

ESSP Report No.1

GCP Report No.1



グローバル カーボン プロジェクト



全球炭素循環に関する
国際研究のための枠組み



グローバルカーボンプロジェクト

科学的枠組みと研究実施計画

編者：

Josep G. Canadell, Robert Dickinson,
Kathy Hibbard, Michael Raupach & Oran Young

GCP 運営委員会：

Michael Apps, Alain Chedin, Chen-Tung Arthur Chen, Peter Cox, Robert Dickinson, Ellen R.M. Druffel,
Christopher Field, Patricia Romero Lankao, Louis Lebel, Anand Patwardhan, Michael Raupach,
Monika Rhein, Christopher Sabine, Riccardo Valentini, Yoshiki Yamagata, Oran Young

本レポートは下記の通り引用してください

Global Carbon Project (2003) Science Framework and Implementation. Earth System Science Partnership (IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS) Report No. 1; Global Carbon Project Report No. 1, 69pp, Canberra.

日本語訳からの引用である場合は

GCP つくば国際オフィス監訳 (2006、CGER-D035-2006)

表紙写真は下記の方の提供です：

森林火災：Brian Stocks、煙突：www.freephoto.com、海洋：Christopher Sabine

はじめに

『GCP の科学的枠組みおよび研究実施計画』を出版するとともに、ESSP(Earth System Science Partnership) レポートシリーズを創刊できたことを大変うれしく思います。このレポートは、国際的な地球変動研究における新しい時代の幕開けとなるとともに、これまでとは違った炭素循環への取り組みの出発点となります。DIVERSITAS、IGBP、IHDP、WCRP の 4 つの地球変動プログラムから構成される ESSP は、地球システム、地球システムの変化、そして変化が地球の持続可能性に与える影響について統括的に研究するために設立されました。GCP は、食糧システム・水資源・健康など他の ESSP プロジェクトと共に、地球変動に関する基礎研究と、人々にとって極めて重要な問題である地球システムの研究とを関連づけることを目指しています。

従来の炭素循環研究は、エネルギーシステムに関する研究とは独立に行われ、炭素の吸収・排出の生物物理学的パターンとプロセスだけに焦点が当てられるのが常でした。GCP では、この現状から以下のようにして前進して行きます。まず第 1 に炭素循環の問題を「人間活動の側面と自然活動の側面を統合」して捉えます。単に生物物理学的な炭素循環として捉えるのではなく炭素 - 気候 - 人間システム（化石燃料に基づくエネルギーシステム + 生物物理学的炭素循環 + 物理気候システム）として捉えるのです。第 2 に、総合的な炭素循環を分析・モデリングする新たな手法の開発をプロジェクトの中心課題とします。第 3 に、世界中で行われている国家レベル・地域レベルでの炭素循環研究計画を調整・統合するための、整合性の取れた枠組みをつくります。第 4 に、大気中二酸化炭素濃度を安定化させるためのマネジメント戦略や持続可能な地域開発のような直接政策に関わる課題に取り組みます。最後に、発展途上地域において工業部門とエネルギー部門および経済発展と資源管理部門の協働を模索しつつ地球変動研究プロジェクトでの従来の利害関係者の枠を越えていきます。

私たちは、少なくともこの先 10 年間、本レポートが、炭素循環研究を力づけ、促進し、形作るのに寄与するものと確信しています。さらに、エネルギーシステム

を変える挑戦と、全球炭素循環のマネジメントをより効果的に行うための知識基盤の枠組みを提供しているものと確信しています。

Michel Loreau
Chair, DIVERSITAS

Anne Larigauderie
Executive Director, DIVERSITAS

Guy Brasseur
Chair, IGBP

Will Steffen
Executive Director, IGBP

Coleen Vogel
Chair, IHDP

Barbara Göbel
Executive Director, IHDP

Peter Lemke
Chair, WCRP

David Carson
Director, WCRP

目次

はじめに	iii
目次	1
要旨	3
1. 序論	6
カーボン・チャレンジ	6
ビジョン	9
指針とアプローチ	10
2. 研究課題	11
テーマ1：パターンと変動性	11
研究の必要性	11
知的基盤	11
現在の研究	11
不確実分野と研究の優先順位	20
テーマ2：プロセスと相互作用	21
研究の必要性	21
知的基盤	21
現在の研究	23
不確実分野と研究の優先順位	27
テーマ3：炭素管理	29
研究の必要性	29
知的基盤	29
現在の研究	30
不確実分野と研究の優先順位	33
3. 研究実施計画	35
テーマ1：パターンと変動性	35
研究活動 1.1：主要な炭素貯蔵量とフラックスの観測の強化	35
タスク 1.1.1：陸域、海洋、大気、人類圏における炭素貯蔵量とフラックスの計測の調整と標準化	36
タスク 1.1.2：河川輸送、大気輸送および貿易による炭素の水平方向輸送の観測	36
タスク 1.1.3：その他の関連する炭素化合物の観測	38
研究活動 1.2：モデル開発とモデルデータ融合	39
タスク 1.2.1：フォワードモデルおよびインバースモデルの改良	39
タスク 1.2.2：モデルデータ融合技術の開発	40
研究活動 1.3：国、地域および区域における総合炭素収支	40
タスク 1.3.1：地域スケールおよび流域スケールにおける総合炭素収支（貯蔵量、貯蔵量とフラックスの変化）推計のための標準化された方法の開発	41

タスク 1.3.2：地域スケールおよび流域スケールの炭素収支の時間変動の追跡と予測のために開発中の 方法論	41
タスク 1.3.3：炭素循環における人為的变化の地理的または分野的な分析	41
テーマ2：プロセスと相互作用	42
研究活動 2.1：炭素貯蔵量とフラックスを制御する機構とフィードバック	42
タスク 2.1.1：海洋炭素ダイナミクスの機構に関する総合研究	42
タスク 2.1.2：陸域炭素ダイナミクスの機構に関する総合研究	43
タスク 2.1.3：人為的炭素排出に関する総合研究	43
研究活動 2.2：炭素－気候統合システムの創発的特性	43
研究活動 2.3：炭素－気候－人間統合システムの創発的特性	44
テーマ3：炭素管理	45
研究活動 3.1：介入ポイントを明らかにすることとミティゲーションオプションの評価	45
タスク 3.1.1：陸域および海洋での炭素交換における介入ポイント	45
タスク 3.1.2：化石燃料排出における介入のポイント	46
タスク 3.1.3：介入ポイントとしての消費パターン	46
研究活動 3.2：全球システムにおける炭素管理	47
タスク 3.2.1：総合ミティゲーション設計の枠組み	47
タスク 3.2.2：ミティゲーションオプションの動的ポートフォリオの設計	47
タスク 3.2.3：炭素管理制度の設計	48
研究活動 3.3：地域開発と炭素の因果関係	48
タスク 3.3.1：開発の要因と炭素変化	49
タスク 3.3.2：炭素管理オプションと将来シナリオ	50
統合とコミュニケーション	50
能力強化（キャパシティビルディング）	51
タイムテーブル	51
マネジメント体制と実行	51
4. 謝辞	54
5. 引用文献	56
6. 付録	61
7. 略語一覧	73

要旨

変化する炭素循環

炭素循環は地球システムの中核であり、気候、水循環、栄養塩循環、そして陸上および海洋における光合成によるバイオマスの生成と密接に関係しています。全球炭素循環を適切に理解することが、地球および人類の環境の変遷を理解し、将来を予測するのに必要不可欠です。

人類は何千年にもわたって全球炭素循環へ介入してきました。しかし、全球炭素循環の中で、人為的な炭素フラックスが主要な自然の炭素フラックスに量的に拮抗するようになったのは、この2世紀のことであり、その影響もたらす脅威に気づいて、協働して取り組むようになったのは、20世紀も終わりになってからです。人類が地球環境のマネジメントに挑戦し始めたということは、地球システムの未来に大きな影響を与える全球炭素循環に新たなフィードバックを加えることとなります。

GCP (the Global Carbon Project)

炭素循環が地球システム全体との繋がりの中でどのように変化しているのかを、人的要素を伴ったフィードバックも含めて観測し(定量化)、理解し(特性解明)、そして将来どのようになるか予測するという科学の挑戦を行います。それには専門分野や地理的条件を超えた、そして特に炭素循環で炭素-気候-人間システムを統合する、新たないくつかの科学的アプローチとそれらの融合が必要です。

この実現のためIGBP、IHDP、WCRPの3つの国際的な地球環境変化研究プログラムが設立したのがGCPです。本レポートは、研究の枠組みとその研究実施計画の概要を示すものであり、自然科学・社会科学の多数の専門分野を含む主要な調査機関や政策立案者にお読みいただくためのものです。

科学の課題

GCPの到達点は、自然的側面・人為的側面およびその相互作用を含む全球炭素循環を、包括的に政策に関連して理解することにあります。以下の3課題の解明により達成します。

1. パターンと変動性
現在の全球炭素循環における主な炭素ストックとフラックスの時空間的分布。
2. プロセスと相互作用
炭素循環のダイナミクスを決めている、人為的およびそれ以外の制御とフィードバック機構。
3. 炭素管理
将来予想される炭素-気候-人間システムのダイナミクスと、このシステムを人間社会が管理するための介入方法およびタイミング。

研究実施計画

GCPは、国レベルおよび国際的な炭素関連研究プログラムと資金提供機関との協働努力を通じ、また解明が困難で、高度に学際的な目処をつけるのには3~5年かかる、新しい研究イニシアチブをいくつか主導することを通じて、研究活動を実施していきます。研究実施計画は3つの科学の課題に沿って策定されています。

テーマ1: パターンと変動性

新規の分野別・地域別の炭素収支データの収集およびモデル-データ融合手法の開発により現在の主要炭素ストックとフラックスの定量的な時空間的な分布を求めます。

- 主要炭素貯蔵量とフラックス
共通プロトコルの作成、データの共有、アプリケーションや技術に関する最新情報の迅速な伝達、共同プロジェクトでのリソースの活用等の促進により、地域および国家レベルの炭素循環プログラムを国際的な協調のもとで支援・強化します。
- モデル-データ融合
炭素循環のパターンと変動を決定する問題への多制約(大気・海洋・陸域のデータとモデルの同時利用)の適用に重点を置いて大気、海洋、陸域データを炭素-気候-人間システムモデルに取り入れる手法を開発し使用します。
- 包括的な国家・地域・流域の炭素収支
国家、地域および流域スケールの炭素収支に対する現行アプローチをハーモナイズし、地域間での炭素収支を比較可能とします。

テーマ2: プロセスと相互作用

炭素－気候－人間システムの要素相互間の相互作用機構とフィードバックの理解に重点を置いて、自然および人間活動起因の炭素の吸収・排出源が何で制御されるか、また、空間的に明らかな原因と影響について理解を深めるため、新たな研究とその統合を促進します。

- 炭素貯蔵量とフラックスの制御機構とフィードバック吸収・排出機構（複数）と相対的な重要度、相互作用の効果を明らかにするための研究を促進し統合していきます。炭素システムのプロセスが個別に、また集合的にどう作用するのかも明らかにします。
- 炭素－気候統合システムで出現し得る特性擾乱をうけた炭素循環を相互作用する要素として含む炭素－気候システムにおいて出現する付加的な特性を、特に、閾値や不安定性、予期しない特性が現れるかどうかに重点を置いて研究します。
- 炭素－気候－人間統合システムで出現し得る特性炭素循環の物理学的、生物化学的、人的要素のモデル（量的または質的）の統合に関する学際的な研究を開始し、全てのサブシステムが連動したときに現れる新しい挙動を解明します。より詳細な予測ツールとより概念を深めた枠組みの開発も促進します。

テーマ3: 炭素管理

炭素－気候－人間統合システムの進行を制御するための炭素循環への介入と時機について定量的に明らかにします。

- 炭素管理の実施時機とミティゲーションオプション
将来の炭素循環の変動に影響を及ぼせる決定的な炭素管理実施時機を明らかにし評価すると共に、ひとたび持続可能な発展が考慮された場合（経済、社会、環境のトリプルボトムライン）の、ミティゲーションオプションの達成可能性を詳細に評価します。
- 地球システムにおける炭素管理
システム全体の分析の中で、ミティゲーションオプション（複数）の最適な組み合わせを評価する枠組みを開発、特定地域の炭素ミティゲーションオプションの動的なポートフォリオを設計し、炭素管理に適した制度を分析・設計します。
- 地域開発の発展経路と炭素収支への影響
 - ・ 地域における発展経路の違いが炭素貯蔵量とフラックスへ及ぼす影響
 - ・ 地域開発で、炭素へ及ぼす影響の程度が大きく異なる重要なプロセスと相互作用

- ・ 炭素貯蔵量およびフラックスの変化と、食糧・水・清浄な空気の供給、生物多様性保全といった他の生態系サービスとの間のトレードオフと相乗効果を解明するため、一連の地域のケーススタディを比較分析します。

統合とコミュニケーション

GCP は研究者および評価者に向け、炭素循環に関して情報を高度に統合化して提供します。政策立案者、教育者、一般市民向けに、文書や Web 上で情報発信し、さらに多方面の利用者に向けて共通の理解を促進し、共通の言葉で話せるよう、特別の資料を作成する予定です。

能力強化（キャパシティビルディング）

GCP は、主な研究テーマと連動して様々な能力強化活動を展開し、炭素－気候－人間システムに関する高度に学際的なトピックスに習熟した若手および中堅科学者等の新しい世代を育成します。

成果

10年間の研究計画で次ぎの成果を予定しています。

- 定量性・特性解明・予測の各能力を向上した、炭素－気候－人間統合システムに関する知見
- 一連の相互に関連したモデルによる、炭素循環を制御する生物物理学相互作用と人間の相互作用を組み合わせた体系的な枠組み
- 炭素循環の変化傾向に迅速に応答するための、研究、モニタリング、評価グループ間の連携の改善
- よりよく調整し、連携し、情報を交換することで得られる国レベルおよび国際的な研究・モニタリング計画の多い成果
- 専門誌や書籍を通じての研究の統合を含むアウトリーチと情報を伝達する成果。電子情報源（データ、グラフィックス、プレゼンテーション素材等）、炭素関連ポータルサイトや教育的なリソース（ポスター、冊子等）、様々な研究活動を通じて高等教育を受ける機会の提供

利害関係者

GCP の主な利害関係者は、以下に関連する科学・評価・政策グループです。

- 地域スケールから全球スケールに渡る炭素収支の定量化および予測
- 温室効果ガス純排出量を減らす政策
- 国際協定の締結および協定遵守
- 環境・経済・社会面での目標を達成するための地域開発

国レベルおよび国際的なプログラムとの連携

GCP の包括的な性質から、多くの既存プロジェクトの成果に立脚するとともに、関心領域が重複するグループ（全く同じでなくてよい）との共同研究が必要不可欠です。特に、下記のグループと連携していきます。

- IGBP、IHDP、WCRP を通じてコーディネートさ

れた研究団体および IGOS-P（統合地球観測戦略パートナーシップ）のメンバー

- 国レベルおよび地域の炭素循環計画
- 炭素循環の変化の帰結、脆弱性、水資源・食糧システム・生物多様性に関する評価・政策グループ

GCP の指針

- 専門領域や時空的境界を越えた取り組みの必要性を認識し、全球炭素循環における生物地球化学的側面、生物物理学的側面、人為的側面を統合して研究する枠組みを構築する。
- 観測・研究ネットワークの設計、データ標準化、情報伝達、キャンペーンとプロセスベース実験の時期、モデルーデータ融合技術の開発等を強化・拡充するため、国レベルおよび国際的な炭素研究計画を調整する全球的基盤を提供する。
- IGBP、IHDP、WCRP、DIVERSITAS および観測団体等のような、国、地域および国際的な炭素関連研究プログラムを、より適切に調整し、目標の明瞭化、概念的枠組みづくりを通じて、研究を強化する。
- 全球炭素循環において重要な役割を果たす可能性がある一方で、ほとんど認識されていない地域の炭素循環に関する研究を育成する。
- 広範な研究・政策グループに対し、炭素ー気候ー人間システムに関する新しい理解を統合し、情報発信する。

1 Introduction

序論

本レポートで、GCP の研究の枠組みを概説します。GCP は IGBP、IHDP、WCRP との協賛のもとに設立された全球炭素循環に関する研究プロジェクトです。IGBP、IHDP、WCRP および DIVERSITAS の資金提供を受けて設置された ESSP の最初のプロジェクトの1つでもあります。多方面の研究者および政策立案者にお読みいただくため本レポートを作成しています。

このレポートは、3つのセクションから構成されています。セクション1（序論）：プロジェクトの概要、目的、将来の見通しおよび主な戦略。セクション2（科学の課題）：GCP の3つの科学の課題の概説。全球炭素循環と気候や人間活動との相互作用についても包括的に記述。各テーマごとに、関連知識基盤、現在の研究分野、不明確な事項、研究の優先順位のサブセクション。セクション3(研究実施計画)：他の多くのプロジェクトや計画との調整の上で行う3～5年の内に実行する初期活動およびプロジェクトの全期間（約10年間）のビジョン。レポートの最後には、炭素循環研究に関する国レベルおよび国際レベルの計画やネットワークに関する情報、とりもなおさずGCPに関連する情報を付録として収録しています。

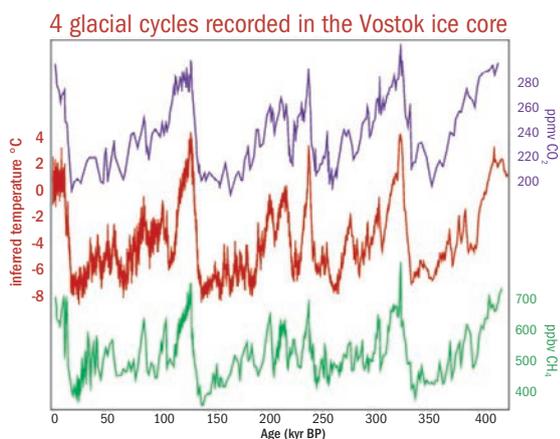


図 1

ポストーク氷床コアの42万年間の記録から得られた大気中の二酸化炭素とメタンの濃度および、同位体比から推定された気温の推移。詳細報告は Petit et al. 1999 を参照。図は IGBP/PAGES の提供。

カーボン・チャレンジ

炭素循環は地球システムの極めて重要なサブシステムであり、気候、水循環、栄養循環、陸上および海洋における光合成によるバイオマス生産と密接に関連しています。このバイオマス生産は、食物および繊維を必要とする人間を含む全動物界を維持しています。そのため、地球や人間の環境の変遷を理解し、共有の未来を予測するためには、全球炭素循環を理解することが必要不可欠なのです。

ポストーク氷床コアの記録（図1）は、大気中のCO₂が自然界でどのようなパターンで、どの範囲で変動してきたか、また、過去42万年間、大気中のCO₂とCH₄（メタン）濃度が推定気温とどのような相関関係にあったかを示しています。およそ50万年前から

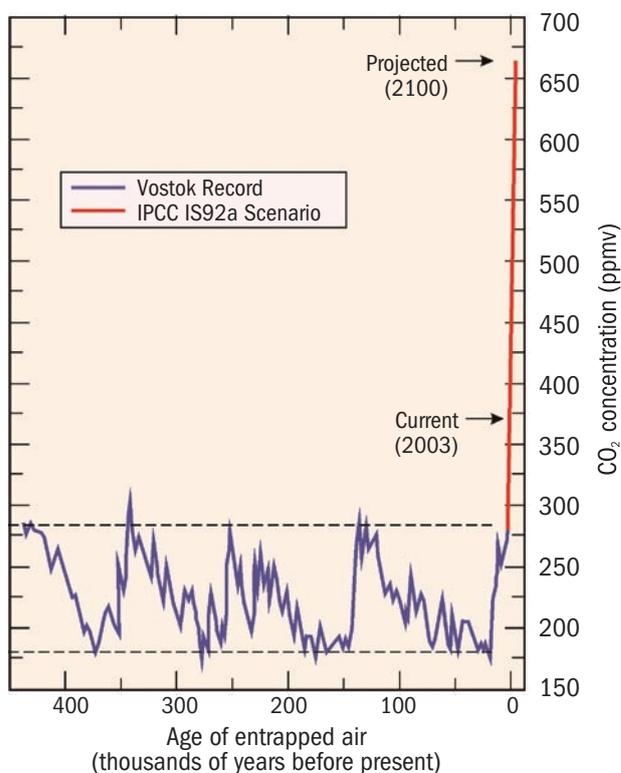


図 2

ポストーク氷床コア記録（Petit et al. 1999）によるCO₂濃度および第3回IPCC評価で報告されている“何も対策しない場合”のCO₂濃度の予測（IPCC 2001a）。現在のCO₂濃度も示してある。

200年前までの間、気候システムは、温度、大気中CO₂濃度およびCH₄濃度に関し、ある範囲内で変動してきました。産業革命以前には、大気中CO₂濃度は、概ね100,000年サイクルで180～280ppmvの間を変動し、CO₂気候システムは、氷河期から間氷期へパルス的に変動していました。氷床コアの記録は明らかに大気組成と気候（特に気温）が密接に関連していることを示しています。

ポストークの記録と現在の大気中CO₂濃度の測定記録とを比較すると、地球システムは氷河期と間氷期の規則的なサイクルから大幅に逸脱したことが明らかです（図2）。大気中CO₂濃度は、間氷期の最高値に比べて、現在100ppmv近く高くなっており、上昇速度は過去42万年のいつと比較しても、10倍（ことによると100倍）速くなっています。CH₄やN₂O（一酸化二窒素）など、その他の温室効果ガス濃度も同様の速度で上昇しています。これらの上昇は、間違いなく人間活動によるものであり、すでに気候に影響を与えています。例えば、過去千年の気温の記録は、現気候システムが、変動しつつある大気中の温室効果ガス濃度に応答していることを示しています。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第2次評価報告書（IPCC 1996）から第3次評価報告書（IPCC 2001 a,b,c）の間で予測の信頼性が向上していますが、数100年単位では、はるかに大きな変化が予測されています。これらの変化は、炭素循環が過去50万年の間に作動してきた範囲を地球システムが大きくはずれていることを示しています。変化は一方にだけ向かうもので前例のないものであり、言い換えれば、人類が地球システムを未知の領域に押し出してしまったと言えます。

炭素循環への人間のかかわりは新しいものではなく、人間活動は何千年にも渡り、農業、林業、貿易、そして産業や輸送におけるエネルギー消費を通じて、炭素循環に影響を与えてきました。しかし、それが世界中に拡大し自然の営みに比肩しえるほど大きくなったのは、ここ200年～300年のことです。人間社会と制度・慣習（社会的、文化的、政治的、経済的）は、炭素循環に一方的に変化を与えているのではなく、炭素循環と気候の変化から影響を受けてきましたが、今度はこれらの変化に、炭素循環にフィードバックを与えるべく応答しようとしています（Young 2002；図3）。例えば、全球の大気を公共物として捉え、その一環として温室効果ガスの排出を管理しようという動きです。

大気、陸上および海洋間の炭素交換の分布と強度を明らかにする過程で、システムの自然的側面と人間的

側面との間の複合的な相互作用と、それらを分離することの難しさが分かってきました。現在の陸域のCO₂吸収源（すなわち、CO₂を大気中から吸収する陸上のエリア）の場所は過去の土地利用変化のパターンに、強度は繰り返された擾乱への生理学的応答に、大きく影響されていると考えられます。海洋のCO₂吸収源のパターンも、陸上からの鉄塵を含んだ大気の流れにより、換言すれば、土地利用と気候の変動性により変化している可能性があります。人間が炭素循環を操作し得る領域には、陸域生態系および海洋中への炭素の固定化の促進と、化石燃料燃焼からの大規模排出を最小限にすることが含まれているのです。

研究の焦点は、全球炭素循環のパターンとプロセス、および環境へのインパクトを観測し、理解することに絞られます。様々な研究資源と手法が使われます。衛星データや大気サンプリングネットワークとインバース法から（トップダウンアプローチ）、全球および大陸スケールの炭素の排出源と吸収源の強度と配置をあきらかにしていきます。地表のモニタリングとプロセス研究では（ボトムアップアプローチ）、より細かい空間スケールで、陸上大気および海洋大気の炭素フラックスを見積もるとともに、地域スケールおよび生態系スケールでフラックス制御のメカニズムを検証していきます（図4）。炭素循環に対する自然のダイナミクスやミティゲーションの潜在可能性を理解することが、政策と国際体制を通じて履行されるべき脱炭素社会への道筋を見いだすことにつながる筈です。

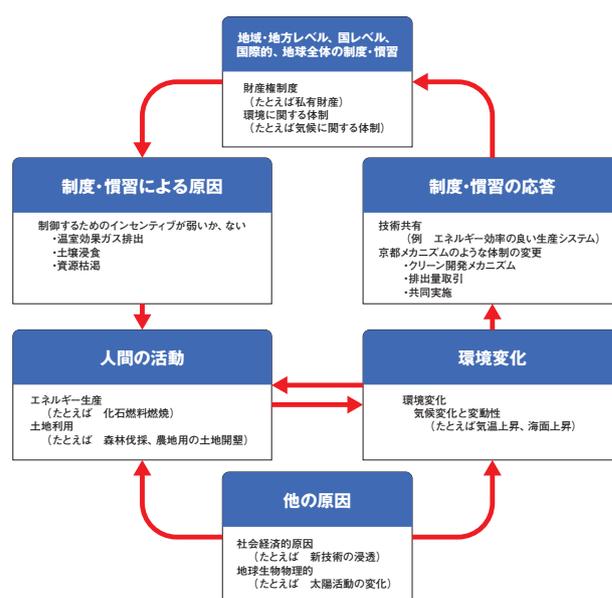


図3

制度・慣習が炭素循環に及ぼす影響 (Young 2002 より)

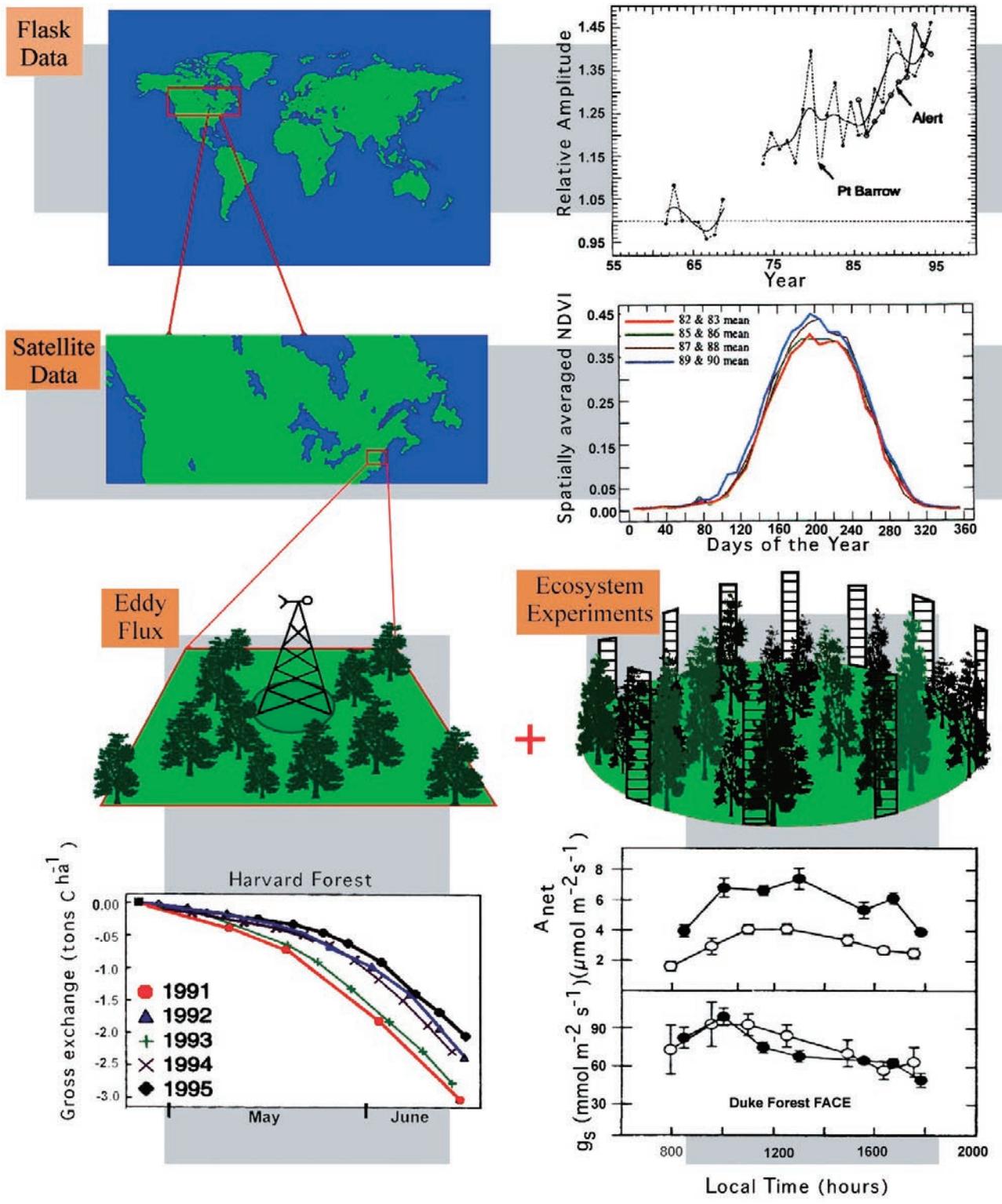


図 4 陸域生態系の炭素代謝測定：手法と結果 (Canadell et al. 2000)

ビジョン

自然的側面、人為的側面およびそれらの相互作用を含む全球炭素循環について、政策に関係する包括的な理解を深めます。

このビジョンを達成するためには、全ての関係分野と地域での、国際的な科学者の協力と多数のリソースおよび技術の活用が必要です。現在、この枠組みを示している国際研究計画はひとつもなく、GCPは、このギャップを埋め、包括的な調整をはかることにより、炭素-気候-人間システムに関する高度に学際的で複雑な問題に取り組むことを目的に設立されました。

GCPは、攪乱されていない自然の炭素循環、攪乱された炭素-気候-人間システム、そして自然システムのダイナミクスと、現実的ないし仮想的な脅威への社会の応答との間のフィードバックを理解するため、学際的なアプローチを採用します(図5)。1999~2003年に行われた一連のワークショップで、科学者達は炭素循環研究に関し、3つの幅広い科学的テーマを示しました。これらはGCPの科学的な意図を定め、変動の検出、原因の追究、将来の予測に関する能力強化を方向付けています。予測面では、人類が攪乱された炭素循環のダイナミクスにどこで、どのように介入しうるかに焦点を絞っています。各テーマの包括的な課題は以下の通りです。

GCPの概念的な枠組み

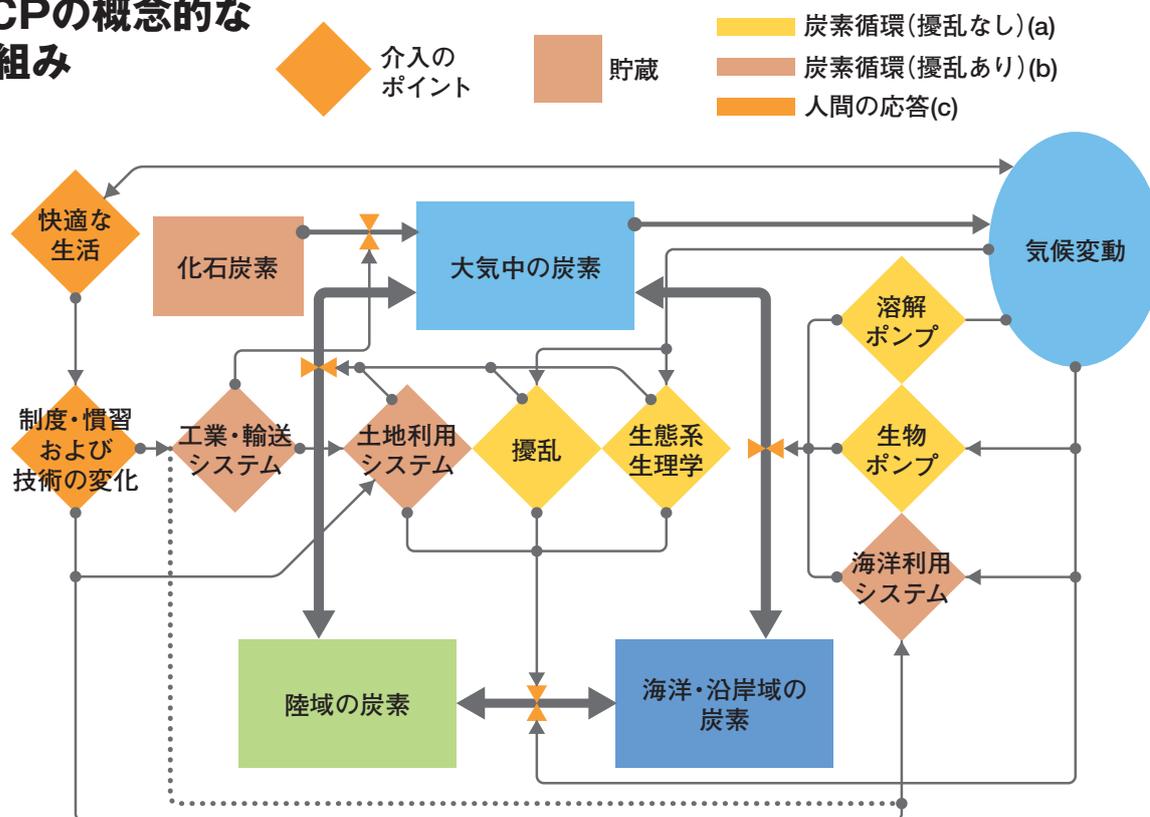


図5

長期的な全球炭素循環に関する3つの捉え方

(a)氷河期-間氷期の時代から目立った人間活動が行われる前まで、全球炭素循環は、陸地、海洋、大気中の炭素貯蔵の一つの連鎖システムでした。そのシステムは、気候変動とシステム自身の内的なダイナミクスによって制御され、或いは駆動されてきました(現在も続いています)。例えば、海洋炭素システムは、大気・海洋間のガス交換、および炭素を輸送する物理的、生物的なポンプで駆動されており、地表面と大気の間では、陸域と生態系の生理学作用とその攪乱で駆動されています。

(b)約200年前に始まった産業化と急速な土地利用変化によって新たな化石燃料由来の炭素が蓄積され、全球炭素循環は複雑になりました。初めのうち、人類は自らの快適な生活が危険にさらされるとは認知していませんでした。大気への化石燃料消費による二酸化炭素投入量の増大に社会的にどう対応すべきかを無視し、現行の土地利用を増大させていくので、全球炭素循環は深刻な影響を受けています。

(c)ここ数十年、人類は、気候と地球システムにおける変化が、全球炭素循環の機能にも自分たちの快適な生活にも影響を与えることに気づき始めています。全球炭素循環をマネジメントするための制度と体制をつくり、履行することは、必然的に現世紀に新しいフィードバックを加えることとなります。

1. パターンと変動性

全球炭素循環の主要な炭素ストックとフラックスの現状の時空間的な分布。

2. プロセスと相互作用

人為的であるかどうかを問わず炭素循環のダイナミクスを決めている制御とフィードバック機構。

3. 炭素管理

将来の炭素—気候—人間システムのダイナミクスの予測と、人間社会がこのシステムを管理するための介入方法および時期。

指針とアプローチ

3つの主要テーマをカバーしてビジョンを実行するため、以下の指針に沿って運営します。

- 専門領域や時空的境界を越えて、全球炭素循環における生物地球化学的側面、生物物理学的側面、人為的側面を統合して研究する枠組みを構築する。
- 観測・研究のネットワーク、データ規格、情報伝達およびキャンペーンとプロセスベース実験の時期を設計・企画し、モデル—データ融合技術の開発を強化・拡充するための、国単位および国際的な炭素研究計画を調整する全球的基盤を提供する。
- 国家、地域および国際的な炭素関連研究プログラム（IGBP、IHDP、WCRP、DIVERSITAS および観測団体など）を、より適切に調整し、目標の明文化、概念的枠組みづくりを通じて、研究を強化する。
- 全球炭素循環において重要な役割を果たす可能性がある一方で、ほとんど解明されていない地域の炭素循環に関する研究を育成する。
- 広範な研究・政策グループに対し、炭素—気候—人間システムに関する新しい知見・見解を統合し、情報発信する。

アプローチ：

これらの研究活動は2つの方法で遂行されます。1つは、炭素循環に関するより専門的な研究で、GCPが支援する計画（Appendix A1 参照）のもとに既に多くのプロジェクトが実施されています。準全球を対象にした研究も、多くの国および地域の炭素研究計画（Appendix A2 参照）で行われています。これらの研究を「全球炭素循環の様々な側面の統合化」という指針に沿ってより高レベルな統合へむけて協力しあえるように図り、研究を強化して付加価値を高めます。もう1つは、数は限られますが研究イニシアティブの創設と主導で、炭素循環に関する高度に学際的で難しい研究活動に、3～5年かけて取り組みます。

科学的ガイダンス：

GCPの科学的な枠組みの主要な学際的な分野をカバーする科学者で構成されるSSC（科学運営委員会）により方向付けが行われます。SSCは、スポンサープログラムやプロジェクトからの提言にも配慮していきます。

ガバナンスと日程：

3つのスポンサープログラム（IGBP、IHDP、WCRP）の議長や理事から成る委員会へ成果を報告します。2002年から10年の時間枠が設定されています。3つのスポンサープログラムによる半期レビューで短期的目標の達成度が評価され、長期目標への進捗状況がチェックされるとともにプロジェクトの効率化に必要な修正事項が示唆されます。

協力関係

広い意味において、地球システム全体の環境科学や国際レベルでの持続的発展に関する課題へむけた数多くの取り組みの本質的な部分は、炭素循環に関する研究です。多くの観測、評価、および政策グループと共に活動するため、公式または非公式なパートナーシップ体制を構築します。

- 全球炭素循環観測の統合戦略IGCO（Integrated Global Carbon Observation）の構築が、IGOS-P（the Integrated Global Observation Strategy Partnership）の範囲内で、GOOS（Global Ocean Observing System）、GTOS（Global Terrestrial Observing System）、GCOS（Global Climate Observing System）およびGCPの貢献のもと、精力的に構築が進められています（Appendix B 参照）。
- 全球炭素循環は、国内レベルでも国際レベルでも、気候ミティゲーション、持続可能な開発、および生態系サービス提供の政策展開での中心課題です。適切な評価グループを通じ、国レベルおよび国際的な政策グループとの連携が必要となります。
- UNFCCC（国連気候変動枠組み条約）のSBSTA（the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice）、MA（the Millennium Ecosystem Assessment）および、その他の評価計画の要請により、IPCCによって科学的な炭素循環研究の評価と、政策立案者へむけた解説が行われています。

Science Themes 2 研究課題

GCPの科学研究の枠組みは、パターンと変動性、プロセスと相互作用、炭素管理の3つの課題を中心に築かれています。このセクションでは、それぞれの課題について、知識基盤（既存の研究で得られた知見）、進行中および実施予定の研究、そして重要な知見が欠落している主な分野（以後「不確実分野」）を述べます。不確実分野を明らかにすることで多数の課題が引き出され、各課題の研究優先順位が決められます。多くの研究項目は、3つの課題にまたがっていることを特記しておきます。

テーマ1：パターンと変動性

研究の必要性

炭素循環の基礎構造は、主要ストック間の炭素の流れで決まり、そこには大気中（主にCO₂）、海洋中（表層、中間層、深海および海洋堆積物）、陸域生態系（植物、落葉・落枝、土）、河川や河口近傍そして化石燃料中の炭素があります。これらには人間の活動により再移動しているものもあります。ストック間を移動する炭素の流れも、ストックの炭素含有量も、自然のダイナミクスと人間活動を反映して、時空間的に多様な構造をしています（図6）。この構造のパターンと変動性を理解することが、氷床コアに残された記録から見て地球システムが経験したことの無い領域における将来の人為的な擾乱を課題とするいま、炭素循環の基礎構造を明らかにし、駆動プロセスを診断し、過去の再現から未来予測を行うために必要不可欠なのです。

知識基盤

現在の全球炭素フラックスのパターンと変動性の知見は、以下に立脚しています。

- CO₂等のガスの大気濃度観測、衛星観測、陸域・海洋の現場観測等の全球観測
- 大気・海洋のダイナミクスと生物地球化学プロセスのモデリング
- 物質収支（マスバランス）の原則

これらの観測・研究から、以下の点を強力に支持する事実が得られています。（IPCC 2001a; Field and Raupach 2003; CDIAC 2003）

1. 全球化石燃料排出は工業化以前から上昇し続け、1980年には5.2 PgC、2002年には6.3 PgCで、大部分は北半球で排出。
2. CO₂、CH₄（メタン）、N₂O（一酸化二窒素）は1750年に比較してそれぞれ31%、150%、16%増加。
3. 化石燃料起因で大気中に放出されるCO₂の約半分は陸域および海洋吸収源により吸収。
4. 大気中CO₂濃度分布と、酸素/窒素比（O₂/N₂）およびインバースモデル研究から、陸域の吸収源は主に北半球の中緯度地方。
5. 熱帯では土地利用の変化により大気中CO₂の排出が顕著になる一方、北半球の中緯度地方では土地管理の変化が顕著な炭素吸収源の主因。
6. ここ数十年間、大気中CO₂濃度観測値は大きく変化（図7）。大気中の炭素の増加速度は化石燃料排出量の年間平均値を反映して年毎に変動。
7. 大気との炭素交換の年々変動は、海洋より、陸域生態系により支配。
8. 穀物、材木および紙類の、2000年の数字に表れた炭素取引量は年間約0.72PgCに達し、地域的炭素の吸収源（生産）、排出源（消費）および一時的な貯蔵（家具等）に影響（図8）。
9. 全球大気-海洋の1995年の正味の炭素フラックス量は、大気から海洋へ2.2PgC（-19%～+22%）。海洋モデルおよび観測から示唆される、全球海洋のCO₂フラックス量の経年変動は、概ね年間0.5PgCで、最大の経年変動は明らかに太平洋赤道付近で出現。
10. 大気CO₂の海洋における大略の吸収・排出パターンは、熱帯地域で排出、高緯度地域で吸収。最大の吸収源は北大西洋、最大の排出源は太平洋赤道付近。
11. 炭素排出源・吸収源パターンと分布を解釈する上で河川による炭素の水平輸送が重要。河川から沿岸海洋への炭素輸送は、年間1PgC以上。

現在の研究

上述の「知識基盤」は、主に観測とモデリングに基づいています。これら二つのアプローチにより続けられている炭素循環のパターンと変動性に関する取り組

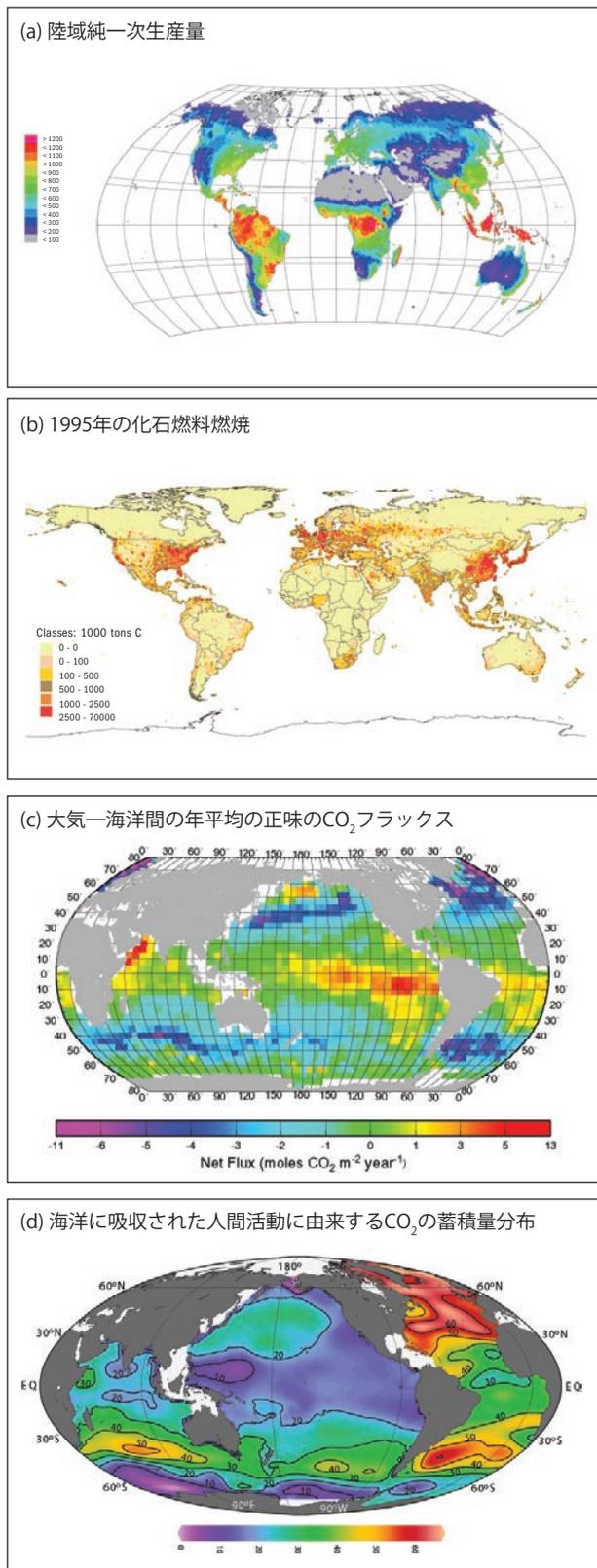


図6

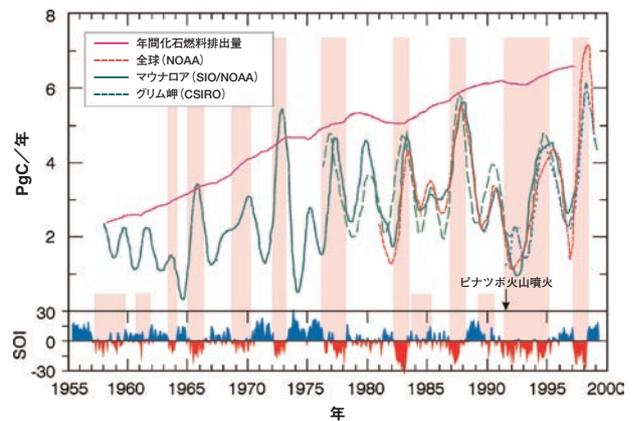
炭素循環の貯留とフラックスのパターンおよび変動性。(a) 陸域純一次生産量 (NPP) の全球分布。IGBP Potsdam NPP モデル相互比較 (gC m^{-2}) (Cramer et al. 2001) (b) 1995年の化石燃料燃焼・セメント生産・油井等のフレアリングによる二酸化炭素の排出量、1度グリッドマップ (Brenkert 1998 [http://cdiac.esd.ornl.gov/])。地図は R J Olson, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, United States による。(c) 1995年の大気-海洋間の年平均の正味のCO₂フラックス ($\text{mole CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) (Takahashi et al. 2002) (d) 海洋に吸収された人間活動に由来するCO₂の蓄積量分布 (mol m^{-2}) (Sabine et al. 2003)

みについて、人間と炭素循環の相互作用の観測および観測のモデルへの統合戦略も含めて述べます

全球モニタリング

長期モニタリングは、全球炭素循環の時空間的パターンの検出、解明、予測の基本的研究ツールで、主な時系列モニタリングは、炭素循環科学および地球システム科学の試金石 (IPCC 2001a) です。ハワイのマウナロアやタスマニアのグリム岬等のベースライン観測所における大気組成 (特にCO₂濃度) の数十年の記録 (例: Keeling and Wholf 2000) や、図1 (Petit et al. 1999) に示したポストーク氷床コアの42万年間の記録などがあります。多くの生物科学モデルで算出されている全球陸域純一次生産量 (NPP) 等の空間データもまた重要です (図6a)。

地球システム (全球炭素循環と人間がその循環に与



大気中CO₂濃度の増加速度 (CO₂濃度の直接的なモニタリング開始以降の、大気中年間炭素蓄積量を10¹⁵g/年単位で表示) の変動と年間の化石燃料排出量との40年にわたる比較。平均して、人為起源の炭素の55%が大気中に残留。大きな年々変動は南方振動指数 (SOI) と相関 (1991年のピナツボ火山噴火に続く非常に低い増加は例外)。CO₂データは季節の影響を取り除き、650日間で平滑化。SIO/NOAAによるハワイのマウナロアでの観測もNOAAによる世界50地点の観測もCSIROによるタスマニアのグリム岬での観測も全て、全球の増加速度を示している。
(出典: R J Francey, EC-IGBP-GTOS 陸域炭素会議におけるプレゼンテーション、22-26 May 2000, Costa da Caparica, Portugal)

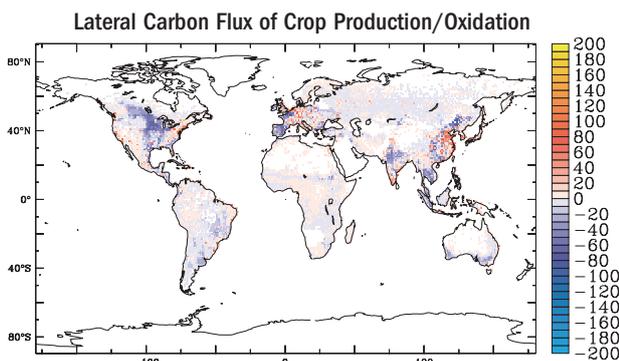


図 8

食糧の生産と代謝による炭素の吸収量および排出量 (gC m⁻² yr⁻¹) (Ciais et al. 2001)

える影響を含む)を解明するために必要な全球観測ツールは、IGOS-P に集約されつつあります。IGOS-P は、陸地・海洋・大気の地球環境観測のため、主要な地上の観測システムと衛星システムを連動させる戦略の創成を目指しています。

IGOS-P の中では、GCP との緊密な協力体制のもと、IGCO のテーマとして次の 10 年間の国際全球炭素循環観測に関する以下の戦略を策定中です (Appendix B 参照)。

- リモートセンシングと現場観測の統合
- 海洋・陸域・大気観測戦略の連携
- 国際的な炭素循環評価研究グループとの緊密な協力

これらの目的に向け、現地観測および衛星観測データから陸域生態系における炭素吸収量・排出量の時空的分布情報を得るための TCO (Terrestrial Carbon Observation; GTOS のコンポーネント) が構築されています。

MODIS 等の衛星から、陸域および海洋の代謝の動的な長期間の記録が得られると期待されます。NPP(純一次生産量) のような全球炭素循環の主要コンポーネントについて、整合性のある校正済みデータが 8 日毎に 1km の解像度で準リアルタイムに得られます(図 9)。

大気観測

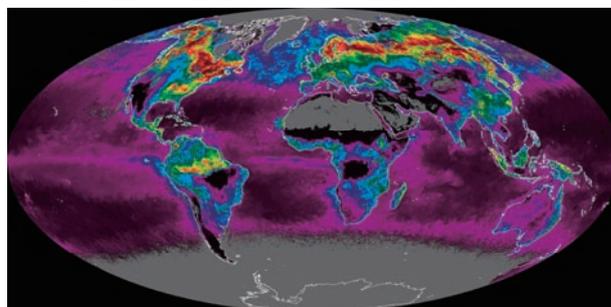
多くの国で大気微量成分ガス濃度の測定は国の支援を受け、その殆どが研究計画の一部として行われています。これらのデータは、気候の変動を検知し解明するのに重要な役割を果たしています。大気は時空間的に変化している地表面フラックスの短時間の変動をな

らす一方、大きな変動のシグナルは残す優れたフィルターとなっています (Tans et al. 1990)。従って大気中の CO₂ 分布とその時間変動を地表面フラックスの定量化に利用できるのです。

地域炭素収支は現在、インバースモデルを用い、約 100 カ所の観測地点における CO₂ データと、いくつかのハイタワーデータや航空機観測データから計算されています。ネットワーク観測 (およびインバース手法) による、重要な成果の一つは、陸域・海洋双方の北半球での大きな CO₂ の正味吸収の発見でした (IPCC 2001a; Gurney et al. 2002; Rödenbeck et al. 2003)。しかし、地表面フラックスの時空間的パターンについては、ほとんど解明されていません。更に制約条件を加えない限り、最も密に測定した北半球の中緯度地方でさえ、海洋・陸地間の、或いは経度方向の吸収・排出を明らかにできません。また、地域レベルにおけるプロセス指向の研究で制約条件が得られても (e.g., Wofsy et al. 1993)、それを全球 CO₂ パターンに敷衍することは難しいのです (Braswell et al. 1997)。広範囲の空間をカバーする CO₂ の測定なしには、輸送モデル、データ誤差またはインバース手法で不確実要素を特定できないのです。

これらの測定の精度と整合性の問題を克服するた

2002年6月



2002年12月

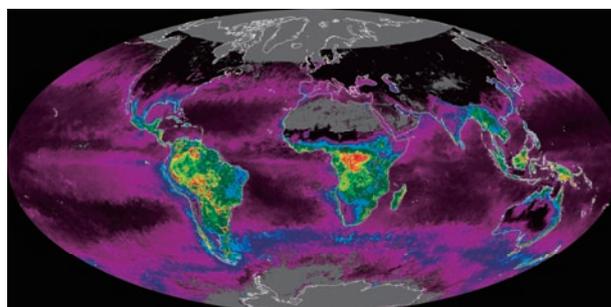


図 9

NASA 地球観測チーム開発のアルゴリズムにより MODIS データから計算した 2002 年 6 月と 12 月の全球純一次生産量 (NPP) (KgC m⁻² yr⁻¹)。他の衛星や地表観測情報も利用。(出典: NASA 地球観測所)

め共同大気データ統合プロジェクトとして、GLOBALVIEW-CO₂が設立され、現在、14カ国から約24の組織が参加しています（図10）。内部矛盾のない21年の全球時系列情報が収録されています。ところで、大気観測システムでは、CO₂に加え、CO₂中の¹³Cと¹⁸O、CH₄、CO、O₂/N₂比およびその他の多くの物質も観測しています。¹³CとO₂/N₂比の測定から、化石燃料使用による排出と陸域-大気間の交換、海洋-大気間の交換で正味の炭素フラックスがどう分配されているかがわかります。¹⁸Oの測定は、生態系交換ではなくGPP（総一次生産量）の推計に使われます。CH₄とCOの測定は、温室効果ガスとしてのCH₄の観測に加え、燃焼量の推定に使われます。またCO₂濃度と同位体に関する国際的な比較がGLOBALHUBSで計画されています。

大気観測での主な進展は以下の3点です。

- 陸域と／航空機による大気組成の測定は、CO₂だけでなく他の前述のガスの観測ネットワークとし
- ネットワーク最適化手法により、既存のサンプリングネットワークのレベルアップが見込まれます。

て拡大していきます。既存の大気観測ネットワークは、地域的な吸収・排出の影響を避けるため、大陸縁辺の海岸近傍に集中しています。これらは、ベースラインデータを得る上で非常に有益ですが、陸域での観測を追加する必要があります。陸域での観測は、地表の不均一や大気境界層の時空間的な日周変動がCO₂濃度に影響するため、より複雑となりますが、サンプリングの改善により、徐々に克服されるものと見込まれます。このような測定は、フラックスネットサイト（後述）の連続測定とフラスコサンプリングデータ、特別仕様の商用航空機や観測協力船SOOP（Ships of Opportunity）のデータを組み合わせることで開始されています。CO₂の連続観測での大切な技術的進展は、これまでのベースライン観測用機器に匹敵する精度を持つ、軽量でメンテナンスのあまりいないセンサーが、近年、利用可能になったことです。

GLOBALVIEW-CO₂ 2002

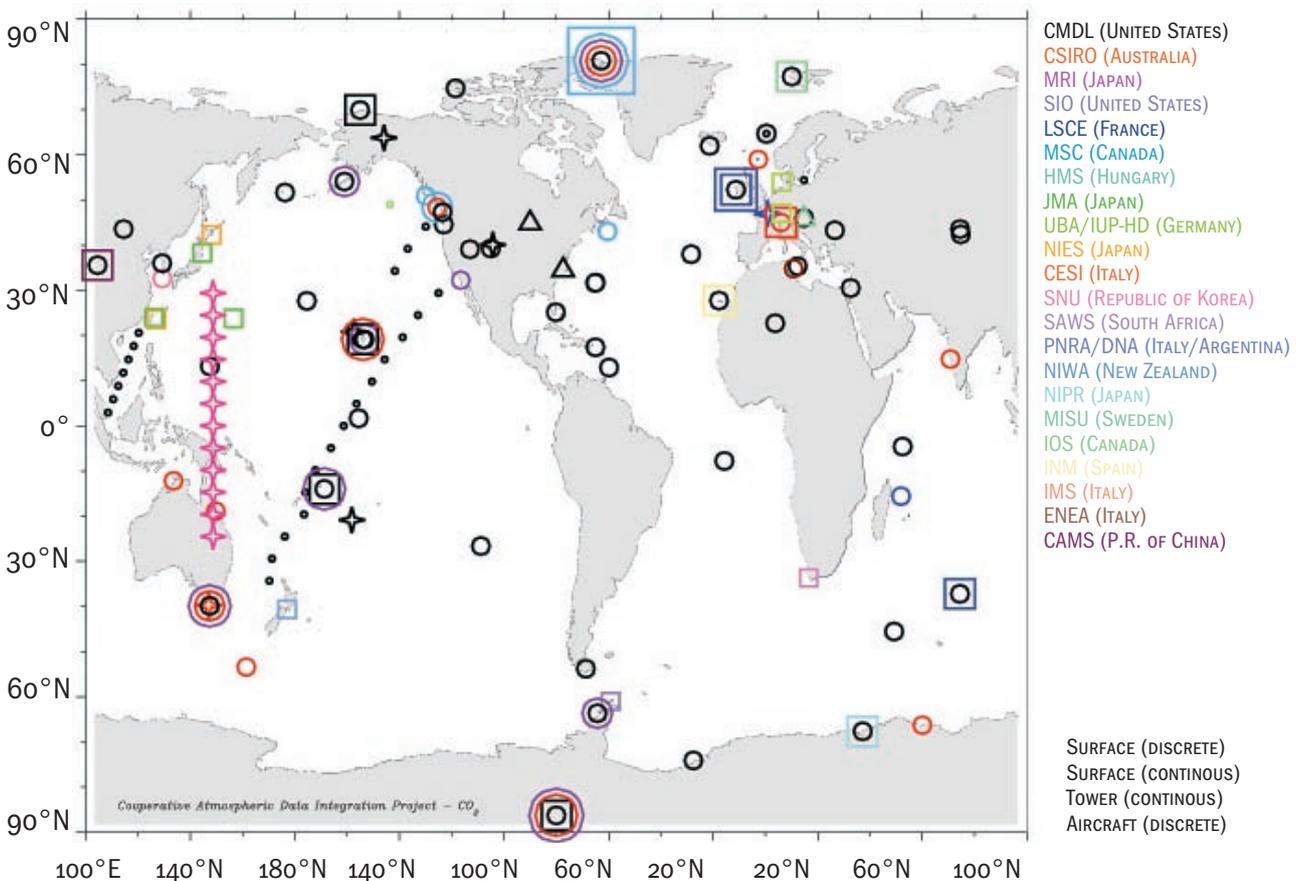


図10

GLOBALVIEWに参加している大気中CO₂濃度の観測サイト。南半球およびユーラシア、アフリカ、南アメリカにおけるステーションの不足に注目（GLOBALVIEW-CO₂ 2002）。[<http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/index.html>]

これはネットワーク最適化の初歩的な手法としてのデータ同化手法の利用に関連します。

- 宇宙からの CO₂ 測定は、インバース手法のアプローチで大きな障害となっている地表・海上・空中のデータ点の粗さと不均一を埋め、大きな成果があげられるものと期待されています (Rayner and O' Brien 2001)。

大気CO₂の衛星観測

衛星搭載機器による地表と大気の観測は、炭素循環研究を全面的に進展させる可能性があります。宇宙からの CO₂ 観測用に 2 つの新しい気象観測用赤外線装置が開発されており、AIRS (the Atmospheric Infrared Sounder) は 2002 年 3 月に打ち上げられた地球観測システム衛星 EOS-Aqua に搭載、IASI (the Infrared Atmospheric Sounder Interferometer) は 2005 年打ち上げ予定の METOP1 号機に搭載予定です。両装置とも高分解能で赤外線スペクトルを測定します。AIRS、IASI の双方と連動して利用できる AMSU (the Advanced Microwave Sounding Unit) も両衛星に搭載予定です。AMSU が大気温度のみの検出であるのに対し、AIRS と IASI は CO₂ 濃度にも応答するので、これらのセンサーから CO₂ に関し付加的な情報が得られると期待されます (Chedin et al. 2003a)。

既存の、米国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) の極軌道気象衛星 TIROS-N (the Television Infrared Observational Satellite-Next) に 1978 年から搭載されている TOVS (TIROS-N Operational Vertical Sounder) のような装置を用い、大気 CO₂ の衛星観測に関する概念研究はまとめられています。スペクトル分解能は非常に限られています。CO₂ やその他の温室効果ガス (N₂O や CO) の季節変動やトレンドの明らかな特徴は TOVS の観測データから抽出でき、濃度の季節変動や年々変動の観点から議論されています (Chedin et al. 2002; 2003b)。

2002 年に打ち上げられた ENVISAT 搭載の SCIAMACHY (the Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) も、CO₂ 濃度検出に有力視されています (Bovensmann et al. 1999)。CO₂、CH₄、N₂O、H₂O の温室効果ガスと CO の検出に利用できる吸収帯を含む、太陽光の地表からの高分解能反射スペクトルが得られると期待され、CO₂、CH₄、H₂O で約 1%、CO、N₂O で約 10% の精度でカラム濃度が得られると見積もられています (Buchwitz et al. 2000)。SCIAMACHY の水平解像度は、通常、対象ガスについて 30km ~ 120km (高緯度地

方では 30km × 120km および 30km × 240km) です。類似の Passive differential absorption technique も、近年、CARBOSAT (European Space Agency mission dedicated to monitoring the carbon cycle) および OCO (Orbiting Carbon Observatory) の観測装置として提案されています (空間分解能、スペクトル分解能を大きく改善)。

衛星観測での課題は、精度 1% (< 3ppmv) 以上で CO₂ 測定を行うことです。シミュレーションでは、衛星からの測定結果を用いることで、炭素フラックスの見積もりが、地上観測ネットワークの測定結果だけの場合と比較して、最高 10 倍以上改善されることが示されています。衛星データが時空間的により広い範囲をカバーするので、CO₂ の測定精度が大気サンプリングネットワークの精度より 1 桁低くても、全球炭素フラックスの見積もりが改善されるのです (Rayner and O' Brien 2001)。

陸域観測

もともと、陸域炭素観測はバイオマス資源拡大の観点から、多くの国で森林や耕地、草地の持続的利用に向けてインベントリーが作成され、モニタリングネットワークが整備されてきました (Cannell et al. 1999; Houghton 2003)。平行して、国レベルの研究プログラムで長期の生態生理学的観測が、多くのサイトで開始され、土地利用のリモートセンシング観測も増加しました。

現在、全球を対象とする地上観測ネットワークや衛星観測など、陸域炭素観測に関する多数の国際的ネットワーク (データ提供者) があります (Appendix C 参照)。地上観測ネットワークのうち Fluxnet は 200 ヶ所以上の協力サイトからなる全球ネットワークで、渦相関法による CO₂、水蒸気、熱等のフラックスの連続測定が行われています (図 11)。これら観測地の多くでは、植物、リター (落葉・落枝)、土壌ストックの炭素の貯蔵とフラックス、およびその他の生態生理学的なパラメータも観測しています。フラックスタワーデータをスケールアップして大陸規模でのフラックスが算出されており (Papale and Valentini 2003)、季節的および経年的な挙動がどう制御されているか、重要な知見が得られています。また、フラックスネットは、新 MODIS の 8 日ごとのデータ (例えば純一次生産量など) の重要な検証ツールになる筈です。

ILTER (the International Long-term Ecological Research Network) では、従来技術による、生態系変

化の観測も含めた、より広範囲にわたる生態生理学観測のネットワークを進めています。地域的な地表観測計画の整合性は、GTOSがGT-Net計画の一部として進めています（Appendix C 参照）。国レベルで収集したデータのハーモナイゼーションもいくつかの研究計画で行われています。例えば、北米とアジアにおける国家森林インベントリーの比較（Goodale et al. 2001）や、多国間による土壌有機物データセットの比較（Smith et al. 2001）などがあげられます。

データユーザーは、陸域生態系の炭素循環の情報が必要な研究機関や研究計画（Appendix C 参照）で、要求されるデータも、対象範囲（全球、大陸、国）、データタイプおよび利用者により異なります。国の機関が目的により、自国の範囲を超えて整合性のとれた情報を必要とする場合もあります。

上に述べた観測データ収集プログラムに加え、系統的に全球観測の能力を強化する多くのプロジェクトが実施されています。全球森林被覆観測（GOFC）プロジェクト、バイオマス燃焼関連データ・情報を提供している世界火災ウェブ、純一次生産量（NPP）推定用データを提供しているGTOS NPPプロジェクト、生態系の生産性に関するアルゴリズムの改善にむけたIGBP NPP 相互比較プロジェクト（Cramer and Field 1999）などです。

これらの、陸域炭素ストックとフラックス観測の主な傾向は、今後数年間、加速されるものとみられます。

- 渦相関法データや生態生理学的データ、およびプロセスレベルデータとリモートセンシングデータのような、いくつかのスケールでの観測を組み合わせる方法に対する注目が高まると予想されます（テーマ2の「現在の研究」における「スケール間の相互作用」を参照）。
- 陸域モデルと観測結果の統合に適用されるような、インバース手法、データ同化手法および多制約条件アプローチを通じた、観測とモデルの統合が見込まれます。（テーマ1の「現在の研究」における「観測とモデルの統合」参照）
- 同位体等のトレーサー（ ^{13}C , ^{14}C , ^{18}O , ^{15}N , ^2H , ^3H ）の利用で、測定法が広がり、モデルにさらに制約条件を加えられると見込まれます。
- 京都議定書での温室効果ガス排出量算出で、指定されたカテゴリーの貯蔵とフラックスを求めするための炭素モニタリング計画を各国が実施し、陸域観測が多様化するものと見込まれます。

海洋観測

従来手法などのサンプリング戦略でも必須で、経年データの蓄積や全水柱試料サンプリング、高精度の実験室測定、詳細なプロセス研究が進められてい

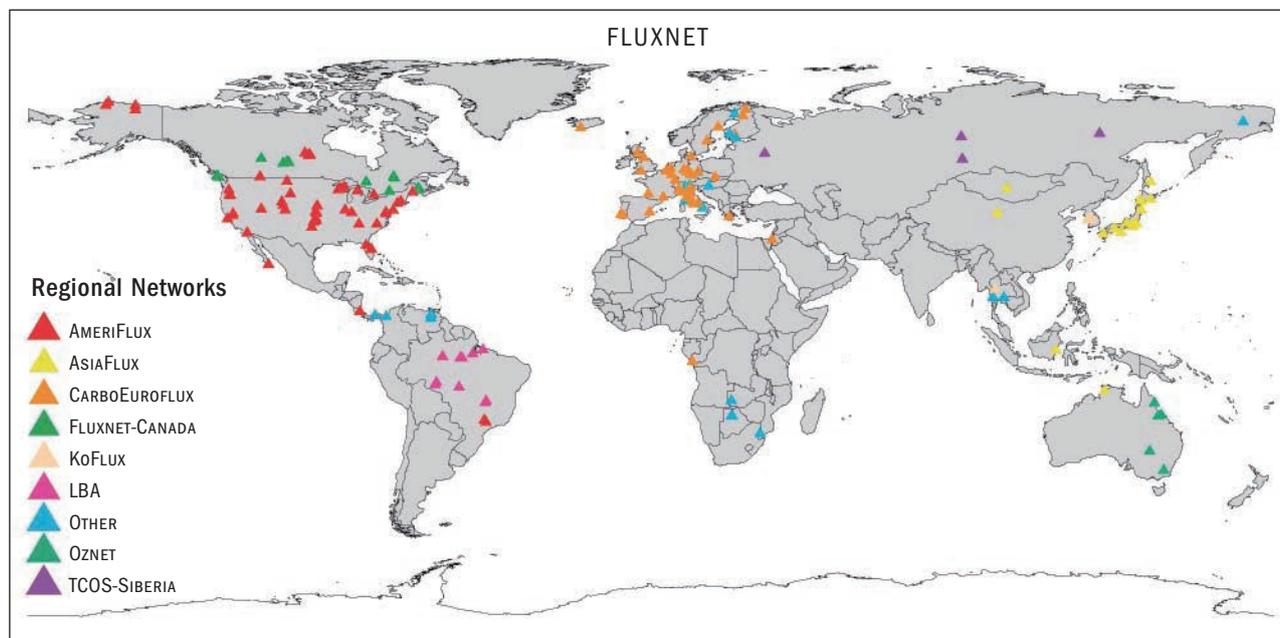


図 11

FLUXNET 観測地およびその代表的な支援国の分布。各ネットワーク間で生態生理学的、および生態系測定・観測を標準化する強い動きがあります。FLUXNET は、国際的な協力体制がいかに国境および専門を越えて情報伝達と交流を促進するかの好例です。GCP の目標の一つは、FLUXNET のような実り多いネットワークの開発、調整、拡大を促進することです。

<http://www-eosdis.ornl.gov/FLUXNET/>

す。継続的な全球調査計画が、GCP および SCOR-IOC 海洋 CO₂ アドバイザリーパネルによるパイロットプロジェクトである IOCCP (the International Ocean Carbon Coordination Project) のもとで調整され、進行しています。IOCCP は、CLIVAR と協力し、WOCE (the World Ocean Circulation Experiment) の海洋観測ラインのいくつかを担当することになっています。いくつかの現場観測では空間分解能の高いデータが、特に大気・海洋炭素フラックス推計に用いられる海洋表面 CO₂ 分圧 (pCO₂) が利用できます。船舶搭載用 pCO₂ システムが海洋観測で一般的に用いられており (最近の事例は、JGOFS (the WOCE-Joint Global Ocean Flux Study) による海洋観測)、SOOP (Ships of Opportunity、観測協力船) による観測も増えています。このような観測は将来増加すると予想され、観測領域と全球の被覆率を最適化するため一層の協力が必要となるでしょう。

観測船による大規模調査は、費用がかさみ補給も必要なので稀にしか行われませんでした。このような時間的に制約された観測では、海洋のおよその平均的な状態はわかるものの、季節的、経年的、また 10 年単位の変動性についてはよく分かりません。これらの時間的変動を解明するには、炭素および生物地球化学的パラメタの定置・長期的観測が必須です。現在、最もよく解明されている海洋経年観測データは 10 年以上前から行われているハワイ付近 (Hawaii Ocean Time-series programme - HOT) とバミューダ付近 (Bermuda Atlantic Time-series Study - BATS) にある米国 JGOFS 観測ステーションのもので、HOT と BATS の月別値データには、炭酸塩システムのパラメタおよびその他従来の生物地球化学データ (一次生産量、クロロフィル、養分、海面付近の堆積物トラップなど) が含まれています。これらは、海面の溶解無機炭素 (DIC) 濃度の上昇や、亜熱帯太平洋における窒素固定の重要性など新しい多くの重要な知見をもたらしてきました。最も観測を効果的にするためには、係留体や漂流体を用いた観測も含んで、時系列観測と SOOP 調査計画を完全に統合すべきです。時系列データは空間的な広がりをもつ観測に時間的な広がりをもたせることができ、空間データは時系列データに空間的な広がりをもたせられるからです。

多くの衛星データセットが、そのまま海洋炭素システムに適用可能です (Appendix C 参照)。海色データは、CZCS (Coastal Zone Colour Scanner Data: 1979-1986) を手始めに収集が開始され、OCTS (Ocean Colour and Temperature Scanner; 1996-1997)、

POLDER (Polarization and Directionality in the Earth Reflectances)、SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor; 1997 後半から現在まで) など、近年、大幅に拡大されています。関連するデータセットには、メソスケールの物理的な循環と変動を対象とした海面高度データ (TOPEX/Poseidon、米国 / フランス共同のレーダー高度計による海面高度観測を行う衛星研究プログラムやヨーロッパのリモートセンシングプログラム)、海面温度データ (AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 等)、表面風速データ (NSCAT (National Aeronautics Space Agency Scatterometer), QuickScat) などがあります。新技術開発で、衛星から塩分測定が可能になると見込まれます。

海洋観測は主として下記の方向に進んでいます。

- 観測の時空間密度と、化学的および生物学的な測定項目を引き続き増やしていきます。海面温度 (SST)、風、海色に関する衛星データは、海洋上層の広範囲に亘る物理学および生物学的なパターンと変動性の重要情報であり続けます。衛星観測では解像度がない物理量に対して、現場での自動計測観測 / サンプルング技術を開発していきます。特に現場化学計測では新型の自動計測センサ (pCO₂、DIC、栄養分、粒子態無機炭素、POC (粒子態有機炭素)、生物光学的手法を用いたものなど)、およびセンサー搭載プラットフォーム (係留施設、漂流ブイ、プロファイリングフロート、グライダー、水中自動観測艇など) に期待がよせられています。
- 観測結果の解析を高度化し、従来に加えて地域的な大気-海洋フラックスの経年変動の情報が得られると期待されます。この情報は現在、海面 pCO₂ の繰り返し観測からも次第に得られています。海域スケールでの炭素収支の解明には海洋における炭素のインベントリーと輸送の変化を見積もる必要があるのです。
- 包括的な海洋炭素観測システムの開発は、組織化と協力体制の改善で促進されます。(1) 現在実施中のプログラム (時系列観測ステーション、水文学観測ライン、SOOP 航路等) および計画段階のものを目立たせ支援、(2) 科学的目標と定常モニタリング目標達成のための観測システムへの要求をブラシアップするための専門家グループ国際会議を奨励、(3) 他の物理学的、化学的、生物学的な海洋分野での取り組み、特に CLIVAR や GOOS との協力体制の構築、などです。現在、北大西洋および北太平洋で、複数の SOOP を用いた水域スケールの特性の継続監視プロジェクトが

実施されています。これらの計画で、使用に供せるデータセットを構築・維持するには長期間の支援が必要です。

- 海洋炭素同化手法とインバースモデルの開発が、(大気および陸域観測と同様)急速に進展しています。プロセスレベルの情報を十分量入手することが、フラックスの時空間的パターンとその制御要因・機構の解明に必要です。観測計画が達成されると、データ駆動型のモデルへ速やかにデータを供給できる従来になかったデータの流れが得られるはずですが、これらのモデルは、全球炭素フラックスおよびインベントリの見積りの時空間的補間に有用と考えられます。

人間活動と全球炭素循環の相互作用の観察

全球炭素循環における人為的要素は、排出、吸収、移送、商品生産と消費などです。これら人間活動起源の炭素フラックスは、人口、経済、エネルギーシステム、技術的な進路、環境的価値と制約等の変化と相互に作用しています(Dietz and Rosa 1997)。相互作用は、炭素循環に人間がもたらした変化への応答を通じて、また、経済的、社会的要請、水や食物の供給等の要因を通じて起こります。

これらの人間活動に起因する炭素フラックス関連データは一連の既存のシステムで提供されています。国レベルの炭素排出量、森林管理および土地利用のインベントリや炭素収支算出システム、地域の環境報告、貿易・商品生産のデータなどです。ばらばらで、多くの場合、間接データであるデータソースをどう統合するかが課題です。

人間活動と炭素循環の相互作用の観測は以下の方向に進んでいます。

- 国、地域および地区レベルの炭素循環での異なる役割。例えば、化石燃料排出の大部分は北半球で生ずる一方、熱帯地方の炭素排出は土地利用変化が支配的です。このような傾向に関するデータと解析は、国際的な協力からのみ得られます(Mason 1997)。
- 炭素循環の変動に対する地域レベルの影響と脆弱性のより詳細な評価。これについては、既に様々な文献がありますが、異なる地域、地区、生態系および社会グループが、それぞれ炭素循環の変化に直面した時の、またそれを乗り切るための方策の検討が主要な目標です(O'Brien and Leichenko 2000)。

観測とモデルの統合

上記の観測のうち、全球炭素循環を形作っているフラックスとストックの直接情報が得られるものはごくわずかで、適切な時空間的パターンが直接得られるものはありません。そこで、間接的に推定する必要があります。これまで多くの推定手法が開発され、いずれも観測とモデル双方からの情報の統合に基づいています。「モデルデータ融合」は、こうした取り組みを包括する表現としても使われます。一般的に、モデル特性を1個以上変化させ、観測データと最もよく適合するのが原則です。原則の適用には、2つの基本的な選択肢があります。第1は、モデル特性を変化させることで、おおまかに4つ選択肢があります。パラメータ(通常は一定値がモデル式に入る)、空間的な境界条件、時間の初期条件、および状態変数自身です。第2の選択肢は、これらの特性値の最適値を見つける方法で、問題のたてかたや複雑さによって、幾つものオプションがあります。最適化では、変数の最適値、その最適値の不確実の度合い、そしてあらかじめ与えられているデータの不確実さを考慮したモデルの適合性の評価、の3つが報告されるべきです。

一連の選択肢の中で、確立されているいくつかの方法から、3つのものの概要を示します。

大気・海洋インバース手法：

全球大気インバース手法では、全球のフラスコサンプリングおよびベースライン観測ネットワークの大気組成の観測結果と全球大気輸送モデルを用いて、大気-地表間のCO₂やその他の成分の平均的な正味のフラックス量を空間的に推定します(Enting 2002; Gurney et al. 2002)。原理的には、対象としているガス、例えばCO₂の吸収・排出源の分布を、大気輸送モデルを用いて、全球のガス濃度の観測結果と最大限整合するように探すのです。したがって、この場合、変化させるモデル特性自体が境界条件となります。「インバース」とは、輸送モデルを逆方向に動かすことを意味しています。

大気インバース手法は、炭素の吸収・排出源の全体像を与えますが、原因となるプロセスの情報は得られません。現在、大気インバース手法の空間解像度は非常に粗く、熱帯と南北半球の温帯の別、陸地と海洋の交換を区分することはできますが、熱帯地方の炭素収支や、経度方向の詳細パターンは得られません(Schimmel et al. 2001)。特に熱帯地方や内陸では、データ不足のため地域的な解像度がきわめて限られています。この不足を解消するため、鉛直プロファイルの利

用が試みられています。なお、インバース手法は、特に海域や大陸以下の小さいスケールの場合、大気輸送モデルの選択にも大きく依存します。

大気インバース手法は、メソスケールモデル (Gloor et al. 2001) と大気境界層収支アプローチ (e.g., Lloyd et al. 1996) を用いて、地域スケールにも適用されています。例えば、山火事や都市部でのブルーム研究 (煙流の移動・拡散に関する研究) では、ガス種や同位体データを使い、他の方法では得られないガス発生源に関する情報を得るために利用されています。林冠スケールでも、植物と土壌の間の吸収・排出を区別するために用いられています (e.g., Raupach 2001)。

海洋インバース手法は、大気インバース手法同様、海洋 $p\text{CO}_2$ やその他のデータを利用して、海洋と大気の CO_2 交換を推定します。必要となるデータも、大気インバース手法のデータと類似で、観測精度と観測の密度が重要課題です。結果は用いる海洋輸送モデルに大きく左右されます。

パラメータ推定：

変数とするモデル特性がパラメータですが、プロセスに関する知見からは殆ど制約されません。生物地球化学的な炭素循環モデルでは、量子効率、光利用効率、呼吸や炭素ストックのターンオーバーを制御している温度等の数値が、モデル特性変数に含まれ得ます (Barret 2002)。モデルをテストデータによく適合させるためには、殆どいつもパラメータの選択が必要です。最適なパラメータを見つけるための技法は多数あり、単純な図形近似 (例えば直線近似で傾きを選択) から、同時に複数のパラメータを見つける、より進んだものまであります。

パラメータ推定では、同時に何種類かのデータを用いる (「複数制約」) が主流になりつつあります。大気組成、リモートセンシング、ストックないしフラックスの現場測定等、多数の異なる種類のデータが利用可能です。異なる種類のデータは、モデル内の異なるプロセスを制約します。例えば、大気の濃度や渦相関法によるフラックスの値は正味の CO_2 交換 (正味の生態系交換) を制約するのに対し、リモートセンシングで得られる NDVI (正規化植物指標) のような指標は、間接的に GPP (総一次生産) を制約します。異なるモデルパラメータは、異なる種類のデータによって制約されるので、包括的なモデルを適切に制約するには、複数のデータが同時に必要なのです。初歩的なアプローチがすでに試みられていて、大陸スケールで

大気濃度および地表データを組み合わせて利用した例 (Wang and Barret 2002)、全球スケールで、大気組成、リモートセンシングデータ、渦相関フラックスデータを連動した例 (Kaminski et al. 2002)、大陸スケールで生態学的データを用い、全球炭素循環の陸域生態系モデルを遺伝的アルゴリズムで制約した例 (Kaminski et al. 2002)、林冠スケールでの適用例 (Styles et al. 2002) などがあります。

複数制約アプローチは、制約に用いるデータをいくつもの情報源に期待します。空間的に、時間的に、またプロセスについて多岐に渡るデータで、より制約された予測ができることとなります。このアプローチは、現在のインバース手法で、推定パラメータの不確実の度合いが与えられるため、炭素循環モデルのプロセス表現を改良するための研究の筋道が重要か否か識別する手段を潜在的に提供しています。不確実さを減らすことが、モデルの予測全体の情報の増加を意味するからです。データの有用性は、モデルパラメータに与える不確実要素の減少という点で評価できます。重要なことは、このアプローチでは、データの不確実さの詳細が要求されますが、実データが利用可能であることは要求しません。したがって、実験的な計画策定の予備的なテストを行うことが可能です。

データ同化手法：

データ同化には、モデルが時間方向に積分されるので、(時間の変数である) モデル状態変数自体の調整が含まれます。これは現在、天気予報で用いられる 4次元変分法データ同化 (4DVAR) 手法同様、初期条件をシーケンシャルに調整することでも可能です。ここでは、質量保存のような、モデルで表現されている様々な場の保存則を考慮しながら、与えられた時間のデータに動態モデルを最適にあてはめるように全球の時系列データが使われます (Chen and Lamb 2000; Park and Zupanski 2003)。データ同化手法の炭素循環モデルへの応用は未だ将来の課題です。

データとモデルの統合は主に以下の方向に進みます。

- 炭素循環の理解を深めると期待される適切な観測項目の発掘 (現在利用可能な炭素循環関連の観測項目のいくつかは未利用です)。当該観測項目と大気 CO_2 および海洋 $p\text{CO}_2$ の観測の密度、検定の継続的改善とデータ解釈の深化
- 地域レベルの見積もりまでダウンスケールを可能とするような観測データ密度の改善。地域レベルの見積もりには、一層全球的な背景の知見を深め

ることが必要（概ね一部の改善は全ての改善に繋がる）

- 地域レベルのインバース手法での3つの有望なデータ収集手法
 - (1) 地域の発生源が特定できる程度に、移送の概略の変動が把握可能な継続的観測
 - (2) 衛星観測による全球をカバーするCO₂ カラム総量
 - (3) メンテナンスをあまり必要としない、使い捨てにし得る軽量センサ
 これらは全て、現在の観測ネットワークの空白部を補間できますが、現在のネットワークに十分に連携する必要があります。データフローの拡大に対応して、国際的なデータマネジメントの強化も必要です。
- プロセスに関する情報（火事や都市部からの大気ブルーム研究で、あるいは地域的海洋輸送研究から得られるような）を提供できる地域レベルの、または「キャンペーンモード」（より狭い地域および時間のスナップショット）のインバース手法
- 物理学的・生物学的・生物地球化学的プロセスを組み合わせたモデルへの多制約アプローチの適用
- パラメータ化のレベルが適度なモデリングに焦点をおいた、多制約研究用炭素循環プロセスモデルの開発（プロセスベースモデルの大部分はこの方法ではパラメータ化過剰）
- 実用的な非線形検索手法の開発
- 複数のデータソースのサブセットを用いたモデルの矛盾点に関する厳格なテスト
- 特に、非線形インバース手法での不確実要素分析の一層の進展

不確実分野と研究の優先順位

ここ10年にわたる進捗にもかかわらず、まだ大きな不確実要素が残されています。

- 既存の全球モデルと観測結果では、観測ネットワーク網の密度が低く、地域スケールでも、大陸スケールでも、経年変動に関しても炭素排出源または吸収源を、許容し得る程度で正確に決定することはできません。例えば、北半球の陸域吸収源の北米とユーラシアの区分は、不明瞭なままです。
- 炭素循環の主なフラックスの空間パターンを求めるための、トップダウンとボトムアップ両アプローチの間に、系統的で説得力のある一致がありません。地域・陸域・流域スケールの炭素収支は全球解析の結果と整合がとれず、南方海洋や熱帯陸域など重要な地域に主な不確実要素があります。

さらに、土地利用に伴うような、重要なフラックスの見積もりは、ボトムアップアプローチでのみ得られますが、全球ではかなりの不確実性が残されています。近年の知見では、地域炭素収支での水平方向輸送と沿岸地域の役割が、従来考えられていたよりも、ずっと大きいことが示されています。

- 主要な炭素フラックスの時系列パターンとそのストックへの帰結は、数年以上のタイムスケールになるとほとんど把握されていません。地域レベルで、または生物地球化学的に解明された主要な炭素ストックのどれが、ポストーク氷床コア記録に示される大気CO₂の長期的変動やより短期間変動にどう寄与するかは不明なままです。
- 海洋フラックスパターンの全球推定は、現在、数十年にわたるデータでのみ可能ですが、データ収集期間内にはフラックスの空間的パターンが変化しています。従ってある年の、或いはある十年間の見積もりは著しく不確実になります。観測密度が疎であることが多く、時空間的に補間する場合の仮定が結果に大きく影響します。
- 人為起源のフラックスの時空間的な分布にも、また人間の意思決定プロセスの影響についても不確実要素があります。例えば開墾や人為的陸域吸収、化石燃料排出に伴うフラックスなどです（IPCC 2000a,b）。

以上の評価から「テーマ1：全球炭素循環における、現在の主要な炭素ストックおよびフラックスの時空間的分布」について、以下の研究が優先されるべきです。

1. 大規模スケール（大陸、海域）の炭素フラックスおよびストックの空間分布は？
 - 熱帯域の炭素収支、特に、土地利用変化による炭素排出の制約
 - 北米・ユーラシア間、ヨーロッパ・アジア間の、北半球陸域吸収源の水平方向分布
 - 特に南方海洋における海洋の炭素吸収・排出源とストックの空間的パターンと規模
 - 陸から陸水域、沿岸地域への水の流れ、沿岸地域と外洋との間の水の交換に伴う炭素フラックスとストック
 - 水と風による沈殿物の巻き上げ・輸送・堆積が全球炭素収支へもたらす結果
 - 全球炭素収支におけるCO₂以外のガス（メタンや揮発性有機化合物など）の役割
2. 地域または準地域の炭素フラックスパターンは全球スケールの炭素循環とどう関わりあうのか？

- 海洋における生物ポンプや溶解ポンプの時空間的ダイナミクスと、それらの地域的または全球海洋炭素収支での役割
 - 炭素気候システムの全球規模の変動により変化している主要な陸域（熱帯地方、サバンナ、中緯度地方、北方地方、ツンドラ）生物群の炭素収支からみた動向
 - 地域レベル、準地域レベルの炭素収支を全球収支の制約とする方法、およびその逆の方法の開発。
3. 全球および地域スケールの炭素収支を形成するフラックスとストックの、季節単位から10年単位での時間変動は、また変動の要因は？
- 海洋、陸域生物圏および人為的炭素排出の変化の相対的な役割
4. 化石燃料の燃焼や土地利用行為を含む、炭素循環への人間の影響の時空間的パターンは？
人為的影響が深刻な地域・分野の炭素フラックス

とストックの定量化。地域には地方と都市（特に巨大都市）を、分野には工業活動と農業活動の双方を含む。

- 過去および現在の土地利用と土地被覆変化の速さとパターンの測定における矛盾点の解明
 - 熱帯陸域、特に土地利用起因の炭素排出源における人間活動の役割
5. 炭素循環変動の社会的影響は？
- 炭素循環変動に対する脆弱性や適応性の社会的・地域的パターン解析

テーマ2：プロセスと相互作用

研究の必要性

炭素循環を形成するフラックスとストックの挙動は、一連の以下のようなプロセスに支配されています。

- 大気、海洋、陸水圏における物理的プロセス
- 生物学的、生態生理学的プロセス
- 生物地球化学的な変化
- 火事、農業、開墾など陸域生態系に対する一連の自然のおよび人為的擾乱
- 人為的な化石炭素の放出を伴うプロセス（即ちエネルギーシステム）

これらのいくつかは、全球炭素循環とその人為的作用に対する応答（陸域吸収源の飽和、熱塩循環の安定性、海洋生物ポンプの挙動など）を決定的に支配します。

これらのプロセスの基本メカニズムレベルの理解と同時に、複合作用で何が出現するか理解する必要があります。この知見は、現在および将来の炭素循環ダイナミクスの把握の核となるもので、主要プロセスとメカニズムの間の現在および過去の相互作用とフィードバックの把握と解釈を含んでいます。プロセスを理解することが、診断および予測ツールの開発に必要で（Section 3のActivities 1.2, 2.2, 2.3参照）、ゆくゆくは、生物物理学的システムのダイナミクスと人間の挙動とを統合します。このようなツールにより、越えてはいけぬ重要な閾値（脆弱性など）の探索が可能となり（Activity 2.3参照）、ミティゲーションオプションとその大気CO₂安定化への寄与を明らかに出来ます。

知識基盤

炭素循環を支配する多くのプロセスは、特に詳細メカニズムレベルで、既によく理解されています。これらの知見は、フィールド観測、実験室研究、フィールドでの操作的実験およびプロセスモデリングから得られています。よく理解されている炭素循環プロセスに

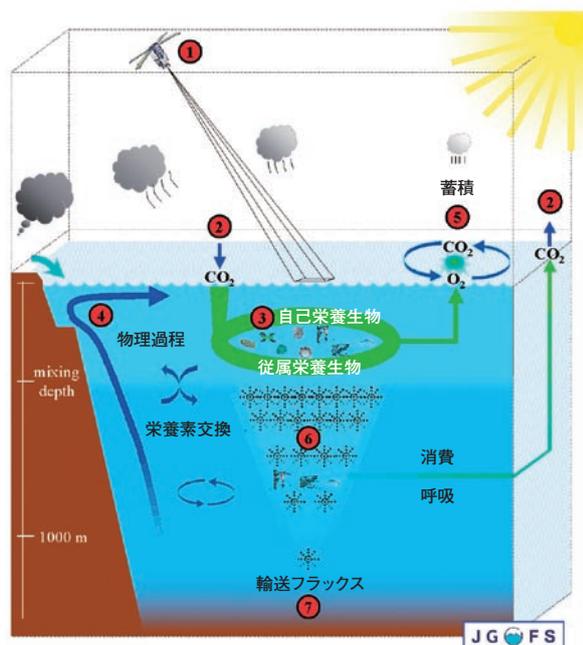


図 12

海洋「生物炭素ポンプ」は、プランクトンの生物学的プロセスとそのフィードバックの集積的表現で、有光層から深海まで炭素輸送の役を担っています。この複合生態系は、植物プランクトンが日光と無機栄養素を使って光合成で大気CO₂を生物態物質に変換し、海洋食物網の基本部分となることから始まります。自己栄養生物と従属栄養生物は、増殖とともに粒子状物質と溶存態物質を排出し、死にます。粒子は沈み、炭素を深海へ移送します。このように、生物ポンプは大気CO₂濃度を調整する1つの方法で、もう1つが物理的な「溶解ポンプ」です。一般的に、食物網は効率的で、生成粒子と溶存有機物の大部分はマイクロバイアル・ループでCO₂に戻り、大気に放出されます（国際JGOFSプロジェクトオフィス（ノルウェー）の好意により掲載）。

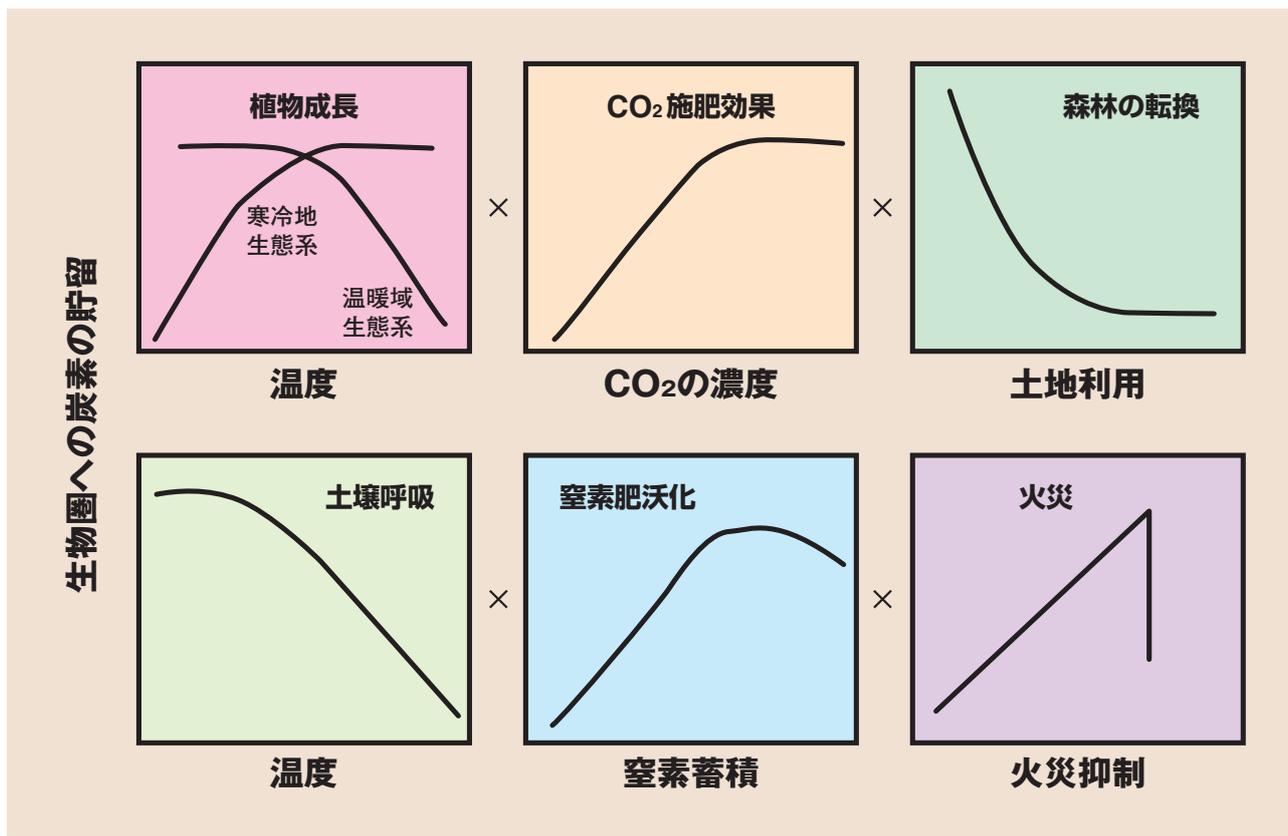


図 13

現在の陸域炭素吸収源に影響を与える複数のメカニズム、および全球変化が進んだ場合における将来動態予測 (Canadell 氏提供)

は、以下のものがあります (Walker et al. 1999; IPCC 2001a; Field and Raupach 2003)。

1. 海洋-大気炭素交換は、変温層と深海水の換気(溶解ポンプ)を含む物理的プロセスに大きく支配され、炭素を表層から深海に再分配する生物学的プロセス(生物ポンプ)にも影響されます。
2. 生物ポンプの主な生物学的制御は、大型植物プランクトン細胞によるもので、大半の微粒子炭素の深海への輸送はこれによります(図 12)。海洋循環の大規模変化が生物ポンプに及ぼす効果は別として、大気 CO₂ 濃度の増加に伴い、大気から海洋への炭素の吸収は増加すると予測されます
3. 一連のフィードバックプロセスは、陸域表層と大気間のエネルギー、水および炭素の交換を制御しているので、これらのフラックスの擾乱(土地被覆の推移や変化など)に対する応答は、スケールに大きく依存します。こうした顕著なフィードバックには、大気温度・湿度および土壌温度・湿度への植物の生理学的応答も含まれます。
4. 現在の北半球の炭素吸収は森林の再生、CO₂ と窒素の施肥効果、気候変化、土壌の浸食、淡水への蓄積などの多様なプロセスによります。これらの

プロセスの相対的重要度は、あまりわかっていません(図 13)。

5. 陸域吸収源の強度は、次の数十年で大気や気候の変化への懸念から、上昇する可能性もあるとはいえ、横ばいから減少に転じると考えられます。
6. 大気 CO₂ 濃度が十分上昇した場合 (>550 ppm) でも、水や養分など環境条件の制約から、陸域植物による光合成同化作用はすぐに生理学的飽和状態になります。
7. 計画的な地表の改変は中期的(20~30年)に気候と炭素循環の双方に大きな物理的作用をもたらすと予想され、気候からの応答は、陸域のマネジメントへフィードバックされるものと考えられます。
8. 大規模スケール(地域~大陸)における陸域生態系-大気間の CO₂ 交換の規模と方向は、下記の要素で決まります。
 - 大気エアロゾル濃度の大規模な擾乱(火山噴火など)によって引き起こされる、干ばつ、季節温度の大幅なシフト、或いは放射の変化等、極端な気候事象。
 - 短時間で大規模に炭素を消失し、その後長期間に渡り炭素貯蔵が回復するような火事・開

墾・その他の広域的な攪乱の頻度の変化。陸域植物の全球 NPP は年間約 57 PgC で、その約 5 ~ 10% は燃焼により大気に戻ります（燃料としての燃焼、山火事など）。

- 広域で炭素の貯蔵とターンオーバーに影響を与える、環境変化ないし土地利用変化がもたらす植物種の分布と境界の変化（常緑樹林から落葉樹林へ、森林から草原へ、草原から森林への転換など。Archer 1995; Hibbard et al. 2001）
 - 炭素、栄養分（特に窒素）および水の利用効率と保持率に影響を及ぼし得る、生物多様性の喪失や外来種の侵入（Schulze et al. 2000）
9. 物理学的な気候、水循環、炭素・栄養循環を構成する、一連の生物物理的・生物化学的システムでは、不安定状態や複数の平衡状態があるものです。それは主として、大気、陸域、海洋、氷の間でのエネルギーと物質の交換が非線形的で、かつ相互にフィードバックしていることによります。例えば、エルニーニョの南方振動現象（ENSO）、北大西洋で起こりうる塩熱循環の鈍化または停止、氷アルベドの激変（Ghil 1994）と砂漠化（Ganopolski et al. 1998）などがあげられます。
10. 気候、大気の温室効果ガス濃度、および炭素循環の人間活動による擾乱、の間には強い相互作用があります。このことが、UNFCCC および京都議定

書という形で、国際的なレベルでの人間の介入を促しているのです。UNFCCC および京都議定書は両方とも、大気中への温室効果ガス排出量の削減に関する国際制度です（図 14）。

現在の研究

生物物理学の視点からは、炭素と関連物質（水、栄養分およびエネルギー）の循環のフローと変換の制御機構を定式化し立証する上で、観測と実験が基本的なツールです。それはモデルパラメータの策定の根拠にもなります。人為的側面においては、プロセス研究が類似の役割を果たしており、人間活動の社会的、経済的および組織的側面に関し仮説を立て、モデル化します。

以下全球炭素循環研究の鍵となるプロセス実験とプロセスモデルの進展について述べます。

陸域生態生理学的プロセス

生理学的研究のネットワークは、前述の Fluxnet や ILTER を含め、数多くあります。Fluxnet：炭素、水、エネルギーのフラックスがどう制御されているか、日別、季節別、年々変動の知見を提供。IGBP の GCTE (the Global Change and Terrestrial Ecosystems) 計画：現在および将来の地球環境における制御プロセスを研究するため、種々の生理学的・実験的研究のネットワークを設立。BASIN (the Biosphere-Atmosphere Stable Isotope Network)：同位体を用いた光合成と呼吸のプロセス研究。大気成分の同位体比を炭素の吸収・排出源の全球推定に制約を与えるため、また、生態系フラックス（光合成と呼吸など）を区分するために利用。大気中の ^{13}C は、水分供給に大きく影響されること、生態系呼吸の $\Delta^{13}\text{C}$ がキャノピーでのダイナミクスと生態系プロセスへ環境の及ぼす効果を統合するのに有用なツールとなりうること、が明らかにされています（Pataki et al. 2003）。

操作的実験も、生態生理学および生物化学モデルの開発と試行に重要です。土壌とキャノピー双方を加熱する実験、大気中高濃度 CO_2 暴露実験（FACE）、灌漑または降水の排除による水分バランス変更実験、肥沃化実験などがあります（Canadell et al. 2002a; Norby et al. 2001; Rustad et al. 2001）。これらの実験で、将来の環境条件下の生態系の変化や、駆動要因が明らかになります。例えば、 CO_2 の施肥効果は、自然の生理学的飽和点約 1000ppm よりずっと低い 500 ~ 600ppm 程度で飽和状態となることが示唆されています（Mooney et al. 1999）。

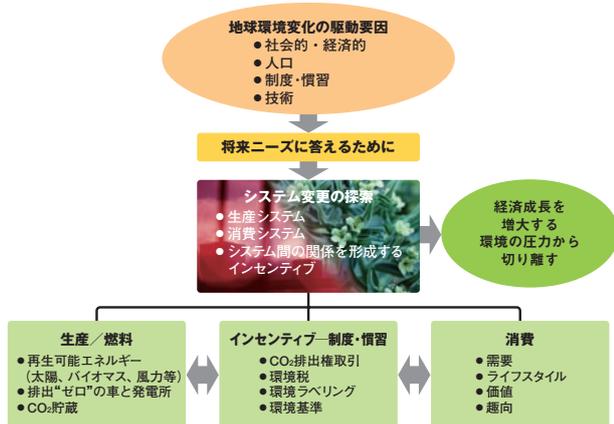


図 14

脱炭素エネルギーシステム。社会経済、人口、制度、技術等の変化に起因する全球環境変化が、将来需要を満たす上で公の関心事になっています。現在および将来のエネルギー需要を、全球への環境影響を最小にして満たす挑戦では、生産、消費、および両者に係るインセンティブ構造まで含めたエネルギーシステムの大々的な転換が要求されます。転換オプションとして、再生可能なエネルギーへの移行、 CO_2 排出量取引の導入、生活様式と価値観の変更などがあげられます。（Vellinga and Wicczorek 2002）

これらの実験から、気温、湿度、栄養分供給などの環境制御に対する陸域呼吸の応答の知見も得られています。特に最近、気温の応答へ疑問が提起され (Valentini et al. 2000 など)、陸域の呼吸速度が、全球炭素循環モデルで過大評価されていると示唆されています (Cox et al. 2000)。土壌呼吸と乾燥した暖かい土壌条件との相互作用、乾期後の雨の効果、スノーパック効果、生育季節の長さは、さらに理解を深め、モデル化を進めるべきテーマです。

陸地と大気間の長期的な炭素交換の支配因子は、短期の制御因子とは異なります。長期的には、生物群系の再分布や攪乱の変化が支配因子に含まれます。気候変化によって生じる生息地や植生域のシフトの一時的な効果と、現在分断されている生態系の大規模な再分布の効果が重要です。

攪乱、土地利用・マネジメントの実施

土地利用や土地被覆の攪乱や変化は、炭素ストックの重要な制御要因です。土地利用または土地被覆の転換は、陸域生物圏を出入りする炭素フラックスに大きな影響を与え (Houghton 1999; Pacala et al. 2001)、炭素の吸収源から排出源に変わる地域もありえます (Kurz and Apps 1999 など)。

多目的土地利用が吸収源強度および炭素ストックに及ぼす効果も数多く研究されています (IPCC 2000b; Canadell et al. 2002b)。CO₂ の大気蓄積速度を遅らせるためには森林の保護がより重要となり、陸域における緩和策が模索されているためです。土地利用には、再植林、新規植林、森林伐採、農業活動および放棄農地の再利用等が含まれます。

バイオマス燃焼や山火事、その他の攪乱が、主要な CO₂、CO および CH₄ の排出源であると推定されます。過去の攪乱の変化と、その大気中温室効果ガス濃度への寄与とを定量化すべく取り組まれており、化石燃料から排出された CO₂ との比較がある期間については可能です。シベリアのような地域の材木資源やアマゾンおよび熱帯アジアの農地は、それらの国々の経済にとってより重要になっているとはいえ、これらの資源開発は、攪乱の頻度を変え、開発後の生態系の潜在的炭素ストックを変化させています。人為的な影響、森林伐採、山火事と気候変動の間の相互作用は複雑で、シベリア、熱帯アジアを対象した取り組みや、LBA (the Long-term Atmosphere-Biosphere Experiment in Amazonia) での取り組みなど、多くの研究があります。泥炭地からの流出または燃焼による炭素排出は、特に

着目されています。

大気-海洋間フラックスと上層海洋生物化学プロセスの制御要因

海洋生態系では、1年単位から10年単位の気候の振動現象 (北極域、北大西洋、北太平洋および南方振動) とそれらの連動が上層海洋の生物化学および大気-海洋間炭素フラックスの主要な制御要因であることがわかってきました (Doney et al. 2000)。大気-海洋間フラックスの物理的・生物的制御機構の研究ツールには、繰り返し行われる水文学的調査、時系列ステーション観測および、炭素、水文学、微量成分測定など総合的に取り組むその他の海洋観測が含まれます。SOIREE (the Southern Ocean Iron Release Experiment) では、赤道太平洋地方や南方海洋における計画的な鉄分供給実験から、富栄養・低クロロフィル地域における鉄分制限の重要性が示されました。南方海洋の表層水域で栄養分として与えられた鉄分へ植物プランクトンが最長6週間まで応答します (Boyd et al. 2000)。この SOIREE の結果を用いて、氷河期から間氷期或いは間氷期から氷河期への気候変化における鉄分制限の役割に関する研究 (Watson et al. 2000) も行われました。将来の海洋プロセス研究に特に関連するのは、外向きフラックスとそのコミュニティ構造依存 (珪藻類と微生物のコミュニティ)、地球化学的な機能 (窒素固定、石灰化)、物理的変動性 (熱帯不安定波、中規模の渦) および極微量栄養素などの研究です。

大気同位体比およびトレーサ研究

同位体比に関する情報の統合と理解は、炭素フラックスのプロセスの解明および大規模なパターンと変動性の診断に貴重なツールとなります (テーマ1にも関連します)。同位体を用いる研究は以下の点を明らかにする上で重要です。

- 大気中 CO₂、¹³C、O₂/N₂ の研究と、物質収支計算および大気インパース解析から、化石燃料、陸域-大気交換および海洋-大気交換に起因する炭素の大気中へのフラックスが定量されてきました (IPCC 2001a; Schimel et al. 2001)。特に、大気 ¹³C 観測から、大気 CO₂ 濃度の増加速度の変化の大部分は南半球より北半球の炭素交換の変化によるものであること、増加速度の年々変動は海洋生態系より陸域生態系に支配されていることが示されています。
- 現在、酸素収支に関しかなりの不確かさがあります。O₂/N₂ 測定に関連した解釈での主な問題は、海洋の温度上昇や循環パターンの変化によって起こる O₂ 蓄積の長期的な変化によるものであるこ

とが明らかになりつつあります。例えば、現在の IPCC (2001a) の海洋と大気吸収源の大きさに関する見積もりには、このことによる誤差があります。

- 海洋の CO₂ 貯蔵量のグローバルまたは特定地域におけるパターンの 10 年単位での見積もりは、数値モデル (¹⁴C 測定等放射性同位元素測定で校正) や、DIC (溶存無機炭素) と海洋の ¹³C 分布の時間変化、データに基づく人為起源の DIC 推定 (Sabine and Feely 2001) など、様々な手法から制約されます。
- 全球の GPP (陸域総一次生産) と NPP/GPP 比は、CO₂ 中の ¹⁸O から推定されます (Ciais and Meijer 1998)。

化石燃料排出を支配する経済的および技術的な進展

化石燃料排出は、しばしば炭素循環の外的駆動要因とみなされ、そのレベルでの正確な定量が非常に重要です (Marland et al. 2000)。しかしながら、将来の全球炭素循環は、人間が不慮の擾乱にも危険を察知して応答するので、化石燃料排出と炭素-気候-人間システム間の相互作用によって決まることになります。化石燃料排出を炭素-気候-人間システムモデルに組み込むことが、将来予測の主要な課題です。

制度・慣習的な生活形態と炭素循環の地域レベルの相互作用

土地利用管理、化石燃料排出および炭素循環の間のフィードバックを全て理解するには、人間の応答の原動力となる直接的な社会的、経済的要因を認識し、それを取り込むことが重要です。チリの放牧と農業の混合システムに関する研究事例では、気候変動に影響をもたらす土地利用および農村人口の脆弱性に、生物物理的、社会政治的および経済的な変数が影響することが明らかにされました (McConnell et al. 2001)。共有地の殆どは起伏が多く土壌形成が未成熟なため、主として一年生作物用となっていますが、私有地は一般的により肥沃で、より傾斜のゆるい谷に位置し、ブドウ畑など多年生作物の栽培に使われ、水利権のほとんどを支配しています。この場合立地と作物の種類が、生活形態を区別する評価項目の 2 つとなります。この 2 つの生活形態が気候変化に対して示す鋭敏さや応答は全く異なります。

現在と将来の炭素貯蔵とフラックスに関するこのような研究の意味は、プロセスレベルの理解との統合化ではっきりします。ケーススタディ (熱帯林伐採、農業強化など) の比較検討から、土地被覆変化の人間活動要因と、地形的および歴史的背景に依存している変

化の経路がより明快になるでしょう。

スケール間の相互作用

プロセス研究もモデルも、常にある特定の時空間スケールを想定しています (陸域生態系の場合なら細胞、葉、林冠、区画、地域、全球)。時間、空間いずれのスケールでも、情報を 1 つのスケールから他のスケール (上でも下でも) に適合させなければならないことがしばしばあります。別のスケールに移される情報は、プロセスモデルで定式化したモデルパラメータやプロセスに関する記述を含むことがあります。情報を下位のスケールから上位のスケールに移動する場合、「アップスケール」または「集約」、逆のプロセスは「ダウンスケール」または「分割」として知られています。

集約での問題点には、葉スケールのモデルからの樹冠の純光合成量の推計、地点ベースのモデルを用いた国家温室効果ガスインベントリーに使う陸域炭素吸収・排出量の予測、大規模スケールの大気モデルにおけるフラックスのグリッドセル平均値、などがあります。これらは、各専門分野の主要な検討課題となっています (Bolle et al. 1993; Michaud and Shuttleworth 1997: 気象分野の課題; Ehleringer and Field 1993: 植物における生態学的な分野の課題; Kalma and Sivapalan 1995: 水文学分野の課題)。

いくつかのイニシアチブで、スケールおよび集約に対する方法論的アプローチを構築し、これらのアプローチをテストするためのデータを収集しています。

- 陸域生態系と大気間の相互作用に関する大規模なキャンペーン実験で、種々のスケールの多数のデータが収集されています (Hutjes et al. 1998)。
- BigFoot プロジェクトは、様々なスケールのデータの検証とスケール課題の解明を目標としており、これにより衛星データプロダクトのより進んだ利用に導こうとしています (Running et al. 1999)。
- 陸域生態系における炭素と関連物質のフラックスのスケールモデルについて、集約に関する系統的なアプローチが進められています (Baldocchi et al. 1996; Raupach et al. 2002)。

炭素循環の脆弱性:非線形ダイナミクス、閾値、生活形態の変更

炭素-気候-人間システムのダイナミクスには、システムの主要な要素やプロセス間の相互作用やフィードバックが非線形であるため、未知の閾値や想

定外の出来事が含まれるものと思われます (Charney 1975; Claussen 1998; Falkowski 2000)。

- 海洋循環の安定性 (例えば、熱塩循環の鈍化や停止の可能性)
- 現在の吸収源が飽和した時、それへの応答として、将来に発現する陸域生態系の炭素固定能力 (CO₂ 施肥効果、放棄されたの森林の再生) (Cramer et al. 2001)
- フェノロジー、土壌呼吸、凍結-融解ダイナミクスの変動、永久凍土融解、地下水面の変化、干ばつ、雪の有無、火事、虫の蔓延等が急変して制御プロセスが変化した場合の、現在の陸域炭素貯蔵量の持続性
- 陸からの塵埃蓄積による海洋 NPP の増強のような、陸域-海洋システム間フィードバック
- 炭素システムの変動に対応し炭素管理に向かう社会的・政策的な要因 (気候変動による危険の認識と、その結果推進される、大気中の温室効果ガスの蓄積をおさえるための新しい制度・慣習的生活形態とに関連)

殆どのプロセスは、気候変化、人間システム、全球炭素循環の相互作用の結果によるもので、大気 CO₂ の蓄積を加速も減速もさせる可能性があります。炭素

循環を安定化させるためには、化石燃料排出の大幅削減と炭素固定の増加が緊急に必要なのです。

こうした相互作用が起きる可能性が高いにもかかわらず、完全に統合した炭素-気候-人間モデルがまだ存在しないため、定量化は困難で、地球システムの一部の要素が定量化されたに留まっています(後述の「統合モデル開発」を参照)。しかし、炭素-気候統合モデルは、起こりうる非線形応答の主要な様相を示しており、今世紀中頃から陸域吸収源の強度は鈍化、今世紀の終わりには排出源に転換することが示されています (Cox et al. 2000; 図 15)。生物物理-意思決定結合モデルもまた、今まで予測されていなかった結果を示しています (Roughgarden and Schneider 1999)。

統合モデルの開発

システムの生物物理学的要素間の相互作用とフィードバックに関する知見がまだ限られているので、全球炭素循環を地球システムモデリングにより理解しようと試みられています。人間活動によりシステムにもたらされる大規模な擾乱 (化石燃料燃焼と陸域植生被覆の変化等) の程度の評価への適用も期待されています。地球のシステム間の変動相互のフィードバックを知ること、人間起因の問題の認識も等しく重要で、それ

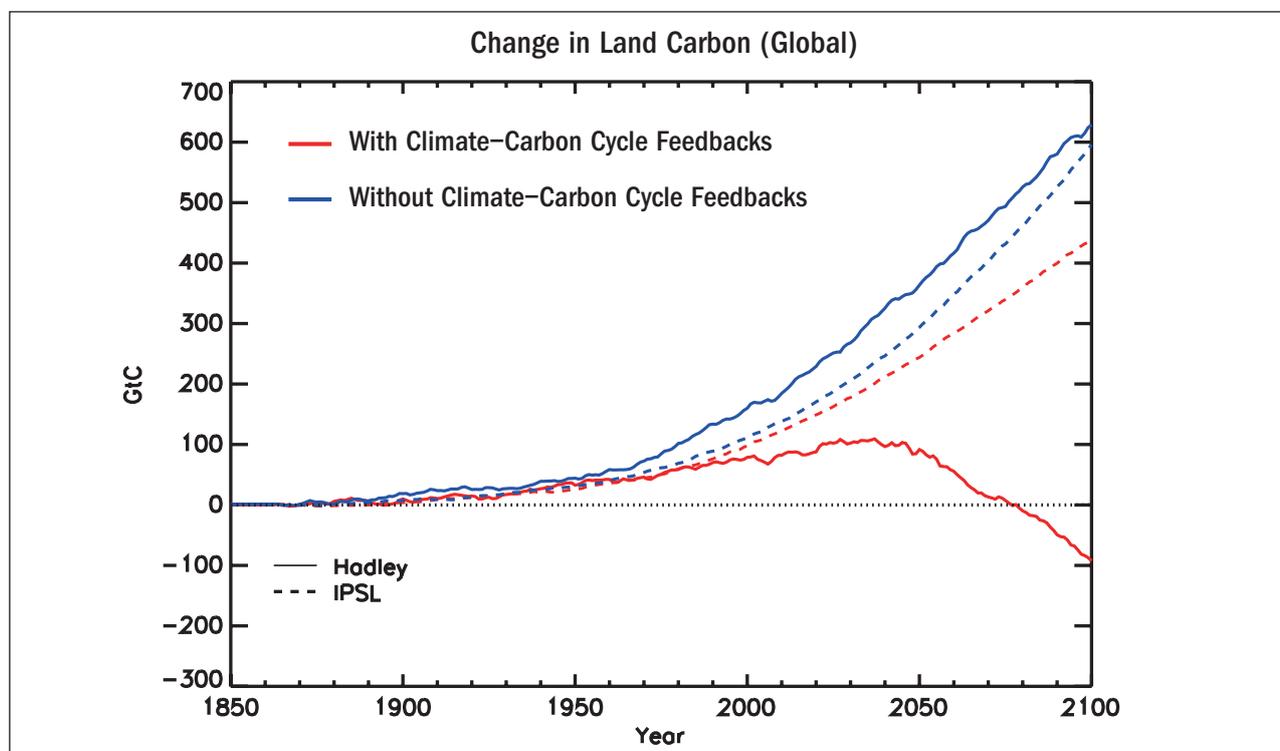


図 15

2つの気候-炭素循環統合 GCM による全球陸域炭素 (植物と土壌) 予測値。炭素貯蔵量の上昇：正。Hadley Centre のモデル結果—実線、IPSL のモデル結果—破線。青線：気候変化を考慮しない場合、赤線：気候-炭素循環のフィードバックを完全に統合させた場合 (Cox et al 2000)。

らは、人間のエネルギーシステムの利用と管理の政策と考え方に変化をもたらすはずで

EMICs (Earth-system Models of Intermediate Complexity) は、何千年にわたる数値積分には十分シンプルですが、地球システムの現実的な描写を行う上では十分に複雑です。なぜなら、包括的で完全に統合したプロセスベースモデルを使い、起こりうる以上の相互作用を含んでいるからです。今日まで、EMICs は、土地利用や CO₂ 排出など所定の人的要素と、地球システムの生物物理学的コンポーネント (地球圏、大気圏およびいくつかの生物圏のコンポーネント) に重点を置いてきました。この分野では、生物界 (生物圏) と人間的側面 (人間活動圏) のより改善された表現が得られつつあります。全球的な有意さを保ってプロセスを的確に捉えるためにモデルに要求される空間解像度 (例えば地域レベル) の向上が課題です。

完全に統合した炭素循環を含む大気、海洋、土地および水圏の包括的な三次元全球気候モデル (GCMs) が、現在、開発されています。大気と海洋の輸送プロセスの現実に近いと思われる記述を与えるとともに、これらのモデルで用いられる生物物理学的パラメータに陸域植生プロセスを統合しているので、物理的環境パラメータがどのように生物的環境パラメータに影響を与えるか、その逆はどうかという相互作用に関する表現も提供します。最終的には、こうしたモデルが、予測ツールとして最も信頼できると考えられます。

大規模で複雑なモデルの主な問題点は、検証です。予測モデルのコンポーネントは、現在とも過去とも異なる気候に対し、頑健である必要があります。統合モデルの頑健性は、現在、4つの方法で確かめられています。第1に、個々のコンポーネント (陸域、海洋、大気、経済、社会) は、キャリブレーションデータの範囲の内外でテストされています。第2は、歴史的傾向の再現で、生物物理学的コンポーネントでは氷河期・間氷期、完全に統合したモデルでは工業時代、が再現できるか、です。第3は、モデルやサブモデルの様々な互換性を促す戦略があるので、結果が特定のモデルの想定にどの程度依存しているかの評価が可能であることです。最後に、地域的モデルの相互比較では、地域的スケールで起こる様々な生物物理的および社会的条件を掘り起こして用いることで、準全球スケールの検証を可能とします。

社会経済的側面と炭素循環を組み込んでいる他のモデルには、IMAGE (the Integrated Model to Assess

the Greenhouse Effect : Leemans and van den Born 1994) などの統合された評価モデルや、京都議定書への社会的応答を予測するゲーム理論に基づいた政治システムモデル、工業・エネルギーシステムおよび工業転換のモデルなどがあります。

不確実な分野と研究の優先順位

全球炭素循環に影響を与えるプロセス、制御要因および相互作用に関し、以下が未解明です。

- 重要な生物物理学的プロセスの機構は、ほとんど解明されていず、現在のモデルでは十分に表現されていません。その機構には、以下のものがあります。
 - 陸域システムの内外で炭素フラックスを制御している、多目的土地利用、生態系生理学および攪乱との間の相互作用。現在と将来の炭素吸収・排出源に寄与する一連の機構が比較的重要
 - 生態系の様々なコンポーネントにおける陸域炭素配分のダイナミクスと環境応答
 - 陸域および海洋システムにおいて気候変化を促進する (特に気温) 従属栄養生物の呼吸のダイナミクスと応答
 - 陸地を横切り、沿岸海洋・外洋へと向かう炭素の横方向の輸送
 - CO₂ の増加に対応した海洋の炭素取り込み量とパターンの変化に果たす、海洋循環、海水、化学および生態系ダイナミクスの役割
 - 海洋生態系の構造とダイナミクス (高度の富栄養化状態での植物プランクトンとその捕食者)
 - 時間的に変動し海域により異なる栄養のダイナミクスの制御プロセス (栄養不足の北太平洋の海域で、生態系レベルの変化に連動し、窒素不足またはリン不足になり、それが気候変動の原因であるようにみえる)
 - 大気から上層海洋、深海へと連続して炭素を移動させる生物学的、科学的、物理的な相互作用
- 全球炭素循環の炭素ストックは、環境変化に対して非常に脆弱といえます。貯蔵された炭素が大気中へ放出されると、気候変動に対して正のフィードバックとなる可能性があります。可能性のあるのは凍土、湿地および熱帯林です。
- 科学界は、人間システムと制度・慣習の中にある、炭素循環変動の直接的で決定的な要因を認識し始めたばかりです。要因には、国際的、国内的、地

域のおよび地方的スケールでの人間の意思決定プロセスがあります。不確定要素の多くの原因も、介入の多くの機会も人間の側にあるので、これらの変化の要因を認識することが必要不可欠なのです。

- 氷床コアの記録から過去 50 万年にわたり全球大気中の CO_2 濃度は、180 ~ 280ppmv の範囲内でした。この範囲内に CO_2 濃度をおさめていた機構についてはまだ議論中です。
- 上述のプロセスはすべて重要ですが、全球炭素循環と、気候その他の生物化学的循環、人間活動とのつながりの中で現れる挙動にどう関連するか、不確かです。これを解明するため、炭素循環プロセスと全体システムの挙動の相互作用とフィードバックの統合評価が必要です。

以上の評価から「テーマ 2：炭素循環のダイナミクスを決めている、人為的およびそれ以外の制御とフィードバック機構」では以下の研究プライオリティが示唆されます。

1. 有史以前および産業革命以前の大气 CO_2 濃度を制御する機構は何か?
 - 制御特性を明らかにし、氷河期・間氷期の炭素気候システムの時間変動をシミュレートする。
2. 現在の水圏（海洋および淡水）炭素吸収源に関与している複数の機構は何か? その機構の寄与の程度と相互作用は?
 - 炭素の取り込みに対する水圏生態系の構造と機能の変化を介した栄養供給（鉄分、シリコン等）の効果や、気候変動の効果も含む、生物ポンプの制御機構の相互作用を定量化する。
 - 海洋表層へ流入する淡水フラックス（氷溶解、河川流入、降水）の変動、表層水の水平移動と潜り込み、海洋-大気間のエネルギー・水・ CO_2 交換、および気候変動性のダイナミクスを含む、溶解ポンプと炭酸塩化学の制御機構間の相互作用を定量化する。
 - 淡水域における堆積物炭素ストックと好気性・嫌気性分解との相互作用を解明する。
3. 現在の陸域炭素吸収源と、寄与の程度およびそれらの相互作用を支配する機構は何か?
 - 気候変化（降水、気温、湿度、輻射、気候変動性など）、大気組成および大気への投入物質（ CO_2 、窒素など）の変化、土地利用と土地利用管理の変化（過去および現在の開墾、火災の管理）を含む、現在の陸域吸収源とそ
- の相互作用に寄与する複数の吸収機構を解明する。
- 炭素の固定と大気への放出への、自然および人為的攪乱（火事、摂取、収穫、嵐によるダメージなど）の影響を評価する。
4. 大気、海洋および陸水における水平方向炭素フラックスの制御機構は何か?
 - 全球炭素循環の変化と、炭素およびエネルギーの海洋と大気での輸送との間に生じるフィードバックを定量化する。
 - 陸-沿岸-外洋の炭素交換を支配する主要プロセスをそれらの相互作用とともに定量化する。
5. 現在の吸収機構の内、将来残りそうなダイナミクスは? 現在の陸域炭素吸収は飽和するのか、或いは減少するのか、また、海洋炭素ポンプは、今後の数世紀、どのように進行するのか?
 - 複数の一連のデータと改良型予測モデルを利用し、全球炭素気候システムの進展のシナリオに基づいて、地域に即した陸域炭素循環の将来シナリオを作成する。
 - 全球の整合性を図るため、地域シナリオを統合テストし、その結果を、全球シナリオ構築にフィードバックし、制約条件を与える。
 - 長期海洋観測結果（既存および将来の海洋調査、ステーションでの時系列観測、リモートセンシングデータ）を用い、予測海洋炭素モデルを検証、改良する。この改良モデルを将来の海洋炭素ポンプのシナリオ構築に利用する。
6. 人為的炭素フラックスと貯蔵の制御機構は何か?
 - 地域的な炭素貯蔵量とフラックスの進展における、種々の経路の駆動力を調査する。
 - 温室効果ガスの人為的排出量を上昇させる生産・消費および土地利用変化のパターンの支配要因を調査する。
 - 富の生産に必要なエネルギー量とエネルギー生産に必要な炭素量の支配要因を調査・解析する。
 - 電源構成比をきめている要因を明らかにする。
 - 公共の行動、個人の行動およびその相互作用が、どのように森林伐採の速さや土地利用行為に影響するかを割り出す。
 - 冷暖房システムの住居・居住パターンの多様性を支配する要素を明らかにする。
 - 輸送システムの特徴の多様性を定量化し、明らかにする。
 - 気候循環（ENSO、太平洋十年変動、北大西

洋振動など)の変化が人為的 CO₂ フラックス (化石燃料、土地利用、火災など) へ及ぼす効果を解明する。

7. 自然プロセスと人間プロセスの間のフィードバックが、人為的および非人為的炭素フラックスをどう増幅または抑制するか?

- 自然および人間の陸域プロセスの間の相互作用、海洋生物学・炭酸塩化学・海洋循環の間の相互作用および炭素循環の変化が人間活動に及ぼす結果を含む、炭素-気候-人間統合システムの簡潔な(次数の低い)モデルを開発する。
- 炭素-気候-人間統合システムを用いて、社会経済学、人間行動および制度に関するコンポーネントを含む、地球システムモデルを開発する。
- 気候-炭素-人間システムが遭遇するかもしれない不安定な挙動をもたらす、フィードバックと閾値をモデリングツールにより調査する。こうした不意で重大な変化の臨界点の解明を試みる。

テーマ 3: 炭素管理

研究の必要性

炭素循環における将来のダイナミクスは、生物圏の自然のダイナミクスと、人間活動による正味の炭素収支の両方で決まります。擾乱を受けている炭素循環の過去、現在、将来のダイナミクスは、テーマ 1、2 で取り扱われていました。テーマ 3 は、大気 CO₂ 濃度とそれに関連する気候変化を安定させるために人間が

介入するポイントはどこか、気候-人間システムをマネジメントする科学分野に焦点を置きます。

また、将来予測やシナリオを構成する能力は、国際レベル、国レベル、地域レベルにおいて政策的に意味があります。それはいくつかの要因と直接的に結びついています。第一に、人間活動が全球炭素循環を攪乱させる主要因の 1 つであるため、人間がどう決めるかという不確実性が、今後の炭素循環の展開の鍵となっているからです。第 2 に、人間による全球炭素循環の変化は、全球の気候システムを変える可能性があります。その結果、水・食物資源、環境の回復力、生物多様性、健康、国際政治の安定性まで変える可能性があります。だからこそ全球炭素循環は、気候ミティゲーションよりはるかに重要な政策課題で、今や、社会発展・持続可能性・公平性に関わる包括的な課題の中の重要なテーマとなっています。シナリオコンポーネント(政策、ミティゲーションオプションの可能性など)を構築し、将来シナリオを着実に分析することが、UNFCCC の目標である CO₂ 濃度の安定化を成功に導くための科学-政策間の重要なインターフェースとなります(図 16)。

知識基盤

現実的なミティゲーションの道筋と何処まで出来るかは、炭素循環モデルと連動した統合評価モデルの分析や、トレンド分析、および帰納的推理から得られます。今までに得られた、一連の「シナリオ要素」と、技術の開発および革新の予想の概要をまとめます(IPCC 2000a,b; IPCC 2001a,b,c; Field and Raupach 2003)。

1. 温室効果ガス濃度は、全球でミティゲーションを

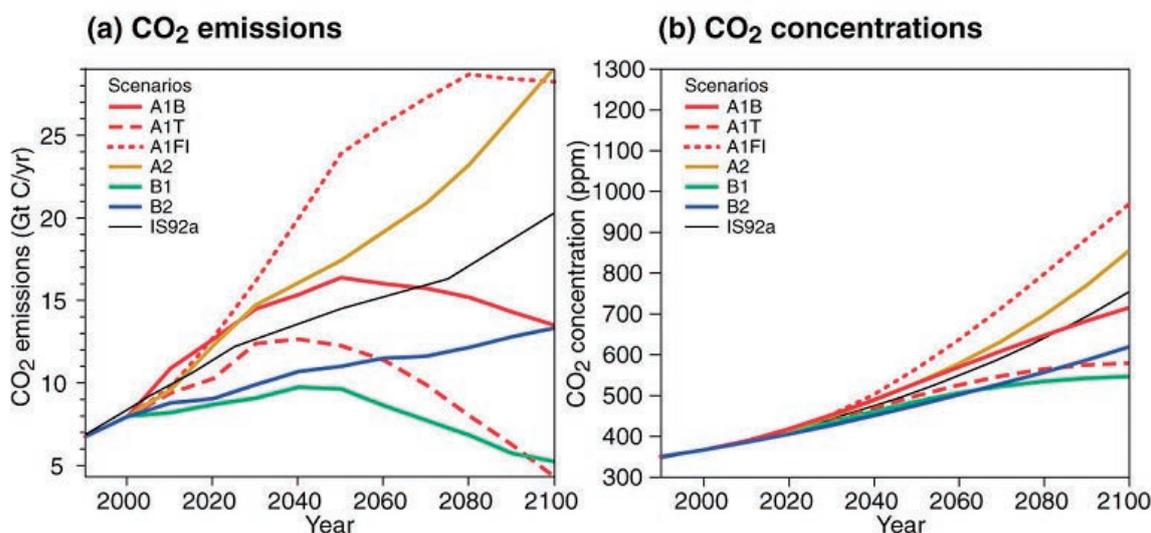


図 16

いくつかの GCM シナリオで予測した 21 世紀中の (a) 大気 CO₂ 排出量および (b) 大気 CO₂ 濃度 (IPCC 2000a)。

- 行っても、今後何十年間は上昇し続け、主要な排出軽減措置をとっても、よくて産業革命以前の2倍のレベルで横ばいになる程度と予測されます。
- 2002年の世界の一次エネルギー産出量は約380EJ（ 10^{18} ジュール）（BP Statistical Review of World Energy 2002）でその81%は化石燃料によるものでした。
 - 国や地域が低炭素排出社会を築ける唯一の技術や方法というものはありません。各国は、社会経済的、政治的および環境的状况に応じて、それぞれの道を選択する必要があります。
 - 望ましからざる気候変化の脅威に対して人間がとりうる応答範囲は広く、大部分が次世紀に大々的に行われると考えられます。
 - 21世紀初期の炭素排出削減は継続的なエネルギー効率の改善、植林、低炭素エネルギー、天然ガスの利用が中心ですがCO₂濃度の完全な安定化には、革新的な非化石燃料技術が必須です。
 - 森林による炭素の吸収と貯蔵は2050年には60～87 PgCに達し、さらに44 PgCが農業地帯で吸収されることが見込まれます。これは、この期間に予測される化石燃料排出の10～20%に相当します。
 - 人類は、快適な生活への脅威となる望ましからざる気候変化に1997年の京都議定書（第一約束期間の温室効果ガス濃度に与える効果はわずかですが）をもって対応を始めています。気候変化の脅威に対する人類の対応は、削減割合や制度と協力レベルに不確定要素があるものの、次世紀にかけてさらに進められるものと見込まれます。

現在の研究

炭素ミティゲーションオプションのポートフォリオ

炭素ミティゲーションの技術やアプローチには、これ一つで気候問題を全て解決可能、というものはありません。国や地域は、社会文化的、環境的背景を踏まえ、適切な選択肢を組み合わせる必要があります。どんな選択肢があり、どれだけのことができるのか盛んに研究されており（Gupta et al. 2001）下記の5種類のミティゲーションに焦点が当てられています（IPCC 2000b; IPCC 2001c; Field and Raupach 2003）。

資源保護と効率向上

技術、政策、人間活動の多くを変えることにより、エネルギー需要を減らすことが可能で、経済的な生産性が向上するか、少なくともコスト削減をもたらします。より効率的な電気製品や輸送手段（機械的エネルギー損失を電氣的に補填するハイブリッドカー等）、

よりよい都市計画（よりよい公共交通等）、コジェネレーション（発電所から排出される低レベルの熱の回収と利用）、より少ないエネルギー投入で済む食生活への切り替え（ベジタリアンへの転向など）などです。これらのオプションで節約できる炭素量は大きく、分野により数十～数百%になります。

非化石燃料エネルギー

水力、風力、太陽、地熱、波力、バイオ燃料（バイオ燃料生産のための作物は、燃料として使用した時の炭素排出と同量の炭素を最低限吸収しています）などがあります。2100年には、最大5億haの土地（全球陸地の約3%）がバイオ燃料作物生産に利用可能になり、その間の3～5PgC相当の炭素排出を置き換えることができます。核分裂や核融合、宇宙太陽発電、地熱等、より進んだ炭素以外のエネルギー技術の研究も、将来、気候ミティゲーションで重要な役割を果たすでしょう。

陸域における炭素吸収源の保全と拡大オプション

このオプションは、土壌を肥沃にし林業を盛んにするという、付加的な環境上、開発上の利益も期待され、大きな関心が集まっています（Yamagata and Alexandrov 2001）。森林再生、植林、地力回復（京都議定書で認められている陸域オプション）による炭素固定量は、2010年で年間1PgC程度で、森林管理を変えれば年間0.175PgCの炭素固定が可能で、また、森林伐採は、全人為的排出の約20～25%を占めているので正味の森林伐採の削減も、大きな可能性を持っています。しかし、森林減少の防止という目標は極めて重要にもかかわらず、多くの地域では困難、ないし不可能です。人為的な介入の要点として、実効性のある社会経済的インセンティブと、森林伐採の究極の要因（市場と政策など）が研究されています。全体として農業分野におけるミティゲーションオプションは、全人為的な温室効果ガス排出の20%を回避可能で、その量は全球で40～90PgCと推計されています。

海洋における生物学的固定

海洋の肥沃化による炭素貯蔵効果と持続期間についてはまだ不明な点が多く、対象となる海域と、使用される肥料種（鉄分、窒素、リンなど）に大きく影響されます。鉄分投入による施肥効果では、南緯30度以南の全海域に連続的に投与したとして最大、年1PgCと推計されています（Sarmiento and Orr 1991）。しかし、不確定要素と副次的な影響は計り知れないものがあり、海洋への施肥オプションが政策決定者によっ

て真剣に検討される前に、十分に研究を進展させることが必要です。

陸地および海洋へのCO₂の人工的廃棄

純粋な液体CO₂の深海注入に関する研究は始まったばかりなのでオプションの包括的なポートフォリオという点から言及します。深海注入したものの物理学的挙動や生物学的・化学的な影響については、ほとんど分かっていません。一方、堆積物や岩石中への地質学的貯蔵に関する研究は、ずっと進んでおり、採掘済みの油井やガス井、深部塩水帯水層内への大量のCO₂投棄の可能性が示されています。CO₂の漏洩、ホスト岩石の溶解、鉱物資源の無価値化、地下水への予測不可能な効果等がなければ、比較的クリーンな解決策と言えます。

ミティゲーションの技術的可能性と現実的な達成可能性

戦略上達成可能なミティゲーションの限界という場合、技術的可能性を指します。それは、生物物理学的に、貯留される炭素量や温室効果ガス排出の削減量から、他の環境や人間活動からの制約を考慮せず、単純に推定したものです。しかし、実際に達成できるミティゲーションは、経済的、環境的、社会的な一連の要因により、個々の技術が社会に受け入れられる程度や、開発の程度が制約をうけるので、技術的に可能とされるものよりも低い（多くはかなり低い）こととなります（図17）。例えば、炭素固定化とバイオマスエネルギー用植林（植林による生物学的吸収源の増大）で、技術的には年間2,000～5,000MtCが見込まれてもその全球的な履行への制約の分析からその10～20%が現実的な値である、と示されています（Cannell 2003）。現在、高度に統合された新研究分野で、ミティゲーションオプションを展開・履行した場合の到達可能性を評価するとともに、気候ミティゲーションと持続可能な開発で当座に得られる利点を見積もっています。また、気候変化へのアダプテーション戦略も同様に重要であり、政策立案者と関係者は、関連するミティゲーションとアダプテーションの相対的な損得を、両政策双方共有利という状況も含めて天秤にかける必要があります。

技術的な可能性に対する制約のいくつかは価格で、より多くの資金投入ができれば、炭素管理戦略の実行可能性が増大します。いくつかの制約条件を以下に示します（IPCC 2001c; Raupach et al. 2003）。

経済的要素

経済市場は、資源へのアクセス面で重要で、政府が

賢く利用すれば、より炭素エネルギーの低い製品への転換に重要なインセンティブを提供できます。下記の経済的要素があげられます。

- 炭素関連製品市場へのアクセスとその性質
- 既存または新規の炭素関連経済分野への工業化・都市化の進展の影響
- 危機に陥りそうな経済状況の有無
- 多くの国、特に発展途上国における負債

他の資源に対する環境上の要求

食物、材木、水などの必需品のニーズにより、技術的に可能なポテンシャルが下がることがあります。

環境上の制約

ミティゲーションの活動が、廃棄物の排出や環境負荷といった環境的代償を招く場合があります。

社会的要素

国や都市・地方の間の社会的要因の違いは、ミティゲーションの成果に大きく影響します。個々のレベルでは、多くの場合、階級構造や生活様式が、文化の象



図 17

経済的、環境的、社会制度的要因が炭素管理戦略のミティゲーションの可能性に及ぼす効果。技術的なミティゲーションの可能性（上記の横線、費用に依存しない）は、経済的要因（市場、取引、経済構造、都市化、工業化）、環境的要因（土地・水・その他資源の必要性、廃棄物投棄、所有権）、制度的・社会的要因（階級制度、政治と公の政策、非公式なルール、生活様式、考え方の姿勢、行動様式）が組み合わさって低下します。その結果が、検討している炭素管理戦略の、持続的で達成可能なミティゲーションということになります。これは炭素にかかわるコストに依存するものであり、コストが他の目標に対する炭素ミティゲーションの尺度になります。持続可能に達成できるミティゲーションの技術的なミティゲーションの可能性に対する割合が戦略として受け入れられる度合いになります。また、図は、炭素管理戦略が「いままで通り」のシナリオで進められた場合の、ベースラインも示しています。（Raupach et al. 2003 に基づく）

徴（車や旅行など）として、炭素関連商品の消費や使用を増加させます。生活様式が、貧困に結びつき技術的代替を困難にすることもあります。社会的なレベルでは、教育や社会自体の様相（先端的、現代化志向、保守志向など）を通じ価値感や考え方で、炭素管理戦略に対しどこまで支持するかが決まります。

制度・慣習的要素

制度慣習からインセンティブの構造が決まり、税金、信用取引、助成金、部門別戦略、所有権制度、その他の公的な要素のどれをマネジメントオプションにする場合でも影響を与えます。また、どのマネジメント戦略が計画・履行されるかという点で政策風土または非公式政策でのインセンティブ構造に影響を与えます。「政策風土」の例としては、制度・慣習の強さ、不正行為の有無、有力な既得権の範囲と特質などが挙げられます。この既得権は、技術展開の速さと代替システムの選択を左右する公共および民間双方の部門で、大きな制約となる可能性があります。つまり、既存エネルギーの技術の所有者は、代替システムの開発、展開の阻止に、相当量の資産的、技術的影響力を行使できます。同様に、政府の規制当局者も、国益を守るため、自国でのミティゲーション技術および技術導入に対する投資の流れに権力を行使して制御できるのです。

技術移転の制度・慣習的、時期的側面

技術移転には、例えば特許制度のように、すべての国や分野で最良の技術に迅速に移行できない、或いは全く移行できないものもあります。多くの場合、技術的なパラダイムの完全な構築には50～70年かかるため、技術移転のタイミングは1つの課題となっています。

人口統計学的側面

人口の密度、増加、移住パターン、分布は、特に高度に社会的に分化している国々では、また別の制約条件となる可能性があります。

消費

消費の増加および形態は、人口統計学的側面と経済的側面での変化とは別に、技術的な選択を制約します。

社会に現在受け入れられている技術が、制度・慣習の変更や経済的な制約の除去を助長するので、研究としては、上述の制約条件を越えて研究をすすめることが必要です。また同時に、制約の有無で、研究と開発の優先順位が決まり、その結果、技術能力に関する知識基盤がどう発展するかが決まります。これら2つ

の重要なフィードバックは、ミティゲーションおよびアダプテーションの将来方式を発展させる上で、上述の制約条件のリストに加え、考慮する必要があります。それは、現在何を持っているかで将来の選択が制限され、過去になされた選択が将来の選択の可能性に影響を与えるからです。つまり、我々はすべての可能性を選択できる訳ではなく、従って将来の方式は限られているのです。

全球排出シナリオの作成

将来動向が予測できず、排出シナリオでは、今日の政策立案者が分析し得た可能な未来を描写しています。分析は、現在の傾向から出発し、異なる社会モデルに行き着く、いくつかの代替案を提示し、気候ミティゲーションや開発の程度も示しています。この分析は将来の予測ではなく、長期にわたり、特定の行動や開発政策をとり続けた場合（またはとらなかった場合）の結果を検討するものです。最も新しい分析としては、Nakicenovic et al (1999) および the IPCC Special Report on Emission Scenarios (IPCC 2000a) があります。

重要な研究分野は、炭素の排出抑制に何の価値もしていない世界（或いは、「今までどおりのやり方」を続けるもう一つのベースラインシナリオ）において予測されている炭素排出レベルと、(UNFCCCによって意図されているように) ある濃度で安定化しようとするときに要求される炭素排出レベルとの間のギャップを埋めるための方策と費用を探ることです。「今までどおりのやり方」のシナリオ IS92a — (2100年には75%の発電が非炭素系で、商業バイオマスが1990年の全球の石油とガスの合算量より多くのエネルギーを提供すると仮定—では、今世紀中にCO₂の安定化は達成できません (Edmonds et al. 2003)。それゆえ、大気CO₂の濃度の安定化を今世紀中に達成しようとする排出シナリオはどれでも、新技術の開発と新政策の提案に多大な努力を傾注することを要求しています。今後、社会経済と炭素排出が統合したモデルを使ったシナリオ分析により、要求される変化の規模とコスト、促進する最適なタイミングが明らかにされる見込みです。

シナリオは（社会組織の様々なレベルで）大規模な技術的变化を進行させるため制度・慣習が要求する事柄を理解する上でも、必要不可欠なツールです。それゆえ、大気CO₂濃度の安定化を可能とする、より効果的な気候と一体化したレジームの設計や、合意の形成、および遂行がどのようなものか見定める上で役立

ちます。

不確実な分野と研究の優先順位

多くの選択肢の中の一つの方法に沿って、エネルギーシステム開発を試行する前に、社会は注意深く環境、経済、社会に与える結果を考慮すべきです。ある方法を選ぶことは、効率性、公正性、持続可能性の間のトレードオフから選ぶことになります。これらのトレードオフを明確にするためには、技術的、経済的、制度・慣習的、環境的、社会的要因を詳細に分析したシナリオが作成されなければなりません。

世界の大部分において、交通システムは化石燃料燃焼に依存しており、人間の炭素循環の変化を伴う交通需要と直接関係しています。交通はCO₂の人為的排出量の25～30%を占めています。車両の生産、道路の建設、およびセメントの生産もまた、顕著に炭素排出量を高めています。交通システムの再設計に関する問題は、技術面、地域のスケールと複雑性、制度面という3点から論じられます。また、こうした将来見通しは、あるコンポーネントの変化が他のコンポーネントの変化に影響を与えるような動的な関係をもつという複合的な観点にたつ必要があります。

それゆえ、将来シナリオまたは将来見通しに関する研究は、これまでにリストアップしたような、「シナリオ要素」の開発や試行を含み、シナリオ要素間の相互作用やフィードバック（質や整合性を含む）も含んでいます。信頼できるリスクアセスメントを、より良い意思決定支援ツールの形で政策立案者に提供することが、これらの課題解決の鍵となります。

しかし、選択されたCO₂の安定化方法と最終目標濃度が、予測が難しい形で展開する様々な生物物理的、社会経済的制約の下（Vellinga and Herb 1999）で行われる指揮と制御プロセスから得られる結果と異なるであろうことを認識することもまた重要です。それゆえ、介入の要点と機会を認識して、それが到来したときに最終的なCO₂の安定化方法と目標濃度がシステムからおのずと導出されるような適応システムを開発する必要があります。

以上のような不確実要素を考えると、「テーマ3: 将来に向けての炭素-気候-人間システムの適切なダイナミクスは何か、人間社会が炭素管理を行うための介入の要点は何で機会はいつか」の研究プライオリティは以下ようになります。

1. 炭素循環の変化に対し、人間はいつどのように応答するのか?

- 様々な地理的、環境的、社会的、経済的状況下でもっとも可能性のあるミティゲーションオプションのポートフォリオを作成する。
- 炭素ミティゲーションオプションで意図していない結果がどの程度現れうるかを探り、負の効果を考慮してもなお持続的に達成しうる可能性を評価する。
- ミティゲーションオプションによる付随的な便益および、適応政策との相互作用を認識する（双方に便益があるミティゲーション-アダプテーションオプションなど）。
- 様々な政策オプションの相対的なメリットを研究する（排出量取引、炭素固定化など）。

2. 炭素循環の自然のダイナミクスと人間活動は、将来の大気中CO₂濃度への影響という点で、どのようにフィードバックするのか?

- 自然炭素循環の将来へ向かって予測されるダイナミクスの下、CO₂安定化の道筋の潜在的な広がり幅を決定する。
- ミティゲーションのポートフォリオを採用した場合の炭素と気候への帰結および変化の結果として生じる人間の挙動へのフィードバックを評価する。
- 正味の陸域温室効果ガス排出の将来の方向性に対する非技術的要因（土地利用の社会的・経済的要因、所有権など）の意味を明らかにする。
- 地方および都市の開発に関する炭素削減可能な代替方法を調査する。

3. 化石燃料依存の経済に対する代替案を促進する上で打開する必要のあるインフラ基盤要素とは?

- 代替エネルギーへ速やかに移行した場合、あるいは緩やかな場合の効果および、エネルギー消費量への影響を研究する。
- 先進工業国と非工業国間のエネルギー使用の相違および、エネルギー消費量の違いに影響する社会的、文化的、経済的、技術的条件を明らかにする。
- 民間エネルギー部門を低炭素技術および市場へ向けて発展させるように方向付ける技術的、経済的、社会的要因を明らかにし、定量化する。
- エネルギー分野およびマテリアル使用分野における、消費者のニーズや好みの原動力は何かを明らかにする。
- 炭素循環に対する影響からモビリティに対するニーズを部分的または完全に切り離せる可

能性を調査する。

4. 世界の異なる国や地域における介入の要点と機会とは?
 - 生物的（陸地と海洋）ミティゲーションオプションを適用する時点と場所をともに特定する。
 - エネルギーシステムベースのミティゲーションオプションを適用する時点と場所を特定する。
 - 利用可能なオプションを将来において展開する場合の人類の選択の影響を調査する。
5. 炭素－気候システムの変化に対する人間の応答の性質と帰結を決定づける上での（様々な社会組織レベルにおける）制度・慣習の役割とは?
 - 購買、投資、生活様式に対し、有害な環境影響を大きく低下させる方向に導くことのできる制度的、社会心理学的、技術的な手段を決める。
 - 温室効果ガス濃度の実効的な安定化の達成に必要な制度・慣習、モニタリングメカニズム、コンプライアンスメカニズムを探求する。それらの進展における幅広い特徴は予測可能か？
 - UNFCCC と京都議定書によって提案された手段の意味合いと有効性を調査する。
 - より効果的な気候レジームの設計、同意形成、履行の見通しを探る。
6. 気候変化の中長期的影響による気候－炭素システムの変化がもたらす（また、今後もたらすであろう）様々な社会的、地域的影響とは?
 - 気候－炭素システムの変化に対する、社会経済的な分野および地域の脆弱性を調査する。

3 Implementation Strategy 研究実施計画

研究実施計画は、3つの科学的テーマと同様、(1) パターンと変動性、(2) プロセスと相互作用、(3) 炭素管理から成ります。各テーマの、3つの研究活動は、プロジェクトの全期間を通じGCPの主要研究分野となります。各研究活動には、多数のタスクがあり、分離された履行ユニットであることもあれば、総合的な目標に達するための段階的アプローチの構成要素であることもあります(図18)。GCPは、全球炭素循環またはその一部の時宜にかなった統合に向け総力をあげて取り組みます。そして、支援者に特別なコミュニケーションとサービスを提供します。

本章では、10年のプロジェクト期間中に展開する大きなポートフォリオから、初期の研究活動について説明します。研究実施計画や様々な研究活動の進展は、GCPのWebサイト(www.globalcarbonproject.org)から定期的に報告します。

全球炭素-気候-人間システムの統合を成功させるべく、多様なコンポーネント間の学際的調整努力を求めながら、3つのテーマの研究活動を並行して進めます。特定の研究者グループが特定の研究活動を主導することになりますが、各研究活動の最終目標を達成するためには、研究実施計画の他の部分の主導研究者グループからの十分な支援およびそれらのグループとの調整が必要となります。

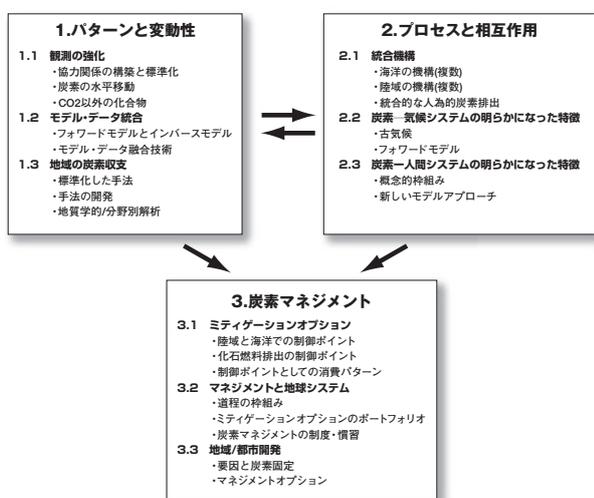


図18

全球炭素プロジェクト研究実施計画

炭素循環に関する最も専門的な研究は、GCPのスポンサープログラム(IGBP, IHDP, WCRP)の後援による数々のプロジェクトを通じ、既に調整・履行されています。同様に、炭素循環に関する準全球的な研究も、多くの国家および地域の炭素プログラムを通じて履行されています。GCPでは、全球炭素循環を広い視点で集約するGCP指針を堅持し、高度な統合に向けた協力を促進することにより、炭素研究の価値を高めていきます。

テーマ1: パターンと変動性

研究活動1.1: 主要な炭素貯蔵量とフラックスの観測の強化

多くの地域の、また国の炭素循環プログラムは、共通のプロトコル、データの共有、新たなアプリケーションと技術に関する情報の迅速な伝達の促進、共同研究におけるリソースの活用により、互いに補間・強化し合える筈です。しかし、現段階では、これらのプログラムは個人研究者の調整努力に大きく依存しています。多くの国が国際共同研究に貢献しようとしていますが、既存の国および地域のプログラムに関する情報を入手することすら非常に困難な状況です。さらに、プログラムに欠けている要素や、重複している要素を抽出する全球的な戦略もありません。このような状況のもと、GCPは国家および地域の観測・実験計画との協力により、パートナーシップに以下のように寄与します。

- 測定の意義を高めるため、キャンペーン研究協力の機会を提供する。
- 結果のより高度な比較ができるよう、技術と方法の標準化を促進する。
- プログラム間の成果と方法論の迅速な共有を促進する。
- 大気CO₂に加え、CO₂以外の炭素輸送の経路の研究も取り込む。
- 炭素循環の人為的側面(人類圏も含む)の観測を取り込む。
- モデル-データ融合および関連するアプローチにより、炭素循環の海洋、陸域、大気、人類圏の観測結果を統合する手段を提供する(研究活動1.2参照)。

- 国家および地域炭素プログラム間の調整およびネットワーク構築に関する助言を行う。

上記を進める上で、GCPは、炭素循環に関する地域または個々のコンポーネントを研究している多数のグループと、様々なレベルで公式に協力体制を築く必要があります（「その他のプロジェクトおよび研究活動との連携」参照）。

重要な研究活動の1つは、相互比較と品質評価／管理のための、技術と測定方法の標準化の促進です。多くの観測や実験プログラムで、プライマリースタンドアードがなかったり、求められている方法や標準ではSI単位系に変換できない場合があります。各機関からのデータを、最適な精度でデータ統合ができないのではないか、特に懸念されます。

タスク1.1.1: 陸域、海洋、大気、人類圏における炭素貯蔵量とフラックスの計測の調整と標準化

海洋：

GCPとSCOR-IOC海洋CO₂アドバイザーパネルの協力で設立したIOCCP（the International Ocean Carbon Coordination Project）は、全球スケールの海洋炭素モニタリング活動を調整する予定で、WOCEの一部のCLIVARへの移行や、SOLAS（the Solar Ocean-Lower Atmosphere Study）、IMBERT（Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research）、GEO（Global Eulerian Observatories）パイロットプロジェクト、SOOP（ship of opportunity projects）の一部として行われる表面pCO₂と時系列観測とが含まれます。大気-海洋フラックス、海洋堆積物の計測も同様に調整する予定です。IOCCPは、Web情報にもとづき国際協力のための定期的なワークショップ開催等、協力のお手本を示しています（<http://www.ioccp.org>; 図19）。これには、国内計画や国際的プロジェクト情報の頻繁な更新と、計画間に摩擦が生じないか、よりよい協力体制や限られたリソースの有効利用の提案がないか定期的なチェックが要求されます。

陸域：

GCPは、多くのネットワークおよびそれぞれの国で集められている、森林インベントリーデータ、フラックスタワー（Fluxnet）、土地利用変化（FAO、UNFCCC）、バイオマス燃焼（火災ワーキンググループ）、操作実験などの陸域全球データセットについて、観測、キャリブレーションおよびデータの取り扱いの標準化を推進しています。標準化の取り組みは、多数のグループ（GTOSなど）で順調に進行しており、そのまま継

続できるよう協力していきます。また、陸域観測を大気および海洋観測ネットワークを適切に調整します。

大気：

品質の評価や管理、相互比較、データの品質向上のためにGCPが協力する、大気観測の標準化と観測を改良するための全球プログラムがいくつかあります。この中には、14ヶ国の100を超える観測点のデータをハーモナイズしているGLOBALVIEWや、WMO（世界気象機関）とIAEA（国際原子力機関）の専門家会合で提唱された、大気組成測定の方法論とキャリブレーションの標準化を促進するGLOBALHUBS戦略があります。また、O₂/N₂、APO（Atmospheric Potential Oxygen）、安定同位体（GCTE-BASIN）、水と熱、その他の測定を行っている他のグループとも活動していきます。さらに、宇宙からのCO₂測定の開発、そのデータ同化アプローチとの関連づけ、検証手法も推進します。

人間圏：

人間活動に関係する炭素貯蔵とフラックスは数多くあり、炭素収支や大気インバース解析での利用には、標準化し整合性を持つ必要があります。これらの観測は、化石燃料排出や、森林伐採、埋め立て、農業活動等の土地利用活動による排出等を、時空間的に適切にカバーします。GCPは、特定分野で活動している多くのグループに協力し、国レベルや地域の取り組みと重要なアプリケーション間の連携を図ります。

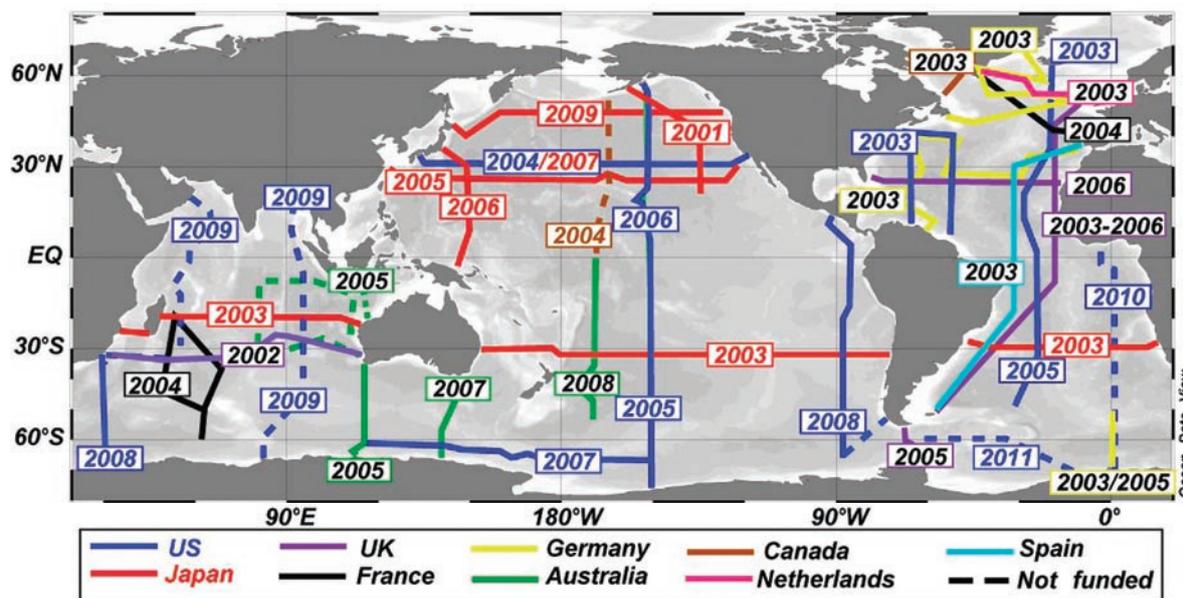
タスク1.1.2: 河川輸送、大気輸送および貿易による炭素の水平方向輸送の観測

河川輸送：

GCPは、下記の2点に優先的に取り組みます。

- 淡水域における炭素吸収源。最近まで、河川の炭素は、輸送中および沿岸地域で大部分酸化されると考えられてきました。現在、ある量の炭素は水中に貯蔵され、現在の炭素吸収源に寄与しているという十分な証拠があります。GCPは、ほとんど特定されていない陸域と水圏との間の炭素の移動に関する地域的、全球的な推計、および淡水域の吸収能に関する研究を促進します。
- 炭素の吸収・排出源としての沿岸地域。沿岸地域が吸収源、排出源のいずれとして作用しているのか、未だ多くの不確実要素があります。GCPは、沿岸地域の炭素ダイナミクスの既存および新規データセットを収集し解析する研究活動に、(1) 様々なタイプの大陸縁辺における水平方向の炭素フラックスの定量化、(2) 大陸棚斜面における炭

(a)



(b)

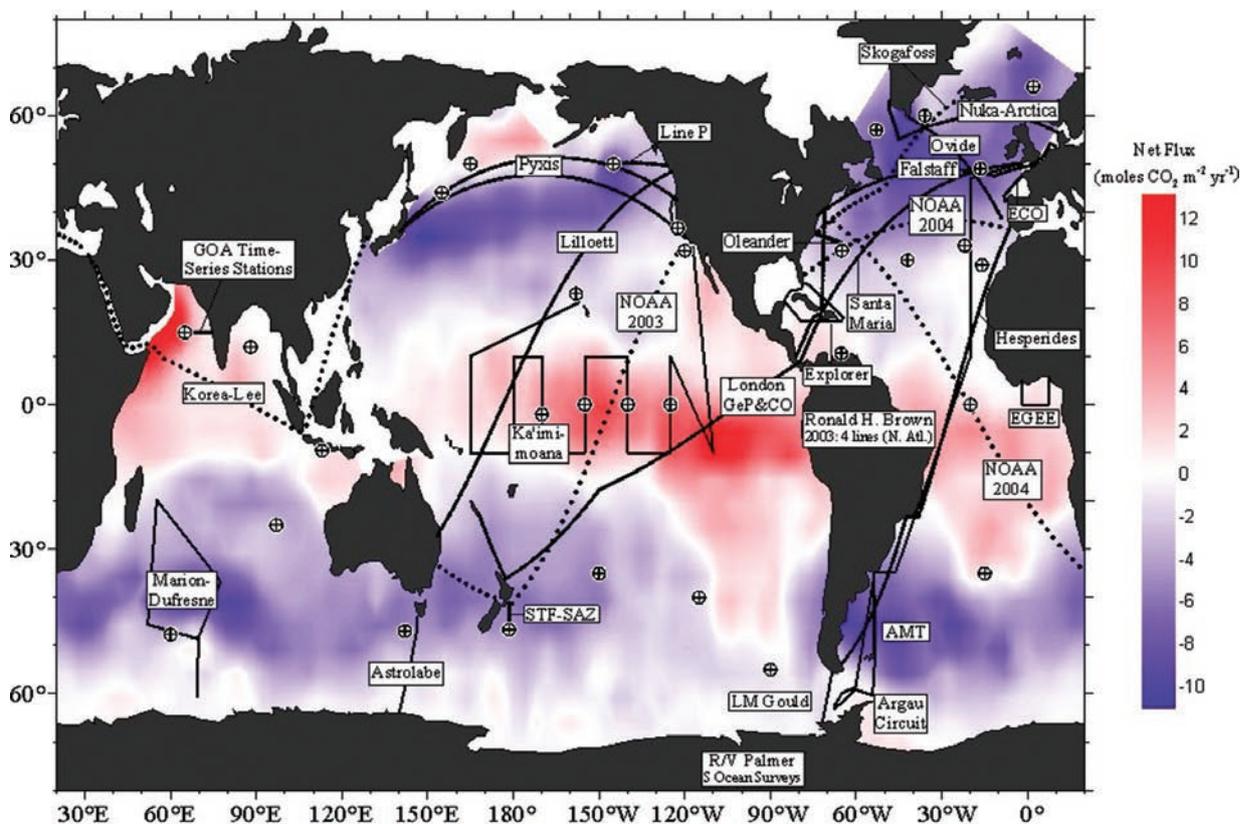


図 19

IOCCP (タスク 1.1.1) による最初の成果。(a) 炭素システム計測を行う水文学分野の観測計画 (実線は資金援助を受けたもの。破線は现阶段では完全には資金援助が受けられていない)。(b) 既存または計画中の海洋表層近傍の pCO₂ 測定に関する全球地図 (実線は既に観測が行われているものを、破線は計画段階のものを示す。ラベルは船舶名またはプロジェクト名。十字のついた白丸は、計画中または既存の表層 CO₂ の時系列観測ステーション)。背景の地図は、Takahashi ら (2002) による正味の年間 CO₂ フラックスの図。(Sabine and Hood 2003)

素貯蔵量の重要度の評価、(2) 大陸縁辺内、およびそれを横切る炭素フラックスの統合的把握と評価、を目的に取り組みます。

大気輸送：

炭素の大気輸送は全球炭素収支の上では、大きなコンポーネントではありません。しかし、大規模な風塵は、大量の炭素を重要な養分である鉄分、リンなどととも地域から持ち去り、それらが貯蔵される地域（例えば、海洋）の炭素吸収・排出に影響を与える可能性があります。GCP は、侵食に関する研究ネットワークと連携し、風塵に晒されやすい地域の炭素除去量および淡水域と沿岸地域への養分輸送と炭素の吸収・排出との関係を定量化します。一連のケーススタディを選定する予定です。

貿易：

大部分の化石燃料は採掘され、また、多くの世界の生態系は収穫されます。これらは時には極めて集中的に行われます。化石燃料、製材、食物の中の炭素は、国内または国際的な取引ルートに沿って横方向に輸送され、炭素が固定化されていたのとは別の場所で、大気放出されるか（例えば、化石燃料や食物）、集積されます（例えば、家具）。貿易は炭素排出および吸収に全球的にみれば効果はないものの、地域レベルでの排出源と吸収源のパターンと変動性には影響を与えます。GCP は、貿易による炭素フラックスを地図に描けるように、林業、農業統計を利用した地理情報に基づくデータセットを調整、統合して行きます。

タスク1.1.3:その他の関連する炭素化合物の観測

GCP は、下記 2 点の優先研究分野に取り組みます。

- CO₂ 以外のガスも地球温暖化に大きく寄与します。温暖化係数はより大きく、大気中の寿命はより短いので短期の温暖化ミティゲーションで対象とする有力候補です。特に CH₄（メタン）の地域的、全球的収支に絞りこんで、GCP は利用可能なデータセットを統合し、観測システムの強化に貢献します。
- 黒色炭素は、バイオマス燃焼による主な生成物であり、難分解性のため、長期の炭素吸収源として寄与します。GCP は、サバンナ、温帯および寒帯森林など、世界の森林火災が起こりやすい地域における黒色炭素生成の量や質をより理解するため、データを統合し、新たな研究を促進します。黒色炭素残留物に関する、より精査された全球的な推計が得られると見込まれます。

研究活動1.1の成果

- 全ての主要な、国、地域、全球対象炭素プログラムおよびプロジェクトに関する情報のインターネットポータルサイト
[<http://www.globalcarbonproject/carbonportal.htm>]
- 海洋観測活動に関する最新情報、標準と実施に関する合意を目標とするワークショップ情報、プログラム間の協力体制の提案に関する情報を提供する Web ベースの情報ツール。GCP-CO₂ パネルの IOCCP に基本情報も提供する予定
[<http://www.ioccp.org/>]
- IGOS-P の IGCO と連携しての、観測リソースの最適化および、協力観測プログラム（炭素観測における抜け、重複、必要性に基づく調整）の見えにくい科学的な便益を明らかにする定期的な一連の提案
- 地域・流域観測プログラムとの協調により形成された最適な観測の実施および整合性の要求に関するガイドライン
- 全球炭素収支およびモデル検証を目的とした海洋、陸域、大気圏、人類圏の炭素観測に関する標準化されたデータセット。本活動には CO₂ 濃度および同位体に関して全球規模でインターキャリブレーションを目指す GLOBALHUBS の促進も含む。
- 溶解無機炭素および有機炭素の河川系での輸送と、貯水域、沿岸部における堆積物に関する新規推計を含む、既存の全球データベースの編纂と更新
- 農業生産物と林業生産物の統計データのハーモナイズを含む、貿易による炭素輸送の規模と時間的推移を見積もるための新しい方法、および見積もり
- 排出源と吸収源に影響を与える人為的起源の炭素化合物（CH₄、黒色炭素など）に関する既存データセットの蓄積と統合
- MODIS/Aqua による総光合成量や表面温度および、宇宙から観測する CO₂ カラム量など、主要な新しいデータストリームのための多数の検証成果

他のプロジェクト、研究活動との連携

この研究活動は、既に炭素循環における個々のコンポーネントを調整している多数の国および地域の観測プログラムや国際的プロジェクトとの協力体制が必要です。炭素研究については、IMBER、SOLAS、CLIVAR と協力して取り組みます。IOC/SCOR CO₂ パネルは、IOCCP の活動全般を通じ海洋関連の調整を行うパートナーの予定です。また、水平方向の輸送に関しては、LOICZ (the Land-Ocean Interactions in

the Coastal Zone)、CMTT (JGOFS-LOICZ joint Continental Margins Task Team) および IMBER とともに、陸地の課題に対しては、GCTE (BASIN、侵食に関するネットワークなど)、LUCC (土地利用/被覆変化)、新 IGBP/IHDP Land プロジェクト、Fluxnet、IT (Industrial Transformation) などと、宇宙からの CO₂ 研究に関しては、GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) との協力体制で取り組みます。調整、標準化、および新規観測の必要性に関して、IGCO と緊密に連携、特に GTOS (中でも陸域炭素観測戦略 TCO) および GOOS プログラムとも連携体制を構築しつつあります。発展途上国が参加しやすいよう、START (Global Change Systems for Analysis, Research and Training) と共同のスポンサーシップを構築しつつあり、南シナ海地域炭素プロジェクトについては、SARCS (START の東南アジア地域委員会) との共同出資が進められています。また、オーストラリア、CarboEurope、NACP (北米炭素プログラム)、中国、日本、LBA (アマゾンでの広域生物圏—大気圏実験) など、すべての国レベルおよび地域の炭素循環研究計画との連携を築いていきます。

研究活動 1.2: モデル開発とモデルデータ融合

モデルデータ融合は、炭素循環の時空間的なパターンと変動性を予測するため、データとプロセス情報を統合する重要なツールとして、近年注目を集めています。また、モデルデータ融合技術はプロセス研究 (特に多数のプロセスとパラメータが同時に扱われる研究) の総合的分析を行うための強力で新しいツールキットを提供します。これは、我々の理解に対する多くの制約条件の適用を意味します。この研究活動は、大気、海洋、陸域データを生物物理、生物地球化学モデルに適用する方法の開発と履行において、中心的な役割を果たします。特に、大気、海洋、陸域のデータおよびモデルの同時使用から、炭素循環のパターンと変動性の決定に関する問題まで、多くの制約条件を適用することに重点が置かれます。

タスク 1.2.1: フォワードモデルおよびインバースモデルの改良

このタスクでは、モデル間相互比較、モデルデータ相互比較を通じ、また人為的攪乱 (土地放棄とその後の推移、消火、栄養供給など) の新たな役割を含めた、次世代のモデルを作成・提供します。モデルには妥当な観測結果を用いて予測する機能と、予測結果を検証する実験データセットが必要です。

このタスクは、IGBP-GAIM (Global Analysis Integration and Modelling Task Force) 傘下の一連の研究

活動に依拠しており、下記のものがあります。

TransCom (Atmospheric Trace Transport Model Intercomparison)

TransCom の目標は、大気輸送シミュレーションの誤差や、使用された大気 CO₂ 測定データの選択、採用されたインバース手法の選択などに起因する全球炭素収支のインバース解析における不確実要素を定量化し、その原因を突き止めることです。TransCom3 で実施された実験の分析により、様々な輸送モデルに関して、予測された排出源/吸収源の分布とその感度について、厳格に評価されました。TransCom3 における今後の直近の研究活動には、鉛直方向の測定データが集まった時点での輸送の比較、表層プロセスモデルに対する大気データの直接的な適用、より高度な表層測定結果 (例えば、多成分の連続観測データ) の利用などがあります。その他、CO₂ 以外の測定結果の制約への組み込み、タスク 1.2.2 で述べるデータ同化モデルアプローチに向けた展開なども取り組まれます。

OCMIP (Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project)

全球の海洋 CO₂ フラックスを明らかにするとともに、既存の 3 次元全球炭素循環モデル間の違いを明らかにすることを目的としています。OCMIP は、自然または人為起源の CO₂ シミュレーションの標準プロトコルを用いている最大 12 の参加グループとともに、多数のモデルの相互比較を行います。OCMIP-2 のサブセットグループは、新たなモデリング研究を実施し、(1) NOCES (the Northern Ocean Carbon Exchange Study)、(2) インバースモデル解析による自然または人為起源 CO₂ の大気—海洋交換に関する制約条件の設定、(3) 海洋モデルのアウトプットに対する AutoMOD (the Automated Model Ocean Diagnostic Facility) の開発、などを予定しています。

EMDI (the Ecosystem Model/Data Intercomparison)

EMDI 研究活動は、幅広い様々な陸域全球炭素循環モデルを、観測・測定された NPP と比較する公の機会を提供します。最初の課題は、自己栄養生物フラックスに関する制約条件を与えると同時に、生物物理操作変数の完全性を与える NPP 観測データを使い、水、炭素、栄養分の収支に関する模擬的な制御とモデルの定式化をテストすることです。EMDI は、全球リター (落葉・落枝) データベース、追加された経年 NPP 観測結果、渦相関によるフラックスの相互比較結果、グリッドデータについての年平均および経年の解析結果、MODIS の NPP プロダクトなど新しいデータセットを

利用した新しいモデルデータ相互比較を組織する予定です。

タスク1.2.2: モデルデータ融合技術の開発

モデルデータ融合は、モデリングの枠組みに観測を導入することと定義できます。これは、(1) モデルパラメータまたは状態変数の推定の改善、(2) パラメータやモデル結果の不確実要素、(3) モデルを却下する能力を提供するためのものです。「モデルデータ融合」という用語は、多数のアプローチ（インバース手法（大気、海洋、生物地球化学）、データ同化、パラメータ推計、多制約アプローチ等）を包含しています。こうしたアプローチは、炭素循環の全球統合に向け、プロセス研究、観測およびモデルを繋げるポテンシャルを持っています。

このタスクの重点事項は以下の通りです。

- 適切にパラメータ化されたプロセスモデルの使用（多くの全プロセスベースモデルはこのような用途の場合過剰にパラメータ化されている）
- モデルデータ融合プロセスにおける、小規模プロセス情報の統合によるアップスケーリング手法の開発
- 複合データセットからのパラメータ推定方法の改善
- 非線形インバース手法の観点からの不確実要素分析の開発
- モデルの整合性の検証を目的とした広範囲の観測から得られる炭素循環関連情報の統合
- 新たな衛星センサから得られる CO₂ カラム濃度測定データを使用する方法の開発
- 炭素循環データをデータ同化に取り込む方向での天気予報のためのオンラインデータ同化との連携の発展
- 感度に関する適切な分析にもとづく観測ネットワークとプロセス研究の費用対効果の改善に立脚したネットワークの設計方法の開発

研究活動1.2の成果

- 新しく適用された数学的アプローチとデータストリームを用いた、今までにないデータモデル融合手法
- モデルデータ融合の従来枠組みの範囲内における、既存および計画中の観測システムと分析的アプローチの評価
- モデルデータ融合技術と観測システムの問題についてトレーニングされた多岐に渡る分野の科学者の育成。この取り組みは、世界中の様々なセン

ターの多くの研究コースによって支援されています。各講習会は2～4週間の講義と実技研修からなり、全球炭素循環の3つの分野（大気、海洋、陸地）の一つのデータ同化ツールと技法を扱います。最終的には、地球システム規模でのデータ同化を取り扱います。

- Web ベースのインターフェースをもつ、研究・教育用総合四次元データベース
- モデルデータ融合分析のためのチュートリアル素材とシミュレーション
- データ同化アプローチ、データの利用可能性と不確実要素分析、生物化学循環研究のネットワーク設計に関する第一次レビューを含む出版物

他のプロジェクト、研究活動との連携

(IGOS-P の) IGCO との連携および、GTOS（およびその TCO 戦略）や GOOS 計画との特別なパートナーシップを通じて、多くの操作型の観測プログラムとの緊密な協力体制が築かれる予定です。データ同化には多様なデータセットが含まれるので、GAIM、GCTE、新 IGBP/IHDP Land プロジェクト、LUCC、SOLAS、LOICZ、JGOFs、IMBER、CLIVAR など多くの適切なグループとパートナーシップを構築する必要があります。また、大気モデルに関するデータ同化専門家集団である JSC/CAS WGNE (Working Group on Numerical Experimentation) とも緊密な連携のための接点を構築します。一方、GEWEX とのパートナーシップは、宇宙からの全球 CO₂ 測定および、GLASS (the Global Land/Atmosphere System Study)、PILPS (Project for Intercomparison of Landsurface Parameterization Schemes)、GMPP (GEWEX Modeling and Prediction Panel) といった表層パラメータ化プロジェクトの理解と発展を促進することが見込まれます。また、全球モデリングに関する取り組みは、GAIM との緊密な協調により実行されます。CarboEurope や NACP といったモデルデータ融合手法を開発している数多くの地域炭素プロジェクトとの連携も進められます。

研究活動 1.3: 国、地域および区域における総合炭素収支

GCP は、異なる社会、経済、環境条件および歴史を持つ地域間の比較を可能にするため、国、地域および流域スケールにおける炭素収支に対する既存のアプローチの間のハーモナイゼーションを積極的に促進します。この研究活動は、与えられた地域の炭素収支（貯蔵量とフラックス）の完全な分析結果を提供するため、国、地域、区域に関する既存のアプローチから出発し、アプローチは、研究活動 1.1（観測の強化）および研

究活動 1.2（モデルデータ融合）の進展に伴い修正されます。また、炭素変動をもたらす人間活動の因子と、それらの地域や地区での空間分布をあきらかにし、炭素管理の制御ポイントの情報を、研究活動 3.3（地域開発）に提供します。下記の項目を実施します。

- 全球パターンと変動性に対する知見を得るための地域の炭素収支の比較
- 全球での推計幅を圧縮するための地域炭素収支推計の利用
- 様々な空間スケールに対する確かな炭素収支システムの開発の促進

この第 3 の項目は、UNFCCC の炭素アカウンティング（温室効果ガスインベントリ）と京都議定書で要求される評価と検証に関連し、温室効果ガスインベントリのための新しい IPCC グッドプラクティスガイダンスレポートの適用に貢献する、多制約アプローチ（研究活動 1.2）の強化です。研究活動の最終目標は、テーマ 1 における 2 つの研究活動をまとめて、全炭素収支における人為起源の変動の全球的な様相を、適切な空間解像度で提供することです。

タスク 1.3.1: 地域スケールおよび流域スケールにおける総合炭素収支（貯蔵量、貯蔵量とフラックスの変化）推計のための標準化された方法の開発

最近 10 年の間に、国、地域、流域、区域の炭素収支は、各所で、様々な理由から研究されてきましたが、分析結果の比較はあまり行われていませんでした。それは、考慮している要素や前定が収支ごとに大きく異なるからです。ある陸域収支では土地利用変化や化石燃料排出を考慮しているが、別の陸域収支では直接的な人間活動を無視して自然生態系にのみ着目していたり、ある推計では、例えば森林インベントリなどの一次データに基づいているのに、別の推計ではプロセススケールのモデルシミュレーションに基づいているなどです。

このタスクでは、与えられた地域または流域における炭素貯蔵量、炭素貯蔵量変化、炭素フラックスの包括的な評価を提供し、他の地域や流域と比較するため、様々な分析的アプローチと評価方法を調和させた一組の共通アプローチの作成を目標としています。貯蔵量、貯蔵量変化（インベントリデータや大気 gradient analyses など）およびフラックス（フラクスタワーネットワークおよび海洋 pCO₂ 測定など）における各観測データの統合化手法を組み込む予定です。国が UNFCCC に提出するような炭素収支報告では、明確な地理情報を含まない、国の統計に基づいて計算されて

います。しかしながら、直接観測を新しいモデルアプローチに完全に統合化し、国際的な協定等で要求される検証を容易にするためには土地利用・土地被覆、気候、生態系構造、用地履歴、攪乱に関する地理情報データが必要となります。

タスク 1.3.2: 地域スケールおよび流域スケールの炭素収支の時間変動の追跡と予測のために開発中の方法論

このタスクは、炭素循環へ自然および人間が及ぼす影響の時空間的パターンの定量化を目標としており、タスク 1.3.1 の炭素収支に関する方法論を以下の手法により拡張・補間します。

- 地域炭素収支に明白に時間的要素を追加する。
- 様々な分野の人間活動（エネルギー、農業、林業、漁業、輸送、工業、家事、廃水処理など）および自然生態系の変化が長期にわたり地域炭素収支へ及ぼす影響を調査する。
- 炭素循環に影響する人間・自然要素および、各要素の重要地域における空間的分布を定量化する。

社会、経済、環境という条件でこれまでに記録されている変化は、歴史的経過を明らかにするために組み込む予定です。様々な要素の重要性を検討するため、様々な時間スケール（地域炭素収支における季節、経年、10 年およびより長期の変化）が採用されます。地域と分野および不確実要素を減らすために求められる重要なデータは、研究活動 1.1（観測の強化）と連携して特定します。

地域スケールにおけるこれらのデータ主導の解析結果は、研究活動 1.2（モデルデータ融合）で開発されたプロセススケールモデルとモデルデータ融合方法のテストへの利用や、大気インバース手法への追加情報としての利用が見込まれます。

タスク 1.3.3: 炭素循環における人為的变化の地理的または分野的な分析

地域炭素収支における変動、その人為的要因および全球の炭素循環への寄与を比較、分析する国際的イニシアチブを促進します。現存する社会的、経済的、環境的条件からみて、近い過去および直近の将来に脆弱さを呈する場所がどこかを特定する既存の総合評価モデルを利用し、地球上の重要地域を特定することから始めます。多部門アプローチを利用した分析は、これらの脆弱な地域において包括的な地域評価を行い、様々な地域間の比較を容易にし、地域内炭素収支の変化を支配する人為的または自然的決定的要因の解明に役立つと期待されます。分析は、まず、既存の地域お

よび分野内の収支に基づき行われ、その後、研究活動 1.2 で開発されたデータモデル融合および多制約手法が組み込まれます。

研究活動1.3の成果

- 国、地域、全球レベルの全ての分野における炭素収支
- 国、地域の炭素収支と、全球炭素収支におけるボトムアップ制約条件としての利用に関する評価
- 既存の国・地域における陸域と海洋の炭素収支へのアプローチのレビューおよび、分析と方法論の改善提案
- 不確実要素の分析・検証技術を伴う炭素アカウンティングシステムの改善
- 研究活動 3.3 で用いるケーススタディとしての、裏付けされた長期にわたる地域炭素収支および変化
- 多数のプロジェクトや国のプログラムから得られたデータおよび分析結果の、利用、入手しやすさ、比較可能性の改善による、国、地域および全球炭素プログラムの間のより強力な相互作用
- 国・地域の炭素プログラム、現地活動、協力・連携の募集、研究活動と着眼点、プレゼンテーションなどを含む炭素循環情報源に関するインターネットのポータルサイト
- 研究の調整（一連の特集記事や著書を含む）を通じて得られた現在の炭素貯蔵量と交換に関する時空間的パターンのより進んだ知見。

他のプロジェクト、研究活動との連携

多数の国および地域の炭素研究プロジェクト。既存のタスクを含む、IPCC 関連の進行中の研究活動：(1) 土地利用、土地被覆変化、林業へのグッドプラクティスガイダンス、(2) 直接的な人間活動による森林と他の植生タイプの劣化による排出をインベントリーに加えるときの定義と方法論的オプション、(3) 直接的な人間活動による炭素貯蔵量の変化および、間接的な人間活動と自然の効果による温室効果ガス排出の原因究明。温室効果ガスインベントリーに関する国内交流や京都議定書報告など、炭素排出源と吸収源に関する SBSTA と UNFCCC の研究活動。GCTE、LUCC、新 IGBP/IHDP Land プロジェクト、IT、IGCO および GTOS、START、JGOFs、CLIVAR、SOLAS、SCOR-IOC CO₂ パネル、IMBERT および LOICZ。IEA（国際エネルギー協会）のバイオエネルギータスク 38「バイオマスとバイオエネルギーシステムの温室効果ガス収支」との連携。

テーマ 2：プロセスと相互作用

研究活動 2.1：炭素貯蔵量とフラックスを制御する機構とフィードバック

自然または人間起因の炭素の排出・吸収源の制御と、空間的に離れた原因と効果の取り扱いの複雑性、特に人間起因の機構の複雑性についての理解を深めるため、新たな研究と統合を促進します。炭素－気候－人間統合システムのコンポーネント間におけるフィードバックと機構との間の相互作用の理解にも重点を置きます。これらは、(1) 人間が炭素循環のダイナミクスを修正することが許される制御ポイントの調査、(2) 陸域・海洋吸収源の将来のダイナミクスと安定性の調査（テーマ 3）の基礎となります。両者は大気 CO₂ 濃度の安定化で、互いに作用しあう重要な働きをします。

タスク 2.1.1：海洋炭素ダイナミクスの機構に関する総合研究

海洋の多数の排出源・吸収源機構とそれらの相対的な重要性、現在および将来の海洋・淡水純炭素フラックスをきめているそれらの相互作用を明らかにするための研究と統合を促進します。つまり、炭素システムプロセスが、個別に、集散的に、どう働くかということです。これらのプロセスには、輸送と混合、生物的炭素固定と分解、およびその相互作用などが含まれます。重点事項は以下のとおりです。

- 鉄分欠乏量 (iron availability) など、海洋生産力および有光層のコミュニティ構造の決定要因
- 海洋上層部や淡水域における再ミネラル化プロセス
- 気候変動性と気候変化が大気－海洋システムの間での炭素分配にどう影響するか
- サブシステム間の相互作用（土壌の乾燥が鉄分の外洋への輸送に与える影響など）
- これらの機構と相互作用の将来のダイナミクス、特に起こりうる海洋吸収飽和との関連の理解

排出源と吸収源強度の分布および、駆動機構とそれらの間に起こりうるフィードバックの評価が得られるものと期待されます。これにより、GCP において、排出源と吸収源に寄与するそれぞれの主要メカニズムについて量的にもおさえられた総合的な地域炭素バランスを構築することが可能になると考えられます。また、テーマ 1 を通して、流域と地域の総合的な炭素収支の作成に資する筈です。

タスク2.1.2: 陸域炭素ダイナミクスの機構に関する総合研究

陸域の多数の排出源・吸収源機構と、それらの相対的な重要性、現在および将来の陸域純炭素フラックスに影響する相互作用を明らかにするための研究および統合を促進します。重点事項は以下のとおりです。

- 現在の陸域吸収源の基礎的な機構の特性解明、定量化、抽出方法の開発。2001年のマラケシュのUNFCCC締約国会議(COP7)の要請を受け、CO₂、窒素等の施肥効果や過去の人間起因の擾乱から派生しているような、陸域炭素吸収源の間接的な人為的要素に重点化
- 森林、農地、放牧地のマネジメントを含む土地利用変化に起因する炭素排出源と吸収源の解明
- 現在の吸収源機構の安定性および将来起こりうる陸域吸収源飽和の可能性の把握
- 地域・区域の炭素ストックの消失の危険の程度、潜在的規模、気候や他の要因に対する感度に焦点を絞った調査
- 気候への重大なフィードバックをもたらす、気候変化の従属栄養生物の呼吸へ及ぼす効果

このタスクでは、多様な吸収源機構の位置と規模をマッピングします。これには、陸域炭素吸収源および排出源に影響を与える機構間のフィードバックを空間的位置関係も含めて評価します。また、現在および将来の排出源と吸収源に影響を与える主要機構それぞれの炭素収支量を特定し、あわせて総合地域炭素収支を算出します。テーマ1を通して、国および地域の総合炭素収支の取り組みを促進します。

タスク2.1.3: 人為的炭素排出に関する総合研究

温室効果ガスの人為的排出を上昇させる生産／消費のパターンおよび土地利用変化の各要因を明らかにし、様々な人為的要素と炭素排出の相互作用、相乗効果、非線形性に関する研究を行います。これにより、全球を代表できるケーススタディが可能になり、より大きな地域を統合して推定することが可能になります。この研究は、炭素変化とその歴史のおよび最近の動向、それに最も関連のある人為的要素と、その地域間の相関（世界の異なる場所でおこる、牛肉需要の伸びに起因した森林伐採など）を含みます。

研究活動2.1の成果

- (1) モデルでの使用、および(2) 炭素ミティゲーションオプションと介入時期の把握、に適した、種々の機構とその相互作用のより深い理解
- 観測された全球炭素フラックスパターン（テーマ

1) と整合のとれた、空間解像度の高い海洋および陸域吸収源機構とその相互作用

- 陸域炭素吸収源に及ぼすCO₂と窒素の施肥効果と林齢構造の効果の最先端知見による統合。これらの機構を観測された陸域吸収源に対し適用できる、整合性のある一連のツールと、この課題に関するSBSTAの要請に対する取り組み
- 将来消失する可能性のある炭素ストックと、それらが気候システムに与える影響の分析（研究活動2.2と併せて）
- 従属栄養生物の呼吸に関する温暖化効果の統合およびモデルの改良に関する提案
- 温室効果ガス排出を上昇させる人為的要素の統合（生産／消費、土地利用変化など）

他のプロジェクト、研究活動との連携

生物物理的メカニズムの研究はGCTE、新IGBP/IHDP Landプロジェクト、JGOFS、IMBER、SOLAS、LOICZとの共同作業により強化・実施します。人為的排出に関する研究活動は、LUCC、IT、IDGEC (Institutional Dimensions of Global Environmental Change)、IPCCワーキンググループIIおよびIII、AIACC (the Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change)と緊密に進められます。また、SBSTA-IPCCとの緊密な協力体制が築かれることも見込まれます。

研究活動2.2: 炭素－気候統合システムの創発的特性

創発的特性は、サブシステムまたはシステムのコンポーネント間の相互作用から現れるシステム全体の挙動を指します。創発的特性には、海洋熱塩循環のボックスモデルに見られるような多数の均衡状態と不安定状態、炭素気候システムにおける氷河期－間氷期循環のような準周期的な振幅、急激な気候変化事象のような非線形変化、そしてJames LovelockのDaisyworldモデルにあるようなホメオスタティックプロセスまで含み得ます。類似の挙動は、モデル予測において人為的攪乱と応答を結合させた時、また、モデルを地球変化によってもたらされる将来の新しい条件に当てはめた時に、あらわれると予測されます。

この研究では、まず、炭素－気候システムにおける過去の変動、特にCO₂の氷河期－間氷期変化について、より深く把握することに焦点を当てます。避けることのできない問題は「炭素循環への人為的介入は次の氷河期を遅らせたり、早めたりできるのか？」と想定されます。氷河期－間氷期循環について多くの機構の説明があるものの、この地球システムの変化を支配

しているモードについて決定的な理解はできていません。GCPは、情報量豊富な氷床コア記録を参照しつつ、炭素-気候システムにおける長期変動の既存の簡潔なモデルについて検討します。主目標は、古気候記録がどのように内部モデルパラメータを制約するか、またそれによって将来における“自然”の炭素循環の挙動にどう境界条件を設定するかです。

次に、攪乱された炭素循環が地球システムの相互作用の要素として含まれる時に現れるシステムの付加的な特性を、特に、閾値や不安定性が出現しないかどうか研究します。最近まで、気候システムの大循環モデル(GCMs)では気候-炭素循環のフィードバックを無視し、代わりに海洋と陸地による炭素の取り込みは気候変化では余り影響されないと仮定してきました。しかし、炭素循環を相互作用要素として含めた最初の全球気候モデル実験では、このようなフィードバックが明らかに大気CO₂濃度の上昇を加速させ、結果として21世紀の気候変化を増大させると示唆しています。ただし、関連する不確定要素は膨大です。この研究では、炭素気候システムの簡素化されたモデル(前述したとおり氷河期循環を背景に開発)を用い、詳細プロセス研究に焦点を当てながら、人為的要因を受けやすい部分を明らかにします。さらに、研究活動2.1で得られる種々の機構の特性および、研究活動1.2で進められるモデル-データ融合を利用し、地球温暖化(および、その他の地球変化)のもとで人為起源のCO₂が海洋・陸域にどのように取り込まれるか、可能な道筋を明らかにします。また海洋および陸域炭素吸収源の飽和の可能性について特にとりあげます。

研究活動2.2の成果

- 炭素-気候統合モデルの開発に関するレビュー、気候研究および炭素研究を行っている科学者間の共同研究の更なる育成
- モデルの相互比較とモデルの検証や開発のための観測データや古気候データの利用
- 研究活動1.2と連携し、統合モデルのための適正なデータ同化手法開発の促進
- 過去の気候およびCO₂記録にもとづく、気候-炭素循環のフィードバックへの新しい制約
- モデル開発におけるプロセスベースの知識(例えば、土壌炭素ダイナミクス、広域植物ダイナミクス、海洋循環など、将来の炭素-気候のフィードバックに関する知見)の、より効果的な利用と表現
- 人為的介入という新たな領域で炭素-気候-人間システムに起こりうる突発的変化のより深い理解

他のプロジェクト、研究活動との連携

この研究活動は、GAIM/WCRP-C4MIP(the Coupled Carbon Cycle Climate Model Intercomparison Project)、WGCM(WCRP Working Group on Coupled Modelling)、PAGES(Past Global Changes)との緊密な連携により進められます。研究活動1.2、特にデータ同化と炭素循環の脆弱性に関するメカニズムと影響を扱ったタスク2.1とも強く連携していきます。

研究活動2.3：炭素-気候-人間統合システムの創発的特性

炭素循環の物理的、生物化学的、人為的要素の統合モデルは未だ揺籃期にあります。この研究活動では、これら全てのサブシステムが結びついたときに現れると考えられる今までにない挙動に着目することにより、この分野における学際的な研究の立ち上げを支援します。そのため、より詳細な予測ツールを開発し、また、炭素モデルと統合した気候システムのGCM(研究活動2.2の次の段階として)からエージェントベースモデルまでの概念的な枠組みの構築を行います。そして、これらのより複雑なモデルで得られる結果を解釈する概念的な枠組みを構築します。

炭素-気候-人間統合モデルの構築は、物理的・生物化学的フィードバックを人間活動に関するエージェントベースモデルに導入する方法と、人間の相互作用と応答を微分方程式ベースの気候-炭素システムモデルに導入する方法の双方から促進します。様々なサブシステムのモデルは、異なった基本構造を持っているため、この研究活動は大きな挑戦になると見込まれます。例えば、物理的気候と生物地球化学のモデルは、通常、連続微分方程式に基づいていますが、人間システムのモデルはエージェントベースモデルを適用したものです。また、人間起因の攪乱に関する多数のシナリオのもとでのシステムの挙動を解明するため、より簡潔なモデリングツールおよび概念的な非定量的枠組みも利用します。結果として得られるモデルにより、補間的な視点が得られ、これらのアプローチの中で要求される整合性がそれらの個々への追加的な制約を与えることになると見込まれます。

上記の潜在的なアプローチとしては、(1)炭素モデルと統合したGCMs、(2)中程度の複雑さのモデル、(3)統合評価モデル、(4)エージェントベースモデル、(5)簡潔な気候モデルと統合した環境的経済、(6)動的システムとゲーム理論アプローチ、(7)最適化/制御理論、(8)概念的枠組み、(9)システムの挙動を明らかにするゲーミングシミュレーター、等があ

ります。

エージェントベースモデルは、統合システムの研究のために特別に期待されている分野です。なぜなら、システム中のエージェントの適応挙動や漸進的に変化する挙動を、それが個々の農業従事者であろうと、国または全球的な組織であろうと、直接的に表現できるからです。

GCP は、(1) モデル研究での取り組みの現状、特に炭素システムに最も密接に関連する人間システムに関する取り組み状況を明らかにします。深刻な欠如が指摘された場合、更なる開発を促進させます。(2) 攪乱された気候-炭素-人間システムにおける、新しいシステムの挙動を、特に急速な変化や非線形性をもたらすようなフィードバック応答に着目して解明できるよう、これらの改良されたモデルアプローチを利用します。

研究活動2.3の成果

- 動的システム、最適化/制御理論、ゲーム理論、エージェントベースモデルなどを含む気候-炭素-人間システムを統合させている、現在および有望なアプローチに関するレビューブック
- 地球システムモデル開発に向けた貢献を含む、気候-炭素-人間統合システム研究のための新世代のツール（新しいモデルを含む）とアプローチ
- 炭素-気候-人間システムに影響を与える重要な相互作用の特定と特性の解明。特に、炭素循環マネジメントに関係するもの
- 人為的介入という新たな領域の下で、炭素-気候-人間システムにおいて発生するかもしれない突発的な変化に関するより深い理解

他のプロジェクト、研究活動との連携

この研究活動は、C4MIP、WGCM、および PAGES や、エージェントベースモデルを利用する多数の、LUCC や IDGEC を含む IHDP イニシアチブとの緊密な連携の下に進められます。この研究活動はまた、GCP のテーマ3にも貢献します。

テーマ3：炭素管理

テーマ3では、観測知識（テーマ1）とプロセス理解（テーマ2）とを炭素-気候-人間システムの効率的なマネジメントと評価を行うために統合し、GCP の総合的な科学ビジョンの完成を支援します。テーマ3では、(1) 炭素循環の将来展開とダイナミクス、および (2) 介入の機会について、気候変化に関連した

科学的なインプットを与えるための政策グループや多様な国際的・国内的プロセスからの重要なニーズに応えます。このシステムを21世紀に発展させることにより、自然プロセス、人為的要因、人間の応答の間の3方向の統合による成果となるものと見込まれます。

研究活動3.1：介入ポイントを明らかにすることと ミティゲーションオプションの評価

(1) 炭素循環の将来の進展が影響を受けると思われる特定の介入ポイントを明らかにし、評価します。また、(2) 持続可能な発展の懸案事項（すなわちトリプルボトムライン）を考えるなど、多様なオプションで到達しうるミティゲーションの重要な評価を提供します。

政策議論において、ミティゲーションは、炭素-気候システムにおける顕著な人為的变化を回避し、それにより政策問題としての気候変化を取り除くことを目標として、温室効果ガス排出を規制、最終的には削減する方向でした。言い換えると、ミティゲーションオプションは、人間が将来の大気CO₂の増減に影響を与える炭素循環における介入ポイントを提示します（タスク3.1.1、タスク3.1.2）。また、他の介入ポイントは、炭素排出の主要な駆動要因である消費パターンに関係しています（タスク3.1.3）。介入ポイントとは、人間が直接炭素循環に影響を与える制御ポイントを意味します。

タスク3.1.1：陸域および海洋での炭素交換における介入ポイント

意図的に導入する陸域および海洋の長期的炭素貯留は、人間が炭素循環のダイナミクスを修正でき、またある程度、大気CO₂濃度の現在の上昇傾向に影響を与える重大な介入ポイントとなります。これには、

- 土地の攪乱に起因する炭素排出の削減（森林伐採の回避など）
 - 陸域または海洋生物吸収源における炭素固定化
 - 地中・海洋貯蔵所へのCO₂の工学的隔離
- があります。

温室効果ミティゲーション効果に加え、大規模な炭素固定化および炭素廃棄プロジェクトは、他の費用と便益を環境的、経済的、社会文化的価値にもたらすものと考えられます。一方で、様々なオプションにおけるミティゲーションの技術的な可能性と、実施上の制約および持続可能な開発の両面を考え合わせた現実的に達成可能なミティゲーションとの間には大きな溝があります。例えば、大規模な単一特異的な森林植林では河川水量と生物多様性が減少するので、準乾燥地帯

と乾燥地帯で植林の拡大は制限されます。一方、好ましい付随効果が見込まれば、ミティゲーションオプションは資金的に実行されやすく、また、社会的にも受け入れられ易くなる可能性があります。例えば、大規模森林再生は、土壌を肥沃化させ、土壌塩類化を抑制させることが見込まれるので、利害関係者や関連機関からの更なる関心を集めるでしょう。つまり、付随的な費用と便益が、与えられたミティゲーションオプションの履行可能性を決めることになります。

GCP は、多数のプロジェクトとミティゲーションオプションに関し、環境面、社会面、および経済面の評価基準（トリプルボトムライン）から一連の分析を行います。これには、(1) 気候目標に到達する効率性、(2) 技術的可能性、(3) 経済的実行可能性、(4) 社会的受容性、(5) 気候的便益以外の観点からの環境上のパフォーマンス、(6) 公平性、が含まれます。気候目標に到達する効率性については、炭素固定化量のみではなく、安定性、永続性、新貯留量の検証しやすさ、にも焦点がおかれます。これらの分析により、最近国際的なアセスメントで提案されている技術的（または論理的）なミティゲーションの可能性に比べ、より現実的で持続可能に達成できるミティゲーションの可能性を提示する予定です。

これらの解析は以下を目標・対象に行います。

- トリプルボトムライン分析がプロジェクトの可能性・有効性評価の一部として考慮されている大規模固定化プロジェクトのケーススタディ
- 地球規模でみて重要な地域（東南アジアなど）
- 全球規模

タスク3.1.2:化石燃料排出における介入のポイント

エネルギー生産における炭素排出および、経済活動におけるエネルギー消費の双方に対し、幅広い代替オプションがあります。それには、再生可能エネルギー、核分裂・核融合などの非化石燃料エネルギー生産オプションの他に、エネルギーの効率的利用の推進（例えば、通常エネルギー分野ではコジェネレーションや流通システム、輸送部門ではハイブリッドカーや非化石燃料カー）などがあります。さらに、この分野では炭素を化石燃料から、燃焼前、燃焼中、または燃焼後に除去するという工学的な炭素固定化も考えられています。なお、タスク 3.1.1 で述べたように、ミティゲーションオプションの評価は、環境面、社会面、経済面での評価基準（トリプルボトムライン）を考慮しなければなりません。

GCP は、多数のプロジェクトとミティゲーションオプションについて、タスク 3.1.1 におけるものと類似した一連の分析を、すべての付随的な費用と便益を考慮した時に持続的に達成できるミティゲーションの可能性の評価、という点から行います。これらの分析では、トリプルボトムライン評価に加え、エネルギー経済モデルの主要な変数のひとつである、技術革新の潜在的な速さと変化の大きさに関する分析も行う必要があります。分析は。

- ケーススタディとしての大規模プロジェクト
- 特別なミティゲーションオプションの達成可能性に関する全球的解析を用いて行います。

タスク3.1.3:介入ポイントとしての消費パターン

消費パターンは、他の環境汚染問題と同様に、化石燃料排出の根底にある要因です。同時に、消費パターンは、人間の欲望、需要、価値観、嗜好など、最終的には市場活動や生産挙動に反映される、より基本的な圧力により生じます。環境汚染は典型的に生産面での介入で対処され、妥当な成功を収めています。一方、挙動を変え、社会を改造するような取り組みの多くは成功していません。化石燃料排出の場合、実質的な応答を得るには消費パターンを根本的に変えることが必要でしょう。

GCP は、消費パターンと生産・消費システムの進展に関し、多数のケーススタディを実施する予定です。より持続可能な消費パターンが育成されるような方法の展望、特に消費パターンにおける変化が全生産システムに影響を与えるのか否か、与える場合はどのようにか、が環境面および炭素への帰結とともに得られると期待されます。

研究活動3.1の成果

- 多数のオプションの、現実的で持続的に達成できる炭素ミティゲーションの可能性に関する、査読付論文誌で公開される一連の分析。この分析は、(1) 陸域における生物学的固定と攪乱の低減、(2) 海洋における生物学的固定、(3) 陸地および海洋への技術的 CO₂ 隔離、(4) 非化石燃料エネルギー源、(5) 省エネルギーとエネルギー効率、というミティゲーションオプションの主要なカテゴリーから成っています。これらの分析は、全球を視野に入れていますが、地域的ないし全球からみでの重要性から、特定の国や地域を対象とすることもあります。
- 消費パターンのレベルにおける潜在的な介入ポイ

ントの分析と提案

他のプロジェクト、研究活動との連携

国内および国際的エネルギー計画。IPCC、IDGEC および IT、GCTE、LUCC、新 IGBP/IHDP Land プロジェクト、SOLAS、IMBER、総合的な評価コミュニティ、IEA、GECAFS (Global Environmental Change and Food Systems)。

研究活動 3.2：全球システムにおける炭素管理

炭素ミティゲーションが総合的に成功するか否かは、気候ミティゲーションの効果や、ポジティブな効果とネガティブな効果のバランス、生物物理的に適切な措置の履行を支援する人為的なプロセスなど、数々の要因に依存しています。全ての問題は、与えられた地域に依存度が極めて高い時空間スケールを持っているので、独自のミティゲーションオプションの組み合わせを必要とし、履行機会を行使する制度的能力が開発されなければなりません。この研究活動では、地球システム全体がどのように人間活動にตอบสนองしているかを評価する上で必要となるモニタリングや研究を進展させます。

また、全システム評価の枠組みの中で、最適なミティゲーションオプションを評価する正式な枠組みの構築（タスク 3.2.1）、特定地域のための炭素ミティゲーションオプションの動的ポートフォリオの計画（タスク 3.2.2）、ポートフォリオの有効性を向上させる上で適正な炭素管理の制度について分析、計画、評価を実施します（タスク 3.2.3）。

タスク 3.2.1：総合ミティゲーション設計の枠組み

このタスクでは、炭素－気候－人間の相互作用を全面的に考慮して CO₂ 安定化の道筋を解析するための正式な枠組みづくりを行います。これには、炭素ミティゲーション、アダプテーション、他の持続可能な開発方針の間における相乗効果や対立効果も含まれます。気候変化に対するアダプテーションおよびミティゲーション戦略は包括的かつ総合的に考える必要があります。それは、多くのミティゲーション戦略（農業実務の改善、森林マネジメント、よりクリーンなエネルギーなど）が気候変化の影響に対処する点で便益をもたらすという理由だけでなく、アダプテーションと開発行為とが繋がっているからです。結果として、持続可能な開発の面では、付随的な費用と便益などに特別な注意を払いながら、アダプテーションとミティゲーションオプションを併せて評価することが重要であるといえます。こうした方法は、トレードオフの

関係进行评估するとともに、開発と保全の両者に有利な関係（Win-Win）や後悔しないための戦略の策定に繋がるでしょう。また、生物多様性の保護、土壌肥沃化、食物と繊維、材木以外の林業製品、気候の調整、洪水・暴風雨対策などといった、その他の生態系機能およびサービスの供給からみて、本研究活動の意味をチェックすることになります。こうした生態系サービスおよび機能は必要不可欠であり、地域コミュニティや持続可能な生活と緊密に結びついています。

概念的な枠組みは、一般的な炭素管理を直接支援することのできる特別なツールとアプローチ（たとえば、コンピュータシミュレーションツール）や、タスク 3.2.2 におけるミティゲーションポートフォリオのようなより専門的な設計と評価により構築されます。これらは、トレードオフの関係や、政策オプション、現在の吸収源・排出源に対する間接的な影響を含む地球システム全体の応答に対する評価手法を含みます。政策の形成に利害関係者をとりこむアプローチでは、トレードオフ意思決定とともに、代替の政策や開発方法の結果を予測するツールについても考慮しなければなりません。良い例としては、政策に関連する知見を得るため、複雑で他分野にわたる事象を扱うための選択アプローチとして急速に現れた「総合評価」があります。なお、方法とツールの構築には以下に示す事項が含まれます。

- シミュレーションツールを含む総合評価モデルとアプローチ
- シナリオの構築、シナリオに基づく論証
- 移行マネジメント、適応マネジメントおよび実践習得
- 参加型アプローチ

独自に活動中の既存の研究分野について、GCP は、それらの取り組みに対し炭素という観点からの寄与を、例えば、総合評価モデルへ炭素循環コンポーネントを組み込むなど模索します。

タスク 3.2.2：ミティゲーションオプションの動的ポートフォリオの設計

大気温室効果ガス濃度を安定化するには、エネルギーシステム、森林および農業のマネジメント、およびその他の人間活動を大きく変える必要があります。単独でこの目標に到達できる技術やアプローチはありません。そこで、公平で持続可能な開発といった大きな課題のもとで、安定化を成功させるためには、ミティゲーションオプションのポートフォリオが必要となります。地域や国家は、環境的、社会経済的、制度

的な状況に従い、特別なミティゲーションオプションのポートフォリオを設計する必要があります。一般的な類似パターンが、同じよう出現している地域や国であっても、2つの地域や国が、同一のポートフォリオを設計することはないと思われます。実際、ポートフォリオは静的で、いつでも適切というのではなく、むしろ状況に応じて動的に発展するものです。

この研究活動は、タスク 3.2.1 で開発される枠組みとツールを利用し、研究活動 3.1 における達成可能なミティゲーション能力に基づいて、対照的で全球的に関連した多くの地域についてミティゲーションオプションの「最適の組み合わせ」を設計していきます。組み合わせの設計では、便益、有用性、福祉を定義した上で最大限得られるようにすると同時に、環境コストを含めた一般的なコストを最小にします。また、ミティゲーションを行うための適切なインセンティブ（と障害）、実施のタイミングを考慮することも必要です。最後に、直近の必要性（例えば、京都議定書締結国の第一約束期間など）よりはるかに先にある、長期的な結果を保証するビジョンを持つことが重要です。

この分析の対象となる予備的な地域リストには、アジア太平洋地域（中国、日本、フィリピン、タイ）、アフリカ（セネガル）、ヨーロッパ（ドイツ、スペイン）、アメリカ（アメリカ合衆国、メキシコ、アルゼンチン）のいくつかの国も入っています。

タスク3.2.3:炭素管理制度の設計

どんな炭素管理戦略の有効性は、様々なレベル（地域的、準国家的、国家的、国際的など）の技術的、組織的、制度的な複合要因に依存しています。また、環境および資源をマネジメントするために形成・履行された様々な制度構造や計画を評価することにより、炭素管理に関する価値のある知見が獲得できます。これには、評価指標、評価ツール、評価パラダイムを明確にすることが必要です。評価することにより、炭素管理において、何が実効的で、何が有効でないかを知ることができ、実践的な戦略の採用が可能になります。このタスクでは、制度的、組織的、技術的オプションおよび戦略の分析も取り扱います。国際的レベルでは、どの程度、国や地域の体制が政策を変えているか、行動様式移行させているか、国際的同意に従う方向へと状況を変えようとしているかも分析します。これらの分析においては、多様な政策オプションの相対的なメリットも評価します（排出量取引、炭素固定化など）。

炭素管理のために何が学ばれうるかという視点の下

に、一連のケーススタディが選ばれ、分析されます。ケーススタディには、成功したモンテリオール議定書や酸性雨、そして、京都議定書のこれまでの進展に関する分析が含まれます。

研究活動3.2の成果

- ミティゲーションオプションのポートフォリオの評価に関する公式の枠組み。炭素-気候-人間システムにおける政策上の帰結を計算機シミュレーションするツール開発を含む。
- いくつかの国家および地域のための炭素ミティゲーションオプションのポートフォリオ。暫定リスト：アジア太平洋地域（中国、日本、フィリピン、タイ）、アフリカ（セネガル）、ヨーロッパ（ドイツ、スペイン）、南北アメリカ（合衆国、メキシコ、アルゼンチン）
- 多様な政策オプション（排出量取引、炭素固定化など）の相対的なメリットの分析、および、ミティゲーションポートフォリオと適応オプションの結合による潜在的便益
- 過去の環境関連の国際合意の分析で得られる、炭素管理に応用できる知見を記述した文書
- 京都メカニズムの有用性に関する一連の詳細研究（排出量取引、共同実施、クリーン開発メカニズム、炭素固定化オプションなど）および、温室効果ガス排出量を削減するための京都メカニズムと代替アプローチとの体系的な比較
- 与えられた安定化シナリオを達成するために必要なミティゲーションと、現在の制度編成から達成可能なミティゲーションとのギャップを最小化するための、制度にかかわるような新たな計画に関する提言

他のプロジェクト、研究活動との連携

IDGEC、GCTE、LUCC、新IGBP/IHDP Land プロジェクト、および START。SCOR、IOC、CO₂ パネルおよび海洋炭素固定化に関する IMBER。IPCC ワーキンググループ II（影響、適応、脆弱性）およびワーキンググループ III（ミティゲーション）、UNFCCC の SBSTA および事務局。APN（Asia-Pacific Network for Global Change Research）、IAI（Inter-America Institute for Global Change Research）、ENRICH（European Network for Research in Global Change）および GECAFS。

研究活動 3.3：地域開発と炭素の因果関係

地域開発は、社会、経済、政治システムが相互に関係して変化した一連の結果です。開発場所によっても時間の経過によっても開発が異なるので、炭素の貯蔵

量とフラックスは順々に制約しあったり、開発プロセスにフィードバックしたりして、それぞれの場所で異なる結果となります。

都市化および都市計画は、総合炭素管理を開発に組み込むための鍵となるプロセスです。都市とその周辺は、地球上のほんのわずかな部分しか占めていませんが、炭素循環の変化における役割は大きく、更にその寄与度は増大しています。次の数十年間に都市を設計・管理する方法は、将来の炭素循環に大きく影響します。よく計画された都市では、一人あたりの炭素排出を削減するため、技術的に多くの機会が提供されます。その一方で、都市化による文化や生活様式の変化は、消費レベル、化石燃料消費、水利用、廃棄物排出を増加させる傾向にあります。

開発計画において炭素循環が重要な要素であることは誰も考えるとはいえ、それが、経済や社会の発展に関する目標のみならず、貧者から富者まで、直接または長い連鎖による変化、代替、移動を通じて、その生活を依存している生態系の機能やサービスの維持と、トレードオフの関係にあることが熟考されなければならないでしょう。このため、GCP では、いろいろな意味で「炭素の視点による開発」に関する研究を提案します。しかし、それは同時に、生物多様性保護や、飲料水および食料の需要、農業、養殖業、漁業からの食料の供給など相互作用を理解するために多大な取り組みを要することになります。

企業・政府・個人の多くの行動は炭素管理以外の目的で行われていると考えられますが、それが炭素循環に対して非常に重要な帰結をもたらしていると認識されています。例えば、都市および工業地帯の空気の質や、超過密で拡大した巨大都市の通勤時間がそれにあたります。このプロジェクトの重要な部分は、どのように地方、地域、全球の目標を独創的に調整するのか、または、どのように個人と公共の目標を独創的に調整するのかにあります。

GCP は、地域ケーススタディに貢献するネットワークに関する主要な比較分析を実施します。地域は、幅広い地形タイプ（都市、工業、農業、森林）を含むのに十分な大きさを考えており、それゆえ、準国家、国家、少数例では複数の国家に渡るケースも対象として考えられます。また、炭素排出および固定化に関して、都市化の影響の重要性が予測されているため、主要な都市を含んだ地域を、ケーススタディの対象として募集していきます。

この研究活動の焦点は、地域開発における重要な社会的、生態学的、生物物理学的プロセスがどのように進展・相互作用するのかを把握し、それをシナリオ作成と政策分析に適用することにあります。

取り扱う主要な課題は以下の通りです。

1. 地域開発手法の違いは炭素貯蔵量とフラックスにどのような帰結をもたらすか？
2. 開発において、大きく異なる炭素の帰結をもたらす重要なプロセスと相互作用は何か？
3. 炭素貯蔵量とフラックスの変化と、他の生態系サービス（特に、食料・水・清潔な空気の供給、生物多様性の維持）に関連した最も重要なトレードオフと相乗効果は何か？

この研究活動の第1ステップは以下の通りです。

- 異なる開発手法での炭素の帰結を、系統的な共同作業で比較することが可能な、地域ケーススタディの国際的ネットワークを構築する。
- これらの比較から研究活動を設定することを可能にするため、測定し、理解することが重要な一連の変数（またはプロセスと結果のまとめ）を明らかにする。
- 最小限のデータセットと共有プロトコルに基づく共同分析の実施に同意する最初の6~12の地域ケーススタディを世界中から集める。これには、都市化問題を解明するのに十分な量の都市を含む必要があります。

ケーススタディの分析は、以下に示す2つのタスクを網羅します。

タスク3.3.1: 開発の要因と炭素変化

- 異なる地域開発方法が、炭素貯蔵量と炭素フローに異なる結果を与える理由を説明するため、主要な構造とプロセスを明確化
- 炭素貯蔵量とフローに影響を与える可能性のあるケーススタディ同士の主な違いの認識
- 相違の主因または基礎をなす原因を特定するため、モデル分析や感度分析、統計分解、歴史プロセスの詳細なレビュー（エネルギー消費や政策に関係したものなど）を含む多様な手法の利用

タスク3.3.2: 炭素管理オプションと将来シナリオ

- 炭素管理が開発にどう統合されるかのオプションの探査と、シナリオや政策の分析を通じて、そのオプションを試行できる方法の提案
- 炭素管理の目標と多様なサービス（特に人間福祉

に重要なもの)の間の主要なトレードオフと相乗効果を、ケーススタディの過去の経験から明確化

研究活動3.3の成果

- START と GCP は多数の研究会／サマースクールの開催による。2003年6月にコロラド州ボルダー(アメリカ)で開催される「都市化、排出、全球炭素循環」に関するものが最初となります。
- 主要な都市、多様な経済、政治背景を含む、世界中から集められた調整済みの地域ケーススタディ。(1) 完全な炭素収支(分野ごと、可能であれば時間の経過に伴うもの)、(2) 炭素バランスを駆動する要因分析、(3) パラメータ化し、定式化し、炭素-気候-人間統合モデルをテストするためのデータ
- ケーススタディの解析・統合を記述した書籍または雑誌の特集号
- 地域開発への炭素管理の組み込みをテーマとする開発指向の政策論文: 何処で、何時それは可能?

他のプロジェクト、研究活動との連携

この研究活動は、ITの過去の取り組み、GCTE(および新IGBP/IHDP Land プロジェクト)における都市生態系および生物地球化学に関する新しい研究活動、IHDPにおける都市化に関する分野横断的な研究活動、その他START、IDGEC、IGAC-citiesなどの計画の上に形成されます。地域的連携は、APN、IAIとENRICH、ESSP 総合地域研究、GECAFSと共に構築されます。研究活動3.3は研究活動1.3(地域炭素収支)と3.2(炭素管理)に貢献します。

統合とコミュニケーション

GCPは、パターンと変動性(テーマ1)、プロセスと相互作用(テーマ2)、炭素管理(テーマ3)を含む、炭素循環に関する高度に統合された情報を提供します。統合の大部分は研究および評価グループを対象としているものの、一部の文書やウェブベースの情報については、政策立案者、有識者団体、一般市民向けに作成されます。多分野にわたる研究者を対象とした、共通の理解と言語を育成するための特別レポートも作成する予定です。

高レベルの統合

主な目的は、炭素-気候-人間システムとそのコンポーネントの総合的視点から統合した、最先端の情報を提供することです。これは個人や科学者グループむけに、総合のためのワークショップや統合のための委員会を組織化することにより実施され、研究方針に迅

速にフィードバックさせるため、短期間で出版します。共働的な統合プロジェクトは、SCOPE(the Scientific Committee on Problems of the Environment)とともに構築する予定です。

炭素循環研究における問題

このタスクでは、生物圏呼吸の気温上昇への応答、や、炭素-気候-人間統合システム研究のための新しいツールなど、全球炭素循環に関する未解決の問題を取り扱う総合議論紙を発行します。固有の問題に関する最新の見解の統合だけでなく、新たな研究ツールとアプローチの開発と利用に関する情報提供にも焦点が置かれています。

コミュニケーションツール

3つの履行テーマや統合的な活動で明らかになった重要な事からを、高度に専門的な研究グループとは別に、政策立案者、政府、有識者、一般市民を対象に伝えるための成果物を作成します。それには、小冊子、ポスター、コンピュータによるプレゼンテーションなどがあり、コミュニケーションのエキスパートやサイエンライターとともに作成します。この他に、コミュニケーションを増やし、研究結果を流布するため、(1)プロジェクトのWebサイト、および(2)研究、政策、教育に関連する炭素循環に関する多数の情報源を提供するポータルサイト、を構築します。

成果

- 最先端の見解や方法論の記事を含む、炭素循環に関する高レベルかつトピック的な情報を扱う総合的な専門誌特集号や書籍。最初の取り組みは、2003年に行われる炭素循環に関する迅速評価プロジェクト(SCOPE-GCP)になります。その中で、炭素-気候と人間の相互作用を含む、炭素循環全般に関する最先端の知見を統合します。この統合は4年毎に行う予定です。類似の取り組みを陸域炭素吸収源と全球の酸化過程についても行います。
- 分野をまたぐ研究コミュニティー、政策立案者、評価者、有識者、一般市民など幅広い人々に研究成果を伝えるための小冊子、ポスター、Webベース素材
- GCPのウェブサイト
[<http://www.Globalcarbonproject.org>]
および、多数の炭素情報源を扱うポータルサイト
[<http://www.globalcarbonproject.org/carbon-portal.htm>]

能力強化 (キャパシティビルディング)

GCP は、主要研究テーマに関連する多数の能力強化活動を行います。これにより、炭素-気候-人間システムに関する高度に学際的なテーマを研修した若い科学者および中堅の科学者らによる新たな世代の育成を促進します。この活動の好例は既に、「データ同化に関する夏期研究会」として進行中で、これはこの新しい分野における能力強化の主要な貢献となるでしょう (研究活動 1.2 参照)。

また、GCP は、IGBP、IHDP、WCRP、DIVERSITAS 後援の計画パートナーとして、START との緊密な協力体制の下に活動します。この協力体制によって、2003 年、「都市化、排出、全球炭素循環」のための主要な研究会が計画されています (研究活動 3.3 参照)。その他の連携が、わずかな炭素研究しか行われていない開発途上地域における、炭素-気候-人間システムに関する研究を育成するために、IAI、APN、ENRICH およびその他の地域計画との間に構築されます。

タイムテーブル

最優先事項とすでに動いている多数の研究活動に基づき、初期の活動および成果に関するタイムテーブルを作成しました (図 20)。活動 (ワークショップ、能力強化課程、委託統合化など) のほとんどは、研究実施計画の様々な分野に示され、図 20 にそれらの全てが要約されています。それ以降のタイムテーブルと全体プランは、GCP のウェブサイトに掲載されます。主な中期プロジェクトレビューは 2005 年に実施されます。

マネジメント体制と実行

GCP の研究活動は、GCP の科学的な枠組みと履行に関する主な研究分野をカバーする科学者達により構成された SSC によって主導されています。SSC は、スポンサープログラムやプロジェクトによる履行活動に対する提言も考慮します。SSC の任期は、2 年間の予定で組織されており、最長 6 年まで延長されます。また、スポンサープログラム (IGBP、IHDP、WCRP) から任命された 3 人の科学者が共同議長をつとめ、事務局長が実行戦略と GCP の履行を取り仕切ります。以下が SSC-2003 のリストです。

共同議長

Michael Raupach (IGBP)
CSIRO Earth Observation Centre
Canberra, AUSTRALIA

Email: Michael.Raupach@csiro.au

Oran Young (IHDP)
University of California
Santa Barbara, CA, USA
Email: young@bren.ucsb.edu

Robert Dickinson (WCRP)
Georgia Institute of Technology
Atlanta GA, USA
Email: robtded@eas.gatech.edu

SSC 会員

Mike Apps
Canadian Forest Service
Victoria, CANADA
Email: Mapps@nrcan.gc.ca

タイムテーブル (2003)

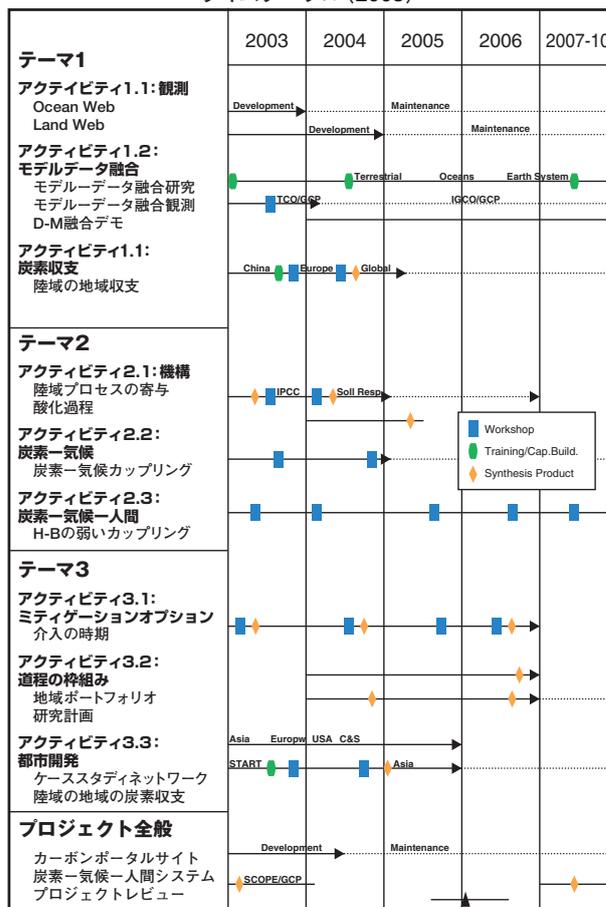


図 20

GCP の 10 年の研究実施計画の一環として、次の 4 年分のワークショップ、能力強化活動、成果のタイムテーブル。

Alain Chedin
Ecole Polytechnique
FRANCE
Email: chedin@araf1.polytechnique.fr

Chen-Tung Arthur Chen
National Sun Yat-sen University
CHINA, Taipei
Email: ctchen@mail.nsysu.edu.tw

Peter Cox
MetOffice
UNITED KINGDOM
Email: Peter.Cox@metoffice.com

Ellen R.M. Druffel
University of California, Irvine
Irvine, CA, UNITED STATES
Email: edruffel@uci.edu

Christopher Field
Carnegie Institution of Washington
Stanford, CA, UNITED STATES
Email: chris@globalecology.stanford.edu

Patricia Romero Lankao
Universidad Autónoma Metropolitana
Mexico City, MEXICO
Email: rolp7543@cueyatl.uam.mx

Louis Philip Lebel
Chiang Mai University
Chiang Mai, THAILAND
Email: llebel@loxinfo.co.th

Anand Patwardhan
Indian Institute of Technology
Bombay, INDIA
Email: anand@cc.iitb.ac.in

Monika Rhein
University Bremen
Bremen, GERMANY
Email: mrhein@physik.uni-bremen.de

Christopher Sabine
NOAA, PMEL
Seattle, UNITED STATES

Email: chris.sabine@noaa.gov
Riccardo Valentini
University of Tuscia, Viterbo, ITALY
Email: Rik@unitus.it

山形 与志樹
国立環境研究所
つくば、茨城県
Email: yamagata@nies.go.jp

事務局長

Josep (Pep) Canadell
CSIRO Atmospheric Research
Canberra, AUSTRALIA
Email: pep.canadell@csiro.au

GCP は、オーストラリアのキャンベラにある国際プロジェクトオフィス (IPO) により支援されています。2 つ目の IPO が 2003 年に日本のつくばに開設されます。GCP はまた、多様なレベルの公式合意に基づく多数の提携オフィスを持っています。これには、フランス・パリの SCOR-IOC 海洋 CO₂ に関するアドバイザリーパネル本部、ドイツ・イエナの CarboEurope オフィス (イタリア ビテルボの温室効果ガスに関する共同活動オフィスと共有) などが含まれます。その他、アメリカおよび中国より提携オフィスの申し出があります。さらに、GCP は世界のその他の地域からの研究計画および科学者グループと連携するために、START 地域オフィスと共に活動します。

GCP 国際プロジェクトオフィス

Australia

Earth Observation Centre
CSIRO Division of Atmospheric Research
GPO Box 3023, Canberra, ACT 2601, Australia
Tel.: 61-2-6246-5630; Fax: 61-2-6246-5988
Pep Canadell
Executive Director
Email: pep.canadell@csiro.au
Rowena Foster
Administration Manager
Email: rowena.foster@csiro.au

日本

国立環境研究所
つくば市、〒305-8506
Tel.: 029-850-2672; Fax.: 029-858-2960
Penelope Canan

Executive Director
Email: gcp@nies.go.jp

GCP 提携オフィス

SCOR-IOC Advisory Panel on Ocean CO₂

Maria Hood
Intergovernmental Oceanographic Commission
UNESCO, 1, rue Miollis
75732 Paris Cedex 15
FRANCE
Tel: 33-1-4568-4028
Fax: 33-1-4568-5812
Email: m.hood@unesco.org

CarboEurope

Annette Freibauer
Max-Planck-Institute for Biogeochemistry
PO Box 100164
07701 Jena, GERMANY
Tel: 49-3641-576164
Fax: 49-3641-577100
Email: afreib@bgc-jena.mpg.de

参加方法

GCP は、環境研究に取り組む NGO に分類され、研究実施計画の発展と実行のために時間と努力を惜しまない何百人もの科学者達の貢献により運営されています。

研究実施計画を支援する参加や活動開発の提案 (ワークショップや統合など) を歓迎します。Pep Canadell (pep.canadell@csiro.au) またはその他 SSC 会員にご連絡下さい。

Acknowledgements

謝辞

スコーピングミーティングに参加いただいた方、執筆いただいた方、前ヴァージョンのレビューをしていただいたり、炭素循環研究における緊急課題の明確化に科学的なリーダーシップを発揮していただいた方など、この報告書を作成するにあたり直接的または間接的に貢献していただいた全ての科学者に編集者一同感謝申し上げます（下記、協力者リストを掲載します）。特に、GCP の立ち上げに多大な貢献をいただいた Berrien Moore 氏と Will Steffen 氏には改めてお礼申し上げます。

NOW (The Netherlands Organization for Scientific Research) には、GCP 立案の過程で、健全な財政基盤を構築するための、たくさんの補助金を提供していただきました。また、欧州委員会 DGXII、NASA (米国)、国立環境研究所 (日本)、NSF (米国)、SCOPE および 3 つの GCP スポンサー (IGBP、IHDP、WCRP) より、1999 年から 2003 年に行われたさまざまなスコーピングワークショップのための財政的支援を受けました。NSF には、GAIM への助成金を通じて、プロジェクトの初期段階における Kathy Hibbard の活動を支援していただきました。

AGO および CSIRO には、キャンベラの GCP 国際オフィスへの支援を通じて、本レポートを編纂した Michael Raupach、Rowena Foster および Josep Canadell の活動を支援していただきました。

協力者リスト

Francis J Abern, Canada; Larry Akinson, USA; Georgii Alexandrov, Japan; Arthur Alexiou, France; Keith Alverson, Switzerland; Diogenes Alves, Brazil; Bob Anderson, USA; Mike Apps, Canada; O. Arino, Italy; Paulo Artaxo, Brazil; Beatrice Baliz, Norway; Alan Barr, Canada; Michael Bender, USA; Wu Bingfang, China; Bert Bolin, Sweden; Frank Bradley, Australia; Robert Braswell, USA; Francis Bretherton, USA; Wendy Broadgate, Sweden; Claus Bruening, Belgium; Ken Caldeira, USA; Josep G. Canadell, Australia; Doug Capone, USA; Mary-Elena Carr, USA; David Carson, Switzerland; Howard Cattle, UK; Alain Chedin, France; Arthur Chen, China-Taipei; Jing Chen, Canada; John Church, Australia; Philippe Ciais, France;

Josef Ciblar, Canada; Martin Claussen, Germany; Peter Cox, UK; Wolfgang Cramer, Germany; Christopher Crossland, Australia; Qin Dabe, China; Hein de Baar Netherlands; Gerard Dedieu, France; Ruth Defries, USA; Scott Denning, USA; Ray L. Desjardins, Canada; Chad Dick, Norway; Andrew Dickson, USA; Lisa Dilling, USA; Craig Dobson, USA; Han Dolman, The Netherlands; Ellen RM Druffel, USA; Hugh Ducklow, USA; Syma Ebbin, USA; Jae Edmonds, USA; James Ehrlinger, USA; Ian Enting, Australia; Paul Falkowski, USA; Christopher B. Field, USA; Roger Francey, Australia; Louis Francois, Belgium; Roger Francois, USA; Annette Freibauer, Germany; Pierre Friedlingstein, France; Inez Fung, USA; Anver Gahzi, Belgium; Véronique Garçon, France; Roy Gibson, France; René Gommès, Italy; David Goodrich, USA; James Gosz, USA; Mike Goulden, USA; Tom S Gower, USA; John Grace, UK; Watson Gregg, USA; Nicolas Gruber, USA; Kevin Gurney, USA; Mykola Gusti, Ukraine; Nei Hamilton, Australia; Dennis A Hansell, USA; Roger Hanson, Norway; Martin Heimann, Germany; Barry Heubert; Kathy Hibbard, USA; Nicolas Hoepffner, Italy; Terri Hogue, USA; Tony Hollingsworth, UK; Maria Hood, France; Richard Houghton, USA; George Hurtt, USA; Tamotsu Igarashi, Japan; Gen Inoue, Japan; Robert Jackson, USA; Roger Janson, Norway; Fortunat Joos, Switzerland; Pavel Kabat, Netherlands; Michael Keller, USA; Haroon S Khesghi, USA; Dave Knapp, USA; Christian Koerner, Germany; Swami Krishnaswami, India; Thelma Krug, Germany; M Dileep Kumar, India; Gregor Laumann, Germany; Sandra Lavorel, France; Louis Lebel, Thailand; Cindy Lee, USA; Rik Leemans, The Netherlands; Corinne LeQuéré, Germany; Ricardo Letelier, USA; Ingeborg Levin, Germany; Sune Linder, Sweden; Karin Lochte, Germany; Sabine Lutkemeier, Germany; Ernst Maier-Reimer, Germany; Gregg Marland, USA; John Marra, USA; Phillippe Martin, France; David McGuire, USA; Liliane Merlivat, France; Jerry Melillo, USA; Patrick Monfray, France; Berrien Moore III, USA; Daniel Murdiyarso, Indonesia; Ranga Myneni, USA; Nebojsa Nakicenovic, Austria; Pascal Niklaus, Switzerland; Ian Noble, Australia; Carlos Nobre, Brazil; Yukihiko Nojiri, Japan; Rich Norby, USA; Dennis Ojima, USA; Dick Olson, USA; James Orr, France; Steve Pacala, USA; Anand Patwardhan, India; Diane Pataki, USA; Joyce E. Penner, USA; João Santos Pereira, Portugal; Louis Pitelka, USA; Stephen Plummer,

UK; Christopher Potter, USA; Michael Prather, USA; Colin Prentice, Germany; Kamal Puri, Australia; Navin Ramankutty, USA; Ichtiague Rasool, France; Michael Raupach, Australia; Dominique Raynaud, France; Peter Rayner, Australia; Monika Rhein, Germany; Donald Rice, USA; Aida F Ríos, Spain; Paul Robbins, USA; Humberto Rocha, Brazil; Patricia Romero-Lanko, Mexico; Eugene A. Rosa, USA; Steve Running, USA; Casey Ryan, UK; Christopher Sabine, USA; Dork Sahagian, USA; Toshiro Saino, Japan; Scott Saleska, USA; Maria José Sanz, Spain; Jayant Sathaye, USA; Bernard Saugier, France; Bernhard Schlamadinger, Austria; John Schellnuber, UK; David Schimel, USA; Reiner Schlitzer, Germany; Robert J Scholes, South Africa; Edetlef Schulze, Germany; Uwe Send, Germany; Emanuel A Serrao, Brazil; Steven Shafer, USA; Anatoly Shvidenko, Austria; Brent Smith, USA; Pete Smith, UK; Steve Smith, USA; Allen M Solomon, USA; Elliott Spiker, USA; Will Steffen, Sweden; Gerard Szejwach, Germany; Arnold H Taylor, UK; Bronte Tilbrook, Australia; Richard Tol, Germany; John Townshend, USA; Neil BA Trivett, Canada; Jeff Tschirley, Italy; Ed Urban, USA; Riccardo Valentini, Italy; Pier Vellinga, The Netherlands; Douglas Wallace, Germany; Virginia M Walsh, USA; Rik Wanninkhof, USA; Andrew Watson, UK; Diane E Wickland, USA; Anna Wieczorek, The Netherlands; Ian Woodward, UK; Jenny Wong, Malaysia; Yoshiki Yamagata, Japan; Yoshifumi Yasuoka, Japan; Oran Young, USA; Guangsheng Zhou, China.

Reference

引用文献

- Archer S (1995) Tree-grass dynamics in a subtropical savanna: Reconstructing the past and predicting the future: *Ecoscience* 2:83-99.
- Baldocchi D, Valentini R, Running S, Oechel W, Dahlman R (1996) Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 2:159-168.
- Barrett DJ (2002) Steady state turnover time of carbon in the Australian terrestrial biosphere. *Global Biogeochemical Cycles* 16:art-1108.
- Barrett DJ, Galbally IE, Graetz RD (2001) Quantifying uncertainty in estimates of C emissions from aboveground biomass due to historic land-use change to cropping in Australia. *Global Change Biology* 7:883-902.
- Bolle H-J, Feddes RA, Kalma JD (Eds.) (1993) Exchange Processes at the Land Surface at a Range of Space and Time Scales. IAHS Publication No. 212, IAHS Press, Wallingford.
- Bovensmann H, Burrows, JP, Buchwitz M, Frerik J, Noel S, Rozanov UU, Chance KU, and Goede APH (1999) SCIAMACHY - Mission objectives and measurement modes. *Journal of Atmospheric Science* 56: 127-150.
- Boyd PW, Watson AJ, Law CS, Abraham ER, Trull T, Murdoch R, Bakker DCE, Bowie AR, Buesseler KO, Chang H, Charette M, Croot P, Downing K, Frew R, Gall M, Hadfield M, Hall J, Harvey M, Jameson G, LaRoche J, Liddicoat M, Ling R, Maldonado MT, McKay RM, Nodder S, Pickmere S, Pridmore R, Rintoul S, Safi K, Sutton P, Strzeppek R, Tanneberger K, Turner S, Waite A, Zeldis J (2000) A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature* 407:695-702.
- BP (2002) BP Statistical Review of World Energy, UK.
- Braswell BH, Schimel DS, Linder E, Moore B (1997) The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science* 278:870-872.
- Brenkert AL (1998) Carbon Dioxide Emission Estimates from Fossil-Fuel Burning, Hydraulic Cement Production, and Gas Flaring for 1995 on a One Degree Grid Cell Basis. ORNL/CDIAC-98, NDP-058A (2-1998). Carbon Dioxide Analysis Center, Oak Ridge, Tennessee. [<http://cdiac.esd.ornl.gov/epubs/ndp/ndp058a/ndp058a.html>]
- Buchwitz M, Rozanov UU, Burrows JP (2000) A nearinfrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH₄, CO, CO₂, H₂O, and N₂O total column amounts from SCIAMACHY/ENVISAT-1 nadir radiances. *Journal of Geophysical Research* 105:15231-15245.
- Canadell JG, Mooney HA, Baldocchi DD, Berry JA, Ehleringer JR, Field CB, Gower ST, Hollinger DY, Hunt JE, Jackson RB, Running SW, Shaver GR, Steffen W, Trumbore SE, Valentini R, Bond BY (2000) Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: A multitechnique approach for improved understanding. *Ecosystems* 3:115-130.
- Canadell JG, Steffen W, White P (2002a) IGBP/GCTE Terrestrial Transects: Dynamics of terrestrial ecosystems under environmental change. *Journal Vegetation Science* 13:298-300.
- Canadell JG, Guangsheng Z, Noble I (2002b) Land use/cover change and the terrestrial carbon cycle in the Asia-Pacific region. *Science in China (Series C)* 45 Supplement:1-141.
- Cannell MGR, Milne R, Hargreaves KJ, Brown TAW, Cruickshank MM, Bradley RI, Spencer T, Hope D, Billett ME, Adger WN, Subak S (1999) National inventories of terrestrial carbon sources and sinks: The UK experience. *Climatic Change* 42:505-530.
- Cannell MGR (2003) Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy* 24:97-116.
- CDIAC (2003) Trends Online: A Compendium of Data on Global Change Carbon Dioxide Information Center. Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. [<http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/trends.htm>]
- Charney JG (1975) Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101:193-202.
- Chedin A, Hollingsworth A, Scott NA, Serrar S, Crevoisier C, Armante R (2002) Annual and seasonal variations of atmospheric CO₂, N₂O and CO concentrations retrieved from NOAA/TOVS satellite observations. *Geophysical Research*

- Letters 29:110-114.
- Chedin A, Saunders R, Hollingsworth A, Scott NA, Matricardi M, Clerbaux C, Etcheto J, Armante R, Crevoisier C (2003a) The feasibility of monitoring CO₂ from high resolution infrared sounders. *Journal of Geophysics Research* 108(D2), 4064.
- Chedin A, Serrar S, Scott NA, Crevoisier C, Armante R (2003b) First measurement of mid-tropospheric CO₂ from NOAA polar satellites: The tropical zone. *Journal of Geophysics Research*, in press.
- Chen CR, Lamb PJ (2000) Improved treatment of surface evapotranspiration in a mesoscale numerical model part II: Via the assimilation of satellite measurements. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* 11:789-832.
- Ciais P, Meijer HAJ (1998) The 18O/16O isotope ration of atmospheric CO₂ and its role in global carbon cycle research. In: Griffiths H (ed) *Stable Isotopes: Integration of Biological, Ecological and Geochemical Processes*. Bios Scientific Publishers Ltd., Oxford, pp. 409-431.
- Ciais P, Naegler T, Peylin P, Freibauer A, Bousquet P (2001) Horizontal displacement of carbon associated to agriculture and its impact on the atmospheric CO₂ distribution. *Proceedings from the 6th International Carbon Dioxide Conference*. Sendai, Japan, p. 673-75.
- Ciais P, Moore B, Steffen, Hood M, Quegan S, Cihlar J, Raupach M, Rasool I, Doney S, Heinze C, Sabine C, Hibbard K, Schulze D, Heimann H, Chédin A, Monfray P, Watson A, LeQuéré C, Tans P, Dolman H, Valentini R, Arino O, Townshend J, Seufert G, Field E, Chu I, Goodale C, Nobre A, Inoue G, Crisp D, Baldocchi D, Tschirley J, Denning S, Cramer W, Francey R (2003) *Integrated Global Carbon Observing: A Strategy to Build a Coordinated Operational Observing System of the Carbon Cycle and its Future Trends*. IGOS-P.
- Claussen M (1998) On multiple solutions of the atmosphere-vegetation system in present-day climate. *Global Change Biology* 4:549-559.
- Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA, Totterdell IJ (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408:184-187.
- Cramer W, Bondeau A, Woodward FI, Prentice IC, Betts RA, Brovkin V, Cox PM, Fisher V, Foley JA, Friend AD, Kucharik C, Lomas MR, Ramankutty N, Sitch S, Smith B, White A, Young-Molling C (2001) Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology* 7:357-373.
- Cramer W, Field CB (Eds.) (1999) *The Potsdam NPP model intercomparison*. *Global Change Biology* 5:1-76.
- Dietz T, Rosa EA (1997) Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94:175-179.
- Doney SC, Wallace DWR, Ducklow HW (2000) The North Atlantic carbon cycle: New perspectives from JGOFS and WOCE. In: Hanson RB, Ducklow HW, Field JG (eds) *The Changing Ocean Carbon Cycle: A Midterm Synthesis of the Joint Global Ocean Flux Study*. Cambridge University Press, pp 373-391.
- Edmonds J, Joos F, Nakicenovic N, Richels R, Sarmiento J (2003) Scenarios, Targets, Gaps and Costs. In: *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*, Field C, Raupach M (Eds.). Island Press, Washington D.C., in press.
- Ehleringer JR, Field CB (Eds.) (1993) *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Academic Press, San Diego, 388 pp.
- Enting IG (2002) *Inverse problems in atmospheric constituent transport*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Falkowski P, Scholes RJ, Boyle E, Canadell J, Canfield D, Elser J, Gruber N, Hibbard K, Hogberg P, Linder S, Mackenzie FT, Moore B, Pedersen T, Rosenthal Y, Seitzinger S, Smetacek V, Steffen W (2000) The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* 290:291-296.
- Field CB, Raupach MR (Eds.) (2003) *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*. Island Press, Washington, D.C., in press.
- Ganopolski A, Kubatzki C, Claussen M, Brovkin V, Petoukhov V (1998) The influence of vegetation-atmosphere-ocean interaction on climate during the mid-Holocene. *Science* 280:1916-1919.
- Ghil M (1994) Cryothermodynamics - the chaotic dynamics of paleoclimate. *Physica D* 77:130-159.
- Gloor M, Bakwin P, Hurst D, Lock L, Draxler R, Tans P (2001) What is the concentration footprint of a tall tower? *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 106:17831-17840.
- Goodale CL, Apps M, Birdsey RA, Field CB, Heath LS, Houghton RA, Jenkins JC, Kohlmaier GH, Kurz WA, Liu S, Nabuurs G-J, Nilsson S, Shvidenko AZ (2002) Forest Carbon sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications* 12:891-899.
- Gurney KR, Law RM, Denning AS, Rayner PJ, Baker D, Bousquet P, Bruhwiler L, Chen YH, Ciais P, Fan S, Fung IY, Gloor M, Heimann M, Higuchi K, John J, Maki T, Maksyutov S, Masarie K, Peylin P, Prather M, Pak BC,

- Randerson J, Sarmiento J, Taguchi S, Takahashi T (2002) Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature* 415:626-630.
- Gupta J, Lebel L, Velling P, Young O, IHDP Secretariat (2001) IHDP Global carbon cycle research. Bonn, IHDP.
- Hibbard KA, Archer S, Schimel DS, Valentine DW (2001) Biogeochemical changes accompanying woody plant encroachment in a subtropical savanna. *Ecology* 82:1999-2011.
- Houghton RA (1999) The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus B* 51:298-313.
- Houghton RA (2003) Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus* 55B: 378-390.
- Hutjes RWA, Kabat P, Running SW, Shuttleworth WJ, Field C, Bass B, Dias MAFD, Avissar R, Becker A, Claussen M, Dolman AJ, Feddes RA, Fosberg M, Fukushima Y, Gash JHC, Guenni L, Hoff H, Jarvis PG, Kayane I, Krenke AN, Liu C, Meybeck M, Nobre CA, Oyebande L, Pitman A, Pielke RA, Raupach M, Saugier B, Schulze ED, Sellers PJ, Tenhunen JD, Valentini R, Victoria RL, Vorosmarty CJ (1998) Biospheric aspects of the hydrological cycle - Preface. *Journal of Hydrology* 213:1-21.
- IPCC (1996) *Climate Change 1995: The science of climate change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 572 pp.
- IPCC (2000a) *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- IPCC (2000b) *Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- IPCC (2001a) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 pp.
- IPCC (2001b) *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 pp.
- IPCC (2001c) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 881 pp.
- Kalma JD, Sivapalan M (1995) Scale Issues in Hydrological Modelling, Kalma JD, Sivapalan M (Eds.). Wiley, Chichester, 489 pp.
- Kaminski T, Knorr W, Rayner PJ, Heimann M (2002) Assimilating atmospheric data into a terrestrial biosphere model: A case study of the seasonal cycle. *Global Biogeochemical Cycles* 16: art-1006,
- Keeling CD, Whorf TP (2000) Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Kurz WA, Apps MJ (1999) A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecological Applications* 9:526-547.
- Leemans R, van den Born GJ (1994) Determining the potential global distribution of natural vegetation, crops and agricultural productivity. *Water, Air, and Soil Pollution* 76: 133-161.
- Lloyd J, Kruijt B, Hollinger DY, Grace J, Francey RJ, Wong SC, Kelliher FM, Miranda AC, Farquhar GD, Gash JHC, Vygodskaya NN, Wright IR, Miranda HS, Schulze D-E (1996) Vegetation effects on the isotopic composition of atmospheric CO₂ at local and regional scales: theoretical aspects and a comparison between rain forest in Amazonia and a Boreal Forest in Siberia. *Australian Journal of Plant Physiology* 23:371-399.
- Marland G, Boden TA, Andres RJ (2000) Global, regional, and national CO₂ emissions. *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Mason M (1997) A look behind trend data in industrialization The role of transnational corporations and environmental impacts. *Global Environmental Change - Human and Policy Dimensions* 7:113-127.
- McConnell WJ, Moran EF, Brondizio E, DeFries R, Laney R, Latham JS, Leon A, Schneider L, Verburg P, Walsh SJ (2001) Meeting in the middle: the challenge of meso-level integration. *LUCC Report Series No. 5*, LUCC Focus 1 Office, Indiana University, and LUCC International Project Office, Belgium, 62 pp.
- Michaud JD, Shuttleworth WJ (Eds.) (1997) *Aggregate Description of Land-Atmosphere Interactions*. *Journal of Hydrology* 190:173-414.
- Mooney H, Canadell J, Chapin FS, Ehleringer J, Körner Ch, McMurtrie R, Parton W, Pitelka L, Schulze DE (1999) Ecosystem Physiology Responses to Global Change. In: *The*

- Terrestrial Biosphere and Global Change. Implications for Natural and Managed Ecosystems. Walker BH, WL Steffen, J Canadell, JSI Ingram (Eds.) Cambridge University Press, London, p. 141-189.
- Nakicenovic N, Victor N, Morita T (1999) Emissions Scenarios Database and Review of Scenarios, RR-99-4, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. Reprinted from *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3:1381-2386.
- Norby RJ, Kobayashi K, Kimball BK (2001) Rising CO₂-future ecosystems - Commentary. *New Phytologist* 150:215-221.
- O'Brien KL, Leichenko RM (2000) Double exposure: assessing the impacts of climate change within the context of economic globalization. *Global Environmental Change - Human and Policy Dimensions* 10:221-232.
- Pacala SW, Hurtt GC, Baker D, Peylin P, Houghton RA, Birdsey RA, Heath L, Sundquist ET, Stallard RF, Ciais P, Moorcroft P, Caspersen JP, Shevliakova E, Moore B, Kohlmaier G, Holland E, Gloor M, Harmon ME, Fan SM, Sarmiento JL, Goodale CL, Schimel D, Field CB (2001) Consistent land- and atmosphere-based US carbon sink estimates. *Science* 292:2316-2320.
- Papale D, Valentini R (2003) A new assessment of European forest carbon exchanges by eddy fluxes And artificial neural network spatialization. *Global Change Biology* 9:525-535.
- Park SK, Zupanski A (2003) Four-dimensional variational data assimilation for mesoscale and storm-scale applications. *Metereology and Atmopsheric Physics* 82:173-208.
- Pataki DE, Ehleringer JR, Flanagan LB, Yakir D, Bowling DR, Still CJ, Buchmann N, Kaplan JO, Berry JA (2003) The application and interpretation of Keeling plots in terrestrial carbon cycle research. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (1).
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov VM, Legrand M, Lipenkov VY, Lorius C, Pepin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399:429-436.
- Raupach MR (2001) Inferring biogeochemical sources and sinks from atmospheric concentrations: general considerations and applications in vegetation canopies. In *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*, pp. 41-60. Schulze E-D, Heimann M, Harrison S, Holland, Lloyd EJ, Prentice IC, Schimel D (Eds.). Academic Press, San Diego.
- Raupach MR, Barrett DJ, Briggs PR, Kirby JM (2002) Terrestrial biosphere models and forest-atmosphere interactions. In: *Forests and Water*, Vertessy R, Elsenbeer H (Eds.). IU-FRO.
- 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 (2003) Interactions between CO₂ stabilisation pathways and requirements for a sustainable earth system. In: *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*, Field C, Raupach M (Eds.). Island Press, Washington D.C., in press.
- Rayner PJ, Knorr W, Scholze M, Giering R, Heimann M, Le Quere C (2001) Inferring terrestrial biosphere carbon fluxes from combined inversions of atmospheric transport and process-based terrestrial ecosystem models. Extended Abstracts of the 6th International Carbon Dioxide Conference, Sendai, Japan, October 2001, Oct, 2001, pp 1015-1017.
- Rayner PJ, O'Brien DM (2001) The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions. *Geophysical Research Letters* 28:175- 178.
- Rödenbeck C, Houweling S, Gloor M, Heimann M (2003) O₂ flux history 1982-2001 inferred from atmospheric data using a global inversion of atmospheric transport. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 3:2575-2659.
- Roughgarden T, Schneider SH (1999) Climate change policy: quantifying uncertainties for damages and optimal carbon taxes. *Energy Policy* 27:415-429
- Running SW, Baldocchi DD, Turner DP, Gower ST, Bakwin PS, Hibbard KA (1999) A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment* 70:108-127.
- Rustad LE, Campbell JL, Marion GM, Norby RJ, Mitchell MJ, Hartley AE, Cornelissen JHC, Gurevitch J (2001) A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126:543-562.
- Sabine CL, Feely RA (2001) Comparison of recent Indian Ocean anthropogenic CO₂ estimates with a historical approach. *Global Biogeochemical Cycles* 15:31-42.
- Sabine CL, Heimann M, Artaxo P, Bakker D, Arther Chen C-T, Field CB, Gruber N, LeQuereC, Prinn RG, Richey JE, Romero-Lanko, P Sathaye J, Valentini R (2003) Current status and past trends of the global carbon cycle. In: *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*, Field C, Raupach M, (Eds.). Island Press, Washington, DC, in press.
- Sabine C, Hood M (2003) Ocean carbon scientists organize to achieve better cooperation, coordination. *EOS* 84:18-20.

- Sarmiento JL, Orr JC (1991) Three-dimensional simulations of the impact of Southern Ocean nutrient depletion on atmospheric CO₂ and ocean chemistry. *Limnology and Oceanography* 36:1928-1950.
- Schimel DS, House JI, Hibbard KA, Bousquet P, Ciais P, Peylin P, Braswell BH, Apps MJ, Baker D, Bondeau A, Canadell J, Churkina G, Cramer W, Denning AS, Field CB, Friedlingstein P, Goodale C, Heimann M, Houghton RA, Melillo JM, Moore B, Murdiyarso D, Noble I, Pacala SW, Prentice IC, Raupach MR, Rayner PJ, Scholes RJ, Steffen WL, Wirth C (2001) Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414:169-172.
- Schulze E-D, Höglberg P, van Oene H, Persson T, Harrison AF, Read D, Kjäller A, Matteucci G (2000) Interactions between the carbon and nitrogen cycle and the role of biodiversity: A synopsis of study along a north-south transect through Europe. *Ecological Studies* 142:468-492.
- Smith P, Faloon P, Smith JU, Powlson DS (2001) Soil organic matter network (SOMNET): 2001 Model and experimental metadata. GCTE Report No. 7 (second edition), Wallingford.
- Styles JM, Raupach MR, Lloyd J, Kolle O, Farquhar GD, Shibistova O, Lawton KA, Schulze E-D (2002) Soil and canopy CO₂, 13CO₂, H₂O and sensible heat flux partitions in a forest canopy inferred from concentration measurements. *Tellus B* 54:655-676.
- Tans PP, Fung IY, Takahashi T (1990) Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247:1431-1438.
- Takahashi T, Sutherland SC, Sweeney C, Poisson A, Metzl N, Tilbrook B, Bates N, Wanninkhof R, Feely RA, Sabine C, Olafsson J, Nojiri Y (2002) Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects, *Deep-Sea Res. II* 49:1601-1623.
- Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, Schulze ED, Rebmann C, Moors EJ, Granier A, Gross P, Jensen NO, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grunwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski AS, Vesala T, Rannik U, Berbigier P, Loustau D, Guomundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis PG (2000) Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404:861-865.
- Vellinga P, Herb N, editors (1999) *Industrial Transformation - Science Plan*, Bonn: IHDP
- Walker BH, Steffen WL, Canadell J, Ingram JSI (Eds.) (1999) *The Terrestrial Biosphere and Global Change. Implications for Natural and Managed Ecosystems*. Cambridge University Press, London.
- Wang YP, Barret DJ (2003) Estimating regional terrestrial carbon fluxes for the Australian continent using a multiple-constraint approach: I. Using remotely sensed data and ecological observations of net primary production. *Tellus* 55B:270-289.
- Watson AJ, Bakker, DCE, Ridgwell AJ, Boyd, PW, Law CS (2000) Effect of iron supply on Southern Ocean CO₂ uptake and implications for glacial atmospheric CO₂. *Nature* 407:730-733.
- Wofsy SC, Goulden ML, Munger JW, Fan SM, Bakwin PS, Daube BC, Bassow SL, Bazzaz FA (1993) Net exchange of CO₂ in a midlatitude forest. *Science* 260:1314-1317.
- Yamagata Y, Alexandrov GA (2001) Would forestation alleviate the burden of emission reduction?: An assessment of the future carbon sink from ARD activities. *Climate Policy* 1:27-40.
- Young OR (1999) *Institutional Dimensions of Global Environmental Change (IDGEC)*. Science Plan, Bonn: IHDP.
- Young OR (2002) *The institutional dimensions of environmental change: Fit, interplay, and scale*. Cambridge, MIT Press.

Appendixes 付録

Appendix A: 関連するイニシアチブおよびネットワーク

A.1. GCP スポンサープログラムと炭素関連活動

IGBP、IHDP および WCRP の地球変動に関わるプログラムが、GCP の共同スポンサーになっています。今日まで、この3つのプログラム内または他グループとの共同で、炭素循環研究に関する多くの進行中の活動または提案中の活動が実施されています。この3つのプログラムにより確立されている協力関係は、国家レベルと地域レベルの活動を繋ぐだけでなく、GCP における将来のプロジェクトのために強い基盤を提供しています。

IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme)

[<http://www.igbp.kva.se>]

IGBP は、海洋鉄施肥効果実験の計測・分析、陸域生態系の温暖化と CO₂ 濃度上昇への応答に関する実験的研究、沿岸域の炭素フラックスにおける炭素収支アプローチ、炭素循環に関連する多くのモデル比較検討など、長期間に及ぶ一連の炭素研究活動を行っています。

GAIM (Global Analysis, Integration and Modeling)

[<http://gaim.unh.edu>]

- OCMIP (海洋炭素サイクルモデルの相互比較プロジェクト)
- EMDI (生態系モデル/データ相互比較)
- TransCom (大気微量成分輸送モデルの相互比較プロジェクト)
- 全球 NPP (純一次生産量) モデル相互比較
- Traces (地球システムにおける微量成分ガスとエアロゾルの循環)
- EMICs (中間的な複雑さをもつ地球システムモデル)
- C4MIP (炭素循環気候結合モデルの相互比較プロジェクト) (WCRP 協賛)
- CCMLP (炭素結合モデル連鎖プロジェクト)

GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystems)

[<http://www.gcte.org>]

- CO₂ 濃度増加の陸域生態系への影響
- 温暖化の陸域生態系への影響

- BASIN (生物圏-大気圏安定同位体ネットワーク)
- SOMNET (土壌有機物ネットワーク)
- 攪乱と生物地球化学
- DGVM (動的全球植生モデル) の開発
- Fluxnet

LUCC (Land Use/Cover Change) (IHDP協賛)

[<http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC>]

- LUCCI (土地利用と気候変化の炭素フラックスへの影響)
- 熱帯雨林炭素吸収源からの固定化された炭素の供給と熱帯雨林炭素吸収源での CDM ルール：コスタリカ LUCC ケーススタディ

Land project (IHDP協賛)

- 陸域生物地球化学
 - 攪乱と炭素排出
 - 人間-地球生物化学統合陸域システム
- [注] GCTE と LUCC による 2004 年始動の新しいプロジェクト

GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics SCORとIOCが協賛)

[<http://www.pml.ac.uk/globec/main.htm>]

- 海洋における食物網ダイナミクス

JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study)

[<http://ads.smr.uib.no/jgoofs/jgoofs.htm>]

- 全球調査/大気-海洋間の CO₂ フラックス
- 大陸棚域フラックスの研究
- 時系列ステーション
- 沿岸クルーズ

[注] JGOFS は 2003 年に活動を終え、新しい IGBP/SCOR IMBER プロジェクトが 2004 年に始まる予定。

IMBER (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) (SCOR協賛)

2004 年に開始される予定

- 炭素の深海移送と貯蔵

ILEAPS (Interactive Land Ecosystem-Atmosphere Processes)

陸域と大気間の相互作用メカニズムの解明に取り組む新しいプロジェクト。2004年の早い時期に開始される予定。

LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coastal Zone)

[<http://www.nioz.nl/loicz/>]

- ・沿岸域のフラックスに対する外的条件または境界条件の変化の影響
- ・沿岸類型分析と地球変動：沿岸及び大陸棚域の炭素の行方
- ・炭素フラックスと微量ガス排出：河川から沿岸域への炭素移送
- ・沿岸域システムにおける地球環境変動の社会経済的な影響：沿岸域システムの持続可能性と資源管理問題

PAGES (Past Global Changes)

[<http://www.pages.unibe.ch/>]

- ・PAGES および CLIVAR：氷床コアと深海堆積物による炭素－気候システムの研究
- ・IMAGE：海洋堆積物と気候変化に関する国際研究
- ・過去の生態系プロセス及び人間と環境の相互作用

SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study) (SCOR、CACGP (Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution)、WCRP協賛)

[<http://www.solas-int.org/>]

- ・海洋と大気の生物地球化学的な相互作用とフィードバック
- ・大気－海洋境界面における交換プロセスと境界層における移送と変換の役割
- ・大気－海洋 CO₂ フラックスと他の長寿命温室効果ガス

IHDP (International Human Dimensions Programme)

[<http://www.ihdp.org/>]

4つのコアとなるサイエンスプロジェクト (IDGEC、IT、LUCC、GECHS) を通じて、炭素関連の活動を幅広く行ってきました。主要なプロジェクトとしては、温室効果ガスの排出コントロールと制度的側面に関するもの、産業転換とエネルギーシステムの脱炭素化に関するもの、土地利用システムの変換と全球炭素循環における陸域コンポーネントの挙動（さらには変化に対する人類の応答）に関するもの、炭素循環変動での人類の安全保障計画に関するものなどがあります。詳しい情報は、GCP Web サイトに掲載されている「IHDP

Global Carbon Research」を参照ください。

IDGEC (Institutional Dimensions of Global Environmental Change)

[<http://fiesta.bren.ucsb.edu/~idgrec/>]

- ・PEF (熱帯・北方林の政治経済学)
- ・CMRA (炭素管理研究活動)
- ・PEEZ (排他的経済水域のパフォーマンス)

IT (Industrial Transformation)

[<http://www.vu.nl/ivm/research/ihdp-it/>]

- ・エネルギーおよびマテリアルフロー
- ・都市／交通
- ・管理および転換プロセス

IT プロジェクトは、GCP に係わる産業転換に関連する研究活動をリストアップしたドキュメントを作成しています。このドキュメントは GCP Web サイトで閲覧できます。

LUCC (Land-use and Land-cover Change) (IGBP協賛プロジェクト)

[<http://www.geo.ucl.ac.be/>]

- ・LUCCI (土地利用と気候変化の炭素フラックスへの影響)
- ・熱帯雨林炭素吸収源からの隔離炭素の供給と当該吸収源に「おける CDM ルール：コスタリカ LUCC のケーススタディ

WCRP (World Climate Research Programme)

[<http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html>]

WCRP は、炭素循環の年々変動或いは世紀にまたがる変動、海洋と大気の循環の炭素移送および貯蔵に対する大きな制御、および炭素と水循環の関係の理解を主目的とする、気候変化・変動のモデリングツールを提供しています。WCRP がスポンサーとなっている主な活動を以下に示します。

GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment)

[<http://www.gewex.org/>]

- ・GLASS (全球陸域／大気システム研究) および PILPS C-1 (地表パラメータ化スキームの相互比較のための特別プロジェクト)
- ・雲および地表のパラメータ化スキームの開発および改良および、パラメータと GCM の統合化を目的とした GMPP (GEWEX モデル化・予測パネル)
- ・データプロジェクト
- ・宇宙からの全球 CO₂ 計測

CLIVAR (Climate Variability and Predictability)

[<http://www.clivar.org/>]

- ・定期大洋横断による 10 年スケールの海洋物理特性および炭素システム変動調査
- ・WGSIP (季節変動および年々変動予測に関するワーキンググループ)

WGCM (Working Group on Coupled Modelling)

[<http://www.wmo.ch/web/wcrp/wgcm.htm>]

- ・炭素循環の現実的な再現を含めた、包括的でインタラクティブな地球システムモデルの開発

WGNE (Working Group on Numerical Experimentation) (WCRP JSC, WMO CAS (Commission for Atmospheric Sciences) 協賛)

[<http://www.wmo.ch/web/wcrp/wgne.htm>]

- ・GCMにおけるCO₂プロセスのキャラクターゼーションの改善を目的としたモデル比較
- ・データ同化アプローチ

ACSYS/CliC (Arctic Climate System Study and Climate and Cryosphere Project)

[<http://www.npolar.no/acsys/>]

- ・全球炭素循環への氷圏の変化の影響
- ・永久凍土からの温室効果ガス排出
- ・北極海の炭素吸収強度

A.2. 国・地域プログラム

国レベルの炭素研究プログラムは、全球的な戦略を策定するための研究・科学コミュニティの基本的なブロックです。GCPは、比較可能性の拡大、リソースの活用、方法論と知識の迅速な伝達を通じ、国・地域プログラムの能力が更に拡大するのに期待するとともに、いわゆる単一の全球炭素循環の全コンポーネントを持ち寄るための科学的なリーダーシップを執ります。このセクションでは、3つの国・地域プログラムの事例を紹介します。他の国レベルのプログラムの情報についてはGCPのHPを参照ください。

The Australian Carbon Cycle Programme

[<http://www.greenhouse.gov.au/science/index.html>]

[<http://www.greenhouse.crc.org.au>]

CSIRO BWG (Biosphere Working Group) と CRC-GA (the Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting) の活動を含むプログラムです。同プログラムは下記に着目しています。

- ・生物圏と大気圏間におけるプロセスの相互作用。特

に、オーストラレーシア地域における生物起源の温室効果ガス (CO₂、メタン、亜酸化窒素) の循環に関する生物圏の役割

- ・オーストラレーシア地域における陸域 - 海洋 - 大気システム間のフィードバックと、その地域気候変動への作用
- ・地域の温室効果ガスの吸収源および排出源を決定し、海洋 - 大気 - 陸域が統合した気候モデルを改善するための多制約アプローチの開発と応用

CarboEurope

[<http://www.bgc-jena.mpg.de/public/carboeur>]

ヨーロッパの炭素バランスの解明と定量化のためのプロジェクト群を指し、ECDG (欧州委員会開発総局) 研究第 5 回フレームワークプログラム (第 6 回フレームワークプログラムに継続) より資金を得ています。炭素固定メカニズムの解明、ヨーロッパの陸域生態系による炭素吸収/排出の規模の定量化、陸域生態系が気候変動・栄養供給・窒素蓄積率変化・管理体制の相互作用等から受ける制約等の解明、を目的としています。ヨーロッパにおける生態系に関する研究は、シベリアおよびアマゾンの森林域における炭素吸収強度の研究によって補足されます。関連トピックスは以下の通りです。

- ・生態系から地域ないし大陸の領域までの様々なスケールで、炭素排出源および吸収源の時空間的な挙動を検証し、排出源・吸収源の社会経済的な要因と結果を評価するための学際的に融合されたフレームワークの提供
- ・最先端の炭素アカウンティング技術およびモデリング技術の利用促進
- ・様々なスケールにわたる矛盾のない炭素アカウンティング方法の導入

China Carbon Flux Programme

NSFC (中国自然科学基金委員会)、SSTC (国家科学技術委員会)、CAS (中国科学院) を含む複数の機関の尽力により設立されたプログラムで以下の 5 点に焦点を当てています。

- ・中国の典型的な陸域・沿岸海域における生態系 (森林、農地、草地、湖沼、沿岸域等を含む) による炭素フラックスと貯蔵量
- ・中国の、森林、耕作地、草地、湖水および沿岸生態系を含む、典型的な陸域・沿岸海域生態系の炭素フラックスおよび貯蔵量
- ・中国の陸域・沿岸海域生態系炭素フラックスおよび貯蔵の生物地球化学的プロセスおよび生物的気候順応

- ・中国の陸域炭素循環の歴史的プロセスと土地利用変化
 - ・陸域・沿岸海域生態系の炭素循環モデル
 - ・炭素収支とミティゲーション／固定化の包括的な研究
- 詳細問い合わせ先：
Guangsheng Zhou (zhougs@public2.bta.net.cn)。

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 (日本)

環境省の地球環境総合推進費による研究プログラムで、CO₂濃度の増加率を究極的に小にするため、アジアにおける大気と陸域生態系との間の炭素ダイナミクスの解明を目的としています。このプログラムは、以下の4つのテーマから構成されています。

- ・微気象・生態学的手法をベースにしたボトムアップアプローチによる陸域生態系の炭素収支解析
 - ・大気観測をベースとするトップダウンアプローチによるメソスケールの陸域炭素収支解析
 - ・陸域生態系の炭素収支管理に向けた炭素収支ダイナミクスおよび方法論の評価
 - ・プロジェクトの統合的推進と情報の共有
- 詳細問い合わせ先：
山形与志樹 (yamagata@nies.go.jp)

LBA (The Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia)

[<http://lba.cptec.inpe.br/lba/indexi.html>]

ブラジル、米国、ヨーロッパの数カ国を含む多くの国々は、LBAの一環としてアマゾンの炭素循環に関する共同研究を実施しています。主な研究対象は以下に示す4つです。

- ・熱帯雨林の炭素循環を制御する大気の機構の強制とアマゾンの森林との間の生物地球化学的な相互作用とフィードバック
- ・森林伐採と人為的要因による炭素フラックス
- ・気候変化の熱帯生態系への影響
- ・冠水林からのCO₂の流失
- ・放射収支と炭素循環へのエアロゾルの影響

USGCRP (The United States Carbon Cycle Science Programme)

[<http://www.carboncyclescience.gov>]

USGCRPは、炭素循環科学プログラムを新たに創設し、環境中の炭素の行方および、炭素の循環がどのように変化するか、また、将来どう変化するかといった科学的で偏らない情報を提供しています。この情報には、環境中の炭素管理のための科学的な基礎情報が

含まれています。CO₂等の温室効果ガスに関する地域から全球レベルの吸収／排出源を明らかにするとともに定量化し、これらの吸収／排出源が将来どう機能するのかという点について、協調的かつ統合的に研究を進め、地球システムの将来状況予測に関する重要な情報を提供していきます。

A.3. 他の国際的イニシアティブ

国・地域プログラムに加えて、全球炭素循環または気候変動に関する一連の課題を取り扱う国際イニシアティブおよびプログラムがあります。

CAVASSOO (Carbon Variability Studies by Ships of Opportunity)

[<http://lgmacweb.env.uea.ac.uk/e072/>]

北大西洋のCO₂の取り込み量と、季節変動および年々変動について信頼性の高い値を提供することを目的としています。大気インバースモデル技法を用いて、ヨーロッパおよび北米の陸域（植生）吸収源の評価を行う際の制約条件として利用できます。

GLOBALHUBS (Global Quality Control for Long-Lived Trace Gas Measurements)

長寿命微量成分ガスの測定について実験室間の相互比較検証を改善し、時空間的な大気組成変化から、より正確な、吸収／排出フラックスを導出すること目的としています。

IGOS-P (Integrated Global Observing Strategy Partnership)

[<http://ioc.unesco.org/igospartners/igoshome.htm>]

IGOS-Pは、GOS (Global Observing System)により実行され調整される、共通・統合戦略に関するパートナーシップです。

- ・GOOS (Global Ocean Observing System)
[<http://ioc.unesco.org/goos/>]
- ・GTOS (Global Terrestrial Observing System)
[<http://www.fao.org/gtos/index.html>]
- ・GCOS (Global Climate Observing System)
[<http://www.wmo.ch/web/gcos/gcoshome.html>]

IPCC (The InterGovernmental Panel on Climate Change)

[<http://www.ipcc.ch/>]

全球的な気候変化の潜在的な問題を認識して、1988年にWMO (世界気象機関)とUNEP (国連環境計画)により立ち上げられました。IPCCの役割は、

人間起源の気候変化のリスクを把握するための科学・技術・社会経済情報を評価することにあります。研究を行ったり気候関連データや大気成分データのモニタリングを行うのではなく、その評価は主に、査読・出版された科学技術文献に立脚しています。

MA (The Millennium Ecosystem Assessment)

[<http://www.millenniumassessment.org/en/index.htm>]

人類の発展に重要な物とサービスを提供する生態系のキャパシティに関して、世界の草地・森林・河川・湖沼・農地・海洋を含む地球上の生命をサポートするプロセスの検証を担う国際的な評価活動です。4年間に及ぶプログラムの目的は、(政府や民間企業における)意思決定者や一般市民の要請に、生態系の状況や変化の帰結、変化に対する行動オプション等、政策に関連した、よく吟味された科学的な情報により応えて、世界の自然と生態系の管理を改善することにあります。また、情報を提供するために、人材および制度面の能力強化(キャパシティービルディング)を行う予定です。

NEESPI (Northern Eurasian Earth Science Partnership Initiative)

[<http://neespi.gsfc.nasa.gov/>]

国際的な科学プログラムを支援し、北ユーラシアにおける生態系・大気・人間ダイナミクス間の相互作用の理解を深めるため、大規模で学際的な受託研究プログラムを創設することを目的としています。パートナーには、NASA等の米国機関、ロシア科学アカデミーおよび他の国際研究機関、GOFD (Global Observation for Forest and Land Cover Dynamics)、IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) および他の国際プログラムが含まれています。NEESPIの炭素研究アプローチは、地域の現地データと、リモートセンシングによる観測・計測、陸域炭素モデル、社会経済モデル、地形モデル、統合モデル等のモデル研究を組み合わせており、以下のような研究が進められています。

- ・米国太平洋側北西地域およびロシア北西地域の森林地帯を対象とした、炭素ダイナミクスと経済の関係のモデル化
- ・経済変化パラダイムを受けた、シベリア森林の土地被覆変化および炭素量のモデル化
- ・北方林火災によるCO₂排出が高緯度地域の大气中CO₂濃度の年々変動に占める寄与率の確定
- ・中央シベリアにおける火災と焼失領域が炭素循環・炭素排出・森林の健全性・持続可能性へ及ぼす効果のモニタリングとモデル化
- ・シベリアの地形の複合衛星マッピング

- ・近年の社会的混乱と土地利用変化の結果としてのロシアの陸域炭素貯蔵量の変化

SCOR (The Scientific Committee on Oceanic Research)

[<http://www.jhu.edu/~scor/>]

JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study)、SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study)、IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme)の海洋生物地球化学・生態系プロジェクト、IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO)の海洋CO₂アドバイザリーパネルが共同スポンサーになっており、炭素循環研究に関連する複数の作業部会を有しています。

- ・CARINA (Carbon Dioxide in the Atlantic Ocean) [<http://www.ioc.unesco.org/iocweb/CO2panel/>]
北大西洋のインベントリーとCO₂データを公表することを目的とするIOC/SCORパネルと関連するプロジェクトです。
- ・海水中鉄分の生物地球化学
- ・全球気候調節における海洋植物プランクトンの役割
- ・プランクトン観測および海洋表層から下方への炭素フラックス評価に関する新しい手法

SCOR-IOC Panel on Ocean CO₂ (The Scientific Committee on Oceanic Research - Intergovernmental Oceanographic Commission Panel on Ocean CO₂)

[<http://ioc.unesco.org/iocweb/CO2panel/>]

SCOR-IOCは、国際コミュニティが共通の関心を持つ海洋炭素活動の調整と交流を仲介するため、2000年に海洋CO₂アドバイザリーパネルを創設しました。現在のプログラムは以下の通りです。

- ・観測の調整 (GCPと共同でIOCCP (International Ocean Carbon Coordinate Project) 経由による)
- ・標準・基準物質に関する唱導
- ・情報交換および計測技術
- ・海洋炭素吸収に関する情報の整備とメンテナンス

AppendixB:

IGCO (Integrated Global Carbon Observing Strategy)

炭素循環と将来のトレンドに関する協調的な定常観測システムを構築するための戦略です。

P Ciais, B Moore, W Steffen, M Hood, S Quegan, J Cihlar, M Raupach, I Rasool, S Doney, C Heinze, C Sabine, K Hibbard, D Schulze, M Heimann, A Chédin, P Monfray, A Watson, C LeQuéré, P Tans, H Dolman, R Valentini, O Arino, J Townshend, G Seufert, C Field, I. Chu, C Goodale, A Nobre, G Inoue, D Crisp, D Baldocchi, J Tschirley, S Denning, W Cramer, R Francey

要旨

IGCO の最終的な目標は、今後 10 年にわたる全球炭素循環の系統的観測のための柔軟かつ強固な戦略を策定することにあります。このレポートは、IGCO 戦略が定める基盤の上に構築されており、定常的な全球炭素観測システムについて述べています。このシステムは、以下の 2 つの主目的を持っています。

- 全球炭素循環の現状と将来挙動、特に全球大気中 CO₂ レベルの支配要因の理解を深めるために必要な長期間観測の改善
- 炭素の固定や排出削減活動の全球大気中 CO₂ レベルへの効果の地域および分野の発生源・吸収源の寄与を含めてのモニタリングと評価

このシステムは、地表面と大気の間で交換される CO₂ フラックスの全球分布を定常的に定量化し評価するとともに、鍵となる炭素貯蔵量の変化を、もとなっている生物地球化学的プロセスが推定できるような観測とともに測定することで、目標を達成しようとしています。この全球炭素観測システムは、炭素循環の主要な 3 領域である海洋、陸地、大気を多面的に統合しています。実際、1 つの領域の結果が他の 2 つの領域への制約となっているので、異なる領域のデータとモデルを組み合わせることで、全球炭素循環の解明が飛躍的に進展するのです。

観測システムを履行する上で、以下の事項が求められます。

- 2015 年まで運用システムの中心的役割を果たすデータ要件の明確化、ネットワーク構造の設計、定常炭素観測のための先進的アルゴリズムの開発

- 経済的でメンテナンスをあまり必要としない大気中 CO₂、海洋溶存 CO₂ (pCO₂)、陸域生態系フラックスのその場測定用センサの開発
- 宇宙からの CO₂ のリモートセンシング測定に関する技術の開発と実施
- 研究機関の協力による、系統的な観測にもとづいており十分に検証された、炭素循環の状態の定期的な診断を配信できる炭素循環モデルの開発
- モデルの開発とモデルを使った研究を行うためのデータのハーモナイゼーション、データベースおよびデータ提供の推進

このレポートは、最終的に研究機関および運営機関の双方によって履行される全球炭素観測システムのビジョンを示すとともに、システムを実現するまでのロードマップを示しています。また、このレポートは、このシステムが立脚すべき核となる一連の既存の研究ベースの観測を、陸域炭素観測戦略および全球海洋観測システムの中から明らかにしています。さらに、一連の研究的な観測から、定常観測に移るために要求される重要な優先事項と手順について述べています。

全球炭素観測システムは、フラックス、プール、プロセスの 3 つのテーマにそれぞれ取り組む相補的な観測コアグループを中心に構築されるべきです。

フラックス

以下に示すような一連の観測で、地表と大気間の CO₂ フラックスの分布と変動の定量化を可能にします。

- 全球を概観できる（全緯度・全季節）少なくとも 1ppm の正確度での大気中 CO₂ のカラム濃度の衛星観測
 - ・ 現在、こうした観測は実現していず、高い優先度が与えられるべきです。
- 正確度 0.1ppm 以上での定常的な大気観測のための現地ステーションおよびフラスコサンプリングサイトの最適化したネットワーク
 - ・ この観測は現在、研究ベースで全世界の約 100 箇所のステーションにおいて行われています。内陸部や余りサンプリングされていない箇所を含め、水平垂直両方向ともカバー範囲を広げる必要があります。そのため、費用対効果の高いセンサの開発と、観測の便宜を供与してもらえらるプラットフォームの系統的な利用が求められます。
- 陸域生態系の CO₂、エネルギー、水蒸気フラックスを定常的に連続観測する渦相関法を用いたタワー観測ネットワークの最適化
 - ・ 現在、研究ベースで約 100 箇所の観測タワー

がネットワーク化されています。このネットワークは、今後、長期間に渡り維持される必要があります。また様々な生態系タイプや継続的な段階および土地利用程度の強化などをカバーするように拡張される必要があります。

- 研究船、観測協力船 (ships of opportunity)、漂流ブイを組み合わせた全球海洋 pCO₂ 測定システム
 - ・ 現在、こうした観測が約 100 の航海で行われています。全球海洋炭素観測ネットワークを構築するための主要な課題は、観測精度が高く、耐久性があり、コスト効率が高い自動海洋 pCO₂ センサを作成することです。
- 直接的な現場観測がまばらな地域の CO₂ フラックスを推定するのに必要なパラメータを全球的に観測できる、長期連続使用が可能なセンサーによる一連の衛星観測
 - ・ 重要な衛星観測として、土地の被覆状況と攪乱範囲・強度、植物活動に関するパラメータ、海色、フラックスを制御する大気と海洋の補助的なパラメータが挙げられます。

地表面と大気間の CO₂ フラックスの分布と変動を定量化する観測を利用したアプローチには、ダウンスケーリングおよびアップスケーリングによる調整が必要となります。例えば、大気移送モデルは、大気 CO₂ 測定結果をフラックスにダウンスケールすることが要求されます。一方、炭素循環フラックスモデル、リモートセンシングで得られたパラメータを利用して現地観測による点データをアップスケールすることが求められます。

定常炭素観測システムの環境が整えば、モデルデータ融合技術により、定期的に上記の炭素計測データの流れを取り入れ、全球 CO₂ フラックスの整合性のある確度の高い見積もり値を、陸域で 10km、海域で 50km の空間分解能で、毎週、提供することができます。

ストック

全球炭素観測システムは 3 つの主要な炭素ストックの変化をモニタリングします。

- 現地インベントリ手法を用いて 5 年間隔で計測され、リモートセンシング手法でより高頻度に検証される森林地上バイオマス
- 主に現地インベントリ手法を用いて 10 年間隔で計測される土壌炭素含有量
 - ・ こうした観測は、既に系統的に行われており、

森林の商業的な価値や土壌の質を評価すべく系統的に集められています。今後さらに、管理されていない森林にも拡張し、炭素循環研究に適用するとともに、地理情報化する必要があります。

- 人為的な CO₂ の表層水への隔離を評価するための、5 年～10 年間隔で計測される、主要海域における溶存炭素インベントリ
 - ・ こうした観測は、現在、研究者間で実施されています。今後、観測をシステム化し、慎重に相互比較を行い、サンプルが少ない海洋環流に拡張することが必要ですが、最も重要なのは、観測が実施されることです。

プロセス

全球炭素観測システムにおける第 3 の観測セットは、重要な炭素循環プロセスに関連する計測です。これらのほとんどは研究の領域内に残されており、GCP (Global Carbon Project) の枠組みの中で調整されるべきものです (図 21)。しかし、プロセスに関連する以下の 2 つの観測については、定常観測の範囲で行われるべきものであり、今後、同システムの中核の一部となります。

- 火災による攪乱中に排出される炭素フラックスを推定するための火災の分布 (場所) および焼失エリア。火災の場所は毎日 (またはより高頻度)、範囲は毎月計測
- 森林伐採や農地の自然生態系への回帰に関わる炭

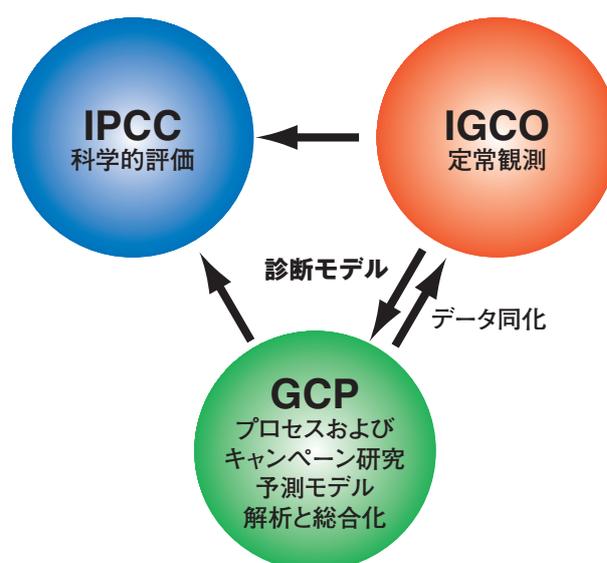


図 21

定常観測 (IGCO) と研究計画 (GCP)、評価 (IPCC) 間の繋がり (Cias et al. 2003)

素フラックスを見積もるための土地被覆変化。地上分解能 1km で 5 年おきにサンプリング

こうした観測活動は、世界中の科学者および行政担当者の中で自由にアクセスできる高品質のプロダクトを提供するデータ解析システムと結びついている必要があります。

Appendix C

炭素観測データ提供機関とユーザー

C.1. 炭素観測データ提供機関の例

形態 (現場観測/衛星)	スポンサー※	データ/プロダクト	空間/時間範囲	URL
陸域現地観測				
FLUXNET	Countries/IGBP/WCRP	生態系、フラックス、微気象	全大陸 (南極を除く)	http://www-eosdis.ornl.gov/FLUXNET/
ILTER	Countries/	生態系	21 カ国	http://www.ilternet.edu/
GT-Net	Countries/GTOS	生態系	84 カ国、多数のネットワーク	http://www.fao.org/gtos/gt-net.html
SOMNET	Countries/IGBP	土壌	70 サイト、6 大陸	http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/somnet/index.htm
海域現地観測				
GOOS	Countries/IOC	Appendix B 参照	全球、地域スケール	http://ioc.unesco.org/goos/
CDIAC Oceans	JGOFs, CLIVAR, GLODADP, CARINA	CO ₂ 測定値	全球スケール	http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/home.html
PICIS PICNIC	PICIS	CO ₂ 測定値	北太平洋	http://picnic.pices.jp
CARINA	CARINA	炭素関連	大西洋	http://www.ifm.uni-kiel.de/fb/fb2/research/carina
IOCCP	IOC - WMO - UNEP - ICSU	観測システム情報・連携	全球、地域、国家スケール	http://www.ioccp.org
CLIVAR	WCRP	炭酸塩システムの定期海洋観測、水路、気象観測、船舶ドップラー流速分布計データ	全球、海盆スケール 5 年毎～10 年毎 30～50km 分解能 (大陸棚はより詳細)、全水柱	http://www.sprint.clivar.org/ http://www.ioccp.org
Carbon SOOP	IOCCP により調整	航走中の pCO ₂ の観測、海色、気象パラメータ、CO ₂ 、 ¹³ C、 ¹⁴ C、 ¹⁸ O、関連パラメータ	地域 (海盆スケール) 航跡に沿って連続 月別値～季節別値	http://www.ifremer.fr/ird/soopip/instr.html http://www.ioccp.org
全球海洋時系列観測	OOPC - CLIVAR - POGO; carbon information compiled by IOCCP	pCO ₂ 、炭酸塩システム、海色変数、補助的な物理量、気象、化学・生物測定	固定ポイント係留または戦略的ステーションによる定期観測 高頻度～毎年	http://www.oceantimeseries.org
国際海色研究グループ (IOCCG)	IOCCG, SCOR	海盆スケールの表層バイオマス生産性、植物プランクトン自然蛍光	全球スケール (4～8km 分解能) 沿岸地域 (0.5～2km 分解能) 日別値～週別値	http://www.ioccg.org/

※直接のスポンサー (通常は国家機関) と国際連携機構の両方を含む

C.1. 炭素観測データ提供機関の例

形態 (現場観測/衛星)	スポンサー※	データ/プロダクト	空間/時間範囲	URL
大気現地観測				
GLOBALVIEW-CO ₂	Countries/WMO	微量ガス成分濃度	全球スケール 週別値	http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/in-dex.html
複合観測				
CDIAC	U.S. DOE	複数の全球・地域・国家研究プログラムからの各種海洋データ・情報を収納	全球、地域、国家スケール	http://cdiac.ornl.gov/oceans/home.html
衛星観測				
高分解能	NASA/CEOS	衛星画像、土地被覆	全球スケール	http://ivanova.gsfc.nasa.gov/daac/
	CNES/CEOS	衛星画像、土地被覆	全球スケール	http://www.spot.com/
	NASDA/CEOS	衛星画像	全球スケール	http://www.eoc.nasda.go.jp
	CSA/CEOS	衛星画像	全球スケール	http://www.spot.com/
中～低分解能	NASA/CEOS	衛星画像、土地被覆変化、LAI (葉面積指数)、火災、CH ₄ 、太陽放射、NPP (純一次生産量)	全球スケール	http://ivanova.gsfc.nasa.gov/daac/
	NOAA/CEOS	太陽放射、衛星画像	全球スケール	http://www.gewex.com/srb.htm
	NASDA/CNES/CEOS	OCT、POLDER	全球スケール	http://www.osdnpd.noaa.gov/
	ESA/JRC(WFW)/EC	火災	全球スケール	http://www.eoc.nasda.go.jp
	CNES/SNSB/OSTC/SAI/EC	衛星画像、土地被覆変化、火災、生態系生産量	全球スケール 全球スケール	http://www.gvm.sai.jrc.it/ http://www.vgt.vito.be/

※直接のスポンサー (通常は国家機関) と国際連携機構の両方を含む

C.2. 炭素情報コーナー

プログラム	スポンサー	利用データ／必要データ	空間・時間範囲	URL
全球／国際レベル				
IPCC	UNFCCC	生態系生産性	全球スケール 過去／現在	http://www.ipcc.ch/
Global Environmental Research Programmes	国または地方	全てのパラメータ	全球スケール 過去／現在	http://www.igbp.kva.se/ http://www.ihdp.org/ http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp/wcrp-home.html
IOC	UNESCO	海洋関連パラメータ	全球、地域スケール 全時間スケール	http://ioc.unesco.org
IGBP (several core projects)	国または地方	全てのパラメータ	全球スケール 過去／現在	http://www.igbp.kva.se/
森林資源評価 (FRA)	FAO	土地被覆変化、バイオマス、火災、生産量	全球スケール 5年毎	
Global Environmental Outlook	UNEP	全てのパラメータ	全球スケール 現在／2年毎	http://www1.unep.org/unepl/eia/geo/reports.htm
NGOs (WRI, WCMC, 他)	各種の公的、私的機関	土地被覆変化、バイオマス、火災、生産量	全球、地域スケール 現在	http://www.wri.org/ http://www.wcmc.org.uk/
生物多様性条約	国	土地被覆変化、バイオマス、火災、生産量	国家～全球スケール 過去／現在	http://www.biodiv.org/
砂漠化対策条約	国	全てのパラメータ	国家スケール 現在	http://www.unccd.de/
国家レベル				
炭素アカウンタ	国 例えば：Australia US, Norway	全てのパラメータ	国家スケール／プロジェクトベース 現在	http://www.greenhouse.gov.au/ncas/ http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrpt/
資源計画 (植生、森林)	国 例えば：Australia, Africa, Canada	全てのパラメータ	国家／サブ国家スケール 現在	http://www.nlwra.gov.au/ http://metart.fao.org/default.htm
資源管理：火災関連	国 例えば：Africa, Indonesia, various others	火災、土地被覆変化、バイオマス	国家スケール 現在	http://www.iffm.or.id/ http://www.ruf.uni-freiburg.de/fire-globe/
資源管理：農作物、水	国 (Africa,...)	土地被覆変化、バイオマス、生産量	国家スケール 現在	

C.3. 全球炭素循環観測のための衛星ミッションの状況※

機関	ミッション※※※	センサー	カテゴリ※※
CAST			
CNES	SPOT-3,-4	HRV	1
CNES, EU	SPOT-4, SPOT - 5	HRG, VEGETATION	
CSA	Radarsat -1,-2	SAR	1
DARA	***		
ESA	ENVISAT-1	ASAR, MERIS, AATSR, SCIAMACHY	1
ESA	ERS-2	ATSR, AMI	1
ESA, CNES	SMOS ***	MIRAS	1
EUMETSAT	METOP - 1, -2, - 3	AVHRR /3, IASI, ASCAT	1
EUMETSAT	MSG	SEVIRI	1
INPE	MECB SSR-1,-2	OBA	計画済
ISRO	IRS -1C, -1D	LISS-III, PAN, WIFS	
ISRO	IRS- P2, -P5, -P6	LISS-II (-IV), WIFS, HR-PAN, AWIFS	
ISRO	IRS- P3, -P4	MOS, WIFS, MSMR	
NASA	EOS Aqua	CERES, MODIS, AMSR-E, AIRS	1
NASA	EOS Aura	HIRLDS, TES	1
NASA	EOS Terra	ASTER, CERES, MISR, MODIS, MOPITT	1
NASA	ESSP/VCL	MBLA	
NASA	ICESat	GLAS	1
NASA	QuikScat	SeaWinds	1
NASA		OCO	1
ORBIMAGE (NASA data buy)	SeaStar***	SeaWifs	1
NASA	NMP/EO-1	ALI, Hyperion	4
NASA, NASDA	TRMM	CERES, VIRS	
NASDA	ALOS	ALOS/PRISM, AVNIR-2, PALSAR, PRISM	1
NASDA, CNES	GCOM - B1, - B2 ***	GLI, POLDER, IMG	2
NASDA, CNES, NASA	ADEOS-II	GLI, POLDER-2	1
NASDA, NASA	GCOM - A1, - A2 ***	SAGE-III, ILAS-II??	2
NOAA	Landsat	ETM	1
NOAA	NPOESS	VIIRS, CrIS/ATMS, CMIS, OMP, CERES	
NOAA	TIROS-N	AVHRR, TOVS	
NOAA	GOES I,J,K,L,M		1
NOAA	GOES - N,O,P,Q		1
NOAA	GOES SEI		
NOAA, NASA	NPOESS Preparatory Project (NPP)***	VIIRS, CrIS/ATMS	3

※ 表に含まれているのは炭素観測を直接的にサポートするミッションおよびプロダクトのみ。他のミッションでもサポート情報が得られる。

※※ カテゴリ： 1 = 計画済みのミッション、 2 = 既存技術利用の提案中のミッション、 3 = 研究段階から実用段階へ移行中のミッション、 4 = 新たな技術・成果・使命を検討中、 5 = データおよび情報システム

※※※ WMO/CEOS データベースに含まれないもの

Abbreviations & Acronyms

略語一覽

ACSYS	Arctic Climate System Study	DGVM	Dynamic Global Vegetation Model
AGO	Australian Greenhouse Office	DIC	Dissolved Inorganic Carbon
AIACC	Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change	EMDI	Ecosystem Model-Data Intercomparison
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder	EMIC	Earth System Model of Intermediate Complexity
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit (NOAA-15)	ENRICH	European Network for Research in Global Change (EU)
APN	Asia-Pacific Network for Global Change Research	ENSO	El Niño Southern Oscillation
APO	Atmospheric potential oxygen	ENVISAT	ESA satellite
AutoMOD	Automated Model Ocean Diagnostic Facility	EOS	Earth Observing Satellite
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	ESA	European Space Agency
BAHC	Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle	ESSP	Earth System Science Partnership
BASIN	Biosphere-Atmosphere Stable Isotope Network	EU	European Union
BATS	Bermuda Atlantic Time-series Study	FACE	Free Air CO ₂ Enrichment
BWG	Biosphere Working Group	FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
C4MIP	Coupled Carbon Cycle Climate Model Intercomparison Project	GAIM	Global Analysis, Integration and Modelling
CACGP	Commission on Atmospheric Chemistry and Global Pollution	GCM	Global Climate Model
CARBOSAT	ESA space mission dedicated to monitoring of the carbon cycle	GCOS	Global Climate Observing System
CARINA	Carbon Dioxide in the Atlantic Ocean	GCP	Global Carbon Project
CAS	Commission for Atmospheric Sciences	GCTE	Global Change and Terrestrial Ecosystems
CAVASSOO	Carbon Variability Studies by Ships of Opportunity	GECAFS	Global Environmental Change and Food Systems
CCMLP	Coupled Carbon Model Linkage Project	GECHS	Global Environmental Change and Human Security
CLIVAR	Climate Variability and Predictability Project	GEO	Global Eulerian Observatories
CMRA	Carbon Management Research Activity	GEWEX	Global Energy and Water Cycle Experiment
CMTT	Continental Margins Task Team	GLASS	Global Land/Atmosphere System Study
COP	Conference of the Parties	GLOBEC	Global Ocean Ecosystem Dynamics
CRCGA	Cooperative Research Center for Greenhouse Accounting	GLOBALHUBS	Global Quality Control for Long-Lived Trace Gas Measurements
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	GLODAP	Global Ocean Data Analyses Project
CZCS	Coastal Zone Color Scanner Data	GMPP	GEWEX Modeling and Prediction Panel
		GOFC	Global Observations of Forest Cover
		GOOS	Global Ocean Observing System
		GPP	Gross Primary Production
		GTOS	Global Terrestrial Observing System
		HOT	Hawaii Ocean Time-series program
		IAI	Inter-American Institute for Global

	Change Research	NCAR	National Center for Atmospheric Research
IAEA	International Atomic Energy Agency	NEESPI	Northern Eurasian Earth Science Partnership Initiative
IASI	Infrared Atmosphere Sounder Interferometer	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ICSU	International Council of Science Unions	NOCES	Northern Ocean Carbon Exchange Study
IDGEC	Institutional Dimensions of Global Environmental Change	NPP	Net Primary Production
IEA	International Energy Agency	NSCAT	NASA Scatterometer
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme	OCO	Orbiting Carbon Observatory
IGCO	Integrated Global Carbon Observation	OCMIP	Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project
IGOS-P	Integrated Global Observation Strategy Partnership	OCTS	Ocean Color and Temperature Scanner
IHDP	International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change	PAGES	Past Global Changes
ILEAPS	Interactive Land Ecosystem-Atmosphere Processes	PEEZ	Performance of Exclusive Economic Zones
IMAGE	Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect	PEF	Political Economy of Tropical and Boreal Forests
IMBER	Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research	PEP	Pole Equator Pole Transects
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission	PICES	The North Pacific Marine Science Organization
IOCCP	International Ocean Carbon Coordination Project	PILPS	Project for Intercomparison of Landsurface Parameterization Schemes
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	POLDER	Polarization and Directionality in the Earth Reflectances
IT	Industrial Transformation	POC	Particulate Organic Carbon
ILTER	International Long-term Ecological Research	ppm	Parts per million
JGOFS	Joint Global Ocean Flux Study	ppmv	Parts per million by volume
JSC	Joint Scientific Committee	SARCS	Southeast Asia Regional Committee of START
LBA	Large-Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia	SBSTA	Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice
Land project	Fusion of GCTE and LUCC under development by IGBP and IHDP	SCIAMACHY	Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography
LOICZ	Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone	SCOPE	Scientific Committee on Problems of the Environment
LUCC	Land Use/Cover Change	SCOR	Scientific Committee on Oceanic Research
LUCCI	Land-Use and Climate Change Impacts on Carbon Fluxes	SeaWiFs	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
MA	Millennium Ecosystem Assessment	SOIREE	Southern Ocean Iron Release Experiment
METOP	Meteorological Operational Polar Satellite	SOLAS	Surface Ocean-Lower Atmosphere Study
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	SOMNET	Soil Organic Matter Network
NACP	North American Carbon Programme	SOOP	Ships Of Opportunity
NASA	National Aeronautics Space Agency	SSC	Scientific Steering Committee
		SST	Sea Surface Temperature
		START	Global Change Systems for Analysis, Research and Training
		SVAT	Soil Vegetation Atmospheric Transfer Scheme
		TCO	Terrestrial Carbon Observation

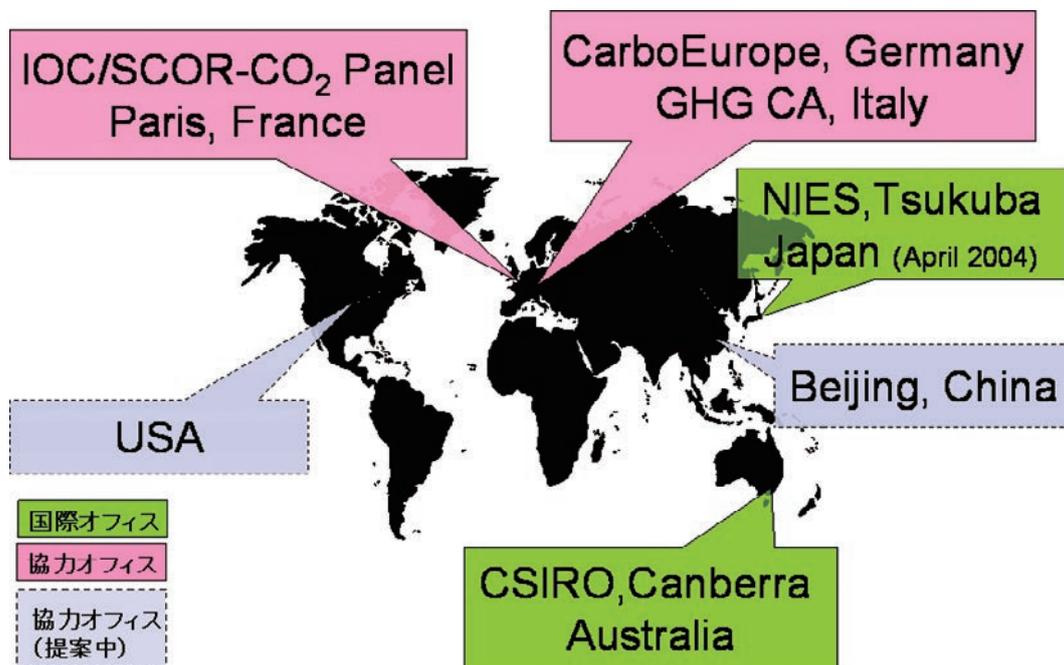
TIROS-N	Television Infrared Observational satellite- Next
TOPEX	US-French orbital mission to track sea- level height with radar altimeters
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder Traces Trace Gas and Aerosol Cycles in the Earth System
TransCom	Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
USGCRP	United States Carbon Cycle Science Programme
WCRP	World Climate Research Programme
WGCM	Working Group on Coupled Modelling
WGSIP	Working Group on Seasonal to Interannual Prediction
WMO	World Meteorological Organization
WOCE	World Ocean Circulation Experiment

GCP つくば国際オフィスの紹介

GCP つくば国際オフィスは 2003 年キャンベラに開設された国際オフィスに次ぐ GCP の 2 番目の国際オフィスとして、また、日本における初めての ICSU(国際科学会議) 関連のオフィスとして 2004 年 4 月、つくばの国立環境研究所地球環境研究センターに開設されました。GCP の役割は、本書に詳述されているようにきわめて広範囲にわたりますが、つくば国際オフィスでは特に 1) 炭素循環の自然的側面と人間的側面の総合化、2) 地域発展と炭素管理、3) アジア地域における観測の統合、4) 炭素関連研究プロジェクトの支援、を分担しています。

2005.12 現在のスタッフは事務局長としてコロラド州デンバー大学の社会学教授ペネロピ・キャンナン博士、フェロー研究員として、メラニー・ハートマン氏(米) NIES アシスタントフェローとしてステファン・ショルツ氏、秘書として尾島優雅子氏により構成されています。

なお、2004.4 現在の国際オフィスと協力オフィスを下に示します。



グローバルカーボンプロジェクト 科学的枠組みと研究実施計画

編者：Josep G. Canadell, Robert Dickinson, Kathy Hibbard, Michael Raupach & Oran Young

GCP つくば国際オフィス監訳

監修 山形 与志樹

勝本 正之

翻訳協力 株式会社パシフィックコンサルタンツ

2006年3月発行

発行元

独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

電話：029-850-2349

FAX：029-858-2645

E-mail: cgercomm@nies.go.jp

<http://www.nies.go.jp/>

本レポートは、ホームページ http://www-cger.nies.go.jp/cger-j/report/r_index-j.html から pdf 形式で閲覧
できます。

本書を国立環境研究所に無断で転載・複製することを禁じます。
この報告書は再生紙を使用しています。

