
4. 3の90年齢級別人工林面積に2の齢級別伐採率を乗じて、90～94年の齢級別伐採面積を推定
5. 2の齢級別伐採率は変化しないと仮定して、3の95年齢級別人工林面積に2の齢級別伐採率を乗じて、95～99年の齢級別伐採面積を推定
6. 1998～2002年、2003～2007年、2008～2012年の齢級別伐採面積は「重要な林産物の需要及び供給に関する長期の見通し」における、すう勢シナリオによる予測値を援用
7. それらを単年当たりの伐採面積に換算

(2) 樹高成長の精度検証について

さらに、森林簿の精度検証、および補完を目的として、空中写真とLiDARを用いた樹高成長の推定手法 DCHM (Digital Canopy Height Model) について研究開発を行った。森林インベントリの基礎データとなる森林簿には、モニタリング機能が欠如しており、データの更新システムにも限界があることから、時間の経過とともに精度の低下が避けられない状況にある。また、面的な森林情報の整備は、現地調査に膨大な労力・時間・費用が発生するためこれまで困難であるとされてきた。これらの背景を踏まえ、本研究では、吸収量評価に必要な情報である道路開発や農地開発等の伐採活動・皆伐や間伐、択伐などの森林施業の抽出および樹木の成長量を捉えるには、高さ情報の利用が有効であると考え、時系列DSM (Digital Surface Model) による定量的な森林モニタリング手法の開発を行い、その有効性について評価を行った。

4. 結果・考察

(1) 収穫試験地データとの比較

収穫試験地の内、人工林のデータとモデルの結果比較を行ったところ定量的、定性的に良い一致を得ることができた。これは生態モデルの適用が妥当であることを示している。収穫試験地のデータと生態系モデルの結果を検討したところ (図7)、成長は直線的に伸び、間伐による吸収量の増大 (年間成長量の増加) は見られず、その原因としては50年生以下の林分では葉部の呼吸

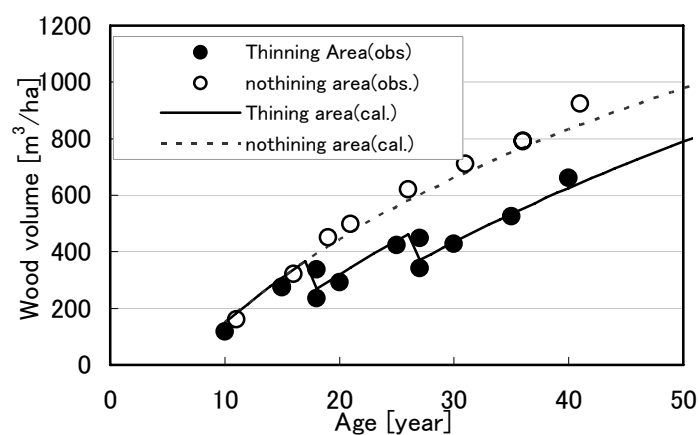


図7 収穫試験地のデータとモデルの比較

が木部の呼吸量に比較して大きい為であった。40年生以下の林分では、むしろ伐採によるGPPの減少が効果を持ち、若干ではあるが間伐を行った林分の方が成長は小さくなる傾向が見られた。モデルでは、60年生以上の林分で間伐を実施した場合はCO₂吸収量を増加させる結果となった。しかし、高齢人工林の間伐に関するデータが不十分であるため、モデルの正当性の検証を十分に行うことが出来なかった。100年を越す林分では、本プロジェクトで開発した生態モデルでは適用が可能か否かの判断を下すことは、そのような林分が希少であるため全く出来なかった。今後の課題として60～100年の人工林での間伐のデータを収集し、100年以上の人工林のデータを検索する必要がある。

(2) モデルの愛媛県への適用と不確実性の評価

本プロジェクトで開発した生態モデルに、本課題の他サブテーマによる伐採モデルを結合したモデルを愛媛県に適用し、不確実性の解析を行った。森林のデータは、国家森林資源データベースより、樹種・林齢別の面積を3次メッシュに再配分したものである。日射量は、気象庁のメッシュ気候値の、月積算日射量と月積算日照時間の双方を用いた。気温も同様にメッシュ気候値の月平均気温を用いた。土壌に関する制約は一律に光合成を0.75倍した。この数字は愛媛県に隣接する高知県の森林簿の林齢40年の平均樹高とモデルの結果が一致するものである。モデルの計算結果（図8）より2005年のCO₂吸収量は0.269Mt-C/yrとなった。この値は、インベントリデータによる推計値（0.268Mt-C/yr）と比較したところ、かなり近い値が得られているのはいいものの、モデルから作成される蓄積表とインベントリの蓄積表との相違がある。この違いは次のような要因によるものと考えられる。

1. インベントリ調査による吸収量算定では、間伐等を含んだ平均的な成長量により蓄積表を作っているが、本モデルでは間伐の影響が直接カウントされるため、スギでは過小評価となっている
2. スギの蓄積がやや過小評価となっているが、ヒノキの蓄積は大きく、特に50年生以上では大きく過大評価となっている
ヒノキの蓄積が大きく過大評価となった

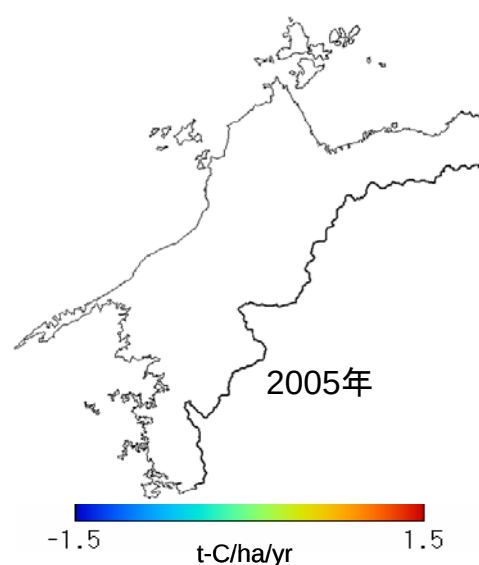


図8 愛媛県における2005年のCO₂吸収量

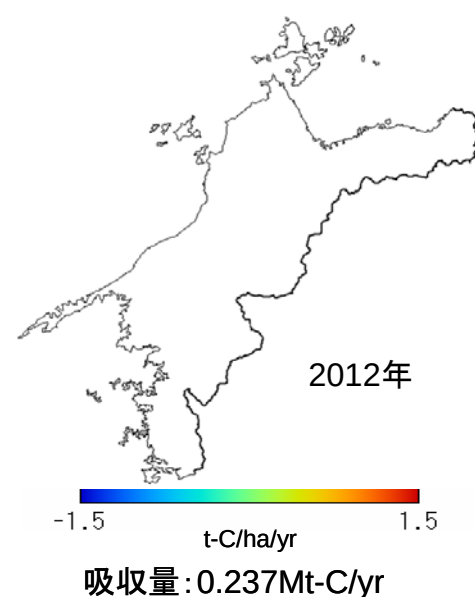


図9 愛媛県における2012年のCO₂吸収量

理由は不明であるが、本モデルの結果は中国地方の結果と近い値となっている。蓄積表では、四国の蓄積は他の地域に比較してかなり小さく、施業方法や、伐採の影響を受けているのではないかと考えられる。

(3) 2012年の吸収量予想

2012年のCO₂吸収量の推定を行った。2012年にはCO₂吸収量は2005年と比較して88%まで落ち込む(図9)。これは多くの人工林の林齢が50年以上なるため、成長が小さくなるためである。今回の計算には、CO₂濃度や気候の変化は含まれていないが、それらの影響よりもかなり大きな減少となる。

(4) 伐採の不確実性が与える影響

日本全体の伐採量が2005年以降、年率3%で増加した場合、2012年の吸収量は5%減少し、年率3%で減少した場合は、CO₂吸収量は4%増加する結果となった。京都議定書では、伐採即排出とカウントされるため、林産業の活性は排出の増加となる。しかし、伐採後の木材は漸次排出されるため、伐採木材における炭素ストックまでを考慮すると、現実には、伐採量の10%増加は、吸収量の2%以下の減少にしかならない。この2%以下の減少は、主に植栽直後の幼齢林の低GPPによるものである。伐採木材の貯留効果を考え、10年程度の排出をより正確に算出するアカウンティング方式としては、伐採木材の取り扱いを含めたフルカーボンアカウンティングに則った何らかの吸収量算出がより現実との差違が小さいとの結論を得た。このため、今後に検討される第2約束期間以降のアカウンティング方式としては、このより科学的な炭素収支との整合が取れるフルカーボンアカウンティング方式の導入が科学的には望ましいものと考えられる。

(5) 樹高成長の精度検証について

全国に分布する森林には、森林簿が存在しない区域も存在する。また森林簿の地位級が必ずしも正しい値となっていない可能性もある。そこで広範囲における樹高成長を推定するため、空中写真とLiDARを用いる樹高成長の推定手法 DCHM (Digital Canopy Height Model) を用いた一連の研究開発を行い、次の知見を得た。

第一に、過去に撮影された空中写真を用いて写真測量を行う際、現在取得したLiDAR (Light Detection And Ranging)による測定結果を加えることによって、高精度な時系列のDSMを作成することが可能であることを示した。その精度については、LiDARデータと比較した結果、本手法は、LiDARに対して±2.5m以内に較差が含まれるピクセルが全体の7割を占めるという、実用に耐え得る精度を達成していることを示した。第二に、この結果を基に、時系列DSM (Digital Surface Model) を用いて、伐採活動と森林施業の抽出、および樹高成長量の算出における有効性を評価した。伐採活動・森林施業の抽出では、伐採活動と皆伐については、ほぼ100%に近い割合で抽出することが可能であることが示された。また間伐については、施業のパターンによって抽出率が異なり、択伐に関しては抽出が難しいことが明らかとなった。第三に、高解像度衛星画像を用いた樹種判別を行った。それら結果を組み合わせた解析を行ったところ、樹高成長量の算出では、スギ・ヒノキ・広葉樹という3種類の樹木に関する樹高成長量について、森林の発達段階に応じて成長量に違いが見られるという一般的な認識を、本手法によっても確認することができた。図10に

高山におけるスギの樹高の推定値とインベントリデータの比較を示す。マークが推定値で、これを回帰したものが波線である。実線は地位級 1 の樹高成長である。該当区域の地位級は不明であるが、ほぼ地位級 1 の成長と一致していることが確認された。今年度開発した手法を、森林簿が無い区域に適用することで、全国の成長予測が可能となり、これに生態モデルを組み合わせることで将来予測やフルカーボンアカウンティングが可能となることが示唆された。

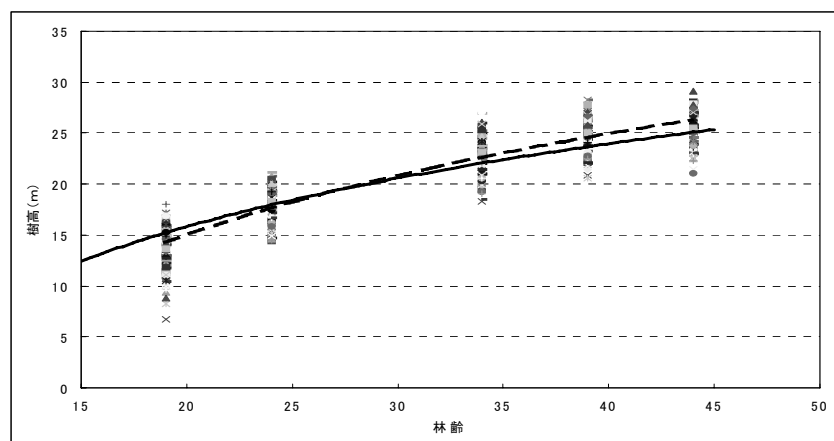


図10 空中写真による樹高成長の推定とインベントリデータの比較

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、森林における炭素収支を推定することを目的として、生態学的なプロセスを組み込んだモデル開発の実施を行った。研究の中で、フルカーボンアカウンティングに資するモデルを開発することが重要であることが判明し、間伐や主伐といった人間活動の影響を考慮することが可能なモデルの開発を行った。これは生態学的プロセスモデルの中に林業活動の影響を加味するだけでなく、林業活動（特に主伐）の予測も取り込んだ、いわば林業－生態モデルの開発をおこなった。このように、高度な林業活動の将来予測と生態学的プロセスモデルの結合モデルは、少なくとも我が国においては皆無であり、世界的にも例がほとんど見られない。このモデルの利点は、将来の気候変化がCO2吸収量に与える影響を考慮し、かつ林業活動の将来予測や、林業政策がCO2吸収量に与える影響を考慮できるモデルである。これは、間伐材の利用や、伐採木の利用方法を取り込むことで、フルカーボンアカウンティング評価に直接的に貢献できるモデルの第一歩となった。詳細な成果は次の通りである。

- ・ 京都議定書第1約束期間の最終年では、吸収量は2005年比の88%程度まで落ち込む事が示された。
- ・ 現在の伐採即排出のルールでは、林業活動の拡大（伐採量の増大）はCO2排出量の増大を意味するが、伐採後の木材利用による大気中への排出遅延を考慮すると、伐採時期に達し、今後成長量が減少すると見られる森林が多く存在する愛媛県では、林業活動の拡大はCO2排出量の減少に繋がる可能性があることが示唆された。

今後の課題は土壌中の炭素収支の変化である。生態学的プロセスモデルによる土壌中炭素収支

の推定を行い、インベントリ調査の結果との比較を行ったが、良い一致が見られなかった。森林の土壌中炭素収支のモデル化に関しては、今後一層の研究が必要と考えられる。これは、今後増大する可能性が見込まれる、バイオマスエネルギー利用が、土壌中炭素蓄積量に影響を与える影響があるためである。それは、現在は利用価値に乏しく、山林に放置される枝、葉等のいわゆる林地残材に利用価値が生じる可能性が高まっている。その結果として、土壌に入る有機物の量がこれまでとは変化する。これにより、土壌中炭素蓄積量に変化が起こる為である。また、本研究で開発したモデルでは、若齢林から壮齢林までの人工林では間伐によるCO2吸収量の増加は見られなかった。しかし、間伐を行うことで土砂流出を減少させる効果があることも事実である。土砂流出も森林からのCO2排出になるため、間伐と土砂流出の関係をモデル化することが必要と考えられる。

（２）地球環境政策への貢献

- ・ 環境省地球環境局「森林等の吸収源に関するワーキンググループ」検討会において、京都議定書における吸収源の取り扱いに関する国際交渉の進展に合わせて提案する吸収源オプションの検討において、本研究成果であるモデル分析から得られる科学的な知見に基づいて検討に貢献した。
- ・ 環境省「温室効果ガス排出量算定方法検討会：森林等の吸収源分科会」検討会において、京都議定書で認められた吸収源活動に伴う炭素吸収量を国連に報告するための算定方法の検討に際して、本研究成果であるモデル分析から得られる科学的な知見に基づいて検討に貢献した。
- ・ 林野庁「森林吸収源計測・活用体制整備強化事業検討会」検討会において、京都議定書で認められた吸収源活動に伴う炭素吸収量を計測するための手法の検討に際して、本研究成果であるモデル分析から得られる科学的な知見に基づいて検討に貢献した。

６．引用文献

なし

７．国際共同研究等の状況

特になし

８．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

- 1) Sedjo, R. A., Amano, M. and Yamagata, Y.: 森林総合研究所研究報告 Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute, 1, 2(383), 151-161(2002) “The Operationalization of the Kyoto Protocol with a Focus on Sinks: A Perspective for Japan”
- 2) 関根秀真、山形与志樹、小熊宏之: 日本リモートセンシング学会誌、22, 5, 517-530(2002) “吸収源プロジェクト実施地域を対象とした衛星データによるARD活動のモニタリング”

- 3) 山形与志樹、小熊宏之、関根秀真、土田聡：日本リモートセンシング学誌、22, 5, 494-509(2002)「吸収源を用いた地球温暖化対策とリモートセンシングの役割」
- 4) G.A.Alexsandrov, Y.Yamagata:SCIENCE IN CHINA (Series C), 45, 7, 1-6(2002)
“Net biome production of managed forests in Japan”
- 5) CLA B Schlamadinger, K Boonpragob, H Janzen, W Kurz, R Lasco, P Smith, LA Pcollas, E A El Sidding, A Fischlin, M Matsumoto, A.nakhutin, I Noble, G Pignard, Z Sonogyi, X Zhang, CA M Easter, W Galinski, G Patenaude, K Paustian, Y Yamagata:Cambridge Universty Press, 4, 1-123(2003)
“Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use change and Forestry”
- 6) CLA Newton Paciornik, Kristin Rypdal, LA Rainer Baritz, Simon Barry, Albertus Johannes Dolman, Marlen Eve, Raisa Makipaa, Giorgio Matteucci, Toshinori Okuda, Keith Porter, Maria Jose Sanz-sanchez, T P Singh, Goran Stahi, Riccardo Valentini, Martina Van Der Merwe, CA Sandra Brown, Ketil Flugsrud, Gen Inoue, Gerald Kaendler, Anders Lindroth, Kenlo NIsida, Steve Ogle, Mats Olsson, Gareth Philips, Fran Sussman:Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, 5, 2-74(2003)
“Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use change and Forestry”
- 7) Alexandrov, G. ; Yamagata, Y. : Climatic Change, 67, 39116, 437-447(2004)
“Verification of carbon sink assessment: Can we exclude natural sinks?”
- 8) Alexandrov G.A., Y.Yamagata Oikawa T.and Saigusa N. : Agricultural and Forest Meteorology , 134, 1-4, 135-142(2005)
“Re-calibrationg TsyBiMo eith eddy-covariance measurements at Takayama “
- 9) Alexandrov, G.A. : Carbon *Balance* and Management, vol2-4, doi:10,1186/1750-0680-2-4 (2007)
“Carbon stock growth in a forest stand: the power of age”

＜その他誌上発表（査読なし）＞

- 1) 山形与志樹：バイオサイエンスとインダストリー、60, 8, 556-558(2002)
「京都議定書における炭素吸収源：最新の国際動向」
- 2) 山形与志樹：エネルギー、資源、24, 4(140), 35-38(2003)
「京都議定書における吸収源対策：マラケシュ合意と中長期的課題 Carbon Sink Activities under the Kyoto Protocol and beyond」

(2) 口頭発表（学会）

- 1) Alexandrov G A, T.Oikawa、Y.Yamagata:Poster Session “P.1.0. Earth System、Planetary Metabolism and Global Element Cycles” at the Global Change Open Science Conference (IGBP Open Sci. Conf.), 74, 2001
“Managing Terrestrial Carbon Sinks: Do Rewards Justify the Risks?”
- 2) Alexandrov G A, T.Oikawa、Y.Yamagata:Poster Session “P.1.0. Earth System、Planetary Metabolism and Global Element Cycles” at the Global Change Open Science Conference

- (IGBP Open Sci. Conf.), 97, 2001
- “The Use of the Osnabruck NPP Dataset in Globalization of a Process-Based NPP Model”
- 3) Alexandrov G A, T.Oikawa, Y.Yamagata : 6th International Carbon Dioxide Conference, 2001

“Climate dependence of the CO₂ Fertilization effect on terrestrial net Primary Production”

 - 4) Alexandrov G A, Y.Yamagata:WENGEN-2002

International Workshop on Quantifying Terrestrial Carbon Sinks; Science, Technology, and Policy, 2002

“Toward verification guidelines for carbon sink assessments at regional, continental and global scale, Abstracts”

 - 5) Alexandrov G A, Yamagata Y, Aigusa N, Oikawa T: Memorial Workshop of the tenth anniversary of Takayama Site, 2003

“Re-Calibrating Tsubimo With The Fluxes Measured At Takeyama Site”

 - 6) Clark S Binkley, David Brand, Zoe”, Word Climate Change Conference, 2003

“Hidden Carbon Sink As A Challenge To Full Carbon Accounting”

 - 7) Yamagata, Y, Alexandrov, G. Saigusa, N. Oikawa, T. :CarboEurope Conference, 2003

“TsuBiMo vs Asia Flux: A case study of Takayama, CarboEurope Conference”

 - 8) A. L. Stepanov, G. A. Alexandrov, Yamagata, Y. :16th International Symposium on Environmental Biogeochemistry, 141, 2003

” Microbial transformation of organic matter in soil aggregates as carbon stock or source in biosphere, 16th International Symposium on Environmental Biogeochemistry Abstracts (II) ”

 - 9) Yamagata, Y. , Alexandrov, G., Nishida K., Saigusa, N., Oikawa, T. :International Workshop on Monitoring and Modeling of Global Environmental Change, 34, Part. 7/W14, ”E8. 1-5 (21-22), 2003

“Integration of Remote Sensing with CO₂ Flux measurement for modelling forest NEP, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences”

 - 10) Alexandrov, G. and Yamagata, Y. :The 4th European Conference on Ecological Modelling, 11-12 (2004)

“Assessing NEP of an even-aged forest with Mathematica”

 - 11) 石渡佐和子、福井弘道、米康充、山形与志樹:日本写真測量学会平成16年度年次学術講演会, 85-86, (2004)

「時系列DSMを用いた高山の天然林におけるバイオマス変動量の解析」

 - 12) Yamagata, Y., jinya nakamura : ACC (Abrupt Climate Change) Strategy Workshop, 2004

“Global institutional regime for responding to ACC – a dynamic game analysis on global carbon cycle vulnerability “

 - 13) Alexandrov, G. and Y. Yamagata : The 4th European Conference on Ecological

- Modelling, 11-12, 2004
- “Assessing NEP of an even-aged forest with Mathematica”
- 14) Yamagata, Y., Georgii A. Alexandrov : The 6th APGC (Air Pollution and Global Changes) Symposium , 115, 2004
 - “Enhancing TsuBiMo for getting robust estimates of regional carbon sinks”
 - The 6th APGC (Air Pollution and Global Changes) Symposium Program and Abstracts
 - 15) Yamagata, Y., Georgii A. Alexandrov : The 6th APGC (Air Pollution and Global Changes) Symposium , 117, 2004
 - “TsuBiMo-Economica: coupling human and biophysical components of carbon cycle” The 6th APGC (Air Pollution and Global Changes) Symposium Program and Abstracts
 - 16) Takeda, T., Hiroyuki Oguma, Yasumichi Yone, Yoshiki Yamagata and Yasumi Fujinuma : Society of Agricultural Meteorology of Japan, Food Production and Environmental Conservation in the Face of Global Environmental Deterioration, 2004
 - “Evaluation of Measuring Canopy Gap by Laser Range Finder”
 - 17) Yamagata, Y., Alexandrov, G. : Regional Carbon Budgets : from Methodologies to Quantification 15-18 NOVEMBER 2004, 2004
 - “The C budget of Japan : Ecosystem Model (TsuBiMo) “
 - 18) Alexandrov, G.A. and Yamagata, Y. : Joint AOGS 1st Annual Meeting & 2nd APHW Conference (5-9 July 2004, Singapore), Abstracts, 1, 700, 2004
 - “Characterization of climate feedbacks from terrestrial carbon cycle”
 - 19) Yamagata, Y., Alexandrov, G., Kinoshita, T. and Iwao, K. : The 11th Japan-U. s. Workshop on Global Change, 407, 2005
 - “Coupling terrestrial ecosystem model and land-use economics model for assessing long-term carbon management potential “
 - 20) Alexandrov, G.A. : AGU Fall meeting, 2005
 - “Appare Trans in Photosynthetic Capacity of Monsoon ASIA from 1982 to 2002”
 - 21) Alexandrov, G.A. and Yamagata, Y. : Eos Trans. AGU, 86(52), FallMeet. Suppl., 86, 52, B51C-0235, 2005
 - “Apparent Trends in Productivity of Monsoon Asia from 1982 to 2002”
 - 22) Alexandrov, G.A., Oikawa, T., and Yamagata, Y. : Seventh International Carbon Dioxide Conference, Extended Abstracts (25-30 September, 2005, Boulder, USA), 441-442, 2005
 - “Apparent trends in photosynthetic capacity of monsoon Asia from 1982 to 2002”
 - 23) Alexandrov, G.A., K. Iwao, Y. Yamagata, A. Ito, V.F. Krapivin, I.I. Mokhov, K. Nishida : Proceedings of Fifth European Conference on Ecological Modelling (September 19-23, 2005, Poushchino, Russia), 13-14, 2005
 - “Analysis and interpretation of satellite data in connection with global carbon cycle modeling”
 - 24) Alexandrov, G.A. and Yamagata, Y. : Proceedings of International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation (24-26 August 2005, Fujiyoshida, Japan), 44, 2005

“Analysis and Interpretation of AsiaFlux data in connection to global carbon cycle modeling”

- 25) Alexandrov, G. A., Chan, D., Chen, M., Gurney, K., Higuchi, K., Ito, A., Jones, C. D., Komarov, A., Mabuchi, K., Matross, D. M., Veroustraete, F., Verstraeten, W. W. : Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting “Summit on Environmental Modelling and Software, 2006 “Model-data fusion in the studies of terrestrial carbon sink”

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

プロジェクト終了後に一般向け成果発表会を企画中。

(5) マスコミ等への公表・報道等

新聞、テレビをはじめとして各種報道機関からの京都議定書における吸収源の取り扱いに関する問い合わせ等に随時（100件以上）対処。また下記の京都議定書における吸収源情報ホームページを作成し、最新の研究成果情報を提供。

<http://www-cger.nies.go.jp/cger-j/db/enterprise/gwdb/index.html>