

# 陸域生態系モデルを用いた気候と生態系の相互作用に関する研究

—2012年度堀内賞受賞記念講演—

伊 藤 昭 彦\*

## 1. はじめに

この度、気象学会より名誉ある堀内賞をいただけたことは望外の喜びです。これまでご指導いただいた先生方、共同研究者の皆様へ深くお礼申し上げます。堀内賞は「気象学の境界領域・隣接分野あるいは未開拓分野における調査・研究・著述等」を顕彰とするということで、私のような生態学研究者も対象にしていたのだと思います。

受賞対象となりました陸域生態系モデル研究は、グローバルな物質循環や気候変動へのフィードバックなど大気現象とも密接に関係している隣接分野であり、現在も活発な研究が進められております。この場をお借りして、研究の背景からモデル開発の経過、その後の発展までをご紹介します。

## 2. 研究の背景

地球という惑星の特徴として、他の太陽系惑星には見られない多量の酸素を含む大気や液体の海の存在に加えて、地表を覆う植生とそれを含む生態系の存在があげられます。陸域生態系には森林や草原といった自然生態系に加え、耕作地や都市の公園緑地などのような人工生態系も含まれ、私達の生活にとって欠かせない存在です。生態系の一般的な定義は「生物群集とその環境の総体」であり、生物活動が周りの環境に影響を与える「環境形成作用」を持つことは以前から知られていました。また、気候条件の違いが大陸スケールの植生分布を決定付けていることも古くから指摘され

ていました（例えば Woodward (1987) のレビュー参照）。しかし、地球システムにおけるそれらの役割が定量的に評価されるようになったのは近年のことです。

地球環境に関する研究が推進されるようになった動機の一つに「地球温暖化」問題があるのは明らかでしょう。その主原因と考えられる二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) のグローバルな収支を解明する上で、必然的に、陸域生態系の役割が注目されることになりました。米国スクリプス海洋研究所の Charles Keeling 博士 (故人) によるハワイ・マウナロアにおける大気 CO<sub>2</sub> 濃度連続観測のデータは、誰もが目にされたことがあると思います。そこに見られる2つの重要な事実は、大気 CO<sub>2</sub> 濃度は明瞭な季節変動をする点と、大気 CO<sub>2</sub> は年々増加しつつもその速度は一定でなく、かつ人為起源排出量から予想される幅の半分程度であるという点です。季節変動が、陸域生態系の光合成-呼吸による正味収支の季節変化に起因することは、同じく Keeling 博士らが陸域で行った大気 CO<sub>2</sub> の安定炭素同位体比の観測 (Keeling 1960) などから早々に指摘されてきました。一方、人為起源排出の約半量の行方は長く未解決であり、1990年頃までは「ミッシングシンク」と呼ばれていたものです。これについても、多くの研究の積み重ねによって、大部分が陸域への吸収で説明されるようになっていきます (例えば Tans *et al.* 1990 ; Le Quéré *et al.* 2013)。皮肉な言い方になりますが、地球温暖化問題が無ければ、グローバルなスケールでの炭素循環と陸域生態系に関する研究は今よりかなり遅れていたかもしれません。

もう一つの背景として、地球システムモデルに代表されるシミュレーション研究の役割が大きくなったことは重要です。大気海洋の数値モデル開発は、その初期から計算機の発達と密接な関係にあったことはよく

\* 独立行政法人国立環境研究所。

E-mail : itoh@nies.go.jp

—2013年12月11日受領—

—2014年3月11日受理—

知られています。電子計算機の黎明期にあたる1960年代初頭から、大気海洋の大循環モデル (GCM) の開発は始まっており、現在では気候に影響を与える諸要素を組み込んだ地球システムモデルの開発が世界の主要機関で進められています (例えば河宮 2007)。当初、陸域生態系は、気候モデルの中では特に重視されていた要素ではなかったのですが、気候研究の深化・多様化に加え温暖化問題がクローズアップされてきたことを受けて陸域のモデル開発と組込が推進されることになりました。初期の GCM で使用されていたバケツモデル (Manabe 1969) などのスキームは、大気-陸面間の運動量・潜熱・顕熱の交換を表す簡単なものですが、徐々に植生キャノピーや炭素循環が組み込まれて精緻化が図られています (Sellers *et al.* 1997)。日本でも、2002年から開始された文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト」以来、GCM に諸要素モデルを結合する形での地球システムモデル開発が進められてきましたし、そこで最先端のスーパーコンピュータである「地球シミュレータ」(とその後継機) が大きな役割を果たしたことは多くの方がご存じかと思います。

### 3. 陸域生態系モデル開発の個人史

本節では、あまり学術的な内容でなくて恐縮ですが、前節で述べた背景の下、陸域生態系モデルを開発運用して今日に至った経緯の概略を述べたいと思います。まだ人生を回顧するには余りに未熟であることは承知しつつも、これまでお世話になった方々への感謝と、後の世代の人にも参考になる部分があることを期待して記してみます (なお文中の機関名・職名等は当時のものです)。

#### 3.1 名古屋大学：基礎がための時期

学部時代を過ごした名古屋大学農学部林学科では、私の研究の方向性を決定付けた大きな出会いが、少なくとも3つありました。1つ目は、当時の林学科の先生方 (例えば造林学講座の只木良也教授と萩原秋男助教授、森林経理学講座の末田達彦助教授と竹中千里助手) から、生態学と地球環境問題について当時の最新の知見を交えた刺激のある講義を受けることができたことです。あわせて実学としての林学講義も受けることで、基礎と応用の両輪を保つ姿勢が自然と養われたかもしれません。2つ目は、篠崎吉郎先生 (大阪市立大学名誉教授) の集中講義を受けることができたことです。篠崎先生は、1960年代から同大の吉良竜夫先

生らとともに、生物生長のロジスチック理論、樹形のパイプモデルなど、数理モデルを用いて世界的な業績をあげられた方です。集中講義は3日間と短いものでしたが、最初に半日を費やして指数・対数の諸概念を (ガロワの口頭試問などのエピソードも交えつつ) 説明されるなど、数学を基礎に自然現象を理解しようとする姿勢に強い感銘を受けました。この集中講義を受けられたのは偶然以外の何物でも無いのですが、私にはモデル研究の門を叩くことになった決定的な出来事だったのです。3つ目は、名古屋大学・大気水圏科学研究所教授の田中 浩先生から、ピナツボ炭素アノマリー (後述) という興味深いテーマを教えていただいたことです。田中 浩先生の知遇を得たのは、前出の竹中千里先生から紹介していただいたのが機縁です。当時注目を集めつつあった地球環境問題に関わりたい気持ちは漠然と芽生えていましたが、具体的なテーマを与えていただいたことで、自分の進むべき方向を真剣に考える契機となりました。この時は、複雑なモデルを開発する素養もスキルも無く、全陸域を少数の緯度帯に分けて炭素収支の感度実験を行う簡単な解析を試みたに過ぎません。そこでより高度なモデル研究に進むべく、今度は田中 浩先生から紹介していただいて、1995年度から筑波大学生物科学研究科の及川武久先生の下で学位論文の研究に取り組むことにしました。

#### 3.2 筑波大学：はじめのモデル開発

大学院期を過ごした筑波大学でも、数々の印象深い出来事がありました。私の入学当時、筑波大・植物生態学講座は、及川武久教授、寺島一郎助教授、鷲谷いづみ助教授、石川真一助手、三枝信子助手という、いま考えれば何とも豪華な教官陣で構成されていました。当時は、地球圏-生物圏国際協同研究計画 (IGBP) の初動期にあたり、及川先生は木田秀次先生 (京都大学) とともにそのコアプロジェクトの一つであるグローバルな解析・統合・モデリング (GAIM) の国内とりまとめを行っておられました。また筑波大学内では水文学の大家・榎根 勇先生を代表として、気象学分野から安成哲三先生などが参加しておられた「地球環境変動特別プロジェクト」が進行していました。ここでも、地球環境研究の最前線でのような活動が行われているかを感じとり、林学や植物生態学だけでなく気象学者や水文学者らと学際的な交流をするという得がたい機会に恵まれました。

一方、自分で取り組んでいた陸域生態系モデルの開

発は、最初からスムーズに進んだわけではありませんでした。学位論文のテーマとして与えられたのは、全球スケールの陸域生態系モデルの開発とそれを用いた温暖化の影響推定でしたが、周囲に類似の研究を行っている人はほぼ皆無でした。当時はインターネットも普及しておらず、情報の検索や論文・データの入手は現在と比較にならないほど時間と手間を要したものです（それでも前の世代よりは便利になっていたのですが）。例えば全球の気象データにしても、当時は気象庁や ECMWF による再解析データが気象学研究で多く用いられていましたが、生態学専攻の大学院生に手が出せるようなものではありませんでした。周りの人から情報を集め、最初に使ったのは、Leemans and Cramer (1991) による地上観測の内挿データでした。これは UNEP が運営する GRID というデータベース組織から無償配布されており、日本では国立環境研究所に支部 (GRID-Tsukuba) が置かれていました。前述のようにネットも未発達であったため、わずか数メガバイトのファイルでしたが 8 mm テープに保存して郵送していただいたことを覚えています。そのうちに NCEP/NCAR 再解析データに切り替えましたが、それもしばらく米国から CD-ROM でデータを受け取っていました。

肝心のモデル開発も、暗中模索から出発した状態でした。先立って及川先生が開発されていた森林炭素循環モデル (Oikawa 1985) をベースにする方針は固まっていたものの、よりプロセス指向なモデルへと高度化するには自分の知識が全く不足していました。さらに、海外では Biome-BGC や TEM といった先行モデルが着々と成果を挙げつつあり、後発としてそれらとは異なる独自性・長所を打ち出す必要があったのも焦燥を加えました。ここでの幸運は、東京大学植物学講座の門司正三教授・佐伯敏郎教授によって創始された、世界的にも先駆的な業績である物質生産理論 (Monsi and Saeki 1953) に代表される植物生理生態学の流れを汲むことができたことです。及川先生や寺島先生は、そのスクールの出身です。この物質生産理論に基づく植生キャノピーの光合成スキームを全球スケールの炭素循環モデル (Sim-CYCLE: Ito and Oikawa 2002) に導入することで他のモデルと差別化することができました。また、寺島先生らのグループで行われていた気孔 (葉の表面でガス交換を行う小さな空隙) 開閉の制御や呼吸代謝といった素過程の詳細な生理生態学的研究に触れることもできましたが、それ

は後々のモデル改良に重要な意味を持つことになりました。微気象学との接点として、筑波大学に設置されていた水理実験センター (当時) の存在も忘れるわけにはいきません。そこでは助手の三枝さんに加え研究室の学生が研究を行っており、蒸発散や放射収支といった基礎的な微気象学の概念を学べただけでなく、まさに渦相関法などの手法が確立されつつあった地表フラックス観測の現場を垣間見ることができたのでした。

大学院に進学した当初は、もちろんこのような恵まれた環境をすべて予期していたわけではありませんが、結果的には、この時期に身につけた知識と視点が貴重な財産となっています。ちなみに、気象学会に入会させていただいたのも大学院在籍時ですが、修士論文の内容をもとにした1997年春季大会でのポスター発表で幸運にもベストポスター賞をいただき、大いに研究の励みとさせていただいたという出来事もありました。また、学位論文の内容が気象集誌と Climate Research (Ito and Oikawa 2000a, b) という気象学系の雑誌に発表されたのも、生物科学専攻としては異例と思います。

### 3.3 研究員として：地球フロンティアから国立環境研究所まで

2000年10月より、当時は東京・浜松町に拠点を置いていた地球フロンティア研究システム (FRSGC、後にセンターに改組) に勤務しました。ご存じの方も多いでしょうが、FRSGC は松野太郎先生をシステム長として、1997年10月より海洋科学技術センター (現 JAMSTEC) と宇宙開発事業団 (現 JAXA) の共同プロジェクトとして進められていました。当時より真鍋淑郎先生 (温暖化領域長) といった著名な先生方が多く在籍しておられ、世界レベルの気候変動研究機関にいることを実感したものでした。私が所属していた生態系変動予測領域は、発足後まだ半年でメンバーも少なく黎明期にありました。領域長をされていた安岡善文先生 (当時は東京大学生産技術研究所教授より兼任) は、リモートセンシングを専門とされており、人工衛星を用いた陸域観測とそのモデルとの融合の可能性について新しい示唆や提案をいただきました。

この浜松町時代と FRSGC 横浜移転後しばらくは特にミッションもなく、安定炭素同位体比の導入 (Ito 2003) や森林火災モデル (Ito 2005a) などの試行に取り組むことができた、今思えば自由なポストドク期でした。地球フロンティアには鈴木力英さんら多くの水

文気象学研究者が所属されており、その頃から現在に至るまで陸域の水循環と物質循環に関する共同研究を続けさせていただいています。2002年になると、地球シミュレータ建設が本格化するとともに、その上で運用する地球システムモデルを開発するための「人・自然・地球共生プロジェクト」に参加することになりました。同時に、環境省で開始された地球環境研究総合推進費S1課題にも参加して、東アジア地域の陸域炭素収支の統合解析（例えば Ito 2008）も行うことになり、一転してプロジェクト指向の研究が主要部分を占めることになりました。地球システムモデル開発では、松野太郎先生の強力なイニシアティブと、それに参加していた気鋭の研究者の面々に大いに触発されたものです。そこでは陸域生態系モデル（Sim-CYCLE）を大気海洋大循環モデル（MIROC）に結合することが課題となりましたが、多くの方々の努力によってそれが達成されました。それはC4MIP（Friedlingstein *et al.* 2006）への参加を通じて、IPCC 第4次報告書に引用される成果につなげることができました。さらにこの頃から、モデル研究の次のステップとして、CO<sub>2</sub>以外の微量ガス交換プロセスの導入にも取り組んでいます。温室効果ガスとして重要なメタン（CH<sub>4</sub>）、亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）、火災起源の一酸化炭素やブラックカーボン、植生起源の揮発性有機物質（BVOC）などの放出

・吸収プロセスを導入してきましたが、これにより大気に対する陸域生態系の役割をより包括的に検討できるようになると期待しています。

それまで行っていたシミュレーション研究は、自分の研究的興味に合致していたのですが、その一方で、温暖化の影響評価や社会の緩和・適応策にもより直接的に貢献できるように応用的モデル研究の必要性も実感するようになっていました。例えば、京都議定書における排出削減メカニズムの一つに加えられた森林吸収源にしても、国レベ

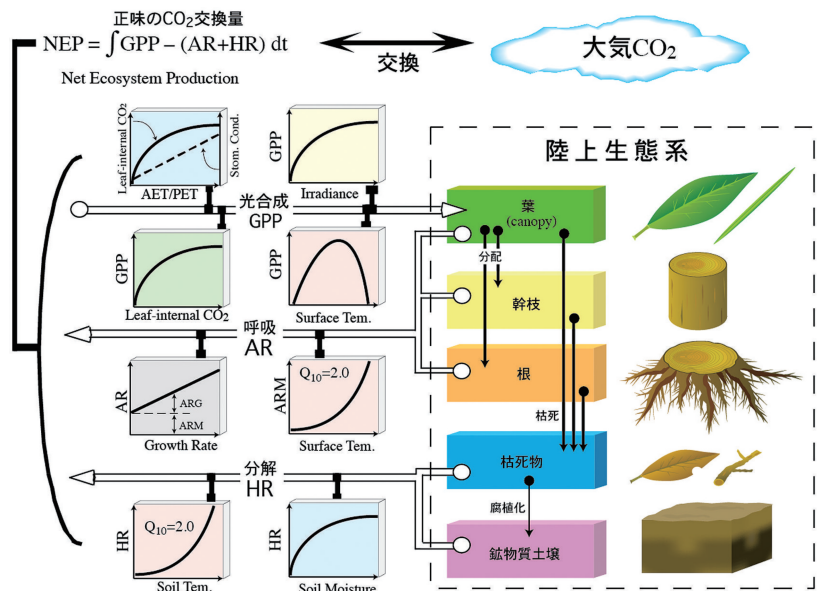
ルで信頼性のある数値を観測することは難しく、また炭素循環モデルによる推定も実用的な精度には達していませんでした。そのような課題に直面していた頃、運良く国立環境研究所に採用され、再びつくばに戻り、地球温暖化に関する総合的研究プログラムに参加することになりました。ここで開始した気候変動による生態系リスク評価や生態系サービス評価は、現在に至る主要課題となって様々な研究を行っているところです。

4. 過去～現在の経年変動のモデル解析

本節では、陸域生態系モデルを用いたグローバル炭素循環の理解に向けた研究例をご紹介します。

4.1 陸域生態系モデルの説明

第1図は私が開発してきた陸域生態系モデル（Sim-CYCLE とその後継モデル VISIT の炭素循環部分）の構造の概略を示しています（Ito and Oikawa 2002；Inatomi *et al.* 2010）。一口にモデルと言っても気象モデルとは基本的発想が異なっており、生態系内での物質（炭素）の貯留と移動をコンパートメントとフローに概念化して生態系のはたらしやダイナミクスを表現するものです。つまり多くの場合、水平方向の相互作用は無視し、鉛直方向ですら長さ（木の高さや土壌の深さ）の次元を省いて貯留量とフローを計



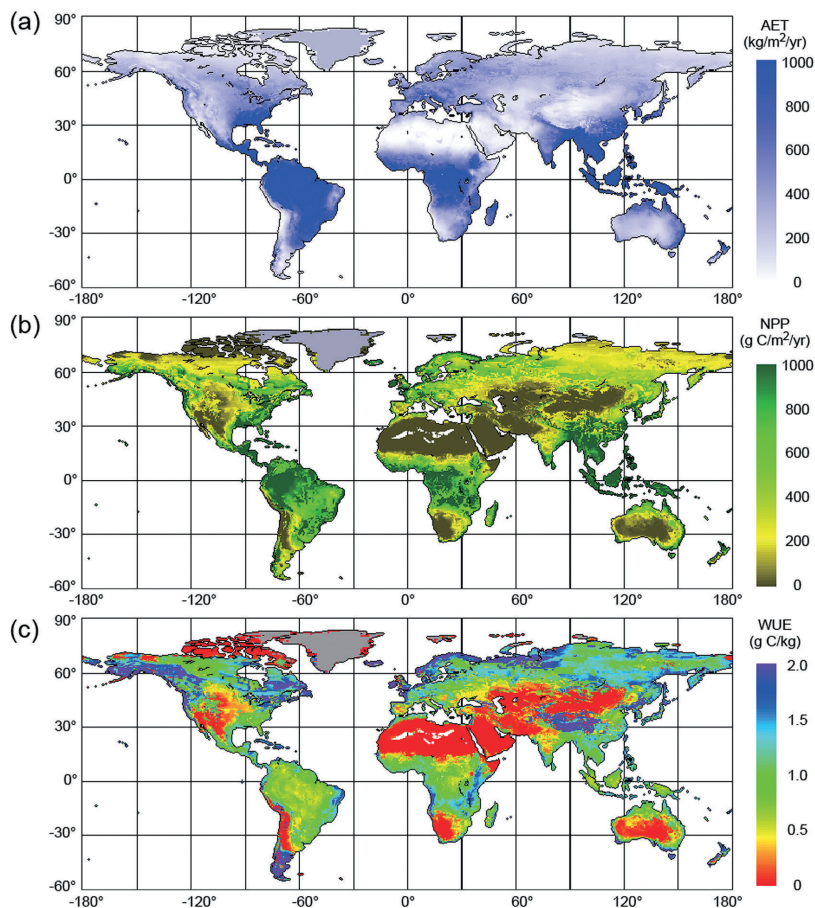
第1図 陸域生態系における炭素の循環と大気との間のCO<sub>2</sub>交換を評価するモデルの構造図 (Ito and Oikawa 2000b, 2002；Inatomi *et al.* 2010)。

算しますので、複雑な生態系を相当単純化して扱うことが可能となります。このようなモデル枠組みは、環境問題（公害から放射性物質の拡散まで）が深刻化し、環境中での物質動態を解明する研究の必要性が高まった1960年代に、「システム生態学」として発展しました。基本的には、生態系において機能的に異なるパーツ、例えば大気からCO<sub>2</sub>を固定する植生の葉（キャノピー）、地下で水分吸収などを担う根系、有機物の貯留源である土壌有機炭素、などのコンパートメントを設定して、それらの間のエネルギーや物質の移動プロセスを数式化することになります。各コンパートメントに含まれる炭素貯留量の時間変化は、外部からのインプット（光合成、炭水化物の転流、枯死物の落下など）と、外部へのアウトプット（呼吸や微生物による分解など）の差分から計算されます。ここでは、生態系のコンパートメントをどこまで細分化するか、光合成や呼吸などのフローをどのように環境・生物要因の関数として数式化するか、などが研究的要素そしてモデルの個性となります。大気海洋のモデルでは、熱や物質の移動は運動・拡散・流体の方程式群により記述されますが、残念ながら生態学にはそれに対応する基礎方程式が確立されていません。生物現象は想像以上に複雑で、個体の中で行われる生化学的プロセスだけでなく、個体と個体間の競争や共生の結果として、生態系のダイナミクスが生じているためです（実際には遺伝的要因も加わります）。そのような複雑性をどこまで導入し、ときには保留あるいは無視するかが実際のモデル開発では勘所となりますが、これは気象モデルにおけるパラメタリゼーションなどと共

通する部分がある気がします。第2図にモデル推定の例として、VISITによる陸域生態系における蒸発散、光合成生産、そして水利用効率の分布 (Ito and Inatomi 2012a) を示しました。

#### 4.2 ピナツボ炭素アノマリーの解析

大規模な火山噴火が広域的気象アノマリーを引き起こすことは以前から知られていました。1991年6月には、フィリピンのピナツボ火山が20世紀最大規模とされる大噴火を起こし、噴煙は成層圏に達して長期間滞留し、日射を減衰させて全球平均気温を約0.5°C低下させたといわれています。日本では1993年のコメ大不作を引き起こした冷夏とともに記憶に残されている方も多いでしょう。この噴火後、大気CO<sub>2</sub>濃度の上昇速度が顕著な鈍化を示したことが炭素循環研究者の注



第2図 陸域モデルで推定された1995-2004年平均の(a)蒸発散量 [AET], (b)純一次生産量 [NPP], (c)水利用効率 [WUE]. Ito and Inatomi (2012a)より。

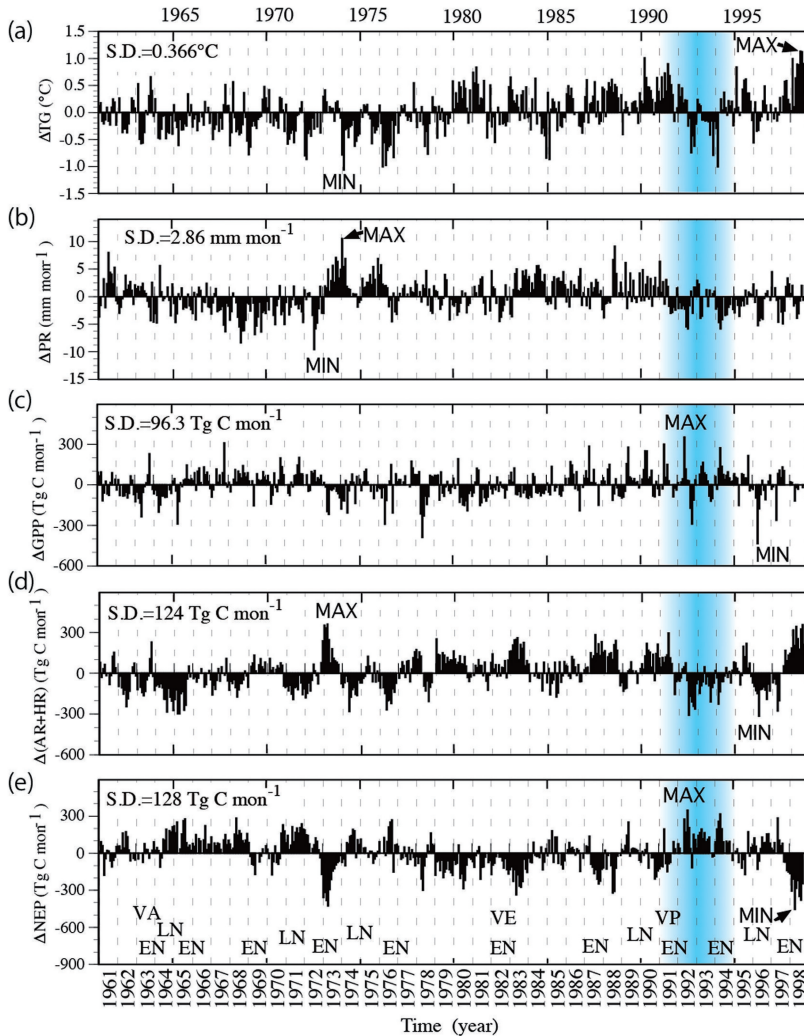
目を集め、「ピナツボ炭素アノマリー」と呼ばれました。その原因として、まずプリンストン大学の Jorge L. Sarmiento 博士は、ピナツボ火山由来の噴出物が海洋に降下し、栄養塩を供給することで植物プランクトンの生産力を高め、大気 CO<sub>2</sub> 吸収を増加させたという仮説を提示しましたが (Sarmiento 1993)、定量的検証は容易ではありませんでした。陸域の寄与はほとんど未知でしたが、前述のように田中 浩先生はこの現象に着目されており、モデル解析を行うことを提案されました。ここで注目した生物現象は、低温アノマリーに伴う呼吸による CO<sub>2</sub> 放出量の減少でした。一般に陸域の生態系では、温度が 10°C 上昇する毎に生物の呼吸量は約 2 倍に増えることが知られています。陸域生態系の呼吸総量は年間 120 Pg C に及ぶため、それが幾分でも減少すれば大気 CO<sub>2</sub> 増加に明確な影響が生じるはずで、上記のような指数関数的温度依存性に基づくと、計算上、0.5°C の温度低下によって呼吸量は 3.5% ほど (約 4.2 Pg C 相当) 減少することになるため、当時の大気 CO<sub>2</sub> 増加速度 (年間約 3 Pg C) を十分相殺する可能性があることとなります。しかし、実際にはアノマリーの時空間分布、低温による光合成への影響、日射減衰や降水量変化の各種影響なども考慮に入れる必要があります。私のモデル計算 (Ito and Oikawa 2000a, b: 第 3 図) では、呼吸低下が大きな量的寄与を果たす一方、植生の生育期間中に光合成はそれほど温度感度が高くなく、また多くの生態系は日射量を十分に受けているため日射減衰の影響も比較的軽微であるという結論になりました。大気 CO<sub>2</sub> の濃度と安定炭素同位体比変動に基づく推定 (Keeling *et al.* 1995) でも、陸域生態系への吸収を支持する結果が出ていますので、ピナツボ炭素アノマリーの (少なくとも主要な部分は) 陸域吸収で説明できると考えています。しかし、その生物学的メカニズムについては、その後の研究で一部修正が加えられました。噴火後は、確かに直達日射量は減少しますが、散乱日射量は増加するため、それが植生の光合成による CO<sub>2</sub> 固定量の増加を引き起こした可能性が指摘されたのです (Gu *et al.* 2003)。多数の葉から構成され複雑な立体構造を持つ植生キャノピーでは、散乱光の方が吸収されやすいためですが、それまでのモデルではその評価が不十分だった事になります。ピナツボ火山の噴火は、数十年に一度の偶発事でしたが、それを契機として、気候学的・地球化学的研究だけでなく陸域生態系の環境応答に関する研究も進展させることになり

ました。最近では、気候工学の手法として硫酸エアロゾルの成層圏散布による日射量調節 (solar radiation management) が提案されていますが (杉山ほか 2011)、その検討上で火山噴火後の大気現象が再び見直されているのも興味深いことです。

#### 4.3 エルニーニョ年の大気 CO<sub>2</sub> 増加

大気 CO<sub>2</sub> の継続観測データに見られる経年変動のうち、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) イベントに対応したアノマリーは早くから指摘されていました (例えば Bacastow 1976)。特に、1982-83年、1997-98年には大規模な ENSO が発生しましたが、その時期に大気 CO<sub>2</sub> 増加速度は大幅に高まっています。しかし、海洋のメカニズム (海水温上昇による溶解度低下、ENSO 終息時の湧昇流からの CO<sub>2</sub> 放出など) と陸域のメカニズム (降水減少による光合成低下、温度上昇による呼吸増加など) が提案されていましたが、定量的な寄与は明らかになっていませんでした。陸域モデル研究者の間でも、ENSO レジームに対応した炭素収支の経年変動は注目されており、いくつかのモデル解析が行われていました (例えば Kaduk and Heimann 1994; Kindermann *et al.* 1996)。私は特に 1997-98年の大規模な ENSO 発生と大気 CO<sub>2</sub> 濃度の大幅な増加に着目してモデル解析を行いました (Ito and Oikawa 2000b)。その結果は、前項のピナツボ炭素アノマリーとは逆方向で、高温による呼吸 CO<sub>2</sub> 放出の増加が主要なメカニズムであることを示唆していました (第 3 図)。平均的に温度が高い熱帯では、温度変化に対する呼吸量の応答幅が大きいため、ENSO 発生時の主要な CO<sub>2</sub> 発生源となることも分かりました。

この現象に関しても、近年の研究により別の放出メカニズムが加わっている可能性が指摘されています。それは森林火災による放出で、ENSO 発生時の高温と少雨により熱帯域を中心として火災が多発し、大規模な CO<sub>2</sub> 放出につながったというものです。実際に、1997-98年にはインドネシアなど東南アジア地域で大規模な森林火災が発生しており、CO<sub>2</sub> だけでなくスヤエアロゾルが多量に放出され、周囲の住民に深刻な健康被害を及ぼすほどでした。現在では、森林火災によるバイオマス燃焼は、陸域の炭素収支を評価する上で無視できない要素であることが広く認識されています (van der Werf *et al.* 2004)。しかし、火災のような偶発的要因を含む現象を生態系モデルで表現するのは現在でも困難であり、特に将来予測上の大きな不確



第3図 全陸域における気象要素と大気-陸域間CO<sub>2</sub>収支におけるアノマリーの時間変動 (Ito and Oikawa 2000a). (a)気温, (b)降水, (c)光合成[GPP], (d)呼吸 [AR+HR], (e)純生態系生産 [NEP]. VPはピナツポ噴火, ENはENSO発生時を示す. 青く影を付けた期間がピナツポ噴火の影響を受けたおおよその期間を指す. (a)~(b)はNCEP/NCAR再解析より, (c)~(e)は陸域モデルによる推定.

実性要因になっています.

#### 4.4 フラックス観測サイトでの連携

私の研究は全球モデルから出発したため,当初は,前節までに述べたような広域スケールの気象変動と陸域CO<sub>2</sub>収支の解析が主なテーマでした.しかし,陸域モデルがどの程度の精度で現実を再現できているかの検証が問題として残されていました.研究を開始した頃は,モデル推定と比較検証しうる観測データは極

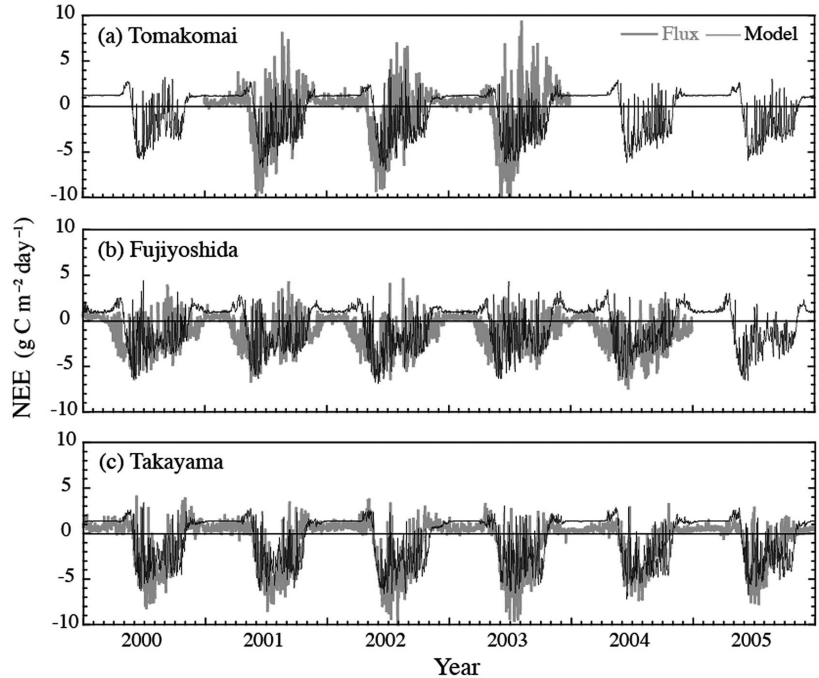
めて少なく,生物圏生産力の定量化を目的としたIBPによるバイオマスおよび純一次生産力データが少数の地点で得られるのみでした.モデルの記述論文であるIto and Oikawa (2002)でも,年間生産力を比較したのは世界17地点,そのうちバイオマス量を含めて詳細に比較を行ったのはわずか4地点に留まっていた.特に,土壌の炭素ストックやCO<sub>2</sub>放出量は観測データが少なく,従って生態系全体での正味CO<sub>2</sub>収支(純生態系生産)のモデル推定を検証する事は困難だったので.その状況を一変させたのは,渦相関法に代表される微気象学的フラックス観測の実現でした.その詳細は2009年度に堀内賞を受賞された三枝信子さんの記事(三枝 2010)などに紹介されていますのでご覧下さい.

世界で最初に渦相関法による大気-陸域生態系間のCO<sub>2</sub>フラックス連続観測を開始し,従って最長の時系列データ(1991年~)を持つのは米国のハーバード試験地です(Goulden *et al.* 1996

など).日本でも,1993年より岐阜大学の小泉 博先生や資源環境技術総合研究所(現在の産業総合技術研究所)の山本 晋先生らにより,岐阜県高山市郊外の冷温帯落葉広葉樹林に観測用タワーが建設され,現在に至る継続観測が開始されました(Yamamoto *et al.* 1999;山本ほか 2013).微気象学的手法によるフラックス観測は,空間的代表性は数km<sup>2</sup>以内に限られるものの,それまでのチャンパー(密閉箱)を用いた観測よりは格段に広い上に,

高い時間分解能で継続観測データの取得を可能にするという利点があります。そのため、現在では観測ネットワーク FLUXNET (Baldocchi *et al.* 2001) に登録されているサイトは世界で560地点を数え、国内でも30地点以上が設置されてきました。この観測データを陸域モデルの検証に用いる流れになったのは、前記のような必要性があったために当然のことではあったのですが、全球スケールのモデルと地点観測データとの直接比較にはなお大きな障壁がありました。それがスケールギャップと言われるもので、グローバルな陸域モデルが数千  $\text{km}^2$  の領域の平均的フラックスを再現する（と想定する）のに対し、観測フラックスが代表するのはせいぜい数  $\text{km}^2$  です。陸域の大部分は地形や土地利用が非常に不均質であり、異なる空間スケールを代表するフラックス同士を比較するのは一般に困難とされています。

そこで、グローバルな陸域モデルをベースにして、現地生態系情報と気象データを入力することで空間スケールを縮小した地点モデルを開発しました (Ito *et al.* 2005, 2007)。さらに、全球モデル計算は1ヶ月の時間ステップで実行されていましたが、およそ30分の間隔でデータ処理を行うフラックス観測に合わせて、時間ステップを1日（または30分）に短縮しました。このような地点モデルは広域シミュレーションには適しませんが、観測データと詳細に比較（例えば Ito 2008：第4図）を行うことで、陸域炭素循環に関する多くの洞察をもたらしてくれました。例えば、温帯から亜寒帯では、春から秋にかけて生育期間中の温度や日射の変化とともに、植物の光合成能力も変化するのですが、そのような植生のプロセスを取り入れることで陸域モデルの  $\text{CO}_2$  フラックス再現性が向上す



第4図 国内のフラックス観測サイトにおける大気-陸域間  $\text{CO}_2$  交換フラックスの観測とモデル推定の比較 (Ito 2008)。(a) 苫小牧のカラマツ林, (b) 富士吉田のアカマツ林, (c) 高山の冷温帯落葉広葉樹林。時間ステップは1日で、夏季に正味吸収、冬季に正味放出が生じている。観測データは渦相関法による AsiaFlux のデータより (Saigusa *et al.* 2008)。

ることが分かりました (Ito *et al.* 2006)。また、日本を含むアジア地域では熱帯低気圧（台風）による被害がしばしば発生します。2004年のように極端に台風上陸数が多かった年には、豪雨と強風によるダメージが植生に生じて、その年の  $\text{CO}_2$  吸収量を低下させた可能性があることもモデルの感度実験から示されました (Ito 2010)。これらの地点スケール研究は、いずれは全球モデルに反映されてグローバル炭素循環変動のより詳細な解明につながりますし、将来の気候変動がもたらすリスク評価にも新たな視点を持ち込むことになりました。

渦相関法による測定は必ずしもパーフェクトではありませんが、観測された時間変動の再現性は陸域モデルの有効なベンチマーキングとなります。現在、複数の国際モデル相互比較プロジェクトが進行しており、アジア地域でも24地点のフラックス観測サイトにおいて陸域モデル推定と観測データの比較が行われています (Ichii *et al.* 2013)。このような活動は、陸域モデルによる推定不確実性の原因特定とモデル改良による



信頼度向上につながりますので、さらなるフィールド観測研究との連携を進めるべきだと考えています。

#### 4.5 大気の観測やモデルとの連携

陸域モデルでは地表面での温室効果ガスフラックスを計算しますが、それが大気中でどのように輸送されて、大気中濃度の分布に反映されるかを直接求めることはできません。そこで、大気輸送モデルや大気組成観測を専門とする研究者と共同研究を行うことで、モデル推定の精度を検証するとともに、フラックスの時空間変動メカニズムをより深く理解できるようになりました。前出の Keeling 博士らによるピナツボ炭素アノマリーの解釈もそうですが、大気中の濃度や同位体組成観測データは、モデル推定とは独立した全球スケールの推定を与えてくれます。国内では東北大学の中澤高清先生、青木周司先生と国立環境研究所などの共同研究グループにより、長年にわたる大気観測と解析研究が続けられており、そこから多くの示唆をいただきました。また、大気輸送モデルを開発使用する研究者とは、大気濃度変動と地表フラックスとの関係で、いくつかの共同研究を行ってきました。Patra *et al.* (2011) は、大気輸送モデル相互比較プロジェクト (TransCom) の一環で、陸域モデル (ORCHIDEE および VISIT) で推定した地表 CH<sub>4</sub> フラックス (Ito and Inatomi 2012b) を境界条件とした再現実験を行っています。また、地域スケールの CO<sub>2</sub> 収支統合解析では、大気輸送モデルのインバージョン計算で推定されたトップダウン推定と、陸域モデルでシミュレートされたボトムアップ推定の比較が行われています。例えば Piao *et al.* (2012) は東アジア地域における1990-2009年の炭素収支を解析し、私たちのものを含む10モデルの結果によるボトムアップ推定として年間0.224±0.141Pg Cのシンク、トップダウン推定として年間0.270±0.507Pg Cのシンクという、地域スケールとしてはかなり整合的な結果を得ています。

日本が打ち上げた温室効果ガス観測衛星 (GOSAT) のデータを用いた研究では、より進んだ陸域モデルと大気輸送モデルとのリンケージが必要となりました。具体的には、国立環境研究所などで実施している事業として、陸域モデルで推定した地表フラックスを先験値として GOSAT 観測データを用いたインバージョン計算を行い、地表 CO<sub>2</sub> フラックスのプロダクトが作成されています (Takagi *et al.* 2011; Maksyutov *et al.* 2013)。陸域モデルによる観

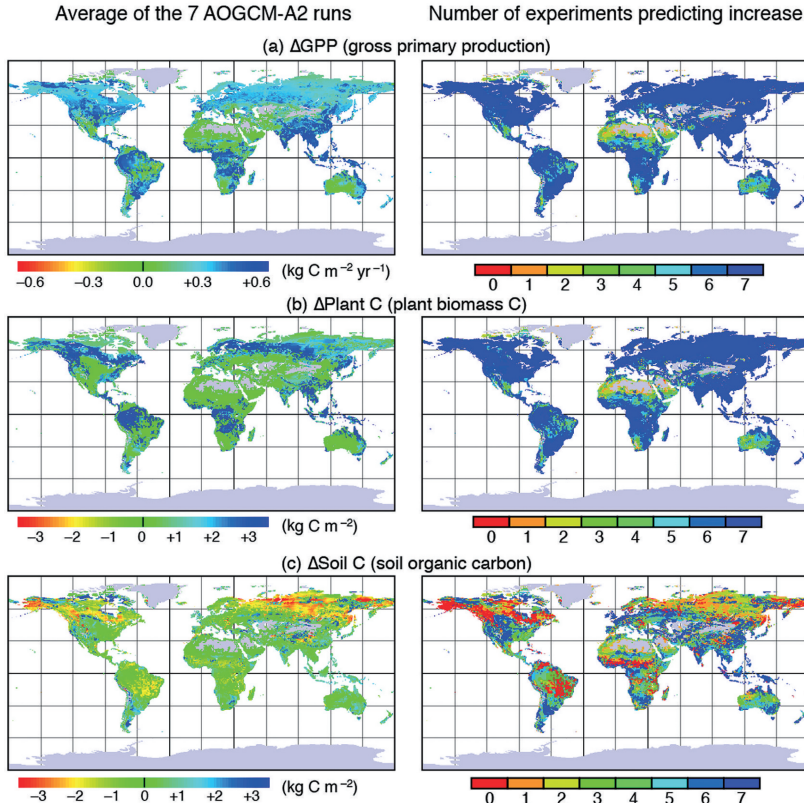
測データの同化研究は、大気海洋モデルと比較してかなり遅れているのが現状ですが、大気中の濃度観測データを用いたパラメータ最適化などの研究が行われ始めています。また、別の発展として、陸域モデル VISIT で推定される様々な生物起源微量物質のフラックス (イソプレンなど揮発性有機物質や火災起源のエアロゾルなど) と、大気化学モデルをリンクさせることで、大気組成とその時空間変動にあたる生物圏の影響を解明するための共同研究も進めているところです。

### 5. 将来の気候変動に関する研究

前節で述べた陸域炭素収支の解析と、将来の予測実験は表裏一体をなすものとして研究を進めてきました。生態学におけるモデル分野では、数理的モデルを用いる理論研究や統計モデルを用いるデータ指向の研究の方が、実は主流であったりします。私が用いているようなプロセス指向のモデルは、生態系の物質循環や生理学的メカニズムの理解を目指した研究で用いられますが、生態学の中ではどちらかというマイナーです。しかし、生態系の諸プロセスを明示的に扱うモデルを用いた方が、気候変動に関する予測を行う上では信頼性が高いと期待されるため、このような方針をとっています。

#### 5.1 将来シナリオを用いた研究

現在進行中の土地利用変化、大気 CO<sub>2</sub> 濃度上昇、そして気候変動は陸域生態系に種々の影響を与えると予想されます。特に炭素循環に対する影響は、陸域への CO<sub>2</sub> 吸収量変化を通じて気候システムにフィードバック効果を及ぼす意味で注目を集めてきました (伊藤 2010)。私の研究でも将来予測は大きな位置を占めていますが、その多くは大気海洋結合大循環モデル (AOGCM) による将来気候シナリオに基づく (つまりオフライン実験の) ものです。Ito (2005b, c) では、IPCC の排出シナリオ (SRES) と AOGCM による21世紀の気候シナリオを用いて、陸域生態系の生産力や炭素プールの応答を推定しました (第5図)。ここでは、植生の応答が比較的シナリオ間で収束するのに対し、土壌炭素の応答 (温度上昇による微生物分解の促進) は非常に不確実性が大きいことが分かりました。これは、入力するシナリオによって土壌炭素がシンクになるかソースになるかが分かれ、陸域の正味フィードバックを推定する上で大きな問題となることを示しています。また、陸域特有の現象として降水の



第5図 陸域モデルを用いて推定された将来の陸域炭素収支の2000年代から2090年代の間の変化 (Ito 2005b). (a)光合成 [GPP], (b)植生バイオマス, (c)土壌有機物. 大気CO<sub>2</sub>濃度のSRES-A2シナリオ, 7種類のAOGCMによる気象予測シナリオを入力した結果であり, 左列は平均した変化幅, 右列は将来的増加を示した結果の頻度を示す.

流出に伴う表土流亡 (エロージョン) に着目し, そのプロセスを生態系モデルに導入して, 将来の土地利用変化と気候変動が土壌の流亡量に与える影響の評価も行いました (Ito 2007). その結果は, 森林破壊が進み, 降水量が増加する地域で表土流亡が深刻化することを示していましたが, それは農業生産性や生物多様性への影響も考えられるため更に詳細な研究が必要な分野ともなっています.

気候変動に関するシナリオを使用するだけでなく, 時にはシナリオ開発にモデルが必要な場合もあります. 現在のIPCC第5次報告書などで用いられている温室効果ガス排出と大気中濃度シナリオ (RCP) の作成において, 陸域起源の土地利用変化とバイオマス燃焼による将来のCO<sub>2</sub>放出量が必要となったため, VISITモデルによる推定データ (Kato *et al.* 2013) を提供しています.

## 5.2 地球システムモデルに関係した研究

AOGCMをコアとして炭素循環などのコンポーネントを追加・結合する形で, 地球システムモデル (ESM) の開発が世界の主要研究機関で進められています. ESMの利点は, 気候変動にフィードバック効果を及ぼす諸プロセスの影響を将来予測に反映させることができる点です (もちろんモデルは複雑化し不確実性は残りますが). 例えば英国ハドレーセンターのグループによる気候-炭素循環フィードバックに関する研究 (Cox *et al.* 2000) は大きなインパクトを与えましたが, 陸域の役割は特に推定不確実性が大きいことも分かってきました.

前述のように人・自然・地球共生プロジェクトへの参加を通じて, 日本の地球システムモデル開発に参加することになりました. こ

こでは主にモデル提供者という立場であり, 実際の作業と解析は多くが共同研究者の方々に負うものです. まず前記のように, モデル相互比較プロジェクト (C4MIP) への参加を通じて, 気候-炭素循環フィードバックの予測不確実性に関する解析に貢献することができました (Friedlingstein *et al.* 2006). 共生プロジェクトで開発されたモデルを用いた研究として, Yoshikawa *et al.* (2008) によるフィードバック効果の空間分布に関する解析, Kato *et al.* (2009) による大気CO<sub>2</sub>濃度変動に及ぼす陸域生態系の寄与に関する解析などがあります. また, Tachiiri *et al.* (2012) は簡易気候モデルに陸域炭素循環モデルを結合し, アンサンブル実験を行うことで, 陸域応答の非線形性やパラメータ感度を解析しました. 共生プロジェクトは2006年度で終了しましたが, 気候変動予測革新プログラム (2007~2011年度), リスク情報創生プログラム

(2012年度～)へとESM開発は発展継承されています。その中で、気候システムにおける陸域の役割が明らかになるとともに植生動態(例えばSato *et al.* 2007)、窒素循環、凍土融解など更なる研究テーマが生まれて研究が進められています。

### 5.3 気候変動のリスクと緩和・適応策の評価へ

生態系は様々な産物やサービスを社会に提供しており、生態系の将来変化は、人間社会にも重大な意味を持ちます。5.1節で述べた表土流亡はその一例ですし、その他にも野外火災の激化や病虫害の範囲拡大と大発生などのリスクが将来的に大きくなるのが懸念されています。特に、tipping elementsと呼ばれる影響が顕著で不可逆的な現象には、温度上昇による永久凍土層の崩壊や乾燥による熱帯多雨林の枯死衰退などが挙げられています(Lenton *et al.* 2008)。このような現象に関する私たちの理解は不足しており、予測は困難と言わざるを得ません。その一方で、温暖化に対する緩和策・適応策を講じるための科学的知見に対するニーズは高まっており、それに答えるモデル研究を進める必要があることも確かです。ここ数年、環境省のプロジェクトに参加して、VISITモデルを用いたリスク評価の試みを進めています。また、気候変動に関する影響評価モデルの国際相互比較プロジェクトに参加することで、このような評価にどの程度の不確実性が含まれるかの検討も進めています。

## 6. 総括と今後の課題

生態学の研究というと、虫取り網やルーペを片手に野外を歩き回っているようなイメージがあるかもしれませんが、私の研究はほぼ完全にデスクワークで、対象は違いますが気候モデル研究のやり方に近いかもしれません。大気と陸域生態系との間の相互作用について、あるときは興味本位で、あるときはプロジェクト指向でモデル研究を行ってきました。その過程で、期せずして生態学と気象学との学際的領域を進むことになったのだと思います。

グローバルな陸域生態系モデル研究は、少数の先駆的研究を除くと、実質的には1990年代から始まったと言える歴史の浅い研究分野です。それだけに未解決の問題も多く、今後の発展の余地も大きいと思います。主な課題には以下のようなものがあると考えています。

1) 炭素循環と栄養物質(窒素やリンなど)循環の相互作用。栄養物質は生態系の生産能力や長期的な定

常状態に影響を与えますが、その挙動は未解明な部分があり陸域モデルに十分反映されていません。

- 2) 永久凍土や泥炭地の扱い。将来の温度上昇や人間活動により、融解した永久凍土や湿原の泥炭が大きな温室効果ガス放出源になる可能性が懸念されていますが、現在の陸域モデルでは推定が困難です。
- 3) 陸面の空間的不均質性の扱い。陸域生態系では、地形・土壌・微気象条件に応じて優占する植生が異なり、また火災や森林破壊などの攪乱によって構造が破壊されることで、様々なスケールの不均質性が生じています。それは大気-陸域相互作用を扱う上でも大きな問題となります。
- 4) 長期的な変動の扱い。現在の陸域モデルはせいぜい数十年から数百年の変動をシミュレートするに過ぎませんが、植物や土壌には数千年以上の時間スケールで進行するプロセス(植生遷移や土壌生成など)があります。また、氷期-間氷期サイクルなどの長期変動に対する陸域応答も興味深い課題です。
- 5) 地球システムモデルにおける陸域の高度化。ESMは温暖化予測だけでなく、生物圏や雪氷圏など各コンポーネントの相互作用、超長期的なシステムの安定性など、様々な地球環境問題に活用されるポテンシャルがあると考えています。それに対応できる陸域生態系のモデルへと高度化を進める必要があります。

最後に強調したいのは、基礎研究から対策に向けた応用研究まで、バランスのとれた研究を進めることの大切さです。地球環境問題では、現状解析から始まってシナリオ作成、将来予測、影響評価、対策検討までのすべての段階で陸域生態系モデルは必要とされています。これはとても個人の研究者でカバーできる課題ではないと思いつつも、問題の全容を見渡すことの大切さもあるはずと信じて、あえて手を広げてきたという側面もあります。少なくとも、真に自分が没頭できる研究課題に出会えたことは幸運と言わなくてはならないでしょう。今後も、色々な方々と協力しつつ、一歩ずつでも問題を解決して研究分野の発展と社会に貢献していきたいと考えています。

## 謝辞

3節であらましを述べましたように、私の陸域モデル研究は、多くの方々にご助言とご協力をいただいで続けることができたものです。大学院時代から折に触れご指導いただいでいる及川武久先生、中澤高清先

生、寺島一郎先生には格別の謝意を述べさせていただけます。本文中で全員のお名前をあげることはできませんでしたが、地球フロンティア (NASDA から JAMSTEC) および国立環境研究所では多くの方々にお世話になってきましたこと、あらためて感謝いたします。国内の陸域モデル研究者では、馬淵和雄さん (気象研究所)、市井和仁さん (福島大)、佐々井崇博さん (名古屋大)、佐藤 永さん (名古屋大)、立入郁さん (JAMSTEC)、羽島知洋さん (JAMSTEC)、家族でもある稲富素子さん (茨城大) など、ここに書き切れない多くの方と楽しく共同研究や議論をさせていただきました (所属は2012年時)。最後に、推薦・選考して下さった気象学会関係者の方々、ならびに学会員の皆様に篤くお礼申し上げます。

#### 略語一覧

AOGCM : Atmosphere-Ocean General Circulation Model

BVOC : Biogenic Volatile Organic Compound

C4MIP : Coupled Climate - Carbon Cycle Model Inter-comparison Project

ENSO : El Niño - Southern Oscillation

ESM : Earth System Model

FRSGC : Frontier Research System for Global Change

GAIM : Global Analysis, Integration, and Modeling

GCM : General Circulation Model

GOSAT : Greenhouse gas Observation SATellite

IBP : International Biological Programme

IGBP : International Geosphere-Biosphere Programme

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency

NASDA : National Space Development Agency of Japan

NCEP/NCAR : National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research

RCP : Representative Concentration Pathway

Sim-CYCLE : Simulation model of Carbon cYCLE in Land Ecosystems

UNEP : United Nations Environmental Program

VISIT : Vegetation Integrated Simulator for Trace gases

#### 参考文献

Bacastow, R. B., 1976: Modulation of atmospheric car-

bon dioxide by the Southern Oscillation. *Nature*, **261**, 116-118.

Baldocchi, D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, C. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Pau U, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson and S. Wofsy, 2001: FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 2415-2434.

Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall and I. J. Totterdell, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, **408**, 184-187.

Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, G. Bala, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H. D. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. J. Weaver, C. Yoshikawa and N. Zeng, 2006: Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *J. Climate*, **19**, 3337-3353.

Goulden, M. L., J. W. Munger, S.-M. Fan, B. C. Daube and S. C. Wofsy, 1996: Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: Response to interannual climate variability. *Science*, **271**, 1576-1578.

Gu, L., D. D. Baldocchi, S. C. Wofsy, J. W. Munger, J. J. Michalsky, S. P. Urbanski and T. A. Boden, 2003: Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science*, **299**, 2035-2038.

Ichii, K., M. Kondo, Y.-H. Lee, S.-Q. Wang, J. Kim, M. Ueyama, H.-J. Lim, H. Shi, T. Suzuki, A. Ito, H. Kwon, W. Ju, M. Huang, T. Sasai, J. Asanuma, S. Han, T. Hirano, R. Hirata, T. Kato, S.-G. Li, Y.-N. Li, T. Maeda, A. Miyata, Y. Matsuura, S. Murayama, Y. Nakai, T. Ohta, T. M. Saitoh, N. Saigusa, K. Takagi, Y.-H. Tang, H.-M. Wang, G.-R. Yu, Y.-P. Zhang and F.-H. Zhao, 2013: Site-level model-data synthesis of terrestrial carbon fluxes in the CarboEast-Asia eddy-covariance observation network: Toward future modeling efforts. *J. For. Res.*, **18**, 13-20.

Inatomi, M., A. Ito, K. Ishijima and S. Murayama, 2010: Greenhouse gas budget of a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan estimated using a process-based model. *Ecosystems*, **13**, 472-483.

- Ito, A., 2003: A global-scale simulation of the CO<sub>2</sub> exchange between the atmosphere and the terrestrial biosphere with a mechanistic model including stable carbon isotopes, 1953–1999. *Tellus*, **55B**, 596–612.
- Ito, A., 2005a: Modelling of carbon cycle and fire regime in an east Siberian larch forest. *Ecol. Model.*, **187**, 121–139.
- Ito, A., 2005b: Climate-related uncertainties in projections of the twenty-first century terrestrial carbon budget: off-line model experiments using IPCC greenhouse-gas scenarios and AOGCM climate projections. *Clim. Dyn.*, **24**, 435–448.
- Ito, A., 2005c: Regional variability in the terrestrial carbon-cycle response to global warming in the 21st century: Simulation analysis with AOGCM-based climate projections. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 251–259.
- Ito, A., 2007: Simulated impacts of climate and land-cover change on soil erosion and implication for the carbon cycle, 1901 to 2100. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L09403, doi:10.1029/2007GL029342.
- Ito, A., 2008: The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 738–747.
- 伊藤昭彦, 2010: 気候-炭素循環フィードバック. *天気*, **57**, 346–348.
- Ito, A., 2010: Evaluation of the impacts of defoliation by tropical cyclones on a Japanese forest's carbon budget using flux data and a process-based model. *J. Geophys. Res.*, **115**, G04013, doi:10.1029/2010JG001314.
- Ito, A. and M. Inatomi, 2012a: Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: A model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. *J. Hydrometeorol.*, **13**, 681–694.
- Ito, A. and M. Inatomi, 2012b: Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences*, **9**, 759–773.
- Ito, A. and T. Oikawa, 2000a: A model analysis of the relationship between climate perturbations and carbon budget anomalies in global terrestrial ecosystems: 1970–1997. *Clim. Res.*, **15**, 161–183.
- Ito, A. and T. Oikawa, 2000b: The large carbon emission from terrestrial ecosystems in 1998: A model simulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 103–110.
- Ito, A. and T. Oikawa, 2002: A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecol. Model.*, **151**, 147–179.
- Ito, A., N. Saigusa, S. Murayama and S. Yamamoto, 2005: Modeling of gross and net carbon dioxide exchange over a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan: Analysis of seasonal and inter-annual change. *Agric. For. Meteorol.*, **134**, 122–134.
- Ito, A., H. Muraoka, H. Koizumi, N. Saigusa, S. Murayama and S. Yamamoto, 2006: Seasonal variation in leaf properties and ecosystem carbon budget in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest: simulation analysis at Takayama site, Japan. *Ecol. Res.*, **21**, 137–149.
- Ito, A., M. Inatomi, W. Mo, M. Lee, H. Koizumi, N. Saigusa, S. Murayama and S. Yamamoto, 2007: Examination of model-estimated ecosystem respiration using flux measurements from a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in central Japan. *Tellus*, **59B**, 616–624.
- Kaduk, J. and M. Heimann, 1994: The climate sensitivity of the Osnabrück Biosphere Model on the ENSO time scale. *Ecol. Model.*, **75**, 239–256.
- Kato, T., A. Ito and M. Kawamiya, 2009: Multiple temporal scale variability during the twentieth century in global carbon dynamics simulated by a coupled climate-terrestrial carbon cycle model. *Clim. Dyn.*, **32**, 901–923.
- Kato, E., T. Kinoshita, A. Ito, M. Kawamiya and T. Yamagata, 2013: Evaluation of spatially explicit emission scenario of land-use change and biomass burning using a process-based biogeochemical model. *J. Land Use Sci.*, **8**, 104–122.
- 河宮未知生, 2007: 地球システムモデリング. *天気*, **54**, 275–278.
- Keeling, C. D., 1960: The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, **12**, 200–203.
- Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen and J. van der Plicht, 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, **375**, 666–670.
- Kindermann, J., G. Wurth, G. H. Kohlmaier and F.-W. Badeck, 1996: Interannual variation of carbon exchange fluxes in terrestrial ecosystems. *Global Biogeochem. Cycles*, **10**, 737–755.
- Le Quééré, C., R. J. Andres, T. Boden, T. Conway, R. A. Houghton, J. I. House, G. Marland, G. P. Peters, G. R. van der Werf, A. Ahlström, R. M. Andrew, L. Bopp, J. G. Canadell, P. Ciais, S. C. Doney, C. Enright, P. Friedlingstein, C. Huntingford, A. K. Jain, C. Jourdain, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, S.

- Levis, P., Levy, M., Lomas, B., Poulter, M. R., Raupach, J., Schwinger, S., Sitch, B. D., Stocker, N., Viovy, S., Zaehle, N., Zeng, 2013: The global carbon budget 1959–2011. *Earth Syst. Sci. Data*, **5**, 165–185.
- Leemans, R. and W. P. Cramer, 1991: The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation, and cloudiness of a global terrestrial grid. Report No. RR-91-18, IIASA, Laxenburg, Austria.
- Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf and H. J. Schellnhuber, 2008: Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **105**, 1786–1793.
- Maksyutov, S., H. Takagi, V. K. Valsala, M. Saito, T. Oda, T. Saeki, D. A. Belikov, R. Saito, A. Ito, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, R. J. Andres and T. Yokota, 2013: Regional CO<sub>2</sub> flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO<sub>2</sub> observations. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 9351–9373.
- Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 739–774.
- Monsi, M. and T. Saeki, 1953: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.*, **14**, 22–52.
- Oikawa, T., 1985: Simulation of forest carbon dynamics based on dry-matter production model: 1. Fundamental model structure of a tropical rainforest ecosystem. *Bot. Mag.*, **98**, 225–238.
- Patra, P. K., S. Houweling, M. Krol, P. Bousquet, D. Belikov, D. Bergmann, H. Bian, P. Cameron-Smith, M. P. Chipperfield, K. Corbin, A. Fortems-Cheiney, A. Fraser, E. Gloor, P. Hess, A. Ito, S. R. Kawa, R. M. Law, Z. Loh, S. Maksyutov, L. Meng, P. I. Palmer, R. G. Prinn, M. Rigby, R. Saito and C. Wilson, 2011: TransCom model simulations of CH<sub>4</sub> and related species: linking transport, surface flux and chemical loss with CH<sub>4</sub> variability in the troposphere and lower stratosphere. *Atm. Chem. Phys.*, **11**, 12813–12837.
- Piao, S. L., A. Ito, S. G. Li, Y. Huang, P. Ciais, X. H. Wang, S. S. Peng, H. J. Nan, C. Zhao, A. Ahlström, R. J. Andres, F. Chevallier, J. Y. Fang, J. Hartmann, C. Huntingford, S. Jeong, S. Levis, P. E. Levy, J. S. Li, M. R. Lomas, J. F. Mao, E. Mayorga, A. Mohammat, H. Muraoka, C. H. Peng, P. Peylin, B. Poulter, Z. H. Shen, X. Shi, S. Sitch, S. Tao, H. Q. Tian, X. P. Wu, M. Xu, G. R. Yu, N. Viovy, S. Zaehle, N. Zeng and B. Zhu, 2012: The carbon budget of terrestrial ecosystems in East Asia over the last two decades. *Biogeosciences*, **9**, 3571–3586.
- 三枝信子, 2010: 森林生態系における炭素循環の観測的研究とそのアジアへの展開. *天気*, **57**, 819–833.
- Saigusa, N., S. Yamamoto, R. Hirata, Y. Ohtani, R. Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, Y. Kosugi, S.-G. Li, Y. Nakai, K. Takagi, M. Tani and H. Wang, 2008: Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO<sub>2</sub> flux in boreal, temperate, and tropical forests in East Asia. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 700–713.
- Sarmiento, J. L., 1993: Atmospheric CO<sub>2</sub> stalled. *Nature*, **365**, 697–698.
- Sato, H., A. Ito and T. Kohyama, 2007: SEIB-DGVM: A new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach. *Ecol. Model.*, **200**, 279–307.
- Sellers, P. J., R. E. Dickinson, D. A. Randall, A. K. Betts, F. G. Hall, J. A. Berry, G. J. Collatz, A. S. Denning, H. A. Mooney, C. A. Nobre, N. Sato, C. B. Field and A. Henderson-Sellers, 1997: Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, **275**, 502–509.
- 杉山昌広, 西岡 純, 藤原正智, 2011: 気候工学 (ジオエンジニアリング). *天気*, **58**, 577–598.
- Tachiiri, K., A. Ito, T. Hajima, J. C. Hargreaves, J. D. Annan and M. Kawamiya, 2012: Nonlinearity of land carbon sensitivities in climate change simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 259–274.
- Takagi, H., T. Saeki, T. Oda, M. Saito, V. Valsala, D. Belikov, R. Saito, Y. Yoshida, I. Morino, O. Uchino, R. J. Andres, T. Yokota and S. Maksyutov, 2011: On the benefit of GOSAT observations to the estimation of regional CO<sub>2</sub> fluxes. *SOLA*, **7**, 161–164.
- Tans, P. P., I. Y. Fung and T. Takahashi, 1990: Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. *Science*, **247**, 1431–1438.
- van der Werf, G. R., J. T. Randerson, G. J. Collatz, L. Giglio, P. S. Kasibhatla, A. F. J. Arellano, S. C. Olsen and E. S. Kasischke, 2004: Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. *Science*, **303**, 73–76.
- Woodward, F. I., 1987. *Climate and Plant Distribution*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 188pp.
- Yamamoto, S., S. Murayama, N. Saigusa and H. Kondo, 1999: Seasonal and inter-annual variability of CO<sub>2</sub> flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus*, **51B**, 402–413.
- 山本 晋, 村山昌平, 近藤裕昭, 三枝信子, 2013: 森林生態系炭素循環の解明を目指して。—20年間の高山 (TA-

KAYAMA) 観測と AsiaFlux への展開一. 天気, 60,  
359-370.  
Yoshikawa, C., M. Kawamiya, T. Kato, Y. Yamanaka  
and T. Matsuno, 2008: Geographical distribution of

the feedback between future climate change and the  
carbon cycle. J. Geophys. Res., 113, G03002, doi:  
10.1029/2007JG000570.

---

## Studies on Climate-Ecosystem Interactions Using a Terrestrial Ecosystem Model

Akihiko ITO\*

\* *National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan.*

(Received 11 December 2013; Accepted 11 March 2014)

---