

課題名 RFa-1202 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定

課題代表者名 笹野 泰弘（独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター センター長）

研究実施期間 平成24年度

累計予算額 9,945千円  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード(5～10個 マップ以下程度)  
気候変動、地球変動予測、自然現象観測・予測、地球環境観測、炭素循環、研究ロードマップ

## 研究体制

- (1)地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定  
(独)国立環境研究所)

## 研究概要

### 1. はじめに(研究背景等)

人為的な起源から排出された主要な温室効果ガスである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が、さまざまな気候条件、環境条件のもとで、どのように大気、海洋、陸域に配分され、分布・蓄積されていくのかを正確に評価しモデル化することは、気候の将来予測モデルの精緻化に大きく寄与する。このことは、達成すべき気候政策(緩和策、適応策)をより高い費用対効果のものとする上で本質的に重要であり、環境行政に直接的な貢献をもたらす。また、炭素循環のいわゆる「ホットスポット(地球温暖化に伴う気候変化を原因として、炭素循環機構に変化をもたらし、さらにそれが地球温暖化を加速させる可能性のある地域など)」の微小な変化を早期に検出し世界に向けて発信することは、国際社会に対して地球温暖化対策の緊急性についての警鐘を鳴らすこととなり、結果として、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた我が国からの重要な貢献となる。

しかしながら、これらを目的とした研究はいまだ不十分であり、このことは国際的にも重要な問題として認識され、欧米各国や国際機関などにより研究戦略、研究プログラムの計画などが提案されている。一方、わが国においては、さまざまな府省・機関によって個別の研究はなされているものの、統合的な研究戦略が策定されているわけではない。今後、わが国としてはアジア・太平洋域を主たる対象として、戦略的な研究に基づいて科学的な情報をわが国から発信することが、わが国の置かれている地理的、地政学的な観点からも極めて重要と考えられる。

### 2. 研究開発目的

地球温暖化問題への対応として、地球温暖化に伴う気候変動とその影響に関しては将来気候変化予測モデル等を用いて予測・評価するための研究が、近年、積極的に進められており、大きな成果が生まれようとしている。一方、これと並行して、実際の地球温暖化に伴う気候変動とその影響を、実観測データをもとにして評価することが重要であり、特に地球温暖化の進行にとって重要な地球上の炭素循環の実態把握とその変動の検出、気候変化のフィードバック効果の有効な評価のための観測・評価システムの確立を図ることが必要とされている。このためには、GOSAT(後継機を含む)を始めとする種々の地球環境観測衛星のデータ、航空機観測データ並びに地上観測ネットワークのデータなど、種々のデータを統合的に評価し、また大気輸送モデルや炭素循環モデル等の数値モデルを活用することが必須であると考えられる。しかしながら、これまで多種多様な観測データの統合的な利用や、観測研究分野とモデル研究分野間の連携については、一機関内で完結させることは難しいため、必ずしも十分には実現されていないというのが実態であり、個々の研究に留まっている例が多い。炭素循環変動の把握と影響評価研究においては、多様な研究の芽が生まれつつあることから、我が国全体でこれらを十分に伸ばすことに特に留意した研究戦略を策定することを目的とした。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定

課題担当者および分担者による当該分野に関する総括的なレビューの他、下記3項目に関する文献調査、予備解析、研究ロードマップの検討作業に加え、当該の各分野の専門家から構成される検討委員会を設置し、年度内に3回の検討委員会を開催し審議を行った。検討委員会での審議の結果を踏まえ、研究ロードマップの改訂を行い、報告書を作成した。

##### ① 炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域や指標の特定

地球環境変動の中でも特に喫緊の対応が求められている地球温暖化に直接関わる炭素循環の変動に着目し、炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域や指標の特定に関し、文献調査ならびに予備的な解析を実施するとともに、研究ロードマップを策定した。

##### ② 観測データと数値モデルの統合的利用による炭素循環変動の導出手法の改良・開発

GOSAT等の衛星データ、航空機データ並びに地上観測ネットワークデータと各種の数値モデルを統合・活用することを念頭におき、観測データと数値モデルの統合的利用による炭素循環変動の導出手法の改良・開発に関する研究ロードマップを策定した。

##### ③ 炭素循環変動の把握と影響評価

炭素循環変動の把握と気候変動に伴うフィードバックを中心とした影響評価のために今後実施すべき研究課題として、温室効果ガスの濃度変動、自然起源のフラックス変動、陸域生態系変化などを検討の対象として課題を整理し、研究ロードマップを策定した。

### 4. 結果及び考察

#### (1) 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定

はじめに、研究開発方法①の結果と考察について以下に記す。

アジア太平洋域における炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域や指標を特定するにあたり、気象条件の変動に対応して炭素循環の経年変動や空間変動の振幅が大きいと予想される陸域の炭素循環に注目し、過去30年間の気象データと衛星データを収集して長期的な変化傾向（トレンド）を検出する予備的な解析を行った。

図1に、1982年から2009年における気温の経年変化のトレンド（1年あたり何℃上昇または低下したか）、渇水などの検出にも用いられる水条件の指標（SPI: Standardized Precipitation Index）のトレンド、および1982年から2011年におけるNOAA-AVHRRより求めた正規化植生指標（NDVI）のトレンドを示す。シベリアを含むアジア域全体にわたり、過去約30年の間に気温は年に0～0.1℃の範囲で上昇、水条件はアジアの多くの地域で湿潤化する一方、ユーラシア内陸の一部（中国・モンゴルなどの半乾燥域）で乾燥化するなどの結果が得られた。また、光合成の活性度などに関連のあるNDVIは、過去30年の間に、シベリアやモンゴルの一部を除き、アジアのほとんどの地域で増加したことがわかった。

また、図2に、複数の陸域生態系モデルと既存のインバージョン解析結果を用いてアジア陸域の炭素収支（2001～2006年平均）の推定値を比較する予備解析の結果を示す。おおまかに言って、ロシア南部や東アジア太平洋岸などで炭素吸収の大きい地域があるといった傾向は一致しているが、ボトムアップ（陸域生態系モデル）、トップダウン（インバージョン解析）ともに、手法間の差が依然として大きいのが現状であり、本研究で策定するロードマップに従い、両手法ともにそれぞれ高度化を進めた上でトップダウン・ボトムアップの統合を実現する必要があることがわかった。

以上の予備研究に基づき、アジア太平洋域における炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域として、陸域においては過去30年間に広範囲で気温の上昇と植物活性の増加がほぼ確実にみられると予想されるアジア全域を対象とする必要があることがわかった。また、ホットスポットの候補地として考慮に入れるべき地域として、炭素蓄積量が特に大きく気温上昇の影響を受けやすいユーラシア高緯度の永久凍土地域、水環境の劣化により植生の炭素吸収量が減少している可能性のあるユーラシア大陸内陸域、降水量や地下水位の変動の影響を受けて炭素循環が大きく変動することが予想される北方・熱帯の泥炭地を含める必要がある。さらに、炭素循環変動の把握において有効と考えられる指標としては、アジア陸域全体にわたり、重要な環境要因である気温、水条件の指標としてSPIまたはそれに類する指標などが必須である。また、凍土域では凍土の厚さや融解面積、泥炭地においては地下水位などの土壌環境に関する指標が必要不可欠である。さらに、光合成生産などの植物の動態を把握するための指標としてNDVIをはじめとする植生指標が有効であることなどが示唆された。最後に、経年変動や空間変動の振幅が大きく依然として手法間で炭素循環の評価結果に大きな差がある陸域においては、トップダウン・ボトムアップ統合化に先立ち、両手法の高度化を進めることが必須であるこ

とも明らかになった。

### 気候の変動傾向

陸域生物圏に重要な要素: 気温・水 (SPI)

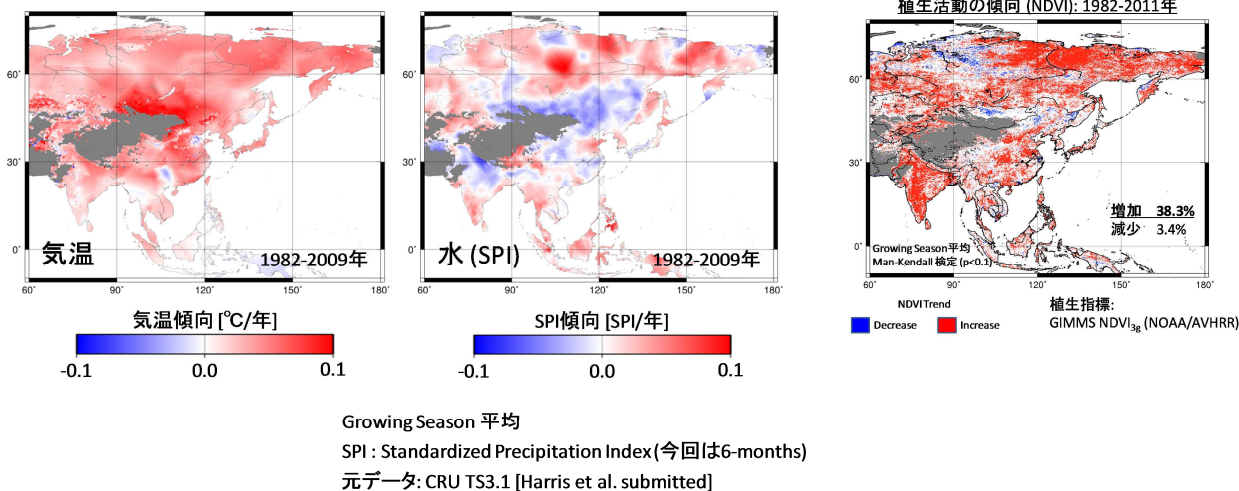


図1 アジア陸域における気温、水条件(SPI)、植生指標 (NDVI) の長期的なトレンド

### 様々な手法による炭素収支の推定 (2001-2006平均)

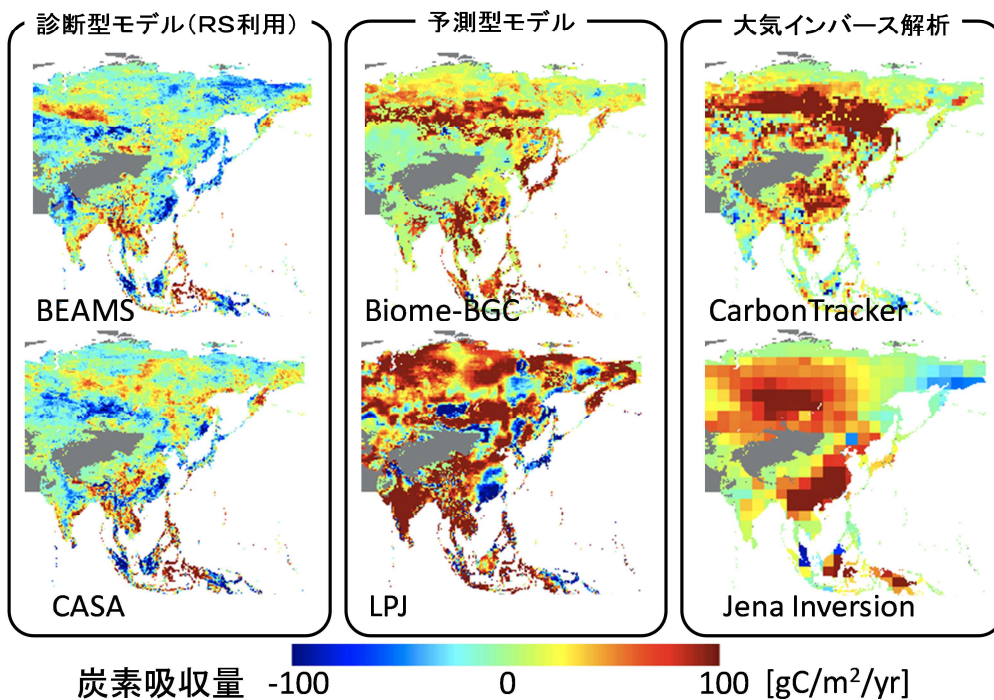


図2 複数の陸域生態系モデルで計算した2001~2006年におけるアジア陸域の炭素収支の空間分布

次に、研究開発方法②③の結果と考察について、検討委員会での審議の結果を踏まえて設定した、実施すべき研究テーマを中心に以下の通り記す。

#### (ア) トップダウンアプローチの高度化

トップダウンアプローチに基づいて特定の領域や地域における温室効果ガスのフラックス（正味の吸収排出量）を推定するためには、大気中の温室効果ガス濃度の空間分布とその時間変化に関するデータ、大気中の物質輸送を正確に表現できる気象データおよび大気輸送モデルが必要となる。

気象データに関しては、日本や欧米で再解析プロジェクトがいくつか実施済みあるいは実施中であり、これらの再解析データを有効に活用することが重要である。

大気輸送モデルに関しては、日本は複数の機関が複数の大気輸送モデルの開発を進めており、マルチモデルアンサンブル実験によって輸送過程に起因する大気輸送モデルの計算結果の違いを基に大気輸送に関する理解を深めやすい状況にある。

温室効果ガスの観測データに関しては、これまで主としてフラスコサンプリング試料の分析や連続測定機器による地上観測点における観測データや、数は限られるものの航空機による鉛直分布観測データ、船舶による海洋上大気の大気観測データなどが用いられてきた。近年、長距離航路の民間航空機（旅客機）を用いた観測により広範囲の上空データや空港周辺での鉛直分布データが取得されるようになった。さらに、GOSAT等の地球観測衛星に搭載した分光計による温室効果ガスカラム平均濃度推定が実現し、その他の現場観測データと比較して測定精度は劣るものの、全球をカバーする大量のデータが取得されつつある。さらに2014年以降世界各国により複数の温室効果ガス観測衛星（GOSAT後継機を含む）の打上げが計画されていることより、今後より多くの衛星データが利用可能になると考えられる。また、地上FTS観測網による定点でのCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>のカラム平均濃度観測も充実しつつある。

これらの観測体制の充実や観測データの品質向上、さらにトップダウンアプローチへの適用のためのデータシステムの構築、大気輸送モデルの精度向上などを通じたフラックス評価の高度化が今後の重要な課題として残されている。

具体的な研究課題は以下の通りである。

- ① GOSAT等衛星によるプロダクトの高品質化と検証体制の強化
- ② 地上、船舶、航空機等による観測の充実とデータ・プロダクトの品質保証
- ③ 大気輸送モデルとフラックス評価モデルの高度化
- ④ 複数化学種・複数衛星搭載センサによる観測情報の同時利用

#### (イ) ボトムアップアプローチの高度化

地表面（陸域、海洋）における炭素循環は数多くのプロセスにより制御されていることから、各種の環境条件や気候条件のもとで炭素の正味の吸収・放出量を実測により求め、個々のプロセスについての知見を深めてモデルを高度化するための研究を行う。また、実測は多くの場合、空間代表性が限られた観測点でなされることから、人工衛星による地表面状態の分布、雲分布や、気象（再解析）データなどを援用して、広域にわたり高い空間分解能の吸収・放出量を評価する（アップスケーリング）手法の高度化もあわせて行う。

気候へのフィードバックに関与する陸域や海洋の炭素循環プロセスは数多くあるが、地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握を早期に実現するために、特に緊急に取り組むべき優先度の高い具体的な研究課題を陸域と海洋に分けて以下に記す。

##### 陸域におけるボトムアップアプローチの高度化

- ① 陸域の炭素循環に及ぼす水循環・土壌乾燥化、窒素循環等の各種プロセスの把握
- ② CH<sub>4</sub>フラックス観測手法改良とネットワーク強化によるフラックス検証
- ③ 陸域の現地観測データに基づく広域評価と長期変化将来予測の高度化

##### 海洋におけるボトムアップアプローチの高度化

- ① 海洋表層観測データの高品質化とデータ早期提供システムの構築
- ② 海洋表層と大気のCO<sub>2</sub>交換の広域評価手法開発とその不確実性評価
- ③ 海洋プロセスモデルの高度化と将来予測高精度化

(ウ) トップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの統合によるフラックス評価手法の高度化  
(Carbon Tracking Systemの構築)

従来、トップダウンアプローチとボトムアップアプローチのそれぞれによる評価は試みられてきたものの、対象とする領域の大きさの違いや空間分解能の違いに起因して、両者を統合した解析は十分には行われて来ていない。また、ボトムアップアプローチによる不確定性が大きな場所では、トップダウンアプローチでも利用可能な観測データが不足している場合が多くあることに注意が必要である。

そこで、本課題ではトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの統合による空間スケール別のフラックス評価手法の高度化および検証のための研究を行う。この際、これまでほとんど無視されてきた陸域内の水域（河川・湖沼・地下水等）を通じた炭素循環の寄与についても検討の対象とする。なお、ここではCO<sub>2</sub>を中心に、実現可能性があればCH<sub>4</sub>についても、検討することとする。

個別の研究課題は以下の通りである。

- ① トップダウン、ボトムアップの比較を通じたフラックス評価手法の高精度化
- ② 統合システムによるフラックス評価手法の高精度化

(エ) アジア・太平洋域を中心とした炭素循環変動の検出

開発されたCarbon Tracking Systemにより、気候変化の影響を受けて炭素収支の変化が起こりやすいと予想される地域（例えばユーラシア大陸北方地域や東南アジア）において、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の収支の年々変動や長期的な変化をこれまでにない確度で検出する。研究期間終了後もアジア太平洋域の炭素収支評価を長期的に継続することをめざし、それに必要な国内の機関間連携やデータ収集の仕組みを整備する。

個別の研究課題は以下の通りである。

- ① アジア太平洋域における地域別炭素収支の評価とその変化の検出
- ② 将来拡張すべきCarbon Tracking Systemの新機能の開発

(オ) 炭素循環変動検出のためのホットスポットの特定および変化の検出

ホットスポットは、大規模な炭素蓄積域（炭素リザーバー）や大きな炭素吸収源でありながら、気候変化や土地利用変化の進行の影響を受けやすく、将来において大きな温室効果気体放出源となりうる地域である。ホットスポットと考えられる場所として、炭素蓄積量が特に大きい地域や、炭素吸収量が気候変化の影響を受けやすい地域・対象が挙げられる。それは、例えば、永久凍土（高緯度）地域、陸域・海洋のCH<sub>4</sub>水和物（ハイドレート）、熱帯林地帯、北方・熱帯の泥炭地、南大洋である。アジア・太平洋地域でホットスポットとして重要視されるべきは、永久凍土（高緯度）地域、熱帯林地帯、北方・熱帯の泥炭地などである。

これらのホットスポットをあらかじめ特定し監視を続けることは、気候変化による炭素循環変動の兆候をいち早く検出することにつながる。これは、気候政策担当者が科学に基づいた緩和・適応策の策定を行うのに役立ち、大きな政治的インパクトを与えることとなる。したがって、ホットスポットの可能性のある地域を的確に把握しておくとともに、その変化を早期に検出できるだけの手法やモニタリング体制を確立しておくことが必要である。

個別の研究課題は以下の通りである。

- ① ホットスポットの特定
- ② ホットスポットでの変化の早期検出
- ③ ホットスポットの将来予測と全球・地域スケールでの気候への影響評価

(カ) 必要十分な長期観測・評価システムの構築に関する指針

炭素循環変動の把握やホットスポット変化の早期検出において、モデルとの統合利用に供される観測データ（衛星による全球観測を含む）が、必要な地点で、十分に長い期間、必要な頻度で、継続的に取得されることが前提となる。さらに、これらの観測データはモデル計算に導入され、セミリアルタイムで自動的に計算結果として出力され、研究者だけでなく環境行政の担当者や国民一般に配信されるような統合データ利用システムの構築を目指す。すでに、文部科学省が進めているDIAS（データ統合・解析システム）等との統合を視野に入れる必要がある。

個別の課題は以下の通りである。

- ①観測のオペレーショナル化（標準化、品質管理を含む）
- ②多様な観測データの収集・保存・提供の枠組み構築
- ③「観測システムシミュレーション実験」による最適化された観測体制の提案
- ④プロセスモデルの改善効果評価のための地球システム統合モデルのコミュニティモデル化

本研究課題およびロードマップ（図3、4）は、当該研究分野で実施すべき事項を整合的・網羅的に示したものであり、現在、他府省・機関で実施されている個々の課題を敢えて排除していない。今後、具体的な研究計画を作成し、予算化を図る段階で、精査されるべきものである。

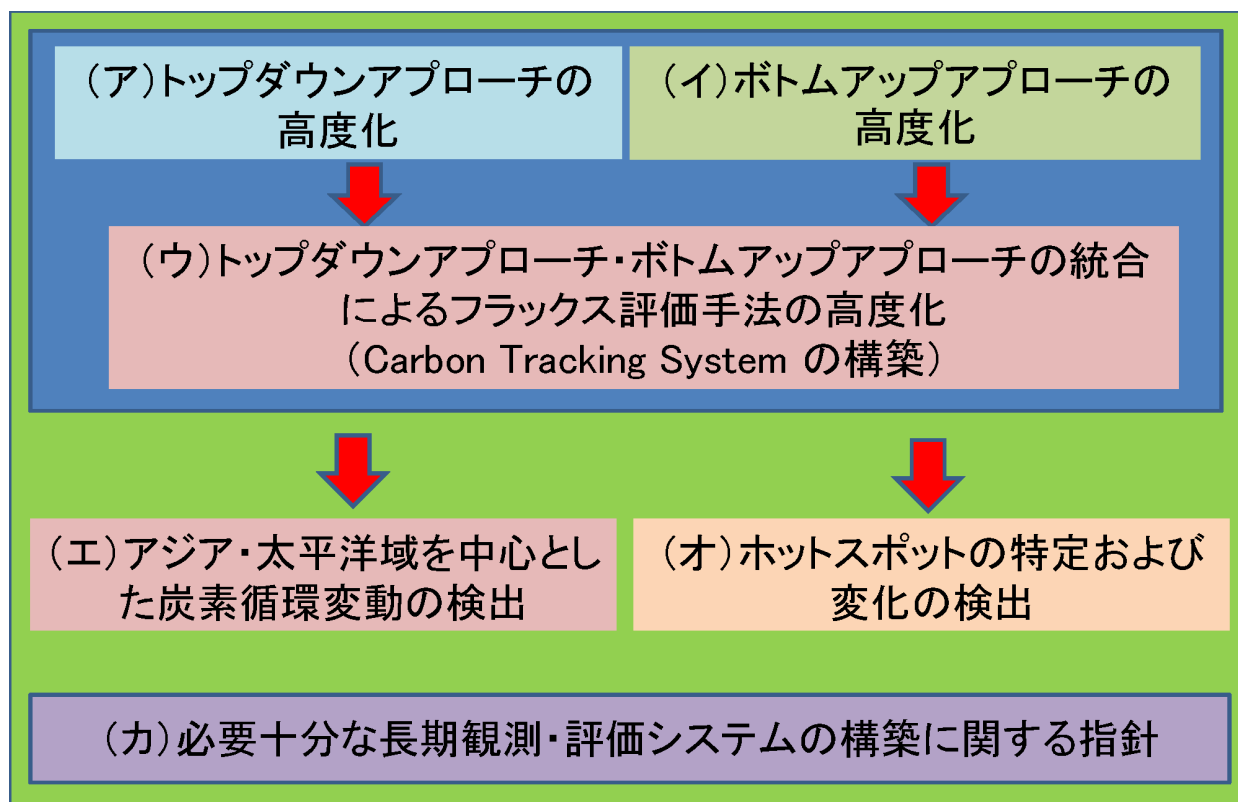


図3 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ全体像

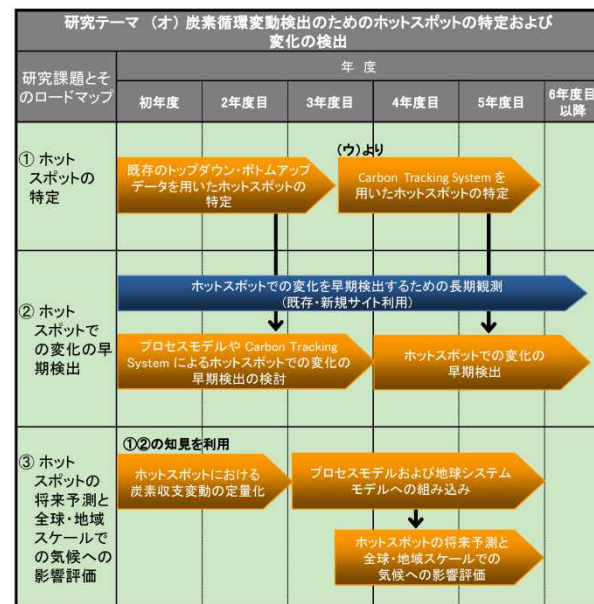
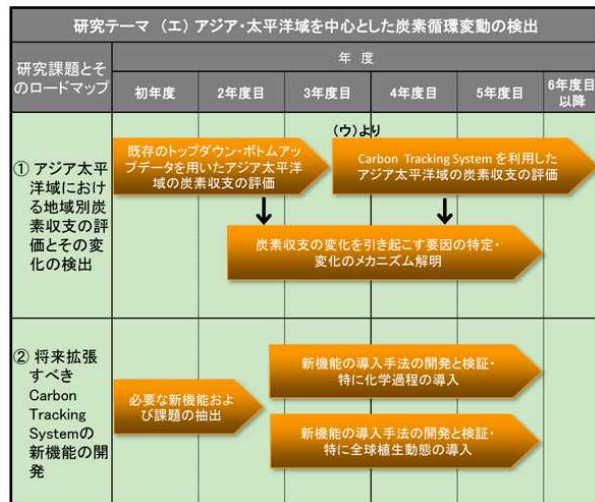
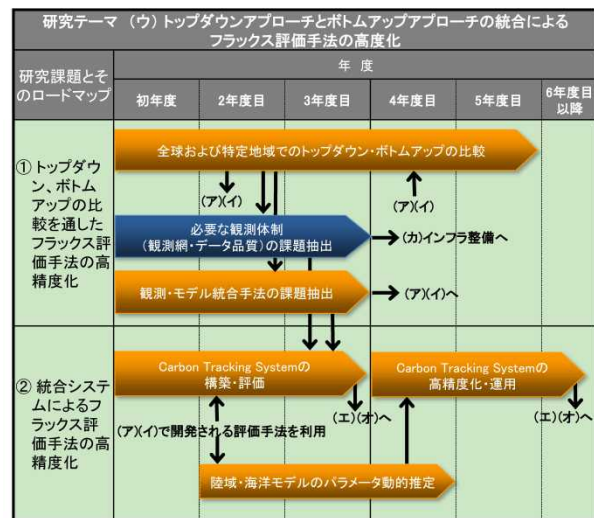
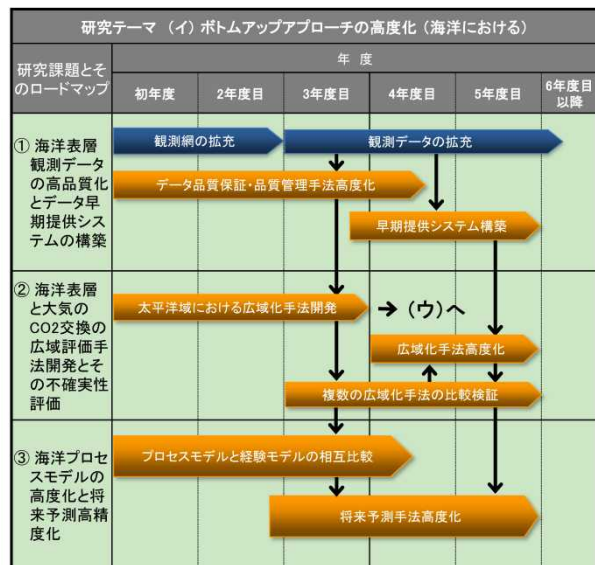
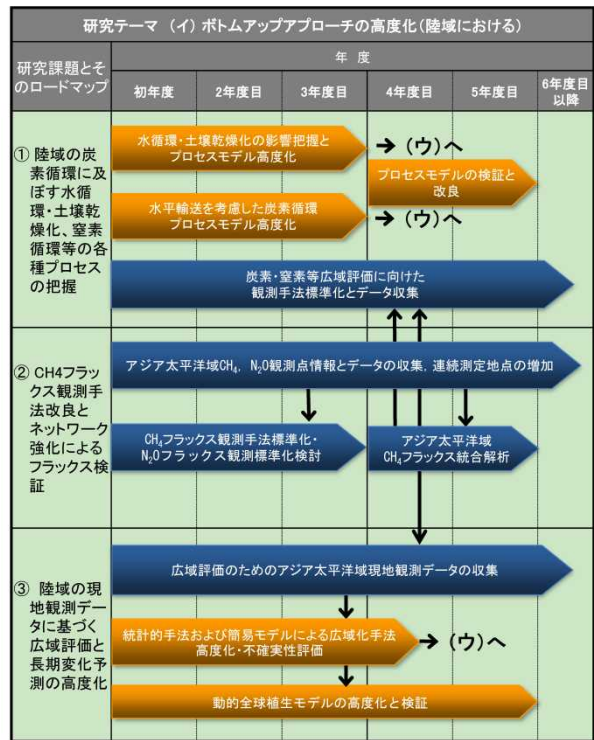
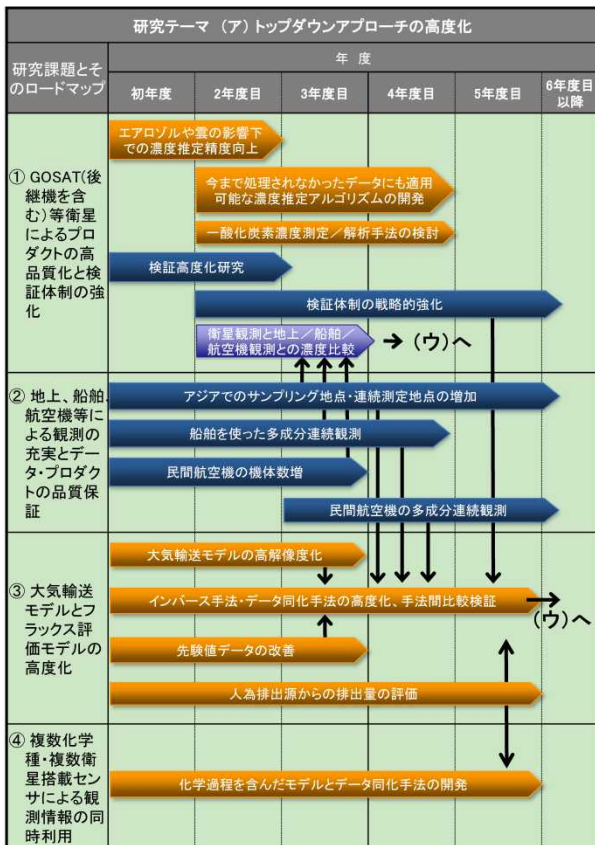


図4 項目別研究ロードマップ(ア~オについて)

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

炭素循環変動の把握およびホットスポット変化の早期検出を目的とした観測・評価システム構築に関し、研究を実施すべき事項を網羅的に示すことにより、今後のわが国における本分野の研究戦略を提示した。各府省・機関が個別に研究計画を立案し実施するに当たっても、本研究戦略を参考にし、研究課題の重複や欠落を避け、また協力関係を築くことでより有効な研究が実施できるものと期待される。

### (2) 環境政策への貢献

研究テーマとロードマップの策定を目標とした課題調査型の研究であるため、現時点では直接的な環境政策への貢献はない。しかしながら、環境政策担当者が今後、当該分野における環境行政への貢献を意図した研究計画を立案する際に参照すべき研究戦略（ロードマップ）を提示することが出来た。

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

### <行政が活用することが見込まれる成果>

政策決定者向けサマリーとして、本研究で得られた研究成果を環境省等の行政が行う政策立案につなげるための参考資料として以下の内容を提示する。

#### 統合的観測・評価システムの構築によるアジア・太平洋域の炭素循環の変化の早期検出

将来の地球環境変化を予測するため、全球気候モデルを用いた研究が進展し、大きな成果が生まれつつある。地球温暖化予測の高精度化に不可欠な全球炭素循環の不確実性をさらに低減させるとともに、炭素循環変化の早期検出、および炭素管理の意思決定が与える効果の評価が求められている。

これまでに、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)を始めとする地球環境観測衛星、航空機(CONTRAILなど)、船舶、地上観測ネットワーク等を利用した温室効果ガスの観測が行われ、多様なデータが蓄積されている。また、観測された大気中温室効果ガス濃度と大気輸送モデルを用いて、大気の側から領域毎の温室効果ガスの地表面正味収支を推定する手法(トップダウンアプローチ)や、地表付近で観測された温室効果ガス収支を衛星データや植生生態モデルを用いて広域化する手法(ボトムアップアプローチ)の研究も発展している。しかし、それぞれ空間分解能、時間分解能、速報性などに固有の限界があることから、環境政策の立案に活用されるまでには至っていない。そこで、トップダウン・ボトムアップの各手法の高精度化を図ると同時に、両手法を統合することにより多様な観測データを取り込み、温室効果ガス収支の全球分布をオペレーショナルに評価する実用的な手法を確立することが喫緊の課題である。

急ぎ実現すべき課題は、第一に、全球、特にアジア太平洋域でこれまでに豊富に得られている衛星・航空機・船舶・地上観測による多様なデータを統合し、これらのデータを解析システムに融合して観測値と計算値が最も整合するよう解析システムの各種パラメータを自動的に調整する技術を開発すること(統合炭素循環観測・評価システムの構築)である。第二に、このシステムを用いて、国別・地域別の炭素収支の精緻な評価を行うと同時に、炭素循環のいわゆるホットスポット(気候変化が炭素循環を変化させ、それが気候変化を加速させる地域)の微小な変化を早期検出することである。炭素循環の変化を早期発見しその影響の可能性を世界に向けて発信することは、国際社会に対し温暖化対策の緊急性を強く訴えることとなり、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた貢献となる。また、例えば途上国の森林地域について空間分解能を上げた評価を行うことにより、REDD+(開発途上国における森林減少・劣化等による温室効果ガス排出量の削減)および炭素クレジット化の検討に対し定量評価と科学的知見を提供することが可能となる。

#### フラックス観測ネットワーク構築によるアジア・太平洋におけるメタン(CH<sub>4</sub>)・亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の動態把握

温室効果ガスのうち、二酸化炭素に次いでその温室効果が高いとされるメタン(CH<sub>4</sub>)や亜酸化窒素について、その収支の把握や将来予測に関する研究が遅れており、環境政策立案に十分な貢献が出来ていない。その中で、温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)による大気中CH<sub>4</sub>濃度の観測が始まり、



これまでに蓄積されてきた航空機、船舶、地上ステーション等によるCH<sub>4</sub>濃度観測データと併用し、大気輸送モデルを用いて大気からの地表の温室効果ガス発生量分布を推定する手法（トップダウンアプローチ）の開発・改良が進んでいる。一方、地表におけるCH<sub>4</sub>の発生源は時間的にも空間的にもきわめて非一様であることから、地表でのCH<sub>4</sub>フラックスの観測データをモデルやリモートセンシングデータを用いて広域化する手法（ボトムアップアプローチ）には未だ非常に大きな不確実性が含まれる。

こうした背景のもと、近年、応答速度が速く、従来に比べて野外でも安定にCH<sub>4</sub>濃度を連続測定できる分析計の改良が進展したことにより、渦相関法（オープンパス型）、簡易渦集積法などの微気象学的方法により、陸上でCH<sub>4</sub>フラックスを長期観測する観測点の数が増え、データの蓄積が始まっている。そこで、アジア太平洋域におけるCH<sub>4</sub>フラックスの観測サイト、およびCH<sub>4</sub>フラックスと同時に観測されることの多い亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）のフラックス観測サイトの情報を収集し、観測サイトのネットワークを構築し、既存のデータ収集を開始する。同時に、まだ観測手法が標準化されていないCH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>Oフラックスについて、観測手法の標準化とデータベース構築を行い、CH<sub>4</sub>フラックスの時空間変動を把握しその要因を明らかにするための統合解析（サイト間比較研究）を実施する。アジア太平洋域において二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）に比べて遅れているCH<sub>4</sub>の統合解析が進むことにより、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>を同時に用いたトップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの高度化が進み、CH<sub>4</sub>の発生源の評価における現状の不確実性を格段に低減することが可能になる。

#### アジア・太平洋域における炭素循環の変化の早期検出、並びに炭素管理の意思決定の効果を評価する上で必要十分な長期観測システムの構築

脱温暖化にかかる環境政策推進の観点から、気候変化に伴う全球、特にアジア太平洋域における炭素循環の変化を早期検出するため、並びに炭素管理の意思決定の効果を評価するための、最適な観測・評価システムを確立する。

第一に、南・東南アジアにおける温室効果ガス観測の強化を行い、衛星観測（GOSAT・GOSAT-2ほか）・航空機・船舶・地上ステーションに基づく温室効果ガスの観測網を確立する。アジア太平洋域の炭素循環とその変化を把握する上で、南・東南アジアが温室効果ガス観測の空白域であることは、衛星観測をもってしてもこの地域が雲の影響でそのデータ取得率に限界があることから、最大の障害となっている。そこで、温室効果ガスの濃度とフラックス双方を観測する総合的な地上観測点を増強・整備すると同時に、航空機と船舶による観測も強化する。

第二に、異なる時間・空間スケールで収集される観測データを省力的に収集・品質管理し、全球及びアジア太平洋域の炭素循環を対象とした統合的観測・評価システムに短時間で提供可能にするオペレーショナルなデータシステムを構築する。

これらの体制強化に際して、炭素循環やホットスポットの変化の早期検出に必要な観測体制（ネットワーク）の最適化設計を行う。特に、大気・海洋・陸域における現状のデータに基づく炭素収支評価の精度限界、観測空白域の解消がもたらす精度向上の定量評価、さらに最適かつ現実的な観測体制の提案を行うため、「観測システムシミュレーション実験」を実施する。また、こうした観測システムシミュレーション実験を用いることにより、特定地域の問題解決に向けた最適な観測システムを設計することが可能となる。例えば、途上国の森林地域での炭素収支の変化を高い空間分解能で評価し、REDD+（開発途上国における森林減少・劣化等による温室効果ガス排出量の削減）および炭素クレジット化の検討に対し定量評価と科学的知見を提供するための観測システム設計などである。

## 6. 研究成果の主な発表状況（別添.作成要領参照）

### (1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

### (2) 主な口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない

## 7. 研究者略歴

課題代表者：笹野 泰弘

東北大学大学院理学研究科修士課程修了、理学博士、（独）国立環境研究所地球環境研究センター センター長

### 研究参画者

（1）：笹野 泰弘（同上）

（2）：三枝 信子

東北大学大学院理学研究科博士課程修了、博士（理学）、（独）国立環境研究所地球環境研究センター 陸域モニタリング推進室長

（3）：町田 敏暢

東北大学大学院理学研究科博士課程修了、博士（理学）、（独）国立環境研究所地球環境研究センター 大気・海洋モニタリング推進室長

（4）：松永 恒雄

東京大学大学院工学系研究科修士課程修了、博士（工学）、（独）国立環境研究所環境計測研究センター 情報解析研究室長

## RFa-1202 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定

### (1) 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定

(独) 国立環境研究所地球環境研究センター	笹野 泰弘
同 陸域モニタリング推進室	三枝 信子
同 大気・海洋モニタリング推進室	町田 敏暢
(独) 国立環境研究所環境計測研究センター 情報解析研究室	松永 恒雄

平成24年度予算額：9,945千円

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

地球温暖化の進行にとって重要な地球上の炭素循環の実態把握とその変動の検出、気候変化のフィードバック効果の有効な評価のための観測・評価システムの確立を図ることを目的とし、国内外で実施中の研究課題と問題点の整理、今後実施すべき研究テーマの提案・整理、及び研究戦略の策定(研究インフラの整備を含む)を、次の①～③に相当する項目について行った。その結果を審議するため、平成24年度中に3回の検討会議を開催し、報告書に取りまとめた。

- ①現在までに確立している炭素循環変動の評価手法及びその結果を用いて、地球温暖化に伴う炭素循環の変動を把握するに当たって重要と考えられる対象領域及び指標の特定を行い、特に、炭素循環に関して気候変動の正のフィードバックが起こることが予想される対象領域と指標の候補を特定し、その地域を監視する観測・評価システムを確立するための研究戦略を策定した。
- ②GOSAT(Greenhouse gases Observing SATellite)をはじめとする衛星データ、航空機並びに地上ステーションでの大気中二酸化炭素濃度観測データ、地上における二酸化炭素収支観測データなどをできる限り短い時間に統合的に集め、それらを数値計算モデル(3次元炭素循環モデル、陸面・海面の炭素収支モデルなど)に取り込み、モデルのパラメータを効率的に最適化する手法を開発する上で解決すべき問題点を網羅し、戦略的に研究を進めるためのロードマップを策定した。
- ③上記①と②で開発を想定する次世代の炭素循環変動評価手法を用い、全球、アジア太平洋地域、並びに①で策定する対象領域をターゲットとして、現在起きている炭素循環の変動をできる限り高い確度で推定すると同時に、気候変動が炭素循環に与える影響を高い時空間分解能で評価するための研究課題を策定した。特に、気候変動に対して正のフィードバックが起こる可能性のある対象領域については、その地域を監視する観測システム及び評価システムを確立するための具体的なロードマップを提案した。

#### [キーワード]

気候変動、地球変動予測、自然現象観測・予測、地球環境観測、炭素循環

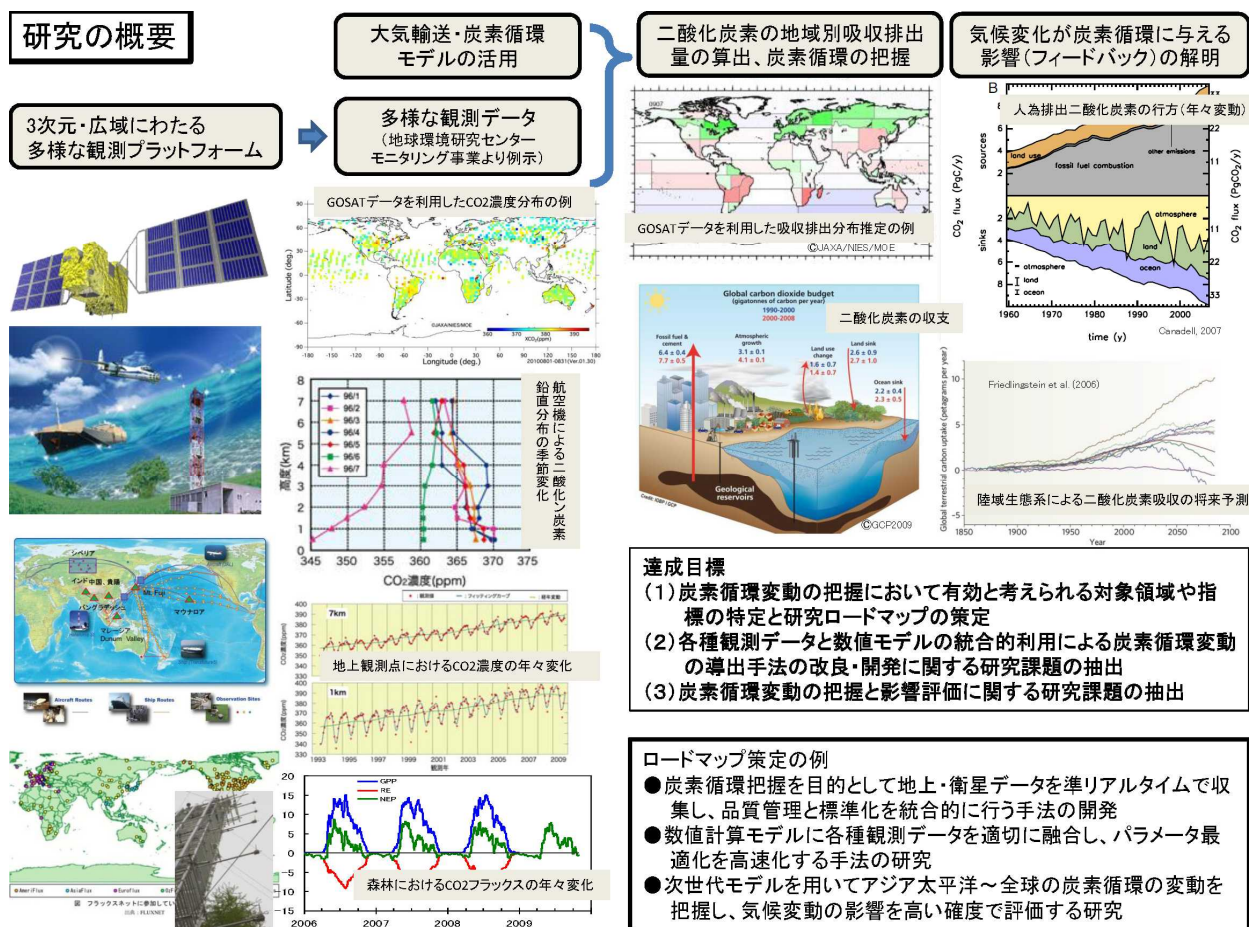
## 1. はじめに

人為的な起源から排出された主要な温室効果ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）が、さまざまな気候条件、環境条件のもとで、どのように大気、海洋、陸域に配分され、分布・蓄積されていくのかを正確に評価しモデル化することは、気候の将来予測モデルの精緻化に大きく寄与する。このことは、達成すべき気候政策（緩和策、適応策）をより高い費用対効果のものとする上で本質的に重要であり、環境行政に直接的な貢献をもたらす。また、炭素循環のいわゆる「ホットスポット（地球温暖化に伴う気候変化を原因として、炭素循環機構に変化をもたらし、さらにそれが地球温暖化を加速させる可能性のある地域など）」の微小な変化を早期に検出し世界に向けて発信することは、国際社会に対して地球温暖化対策の緊急性についての警鐘を鳴らすこととなり、結果として、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた我が国からの重要な貢献となる。

しかしながら、これらを目的とした研究はいまだ不十分であり、このことは国際的にも重要な問題として認識され、欧米各国や国際機関などにより研究戦略、研究プログラムの計画などが提案されている。一方、わが国においては、さまざまな府省・機関によって個別の研究はなされているものの、統合的な研究戦略が策定されていないわけではない。今後、わが国としてはアジア・太平洋域を主たる対象として、戦略的な研究に基づいて科学的な情報をわが国から発信することが、わが国の置かれている地理的、地政学的な観点からも極めて重要と考えられる。

## 2. 研究開発目的

地球温暖化問題への対応として、地球温暖化に伴う気候変動とその影響に関しては将来気候変化予測モデル等を用いて予測・評価するための研究が、近年、積極的に進められており、大きな成果が生み出されようとしている。一方、これと並行して、実際の地球温暖化に伴う気候変動とその影響を、実観測データをもとにして評価することが重要であり、特に地球温暖化の進行にとって重要な地球上の炭素循環の実態把握とその変動の検出、気候変化のフィードバック効果の有効な評価のための観測・評価システムの確立を図ることが必要とされている。このためには、GOSAT(後継機を含む)を始めとする種々の地球環境観測衛星のデータ、航空機観測データ並びに地上観測ネットワークのデータなど、種々のデータを統合的に評価し、また大気輸送モデルや炭素循環モデル等の数値モデルを活用することが必須であると考えられる。しかしながら、これまで多種多様な観測データの統合的な利用や、観測研究分野とモデル研究分野間の連携については、一機関内で完結させることは難しいため、必ずしも十分には実現されていないというのが実態であり、個々の研究に留まっている例が多い。炭素循環変動の把握と影響評価研究においては、多様な研究の芽が生まれつつあることから、我が国全体でこれらを十分に伸ばすことに特に留意した研究戦略を策定することを目的とした。



図(1)-1 炭素循環変動研究の概要図

### 3. 研究開発方法

課題担当者および分担者による当該分野に関する総括的なレビューの他、下記①～③の項目に関する文献調査、予備解析、研究ロードマップの検討作業に加え、当該の各分野の専門家から構成される検討委員会を設置し、年度内に3回の検討委員会を開催し審議を行った。検討委員会での審議の結果を踏まえ、研究ロードマップの改訂を行い、報告書を作成した。

#### ①炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域や指標の特定

地球環境変動の中でも特に喫緊の対応が求められている地球温暖化に直接関わる炭素循環の変動に着目し、炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域や指標の特定に関し、文献調査ならびに予備的な解析を実施するとともに、研究ロードマップを策定した。

#### ②観測データと数値モデルの統合的利用による炭素循環変動の導出手法の改良・開発

GOSAT等の衛星データ、航空機データ並びに地上観測ネットワークデータと各種の数値モデルを統合・活用することを念頭におき、観測データと数値モデルの統合的利用による炭素循環変動の導出手法の改良・開発に関する研究ロードマップを策定した。

#### ③炭素循環変動の把握と影響評価

炭素循環変動の把握と気候変動に伴うフィードバックを中心とした影響評価のために今後実施

すべき研究課題として、温室効果ガスの濃度変動、自然起源のフラックス変動、陸域生態系変化などを検討の対象として課題を整理し、研究ロードマップを策定した。

#### 4. 結果及び考察

はじめに、研究開発方法①の結果と考察について以下に記す。

アジア太平洋域における炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域や指標を特定するにあたり、気象条件の変動に対応して炭素循環の経年変動や空間変動の振幅が大きいと予想される陸域の炭素循環に注目し、過去30年間の気象データと衛星データを収集して長期的な変化傾向（トレンド）を検出する予備的な解析を行った。

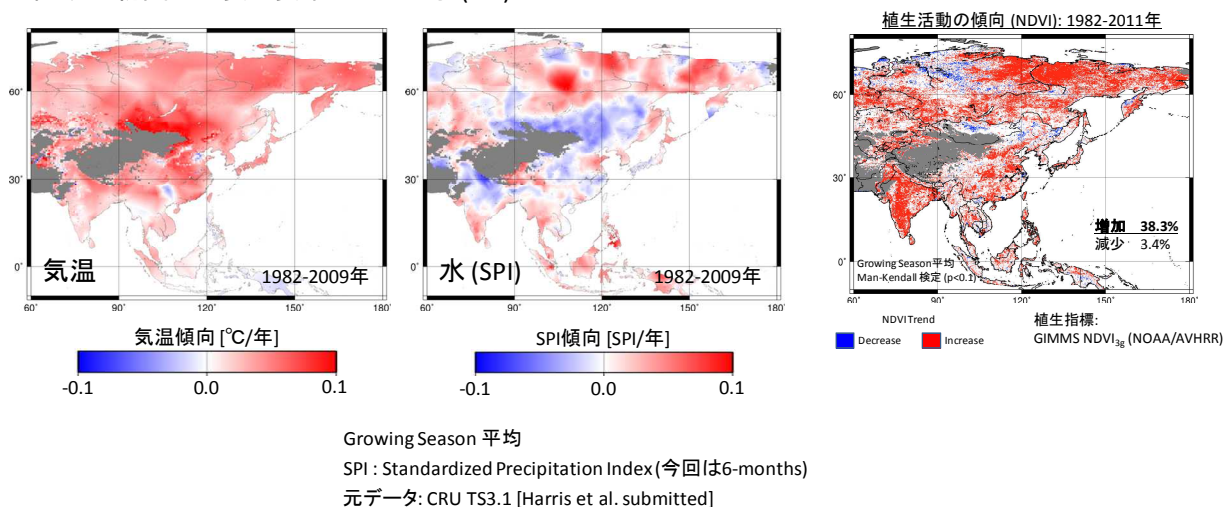
図(1)-2に、1982年から2009年における気温の経年変化のトレンド（1年あたり何℃上昇または低下したか）、渇水などの検出にも用いられる水条件の指標（SPI: Standardized Precipitation Index）のトレンド、および1982年から2011年におけるNOAA-AVHRRより求めた正規化植生指標

（NDVI）のトレンドを示す。シベリアを含むアジア域全体にわたり、過去約30年の間に気温は年に0～0.1℃の範囲で上昇、水条件はアジアの多くの地域で湿潤化する一方、ユーラシア内陸の一部（中国・モンゴルなどの半乾燥域）で乾燥化するなどの結果が得られた。また、光合成の活性度などと関連のあるNDVIは、過去30年の間に、シベリアやモンゴルの一部を除き、アジアのほとんどの地域で増加したことがわかった。

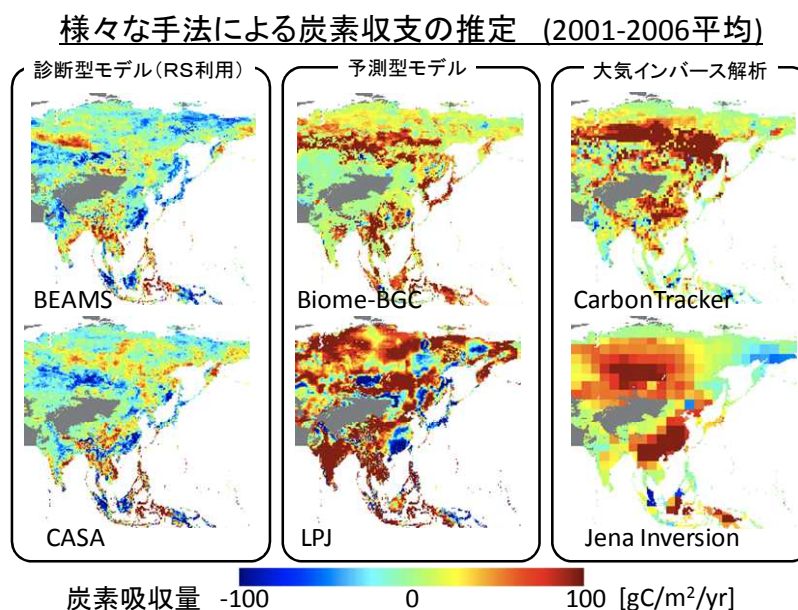
また、図(1)-3に、複数の陸域生態系モデルと既存のインバージョン解析結果を用いてアジア陸域の炭素収支（2001～2006年平均）の推定値を比較する予備解析の結果を示す。おおまかに言って、ロシア南部や東アジア太平洋岸などで炭素吸収の大きい地域があるといった傾向は一致しているが、ボトムアップ（陸域生態系モデル）、トップダウン（インバージョン解析）ともに、手法間の差が依然として大きいのが現状であり、本研究で策定するロードマップに従い、両手法ともにそれぞれ高度化を進めた上でトップダウン・ボトムアップの統合を実現する必要があることがわかった。

### 気候の変動傾向

陸域生物圏に重要な要素: 気温・水 (SPI)



図(1)-2 アジア陸域における気温、水条件(SPI)、植生指標(NDVI)の長期的なトレンド



図(1)-3 複数の陸域生態系モデルで計算した2001～2006年におけるアジア陸域の炭素収支の空間分布

次に、本研究で策定したロードマップを審議するために設置された検討委員会（炭素循環研究ロードマップ検討委員会）の構成員について記すとともに、検討委員会で研究開発方法②③の内容全般について議論した結果を踏まえて、国内外の気候変動研究の動向、本研究による検討対象の重要性、データとモデルの統合利用における諸問題、実施すべき研究テーマとロードマップをとりまとめた結果を以下に記す。

### (1) 検討委員会

本研究で策定するロードマップの妥当性を検討するため、気象学・海洋学・生態学・農学・社会科学等の分野の専門家、並びに温室効果ガスの地上および海洋観測・航空機観測・衛星観測、全球モデルやプロセスモデル開発等の研究手法に詳しい専門家で構成される検討委員会を設置し、本研究の課題担当者とアドバイザーを加えて平成24年度内に3回の委員会を開催し議論を行った。検討委員会構成員を以下に記す。

#### 炭素循環研究ロードマップ検討委員会委員（平成25年3月15日現在）

青木 周司	東北大学大学院理学研究科附属大気海洋変動観測研究センター	教授
市井 和仁	福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻	准教授
今須 良一	東京大学大気海洋研究所気候モデリング研究部門	准教授
大崎 満	北海道大学大学院農学研究院生物資源生産部門植物栄養学研究室	教授
河宮 未知生	海洋研究開発機構地球環境変動領域地球システム統合モデリング研究チーム	上席研究員

竹川 暢之	東京大学先端科学技術研究センター 准教授
中島 孝	東海大学情報デザイン工学部情報システム学科 教授
奈佐原 顕郎	筑波大学生命環境系 准教授
眞木 貴史	気象庁気象研究所環境・応用気象研究部 主任研究官
松枝 秀和	気象庁気象研究所地球化学研究部第一研究室 室長
宮崎 和幸	海洋研究開発機構地球シミュレーションセンター 研究員
宮田 明	農業環境技術研究所大気環境研究領域 領域長
村山 昌平	産業技術総合研究所環境管理技術研究部門大気環境評価研究グループ グループ長
向井 人史	国立環境研究所地球環境研究センター 副センター長
山形 与志樹	国立環境研究所地球環境研究センター 主席研究員
S. Maksyutov	国立環境研究所地球環境研究センター物質循環モデリング・解析研究室 室長
中山 忠暢	国立環境研究所地球環境研究センター物質循環モデリング・解析研究室 主任研究員
伊藤 昭彦	国立環境研究所地球環境研究センター物質循環モデリング・解析研究室 主任研究員
寺尾 有希夫	国立環境研究所地球環境研究センター炭素循環研究室 主任研究員
吉田 幸生	国立環境研究所地球環境研究センター衛星観測研究室 研究員

## (2) 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ

検討委員会で審議された地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップについて、以下の1)～4)の項目に分けて記す。あわせて、審議の参考にした資料を5)に記載する。

- 1) 国内外の気候変動研究の動向
- 2) 本研究の目的と検討対象の重要性
- 3) データとモデルの統合利用における諸問題
- 4) 実施すべき研究テーマとロードマップ
- 5) 参考資料

### 1) 国内外の気候変動研究の動向

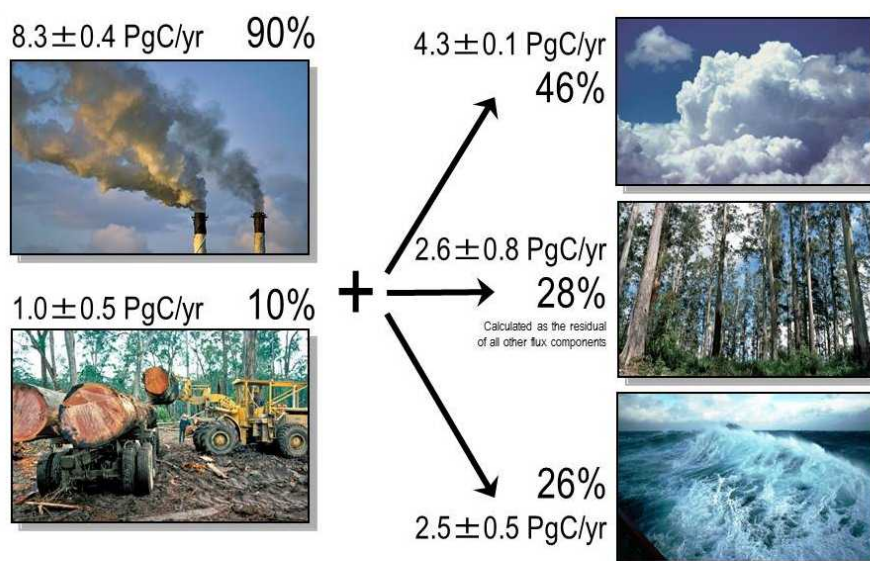
#### a. 何が問題か

現在、IPCCでは第5次評価報告書の発行に向けて、着々と作業が続けられているところであるが、既にIPCC第4次報告書<sup>1)</sup>において、「気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である」、「20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い」と述べられている。将来については、「温室効果ガスの排出が現在以上の割合で増加し続けた場合、21世



紀にはさらなる温暖化がもたらされ、世界の気候システムに多くの変化が引き起こされるであろう。その規模は20世紀に観測されたものより大きくなる可能性がかなり高い」と報告されている。

人為起源の温室効果ガスの大気中濃度の増大により、全球規模での地球温暖化とそれによる気候変動（気候変化）が問題視されるに至って久しい。これまでの知見によれば図(1)-4に示す通り2002年～2011年の平均で、人為的に排出されるCO<sub>2</sub>は炭素換算（以下、同様）で93億トン/年（内訳は化石燃料燃焼・セメント製造により83億トン/年、および土地利用変化により10億トン/年）であった。そのうち、陸域により約26億トン/年、海洋により25億トン/年が吸収され、残りの43億トン/年が年々、大気中に蓄積し、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を増加させ、地球温暖化を進行させているという<sup>2)</sup>。こうした地球の温暖化とそれに伴う気候変化により、人間を含む自然生態系に各種の影響をもたらすことが懸念されている。

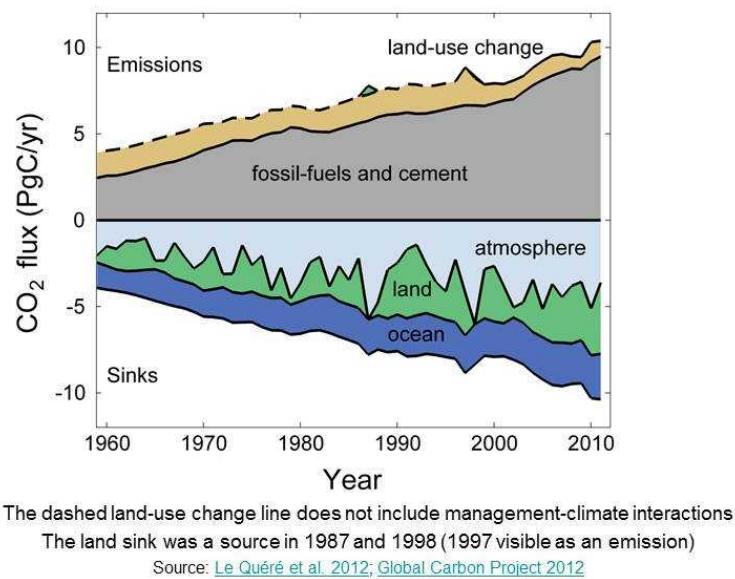


Source: [Le Quééré et al. 2012; Global Carbon Project 2012](#)

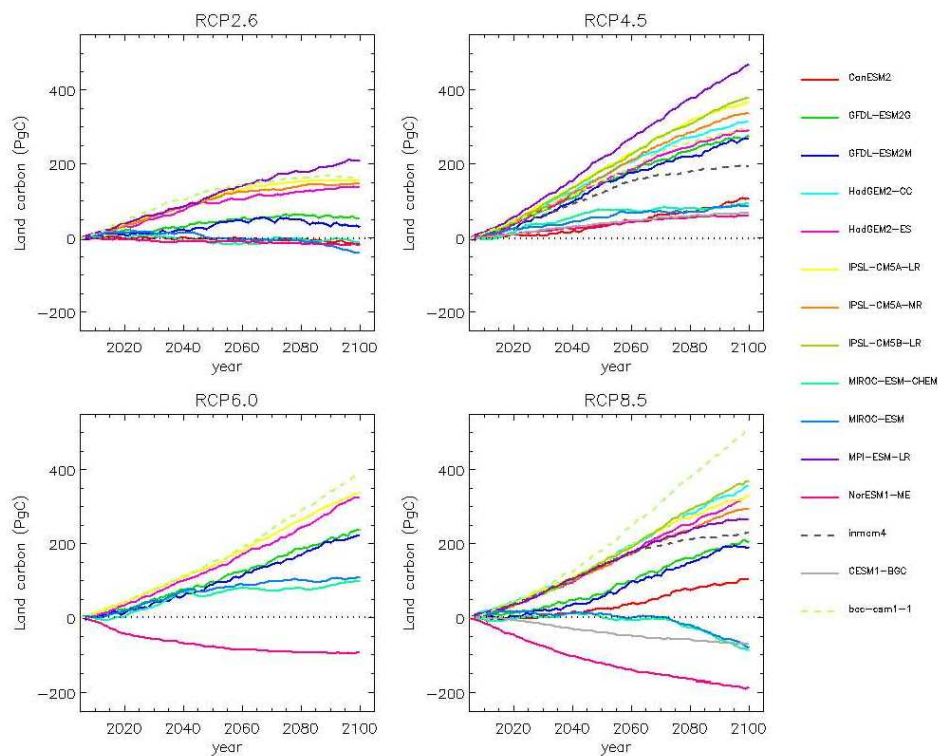
図(1)-4 人為起源のCO<sub>2</sub>の排出量と大気、陸域、海洋の各圏への年あたりの蓄積量。2002年から2011年の平均値（単位：PgC/yr=炭素換算で10億トン/年）と分配比率<sup>3)</sup>。

将来の温室効果ガス（ここでは主としてCO<sub>2</sub>を考える）の排出シナリオのもとで、大気中に残留するCO<sub>2</sub>の量（すなわち、大気中濃度）を正確に予測し、温室効果の増大に伴う地球温暖化を定量的に評価することは重要である。そのためには、陸域による吸収、海洋による吸収の大きさが、将来のある時点においていかなるものであるか、21世紀初頭の26億トン/年（陸域）、25億トン/年（海洋）という吸収量は維持されるのか、増加するのか、あるいは減少に向かうのかを解明することが重要である。さらに、その変化と変化の速度は世界の各地域（異なる植生帯、海洋域）によって同じなのか、あるいは異なるのか。図(1)-5に示すように、特に陸域の炭素収支の年々変動の幅は非常に大きく、年々変動の地理的な分布とその原因を特定することが重要である。また、図(1)-6に示すように、陸域炭素収支の将来予測には未だ不確実性が大きいことから、さまざまな観測データを駆使し、適切にモデルの精緻化を図ることが重要な課題である。海洋に関しても、不確実性は大きく、大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加は海洋水の酸性化を引き起こし、海洋生態系にさまざま

まな影響をもたらすと考えられている。この他、大陸からのエアロゾルが海洋中に取り込まれることにより、海洋中の炭素循環に影響を与えると考えられている。



図(1)-5 化石燃料起源および土地利用変化に伴うCO<sub>2</sub>の排出量と大気、陸域、海洋の各圏への蓄積量（縦軸単位：炭素換算で10億トン/年）の経年変化<sup>3)</sup>



図(1)-6 図の右に示した種々の地球システム統合モデルによる陸域のCO<sub>2</sub>蓄積量の、代表的排出経路（RCP）毎の将来予測（2005年以降）<sup>4)</sup>。単位は、炭素換算で10億トン。

また、こうした地球温暖化に起因する問題（さまざまな気候変化や、それに伴う人間を含む自然生態系に対する影響）に対して、国際的な合意のもとで人為起源の排出を抑える（土地利用変化に伴う排出を含む）ための「緩和策」を取ることで将来の影響を最小限に抑えようとする動きとともに、現時点でもはや避けることの出来ない影響に対してはそれによる被害を減らすための「適応策」の検討が進められている。

陸域、海洋におけるCO<sub>2</sub>収支を正確に把握し、予測することは、将来の人為起源排出量を正確に見通すことと同様に、緩和策や適応策に対して大きく貢献するために極めて重要な課題である。すなわち、緩和策としての排出削減目標の設定を左右し、また適応策の基本となる気候変化の予測精度を向上させることにより、各国の政策だけでなく世界経済（世界の持続可能社会の構築）に直接的な影響を与えるからである。一方、ホットスポットに関わる地域や事象を特定し、その微小な変化を早期に検出することは、地球温暖化対策の緊急性について国際社会ならびに地域社会に対して警鐘をならすことにもつながる。

以上の観点からも、観測とモデルの統合利用を最大有効化させ、地球上の炭素循環変動のメカニズムを理解し将来予測モデルの高度化につなげると同時に、炭素循環変動を観測的に早期にかつ正確に把握することがとりわけ重要となる。

## b. 国内の研究動向

平成24年版環境白書<sup>5)</sup>にわが国における「地球環境に関する観測・監視」に関して、24年度の実施計画が記載されている。地球温暖化関連部分の概要は以下の通りである。

- ① 気候の観測・監視については、世界気象機関（WMO）及び全球気候観測システム（GCOS）の枠組みに基づき、地上及び高層における定常観測を引き続き推進するとともに、その推進に向けた国際的な取組に積極的に参画。
- ② 温室効果ガスなど大気環境の観測については、独立行政法人国立環境研究所及び気象庁が、それぞれ沖縄県波照間島や東京都南鳥島等で温室効果ガスの測定を実施。
- ③ 独立行政法人国立環境研究所では、航空機・船舶を利用した大気中および海洋表層における温室効果ガスの測定や陸域生態系における二酸化炭素収支の測定を実施。
- ④ 気象庁ではWMOの全球大気監視（GAW）計画の一環として、温室効果ガス、CFC、オゾン層、有害紫外線等の定常観測を引き続き実施するとともに、日本周辺海域及び北西太平洋海域における洋上大気・海水中の二酸化炭素等の定期観測、北西太平洋上空の温室効果ガスの航空機による定期観測を継続。
- ⑤ 衛星による地球環境観測については、GOSATによる観測を行い、世界の温室効果ガスの濃度分布に加え、地域ごとの吸収排出量のより正確な把握等を目指すとともに、より精緻な観測が可能な後継機を開発。
- ⑥ 降水、雲・エアロゾル、植生等の地球環境に関する全球の多様なデータの収集を行う衛星の研究開発やデータ提供、世界に先駆けて地球観測機能を強化した「静止地球環境観測衛星」としての次期静止気象衛星ひまわりの整備等、人工衛星による観測・監視技術の開発利用を一層推進。
- ⑦ 海洋地球研究船「みらい」等を用いた観測研究、観測技術の研究開発を引き続き推進し、地球規模の諸現象の解明・予測等の研究開発を推進。

- ⑧ 南極昭和基地を中心に、海洋、気象、電離層等の基本観測のほか、南極地域観測第Ⅷ期計画に掲げた「南極域から探る地球温暖化」をメインテーマとして、各種研究観測を実施。気候変動を解明する鍵となる北極研究について、研究基盤の整備や、コンソーシアムの創設による研究者の連携強化、モデル研究者と観測研究者の協働促進を実施。
- ⑨ 地球温暖化対策に必要な観測を、統合的・効率的なものとするため、環境省と気象庁が共同で運営する「地球観測連携拠点（温暖化分野）」の活動を通じて、関係府省・機関間の観測の連携を推進。
- ⑩ 温暖化影響に対して脆弱な東アジアの途上国における監視・影響評価を推進することにより、途上国の取組に寄与し、気候変動対策に係る将来の国際的な枠組みの構築に貢献。
- ⑪ 地球環境変動予測研究については、世界最高水準の性能を有するスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を活用した地球温暖化予測モデル開発等、及び全球予測結果の高精細化や不確実性の低減等のための研究開発を推進。
- ⑫ 観測・予測データの収集からそれらのデータの解析処理を行うための共通プラットフォームの整備・運用を実施
- ⑬ 環境省では、地球温暖化の原因物質や直接的な影響を的確に把握する包括的な観測態勢整備のため、「地球環境保全試験研究費」において「地球観測モニタリング支援型」の課題を継続して実施。
- ⑭ 全国の気象官署における観測開始以降の観測資料の利用を促進するなど、地球温暖化の状況等に関する調査研究を推進し、地球温暖化予測を強化。

さらに、2012年10月時点で日本の各省等において実施されている外部競争的資金等による研究課題について、各省のホームページ等から情報収集して検討に反映した。極めて多彩な研究課題が、大学・研究機関において実施されている。この他、平成24年版環境白書には記載されていないものの、関係省・研究機関等における独自の施策として、間接的に地球温暖化・炭素循環に関係する調査研究が行なわれていると考えられる。

例えば、地球環境変動予測研究については、次世代コンピュータ「京」を用いた防災減災に資する地球変動予測の一環として、地球温暖化に伴う台風の変化を予測するための研究開発が推進されている。また、「海洋生物多様性および生態系の保全・再生に資する基盤技術の創出」研究の一環として、海洋生態系の将来予測に貢献する新規モデルの開発・研究が実施されている。さらに、地上観測データと大気輸送モデル、あるいはGOSATデータと大気輸送モデルを用いたCO<sub>2</sub>の排出源・吸収源の推定に基づくCO<sub>2</sub>の3次元分布情報が、それぞれ気象庁や国立環境研究所から提供されている。

第2期科学技術基本計画（2001年～2005年）では、重点4分野のひとつとされた「環境分野」において「地球温暖化研究イニシャティブ」を含む5つのイニシャティブが総合科学技術会議の環境プロジェクトチームにより設定され、イニシャティブ毎に All Japan 体制としての戦略的な研究開発目標が定められた。これは、「環境問題は非常に複雑で多様であることから、個別の現象を断片的に研究しても、問題の本質的な解決への有効な糸口とならないことが多く、もっと総合的な研究を行うべきである。さらに環境分野の研究開発を行うにあたっては、国際的視野とともに、省庁間の連携が考慮されるべきである。これまでも、複数省庁によって実行される研究

プログラムは存在したが、実際の研究体制は各省ごと、あるいは研究機関ごとに独立して行われる傾向が強く、環境研究の総合化を阻んできたという実態がある。このようないわゆる縦割りの弊害を排除するには、これまでの戦略やプログラムを見直し、政府全体としての共通の政策目標とその解決に至る道筋を設定したシナリオ主導型の、研究開発を推進する仕組みとしての『イニシヤティブ』が検討されるべきである。また、適切な産学官の役割分担と密接な連携のもとで、研究開発や普及を推進することが必要である。」

([http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/pub/GW\\_report/01\\_00.pdf](http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/pub/GW_report/01_00.pdf)) との考えに基づくものであり、省庁・研究機関間における具体的な研究開発目標や情報の共有が本格的な行われることとなった。

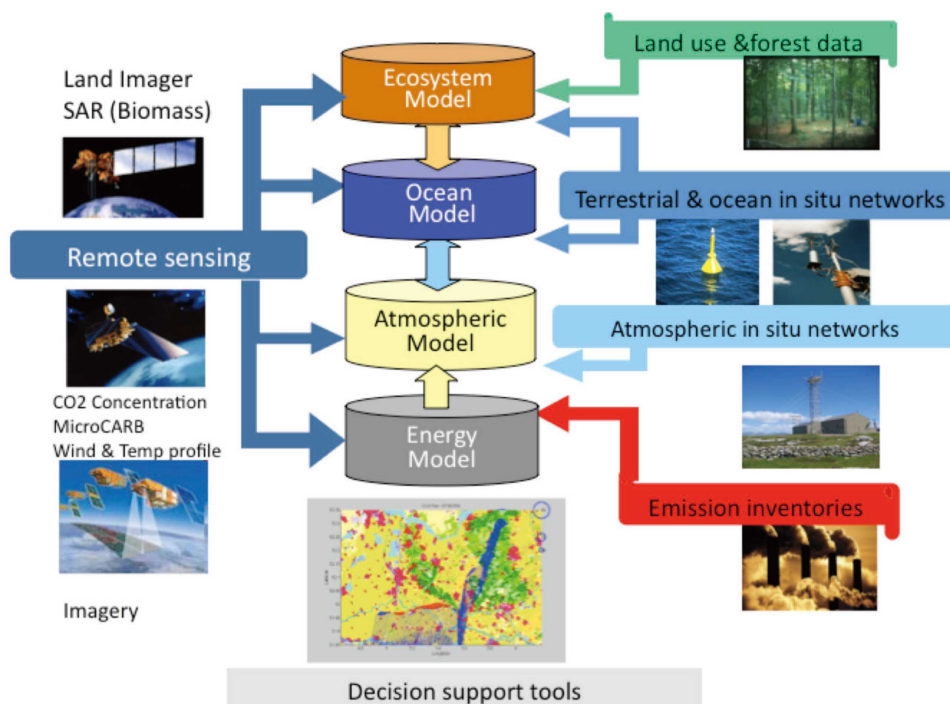
しかしながら、第3期、第4期の科学技術基本計画においては、必ずしもこの動きは継承されてはならず、わが国としての地球温暖化研究の推進戦略が明確化されていないのが実情と言えよう。地球温暖化研究の要素である炭素循環研究においても同様である。一方、観測面に関しては、総合科学技術会議において策定された「地球観測の推進戦略」（2004年12月）ならびに、それに基づいて毎年度、関係府省・機関の協力のもとに取りまとめられている「地球観測の実施方針」、「地球観測の実施計画」がその役割の一端を担っている。

### c. 海外の研究動向

観測とモデルの統合利用による陸域、海洋の炭素循環の把握については海外でも、また国際的にも重要なテーマであると考えられており、国際的政府間組織、欧米諸国などでも統合的な研究計画が策定され、一部では研究が実施されている。2012年10月時点で入手出来る主要な資料として、国際的な政府間組織であるGEO(Group on Earth Observations)のGEO Carbon Strategy 2010、米国のA Carbon Cycle Science Plan、EUのGHG-EUROPEおよびIntegrated Carbon Observation Systemなどがある。これらの概要を以下に簡潔に示す。

#### ① GEO Carbon Strategy 2010

全球炭素循環の把握に不可欠な統合された観測システムを構築するため、現状の地球観測をどのように拡大する必要があるかをとりまとめ、実施すべき課題について報告している。同報告書では、現状の気候変化予測の不確実性を大きくしている主な原因の一つに自然の炭素吸収源の不確実性が挙げられ、また気候変化に対する陸域や海洋のフィードバックについては乏しい理解しか得られていないことを指摘している。自然の炭素吸収・放出過程に加え、人為起源のCO<sub>2</sub>放出（化石燃料燃焼や土地利用変化）についても評価の精度を上げなければならないとしており、1) 観測点の密度を上げることに、特に、地上と航空機による大気中温室効果ガスの観測、海洋表層pCO<sub>2</sub>観測、陸域生態系のフラックス観測ネットワーク、2) 衛星観測による全球規模でのCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>の空間分布の観測を確立すること、特に、GOSAT、SCIAMACHYの後のギャップを埋めることなど、11項目の実施を推奨している。



図(1)-7 GEO Carbon Strategyが目指す「GHG排出・吸収源マップ作成に応用できる全球炭素サイクル・データ同化システム計画の概要」<sup>6)</sup>

## ② A U.S. Carbon Cycle Science Plan

主たる目的は、これからの10年、炭素循環の科学において優先的に研究すべき課題について研究者のコミュニティから情報提供することであり、観測とモデルの統合利用に限らず、必要とされる炭素循環研究の全体像を示している。本課題調査研究に係る研究目標としては、以下の事項が挙げられる。

G1：過去および現在の大气中CO<sub>2</sub>およびCH<sub>4</sub>濃度の変動についての明確な説明

G3：将来の気候と人間活動の影響下における炭素ストックとフローに関する脆弱性の評価、特に炭素吸収・放出にかかわる正のフィードバックについて

G4：異なる将来シナリオの下で生態系、生物多様性、および自然の資源がどのように変化するかについての予測

G6：政策などの意思決定者が必要とする現在と将来の炭素循環の情報、彼らの決定に必要な重要な信頼性があり合理的なデータや予測を提供すること

## ③ GHG-EUROPE

主たる目的は、欧州の陸域で主要な温室効果ガス（CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O））の収支を1～10年スケールで評価することであり、炭素収支の変動に含まれる自然変動と人為起源の変動を分離し、気候変動によって引き起こされる部分と人間が制御可能な部分を分けて把握する。気候変化に対して最も敏感で脆弱な炭素のプールと炭素収支のプロセスを明らかにし、将来の気候変化

に対する正のフィードバックに伴うリスクを理解することを内容としている。

#### ④ Integrated Carbon Observation System(ICOS)

目的は、全球炭素循環と温室効果ガス排出に関する現状把握と将来予測に必要となる長期観測を提供することにある。2008～2012年を準備期間とし、2014～2031年の長期にわたり、主要な温室効果ガス（CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O）について、その収支を階層的な観測により欧州のスケールで把握することとなる。大気観測地上ステーション、大気成分測定のための航空機または高高度タワー（および地上FTS（フーリエ変換赤外分光計）サイト）、生態系観測ステーション、海洋表層および大気観測のための船舶及び固定観測点を設けることとしている。この他、データ転送、データ品質管理、フラスコを使った大気サンプルの高精度分析、標準ガスの検定、新しい測器や測定技術の試験、データベースの整備などを担当するセンターやラボを観測基盤要素として整備する。

## 2) 本研究の目的と検討対象の重要性

本研究では、地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定の視点から、GOSAT（後継機を含む）を始めとする地球環境観測のための衛星データ、航空機や船舶による観測データ、並びに地上観測ネットワークのデータを統合的に評価し、炭素循環モデル等の数値モデルを活用することで実現できる地球環境変動、特に炭素循環システムの把握・影響評価体制の確立を目指し、研究課題を特定し、必要な研究インフラ機能も含めた研究のロードマップを策定することを目的とする。

以下に、炭素循環システム把握、炭素循環変動（影響）の早期検出、およびアジア・太平洋域を対象とすることの重要性について述べる。

### a. 炭素循環システム把握の重要性

陸域生態系による吸収、海洋による吸収の大きさに関して、将来において変化は起きるのか。さらに、変化があるとすれば、変化の速度は世界の異なる植生帯、海洋域によって同じなのか、あるいは異なるのか。この課題に対して解答を与えることは、大気中の温室効果ガス濃度の将来変化、それに伴う地球温暖化と気候変化、それによる人間を含む地球生態系への影響について、より精緻な予測を可能にすることにつながる。これは同時に、温室効果ガスの削減目標の設定の精緻化をも意味し、今後、人類が経験するであろう地球規模での温暖化対策の、費用対効果の最大化に貢献することとなる。

### b. 炭素循環変動の早期検出の重要性

ホットスポットと考えられる場所として、炭素蓄積量が特に大きい地域や、炭素吸収量が気候変化の影響を受けやすい地域・対象が挙げられることが多い。それは、例えば、永久凍土（高緯度）地域、陸域・海洋のCH<sub>4</sub>水合物（ハイドレート）、熱帯林地域、北方・熱帯の泥炭地、南大洋である。

炭素循環変動把握の研究によりホットスポットの所在について、より精緻な同定が可能となり、さらにホットスポットにおける炭素循環の変動を早期に検出することが出来れば、気候変動影響

の直接的な証拠であり、国際社会に対する警鐘となるばかりでなく、温暖化対策の促進に大きく貢献することとなる。ホットスポットに関しては、将来の気候変化に伴うものだけではなく、台風や火災、洪水などの自然攪乱に起因するものや、大規模な植林や伐採など人間活動により引き起こされる可能性もあり、それらの検出も重要な課題と考えられる。

### c. アジア・太平洋地域の重要性

日本の研究者コミュニティが対象地域として得意とするのがアジア・太平洋地域であるという理由だけではなく、ホットスポットとして重要視される永久凍土（高緯度）地域、熱帯林地域、北方・熱帯の泥炭地などを含むという理由から、アジア・太平洋地域は大きな関心が払われるべき地域である。また、中国やインドなどの人口増大国、そのほか急速な経済発展を遂げつつある東南アジア諸国を抱えており、人為起源排出量の予測という面からも重要な地域である。これらのことから、わが国としてアジア・太平洋地域に重点をおいた観測体制の構築を図り、高空間分解能モデルとの統合利用によりこの地域の炭素循環の変化を詳細に把握する手段をもつことは、アジア・太平洋域の持続可能な発展を実現するために我が国が果たすべき役割の一つである。

## 3) データとモデルの統合利用における諸問題

データとモデルの統合利用の課題において、残されている問題の概要をまとめて記す。なお、観測データとモデルの統合利用に関わる検討に必要な基礎情報を、観測、フラックス推定、データ・モデル統合利用、およびホットスポットについて、参考資料として5) にまとめた。

### a. 長期観測の充実

地球規模の環境問題である地球温暖化現象の特徴は、その主たる原因物質であるCO<sub>2</sub>等の温室効果ガスの寿命が長く、また地球システムの熱慣性のために、温室効果の具体的な影響が自然システムに現れるまでに時間がかかること、さらには、同様の理由で影響が現れてから対策を施したのでは手遅れになる可能性が極めて高いことにある。また、CO<sub>2</sub>等の地球上での動態・変動メカニズムについて、依然としてその理解が不十分であり、とりわけ自然生態系が将来の地球温暖化・気候変化のもとで、どのような応答を示すかが、十分な精度で予測できるまでには至っていない。また、近年の観測網の充実により、対象によっては数年スケールでの現象（年々変動）などは明らかになってきたが、長期の変動・トレンドの検出までには至っていないことにも留意する必要がある。

このことから、気候変化に対する海洋や陸域の炭素循環フィードバックの効果を含めて、観測的に実態とメカニズムを明らかにすることが重要である。そのためにはさまざまな環境条件・気候条件のもとでの挙動を明らかにする必要があることから、衛星、航空機、船舶、地上ステーションなどの様々なプラットフォームを用いた、多様な要素の長期観測の充実を図ることが必須となる。これらは同時に、炭素循環変動の長期の変動・トレンドの検出を踏まえての、早期検出に対しても必須の要件となる。

なお、過去から現在までの数十年から数十万年スケールでの炭素収支の変動の実態を知ることが、気候変動との相互作用を含めた炭素収支変動のメカニズムを理解する上で重要な知見となり



うることから、例えば、極域氷床上のフィルン空気（氷床上部の雪粒子の間に留まっている空気）やアイスコアなどの解析手法を用いた研究の充実が望まれる。

#### **b. 新しい観測手法の開発、データの品質保証・管理、早期提供**

炭素循環の解明においては、CO<sub>2</sub>濃度を広域にわたって連続的に測定を継続することが重要であるが、それだけではなく各種の同位体比、酸素（O<sub>2</sub>）濃度の計測や、フラックスの直接測定、人工衛星を利用した先端的な観測など、新しい観測手法を開発し、新しい情報を出来る限り取り入れて、実態の把握・メカニズムの解明に役立てていくことが重要である。

また、得られたデータの品質を保証することが極めて大事である。とりわけ、自動観測機器や衛星搭載センサの発展により、大量のデータが取得できるようになったことから、データの品質を、人手を介さずに自動的に評価し、データを選別して、データ質を示す指標とともに、アーカイブ（蓄積）していくようなシステムの確立が必要となっている。さらに、データ取得後、データを必要とする機関が早期にデータを取得できるようにする上でも、このデータシステムの構築は不可欠である。

データの品質を、人手を介さずに自動的に評価できるようにするまでには、観測担当者（研究者）の観測対象の現象に対する深い理解と洞察力に基づく経験を積み重ねて、アルゴリズムを開発する必要がある。データシステムの構築に際しての研究者の参画と、当分の間、データシステムの運用時における研究者の深い関与が必須である。

#### **c. 要素モデルの高度化**

炭素循環の理解を深める上では、大気輸送モデル、陸域植生モデル、土壌呼吸モデル、水・窒素循環モデル、海洋循環モデル、海洋生態系モデル等々、さまざまな要素モデルが利用される。また、人為起源の温室効果ガスの排出に関する情報も、ある意味では人為起源排出モデルと捉えることが出来る。これらのさまざまなモデルが、実態の再現性、異なる環境・気候条件での振る舞いなどにおいて合理的かつ精度の高いものでなければならない。要素モデルの高度化のためには、さまざまな条件下での種々の観測データが得られていることが必要であり、その観点から適切な観測計画が立案・実施されなければならない。

#### **d. データとモデルとの統合利用の高度化**

現時点でも、また近い将来においても、さまざまな観測データの利用が期待される。通常行われている世界の気象観測や気象衛星観測データは言うに及ばず、例えば、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、O<sub>2</sub>や、その他の大気汚染成分、粒子状物質成分、同位体成分などに関する、多点の地上観測点におけるさまざまな連続観測データ、航空機や高高度タワーにおける観測データ、船舶を利用した多数の航路での観測データ、さまざまな衛星観測データなど、極めて多様である。しかも、測定地点は固定しているとは限らず、また測定時刻もさまざまである。こういった時間的にも空間的にも不均一なデータを効果的にモデルに取り込み、各種のプロセスモデルのパラメータや排出・吸収量の空間的・時間的変化を精度よく推定するための、効率的なデータ同化モデルの開発と利用が望まれる。他方、データ同化モデルは効率的で最適化された観測システムの構築に際しても有用な情報を提供する。

#### 4) 実施すべき研究テーマとロードマップ

前節では、地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握を実現するために必要な基本的な研究課題は何かという観点から、a. 長期観測の充実、b. 新しい観測手法の開発、データの品質保証・管理、早期提供、c. 要素モデルの高度化、d. データとモデルとの統合利用の高度化、について総論的に問題点を指摘した。

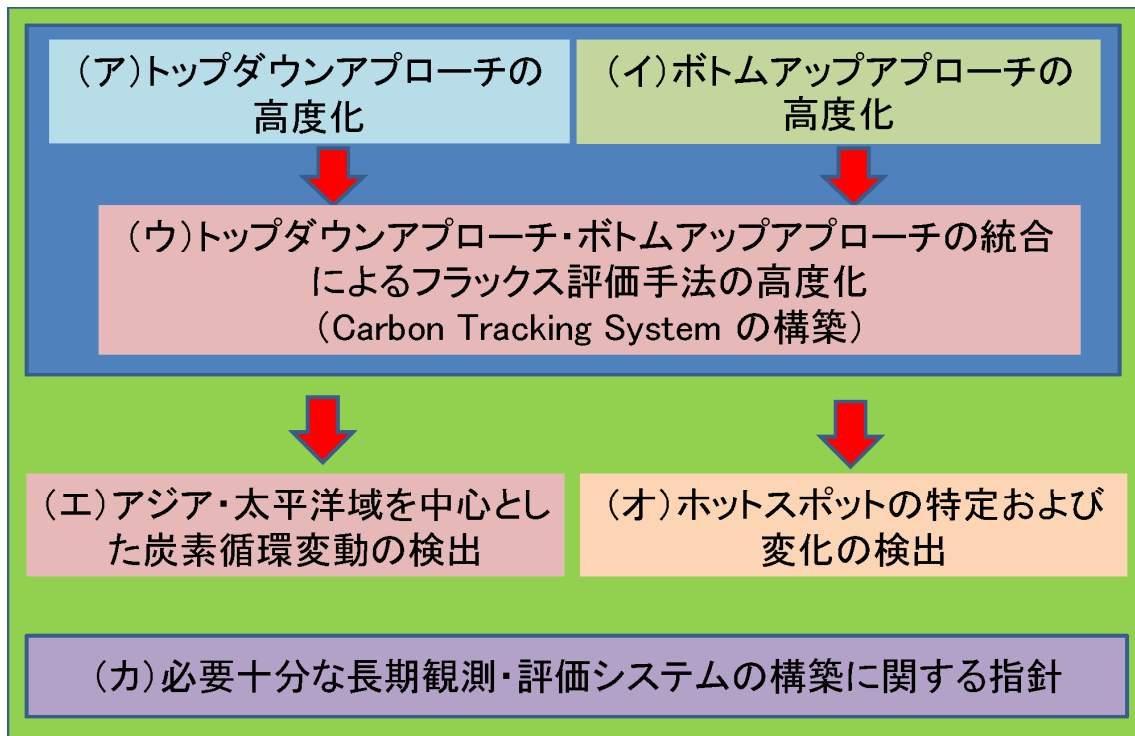
地球上の炭素循環の把握においては、大気圏、海洋圏、陸圏などの各圏の間の炭素フラックス（ある期間における正味の吸収排出量）をさまざまな空間スケール、時間スケールで評価する必要がある。特に、ある程度の広がりを持つ空間スケールでの大気圏と海洋圏および陸圏（陸域生態系）間の炭素フラックスの評価の手法は、トップダウンアプローチおよびボトムアップアプローチと呼ばれる手法に大別できる。

トップダウンアプローチでは、大気中のガス濃度の空間分布とその時間変化を観測し、大気輸送モデルを介して、海域あるいは陸域からのフラックス（ソース・シンク）の空間分布・時間変化を算出する。ここでは、大気輸送モデルを用いたインバースモデル・データ同化モデルなどが用いられる。一方、ボトムアップアプローチは、海表面や陸域生態系における特定点でのフラックスや周囲環境の直接測定をもとに、衛星観測データなどの補助データを用いてモデル（プロセスモデルや経験モデル）を構築し、これらのモデルを介して、ある領域の海洋や陸域生態系と大気圏との間のフラックスを評価しようとするものである。

本節では、これらのアプローチを基礎として、データとモデルの統合化に関する研究テーマに対応するための具体的な個別課題を提示する。

それに先立ち、まず研究の全体像について述べる（図(1)-8）。「地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握」の最終目標を「アジア・太平洋域を中心とした炭素循環変動の検出」（図(1)-8（エ））、「ホットスポットの特定および変化の検出」（図(1)-8（オ））におく。そのための重要な構成要素として、観測・解析技術であるところの「トップダウンアプローチの高度化」（図(1)-8（ア））および「ボトムアップアプローチの高度化」（図(1)-8（イ））と、それらが取り扱う空間スケールのマッチングを含め、「両者の統合によるフラックス評価手法の高度化」（図(1)-8（ウ））を図ることが主要な課題である。さらに、これらを下支えするものとして「必要十分な長期観測・評価システムの構築」が必要であり、その指針を提示する（図(1)-8（カ））。

なお、本研究では、「地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定」を目的としており、これまでになされてきた関連研究の成果を踏まえつつも、なすべき研究の全体像を描くために、他で実施されている研究課題との重複を敢えて排除することはしていない。



図(1)-8 「地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究」の全体像

#### (ア) トップダウンアプローチの高度化

トップダウンアプローチに基づいて特定の領域や地域における温室効果ガスのフラックス（正味の吸収排出量）を推定するためには、大気中の温室効果ガス濃度の空間分布とその時間変化に関するデータ、大気中の物質輸送を正確に表現できる気象データおよび大気輸送モデルが必要となる。

気象データに関しては、日本や欧米で再解析プロジェクトがいくつか実施済みあるいは実施中であり、これらの再解析データを有効に活用することが重要である。

大気輸送モデルに関しては、日本は複数の機関が複数の大気輸送モデルの開発を進めており、マルチモデルアンサンブル実験によって輸送過程に起因する大気輸送モデルの計算結果の違いを基に大気輸送に関する理解を深めやすい状況にある。

温室効果ガスの観測データに関しては、これまで主としてフラスコサンプリング試料の分析や連続測定機器による地上観測点における観測データや、数は限られるものの航空機による鉛直分布観測データ、船舶による海洋上大気中の観測データなどが用いられてきた。近年、長距離航路の民間航空機（旅客機）を用いた観測により広範囲の上空データや空港周辺での鉛直分布データが取得されるようになった。さらに、GOSAT等の地球観測衛星に搭載した分光計による温室効果ガスカラム平均濃度推定が実現し、その他の現場観測データと比較して測定精度は劣るものの、全球をカバーする大量のデータが取得されつつある。さらに2014年以降世界各国により複数の温室効果ガス観測衛星（GOSAT後継機を含む）の打上げが計画されていることより、今後より多くの衛星データが利用可能になると考えられる。また、地上FTS観測網による定点でのCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>のカラム平均濃度観測も充実しつつある。

これらの観測体制の充実や観測データの品質向上、さらにトップダウンアプローチへの適用のためのデータシステムの構築、大気輸送モデルの精度向上などを通じたフラックス評価の高度化が今後の重要な課題として残されている。

以下の個別課題に関するロードマップを図(1)-9に示す。

### ①GOSAT等衛星によるプロダクトの高品質化と検証体制の強化

GOSAT（後継機を含む）等の衛星による温室効果ガス濃度推定に関し、エアロゾルや薄い雲の影響下における推定精度向上（ばらつき、バイアスの低減）に加え、太陽及び観測天頂角の大きいデータ、視野内に厚い雲がある場合や信号対雑音比の低いデータといった今まで処理されなかったデータにも適用可能な推定アルゴリズムの検討・開発を行う。さらに、衛星により推定された温室効果ガス濃度を用いたトップダウンアプローチによるフラックス推定に関し、更なる精度向上、濃度データや各種先験データの誤差に対する依存性の評価及びその軽減法、さらにはフラックス推定の高分解能化（時間・空間）に関する研究等を進める。また、CO<sub>2</sub>の排出源特定に向けた一酸化炭素濃度（CO）測定手法と解析手法の検討も急ぐ必要がある。

さらに、衛星からの温室効果ガス濃度の導出精度の向上及び導出可能な地点の増加に伴い、検証精度の向上や検証地点の拡充も求められつつある。これらに対応するためには新たな検証用観測装置等の開発、新たな地点／新たな観測装置による検証観測の実施に関する研究、多様な検証データを用いた検証解析手法の高度化といった検証高度化に関する研究を行い、それらの成果に基づいて必要に応じて検証体制を強化する。

衛星データをその他の観測データと同時に統合的に利用することで、フラックス推定精度の一層の向上が期待される。

### ②地上、船舶、航空機等による観測の充実とデータ・プロダクトの品質保証

東南アジア・南アジア等では地上観測点の空白域が多く残されており、アジア地域におけるフラックス推定の大きな誤差要因となっていることから、これらの地域におけるフラスコサンプリングネットワークと連続観測局の開設による温室効果ガス濃度やそれらの同位体比ならびにO<sub>2</sub>濃度計測のための地上観測網の拡充を図る。また、アジア・オセアニア航路を航行する商船を利用した温室効果ガス観測において、新たに多成分ガス連続観測システムの開発と観測を実施し、人為起源と自然起源の分離を目指す。

民間航空機に搭載できる温室効果ガス多成分連続測定装置の開発（および搭載承認取得と、次世代型航空機に観測装置を搭載するための改修と承認取得）ならびに実運用を進め、広域に渡る上空データと世界各地の空港周辺域の鉛直分布データの取得を行う。

いずれの観測においてもCO<sub>2</sub>濃度の測定においては世界気象機関（WMO）が定める0.1 ppm以内（南半球においては0.05 ppm以内）の精度を保つ必要がある。

### ③大気輸送モデルとフラックス評価モデルの高度化

トップダウンアプローチにおいて重要な役割を果たす大気輸送モデルについて、その高解像度・高精度化とともに、これらのモデルを用いたインバース計算手法の開発を行う。

データ同化計算時に得られる各種診断情報を利用し、モデルの改善につなげる。例えば、地上

および上空（航空機やCO<sub>2</sub>カラム平均同度）の観測データを同時に同化した際に得られる状態修正量の時空間構造を解析することで、積雲対流、前線の通過、境界層乱流などに関連する鉛直輸送エラーについて考察し大気輸送モデルの改善につなげる。改善されたモデルは、トップダウン計算に利用することでフラックス推定の精密化につながる。

また、データ同化手法である4次元変分法（4DVar）やアンサンブルカルマン smoother（Ensemble Kalman Smoother : EnKS）の改善を図る。この際、どの観測物理量を統合するのか、アプトプットとしてどのパラメータを対象にするのか、アウトプットの時空間分解能はどの程度を目指すのか、そのために必要な最適なデータ同化フレームワークはどのようなものであるべきか、について具体的な要求を明確化する。さらに、近年の観測データ量の急速な増加に対応し、モデルとの効果的な統合利用を可能にするため、特に同化モデルにおけるモデルバイアスや観測代表性を適切に取り扱うスキーム、様々なパラメータを同時に最適化する手法の開発などについて検討を行う。

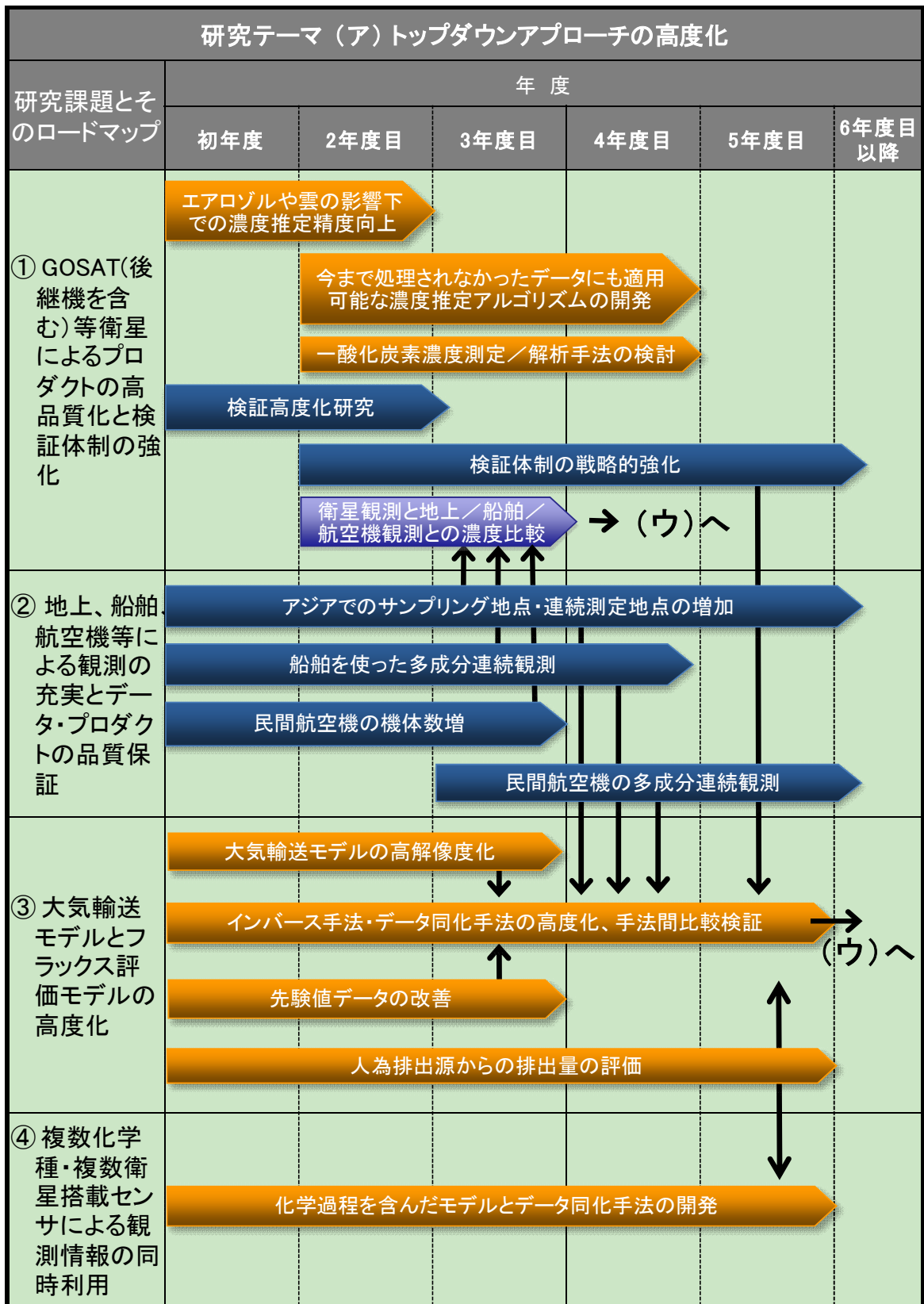
フラックス評価の際に使用する先験値データの大幅な改善と、不確実性の定量化を行う。先験値は、主として陸域生態系に関するプロセスモデルや海洋表層の観測データ（あるいは海洋モデル）、さらに森林火災などによる放出量の推定データ等で与えられるが、これらの不確実性は大きいことから、本課題は後述のボトムアップアプローチの高度化と直接関係する。加えて、陸域生態系や海洋表層と比較して推定精度が高いと考えられる人為起源（化石燃料燃焼、セメント生産、および土地利用変化）による排出量に関しても先験値として用いられることから、一層の高精度化を図る。

火力発電所や大都市など大規模な人為起源排出源からの排出量や、自然あるいは人為的な森林火災・泥炭火災による排出量の評価について、排出源に的を絞った直接的な測定に基づく評価、あるいは正味排出量の推定値から自然起源排出（吸収）分の差し引きによる評価、全球大気輸送モデルと領域大気輸送モデルを結合したダウンスケーリング解析システムによるメガシティスケールでの高分解能排出量推定など諸手法の実現可能性の評価と実データによる検証を試みる。

#### ④複数化学種・複数衛星搭載センサによる観測情報の同時利用

炭素循環環境変動の把握において、CO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>などの直接的な成分だけではなく、CO、オゾン、窒素酸化物、OHラジカルなどの情報は有効であり、NASAやESAによる衛星観測プロジェクトなどから得られる複数化学種の観測データとモデルとを統合利用するための方策を検討する。このためには、様々な化学種の過程を含む数値モデルとデータ同化手法の開発が必要となると考えられる。

また、温室効果ガスの同位体比やO<sub>2</sub>濃度の観測結果を同時に解析することにより、輸送モデルを使った解析とは独立したフラックス推定を行い、お互いの推定手法の評価・改善を進める。



図(1)-9 「トップダウンアプローチの高度化」研究のロードマップ

### (イ) ボトムアップアプローチの高度化

地表面（陸域、海洋）における炭素循環は数多くのプロセスにより制御されていることから、各種の環境条件や気候条件のもとで炭素の正味の吸収・放出量を実測により求め、個々のプロセスについての知見を深めてモデルを高度化するための研究を行う。また、実測は多くの場合、空間代表性が限られた観測点でなされることから、人工衛星による地表面状態の分布、雲分布や、気象（再解析）データなどを援用して、広域にわたり高い空間分解能の吸収・放出量を評価する（アップスケーリング）手法の高度化もあわせて行う。

気候へのフィードバックに關与する陸域や海洋の炭素循環プロセスは数多くあるが、地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握を早期に実現するために、特に緊急に取り組むべき優先度の高い課題を陸域と海洋に分けて以下に記すとともに、個別課題に関するロードマップを図(1)-10および図(1)-11に示す。

### 陸域におけるボトムアップアプローチの高度化

#### ①陸域の炭素循環に及ぼす水循環・土壌乾燥化、窒素循環等の各種プロセスの把握

炭素循環に及ぼす水循環の変化（土壌乾燥化等）の影響を考慮したプロセスモデルの高度化、および炭素や窒素（栄養塩）の水平輸送を考慮した流域圏での広域評価（例えば森林土壌から河川への溶存有機物の流出、沿岸域の生態系に対する影響評価等）の手法開発を行う。これまでも各種プロセスの把握とモデルの高度化は観測点のスケールでは行われてきたが、陸域のホットスポットにおける変化の早期検出に向けて、流域圏スケールや大陸スケールで観測データを利用したプロセスモデルの開発・検証を実施した例は限られている。広域かつ長期での炭素循環変動把握に資する新たな視点でのアップスケーリング手法の高度化が求められる。同時に、陸域の炭素および窒素循環の広域評価に向けた観測手法の標準化とアジアにおける炭素・窒素動態のデータベース整備、CO<sub>2</sub>以外の含炭素化合物の動態把握を行う。

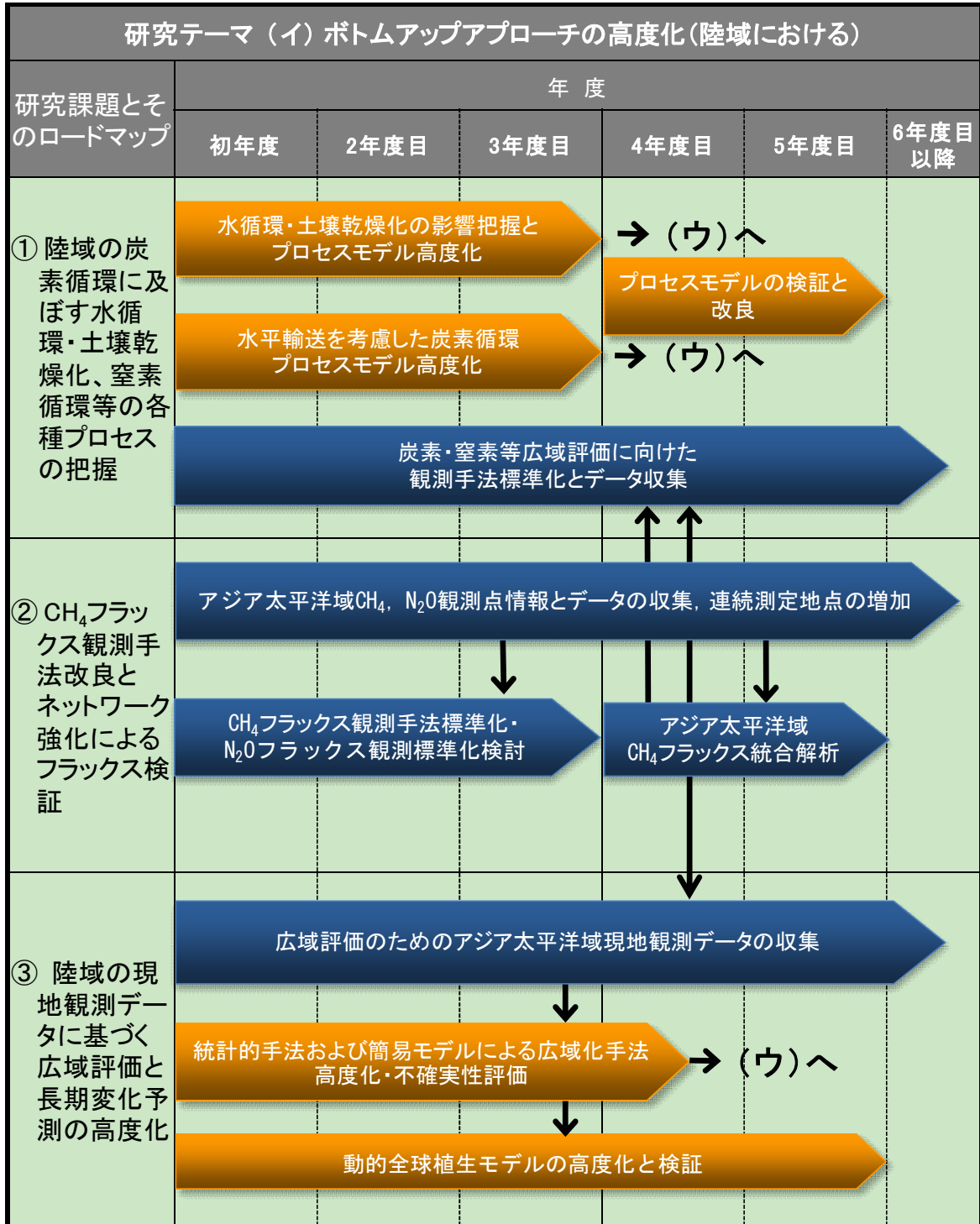
#### ②CH<sub>4</sub>フラックス観測手法改良とネットワーク強化によるフラックス検証

応答速度が速く、従来に比べて野外でも安定にCH<sub>4</sub>濃度を連続測定できる分析計の改良が進んだことにより、渦相関法（オープンパス型）、簡易渦集積法などにより陸上でCH<sub>4</sub>フラックスを長期観測する観測点の数が増え、データの蓄積が始まっている。こうした背景の下、アジア太平洋域におけるCH<sub>4</sub>およびN<sub>2</sub>Oフラックスの観測サイト情報と既存のデータ収集を開始し、特にCH<sub>4</sub>フラックスについては観測手法標準化の方針を定める。CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>を同時に用いたトップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの統合に向けて、アジア太平洋域においてCO<sub>2</sub>に比べて遅れているCH<sub>4</sub>フラックスの時空間変動を把握するための統合解析（サイト間比較研究）を実施する。

#### ③陸域の現地観測データに基づく広域評価と長期変化予測の高度化

陸域の熱・水・CO<sub>2</sub>フラックスやバイオマス等の現地観測データを多地点で収集し、複数の統計的手法または簡易モデルによる広域化を行い、その結果に含まれる不確実性の評価と地上観測点の空間代表性の評価を行う。ここで高度化される広域評価手法は、今後長期にわたりアジア太平洋域における炭素循環変動の変化の検出を可能にするものであり、かつトップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの直接比較を行うため空間スケールのマッチングを考慮したものと

する。また、得られた現地観測データと知見に基づき、全球規模で植生の長期的な動的变化を予測するための動的全球植生モデル (Dynamic Global Vegetation Model (DGVM)) の高度化を行う。



図(1)-10 「陸域におけるボトムアップアプローチの高度化」研究のロードマップ



## 海洋におけるボトムアップアプローチの高度化

### ①海洋表層観測データの高品質化とデータ早期提供システムの構築

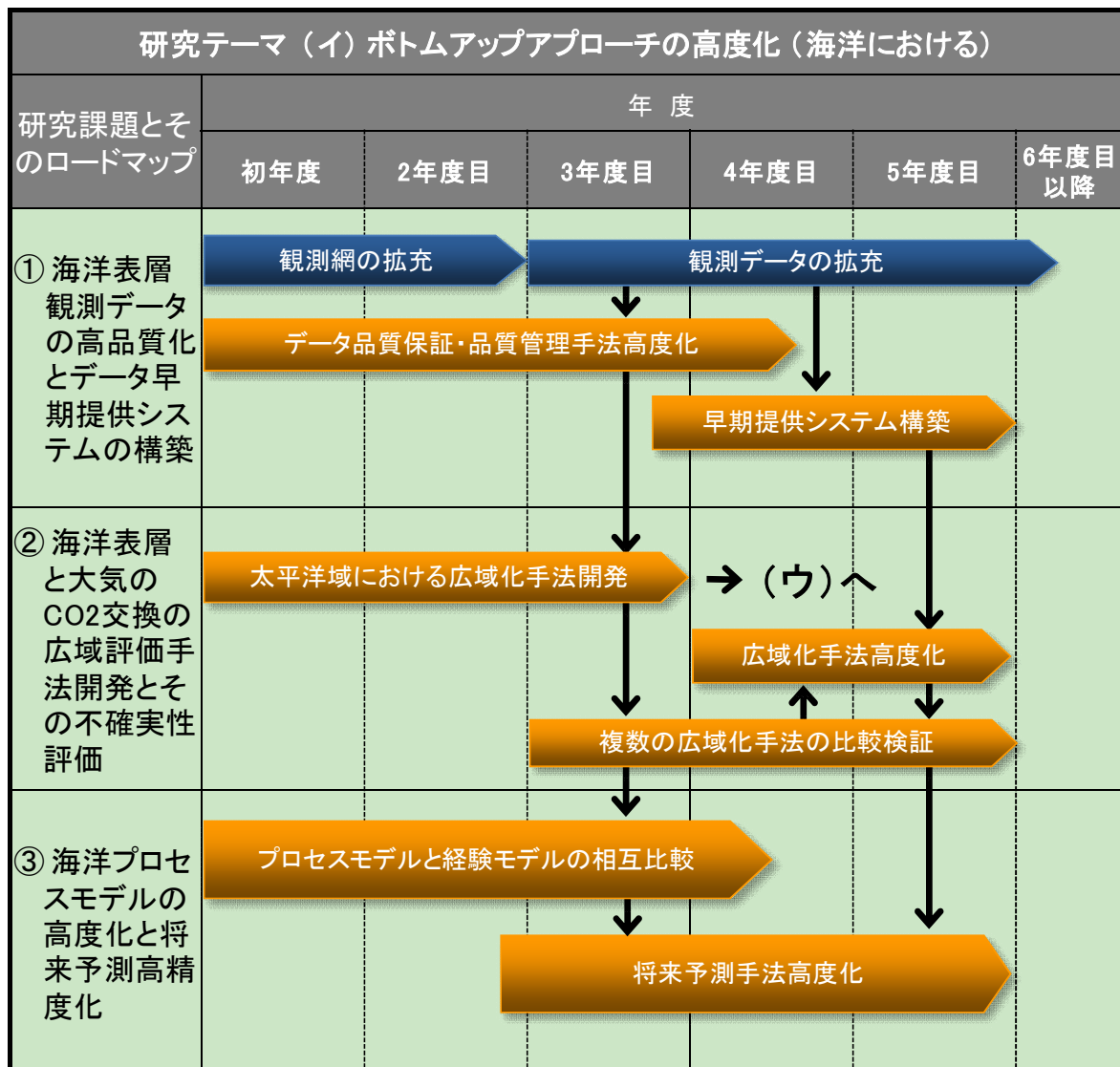
現時点で収集可能な海洋表層観測データ(CO<sub>2</sub>分圧 (pCO<sub>2</sub>)、栄養塩、水温、塩分など)を解析し、海洋における炭素循環を制御する要因を特定する。そのために、研究観測船や民間定期航路貨物船等の利用を促進し、観測空白域における海洋の観測網・観測頻度・観測項目の拡充を図る。観測データの統一的な品質保証・管理手法を開発するとともに、これらのデータの早期提供システムを構築する。

### ②海洋表層と大気CO<sub>2</sub>交換の広域評価手法開発とその不確実性評価

現時点で収集可能な海洋表層観測のデータ(pCO<sub>2</sub>、栄養塩、水温、塩分など)に基づき、複数のを行う。複数の手法による相互比較を行い、不確実性の評価と観測点の空間代表性についての検討を行う。得られたデータおよび知見に基づき、海洋からのCO<sub>2</sub>フラックス評価手法の改良を行う。

### ③海洋プロセスモデルの高度化と将来予測高精度化

海洋生物地球化学・大循環モデルから計算された海洋上CO<sub>2</sub>フラックスについて、pCO<sub>2</sub>観測から推定された海洋フラックスの気候値や経験的モデルからのフラックス、さらには海洋インバージョン、大気インバージョンからのフラックス推定値と季節変動や経年変動についての比較を行う。海洋生物地球化学・大循環モデルによって推定されるpCO<sub>2</sub>は、モデルの解像度、生物地球化学過程、海洋表層での外的要因によって異なるが、これらが海洋炭素循環に及ぼす感度について評価し、将来予測の高精度化を行う。



図(1)-11 「海洋におけるボトムアップアプローチの高度化」研究のロードマップ

#### (ウ) トップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの統合によるフラックス評価手法の高度化（Carbon Tracking Systemの構築）

従来、トップダウンアプローチとボトムアップアプローチのそれぞれによる評価は広く試みられてきたものの、対象とする領域の大きさの違いや空間分解能の違いに起因して、両者を統合した解析は十分には行われて来っていない。トップダウンアプローチやボトムアップアプローチに含まれる様々な手法による結果の比較を通して、様々な空間スケールにおけるフラックスの不確実性の評価を行うことができる。さらに、各手法から得られる知見を統合的に解釈することにより、これまで重要視されなかった素過程の推定などの新たな炭素循環への知見を与える可能性を含んでいる。一方で、ボトムアップアプローチによる不確実性が大きな場所では、トップダウンアプ

ローチでも利用可能な観測データが不足している場合が多くあることに注意が必要である。そこで、本課題ではトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの統合による空間スケール別のフラックス評価手法の高度化および検証のための研究を行う。この際、これまでほとんど無視されてきた陸域内の水域（河川・湖沼・地下水等）を通じた炭素循環の寄与についても検討の対象とする。なお、ここではCO<sub>2</sub>を中心に、実現可能性があればCH<sub>4</sub>についても、検討することとする。

個別の課題に関するロードマップを図(1)-12に示す。

#### ① トップダウン、ボトムアップの比較を通じたフラックス評価手法の高精度化

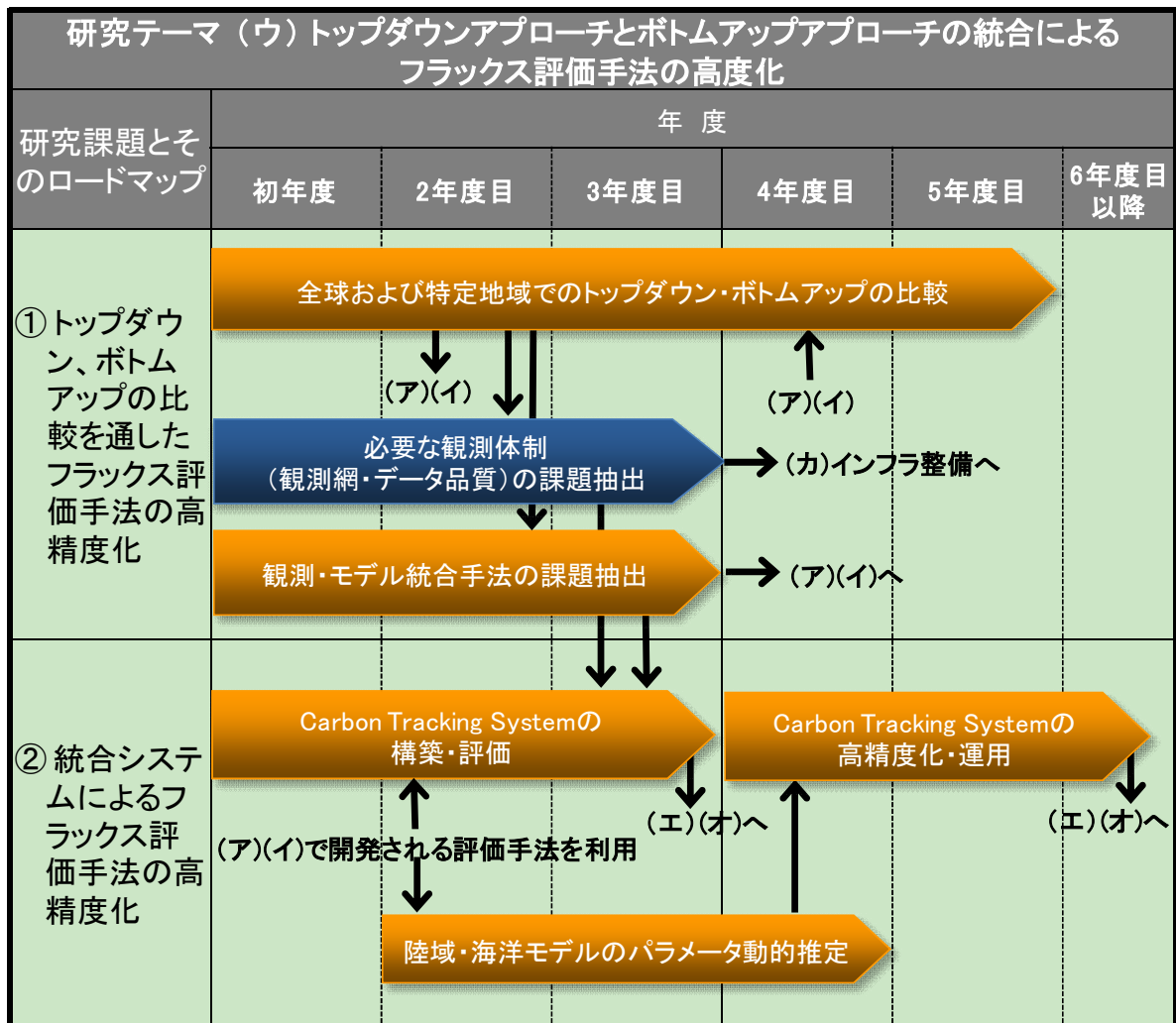
特定の観測サイト領域(集中観測領域)、地域・全球レベルでトップダウン及びボトムアップによるフラックス推定の結果を詳細に比較・検討し、トップダウン/ボトムアップ双方の課題の抽出/改善方法の検討を行う。この際、検証の方法について検討する。

また、濃度などモデル予報変数の比較・検証、プロセスに踏み込んだモデルの比較・検証、モデル計算をもとにした観測網の最適化やデータ品質管理の実施など、今後有効となる観測データとモデルの統合利用手法に関して、想定される課題を抽出する。

#### ② 統合システムによるフラックス評価手法の高精度化

国内複数の研究機関の協力により、さまざまな観測データとトップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの手法を組み合わせ、全球の炭素収支、特にアジア太平洋域の炭素収支をより高精度で評価することのできる統合システム(Carbon Tracking System)を構築する。これまでも、トップダウンアプローチに基づき、米国 NOAA が主に北米を対象として地表面の炭素収支を推定する解析システム(CarbonTracker)を開発し定常的に運用しているほか、韓国気象研究所がそれをアジアに応用した例(CarbonTracker-Asia)、日本の気象庁の定常運用などの例がある。

一方、ここで構築を提案する Carbon Tracking System は、従来のトップダウンアプローチの利用にとどまらず、アジア太平洋域における独自の観測データをできる限り早期に利用すること、アジア太平洋域のボトムアップアプローチによる炭素収支の結果を活用し空間的により詳細化すること、データ同化モデルの活用により各種の陸域・海洋モデルのパラメータの動的推定によりシステムを同時最適化する方法を開発することなど、より高度な機能をもたせ、特にアジア太平洋域の炭素収支をこれまでにない高い精度で評価できるものとする。



図(1)-12 「トップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの統合によるフラックス評価手法の高度化（Carbon Tracking Systemの構築）」研究のロードマップ

#### （エ）アジア・太平洋域を中心とした炭素循環変動の検出

開発されたCarbon Tracking Systemにより、気候変化の影響を受けて炭素収支の変化が起こりやすいと予想される地域（例えばユーラシア大陸北方地域や東南アジア）において、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の収支の年々変動や長期的な変化をこれまでにない確度で検出する。研究期間終了後もアジア太平洋域の炭素収支評価を長期的に継続することをめざし、それに必要な国内の機関間連携やデータ収集の仕組みを整備する。

個別の課題に関するロードマップを図(1)-13に示す。

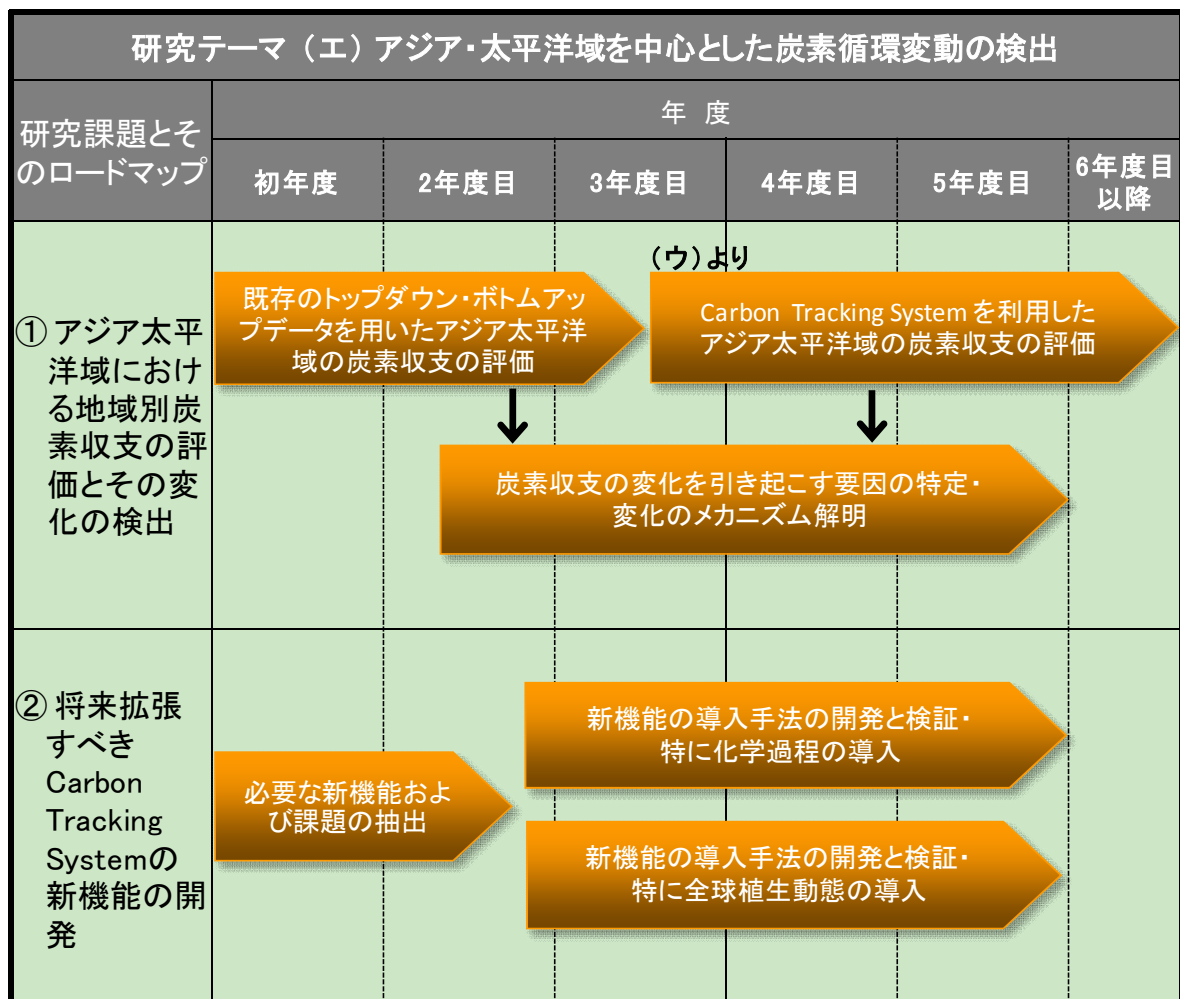
#### ① アジア太平洋域における地域別炭素収支の評価とその変化の検出

アジア太平洋域において炭素収支の現状を地域別に評価し、炭素収支の変化を早期に検出する。

例えば、ユーラシア北方地域の植生変動とCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>収支の関係、東南アジアにおける火災頻度の変化とCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>大規模放出の関係、人為起源排出量の急増している国を対象とした排出量の経年変化などを対象として地域別に調査する。また、炭素収支の変化を引き起こす要因を特定し、変化のメカニズムを解明する。

## ② 将来拡張すべきCarbon Tracking Systemの新機能の開発

アジア太平洋域における炭素収支の評価精度を向上するために将来必要となる新しい機能を検討し、Carbon Tracking Systemに導入するための手法を開発する。例えば、アジア太平洋域で炭素収支の変化が特に大きい地域を対象として高い時空間分解能で評価を行う手法の開発、全球規模でCH<sub>4</sub>やCO、オゾン、窒素酸化物、OHラジカルなどの3次元観測データを整備しCarbon Tracking Systemに化学反応をも導入するための手法の開発を行う。また、全球規模で長期的に起こる植生の変化を組み込むためのDGVMを導入する手法の開発などを検討する。



図(1)-13 「アジア・太平洋域を中心とした炭素循環変動の検出」研究のロードマップ

### (オ) 炭素循環変動検出のためのホットスポットの特定および変化の検出

ホットスポットは、大規模な炭素蓄積域（炭素リザーバー）や大きな炭素吸収源でありながら、気候変化や土地利用変化の進行の影響を受けやすく、将来において大きな温室効果気体放出源となりうる地域である。これらのホットスポットをあらかじめ特定し監視を続けることは、気候変化による炭素循環変動の兆候をいち早く検出することにつながる。これは、気候政策担当者が科学に基づいた緩和・適応策の策定を行うのに役立ち、大きな政治的インパクトを与えることとなる。したがって、ホットスポットの可能性のある地域を的確に把握しておくとともに、その変化を早期に検出できるだけの手法やモニタリング体制を確立しておくことが必要である。

個別課題に関するロードマップを図(1)-14に示す。

#### ①ホットスポットの特定

過去および今後取得される衛星観測データ、地上観測データなどの解析や、プロセスモデルによる感度解析などを通して、ホットスポットを特定する。さらに未知のホットスポットを探索する手法の検討を行う。

ホットスポットの可能性のある地域としては以下の地域が挙げられる。

- ・高緯度で温暖化の影響が大きいと予想される陸域、特に、生育期間伸長に伴うCO<sub>2</sub>吸収量増加、夏季乾燥化によるCO<sub>2</sub>吸収量低下、大規模森林火災によるCO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>放出量の増加、水循環の変化とその生態系への影響が強い地域、融雪早期化によるアルベド変化のみられる地域、凍土の融解とそれに伴う土壌からのCO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>放出増加のみられる地域など
- ・アジア・オセアニア低緯度地域では、気候変動、特にEl Ninoに伴い数年に一度程度の頻度で強い旱魃の起こる地域、土地利用変化や森林火災の影響の大きい地域、泥炭中の有機物分解によるCO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>放出量の増加のみられる地域など
- ・ユーラシア中高緯度地域では、凍土の融解によるCH<sub>4</sub>の放出が予想される地域、降水量の空間分布に長期変化が見られる地域、土壌乾燥化または湿潤化の進んでいる地域、それに伴い植生の生育限界（森林域から草原、草原から砂漠化）や農業適地の限界が変化している可能性のある地域など
- ・海洋においては、世界規模では氷河融解による淡水化が海洋大循環・深層循環を変化させる可能性のある地域、またアジア太平洋地域を中心に、インドネシア海洋大陸における熱・水蒸気輸送に変化がみられる地域、CH<sub>4</sub>ハイドレートの存在する地域など。

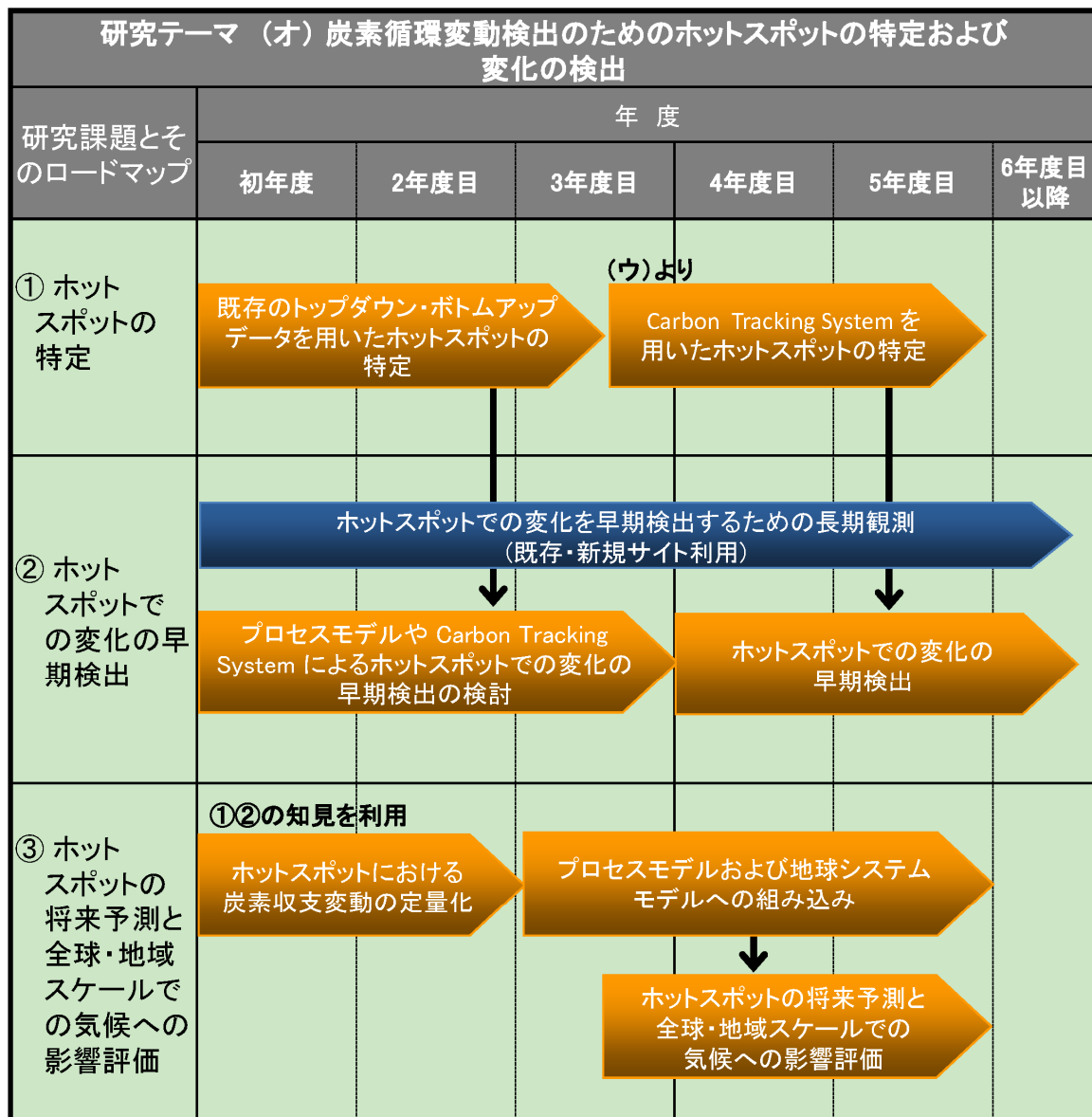
#### ②ホットスポットでの変化の早期検出

上記①の研究成果をもとに、現地観測あるいは衛星観測により、ホットスポットの種類や大きさ、過去データの蓄積、現地へのアクセスや現地観測サイト維持に関する制約等を考慮した、観測方法の選択／組み合わせや技術開発・検証、定常的な観測への移行準備を行うための研究を行う。

このため、観測データとモデルの統合利用によるホットスポット早期検出可能性の検討や準リアルタイムデータを用いたプロセスモデルによるホットスポット早期検出可能性の検討を行う。

③ホットスポットの将来予測と全球・地域スケールでの気候への影響評価

特定されたホットスポット (CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>) について、特に詳細なモデル化を行い、プロセスモデルおよび地球システムモデルに組み込む。プロセスモデルに関しては、気候予測シナリオなどを入力することによってホットスポットに関する将来予測を行い、その結果を踏まえてホットスポットの変化による陸・海洋の炭素蓄積量などの変化を推定する。地球システムモデルに関しては、炭素循環の変化に加えて、気候予測（陸・海洋の変化）への影響を推定する。さらに、人為・自然の攪乱による土地利用・地表面被覆の変化が全球・地域レベルでの気候変動に与える寄与を推定する



図(1)-14 「炭素循環変動検出のためのホットスポットの特定および変化の検出」研究のロードマップ

### (カ) 必要十分な長期観測・評価システムの構築に関する指針

炭素循環変動の把握やホットスポット変化の早期検出において、モデルとの統合利用に供される観測データ（衛星による全球観測を含む）が、必要な地点で、十分に長い期間、必要な頻度で、継続的に取得されることが前提となる。さらに、これらの観測データはモデル計算に導入され、セミリアルタイムで自動的に計算結果として出力され、研究者だけでなく環境行政の担当者や国民一般に配信されるような統合データ利用システムの構築を目指す。すでに、文部科学省が進めているDIAS（データ統合・解析システム）等との統合を視野に入れる必要がある。

#### ①観測のオペレーショナル化（標準化、品質管理を含む）

大気中温室効果ガスの観測、海洋表層pCO<sub>2</sub>観測、陸域のフラックス観測については、アジア太平洋域における炭素収支の広域かつ長期的な把握を支える重要な基盤として、観測の空白域を低減するための新たな観測点（観測域）を設定し運用開始すると同時に、既存の観測についてはさらなる省力化・自動化をはかることが必要不可欠である。

これらの観測を長期的に運用可能な基盤として整備するために特に必要なものは、各種観測手法の標準化と定期的な比較観測の実施、標準ガスの比較・校正、新たに開発される測器や新規観測技術の試験と各観測点への普及支援、遠隔地にある観測点等からのオンラインデータ回収の技術整備、データ品質管理を安定かつ短時間で行うしくみの整備、データベース整備とデータ流通促進（統合解析やモデル比較実験等へのデータ提供支援を含む）、新たな観測点や観測グループ（特にアジア諸国）への技術支援などである。

とりわけ、ボトムアップ研究では国外での現地観測、しかも長期的な観測研究が不可欠であり、海外の研究者の継続的な協力体制や、データの交換、モデルの相互比較などのための仕組み作りが必要である。

#### ②多様な観測データの収集・保存・提供、統合の枠組み構築

統合データ利用システムの構築に向け、地球温暖化分野、特に炭素循環変動把握に関わる観測を実施した組織、個人が保有したままになっている各種観測データの所在を確認しインベントリとして取りまとめた上、可能な範囲でデータそのものを収集し、メタデータとともに統合利用に適した統一された様式（単位系、メッシュサイズ、ファイルフォーマット等）に変換したデータを長期保存する枠組みを整える。また統合データ利用システム等に対し、適切なタイミングと方法でデータを供給する機能の整備を行う。

各種データの統合利用を目的とした大規模システムとして、文部科学省が進めているDIAS（データ統合・解析システム）等が既に存在するが、個々の観測担当者自らがこれらの大規模システムにデータを直接入力することは現状では容易ではない。このため、これらの大規模システムと個々の観測担当者または各分野で運用されているデータベースとをつなぐインターフェースの開発が求められる。

一方、炭素循環変動把握を主目的として、高度化された炭素収支評価モデル（全球、アジア・太平洋域）と合わせて各種データ（4次元）の統合データ利用システム（Carbon Tracking System）を整備、運用する。



### ③「観測システムシミュレーション実験」による最適化された観測体制の提案

炭素循環変動の把握やホットスポット変化の早期検出に必要な十分な観測データ（観測点、観測頻度、観測項目など）を収集するための、衛星観測を含む観測体制（ネットワーク）の最適化設計を行う。特に、大気・海洋・陸域における現状の観測点（観測域）で得られるデータに基づく炭素収支評価の精度限界、観測空白域の解消がもたらす精度向上の定量評価、さらに最適かつ現実的な観測体制の提案を行うため、「観測システムシミュレーション実験」を実施する。

### ④プロセスモデルの改善効果評価のための地球システム統合モデルのコミュニティモデル化

気候と炭素循環の間のフィードバック効果を含むモデル（地球システム統合モデル）による温暖化予測において、様々な観測データを適用して改善された陸域・海洋のプロセスモデルが地球温暖化予測に与える影響を容易に評価するため、地球システム統合モデルのコミュニティモデル化（フレームワークの構築）を行う。この際、文部科学省が実施している「気候変動リスク情報創生プログラム」等との連携を図る。

## 5) 参考資料

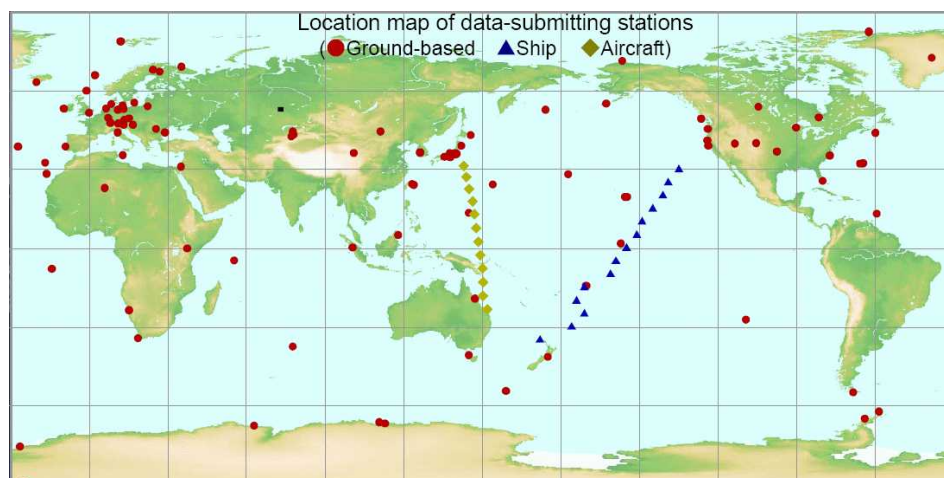
議論の参考にした基礎情報を以下に記す。

### a. 観測（全球、アジア・西太平洋域）

#### (ア) 大気中濃度の直接観測

##### ①地上固定点

地上観測点のほとんどは北半球に位置しているが、図(1)-15のように空間的な偏りがあることがわかる。特にアフリカ、南米、シベリア、インドなどの強い放出源・吸収源が存在する地域が観測の空白域になっている。海洋上は濃度の濃淡が小さいが、ペルー沖などの海洋湧昇域での観測がいまだに実施されていない。現行の観測点のほとんどはサンプリング法で観測が実施されており、高い時間分解能でデータが得られる連続測定が実施されている観測地点は限られている。



図(1)-15 WDCGGにデータ提供している観測点。赤丸が地上観測点を示す。

(<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>)

## ②船舶

不定期なキャンペーン航海で大気観測を実施する例も多いが、ここでは季節変化または経年変化を捉えるための定期観測のみを記述する。定期観測には観測専用船を使った航海観測と、貨物船の協力を得て実施する観測とがある。前者では気象庁気象研究所の太平洋上東経137度線上での観測を初めとして、欧米の観測機関が定点での観測を定期的に行っている。また、各国の南極観測船を利用した定期観測も多い。後者では国立環境研究所や東北大学が実施している日豪および日米航路、米国NOAAが実施しているニュージーランド航路での観測、英UEAの大西洋航路の観測などがある。

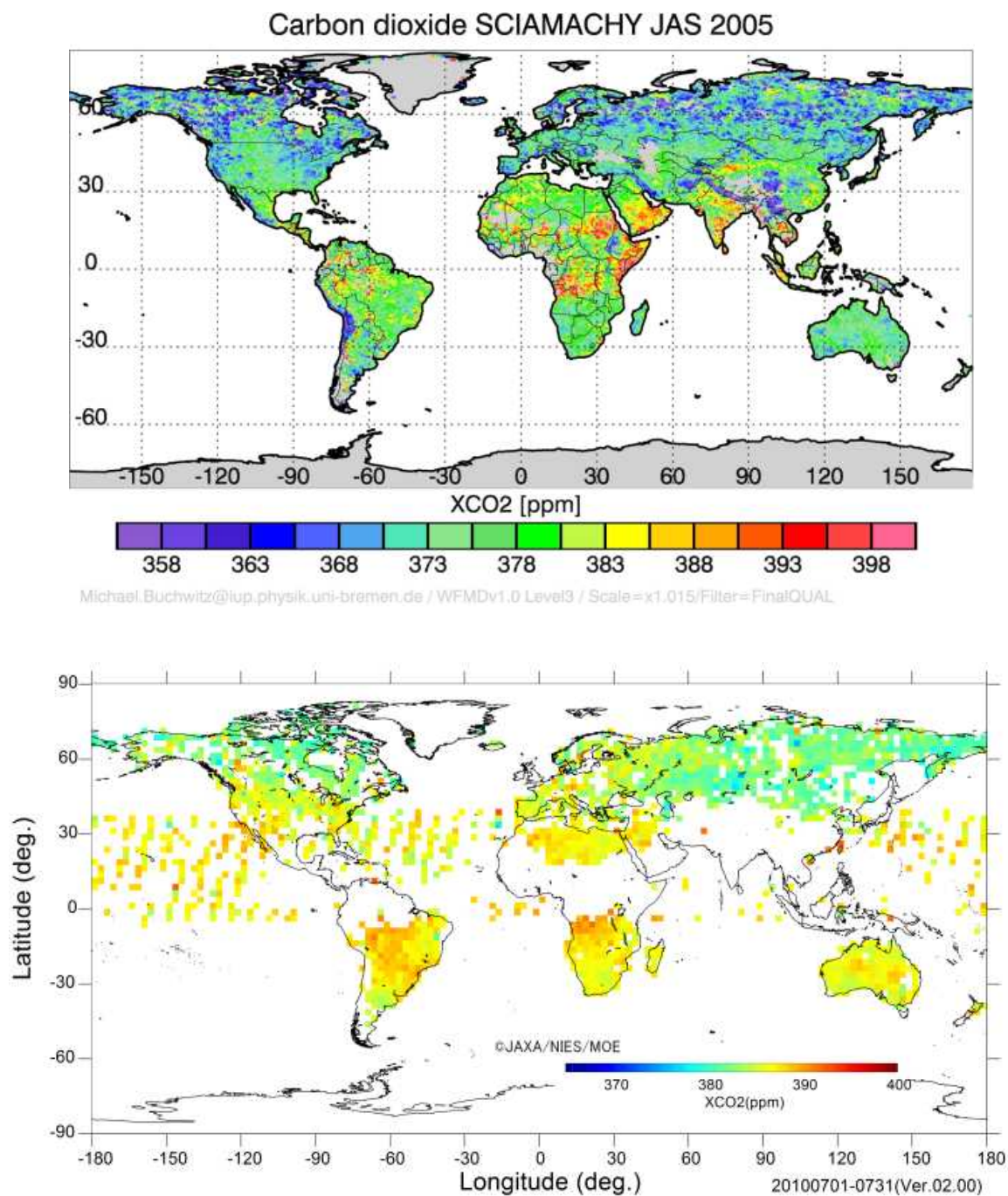
## ③航空機

チャーター機による観測はNOAAが米国内の15ヶ所あまりで実施しているサンプリング観測網が最も観測点が多い。欧州もICOSの一環として2ヶ所での観測を実施している。国立環境研究所では1993年よりシベリアでの定期的なサンプリング観測を実施している。東北大学が1970年代から実施している仙台上空での観測は世界最長の上空でのCO<sub>2</sub>観測データである。2005年より日本のCONTRAILプロジェクトが民間航空機の機上で連続してCO<sub>2</sub>の観測を実施するようになり、上空の観測データが飛躍的に増加した。欧州のIAGOSプロジェクトでも民間航空機の機上でCO<sub>2</sub>等の温室効果ガスを観測する計画である。

## ④衛星

衛星による大気中の温室効果ガス観測濃度の観測は、熱赤外域（GOSATの場合は6～14μm）の観測と短波長赤外域（GOSATの場合は0.7～2.1μm）の観測に大別される。また観測方向については、衛星から地心方向を観測する場合（主に太陽光の地表面からの反射や大気・地表面からの熱放射を観測）と、衛星から大気縁辺域方向を観測する場合（主に大気を透過して来た太陽光を観測）の2種類に分けられる。ただし対流圏下部の全球温室効果ガス観測としては、事実上短波長赤外域の地心方向観測に限定される。

短波長赤外域の地心方向観測の代表例としては、ESAのENVISAT（運用期間：2002～2012）に搭載されたセンサSCIAMACHYや、わが国のGOSAT（運用期間：2009～2014）に搭載されたセンサTANSO FTSがある。これらのセンサでは全球のCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>のカラム量、カラム平均濃度が算出されている。また将来計画としては米国NASAのOCO-2（運用期間：2014～2017）や中国のTanSat（打上げ：2015）、ESAのCarbonSat（2019～2023）がある。なおCarbonSatはCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>を観測対象とするが、OCO-2やTanSatはCO<sub>2</sub>のみを対象とする。



図(1)-16

(上図) SCIAMACHYによる全球CO<sub>2</sub>カラム平均濃度図の例 (2005年7~9月)

[http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR\\_NADIR\\_WFM\\_DOAS/wfmd\\_CO2v1\\_figs\\_2005.html](http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/wfmd_CO2v1_figs_2005.html)

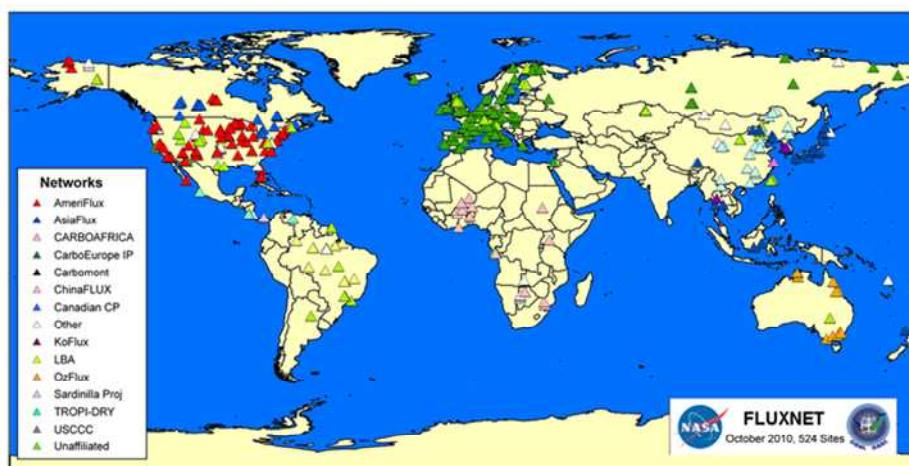
(下図) GOSAT TANSO FTSによる全球CO<sub>2</sub>カラム平均濃度図の例 (2010年7月)

[https://data.gosat.nies.go.jp/GosatBrowseImage/browseImage/fts\\_l2\\_swir\\_co2\\_gallery\\_ja.html](https://data.gosat.nies.go.jp/GosatBrowseImage/browseImage/fts_l2_swir_co2_gallery_ja.html)

## (イ) フラックス（大気-陸域生態系、大気-海洋）

## ①陸域直接観測

1990年代以降、各地の陸域生態系の上で微気象学的方法により熱・水・CO<sub>2</sub>フラックスの長期観測を行うことができるようになった。現在では世界規模の観測ネットワーク（FLUXNET）が観測点情報の収集、観測法の標準化、データ品質管理法の開発などを推進している。世界に観測点が500地点以上あるといわれる。しかしながら、依然として、中央アジア・アフリカ・オーストラリア等の半乾燥域、南・東南アジアなどの熱帯・亜熱帯、シベリアなどの観測の空白域が残されている。また、観測手法の標準化は進展しつつあるものの、各観測点におけるフラックスの観測誤差は、短い時間スケール（30分毎）ではおおそ20～30%程度（熱収支残渣による類推）、年間炭素収支の値で  $\pm 100 \text{ gC m}^{-2}$  程度のオーダーと予想される。



図(1)-17 陸域生態系における熱・水・CO<sub>2</sub>収支の観測点ネットワークの観測サイト  
(FLUXNET: <http://fluxnet.ornl.gov>)

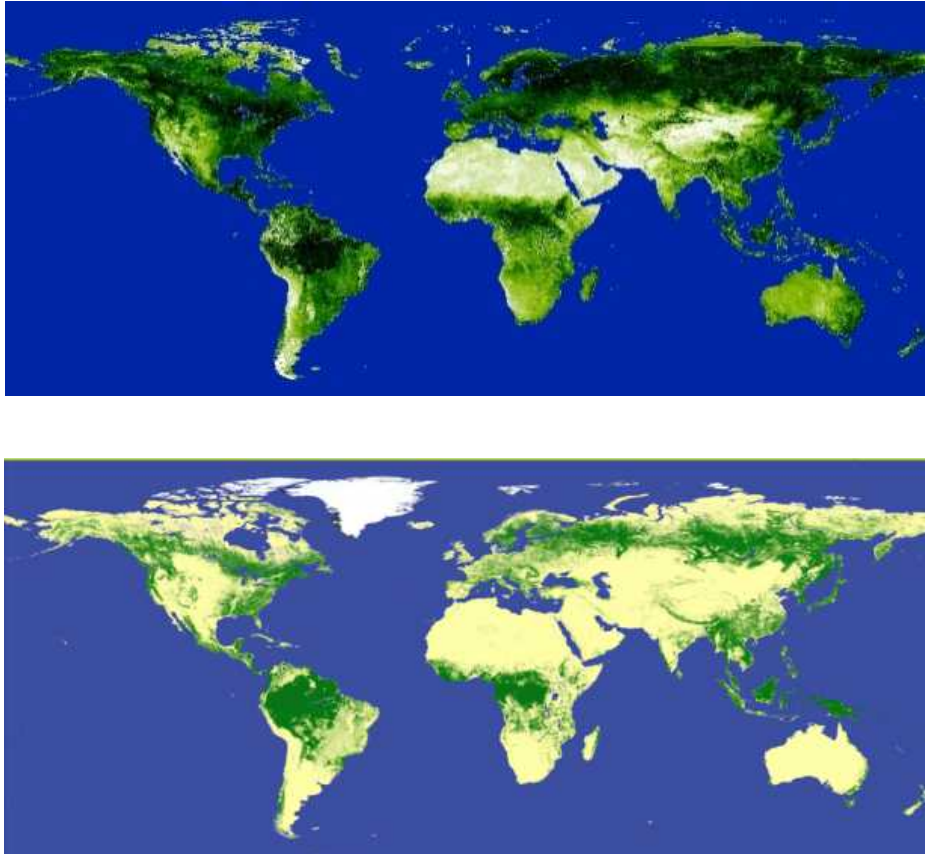
## ②海洋直接観測

観測専用船による海洋表層CO<sub>2</sub>分圧（pCO<sub>2</sub>）観測の歴史は長く、日、米、欧の研究機関が定点での観測データを積み重ねているが、季節変化を導出するまでには至っていない。日本による太平洋路線と英国による大西洋路線では定期貨物船を使った高頻度観測が実施されている。最近では定置ブイを使った観測も行われており、時間分解能の高いデータが所得できるようになった。いずれの観測においても、北半球に比べて南半球のデータが明らかに少ないのが現状である。

## (ウ) 陸域植生分布

全球や広域の陸域植生分布については、光学センサやマイクロ波を利用した合成開口レーダを搭載した衛星による調査が進められている。全球については、米国NOAA衛星シリーズに搭載されたセンサAVHRR（1978～現在）やNASA Terra（1999～現在）及びAqua（2002～現在）衛星に搭載されたセンサMODIS等の光学センサによる全球植生指標図等があり、陸域生態系モデル（empirical

model) の入力データ等に広く利用されている。またマイクロ波センサではわが国のALOS衛星に搭載されたLバンド（波長＝約23cm）SARである PALSAR（2006～2011）による全球の森林・非森林分類図（10m分解能。2009年6～9月のデータ。地上バイオマス量100t/haを森林とする。地上基準データセットとの比較で84%の正確さを持つことが確認されている。）が作成されている。



図(1)-18 （左図）NOAA AVHRRによる1981年7月の植生指標図

<http://glcf.umd.edu/data/gimms/>

（右図）ALOS PALSARによる2009年6～9月の森林・非森林分布

[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/kyoto/kyoto\\_jindex.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/kyoto/kyoto_jindex.htm)

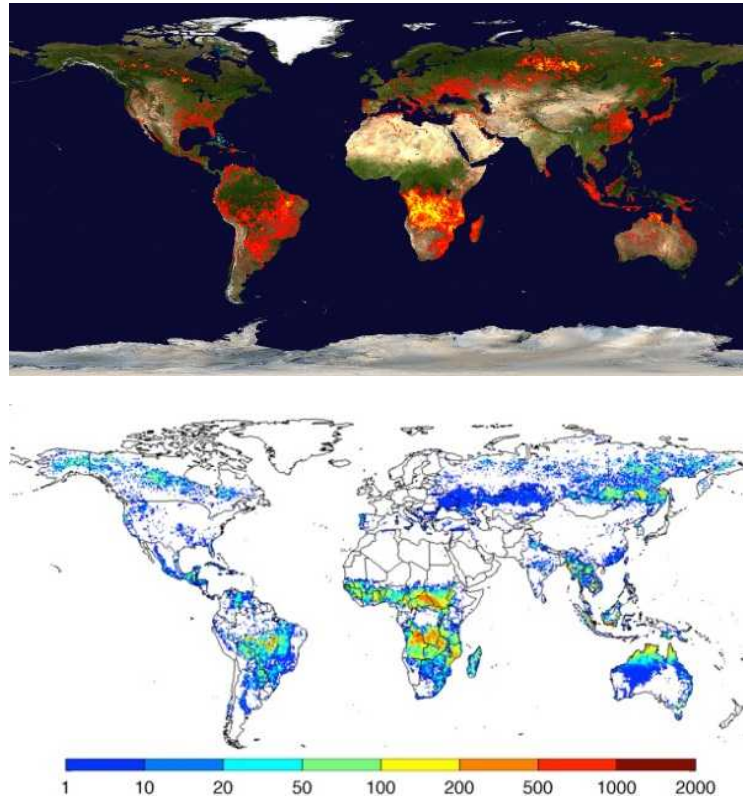
#### （エ）森林火災、泥炭火災

衛星による森林火災の検知については、①火災による高温地帯を短波長赤外線または熱赤外線の観測で検出する、②火災による発光を可視域の観測で検出する、③火災による煙を主に可視域で検出する、の3種類の方法がある。この中で衛星による全球森林火災検知に広く用いられているのは①であり、森林総合研究所が開発した「林野火災発見・通報サポートシステム」

（<http://hinomiyagura.dc.affrc.go.jp/>）、東京大学生産技術研究所と海洋研究開発機構が開発した「WebMODIS アジア・ホットスポット分布図」（<http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/FIRE/>）、JAXAが開発したJASMES地球環境アラートシステム

([http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index\\_j.html](http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_j.html))、米国NASAによる「MODIS Global Fire Map」(<http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/firemaps.cgi>) 等がある。

一方、泥炭火災は、火災による高温部分を直接衛星による検知することが困難であるため、衛星による広域監視は一般に難しい。



図(1)-19 (左) MODIS Global Fire Mapの例 (2012/7/19-7/28)  
(右) GFEDによる1997-2009の平均年間炭素排出量マップ (単位:  $\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ )

## b. フラックス推定

### (ア) 大気輸送モデル

大気輸送モデルの相互比較プロジェクトTransComには世界の10以上の研究機関が参画し、20以上のモデルを使った比較が行われている。TransComは当初は $\text{CO}_2$ 循環モデルの相互比較であったが、現在では $\text{CH}_4$ や $\text{N}_2\text{O}$ の循環モデルによる比較実験も行われている。従来は緯度経度方向の直交座標グリッドの大気輸送モデルのみが使われていたが、最近はNICAMの正20面体グリッドに代表される高解像度化がしやすいモデルを使う動きがある。いずれのモデルでも高解像度化して詳細なフラックスを導出しようとするのが最近の傾向である。またラグランジュ型モデルによって高解像度化・高分解能化を目指す動きもある。より高分解能でのフラックス推定を可能とするために、欧州域などを対象とした領域輸送モデルも開発されている。さらに、大規模輸送計算手法の改良と合わせて、サブグリッドスケールの境界層混合および対流による輸送計算手法の改良も実施され

ている。

日本国内では、国立環境研究所、気象研究所、海洋研究開発機構、産業技術総合研究所などで開発に取り組んでいる。

#### (イ) 陸域モデル

VISIT、ORCHIDEEなどの物理生物過程を数式化してフラックスを算出するprocess based modelと、CASA、BEAMSなどの衛星データ等の観測値に合わせるようフラックスを調整するempirical modelとがあり、多くの種類のモデルが様々な大気輸送モデルとの組み合わせで使われている。process based modelは将来予測の研究に利用可能で、empirical modelは現状把握の研究に適する。陸域生態系のフラックスは全球の炭素循環に与える影響が大きいが、各プロセスの取り扱いや時間・空間分解能の違いによる不確実性の幅も大きいため、現在も発展途上である。最近の陸域モデル比較研究などの結果によると、特に熱帯域の炭素収支評価においてモデル間の違いが大きく、現状で不確実性は100%のオーダーに達する場合もある。

日本国内では、プロセスモデルとしては、VISIT、SEIB-DGVM、BAIMなど、経験的モデルとしては、BEAMSなどが開発・運用されている。

#### (ウ) 海洋モデル

全球炭素循環を考える際に海洋からのCO<sub>2</sub>フラックス分布はT. TakahashiらのグループがpCO<sub>2</sub>を基に算出した気候値を使うことがほとんどである。陸上生態系フラックスのように様々なモデルの組み合わせが存在しないのは、海洋フラックスの時間的・空間的変動が小さいことが要因と考えられる。最近では海洋フラックスの年々変動を炭素循環モデルに組み込むために、OTTMを用いた同化モデル等も使われるようになった。一方海洋からのフラックスの長期変動を推定するために世界で10以上のプロセスモデルが使われている。

日本では北海道大学、海洋研究開発機構、気象研究所などで生態系モデルを組み込んだプロセスモデルが運用されている。

#### (エ) 森林火災、泥炭火災

炭素循環モデルのユーザーにとって、森林火災のフラックスデータは唯一GFEDモデルに頼っているのが現状である。GFEDはCASAなどの陸域生態系モデルで有機物の（燃料の）量を見積もっておき、衛星観測で燃焼面積を判断してフラックスを算出するものである。

#### (オ) 化石燃料起源人為排出量

全球の炭素循環モデルに使われる化石燃料起源人為排出量マップは、CDIACやODIACのように国別排出量の統計値を人口分布や夜間光、経済指標、月別燃料消費データなどを用いて空間的、時間的に展開したものや、EDGARのように地域ごとの燃料の消費量、CO<sub>2</sub>排出係数、空間情報などを組み合わせて積み上げたものがある。後者は高解像度、高時間分解能が達成可能だがアップデートに時間がかかる。前者はその逆であるが、最近では高解像度化も進んでいる。

#### (カ) トップダウンアプローチにおけるフラックス推定

TransComではインバースモデルの比較実験も行われている。大気輸送モデルが世界に20種類以上あることに加えて、インバース計算方法も従来行われていたSynthesisインバージョン、データ同化手法の1つである4DVarとEnsemble Kalman Smoother (EnKS) などがあり、多岐に及んでいる。フォワード計算の比較と同様に、条件を合わせた比較が試みられようとしている。大気輸送モデルの高解像度化やラグランジュ型モデルの使用、さらには、利用可能な観測情報の空間密度の増大によってフラックス推定の空間解像度は高くなる傾向にある。

#### (キ) ボトムアップアプローチにおけるフラックス推定

上記(イ)(ウ)(エ)(オ)の通り。なお、最近では海上および陸上でのCO<sub>2</sub>収支観測網(pCO<sub>2</sub>観測やFLUXNETなど)で得られる多点のデータを empirical model (特に回帰型、学習型と呼ばれるモデル)によってグリッドデータ化する研究が進み、全球モデルの広域検証用データとしても利用され始めている。

### c. データ・モデル統合利用

#### (ア) データベース

人工衛星や地上観測に基づく地球規模の観測を行い、観測データの流通促進をはかる取組に全球地球観測システム(Global Earth Observation System of Systems; GEOSS)がある。国内では、地球観測に係わる各分野の観測データを収集、蓄積、統合、解析するために「データ統合・解析システム(DIAS)」が組織されており、現在は各種観測データのメタデータの共有を推進している。

炭素循環観測の分野ではDIASへのデータ集約はまだ本格的には進んでおらず、現在のところ大気中温室効果ガス濃度であれば温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)、海洋表層CO<sub>2</sub>分圧であれば表層海洋CO<sub>2</sub>アトラス(SOCAT)、陸域生態系炭素収支であればFLUXNETといった分野ごとのデータベースの整備が進められ、各種の統合研究に利用されている。

#### (イ) データ同化システム(ソースシンク評価)

モデルと観測による情報を最適に統合利用する目的で、データ同化手法は気象の数値予報モデルでは古くから使われてきたものであり、ECMWFや気象庁なども4DVarを使って予報精度の向上に役立てている。現在ではこれを炭素循環モデルおよび大気輸送モデルに応用してCO<sub>2</sub>フラックスを推定する研究が増えている。炭素循環研究に係る同化手法としては4DVarだけでなく、Ensemble Kalman Smoother (EnKS) も使われている。米国のCarbon Trackerは大気輸送モデルにTM5を使い fixed-lag Kalman Smootherでデータ同化をしている。

GOSATやAIRSなどの衛星搭載センサにより観測情報量が膨大に増えつつある中で、データ同化システムの重要性は高まっている。日本国内では、国立環境研究所、気象研究所、海洋研究開発機構などで開発に取り組んでいる。



#### d. ホットスポット

気候変化によって炭素循環が大きく変化し、その変化が気候に大きな影響を与える可能性のある地域を、炭素循環におけるホットスポット (Regional hotspots) と呼ぶことがある。Regional hotspotsには、炭素蓄積量が特に大きい地域や、炭素吸収量が気候変化の影響を受けやすい地域が挙げられることが多い。Regional hotspots の例として、GEO Carbon Strategy<sup>6)</sup> には以下のような例が記されている。

##### (ア) 永久凍土 (高緯度) 地域

温暖化により、永久凍土の融解および地中の有機物分解が進むことにより、地中に大量の炭素を蓄積している高緯度の永久凍土地域が温室効果ガス (特にCO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>) の大きな発生源になる可能性がある。関連分野の国内の研究計画に、文部科学省グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 事業の北極気候変動分野「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明」 (<http://www.nipr.ac.jp/grene/>) などがある。

##### (イ) 陸域・海洋のCH<sub>4</sub>水和物 (ハイドレート)

陸域 (永久凍土帯) や海洋 (特に大陸縁辺部) に大量に埋蔵されているといわれるCH<sub>4</sub>ハイドレートが、温度上昇とともに不安定になると、大量のCH<sub>4</sub>が大気へ放出され世界規模での急速な温暖化を引き起こす可能性がある。国内機関の推進する研究プロジェクトには、海洋研究開発機構による「海底資源研究プロジェクト」などがある。

##### (ウ) 熱帯林地帯

気候変化 (特に乾燥化) に伴い森林劣化、森林減少、森林火災の増加などが進むと、地上部および地下部にバイオマスとして炭素を蓄積している熱帯・亜熱帯の森林地域が炭素放出源となる可能性がある。国内機関が推進する熱帯林地帯の観測研究には、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) 「アマゾンの森林における炭素動態の広域評価 (森林総研)」 「インドネシアの泥炭・森林における火災と炭素管理 (北海道大学)」 などがある。また、東南アジアを対象とした Synthesis study には、APNの支援する「Greenhouse Gas Budgets of South and Southeast Asia」 (GCP) などがある。

##### (エ) 北方・熱帯の泥炭地

北方や熱帯における泥炭地は、全陸域の2~3%の面積であるにも拘らず、全土壌炭素の30%程度を有していると推定されている。しかしその炭素蓄積量や炭素蓄積機構の脆弱性についてはまだ十分に解明されていない。また気候変動による降雨量減少・土壌水分量減少・落雷頻度の増加が火災の発生件数及び火災による炭素放出量の増大につながる可能性も指摘されている。

熱帯の泥炭地については、(ウ) 項に記載された「インドネシアの泥炭・森林における火災と炭素管理」プロジェクトで研究が進められている。

##### (オ) 南大洋 (Southern Ocean)

成層圏のオゾン減少と大気中CO<sub>2</sub>濃度の上昇が同時に起こることにより、南半球環状モード (SAM)

と呼ばれる大気循環が活発になり、海洋深層から表層への炭素に富んだ水の流れが加速し、結果として海洋表層の $p\text{CO}_2$ が増加し海洋への $\text{CO}_2$ 吸収量が減少するという説がある。

#### e. 略語一覧

4DVar (Four dimensional variational data assimilation)  
AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)  
ALOS (Advanced Land Observing Satellite)  
APN (Asia-Pacific Network for Global Change Research)  
Aqua: (EOS PM-1) a multi-national NASA scientific research satellite  
AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)  
BEAMS (Biosphere Model integrating Eco-physiological and Mechanistic Approaches using Satellite Data)  
CarbonSat (Carbon Monitoring Satellite)  
CASA (The Carnegie Ames Stanford Approach)  
CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center)  
CFC (Carbon Fiber Reinforced Carbon)  
CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner)  
DIAS (Data Integration and Analysis System)  
DGVM (Dynamic Global Vegetation Model)  
ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)  
EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research)  
EnKS (Ensemble Kalman Smoother)  
ENVISAT (Environmental Satellite)  
ESA (European Space Agency)  
FLUXNET: a global network of micrometeorological tower sites  
FTS (Fourier Transform Spectroscopy)  
GAW (The Global Atmosphere Watch)  
GCOS (Global Climate Observing System)  
GCP (The Global Carbon Project)  
GEO (Group on Earth Observations)  
GEOSS (The Global Earth Observation System of Systems)  
GFED (Global Fire Emissions Database)  
GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite)  
GRENE (Green Network of Excellence)  
IAGOS (In-Service Aircraft for the Global Observing System)  
ICOS (Integrated Carbon Observation System)  
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)  
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

NICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmosphere Model)  
NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)  
NASA (National Aeronautics and Space Administration)  
OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory 2)  
ODIAC (Open source Data Inventory of Anthropogenic CO<sub>2</sub> emission)  
ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems)  
PALSAR (Phased Array L band Synthetic Aperture Radar)  
SAM (Southern Annular Mode)  
SAR (Synthetic Aperture Radar)  
SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development)  
SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography)  
SOCAT (The Surface Ocean CO<sub>2</sub> Atlas)  
TanSat (Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite Mission)  
Terra: (EOS AM-1) a multi-national NASA scientific research satellite  
TM5: Global Chemistry Transport Model, Tracer Model 5  
TransCom (The Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project)  
UEA (University of East Anglia)  
VISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace Gases)  
WDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases)  
WMO (World Meteorological Organization)

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

炭素循環変動の把握およびホットスポット変化の早期検出を目的とした観測・評価システム構築に関し、研究を実施すべき事項を網羅的に示すことにより、今後のわが国における本分野の研究戦略を提示した。

人為的な起源から排出された主要な温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>が、さまざまな気候条件、環境条件のもとで、どのように大気、海洋、陸域に配分され、分布・蓄積されていくのかを正確に評価しモデル化すること、また、炭素循環のいわゆる「ホットスポット（地球温暖化に伴う気候変化を原因として、炭素循環機構に変化をもたらし、さらにそれが地球温暖化を加速させる可能性のある地域など）」の微小な変化を早期に検出し世界に向けて発信することは、地球温暖化問題の効果的な解決にむけた国際的な環境政策に対するわが国からの重要な貢献となる。本研究で提案する研究ロードマップは、これらの目的達成のために炭素循環変動の把握を可能にするモニタリング・評価システムの構築を目指すものである。

一方、このようなモニタリング・評価システムの構築は、領域別、国別の正味の吸収排出量や大都市圏・固定大規模発生源からの排出量のモニタリングや、REDD+に関係する森林域における炭素収支の評価に用いられる可能性を有しており、環境行政にとって重要な貢献となり得る。

わが国の置かれている地理的、地政学的な観点からも、わが国としてはアジア・太平洋域を主たる対象として、科学的な情報を発信していくことが、国際的な環境政策を進めて行く上で極めて重要と考えられる。

例えば、数年に一度、自然現象として発生するエルニーニョ期間中に、熱帯地域で頻発する森林火災に伴うCO<sub>2</sub>の発生量は、種々の方策で保全される森林からのCO<sub>2</sub>の発生量削減の効果を相殺してしまうとも見積もられている。これは、化石燃料の消費や人為的な土地利用変化などによるCO<sub>2</sub>の発生量を正確に見積もることと同時に、自然によるCO<sub>2</sub>の吸収・排出の実態を科学的に把握すること、当該分野の研究を総合的に推進することの重要性を端的に示す一例と言える。

各府省・機関が個別に研究計画を立案し実施するに当たっても、本研究戦略を参考にし、研究課題の重複や欠落を避け、また協力関係を築くことでより有効な研究が実施できるものと期待される。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

### <行政が活用することが見込まれる成果>

政策決定者向けサマリーとして、本研究で得られた研究成果を環境省等の行政が行う政策立案につなげるための参考資料として以下の内容を提示する。

#### 統合的観測・評価システムの構築によるアジア・太平洋域の炭素循環の変化の早期検出

将来の地球環境変化を予測するため、全球気候モデルを用いた研究が進展し、大きな成果が生まれつつある。地球温暖化予測の高精度化に不可欠な全球炭素循環の不確実性をさらに低減させるとともに、炭素循環変化の早期検出、および炭素管理の意思決定が与える効果の評価が求められている。

これまでに、温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）を始めとする地球環境観測衛星、航空機（CONTRAILなど）、船舶、地上観測ネットワーク等を利用した温室効果ガスの観測が行われ、多様なデータが蓄積されている。また、観測された大気中温室効果ガス濃度と大気輸送モデルを用いて、大気の側から領域毎の温室効果ガスの地表面正味収支を推定する手法（トップダウンアプローチ）や、地表付近で観測された温室効果ガス収支を衛星データや植生生態モデルを用いて広域化する手法（ボトムアップアプローチ）の研究も発展している。しかし、それぞれ空間分解能、時間分解能、速報性などに固有の限界があることから、環境政策の立案に活用されるまでには至っていない。そこで、トップダウン・ボトムアップの各手法の高精度化を図ると同時に、両手法を統合することにより多様な観測データを取り込み、温室効果ガス収支の全球分布をオペレーショナルに評価する実用的な手法を確立することが喫緊の課題である。

急ぎ実現すべき課題は、第一に、全球、特にアジア太平洋域でこれまでに豊富に得られている衛星・航空機・船舶・地上観測による多様なデータを統合し、これらのデータを解析システムに融合して観測値と計算値が最も整合するよう解析システムの各種パラメータを自動的に調整する技術を開発すること（統合炭素循環観測・評価システムの構築）である。第二に、このシステムを用いて、国別・地域別の炭素収支の精緻な評価を行うと同時に、炭素循環のいわゆるホットス

ポット（気候変化が炭素循環を変化させ、それが気候変化を加速させる地域）の微小な変化を早期検出することである。炭素循環の変化を早期発見しその影響の可能性を世界に向けて発信することは、国際社会に対し温暖化対策の緊急性を強く訴えることとなり、持続可能な地球環境と社会の実現に向けた貢献となる。また、例えば途上国の森林地域について空間分解能を上げた評価を行うことにより、REDD+（開発途上国における森林減少・劣化等による温室効果ガス排出量の削減）および炭素クレジット化の検討に対し定量評価と科学的知見を提供することが可能となる。

### フラックス観測ネットワーク構築によるアジア・太平洋におけるメタン（CH<sub>4</sub>）・亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）の動態把握

温室効果ガスのうち、二酸化炭素に次いでその温室効果が高いとされるメタン（CH<sub>4</sub>）や亜酸化窒素について、その収支の把握や将来予測に関する研究が遅れており、環境政策立案に十分な貢献が出来ていない。その中で、温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）による大気中CH<sub>4</sub>濃度の観測が始まり、これまでに蓄積されてきた航空機、船舶、地上ステーション等によるCH<sub>4</sub>濃度観測データと併用し、大気輸送モデルを用いて大気の側からの地表の温室効果ガス発生量分布を推定する手法（トップダウンアプローチ）の開発・改良が進んでいる。一方、地表におけるCH<sub>4</sub>の発生源は時間的にも空間的にもきわめて非一様であることから、地表でのCH<sub>4</sub>フラックスの観測データをモデルやリモートセンシングデータを用いて広域化する手法（ボトムアップアプローチ）には未だ非常に大きな不確実性が含まれる。

こうした背景のもと、近年、応答速度が速く、従来に比べて野外でも安定にCH<sub>4</sub>濃度を連続測定できる分析計の改良が進展したことにより、渦相関法（オープンパス型）、簡易渦集積法などの微気象学的方法により、陸上でCH<sub>4</sub>フラックスを長期観測する観測点の数が増え、データの蓄積が始まっている。そこで、アジア太平洋域におけるCH<sub>4</sub>フラックスの観測サイト、およびCH<sub>4</sub>フラックスと同時に観測されることの多い亜酸化窒素（N<sub>2</sub>O）のフラックス観測サイトの情報を収集し、観測サイトのネットワークを構築し、既存のデータ収集を開始する。同時に、まだ観測手法が標準化されていないCH<sub>4</sub>・N<sub>2</sub>Oフラックスについて、観測手法の標準化とデータベース構築を行い、CH<sub>4</sub>フラックスの時空間変動を把握しその要因を明らかにするための統合解析（サイト間比較研究）を実施する。アジア太平洋域において二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）に比べて遅れているCH<sub>4</sub>の統合解析が進むことにより、CO<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>を同時に用いたトップダウンアプローチ・ボトムアップアプローチの高度化が進み、CH<sub>4</sub>の発生源の評価における現状の不確実性を格段に低減することが可能になる。

### アジア・太平洋域における炭素循環の変化の早期検出、並びに炭素管理の意思決定の効果を評価する上で必要十分な長期観測システムの構築

脱温暖化にかかる環境政策推進の観点から、気候変化に伴う全球、特にアジア太平洋域における炭素循環の変化を早期検出するため、並びに炭素管理の意思決定の効果を評価するための、最適な観測・評価システムを確立する。

第一に、南・東南アジアにおける温室効果ガス観測の強化を行い、衛星観測（GOSAT・GOSAT-2ほか）・航空機・船舶・地上ステーションに基づく温室効果ガスの観測網を確立する。アジア太平洋域の炭素循環とその変化を把握する上で、南・東南アジアが温室効果ガス観測の空白域であることは、衛星観測をもってしてもこの地域が雲の影響でそのデータ取得率に限界があることか

ら、最大の障害となっている。そこで、温室効果ガスの濃度とフラックス双方を観測する総合的な地上観測点を増強・整備すると同時に、航空機と船舶による観測も強化する。

第二に、異なる時間・空間スケールで収集される観測データを省力的に収集・品質管理し、全球及びアジア太平洋域の炭素循環を対象とした統合的観測・評価システムに短時間で提供可能にするオペレーショナルなデータシステムを構築する。

これらの体制強化に際して、炭素循環やホットスポットの変化の早期検出に必要な観測体制（ネットワーク）の最適化設計を行う。特に、大気・海洋・陸域における現状のデータに基づく炭素収支評価の精度限界、観測空白域の解消がもたらす精度向上の定量評価、さらに最適かつ現実的な観測体制の提案を行うため、「観測システムシミュレーション実験」を実施する。また、こうした観測システムシミュレーション実験を用いることにより、特定地域の問題解決に向けた最適な観測システムを設計することが可能となる。例えば、途上国の森林地域での炭素収支の変化を高い空間分解能で評価し、REDD+（開発途上国における森林減少・劣化等による温室効果ガス排出量の削減）および炭素クレジット化の検討に対し定量評価と科学的知見を提供するための観測システム設計などである。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

## 7. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

#### <論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない

#### <査読付論文に準ずる成果発表>（「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可。）

特に記載すべき事項はない

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

### （2）口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない

### （3）出願特許

特に記載すべき事項はない

### （4）シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない

**8. 引用文献**

- 1) IPCC, 2007: IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告書 技術要約 (気象庁訳)  
([http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc\\_ar4\\_wg1\\_ts\\_Jpn.pdf](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_ts_Jpn.pdf))
- 2) Global Carbon Project, 2012: Carbon Budget 2012: An annual update of the global carbon budget and trend, <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/index.htm>
- 3) Le Quéré, C., R. J. Andres, T. Boden, T. Conway, R. A. Houghton, J. I. House, G. Marland, G. P. Peters, G. van der Werf, A. Ahlström, R. M. Andrew, L. Bopp, J. G. Canadell, P. Ciais, S. C. Doney, C. Enright, P. Friedlingstein, C. Huntingford, A. K. Jain, C. Jourdain, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, S. Levis, P. Levy, M. Lomas, B. Poulter, M. R. Raupach, J. Schwinger, S. Sitch, B. D. Stocker, N. Viogy, S. Zaehle, N. Zeng, 2012: The global carbon budget 1959- 2011, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 5, 1107- 1157, [www.earth-syst-sci-data-discuss.net/5/1107/2012/](http://www.earth-syst-sci-data-discuss.net/5/1107/2012/) doi:10.5194/essdd-5-1107-2012  
(manuscript under review)
- 4) Jones, C., Robertson, E., Arora, V., Friedlingstein, P., Shevliakova, E., Bopp, L., Brovkin, V., Hajima, T., Kato, E., Kawamiya, M., Liddicoat, S., Lindsay, K., Reick, C., H., Roelandt, C., Segschneider, J., & Tjiputra, J. (in press). 21st century compatible CO<sub>2</sub> emissions and airborne fraction simulated by CMIP5 earth system models under 4 representative concentration pathways. *Journal of Climate*.  
doi:10.1175/JCLI-D-12-00554.1.
- 5) 環境省, 2012: 平成24年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書, 日経印刷, pp.442.
- 6) Ciais, P., Dolman, A. J., Dargaville, R., Barrie, L., Bombelli, A., Butler, J., Canadell, P., Moriyama, T., 2010: *Geo Carbon Strategy* Geo Secretariat Geneva, /FAO, Rome, 48 pp.

## **Drawing a Research Road Map toward Understanding Carbon Cycle Changes by Integrating Global Environment Observational Data and Models**

Principal Investigator: Yasuhiro SASANO

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2444 / Fax: +81-29-850-2645  
E-mail: sasano@nies.go.jp

[Abstract]

**Key Words:** Climate change, Predicting global-scale variations, Observing and predicting natural phenomena, Earth environmental observation, Carbon cycle, Research roadmap

A research road map was proposed aiming at identifying primary issues and tasks that must be undertaken to accelerate the development of an effective system for observing and evaluating the impacts of climate-carbon cycle feedbacks. This road map provides a way forward for achieving a better estimation of the global carbon cycle and detecting its changes by suggesting a list of required studies including not only scientific targets but also infrastructures that allow us to find minor signs of the changes. A committee was established to review the road map based on discussions at three meetings in the fiscal year of H24. The discussions covered the following topics.

Critical regions and effective indices were identified particularly in the Asia-Pacific for detecting changes in the carbon cycle. Based on a review of published papers and preliminary analyses, areas that should be monitored were suggested for early detection of the impacts of climate-carbon cycle feedbacks. Effective parameters such as various precipitation and vegetation indices were proposed to detect potential hotspots for climate change.

Next, plans were suggested to integrate various observational data and models for developing a system for early detection of carbon cycle changes. Based on the integration of satellite observations including GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite), airborne and ground-based observations, and atmospheric, oceanic, and terrestrial carbon cycle models, the primary issues and tasks were identified to accelerate the development of an effective system for observing and evaluating the impacts of climate-carbon cycle feedbacks. Scientific and technological issues were also highlighted to improve methods for optimizing model parameters using the observational data.

Finally, a road map was proposed for achieving a better estimation of the global carbon cycle and the impact of climate-carbon cycle feedbacks. A list of required studies



was proposed including not only scientific targets but also infrastructures that would allow us to find minor signs of the changes. The target area was the whole globe, with an emphasis on the Asia-Pacific and the critical areas of potential hotspots suggested by the present study.

# RFa-1202 地球環境観測データとモデル統合化による炭素循環変動把握のための研究ロードマップ策定

## 研究の概要

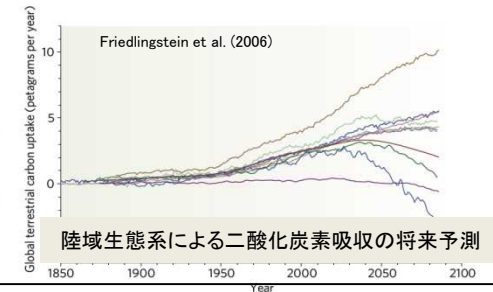
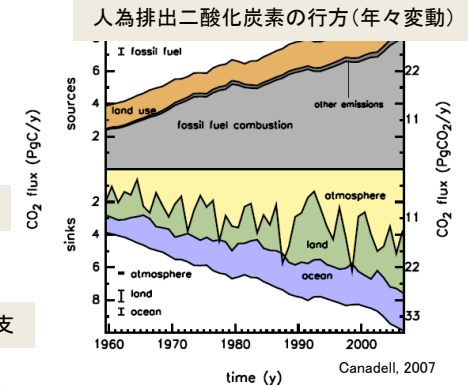
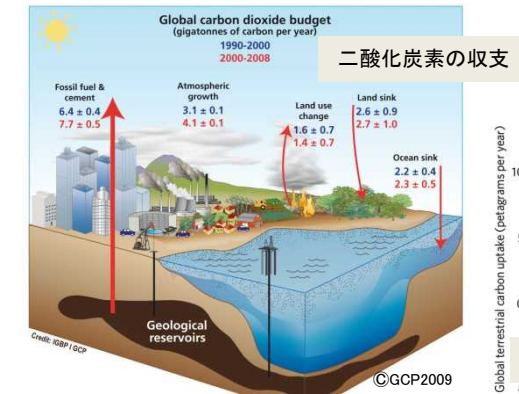
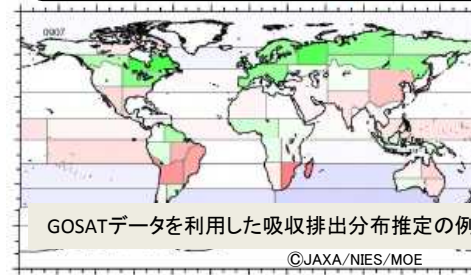
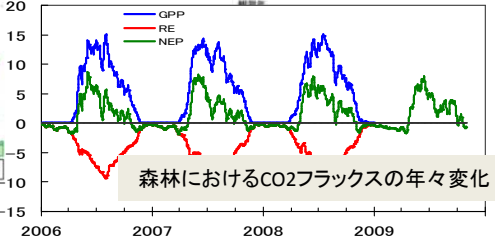
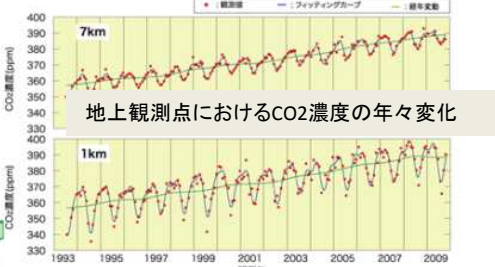
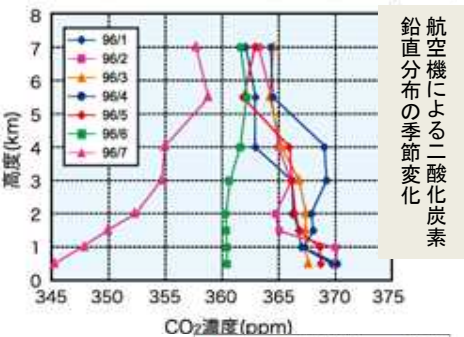
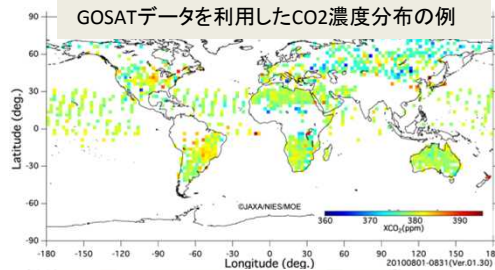
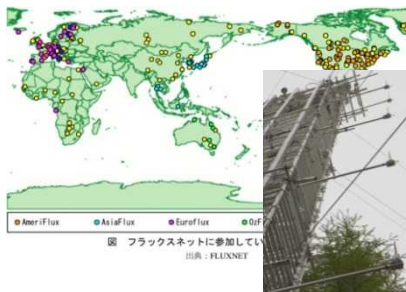
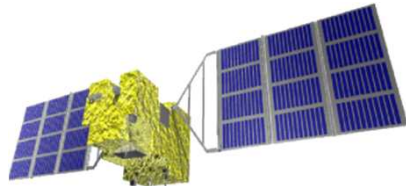
3次元・広域にわたる  
多様な観測プラットフォーム

大気輸送・炭素循環  
モデルの活用

多様な観測データ  
(地球環境研究センター  
モニタリング事業より例示)

二酸化炭素の地域別吸収排出  
量の算出、炭素循環の把握

気候変化が炭素循環に与える  
影響(フィードバック)の解明



## 達成目標

- (1) 炭素循環変動の把握において有効と考えられる対象領域や指標の特定と研究ロードマップの策定
- (2) 各種観測データと数値モデルの統合的利用による炭素循環変動の導出手法の改良・開発に関する研究課題の抽出
- (3) 炭素循環変動の把握と影響評価に関する研究課題の抽出

## ロードマップ策定の例

- 炭素循環把握を目的として地上・衛星データを準リアルタイムで収集し、品質管理と標準化を統合的に行う手法の開発
- 数値計算モデルに各種観測データを適切に融合し、パラメータ最適化を高速化する手法の研究
- 次世代モデルを用いてアジア太平洋～全球の炭素循環の変動を把握し、気候変動の影響を高い確度で評価する研究