

1. 地球温暖化

1-1. 背景

地球温暖化が 21 世紀における人類の大きな関心事の一つであることは言うまでもないであろう。2001 年に出された IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) の第 3 次報告書では、地上の平均気温が 20 世紀の間に約 0.6 度上昇し、この気温上昇は過去 1000 年のどの世紀よりも大きかったと考えられること、また衛星データによる 60 年代以降の雪氷面積の減少、海洋の貯熱量の増加など、様々な観測から地球の温暖化の傾向がよりはっきりしてきたことを述べている。精力的に行われた過去の気候調査に現在の気候データを重ね合わせることによって、世界的な地球温暖化についての全体像が明らかになりつつある。一方で、カリフォルニア大学のキーリング博士がハワイ島マウナロア山頂付近で大気中の二酸化炭素の連続観測を始めたのは 1957 年であり、また地球観測年 (IGY) の一環として同年から南極点での二酸化炭素濃度の連続観測が開始された。これらの精密な長期連続観測データによって大気中の二酸化炭素は着実に増加していることが明らかにされた。これまで実際のデータが無いままに提唱されていた論議である二酸化炭素等の温室効果メカニズムにより、気温の上昇が引き起こされる可能性を観測データと結びつけて検討されるようになった。

温室効果ガスには、二酸化炭素のほかにもメタン、一酸化二窒素、クロロフルオロカーボンなどがある。また、温室効果ガスには含まれないが、地表の温度を支配する人間活動にも起因する大気成分としてエアロゾルがある。自然起源のエアロゾルは、土壌粒子、海水の飛沫、火山灰などの微粒子である。一方、人間活動による化石燃料の使用によって、二酸化イオウや煤 (ブラックカーボン) などが多量に大気中に放出されている。一般にこのようなエアロゾルは、雲の凝結核となる他、太陽光を散乱させ地球が吸収する放射量を減少させ、負の温室効果をもたらす。しかし、ブラックカーボンなどは正の放射強制力を生じるなど組成によってもその影響は大きく異なり、現在地球温暖化に関与する大気成分の中では説明が遅れている成分である。大気中の水蒸気 (雲) も地球大気の温室効果には大きな効果を持っており、従って地球規模での水循環は地球温暖化と密接な関係がある。大気中の水蒸気は気象条件の影響を受け時空間的変動が極めて大きいことから、一般的には温室効果の議論では従属的要素と見なされ、前記のガス類が主な温室効果ガスとして扱われている。温室効果ガスはいずれも人間活動によりこれらの生成・吸収が大きく支配されており、特にクロロフルオロカーボンは完全に人間活動にその生成が由来している。しかし、クロロフルオロカーボンはオゾン層の破壊に関与することから、1987 年のモントリオール議定書により生産量が国際的に制限され、今後長期

的には減少していくことが予想されている。このような大気成分の科学的な作用機構の解明と国際政治が結びつき法的な手段を執ることが出来たことは、その他の温室効果ガス排出に関する国際的な取り決めの策定に関して一つの指針を与えるものとなった。二酸化炭素の排出削減についての京都議定書はこれに習うものであるが、二酸化炭素の生成・吸収には人間活動以外にも多くのプロセスがあり、その制御機構も複雑である。このような背景から、地球温暖化に大きな影響を及ぼす二酸化炭素・メタン・一酸化二窒素に関して、大気中での収支に関与する大気・海洋・陸域での物質循環の観測・プロセス解明が地球温暖化観測・研究の一つの柱になっている。

さらに、先に述べたエアロゾルと雲が相互作用することで地球温暖化と関係がある地球放射環境に大きな影響を与えていることが指摘されていることも見逃せない。地球の放射環境を明らかにすることは、将来の温暖化予測の不確実性を小さくすることにつながる。従って、観測とモデルの連携により、エアロゾルと雲の相互作用メカニズムの解明と、影響度の定量化が必要となっている。地球の気温を定め、大気や海を駆動し、気象の多様性を生み、人類を含む生物圏を反映させているエネルギーのほとんどは太陽を源とする放射である。地球温暖化の問題は地球に入射する太陽放射の量と、出てゆく地球放射の量の収支を知ることから始まる。入射した太陽放射は、地球上の様々な物質 (例えば、地表面、雲、大気) と相互作用し、一部は反射して宇宙空間に放出され、また一部は熱として取り込まれ、大気や海を駆動するエネルギーとして利用されるという複雑なプロセスを経る。これらのプロセスは全地球規模で時空間的に変動していることが地上に多くの観測点を必要とする理由である。宇宙からの衛星観測は有効な手法の一つと言える。

地球温暖化が進行することで、地球環境の変化は様々な事象に及ぶと考えられている。気候変化を予測し評価する IPCC の第 1 作業部会では、2100 年における世界の気温上昇および海水面上昇を予測しており、このような近未来の気候変化のシナリオに対してその影響、脆弱性を第 2 作業部会で影響予測や評価を行っている。例えば、過去 30 年間、北半球の積雪面積は約 10% 減少しているが、特に、1980 年代半ば以降の減少、また季節としては、融雪期である春における減少が顕著である。融雪期の顕著な積雪面積の減少は、積雪域のアルベド・フィードバックが働いているとの考えが出されている。北半球の海水面積も過去 30 年間では減少傾向にあり、その速度は 10 年間で 3% ほどの割合である。北極海の海水面積の減少を季節で見ると 8 月から 9 月に特に顕著である。これらは温暖化の影響と考えられ、海面上昇は太平洋などに点在する隆起珊瑚礁からなる島嶼国家にとっては大きな脅威である。また、

気候メカニズムの変化により地域によっては降水量や降水頻度が変わる可能性があり、そのため水需給のバランスが崩れるなど日常生活や農業などへの影響が懸念されている。また温暖化により夏季の暑い日が多くなることが予測されているが、これにより熱射病などの発生率が増加し、特に高齢者の死亡率が増えることが心配されている。また、死亡率の高い熱帯熱マラリアの流行危険地域が北上し、中国北部、韓国、西日本一帯までが100年後にはその危険地域に入る可能性が指摘されている。このような温暖化による様々な現象を長期的に観測することも地球観測の重要な柱である。

1-2. ニーズと現状

地球温暖化における観測のニーズは次の3つに大別することが出来る。気象・海象要素などを含む地球の温暖化のモニタリングは、地球温暖化に関心を持つすべての国民のニーズである。この目的での観測は現在定常観測として、各省庁の研究・調査機関で実施されている。2つ目は、モデラーを含む気候変動の研究者を主なユーザとした地球温暖化のプロセスを理解するための解析に必要な地球観測であり、地球温暖化とリンクする大気成分（二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素）などの濃度、及びそれらの大気・陸域間あるいは大気・海洋間のフラックスのモニタリング、さらに大気中微粒子（エアロゾル、雲）の分布や物理特性の観測、及びそれらの変化のモニタリングである。これらの観測は、温暖化のモデリング・将来予測のための検証データとして必要なものである。さらに地球大気モデリングのためのパラメータを明らかにする観測も含まれる。さらに様々な産業活動に携わっている一般国民が必要とする、地球の温暖化が食料生産や生態系を含む地球環境に与える影響を監視し評価するための観測である。この観測の対象としては、気象・海象（気温、水温、降水量など）、海水面（水位）、雪氷（大陸氷河、氷床、海氷）、陸域・海域生態系などがある。また、気象庁が行っている各地の桜などの開花調査、気象庁・海上保安庁による海水面変動調査などもこの影響評価の観測とも考えることが出来る。

1-2-1. 我が国の基本方針

我が国においては、総合科学技術会議の重点分野推進戦略に基づいて、環境分野での重点課題に対応した「地球温暖化研究イニシアティブ」が立ち上がっており、研究の枠組みの立案がすでになされている。従って、この枠組みの中での温暖化のための地球観測計画を重視して立案する必要がある。この研究の中で温暖化の観測が明らかにすべき事項は以下のとおりである。

二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハロゲン化炭化水素、対流圏オゾンなど主要温室効果ガスの濃度変化は？エアロゾル、イオウ化合物等

の放射強制力に影響を与える成分と温暖化との関係は？

陸域と海洋の二酸化炭素吸収の現状と変化 大気 海洋 陸域の炭素や窒素の大規模循環はどうなっているのか？

土地利用、海氷、雪氷、生態系の現状と変化 いつの時点でどのような気候や海面水位などの変化がおこるか？

人間活動による温室効果ガスの発生・吸収量、人口、産業構造、森林等の変化、エネルギー需給構造の変化 人為的な温室効果ガスの発生源と発生量はどのように推移するのか？

1-2-2. 国際的な動向

地球温暖化に関わる観測においては多くの国際的な取り組みが行われており、これらの国際プロジェクトからの要請も我が国に対するニーズと考えることが出来る。地球温暖化観測と密接に関連する気候変動に関する観測については全球気候観測システム（GCOS）が活動しており、昨年4月のGCOS分科委員会で承認された、GCOS第2回適性度報告（Second report on the adequacy of the global observation systems for climate in support of the UNFCCC）は、昨年12月のCOP9/SBSTA19（第9回締約国会議/科学的及び技術的な助言のための補助機関第19回会合）に基づいて討論されており、今後の実施計画がSBSTA21で報告されることになった。この適性度報告の中には、温暖化研究の観点から重要な、観測項目が提示されている。以下に、UNFCCCやIPCCの目的に合う統一的な気候情報を提供していくために必要で、全球規模で気候監視にみあう高品質の観測を行っていくべきとされた観測量を、大気・海洋・陸面の成分ごとに整理した。

全球での実施が現在可能でUNFCCCの要請に大きなインパクトをもつ「基本気候変数」

【大気】

表面： 気温、降水量、気圧、放射収支、風速、風向、水蒸気量、視程
高層： 放射収支（太陽放射含む）、上層大気温度、風速、風向、水蒸気量、雲特性
組成： 二酸化炭素、メタン、オゾン、他の温室効果ガス、エアロゾル特性

【海洋】

海面： 海面水温、海面塩分、水位、海面状態、海氷、海流、海色（生物活動のため）、二酸化炭素分圧
表層： 水温、塩分、海流、硝酸、炭素、トレーサ、リン酸

【陸面】

河川流量、水利用、陸水、湖面水位、積雪被覆、氷河、氷帽、永久凍土及び季節凍土、反射率、陸

面被覆（植生タイプを含む）、fAPAR（光合成有効放射吸収率）、LAI（葉面積指数）、バイオマス、森林火災

また、温暖化への寄与率の半分以上を占める二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの大気蓄積を決める人為的な排出と森林や海洋への炭素吸収を評価し、そのメカニズムを理解し、将来を予測することが、地球温暖化を防止するための排出削減目標を科学的根拠に基づいて設定するためにも重要である。我が国の温暖化研究に関わる観測はこのような地球規模での炭素循環研究における国際プロジェクトである GCP (Global Carbon Project)、および定常的な炭素観測を目指す全球炭素観測 (IGCO, Integrated Global Carbon Observation) の提案と連携して推進しなくてはならない。同時にこれらの活動は IPCC に重要な貢献となる。これらの国際プロジェクトにおいては、温室効果ガス観測について、以下のことを重視している。

温室効果ガスの発生、吸収、輸送、変質などの現状を把握することが重要である。

自然のプロセスと人為影響において温室効果ガスの大気、陸域、海洋のプール間のフラックスと、各プールのストックを、長期継続的にグローバルに観測することが基本である。

その長期変動を駆動する人為排出量の統計データを長期に継続的に調査して、その変動要因を明らかにする。また、それは自然のプロセスと人為要因を分離して解析する重要な情報である。現在調査しなければ過去にさかのぼって調査できない点で観測と同じ性格をもつ。

二酸化炭素など温室効果ガス濃度だけではなく、自然との相互作用の駆動力を明らかにするための様々な観測が重要である。研究として実施されその有効性が明らかになったものを、長期に、グローバルに、系統的に展開することが重要である。排出削減努力の評価として炭素隔離や排出削減などが大気中二酸化炭素濃度レベルにどのように貢献するかを監視・予測する。地域や分野ごとの発生/吸収を評価する（空間的な分解能を上げる）ことを含む。

気候変化に伴う炭素循環変化として気温上昇、高二酸化炭素濃度、水環境変化など気候が変化した環境での陸域の炭素ストック変化のモニタリングが重要である。

1-3. 温暖化観測の目標・現状・課題

1-3-1. 温暖化観測で今後 10 年間に達成すべき目標

二酸化炭素の大気中濃度観測からそのフラックスを月単位で、陸域では 100 km、海洋では 500 km の空間分解能で、誤差 10 %で算出。

陸域・海洋・人為など発生源・吸収源を分離するための同位体、酸素、その他の大気微量成分の観測をモニタリングへ移行。(世界で 100 地点。フラスコサンプリングでは炭素同位体は 0.02 ‰で、酸素濃

度を 10 permeg (パーメグ：百万分の 1) で、それぞれ相互比較できることと、自動連続観測に移行)

気温上昇、二酸化炭素・窒素酸化物の施肥効果、水環境の変化、病虫害の移動、森林火災などの擾乱、異常気象の頻発など、将来の環境変化に対する食料生産や陸域生態系の応答・炭素フラックス/ストック変化に関する試験モニタリングの実施と、その後の長期モニタリングの定式化。

メタンの大気中濃度観測から、そのフラックスを月単位で、陸域で 100 km で、誤差 30%で測定。消滅に関わる OH ラジカル濃度を含めた大気化学関連観測をモニタリングに移行。

エアロゾルと雲の相互作用メカニズムの解明と、放射収支に与える影響の定量化。温暖化がもたらす雲量や雲頂および雲底高度の変化メカニズムの把握と、その定式化。

1-3-2. 気象・海象観測

日本における、地上、高層、潮位の定常観測地点のうち、地上観測に関しては、気象庁の 156 の観測点で定常観測がおこなわれており、そのうち 14 地点は GCOS の地上ネットワーク (GSN) に指定されている。また、高層観測に関しても、18 の陸上観測点で定常観測が行われており、そのうち、南極昭和基地など 7 地点は、GCOS 高層ネットワーク (GUAN) に指定されている。一方、海上気象や海象の観測は、観測・調査船、篤志観測船 (VOS) およびブイにより行われている。

上記により、温度、降水量(雨・雪を区別)、上層風、陸上風、水蒸気、海上風など、基本的な気象の物理量や、水温、塩分、海流、波浪、潮位などの基本的な海象要素が観測されている。これらにより、これまで、地上気温や、海面水位(検潮)、など地球温暖化監視の基本的物理量が測定されており、今後も一貫した観測の継続が必要である。

1-3-3. 大気組成観測

衛星観測

グローバル(全経度、季節)に、大気中二酸化炭素のカラム濃度を、1 ppm の精度で観測する衛星。10 年後の衛星センサとして 1 ppm の精度の実現をめざし、その第一段階として 4 ppm の精度を目標として進められている GOSAT センサのハードウェア開発とデータ解析技術の研究をすすめること、さらに、次期センサの開発を目指した研究には、極めて高いプライオリティーを与えるべきである。GOSAT センサの構成・データ解析・検証観測などに広範な研究者の英知を結集して成功させることが重要である。

地上観測

GCOS の大気部分で直ちに行うべきことは、フラックスの多様性をより空間的に代表するもっと密度の高い観測ネットワークを建設し観測を維持することである。そのためには少なくとも 0.2 ppm の測定

確度を持つ、直接連続観測あるいはフラスコサンプリングによる定常的な観測ネットワークの充実と最適化(相互に比較できる精度として0.2ppm)である。現在達成しているよりもっと高密度の観測網を、大陸内部でネットワークを拡張することが必要である。

現在この観測は研究として実施されており、世界で100地点でのステーションからなる。わが国で連続観測を、気象庁(3地点)、環境研(2ヶ所+シベリア10地点)、極地研(南北極2地点)での観測を実施している。今後、大陸内部や熱帯地域などに観測領域を広げる必要がある。そのためには費用対効果の高いセンサ開発と既存のプラットフォームを有効活用することが重要である。

航空機による高度分布の観測

航空機での直接連続観測あるいはフラスコサンプリング分析による高度分布の定常的な観測ネットワークを充実することが重要である。航空機などにより大気中の二酸化炭素濃度の全球的な三次元分布が求められ、大気の輸送の評価も含めて、さらにモデルを本質的なところで束縛する、有効なデータとなる。そのためには高精度・高頻度で高度分布を測定する必要があり、その経済的な方法として民間航空機による全球的な詳細な観測を実施することが現実的で、重要である。しかしながら、民間航空機に観測機器を搭載するには、1.航空機の安全に関する完全な認証を得るための機器開発、2.運行にあたる民間航空機会社の理解と協力を得て地球全体をカバーすること、3.飛行場周辺での汚染、長期にメンテナンして運用することからくる測定精度・データの質を保証するQA/QC体制の確立が必要である。

我が国は航空機によるモニタリングを世界に先駆けて実施してきた。仙台沖でのフラスコ(東北大)、民間航空機による成田-シドニー間でのフラスコ(日航・気象庁)、シベリア3ヶ所での連続+フラスコ(環境研)、相模湾沖での連続+フラスコ(環境研・JAXA)などが実施されている。また、民間機に搭載できる連続測定器の開発が進められており(環境研・日航・気象研など)、民間航空機による観測を整備することで、地上観測が困難な場所を含め世界約数百地点で、毎日のペースでの観測が可能である。

炭素同位体、酸素濃度

大気・海洋・陸域の炭素循環の理解に不可欠な二酸化炭素の同位体、酸素濃度などの高精度観測ネットワークの充実と、相互比較できる標準ガスシステムの構築。二酸化炭素の発生源に関連する一酸化炭素(CO)、水素(H₂)、煤(BC:ブラックカーボン)などの観測が重要である。

我が国では、国立環境研究所(波照間、落石の地上ステーション、シベリアでの航空機、北米・豪州航路の船舶、苫小牧のフラックスサイトなど)、東北大学(日本-オーストラリアの商船、中国内陸)、極

地研究所(昭和基地、スバルバル)、産業総合研究所(高山)、京都大学(シベリア)などでフラスコサンプリングによる同位体比の長期継続的な観測が行われている。大気中の酸素濃度については、国立環境研究所(GC-TCD法)や東北大学(質量分析法)が二酸化炭素等の同位体比観測と同時に分析を行っている。また、国立環境研究所は波照間の地上ステーションで酸素濃度の連続自動測定を行っている。

エアロゾルの観測

地球温暖化の監視と将来予測をより発展させるためには、一般には、気候システムを構成する大気・海洋・陸面間のエネルギー相互作用、大気大循環を駆動する水循環、放射過程をコントロールする雲とエアロゾル、長期変動を支配する大気海洋相互作用の理解を進める必要がある。しかし、現在もっとも不確実性が高く、重点的な研究を進めなければならない課題として、IPCC第一作業部会が取りまとめた第三次評価報告書の本文第7章では、

「おそらく、気候の将来予測における、最大の不確実性は、雲や、雲・放射の相互作用に起因する。」

と指摘しており、また、この相互作用には、エアロゾルが関与していることから、エアロゾルの雲を通しての放射への効果、いわゆる間接効果が上記の不確実性に含まれる。実際、上記報告書の「政策決定者への要約(SPM)」では、放射強制力に関連して、

「エアロゾルは、直接的な放射強制力に加え、雲への効果を介して、間接的な放射強制力も持っている。この間接的な効果は、その度合は非常に不確実であるものの、負の値の放射強制力であり、現在、この効果に関して、より多くの事実が集まっている。」

と記述している。現在、この問題に関する研究が進みつつあるものの、大きな不確実が残されている。これらを考慮すれば、大気における、雲・エアロゾル・放射をめぐる物理過程に関する理解を進めることが最重要課題であり、従来の気象・海象の観測に加えて、衛星、航空機などによる観測手段を導入して、放射収支など放射の物理過程、三次元雲分布、三次元エアロゾル分布を把握する観測が必要と考えられる。従来の気象、海象の観測体制の維持は重要な役割を引き続き担うものである。

このエアロゾル、雲の観測には理想的には、大気観測用の専用航空機の確保が必要である。このような専用機の確保によって、始めて観測技術のノウハウが蓄積され、我が国の大気観測の大幅な向上につながると考えられる。特に雲システムの研究には航空機観測が非常に有効である。しかし、我が国での当面の対応として、研究観測用の専用航空機が無いことを前提にすると、我が国では比較的設備が整っている船舶の利用と、高い技術による高度な地上観測システムの開発と配備がもっとも現実的・効果的であると考えられる。具体的にはエアロゾルと雲の気候影響研究にとっては、日射計、赤外放射計、マ

マイクロ波放射計，スカイラジオメーターなどの受動型のセンサを，2 波長ライダーと雲レーダなどの能動型センサを組み合わせた地上（船舶を含む）設置型システムが有効である．これらの機器は全自動化できる．同時に大気質を観測するために短寿命ガスとエアロゾルの観測が必要である．そのために二酸化イオウ（ SO_2 ），一酸化炭素（ CO ），オゾン（ O_3 ），さらにエアロゾルの観測機器が必要である．最近では大循環モデルにおいても雲核量を顕わに表すことによってエアロゾルの間接効果をシミュレーションする必要があるため雲核計が必要になる．これらも全自動型にする必要がある．これらの観測データの包括的な収集は，下記の地球温暖化プロセスの理解を高める上で，必要不可欠である．

（雲とエアロゾルの鉛直分布の解析）

エアロゾルの雲との相互作用を気候研究の観点から研究するためには，エアロゾルの特性（粒径分布，化学組成など）とともに雲底付近の雲粒径の情報が非常に重要である．このような研究は，現在の大循環モデリングにおいて大きな不確定性をもつ低層雲の形成過程のモデリングにとっても重要である．また，大循環モデルを用いて地球温暖化研究を行うためには，中上層雲の融解プロセスを理解につながる中上層雲の雲量，雲水量，有効粒子半径，雲粒子落下速度などの温度依存性のデータ取得が必要である．しかし，これらの情報は受動センサ観測では得ることが出来なく，能動センサである 94 GHz 雲レーダとライダーの同時解析が必要である．現在進められている，「人・人間・地球共生プロジェクト」のモデリンググループは，この部分のパラメタリゼーションの違いにより 1 度から 2 度程度の気候感度の変化が起きるとしている．2005 年頃に実現予定の NASA（米国大気海洋局）による CALIPSO と CLOUDSAT による A-train 計画は，短期間の技術実証ミッションであるが，衛星搭載レーダとライダーのデータが得られ，その検証と同時解析が気候研究にとって重要である．さらに，より高精度で本格的な研究観測を目的として単一衛星に雲レーダ，ライダー，受動センサを搭載した，EarthCARE 計画が日欧協力により研究中である．

（エアロゾルの光学的厚さと一次散乱アルベド）

スカイラジオメーター，日射計，エアロゾルサンプリング装置で得られる情報を総合的に検討することで，放射エネルギー収支のエアロゾルの光学的厚さと一次散乱アルベドを得る新たな試みがある．エアロゾルの直接効果は大気上端ではほとんど 0 であるが，大気下端では大きな放射強制を起こすために，大気安定度やモンスーン循環を変調する間接循環を引き起こす．それにともなって降雨量も 1mm/day の大きさで変化する可能性がある．その定量化を行うことは重要である．

（衛星観測による降雨量，水蒸気解析）

TRMM/PR による直接観測の他に，可視・赤外センサとマイクロ波センサを組み合わせた高度なアルゴリズムが存在する．この衛星観測は地上における土壌水分量，雲の鉛直分布の観測と併せると有効である．将来は GPM 主衛星も利用できる

（衛星観測による雲解析）

従来の雲量，雲頂温度に加えて雲水量，光学的厚さ，有効粒径，氷雲・水雲の分離等を可視・赤外放射計とマイクロ波放射計データを複合解析する．2005 年頃からは A-Train 衛星群のデータが利用できる．

（衛星観測によるエアロゾル解析）

エアロゾル種，光学的厚さ，オングストローム指数などを出す新たな研究が出てきている．2005 年頃からは A-Train 衛星群のデータが利用できる．これらの解析研究は，GEWEX (Global Energy and Water cycle Experiment) や既存の気象観測網で行われている早く応答するシステムのための観測網と同時に解析されることが重要である．たとえば，土壌水分量は GEWEX/GAME (Asian Monsoon Experiment)/CEOP (Coordinated Enhanced Observing Period) プロジェクトで投資され配備されているので，共同が可能である．

温室効果ガス観測の精度管理

二酸化炭素について，WMO（世界気象機関）は NOAA の標準ガスを推奨している．我が国は東北大学が開発した重量法による標準ガスシステムを，東北大学，国立環境研究所，気象研究所，極地研究所で持っており，気象庁は NOAA の標準ガスを使用している．NOAA の標準ガスとの相互比較が定期的に行われている．国立環境研究所では大気中二酸化炭素同位体計測のための国際的相互比較と標準ガスシステムの体制整備を進めている．また，大気中酸素濃度測定のための標準ガスの開発も進めている．

1-3-4. 陸域観測

定常的な二酸化炭素，エネルギー，水蒸気フラックス観測

陸域生態系での二酸化炭素，エネルギー，水蒸気のフラックスを連続的に渦相関タワーで測定する定常的なネットワークの展開と適正配置が必要である．ここで重要なことは，1. 現存する渦相関生態系フラックスの観測を，それぞれの場所で少なくとも 10 年間の継続することを保証すること，2. 観測密度の低い地域や擾乱を受けている生態系にも拡張し，3. 即時性のあるデータ公開を実現し，データの質を保証することである．また，較正付の二酸化炭素濃度の測定を加え，大気観測ネットワークを補強するべきである．

現在，この観測は世界で約 150 地点のタワーから

なるネットワークで実施されており、近いうちに250地点に増加する可能性がある。

我が国では、高山（産業総合研究所・岐阜大学）、苫小牧（国立環境研究所）、林野庁によって6ヶ所での長期観測が実施され、大学などによって国内に約15ヶ所、海外（シベリア、中国、タイ、マレーシア、インドネシアなど）に約10ヶ所での観測を実施している。また、これらのサイトと韓国などのサイトが協力してAsia Flux ネットワークを組織している。今後、生態系タイプ、生態系の回復のステージや土地利用の強さなど様々な種類の土地被覆地域をカバーする観測が重要である。

Asia Flux では測定法やデータ解析に関するガイドブックを出版している。苫小牧のフラックスサイトを国際相互比較の場として提供している。

複雑地形などフラックスの直接計測に関わる問題

陸域生態系の二酸化炭素フラックスは幾つかの方法で測定されているが、森林・草地・農地などでは微気象学的方法が一般化しつつある。しかしながら、夜間や降雨時の測定など欠測が避けられないこと、長周期成分などエネルギーフラックスが閉じないこと等の課題が残され、未だ開発や研究的要素が多い。さらに、この方法が適用できるのは平坦で均一な場所に限られるため、複雑地形でのフラックス測定に大きな研究開発課題が残されている。アジアの人口密度が高い地域では、平地は農業用地化され森林は複雑な地形の山岳地に多く、適用に向けた課題が多い。

葉、枝、幹、根、土壌、林床植生などコンパートメントごとの炭素収支測定

気候変動実験のほかに、植物の葉、枝、幹、根、土壌、林床植生など森林のコンパートメントごとに炭素収支を測定し、その気温・日射・土壌水分・生物季節（Phenology）などに対する応答や、そのコンパートメント間の相互作用を理解する必要がある。そのためには、コンパートメントごとの炭素収支を自動で長期に計測することが重要である。少なくとも長期に運営する二酸化炭素フラックスサイトではこうした観測と結合した総合的なモニタリングが重要である。

現在の陸域炭素観測は、生態学的な観測（一次生物生産やバイオマス、土壌炭素など）、渦相関法によるフラックス観測、陸域の（高高度タワーや航空機による）大気中の二酸化炭素濃度観測、遠隔計測データなどから成り立っている。さらに、肥料、気候、土壌水分、日射、擾乱（焼失面積や衛星からの火災個所）などの情報がある。

森林および土壌のバイオマス

森林バイオマスのインベントリは、地上部の炭素貯留の大きさ変化をモニターするのに重要である。現在のインベントリは、商用木材の量を高精度で（国

レベルでは標準誤差が1%）定量化するように策定されている。直径、樹高、樹齢の要素とバイオマスの関係式を使って、樹木の炭素貯留を推定できる。しかし、一定の変換/拡張係数を使うことは、樹木の密度も拡張係数も樹齢や樹種により大きく変わることから、大きな誤差を生じさせる。さらに、繰り返されるインベントリから堆積増加を求め、炭素の隔離量に変換するには、植物の器官によって異なるCO₂として大気に帰っていく速度を考慮した拡張係数が必要である。非商用林や熱帯森林までカバーを広げ、衛星からバイオマスを遠隔計測する技術(SAR)を発展させるにはさらなる研究が必要である。

土壌炭素の貯留量は大気や地上陸域炭素プールの2倍以上の大きさがあるが、管理のあり方により極めて変動しやすい。このプールの特性を明らかにするためには、有機層と無機土壌双方のデータが必要である。全炭素プールはバルク密度と深さ方向の分布によっても決められるので、それ自身の炭素濃度だけでは十分ではない。さらに、土壌の脆弱性を理解するには、早いターンオーバーのサブプールと遅いものとを区別する必要がある。それは生物学的、化学的、物理的な流動性加速のメカニズムにかかわる。

多くの国の土壌調査は土壌中炭素貯留の定量化ができるように実施している。こうした調査のほとんどは土壌の体積密度や石の混入推定がほとんど考慮されていないので、現在使える情報源を代表しているに過ぎない。さらに、土壌炭素計測の技術開発、土壌炭素評価の新しいモデルに基づいた柔軟性に富んだ取り組み、モデルに必要な生物物理的パラメータの提供が必要である。

1-3-5. 海域観測

従来から、海洋の循環や物質循環に関わる観測は主として観測船による現場観測を中心に行われてきた。我が国では、気象庁や水産庁が現業観測として、太平洋におけるいくつかの定線でCO₂観測を含む温暖化に関係する成分の観測を行ってきた。例えば、気象庁では本邦南方の東経137度の定線で1980年代の始めから継続して海洋・大気のCO₂観測を行っており、精度の高い長期観測として高く評価されている。

これらの観測船による観測は多種・多様な観測を高い精度で実施できること、観測目的にあわせて運航を計画できるなど多くの長所があり、今後も強く推進されるべきである。しかし、観測船による観測では、船舶の数や運航経費の面から、観測データの時間・空間密度を飛躍的に充実させることは極めて難しい。従って、今後は、観測船による観測の長所を生かして、海洋定点観測の充実、国際共同による海洋定線・断面観測の推進、研究観測の充実、を図るとともに、これらと連携しながらSOOP (ships-of-opportunity)の活用、自動観測センサの開発とブイ・フロートの利用の推進、衛星観測およびデータの利用促進等、によって観測データの

時空間密度の充実を図ることが重要である。ここでは、これらによる温暖化研究観測における必要項目の整理を行い、今後の観測船・研究船による研究観測を加える。

海洋定点観測

従来型の観測船による観測定線のスナップショット的な海洋観測により海洋の構造が解析されてきた。これに対し、海洋定点観測では、季節・年の進行にともなう海洋の変動・変化を観測するのが目的であり、温暖化現象解明のためのプロセス研究、海洋物質循環モデルの検証と将来予測、海洋の長期変化検出に重要な意味を持つ。

観測が比較的容易な亜熱帯海域でかつ島の観測拠点に近いハワイ、バミューダで季節的に密度の高い長期観測研究が実施されてきた。1988年からは、炭素循環観測に必要なパラメータを網羅した観測が開始され、10年スケールの海洋生態系構造変化、海洋表層二酸化炭素濃度の増加のような長期変動も確認されている。毎月の観測船観測が原則として実施され、可能な限り多くの物理・化学・生物パラメータを観測することで、現象間の相関・因果関係を解析できる代表的ステーションとなった。アラスカ湾海域にカナダの気象定点観測船が運用された1960年代から1981年の期間には週ごとに物理・化学観測が実施され、海洋炭素循環研究に重要なデータが蓄積された。しかし、定点観測船の運用は廃止された。日本では1998年から2000年を集中観測期間として北西太平洋高緯度において年9回程度の繰り返し観測が実施されたが、その後の高い頻度での定常的観測の継続が途絶えた。

海洋の定点観測として、実現性のある海域の点で、隔月程度以上の観測頻度で観測船観測を行うことが、海洋の炭素循環研究には必要である。亜熱帯海域の観測は、先進国の研究拠点が存在する島から近い海域に代表的観測点を設定することができた点で地理的に恵まれていた。太平洋高緯度海域には適切な拠点になりうる離島がない。カナダ定点では、定点観測船が維持されなくなって以来、高頻度観測が困難となり、その後は年3回程度と観測頻度が低下している。

観測定点を多数維持することは困難であるが、海洋物質循環モデルを検証する目的では、海域特性の大きく異なる代表的な観測定点を各国が分担して維持し、高い質の観測を続けることが重要である。太平洋には亜熱帯循環といわれる大きな海洋循環系があり、循環域中央部に位置しているハワイ観測定点でのデータと比較するうえでも、亜熱帯循環の源流と下流である東西亜熱帯海域の対象観測が望まれる。また、亜寒帯海域東西には、陸からの栄養塩供給の違いなどを反映した生態系構造の相違があり、東西の対照定点観測が望まれる（千島沖とアラスカ湾）。東部赤道海域には大きな湧昇域があり、エルニーニョ周期で湧昇強度が変化し気候変動を与えている。

一方、西部赤道海域は世界の海洋で最も表面水温の高い海域である（warm water pool）。そこで、これらの違いを観測する東西の対照定点観測が望まれる。このように、赤道から北太平洋だけでも多数の観測点候補があり得る。大きな沿海である南シナ海での定点観測も有用であろう。少なくとも、世界の海域で10-20点の高度観測定点が各国で維持されると炭素循環研究の格段の発展につながる。ここでいう海洋観測定点では、後に述べるブイ観測を併用するとしても、隔月程度の観測船来訪を行い、物理計測に加え、炭酸系、主要栄養塩、微量栄養塩、植物プランクトン現存量と基礎生産量など主要な物質循環に関連する項目を網羅する生物化学観測を行う必要がある。

これらの海洋定点観測は、相当程度の高度観測機能を有する観測船が、定点観測点を訪問して観測すべきものである。この研究分野推進には、大型多機能観測船の必要なく、観測定点とできるだけ近い研究拠点から、中型観測船（例えば500-2000トン）を用い隔月以上の頻度で観測を進めるのが理想的である。このような中型観測船は、経済水域内などの観測業務にも適するものである。ただし、高緯度海域の冬の観測には、拠点から比較的近い海域でも大型観測船の助けが必要なことがあり、それらを組み合わせる体制を整えることが、今後、高緯度観測定点を維持するための必要な条件である。

SOOPの利用

従来の観測船観測によって頻度を高くすることが難しかった広い海域の繰り返し観測の場合、海洋表層の観測に限定されるが、定期貨物船の利用が有効であることが明確になった（SOOP貨物船）。従来から、水温観測のために、定期貨物船の航海中に投げ込み型センサ（XBT）による計測を依頼する国際共同プログラムが実施されてきて、海洋観測に大きな貢献をしてきた。このプログラムは、後で述べるARGOフロート（漂流型水温・塩分鉛直分布自動計測）に置き換えられつつあり、観測協力船の数は減少しつつある。

ここで、地球温暖化研究、炭素循環研究のための観測を考えると、海洋の二酸化炭素吸収フラックスの季節変化と海域分布を明らかにすることができる海洋表層二酸化炭素分圧を計測することが最も重要である。これは、前述XBT観測のように船に特段の設備を加えずに実施できる簡易観測ではなく、海水の取り込み設備と計測装置を必要とする高度観測である。船への観測装置の設置には工事が必要となるが、船内で海水そのものを計測できるようになるので、貨物船であっても化学成分・生物に関する項目の測定も可能となる。この意味で、高度な貨物船観測では、二酸化炭素分圧の他に、水温、塩分、栄養塩、植物色素など表層海水の物理生物化学パラメータを計測することが望まれる。塩分・植物色素は、採取海水持ち帰り分析と船上連続計測装置の両者で

測定できる。栄養塩は採取海水の持ち帰りが従来法であるが、船上連続計（硝酸、ケイ酸など）が実用段階になってきた。また、高度な二酸化炭素分圧観測の場合、大気中の二酸化炭素濃度計測に配慮を行うと質の高い大気観測を行うことができる。海水の二酸化炭素分圧計測とは別に専用の二酸化炭素濃度計測装置を用いるのが理想的であるが、兼用器を用い計測することも可能である。水温・塩分の連続計測と二酸化炭素分圧観測のみに絞る簡易観測で協力貨物船の数を増やす手段も考えられる。

貨物船を用いた二酸化炭素分圧観測では海水を流しながらの計測になるため、その観測維持のためには従来観測員の乗船が必要であった。しかし、機器の自動化、船員を運転要員として雇用すること、船の全面協力が前提ではあるが、通常船員に観測を依頼することで人的経費削減が図られている。ただし、専門家が操作にあたらぬ場合には、寄港地で観測機関によるメンテナンス作業を十分に計測の質を維持することが重要である。主たる観測協力船の対象は大洋横断国際航路貨物船であり、太平洋、大西洋、インド洋の海域カバーを国際協力分担で目指すべきである。そのために、GCPとSCOR（海洋研究科学委員会）/IOC（政府間海洋学委員会）CO₂パネルのもとで、IOCCP（International Ocean Carbon Coordination Project）が国際協力の展開を行っている。

現在、二酸化炭素分圧装置を搭載している貨物船が世界で7隻程度運行されている。機器搭載して観測を行った履歴のある貨物船は20隻程度になる。貨物船では、就航航路の変更がしばしば起こるので、その際に観測継続を断念せざるを得ない。このような場合、貨物船への機材積み替え、観測海域の変更が生じる。緯度10度間隔（主として東西航路を考えたとき）で三大洋をカバーし、月から隔月の観測頻度を実現するには20から30隻ほどの貨物船を世界で維持しなくてはならない。南緯40度以南では、運航貨物船を確保することは不可能であるが、それ以北、北緯60度以南には何らかの定期貨物船がある。

また、観測協力船として、沿海航路を利用することも考えるべきである。この場合、毎週、毎日のようなデータ取得が可能となる。我が国には周囲をほぼカバーするフェリーや国内定期航海貨物船航路があるので、沿海の二酸化炭素吸収の高頻度観測として有効であり、あわせて大気二酸化炭素観測網を構築することも可能である。

一方、各国の観測船で、二酸化炭素観測が主要ミッションではない場合も二酸化炭素分圧装置を設置したまま測定を続けることが行われている（SOOP観測船）。米国では4隻のNOAA関連貨物船が二酸化炭素機器を搭載して、他の目的の観測航海を含めて観測を続けている。わが国では気象庁、JAMSTEC（海洋研究開発機構）、海上保安庁、水産庁などの所属観測船、南極観測船「しらせ」等で他の目的航海でも二

酸化炭素濃度観測を行っている例がある。国内観測船・研究船で、二酸化炭素機器が設置済み、あるいは、頻りに設置される船の数は10隻程度である。観測船では船内で利用できる海水ラインが既設であることが多く、機器設置は極めて容易である。また、関連航海においても運転の依頼は比較的簡単である。多くの観測船の場合、気象庁・水産庁で行っているような同一定線観測を繰り返して行うことは困難であり、時空間変動解析にはデータのデータベースへの集約が必要である。

ブイの利用

従来から海上気象や海流の観測で海洋観測にブイが利用されてきた。その場合でも固定点に係留するタイプと漂流するタイプがあり、それぞれ、データや試料を回収するタイプとテレメトリでデータ回収するタイプ、系を回収再利用するタイプと使い捨てタイプがある。以下に、現行のブイ観測を比較した。

炭素循環関連研究観測として、固定点観測としては、セディメントトラップ実験が1980年代から精力的に実施されてきた。表層での生物生産粒子の沈降量とその化学成分の測定から、沈降中の分解などを観測するものであり、間接的ながら表層の生物生産の経時変化を推定することができる。また、表層の生物生産物の海洋循環を解析する情報となる。全海洋の沈降粒子の情報を収集することには意義があるが、プロセス研究の中で行われるべき観測研究である。

係留系の設置や回収には観測船のシフトタイムが必要となり、設置、回収のため同じ点に繰り返し行く必要がある。従って、先に記述した海洋時系列観測と組み合わせで係留センサ観測が実施されると効率的である。既に海洋時系列観測を支援するために化学センサ類を持つ係留ブイ観測が行われており、特にバミュダ時系列点は、係留系のテストサイトとして共同利用されている。

係留ブイ観測で生物・化学測定が行えると、時系列観測の観測航海間の現象を連続的に把握できる。その進歩によって、観測船航海頻度が低減されると有効である。まずは表層二酸化炭素分圧計測をブイで行うことがターゲットである。米国では二酸化炭素濃度計測装置として、分光式と色素式の2方式が開発され、係留ブイでの使用実績を増やしつつある。分光式は表層観測用に限るが、色素式は200m程度までの深度ならば表層下での使用も可能である。後述するフランスの色素式二酸化炭素分圧計の係留使用も可能である。栄養塩計測装置は、イギリスの開発品で外洋係留ブイによる実用化実験が行われている。これらの機器のいくつかは、商業ベースで生産され始めているが、安定な性能が確立されたものではない。最近、二酸化炭素濃度測定相互比較実験に参加し、船上観測装置との比較データが得られた。

表 1-1 海洋炭素循環研究に係る現行のブイ観測の比較

例	試料回収	テレメトリ	表層係留 / 表層下係留 ×	再利用 / 使いすいて ×	
1 固定点		×	×		単純な中深層係留系 ,炭素循環観測では主としてセディメントトラップで沈降粒子試料回収を行う ,各国の研究機関が運用中である ,センサ類を加えることで化学計測を拡大することが今後の発展
2 固定点	×	または ×			米国モンタレー湾海洋研究所では二酸化炭素濃度計測センサを沿岸域で係留利用している ,沿岸係留ではテレメトリは必ずしも必要でない
3 固定点	×				大型の海上気象観測ブイには二酸化炭素観測を加えることが可能で ,日本では気象庁大型ブイ(現在はブイ自体撤去済)で実施歴あり ,米国は赤道海域の TOGA ブイに二酸化炭素 ,栄養塩 ,酸素など化学センサを取り付けて観測継続中
4 固定点		×			JAMSTEC が現在実施中の多項目観測ブイ ,近隣の別系ではCTD 昇降システムによる水温塩分鉛直プロファイル繰り返し観測を実施 ,生物化学係留系では ,亜表層海水試料の採取(全炭酸・栄養塩などの持ち帰り計測) ,表層基礎生産の間欠測定(試料持ち帰り計測) ,セディメントトラップ試料の採取を意図 ,ブイが海面に出ない亜表層係留なので ,電波テレメトリは不可能 ,測器が本来位置を離れて浮遊漂流すると ,テレメトリ発信
5 固定点					EU 計画の観測ブイ ,表層の二酸化炭素・栄養塩観測 ,セディメントトラップによる試料採取をねらって実施中
6 固定点			(間欠浮上)		水中ウインチの利用で ,周期的にセンサが亜表層(200 m)から表層に浮上 ,浮上中に基礎生産量センサが作動 ,CTD とともに計測 ,科学技術振興機構 / 名大研究課題で実験中 ,浮上時にデータテレメトリを行う
7 漂流	×		(間欠浮上)	×	ARGO フロート ,2000m水深付近を中性浮力で漂流し 2 週毎に浮上 ,浮上過程で水温・塩分鉛直分布を測定し ,衛星経路でデータ伝送する , 4 年ほどの寿命を持つ使い捨てセンサで運用 ,船舶からの投げ込みセンサによる水温観測(XBT ネットワーク)プログラムの後継観測として拡大中 ,酸素センサを加えることを検討
8 漂流	×		間欠浮上		化学 ARGO ,ARGO に化学センサを加えることが検討されている ,浮上過程で計測を行う ,粒子状物質の計測には既に成功 ,高価で使い捨てできない
9 漂流	×				二酸化炭素計測用漂流ブイシステムにフランスの CARIOCA がある ,1 年連続の漂流観測を南大洋で成功

物理的な観測として水温観測を広域で展開する目的で進められた XBT ネットワークは ,塩分センサを持つ XCTD 使い捨てセンサが高価であること ,投げ込み型では塩分計測の正確度の維持が容易でないことが理由で ,漂流ブイによる ARGO 観測に置き換えられた .中層を漂流し ,一定周期で浮上する ARGO の場合 ,通常の CTD と同じセンサが利用できるため ,特に塩分測定精度 ,確度が高まった .また ,ブイそのものの動きが中層流を示す .各国の協力で全海洋に 3000 個のブイを展開する計画である .現在 ,1000 個以上のブイが投入された .

漂流型計測器運用における最大の問題点は ,測器の搜索 ,回収を行うことである .いかに ,テレメト

リによって測器の位置情報を送信してきても ,その場に観測船が向かい回収することは ,膨大なコストになる .篤志船に回収を依頼することも困難なことも多いし ,本来 ,このような観測の大きな意義の一つに ,商船航路や漁船の活動域から外れたところでも観測を可能にすることにある .ARGO はデータ転送のテレメトリの実現と低価格化で使い捨てを実現し ,運用を圧倒的に簡易にした .さらには ,測器の投入も観測船に限らず ,飛行艇 ,商船 ,漁船などの利用も可能である .

水温 ,塩分観測も海洋炭素循環モデルの構築に重要であるが ,これからの漂流ブイ観測でも二酸化炭素と化学成分を計測することが重要になってきた .

この目的で ARGO に搭載する(piggyback)センサの開発が行われ、光学センサによる粒子計測には成功するようになった。ただし、二酸化炭素分圧の測定を浮上の過程で行うには水中で動作し応答が速い連続センサが必要で、技術的な問題が残されている。ARGO 浮上時にのみ、表面海水の二酸化炭素分圧を測定するセンサ開発が必要だろう。ただし、使い捨て ARGO と組み合わせられる廉価センサを開発するのは、技術的に困難である。

漂流型ブイを用い二酸化炭素分圧の観測で最も成功しているのはフランスの CARIOCA センサであり、テレメータを備えたブイ本体と組み合わせて南大洋で 1 年間の長期観測に成功した。これに続く機器開発が各国で進められている。表層係留系による海洋表層二酸化炭素分圧測定に比べ漂流ブイによる測定は、強固な係留系の設置が不要なため低価格化実現の可能性があるが、現在のところは、漂流化学計測システムはすべて高額であり、回収を前提としている。しかしながら、低価格化による使い捨てを目指すのは一つの方向である。また、科学計測システムの場合、センサドリフトの補正を行う意味でも、回収して再検定することは精度確保上必要であるが、ドリフトのない装置を開発することも目標となる。

衛星観測

衛星観測における海洋センサについては 3.7. での記事があるのでここでは一部パラメータに限り現状を記述する。

海面水温センサは極めて有効になったが、海洋物理海洋循環研究にとって重要な塩分計測が、衛星センサでは困難なことが大きな問題である。海色スペクトルセンサからは表層付近の植物プランクトン色素量、懸濁物質、溶存有機物質などの情報が得られる。栄養塩、二酸化炭素などの化学成分を直接計測する方法はなく、これらを水温、植物プランクトン色素量から推定するデータ解析が行われている。海域によっては極めて高い相関式が得られる場合もあるが、現段階では船舶観測を補うようなデータ利用に至っていない。これら化学成分と比較して、基礎生産量は、より水温、植物プランクトン量と直接的関係にあると考えられ、衛星や雲モデルからのデータセットが得られる日射量、水中光減衰率、混合層深度（気候値分布で近似できる）を組み合わせ、現実的な推定を行う努力がなされている。また、海面風速は海面での二酸化炭素ガス交換係数に関わるので、炭素循環研究に重要なパラメータであり、その衛星センサが重要である。このためには、衛星アルゴリズムをキャリブレーションするための船上観測による基礎生産データ収集が今後も必要である。

近い将来、大幅な技術革新があるとしても、衛星センサから化学成分そのものを直接測定する技術の進展は見込めない。海洋における物質循環研究には、衛星観測の直接評価できる水温や海色等のパラメータと観測によって得られる生物・化学パラメータと

の相関解析に基づき、より高密度の時空間分布を評価する手法の開発が有効であろう。

断面観測

海洋断面観測で測定を行うべき成分で最も優先されるものは、水温・塩分・酸素・主要栄養塩・炭酸系（全炭酸、アルカリ度）であり、追加的に、フロン類・放射性炭素・炭素安定同位体比のようなトレーサ観測が求められている。CLIVAR (A Study of Climate Variability and Predictability) では、海洋断面観測の各国のプランを整理し、WEB に掲載している

(http://www.clivar.org/carbon_hydro/index.htm)。

観測データの収集とモデルの高度化から、将来の急激な気候変動を引き起こす要因となる海洋循環の急激な変化を予測するためには、海洋断面の物理計測の密な繰り返し観測がまず重要である。この場合、水温・塩分の精密計測が第一義的に重要であるので、現在予定されている今後の断面観測でも、化学計測を含まないものも半分程度はある。

断面観測で化学成分を測定するには、船上の持ち込み機器が多くなり、熟練観測員を確保して航海を行う必要があり、長期航海が可能な例えば 2000 トン以上の大型の観測船が必要である。CLIVAR のサブグループである CLIVAR Carbon Hydrographic Section は、IOCCP とともに、CO₂ 計測を含む海洋断面観測を国際協力で行っている。

特に、断面繰り返し観測(Repeat Hydrography)は、重要測線の 5 年から 10 年の繰り返しを行い、その間の濃度変化を検出、人為起源 CO₂ の蓄積量変化を求め、大きな目的としている。そのため、異なる観測航海のデータを比較する作業が必ず必要になる。海洋の比較的浅い層での CO₂ 増加量は年間 0.05% 程度であるので、10 年でも 0.5% の比較を行うことになる。また、この比較の際には、自然の作用として沈降粒子分解で回帰する無機炭素を栄養塩データから補償する必要があり、そこから新たな誤差も発生する。この問題を解決するために炭酸系は共通の標準試料（スクリップス海洋研究所調製による）の使用が行われるようになり、各国の精度確保に大いに貢献し、データ比較の現実性が極めて高まった。また、海洋プロセス研究推進には、海洋断面観測とタイアップして、より詳細が知られていない化学成分計測を進めることが有用である。これには、粒子状・溶存有機炭素、微量金属元素、微量放射性元素、人工有機化合物などがある。

観測船・研究船による研究観測

上記 5 項目では海洋における温暖化研究を重視する立場から、観測船を利用することや、観測船以外のプラットフォームで観測する分野を主に、これから進めるべき観測研究のレビューを行った。しかしながら、これは今後の海洋観測において、観測船・研究船のニーズが減ったわけではなく、それ以外の

プラットフォームの新しいニーズが加わったと考えられ、観測船利用と、それ以外のプラットフォームの利用を、それぞれ有用な分野を仕分けつつ、関係づけながら進めてゆくべきものである。例えば、
、
のブイ設置・回収などは観測船で実施する手法が通常であるが、
は観測船以外のプラットフォームによる海洋観測の例である。
のブイ観測の場合も、設置・回収に観測船を利用するにしても、観測船が現場に不在の時も観測を継続するという方法であるし、ARGO はさらに発展的に何らかの方法で投入さえすれば、継続的観測が可能となる新たな手法である。

から までにあげた観測のタイプでは、最終的な観測形態をオペレーショナルな観測に持ち込み、国内、国際的に多機関の協力でグローバルなデータ取得を進めるべきであると考えられるが、海洋研究においては、個別的な観測が必要な分野も多い。観測船によるオペレーショナル観測の際に、同時に個別観測研究を実施することも可能である。海洋炭素循環の分野では、例えば、鉄など微量金属類の生物生産への影響を把握するようなプロセス研究的観測も必要であるが、特別な計測装置や海水採取器具などを必要とするので、
の海洋断面観測のように限られた航海日程の中で多数の観測点をこなす必要がある観測航海では同時実施が困難な場合もある。また、
のような海水吸引ラインによる貨物船観測で、微量金属類の表層海水分布の観測を行うのも困難な場合がある。このような、技術的に高度な観測において、あるいは、将来定常観測に持ち込むべき技術開発において、観測船・研究船はその特性を發揮すべきである。

1-3-6. 雪氷観測

地球上には、南極とグリーンランドを覆う厚さ 3000m を超える氷床、ヒマラヤやアラスカなど山岳地域に発達する氷河、北極海や南極海の広大な海水、高緯度地方の積雪や永久凍土など、広大な雪氷圏が存在する。地球温暖化に対するこうした雪氷圏の重要性は、正のフィードバック機構による地球温暖化の加速と、地球温暖化による雪氷圏の変化が及ぼす環境への影響の二点に集約される。地球温暖化に果たす雪氷圏の役割として、北半球ではほぼ北緯 50 度以北に $46 \times 10^6 \text{ km}^2$ の規模で広がる広大な季節積雪や、北極海を中心にオホーツク海まで最大 $15 \times 10^6 \text{ km}^2$ にも拡大する海水のアルベド・フィードバックが重要である。

過去 30 年間、北半球の積雪面積は 10% ほど減少している。特に、1980 年代半ば以降の減少、また季節としては、融雪期である春における減少が顕著である。融雪期の顕著な積雪面積の減少は、積雪域のアルベド・フィードバックが働いているとの考えがある。積雪域の面積については、衛星リモートセンシングで詳細な観測が可能になってきたが、水循環の物理量として重要な積雪水量への変換に係わる課題

が残されている。北半球の最も広大なツンドラ域である北極ロシアは、1990 年以降観測点が閉鎖され、広大な観測空白域になっている。地球温暖化が進行するこの地域の積雪水量の変化は、北極海への淡水供給量の変化を通じて海水の形成に影響を及ぼす他、融雪時期の変化に伴う永久凍土の融解量の変化を通じて凍土からの二酸化炭素やメタンなど温室効果気体の放出量の変化を引き起こす等、広範囲な気候への影響を及ぼす可能性がある。このため、北極ロシアに観測拠点を設置し、降雪量、積雪深、積雪密度、融雪量などの積雪観測の他、永久凍土の温度分布などの雪氷モニタリング観測を実施することは重要である。観測拠点では、温室効果気体のフラックスや高層ゾンデによる対流圏・成層圏気象などの観測、大気汚染物質による積雪アルベド影響観測、ツンドラ植生の炭素循環観測など、地球温暖化に関する総合モニタリング観測を、我が国の主導で推進する必要がある。また、北極海をはさんで北極ロシアの反対に位置する北極カナダにも地球温暖化に関する総合モニタリング観測拠点を設置し、両地点の比較観測から北極振動などの実態解明に貢献することも重要である。

過去 30 年間に北半球の海水面積も減少傾向にあり、その速度は 10 年間で 3% ほどの割合である。北極海の海水面積の減少を季節で見ると 8 月から 9 月に特に顕著である。大陸における冬から春の温暖化が海水の融雪時期を早めた結果であるとか、北極海での低気圧活動を活発化させる大気循環場（北極振動）の変化に起因するとの仮説がある。特に、1997 年以降、海水面積の減少が著しい海域は、太平洋側北極海で、夏季のベーリング海水の移流に起因している可能性がある。海水の形成は、大気-海洋-流入河川水の相互作用の結果でもあり、将来予測のために海水変動のメカニズム解明を総合的に取り組む必要がある。特に、海水分布の南限に位置するオホーツク海は、我が国主導で海水関連の観測が実施されており、今後、河川による淡水供給と海水形成、海水形成と深層水形成、海水藻類と二酸化炭素の生物ポンプメカニズムなどを解明するために観測を高度化することが重要である。

頻発する北方針葉樹林の火災や人間活動を起源とする北極の大気環境汚染物質は、春には Arctic Haze（北極煙霧層）を形成し、広域にわたり北極に拡散している。大気汚染物質の積雪や海水への沈積は、アルベドの低下により融解を促進し、さらにアルベドを低下させると言うフィードバック機構が働き、北極域の温暖化促進に一定の役割を果たしている可能性がある。また、過去数十年の温暖化は、シベリア南部で冬期の最低気温の急激な上昇で特徴付けられるが、そのメカニズムとして、接地逆転層内に漂う大気汚染物質が夜間の氷霧形成を促し、氷霧が放射冷却を抑制するシナリオが考えられている。北極域の大気汚染物質の研究観測は、雪氷の気候への影響解明の観点からも重要である。

地球温暖化が雪氷圏の変化を通じて環境へ与える影響の研究も重要である。地球温暖化により、過去100年、ほぼ全ての山岳氷河は縮小し、海面上昇の16%に寄与したと推定されている。特に、1980年代以降の縮小が顕著で、その海面上昇への寄与はさらに大きくなっている。山岳地域の氷河は天然のダムとしての役割を果たすので重要な水資源と言える。その役割は、特にアジア乾燥地域での人間活動に大きな役割を果たしている。山岳氷河の中で最も縮小が激しいのは、アジア高山地域である。ヒマラヤ山脈では、温暖化に伴い大規模な氷河の末端に氷河湖が形成されており、氷河の縮小とともに近年その規模を拡大し、GLOF (Global Lake Outburst Flood) と呼ばれる氷河湖決壊により下流域に大規模な災害を引き起こしている。ヒマラヤ山脈を中心としたアジア高山地域の氷河や氷河湖決壊は、長年にわたりわが国が主導している研究であり、現地の住民の生活環境に及ぼす影響や地球規模の海面変動に及ぼす影響が大きいので、さらに研究観測を継続することが重要である。

氷河や氷床は過去の気候や環境変動の優れた記録媒体である。アイスコアから観測時代以前に遡る長期の気候・環境シグナルを抽出し、過去の詳細な事例解読は、地球温暖化の重要な研究アプローチである。アイスコアに記録された温暖化と乾燥化や森林火災、海氷域変化などの環境変化の関係を調べることで、多地点のアイスコア比較により温暖化と北極振動など気候モードとの関係を明らかにすることが、地球温暖化研究に大きな貢献となる。

一方、南極は南極半島周辺を除き、顕著な温暖化は見られない。しかし、南極海の海氷面積も1950年を境に10年程度の振動をしながら20%も減少したとの報告が最近出された。この報告は、海氷の衛星観測の結果に加え、氷床掘削コア中の海氷規模指標シグナルであるアイスアルジー起源の物質を用いた結果である。海氷の10年程度の振動は、長期にわたるモニタリング観測の重要性を示している。また、南極域で温暖化が進行した場合、海洋からの水蒸気の蒸発の増大に伴う降雪量の増大が氷床の質量を増加させ、結果として海面低下を引き起こすという数値シミュレーション結果がなされている。南極氷床の質量の増減は、地球規模で大きな海面変動を引き起こす可能性があるため、この数値シミュレーション結果の検証観測は重要である。南極氷床の質量収支は、積雪量、融解量の静的な収支の他、気候変化に数千年スケールの時間応答をする氷床流動による氷の海洋への流出と言うダイナミックな収支も加味せねばならないので、総合的な流域雪氷モニタリング観測が重要である。以下に地球温暖化に関わる雪氷圏観測で、わが国の貢献が期待できる観測課題を提案する。

雪氷圏モニタリング観測

衛星リモートセンシング観測：海氷、積雪、氷河

域の変動観測

極温暖化進行地域での地上観測：広大な観測空白域である東シベリア域に観測拠点を設置し、降雪、積雪、融雪、永久凍土などの雪氷モニタリング観測を実施するとともに、大気、大気汚染物質、ツンドラ植生の総合観測(ロシアとの共同観測)。衛星地上観測。

極寒冷化進行地域での地上観測：北極カナダに観測拠点を設置し、積雪、海氷、海洋、大気汚染物質、ツンドラ植生の総合観測(カナダとの共同観測)。衛星地上観測。との比較観測。

研究観測(プロセス研究観測)

海氷変動海域での観測：オホーツク海、北極海太平洋セクター、南極海における海氷、海洋、生物生産、二酸化炭素循環観測

積雪アルベド動態観測：シベリアでの大気汚染物質沈着と積雪アルベド変化のプロセス観測。広域積雪観測による冬期の大気汚染物質の広域拡散観測。

検証観測

温暖化に伴う南極氷床の質量増加シミュレーション検証観測：南極氷床の流域を設定し、その質量収支の総合観測。

1-3-7. 衛星観測

衛星による二酸化炭素濃度観測

衛星からのグローバルで高頻度の二酸化炭素濃度積分濃度の高精度測定は、陸域海洋の二酸化炭素フラックスを決めるために極めて重要な他の方法にない価値をもつ。この観測は直接測定やボトムアップモデルで評価するのと独立に二酸化炭素フラックスを決めるというユニークな意義をもつ。

短波長の赤外光を使うと、大気を地表面まで観測できる長所がある。しかし雲やエアロゾル粒子は重要な妨害因子であり、10km程度の瞬時視野角では多くのデータが使えない可能性がある。長波の観測は主として大気上層部を把握するもので、ここでは地表面の発生や吸収の信号は強度が(熱帯を除いては)弱く勾配が小さいという欠陥がある。

2007年にはNASAのOCO(Orbiting Carbon Observatory)が、2008年には環境省、宇宙航空研究開発機構(JAXA、国立環境研究所の3機関が開発するGOSAT(Greenhouse gas Observing SATellite)が、ともに近赤外の太陽光反射により二酸化炭素のカラム積分濃度を高精度で測定するセンサとして打ち上げられる予定である。これらは長期の二酸化炭素モニタリングミッションの行方を占うものである。

光合成が活性な時間的/空間的条件下での系統的な観測となる(例えば、夜間と日中、晩秋や高緯度地域のデータ不足)から、推定するフラックスにはバイアスが入り込む可能性がある。

その他の衛星観測と測定センサ

IGOS (統合地球観測戦略) 報告書では衛星に強く依存し、重要な観測項目として以下の項目を挙げている。

【大気】降水量, 放射収支 (太陽放射含む), 上層大気温度 (MSU 放射輝度含む), 風速&風向 (特に海上), 水蒸気量, 雲特性, 二酸化炭素, オゾン, エアロゾル特性

【海洋】海面水温, 水位, 海氷, 海色 (生物活動の

ため)

【陸面】積雪被覆, 氷河, 氷帽, 永久凍土及び季節凍土, 反射率, 陸面被覆 (植生タイプを含む), FAPAR (光合成活性放射吸収), 森林火災

今後 10 年間に我が国が早急に開発・整備すべき温暖化研究に関わる観測を目的とする観測衛星およびセンサについて以下にまとめる。

表 1-2 観測衛星およびセンサについて

放射強制力に関わる観測：温室効果ガス, 雲・エアロゾル・水蒸気, 氷床など温室効果ガス等
温室効果ガス

観測対象	観測衛星	センサ	利用方法
CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, O ₃ , その他 (CO, N ₂ O, CFC)	GOSAT	短波長赤外分光計, 熱赤外分光計	地上観測, 輸送モデルと併せて精度達成

雲・エアロゾル

観測対象	観測衛星	センサ	利用方法
エアロゾルオンゲストローム指数	ADEOS-II 後継機	GLI 後継機	エアロゾル発生源の推定
エアロゾル光学的厚さ	"	"	エアロゾル分布・動態把握
雲光学的厚さ	"	"	放射収支・放射強制力の推定, 相互作用メカニズムの解明
雲粒子有効粒径	"	"	"
雲種別・雲量	"	"	放射収支・放射強制力の推定
雲頂高度	"	"	"
雲頂温度	"	"	"
雲水量	"	"	"
雲エアロゾル 3 次元構造	EarthCARE	CPR	"

気象・海象

観測対象	観測衛星	センサ	利用方法
分光放射輝度	GOSAT	短波長赤外, 熱赤外	
気温	"	熱赤外	
大気中の水蒸気量	ADEOS-II 後継機	AMS-R 後継機	
雲水量	"	"	
降水量	GPM, ADEOS-II 後継機	DPR, GMI, AMS-R 後継機	

雪氷圏

観測対象	観測衛星	センサ	利用方法
積雪・海氷分布	ADEOS-II 後継機	GLI 後継機, AMS-R 後継機	
海氷密接度	"	GLI 後継機, AMS-R 後継機	
積雪深	"	AMS-R 後継機	
積雪粒径分布	"	GLI 後継機	
積雪不純物濃度	"	"	
雪氷表面温度	"	"	

温室効果ガスのシンク・ソースの解析に必要な陸域・海域生態系および土地利用など：

陸上生態系

観測対象	観測衛星	センサ	利用方法
植生分布・植生分類	ADEOS-II 後継機, ALOS	GLI 後継機, AVNIR-2, PALSAR	基礎生産推定
正規化植生指標, 拡張植生指標	"	GLI 後継機, AVNIR-2	"
基礎生産量	"	"	
森林バイオマス	ALOS	PALSAR	炭素ストック

海洋・海象・海洋生態系

観測対象	観測衛星	センサ	利用方法
正規化海面射出輝度	ADEOS-II 後継機	GLI 後継機	
海面水温	"	", AMSR 後継機	
クロロフィル a 濃度	"	"	
海洋基礎生産力	"	"	
海上風速	"	AMSR 後継機, SeaWinds 後継機	

土地利用・土地被覆

観測対象	観測衛星	センサ	利用方法
土地利用	ADEOS-II 後継機, ALOS	GLI, AVNIR, PALSAR	
土地被覆	"	"	
植生分布	"	"	
土壌水分	"	AMSR 後継機, PALSAR	

1-3-8. 人為負荷統計

温室効果ガスの排出インベントリの精度を向上すること。現在、年ベースで国全体の値として集計されている統計を、月ベース、少なくとも県単位の統計として集計する必要がある。東・東南アジアのインベントリ精度の向上への協力が重要である。現在の温室効果ガス排出の国別インベントリを UNFCCC に提出するために実施されており、排出の実態や削減効果を把握するためには不十分である。現在のセクター分類のうち、幾つかは残差として求められている。これらのデータ収集の方法を検討し、その実施体制を早急に確立する必要がある。また、実際の計測により推計精度を改良する必要がある。途上国の温室効果ガス排出インベントリ改良のため、実態把握、現場に適した方法の開発、キャパシティ移転などの協力が必要である。

1-3-9. 生態系影響変化

森林火災と土地利用変化

通常の森林は炭素を吸収しており、十分成熟した森林は収支が均衡している。森林全体の収支を考える上で、火災による炭素放出は大きなウエイトを占める。火災による擾乱中に放出される炭素の量を推

定するためには、火災の分布と焼失面積。火災の場所は日のステップで、面積を月の間隔で観測する必要がある。

火災焼失や農地の自然生態系への回復にかかわる炭素のフラックスを評価するためには、土地被覆の変化を 1 km の空間分解能、5 年間隔でサンプリングを実施する必要がある。我が国では森林火災の規模・頻度は小さい。東南アジアはエルニーニョ等の気候変動とリンクして定期的に大火災が起こっており、シベリアでは火災が増加している。森林火災の研究の遅れている重要な地域での観測を実施していくことが国際的に我が国に期待されている。土地被覆変化(5 年間隔で 1 km の分解能)や火災面積(月単位の時間分解能)は炭素循環に大きな影響がある。土地被覆変化観測では森林から非森林への遷移をもっと高い分解能(25 m)で行うことも必要である。観測システムには、衛星システムを適切な地上探査(例えばフラックスタワーサイトで)と組み合わせ改良し、光合成活性を推定するための生物物理量(LAI, fAPAR, 日射や土壌水分に関連する情報)をシノプティックスケール(1~7 日)で、大陸全体をカバーして実施することを含む。

二酸化炭素や気温上昇に対する生態系の応答

陸域での炭素収支の将来予測のためには、二酸化炭素濃度増加と炭素収支の変化、気温や降雨など将来変動が予想されるパラメータに対する応答などの研究が必要である。その一つ的手段として、二酸化炭素濃度増加や気温上昇の条件を人為的に作り出し、単純化した植物系や自然の複雑な生態系の応答を測定する必要がある。これらは研究として実施されているが、数年にわたる影響は単年度とことなること、窒素など他の条件が制限因子に転化する可能性、植物の化学的組成変化の可能性、植生の応答は種の競争や食物連鎖など複雑であり長期の応答を見る必要があるなど、長期モニタリングに近い観測実験が必要であるとの認識も広がっている。

1-4. 今後 10 年間程度の取り組みの重点事項

1-4-1. 国際協力・観測の先進性などで我が国として優位な観測項目および観測域

今後 10 年の地球温暖化に関して優先的に実施する必要がある観測を考えた時、先に挙げた地球の温暖化をモニタリング、地球温暖化のプロセスの理解、地球の温暖化が地球環境や生態系に与える影響の監視と評価という 3 つの観点が重要である。また、我が国が先行している観測分野・項目並びに国際協力の上で我が国が優位な観測項目・観測域を考慮する必要がある。国際協力ではアジア、オセアニアでの観測協力の強化が国際的にも要請されている。このような観点から、各観測区分での項目を精査し、観測・分野および項目の絞り込みを行った。さらに今後 10 年の地球温暖化に関する観測のために必要な技術開発についてもその優先項目を検討した。

大気組成観測

東南アジアの地上観測ネットワークの充実

現在、地上での温室効果ガスの連続観測ステーションは 40 箇所あり、フラスコサンプリング分析を行っている場所は 100 ヶ所ある。しかしながら、アフリカ・東南アジア・中南米ともに観測の空白域となっており、熱帯域での炭素収支を推定する上での課題となっている。中南米については米国の支援で観測点が増えつつあり、我が国が積極的に東南アジアでの観測網の充実のために努力することが必要と考える。従来の途上国支援では精緻な高度な計測機器を導入してもその後の消耗品の補給が途絶え、さらには近年の電子部品に共通しているが故障しても直すことができず、観測が継続できない例が多い。このために、標準ガスなどの消耗品を 5 年間は必要とせず、電力使用量を抑制し新たなインフラを必要とせず、一般民生部品や修理可能な電子部品の開発を進め、自動化と IT 通信により特別な訓練がなくとも維持管理を可能である次世代システムを開発し導入する必要がある。また、データは現地スタッフが解析を行うよう研修を行うことが重要である。

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

我が国は、航空機による温室効果ガスの高度分布モニタリングを世界に先駆けて実施し、温室効果ガス濃度の年変動や陸域生態系との相互作用などに関する重要な知見が得られることを明らかにしてきた。近年、米国や EU でも航空機モニタリングを充実させる方向にある。

しかしながら、一般にチャーター機による観測は経費が高く、高い頻度でグローバルな観測を長期に継続することは困難である。そこで現在、民間旅客機に二酸化炭素の連続測定装置を搭載するための機器開発が実施されており、安全性を保障したシステムが開発される予定である。開発されたシステムを航空機に設置し、グローバルに観測網を形成する。高度分布という他に無いデータが得られる点が特徴であるが、更に、国際的な協力のもとアフリカや中東など治安の悪い地域や、測定器の維持管理が困難な場所での観測に応用していくことが重要である。

雲・エアロゾル・放射をめぐる物理過程に関する観測

大気における、雲・エアロゾル・放射をめぐる物理過程に関する理解を進めることが最重要課題であり、エアロゾルの放射特性と化学組成の関係といったエアロゾルの化学的特性の理解も重要である。観測からの貢献としては、従来の気象・海象の観測に加えて、衛星、航空機などによる観測手段を導入して、放射収支など放射の物理過程、三次元雲分布、三次元エアロゾル分布を把握する観測が必要と考えられる。従来の気象、海象の観測体制も引き続きこれらに貢献し続ける重要な役割を引き続き担う必要がある。

陸域観測

タワーフラックス観測

陸域生態系による大気からの二酸化炭素の吸収・放出は、系内での炭素循環とそれに影響を及ぼすさまざまな要因に支配されるが、まだ解明されていない点が多い。IGBP, GCP などの国際プロジェクトを背景に、アジア域の代表的な陸域生態系においてタワーフラックス観測を実施し、大気・陸域生態系間の二酸化炭素、顕熱、潜熱フラックスを長期連続観測することが必要である。

生態学的な調査・観測、生態系の長期モニタリング

生態学的な調査・観測、生態系の長期モニタリング等を、タワーフラックスサイトに集中的に配置し、植生の変化を視野に入れた陸域生態系の二酸化炭素の吸収量とその変動要因を解明する。アジア域に特徴的な陸域生態系の炭素循環に与える水の影響を考慮し、水循環観測との統合観測ステーションを東南

アジアに充実させていく必要がある。

海域観測

観測船や民間商船等による海洋表層の二酸化炭素観測の広範囲・高頻度モニタリング

全海洋の二酸化炭素吸収量とその変動について理解には、海洋表層の二酸化炭素観測を広範囲に高頻度で行うことが必要で、観測船に加えて民間商船などを利用する定常観測体制を築くことが重要である。この分野で我が国は、太平洋観測と国際研究連携に重要な貢献を続けており、北太平洋域のみならず、外国機関との連携の下に南太平洋・インド洋の海域観測を進めることが重要である。一方、極域などを含む商船運航のない海域ではこれらの海域で運航される観測船を活用してカバーすることも重要である。今後 10 年間で商船 10 隻程度と諸機関観測船通常航行中の表層二酸化炭素観測体制を整備しデータ集約を行う体制を確立する。さらに、これらのデータを国際的な研究連携のもとで統合を行うことが重要である。

南北太平洋と南大洋の海洋断面二酸化炭素観測

海洋断面観測の実施体制を強化し、南北太平洋と南大洋の海洋断面二酸化炭素観測を実施する。海洋の長期的二酸化炭素吸収を明らかにすることを目的とし、国際共同研究の観測方針に従った精度の高い計測を実施する必要がある。世界海洋の約 60 測線で 5 - 10 年毎の繰り返し観測を行い、海洋の二酸化炭素吸収量変化が明らかにする計画であるが、同時に、海洋大循環の変化という気候変動に多大な影響を及ぼす現象の検知も可能となる。国際分担として、我が国の研究機関の観測船が年 2 測線程度の観測実施を行う体制とその技術支援体制を確立する。

海洋時系列観測点の確立

年々変動と 10 年スケール超の長期変動を含む海洋環境変動の把握には海洋時系列観測が最も有効な手段である。気候変動予測モデルに必要な海洋の二酸化炭素吸収に関するプロセス研究と合わせ、海洋定点の繰り返し観測を観測船で実施する。国際分担として、西部北太平洋高緯度亜寒帯、中緯度、低緯度亜熱帯の 3 ヶ所で実施することが望まれる。観測船観測の密度を補うために、時系列定点に表層大型定置ブイを設置し、炭素循環に関わる主要なパラメータを連続計測する。

雪氷観測

東シベリア域と北極カナダにおける地球温暖化総合観測拠点の設置

地球温暖化が最も進行している北極域の雪氷圏は、正のフィードバック機構による温暖化加速と温暖化による雪氷圏の変化が及ぼす環境への影響が大きい。そのため、重要な観測対象である。雪氷地上観測としては、観測極温暖化進行地域で広大な観測空白域であ

る東シベリア域と北極カナダに観測拠点を設置し、衛星の地上検証観測としての降雪、積雪、融雪、永久凍土のモニタリング観測を行う。また、この観測拠点を地球温暖化総合観測拠点（スーパーステーション）と位置づけ、二酸化炭素など大気微量成分、高層ゾンデによる大気循環場、大気汚染物質、ツンドラ植生などのモニタリング観測も進める。海洋観測としては、北半球の海水の南限で温暖化が海水の形成を鋭敏に反映すると考えられるオホーツク海を中心に、海水分布の衛星検証観測、河川による淡水供給と海水形成に関わる観測を重点的に推進する。一方、我が国は南極昭和基地で温室効果ガスやエアロゾル等の大気組成観測を世界に先駆けて充実させてきており、北半球高緯度の対照区としての観測の継続・充実が望まれる。

ヒマラヤ山脈における氷河の縮小、氷河湖発達と決壊に関するモニタリング観測

山岳氷河の中で最も縮小が激しいヒマラヤ山脈では、わが国の研究者が長年主導的な観測を継続してきているので、この実績を背景に、温暖化による氷河の縮小、氷河湖発達と決壊に関するモニタリング観測を進める。

南極氷床の総合的な流域雪氷モニタリング観測

南極氷床の質量の増減は、地球規模で大きな海面変動を引き起こす可能性がある。温暖化による降雪量の増大と海面の低下を示す数値シミュレーション結果の検証観測は重要である。南極氷床の質量収支は、積雪量、融解量からなる静的な収支の他、気候変化に数千年スケールで時間応答をする氷床流動による氷の海洋への流出と言うダイナミックな収支も加味せねばならないので、南極氷床の総合的な流域雪氷モニタリング観測を実施することが必要である。

衛星観測

大気中温室効果ガスの観測

二酸化炭素、メタンなどの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ことによって、その排出吸収源分布の推定や変動要因の解析を行い、将来の濃度変動予測精度を向上させることが重要である。このため温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT: Greenhouse Gases Observation Satellite）を早期に開発し、観測システムの実証、定常観測の継続を行う必要がある。この衛星には短波長赤外、熱赤外分光計等、観測目的に最適な観測センサを検討し搭載する必要がある。

陸上植生・海洋生物等の炭素循環観測

陸上植生の炭素貯留量及びフラック量を求めるためには、二酸化炭素の排出・吸収源となる森林等陸上植生のバイオマス量を定期的にモニターし変動を把握する必要がある。また植林、再植林、森林伐

採等の人間活動を把握する手段として、高分解能の合成開口レーダ PALSAR を中心に、光学センサを併せて搭載する陸域観測技術衛星 (ALOS: Advanced Land Observing Satellite) を早期に打ち上げ、観測を開始・継続する必要がある。また、海洋生物による炭素フラックス量を求めるため、衛星の水色センサによるクロロフィル量の測定と観測船による現場測定を併せた観測を推進する必要がある。

雲・エアロゾルの放射強制力のグローバル観測

雲・エアロゾルの分布は時間的・空間的な変動が速く、温暖化予測の主たる不確定要因となっている。グローバルな衛星観測は、全球規模の気候変動実態の定量化を実現する。また長期モニタリングは、温暖化の影響及び予兆の検知に重要な情報を提供する。このため ADEOS-II の観測機能を継承・発展し、光学センサ (GLI) を中心に、マイクロ波放射計 (AMSR) 及び散乱計 (SeaWinds) を組み合わせた複合観測の早期再開・継続が必要である。併せて全球降水観測 (GPM: Global Precipitation Measurement) 計画の実現が必要である。

生態系影響観測

アジア域における災害被災地における継続観測の実施

地球温暖化に対応して加速する攪乱体制に対して脆弱性を持ち、かつ激変が予想される生態系については、特にここ 10 年スケールで観測を体系的に強化する必要がある。高頻度の攪乱によって、同一の定常安定状態への修復が妨げられる可能性が高いためである。エルニーニョ影響による東南アジア熱帯雨林 (特にボルネオ島) の森林火災、シベリア・タイガの森林火災、および国内を中心とするモンスーンアジア域の台風・豪雨による自然植生倒壊などの被災地を対象として、攪乱の規模と頻度をカバーするように、継続観測サイトを設置する。サイトは、特に今後の変化が予測される植生 (バイオーム) タイプの境界域 (ツンドラとタイガ、常緑照葉樹林と落葉性冷温帯林) をカバーするように設置する。各サイトでは、攪乱後の各生態系についての回復過程の追跡観測を、植生の種組成と構造、現存量、純一次生産量、土壌の発達過程と栄養塩組成の各項目について経時的 (最大限 1 年間隔) に行う。これらは、衛星観測および陸域炭素フラックスのベースライン観測と結びつけて実施する必要がある。

1-4-2. 今後 10 年で優先すべき温暖化観測のための技術開発

以下に今後 10 年間程度の取り組みの重点事項として挙げられた観測を実現するために優先的に取り組む必要のある技術開発についてまとめる。

土壌有機物観測手法の開発

陸域生態系における土壌有機物は巨大な炭素プー

ルを構成しているが、その時間変化を観測によって把握する技術は確立されていない。また、長期に渡る土壌中への炭素蓄積に関連した難分解性有機物への炭素フラックスを、現時点で観測から精度良く求めることは難しい。土壌放出炭素フラックスのパラメタリゼーションにおいて、温度、水分条件以外の要因による影響、とくに土壌形成の履歴と土壌有機物蓄積などを考慮する必要性が指摘されている。パラメタリゼーションを向上させ、地球温暖化や攪乱にともなう土壌放出炭素フラックスの変化等を精度良く評価するためには、土壌有機物量とその動態に関する効率的かつ精度の高い観測方法の開発が必要である。

陸域温暖化観測のためのセンサ開発

開発途上国や物資の輸送・エネルギー供給などが困難な場所での温室効果ガスなどのモニタリングを実現するために、電力・消耗品を最小化すると同時に信頼性を高めたセンサシステムを開発し、さらに、その同位体、大気中の酸素濃度などの連続自動測定装置を開発する。二酸化炭素濃度の連続測定器の民間航空機への搭載 (現在、ボーイング社のみ、エアバスなど多くのメーカーに対する搭載) を進める。メタンなどについて、航空機搭載が可能な高信頼性・軽量小型の自動連続測定器を開発する。自動操縦小型飛行機搭載の二酸化炭素濃度・メタン濃度測定システムを開発する。気球ゾンデによる二酸化炭素濃度測定システムを開発する。

海洋自動観測のためのセンサ開発

自動昇降式の ARGO フロートに組み合わせることができる二酸化炭素測定センサとして、特に浮上時に海洋表層二酸化炭素分圧を測定する技術を開発する。より実現性の高いと考えられる表層漂流式二酸化炭素分圧測定装置の開発を進め、将来は使い捨てが可能となる低価格化を目指す。また表層定置ブイで二酸化炭素と生元素の循環に関わる多項目自動測定を行うセンサ開発を含む技術を開発し、特に高緯度海域での運用を目指す。これらのセンサは耐圧性、省電力、耐久性、検出感度・精度等において優れたものでなくてはならず、我が国の技術を持って世界標準を作っていくことが急務である。

衛星観測システムの研究開発

地球温暖化に係わる観測に必要な地球物理量を、衛星から目標とする観測精度で定量的に計測するには、ミッション解析、センサ及びプラットフォームの最適仕様の設定、センサ開発、センサ特性の評価・校正、高次処理アルゴリズムにより処理された高次プロダクトの検証が重要な研究開発要素となる。このため広範かつ高度な科学技術の知識集約型の研究開発体制の構築が極めて重要である。当面 GOSAT の温室効果ガス等の観測用分光計開発及び観測データ処理解析技術、ADEOS-II 後継機の多波長可視赤外放

射計，マイクロ波放射計，散乱計の開発及び観測データ処理解析技術，ALOSの合成開口レーダ，光学センサの開発及び観測画像データ処理解析技術，アクティブ観測を行うライダー，レーダの開発および，放射計，画像データとの統合的解析技術が優先的に必要となる．また観測要求の高度化に応える，将来型センサの研究を先行的に実施し，高精度化に必要な科学及び開発要素技術を修得し，着実な開発を行うことが必要である．

統合的観測システムの利用実証から定常利用への段階的移行

衛星の観測データから得られるプロダクトは，時間・空間的に継続するデータセットとして常時最新の状態を利用可能なように整備し，地球温暖化に関する気候変動等の現象を抽出し，対策に必要な情報として利用できることが重要である．このためには定常的観測及び解析研究が一体となったアクティブに対応可能な利用実施体制の整備が必要である．また複合的な観測データ及びモデルとの統合的システムの最適設計を行い，最終的に目標とする温暖化の実態把握，現状診断，将来予測への，実証から定常利用への移行を実現する必要がある．また，ミッション設定，研究開発，観測，データ解析を一世代3～5年間程度として，三世代10～15年間程度の過程を経て，次世代へのフィードバックを着実にを行い，段階的に定常利用体制の構築を図る必要がある．

エアロゾルとオゾンの影響の実態解明・メカニズムの解明

エアロゾルやオゾンとその材料となる物質（前駆気体）について，1）人為的排出源強度の把握，2）大気中での輸送・化学的変容・除去過程の定量化，3）地球システムへのインパクトの統合的な推定が必要である．特にこれまで系統的な観測のない，いわば観測の空白地帯であるアジア大陸内部での観測を行い，エアロゾルやオゾンへの人為的な影響を評価することが不可欠である．このような観点から，光吸収性エアロゾル（ブラックカーボンや黄砂）とオゾンおよびそれらの前駆気体（窒素酸化物（ NO_x ），硫酸化物（ SO_2 ），ホルムアルデヒド（ CH_2O ））を同時に，高精度・高時空間分解能で測定する測定器である衛星搭載用の紫外分光計（UVS）の開発が必要である．

1-5. 留意事項

1-5-1. 温暖化観測のネットワークとデータ管理

地球温暖化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が得られる点にあり，気象データと類似した正確を持っている．地球温暖化観測に求められる条件は，各国は，単独に，あるいは相互同意により，さらに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実施に向けて行動しなくてはならない．それ

には，高品質の衛星と現場観測を組み合わせた基盤を維持し，インフラを整備し，人材育成を果たす必要がある．

国際協力の下で再解析の推進を強化することで，気候トレンドの監視や，衛星観測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）方式の解析システム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，無料で無制限のデータ交換を各国が遵守することを原則とする．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の共同による効率化や，インパクト評価や適応戦略の構築のために，より稠密な観測点でより頻繁な観測を実施する地域的，国内ネットワークが重要である．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・品質管理等の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，高い質を保証するよう努める．

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，データの共同利用なくしては，解析研究を進めることができない．そのため，1995年ころから，米国が運営する国際二酸化炭素データベース機関であるCDIACの海洋二酸化炭素データのデータベース活動が始まった．CDIAC（二酸化炭素情報解析センター、オークリッジ国立研究所）には既に，海洋二酸化炭素関連データを含むWOCE（World Ocean Circulation Experiment）断面観測（63プロジェクトのデータ），同様に二酸化炭素関連データを含むWOCE以外の断面観測データ（15プロジェクトのデータ），表層二酸化炭素分圧観測（27プロジェクトのデータ）が収録されている．また，我が国の二酸化炭素関連海洋化学研究者はPICES（北太平洋海洋科学機構）のもとでデータベースの構築を行っており（<http://picnic.pices.jp/index.html>），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。今後の継続的な措置が必要である。またこの活動を通じて、我が国の研究機関が取得したデータを、国際的に流通することが求められている。将来的には即時性のあるデータ公開が望まれているが、現段階では2年程度の遅れでのデータ流通が進むようになれば大きな進歩である。データセンター機能の強化がなされて、観測機関にとってデータ提供・公開のプロセスが進め易くなることが望まれる。

データの精度管理の活動はSCOR/IOC CO₂パネルのもとで行われており、全炭酸、アルカリ度分析に関しての標準試料プログラムが米国のスクリップス海洋研究所が中心となり継続的に行われている。現在、PICESの活動の中で、溶存炭素同位体の標準化も目指している。日本の活動も、スクリップス海洋研究所をサポートし、なおかつ、国内機関が利用しやすい船上標準試料の供給がなされることが望まれる。これに対し、表層二酸化炭素分圧測定国際精度管理では、現在国立環境研究所がリーダーシップをとり、ドイツ、イギリス、フランス、米国、韓国などの各国の研究グループと共同でプログラムを進めている。

気象庁・気象研究所による20年以上にわたる海洋CO₂観測の間に確立した標準ガスの長期的な精度管理の技術も今後の観測ネットワークの構築に活用していくことが望まれる。

具体的な項目としては

気象

GSN, GUANの推進を評価。しかし、地域的に偏在する、低品質と通報障害が課題。

異常気象の評価に、高頻度、精密な測点での観測、必要。

海上気象のデータ、全球カバーに必要。VOSCLIM (篤志船による海上気象観測計画), 海面基準点ネットワーク。

衛星による雲、水蒸気量の観測。GPS 技術への期待。

大気組成

大気組成の観測ネットワーク(地上、洋上、航空機などの in situ 観測)とQA/QC(データの品質保証・品質管理)。

二酸化炭素、CH₄、N₂O、HFC's、SF₆など規制温室効果ガスのほか、炭素(酸素)同位体や酸素(窒素比)、エアロゾルとオゾンや前駆体など関連物質など、観測項目の増加と連続測定化。

メタン、亜酸化窒素など温室効果ガス、および、同位体や酸素など重要な関連ガスの標準ガス開発は、研究段階を終えている。これを国際的なものとするため、組織的な取り組みが重要である。衛星による二酸化炭素、メタンなど温室効果ガスの高精度観測、エアロゾル観測。このために、高

精度のセンサ開発、国際的競争と協調の下に継続的に実施する

周回軌道衛星によるグローバルな観測と国際的に協調した静止衛星による定点観測網を構築する。

海洋

90年代の技術革新をもとに計画された全球海洋観測システムの構築に引き続き努力。

衛星データの重要性。持続性が課題

漂流ブイ、係留ブイ、ARGO フロート+他の海面、表層の水温・塩分ネットワーク

海面基準点ネットワーク。大気・海洋間のフラックス・モニター。

水位上昇検知の潮位観測ネットワーク

海洋中の炭素循環

深層循環のモニターのための海底に至る全層観測

陸面

大気、海洋に比べ、最も観測システムの構築が遅れている。一方で、陸面データの重要性は増す一方。

衛星によるGTN(全球陸面ネットワーク)に期待。衛星データの品質が、気候監視に合う水準か否か、未検討

過去に遡って長期間に及ぶ整合性のあるデータを再作成する必要。

LAI(葉面指数)測定のような衛星データと現場観測の比較検証、重要。

GTNの3要素(水、氷河、永久凍土)をあわせて整備

1-5-2. 温暖化観測のための組織体制

温暖化観測に係わる取り組みの優先度の判断、予算の分配、観測ネットワークの確立など、我が国の行政・研究者・産業界の総力を挙げた取り組みが必要である。このためには、これまでの各省縦割りの予算および実施計画検討体制は適していない。我が国における温暖化観測を統合的、総合的、且つ効率的(経費においても人的資源においても)に行うためには、各省で実施されている業務を連携した開かれた観測推進体制を整備する必要がある。温暖化観測を研究の1つの柱とする総合的な気候変動研究の統合的な推進体制の構築が望まれるところである。気候変動・温暖化観測に関する研究者、技術者、行政担当者が、今後の取り組み優先度について闊達な議論を行い、予算配分はその優先度に応じて行われるべきである。また、その優先度は研究の進展や社会からの要請で柔軟に変更可能とし、適時見直される必要があり、その有益性が常に評価・検証されなくてはならない。

1-6. 課題分析表

(「観測ニーズ」及び「重点化の必要性」欄の印は特に重要度が高いものを示している)

分類	観測ニーズ (重要度)	現状	ギャップ(問題・課題)	具体的な 取り組み	重点化 の必要 性	重点化の視点(留意事項)
排出実態・ 濃度の把握	地上での二酸化炭素分布と時間変化	<p>フラスコサブリングが全世界の100地点で実施 連続観測ステーションが全世界で40地点設置 国内機関の地上観測ステーション: 気象庁(3), 環境研(2+シベリア10), 極地研(南北極) 米国の支援で中南米での観測点が整備.</p>	<p>東南アジア・中南米・アフリカでの二酸化炭素観測が不十分 大陸内部や熱帯域での観測が不十分 途上国では, 高度な観測機器の維持が不可能 衛星で観測しにくい場所を優先</p>	東南アジアの地上観測ネットワークの充実		<p>東南アジア地域との連携強化 データ解析に関する現地スタッフの研修等の能力開発 二酸化炭素濃度に関しては0.2 ppm分析精度が必要 標準ガス等の消耗品交換頻度の低減 電力供給等の新たなノウハウの整備を最小限に抑えるための技術開発 一般民生品の利用 自動化とIT利用による高度観測技術を必要としない維持管理</p>
排出実態・ 濃度の把握	対流圏大気中の二酸化炭素・メタン等の三次元分布と時間変化	<p>我が国の先駆的な観測 仙台沖(フラスコ, 東北大), 成田(シベリア便(日航, 気象庁), シベリア(連続・フラスコ, 環境研)), 相模湾沖(連続・フラスコ, 環境研・JAXA) EU, 米国での航空機モニタリングを充実させる方向 科学振興調整費による航空機搭載二酸化炭素濃度連続測定装置の開発の実施 ボーイング社航空機搭載型二酸化炭素連続測定装置が開発済み</p>	<p>チャーター機は経費が高む 大空港付近の大気は汚染されており, 中規模の空港の活用</p>	民間航空機等による温室効果ガスの高度分布観測ネットワークの構築 世界のモニタリング実施機関への技術提供		<p>民間協力・民間活力の活用 観測機器の電力・消耗品の最小化 同位体, 酸素等の連続自動測定装置の開発 二酸化炭素・メタンの連続測定器の民間航空機・自動操作小型飛行機への搭載</p>
排出実態・ 濃度の把握	大気中の二酸化炭素の高度分布と時間変化	<p>大気中の二酸化炭素濃度を高精度で測定できる衛星開発 衛星センサとして太陽光の地表散乱光の分光方式が検討</p>	<p>大気中の二酸化炭素濃度を高精度で測定できる衛星観測の実現 エアロゾルや雲が観測の精度を低下 基礎技術開発や方式の競争的提案の仕組が必要</p>	GOSAT(温室効果ガス衛星観測)の早急な実現 衛星センサ開発の体制の整備		<p>1 ppmの測定精度で二酸化炭素カラム濃度を決定 米国のOCO衛星との競争と協力</p>
排出実態・ 濃度の把握	大気中の二酸化炭素の高度分布と時間変化	<p>バルーンによる高度分布観測が世界の100ヶ所で実施されている 大気球による温室効果ガスのサブリング分析が行われている(極地研, 東北大)</p>	<p>バルーンのような安価で軽量の二酸化炭素, メタンの観測センサの開発</p>	電気化学, 半導体光源などの技術開発によるセンサ開発		<p>衛星や航空機観測で困難な気象状況での高度分布観測が可能</p>

排出実態・濃度の把握	対流圏エアロゾルの分布と変化	エアロゾルの航空機観測が、不定期に実施 衛星データからエアロゾルの分布の算出	エアロゾルの光学的性質を高品質で測定するには航空機観測が不可欠であるが、高頻度の観測が不十分	大気質の観測を定期的に行う専用機の整備	大気質の高度な観測を定期的に行う航空機を整備し、アジア全域で共同運航
排出実態・濃度の把握	二酸化炭素の同位体比や酸素濃度の分布と変化	安定同位体や酸素濃度の測定（東北大、環境研、産総研など）	大気のサブミクロン分析が行われているが、自動連続測定が確立していない	高精度で安定な自動測定機器の新規開発	世界にモタリタガステーションに展開することにより、イノベーションが可能。
排出実態・濃度の把握	北太平洋の海洋表層における二酸化炭素濃度分布	従来からの各国観測船による海洋表層二酸化炭素観測 北太平洋の商船による研究観測実施とEU、米国の追随による観測網拡大 観測精度向上へ我が国の活動が貢献	南大洋などの商船航路が得られない海域の観測網の不足 定期航路船による観測網の不足 測定装置比較実験の定期的開催が必要 効果的な観測点配置が不十分	民間商船による海洋表層の二酸化炭素観測網の拡大 多目的運航観測船の表層観測への利用 測定装置比較実験の定期的実施 自動計測システムの開発と運用	民間商船を利用した定常観測体制を構築 多目的運航観測船などの活用 太平洋・大西洋・インド洋を国際分担で実施、南北太平洋、南極海、インド洋などの観測を国際共同実施することがわが国の使命 国際研究連携によるデータ集約体制の整備 現代の二酸化炭素シミュレーションの理解、気候モデルの評価・検証による将来予測の正確化
排出実態・濃度の把握	南北太平洋と南大洋における海洋断面の二酸化炭素濃度分布	わが国の研究機関観測船によって不定期に測線観測を実施 CLIVARはIOCCPと連携して二酸化炭素分圧を含む海洋断面観測を実施、米、加、EU、豪日などが断面観測を実施、国際データ共有体制が構築されつつある 観測精度向上へ我が国の活動が貢献	断面観測航海の不足で、5-10年間隔では全海洋観測が困難	南北太平洋と南大洋において海洋断面において実施体制の強化 測定精度確保のための国際的標準試料維持への貢献	国際共同研究の観測方針・データ公開ポリシーを尊重 米国の標準試料プログラムと互換性のある国内標準試料の作成・普及が必要 測定設備・実験室の備わる海洋炭素循環専用観測船が望まれる 過去から現在にいたる二酸化炭素シミュレーションの理解、将来のシミュレーション予測、海洋炭素隔離の検討
排出実態・濃度の把握	西部北太平洋高緯度亜寒帯、中緯度、低緯度亜熱帯における海洋の二酸化炭素濃度の長期変化	米国は亜熱帯太平洋・大西洋定点で観測船による15年継続観測を実施、長期変動観測と共に炭素循環プロセス研究	我が国の海洋時系列テストプログラムは3年の観測で終了、太平洋高緯度海域での時系列観測の継続が困難 海洋の二酸化炭素吸収によるゆっくりとした二酸化炭素増大や化学成分変化を検出・把握する高精度観測専用観測船の所有	西部北太平洋高緯度亜寒帯、中緯度、低緯度亜熱帯（国際分担の3海域）における海洋時系列観測点の長期継続観測	海洋観測機関の二酸化炭素等海水成分の測定精度維持管理体制が必要 観測船観測の補充のため時系列定点に表層大型定置システム設置 海洋炭素循環観測専用観測船の効率運用と、既存観測船の組み合わせが必要 海洋炭素循環モデルの検証

排出実態・濃度の把握	陸域生態系の二酸化炭素吸収・放出量	ツ-フラックス観測サイトにおける陸域生態系の吸収・放出二酸化炭素フラックス観測 世界各地の約 150 地点 産総研・岐阜大（高山）、環境研（苫小牧）森林総研、大学等による 15 地点	複雑地形でのフラックス評価法の確立	アジア域の代表的な陸域生態系におけるツ-を設置し二酸化炭素フラックスを長期連続観測	アジア域各国連携による AsianFlux ネットワークの組織化 IGBP, GCP 等との連携水循環観測との統合観測ステーションを東南アジアに充実 衛星からのバリエーションを遠隔計測する技術（SAR）の高度化 土壌有機物量とその動態に関する効率の高精度の観測手法開発
排出実態・濃度の把握	陸域生態系の二酸化炭素吸収・放出量	東南アジアにおける森林火災早期発見システム、NOAA, DMSF 衛星を用いた森林火災情報抽出と即時配信 地球資源衛星（JERS-1）の 92-98 年における高解像度データより全球森林マップの作成 中解像度（約 1km）観測データによる全球植生指標マップの作成など	陸域観測技術衛星（ALSO）の早期運用 中解像度全球植生観測の高度化 森林火災情報に基づく二酸化炭素放出量推定	陸域植生の炭素循環に関わる衛星観測	高分解能の合成開口レーダ PALSAR を中心に、光学センサを搭載する陸域観測技術衛星の早期打ち上げ、観測の開始・継続 全球中分解能バリエーション加観測高度化（BRDF, EVI など） 森林火災モニタリングの監視地域拡大と二酸化炭素放出量予測へのリンク 広域な陸域生態系の炭素現存量・変動量の把握を通じて、地球温暖化予測の不確実性を低減
温暖化プロセスの理解	包括的データ	ADEOS-II による総合観測システムを開始（現在は中断） TRMM, Aqua による水循環観測データの継続取得	中・長期変動を評価するための十分な期間のデータ取得が欠落	ADEOS-II の観測機能を継承・発展させた複合衛星観測の再開・継続 GPM による水循環データ取得の継続	全球気候モデル検証のためのデータ構築
温暖化プロセスの理解	大気中温室効果ガス等の長期変化	フラスコップリングによる二酸化炭素の炭素同位体の長期継続的な観測（環境研、東北大、極地研、産総研、京大） フラスコップリングによる酸素濃度測定（環境研、東北大）	高精度の長期間観測データの蓄積	フラスコップリング二酸化炭素の炭素同位体、酸素濃度測定	一酸化炭素、水素、BC の測定 炭素同位体測定精度 0.02 permil 酸素濃度 10 permeg 温室効果ガス分析のための標準ガス精度管理
温暖化プロセスの理解	全海洋基礎生産量の分布と変化	全海洋のデータセット作成 （ADEOS/OCTS: 1996-7, ADEOS-II/GLI: 2003） 全海洋基礎生産の研究プログラムの作成	ADEOS-II の観測機能を継承・発展した光学センサ（GLI）を中心に、マイクロ波放射計（AMSR）及びドップラ計（SeaWinds）を組み合わせた複合衛星観測の早期再開・継続	沿岸水域の高クロロフィル濃度、懸濁物質との分離などに対応した観測の高精度化 人間活動や海洋資源開発の影響評価	高分解能（250m）観測多チャンネル観測データ解析
温暖化プロセスの理解	海洋断面の化学成分分布	わが国では、研究船観測で海洋データ研究を実施してきた	化学成分計測実施には、他の二酸化炭素観測航海の観測船運用と異なる条件が生じる	データ研究のための観測航海の実施 時系列観測・断面観測と連携	化学計測（粒子状・溶解有機炭素・微量金属元素・微量放射性元素・人口有機化合物）の実施 海洋炭素循環を規定す

				した観測研究	る要因としての微量栄養塩などの役割、海洋炭素循環の高度化
温暖化の理解	海洋表面の化学成分分布	米国では観測船時系列点において、自動観測の研究を実施 わが国では、各省庁で観測の高度化研究を実施 フランスは観測困難海域での漂流装置による表層二酸化炭素分圧測定に挑戦	荒天海域での大型係留観測は困難 水中を用いた化学成分測定のための技術的な制約	漂流型の二酸化炭素分圧測定システムの開発 海表面係留設置型多項目化学のの開発	漂流型の表層二酸化炭素分圧測定システムの開発と低価格化による使い捨て利用 表層定置型に搭載可能な多項目自動測定技術の開発 海洋炭素循環の高度化
温暖化の理解	海洋断面の二酸化炭素分布	貨物船からの投げ込み型水温センサー(XBT)による国際共同プロジェクト 水温・塩分観測用自動昇降漂流型ARGO, 3000個の投入(現在1000個)が国際共同プロジェクトで進行中	高精度の長期間観測データの蓄積 観測頻度が不足 自動昇降漂流型への二酸化炭素センサー搭載は現状技術では困難	自動昇降漂流型搭載可能二酸化炭素センサーの開発	ARGO 浮上時に表面海水の二酸化炭素分圧を測定するための開発、浮上時に限った表層海水二酸化炭素分圧測定センサーの開発がやや容易で表層海洋観測網に貢献できる より高度な二酸化炭素センサーは断面観測に貢献 現代の二酸化炭素シミュレーションの理解、海洋炭素循環の高度化
温暖化の理解	雲・エアロゾル・放射強制力	中期間(～1年間)の観測データセット作成 ADEOS/OCTS:1996-7, ADEOS-II/GLI:2003) 雲とエアロゾルとの比較開始 NASAのALIPSOとLOUDSATによるA-train計画の準備(2005年～) GPM(2007年～) Earth CARE	ADEOS-IIの観測機能を継承・発展した光学センサー(GLI)を中心に、マイクロ波放射計(AMSR)及び散乱計(SeaWinds)を組み合わせた複合衛星観測の早期再開・継続 全球降水観測衛星(GPM)の実現 長期間のデータの必要性 低軌道衛星による高精度観測(Earth CAREの提案) 雲形成から降雨までの全プロセスの観測	地球規模での雲・エアロゾル・放射強制力の衛星観測	雲・エアロゾルの放射強制力の衛星観測 雲とエアロゾルの鉛直分布 エアロゾルの光学的厚さと一次散乱アルベド 降雨量・水蒸気量の衛星観測 雲の衛星観測 エアロゾルの衛星観測 従来の気象・海象の観測の着実な実施
地球温暖化の検出/プロセスの解明	過去の地球温暖化、温室効果ガス、エアロゾルの変動	アイスアによる酸素同位体、二酸化炭素濃度の変動研究(極地研、東北大) 仏、デンマーク、米国、日本が主導 2004年3月のNSF主催の国際会議:今後南極氷床内陸部、沿岸域や環北極海での多点掘削を重点的に取り組む方針を採択	過去10 ⁰ ～10 ⁵ 年の気温等の変化トレンドは解明されたが、地域比較、高時間分解能復元が未解明 南極氷床沿岸部、環北極海は、アイスアの空白域	南極氷床、超長期アイスア掘削 南極氷床沿岸部及び環北極海の多点アイスア掘削	アイスアによる二酸化炭素濃度の解析は、氷の融解が生じない南極氷床しか適地がない 国際共同観測として実施
地球温暖化の検出	気象要素	地上気象観測点における、気温、降水量などの観測:GCOS地上気象観測網(GSN)世界1000箇所	観測データの即時的な流通と共有化 観測技術の高度化の必要性 アフリカ、南米などでの	データ寡少域の改善、GSNやGUANのデータ流通の監視や品質評価	雲・エアロゾル、降水、植生、雪氷、陸面・海面温度など変動

		高層気象観測：GCOS 高層気象観測網（GUAN） 世界 150 箇所	気象データ寡少に くわえ、旧ソ連域での気象 観測点の減少			
地球温暖化 の検出	大気成分濃度	大気成分濃度モニタ リング： 全球大気監視 (GAW)	観測データの品質管理 の改善	温室効果がス データの収集・還 元や品質評価測 定に必要な標準 がスの較正		GAW を通しての国際協 力の強化：観測データの品 質管理の高度化と、途上 国などへの技術移転
地球温暖化 の検出	海象	海面水位監視のため の潮位観測：GLOSS 全球 海面水位システム	世界的に観測点が不 均質	検潮所の地盤 の沈下変動		IOC を通しての国際協 力の強化 潮位の長期観測データの 補正
地球温暖化 影響	全球規模の雲・ エアロゾル、降水、 植生、雪氷、陸 面・海面温度な ど変動	ADEOS-II による総合 観測システムを開始（現在 は中断）	継続した観測の欠落	各地球圏に現 れる温暖化影響 の監視を行う全 球観測衛星 (ADEOS-II 型) の再開・継続		
地球温暖化 影響	北極陸域におけ る大気微量成 分、大気循環場 大気汚染物質、 ツンドラ植生、 降雪、積雪、融 雪、永久凍土	北極圏では、1990 年以降観測点の多数が 閉鎖 WCRP/CLIC 計画の主 要課題 IPY4（国際極年 4,2007/8）がターゲット	地球温暖化が顕著に 進行する北極域で広大 な観測空白域が存在	東シベリア域と 北極圏にスパー ステーションを 設置 大気微量成 分、大気循環場 (高層ゾンデ)、 大気汚染物質 (高層ゾンデ)、 ツンドラ植生の 総合的観測 降雪、積雪、 融雪、永久凍土 のモニタリング観測		国際共同観測拠点とし て基地を運営 衛星の地上検証観測地 点として利用
地球温暖化 影響	ホムツ海 の海水分布	北海道大学がコアと 推進 WCRP/CLIC 計画 の主要課題	海水形成に関わる大 気・陸域・河川の役割 は未解明	ホムツ海を中 心に、海水分布 の衛星検証観 測、河川による 淡水供給と海水 形成プロセス解 明観測		衛星の地上検証観測地 点として利用
地球温暖化 影響	ヒマラヤ山岳氷河分 布	我が国の研究者（名 古屋大学、北海道大学） による長年の主導的な 取り組み	全ヒマラヤの広域特性の 実態把握は不十分 地元研究者の養成	ヒマラヤ山脈にお ける氷河の縮 小、氷河湖発達 と決壊に関する モニタリング観測		温暖化影響による氷河 水資源、雪氷災害影響研 究として、パキスタン、ブ ータンへの貢献 衛星の地上検証観測地 点として利用
地球温暖化 影響	日本列島におけ る雪氷圏の変化	低地積雪量は、気象 庁、防災科学技術研究 所等で長期実施 北アルプスでの雪渓モニ タリング観測の継続（名大）	観測点は、低地に集 中し、山岳域は不十分	航空機による 広域多年性雪深 のモニタリング観測 山岳積雪の多 点モニタリング観測		積雪観測地点のネットワ ーク化
地球温暖化 影響	南極氷床の分布	南極観測として断続 実施 CRP/CLIC 計画の主要 課題	広大な氷床流域の面 積観測が不十分	南極氷床の総 合的な流域雪氷 モニタリング観測（積 雪量、流動量、 海洋流出量観 測） 地上/航空機/ 衛星観測		衛星の地上検証観測地 点として利用 数値シミュレーションの基礎 データ提供

地球温暖化影響	陸域生態系の変化	熱帯域の急激な土地利用・生物多様性喪失の調査を我が国はおもに東南アジア熱帯域で展開	多国間の研究連携・総括体制の構築	陸域植生の実体把握	DIVERSITAS-DIIPA の機能強化による多国間の連携強化
地球温暖化影響	被災地域の生態系変化	永久調査区による追跡観測網を利用した解析とモデル化	被災地を中心とした観測サイトの設営	森林火災・暴風害などの災害被災地における継続的観測の実施	衛星観測や陸域炭素フラックスの衛星観測と連携
地球温暖化影響	海洋生態系の長期変化	国際共同研究 GLOBEC などいくつかの海域で温暖化による海洋生態系、特に高次生態系の変動を解析している	海洋生態系の影響調査には長期的な視野が必要 代表的な生態系を設定し、国際協力で長期モニタリングの実施	太平洋の各生態系における生物群集構造の長期モニタリング	定点観測とバイオ多様性資源調査との連携