

S-1 21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究
 テーマIII アジア陸域生態系の炭素収支変動予測と21世紀の炭素管理手法の検討
 (2) 陸域炭素循環モデルの国際比較と高度化

独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター

ソバカル ダカール

〈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

山形与志樹・Penelope Canan
 伊藤昭彦・木下嗣基

オーストラリア連邦科学研究機構

Josep Canadell
 Michael Raupach

平成14～18年度合計予算額 125,358千円
 (うち、平成18年度予算額 28,500千円)
 ※上記予算額には、間接経費 28,929千円を含む

[要旨] 本課題では、グローバルカーボンプロジェクト (GCP) に関する国際共同研究として、統合的なモデル研究の基盤となる陸気炭素収支管理モデルの国際比較として自然—社会システムを統合したモデルの国際比較検討を実施するとともに、グローバルな炭素循環に関する最新の統合的な知見を集約した。人間活動を統合した炭素管理に関係する国際モデル比較を実施することで、統合評価モデル研究の発展に資するとともに、国際比較研究から新たな国際研究を展開した。まず、モデル国際比較検討への情報基盤として関連研究情報のデータベース構築を実施し、次に、グローバルな炭素循環を推定する陸域生態系モデルの国際比較を実施し、さらに自然—社会統合モデルの国際的モデル比較を実施した。また、最終年にはグローバルな炭素循環に関する最新の統合的な知見を集約し、本プロジェクト全体における東アジアにおける炭素動態の解明に対して、国際的な観点からの位置づけを明らかにした。尚、本研究はS1と連携して国立環境研究所に設置されたGCPつくば国際オフィスの研究活動の一環として実施されたものである。

[キーワード] 自然—社会システム、統合モデル、炭素管理、データベース、国際比較

1. はじめに

グローバル炭素循環研究において、自然系—社会系を統合した炭素収支管理モデルが果たすべき役割は(1)断片的なシステムモデルを統合した全体像の構成、(2)感度分析に基づく炭素管理へのアセスメントへの応用、(3)国レベルと国際レベルの空間的スケールアップ、などである。これらの要求に応えるには自然—社会系のプロセスをメカニスティックに記述した構造を持ち、各サブシステムの特徴を十分に現したモデルを開発する必要がある。地球温暖化問題に対処するための中長期的な科学的炭素管理手法を検討する上で、人為的な活動によりもたらされる陸域炭素収支の変動に対する正確な理解が不可欠である。

本課題では、本プロジェクトの他課題から得られる成果 (生態系モデルおよび社会系モデル)

との連携を図りつつ、陸域炭素収支を中長期的に管理する炭素管理方策を検討することを目的とする本プロジェクトの趣旨にそって、関連する国際モデルの比較を実施するものである。尚、本課題は、ICSU（国際科学会議）における国際研究計画グローバル・カーボン・プロジェクト（Global Carbon Project；以下GCP）のテーマ3「炭素循環の将来動態と炭素管理」の一部に対応した課題である。尚、GCPは、炭素循環に係わる自然科学（IGBP）、社会科学（IHDP）、観測研究（WCRP）にまたがる分野横断的な研究推進を目的として、グローバルな炭素循環の現状把握・メカニズム解明・予測と管理の3つのテーマと取組む国際研究プログラムである。

2. 研究目的

本課題は、人間活動を統合した炭素管理に関する国際モデル比較を実施することで、本プロジェクトにおける陸域炭素収支および管理に関する統合モデル開発にフィードバックすることに資することを目的とする。特に本課題では、グローバルカーボンプロジェクト（GCP）に関する国際共同研究の一環として、GCPつくば国際オフィスにおいて研究が実施されるものである。統合的なモデル研究の基盤となる自然—社会システム統合モデルの比較検討を実施する。プロジェクトの前半では、国際モデル比較検討の一環としてモデルデータベースの設計と情報収集を実施し、本プロジェクトで研究される生態系モデルの国際比較を実施した。プロジェクトの後半では、自然—社会統合モデルの国際比較検討に基づいたデータベースを構築し、統合国際的モデルの比較検討を実施するとともに、グローバルな炭素循環に関する最新の統合的な知見を集約した。

また、本課題での検討は、サブテーマ1の陸域炭素収支モデル、サブテーマ4の陸域炭素管理モデル開発課題と連携して、それぞれの課題における開発に寄与することを目的とするものであり、国際比較の結果から、本サブテーマにおけるモデル開発研究を促進するための情報基盤として、モデルデータベースが構築され、国際的な陸域生態—社会経済システムの統合モデルの開発や、最終年度におけるプロジェクト全体での統合解析（テーマ4）において東アジアにおける統合的炭素動態の解明にあたって、研究成果の国際的な位置づけを明らかにすることを目的とした。

3. 研究方法

グローバルな炭素循環に関する最新の統合的なモデル知見を収集し、人間活動を統合した炭素管理に関する国際モデル比較を実施するため、

- モデル国際比較検討への情報基盤として関連研究情報のデータベース構築
- グローバルな炭素循環を推定する陸域生態系モデルの国際比較
- 自然—社会統合モデルの国際的モデル比較
- グローバルな炭素循環に関する最新の統合的な知見の集約

を実施した。

特に、本プロジェクト全体における東アジアにおける炭素動態の解明に対して、国際的な観点からの位置づけを明らかにするため、国際モデル比較に当たっては、それぞれの検討に際して、下記の項目に関する作業を踏まえて、情報収集と比較分析を実施した。

（1）モデル情報の収集・整備

モデルに関する情報整備。モデル利用（検証）、ないしモデル間での比較を行う際の基本情報

として、モデルのロジック、入出力データの種類およびデータフォーマット、モデルから導き出された結果、関連文献などの情報を収集し整備した。

(2) 入力データの収集・整備

モデルに必要となる入力情報を整備した。モデル研究を進めるにあたって、最も煩雑な作業の一つが入力情報の準備である。また、モデル間の出力の違いを検証する上でも、入力情報を分析することが重要である。なお、入力情報として各モデルに対し共通的に利用可能なものから優先して検討する。

(3) モデル解析結果の整備に関する検討

モデル解析を収集して分析し、各種モデルの解析結果の比較検討できる環境を整備した。モデル研究の成果が、第三者により利用（検証）されることが少なかったのは、モデル解析結果を利用できる環境が整備されていなかったことが原因の一つである。モデル研究の関連文献をもとに、総括的な炭素循環に関する知見を集約した。

4. 結果・考察

(1) 陸域生態系モデル情報の国際比較

陸域炭素収支に関連する主な国際モデルの比較表を表1に、本プロジェクトで利用される4つのモデルの概要を表2に示す。ほとんどのモデルは、大気と生態系との間の正味の炭素収支（NEPまたはNEE）を与えることができ、植生と土壌の寄与分を分離して扱っている。これらのモデルは、そのプロセスから、以下の3タイプに大別することができる。

- 1) 陸面における運動量・水・熱の交換を表現するタイプ
- 2) 生態系の物質循環を表現するタイプ
- 3) 植生の分布とその移動を表現するタイプ

現時点におけるモデル研究においては、光合成や呼吸といった基礎的な部分についても標準的な算定方法が確立されていないといった状況に加え、入出力データ種の違いや、時間・空間精度の違いのために、例えば、同一領域に対するモデルの適用においても、その応答には必ずしも整合性があるとはいえない状況にあることが指摘されている。

例えば、多くの全球モデルでは0.5〜1度メッシュ程度の空間精度であるのに対し、一部リモートセンシングデータを組み込んでいるモデル等については、10kmメッシュ以上の高い空間精度の下で実行されている。また、いくつかのモデルは炭素循環だけでなく、窒素循環も考慮に入れている。

モデルDBのコンセプトおよび開発フェイズに従い、モデル情報を収集・整理を実施した。特に、入力データセットとして、どのような種類、時間・空間分解能が必要なのかを明らかにすることで、第2フェイズ（入力データセットの整備）について検討した。

また、時間・空間分解能など適用要件の異なるモデルに対し、入力データセットを共通利用できるのか、さらに、入力データの種類が異なる中で、出力された結果を比較すること自体にどれほどの妥当性があるのかなど、モデル間の整合性を確認するための仕組みについては、第2フェイズにおいて検討した。

表1 陸域生態系モデルデータの比較

| モデル名 | タイプ | GPP/NPP/NEP | 時間幅 | 衛星データ利用 | 主要開発国 |
|-----------|----------|-------------|-------|------------|--------|
| BAIM | 陸面過程 | ○△△ | <1時間 | × | 日本 |
| BEAMS | 物質循環 | ○○○ | 1月 | fAPAR, LAI | 日本 |
| BIOME3 | 植生分布 | ○○- | 1月 | × | スウェーデン |
| BIOME-BGC | 物質循環 | ○○○ | 1日 | × | アメリカ |
| CARAIB | 物質循環 | ○○○ | 1日 | × | ベルギー |
| CASA | 物質循環 | ×○○ | 1月 | fAPAR | アメリカ |
| CENTURY | 物質循環 | ×○○ | 1月 | × | アメリカ |
| CEVSA | 物質循環 | ○○○ | 1月 | × | イギリス |
| DOLY | 植生分布 | ○○○ | 1年 | × | イギリス |
| FBM | 物質循環 | ○○○ | 1日 | × | ドイツ |
| GLO-PEM | 物質循環 | ○○- | 10日 | fAPAR | アメリカ |
| HRBM | 物質循環 | ×○○ | 1月 | × | ドイツ |
| HYBRID | 物質循環 | ○○- | 1日 | × | イギリス |
| IBIS | 統合(物質循環) | ×○○ | <1時間 | × | アメリカ |
| KGBM | 物質循環 | ○○- | 1日 | × | フランス |
| LPJ | 統合(植生分布) | ○○○ | <1時間 | × | ドイツ |
| PLAI | 物質循環 | ○○- | 1日 | × | ドイツ |
| SDBM | 物質循環 | ×○- | - | fAPAR | ドイツ |
| SiB2 | 陸面過程 | ○△△ | <1時間 | fAPAR | アメリカ |
| SILVAN | 物質循環 | ○○- | 6日 | × | ドイツ |
| Sim-CYCLE | 物質循環 | ○○○ | 1月/1日 | × | 日本 |
| SLAVE | 物質循環 | ○○○ | 1月 | × | フランス |
| TEM | 物質循環 | ○○○ | 1月 | × | アメリカ |
| TRIFFID | 統合(陸面過程) | ○○○ | <1時間 | × | イギリス |
| TURC | 物質循環 | ○○- | 1月 | fAPAR | アメリカ |
| TSUBIMO | 物質循環 | ○○○ | 1年 | × | 日本 |

表2 本プロジェクトで利用される陸域生態系モデルの概要

| モデル | 概要 |
|-----------|---|
| BAIM | 気象庁気象研究所で開発された陸面過程スキームであり、運動量・熱・水の物理的過程を高い精度で記述している。本来、大気モデルにおける地表近くの境界条件を与えるモデルであるため計算ステップは短く、低分解能の全球モデルでも30分程度、領域モデルでは数分単位で大気-陸面間の諸物理量および物質の交換を推定する。現在では、東アジアを対象とした気象庁領域モデルにおいて大気CO ₂ 濃度の時空間変動を再現している。 |
| Sim-CYCLE | 筑波大・地球フロンティア研究システムで開発された生物地球化学モデルであり、光合成から分解までの生態系内部の炭素動態を明示的に扱っている。計算時間ステップは、1日~1ヶ月と長いですが、生態系の成長過程を内蔵しているため、数十年以上の長期間積分に適する。現在は、5分メッシュ程度の高分解能でモンソーンアジア域を対象とした数値計算を行っている。 |
| TsuBiMo | 筑波大・国立環境研究所で開発された生物地球化学モデルであり、門司-佐伯の理論式を拡張して純生態系生産を求める。計算時間ステップは1年であり、温度・水分条件への応答は簡単な経験式によって評価される。現在は、大気CO ₂ 濃度上昇による生態系への施肥効果の評価や、森林施業に伴う正味炭素吸収量の推定を行っている。 |

グローバルスケールのモデル研究では、モデルの開発と検証への要求を満たすだけの長期・広域データが得られない事態はしばしば発生する。Rastetter (1996) はそのような場合の代替的モデル検証法を以下の4種類に分類して各々の利点と問題点を検討している。(1)短期データからの外挿、(2)時間と空間の置換、(3)過去の再現性、(4)モデル間の相互比較。陸域生態系炭素循環のモデル研究においては、内包する過程が多岐に及び、その時間的・空間的スケールが比較的大きいことから、少数の観測データと比較するよりもモデル間で多面的な相互比較を行うほうがモデルの特徴を明確化しやすいと考えられる。モデル相互比較を行う上での注意点としては、モデル構造に起因する差違点を明確化するために計算の設定条件と入力データを共通化する必要があることや、出力値の単位や比較項目・範囲を適切に選択することなどが挙げられる。

大気・海分野では、モデル比較がかなり体系的に実施されてきている（その多くはIGBP、特にIGBP-GAIM (現AIMES)に関連している：<http://gaim.unh.edu/Structure/Future/MIPs/index.html>)。例えば、

- ・ AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) : 大気大循環モデル (Gates 1992)
- ・ OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) : 海洋大循環モデル (パイロットフェーズ)
- ・ CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) : 大気-海洋結合大循環モデル (Meehl et al. 2000; Covey et al. 2003)
- ・ PMIP (Paleoclimate Model Intercomparison Project) : 気候モデルによる古気候再現などの例がある。これら大気-海洋物理モデルの相互比較研究では、天気予報のために作成された客観解析データを比較参照できるため、全球スケールでの検証が行いやすい。また、Cess et al. (1993)は、GCMによる同一大気CO₂増加シナリオを用いた温暖化予測のモデル間比較も行っている。さらに、領域モデルや陸面過程スキームに関するモデル間比較も行われている。

- ・ RMIP (Regional climate Model Intercomparison Project) : 領域モデル
- ・ PILPS (Project for Intercomparison of Landsurface Parameterization Schemes) : 陸面過程モデル (Pitman et al. 1999)
- ・ GSWP (Global Soil Wetness Project) : 陸面過程モデルにおける土壌水分 (Dirmeyer et al. 1999)

炭素循環分野では、物理気候モデルに比べてモデル開発の開始時期が遅かったことから、相互比較に関するプロジェクトもやや立ち後れている。しかし、大気・海洋の炭素循環に関しては次のような例がある。

- ・ OCMIP (Ocean Carbon-cycle Model Intercomparison Project) : 海洋炭素循環モデル (Dutay et al. 2002)
- ・ TRANSCOM (Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison) : 大気輸送拡散モデル・インバースモデル (Gurney et al. 2002)

一般に炭素循環分野では、観測網が張り巡らされている物理気候場と比べて観測データが少なく、モデル検証が難しいとされる。しかし、大気海洋領域では輸送と混合が盛んに起こるためデータの空間代表性が比較的大きく、さらに近年ではJGOFsやGLOBECといった国際プロジェクトによりデータ集積が進んでいることが、モデル研究の進展を促している。一方、陸域は前述のように空間的不均質性が大きく制御要因が複雑であり、陸域炭素循環モデルに関しては個々のモデルが開発

途上段階にあったため、複数モデル間差の解析研究例は多くない。これまでの研究例としては以下のようなものがある。

- ・ Potsdam NPP (Net Primary Production) : ドイツのポツダム気候研究所による純一次生産推定モデルの比較研究 (Cramer et al. 1999)。16モデルが参加し、NPPとその放射利用効率、水分依存性などが検討された。
- ・ EMDI (Ecosystem Data-Model Intercomparison) : 全球陸域炭素循環モデルに関するデータ間およびモデル間 (12種類) の相互比較研究。NPPに関する実測データを集成したデータベースの提供などを行った (Zheng et al. 2003)。
- ・ DGVM (Dynamic Global Vegetation Model) : 6種類の動的全球植生モデル (LPJ、IBIS、HYBRID、TRIFFID、SDGVM、VECODE) の相互比較が実施された (Cramer et al. 2001)。
- ・ McGuire et al. (2001)は、4種類の陸域生態系モデル (TEM、LPJ、HRVM、IBIS) を用いて20世紀中の地球環境変動に対する陸域炭素収支の応答を比較検討した。

対象領域を限定した研究も実施されている。

- ・ VEMAP (The Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project) : 北米地域における陸域生態系モデルの検証・相互比較研究 (VEMAP 1995; Schimel et al. 1997)。
- ・ CarboEuro : ヨーロッパ地域における総合的炭素収支研究であり、その一環としてフラックス観測サイトにおけるモデル相互比較が実施されている (Kramer et al. 2002)。
- ・ Ryan et al. (1996)は温帯-亜寒帯針葉樹林を対象として構築されたモデル間でコンパートメント構造の比較検討などを行った。

また、生態系 (炭素循環) 全般でなく、特定のプロセスに焦点を当てたモデル比較も少数ながら行われており、含蓄のある知見を提供している。

- ・ Pan et al. (1998)は、上記VEMAPに参加したモデルについて大気CO₂濃度上昇による光合成への施肥効果に関する各モデルのパラメタリゼーションを比較検討した。
- ・ Smith et al. (1997)は、IGBP-GCTEの一環として実施された土壤有機炭素研究 (SOMNET) において、土壤炭素動態モデルの相互比較を行った。土壤炭素はかなり長い時間スケールを持つが、英国ロザムステッド試験地における長期データを利用している。

この他にも、光合成生化学モデルや呼吸の温度依存性モデルなど、個別プロセスのパラメタリゼーションに関する研究例は多い。最近の新しい展開としては、世界の先進的な気候研究機関で開発されている地球システムモデル、特に気候-炭素循環結合モデルの相互比較が挙げられる。数年前までこのような結合モデルは、英国ハドレーセンターとフランスのラプラス研究所の開発例があるに過ぎなかったが、近年では多数の機関が参入するに至っている (国内では地球環境フロンティア研究センターや気象研究所)。ハドレーセンターとラプラス研究所の結合モデルの相互比較は既に実施されているが (Friedlingstein et al. 2003)、それらは陸域炭素収支の気候に対するフィードバック効果に関して相当に異なる推定を与えることが示されている。そのため、このような気候-炭素循環結合モデルの相互比較を行うことで、モデルの不確定性を低減させていく必要性が強く認識されている。実際、

- ・ C4MIP (Coupled Climate and Carbon Cycle Model Intercomparison Project) : 気候-炭素循環結合モデル (Rayner 2001; Friedlingstein et al. in press)

が実施中であり、第四次IPCC報告書への貢献を目指した作業が進められている。

グローバル炭素プロジェクト（GCP）においても、モデル相互比較の推進は重要課題の1つと考えられる。近年のプロセス研究の成果に基づいて光合成や呼吸・分解に関する新しい定式化が提唱されているが、それらは従来の定式化と置換することで出力にどの程度の差が生じるかが評価されるべきである。加えて、現在の研究では入力データの違いが推定結果に重大な影響を与えている可能性があるが、Ito and Sasai (submitted)では、3種類の気候データを入力データに使用したモデル計算結果の詳細な比較検討を行っている。その結果は、入力データ、特に日射データの精度が炭素収支の推定結果を大きく左右することを示唆しており、高精度データ整備の重要性を示していた。また、最近では植生動態を組み入れた新しいタイプの生態系モデル（DGVM；動的全球植生モデル）が構築されており、それらを含めた相互比較も新しい知見を提供しうる（一部はCramer et al. (2001)で試みられている）。より緊要な課題としては、最新の衛星リモートセンシングデータ（MODISなど）やフラックス観測データを参照データとするモデル間相互比較が挙げられる。これら衛星・フラックス観測によるデータは、今後増加の一途を辿ると考えられ、それらをモデル研究でどう活用するかを慎重かつ早急に検討しておく必要がある。京都議定書における森林炭素吸収源の問題とも関連して、陸域生態系モデルは刻々と取得される観測結果を連続的に反映していく一種のデータ同化システムに発展していく可能性が高い。つまり、衛星による植生指数やフラックス観測点における正味収支データを取り入れた初期条件を作成し、その状態からモデルシミュレーションを行うことで高精度の予測を行うものである。このようなシステムを構築する上で、既存モデルの特性を相互比較によって明らかにしておく意義は大きい。

（2）自然—社会システム統合型モデルの国際比較

GCPつくば国際オフィスにおけるモデル比較プロジェクトは、「炭素-気候-人間システム統合モデル」の構築という非常に高度な目標に対して、最も完成度が高いモデルを選出することを目的とし、モデル及びモデル要素の比較を行うものである。本報告ではモデル比較プロジェクトに関して、これまでに得られた知見について紹介する。

1) モデル比較

a. モデル特徴の定義

モデル化の手法は文字通り何千通りも存在する。ここでいうモデルとは、概念的なモデルから経験的モデルまで幅広く網羅する。今回の目的に対しては、炭素-気候-人間システムが完全に統合された理想的なモデルとは、相互作用する炭素・気候・人間システムの3つのコンパートメントを含み、ローカルスケールからグローバルスケールを網羅する物である。

表3 形式化されたモデルタイプ

| Type | Purpose | Scale | Approach |
|------|-------------------------------|----------|-----------------|
| I | Understanding the Big Picture | Global | Conceptual |
| II | Setting Regional Policy | Regional | Weighted Ratios |
| III | Monitoring Progress | Local | Empirical Data |

表3はモデルタイプの形式化についてまとめたものである。それぞれの目的に応じて、異なったタイプのモデルが有用となる。現状では、意志決定機関が炭素収支や炭素管理に対して信頼でき

る程度の都市・地域スケールモデル作成には至っていない状況である。とはいえ、科学的な計測手法や、人為起源排出の温暖化ガスを含む地球規模の炭素循環に対する理解の進歩を考慮しつつ、都市・地域スケールモデル作成という最終目標に向かって、GCPの国際共同研究活動として検討が本プロジェクト終了後も継続する予定である。

b. 比較に用いたモデルの選別

モデル比較プロジェクトの対象となるモデルを選出するため、GCPサイエンスフレームワーク(2003)で取り上げられたモデルのみならず、様々なモデルの文献調査からはじめた。炭素循環ダイナミクスと人間系に関係する200以上のモデルをリストした。また、POETICsフレームワークを用いた、いわゆる人間系を扱うモデルについての評価も同時にまとめた。

c. モデル特徴の評価： 点数化と重み付け

炭素・気候・人間系の3つのコンパートメントをそれぞれ図1および図2に示す包含表に基づき10のサブコンパートメントに分割し、調査対象としたモデルに含まれるサブコンパートメントの数で3コンパートメントの点数化を行った。この比較の分析の結果は、結果の検証とコメントを目的とし、モデルの作成者にフィードバックされている。

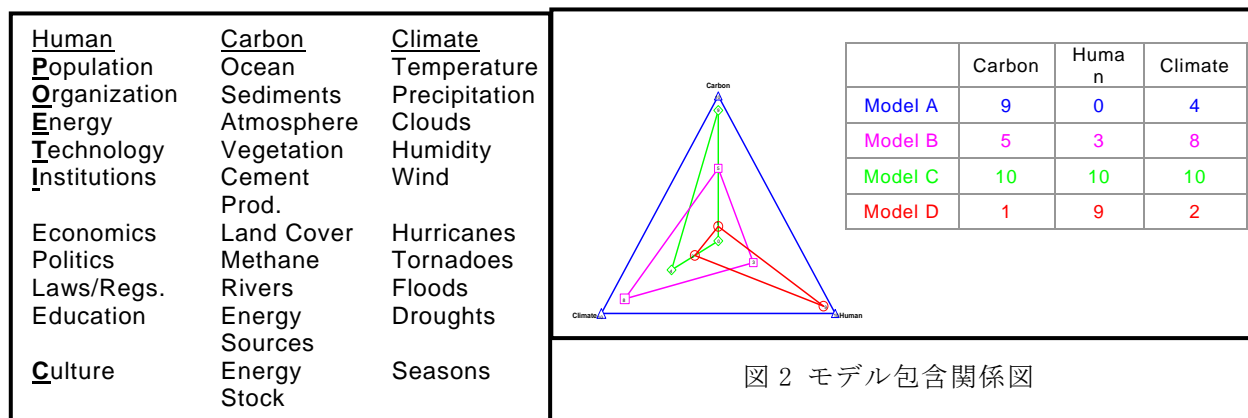


図2 モデル包含関係図

図1 提案した包含表

2) 炭素循環—人間系統合モデルの分類

炭素循環と人間系とに関係がある200以上のモデルからなるモデル分類表を作成した。モデルとしては、Simple Light Interception Modelのような森林キャノピーレベルを計算する比較的範囲が限定されたモデルからTARGETS (Tool to Assess Regional and Global Environmental and Health Targets for Sustainability) モデルのような環境や人間の健康への影響についての持続可能性を評価するようなサブモデルを統合したモデルまで広範を網羅する。これらのモデルはタイトル、著者、作成日、修正日、最終確認の順番でリストアップしてある。それぞれのモデルに関する簡単な記述、すなわち、手法やアプローチ、タイプ（理論的、ダイナミクス、統合型、経験則、シミュレーションなど）、キーワード、さらにはPOETICsワークフレームに基づいて、人間系に含まれる人口・組織・エネルギー・技術・機関・文化の6項目の包含を調査した。

調査結果

次項目以降、炭素-気候-人間系統合モデルのために適切な要素を有する理想的なモデルを提示する。複数のコンセプトモデルの概観から始め、次に世界中のモデルについても評価を行った。

a. コンセプトモデル

Sabineら（2004）が行った炭素循環と人間活動に関する研究では、人為起源以前の炭素ストックやフラックス、さらには人間活動に起因するそれらの攪乱を示している。さらには、1980年～2000年の年間変動の平均についても示している。しかし、このモデルでは気候コンパートメントは内包されていない。

GCP Conceptual Framework（2003）では、異なるシステムである人為攪乱と非人為攪乱の両者を含むシステムについて概観し、グローバルスケールの炭素循環を気候の不確実性と関連づけることを目指している。この研究では、気候変化と不確実性の社会的な理解力がすすむことで、化石燃料による排出や炭素隔離に影響を与える産業、輸送、土地利用形態に見られる産業構造や技術の変化につながるであろうことを示唆している。

Lebel（2004）は、グローバル炭素循環に影響を与える社会構造とプロセスの理解を試みた。この場合、炭素と気候のコンパートメントは規定されていない。これはCanan（2005）によるURCMコンセプトも同様である。

両方の取り組みを通じて、いまだ定義が未確定な要素が多く含まれるが、これまでは未知の領域であった人間系モデルへの最初の一步になる。

b. 経験モデル

経験モデルは、エネルギーセクターなど特定のセクターに焦点を当てたもの、特定の気候帯に焦点を当てたもの（例えば地域気候変化についてのDICEモデルなど）から、Asia Pacific Integrated Model (AIM) のような複数のサブモデルと3200変数を持ち、外生的な社会経済シナリオを基準としたエネルギー利用のレベルやタイプを計算するものまで広範を網羅する。

CONSTRUCTモデルは、グループや組織を複雑システムとしてモデル化し、人間や組織の要素についての不確実性を捉えることを目的としたモデルである。このモデルはカーネギー・メロン大学のCenter for the Integrated Study of the Human Dimensions of Global Change (CIC-HDGC: 地球プロジェクトの人間の側面に関する統合研究センター) で構築された幾つかの経験モデルのうちの一つである。このモデルは、マルチエージェント、非線型のブロックモデルで構成されていて、各ブロックはより多くの複雑性と機能性を加える前に十分なテストが行われている。

c. 点数化の方法

モデル比較における点数化の方法は、モデル構成要素、モデリングの方法、およびそれらの有用性を考慮する。モデルあるいはそれらの構成要素のうち、何がグローバル炭素循環に関連する科学と政策の両方に最も役立つかを知ることに加えて、我々はモデル構成要素について都市・地域レベルでのGCP人間系POETICアプローチとのリンクも試みている。モデルの点数化が行われた後、炭素-気候-人間系についての包含関係に焦点を当てた各モデルの特徴解析を実施した。

3) まとめ

- a. 現在までの研究成果を基に、モデル比較研究プロジェクトはすでに「モデリング共同体」との協議を通じた新たな方向性を定める準備が出来ている。協議は特定の予想される結果、比較のためのモデル選別についての基礎理解、モデル評価のための操作上の定義を含む。
- b. 地域の炭素収支の合計が、グローバルな炭素循環につながるため、信頼性が高い炭素-気候-人間系統合モデルは、炭素管理に一層役立つこととなる。高精度で炭素収支を求めることができるようになり、そしてトップダウン、ボトムアップによる炭素収支計測の精度向上が進むことにより、このような状況がこれまで以上に構築しうる状況にある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

陸域炭素収支のモデル間の整合性を確認するためには、モデルへの入力情報の基盤を整備する必要がある。グローバルカーボンプロジェクト（GCP）に関する国際共同研究の一環として、統合的なモデル研究の基盤となる陸域生態系モデルの比較検討がなされた。特に、モデルの比較検討への準備としてデータベース構築の方針に関する検討を実施するとともに、国内外のモデルの比較を実施した。また、サブテーマ1の国内3モデルの比較分析とも連携し、国際モデル相互比較に関する現状のレビューと、今後のモデル国際比較の実施方向に関する検討を実施した。人間活動を統合した陸域炭素収支・炭素管理に関係する国際モデル比較を実施することで、サブテーマにおけるモデル開発研究に貢献した。本課題では、グローバルカーボンプロジェクト（GCP）に関する国際共同研究として、統合的なモデル研究の基盤となる自然-社会システム統合モデルの比較検討を実施され、国際的なモデルデータベースのプロトタイプが構築された。GCPの研究目的は、(1) 全球炭素循環に関する統合地球系科学にいわゆる「人間的次元」を組み込むこと、(2) 炭素循環経路への介入可能機会を特定し、定量化すること、(3) 炭素管理について、政策上も妥当な科学的ツールおよび方法を開発すること、(4) 日本国内の炭素循環プログラムを支援すること、である。これらを遂行する上で、モデル比較プロジェクトはGCPつくば国際オフィスの活動の重要な活動のひとつである。GCPでは、まずモデル比較コーディング体系を構築したうえで、全球炭素循環の動態と関連性がある約200の定量モデルと30の概念モデルを特定した。コーディングシステムをこれらのモデルに適用して比較分析を実施した。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究の成果に基づいてIPCC報告書「土地利用・土地利用変化・林業インベントリーに関するグッドプラクティスガイダンス」の作成に際して、モデルによる検証の章の執筆に参加した。

また、本研究の炭素循環の総括的な知見に基づいて、IPCC第4次評価報告書、IPCC (2007) *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridgeの第7章の執筆に貢献した。

6. 引用文献

- 1) Covey, C., AchutaRao, K. M., Cubasch, U., Jones, P., Lambert, S. J., Mann, M. E., Phillips,

- T. J. and Taylor, K. E. : Global and Planetary Change, 37, 103-133 (2003)
 "An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project"
- 2) Cramer, W., Kicklighter, D.W., Bondeau, A., Moore, B. I., Churkina, G., Nemry, B., Ruimy, A. Schloss, A.L. and Potsdam: Global Change Biology, 5 (Suppl.1), 1-15 (1999)
 "Comparing global NPP models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results"
- 3) Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, V., Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J. A., Friend, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A. and Young-Molling, C. : Global Change Biology, 7, 357-373 (2001)
 "Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models"
- 4) Gurney, K. R., Law, R. M., Denning, A. S., Rayner, P. J., Baker, D., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.-H., Ciais, P., Fan, S., Fung, I. Y., Gloor, M., Heimann, M., Higuchi, K., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Peylin, P., Prather, M., Taguchi, S., Takahashi, T. and Yuen, C.-W. : Nature, 415, 626-630 (2002)
 "Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models"
- 5) Kramer, K., Leinonen, K. I., Bartelink, H. H., Berbigier, P., Borghetti, M., Bernhofer, C., Cienciala, E., Dolman, A. J., Froer, O., Gracia, C. A., Granier, A., Grünwald, T., Hari, P., Jans, W., Kellomäki, S., Loustau, D., Magnani, F., Markkanen, T., Matteucci, G., Mohren, G. M., Moors, E., Nissinen, A., Peltola, H., Sabaté, S., Sanchez, A., Sontag, M., Valentini, R. and Vesala, T. : Global Change Biology, 8, 213-230 (2002)
 "Evaluation of six process-based forest growth models using eddy-covariance measurements of CO₂ and H₂O fluxes at six forest sites in Europe"
- 6) McGuire, A. D., Sitch, S., Clein, J. S., Dargaville, R., Esser, G., Foley, J., Heimann, M., Joos, F., Kaplan, J., Kicklighter, D. W., Meier, R. A., Melillo, J. M., Moore, B. I., Williams, L. J. and Wittenberg, U. : Global Biogeochemical Cycles, 15, 183-206 (2001)
 "Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analysis of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models"
- 7) Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M. and Stouffer, R. J. : Bulletin of the American Meteorological Society, 81, 313-318 (2000)
 "The coupled model intercomparison project (CMIP)"
- 8) Pan, Y., Melillo, J. M., McGuire, A. D., Kicklighter, D. W., Pitelka, L. F., Hibbard, K., Pierce, L. L., Running, S. W., Ojima, D. S., Parton, W. J., Schimel, D. S. and members, O. V. : Oecologia, 114, 389-404 (1998)
 "Modeled responses of terrestrial ecosystems to elevated atmospheric CO₂: a comparison of simulations by the biogeochemistry models of the Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project (VEMAP)"

- 9) Rastetter, E.B. : BioScience, 46, 190-198 (1996)
 “Validating models of ecosystem responses to global change: How can we best assess models of long-term global change?”
- 10) Rayner, P. : RESEARCH GAIM, 8-12 (2001)
 “‘Flying Leap’ becomes C4MIP”
- 11) Ryan, M.G., Hunt Jr, E.R., McMurtrie, R.E., Agren, G.I., Aber, J.D., Friend, A.D., Rastetter, E.B., Pulliam, W.M., Raison, R.J. and Linder, S. : Comparing models of ecosystem function for temperate conifer forests. I. Model description and validation. In: A.I. Breymeyer, D.O. Hall, J.M. Melillo and G.I. Agren (Editors): John Wiley & Sons, New York, 313-362 (1996)
 “Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands”
- 12) Zheng, D., Prince, S. and Wright, R. : Global Change Biology, 9, 46-64 (2003)
 “Terrestrial net primary production estimates for 0.5° grid cells from field observations - a contribution to global biogeochemical modeling”
- 13) Ito, A., and T. Sasai. (submitted)
 “A comparison of simulation results from two terrestrial carbon cycle models using three climate datasets”
- 14) 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. : Journal of Climate (in press)
 “Climate-carbon cycle feedback analysis, results from the C4MIP model intercomparison”
- 15) Canan, Penelope. : Journal of Climate (2005)
 “Urban and Regional Carbon Management An Initiative under Theme 3 of the Science Framework of the Global Carbon Project. X”
- 16) Global Carbon Project. : Earth System Science Partnership (IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS) Report No. 1; Global Carbon Project Report No. 1. Canberra: GCP (2003)
 “Science Framework and Implementation”
- 17) Lebel, Louis. : Washington: Island Press, 371-382 (2004)
 “The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World.”
- 18) Sabine, Christopher L. et al. : Washington: Island Press, 17-44 (2004)
 “The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World”

7. 国際共同研究等の状況

本研究は、GCPつくば国際オフィスとGCPキャンベラ国際オフィスにおける国際オフィス活動の一環として、国際共同研究として実施された。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

〈学術誌 (査読あり)〉

- 1) Canadell J, Ciais P, Cox P, Heimann P: Climatic Change, 67, 145-146 (2004)
“Quantifying Terrestrial Carbon Sinks”
- 2) Canadell J: Science in China 45 Supp, 1-9 (2002)
“Land use effects on terrestrial carbon sources and sinks”
- 3) Canadell J, Steffen W, White PS: IGBP/GCTE Terrestrial Transects, Journal Vegetation Science 13, 297-448 (2002)
“Dynamics of terrestrial ecosystems under environmental change”
- 4) Canadell JG, Kirschbaum MUE, Kurz WA, Schlamadinger B, Yamagata Y: Environmental Science and Policy (In press) (2007)
“Factoring out natural, indirect and direct human effects on terrestrial greenhouse gas sources and sinks”
- 5) Canadell JG, Pataki D, Gifford RM, Houghton R, Luo YQ, Raupach MR, Smith P, Steffen W: Canadell JG, Pataki D, Pitelka L (eds) Terrestrial Ecosystems in a Changing World. The IGBP Series, Springer-Verlag, Berlin, 59-78 (2007)
“Saturation of the terrestrial carbon sink”
- 6) Raupach MR, Marland G, Ciais P, Le Quere C, Canadell JG, Klepper G, Field CB: Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. (In Press) (2007)
“Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions.”

〈学術誌 (査読なし)〉

- 1) Ito A., Mabuchi K., Alexandrov G. A., Yamagata Y., Kohyama T., and Oikawa T.: Contribution from ‘The Integrated Study for Terrestrial Carbon Management of Asia in the 21st Century Based on Scientific Advancements’. Report Series in Aerosol Science 62A-1, 175-180 (2003)
“Model analyses of atmosphere-biosphere exchange at various spatial scales”
- 2) Canadell J, Pataki D: Trends in Ecology and Evolution 17, 156-158 (2002)
“New advances in carbon cycle research”

〈書籍〉

- 1) Raupach M, Canadell JG, Bakker D, Ciais P, Sanz M-J, Fang JY, Melillo J, Romero-Lankao P, Sathaye J, Schulze D, Smith P, Tschirley J: The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World”, Field C, Raupach M (Eds.). Washington D.C. (2004)
“Interactions between CO₂ stabilization pathways and requirements for a sustainable earth system”
- 2) Raupach MR, Canadell JG: Dolman AJ, Valentini R, Freibauer A (eds) Observing the Continental Scale Greenhouse Gas Balance of Europe. Springer, Berlin, (2007)
“Observing a vulnerable carbon cycle”

<報告書類等>

- 1) Canadell J, Dickinson R, Hibbard K, Raupach M, Young O: ESSP Report No. 1, GCP Report No. 1, Canberra, pp. 64 (2003)
 “Global Carbon Project. The Science Framework and Implementation”
- 2) Canan P, Hartman M: MeREM Project Report(IV), pp. 223 (2005)
- 3) Proceedings on the 1st International Workshop on Social Network Theory and Methodology: Applications to Urban and Regional Carbon Management. GCP Report No. 2, Tsukuba, pp. 129.
- (2) 口頭発表
 - 1) Ito A., Mabuchi K., Alexandrov G. A., Yamagata Y., Kohyama T., and Oikawa T. :
 International Open Science Conference Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study (ILEAPS) Helsinki (2003)
 “Model analyses of atmosphere-biosphere exchange at various spatial scales: Contribution from 'The Integrated Study for Terrestrial Carbon Management of Asia in the 21st Century Based on Scientific Advancements”
 - 2) Canan P. : TransCOM Annual Meeting, Tsukuba (2004)
 “Global Carbon Project”
 - 3) Canan P. : GCP Seminar. Tsukuba (2004)
 “Fostering Expert Networks to Integrate Science and Policy”
 - 4) Canan P. : ASA Workshop on Governance of New Emerging and Technological Risks, San Francisco (2004)
 “Risk, the ESSP, and Carbon Cycle Science”
 - 5) Canan P. : GCP Seminar, Tsukuba (2004)
 “Economic Models of Climate Change: A Critique by S. J. De Canio”
 - 6) Canan P. : International Workshop on Sustainable Production-Consumption Systems: Research Frontiers, Chiang Mai (2004)
 “Expert Networks as Global Environmental Governance”
 - 7) Canan P. : Plant Responses to Air Pollution & Global Changes, 6th International Symposium. Tsukuba (2004)
 “Global Carbon Project: International Research Strategy”
 - 8) Canan P. : GCP Seminar, Tsukuba (2004)
 “Earth System Science for Urban and Regional Carbon Management - RC6”
 - 9) Canan P. : Yamagata and Colorado Symposium on Global Warming, Yamagata (2004)
 “Global Warming, the Carbon Cycle and You”
 - 10) Canan P. : The Ties That Count. ICOLP Clan. Tokyo. (2005)
 “Ozone Connections”
 - 11) Canan P. : The 4th Meeting of Research Coordination Committee of the Asia-Pacific Environmental Innovation Strategy Project, Tsukuba (2005)
 “Global Carbon Project”

- 12) Canan P. : GCP Networks Conference, Tsukuba (2005)
“GCP RC6 Initiative.”
- 13) Canan P. : United Nations University - IAS, (2005)
“The Link between Urbanization and the Global Carbon Cycle”
- 14) Canan P. : University of Central Florida, Florida, (2005)
“Stepping Up to the Plate. Department of Sociology”
- 15) Canan P. : Synergies Among Universities, Institutes, and Laboratories for Carbon Management , Colorado, (2005)
“Social and Economics Impacts Group & IGBP Office, National Center for Atmospheric Research”
- 16) Canan P. : ScieJournalism Forum and Workshop, Tokyo (2005)
“Global Warming and the POETICs of Regional Carbon Management”
- 17) Canan P. : Division of Technology, Industry and Economics, United Nations Environment Programme, Paris (2005)
“Interorganizational Network Effectiveness in Implementing Global Agreements”
- 18) Canan P. : GCP Science Steering Committee, Paris, (2005)
“GCP- Tsukuba IPO”
- 19) Canan P., Canadell P. : GCP Science Steering Committee, Paris (2005)
“The Global Carbon Project: Integrating Humans, Climate and the Natural World _ Progress Report”
- 20) Scholz S. : Japan American Sociology, Hokkaido (2005)
“Knitting Biomass Energy Networks through a Public participation Geographic Information System “
- 21) Canan P. : American Sociological Association, Philadelphia (2005)
“Sociological Work, Global Warming and Climate Chang”
- 22) Canan P. : American Sociological Association, Philadelphia (2005)
“Leadership in Networks”
- 23) Scholz S. : American Sociological Association, Philadelphia (2005)
“Urban and Regional Carbon Management: Initial Approaches and Examples”
- 24) Alexandrov G., Canan P. : Asia Flux Workshop, Fujiyoshida (2005)
“Towards Regional Carbon Balance and Management”
- 25) Canan P. : IHDP Open Science Meeting, Bonn (2005)
“The Global Carbon Project -Earth System Science Joint Project for Sustainability”
- 26) Canan P., Elizabeth L. Malone: Increasing Social Science Content in Integrated Assessment Models, Bonn (2005)
“IHDP Open Science Meeting”
- 27) Scholz S. : IHDP Open Science Meeting, Bonn (2005)
“Linking Urban and Regional Carbon Management: Biomass Power Networks in Hokkaido, Japan”

- 28) Canan P. : 11th Japan-US Workshop on Global Change, Yokohama (2005)
“The Global Carbon Project: Earth System Science Joint Project for Sustainability”
- 29) Canan P. : MeREM Workshop. Long Xuyen, Vietnam (2005)
“Science-Journalism Collaboration: An Experiment in Closing the Communication Gap”