

課題名	A-0801 グローバルな森林炭素監視システムの開発に関する研究
課題代表者名	山形与志樹（独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター）
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	164,427千円（うち22年度 51,029千円） 予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>（1）国際監視システム構築に向けた炭素アカウンティング手法の開発に関する研究 （独立行政法人国立環境研究所）</p> <p>（2）時系列SAR解析による森林減少・森林劣化抽出に関する研究 （独立行政法人宇宙航空研究開発機構）</p> <p>（3）森林インベントリ情報に関する研究 （株）三菱総合研究所 研究協力機関 （株）三菱総合研究所、（独）森林総合研究所、北海道大学、東北大学、東京農業大学、筑波大学、鹿児島大学、広島大学、コンサベーション・インターナショナル</p> <p>（4）マイクロ波による林分構造パラメータ推定に関する研究 （独立行政法人国立環境研究所）</p> <p>（5）リモートセンシングによる植生攪乱の推定に関する研究 （東京大学生産技術研究所）</p> <p>（6）植生攪乱と陸域生態系モデルに関する研究 （独立行政法人国立環境研究所）</p>
研究概要	<p>1. はじめに</p> <p>世界的な森林減少・劣化の傾向は現在も継続しており、特に近年はアジア域における森林減少が大きい。グローバルなCO<sub>2</sub>排出のうち、森林減少による排出は約20%（年60億トンCO<sub>2</sub>）を占めている。2050年までに現状比で50%のグローバルな温室効果ガス削減を実現する長期的な対策が、サミット等で国際的に議論されはじめている中、化石燃料の消費を大幅に減らすとともに、森林減少・劣化によるCO<sub>2</sub>排出を抑制する対策の実現が喫緊の課題となっている。森林減少・劣化が進んでいる発展途上国の国々の森林保全を進めるために、先進国が資金を拠出して温室効果ガスの排出権取引を行う制度が検討されている。従って、森林減少・劣化の防止を温暖化対策として実施する場合には、途上国等において温暖化対策の排出削減目標が達成されたかどうかを判定する必要がある。本課題では、衛星リモートセンシング技術を用いて熱帯域をはじめとする各種森林生態系を定期的に観測し、さらに現地観測データとモデルシミュレーションを用いて、森林減少・劣化に伴うCO<sub>2</sub>排出を評価する森林炭素監視システムの構築に向けた研究をおこなった。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>森林減少の防止による温暖化対策を次期枠組みにおいて実現するためには、森林減少に伴うCO<sub>2</sub>排出量を算定するための信頼性の高い国際的な監視システムが不可欠である。グローバルな森林炭素監視システム（Global Forest Carbon Monitoring System）の構築に関する科学的な検討を、国際共同研究を実施するEUの共同研究センター（Joint Research Center: JRC）、豪州炭素アカウンティングオフィス（National Carbon Accounting System: NCAS）他と協力し、特に国際監視システムに必要な機能の仕様とその開発手法を検討することを目的とした。特に我が国からの貢献が期待されているPALSARを活用した監視システムの構築にむけて、まず、多時期PALSAR画像により森林減少を高精度に把握する手法（サブテーマ2）を確立し、アジアを中心に森林インベントリ情報を収集、整備すること（サブテーマ3）で、IPCCデフォルト法による森林減少に伴うCO<sub>2</sub>排出量の推定精度を向上させる。次に、本課題のサブテーマ4、5で開発される、リモートセンシングにより推計される植生攪乱や林分構造に関する情報を、高度化した陸域生態モデル（サブテーマ6）に入力して炭素収支を高精度に算定する手法を確立し、我が国独自の国際監視システムの提案を検討</p>

する。さらに、森林減少の防止による温暖化対策にはCO<sub>2</sub>排出削減にとどまらず森林保全による副次的な便益があるため、環境ベネフィットを含めた対策効果の評価を総合的に実施するための評価ツールの開発にも取り組むこととした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 国際監視システム構築に向けた炭素アカウンティング手法の開発に関する研究

GEO (Group on earth observations)のデモンストレーション領域の一つとなっているボルネオ島を主な対象として、人工衛星-生態系モデルによる森林モニタリングシステムのプロトタイプ開発を行った。NOAA/AVHRR、SPOT/VEGETATION、MODISによる森林被覆率の時系列データから森林減少域を抽出し、陸域生態系モデルによる森林減少後の炭素放出・吸収パターンを適用することで、ボルネオ島の炭素収支マッピングを試行した。さらに、PALSARはそれぞれ2偏波同時受信によって観測対象の4偏波特性を取得するフルポーラリメトリック機能も有している。本課題では、ポーラリメトリックSARであるPALSAR画像の4偏波の画像(HH、HV、VH、VV偏波)と位相情報を用いて、東南アジアの森林蓄積推定の基礎となる土地被覆分類手法を開発した。

#### (2) 時系列SAR解析による森林減少・森林劣化抽出に関する研究

森林減少解析の為にPALSARデータセットの作成は、本研究課題の対象としている領域について、JERS-1 SARのデータセットと2006年からのPALSAR観測データを処理し、チーム内に提供する。2006年以降、夏期はPALSARのFine Beam Dual (FBD) (HH+HV)で、雨期はFBS (HH)でデータを取得しており、可能な限り同一偏波情報での時間変化を表示する。また、Pi-SAR-Lの傾斜補正画像を用いた森林評価では、観測対象物の勾配によってPi-SAR-L画像(振幅情報)の明るさが変わることがこれまでの研究で知られている。本サブテーマでは、北海道苫小牧を対象に、補正の効果および勾配補正後方散乱係数とバイオマスの関係を抽出して評価を行った。

#### (3) 森林インベントリ情報に関する研究

本サブテーマでは、国、地域およびサイトレベルにおける森林インベントリ情報の整備状況を調査し、森林インベントリの収集・整備、取得・管理および解析手法の検討を行い、また、各サブテーマにて活用を可能とする森林インベントリデータベースのプロトタイプを開発した。また、森林インベントリデータの解析手法として、特に衛星画像解析の検証データとして活用するための課題に取り組んだ。さらに、森林インベントリデータを適切に管理・提供するための基盤となるデータベースのプロトタイプを開発した。なお、本研究では、東アジアを対象として整備が進められているプロットレベルの森林インベントリシステムである「Plot-Net」を基盤ツールとして研究を行った。

#### (4) マイクロ波による林分構造パラメータ推定に関する研究

航空機や地上からのレーザ計測を中心とした森林トゥルスデータを整備し、土地の傾斜、森林タイプなど多様な条件下での森林バイオマス、樹冠密度、葉や幹等の三次元分布といったデータセットを作成し、サブテーマ2で行う森林劣化抽出ルールの作成をおこなった。また、人為・自然攪乱によって森林バイオマスと森林構造が変化したときに $\sigma^0$  (PALSARの後方散乱)がどのように変化するかについて解析を行うための解析用ツールとして、樹木の幹・枝・葉の詳細な3次元構造を考慮した、森林群落の3次元放射伝達モデルの開発を行った。モデルを開発するにあたり検証データとして必要となる観測は、平坦な北方林である北海道苫小牧国有林で実施した。また、苫小牧国有林は東ユーラシアに広く分布する樹種であるカラマツを優占種とする森林であり、東ユーラシアの広域において森林変化を検出するアルゴリズムを開発するために最適な場所であるといえる。森林バイオマスのグラウンドトゥルスデータと航空機搭載合成開口レーダ (Pi-SAR; Polarimetric and Interferometric Airborne Synthetic Aperture Radar) のデータを用い、中規模な攪乱である間伐と大規模な攪乱である台風による風倒によって森林のバイオマスと構造が変化したときに、 $\sigma^0$ でどのように検出されるかについて関係を調べた。さらに、森林改変と地上部バイオマスを広域において推定するアルゴリズムの開発を行った。森林GISデータを整備し、PALSARデータを用いて解析を行うことで間伐や皆伐、風倒等による森林改変の検出限界を明らかにし、モデルを用いた推定アルゴリズムに基づいてPALSARによる森林地上部バイオマスの推定精度を明らかにした。

#### (5) リモートセンシングによる植生攪乱の推定に関する研究

本サブテーマで実施する内容は、衛星リモートセンシングによる植生攪乱の推定に関する研究である。植生攪乱の観測には10~20年程度の変動を毎日観測することが求められるため、Aqua/Terra

MODIS、NOAA/AHRRR、SPOT/VEGETATION、MSG/SEVIRI、MTSATなどの大陸から全球レベルでの観測が可能な可視・赤外センサーを使用する。これらの衛星データが利用可能な過去25年にわたって、1) 国およびプロジェクトレベルでの土地被覆分類手法の開発、2) 土地利用変化（森林減少）と森林管理（伐採・植林）の区分、3) 森林火災領域の抽出、火災程度の区分、火災継続時間の推定、火災履歴図の作成を行った。

#### （6）植生攪乱と陸域生態系モデルに関する研究

森林からアブラヤシ・プランテーションなどへの土地利用変化が急速に進行する発展途上国地域では、現地でのバイオマス・土壌炭素動態に関する情報が乏しく、インベントリ的手法による推定（例えばIPCC Good Practice GuidanceのTier-1による推定）の信頼性が低いことが問題となるモデル高度化を進めるため、マレーシアのパソー熱帯多雨林、タイのサケラート季節性常緑樹林で土壌炭素動態に関する現地データを収集した。土壌表面からのCO<sub>2</sub>放出速度（土壌呼吸）を天然林とプランテーションで測定し、各サイトにおける土壌特性と環境要因と関連づけた。

### 4. 結果及び考察

#### （1）国際監視システム構築に向けた炭素アカウンティング手法の開発に関する研究

ALOS京都・炭素観測計画(K&C)の森林分野の研究機関と本プロジェクトとの連携体制を構築するとともに、全球地球観測システム(GEOSS)のAP(Asia-Pacific)会合を通じた海外研究者との調整を実施した。この開発研究はGEOSSの2009年～2011年のワークプランにおける新タスクである「CL-09-03: Global Carbon Observation and Analysis System」のサブタスク「Forest Carbon Tracking」として位置づけられることとなり、国際連携のもとで森林炭素監視システムに必要な機能の仕様とその開発手法の検討を行う体制を整備した。また、衛星観測による森林/非森林の時系列マップから、ボルネオ島における森林減少の実態を明らかにした。部分空間法という新しい土地被覆分類手法を開発して、フルポーラリメトリックPALSARデータとそのCoherency行列の要素を用いる土地被覆分類の手法を提案した。この手法によって、雲の影響を受けないフルポーラリメトリックPALSARは、東南アジアの熱帯林等における森林減少・劣化の高精度な観測に貢献すると期待される。

#### （2）時系列SAR解析による森林減少・森林劣化抽出に関する研究

1) 勾配補正はSARが地表形状から受ける変動を効果的に補正できること、2) 苫小牧ではバイオマス量が60トン/ha辺りで後方散乱係数が飽和すること、3) 後方散乱係数は、HH>VV>HVの順に大きいこと、4) 台風による倒木、間伐により後方散乱係数は減少することがわかった。これらは、常識的な結果であるが、本研究により定量的な結果を得ることができ今後の森林研究にL-Band SARが効果的に使用できることが確認された。

#### （3）森林インベントリ情報に関する研究

森林インベントリデータの解析手法の検討を行った。特に、衛星データとの統合解析に資するため、森林タイプ別、空間分解能別の森林構造及び動態の影響を解析、比較した。また、森林バイオマス推定におけるバイオマス導出式やパラメータの違いによる影響を評価した。その結果、ある時間断面における森林構造は空間分解能の影響をあまり受けないこと、本研究で用いる12.5mのPALSAR分解能は森林構造のばらつきを十分反映していることが示された。また、バイオマス推定におけるパラメータの影響は大きく、森林インベントリデータベース構築の際には、パラメータ情報の整備が重要であることが示された。さらに、森林インベントリデータを管理するためのデータベースのプロトタイプを開発した。森林インベントリデータベースの要求条件を、インベントリデータ整備、衛星データとの統合解析、国際FCMSとの連携の3つの観点から整理すると共に、PlotNetを基盤ツールとして、要求条件に則した改修を実施した。

#### （4）マイクロ波による林分構造パラメータ推定に関する研究

森林変化による $\sigma^0$ の変化について詳細な解析を行うために、数値シミュレーションを行うための3次元放射伝達モデルを開発した。開発したモデルを用いて地上部バイオマスの変化に対する $\sigma^0$ の変化を調べたところ、バイオマスとともに $\sigma^0$ は減少を示し、変化傾向は概ね一致した。間伐率が30%の間伐における $\sigma^0$ の変化は、観測結果と同様に1dB程度であることがモデルから示された。倒木については、マイクロ波の入射角と倒木の傾斜角の関係で $\sigma^0$ が増減し、マイクロ波が幹に垂直に入射する条件のときに $\sigma^0$ が最大となることが示された。北海道胆振東部の道有林では、 $\sigma^0$ に対する入射角（20～50度）の差による影響がみられた。したがって、様々な斜面傾斜角・方位を含んだ領域で平均した場合は、領域内における各斜面の入射角の違いが $\sigma^0$ のバラツキの要因となると考えられ

る。斜面の入射角の差が10度では、 $\sigma^0$ は約2dBの差であった。

#### (5) リモートセンシングによる植生攪乱の推定に関する研究

SAR画像であるJERS-1 SARとALOS PALSARを組み合わせると同様の土地被覆分類変化を抽出したところ、起伏の平坦な地域に関しては整合性の高い結果が得られ、可視赤外センサーと相互補完的に利用することで信頼性を高くできることが明らかになった。一方で、米国地質調査所(USGS)が公開している全球レベルのLandsatデータベースからアジア全体を網羅するデータセットを1970-2000年代まで10年おきに収集し、同地域の土地被覆解析結果と自動で比較するシステムを構築した。これにより、特にSAR画像で問題のある起伏の激しい山岳地域において、高分解能の可視画像を併用することにより土地利用変化図を高精度に作成できることが明らかとなった。また、MODISによる準実時間森林火災監視システムを拡張し、サブテーマ6の炭素収支算出に必要な、火災程度の区分、火災継続時間の推定、火災履歴図の作成アルゴリズムの開発を行い、2001-2010年の10年間にわたる全球火災発生分布図データセットを作成した。

#### (6) 植生攪乱と陸域生態系モデルに関する研究

土地利用変化に伴う炭素収支の時間変化を推定できるか否かは、攪乱時に既存植生のバイオマスがどのように扱われるかに大きく依存すると考えられるが、それに関する情報は現段階では十分に得られていない。そこで、本研究では攪乱時のバイオマスにおける系外持出しと残滓としての現場廃棄の割合を数通りに変化させ、発生し得る炭素放出パターンを幅を示すこととした。正味CO<sub>2</sub>収支(NEP)は、定性的には攪乱後に強い放出を示した後で数年後に吸収に転じ、徐々に低減しながら数十年間継続する影響を示した。しかし、その最大放出強度や吸収に転じる時期、そして数十年後の吸収強度は攪乱発生様式に大きく依存していた。また、伐採後に放棄して二次林を発生させた場合(植生パラメータは攪乱発生前と同じ)と、アブラヤシ・プランテーション化させた場合では、直後の放出強度には大差ないが、植生回復に伴う吸収の時間変化に差が生じることが示された。具体的には、二次林化した場合の方が吸収に転じるまでの期間が短く、成長最盛期のCO<sub>2</sub>吸収も強い傾向があった。

### 5. 本研究により得られた成果

#### (1) 科学的意義

インドネシア・ボルネオ島のような広域を対象として、人為的な森林減少を考慮した炭素収支マッピングを行う手法のプロトタイプを開発した。この手法は、代表的な熱帯林サイトにおける土壌まで含めた炭素収支に関する観測データを用いた検証を経ている。また、最近の衛星観測と組み合わせることで、これまで実施が困難であった広域評価への道筋をつけることができた。この手法は、森林における土地利用変化に伴う排出量の広域評価を高精度化し、グローバル炭素循環の理解に貢献すると期待される。今後、モデル高度化を進めるとともに、泥炭地やマングローブ林、さらにゴム園など多様な植生情報を加えることにより、さらに信頼性の高い評価が可能になると考えられる。また、衛星データと森林インベントリの統合解析を行う上では、プロットの位置情報の精緻化が必要である。このため、データベース構築に当たっては、四隅の位置情報の登録など、精緻な位置情報を付与するための一定のルールが必要であることを示した。また、衛星データの検証としてプロットデータを使用する場合、プロットデータの空間代表性が重要となることを示した。本課題では、異なる森林タイプに属する森林インベントリデータおよびDBH-H関係式を用い、DBH-H関係式のバイオマス推定に与える影響の分析を行った。この結果より、データベース構築に際しては、計算に用いるパラメータも重要な要素であることがわかり、データベース構築および衛星データと森林インベントリの統合解析における科学的知見が得られた。一方、衛星データに関しては、合成開口レーダを始めとしたリモートセンシングを用いて、北方林における広域のバイオマス変遷のデータセットを作成し、そのデータ検証の結果から森林改変の検出限界を明らかにした。また、森林の樹冠部を透過する割合の高いL-band信号を用いる合成開口レーダによる2000年初頭からの苦小牧森林観測データを再解析することで、近年問題が顕在化してきた森林バイオマス量と後方散乱係数の関連性を評価することができた。特に、バイオマス量の明確な苦小牧のテストサイトを用いて勾配補正を行った後方散乱係数との関係明確化はレーダによるバイオマス量計測の可能性を示唆するとともに、苦小牧では60トンが計測限界であることが明確になった。ベトナム全土を対象に、可視赤外センサーであるVEGETATIONとMODISを用いて土地被覆分類図を作成し、ベトナム森林保護局が報告している県レベルでの森林面積と比較した結果、衛星による推定結果は過大評価傾向にあることが明らかになった。SAR画像であるJERS-1 SARとALOS PALSARを組み合わせると同様の土地被覆分類変化を抽出したところ、起伏の平坦な地域に関しては整合性の高い結果が得られ、可視赤外セ

ンサーと相互補完的に利用することで信頼性を高くできることが明らかになった。一方で、起伏の激しい地域では、デジタル標高モデルを利用した地形効果補正を施しても十分な地形効果補正処理が行われなかったため、利用に際しては注意が必要であることも示唆された。

攪乱が森林生態系の構造や機能に本質的な影響を与えることは、これまでの生態学的な研究により森林をはじめとする多くの生態系で定性的に観察されてきたが、植生の転換を含む大規模な攪乱による長期的な炭素収支を定量的に評価することは困難であった。本研究は、従来の陸域モデルを高度化することで森林減少に伴う炭素収支変化のシミュレーションを可能とした。これは、以前のモデル研究で用いられた経験的方法や、IPCC GPG-LULUCFによる簡易推定（サブテーマ1参照）と比較して、現地データに基づいて生態学的関係から導出された信頼性の高い手法といえる。モデルで用いられるパラメータは基本的に生理生態的な意義付けがあり、つまり経験的な調整パラメータが少ないことにより、多様な生態系への適用が可能となっている。さらに、このモデル推定はメッシュ気象データなどを用いることで広域展開が容易であり、アジア地域の炭素収支評価にも重要な貢献を為すものと期待される。

## （2）環境政策への貢献

本課題の実施により、これまで雲の影響などで観測が困難であった熱帯林について、合成開口レーダ画像を用いることにより、熱帯林等における森林減少・劣化を高精度に観測する手法、および、森林減少・劣化の防止に伴うCO<sub>2</sub>排出量削減の効果を定量的に評価する手法が開発される。SARデータを始めとする衛星データ利用技術開発、インベントリ情報の解析、陸域生態系モデルの開発を統合的に行うことにより、森林減少・劣化の防止を京都議定書の次期枠組みにおける新たな温暖化対策として実現するために必要となる、グローバルな森林炭素監視システムの構築に関する検討に直接的に貢献する。特に、森林減少・劣化の防止に関する国際監視システムの開発に際して、我が国の陸域観測衛星（だいち）に搭載された合成開口レーダ「PALSAR」の利用に対する国際的な関心が高いため、本研究により得られる最新の研究知見をベースとして、国際監視システム開発に関する研究をリードし、得られた研究知見によって日本からの直接的な提案に貢献する。本研究においてグローバル森林炭素監視システムの開発に関する国際共同研究を実施することで、研究成果を国際的に共有するネットワークが構築される。現在、気候変動枠組み条約のもとで行われている、途上国の森林減少・劣化に伴う排出の抑制に関する議論では、方法的・技術的課題として、モニタリング方法やアカウンティング方法が挙げられており、国際ネットワークのもとで収集された科学的知見は、IPCCやUNFCCCにおける科学技術的な検討に貢献することが可能となる。

本課題で開発された土地被覆分類手法は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と文部科学省が主催するアジア太平洋地域宇宙機関会議(APRSAP)を通じて、ベトナム森林保護局(ベトナム国におけるREDD国連代表組織)、ラオス国リモートセンシング研究センターおよび森林局、ミャンマー森林局へと実務利用するための技術移転がなされた。また、森林インベントリ情報とリモートセンシングデータの統合的な解析のための課題と今後の方策を示したことにより、森林減少による二酸化炭素排出の定量的な評価に向けた国際的な議論および制度設計に対して貢献できる。

攪乱に伴う森林炭素収支の変化は、グローバルな気候影響だけでなく、各国や地域の森林吸収源と深く関係しており、気候変動に関する国際交渉や抑制策にも影響を与える可能性が高い。今後、GEOS-FCTによるグローバルな森林炭素監視活動を通じ、UNFCCCのREDDプラス（途上国における森林減少・劣化の防止および植林活動）などの環境政策に貢献していく。生態学的モデルを用いることで、REDD活動の評価に必要なベースラインの設定が高い信頼度で可能になると期待される。また、IGBP-GLPなどの国際プロジェクト参加を通じ、成果の広報・普及に努める。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：山形与志樹

1961年生まれ、東京大学教養学部卒業、博士（学術）、現在、国立環境研究所主席研究員

## 主要参画研究者

(1) : 山形与志樹（同上）

(2) : 島田政信

1955年生まれ、京都大学工学部卒業、博士（工学）、現在、宇宙航空研究開発機構、地球観測研究センター、上席研究員

(3) : 関根秀真

1968年生まれ、早稲田大学工学研究科博士課程単位取得退学、博士（工学）、現在、三菱総合研究所主任研究員

(4) : 小熊宏之

1965年生まれ、千葉大学園芸学部卒業、博士（工学）、環境庁国内交流研究員、現在、国立環境研究所地球環境研究センター 主任研究員

(5) : 竹内渉

1975年生まれ、東京大学大学院工学研究科卒業、博士（工学）、現在、東京大学生産技術研究所専任講師

(6) : 伊藤昭彦

1972年生まれ、筑波大学生物科学研究科卒業、博士（理学）、海洋研究開発機構研究員、現在、国立環境研究所研究員

## 7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

## (1) 査読付き論文

- 1) 竹内渉 (2008) 宇宙からの森林火災の監視. 計測と制御, 47(12), 1037-1040.
- 2) Takeuchi, W. & Matsumura, Y. (2008) "Evaluation of wildfire duration time over Asia using MTSAT and MODIS" Asian Journal of Geoinformatics, 8(3), 13-17.
- 3) Bagan, H., Takeuchi, W., Yamagata, Y., Wang, X. & Yasuoka Y. (2009) "Extended averaged learning subspace method for hyperspectral data classification" Sensors, (9), 4247-4271.
- 4) 竹内 渉 (2010) 森林火災（東南アジア）. 森林リモートセンシング 第3版（加藤正人編集）, 日本林業調査会（J-FIC）,（分担執筆）
- 5) Takeuchi, W. (2010) "Investigation of cloud coverage over Asia with NOAA AVHRR time series" Asian Journal of Geoinformatics, 10(4), 47-52.
- 6) Bagan, H., Takeuchi, W., Kinoshita, T., Bao, Y. & Yamagata Y. (2010) "Land cover classification and change analysis in the Horqin sandy land from 1975 to 2007" IEEE J. selected topics in Applied Earth Observations and Remote Sens., 3(2).
- 7) Yamagata, Y., Takeuchi, W., Bagan, H., Ito, A. & Adachi, M. (2010) "Forest carbon mapping using remotely sensed disturbance history in Borneo" Earthzine, published on-line, September 21.
- 8) Adachi, M., Ito, A., Ishida, A., Rashidah, W., Ladpala, P., & Yamagata, Y. (2011) "Carbon budget of tropical forests in southeast Asia and the effects of deforestation: An approach using a process-based model and field measurements" Biogeosciences Discussions, 8, 3051-3079, doi:10.5194/bgd-8-3051-2011.