

気候変動研究の戦略的推進について

平成 16 年 11 月 29 日

地球温暖化研究イニシャティブ (気候変動研究分野)

はじめに

地球温暖化研究における気候変動分野の研究は、3つの理由により俯瞰的立場から立案された計画に基づく戦略的推進が必要である。

- (1) 気候変動に関連する研究分野は多種多様であり、個別の研究分野の中での研究者による自律的な調整だけでは、包括的かつ整合的に研究領域全体を過不足なくおおって発展させることが難しい。
- (2) 研究成果を研究者社会に提示するだけでなく、政策決定者に示して政策立案に対する科学的基盤を与え、また一般社会の人々に示して行動規範の基盤を与えることが要請される。そして、政策決定者は具体的政策につながり、一般市民は行動規範につながる包括的、整合的かつ具体的な知識を必要としている。
- (3) 気候変動に関連する研究課題は多種多様で、限られた研究資源の下でそのすべてを推進することは不可能であり、研究課題の重要性および研究資源の有効性の下で優先度を設定せざるを得ない。

この要求に応じて、米国では200頁に及ぶ詳細なStrategic Plan for Climate Change Science Program を作成し、英国ではUK National Strategy for Global Environmental Researchを作成して、戦略的推進を図っている。我が国では、総合科学技術会議が策定した「科学技術基本計画に基づく分野別推進戦略(平成13年9月)」の中の「環境分野」に戦略的推進方策が与えられているが、ここでは研究開発目標が抽象的に示されており、これを具体的な研究課題に接続することは、各府省、各研究機関および各研究者の判断にゆだねられている。結果として、研究課題の大半がボトムアップの形で研究推進されているのが実態である。

気候変動研究を戦略的に進める場合にも、ボトムアップによって優れた研究提案を取り上げることは重要である。しかし、研究の大半がボトムアップであってはならない。そして、提案された研究課題であっても、それを全体の推進計画の中に位置づけし、あるいはそれを取り込んで推進の枠組みを改訂し、全体として整合性を維持しつつ研究を進展させることが必要である。

この要求に応えるため、地球温暖化研究イニシャティブ(気候変動研究分野)において、研究者の立場から俯瞰的に見た戦略的研究計画のあり方を、座長を中心にまとめ、環境研究開発推進プロジェクトチームに報告した。今後、この「気候変動研究の戦略的推進について」が関連する研究者の意見や地球環境研究を取り巻く状況の変化に応じて改訂され進化を遂げることを期待するとともに、関連する研究者社会(コミュニティー)の戦略的推進計画の基本的な考え方と位置づけて、関係各方面の指針として活用されることを希望する。

平成16年11月

総合科学技術会議
地球温暖化研究イニシャティブ
気候変動研究分野前座長
市川惇信
気候変動研究分野座長
小池勲夫

目次

はじめに

I. 総論－基本的考え－	1
1. 気候変動研究の重要性	
2. 戦略的研究推進の必要性	
3. 戦略的研究計画の策定とその推進体制	
4. 分野横断的事項	
II. 地球観測	10
1. 総合科学技術会議における「地球観測のあり方」の検討	
2. 必要性の区分	
3. 今後10年程度の重点事項	
4. 技術開発の課題	
5. 留意事項	
III. 気候変動に関わるプロセス研究	16
1. 基本的事項	
2. 研究すべき事項	
3. 実現の方策	
IV. 地球環境モデリング・将来予測	24
1. 気候変動予測研究のあり方－総合化と個別過程研究の深化	
2. 優先度の高い研究課題	
3. 研究推進体制	
V. 影響・リスク評価	28
1. 影響・リスク評価研究のあり方	
2. 研究すべき事項	
VI. 抑制・適応政策	33
1. 抑制・適応政策研究のあり方	
2. 研究すべき事項	
VII. 提言	37
1. 全般的事項	
2. 地球観測	
3. 気候変動に関するプロセス研究	
4. 気候変動モデリング・将来予測	
5. 影響リスク評価	
6. 政策研究	

I. 総論－基本的考え方－

1. 気候変動研究の重要性

気候変動研究の目的は、

- 気候とそれに関連する諸現象を観測・解析し、気候システムに関する包括的かつ整合的な科学的知識をより確かなものとし、気候変動をもたらす主要な自然要因と人為的要因を明らかにし、
- それらの知見を総合して、今後予想される自然要因の変動と今後の人為的要因の操作の下での短期的および中長期的な気候変動の予測の不確定性を減少させると共に、その予測の限界を明らかにし、
- 予想される気候変動の人類の活動や自然生態系に対する影響を評価するとともに、許容される気候変動の範囲を明らかにし、
- 予想される気候変動を人類の安寧な存続と文明の持続を許す範囲に安定化する緩和策(削減策)および、変動の影響に適応する方策を決定するための科学的基盤を与えることにある。

気候変動は人類を取り巻く自然環境変化の主要な部分を構成し、かつ他の多くの環境変化を引き起こす主要な要因となり、それらを通して、数千年来の気候に適応してきた人間の社会的活動、とくに経済的活動に大きな影響を与える。気候変動への対処は人類の生存と文明の持続にとって現在もっとも重要な課題の一つである。

気候システムは宇宙圏、地球圏、生物圏、人間活動圏における諸現象が要素となり相互作用を持ちながら構成される巨大かつ複雑なシステムである。気候システムは巨大であることから大きな慣性を持ち、変動要因がシステムに生起してからその結果が顕在化するまでに長い時間がかかる。また、複雑であることから、ある時点での状態の微少な変動が将来におけるきわめて大きな変動を引き起こし回復不可能な転移を招来する恐れがある。したがって、顕著な気候変動が観測され始めてからそれに対応することでは、気候変動を望ましい範囲に安定化することは著しく困難かあるいは不可能であると考えられている。

気候変動を引き起こす外生的要因としては、太陽放射の変化や火山噴火などの自然に生起する要因と温室効果気体の放出などに代表される人為的要因とがある。このいずれの要因による変動であっても、気候変動を人類とその文明が許容する変動速度と範囲に安定化させるためには、図1に示すように、自然要因と人為的

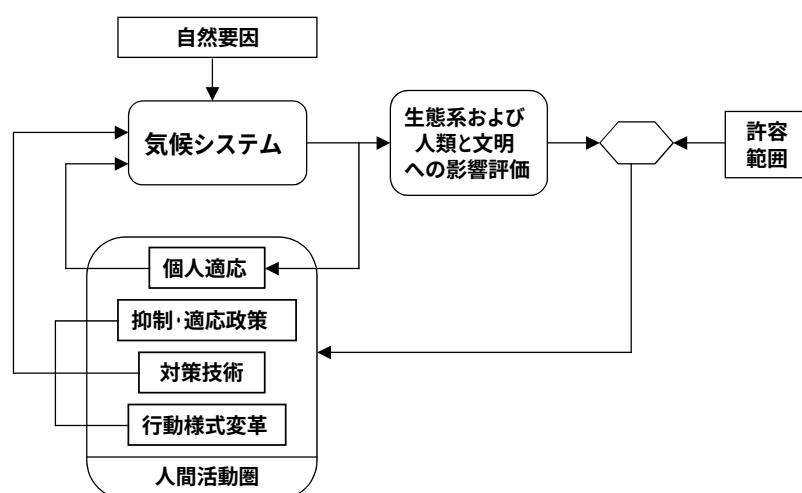


図1 気候システム

要因により引き起こされる変動を予測し、その影響が及ぶ範囲と程度を明らかにし、予測される気候変動が生態系および人類とその文明が許容できる変動範囲に安定化されるように人為的要因を操作する必要がある。

以上のことから、科学的知見に基づいて気候変動を許容できる範囲に抑制・安定化し、避けられない範囲の変動の影響に適応しようとする気候変動研究は、現在人類が直面する最大の課題の一つを解決するために、きわめて重要かつ緊急性の高い研究分野である。

2. 戦略的研究推進の必要性

気候変動研究は次の3つの特徴を持つ。

- 気候が、既に述べたように、きわめて多種多様な現象が関連する複雑なシステムであることから、伝統的な研究分野にみられるように、研究成果が個別の分野の学術的メディアに報告され、それに基づいて研究者が次に展開すべき研究テーマを策定する、という研究者社会の中での自律的調整だけでは、その目的を達成できない。
- 気候変動研究は、気候変動に対処する具体的方策の基盤を与える研究分野である。政策決定者は具体的政策の基盤となる、一般社会の人々は行動規範の基盤となる、包括的、整合的かつ具体的な知識を必要とする。そのため気候変動研究は、研究成果を研究者社会に提示するだけでなく、政策決定者に示して政策立案に対する科学的基盤を与え、一般社会の人々に示して行動規範の基盤を与えることが要求される。
- 気候に関連する研究課題は多種多様で、限られた研究資源の下でそのすべてを推進することは不可能であり、期待される研究成果の重要性および研究資源の有効性の下で優先度を設定せざるを得ない。

これらのことから、気候変動研究を戦略的な計画の下で推進する必要がある、国の政策を決定し、国民の生存基盤を確保する責任がある国のレベルでの戦略的研究計画の策定は不可欠である。国のレベルでの戦略的研究計画の下で、各府省、研究機関および研究者・研究グループは顕在的および潜在的に連携して研究活動を展開する必要がある。

【海外の状況】

米国においては、1990年にGlobal Change Research Actに基づいてUnited States Global Change Research Program (USGCRP) が制定され、これに基づいて気候変動研究の戦略的推進が開始された。2001年5月にBush大統領はNational Research Council (NRC) に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第3次評価報告書に示される気候変動予測の精度に関して諮問を行い、その答申を得て2001年6月にClimate Change Research Initiative (CCRI) を設置し、気候変動予測の不確定性を減少させる上で効果的な優先的課題を検討させるとともに、科学的研究と政策との整合性を図ることをその任務とした。2002年2月にはUSGCRPとCCRIの上部組織としてClimate Change Science Program (CCSP) を設定した。CCSPは約1年をかけて、2003年7月に関連する国内外の研究者の意見も取り入れた200頁におよぶ詳細なStrategic Plan for the Climate Change Science Programを公表した。今後はこの線に沿って気候変動研究が推進されることとなろう。すでに、この戦略プランに沿って、エビアン・サミットにおいて地球観測に関する国際協力事業を提案しており、その具体化が国際的に進められている。

英国においては、1990年に省庁横断の機構として Inter-Agency Committee on Global Environmental Change (IACGEC) が設置され、8機関と4研究カOUNシルの間で研究課題と研究資源配分の調整を図ってきている。1996年9月には UK National Strategy for Global Environmental Research -Report of Expert Panel- を公表し、戦略的な研究計画を推進している。1997年に行われた IACGEC の評価では、この機構が効果的に機能しており、今後もこれを継続するのが適当であるとしている。

気候変動に関する国際的研究活動として、International Geosphere Biosphere Programme (IGBP)、International Human Dimensions Programme (IHDP)、World Climate Research Programme (WCRP)をはじめとして、その下に、あるいはそれと独立に、多数の研究プログラムが存在する。これらはそれぞれ戦略的な研究計画をもち、各国分担して研究活動を進めている。また、IPCC は、得られた研究成果を包括的に評価し、現状において最も信頼できるとする気候変動の予測、変動の影響および抑制・適応の方策を評価報告書として公表しており、現在は第4次評価報告書の作成に向けて準備に入っている。

とくに地球観測に関しては、先述のように、エビアン・サミットにおいて国際協力事業の提案があり、参加各国の間で事業の具体化に向けて準備作業が進められている。この事業は Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)と名付けられ、Group on Earth Observation (GEO)が暫定的な組織として実施に向けて準備を進めている。

我が国は、これらの国際的共同研究事業のうち、政府レベルの国際機関が主宰し政府として参加しているものについてはある程度組織的対応がなされているものの、非政府の国際研究組織が主催しているプログラムについては、研究者の個人レベルの参加にとどまっている現状にある。さらに、国際協力プログラムに参加するだけでなく、我が国からプログラムを提言して主体的な推進を図るためには、我が国の研究者社会として気候変動研究に関する戦略的計画をもつ必要がある。

【我が国における状況】

平成13年3月に閣議決定された第II期科学技術基本計画において、研究開発の重点化が図られ4つの重点分野が指定された。これを受けて重点分野の推進戦略を定めた「科学技術基本計画に基づく分野別推進戦略」が平成13年9月に総合科学技術会議から公表された。重点分野の一つである環境分野については、問題点として、各省における縦割りの個別研究の傾向、基盤的研究の整備が不十分、社会科学、人文科学と自然科学との連携が不十分、人材の不足、国際的取り組みへの対応が不十分、の5つが指摘された。これらの問題点のうち、第一の縦割りの個別研究の問題を解決するために、府省横断型のイニシャティブという研究体制により環境研究を推進することとされた。

気候変動研究に関しては「地球温暖化研究イニシャティブ(気候変動研究分野)」(以下「イニシャティブ」)が置かれた。そこでは、今後5年間には「気候変動枠組条約の第一約束期間(2008年-2012年)で我が国の二酸化炭素排出量の1990年比6%減を実現するための技術を可能とするとともに、第2約束期間(2012年以降)を見据えた地球温暖化防止対策の検討に資するため、人類や生態系に危機を及ぼさないような大気中の温室効果気体の排出シナリオを提示すること」、さらに、中長期的には「気候変動枠組条約の最終的な目標を

達成するための継起的意思決定に資する科学的知見および技術的基盤を国際的協調のもとで提供すること」が目標として設定され、この目標達成のために、イニシャティブの下に(1)温暖化総合モニタリング、(2)温暖化将来予測・気候変化、(3)温暖化影響・リスク評価、および(4)温暖化抑制政策の4つの研究プログラムが設定され推進されてきており、現在第3年次の途上にある。

この間のイニシャティブ研究推進の経験から、イニシャティブの目標を達成するためには、戦略的研究推進計画を立案し、各府省各研究機関から個別に研究課題が申請されるに先だって関連する研究者に提示することが必要である、との結論に達した。この線に沿って、関連研究者の参画を得てイニシャティブ会合座長の責任において、今後10年ほどにわたる戦略的推進計画の原案をとりまとめたものがこの推進計画である。

3. 戦略的研究計画の策定とその推進体制

【気候変動研究の機能】

気候変動研究の成果が、図 1 に示す気候システムにおいて、気候変動を安定化し、あるいは気候変動に適応する施策の基盤となり得るためには、次の機能をもつ必要がある。

- 観測 (研究観測・定常観測) 機能： 地球の過去から現在に至る状況を把握し、気候変動研究にとって必要なデータを取得し、蓄積し、流通させる。ここにいう必要なデータには、観測した原データから必要とする情報を抽出して得る高次データが含まれる。また、自然科学的なデータだけでなく、必要となる社会経済的データも対象となる。
- プロセス研究機能： 気候システムを構成するサブシステムの過程と機構を、「仮説 (理論) 形成と観測・実験による実証のループ」という伝統的な科学の方法に基づいて明らかにする、
- 気候変動の将来予測の機能： 観測結果として得られる過去から現在に至る気候の状況およびプロセス研究の成果である気候サブシステムに関する知見を統合して気候モデルを作成し、計算機上に気候システムを実現して将来の気候変動を予測すると共に、予測の限界についての知見を得る。
- 影響・リスク評価の機能： 気候変動の将来予測に基づいて、それが人間活動に及ぼす影響を評価するとともに、人間活動にとって許容し得る気候変動の範囲を推定する。
- 抑制・適応政策研究の機能： 気候変動が人間活動にとって許容し得る範囲にとどまるよう気候システムへの人為的入力決定し、それを実現する抑制政策、避けられない気候変動に対する適応政策、および社会的行動規範を策定する。

これらの機能が研究推進上の核となる機能となる。

気候変動研究の特徴である戦略的推進、多種多様な領域の相互関連、および研究者以外の顧客の存在から、次に示す横断的機能とそれを実現する体制が必要となる。

- データ管理機能： 上記 5 つの機能の間の情報の流通を実現し、研究者、政策決定者および一般社会の人々が必要とする情報を必要なときに必要な形で取得することを可能とする「気候変動情報システム (仮称)」を形成・運営する。
- 評価・広報機能： 研究の成果として発生する情報の品質管理を行い、情報システムへの入力を管理するとともに、それらの情報を統合して、人類として得られている気候変動

に関する科学的知見を提示する「気候変動専門家パネル (JPCC) (仮称)」を設置する必要がある。

先のパラグラフに示される気候変動研究に関するすべての機能が構造化され所期の性能を実現するとともに、相互に密接に関連して統合された研究システムとして推進されるよう、「計画／実行／評価」のマネジメント・サイクルを回す「統合推進」の機能が不可欠である。ここでは次の各機能が実現されている必要がある。

- 気候変動研究に関するすべての機能が整合的に推進されるよう計画の修正と再評価を恒常的に行う。
- 国際的共同研究の日本における中核として、我が国としての国際共同研究への有効な参画と多くの国際的協力を横断した全体的調整を行う。

統合推進機能を実現する構造は2つある。

- 米国の USGCRP, USCCSP に見られるように、関連する部署を統合して一つの体制を作り、そこがマネジメントを行う。この形態は、我が国では「南極地域観測統合推進本部」に見ることができる。
- 英国の IACGEC に見るように府省横断型の委員会あるいは協議会を設置し、そこにおいてマネジメント・サイクルを回す。この形は、部分的実現としては、総合科学技術会議の温暖化研究イニシアティブ(気候変動分野)に見ることができる。この場合には各府省・各研究機関の研究課題を束ねるだけでなく、戦略的推進全体に関わる事業に展開する必要がある。

いずれの形をとるにせよ、気候変動研究が整合的に推進されるためには、統合推進機能は、間接的にせよ予算申請権をもち各研究課題に予算配分できることが必要である。

【気候変動研究の対象範囲】

気候変動研究の対象範囲は、次の空間的および時間的広がりをもつ。

- 空間的広がり: 宇宙(太陽放射, 太陽風), 大気(超高層, 大気, 成層圏, 対流圏) 海洋(表層, 中層, 深層, 層間混合, 地球規模熱塩循環など), 陸域, 雪氷圏
- 外生変動要因: 太陽放射, 太陽風, 地軸変動, 火山活動など
- 内生変動要因: 地球圏(大気, 海洋, 陸域), 生物圏, 人間活動圏
- 時間的広がり: 古気候とそれに関係する古環境から約 100 年後まで。ただし、海洋におけるコンベア・ベルト(海洋大循環)の変化など、将来の気候に深刻な影響を与えると見込まれる事象については、数百年数千年の将来を視野に入れる必要があろう。

【気候変動研究のあり方】

地球観測は、先のパラグラフに示す対象範囲について、衛星, 航空機, 船舶, ブイ, 地上観測点, 観測ステーションなどの多様なプラットフォームからなされる。これらについて次の点への十分な配慮が必要である。

- 観測活動は、相互に十分に連携を取り、全体として一つの観測システムとして機能する必要がある。また、観測は基本的に横断的機能を除く他の4つの機能からの要請に応えるために行われるべきである。
- 観測には、関係各府省・機関等が行っている長期定常観測(モニタリング), 大学・研究機関などが行っているプロセス研究などに見られる期間を限った観測および長期研究

観測がある。また、現在、研究観測を実施している研究組織等が長期研究観測の延長として定常観測を実施している場合があるが、観測の定常性を保証するためにも、定常観測はそれにふさわしい機関が必要とする組織を整え観測資源を確保して実施する必要がある。これに伴い、研究観測のうち長期的に観測すべき項目を選定し、定常観測に移行させる仕組みが必要である。

- 観測の領域では国際的協力事業が多数行われており、また地球観測に関わる新たな国際協力事業が準備されつつある。日本の地球観測事業はこれら国際的協力事業の部分システムを構成すると同時に、日本として必要な観測項目・観測地域について、独自の観測事業を実施する必要がある。

プロセス研究は、対象とする気候プロセスについて仮説形成とその実証のループを回すという最も伝統的な形をとどめる研究領域である。この意味で、研究の対象と方法は様々であり、これらを一つの研究体制に統合することは適切とは思われない。しかしながら、プロセス研究といえども、研究者の興味だけで駆動されるものであってはならず、気候変動研究の目的に沿って他の機能と連携しつつ組織的に行われるべきである。組織化は、気候変動に寄与が大きいプロセスから優先して行うのが適当である。現在のところ優先すべきプロセスは、エアロゾルの生成・消滅と雲の生成消滅を含めての温室効果への影響、炭素循環プロセス、水循環プロセスおよび窒素循環プロセスなどが挙げられる。こうした個々のプロセスの研究により、限られた観測データが様々なスケールアップ・スケールダウン・アシミレーションの手法により一般化され、現状の把握とその変動の要因解析が可能になる。さらに、プロセス内および異なったプロセス間のフィードバックのメカニズムが解明され、それらの結果から将来を予測するモデルの開発が進み、その検証が可能となる。また、プロセス研究から観測項目やデザインについての提案がなされ、観測とのインターラクティブな対話により効率的で整合性のあるデータ取得が可能となる。

気候モデル形成とそれによる将来気候の予測は、現在のところ、主として物理モデルとしての大気大循環と海洋大循環の結合モデルに基づいてなされている。気候モデルの形成とそれによる気候変動の予測は、気候変動の影響評価とそれに基づく政策決定の基盤となることから、より精緻な「地球モデル」というべきものに展開していく必要がある。現在考えられる重要な課題には次に示すものがある。

- 温室効果気体の循環プロセスをはじめ陸域・海洋生態系が関与する諸現象をモデルに取り入れる、
- 局地的な気候変動とその影響を予測する。これは、気候変動に対する国別地域別の適応政策を策定する基盤となる、
- 異常気象や極端事象の世界的および地域的な発生頻度と規模を予測する。これは気候変動に対する国際的および国別地域別の適応政策を策定する基盤となる、
- 気候の将来予測の限界や不確実性に関する知見を得る。

日本は、現在のところ世界最高速の計算資源を保有していることから、これらの面で世界をリードする研究成果を生み出す機会を有し、かつその責任を負っている。

影響・リスク評価研究は、気候変動がもたらす人類および生態系への影響のうち、人類の生存基盤に大きな影響をもたらす諸事象について漏れなく行う必要がある。これは、農林水産、鉱工業などの生産活動のみならず、健康などの人間の個人に関すること、観光など人

の社会的行動に及ぼす影響などを包括的に評価する必要がある。

また、気候変動が引き起こされる地域とその影響の大きさを国内のおよび世界的に明らかにし、それへの適応能力の大きさの相違を考慮して、気候変動に対する脆弱性の分布を国内的・国際的に明らかにする必要がある。そして、温暖化影響の不確実性、不可逆性、閾値の存在、突発的事象などの性格を明らかにすることは、政策の策定を考えるためにきわめて重要である。さらに、これらの影響の社会的・経済的評価を通じて、人類として許容できる気候変動の範囲を推定することも重要である。

抑制・適応研究は、人類社会の持続的な発展に向けた政策の中核として、気候変動による長期影響を許容出来る範囲にとどめるための抑制・適応政策の考え方、国際的枠組み、政策と手段および政策過程を研究範囲とする。現在のところ、温室効果気体の排出に関する国際的調整に向けての抑制政策が研究の主眼となっているが、今後はこれに加えて適応政策に目を向ける必要がある。適応政策には国内的適応と国際的適応がある。国内的適応では、影響評価研究が予想する気候変動の日本への影響に耐えるための諸施策を検討することである。国際的適応では、例えば、低地帯・島嶼など気候変動の影響を受けやすく、それへの適応能力の低い地域にある人々に対する国際的な支援方策を明らかにすることなどが挙げられる。

上に述べた地球観測、プロセス研究、モデリング・将来予測、影響・リスク評価、および抑制・適応政策の各研究領域は互いに密接に関連している。その代表的な関連を行列として書き出したものが、表 1. 1 である。関連は行から列への寄与として書き出してある。

	地球観測	プロセス研究	モデリング・将来予測	影響・リスク評価	抑制・適応政策
地球観測		研究課題提供 データ提供	初期・境界条件供給 検証データ提供	影響データ供給	政策ニーズ示唆 政策効果確認
プロセス研究	観測項目・地点・時点要求		部分モデルの知見供給		
モデリング・将来予測	観測項目・地点・時点要求	同化モデル供給		影響・リスク予測シナリオ	政策ニーズ示唆・政策効果確認
影響・リスク評価		研究課題供給	必要なモデル・予測項目示唆		施策ニーズ示唆
抑制・適応政策	観測項目・地点・時点要求	プロセス入力供給	モデル入力供給	政策効果の確認	

【とくに推進すべき領域】

陸上生態系および海洋生態系は温室効果気体の循環に関連して気候変動に影響を与える重要な要素である。この研究は、「気候システムを構成する要素としての生態系」というこ

れまでの生態学研究とは異なった視点からの接近である。この視点での研究の推進は緊急を要する。

土地利用と土地被覆の変化は土壌の特性の変化を引き起こし、気候変動の要因となることから、重要な研究課題の一つである。

人の健康に対する気候変動の影響を明らかにすることは、気候変動の抑止とそれへの適応を考える上で重要である。人は自分自身の生物的生き残りに関する障害に対してはきわめて敏感であることは、公害への対処およびオゾン層破壊に対する対処にその例が見られるところである。再興・新興感染症の拡大発生など気候変動が人の健康に及ぼす影響を明らかにすることは、気候変動に対する適応政策の基盤となると同時に、人の行動様式の変革に貢献する。

人間活動圏と気候変動との関わりに関する研究には3つの側面がある。

- 温室効果気体の放出および吸収は経済活動と密接に関連している。経済活動の量的拡大と質的变化が気候変動に及ぼす影響を明らかにし、統合モデルに経済活動を組み込むことを可能とする。
- 気候変動は人間活動に影響を及ぼす。人間は、国際的・国内的政策、および集団・組織または個人レベルでの気候変動に対応する緩和策あるいは適応策をとる。そして、この緩和策・適応策は気候変動にフィードバックされる。
- 人間の行動規範とこれが生み出す行動様式の変化は温室効果気体の放出と吸収などを通じて気候変動の要因となる。この要因を気候システムへの入力の一つと見なして、その変化が気候変動に及ぼす影響を明らかにすることは、社会一般の人々の行動様式の変革を支える科学的基盤を与える。

このことから、気候変動研究においては、人文社会科学分野の研究者と自然科学分野の研究者との緊密な連携が不可欠である。

4. 分野横断的事項

【統合推進体制の形成】

分野横断事項のうちで、もっとも緊急でかつ優先度が高いのは、気候変動研究を統合推進する体制・組織の整備である。先のパラグラフに記した役割と機能を実現する体制・組織をできるだけ速やかに形成する必要がある。

【人材育成機能】

我が国として気候変動研究を社会の要請に応じて効果的に推進できるため、また、気候変動研究に関わる活動を国際的に、とくに我が国の周辺であるアジア諸国に、展開するためには、それを担う人材が必要である。この面で、我が国は満足できる状況になく、気候変動研究の各機能において人材の枯渇に悩まされている。

これらの人材の養成は、気候変動研究がきわめて広範囲にわたり、かつ多様であることから、伝統的な学問分野における養成のみに頼ることはできない。一方において、人材養成を

業務内訓練のみに頼るときには、育成される人材の視野がその特定業務内に偏るおそれがある。すなわち、学部・大学院の課程を通じて広い視野を獲得させ、大学院後の業務内訓練（ポスドクトラル・フェロー）において実務の能力を獲得させる組織的な訓練課程が必要である。

とくにここで提唱する統合推進組織においては、我が国の気候変動研究全般に通じているだけでなく、国際的視野をもち、かつ気候変動研究の将来計画について見識のある研究者を必要とする。これらの人材を意図的に養成することも人材育成の視野に入れる必要がある。

【研究資源の配分】

気候変動研究に対する研究費の配分に当たって、配分機関の間の連絡調整が必要である。気候変動研究に対しては、各省庁における行政目的のための研究に対して交付される研究費に加えて、競争的研究資金による配分がある。これらの間で連絡調整を行い、研究資金配分の不要な重複と重大な欠落がないように図る必要がある。

【トップダウンとボトムアップの整合的調整】

トップダウンの戦略的推進計画に加えてボトムアップの研究課題の提案も、とくにプロセス研究において重要である。研究課題の採択において、両者が整合的に調整され、研究計画が柔軟かつ効率的に策定され推進される必要がある。

【社会との情報交流】

政策決定者および一般社会人との情報交流は、気候変動研究の目的の上からもきわめて重要である。研究者からの情報発信は、政策決定者および一般市民にとって理解が容易な形でなされねばならず、また政策決定者および一般社会人からの疑問に適切に答えるものでなければならない。

【国際協力】

気候変動は全球的問題であり、かつ多大の研究資源を要する研究であることから、国際協力による推進は不可欠である。これは、研究開発能力を同じくする先進国との連携だけでなく、発展途上国との相互扶助的な連携が含まれる。日本の地理的な立場、研究能力および研究成果の蓄積の面から見て、東アジア、東南アジア、オーストラリア、ニュージーランド、ポリネシア、インド、シベリアなどユーラシア大陸東側と環太平洋西側の地域は国際協力上で重要な対象である。この場合に、連携先からのデータの収奪にならないよう、データ利用の方法手段を提供し、データから得られる研究成果が連携先に還元されるものでなければならない。

II. 地球観測

1. 総合科学技術会議における「地球観測のあり方」の検討

2002 年 9 月のヨハネスブルグ・サミット「持続可能な開発に関する世界首脳会議」において採択された「実施計画」の中で、気候変動に関する地球の組織的観測の推進が謳われた。2003 年 6 月のエビアン G8 サミットにおいては「持続可能な開発のための科学技術 G8 行動計画」が採択され、その一つとして地球観測についての国際協力の強化が呼びかけられ、これを受けて 2003 年 7 月にはワシントン D.C.で、2004 年 4 月には東京で、閣僚レベルの「地球観測サミット」が開催された。

この国際的流れの中で、先進各国は、すでに例示したように国としての戦略的推進計画に基づいて主張を展開してきている。この中にあって、我が国も国としての地球観測の基本計画を持つ必要から、その策定に総合科学技術会議があたっている。その最初の成果として、「今後の地球観測に関する取り組みの基本について 中間取りまとめ（平成 16 年 3 月 24 日）」が総合科学技術会議から公表された。「中間取りまとめ」における地球観測の内容は、気候変動に関わるだけでなく、自然災害の監視、地理情報の整備、資源探査・管理さらには地球科学的知見の充実に至る広範なものであるが、基本については、共通するところであるので、その内容を以下の 3 つのパラグラフに要約する。詳細については「中間取りまとめ」を参照されたい。

【現状認識】

我が国では各府省・研究機関・大学等においてさまざまな地球観測がなされてきたところであるが、我が国全体としての体系的な観測計画の立案や実施機関の間の効果的な連携が十分でなく、体系的な地球観測データの収集が十分に図られていない。関係府省が連携して統合された地球観測システムの構築を図り、戦略的な取り組みを進めることが必要である。

【基本戦略】

地球観測は人類の持続可能性と福祉を確保するための政策決定および社会経済活動に資するものとして、国際社会において必要不可欠なものとなっている、ことから我が国は地球観測を次の基本戦略の下で推進する。

○ 利用ニーズ主導の統合された地球観測システムの構築

観測は機器開発やデータの利用ニーズ発掘を主眼とする段階から脱却し、利用ニーズに立脚した地球観測を推進する必要がある。このため、関係機関等の役割分担を明確にし、選択と集中による予算、人材等の資源配分の重点化を図ることが重要である。

○ 国際的な地球観測システムの統合化における我が国の独自性の確保とリーダーシップの発揮

我が国は、国際協力による包括的で組織化された継続的な地球観測システムに参加し、各国・地域との連携の下に効果的、効率的な地球観測を推進する。この際、我が国の持つ技術や地域特性における強みを生かし、戦略的に重要な観測項目、観測地域、観測機関について重点的に取り組むことにより、我が国の独自性を確保するとともに、国際的リーダーシップを発揮する。

- アジア・オセアニア地域との連携の強化による地球観測体制の確立
我が国の地理的条件を踏まえ、各国・地域との適切な役割分担の下に、アジア並びにオセアニア地域を中心とした地球観測体制の構築を進める。

【取り組みにあたっての考え方】

地球観測の取り組みにあたっては次の考え方を基本とする。

- 統合された地球観測システム
地球システムを構成する地圏、水圏、大気圏、雪氷圏、生物圏の実態を種々の空間スケールと時間スケールで把握するために、関係各府省連携により地上、船舶、航空機、衛星等のプラットフォームを用いた各種の観測システムを構築する。このとき、観測項目、地域、機関、データ流通の空白をなくし重複を排した、包括的な地球観測戦略を推進し、統合された地球観測システムを確立する。
- 利用ニーズ主導の観測計画の推進
地球観測の目的は多岐にわたり、利用ニーズは広範囲にわたる。今後の統合された観測システムにおいては、観測の目的が明確化され、ニーズに的確に応える観測を推進する。
- 国際連携・協力の推進
我が国は、東アジア・東南アジア地域、アジア・オセアニア地域、および地球規模の3階層のそれぞれにおいて、地球観測およびデータ利用・研究に積極的な貢献をし国際的リーダーシップを発揮する。観測データの時間的・空間的並びに項目の空白を埋め、データの流通を図るために、先進国・開発途上国のそれぞれと役割分担と共同作業を行うことにより統合地球観測システムの構築を図る。とくに我が国の地球観測の優位性が確保でき、有効な貢献ができるアジア・オセアニア地域との相互協力を進める。このとき、開発途上国における教育・研修、基盤整備等の支援を含めて、地球観測体制の構築強化を図る。
- 長期的な観測・モニタリング
長期的な継続を必要とする重要度の高い新たな観測・モニタリングについては、研究開発機関等での長期にわたる観測を可能とする体制とするほか、関係府省・機関で行う定常的な業務の一環として実施する等、長期継続性を確保する方策を検討する。また、データ利用者による受益者負担のあり方、国から民間への移管による民間活力の活用もあわせ検討する。
- 観測技術の研究開発の推進
新しい計測機器や船舶・衛星などのプラットフォーム等、開発に長期を要する観測システムの開発には、地球観測の方向性や利用ニーズの動向を踏まえて先駆的かつ積極的に取り組み、大容量データや情報の分析・活用技術および様々な利用ニーズに応える計測技術の研究開発を推進する。また、データの品質管理のために測定技術、機器、データ処理手法の標準化に努める。費用対効果に優れ長期運用が可能な自動化された観測センサー等、革新的な技術開発を促進する。
- 高度なデータ利用技術の開発
大容量の観測データから有用な情報を抽出し、データ利用を効果的・効率的に行う統合的なデータ利用技術システムの開発を促進する。
- データの公開と流通の促進
人類の公共財である地球観測データは原則として公開されるべきであり、すでに世界気象機関(WMO)などの国際機関で行われているように、すべての利用者が可能な限り速

やかに最小の費用で容易に利用可能であるようにする。データ公開に際しては、国際機関等における公開原則を尊重する。研究活動の一環として収集されるデータの公開については、一定期間の研究者の優先的使用を認めるなど、知的財産の保護に配慮が必要である。データの流通を促進し、広範囲の利用者の利用を容易にするため、データの共有システムの体制を構築するとともに、データ・フォーマットの標準化を進める。

○ 推進体制の整備等

地球観測システムの構築・運用を効果的、効率的に推進するため、俯瞰的かつ戦略的に関係機関内の調整・連携を推進する体制や組織のあり方について検討する。データ収集に関して、民間との連携をより一層高める必要がある。また、一部教育機関や非政府団体が収集したデータの有効利用を検討する必要がある。地球観測の意義や必要性、期待される効果、得られた結果等について国民に積極的に情報を公開し理解を得ることに努める。

総合科学技術会議における地球観測の基本計画の策定作業は、観測領域および横断的事柄について部会を設けて検討が続けられており、その成果を受けて最終報告が取りまとめられる予定である。このうち、気候変動分野に関わりの深い部分を要約する。

2. 必要性の区分

気候変動に関わる地球観測の必要性は次の3つに大別できる。

○ 顕在化しつつある気候変動を検出・監視する。

気温、水温、降水量、海面水位などの気象・海象の変化、氷河、氷床、海氷などの雪氷の変化を観測し、顕在化しつつある気候変動を検知するものである。人々の生活、社会および経済的活動に資するとともに、人々に気候変動が起きていることを認識する機会を与え、モデルによる気候変動予測結果を検証するために必要である。

○ 気候システムの解明に資する。

二酸化炭素等の大気微量成分濃度、それらの大気／陸域、大気／海洋間のフラックスおよびエアロゾルや雲などの大気中の微粒子の分布や特性変化などの観測は、気候システムを解明し、気候モデルを改善し気候変動の将来予測に資するとともに、モデルによる予測結果を検証するために必要である。

○ 気候変動の影響を評価する

気候変動が生態系を含む地球環境や食料生産に与える影響およびそれが人類に及ぼす影響を観測する。観測項目は気候変動の検出・監視と重なるものが多いが、陸域・海域の生態系の変化の観測などもその例である。植生および土壌の変化、永久凍土の融解、さらには病虫害の分布の変化および風土病の分布の変化なども人間に及ぼす影響として重要である。

3. 今後 10 年程度の重点事項

前節で大別された利用ニーズの観点での優先度、我が国が先行している観測分野・観測地域・海域、国際的に要請されているアジア、オセアニアでの観測協力の強化の観点を踏まえ、今後 10 年程度の重点観測項目が選択される必要がある。以下の項目は我が国にお

ける気候変動研究を進める上で優先度の高いと考えられるものである。さらに「4. 技術開発の課題」にはこれらの観測を進めるに当たっての技術開発の課題をまとめた。

- 大気・海洋・陸面の定常観測を長期にわたり継続して実施する。
- 雲被膜により遠隔計測が困難な東南アジアにおける大気組成の地上での観測点ネットワークの充実をはかる。
- コストパフォーマンスの良い高頻度の観測を実現するため、民間航空機による温室効果ガスの高度分布観測ネットワークを形成する。
- 雲・エアロゾル・放射をめぐる物理過程に関する観測を進める。そのために観測用航空機の導入が必要である。
- 陸域生態系による大気との二酸化炭素の吸収・放出を支配する炭素循環の解明をフラックスタワーによる観測および生態学的な調査・長期モニタリングによって行う。
- 海域観測においては全海洋における二酸化炭素の吸収量とその変動を観測するために国際連携による観測体制を構築することが必要であり、このため定常的な観測活動を拡充するとともに、とくに断面観測を行う観測船、民間商船等による広範囲・高頻度の表層二酸化炭素分圧観測、高精度定点観測を推進する。
- 海洋の長期的な二酸化炭素の吸収の変動と海洋大循環の変動を把握するため南北太平洋と南大洋の海洋断面観測を 5～10 年周期で行う。
- 海洋の炭素循環の年間変動と 10 年スケールを越える海洋環境の変動把握のための時系列観測点を北部太平洋に確立する。
- 全世界の海洋の水温・塩分鉛直分布のを把握する「アルゴ計画」を推進する。
- 地球温暖化が最も進行していると考えられるが広大な観測空白域であるシベリア域と北極カナダにおいて地球温暖化の観測拠点を設置するとともにバックグラウンド地域である南極域での温暖化関連観測を強化する。
- 我が国が長年観測に主導的な役割を果たし、且つ温暖化の影響が顕著とされるとマラヤ山脈における氷河の縮小、氷河湖の発達と決壊に関するモニタリングを継続する。
- 地球規模で大きな海面変動を引き起こしうる南極氷床の総合的な流域雪氷の長期観測を行う。
- 温室効果ガス濃度の地理的分布・時間的変動を定量化するための温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) の早期開発を行うことによって、全球および地域的な温室効果ガスの濃度変動予測を向上させる。
- 陸上植生・海洋植物等による炭素循環、とくに二酸化炭素のフラックスを制御する生物量 (バイオマス) をモニターするために高分解能の合成開口レーダーを中心とする陸域観測技術衛星 (ALOS) を早期に打ち上げて観測を行う。
- 温暖化予測の大きな不確定要因である雲・エアロゾルの放射強制力や水・エネルギー循環を見積もるためのグローバルな観測を行うために、環境観測技術衛星 (ADEOS-II) の観測機能を継承・発展させ、GLI (グローバルメジャ)、AMSR-E (改良型マイクロ波放射計) などの後継センサーを組み合わせた観測の早期再開を行う。また、雲の三次元分布観測を行う能動センサーを搭載する EarthCARE 衛星の実現が必要である。
- 気候変動の顕在化の一つの指標としてあげられる全球降水量の変動を検出・監視するため、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載された降雨レーダ (PR) の観測機能を継承・発展させた、二周波降水レーダ (DPR) の早期開発を行い、国際協力による複数衛星の複合観測による全球降水観測 (GPM) 計画の早期実現を図る。
- 地球温暖化による攪乱に対して脆弱性を持っているアジア域の災害被災地における生態系に関する諸項目の継続観測を実施する。

4. 技術開発の課題

- 陸域生態系における土壌有機物の現存量と変動に関する効率的かつ精度の高い観測方法を開発することで、大気中の二酸化炭素濃度変動予測の不確実性を大きく減少させることが出来る。
- 遠隔地および途上国での温室効果ガスのモニタリングを実現するためには電力と消耗品を最小とし、且つ信頼性の高いセンサーシステム、同位体、酸素などの自動連続測定装置の開発が急務である。
- 海洋での二酸化炭素の高精度自動測定に適したセンサーの開発を、他の化学・生物パラメータのセンサーとともにに行い我が国の優れた技術を持って世界水準を作っていく。
- 地球変動観測に必要なパラメータを、目標とする観測精度で衛星から定量的に計測するために、広範、且つ高度な科学技術の知識集約型の研究開発体制の構築を推進する。当面は現在、計画中のGOSAT, GPM, ADEOS-II後継機, ALOS, EarthCAREなどに搭載するセンサーに関する技術開発を優先するが、将来型センサーの先行的研究と継続的な技術開発も行う。
- 衛星観測から得られるプロダクトを、時間・空間的に連続するデータセットとして利用可能のように整備するためには、統合的衛星観測システムの利用・実証の段階から定常利用の段階への早期移行が必要である。このような段階的な定常利用体制を構築するには、打ち上げ後の観測運用を1世代3～5年として1世代3～5年として3世代10～15年程度の過程を経て、次世代へ着実にフィードバックさせる。

5. 留意事項

【温暖化観測のネットワークとデータ管理】

気候変動に関連する観測の特徴は、グローバルな観測データを統合して初めて有効な情報となる点にあり、気象データと類似した性格を持っている。各国は、単独に、あるいは相互同意により、さらには国際協力の枠組みのもとで、統合的グローバル気候観測システムの完全な構築と運用に向けて行動しなくてはならない。それには、衛星と現場観測を組み合わせた高度な基盤を維持し、インフラを整備し、人材育成を行う必要がある。

国際協力の下でデータの再解析の推進を強化するとともに、これを関係各国によって維持しなくてはならない。この再解析により、気候トレンドの監視や、近年の衛星観測時代の海洋再解析の実施、大気組成や他の強制力に関わる量の解析が可能となる。地球温暖化に関する観測データは多様であることから、分散型の解析センターシステム (Distributed Data Analysis Center) の考え方を導入する必要がある。個々のデータセンターはお互いに原データと処理データを共有しつつ、そのセンターがもっとも得意とするパラメータの解析を行う。

現場観測および衛星観測については、原則無料で無制限のデータ交換を各国が遵守する。各国は、基本気候変数の観測データと付随するメタデータを、過去の歴史データも含め、気候解析のために国際データセンターで利用できるよう保証すべきである。

同一の気候帯や地域を対象とする共同観測による効率化、インパクト評価や適応戦略構築のためにより稠密な測点でより頻繁な観測を実施する地域・国内ネットワークも重要である。その例として、AsiaFlux (二酸化炭素のタワーフラックス観測を中心とした研究者間のネットワーク)や LTER (Long-term ecological research, 生態系炭素収支にも関わる生態系の長期研究ネットワーク) がある。各国は、温室効果ガスの排出インベントリや、土地利用インベントリなど、国内の統計データを整備し、国際データセンターで利用できるよう保障すべきである。これらのデータは、現在より空間的にも時間的にも高い分解能を持つよう努力することが必要である。

データの品質保証・品質管理について、我が国が得意とする分野においては、積極的に国際的役割を果たす。また、国内で取得されるデータについては、高い品質を保証するよう努める。このため、国内の現業・研究機関が確立したCO₂標準ガスの長期的な精度管理等の技術を新たな観測ネットワークの構築に活用していくことが有効である。大気の温室効果ガスの観測と同様に海洋観測においても、各国分担観測、データの共同利用を促進するために米国が運営する国際CO₂データベース機関 (CDIAC) の活動が 1995 年ころから始まった。CDIAC (Ocean) には既に、CO₂関連データを含むWOCE断面観測 63 プロジェクトデータをはじめとする多くのデータが収録、あるいは、データサイトにリンクされている。また、我が国のCO₂関係の海洋化学研究者はPICES (北太平洋海洋科学機構) のもとでデータベース活動を行っており、実データの公開がなされていないデータセットのカタログ化を含めて、データ共有を進める活動を行っているが、今後の継続的な措置が必要である。

【地球観測関連技術者の確保と人材育成システム】

我が国では幸い高度に進んだ各種の計測機器の開発を民間・国の機関で行っているが、新たな研究のニーズに答えられるような機能を持つ機器の開発においては、その人材や組織は限られている。このような人材の育成に配慮するとともに、地球観測の測器の開発を行うための産業育成も重要な課題である。また、地球観測のかかなりの部分にロボット観測のような無人化を進めることが費用対効果からも望ましい。しかし、これらの装置の維持、管理、および得られたデータの処理には多くの技術者が必要であり、これらを行うことが出来る高度の技術と知識を持った技術者の育成とその確保は、我が国が地球観測において先導的な地位を維持するために急務である。

III. 気候変動に関わるプロセス研究

1. 基本的事項

【現状認識】

大気中二酸化炭素濃度の現在の測定値と過去数十万年にさかのぼるアイスコア中の二酸化炭素濃度の分析値との比較から、周期的な氷期／間氷期において大気の組成と地球の平均気温とは明確な範囲内で変動してきたこと、そして現在はその範囲から逸脱していることが明らかになってきた。地球大気中の二酸化炭素濃度は、氷期に低値を間氷期に高値を示してきたが、現在の地球大気中の二酸化炭素濃度は、間氷期の最大値よりさらに約 100 ppmv 高い。この二酸化炭素濃度上昇は、氷期の最小値と間氷期の最大値の変動幅に匹敵しており、その原因と将来の予測をすることが要請されている。

二酸化炭素と同様に人間活動による化石燃料の消費に伴うSO₂、NO_x (窒素酸化物)、エアロゾルの排出が増加している。NO_xは炭化水素の存在下で光化学反応により温室効果を有するオゾン生成するが、その量は全球として増大している可能性がある。また、SO₂は大気化学反応によりエアロゾルを生成し、直接排出されるエアロゾルと共に、放射場に直接影響を与える。同時に雲生成に大きな影響を与え、その間接効果は極めて大きいと考えられている。

気候変動に関わるプロセスとしては、水・エネルギー循環が重要な研究対象であるが、総合科学技術会議の環境研究開発プロジェクトチームにおいては水循環イニシャティブが別途活動しており、地球温暖化研究イニシャティブ (気候変動分野) と連携して推進されているので、ここでは取り上げない。

【原因の認識・研究の対象】

近年における大気中二酸化炭素の劇的ともいえる増加は、疑いなく化石燃料消費と森林減少という人間活動の所産である。20 世紀に観測された気候の温暖化は二酸化炭素の増加による可能性がきわめて高い。全体として化石燃料消費の 60%が大気中に蓄積されてきているが、年ごとの大気中の二酸化炭素の増加速度は人為排出と一致しておらず、人為ではない自然の炭素吸収・放出プロセスが気象条件に対して応答しているためと考えられている。したがって、人間と環境システムは高度に連結し相互に作用しながら炭素循環に決定的役割を果たしており、一つのシステムとして考えなくてはならない。また、炭素循環は気候変化により大きく影響を受けることが知られており、そのフィードバック効果を精度良く評価することが重要である。

大気中に排出されるSO₂やNO_xの大気化学反応やオゾン生成の理解は進んでいるが、地表面を含めた不均一反応など未解明な点が残っている。エアロゾルの間接効果をはじめ、雲プロセスの理解は大きな進展が進みつつあるものの、気候変動予測の不確実性の大きな原因の一つである。

【気候変動の主因としての炭素循環研究の目的】

炭素循環研究の目標は、炭素循環を制御している基本的なメカニズムの理解、現在の排

出源と吸収源のパターンの説明、将来に向けての炭素循環の妥当な変動予測をすることである。その目的は温暖化対策政策を策定する際の基盤となる全球炭素循環のより明確な科学的知見を社会に提供することにある。これは温室効果ガスの安定化目標を達成するために必要な削減量の決定に大きく影響する。

自然を含めた SO_2 、DMS (硫化ジメチル: CH_3SCH_3)などの硫黄化合物、燃焼、雷、土壌から放出される窒素化合物、土壌粒子、化学反応生成物、黒色炭素粒子などの各種エアロゾルの生成と消滅のプロセスを定量化することや、エアロゾルの雲物理過程での役割の理解と定量化を進めることは、温室効果ガス以外の放射強制力の変化とその将来予測の精度を高めることになる。

【研究の対象】

二酸化炭素については、(1) 炭素循環のパターンと変動の認識、(2) 炭素循環プロセスの理解と、それを駆動・制御する機構およびプロセス間の相互作用、(3) 気候が変化する将来の炭素循環の予測、が必要である。将来の炭素循環の予測には、現在の炭素循環の変動観測から予測される気温や二酸化炭素濃度の上昇などに対応した比較的短期の変化のほか、土壌有機物や植生変化を含む陸域生態系の気候変化への応答や海洋大循環の変化など、長期的な変化を予測するための研究も重要である。メタンや N_2O (一酸化二窒素) については、土壌 (湿原) や廃棄物などでの発生量を制御する機構とプロセスの理解、農業の施業や気候変動に伴う発生や吸収量の変動予測が必要である。エアロゾルについては、水蒸気の過飽和と雲生成、氷雲と水雲の転換と蒸発などのプロセスにおけるその役割を理解することが必要である。

炭素循環、メタン、 N_2O およびエアロゾルの収支には全球的な研究が必要であり、国際的な共同研究として効率よく推進することが必要である。我が国は、自国については当然優先的に実施すべきであるが、衛星など全球的な観測とデータ解析や、アジア諸国での研究を実施するとともに、その相手国の研究能力を高める努力を行う必要がある。

二酸化炭素など温室効果ガスおよびエアロゾルの循環に関わるプロセスの理解、放射強制力・雲生成・熱物質循環など物理モデルの構築にかかわる室内実験も、フィールド観測研究と並んで重要な研究手法であり、気候変動予測への貢献度を判断して優先させ実施する必要がある。

【研究対象期間】

主要な研究対象期間は現在および今後 100 年と考えられるが、自然の炭素循環を人為と区別して理解するためには、人間活動が自然のサイクルに影響を与える前を対象にした数万年前の古気候の研究、1000 年規模で生態系が変化・応答した状態、海洋の大循環が変化した状態での炭素循環予測、などが含まれる。なお、億年規模の古気候は地球科学研究の対象となるが、植生や海洋循環などが現在と大きく異なると予想され、その推定が困難であることから、いわゆる炭素循環研究には含めない。

【研究組織】

炭素および窒素の物質循環の研究組織は、地球上における生元素循環と生物活動のリンクを統合的に研究する生物地球化学、気象学、地球化学、大気化学などの大気組成、生

物理学、生態学、林学、農学、地質学、気候学などの陸域生態系、および海洋物理学、海洋化学、海洋生物学、水産学などの海洋における炭素とそれに関わる物質循環の研究者が中心的構成要素となる。また、エアロゾルに関しては大気化学、光学、および雲物理学の研究者が研究組織を構成する。同時に、これと強く関連する観測研究手段を提供する物理学、化学、工学の研究者の参加・協力が強く促される。また、人間活動のデータを扱う社会学、農業経済学を含む経済学、地理学などの研究者の参加が不可欠である。更にプロセス研究に必要なデータ解析やデータベース構築には、応用数学、情報科学、統計学など、現在参画が少ない研究分野の研究者に参加を呼びかける必要がある。

2. 研究すべき事項

【炭素排出源と吸収源の空間的、時間的パターン】

炭素排出源と吸収源の空間的・時間的パターンを明らかにする課題として次が挙げられる。

- 炭素排出源と吸収源の空間的パターンの時間的变化
- 炭素排出源と吸収源の大陸と流域規模の空間パターン、およびその炭素蓄積との関係
- 化石燃料の燃焼、土地利用の形態を含め、人間活動が炭素排出源と吸収源に及ぼす作用
- 炭素フローにおける地域的 (regional)、小地域的 (sub-regional) パターンが地球炭素収支に及ぼす影響

このうち、次のことがとくに優先すべき課題である。

- 北半球における陸上吸収源の経度分布を明らかにする。全球炭素循環における熱帯陸域の役割を解明する。そのため地上での観測に加え、航空機や衛星により二酸化炭素の詳細な分布を測定し、そのデータを解析する診断モデルを開発する必要がある。
- 海洋の放出／吸収源における変動を定量化する。南極海と沿岸域が果たす役割を明確にする。とくに北西太平洋における定常観測を拡充するとともに南半球の観測頻度を高め炭素収支の推定精度を向上させる。
- 現在の海洋における人為起源の炭素分布と大気／海洋間のフラックスへの影響を定量化する。
- 陸域吸収源の空間パターンが自然の擾乱と土地利用とによりどう影響されるかを、過去の経過も含めて明らかにする。そのために温暖化が著しく進展すると予想される地域や、土地利用の変化が自然の循環を変え大きな擾乱となることが予想される地域を重視する必要がある。
- 個々の国における工業部門間、異なった地域間での化石燃料使用パターンの違いを定量化する(地域・季節などのパターンを含む)。そのため、温室効果ガスの排出インベントリを、現在の国家単位の年間統計から、最終的には化石燃料タイプ別、月別、部門別排出量のグリッドデータにまで精密化することが必要である。また、輸出入などを含む炭素や窒素のマテリアルフローを国際的な規模で明らかにする必要がある。
- 大気中二酸化炭素増加速度の年間変動パターンを引き起こすと考えられる気候変動要因を解明する。そのために二酸化炭素などの濃度測定ネットワークのほか、酸素濃度、二酸化炭素の同位体などの国際的観測の充実と、炭素循環プロセス毎の変動量を明らかにする必要がある。

- 観測データを相互に比較して利用できるよう、二酸化炭素、メタン、 N_2O 、 SF_6 (六フッ化硫黄)、HCFC (水素化クロロフルオロカーボン)、オゾンなど温室効果ガスの標準ガスや相互検定システムを早急に整備する。

【人為および非人為起源の二酸化炭素制御機構とフィードバック機構】

これに関しては次の課題がある。

- 産業革命以前から数十万年の太古まで長期にわたり大気二酸化炭素濃度を制御していた機構 (雪氷によるアルベドの変化を含む)
- 現在の陸域および海洋の炭素フラックスを制御している機構
- 人為起源の炭素フラックスと蓄積を制御している機構
- フィードバックが人為および非人為起源の炭素フラックスの拡大・縮小に作用している機構

このうちとくに優先すべき課題として次がある。

- 氷期／間氷期において炭素／気候システムが制御されていた機構を解明し、時間的な変動のシミュレーションを行う。
- 各炭素プール間の流れ、すなわち (1) 陸上と大気の炭素蓄積における炭素の流れ、(2) 海洋と大気の炭素蓄積における炭素の流れ、(3) 陸上と沿岸域海洋の炭素蓄積における炭素の流れ、を制御している機構を解明する。
- 炭素循環において、人間のエネルギー使用の空間的・時間的変動が引き起こす変化要因の相対的な重要性を解明する。例えば、異常気象に対する消費の変動は、経済発展以外の変動要素を検討する上で重要なヒントになる。
- 公的な人間活動と私的な人間活動、およびそれらの相互作用が、森林破壊の速度と土地利用の実態に及ぼしている影響を明らかにする。これは京都議定書の森林メカニズムを評価し、持続可能な社会を目指す上でも重要である。

【地球規模の炭素循環のダイナミクスの将来予測】

この予測をする上で、次の課題が挙げられる。

- 現在の陸域炭素吸収源は、生物圏に恒久的に存在するのか、なくなるのか、あるいは、将来は排出源にもなり得るのか？
- 海洋における物理的・生物学的炭素吸収の駆動力が、次世紀にはどのように変化し、海洋の炭素蓄積にどのような影響を与えるか？
- 土地利用形態、被覆変化だけではなく、工業、商業、運輸、居住システムなどに関連した炭素フラックスの今後の変化はどうか？
- 炭素循環管理という難問に、人類は今どう対応し、今後どう対応するだろうか？

このうちとくに次の課題は優先すべきである。

- 産業化以前から現在に至る炭素循環の変遷を、将来の気候と環境の変化を予測するための基盤として、シミュレートする。
- 地球規模の炭素収支の拡大と抑制のために用いることのできる炭素循環の地域的なシナリオを開発する。
- 今後 10 年から 50 年にわたる産業経済の脱炭素化の見通しを支配する要因を同定する。
- 気候安定化のための制度を成功させる見通しを決め、より効果的に人為的な二酸化炭

素排出を削減する様々な制度の優劣を分析する。

- 陸域と海洋の吸収源の強さとパターンが変化する可能性、変化するとしたとき、その時期と原因を明らかにする。
- 将来予想される温暖化と大気中の高濃度の二酸化炭素の条件の下での、生態系の炭素固定能力の応答・変化を予測し、より長期的な生態系の構造の変化を、実証とモデルにより予測する。

【メタン・N₂O】

メタン、N₂Oについても、これまでに述べた炭素循環と共通の問題認識がある。ここでは共通部分を省略し、これらに特有の点のみを述べる。

メタン生成は化石燃料の採掘や輸送に起因するもの、自然湿原・水田・埋め立てなど嫌気性有機土壌から発生するもの、家畜の腸内発酵によるものがあり、さらに、その量は確認されていないがメタンハイドレートからの放出も視野に入れる必要がある。それらの把握はIPCCの排出インベントリとして取りまとめられているが、それは発生源の調査から原単位の積上げで算出されている。これとは独立に大気濃度観測から発生量を算出するトップダウンのアプローチが優先すべき課題である。

発生のメカニズムと環境因子との関係を明らかにする研究は、発生の抑制と将来の発生量をフィードバックの評価を含めて予測するために重要である。例えば有機物と窒素に富んだ土壌や水環境では、嫌氣的雰囲気好氣的雰囲気にすることによりメタン発生は抑制されるが、逆にN₂Oの発生を促進する。

N₂Oの発生は、人為の直接放出が大幅に削減されつつあり、自然環境での発生がより重要になりつつある。メタンの発生源よりもさらに広く薄いため、その発生量の推定は大きな誤差を含んでいると考えられるが、とくに窒素肥料とN₂Oの発生量の定量的関係を、様々な施肥と気象、気候で明らかにする必要がある。地表面での消滅プロセスについては僅かしか分っていない。

将来において、海洋および地下のメタンハイドレートが不安定化し、大量に大気中に放出される可能性がある。現在でも地震などを引き金にした小規模な不安定化と放出が起こっていると予想されるが、その量もメカニズムも殆ど分っていない。現在、既に不安定化しているハイドレートが大量にある可能性は否定できず、将来の地温、海水温の上昇が引き金となり突発的に大量の放出が起きる可能性がある。海洋および凍土地帯で予想される継続的・小規模な不安定化とそれに伴う放出は、海洋および地表面での酸化を受けるので大気への放出は小さいと予想されるが、実測データはない。メタンハイドレートの研究は資源探査を中心に行われており、長期的なモニタリングなどは全く実施されていない。メタンハイドレートの不安定性に関する調査とモニタリングは、確率的には小さいが大きなインパクトを有するプロセスに関する研究であり、優先度は高い。

メタンやN₂Oの高精度の測定は主としてガスクロマトグラフ分析で行われており、安価でフィールド観測に適した測定機器の開発が、この分野の研究を展開するために強く要請されている。

【エアロゾルとその間接効果】

エアロゾルの効果は、気象モデルはもとより気候変動予測モデルでも雲生成とその変化において重要な気象プロセスであり、モデルに組み込まれているという意味では水蒸気の温室効果と同様である。しかし、大気化学反応により生成するエアロゾルは、その量が増大することが予想され、その数密度が高く、水蒸気の凝結プロセスに大きな影響を与える。研究課題としては次が挙げられる。

- エアロゾル・雪のキャラクタリゼーション (分類と特性に関する研究)
- エアロゾルの生成と消滅プロセス
- エアロゾルの雲物理プロセスへの影響

【対流圏オゾン】

対流圏オゾンが広域的に増加しているかどうかは、現在のところ確定的な根拠がない。先進国は都市の大気汚染防止のため NO_x の排出規制を行い一定の成果をあげているが、経済発展の著しい諸国では排出が急激に増加している。気候変化が森林火災の増加をもたらす可能性もあり、NO_x や反応性炭化水素の放出が増加する危険性がある。また、CFC (クロロフルオロカーボン) が引き起こす成層圏オゾン破壊による対流圏の紫外線増加、気候変化による成層圏オゾンの対流圏への侵入頻度の変化など、成層圏オゾンを介して対流圏オゾンの変化がもたらされる現象が予想される。オゾンは大気における蓄積性はないものの、定常的な濃度が増加すると放射強制力に影響を与える。

大気化学反応によるオゾン生成プロセスは比較的良く理解できているが、現在知られていない反応プロセスの存在を否定できない。対流圏オゾン濃度の将来を予測するためには、人為による NO_x 排出の増加と並んで自然の NO_x 放出量を正確に把握する必要がある。また、オゾン生成の大気化学反応に関わる炭化水素の人為・自然の発生量把握も重要である。同時に、対流圏オゾンを消滅させるプロセスとして、海洋起源の含ハロゲン化合物、地上での不均一過程の理解も必要である。

対流圏オゾンの長期的傾向を明らかにするためには、現在のオゾン測定器の校正方法を改良し、僅かな変化を正確に把握する必要がある。

3. 実現の方策

【国際協力】

次の 10 年に上記の基本的な課題に答えることは容易ではない。現在、排出源と吸収源の空間的、時間的パターンを明らかにする「研究すべき事項」として示した二酸化炭素に関する三つの事項のうち第一課題を中心に、米国では Carbon America、欧州では EuroCarb などのプロジェクトが進行している。我が国では環境省地球環境研究総合推進費による陸域炭素循環課題などによって、人為および非人為起源の制御機構とフィードバック機構を明らかにする第二課題に及ぶ範囲で、取り組まれている。地球観測サミットなどで、この課題に強く関連する炭素観測の戦略が検討されている。文科省共生プロジェクトでは地球規模の炭素循環ダイナミクスの将来予測に関する第三課題に取り組んでいる。京都議定書で自国の炭素吸収の強化を削減活動として認めることになったためもあり、欧米では自国の炭素収支を推定するための研究が強化されている。

自国以外については、EU ではロシアを、USA では南米を対象とした研究がある程度で、アフリカについての研究は殆ど行われていない。我が国ではシベリア、中国、東南アジアなどを含めて研究を行っているが、インド以西を対象にした研究は行われていない。このように、これらの研究の大部分が統合もしくは調整されておらず、結果として、空白地域がある一方で重複している地域がある。Earth System Science Partnership (ESSP) が推進する Global Carbon Project (GCP) のような統一された、相互の合意に基づくフレームワークとメカニズムを開発し、情報交換を進めることによって、研究の空白を明確にし、研究資源の利用における余分な努力と効率の悪さを軽減しようとしている。

GOSAT (温室効果ガス観測技術衛星, 日本) や OCO (Orbital Carbon Observatory, 米国) など衛星による大気中二酸化炭素の観測が計画されており、観測の国際協力が進められる。また、WMO や研究者のグループは、温室効果ガスやその同位体、酸素などの観測精度向上のための国際的相互検定、測定標準化等に取り組んでいる。また、データを共有し共同して解析しようという動きもある。二酸化炭素の陸域生態系でのフラックスの観測を統合的に行うためのフラックスネットなども国際的に組織化されつつある。

このように、地球規模の炭素循環の問題に取り組むため、それぞれの国や単一の学問分野における取り組みを、国際的・学際的な共同のフレームワークの中に取りまとめる動きがある。上記の問いに答えるには、GCP (プロセスとモデル) や IGOS-IGCO (統合的 global 炭素観測) などの国際プロジェクトの下で取り組みを加速する必要がある。

二酸化炭素以外の温室効果ガスであるメタン、 N_2O 、 SF_6 、HCFC、PFC (フッ化炭素) などの研究は二酸化炭素と合わせて研究されているケースもあるし、地球大気化学国際協同研究計画 (IGAC) による生成・消滅に関わる化学プロセスの研究やエアロゾルの化学的側面に関する精力的な研究活動があり、グローバルな視点、気候変化との連携が強められている。

【統合と総合】

炭素循環研究における中心的な課題は、大量の異なる観測とケーススタディーやプロセス研究を、単一で整合的な枠組みに総合することである。基本的には、リモート・センシングや現場での観測、診断的あるいは予見的なモデル、プロセス、操作的な実験、ケーススタディーなどを統合し、地域的・局地的な収支も含む地球規模の炭素収支推定の制約条件とするものである。社会科学と自然科学双方からのデータをモデルのパラメータ最適化の制約条件とし、それによって炭素ストックとフローの完全な空間・時間的な分布やその他の必要なパラメータを推定する必要がある。すなわち、化石燃料燃焼、セメント生産、土地利用変化、森林資源利用、人為活動に伴うメタン放出や窒素肥料の多用による N_2O の発生など、人為の発生・吸収に関するデータ収集や解析が、観測に基づく自然科学的解析と並んで重要であり、両者の統合的な拘束条件が炭素循環解明に必須である。

最初にあげた基本的な問題に答える仕事に必要な統合と総合の方法として、重点的な問題に取り組む学際的ワークショップ、人間科学と自然科学からのモデルへのリンク、それらに関連するデータセットの統合、期間毎の地球規模の炭素収支の構築、逆モデルとデータの比較試験、国際的な観測データセットの同化や統合などが必要である。

【プロセス研究】

炭素循環のダイナミクスに関わる観測は、炭素循環を解明するための基本的な構成要素である。ハワイのマウナロア観測所での綿密かつ長期間にわたる大気中の二酸化炭素の計測により、人類は地球温暖化の深刻さに初めて気がついた。現在では炭素だけではなく、関連するトレーサーの観測を地球規模のネットワークに展開し改良することが必要と考えられている。その達成のためには、異なる計器と技術を用いて観測された以下のものを比較し、統合化することが求められる。また、グローバルな視点と同時に、空間的および時間的分解能の高い観測とそのデータ解析が必要である。

- 大気中の二酸化炭素・炭素同位体・酸素の測定の適切な拡張,
- 表層海洋の二酸化炭素分圧測定 of 拡張, 時系列定点での炭素と生物地球化学パラメータ観測の充実, 海洋断面における炭素と化学トレーサーの反復観測の強化,
- 温室効果ガスの全球の高度分布観測,
- 衛星センサーによる大気二酸化炭素の観測,
- 人間活動の空間的分布を明確にするデータセット構築および地球科学的なデータとの統合,
- 土地の被覆変化の記述と定量化, などである。

ケーススタディーとプロセス研究は、システムレベルの理解に不可欠な動力学に関する知見の基礎的土台となる。例えば、土地利用、人口統計学的な変化、経済発展などの相互作用についてのケーススタディーと作業仮説から出発し、工業システムの変換をもたらす動力学を理解することにより、エネルギーシステムを「脱炭素化」できるかどうか、また、いつできるかといった問題が洞察できる。制度的な発展と進化を扱うケーススタディーにより、人間社会が炭素排出削減の制度としてどのような合理的な選択をできるかを提案することができる。生物学が関与する側面からいえば、海洋の循環と栄養塩による海洋の炭素吸収の規模の推定や、温度と湿度の変化に対する土壌中の炭素の応答など、個々の問題においては、様々なプロセス研究が必要である。

IV. 地球環境モデリング・将来予測

1. 気候変動予測研究のあり方-総合化と個別過程研究の深化

地球温暖化とそれに伴う気候の変化, その影響を受けた生態系の変化など, 温室効果ガスの増加によって起こる地球環境の変化は, 大気・海洋・陸域・雪氷・植生など地球環境を形成している各部分が相互に影響を与えながら一体となって変化して行くものである. すなわち地球環境が一つのシステムとして温室効果ガス増加という外的強制に対して応答する現象に他ならない. このシステムの変化に介在する要素過程は物理・化学・生物と広範囲にまたがる多様なものでかつ多数に上ることから, 要素過程を組み込んだ地球環境システム, あるいはそのサブシステムのモデルを作るには多くの専門の多くの知識を必要とする. 勿論, 地球環境変化への影響の強さにより組み込むべき要素過程の数は節減できるし, 逆に実際に計算機を用いてシミュレーションを実行するために, 計算機の実力の制約のため取り入れられる要素過程の数が限られ, あるいは簡略化して取り入れられて来たという事情がある.

近年, 地球温暖化と環境変化についての社会的関心が強まったこと, これまでの研究の積み上げによって我々の理解が進むと同時に逆に不十分さも明らかになって来たこと, そして計算機能力の向上とが相俟って地球温暖化予測のためのモデルに取り入れられる要素過程の数は増え, また個々の取り扱いもより厳密なものとなって来ている. 例えば大気モデルでの雲と降水に関して, かつては単純に上昇気流の下で湿度が飽和に近づく事だけで判断されていたが, 最近は雲形成の核となるエアロゾルをその発生源を与えた上で濃度・粒径を計算し, それを上昇流速度と組み合わせることで雲粒の数と粒径を求める, といった試みも行われている. これは, 温暖化に伴う雲の放射効果のフィードバックが結果に大きな影響を与え, その取り扱い如何によって不確実性が増すからである. このような雲・降水の形成機構は, これまで気象学の一専門分野である雲物理学として研究が進んで来たが, この分野は, この 20 年ほどの気候研究を初めとする総合化への関心の強まりとそれに伴う資源配分のシフトにより, 研究の進みが停滞気味であった. しかし最近, 前述の事情により, 一旦は活動が縮小していたものが再び活発化し始めている.

モデルによる地球温暖化 (広く地球規模環境変化) の将来予測をより確かなものとするには, 直接的には, より現実に近い多数の要素過程をより厳密にモデルに取り入れることであるが, そのためにも, それと同時に基礎となる個別過程の専門的研究の深化を図ることが必要である. これは当然のことではあるが, 前述の雲物理学をめぐる状況を考えると, 個別専門分野での研究を疎かにしてはならないことの重大さが改めて認識される. 多分野にわたる環境研究の中の気象研究を例にあげたが, 同様の事情は他分野にもあるであろう.

2. 優先度の高い研究課題

【全地球気候変化予測の確度向上】

現在の予測モデルの不確かさとシミュレーション結果のばらつきの原因は, 物理法則をもとにして直接計算できない格子間隔 110 km 以下のスケールの現象, 例えば積乱雲 (入道雲) の取り扱い (パラメタリゼーション) が, 個々の研究者の判断によらざるを得ない点にある.

「地球シミュレータ」によって格子間隔 20 km 程度の高解像度の予測実験が行えるようになり、日本の研究者社会の貢献が期待されている。しかし、高解像度化は、パラメタリゼーションの困難をなくす訳ではない。格子スケール以下のプロセスのより良いパラメタリゼーションには、積雲、普通の雲による日射の反射、地中から植生によって吸い上げられた水の蒸散等の多数のプロセスについての個別プロセス研究の深化と、そこで得られた知識を全地球の気候モデルに適切に遅滞なく取り入れられるようにすることが求められる。具体的には、多くの大学・研究機関での個別プロセス研究の促進と同時に、プロセス研究者とモデル研究者の連携を図る方策が必要と思われる。

【超高解像度化によるモデルの質的向上の可能性追求】

一般に、モデルの解像度の向上によって、現象や構造がこれまでより細部まで表現できるようになり、それと共に全体としてのモデルの確度も向上する。しかし、その向上の程度は、一般には漸進的なものととどまる。解像度がある限界を超えて、それまではパラメータ化されてきた現象やプロセスを直接計算することができるようになると、向上の質的な変化が期待できる。「地球シミュレータ」の出現により、5 km 以下のメッシュで対流雲を直接表現することで、現在の気候モデルにおいて最も困難とされる対流雲のパラメータ化を解消できる可能性が見えてきた。これは挑戦すべき重要な課題である。海洋に対しても同様に、中規模渦を解像しつつ、全地球の循環を平衡状態に達するまで計算することは未踏の挑戦目標である。

【地域的気候変化と極端現象の予測】

気候変化の生活・産業への影響を予測するには、各地域に特有の重要な気象、例えば日本の夏季の梅雨とか冬季の日本海側の積雪のようなものの変化をきめ細かに調べる必要がある。また、台風、集中豪雨のような極端な気象がどう変化するのか(台風の数・強さ等)は生活・産業への影響が大きい。海についても温暖化と風系の変化に伴う海流・水温の地域変化は、気候のみならず水産・海運にも影響を与える。幸い、「地球シミュレータ」には大きな計算力があるので、これを生かして全球および地域の高解像度モデルを開発し、影響評価の鍵となる情報を日本に限らずアジア全域にわたり提供できるようにする必要がある。重要なことは、気温・降水量など気候変化の将来予測を生活・産業への影響の推定に結びつけられるようにすること、すなわち、予測の利用者側からの要求に応えるような情報を提供することである。例えば、水資源管理・洪水対策のためには特定流域の日雨量の頻度分布がどう変わるかが有用であろう。また、一般社会への情報としても、気候変化を実感できるような形にして発信する工夫・努力も必要である。

【気候変化のクリティカル・エレメントについての予測研究】

気候変化は、温室効果ガス増加とともに連続的に変化するものばかりでなく、あるレベルから急に変化し、大きく違った状態に遷移する可能性を秘めている。国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) は、温室効果ガスの濃度を、気候システムに危険な影響を及ぼさない範囲で安定化させる(濃度上昇を抑え一定値に落ち着かせる)ことを目的としているが、「危険」とはどの程度の変化かとの検討を進めるとともに、急な変化、不連続的な変化あるいは不可逆な変化があるとすれば、それを見つけ出し調べることが重要である。すでに話題となっているものとして、全世界の海洋をめぐり深層と表層を結ぶ海流(コンベア・ベルト)すなわち地球規模での熱塩循環が、極端に弱まる可能性が指摘されている。

【全地球環境変化の総合的予測】

これまでの温暖化予測は、人間活動による二酸化炭素排出の将来シナリオをもとに、簡略化した炭素循環モデルによって海洋と陸域生態系に吸収される二酸化炭素の量を求め、大気中二酸化炭素濃度の将来予測を行い、その結果を気候モデルに導入して温暖化と気候変化の予測を行っていた。しかし、これでは不十分である。気温、降水、日射の変化などの気候変化は、陸域生態系の二酸化炭素吸収－放出に大きな影響を与え、また海洋の温度・循環の変化も海洋の二酸化炭素吸収を変化させるからである。とくに温度上昇によって土壌有機物の分解が促進され二酸化炭素が大気中に放出されるプロセスは温暖化を強める正のフィードバックを構成するので、これを考慮する必要がある。すなわち、従来の物理的気候モデルに加え、大気・海洋の化学組成や植生・土壌などの陸域生態系の変化をも組み込んだ地球環境システムの統合モデルを作り、土地利用変化なども加え、人間活動が地球環境全体に与える変化を総合的に予測する必要がある。

【古環境研究】

地球温暖化予測は、日々の天気予報やエルニーニョ現象に結びついた長期予報などのように事後に予測の当否をチェックする事ができない。例外として、既に進行している 20 世紀気候変化の再現実験があるが、二酸化炭素の増加、気候変化とも僅かなので、他の要因による変化との区別が難しい。これから起きるであろう百年程度の短期間の急速な気候変化とは同じではないが、約 10 万年周期の氷期／間氷期サイクルのような過去に起こった大きな気候の変化と、二酸化炭素、メタン、海洋循環なども変化した環境全体の変化の実態を調べ、変化の機構をモデルで再現することは、気候（環境）変化予測の信頼性のチェックとして唯一の可能な手段である。海底・湖底堆積物や南極・グリーンランドの氷床、さらに陸域の花粉など過去の気候や環境の残した記録によって古環境を復元し、同時にモデルによって変化機構を解明することが強く求められる。近い過去の花粉試料などによって植生などの温暖期の状況を知ることが、将来予測にも役立つ。このように、古環境の変化の解明は、先に記した「危険」な変化の可能性を探る上でもかけがえのない貴重な知識となるであろう。

3. 研究推進体制

日本における地球温暖化予測研究は、1990 年、1995 年の IPCC 第 1 次、第 2 次報告書までは気象庁、気象研究所におけるものだけであったが、2001 年の第 3 次報告書には、それに加え東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所の共同研究チームによるものが提出された。現在、2007 年の第 4 次報告書に向けて、さらに地球フロンティア研究システム（現在、海洋研究開発機構の地球環境フロンティア研究センター）が、東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所の共同研究チームに加わり、新たな体制で研究が進んでいる。とくに重要なことは、文部科学省のプロジェクトとして世界最速のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」が平成 14 年 3 月に完成、稼働を開始し、これを利用して気候モデルの開発、改良が行われていることと、それに対応して「地球シミュレータ」の系統的な有効利用を目的とした文部科学省の「人・自然・地球共生プロジェクト」が、平成 14 年度から 5 年間のプロジェクトとして行われていることである。日本国内の主要研究機関が、それぞれの任務と特色を生かして計画調整・役割分担が実現している。また、さらに大きな枠組みとして「地球温暖化研究イニシャティブ」が作られ、観測・モニタリング研究と影響評価研究との連絡や相互のフィードバックが可能になっていることも日本の強みである。

一方、日本の弱点は研究者の不足にある。「1. 総論－基本的考え方－」に記したように、総合化と個別過程研究の深化を同時に進めるには、第一に研究者層を厚くすることと個別基礎研究への研究資源配分の拡大を図る必要がある。その意味で近年の「重点化」指向は問題を含んでいる。しかし、現実には常に全体として人的・物的資源の制約があることも確かで、そのためには研究推進体制を的確に作る必要がある。

【個別過程研究の絶え間ない推進】

基礎研究が全ての出発点であることを考えると、例え十分でないにしても自発的興味に基づく多様な研究の芽が失われないよう、広く薄く基礎研究を進める必要がある。これは基礎科学一般に言えることで、具体的には大学の研究体制をその観点でしっかりと守ることである。前述の例のように、社会的必要に応じてある段階で基礎研究の一部を急速に強化する必要が生じることが起こり得る。このためには、常にその時々に見渡せる範囲で個別研究に環境予測への応用の見地で優先順位付けを行い、資源配分を行わねばならない。広範囲にわたる基礎研究の維持と同時にこのような選択を遅滞なく行うには、国全体、研究機関、プロジェクトといった単位毎に、重点研究領域とされるものの中に、直接目標達成につながるが基礎となる個別研究を常に一定の割合で含める必要がある。

【総合化のための適切な集中化】

多数の過程を含むシステムとしての地球環境変化予測には、多くの領域の専門家の知識を集約するための研究体制、具体的にはそれを目的とする調整機構が必要である。地球温暖化問題の認識と共に、気象庁／気象研究所、国立環境研究所／地球環境研究センター、東京大学気候システム研究センター、地球フロンティア研究システム（現在、海洋研究開発機構の地球環境フロンティア研究センター）と、気候予測モデルに係わる研究センターが作られてきたが、最近のモデル研究の範囲拡大・大型化があり、また数年ごとの IPCC 報告への対応のような一種の業務化を考えると、大学や個別分野の研究の有効な連携を担保した日本全体での気候変化予測に関する研究活動を調整する機構が必要である。

【アジア域で重要な熱帯の気象・気候に重点を置いた研究の推進】

これまでの気象・気候のモデルは、基本的には中・高緯度での大規模な現象（温帯低気圧、前線、ジェットストリームなど）を対象として、より良いシミュレーションと予測の向上を図って来たと言える。他方、熱帯の主役は、積乱雲とその集団（クラウドクラスター）として現れる上下の対流であるが、その水平スケールが小さいため、温帯低気圧のように直接計算されることなく、パラメタライズして扱われて来た。アジアモンスーン域での対流性降雨や、対流集団の挙動に支配される亜熱帯高気圧の変動の重要性を考えると、日本を含むアジア域の気象・気候のシミュレーションには対流の正しい取り扱いが不可欠である。幸いにも「地球シミュレータ」という処理速度が世界最速級のスーパーコンピュータが利用可能となり、将来の更なるコンピュータ能力の向上を想定すると、中規模対流システムを直接計算する地球全体の気象・気候モデルが現実のものとなって来た。

現在のところ世界唯一の強力な道具を手に入れている日本の気象・気候研究陣は、これを最大限に活用して世界に貢献する方途として、日本を含むアジア域にとって重要な熱帯の気象・気候の研究を強力に推進することが望まれる。その具体的方策として先に記した総合化のための全国調整機構に、この役割をも重ね持たせるのが適切であろう。

V. 影響・リスク評価

1. 影響・リスク評価研究のあり方

【影響・リスク評価研究の位置】

影響・リスク研究は、気候変動研究の中で、「予想される変動の人類の活動に対する影響・リスクを評価するとともに、許容される気候変動の範囲を明らかにする」位置を占める。そのため、観測結果や将来の気候システムの予測結果を受けて、影響・リスクを評価し、その成果を気候変動対応政策研究に引き渡す役割を果たす。さらに、温暖化の危険なレベル（影響閾値）や適応策、安定化シナリオに関する研究によって、国際的・国内的に温暖化対策の立案・実施に資する科学的情報を提供する。

【研究対象分野】

研究対象として、基本的には自然環境から人間社会まで気候変動の影響を受けるすべてのシステムを視野に入れる。その中でも、自然生態系、水資源・水環境、農林水産業・食料生産、沿岸域、防災・国土保全、生活・都市・産業・エネルギー、人の健康などとりわけ社会的優先度の高い分野に重点を置く。

【研究課題】

これらの分野において、既に出現しつつある影響を検出し、政策決定者および一般市民が必要とする包括的、整合的かつ具体的な知識の形で将来の影響・リスク像を提供することが研究課題である。とりわけ、適切な影響指標の開発と物理的・生物的・経済的影響量の予測、日本全国、アジア・太平洋地域、世界レベルでの影響・リスク規模の推定、とくに脆弱な地域とセクターの特定、温暖化の危険なレベル（影響閾値）の解明、適応策とその効果推定、各国・各分野の適応能力の評価、安定化シナリオと影響出現経路等に関する体系的な知識を生み出すことが使命である。

【研究対象地域】

研究対象地域は第一義的には我が国全体である。しかし、気候変動の対策は最終的には世界スケールで実施されるため、世界規模の普遍性を持つ研究成果をめざす必要がある。一方、我が国の地理的位置、また国際的な期待を考えれば、アジア・太平洋地域における影響・リスク研究にも積極的に取り組む必要がある。

【研究対象期間】

影響・リスク研究がカバーすべき期間は、IPCCをはじめ2100年までの約100年間が基本的な対象期間である。しかし、異常気象現象の影響など、より早い時期に重大な影響が出現する危険性に十分注意し、政策提言に係る比較的近い将来を見据えた研究も必要である。一方、海洋大循環の停止や西南極氷床の融解といった長期的だが、一旦起こると不可逆的に進行する現象にも注意を払わなくてはならない。

【研究組織】

影響・リスク研究は極めて広い範囲にわたるため、自然科学から社会・人文科学の多くの研究者の参加が不可欠である。同時に、最初に掲げた役割を果たすためには、すそ野の広

い研究が総合科学技術会議の研究イニシャティブに効果的に統合されなければならない。そのためには、研究の広がりとの統合を両立させるための研究組織のあり方をさらに追求する必要がある。また、従来、社会・人文科学の研究者の参加が弱く、そのことが影響の経済的・社会的評価の弱点につながってきたので、有効な参加をはかる必要がある。

【他分野との関係など】

温暖化研究における影響・リスク研究の位置づけを考えると、観測および気候予測研究分野、また気候変動対応政策分野と密接な連携が必要である。最新の気候モデルの出力をいかに取り入れるか、また不断に変化する政策ニーズにいかに対応するかが大きな課題である。

人間社会は、地域環境の悪化、人口変化と経済開発、経済と貿易のグローバル化の進展など温暖化以外の様々なストレスを受けている。将来社会のより総合的で現実的なリスク像を描くためには、温暖化とこれらストレスの複合的な影響・リスク評価が必要である。そのための方法論の開発や研究が今後の展開方向の一つである。

世界規模の水循環など他の環境イニシャティブとの連携や IGBP, IHDP, DIVERSITAS, START, APN をはじめ国際的研究ネットワークとの連携をいかに図るかも課題である。とりわけ、我が国研究者のアジア・太平洋地域を中心にした国際的な研究活動への参加と積極的貢献を推進する必要がある。

2. 研究すべき事項

(1) 温暖化影響の検出およびモニタリングシステムの開発

この50年間に人間活動が引き起こした温暖化が進んでおり、このため水河や海水などの雪氷圏、高山植物、ブナ林などの脆弱な生態系にすでに影響があらわれており、今後影響がさらに拡大すると予測される。気候の変化に敏感で脆弱な雪氷圏や生態系を特定し、影響の出現を監視する全国的な体制を整え、継続的にモニタリングを行う。モニタリング結果を国民に逐次情報提供して、温暖化の進行や影響の発現について注意を喚起するとともに、温暖化防止対策の一層の推進をはかる。また、生態系や多様性の保全のための施策を立案、実施する際の基礎情報とする。

〈研究課題の例〉

過去のデータ(生物季節長期モニタリングデータ、長期海洋環境観測データ、極域観測データなど)を再評価して温暖化の影響検出そのものを行う研究と、検出システムの開発の、両方が必要である。またスポット的な影響事例(蝶や蚊の北上、高山植物の衰退、熱帯性の魚の出現など)を国民の協力も得て極力広い範囲で収集し、それらの情報をマップ化することにより、影響が顕在化していることの全体像が把握できる。

- 海洋環境など長期観測データの再評価
- 植生を用いた温暖化影響の検出方法の開発
- 日本を対象とした影響検出モニタリングシステムの開発
- 影響モニタリング結果情報の提供システムの開発
- 国際的な影響モニタリングネットワークの構築

(2) 分野別影響評価の高度化

これまでに得られた影響評価の研究成果を踏まえて、さらに影響評価の高度化を行う。とくにヨハネスブルグ・サミット(WSSD)、IPCCなど国際的な政策面で重要な分野に適用する。高度化の内容は、高精度の気候シナリオの適用、定量的予測、経済的予測、閾値の特定、脆弱性指標の開発、将来の社会経済シナリオの適用によって、より精度が高く、将来リスクを明確に示すことが緊急課題である。なお、ここであげる重点領域は、温暖化イニシアティブの気候モデルプログラム・抑制政策プログラムとの緊密な連携および水循環イニシアティブとの緊密な連携が必要である。

【水資源・水環境への影響評価】

ヨハネスブルグ・サミットの重要分野(WEHAB: water, energy, health, agriculture, biodiversity)の1つであり、IPCC第四次報告書(2007年公表予定)でも分野横断テーマの1つに上がっている。日本での水資源問題というより、干ばつ、砂漠化、洪水などを含めたアジア・太平洋地域の広域的課題である。水資源・水供給といった側面の他に、水質・水環境、洪水や渇水といった水災害という側面も重要である。こうした水資源・水環境に係わる将来リスクの予測と対策の検討が必要であり、とくに将来予測では、時空間的に高分解能気候モデル(地域気候モデル)の結果とのリンクや地球規模水循環イニシアティブとのリンクも緊密に進める必要がある。温暖化の水資源、水環境の影響が顕著に現れる地域を特定することにより、進行する温暖化影響への対応(適応策)を講じ、影響を軽減することが可能となる。

<研究課題の例>

- 日本およびアジア地域における水不足リスクの評価
- 水資源影響を緩和するための適応策の開発とその多面的評価(経済性、受容性など)
- 水環境悪化の予測評価と対応策の検討

【農林水産業、食料生産への影響評価】

長期的な気候の変化や大気中の二酸化炭素濃度の上昇、さらに短期的な異常気象の発生により、穀物等の食料生産、森林資源、漁業資源への影響が深刻化すると予測される。国際的な食料需給の点から、いったん穀物生産地域で影響がでると、貿易を通じて穀物需給のバランスが崩れ、穀物価格が上昇することにより、食料確保が困難な状況が発生すると予測される。

現在でも日本をはじめ、アジア途上国では、食料自給率が下がっており、いったん穀物への影響が生じると、波及的な影響を与える可能性がある。

現在の食料生産、食料確保の安全性を評価するとともに、気候変化による穀物生産への影響、貿易を通じた食料需給への波及的な影響を予測、評価することにより、リスクを見積もる。また、穀物生産と国際貿易レベルでの対応策を検討しておく。

<研究課題の例>

- 日本、アジア地域における農業・林業・水産業影響の予測と評価ならびに影響削減技術の開発
- 食料安全保障を確保するための仕組みと予測および食料生産シナリオの提案
- リスクに関する総合解析手法の開発

【日本の国土および社会経済へ与えるリスクの評価】

沿岸域(とくに海面上昇の影響)、国土保全・防災・人間居住、産業・エネルギーなど社会

影響については、各省庁が所管する分野について個別に実施されているが、相互に関連性もあるために、総合的な取り組みや研究が必要な分野である。しかしながら、影響を検出にくい分野なので、自然災害や防災などの研究との連携が必要である。

影響緩和や適応策を考えると、メインストリームの政策分野(国土保全、防災、地域計画、エネルギー政策、環境管理)等に温暖化への対応をどう取り込むかが重要であるため、こうした視点での適応策あるいは政策研究を進めることも重要である。

<研究課題の例>

- 適応策の検討およびメインストリームの政策分野に適応策を組み入れる政策研究
- 産業へ与える影響の予測と多面的評価(エネルギー、保険・金融、交通、季節産業、観光)
- 影響緩和の方策

【市民の活動や生活(人の健康を含む)への影響】

市民の活動や生活への顕著な影響が現れ始めるより前に、健康、衣食住など日常生活への影響の現状を把握し、将来の影響の進行を予測することにより、市民レベルでの対応策について検討する必要がある。

熱ストレスや熱帯・新興感染症など健康影響を体系的に把握すること、そして、他の環境要因、例えば大気汚染等との相乗影響などについても検討が必要である。そして市民の活動や生活の安全性を確保するための適応策の研究も必要となっている。

<研究課題の例>

- 温暖化、環境変化がもたらす健康への影響リスクの総合評価
- 突発的な感染症等への対応策
- 夏の熱中症の発生や感染症の実態や予測
- 市民生活や活動、とくに衣食住への影響の予測、評価手法の開発
- 影響緩和のための対策(適応策)および環境コミュニケーションの推進

(3) 影響評価の統合化 -日本全体の影響や総量の予測-

温暖化の影響について、とくに脆弱な地域や分野を特定し、対応策を立案・実施するためには、日本全体を対象とした影響の総量の見積りを行い、経済面、技術面から評価する必要がある。とくに、対策の実施可能性を検討するうえで重要な経済評価(環境経済学的手法による自然生態系への影響の価値付けを含む)については、環境経済関連学会や研究者との共同研究を進めることが不可欠である。また、影響分野は各省庁にまたがるため、個別分野の影響評価の成果を統合する体制を整え、定期的に日本への影響評価の現状と将来動向を見極める必要がある。

<研究課題の例>

- 日本への影響の統合評価の実施
- 日本を対象とした社会・経済・環境シナリオの開発
- 日本全体を対象とした影響の予測と総合評価手法の開発
- 総合評価手法の適用による脆弱な地域と分野の特定
- 脆弱な地域における、適応策の立案とその効果評価

(4) 脆弱性評価と影響閾値の特定

気候変動枠組条約の究極的な目標(第2条)に示された大気中の温室効果気体の安定化濃度を特定するためには、(1)地球の自然システムが崩壊するクリティカルなレベル、(2)

生態系や社会システムが耐えられなくなるレベル, (3) 社会経済的な費用面からのレベルの視点などがある. とくに影響面からみた温暖化の危険な水準と安定化濃度の特定が, IPCC, 気候変動枠組条約および京都議定書の実施, さらに長期的な対温暖化政策の立案にあっては重要な役割を果たす.

〈研究課題の例〉

- 影響閾値の特定
- 経済的損失, 影響人口, 生活質の低下, 生物種・多様性の損失, 分布変化・平等など影響量の指標化
- 気候パラメータと影響との関係 (感度分析)
- 途上国と先進国間および世代間などの影響負担の差
- 適応策による影響低減可能性とその経済評価
- 影響の閾値からみた安定化濃度の特定 (逆推定手法・モデルの開発)

(5) 適応策と適応能力の評価

温暖化対策の中で適応策は今後一層重視されると予想される. とりわけ, アジア太平洋地域の途上国では, 異常気象対策を含めて適応策の重要性が高い. 適応策はどの地域でも一様ではない. 各国の地域性 (風土性) と社会的伝統によってそれぞれの地域の固有の技術や社会制度があり, これらと近代的技術や保険などの西欧型システムをうまく組み合わせることが適応策として有効になる. 地域固有の要素は, 各国各地域の適応能力を示すものであり, 適応策の研究では, こうした伝統的適応能力の評価も必要である. また, 適応策によって温暖化影響を低減・回避できるようになるので, 危険なレベルとも密接に関連する.

〈研究課題の例〉

- 適応政策のあり方
- 適応の技術メニュー
- 地域毎, 国毎の適応能力, 伝統的な適応技術や社会組織の評価
- 適応策の評価. 適応策と影響閾値の関係

(6) アジア太平洋地域における脆弱性評価

アジア地域の途上国, とくに熱帯・亜熱帯地域の途上国では, 温暖化の影響を深刻に受けると予測される. しかしながら, 各国が独自に温暖化の影響や脆弱性評価, および適応策を立案するための人材は乏しく, また研究ノウハウも少ない状況にある.

アジア・太平洋地域は温暖化に対して最も脆弱な地域の一つと目されていることから, この地域における影響評価, 適応策の研究に, 我が国の研究コミュニティが積極的に取り組む必要がある. なお, アジア地域における温暖化の脆弱性評価などについては, アジア太平洋ネットワーク (APN), IPCC等が支援する途上国の影響評価プログラムが進行中であるので, これらのプログラムと緊密な連携をとりながら, 我が国の研究者が積極的に貢献できるような国内体制の整備を行うことも重要である.

〈研究課題の例〉

- アジア地域の途上国を対象とした国別影響評価モデルの開発と技術移転
- 共同研究プロジェクトによる人材育成と研究能力の向上
- アジア地域全体を対象とした影響マップの作成
- アジア地域の文化等を考慮した適応策の立案とその効果評価

VI. 抑制・適応政策

1. 抑制・適応政策研究のあり方

【研究範囲】

持続的な人類社会の実現に向けた政策の中核として、気候変動による長期的影響を許容できる範囲にとどめるための抑制・適応政策の考え方、国際的枠組み、政策と手段(P&M)および政策過程を研究範囲とする。ここで次の事柄が重要である。

- 対象を自然と人類社会を統合したダイナミックなシステムとしてとらえる。
- 分析的研究にとどまらず、成果を現実に進行する UNFCCC など国際的政策決定過程や IPCC など科学的評価過程、国内政策形成過程に効果的に反映できる提案型の研究とする。
- 世界規模での広がりの中での研究を目途とするが、日本の地政学的位置に考慮しアジアに立脚した研究、国際社会の中での日本の立場を踏まえた国内政策研究を含む。

【研究のあり方とその進め方】

研究成果のみに重点を置くのではなく、政策・評価過程とのフィードバックを促進する働きかけを伴った研究プロセス、すなわち、国民各層に透明性をもって研究成果を問い、研究成果の社会への普及について考慮した公開された研究プロセスを取る。その進め方においては次のことに配慮する。

- 温暖化イニシアティブの他分野との十分な協力のもとで研究を進める。
- 我が国の立場、研究体制の強みおよび研究の費用対効果を勘案した重点的な取り組みとする。
- 我が国における気候変動政策を総合的、整合的、かつ効率的に行うための政策研究体制を、気候変動研究統合推進本部(仮称)の下に形成する。

【国際協力】

気候変動の政策は、対象が地球公共財であるため、研究も必然的に国際的な枠組みのもとでの整合性が求められる。IHDP や IPCC といった国際協力の場合での共同研究に積極的に参加する必要がある。

- 抑制政策手段は多くの場合各国共通であり、国際比較研究によって一層効果的な政策提案が可能となる。
- 途上国を抑制政策参加に向かわせるには、途上国自身で危機の認識と成長との調和の道を考案することが必要であり、そのためには途上国の能力構築型共同研究が望まれる。

2. 研究すべき事項

気候変動対策は長期にわたるものであり、世界規模で社会経済政治の動向と密接にリンクする。気候変動政策推進には、対象を自然と人類社会のダイナミックな統合システムととらえ、種々の不確実性を踏まえながら、長期にわたる問題の推移を見とおし、対応政策を考え、その効果を評価し、持続可能な社会の実現に向けたリスク管理の規範にもとづき、対象シス

テムの刻々の変化に対応する国際・国内政策枠組みと決定手順を適切に構築することが必要である。対応政策としては技術進歩・社会変革・国際協力が鍵となろう。政策研究は、これらのプロセスを全体的および部分的に支援するものである。

気候変動対応政策に対する研究の必要性は、京都議定書の数値目標の達成とともに京都議定書以降の国際的政策合意に向けて急速に拡大しつつある。これらの要請は、我が国はもとより、世界全体の経済発展に大きく関係することから、この要請に的確に対応する研究活動を強化することが不可欠となってきた。

政策側からの要請については、この1年間に気候変動枠組条約事務局やIPCCに対して各国政府から出された文書に包括的に表明されている。その主要なものをまとめれば以下の6点である。

- ① 短中期的にどこまで温暖化対策を進めればよいのか？ それは長期的な対策シナリオとどのように関係しているのか？ もっとしっかりした長期的対策シナリオが必要ではないのか？
- ② 持続可能な発展を推進する方向にこのような対策を進めるにはどうするのか？ とくに京都議定書に絞った議論はまだ足りない。また対策の副次的便益をもっとしっかり見積もる。
- ③ このような対策に要するコストの見積もりにはまだ大きな開きがある。地域の実情にあったコストをしっかりと見積もる。
- ④ 新しい技術についてもっと評価すべきである。技術の普及のための障害の除去や社会的条件整備についても地域ごとにもっと知りたい。
- ⑤ 発展途上国においては温室効果気体を削減することよりも、温暖化影響に適応することにお金を使った方がよいのではないか？
- ⑥ 京都議定書以降の合意できる国際的枠組みはどのようなものか？

この項では、上記 IPCC の要請を参考にしながら、気候変動対応政策研究として中期になすべき課題について以下のように示す。

【温暖化対策評価のための長期排出・対策シナリオ】

政策決定者の判断に供するため、自然と人類社会を統合的に捕らえ、そのダイナミックスを定量的に把握、種々に提案される対応政策・道筋を評価できる道具（ツール）が必要である。既に統合評価モデル（Integrated Assessment Model）として世界で有効に活用されており、我が国でも強い領域として育ちつつあるが、常に新たな知見・要請を取り入れて進化させる必要がある。SRES（排出シナリオに関する特別報告書）の例に見るように、人類社会の方向を与えたシナリオによる検討は国際的政策決定に影響するところ大であり、日本としての独自の研究確立は国策検討の面からも不可欠である。シナリオに含まれる要素としては、長期の人口・社会経済動向、国際関係、技術進歩等があり、世界規模での政策枠組みが検討評価されるものである。さらに、短中期の対策シナリオの高度化、地域ごとのシナリオの明確化、長期と短期を結ぶ説得力のある分析枠組みの提示が必要である。国内政策検討には、国際状況を良く反映されたモデルである必要がある。

IPCCでは、フィードバックを含め、最新の傾向を勘案した長期的排出シナリオの改定が必要との認識があるが、この課題については、これからSRESシナリオの公式アセスメントが開始され、1年半後に特別報告書としてまとめられることが予想されるので、新しいIPCCの排出シ

ナリオ (SRESの次期) の作業が開始されるのは早くても一年半後となり、第 4 次報告書ではなく第 5 次報告書用の作業となる。今後、この動きが長期排出シナリオの中心的な流れとなる。これまでの研究の上に立って、非エネルギーCO₂および非CO₂温室効果気体の削減を勘案した安定化排出シナリオの作成、安定化対策オプションの評価の進展、さらにIPCCのAR5 に向けた新シナリオ策定に重点的に取り組む必要がある。今のところこのシナリオ研究に参加できるのは日本では3 チームだと予想されるが、もう1 チーム増える可能性もある。

【持続可能な発展に向けた気候変動リスク管理のクライテリアの検討】

気候変動問題を自然と人類社会のダイナミックな統合システムととらえ、その動的安定化のための目標および制御手順の各種代替案を提示する必要がある。気候変動がこれまで築き上げられた人類社会システムに長期かつ重大な不可逆的な影響を与える懸念があること、気候システム自身に、そして影響を受ける自然・社会システムや対応する国際政策決定システムのいずれにも「遅れ」があり、政策決定へのそれぞれからの状況認識のために情報に不確実性があることを踏まえると、気候変動問題はリスク管理の観点から検討する必要がある。不確実性の程度(気候変動知見の不確実性推移定量的評価)、影響の性格と大きさ(空間時間分布・社会経済的評価、比較リスク分析等)、予防原則、費用便益あるいは費用効果、継起的(追従的 (adaptive) あるいは動的 (dynamic) な)政策決定手順、抑制策と適応策のバランス、など政策決定のための規範(クライテリア)や分析、政策の提案が必要である。さらに、気候政策は、持続可能な発展など他の政策目標との整合が求められることから、WEHAB との関係、途上国先進国協力、現世代内・世代間の公平性(衡平性)、政策のCo-Benefit、抑制政策の正負経済影響に関する研究が必要である。本課題は、課題(1)の検討と平行しかつ連携を取りながら進められるべきである。国際的には、IPCC の安定化シナリオの検討があり、これに向けた安定化レベルの検討が欧州で進んでいる。これらの研究との共同研究が要る。影響研究では、抵抗力(Resilience)や適応策(Adaptation)、公平性について研究が進んでいる。不確実性や費用を考慮した予防原則の適用についての研究も重要である。

【短期および中期の内外政策枠組み・政策・手順の検討】

京都議定書対応の国内外政策研究:

先進国の京都議定書目標達成が今後の国際枠組み検討の前提となる。既に、京都議定書対応の政策に関する各種代替案は出尽くしており、実施に関する詳細の検討に時期に入っている。研究としては、日本では欧州に比べて出遅れている国際・国内的に整合の取れた制度の提案と、その経済社会政治面からの評価、京都体制・京都メカニズム利用の分析的評価等が政策遂行・評価に必要となっている。我が国では各種の技術革新評価や環境産業研究が世界をリードするものとなりうる。

次期枠組みの国際レジーム形成の考え方に関する研究:

京都議定書で定められた2010あるいは2012年以降の国際的枠組みをどうするかの議論は、国際的には2005年から始まる。アメリカや中国およびインドなどの大量排出国をも参加させた効果的な世界各国の参加(global participation)の枠組みの提案が必要とされている。これまでに既に、京都型目標設定の枠での目標設定(動的目標設定 Dynamic Target など)、top-down / bottom-up(自治体・産業界や市民の自主的取り組みと他の政策手段との組み合わせ)、途上国参加のインセンティブ向上、地域協力、技術革新・転移の促進方法、適応策と抑制策との組み合わせ、地球環境基金 (GEF)/適応資金・ODA などを用いた資

金メカニズム再構築, などの検討が行なわれてきている。最終的な枠組みの提示だけでなく, 国際的合意を目指した, 政策決定過程の国際政治学的観点からの分析, それに基づく交渉手順のあり方の提案も必要である。さらに, 温暖化適応政策の研究分野では, 京都議定書以降の発展途上国の参加問題をにらんで, とくに国際レジーム形成の研究が急がれている。途上国側の「温暖化適応対策に対して先進国が援助するのは先進国の義務」との主張に対して, 適応対策の必要性とその範囲, 先進国の支援の理論的解釈に関する研究を冷静に推進しておくことは, 途上国の参加問題の政治的混乱を回避するだけでなく, 先進国途上国双方に利益をもたらすことが期待される。既に京都議定書達成に向けて多くの社会経済システムが変わりつつあり, その政策効果評価は, 政策見直しや次期枠組み検討の基礎となりうる。日本の国策をも踏まえた国際的枠組みに関する研究を, 早期に国際的な場で打ち出して行く必要がある。

【技術的イノベーションと社会的イノベーションの統合】

気候変動政策の具体的推進要素として, 技術開発と普及, 社会システムの変革がある。我が国では個別の技術開発研究は進展してきているが, これらの研究を社会的イノベーションと結びつけ, 技術普及の障害を取り除き, 技術の環境効果をさらに高める研究を進める必要がある。今後この研究分野を推進することにより, 個別の技術開発研究の付加価値を増大させることになる。世界的には, 気候政策に技術革新が寄与する可能性が大である。促進政策検討およびマクロ経済コストとエンジニアリングコストの評価と調和化研究, 内発的技術進歩, の分析が必要である。また, 途上国などへ技術移転は, 気候政策のみでなく発展にも大きな効果をもたらすとみられるため, その促進策と副次効果, スピルオーバー効果の評価研究が必要である。個人の意識行動—社会的慣習や制度, 経済システムの変革は技術進歩と相まって気候政策に影響するところ大であり, 気候政策に関連した広い観点からの把握分析および変革の政策オプション提示が必要であろう。とくに, リスク管理の観点からは, 技術革新か社会的変革のどちらかに一方的に頼ることのないバランスの取れた政策, 持続可能な社会の実現を念頭に置いた政策が必要である。社会への普及速度を加味した有効技術の現実的な市場ポテンシャル定量的分析, 社会的変革の国あるいは世界単位での効果の定量的評価, 技術の社会普及の障害分析, 副次的効果の評価が必要である。

VII. 提 言

1. 全般的事項

研究推進体制を整備すること。

気候変動研究を計画的、統合的かつ整合的に推進するために、省庁を横断する研究統合推進体制を設置する必要がある。これには2つの型が考えられる。一つは、米国における Climate Change Science Program (CCSP)、日本では「南極地域観測統合推進本部」に例を見るような府省関連機関横断型の単一組織という型である。他の一つは、英国に見られるような府省横断型の委員会型である。いずれの型を取るとしても、統合推進体制は長期研究計画を国際協力と国内研究を合わせて策定し、それに沿って、資源配分機関との連携を含めて、研究を強力に推進する能力を持つ必要がある。

国際的連携を強めること。

気候変動研究に関連する国際研究協力体制に積極的かつ計画的に参画する仕組みが必要である。気候変動研究に関する国際研究協力は数多く設定されており、最近これらの間の調整も図られつつある。また、我が国として主体的に展開すべき地域や研究領域が存在する。これらにおいて、我が国が意味のある貢献ができる体制を整備する必要がある。具体的には、先のパラグラフに記した統合推進体制において、国際協力事業に対する戦略的かつ計画的な貢献の方法を策定し実現することが必要である。

資源配分の調整を適切に行うこと。

戦略的研究計画に沿って研究が円滑に進むよう、研究資源の配分が調整される必要がある。この仕組みは気候変動研究の統合推進体制と研究費配分機関との緊密な連携の形で実現できよう。この場合に、研究計画の外にあって意外な貢献をする個別過程研究や観測を適切に研究計画に取り込み育成できる資源配分が行われるよう配慮が必要である。

地域から全球への視点を持つこと。

以下に述べる観測、将来予測、影響評価、適応政策のそれぞれの研究分野別の推進計画の軸とともに、これらを統合した例えば日本の地域ごとの研究から東アジア、全球への研究の空間スケールでの視点も重要である。これらの視点によって戦略的研究計画の統合化が促進される。

2. 地球観測

研究観測から定常観測を経て業務観測へ展開すること。

地球変動の観測には、従来の業務観測とは異なる情報が必要とされる。衛星による氷床や森林の観測がその一例である。これらの研究のための観測・調査から、長期の定常観測、国による業務観測へと必要に応じて円滑に展開できるようにその体制および予算について調整できる仕組みが必要である。この仕組みは先のパラグラフの統合推進体制に設置されることが望ましい。

地球変動観測を統合的に推進すること。

地球変動において重要な多くの現象、例えば温室効果ガスの動態を把握するプロセスにおいては、陸域、海域、大気のすべてを通じての統合的な観測が必要であるとともに、変動する地球システムに関する知見も、人間活動を定量的に評価する上で欠くことが出来ない。

従って、生態学、海洋学、大気科学など地球システムを研究する基礎科学との観測・調査における密接な連携は、地球変動の観測においては極めて重要である。

観測のための機器開発を進めること。

観測研究には、高精度、高耐久性を持った観測機器および観測プラットフォームの研究開発が急務である。これは、陸域での測点観測、海洋でのプラットフォーム観測、衛星観測すべてに共通して行われる必要がある。我が国では幸い高度に進んだ各種の計測機器の開発を民間・国の機関で行っている。しかし、新たな研究のニーズに答えられるような機能を持つ機器の開発においては、その人材や組織は限られている。このような人材の育成に配慮するとともに、地球観測の測器の開発を行うための産業育成も重要な課題である。

地球観測技術者を育成すること。

地球観測のかかなりの部分をロボット観測のような無人化のもとで行えるようになることが、費用対効果からも望ましい。しかし、これらの装置の開発、維持、管理、および得られたデータの処理には多くの技術者が必要であり、これらを行うことが出来る高度の技術と知識を持った技術者の育成とその確保は、我が国が地球観測で先導的な地位を維持するために急務である。

3. 気候変動に関するプロセス研究

観測結果を解析しモデル化を行うためのデータ解析型モデラーを育成すること。

我が国では重要な点に着目し、信頼できる優れたデータを生み出している例が多数あるが、その結果が十分解析され、他のデータと合わせて総合化され、高度な情報として将来予測などにつなげることに成功している例は少ない。フィールド観測や室内実験に基づくプロセスの理解をモデル化し、観測を将来予測につなげるデータ解析型モデラーを育成し、データを情報に転化する能力を強化する必要がある。また、データ解析型モデラーと観測研究者との対話により、最も効率よい観測がデザインされる。

データベース作成の組織的な取り組み強化と、これに携わる研究者・技術者の評価を高めること。

観測データ・人間活動に関するデータ・衛星データなどを収集・評価・加工しデータベースを作成することが、これまでそのユーザーであるモデル研究者の小規模な活動に任されたり、研究者が取得したデータに限られた小規模なものに留まったりする傾向がある。グローバルで緻密なデータベース整備を、観測・データ解析・モデルの研究者の密接な協力のもとに、専門的な研究者・情報技術者が組織的に推進する必要がある。そのためには、この分野の研究者の養成と、こうした競争的資金になじまない研究基盤整備を推進する予算・評価などの仕組み作りが急務である。

人為・陸域・海洋の炭素収支やエアロゾル・雲のプロセス解明のための国際協力を進めるこ

と。

グローバルカーボンプロジェクト (GCP) など国際的な研究プロジェクトの研究計画立案に積極的に参画し、事務局を招致し、そのなかで中核的役割を果たすとともに、プロジェクトをマネージメントできる人材を養成する。

4. 気候変動モデリング・将来予測

計算機資源を継続的に確保すること。

気候・地球環境モデリングの分野は 1960 年代の大気大循環モデリング以来長く計算機の最大ユーザーとして知られており、従って計算機資源に恵まれた環境下において先導的な研究がなされて来た。日本は、1990 年代に計算機資源の増加に助けられて気候モデリングにおいて世界と並ぶようになり、2002 年地球科学を主要目的とした世界最大のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」の完成によって、今や世界最先端のモデルによる温暖化予測が行われつつある。この状態を維持し更に発展させるには、引き続き世界トップレベルの計算機資源を温暖化予測目的に確保することが肝要である。

研究機関 (グループ) の適切な連携と集中化を行うこと。

現在「地球シミュレータ」を用いて行われている温暖化・気候・環境変化予測においては、日本国内の主要研究センターがそれぞれの特色・ミッションにふさわしい役割分担とグループ間連携をして、地球温暖化予測に求められている様々な種類の数値実験を過不足なく行っている。これは研究者レベルでの自主的計画が文部科学省の「人・自然・地球共生プロジェクト・日本モデルミッション」によって構造化された結果である。ますます社会的重要性を増す温暖化予測とそれに必要なより高度なモデルの開発を進めるため、現在実現している研究グループ間の連携を適切な方法で継続する必要がある。また、今後温暖化をめぐる多様なモデル開発と数値実験の大型化と一種の定常業務化が不可欠であり、多数のグループ間の連携を促す、温暖化予測研究の中核的研究拠点を作ることが必要である。このような構造は英国ではハドレーセンターを中心として実現しており、ヨーロッパ各国、アメリカでも同様の動きがある。

地球環境観測・監視と連携すること。

地球温暖化・環境変化予測の前提は地球環境全体の現状についての詳しい情報である。また、今後相当程度の温暖化と環境変化が不可避であることを考えると、近い将来、地球環境の人工衛星等による定常的監視が実用的に行われることになる。この場合、温暖化・環境変化の観測・監視と予測は強い連携の下に行われる必要がある。現在、気象の観測・監視と予測は気象機関によって一元的に実施されている。地球温暖化・環境変化の観測・予測は広範囲の科学技術の専門の協力を必要とするので一元化は不適當と思われるが、人工衛星観測による地球環境の現状の把握には、モデルを用いたデータ同化手法が必須で最も有効な方法である事を考えると、その観点での強い連携が不可欠であり、その点でも前記の少数センターが連携の中核となる必要がある。

アジア・西太平洋域に力点を置いた研究・開発と国際協力を進めること。

地球温暖化と気候・環境の変化は、地球全体で起こるものであり、そのモデリングと予測も地球全体を対象として行われる。しかし、地球上の気候・環境には地域的特色があり、今後

進行する温暖化に伴う変化に対応するために社会から求められる情報は、地域的なものが重要になることは明らかである。現在の気象・気候のモデル（更に地球環境のモデル）はまだ不十分であり、地球全体を同一レベルの詳しさ、信頼度で予測することが難しい。日本の気象・気候にとってはモンスーン、台風、集中豪雨などアジア・西太平洋域に特有でかつ社会的影響の大きな現象があるので、それに力点を置いた研究とモデル開発を進めることは、世界全体の温暖化―気候変化予測における日本研究陣の重要な役割である。また、そのために共通の関心を持つ諸国との協力を重点的に進める事が求められる。

5. 影響・リスク評価

温暖化政策に有用な情報を提供する高度で定量的な影響・リスク研究を推進すること。

中長期的な温暖化政策や国民のライフスタイル選択に対して判断基準となる有用なリスク情報を提供するためには、個別プロセス研究にとどまらず定量的な影響・リスク研究が必要である。そのためには、経済評価を含む影響量の定量化に関する研究や日本、アジア・太平洋地域、さらに全球といった一定の地域全体の総影響量を予測するような研究を強化する必要がある。

国際的な温暖化政策に対して有用な科学的情報提供を可能にする影響・リスク研究を進めること。

「気候系に対して、危険な人為的干渉をおよぼすこととしない水準において、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化すること」という国連気候変動枠組条約(UNFCCC)の究極の目的を達成するためには、影響から見た温暖化の危険な水準や世界的にみて脆弱な分野および地域の特定が必要である。こうした知見は、複数の分野および地域の影響に関する知見を総合化することによって得られるものであり、そのためには目標を共有した体系的研究の組織化が必要である。その中では自然科学、応用科学と社会・人文科学の研究者が密接に協力すべきである。

影響・リスク研究を適応策の研究に展開すること。

温暖化への適応策は、単に悪影響の克服だけでなく、将来社会の持続可能な開発にとって不可欠の要素である。望ましい適応策は、近代的技術と個々の地域や国、地方の伝統的な適応能力を組み合わせることによって実現されるものであるため、そうした方向での適応策に関する研究が必要である。

モニタリング、気候モデル研究および政策研究との密接な連携体制を構築すること。

影響リスク研究は、前提として影響の検証および気候シナリオと強くリンクしており、また研究目的の明確化のためには政策研究からのガイドが必須である。これらの分野とのより一層の緊密な連携が必要である。そのためには、省庁を横断した気候変動研究を推進する連携拠点の設置が極めて有効であると考えられる。

6. 政策研究

予防的で柔軟性を持ちかつ頑健な気候政策を可能にする自然科学・社会科学を統合した実政策に対応する定量的政策研究を推進すること。

気候は慣性を持つため、その政策は長期にわたり、かつエネルギー経済など他の重要政策との関連が高い。予見的な政策を可能にするためには、環境リスクや他の政策との融合を目指した、自然科学と社会科学を統合するシナリオタイプの数量化モデル開発等、政策を定量的に評価できるツールの開発を一層推進すべきである。研究のための研究でなく、実政策プロセスを支援する研究でなくてはならない。

政策研究を国内のみならず世界の政策形成へも貢献できるよう国際化を進めること。

気候政策は地球規模で進められている。しかし現在の日本の政策研究はとかく国内政策対応にとじこもっている傾向が強く、国際政治の中での日本の国策形成、世界の政策形成に十分な貢献をしているとはいえない。政策研究者は広く世界に場を求めるべきである。

政策論議の前提として、公開された政策研究検討の場を設置すること。

現状では各省庁が in-house で政策研究を行い、政策にしたてて省庁間での政策調整に持ち込む。このため、政策研究の過程が明らかにされない場合や、科学的知見に政策的バイアスがかかる場合がある。政策研究に関して、科学的・中立的に公開で議論される場が学会等を中心に設定されるべきである。

おわりに

地球温暖化研究イニシャティブ(気候変動分野)の座長をリーダーに、同イニシャティブに設けられた4つのプログラムの世話人を中心とする執筆者グループが組織され、主として研究者の視点から「気候変動研究の推進戦略の策定」という挑戦的な試みが行われた。執筆者グループメンバーは、市川惇信・小池勲夫・松野太郎・三村信男・井上元・林陽生・西岡秀三・森田恒幸(故人)・近藤洋樹・原沢英夫(敬称略)の11名である。

地球温暖化研究に関わる研究者や関心のある方々の意見を可能な限り報告書に反映させるべく、報告書のドラフトをホームページで公開して意見を募集した。提出していただいた約100件の貴重な御意見は本報告書を作成するうえで参考とさせていただいた。この場をかりて御礼申し上げたい。